



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

Alumno: Luis Álvaro García Lorite

Tutor: Prof. D. Ignacio Pérez Guerrero
Dpto: Ingeniería Eléctrica

Junio, 2015



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Don Ignacio Jesús Pérez Guerrero , tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: Transformadores trifásicos. Respuesta ante cargas lineales y no lineales, ensayos y simulación, que presenta Luis Álvaro García Lorite, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Junio de 2015

El alumno:

Luis Álvaro García Lorite

El tutor:

Ignacio Jesús Pérez Guerrero

Índice

1. INTRODUCCIÓN.....	7
2. OBJETIVO.....	7
3. NORMATIVA APLICABLE.....	7
3.1. Norma UNE-EN 60076-1:2013.....	8
3.1.1. Definiciones.....	8
3.1.2. Grupos de conexión y de desfase para transformadores trifásicos.....	11
3.1.3. Placas de características.....	12
3.1.3. Ensayos.....	14
4. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	20
4.1. Definiciones fundamentales.....	20
4.2. Relaciones en un transformador ideal.....	23
4.3. Impedancia reducida, transformación de impedancia y transformadores reales.....	28
4.4. Circuito equivalente para un transformador de potencia real.....	33
4.5. Regulación de tensión de un transformador de potencia.....	37
4.6. Regulación de tensión a partir del ensayo de cortocircuito.....	40
4.7. Hipótesis inherentes en el ensayo de cortocircuito.....	43
4.8. Rendimiento del transformador a partir de los ensayos de vacío y cortocircuito.....	44
4.10. Identificación de fases y polaridad de los arrollamientos de un transformador.....	49
4.11. Conexión de los arrollamientos del transformador en serie y en paralelo.....	54
4.12. El autotransformador.....	59
4.13. Rendimiento del autotransformador.....	66
4.14. Transformación trifásica.....	69
4.15. Armónicos en los transformadores. Armónicos en las corrientes de excitación, en los flujos y en las tensiones.....	77
4.15.1- Bancos trifásicos a base de transformadores monofásicos.....	77
4.15.2. Corrientes de excitación en los transformadores con núcleo trifásico.....	82
4.16. Corriente de conexión.....	83
4.17. Importancia del neutro y medios para crearlo.....	85
4.18. Relaciones de transformación V-V. Sistemas en triángulo abierto.....	88
4.19. Relaciones de transformación T-T.....	90
4.20. Estudio de transformadores trifásicos estrella-estrella con cargas desequilibradas.....	94
4.20. Uso de las transformaciones polifásicas en la conversión de potencia.....	103

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

4.20.1. Rectificación hexafásica de media onda usando diodos.	106
5. MODELO MATEMÁTICO Y DATOS EXPERIMENTALES.	107
5.1. Circuito eléctrico y circuito magnético en el dominio del tiempo	108
5.1.1. Ecuaciones en valores reales	108
5.1.2. Ecuaciones en valores reducidos a pu.....	110
5.2. Modelo del transformador trifásico desconectado con núcleo lineal en régimen permanente.....	113
5.3. El transformador trifásico con núcleo lineal conectado en régimen permanente. La matriz de conexión.	117
5.4. El transformador trifásico en régimen permanente desequilibrado	119
5.4.1. Funcionamiento en régimen desequilibrado.....	120
5.4.2. Centro de gravedad del sistema de tensiones trifásico	121
5.4.3. Componentes simétricas.....	122
5.4.4. Topología del circuito magnético.....	124
5.4.5. La corriente magnetizante y su contenido armónico	125
5.5. Características de las máquinas.....	127
5.6. Montajes.....	133
6. CAMPAÑA DE DATOS.....	145
6.1. Ensayos.	145
6.1.1. Ensayo de corriente de conexión	145
6.1.2. Ensayo de vacío	147
6.1.2. Ensayo de cortocircuito.....	148
6.2. Cargas lineales equilibradas.....	149
6.2.1. Carga Resistiva.....	150
6.2.2. Carga Inductiva.....	151
6.2.3. Carga Capacitiva	153
6.2.4. Motor asíncrono	156
6.3. Cargas no lineales equilibradas.....	158
6.3.1. Motor asíncrono conectado a través de un variador de velocidad a 30Hz	158
6.3.2. Motor asíncrono conectado a través de un variador de velocidad a 40Hz	160
6.3.3. Motor asíncrono conectado a través de un variador de velocidad a 50Hz	163
6.4. Cargas desequilibradas.....	165
6.4.1. Carga Resistiva.....	166
6.4.2. Carga Inductiva.....	173
6.4.3. Carga Capacitiva	179
6.4.3. Circuito RL	185

6.4.4. Circuito RC	189
7. SIMULACIÓN.	193
7.1. Datos de simulación.	193
7.2. Modelo de simulación.	195
7.2.1. Modelo del transformador	196
7.2.2. Vatímetro	205
7.2.3. Cargas y fuente de alimentación.	207
8.- RESULTADOS SIMULADOS	210
8.1.- Cargas lineales equilibradas.	210
8.1.1.- Carga Resistiva	210
8.1.2.- Carga Inductiva.....	212
8.1.3.- Carga Capacitiva	214
8.2.- Cargas desequilibradas.....	215
8.2.1.- Carga Resistiva	216
8.2.2.- Carga Inductiva.....	220
8.2.3.- Carga Capacitiva	224
8.2.4.- Circuito RL.....	228
8.2.5.- Circuito RC	230
9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.	232
9.1. Cargas lineales equilibradas.....	232
9.1.1. Cargas Resistivas	232
9.1.2. Cargas Inductivas equilibradas	233
9.1.3. Cargas capacitivas.....	234
9.2. Cargas motor	235
9.2.1. Motor asíncrono a 50Hz sin variador de velocidad.....	236
9.2.4. Motor asíncrono a 50Hz.....	237
9.2.3. Motor asíncrono a 40Hz.....	240
9.2.2. Motor asíncrono a 30Hz.....	242
9.3. Cargas desequilibradas.....	244
9.3.1. Cargas Resistivas	244
9.3.2. Cargas Inductivas	247
9.3.3. Cargas capacitivas.....	250
9.3.4. Circuito RL.....	253
9.3.5. Circuito RC	254
10. CONCLUSIÓN.....	255
10.1. Efectos de los armónicos en cada uno de los elementos de la red.....	255

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

10.1.1. Conductores	255
10.1.2. Neutro	255
10.1.3. Condensadores.....	256
10.1.4. Transformadores.....	256
10.1.5. Motores.....	257
10.1.6. Grupos electrógenos.....	257
10.1.7. Equipos de medida	258
10.2. Influencia de los armónicos en condensadores	258
10.2.1. Filtro pasivo	259
10.2.2. Filtro activo	260
10.3. Los armónicos en el disparo de las protecciones	261
. Bibliografía.....	262

1. INTRODUCCIÓN.

La energía es un factor fundamental en el desarrollo de la sociedad actual y el abastecimiento de la misma tiene consecuencias directas en el desarrollo social y económico mundial. La sociedad actual tiene una elevada demanda de energía, siendo la particularidad de la energía eléctrica, que no es fácilmente almacenable en grandes cantidades. Si a a esto, le unimos que normalmente las zonas de producción y de consumo están distantes entre sí, se plantea el problema del diseño de una red de transporte y distribución en la que el transformador, a la postre, protagonista de nuestro estudio juega un papel clave. Si observamos la estructura de un sistema eléctrico, encontramos al transformador como nexo de unión entre las distintas partes del sistema.

Por su importancia en el desarrollo de la tecnología eléctrica nuestro trabajo pretende analizar en mayor o menor medida la respuesta ante distintas cargas al ser conectado al mismo. Analizando su comportamiento.

2. OBJETIVO.

Se busca conocer la respuesta que ofrece el transformador objeto de nuestro estudio ante la aplicación de distintos tipos de cargas. Para ello se dispondrán cargas lineales de tipo inductivo puro y capacitivo así como motores. Además se analizará el efecto de una carga no lineal, en este caso un variador de frecuencia, que conectado a un motor en carga aportará información interesante desde el punto de vista de los armónicos, y como afectan a la forma de onda.

3. NORMATIVA APLICABLE.

En este caso, al no existir una normativa aplicable a los transformadores de ensayo exclusivamente, nos regimos por lo que nos dice la norma UNE-EN 60076-1:2013. Esta dice literalmente en su pagina 11 “Cuando no exista norma IEC para los transformadores mencionados anteriormente (en particular transformadores para uso industrial sin arrollamientos de mas de 1000V) se podrá aplicar esta parte de la norma IEC 60076 total o parcialmente”.

Según la citada norma se define al transformador de potencia como: Aparato estático, con dos o más arrollamientos que, por inducción electromagnética, transforma un sistema de tensión y corriente alterna en otro sistema de tensión y corriente alterna de valores generalmente diferentes y de la misma frecuencia, con el fin de transmitir potencia eléctrica.

3.1. Norma UNE-EN 60076-1:2013.

3.1.1. Definiciones

Transformador de tipo seco: Transformador en el que el circuito magnético y los arrollamientos no están sumergidos en un dieléctrico líquido.

Borne: Elemento conductor destinado a conectar un arrollamiento a los conductores exteriores.

Borne neutro:

(a) para los transformadores trifásicos y para los bancos polifásicos constituidos por transformadores monofásicos:

Borne o bornes conectados al punto común (punto neutro) de un arrollamiento conectado en estrella o zig-zag.

Punto neutro: Punto de un sistema simétrico de tensiones que está normalmente a potencial cero.

Bornes homólogos: Bornes de diferentes arrollamientos de un transformador, marcados con las mismas letras o símbolos correspondientes.

Arrollamiento: Conjunto de espiras que forman un circuito eléctrico asociado a una de las tensiones para las que el transformador ha sido definido.

Arrollamiento de fase: Conjunto de espiras que forman una fase de un arrollamiento polifásico.

Arrollamiento de alta tensión: Arrollamiento cuya tensión asignada es la más elevada.

Arrollamiento de baja tensión: Arrollamiento cuya tensión asignada es la más baja.

Régimen asignado: Conjunto de valores numéricos asignados a las magnitudes que definen el funcionamiento del transformador en las condiciones especificadas en esta parte de la Norma CEI 76 y que sirven de base a las garantías del fabricante y a los ensayos.

Magnitudes asignadas: Magnitudes (tensión, corriente, etc.) cuyos valores numéricos definen el régimen asignado.

Tensión asignada de un arrollamiento (U_r): Tensión especificada para ser aplicada u obtenida en funcionamiento en vacío entre los bornes de un arrollamiento sin tomas, o de un arrollamiento con tomas, conectado en la toma principal. Para un arrollamiento trifásico, es la tensión entre los bornes de línea.

Relación de transformación asignada: Relación entre la tensión asignada de un arrollamiento y la de otro arrollamiento caracterizado por una tensión asignada inferior o igual.

Frecuencia asignada (f_r): Frecuencia para la que el transformador está diseñado para funcionar.

Potencia asignada (S_r): Valor convencional de la potencia aparente de un arrollamiento que determina la corriente asignada, cuando se conoce la tensión asignada.

Corriente asignada (I_r): Corriente que llega a un borne de línea de un arrollamiento, determinada a partir de la potencia asignada (S_r) y de la tensión asignada (U_r) de dicho arrollamiento.

Pérdidas en vacío: Potencia activa absorbida cuando la tensión asignada a la frecuencia asignada, se aplica a los bornes de uno de los arrollamientos, estando a circuito abierto el otro o los otros arrollamientos.

Corriente en vacío: Valor eficaz de la corriente que llega a un borne de línea de un arrollamiento cuando se aplica a este arrollamiento la tensión

asignada a la frecuencia asignada, estando a circuito abierto el otro o los otros arrollamientos.

Pérdidas debidas a la carga: Potencia activa absorbida a la frecuencia asignada y la temperatura de referencia, asociada a un par de arrollamientos cuando la corriente asignada atraviesa los bornes de línea de uno de los arrollamientos, estando puestos en cortocircuito los bornes del otro arrollamiento. Los demás arrollamientos, si los hay, deben estar en circuito abierto.

Pérdidas totales: Suma de las pérdidas en vacío y de las pérdidas debidas a la carga.

Impedancia de cortocircuito de un par de arrollamientos: Impedancia serie equivalente en ohmios, a la frecuencia asignada y a la temperatura de referencia, medida en los bornes de uno de los dos arrollamientos, de un par, estando puesto en cortocircuito el otro arrollamiento del mismo par y en circuito abierto el o los arrollamientos restantes. Para un transformador trifásico, la impedancia se expresa como la impedancia de fase (conexión estrella equivalente).

Caída o aumento de tensión para una condición de carga especificada: Diferencia aritmética entre la tensión en vacío de un arrollamiento y la tensión en carga entre los bornes del mismo arrollamiento para una corriente de carga y un factor de potencia especificados, siendo la tensión aplicada en el otro u otros arrollamientos, igual a su valor asignado si el transformador está conectado sobre la toma principal (la tensión en vacío del primer arrollamiento es entonces igual a su tensión asignada);

Esta diferencia se expresa, generalmente, en tanto por ciento de la tensión en vacío del primer arrollamiento.

Impedancia homopolar (de un arrollamiento trifásico): Impedancia, expresada en ohmios por fase a la frecuencia asignada, entre los bornes de línea de un arrollamiento trifásico en estrella o en zig-zag conectados juntos, y su borne neutro.

Conexión en estrella (conexión Y): Conexión de los arrollamientos en la que un extremo de cada arrollamiento de fase de un transformador trifásico, o de cada arrollamiento de la misma tensión asignada para los transformadores monofásicos que constituyen un banco trifásico, está conectado a un punto común (punto neutro), estando conectado el otro extremo al borne de línea correspondiente.

Conexión en triángulo (conexión D): Conexión en serie de los arrollamientos de fase de un transformador trifásico o de los arrollamientos de la misma tensión asignada de transformadores monofásicos que constituyen un banco trifásico, efectuada de forma que se realice un circuito cerrado.

Desfase de un arrollamiento trifásico: Diferencia angular entre los vectores que representan las tensiones entre el punto neutro (real o ficticio) y los bornes homólogos de dos arrollamientos cuando se aplica un sistema de tensiones de secuencia directa a los bornes del arrollamiento de alta tensión en el orden de secuencia alfabética de estos bornes si están identificados por letras, o en el orden de secuencia numérica si están identificados por cifras. Se supone que los vectores giren en el sentido inverso de las agujas de un reloj.

Ensayo individual: Ensayo efectuado sobre cada transformador tomado individualmente.

Ensayo de tipo: Ensayo efectuado sobre un transformador que es representativo de otros transformadores, para demostrar que estos transformadores cumplen con las condiciones especificadas que no son controladas por los ensayos individuales.

Ensayo especial: Ensayo diferente a un ensayo de tipo o a un ensayo individual, definido por acuerdo entre fabricante y comprador.

3.1.2. Grupos de conexión y de desfase para transformadores trifásicos

La conexión en estrella, triángulo o zig-zag de un conjunto de arrollamientos de fase de un transformador trifásico o de los arrollamientos de la misma tensión de transformadores monofásicos que constituyen un banco

trifásico se indicarán con las letras mayúsculas Y, D o Z, para el arrollamiento de alta tensión (AT) y con letras minúsculas y, d o z para los arrollamientos de tensión media y baja (BT). Si está accesible un punto neutro de una conexión en estrella o zig-zag, la indicación será YN (yn) o ZN (zn), respectivamente.

Los símbolos de letras para los distintos arrollamientos de un transformador se anotan en orden descendiente de tensión asignada. La letra de conexión de cualquier arrollamiento de tensión intermedia o baja estará seguida inmediatamente por el "índice horario" de su desfase. Hay tres ejemplos a continuación, que se representan en la figura:

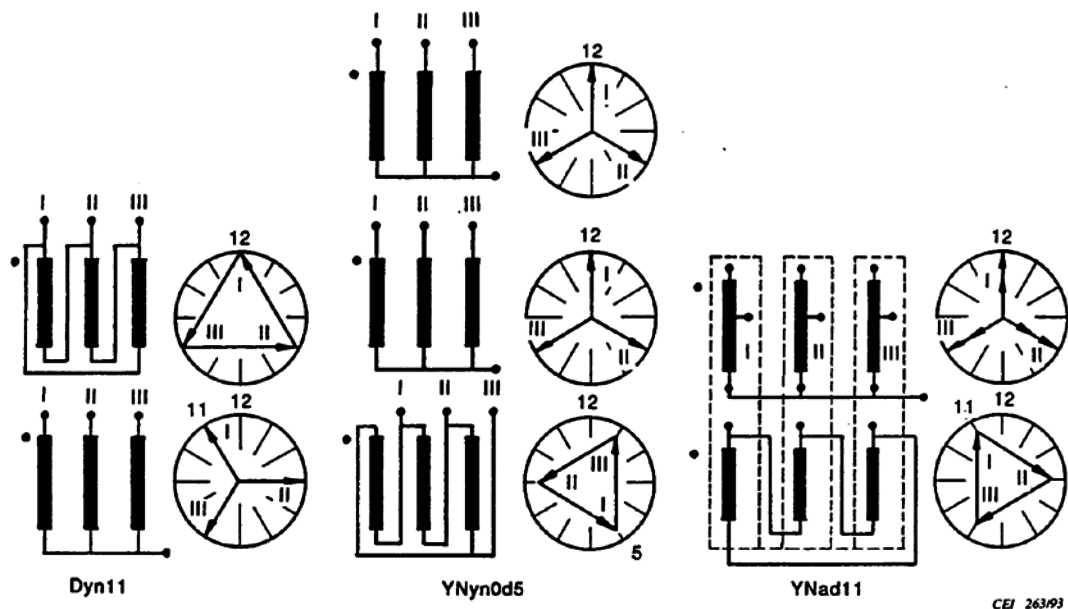


Diagrama 3.1. Índices horarios.

3.1.3. Placas de características

Cada transformador llevará una placa de características de material resistente a la intemperie, fijada en un lugar visible y que recoja las indicaciones enumeradas a continuación. Las inscripciones sobre la placa estarán marcadas de forma indeleble.

Informaciones a dar en todos los casos

- a) Tipo del transformador
- b) Número de esta norma.
- c) Nombre del fabricante, país y ciudad donde se montó el transformador.
- d) Número de serie del fabricante.
- e) Año de fabricación.
- f) Número de fases.
- g) Potencia asignada (en kVA o MVA). (
- h) Frecuencia asignada (en Hz).
- i) Tensiones asignadas (en V o kV) y extensión de tomas.
- j) Corrientes asignadas (en A o kA).
- k) Símbolo de acoplamiento.
- j) Impedancia de cortocircuito, valor medido expresado en tanto por ciento. Para transformadores de más de dos arrollamientos, se indicarán las impedancias para las diferentes combinaciones de dos arrollamientos, con los valores respectivos de la potencia de referencia.
- m) Tipo de refrigeración.
- n) Masa total.
- o) Masa del liquido aislante y referencia a la norma correspondiente.
- p) Máxima potencia o corriente de cortocircuito del sistema utilizada para determinar la capacidad de soportar cortocircuitos si no es infinita.

Si el transformador tiene más de un régimen asignado, según las diferentes conexiones de los arrollamientos previstas en su construcción, los regímenes asignados complementarios se indicarán en la placa de características, o se colocarán placas de características separadas para cada régimen.

3.1.3. Ensayos

Los transformadores se someterán a los ensayos descritos a continuación.

Los ensayos se efectuarán a una temperatura ambiente cualquiera comprendida entre 10 y 40°C y con un agua de refrigeración (si es necesario) cuya temperatura no sobrepase los 25°C.

Los ensayos se efectuarán en los talleres del fabricante a menos que medie otro acuerdo entre el comprador y el fabricante.

Todos los elementos constitutivos y accesorios externos susceptibles de influir en el funcionamiento del transformador durante el ensayo estarán colocados en su sitio.

Para todas las características distintas a las de aislamiento, los ensayos están basados en las condiciones asignadas, a menos que se especifique otra cosa en el apartado relativo al ensayo de que se trate.

Todos los sistemas de medida utilizados en los ensayos tendrán certificados, precisión conocida, y serán calibrados periódicamente, de acuerdo con las directrices de la Norma ISO 9001.

Ensayos individuales

- a) Medida de la resistencia de los arrollamientos.
- b) Medida de la relación de transformación y verificación del desfase.
- c) Medida de la impedancia de cortocircuito y de las pérdidas debidas a la carga.

d) Medida de las pérdidas y de la corriente en vacío.

e) Ensayos dieléctricos individuales (IEC 60076-3).

f) Ensayos en los cambiadores de tomas de regulación en carga, si son necesarios.

g) Ensayos de fugas con presión para los transformadores sumergidos en líquido.

h) Ensayos de estanqueidad y de presión para cubas de transformadores llenos de gas.

i) Verificación de la relación de transformación y de la polaridad de los transformadores de intensidad instalados.

j) Verificación del aislamiento del núcleo magnético y de la estructura en transformadores sumergidos en líquido con aislamiento de núcleo o estructura.

Ensayos de tipo

a) Ensayos de calentamiento (CEI 60076-2).

b) Ensayos dieléctricos de tipo (CEI 60076-3).

c) Determinación del nivel de ruido (IEC 60076-10) para cada método de refrigeración para el que se especifica un nivel de ruido garantizado.

d) Medición de la potencia absorbida por los motores de los ventiladores y de las bombas de líquido.

e) Medición de las pérdidas y de la corriente en vacío al 90% y al 110% de la tensión asignada.

Ensayos especiales

a) Ensayos dieléctricos especiales (CEI 60076-3).

b) Mediciones de calentamiento del punto caliente de los arrollamientos.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

c) Determinación de las capacidades entre arrollamientos y tierra, y entre los arrollamientos.

d) Medición del factor de disipación ($\tan \delta$) de las capacidades del sistema de aislamiento

e) Determinación de las características de transferencia de tensiones transitorias

f) Medida de las impedancias homopolares en transformadores trifásicos.

g) Ensayo de resistencia al cortocircuito. (CEI 60076-5).

h) Medida de los armónicos de la corriente en vacío (apartado 10.6)

h) Medida de la resistencia de aislamiento en corriente continua entre arrollamientos y tierra, y entre los arrollamientos.

o) Ensayo mecánico o valoración de la validez de la cuba para transporte.

Medida de la resistencia de los arrollamientos

Se debe registrar la resistencia de cada arrollamiento, los bornes entre los que se mida y la temperatura de los arrollamientos. La medida se efectuará en corriente continua.

Todas las medidas de resistencia se realizarán con cuidado para reducir al mínimo los efectos de la autoinducción.

10.2.2 Transformadores de tipo seco. Se debe comprobar que la temperatura del medio refrigerante no haya variado mas de 3°C durante 3 horas antes de la medición, y que todas las temperaturas del arrollamiento del transformador medidas por sensores de temperatura internos no deben diferir de la temperatura del medio refrigerante exterior en mas de 2°C.

La resistencia y la temperatura del arrollamiento se medirán simultáneamente. La temperatura del arrollamiento se medirá mediante

sensores colocados en posiciones representativas, preferentemente dentro del conjunto de arrollamientos, p.ej. en un conducto entre los

Medida de la relación de transformación y verificación del desfase

Se debe medir la relación de transformación en cada toma. Se debe verificar la polaridad de los transformadores monofásicos y el símbolo de acoplamiento de los transformadores trifásicos. Si se emplea una medición de tensión, las tensiones de ambos arrollamientos se deben medir simultáneamente.

Medición de la impedancia de cortocircuito y de las pérdidas debidas a la carga

Se medirá la tensión de cortocircuito y las pérdidas debidas a la carga para un par de arrollamientos a la frecuencia asignada aplicando una tensión prácticamente sinusoidal en los bornes de uno de los arrollamientos, estando el otro arrollamiento puesto en cortocircuito y el o los arrollamientos restantes en circuito abierto. La corriente suministrada debería ser igual a la corriente asignada relevante (corriente de toma), o no menos del 50% de la misma. Las medidas se efectuarán rápidamente para asegurarse de que los calentamientos no introducen errores significativos. La diferencia de temperatura del aceite entre la parte superior e inferior será suficientemente pequeña para permitir la determinación de la temperatura media con la precisión requerida.

Se debe multiplicar el valor medido de las pérdidas debidas a la carga por el cuadrado de la relación entre la corriente asignada (corriente de toma) y la corriente utilizada para el ensayo. El valor resultante se corregirá a la temperatura de refrigeración apropiada. Las pérdidas de Joule I^2R (siendo R la resistencia en corriente continua) se supone que varía en relación directa con la resistencia del arrollamiento, y todas las otras pérdidas en relación inversa con la resistencia del arrollamiento. La resistencia del arrollamiento se medirá de acuerdo con el apartado. El procedimiento para la corrección de la temperatura se describe en el anexo E.

La impedancia de cortocircuito se representa como una reactancia y una resistencia de corriente alterna puestas en serie. El valor de la impedancia se corrige a la temperatura de referencia suponiendo que la reactancia es

constante y que la resistencia de corriente alterna depende de las pérdidas debidas a la carga, según se ha descrito anteriormente.

En los transformadores de arrollamiento con tomas cuya extensión de tomas es superior a $\pm 5\%$, la impedancia de cortocircuito se medirá en la toma principal.

En los transformadores con tres arrollamientos, las medidas se efectúan sobre los tres pares de arrollamientos. Los resultados se vuelven a calcular asignando impedancias y pérdidas a cada arrollamiento (véase la Norma CEI 606). Así se determinan las pérdidas totales para los casos de carga especificados que incluyan todos estos arrollamientos.

Medición de las pérdidas y de la corriente en vacío

Las pérdidas en vacío y la corriente en vacío se medirán en uno de los arrollamientos, a la frecuencia asignada y a una tensión igual a la tensión asignada si el ensayo se efectúa sobre la toma principal, o igual a la tensión de toma apropiada si el ensayo se efectúa sobre otra toma. El o los otros arrollamientos se dejarán en circuito abierto y los arrollamientos que pueden conectarse en triángulo abierto tendrán su triángulo cerrado.

El transformador estará aproximadamente a la temperatura ambiente de la fábrica.

Para un transformador trifásico, se debe elegir el arrollamiento y la conexión a la fuente de potencia del ensayo para proporcionar, en la medida de lo posible, tensiones simétricas y sinusoidales a través de las fases.

La tensión de ensayo se ajustará de acuerdo con un voltímetro que responda al valor medio de la tensión, pero que esté graduado para leer el valor eficaz de una tensión sinusoidal que tenga el mismo valor medio. La lectura de este voltímetro será U' .

Simultáneamente, un voltímetro que mida el valor eficaz de la tensión se conectará en paralelo con el voltímetro que mide el valor medio, y se anotará la tensión U que indique.

Si el ensayo se efectúa sobre un transformador trifásico, las tensiones se medirán entre los bornes de fase, si está en tensión un arrollamiento conectado en triángulo, y entre los bornes de fase y neutro, si está en tensión un arrollamiento conectado en YN o en ZN.

Medición de las impedancias homopolares en los transformadores trifásicos

La impedancia homopolar se mide a la frecuencia asignada entre los bornes de línea conectados juntos y el borne neutro de un arrollamiento conectado en estrella o en zig-zag. Se expresa en ohmios por fase y se da por la relación $3U/I$, siendo U la tensión de ensayo e I la corriente de ensayo.

Se especificará la corriente de fase de ensayo $I/3$.

Se asegurará que la corriente en la conexión de neutro es compatible con la capacidad de carga de dicha conexión.

En el caso de un transformador con un arrollamiento adicional conectado en triángulo, el valor de la corriente de ensayo será tal que la corriente en el arrollamiento conectado en triángulo no sea excesiva, teniendo en cuenta el tiempo de aplicación.

Si no hay amperios-vueltas de equilibrado en el sistema homopolar, por ejemplo en un transformador estrella-estrella sin arrollamiento conectado en triángulo, la tensión aplicada no debe exceder de la tensión fase-neutro correspondiente al servicio normal. La corriente en el neutro y el tiempo de aplicación se limitarán, sin embargo, para evitar temperaturas excesivas en las partes metálicas.

En el caso de transformadores que tengan más de un arrollamiento en estrella con neutro accesible, la impedancia homopolar depende de las conexiones (véase el apartado 3.7.3), y los ensayos a efectuar serán objeto de acuerdo entre el fabricante y el comprador.

Los autotransformadores con un borne neutro destinado a estar puesto a tierra permanentemente se tratarán como transformadores normales con dos arrollamientos conectados en estrella. De esta forma, el arrollamiento serie y el

arrollamiento común forman juntos un circuito de medida, estando el otro circuito de medida compuesto por el arrollamiento solo. Las medidas se efectúan con una corriente que no exceda de la diferencia entre las corrientes asignadas de los lados de baja y alta tensión.

(60076-1:2013, 2013)

4. FUNDAMENTO TEÓRICO.

4.1. Definiciones fundamentales

El transformador funciona según el principio de la inducción mutua entre dos (o más) bobinas o circuitos acoplados inductivamente. La figura 4.1 muestra un transformador teórico con núcleo de aire en el cual están acoplados dos circuitos por inducción magnética. Los circuitos no están físicamente conectados.

El circuito conectado a la fuente de tensión alterna, V_1 o se denomina primario. El primario recibe su energía de la fuente de corriente alterna. Según el grado de acoplamiento magnético entre los dos circuitos, la energía se transfiere del circuito 1 al circuito 2. Si los dos circuitos están débilmente acoplados, como en el caso del transformador con núcleo de aire que se ve en la figura sólo una pequeña parte de la energía se transfiere del primario al secundario.

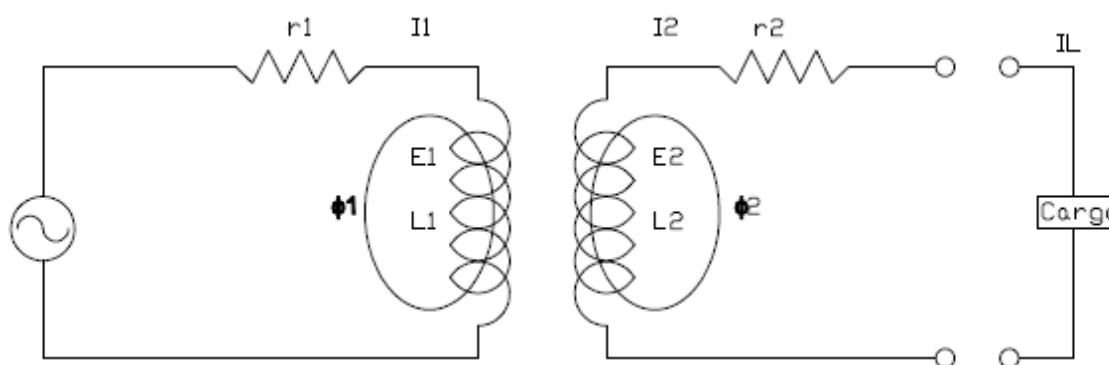


Figura 4.1. Transformador simplificado.

Si las dos bobinas o circuitos están devanados sobre un núcleo de hierro común, están fuertemente acoplados. En tal caso, casi toda la energía recibida

de la alimentación por el primario se transfiere al secundario debido a la acción transformadora.

Obsérvese el significado de la convención de punto usada en la figura 4.1, para mostrar la polaridad positiva instantánea de la tensión alterna inducida en ambos arrollamientos primario y secundario como resultado de la acción transformadora. Así, cuando V_1 es positiva en un instante dado, en el arrollamiento primario se induce una tensión E_1 de una polaridad tal que se opone a V_1 de acuerdo con la ley de Lenz.

Definiciones

V_1 tensión de alimentación aplicada al primario en voltios

r_1 resistencia del circuito primario, en ohmios.

L_1 inductancia del circuito primario, en henrios.

X_{L1} reactancia inductiva del circuito en ohmios.

Z_1 impedancia del circuito primario, en ohmios.

I_1 corriente eficaz absorbida de la alimentación por el primario, en amperios.

E_1 tensión inducida en la bobina primaria por todo el flujo concatenado con la bobina 1, en voltios.

E_2 tensión inducida en la bobina secundaria por todo el flujo que concatena con la bobina 2, en voltios.

I_2 corriente eficaz suministrada por el circuito secundario a una carga conectada entre sus terminales.

r_2 resistencia del circuito secundario excluyendo la carga, en ohmios.

V_2 tensión que aparece en los bornes del arrollamiento secundario.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

L_2 inductancia del circuito secundario, en henrios.

X_{L1} reactancia inductiva del circuito secundario en ohmios.

Z_1 impedancia del circuito secundario, en ohmios.

Φ_1 componente de dispersión del flujo que concatena solamente con la bobina 1.

Φ_2 componente de dispersión del flujo que concatena solamente con la bobina 2.

Φ_m flujo mutuo compartido por ambos circuitos que concatena la bobina 1 y 2.

M inducción mutua entre las 2 bobinas producido por el flujo mutuo Φ_m en henrios.

El coeficiente de acoplamiento. k , entre las dos bobinas es una relación entre el flujo mutuo y el flujo total definido como:

$$k = \frac{\phi_m}{\phi_m + \phi_i} = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}}$$

(Fórmula 4.1)

Si las dos bobinas están débilmente acopladas, como en el transformador con núcleo de aire de la figura 4.1. los términos Φ_m y Φ_2 son pequeños en comparación con Φ_1 . En consecuencia, los términos L_2 y M son pequeños en comparación con L_1 . Sustituyendo se obtiene un valor pequeño del coeficiente de acoplamiento, k . Éste, a su vez, da lugar a un valor bajo de E_2 y V_2 en comparación con E_1 y V_1 . Para cualquier carga dada, por consiguiente, un valor pequeño de V_2 da lugar a una pequeña corriente de carga, I_2 . Así, para establecerlo simplemente, para un acoplamiento débil, la potencia transferida al circuito secundario. $E_1 I_2$, es relativamente pequeña.

Los transformadores que tienen un acoplamiento débil, se usan principalmente en la comunicación por alta frecuencia (RF) y en los circuitos

electrónicos. Prácticamente todos los transformadores usados en aplicaciones de sistemas y máquinas eléctricas, sin embargo, son transformadores con núcleo de hierro fuertemente acoplados.

Si las bobinas o circuitos están fuertemente acoplados, y los flujos de dispersión Φ_1 y Φ_2 son relativamente pequeños en comparación con Φ_m , la inductancia mutua entre las dos bobinas tiene un valor elevado así como los términos

E_2 , I_2 y V_2 , En este caso, la energía transformada $E_2 \cdot I_2 \cdot t$ es prácticamente igual a $E_1 \cdot I_1 \cdot t$. En lo posible, al proyectar transformadores eléctricos de potencia con núcleo de hierro se intenta conseguir un coeficiente de acoplamiento unidad. ($k=1$) tal que:

$$M = \sqrt{L_1 \cdot L_2}$$

(Fórmula 4.2)

El acoplamiento entre los dos circuitos aumenta si parte de ambas bobinas se devanan sobre un mismo núcleo magnético de reluctancia relativamente baja. Tales disposiciones tienden a reducir los flujos de dispersión Φ_1 y Φ_2 . Pero incluso en proyectos óptimos es imposible conseguir el transformador ideal, sin flujos de dispersión en el primario ni en el secundario y con acoplamiento unidad. Sin embargo, en el estudio que sigue se empieza con un transformador ideal, para simplificar el conocimiento de los fenómenos de los transformadores. Luego, se seguirá con los transformadores de potenciareales.

4.2. Relaciones en un transformador ideal.

Consideremos un transformador ideal con núcleo de hierro como el de la figura 4.2 en el que los flujos de dispersión Φ_1 y $\Phi_2=0$ y $k=1$. Un transformador de este tipo posee sólo flujo mutuo Φ_m , común a ambas bobinas primaria y secundaria. Cuando V_1 es positiva en un instante dado, como muestra la figura, la corriente primaria I_1 da lugar a un flujo mutuo en el sentido indicado. La tensión primaria inducida. E_1 , de acuerdo con el criterio de signos y la ley de Lenz, da lugar a una polaridad positiva en la parte superior de la bobina

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

primaria, que en cada instante se opone a la tensión aplicada V_1 . De manera parecida, en el secundario, para el sentido indicado de Φ_m que se muestra, la polaridad positiva de E_2 debe ser tal que cree un flujo desmagnetizante que se oponga a Φ_m . Una carga conectada en los bornes del secundario da lugar a una intensidad secundaria I_2 que circula en respuesta a la polaridad de E_2 y origina un flujo desmagnetizante.

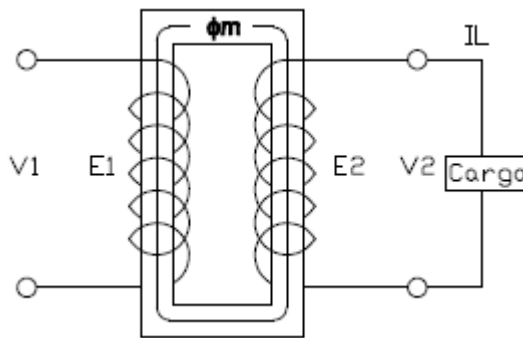
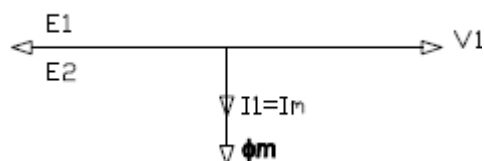


Figura 4.2. Transformador ideal.

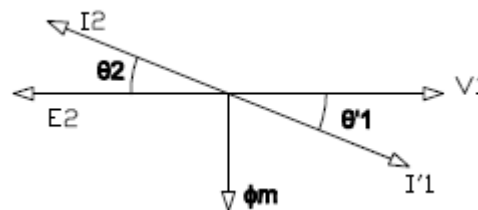
Estamos ahora en condiciones de comprender cualitativamente cómo un transformador desarrolla potencia en el secundario y transfiere potencia del primario al secundario, de la siguiente manera:

1. Supóngase un circuito abierto, impedancia infinita o carga nula en el secundario y por tanto. $I_2=0$.
2. Como resultado del flujo alterno mutuo Φ_m creado por la tensión aplicada se producen fem E_2 y E_1 que tienen la polaridad instantánea que se indica respecto a Φ_m .
3. Incluso cuando el transformador está sin carga, debe circular una pequeña corriente por el primario I_m conocida como corriente magnetizante . La corriente es pequeña porque la tensión inducida en el primario, E_1 se opone a la tensión aplicada V_1 , en cada instante. El valor de I_m es función principalmente de la reluctancia del circuito magnético. y del valor máximo del flujo mutuo de magnetización Φ_{pm} para un número dado de espiras en el arrollamiento primario. •

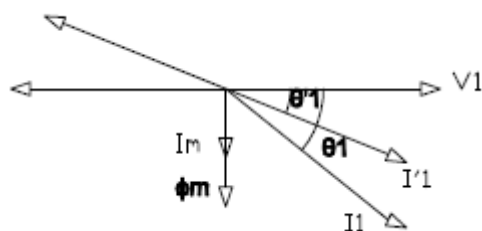
4 Como muestra la figura 4.3a, el pequeño valor de I_m retrasa 90° respecto a la tensión del primario y produce Φ_m



(a) Relaciones en el primario en vacío.



(b) Relaciones en el secundario en carga.



(c) Relaciones en el primario en carga.

Figura 4.3. Relaciones vectoriales en un transformador ideal.

5. Φ_m a su vez, induce las fem primaria y secundaria, E_1 y E_2 , retrasadas 90° . Estas fem inducidas están en fase debido a que ambas son producidas por Φ_m . Obsérvese que E_1 en la figura 4.3a se opone a V_1 (ley de Lenz). En ausencia de carga, la figura 4.3a representa todas las relaciones intensidad-tensión en el transformador ideal.

6. Supóngase una carga inductiva conectada en bornes del secundario transformador ideal de la figura 4.2. Una carga de este tipo produce una intensidad I_2 que retrasa un ángulo θ_2 respecto a E_2 como muestra la figura 4.3b.

7. Los amperivoltajes secundarios I_2 , como muestra la figura 4.2, tienden a producir un flujo desmagnetizante que reduce instantáneamente el flujo mutuo Φ_m y las fem inducidas E_2 y E_1 .

8. La reducción de E_1 hace que circule una componente primaria de la componente de carga I'_1 , por el circuito primario, de manera que $I'_1 \cdot N_1 = I'_2 \cdot N_2$, llevando Φ_m a su valor original. Obsérvese en la figura 4.3b que I'_1 retrasa ϑ_1 respecto a V_1 mientras que I_2 retrasa ϑ_2 respecto a E_2 de manera que $\vartheta_1 = \vartheta_2$. La última igualdad es necesaria para que los amperivoltajes magnetizantes del primario, que $I'_1 \cdot N_1$ compensen a $I'_2 \cdot N_2$ amperivoltajes desmagnetizantes de la carga .

9. El efecto de la componente primaria de la corriente de carga, I'_1 , sobre el primario puede verse en la figura 4.3c. en la que la intensidad en el primario es el vector suma de I_1 I_m . En relación con el factor de potencia del circuito primario, en esta figura se destacan:

- a. el ángulo del factor de potencia del primario ha disminuido en relación a su valor original sin carga. 90° . a su ángulo en carga ϑ_1 . y
- b. el ángulo de fase del circuito primario no es exactamente el mismo que el del circuito secundario.

Las etapas anteriores revelan de qué manera responde el circuito primario a una carga sobre el circuito secundario. En un cierto sentido, el funcionamiento del transformador en carga puede considerarse similar a la carga de un motor derivación de c.c.

La igualdad entre la fmm de desmagnetización $I'_2 \cdot N_2$ y la componente de carga de la fmm primaria que debe circular para contrarrestar la acción desmagnetizante $I'_1 \cdot N_1$, tal como se ha descrito en el punto 8 anterior. puede resumirse y disponerse como sigue:

$$\frac{I_2}{I'_1} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{V_1}{V_2} = \alpha = m$$

(Fórmula 4.3)

$\alpha = m$ = relación de transformación.

$$E_1 \cdot I'_1 = E_2 \cdot I_2$$

(Fórmula 4.1.)

Si la componente de carga de la corriente primaria es mucho mayor que la corriente magnetizante, I_m , se puede escribir (despreciando I_m):

$$E_1 \cdot I_1 = E_2 \cdot I_2$$

(Fórmula 4.5)

Para un transformador ideal sin pérdidas, que no tenga flujos de dispersión ni en el primario ni en el secundario se puede decir:

$$V_1 \cdot I_1 = V_2 \cdot I_2$$

(Fórmula 4.6)

La ecuación última corrobora la definición fundamental de transformador, o sea, dispositivo que transfiere energía de un circuito a otro. Para un transformador ideal, la potencia aparente absorbida de la fuente de corriente alterna, es igual a la potencia aparente transferida al secundario y suministrada a la carga. La ecuación también permite establecer una forma de definir la potencia nominal de un transformador en voltamperios (VA) o en kilovoltamperios (KVA), donde V_1 e I_1 son la tensión e intensidad nominales del primario, respectivamente y V_2 e I_2 son la tensión e intensidad nominales del secundario, respectivamente.

La relación voltios por espiras se ha establecido en 2,5 V/e para ambos devanados. Puede demostrarse que este valor es directamente proporcional al valor máximo del flujo mutuo, Φ_m , y a la frecuencia

$$\frac{E_2}{N_2} = \frac{E_h}{N_h} = 4,44 \cdot f \cdot \Phi_{pm} \cdot 10^{-8} \text{ V/e} = k \cdot f \cdot \Phi_{pm} = k f (B_m \cdot A)$$

donde B_m es la densidad de flujo máxima admisible y A es la sección del núcleo del transformador $\Phi_{pm} = B_m \cdot A$

El significado de la ecuación no puede dejar de tenerse en cuenta debido a que establece el flujo mutuo máximo admisible o densidad máxima admisible de flujo para una frecuencia y una tensión nominal dadas. Así los transformadores proyectados para funcionar a una frecuencia dada no pueden funcionar a otra frecuencia sin las correspondientes variaciones de tensión aplicada.

Si se reducen frecuencia y tensión, la capacidad en kVA del transformador también se reduce. Si se aumentan ambas, frecuencia y tensión, la capacidad en kVA aumenta de manera correspondiente (con tal de que no se excedan las tensiones de perforación de los devanados del transformador). Obsérvese que en cualquier caso, la densidad de flujo máxima admisible debe permanecer igual. Esto es necesario para que el transformador no se caliente.

Incluso en ausencia de corriente de carga, las pérdidas en el hierro aumentan de 10 W a 440 W para un transformador de 1 kVA que funcione a frecuencia reducida pero a la misma tensión nominal. Si la tensión en el primario se hubiera reducido en la misma proporción que la frecuencia, las pérdidas en el hierro no habrían aumentado tan fuertemente, de hecho, habrían disminuido por debajo de 10W debido a la reducción de la frecuencia.

4.3. Impedancia reducida, transformación de impedancia y transformadores reales.

En la figura 4.4a puede verse de nuevo el transformador con núcleo de hierro de la figura 4.2, con una carga Z_L en bornes de sus terminales de salida secundarios. Obsérvese que si la carga secundaria se elimina y el transformador se deja en circuito abierto, $I_2 = 0$; y la impedancia Z_L es infinita. Para cualquier valor de la impedancia de carga, Z_L , la impedancia secundaria vista desde la carga es:

$$Z_2 = \frac{V_2}{I_2}$$

(Fórmula 4.7)

De manera similar, la impedancia de entrada equivalente, vista desde la alimentación, es como muestra la figura 4.4b.

$$Z_1 = \frac{V_1}{I'_1}$$

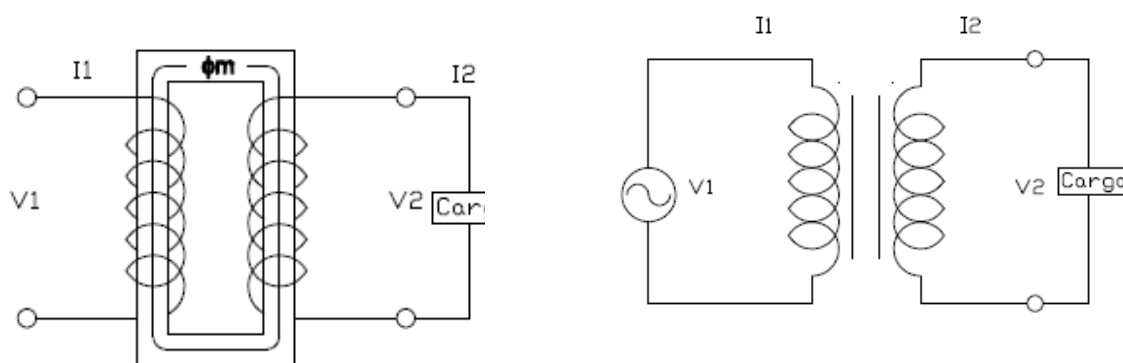
(Fórmula 4.8)

Como cualquier variación en la impedancia y corriente de carga en el secundario se refleja como una variación en la corriente en el primario, a veces resulta conveniente simplificar el transformador mediante un circuito equivalente único. Esto implica reducir la impedancia secundaria al primario como

$$Z_1 = \alpha^2 \cdot Z_2 \text{ ó } \frac{Z_1}{Z_2} = \alpha^2 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2$$

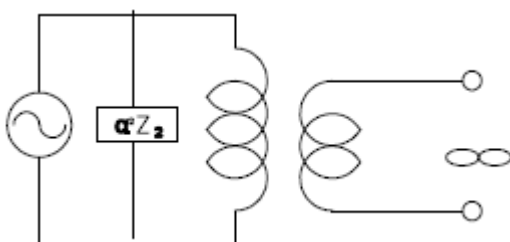
(Fórmula 4.9)

La figura 4.4c muestra la impedancia vista desde la alimentación cuando la impedancia del secundario se ha reducido al primario. Ahora se supone que el secundario está en circuito abierto, como muestra la figura 4.4c y que la impedancia del arrollamiento secundario del transformador es despreciable en comparación con la impedancia de la carga Z_L , que es igual a Z_2 . La expresión anterior establece que la relación entre la impedancia de entrada y de salida es igual al cuadrado de la relación de transformación. Como $Z_1 = \alpha^2 \cdot Z_2$, esta relación implica que los transformadores pueden servir como dispositivos de adaptación de impedancia, de manera que proporcionen una transferencia máxima de potencia de un circuito a otro.



(a) Transformador en carga

(b) Impedancia equivalente de entrada y salida



(c) Impedancia equivalente reducida

Figura 4.4. Impedancia reducida del secundario al primario.

Transformador real.

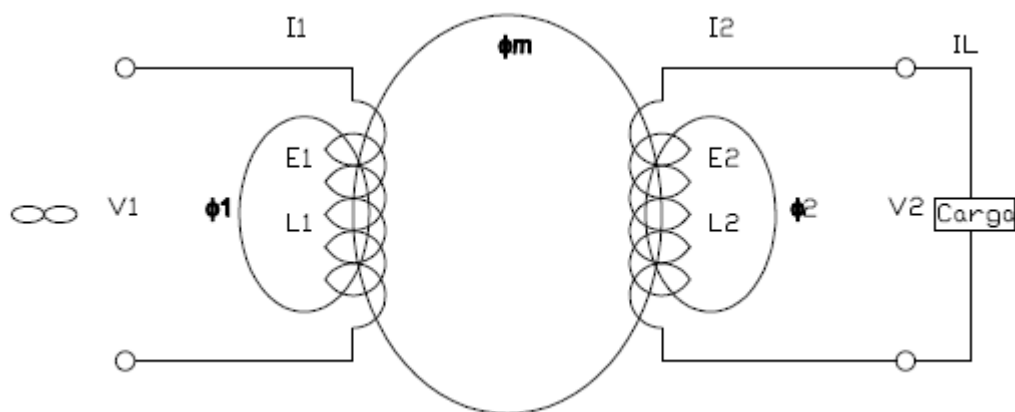
En la figura 4.5a está representado un transformador real en carga, con núcleo de hierro. Aunque hay un buen acoplamiento debido al núcleo de hierro, además del flujo mutuo Φ_m mostrado en la figura 4.5a, se producen unos pequeños flujos de dispersión en los arrollamientos del primario y del secundario, Φ_1 y Φ_2

El flujo de dispersión primario, Φ_1 , produce una reactancia inductiva primaria, X_{L1} . El flujo de dispersión secundario, Φ_2 , produce una reactancia inductiva secundaria, X_{L2} . Además, los arrollamientos del primario y del secundario están devanados con cobre que tiene una cierta resistencia. La resistencia interna del arrollamiento primario es r_1 y la del secundario es r_2 .

Las resistencias y reactancias de los arrollamientos primario y secundario, respectivamente, producen caídas de tensión dentro del transformador como resultado de las corrientes del primario y del secundario. Aunque estas caídas de tensión son internas, es conveniente representarlas externamente en serie con un transformador ideal como muestra la figura 4.5b. El transformador ideal que muestra la figura 4.5b se supone que no tiene caídas de tensión resistivas ni reactivas en sus arrollamientos. Se ha tenido en cuenta la dispersión mediante la caída de tensión del primario $I_1 Z_1$ y la caída de tensión en el secundario, $I_2 Z_2$. Como se trata de caídas de tensión inductivas, podemos decir que la impedancia interna primaria y secundaria del transformador respectivamente es:

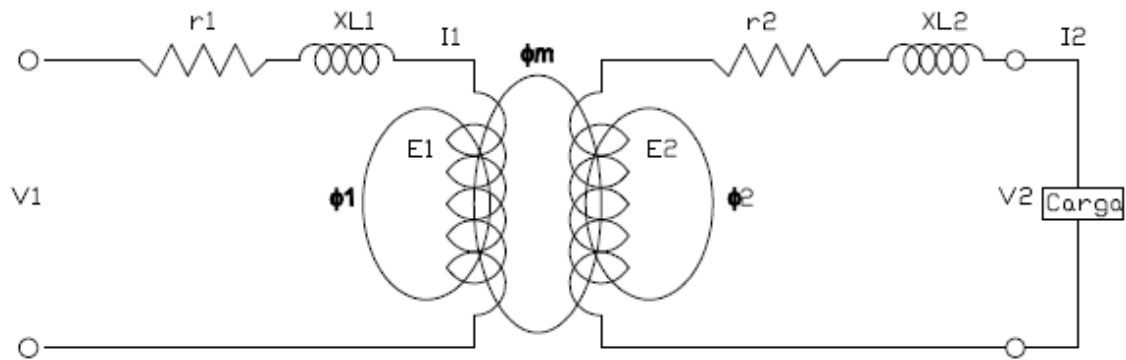
$$z_1 = r_1 + jX_{L1}; \quad z_2 = r_2 + jX_{L2}$$

(Fórmula 4.10)



(a)Flujos de dispersión en un transformador real en carga

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.



(b) Resistencias y reactancias primarias y secundarias que causan caídas de tensión en un transformador real.

Figura 4.5. Transformador real.

Ahora resulta posible ver la relación entre las tensiones en bornes y las fem inducidas en el primario y en el secundario, respectivamente. Las fem inducidas en el primario y en el secundario pueden calcularse a partir de la relación fundamental:

$$E1 = 4,44 \cdot f \cdot N1 \cdot B_m \cdot A \cdot 10^{-8}V$$

$$E2 = 4,44 \cdot f \cdot N2 \cdot B_m \cdot A \cdot 10^{-8}V$$

(Fórmula 4.11)

Pero como resulta relativamente difícil calcular B_m , la densidad de flujo máxima admisible del transformador a partir de las medidas de tensión e intensidad, también se deducen las siguientes relaciones de la figura 4.5b. que permiten el cálculo de las fem inducidas en el primario y en el secundario:

$$E1 = V1 - I1Z1 = V1 - I1(r1 + jXL1)$$

$$E2 = V2 - I2Z2 = V2 - I2(r2 + jXL2)$$

(Fórmula 4.12)

La tensión aplicada al primario , V_1 , es mayor que la fem inducida en el arrollamiento primario E_1 . La fem inducida en el arrollamiento secundario, E_2 ,

es mayor que la tensión terminal en el secundario, V_2 . Luego, para un transformador real en carga.

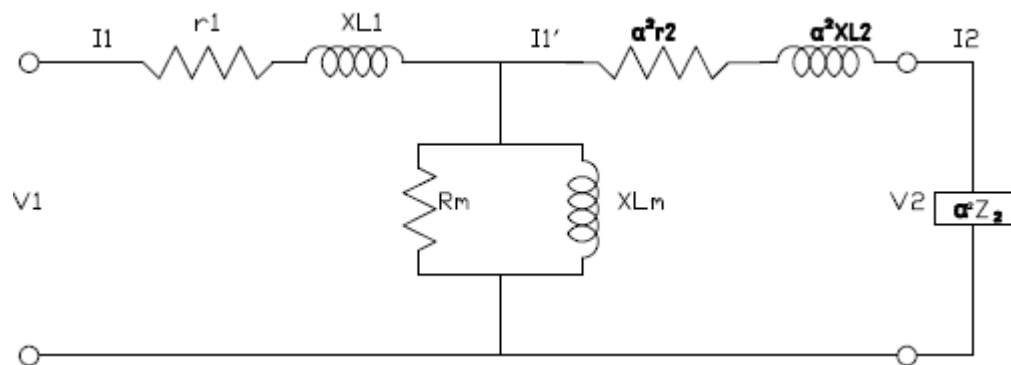
$$V_1 > E_1 \text{ y } V_2 < E_2$$

(Fórmula 4.13)

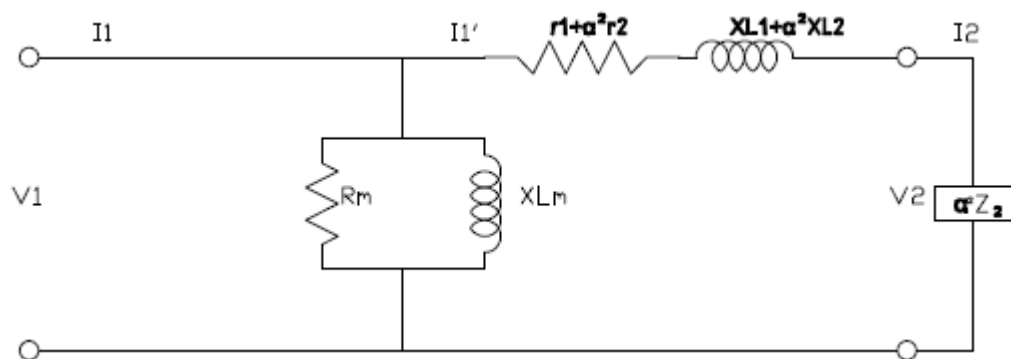
4.4. Circuito equivalente para un transformador de potencia real.

La obtención del circuito equivalente de un transformador es de suma utilidad para la resolución de problemas relacionados con el rendimiento y la regulación de tensión de un transformador.

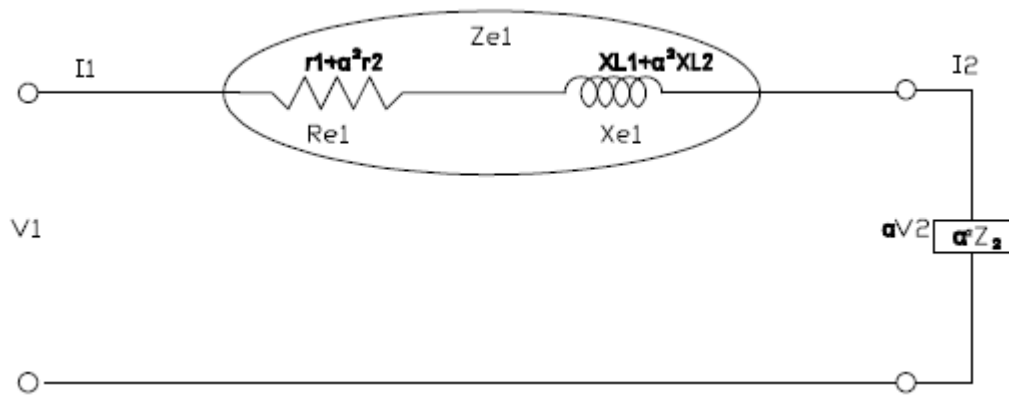
El circuito de la figura 4.5b puede verse en la figura siguiente con la impedancia de carga y la resistencia y reactancia interna del secundario referidas al primario.



(a) Circuito equivalente de un transformador de potencia.



(b) Circuito equivalente aproximado con resistencias y reactancias agrupadas.



(c) Circuito equivalente simplificado suponiendo despreciable la corriente magnetizante.

Figura 4.6. Circuitos equivalentes para un transformador de potencia.

La intensidad en el primario, I_1 , es la suma de la corriente magnetizante, I_m , y de la corriente de carga I_L . Esto está de acuerdo con las relaciones vectoriales de un transformador en carga indicadas en la figura 4.3c. Además, R_m representa las pérdidas en el hierro del transformador equivalente (por histéresis y corrientes de Foucault), como consecuencia de la corriente magnetizante, I_m . Obsérvese que R_m está en paralelo con X_{Lm} que representa la reactancia del transformador (en vacío).

La figura 4.6a es una representación del transformador que satisface tanto la condición de carga como la de vacío. Si el secundario del transformador está en vacío, $I'_1 = 0$, y sólo circula $I_1 = I_m$ que produce una pequeña caída de tensión interna debido a la impedancia del primario Z_1 (igual a $r_1 + jXL_1$). Como la impedancia del primario Z_1 y la caída de tensión $I_1 Z_1$

Son relativamente pequeñas, es posible obtener un circuito equivalente aproximado colocando directamente la rama en paralelo L-R a los bornes de la alimentación, V_1 . Esto nos permite agrupar las resistencias y reactancias internas de los circuitos primario y secundario como se ve en la figura 4.6b, para establecer las siguientes equivalencias:

$$R_{e1} = r_1 + m^2 r_2 \quad \text{resistencia equivalente referida al primario}$$

$$X_{e1} = r_1 + m^2 r_2 \quad \text{reactancia equivalente referida al primario}$$

$$Z_{e1} = r_1 + m^2 r_2 \quad \text{impedancia equivalente referida al primario}$$

(Fórmula 4.14)

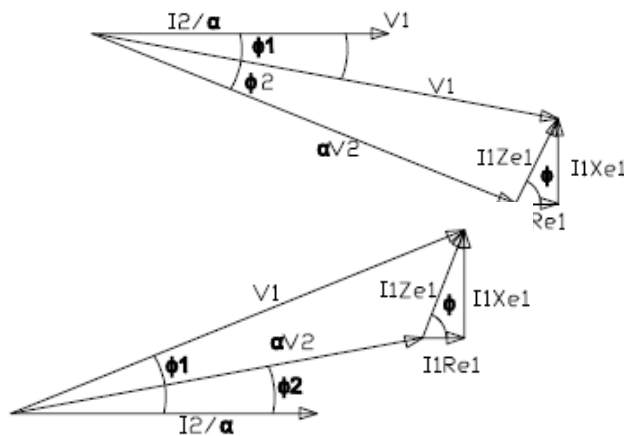
Si el transformador está en carga, la corriente, I_1 , es mayor que la corriente magnetizante I_m . y ésta puede considerarse despreciable, como puede verse en el equivalente simplificado de la figura 4.6c. Esta figura permite establecer algunas consideraciones en las que interviene el rendimiento del transformador y la regulación de tensión, así como el cálculo de la corriente del primario (y del secundario). Para un transformador en carga, la corriente del primario, que depende de la naturaleza de la carga, es

$$I_1 = \frac{V_1}{[R_{e1} + m^2 R_L] + j[X_{e1} \pm m^2 X_L]}$$

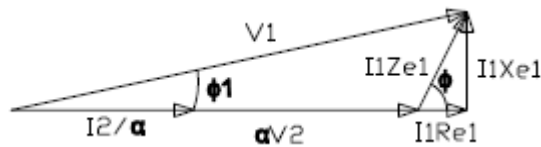
(Fórmula 4.15)

En la aproximación de la figura 4.6c no se tiene en cuenta la componente magnetizante, I_m , de la corriente del primario I_1 . En efecto, esto significa que el ángulo de fase de la carga secundaria está directamente reflejado en el primario sin variación. En la figura 4.3c aparece una diferencia entre el ángulo ϑ_1 de factor de potencia en el primario y el ángulo reflejado ϑ'_1 , debido a la corriente magnetizante. Si se desprecia la corriente magnetizante del primario, se obtiene el simple diagrama vectorial equivalente de la figura 4.7 correspondiente a un transformador en carga, con cualquier tipo de carga (en adelanto, en retraso o con factor de potencia unidad).

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.



(a)Cargas con factor de potencia capacitivo (b)Cargas con factor de potencia Inductivo



(c) Cargas con factor de potencia unidad

Figura 4.7. Transformador de potencia en condiciones variables de carga secundario y su efecto sobre el factor de potencia primario.

a. Carga con un factor de potencia en adelanto (figura 4.7a). La corriente secundaria de carga reducida al primario, I_2/m , está adelantada respecto a la tensión en bornes de la carga secundaria reducida al primario $V_2 \cdot m$ de un ángulo ϑ_2 . La diferencia vectorial entre mV_2 y V_1 es la caída de tensión por la impedancia $I_1 Z_{e1}$. La caída de tensión resistiva $I_1 R_{e1}$ está en fase con I_1 . La caída de tensión reactiva $I_1 X_{e1}$ avanza 90° respecto a la corriente I_1 . Debido a estas caídas de tensión, I_1 continúa adelantando todavía a V_1 con un ángulo ϑ_1 . ϑ_1 es menor que ϑ_2 debido a que el transformador es internamente inductivo.

b. Carga con un factor de potencia en retraso, figura 4.7b. La corriente secundaria de carga reducida al primario, I_2/m , retrasa respecto a la tensión en bornes de la carga secundaria reducida al primario, mV_2 , de un ángulo ϑ_2 . La diferencia vectorial entre la tensión secundaria reflejada, mV_2 , y

la tensión aplicada al primario, V_1 es la caída de tensión por impedancia, $I_1 \cdot Z_{e1}$. En este caso, el ángulo ϑ_1 es mayor que el ángulo ϑ_2 debido a que el transformador es internamente inductivo y tiende a que el circuito completo retrase más.

c. Carga con un factor de potencia unidad figura 4.7c. La intensidad secundaria de carga reducida al primario, I_2/m , está en fase con la tensión en bornes de la carga secundaria reducida al primario, mV_2 , para un factor de potencia unitaria, con una carga resistiva sobre el secundario del transformador. La diferencia vectorial entre la tensión en bornes de la carga secundaria reducida al primario mV_2 y la tensión aplicada al primario V_1 es la caída de tensión por impedancia, $I_1 \cdot Z_{e1}$. La corriente primaria I_1 retrasa un pequeño ángulo ϑ_1 respecto a V_1 . Con factor de potencia unidad en el secundario, la corriente del primario retrasa respecto a la tensión del primario debido a la inductancia interna del transformador.

4.5. Regulación de tensión de un transformador de potencia.

Un examen de los tres casos mostrado, en la figura 13-7 muestra también que la tensión en bornes de la carga secundaria reducida al primario, mV_2 , difiere de la tensión aplicada en el primario V_2 , en la caída de tensión por impedancia referida al primario. La relación entre la tensión en bornes de la carga secundaria reducida al primario, mV_2 y la tensión del primario V_1 , guarden la misma relación que la que existe entre la tensión en bornes del secundario y la tensión del secundario en vacío.

La figura 4.8 muestra las tres condiciones de la figura 4.7 con dos modificaciones. Todos los valores se han referido al lado secundario del transformador, y

2. se usa la tensión del secundario como vector de referencia en lugar de la intensidad ecuación para la resistencia equivalente referida al secundario

$$R_{e2} = r_2 + \frac{r_1}{m^2}$$

(Fórmula 4.16)

y la ecuación para la reactancia equivalente referida al secundario es

$$X_{e2} = X_{L2} + \frac{X_{L1}}{m^2}$$

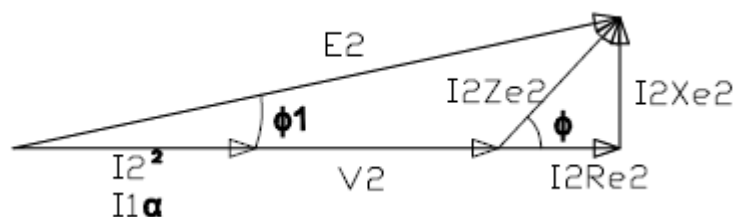
(Fórmula 4.17)

De las cuales se deduce que la impedancia equivalente

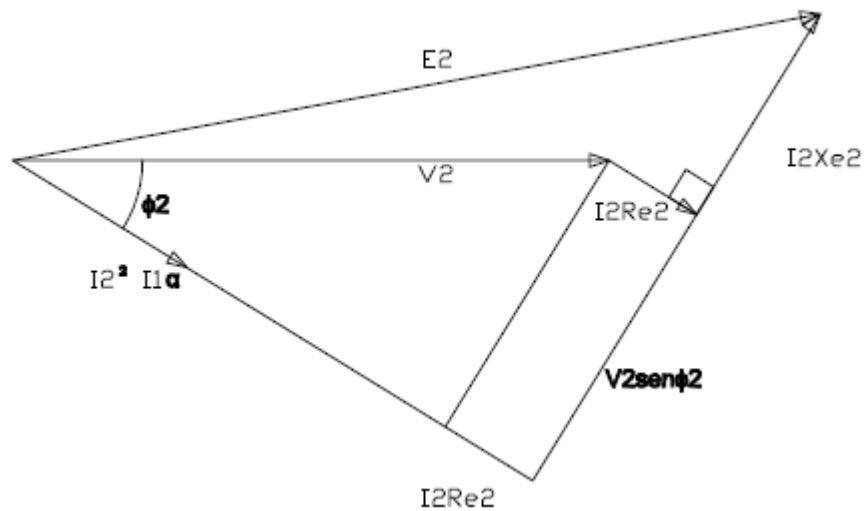
$$Z_{e2} = R_{e2} + jX_{e2}$$

(Fórmula 4.18)

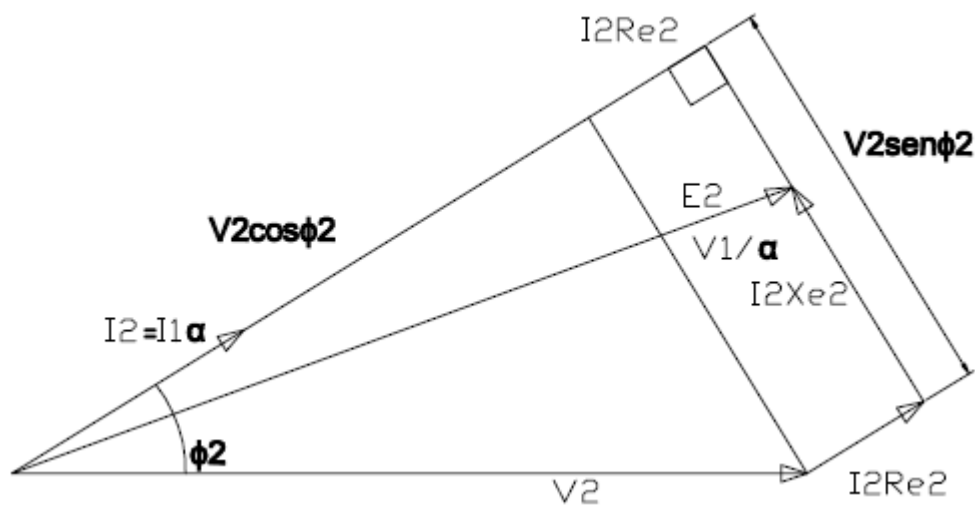
Para cualquier valor dado de la corriente de carga I_2 , por tanto, resulta posible calcular la fem inducida, E_2 y la regulación de tensión del transformador, respectivamente, a partir de las siguientes relaciones deducidas de la figura 4.8, en las que el signo + en el término imaginario corresponde a las cargas en retraso y el factor de potencia unidad, y el signo - en el término imaginario corresponde a las cargas en adelanto.



(a) Cargas con factor de potencia unidad



(b) Cargas con factor de potencia inductivo



(c) Cargas con factor de potencia capacitivo

Figura 4.8. Regulación de tensión secundaria en un transformador de potencia (con todas las tensiones y corrientes referidas al secundario) usando la tensión secundaria como vector de referencia.

La regulación de tensión, medida en los bornes del secundario de un transformador:

$$VR (\% \text{ de regulación de tensión}) = \frac{E_2 - V_2}{V_2} \cdot 100$$

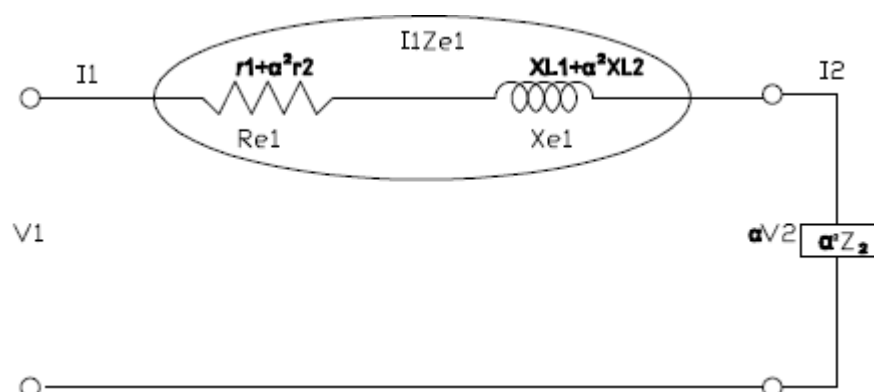
(Fórmula 4.19)

siendo E_2 la fem inducida en el secundario en vacío y V_2 la tensión en el secundario a plena

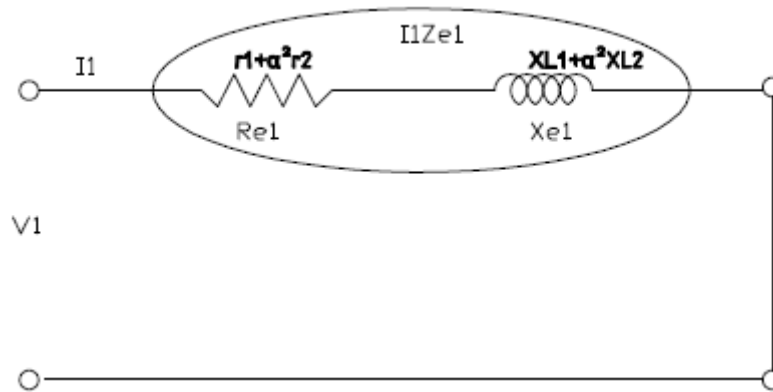
4.6. Regulación de tensión a partir del ensayo de cortocircuito.

El circuito equivalente simplificado, referido al primario, obtenido en la figura 4.6c, puede verse de nuevo en la figura 4.9a. Si el secundario de baja tensión de un transformador se pone en cortocircuito, tanto V_2 , la tensión en bornes del secundario, como Z_L , la carga secundaria son cero. El circuito equivalente para este transformador, con el secundario cortocircuitado, puede verse en la figura 4.9b. Las consecuencias de la figura 4.9b son claras. Si el secundario de un transformador está cortocircuitado, sólo queda cargado con las resistencias y reactancias internas del primario y del secundario. En consecuencia, la corriente I_1 absorbida de V_1 está determinada únicamente por la impedancia interna, Z_{e1} por lo que $I_1 = V_1 / Z_{e1}$

Un transformador cargado normalmente, como el que muestra la figura 4.9a, tiene una caída de tensión interna pequeña, $I_1 \cdot Z_{e1}$, en comparación con mV_1 , la tensión en bornes de la carga. La mayor parte de la tensión de V_1 en la figura 4.9a se aplica a la carga mV_2 . Pero con impedancia de carga cero (secundario cortocircuitado) toda la tensión V_1 se aplica a la impedancia interna, $I_1 \cdot Z_{e1}$, como muestra la figura 4.9b. Así pues, cuando un transformador está cortocircuitado:



(a) Circuito equivalente simplificado para transformador en carga



(b) Circuito equivalente de transformador con secundario en cortocircuito

Figura 4.9. Circuitos equivalentes del transformador en carga y en cortocircuito.

$$V1 = I1 \cdot Ze1; \frac{V1}{I1} = Ze1$$

$$Re1 = \frac{V1 \cdot \cos\theta}{I1}; Xe1 = \frac{V1 \cdot \sin\theta}{I1}$$

(Fórmula 4.20)

Estas expresiones indican claramente que las medidas de la tensión, la intensidad y la potencia de un primario, cuando el transformador está cortocircuitado, pueden proporcionarnos los valores de los parámetros $Re1$, $Xe1$, $Ze1$.

La figura 4.10 muestra una disposición típica de instrumentos y dispositivos para obtener los datos del ensayo de cortocircuito de un transformador.

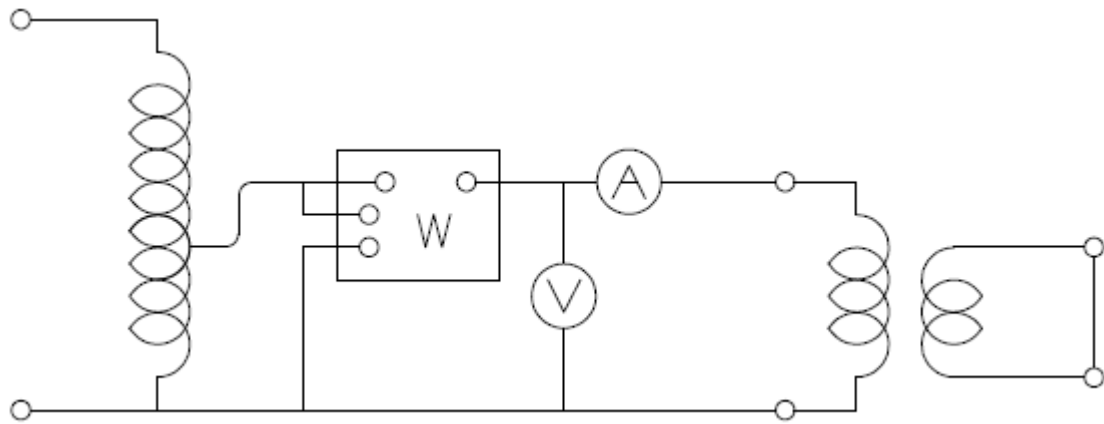


Figura 4.10. Conexión típica de instrumentos en el ensayo de cortocircuito para determinar R_{e1} , X_{e1} , Z_{e1} .

1. Ajustar a cero la tensión aplicada al primario mediante un potenciómetro o un transformador regulable, y cortocircuitar los terminales de baja tensión, X_1 - X_2 , del transformador.

2. Aumentar lenta y cuidadosamente la tensión mediante el potenciómetro transformador regulable hasta que el amperímetro señale la intensidad nominal del primario. (La intensidad nominal del primario se determina a partir de la nominal del transformador en voltamperios dividida por la tensión nominal del de alta tensión, VA/V_a).

3. Anotar los valores de la potencia, P_{sc} : tensión de cortocircuito, V_{sc} , y la intensidad en el primario, $I_{sc}=I_1$ (nomina).

4. Calcular Z_{e1} como relación de lecturas de voltímetro y amperímetro:

$$Z_{e1} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} = \frac{\text{lectura del voltímetro}}{\text{lectura del amperímetro}}$$

(Fórmula 4.21)

5. Calcular R_{e1} como cociente entre la lectura del watímetro y el cuadrado de la lectura del amperímetro:

$$R_{e1} = \frac{P_{sc}}{I_{sc}^2} = \frac{\text{lectura del watímetro}}{\text{lectura del amperímetro}^2}$$

(Fórmula 4.22)

6. Calcular X_{e1} a partir de Z_{e1} , y de R_{e1} obtenidas en las etapas 4 y 5 anteriores, usando:

$$X_{e1} = \sqrt{Z_{e1}^2 - R_{e1}^2}; \theta = \arcsin\left(\frac{R_{e1}}{Z_{e1}}\right); X_{e1} = Z_{e1} \cos\theta$$

(Fórmula 4.23)

Los datos y cálculos del ensayo de cortocircuito, así como su aplicación para la regulación del transformador, están ilustrados en el ejemplo 4.12.

4.7. Hipótesis inherentes en el ensayo de cortocircuito.

El watímetro de la figura 4.10 registra esencialmente las pérdidas en el cobre (resistencia) del primario y del secundario, referidas al lado de alta tensión (primario). Podría parecer que el watímetro de la figura 4.10 proporciona una lectura de la potencia algo superior, ya que la fuente de alimentación de c.a. debe también alimentar las pérdidas en el núcleo o hierro del transformador. Por tanto una lectura superior daría lugar a un valor más elevado de R_{e1} .

Sin embargo, la tensión aplicada al lado de alta del transformador durante el ensayo de cortocircuito sólo es una pequeña fracción de la tensión nominal del lado de alta. La densidad de flujo varía directamente con la tensión (50/2300). Las pérdidas en el hierro, varían aproximadamente con el cuadrado de la densidad de flujo o con el cuadrado de la tensión aplicada al primario. A tensión y frecuencia nominales, las pérdidas en el hierro de un transformador no son despreciables. Pero en el caso del ensayo de cortocircuito, la tensión aplicada al primario es sólo una pequeña fracción de la tensión nominal en el lado de alta. En estas condiciones, las pérdidas en el hierro, que varían con el cuadrado de la tensión, pueden considerarse despreciables.

Las pérdidas en el hierro para un transformador de potencia son verdaderamente despreciables, para las tensiones extremadamente reducidas en el lado de alta durante el ensayo de cortocircuito. Esto es cierto para la mayoría de transformadores de potencia con la posible excepción de los extremadamente pequeños o de los de alta frecuencia de núcleo de hierro. Las pérdidas en el hierro, por tanto, pueden despreciarse en la mayoría de condiciones de ensayo de cortocircuito.

4.8. Rendimiento del transformador a partir de los ensayos de vacío y cortocircuito

Las pérdidas en el hierro a la tensión nominal o de funcionamiento, como consecuencia de lo anterior, sólo pueden obtenerse excitando uno cualquiera de los devanados del transformador a su tensión nominal. Como la mayoría de transformadores de potencia de transporte y de distribución tienen uno o más arrollamientos de muy alta tensión, lo más corriente y seguro para realizar el ensayo de vacío para determinar las pérdidas en el hierro consiste en trabajar sobre el arrollamiento correspondiente a la tensión más baja. Las conexiones típicas pueden verse en la figura 4.11 para un transformador de dos devanados, con la tensión nominal aplicada a los terminales de baja tensión, $X_1=X_2$, y los terminales de alta tensión $H_1=H_2$, abiertos. Como se aplica la tensión nominal al lado de baja tensión, la tensión nominal aparecerá también en los terminales del lado de alta tensión. Deben tomarse precauciones para ver que estos terminales a alta tensión estén adecuadamente aislados entre sí y del personal.

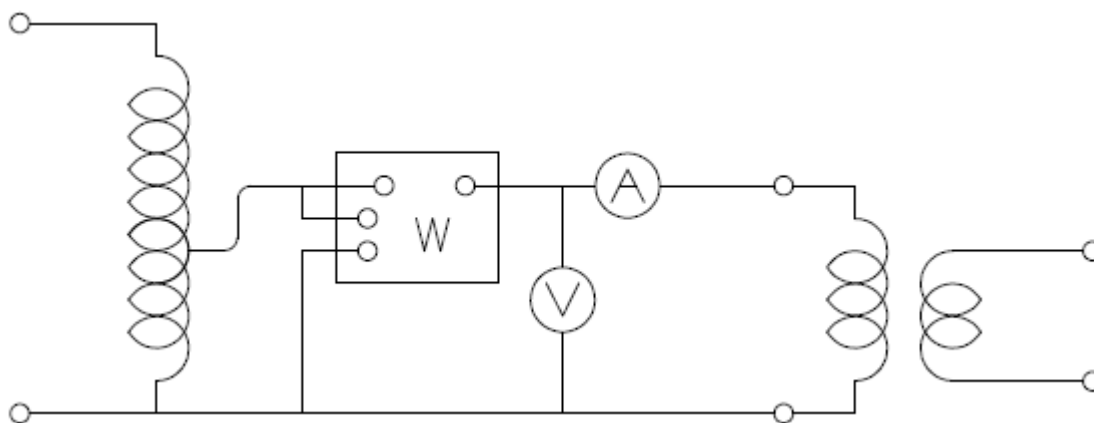


Figura 4.11. Conexión típica de Instrumentos en el ensayo de vacío para la determinación de las pérdidas en el hierro.

La finalidad principal cuando se realiza el ensayo en circuito abierto es medir las pérdidas en el hierro a tensión nominal. El procedimiento para realización del ensayo en vacío es como sigue:

1. Variar el potenciómetro o el transformador regulable desde cero hasta la tensión nominal correspondiente al arrollamiento particular.
2. Anotar la potencia en vacío, P_o , a tensión nominal, V_n y la corriente magnetizante, I_m , que se hayan medido en el watímetro, voltímetro y amperímetro.
3. Calcular las pérdidas en el hierro a partir de $P_h = P_o - I_m^2 R_x$, donde R_x es la resistencia del arrollamiento de baja tensión seleccionado.

Debido a que el transformador está en vacío, la corriente de vacío es relativamente pequeña, así como la resistencia del arrollamiento particular de baja tensión sobre el cual se ha realizado el ensayo. En la mayoría de casos, por tanto se acostumbra a tomar la lectura del watímetro como valor de pérdidas en el hierro sin restarle las pérdidas en el cobre en el arrollamiento o debidas a la corriente magnetizante.

Además de la regulación de tensión, es posible usar los datos de los ensayos en circuito abierto y en cortocircuito, para calcular el rendimiento de un

transformador. Debe hacerse notar que ambos ensayos emplean técnicas convencionales en lugar de la carga directa.

Un transformador, cuyo secundario esté en vacío, consume sólo la potencia para su pérdidas en el hierro, menos del uno por ciento de la potencia nominal. La potencia consumida durante el ensayo de cortocircuito de manera parecida es muy pequeña, ya que la potencia demandada es esencialmente la correspondiente a las pérdidas nominales en el cobre del transformador, las cuales, asimismo, son menores del uno por ciento de su potencia nominal.

$$\eta = \frac{P_{sal}}{P_{sal} + P_{perd}} = \frac{V_2 \cdot I_2 \cdot \cos\theta_2}{V_2 \cdot I_2 \cdot \cos\theta_2 + P_{fe} + I_2^2 \cdot R_{e2}}$$

(Fórmula 4.24)

Las pérdidas son de dos tipos, unas pérdidas fijas, las pérdidas en el hierro y las pérdidas variables, las pérdidas en el cobre. El único término fijo de es el de las pérdidas en el hierro. El término de la potencia útil y el de las pérdidas equivalentes en el cobre son ambos funciones de I_2 , la corriente de carga del secundario.

El rendimiento máximo tiene lugar cuando las pérdidas fijas y las variables son iguales.

$$I_2^2 \cdot R_{e2} = P_{fe}$$

(Fórmula 4.25)

La intensidad en la cual el rendimiento es máximo será:

$$I_2 = \sqrt{P_{fe}/R_{e2}}$$

(Fórmula 4.26)

El factor de potencia de la carga, $\cos\theta_2$, determina la magnitud del término de potencia útil. Para el mismo valor de la intensidad nominal de carga, I_2 , una reducción del factor de potencia va acompañado de una reducción correspondiente de rendimiento. Finalmente, como en el caso de cualquier

máquina eléctrica y de otro tipo, la curva de rendimiento de un transformador sigue la misma forma general que aparece en la figura 4.12. Para cargas relativamente pequeñas, las pérdidas fijas son elevadas en relación con la potencia de salida. y el rendimiento es bajo. Con cargas fuertes, las pérdidas en el cobre son elevadas en proporción a la salida y el rendimiento es de nuevo bajo. Desde luego, el rendimiento máximo tiene lugar a un valor de la carga tal que en él las pérdidas en el hierro son iguales a las pérdidas en el cobre.

La curva de rendimiento, por consiguiente, crece desde cero, en vacío, hasta un máximo, a un valor comprendido entre la mitad y la plena carga nominal, y disminuye luego de nuevo para cargas superiores a la nominal.

1. En vacío, aplicando la tensión nominal a uno de los arrollamientos de baja tensión, la potencia absorbida P_0 es esencialmente debida a las pérdidas en el hierro. Pueden despreciarse las pequeñas pérdidas en el cobre en vacío.

2. Aunque el rendimiento es cero en vacío, $I_2=0$, y la salida $V_2 I_2 \cdot \cos \vartheta_2=0$, aumenta rápidamente con la aplicación de pequeñas cargas en el secundario. Superando el 97% a 1/4 de la carga nominal.

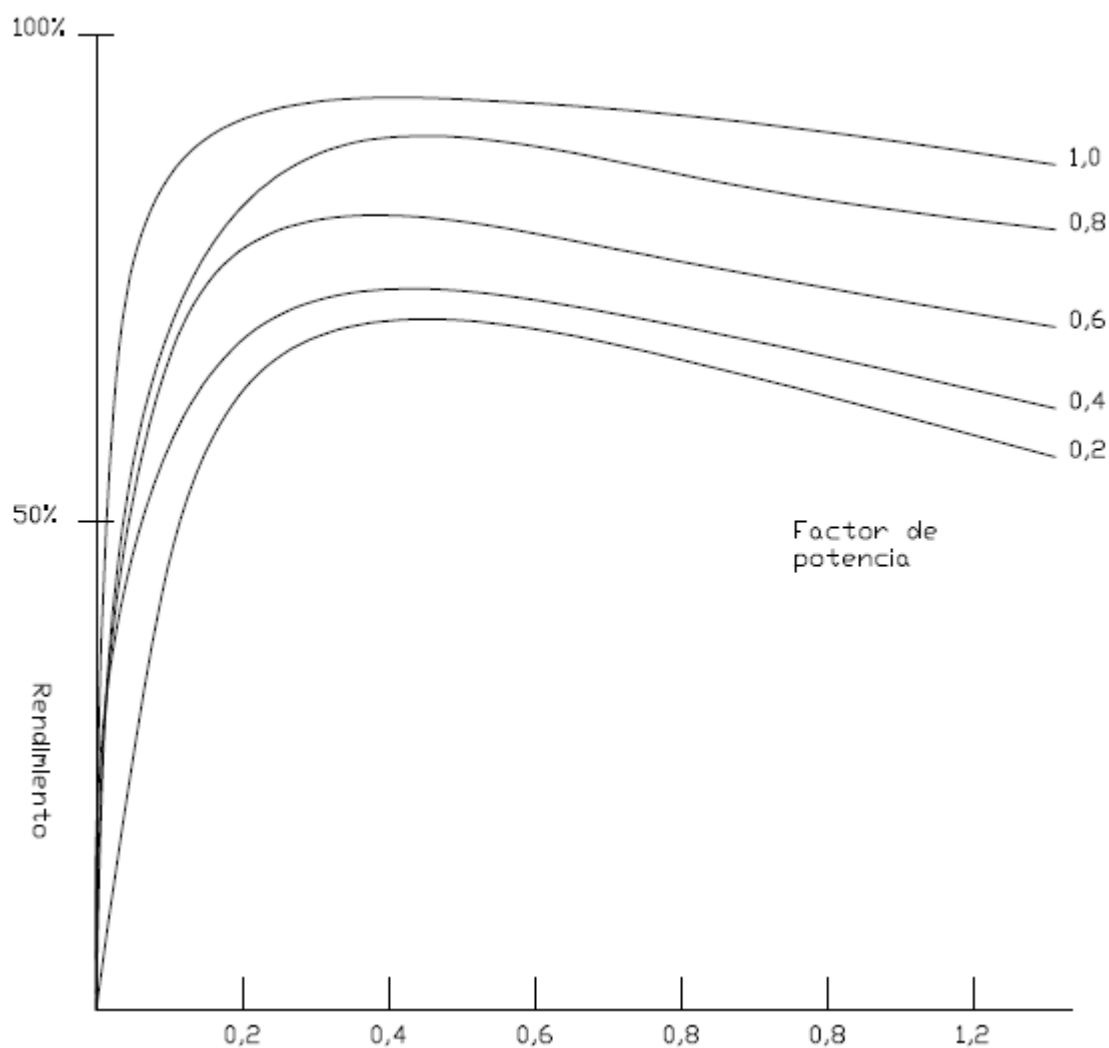


Figura 4.12. Rendimiento del transformador en función del factor de potencia de la carga.

3. El rendimiento máximo ocurre aproximadamente a la mitad de carga. Ajustando el rendimiento máximo a este valor de carga, se consigue que el transformador mantenga un rendimiento suficientemente elevado para cargas pequeñas inferiores a este valor y para cargas mayores superiores a este valor. El transformador, así, mantiene su elevado rendimiento sobre un ancho espectro de valores de carga.

4. Para el mismo valor de corriente de carga, el efecto de los valores decrecientes del factor de potencia es una pequeña reducción en el rendimiento, como nuestra la familia de curvas de la figura 4.12.

5. La carga a la cual tiene lugar el rendimiento máximo, sin embargo, para cada curva de las familias que muestra la figura 4.12, permanece igual

debido a que las pérdidas en el hierro y las pérdidas variables en el cobre son independientes del factor de potencia. Por tanto, el rendimiento máximo es más bajo para este punto de carga para factores de potencia inferiores.

6. Los rendimientos de los transformadores son algo mayores que los de las máquinas eléctricas rotativas, para la misma capacidad en kVA, debido a que estas últimas poseen pérdidas adicionales tales como pérdidas mecánicas y pérdidas por corrientes parásitas. Así, un transformador bien proyectado siempre tiene mayor rendimiento que la máquina rotativa conectada como carga secundaria.

4.10. Identificación de fases y polaridad de los arrollamientos de un transformador.

Además de los ensayos de vacío y de cortocircuito usados para determinar la regulación, el rendimiento y el rendimiento diario de los transformadores comerciales, se suelen realizar otros ensayos antes de poner un transformador en servicio. Dos de tales ensayos tratan de la identificación de fases y la polaridad, respectivamente, del transformador construido. La identificación de fases es el proceso mediante el cual se identifican los terminales individuales que constituyen los devanados de cada una de las bobinas del transformador. El ensayo de polaridad se realiza de manera que los terminales individuales de los devanados de bobinas independientes de un transformador puedan ser marcados o codificados de manera que se identifiquen los terminales que tengan igual polaridad relativa instantánea. Consideraremos, primero, la polaridad, y luego las técnicas de identificación de fases.

La figura 4.13 muestra un transformador de varias bobinas con dos arrollamientos de alta tensión y dos arrollamientos de baja tensión. Las bobinas de alta tensión (mayor número de espiras) están codificadas con la letra «H» para designar sus terminales. Los terminales de baja tensión están designados por la letra «X».

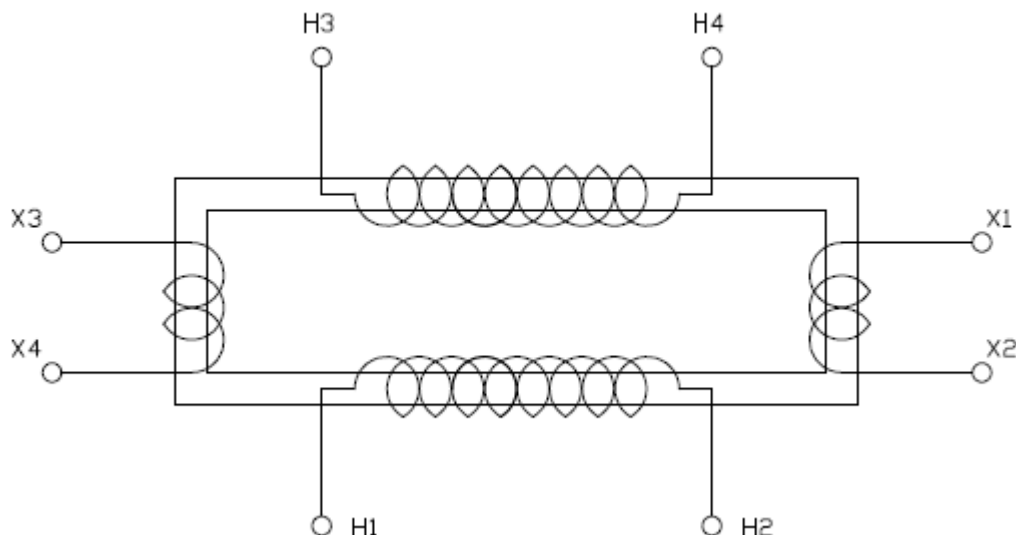


Figura 4.13. Determinación de la polaridad de los transformadores usando el criterio de signos.

Como muestra la figura 4.13, la polaridad instantánea se codifica mediante subíndice. En el código particular que muestra la figura se usa un subíndice

u mero impar para designar la polaridad instantánea positiva de cada arrollamiento. Obsérvese que el subíndice de número impar se corresponde también con el punto que representa la fem inducida positiva en cada arrollamiento, como muestra la figura 4.13. Así, en el caso de que las bobinas deban contactarse ya sea en paralelo o en serie para obtener distintas relaciones de tensión, puede hacerse adecuadamente la conexión teniendo en cuenta las polaridades instantáneas. Se asigna un punto o un número impar a los arrollamientos de la figura 4.13. Supóngase que el primario H1-H2 esté en tensión y que H, esté conectado en un instante dado al terminal positivo de la alimentación, El flujo mutuo, Φ_m , en el núcleo, tiene en este instante el sentido de las agujas del reloj, indicado. De acuerdo con la ley de Lenz, las fem inducidas en los restantes devanados tienen el sentido que se ve. Otro método para comprobar el criterio de signos de la figura 4.13 consiste en comparar la manera cómo están devanadas las bobinas sobre el núcleo. Las bobinas H₁-H₂ y X₁-X₄ están devanadas en el mismo sentido, por tanto el punto está en el terminal izquierdo. Las bobinas X₁-X₂ y H₃-H₄ están devanadas en igual

sentido, que es opuesto al de H_1 - H_2 . Estas bobinas deben tener el punto en el terminal derecho para significar polaridad positiva y polaridad opuesta a H_1 - H_2 .

Desgraciadamente, es imposible examinar un transformador real y deducir el sentido en que están devanadas sus espiras, ya sea para identificar las fases o determinar la polaridad relativa de los terminales de las bobinas. Si fuera posible examinar los conductores desnudos de las bobinas, el diámetro de los hilos podría indicar qué conexiones o terminales están asociados con las bobinas de alta o con las de baja tensión. Las bobinas de baja tensión tendrán conductores de sección mayor que la de las bobinas de alta tensión. Las bobinas de alta tensión también pueden tener un aislamiento superior que las de baja tensión. Sin embargo, este examen físico no proporciona ninguna indicación relativa a la polaridad o desfase de las tomas de la bobina o de los terminales de la bobina asociados con las bobinas individuales que están aisladas entre sí.

Identificación de fases del transformador.

Un método simple para la identificación de fases de los arrollamientos del transformador puede verse en la figura 4.14. Una lámpara proporciona un medio para la identificación de la bobina. Si la parte de la carga de la lámpara está conectada al terminal H_1 como se muestra y la conexión de exploración se conecta al terminal X_4 la lámpara no se enciende. Moviendo la conexión de exploración de derecha a izquierda a lo largo del bloque de terminales no se produce indicación en la lámpara hasta que se alcanza el terminal H_4 . La lámpara se enciende en los terminales H_4 - H_3 y H_2 , indicando que solamente los cuatro terminales de la parte izquierda forman parte de una única bobina. El brillo relativo de la lámpara puede dar indicación de las tomas. La Lámpara brillará más cuando se cierra el circuito entre H_1 - H_2 y menos cuando se cierra entre H_1 - H_4 . Puede obtenerse una comprobación más sensible de la identificación de fases de las bobinas tomas con un voltímetro de c.a. en lugar de la lámpara. El voltímetro indicará la tensión de alimentación para cada toma de una bobina común puesto que su resistencia es mucho mayor que la resistencia del arrollamiento del transformador. Puede utilizarse un óhmetro electrónico o accionado por baterías para identificar las tomas mediante

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

medidas de resistencia y también comprobar los devanados de las bobinas mediante la prueba de continuidad.

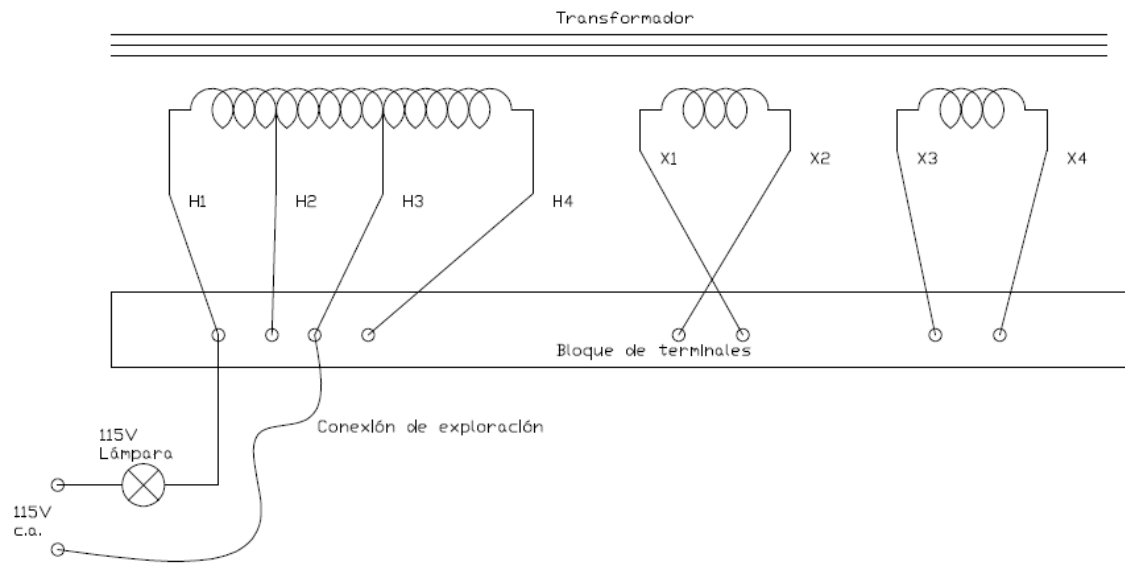


Figura 4.14. Ensayo de identificación de extremos y tomas de bobinas de transformador usando una lámpara como comprobador de continuidad.

Polaridad del transformador.

Después de haber identificado los extremos de las bobinas mediante los ensayos de identificación de fases Anteriores se determina la polaridad relativa instantánea según el método que muestra 4.15, usando un voltímetro de c.a. una fuente de tensión de c.a.

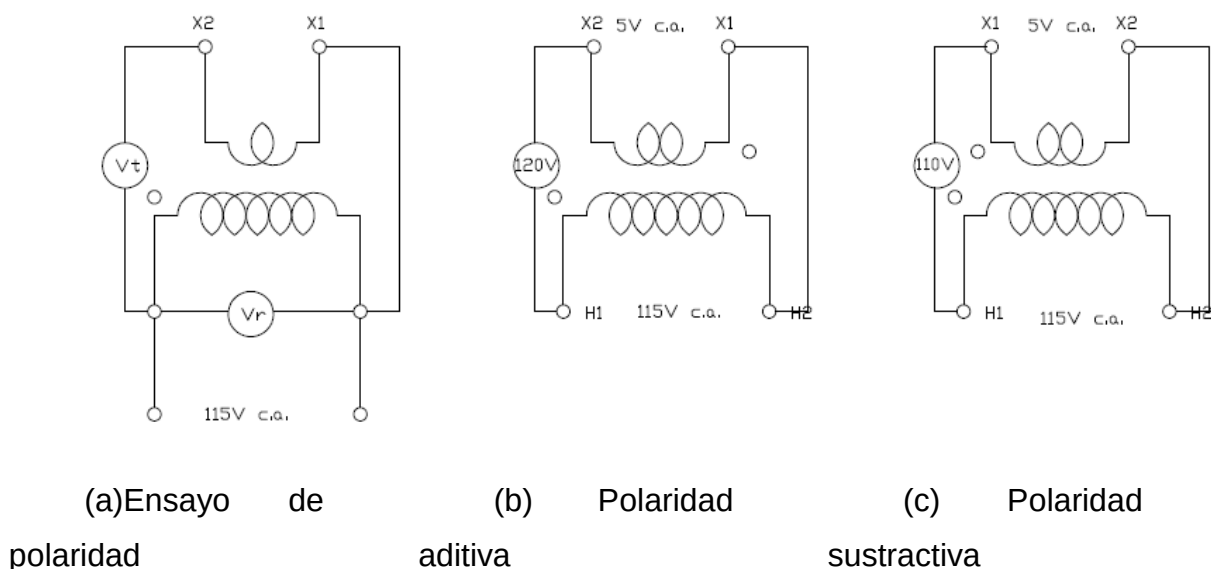


Figura 4. 15. Ensayo de polaridad de devanados de un transformador, mostrando polaridad aditiva y sustractiva y designación de terminales.

Seleccionar cualquier arrollamiento de alta tensión y usarlo como bobina de referencia.

Unir mediante una conexión un terminal de la bobina de referencia con un terminal de cualquier otro arrollamiento de polaridad desconocida.

Designar al otro terminal de la bobina de referencia con un punto de polaridad (positiva).

Conectar un voltímetro entre el terminal marcado con punto de la bobina de referencia y el otro terminal de la bobina de la polaridad desconocida.

Aplicar a la bobina de referencia.

Anotar los valores de la tensión en bornes de la bobina de referencia V_r y el de la tensión de ensayo entre las bobinas V_t

Si la tensión de ensayo V_t es superior a V_r , la polaridad es aditiva, y debe marcarse un punto en la bobina ensayada como muestra la figura 4.15b

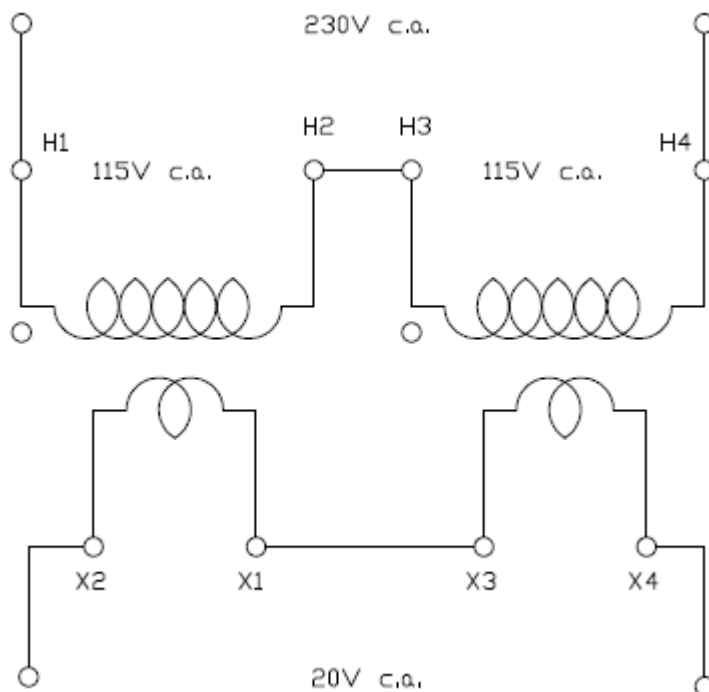
Si la tensión de ensayo V_t es menor que V_r , la polaridad es sustractiva y debe marcarse el punto en la bobina ensayada como muestra la figura 4.15c.

Etiquetar el terminal marcado con punto de la bobina de referencia con la denominación H_1 y el terminal marcado con punto de la bobina ensayada X_1 .

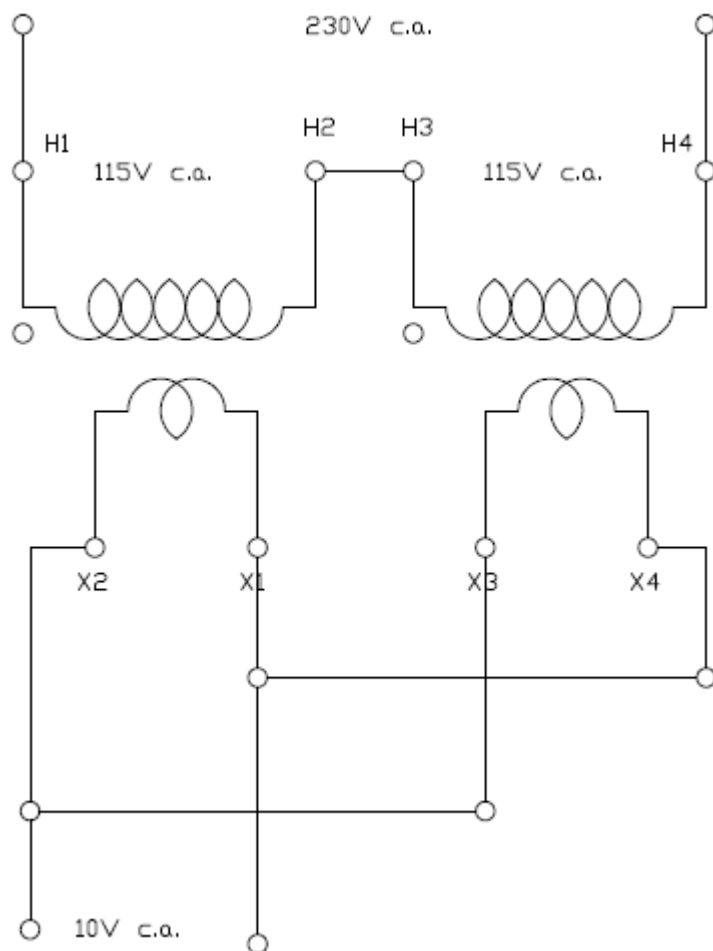
Repetir las etapas 2 a 9 anteriores para los restantes arrollamientos del transformador.

4.11. Conexión de los arrollamientos del transformador en serie y en paralelo.

Los ensayos de identificación de fases y de polaridad descritos en el apartado 4.10 son fundamentales al considerar las maneras en que los devanados de un unico transformador con varios devanados o los de varios transformadores individuales pueden conectarse en serie o en paralelo. para obtener distintas tensiones. Consideremos primero el transformador de varios arrollamientos que muestra la figura 4.13 que tiene una tensión nominal de 115 V para cada arrollamiento de alta tensión y 10 V para cada arrollamiento de baja tensión. Es posible obtener cuatro relaciones de tensión usando este transformador, como muestra la figura 4.16. Estas combinaciones son:

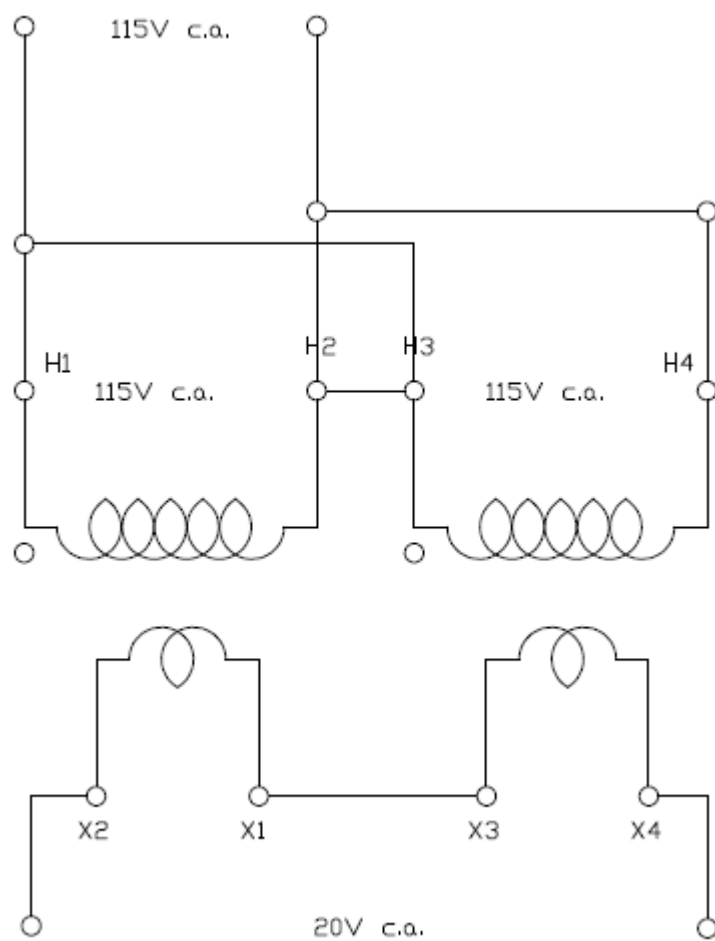


(a) Bobinas de alta tensión en serie, bobinas de baja tensión en serie.

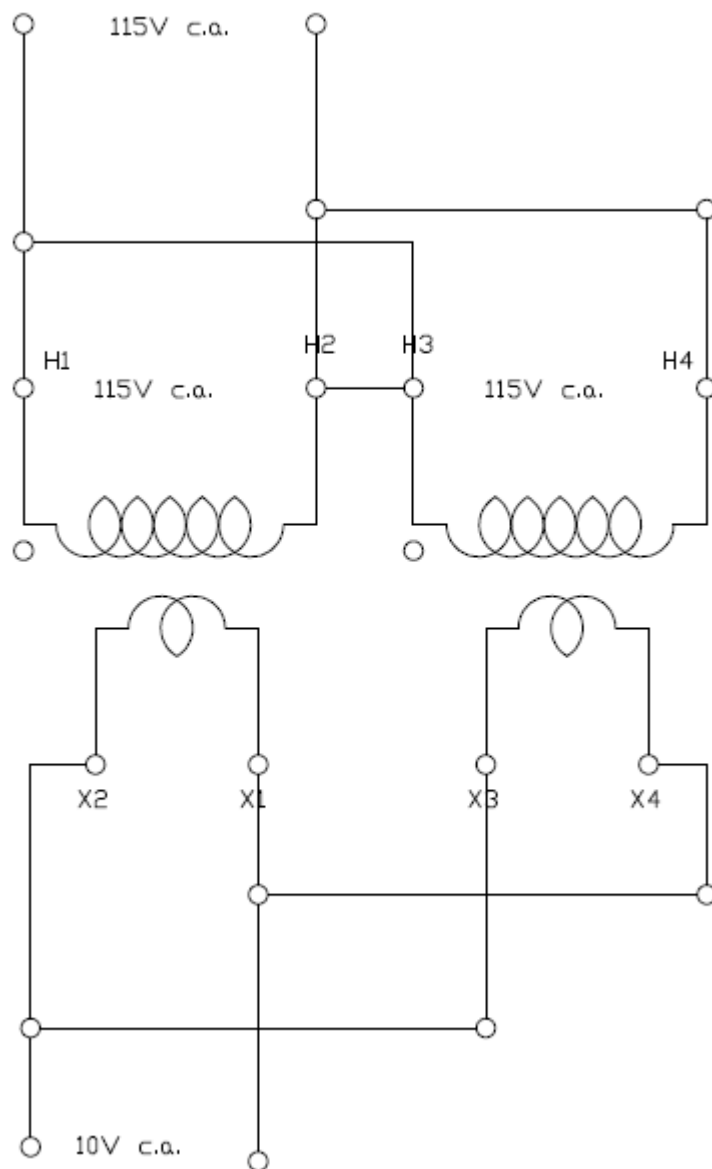


(b) Bobinas de alta tensión en serie, bobinas de baja tensión en paralelo

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.



(c) Bobinas de alta tensión en paralelo, bobinas de baja tensión en serie



(d) Bobinas de alta tensión en paralelo, bobinas de baja tensión en paralelo

Figura 4.16. Conexión de devanados de transformador de igual tensión en serie y en paralelo

Cuando las bobinas están conectadas en paralelo, las bobinas que tienen la misma tensión y polaridad instantánea están en paralelo.

Cuando las bobinas se conectan en serie, se une un terminal de una bobina con el terminal de polaridad opuesta de la otra de manera que las tensiones sean aditivas. Si se conectasen al revés, las tensiones inducidas se opondrían entre sí (obteniéndose una tensión de salida cero). Sólo pueden

conectarse en paralelo bobinas de idénticos valores nominales de tensión. La razón de ello, como se ve en la figura, estriba en que cuando las bobinas están en paralelo, las tensiones inducidas se oponen en cada instante entre sí. Así, si dos bobinas de distintas tensiones nominales están en paralelo, se desarrollan grandes corrientes circulatorias en ambos devanados debido a que la impedancia equivalente interna de los arrollamientos es relativamente pequeña, mientras que la diferencia neta entre las tensiones inducidas (desiguales) es relativamente grande.

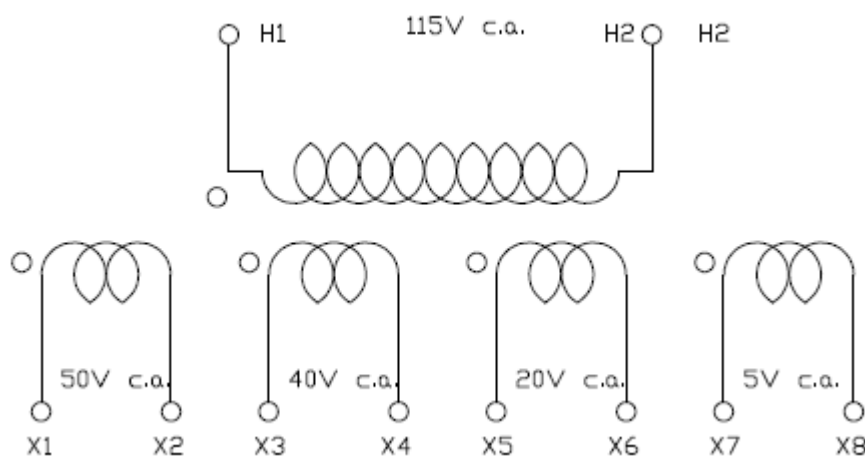


Figura 4.17. Conexión de devanados de transformador de distinta tensión en combinaciones de serie aditiva y serie sustractiva.

Las bobinas de distintas tensiones nominales, sin embargo, pueden conectarse en serie, aditiva o sustractiva. Esto hace aumentar el número de relaciones de transformación posibles en los transformadores con varios devanados, como muestra la figura 4.17. Con el transformador que muestra la figura 4.17a pueden conseguirse 21 combinaciones diferentes de tensión, capaces de suministrar corriente nominal del secundario. Poniendo el primario a tensión nominal. Aparece la posibilidad de un total de 14 tensiones con las combinaciones en serie aditiva o transformación directa, que muestra la figura 4.17b. Además, pueden conseguirse 7 tensiones más con las conexiones que usan combinaciones sustractivas, que muestra la figura 4.17c.

Resulta evidente que si no se usa el arrollamiento H_1-H_2 de 120 V de la figura 4.17 como primario, son posibles otras combinaciones tales como la que

resulta de usar el arrollamiento de 50 V o cualquier otro como primario. En estas aplicaciones el transformador puede usarse como transformador elevador o reductor con arrollamientos conectados tanto en serie aditiva como en serie sustractiva. Así, pueden conseguirse muchas más combinaciones de tensiones que las consideradas en la figura 4.17b y c. Son posibles, todavía, otras combinaciones si el devanado H_1-H_2 se conecta en serie aditiva con los devanados X_1-X_2 y se obtiene un primario de 125 V. De manera similar, conectando el arrollamiento de alta tensión a otro arrollamiento de baja tensión se obtendrían tensiones en el primario de hasta 230 V/5 V. Así, las posibilidades de transformación de la figura 4.17a son numerosas. Y todavía hay más si el transformador se conecta como autotransformador.

Sin embargo, debe hacerse notar que sólo cuando se usan todos los arrollamientos en combinaciones aditivas es cuando el transformador alcanza generalmente su plena capacidad de potencia. Sin embargo, existen especiales contruidos para proporcionar la plena capacidad, kVA, para cualquier combinación de arrollamiento y/o relación de transformación, pero tales generalmente son de mayor tamaño debido a que en su construcción se necesita más hierro y conductores mayores. Al usar transformadores con distintas combinaciones serie, tanto aditivas como sustractivas, debe considerarse, por tanto, una posible reducción de la potencia cuando se usen arrollamientos aislados, o sea, sin acoplamiento conductivo entre ellos.

4.12. El autotransformador.

Todas las combinaciones discutidas para el transformador de la figura 4.17a en el apartado 4.11 suponen aislamiento entre el primario y el secundario. Existen posibles transformaciones con mayor rendimiento y sin reducción importante de potencia en un autotransformador con tal de que estemos dispuestos a sacrificar el aislamiento del secundario respecto del circuito primario.

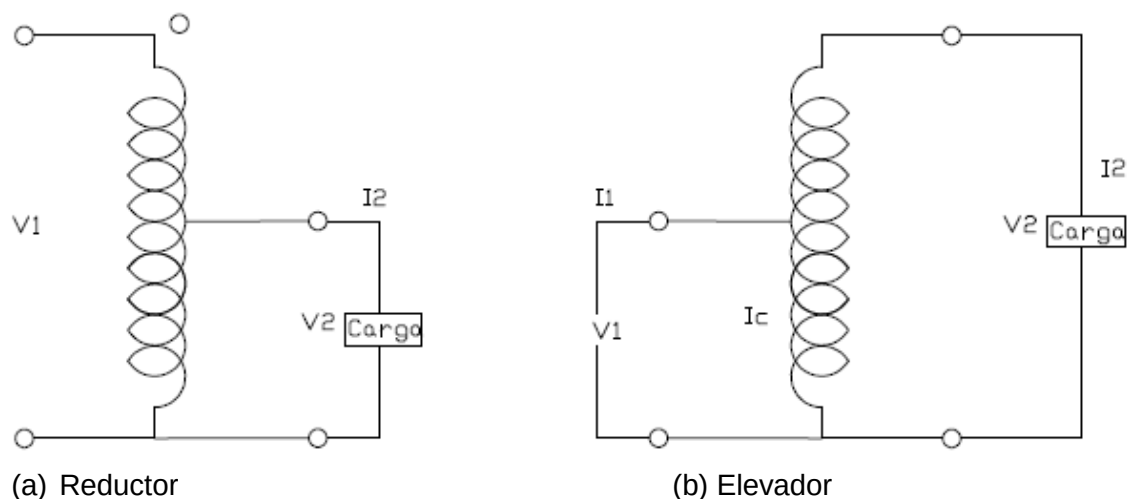


Figura 4.18. Conexiones de autotransformador como reductor y elevados.

Teóricamente, un autotransformador se define como un transformador que tiene sólo un arrollamiento. Así, un transformador con varios arrollamientos que tenga arrollamientos aislados puede considerarse un autotransformador si todos sus arrollamientos están conectados en serie aditiva (o sustractiva) para formar un arrollamiento único. En las figuras 4.18a y b se muestran tales conexiones de autotransformador. A primera vista, puede parecer que el transformador reductor de la figura 4.18a no es más que un divisor de tensión. Pero fijándonos en el sentido de la corriente de la parte del autotransformador común a ambos circuitos, primario y secundario, I_c , puede verse que dicho sentido es inverso comparado a un divisor de tensión ordinario.

El autotransformador puede hacerse regulable, de manera muy parecida a como un potenciómetro se convierte en un divisor de tensión regulable. Los autotransformadores regulables constan de un único arrollamiento devanado sobre un núcleo de hierro toroidal, como muestra la figura 4.19a. Tales autotransformadores regulables, denominados variacs, tienen un contacto deslizante de carbón sobre un eje giratorio que hace contacto con espiras expuestas del arrollamiento del transformador. Aunque la construcción de la figura 4.19a permite su uso sólo como transformador reductor, el circuito de la figura 1319b permite ambos usos, reductor y elevador. Obsérvese que en ambos casos, sin embargo, sólo se emplea un único arrollamiento. Los autotransformadores regulables son extremadamente útiles en el laboratorio o

en situaciones experimentales en las que se requiere una amplia gama de ajuste de tensiones con poca pérdida de potencia.

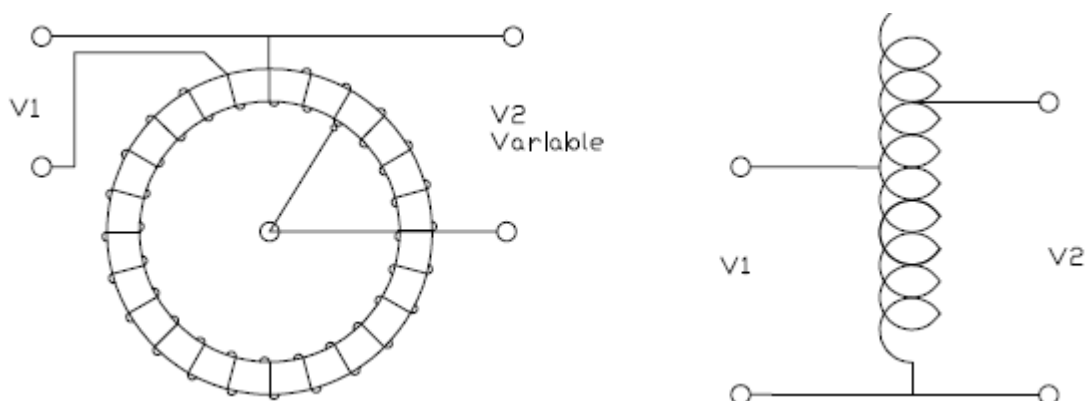


Figura 4.19. Autotransformador regulable

Debe observarse que la corriente instantánea en la parte común del autotransformador, I_c , indicada en las figuras 4.18a y b, puede tener cualquier sentido, hacia arriba o hacia abajo respecto a la conexión común, dependiendo de si se usa el transformador como dispositivo reductor o como elevador. Veremos, también, que el sentido de la corriente instantánea es también función de si el arrollamiento común usa polaridad aditiva o substractiva respecto a la parte del arrollamiento no común a ambos circuitos. Así, la única manera de determinar el sentido de la corriente en el arrollamiento común consiste en dibujar los sentidos instantáneos de la intensidad en el primario, I_1 , y la intensidad en el secundario, I_2 . La diferencia entre estas corrientes es I_c .

Cualquier transformador ordinario con aislamiento entre los dos devanados puede convertirse en autotransformador, como se ve en la figura 4.20.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

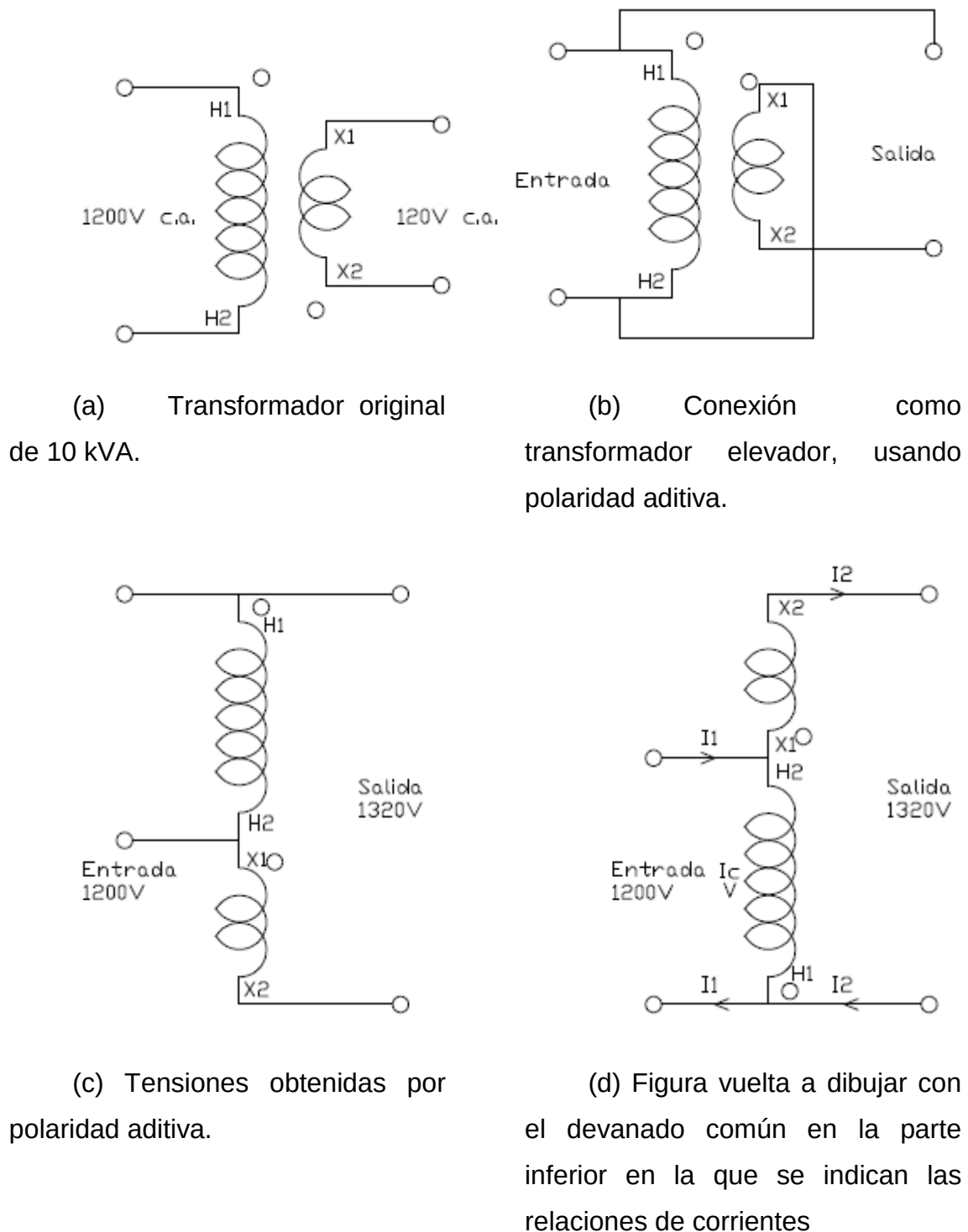
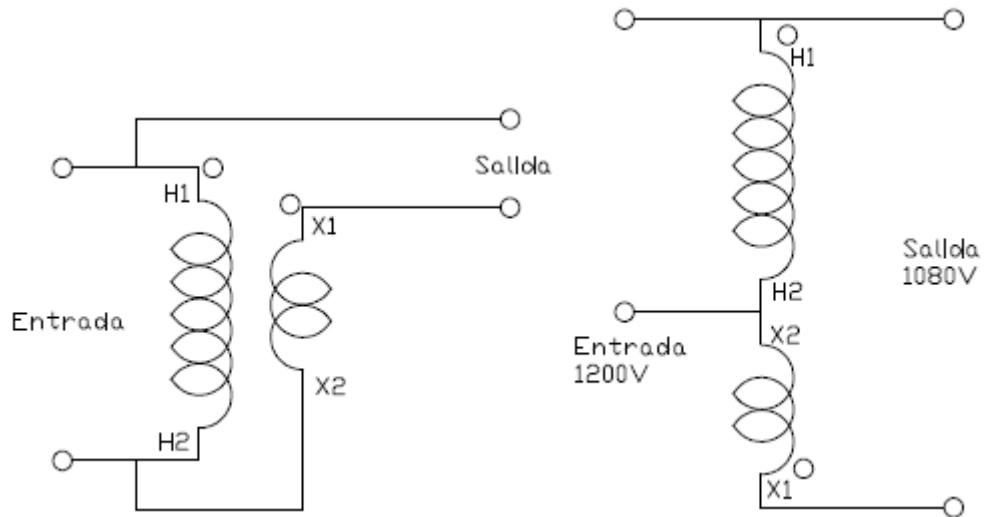


Figura 4.20. Transformador conectado como transformador elevador usando polaridad aditiva

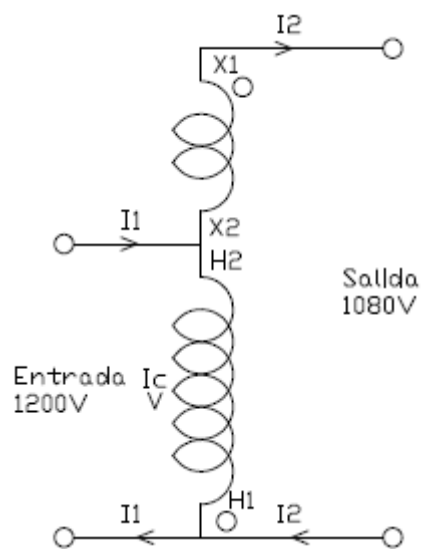
El enorme incremento de potencia en kVA, producido al conectar un transformador como autotransformador es lo que permite que los autotransformadores sean de tamaño mucho menor que los transformadores. Sin embargo, debe hacerse notar que sólo cuando la relación entre las

tensiones del primario del secundario se acerca a la unidad, existe un aumento notable de capacidad. Si la relación entre las tensiones de primario y secundario es elevada, el incremento de potencia no es tan notable.



(a) Conexión como transformador elevador usando polaridad sustractiva

(b) Tensiones producidas por polaridad sustractiva



(c) Nueva figura con el devanado común en la parte Inferior Indicando las relaciones de las corrientes

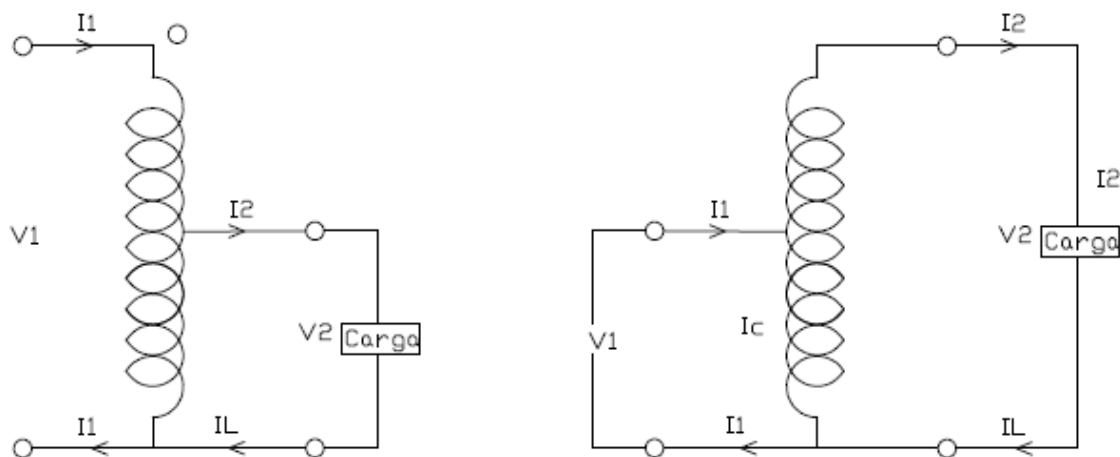
Figura 4.21. Transformador conectado como reductor usando polaridad sustractiva.

En la figura 4.21 puede verse el mismo transformador en el que se usa polaridad sustractiva conectado como transformador reductor. Para conseguir un único arrollamiento usando polaridad sustractiva, es necesario conectar X_2 a H_2 , como muestra la figura 4.21a. Las tensiones producidas por esta combinación pueden verse en la figura 4.21b, en la que puede verse también que el transformador actúa como transformador reductor. Este circuito está dibujado de nuevo en la figura 4.21c, en la que se han añadido las corrientes instantáneas. La intensidad I_1 , está alejándose de la unión en este caso, debido principalmente a que el autotransformador es un transformador reductor, y por tanto $I_2 > I_1$. La corriente le debe aumentarse en I_1 para ser igual a I_2 .

Como en el caso anterior de polaridad aditiva, la conexión del transformador de 10 kVA como autotransformador reductor con polaridad sustractiva produce un aumento de la potencia nominal en kVA.

Al conectar un transformador como autotransformador se obtiene un aumento de la capacidad en kVA. El aumento de capacidad varía con la conexión (según sea sustractiva o aditiva) y la relación de transformación producida.

Los transformadores son dispositivos de alto rendimiento. Prácticamente, toda la energía recibida por el primario se transforma al secundario en un transformador. No hay conexión conductiva entre los circuitos primario y secundario en un transformador. En un transformador, toda la energía recibida por el primario debe ser transformada para alcanzar al secundario. En un autotransformador, parte de la energía puede ser transferida conductivamente desde el primario al secundario y parte de la energía puede ser transferida por transformación. Esta diferencia explica el aumento de potencia nominal en kVA del autotransformador. El autotransformador presenta la ventaja de transferir energía conductivamente, además de transformación.



(a) Corrientes y tensiones como reductor (b) Corrientes y tensiones como elevador

Figura 4.22. Notación para autotransformador en configuraciones reductor y elevador cuando la transferencia de potencia por conducción y por transformación.

El circuito muestra un autotransformador reductor. Como $I_2 = I_1 + I_c$ en este circuito, toda la corriente I_1 está conducida a I_2 . La potencia transferida conductivamente, del primario al secundario, para un transformador reductor, es:

$$\text{Potencia conductiva} = V_2 \cdot I_1$$

(Fórmula 4.27)

Como $V_2 + V_p = V_1$, la diferencia entre V_1 y V_2 (o V_p) es una medida de la energía transformada. Así, la potencia transferida del primario al secundario por transformación, para un transformador reductor, es

$$\text{Potencia transformada} = V_p \cdot I_1$$

(Fórmula 4.28)

Para un transformador elevador, es aplicable el mismo razonamiento. Como muestra la figura 4.22b, I_2 es la parte de V_1 que se transfiere conductivamente. Por tanto, la potencia transferida conductivamente del primario al secundario, para un transformador elevador, es

$$\text{Potencia conductiva} = V_1 \cdot I_2$$

(Fórmula 4.29)

Como $V_2 = V_s + V_1$, la diferencia entre V_2 y V_1 (o V_s) es una energía transformada. Así la potencia transferida del primario al secundario por transformación para un transformador elevador, es

$$\text{Potencia transformada} = V_s \cdot I_2$$

(Fórmula 4.30)

Tanto para el transformador elevador como para el reductor, la cantidad total de energía transferida desde el primario al secundario, medida en kVA es:

$$\text{kVA (total)} = \text{kVA transferidos conductivamente} + \text{kVA transformados}$$

(Fórmula 4.31)

4.13. Rendimiento del autotransformador.

El rendimiento de un transformador, como el de la figura 4.12, es bastante alto tanto para cargas relativamente pequeñas como para plena carga. Como se ha descrito en el apartado 4.8, sólo pueden encontrarse dos clases de pérdidas en un transformador: unas pérdidas fijas en el hierro y unas pérdidas variables en el cobre de los arrollamientos primario y secundario. Estas últimas pérdidas aumentan con el cuadrado de la intensidad de carga. Así, las pérdidas variables en el cobre a una carga 125% de la nominal son aproximadamente 156 % de las pérdidas a carga nominal.

El autotransformador transfiere parte de su potencia por conducción. En consecuencia, para una misma potencia de salida, un autotransformador es algo más pequeño, por lo que se usa menos hierro que en un transformador. Así, en un autotransformador, las pérdidas en el hierro serán significativamente menores para la misma potencia de salida.

El autotransformador posee sólo un arrollamiento, por definición, en comparación con los dos del transformador. Además, como muestra la figura 4.23, la corriente que circula por una parte de este devanado es la diferencia

entre las corrientes del secundario y del primario. Estos dos factores tienden, asimismo, a reducir las pérdidas variables con la carga.

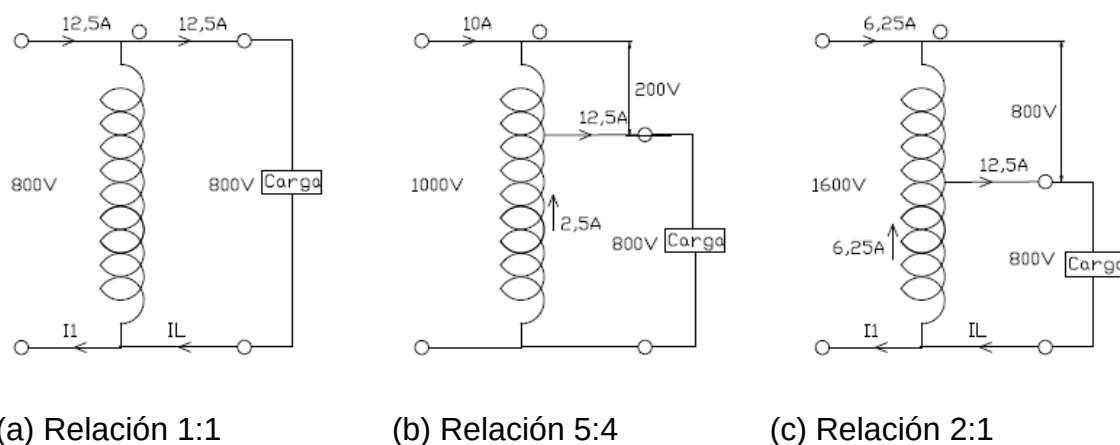


Figura 4.23. Efecto de la relación de transformación sobre el rendimiento del autotransformador

El efecto neto es que los autotransformadores poseen rendimientos extraordinariamente elevados (99 % y superiores) muy cercanos al 100 %. Este rendimiento, sin embargo, varía con la relación de transformación. Es mayor cuando la relación de transformación se acerca a la unidad. Aquí, toda la energía es transferida conductivamente y la intensidad en el transformador es extremadamente pequeña. Las pérdidas variables en el cobre en el arrollamiento del transformador de la figura 4.23a son prácticamente cero debido a la resistencia relativamente baja del arrollamiento del transformador y a la corriente de excitación despreciable.

Cuando la relación de transformación $m = 5/4$, como muestra la figura 4.23b, sólo $1/5$ parte del arrollamiento total del transformador conduce una corriente primaria de 10 A, mientras $4/5$ del arrollamiento conducen una corriente de 2.5 A. Nuevamente, esto hace reducir las pérdidas variables en el cobre y mantener un rendimiento elevado, al mismo tiempo que se suministra la misma potencia a la carga.

Incluso para una relación de $m = 2/1$, como muestra la figura 4.23c, sólo la mitad de la corriente de carga secundaria aparece en el arrollamiento único del transformador, reduciendo considerablemente las pérdidas variables en el

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

cobre en comparación con un transformador que suministrase la misma potencia a la carga. Por tanto:

1) Los autotransformadores son generalmente de menor tamaño y de mayor rendimiento que los transformadores de la misma potencia nominal (kVA).

(2) el rendimiento de los autotransformadores aumenta cuando la relación de transformación se aproxima a la unidad.

Sin embargo plantean el serio problema de que en caso de corte en el arrollamiento del autotransformador, la salida del mismo, estará a la misma tensión de la entrada, lo que justifica que los transformadores se utilicen sólo con tensiones relativamente bajas, en estos casos, sus ventajas de menor tamaño y peso, menor coste y mayor rendimiento, aconsejan su uso con desventajas mínimas.

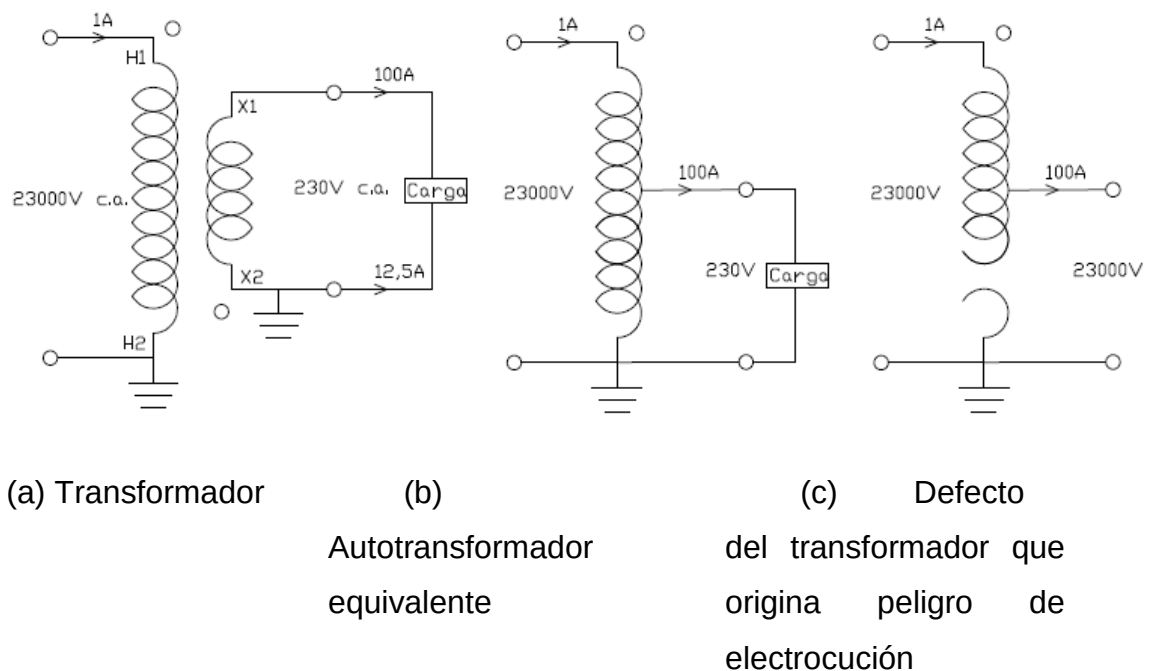


Figura 4.24. Posibilidad de accidentes si se utilizan autotransformadores para la distribución.

4.14. Transformación trifásica.

Para transformar una fuente trifásica, se necesita o un banco de tres transformadores idénticos como muestra la figura 4.25, o bien, si no, un único transformador polifásico que tenga los seis devanados en un núcleo común de hierro.

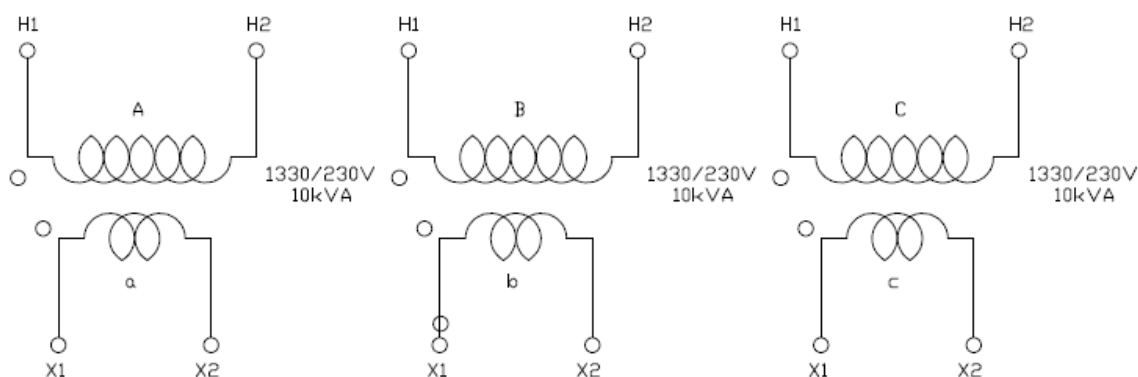
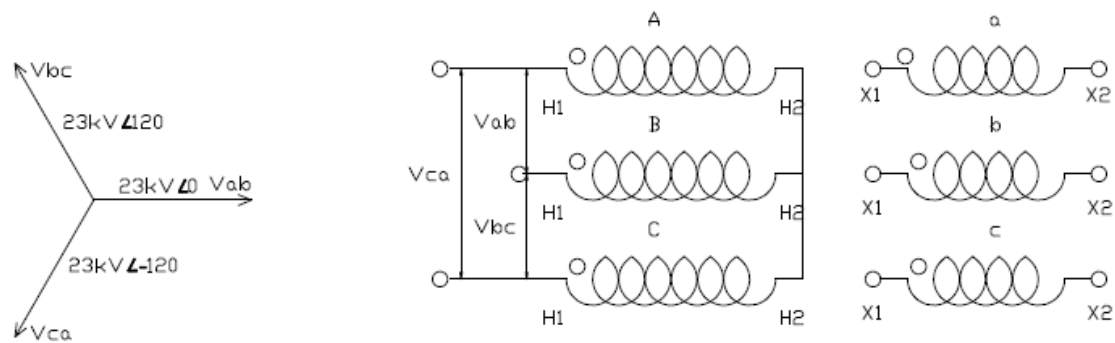


Figura 4.25. Tres transformadores monofásicos idénticos (a, b y c) con sus marcas de polaridad.

Supongamos que la tensión trifásica disponible para la excitación de los transformadores es 2300 V, 3 fases, alimentación de 60 Hz, como muestra la figura 4.26a. Las tres tensiones de línea están desplazadas 120° , como puede verse en la figura 4.26a, y esta relación representa las tensiones entre los tres conductores de la fuente de alimentación: V_{AB} , V_{BC} y V_{CA} respectivamente, en las que cada una tiene un valor de 2300V, algo superior a la tensión nominal del lado de alta de cada transformador. Esto, desde luego, obliga a que los transformadores individuales deban estar conectados en Y, como muestra la figura 4.26b. Hay que vigilar para asegurar que la polaridad instantánea positiva (terminal H_1) está conectada a la fuente mientras que el terminal H_2 de cada transformador está conectado a la unión común (N). Obsérvese que las bobinas de alta tensión se designan por A B y C. en la figura 4.26b, mientras

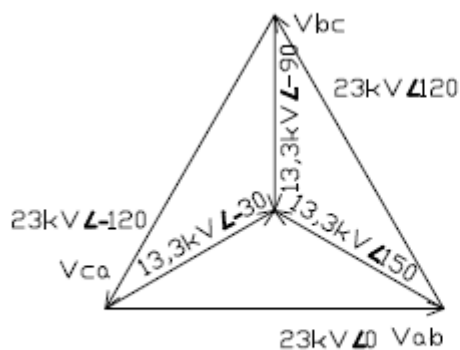
TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

que las bobinas de baja tensión se designan por a, b y c. respectivamente.

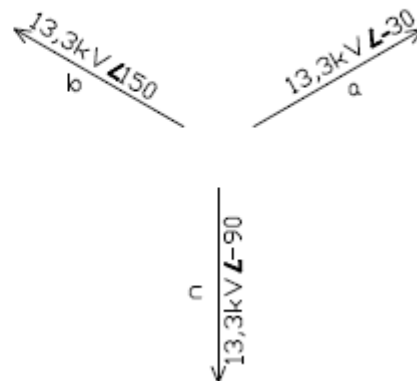


(a) Tensiones en las líneas trifásicas disponibles para excitación de transformadores

(b) Tensiones de línea aplicadas en los lados de alta tensión de los transformadores A, B, y C conectados en Y



(c) Tensiones de línea y fase aplicadas a los primarios de los transformadores A, B y C conectados en Y



(d) Tensiones de fase inducidas en los secundarios de baja tensión a, b y c en (b) anterior.

Figura 4.26. Tensiones de línea y de fase trifásicas aplicadas a los lados de alta tensión de transformadores conectados en Y. y tensiones de fase inducidas en los lados de baja tensión.

La relación entre las tensiones de línea aplicadas por la fuente de alimentación y las tensiones de fase aparecen en bornes de las bobinas de alta tensión del transformador individual, se indican en la figura 4.26c. La tensión aplicada sobre el primario del transformador A es $1330\angle 30^\circ$ V. La tensión de

fase desde el borne B a N, aplicada sobre el transformador B, es 1330 L150° V. La tensión de fase desde el borne C y N, aplicada sobre el transformador C, es 1330L-90° V.

De acuerdo con la teoría clásica de los circuitos trifásicos•, la tensión de fase, V_p , es:

$$V_p = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$$

(Fórmula 4.32)

Así. las tensiones de fase no sólo son menores sino que están desplazada 30° respecto a las tensiones de línea. Sin embargo que las tensiones de fase aplicadas sobre los 3 transformadores, a pesar del desfase de 30°, continúan desplazadas 120° entre sí de acuerdo con la teoría trifásica clásica. En consecuencia, la suma vectorial de las tensiones de dos fases, es la tensión de línea, como se ve en la figura 4.26c. Así, la tensión de línea V_{AB} , es la suma vectorial de las tensiones entre H1 y H₂ de la bobina A y H₂-H₁ de la bobina B.

Como resultado de la transformación. las tensiones inducidas en las bobinas de baja tensión. a, b y c, respectivamente, guardan la misma relación entre sí que las tensiones de fase aplicadas en el primario, como muestra la figura 4.26d. Es evidente que el primario de 1330 V debe estar conectado en Y a la alimentación de 2300 V de manera que no se exceda la tensión nominal de los arrollamientos de alta tensión del transformador. Esto, a su vez, impone la relación de las tensiones de fase del primario que muestra la figura 4.26c y también las relaciones de fase de los secundarios no conectados, que pueden verse en la figura 4.26d. La relación desarrollada en la figura 4.26d, por tanto, se usará como referencia para las distintas maneras en que pueden conectarse los secundarios.

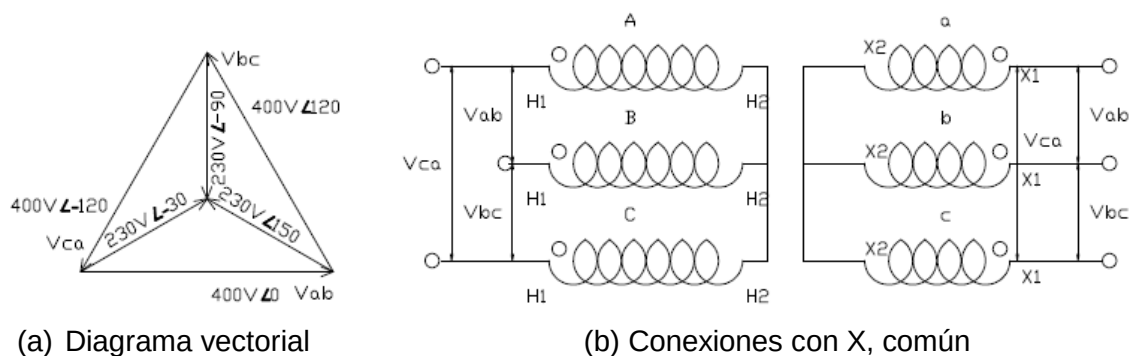


Figura 4.27. Secundarios (terminales X) conectados en Y y diagrama vectorial mostrando las tensiones de fase y de línea.

La figura 4.27b muestra los secundarios conectados en Y de tal manera que los terminales X_2 están conectados a una unión común, n y los terminales X_1 positivos están conectados a las líneas a, b y c, respectivamente. Usando las relaciones vectoriales de la figura 4.26d, las tensiones de fase Y de línea de los secundarios conectados en Y pueden verse en el diagrama vectorial de la figura 4.27a. En la figura 4.27a que, de acuerdo con la teoría de los circuitos trifásicos clásica, la suma vectorial de dos tensiones de fase cualesquiera da la tensión de línea. Así, la tensión entre las líneas a y b, V_{ab} , es la suma vectorial de las tensiones entre X_1 - X_2 de la bobina a y X_2 - X_1 de la bobina b. Por tanto, V_{ab} como se ve en la figura 4.27b es igual a $\sqrt{3}$ veces las tensiones de fase y está desplazada 30° respecto a ellas.

Resulta muy importante comparar la figura 4.27b con la figura 4.26c y observar que para las conexiones particulares hechas en la figura 4.27a, no hay desplazamiento entre las tensiones de línea de los secundarios y las tensiones de línea de los primarios. De manera similar, no existe desplazamiento (desfase) entre las tensiones de fase de los primarios y las tensiones de fase de los secundarios. Las diferencias entre los dos diagramas vectoriales son sólo diferencias de valor de las tensiones debidas a la relación de transformación. Así, la tensión de línea del primario es $V_{AB}=2300\angle 0^\circ\text{V}$, mientras la tensión de línea del secundario es $V_{ab}=400\angle 0^\circ\text{V}$. Análogamente, la tensión de fase del primario es $V_{AN}= 1330\angle 30^\circ\text{V}$, mientras que la tensión de fase en el secundario es $V_{an}= 230\angle 30^\circ\text{V}$. La importancia de realizar conexiones con la debida consideración de la polaridad instantánea no puede dejarse de lado tanto en lo que afecta a la puesta en paralelo de los

secundarios como en lo referente a la obtención de las tensiones de línea secundarias de valor y fase adecuadas.

Consideremos el caso simple de conectar los terminales X_1 (en lugar de los X_2) a una unión común, n , como muestra la figura 4.28a.

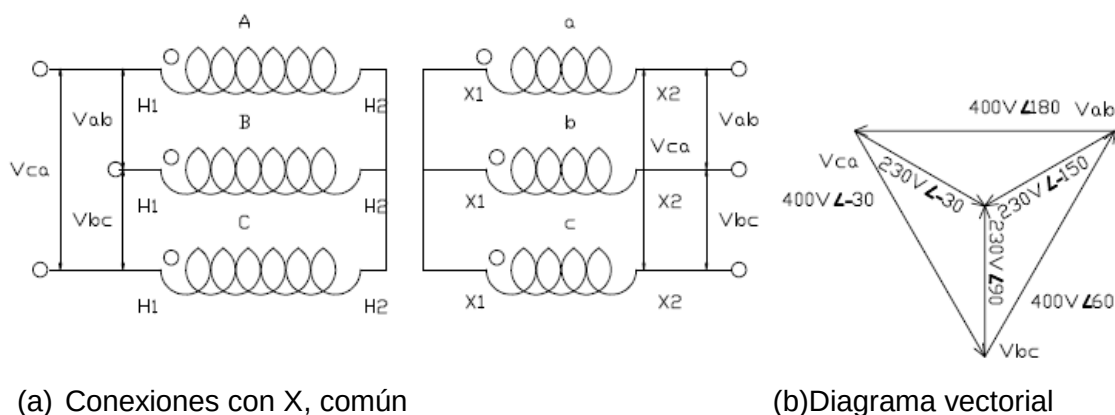


Figura 4.28. Secundarios (terminales X_2) conectados en Y-y diagrama vectorial indicando tensiones de fase y de línea.

La conexión de los terminales positivos a n , en lugar de a la línea, produce una inversión de 180° tanto de las tensiones de fase como de las de línea, según se ve en el diagrama vectorial de la figura 4.28b. Por tanto, los valores de todas las tensiones de fase y de línea sean las mismas en figuras 4.28b y 4.27b, existe una diferencia de fase de 180° entre sí y nunca pueden conectarse en paralelo. Cualquier intento de hacerlo así da lugar a un cortocircuito inmediato. Así, los secundarios de las figuras 4.28a y 4.27a no pueden ponerse en paralelo.

También se produciría un cortocircuito inmediato si uno de los arrollamientos de una fase del secundario se invirtiera accidentalmente cuando se efectúan las conexiones en Y. Esto puede verse en la figura 4.29a en la que la bobina b tiene su terminal X_1 con punto, conectado a la unión común n en lugar del terminal X_2 . Aunque las tensiones de fase continúan estando 120° desfasadas entre sí, como se ve en la figura 4.29b, la inversión de la bobina b produce unas tensiones de línea reducidas y desplazadas en fase también una tensión de línea ($V_{ca}=400\angle-120^\circ$ Y) mayor que las otras dos. Obsérvese que las tres tensiones de línea ya no son iguales en valor ni están desplazadas 120°

entre sí y, además, ya no están en fase con las tensiones de línea de la figura 4.27b. Así, la inversión accidental de un arrollamiento no permitirá que los secundarios conectados en Y de la figura 4.29a pueden ponerse en paralelo con los secundarios conectados en Y de la figura 4.27a.

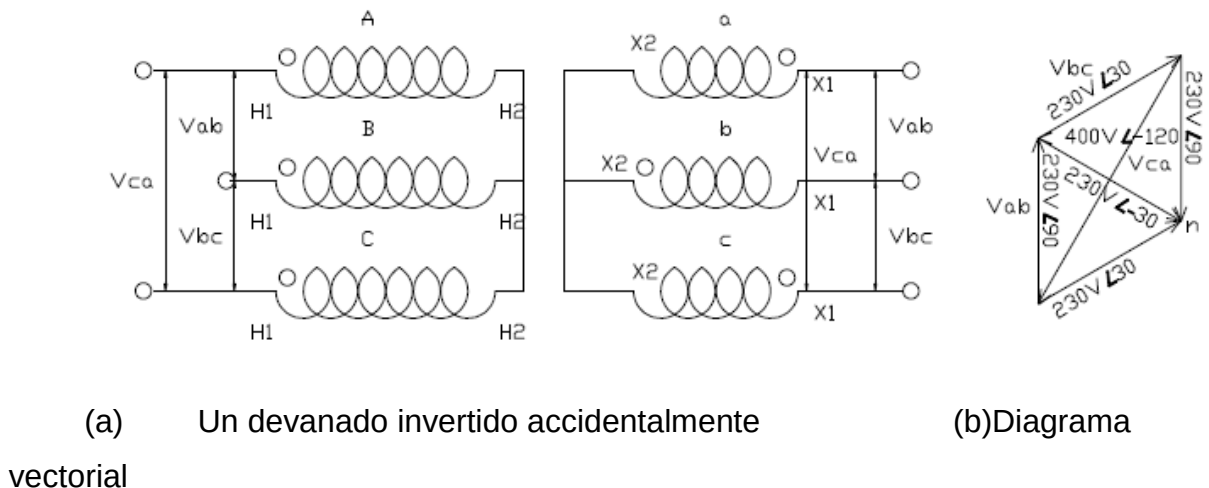


Figura 4.29. Efecto de la Inversión accidental del devanado de una fase (bobina b del secundario conectado en Y) y tensiones desequilibradas de fase y de línea obtenidas.

De manera similar, si todos los primarios están conectados en Y, nunca será posible poner en paralelo los secundarios conectados en Y y conectados en triángulo. Las bobinas de baja tensión de los transformadores de la figura 4.25 pueden verse conectadas en triángulo en la figura 4.30a. La conexión en serie o en malla del triángulo requiere que los terminales de la bobina de polaridad instantánea opuesta estén conectados en malla para formar un anillo cerrado. Suele ser costumbre, como muestra la figura 4.30a, usar un voltímetro para medir la tensión resultante, V_R , antes de cerrar el triángulo entre el terminal X2 de la bobina c y el terminal X 1 de la bobina a. Sólo cuando el voltímetro indica cero, se elimina el voltímetro y se cierra el triángulo. Usando las mismas tensiones aplicadas al primario conectado en Y, las tensiones de fase de las bobinas secundarias, a, b y c, respectivamente, son las mismas en la figura 4.30b que en la figura 4.26d. Cuando se hace la conexión en malla, por tanto, la suma vectorial de las tensiones de fase secundarias debe ser cero. La tensión de fase y de línea de los secundarios conectados en triángulo son las mismas, de acuerdo con la teoría de los circuitos trifásicos, puesto que los

terminales de línea están conectados entre cada fase del arrollamiento conectado en malla.

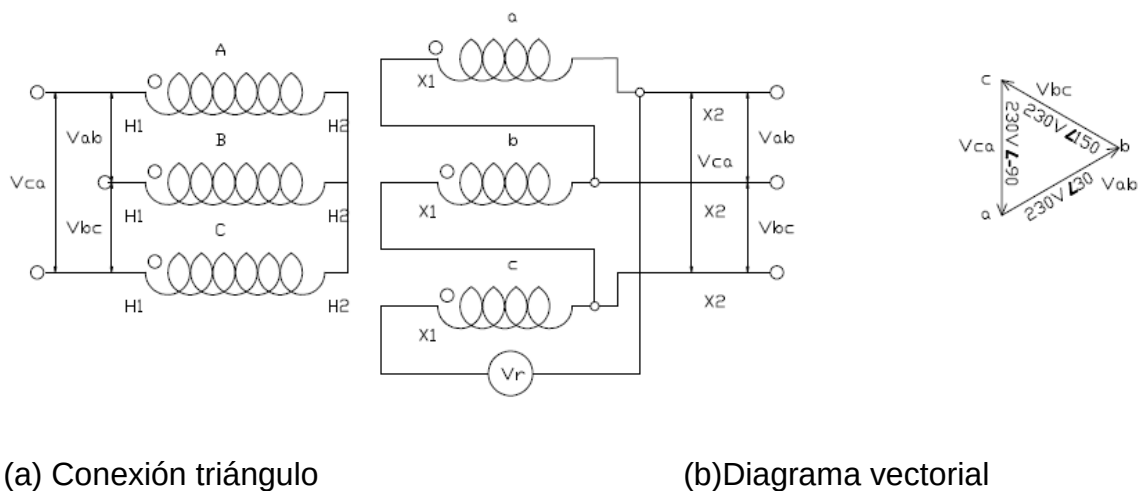


Figura 4.30. Secundarios conectados en diagrama vectorial.

La importancia de la lectura del voltímetro antes de cerrar cualquier circuito de malla, en general, y el triángulo de los secundarios de un transformador, en particular, puede verse en la figura 4.31. Un arrollamiento del transformador está accidentalmente invertido en la malla. La polaridad instantánea de la bobina c es $230\angle 90^\circ\text{V}$ en lugar de $230\angle -90^\circ\text{V}$, como se indica en la figura 4.26d. El diagrama vectorial de la figura 4.31b muestra que la tensión medida con el voltímetro VR ya no es cero sino realmente $460\angle 90^\circ\text{V}$. Si se cierra el triángulo sin usar voltímetro, se producirá un serio cortocircuito provocando fuertes corrientes circulatorias (de malla) en los transformadores.

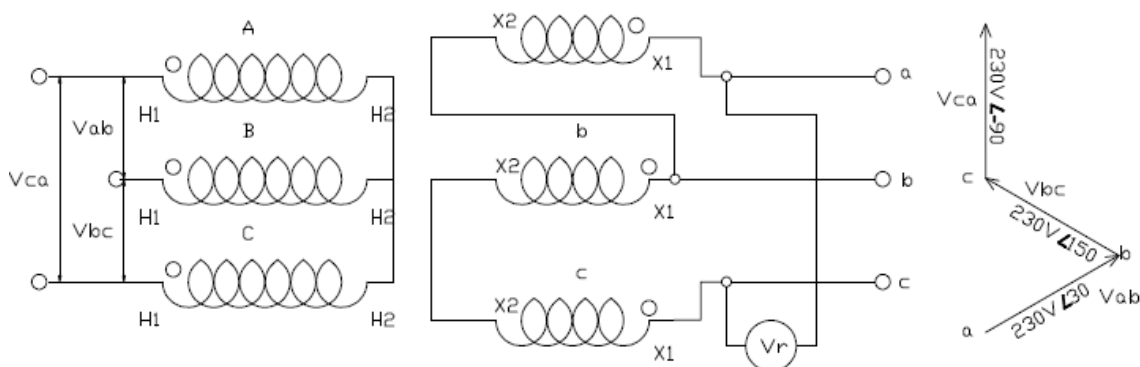


Figura 4.31. Efecto de la inversión accidental de un devanado de fase (bobina C) en un secundario conectado en triángulo.

Ya se ha dicho anteriormente, pero vale la pena repetirlo, que los secundarios conectados en Δ no pueden ponerse en paralelo con los secundarios conectados en Y. Como muestra la figura 4.27b, no hay desfase entre las tensiones de línea secundarias y las tensiones de línea primarias de la figura 4.26a, en una transformación Y-Y. Pero en una transformación Y- Δ , como la de la figura 4.30b se produce un desfase de 30° . Incluso si se determina previamente la relación de transformación de los transformadores Y- Δ , para obtener las mismas tensiones de línea, el desfase angular que aparece en una transformación Y- Δ , no permite el funcionamiento en paralelo.

Podemos resumir por tanto que teniendo en cuenta las tensiones de línea de primario y secundario, las relaciones de transformación, la polaridad instantánea y la conexión adecuada de bobinas, son posibles las siguientes combinaciones en paralelo:

Y-Y a Y-Y: no hay desfase entre las tensiones compuestas del primario y del secundario.

Y- Δ a Y- Δ : igual desfase de 30° entre el primario y el secundario de todos los transformadores.

Δ -Y a Δ -Y: igual desfase de 30° entre el primario y el secundario de todos los transformadores.

Δ - Δ a Δ - Δ : no hay desfase entre primario y secundario.

Δ - Δ a Y-Y: no hay desfase entre primario y secundario, pero sí diferentes tensiones nominales.

Y- Δ a Δ -Y: no hay desfase entre primario y secundario pero se necesitan diferentes tensiones nominales.

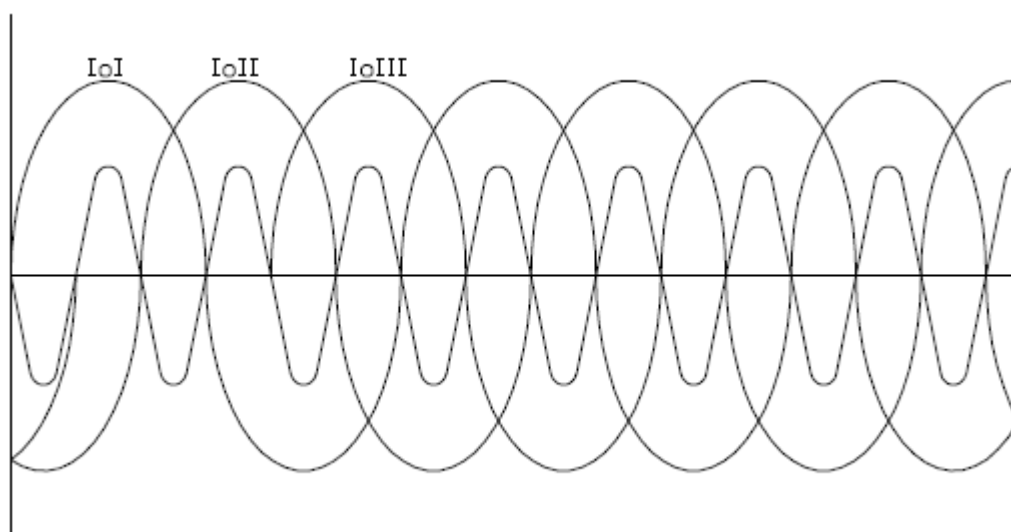
Y-Y a Y-Y: igual desfase de 30° entre las tensiones de línea de primario y secundario. Sin embargo, los valores nominales de las tensiones compuestas deben ser los mismos.

Las combinaciones en paralelo que no son posibles, a pesar de las idénticas tensiones de línea de primario y de secundario, incluyen aquellas en las que se produce un desfase en uno de los grupos y no en el otro. Así, un Y- Δ puede ponerse en paralelo con un Δ - Δ .

4.15. Armónicos en los transformadores. Armónicos en las corrientes de excitación, en los flujos y en las tensiones.

4.15.1- Bancos trifásicos a base de transformadores monofásicos.

Supóngase que los circuitos eléctricos se han conectado en estrella, según figura III-1,2 izquierda, o III-4,1b; cada transformador monofásico requiere, para su magnetización o formación de su flujo alterno, un tercer armónico de intensidad. En la figura III-4,1a, se han dibujado las tres senoides de corrientes de excitación (I_{oI} , I_{oII} , I_{oIII}), con sus correspondientes terceros armónicos. La inspección de tal figura pone de relieve que los terceros armónicos están en fase (pulsan a un tiempo), en otras palabras, son homopolares. Por lo tanto, por el neutro N retorna una corriente, I_{oN} , igual a tres veces la de una de las tres fases (primera ley KIRCHHOFF aplicada al punto neutro (N), y propiedad característica de las corrientes homopolares. Las ondas fundamentales, por el contrario, se anulan en su retorno por el neutro.



(a) Diagrama de corrientes en cada una de las columnas del transformador.

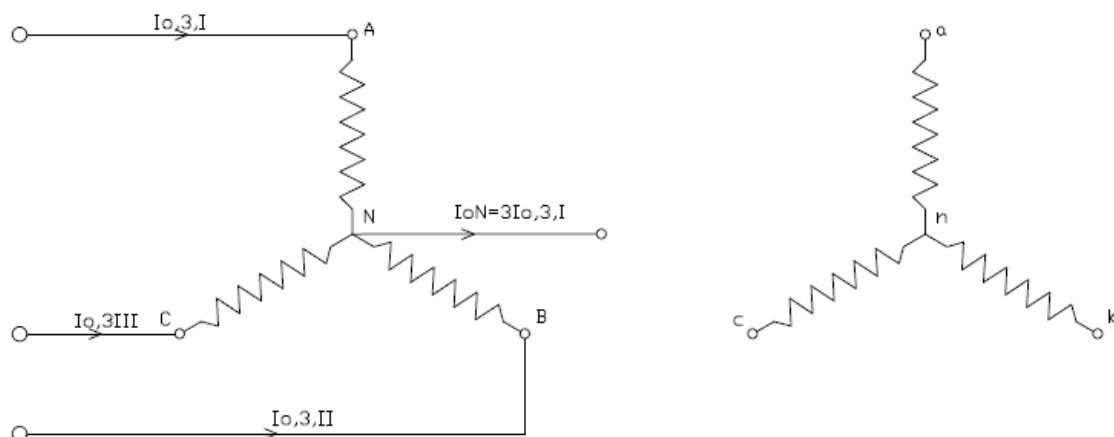


Figura 4.32. Supresión de neutros de retorno en líneas para alta tensión.

La circulación, en líneas aéreas, de un tercer armónico de corriente ($3 \times 50 \text{ Hz} = 150 \text{ Hz}$) (por las fases, con su retorno por el neutro) tiene el inconveniente de que, siendo la frecuencia 150 Hz audible, puede interferir (por inducción mutua) con líneas telefónicas paralelas cercanas.

Otro inconveniente de la circulación de terceros armónicos de corriente por las líneas y sistemas eléctricos, en general, es que deforman las tensiones haciéndoles perder su carácter senoidal. El proceso es el siguiente. Imagínese una central generadora de tensiones trifásicas, que se suponen perfectamente senoidales. Alimenta una línea que permite la circulación de los terceros armónicos, por existir neutro de retorno (por ejemplo, están puestos a tierra los puntos neutros del generador y del transformador de final de línea). Las corrientes de vado del transformador circulan por el generador y por la línea, y, en consecuencia, ocasionan caídas de tensión, en virtud de las resistencias e inductancias de la línea, y de las internas (por fase) del generador. Las caídas de tensión (en cada fase) motivadas por las ondas fundamentales de las corrientes de excitación, son senoidales (50 Hz y desfasadas 120°). Por lo tanto, las tensiones al final de la línea, aun cuando distintas de las de principio de línea, seguirían siendo senoidales. Pero los terceros armónicos de corriente (homopolares) ocasionarán caídas de tensión homopolares, que deformarán las tensiones simples de final de línea, dejando de ser senoidales.

La relativa pequeñez de los terceros armónicos de las corrientes de vacío, pueden hacer pensar que tal efecto será de escasa consideración. Mas hay que tener presente que las reactancias inductivas, interna del generador y de la línea, adquieren mayor importancia al tratarse de terceros armónicos (150 Hz) y superiores. Además, siendo corrientes homopolares, interviene la impedancia de retorno del neutro $3 Z_n$,

La asimetría de los núcleos trifásicos hace que las tres corrientes de excitación no sean iguales, y tampoco los terceros armónicos correspondientes. Consecuencia, por tal razón hay alguna circulación de terceros armónicos por la línea, aun sin existir neutro de retorno. Para evitarlo se puede recurrir al cambio cíclico de conexiones (ABC, BCA, CAB), al co-nectar cada uno de los transformadores.

Por los motivos (que el lector puede omitir) explicados en los párrafos precedentes, en las líneas de alta tensión no se suele disponer neutro de retorno.

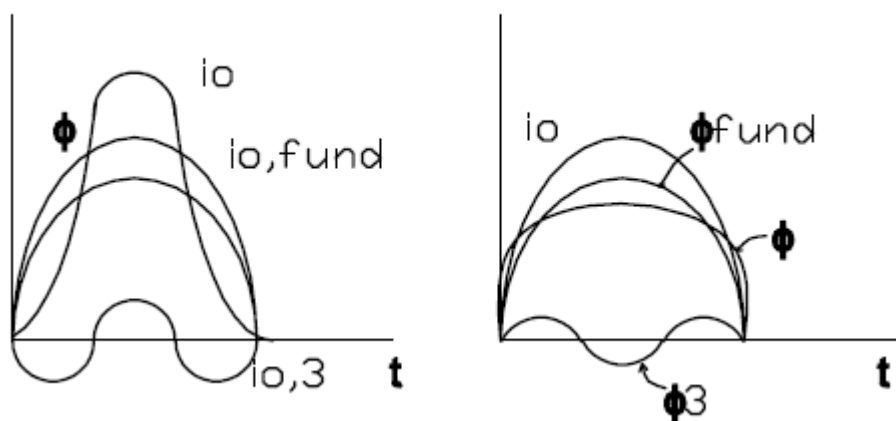


Figura 4.34. Diferentes formas de onda en el transformador trifásico.

Si se suprime el neutro de retorno, las ondas fundamentales continuarán circulando, ya que no así sus correspondientes terceros armónicos, pues

$$I_{0,3,I} = I_{0,3,II} = I_{0,3,III} = \frac{1}{3} I_{0,3,N} = 0$$

(Fórmula 4.32)

La no existencia de terceros armónicos en la corriente de excitación, implica que el flujo ϕ_m (y la inducción B) dejen de ser senoidales, onda de flujo rebajada. La nueva onda de flujo ϕ_m puede descomponerse en una onda fundamental más un tercer armónico.

La consecuencia de lo visto es que, al no ser senoidales los flujos, tampoco lo serán las f.e.m. inducidas en los secundarios. El banco trifásico se habrá convertido en un generador de armónicos de tensión. Es fácil ver que los terceros armónicos de las f.e.m. secundarias estarán en fase.

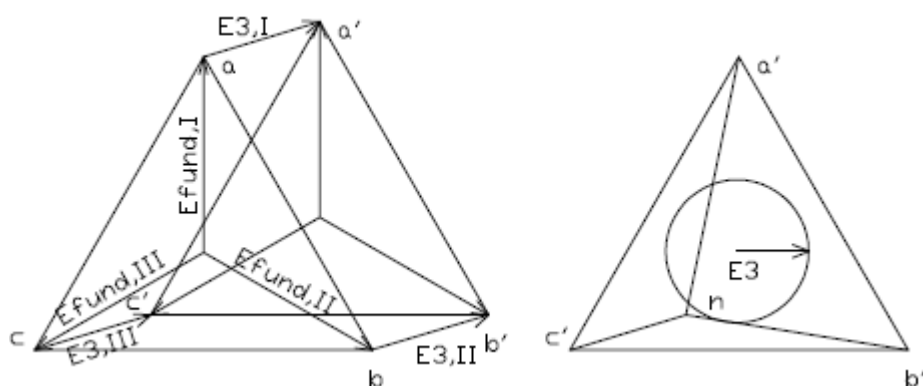


Figura 4.35. f.e.m. inducidas en el secundario, ondas fundamentales y terceros armónicos.

En la figura de arriba se han representado las f.e.m. inducidas en el secundario, ondas fundamentales y terceros armónicos. Las fundamentales dispuestas a 120° y los terceros armónicos en fase. No es corriente el uso del plano de Gauss para representar simultáneamente vectores con distinta frecuencia. En general no es práctico, ya que unos vectores tendrán movimiento respecto a otros.

Si se suponen quietos los fundamentales (50 Hz), por ejemplo porque los observadores giramos con ellos, se verá a los vectores terceros armónicos (subíndices 3, 150 Hz) girando a razón de cien vueltas por segundo. Estando quietos el neutro (n), los vectores simples fundamentales, y los correspondientes compuestos. Por el contrario, girando a razón de cien vueltas por segundo, los vectores (3), con centros en a, b y c. Como consecuencia,

todos los puntos del triángulo final de tensiones compuestas están sujetos a movimientos circulares. Se acaba de dar una visión, en ocasiones es mejor otra, supóngase quieto el triángulo final a que se ha aludido, en tal caso, el punto neutro (n) se moverá según una circunferencia de radio E_3 .

Las tensiones simples del secundario del transformador, que está conectado en estrella, son na' , nb' , nc' de la figura (a). Son vectores que no giran uniformemente alrededor de n, y, además, no tienen longitud constante. Las proyecciones sobre el eje de referencia, los valores instantáneos, son algo complicadas, suma de una onda fundamental más tercera armónica. Por el contrario, las tensiones compuestas $a'b'$, $b'e'$, $e'd'$, forman un triángulo indeformado, cuyos lados tienen longitudes constantes, y giran uniformemente. Luego sus proyecciones sobre el eje fundamental son senoides puras. En resumen, en las tensiones compuestas no existen terceros armónicos de tensión. En la interpretación (b) se ve un triángulo de tensiones compuestas normal, cuyo punto neutro n, “inquieto”, se mueve uniformemente según un círculo.

Estas son las consecuencias del empleo de un banco trifásico a base de transformadores monofásicos, si no se dispone conductor neutro en el primario, siempre que los transformadores lleguen a trabajar en la zona de saturación.

Nótese que la existencia de armónicos de tensión se apreciaría mediante un osciloscopio que se conectase, por ejemplo, entre los bornes n y a, pero no si se conectara entre a y b.

Lo anterior equivale a decir que en el secundario del banco trifásico aparecen sobretensiones (en las tensiones simples), que pueden ser fácilmente de consideración. Por tal razón, hay que proyectar los transformadores monofásicos con inducciones, B, relativamente bajas, lo que supone encarecimiento de los aparatos.

4.15.2. Corrientes de excitación en los transformadores con núcleo trifásico.

Se sigue suponiendo que las conexiones de los arrollamientos son en estrella, no se dispone neutro en la línea de alimentación del primario. Por lo tanto, no circularán terceros armónicos de corriente de excitación.

Si el núcleo es trifásico, la diferencia respecto al caso anterior es que se ha suprimido la cuarta columna de retorno. Esta supresión se fundaba en que $\phi_I + \phi_{II} + \phi_{III} = 0$. Esto sigue siendo cierto en lo que se refiere a los flujos fundamentales, pero no en lo que concierne a los terceros armónicos de flujos, que están en fase. Tienden a retornar por la cuarta columna. Pero esta es el aire, lo que significa que los circuitos magnéticos, para los terceros armónicos de flujos, tienen gran reluctancia. Por lo tanto, apenas existirán terceros armónicos de flujos, y las que débilmente subsistan retornarán por el aire o en parte cerrándose por la cuba del transformador, por tanto:

a) La falta de conductor neutro en la línea de alimentación del primario, impide la circulación de los terceros armónicos de corriente de excitación, que, así; no pueden existir.

b) La carencia de la cuarta columna es obstáculo para la existencia de terceros armónicos de flujo importantes.

La corriente de excitación y el flujo están relacionados, en los transformadores monofásicos, lo cual significa que, si la corriente no tiene tercera armónica, la tiene el flujo, o viceversa. Y, no obstante, en nuestro caso carecen de terceros armónicos tanto las corrientes de excitación como los flujos. La paradoja no es tal, si se advierte que la supresión de la cuarta columna significa que el circuito magnético adquiere característica lineal, la reluctancia del aire, siendo compatibles flujos y corrientes prácticamente sin terceros armónicos.

La consecuencia, de orden práctico, es que las tensiones simples secundarias no presentan terceros armónicos de gran consideración, aun cuando se proyecte para trabajo en la zona de saturación.

4.16. Corriente de conexión

En el proceso de conexión del transformador a la red de distribución, el cual se suele llevar a cabo en vacío, se produce un transitorio durante el cual la corriente instantánea consumida puede ser muy superior a la nominal, no siendo infrecuentes picos alrededor de 4 veces dicho valor en transformadores de gran potencia. La incidencia de la corriente de conexión es múltiple ya que, además de sospecharse que, si se produce de forma repetida, puede acelerar el deterioro de los dieléctricos, es fácil que provoque disparos no deseados en las protecciones del transformador que impidan finalizar el proceso de conexión a la red. A lo anterior se unen posibles sobretensiones y efectos de resonancia nocivos asociados a los armónicos de corriente. Además de ello, los elevados valores de la componente continua de la corriente de conexión pueden afectar a relés de corriente en la instalación saturando su núcleo ferromagnético y provocando así un funcionamiento incorrecto.

El origen de la corriente de conexión está asociado al transitorio de construcción del flujo de variación senoidal necesario en el funcionamiento en régimen permanente del transformador. Con el fin de destacar de forma rápida lo esencial del problema que surge con referencia al conectar un transformador a la red y señalar las razones físicas que lo desencadenan, consideramos primero el caso ideal de un transformador con una impedancia nula en el primario, sin pérdidas en el circuito magnético y con una curva característica B-H determinada, la ecuación eléctrica del devanado primario tras su conexión a la red es:

$$\begin{aligned}
 -\sqrt{2}U_1 \cos(\omega t + \varphi_u) &= -u_1(t) = e_1(t) = -N_1 \frac{d\phi(t)}{dt} \rightarrow \\
 \phi(t) &= \sqrt{2} \frac{U_1 \cos(\omega t + \varphi_u - \pi/2)}{N_1 \omega} + C \\
 C &= \phi_0 - \sqrt{2} \frac{U_1 \cos(\varphi_u - \pi/2)}{N_1 \omega} = \phi_0 - \phi_{\text{máx,perm}} \cos(\varphi_u - \pi/2)
 \end{aligned}$$

(Fórmula 4.33)

En el caso mas desfavorable (si la tensión de red tiene un argumento $\phi_u = -\pi/2$ con el origen del tiempo elegido en el instante de la conexión) la componente no alterna del flujo, de valor inicial C , puede llegar a ser igual al valor máximo del flujo en régimen permanente, $\phi_{\text{máx,perm}}$, mas el flujo remanente presente justo antes de la conexión, ϕ_0 , que puede ser despreciable y llegar en algunos casos hasta 0,6 veces $\phi_{\text{máx,perm}}$. Esto implica que, en el primer semiciclo, el valor de pico del flujo puede alcanzar hasta 2,6 veces su valor de pico nominal. Valores elevados del flujo requieren, debido a la saturación del núcleo, f.m.m. y corrientes magnetizantes instantáneas que, como ya se ha indicado, no es infrecuente que sean 3 o 4 veces superiores a la corriente nominal del transformador, o incluso mayores en casos concretos.

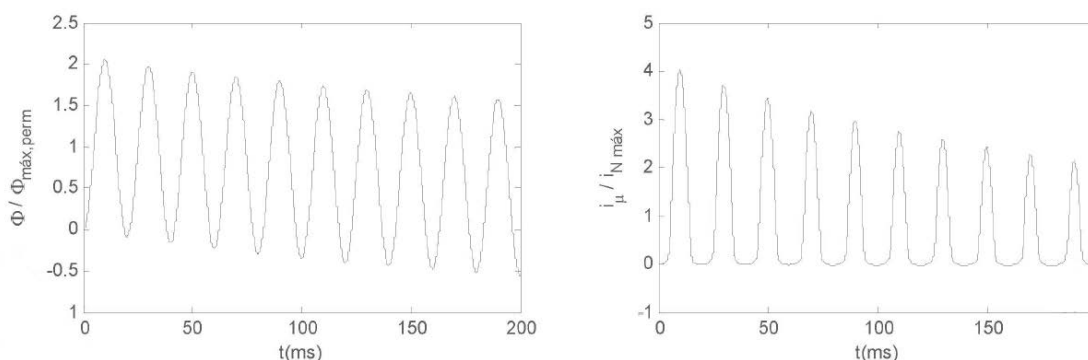


Figura 4.16.1. Flujo durante el transitorio de conexión (izda.) y corriente de conexión (dcha.) respecto a sus valores nominales.

Afortunadamente la componente no alterna del flujo en un transformador real se atenúa mas o menos rápidamente dependiendo de los diferentes efectos que producen pérdidas de potencia durante el transitorio (resistencia del devanado, histéresis magnética, y corrientes de Foucault) y de la inductancia total del primario. El tiempo característico de atenuación de éste componente unidireccional típicamente es del orden de 1s por lo que el efecto térmico de la corriente de conexión es limitado es de duración suficiente, sin embargo, como para afectar a las protecciones aguas arriba del transformador, pudiendo causar disparos indeseados o averías en relés de corriente.

Los métodos utilizados hasta la fecha, en los que es imperativo reducir la corriente de conexión han sido, primero, la conexión de resistencias en serie,

caras y con una efectividad limitada y más recientemente, la conexión controlada basada en la fase de la tensión de entrada (point-on-wave, pow, controlled closing). Este último método es el más efectivo y se viene utilizando en instalaciones para limitar la corriente de conexión de baterías de condensadores, y últimamente cada vez más para la conexión de transformadores de gran potencia. Por otro lado, para discriminar que una corriente de conexión no representa el inicio de una corriente de cortocircuito (frente a la que deben de actuar de inmediato las protecciones) se utilizan en ocasiones dispositivos basados en el alto contenido de armónicos en la corriente de conexión.

4.17. Importancia del neutro y medios para crearlo.

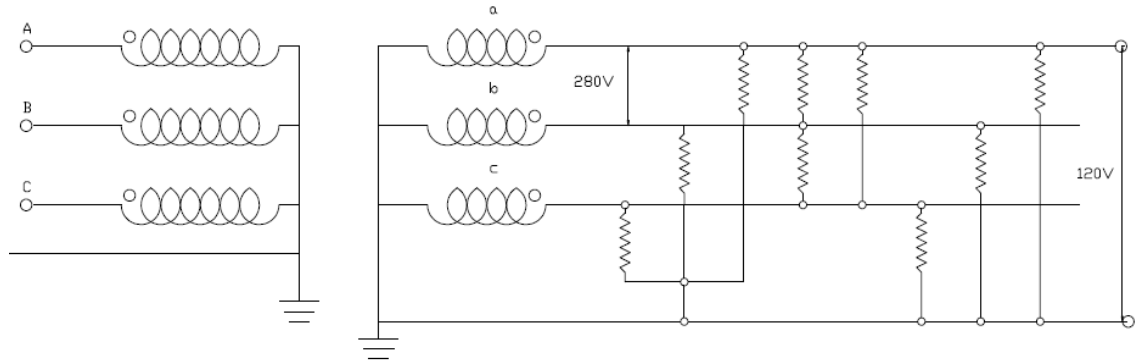
El neutro es fundamental para la supresión de los armónicos en los sistemas Y-Y. Pero además de esta función, en los sistemas Y-Y, Y- Δ , Δ -Y, o Δ - Δ , el neutro proporciona también las siguientes ventajas:

1. un camino para las corrientes desequilibradas debidas a las cargas desequilibradas.
2. un medio por el cual puede proporcionarse un servicio eléctrico doble (tanto la tensión trifásica superior para las potencias y cargas de motores mayores como una tensión monofásica inferior para las cargas de iluminación y aparatos domésticos).
3. un medio por el cual las tensiones de fase (entre las cargas conectadas en Y o los transformadores conectados en Y) se equilibran en relación con las tensiones de línea.

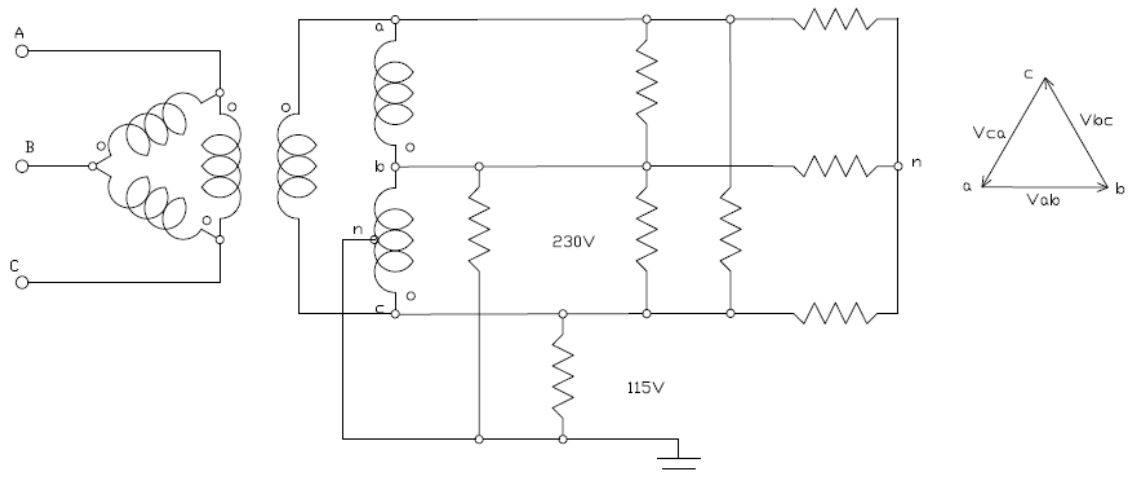
En la figura 4.33a, puede verse una transformación Y-Y. El neutro de la fuente de alimentación está conectado al neutro de los primarios y secundarios del transformador y también a las cargas. Se conecta una carga trifásica en Y al neutro de manera que cualquier desequilibrio en las corrientes de fase no desequilibrará las tensiones de fase. Se conectan tres cargas en triángulo entre las línea a-b, b-c y c-a, respectivamente, como muestra la figura 4.33a. Las cargas monofásicas se conectan entre una línea y neutro, como se ve.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

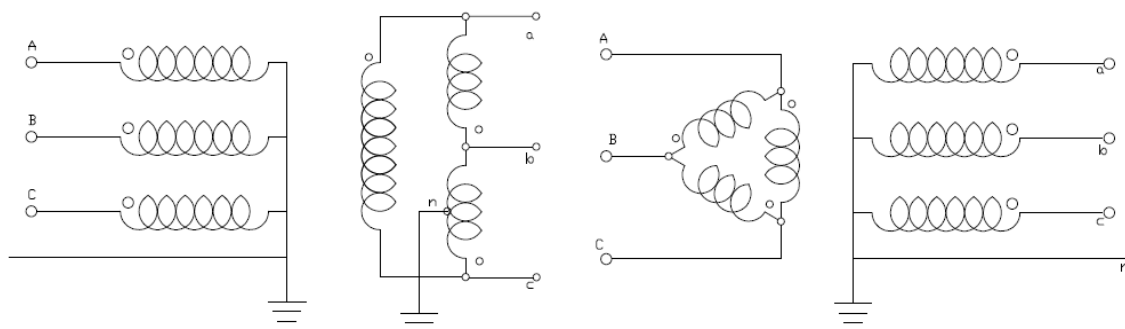
Obsérvese que para un secundario conectado en Y, la tensión monofásica es $V_L/\sqrt{3}$ de acuerdo con la teoría de los circuitos trifásicos. Así, si las tensiones de línea secundarias, V_t , son 400 V, las tensiones de fase secundarias V_f , (entre cualquier fase y neutro) son 230 V. Cualquier fase de un secundario conectado en Y puede proporcionar tensiones monofásicas respecto al neutro.



(a) Transformación Y-Y con cargas conectadas en Y y en Δ , y cargas monofásicas.



(b) Transformación Δ - Δ con cargas conectadas en Y y en Δ .



(c) Transformación Y- Δ .

(d) Transformación Δ -Y

Figura 4.36. Cargas monofásicas y trifásicas con neutro en varios transformadores.

En la figura 4.33b, puede verse una transformación. Solamente un secundario tiene una toma central que está conectada a tierra, nunca existe una toma central en más de un secundario debido a que esto produciría un cortocircuito entre los devanados. El primario nunca está puesto a tierra debido a que produciría un cortocircuito en el transformador en la alimentación. La toma central del secundario proporciona tensiones monofásicas de valor mitad del de las tensiones compuesta, $V_L/2$. Tanto las cargas trifásicas conectadas en triángulo como en Y pueden estar conectadas al secundario de un transformador en triángulo. Sin embargo, si la carga trifásica conectada en Y es desequilibrada, las corrientes desequilibradas producen tensiones simples desequilibradas como indica el diagrama vectorial de la figura 4.33b. Además, si las cargas monofásicas están desequilibradas, se produce un desequilibrio de las tensiones de fase debido a la caída de tensión en la línea. Así, el neutro en una transformación no evitará el desequilibrio de tensiones de fase, trifásicas o monofásicas, aunque proporcione un camino para las corrientes monofásicas desequilibradas, que tiende a reducir el desequilibrio de tensiones.

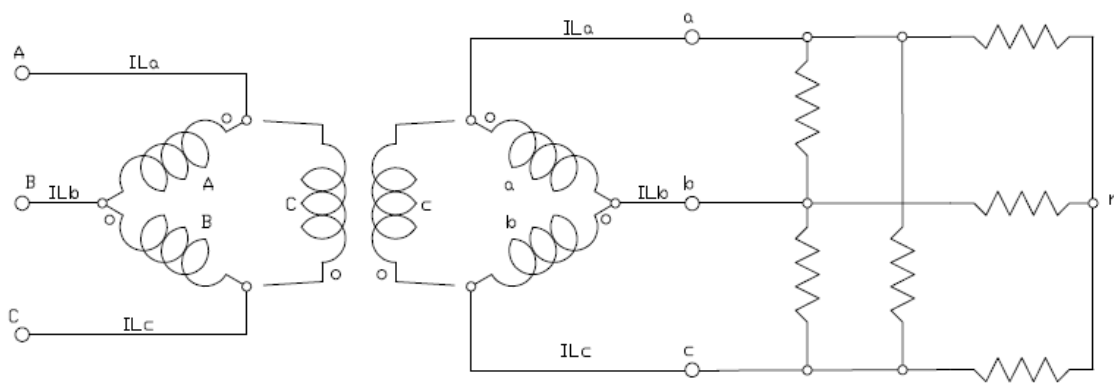
En la figura 4.33c puede verse una transformación Y- Δ . El neutro del primario está puesto a tierra en la alimentación para suprimir los armónicos en el primario. Se dispone de un sistema monofásico de tres hilos utilizando un neutro sacado de la toma central entre las fases b y c. Los conductores a, b y c

permiten la conexión de cargas en Y y en Δ . Los sistemas Y- Δ , se usan a menudo en los sistemas de distribución reductores debido a que el primario de los transformadores sólo necesita ser aislado para la tensión simple en lugar de para la tensión compuesta. Así, la tensión nominal en el primario de los transformadores necesaria para una transformación 20.000/400V, usando la configuración Y- Δ es sólo 11.547 V. Esta reducción de tensión hace que haya un ahorro considerable en los costes de construcción de los transformadores de alta tensión.

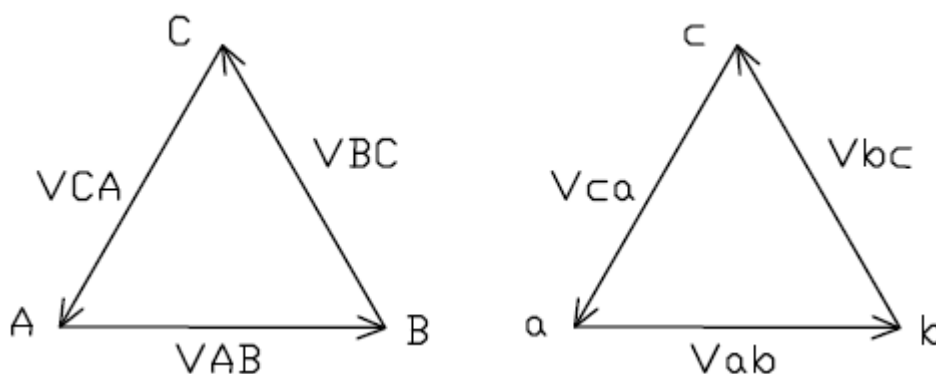
De manera parecida, la transformación Δ -Y mostrada en la figura 4.33d se presta a transporte a alta tensión debido a que proporciona una tensión compuesta en el secundario más elevada que el valor nominal del secundario del transformador. Así, puede conseguirse un transporte 400/20 000 V mediante transformadores cuyos arrollamientos secundarios tengan una tensión nominal de $20.000/\sqrt{3}$ V. Véase, en la figura 4.33d que se necesita un neutro en el secundario para suprimir los armónicos y proporcionar el neutro necesario para los sistemas Y-Y.

4.18. Relaciones de transformación V-V. Sistemas en triángulo abierto.

Si el primario de un transformador de un sistema se abre accidentalmente, el sistema continuará suministrando energía a una carga trifásica. Si este transformador defectuoso se desconecta y se elimina, como muestra la figura 4.34^a, el banco de transformadores resultantes se denomina un sistema en triángulo abierto o V-V. El sistema continúa suministrando potencia trifásica a las cargas conectadas en Δ y en Y sin ningún cambio en la tensión por las razones indicadas en las figs. 4.34b y c.



(a) Eliminación de un transformador de un sistema obteniéndose un banco de transformadores en V-V



(b) Tensiones en aplicadas al primario e inducidas en el secundario del banco de transformadores.

Figura 4.37. Banco de transformadores en triángulo abierto o V-V y relaciones vectoriales

La figura 4.34b muestra las relaciones vectoriales entre las tensiones compuestas trifásicas aplicadas a los primarios V-V. Las relaciones vectoriales para las tensiones simple y compuesta inducidas en los dos secundarios pueden verse en la figura 4.34c. Obsérvese que las tensiones de fase y de línea son las mismas. V_{al} es la tensión inducida en la bobina secundaria a del transformador. V_b es la tensión inducida en la bobina b del transformador. La suma vectorial de $V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}$ como se ve en la figura 4.34a y c. En consecuencia, mediante un sistema V-V se producen todavía 3 tensiones simples, desfasadas 120° entre sí.

La potencia suministrada por cada transformador en un sistema V-V no es la mitad de la potencia total sino aproximadamente del 57,7 %. Esto puede demostrarse como sigue.

Como cada transformador en V-V suministra ahora corriente compuesta, la potencia suministrada por cada transformador en triángulo abierto comparada con la potencia trifásica total es

$$\frac{\text{Potencia del transformador}}{\text{Potencia trifásica total}} = \frac{V_p \cdot I_p \cdot \cos\varphi}{\sqrt{3} \cdot V_l \cdot I_l \cdot \cos\varphi} = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

(Fórmula 4.34)

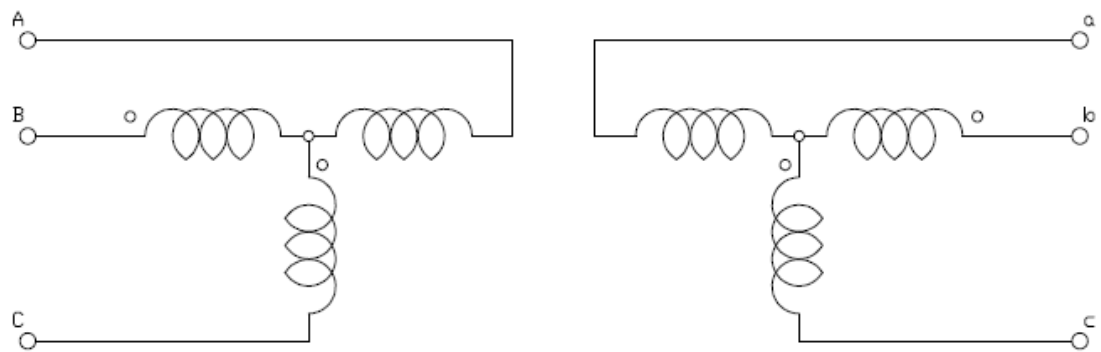
Si 3 transformadores en están alimentando una carga nominal y se elimina un transformador, la sobrecarga en cada uno de los transformadores restantes es del 173%, la inversa. La relación anterior también implica que si dos transformadores están funcionando en V-V y están cargados a la capacidad nominal, la adición de un tercer transformador aumenta la capacidad total en $\sqrt{3}$. Así, con un incremento en el coste del 50% para un tercer transformador, la capacidad del sistema se eleva en un 73,2%, al convertir un sistema V-V en un sistema Δ - Δ .

4.19. Relaciones de transformación T-T.

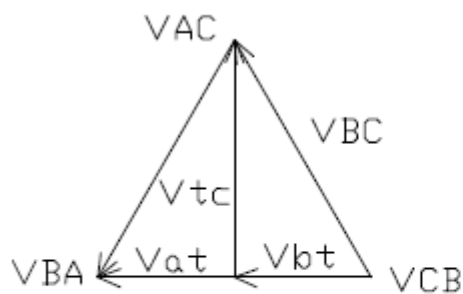
Al igual que la transformación V-V, es posible usar sólo 2 transformadores para proporcionar una transformación trifásica, si están conectados en T-T. Sin embargo, a diferencia de la conexión V-V, la conexión T-T requiere 2 especiales distintos entre si. Como en la conexión V-V, la T-T se denomina así debido a la disposición de sus conexiones, que se ven en la figura 4.35a.

Los transformadores necesarios especiales para la conexión T-T son un transformador corto cuyas tensiones nominales en el primario y en el secundario son el 86,6% de las tensiones nominales en el primario y en el secundario del transformador largo (A,a). El transformador largo es o un transformador con una toma central o un transformador de varios devanados que tiene dos devanados iguales en el primario y en el secundario cuya tensión

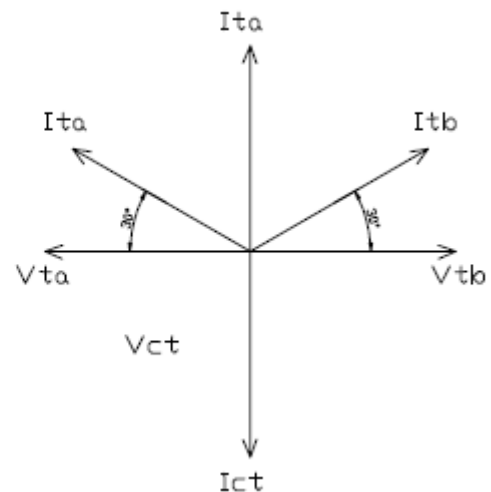
nominal total el 115 % de las tensiones primaria y secundaria del transformador corto, respectivamente.



(a) Conexiones de transformador T-T



(b) Tensión trifásica aplicada
secundaria



(c) Corriente

Figura 4.38. Conexiones de transformador T-T y relaciones vectoriales.

Las tensiones trifásicas aplicadas al primario de la T, V_{AC} , V_{CB} y V_{BA} se convierten en V_{Bt} , V_{tA} y V_{tc} , para las polaridades instantáneas dadas, en la que t es la unión entre el transformador corto y la toma central del transformador. Las tensiones secundarias inducidas están en fase con los componentes indicados de la tensión aplicada, y están representados como vectores de trazo continuo en la figura 4.3Sc. Como puede verse en la figura 4.35c, la tensión de línea V_{bc} es la suma vectorial de $V_{bt} + V_{tc}$. Como V_{bt} es $0,5 V_L$, en la que V_L es

la tensión de línea secundaria y V_{tc} es $0,866 V_L$, la cual es la tensión nominal secundaria del transformador corto, entonces

Las tres tensiones de línea en el secundario que se ven en la figura 4.35c son iguales a V_L , forman un triángulo equilátero con ángulos de 60° entre sí y sus desfases relativos son, realmente, de 120° , dando lugar así a una verdadera transformación trifásica de las tensiones de línea originales aplicadas al primario.

Las relaciones vectoriales entre corrientes y tensiones para el transformador largo y el de corto, respectivamente, pueden verse en la figura 4.35d. La suma vectorial de las corrientes es cero, como ocurre en cualquier verdadero sistema trifásico. Obsérvese, sin embargo, que la corriente en el transformador corto, I_{tc} está en fase con su tensión V_{tc} . Pero obsérvese también que las intensidades en el transformador largo avanzan o retrasan 30° respecto a sus componentes de tensión de fase. Estas relaciones de intensidades actúan disminuyendo el valor de potencia nominal en ambos transformadores.

Para transformaciones trifásicas, las relaciones anteriores demuestran que no existe ventaja alguna al usar el banco T-T en comparación con el banco de transformadores en V-V, por varias razones. Un banco T-T requiere transformadores especiales y una disposición especial de conexiones. El banco V-V permite fácilmente la adición del tercer transformador y cada transformador es un transformador monofásico normal. Así, si se usan transformadores en T-T la adición de un tercer transformador para producir un banco Δ - Δ es difícil debido a que el transformador corto está preparado sólo para la tensión nominal de $0,866 V_L$.

Puede demostrarse que el factor de disminución de la potencia para ambos transformadores en T-T y en V-V es realmente la misma y no se obtiene ninguna ventaja, por consiguiente, usando la transformación T-T. La relación entre la carga nominal en un banco V-V por transformador y la carga total que cada transformador puede suministrar (si ambos se usaran como

transformadores conectados en monofásico) es exactamente el mismo factor que resulta para cada transformador en T-T:

$$\frac{\text{kVA en V - V}}{2 \cdot \text{kVA monofásicos}} \text{ o } \frac{\sqrt{3}\text{kVA}}{2\text{kVA}} = 0,866$$

(Fórmula 4.35)

Por las razones anteriores, por tanto, el banco de transformadores tiene poca aplicación excepto para comprender la conexión Scott.

Al igual que la transformación en V-V, así como en Y-Y y en Δ - Δ , la transformación T-T de las figuras. 4.35b y c no produce desfase entre primario y secundario. Por consiguiente pueden ponerse en paralelo con cualquier disposición de transformadores que no presente desfase entre primario y secundario, con tal de que las tensiones primaria y secundaria sean las mismas, y se conserve la misma polaridad instantánea.

TIPOS DE TRANSFORMADORES QUE PUEDEN PONERSE EN PARALELO	
COLUMNA A DESFASE 0°	COLUMNA B DESFASE 30°
Y-Y	Δ -Y
Δ - Δ	Y- Δ
V-V	
T-T	

Tabla 4.1. Tipos de transformadores que pueden ponerse en paralelo

De la tabla 4.1 se deduce que un transformador T-T puede ponerse en paralelo con un transformador V-V, T-T, Y-Y o Δ - Δ , pero no con transformadores Y- Δ ni Δ -Y. Así, cualquier transformador de la columna A puede ponerse en paralelo consigo mismo o con cualquier otro transformador de la misma columna A. De manera parecida, cualquier transformador de la columna B puede ponerse en paralelo con una combinación idéntica o con cualquier otra de la propia columna B. Así, un transformador Δ -Y puede ponerse en paralelo con cualquier otra combinación Δ -Y o Y- Δ puesto que en ambos casos se produce un desfase de 30°.

Ninguna combinación de transformadores de la columna A puede ponerse en paralelo con combinaciones de la columna B debido a que la última produce un desfase de 30° entre las tensiones del primario y del secundario.

4.20. Estudio de transformadores trifásicos estrella-estrella con cargas desequilibradas.

Es útil analizar el comportamiento de los transformadores trifásicos al aplicarles cargas desequilibradas. En la práctica, tales cargas se evitan, en la medida posible, ya que, aparte otros inconvenientes que pueden ofrecer, según se va a ver, en cualquier caso significan mala utilización de los transformadores, al no poder trabajar todas sus fases a plena carga. No siempre es posible lograr equilibrios de carga completos. En particular, son cargas desequilibradas los cortocircuitos asimétricos.

Para comprender los efectos derivados de los desequilibrios de carga de una forma sencilla y concisa se tienen en cuenta las siguientes simplificaciones, propias del transformador ideal.

1ª Se consideran inexistentes las caídas de tensión internas (óhmicas e inductivas).

2ª Frente a las corrientes de carga, se despreciarán las corrientes de excitación. Ello equivale a suponer:

a) que no existen pérdidas en el hierro ($i_{Fe} \approx 0$)

b) las reluctancias magnéticas de los circuitos son infinitamente pequeñas ($R_m \approx 0$), en cuyo caso las μ , necesarias para crear los flujos en vacío, son prácticamente nulas, aun no siéndolo los flujos.

3ª Se imaginará un transformador relación 1/1, o, si se prefiere, con secundario reducido al primario. Es más, se supondrá $N_1 = N_2 = 1$.

Carga entre fase y neutro en un transformador estrella- estrella con núcleo trifásico.

Se supone que al primario no va conductor neutro ya que no es aconsejable y el transformador está en vacío. Independientemente de los valores R_m , se establecerán los flujos comunes, determinados por las tensiones aplicadas. Se tiene un estado físico de equilibrio, tanto en los circuitos eléctricos, primario, como en los magnéticos.

Entre b y n se dispone cualquier carga $i_2 = 100$. Esto altera el equilibrio, por lo que, tras un estado transitorio, se establece otro, permanente, que se ha representado en la figura.

Las ecuaciones que definen el nuevo estado son: una de naturaleza electrocinética, y dos relativas a los circuitos magnéticos. En la figura, se han indicado las flechas de valoración ($-->$), arbitrariamente adoptadas. Se supone que el sentido instantáneo de la corriente de carga $i_c = i_{2,II} = 100$, en un momento determinado, coincide con el indicado por su flecha de valoración. Primera ley de KIRCHHOFF en el primario (no existiendo neutro de retorno),

$$i_{1,I} + i_{1,II} + i_{1,III} = 0 ; I_{1,I} + I_{1,II} + I_{1,III} = 0$$

(Fórmula 4.36)

En cualquier anillo (trayecto cerrado) del núcleo ferromagnético trifásico se verifica, aproximadamente,

$$\Sigma \text{ fuerzas magnetomotrices} = \Sigma \phi R_m \approx 0$$

(Fórmula 4.37)

Teniendo en cuenta $N_1 = N_2$, lo anterior permite escribir:

$$i_{1,I} - i_{1,II} - i_{2,II} = 0 ; I_{1,I} - I_{1,II} - I_{2,II} = 0$$

$$i_{1,I} - i_{1,III} = 0 ; I_{1,I} - I_{1,III} = 0$$

(Fórmula 4.38)

Sumando las tres ecuaciones, se deduce

$$i_{1,I} = \frac{i_{2,II}}{3} = 33,33$$

$$i_{1,I} = i_{1,III} = 33,33$$

$$i_{1,II} = -i_{1,I} - i_{1,III} = -66,66$$

(Fórmula 4.39)

Por tanto:

$$i_{1,I} = 33,33 \cdot I_{2,II}$$

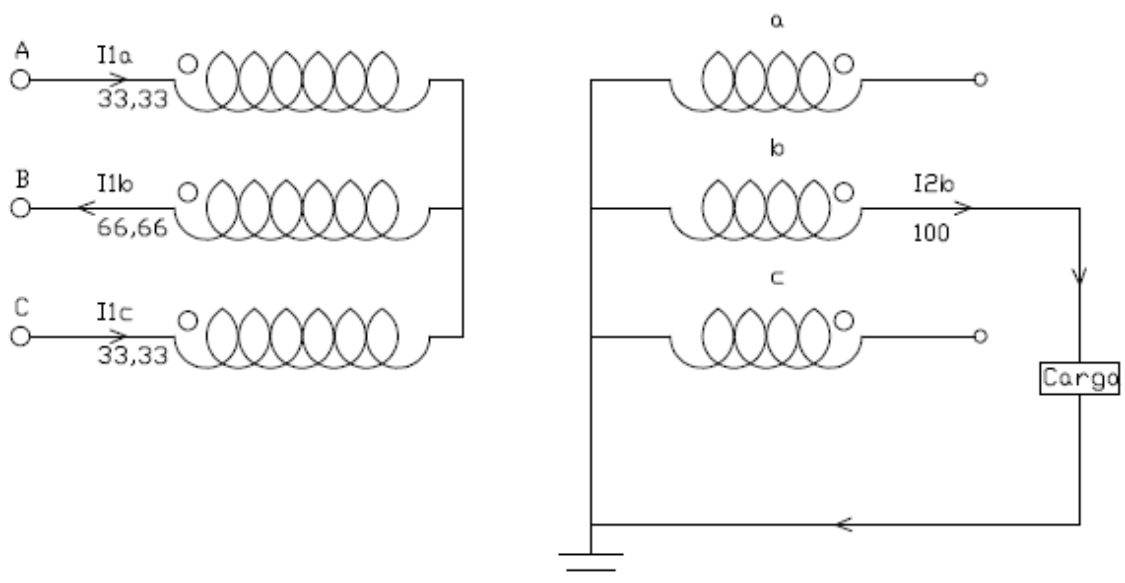
$$i_{1,III} = 33,33 \cdot I_{2,II}$$

$$i_{1,II} = -66,66 \cdot I_{2,II}$$

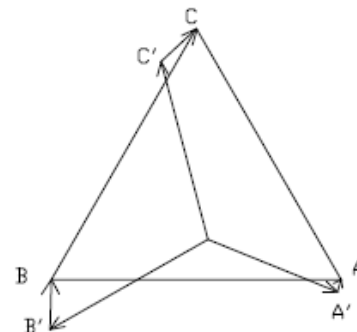
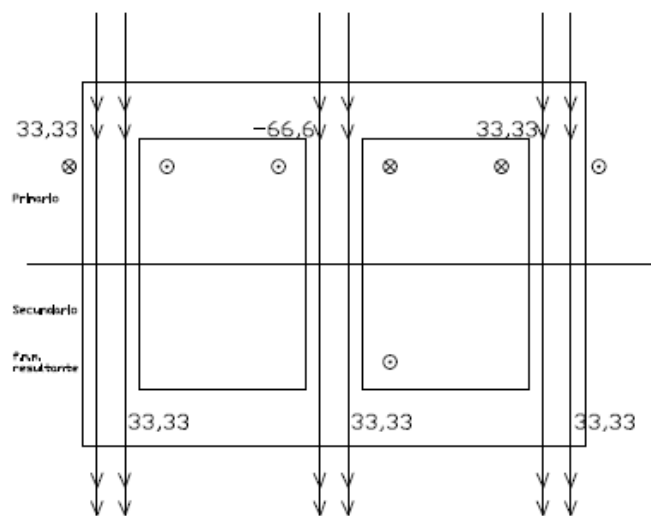
(Fórmula 4.40)

Para más fácil visión, en la figura, se han dibujado las flechas ($\rightarrow$) de las corrientes con los verdaderos sentidos que les corresponde en el instante considerado.

Con el fin de ver lo que sucede en los circuitos ferromagnéticos, los resultados precedentes están gráficamente dados en la figura. Nótese que, en cada anillo, se compensan las f.m.m. No ocurre lo mismo en cada columna. Más concretamente, todas las columnas tienen una f.m.m. resultante de igual sentido y valor 33,3 ($N_1 = N_2 = 1$). La conclusión física es que aparecen tres flujos alternos que pulsan a un tiempo, homopolares. Al no tener retorno por una cuarta columna, saltan por el aire, a través de dieléctricos líquidos y sólidos, y de conductores y, en particular, buscan, parcialmente, el camino ferromagnético ofrecido por la caja del transformador, que por tal motivo tiende a calentarse.



(a) Dirección de las corrientes en el primario y el secundario.



(b) Dirección de las corrientes en el esquema del transformador.

(c) Diagrama vectorial

Figura 4.39. Corrientes de desequilibrio fase-neutro en un transformador Y-Y.

En lo que refiere a las tensiones, ocurre lo siguiente. Los flujos comunes originales (de régimen de vacío) motivan unas E_1 primarias: $O-A'$, $O-B'$, $O-C'$.

Pero hay que agregar otras f.e.m. inducidas por los flujos homopolares: $A'-A$, $B'-B$, $C'-C$. El transformador se convierte en generador de tensiones homopolares. Luego las tensiones simples resultantes son OA , OB , OC . El neutro O queda trasladado. Análogamente ocurre en las tensiones secundarias. Es evidente que la dirección del traslado depende de la clase de carga $i_2 = i_c$.

Conclusiones:

1ª. Se establecen las corrientes primarias tal como se ve en la figura.

2ª. Al no estar compensados los amperios-vuelta de cada columna, se originan unos flujos alternos homopolares que, por pulsar a un tiempo, tienen que saltar por el aire.

3ª. La corriente, en una sola fase, del secundario se traduce en cargas repartidas, pero no equilibradas, en el primario. Un sistema directo más otro inverso pero ninguno homopolar, pese a que la carga del secundario lo tiene.

4ª. Surge un traslado de neutro que desequilibra las tensiones simples.

Con el fin de evitar el desequilibrio de tensiones, se recomienda no emplear esta clase de transformadores en aquellos casos en que son de prever desequilibrios fase-neutro en las cargas. Como dato práctico, de orientación, se suele recomendar el uso del transformador estrella-estrella cuando el desequilibrio de la carga fase-neutro no se prevé superior al 10% de la intensidad nominal.

Carga entre dos fases en un transformador estrella-estrella con núcleo trifásico.

Si la carga monofásica se aplica entre dos fases, no se producen las anomalías que se acaban de ver en el caso anterior.

Los razonamientos empleados en el apartado precedente, aplicados aquí, conducen a las corrientes primarias que se ven en la figura siguiente. Ahora bien, en este caso, las f.m.m. de cada columna se compensan. Luego la carga desequilibrada no ocasiona flujos adicionales. No existirán más que los flujos normales de excitación, motivados por las tensiones primarias aplicadas.

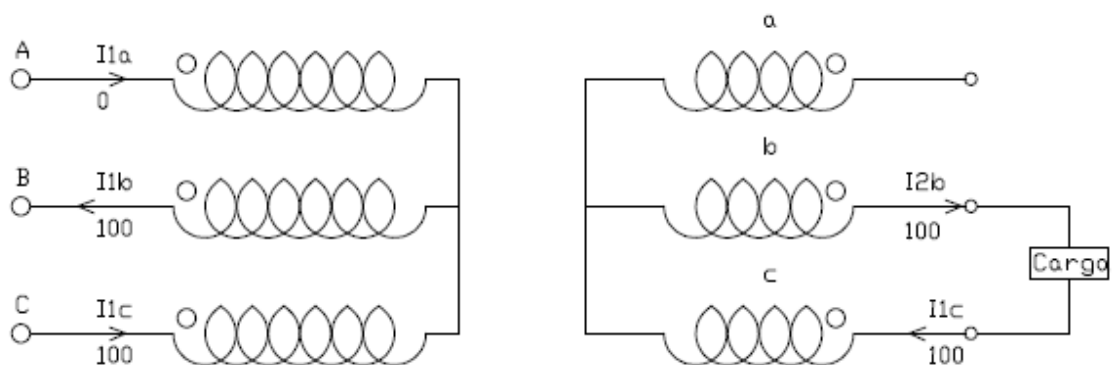


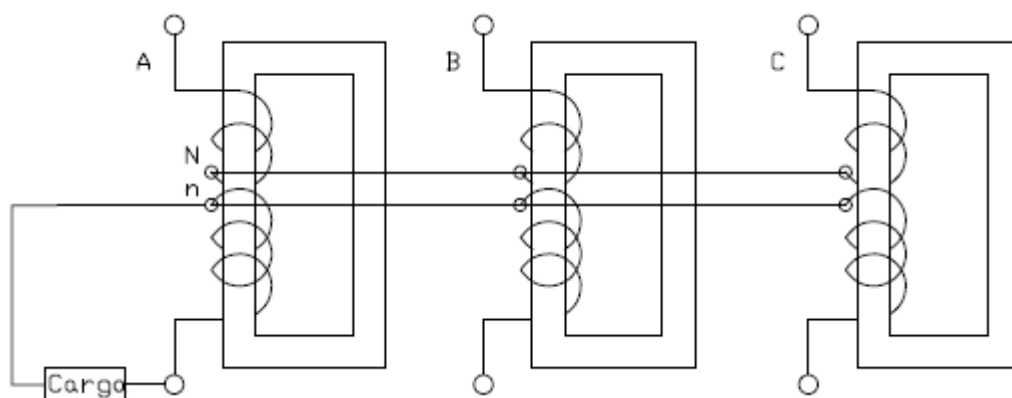
Figura 4.40. Corrientes de desequilibrio fase-fase en un transformador Y-Y.

Salvo el lógico mal aprovechamiento del transformador, las cargas entre fases no están contraindicadas.

Carga entre fase y neutro en bancos de transformación trifásica y en transformadores con cinco columnas.

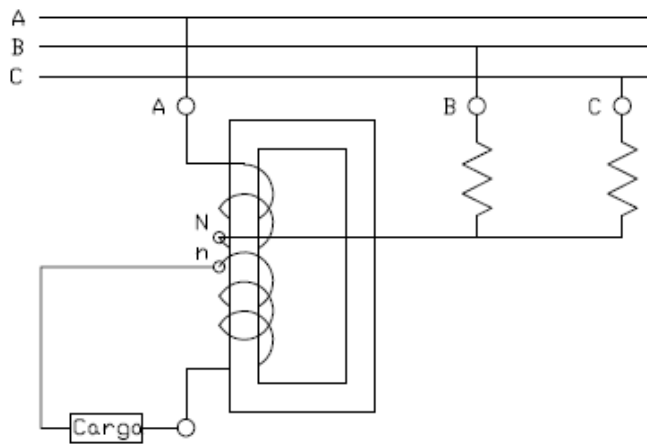
En la figura siguiente, se ven tres transformadores monofásicos, en transformación trifásica, con carga fase-neutro. Este esquema equivale al (b). En definitiva es un transformador monofásico en carga, con la particularidad de estar conectado a la red a través de dos bobinas previas.

Para fijar ideas, supóngase que la carga monofásica es óhmica. Las bobinas conectadas al primario significan caídas de tensión. Con poca importancia que tenga la corriente de carga, ha de originar fuerte saturación de los núcleos de los transformadores descargados. En efecto, las corrientes que por estos han de circular pasan a ser puras corrientes de excitación, y no se olviden los valores muy reducidos que normalmente deberían tener tales corrientes. En (c) se ha representado el diagrama vectorial del conjunto (tensión A-N muy reducida). En resumen, sucede que al transformador monofásico cargado se le han conectado (en el primario) unas reactancias adicionales. Los anglosajones denominan al fenómeno «chocking effect» (efecto choque).

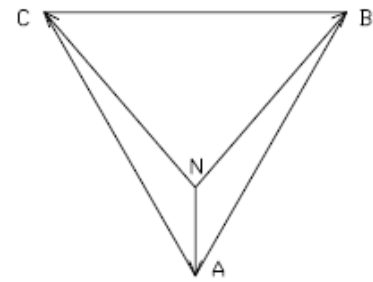


(a) Carga fase-neutro en un banco trifásico de tres columnas.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.



(b) Diagrama simplificado fasorial.



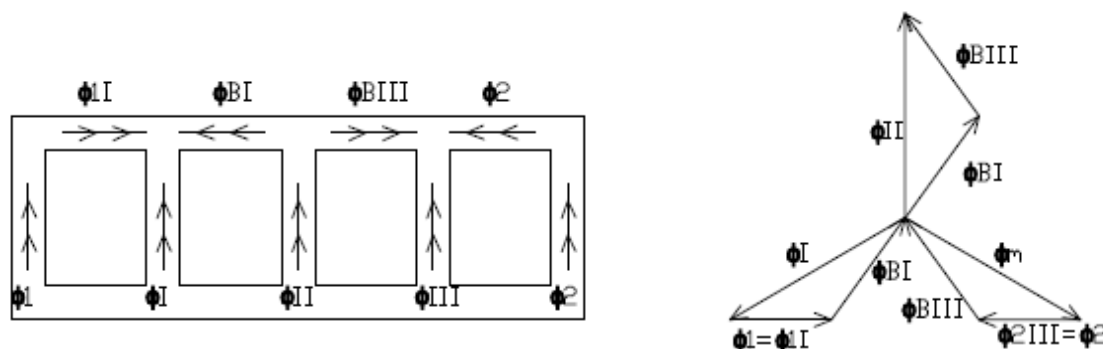
(c) Diagrama

Figura 4.41. Carga fase-neutro en un banco trifásico de tres columnas.

Algo parecido sucede con los transformadores con cinco columnas.

A los efectos de transporte, los grandes transformadores han de ceñirse a un gálibo determinado. Con el fin de reducir altura, cabe disminuir las secciones de las culatas, a base de que parte de los flujos (ϕ_1 y ϕ_2) retornen por dos columnas suplementarias sin arrollamientos. En la figura, se ve tal tipo de núcleo. En (b) se ofrece el diagrama vectorial de flujos, en trabajo equilibrado normal.

Supóngase conexiones estrella-estrella. Este caso puede asimilarse, en principio, al efecto que se produce en los transformadores de núcleo trifásico. La diferencia estriba en que los flujos adicionales, creados por un desequilibrio fase-neutro, no están obligados a retornar por el aire. Aquí tienen fácil retorno por las dos columnas adicionales. Esto significa que, incluso corrientes de desequilibrio moderadas motivarán considerables flujos, limitados por fuertes saturaciones. Una vez más el proceso se sale del campo de lo lineal. El resultado es, como en el caso precedente, el efecto choque.



(a) Carga fase-neutro en un banco de cinco columnas. (b) Diagrama fasorial.

Figura 4.42. Carga fase-neutro en un banco de cinco columnas.

1°. Con el fin de que no puedan producirse desequilibrios fase-neutro, debe proscribirse el uso de neutros en los secundarios, tanto en el caso de bancos a base de transformadores monofásicos como tratándose de transformadores con cinco columnas. Siempre en el supuesto de que no se está dispuesto a dar aportación de corriente por el neutro del primario.

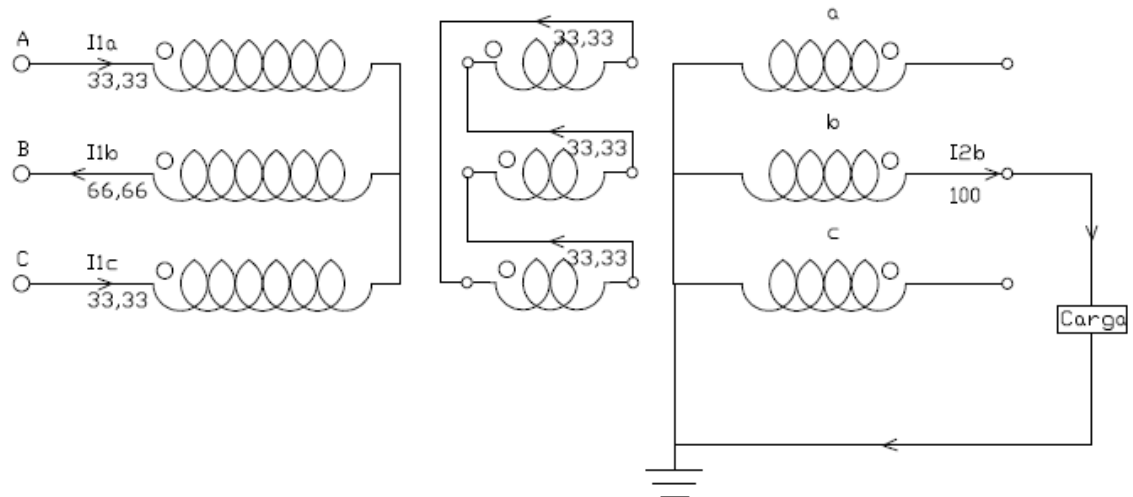
2°. Las precedentes limitaciones o inconvenientes se evitan si uno de los arrollamientos está conectado en triángulo, o si se dispone un arrollamiento de compensación.

Arrollamientos terciarios o de compensación.

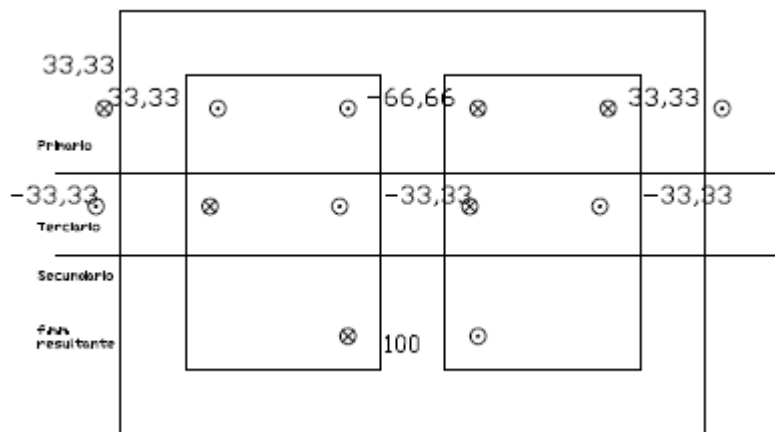
Si en los transformadores estrella-estrella se dispone un arrollamiento terciario, también llamado de compensación, conectado en triángulo, desaparecen los inconvenientes motivados por las cargas entre fase y neutro, por los terceros armónicos en las tensiones simples secundarias.

Aun cuando no es condición precisa, en la figura se supone que, siendo N_3 el número de espiras de cada fase del terciario, $N_1 = N_2 = N_3$.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.



(a) Transformador con devanado terciario.



(b) Sentidos de las corrientes en los núcleos del transformador

Figura 4.42. Carga fase-neutro en un banco trifásico de cinco columnas.

Si se cierra el devanado terciario, la f.e.m. total $3 \cdot E_3$ motivará una corriente que tenderá a oponerse a la causa originaria (aumento y disminución de los flujos ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3), en otras palabras, tenderá a eliminarlos. Ciertamente, no lo hará por completo, ya que, en tal caso, no se inducirían las E_3 y no existiría corriente. Dada la pequeña impedancia del devanado terciario (R_3 pequeña y escasos flujos de dispersión), la $3 \cdot E_3$, necesaria para mantener la corriente I_3 , es pequeña. Luego los flujos ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 también son pequeños, los precisos para mantener la corriente de cortocircuito I_3 . El valor $i_3 = 33,3$ se justifica por el hecho de ser el necesario para anular los flujos homopolares, se ha visto que en la práctica no son nulos pero sí de reducido valor.

El mismo devanado terciario elimina por idéntico mecanismo, los flujos homopolares de terceros armónicos. Tampoco quedan totalmente eliminados pero sí fundamentalmente. Suele decirse que el devanado de compensación, y en general cualquier arrollamiento en triángulo, permiten la circulación de los terceros armónicos de corriente necesarias para disponer de flujos senoidales.

Los devanados terciarios realizan la función de eliminar, prácticamente, los flujos homopolares. Con esto, desaparecen los inconvenientes de las cargas fase-neutro en los transformadores estrella-estrella. En consecuencia, con devanados terciarios nada hay que objetar a las cargas desequilibradas, salvo mal aprovechamiento del transformador.

4.20. Uso de las transformaciones polifásicas en la conversión de potencia.

Además de usarse en la transformación trifásica de la c.a. a altas tensiones para el transporte a larga distancia y en la subsiguiente transformación a tensiones más bajas para la distribución de energía eléctrica, los transformadores también se usan para la conversión de c.a. en c.c. Las transformaciones polifásicas de tres a seis, e incluso mayor número de fases, constituyen una etapa en el proceso de rectificación. Pueden citarse varias ventajas de la rectificación polifásica respecto a la monofásica, a saber:

1. menor contenido de rizado en la componente fundamental y en los armónicos de orden superior en la onda de salida, lo que requiere filtros de alisado menos complejos.
2. los transformadores se usan con más rendimiento ya que la relación entre potencia en c.c. y kVA de transformador es más elevada para la conversión polifásica,
3. al aumentar el número de fases aparece una relación entre tensiones de c.c. y de c.a., superior (media a eficaz),

4. el rendimiento total del proceso de conversión aumenta. Esto es importante cuando deben convertirse grandes cantidades de potencia de c.a. en c.c.

Por consiguiente, es mucho mejor, para una compañía eléctrica, suministrar c.a. a un abonado industrial que requiera grandes cantidades de c.c., enviando energía por líneas de transporte trifásicas a alta tensión. Se usan entonces los transformadores para proporcionar una tensión secundaria adecuada para la rectificación.

La tabla 4.2 muestra una comparación de los distintos factores que intervienen en la elección del número de fase que deben usarse para una rectificación óptima. La primera fila muestra la relación entre tensiones de salida en c.c. y tensiones de fase en c.a., V_{dc}/V_{p2} . Esta relación aumenta al aumentar el número de fases hasta un máximo teórico de 1,414. Representa, en efecto, una medida de la c.c. útil respecto a la componente de rizado de c.a. presente. Así resulta que si se usara una rectificación dodecafásica (o incluso de 24 fases), prácticamente se alcanza el valor máximo teórico correspondiente a una diferencia menor del uno por ciento. Obsérvese que para cualquier onda senoidal, $E_m = 1,414E_{p2}$. en la que E_{p2} es la tensión de fase eficaz del secundario del transformador, y este valor es el valor límite de c.c.

COMPARACIONES ENTRE SISTEMAS POLIFÁSICOS DE RECTIFICACION					
Numero de fases n ONDA COMPLETA					
	1	3	6	12	∞
$\frac{V_{cc}}{V_{ps}}$	0,9	1,17	1,35	1,4	1,414
$\frac{E_h}{V_{cc}}$	0,667	0,25	0,057	0,014	0
$\frac{P_{cc}}{V_{A2}}$	0,54	0,675	0,551	0,4	0

Tabla 4.2. Comparaciones entre sistemas polifásicos de rectificacion

La segunda fila de la tabla 4.2 muestra la relación E_h/V_{cc} , la amplitud del armónico principal a la tensión de salida de c.c. sin filtrar, al aumentar el número de fases. Nuevamente al aumentar el número de fases, se reduce el contenido armónico, reduciéndose pues considerablemente el rizado de c.a. Este factor, también, tiende a aconsejar el uso de conversiones y rectificaciones utilizando transformadores polifásicos de gran número de fases.

La última fila de la tabla 4.2 es una relación entre la potencia rectificada y la potencia aparente nominal, V_A , del arrollamiento del secundario del transformador. Esta relación, se denomina a veces factor de utilización. Un factor de utilización bajo significa un coste más elevado del transformador para la cantidad de potencia de c.c. producida. El factor de utilización puede considerarse como máximo teóricamente para 2,7 fases. Así, resulta que la rectificación trifásica proporciona una conversión con mayor rendimiento en función del coste del transformador, a pesar de su elevado contenido de rizado y su baja relación entre tensión de c.c. y tensión eficaz de c.a.

La figura 4.43 muestra el uso de una conversión Δ -Y con primario de alta tensión y secundario de baja tensión, usando rectificación de media onda a semiconductores. El primario es un triángulo para suprimir los armónicos. El neutro del secundario está puesto a tierra por la misma razón. Para la mayoría de aplicaciones comerciales en las que se manejan grandes potencias de c.c. el circuito de la figura 4.43 es muy poco satisfactorio, a pesar de su elevado factor de utilización del transformador. La corriente de c.c. tiene siempre el mismo sentido en cada devanado del secundario, lo que provoca una corriente de excitación excesivamente elevada debido a la magnetización que produce la

c.c. en el núcleo de hierro. El efecto resultante es un sobrecalentamiento de los transformadores. Esto, junto con las desventajas de un contenido mayor de rizado y una relación menor entre la tensión de c.c. y la tensión eficaz de c.a., aconseja el uso de la rectificación hexafásica, a pesar de que el factor de utilización del transformador sea algo inferior.

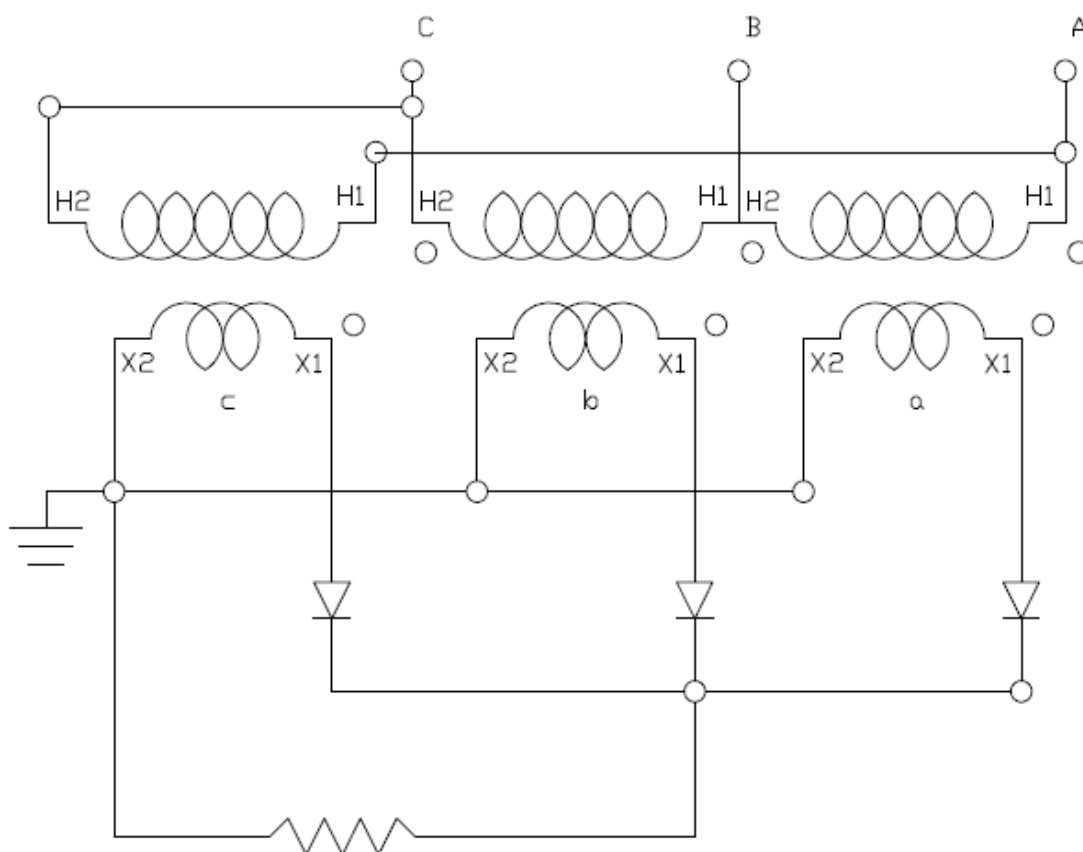


Figura 4.43. Rectificación trifásica de media onda

4.20.1. Rectificación hexafásica de media onda usando diodos.

En la mayoría de transformaciones trifásica o hexafásica se prefiere la conexión hexafásica en estrella debido a que proporciona un neutro (que puede ser puesto a tierra), así como un verdadero sistema hexafásico. Se usan un total de 6 rectificadores a semiconductores con una tensión inversa de cresta (PRV) y una corriente nominal adecuados para proporcionar una salida rectificada de media onda de la tensión hexafásica secundaria. Si se desea regular la tensión de salida de c.c. se utilizan comúnmente dos métodos en función del coste relativo y de la potencia. Puede usarse un variac trifásico en

la entrada para variar la tensión de alimentación de los tres transformadores conectados en triángulo, cambiando así la tensión de fase de salida en el secundario E_{p2} y la tensión de salida de c.c., V_{dc} . Otra solución, consiste en usar en lugar de los diodos D_1 a D_6 , rectificadores controlados de silicio (SCR) junto con un circuito desfasador para controlar la tensión de salida de c.c.

La onda producida por los seis diodos puede verse en la figura 4.44b, en ausencia del condensador C de filtro (mostrado en la figura 4.44a). El efecto sobre la onda de salida al añadir un condensador de filtro puede verse en la figura 4.44c.

Como muestra la tabla 4.2. este valor de c.c. es algo superior al valor comparable obtenido con la rectificación trifásica ($1,17E_{pz}$), pero con un contenido de rizado armónico considerablemente menor.

Se obtiene un rizado considerablemente menor y una relación de salida de tensión de c.c. superior shuntando RL con un condensador de tamaño y tensión nominal adecuados, como muestra la figura 4.44c. En tales circunstancias, el condensador resulta más que justificado debido a que produce la misma relación entre V_{de} y E_{p2} que la que se obtendría con la rectificación dodecafásica sin presentar la reducción del factor de utilización del transformador que aparece si se usa la conversión dodecafásica y sin necesidad de utilizar 6 rectificadores adicionales.

5. MODELO MATEMÁTICO Y DATOS EXPERIMENTALES.

En este capítulo se presenta el modelo matemático implementado para el estudio del transformador trifásico en régimen permanente así como las bases experimentales en las que se apoya nuestro estudio. Este capítulo se estructura en tres partes, en la primera se aborda el modelo matemático tenido en cuenta, en la segunda se exponen cada una de las máquinas e instrumentos utilizados para llevar a cabo dicho estudio y en la última parte se detallan cuidadosamente los montajes necesarios para la toma de datos de las distintas experiencias.

5.1. Circuito eléctrico y circuito magnético en el dominio del tiempo

El comportamiento de un transformador queda definido con la resolución de sus ecuaciones eléctricas y magnéticas. Dichas ecuaciones relacionan las tensiones, las intensidades y los flujos del transformador. Cuando estas ecuaciones se pueden representar mediante circuitos equivalentes, como es el caso de los modelos presentados en este trabajo, se deben resolver estos circuitos equivalentes.

Las ecuaciones del circuito eléctrico y del circuito magnético se reducen a por unidad (pu) para eliminar el número de espiras que forman los devanados del primario y del secundario, puesto que dichos valores no se suelen conocer, a no ser que los indique el fabricante.

5.1.1. Ecuaciones en valores reales

Las ecuaciones en valores reales que definen el comportamiento eléctrico de los seis devanados del transformador trifásico de tres columnas son:

$$u_{pq} = \left(R_p + L_{dp} \frac{d}{dt} \right) i_{pq} + N_p \frac{d\phi_q}{dt}$$

$$u_{sq} = \left(R_s + L_{ds} \frac{d}{dt} \right) i_{sq} + N_s \frac{d\phi_q}{dt}$$

para $q = 4,5,6$

(Fórmula 5.1)

donde:

i_{pq} , i_{sq} , u_{pq} y u_{sq} son las corrientes y tensiones del devanado q del primario y del secundario.

ϕ_q es el flujo por unidad de espira que circula por la columna q del hierro.

N_p y N_s son los números de espiras del primario y del secundario.

R_p , R_s , L_{dp} y L_{ds} son las resistencias internas e inductancias de dispersión del primario y del secundario.

Estas ecuaciones se pueden representar mediante el circuito eléctrico de la Figura 5.1.1 y son comunes para los transformadores de las tres topologías, entiéndase, transformador de tres columnas, banco de transformadores y transformador de cinco columnas. Para simplificar los cálculos, en estas ecuaciones no se han considerado las pérdidas en el hierro.

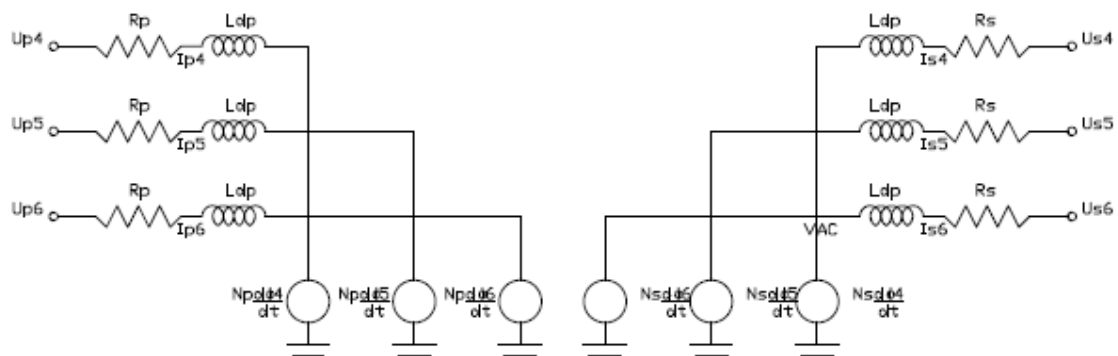


Figura 5.1.1. Circuito eléctrico del transformador trifásico con los devanados sin conectar.

En la figura anterior, se puede observar que los devanados del primario (p) y del secundario (s) están desconectados, es decir, no se ha realizado conexión alguna en ellos. Para considerar las pérdidas en el hierro se pueden añadir tres resistencias en paralelo con las tensiones inducidas del primario o con las del secundario.

En la Figura 4.1.2 se muestra el circuito magnético en valores reales del transformador trifásico de tres columnas.

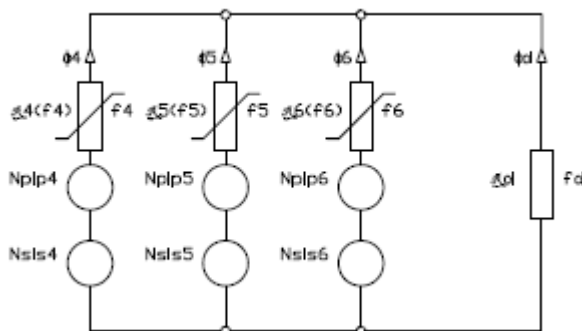


Figura 5.1.2. Circuito magnético del transformador de tres columnas.

Las ecuaciones que definen el comportamiento magnético del transformador trifásico de tres columnas se deducen del circuito anterior, resultando:

$$N_p i_{pq} + N_s i_{sq} = i_{mq} = f_q - f_d$$

$$\phi_4 + \phi_5 + \phi_6 + \phi_d = 0$$

$$q = 4,5,6$$

(Fórmula 5.2)

$N_p i_{pq}$ y $N_s i_{sq}$ son las fuerzas magneto motrices del devanado q del primario y del secundario.

i_{mq} es la corriente magnetizante del devanado q.

$f_q = R_q(f_q)\phi_q$ es el potencial magnético de la columna q del hierro, donde $R_q(f_q)$ es la reluctancia no lineal de dicha columna, que a su vez depende de f_q ,

$f_d = R_d \phi_d$ es el potencial magnético del circuito d. En esta topología de transformador, este circuito representa el circuito de dispersión que se cierra a través del aire, donde

R_d es la reluctancia lineal de dicho circuito, que posee un valor constante, y ϕ_d es el flujo de dispersión que circula por dicho circuito.

5.1.2. Ecuaciones en valores reducidos a pu

Puesto que en un transformador real no se suelen conocer los números de espiras de los devanados del primario, N_p , ni del secundario, N_s , no se puede trabajar en valores reales y se han de eliminar los números de espiras. Por otro lado, aunque se conocieran los números de espiras, siempre se suele

trabajar en valores reducidos, siendo la reducción más empleada la reducción a pu, cuyos valores base se muestran a continuación:

$$S_B = \frac{S_N}{3}$$

$$\omega_B = 1$$

$$U_{Bp} \begin{cases} U_{Np}/\sqrt{3} & \text{Estrella} \\ U_{Np} & \text{Triángulo} \end{cases}$$

$$U_{Bs} \begin{cases} U_{Ns}/\sqrt{3} & \text{Estrella} \\ U_{Ns} & \text{Triángulo} \end{cases}$$

$$I_{Bp} = \frac{S_B}{U_{Bp}}$$

$$I_{Bs} = \frac{S_B}{U_{Bs}}$$

$$Z_{Bp} = \frac{(U_{Bp})^2}{S_B}$$

$$Z_{Bs} = \frac{(U_{Bs})^2}{S_B}$$

$$L_{Bp} = \frac{Z_{Bp}}{\omega_B}$$

$$L_{Bs} = \frac{Z_{Bs}}{\omega_B}$$

$$\phi_B = \frac{U_{Bp}}{N_p \omega_B} = \frac{U_{Bs}}{N_s \omega_B}$$

$$R_B = \frac{N_p^2 \omega_B}{Z_{Bs}}$$

$$F_B = N_p I_{Bp} = N_s I_{Bs}$$

(Fórmula 5.3)

Variables Reales	u_{pq}, u_{sq}	i_{pq}, i_{sq}	R_p, R_s	L_{dp}, L_{ds}	i_{mq}
Variables Reducidas	u_{pq}^r, u_{sq}^r	i_{pq}^r, i_{sq}^r	r_p, r_s	l_{dp}, l_{ds}	i_{mq}^r

Tabla 4.1. Reducción de las variables presentes en el circuito eléctrico del transformador trifásico, con q = 4, 5, 6

Variables Reales	φ_q	Φ_d	f_q	f_d	R_q	R_d
Variables Reducidas	φ_q^r	φ_q^r	f_q^r	f_d^r	T_q	T_q

Tabla 4.2. Reducción de las variables presentes en el circuito magnético del transformador trifásico, con $q = 4, 5, 6$

Por lo tanto, las variables del circuito eléctrico de la figura 4.1.1 quedan reducidas como se muestra en la Figura 4.1.3 y las del circuito magnético de la Figura 4.1.2 quedan reducidas como se muestra en la Figura 4.1.4, teniendo en cuenta que, por simplicidad, se omiten los superíndices r en todas las variables reducidas.

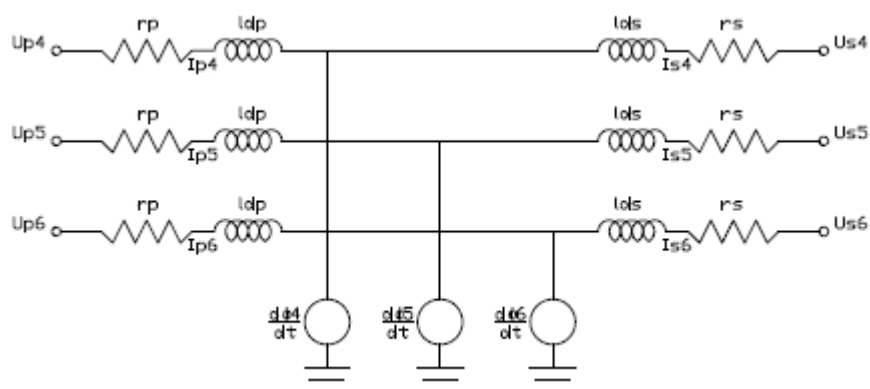


Figura 5.1.3. Circuito eléctrico reducido a pu del transformador trifásico con los devanados sin conectar

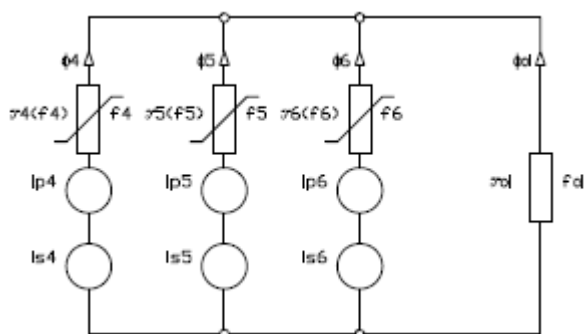


Figura 5.1.4. Circuito magnético reducido a pu del transformador de tres columnas

Por lo tanto, las ecuaciones reducidas que definen el comportamiento eléctrico del transformador trifásico son

$$u_{pq} = \left(r_p + l_{dp} \frac{d}{dt} \right) i_{pq} + \frac{d\phi_q}{dt}$$

$$u_{sq} = \left(r_s + l_{ds} \frac{d}{dt} \right) i_{sq} + \frac{d\phi_q}{dt}$$

$$\text{para } q = 4,5,6$$

(Fórmula 5.4)

y las que definen el comportamiento magnético del transformador de tres columnas son:

$$i_{pq} + i_{sq} = i_{mq} = f_q - f_d$$

$$\phi_4 + \phi_5 + \phi_6 + \phi_d = 0$$

$$q = 4,5,6$$

(Fórmula 5.5)

5.2. Modelo del transformador trifásico desconectado con núcleo lineal en régimen permanente

El comportamiento magnético del núcleo de un transformador puede definirse con diferentes grados de complejidad: desde considerarlo ideal (permeabilidad del núcleo infinita) hasta considerarlo no lineal (permeabilidad del núcleo no constante). En nuestro caso, al estar trabajando en la zona lineal de la máquina y no en saturación no la tendremos en cuenta.

Si se considera que las tres reluctancias del hierro (τ_4 , τ_5 y τ_6) son constantes, se tiene un sistema de ecuaciones lineal que, en caso necesario, permite aplicar el principio de superposición.

Como se comentó anteriormente independientemente de la construcción del transformador, el circuito eléctrico, siempre va a ser el mismo. El circuito magnético del transformador con núcleo lineal en régimen permanente se

puede obtener, igualmente del apartado anterior. Teniendolos en cuenta obtenemos los siguiente:

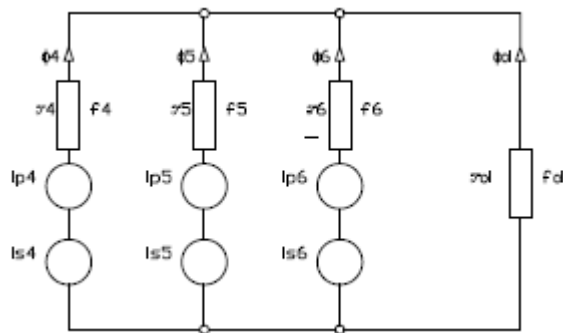


Figura 5.2.1. Circuito magnético reducido a pu en régimen permanente del transformador de tres y cinco columnas con núcleo lineal

El valor de la reluctancia reducida a pu de cada columna del núcleo del transformador puede obtenerse a partir de la expresión:

$$\tau_q(f_q^r) = \frac{1}{k_1 \left(1 + \left| \frac{f_q^r}{f_0^r} \right|^p \right)^{-1/p} + k_2}$$

(Fórmula 5.6)

Al considerar que la reluctancia es constante, hay que fijarse en la zona lineal de la curva de saturación de la Figura 4.1.6, es decir, en la zona donde $f \ll f_0$.

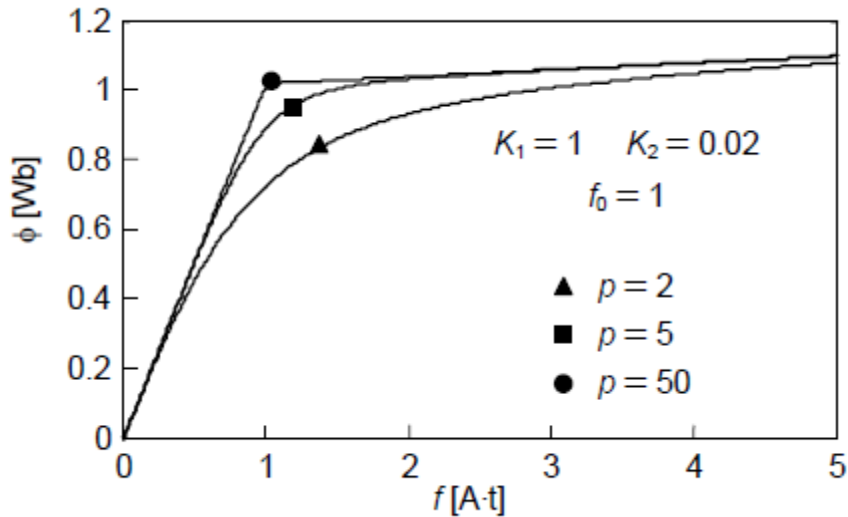


Figura 5.2.2. Curva de saturación de una columna cualquiera (relación $\phi - f$)

Por lo tanto, dicha reluctancia se calcula para una columna q cualquiera como=

$$\tau_q = \tau_q(f_q \ll f_0) \approx \frac{1}{k_1 + k_2}$$

(Fórmula 5.7)

Donde k_1 y k_2 se calculan:

$$k_1 = K_1 R_B = K_1 \frac{N_p^2 \omega_B}{Z_{Bp}}$$

$$k_2 = K_2 R_B = K_2 \frac{N_p^2 \omega_B}{Z_{Bp}}$$

(Fórmula 5.8)

Siendo R la reluctancia

Como puede observarse en la Figura 4.1.5, el circuito magnético para el transformador de tres y cinco columnas coincide, pero la expresión con la que se calcula la reluctancia del circuito d , τ_d , no es la misma, ya que dicho circuito para el transformador de tres columnas es el que se cierra a través del aire y para el transformador de cinco columnas es la agrupación de la cuarta y quinta

columnas del hierro. Por lo tanto, dicha reluctancia se calcula para el transformador de tres columnas como:

$$\tau_d \approx \frac{\omega^r}{3z_1 \left(\left[\frac{z_0}{z_1} \right]_{\text{estimado}} - 0.5 \right)} = \frac{\omega_N / \omega_B}{3z_1 \left(\left[\frac{z_0}{z_1} \right]_{\text{estimado}} - 0.5 \right)} = \frac{2\pi f_N / \omega_B}{3z_1 \left(\left[\frac{z_0}{z_1} \right]_{\text{estimado}} - 0.5 \right)}$$

(Fórmula 5.9)

z_1 es el módulo de la impedancia de secuencia directa reducida a pu que se ve desde el primario del transformador cuando el secundario está cortocircuitado y que coincide con la tensión relativa de cortocircuito, ϵ_{cc}

z_0 es el módulo de la impedancia de secuencia homopolar reducida a pu que se ve desde el primario del transformador estando el secundario en vacío.

$\left[\frac{z_0}{z_1} \right]_{\text{estimado}}$ es la relación entre el módulo de la impedancia homopolar y el de la impedancia directa, que suele variar entre 3 y 10 veces para esta topología de transformador, con el valor más pequeño para los transformadores de menor potencia y el valor mayor para los transformadores de mayor potencia.

f_N es la frecuencia nominal del transformador.

ω_B es la pulsación base en la reducción a pu.

Las ecuaciones que definen el comportamiento magnético en régimen permanente del transformador de tres columnas se obtienen a partir como

$$i_{pq} + i_{sq} = i_{mq} = f_q - f_d$$

$$\phi_4 + \phi_5 + \phi_6 + \phi_d = 0$$

$$q = 4,5,6$$

(Fórmula 5.10)

Las ecuaciones eléctricas y magnéticas de este modelo de transformador también pueden escribirse en forma matricial como en el apartado anterior,

pero ahora hay que considerar las reluctancias del hierro, con lo que el sistema se escribe como:

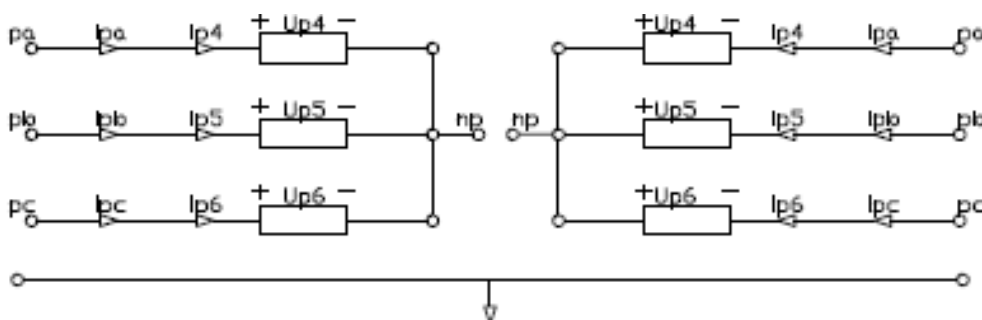
$$\begin{bmatrix} \underline{U}_{p4} \\ \underline{U}_{p5} \\ \underline{U}_{p6} \\ \underline{U}_{s4} \\ \underline{U}_{s5} \\ \underline{U}_{s6} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_{dp} & & & & & & & & \\ & \underline{Z}_{dp} & & & & & & & \\ & & \underline{Z}_{dp} & & & & & & \\ & & & 0 & & & & & \\ & & & & \underline{Z}_{ds} & & & & \\ & 0 & & & & \underline{Z}_{ds} & & & \\ & & & & & & \underline{Z}_{ds} & & \\ -1 & & & -1 & & & & & \\ & -1 & & & -1 & & & & \\ & & -1 & & & -1 & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j\omega \\ j\omega \\ j\omega \\ j\omega \\ j\omega \\ j\omega \\ \tau_4 + \tau_d & \tau_d & \tau_d \\ \tau_d & \tau_5 + \tau_d & \tau_d \\ \tau_d & \tau_d & \tau_6 + \tau_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{i}_{p4} \\ \underline{i}_{p5} \\ \underline{i}_{p6} \\ \underline{i}_{s4} \\ \underline{i}_{s5} \\ \underline{i}_{s6} \\ \underline{\phi}_4 \\ \underline{\phi}_5 \\ \underline{\phi}_6 \end{bmatrix}$$

Figura 4.1.7. Matriz de ecuaciones del sistema.

Este sistema de ecuaciones define el comportamiento eléctrico y magnético en régimen permanente del transformador de tres columnas desconectado y considerando que el núcleo es lineal. Las ecuaciones del banco de transformadores desconectado se pueden obtener imponiendo que $\tau_d = 0$.

5.3. El transformador trifásico con núcleo lineal conectado en régimen permanente. La matriz de conexión.

La matriz de conexión reducida a pu, c ,relaciona las tensiones reducidas de devanado ($\underline{U}_{p4}$, $\underline{U}_{p5}$, $\underline{U}_{p6}$, $\underline{U}_{s4}$, $\underline{U}_{s5}$, $\underline{U}_{s6}$) con las tensiones reducidas fase-tierra de la línea ($\underline{U}_{pa}$, $\underline{U}_{pb}$, $\underline{U}_{pc}$, $\underline{U}_{sa}$, $\underline{U}_{sb}$, $\underline{U}_{sc}$), y su transpuesta conjugada ($\underline{c}^T$)* relaciona las corrientes reducidas de devanado ($\underline{i}_{p4}$, $\underline{i}_{p5}$, $\underline{i}_{p6}$, $\underline{i}_{s4}$, $\underline{i}_{s5}$, $\underline{i}_{s6}$) con las corrientes reducidas de la línea ($\underline{i}_{pa}$, $\underline{i}_{pb}$, $\underline{i}_{pc}$, $\underline{i}_{sa}$, $\underline{i}_{sb}$, $\underline{i}_{sc}$).



TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

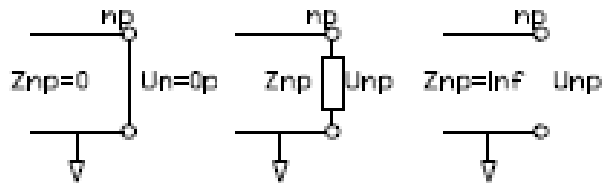


Figura 5.3.1. Conexiones en un transformador trifásico.

Las relaciones entre las tensiones y corrientes de devanado y las tensiones fase-tierra y las corrientes de la línea para las conexiones en Y-Y son:

$$\begin{bmatrix} \underline{u}_{p4} \\ \underline{u}_{p5} \\ \underline{u}_{p6} \\ \underline{u}_{s4} \\ \underline{u}_{s5} \\ \underline{u}_{s6} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ \hline & & & -1 & & \\ & 0 & & & -1 & \\ & & & & & -1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \underline{u}_{pa} \\ \underline{u}_{pb} \\ \underline{u}_{pc} \\ \underline{u}_{sa} \\ \underline{u}_{sb} \\ \underline{u}_{sc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \underline{u}_{np} \\ \underline{u}_{np} \\ \underline{u}_{np} \\ \underline{u}_{ns} \\ \underline{u}_{ns} \\ \underline{u}_{ns} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \underline{i}_{pa} \\ \underline{i}_{pb} \\ \underline{i}_{pc} \\ \underline{i}_{sa} \\ \underline{i}_{sb} \\ \underline{i}_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ \hline & & & -1 & & \\ & 0 & & & -1 & \\ & & & & & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{i}_{p4} \\ \underline{i}_{p5} \\ \underline{i}_{p6} \\ \underline{i}_{s4} \\ \underline{i}_{s5} \\ \underline{i}_{s6} \end{bmatrix}$$

Figura5.3.2. -Relación entre tensiones y corrientes.

$$\underline{u}^{\text{dev}} = c(\underline{u} - \underline{u}^n)$$

$$\underline{i} = (c^T)\underline{i}^{\text{dev}}$$

(Fórmula 5.11)

donde la matriz de conexión reducida a pu, c, y su transpuesta conjugada, (cT)*, son circulantes. Al ser ambas circulantes, pueden diagonalizarse

aplicándoles la transformación de Fortescue. Aplicando dicha transformación, resultan las relaciones en variables de secuencia (subíndice F) como

$$u_F^{dev} = c_F(u_F - u_F^n)$$

$$i_F = (c_F^T)^* i_F^{dev}$$

(Fórmula 5.12)

Luego, la ecuación de la figura 4.1.8. se puede escribir como:

$$\begin{bmatrix} \underline{u}_{p0}^{dev} \\ \underline{u}_{p1}^{dev} \\ \underline{u}_{p2}^{dev} \\ \underline{u}_{s0}^{dev} \\ \underline{u}_{s1}^{dev} \\ \underline{u}_{s2}^{dev} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ \hline & & & -1 & & \\ & 0 & & & 1\angle -60^\circ & \\ & & & & & 1\angle 60^\circ \end{bmatrix} \times \left(\begin{bmatrix} \underline{u}_{p0} \\ \underline{u}_{p1} \\ \underline{u}_{p2} \\ \underline{u}_{s0} \\ \underline{u}_{s1} \\ \underline{u}_{s2} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \underline{u}_{np} \\ 0 \\ 0 \\ \underline{u}_{ns} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \right)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{i}_{p0} \\ \underline{i}_{p1} \\ \underline{i}_{p2} \\ \underline{i}_{s0} \\ \underline{i}_{s1} \\ \underline{i}_{s2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & & & & & \\ & 1 & & & & \\ & & 1 & & & \\ \hline & & & -1 & & \\ & 0 & & & 1\angle 60^\circ & \\ & & & & & 1\angle -60^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{i}_{p0}^{dev} \\ \underline{i}_{p1}^{dev} \\ \underline{i}_{p2}^{dev} \\ \underline{i}_{s0}^{dev} \\ \underline{i}_{s1}^{dev} \\ \underline{i}_{s2}^{dev} \end{bmatrix}$$

Figura 5.3.3. Matriz formulada en variables de secuencia.

5.4. El transformador trifásico en régimen permanente desequilibrado

El transformador trifásico se diseña para trabajar en régimen senoidal y en condiciones equilibradas (sistema simétrico de tensiones en el primario y carga equilibrada en el secundario). En este caso, los flujos de las tres fases son senoidales y la suma de ellos es nula.

Sin embargo, los armónicos de la corriente magnetizante pueden provocar que los flujos y las tensiones no sean senoidales. Esta situación

depende de la conexión de los devanados y de la topología del circuito magnético. Por otro lado, muchos transformadores trifásicos trabajan en régimen desequilibrado, generalmente porque las cargas que alimentan no son equilibradas y, con menor frecuencia, porque las tensiones de alimentación no son simétricas y/o equilibradas. El comportamiento del transformador en estas condiciones también depende de la conexión de los devanados y de la topología del circuito magnético.

5.4.1. Funcionamiento en régimen desequilibrado

Para resolver numéricamente un problema general de un transformador trifásico en condiciones desequilibradas hay que resolver el sistema de ecuaciones compuesto por:

Las ecuaciones eléctricas y las ecuaciones magnéticas del transformador.

Las restricciones debidas a las conexiones de ambos devanados.

Las ecuaciones de la alimentación y de la carga.

El transformador trifásico se puede modelizar con diferentes grados de complejidad, en este caso considerando que el hierro es lineal.

Está claro que cuanto mayor es la complejidad del modelo del transformador mejores son los resultados obtenidos. Pero cabe decir, que para realizar un estudio en condiciones desequilibradas es crucial la topología del circuito magnético, puesto que es posible que el flujo neto no sea nulo, a diferencia de lo que sucede en condiciones equilibradas.

Debido a la topología del transformador de tres de columnas, que fuerza que la suma de flujos en cada instante sea muy pequeña (flujo homopolar pequeño), es apropiada su utilización en cualquier tipo de conexión de los devanados del primario y del secundario, excepto en la conexión Yyn cuando la carga está muy desequilibrada.

Se pueden analizar las conexiones Yyn e Yy, en las que la utilización del banco de transformadores no era apropiada, en el transformador de tres columnas de la siguiente manera:

Conexión Yyn: si la carga está poco desequilibrada, el neutro prácticamente no se desplaza. Si la carga está muy desequilibrada, el neutro se desplaza, aunque no tanto como para que el transformador se sature.

Conexión Yy: prácticamente elimina el tercer armónico de flujo motivado por la ausencia de tercer armónico de corriente magnetizante. Por ello, los flujos y las tensiones son prácticamente senoidales.

5.4.2. Centro de gravedad del sistema de tensiones trifásico

En un sistema trifásico de tensiones se pueden definir dos propiedades geométricas que lo caracterizan: la simetría y el equilibrio de dicho sistema. Para comprobar estas propiedades se debe dibujar un diagrama fasorial de las tensiones, es decir, un diagrama que contenga tanto las tensiones sencillas (U_{AN} , U_{BN} y U_{CN}) como las tensiones compuestas (U_{AB} , U_{BC} y U_{CA}).

Si las tensiones compuestas forman un triángulo equilátero, (es decir, si los módulos de las tensiones compuestas son iguales), se dice que el sistema de tensiones es simétrico y, en caso contrario, asimétrico.

En el centro de gravedad (cdg) del triángulo ABC que forman las tensiones compuestas la suma de las tensiones sencillas es nula, entonces, si el neutro del sistema coincide con el cdg de dicho triángulo, se dice que el sistema de tensiones es equilibrado, y en caso contrario, desequilibrado

$$N \equiv G \rightarrow U_{AN} + U_{BN} + U_{CN} = 0 \text{ Equilibrado}$$

$$\frac{N}{\equiv G} \rightarrow U_{AN} + U_{BN} + U_{CN} \neq 0 \text{ Desequilibrado}$$

(Fórmula 5.13)

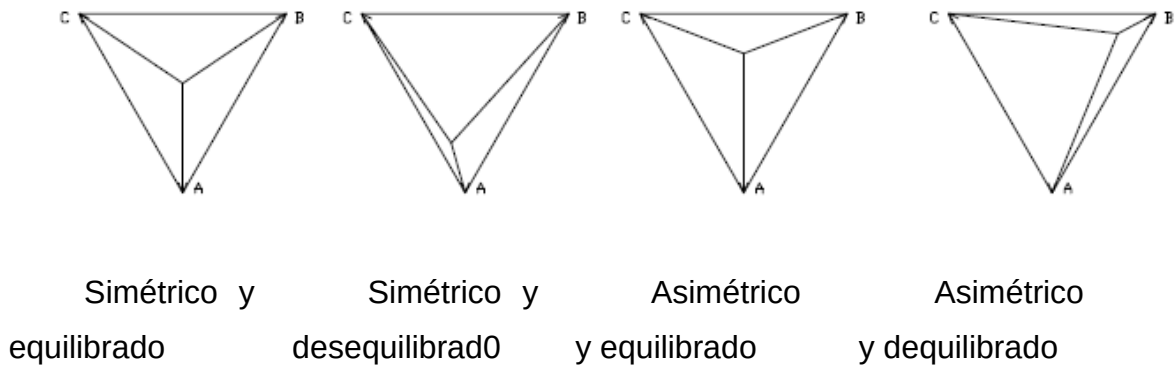


Figura 5.4.1. Sistemas de tensión trifásicos

5.4.3. Componentes simétricas

Fortescue desarrolló el método de las componentes simétricas con el objetivo de facilitar el estudio de sistemas polifásicos desequilibrados mediante la transformación de éstos en el sumatorio de sistemas polifásicos equilibrados.

La matriz de transformación de Fortescue y su inversa se definen como:

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

$$F^{-1} = \frac{1}{3} F^* = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

$$\text{Siendo } a = e^{j2\pi/3}$$

(Fórmula 5.14)

Al aplicar la inversa de dicha transformación sobre cualquier magnitud de un sistema trifásico (tensiones, corrientes, flujos, etc.) en variables de fase (A, B, C), ésta la convierte en variables de secuencia (0, 1, 2), es decir, variables de secuencia homopolar (0), directa (1) e inversa (2). Entonces, si en régimen permanente se cuenta con una magnitud trifásica cualquiera (x) en variables de fase que representa alguna de las magnitudes explicadas, se puede convertir en variables de secuencia (x_F) como:

$$x_F = F^{-1}X \rightarrow \begin{bmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_A \\ x_B \\ x_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} x_A + x_B + x_C \\ x_A + ax_B + a^2x_C \\ x_A + a^2x_B + ax_C \end{bmatrix}$$

(Fórmula 5.15)

Obsérvese que en el caso particular de que $x_A = x_B = x_C$ únicamente existiría la componente homopolar x_0 , ya que el término $1 + a + a^2$ que aparecería en la componente directa x_1 e inversa x_2 es nulo. Obsérvese también, que en el caso de tener unas magnitudes fasoriales simétricas y equilibradas ($x_A, x_B = a^2 x_A, x_C = a x_A$), únicamente existiría la componente directa x_1 , en este caso de valor $x_1 = x_A$.

Se puede saber si un sistema de tensiones trifásico U_{AN}, U_{BN} y U_{CN} es equilibrado calculando la tensión homopolar U_0 :

$$U_0 = \frac{1}{3}(U_{AN} + U_{BN} + U_{CN})$$

(Fórmula 5.16)

Si no existe dicha tensión, el sistema es equilibrado; en caso contrario, es desequilibrado. También se puede comprobar fácilmente que la tensión homopolar es la tensión entre el cdg (G) y el neutro (N):

$$U_0 = U_{GN}$$

(Fórmula 5.17)

Una magnitud a tener en cuenta en un transformador trifásico es el flujo homopolar. En este caso, al no ser siempre senoidal, se generaliza su cálculo como

$$\phi_0(t) = \frac{1}{3}(\phi_A(t) + \phi_B(t) + \phi_C(t))$$

(Fórmula 5.18)

Este flujo puede aparecer en condiciones desequilibradas, desplazando el neutro de las conexiones en estrella (Y) y dando lugar a sistemas desequilibrados.

El uso de la transformación de Fortescue se fundamenta en el hecho de que dicha transformación diagonaliza matrices circulantes. Una matriz Z es circulante si se cumple:

$$Z_{\text{circulante}} \leftrightarrow Z = \begin{bmatrix} Z_A & Z_B & Z_C \\ Z_C & Z_A & Z_B \\ Z_B & Z_C & Z_A \end{bmatrix}$$

(Fórmula 5.19)

Por lo tanto, si en régimen permanente se tiene una matriz Z circulante en variables de fase, que podría ser una matriz de impedancias, y se le aplica la transformación de Fortescue, se obtiene una matriz Z_F en variables de secuencia como

$$\begin{aligned} Z = \begin{bmatrix} Z_A & Z_B & Z_C \\ Z_C & Z_A & Z_B \\ Z_B & Z_C & Z_A \end{bmatrix} &\rightarrow Z_F = F^{-1}ZF \\ &= \begin{bmatrix} Z_A + Z_B + Z_C & 0 & 0 \\ 0 & Z_A + a^2Z_B + Z_C & 0 \\ 0 & 0 & Z_A + aZ_B + a^2Z_C \end{bmatrix} \end{aligned}$$

(Fórmula 5.20)

Esta propiedad permite que un sistema trifásico con alimentación senoidal desequilibrada, cuya matriz de impedancias Z sea circulante, se pueda estudiar como tres sistemas trifásicos equilibrados.

5.4.4. Topología del circuito magnético

El circuito magnético puede influir en el funcionamiento del transformador en condiciones desequilibradas porque puede imponer, o no, una restricción a los flujos de las tres columnas. En concreto, al considerar los tres tipos de transformadores trifásicos:

El circuito magnético del transformador de tres columnas fuerza que la suma de los flujos en cada instante sea nula. En realidad, la suma de flujos en un transformador real de tres columnas no es estrictamente nula, debido al flujo que se cierra a través del aire o a través de la armadura. Sin embargo, este flujo es pequeño porque este circuito magnético tiene una elevada reluctancia magnética. Este flujo también se denomina de dispersión. En resumen, en caso de existir flujo homopolar en un transformador de tres columnas, es de valor muy pequeño.

5.4.5. La corriente magnetizante y su contenido armónico

Para que se establezca el flujo magnético en el núcleo de un transformador, éste debe consumir una cierta intensidad que se suele denominar corriente de vacío, $i_0(t)$, porque coincide aproximadamente con la corriente que consume el transformador cuando está en vacío. Dicha corriente de vacío se calcula en un transformador trifásico para cada devanado k como:

$$i_{0k}(t) = N_p i_{pk}(t) + N_s i_{sk}(t)$$

Siendo $k = a, b, c$

(Fórmula 5.21)

$i_{pk}(t)$ e $i_{sk}(t)$ son las corrientes del primario y del secundario del devanado k , y N_p y N_s son el número de espiras de los devanados del primario y del secundario.

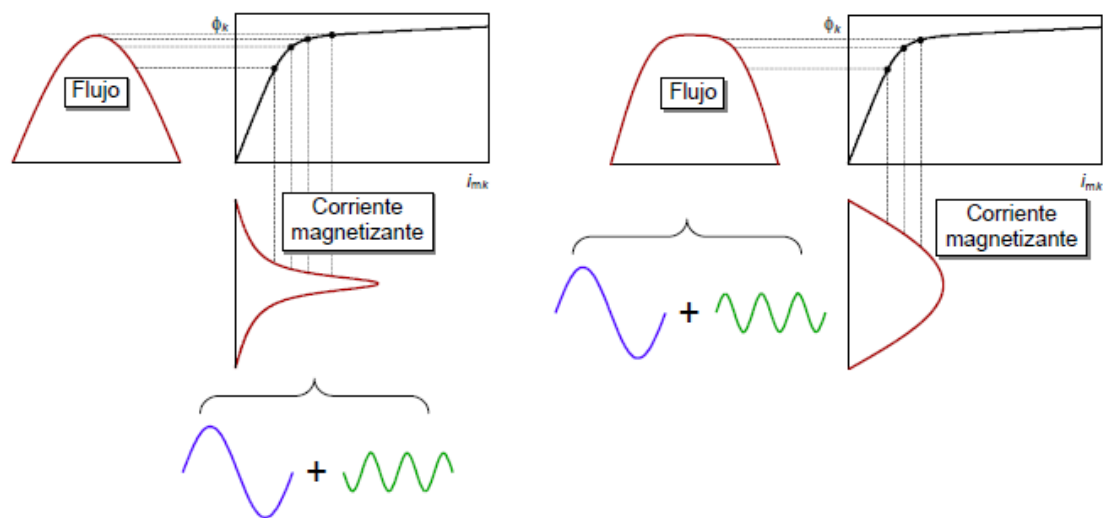
Una pequeña parte de la corriente de vacío se debe a las pérdidas del núcleo, $i_{Fe}(t)$, pero la mayor parte es la que, propiamente hablando, crea el flujo magnético. Es la denominada corriente magnetizante, $i_m(t)$. Dicha corriente magnetizante se calcula en un transformador trifásico para cada devanado k como:

$$i_{mk}(t) = i_{0k}(t) - i_{Fe}(t) \approx i_{0k}(t) = N_p i_{pk}(t) + N_s i_{sk}(t)$$

Siendo $k = a, b, c$

(Fórmula 5.22)

La corriente magnetizante de un transformador real no es senoidal, y su contenido armónico puede ser causa de un mal funcionamiento del mismo. Dicha corriente magnetizante no es senoidal porque los transformadores se diseñan para trabajar cerca del codo de la curva B-H (o ϕ - i_m), por lo que están ligeramente saturados. Si la tensión de alimentación es senoidal, el flujo también lo es y, por lo tanto, la corriente magnetizante (y la de vacío) presenta la típica forma de campana que se muestra en la figura.



(a) tercer armónico en la corriente como consecuencia de que el flujo es senoidal.

(b) tercer armónico en el flujo como consecuencia de que la corriente magnetizante es senoidal

Figura 5.4.2. Relación entre el flujo en el hierro y la corriente magnetizante en una columna k del transformador trifásico con hierro no lineal.

En el espectro armónico de esta corriente magnetizante destacan la onda fundamental y un alto contenido del tercer armónico, que puede variar entre el 10% y el 60%, mientras que la amplitud del resto de armónicos es mucho menor y, por lo tanto, no se suelen considerar.

Si, por el contrario, se tuviera una corriente magnetizante senoidal, entonces quien tendría el contenido del tercer armónico sería el flujo y, por lo tanto, las tensiones inducidas en ambos devanados también tendrían un tercer armónico.

5.5. Características de las máquinas

Transformador

Características:

Marca: Sepsa

Conexión YY0

Nº Serie: 31254

Tipo: T

Potencia: 5KVA

Servicio: DB

Frecuencia: 50Hz

Fases: 3

Tensión
380±5±10%V

Primaria:

Intensidad secundaria: 13,1A

Tensión Secundaria: 220-127V

Motor

Características:

Marca: ABB

Nº Serie: 3GE11820002973

Potencia: 3kW

Frecuencia: 50/60Hz

Tensiones de operación: 230V Δ / 400 Y / 460 Y

Intensidades de operación: 10,9 Δ / 8,8 Y / 5,9 Y@460V

Cos ϕ : 0,79 Δ / 0,79 Y / 0,8 Y@460V

Configuración empleada:

Frecuencia: 50Hz

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

Tensiones de operación: 400 Y

Intensidades de operación: 8,8 Y

Cosφ: 0,79 Y

Autotransformador

Características:

Marca: Sepsa

Conexión Auto

Nº Serie: 31298

Tipo: T

Potencia: 5KVA

Servicio: DB

Frecuencia: 50Hz

Fases: 3

Tensión Primaria: 220-127V

Intensidad secundaria: 7,61 a
19,25A

Tensión Secundaria: 150 a
380V

Resistencias

Características:

Marca: LANGLOIS

Potencia: 5kW

Frecuencia: 50Hz o CC

Tensiones de operación: 230V Monofásica / 230V Δ / 400 Y

Intensidades de operación: 17,4A Monofásica 10A Δ / 5,77A Y

Escalonado: 5%

Inductancias

Características:

Marca: DELORENZO

Modelo: DL 1017L

Potencia: 3X300VAR

Frecuencia: 50Hz

Tensiones de operación: 220V Δ / 380 Y

Intensidades de operación: 3,9A Δ / 2,3A Y

Nº Escalones: 7

Condensadores

Características:

Marca: MEDELEC

Nº Serie: Oct-002 nº128

Potencia: 3X300VAR

Frecuencia: 50Hz

Tensiones de operación: 220V Δ / 380 Y

Intensidades de operación: 17,75A Δ / 9,1A Y

Escalonamiento: 500VAR

Variador de frecuencia

Características:

Marca: ABB

Modelo: ACS550-01-08A8-4

Alimentación: Trifásica.

Tensión entrada: 380V~480V

Frecuencia entrada: 48~63Hz

Intensidad nominal: 8.8A

Salida: Trifásica

Tensión salida: 0... V_1

Frecuencia de salida: 0...500Hz

Vatímetro

Características:

Marca: Chauvin-Arnoux

Modelo: Metrix PX120

Naturaleza de las redes: Monofásica y Trifásica 3 cables equilibrado (T3FE)

Número de puntos: 3 líneas de 4 dígitos

Ancho de banda: de c.c. a 1 kHz

Potencia activa:

Escalas: 10 W a 1 kW - 1 kW a 6 kW

Resolucion: 0,1 W – 1 W

Precisión básica en c.a. / c.c.: 1%L ± 2D / 2%L ± 3D

Potencia aparente, reactiva

Escalas: 10* a 1 k* - 1 k* a 6 k*

Resolución / Precisión básica: 0,1* - 1* / 2%L ± 2D

Factor de Potencia

Alcance: 1,00

Resolución: 0,01 / 3%L ± 2D

Tensión

Alcance: 0,5 a 600 V RMS

Resolución: 100 mV

Precisión básica en c.a. / c.c.: 0,5%L ± 2D / 1%L ± 3D

Impedancia de entrada: 1 MΩ

Corriente

Escalas: 10 mA a 2 A - 2 A a 10 A RMS

Resoluciones: 1 mA – 10 mA

Precisión básica en c.a. / c.c.: 0,5%L ± 2D / 1%L ± 3D

Multímetro

Características:

Marca: Amprobe

Modelo: 33XR-A

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

Tensión: 1000V CC / 750V CA

Intensidad: 10A CC/CA

Frecuencia: HASTA 40MHz

Resistencia: 4MΩ

Medidor continuidad: Si

Analizador de redes

Características:

Marca: Fluke

Modelo: 434

Tensión:Vrms:1 V a 1000 V fase a neutro. Resolución: 0,1 V

Intensidad: 0,5 A a 200 A (CA sólo). Resolución: 0,1A

Frecuencia: 42,50 Hz a 57,50 Hz. Resolución: 0,01 Hz

Potencia: Vatios (VA, var) máx. 6000 MW. Resolución: 0,1 W a 1 MW

Factor de Potencia: 0 a 1 Resolución: 0,001

Armónicos: 0,0% a 100%. Resolución: 0,10%

Angulo de fase: -360° a 0°. Resolución: 1°

Medidor RLC

Características:

Marca: Promax

Modelo: MZ-505B

Pantalla: L/C/R Visualización máxima 19999 cuentas 4 ½ dígitos.

Rangos de medición:

C (120 Hz) 1 pF ~ 10 mF (precisión básica 0,8 %).

C (1 kHz) 0,1 pF ~ 1000 μ F (precisión básica 0,8 %).

L (120 Hz) 1 μ H ~ 10000 H (precisión básica 0,7 %).

L (1 kHz) 0,1 μ H ~ 1000 H (precisión básica 0,7 %).

R 1 m Ω ~ 10 M Ω (precisión básica 0,5 %).

Resolución.

R Hasta 0,001 Ω

L Hasta 0,1 μ H.

C Hasta 0,1 pF.

Modalidad de escala: Auto y manual.

Terminales de medida: 2 terminales con zócalo.

Frecuencias de prueba: 1 KHz, 120 Hz $\pm$ 0,1 %.

Modo tolerancia: 1 %, 5 %, 10 %, 20 %.

Régimen de medición: 1 medición x segundo, nominal.

Tiempo de respuesta: Aprox. 1 segundo en la escala manual.

5.6. Montajes.

En este apartado se explica cada uno de los montajes para las experiencias que se han llevado a cabo en el estudio.

Ensayo Corriente de conexión.

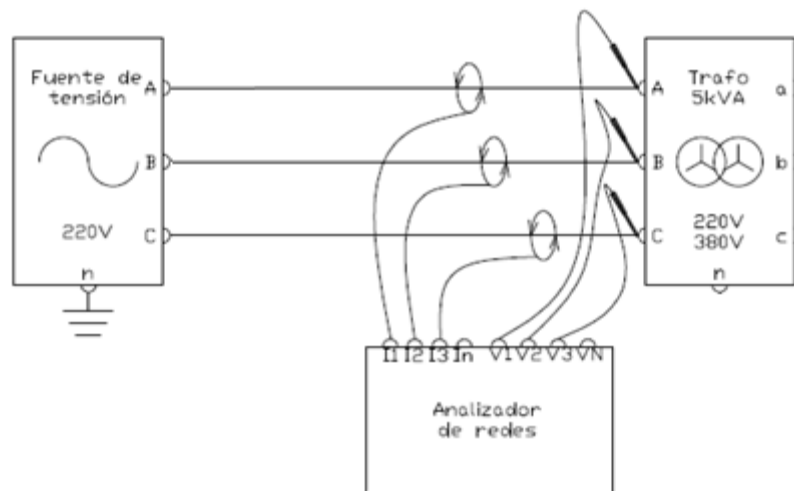


Figura 5.6.1. Ensayo de corriente de conexión.

En este ensayo y valiéndonos del analizador de redes observamos el pico de corriente que se produce al conectar en vacío el transformador a la red.

Ensayo de vacío.

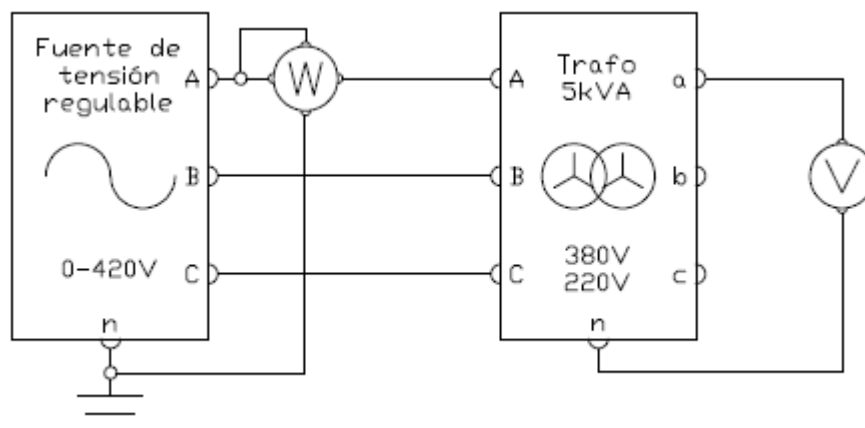


Figura 5.6.1. Ensayo de vacío.

El ensayo de vacío se llevó a cabo con el transformador en modo reductor, se procedió conectando la máquina a una fuente de tensión regulable y se fue aumentando la tensión en un 10% hasta el 120% de su tensión asignada.

Para la toma de datos se utilizó un watímetro de la marca METRIX como el recogido en el apartado anterior y un multímetro como el especificado anteriormente para medir la tensión en el secundario.

Ensayo de cortocircuito.

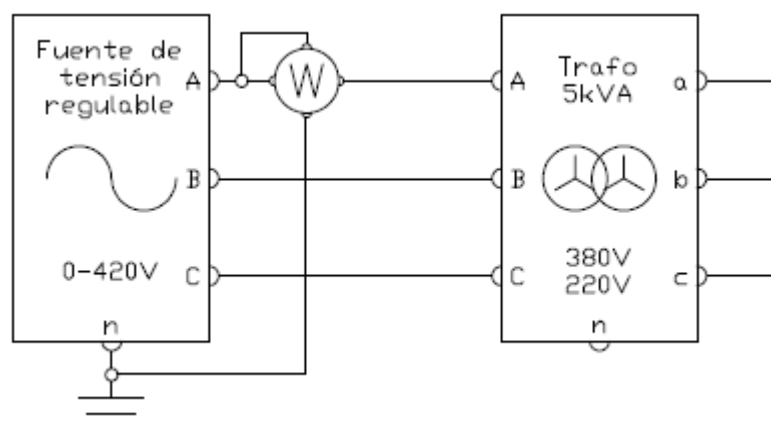


Figura 5.6.2. Ensayo de cortocircuito.

El ensayo en cortocircuito se llevó a cabo con el transformador en modo reductor, se procedió conectando la máquina a una fuente de tensión regulable y se fue aumentando la tensión gradualmente para que la intensidad aumentara en escalones del 10% hasta la tensión asignada.

Para la toma de datos se utilizó un watímetro de la marca METRIX como el recogido en el apartado anterior.

Ensayo con carga resistiva.

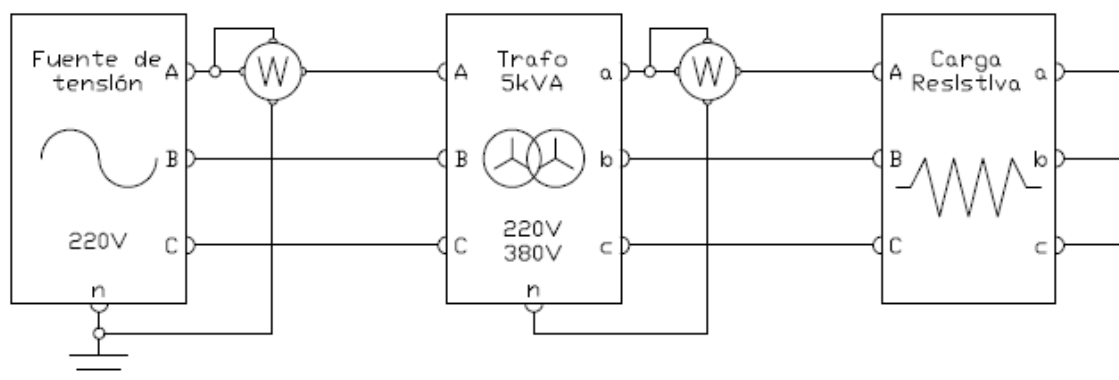


Figura 5.6.3. Ensayo con carga resistiva pura.

Para el ensayo en carga, con carga resistiva pura se utilizó el grupo de resistencias expuesto anteriormente y se llevó a cabo elevando la carga en escalones del 5% hasta el 100% de la carga soportada por el grupo de resistencias. En esta ocasión el transformador se conectó a una fuente de tensión de 220V y se utilizó como elevador. Esta decisión vino motivada por la necesidad de utilizar en los ensayos con motores el variador de velocidad, el cual ineludiblemente debía funcionar a 380V. Para obtener homogeneidad en la toma de datos y ahorrar en cálculos todas las tomas de datos se llevaron a cabo de la misma manera.

Para el registro de datos se utilizaron 2 vatímetros de la marca METRIX y se registraron sus valores. No se conectó el analizador de redes, ya que los resultados que podía ofrecer no eran lo suficientemente interesantes.

Ensayo con carga inductiva pura.

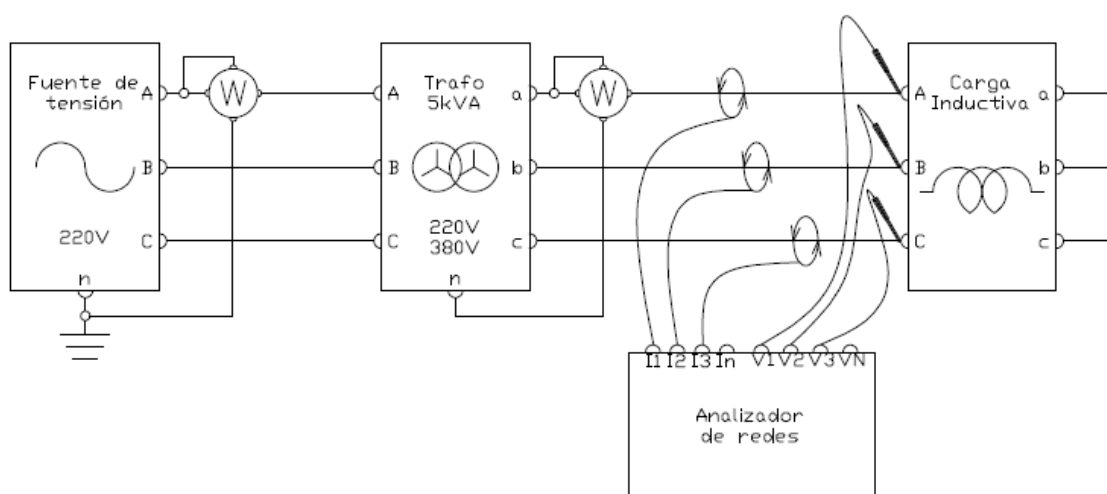


Figura 5.6.4. Ensayo con carga inductiva pura.

Para el ensayo en carga, con carga inductiva pura, el transformador se configuró como elevador y se utilizaron distintos tipos de cargas con el fin de conseguir elevar la potencia en la máquina, para ello se dispusieron un total de 3 grupos de resistencias de marca DELORENZO las cuales se fueron añadiendo progresivamente en paralelo y un motor de marca ABB y potencia nominal 3kW en vacío.

Para el registro de datos se utilizaron 2 vatímetros de la marca METRIX y se registraron sus valores. El analizador de redes se dispuso entre el segundo vatímetro y las cargas con el fin de registrar los datos del transformador.

Ensayo con carga capacitiva pura.

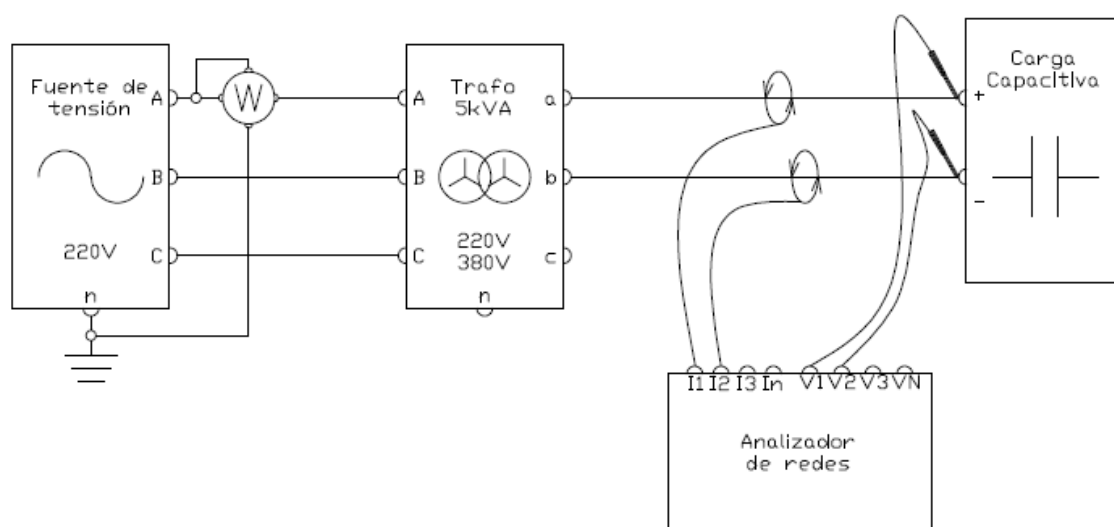


Figura 5.6.4. Ensayo con carga capacitiva pura.

Para el ensayo en carga, con carga capacitiva pura se utilizó el transformador como elevador y el grupo de condensadores expuesto anteriormente. Para llevar a cabo la experiencia, se elevó la carga en escalones de 500W hasta 4500W, vigilando en todo momento que la sobretensión producida no provocase daños en la máquina.

Para el registro de datos se utilizaron 2 vatímetros de la marca METRIX y se registraron sus valores. El analizador de redes se dispuso entre el segundo vatímetro y las cargas con el fin de registrar los datos del transformador.

Ensayo motor con variador de frecuencia.

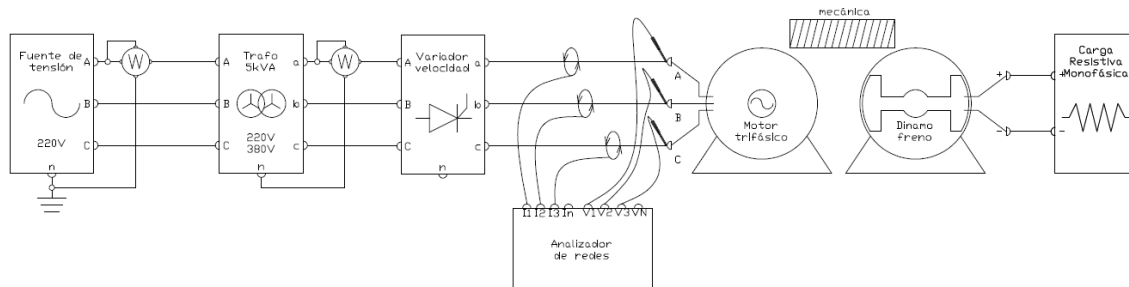


Figura 5.6.5. Ensayo con motor asíncrono y variador de frecuencia.

El ensayo de motores como se puede observar en el diagrama, fue el mas complejo de ejecutar, y el más exigente en cuanto a medios. Por las características del variador de velocidad, el cual solo es capaz de funcionar en un rango de tensiones entre 360 y 420V el transformador fue usado como elevador. Para ello, se conectó a una fuente de tensión a 220V, y se conectó su secundario el citado variador, tras el cual se dispuso el analizador de redes. Esto posibilitó la obtención de datos fiable con respecto a la entrega de armónicos del mismo.

Para exigir potencia a la máquina de nuestro estudio, se configuró un montaje que constaba de un motor de 3kW de la marca ABB, una dinamo freno y un grupo de resistencias para pedir potencia a dicha dinamo.

El motor se unió mecánicamente a la dinamo freno, y en la dinamo se fue elevando el régimen de carga. Debido a la complejidad de despejar los datos de pérdidas en las distintas máquinas y por quedar fuera de nuestro interés, los escalones de potencia se establecen respecto a la exigencia registrada en nuestra máquina y no en la dinamo ni en el motor.

Ensayo de motor sin variador de frecuencia.

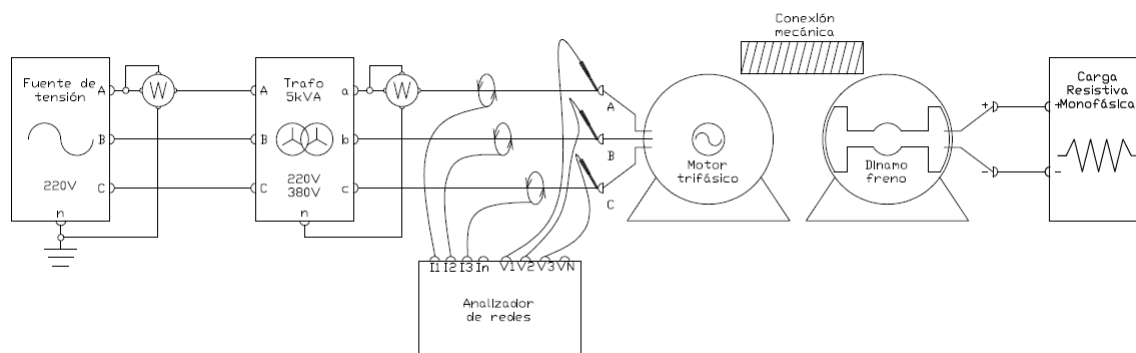


Figura 5.6.6. Ensayo con motor asíncrono sin variador de frecuencia.

Al ensayar el motor quedando fuera el variador de frecuencia, se repite el montaje y se elimina el variador de velocidad. Para poder tener una visión mas sencilla de los datos el transformador se mantiene como elevador en todo momento. El analizador de redes se dispuso en el mismo lugar que en el ensayo anterior para poder comparar la carga de armónicos del mismo.

Para la cargar nuestra máquina se utilizó el mismo montaje expuesto anteriormente. El motor se unió mecánicamente a la dinamo freno, y en la dinamo se fue elevando el régimen de carga. Igualmente los escalones de potencia serán los obtenidos a la salida del transformador y nunca los del motor o la dinamo freno.

Ensayo con carga desequilibrada resistiva Fase-Fase.

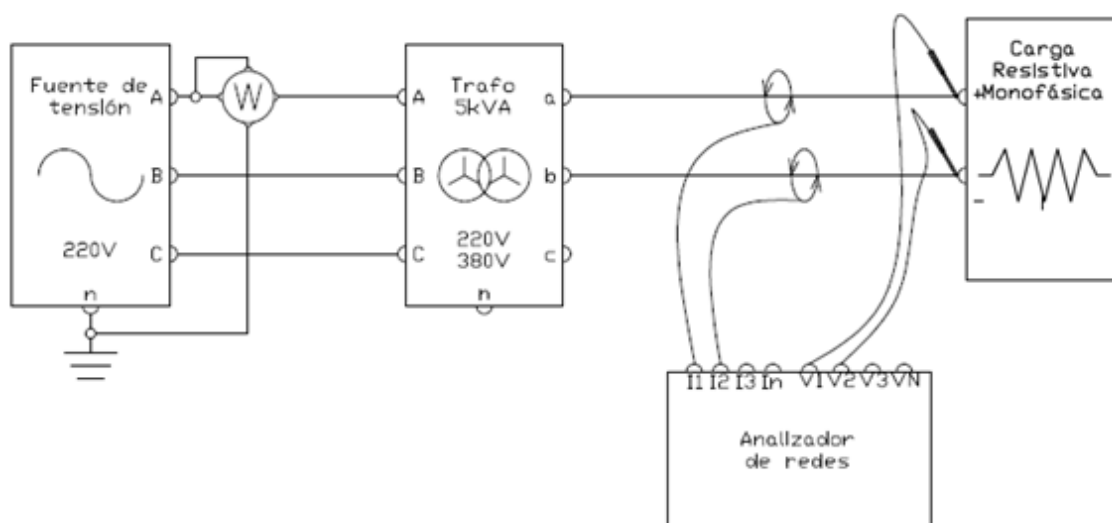


Figura 5.6.7. Ensayo con carga desequilibrada resistiva fase fase.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

Con el transformador funcionando como elevador, y la resistencia configurada para funcionar en monofásico, conectamos la resistencia entre las fases A y B y vamos elevando la potencia y observando los datos obtenidos. Para ver el comportamiento de las distintas fases se utiliza el analizador de redes, tal como muestra la figura.

Ensayo con carga desequilibrada resistiva Fase-Neutro.

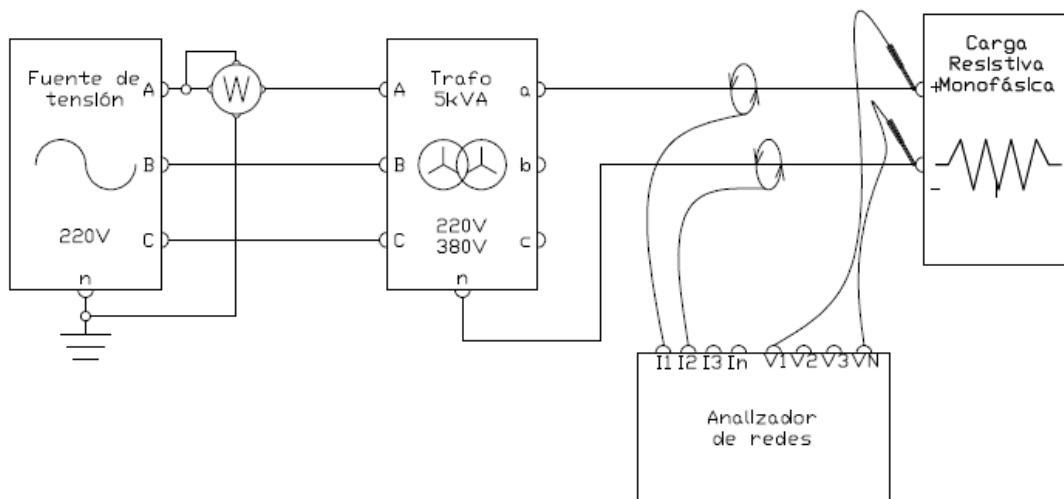


Figura 5.6.8. Ensayo con carga desequilibrada resistiva fase neutro

Con el transformador funcionando como elevador, y la resistencia configurada para funcionar en monofásico, conectamos la resistencia entre las fases A y el neutro de nuestro transformador y vamos elevando la potencia y observando los datos obtenidos. Para ver el comportamiento de las distintas fases se utiliza el analizador de redes, tal como muestra la figura.

Ensayo con carga desequilibrada inductiva Fase-Fase.

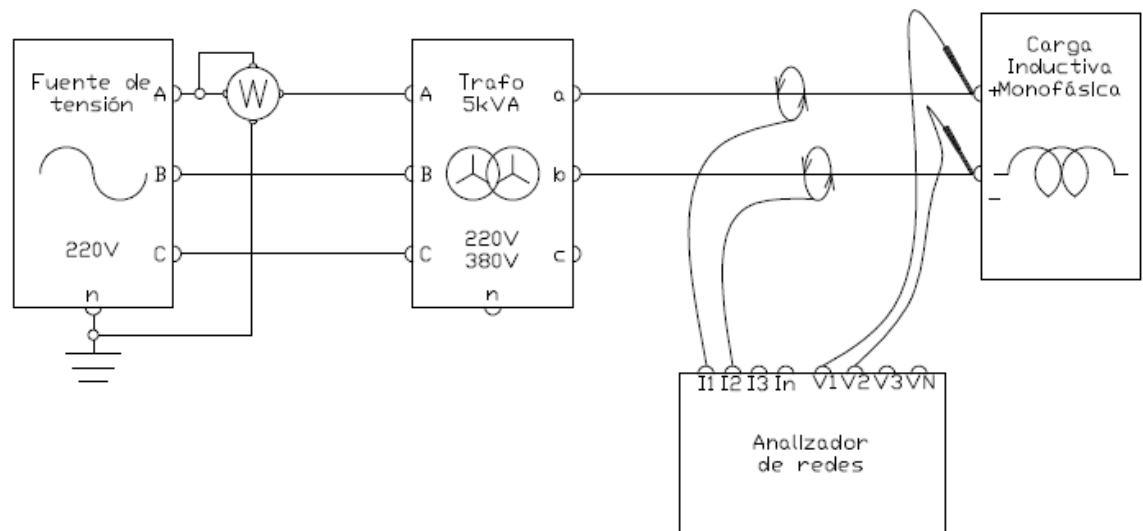


Figura 5.6.9. Ensayo con carga desequilibrada inductiva fase fase.

Con el transformador funcionando como elevador, y la reactancia configurada para funcionar en monofásico, conectamos la resistencia entre las fases A y B de nuestro transformador y vamos elevando la potencia y observando los datos obtenidos. Para ver el comportamiento de las distintas fases se utiliza el analizador de redes, tal como muestra la figura.

Ensayo con carga desequilibrada inductiva Fase-Neutro.

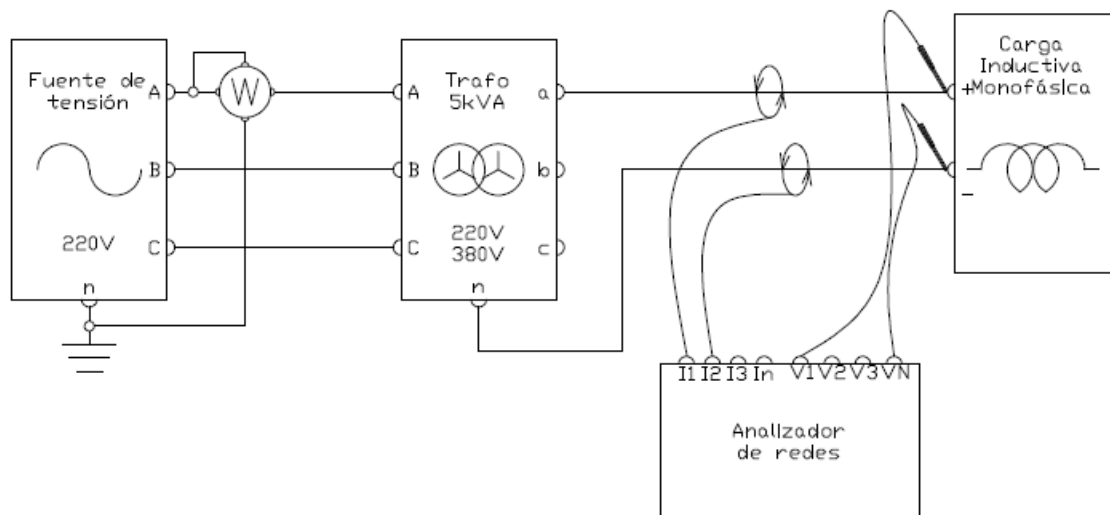


Figura 5.6.10. Ensayo con carga desequilibrada inductiva fase neutro.

Con el transformador funcionando como elevador, y la reactancia configurada para funcionar en monofásico, conectamos la resistencia entre las

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

fases A y el neutro de nuestro transformador y vamos elevando la potencia y observando los datos obtenidos. Para ver el comportamiento de las distintas fases se utiliza el analizador de redes, tal como muestra la figura.

Ensayo con carga desequilibrada capacitiva Fase-Fase.

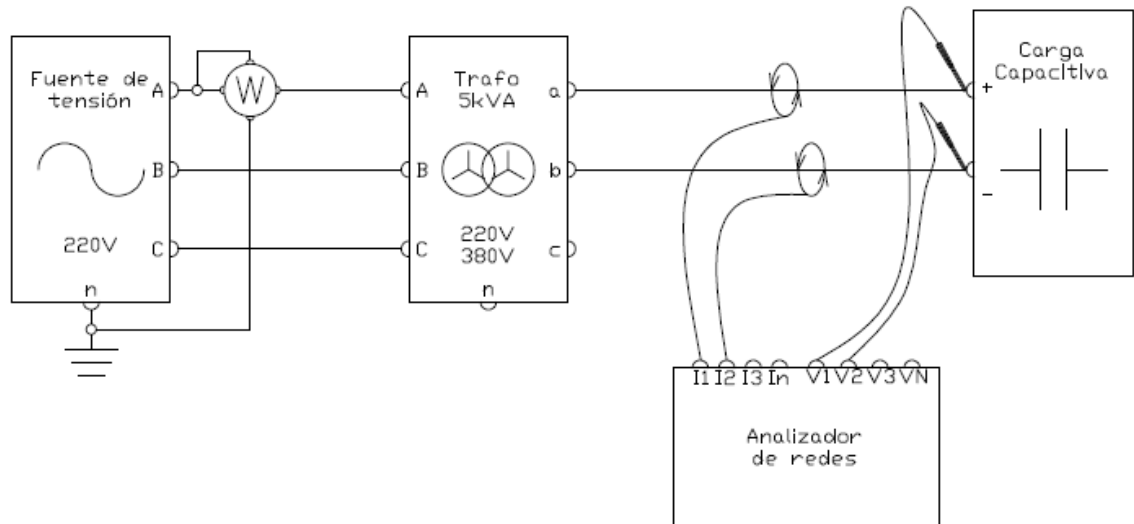


Figura 5.6.11. Ensayo con carga desequilibrada capacitiva fase fase.

Con el transformador funcionando como elevador, y la reactancia configurada para funcionar en monofásico, conectamos la resistencia entre las fases A y B de nuestro transformador y vamos elevando la potencia y observando los datos obtenidos. Para ver el comportamiento de las distintas fases se utiliza el analizador de redes, tal como muestra la figura.

Ensayo con carga desequilibrada capacitiva Fase-Neutro.

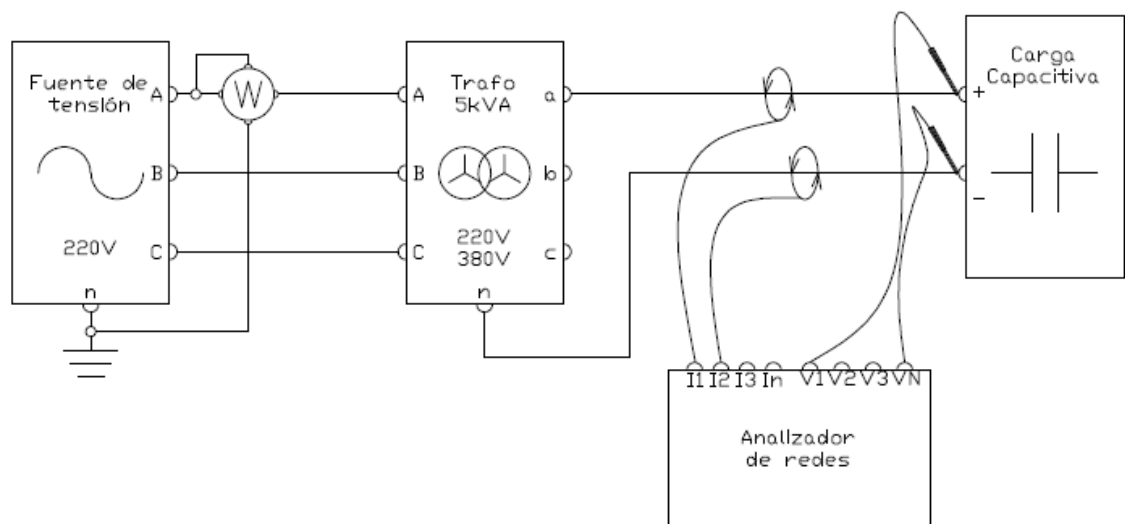


Figura 5.6.12. Ensayo con carga desequilibrada capacitiva fase neutro.

Con el transformador funcionando como elevador, y la reactancia configurada para funcionar en monofásico, conectamos la resistencia entre las fases A y el neutro de nuestro transformador y vamos elevando la potencia y observando los datos obtenidos. Para ver el comportamiento de las distintas fases se utiliza el analizador de redes, tal como muestra la figura.

Ensayo con carga desequilibrada RL Fase-Fase.

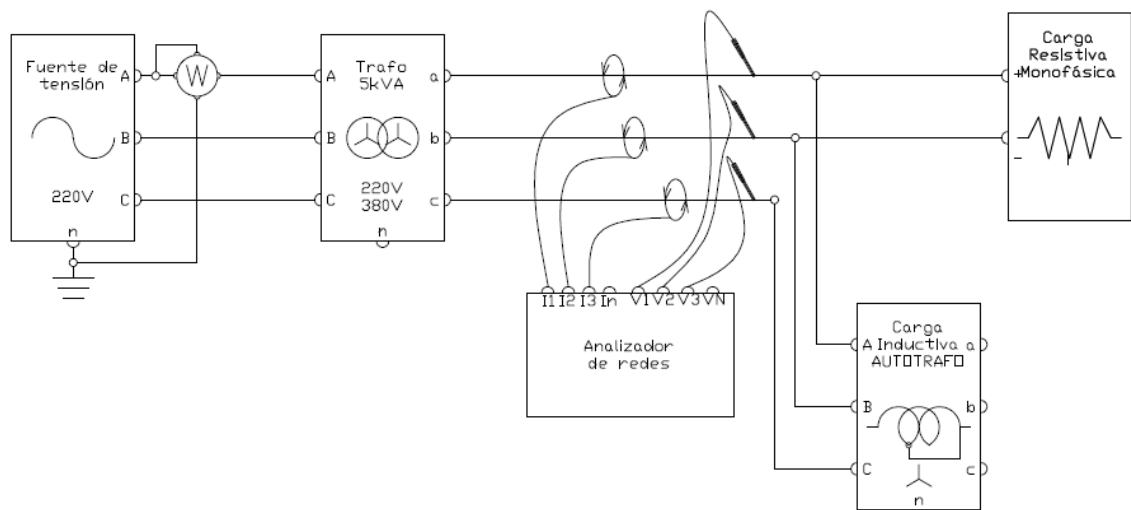


Figura 5.6.13. Ensayo con carga desequilibrada RL Fase-Fase

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

Para llevar a cabo el ensayo RL, conectamos el autotransformador en vacío en paralelo con la línea que sale del transformador y la carga resistiva monofásica entre las fases A y B del transformador.

Ensayo con carga desequilibrada RC Fase-Fase.

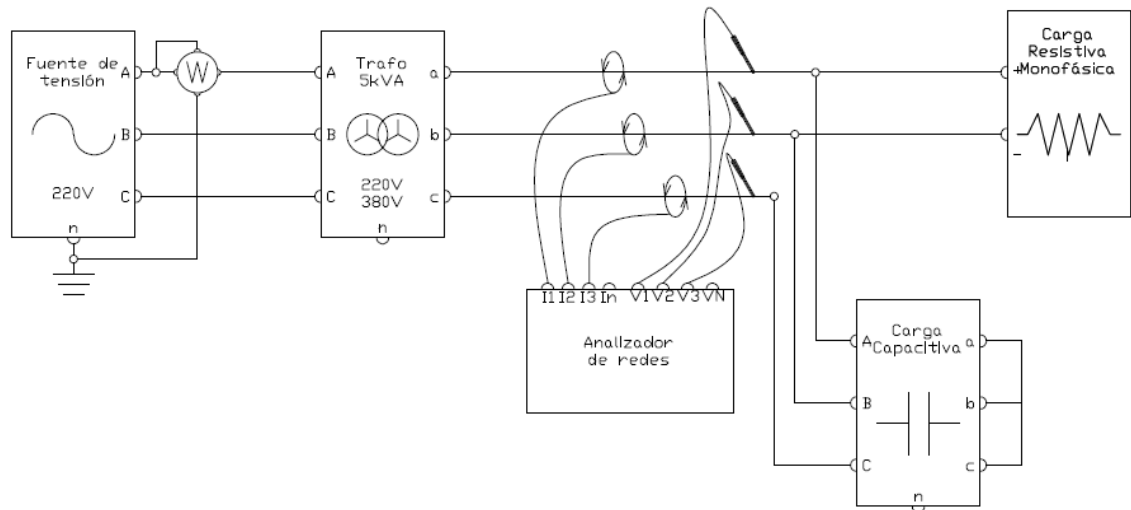


Figura 5.6.14. Ensayo con carga desequilibrada RC Fase-Fase

Para llevar a cabo el ensayo RC, conectamos la carga capacitiva fijándole una carga de 2 kVAR en vacío en paralelo con la línea que sale del transformador y la carga resistiva monofásica entre las fases A y B del mismo. La carga capacitiva se mantiene estática mientras que se eleva la resistiva.

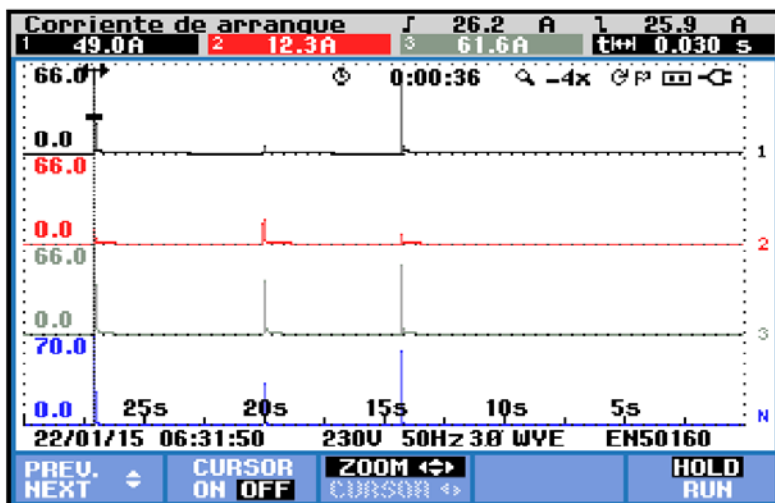
6. CAMPAÑA DE DATOS.

En este apartado se exponen los resultados mas significativos de los obtenidos en los distintos ensayos llevados a cabo en el transformador. Para aligerar el documento y con el fin de no ahogar en datos al lector se van a exponer dos casos de cada una de las experiencias. Las otras están disponibles fuera de este documento en el archivo llamado “Campaña de datos”. En este apartado vamos a comenzar por las cargas lineales equilibradas, vamos a continuar con las no lineales y a terminar con las desequilibradas.

6.1. Ensayos.

6.1.1. Ensayo de corriente de conexión

Para llevar a cabo el ensayo de corriente de conexión, se conecta el transformador a través de un interruptor, mediante el cual alimentamos el transformador, en nuestro caso y por la magnitud de la corriente, la protección disparó varias veces.



Captura 6.1.1. Ensayo de corriente de conexión.

El la captura anterior, observamos los datos extraídos del analizador de redes para el ensayo de corriente de conexión. Si observamos la figura detenidamente observamos que se producen 3 picos, coincidiendo con las tres

maniobras que se llevaron a cabo, y que una de ellas, la segunda, tiene una magnitud muy inferior a las otras dos. Este fenómeno se puede explicar de forma sencilla si tenemos en cuenta las características magnéticas de la máquina.

Si un transformador se encuentra desconectado y el flujo en su circuito magnético nulo o muy cercano a cero. En el momento de conectarlo a la tensión nominal el flujo tiende en los primeros instantes a mantenerse en ese valor, esto significa que debe pasar por un transitorio para cambiar su valor desde cero al correspondiente al régimen permanente de la marcha en vacío.

Si en el momento de conectar el transformador coincidiera que la componente permanente del flujo tiene valor nulo, lo que equivale a que la tensión V_1 alcanza un máximo positivo o negativo no existirá el régimen transitorio y el flujo entrará directamente en el régimen permanente sin que se produzca ninguna discontinuidad en su valor antes y después de la conexión.

Por otra parte, si la conexión se realiza en el momento en que la componente permanente del flujo es máxima positiva o negativa, (la tensión tiene un valor nulo en el momento de conectar el primario del transformador), la componente transitoria debe tener un valor inicial igual al máximo de la componente permanente para que el flujo total sea cero en el instante inicial.

Esto indica que en este caso el flujo alcanza un valor máximo aproximadamente igual a 2 veces el flujo máximo Φ_m de régimen permanente.

Como, además, existe el fenómeno de la histéresis, puede suceder que el transformador quede con un flujo remanente cuando se lo desconecta, el cual puede alcanzar valores de hasta la mitad del flujo máximo en régimen permanente. Entonces, al volverlo a conectar a la red, el flujo inicial no será nulo, como se ha supuesto hasta ahora, sino que valdrá Φ_r

. Teniendo esto en cuenta se deduce que al conectar un transformador a la red, el flujo del transformador puede llegar a alcanzar un valor máximo igual a $2,5 \Phi_m$

En resumen, al conectar un transformador se produce un proceso transitorio donde el flujo alcanza un máximo de $2,5 \Phi_m$ y la corriente alcanzar valores muy superiores a I_0 , del orden de 100 veces, es decir, de 5 a 8 veces la corriente nominal I_1N

6.1.2. Ensayo de vacío

$^\circ$	I_0	P_0	Q_0	S_0	$\cos\phi_0$	$V2_0$
22,4	0,019	0,3	0,3	0,4		14
44	0,028	0,9	0,8	1,2		28
66,2	0,036	1,9	1,4	2,4		41
88,1	0,044	3,2	2,3	3,9		55
110,1	0,056	4,9	3,8	6,2	0,79	68
132,2	0,073	7,1	6,5	9,7	0,73	82
154,3	0,106	10,4	12,5	16,3	0,64	95
176,1	0,187	16,1	28,8	33	0,49	108
198,3	0,364	25,3	68,1	72,7	0,35	122
220,1	0,627	38,1	132,7	138,1	0,28	135
242,3	0,986	57,9	231,8	239	0,24	148
262,3	1,376	81,3	351,6	360,9	0,23	160

Tabla 6.1. Ensayo de vacío

Para llevar a cabo el ensayo en vacío, la máquina fue conectada a la red a través de un variac trifásico mediante el cual se fue elevando la tensión progresivamente la tensión en escalones del 10% hasta el 110% de la tensión nominal. Con ello conseguimos los datos de intensidad y potencia activa y reactiva. Si observamos el diagrama siguiente, podemos observar como el valor de la resistencia con respecto a la tensión no es lineal, por lo que vemos la siguiente progresión. Los datos válidos para el ensayo serán los obtenidos a tensión nominal.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

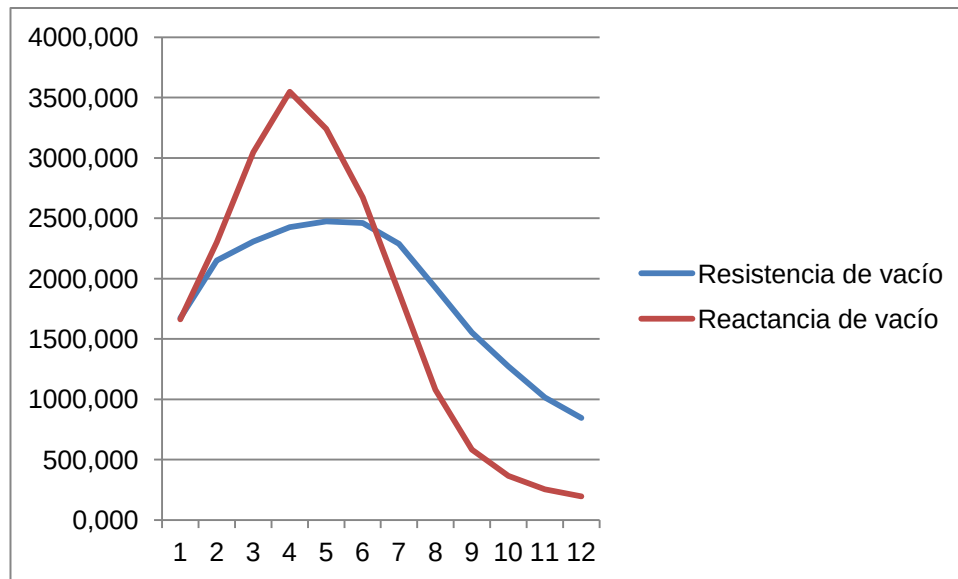


Diagrama 6.2. Evolución impedancia de vacío respecto a la tensión.

6.1.2. Ensayo de cortocircuito

Intensidad	I _{cc}	V _{cc}	P _{cc}	Q _{cc}	Cos φ _{cc}
20%I _n	1,644	2,1	3,3	0,9	-
30%I _n	2,33	2,9	6,5	1,7	0,96
40%I _n	3,06	3,8	11,3	3	0,97
50%I _n	3,8	4,7	17,2	4,7	0,97
60%I _n	4,5	5,5	23,7	6,7	0,96
70%I _n	5,35	6,6	34,1	9,2	0,97
80%I _n	6,1	7,5	44,3	12	0,97
90%I _n	6,81	8,4	55,3	14,9	0,97
100%I _n	7,71	9,5	70,4	19,3	0,96
110%I _n	8,03	9,9	76,6	21	0,96

Tabla 6.2. Ensayo de cortocircuito.

Para el ensayo de cortocircuito se conecta el primario del transformador a una fuente de tensión variable y se cortocircuitan las bornas del devanado secundario, se va elevando la tensión progresivamente hasta que se alcanza la intensidad nominal.

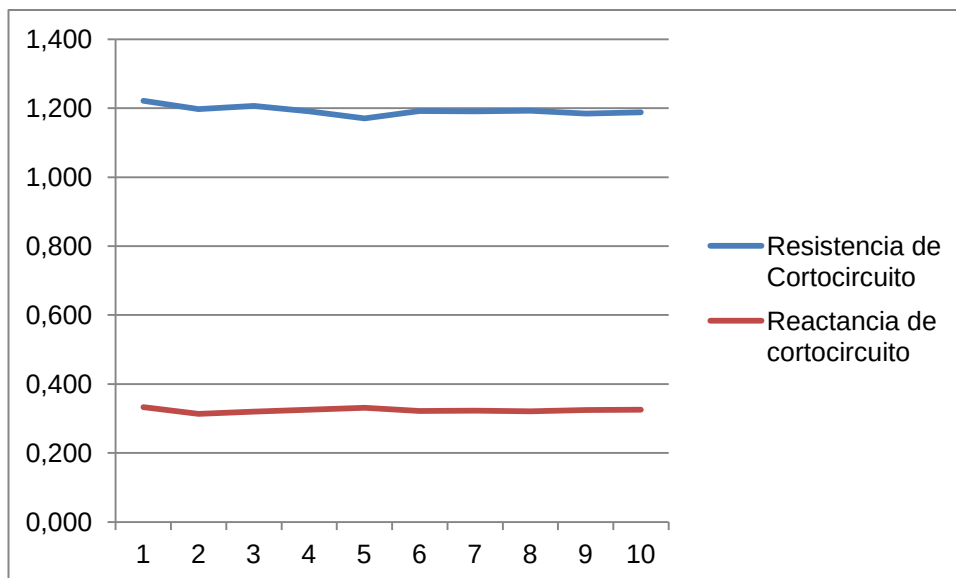


Diagrama 6.2. Evolución de la impedancia de cortocircuito respecto a la intensidad.

Como en este caso se mide la resistencia, vemos que se mantiene constante independientemente de la intensidad.

6.2. Cargas lineales equilibradas.

Una carga lineal es aquella que en operación de estado estable, presenta una impedancia de carga esencialmente constante frente a la fuente de potencia durante todo el ciclo de la tensión aplicada. Por tanto, una carga lineal es la que tiene una relación constante entre la tensión y la intensidad. Como por ejemplo una lámpara incandescente, en la cual la relación entre tensión y corriente, la resistencia, no cambia.

Una carga equilibrada es aquella en la que la carga total está repartida en partes iguales por cada una de las fases.

6.2.1. Carga Resistiva

Escalón	Arrollamiento	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos φ
Vacío	1º	132,5	1,016	3,7	129,4	134,6	0,27
	2º	217,8	-	-	-	-	-
10%	1º	132,4	1,596	167,6	128,8	211,4	0,79
	2º	217,3	0,6	130,4	0	130,4	1
20%	1º	132,3	2,46	298,8	128,5	325,3	0,92
	2º	216,1	1,261	259,6	0	259,6	1
30%	1º	132,1	3,37	426,6	127,2	445,2	0,94
	2º	215,3	1,79	385,3	0	385,3	1
40%	1º	131,9	9,27	549,8	123,5	563,6	0,96
	2º	214	2,36	504,1	0	504,1	1
50%	1º	131,9	5,17	670,3	122,1	681,4	0,98
	2º	213,3	2,91	621,4	0	621,4	1
60%	1º	131,7	6,09	793,1	120,5	802,2	0,98
	2º	212,1	3,48	738,8	0	738,8	1
70%	1º	131,5	7,03	916,2	118,5	922,2	0,99
	2º	211,2	4,06	858	0	858	1
80%	1º	131,3	7,94	1036	119,5	1043	0,99
	2º	210,1	4,62	971,4	0	971,4	1
90%	1º	130,8	8,83	1049	115	1155	1
	2º	208,5	5,17	1078	0	1078	1
100%	1º	130,7	9,73	1266	114,1	1272	1
	2º	207,6	5,72	1187	0	1187	1

Tabla 6.3. Ensayo con carga resistiva.

En este caso y debido a la poca información que aportaba el analizador de redes, por la ausencia de potencia reactiva ni de armónicos se ha declinado su utilización. En cualquier caso a medida que la carga se eleva el factor de potencia va acercándose a uno. Esto se debe a que al elevar la carga la proporción de potencia activa y reactiva se altera, la potencia activa se eleva mientras la reactiva permanece constante. Lo cual hace que aumente el factor de potencia. Respecto a la tensión observamos que a medida que aumenta la carga empieza a caer la tensión.

6.2.2. Carga Inductiva

°	Arroyamiento	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
Motor	1°	132,9	4,48	116,4	581,9	595	0,2
	2°	217,5	2,1	72,6	451,4	457,2	0,16
Motor +1Q	1°	132,4	6,5	135	850,2	860,8	0,16
	2°	216,2	3,35	84,5	719,8	724,7	0,12
Motor +2Q	1°	132,3	8,56	159,8	1121	1133	0,14
	2°	215,5	4,62	94,1	990,4	994,9	0,09
Motor +3Q	1°	132,3	10,91	220	1430	1440	0,13
	2°	214,4	5,91	107,7	1262	1267	0,09
Motor +3Q+ Autotrafo	1°	132,6	12	270	1570	1590	0,17
	2°	214,7	6,4	132,4	1368	1374	0,1

Tabla 6.4. Ensayo con carga inductiva.

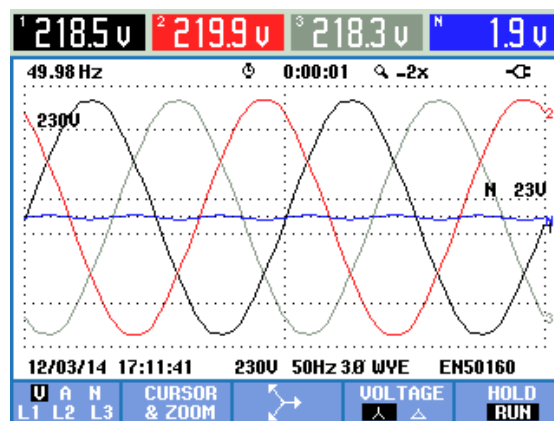
El caso de la carga inductiva es el contrario al anterior, al ser una carga que consume reactiva, unida al carácter inductivo propio de la máquina, recuérdese que se trata de una bobina arrollada sobre un núcleo de material ferrromagnético, refuerza el carácter inductivo de la misma, haciendo bajar el factor de potencia. Debido a la particularidad de las cargas inductivas observamos como se produce una caída de tensión en la salida del transformador, esta caída de tensión se debe al efecto desmagnetizante de la carga, el cual produce que caiga la tensión en bornes de la máquina

Primer Escalón

Tensión e intensidad

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	218.6	219.9	218.3	1.9
Vpk	308.9	310.5	309.6	3.4
CF	1.41	1.41	1.42	OL
Hz	49.98			
	L1	L2	L3	N
Arms	2	2	2	1
Apk	3	4	3	1
CF	OL	OL	OL	OL
12/03/14 17:11:34 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE				
TREND				
HOLD RUN				

Gráficas



TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

Armónicos

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
THD% _r	1.7	1.6	1.7	99.4
H3% _r	1.3	1.2	1.2	98.1
H5% _r	0.2	0.4	0.4	9.0
H7% _r	1.1	0.9	1.1	5.0
Amp	L1	L2	L3	N
H3% _r	4.7	0.6	1.9	0.8
H5% _r	3.7	0.5	1.9	0.8
H7% _r	3.6	0.5	2.1	0.8
12/03/14 18:48:49 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W	HARMONIC GRAPH		TREND	HOLD RUN

Potencia

Potencia y energía				
	L1	L2	L3	Total
kW	0.0	- 0.0	- 0.0	- 0.0
kVA	0.4	0.4	0.3	1.1
kVAR	÷ 0.4	÷ 0.4	÷ 0.3	÷ 1.1
PF	0.00	-0.01	-0.00	-0.01
Cosφ	0.00	-0.02	-0.00	-0.01
Arms	2	2	2	
	L1	L2	L3	
Vrms	218.5	219.8	218.1	
12/03/14 17:12:17 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE	ENERGY		TREND	HOLD RUN

Escalón Final

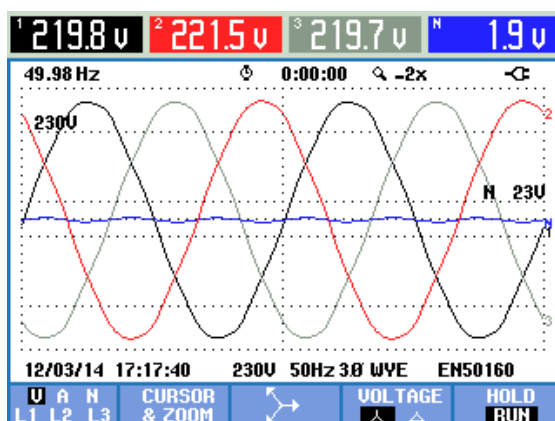
Tensión e intensidad

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	219.8	221.7	219.8	1.9
Vpk	311.7	314.0	311.5	3.6
CF	1.42	1.42	1.42	OL
Hz	50.01			
	L1	L2	L3	N
Arms	5	5	5	1
Apk	8	10	8	1
CF	1.64	1.78	1.70	OL
12/03/14 17:16:47 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE	TREND		HOLD RUN	

Armónicos

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
THD% _r	1.7	1.5	1.5	98.2
H3% _r	1.2	1.1	1.1	96.7
H5% _r	0.3	0.4	0.4	9.0
H7% _r	1.1	0.9	1.0	6.2
Amp	L1	L2	L3	N
H3% _r	0.3	0.4	0.7	0.9
H5% _r	0.4	0.8	0.6	0.8
H7% _r	1.1	0.9	1.2	0.9
12/03/14 18:43:21 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W	HARMONIC GRAPH		TREND	HOLD RUN

Gráficas



Potencia

Potencia y energía				
	L1	L2	L3	Total
kW	0.0	- 0.0	- 0.0	- 0.0
kVA	1.1	1.2	1.1	3.4
kVAR	÷ 1.1	÷ 1.2	÷ 1.1	÷ 3.4
PF	0.01	-0.02	-0.02	-0.01
Cosφ	0.01	-0.02	-0.02	-0.01
Arms	5	5	5	
	L1	L2	L3	
Vrms	219.5	221.2	219.3	
12/03/14 17:17:55 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE	ENERGY		TREND	HOLD RUN

6.2.3. Carga Capacitiva

Escalón	Arroyamiento	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
10 μF	1º	132,3	0,43	39,2	-41,2	56,8	0,69cap
	2º	218,5	0,7	1,2	-152,9	152,9	0,01cap
25 μF	1º	132,7	1,404	42,4	-181,3	186,2	0,23cap
	2º	218,6		2,4	-306,8	306,8	0,01cap
35 μF	1º	132,2	3,11	53,4	-407,5	410,9	0,13cap
	2º	218,7	2,44	8,6	-533,1	533,2	0,02cap
51 μF	1º	132,5	4,94	62,7	-783,3	655,1	0,1cap
	2º	219,3	3,53	8,6	-652,1	783,4	0,01cap
61,5 μF	1º	132,5	6,11	71,8	-805,6	808,8	0,09cap
	2º	219,6	4,28	9,1	-938,8	938,8	0,01cap
76,5 μF	1º	132,4	7,85	91,3	-1035	1039	0,09cap
	2º	219,6	5,33	17	-1169	1170	0,01cap
86,5 μF	1º	132,6	9,01	105	-1188	1193	0,09cap
	2º	219,9	6,04	18	-1329	1329	0,01cap
103,5 μF	1º	132,9	10,73	80	-1400	1420	0,06cap
	2º	221	7,2	18,1	-1592	1592	0,01cap
113,5 μF	1º	132,9	11,9	100	-1560	1580	0,06cap
	2º	220,7	7,89	25,1	-1741	1741	0,01cap

Tabla 6.5. Ensayo con carga capacitiva.

Al conectar una carga de tipo capacitivo a las bornas del transformador observamos que al elevarla el factor de potencia cada vez se va haciendo menor, si hubiésemos conseguido elevar la carga de una manera mas progresiva veríamos como partiendo de un factor de potencia inductivo, va mejorando hasta ser 1 y progresivamente va disminuyendo. Las cargas

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

capacitivas producen energía reactiva y poseen carácter magnetizante, esto es, elevan la tensión en bornes del transformador.

Primer Escalón

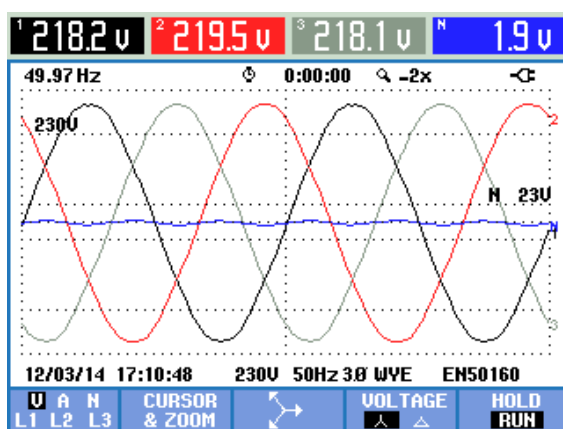
Tensión e intensidad

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	218.2	219.5	218.0	1.9
Vpk	309.5	311.4	309.7	3.4
CF	1.42	1.42	1.42	OL
Hz	49.98			
	L1	L2	L3	N
Arms	1	1	1	1
Apk	1	3	2	1
CF	OL	OL	OL	OL
12/03/14 17:10:44 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

Armónicos

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
THD%r	1.6	1.3	2.1	98.1
H3%r	1.1	0.7	1.6	95.3
H5%r	0.4	0.5	0.4	9.8
H7%r	1.1	0.9	1.1	6.4
	L1	L2	L3	N
Amp				
H3%r	4.4	5.5	7.5	0.9
H5%r	2.0	2.3	0.7	0.8
H7%r	1.0	0.3	0.5	0.8
12/03/14 18:44:11 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

Gráficas



Potencia

Potencia y energía				
	L1	L2	L3	Total
kW	- 0.0	- 0.0	- 0.0	- 0.0
kVA	0.1	0.1	0.1	0.4
kVAR	÷ 0.1	÷ 0.1	÷ 0.1	÷ 0.4
PF	-0.01	-0.01	-0.02	-0.01
Cosφ	-0.01	-0.02	-0.03	
Arms	1	1	1	
	L1	L2	L3	
Vrms	218.0	219.4	217.8	
12/03/14 17:11:19 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

Escalón Final

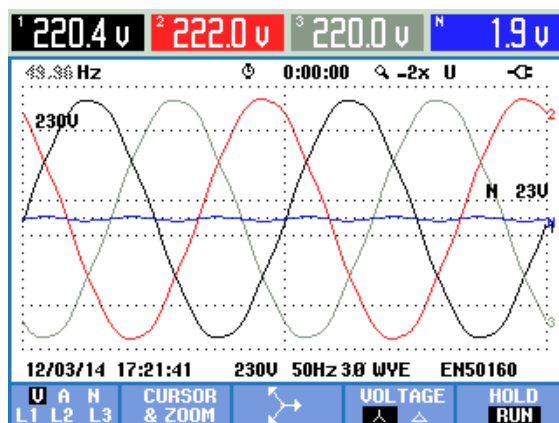
Tensión e intensidad

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	220.3	222.0	220.1	1.9
Vpk	312.8	314.7	312.1	3.6
CF	1.42	1.42	1.42	OL
Hz	49.93			
	L1	L2	L3	N
Arms	7	7	7	1
Apk	11	13	11	1
CF	1.63	1.74	1.66	OL
12/03/14 17:21:36 230V 50Hz 3Ø WYE ENS0160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

Armónicos

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
THD% _r	2.6	2.5	2.4	99.7
H3% _r	1.3	1.2	1.2	98.2
H5% _r	0.3	0.6	0.6	9.5
H7% _r	2.2	2.1	2.0	8.0
	L1	L2	L3	N
Amp				
H3% _r	0.1	0.6	0.9	0.8
H5% _r	2.4	2.4	2.8	0.8
H7% _r	15.1	14.7	14.2	0.8
12/03/14 18:47:56 230V 50Hz 3Ø WYE ENS0160				
V A W		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

Gráficas



Potencia

Potencia y energía				
	L1	L2	L3	Total
kW	- 0.0	- 0.0	- 0.0	- 0.0
kVA	1.5	1.6	1.5	4.6
kVAR	÷ 1.5	÷ 1.6	÷ 1.5	÷ 4.6
PF	-0.01	-0.00	-0.02	-0.01
Cosφ	-0.01	-0.00	-0.02	
Arms	7	7	7	
	L1	L2	L3	
Vrms	220.3	221.9	219.8	
12/03/14 17:21:53 230V 50Hz 3Ø WYE ENS0160				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

6.2.4. Motor asíncrono

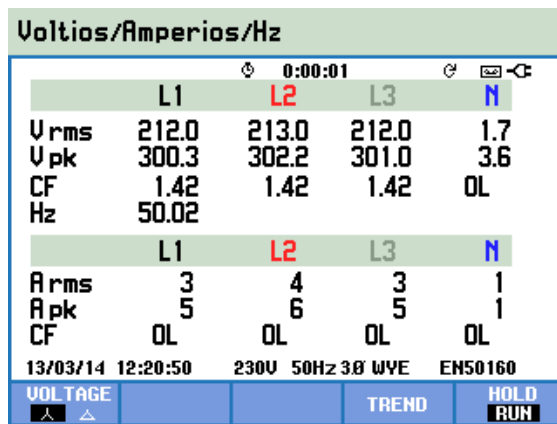
Escalón	Arroyamiento	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos φ
Vacío	1º	131,7	6,04	358,4	709,7	795,1	0,45
	2º	213,8	3,11	309,8	588	664,6	0,47
10%	1º	131,5	6,43	459,9	710	845,9	0,54
	2º	212,7	3,37	409,4	588,9	717,2	0,57
20%	1º	131,6	6,59	495,1	712,4	867,5	0,57
	2º	212,8	3,48	444,8	591,9	740,4	0,6
30%	1º	131,6	6,88	561	711,1	905,7	0,62
	2º	212,4	3,61	506,5	591,7	778,4	0,65
40%	1º	131,5	7,24	627,8	712,9	949,9	0,66
	2º	211,3	3,91	573,2	594,4	997,5	0,69
50%	1º	131,5	7,59	686,3	723,9	997,5	0,69
	2º	211,3	4,12	626,8	602,9	869,6	0,72
60%	1º	131,5	7,97	746,6	735,9	1048	0,71
	2º	211,2	4,36	685,5	614,1	920,4	0,74
70%	1º	131,7	8,38	813,2	745,6	1103	0,74
	2º	211,2	4,62	750,1	624,4	976	0,77
80%	1º	131,4	8,66	857,8	747,3	1138	0,75
	2º	210,4	4,8	191,3	628,8	1011	0,78
90%	1º	131,1	9,07	918,7	755,3	1189	0,77
	2º	209,5	5,07	851,8	634	1062	0,8
100%	1º	131,1	9,5	982,4	765,1	1245	0,79
	2º	209,1	5,33	909,1	645,1	1115	0,82

Tabla 6.6. Ensayo con motor asíncrono.

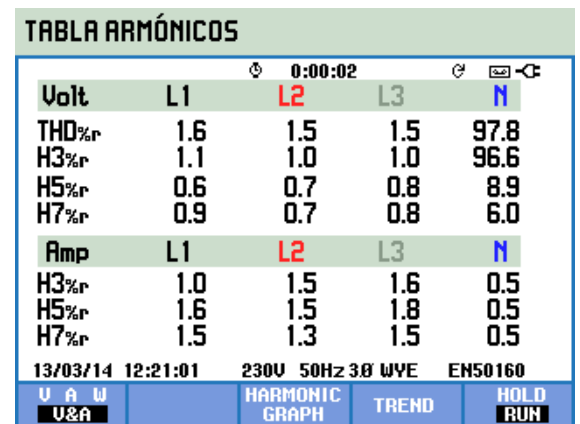
Al aumentar la carga mejora progresivamente el factor de potencia. No hay que olvidar que un motor tiene comportamiento inductivo, con lo cual producirá un efecto desmagnetizante en la máquina que hace caer la tensión. Cabe observar el factor de potencia el cual se queda en 0,82 mas adelante veremos como a través del variador de frecuencia mejora notablemente.

Primer escalón 20%

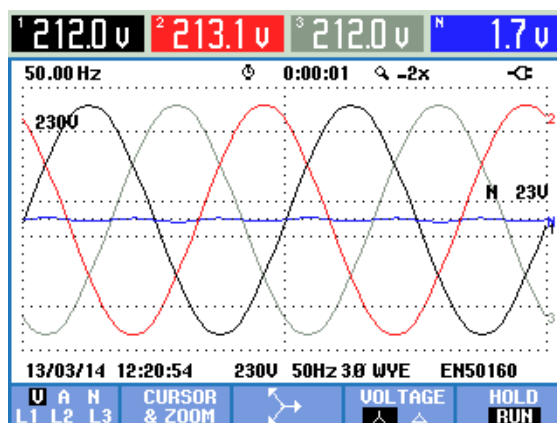
Tensión e Intensidad



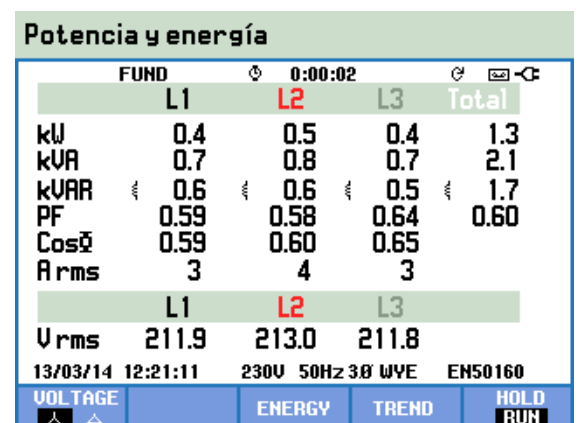
Armónicos



Gráficas

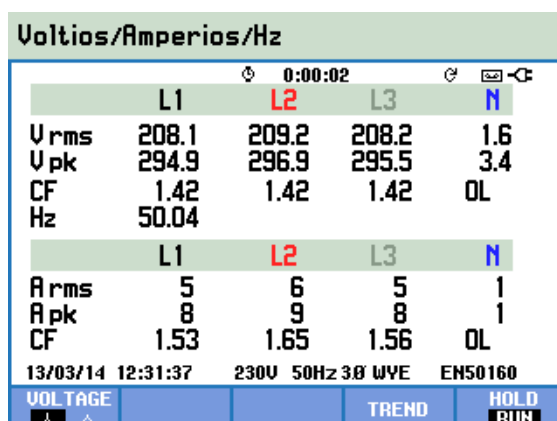


Potencia

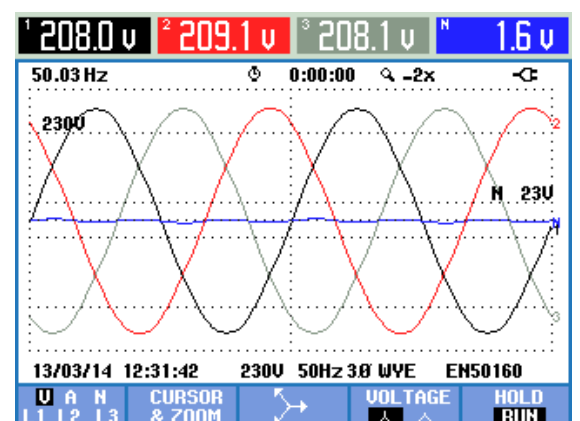


Escalón Final

Tensión e Intensidad



Gráficas



TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

Armónicos

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
THD%	1.5	1.4	1.5	97.2
H3%	1.0	1.0	1.0	96.1
H5%	0.6	0.7	0.8	8.5
H7%	0.9	0.7	0.8	6.1
Amp	L1	L2	L3	N
H3%	0.8	1.2	0.8	0.3
H5%	0.8	1.3	0.9	0.3
H7%	1.1	0.8	1.0	0.3
13/03/14 12:31:48 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W	HARMONIC GRAPH TREND HOLD RUN			

Potencia

Potencia y energía				
	L1	L2	L3	Total
kW	0.9	0.9	0.9	2.7
kVA	1.1	1.1	1.1	3.3
kVAR	0.6	0.6	0.6	1.8
PF	0.83	0.80	0.84	0.83
Cosφ	0.83	0.82	0.85	
Arms	5	6	5	
	L1	L2	L3	
Vrms	208.0	209.1	208.1	
13/03/14 12:31:57 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE	ENERGY TREND HOLD RUN			

6.3. Cargas no lineales equilibradas.

6.3.1. Motor asíncrono conectado a través de un variador de velocidad a 30Hz

Escalón	Arroyamiento	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos φ
Vacío	1º	131,8	1,922	174,8	183,2	253,2	0,69
	2º	216	0,896	137,2	136,4	193,5	0,71
10%	1º	131,8	2,04	187,8	193,3	269,5	0,7
	2º	215,9	0,97	149,4	146,9	209,5	0,71
20%	1º	131,6	2,17	202,2	200,6	284,9	0,71
	2º	215,8	1,055	165,2	156,7	2278,7	0,73
30%	1º	131,6	2,29	216,3	209,4	301,1	0,72
	2º	215,5	1,14	179,4	167,7	245,6	0,73
40%	1º	131,6	2,49	238,9	224,5	327,8	0,73
	2º	215,5	1,261	200,5	183,5	271,8	0,74
50%	1º	131,4	2,61	251,9	232,6	342,9	0,73
	2º	215,1	1,341	214,5	192,8	288,4	0,74
60%	1º	131,4	2,73	266	241	359	0,74
	2º	214,9	1,416	227,7	201,7	304,2	0,75
70%	1º	131,5	2,87	281,8	251,7	377,8	0,75
	2º	214,9	1,498	242,3	211,8	321,8	0,75
80%	1º	131	2,99	295,3	258	392,2	0,75
	2º	214,2	1,58	257,8	219,5	338,5	0,76
90%	1º	131,1	3,15	214,1	268,5	413,2	0,76
	2º	214,1	1,679	275,3	231,3	359,5	0,77
100%	1º	131,1	3,29	328,8	279	431,2	0,76
	2º	214	1,762	289,5	241,4	376,9	0,77

Tabla 6.7. Ensayo con motor asíncrono a 30Hz.

Al motor no se le puede exigir mas carga de la obtenida por las particularidades del ensayo. El motor está conectado mecánicamente a una dinamo freno a la que conectamos una resistencia a la salida para exigir

potencia. Al estar trabajando por debajo de su velocidad de régimen, la tensión es muy inferior, por lo que la potencia también lo es.

Primer escalón 20%

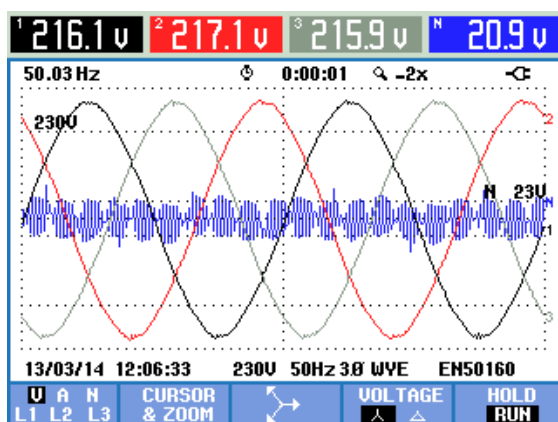
Tensión e Intensidad

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	216.0	217.0	215.9	20.6
Vpk	314.7	317.2	314.6	46.4
CF	1.46	1.46	1.46	2.25
Hz	50.02			
	L1	L2	L3	N
Arms	1	2	1	1
Apk	3	4	3	1
CF	OL	OL	OL	OL
13/03/14 12:02:47 230V 50Hz 3Ø WYE ENS0160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

Armónicos

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
Volts				
THD%	1.6	1.6	1.7	98.9
H3%	1.1	1.1	1.1	13.8
H5%	0.9	0.9	1.0	7.9
H7%	0.3	0.2	0.3	0.8
	L1	L2	L3	N
Amps				
H3%	4.4	3.7	1.3	0.5
H5%	38.4	29.5	35.1	0.6
H7%	27.8	21.8	25.7	0.6
13/03/14 12:06:52 230V 50Hz 3Ø WYE ENS0160				
U A W		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

Gráficas



Potencia y Energía

Potencia y energía				
	L1	L2	L3	Total
FUND				
kW	0.2	0.2	0.1	0.5
kVA	0.2	0.2	0.1	0.5
kVAR	0.0	0.0	0.0	0.0
PF	0.71	0.49	0.66	0.59
Cosφ	1.00	1.00	1.00	
Arms	1	2	1	
	L1	L2	L3	
Vrms	216.2	217.2	216.0	
13/03/14 12:07:00 230V 50Hz 3Ø WYE ENS0160				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

Escalón final

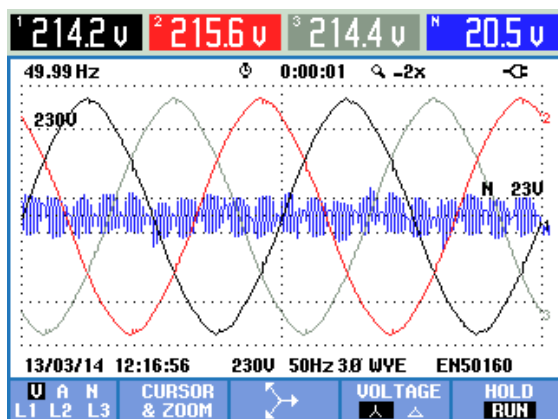
Tensión e Intensidad

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	214.4	215.7	214.6	20.5
Vpk	315.7	317.5	316.5	47.0
CF	1.47	1.47	1.48	2.30
Hz	50.00			
	L1	L2	L3	N
Arms	2	2	1	1
Apk	4	5	4	1
CF	OL	OL	OL	OL
13/03/14 12:16:50 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

Armónicos

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
THD%	1.8	1.8	1.8	99.0
H3%	1.1	1.1	1.0	14.1
H5%	1.2	1.3	1.4	7.7
H7%	0.0	0.2	0.1	0.9
	L1	L2	L3	N
Arms	3.3	2.8	1.0	0.5
H3%	37.6	33.2	36.1	0.5
H7%	24.6	21.5	23.8	0.5
13/03/14 12:17:02 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
V A W		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

Gráficas



Potencia y Energía

Potencia y energía				
	L1	L2	L3	Total
kW	0.3	0.3	0.2	0.8
kVA	0.3	0.3	0.2	0.8
kVAR	0.0	0.0	0.0	0.1
PF	0.75	0.63	0.73	0.70
Cosφ	0.99	1.00	1.00	
Arms	2	2	1	
	L1	L2	L3	
Vrms	214.4	215.7	214.5	
13/03/14 12:17:10 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

6.3.2. Motor asíncrono conectado a través de un variador de velocidad a 40Hz

Escalón	Arroyamiento	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos φ
Vacío	1º	131,2	2,73	266	238,9	357,5	0,74
	2º	214,7	1,412	227,3	200,6	303,2	0,75
10%	1º	131,3	3,07	304,1	264,5	403	0,75
	2º	214,2	1,625	264,8	226,6	348,1	0,76
20%	1º	131,7	3,36	339	284,7	442,7	0,77
	2º	215	1,81	300,1	247,4	388,9	0,77
30%	1º	131,5	3,67	374,4	304,6	482,7	0,78
	2º	214,3	1,99	332,5	266,9	426,4	0,78
40%	1º	131,4	3,94	406,7	320,7	518	0,79
	2º	214	2,16	365,7	283,4	462,6	0,79
50%	1º	131,4	4,15	434,6	329,5	545,4	0,8

	2º	213,9	2,28	391	291,6	487,8	0,8
60%	1º	131,5	4,4	471,1	337	579,2	0,81
	2º	213,7	2,44	427	298,7	521,1	0,82
70%	1º	131,6	4,64	505,2	341,9	610	0,83
	2º	213,8	2,58	460,6	303,8	551,8	0,83
80%	1º	131,6	7,91	541,5	351,9	645,8	0,84
	2º	213,5	2,75	495,6	313	586,2	0,85
90%	1º	131,3	5,12	571	355,8	672,8	0,85
	2º	212,9	2,88	532,9	317,9	612,7	0,86
100%	1º	131,4	5,38	606,7	362,3	706,7	0,86
	2º	212,7	3,04	558,4	323,8	645,5	0,87

Tabla 6.8. Ensayo con motor asíncrono a 40Hz.

En este caso vemos como el factor de potencia mejora, al elevar la velocidad, la dinamo eleva la tensión y por tanto la entrega de potencia, lo que se revela como mayor carga en el motor. Mención aparte merecerán los armónicos los cuales producirán grandes distorsiones las cuales llegado el momento podrían llegar a producir disparo de diferenciales. El tema será abordado más adelante.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

Primer Escalón

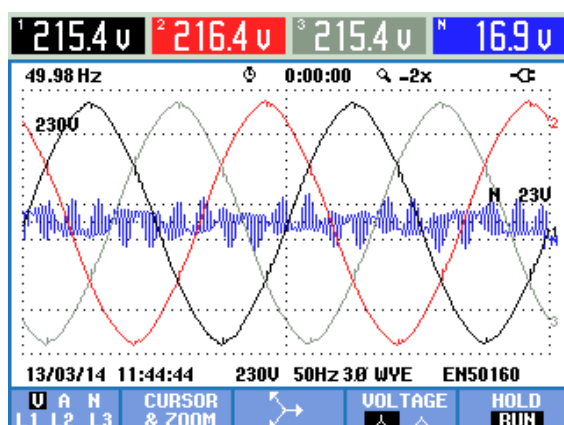
Tensión e Intensidad

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	215.6	216.7	215.5	17.0
Vpk	317.4	319.4	318.1	40.4
CF	1.47	1.47	1.48	2.38
Hz	49.98			
	L1	L2	L3	N
Arms	2	2	2	1
Apk	4	5	4	1
CF	OL	OL	OL	OL
13/03/14 11:44:38 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

Armónicos

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
THD%	1.8	1.8	1.8	99.1
H3%	1.1	1.1	1.1	17.2
H5%	1.2	1.2	1.3	2.0
H7%	0.1	0.2	0.1	4.8
	L1	L2	L3	N
Amp				
H3%	2.7	3.2	1.1	0.6
H5%	39.3	34.2	37.7	0.5
H7%	25.5	22.0	24.9	0.5
13/03/14 11:44:53 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

Gráficas



Potencia y Energía

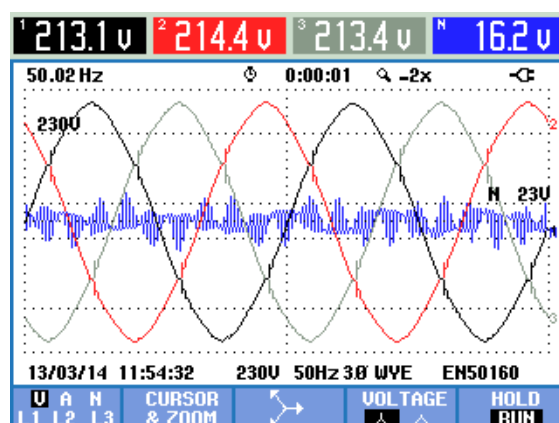
Potencia y energía				
	L1	L2	L3	Total
kW	0.3	0.3	0.2	0.8
kVA	0.3	0.3	0.2	0.8
kVAR	0.0	0.0	0.0	0.1
PF	0.75	0.63	0.73	0.70
Cosφ	0.99	1.00	1.00	
Arms	2	2	2	
	L1	L2	L3	
Vrms	215.5	216.6	215.3	
13/03/14 11:45:04 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

Escalón Final

Tensión e Intensidad

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	213.3	214.6	213.6	16.1
Vpk	313.7	316.4	315.1	39.5
CF	1.47	1.47	1.48	2.46
Hz	50.02			
	L1	L2	L3	N
Arms	3	3	3	1
Apk	6	7	6	1
CF	OL	OL	OL	OL
13/03/14 11:54:21 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

Gráficas



Armónicos

TABLA ARMÓNICOS				
0:00:02				
Volt	L1	L2	L3	N
THD%	2.3	2.3	2.5	99.2
H3%	1.0	1.1	1.1	17.7
H5%	1.8	1.8	1.9	2.0
H7%	0.4	0.5	0.4	4.4
Amp	L1	L2	L3	N
H3%	3.3	2.5	2.8	0.5
H5%	36.2	32.7	36.2	0.6
H7%	18.7	16.0	18.3	0.5
13/03/14 11:54:44 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A U	HARMONIC GRAPH		TREND	HOLD RUN

Potencia y Energía

Potencia y energía				
FUND 0:00:01				
	L1	L2	L3	Total
kW	0.5	0.6	0.5	1.6
kVA	0.5	0.6	0.5	1.6
kVAR	0.1	0.0	0.0	0.1
PF	0.86	0.82	0.85	0.84
Cosφ	0.99	1.00	1.00	
Arms	3	3	3	
	L1	L2	L3	
Vrms	213.2	214.4	213.4	
13/03/14 11:54:52 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE	ENERGY		TREND	HOLD RUN

6.3.3. Motor asíncrono conectado a través de un variador de velocidad a 50Hz

Escalón	Arrollamiento	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos φ
Vacío	1º	131,7	3,51	358,9	291,8	462,6	0,78
	2º	214,6	1,896	317,9	254,2	407,1	0,78
10%	1º	131,5	4,06	423,4	325,1	533,8	0,79
	2º	214,4	2,24	381,6	290,4	479,5	0,8
20%	1º	131,4	4,53	489	340,6	595,9	0,82
	2º	213,5	2,52	444,3	304,4	538,6	0,82
30%	1º	131,4	4,95	553,4	342,4	650,8	0,85
	2º	213,1	2,77	505,4	305,1	590,3	0,86
40%	1º	131,3	5,42	615,9	357,4	712	0,87
	2º	212,6	3,07	567,8	322,1	652,8	0,87
50%	1º	131,2	5,89	678,2	372,1	773,6	0,88
	2º	212,2	3,35	627,7	334,5	711,3	0,88
60%	1º	131,2	3,39	737,6	396,4	837,4	0,88
	2º	211,8	3,67	688,1	346,9	770,6	0,89
70%	1º	131	6,87	803,3	404,9	899,6	0,89
	2º	210,9	3,96	749,2	369,2	835,2	0,9
80%	1º	130,8	7,735	863,2	423,5	961,5	0,9
	2º	210	4,24	802,8	386	890,7	0,9
90%	1º	130,6	7,83	926,2	434,7	1023	0,91
	2º	209,5	4,55	865,9	400,1	953,9	0,91
100%	1º	130,5	8,31	988,2	445,3	1084	0,91
	2º	209,1	4,83	923,4	408,7	1010	0,91

Tabla 6.9. Ensayo con motor asíncrono a 50Hz.

Observando el factor de potencia y comparándolo con el obtenido en el ensayo sin variador de frecuencia, vemos que la mejora se sitúa en el entorno del 10% al utilizar el variador de velocidad, esto tendrá sus inconvenientes

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

derivados de una fuerte presencia de armónicos los cuales serán tratados a posteriori.

Primer Escalón

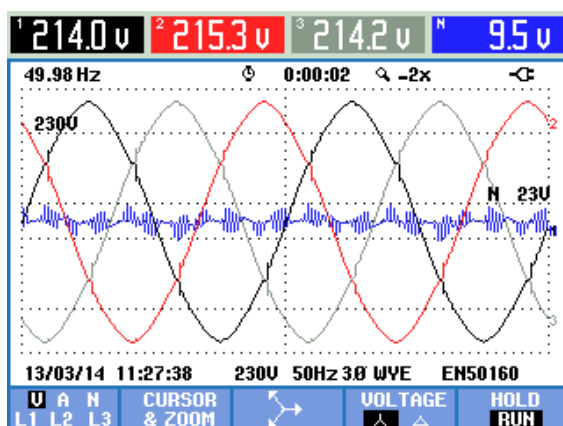
Tensión e Intensidad

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	214.0	215.3	214.2	10.0
Vpk	314.6	317.1	315.9	24.0
CF	1.47	1.47	1.47	2.39
Hz	49.99			
	L1	L2	L3	N
Arms	2	3	2	1
Apk	5	6	5	1
CF	OL	OL	OL	OL
13/03/14 11:27:31 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

Armónicos

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
Volt				
THD%	2.2	2.1	2.3	98.3
H3%	1.1	1.1	1.1	20.3
H5%	1.6	1.6	1.8	2.5
H7%	0.5	0.5	0.4	1.4
Amp	L1	L2	L3	N
H3%	3.4	2.2	2.5	0.8
H5%	45.8	40.0	45.9	1.0
H7%	26.3	21.8	26.1	0.9
13/03/14 11:27:53 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A U		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

Gráficas



Potencia

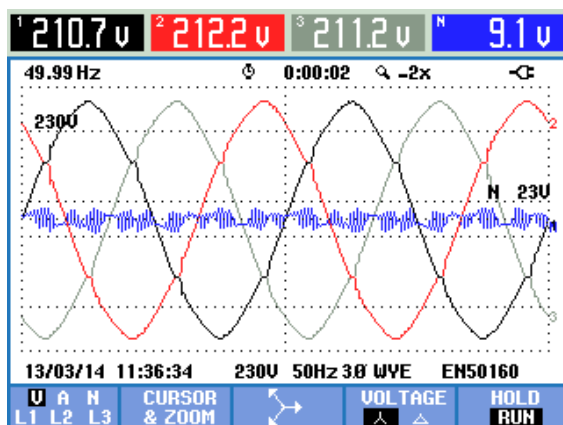
Potencia y energía				
	L1	L2	L3	Total
kW	0.4	0.5	0.4	1.3
kVA	0.4	0.5	0.4	1.3
kVAR	0.1	0.0	0.0	0.1
PF	0.82	0.77	0.81	0.80
Cosφ	0.99	1.00	1.00	
Arms	2	3	2	
	L1	L2	L3	
Vrms	214.1	215.4	214.3	
13/03/14 11:28:03 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

Escalón Final

Tensión e Intensidad

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	210.6	211.9	211.0	9.6
Vpk	310.0	312.8	312.1	23.6
CF	1.47	1.48	1.48	2.47
Hz	50.01			
	L1	L2	L3	N
Arms	5	5	5	1
Apk	8	9	8	1
CF	1.73	1.86	1.77	OL
13/03/14 11:36:29 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

Gráficas



Armónicos

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
THD%	3.1	3.0	3.2	99.0
H3%	1.1	1.0	1.1	39.1
H5%	2.2	2.2	2.4	2.3
H7%	0.7	0.7	0.7	1.1
	L1	L2	L3	N
Amp				
H3%	1.9	1.0	2.1	0.6
H5%	31.9	29.7	31.7	0.7
H7%	11.6	10.3	11.5	0.6
13/03/14 11:36:51 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W			HARMONIC GRAPH	TREND HOLD RUN

Potencia

Potencia y energía				
	L1	L2	L3	Total
kW	0.9	1.0	0.9	2.8
kVA	0.9	1.0	0.9	2.8
kVAR	0.1	0.1	0.1	0.2
PF	0.91	0.90	0.91	0.91
cosφ	0.99	1.00	1.00	
Arms	5	5	5	
	L1	L2	L3	
Vrms	210.7	212.1	211.2	
13/03/14 11:36:42 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

6.4. Cargas desequilibradas.

Lo ideal es que en una instalación eléctrica el sistema de tensiones e intensidades esté equilibrado, esto es, que cada una de sus fases soporte la misma carga. Que haya un desequilibrio en la corriente que circula por cada fase implica que aparezca una corriente por el neutro, esto puede producir disparos indiscriminados de las protecciones como consecuencia más evidente y otras menos evidentes a priori pero incluso mas importantes como sobrecalentamiento en los receptores y en cables de alimentación.

Con el fin de estudiar de una manera objetiva las consecuencias de los desequilibrios, se jam estudiado en dos fases distintas, la primera teniendo en cuenta un desequilibrio de tipo fase-fase y después fase-neutro. El primer caso se debería a defectos en las máquinas y la segunda a una mal diseño de la

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

instalación eléctrica en el cual una fase(en este caso la primera) tuviera una elevada carga monofásica en ella

6.4.1. Carga Resistiva

Fase-Fase

Devanado Primario

Escalón		V	I	P	Q	S	Cos φ
	A	125,3	1,6	138,1	182,7	229,0	0,60
727,8	B	126,0	1,6	138,1	72,7	156,1	0,88
	C	125,6	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28
	A	125,2	2,1	238,1	242,7	340,0	0,70
362,46	B	125,9	2,1	228,1	12,7	228,5	1,00
	C	125,9	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28
	A	124,6	2,6	328,1	292,7	439,7	0,75
244,92	B	125,6	2,7	328,1	-47,3	331,5	0,99
	C	125,6	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28
	A	123,9	3,1	418,1	342,7	540,6	0,77
182,76	B	125,1	3,1	418,1	-97,3	429,3	0,97
	C	125,5	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28
	A	123,6	3,7	518,1	402,7	656,2	0,79
146,88	B	125,0	3,7	508,1	-157,3	531,9	0,96
	C	125,7	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28
	A	123,4	4,1	608,1	452,7	758,1	0,80
122,4	B	124,9	4,1	598,1	-207,3	633,0	0,94
	C	125,9	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28
	A	123,3	4,7	698,1	502,7	860,3	0,81
94,176	B	124,9	4,7	698,1	-267,3	747,5	0,93
	C	126,3	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28
	A	122,8	5,2	788,1	552,7	962,6	0,82
82,231	B	124,6	5,2	788,1	-327,3	853,4	0,92
	C	126,3	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28
	A	122,3	5,6	878,1	612,7	1070,7	0,82
73,278	B	124,2	5,7	868,1	-377,3	946,5	0,92
	C	126,4	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28
	A	121,6	6,1	958,1	662,7	1165,0	0,82
66	B	123,8	6,1	958,1	-437,3	1053,2	0,91
	C	126,2	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28

Devanado Secundario

Escalón		V	I	P	Q	S	Cos φ
	A	217,1	0,5	100	50	110	0,909
727,8	B	218,3	0,5	100	-60	110	0,909
	C	217,6	0	0	0	0	
	A	216,9	1	200	110	220	0,909
362,46	B	218,1	1	190	-120	230	0,826
	C	218	0	0	0	0	

	A	215,8	1,5	290	160	330	0,879
244,92	B	217,5	1,6	290	-180	340	0,853
	C	217,6	0	0	0	0	
	A	214,6	2	380	210	440	0,864
182,76	B	216,6	2	380	-230	440	0,864
	C	217,3	0	0	0	0	
	A	214,1	2,6	480	270	550	0,873
146,88	B	216,5	2,6	470	-290	550	0,855
	C	217,7	0	0	0	0	
	A	213,7	3	570	320	650	0,877
122,4	B	216,4	3	560	-340	660	0,848
	C	218,1	0	0	0	0	
	A	213,5	3,6	660	370	760	0,868
94,176	B	216,4	3,6	660	-400	770	0,857
	C	218,7	0	0	0	0	
	A	212,7	4,1	750	420	860	0,872
82,231	B	215,8	4,1	750	-460	880	0,852
	C	218,7	0	0	0	0	
	A	211,8	4,5	840	480	960	0,875
73,278	B	215,2	4,6	830	-510	980	0,847
	C	218,9	0	0	0	0	
	A	210,7	5	920	530	1060	0,868
66	B	214,4	5	920	-570	1080	0,852
	C	218,6	0	0	0	0	

Tabla 6.10. Ensayo con cargas desequilibradas resistivas fase-fase.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

Primer Escalón

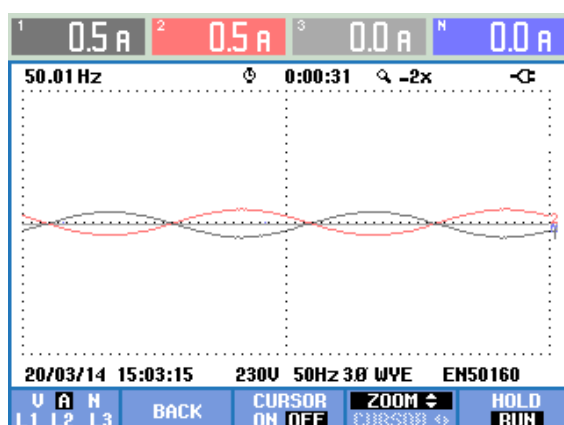
Voltios y amperios

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	217.7	218.7	218.1	2.4
Vpk	308.2	309.3	309.2	4.9
CF	1.42	1.41	1.42	2.06
Hz	49.99			
	L1	L2	L3	N
Arms	0.5	0.5	0.0	0.0
Apk	0.8	0.9	0.1	0.1
CF	1.54	1.67	OL	OL
20/03/14 15:02:26 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

Armónicos

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
THD%	1.6	1.5	1.6	78.6
H3%	1.2	1.1	1.1	77.8
H5%	0.6	0.8	0.7	5.0
H7%	0.8	0.6	0.8	2.0
	L1	L2	L3	N
Amp	0.5	0.4	1.3	0.4
H3%	0.3	0.6	0.2	0.1
H5%	0.7	0.6	0.2	0.2
20/03/14 15:03:21 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

Gráfica de corriente



Desequilibrios

Desequilibrio				
	Uneg.	Uzero	Aneg.	Azero
Unbal. (%)	0.2	0.1	99.5	0.9
	L1	L2	L3	N
Vfund	217.1	218.5	217.9	1.4
Hz	49.99			
	L1	L2	L3	N
ØV(°)	0.0	-240.0	-119.9	-40.0
ØA(°)	-27.5	-207.7	-76.5	-56.0
Afund	0.5	0.5	0.0	0.0
20/03/14 15:03:28 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
			TREND	HOLD RUN

Potencia

Potencia y energía				
	L1	L2	L3	Total
kW	0.10	0.10	0.00	0.19
kVA	0.11	0.11	0.00	0.22
kVAR	0.05	0.06	0.00	0.01
PF	0.89	0.81	---	0.83
CosØ	0.89	0.84	---	
Arms	0.5	0.5	0.0	
	L1	L2	L3	
Vrms	217.1	218.3	217.6	
20/03/14 15:03:35 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

Escalón Final

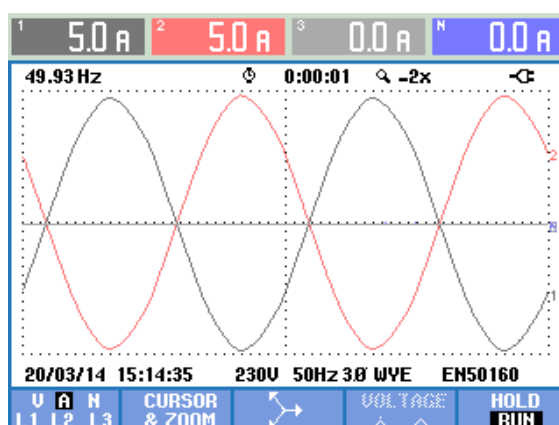
Voltios y amperios

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	210.7	214.4	218.6	2.3
Vpk	298.2	303.2	309.4	4.8
CF	1.42	1.41	1.42	2.06
Hz	49.93			
	L1	L2	L3	N
Arms	5.0	5.0	0.0	0.0
Apk	7.3	7.4	0.1	0.1
CF	1.45	1.47	OL	OL
20/03/14 15:14:32 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

Armónicos

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
THD%	1.5	1.5	1.6	76.2
H3%	1.1	1.0	1.1	75.4
H5%	0.6	0.7	0.7	3.8
H7%	0.8	0.6	0.8	2.7
	L1	L2	L3	N
Amp				
H3%	0.1	0.1	1.2	0.4
H5%	0.6	0.6	0.2	0.2
H7%	0.8	0.7	0.3	0.2
20/03/14 15:14:45 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

Gráfica de corriente



Desequilibrios

Desequilibrio				
	Uneg.	Uzero	Aneg.	Azero
Unbal.(%)	2.1	0.1	99.4	0.5
	L1	L2	L3	N
Vfund	210.7	214.3	218.6	1.5
Hz	49.93			
	L1	L2	L3	N
φU(°)	0.0	-242.0	-120.4	-41.5
φA(°)	-29.8	-210.3	-79.3	-39.6
Afund	5.0	5.0	0.0	0.0
20/03/14 15:14:52 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
			TREND	HOLD RUN

Potencia

Potencia y energía				
	FUND			
	L1	L2	L3	Total
kW	0.92	0.92	0.00	1.84
kVA	1.06	1.08	0.00	2.14
kVAR	0.53	0.57	0.00	0.04
PF	0.87	0.85	---	0.86
Cosφ	0.87	0.85	---	
Arms	5.0	5.0	0.0	
	L1	L2	L3	
Vrms	210.7	214.4	218.6	
20/03/14 15:15:01 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

Fase-Neutro

Devanado Primario

		V	I	P	Q	S	Cos φ
	A	124,8	2,9	418,1	142,7	441,8	0,95
121,3	A	124,9	1,3	38,1	132,7	138,1	0,28
	A	128,5	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28
	N	3,8	1,8	0	0	0,0	
	A	122,9	4,6	798,1	152,7	812,6	0,98
60,41	B	122,9	1,3	38,1	132,7	138,1	0,28
	C	130,9	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28
	N	7,2	3,5	0	0	0,0	
	A	121,1	6,3	1138,1	162,7	1149,7	0,99
36,738	B	121,0	1,3	38,1	142,7	147,7	0,26
	C	133,1	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28
	N	10,5	5,2	0	0	0,0	
	A	119,2	7,9	1448,1	162,7	1457,2	0,99
26,5	B	119,3	1,3	38,1	142,7	147,7	0,26
	C	135,3	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28
	N	13,7	6,8	0	0	0,0	
	A	117,5	9,5	1738,1	172,7	1746,7	1,00
19,9	B	118,0	1,3	38,1	142,7	147,7	0,26
	C	137,5	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28
	N	16,7	8,4	0	0	0,0	

Devanado Secundario

		V	I	P	Q	S	Cos φ
	A	216,1	1,8	380	10	380	1
121,3	B	216,4	0,2	0	0	0	
	C	222,5	0	0	0	0	
	N	3,8	1,8	0	0	0	
	A	212,8	3,5	760	20	760	1
60,41	B	212,8	0,2	0	0	0	
	C	226,7	0	0	0	0	
	N	7,2	3,5	0	0	0	
	A	209,8	5,2	1100	30	1100	1
36,738	B	209,6	0,2	0	10	10	
	C	230,5	0	0	0	0	
	N	10,5	5,2	0	0	0	
	A	206,4	6,8	1410	30	1410	1
26,5	B	206,7	0,2	0	10	100	
	C	234,3	0	0	0	0	
	N	13,7	6,8	0	0	0	
	A	203,6	8,4	1700	40	1700	1
19,9	B	204,4	0,2	0	10	10	
	C	238,1	0	0	0	0	
	N	16,7	8,4				

Tabla 6.11. Ensayo con cargas desequilibradas resistivas fase-neutro.

Primer Escalón

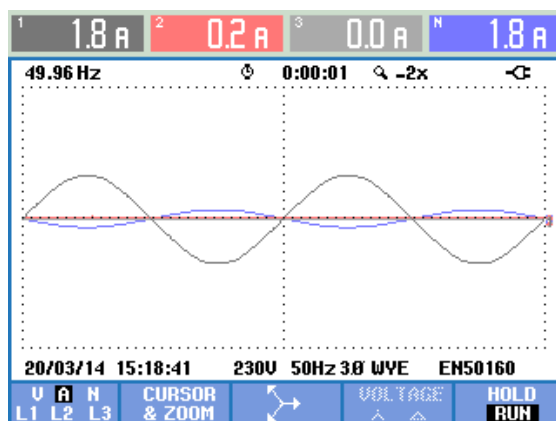
Voltios y amperios

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	216.1	216.6	222.5	3.8
Vpk	305.9	306.4	315.6	8.2
CF	1.42	1.41	1.42	2.17
Hz	49.95			
	L1	L2	L3	N
Arms	1.8	0.2	0.0	1.8
Apk	2.6	0.2	0.1	2.6
CF	1.45	0L	0L	1.46
20/03/14 15:18:37 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

Armónicos

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
THD%	1.6	1.6	1.7	53.4
H3%	1.3	1.2	1.2	52.3
H5%	0.5	0.8	0.6	8.5
H7%	0.8	0.5	0.9	5.2
	L1	L2	L3	N
Amp	1.5	0.1	0.9	1.0
H3%	0.5	0.1	0.2	0.4
H7%	0.7	0.1	0.1	0.9
20/03/14 15:18:46 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

Gráfica de corriente



Desequilibrios

Desequilibrio				
	Uneg.	Uzero	Aneg.	Azero
Unbal.(%)	0.6	2.2	99.6	102
	L1	L2	L3	N
Vfund	216.0	216.4	222.3	3.2
Hz	49.95			
	L1	L2	L3	N
φV(°)	0.0	-237.6	-117.9	-304.9
φA(°)	-358.2	-344.5	-359.0	-178.5
Afund	1.8	0.0	0.0	1.8
20/03/14 15:18:53 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
			TREND	HOLD RUN

Potencia

Potencia y energía				
	FUND			
	L1	L2	L3	Total
kW	0.38	- 0.00	- 0.00	0.38
kVA	0.38	0.00	0.00	0.39
kVAR	0.01	0.00	0.00	0.01
PF	1.00	-0.03	---	0.90
Cosφ	1.00	---	---	
Arms	1.8	0.2	0.0	
	L1	L2	L3	
Vrms	216.1	216.4	222.5	
20/03/14 15:18:58 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

Escalón final

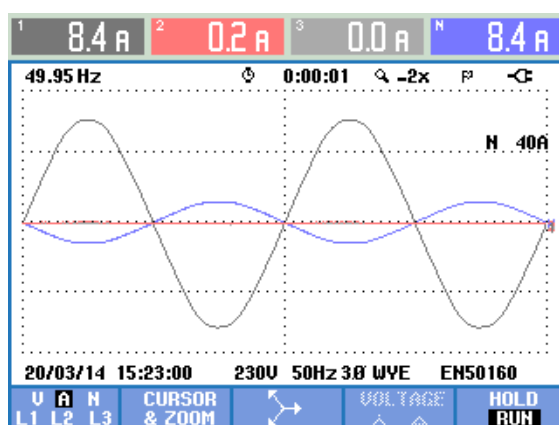
Voltios y amperios

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	203.6	204.4	238.1	16.7
Vpk	288.9	289.2	338.3	27.2
CF	1.42	1.41	1.42	1.63
Hz	49.96			
	L1	L2	L3	N
Arms	8.4	0.2	0.0	8.4
Apk	11.9	0.2	0.1	11.9
CF	1.43	0.1	0.1	1.43
20/03/14 15:22:56 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

Desequilibrios

Desequilibrio				
	Uneg.	Uzero	Aneg.	Azero
Unbal.(%)	2.2	10.6	99.8	101
	L1	L2	L3	N
Vfund	203.6	204.3	238.0	16.5
Hz	49.95			
	L1	L2	L3	N
φV(°)	0.0	-229.5	-111.4	-288.3
φA(°)	-358.6	-344.8	-1.0	-178.9
Afund	8.4	0.0	0.0	8.4
20/03/14 15:23:08 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
			TREND	HOLD RUN

Gráfica de corriente



Potencia

Potencia y energía				
	FUND	L1	L2	L3
kW	1.70	- 0.00	- 0.00	1.70
kVA	1.70	0.01	0.00	1.71
kVAR	0.04	0.01	0.00	0.04
PF	1.00	-0.09	-	-
Cosφ	1.00	-	-	-
Arms	8.4	0.2	0.0	
	L1	L2	L3	
Vrms	203.5	204.0	237.9	
20/03/14 15:23:18 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

Armónicos

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
THD%	1.7	2.0	1.8	14.7
H3%	1.5	1.5	1.3	13.8
H5%	0.6	1.1	0.5	3.9
H7%	0.6	0.7	1.0	3.0
	L1	L2	L3	N
H3%	1.5	0.4	0.5	1.6
H5%	0.6	0.3	0.4	0.6
H7%	0.7	0.2	0.2	0.6
20/03/14 15:23:13 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

6.4.2. Carga Inductiva

Fase-Fase

Devanado Primario

		V	I	P	Q	S	Cos φ
	A	126,1	2,2	-61,9	352,7	358,1	-0,17
1140mH	B	125,6	2,2	178,1	332,7	377,4	0,47
	C	125,5	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28
	A	126,4	3,3	-171,9	572,7	597,9	-0,29
547,2mH	B	124,8	3,3	308,1	522,7	606,7	0,51
	C	125,5	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28
	A	126,8	4,4	-271,9	782,7	828,6	-0,33
366,025mH	B	124,2	4,4	438,1	712,7	836,6	0,52
	C	125,9	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28
	A	127,1	5,5	-371,9	1002,7	1069,4	-0,35
270.723mH	B	123,5	5,5	568,1	902,7	1066,6	0,53
	C	126,0	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28

Devanado Secundario

		V	I	P	Q	S	Cos φ
	A	218,4	1,1	-100	220	240	-0,417
1140mH	B	217,5	1,1	140	200	240	0,583
	C	217,3	0	0	0	0	
	A	218,9	2,2	-210	440	480	-0,438
547,2mH	B	216,2	2,2	270	390	480	0,563
	C	217,4	0	0	0	0	
	A	219,6	3,3	-310	650	720	-0,431
366,025mH	B	215,2	3,3	400	580	710	0,563
	C	218,1	0	0	0	0	
	A	220,1	4,4	-410	870	960	-0,427
270.723mH	B	213,9	4,4	530	770	930	0,570
	C	218,2	0	0	0	0	

Tabla 6.12. Ensayo con cargas desequilibradas inductivas fase-fase.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

Primer Escalón

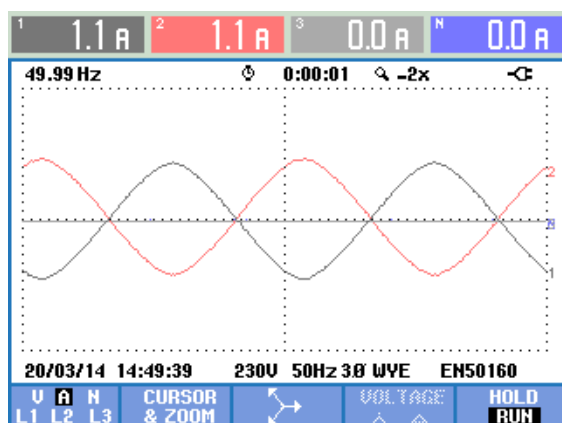
Voltios y amperios

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	218.4	217.6	217.5	2.3
Vpk	309.0	307.7	308.1	4.7
CF	1.41	1.41	1.42	2.06
Hz	49.98			
	L1	L2	L3	N
Arms	1.1	1.1	0.0	0.0
Apk	1.7	1.8	0.1	0.1
CF	1.52	1.62	OL	OL
20/03/14 14:49:34 230V 50Hz 3Ø WYE ENS0160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

Armónicos

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
THD%	1.6	1.5	1.6	79.3
H3%	1.1	1.1	1.1	78.6
H5%	0.5	0.8	0.7	5.2
H7%	0.9	0.7	0.9	1.7
	L1	L2	L3	N
Arms	3.7	3.1	6.2	1.4
H3%	0.8	1.1	0.9	0.2
H5%	0.3	0.1	0.6	0.4
20/03/14 14:49:49 230V 50Hz 3Ø WYE ENS0160				
U A W		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

Gráfica de corriente



Desequilibrios

Desequilibrio				
	Uneg.	Uzero	Aneg.	Azero
Unbal.(%)	0.4	0.1	99.7	0.6
	L1	L2	L3	N
Vfund	218.3	217.4	217.2	1.4
Hz	49.99			
	L1	L2	L3	N
φV(°)	0.0	-239.8	-120.4	-42.8
φA(°)	-115.2	-295.6	-89.8	-115.9
Afund	1.1	1.1	0.0	0.0
20/03/14 14:49:56 230V 50Hz 3Ø WYE ENS0160				
			TREND	HOLD RUN

Potencia

Potencia y energía				
	FUND	L1	L2	L3
kW	- 0.10	0.14	0.00	0.03
kVA	0.24	0.24	0.00	0.49
kVAR	0.22	0.20	0.00	0.42
PF	-0.42	0.56	---	0.07
Cosφ	-0.43	0.56	---	
Arms	1.1	1.1	0.0	
	L1	L2	L3	
Vrms	218.4	217.5	217.3	
20/03/14 14:50:02 230V 50Hz 3Ø WYE ENS0160				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

Escalón Final

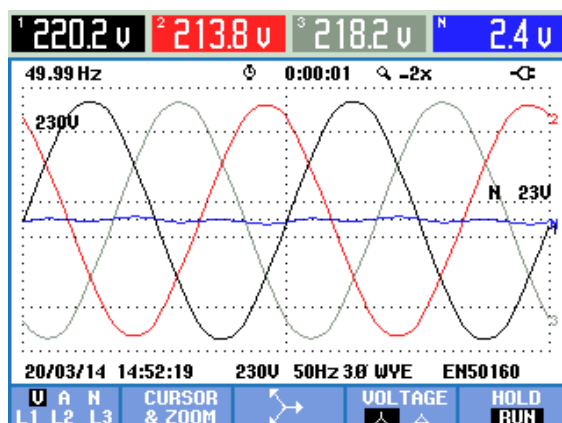
Voltios y amperios

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	220.0	213.9	218.1	2.4
Vpk	311.2	303.0	309.1	5.0
CF	1.41	1.42	1.42	2.12
Hz	50.00			
	L1	L2	L3	N
Arms	4.4	4.4	0.0	0.0
Apk	6.5	6.6	0.1	0.1
CF	1.48	1.51	0.1	0.1
20/03/14 14:52:14 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

Armónicos

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
THD%	1.5	1.5	1.6	76.9
H3%	1.1	1.1	1.1	76.4
H5%	0.6	0.8	0.7	4.0
H7%	0.8	0.6	0.8	2.0
	L1	L2	L3	N
Arms	2.8	3.0	1.5	0.5
H5%	0.7	0.9	0.3	0.2
H7%	0.2	0.1	0.2	0.3
20/03/14 14:52:24 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

Gráfica de corriente



Desequilibrios

Desequilibrio				
	Uneg.	Uzero	Aneg.	Rzero
Unbal.(%)	1.9	0.2	99.5	0.5
	L1	L2	L3	N
Vfund	220.3	214.0	218.3	1.5
Hz	49.98			
	L1	L2	L3	N
φU(°)	0.0	-240.4	-121.9	-45.6
φA(°)	-115.3	-295.8	-103.8	-114.0
Rfund	4.4	4.4	0.0	0.0
20/03/14 14:52:32 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
			TREND	HOLD RUN

Potencia

Potencia y energía				
	FUND	L1	L2	L3
kW	-0.41	0.53	0.00	0.12
kVA	0.96	0.93	0.00	1.90
kVAR	0.87	0.77	0.00	1.64
PF	-0.43	0.57	---	0.06
Cosφ	-0.43	0.57	---	
Arms	4.4	4.4	0.0	
	L1	L2	L3	
Vrms	220.1	213.9	218.2	
20/03/14 14:52:38 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

Fase-Neutro

Devanado Primario

		V	I	P	Q	S	Cos φ
1140mH	A	126,1	2,2	-61,9	352,7	358,1	-0,17
	B	125,6	2,2	178,1	332,7	377,4	0,47
	C	125,5	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28
547,2mH	A	126,4	3,3	-171,9	572,7	597,9	-0,29
	B	124,8	3,3	308,1	522,7	606,7	0,51
	C	125,5	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28
366,025mH	A	126,8	4,4	-271,9	782,7	828,6	-0,33
	B	124,2	4,4	438,1	712,7	836,6	0,52
	C	125,9	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28
270.723mH	A	127,1	5,5	-371,9	1002,7	1069,4	-0,35
	B	123,5	5,5	568,1	902,7	1066,6	0,53
	C	126,0	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28

Devanado Secundario

		V	I	P	Q	S	Cos φ
1140mH	A	218,4	1,1	-100	220	240	-0,417
	B	217,5	1,1	140	200	240	0,583
	C	217,3	0	0	0	0	
547,2mH	A	218,9	2,2	-210	440	480	-0,438
	B	216,2	2,2	270	390	480	0,563
	C	217,4	0	0	0	0	
366,025mH	A	219,6	3,3	-310	650	720	-0,431
	B	215,2	3,3	400	580	710	0,563
	C	218,1	0	0	0	0	
270.723mH	A	220,1	4,4	-410	870	960	-0,427
	B	213,9	4,4	530	770	930	0,570
	C	218,2	0	0	0	0	

Tabla 6.13. Ensayo con cargas desequilibradas inductivas fase-neutro.

Primer Escalón

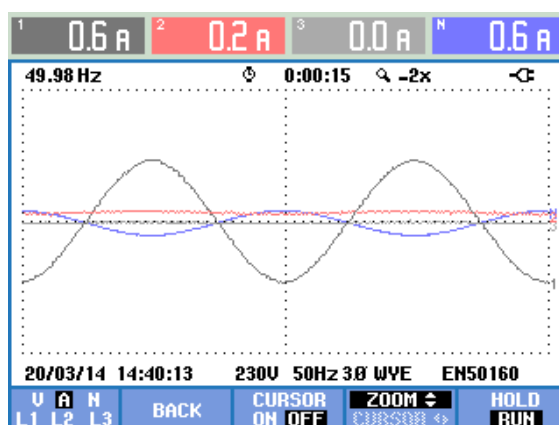
Voltios y amperios

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	217.1	220.4	219.0	3.1
Vpk	307.5	311.9	310.5	6.4
CF	1.42	1.41	1.42	2.05
Hz	49.99			
	L1	L2	L3	N
Arms	0.6	0.2	0.0	0.6
Apk	0.9	0.2	0.1	1.0
CF	1.51	0L	0L	1.55
20/03/14 14:39:54 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

Armónicos

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
THD%	1.6	1.6	1.6	61.1
H3%	1.2	1.1	1.1	60.5
H5%	0.7	0.9	0.8	4.1
H7%	0.8	0.6	0.7	1.7
	L1	L2	L3	N
Arms	1.3	0.1	1.1	0.7
H3%	0.2	0.1	0.2	0.4
H7%	0.3	0.1	0.1	0.1
20/03/14 14:40:24 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

Gráfica de corriente



Desequilibrios

Desequilibrio				
	Uneg.	Uzero	Aneg.	Azero
Unbal.(%)	0.2	0.9	99.9	105
	L1	L2	L3	N
Vfund	216.8	220.4	218.9	2.4
Hz	49.98			
	L1	L2	L3	N
φV(°)	0.0	-239.6	-120.4	-32.9
φA(°)	-84.7	-78.7	-78.9	-265.1
Afund	0.6	0.0	0.0	0.6
20/03/14 14:40:34 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
			TREND	HOLD RUN

Potencia

Potencia y energía				
	L1	L2	L3	Total
kW	0.01	-0.00	0.00	0.01
kVA	0.13	0.00	0.00	0.13
kVAR	0.13	0.00	0.00	0.13
PF	0.09	-0.07	---	0.06
Cosφ	0.09	---	---	---
Arms	0.6	0.2	0.0	
	L1	L2	L3	
Vrms	216.6	220.1	218.8	
20/03/14 14:40:44 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

Escalón Final

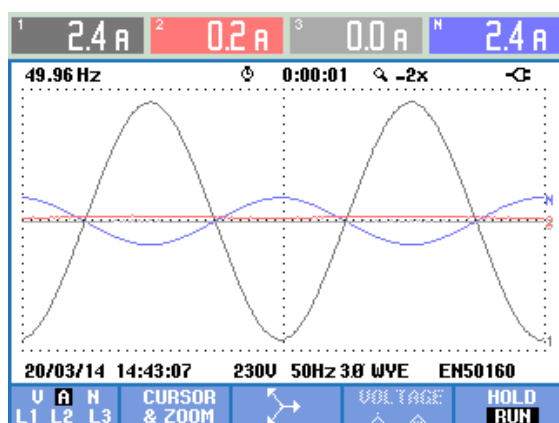
Voltios y amperios

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	211.3	222.8	221.3	6.3
Vpk	299.8	315.0	314.0	9.7
CF	1.42	1.41	1.42	1.55
Hz	49.87			
	L1	L2	L3	N
Arms	2.4	0.2	0.0	2.4
Apk	3.5	0.2	0.1	3.5
CF	1.46	0L	0L	1.46
20/03/14 14:43:02 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

Armónicos

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
THD%	1.7	1.5	1.6	31.9
H3%	1.3	1.1	1.2	31.7
H5%	0.6	0.8	0.7	1.8
H7%	0.8	0.6	0.8	0.9
	L1	L2	L3	N
H3%	1.2	0.3	1.1	0.8
H5%	0.2	0.3	0.2	0.3
H7%	0.2	0.1	0.2	0.2
20/03/14 14:43:16 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

Gráfica de corriente



Desequilibrios

Desequilibrio				
	Uneg.	Uzero	Rneg.	Azero
Unbal.(%)	0.2	3.1	99.8	102
	L1	L2	L3	N
Vfund	211.5	222.5	221.1	5.9
Hz	49.98			
	L1	L2	L3	N
φV(°)	0.0	-239.3	-122.1	-20.7
φA(°)	-85.1	-71.6	-76.2	-265.5
Rfund	2.4	0.0	0.0	2.4
20/03/14 14:43:31 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
			TREND	HOLD RUN

Potencia

Potencia y energía				
	L1	L2	L3	Total
kW	0.04	-0.00	0.00	0.04
kVA	0.50	0.00	0.00	0.51
kVAR	0.50	0.00	0.00	0.50
PF	0.08	-0.13	---	0.07
Cosφ	0.08	---	---	---
Arms	2.4	0.2	0.0	
	L1	L2	L3	
Vrms	211.1	222.0	220.5	
20/03/14 14:43:41 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

6.4.3. Carga Capacitiva

Fase-Fase

Devanado Primario

		V	I	P	Q	S	Cos φ
	A	126,0	2,6	188,1	422,7	462,7	0,41
12.5uF	B	128,1	2,6	-131,9	422,7	442,8	-0,30
	C	126,0	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28
	A	125,6	4,2	358,1	722,7	806,6	0,44
25.5uF	B	128,9	4,2	-311,9	732,7	796,3	-0,39
	C	125,7	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28
	A	125,1	5,8	518,1	1012,7	1137,5	0,46
38uF	B	129,7	5,8	-481,9	1032,7	1139,6	-0,42
	C	125,5	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28
	A	124,1	7,4	688,1	1472,7	1625,5	0,42
51uF	B	130,4	7,4	-651,9	1542,7	1674,8	-0,39
	C	125,2	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28
	A	124,3	9,0				
64uF	B	131,9	9,0				
	C	125,7	1,1				

Devanado Secundario

		V	I	P	Q	S	Cos φ
	A	218,3	1,5	150	290	320	0,469
12.5uF	B	221,8	1,5	-170	290	330	-0,515
	C	218,2	0	0	0	0	
	A	217,5	3,1	320	590	670	0,478
25.5uF	B	223,3	3,1	-350	600	690	-0,507
	C	217,8	0	0	0	0	
	A	216,6	4,7	480	880	1000	0,48
38uF	B	224,6	4,7	-520	900	1040	-0,5
	C	217,4	0	0	0	0	
	A	215	6,3	650	1340	1230	0,528
51uF	B	225,8	6,3	-690	1410	1230	-0,561
	C	216,9	0	0	0	0	
	A	215,3	7,9				
64uF	B	228,4	7,9				
	C	217,8	0				

Tabla 6.14. Ensayo con cargas desequilibradas capacitivas fase-fase.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

Primer Escalón

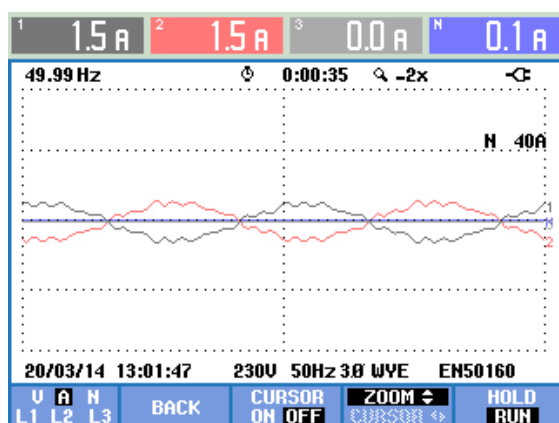
Voltios y amperios

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	218.3	221.8	218.2	2.6
Vpk	308.4	313.7	308.7	5.4
CF	1.41	1.41	1.41	2.11
Hz	49.97			
	L1	L2	L3	N
Arms	1.5	1.5	0.0	0.1
Apk	2.4	2.6	0.1	0.1
CF	1.58	1.68	0L	0L
20/03/14 13:01:09 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

Armónicos

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
THD%r	2.0	1.9	1.8	73.2
H3%r	1.2	1.1	1.2	72.5
H5%r	0.6	0.8	0.7	4.9
H7%r	1.3	1.2	1.1	1.5
	L1	L2	L3	N
Amp				
H3%r	0.3	0.3	0.3	0.3
H5%r	3.4	3.5	0.3	0.2
H7%r	8.9	8.9	0.4	0.2
20/03/14 13:01:54 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

Gráfica de corriente



Desequilibrios

Desequilibrio				
	Uneg.	Uzero	Aneg.	Azero
Unbal.(%)	1.0	0.1	99.5	0.6
	L1	L2	L3	N
Vfund	218.1	221.5	218.0	1.7
Hz	49.97			
	L1	L2	L3	N
φU(°)	0.0	-239.4	-119.1	-54.1
φA(°)	-298.2	-118.6	-101.0	-37.5
Afund	1.5	1.5	0.0	0.0
20/03/14 13:02:02 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
			TREND	HOLD RUN

Potencia

Potencia y energía				
	FUND			
	L1	L2	L3	Total
kW	0.15	-0.17	0.00	-0.02
kVA	0.32	0.33	0.00	0.66
kVAR	± 0.29	± 0.29	0.00	± 0.57
PF	0.47	-0.51	---	-0.02
Cosφ	0.47	-0.51	---	
Arms	1.5	1.5	0.0	
	L1	L2	L3	
Vrms	218.2	221.6	218.1	
20/03/14 13:02:15 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

Escalón Final

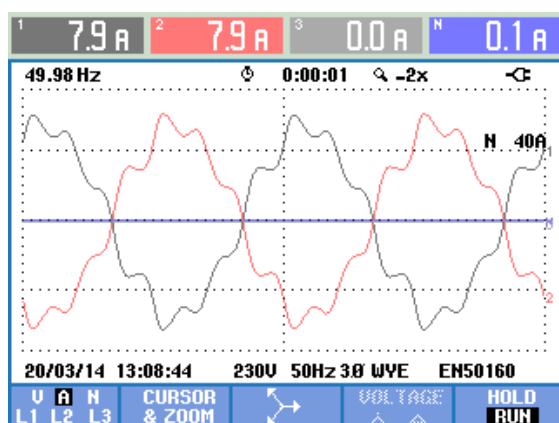
Voltios y amperios

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	215.3	228.4	217.8	2.5
Vpk	305.1	320.2	308.2	5.6
CF	1.42	1.40	1.42	2.20
Hz	49.99			
	L1	L2	L3	N
Arms	7.9	7.9	0.0	0.1
Apk	12.4	12.6	0.1	0.1
CF	1.57	1.59	0.1	0.1
20/03/14 13:08:40 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

Armónicos

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
THD%	2.2	2.5	1.8	75.5
H3%	1.2	1.0	1.2	74.7
H5%	1.2	0.9	0.8	6.2
H7%	1.3	2.1	1.0	2.2
	L1	L2	L3	N
Arms	0.3	0.3	0.6	0.2
H3%	5.6	5.5	0.6	0.2
H7%	13.8	13.8	1.4	0.2
20/03/14 13:08:51 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

Gráfica de corriente



Desequilibrios

Desequilibrio				
	Uneg.	Uzero	Rneg.	Rzero
Unbal.(%)	3.6	0.1	99.5	0.6
	L1	L2	L3	N
Vfund	215.4	228.5	217.9	1.7
Hz	49.97			
	L1	L2	L3	N
φV(°)	0.0	-238.6	-116.4	-50.4
φA(°)	-299.0	-119.4	-103.6	-352.8
Rfund	7.8	7.8	0.0	0.0
20/03/14 13:08:57 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
			TREND	HOLD RUN

Fase-Neutro

Devanado Primario

	V	I	P	Q	S	Cos φ
35,35uF	A	130,7	3,7	18,1	722,7	0,03
	B	124,7	1,3	38,1	132,7	0,28
	C	124,2	1,1	38,1	132,7	0,28
61,52uF	N	3,6	3,7	38,1	138,1	0,28
	A	135,9	6,8	8,1	1462,7	0,01
	B	122,1	1,3	138,1	132,7	0,72
92.4uF	C	122,4	1,1	38,1	132,7	0,28
	N	6,9	6,8	38,1	132,7	0,28
	A	140,8	9,9	-11,9	2252,7	-0,01
	B	119,7	1,3	138,1	132,7	0,72
	C	121,3	1,1	28,1	132,7	0,21
	N	10,7	9,8	38,1	132,7	0,28

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

Devanado Secundario

		V	I	P	Q	S	Cos ϕ
35,35uF	A	226,3	2,6	-20	590	590	-0,034
	B	216	0,2	0	0	0	
	C	215,2	0	0	0	0	
	N	6,3	2,6				
61,52uF	A	235,3	5,7	-30	1330	1330	-0,023
	B	211,5	0,2	100	0	0	
	C	212	0	0	0	0	
	N	11,9	5,7				
92.4uF	A	243,9	8,8	-50	2120	2120	-0,024
	B	207,4	0,2	100	0	10	
	C	210,1	0	-10	0	10	
	N	18,5	8,7	0	0	0	

Tabla 6.15. Ensayo con cargas desequilibradas capacitivas fase-neutro.

Primer Escalón

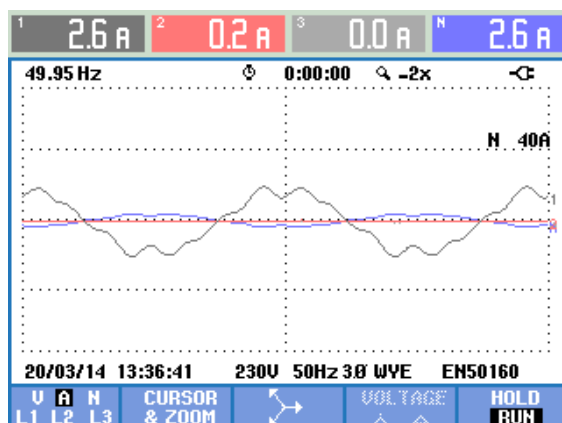
Voltios y amperios

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
Urms	226.3	216.0	215.2	6.3
Vpk	322.6	314.3	306.5	11.5
CF	1.43	1.46	1.42	1.80
Hz	49.96			
	L1	L2	L3	N
Arms	2.6	0.2	0.0	2.6
Apk	4.0	0.2	0.1	4.0
CF	1.54	0L	0L	1.53
20/03/14 13:36:37 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

Armónicos

TABLA ARMÓNICOS				
Volt	L1	L2	L3	N
THD%	3.0	3.1	3.2	73.2
H3%	1.6	1.5	1.6	40.1
H5%	1.9	1.7	0.4	32.0
H7%	1.6	2.1	2.7	51.9
Amp	L1	L2	L3	N
H3%	4.5	0.7	0.9	4.9
H5%	9.5	0.8	0.7	9.3
H7%	11.2	1.0	1.1	11.2
20/03/14 13:36:47 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

Gráfica de corriente



Desequilibrios

Desequilibrio				
	Uneg.	Uzero	Aneg.	Azero
Unbal.(%)	1.0	3.1	99.9	102
	L1	L2	L3	N
Vfund	226.3	215.8	215.0	4.3
Hz	49.96			
	L1	L2	L3	N
$\phi V(^{\circ})$	0.0	-240.0	-117.2	-173.1
$\phi A(^{\circ})$	-268.5	-252.3	-255.0	-88.8
Afund	2.6	0.0	0.0	2.6
20/03/14 13:36:58 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W			TREND	HOLD RUN

Potencia

Potencia y energía				
FUND	0:00:01			
	L1	L2	L3	Total
kW	- 0.02	0.00	- 0.00	- 0.01
kVA	0.59	0.00	0.00	0.60
kVAR	+ 0.59	0.00	0.00	+ 0.58
PF	-0.03	0.13	---	-0.02
cosφ	-0.03	---	---	---
Arms	2.6	0.2	0.0	
	L1	L2	L3	
Vrms	226.3	215.9	215.1	
20/03/14 13:37:07 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

Escalón Final

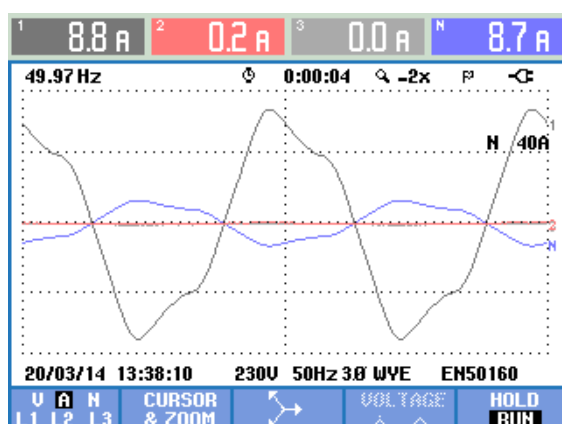
Voltios y amperios

Voltios/Amperios/Hz				
	0:00:02			
	L1	L2	L3	N
Vrms	243.9	207.4	210.1	18.5
Vpk	353.8	307.0	298.0	32.6
CF	1.45	1.48	1.42	1.77
Hz	49.96			
	L1	L2	L3	N
Arms	8.8	0.2	0.0	8.7
Apk	13.2	0.2	0.1	13.0
CF	1.50	OL	OL	1.49
20/03/14 13:38:01 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

Armónicos

TABLA ARMÓNICOS				
	0:00:05			
Volt	L1	L2	L3	N
THD%	5.0	5.4	5.4	45.4
H3%	5.0	4.9	4.9	48.2
H5%	0.6	1.7	1.5	10.7
H7%	0.2	1.3	1.5	8.3
Amp	L1	L2	L3	N
H3%	16.6	4.0	13.3	16.7
H5%	3.3	0.9	3.4	3.3
H7%	1.7	0.7	3.1	1.7
20/03/14 13:38:25 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

Gráfica de corriente



Desequilibrios

Desequilibrio				
	0:00:03			
Uneg.	Vzero	Aneg.	Rzero	
Unbal.(%)	2.5	10.7	99.9	101
	L1	L2	L3	N
Vfund	239.9	209.3	211.4	14.2
Hz	49.96			
	L1	L2	L3	N
φV(°)	0.0	-240.7	-110.5	-188.9
φA(°)	-268.8	-254.3	-262.3	-89.1
Rfund	8.7	0.0	0.0	8.6
20/03/14 13:38:39 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
			TREND	HOLD RUN

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

Potencia

Potencia y energía				
FUND 0:00:00				
	L1	L2	L3	Total
kW	- 0.05	0.01	- 0.01	- 0.04
kVA	2.12	0.01	0.01	2.13
kVAR	÷ 2.12	0.00	0.00	÷ 2.11
PF	-0.02	0.23	---	-0.02
Cosφ	-0.02	---	---	
A rms	8.8	0.2	0.0	
	L1	L2	L3	
U rms	244.0	207.7	210.4	
20/03/14 13:38:46 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE	ENERGY		TREND	HOLD RUN

6.4.3. Circuito RL

Datos del primario

Desequilibrios		V	I	P	Q	S	Cos φ
528,71	A	126,3	1,7	148,1	162,7	220,0	0,67
	B	125,5	2,1	168,1	292,7	337,5	0,50
	C	125,7	1,6	48,1	242,7	247,4	0,19
312,6	A	126,0	2,1	238,1	102,7	259,3	0,92
	B	124,9	2,6	268,1	342,7	435,1	0,62
	C	125,8	1,6	48,1	242,7	247,4	0,19
240,48	A	125,9	2,5	338,1	42,7	340,8	0,99
	B	124,7	3,1	368,1	402,7	545,6	0,67
	C	125,9	1,6	48,1	242,7	247,4	0,19
168,5	A	125,6	3,0	428,1	-7,3	428,2	1,00
	B	124,3	3,6	458,1	452,7	644,0	0,71
	C	125,9	1,6	48,1	242,7	247,4	0,19
136,97	A	124,0	3,5	508,1	-67,3	512,5	0,99
	B	122,3	4,0	538,1	482,7	722,9	0,74
	C	124,6	1,6	48,1	232,7	237,6	0,20
115,3	A	123,5	3,9	588,1	-127,3	601,7	0,98
	B	121,8	4,5	628,1	532,7	823,6	0,76
	C	124,5	1,6	48,1	232,7	237,6	0,20
96	A	123,0	4,4	678,1	-177,3	700,9	0,97
	B	121,2	5,0	718,1	582,7	924,8	0,78
	C	124,4	1,6	48,1	232,7	237,6	0,20
83	A	124,3	5,0	778,1	-237,3	813,5	0,96
	B	122,3	5,5	818,1	642,7	1040,4	0,79
	C	126,1	1,6	48,1	242,7	247,4	0,19
73,44	A	124,1	5,5	868,1	-297,3	917,6	0,95
	B	121,9	6,0	908,1	702,7	1148,2	0,79
	C	126,2	1,6	48,1	242,7	247,4	0,19
66,75	A	123,4	5,9	948,1	-347,3	1009,7	0,94
	B	121,0	6,5	988,1	742,7	1236,1	0,80
	C	125,6	1,6	48,1	242,7	247,4	0,19

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

Datos del secundario

Desequilibrios		V	I	P	Q	S	Cos ϕ
528,71	A	218,7	0,6	110	30	110	1,000
	B	217,3	1	130	160	210	0,619
	C	217,7	0,5	10	110	110	0,091
312,6	A	218,2	1	200	-30	200	1,000
	B	216,4	1,5	230	210	310	0,742
	C	217,9	0,5	10	110	110	0,091
240,48	A	218,1	1,4	300	-90	310	0,968
	B	216	2	330	270	420	0,786
	C	218	0,5	10	110	110	0,091
168,5	A	217,6	1,9	390	-140	410	0,951
	B	215,3	2,5	420	320	530	0,792
	C	218,1	0,5	10	110	110	0,091
136,97	A	214,7	2,4	470	-200	510	0,922
	B	211,9	2,9	500	350	620	0,806
	C	215,9	0,5	10	100	100	0,100
115,3	A	213,9	2,8	550	-260	610	0,902
	B	211	3,4	590	400	710	0,831
	C	215,7	0,5	10	100	100	0,100
96	A	213,1	3,3	640	-310	710	0,901
	B	209,9	3,9	680	450	810	0,840
	C	215,4	0,5	10	100	100	0,100
83	A	215,3	3,9	740	-370	830	0,892
	B	211,9	4,4	780	510	940	0,830
	C	218,4	0,5	10	110	110	0,091
73,44	A	214,9	4,4	830	-430	940	0,883
	B	211,1	4,9	870	570	1040	0,837
	C	218,6	0,5	10	110	110	0,091
66,75	A	213,7	4,8	910	-480	1030	0,883
	B	209,5	5,4	950	610	1120	0,848
	C	217,6	0,5	10	110	110	0,091

Tabla 6.16. Ensayo con cargas desequilibradas RL.

Primer Escalón

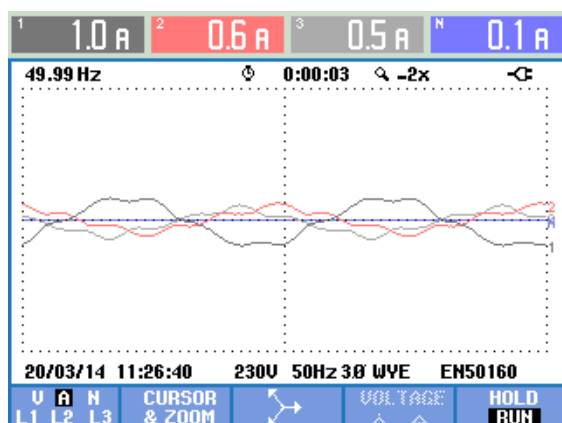
Tensión e intensidad

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	217.3	218.7	218.0	2.6
Vpk	306.6	308.0	307.5	5.4
CF	1.41	1.41	1.41	2.07
Hz	49.98			
	L1	L2	L3	N
Arms	1.0	0.6	0.5	0.1
Apk	1.4	1.1	1.0	0.1
CF	1.46	2.03	1.91	0.1
20/03/14 11:26:27 230V 50Hz 3Ø WYE ENS0160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

Armónicos

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
THD%	2.0	1.7	1.9	69.3
H3%	1.2	1.0	1.1	68.6
H5%	0.5	0.6	0.5	4.4
H7%	1.4	1.2	1.4	3.1
Amp	L1	L2	L3	N
H3%	1.5	10.4	8.4	0.3
H5%	13.2	20.3	20.4	0.3
H7%	2.5	3.7	3.9	0.4
20/03/14 11:26:56 230V 50Hz 3Ø WYE ENS0160				
U A W		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

Gráfica de intensidad



Desequilibrios

Desequilibrio				
	Uneg.	Uzero	Aneg.	Azero
Unbal.(%)	0.3	0.1	55.7	2.0
	L1	L2	L3	N
Vfund	217.2	218.8	217.7	1.9
Hz	50.00			
	L1	L2	L3	N
∠V(°)	0.0	-240.0	-119.8	-52.8
∠A(°)	-50.2	-257.2	-203.6	-35.4
Rfund	1.0	0.5	0.5	0.0
20/03/14 11:27:12 230V 50Hz 3Ø WYE ENS0160				
			TREND	HOLD RUN

Potencia

Potencia y energía				
	L1	L2	L3	Total
kW	0.13	0.11	0.01	0.25
kVA	0.21	0.11	0.11	0.43
kVAR	0.16	0.03	0.11	0.30
PF	0.63	0.88	0.11	0.56
cosφ	0.64	0.96	0.11	
Arms	1.0	0.6	0.5	
	L1	L2	L3	
Vrms	217.3	218.7	217.7	
20/03/14 11:27:24 230V 50Hz 3Ø WYE ENS0160				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

Escalón Final

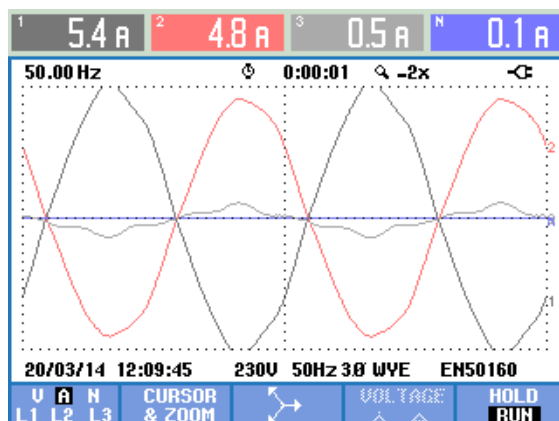
Tensión e intensidad

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
V _{rms}	209.6	213.8	217.7	2.7
V _{pk}	295.6	300.8	307.8	5.6
CF	1.41	1.41	1.41	2.06
Hz	49.99			
	L1	L2	L3	N
A _{rms}	5.4	4.8	0.5	0.1
A _{pk}	7.9	7.0	1.0	0.1
CF	1.46	1.45	1.98	0.1
20/03/14 12:09:40 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

Armónicos

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
THD%	1.8	1.7	1.8	62.9
H3%	1.1	0.9	1.1	62.3
H5%	0.7	0.8	0.8	2.0
H7%	1.2	1.1	1.2	3.5
	L1	L2	L3	N
A _{rms}	0.4	1.3	14.2	0.3
H3%	2.7	2.2	17.7	0.1
H5%	1.4	0.8	4.3	0.2
20/03/14 12:09:53 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A U		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

Gráfica de intensidad



Desequilibrios

Desequilibrio				
	Uneg.	Uzero	Aneg.	Azero
Unbal.(%)	2.2	0.2	96.6	0.6
	L1	L2	L3	N
V _{fund}	209.5	213.7	217.8	2.1
Hz	49.99			
	L1	L2	L3	N
φV(°)	0.0	-242.0	-120.3	-54.0
φA(°)	-32.7	-214.1	-202.7	-29.1
A _{fund}	5.4	4.8	0.5	0.0
20/03/14 12:10:07 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
			TREND	HOLD RUN

Potencia

Potencia y energía				
	L1	L2	L3	Total
kW	0.95	0.91	0.01	1.87
kVA	1.12	1.03	0.11	2.27
kVAR	0.61	0.48	0.11	0.23
PF	0.84	0.88	0.13	0.83
cosφ	0.84	0.88	0.14	
A _{rms}	5.4	4.8	0.5	
	L1	L2	L3	
V _{rms}	209.5	213.7	217.6	
20/03/14 12:10:29 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

6.4.4. Circuito RC

Devanado Primario

		V	I	P	Q	S	Cos φ
363,9	A	127,1	5,0	128,1	982,7	991,0	0,13
	B	126,3	4,5	118,1	852,7	860,8	0,14
	C	126,5	4,7	18,1	902,7	902,9	0,02
240,48	A	126,8	5,3	228,1	1032,7	1057,6	0,22
	B	125,8	4,3	218,1	792,7	822,2	0,27
	C	126,5	4,7	18,1	902,7	902,9	0,02
181,23	A	126,8	5,7	328,1	1092,7	1140,9	0,29
	B	125,9	4,2	318,1	732,7	798,8	0,40
	C	127,0	4,7	18,1	902,7	902,9	0,02
147,09	A	126,6	6,1	418,1	1152,7	1226,2	0,34
	B	125,4	4,2	18,1	902,7	902,9	0,02
	C	127,1	4,7	18,1	902,7	902,9	0,02
122,46	A	126,1	6,5	508,1	1202,7	1305,6	0,39
	B	124,6	4,3	508,1	612,7	796,0	0,64
	C	126,7	4,7	18,1	902,7	902,9	0,02
104,85	A	125,2	6,8	598,1	1242,7	1379,1	0,43
	B	123,6	4,4	588,1	552,7	807,1	0,73
	C	126,2	4,6	18,1	892,7	892,9	0,02
91,38	A	124,9	7,3	688,1	1292,7	1464,4	0,47
	B	123,2	4,6	678,1	492,7	838,2	0,81
	C	126,3	4,6	8,1	902,7	902,7	0,01
81,3	A	124,6	7,7	778,1	1342,7	1551,9	0,50
	B	122,8	4,9	768,1	442,7	886,5	0,87
	C	126,3	4,6	8,1	902,7	902,7	0,01
73,44	A	124,5	8,2	868,1	1402,7	1649,6	0,53
	B	122,5	5,2	858,1	382,7	939,6	0,91
	C	126,5	4,6	18,1	902,7	902,9	0,02
61,2	A	124,2	8,6	958,1	1452,7	1740,2	0,55
	B	122,2	5,5	948,1	322,7	1001,5	0,95
	C	126,5	4,6	8,1	902,7	902,7	0,01

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

Devanado Secundario

		V	I	P	Q	S	Cos ϕ
363,9	A	220,2	3,9	90	850	850	0,106
	B	218,8	3,4	80	720	720	0,111
	C	219,1	3,6	-20	770	770	-0,026
240,48	A	219,6	4,2	190	900	920	0,207
	B	217,9	3,2	180	660	680	0,265
	C	219,1	3,6	-20	770	770	-0,026
181,23	A	219,7	4,6	290	960	1010	0,287
	B	218	3,1	280	600	670	0,418
	C	220	3,6	-20	770	780	-0,026
147,09	A	219,3	5	380	1020	1090	0,349
	B	217,2	3,1	-20	770	780	-0,026
	C	220,1	3,6	-20	770	780	-0,026
122,46	A	218,4	5,4	470	1070	1160	0,405
	B	215,9	3,2	470	480	670	0,701
	C	219,5	3,6	-20	770	770	-0,026
104,85	A	216,8	5,7	560	1110	1240	0,452
	B	214	3,3	550	420	690	0,797
	C	218,6	3,5	-20	760	770	-0,026
91,38	A	216,4	6,2	650	1160	1330	0,489
	B	213,4	3,5	640	360	740	0,865
	C	218,8	3,5	-30	770	770	-0,039
81,3	A	215,8	6,6	740	1210	1420	0,521
	B	212,7	3,8	730	310	800	0,913
	C	218,8	3,5	-30	770	770	-0,039
73,44	A	215,6	7,1	830	1270	1520	0,546
	B	212,2	4,1	820	250	860	0,953
	C	219,1	3,5	-20	770	770	-0,026
61,2	A	215,2	7,5	920	1320	1610	0,571
	B	211,7	4,4	910	190	930	0,978
	C	219,1	3,5	-30	770	770	-0,039

Tabla 6.17. Ensayo con cargas desequilibradas RC.

Primer Escalón

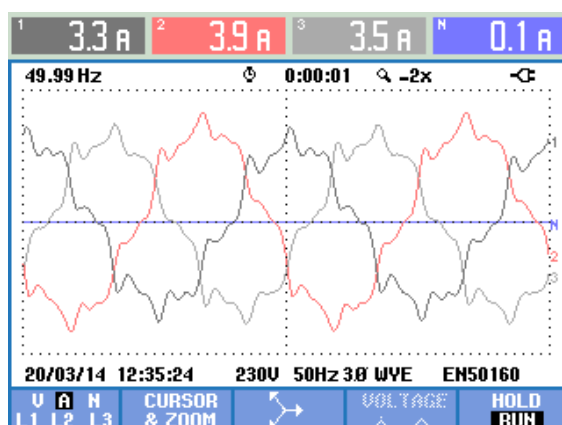
Voltios y amperios

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	218.4	219.9	218.8	2.5
Vpk	307.1	309.7	307.9	5.4
CF	1.41	1.41	1.41	2.11
Hz	49.99			
	L1	L2	L3	N
Arms	3.3	3.9	3.5	0.1
Apk	5.6	6.4	5.7	0.1
CF	1.66	1.64	1.61	OL
20/03/14 12:35:16 230V 50Hz 3Ø WYE ENS0160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

Armónicos

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
THD%	2.4	2.2	2.4	70.8
H3%	1.2	1.1	1.1	71.4
H5%	0.8	0.9	0.9	3.7
H7%	1.9	1.6	1.8	2.2
	L1	L2	L3	N
Arms	0.2	0.3	0.4	0.3
H5%	4.6	3.7	4.5	0.2
H7%	13.6	10.8	12.3	0.3
20/03/14 12:36:52 230V 50Hz 3Ø WYE ENS0160				
U A W		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

Gráfica de intensidad



Desequilibrios

Desequilibrio				
	Uneg.	Uzero	Rneg.	Rzero
Unbal.(%)	0.3	0.1	9.4	0.7
	L1	L2	L3	N
Vfund	218.5	219.9	218.9	1.8
Hz	50.00			
	L1	L2	L3	N
φV(°)	0.0	-239.9	-119.8	-56.0
φR(°)	-276.6	-155.9	-28.0	-16.5
Rfund	3.3	3.9	3.5	0.0
20/03/14 12:37:34 230V 50Hz 3Ø WYE ENS0160				
			TREND	HOLD RUN

Potencia

Potencia y energía				
	FUND	L1	L2	L3
kW	0.08	0.09	-0.02	0.15
kVA	0.72	0.85	0.77	2.34
kVAR	÷ 0.72	÷ 0.85	÷ 0.77	÷ 2.33
PF	0.11	0.10	-0.03	0.06
Cosφ	0.11	0.11	-0.03	
Arms	3.4	3.9	3.6	
	L1	L2	L3	
Vrms	218.8	220.2	219.1	
20/03/14 12:37:43 230V 50Hz 3Ø WYE ENS0160				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

Escalón Final

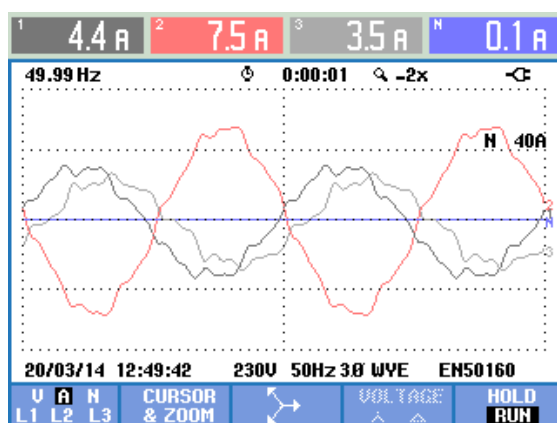
Voltios y amperios

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	211.5	215.1	219.1	2.4
Vpk	298.1	303.2	308.9	5.1
CF	1.41	1.41	1.41	2.09
Hz	49.99			
	L1	L2	L3	N
Arms	4.4	7.5	3.5	0.1
Apk	6.5	11.0	5.6	0.1
CF	1.48	1.46	1.59	OL
20/03/14 12:49:33 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

Desequilibrios

Desequilibrio				
	Uneg.	Uzero	Aneg.	Azero
Unbal.(%)	1.9	0.1	65.6	0.9
	L1	L2	L3	N
Vfund	211.8	215.3	219.3	1.7
Hz	50.01			
	L1	L2	L3	N
φV(°)	0.0	-241.8	-120.3	-53.2
φA(°)	-348.0	-186.6	-28.4	-38.8
Afund	4.4	7.5	3.5	0.0
20/03/14 12:50:18 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
			TREND	HOLD RUN

Gráfica de intensidad



Potencia

Potencia y energía				
	FUND	L1	L2	L3
kW	0.91	0.92	-0.03	1.81
kVA	0.93	1.61	0.77	3.32
kVAR	÷ 0.19	÷ 1.32	÷ 0.77	÷ 2.29
PF	0.97	0.57	-0.03	0.54
Cosφ	0.98	0.57	-0.03	
Arms	4.4	7.5	3.5	
	L1	L2	L3	
Vrms	211.7	215.2	219.1	
20/03/14 12:50:26 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE		ENERGY	TREND	HOLD RUN

Armónicos

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
Volts				
THD%	2.1	2.0	2.2	71.4
H3%	1.1	1.0	1.1	71.0
H5%	0.7	0.8	0.8	3.0
H7%	1.6	1.4	1.7	1.9
Amps				
H3%	0.1	0.2	0.2	0.4
H5%	3.5	1.4	4.0	0.2
H7%	7.5	5.4	11.2	0.5
20/03/14 12:50:10 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

7. SIMULACIÓN.

7.1. Datos de simulación.

Para poder simular las experiencias llevadas a cabo en el laboratorio, primero debemos conocer que datos necesitamos y extraerlos de los ensayos llevados a cabo.

Obtención parámetros para el modelo.

Resistencia de los devanados:

$$R_1 = 0,6\Omega; R_2 = 0,9\Omega$$

(Fórmula 7.1)

Del ensayo de vacío obtenemos los siguientes datos:

$$V_0=220,1V \quad I_0=0,627A \quad P_0= 38,1W \quad Q_0=132,7VAR \quad S_0=138,1VA \\ V_{20}=135V$$

$$I_{1n} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot 380} = \frac{5000}{\sqrt{3} \cdot 380} = 7,59A$$

$$I_{0\%} = \frac{I_0}{I_n} \cdot 100 = \frac{0,627}{7,59} \cdot 100 = 8,25\%$$

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{S_0} = \frac{38,1W}{138,1VA} = 0,2758 \approx 0,276$$

$$\sin\varphi_0 = \frac{Q_0}{S_0} = 0,961$$

$$I_{fe} = I_0 \cdot \cos\varphi_0 = 0,627A \cdot 0,276 = 0,173A$$

$$I_{\mu} = I_0 \cdot \sin\varphi_0 = 0,627A \cdot 0,961 = 0,602A$$

$$R_{fe} = \frac{V_0}{I_{fe}} = \frac{220,1}{0,173} = 1272,25\Omega$$

$$X_{\mu} = \frac{V_0}{I_{\mu}} = \frac{220,1}{0,602} = 365,614\Omega$$

$$I_0 \% = \frac{I_{0100\%}}{I_{1n}} \cdot 100 = \frac{0,627}{13,1} \cdot 100 = 8,23\%$$

(Fórmula 7.2)

Del ensayo de cortocircuito obtenemos:

$$V_{cc}=9,5V \quad I_{cc}=7,71A \quad P_{cc}= 70,4W \quad Q_{cc}=19,3VAr$$

$$\cos\varphi_{cc} = \frac{P_{cc}}{V_{cc} \cdot I_{cc}} = 0,961$$

$$\operatorname{sen}\varphi_0 = \frac{Q_{cc}}{S_{cc}} = 0,2758 \approx 0,276$$

$$Z_{cc} = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} = \frac{9,5V}{7,71A} = 1,231\Omega$$

$$R_{cc} = Z_{cc} \cdot \cos\varphi_{cc} = 1,231\Omega \cdot 0,961 = 1,183\Omega$$

$$X_{cc} = Z_{cc} \cdot \operatorname{sen}\varphi_{cc} = 1,231\Omega \cdot 0,276 = 0,339\Omega$$

(Fórmula 7.3)

Del ensayo homopolar en vacío:

$$V_{00}=10,6V \quad I_{00}=9,68A \quad P_{00}= 29,3W \quad Q_{00}=98,1VAr \quad S_{00}=102,4VA$$

$$Z_{00} = 3 \cdot \frac{V_{00}}{I_{00}} = \frac{10,6V}{9,68A} = 3,25\Omega$$

$$I_{00} \% = \frac{I_{00100\%}}{I_{1n}} \cdot 100 = \frac{9,68}{13,1} \cdot 100 = 73,89\%$$

(Fórmula 7.4)

Del ensayo homopolar en cortocircuito:

$$V_{0cc}=1,9V \quad I_{0cc}=8,5A \quad P_{0cc}=15,8W \quad Q_{0cc}=155,8VAR \\ S_{0cc}=160,2VA$$

$$Z_{0cc} = 3 \cdot \frac{V_{0cc}}{I_{0cc}} = \frac{1,9V}{8,5A} = 0,65\Omega$$

(Fórmula 7.5)

Para nuestro modelo de MATLAB necesitamos los datos anteriores en sistema por unidad. Para ello tendremos en cuenta los siguientes datos de partida.

$$V_b = 220V \quad I_b = 13,1A \quad S_b = 5kVA$$

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{220V^2}{5000W} = 9,68\Omega$$

$$R_{1pu} = \frac{R_1}{Z_b} = \frac{0,6}{9,68} = 0,062\Omega$$

$$R_{ccpu} = \frac{R_{cc}}{Z_b} = \frac{0,394}{9,68} = 0,04\Omega$$

$$R_{2pu} = \frac{R_2}{Z_b} = \frac{0,9}{9,68} = 0,093\Omega$$

$$X_{\mu pu} = \frac{X_{\mu}}{Z_b} = \frac{0,113}{9,68} = 0,011\Omega$$

$$R_{fepu} = \frac{R_{fe}}{Z_b} = \frac{1272,25}{9,68} = 131,44\Omega$$

$$Z_{00pu} = \frac{Z_{00}}{Z_b} = \frac{3,25}{9,68} = 0,33\Omega$$

$$X_{\mu pu} = \frac{X_{\mu}}{Z_b} = \frac{365,614}{9,68} = 37,77\Omega$$

$$Z_{0ccpu} = \frac{Z_{0cc}}{Z_b} = \frac{0,65}{9,68} = 0,067\Omega$$

(Fórmula 7.6)

7.2. Modelo de simulación.

El Transformador trifásico de Inductancia tipo Matriz (con dos bobinas), es un bloque que consta de un transformador trifásico con un núcleo de tres columnas y tres bobinas por fase. A diferencia del Transformador trifásico (con dos bobinas), el cual está basado en tres transformadores monofásicos separados, este bloque tiene en cuenta los acoplamientos entre las bobinas de las diferentes fases.

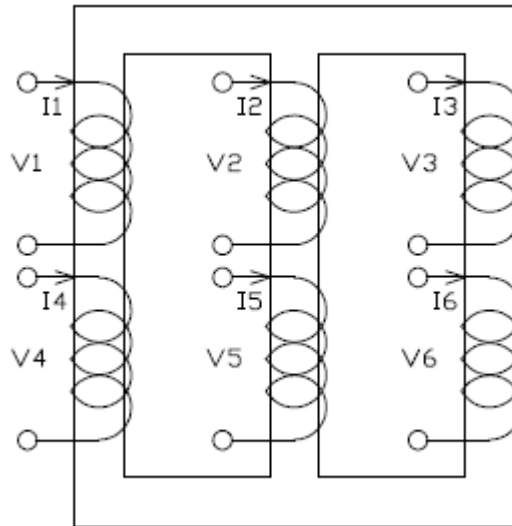


Figura 7.1. Transformador trifásico.

Esta geometría del núcleo implica que la bobina de la fase 1 está acoplada a las bobinas de todas las demás fases.

7.2.1. Modelo del transformador

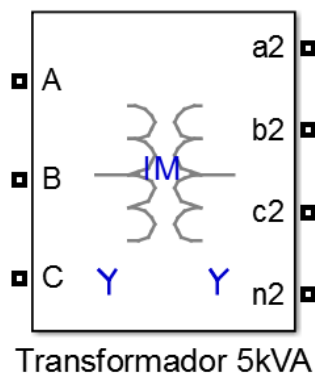


Figura 7.2. Transformador trifásico en MATLAB.

El bloque del Transformador trifásico de Inductancia tipo Matriz (con dos bobinas) realiza la siguiente relación de matrices:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & R_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & R_6 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \cdots & L_{16} \\ L_{21} & L_{22} & \cdots & L_{26} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{61} & L_{62} & \cdots & L_{66} \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_6 \end{bmatrix}$$

(Fórmula 7.6)

Los valores de R_1 a R_6 representan las resistencias de las bobinas. Los términos de inductancia propia de L_{ii} y los términos de inductancia mutua de L_{ij} son calculados por las razones entre tensiones, por el componente de las corrientes de inductancia sin carga y por las reactancias del cortocircuito en frecuencia nominal. Los conjuntos de valores de secuencia positiva y de secuencia cero permiten el cálculo de los términos diagonales 6 y 15 fuera de los términos de la diagonal de la matriz de inductancia simétrica.

Cuando el parámetro core type está ajustado a los tres núcleos monofásicos, el modelo usa dos circuitos independientes con matrices R y L de 3×3 . En esta condición, los parámetros de secuencia positiva y secuencia cero son idénticos y sólo se necesita especificar los valores de secuencia positiva.

Los términos propios y mutuos de L se obtienen a partir de corrientes de excitación (una bobina trifásica se excita y la otra bobina trifásica se deja abierta) y a partir de una secuencia positiva y una secuencia cero de las reactancias de cortocircuito X_{112} y X_{012} medidas con la excitación de la bobina trifásica 1 y con la bobina trifásica 2 cortocircuitada.

Asumiendo los siguientes parámetros de secuencia positivos:

Q_{11} = potencia reactiva trifásica en secuencia positiva absorbida por el arrollamiento 1 sin carga cuando el arrollamiento está excitado por una tensión en secuencia positiva V_{nom1} con el arrollamiento secundario en vacío.

Q_{12} = potencia reactiva trifásica en secuencia positiva absorbida por el arrollamiento 2 sin carga cuando el arrollamiento 2 está excitado por una tensión en secuencia positiva V_{nom2} con el arrollamiento 2 abierto

X_{112} = reactancia de cortocircuito en secuencia positiva en el primer arrollamiento cuando el segundo arrollamiento está cortocircuitado

V_{nom1}, V_{nom2} = tensión nominal línea a línea de los arrollamientos 1 y 2

La reactancia propia de secuencia directa viene dada por:

$$X_1(1,1) = \frac{V_{\text{nom1}}^2}{Q1_1}$$

$$X_1(2,2) = \frac{V_{\text{nom2}}^2}{Q1_2}$$

$$X_1(1,2) = X_1(2,1) = \sqrt{X_1(1,1) \cdot X_1(2,2) \cdot X1_{12}^2}$$

(Fórmula 7.7)

La reactancia de secuencia cero $X_{0(1,1)}$, $X_{0(2,2)}$ y la reactancia mutua $X_{0(1,2)}=X_{0(2,1)}$ también se calcula usando ecuaciones similares. Aquí tenemos la matriz de secuencias que relaciona las reactancias de secuencia directa e inversa del sistema.

$$\begin{bmatrix} X_1(1,1) & X_1(1,2) \\ X_1(2,1) & X_1(2,2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0(1,1) & X_0(1,2) \\ X_0(2,1) & X_0(2,2) \end{bmatrix}$$

(Fórmula 7.8)

De esta pareja se puede obtener una submatriz de 3 por 3 de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} X_s & X_m & X_m \\ X_m & X_s & X_m \\ X_m & X_m & X_s \end{bmatrix}$$

(Fórmula 7.9)

Donde las reactancias propias y mutuas vienen dadas por:

$$X_s = \frac{(X_0 + 2X_1)}{3}$$

$$X_m = \frac{(X_0 + X_1)}{3}$$

(Fórmula 7.10)

Con el fin de modelar las pérdidas en el núcleo, se tienen en cuenta las resistencias y reactancias conectadas a los terminales. Si se refieren dichas impedancias al primario las resistencias se calculan como:

$$R_{1_1} = \frac{V_{nom1}^2}{P_{1_1}}; R_{0_1} = \frac{V_{nom1}^2}{P_{0_1}}$$

(Fórmula 7.11)

El bloque tiene en cuenta el tipo de conexión que seleccione, y el icono del bloque se actualiza automáticamente. Se añaden puertos de entrada y salida marcados con N y n si se selecciona la configuración.

Corriente de excitación en secuencia cero.

Para obtener la corriente de excitación de secuencia cero en un transformador trifásico con un solo núcleo magnético, como el de nuestro estudio, se alimenta la máquina solo por la columna B y se mide la tensión en las fases A y C. El flujo producido en ambas fases debe ser el mismo y coincidir con $\Phi/2$, considerando esto y que la inductancia de fuga es es cero, , la tensión inducida en las fases A y C será $k \cdot V_B = V_B / 2$. De hecho, debido a la inductancia de fuga de los tres devanados, k debe ser ligeramente inferior a 0,5.

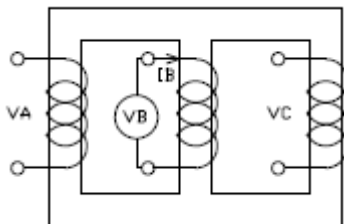


Figura 7.3. Ensayo para la determinación de la corriente de excitación en secuencia cero.

Asumiendo los siguientes valores, podemos obtener la relación:

$$V_B = Z_s \cdot I_B$$

$$V_A = Z_m \cdot I_B = \frac{V_B}{2}$$

$$V_C = Z_m \cdot I_B = \frac{-V_B}{2}$$

$$Z_s = \frac{2Z_1 + Z_0}{3}$$

$$Z_m = \frac{Z_0 - Z_1}{3}$$

$$V_A = V_C = \frac{Z_m}{Z_s} V_B = \frac{\frac{Z_0 - Z_1}{3}}{\frac{2Z_1 + Z_0}{3}} V_B = \frac{Z_0 - Z_1}{2Z_1 + Z_0} V_B = \frac{\frac{I_0}{I_1} - 1}{2\frac{I_0}{I_1} + 1} V_B = -kV_B$$

(Fórmula 7.12)

Siendo:

Z_s : Valor medio de las tres impedancias propias de cada devanado.

Z_m : Valor medio de la impedancia mutua entre fases.

Z_1 : Impedancia de secuencia directa.

Z_0 : Impedancia de secuencia homopolar.

I_1 : Corriente de excitación de secuencia directa.

I_0 : Corriente de excitación de secuencia cero.

K se puede obtener de la siguiente expresión:

$$\frac{I_0}{I_1} = \frac{1 + k}{1 - 2k}$$

(Fórmula 7.13)

Obviamente k no puede ser exactamente 0,5, porque esto conduciría a una corriente de secuencia cero infinita. Además, cuando los tres devanados son excitados con una tensión de secuencia cero, la trayectoria de flujo debe volver a través del aire, o el aceite que rodea los devanados. La alta reluctancia que encuentra el flujo de secuencia cero se traduce en una alta corriente de secuencia cero.

Cuadro diálogo de los devanados

En el siguiente cuadro podemos configurar el tipo de transformador que vamos a estudiar eligiendo las conexiones en el primario y en el secundario y las medidas que nos va a ofrecer

Three-Phase Transformer Inductance MatrixType (Two Windings) (mask) (link)

This three-phase transformer model represents inductive coupling between windings located on different phases of a three-limb or a five-limb core. It also allows modelling of a three-phase transformer built with three single-phase units (no coupling between phases). The transformer R L parameters are obtained from no-load excitation tests and short-circuit tests in positive- and zero-sequence. When "Three-limb or five-limb" core type is specified, the transformer is modelled by 6 coupled windings; otherwise, it is modelled by 3 sets of 2 coupled windings ($Z_0=Z_1$).

Configuration Parameters

Core type Three-limb or five-limb core

Winding 1 connection Y

Winding 2 connection Yn

☐ Connect windings 1 and 2 in autotransformer (Y, Yn or Yg)

Measurements All measurements

Figura 7.4. Cuadro de dialogo de los devanados en MATLAB

Core type

Este apartado nos permite configurar la geometría del núcleo: "Three single-phase cores" o "Three-limb or five-limb core", esto es banco trifásico a partir de 3 transformadores monofásicos, o núcleo trifásico con o sin devanado amortiguador. Si selecciona la primera opción, sólo se tendrán en cuenta los parámetros de secuencia directa para calcular la matriz de inductancia. Si se

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

elige la segunda opción, se utilizarán tanto los parámetros de secuencia directa como homopolar.

Winding 1 connection

Aquí podemos elegir el tipo de conexión en el devanado primario, que serán:

Y

Y con neutro accesible.

Y con neutro puesto a tierra.

Triángulo a las 1.

Triángulo a las 11.

Winding 2 connection

Aquí podemos elegir el tipo de conexión en el devanado secundario, las cuales son las mismas que en el caso anterior.

Connect windings 1 and 2 in autotransformer

Aquí ofrece la posibilidad de configurar los devanados primario y secundario como autotransformador, al no ser el objetivo de nuestro estudio y con el ánimo de no divagar. No estudiaremos esa posibilidad.

Measurements

Al marcar "Winding voltages" nos ofrece la posibilidad de medir la tensión en los terminales del arrollamiento del bloque de transformador trifásico.

Al marcar "Winding currents" nos ofrece la posibilidad de medir la corriente que fluye a través de los devanados del bloque transformador trifásico.

Seleccione "All measurements" para medir los voltajes y corrientes.

Sirviéndonos del vatímetro desarrollado íntegramente para este trabajo, podemos obtener tanto medidas de tensión e intensidad como de potencia activa y reactiva.

Three-Phase Transformer Inductance MatrixType (Two Windings) (mask) (link)

This three-phase transformer model represents inductive coupling between windings located on different phases of a three-limb or a five-limb core. It also allows modelling of a three-phase transformer built with three single-phase units (no coupling between phases). The transformer R L parameters are obtained from no-load excitation tests and short-circuit tests in positive- and zero-sequence. When "Three-limb or five-limb" core type is specified, the transformer is modelled by 6 coupled windings; otherwise, it is modelled by 3 sets of 2 coupled windings ($Z_0=Z_1$).

ConfigurationParameters

Nominal power and frequency [Pnom(VA) Fnom(Hz)]

[5e3 50]

Nominal line-line voltages [V1 V2] (Vrms)

[220 380]

Winding resistances [R1 R2] (pu)

[0.062 0.093]

Positive-sequence no-load excitation current (% of Inom)

8.253

Positive-sequence no-load losses (W)

114.3

Positive-sequence short-circuit reactance X12 (pu)

0.011

Zero-sequence no-load excitation current with Delta windings opened (% of Inom)

100

Zero-sequence no-load losses with Delta windings opened (W)

475

Zero-sequence short-circuit reactance X12 (pu)

0.067

Figura 7.5. Cuadro de dialogo de los parámetros del transformador

Nominal power and frequency

Debemos especificar la potencia nominal en VA y la frecuencia nominal de la máquina en Hz.

Nominal line-line voltages [V1 V2]

Las tensiones eficaces fase- fase de cada uno de los devanados.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

Winding resistances [R1 R2]

Las resistencias de los devanados 1 y 2 en pu.

Positive-sequence no-load excitation current

Corriente de excitación e secuencia directa. La obtenida en el ensayo de vacío.

Positive-sequence no-load losses

Las pérdidas en el núcleo mas las pérdidas en los arrollamientos en vacío a tension nominal.

Positive-sequence short-circuit reactance

La reactancia de cortocircuito obtenida en el ensayo en pu.

Zero-sequence no-load excitation current with Delta windings opened

La corriente de excitación en tanto por ciento de la corriente nominal cuando se aplica tensión y alguno de los devanados están conectados en estrella con neutro accesible o puesto a tierra.

Zero-sequence no-load losses with Delta windings opened

Las pérdidas de en secuencia cero con un devando puesto en estrella (Yn o Yg) medidos en el otro devanado con triangulo abierto.

Zero-sequence short-circuit reactance

La reactancia de cortocircuito de secuencia cero en pu, medida en el primario con el secundario en cortocircuito.

Limitaciones

Modelando un transformador con tres transformadores monofásicos o con devanado amortiguador, el modelo produce corrientes de saturación al quedar el flujo en el núcleo.

Para un núcleo de tres columnas, este modelo de saturación produce resultados aceptables, incluso si el flujo de secuencia cero circula por fuera del núcleo y vuelve a través del aire. A medida que el flujo de secuencia cero circula en el aire, el circuito magnético es principalmente lineal y su reluctancia es alta (altas corrientes de magnetización). Estas corrientes de secuencia cero altas necesarias para magnetizar el recorrido de aire ya se tienen en cuenta en el modelo lineal.

7.2.2. Vatímetro

El vatímetro ha sido especialmente diseñado para este estudio. Por las necesidades propias de nuestro estudio hemos elegido el método de los tres vatímetros, el cual nos ofrece datos precisos de tensión, intensidad, potencia activa y reactiva.

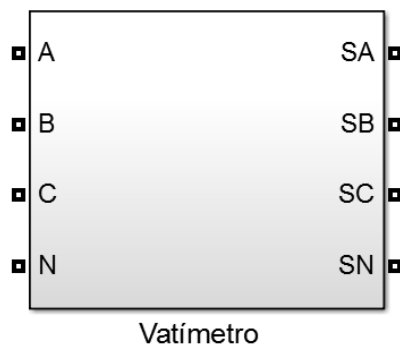


Figura 7.5. Vatímetro trifásico en MATLAB.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

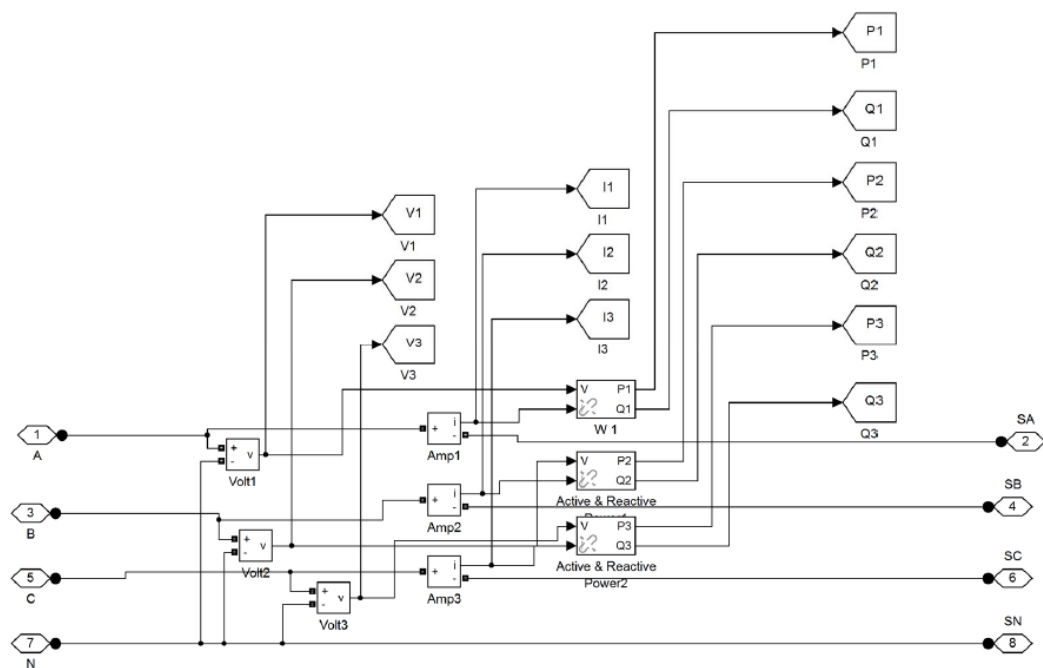


Figura 7.6. Composición interna del vatímetro trifásico en MATLAB.

Los voltímetros se han dispuesto entre fase y neutro y los amperímetros en cada una de las fases. La salida de amperímetros y voltímetros se ha llevado a tres vatímetros monofásicos, los cuales mediante Fourier calculan la potencia activa y reactiva.

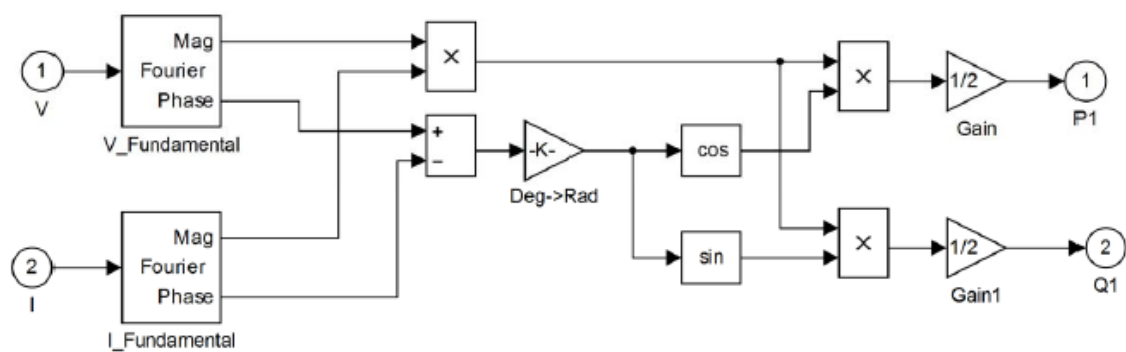


Figura 7.7. Vatímetro monofásico utilizado en MATLAB.

Las salidas del vatímetro se muestran en la pantalla principal del modelo, para su correcta visualización y muestran tensión, intensidad y potencia activa y reactiva.

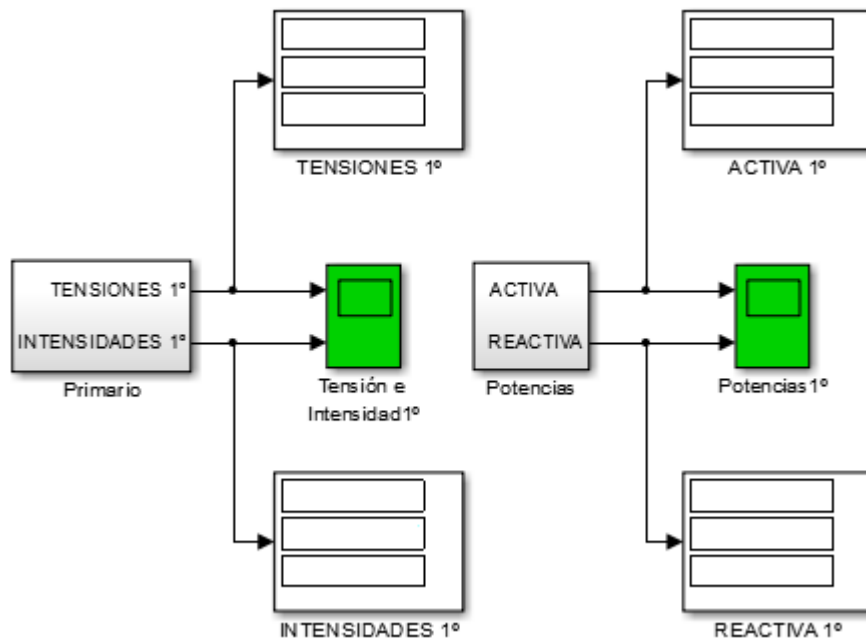


Figura 7.8. Visualización de resultados en MATLAB

Se disponen uno en el primario y otro en el secundario para poder comprender como se comporta el transformador.

7.2.3. Cargas y fuente de alimentación.

Para la simulación se han utilizado las cargas en serie trifásicas que matlab tiene en su librería y solamente se han modificado los valores para poder obtener los resultados deseados. El motivo de la elección de las mismas es la de que matlab no soporta cargas inductivas y capacitivas puras, por lo que si se quieren obtener resultados fiables se debe intercalar una pequeña resistencia en serie.

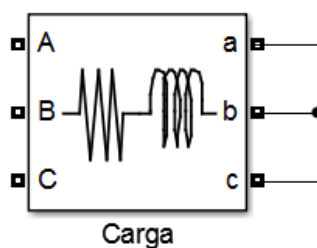


Figura 7.9. Representación de la carga serie en MATLAB

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

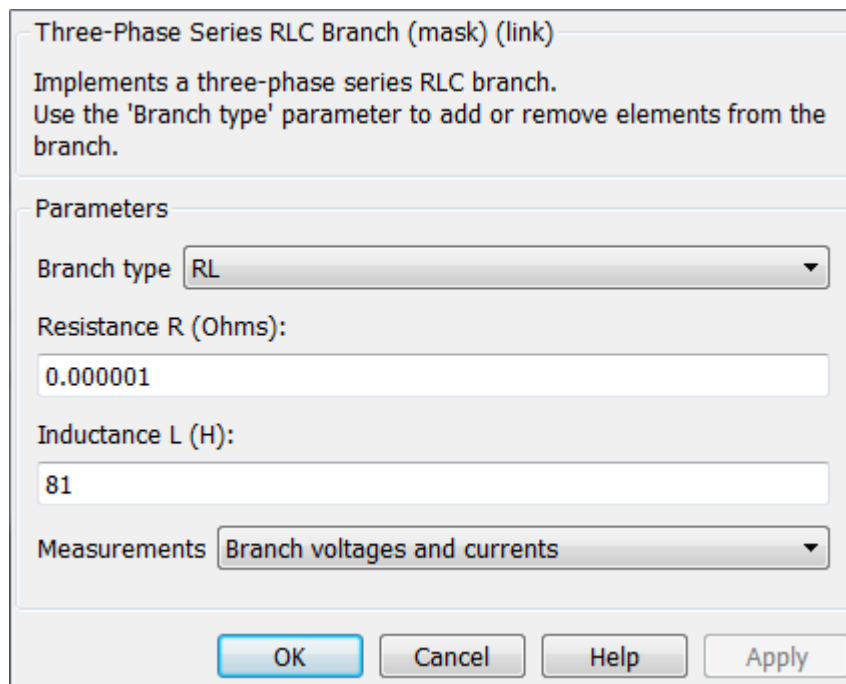


Figura 7.10. Cuadro de dialogo de la carga en MATLAB

En el caso de la fuente de alimentación, se ha dispuesto la trifásica genérica que ofrece matlab y se ha modificado el valor de tensión y frecuencia.

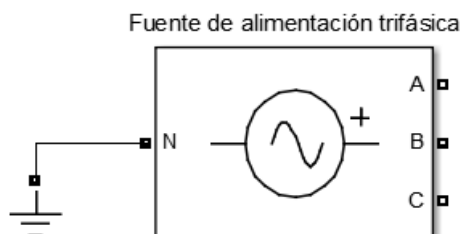


Figura 7.11. Representación de la fuente de alimentación en MATLAB

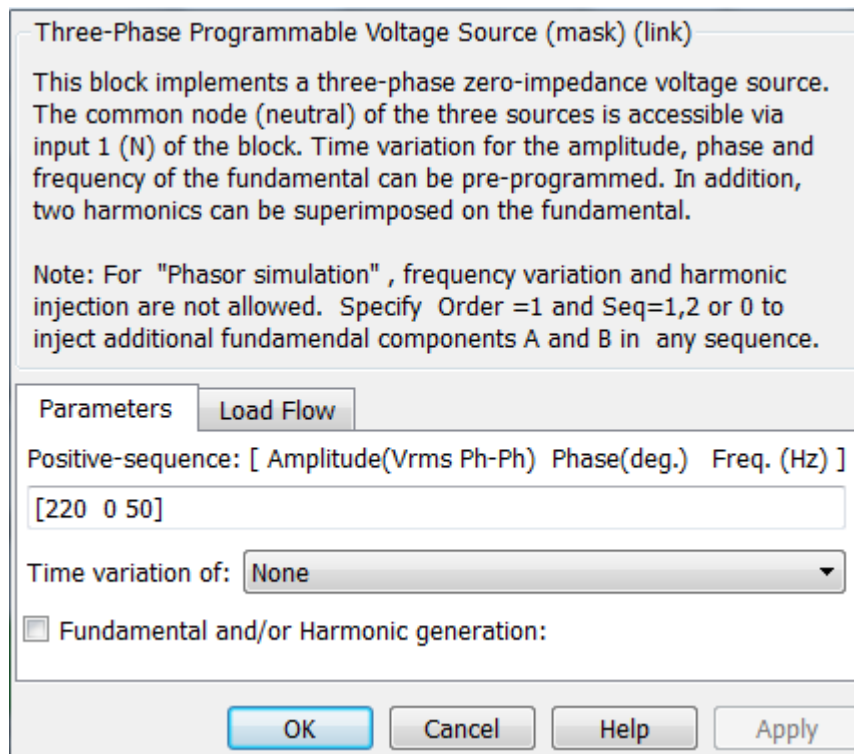


Figura 7.11. Cuadro de dialogo de la fuente de alimentación en MATLAB

8.- RESULTADOS SIMULADOS

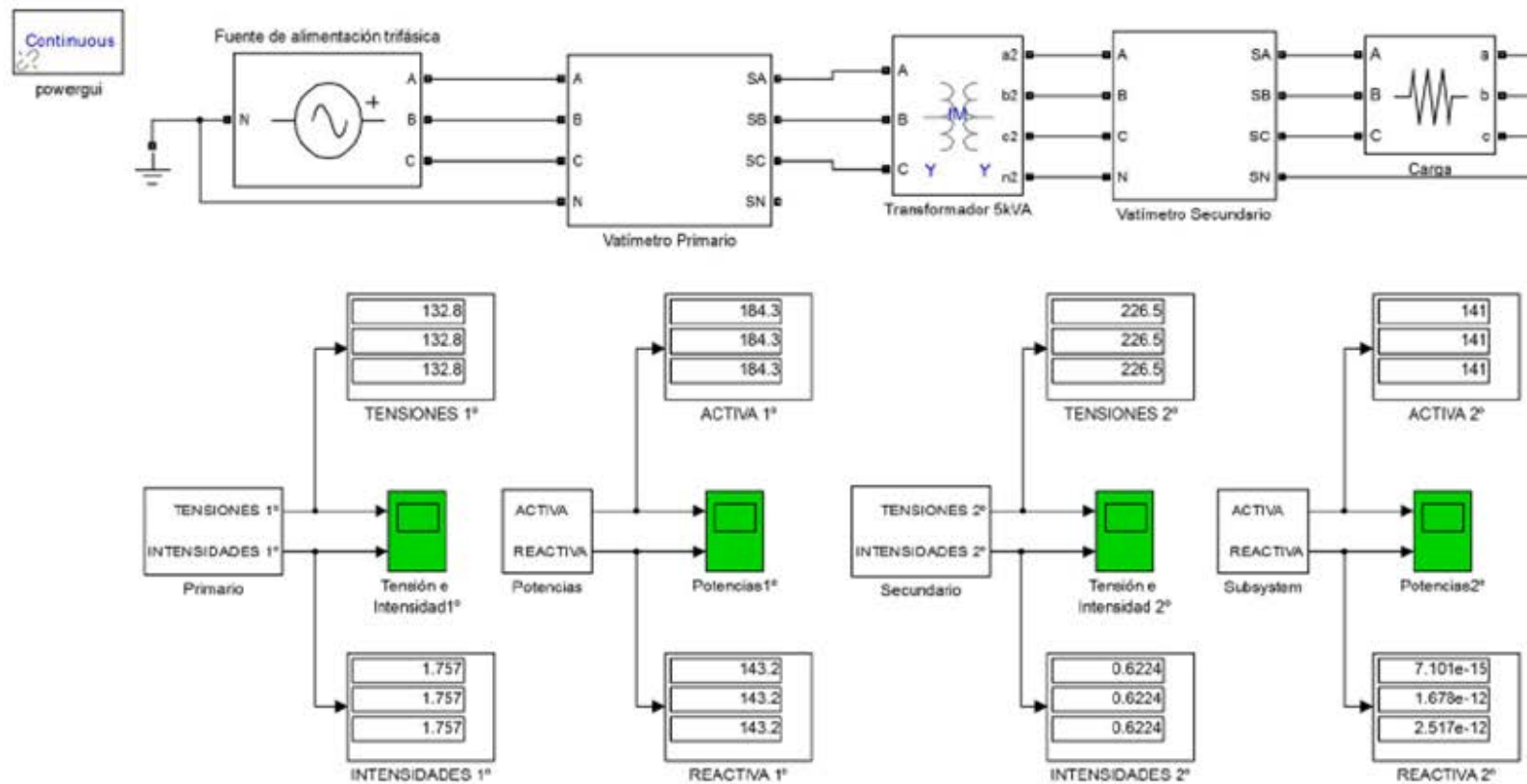
8.1.- Cargas lineales equilibradas.

8.1.1.- Carga Resistiva

Primer escalón

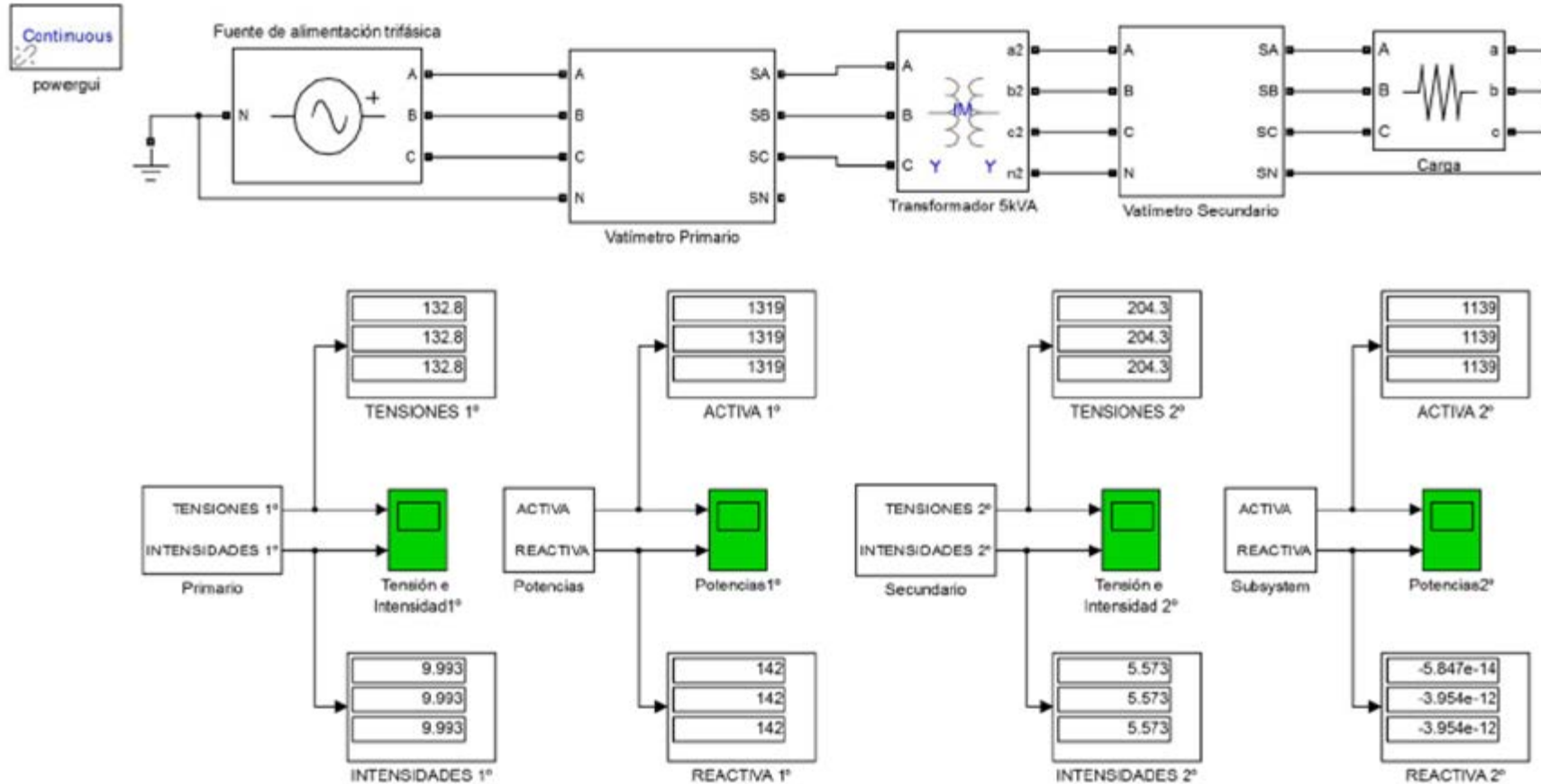
Carga resistiva pura.

Escalón: 1



Carga resistiva pura.

Escalón: 10

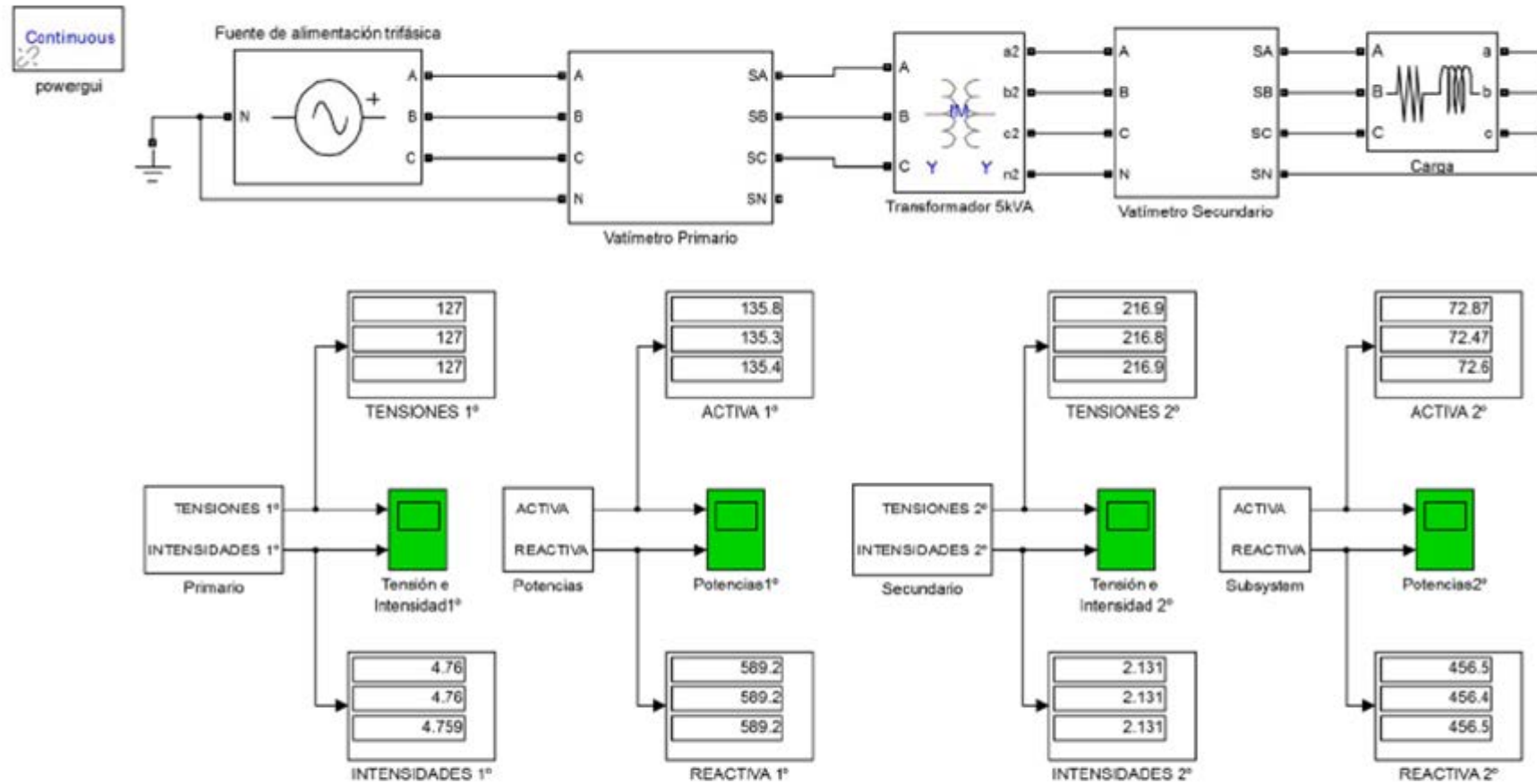


8.1.2.- Carga Inductiva

Primer escalón

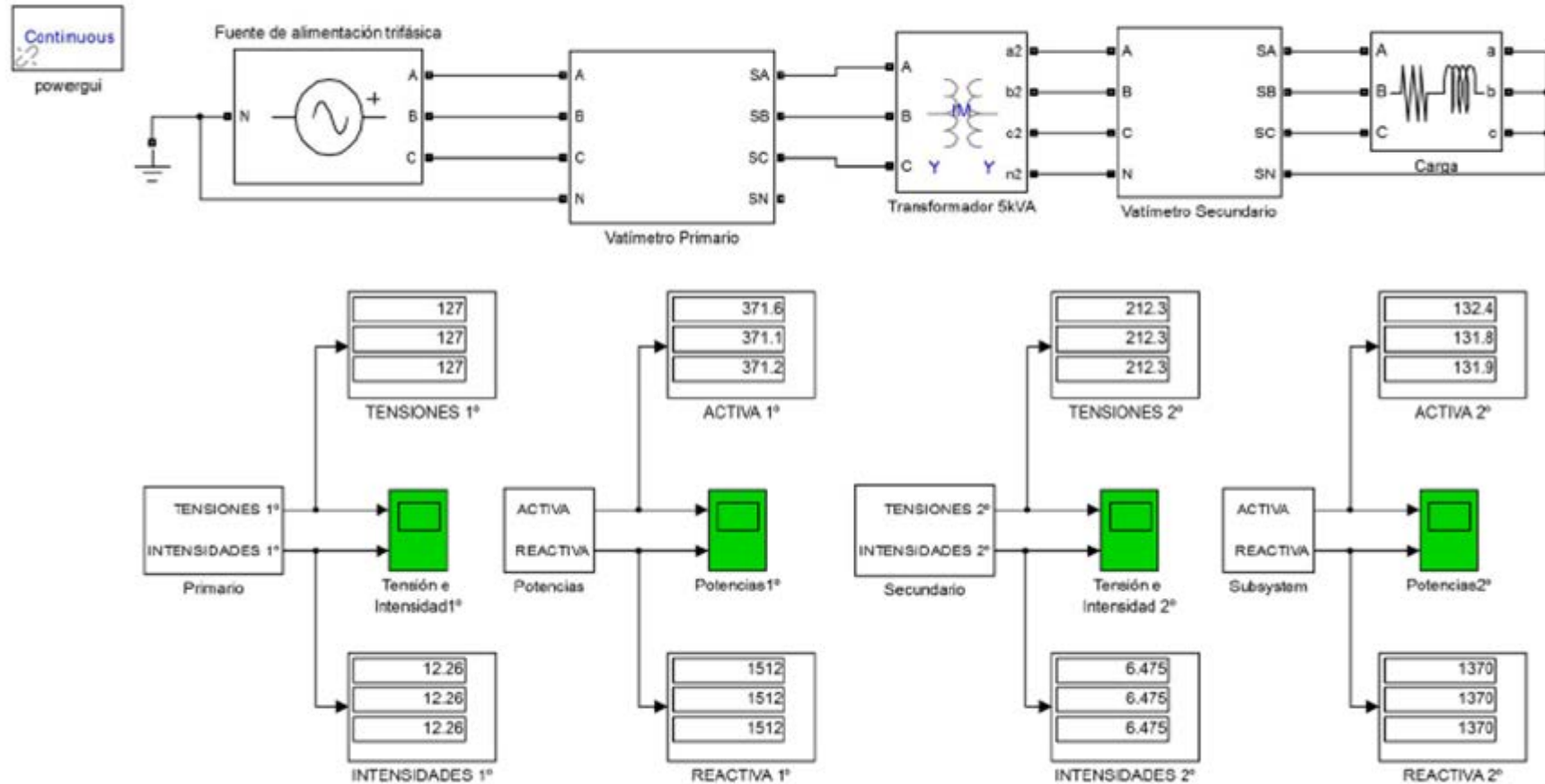
Carga inductiva.

Escalón: 1



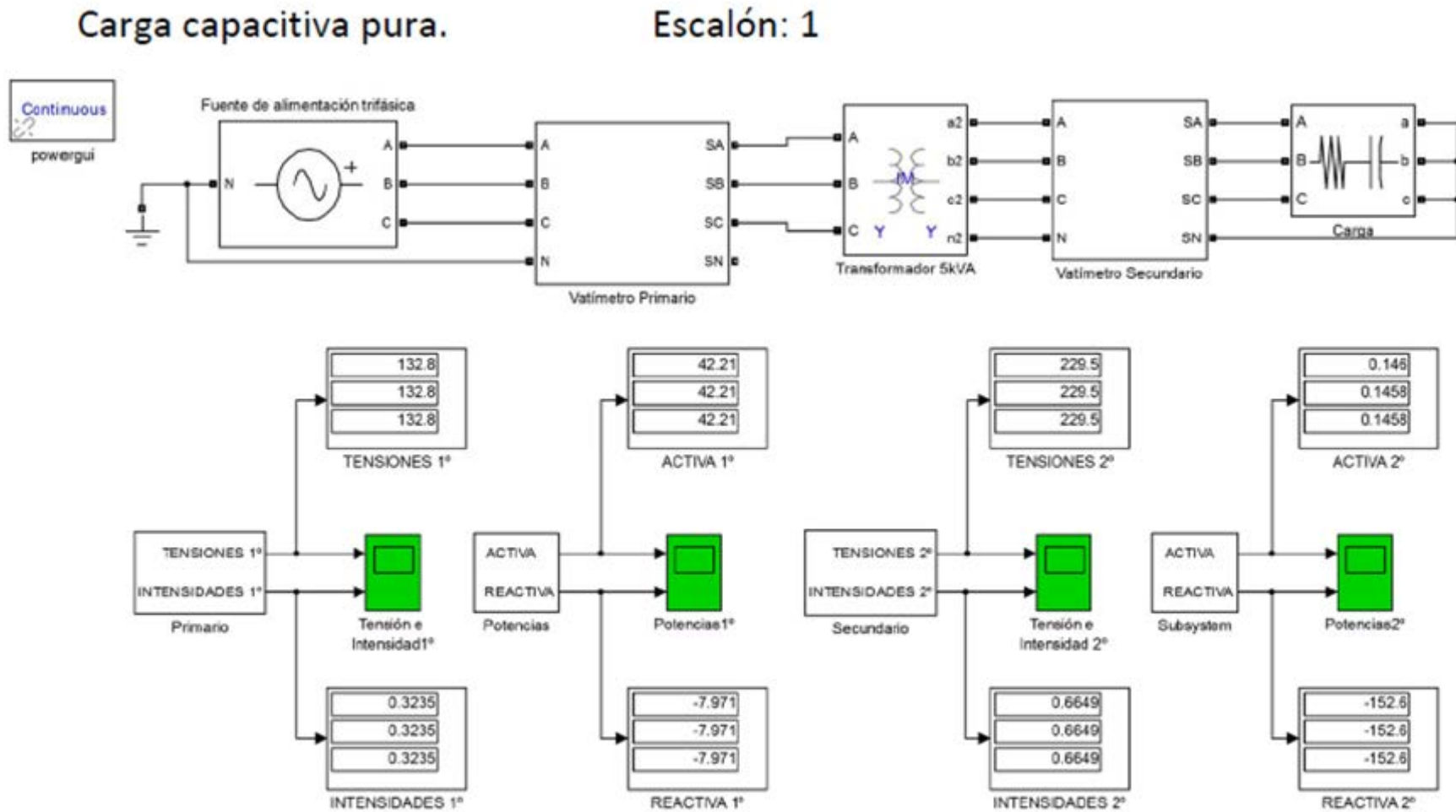
Carga inductiva.

Escalón: 5



8.1.3.- Carga Capacitiva

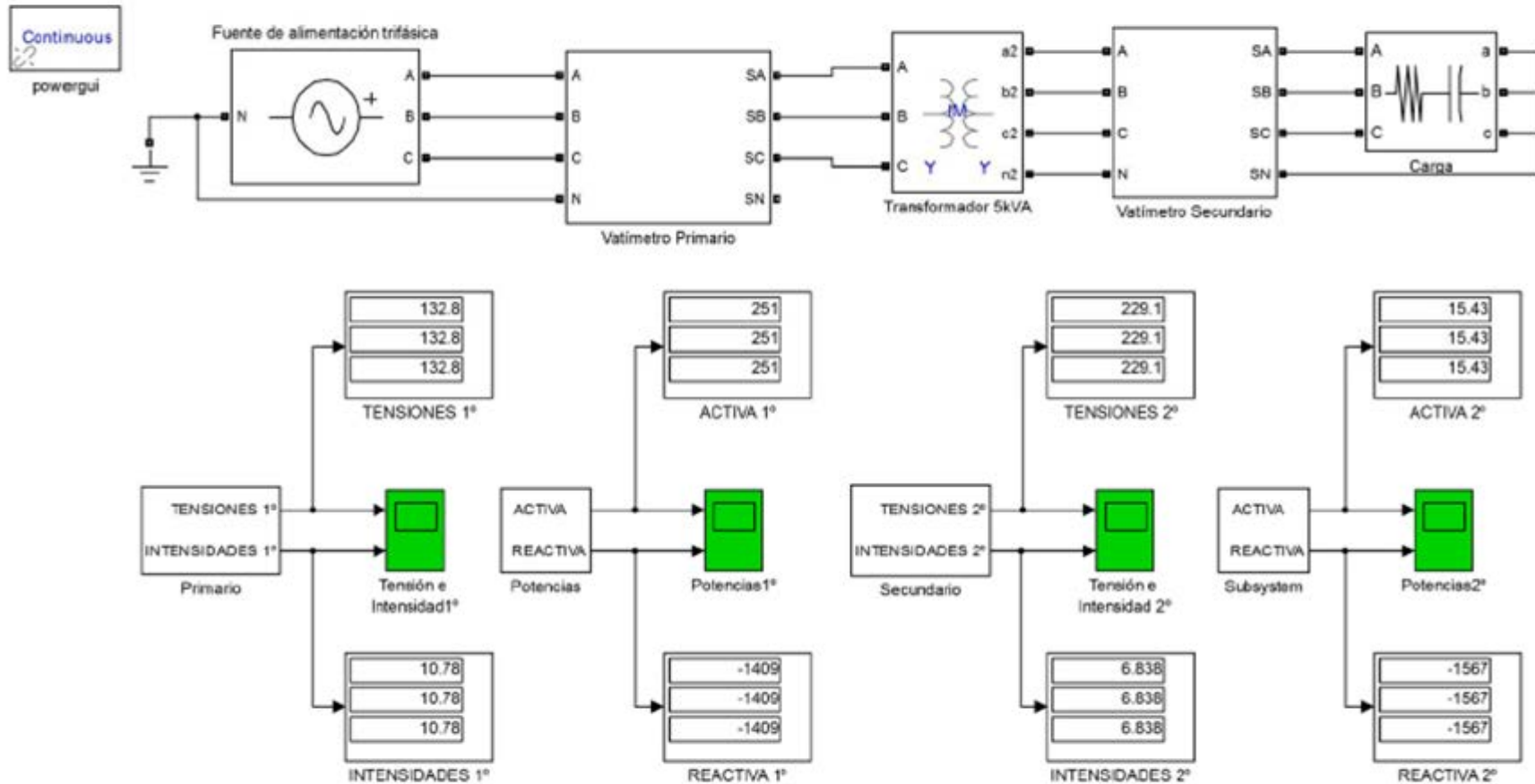
Primer escalón.



Escalón:

Carga capacitiva pura.

Escalón: 8



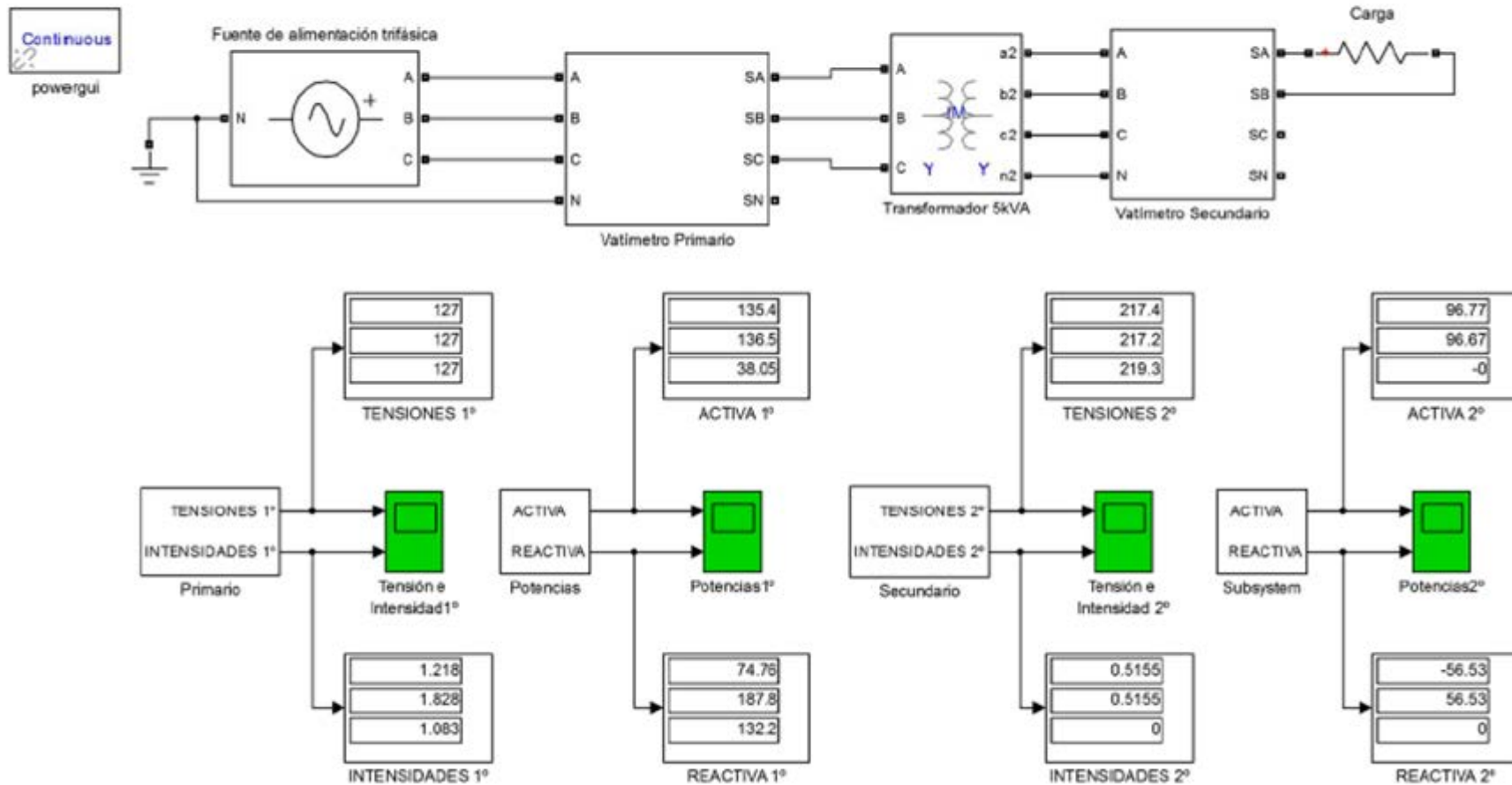
8.2.- Cargas desequilibradas.

8.2.1.- Carga Resistiva

Fase-Fase Primer escalón

Carga resistiva fase-fase.

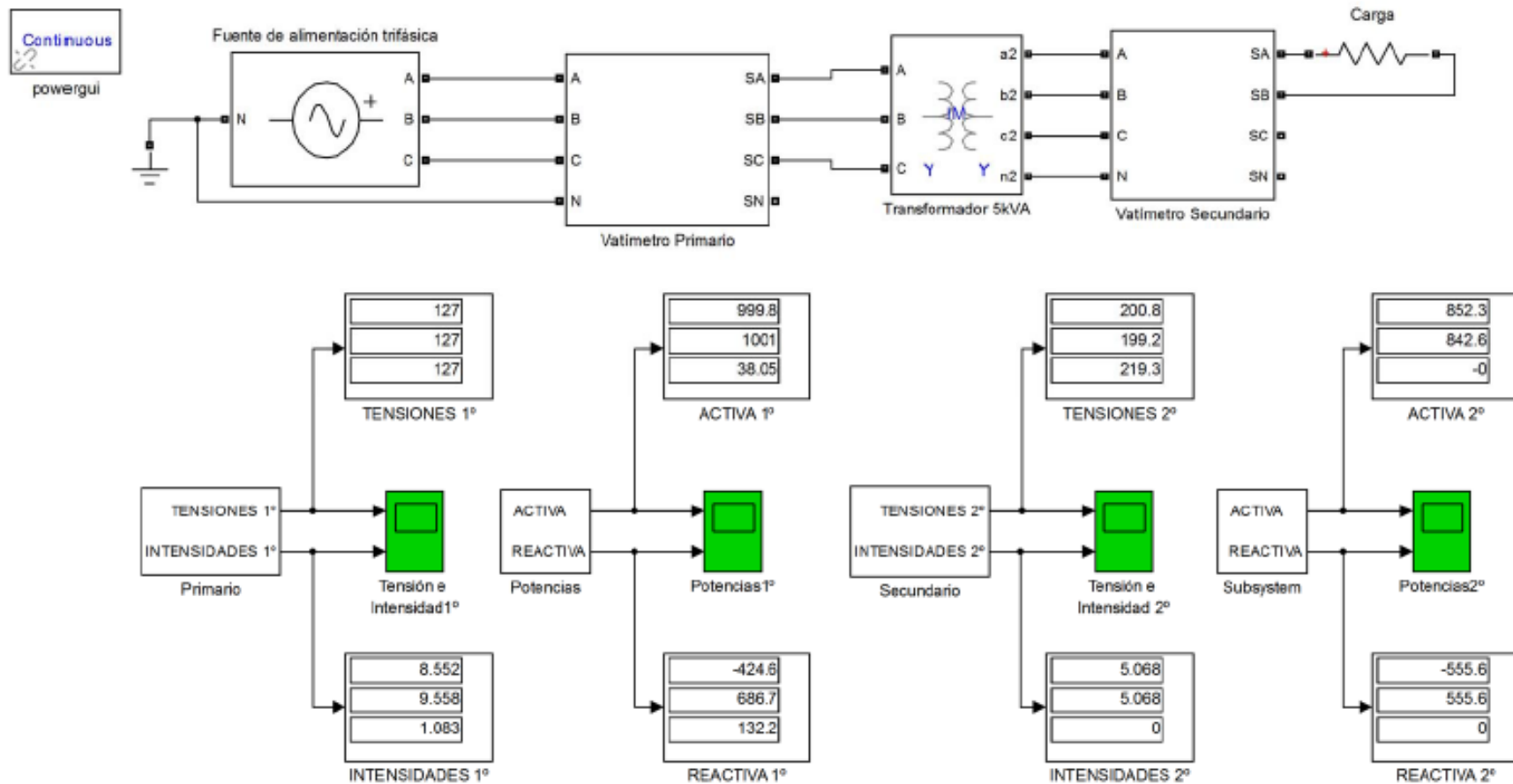
Escalón: 1



Escalón Final

Carga resistiva fase-fase.

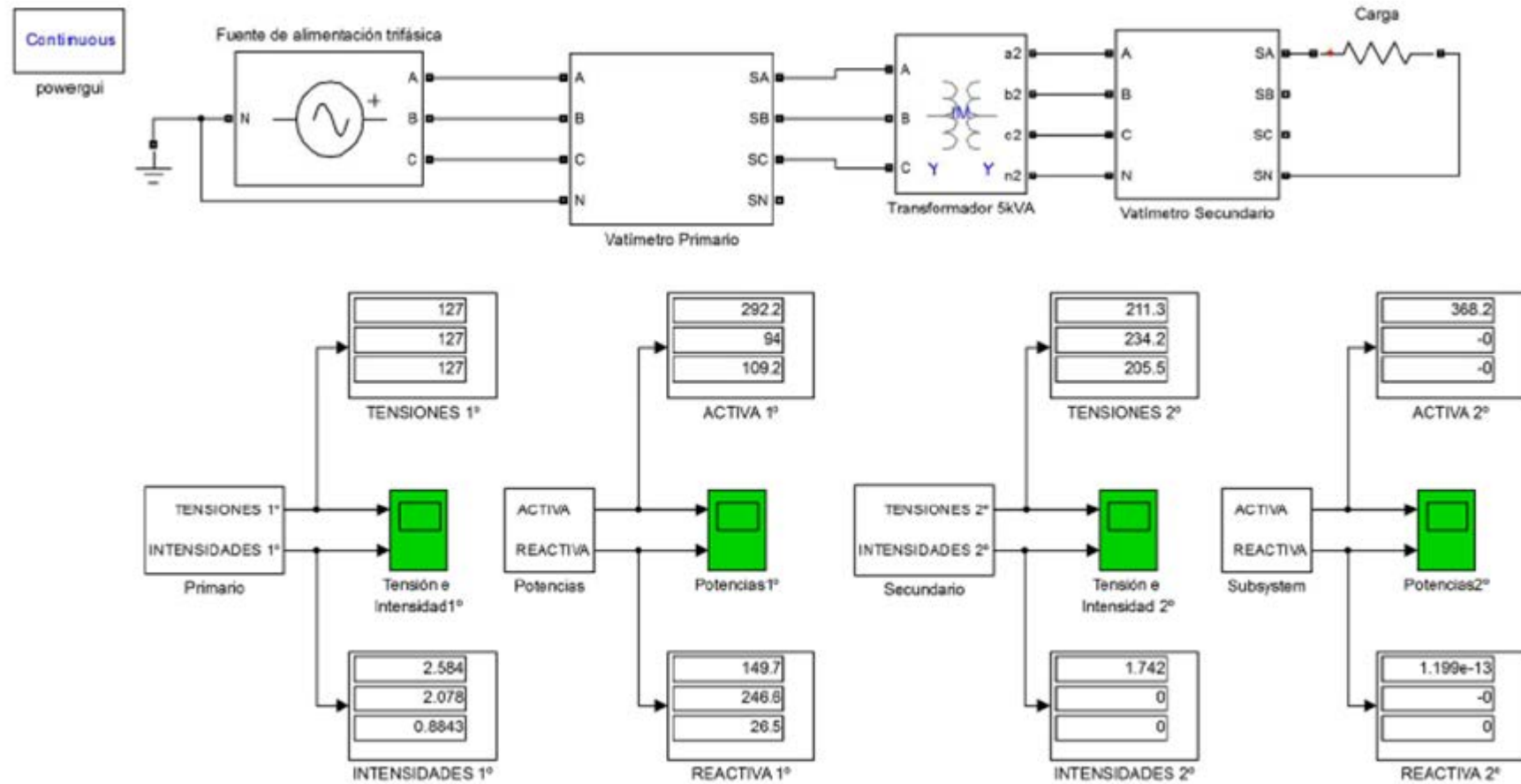
Escalón: 10



Fase-Neutro Primer escalón

Carga resistiva fase-neutro.

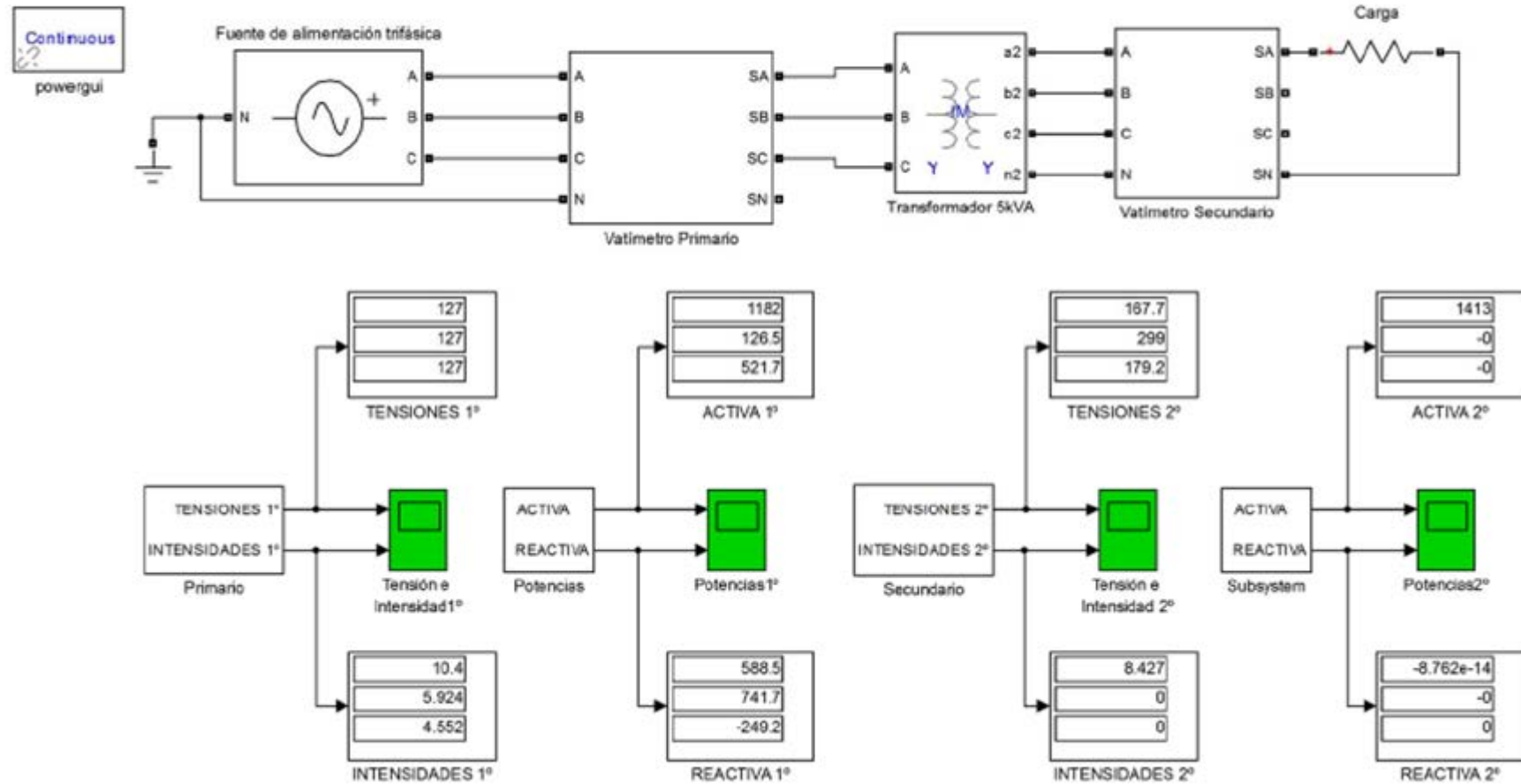
Escalón: 1



Escalón Final

Carga resistiva fase-neutro.

Escalón: 5

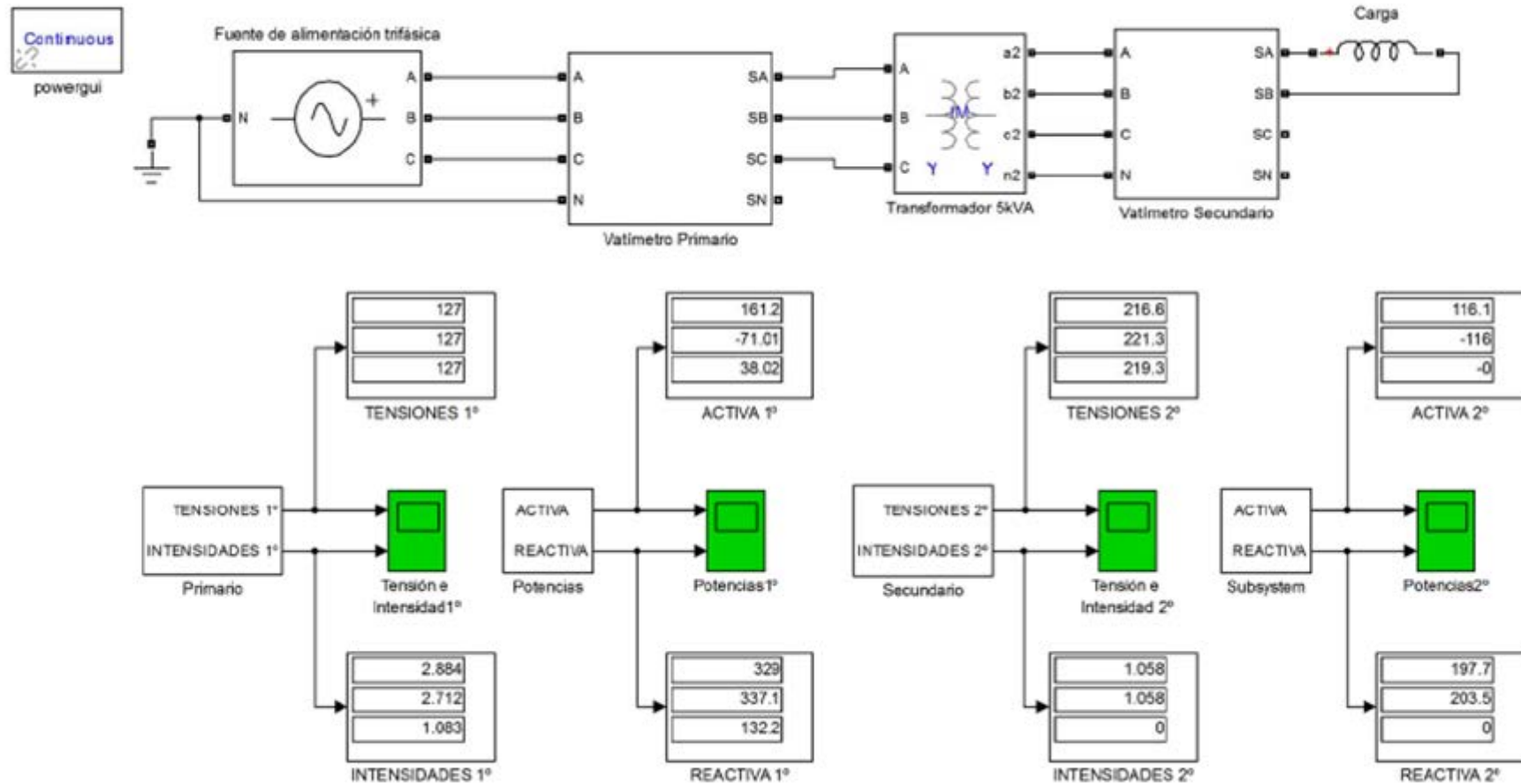


8.2.2.- Carga Inductiva

Fase-Fase Primer escalón

Carga inductiva fase-fase.

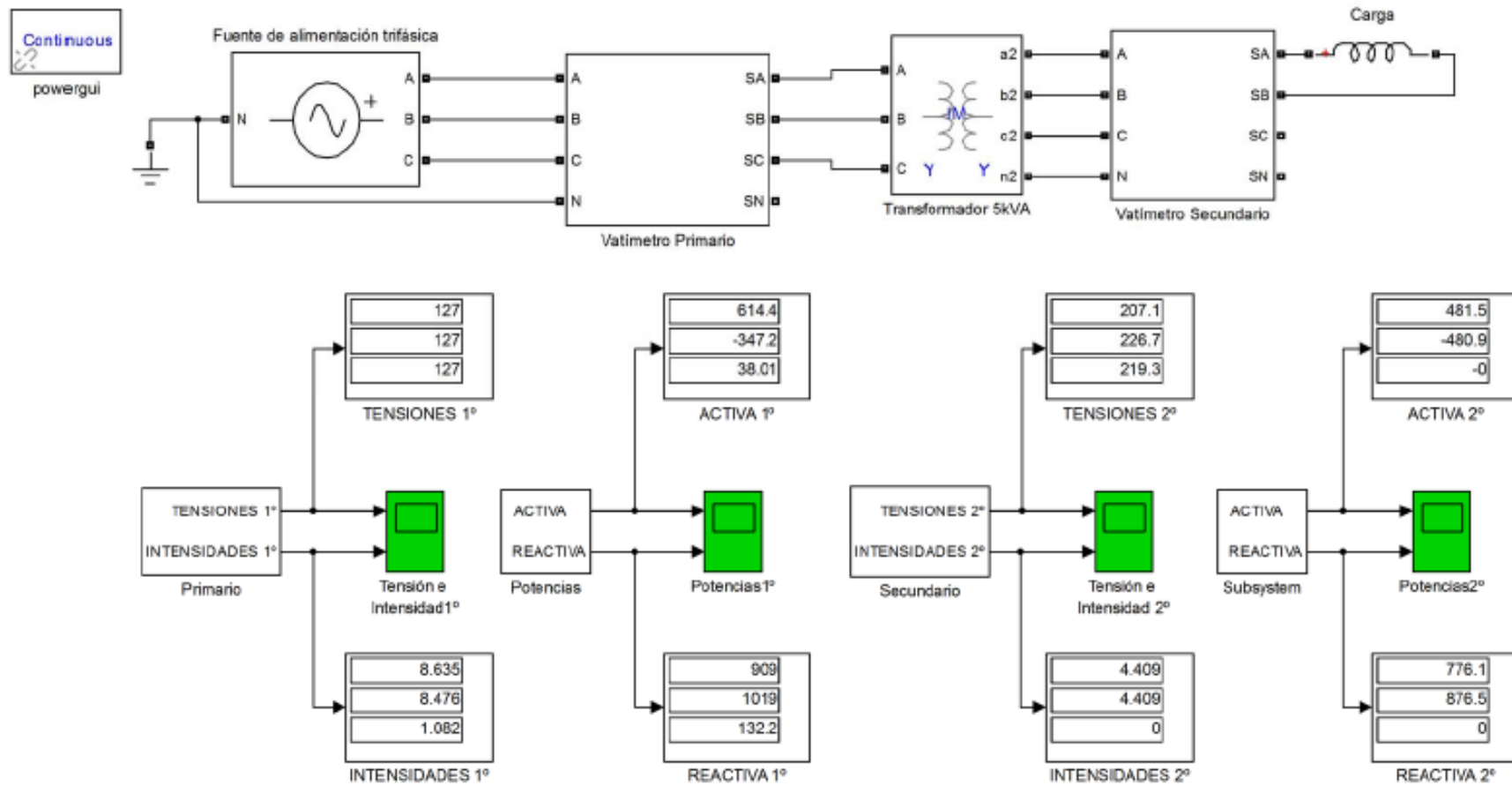
Escalón: 1



Escalón Final

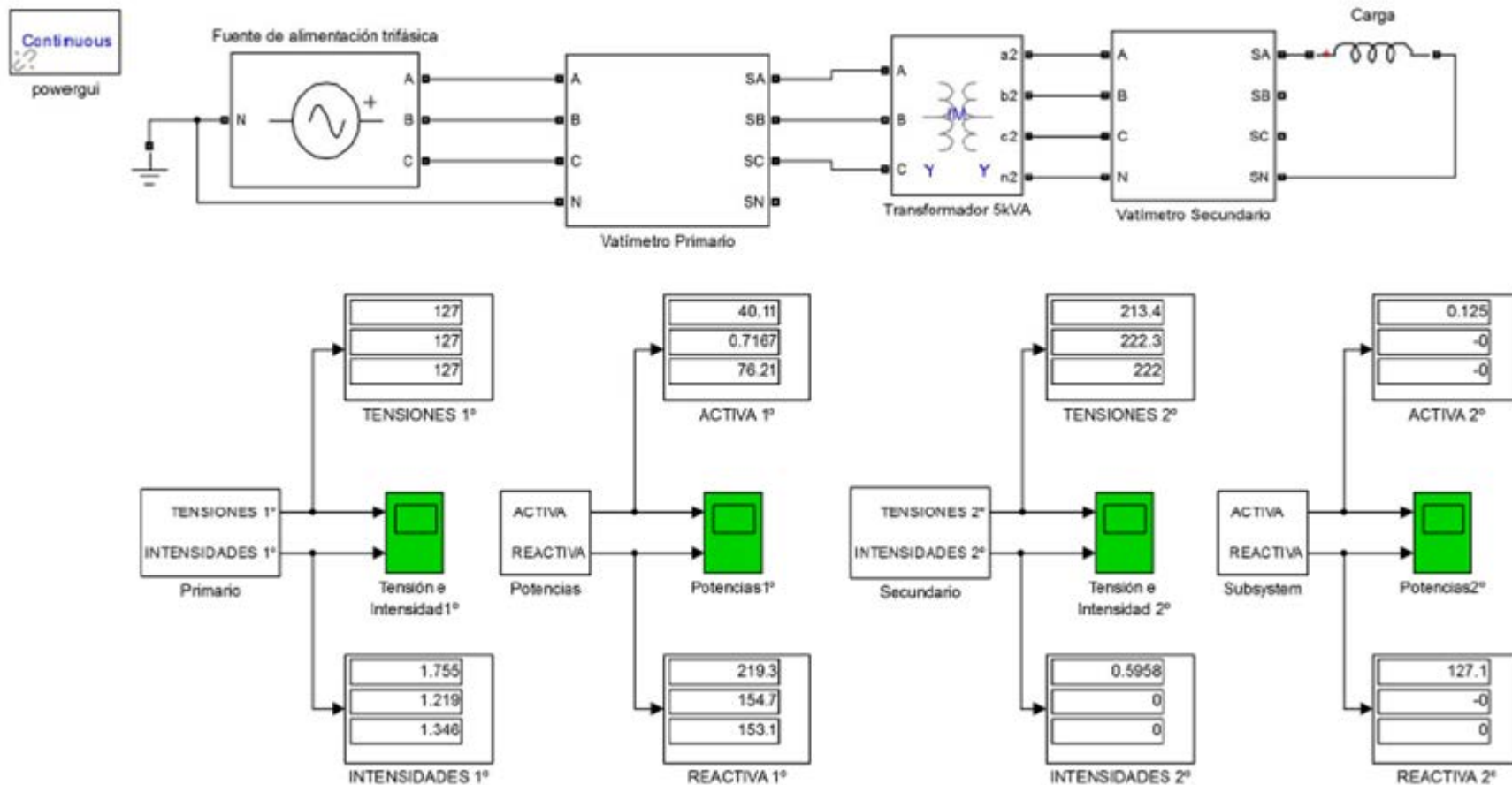
Carga inductiva fase-fase.

Escalón: 4



TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.
Fase-Neutro Primer escalón

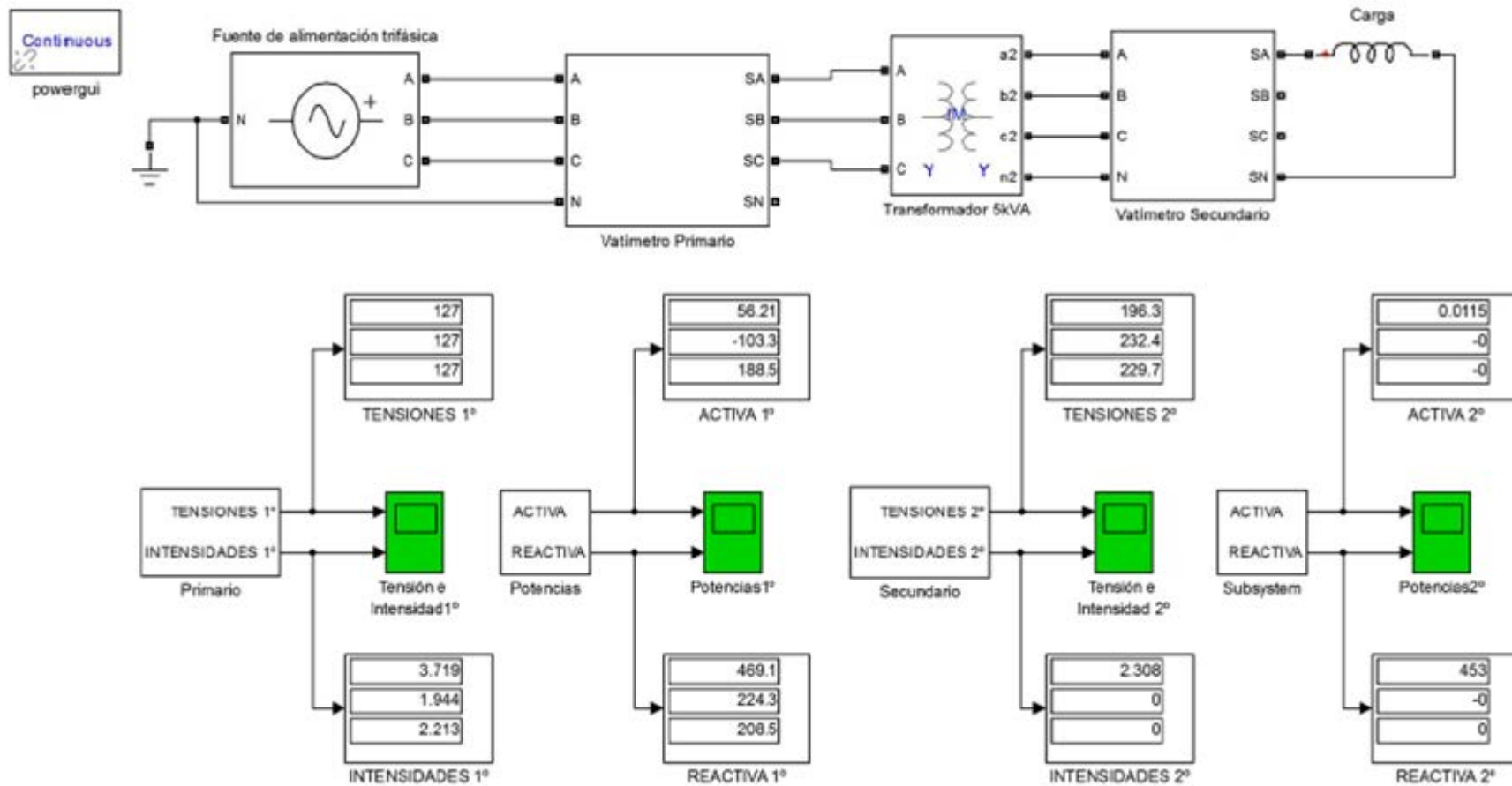
Carga inductiva fase-neutro. Escalón: 1



Escalón Final

Carga inductiva fase-neutro.

Escalón: 4

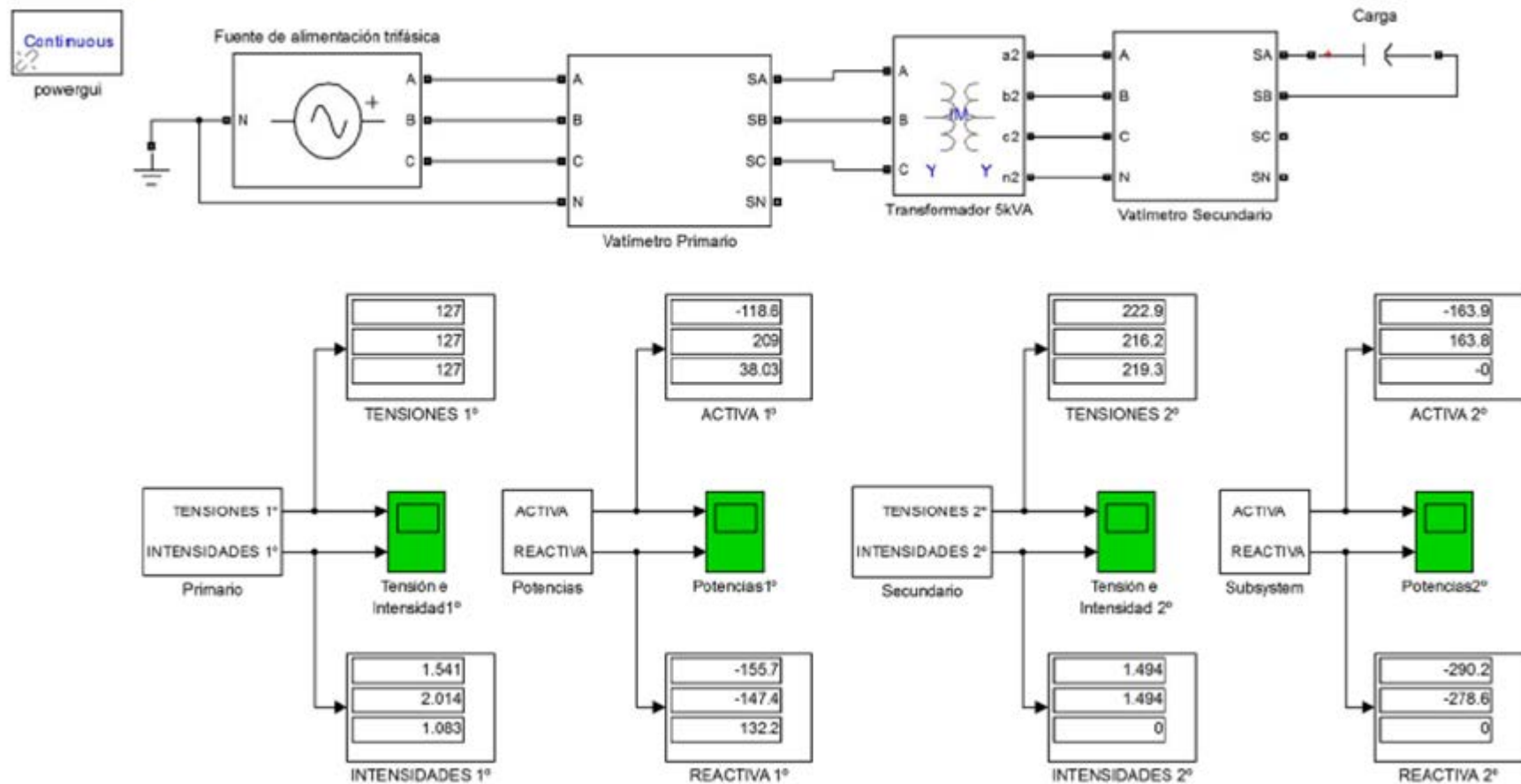


8.2.3.- Carga Capacitiva

Fase-Fase Primer escalón

Carga capacitiva fase-fase.

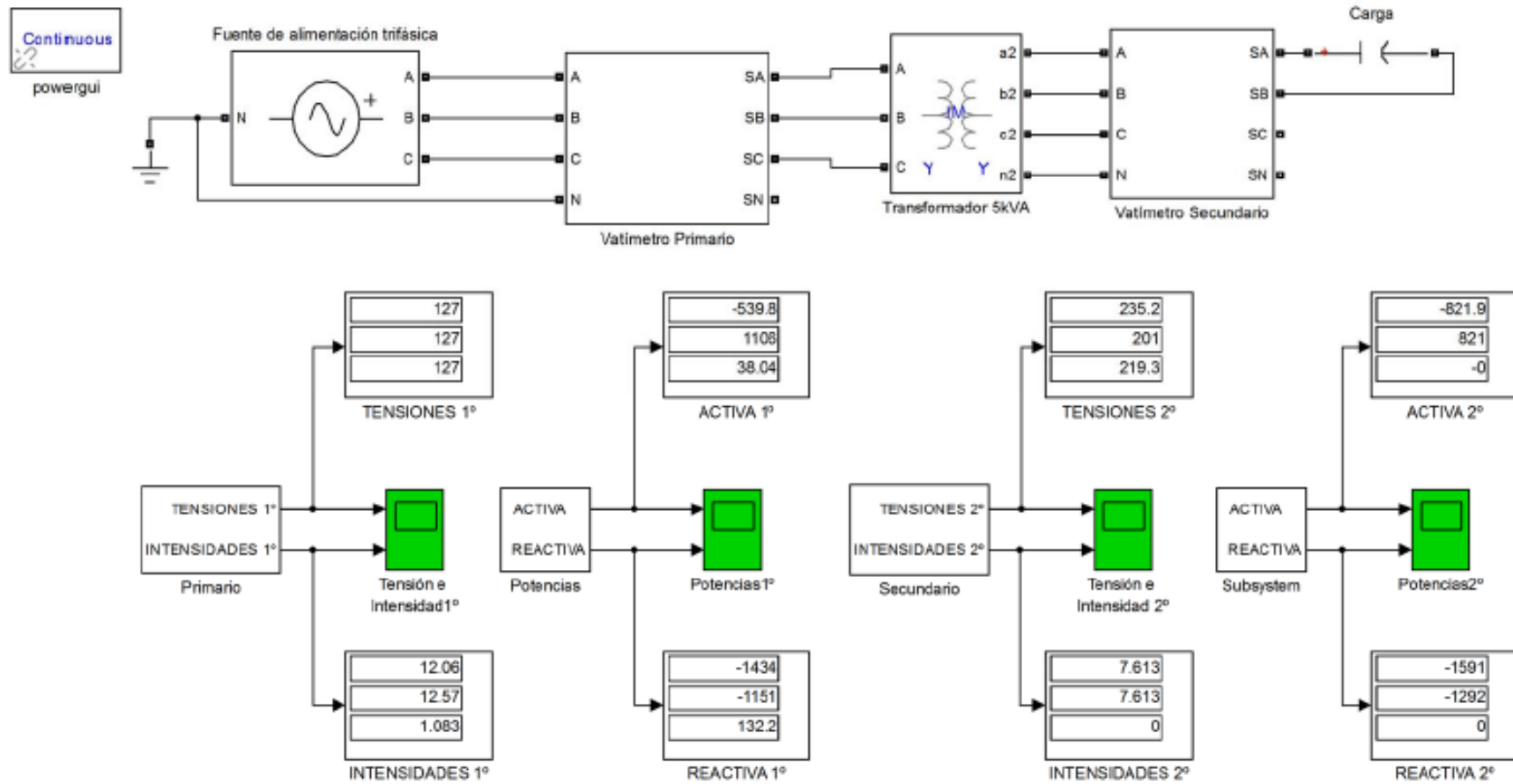
Escalón: 1



Escalón Final

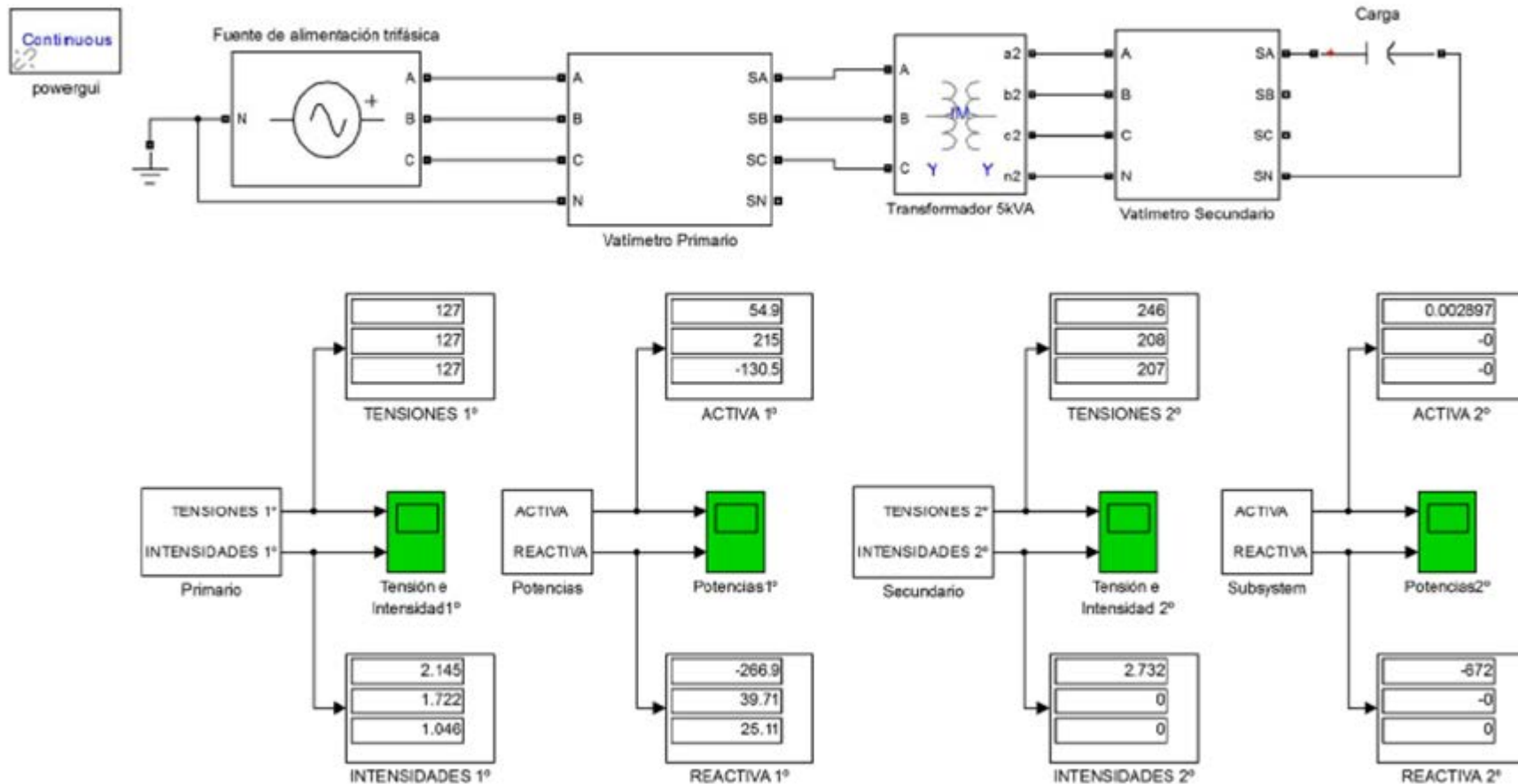
Carga capacitiva fase-fase.

Escalón: 5



TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.
Fase-Neutro Primer escalón

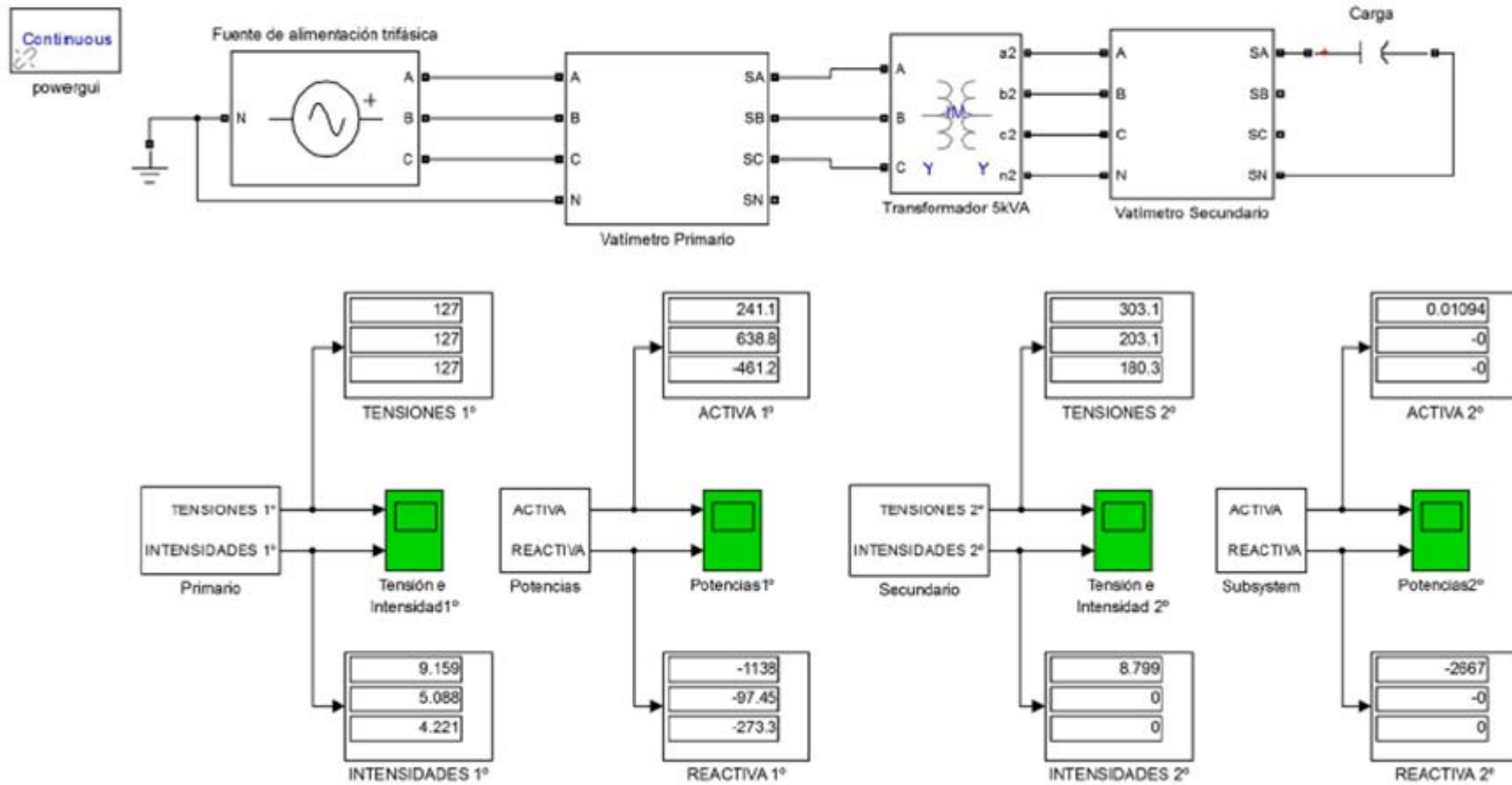
Carga capacitiva fase-neutro. Escalón: 1



Escalón Final

Carga capacitiva fase-neutro.

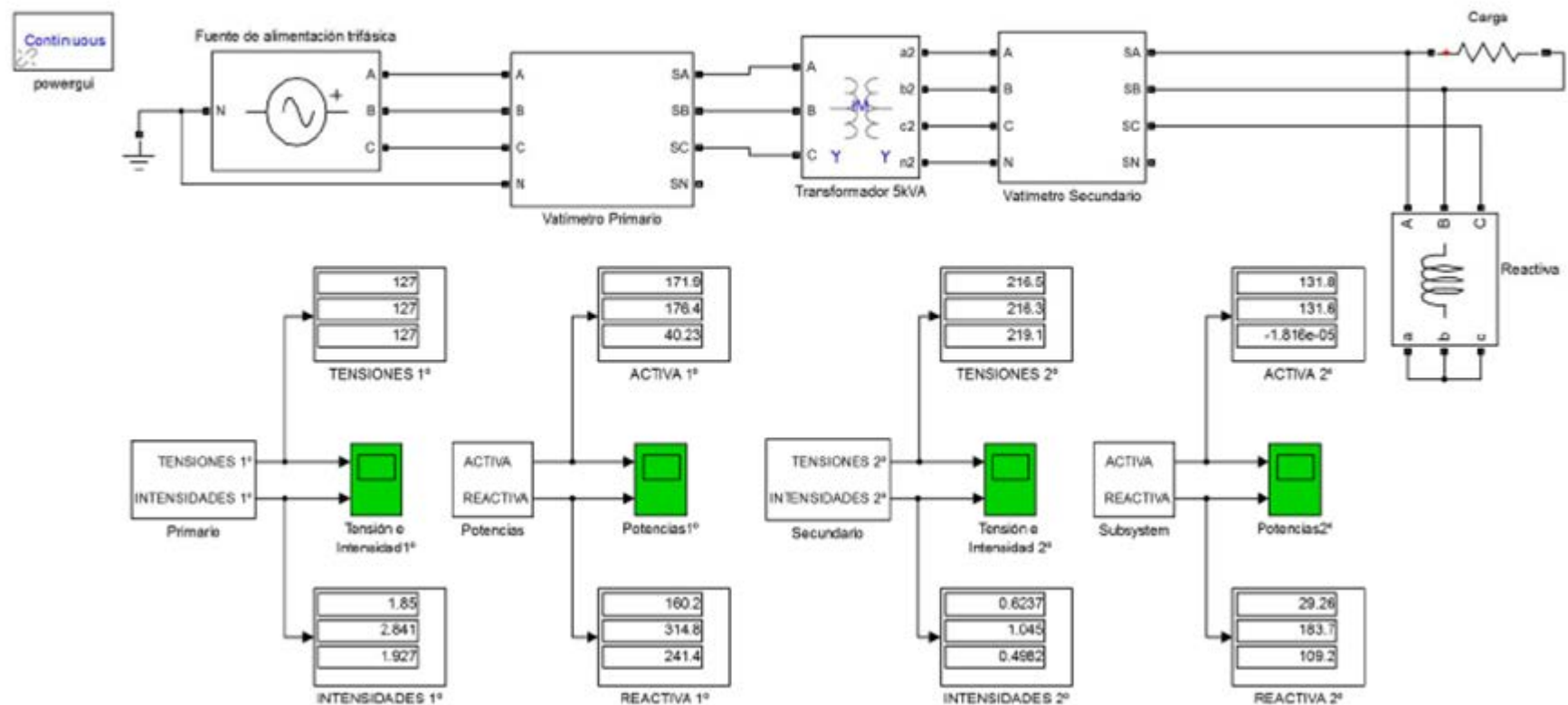
Escalón: 3



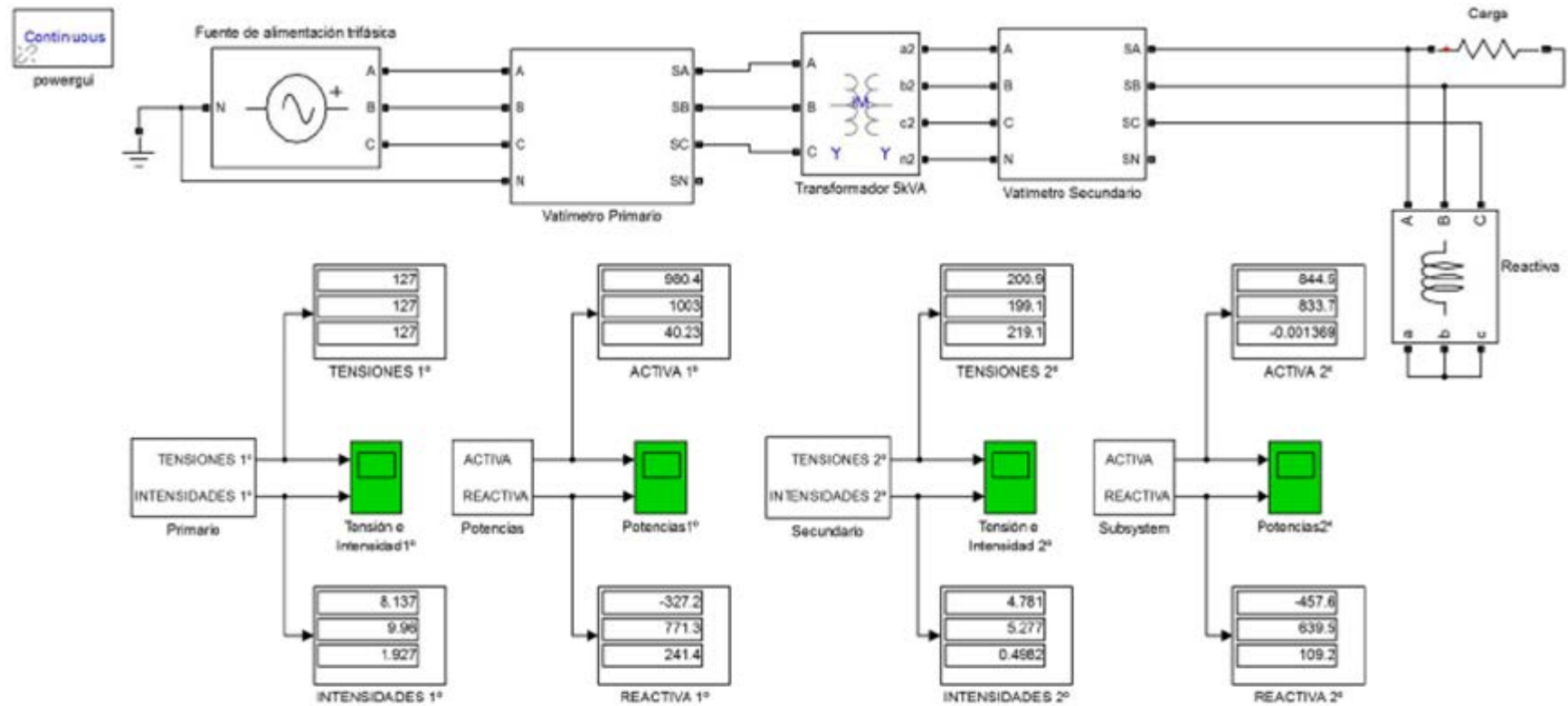
8.2.4.- Circuito RL

Primer escalón

Circuito RL. Resistencia fase-fase. Escalón: 1



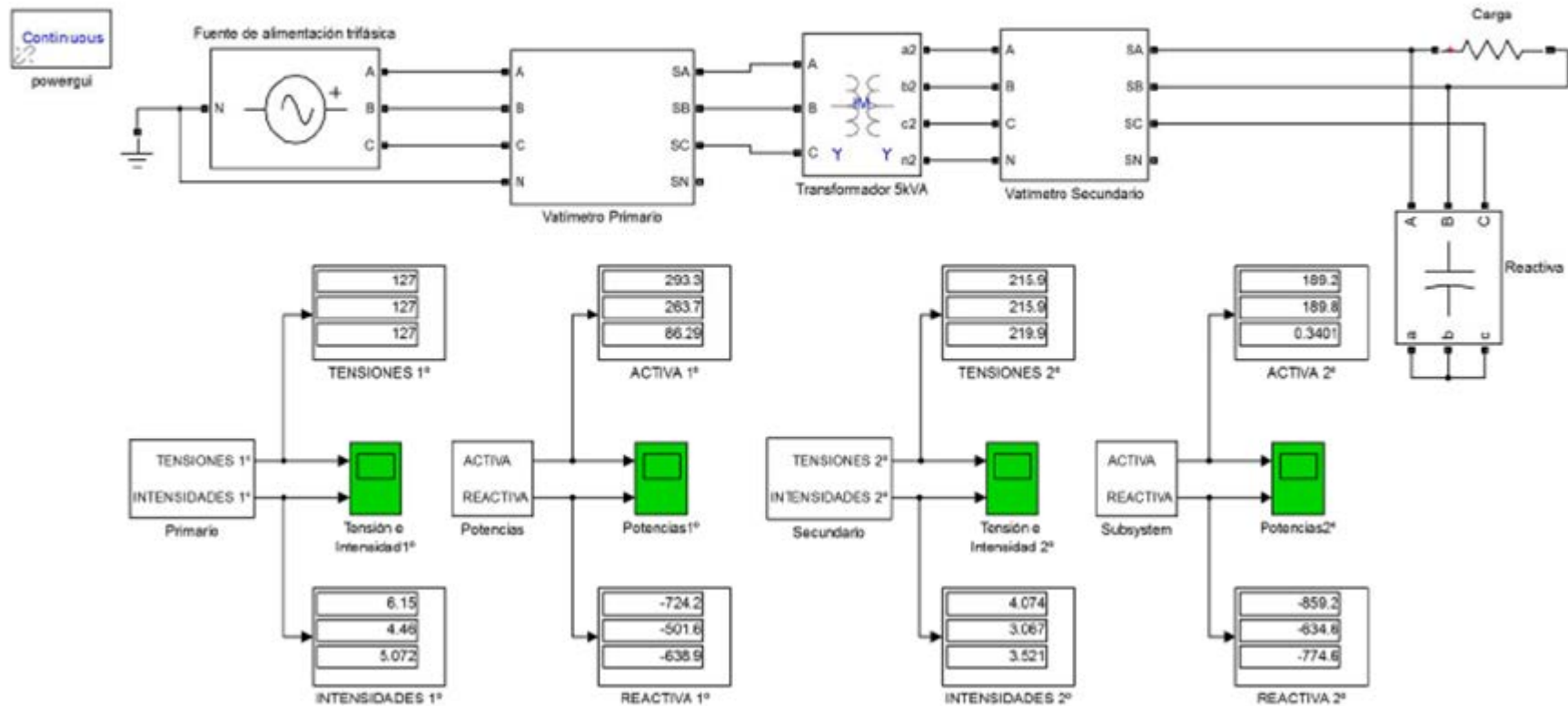
Circuito RL. Resistencia fase-fase. Escalón: 10



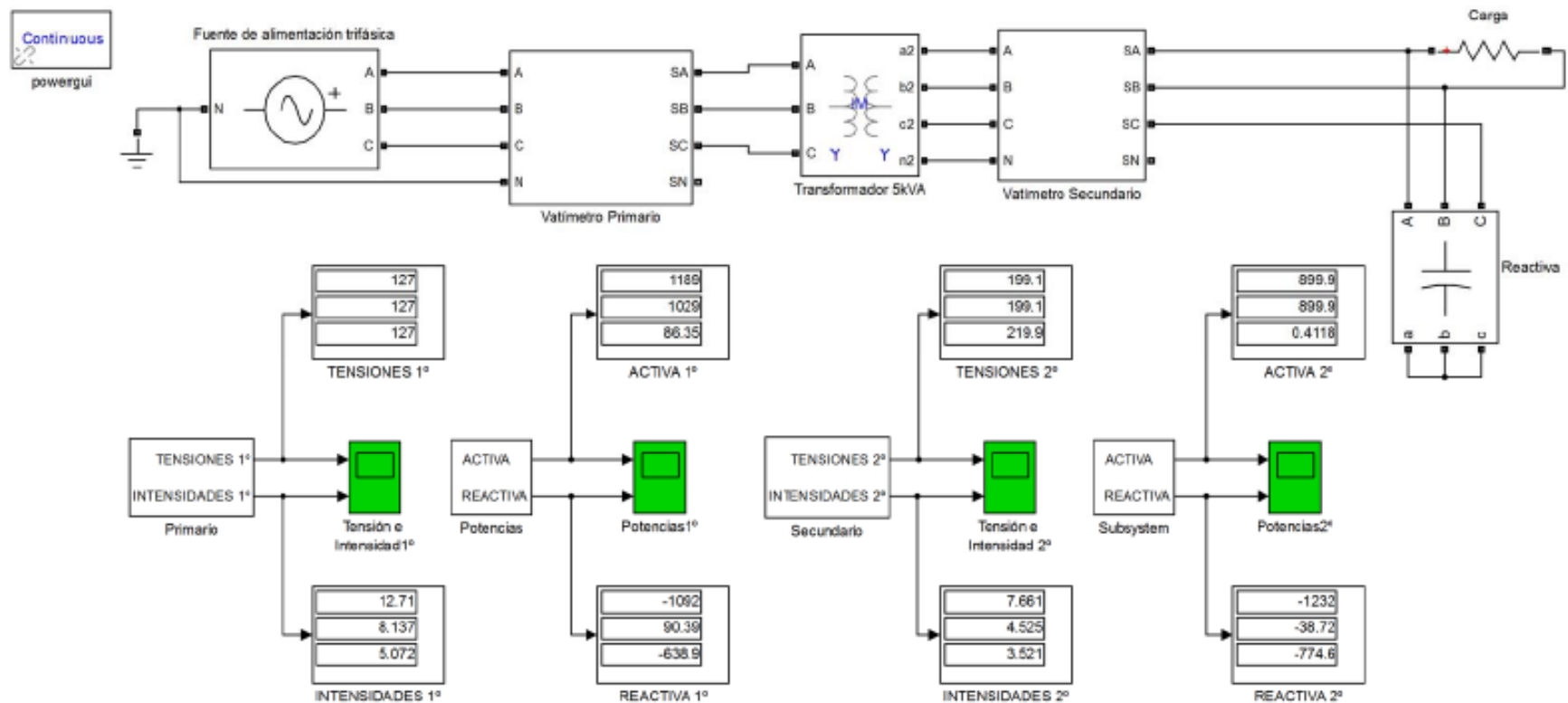
8.2.5.- Circuito RC

Primer escalón

Circuito RC. Resistencia fase-fase. Escalón: 1



Circuito RC. Resistencia fase-fase.Escalón: 10



9. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

9.1. Cargas lineales equilibradas

9.1.1. Cargas Resistivas

Comenzamos observando los resultados medidos en la máquina, Tabla 9.1, los cuales comparamos con los datos simulados, Tabla 9.2.

Escalón	Arrollamiento	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
100%	1º	130,7	9,73	1266	114,1	1272	0,995
	2º	207,6	5,72	1187	0	1187	1

Tabla 9.1. Carga resistiva pura resultados medidos.

Devanado Primario						
Arrollamiento	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
A	132,8	9,993	1319	142	1326,6	0,995
B	132,8	9,993	1319	142	1326,6	0,995
C	132,8	9,993	1319	142	1326,6	0,995
Devanando Secundario						
Arrollamiento	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
A	204,3	5,573	1139	0	1139	1
B	204,3	5,573	1139	0	1139	1
C	204,3	5,573	1139	0	1139	1

Tabla 9.2. Carga resistiva pura resultados simulados.

Los valores de tensión obtenidos tanto por el procedimiento experimental como por el simulado coinciden casi totalmente, así como los valores de intensidad con unos ligeros matices, por las particularidades del modelo de transformador que hay disponible en MATLAB encontraremos ligeras diferencias en casos puntuales, sin embargo la coherencia impera en todos los casos.

Al observar las potencias, observamos una coincidencia casi total, y con un error siempre por debajo del 5% (y mayoritariamente debajo del 2%) lo cual nos da fe de la gran calidad y robustez del modelo empleado.

Al tratarse de cargas resistivas no se ha precisado la utilización del analizador de redes, ya que toda la información posible se puede leer fácilmente del vatímetro.

9.1.2. Cargas Inductivas equilibradas

Escalón	Arrollamiento	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
Motor +3Q+ Autotrafo	1º	132,6	12	270	1570	1590	0,17
	2º	214,7	6,4	132,4	1368	1374	0,1

Tabla 9.3. Carga inductiva pura resultados medidos.

Devanado Primario						
Arrollamiento	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
A	127	12,26	371,6	1512	1557	0,239
B	127	12,26	371,6	1512	1557	0,239
C	127	12,26	371,6	1512	1557	0,239
Devanado Secundario						
Arrollamiento	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
A	212,3	6,475	132,4	1370	1376	0,096
B	212,3	6,475	132,4	1370	1376	0,096
C	212,3	6,475	132,4	1370	1376	0,096

Tabla 9.4. Carga inductiva pura resultados simulados.

Los datos obtenidos en este caso tanto experimental como analíticamente guardan una tremenda similitud igualmente con algunos matices.

Observamos como la tensión en la simulación en el secundario coincide casi exactamente con la medida físicamente en el transformador, sin embargo la tensión en el primario en la simulación cae en mayor medida que en la realidad, esto se debe a la influencia desmagnetizante que la carga produce. En el caso práctico, pese a notarse una pequeña caída de tensión al aumentar la carga ésta prácticamente no cae, sin embargo en el modelo este descenso es mucho más acusado.

Esto nos hace encontrar algunas distorsiones entre las medidas reales y las simuladas, sin embargo, si corregimos el dato de tensión, observamos como de nuevo los resultados coinciden casi al 100% con los medidos.

Devanado Primario						
Arrollamiento	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
A	132,6	12,26	276,36	1602	1626	0,170
B	132,6	12,26	276,36	1602	1626	0,170
C	132,6	12,26	276,36	1602	1626	0,170

Tabla 9.5. Carga inductiva pura resultados corregidos.

La distorsión parece a priori tan importante por el efecto de la tensión en la potencia reactiva, recordemos que al tratarse de un circuito netamente inductivo, este ve fuertemente alterado su consumo de potencia reactiva al variar la tensión. Un claro ejemplo lo podemos observar en el diagrama 6.2. “Evolución impedancia de vacío respecto a la tensión” en el que claramente observamos como al elevar la tensión disminuye la reactancia y por tanto obtenemos mayor consumo de potencia reactiva.

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
Volt				
THD%	1.7	1.5	1.5	98.2
H3%	1.2	1.1	1.1	96.7
H5%	0.3	0.4	0.4	9.0
H7%	1.1	0.9	1.0	6.2
Amp	L1	L2	L3	N
H3%	0.3	0.4	0.7	0.9
H5%	0.4	0.8	0.6	0.8
H7%	1.1	0.9	1.2	0.9
12/03/14 18:43:21 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W	HARMONIC GRAPH		TREND	HOLD RUN

Captura 9.1. Armónicos de tensión e intensidad en una carga inductiva pura.

En el plano del estudio de los armónicos vemos como la presencia de los mismos es prácticamente nula, en la captura anterior podemos ver como prácticamente la onda es pura.

9.1.3. Cargas capacitivas

Escalón	Arrollamiento	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
103,5 μF	1º	132,9	10,73	80	-1400	1420	0,06cap
	2º	221	7,2	18,1	-1592	1592	0,01cap

Tabla 9.6. Carga capacitiva pura resultados medidos.

Devanado Primario						
Arrollamiento	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
A	132,8	10,78	251	-1409	1431	-0,175
B	132,8	10,78	251	-1409	1431	-0,175
C	132,8	10,78	251	-1409	1431	-0,175
Devanando Secundario						
Arrollamiento	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
A	229,1	6,838	15,43	-1567	1567	-0,010
B	229,1	6,838	15,43	-1567	1567	-0,010
C	229,1	6,838	15,43	-1567	1567	-0,010

Tabla 9.7. Carga capacitiva pura resultados simulados.

De la misma forma en la que en el caso anterior era la tensión primaria la que se veía muy afectada por el efecto de la carga en este caso ocurre algo similar en el secundario. En este caso en mucha menor medida. Podemos apreciar la gran precisión obtenida.

TABLA ARMÓNICOS				
	0:02:51			
Volt	L1	L2	L3	N
THD%	2.6	2.5	2.4	99.7
H3%	1.3	1.2	1.2	98.2
H5%	0.3	0.6	0.6	9.5
H7%	2.2	2.1	2.0	8.0
Amp	L1	L2	L3	N
H3%	0.1	0.6	0.9	0.8
H5%	2.4	2.4	2.8	0.8
H7%	15.1	14.7	14.2	0.8
12/03/14 18:47:56 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W	HARMONIC GRAPH TREND HOLD			
U&A	RUN			

Captura 9.2. Armónicos de tensión e intensidad en una carga capacitiva pura.

Respecto de los armónicos como en el caso de la reactancia inductiva observamos como la presencia de armónicos es prácticamente igual a cero.

9.2. Cargas motor

Sin duda el apartado más importante de todos los tratados en este estudio sea este que nos ocupa. El motor de inducción es sin duda una de las maquinas mas utilizadas en la actualidad y en la que mas nos interesa detenernos. Con los avances técnicos originados por el desarrollo de la electrónica de potencia se han incorporado nuevos equipos capaces de gestionar y controlar los motores de inducción de una manera que antes no se conocía.

Hablamos sin duda del variador electrónico de velocidad, el cual, valiéndose de complejos equipos de control es capaz de a partir de una frecuencia dada (50 o 60Hz) variarla desde cero hasta prácticamente cualquier velocidad.

La implementación de dichos equipos tendrá una serie de ventajas, como la versatilidad a la que dotan al motor permitiendo variar su velocidad de trabajo sin que se vea resentido el par así como para los arranques, los cuales

se podrán llevar a cabo en carga controlando el pico de intensidad de arranque y permitiendo a la vez obtener un gran par de arranque desde 0 rpm.

9.2.1. Motor asíncrono a 50Hz sin variador de velocidad

Escalón	Arrollamiento	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
20%	1º	131,6	6,59	495,1	712,4	867,5	0,57
	2º	212,8	3,48	444,8	591,9	740,4	0,6
100%	1º	131,1	9,5	982,4	765,1	1245	0,79
	2º	209,1	5,33	909,1	645,1	1115	0,82

Tabla 9.9. Motor asíncrono a velocidad nominal.

Este primer apartado tenemos que considerarlo como referencia, ya que apoyándonos en él vamos a poder comprender el funcionamiento del variador de velocidad. Debemos tener en cuenta que un motor de inducción se reduce a una carga serie RL, esto es una resistencia (Carga más pérdidas mecánicas, pérdidas de rozamiento y pérdidas de ventilación) y una reactancia (pérdidas por Foucault, histéresis etc).

Al intercalar entre el transformador y el motor un variador de frecuencia, éste dejará de comportarse como una carga lineal, para pasar a ser una carga de tipo no lineal, como la definida en el apartado número 4.

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	212.0	213.0	212.0	1.7
Vpk	300.3	302.2	301.0	3.6
CF	1.42	1.42	1.42	OL
Hz	50.02			
	L1	L2	L3	N
Arms	3	4	3	1
Apk	5	6	5	1
CF	OL	OL	OL	OL
13/03/14 12:20:50 230V 50Hz 3Ø WYE ENS0160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
THD% _r	1.6	1.5	1.5	97.8
H3% _r	1.1	1.0	1.0	96.6
H5% _r	0.6	0.7	0.8	8.9
H7% _r	0.9	0.7	0.8	6.0
	L1	L2	L3	N
Amp				
H3% _r	1.0	1.5	1.6	0.5
H5% _r	1.6	1.5	1.8	0.5
H7% _r	1.5	1.3	1.5	0.5
13/03/14 12:21:01 230V 50Hz 3Ø WYE ENS0160				
U A W		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	208.1	209.2	208.2	1.6
Vpk	294.9	296.9	295.5	3.4
CF	1.42	1.42	1.42	OL
Hz	50.04			
	L1	L2	L3	N
Arms	5	6	5	1
Apk	8	9	8	1
CF	1.53	1.65	1.56	OL
13/03/14 12:31:37 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
THD% _r	1.5	1.4	1.5	97.2
H3% _r	1.0	1.0	1.0	96.1
H5% _r	0.6	0.7	0.8	8.5
H7% _r	0.9	0.7	0.8	6.1
	L1	L2	L3	N
Amp				
H3% _r	0.8	1.2	0.8	0.3
H5% _r	0.8	1.3	0.9	0.3
H7% _r	1.1	0.8	1.0	0.3
13/03/14 12:31:48 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

Captura 9.3. Tensión, intensidad y armónicos en dos escalones de carga en un motor asíncrono.

Podemos observar como independientemente de la carga la presencia de armónicos es prácticamente nula. Cuando veamos el motor a través del variador la presencia de dichos armónicos se multiplicará.

9.2.4. Motor asíncrono a 50Hz

Escalón	Arrollamiento	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
20%	1º	131,4	4,53	489	340,6	595,9	0,82
	2º	213,5	2,52	444,3	304,4	538,6	0,82
100%	1º	130,5	8,31	988,2	445,3	1084	0,91
	2º	209,1	4,83	923,4	408,7	1010	0,91

Tabla 9.9. Motor asíncrono a 50Hz a través de un variador de velocidad.

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	214.0	215.3	214.2	10.0
Vpk	314.6	317.1	315.9	24.0
CF	1.47	1.47	1.47	2.39
Hz	49.99			
	L1	L2	L3	N
Arms	2	3	2	1
Apk	5	6	5	1
CF	OL	OL	OL	OL
13/03/14 11:27:31 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
THD% _r	2.2	2.1	2.3	98.3
H3% _r	1.1	1.1	1.1	20.3
H5% _r	1.6	1.6	1.8	2.5
H7% _r	0.5	0.5	0.4	1.4
	L1	L2	L3	N
Amp				
H3% _r	3.4	2.2	2.5	0.8
H5% _r	45.8	40.0	45.9	1.0
H7% _r	26.3	21.8	26.1	0.9
13/03/14 11:27:53 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
V _{rms}	210.6	211.9	211.0	9.6
V _{pk}	310.0	312.8	312.1	23.6
CF	1.47	1.48	1.48	2.47
Hz	50.01			
	L1	L2	L3	N
A _{rms}	5	5	5	1
A _{pk}	8	9	8	1
CF	1.73	1.86	1.77	OL
13/03/14 11:36:29 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
Volt				
THD _{%r}	3.1	3.0	3.2	99.0
H3 _{%r}	1.1	1.0	1.1	39.1
H5 _{%r}	2.2	2.2	2.4	2.3
H7 _{%r}	0.7	0.7	0.7	1.1
Amp	L1	L2	L3	N
H3 _{%r}	1.9	1.0	2.1	0.6
H5 _{%r}	31.9	29.7	31.7	0.7
H7 _{%r}	11.6	10.3	11.5	0.6
13/03/14 11:36:51 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

Captura 9.4. Tensión, intensidad y armónicos en dos escalones de carga en un motor asíncrono a 50Hz.

En este caso, al haber conectado entre el transformador y el motor el variador de velocidad observamos como la presencia de armónicos ha aumentado dramáticamente, vamos a estudiar cada parámetro por separado.

Escalón	Arrollamiento	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
Sin Variador	1º	131,1	9,5	982,4	765,1	1245	0,79
	2º	209,1	5,33	909,1	645,1	1115	0,82
Con variador	1º	130,5	8,31	988,2	445,3	1084	0,91
	2º	209,1	4,83	923,4	408,7	1010	0,91

Tabla 9.10. Comparativa datos con presencia y sin presencia del variador de velocidad.

Vamos a observar el parámetro de intensidad, observamos que pese a tener la misma carga en los 2 casos, como podemos comprobar viendo el dato de la potencia activa, la intensidad consumida por la máquina al estar conectado el variador, es mucho menor. Si continuamos observando observamos que la diferencia está en la potencia reactiva. Que se reduce en mas del 10%. Consecuentemente, el factor de potencia cae del 0,79 en el primario al 0,91, prácticamente perfecto, desde el punto de vista energético se observa una mejora tremenda.

Para una misma carga la potencia aparente que circula por la red disminuye casi un 13% y la potencia reactiva en casi un 42%, propiciando una mejora del 15% en el factor de potencia. Son datos a tener muy en cuenta, ya que la mejora en cuanto a potencia aparente y factor de potencia son

importantes sin embargo producirá unos efectos adversos que superarán a las ventajas.

Sin variador

TABLA ARMÓNICOS				
	0:00:01			
Volt	L1	L2	L3	N
THD%	1.5	1.4	1.5	97.2
H3%	1.0	1.0	1.0	96.1
H5%	0.6	0.7	0.8	8.5
H7%	0.9	0.7	0.8	6.1
Amp	L1	L2	L3	N
H3%	0.8	1.2	0.8	0.3
H5%	0.8	1.3	0.9	0.3
H7%	1.1	0.8	1.0	0.3
13/03/14 12:31:48 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W	HARMONIC GRAPH TREND HOLD RUN			
U&A				

Con Variador

TABLA ARMÓNICOS				
	0:00:03			
Volt	L1	L2	L3	N
THD%	3.1	3.0	3.2	99.0
H3%	1.1	1.0	1.1	39.1
H5%	2.2	2.2	2.4	2.3
H7%	0.7	0.7	0.7	1.1
Amp	L1	L2	L3	N
H3%	1.9	1.0	2.1	0.6
H5%	31.9	29.7	31.7	0.7
H7%	11.6	10.3	11.5	0.6
13/03/14 11:36:51 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W	HARMONIC GRAPH TREND HOLD RUN			
U&A				

Captura 9.5. Presencia de armónicos conectando y no conectando el variador de velocidad.

Aquí es donde verdaderamente hay una diferencia respecto del uso o no del variador de velocidad. Observamos que en la tensión, la presencia del 5º armónico, casi triplica a la observada en el primer caso. Sin embargo este tiene poco efecto en el sistema.

Es el armónico de corriente el que si repercute de forma notable en el sistema. Observamos que en el caso del 5º armónico su presencia se multiplica por 30 y en el 7º por 10, esto produce una deformación notable en la onda de corriente que contamina el sistema.

Dicha deformación repercute en el sistema y provoca problemas en el sistema propio y en los sistemas cercanos, debemos tener en cuenta que los armónicos impares son homopolares respecto a la fundamental, lo que propicia que sean tan problemáticos.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
THD%	2.2	2.1	2.3	98.3
H3%	1.1	1.1	1.1	20.3
H5%	1.6	1.6	1.8	2.5
H7%	0.5	0.5	0.4	1.4
Amp	L1	L2	L3	N
H3%	3.4	2.2	2.5	0.8
H5%	45.8	40.0	45.9	1.0
H7%	26.3	21.8	26.1	0.9
13/03/14 11:27:53 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W	HARMONIC GRAPH		TREND	HOLD RUN

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
THD%	3.1	3.0	3.2	99.0
H3%	1.1	1.0	1.1	39.1
H5%	2.2	2.2	2.4	2.3
H7%	0.7	0.7	0.7	1.1
Amp	L1	L2	L3	N
H3%	1.9	1.0	2.1	0.6
H5%	31.9	29.7	31.7	0.7
H7%	11.6	10.3	11.5	0.6
13/03/14 11:36:51 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W	HARMONIC GRAPH		TREND	HOLD RUN

Captura 9.6. Presencia de armónicos conectando en función de la carga.

Del mismo modo observamos que la presencia de armónicos aumenta cuando la carga es pequeña, observamos en las capturas como la presencia del 5º armónico aumenta en un 30% y el dato del 7º armónico se duplica, aumentando también y en menor medida el 3º.

9.2.3. Motor asíncrono a 40Hz

Escalón	Arrollamiento	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
20%	1º	131,7	3,36	339	284,7	442,7	0,77
	2º	215	1,81	300,1	247,4	388,9	0,77
100%	1º	131,4	5,38	606,7	362,3	706,7	0,86
	2º	212,7	3,04	558,4	323,8	645,5	0,87

Tabla 9.11. Motor asíncrono a 40Hz a través de un variador de velocidad.

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	215.6	216.7	215.5	17.0
Vpk	317.4	319.4	318.1	40.4
CF	1.47	1.47	1.48	2.38
Hz	49.98			
	L1	L2	L3	N
Arms	2	2	2	1
Apk	4	5	4	1
CF	OL	OL	OL	OL
13/03/14 11:44:38 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE	TREND		HOLD RUN	

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
THD%	1.8	1.8	1.8	99.1
H3%	1.1	1.1	1.1	17.2
H5%	1.2	1.2	1.3	2.0
H7%	0.1	0.2	0.1	4.8
Amp	L1	L2	L3	N
H3%	2.7	3.2	1.1	0.6
H5%	39.3	34.2	37.7	0.5
H7%	25.5	22.0	24.9	0.5
13/03/14 11:44:53 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W	HARMONIC GRAPH		TREND	HOLD RUN

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
V _{rms}	213.3	214.6	213.6	16.1
V _{pk}	313.7	316.4	315.1	39.5
CF	1.47	1.47	1.48	2.46
Hz	50.02			
	L1	L2	L3	N
A _{rms}	3	3	3	1
A _{pk}	6	7	6	1
CF	OL	OL	OL	OL
13/03/14 11:54:21 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
THD% _r	2.3	2.3	2.5	99.2
H3% _r	1.0	1.1	1.1	17.7
H5% _r	1.8	1.8	1.9	2.0
H7% _r	0.4	0.5	0.4	4.4
	L1	L2	L3	N
A _{pk}	3.3	2.5	2.8	0.5
H3% _r	36.2	32.7	36.2	0.6
H5% _r	18.7	16.0	18.3	0.5
13/03/14 11:54:44 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

Captura 9.7. Tensión, intensidad y armónicos en dos escalones de carga en un motor asíncrono a 40Hz.

Vemos como los datos prácticamente se calcan con los obtenidos en el apartado anterior, y como se reproduce el efecto de la carga sobre la presencia de armónicos. Sin embargo, aunque los datos son parecidos observándolos detenidamente vemos como al bajar la velocidad la presencia de armónicos desciende ligeramente, en el primer caso, a 50 Hz, tenemos un porcentaje de armónicos del 45% mientras que en el caso de la velocidad a 40Hz éste se reduce hasta el 40% aproximadamente.

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
THD% _r	2.2	2.1	2.3	98.3
H3% _r	1.1	1.1	1.1	20.3
H5% _r	1.6	1.6	1.8	2.5
H7% _r	0.5	0.5	0.4	1.4
	L1	L2	L3	N
A _{pk}	3.4	2.2	2.5	0.8
H3% _r	45.8	40.0	45.9	1.0
H5% _r	26.3	21.8	26.1	0.9
13/03/14 11:27:53 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
THD% _r	1.8	1.8	1.8	99.1
H3% _r	1.1	1.1	1.1	17.2
H5% _r	1.2	1.2	1.3	2.0
H7% _r	0.1	0.2	0.1	4.8
	L1	L2	L3	N
A _{pk}	2.7	3.2	1.1	0.6
H3% _r	39.3	34.2	37.7	0.5
H5% _r	25.5	22.0	24.9	0.5
13/03/14 11:44:53 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

Captura 9.9. Presencia de armónicos a 50 y a 40Hz.

9.2.2. Motor asíncrono a 30Hz

Escalón	Arrollamiento	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
20%	1º	131,6	2,17	202,2	200,6	284,9	0,71
	2º	215,8	1,055	165,2	156,7	2278,7	0,73
100%	1º	131,1	3,29	328,8	279	431,2	0,76
	2º	214	1,762	289,5	241,4	376,9	0,77

Tabla 9.12. Motor asíncrono a 30Hz a través de un variador de velocidad.

En este caso vemos como la intensidad prácticamente permanece constante, esto es debido a que la carga se le ha aplicado al motor a través de una dinamo, la cual al estar muy por debajo de su potencia nominal no producía potencia, lo que hace que no podamos ver el motor a plena carga a velocidades distintas a 50hz.

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	216.0	217.0	215.9	20.6
Vpk	314.7	317.2	314.6	46.4
CF	1.46	1.46	1.46	2.25
Hz	50.02			
	L1	L2	L3	N
Arms	1	2	1	1
Apk	3	4	3	1
CF	OL	OL	OL	OL
13/03/14 12:02:47 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

Voltios/Amperios/Hz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	214.4	215.7	214.6	20.5
Vpk	315.7	317.5	316.5	47.0
CF	1.47	1.47	1.48	2.30
Hz	50.00			
	L1	L2	L3	N
Arms	2	2	1	1
Apk	4	5	4	1
CF	OL	OL	OL	OL
13/03/14 12:16:50 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
Volts				
THD%	1.6	1.6	1.7	98.9
H3%	1.1	1.1	1.1	13.8
H5%	0.9	0.9	1.0	7.9
H7%	0.3	0.2	0.3	0.8
	L1	L2	L3	N
Amps				
H3%	4.4	3.7	1.3	0.5
H5%	38.4	29.5	35.1	0.6
H7%	27.8	21.8	25.7	0.6
13/03/14 12:06:52 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

TABLA ARMÓNICOS				
	L1	L2	L3	N
Volts				
THD%	1.8	1.8	1.8	99.0
H3%	1.1	1.1	1.0	14.1
H5%	1.2	1.3	1.4	7.7
H7%	0.0	0.2	0.1	0.9
	L1	L2	L3	N
Amps				
H3%	3.3	2.8	1.0	0.5
H5%	37.6	33.2	36.1	0.5
H7%	24.6	21.5	23.8	0.5
13/03/14 12:17:02 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W		HARMONIC GRAPH	TREND	HOLD RUN

Captura 9.9. Tensión, intensidad y armónicos en dos escalones de carga en un motor asíncrono a 30Hz.

En este caso como en el anterior la presencia del 5º y el 7º armónico se mantiene muy alta, siempre por encima del 30% en el caso del 5º armónico y por encima del 20% en el caso del 7º.

Para una potencia similar, observamos que dependiendo de la velocidad, la presencia de armónicos aumenta para velocidades superiores.

30Hz

TABLA ARMÓNICOS				
0:00:02				
Volt	L1	L2	L3	N
THD%	1.8	1.8	1.8	99.0
H3%	1.1	1.1	1.0	14.1
H5%	1.2	1.3	1.4	7.7
H7%	0.0	0.2	0.1	0.9
Amp	L1	L2	L3	N
H3%	3.3	2.8	1.0	0.5
H5%	37.6	33.2	36.1	0.5
H7%	24.6	21.5	23.8	0.5
13/03/14 12:17:02 230V 50Hz 3Ø WYE ENS0160				
U A W	HARMONIC GRAPH		TREND	HOLD RUN
U&A				

50Hz

TABLA ARMÓNICOS				
0:00:08				
Volt	L1	L2	L3	N
THD%	1.9	1.9	1.9	98.8
H3%	1.1	1.1	1.1	27.8
H5%	1.3	1.4	1.5	2.4
H7%	0.2	0.4	0.2	1.2
Amp	L1	L2	L3	N
H3%	2.9	2.3	1.1	0.8
H5%	51.3	43.3	50.2	0.9
H7%	32.2	26.5	32.2	0.9
13/03/14 11:26:31 230V 50Hz 3Ø WYE ENS0160				
U A W	HARMONIC GRAPH		TREND	HOLD RUN
U&A				

40Hz

TABLA ARMÓNICOS				
0:00:02				
Volt	L1	L2	L3	N
THD%	1.8	1.8	1.8	99.1
H3%	1.1	1.1	1.1	17.2
H5%	1.2	1.2	1.3	2.0
H7%	0.1	0.2	0.1	4.8
Amp	L1	L2	L3	N
H3%	2.7	3.2	1.1	0.6
H5%	39.3	34.2	37.7	0.5
H7%	25.5	22.0	24.9	0.5
13/03/14 11:44:53 230V 50Hz 3Ø WYE ENS0160				
U A W	HARMONIC GRAPH		TREND	HOLD RUN
U&A				

Captura 9.10. Comparación de la presencia de armónicos para un nivel similar de carga a diferentes velocidades.

Tomando como base una carga de 0,3 kW por fase aproximadamente, vemos que a 30Hz la presencia del 5º armónico está en el entorno del 35%, sin embargo, aumenta sensiblemente para 40Hz y se dispara por encima del 50% para una frecuencia de 50Hz, Algo parecido ocurre con el 7º, para 30Hz está entre el 20 y el 25% mientras que para 50 está sobre el 30%.

9.3. Cargas desequilibradas

9.3.1. Cargas Resistivas

Fase- Fase

Devanado Primario							
Escalón		Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
	A	123,8	6,1	958,1	-437,3	1053,2	0,91
Final	B	121,6	6,1	958,1	662,7	1165	0,82
	C	126,2	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28
Devanado Secundario							
Escalón		Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
	A	214,4	5	920	-570	1080	0,852
Final	B	210,7	5	920	530	1060	0,868
	C	218,6	0	0	0	0	

Tabla 9.13. Carga resistiva fase-fase resultados medidos.

Devanado Primario							
Escalón		Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
	A	127	8,552	999,8	-424,6	1086,23	0,920
Final	B	127	9,558	1001	666,7	1202,70	0,832
	C	127	1,083	35,05	132,2	136,77	0,256
Devanado Secundario							
Escalón		Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
Final	A	200,8	5,088	852,3	-555,8	1017,51	0,838
	B	199,2	5,088	842,6	555,8	1009,40	0,835
	C	219,3	0	0	0	0,00	0,000

Tabla 9.14. Carga resistiva fase-fase resultados simulados.

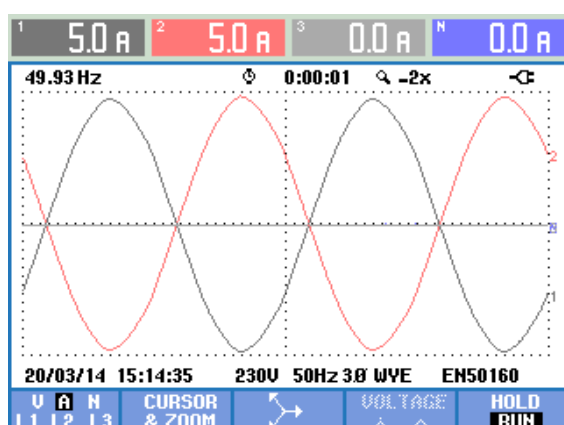


TABLA ARMÓNICOS					
Volt	L1	L2	L3	N	
THD%	1.6	1.5	1.6	78.6	
H3%	1.2	1.1	1.1	77.8	
H5%	0.6	0.8	0.7	5.0	
H7%	0.8	0.6	0.8	2.0	
Amp	L1	L2	L3	N	
H3%	0.5	0.4	1.3	0.4	
H5%	0.3	0.6	0.2	0.1	
H7%	0.7	0.6	0.2	0.2	
20/03/14 15:03:21 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160					
U A W	HARMONIC GRAPH		TREND	HOLD RUN	

Captura 9.12. Grafica Intensidad desequilibrio y armónicos Fase-Fase.

Al conectar una carga solamente entre dos fases del sistema dejando la otra libre observamos, como por la fase A circula la corriente a la carga y por la columna B retorna, por la naturaleza de la carga vemos un desequilibrio perfecto, observando el diagrama de la intensidad vemos como la intensidad que circula por la fase C y por el neutro es igual a cero.

Respecto de los armónicos, vemos que su presencia es prácticamente igual a cero, esto también lo podemos comprobar en el diagrama en el que vemos como la intensidad describe una senoide perfecta.

Observando la concordancia entre los datos obtenidos y simulados vemos una vez más como existe una coincidencia casi perfecta tanto en magnitudes como en signos, se aprecia como la potencia reactiva en la columna primaria toma carácter capacitivo, de ahí que cambie el signo.

Fase-Neutro

Devanado Primario						
Escalón	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
	A 117,5	9,5	1738,1	172,7	1746,7	1
19,9	B 118	1,3	38,1	142,7	147,7	0,26
	C 137,5	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28
	N 16,7	8,4	0	0	0	
Devanado Secundario						
Escalón	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
	A 203,6	8,4	1700	40	1700	1
19,9	B 204,4	0,2	0	10	10	
	C 238,1	0	0	0	0	
	N 16,7	8,4	0	0	0	

Tabla 9.15. Carga resistiva fase-neutro resultados medidos.

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

Devanado Primario						
Escalón	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
A	127	10,4	1182	588,5	1320,40	0,895
B	127	5,924	126,5	741,7	752,41	0,168
C	127	4,552	521,7	-249,2	578,16	0,902
Devanado Secundario						
Escalón	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
A	167,7	8,427	1413	0	1413,00	1,000
B	299	0	0	0	0,00	0,000
C	179,2	0	0	0	0,00	0,000

Tabla 9.16. Carga resistiva fase-neutro resultados simulados.

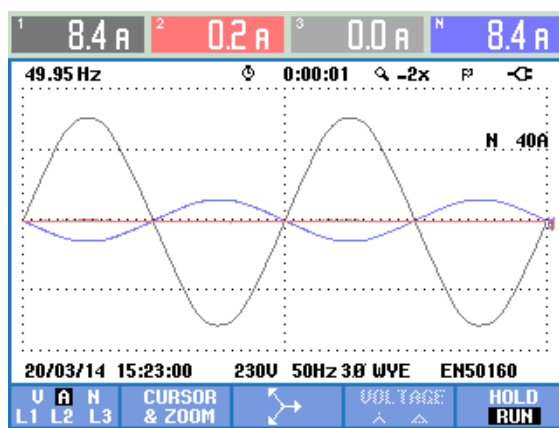


TABLA ARMÓNICOS				
Volt	L1	L2	L3	N
THD%	1.7	2.0	1.8	14.7
H3%	1.5	1.5	1.3	13.8
H5%	0.6	1.1	0.5	3.9
H7%	0.6	0.7	1.0	3.0
Amp	L1	L2	L3	N
H3%	1.5	0.4	0.5	1.6
H5%	0.6	0.3	0.4	0.6
H7%	0.7	0.2	0.2	0.6

Captura 9.11. Grafica Intensidad desequilibrio y armónicos Fase-Neutro.

Al conectar una carga entre fase y neutro, solamente la fase A debería entregar potencia, pero vemos que por la fase B circula una pequeña intensidad, en este caso como tenemos la referencia de la simulación y sabemos que la pinza 2 no estaba conectada, confirmamos que es un error de medida.

Omitiendo esa anomalía vemos de nuevo concordancia de datos entre los tomados y los estudiados analíticamente, con la salvedad de los datos del primario, al haber estudiado solamente los desequilibrios en el secundario y haber referidos estos al primario, los datos no concuerdan. En el caso anterior la divergencia era menor, sin embargo en éste al tener la carga entre fase y neutro la diferencia es más llamativa.

9.3.2. Cargas Inductivas

Fase-Fase

Devanado Primario							
		Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
	A	123,5	5,5	568,1	902,7	1066,6	0,53
270.723mH	B	127,1	5,5	-371,9	1002,7	1069,4	-0,35
	C	126	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28
Devanado Secundario							
		Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
	A	213,9	4,4	530	770	930	0,57
270.723mH	B	220,1	4,4	-410	870	960	-0,427
	C	218,2	0	0	0	0	

Tabla 9.17. Carga resistiva fase-fase resultados medidos.

Devanado Primario							
Escalón		Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
	A	127	9.635	614,4	909	1097,16	0,560
Final	B	127	9.476	-347,2	1019	1076,53	-0,323
	C	127	1,082	38,01	1312	1312,55	0,029
Devanado Secundario							
Escalón		Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
	A	207,1	4,409	481,5	776,1	913,33	0,527
Final	B	226,7	4,409	-480,9	878,5	1001,51	-0,480
	C	219,3	0	0	0	0,00	0,000

Tabla 9.19. Carga resistiva fase-fase resultados simulados.

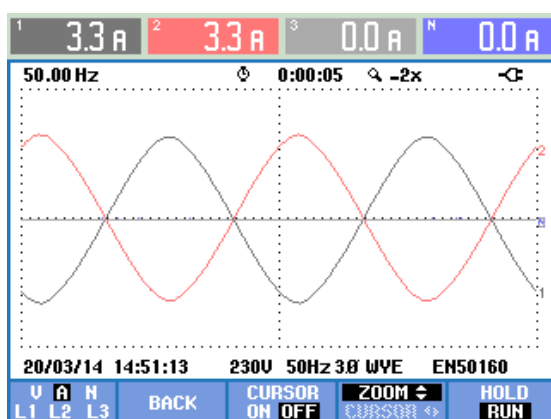


TABLA ARMÓNICOS				
Volt	L1	L2	L3	N
THD%	1.6	1.5	1.6	79.3
H3%	1.1	1.1	1.1	78.6
H5%	0.5	0.8	0.7	5.2
H7%	0.9	0.7	0.9	1.7
Amp	L1	L2	L3	N
H3%	3.7	3.1	6.2	1.4
H5%	0.8	1.1	0.9	0.2
H7%	0.3	0.1	0.6	0.4

Captura 9.12. Grafica Tensión desequilibrio y armónicos Fase-Fase.

Al conectar una carga solamente entre dos fases del sistema dejando la otra libre observamos, como por la fase A circula la corriente a la carga y por la columna B retorna, por la naturaleza de la carga vemos un desequilibrio

perfecto, observando el diagrama de la intensidad vemos como la intensidad que circula por la fase C y por el neutro es igual a cero.

Respecto de los armónicos, vemos que su presencia es prácticamente igual a cero, debemos tener en cuenta que por la naturaleza de la carga, a medida que aumentamos la frecuencia aumenta la reactancia, esta característica dificultará enormemente el paso de los armónicos. Este fenómeno también lo podemos comprobar en el diagrama en el que vemos como la intensidad describe una senoide perfecta.

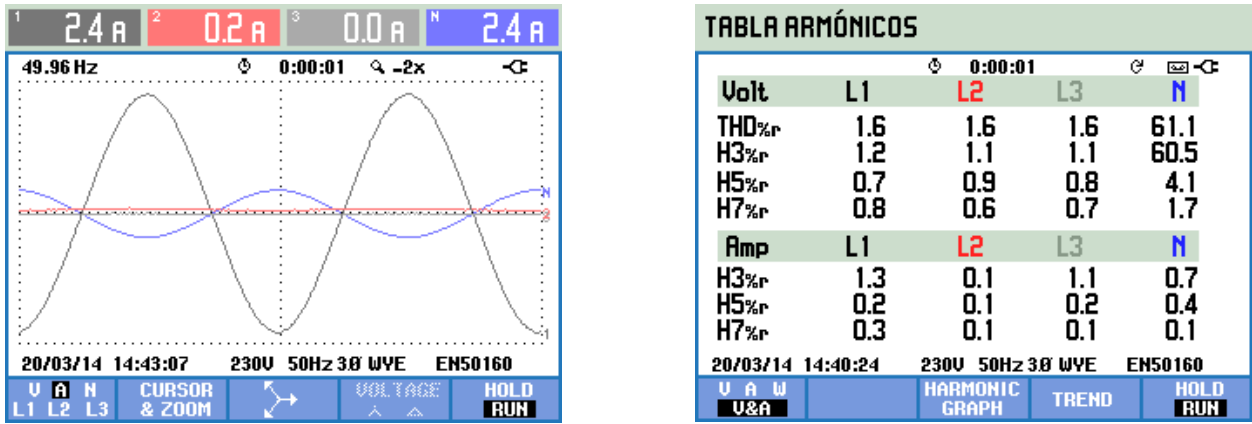
Fase-Neutro

Devanado Primario						
	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
A	123,5	5,5	568,1	902,7	1066,6	0,53
270.723mH B	127,1	5,5	-371,9	1002,7	1069,4	-0,35
C	126	1,1	38,1	132,7	138,1	0,28
Devanado Secundario						
	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
A	213,9	4,4	530	770	930	0,57
270.723mH B	220,1	4,4	-410	870	960	-0,427
C	218,2	0	0	0	0	

Tabla 9.19. Carga resistiva fase-neutro resultados medidos.

Devanado Primario						
Escalón	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
A	127	3,719	56,21	469,1	472,46	0,119
B	127	1,944	-103,3	224,3	246,94	-0,418
C	127	2,213	185,5	208,5	279,07	0,665
Devanado Secundario						
Escalón	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
A	196,3	2,0306	0,0115	453	453,00	0,000
B	232,4	0	0	0	0,00	0,000
C	229,7	0	0	0	0,00	0,000

Tabla 9.20. Carga resistiva fase-neutro resultados simulados.



Captura 9.13. Grafica Intensidad desequilibrio y armónicos Fase-Neutro.

Al conectar una carga entre fase y neutro, solamente la fase A debería entregar potencia, pero vemos que por la fase B circula una pequeña intensidad, en este caso como tenemos la referencia de la simulación y sabemos que la pinza 2 no estaba conectada, confirmamos que es un error de medida.

Omitiendo esa anomalía vemos de nuevo concordancia de datos entre los tomados y los estudiados analíticamente, con la salvedad de los datos del primario, al haber estudiado solamente los desequilibrios en el secundario y haber referidos éstos al primario, los datos no concuerdan. En el caso anterior la divergencia era menor, sin embargo en éste al tener la carga entre fase y neutro la diferencia es más llamativa.

De nuevo vemos que la presencia de armónicos es prácticamente nula.

9.3.3. Cargas capacitivas

Devanado Primario						
Escalón		Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente Cos ϕ
	A	124,1	7,4	688,1	1472,7	1625,5 0,42
51uF	B	130,4	7,4	-651,9	1542,7	1674,8 -0,39
	C	125,2	1,1	38,1	132,7	138,1 0,28
Devanado Secundario						
Escalón		Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente Cos ϕ
	A	215	6,3	650	1340	1230 0,528
51uF	B	225,8	6,3	-690	1410	1230 -0,561
	C	216,9	0	0	0	0

Tabla 9.21. Carga capacitiva fase-fase resultados medidos.

Devanado Primario						
Escalón		Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente Cos ϕ
	A	127	6,82	-376,1	-781,4	867,20 -0,434
	B	127	7,272	622,2	-683,1	923,99 0,673
	C	127	1,083	38,04	132,2	137,56 0,277
Devanado Secundario						
Escalón		Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente Cos ϕ
	A	229,6	4,572	-498,8	-924,4	1050,39 -0,475
	B	209,1	4,572	498,5	-816,3	956,48 0,521
	C	219,2	0	0	0	0,00 0,000

Tabla 9.22. Carga capacitiva fase-fase resultados simulados.

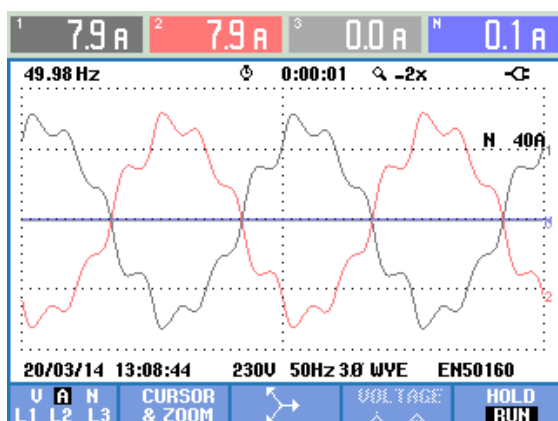


TABLA ARMÓNICOS				
Volt	L1	L2	L3	N
THD%	2.2	2.5	1.8	75.5
H3%	1.2	1.0	1.2	74.7
H5%	1.2	0.9	0.8	6.2
H7%	1.3	2.1	1.0	2.2
Amp	L1	L2	L3	N
H3%	0.3	0.3	0.6	0.2
H5%	5.6	5.5	0.6	0.2
H7%	13.8	13.8	1.4	0.2

Captura 9.14. Grafica Intensidad desequilibrio Fase-Fase.

El efecto observado en las cargas capacitivas es cuanto menos curioso, al mirar la gráfica sorprende la deformación que encontramos en la onda de corriente. La explicación de esto viene de la naturaleza de las cargas capacitivas, en las cuales al aumentar la frecuencia disminuye la reactancia, lo

cual propicia el paso de los armónicos, afectando éstos en gran medida a la forma de onda.

Si observamos detenidamente la tabla de armónicos vemos como la presencia del tercer armónico es muy poco importante sin embargo aumenta para el 5º y se dispara para el 7º. En este caso, y debido a la gran cantidad de armónicos presentes, así como al desequilibrio la pantalla del ordenador empezó a parpadear.

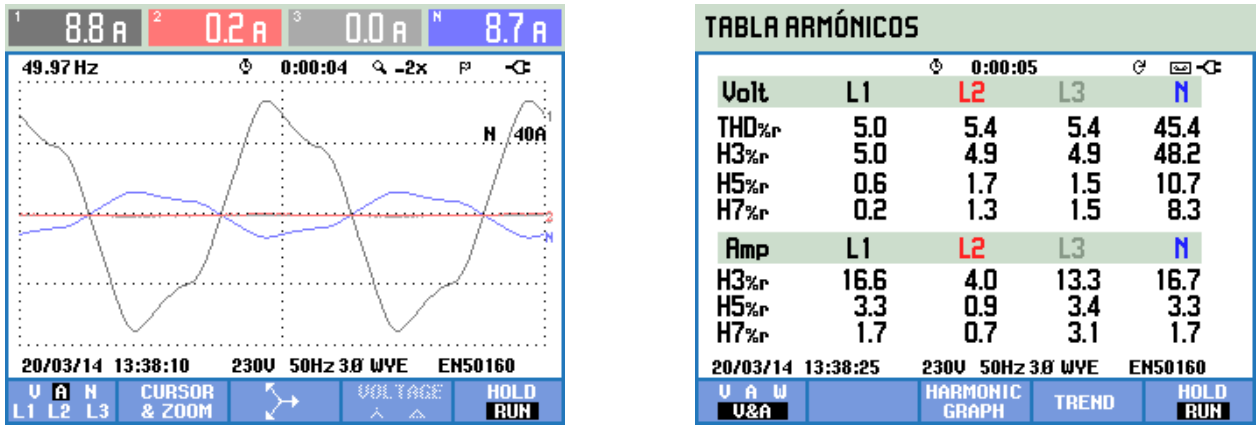
Devanado Primario						
Escalón	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
	A 140,8	9,9	-11,9	2252,7	2252,7	-0,01
92.4uF	B 119,7	1,3	138,1	132,7	191,5	0,72
	C 121,3	1,1	28,1	132,7	135,6	0,21
	N 10,7	9,8	38,1	132,7	138,1	0,28
Devanado Secundario						
Escalón	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
	A 243,9	8,8	-50	2120	2120	-0,024
92.4uF	B 207,4	0,2	100	0	10	
	C 210,1	0	-10	0	10	
	N 18,5	8,7	0	0	0	

Tabla 9.23. Carga capacitiva fase-neutro resultados medidos.

Devanado Primario						
Escalón	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
	A 127	9,159	241,1	-1138	1163,26	0,207
	B 127	5,088	638,8	-97,45	646,19	0,989
	C 127	4,221	-461,2	-273,3	536,10	-0,860
Devanado Secundario						
Escalón	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
	A 303,1	8,799	0,01094	-2667	2667,00	0,000
	B 203,1	0	0	0	0,00	0,000
	C 180,3	0	0	0	0,00	0,000

Tabla 9.24. Carga capacitiva fase-neutro resultados simulados.

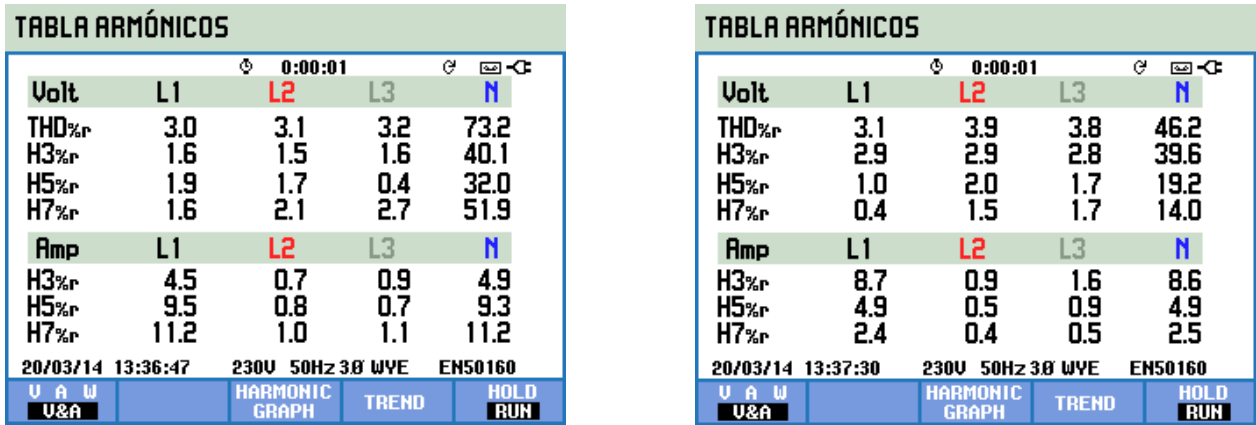
TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.



Captura 9.15. Grafica Intensidad desequilibrio Fase-Neutro.

Los datos obtenidos experimentalmente y analíticamente son prácticamente los mismos, cabe destacar de nuevo la gran estabilidad del modelo, el cual refleja de manera clara y precisa los fenómenos que se dan en el sistema.

El efecto se repite para el caso del desequilibrio fase-neutro, vemos que la onda presenta una deformación importante sin embargo observamos como en este caso el tercer tiene mucha más presencia que el 5º y el 7º, si estudiamos el fenómeno a otros niveles de carga como por ejemplo:



Al elevar la carga aumenta el peso del tercer armónico y disminuye el del 5º y el 7º esto se debe al efecto de la resistencia, al aumentar la demanda de potencia activa, hace disminuir la presencia de los armónicos de mayor rango.

9.3.4. Circuito RL

Datos del primario						
Escalón	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
66,75	A 123,4	5,9	948,1	-347,3	1009,7	0,94
	B 121	6,5	988,1	742,7	1236,1	0,8
	C 125,6	1,6	48,1	242,7	247,4	0,19
Datos del secundario						
Escalón	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
66,75	A 213,7	4,8	910	-480	1030	0,883
	B 209,5	5,4	950	610	1120	0,848
	C 217,6	0,5	10	110	110	0,091

Tabla 9.25. Circuito RL resultados medidos.

Devanado Primario						
Escalón	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
A	127	8,137	980,4	-327,2	1033,56	0,949
	B 127	9,96	100,3	771,3	777,79	0,129
	C 127	1,927	40,23	241,4	244,73	0,164
Devanado Secundario						
Escalón	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
A	200,9	4,781	844,5	-457,6	960,51	0,879
	B 199,1	5,277	833,7	639,5	1050,72	0,000
	C 219,1	0,4982	0	109,2	109,20	0,000

Tabla 9.26. Circuito RL resultados simulados.

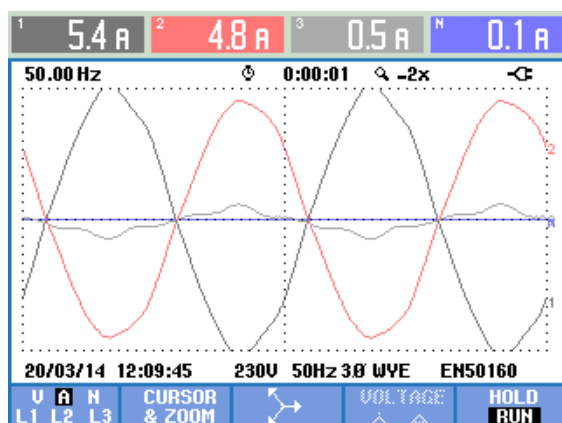


TABLA ARMÓNICOS				
Volt	L1	L2	L3	N
THD%	1.8	1.7	1.8	62.9
H3%	1.1	0.9	1.1	62.3
H5%	0.7	0.8	0.8	2.0
H7%	1.2	1.1	1.2	3.5
Amp	L1	L2	L3	N
H3%	0.4	1.3	14.2	0.3
H5%	2.7	2.2	17.7	0.1
H7%	1.4	0.8	4.3	0.2
20/03/14 12:09:53 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W	HARMONIC GRAPH		TREND	HOLD RUN

Captura 9.16. Grafica Intensidad y armónicos circuito RL.

En este caso se aprecia también una cierta deformación lo que nos indica en un principio la presencia de armónicos, si observamos la tabla de armónicos de la derecha vemos que por la fase tercera, la cual está conectada a la reactancia, pero no a la resistencia circula una importante cantidad de

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

armónicos. Este fenómeno se debe a que la reactancia, en este caso un autotransformador está en vacío y sus devanados conectados en estrella, como sabemos, en vacío se producen una serie de armónicos propios de la excitación de los circuitos magnéticos, estas corrientes armónicas se ven amortiguadas en la fase primera y segunda, ya que a éstas hay conectada una resistencia. Sin embargo la tercera fase se encuentra en vacío, por lo que por ella si que circulan los armónicos, contaminando el sistema.

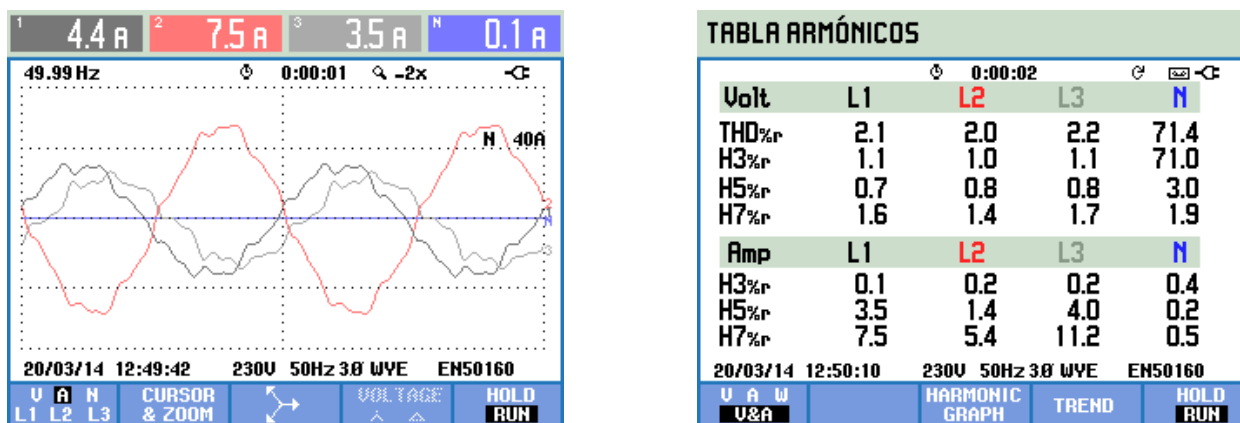
9.3.5. Circuito RC

Devanado Primario						
Escalón	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
61,2	A 124,2	8,6	958,1	1452,7	1740,2	0,55
	B 122,2	5,5	948,1	322,7	1001,5	0,95
	C 126,5	4,6	8,1	902,7	902,7	0,01
Devanado Secundario						
Escalón	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
61,2	A 215,2	7,5	920	1320	1610	0,571
	B 211,7	4,4	910	190	930	0,978
	C 219,1	3,5	-30	770	770	-0,039

Tabla 9.27. Circuito RC resultados medidos.

Devanado Primario						
Escalón	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
A	127	12,71	1189	-1082	1607,62	0,740
B	127	8,137	1029	90,39	1032,96	0,996
C	127	5,072	86,35	-638,9	644,71	0,134
Devanado Secundario						
Escalón	Tensión	Intensidad	Potencia	Reactiva	Aparente	Cos ϕ
A	199,2	7,661	899,9	-1232	1525,66	0,590
B	199,2	4,525	899,9	-38,72	900,73	0,000
C	219,9	3.521	0,4118	-774,6	774,60	0,000

Tabla 9.29. Circuito RC resultados simulados.



Captura 9.17. Gráfica Intensidad y armónicos circuito RC.

En este caso vemos que la distorsión armónica es muy importante, como en el caso anterior se ha dispuesto una batería de condensadores en paralelo con el transformador y se ha conectado una resistencia entre las fases A y B.

Como podemos ver en la gráfica, la distorsión provocada por los armónicos es importante, esto hace que la onda se vea muy distorsionada. Como podemos comprobar el fenómeno visto anteriormente se repite, el tercer armónico está poco presente, el quinto algo más y el séptimo algo más, disparándose en la fase que está en vacío.

10. CONCLUSIÓN.

10.1. Efectos de los armónicos en cada uno de los elementos de la red

En este apartado vemos como afecta la presencia de armónicos a cada uno de los elementos de la red.

10.1.1. Conductores

Provocan el aumento de la corriente así como el aumento de la resistencia, lo que provoca que aumenten las pérdidas por efecto Joule y propician la aparición del efecto pelicular, que hace que disminuya la banda en la que se distribuye la carga en los conductores. Ocasionando calentamiento en los cables y disparo de las protecciones.

10.1.2. Neutro

Los armónicos múltiplos de 3 se suman y circulan por el neutro, retornando por el mismo, lo que genera sobreintensidad de la corriente circulando por el neutro, calentamiento del conductor de neutro que a su vez provoca la degradación prematura del conductor. Además, propicia la aparición de tensión entre neutro y tierra y el disparo intempestivo de las protecciones.

10.1.3. Condensadores

La forma de mitigar los efectos sobre los condensadores los veremos más adelante, para ello debemos tener en cuenta que los armónicos en los condensadores propician que se produzcan resonancias en paralelo con el sistema y que los armónicos se amplifiquen. Esto desembocará en calentamientos, envejecimiento prematuro de condensadores y finalmente la destrucción de los mismos.

10.1.4. Transformadores

En los transformadores aparecerán corrientes armónicas en los devanados que provocarán sobrecalentamiento, pérdida de aislamiento térmico por calentamiento y pérdidas en el cobre por efecto Foucault y en el hierro por la histéresis con la consecuente pérdida de rendimiento. Propiciará la saturación del transformador, que genera mayor distorsión y obliga a sobredimensionar la máquina, sin embargo, esta solución solo puede ser contemplada cuando es conocida la polución armónica y transmitida al fabricante antes del estudio del transformador.

Otra solución preventiva que puede aplicarse a transformadores consiste en utilizar transformadores con acoplamientos especiales, ya que algunos grupos de conexión tienen la propiedad de suprimir ciertos rangos de armónicos.

El grupo de conexión "**Dyd**" frena los armónicos de rango 5 y 7

El grupo de conexión "**Dy**" frena los armónicos de rango 3, los armónicos circulan por cada fase y se cierran por el neutro del transformador.

El grupo de conexión " **DZ5** " frena los armónicos de rango 5 que se cierran por el circuito magnético.

La presencia de armónicos en el sistema puede producir resonancia entre el transformador y los elementos de tipo capacitivo de la red eléctrica. Esto es posible si, en una cierta configuración de la red, las frecuencias armónicas presentes se corresponden al menos a una de las frecuencias propias de resonancia del transformador.

En este caso, las sobretensiones/sobreintensidades están generalmente localizadas en el interior de un arrollamiento del transformador.

Finalmente estas resonancias internas degeneran en incidentes dieléctricos que conducen a la avería del transformador.

Si un transformador es operado a una tensión anormalmente elevada, se generarán pérdidas excesivas en el hierro causando calentamientos importantes y armónicos que presuponen riegos de resonancia con el riesgo que acarreen.

10.1.5. Motores

Para los motores, los efectos son parecidos a los transformadores. Aparecerán corrientes armónicas en los devanados que provocarán sobrecalentamiento, pérdida de aislamiento térmico por calentamiento y pérdidas en el cobre por efecto Foucault y en el hierro por la histéresis. Esto dará como resultado pérdida de rendimiento, vibraciones en el eje, desgaste mecánico en los rodamientos, excentricidad y reducción de par.

10.1.6. Grupos electrógenos

En los grupos electrógenos al tratarse de sistemas mas débiles, con mayor impedancia que la red, provocarán graves distorsiones de la tensión que ocasionará dificultados para la sincronización automática y la conmutación.

10.1.7. Equipos de medida

Los armónicos falsearán las medidas y dificultarán los procesos de control sobre todo en equipos que toman como referencia el paso por cero de la onda. Además provocarán saturación en los transformadores de medida y/o protección, así como magnitudes medidas incorrectas.

10.2. Influencia de los armónicos en condensadores

Los equipos que utilizan componentes electrónicos de alimentación como nuestro variador de velocidad, aumentan considerablemente los problemas provocados por los armónicos en las instalaciones eléctricas. Los armónicos siempre están presentes y los provocan las impedancias magnetizantes no lineales de transformadores, reactancia de lámparas fluorescentes etc. Los armónicos en sistemas de alimentación trifásicos simétricos suelen ser en general impares, principalmente tercero, quinto y séptimo y la magnitud disminuye al ir aumentando el orden del armónico. Conociendo las características y singularidades de los diferentes generadores de armónicos se pueden reducir los armónicos a valores insignificantes aunque la eliminación total casi es imposible. Para reducir el contenido de armónicos será necesario emplear una serie de métodos pensando en que no se amplifiquen al utilizar baterías de condensadores. Los condensadores son especialmente sensibles a los componentes armónicos de la tensión suministrada debido al hecho de que la reactancia capacitiva se reduce según va aumentando la frecuencia. En la práctica, esto significa que un porcentaje relativamente pequeño de tensión armónica puede provocar que circule una corriente elevada por el condensador. La presencia de componentes armónicos provoca que se distorsione la forma de onda de tensión o corriente; cuanto mayor sea el contenido de armónicos, mayor será el grado de distorsión. Si la frecuencia de resonancia entre la batería de condensadores y la inductancia de la red es cercana a un armónico en particular, se producirá una resonancia parcial, con valores amplificados de tensión y corriente en la frecuencia del armónico en cuestión. En este caso, el aumento de corriente provocará el sobrecalentamiento del condensador, con la degradación del dieléctrico, lo que

puede provocar la destrucción del condensador. Existen varias soluciones las cuales son válidas tanto para los condensadores como para la red en general.

10.2.1. Filtro pasivo

El filtro pasivo cumple con dos funciones principalmente. La primera es la de contrarrestar los efectos de los armónicos y la segunda es la de contrarrestar los efectos de la resonancia.

La presencia de armónicos de tensión produce niveles de corriente anormalmente altos a través de los condensadores. Por normativa, los condensadores deben de soportar $1,3 I_n$ en régimen permanente, por lo que todos los componentes que estén asociados a los condensadores, como fusibles, contactores, cables, aparataje están sobredimensionados de forma similar. La distorsión armónica de la onda de tensión produce con frecuencia un pico, en el que aumenta el valor de la onda senoidal a la frecuencia fundamental. En previsión y para proteger los condensadores, se aumenta la tensión de trabajo de los mismos. En algunos casos, con estas dos contramedidas, el sobredimensionamiento en corriente y tensión, es suficiente para lograr un funcionamiento satisfactorio.

Para contrarrestar los efectos de la resonancia, debemos tener en cuenta que los condensadores son dispositivos reactivos lineales y, por consiguiente, no generan armónicos. La instalación de condensadores en una instalación en la que las impedancias son predominantemente inductivas, puede producir resonancia total o parcial en una de las frecuencias armónicas. El rango armónico h_0 de la frecuencia de resonancia natural entre la inductancia del sistema y la batería de condensadores lo proporciona la ecuación:

$$hh_0 = \sqrt{\frac{S_{sc}}{Q}}$$

(Fórmula 10.1)

Siendo:

h_0 : Rango armónico.

Ssc: Potencia de cortocircuito, kVA del sistema en el punto de conexión de la batería de condensadores

Q: Potencia de la batería de condensadores en kVAr.

Cuando más se acerca la frecuencia de resonancia a uno de los armónicos presentes en el sistema, más probabilidades de sufrir las consecuencias negativas de los armónicos. En estos casos, se debe cambiar la frecuencia de resonancia por un valor que no presente resonancia con ninguno de los armónicos que se sabe que estarán presentes. Esto se consigue añadiendo una inductancia antiarmónicos en serie con los condensadores. En redes de 50 Hz, el conjunto condensador inductancia se sintoniza a una frecuencia de resonancia entre 189-215Hz. La frecuencia de sintonía del conjunto LC aumenta el nivel de tensión en bornes del condensador, en torno a un 7-8%; por lo que la tensión asignada de los condensadores debe ser como mínimo de 440V, para redes de 400V.

10.2.2. Filtro activo

Los filtros activos están basados en la tecnología electrónica de potencia. Normalmente se instalan en paralelo a las cargas no lineales. Los filtros activos analizan los armónicos generados por las cargas no lineales e inyectan a la red la misma corriente armónica desfasada 180°. En consecuencia, las corrientes armónicas se neutralizan por completo, es decir, ya no circulan aguas arriba del filtro activo. Una de las ventajas de los compensadores activos es que siguen garantizando una compensación de armónicos eficaz incluso cuando se realizan modificaciones en la instalación. Generalmente, son también fáciles de utilizar ya que presentan:

Autoconfiguración para cargas de armónicos independientemente del orden de magnitud.

Eliminación de riesgos de sobrecarga.

Compatibilidad con generadores eléctricos.

Conexión en cualquier punto de la red eléctrica.

Se pueden utilizar varios compensadores activos en la misma instalación para aumentar el rango de corrientes armónicas a eliminar.

Los filtros activos proporcionan también la corrección del factor de potencia, si se utilizan los amperios “sobrantes” para ese cometido, no siendo recomendable este uso por el elevado coste del amperio reactivo.

Filtro Híbrido

Este tipo de filtro combina ventajas de filtros activos y pasivos. Se puede filtrar una frecuencia mediante un filtro pasivo, y un filtro activo filtra todas las demás frecuencias.

10.3. Los armónicos en el disparo de las protecciones

Las corrientes armónicas pueden ser la causa de disparos intempestivos o de la fusión de fusibles sin causa aparente. En estos casos no solo influye el aumento del valor eficaz de la corriente y el calentamiento por efecto pelicular sino también la frecuencia de los armónicos más destacados. Así puede producirse el disparo de un interruptor automático aunque no se alcance el valor de la corriente de disparo.

En cuanto a los diferenciales, los disparos se dan no por los armónicos en sí sino porque se producen fugas a tierra.

Las fugas a tierra pueden producirse por defectos de aislamiento y por corrientes capacitivas debidas a las capacidades de las propias líneas respecto a tierra o por condensadores de filtros de determinados dispositivos. Las tensiones armónicas al ser de frecuencia superior a la de la red se encontrarán reactancias capacitivas más bajas y por tanto corriente de fugas a tierra más altas que pueden contribuir a disparos más frecuentes.

Los contenidos en armónicos que con diferentes cargas presenta el transformador puede afectar a la detección de la protección de los transformadores. Por ejemplo en protección diferencial se detecta el 2º armónico y en corrientes de defecto el 3º y 5º. Es decir diferentes cargas no lineales pueden hacer que aparezcan armónicos y la protección detecte éstos

TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. RESPUESTA ANTE CARGAS LINEALES Y NO LINEALES, ENSAYOS Y SIMULACIÓN.

armónicos y actúe. Estamos hablando de equipos de mayor potencia pero transformadores a los que se conecte una planta fotovoltaica puede dar lugar al mismo efecto.

. Bibliografía

Norma UNE-EN 60076-1:2013 Transformadores de potencia. Parte 1 Generalidades.

Máquinas eléctricas y transformadores. Irving L. Kosow. Ed. Pearson Educación. Año 1993.

Máquinas eléctricas. Jesús Fraile Mora. Ed. Mc Graw Hill. 5ª Edición.

Transformadores de potencia, de medida y de protección. Enrique Ras Oliva. Ed. Marcombo.

Manual de
simulink http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/simulink/sl_using.pdf

Documento técnico Schneider Electric “Mejora del factor de potencia y filtrado de armónicos”

http://www.schneiderelectric.es/documents/local/productos-servicios/distribucion_electrica/guia_instalaciones_electricas/capitulo-l-mejora-factor-potencia-filtrado-armonicos.pdf

Documento técnico Schneider Electric “El transformador y su entorno, para una protección máxima”

<http://www.schneiderelectric.es/documents/news/automation-control/el-transformador.pdf>

Documento técnico IEEE “Transformer Protection Application Guide”

<http://sites.ieee.org/fw-pes/files/2013/01/transfguide.pdf>

Documento técnico CYDESA. “Conviviendo con los armónicos. Rev. 06-06-07”

<http://www.cydesa.com/download/pdf/convivir.pdf>

Documento técnico CIRCUTOR. “Efecto de los armónicos en el sistema de potencia”

<http://circutor.es/es/formacion/armonicos-electricos/efecto-de-los-armonicos-en-el-sistema-de-potencia>