UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

Área de Energía, Industrias y Recursos Naturales no Renovables

INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

TESIS DE GRADO

""Análisis del comportamiento eléctrico de transformadores de distribución en situaciones especiales"

AUTOR: Lauro Iván Larreátegui Moreno.

DIRECTOR: Ing. Daniel Mahauad Ortega

Loja - Ecuador

2005

“ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO ELÉCTRICO DE TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN EN SITUACIONES ESPECIALES”

POR: Lauro Iván Larreátegui Moreno

Ing. Daniel Mahauad Ortega.

CERTIFICO:

Que el señor Lauro Iván Larreátegui Moreno, egresado de la carrera de Ingeniería electromecánica desarrolló el trabajo de investigación sobre el tema: **"Análisis del comportamiento eléctrico de transformadores de distribución en situaciones especiales"** La misma que ha sido revisada en forma apropiada cumpliendo con las normas generales para la graduación en la Universidad Nacional de Loja para lo cual autorizo su presentación.

Loja, 2005-03-16

Ing. Daniel Mahauad Ortega
DIRECTOR DE TESIS

DECLARACIÓN DE AUTOR:

Yo, Lauro Iván Larreátegui Moreno, autor de este trabajo de tesis, certifico la propiedad intelectual a favor de la Universidad Nacional de Loja, la cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad académica que estime conveniente.

Lauro Iván Larreátegui Moreno

Autor

DEDICATORIA

Dedico este trabajo con mucho cariño y amor, a mis padres Lauro y Myriam, los cuales me inculcaron valores, me apoyaron siempre y han hecho de mi una persona de bien. A mis hermanas Diana y Karen, por su apoyo incondicional y su sincero cariño y a mi sobrinito Luis Emilio por llevar a nuestro hogar toda la felicidad; siendo por ellos especialmente que yo haya llegado hasta aquí.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco especialmente a Dios por brindarme salud, voluntad y decisión para realizar el presente trabajo.

Al M Sc Ignacio Romero Ruedas y a la Ing. Idelín Pérez Labañino, tutores de mi tesis, los cuales me brindaron todo su apoyo, y voluntad para la realización de este trabajo.

Al Ing. Daniel Mahuad por guiarme hacia la realización de mi trabajo de tesis.

A la Universidad Nacional de Loja y al Instituto Minero Metalúrgico Dr. Antonio Núñez Jiménez por haberme dado la oportunidad de realizar mi trabajo.

PENSAMIENTO

"Presencia de ánimo y valor en la adversidad valen para conquistar el éxito más que un ejército".

John Dryden

ÍNDICE

Pág.

Dedicatoria..... II

Agradecimiento..... III

Pensamiento..... IV

Resumen..... V

Summary..... VI

INTRODUCCIÓN..... 3

Objetivos de la investigación..... 4

Problema..... 4

Hipótesis..... 4

Tareas a desarrollar..... 5

CAPITULO I: ***Aspectos generales sobre transformadores***..... 6

1.1. Estructura y funcionamiento..... 6

1.1.1. Concepto..... 6

1.1.2. Principio y funcionamiento..... 9

1.2. Circuito equivalente del transformador..... 10

1.2.1. Relaciones Eléctricas en el Transformador Ideal..... 10

1.2.2. Reducción del enrollado secundario al primario..... 12

1.2.3. Circuito equivalente considerando las pérdidas magnéticas..... 15

1.3. Determinación experimental de los parámetros del circuito equivalente.. 19

1.3.1. Ensayo de vacío..... 19

1.3.2. Ensayo de cortocircuito..... 23

1.4. Trabajo del transformador con carga..... 28

1.4.1. Condiciones físicas de trabajo, diagrama fasorial y energético..... 28

1.4.2. Diagrama energético del transformador..... 33

CAPITULO II: ***Características de explotación del transformador***..... 36

2.1. Variación de voltaje del transformador..... 36

2.2. Regulación de voltaje del transformador..... 39

2.3. Eficiencia del transformador..... 44

2.4. Transformadores en paralelo..... 49
2.4.1. Condición de igualdad del grupo de conexión de los enrollados... 50
2.4.2. Condición de relación de transformación igual..... 52
2.4.3. Condición de igualdad de los voltajes de cortocircuito..... 53
2.5. Selección de transformadores teniendo en cuenta la sobrecarga..... 57
2.6. Trabajo de transformadores de acuerdo a la altura..... 59
2.7. Régimen anormal de alimentación..... 60
CAPITULO III: ***Análisis del comportamiento del transformador con Matlab.*** 66
3.1. Puntualidades..... 66
3.2. Fundamentos internos del FUNCTRANS..... 74
3.3. Ejemplos de aplicación de transformadores y sus explicaciones..... 76
3.3.1. Diferentes tensiones de cortocircuito..... 76
3.3.2. Diferentes tensiones en el secundario..... 77
3.4. Valoración Técnica, Económica y Social..... 77
3.4.1. Técnica..... 77
3.4.2. Económica..... 78
3.4.3. Social..... 78
CONCLUSIONES..... 79
RECOMENDACIONES..... 80
BIBLIOGRAFÍA..... 81
ANEXOS..... 82

.

RESUMEN

El presente trabajo de diploma está estructurado en tres partes que se describen a continuación:

En la primera parte**, Aspectos generales de los transformadores,** se abordan los aspectos fundamentales de la estructura y funcionamiento del transformador así como los modelos matemáticos y físicos en régimen estable del mismo. Se hace referencia específicamente al circuito equivalente, la determinación experimental de los parámetros y se describe el trabajo del transformador con carga a través del diagrama energético. En una segunda parte, **Características de explotación del transformador,** se hace una descripción teórica de algunos aspectos importantes de los transformadores cuando operan como elemento de un sistema eléctrico o prestando servicio, tales como: variación y regulación de voltaje, eficiencia y funcionamiento en paralelo de dos transformadores. Por último, **Aplicación con MATLAB**, se realiza un software en MATLAB.6.5 denominado FUNCTRANS, que implementa los aspectos anteriores con fines de investigación de forma compacta, el mismo permite integrar la solución de diferentes situaciones a casos particulares de transformadores, que son o serán utilizado en diferentes partes de un sistema.

SUMMARY

The present diploma work is structured in three parts that are described next:

In the first part, **General aspects of the transformers**, the fundamental aspects of the structure and operation of the transformer are approached as well as the mathematical and physical models in stable regime of the same one. Reference is made specifically to the equivalent circuit, the experimental determination of the parameters and the work of the transformer is described with load through the energy diagram. In a second part, **Characteristic of exploitation of the transformer**, a theoretical description of some important aspects of the transformers is made when they operate as element of an electric system or lending service, such as: variation and voltage regulation, efficiency and operation in parallel of two transformers. Lastly, **Application with MATLAB**, is carried out to software in denominated MATLAB.6.5 FUNCTRANS that implements the aspects previous with ends of investigation in to compact way, the same one it allows to is integrated the solution of different situations to you marry peculiar of transformers that it plows or they will be used in different parts of to system.

INTRODUCCIÓN

En el mundo actual en donde nos encontramos inmersos, la electricidad juega un papel muy importante y necesario por lo que nos exige perfeccionar y mejorar éste servicio. La electricidad es el eje en el cual gira el desarrollo de nuestra sociedad y sin ésta no existe progreso alguno.

En el proceso de generación de la electricidad, llámese ésta hidráulica, térmica ó nuclear, hasta su transmisión y distribución a cada uno de los abonados, es decir hasta el consumo de energía generada, se puede observar que se emplea diferentes tensiones ó voltajes. Los elementos que desempeñan la función de hacer variar las tensiones, reduciendo ó elevando el valor de los mismos, reciben el nombre de transformadores.

Los transformadores son ampliamente utilizados en los sistemas eléctricos desde la generación hasta el consumo de la energía eléctrica. Los transformadores representan una parte sustancial del total de las inversiones que se realizan en los sistemas de electrificación. El transformador es probablemente el más eficaz aparato eléctrico para transferir energía utilizada por el hombre.

Aunque aparece la teoría general del transformador, existen muchos aspectos prácticos que dificultan su aplicación, en este trabajo se pretende dar solución a determinados aspectos, tales como, rendimiento y pérdidas en el transformador, funcionamiento en paralelo de los transformadores, funcionamiento para diferentes cargas, la selección de un sistema de alimentación y sobrecargas; puesto que permitan integrar solución y rapidez en cálculo, empleando expresiones generales.

Por todo esto se ha hecho necesario buscar un método que permita realizar un análisis del mismo, para su eficaz funcionamiento. Para esto se ha recurrido al programa MATLAB.6.5, en el cual se ha creado un software llamado FUNCTRANS. Esto permite definir el siguiente problema, hipótesis y objetivo.

PROBLEMA

El desconocimiento de como se comporta el transformador cuando se encuentra en situaciones especiales, tales como, el rendimiento y pérdidas, el funcionamiento en paralelo, el funcionamiento para diferentes cargas, la selección de un sistema de alimentación y sobrecargas; no permite tomar las medidas necesarias para resolver determinados aspectos que puedan presentarse en este campo.

PROBLEMAS EPECÍFICOS

- Bajo rendimiento y pérdidas en el transformador.
- Deficiente funcionamiento en paralelo de los transformadores.
- Funcionamiento para diferentes cargas.
- Mala selección de un sistema de alimentación.
- Sobrecargas.

HIPÓTESIS.

La aplicación del método propuesto unido al software FUNCTRANS permitirá prever y determinar el comportamiento del transformador ante las citadas situaciones especiales.

HIPÓTESIS ESPECÍFICAS.

- Determinar las pérdidas en el transformador permite tomar decisiones en aras de mejorar su rendimiento.
- Determinar la distribución de carga de los transformadores en paralelo permite la utilización eficiente de su capacidad.

OBJETIVO

Establecer un método que permita determinar y analizar el funcionamiento del transformador en tales situaciones especiales.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Determinar las pérdidas en los devanados y núcleo del transformador
- Determinar la distribución de carga y su funcionamiento eficiente.
- Determinar el comportamiento para diferentes cargas.

TAREAS A DESARROLLAR

- Hacer una revisión bibliográfica sobre transformadores.
- Realizar los ensayos de vacío y cortocircuito para la determinación de los parámetros del circuito equivalente.
- Aplicación en MATLAB.6.5 de los parámetros obtenidos junto a otros para la creación del programa FUNCTRANS.
- Análisis en el programa, aplicando diversas situaciones al o los transformadores, con el propósito de apuntar a una correcta selección y adecuado funcionamiento.

CAPITULO I: Aspectos generales sobre transformadores

Para iniciar el estudio del comportamiento del transformador se partirá de ofrecer algunos aspectos estructurales y de los métodos más utilizados para el análisis de forma general, especificando las particularidades para caso monofásico y trifásico, en este último dependiendo de la conexión.

1.1. Estructura y funcionamiento.

1.1.1. Concepto

El transformador es uno de los dispositivos eléctricos más utilizados, fundamentalmente en relación con la transmisión y distribución de la energía eléctrica. La transportación de la energía eléctrica a grandes distancias requiere de voltajes elevados para lograr una mayor eficiencia. No obstante es necesario reducir considerablemente tales niveles de voltaje a magnitudes que permitan su utilización práctica sin que exista riesgo para la vida de los consumidores.

Uno de los factores que favorece el amplio uso de los voltajes alternos, si se les compara con los directos, radica precisamente en que posibilitan la utilización de los transformadores, por medio de los cuales se logra producir energía en las plantas generadoras al voltaje más económico para los alternadores, transmitir la potencia a grandes distancias mediante el uso del voltaje más económico para la transmisión en cada caso, y utilizar, en lo que respecta a los usuarios, la energía eléctrica con fines prácticos al voltaje más económico y útil de acuerdo con las circunstancias específicas. Esta es precisamente la importantísima función que realizan los transformadores en las redes eléctricas. Estos equipos requieren, además, una extraordinaria simplicidad y elevada eficiencia.

Las diferentes partes que forman el transformador de distribución son:

- Bobinados ó devanados
- Núcleos

- Accesorios: Tanque, tanque de expansión, tapas ó derivaciones, bushing, sistemas de aislamiento y refrigeración, sistemas de sujeción y otros, placas de características

- **Bobinados o devanados**

El bobinado primario es aquel que recibe la energía eléctrica del sistema, el bobinado secundario es el que entrega la energía eléctrica al sistema. Los bobinados se colocan en forma concéntrica, con láminas de cobre de pequeño espesor que soportan altos voltajes, tienen la configuración tipo baja-alta-baja; es decir un bobinado de baja tensión, luego otro de alta tensión y finalmente uno de baja tensión, para transformadores monofásicos y para transformadores trifásicos, esta configuración es baja-alta; es decir un bobinado de alta sobre otro de baja tensión, esta provee un circuito compacto con gran resistencia mecánica, menor impedancia y mayor posibilidad de regulación de voltaje.

Los devanados o bobinados son generalmente de cobre (últimamente se utiliza mucho el aluminio), son forrados con papel, algodón o esmalte, doble formes, en otros casos con mica con tela de vidrio, con tubos aislantes. Estos van de acuerdo con las características de servicio a las que van a ser sometidos los transformadores, así como los transformadores sumergidos en aceite y del tipo seco. El aislamiento de los devanados debe resistir incremento de temperatura, fuerzas eléctricas o mecánicas; el bobinado primario se compone de conductor de fino y el secundario de láminas anchas y delgadas para evitar sobre temperaturas.

De acuerdo con los diseños especiales de cada fabricante los devanados de los transformadores se hacen por diferentes métodos y formas, tendiendo todos a buscar como fines principales: eficiencia, bajas pérdidas y larga duración de las máquinas, dentro de lo más económico posible a fin de conseguir un costo menor.

- **Núcleo**

Pieza destinada a conducir el flujo magnético a los bobinados del transformador, compuesto de láminas de hierro y/o silicio, aislados entre si, el tipo de núcleo monofásico (acorazado) evita uniones, en consecuencia, evita pérdidas y por ser de hoja concéntrica disminuye la corriente de excitación. El núcleo trifásico es de doble ventana de muy alta permeabilidad, la configuración protege a los bobinados e incrementa la resistencia mecánica.

El material empleado en la construcción del núcleo del transformador es acero al silicio, debido a la resistencia que ofrece al envejecimiento y a las bajas pérdidas por histéresis, siempre y cuando el ensamble de las láminas se lo efectúa con la máxima perfección.

En los últimos años se ha lanzado al mercado un nuevo material llamado hipersil de grano orientado que presenta una mejora notable en los aceros al silicio; con este nuevo material el tamaño de los transformadores se ha reducido considerablemente, pues puede trabajarse a elevadas inducciones debido a su alta permeabilidad y muy bajas pérdidas, pero tiene el inconveniente de que se requiere hornos especiales para su tratamiento.

Los bobinados o devanados del transformador se encuentran arrollados en el núcleo y todo este conjunto se encuentre inmovilizado en el interior del tanque principal, de manera que no se produzcan vibraciones tanto el manejo como en la operación misma del transformador, evitándose de esta manera aflojamiento o deformaciones que pueden ser causa de fallas posteriores cuando se produzcan esfuerzos dinámicos sobre el transformador.

- **Accesorios**

Los accesorios más comunes en los transformadores de distribución son:

- Tanque principal
- Tanque de expansión
- Taps o derivaciones
- Bushings
- Sistema de aislamiento y refrigeración
- Sistema de sujeción
- Placa de características.

1.1.2. Principio de funcionamiento.

El transformador constituye un dispositivo electromagnético, utilizado para la conversión de corriente alterna de un voltaje, en corriente alterna de otro voltaje a la misma frecuencia.

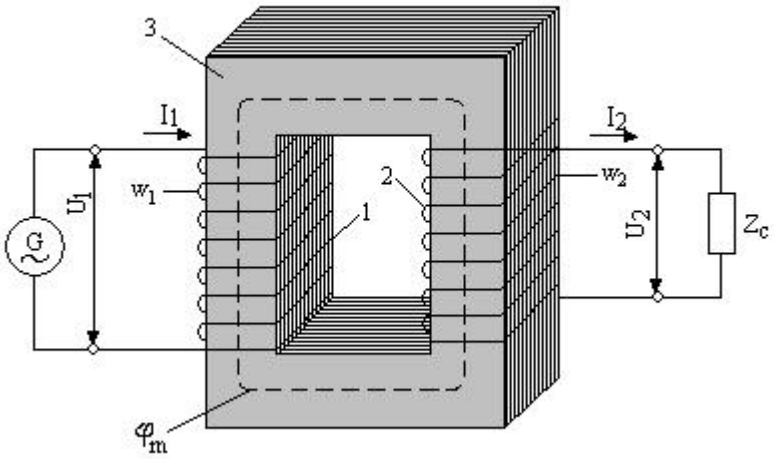


Fig. 1-1. Principio de construcción del transformador

En el caso más simple (Fig. 1-1), el transformador tiene un enrollado primario 1, al cual se le introduce la energía eléctrica y un enrollado secundario 2, del cual la energía se envía a los consumidores (carga). La transferencia de energía de un

enrollado al otro, transcurre mediante la inducción electromagnética. Para aumentar el acoplamiento electromagnético entre los enrollados, los últimos, usualmente se disponen de un núcleo ferromagnético cerrado 3.

Al conectar el enrollado primario del transformador (Fig. 1-1) al voltaje sinusoidal U_1 de la red, en el enrollado surge la corriente I_1, la cual establece un flujo magnético Φ que varía sinusoidalmente y que se cierra por el núcleo. El flujo Φ induce f.e.m. en el enrollado primario y en el secundario, en este, circula la corriente secundaria I_2 y en sus terminales se establece un voltaje U_2. El flujo magnético resultante Φ_m, en el núcleo se establece por las corrientes de ambos enrollados.

1.2. Circuito equivalente del transformador.

1.2.1. Relaciones Eléctricas en el Transformador Ideal.

Llamamos ideal a aquel transformador en el cual: 1) no existen pérdidas de energía (las resistencias de los enrollados y las pérdidas en el aceros del núcleo, son iguales a cero); 2) la permeabilidad magnética en el acero del núcleo $\mu = \infty$ y en las laminas del acero del núcleo no hay partiduras ni juntas; 3) todas las líneas de inducción magnética corren enteramente por el núcleo y cada línea concatena con todas las vueltas del enrollado primario (W_1) y del secundario (W_2). Advertimos que con la observación de la ultima condición el acoplamiento electromagnético entre los enrollados primario y secundario es total y el FACTOR DE ACOPLAMIENTO MAGNETICO de los enrollados del transformador,

$$c = \frac{M}{\sqrt{L_{11}L_{22}}} \tag{1-1}$$

es igual a la unidad. Aquí L_{11} y L_{22} son las inductancias propias y M la inductancia mutua de los enrollados.

Las f.e.m. del enrollado primario y secundario de tal transformador, para corriente alterna sinusoidal, respectivamente, son iguales a:

$$e_1 = -\frac{d\psi_1}{dt} = -w_1 \frac{d}{dt}(\Phi_m \sin \omega t) = -\omega w_1 \Phi_m \cos \omega t \tag{1-2}$$

$$e_2 = -\frac{d\psi_2}{dt} = -w_2 \frac{d}{dt}(\Phi_m \sin \omega t) = -\omega w_2 \Phi_m \cos \omega t$$

donde Φ_m es la amplitud del flujo magnético del transformador.

Los valores efectivos de estas f.e.m. son:

$$E_1 = \frac{\omega w_1 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \pi\sqrt{2} f w_1 \Phi_m = 4{,}44 f w_1 \Phi_m$$

$$E_2 = \frac{\omega w_2 \Phi_m}{\sqrt{2}} = \pi\sqrt{2} f w_2 \Phi_m = 4{,}44 f w_2 \Phi_m \tag{1-3}$$

Como en el transformador ideal no existen caídas de voltaje

$$U_1 = E_1 \;\; ; \;\; U_2 = E_2 \tag{1-4}$$

De las expresiones (1-3) y (1-4)

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \tag{1-5}$$

o

$$\frac{U_1}{U_2} = k \;\; ; \;\; U_2 = \frac{U_1}{k} \tag{1-6}$$

donde

$$k = w_1 / w_2 \tag{1-7}$$

se llama FACTOR DE TRANSFORMACIÓN del transformador.

Como en el transformador ideal no existen pérdidas de energías activa y reactiva,

$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

De donde

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2} \tag{1-8}$$

o

$$\frac{I_2}{I_1} = k \quad ; \quad I_2 = kI_1 \tag{1-9}$$

De esta manera, en el transformador ideal los voltajes primario y secundario, son directamente proporcionales y las corrientes primaria y secundaria, son inversamente proporcionales al número de vueltas de los correspondientes enrollados. En un transformador real, las relaciones obtenidas se diferencian algo, sin embargo, en los transformadores con núcleo ferromagnético, esta variación, para cargas cercanas a la nominal, son relativamente pequeñas.

1.2.2. Reducción del enrollado secundario al primario.

Las corrientes primaria y secundaria, los voltajes y otras magnitudes, tienen iguales valores, si el número de vueltas de los enrollados primario y secundario son iguales. Analicemos, por eso, en lugar de un transformador real, uno equivalente a él, llamado transformador reducido, cuyos enrollados primario y secundario tienen igual número de vueltas.

Supongamos así, que el enrollado secundario real del transformador con W_2 vueltas, imaginariamente se cambia o se reduce a un enrollado con $W_2^{'} = W_1$ vueltas. Con esto, el número de vueltas del enrollado secundario se altera en

$$K = \frac{w_2^{'}}{w_2} = \frac{w_1}{w_2} \tag{1-10}$$

veces. La magnitud k se llama FACTOR DE REDUCCIÓN O TRANSFORMACIÓN.

Como resultado de tal cambio, o reducción, la f.e.m. $E_2^{'}$ y el voltaje $U_2^{'}$ del enrollado reducido, también se altera en k veces, en comparación con las magnitudes E_2 y U_2 del enrollado secundario real:

$$\dot{E}^{'}{}_2 = k\dot{E}_2 \;\; ; \;\; \dot{U}^{'}{}_2 = k\dot{U}_2 \tag{1-11}$$

Para que las potencias del enrollado reducido y del real sean iguales, para todos los regímenes de trabajo, es necesario conservar la igualdad

$$\dot{U}^{'}{}_2 I_2^{'} = \dot{U}_2 \dot{I}_2$$

Donde $\dot{I}_2^{'}$ es la corriente reducida del secundario. De aquí, con el cálculo de la segunda igualdad, se desprende que,

$$\dot{I}^{'}{}_2 = \dot{I}_2 / k \tag{1-12}$$

La f.m.m. de los enrollados real y reducido, de acuerdo con los expresiones y son iguales:

$$\dot{I}^{'}{}_2 w_2^{'}{}' = \dot{I}_2 w_2 \tag{1-13}$$

Para que los procesos electromagnéticos en los transformadores real y reducido ocurran igualmente, los enrollados secundarios real y reducido, deben producir campos magnéticos iguales. Para esto además del cumplimiento de la condición, es necesario que el enrollado secundario reducido tenga las mismas dimensiones y configuración geométrica y sea distribuido en la ventana del núcleo del transformador de la misma manera que el enrollado secundario real. Por eso, la sección de todas la vueltas del enrollado reducido debe ser la misma que la del enrollado real y la sección de cada vuelta del enrollado reducido debe disminuirse en k vueltas, en resumen, la resistencia del enrollado reducido es k^2 veces mayor que el real:

$$r_2^{'} = k^2 r_2 \tag{1-14}$$

Como para iguales dimensiones geométricas e igual distribución de las bobinas, su inductancia y reactiva inductiva son proporcionales al cuadrado del número de vueltas, entre las reactancias inductivas del enrollado reducido $x_2^{'}$ y del real x_2 existirá la misma relación:

$$x_2^{'} = k^2 x_2 \tag{1-15}$$

Evidentemente las pérdidas en los enrollados reducido y real serán iguales:

$$(I_2^{'})^2 r_2^{'} = (\frac{I_2}{k})^2 k^2 r_2 = I_2^2 r_2$$

Igualmente, las caídas de voltaje relativas en los enrollados secundarios reducido y real del transformador:

$$\frac{r_2^{'} I_2^{'}}{U_2^{'}} = \frac{k^2 r_2}{k U_2} \frac{I_2}{k} = \frac{r_2 I_2}{U_2} ; \frac{x_2^{'} I_2^{'}}{U_2^{'}} = \frac{k^2 x_2}{k U_2} \frac{I_2}{k} = \frac{x_2 I_2}{U_2}$$

De esta manera, todas las relaciones eléctricas y electromagnéticas en los transformadores reducido y real, son iguales lo que permite utilizar la reducción indicada.

1.2.3. Circuito equivalente considerando las pérdidas magnéticas.

Las pérdidas en el acero del núcleo P_{mag} para una frecuencia dada son proporcionales a las siguientes magnitudes:

$$P_{mag} \sim B_n^2 \sim \Phi_n^2 \sim E_1^2$$

De esta manera, las pérdidas P_{mag} son proporcionales al cuadrado del voltaje U_{12} en los bornes 1-2 de la rama magnetizante del circuito equivalente. Si estos bornes, en paralelo con $x_{12}^{'} = x_{n1}$ conectamos la resistencia r_{mag} como muestra la figura 1-2, las pérdidas en esta resistencia también serán proporcionales a U_{12}^2 . La magnitud de la resistencia r_{mag} se debe escoger de manera tal que las pérdidas en ella, sean iguales a las pérdidas magnéticas:

$$P_{mag} = \frac{m_1 U_{12}^2}{r_{mag}} = \frac{m_1 E_1^2}{r_{mag}}$$

De donde

$$r_{mag} = \frac{m_1 E_1^2}{P_{mag}} \qquad (1\text{-}16)$$

La magnitud P_{mag} para una f.e.m. E_1 dada, se puede suponer conocida de los cálculos o de datos experimentales. Entonces se puede suponer conocido también el valor de r_{mag} .

La corriente magnetizante

$$\dot{I}_M = \dot{I}_1 + \dot{I}_2^{'}$$

se divide en dos ramas del circuito de magnetización en las componentes activa $\dot{I}_{Ma}$ y reactiva $\dot{I}_{Mr}$ de las cuales, la primera determina la potencia de la pérdidas magnéticas y la segunda establece el flujo en el núcleo.

El circuito con dos ramas paralelas de la red magnetizante, concuerda con la realidad física del fenómeno. Sin embargo, los cálculos sobre la base del circuito equivalente, se realizan más fácilmente si sustituimos el circuito de dos ramas paralelas por una rama común. Entonces, la impedancia de esta rama será:

$$Z_M = \frac{mag^{jx'_{12}}}{r_{mag} + jx'_{12}} = \frac{r_{mag}(x'_{12})^2}{r_{mag}^2 + (x'_{12})^2} + j\frac{r_{mag}^2 x'_{12}}{r_{mag}^2 + (x'_{12})^2} = r_M + jx_M \qquad (1\text{-}17)$$

Como $r_{mag} > x'_{12}$

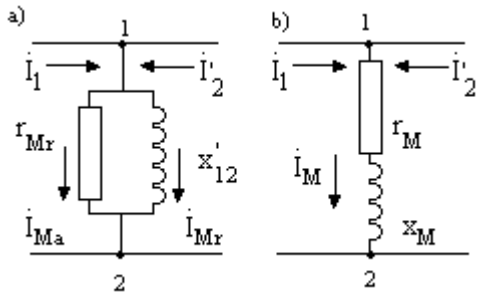


Fig. 1-2. Circuito equivalente de magnetización considerando las pérdidas magnética.

$$r_M \approx \frac{(x'_{12})^2}{r_{mag}} \quad ; \quad x_M \approx x'_{12} \approx x_{n1} \qquad (1\text{-}18)$$

Con el aumento de la saturación del núcleo, es decir, con el aumento de Φ_m, E_1 o U_1, la reactancia x'_{12} para f = const. aumentan. Sin embargo equivalente del transformador, considerado las pérdidas magnéticas. Si se utilizan las designaciones.

$$Z_1 = r_1 + jx_1 \quad ; \quad Z'_2 = r'_2 + jx'_2 \quad ; \quad Z_M = r_M + jx_M \qquad (1\text{-}19)$$

El circuito equivalente se puede representar más compactamente. En vacío $\dot{I}_2^{'}$ =0 e $\dot{I}_1$ = $\dot{I}_M$ (corriente de vació del transformador).

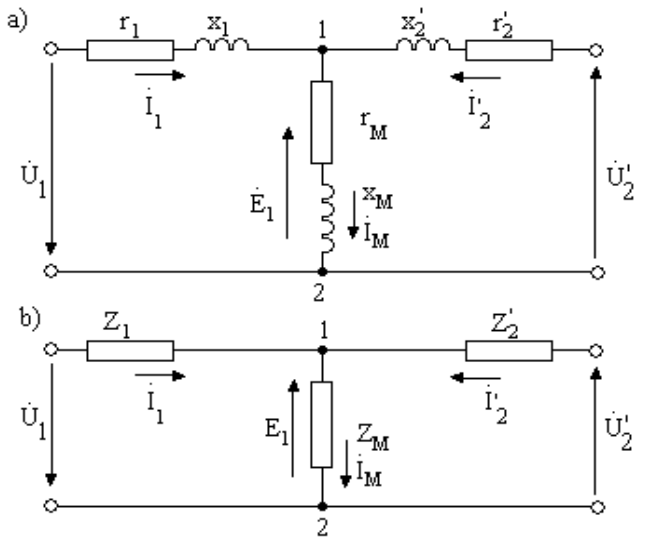


Fig. 1-3. Circuito equivalente del transformador de dos enrollados considerando las pérdidas de magnetización.

El circuito equivalente T, más simple del transformador representa un cuadripolo pasivo. La impedancia magnetizante Z_M. de este circuito refleja el fenómeno en el núcleo ferromagnético. Ella es considerablemente mayor que las impedancias Z_1 y $Z_2^{'}$, las cuales incluyen la resistencia y reactancia inductiva de dispersión de los enrollados. Para los transformadores de fuerza en unidades relativas [1]

$$Z_{M\,*} = 25 \text{ a } 200; \quad Z_{1\,*} \approx Z_{2\backslash *}^{'} = 0{,}025 \text{ a } 0{,}10.$$

Las ecuaciones de voltaje y el circuito equivalente del transformador , se pueden presentar también en unidades relativas. Teniendo en cuenta que

$$U_N = Z_N I_N$$

la parte izquierda de la ecuación , se puede dividir por U_N y la parte derecha por $Z_N I_N$, con el resultado de lo cual, se ha realizado la transformación a unidades relativas. No es

difícil ver que, las magnitudes relativas de voltaje, corriente, resistencia, reactancia e impedancia de la red secundaria dependen, según esto, de que magnitud del factor k sea utilizada para la reducción del enrollado secundario al primario. La indeterminación en esta cuestión desaparece, si determinamos k, siempre de la misma forma. Por ejemplo, en transformadores de fuerza siempre se toma $k = W_1 / W_2$.

Circuito equivalente simplificado. Como $Z_M > Z_1 \approx Z_2^{'}$, en muchos casos, se puede suponer $Z_M = \infty$, lo que representa eliminar la rama magnetizante del circuito equivalente. Para Z es decir, tal suposición es equivalente a despreciar la corriente magnetizante o de vacío, lo cual en vista de la preciar la corriente magnetizante o de vacío, lo cual en ista de la pequeñez de I_M, es permisible en muchos casos. Con esto $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2^{'} = i$. Para $Z_M = \infty$ e I_M = 0, el circuito equivalente toma la forma expuesta. Los parámetros de este circuito son

$$Z_k = Z_1 + Z_2^{'} \;\; ; \;\; r_k = r_1 + r_2^{'} \;\; ; \;\; x_k = x_1 + x_2^{'} \qquad (1\text{-}20)$$

llamados respectivamente resistencia, reactancia e impedancia de cortocircuito. Tal designaciones debe a que, conectando en cortocircuito los bornes secundarios del transformador,

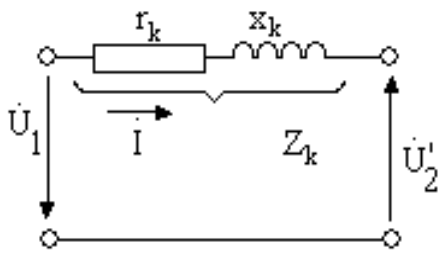


Fig. 1-4. Circuito equivalente simplificado del transformador.

Corresponde a conectar en cortocircuito los bornes secundarios (de la derecha) en el circuito equivalente, y según esto, la impedancia del transformador en cortocircuito será igual a Z_k. Usualmente en los transformadores de fuerza Z_k *=0.05 a 0.15.

1.3. Determinación experimental de los parámetros del circuito equivalente.

1.3.1. Ensayo de vacío.

La determinación experimental de los parámetros de los circuitos equivalentes del transformador se realizan según los datos de los ensayos de vacío y cortocircuito.

Los circuitos para el ensayo de vacío del transformador monofásico (m = 1) y trifásico (m = 3). El enrollado primario del transformador se conecta a un voltaje sinusoidal y el enrollado secundario esta desconectado. Se miden el voltaje primario $U_0 = U_{10}$, la corriente $I_0 = I_1$ y la potencia $P_0 = P_1$ y también el voltaje secundario U_{20}.

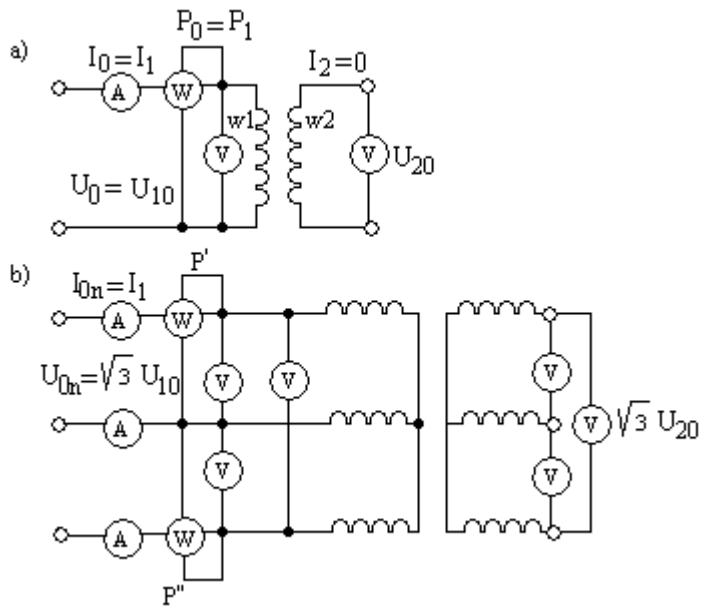


Fig. 1-5. Circuitos para el ensayo de vacío del transformador monofásico (a) y trifásico (b) de dos enrollados.

De los datos del experimento para el transformador monofásico se determina la impedancia, reactancia y resistencia de vacío.

$$Z_0 = \frac{U_0}{I_0} \;;\; r_0 = \frac{P_0}{I_0^2} \;;\; x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2} \qquad (1.21)$$

y también el factor de transformación

$$K = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_{10}}{U_{20}} \tag{1-22}$$

Y el factor de potencia de vacío

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{U_0 I_0} \tag{1-23}$$

Para el transformador trifásico, por las lecturas de los tres amperímetros y voltímetros se determinan los valores medios de la corriente y el voltaje de línea y por la lectura de los vatímetros, la potencia de vació de las tres fases $P_0 = P' + P''$. Solo tienen sentido físico los valores de los parámetros calculados para las fases del enrollado. Por eso, es necesario tomar en cuenta el esquema de conexiones del enrollado. En el caso de la conexión estrella de los enrollados primarios

$$Z_0 = \frac{U_{0l}}{\sqrt{3} I_{0l}}; \quad r_0 = \frac{P_0}{3 I_{0l}^2}; \; x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2} \tag{1-24}$$

y para la conexión triangulo

$$Z_0 = \frac{\sqrt{3} U_{0l}}{I_{0l}}; \quad r_0 = \frac{P_0}{I_{0l}^2}; \; x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2} \tag{1-25}$$

El factor de potencia de vacío es

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} U_{0l} I_{0l}} \tag{1-26}$$

El factor de transformación del transformador trifásico se puede calcular por los voltajes de fase (k) o por los voltajes de línea (k_l). Para la teoría del transformador tiene significado el primero de los valores del factor de transformación indicados.

Es útil determinar los valores relativos de los parámetros calculados:

$$Z_{0*} = \frac{I_n Z_0}{U_n} \quad ; \quad r_{0*} = \frac{I_n r_0}{U_n} \quad ; \quad x_{0*} = \frac{I_n x_0}{U_n} \tag{1-27}$$

aquí I_n y U_n son la corriente y el voltaje de fase. La impedancia nominal se utiliza como base, con esto es igual a

$$Z_n = U_n / I_n \tag{1-28}$$

En los transformadores de fuerza modernos para $U_0 = U_{n'}$ usualmente $Z_{0*} \approx x_{0*} =$ 25 a 200 y $r_{0*} =$ 5 a 25. Las segundas cifras corresponden a los transformadores potentes.

Del análisis del circuito equivalente del transformador, para $I_2' = 0$ se desprende que, los parámetros de vacío $Z_{0,}$ r_0 y x_0 representan la suma de los siguientes parámetros:

$$Z_0 = |Z_1 + Z_m| \; ; \; r_0 = r_1 + r_m ; x_0 = x_1 + x_m \tag{1-29}$$

En los transformadores de fuerza la resistencia r_1 y la reactancia x_1 son respectivamente diez y cien veces menores que r_m y x_m. Por eso, con gran exactitud se puede suponer que, los parámetros de vacío son iguales a los parámetros de la rama magnetizante:

$$Z_0 \approx Z_m ; r_0 \approx r_m ; x_0 \approx x_m \tag{1-30}$$

Por esta misma causa se puede decir que, la potencia de vacío P_0, con una exactitud muy grande es igual a las pérdidas magnéticas P_{mag} en el núcleo del transformador.

En vacío, de acuerdo con el circuito equivalente 1-2

$$\dot{U} = \dot{I}_0 Z_1 + \dot{I}_0 Z_m = \dot{I}_0 Z_1 + (-\dot{E}_1) \qquad (1\text{-}31)$$

o como $Z_1 \ll Z_m$ con gran exactitud,

$$\dot{U}_0 \approx -\dot{E}_1; U_0 \approx E_1 \qquad (1\text{-}32)$$

La ecuación de voltaje de vacío (1-31) corresponde al diagrama 1-5 . En este, para su claridad, las caídas de voltaje $\dot{I}_0 r_1$ y j $\dot{I}_0 x_1$ se han trazado muy grandes. En realidad ellas constituyen un pequeño porciento de $\dot{U}_0 = -E_1$. A consecuencia de la preponderancia de la reactancia inductiva, para $U_0 = U_{n'}$ el factor de potencia $\cos\varphi_0 \leq$ 0,1.

Como $r_1 \ll r_M$, las pérdidas de vacío prácticamente representan las pérdidas en el acero del núcleo, incluyendo las pérdidas por corrientes parásitas en las paredes del tanque en el régimen de vacío.

El ensayo de vacío se realiza usualmente para una serie de valores U_0: desde $U_0 \approx 0{,}3U_N$ hasta $U_0 \approx 1{,}1U_N$ y según los datos obtenidos se construyen las características de vacío, las cuales representan la variación de $I_{0,} P_{0,} Z_{0,} r_{0,} \cos\varphi_0$ con U_0 (Fig. 1-7). Con el aumento de U_0, la saturación del núcleo aumenta, a consecuencia de lo cual, I_0 crece más rápidamente que U_0. Por eso Z_0 y X_0, con el aumento de U_0, disminuyen . Como $P_0 \sim E^2 \sim U^2$ e I_0^2 crece más rápidamente que U_0^2, r_0 también disminuye con el crecimiento de U_0. Por las características de vacío, se establecen los valores de las magnitudes correspondientes para $U_0 = U_N$.

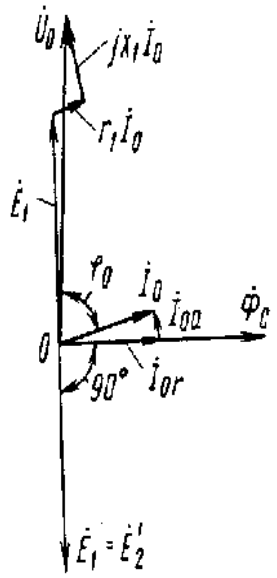


Fig. 1-6. Diagrama fasorial del transformador en vacío.

1.3.2. Ensayo de cortocircuito.

Se realiza según el esquema de la figura 1-8. El enrollado secundario se conecta en cortocircuito y en el enrollado primario, para evitar el calentamiento y deterioro del transformador, se reduce el voltaje a un valor, para el cual, la corriente se halle entre los limites del valor nominal.

La impedancia Z_k, resistencia r_k y reactancia x_k de cortocircuito se calcula por fórmulas análogas a las del caso de vacío.

Para el transformador monofásico

$$Z_k = \frac{U_k}{I_k}; r_k = \frac{P_k}{I_k^2}; x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} \qquad (1\text{-}33)$$

Para el transformador trifásico, por las lecturas de los instrumentos, se determinan los valores medios del voltaje U_{kl} y la corriente I_{kl} de línea y la potencia de

cortocircuito de las tres fases P_k. Para la conexión estrella de los enrollados primarios, los parámetros de cortocircuito por fase serán los siguientes:

$$Z_k = \frac{U_{kl}}{\sqrt{3}I_{kl}}; \quad r_k = \frac{P_k}{3I_{kl}^2}; \quad x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2}, \tag{1-34}$$

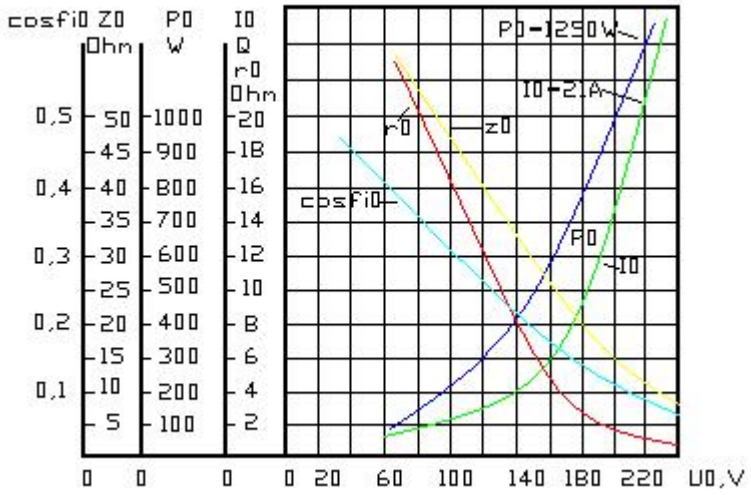


Fig. 1-7. Características de vacío de un transformador con enrollados de Y/Y_0, de 240 kVA 3150/380 V, medidas desde el lado de BV.

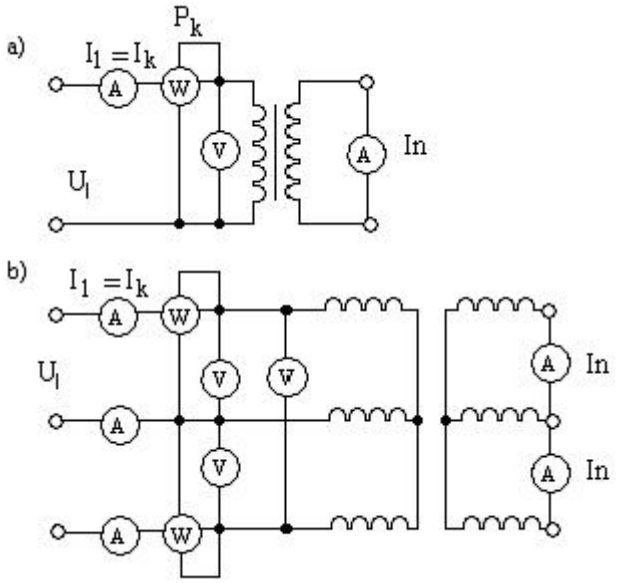


Fig. 1-8. Circuitos para la prueba de cortocircuito del transformador monofásico (a) y trifásico (b) de dos enrollados.

y para la conexión en triangulo de los enrollados primarios

$$Z_k = \frac{\sqrt{3}U_{kl}}{I_{kl}}; \quad r_k = \frac{P_k}{I_k^2}; \quad x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} \tag{1-35}$$

El factor de potencia para cortocircuito, se determina por fórmulas análogas a (1-23) y (1-26). De acuerdo con el circuito equivalente de la figura 1-3, la impedancia de cortocircuito es

$$Z_k = Z_1 + \frac{Z_m Z_2^{'}}{Z_m + Z_2^{'}} \tag{1-36}$$

como Z_m es cien veces mayor que $Z_2^{'}$ en el denominador de (1-36) se puede despreciar $Z_2^{'}$ en comparación con Z_m. Por eso con gran exactitud,

$$Z_k = Z_1 + Z_2^{'}; \quad r_k = r_1 + r_2^{'}; \quad x_k = x_1 + x_2^{'} \tag{1-37}$$

Estas relaciones se corresponden con las ecuaciones del circuito equivalente de la figura 1-4, al conectar en cortocircuito los bornes secundarios ($U_2^{'} = 0$). Como x_1 y $x_2^{'}$ las determina el flujo que se cierra por el aire, sus magnitudes y también la magnitud de Z_k son independientes de U_k e I_k. Las características de cortocircuito del transformador aparecen en la figura aparecen en la figura 1-9

El voltaje $U_k = U_{kn}$, para el cual, la corriente de cortocircuito es igual a la nominal: $I_k = I_n$, recibe el nombre de VOLTAJE DE CORTOCIRCUITO y se designa u_k. La magnitud u_k en unidades relativas es igual a la impedancia de cortocircuito en unidades relativas:

$$u_{k*} = \frac{U_{kn}}{U_n} = \frac{Z_k I_n}{U_n} = \frac{Z_k}{Z_n} = Z_{k*} \tag{1-38}$$

La magnitud u_k, en la practica se expresa también en porciento:

$$u_{k\%} = \frac{U_{kn}}{U_n} \cdot 100 = 100u_{k*} = 100Z_{k*} \qquad (1\text{-}39)$$

El diagrama fasorial del transformador en cortocircuito con $I_k = I_N$ se muestra de dos formas en la figura 1-10 b, se llama TRIANGULO DE CORTOCIRCUITO. Sus catetos representan las componentes activa y reactiva del voltaje de cortocircuito:

$$u_{ka} = u_k \cos\varphi_k; \quad u_{kr} = u_k sen\varphi_k \qquad (1\text{-}40)$$

En transformadores con capacidad $S_N = 10kVA$, usualmente $\cos\varphi_K \approx 0{,}65$ y en transformadores con capacidad $S_N = 60000kVA$ usualmente $\cos\varphi_k \approx 0{,}05$. De esta manera, en los transformadores potentes predominan las componentes u_{kr} y x_k en comparación con u_{ka} y r_k. Evidentemente que, $u_{ka*} = r_{k*}, u_{kr*} = x_{k*}$. La magnitud u_{ka*}, se reduce a una temperatura del enrollado de 75 ^{0}C.

De acuerdo con lo expuesto, el voltaje de cortocircuito caracteriza la magnitud de la resistencia y reactancia inductiva de dispersión del transformador y es por eso, la característica más importante del transformador. La magnitud $u_{k\%}$ se indica en la placa del transformado. En los transformadores de potencia $u_{k\%}$ = 4,5 a 15. La primera cifra corresponde a transformadores con voltajes nominales de línea $U_{N1} \leq 10kV$, y la segunda a transformadores con $U_{N1} = 500kV$, los cuales poseen gran dispersión a consecuencia de una gran separación entre enrollados.

La magnitud de la f.e.m. E_1 en la ensayo de cortocircuito, para $I_k = I_N$ es 15-40 veces menor que U_N. Con esto, las pérdidas magnéticas son 225-1600 veces menores que en el caso de $U = U_N$ y son muy pequeñas. Por eso, la potencia de cortocircuito P_k con gran exactitud representa la potencia de las pérdidas eléctricas en los enrollados, incluyendo las pérdidas en las paredes del tanque y en los detalles de fijación debidas a los flujos de dispersión del transformador. Por consiguiente, $r_k = r_1 + r_2^{'}$, determinada

por la ensayo de cortocircuito es equivalente a la resistencia considerando estas pérdidas.

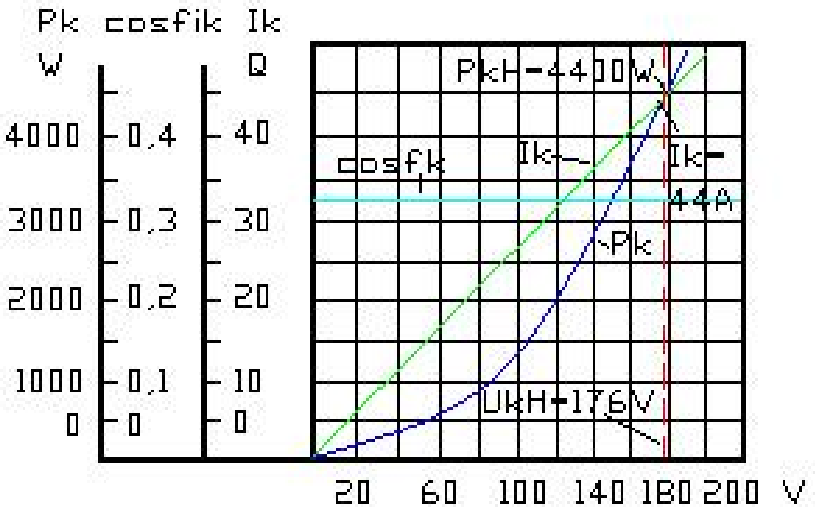


Fig. 1-9. Características de cortocircuito de un transformador con enrollados de Y/Y_0, de 240 kVA, 3150/380 V, medido desde el lado de AV.

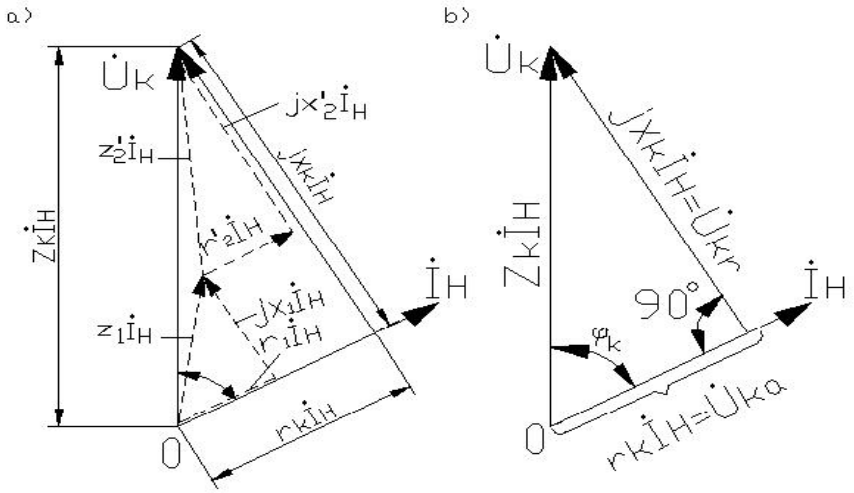


Fig. 1-10. Diagrama fasorial del transformador en cortocircuito con $I_k = I_n$.

Si el cortocircuito se realiza a voltaje primario nominal,

$$I_k = U_n / z_k$$

o en unidades relativas

$$I_{k*} = \frac{1}{Z_{k*}} = \frac{100}{u_{k\%}}$$

Si por ejemplo, $u_{k\%} = 10\%$, $I_k = 10 I_N$.

1.4. Trabajo del transformador con carga.

1.4.1. Condiciones físicas de trabajo, diagrama fasorial y energético.

En el análisis del trabajo del transformador, tendremos presente el transformador monofásico o trifásico con carga simétrica cuando puede analizarse solo una fase del transformador. El trabajo del transformador trifásico con carga asimétrica se estudiará independientemente. Supondremos que el voltaje primario $U_1 = cte.$ y la frecuencia $f = cte.$

- Condiciones físicas del trabajo del transformador.- Sobre la base del circuito equivalente de la figura 1-3, se pueden escribir las siguientes ecuaciones de voltaje del transformador:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 x_1 + (\dot{I}_1 + \dot{I}_2^{'}) Z_M$$

$$-\dot{U}_2^{'} = \dot{I}_2^{'} r_2^{'} + j \dot{I}_2^{'} x_2^{'} + (\dot{I}_1 + \dot{I}_2^{'}) Z_M \qquad (1\text{-}41)$$

al mismo tiempo

$$(\dot{I}_1 + \dot{I}_2^{'}) Z_M = \dot{I}_M Z_M = -\dot{E}_1$$

Por eso, en lugar de las ecuaciones (1-41) también se puede escribir

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 r_1 + j\dot{I}_1 x_1 + (-\dot{E}_1);$$

$$\dot{U}_2^{'} = \dot{E}_1 - \dot{I}_2^{'} r_2^{'} - j\dot{I}_2^{'} x_2^{'} \qquad (1\text{-}42)$$

La singularidad del trabajo del transformador consiste, de que en vista de la pequeñez relativa de r_1 y x_1, la caída de voltaje $(r_1 + jx_1)\dot{I}_1$ en el rango normal de carga es relativamente pequeña, a consecuencia de lo cual, de acuerdo con la primera ecuación (1-42), $E_1 \approx U_1$. A su vez la f.e.m. E_1, sobre la base de la expresión (1-3), es proporcional al flujo del núcleo Φ_m. Por eso, la magnitud del flujo se determina de acuerdo con el voltaje primario:

$$\Phi_m \approx \frac{U_1}{4{,}44 f w_1} \qquad (1\text{-}43)$$

y para $U_1 = cte.$ también $\Phi_m = cte.$

En vacío el transformador consume de la red, aquella corriente igual a $I_0 = I_1$, necesaria para establecer el flujo requerido para una magnitud dada U_1. La magnitud del flujo Φ_m, es siempre aquella que induciendo en e l la f.e.m. E_1, junto con la caída de voltaje $Z_1 \dot{I}_1$, en correspondencia con la ecuación (1-42), equilibre al voltaje aplicado.

Cuando en el enrollado secundario se conecta carga, en este enrollado circula la corriente $\dot{I}_2$. La f.m.m. secundaria $W_2 \dot{I}_2 = W_1 \dot{I}_2^{'}$ se esfuerza por establecer en el núcleo su propio flujo y cambiar de esta manera, el flujo existente en el régimen de vacío. Sin embargo, como fue indicado antes, para $U_1 = cte.$, este flujo no puede variarse de manera considerable. Por eso, el enrollado primario consumirá de la red además de la corriente magnetizante $\dot{I}_M$ una corriente complementaria $\dot{I}_1^{'}$, de tal magnitud que, creando en el la f.m.m. $W_1 \dot{I}_1^{'}$, equilibre la f.m.m. $W_2 \dot{I}_2$. De esta manera,

$$w_1 \dot{I}_1^{'} = - w_2 \dot{I}_2 = - w_1 \dot{I}_2^{'} \tag{1-44}$$

de donde

$$\dot{I}_1^{'} = - \dot{I}_2^{'} , \tag{1-45}$$

La corriente $\dot{I}_1^{'}$ que equilibra en relación magnética a la corriente secundaria $\dot{I}_2$ se denomina COMPONENTE DE CARGA DE LA CORRIENTE PRIMARIA. La corriente total primaria se compone de las componentes magnetizantes $\dot{I}_M$ y de carga $\dot{I}_1^{'}$:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_M + \dot{I}_1^{'} \tag{1-46}$$

En virtud de la igualdad (1-44), en lugar de (1-46), también se puede escribir

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_M - \dot{I}_2^{'} \tag{1-47}$$

lo que esta en correspondencia con lo explicado antes y el circuito equivalente de la figura (1-3).

Multiplicando la expresión (1-47) por w_1, obtenemos

$$w_1 \dot{I}_1 + w_1 \dot{I}_2^{'} = w_1 \dot{I}_M \tag{1-48}$$

o

$$w_1 \dot{I}_1 + w_2 \dot{I}_2 = w_1 \dot{I}_M \tag{1-49}$$

Sobre la base de lo explicado, se puede señalar lo siguiente. El flujo del núcleo del transformador se crea por la suma de las f.m.m. de las corrientes primaria y secundaria o la f.m.m. magnetizante de la componente $\dot{I}_M$ de la corriente primaria. Como con la variación de la carga $\dot{I}_1$ y $Z_1 \dot{I}_1$ varían, para $U_1 = cte.$ de acuerdo con las expresiones

(1-42) y (1-3), E_1 y Φ_m, también varían algo. Correspondientemente con esto, con las variaciones de carga también varia algo la componente magnetizante I_M de la corriente primaria.

El diagrama fasorial del transformador permite analizar el trabajo del transformador y las situaciones enunciadas más completamente. El diagrama fasorial se puede construir sobre la base del circuito equivalente de la figura (1-3) o la ecuación (1-42).

En la figura 1-11, (a), se muestra el diagrama fasorial del transformador para el caso de una carga compuesta de resistencia e inductancia, (carga RL). La f.e.m. $\dot{E}_1$ y $\dot{E}_2^{'}$ se retrasan 90° del flujo Φ_m del núcleo. La corriente $\dot{I}_2^{'}$ se retrasa de $\dot{E}_2^{'}$ en algún ángulo ψ_2, cuya magnitud se determina por el carácter de la carga. Restando de $\dot{E}_2^{'}$ la caída de voltaje $jx_2^{'}\dot{I}_2^{'}$ (perpendicularmente a $\dot{I}_2^{'}$) y $r_2^{'}\dot{I}_2^{'}$ (paralelamente a $\dot{I}_2^{'}$), obtenemos el fasor del voltaje $\dot{U}_2^{'}$ del secundario.

La componente reactiva $\dot{I}_{mr}$ de la corriente magnetizante concuerda en fase con Φ_m y su componente activa $\dot{I}_{ma}$, esta desfasada de $\dot{\Phi}m$ en 90°. Por eso, la corriente magnetizante $\dot{I}_m = \dot{I}_{ma} + \dot{I}_{mr}$ se desfasa algo de $\dot{\Phi}_m$. Sumando a $\dot{I}_m$ el fasor $\dot{I}_1^{'} = -\dot{I}_2^{'}$, Hallamos la corriente primaria $\dot{I}_1$. Para obtener el fasor del voltaje primario $\dot{U}_1$, es necesario trazar el fasor -$\dot{E}_1$ igual en magnitud y de sentido contrario al fasor $\dot{E}_1$ y añadir a le las caídas de voltaje $\dot{I}_1 r_1$ y $j\dot{I}_1 x_1$. Con carga activa inductiva (RL) $\varphi_1 > \varphi_2$.

En la figura 1-11, (b), se construye de forma análoga el diagrama fasorial para el caso de carga activa-capacitiva (RC), cuando el fasor de corriente $\dot{I}_2^{'}$ adelantada a los

fasores $\dot{E}_2^{'}$ y $\dot{U}_2^{'}$ en los ángulos ψ_2 y φ_2 respectivamente. Señalamos que, por claridad en el diagrama las magnitudes $\dot{I}_{ma}$, $\dot{I}_{mr}$ y las caídas de voltaje se han trazado proporcionalmente grandes.

Del diagrama de la figura 1-11, (a), se puede concluir que, para $U_1 = cte.$ y $\psi_2 = cte.$ o $\varphi_2 = cte.$, el aumento de la carga $\dot{I}_2^{'}$ también disminuye algo Φ_m e I_m. Del diagrama 1-11, b, para las mismas condiciones, se desprende que, en el caso del aumento de la carga activa-capacitiva (RC), la magnitud $E_1 = E_2^{'}, U_2^{'}, \Phi_m$ e I_m para valores de $|\psi_2|$ o $|\varphi_2|$ suficiente grandes, puede incluso aumentar.

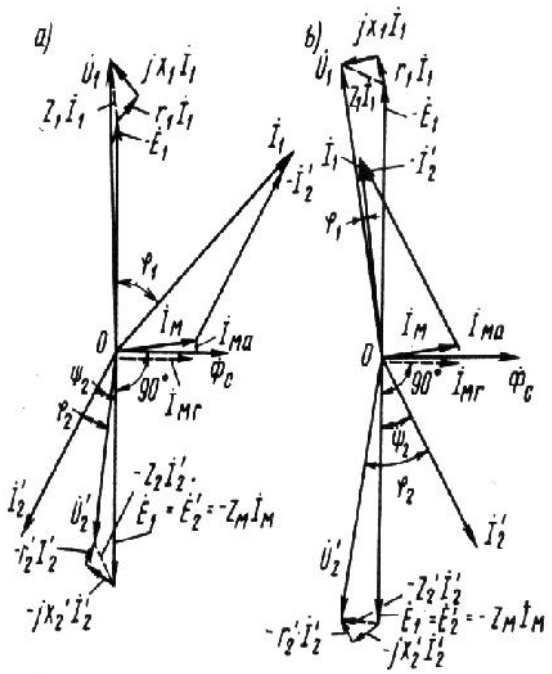


Fig. 1-11. Diagrama fasorial del transformador con carga resistiva-inductiva (R-L) (a) y resistiva-capacitiva (R-C) (b).

El diagrama fasorial simplificado, corresponde al circuito equivalente simplificado del transformador (Fig. 1-4), en el cual la corriente magnetizante se ha supuesto cero. Si con esto se cambian los sentidos positivos de $\dot{U}_2^{'}$ e $\dot{I}_2^{'}$ giramos sus fasores 180°, así obtenemos en correspondencia con el circuito de la figura 1-4, el diagrama trazado en la figura 1-12. Si $U_1 = cte.$ e $I_2^{'} = cte.$, y el ángulo de desfasaje φ_2

se varia, el extremo del fasor $\dot{U}_1$, como se muestra en la figura 1-12 por una línea discontinua. De este diagrama se puede fácilmente sacar la conclusión de la influencia del carácter de la carga o de la magnitud φ_2 sobre el voltaje $U_2^{'}$.

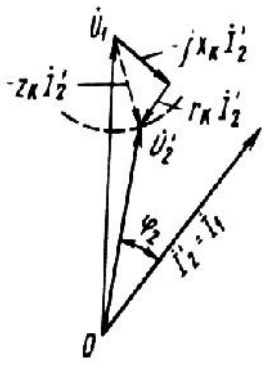


Fig. 1-12. Diagrama fasorial simplificado del transformador con carga resistiva-inductiva (R-L).

1.4.2. Diagrama energético del transformador.

La conversión de potencia del transformador, transcurre de acuerdo con el diagrama de la figura 1-13, (a), en correspondencia del circuito equivalente de las figuras 1-2 y 1-3 y el diagrama de la figura 1-11.

El enrollado primario toma de la red alimentadora la potencia

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos\varphi_1$$

Parte de esta potencia se disipa en forma de calor en el enrollado primario:

$$P_{el1} = mI_1^2 r_1$$

La otra parte de la potencia se gasta en pérdidas magnéticas en el núcleo:

$$P_{mag} = mE_1 I_{ma} = mI_m^2 r_m$$

La potencia electromagnética

$$P_{em} = P_1 - p_{el1} - p_{mag} = mE_1 I_2^{'} \cos\psi_2$$

se, transfiere al enrollado secundario por el campo magnético. En este enrollado se pierde la potencia

$$P_{el2} = mI_2^2 r_2 = m(I_2^{'})^2 r_2^{'}$$

La potencia restante P_2 representa la potencia útil entregada a los consumidores:

$$P_2 = P_{em} - p_{el2} = mU_2 I_2 \cos\varphi_2 = mU_2^{'} I_2^{'} \cos\varphi_2$$

La conversión de potencia reactiva transcurre de acuerdo con el diagrama de la figura 1-13, b). De la potencia reactiva primaria

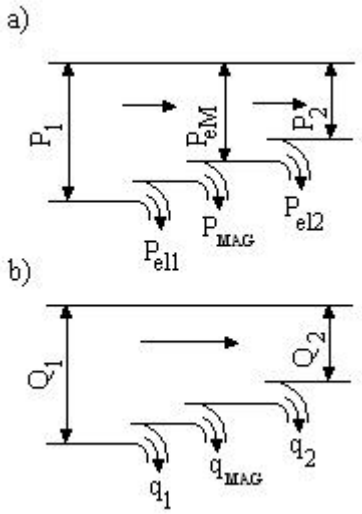


Fig. 1-13. Conversión de potencia activa (a) y reactiva (b) en el transformador.

$$Q_1 = mU_1 I_1 \sin\varphi_1$$

la potencia

$$q_1 = mI_1^2 x_1$$

establece el campo magnético de dispersión del primario y la potencia

$$q_{mag} = mE_1 I_{mr} = mI_m^2 x_m$$

en la creación del campo magnético o magnetización del núcleo.

En el enrollado secundario se asocia la potencia reactiva

$$q_2 = mI_2^2 x_2 = m(I_2^{'})^2 x_2^{'}$$

y la potencia reactiva restante

$$Q_2 = Q_1 - q_1 - q_{mag} - q_2 = mI_2 U_2 \sin\varphi_2 = mU_2^{'} I_2^{'} \sin\varphi_2$$

se entrega a los consumidores.

Con cargas activo-capacitivas $\varphi_2 < 0$ y también $Q_2 < 0$. El cambio de signo de Q_2 significa que el sentido de la transferencia de potencia o energía reactiva se ha invertido. Si, según esto también

$$Q_1 = Q_2 + q_2 + q_{mag} + q_1 < 0,$$

la potencia reactiva se transfiere del enrollado secundario al primario. Si $Q_2 < 0$ y $Q_1 > 0$, la potencia reactiva se consume del enrollado primario y del enrollado secundario y se gasta en la magnetización del transformador.

CAPITULO II. Características de explotación del transformador.

El transformador cuando opera como elemento de un sistema o alimenta una carga determinada tienes particularidades que requieren de un análisis individual y más cercano al uso que se desea. En este capítulo se hará referencia a determinados aspectos.

2.1 Variación de voltaje del transformador.

Se llama VARIACION DE VOLTAJE del transformador a la diferencia aritmética entre el voltaje secundario del transformador en vacío y a corriente nominal de carga cuando el voltaje y la frecuencia son constantes e iguales a los nominales. La variación de voltaje representa la característica de explotación más importante del transformador. Determinar la variación de voltaje mediante la construcción del diagrama fasorial, no es cómodo, en vista de la relativa pequeñez de su magnitud y la inexactitud de las construcciones graficas. Por eso se utilizan fórmulas analíticas, las cuales se deducen a continuación .

Utilicemos para la deducción de estas fórmulas el diagrama fasorial simplificado Fig.1-12, construido en unidades relativas para $U_1 = U_{1N}$ e $I_2 = I_{2N}$ o $I_2^{'} I_{2N}^{'} = I_{1N}$ en la Fig. 2-1. Entonces las caídas de voltaje y sus componentes serán iguales al voltaje de cortocircuito y sus componentes en unidades relativas:

$$z_{k*} I_{2N*}^{'} = z_{k*} = u_{k*}; \quad r_{k*} I_{2N*}^{'} = r_{k*} = u_{ka*}; \quad x_{k*} I_{2N*}^{'} = x_{k*} = u_{kr*}$$

como se muestra en la fig. 2-1. En este diagrama, además de esto, la línea CD es la prolongación de OC, AE ⊥ OD ⊥, KB ⊥ OD y ∠BAE = φ2

De acuerdo con lo establecido, la variación de voltaje ΔU , en unidades relativas es:

$$\Delta U* = \frac{U_{20*} - U_{2*}}{U_{20*}} = \frac{U_{20*}^{'} - U_{2*}^{'}}{U_{20*}^{'}} = \frac{U_{1N*} - U_{2*}^{'}}{U_{1N*}} = 1 - U_{2*}^{'} \qquad (2\text{-}1)$$

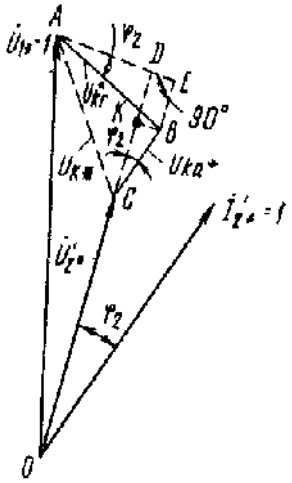


Fig. 2-1. Diagrama para obtener la fórmula de variación de voltaje del transformador.

Sobre la base de la figura 2-1

$$U'_{2*} = OD - CD = \sqrt{OA^2 - AD^2} - CD = \sqrt{1 - AD^2} - CD$$

En la realidad, la magnitud $AD < 1$ para los transformadores y por eso, se puede tomar el valor de la raíz, aproximadamente como los dos primeros términos del binomio de Newton:

$$\sqrt{1 - AD^2} \approx 1 - \frac{AD^2}{2}$$

entonces,

$$U'_{2*} = 1 - CD - \frac{AD^2}{2}$$

y sobre la base de la expresión 2-1

$$\Delta U^* = CD + \frac{AD^2}{2} \qquad (2\text{-}2)$$

De acuerdo con la fig. 2-1,

$$CD = CK + KD = CK + BE = u_{ka*}\cos\varphi_2 + u_{kr*}sen\varphi_2;$$
$$AD = AE - DE = AE - KB = u_{kr*}\cos\varphi_2 - u_{ka*}sen\varphi_2$$

Sustituyendo estos valores de los segmentos en la expresión (2-2), obtenemos la fórmula de cálculo buscada:

$$\Delta U* = u_{ka*}\cos\varphi_2 + u_{kr*}\sin\varphi_2 + \frac{(u_{kr*}\cos\varphi_2 - u_{ka*}\sin\varphi_2)^2}{2} \qquad (2\text{-}3)$$

Usualmente ΔU se calcula en porciento y se expresa a través de $u_{ka\%}$ y $u_{kr\%}$. Sustituyendo en la expresión (2-3)

$$u_{ka*} = \frac{u_{ka\%}}{100}; \quad u_{kr*} = \frac{u_{kr\%}}{100}$$

y multiplicando ambas partes de esta expresión por 100, obtenemos

$$\Delta U_{\%} = u_{ka\%}\cos\varphi_2 + u_{kr\%}\sin\varphi_2 + \frac{(u_{kr\%}\cos\varphi_2 - u_{ka\%}\sin\varphi_2)^2}{200} \qquad (2\text{-}4)$$

El último termino de esta expresión, usualmente es relativamente pequeño y por eso

$$\Delta U_{\%} \approx u_{ka\%}\cos\varphi_2 + u_{kr\%}\sin\varphi_2 \qquad (2\text{-}5)$$

Si es necesario determinar la variación de voltaje para una corriente $\mathrm{I}_2 \neq \mathrm{I}_{2N}$, basta multiplicar los dos primeros términos de las relaciones (2-3) y (2-4) por el factor de carga del transformador $k_c = I_2 / I_{2N}$ y el último termino por k^2.

Para ilustrar la variación de ΔU con el carácter de la carga del transformador en la figura 2-2 se muestra el grafico $\Delta U_{\%} = f(\varphi_2)$ para $I = I_N$. El cuadrante derecho

corresponde a una carga resistiva-inductiva (RL) y el cuadrante izquierdo, a una carga resistiva-capacitiva (RC).

En la figura 2-2 se ve que, para una carga resistiva-inductiva, el voltaje secundario del transformador cae $(\Delta U > 0)$ y en el caso de una carga resistiva-capacitiva con ángulo de defasaje suficientemente grande, aumenta $(\Delta U < 0)$. Esto lo condiciona que la circulación de corriente inductiva por la reactancia inductiva, produce la disminución del voltaje y la corriente capacitiva, su aumento. Cuanto mayor el voltaje nominal del transformador, mayor la dispersión y el voltaje de cortocircuito del transformador y por eso mayor será la variación de voltaje del transformador.

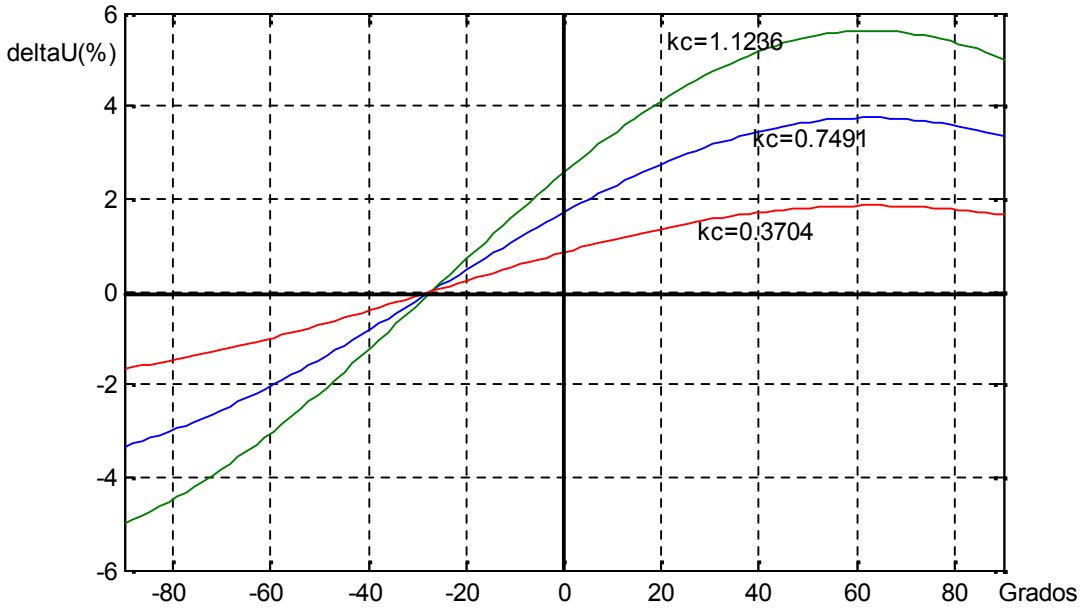


Fig. 2-2. Variación de voltaje con el carácter de la carga, para diferente coeficiente de carga.

2.2. Regulación de voltaje del transformador.

A consecuencia de las caídas de voltaje en el transformador y las redes de alimentación, las oscilaciones de la carga de los consumidores, provoca oscilaciones del voltaje secundario del transformador. Por eso, surge la necesidad de regular el voltaje de los transformadores, lo que se puede realizar por medio de la variación del factor de transformación $k = w_1 / w_2$ o el número de vueltas conectadas del enrollado primario o

secundario del transformador. Con este objetivo el enrollado se construye con una serie de derivaciones (taps) y para regular el voltaje se realiza la conmutación de estos taps, mediante la correspondiente instalación conmutadora.

La conmutación de los taps del enrollado, se puede ejecutar con o sin la desconexión del transformador con carga. Con el primer método de conmutación la instalación es más simple y barata, sin embargo, la conmutación está ligada con la interrupción de la energía eléctrica a los consumidores y no puede realizarse frecuentemente. Por eso, este método se utiliza principalmente para corregir el voltaje secundario de los transformadores reductores de redes, en función del nivel del voltaje primario en una parte dada de la red y también para variaciones temporales del voltaje de la red en relación con variaciones temporales de carga. La conmutación con carga requiere una instalación conmutadora más compleja y cara y se utiliza en los transformadores potentes cuando es necesaria la regulación frecuente y continua del voltaje. La utilización de transformadores con regulación de voltaje con carga se desarrolla ampliamente.

Los transformadores con conmutación del número de vueltas en condiciones de desconexión, se construyen con regulación de voltaje de ± 5% con relación al voltaje nominal (transformadores de fuerza de pequeña .y mediana potencia) y de ± 2,5% y ± 5% (transformadores de gran potencia). En el primer caso el transformador tiene tres niveles y en el segundo, cinco niveles de voltaje. Las derivaciones (taps) se ejecutan en aquel lado, en el cual el voltaje, en el proceso de explotación esta sometido a variaciones. Con esto, el flujo magnético del transformador $\Phi \sim U / W$ con el trabajo en los diferentes niveles (derivaciones) varía poco. Usualmente este lado es el lado de alto voltaje, también tiene la ventaja de que, con esto, en vista del gran número de vueltas, la selección de ±2,5% y ±5% del número de vueltas, puede realizarse con gran exactitud. Además de esto,'la corriente en el lado de alto voltaje es menor y el conmutador es más compacto.

Las partes conmutadas del enrollado entre las derivaciones, racionalmente se distribuyen en la ventana del transformador según la altura del enrollado, en su parte media para que la distribución de las partes del enrollado, cargadas con corriente, sea

con relación al yugo con el trabajo de las diferentes derivaciones, en lo posible simétricas. En caso contrario, el campo magnético de dispersión se distorsiona fuertemente, lo que conduce al aumento de la reactancia inductiva de dispersión y al brusco aumento de las fuerzas que actúan en el enrollado con un cortocircuito. Por otro lado, las derivaciones preferiblemente se realizan desde el lado del enrollado con neutro aterrado (punto neutro) ya que, con esto, el aislamiento del conmutador se aligera.

En la fig. 2-3 se muestran los esquemas más característicos de ejecutar enrollados con derivaciones. El esquema de la fig. 2-3, a, se aplica en los enrollados cilíndricos de múltiples capas y las derivaciones se distribuyen en los extremos de las capas cilíndricas. En el esquema de la fig. 2-3, b, el enrollado se construye de dos partes, enrollados en lados diferentes, para que la f.e.m. y f.m.m; de las dos partes del enrollado se sumen y no se resten. En los esquemas de la fig. 2-2 a y b, se emplea el conmutador trifásico (fig. 2-4, a) y en los esquemas de la fig. 2-3 c y d, cada fase tiene su conmutador (fig. 1-13, b), ya que, en este caso, entre las derivaciones de las diferentes fases existe el voltaje $U \approx 0{,}5U_N$ Los conmutadores se disponen en el interior del tanque del transformador y el extremó del eje del conmutador se saca en la tapa del tanque.

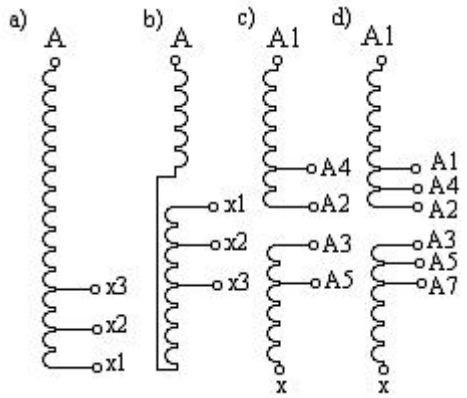


Fig. 2-3. Esquema de los enrollados con taps (derivaciones) para regular el voltaje.

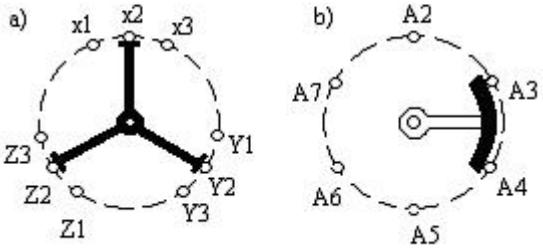


Fig. 2-4. Esquema del conmutador para la regulación de voltaje.

Los transformadores con regulación de voltaje con carga, producidos en el mundo, usualmente se calculan para la regulación de voltaje en los límites del 6-10% a través de 1,25-1,67%. En estos transformadores el tránsito de uno a otro nivel debe

transcurrir sin perturbaciones de la corriente de la red. Por eso, en la posición intermedia se conectan dos derivaciones adyacentes del enrollado y la parte del enrollado entre ellas se encuentra en cortocircuito.

Para limitar la corriente de cortocircuito se utilizan limitadores de corriente reactiva o resistivas.

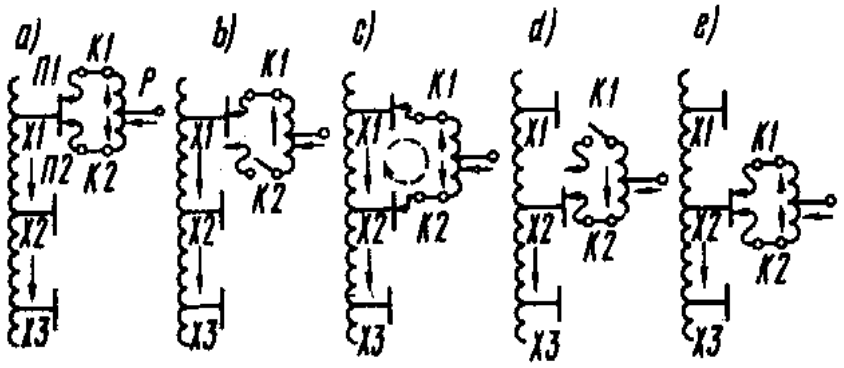


Fig. 2-5. Conmutación de las derivaciones (taps) del enrollado para regular el voltaje con carga, mediante toma a reactor.

En la fig. 2-5 se representa el esquema de la conmutación con el limitador de corriente P y se muestran cinco posiciones consecutivas para el tránsito de la derivación X1 (posición a) a la derivación X2 (posición e). En cada una de las dos ramas del esquema de conmutador se tienen los contactores (Kl, K2) para la desconexión de la corriente de la rama dada ante su conmutación y los contactos móviles del conmutador (III, II2), los cuales se calculan para la conmutación de la rama sin corriente.

En condiciones normales de trabajo (posiciones a y e) las corrientes de las dos ramas del esquema circulan por dos mitades del enrollado del reactor en diferentes sentidos. Por eso, prácticamente no existe, el flujo en el núcleo del reactor y la reactancia inductiva del reactor es pequeña. Al contrario, la corriente de cortocircuito del escalón que aparece durante la posición intermedia del conmutador, mostrada en la fig. 2-5, c con línea discontinua, circula por todo el enrollado del reactor en sentidos iguales, con esto, el núcleo del reactor se magnetiza y la reactancia del reactor en relación con esta corriente es grande.

El reactor P y el conmutador n se disponen en el interior del tanque del transformador y los contactores K en un tanque especial complementario, el cual se monta en una pared lateral del tanque del transformador. Con tal construcción, el aceite en el tanque del transformador se protege de la contaminación ocasionada por el trabajo del contactor con la ruptura en el de la corriente de la red.

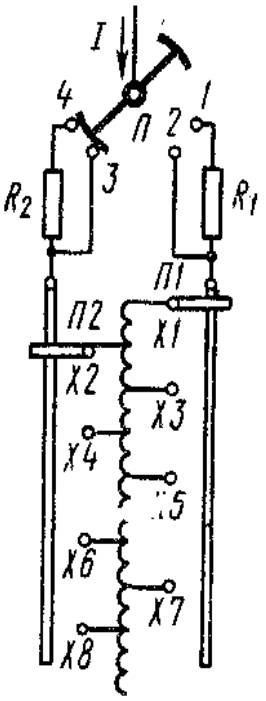


Fig. 2-6. Esquema de regulación de voltaje con carga mediante toma a resistor

En la fig. 2-6 se muestra el esquema principal de conmutación con carga con aplicación de resistencias limitadoras de corriente R_1 y R_2. Para la posición del conmutador mostrada en la fig. 2-6, el transformador trabaja en la derivación X2. Para el tránsito a la derivación XI, al principio en la posición de trabajo se traslada el conmutador ni y después el conmutador II, por la acción del correspondiente mecanismo, rápidamente se lanza a la posición en la cual él se conecta a los contactos 1 y 2. La sucesión de apertura de los contactos 3 y 4 y el cierre de los contactos 1 y 2 con esto, se calcula de manera que la corriente de la red no se perturbe. Es necesario la rapidez de la conmutación, en el transcurso de algunas decenas de segundo, para evitar el calentamiento de las resistencias R_1 y R_2.

2.3. Eficiencia del transformador.

Las pérdidas de potencia activa en el transformador se subdividen en pérdidas eléctricas en los enrollados y pérdidas magnéticas en el núcleo. Las pérdidas adicionales por corrientes parásitas en los enrollados se incluyen en las pérdidas eléctricas. Además de esto, surgen pérdidas por corrientes parásitas del campo de dispersión en las paredes del tanque y en los detalles de fijación. Como estas pérdidas son proporcionales al cuadrado de la corriente, también se atribuyen a las pérdidas eléctricas. El valor de la resistencia de la prueba de cortocircuito r_k, tiene en cuenta estas pérdidas adicionales.

La magnitud de las pérdidas se determina por medio de cálculos durante el diseño del transformador o por vía experimental en los transformadores ya construidos. De acuerdo con las normas de la IEC, las pérdidas magnéticas P_{mag} se determinan de la prueba de vacío.

Como se ha establecido el flujo del transformador para $U_1 = const$ varía algo con las variaciones de carga, en correspondencia con lo cual también varían las pérdidas magnéticas. Sin embargo, las variaciones son relativamente pequeñas y por eso, para $U_1 = U_{1N} = const$, las pérdidas magnéticas para todas las cargas, se toman, de acuerdo con las normas de la IEC, iguales a la potencia de vacío P_0 para este voltaje.

Las pérdidas eléctricas, P_{el}, incluyendo las adicionales, para corriente nominal se aceptan iguales a la potencia de cortocircuito P_k para esta corriente. Usualmente, en la prueba de cortocircuito la temperatura del enrollado θ se diferencia de 75°C y por eso, la potencia P_k se lleva a 75 °C, para lo cual el valor de las pérdidas se multiplica; para el cobre por el factor,

$$k_\theta = \frac{235 + 75}{235 + \theta}$$

y para enrollados de aluminio por el factor

$$k_\theta = \frac{245 + 75}{245 + \theta}$$

Las pérdidas eléctricas para la carga $I = I_N$, se toman iguales a $k_c^2 P_k$, donde

$$k_c = I_2 / I_{2N} \tag{2-6}$$

representa el factor de carga del transformador. Con esto, no se toma en consideración la circunstancia de que, debido a la componente magnetizante de la corriente la relación I_1 / I_{1N}, se aleja algo de k_c, determinado por la fórmula (2-6).

De esta manera, las pérdidas totales del transformador, para $U = U_N$ se toman iguales a

$$P_\Sigma = P_{mag} + P_{el} = P_0 + k_c^2 P_k \tag{2-7}$$

Para orientación de las proporciones que se encuentran en la práctica, en la tabla 2-1 y 2-2 para transformadores monofásicos y la tabla 2-3 para transformadores trifásicos. En los transformadores fabricados, P_0 y P_k, no deben excederlos valores indicados en las tablas 2-1, 2-2 y 2-3, según la norma INEN 2 114:2003.

Tabla 2-1

Transformadores monofásicos de 3 a 333 kVA, clase medio voltaje ≤ 25 kV, clase bajo voltaje ≤ 1,2 kV referidos a 85°C. De acuerdo a la norma INEN 2 114:2003

Potencia nominal kVA	Io (% de Io)	Po (W)	Pk (W)	Pt (W)	U_{2n} (%)
3	2,5	21	70	91	3,0
5	2,5	31	91	122	3,0
10	2,5	52	142	194	3,0
15	2,4	68	192	260	3,0
25	2,0	98	289	387	3,0
37,5	2,0	130	403	533	3,0
50	1,9	160	512	672	3,0
75	1,7	214	713	927	3,0
100	1,6	263	897	1160	3,0
167	1,5	379	1360	1739	3,0

Tabla 2-2

Transformadores monofásicos de 15 a 333 kVA, clase medio voltaje > 25 kV y ≤ 34,5 kV, clase bajo voltaje ≤ 1,2 kV referidos a 85°C. De acuerdo a la norma INEN 2 114:2003

Potencia nominal kVA	Io (% de Io)	Po (W)	Pk (W)	Pt (W)	U_{2n} (%)
15	2,4	141	246	387	4,0
25	2,4	185	360	545	4,0
37,5	2,0	229	486	717	4,0
50	2,0	267	606	873	4,0
75	1,9	331	821	1152	4,0
100	1,7	386	1019	1405	4,0
167	1,6	507	1497	2004	4,0
250	1,6	628	2025	2653	4,0
333	1,6	732	2510	3242	4,0

Tabla 2-3

Transformadores trifásicos de 15 a 2000 kVA, clase medio voltaje ≤ 25 kV, clase bajo voltaje ≤ 1,2 kV referidos a 85°C. De acuerdo a la norma INEN 2 114:2003

Potencia nominal kVA	Io (% de Io)	Po (W)	Pk (W)	Pt (W)	U_{2n} (%)
15	4,4	80	313	393	3,0
30	3,6	134	514	648	3,0
45	3,6	182	711	893	3,0
50	3,4	197	776	973	3,0
60	3,2	225	903	1128	3,5
75	2,6	266	1094	1360	3,5
100	2,6	330	1393	1723	3,5
112,5	2,6	361	1539	1900	3,5
125	2,6	390	1682	2072	3,5
150	2,4	447	1959	2406	4,0
160	2,5	486	2211	2697	4,0
200	2,1	569	2630	3199	4,0
225	2,1	618	2892	3510	4,0

250	2,1	666	3153	3819	4,0
300	2,0	758	3677	4435	4,5
350	2,0	846	4200	5046	4,5
400	1,9	930	4730	5660	4,5
500	1,7	1090	5770	6860	5,0
630	1,6	1284	7170	8454	5,0
750	1,6	1453	8386	9839	5,0
800	1,6	1584	8909	10430	5,0
1000	1,6	1782	11138	12920	5,0
1250	1,5	2088	13454	15542	6,0
1500	1,5	2395	15770	18165	6,0
1600	1,5	2518	16696	19215	6,0
2000	1,5	3009	20402	28400	6,0

La eficiencia del transformador se calcula en la suposición que la potencia útil del transformador se expresa por la relación

$$P_2 = mU_{2N}k_cI_{2N}\cos\varphi_2 = k_cS_N\cos\varphi_2 \tag{2-8}$$

la cual no considera que, con las variaciones de carga, el voltaje U_2 varía y no es exactamente igual a U_{2N}.

En correspondencia con lo expuesto la fórmula para calcular la eficiencia es ,

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - p_\Sigma}{P_1} = 1 - \frac{p_\Sigma}{P_2 + p_\Sigma}$$

toma la forma

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + k_c^2P_k}{k_cS_N\cos\varphi_2 + p_0 + k_c^2P_k} \tag{2-9}$$

La suposición indicada prácticamente se refleja poco en la exactitud del cálculo de la eficiencia.

La eficiencia del transformador es máxima para aquella carga a la cual, las pérdidas variables p_{el} son iguales a las pérdidas constantes p_{mag}, es decir, para $k_c^2 P_k = P_0$.

De esta manera, $\eta = \eta_{\max}$ para

$$k_c = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}} \tag{2-10}$$

La variación de la eficiencia con el factor de carga k_c, para un transformador de fuerza de 180 kVA de capacidad y voltaje de 6,3/0,525 kV, a cos $\varphi_2 = 1$ y $\cos\varphi_2 = 0.8$ se representan en la fig. 2-7. Para este transformador $\eta = \eta_{\max}$ para,

$$k_c = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}} = \sqrt{\frac{1}{4}} = 0{,}5$$

Para valorar la economía del trabajo del transformador considerando las variaciones de su carga, se utiliza el concepto de eficiencia anual, por la cual se entiende la relación entre la energía entregada por el transformador durante un año a la red secundaria y la energía consumida en este mismo tiempo de la red primaria.

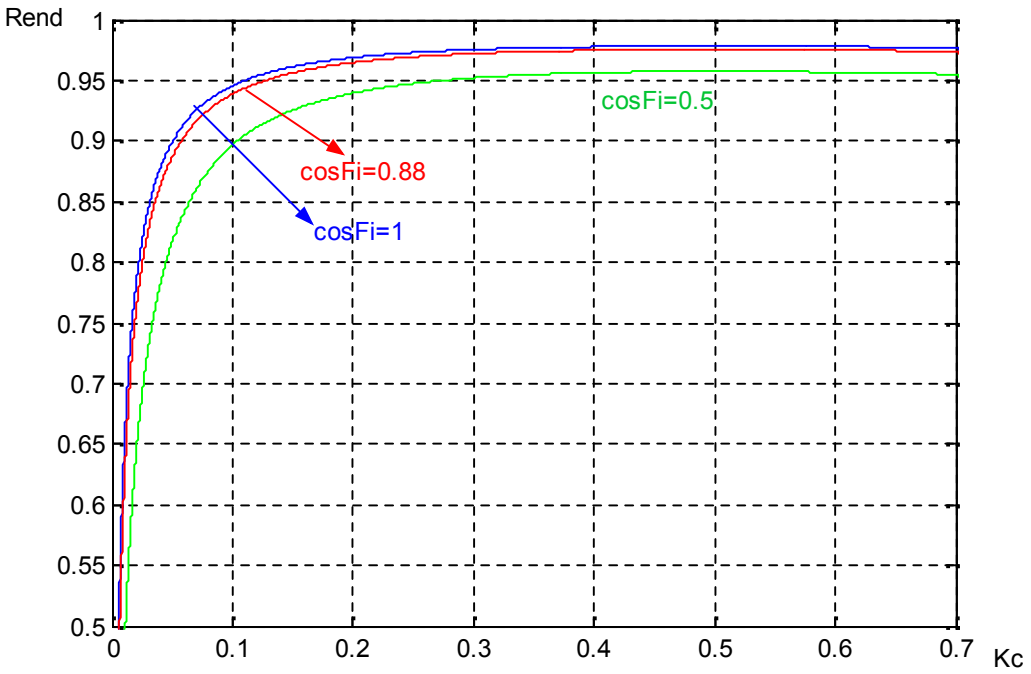


Fig. 2-7. Variación de la eficiencia de un transformador de 180 kVA, con el factor de potencia.

2.4. Transformadores en paralelo

Condiciones para la operación en paralelo.

En las subestaciones transformadoras de subida y bajada, en relación con la potencia de la subestación, usualmente se instalan dos, tres o más transformadores que trabajan en paralelo (Fig. 2-8). La operación de transformadores en paralelo, se requiere en casos similares a la operación de generadores en paralelo: 1) garantizar el suministro de energía a los consumidores en caso de fallas y mantenimiento de los transformadores; 2) disminuir las pérdidas de energía en los períodos de pequeña carga en la subestación, mediante la desconexión de parte de los transformadores que trabajan en paralelo.

Igual que en la operación de generadores en paralelo, para lograr las mejores condiciones de trabajo de los transformadores en paralelo, es necesario que, la carga total de la subestación se distribuya entre los transformadores proporcionalmente a sus capacidades nominales. Esta distribución de carga se logra cuando los transformadores que trabajan en paralelo cumplen con las siguientes condiciones: 1) iguales grupos de conexión de sus enrollados; 2) iguales voltajes nominales primarios y secundarios o lo que es igual, iguales factores de transformación; 3) iguales voltajes de cortocircuito.

Si las dos primeras de estas condiciones se cumplen, el voltaje secundario de fase que corresponde a los transformadores conectados en paralelo, en vacío, cuando los enrollados secundarios están desconectados, serán iguales en módulo y en fase. Por eso al conectar los enrollados secundarios a una barra común, sin carga, no circulará corriente en estos enrollados.

En caso contrario, aún en vacío, circulará una corriente igualadora I_{i11} la cual circulará en el circuito cerrado formado por los enrollados secundarios de los transformadores conectados en paralelo y se refleja también en los enrollados primarios. En la Fig. 2-8, a, se muestra esta corriente con flechas discontinuas. Las corrientes igualadoras, incluso si no son muy grandes y por tanto, no llegan a producir avería, se combinan con la corriente de carga de los consumidores, ocasionando una carga irregular y también pérdidas y calentamiento innecesario de los transformadores.

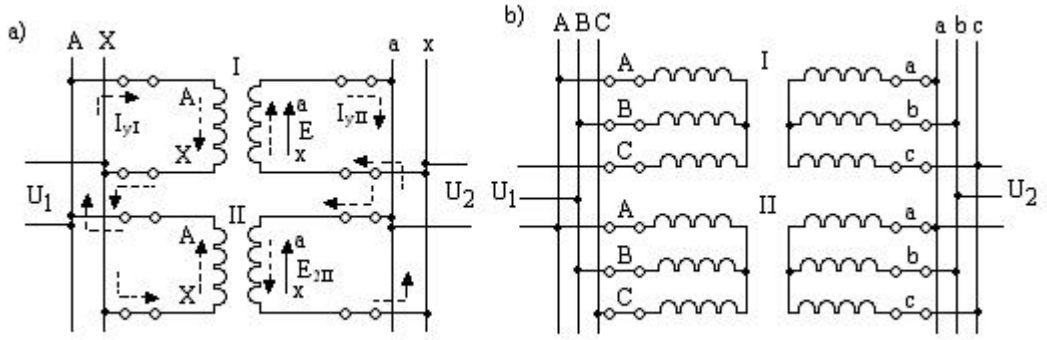


Fig. 2-8. Conexiones de dos transformadores monofásicos (a) y trifásicos (b) en paralelo.

El cumplimiento de la tercera condición señalada, asegura la distribución uniforme de la carga entre los transformadores. Señalamos que, al conectar por primera vez transformadores en paralelo, es necesario comprobar sus fases (fasear), esto es, asegurarse que a cada una de las barras se conectan las fases de los distintos transformadores cuyos voltajes están en fase.

Esta comprobación, conforme por ejemplo, al esquema de la Fig. 2-8, b, en el simple caso de voltajes secundarios no muy grandes, puede realizarse de la siguiente manera. Cerramos todas las cuchillas de los interruptores (desconectivos) del diagrama de la Fig. 2-8, b, sin conectar, por ejemplo, las cuchillas de las fases b y c del transformador II. Después, para $U_1 \neq 0$ medimos el voltaje entre estas cuchillas y sus terminales. Si estos voltajes son iguales a cero, las fases están correctas.

Aclaramos, la influencia del incumplimiento de la desviación de las condiciones generales indicadas para el trabajo de los transformadores en paralelo. Según esto, despreciamos la corriente de magnetización de los transformadores y se utiliza el circuito equivalente simplificado.

2.4.1. Condición de igualdad del grupo de conexión de los enrollados.

Admitamos que para trabajar en paralelo, conectamos dos transformadores con sus enrollados en Y/Δ -11 y Y/Y-0, los cuales tienen iguales voltajes nominales primarios y secundarios. Entonces, las f.e.m. de los secundarios E_2 que corresponden a

las fases de estos transformadores, serán iguales en magnitud, pero desfasadas 30° (Fig. 2-9). En el circuito cerrado de los enrollados secundarios, actuará la diferencia de estas f.e.m.

Estos dos grupos de conexión están relacionados con las horas de un reloj, en este caso 11 significa las once horas y 0 las doce horas, siendo así que solo existe una hora de diferencia o 30° (12 horas = 360°); si fuera mayor la diferencia de horas, mayor diferencia de ángulo habría, queriendo decir con esto que la diferencia de una hora es la menor posible por tanto el menor ángulo posible es de 30°, y si con este ángulo existe una corriente circulante elevada sería mucho mayor con mayor diferencia.

$$\Delta E = 2E_2 \sin 15^\circ = 0{,}518E_2$$

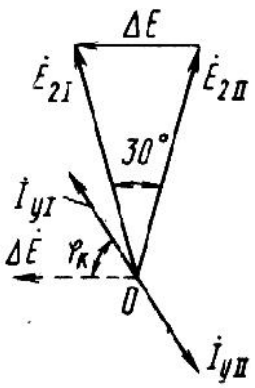


Fig. 2-9. Corriente igualadora en el trabajo en paralelo de un transformador Y/Δ-11 y otro Y/Y-0

La corriente igualadora sólo circulará por los enrollados secundarios y primarios de los transformadores y estará limitada en magnitud, solamente por las impedancias de estos enrollados, esto es, las impedancias de cortocircuito de los transformadores.
Por eso,

$$\dot{I}_i = \frac{\Delta E}{Z_{kI} + Z_{kII}} \qquad (2\text{-}11)$$

Si por ejemplo, la potencia de los transformadores son iguales y $Z_{kI*} = Z_{kII*} = u_{kI*} = u_{kII*} = 0{,}05$, la magnitud relativa de la corriente igualadora será,

$$I_{i*} = \frac{0{,}518}{2 * 0{,}05} = 5{,}18$$

es decir, esta corriente será 5,18 veces mayor que la nominal. La presencia de tal corriente es casi equivalente a un cortocircuito. Por tanto, la conexión en paralelo de transformadores de diferente grupo de conexión, no es admisible.

Sin embargo, es posible el caso, por medio de una transposición circular en la designación de los terminales de los enrollados o las correspondientes conexiones de los terminales de dos transformadores, conseguir la coincidencia de fases de las f.e.m. de las fases conectadas en paralelo, de transformadores que tienen diferente grupo de conexión. En cada caso concreto, esta posibilidad debe comprobarse por el análisis del diagrama fasorial de los, voltajes de los transformadores.

2.4.2. Condición de relación de transformación igual.

Sea, por ejemplo, los transformadores monofásicos (vea fig. 2-8, a), con voltajes nominales primarios y secundarios desiguales y por eso $\dot{E}_{2I} > \dot{E}_{2II}$ (Fig. 2-10, a). En el

circuito cerrado de los enrollados secundarios actuará la diferencia $\Delta \dot{E} = \dot{E}_{2I} - \dot{E}_{2II}$ y aparecerá una comente igualadora, determinada por la igualdad (2-11). Esta corriente actúa en los enrollados secundarios de los transformadores de forma diferente con relación a los sentidos de sus f.e.m. (Fig. 2-8, a y 2-10, a): del transformador I sale la corriente I_{iI} y el transformador II consume la corriente I_{iII}. La caída de voltaje producida por la corriente igualadora en los enrollados de los transformadores, equilibra el voltaje de los enrollados secundarios (Fig., 2-10, a).

Al conectar la carga a los transformadores, aparece una corriente de carga I_{cI} e I_{cII}. Sumando con ellas la corriente igualadora,

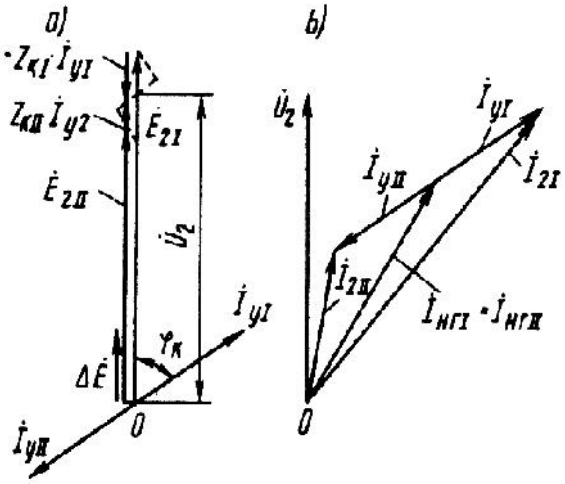


Fig.2-10. Corriente igualadora en transformadores con diferente factor de transformación.

obtenemos las corrientes desiguales I_{2I} e I_{2II} y la carga desigual de los transformadores (Fig. 2-10, b).

Como ejemplo, permitamos la operación en paralelo de dos transformadores de iguales potencias y $Z_{kI*} = Z_{kII*} = 0{,}055$ y que sus relaciones de transformación se diferencien en un 1%. Entonces $\Delta E = 0{,}01 U_N$ y de acuerdo con la fórmula (2-11),

$$I_i = \frac{\Delta E_*}{Z_{kI*} + Z_{kII*}} = \frac{0{,}01}{2 * 0{,}055} = 0{,}091 \text{ o } 9{,}1\%,$$

es decir, la corriente igualadora representa una magnitud bastante grande. En general, se permite una diferencia en los valores de la relación de transformadores del 0,5% y para transformadores con k > 3 del 1,0%. Se permite la operación de transformadores en paralelo con estas diferencias en la relación de transformación.

2.4.3. Condición de igualdad de los voltajes de cortocircuito.

Veamos la operación en paralelo de tres transformadores de iguales voltajes nominales e iguales grupo de conexión. Los resultados obtenidos así, pueden fácilmente extenderse a cualquier número de transformadores que trabajen en paralelo. Despreciando las corrientes magnetizantes y utilizando el circuito equivalente

simplificado (vea Fig. 1-4) podemos representar el circuito de tres transformadores en paralelo, según se muestra en la Fig. 2-11.

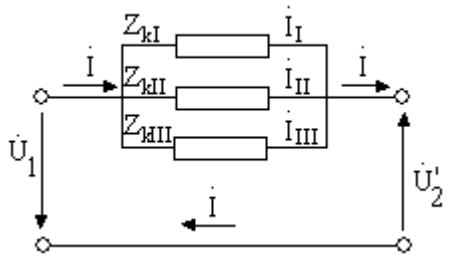


Fig. 2-11. Circuito simplificado del trabajo en paralelo de transformadores del mismo grupo de conexión e iguales factores de transformación.

La caída de voltaje

$$\Delta \dot{U} = U_1 - \dot{U}'_{20} - \dot{U}'_2$$

será igual en los tres transformadores:

$$\Delta \dot{U} = Z\,\dot{I} \tag{2-12}$$

donde $\dot{I}$ es la corriente total de carga y

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{Z_{kI}} + \frac{1}{Z_{kII}} + \frac{1}{Z_{kIII}}} = \frac{1}{\sum_n \frac{1}{Z_{Kn}}} \tag{2-13}$$

Las corrientes de los diferentes transformadores serán;

$$\dot{I}_1 = \frac{\Delta \dot{U}}{Z_{kI}} = \frac{\dot{I}}{Z_{kI} \sum_n \frac{1}{Z_{kn}}} \quad ; \quad \dot{I}_{II} = \frac{\dot{I}}{Z_{KII} \sum_n \frac{1}{Z_{kn}}} \quad ; \quad \dot{I}_{III} = \frac{\dot{I}}{Z_{kIII} \sum_n \frac{1}{Z_{kn}}} \tag{2-14}$$

En el caso general, estas corrientes no concuerdan en fase, ya que los argumentos $\varphi_{kI,}$ φ_{KII} y φ_{kIII} de las impedancias de cortocircuito

$$Z_{kI} = Z_{kI} e^{j\varphi kI} \quad ; \quad Z_{kII} = Z_{kII} e^{j\varphi kII} \quad ; \quad Z_{kIII} = Z_{kIII} e^{j\varphi kIII}$$

pueden ser desiguales. Con esto, por ejemplo

$$\frac{\dot{I}_I}{\dot{I}_{II}} = \frac{Z_{kII}}{Z_{kI}} e^{j(\varphi kII - \varphi kI)}$$

es decir $\dot{I}_I$ e $\dot{I}_{II}$ están desplazados en fase al ángulo $\varphi kII - \varphi kI$. Sin embargo, en condiciones usuales, este desfasaje no es grande y con gran exactitud

$$I_I + I_{II} + I_{III} = I \tag{2-15}$$

por tanto, la suma de las potencias aparentes de los transformadores es igual, con .gran exactitud, a la potencia aparente de la carga S:

$$S_I + S_{II} + S_{III} = S \tag{2-16}$$

Consecuentemente, las magnitudes complejas utilizadas en las expresiones (2-13) y (2-14) pueden sustituirse por sus módulos.

De acuerdo con la determinación

$$Z_{kI*} = \frac{Z_{kI} I_{IN}}{U_N}$$

de donde obtenemos

$$Z_{kI} = Z_{KI*} \frac{U_N}{I_{IN}} = \frac{u_{kI\%}}{100} * \frac{U_N}{I_{IN}}$$

y expresiones análogas para Z_{kII} y Z_{kIII}.

Sustituimos estas expresiones de Z_k en (2-14) y cambiamos las corrientes proporcionalmente a sus potencias aparentes y multiplicando (2-14) por la magnitud U_N obtenemos,

$$mU_N I_I = \frac{mU_N}{\frac{u_{kI\%}}{100} * \frac{U_N}{I_{IN}} : \frac{m}{m} \sum_n \frac{100 I_{Nn}}{u_{kn\%} U_N}}$$

o

$$S_{I*} = \frac{S}{\frac{u_{k1\%}}{S_{NI}} \sum_n \frac{S_{Nn}}{u_{kn\%}}}$$

En unidades relativas

$$S_{I*} = \frac{S_I}{S_{NI}} = \frac{S}{u_{KI\%} \sum_n \frac{S_{Nn}}{u_{kn\%}}}$$

$$S_{II*} = \frac{S_{II}}{S_{NII}} = \frac{S}{u_{kII\%} \sum_n \frac{S_{Nn}}{u_{kn\%}}} \qquad (2\text{-}17)$$

$$S_{III*} = \frac{S_{III}}{S_{NIII}} = \frac{S}{u_{kIII\%} \sum_n \frac{S_{Nn}}{u_{kn\%}}}$$

Sobre la base de las igualdades (2-17)

$$S_{I*} : S_{II*} : S_{III*} = \frac{1}{u_{kI\%}} : \frac{1}{u_{kII\%}} : \frac{1}{u_{kIII\%}} \qquad (2\text{-}18)$$

Es decir, la carga relativa de los transformadores es inversamente proporcional a sus voltajes de cortocircuito.

Si $u_{kI\%} = u_{kII\%} = u_{kIII\%}, S_{I*} = S_{II*} = S_{III*}$, es decir los tres transformadores se cargan igualmente y según la carga, alcanzan simultáneamente la potencia nominal. Evidentemente, bajo estas condiciones, la operación en paralelo es óptima. Si los $U_{k\%}$ no son iguales, al aumentar la carga, el transformador con menor $U_{k\%}$ será el primero en alcanzar la carga nominal. Los otros transformadores no estarán aún plenamente cargados y desde ese momento, no son permisibles aumentos posteriores de la carga total, ya que el transformador de menor $u_{k\%}$ se sobrecargaría. La capacidad de los transformadores; de esta manera, se subutiliza. Se recomienda conectar en paralelo, aquellos transformadores, en cada uno de los cuales, el valor $u_{k\%}$ no diferencie más de ±10% del valor medio aritmético $u_{k\%}$ de todos los transformadores que trabajarán en paralelo y cuyas capacidades relativas estén en el rango 3:1.

2.5. Selección de transformadores teniendo en cuenta la sobrecarga.

En los sistemas industriales de suministro eléctrico la potencia de los transformadores debe garantizar, en condiciones normales, la alimentación de todos los consumidores o receptores. En la relación de la potencia de los transformadores se debe tratar de obtener tanto el régimen de trabajo económicamente útil, como la alimentación de reserva explícita e implícita de los consumidores; además, la carga de los transformadores, en condiciones nominales, no debe (por calentamiento) conducir al acortamiento de su tiempo de vida ó servicio. La potencia del transformador debe garantizar la demanda indispensable de potencia durante el periodo posterior a la desconexión del transformador averiado, en dependencia de los requerimientos presentado por los consumidores de acuerdo a su categoría.

Como regla general, todas las instalaciones, de año en año, aumentan su productividad y se amplían ya por la construcción de nuevas áreas de producción o por la más racional utilización de las existentes.

Puede asegurarse que, ya sea por una causa o por la otra, la potencia eléctrica demandada por la empresa industrial crece. Por ello es conveniente, para tomar en cuenta el crecimiento de la demanda de potencia, prever la posibilidad del incremento

de potencia de las subestaciones a través del cambio de los transformadores por otros más potentes; esto es, prever la posibilidad de la instalación de transformadores mayores en un grado de potencia estándar.

Se denomina potencia nominal de un transformador a la potencia a que este puede ser cargado ininterrumpidamente durante todo su tiempo de vida o servicio bajo condiciones normales de temperatura del medio refrigerante.

La potencia de los transformadores es conveniente seleccionarla teniendo en cuenta su capacidad de sobrecarga. El no prestar atención a la capacidad de sobrecarga del transformador significa depender innecesariamente de la capacidad nominal. En las condiciones de explotación se admiten las sobrecargas: de emergencia y sistemáticas.

Sobrecargas de emergencia.

Para transformadores con sistemas de enfriamiento una sobrecarga de corta duración. En aquellos casos en que la carga del transformador, antes de la sobrecarga de emergencia no sobrepase el 0,93 de potencia de chapa, éste puede ser sobrecargado durante cinco días en un 40%. Sin embargo la duración de la sobrecarga no deberá exceder de 6 horas cada día, ya sea en forma consecutiva o intervalos (ver anexo 4).

Sobrecarga sistemática.

La sobrecarga sistemática es aquella carga adicional permisible del transformador mediante las horas máximas de carga, superior a la nominal debido a la utilización incompleta del transformador durante el resto del día. Pueden ser admitidas sobrecargas adicionales en los casos en que exista marcada diferencia. En cualquier caso, la sobrecarga total no debe exceder del 30%.

2.6. Trabajo de transformadores de acuerdo a la altura.

Tabla 2-4

Factores de corrección de acuerdo a la altura en la que se encuentra un transformador.

Altura en metros	Factor de corrección
1000	1,00
1200	0,98
1500	0,95
1800	0,92
2100	0,89
2400	0,86
2700	0,83
3000	0,80
3600	0,75
4200	0,70
4500	0,67

La altitud de 4500 metros es considerada la máxima para transformadores normales.

El aumento en la altitud produce disminución en la densidad del aire, la cual a su vez disminuye la tensión de flameo. La rigidez dieléctrica de algunas partes de un transformador que dependen total o parcialmente del aire para su aislamiento, dada la rigidez dieléctrica a 1000 metros de altitud debe multiplicarse por el factor de corrección apropiado para la nueva altitud a fin de obtener la nueva rigidez dieléctrica a la altitud especificada.

La prueba de potencial aplicado, tiene como ya se dijo que aplicarse lentamente, hasta llegar al voltaje de norma el cual ya se indica, así como el factor de corrección para este caso, la duración de esta prueba es de un minuto durante el cual, de no dispararse el interruptor de seguridad de inmediato, la prueba se toma como buena, ya que el aislamiento no se ha perforado, lo que se manifiesta por un zumbido especial en

el interior del transformador, o el disparo del interruptor y el exceso de corriente que toma en este caso la alimentación del potencial.

2.7. Régimen anormal de alimentación.

Operación de emergencia de un banco Delta-Y

Cuando la energía es transmitida con un banco delta-Y lado de alta y un banco Y-delta por el lado de baja el servicio puede mantenerse, a carga reducida, cuando una fase está inhabilitada, se conectan juntos los neutrales a tierra o, preferentemente, a través de un conductor de cobre. En la figura 2 –12, este arreglo es demostrado en el caso de una falla en el banco de sep-up para una carga en el lado de alto voltaje. En la figura 2-13 el mismo arreglo es demostrado, con la excepción que la carga está en el lado secundario del step-down del transformador En ambas figuras, el neutro está obligado a conducir una corriente excesiva. Debe notarse que, aunque esta conexión entrega tres corrientes de fase que son aproximadamente simétricas a tres fases de una carga simétrica, las corrientes que circulan en el circuito de alto voltaje no son iguales ni están a 120°. Los valores y relaciones de fase de las corrientes en la línea de alto voltaje, ignoran los efectos de los voltajes desequilibrados debido a la conexión no simétrica, está ilustrado en el diagrama fasorial adjunto.

El máximo rendimiento seguro del banco que opera de esta manera es 58% del banco Y-delta original. El sistema esta demasiado desequilibrado electro-estáticamente y electro-magnéticamente.

Uso del banco transformador Y-Delta con neutro a tierra del sistema.

Los sistemas de alimentación generalmente están conectados a tierra aunque el neutro de un banco step-up delta-Y, esta localizado en la estación generadora. Algunas veces un transformador con Y-delta sep-down se usa para este propósito, y, cuando los neutros de ambos transformadores de potencia, sep- up y sep-down están inhabilitados para conectar a tierra, como cuando ambos bancos están conectados en delta-delta; puede agregarse un Y-delta especial que conecte el transformador a tierra con el solo

propósito de mantener el neutro aterrado. La distribución de la corriente resultante y la distorsión del voltaje, en el caso de una falla de línea a tierra, difiere considerablemente, dependiendo del neutro del transformador step-up en la planta generadora o el neutro del transformador step-down es aterrado.

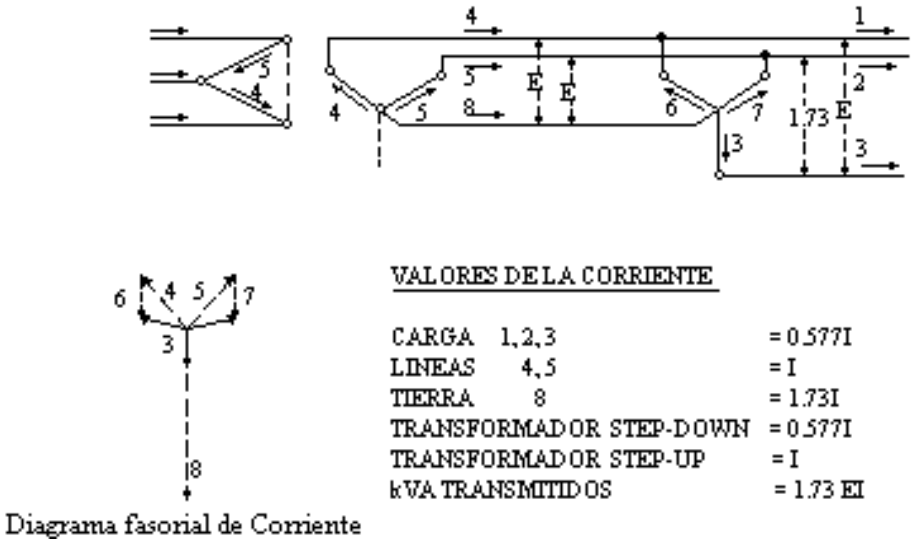


Fig. 2-12. Operación de emergencia del banco delta-Y con carga en el lado del primario del transformador step-down.

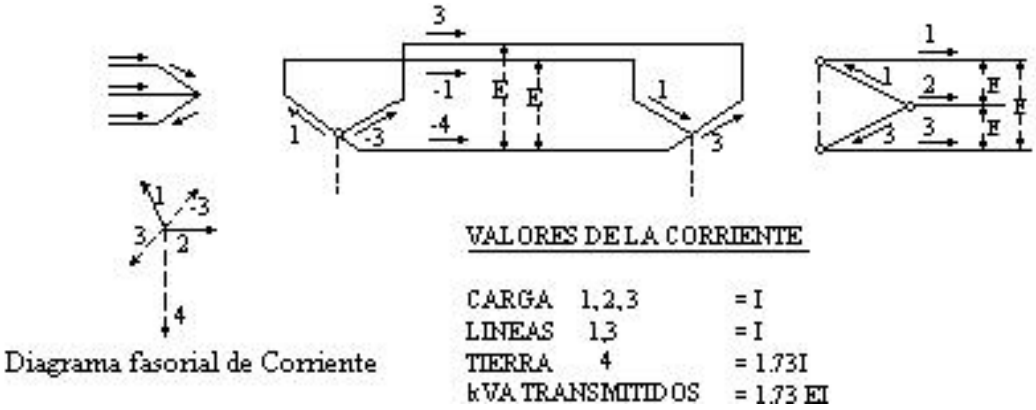


Fig. 2-13. Operación de emergencia del banco delta-Y con carga en el lado del secundario del transformador step-down.

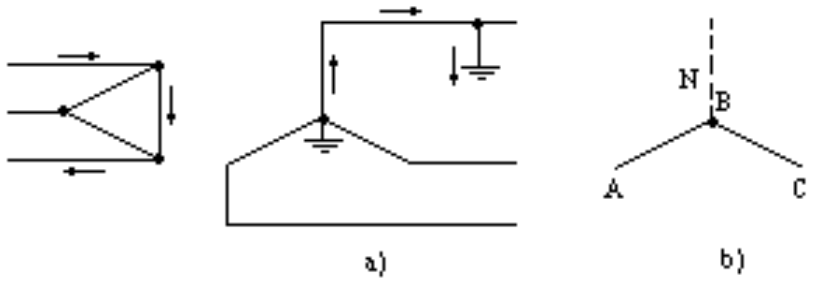


Fig. 2-14. Sistema conectado a tierra por medio del neutro del transformador step-up. a) Distribución de la corriente por la falta de una fase. b) Distorsión del voltaje ante una falla.

La distribución de la corriente y los cálculos de estos valores son bastante obvios donde el sistema se conecta a tierra a través del neutro del banco del transformador step-up. (Fig. 2-14), pero por ningún medio obvio cuando el banco step-down o el banco auxiliar es usado con propósito de conectar a tierra (Fig. 2-15). Asumiendo que la falta de corriente es limitada solamente por la impedancia del banco del transformador q esta con el neutro conectado a tierra, la corriente de cortocircuito que circula en los bobinados, son iguales para ambos casos.

$$I_s = \frac{I}{IZ} \tag{2-19}$$

donde

I_s = Corriente de corto circuito que circula en el transformador conectado a tierra.

I = Corriente por fase del transformador conectado a tierra.

IZ = Impedancia por unidad de los transformadores conectados a tierra.

En el caso del banco step-down (Fig. 2-15a) el delta del bobinado sirve para acoplar las tres fases, así que, en efecto, todo esta cortocircuitado, la corriente de cortocircuito I_s fluye por los bobinados. Esto se demuestra en la Fig. 2-15b. En donde los voltajes de fase del transformador por la duración de la falla son demostrados. Los voltajes en Y se distorsionan, así que dos fases tienen señalados en ellos línea a línea los voltajes a y c, y, la fase que corresponde a la falla de cortocircuito, el voltaje señalado es cero. Por otro lado los voltajes en el delta no están afectados por las condiciones de cortocircuito. Se notará que los voltajes primarios y secundarios (asumiendo un radio 1:1) no son iguales en fase; pero para cada fase, el fasor se diferencia entre los voltajes

terminales del primario y el secundario (Fig. 2-15b) iguales a BO el voltaje normal de la fase en cortocircuito.

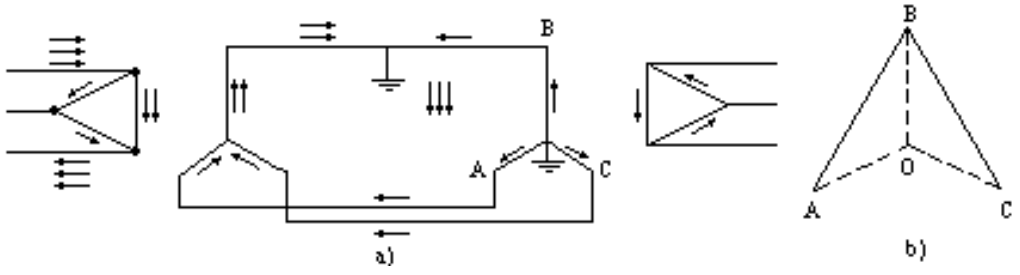


Fig. 2-15. Sistema de puesta a tierra por bajo rendimiento del neutro del transformador step-down, o transformador auxiliar puesto a tierra. a) Distribución de corriente para una fase averiada. b) Distorsión del voltaje.

$$a - a' = BO$$
$$c - c' = BO$$
$$b' = BO$$

Como la diferencia de fase en los voltajes terminales entre el primario y el secundario es la impedancia q cae del transformador, circula una corriente I_s, de acuerdo con la ecuación anterior, circulando por los seis bobinados del transformador.

De la Fig. 2-15, donde es demostrada la circulación de la corriente, es evidente que la corriente en la falla es $3I_s$, y en la línea entre el transformador step-up a la falla $2I_s$. Debe notarse que, como las dos fases del transformador a y c son sobreexcitados un 73%, la excesiva corriente de excitación debe fluir, y el valor de la corriente en estas fases puede aumentar considerablemente.

La impedancia de la línea y la impedancia del transformador step-up son despreciadas. Teniendo en cuenta esto, la corriente de cortocircuito que circula como resultado de una falla en la línea a tierra puede estar determinada por la siguiente fórmula;

$$I_s = \frac{I}{IZ + 2IZ_G} \tag{2-20}$$

donde

I_s = corriente de corto circuito que fluye por las fases del transformador puesto a tierra.

I = porcentaje de corriente del transformador puesto a tierra.

IZ = Impedancia por unidad del transformador puesto a tierra.

IZ_G = impedancia del circuito entre la falla y la fuente de poder, incluyendo al transformador step-up y al generador. Como la caída en la línea de falla entre la falla y el transformador step-down es negativa, es neutralizado por el incremento positivo en las dos líneas de retorno.

Para una corriente de corto circuito dada, el cambio del neutro y el incremento de las tensiones de línea, es el mismo sin tomar en cuenta si la unidad conectada a tierra se conecta en zigzag o Y-delta.

Como el transformador Y-delta, puesto a tierra consiste de tres enrollados primarios conectados en Y, cada uno se diseño para 57,7 por ciento de voltaje de línea y para conducir una corriente de cortocircuito I_s, junto con enrollados terciarios en delta llevando una cantidad igual de voltio-amperios, el total de voltio-amperios asociados con el transformador es 6 X 0,577 EI_s = 3,46 EI_s, donde E es el voltaje de línea. Este valor es 1,73 veces más grande que el transformador puesto a tierra en zigzag para un mismo desempeño. Por consiguiente los enrollados en zigzag son preferidos, a menos que los enrollados terciarios en delta se necesiten para otros propósitos.

En el diseño y operación de transformadores puestos a tierra, debe considerarse el hecho que estos frecuentemente estarán sometidos a corrientes de cortocircuito mas que otros transformadores de potencia. Además, cuando los transformadores puestos a tierra han sido pequeñamente proporcionados en comparación a la proporción con el sistema, la máxima corriente de cortocircuito resultante de una línea a tierra circulando en el sistema no es tan brusca una sobrecarga en el sistema como en el transformador puesto a tierra, y la tendencia es a permitir q circulen estas corrientes para periodos mas

largos. Deben tenerse en cuenta ambas consideraciones para diseñar y operar transformadores puestos a tierra.

CAPITULO III: Análisis del comportamiento del transformador con Matlab.

Para dar solución a muchos aspectos del comportamiento del transformador se hace necesario establecer el conjunto de ecuaciones que intervienen en diferentes aspectos vinculados al mismo, por ello en aras de ganar en claridad, precisión, rapidez y efectividad a varias aplicaciones al mismo tiempo se elabora una aplicación desde Matlab 6.5, empleando la interfase gráfica de usuario (GUI).

3.1. Puntualidades.

Al iniciar se observa la ventana inicial (figura 3-1.) que ayudará en los siguientes pasos:

Existe una primera selección debajo de **Transformador**, al hacer clic sobre **Monofásico,** se ha seleccionado el trabajo en este régimen y por tanto todos los pasos restantes serán sobre transformadores monofásicos. Se esconden las opciones que estaban bajo la selección **Trifásico**.

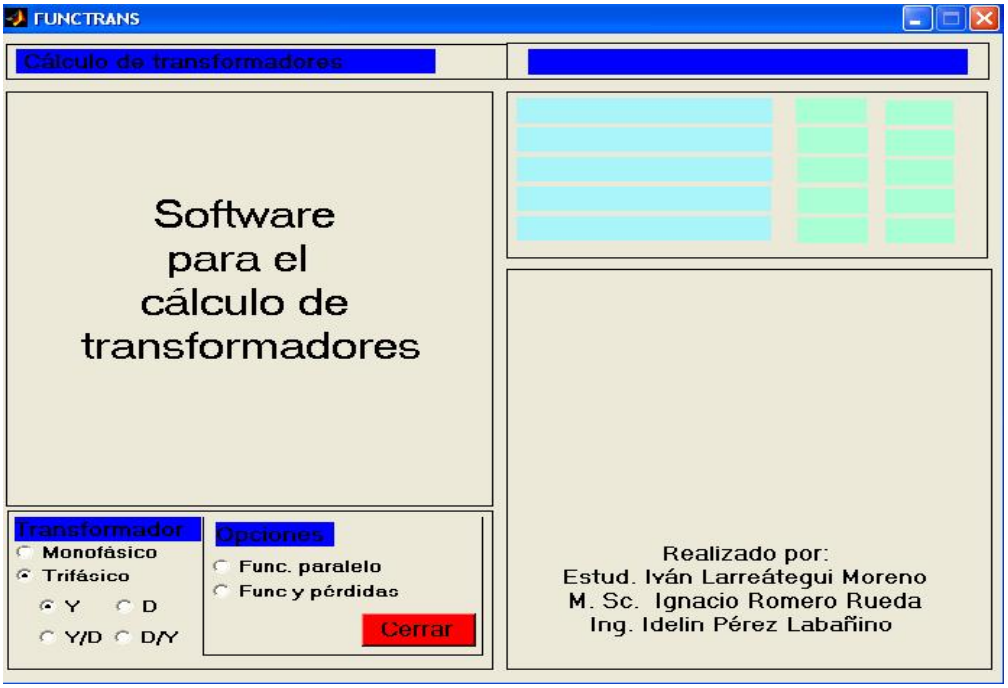


Fig. 3-1. Ventana inicial de FUNCTRANS

Al hacer clic sobre **Trifásico** nuevamente aparecerán las conexiones típicas, de las cuales ha de seleccionarse una. El trabajo futuro se desarrolla para transformadores trifásicos, de la conexión seleccionada.

En el segundo cuadro **Opciones**; al hacer clic sobre funcionamiento en paralelo **Func. paralelo;** el software abre una ventana de introducción de datos (figura 3-2.) para dos transformadores (el programa limita el trabajo en paralelo solo a dos transformadores). Partiendo de datos de catálogos tales como; Potencia nominal en (kVA); Tensión de primario y secundario en (V); Tensión de cortocircuito en (%); Pérdidas de vacío y cortocircuito en (kW); Corriente de vacío en (%).

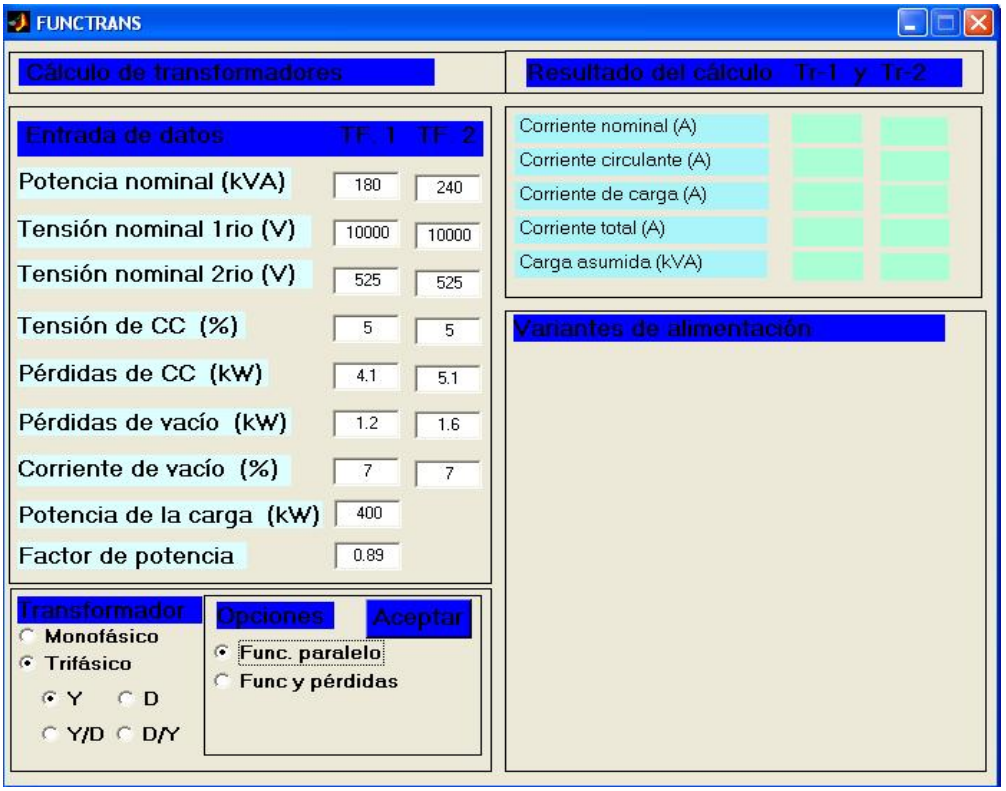


Fig. 3-2. Ventana de entrada de datos para el funcionamiento en paralelo de dos transformadores.

Los dos últimos datos se refieren a la carga que alimentará independientemente del tipo de circuito trifásico ó monofásico, representa la carga total en (kW) bajo un factor de potencia promedio.

También aparece el botón que efectuará los cálculos **Aceptar**. Al pulsar sobre este botón, se llenará por vez primera el cuadro debajo de **Resultados de cálculo**, donde se observan los elementos más importantes durante la operación en paralelo de dos transformadores; además de la corriente nominal de cada transformador.

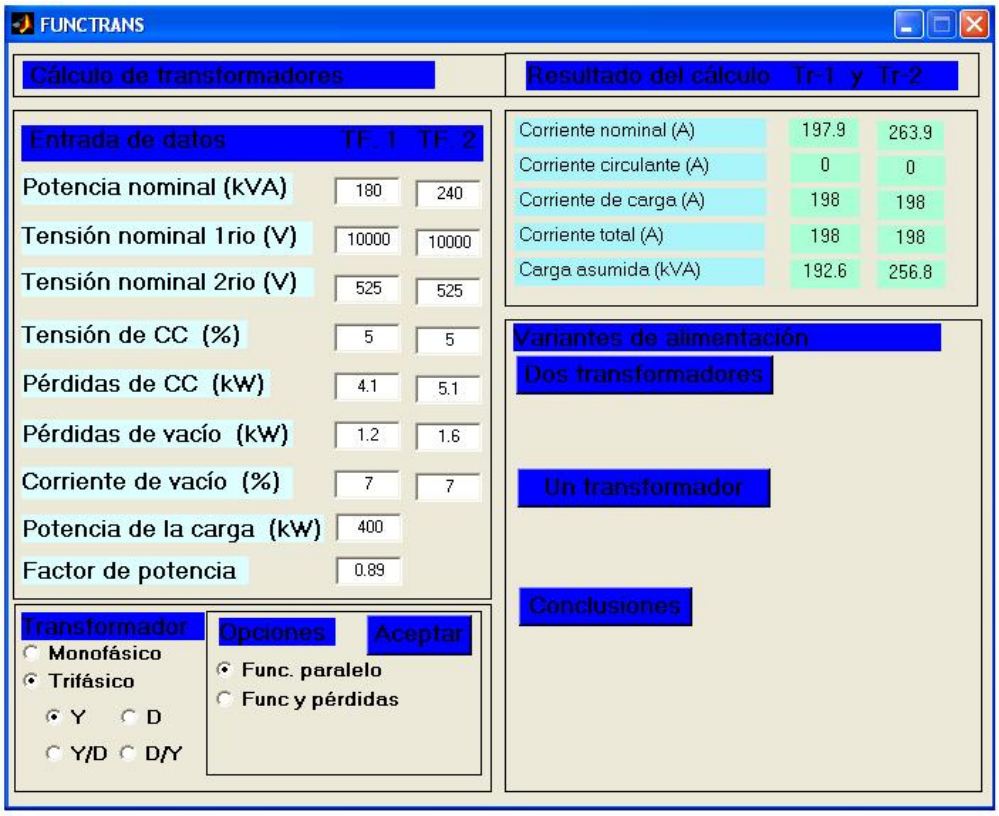


Fig. 3-3. Resultados del cálculo en paralelo.

En la figura 3-3. se pueden observar las siguientes magnitudes: Corriente nominal (A) del primero y el segundo transformador; Corriente circulante (A); Corriente de carga de cada transformador y la Corriente total que incluye las corrientes de carga y circulante. Por último se sitúa la carga asumida por cada transformador en (kVA).

Si se quiere utilizar otro transformador se puede situar los datos solicitados y hacer clic sobre **Aceptar** y se actualizará los resultados de cálculos. Esto se puede hacer tantas veces como se quiera. En caso de transformadores trifásicos la corriente nominal pertenece a la de línea.

En el cuadro de **Variantes de alimentación** se utiliza para comparar el trabajo de dos transformadores o solo uno cuando se alimenta la carga dada; también para el cálculo de las pérdidas de los transformadores y el estimado de energía anual por este concepto.

Dos transformadores; toma los datos que se observan en pantalla y calcula las pérdidas totales en kW y el estimado de energía anual en (MWh). El botón cambia el nombre por **Aceptar**. Si se quiere cambiar algo de la ventana se puede hacer y pulsando **Aceptar**, con lo que se aceptan los valores introducidos.

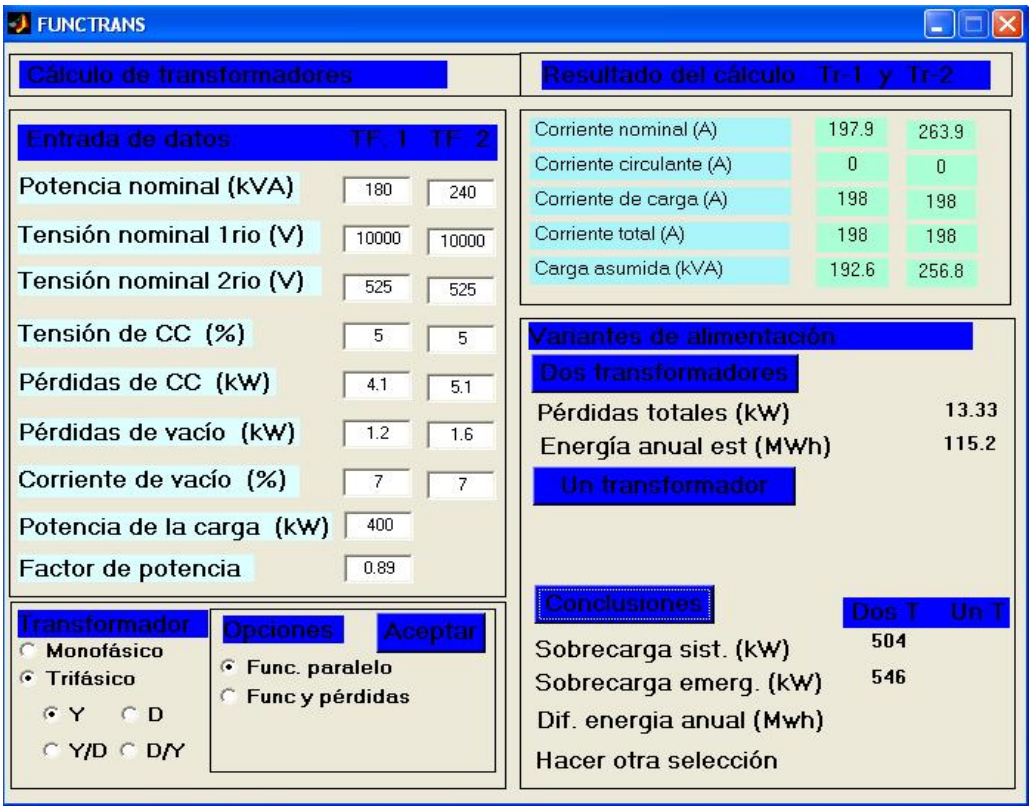


Fig. 3-4. Resultado de la alimentación con dos transformadores.

Al pulsar sobre **Un transformador** se ajusta la ventana; calcula las pérdidas totales (kW) y la energía anual estimada (MWh), pero en el transformador presente, es necesario cambiar los valores para el transformador que se escogerá y pulsar **Aceptar** con lo cual se acepta los nuevos valores.

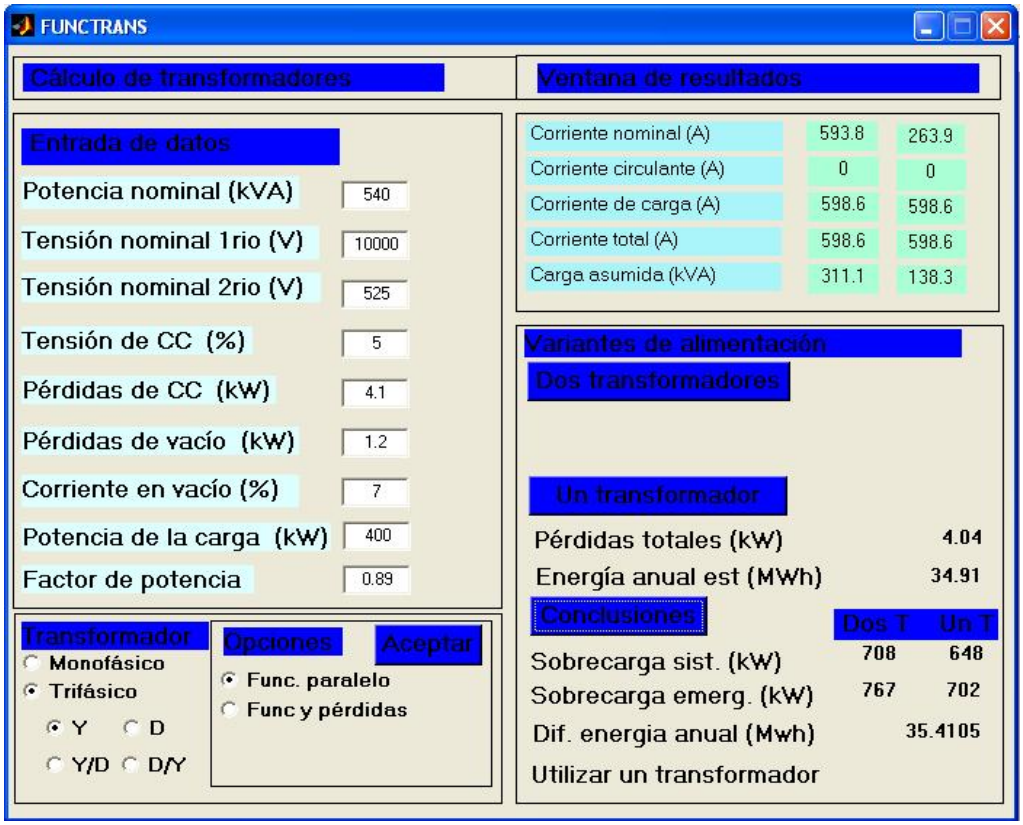


Fig. 3-5. Resultado de la alimentación con un solo transformador.

Por último **Conclusiones** compara la selección de dos transformadores o solo uno y muestra en pantalla los datos de sobrecarga sistemática (kW). Esto tomado sobre la base de la capacidad instalada y la carga que alimentará; también sobre este criterio la sobrecarga de emergencia (kW). También ofrece el dato sobre la diferencia de energía anual estimada (MWh) entre las dos formas de alimentación.

La última parte recomienda utilizar un transformador, utilizar dos transformadores o hacer otra selección. Esta última opción es cuando la potencia de la carga representa más del 85% de la potencia total de los transformadores o el transformador (se recomienda que el estado de carga no sea mayor que este valor). De lo contrario se podrá asumir quien tenga menos pérdidas totales y la potencia total sea mayor que la carga.

Para volver a iniciar el análisis del funcionamiento en paralelo, es obligatorio hacer clic sobre **Func. Paralelo** y aunque aparece solucionado, es apariencia por tal motivo si se pulsa sobre **Aceptar** no dan resultado alguno.

Las condiciones para el funcionamiento en paralelo están implícitas en el programa y por tal motivo estas no se solicitan al usuario. Se puede cambiar los parámetros de esas condiciones tales como: Tensión de cortocircuito y tensión del secundario. No es posible cambiar el grupo de conexión.

Func y pérdidas, prepara para el cálculo del rendimiento y variación de tensión, además se abre una ventana para la introducción de los datos de catálogo; aparecen las opciones de **Rend y deltaU** y **Carga puntual,** (Fig. 3-6.) ambas opciones solicitan la potencia de la carga a alimentar (kW), factor de potencia y en caso de carga puntual la tensión de la carga.

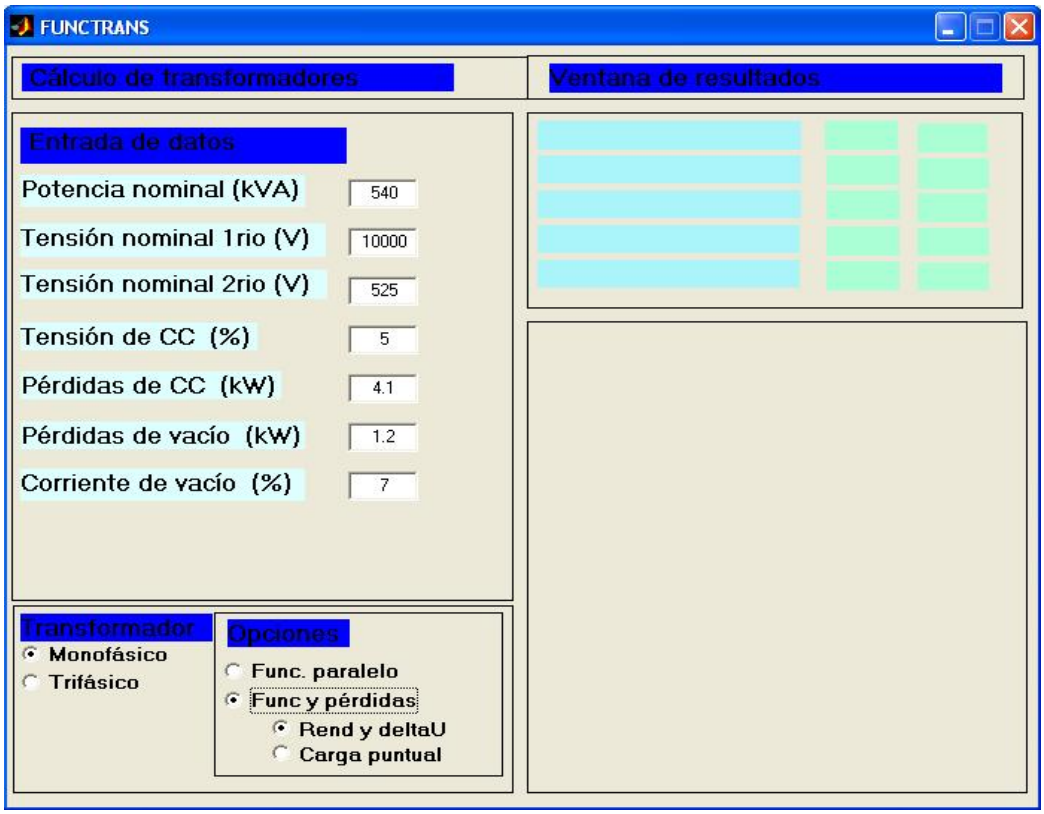


Fig. 3-6. Ventana para la introducción de datos para funcionamiento y pérdidas.

Al decidirse por la opción **Rend y deltaU** se prepara la ventana para recibir cálculos y gráficos; aparece una nota a leer bajo **IMPORTANTE**, al pulsar sobre **Aceptar** aparecen los datos del circuito equivalente y se sitúan en el cuadro superior, se toman los valores máximos de la variación de tensión y el ángulo para el cual se obtiene **Variación DUmáx% y Fi_m**; también el rendimiento máximo y coeficiente de carga para el cual se obtiene, **Rendimiento Rmáx y kcm**

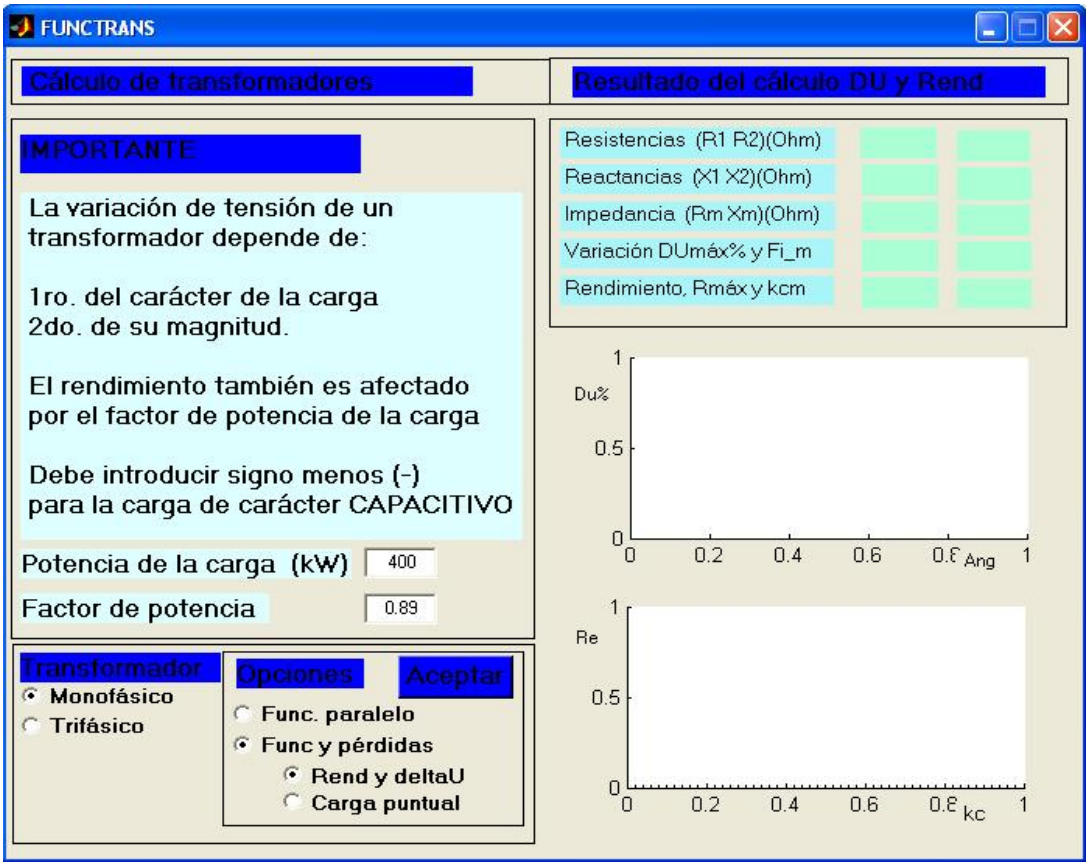


Fig.3-7. Ventana lista a realizar cálculos y graficas.

Al igual que en el caso anterior se puede interactuar y dando clic sobre **Aceptar** se actualizan los datos y gráficos que aparecen en el lado derecho.

Por último la opción **Carga puntual** que permite el cálculo a partir de la carga, (tensión, potencia y factor de potencia) de los parámetros de corriente y tensión del primario y secundario; pérdidas totales; factor de potencia y rendimiento de ese

transformador para la carga situada; reflejan además los valores de impedancia del circuito equivalente; al igual que casos anteriores permite interactuar.

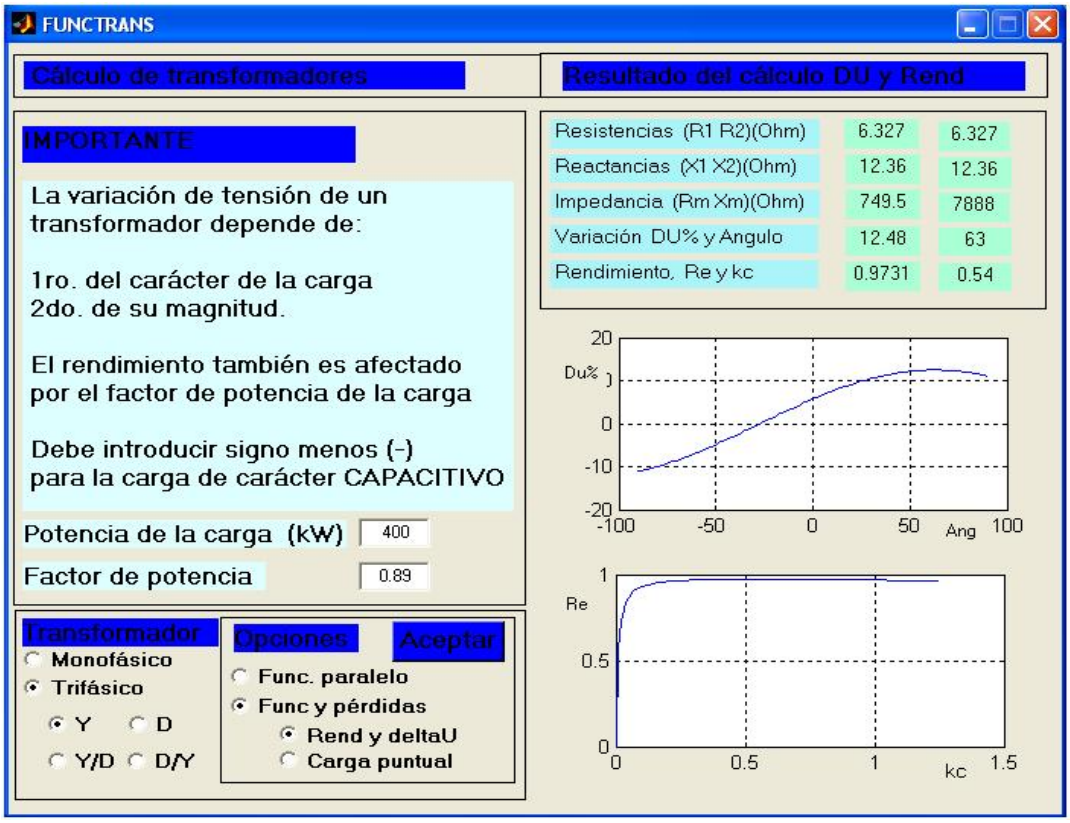


Fig. 3-8. Resultados y gráficas de los datos actualizados.

Puede volver a cualquier opción fundamental para preparar el programa y ejecutar una aplicación.

Limitaciones fundamentales del software.

1. Trabaja basado en cargas simétricas para sistemas trifásicos.
2. No tiene en cuenta la presencia de armónicos de cada régimen.
3. No contempla la saturación.

Esto no dificulta su correcta aplicación a problemas prácticos.

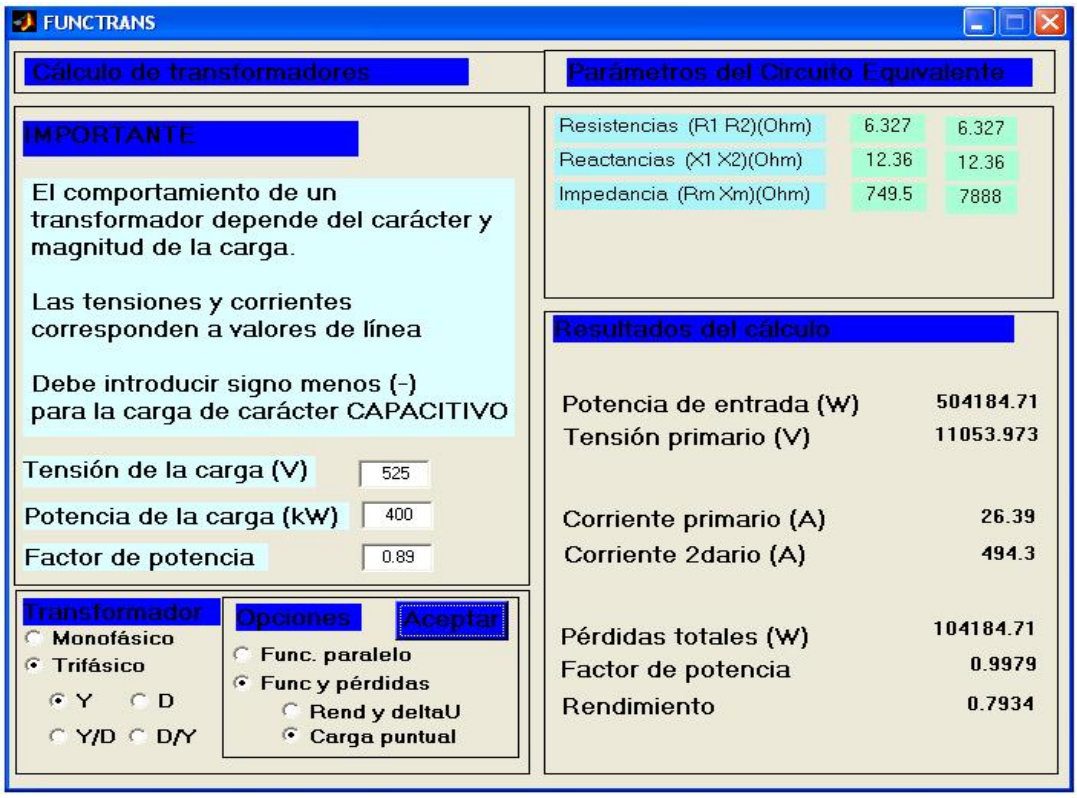


Fig. 3-9. Resultado de cálculos para cargas puntuales.

Los limitantes anteriores hacen mucho más complejo el algoritmo y los resultados no serían de diferencia notable con los obtenidos aquí.

3.2. Fundamentos internos del FUNCTRANS.

Esta aplicación es un acercamiento al cálculo del transformador para diferentes condiciones vistas desde las limitaciones propias antes expuestas; se parte de la introducción de datos teniendo como base los parámetros ofrecidos por los fabricantes en catálogos, que no requieren grandes esfuerzos para disponer de ellos. Si en algún momento el usuario no dispone de estos datos se puede determinar por ensayos característicos (ensayo en vacío y ensayo en cortocircuito). El hecho de que estos datos puedan variar de acuerdo al tiempo de uso del transformador, reparaciones u otros daños, se pueden solventar, con los ensayos arriba mencionados. En la literatura internacional siempre se trabaja con estos datos para determinar todas las características

de un transformador siempre que este cumpla con las normas de fabricación según la comisión internacional de electrotecnia (ICE).

Otros datos son necesarios siempre que se trabaja en presencia de la carga, se ha querido introducir la potencia activa y factor de potencia por cuanto se determinan las otras magnitudes asociadas, en este caso la potencia aparente y la potencia reactiva.

Las ecuaciones que describen el funcionamiento en paralelo están descritas en el capitulo II del trabajo y se generalizan, también se han comprobado que aparecen en manuales de electricidad y de explotación de transformadores para diferentes condiciones. Dentro de la aplicación se sostiene el tipo de transformador; monofásico ó trifásico, este último con los tipos de conexión, de esto dependen las corrientes, tensiones de fase y potencia.

Para la determinación de la característica de la variación de tensión en función del ángulo de carga, partiendo de los datos iniciales se determinan los datos del circuito equivalente en T referido al lado de alta tensión y con ello se determinan las componentes fundamentales que intervienen en la ecuación como la tensión de cortocircuito activa y la tensión de cortocircuito reactiva, además de esto el ángulo que varía de –90 hasta 90 grados teniendo en cuenta que la carga puede tener un carácter capacitivo, activo e inductivo, además de ello se tiene en cuenta el grado de carga que presenta el transformador, a través del coeficiente de carga y posteriormente sobre ésta base se representan gráficamente.

El rendimiento sigue también las metodologías anteriores y utiliza los datos iniciales o de catálogo, más los datos de la carga para efectuar el cálculo. Es importante que siempre que se puedan actualizar los datos iniciales se hagan para mostrar una curva de rendimiento más exacta; por último las capacidades ó disponibilidades de datos para uno ó dos transformadores me permiten vincular la aplicación, para comparar la alimentación de una carga por dos vías considerando las pérdidas que existen en ambos casos; la capacidad de sobrecarga sistemática, la capacidad de sobrecarga de emergencia y estimando la energía que se consume anualmente por concepto de pérdidas, aunque en el mejor de los casos nunca se puede prescindir del consumo de

energía (por pérdidas), si es recomendable minimizarlas, por tal motivo, el criterio de selección tiene en cuenta estos factores.

3.3. Ejemplos de aplicación de transformadores y sus explicaciones.

Se necesitan los datos de catálogo de transformadores (ver anexo número 1) para escoger aquellos que serán utilizados para el funcionamiento en paralelo o simplemente aquel que se quiera estudiar su comportamiento, determinar el rendimiento y gráfica de variación de tensión o calcular determinadas magnitudes ante carga puntual, de acuerdo a la magnitud de la carga que se alimenta. Para el funcionamiento en paralelo se eligen dos transformadores los cuales tengan igual grupo de conexión como exigen las condiciones para la operación.

3.3.1. Diferentes tensiones de cortocircuito

En este caso se han escogido dos transformadores uno de 100 kVA y otro de 40 kVA, con sus tensiones nominales primaria y secundaria iguales (6000/400 V), pero con distintas tensiones de cortocircuito 4,5% para el primer transformador y 4,7% para el segundo. Los datos de catálogo que corresponden a pérdidas de cortocircuito en el primer transformador son de 1,97 kW y 1,0 kW para el segundo; las pérdidas de vacío 0,36 kW para el primero y 0,18 kW para el segundo y la corriente de vacío para el primer transformador es 2,6% mientras que para el segundo es 3%. Con estos datos se quiere alimentar una carga de 80 kW con un factor de potencia de 0,9.

Los resultados de cálculo del primer y segundo transformador que se obtienen son: la corriente nominal, 144,3 A y 57,74 A respectivamente; las corrientes circulantes en este caso tienen valores nulos, puesto que las tensiones nominales del primario y secundario son iguales en ambos transformadores y no existe diferencia de tensión que originen tal corriente; las corrientes de carga de cada transformador 146,3 A y 140,1 A respectivamente; las corrientes totales que constituyen la resultante de la corriente circulante y la corriente de carga de cada transformador, siendo 146,3 A y 140,1 A y por último la carga asumida de 64,27 kVA para el primer transformador y 24,62 kVA, para el segundo.

Como se puede observar la carga se distribuye inversamente proporcional a la impedancia de cortocircuito.

3.3.2. Diferentes tensiones en el secundario

Para un segundo ensayo se ubican dos transformadores, uno de 100 kVA y otro de 50 kVA, iguales tensiones nominales en los primarios (10000 V.); e iguales tensiones de cortocircuito (5,0%); las tensiones nominales de los secundarios para este ensayo son diferentes; el primer transformador tiene 525 V y el segundo 400 V. Los datos de catálogo que corresponden a pérdidas de cortocircuito en el primer son de 2,4 kW y en el segundo transformador son de 1,3 kW; las pérdidas de vacío son 0,7 kW para el primero y 0,44 kW para el segundo transformador y la corriente de vacío para el primer es de 7,5% y para el segundo transformador es 8,0%. Con estos datos se quiere alimentar una carga de 100 kW con un factor de potencia de 0,9.

Los resultados de cálculo del primer y segundo transformador que se obtienen son: la corriente nominal, 110 y 72,17 A respectivamente; las corrientes circulantes con valores de 174,6 A y 229,1 A, puesto que las tensiones nominales en los secundarios son diferentes en ambos transformadores; las corrientes de carga de los dos transformadores 110 A; las corrientes totales que constituyen la resultante de la corriente circulante y la corriente de carga de cada transformador siendo 65,3 y 459,1 A y la carga asumida que extrae valores de 74,07 kVA para el primer transformador y 34,07 para el segundo puesto que los dos transformadores son de distinta potencia nominal.

3.4. Valoración Técnica, Económica y Social.

3.4.1. Técnica.

El trabajo trata aspectos de amplio uso en la industria de la electricidad; sirve de base para los cálculos necesarios a la hora de determinar el comportamiento del transformador en diferentes situaciones. Facilita y posibilita el cálculo, y toma de decisiones de forma precisa y con mayor rapidez.

3.4.2. Económica.

No hay una incidencia directa en la economía del trabajo que aquí se trata. De forma indirecta resuelve las problemáticas de una correcta selección de transformadores para alimentar una determinada carga, en este aspecto se puede evitar un sobredimensionamiento del transformador y por ende menores costos de mantenimiento y de inversión inicial.

Resuelve el funcionamiento del transformador sobrecargado, lo que posibilita, determinar el grado de carga y por esta causa, el pago de energía y seleccionar una previa alimentación o distribuir la carga a otras fuentes.

3.4.3. Social.

De la implementación de esta aplicación se apreciará el aumento en la calidad de la energía que se entrega al cliente (nivel de tensión adecuada; disminución de interrupciones por concepto de disparo por sobrecarga y mantenimiento).

El aumento de conocimientos de la electricidad a mi formación profesional; ayudando a resolver problemas reales y vincularlo, con el uso de las técnicas de computación.

Sirve como ayuda a los futuros ingenieros electromecánicos de la Universidad Nacional de Loja, como también a profesionales que se dedican a este campo.

CONCLUSIONES

Se hizo una revisión bibliográfica acerca de transformadores, enfatizando en la operación en situaciones especiales (trabajo individual, para diferentes cargas y operación en paralelo)

Los ensayos de vació y cortocircuito realizados, fueron fundamentales para la obtención de los parámetros del circuito equivalente y para establecer el vínculo a los datos del fabricante.

Se elaboró un software (FUNCTRANS), basado en MATLAB.6.5, para el análisis del transformador en diferentes situaciones, tales como:

- Operación con carga puntual (Individual).
- Rendimiento y Variación de Tensión (Individual).
- Distribución de carga (En paralelo)
- Selección de variantes de alimentación.

Se pudo realizar varias pruebas con el Software FUNCTRANS, ingresando distintos parámetros, para de acuerdo a los resultados apuntar a una correcta selección del o los transformadores.

RECOMENDACIONES

Hacer uso del FUNCTRANS, cuando se quiera analizar el comportamiento de transformadores en diferente condiciones.

Ampliar en un futuro, en base al presente software, las posibilidades de cálculo de otros factores tales como, trabajo con cargas asimétricas para sistemas trifásicos, presencia de armónicos y saturación, que inciden en el funcionamiento de los transformadores, logrando así un completo y eficaz método de análisis.

BIBLIOGRAFÍA

1. VOLDEK, A. I. Máquinas Eléctricas. Tomo I.
2. AMADOR MARTÍNEZ, Esteban. Electrotecnia Básica. Editorial Pueblo y Educación.
3. CAMARENA M, Pedro. Transformadores Eléctricos Industriales.
4. FEODOROV, A. A. y RODRÍGUEZ LÓPEZ, Eduardo. Suministro Eléctrico de Empresas Industriales. Editorial Pueblo y Educación.
5. Catálogo de transformadores.
6. GARCÍA DE JALÓN, Javier; RODRÍGUEZ, José Ignacio; BRAZALES Alfonso, San Sebastián, Agosto 1999
7. D. LARAMORE, Robert, McPHERSON, George. An introduction to electrical machines an transformers. 315 p.
8. Colectivo de autores. *Manual Estandard del Montador Electricista.*
9. ESPINOSA NIEVES, Guillermo. *Redes Eléctricas.* Ciudad de la Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1988. 97 p.
10. FIGUEROA PÉREZ, Arian. *Estudio de los indicadores energéticos del Instituto Superior Minero Metalúrgico.* Ignacio Romero y Secundino Marrero (tutores). Tesis de Grado. Instituto Superio Minero Metalúrgico Dr. ANJ, 2002. 82 p.
11. KOSTENCO, M. y PIOTROVSKY, L. *Máquinas Eléctricas.* Ciudad de la Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1982. 522 p.
12. LORENZO MUSTELIER, Arquímides. *Mediciones Eléctricas: Mediciones eléctricas de los parámetros eléctricos.* La Habana: ENPES, 1987. 435 p.
13. SMOLENSKI, Ivanov. *Máquinas Eléctricas.*
14. M.I.T, Circuitos magnéticos y Transformadores. *Reverté.* Buenos Aires, 1981. Disponible en: <

    http://transformadortrifásico.mth >

    http://zeus.dci.ubiobio.cl/electricidad/transformadores/pagina_n1.htm

ANEXOS

1. Características técnicas de Transformadores monofásicos ECUATRAN S.A.

kVA	Alto voltaje (V)	Bajo voltaje (V)	Po (W)	Io (A)	Pcu 85°C (W)	Z 85° (%)
03	13200Grdy/7620	120/240	17.03	0.46	74.63	4.19
05	13200Grdy/7620	120/240	23.22	0.44	168.06	3.47
05	13800Grdy/7970	120/240	22.80	0.35	166.79	3.45
05	7620/13200Y	120/240	22/22	0.42	167.92	3.48
10	12700/22000Y	120/240	31.41	0.44	282.47	3.38
10	13200Grdy/7620	120/240	32/29	0.57	272.26	3.06
10	13200/22860Y	120/240	31.07	0.44	271.76	3.23
10	22000Grdy/12700	120/240	33/17	0.45	269.12	3.11
10	22860Grdy/13200	120/240	33.66	0.45	267.95	3.19
10	6000Y	120/240	30.54	0.55	246.81	2.97
10	7620/13200Y	120/240	32.29	0.59	277.28	3.14
15	13200Grdy/7620	120/240	42.68	0.65	379.15	3.01
15	13200/22860Y	120/240	42.35	0.64	364.00	3.09
15	13800Grdy/7970	120/240	42.72	0.68	375.06	2.98
15	22000Grdy/12700	120/240	43.86	0.55	366.98	2.99
15	22860Grdy/13200	120/240	43.32	0.53	354.53	2.95
15	6000Y	120/240	44.06	0.78	381.05	2.97
15	7620/13200Y	120/240	42.09	0.68	379.06	3.05
25	13200Grdy/7620	120/240	60.79	1.22	524.51	3.23
25	13200/22860Y	120/240	62.00	1.31	515.83	3.44
25	13800Grdy/7970	120/240	60.29	1.19	514.72	3.29
25	22000Grdy/12700	120/240	63.60	1.36	520.38	3.27
25	22860Grddy/13200	120/240	61.78	1.18	508.59	3.23
25	6000Y	120/240	62.65	1.51	471.38	3.07
25	7620/13200Y	120/240	63.19	1.52	529.15	3.35
25	7620/13200Y	240/480	69.78	0.92	504.58	3.20
37	13200Grdy/7620	120/240	96.87	1.88	693.38	2.49
37	13200/22860Y	120/240	96.73	1.70	708.50	2.95

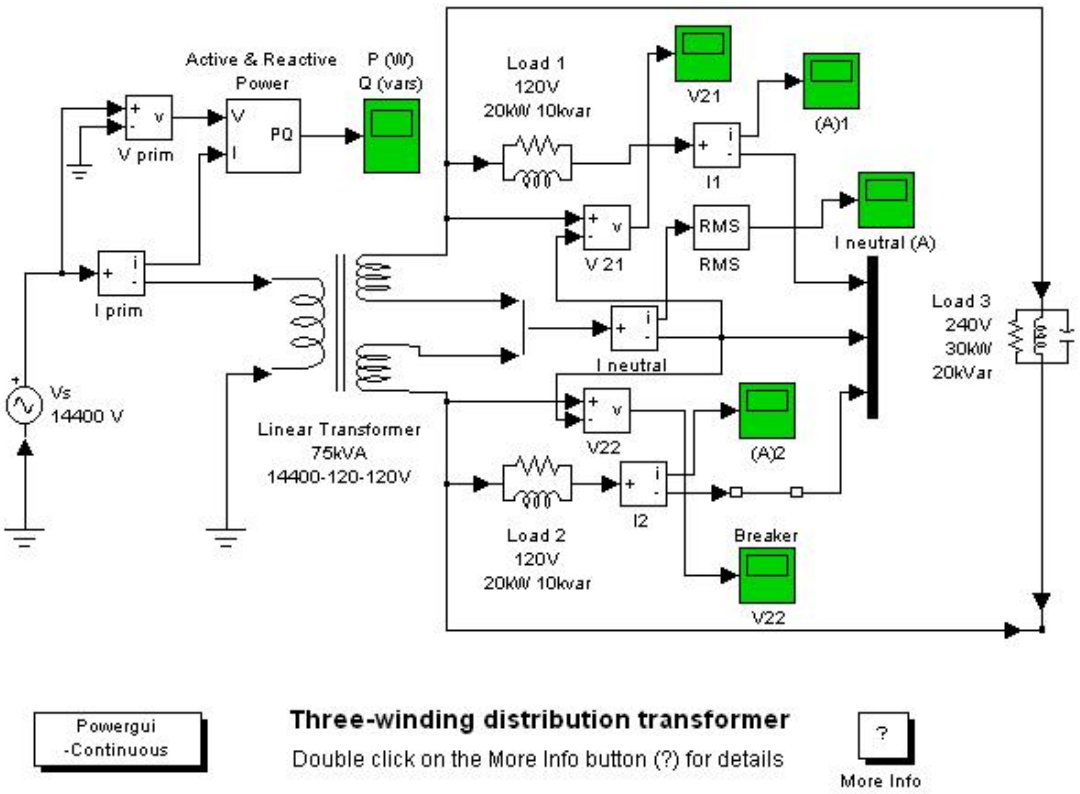
37	22000Grdy/12700	120/240	99.54	1.79	680.38	2.83
37	22860Grdy/13200	120/240	95.86	1.47	697.82	2.78
37	6000Y	120/240	97.65	1.95	626.25	2.41
37	7620/13200Y	120/240	97.59	2.02	694.21	2.55
50	13200Grdy/7620	120/240	149.24	3.03	667.33	1.88
50	13200/22860Y	120/240	140.78	2.28	579.87	1.90
50	22000Grdy/12700	120/240	148.00	2.81	576.70	1.81
50	22860Grdy/13200	120/240	145.10	2.40	572.69	1.82
50	7620/13200Y	120/240	147.25	2.76	608.18	1.81
50	7620/13200Y	240/480	157.75	2.17	687.91	1.92
75	13800Grdy/7620	120/240	218.50	4.17	745.96	1.43
75	7620/13200Y	120/240	214.79	4.27	1252.50	2.02
75	7620/13200Y	240/480	234.00	2.32	1244.28	1.93
100	7620/13200Y	120/240	264.30	5.45	1467.62	1.86
167	7620/13200Y	120/240	329.11	6.19	3083.10	2.43

2. Características técnicas de transformadores trifásicos ECUATRAN S.A.

kVA	Volt Prim. (V)	Volt Sec.	In A.V.	In B.V.	Mater A.V.	Mater B.V.	Po (W)	Io (A)	Pcu 85°C	Resis A.V. 85°C	Resis B.V. 85°C	Z 85°C
30	13200	220	1.31	78.73	Cu	Cu	202.26	1.834	674.15	125.4	0.02072	3.22
30	22000	220	0.76	78.73	Cu	Al	175.46	1.250	535.76	220.4	0.02063	3.30
30	22860	210	1.26	82.48	Cu	Al	206.00	1.552	532.55	214.1	0.01934	3.22
50	6000	210	4.811	137.46	Al	Al	202.95	1.885	1051.41	13.5	0.01102	4.01
50	13200	208	2.18	138.78	Cu	Al	217.93	1.729	1090.08	71.6	0.01007	3.89
50	13200	210	2.18	137.46	Cu	Al	191.94	1.635	1098.92	72.3	0.01102	4.03
50	13200	220	2.18	131.20	Cu	Al	210.32	1.706	1046.24	69.7	0.01091	3.86
50	13800	210	2.09	137.46	Cu	Al	203.21	1.652	1058.68	74.1	0.01101	3.94
50	22000	210	1.26	137.46	Cu	Al	212.80	1.511	987.114	185.2	0.01026	3.87
50	22000	220	1.26	131.20	Cu	Al	217.36	1.417	1079.87	197.6	0.01109	4.29
50	22860	210	1.263	137.46	Cu	Al	197.96	1.305	1096.82	206.8	0.01082	4.21
50	22860	220	1.263	131.20	Cu	Al	203.89	1.221	1022.61	199.7	0.01129	4.02
75	6000	210	7.22	206.11	Al	Al	248.62	2.421	1537.47	7.7	0.00828	4.06
75	13200	208	3.28	208.18	Al	Al	261.45	1.850	1629.65	42.9	0.00826	3.97
75	13200	210	3.28	206.19	Al	Al	232.93	1.833	1603.30	42.3	0.00827	4.06
75	13200	220	3.28	196.82	Al	Al	235.24	1.643	1652.69	43.4	0.00877	4.18
75	13200	460	3.28	94.13	Cu	Al	254.40	0.894	1462.31	43.2	0.03182	4.04
75	22000	210	1.96	206.19	Cu	Al	256.62	1.741	1584.76	113.1	0.00809	4.22
75	22000	220	1.96	196.82	Cu	Al	258.72	1.586	1535.88	111.8	0.00823	4.05
75	22860	210	1.89	206.19	Cu	Al	241.20	1.335	1594.51	118.7	0.00823	4.22
75	22860	220	1.89	196.82	Cu	Al	221.04	0.916	1590.96	123.9	0.00899	4.26
90	6000	210	8.66	247.44			299.75	2.571	1583.67	6.0	0.00533	3.87
100	6000	210	9.62	274.92	Cu	Al	295.73	2.957	1957.51	5.7	0.00544	4.36
100	13200	208	4.37	277.57	Al	Al	334.33	2.742	1719.71	22.1	0.00558	4.02
100	13200	210	4.37	274.92	Al	Al	285.33	2.729	1829.82	25.1	0.00572	4.07
100	13200	220	4.37	262.43	Al	Al	295.28	2.480	1769.88	24.6	0.00580	4.08
100	13800	220	4.18	262.43	Al	Al	287.00	2.292	1746.66	25.9	0.00599	4.18
100	22000	220	2.62	262.43	Cu	Al	273.85	1.338	1885.05	70.9	0.00612	4.94
100	22860	210	2.53	274.92	Cu	Al	293.229	2.016	1776.32	71.0	0.00571	4.34
112	6000	210	10.83	309.30	Al	Al	397.60	3.453	1416.83	3.6	0.00277	2.90
112	22000	220	2.95	295.40	Cu	Al	449.50	3.451	1293.06	48.0	0.00267	2.54
125	6000	210	12.03	343.66	Al	Al	352.80	3.497	2068.10	4.11	0.00345	4.02
125	22860	210	3.16	343.66	Cu	Al	336.20	2.352	2150.79	60.6	0.00345	4.39

160	6000	210	15.4	439.89	Al	Al	403.67	2.103	2949.34	3.7	0.00270	4.32
160	13200	220	7.0	419.89	Cu	Al	403.54	2.634	2729.26	16.1	0.00295	4.07
160	22000	220	4.20	419.89	Cu	Al	451.43	2.756	2536.01	38.8	0.00254	3.86
160	22860	210	4.04	439.89	Cu	Al	403.67	2.103	2584.01	42.7	0.00277	4.01
160	22866	220	4.04	419.89	Cu	Al	398.75	1.947	2606.98	43.4	0.00295	4.22
200	6000	210	19.25	549.86	Al	Al	511.60	4.507	3381.89	2.5	0.00215	4.26
200	13200	220	8.75	524.86	Al	Al	482.22	3.190	3168.59	11.4	0.00225	3.97
250	6000	210	24.1	687.32	Al	Al	579.00	4.405	9964.42	1.9	0.00156	3.81
250	13200	220	10.95	656.08	Cu	Al	479.50	3.102	3167.64	11.4	0.00225	3.96
300	13200	220	13.12	787.30	Al	Al	607.00	3.946	4180.88	6.6	0.00127	4.07
500	13200	220	21.9	1312.20	Al	Al	939.11	6.548	6827.34	3.6	0.00079	4.54
750	13200	220	32.8	1968.30	Al	Al	1163.71	8.519	10159.29	2.4	0.00049	5.44
900	13200	480	43.7	1202.80	Al	Al	1432.00	3.877	11516.20	1.6	0.00133	5.62

3. Ejemplo. Simulación en régimen dinámico de un transformador de distribución de dos devanados secundarios



4. Carga máxima del transformador por unidad de los kVAs. nominales sin alterar su vida útil.

Carga Máxima Tiempo en Horas	Refrigeración – Autorefrigerado ó Refrigerado por agua (0A ó 0W) Carga del transformador en porcentaje de los kVAs. nominales anterior al periodo de la carga máxima																	
	50% Temperatura Ambiental en °C						70% Temperatura Ambiental en °C						90% Temperatura Ambiental en °C					
	0	10	20	30	40	50	0	10	20	30	40	50	0	10	20	30	40	50
½	2.00	2.00	2.00	1.89	1.70	1.52	2.00	2.00	1.95	1.78	1.60	1.41	2.00	1.99	1.82	1.64	1.46	1.24
1	2.00	1.88	1.73	1.58	1.41	1.23	1.95	1.80	1.65	1.49	1.32	1.14	1.86	1.70	1.55	1.39	1.20	0.99
2	1.76	1.64	1.51	1.37	1.22	1.06	1.72	1.59	1.46	1.32	1.16	0.99	1.66	1.53	1.39	1.24	1.08	0.90
4	1.54	1.43	1.33	1.19	1.06	0.92	1.52	1.41	1.29	1.17	1.04	0.89	1.50	1.39	1.26	1.13	1.00	-
8	1.41	1.30	1.19	1.08	0.96	0.84	1.40	1.30	1.19	1.07	0.95	0.83	1.39	1.29	1.18	1.06	0.94	-
24	1.33	1.22	1.11	1.00	0.89	0.78	1.33	1.22	1.11	1.00	0.89	0.78	1.33	1.22	1.11	1.00	-	-