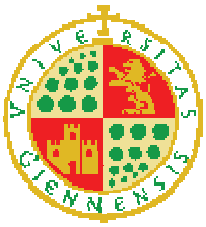
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Grado en Ingeniería Eléctrica



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

ENSAYO TEÓRICO Y REAL DE ESTADOS TRANSITORIOS DE UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE POTENCIA: COMPARATIVA

Alumno: Vicente Gil Plazas Sánchez.

Tutor: Prof. D. Carlos Sánchez Martos.
Dpto: Ingeniería Eléctrica.

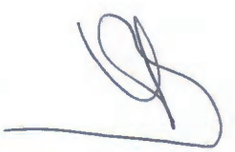
Mayo, 2015

Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Electricidad

DON **CARLOS SÁNCHEZ MARTOS** , TUTOR DEL TRABAJO FIN DE GRADO TITULADO: *ENSAYO TEÓRICO Y REAL DE ESTADOS TRANSITORIOS DE UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE POTENCIA: COMPARATIVA*, QUE PRESENTA **VICENTE GIL PLAZAS SÁNCHEZ**, AUTORIZA SU PRESENTACIÓN PARA DEFENSA Y EVALUACIÓN EN LA ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JAÉN.

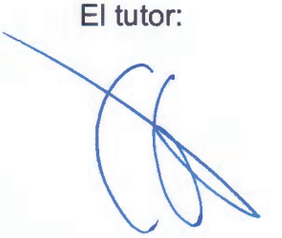
Jaén, Mayo de 2015

El alumno:



VICENTE GIL PLAZAS SÁNCHEZ

El tutor:



CARLOS SÁNCHEZ MARTOS

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN 4

1.1. Justificación 7

1.2. Objetivos 8

2. TEORÍA SOBRE EL TRANSFORMADOR DE POTENCIA 9

2.1. Núcleo magnético: Ciclo de histéresis 9

2.2. Conceptos básicos de un transformador 13
2.2.1. Transformador en vacío 17
2.2.2. Transformador en carga 18

2.3. Reducciones del circuito equivalente 20

2.4. Ensayos de vacío y de cortocircuito 23
2.4.1. Ensayo de vacío 23
2.4.2. Ensayo de cortocircuito 25

3. EFECTOS TRANSITORIOS: FUNDAMENTACIÓN 28

3.1. Transitorio de Conexión 28
3.1.1. Generación de la corriente inrush 31
3.1.2. Comportamiento en régimen saturado 34
3.1.3. Contenido armónico 35
3.1.4. Efectos sobre el transformador 36

3.2. Transitorio de Cortocircuito 37
3.2.1. Corriente permanente de cortocircuito 38
3.2.2. Corriente transitoria de cortocircuito 40
3.2.3. Corriente de choque 45
3.2.4. Causas y efectos sobre el transformador 47

3.3. Transitorio de Sobreexcitación 48
3.3.1. Causas y efectos de una sobretensión 50
3.3.2. Circuito equivalente del transformador en caso de sobretensiones. 52

3.4. Transitorio de Sobrefrecuencia/Subfrecuencia 54
3.4.1. Causas y efectos de la variación de frecuencia 55

4. ELEMENTOS PARA LA REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS 56
5. ENSAYOS Y MEDICIONES PREVIAS 63

5.1. Ensayo de vacío en secuencia directa 64

5.2. Ensayo de cortocircuito en secuencia directa 66

5.3. Ensayo de vacío en secuencia cero 68

5.4. Ensayo de cortocircuito en secuencia cero 70

5.5. Medición de las resistencias de los devanados 71

6. ENSAYOS REALIZADOS AL TRANSFORMADOR REAL 72

6.1. Ensayo transitorio de Conexión 73

6.2. Ensayo transitorio de Cortocircuito 75

6.3. Ensayo transitorio de Sobreexcitación 78

6.4. Ensayo transitorio de Sobrefrecuencia/Subfrecuencia 81

7. SIMULACIONES REALIZADAS 82

7.1. Transitorio de Conexión 84

7.2. Transitorio de Cortocircuito 86

7.3. Transitorio de Sobreexcitación 89

7.4. Transitorio de Sobrefrecuencia/Subfrecuencia 92

8. COMPARATIVA ENTRE ENSAYO REAL Y SIMULACIÓN 94
9. CONCLUSIONES 99

9.1. Aumento de la intensidad de corriente teórica-real 99

9.2. Variación de los datos ensayos real y simulación 101

9.3. Resumen comparativa real-simulación 102

10. BIBLIOGRAFIA 104
11. LISTA DE NOMENGLATURA 105
12. ANEXOS 108

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo fin de grado titulado *"Ensayo teórico y real de un transformador trifásico de potencia: Comparativa"* es redactado en cumplimiento de la normativa sobre trabajos fin de grado de la **Universidad de Jaén y de la Escuela Politécnica Superior de Jaén** y que conduce a la obtención del título de grado en Ingeniería eléctrica.

Su contenido ha sido dividido en once apartados. El primero de los cuales sirve como introducción y en el cual, uno de los puntos a tratar es enumerar los objetivos que persigue este trabajo así como la justificación de elección e importancia que tiene el transformador como elemento integrante del sistema eléctrico de potencia y el conocimiento de su comportamiento ante los posibles efectos transitorios a los que se vea sometido.

El segundo y tercer apartado describe en primer lugar los conceptos básicos del estudio de los transformadores de potencia a los que el presente trabajo hace referencia durante su desarrollo, y que a modo de aclaración o de repaso servirán para la mejor comprensión durante su lectura y, por otra parte la fundamentación o teoría en la que se sustenta los efectos transitorios de conexión, cortocircuito, sobretensión y sobre/subfrecuencia.

El cuarto apartado muestra la relación de materiales y elementos que han hecho posible la realización de los ensayos, tanto los ensayos al transformador de potencia de 5 KVA que se encuentra en el laboratorio de la Universidad de Jaén así como los utilizados en la simulación por medio de software informático.

En el quinto apartado se incluye los ensayos y mediciones previas que se han realizado al transformador del laboratorio y que tienen como finalidad poder introducir los datos demandados por el software informático para simular correctamente los ensayos de transitorios que se han realizado a la máquina real.

En el sexto y séptimo apartado se muestran respectivamente los resultados obtenidos en la realización de los ensayos al transformador y de la simulación.

Un octavo apartado se dedica a comparar los datos o valores obtenidos del transformador real y simulaciones y, un noveno apartado recoge una serie de conclusiones extraídas tanto de la comparación de resultados así como de todo lo que desarrolla este trabajo.

Las fuentes bibliográficas que han ayudado a la elaboración del trabajo fin de grado se describen en un décimo punto.

Finalmente, en el punto de anexos, se muestra diferentes simulaciones dentro de las cuales se introducen variantes a los esquemas de conexiones realizados al transformador de 5KVA.

- ASBTRACT

This Final Project entitled "Theoretical and actual test of a three-phase power transformer: Comparison" is written in compliance with the regulations on final degree from the University of Jaen work and the Polytechnic School of Jaén and leading to obtaining a degree in electrical Engineering.

Its content has been divided into eleven sections. The first of which serves as an introduction and one of the topics of discussion is enumerate the objectives that this project seeks to answer and justify the choice and the importance of the transformer as a component of the power system and knowledge of their behavior in the possible transient effects to which it may be subjected.

The second and third section describes, at first, the basics concepts of the study of power transformers as a kind of clarification or revision will serve for a better understanding for reading and, moreover the rationale or theory that transient effects connection, short circuit, over-voltage and over / under frequency is based.

The fourth section shows the list of materials and elements that have made it possible the execution of the tests: the test of the power transformer 5 KVA found in the laboratory of the University of Jaen and the test used in the simulation by computer software.

The fifth section contains the tests and previous measurements made at the laboratory to the transformer which aim to enter the data demanded by the computer software to properly simulate transient assays that have been made to the actual machine.

The sixth and seventh section show, respectively, the results obtained from the tests to the transformer and the simulation.

An eighth paragraph is dedicated to compare the values or data obtained from the real transformer and simulations and the ninth paragraph contains a number of conclusions deduced from the comparison of results and the development of the project.

The bibliographical sources that have helped the development of the final degree project are described in tenth spot.

Finally, at the point of annexes, the different simulations are shown within which the variations are introduced to the circuit diagrams made to the transformer 5KVA.

1.1 . Justificación

El transformador es uno de los equipamientos más importantes dentro de la estructura de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP), presentándose en diferentes tipos, tamaños y configuraciones. Los transformadores de potencia son complejos sistemas electromagnéticos y actúan como un nodo de interconexión para dos puntos de diferentes niveles de tensión y por ello el funcionamiento continuo del transformador es de vital importancia en la confiabilidad del sistema eléctrico dado que cualquier trabajo de reparación no programada, especialmente la sustitución de un transformador defectuoso, es muy caro y demorado.

Ante cualquier variación de una o de varias magnitudes que determinan el trabajo del transformador: tensión, frecuencia, intensidad, etc. Sobreviene la transición de un estado estacionario a otro. En algunos casos esta transición dura un tiempo muy corto pero no obstante puede ir acompañada de efectos considerables y peligrosos para los transformadores, tales como: el surgimiento de grandes esfuerzos mecánicos entre los devanados, la distribución irregular entre partes determinadas de sus devanados, el recalentamiento brusco de los bobinados, etc. Estos efectos tienen gran relevancia en los transformadores de gran potencia y por lo tanto la importancia del estudio de los fenómenos transitorios radica en el efecto que pueden tener en el funcionamiento de un sistema o sobre los equipos que forman parte de ese sistema.

De este modo, es sumamente importante conocer su comportamiento tanto en condiciones normales de funcionamiento, así como en condiciones transitorias. Esto dará como resultado el poder realizar un estudio técnico en profundidad para el control del mismo y especialmente para su protección efectiva, evitando de esta manera una actuación innecesaria de los relés de protección.

1.2. Objetivos

El trabajo fin de grado titulado “Ensayo teórico y real de un transformador trifásico de potencia: Comparativa” tiene como finalidad el cumplimiento de una serie de objetivos descritos a continuación:

- CONOCER LAS CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE CADA TRANSITORIO. Se expondrá antes de la realización práctica de los ensayos, la fundamentación o explicación teórica de las causas que originan la aparición de estos fenómenos.

- REALIZAR EL ENSAYO REAL DEL FUNCIONAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO ANTE ESTADOS TRANSITORIOS. Se realizará las pruebas para obtener la respuesta de un transformador trifásico ante los transitorios de: conexión, cortocircuito, sobreexcitación, sobrefrecuencia/subfrecuencia. Se extraerá principalmente de estos ensayos la variación que sufre la intensidad de corriente en el momento de producirse o en el transcurso de cada transitorio. El transformador a ensayar tiene una potencia de 5 KVA y se encuentra en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Universidad de Jaén.

- REALIZAR LA SIMULACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO DE POTENCIA MEDIANTE LA HERRAMIENTA MATLAB/SIMULINK. En la actualidad se dispone de potentes herramientas informáticas que nos ayudan a comprender de antemano el funcionamiento de un elemento real. Es esta ocasión, gracias a la herramienta Simulink de Matlab se van a realizar las mismas pruebas hechas al transformador de 5KVA del laboratorio, para lo cual se tendrán que respetar en primer lugar el mismo esquema de conexiones que se ha utilizado en el transformador de laboratorio y en segundo lugar, será necesario la realización a este transformador de unas pruebas preliminares cuya finalidad es la obtención de los datos solicitados por el software informático para la correcta simulación de los elementos que intervienen en el montaje del esquema.

- ANALIZAR Y COMPARAR LOS DATOS OBTENIDOS MEDIANTE LA SIMULACIÓN Y EL ENSAYO REAL. A partir de los cuales se extraerán una serie de conclusiones.

2. TEORÍA SOBRE EL TRANSFORMADOR DE POTENCIA

2.1. Núcleo magnético: Ciclo de histéresis

Histéresis, que quiere decir remanencia, es una característica que poseen todos los materiales magnéticos de mantener su imantación al cesar la causa que la produce. El fenómeno de histéresis da lugar a pérdidas de potencia en los circuitos magnéticos de las máquinas y aparatos eléctricos, por lo cual es de gran importancia para su conocimiento y estudio.

La manera más sencilla de estudiar el fenómeno de histéresis consiste en someter al núcleo de hierro a intensidades de campo de distinto valor absoluto y de diferente sentido, obteniendo lo que se denomina ciclo de histéresis.

Si sometemos a un grupo de hierro neutro a un campo magnético de intensidad progresivamente creciente, se obtiene la curva de magnetismo del núcleo ensayado. Sobre un sistema de coordenadas (ilustración 1) llevemos en abscisas las intensidades de campo H y en ordenadas las correspondientes inducciones. Partiendo de un hierro neutro, cuando la bobina no es recorrida por corriente eléctrica, ella no creará intensidad de campo H=0 y la inducción en el núcleo también será nula. El punto O representa este estado del material.

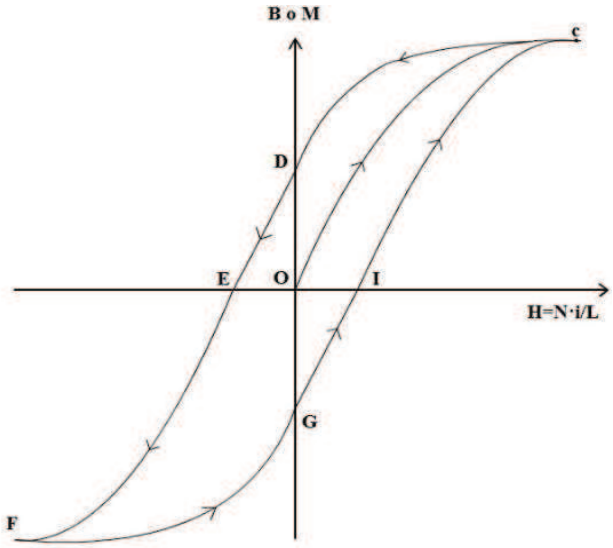


Ilustración 1: Ciclo de histéresis

El punto O representa el comienzo del ciclo de imantación que, al aumentar la intensidad llega a C. El extremo del ciclo o máxima intensidad negativa se encuentra en el punto F. El área de histéresis lo comprenden los puntos ICDEFG. Queda representada la fuerza de campo coercitiva por el tramo EO y el magnetismo remanente por OD.

Es interesante recordar en este momento que la variación del campo eléctrico en la máquina es proporcional a la intensidad de corriente que circula por sus espiras según la expresión:

$$H = \frac{1.25 * N * I}{Lb} \text{ en gausios}$$

Donde :

H = Intensidad del campo magnético (A*v/m)

N = número de espiras del bobinado

I = intensidad de corriente (A)

Lb = longitud de la bobina (m)

(Fórmula 1)

La variación de la inducción que se recoge en el eje de ordenadas, es el número de líneas de fuerza que recorre una unidad de superficie y el flujo es la

cantidad total de líneas de fuerza del circuito magnético. La fórmula que relaciona estas dos magnitudes es:

$$\beta = \frac{\phi}{S}$$

Donde:

β = Inducción en gausios

ϕ = Flujo máximo en maxvelios

S = Sección del circuito magnético

(Fórmula 2)

El flujo variable establecido en el circuito magnético del transformador da origen a una fuerza electromotriz inducida en cada uno de los bobinados primario y secundario. Para continuar con las relaciones que existen entre inducción, flujo y fuerza electromotriz, mostramos la relación entre el flujo y el valor eficaz de la fuerza electromotriz a través de la fórmula 3.

$$E = \frac{4.44 * \phi * f * N}{100000000}$$

Donde:

E = fuerza electomotriz eficaz (en voltios por dividir entre 10^8)

ϕ = flujo máximo en maxvelios

f = frecuencia

(Fórmula 3)

En el comienzo del ciclo de histéresis, si se aumenta la intensidad de campo creado por la bobina, también aumentará el valor de la inducción en el núcleo de hierro (curva OC). El punto C corresponde a la saturación del hierro. Si después disminuimos la intensidad de campo creado por la bobina, entonces se obtiene el extraño resultado de que, para una misma intensidad de campo, el valor de la inducción, durante el descenso de la curva, no coincide con el obtenido en la curva OC, sino que queda por encima de ella, lo que indica que en el hierro se presenta una especie de retraso de la inducción respecto al campo, siendo ésta la razón del

nombre de histéresis. Cuando la intensidad de campo queda anulada, queda todavía en el hierro cierta imantación residual, de manera que la inducción conserva el valor OD, que recibe el nombre de magnetismo remanente.

Para hacer desaparecer el magnetismo remanente, es preciso someter al núcleo de hierro a una intensidad de campo negativa, es decir, de sentido contrario al anterior. La variación de la inducción respecto a la intensidad de campo vendrá representada por la curva DE. En ella se observa que para que quede anulada la inducción se precisa que la intensidad de campo tome el valor OE, que recibe el nombre de fuerza coercitiva.

Al llegar la curva al punto F vuelve a manifestarse la saturación del núcleo de hierro. Invirtiendo el sentido de la corriente llegaremos al punto C, para lo cual habrá que considerar los mismos conceptos anteriores.

Realmente, lo que ocurre durante el ciclo de histéresis son giros, según el sentido de la intensidad de la corriente, de los imanes moleculares del núcleo de hierro. Cuando la intensidad de campo es creciente, los imanes moleculares giran para orientarse más y más en el sentido señalado por el flujo de líneas de fuerza.

Llegará un instante en el cual es completa la orientación de los imanes moleculares, estado magnético que corresponde a la saturación del hierro. Reduciendo el valor de la intensidad de campo, los imanes moleculares tienden a girar a su posición inicial. Sin embargo, a pesar de quedar anulada la intensidad del campo, los imanes elementales no llegan a alcanzar la posición neutra debido a que lo impide el rozamiento de las moléculas. Este frotamiento origina unas pérdidas de potencia conocida con el nombre de pérdidas por histéresis, que tienen importancia en las máquinas eléctricas ya que influye en el rendimiento, así como en el calentamiento.

Se demuestra matemáticamente, y lo confirma la experiencia, que esta pérdida de potencia es proporcional al área de la curva de histéresis, así pues, cuanto menor es la superficie interior, menores perdidas originará.

2.2. Conceptos básicos de un transformador

El transformador se puede definir como una máquina eléctrica que tiene por objetivo la transmisión, gracias a la creación de un campo electromagnético alterno, de la energía eléctrica de un sistema, con determinada tensión e intensidad, a otro sistema con tensión e intensidad deseada. Podremos hablar entonces de que en el transformador existirán dos arrollamientos claramente diferenciados, un arrollamiento primario que recibe la energía activa y otro arrollamiento secundario que la suministra.

Cuando aludimos a la potencia nominal del transformador, nos estamos refiriendo a la potencia aparente (S) en KVA o MVA, que es el producto de su tensión nominal primaria por la corriente nominal correspondiente. Para este trabajo, la potencia del transformador ensayado es de 5 KVA.

Para la adquisición de la idea de funcionamiento de un transformador estático, se examina la construcción más elemental. Sea un circuito magnético simple, constituido por dos columnas y dos culatas, en el que han sido arrollados dos circuitos eléctricos: uno constituido por una bobina de N1 espiras, es conectado a la fuente de energía eléctrica de corriente alterna (bobinado primario). Un segundo bobinado (bobinado secundario) constituido por N2 espiras, permite conectar a sus dos extremos libres un circuito eléctrico, al que cede la energía eléctrica absorbida por el bobinado primario.

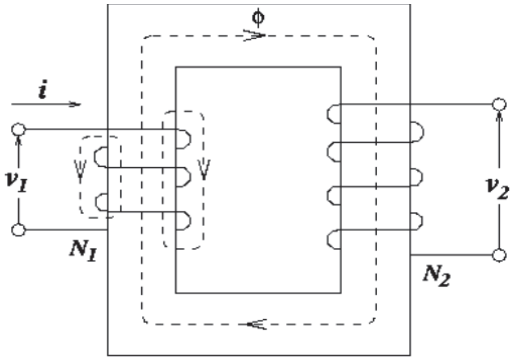


Ilustración 2: Esquema simple de transformador monofásico

Podemos considerar el transformador, desde el punto de vista del bobinado primario, como un receptor de corriente, mientras que desde el lado del bobinado secundario es un verdadero generador eléctrico. El efecto combinado de ambos bobinados recorridos por sus respectivas corrientes, determina una fuerza magnetomotriz que da lugar a que se establezca un flujo de líneas de fuerza alterno sinusoidal en el circuito magnético del transformador.

Este flujo, que es común para los dos bobinados, sirve para transmitir la energía eléctrica de uno a otro. Por otra parte, por ser un flujo variable, hace que en ambos bobinados se genere una fuerza electromotriz inducida, que de acuerdo con la ley de Faraday responderán a las ecuaciones:

$$e1\ (t) = N1 \frac{d\phi}{dt} \quad ; \quad e2\ (t) = N2 \frac{d\phi}{dt}$$

Donde :

e1= fuerza electromotriz primaria instantánea

e2 = fuerza electromotriz secundaria instántanea

N1 = número de vueltas bobinado primario

N2 = número de vueltas bobinado secundario

(Fórmulas 4)

Ahora bien, la f.e.m. generada en el bobinado primario, al igual que en un motor, es una verdadera fuerza contraelectromotriz, mientras que la que se genera en el bobinado secundario es aprovechada en el circuito exterior de utilización.

Un término importante en el estudio de los transformadores de potencia es la llamada relación de transformación, que es el valor del cociente que resulta de dividir los números de espiras del bobinado primario y secundario, por tanto, esta será igual:

$$m = \frac{N1}{N2}$$

Donde:

m = relación de transformación

N1,N2 = número de vueltas bobinado primario y secundario

(Fórmula 5)

En el análisis del transformador real, hay que tener presente dos elementos que nos determinarán las pérdidas en el cobre y las pérdidas en el circuito magnético, estos son la presencia de la resistencia (R) que ofrece cada uno de los bobinados primario y secundario, y la reactancia (X, con igual número de espiras que el bobinado correspondiente) que refleja los flujos de dispersión que recorren los caminos no magnéticos, como son los conductores y el aire que los rodea.

En la ilustración 3 están los elementos presentes en el transformador real.

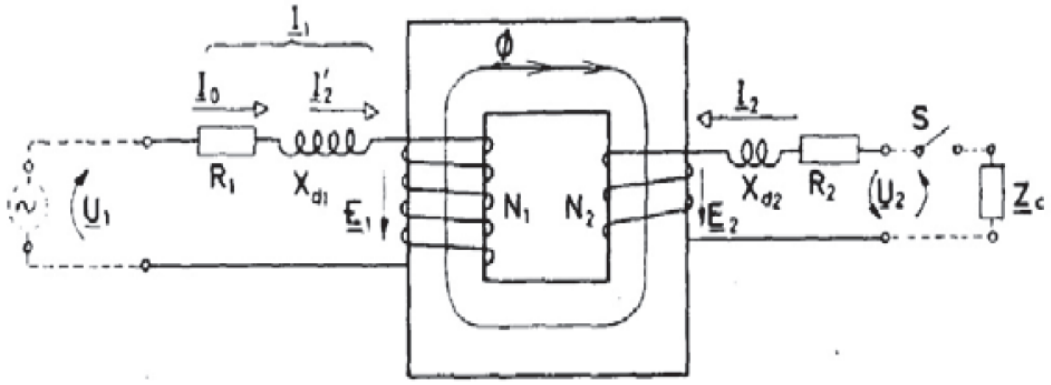


Ilustración 3: esquema con pérdidas de un transformador real

Si aplicamos el segundo lema de kirchhoff a los circuitos primario y secundario de la ilustración 3, tendremos:

$$v1 = e1 + R1*i1 + Ld1 \frac{di1}{dt} \quad ; \quad e2 = v2 + R2*i2 + Ld2 \frac{di2}{dt}$$

Donde:

v1,v2 = tensión primaria entrada y secundaria de salida

e1,e2 = fuerza electromotriz bobinado primario y secundario

R1,R2 = Resistencia primaria y secundaria

L1, L2 = coeficiente de autoindición primario y secundario

(Fórmulas 6)

Donde los valores e1 y e2 vienen expresados por las ecuaciones de las fórmulas 06. Estos valores corresponden a los valores eficaces:

$E1 = 4.44 * f * N1 * \phi m \quad ; \quad E2 = 4.44 * f * N2 * \phi m$

Donde:

E1,E2 = fuerza electromotriz eficaz primaria y secundaria

ϕm = flujo máximo que circula por el circuito magnético

(Fórmulas 7)

Sustituyendo estos valores en la fórmulas 06 y expresándola en forma compleja, resultan las siguientes ecuaciones:

$V1 = E1 + R1*I1 + jX1*I1 \quad ; \quad V2 = E2 – R2*I2 – jX2*I2$

Donde:

X1,X2 = Reactancia primaria y secundaria

(Fórmulas 8)

Si operamos con las ecuaciones de los valores eficaces de las fuerzas electromotrices, obtenemos las siguientes relaciones:

$\frac{E1}{E2} = \frac{N1}{N2} = m$

Donde:

m = relación de transformación

(Fórmula 9)

Ecuación que siempre se cumple, tanto si se habla del transformador ideal así como del transformador real.

2.2.1. Transformador en vacío

Cuando el transformador funciona en vacío, es decir, cuando presenta abierto el circuito secundario de utilización, su intensidad secundaria será nula y el bobinado primario será recorrido por una corriente de pequeña intensidad (I_0) que recibe el nombre de corriente de vacío.

Si por el bobinado secundario no circula corriente de carga, las fórmulas 8, se transforman en las siguientes expresiones:

V1 = E1 + R1*Io +j X1*Io ; V2 = E2

Donde:

Io = intensidad de vacío

(Fórmula 10)

Ya que I_2 es igual a cero. La corriente de vacío que circula por el bobinado primario en la práctica, es de un valor muy pequeño (de 0.6 a 8% de I_1), es por esta razón que las caídas de tensión que se producen en la resistencia y en la reactancia (R_1*I_0 y X_1* I_0) son también muy inferiores a la tensión nominal (0.004 a 0.06 % de V_1), y finalmente podemos concluir que en vacío se pueden considerar bastante exactas las siguientes igualdades:

V1 = E1 ; V2o = E2

Donde:

V2o =Tensión secundaria en vacío

(Fórmula 11)

Teniendo en cuenta lo que se acaba de explicar, podremos escribir:

$$\frac{E1}{E2} = \frac{N1}{N2} = \frac{V1}{V2o} = m$$

(Fórmula 12)

que nos define la relación de transformación como el cociente entre la tensión primaria de alimentación y la tensión secundaria en vacío. Este cociente es el que incluye el fabricante en la placa de características de la máquina.

2.2.2. Transformador en carga

Si conectamos una impedancia (Z) al secundario del transformador, decimos que funciona con carga ya que alimenta a un circuito exterior y por tanto, por dicho bobinado secundario circula una corriente alterna sinusoidal de valor instantáneo I_2 que da lugar a una fuerza magnetomotriz de valor instantáneo fmm = 1.25 * N_2*i_2.

El flujo magnético creado por la fuerza magnetomotriz secundaria tiende a reducir el flujo magnético que existía antes de conectar la carga, es decir, el flujo de magnetización creado por I_0, y con él, los valores de las fuerzas electromotrices primaria y secundaria.

Ahora bien, como es sabido, el flujo magnético permanece casi constante tanto en vacío como en cualquier régimen de carga, es decir, al disminuir el valor de la fuerza magnetomotriz primaria, el bobinado primario deberá absorber una corriente de mayor intensidad que la corriente de vacío para contrarrestar esta disminución que impone la conexión de la carga. Este simple razonamiento permite afirmar que al ser recorrido el bobinado secundario por la corriente de carga debe aumentar simultáneamente el valor de la corriente primaria.

Admitimos que en el primario aparece una corriente suplementaria que llamaremos I'_2 (i'_2), es decir una corriente que se superpone a la I_0 (i_0). Esta corriente aporta una nueva fuerza magnetomotriz N1*I'_2 y para que el flujo no resulte alterado, se verifica:

$$N1 * i'_2 = N2 * i_2 \quad ; \quad i_1 = i_0 + i'_2$$

Donde:

i'_2 = corriente suplementaria primaria

i_1, i_2, i_0 = corriente instantánea primaria, secundaria y de vacío

(Fórmula 13)

Eludiendo el estudio minucioso del transformador, supondremos que tiene pocas pérdidas, y si aplicamos una carga para que circule su intensidad nominal en el secundario del transformador, podremos expresar la siguiente ecuación:

$$V1 * I_1 * \cos\varphi_1 \approx V_2 * I_2 * \cos\varphi_2$$

Donde:

V_1,V_2 = Tensión primaria y secundaria

I_1, I_2 = Intensidad primaria y secundaria

Cos φ = coseno del desfase entre tensión y intensida

(Fórmula 14)

En el caso de transformadores trifásicos a plena carga, se suele cumplir que $\varphi_1 \approx \varphi_2$. Luego:

$$\frac{I1}{I2} \approx \frac{1}{m}$$

Donde:

I1,I2 = intensidad eficaz primaria y secundaria

m = relación de transformación

(Fórmula 15)

La relación de transformación de tensiones va perdiendo rigor a medida que aumentan las cargas. Por el contrario, la relación de transformación de intensidades lo pierde tratándose de cargas pequeñas, llegando a ser inadmisible en regímenes cercanos al de vacío.

En régimen de carga, la corriente I_2 crea el flujo de dispersión del secundario. Por un proceso mental análogo al seguido en el caso del flujo de dispersión primario, el flujo de dispersión secundario se sustituiría por una bobina Xd_2. Lo que se persigue es conseguir lo que ya se logró con el flujo de dispersión primario. Se desea imaginar que el circuito magnético no tiene más que flujo común de primario a secundario.

Las ecuaciones relativas a estas concepciones son:

$V_1 = E_1 + R_1 * I_1 + j\, X_1 * I_1$; $E_2 = I_2 * R_2 + I_2 * j\, X_2 + V_2$

X1,X2 = Reactancia primaria y secundaria

(Fórmula 16)

2.3. Reducciones del circuito equivalente

Para realizar el circuito equivalente de un transformador, es preciso reducir ambos devanados al mismo número de espiras, de tal manera que se conserven las condiciones energéticas de la máquina, es decir, sus potencias activas, reactivas y su distribución entre los elementos del transformador. Se trata de una operación de gran utilidad en el estudio de sistemas eléctricos a base de varias tensiones nominales. Se estudia, por tanto, un sistema ideal trabajando a una sola tensión.

En el caso de reducir el bobinado secundario al primario, se tendrá un mismo primario con N_1 espiras y un nuevo secundario con un número de espiras N'_2 igual a N_1. Todas las magnitudes relativas al devanado nuevo se indican con los nuevos símbolos del transformador pero con la diferencia de tener añadida una tilde.

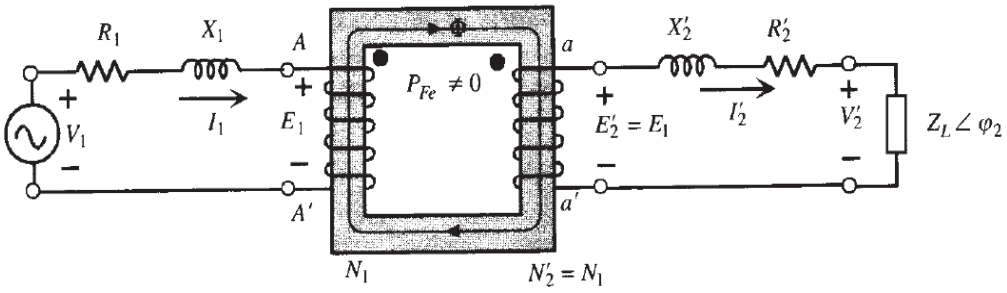


Ilustración 4: esquema equivalente con valores reducidos al primario

Para reducir el secundario al primario, se aplican las siguientes ecuaciones en lo referente a tensiones, intensidades e impedancias.

- Tensiones:

$E'_2 = E_2 * m$

$V'_2 = V_2 * m$

$V'R_2 = ER_2 * m$

$V'X_2 = VX_2 * m$

Donde:

E'_2 = fuerza electromotriz secundaria reducia al primario

V'2 = tensión secundaria reducida al primario

$V'R_2$, $V'X_2$ = caídas de tensión reducidas al primario

(Fórmulas 17)

- Intensidades:

$$I'_2 = I_2 * \frac{1}{m}$$

Donde:

I'_2 = intensidad secundaria reducida al primario

(Fórmula 18)

- Impedancias:

$$Z'_2 = \frac{V'2}{I'2}$$

$R'_2 = R_2 * m^2$

$X'_2 = X_2 * m^2$

Donde:

Z'_2 = impedancia secundaria reducida al primario

R'_2 = resistencia secundaria reducida al primario

X'_2 = reactancia secundaria reducida al primario

(Fórmulas 19)

Una vez reducido el secundario al primario, al existir una igualdad entre las f.e.m.s primaria y secundaria, se podrá sustituir ambos devanados por uno solo.

Anteriormente, los devanados estaban acoplados magnéticamente, en esta nueva figura, los devanados están acoplados eléctricamente.

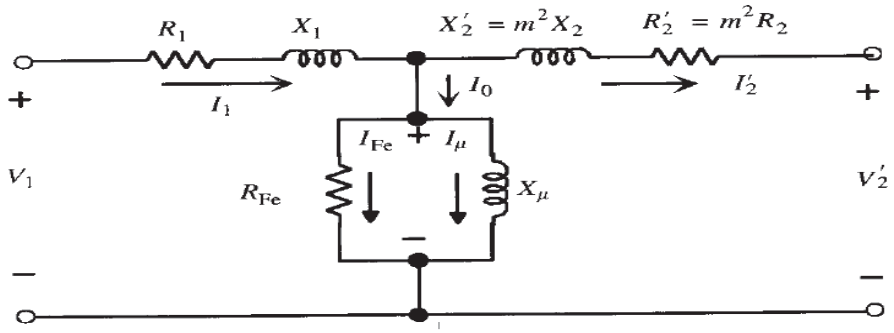


Ilustración 5: esquema equivalente exacto de un transformador real reducido al primario

Por la rama en paralelo circulan las dos componentes en que se divide la Intensidad de vacío, Un activa (I_{fe}) y otra reactiva (I_μ) que representan respectivamente las pérdidas en el hierro del transformador y la corriente de magnetización de la máquina.

En la práctica, debido al reducido valor de I_0 frente a las corrientes I_1 y I_2, se trabaja con un circuito equivalente aproximado donde se desplaza la rama en paralelo a los bornes de entrada del primario. De esta forma, no se introducen errores apreciables de cálculo y se simplifica notablemente el estudio de estas máquinas. Proseguimos de nuevo, observando el esquema resultante, para hacer una nueva simplificación con la conexión en serie de los elementos de la rama primaria y secundaria (reducida al primario), resultando:

$R_{cc} = R_1 + R'_2$

$X_{cc} = X_1 + X'_2$

Donde:

R_{cc} = resistencia de cortocircuito

X_{cc} = reactancia de cortocircuito

(Fórmulas 20)

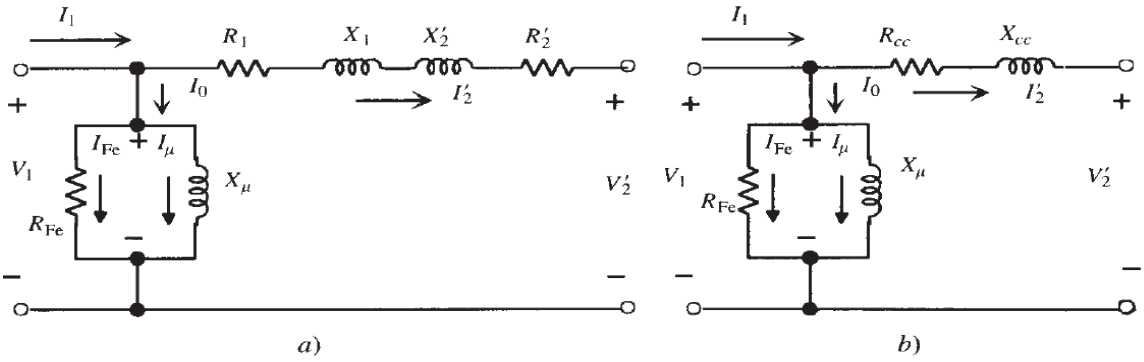


Ilustración 6: Circuito equivalente aproximado reducido al primario

Este es el esquema equivalente simplificado a partir del cual se pueden resolver una serie de problemas prácticos de transformadores. Además, si en un problema real se requiere únicamente la determinación de la caída de tensión del transformador, se puede prescindir de la rama paralelo, ya que no afecta esencialmente al cálculo. De este modo, el circuito resultante será la impedancia serie: $R_{cc} + jX_{cc}$. Finalmente, decir que en grandes transformadores se cumple que X_{cc} es varias veces R_{cc}, pudiéndose utilizar solamente la reactancia serie X_{cc} para representar el circuito equivalente del transformador.

Los valores R_{cc} y X_{cc} los proporciona el ensayo en cortocircuito y los valores de la rama en paralelo los proporciona el ensayo en vacío. Ambos ensayos se verán a continuación.

2.4. Ensayos de vacío y de cortocircuito

2.4.1. Ensayo de vacío

En primer lugar, el interés práctico de realizar el ensayo en vacío será conocer los parámetros de la rama paralela del circuito equivalente así como el valor de las pérdidas en el hierro que se existen en el transformador.

Para tal finalidad, se alimenta el primario con la tensión asignada, estando el secundario en vacío. Al mismo tiempo se mide la potencia absorbida P_0, la corriente de vacío I_0 y la tensión secundaria, de acuerdo con el esquema de conexiones siguiente:

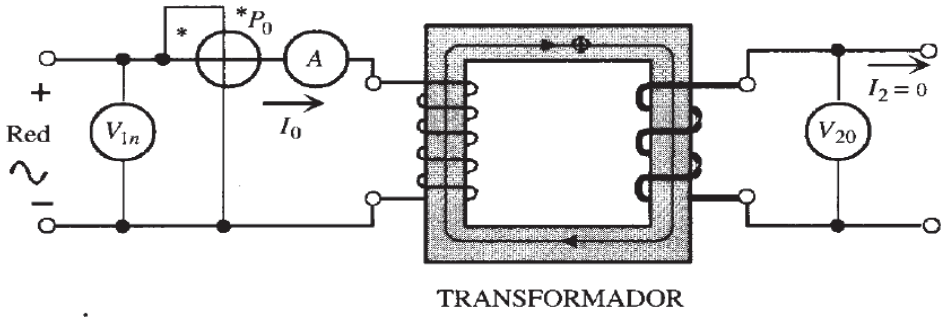


Ilustración 7: Esquema eléctrico del ensayo de vacío

Al ser la corriente de vacío de un valor muy pequeño comparada con la intensidad nominal, las pérdidas $R_1 * I_0^2$ son despreciables, y la potencia absorbida en vacío coincide prácticamente con las pérdidas en el hierro. A partir de los valores obtenidos de las mediciones, podremos calcular en primer lugar, el factor de potencia en vacío despejando de la ecuación:

$$P_o = V_{1n} * I_o * \cos \varphi_o = P_{FE}$$

Donde:

P_o, P_{FE} = pérdidas de vacío que coinciden con pérdidas en el hierro

V_{1n} = Tensión nominal primaria de entrada

(Fórmula 21)

A consecuencia de funcionar el transformador sin carga, V_{1n} coincide prácticamente con E1 y por tanto se puede considerar el diagrama de la ilustración8.

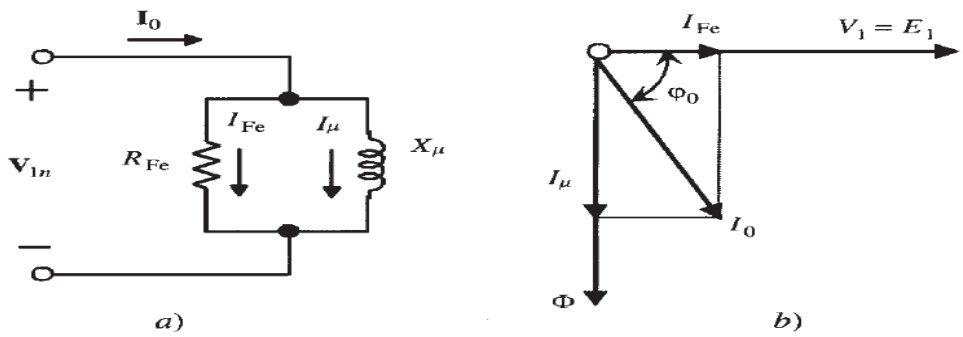


Ilustración 8: Circuito equivalente en vacío y diagrama fasorial correspondiente

Según este diagrama, las ecuaciones resultantes para las dos componentes de I_0 se expresan de la siguiente forma:

$$I_{FE} = I_o * \cos \varphi_o \;\; ; \;\; I\mu = I_o * \operatorname{sen} \varphi_o$$

Donde:

I_{FE} = intensidad de pérdidas en el hierro

$I\mu$ = intensidad de magnetización

(Fórmulas 22)

A partir de aquí, con los datos obtenidos en las mediciones se podrán obtener los valores de R_{fe} y $X\mu$, a partir de las siguientes ecuaciones:

$$R_{FE} = \frac{V1}{IFE} \;\; ; \;\; X\mu = \frac{V1}{I\mu}$$

Donde:

R_{FE} = resistencia de pérdidas en hierro

$X\mu$ = reactancia de magnetización

(Fórmulas 23)

Las pérdidas en el hierro son sensiblemente constantes, cualquiera que sea la carga (vacío, media carga o plena carga). Estas pérdidas son proporcionadas, como se ha visto, a partir del ensayo de vacío.

2.4.2. Ensayo de cortocircuito

Este ensayo tiene como finalidad proporcionar los valores de los elementos de la rama serie del circuito equivalente del transformador. Para lo cual se cortocircuita el devanado secundario y se aplica al primario una tensión progresiva, es decir, se elevará gradualmente desde cero hasta que circule la corriente asignada a plena carga por los dos devanados. Se cortocircuita el devanado de menor tensión con el objetivo de medir una intensidad razonable en el devanado de alta tensión. El

esquema de conexiones con los aparatos que intervienen en este ensayo es el siguiente:

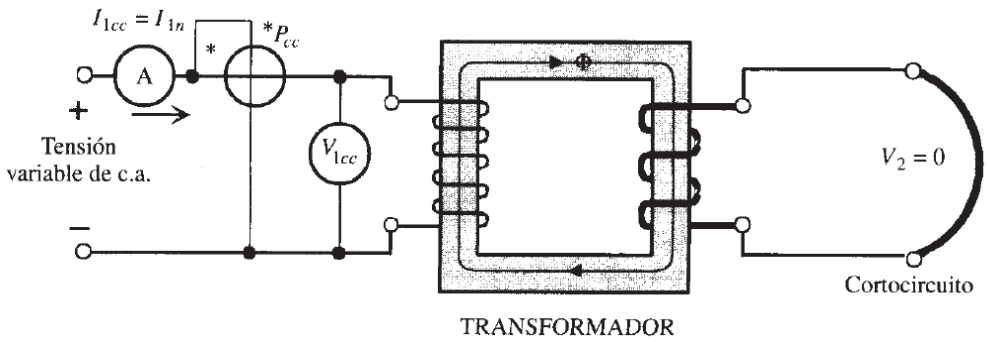


Ilustración 9: Circuito eléctrico del ensayo de cortocircuito

La tensión aplicada en esta prueba representa un pequeño porcentaje respecto a la tensión nominal (3-10 % de V_1n), por lo que el flujo en el núcleo es pequeño, siendo por tanto que las pérdidas que se producen en el núcleo del transformador sean mínimas. Consecuencia directa del reducido valor del flujo es considerar despreciables las pérdidas en el hierro, es decir, no se considera la rama en paralelo del circuito equivalente. La potencia absorbida en el ensayo de cortocircuito coincidirá con las pérdidas en el cobre

El factor de potencia en cortocircuito, como primer paso, se obtiene despejando de la siguiente ecuación:

$$P_{cc} = V_{1cc} * I_{1n} * \cos\varphi_{cc}$$

Donde:

Pcc = potencia de pérdidas en el cobre

V_{1cc} = Tensión de cortocircuito primaria

I_{1n} = Intensidad nominal primaria

$\cos\varphi_{cc}$ = factor de potencia en cortocircuito

(Fórmula 24)

Si tomamos la intensidad de corriente como referencia en un diagrama vectorial, podremos representar el siguiente esquema fasorial de tensiones:

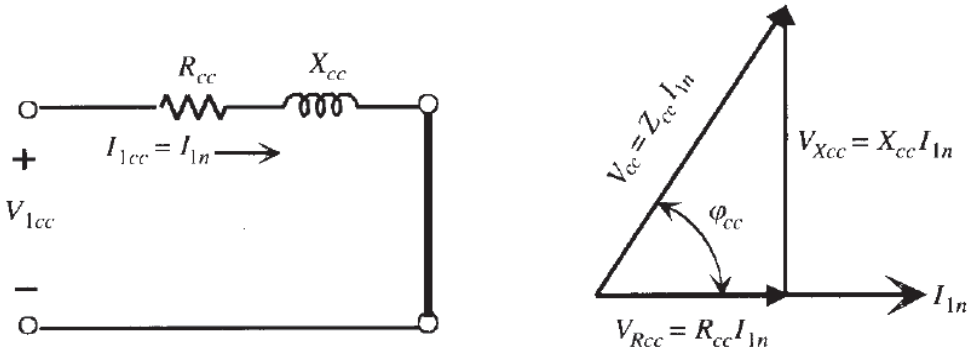


Ilustración 10: Circuito equivalente de cortocircuito y esquema fasorial de tensiones

Las ecuaciones deducidas a partir del diagrama de la ilustración 10 serán:

$V_{RCC} = R_{cc} * I_{1n} = V_{1cc} * \cos\varphi_{cc}$; $V_{XCC} = X_{cc} * I_{1n} * \text{sen}\ \varphi_{cc}$

$R_{cc} = \frac{V1cc}{I1n} * \cos\varphi_{cc}$; $X_{cc} = \frac{V1cc}{I1n} * \text{sen}\varphi_{cc}$

Donde:

V_{RCC} = caida de tensión en resistencia de cortocircuito

V_{XCC} = caida de tensión en reactancia de cortocircuito

(Fórmulas 25)

De esta forma se obtienen los parámetros de la rama serie del circuito equivalente del transformador. Normalmente las caídas de tensión existente en cada elemento del circuito se suelen expresar de una forma relativa en tanto por ciento respecto a la tensión asignada, resultando:

$\varepsilon_{cc} = \frac{V1cc}{V1n} * 100$; $\varepsilon_{Rcc} = \frac{VRcc}{V1n} * 100$; $\varepsilon_{Xcc} = \frac{VXcc}{V1n} * 100$

Donde:

ε_{cc} = caida de tensión porcentual (tensión de cortocircuito)

ε_{Rcc} = caida de tensión porcentual en resistencia de cortocircuito

ε_{Xcc} = caida de tensión porcentual en reactancia de cortocircuito

(Fórmulas 26)

3. EFECTOS TRANSITORIOS: FUNDAMENTACIÓN

3.1. Transitorio de Conexión

La corriente de vacío “Io” que aparece en el transformador cuando está en régimen permanente representa un valor entre el 5 y el 8 por ciento de la corriente nominal asignada “In” del transformador, cuando la inducción máxima se situa en el codo de la curva de imantación del matería magnético. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la aplicación brusca de la tensión nominal asignada “V1n” a un transformador puede dar lugar a un periodo transitorio en el que la corriente (supóngase por sencillez que el transformador está en vacío) puede alcanzar varias veces la asignada y que en ocasiones se ha confundido con la de cortocircuito.

En efecto, en el momento en el que el transformador sin carga es energizado, aparece en el bobinado primario una corriente transitoria conocida como “ corriente inrush” la cual se presenta como picos transitorios y mostrando además las siguientes características:

- Valor de pico inicial elevado (10-20 veces o más del valor de pico de la corriente nominal del transformador).
- Duración de varios ciclos.
- Amplio espectro de componentes armónicas, predominando la segunda armónica.

La corriente Inrush fluye solamente en uno de los bobinados del transformador resultando grandes corrientes diferenciales que pueden ocasionar la operación del relé de protección. Sin embargo, estos casos no son condiciones de falla y los relés de protección deben de discriminar correctamente el fenómeno de energización de un evento de falla.

La siguiente ilustración indica esquemáticamente la relación entre la corriente nominal “In” y la corriente inrush “Ir” durante la energización del mismo.

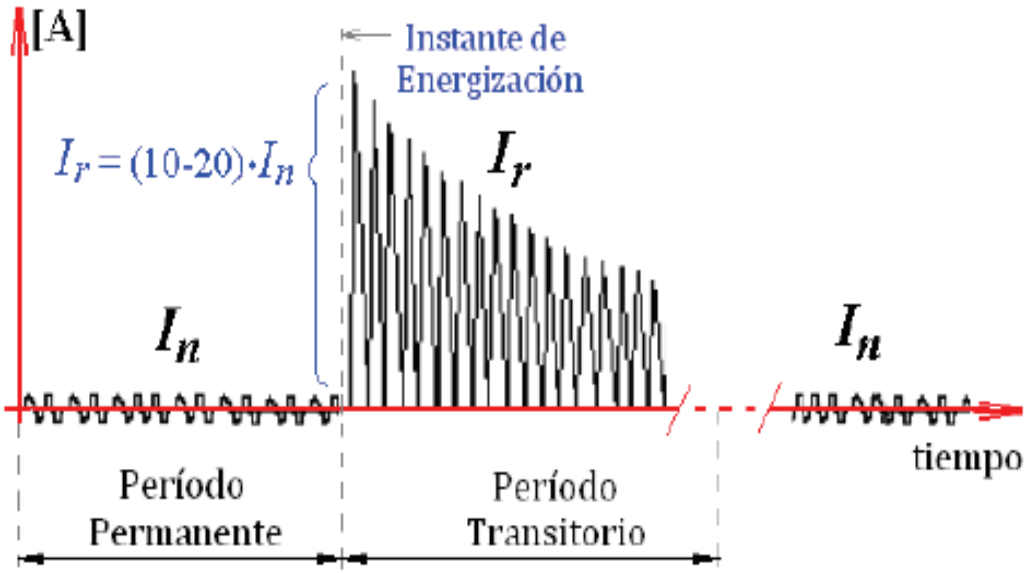


Ilustración 11: Ejemplo de relación entre la intensidad nominal y de energización

La intensidad y la corriente de la duración inrush dependen de los siguientes factores:

- Valor instantáneo de la tensión aplicada al transformador en el instante de energización.
- Magnitud y sentido del flujo residual en el núcleo magnético.
- Resistencia y inductancia del circuito equivalente.
- Características magnéticas y geométricas del núcleo.
- Velocidad de cierre de los contactos del disyuntor.
- Existencia del bobinado terciario conectado en delta, en transformadores trifásicos.

Para comprender esto de una forma más analítica, vamos a suponer que la tensión aplicada al transformador es de la forma:

$$Ub(t) = Um * \text{sen}(\omega t)$$

Donde:

Ub = tensión aplicada a la bobina

Um = tensión máxima

ω = velocidad angular

t = tiempo

(Fórmula 26)

Despreciando el flujo magnético disperso en el aire así como la resistencia de las bobina, vemos que el flujo nominal (ϕn) se relaciona con la tensión en la bobina Ub a través de la ley de inducción electromagnética (Ley de Faraday-Lenz) definida por la siguiente expresión:

$$Ub\ (t) = Nb \frac{d\phi n\ (t)}{dt}$$

Donde:

Nb = número de vueltas de la bobina

(Fórmula 27)

A partir de estas dos expresiones calculamos el flujo magnético del transformador cuando es des-energizado, es decir, el flujo remanente existente en el mismo y el flujo magético en el periodo de energización.

El flujo residual cuando la corriente en el primario es interrumpida en un tiempo to es calculado como:

$$\phi r = \frac{1}{Nb} \int^{to} Ub\ (t)dt = -\ \phi m \cos(\omega t)$$

Donde:

ϕr = flujo residual

Φm = flujo máximo

(Fórmula 28)

El flujo magnético en el periodo de energización puede ser calculado analíticamente a través de la siguiente ecuación:

$$\phi n\ (t) = \frac{1}{Nb} \int_{te}^{t} Ub\ (t)dt + \phi r = \underbrace{-\ \phi m \cos(\omega t)}_{\phi p} + \underbrace{\phi m \cos(\omega te) + \phi r}_{\phi t}$$

Donde:

ϕp = flujo permanente

Φt = flujo transitorio

(Fórmula 29)

Si un transformador es energizado en un tiempo de energización aleatorio (te) puede ocurrir o no que aparezca corriente inrush transitoria. Esto es debido porque la corriente inrush no depende solamente del instante de energización (te), tal y como se indicó anteriormente, sino también del flujo residual ϕr establecido en el instante de des-energización del transformador.

No obstante, a consecuencia de los efectos de amortiguamiento presentes en el transformador, ese flujo decae hasta cero despues de poco tiempo y se establece la corriente de magnetización en estado permanente ϕp comienza a fluir.

3.1.1. Generación de la corriente inrush

Tal y como se ha demostrado anteriormente, el flujo será máximo cuando la integral de la señal de voltaje esté en su valor máximo y mínimo cuando la integral de la señal de voltaje sea mínima. De tal modo y a modo de ejemplo se comprueba según la señal mostrada a continuación, que el flujo máximo se dará cuando la señal de tensión esté en su primer paso por cero, ya que cuando la tensión está en su máximo negativo, el flujo será mínimo. En definitiva, el nivel máximo se dará al paso por cero de la señal de tensión, para una señal de excitación senoidal estará en los múltiplos de pi, mientras que para una señal cosenoidal estará en los múltimplos de pi/2.

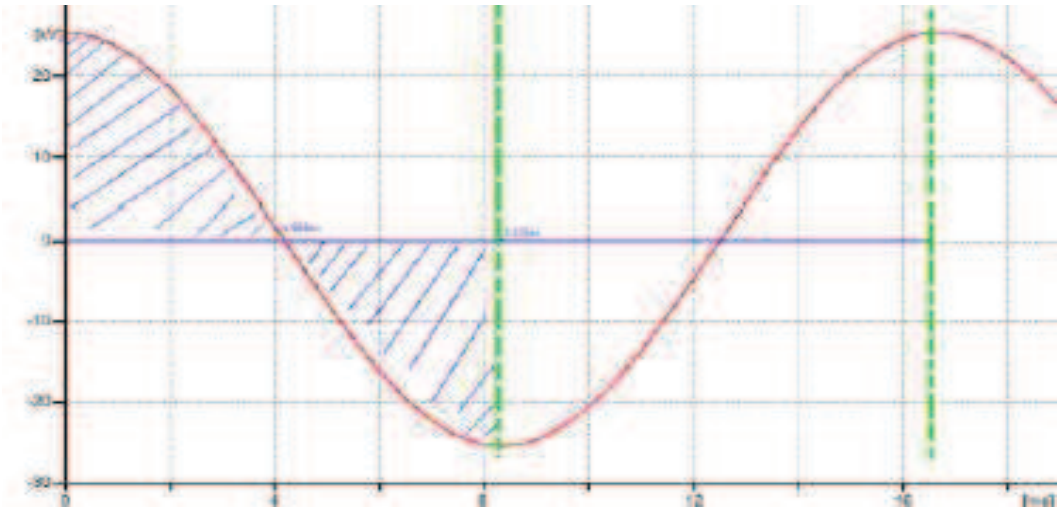


Ilustración 12: diagrama señalizando el área de la señal de tensión

Tal y como indica la fórmula 29 el flujo magnético en el núcleo del transformador (ϕn) en el instante de energización es compuesto por un flujo permanente (ϕp) y por un flujo transitorio (ϕt).

En la gráfica siguiente se muestra el instante a través del cual no aparecerá el transitorio de la corriente inrush. Para ello se muestra el instante de des-energización (t0) y el instante de energización (te) junto con el comportamiento de los flujos dentro del transformador. Se observa que si el transformador fuese energizado en el instante en el cual, el flujo impuesto por la forma de onda tensión corresponde con el flujo residual dentro del núcleo, habría una continuación uniforme de la forma de onda de la corriente de energización Ie.

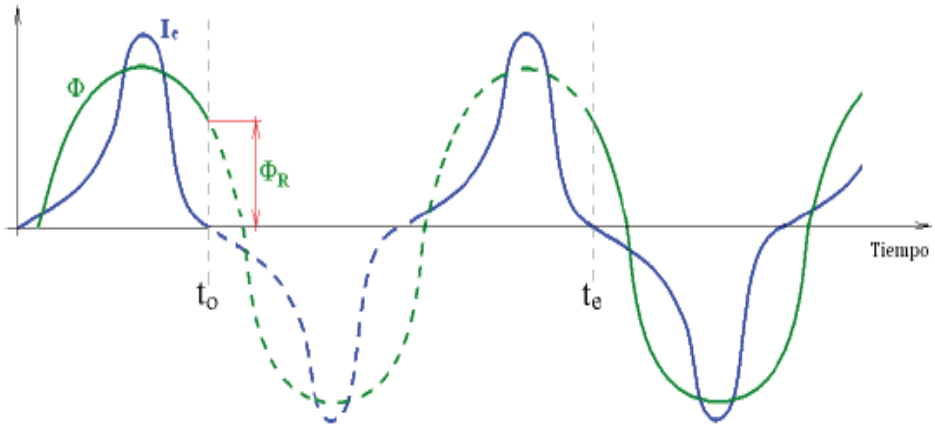


Ilustración 13: instante de energización te para anular el transitorio de conexión

En la práctica, es dificil de controlar el instante de energización, hecho que hace que la ocurrencia de un transitorio electromagnético sea inevitable.

En la figura que se muestra a continuación sería el caso más desfavorable. El transformador es energizado cuando el flujo está en su valor máximo negativo (ϕm) y el flujo residual tiene un valor positivo. En esta situación, el flujo comenzará en el flujo residual, y como este no puede ser creado ni destruido, seguirá la curva ϕt. Puede observase el valor que adquiere la corriente, que en este caso es llamada corriente de saturación Is.

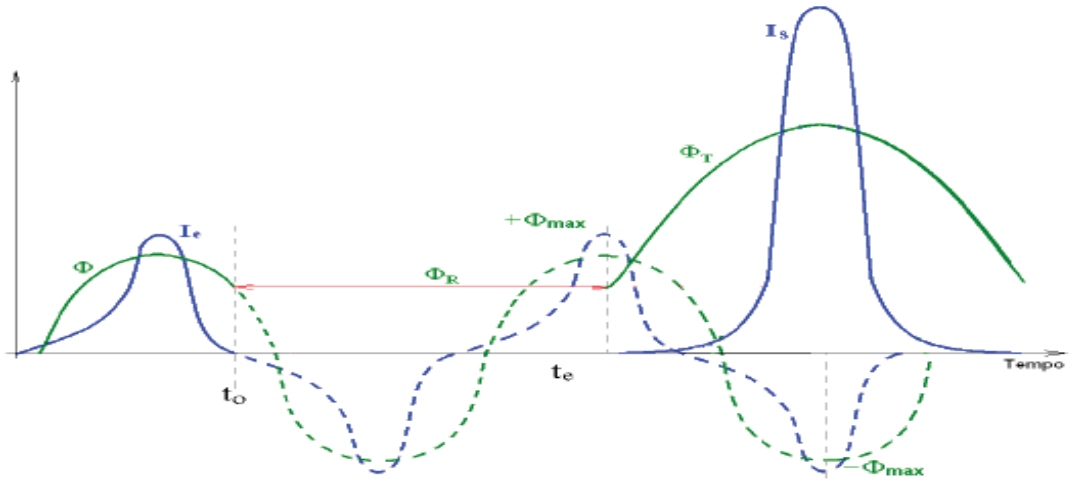


Ilustración 14: instante de energización más desfavorable

Los cierres tripolares no son exastamente realizados al mismo tiempo, existen por tanto desviaciones debidas a estos retrasos. Esto ocasiona peores efectos para la corriente inrush como se muestra a continuación.

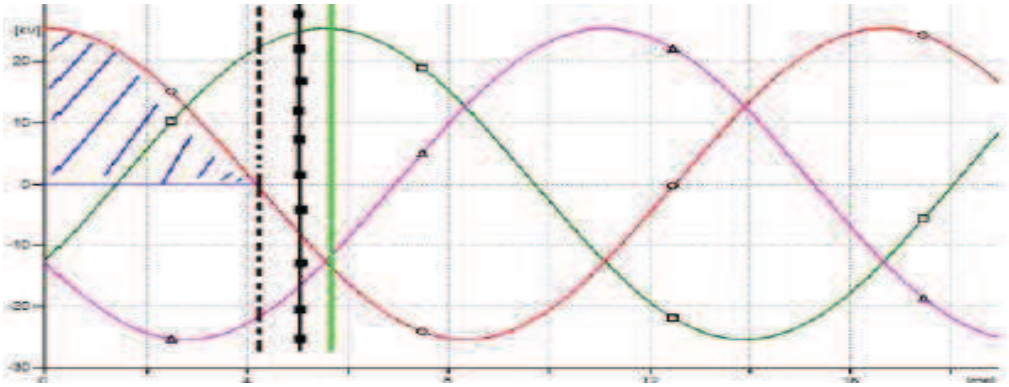


Ilustración 15: Momento de cierre tripolar de la onda de tensión

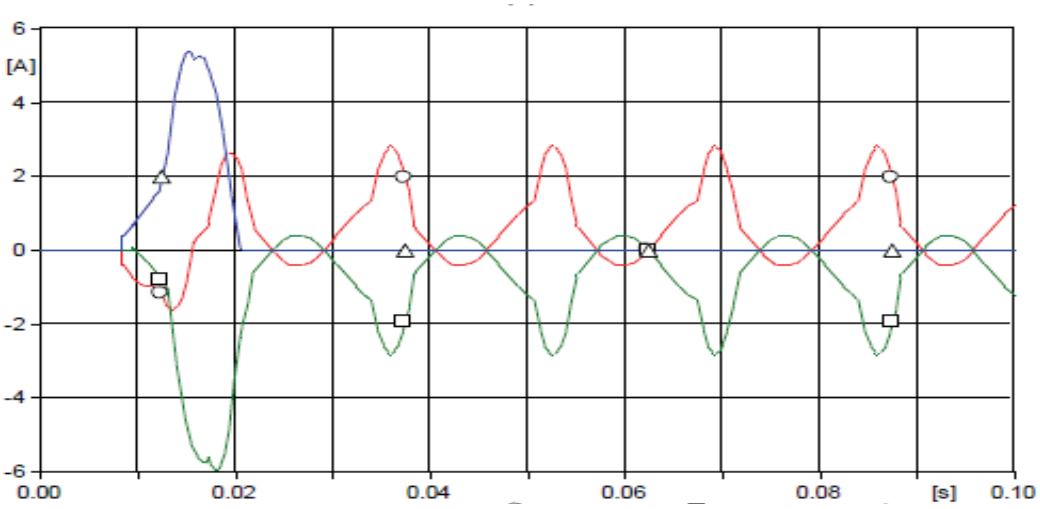


Ilustración 16. Comportamiento de la intensidad de corriente en cierre tripolar

3.1.2. Comportamiento en régimen saturado

El circuito de la ilustración 17 se utiliza para el estudio de corrientes transitorias durante la energización de los transformadores alimentados a través de una fuente de tensión. El inductor no lineal indicado posee características de magnetización i=f(λ) donde λ es el flujo de enlace. Inicialmente son despreciables las pérdidas en el núcleo magnético.

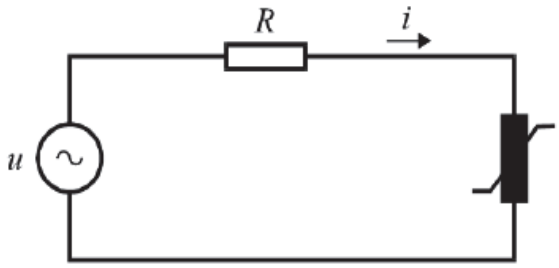


Ilustración 17: Modelo de circuito para el estudio de corrientes de conexión

Durante los primeros instantes de energización de un transformador, los elevados valores del flujo alcanza la región de saturación de la zona de histéresis del núcleo. De esta forma para pequeñas variaciones de λ puede ocurrir variaciones muy elevadas de la corriente.

Como λ está limitado por el nivel de saturación λs, el valor λm no es alcanzado.

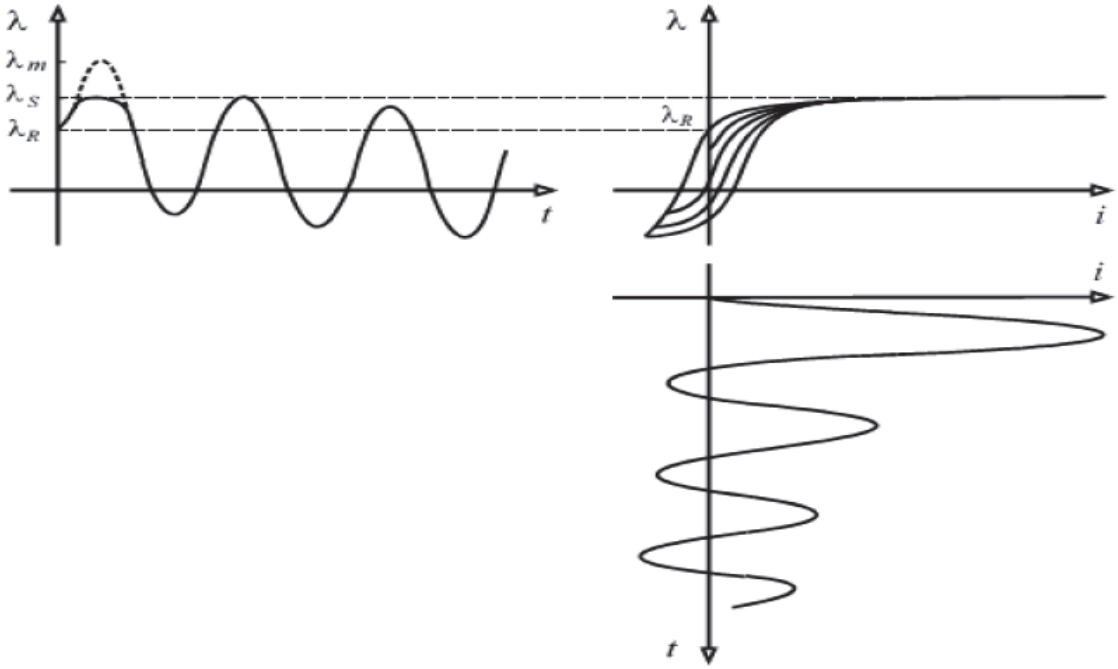


Ilustración 18: Variación de la intensidad de corriente debida a la variación del flujo

3.1.3. Contenido armónico

El contenido espectral armónico de la señal de la corriente en el transitório de conexión se muestra a continuación.

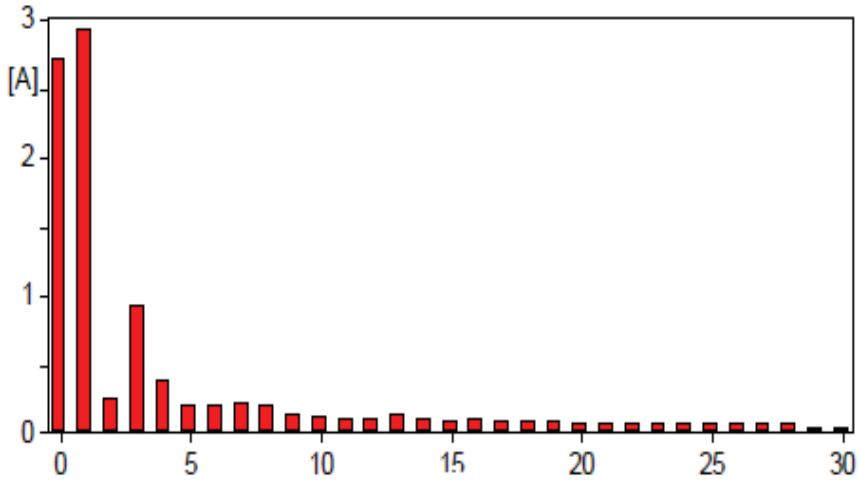


Ilustración 19: armónicos en el intante de energización

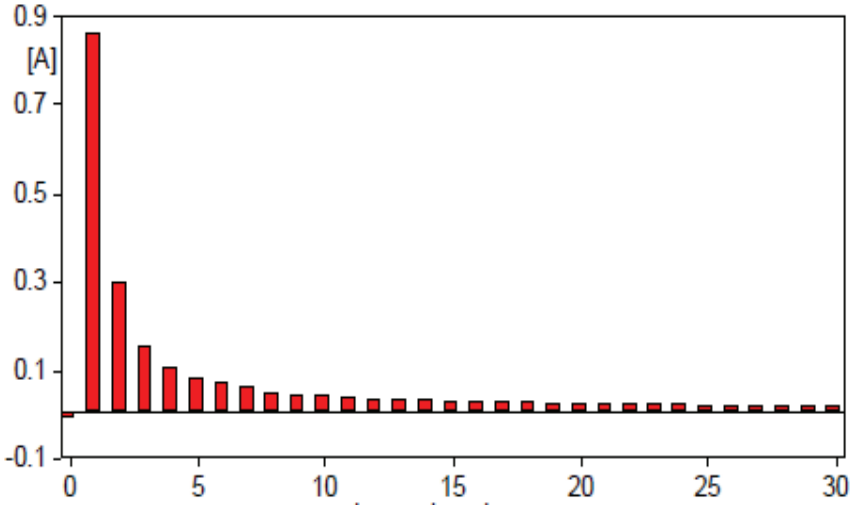


Ilustración 20: armónicos en estado estable

El espectro de frecuencia muestra un contenido armónico DC motivado por la existencia del flujo remanente que tenía el transformador en el momento de la energización. Esta señal desaparecerá en estado estable.

La razón por la que existen tantos armónicos tanto pares como impares es por la falta de simetría de la corriente inrush. Se observa en la ilustración 19 que existe para la corriente de magnetización inrush, un predominio de los armónicos impares contra los armónicos pares, y en concreto la componente de tercer armónico.

En el análisis en el estado estable, aun sigue existiendo los armonicos, pero sin tener una distribución tan marcada de los armónicos impares.

3.1.4. Efectos sobre el transformador

Los transformadores de potencia están construidos de manera que puedan soportar condiciones de falla de valor de 20*In en el tiempo de un segundo. La corriente inrush tiene una duración del orden de milisegundos y es el motivo por el cual el transformador está preparado para soportarla.

Por otro lado, hay que prestar especial atención a la protección del transformador para que pueda discriminar correctamente este tipo de transitorio, para ello existe en la actualidad diferentes metodologías que ofrecen a los relés de protección inmunidad a la corriente inrush, estas metodologías están basadas en el

análisis de las componentes armónicas que se originan en el momento de la conexión.

Desde el punto de vista de calidad de energía, la corriente inrush se puede considerar como una onda distorsionada, resultando por tanto corrientes desequilibradas y armónicos ya mencionados en la misma. Es por esto que se destaca la necesidad de limitar la corriente inrush en transformadores principalmente cuando los mismos se encuentran conectados a barras que contienen generación distribuida, para lo cual también existen diferentes métodos como por ejemplo: el control del instante de conexión, el control por carga capacitiva o el control por circuitos de filtros.

3.2. Transitorio de Cortocircuito

Este fenómeno se produce cuando se cortocircuita el secundario de un transformador estando su primario conectado a la tensión nominal. A diferencia con el ensayo de cortocircuito, donde el transformador es alimentado a una tensión reducida para que las corrientes que circulen por los devanados no sean peligrosas, en el fallo de cortocircuito van a circular corrientes muy altas, varias veces superiores a la intensidad nominal.

La corriente de cortocircuito no aparece de forma instantánea, en un elemento inductivo como es el transformador, las corrientes no pueden variar burscamente. Desde el momento desde que ocurre el cortocircuito y durante su evolución a lo largo del tiempo, se distinguen dos etapas bien diferenciadas. En la primera etapa aparece el estado transitorio de la corriente de cortocircuito, el cual dependerá entre otros factores, del instante en el cual se encuentre la señal de tensión que alimenta al transformador. En el estado transitorio va disminuyendo progresivamente según va disminuyendo la componente continua que tiene asociada hasta alcanzar la segunda etapa de la corriente de cortocircuito definida como estado permanente.

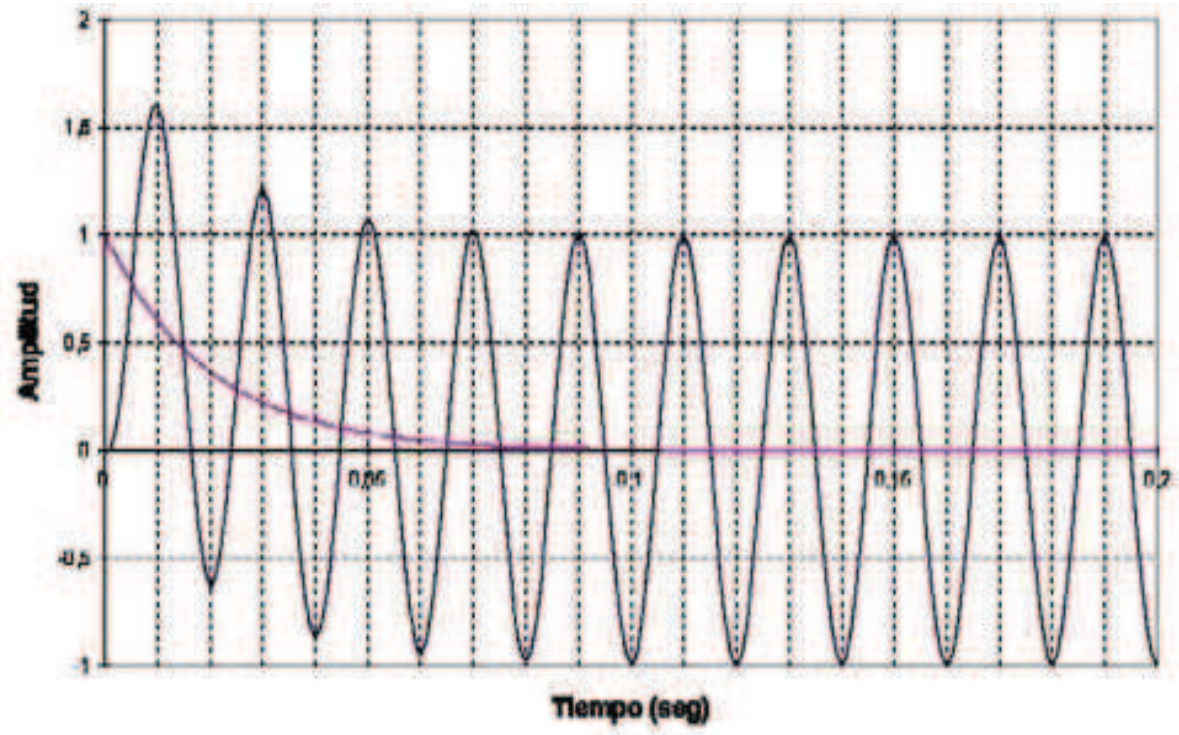


Ilustración 21: Corriente de cortocircuito de un transformador

En la gráfica mostrada se refleja lo expuesto hasta ahora para posteriormente hacer un análisis de la corriente de cortocircuito y de la transitoria.

3.2.1. Corriente permanente de cortocircuito

Para el análisis de la corriente de cortocircuito de un transformador no se tendrá en cuenta la corriente de vacío, ya que su intensidad nominal es despreciable comparada con la magnitud de la corriente de cortocircuito, la cual tiene un valor muy superior a la corriente nominal de la máquina. Por lo tanto, para el estudio de la corriente de cortocircuito se puede prescindir de la rama en paralelo del circuito equivalente y utilizar el de la siguiente figura:

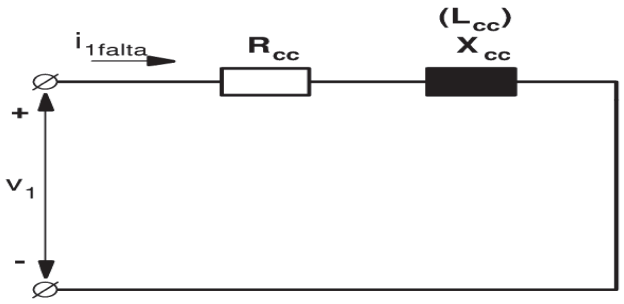


Ilustración 22: modelo de esquema para estudio del cortocircuito

Si la tensión de alimentación es la nominal, cuyo valor eficaz es V1n, la corriente de cortocircuito en régimen permanente tiene un valor eficaz “I1falta” que se puede obtener aplicando la ley de Ohm en la figura anterior:

$$I1falta = \frac{V1n}{\sqrt{Rcc2+Xcc2}} = \frac{V1n}{Zcc}$$

Donde:

Rcc = Resistencia equivalente de cortocircuito

Xcc = Reactancia equivalente de cortocircuito

Zcc = impedancia equivalente de cortocircuito

(Fórmula 30)

Por otra parte, teniendo en cuenta la instensidad nominal obtenida del ensayo de cortocircuito:

$$I1n = \frac{Vcc}{Zcc}$$

Donde:

Vcc = Tensión de cortocircuito

(Fórmula 31)

Operando con las fórmulas 30 y 31 obtendremos el valor de la intensidad de cortocircuito Ifalta:

$$I1falta = In\ \frac{100}{ecc}$$

Donde:

ecc = tensión de cortocircuito

(Fórmula 32)

Al despreciarse la corriente de vacío, se obtiene:

$$I_{1falta} = I'_{2falta} + I_o = I'_{2falta} = \frac{I'2falta}{m}$$

Donde:

m = relación de transformación

I'_{2falta} = Instensidad del secundario referida al primario

(Fórmula 33)

Es decir, ante un cortocircuito se cumple que el cociente entre intensidades del primario y del secundario es igual a la inversa de la relación de transformación. Así pues, la corriente de cortocircuito en el secundario tiene un valor eficaz I2falta que se puede calcular así:

$$I_{2\,falta} = m\, I_{1N} = m\, I_{1N}\, \frac{100}{ecc}$$

(Fórmula 34)

$$I_{2falta} = I_{2N}\, \frac{100}{ecc}$$

(Fórmula 35)

Las expresiones anteriores nos indican que un valor elevado de la tensión de cortocircuito ecc evita que circulen corrientes muy elevadas por los devanados de un transformador. Sin embargo, hay que tener en cuenta, que valores elevados de ecc conducen a altas caídas de tensión en el transformador. Por lo tanto, en el diseño de un transformador tendrá que existir un compromiso entre las corrientes de cortocircuito y la caida de tensión de un transformador. En la práctica, para los transformadores de pequeña potencia, inferior a 1000KVA, se da al coeficiente ecc un valor comprendido entre 1 y 6%, mientras que en los grandes transformadores, de más de 1000KVA, este coeficiente adquiere valores entre 6 y 13%.

3.2.2. Corriente transitoria de cortocircuito

La corriente durante el cortocircuito consta de dos componentes, la primera es una corriente alterna simétrica de frecuencia f = ω/2 ciclos por segundo, la segunda es una corriente continua amortiguada que decae exponencialmente con la constante de tiempo del sistema.

Para analizar la corriente continua se parte de las siguientes consideraciones:

- Se define la tensión e impedancia del sistema como:

  - ✓ V = Vm sen (ωt + θ)
  - ✓ Z = R + j ωL

- La amplitud de la componente continua del sistema cuando se produce el cortocircuito, dependerá del término sen ($\theta - \varphi$), donde φ estará definido por:

  - $\varphi = \text{tag}^{-1} \frac{\omega L}{R}$

- En sistemas de media y alta tensión el valor de la reactancia equivalente es mucho mayor que el de la resistencia, debido a esto se supone que $\varphi = 90^{o}$.
- La componente alterna decae rápidamente en los primeros ciclos y despues lentamente hasta alcanzar el valor de la corriente de cortocircuito permanente.

La componente continua puede ser máxima o cero dependiendo del instante en el que se encuentre la señal de tensión cuando se produce el cortocircuito, a continuación se describe estos dos casos:

(1) Componente corriente continua igual a cero.

Si el cortocircuito se produce en el instante en el que la señal de voltaje se encuentra es su valor máximo (θ = 90º), el término sen ($\theta - \varphi$) es cero y el valor de la componente continua será tambien cero, esto es debido a que cuando el voltaje pasa por su valor máximo, la corriente se inicia con un desfase de 90º con respecto a la tensión y no existirá por tanto componente continua.

(2) Componente corriente continua máxima.

En el caso en que el cortocircuito ocurra cuando la señal de voltaje es cero, (θ = 0º), el término sen ($\theta - \varphi$) da como resultado 1, y la amplitud de la componente continua es máxima.

En el análisis se utiliza el mismo circuito equivalente que se uso para el régimen permanente con algunas diferencias y se realizan algunas suposiciones como que habrá que utilizar la industancia Lcc en lugar de la reactancia Xcc,

Lcc = Xcc/ω, trabajando con los valores instantaneos de la tensión y de la corriente en lugar de los valores eficaces.

Se va a suponer que el cortocircuito se produce en el instante t = 0, que el transformador funcionaba previamente en vacío y que la tensión en el primario es:

$$V = Vm \cos(\omega t + \theta)$$

Donde:

θ = Ángulo de desfase tensión-intensidad

(Fórmula 36)

Dado el pequeño valor de la corriente de vacío comparada con la de cortocircuito, se le va a despreciar y se utilizará la siguiente condición inicial:

$$I1falta\ (t = 0) = 0$$

(Fórmula 37)

La ecuación diferencial que relaciona los valores instantáneos de la tensión y de la corriente es:

$$V1 = Rcc\ I1falta + Lcc\ \frac{dI1falta}{dt}$$

Donde:

Lcc = Inductancia de cortocircuito

(Fórmula 38)

Resolviendo la fórmula 38 se obtendrá que la corriente de cortocircuito es igual a la suma de la corriente en régimen permanente I_{1perm} y de la corriente en régimen transitorio I_{1trans}.

$$I1falta = I1perm + I1tras$$

(Fórmula 39)

El valor eficaz $I_{1\ falta}$ de la corriente en régimen permanente se obtuvo en el apartado anterior, para misma se tiene en cuenta una impedancia de cortocircuito Zcc con su argumento φ_{cc}.

$$Zcc = Rcc + jXcc = Zcc \angle \varphi cc$$

(Fórmula 40)

En consecuencia, teniendo en cuenta la ecuación 36 , la corriente permanente tiene un valor instantáneo I_{1perm} dado por la siguiente relación:

$$I1perm = \sqrt{2}\ I1falta\ Cos\ (\omega t + \theta - \varphi cc\ )$$

(Fórmula 41)

Para obtener I_{1trans} hay que resolver la ecuación homogénea, es decir, la ecuación 38 sin las fuentes (con la tensión V1 = 0).

$$0 = Rcc\ I1trans + Lcc\ \frac{dI1trans}{dt}$$

(Fórmula 42)

Cuya solución es de la forma:

$$I1trans = C\ e^{\frac{-t}{\tau cc}}$$

Donde:

C = constante a deducir posteriormente

τcc = constante de tiempo

(Fórmula 43)

Sustituyendo 43 en 42 se obtine que:

$$0 = Rcc\ C\ e^{\frac{-t}{\tau cc}} + Lcc\ \ C\ e^{\frac{-t}{\tau cc}}\ (-\frac{1}{\tau cc}) \rightarrow \tau cc = \frac{Lcc}{Rcc} = \frac{Xcc}{\omega\ Rcc} = \frac{ecc}{\omega\ ecc}$$

(Fórmula 44)

Imponiendo la condición inicial 37 y teniendo presente las realaciones 39, 41 y 43 se deduce que la constante C vale:

$$0 = I1falta\ (t=0) = \sqrt{2}\ I1falta\ Cos\ (\theta - \varphi cc\ ) + C$$

$$C = -\sqrt{2}\ I_{1falta}\ Cos\ (\theta - \varphi_{cc}\ )$$

(Fórmula 45)

La ecuación final de la corriente de cortocircuito se obtiene combinando las relaciones 39, 41, 43, 44 y 45:

$$I_{1falta} = \sqrt{2}\, I_{1falta} \left[\text{Cos}\,(\omega t + \theta - \varphi_{cc}) - \text{Cos}\,(\theta - \varphi_{cc})\, e^{\frac{-t}{Xcc/wRcc}} \right]$$

(Fórmula 46)

Tal y como se explico anteriormente, podemos observar que la corriente transitoria de cortocircuito es cero cuando la tensión se encuentra en su valor máximo, es decir, en este caso según ecuación 46, la tensión tendrá su máximo valor cuando θ = 0 y por lo tanto (θ - φ_{cc}) = 90º y cos (θ - φ_{cc}) = 0, en este caso la corriente de cortocircuito inicia en régimen permanente.

Por el contrario, la corriente transitoria será máxima cuando la señal de tensión se encuentra en su valor mínimo, otra vez, partiendo de la ecuación 46, obsevamos que la tensión tendrá su valor mínimo cuando θ = 90º y por lo tanto (θ - φ_{cc}) = 0º y cos (θ - φ_{cc}) = 1, la corriente de cortocircuito alcanza su valores más elevados.

A continuación se muestra varias gráficas representando las diferentes situaciones anteriormente expuestas:

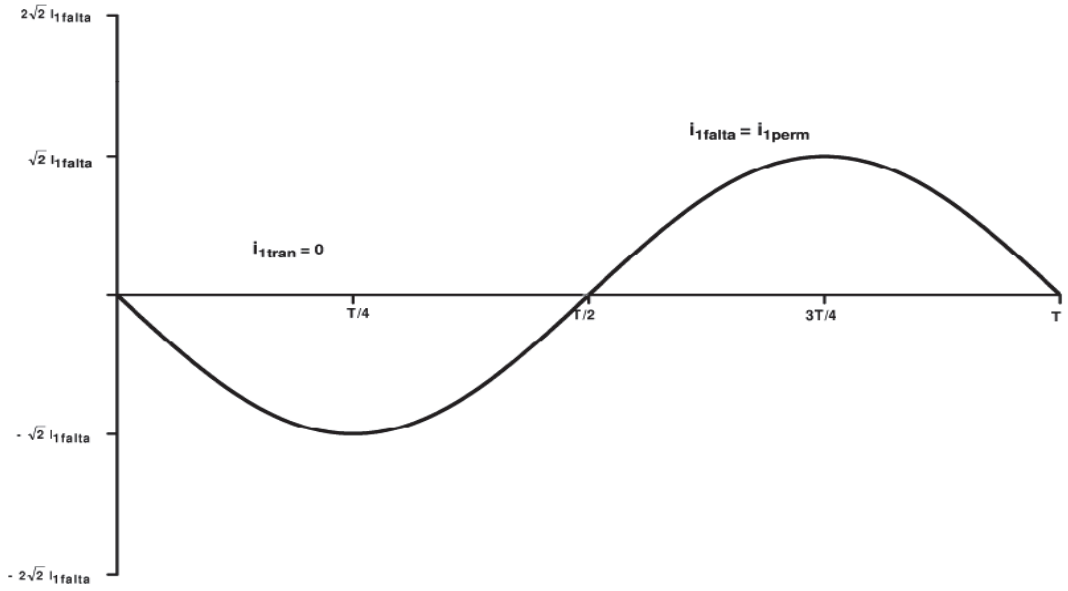


Ilustración 21: corriente de cortocircuito en estado permanente

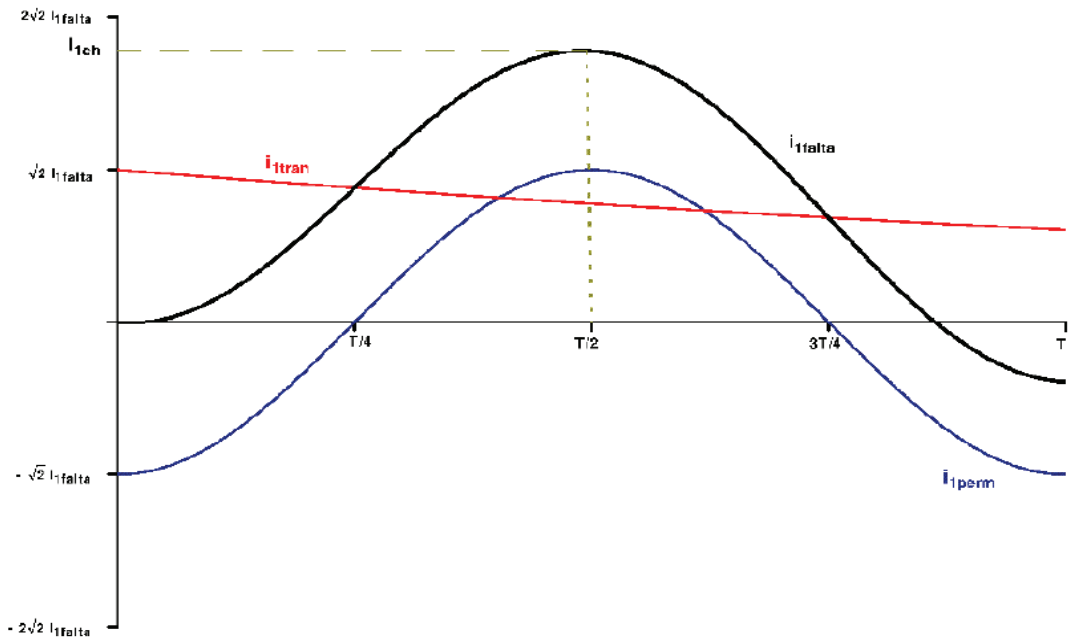


Ilustración 22: corriente de cortocircuito transitoria

3.2.3. Corriente de choque

Las elevadas corrientes que circulan por los devanados del transformador durante un cortocircuito son muy peligrosas,a la hora de proteger el transformador será interesante conocer el máximo valor que estas pueden llegar a alcanzar, nos referimos entonces a la corriente de choque.

La corriente de choque I_{1ch} es el máximo valor instantáneo que puede alcanzar la corriente que circula por el primario del transformador cuando el cortocircuito se produce en las peores condiciones posibles.

Como ya se ha indicado, el cortocircuito se dará en las peores condiciones cuando la señal de la tensión de alimentación esté en su paso por cero, o dicho de otro modo, cuando la intensidad esté en su máximo valor, positivo o negativo, esta condición se da cuando ha transcurrido la mitad del periodo t=T/2, una forma de expresar la corriente de choque viene dada por la siguiente expresión:

$$Ichoque = \sqrt{2} * I1cc * [1 + e^{-\pi \frac{-t}{\tau cc}}]$$

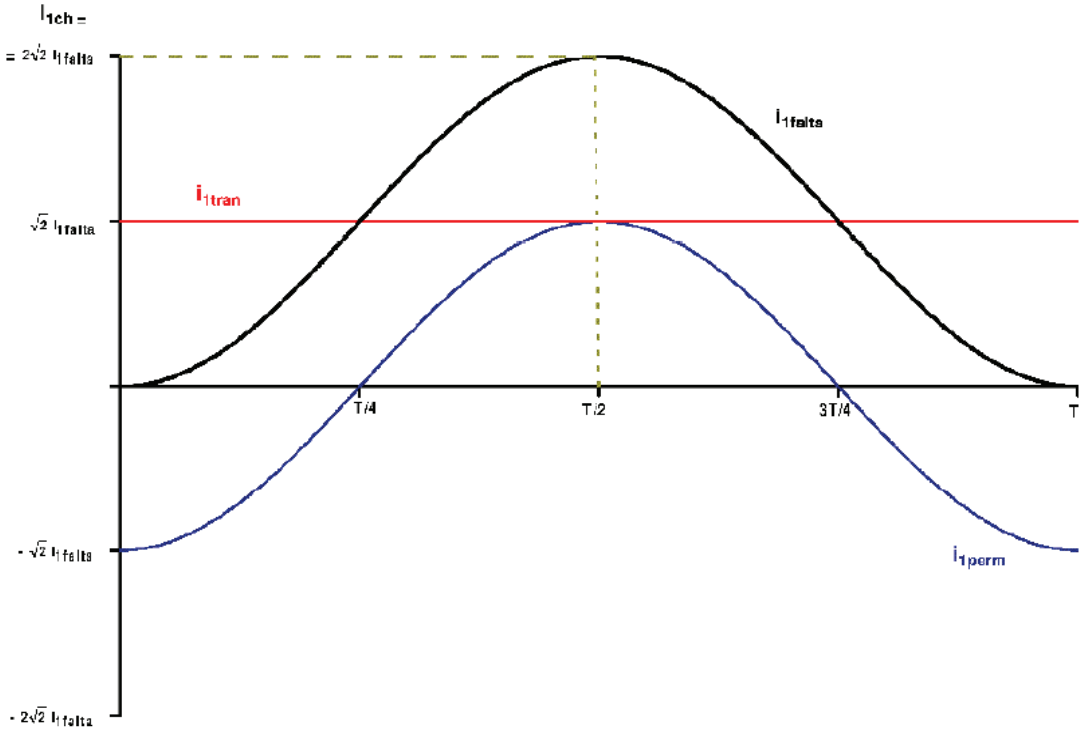
(Fórmula 47)

También es posible calcular la corriente de choque de una manera menos exasta, sin que esto implique una diferencia importante respecto al resultado de la ecuación anterior.

$$Ichoque = \lambda * \sqrt{2} * I1cc$$

Donde λ es un valor que varía entre 1.2 y 1.3 para transformadores pequeños. En el caso de transformadores grandes varía entre 1.7 y 1.85.

(Fórmula 48)



Ilustación 23: Obtención del límite superior de la corriente de choque

3.2.4. Causas y efectos sobre el transformador

Un cortocircuito se produce cuando se conecta dos puntos entre los cuales existe una diferencia de potencial a través de una impedancia de valor muy reducido y cuando, se está operando a la tensión nominal del sistema.

Las causas del cortocircuito pueden ser de origen interno o externo:

- Interno: se trata de un defecto entre conductores de fases diferentes o de un defecto entre espiras de un mismo arrollamiento. El arco de defecto degrada el arrollamiento del transformador y puede conducir a su destrucción.
- Externo: son principalmente originados por fallos de aislamiento de la instalación, fallos de los receptores conectados, avería o conexión incorrecta.

Los elevados niveles a los que llega la corriente en el transformador durante el cortocircuito causan un gran peligro de daño en los devanados y demás componentes del transformador, todo esto provocará esfuerzos electrodinámicos y solicitaciones térmicas susceptibles de afectar a los arrollamientos y de evolucionar después hasta la destrucción del transformador.

- Efectos térmicos: al ser estas corrientes de cortocircuito muy superiores a las nominales, aparecen unas pérdidas por efecto Joule (pérdidas en el cobre) muy superiores a la nominales, lo que origina un aumento peligroso de la temperatura. La masa del transformador impedirá que el aumento de temperatura sea de forma instantánea, es decir, se desprecia la componente transitoria de cortocircuito y solo se tendrá en cuenta para este efecto la componente permanente.
- Efectos electrodinámicos: los bobinados del transformador son una serie de conductores próximos y recorridos por una corriente. Una intensidad elevada originará entre ellos unas fuerzas (fuerzas de Laplace) que tiende a desplazarlos o a deformarlos. La fuerzas que aparecen sobre los devanados tienen dos componentes, radiales, que tienden a

comprimir el devanado interior y a expandir el devanado exterior, y axiales.

La protección del transformador ante cortocircuitos es de extremada importancia por lo que un adecuado diseño de protecciones y su coordinación darán como resultado la reducción de peligrosos defectos, esta tarea se realiza mediante la implementación de tres tipos de protección las cuales se mencionan a continuación:

a. Protección diferencial, es la primera línea de protección del transformador, detectando operaciones anormales en el lado de alta y baja del transformador.
b. Protección contra sobrecarga o sobre-corriente. Este relé se utiliza como una protección de respaldo a la diferencial.
c. Relé Buchholz, que tienen por objetivo, detectar la presencia de gas originado con el incremento de temperatura del transformador.

El uso de las protecciones disminuye en gran medida el tiempo de exposición del transformador a la corriente de falla pero se deben coordinar considerando los periodos de tiempo que el equipo podrá resistir la acción del cortocircuito.

3.3. Transitorio de Sobreexcitación

Se puede entender como sobreexcitación cualquier elevación de la tensión por encima de la tensión máxima de servicio, pero generalmente bajo la denominación de sobretensión se entiende los procesos breves con carácter de cortos impulsos aislados periódicos y aperiódicos.

El flujo magnético que circula por dentro del núcleo del transformador es directamente proporcional a la tensión aplicada y inversamente proporcional a la frecuencia del sistema, tal y como muestra la fórmula deducida matemáticamente a partir de la fuerza electromotriz originada en cada arrollamiento del transformador (Fórmula 49).

Las condiciones de sobretensión pueden producir niveles de flujo magnético que saturan el núcleo del transformador. Pueden existir estas condiciones anormales

en cualquier punto del sistema eléctrico de potencia, por lo que cualquier transformador puede estar expuesto a sobreexcitación.

$$\Phi m = \frac{E1}{4.44 * f * N1}$$

Donde:

E_1 = F.e.m. del bobinado primario

N1 = número vueltas del bobinado primario

Φ_m = flujo máximo

(Fórmula 49)

En la siguiente imagen podemos observar un ejemplo de cómo en este caso la corriente de magnetización (Im) va aumentando progresivamente conforme la sobreexcitación. En el eje de abscisas se representa el porcentaje de la tensión respecto a la tensión nominal y en el eje de ordenadas se encuentra la corriente de magnetización principal (Im) así como la variación que también sufre tres de sus armónicas (I1, I3, I5). Se puede apreciar como el valor de las componentes armónica, en concreto, la tercera y la quinta, va aumentando en primer lugar conforme lo hace la tensión hasta el valor porcentual de 115 para después disminuir aun cuando la tensión sigue aumentando.

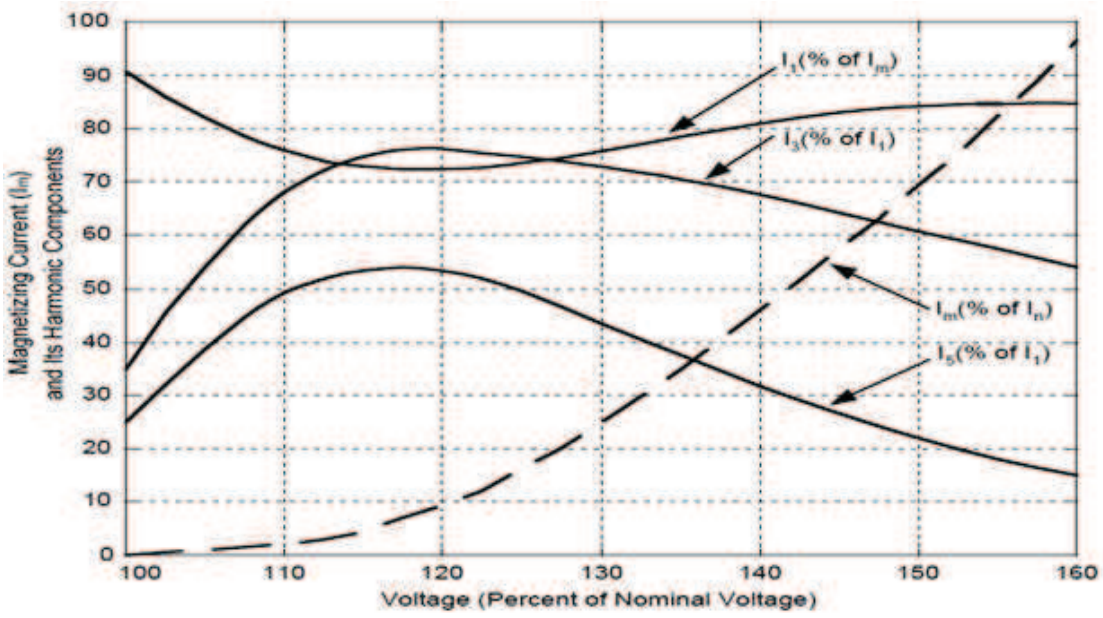


Ilustración 24: Ejemplo de variación de la intensidad de corriente con el voltaje

3.3.1. Causas y efectos de una sobretensión

El carácter de los procesos que ocurren en el transformador en condiciones de sobretensión depende de la forma concreta de onda que existe en el momento concreto de producirse el fenómeno (onda hertziana). Las diferentes causas que conducen a una sobretensión pueden ser:

- Los fenómenos de carácter atmosférico: golpes directos de rayos sobre la línea de transmisión, fenómenos de inducción electromagnética en la línea de transmisión, fenómenos de inducción electromagnética en la línea durante la descarga de las nubes, e inducción electrostática por las nubes cargadas, electrificación de los conductores de la línea por el viento con la participación de pequeñas partículas de polvo, nieve…
- Los procesos de conmutación: conexión, desconexión, cambios rápidos de las cargas, etc. Acompañados de cambios bruscos de la energía electromagnética del sistema.
- Los procesos de carácter de avería, cortocircuitos y desconexiones, arcos repetidos de conexión a tierra, etc.

Tal y como hemos comentado anteriormente, el carácter de la sobretensión dependerá de la forma de onda, es por esto, que se distinguen tres tipos de ondas en función de la causa que lo ha producido. A continuación se puede observar: a) y b) son ondas aperiódicas simples y complejas respectivamente, que se dan en sobretensiones de carácter atmosférico, c) ondas periódicas que se observan durante los procesos de conmutación.

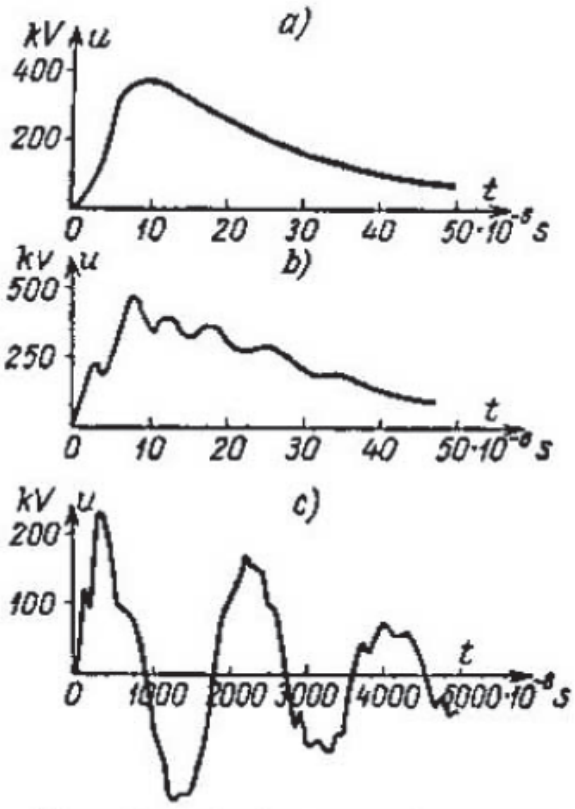


Ilustración 25: Ondas en función del tipo de sobreexcitación (simple, compleja y periódica)

Los resultados de investigaciones demostraron que a) las sobretensiones provocadas por procesos de conexión y desconexión pueden superar la tensión nominal de fase en 2-5 veces; b) las sobretensiones por avería en 7- 8 veces y c) las sobretensiones provocadas por causas atmosféricas en 7- 12 veces la tensión nominal.

Las sobretensiones que se producen dentro del transformador son las más peligrosas, es decir, cuando la onda electromagnética se distribuye a lo largo del devanado y durante las cuales la tensión entre las bobinas o incluso entre las espiras del devanado, pueden superar en muchas veces las tensiones normales entre ellas en el régimen estacionario de trabajo del transformador. Los fenómenos que se producen en un transformador sobreexcitado se muestran con un calentamiento del mismo, el aumento de la corriente, ruidos y vibraciones. La experiencia nos demuestra que las espiras más próximas a los terminales son las que se deterioran pero las sobretensiones y las roturas del aislamiento pueden surgir en cualquier punto del devanado, esto conduce lógicamente a la avería del transformador.

Hay que tener en cuenta que los fenómenos que acompañan a la propagación de la onda de sobretensión en el transformador se distinguen por su complejidad singular y no se someten totalmente al análisis matemático. Para ello, hay que hacer varias suposiciones simplificadoras para poder reducir este fenómeno a una forma relativamente simple y de esta manera comprenderlo de la forma más claramente posible.

3.3.2. Circuito equivalente del transformador en caso de sobretensiones.

Se va a analizar un caso elemental de sobretensiones en un transformador con solo un devanado de alta tensión al que la onda de tensión desde el borne de la línea A, estando el otro borne (el neutro) aislado o puesto a tierra.

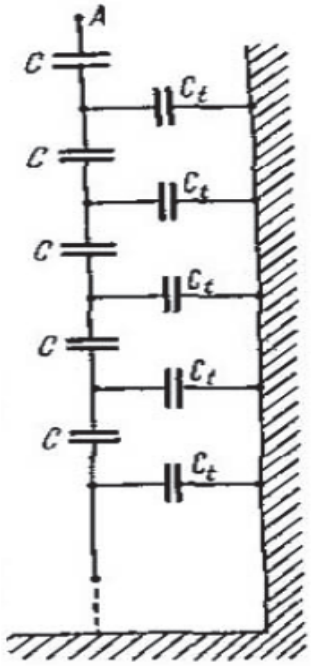


Ilustración 26: esquema equivalente simple de sobretensiones en transformadores

En régimen estable de funcionamiento de un transformador, la corriente circula prácticamente solo por el devanado del transformador, encontrando en su camino las resistencias activas e inductivas. Pero durante las sobretensiones el fenómeno cambia radicalmente. En efecto, los fenómenos ligados a las sobretensiones transcurren a una velocidad extraordinaria y son percibidos por el transformador como fenómenos oscilatorios de muy alta frecuencia. En este caso la resistencia

inductiva del transformador se hace muy grande, mientras que la capacitancia, por el contrario, disminuye. En el límite se puede considerar que durante la sobretensión, la corriente solo fluye por las capacitancias (capacidades C de la parte dada del devanado, por ejemplo la bobina, con respecto a la parte adyacente y la capacitancia de los devanados a tierra Ct). Para simplificar el análisis no se tienen en cuenta las capacidades entre los devanados. De esta forma, el circuito equivalente tiene la forma representada en la ilustración 26.

Durante los análisis de los fenómenos que ocurren en el transformador en caso de sobretensiones, se parte de la suposición de que al transformador llega una forma de onda infinitamente larga y rectangular. Como es sabido, la onda de tensión se propaga a lo largo de la línea a una velocidad:

$$V = \frac{1}{\sqrt{L*C1}}$$

Donde:

L = Inductacia por unidad de longitud de la línea

C1 = Capacitancia por unidad de longitud de la línea

(Fórmula 50)

Para las líneas aéreas esta velocidad se encuentra próxima a la velocidad de la luz. Una de las características principales de la línea es su impedancia de onda (Z):

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C1}}$$

(Fórmula 51)

La impedancia de onda de los transformadores es varias veces mayor que la impedancia de las líneas y varía en función del carácter o de la frecuencia de las vibraciones. Según se sabe, al pasar la onda de tensión por el circuito con menor impedancia de onda (línea) al circuito de mayor impedancia de onda (transformador), la tensión en bornes del transformador aumenta, y en el límite puede duplicarse, según se representa en a) y b).

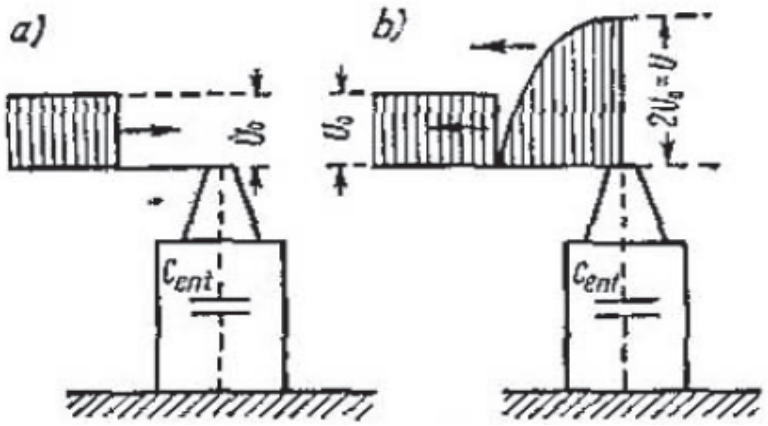


Ilustración 27: paso de la onda de tensión de línea a transformador

El tiempo en el cual transcurre la sobretensión de U_o a $2U_o$ es muy pequeño del orden de 0.1 μ_s. Durante este tiempo casi instantáneo se carga el circuito capacitivo del transformador. Puesto que este proceso supone una combinación compleja de capacidades e inductancias, el paso del estado inicial al de equilibrio tiene lugar por medio del proceso oscilatorio, que decrece gradualmente a causa de la resistencia activa del devanado y la conductancia del aislamiento.

3.4. Transitorio de Sobrefrecuencia/Subfrecuencia

Los transformadores son complejos elementos electromagnéticos, tal y como se ha explicado anteriormente y su respuesta, en algunos casos, ante pequeñas variaciones de sus características nominales pueden causar efectos muy perjudiciales para el sistema. La respuesta ante la fluctuación de frecuencia se muestra de manera diferente a como lo hacía con la variación de tensión, es decir, cuando aumentaba la tensión, aumentaba el flujo magnético y con él la intensidad de corriente pero en esta ocasión, es al disminuir la frecuencia cuando aumenta el flujo magnético y la intensidad de corriente que fluye por los devanados.

De acuerdo con la fórmula 52 el flujo variará en proporción inversa a la frecuencia.

$$\Phi m = \frac{E1}{4.44 * f * N1}$$

(Fórmula 52)

Al contrario de la respuesta del transformador ante una variación de la tensión, en este caso, una disminución de la frecuencia sería casi inadmisible. Basta considerar que en el gráfico B-H existe una proporcionalidad entre H e I, y notar que cuando aumenta la inducción, aumenta también la intensidad de corriente y viceversa.

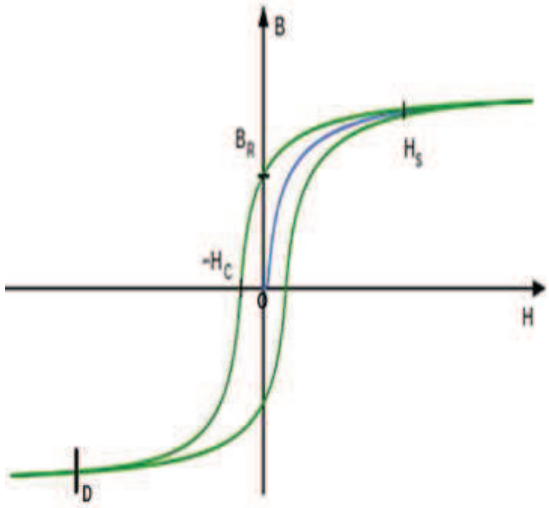


Ilustración 27: ciclo de histéresis

El funcionamiento normal del transformador se mueve dentro de la curva de saturación, es por esto que según se extrae de la gráfica, una pequeña disminución en la frecuencia conlleva un aumento del flujo magnético, esto originaría por tanto un aumento brusco de la intensidad de corriente.

3.4.1. Causas y efectos de la variación de frecuencia

El estudio del transitorio de frecuencia en transformadores de potencia también es de elevada importancia, pero este análisis está orientado a la respuesta de la propia máquina ante ondas de frecuencia elevadas cuyas causa principal es origen atmosférico. En este estado hay que tener presentes características adicionales del

transformador como son las capacidades internas, tal y como se ha visto en el apartado de sobretensiones.

La variación de frecuencias a nivel de pequeñas escalas, es decir, pequeñas variaciones de frecuencias, son menos problemáticas partiendo del hecho práctico de ser menos usuales. Es este tipo de variación de frecuencia objeto de este trabajo y su respuesta viene fundamentada por la proporcionalidad existente entre H e I, según se refleja de la curva de histéresis del transformador y que se ha visto en el apartado anterior.

4. ELEMENTOS PARA LA REALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS

Para la realización de los ensayos tanto teórico como real del transformador trifásico de potencia, ha sido necesario disponer de una serie de elementos tales como materiales, herramientas, aplicaciones informáticas, etc, que conducirán a poder cumplir los objetivos marcados en este trabajo fin de grado.

Como elemento principal, partimos de un transformador de potencia de 5KVA existente en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Universidad de Jaén. El segundo elemento principal es el programa informático que nos ayudará a comparar los resultados obtenidos de los ensayos del transformador real. El programa informático en cuestión es Matlab, y dentro de este entorno de programación, se utilizará la herramienta de simulación llamada Simulink, basado en la construcción de diagramas de bloques.

Cada uno de estos elementos principales, demandará la utilización de otra serie de elementos auxiliares, necesarios para la realización de los ensayos. Se ha tenido que estudiar, por lo tanto, los requisitos de cada uno, para, elaborar los esquemas de instalación e introducir los valores correctos de las simulaciones.

Se muestra a continuación los materiales y herramientas que se han dispuesto para la realización de este trabajo:

- Transformador trifásico de potencia.

Transformador trifásico de potencia: 5KVA

Ilustración 28: transformador trifásico para ensayos disponible en laboratorio

Las características principales del transformador son las siguientes, al ser un transformador para educación, ofrece la posibilidad de obtener diferentes tipos de conexión, se incluye además los datos que corresponden a las intensidades nominales de cada devanado, su impedancia base y la relación de transformación.

Denominación	Valor
Potencia (S)	5 KVA
Frecuencia (f)	50 Hz
Tensión primaria (V_{1n})	380 V
Tensión secundaria (V_{2n})	220 V
Conexión	YY-0
Intensidad nominal primaria (I_{1n})	7.59 A
Intensidad nominal secundaria (I_{2n})	13.12 A

Impedancia base del primario	28.88 Ω
Impedancia base del secundario	9.68 Ω
Relación de transformación	1.72

Tabla 1: Características del transformador a ensayar

Las fases de cada uno de los arrollamientos primario y secundario están divididas en dos bobinas, las del arrollamiento primario, estarán formadas por dos bobinas que soportan cada una la tensión de 110 V y las del arrollamiento secundario tienen asignadas cada una la tensión de 63.5 V. Las bobinas de cada fase se conectarán en serie para poder posteriormente elegir la conexión más favorable según el tipo de ensayo a realizar. En cada tipo de ensayo, se mostrará la conexión a realizar, partiendo del croquis del transformador que se indica seguidamente:

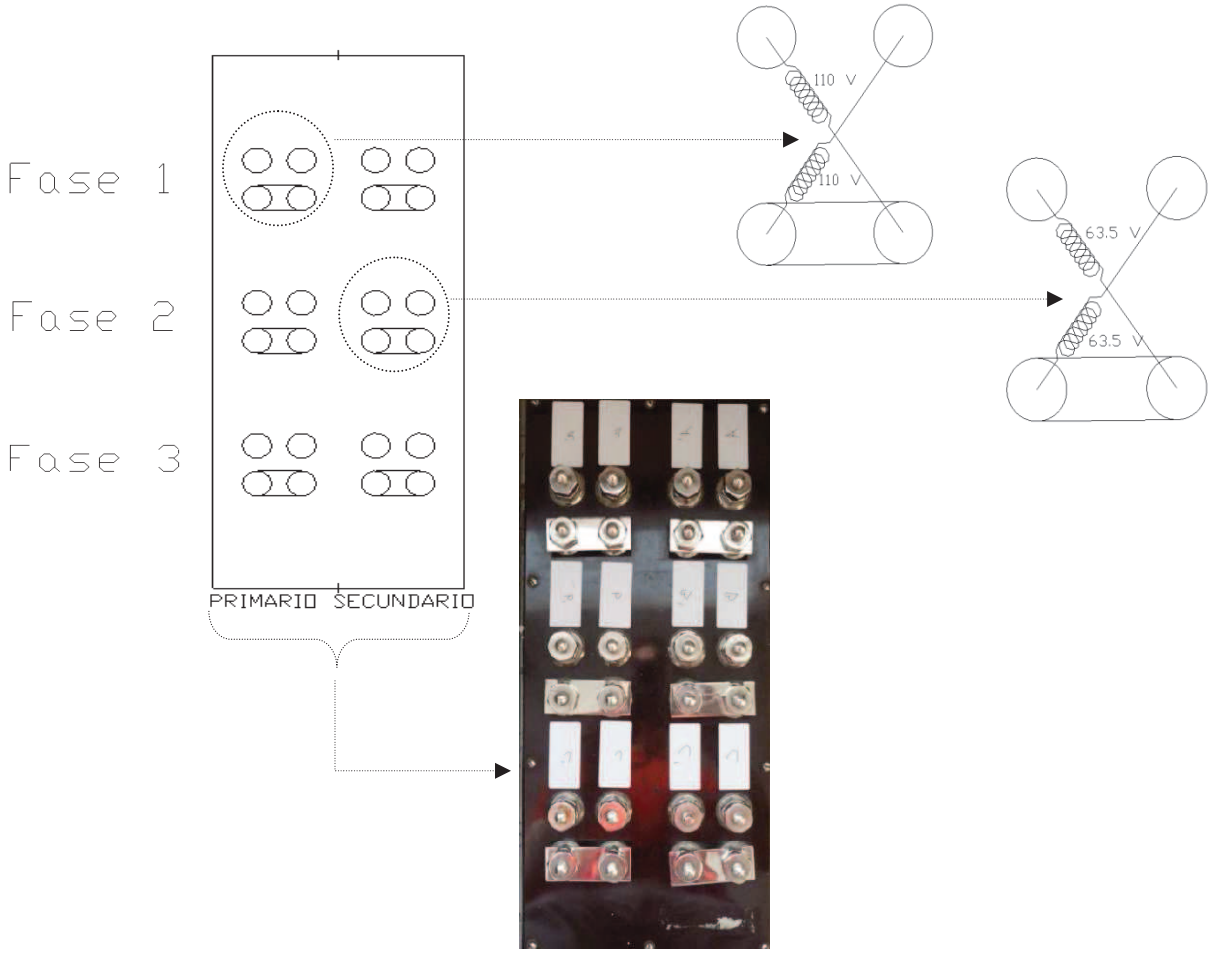


Ilustración 29: bornes de conexión del transformador trifásico para ensayos

- Aplicación informática.

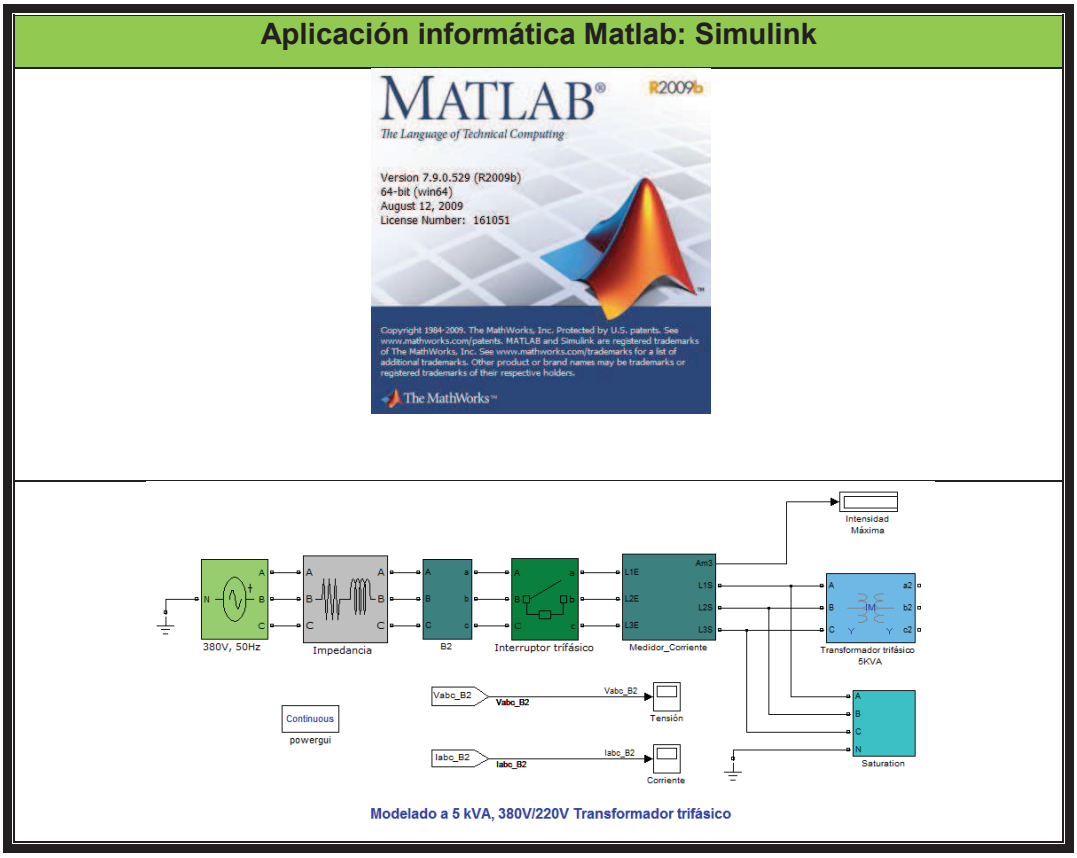


Ilustración 30: Software para la realización de ensayos

La herramienta de simulación Simulink de Matlab incluye un gran número de bloques para poder realizar cualquier tipo de simulación. En nuestro caso, entre los distintos bloques necesarios para realiza la simulaciones está el del transformador que se puede ver a continuación. Se deberá configurar para que responda de la misma forma que el transformador real.

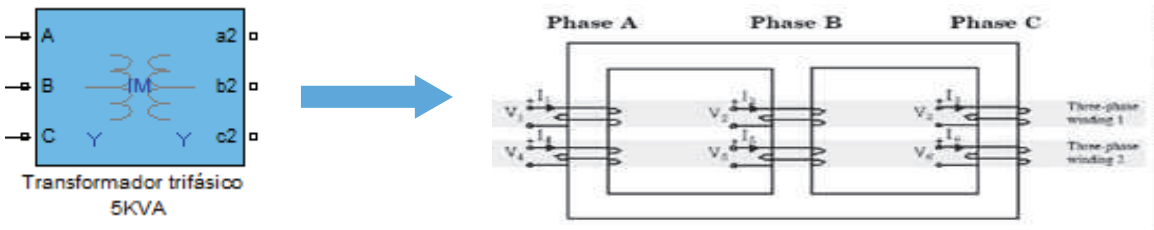
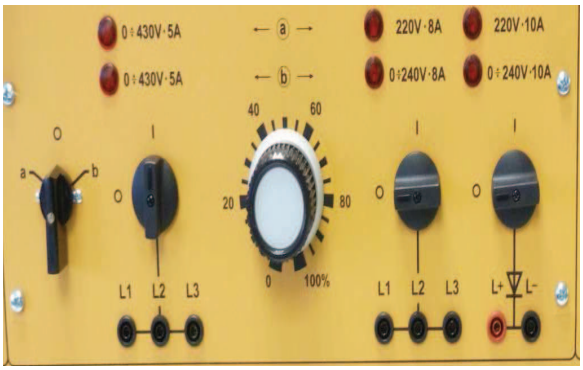


Ilustración 31: Modelo de transformador trifásico en programa informático

- Panel de control.

Paneles de control utilizados para los ensayos



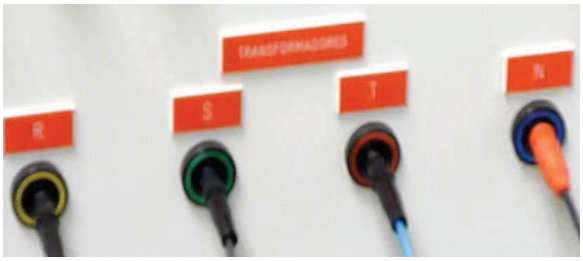


Ilustración 32: Paneles de control en laboratorios

El control de las características de los valores de tensión suministrados al transformador se ha realizado a través de los dos paneles de control de las fotografías. Para los ensayos de conexión y sobreexcitación se ha utilizado el que se muestra en la parte superior y para la realización del ensayo de cortocircuito el de la parte inferior, debido a que este cuadro de control, puede soportar la circulación de intensidades más elevadas durante cortos periodos de tiempo.

- Analizador de redes.

Analizador de redes

Ilustración 33: Analizador de redes para recogidas de datos en ensayos

Es un elemento esencial para la realización de los ensayos. Gracias a él se ha podido obtener las gráficas y valores de corriente que se producen en el corto periodo de tiempo que dura un transitorio. El modelo es el Fluke 434.

- Interruptor automático de caja moldeada.

Interruptor de caja moldeada

Ilustración 34: Interruptor para realización del ensayo de cortocircuito

Interruptor magneto-térmico de caja moldeada para la realización del ensayo de cortocircuito.

- Polímetro.

Polímetro

Ilustración 35: Polímetro para recogida de valores eléctricos

Aparato utilizado para la medición de los valores en los ensayos previos realizados al transformador.

- Cableado y herramientas auxiliares.

Cableado y herramientas auxiliares

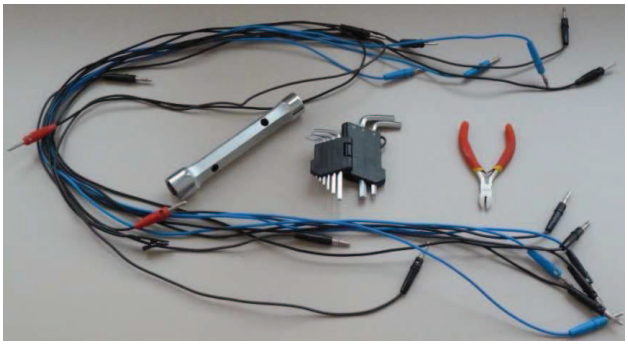


Ilustración 36: medios auxiliares empleados en la realización de ensayos

- Generador de corriente eléctrica alterna.

Generador de corriente eléctrica

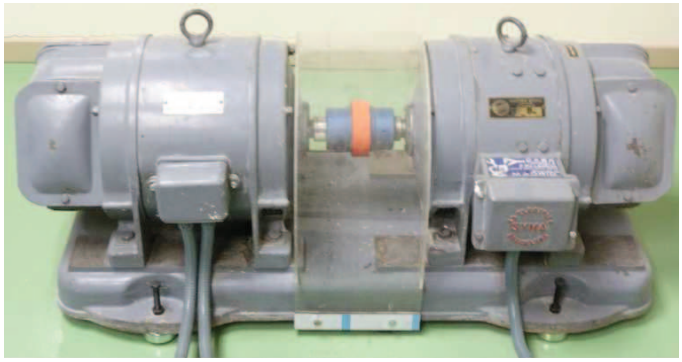


Ilustración 37: Generador para transitorio de sobre/sub-frecuencia

El generador de corriente eléctrica se encuentra en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Universidad de Jaén. Es la máquina indicada para realizar el ensayo de sobre-frecuencia y sub-frecuencia. Debido a problemas internos del elemento, es decir, a defectos de funcionamiento de la máquina, no se ha podido realizar este tipo de ensayo al transformador real.

5. ENSAYOS Y MEDICIONES PREVIAS

La realización de los ensayos previos al transformador trifásico de potencia han sido necesarios para la obtención de los datos a introducir en el programa de simulación.

Determinados valores se han obtenido de las características propias del transformador, como son sus valores nominales, potencia, frecuencia, tensiones primaria y secundaria, etc. Otros valores demandados por el programa de simulación y en concreto, del bloque correspondiente al transformador, y del bloque de saturación, hacen necesario la realización de determinados ensayos y mediciones a la máquina real, con el fin de poder representar y simular correctamente los fenómenos representados por el programa de simulación y que estos sean similares a los que se producen en la máquina real. El bloque del transformador representa

como su propio nombre indica al transformador real y, el bloque de saturación es necesario para simular correctamente la variación del flujo con respecto a la intensidad de corriente que se produce en el circuito magnético de la máquina.

Los ensayos y mediciones previas realizados al transformador son:

- Ensayo de vacío en secuencia directa.
- Ensayo de cortocircuito en secuencia directa
- Ensayo de vacío en secuencia cero.
- Ensayo de cortocircuito de secuencia cero.
- Medición de la resistencia de los devanados.

En los apartados que proceden se indica el esquema utilizado y los valores obtenidos de cada uno de los ensayos.

5.1. Ensayo de vacío en secuencia directa

Para el ensayo de vacio en secuencia directa se ha alimentado el devanado secundario a la tensión correspondiente estando el primario en circuito abierto. Tanto el devanado primario como el secundario se ha conectado en estrella, es decir que el primario soporta una tensión de 380 V y el secundario de 220V entre fases.

El esquema de conexión realizado al transformador del laboratorio es el siguiente:

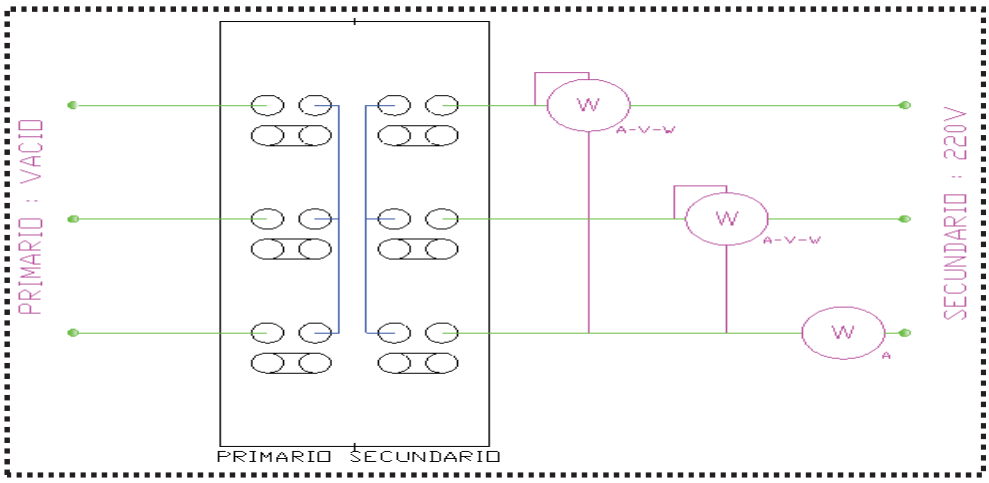


Ilustración 38: esquema de conexión en ensayo de vacio

La finalidad de la realización de este ensayo será obtener la siguiente relación de valores, a introducir posteriormente en el programa de simulación:

- Potencia de vacío (P_o) que representa las pérdidas en el hierro del transformador.
- Intensidad de vacio (I_o).
- Resistencia (R_{fe}) de la rama en paralelo del circuito equivalente del transformador.

Como las pérdidas ($R1*I_o$) son despreciables (por ser el valor de I_o muy pequeño), la potencia absorbida en vacío coincide con las pérdidas en el hierro. De los datos obtenidos en mediciones se puede obtener el factor de potencia en vacío (Cos φ_o), según la ecuación (deducida en el primer capítulo).

$$\text{Cos } \varphi_o = \frac{Po}{\sqrt{3} * V2n * Io}$$

Donde:

V_{2n} = Tensión nominal secundaria.

(Fórmula 53)

Por otro lado, al ser la intensidad de vacío de valor reducido, la caída de tensión, en este caso del secundario, es también de un valor muy pequeño y se considera que V_{2n} coincide con la E_2, gracias a esta consideración, podremos obtener el parámetro (R_{fe}) de la rama en paralelo del circuito equivalente aplicando las siguientes fórmulas:

$$I_{fe} = I_o * \cos \varphi_o$$

$$R_{fe} = \frac{V2n}{\text{Ife}}$$

Donde:

I_{fe} = Intensidad de la rama de la resistencia.

(Fórmula 54)

Las mediciones realizadas a partir de este ensayo son:

- P_o = W1 + W2 = 117.9 + (-68.1) = 49.8 W
- I_1 = 1.078 A
- I_2 = 0.710 A
- I_3 = 0.988 A
- $I_o = (I_1+I_2+I_3)/3$ = 0.925 A

Aplicando las fórmulas indicadas anteriormente, nos da:

$$\text{Cos } \varphi_o = \frac{Po}{\sqrt{3}*V2n*Io} = \frac{49.8}{\sqrt{3}*220*0.925} = 0.1413$$

$$I_{fe} = I_o * \cos \varphi_o = 0.925 * 0.2447 = 0.131 \text{ A}$$

$$R_{fe} = \frac{V2n}{\text{Ife}} = \frac{220}{0.131} = 1679.39\ \Omega$$

El dato pedido en el caso de la intensidad de vacío es en tanto por ciento, que corresponde al valor de 7.05 %.

5.2. Ensayo de cortocircuito en secuencia directa

Para el ensayo de cortocircuito de secuencia directa se ha alimentado el primario a la tensión nominal estando el secundario cortocircuitado. Las conexiones realizadas son similares al ensayo en vacío, es decir, la conexión estrella en el primario y en el secundario. La alimentación del primario será por tanto de 380V. El procedimiento seguido para la obtención de las mediciones ha consistido en ir aumentando la tensión del primario gradualmente desde cero hasta que circule la corriente nominal por el devanado primario.

El esquema de conexión realizado al transformador del laboratorio es el siguiente:

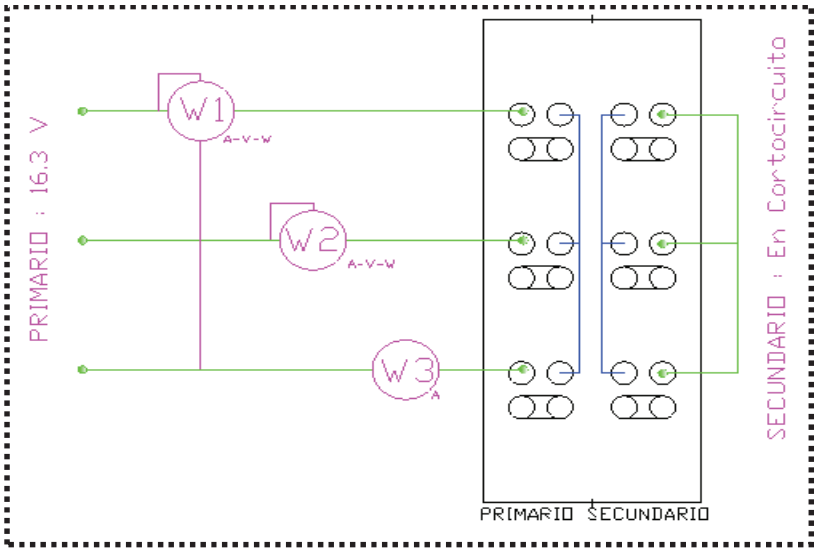


Ilustración 39: esquema de conexión para el ensayo de cortocircuito en secuencia directa

El dato que ha sido necesario calcular con el fin de introducirlo en el programa de simulación ha sido el de la reactancia de cortocircuito en secuencia directa (X_{cc}), para ello ha sido necesario extraer los siguientes datos del ensayo:

- Potencia de cortocircuito (P_{cc}).
- Tensión de cortocircuito (V_{cc}).

Consecuencia directa de la tensión tan reducida necesaria para realizar esta prueba (V_{cc}), es considerar despreciables las perdidas en el hierro, es decir, el flujo originado en el núcleo magnético variará en relación directa con la tensión de alimentación. Además se desprecia la rama en paralelo por ser I_o muy inferior a la intensidad nominal que circula por el arrollamiento. La potencia absorbida en cortocircuito (P_{cc}) por la máquina y que extraemos de las mediciones coincide con las pérdidas en el cobre.

Para la obtención del valor de la reactancia de cortocircuito se debe calcular en primer lugar la diferencia de potencia ddp, es decir, el valo del cos φ_{cc} para despues con la ayuda de las fórmulas correspondientes (decucidas en el primer capítulo) obtener el valor de la reactancia de cortocircuito:

$$\text{Cos } \varphi_{cc} = \frac{Pcc}{\sqrt{3} * V1cc * I1n}$$

$$V_{xcc} = X_{cc} * I_{1n} = V_{1cc} * \text{sen } \varphi_{cc}$$

$X_{cc} = \frac{V1cc}{I1n}$ * sen φ_{cc}

Donde:

V_{xcc} = Tensión de cortocircuito en la reactancia de dispersión.

sen φ_{cc} = seno del desfase existente entre la tensión y corriente.

Las mediciones realizadas a partir de este ensayo son:

- P_{cc} = W1 + W2 = 116.5+ 78.2 = 204.8 W
- V_{1cc} = 16.3 V
- $I_{cc} = I_{1n}$ = 7.596 A

Aplicando las fórmulas indicadas anteriormente, nos da:

Cos $\varphi_{cc} = \frac{Pcc}{\sqrt{3}*V1cc*I1n} = \frac{204.8}{\sqrt{3}*16.3*7.596}$ = 0.955

Sen φ_{cc} = 0.296

$X_{cc} = \frac{V1cc}{I1n}$ * sen $\varphi_{cc} = \frac{16.3}{7.596}$ * 0.2966 = 0.6365 Ω

$R_{cc} = \frac{V1cc}{I1n}$ * cos $\varphi_{cc} = \frac{16.3}{7.596}$ * 0.955 = 2.05 Ω

El dato que se demanda en el caso de la impedancia de cortocircuito es por unidad, que corresponde al valor de 0.022. (referido al primario).

5.3. Ensayo de vacío en secuencia cero

Cuando una máquina o sistema eléctrico está funcionando de forma equilibrada, en su comportamiento no influye la impedancia de secuencia cero. La impedancia de secuencia cero aparecerá cuando las corrientes que circulan por las diferentes fases no sean iguales, es decir, en nuestro caso, cuando el transformador se encuentra en estado transitorio.

Para la realización del ensayo de vacío en secuencia cero se deben alimentar las tres fases con una misma tensión. Para ello se ha montado el esquema de la ilustración siguiente, donde el primario, conectado en estrella, recibe la alimentación y el secundario, en vacío, se conecta en triángulo en circuito abierto tal y como lo requiere el programa de simulación.

El esquema de conexión realizado al transformador del laboratorio es el siguiente:

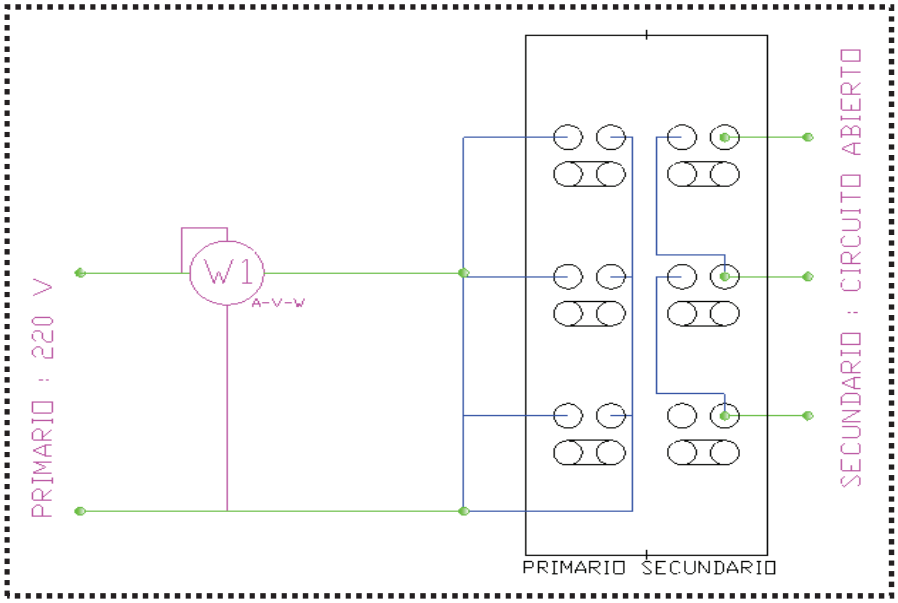


Ilustración 40: esquema de conexión para ensayo de vacío secuencia cero

La finalidad de este ensayo es obtener los datos de la corriente de excitación y de la potencia absorbida por el circuito en vacío. La corriente que demanda el circuito primario durante la realización de este ensayo, cuando este es alimentado a la tensión de 220V y según la configuración del montaje, es superior a la que puede suministrar el panel de control, ya que se comprueba un elevado consumo de corriente al ir aumentando la tensión de alimentación, siendo imposible alcanzar la tensión nominal.

Por tal motivo, no se ha podido realizar y se ha optado por calcular los datos de una manera estimada. Para ello se ha tomado como referencia los datos introducidos para el mismo bloque del transformador en otros circuitos construidos por el programa de simulación además de buscar un equilibrio entre la corriente de excitación y la potencia absorbida en secuencia cero para que el propio programa de simulación no diera error. La corriente de excitación ha sido del 300% con respecto a la intensidad nominal y la potencia que representa las pérdidas en vacío en secuencia cero ha sido del 40%.

5.4. Ensayo de cortocircuito en secuencia cero

Para la realización del ensayo de cortocircuito en secuencia cero se han realizado las conexiones que muestran la figura. Las fases del primario se han conectado en serie para de esta forma conseguir que cada una de ellas reciba la misma tensión y, por otro lado, que la fuente de alimentación soporte la intensidad nominal total que circule por el circuito, que para este montaje corresponde con la intensidad nominal que soporta cada fase.

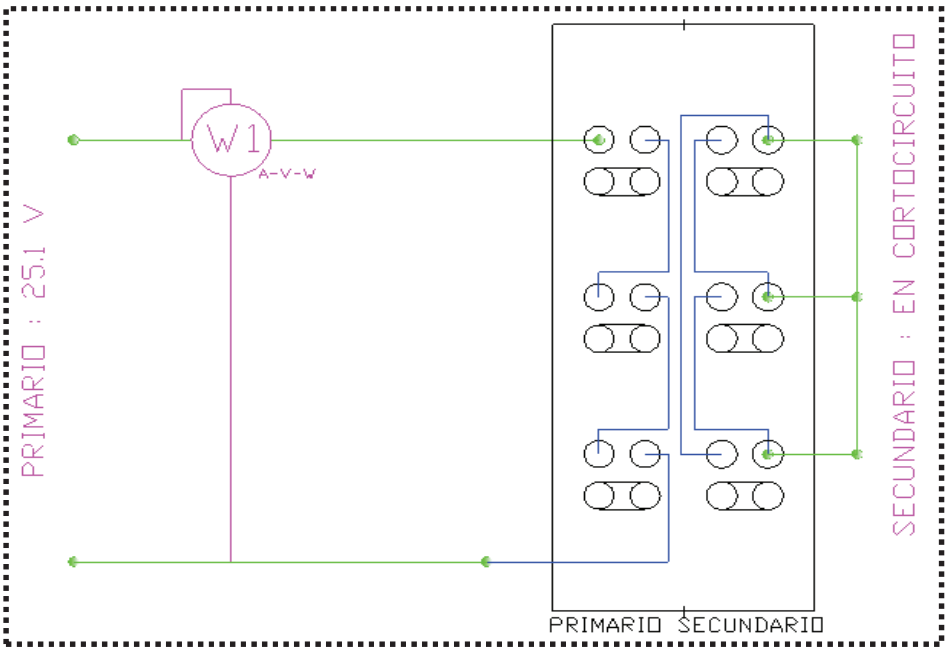


Ilustración 41: esquema de conexión para ensayo de cortocircuito en secuencia cero

El dato que ha sido necesario calcular con el fin de introducirlo en el programa de simulación ha sido el de la reactancia de cortocircuito en secuencia cero (X_{cc}), para ello ha sido necesario extraer los siguientes datos del ensayo:

- Potencia de cortocircuito (P_{cc}).
- Tensión de cortocircuito (V_{cc}).

Para la obtención del valor de la reactancia de cortocircuito se debe calcular en primer lugar la diferencia de potencia ddp, es decir, el valo del cos φ_{cc} para despues

con la ayuda de las fórmulas correspondientes, obtener el valor de la reactancia de cortocircuito:

$$\text{Cos } \varphi_{cc} = \frac{Pcc}{V1cc*I1n}$$

$$V_{xcc} = X_{cc} * I_{1n} = V_{1cc}*\text{sen } \varphi_{cc}$$

$$X_{cc} = \frac{V1cc}{I1n} * \text{sen } \varphi_{cc}$$

(Fórmulas 53)

Las mediciones realizadas a partir de este ensayo son:

- P_{cc} = W1 = 179.8 W
- V_{1cc} = 25.1 V
- $I_{cc} = I_{1n}$ = 7.596 A

Aplicando las fórmulas indicadas anteriormente, nos da:

$$\text{Cos } \varphi_{cc} = \frac{Pcc}{V1cc*I1n} = \frac{179.8}{25.1*7.596} = 0.95$$

$$\text{Sen } \varphi_{cc} = 0.31$$

$$X_{cc} = \frac{V1cc}{I1n} * \text{sen } \varphi_{cc} = \frac{25.1}{7.596} * 0.31 = 1.04\ \Omega$$

El dato que se demanda en el caso de la impedancia de cortocircuito es por unidad, que corresponde al valor de 0.1. (Referido al secundario).

5.5. Medición de las resistencias de los devanados

La medición de la resistencia que ofrece cada devanado del transformador, primario y secundario se ha realizado justo después de realizar los ensayos de vacío y cortocircuito del transformador, cuyo objetivo es la obtención de un valor que se acerque más a la realidad de funcionamiento de un transformador de potencia. Los datos obtenidos son los indicados en la tabla siguiente:

	RESISTENCIA DE LOS DEVANADOS (Ω)	
	PRIMARIO	SECUNDARIO
FASE 1	0.9	0.5
FASE 2	0.9	0.5
FASE 3	0.9	0.5
MEDIA	0.9	0.5

Tabla 2: valores de las resistencias de los devanados

6. ENSAYOS REALIZADOS AL TRANSFORMADOR REAL

Para cada uno de los ensayos realizados al transformador de 5 Kva se indicará los materiales que se han utilizado, el esquema de conexión realizado así como los resultados obtenidos gracias a la utilización del analizador de redes Fluke 434. Los ensayos a realizar según objetivos marcados por el trabajo fin de grado son los correspondientes al transitorio de conexión, cortocircuito, sobreexcitación y de sobrefrecuencia/subfrecuencia. Para cada una de las mediciones se mostrará las variaciones que experimenta la intensidad de corriente en el momento del transitorio.

Los ensayos se han realizado sin necesidad de conectarle ninguna carga al transformador. Uno de los motivos por los cuales no se ha incluido una carga a la máquina es porque los efectos de cada transitorio son visibles independientemente de la carga conectada, variando principalmente en magnitud en el caso de existir una impedancia de carga en el secundario del transformador. Otro motivo para no conectarle una carga es el resultado de la existencia de intensidades de corriente elevadas que imposibilitaría realizar los algunos ensayos ya que el panel de control y alimentación no suministra tal potencia.

Es necesario indicar referente al último ensayo del transitorio de frecuencia, un fallo en el funcionamiento interno del generador que se encuentra en el laboratorio de máquinas eléctricas de la Universidad de Jaén, ha ocasionado la incapacidad de poder realizar esta prueba al transformador real.

6.1. Ensayo transitorio de Conexión

Estando el transformador en vacío, se ha alimentado el bobinado primario a la tensión nominal y se ha medido la variación que sufre la corriente en el instante de energización de la máquina. Para ello se ha realizado la conexión Y-Y. Al estar el primario conectado en estrella, se ha alimentado a una tensión de 380 V.

Los materiales empleados para este ensayo son:

- Transformador trifásico de 5KVA.
- Analizador de redes Fluke 434.
- Panel de control y alimentación.
- Cableado y herramienta.

El esquema de montaje para el ensayo de conexión es el siguiente:

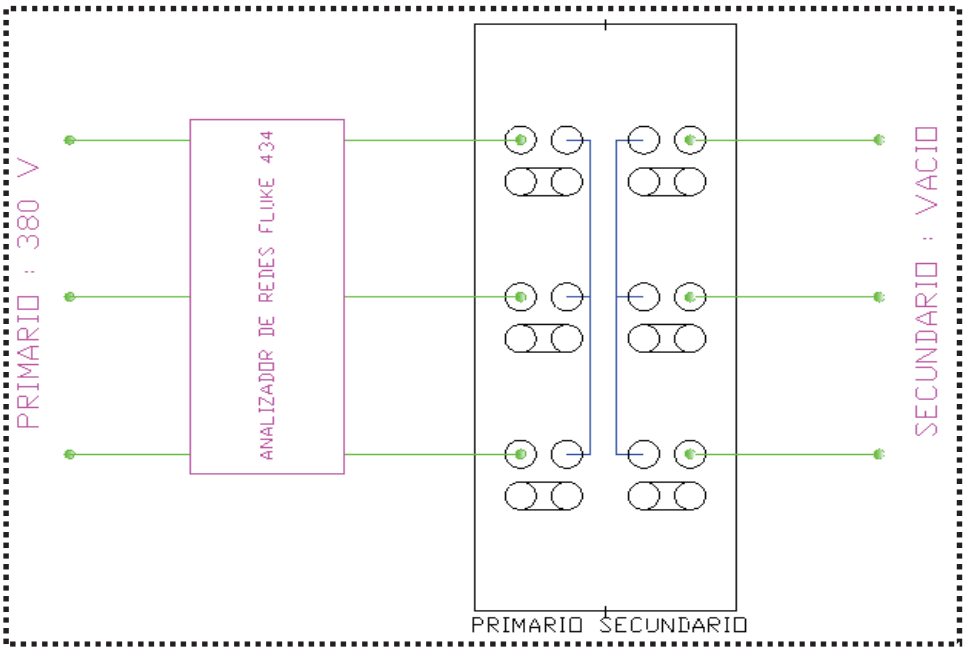


Ilustración 42: Esquema de conexión para transitorio de conexión

El valor instantáneo que adquiere la tensión en el momento de la conexión es de suma importancia, ya que este influye en la manera de desarrollarse el transitorio y por lo tanto en el valor que adquiere la intensidad de corriente. La forma de onda de la tensión en el instante de la energización del transformador es registrada tal y como se muestra en la ilustración 43, se representa para mayor claridad, el instante

de una de las fases del sistema trifásico, estando las otras dos desfasadas un ángulo de 120º con respecto a esta.

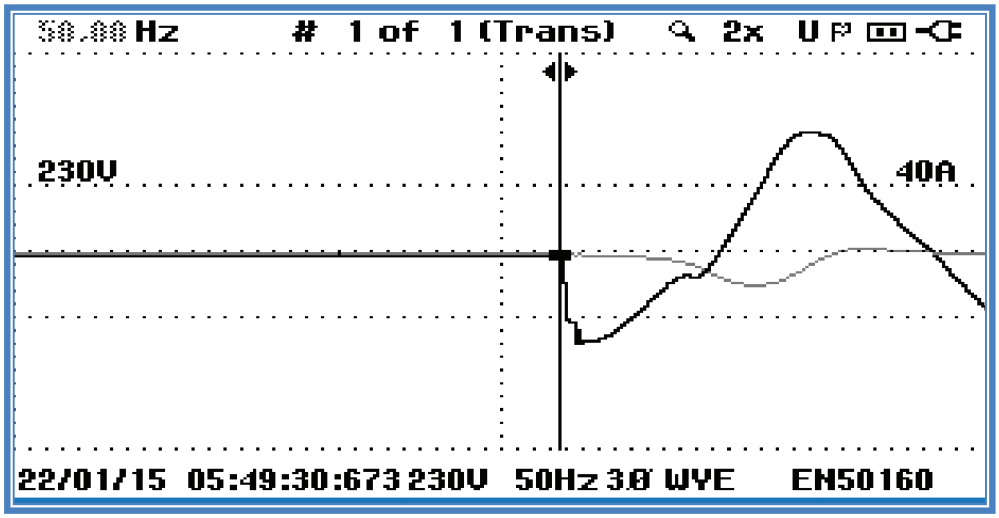


Ilustración 43: Forma de onda de tensión en el instante de conexión

Se puede apreciar como el ángulo inicial de conexión es aproximadamente de 250º.

Durante la realización de este ensayo, la intensidad más elevada que se ha alcanzado en el instante de conexión del transformador trifásico de potencia tiene un valor de 39 A tal y como se ha registrado en el analizador y como se muestra en la siguiente ilustración. Los valores picos de las intensidades de las otras dos fases y que se pueden extraer de la gráfica son aproximadamente de 28 A la segunda fase y de unos 16 A la fase restante.

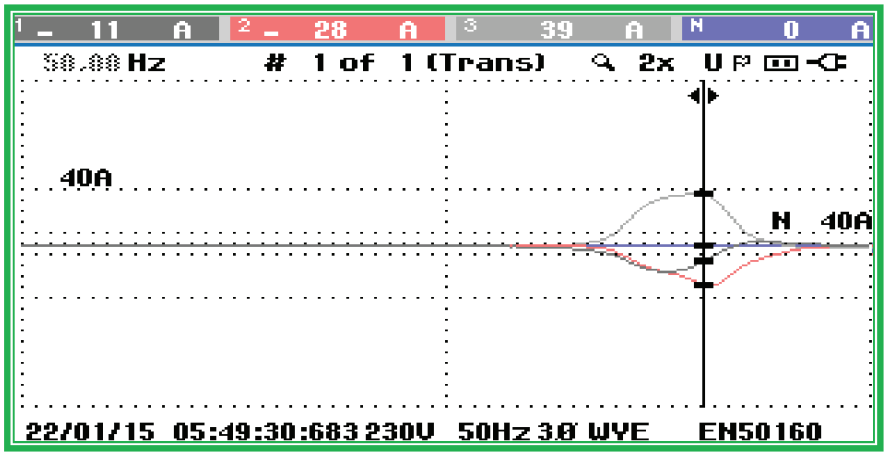


Ilustración 44: Formas de onda y valor máximo de intensidad de corriente en instante de conexión

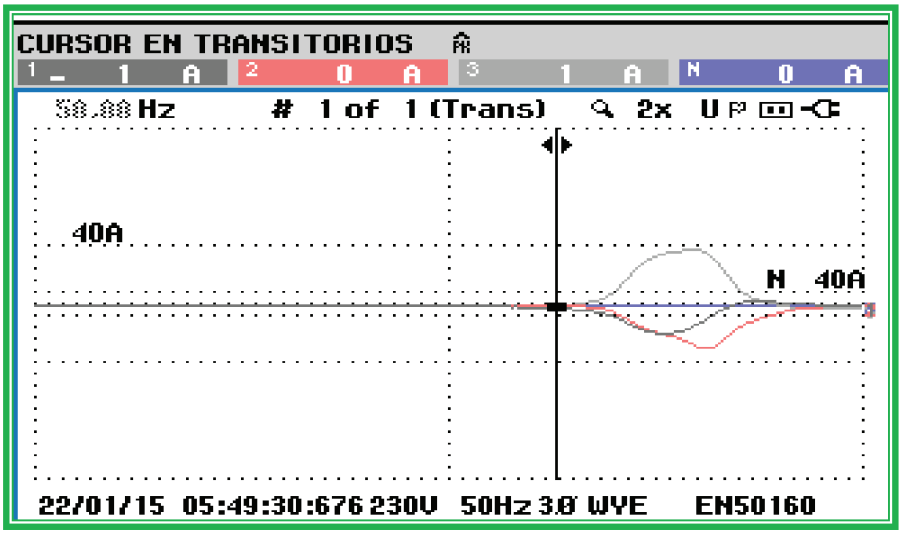


Ilustración 45: punto considerado como inicio del instante de energización

Las dos gráficas de más arriba tienen por objetivo establecer el tiempo en alcanzar la máxima intensidad en el momento de la conexión. Para ello se establece la diferencia entre el tiempo en el cual se produce la conexión y el que hay en su máximo valor de corriente. Este tiempo es del orden de milisegundos y será la diferencia entre 683 y 676 milisegundos. Con estos datos podemos concluir que el tiempo en el cual circula el mayor valor de la intensidad de corriente en el momento de la conexión es de 7 milisegundos.

6.2. Ensayo transitorio de Cortocircuito

En el transitorio de cortocircuito se alcanzan intensidades muy elevadas y las protecciones del panel de control y alimentación cortarán el suministro de energía con el fin de que estas no lleguen a ser peligrosas. Sin embargo, para la realización de este ensayo, es necesario que el transitorio se mantenga el tiempo suficiente para poder registrar los valores pico de corriente correspondiente al instante del corto.

Es por esto que el panel de control y alimentación utilizado es el que se encuentra en el departamento de máquinas por tener este un poder de ruptura superior y de esta manera soportar durante unos instantes el cortocircuito.

Se ha mantenido la conexión Y-Y del transformador y se ha alimentado en esta ocasión a la tensión de 220 V el devanado secundario, y se ha realizado el cortocircuito en el devanado primario. Para la realización de tal fin, se ha dispuesto de un interruptor magneto-térmico de caja moldeada además de los mismos materiales que los utilizados en el ensayo anterior.

Los materiales empleados para este ensayo son:

- Transformador trifásico de 5KVA.
- Analizador de redes Fluke 434.
- Panel de control y alimentación.
- Cableado y herramienta.
- Interruptor magneto-térmico de caja moldeada de 100ª

El esquema de montaje para el ensayo de conexión es el siguiente:

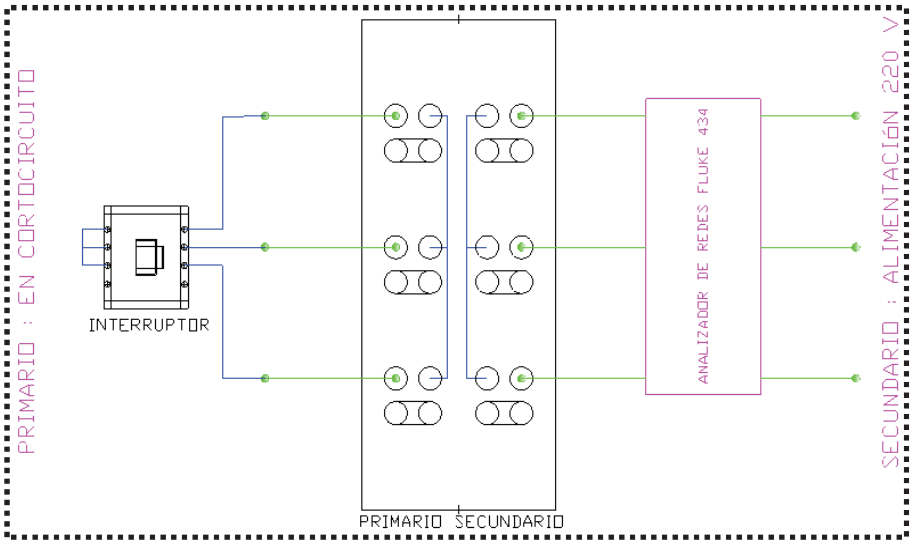


Ilustración 46: esquema de conexión transitorio de cortocircuito

Al igual que en el transitorio de conexión, deberemos conocer el valor instantáneo de la tensión en el instante del cortocircuito. La forma de onda de la tensión en el instante del cortocircuito del transformador es registrada tal y como se muestra en la ilustración 47, se representa el instante de una de las fases del sistema trifásico, donde se puede apreciar que esta se encuentra aproximadamente

con un ángulo de 280º. Es a partir de este momento en el que se registra el aumento brusco de la intensidad de corriente.

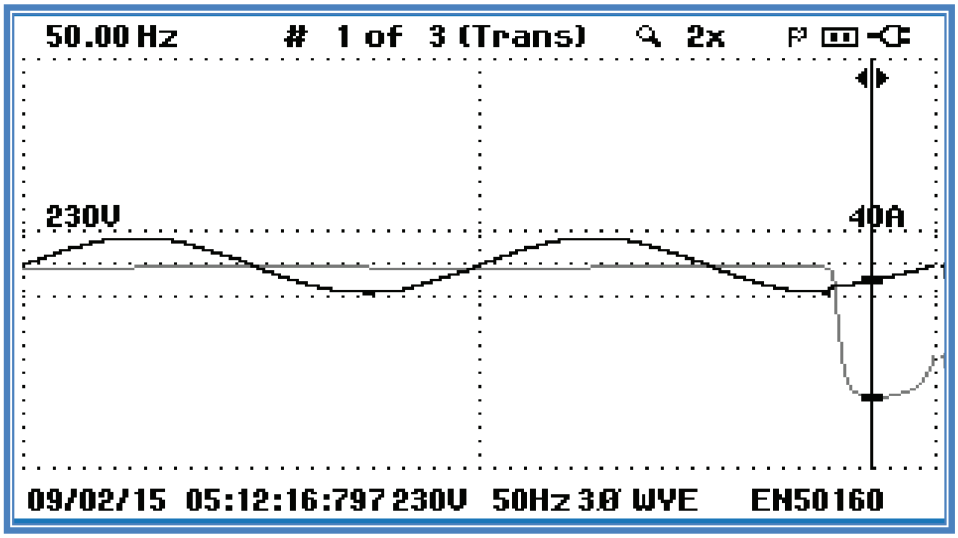


Ilustración 47: Estado instantáneo del voltaje en el momento del cortocircuito

Este transformador, durante el ensayo de cortocircuito, ha alcanzado una intensidad máxima de 157 A tal y como reflejan las ilustraciones siguientes, se representa tanto el instante inicial, como el permanente.

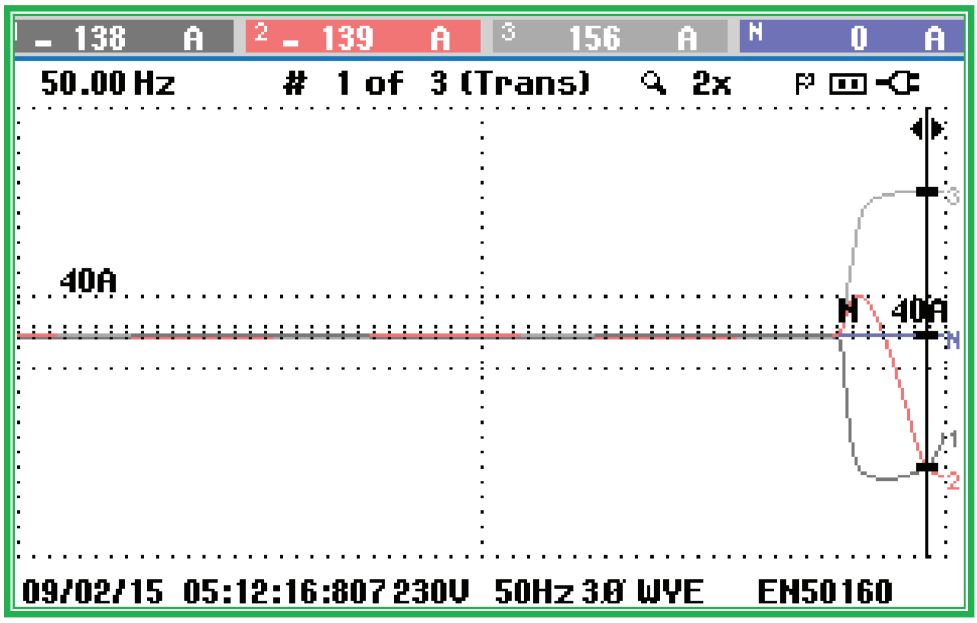


Ilustración 48: Formas de onda inicial de corriente en el momento del cortocircuito

El tiempo en el cual se establece la intensidad máxima tras el momento del cortocircuito es de unos 16 milisegundos aproximadamente.

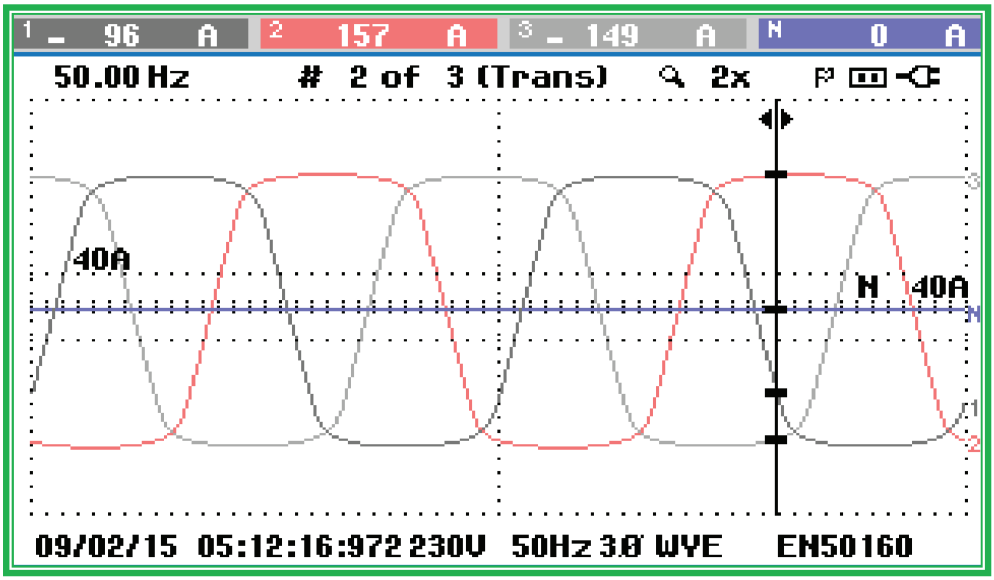


Ilustración 49: Valores máximos de la intensidad de corriente en cortocircuito

6.3. Ensayo transitorio de Sobreexcitación

El ensayo de sobreexcitación, se ha realizado de manera que se registra la variación que experimenta la intensidad de corriente a medida que varían los valores de la tensión.

El montaje efectuado es el mostrado en la figura siguiente. Se ha tomado una tensión de referencia de 127 V a partir de la cual, se ha ido aumentando y disminuyendo su valor. La conexión que corresponde a la mencionada tensión es la conexión en triángulo del devanado secundario, estando el primario en estrella y en vacío.

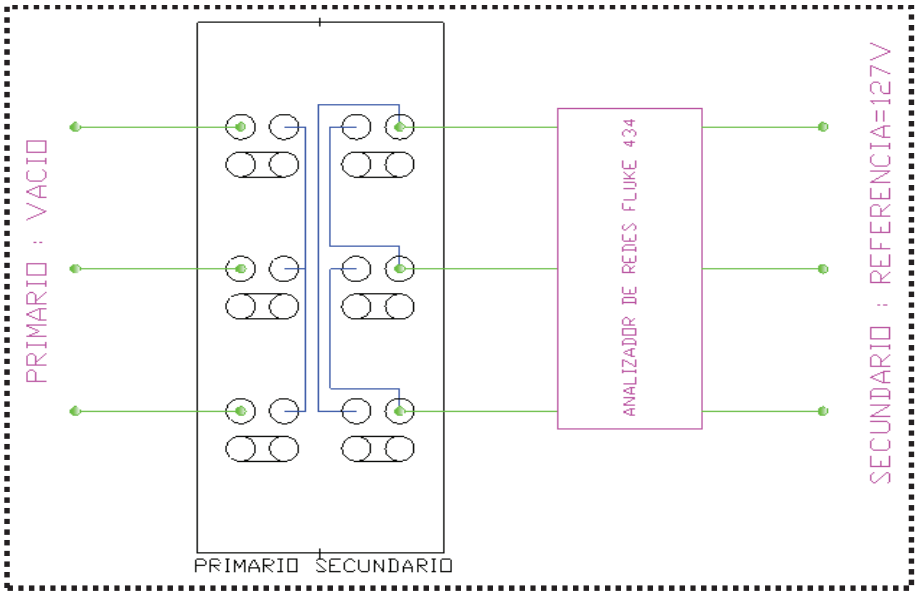


Ilustración 50: esquema de montaje para transitorio de sobreexcitación

El procedimiento seguido ha sido registrar los valores tanto de tensión como de intensidad en su variación partiendo como se ha dicho de la tensión de 127 V. Estos valores se han trasladado a una tabla y se han representado en dos gráficas diferentes, una que recoge el aumento de la intensidad de corriente con la elevación de la tensión y la otra que recoge la disminución de la intensidad de corriente conforme decrece la tensión.

TENSIÓN	INTENSIDAD	TENSIÓN	INTENSIDAD
127	1,4	127	1,4
140	2,3	120	1
155	3,6	115	0,8
170	5,2	110	0,6
185	7,8	100	0,4
200	12,5	90	0,3
210	21,3	3,2	0

Tabla 3: valores de intensidad de corriente según tensión de entrada

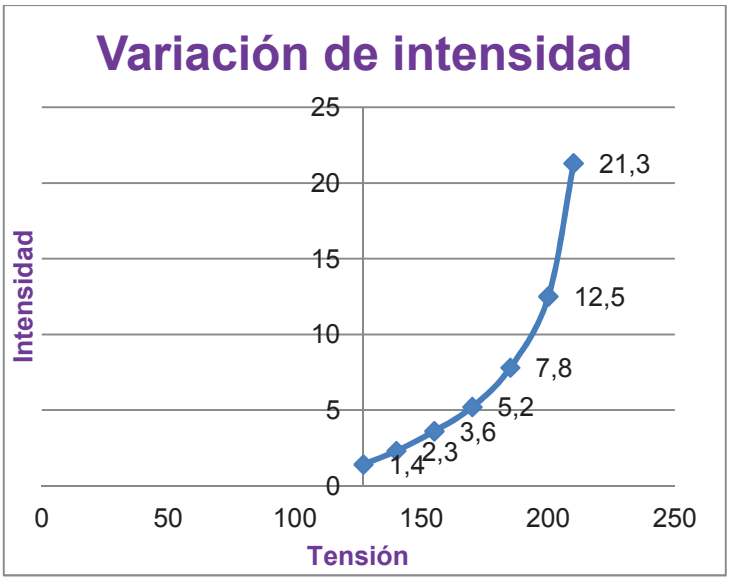


Ilustración 51: variación de la corriente con la sobretensión

Los valores marcados en la curva, son los correspondientes a los de la intensidad de la corriente. Durante el aumento de la tensión, se aprecia como la corriente también crece. Conforme el valor de la tensión es más elevado, a pequeñas variaciones de la misma, la intensidad aumenta en mayor cantidad. Este hecho es debido a que siguen una trayectoria no lineal según se desprende de la curva de magnetización del transformador, la curva de histéresis.

Una vez que entramos en el codo de saturación de la máquina, pequeñas variaciones de la tensión, provoca aumentos bruscos de la intensidad. En nuestro ensayo a la tensión de 210V, la protección ha actuado circulando una intensidad de 21.3 A y ha cortado el suministro de energía.

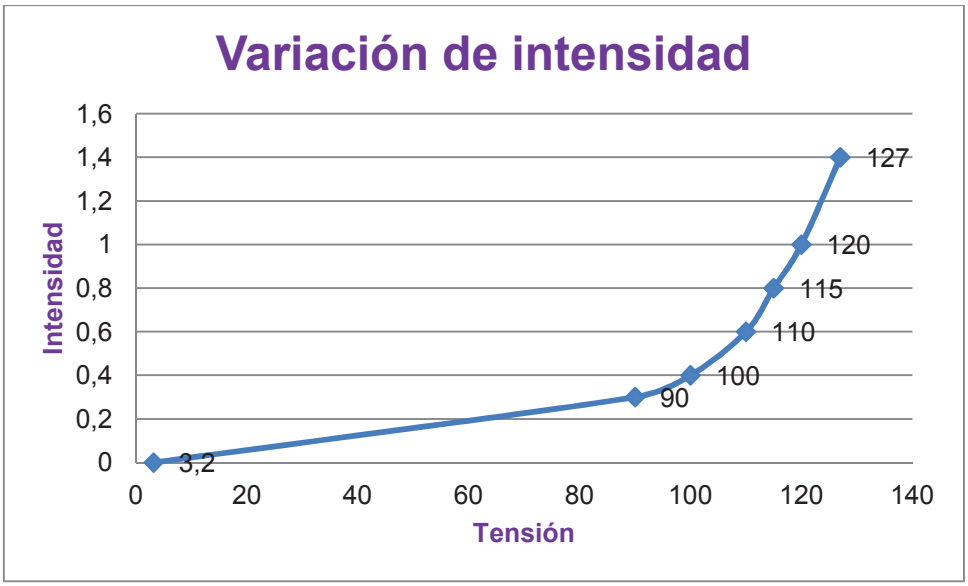


Ilustración 52: Variación de la corriente ante una sub-tensión

En este caso, los valores marcados en la curva, son los correspondientes a los de la tensión. Al disminuir la tensión, también lo hace la intensidad de corriente hasta tal punto de anularse. En nuestro ensayo, cuando la intensidad de corriente es cero, la tensión es de 3.2 V. Esta tensión es la que genera el flujo remanente del transformador.

6.4. Ensayo transitorio de Sobrefrecuencia/Subfrecuencia

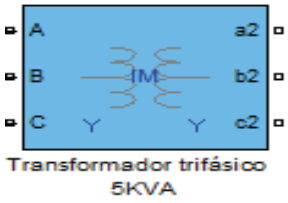
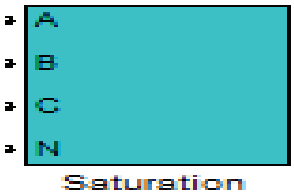
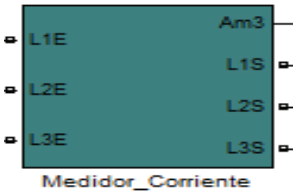
Para la realización de este ensayo era necesario utilizar el alternador de 3 KVA para de esta manera poder variar los valores de frecuencia a la entrada del transformador. Este alternador se encuentra en el laboratorio de máquinas eléctricas.

En el inicio del ensayo y una vez realizados varios intentos no ha sido posible llevar a la práctica este ensayo. Una avería en el sistema de excitación de este alternador ha imposibilitado poder suministrar los valores eléctricos correspondientes a este transitorio.

7. SIMULACIONES REALIZADAS

Con el software de simulación se realizan los mismos transitorios practicados al transformador real. En primer lugar es necesario introducir los datos que se obtuvieron gracias a los ensayos y mediciones previas hechas a la máquina. Estos datos nos definen el comportamiento que deberá tener el módulo del transformador del programa, para que sean similares a la máquina real.

El resto de módulos que los componen son, por ejemplo, la fuente de alimentación, elementos de medición, interruptores para la puesta en corto del devanado del transformador… El conjunto de elementos utilizados en los distintos ensayos se recogen en la siguiente tabla.

ELEMENTO	DESCRIPCIÓN
	**Transformador trifásico:** Permite el modelado de un transformador trifásico con acoplamiento inductivo entre arrollamientos situados en diferentes fases de tres de sus extremidades.
	**Bloque saturación:** Acoplado al transformador trifásico para modelar las características de histéresis (saturación).
	**Bloque medidor:** Elemento utilizado para medir diferentes valores de la línea, en este caso para la medición de la corriente instantánea.

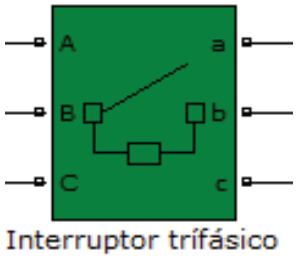
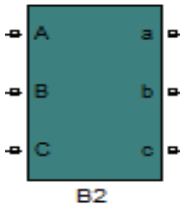
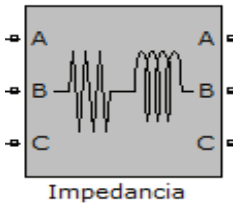
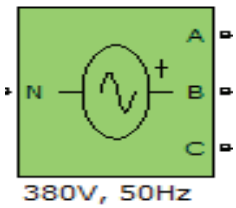
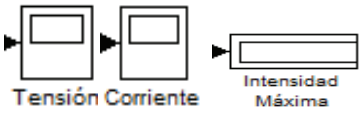
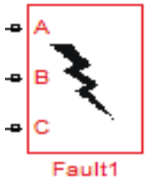
	**Interruptor trifásico:** Elemento necesario para efectuar la conexión y desconexión de la alimentación del transformador.
	**Bloque medidor trifásico:** Elemento utilizado para representar la forma de onda de las tensiones y de las corrientes instantáneas.
	**Bloque impedancia:** Representa la impedancia aguas arriba de la instalación.
	**Fuente de voltaje:** Genera un voltaje sinusoidal trifásico con parámetros variables en el tiempo.
	**Elementos de señal:** Representan los valores registrados por los medidores en forma de onda o con valores instantáneos.
	**Bloque fallo trifásico:** Realiza la conexión en cortocircuito de las fases del transformador.

Ilustración 53: bloques de elementos utilizados para el montaje de los esquemas

7.1. Transitorio de Conexión

Al igual que en el ensayo en el transformador real, para la simulación del transitorio de conexión se alimentará el primario a la tensión de 380 V, con un desfase de unos 250º según muestran las gráficas extraídas de los ensayos correspondientes. El secundario se deja sin conectar ninguna carga, es decir, el bobinado secundario está en vacío.

El esquema montado para realizar la simulación es el siguiente:

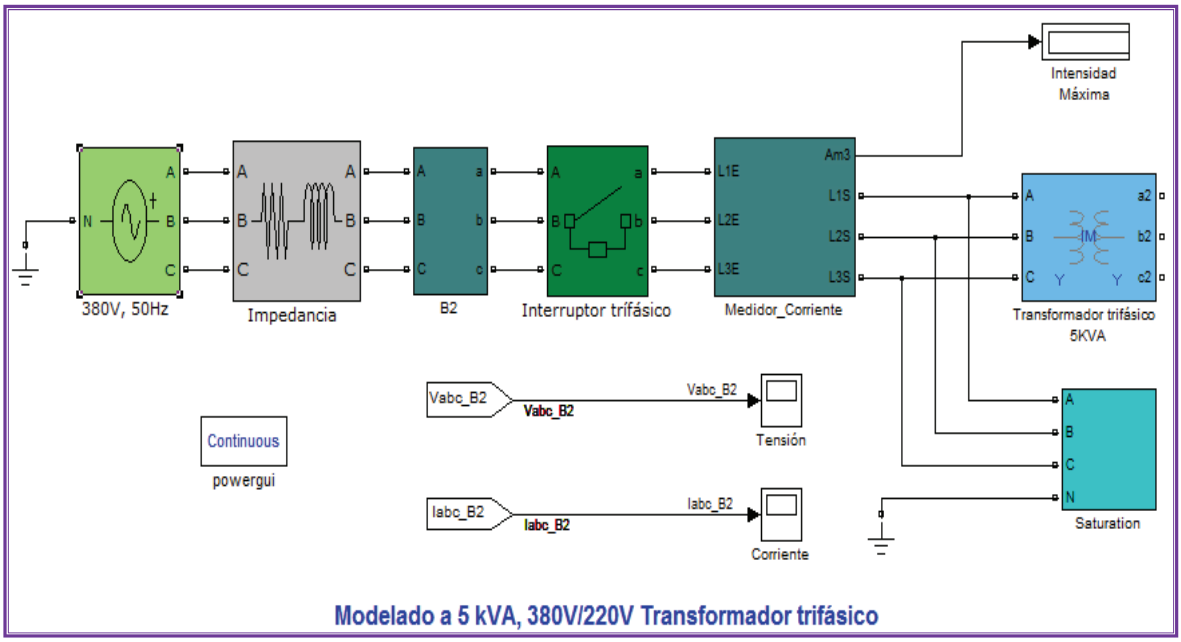


Ilustración 54: esquema de montaje para el transitorio de conexión

Se mostrará a continuación la forma de onda de la intensidad en el momento de la conexión, y se indicará los valores máximos que se alcanzan en cada una de las fases. No se muestra la forma de onda de tensión por no extraer de ella datos necesarios para el análisis del transitorio.

En la primera ilustración se puede apreciar el pico tan significativo que ocasionan las corrientes en el momento de la conexión y como esta va decreciendo en poco tiempo hasta llegar a los valores nominales. El tiempo aproximado de duración del transitorio es de 0.4 segundos y el pico máximo se obtiene entorno a los 0.01 segundos. En una segunda gráfica se representa únicamente los picos de corriente más elevados que se producen en transformador.

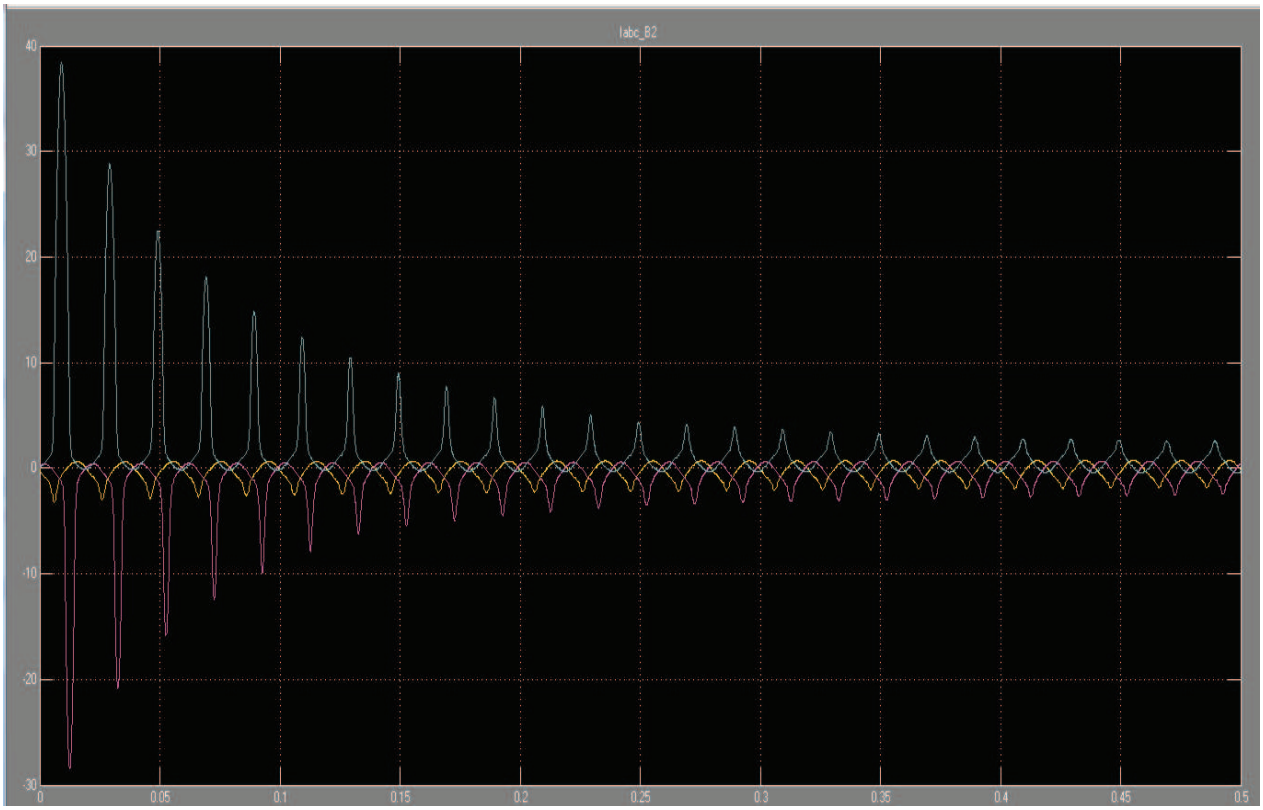


Ilustración 55: forma de onda de corriente en el instante de conexión

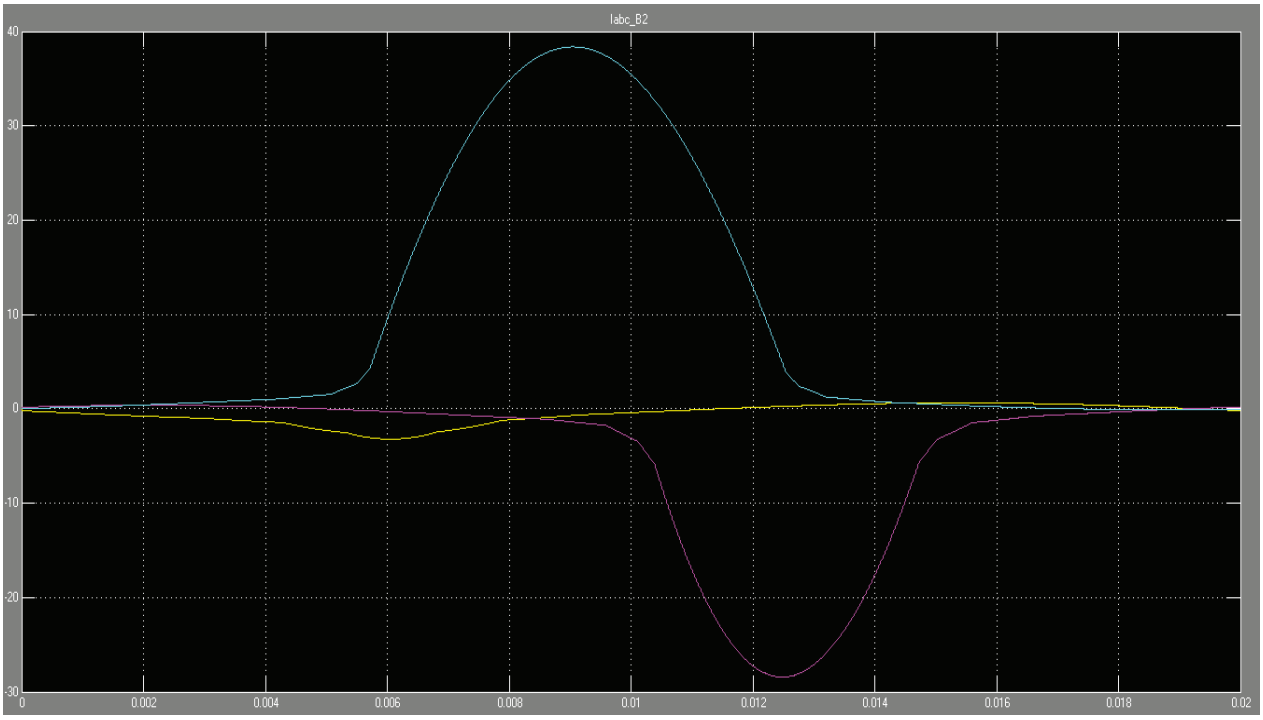


Ilustración 56: Formas de onda de la intensidad de corriente en el primer periodo

El pico de la intensidad de corriente más elevada que circula por un devanado del transformador es de valor 38.3 A, tal y como se puede observar en el detalle que se ha añadido en una tercera ilustración. Por el resto de devanados tienen que soportar inicialmente un pico de corriente de 28.4 A y de 4 A aproximadamente.

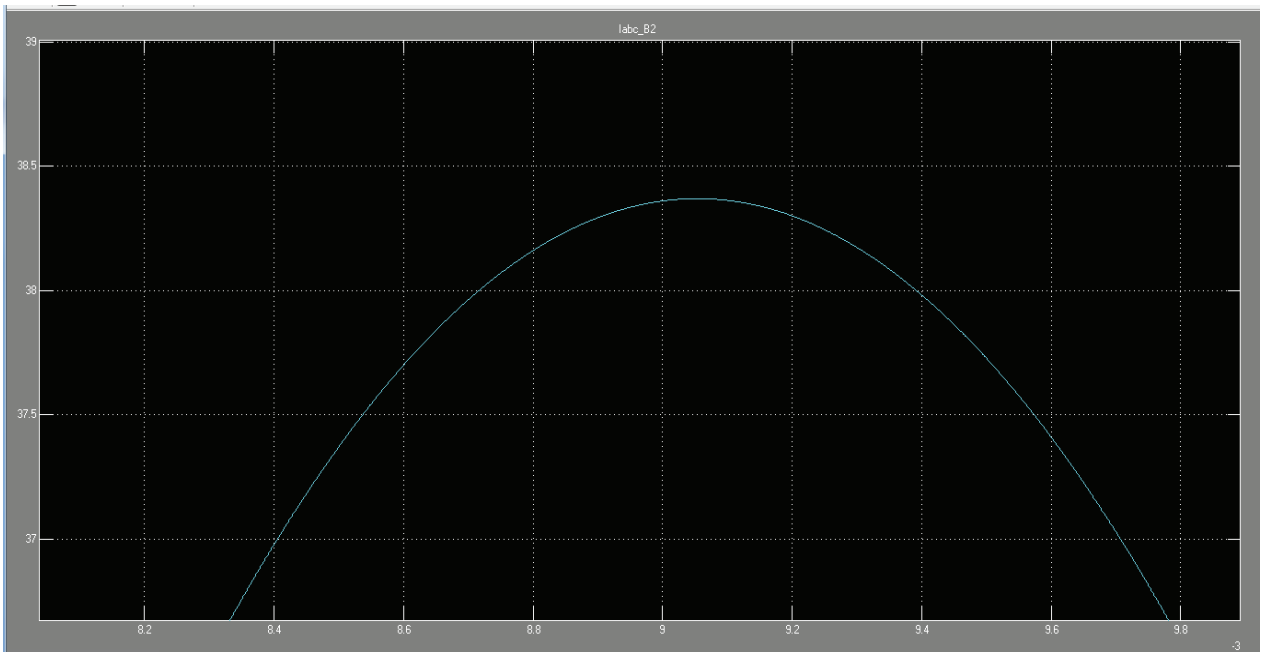


Ilustración 57: Valor máximo adquirido por la corriente en el instante de conexión

También podemos comprobar, tal y como también se vio en el ensayo real, que el tiempo que existe entre el momento de conexión y el cual se produce la intensidad máxima es de un valor de 9 milisegundos.

7.2. Transitorio de Cortocircuito

Para realizar la simulación del transitorio de cortocircuito, se han escogido los elementos necesarios para imitar el esquema montado en el ensayo real. La conexión del transformador es Y-Y, este es alimentado a la tensión de 220V con un ángulo de desfase de 280º con el fin de imitar la condición a la que fue sometida la máquina en su ensayo real. Para la realización del cortocircuito se ha incorporado el módulo llamado “Fault” que realiza la conexión instantánea de las tres fases en el tiempo estipulado por el usuario.

En primer lugar se presentará el esquema de conexión para la simulación de este transitorio para después mostrar los resultados ofrecidos con respecto a los valores alcanzados por la intensidad de corriente.

El esquema montado para realizar la simulación es el siguiente:

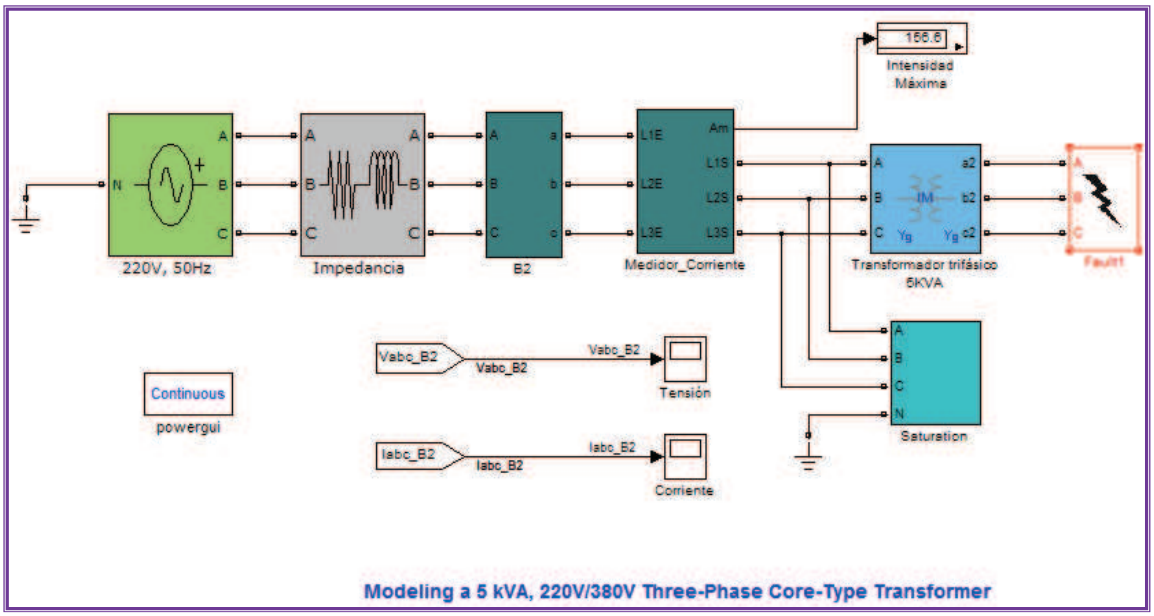


Ilustración 58: esquema de montaje para transitorio de cortocircuito

Se representa en el eje de abscisas el tiempo en segundos de duración de la simulación y en el eje de ordenadas la intensidad de corriente en amperios. En los primeros instantes el transformador trabaja en vacío para después producirse el cortocircuito en el instante que corresponde a los 0.017segundos.

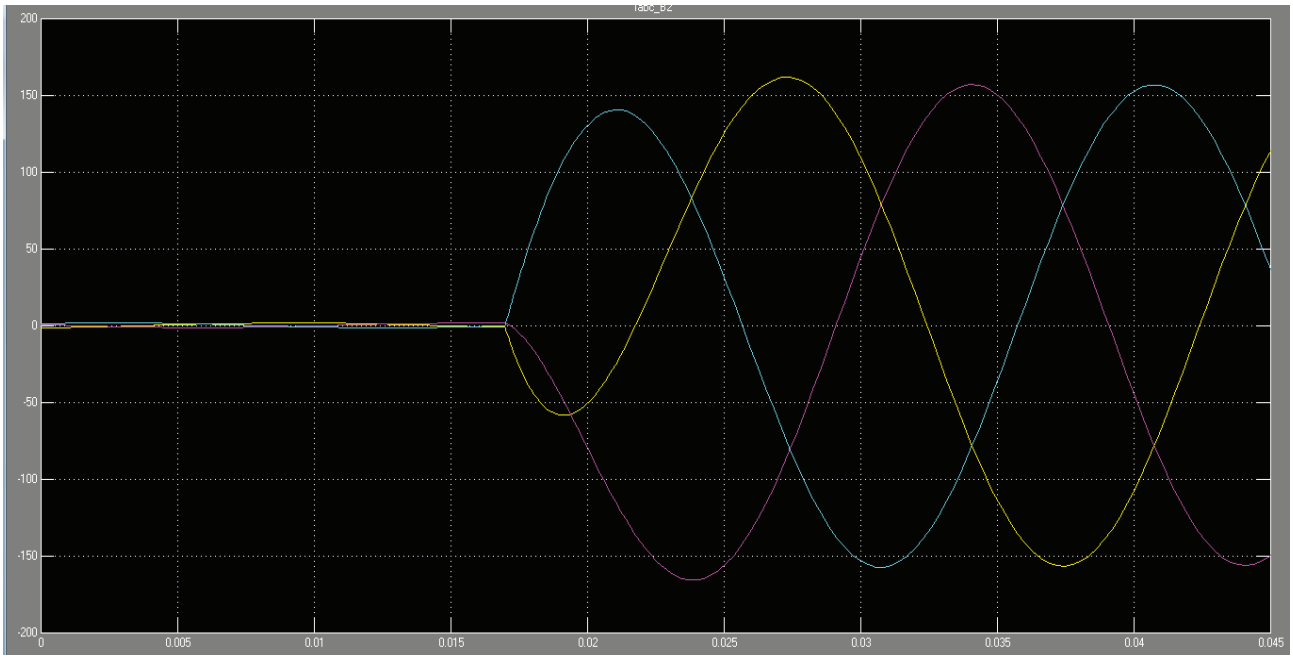


Ilustración 59: Formas de onda de corriente en el instante del cortocircuito

Se observa que la intensidad máxima alcanzada por las tres fases durante el cortocircuito es de 161 A, valor que se puede apreciar más fácilmente en la gráfica donde se muestra de forma ampliada el valor de una de las fases. También extraemos de la gráfica que a partir del instante del cortocircuito, pasa un tiempo muy pequeño de valor de milisegundos hasta que la corriente alcanza su máximo valor.

El periodo de tiempo en el cual se alcanza la intensidad máxima desde el momento del cortocircuito es de unos 14 milisegundos aproximadamente.

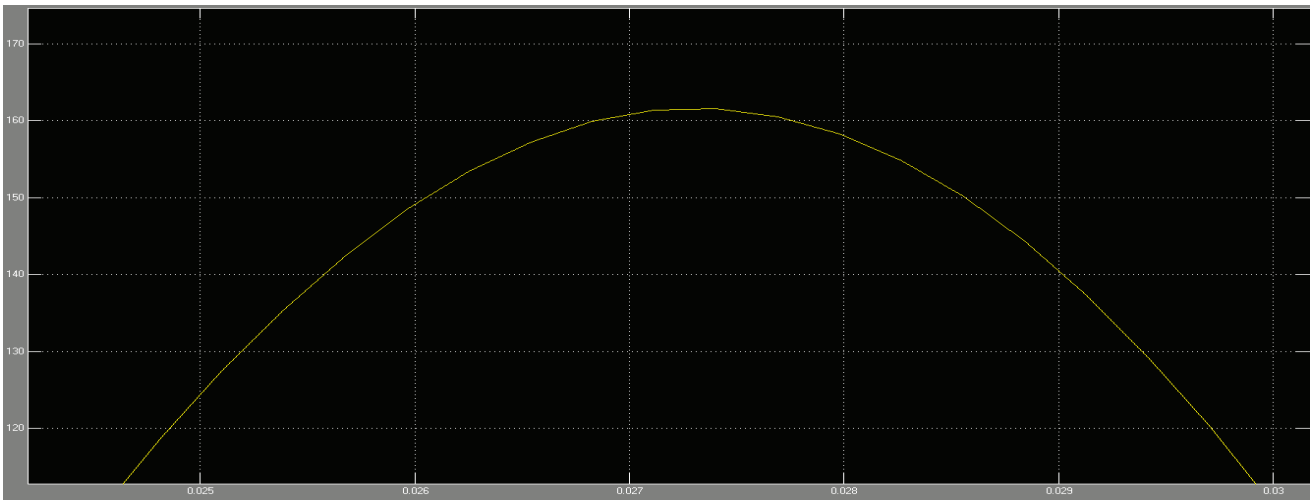


Ilustración 60: valor máximo de la intensidad de corriente en cortocircuito

7.3. Transitorio de Sobreexcitación

El bobinado secundario del transformador, cuando se conecta en triángulo soporta una tensión de 127 V. Es esta nuestra tensión de referencia a partir de la cual se irá aumentando y disminuyendo su valor, con el fin de ver la respuesta que ofrece la intensidad de la corriente a la variación de la tensión.

Se alimenta a la hora de realizar el montaje en el programa el primario del transformador a la tensión indicada y el secundario se mantiene en vacío. La conexión, por tanto, será la de Δ-Y y junto con el resto de elementos necesarios, el esquema resultante es el siguiente:

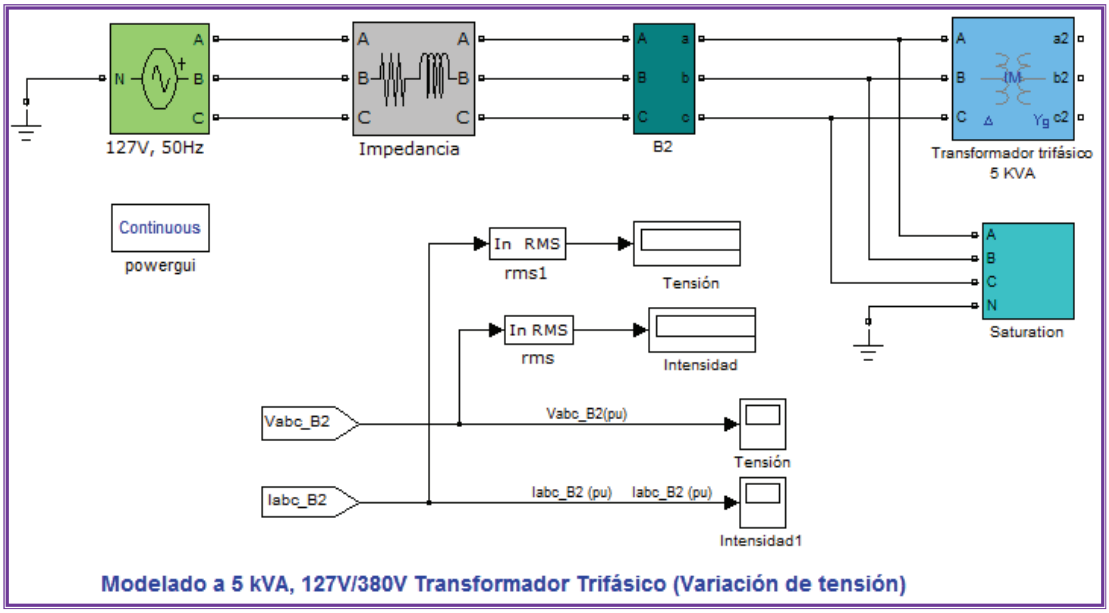


Ilustración 61: esquema de conexión para transitorio de sobreexcitación

Al esquema de montaje se le ha añadido elementos de señal que convierten los valores instantáneos de tensión e intensidad en valores eficaces, que son los que recogemos en la tabla mostrada a continuación:

TENSIÓN	INTENSIDAD	TENSIÓN	INTENSIDAD
127	1,42	127	1,42
140	2,1	120	1,12
155	3,4	115	0,87
170	4,6	110	0,64
185	7,3	100	0,45
200	12,21	90	0,38
210	20,5	3,2	0

Tabla 4: Valores de intensidad de corriente según tensión aplicada en simulación

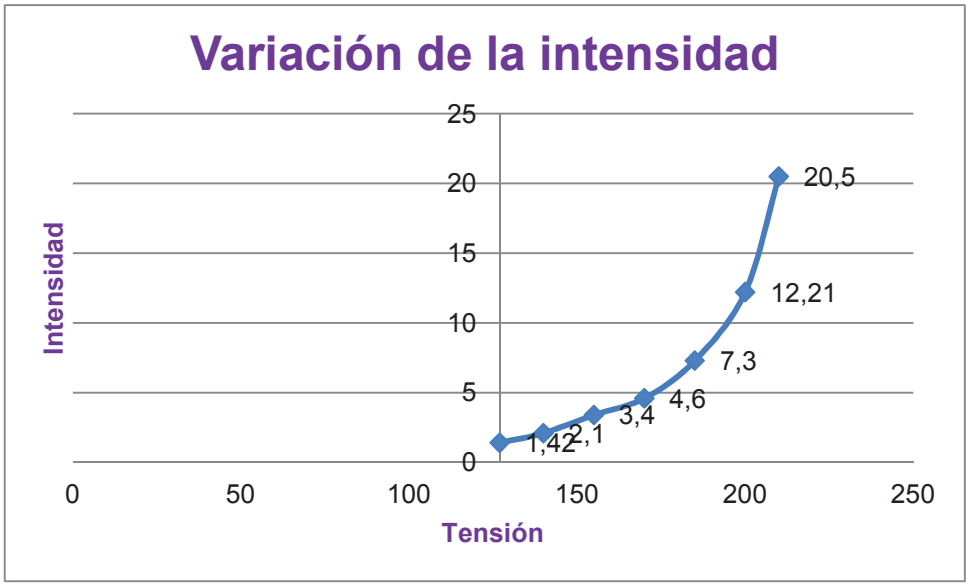


Ilustración 62: variación de la intensidad de corriente con la sobre-tensión

La curva de la gráfica representa la variación de la intensidad de corriente. Conforme se va aumentando los valores de la tensión de entrada, se incrementa los valores de la intensidad, observando que la pendiente de la curva se hace más pronunciada conforme la tensión es más elevada, es decir, en el codo de saturación del transformador, a pequeñas variaciones de la tensión, se producen mayores variaciones de la intensidad de corriente.

En el caso contrario, al ir disminuyendo los valores de tensión, también disminuye los de corriente hasta que es nula, momento en el cual, la tensión que corresponde a este valor es la que origina el flujo remanente de la máquina.

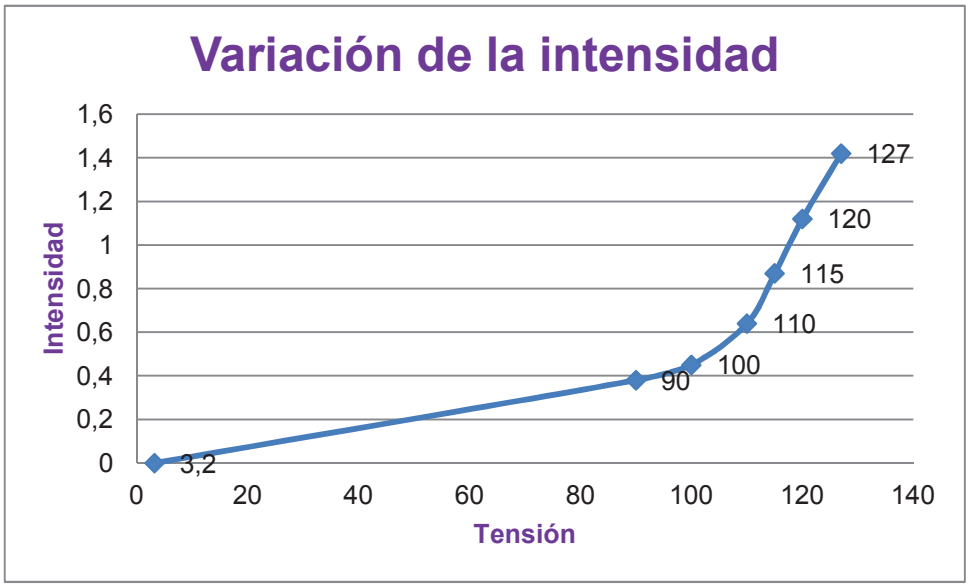


Ilustración 63: variación de la intensidad de corriente con la sub-tensión

A modo de ejemplo, se muestra en las dos gráficas representadas más abajo, como al ir aumentando la forma de onda de la tensión, se produce un aumento de la forma de onda de la intensidad de corriente.

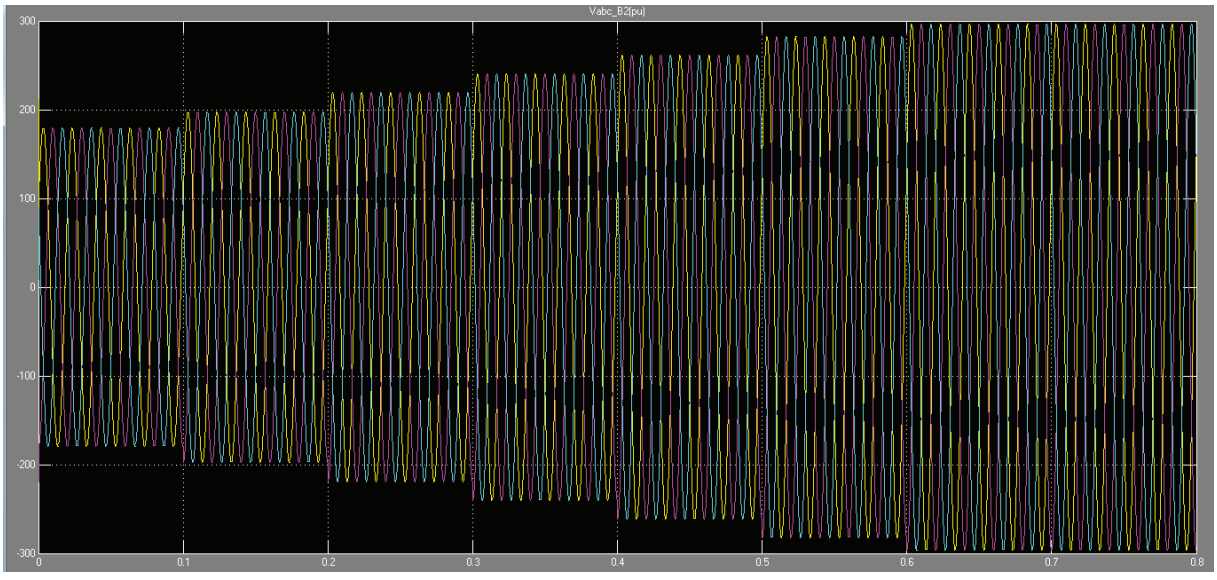


Ilustración 64: representación del aumento escalonado de la tensión

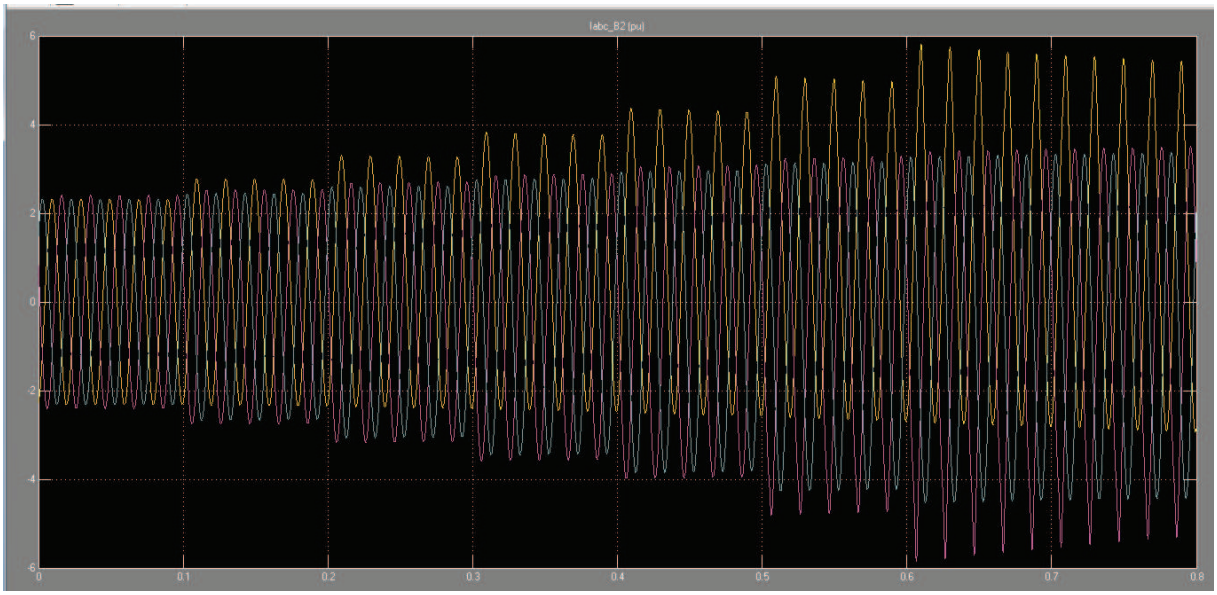


Ilustración 65: Aumento de la intensidad de corriente con la sobre-tensión

7.4. Transitorio de Sobrefrecuencia/Subfrecuencia

Para la realización de esta simulación se escoge la conexión Y-Y y se alimenta el secundario del transformador a su tensión nominal, esta tensión al estar conectado en estrella es de 220 V, el secundario de la maquina está en vacío.

El esquema de montaje al igual que las otras simulaciones es el siguiente:

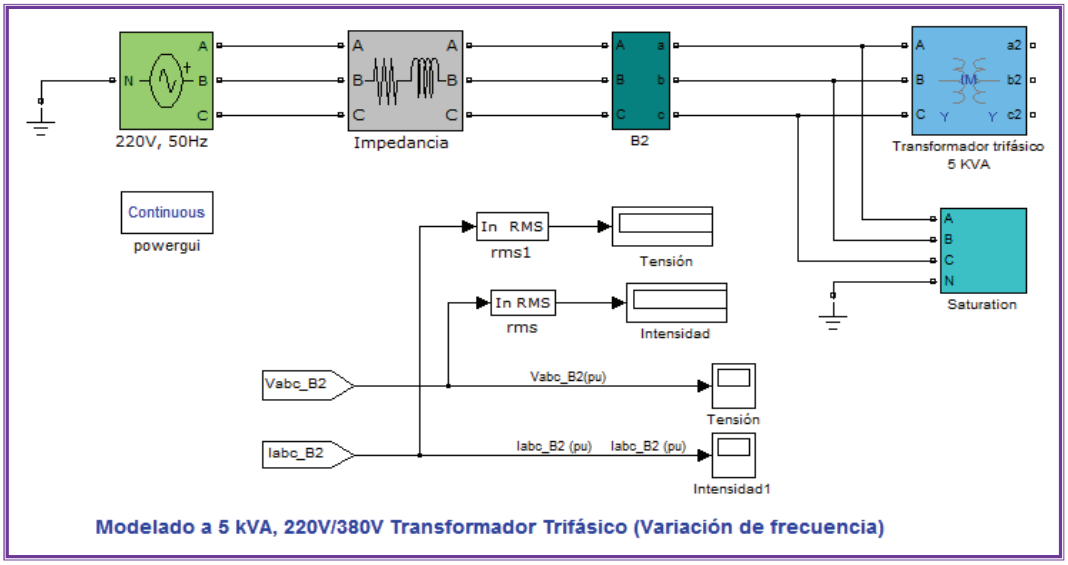


Ilustración 65: esquema de montaje para transitorio de sobre/subfrecuencia.

Como se indicó en capítulos anteriores, la intensidad de corriente que circula por el transformador varía de forma contraría entre las variaciones de tensión y de frecuencia, es decir, que un aumento de Tensión provoca una elevación de la intensidad de corriente y una disminución en el aumento de la frecuencia.

Esto es debido a que el aumento de la frecuencia provoca una disminución del flujo magnético de la máquina y viceversa, según podemos comprobar en la fórmula 66.

$$\Phi m = \frac{E1}{4.44 * f * N1}$$

(Fórmula 66)

En la situación de producirse un aumento de la frecuencia, habría por tanto una disminución del flujo que circula por el circuito magnético del transformador, y consecuencia de esto, se produciría una disminución de la corriente, tal y como se puede apreciar en la siguiente gráfica donde se ha aumentado la frecuencia en cuatro valores de: 50, 51, 52 y 53 Hercios en los tiempos de 0, 0.1, 0.2 y 0.3 segundos.

En el eje vertical se representa la intensidad de corriente y en el eje horizontal el tiempo.

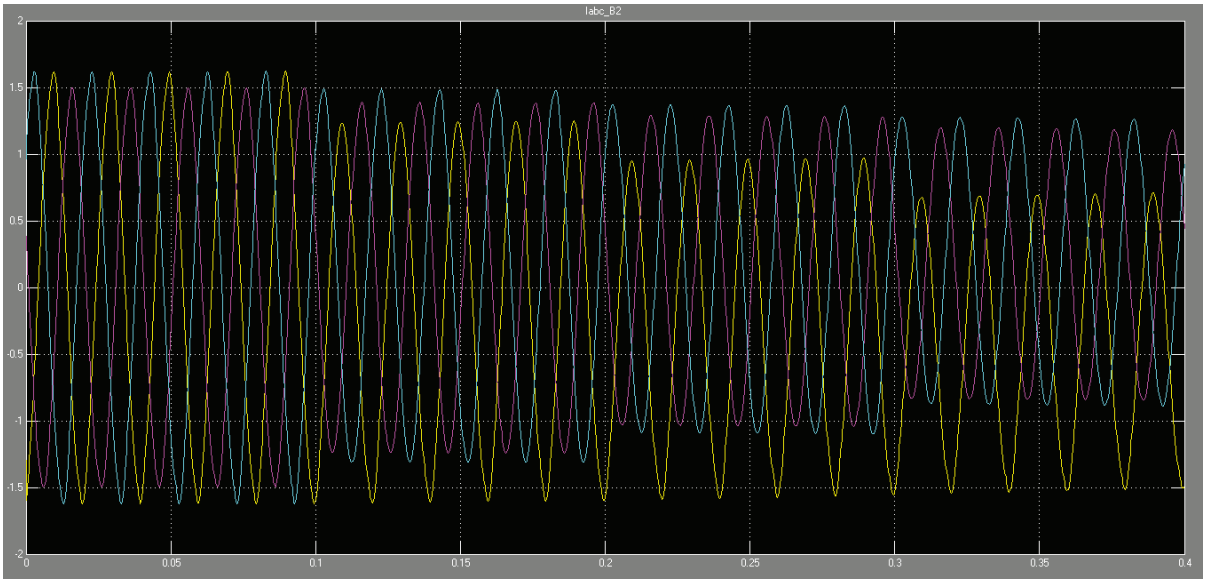


Ilustración 66: variación de la corriente con el aumento de la frecuencia

En el caso contrario, se ha realizado una disminución de la frecuencia. Este es el caso peligroso para el transformador ya que se produciría un aumento de la intensidad de la corriente. En este caso se ha indicado una disminución de: 50, 49, 48 y 47 Hercios en los tiempos de 0.1, 0.2, 0.3 y 0.4 segundos.

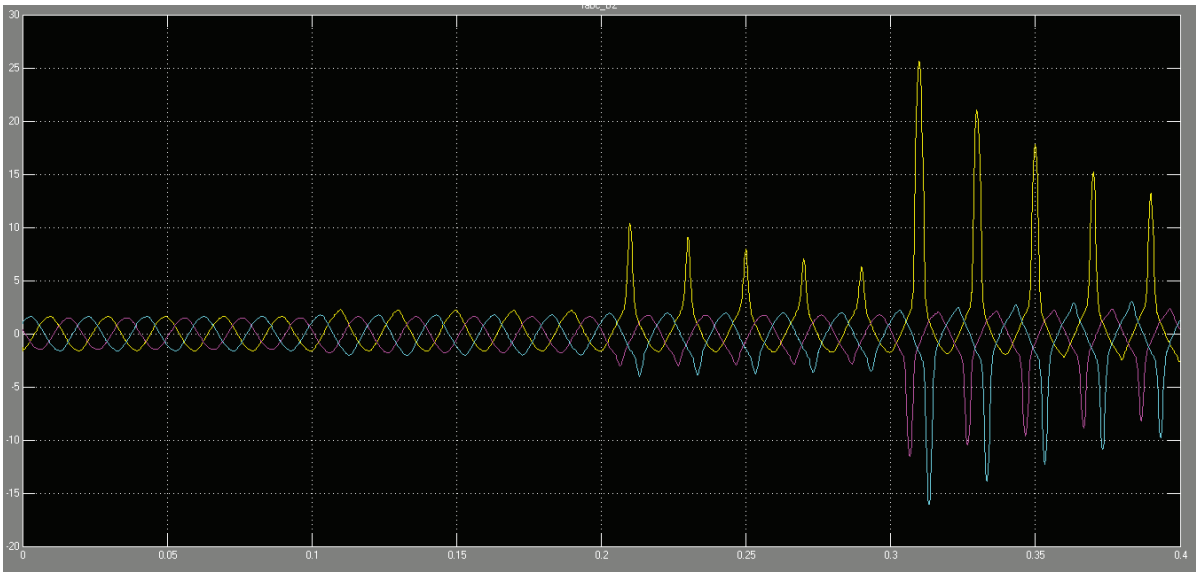


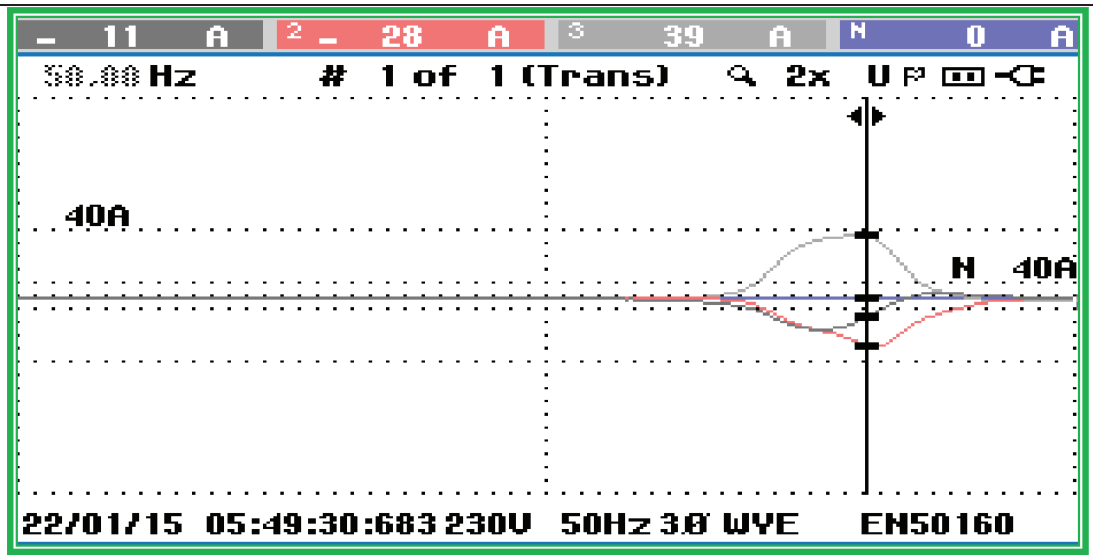
Ilustración 67: Variación de la corriente con la disminución de la frecuencia

8. COMPARATIVA ENTRE ENSAYO REAL Y SIMULACIÓN

Para poder establecer posibles diferencias o semejanzas entre los resultados obtenidos entre los ensayos al transformador real y las simulaciones, se procede a comparar los datos obtenidos. En primer lugar se mostrará ambas gráficas de la variación de las intensidades en el transitorio de conexión, para después hacerlo con el de cortocircuito y finalmente con el transitorio de sobreexcitación. El transitorio de sobrefrecuencia/subfrecuencia no es posible compararlo ya que el ensayo al transformador real no ha sido posible realizarlo por los motivos anteriormente expuestos.

Las gráficas del transitorio de conexión para comparar son:

ENSAYO REAL



SIMULACIÓN

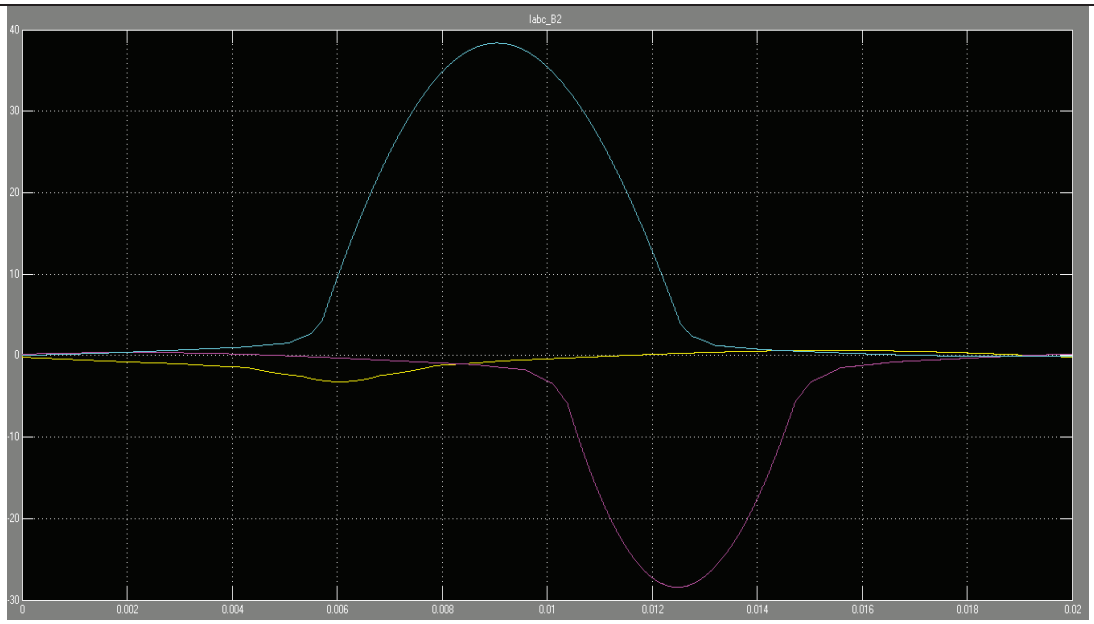


Ilustración 68: Comparativa de datos ensayo real-simulación transitorio conexión

En el ensayo del transformador real se ha alcanzado una intensidad de corriente máxima de 39 A en un tiempo de 7 milisegundos. En la simulación del mismo transitorio, la intensidad máxima alcanzada es de un valor de 38.3 A en un tiempo de 9 milisegundos.

El resto de intensidades máximas que se establece en el momento de la conexión para el resto de las fases son de 28 y 16 A en el ensayo al transformador real, y en la simulación es de 28.4 y 4 A.

Se observa como en el momento de la conexión existe una ligera diferencia con respecto al tiempo en el cual se establece las intensidades máximas para cada una de las fases, diferencia que corresponde a uno u dos milisegundos aproximadamente.

Para el transitorio de conexión extraemos los siguientes datos:

	ENSAYO REAL	SIMULACIÓN
Intensidades máximas	39 A – 28 A – 16 A	38.3 A – 28.4 A – 4 A
Tiempo máxima corriente	0.007 s	0.009 s
Semejanza forma de onda	Ligera diferencia (1-2ms)	

Tabla 5: valores de ensayo real y simulación para transitorio de conexión

Las gráficas correspondientes al transitorio de cortocircuito son:

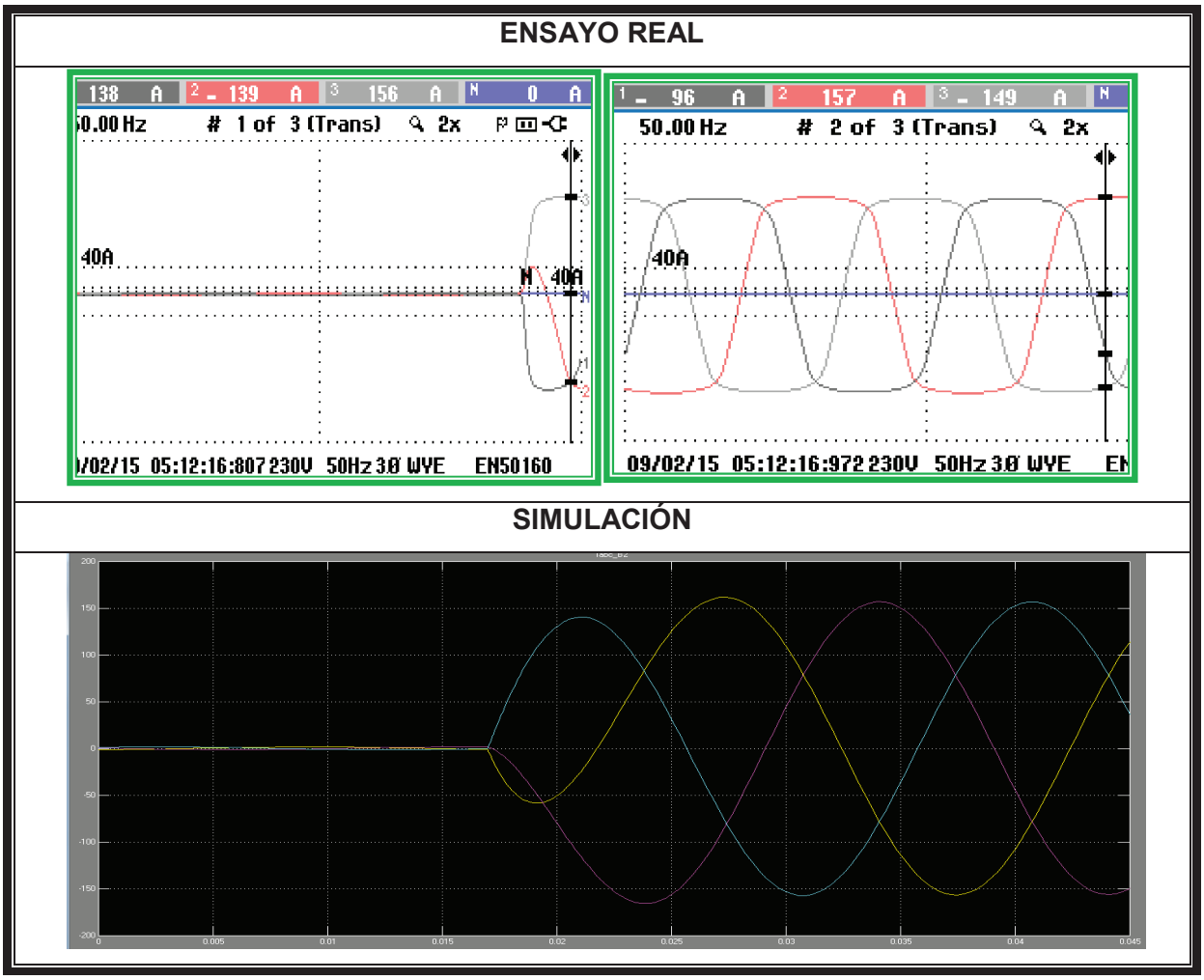


Ilustración 69: Comparativa ensayo real-simulación transitorio de cortocircuito

En el ensayo de cortocircuito del transformador real se extrae que la intensidad de corriente máxima alcanzada corresponde a un valor de 157 A, y esta es alcanzada en un tiempo aproximado de 16 milisegundos. En la simulación, la intensidad de corriente máxima es de 161 A y el tiempo que transcurre para llegar a este valor es de unos 14 milisegundos aproximadamente.

Se observa que desde el momento del inicio del cortocircuito hasta que este alcanza su valor máximo, existe semejanza entre la evolución de las formas de onda.

Para el transitorio de cortocircuito extraemos los siguientes datos:

	ENSAYO REAL	**SIMULACIÓN**
Intensidades máximas	157 A	161 A
Tiempo máxima corriente	16 ms	14 ms
Semejanza forma de onda	semejanza	

Tabla 6: valores de ensayo real y simulación para transitorio de cortocircuito

Para los transitorios de sobreexcitación y subexcitación procedemos a comparar las tablas extraídas de las respectivas pruebas.

ENSAYO REAL				
	TENSIÓN	INTENSIDAD	TENSIÓN	INTENSIDAD
	127	1,4	127	1,4
	140	2,3	120	1
	155	3,6	115	0,8
	170	5,2	110	0,6
	185	7,8	100	0,4
	200	12,5	90	0,3
	210	21,3	3,2	0
SIMULACIÓN				
	TENSIÓN	INTENSIDAD	TENSIÓN	INTENSIDAD
	127	1,42	127	1,42
	140	2,1	120	1,12
	155	3,4	115	0,87
	170	4,6	110	0,64
	185	7,3	100	0,45
	200	12,21	90	0,38
	210	20,5	3,2	0

Ilustración 70: Comparativa datos ensayo real-simulación transitorio de sobre/sub-tensión

En su comparación observamos que existe bastante similitud entre los datos extraídos en ambas pruebas. En los dos casos cuando existe un aumento de tensión, este corresponde con un aumento de la intensidad de corriente que circula por los devanados, de igual manera ocurre cuando se disminuye la tensión de alimentación, hecho que corresponde con una disminución de la intensidad de corriente.

9. CONCLUSIONES

Para poder establecer una serie de conclusiones, se procede a realizar previamente un análisis de la teoría sobre el funcionamiento del transformador de potencia y de los ensayos realizados al transformador real. También se recuperarán los datos extraídos de la comparativa entre los ensayos al transformador con los resultados de la simulación (apartado 8). Estos análisis conducirán a establecer las conclusiones que se irán enumerando de forma paulatina.

9.1. Aumento de la intensidad de corriente teórica-real

Se ha descrito en su apartado correspondiente y para cada uno de los transitorios, la variación que sufre la intensidad cuando el transformador está sometido a cada uno de los defectos de conexión, cortocircuito y sobreexcitación. A continuación los volvemos a recuperar y a compararlos con los ensayos realizados en el laboratorio:

- transitorio de conexión:

En teoría se describe que en el ensayo de conexión la intensidad de pico en el momento de la energización varía entre **10-20 veces** el valor de pico de la corriente asignada al transformador.

En el ensayo real, partiendo de una intensidad nominal primaria del transformador de 7.59 A, la intensidad pico alcanzada en el ensayo de conexión ha sido de 39 A. Esto manifiesta que durante el instante de conexión la intensidad de corriente supera **5.14 veces** la asignada a la máquina en ese instante.

- Transitorio de cortocircuito:

La intensidad de falta que puede ser alcanzada por el transformador es de 168 A, dato que se ha extraído a partir de la aplicación las fórmulas 26 y 32 de anteriores apartados:

$$\varepsilon_{cc} = \frac{V1cc}{V1n} * 100 \quad ; \quad I_{1falta} = \ln \frac{100}{ecc}$$

La aplicación de estas fórmulas da como resultado una tensión de cortocircuito del 4.5 % que origina una intensidad de falta teórica de **168 A.**

En el ensayo real la intensidad alcanzada ha sido de **157 A**. La diferencia entre el ensayo real y la teoría es de 11 A, es decir, una diferencia entorno al 6.5%.

- Transitorio de sobreexcitación

La intensidad de corriente que circula por los bobinados del transformador se eleva conforme se aumenta la tensión de alimentación tal y como se puede deducir de la fórmula 49 de apartados anteriores:

$$\Phi m = \frac{E1}{4.44 * f * N1}$$

En el ensayo real, tal y como se extrae de los valores recogidos en la tabla 02 también siguen esta tendencia.

PRIMERA CONCLUSIÓN: LIGERA DIFERENCIA ENTRE LOS VALORES TEÓRICOS Y REALES EN ALGUNOS TRANSITORIOS.

En el caso del transitorio de sobreexcitación se comprueba que siguen la misma tendencia que lo explicado en teoría, sin embargo, existe cierta diferencia en los valores obtenidos en el transitorio de conexión y de cortocircuito, especialmente el de conexión al ser la intensidad de energización 5.14 veces superior a la expuesta en teoría.

El efecto que los transitorios pueden ocasionar en un transformador se debe a diversos factores. Esta diferencia de valores puede ser motivada en primer lugar por el ángulo inicial de la señal de tensión y en segundo lugar por distintas características geométricas y magnéticas existentes entre un transformador industrial y el transformador utilizado en el laboratorio fabricado especialmente para docencia.

9.2. Variación de los datos ensayos real y simulación

En esta ocasión extraeremos una segunda conclusión a partir de la comparación entre los datos del ensayo al transformador real y los obtenidos de la simulación.

- Transitorio de conexión.

	ENSAYO REAL	SIMULACIÓN
Intensidades máximas	39 A – 28 A – 16 A	38.3 A – 28.4 A – 4 A
Tiempo máxima corriente	0.007 s	0.009 s
Semejanza forma de onda	Ligera diferencia (1-2ms)	

Tabla 7: valores de ensayo real y simulación para transitorio de conexión

- Transitorio de cortorcircuito.

	ENSAYO REAL	SIMULACIÓN
Intensidades máximas	157 A	161 A
Tiempo máxima corriente	16 ms	14 ms
Semejanza forma de onda	Existe semejanza	

Tabla 8: valores de ensayo real y simulación para transitorio de cortocircuito

- Transitorio de sobreexcitación.

	ENSAYO REAL		SIMULACIÓN	
	TENSIÓN	INTENSIDAD	TENSIÓN	INTENSIDAD
Variación de intensidades	127	1,4	127	1,42
	140	2,3	140	2,1
	155	3,6	155	3,4
	170	5,2	170	4,6
	185	7,8	185	7,3
	200	12,5	200	12,21
	210	21,3	210	20,5

Tabla 9: valores de ensayo real y simulación para transitorio de sobreexcitación

SECUNDA CONCLUSIÓN: VALORES MUY SIMILARES ENTRE ENSAYO REAL- SIMULACIÓN. Si comparamos los resultados de ambas pruebas podemos ver la pequeña diferencia que existe entre ambos. La diferencia entre la mayoría de estos valores se encuentra alrededor del 3%.

Una razón de esta mínima diferencia puede ser debida a la velocidad de cierre de los contactos existente entre el ensayo real y la simulación que se presupone inmediata. Sin embargo, en realidad estos contactos no cierran exactamente al mismo tiempo, lo que origina que las intensidades pico de cada fase sean ligeramente diferentes.

Además el efecto de cada transitorio también depende del valor instantáneo de la tensión en el momento en que se produce. Este instante es un valor aproximado sacado de la gráfica mostrada por el analizador de redes durante el ensayo real.

En último lugar, se ha introducido un valor aproximado que se debería sacar del ensayo de vacío en secuencia cero que no pudo realizarse tal y como se ha explicado en el apartado correspondiente. Este dato aproximado se presupone que prácticamente no afecta a los resultados finales aunque es una condición a tener en cuenta.

9.3. Resumen comparativa real-simulación

A partir del resultado de los datos de las intensidades máximas, el tiempo que transcurre para que alcance su máximo valor y de la forma de onda podemos extraer la tercera y cuarta conclusión.

TERCERA CONCLUSIÓN: HERRAMIENTA INFORMATICA DE GRAN UTILIDAD PARA SIMULACIONES. La gran semejanza existente entre los resultados de los ensayos al transformador real y las simulaciones realizadas por el programa Matlab/Simulink, conducen a admitir el gran valor que tiene su uso en la evaluación y análisis del comportamiento de los equipos en la realidad.

CUARTA CONCLUSIÓN: ANALISIS Y PROTECCIÓN DEL TRANSFORMADOR FUNDAMENTAL. El efecto que tiene la aparición de un transitorio en el transformador deriva en consecuencias muy graves que ocasionan daños muy perjudiciales en el funcionamiento del sistema.

En el caso del transitorio de conexión, si no se discrimina la falta correctamente, conduce a la actuación de la protección y corte innecesario del suministro de energía.

Para el resto de transitorios, sus consecuencias son entre otras: aumentos peligrosos de temperatura, deformación de devanados, ruido, vibraciones… Su protección y desconexión se hace esencial.

Actualmente existen diversos elementos y metodologías para actuar correctamente ante un transitorio. Como elementos a destacar encontramos: la protección diferencial, diversos tipos de relés automáticos, control del instante de conexión, relé buchholz…

10. BIBLIOGRAFIA

- Fraile Mora, Jesús. (2003). Máquinas eléctricas. Madrid. Mc Graw Hill.
- Ras Oliva, Enrique. (1991). Transforamdores de potencia, de medida y de protección. Barcelona. Marcombo, S.A.
- M.P. KOSTENCO, L.M. PIOTROVSKI. (1975). Máquinas eléctricas. Tomo III. Mir. Moscu. (traducido por Luis García Rodriguez).
- M. O. Oliveira, A.S. Bretas, O.E. Perrone, J.H. Reversat, H. E. Muñoz, R.S. Orellana Paucar. Principales características de la corriente inrush en transformadores.
- Jiménez. R, Esteban. Fenómenos transitórios asociados a la energización de un transformador. Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín.
- Schneider Electric España, S.A. (2007). El transforamador y su entorno, para una protección máxima. Barcelona.
- Solano Hernández, José Roberto. (2009). Proyecto eléctrico. Operación de transformadores de potencia en condiciones de cortocircuito. Universidad de Costa Rica.
- Rodriguez Pozueta, Miguel Angel. Regímenes transitorios de los Transformadores. Universidad de Cantabria.
- Ramos Gómez, Ángel. (2010). Determinación de la impedancia homopolar de un transformador trifásico. Prácticas de laboratorio. Madrid. Universidad Carlos III.
- H.Harlow, James. (2004). Electric Power Transformer engineering. EE. UU. CRCPRESS LLC.

11. LISTA DE NOMENGLATURA

H = intensidad del campo magnético (A*v/m)

N = número de espiras del bobinado

I = intensidad de corriente (A)

I1 = intensidad eficaz primaria

I2 = intensidad eficaz secundaria

Io = intensidad de vacío

I'_2 = intensidad secundaria reducida al primario

i'_2 = corriente suplementaria primaria

i_1 = corriente instantánea primaria

i_2 = corriente instantánea secundaria

i_0 = corriente instantánea de vacío

I1cc = intensidad de cortocircuito primaria

β = inducción en gausios

ϕ = flujo máximo en maxvelio

S = sección del circuito magnético

E = fuerza electomotriz eficaz (en voltios por dividir entre 10^8)

E1 = fuerza electromotriz eficaz primaria

E2 = fuerza electromotriz eficaz secundaria

e1= fuerza electromotriz primaria instantánea

e2 = fuerza electromotriz secundaria instántanea

N1 = número de vueltas bobinado primario

N2 = número de vueltas bobinado secundario

f = frecuencia

m = relación de transformación

v1 = tensión primaria de entrada

v2 = tensión secundaria de salida

R1 = resistencia primaria

R2 = resistencia secundaria

L1 = coeficiente de autoinducción primario

L2 = coeficiente de autoindición secundario

Lb = longitud de la bobina (m)

ϕm = flujo máximo que circula por el circuito magnético

X1 = reactancia primaria

X2 = reactancia secundaria

E'_2 = fuerza electromotriz secundaria reducia al primario

V'2 = tensión secundaria reducida al primario

$V'R_2$ = caída de tensión en resistencia reducida al primario

$V'X_2$ = caídas de tensión en reactancia reducida al primario

Z'_2 = impedancia secundaria reducida al primario

R'_2 = resistencia secundaria reducida al primario

X'_2 = reactancia secundaria reducida al primario

R_{cc} = resistencia de cortocircuito

X_{cc} = reactancia de cortocircuito

P_o = pérdidas de vacío

P_{FE} = pérdidas en el hierro

V_{1n} = Tensión nominal primaria de entrada

I_{FE} = intensidad de pérdidas en el hierro

Iμ = intensidad de magnetización

R_{FE} = resistencia de pérdidas en hierro

$X\mu$ = reactancia de magnetización

Pcc = potencia de pérdidas en el cobre

V_{1cc} = Tensión de cortocircuito primaria

I_{1n} = intensidad nominal primaria

$\cos\varphi_{cc}$ = factor de potencia en cortocircuito

V_{RCC} = caida de tensión en resistencia de cortocircuito

V_{XCC} = caida de tensión en reactancia de cortocircuito

ε_{cc} = caida de tensión porcentual (tensión de cortocircuito)

ε_{Rcc} = caida de tensión porcentual en resistencia de cortocircuito

ε_{Xcc} = caida de tensión porcentual en reactancia de cortocircuito

Ub = tensión aplicada a la bobina

Um = tensión máxima

ω = velocidad angular

t = tiempo

ϕr = flujo residual

ϕp = flujo permanente

Φt = flujo transitorio

θ = ángulo de desfase tensión-intensidad

Lcc = inductancia de cortocircuito

C = constante

τcc = constante de tiempo

Ichoque = intensidad de choque

V´ = velocidad de onda

L = inductacia por unidad de longitud de la línea

C1 = capacitancia por unidad de longitud de la línea

12. ANEXOS

A continuación se presenta de forma breve los resultados de la simulación de los transitorios tratados en el presente trabajo pero con la introducción de algunas modificaciones en el esquema de conexiones, como por ejemplo, la incorporación de una carga en el secundario del transformador.

Estos anexos se adjuntan al trabajo fin de grado a título informativo y como posibles variaciones que se podrían presentar en el origen de un transitorio, y sus diferencias con respecto al transformador cuando trabaja en vacío.

- Ensayo de conexión con carga de 4 KVA.

Para la realización de este ensayo se ha añadido una carga de 4 KVA al esquema de empleado anteriormente para el mismo transitorio, es decir, se alimenta a la tensión de 380 V, con tensión secundaria de 220 V. La carga es inductiva con cos φ = 0.9.

El esquema indicado se muestra seguidamente:

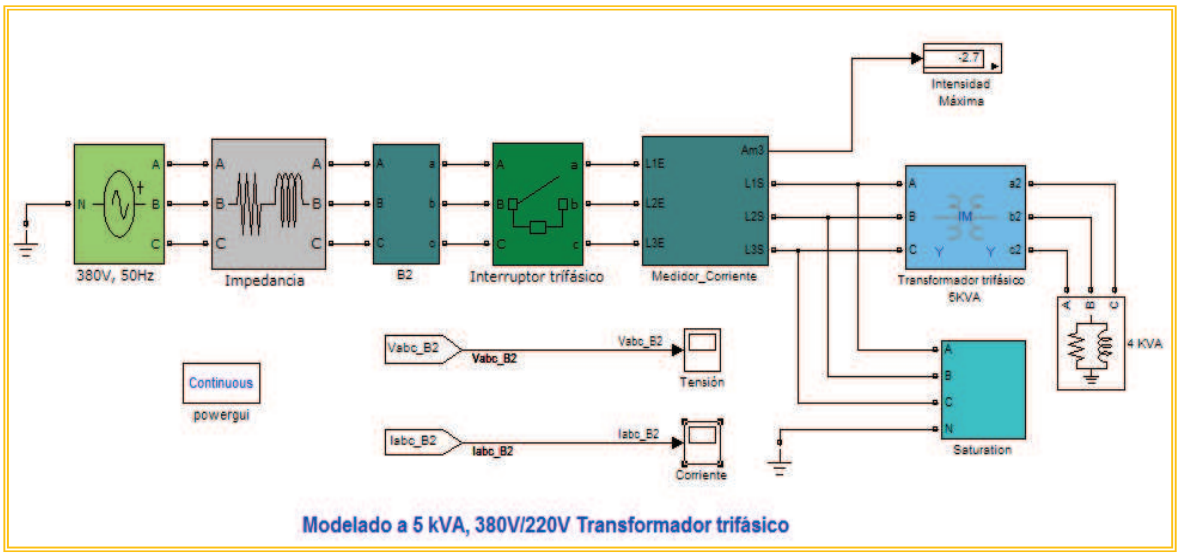


Ilustración 71: transitorio de conexión con carga de 4KVA

Al igual que en el transitorio sin carga, se puede apreciar el pico tan significativo que ocasionan las corrientes en el momento de la conexión y como esta va decreciendo en poco tiempo hasta llegar a los valores correspondientes. El tiempo aproximado de duración del transitorio es de 0.3 – 0.4 segundos y el pico máximo se obtiene entorno a los 0.0088 segundos. Es decir, el tiempo de duración del transitorio es muy parecido al que ocurría sin carga, sin embargo, el pico máximo en esta ocasión se ha obtenido en un tiempo algo inferior. En una segunda gráfica se representa únicamente los picos de corriente más elevados que se producen en transformador.

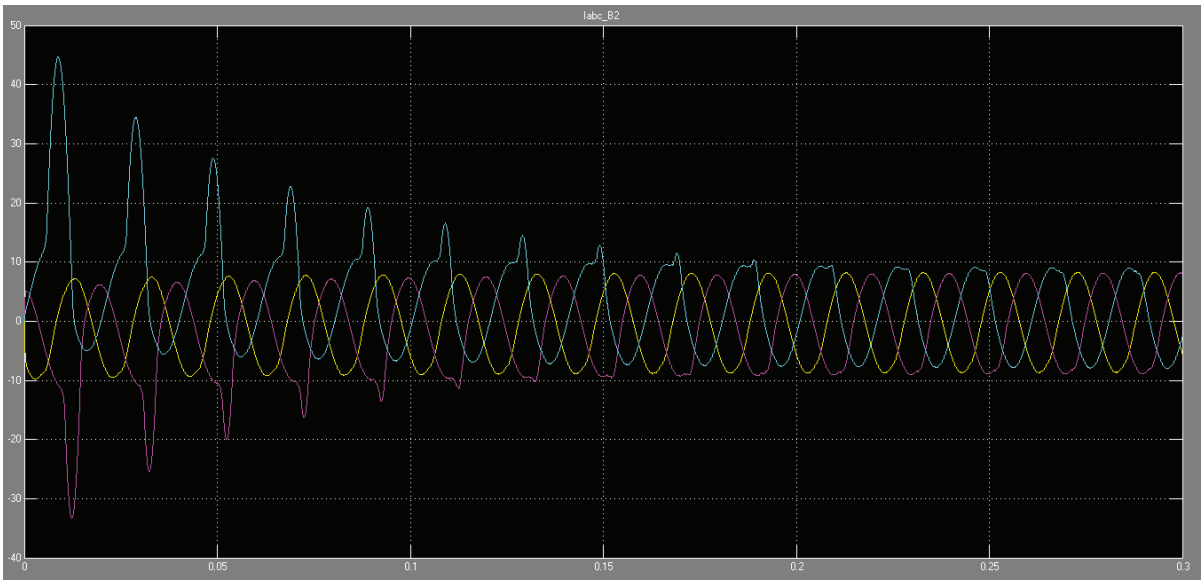


Ilustración 72: intensidad de corriente en el instante de conexión con carga de 4KVA

El pico de la intensidad de corriente más elevada que circula por un devanado del transformador es de valor 44.6 A. Por el resto de devanados tienen que soportar inicialmente un pico de corriente de 33.4 A y de 10 A aproximadamente.

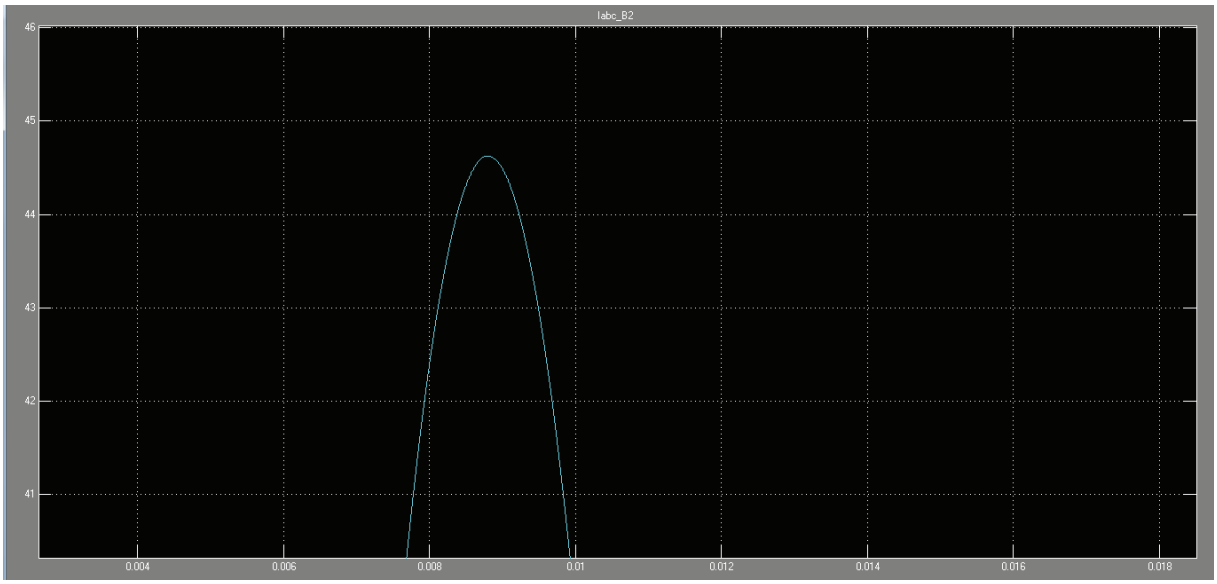


Ilustración 73: Valor máximo de la intensidad de corriente con carga de 4KVA

- Ensayo de conexión con carga de 5 KVA.

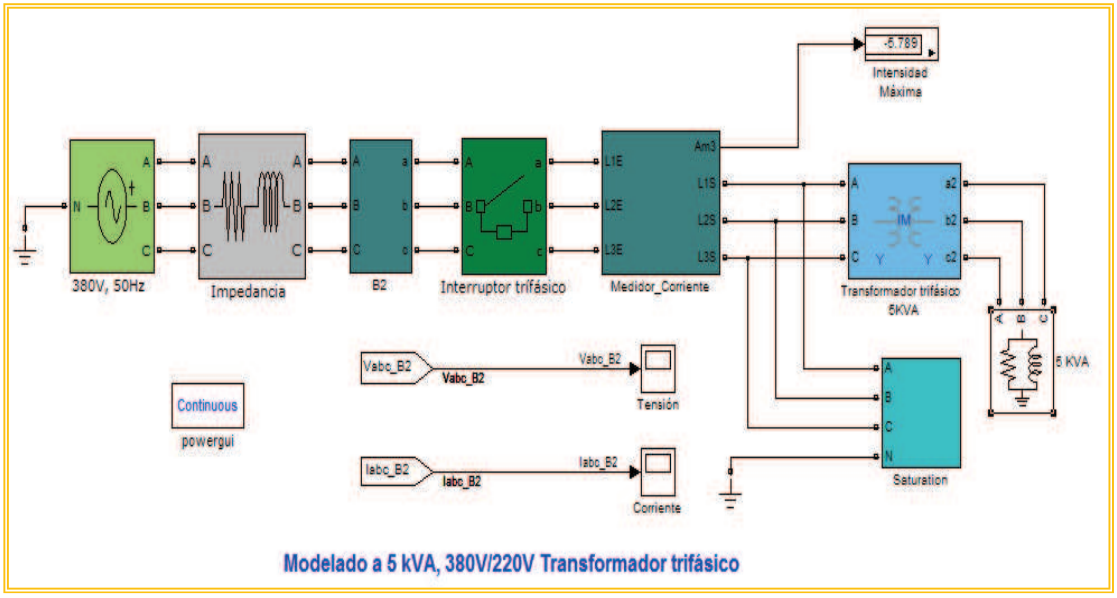


Ilustración 74: esquema para transitorio de conexión con carga de 5KVA

En esta ocasión, el tiempo aproximado de duración del transitorio sigue siendo 0.3 – 0.4 segundos y el pico máximo se obtiene entorno a los 0.0088 segundos. Es decir, semejante al caso anterior.

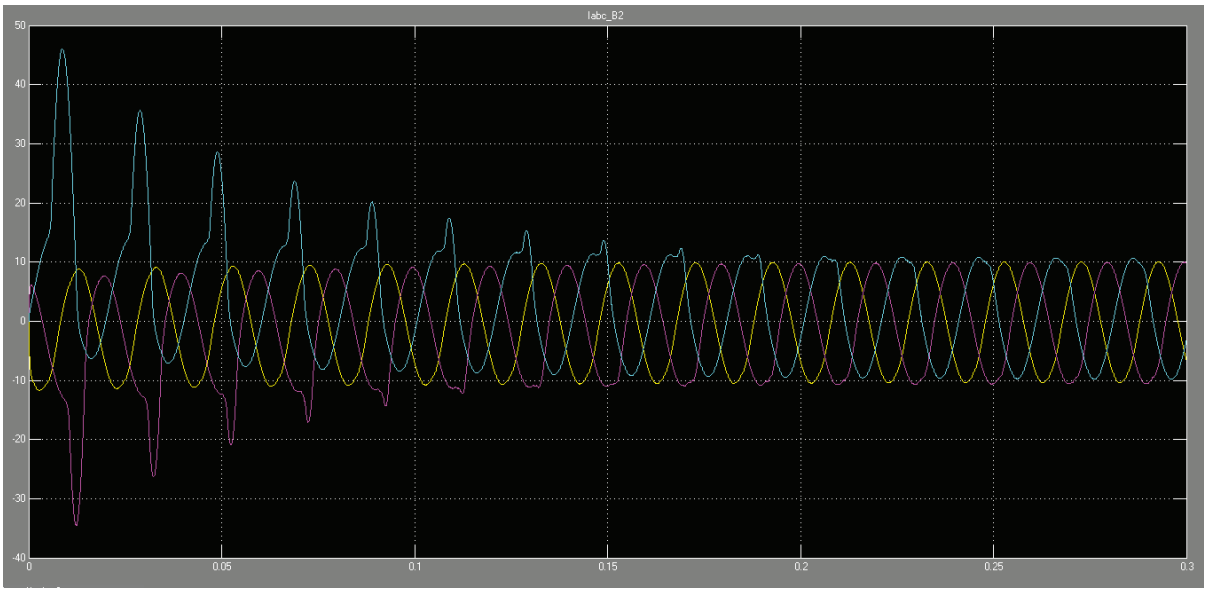


Ilustración 75: Ondas de la intensidad de corriente con carga de 5KVA

El pico de la intensidad de corriente más elevada que circula por un devanado del transformador es de valor 46.1 A. Por el resto de devanados tienen que soportar inicialmente un pico de corriente de 34.5 A y de 11.4 A.

- Ensayo de cortocircuito trifásico con carga de 5 KVA.

El transformador con conexión Y-Y alimenta a una carga de 5 KVA y cos φ = 0.9 a una tensión de 380 V. El primario del transformador es alimentado a la tensión de 220V. El esquema de montaje es el siguiente:

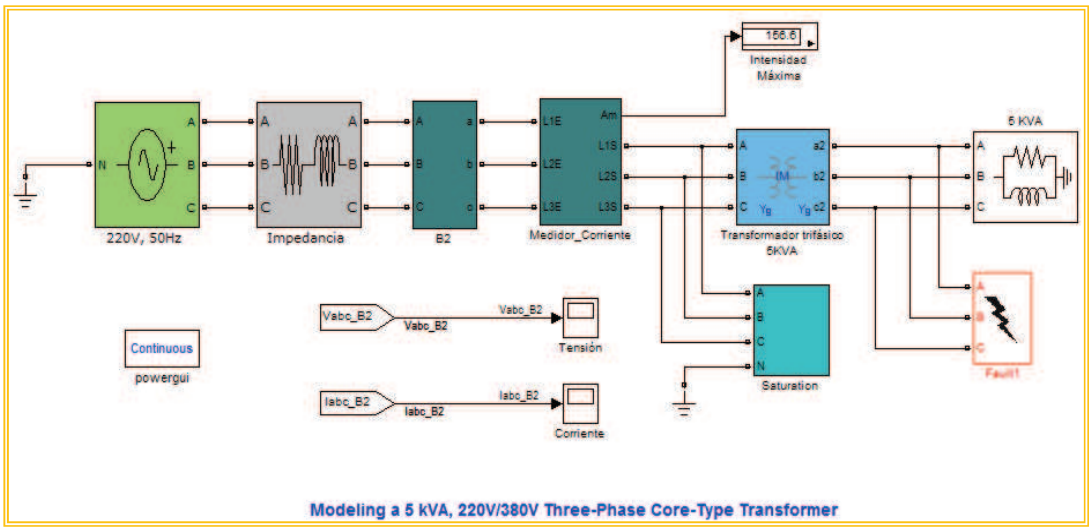


Ilustración 76: esquema para transitorio de cortocircuito con carga de 5KVA

El momento del cortocircuito es producido a los 0.017 segundos. A partir de este instante y después de un tiempo muy breve del orden de milisegundos se alcanza la intensidad máxima de cortocircuito de 161 A, es decir, similar a la alcanzada cuando el transformador trabajaba en vacío.

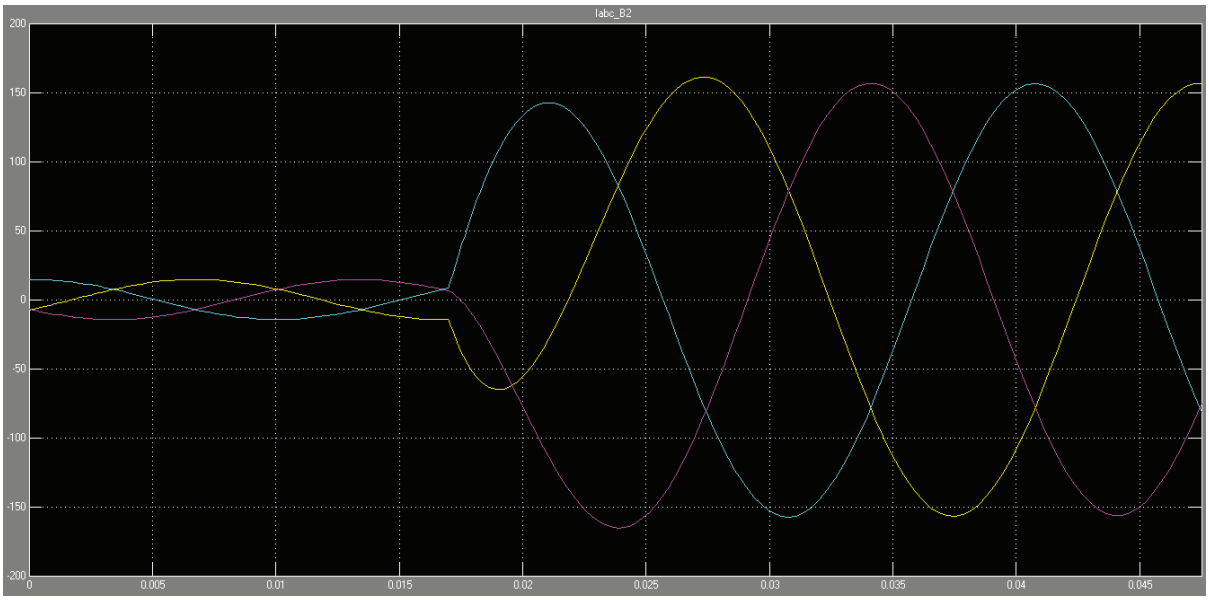


Ilustración 77: ondas de la intensidad de la corriente en cortocircuito trifásico con carga de 5KVA

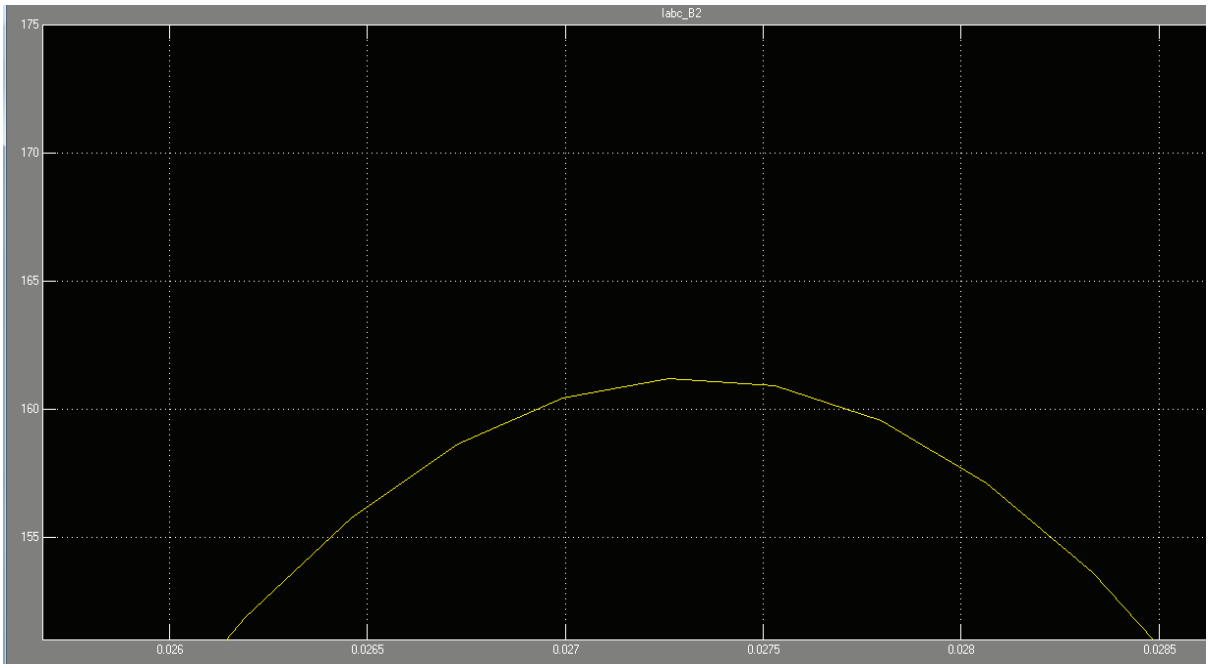


Ilustración 78: valor máximo alcanzado en cortocircuito trifásico con carga de 5KVA

- Ensayo de cortocircuito bifásico con carga de 5 KVA.

A partir de un esquema similar al anterior, se ha procedido a simular un cortocircuito bifásico. Este defecto se produce a los 0.017segundos del inicio de conexión y en un tiempo muy breve del orden de milisegundos se registra una intensidad máxima de 157 A. Esta intensidad se registra en las fases que presentan el cortocircuito.

En este defecto, si comparamos las intensidades máximas con respecto al cortocircuito trifásico, podemos comprobar que en esta ocasión su valor de intensidad máxima es algo inferior.

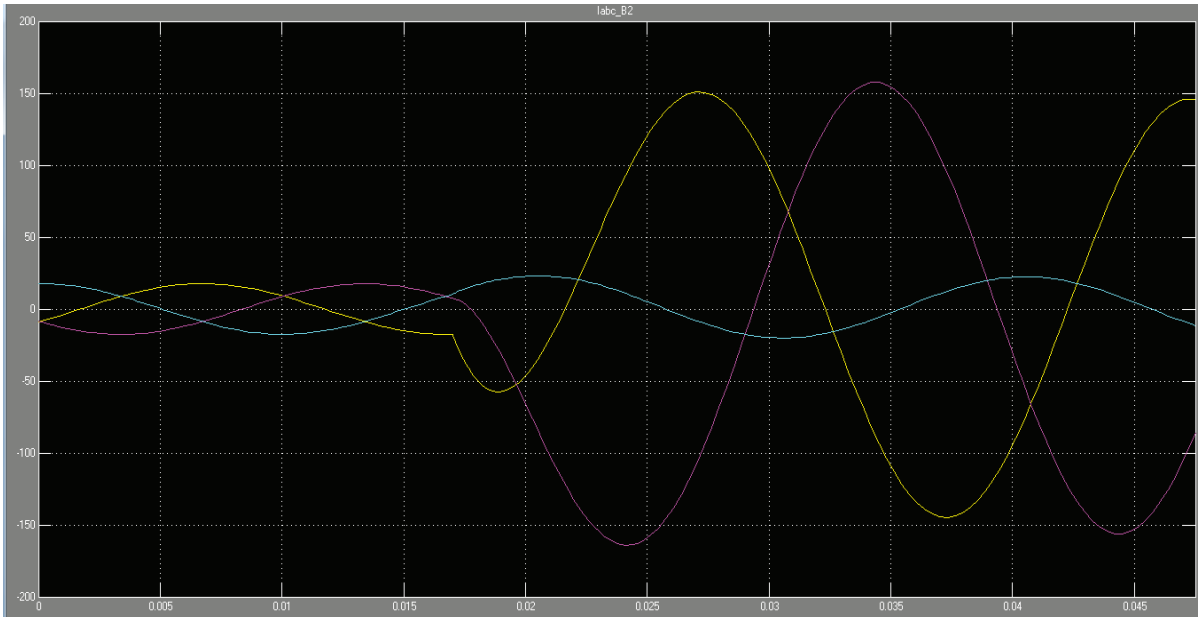


Ilustración 79: ondas de intensidad de corriente en cortocircuito bifásico con carga de 5KVA

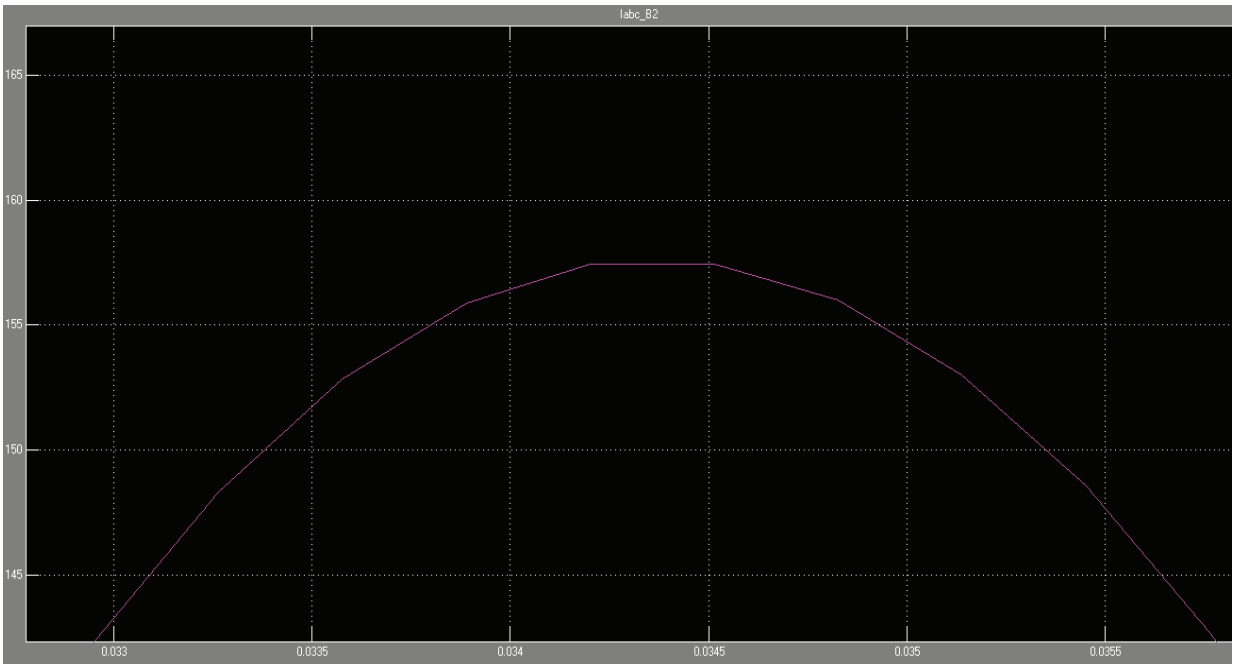


Ilustración 80: Valor máximo de la intensidad de corriente en cortocircuito bifásico con carga de 5KVA

- Ensayo de cortocircuito fase-neutro con carga de 5 KVA.

Al igual que en las simulaciones anteriores, se parte del mismo esquema de montaje pero con las modificaciones necesarias para simular un cortocircuito fase-neutro. A partir de los 0.017 segundos, que es el instante en el que se produce el cortocircuito, se registra en la fase del defecto una intensidad máxima de 150 A.

Al comparar el valor de intensidad máxima en este defecto con los cortocircuitos trifásicos y bifásicos, podemos comprobar nuevamente que en esta ocasión el valor máximo se reduce nuevamente.

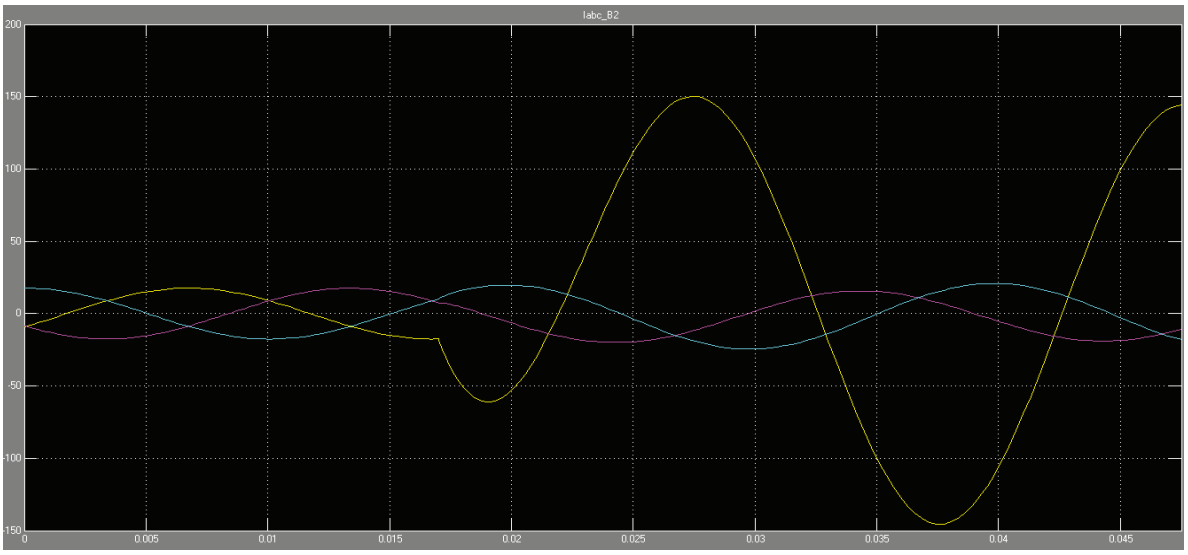


Ilustración 81: forma de onda de la intensidad de corriente en cortocircuito fase-neutro con carga de 5KVA

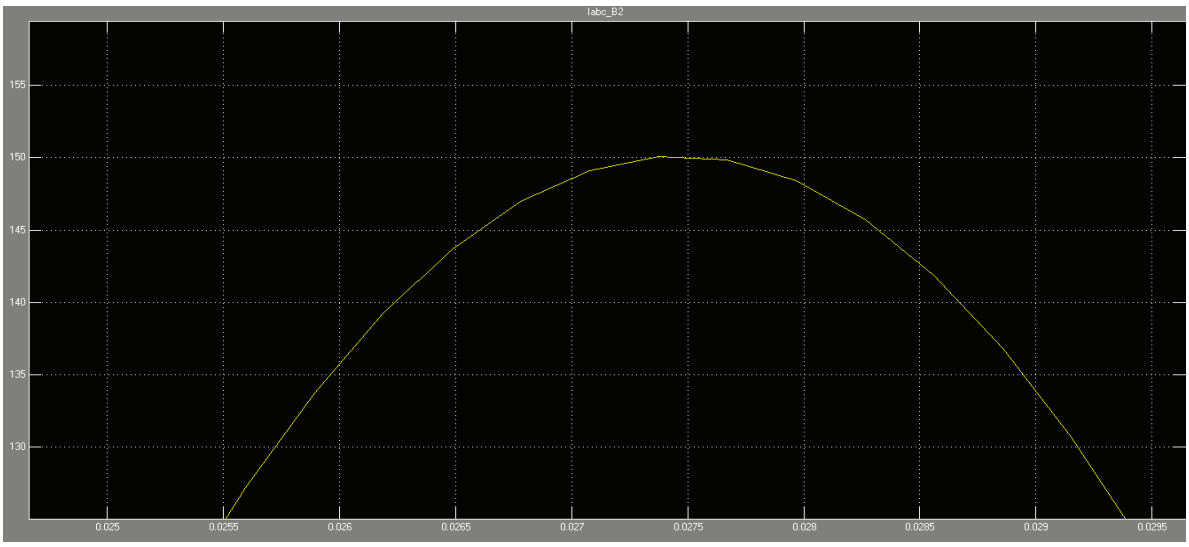


Ilustración 82: valor máximo de la intensidad de corriente en cortocircuito fase-neutro con carga de 5 KVA

- Ensayo de sobretensión con carga de 5 KVA.

Para la realización de este ensayo, se ha mantenido el esquema de montaje mostrado en el transitorio sin carga añadiéndole una carga de 5 KVA con cos φ =0.9. Por tanto, la tensión de referencia será de 127 V y a partir de esta se irá aumentando y disminuyendo su valor. La conexión utilizada es Δ-Y y el esquema resultante es el mostrado a continuación:

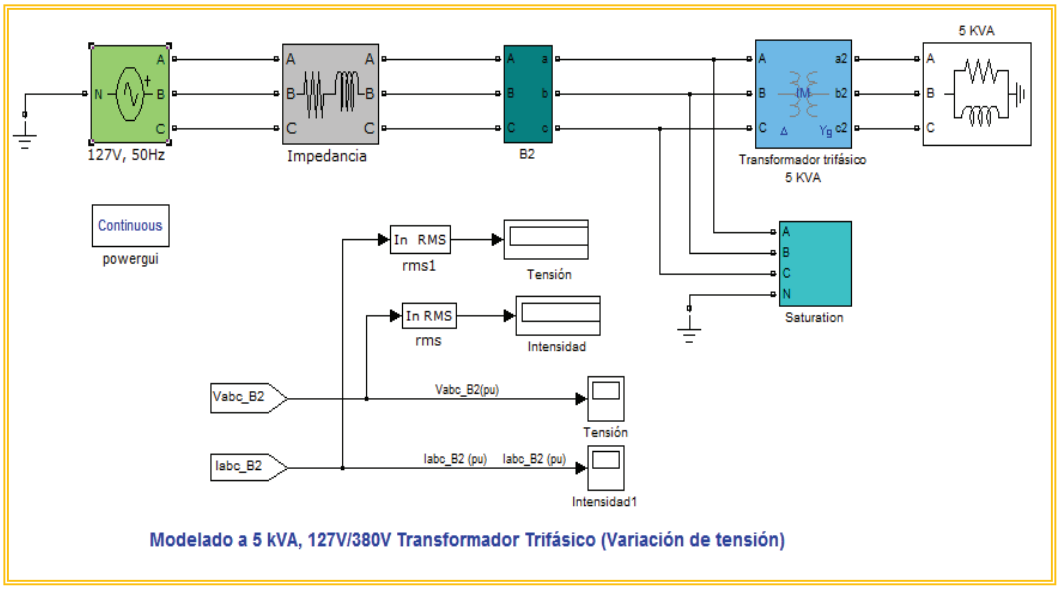


Ilustración 83: esquema para transitorio de sobre-tensión con carga de 5KVA

Los valores de la intensidad de corriente tomados a partir de la variación de tensión son recogidos en la siguiente tabla:

TENSIÓN	INTENSIDAD	TENSIÓN	INTENSIDAD
127	22,19	127	22,19
140	32,81	120	17,50
155	53,13	115	13,59
170	71,88	110	10,00
185	114,06	100	7,03
200	190,78	90	5,94
210	320,31	3,2	0,00

Tabla 10: valores recogidos de la simulación del transitorio de sobretensión/subtensión

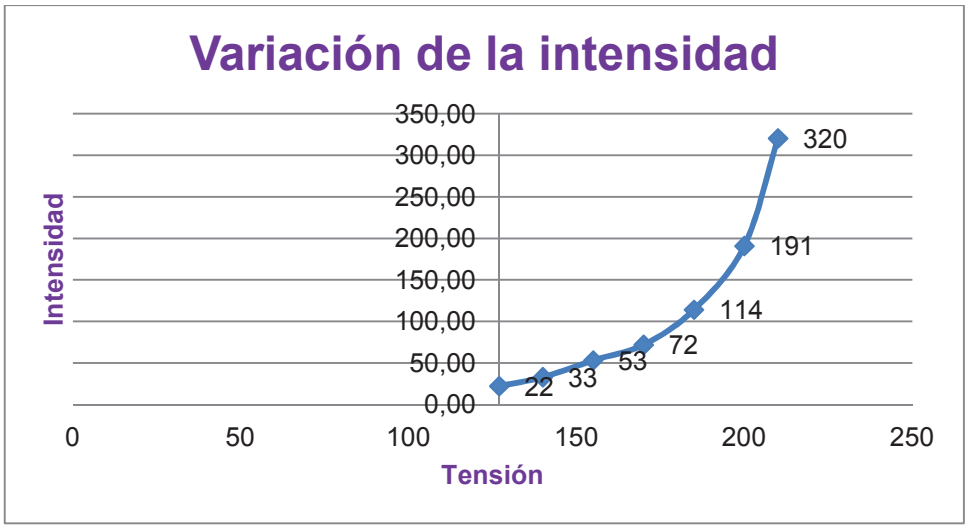


Ilustración 84: Variación de la intensidad de corriente con sobre-tensión con carga de 5KVA

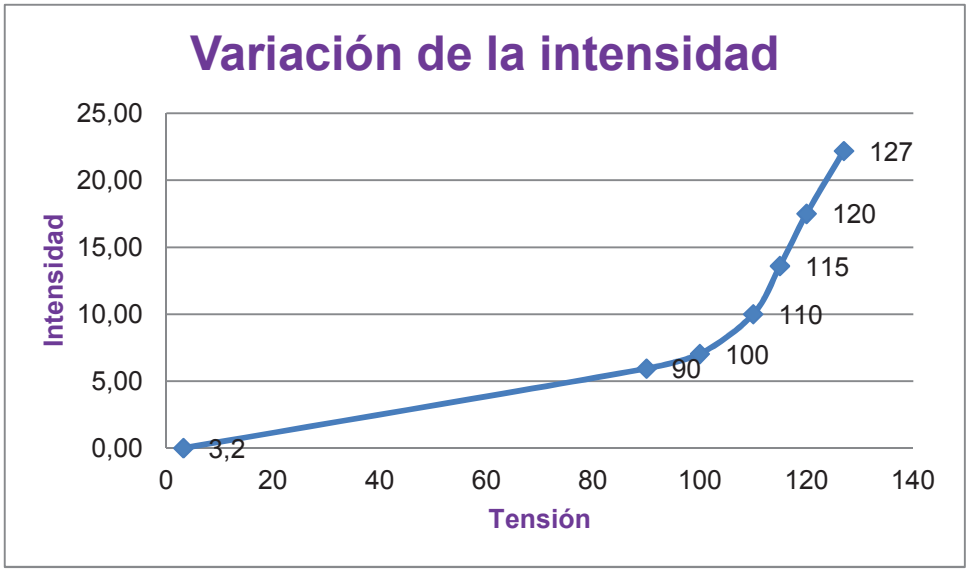


Ilustración 85: Variación de la intensidad de corriente con sub-tensión con carga de 5KVA

De igual forma que en el ensayo con el transformador en vacío, los valores de la intensidad de corriente se incrementa conforme se eleva la tensión de entrada. Estas variaciones serán más acusadas cuando la tensión entre en el tramo que corresponde al codo de saturación.

El transformador tiene conectada una carga de 5 KVA y por tanto está trabajando a plena carga. Los valores con respecto a los resultados con el transformador en vacío son muy superiores tal y como muestran las ilustraciones 62 y 63 del apartado de simulaciones.