

Transformadores METODOLOGÍA GENERALIZADA PARA DETERMINAR LOS GRUPOS DE CONEXIÓN



Las reglas de formación de los voltajes inducidos en los devanados del transformador son básicas para la metodología desarrollada.

PALABRAS CLAVES

Transformador trifásico, grupos de conexión, puesta en paralelo.

ABSTRACT

In this paper, a generalized methodology for determining the connection group of three-phase transformers is shown. This is done from the physical connection of the windings. The developed methodology is also useful to determine the connection of the windings during the implementation stage of the designs. The methodology was verified with the 26 normalized connection types and with other proposed cases in this paper. The rules of the induced voltages formation in the windings are basic to the developed methodology.

KEYWORDS:

Three-phase transformer, groups of connection, putting in parallel.

RESUMEN

- **Eduardo Marlés Sáenz.**
M.Sc.
Profesor Auxiliar
Universidad del Valle,
Cali, Colombia.

En este artículo se presenta una metodología generalizada para la determinación del grupo de conexión de transformadores trifásicos de dos devanados. Esto se logra a partir de la conexión física de los devanados. La metodología desarrollada también es útil para determinar el conexionado de las bobinas durante la etapa de implementación de los diseños. La metodología se verificó con los 26 tipos de conexiones normalizados, y con otros casos propuestos en este documento.

Grupo de Investigación
GRALTA.
www.gralta.univalle.edu.co

1. INTRODUCCIÓN

Por razones económicas o técnicas es necesario alimentar una carga con dos o más transformadores operando en paralelo, para lo cual se verifica que los transformadores sean del mismo grupo de conexión -. También es necesario determinar, el tipo de conexión en los casos cuando no se dispone de los datos en la placa característica del transformador en reparación, mantenimiento ó en situaciones en donde hay que lograr la implementación de las adecuadas protecciones eléctricas diferenciales, con el requerimiento de bancos trifásicos de transformadores de medida para la compensación por desplazamiento de fase [4].

Para determinar el grupo de conexión de los transformadores trifásicos, actualmente las normas que plantean los procedimientos correspondientes, hacen uso del método del diagrama fasorial y la verificación de relaciones establecidas entre los valores de voltaje medidos -. Los métodos propuestos por estas normas no presentan ninguna verificación para los grupos de conexión III y IV, ni tampoco justifican el porqué de las conexiones de los tipos actualmente normalizados.

Esta nueva metodología podrá ser usada tanto para labores académicas como en la fabricación de los devanados de transformadores trifásicos

2. GRUPOS DE CONEXIÓN DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS

Los grupos de conexión constituyen 26 tipos posibles, para transformadores trifásicos de dos devanados por fase. Todas las bobinas de cada lado del transformador trifásico (B.T. o A.T.) pueden ser conectadas en y (estrella), d (delta) o en z (conexión z).

La norma UNE-EN 60076-1:1998 establece los posibles tipos de conexión para cada grupo.

2.1 Nomenclatura para la notación de los grupo de conexión

-Un transformador con nomenclatura Ydi, posee el devanado de alta tensión (A.T.) conectado en estrella y el devanado de baja tensión (B.T.) conectado en delta con un desfase de $i \times 30^\circ$ eléctricos entre los vectores de fase de f.e.m primaria y secundaria.

-Según la metodología del índice horario (metodología del reloj, ver figura 1), i puede tomar los valores: 0/12, 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11 (conexiones con $i = 3, 9$ no se hacen).

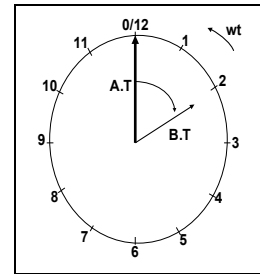


Figura 1 Ubicación de los índices de los tipos de transformador bajo la metodología del reloj.

-Los subíndices impares se obtienen cuando aparece una sola conexión en estrella en alguno de los dos lados del transformador, estas conexiones son: Yd, Dy, Yz. En los demás casos el índice resulta par.

- La conexión en Z de los devanados se utilizan para el secundario, donde las fases constan de dos semifases de $N_2/2$ espiras.

-El índice (ángulo de desplazamiento) se obtiene midiendo el barrido angular en el sentido de las manecillas del reloj entre vectores de f.e.m de fase, desde el vector de una fase de A.T. hasta el vector de la misma fase de B.T. que en la metodología éste último se considera está en atraso, como se muestra en la figura 1

3. METODOLOGIA PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL TIPO DE CONEXIÓN

A continuación se definen algunas reglas y consideraciones que caracterizan la formación de los voltajes para cada uno de los grupos de conexión, en los devanados primario y secundario.

3.1 Consideraciones sobre la formación e interpretación de los voltajes inducidos en los devanados (f.e.m)

-El voltaje de fase en N_1 espiras, es la magnitud del valor de la fuerza electromotriz primaria (f.e.m) autoinducida por la excitación únicamente de la propia fase, con el sentido que se muestra en la figura 3(a). Proporcional al voltaje primario V_{AX} se induce un voltaje secundario V'_{AX} .

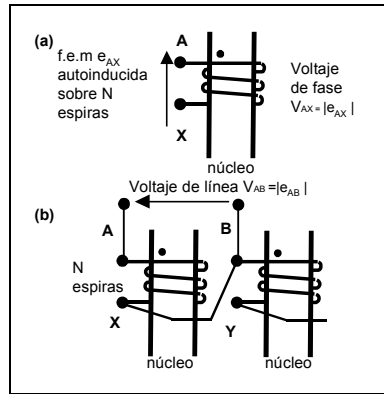


Figura 2 Conceptualización de los voltajes de fase y de línea en relación con las f.e.m autoinducidas.

-El voltaje de línea (sobre N_{AX} espiras de una fase) es el valor de la f.e.m resultante debido a los amperes - vueltas de dos fases, y se determina de la diferencia fasorial de las dos f.e.m de fase que están aplicadas a los extremos de las N_{AX} espiras como se muestra en la figura 2(b). Proporcional al voltaje primario V_{AB} se induce un voltaje secundario V'_{AB} .

3.2 Consideraciones para la presentación esquemática de los devanados

-Los principios de los terminales de las bobinas de alta tensión se rotulan con las letras mayúsculas A,B,C ó U,V,W y los finales con X, Y, Z. Figura 3(a).

-De manera normalizada, independientemente del tipo de conexión del transformador, los conexiones del primario toman la alimentación de la red por los principios de bobina A, B, C ó U, V, W.

-Los principios de los terminales de las bobinas de baja tensión se rotulan con las letras minúsculas a,b,c ó u,v,w y los finales con x, y, z..

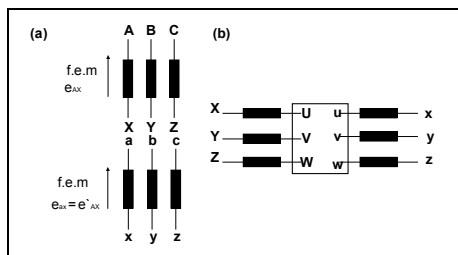


Figura 3. Posición relativa entre los devanados de A.T respecto a los devanados de B.T. (a) Esquema convencional. (b) Esquema normalizado.

-Se asume para cada fase que si los devanados de A.T. y B.T. están ubicados en una misma pierna, con igual polaridad, para un - flujo máximo se induce la f.e.m de fase de alta tensión y en baja tensión la f.e.m de fase . con orientación que se muestra en la figura 3(a).

3.3 Reglas para implementar la metodología en la construcción de cada tipo de conexión

- Hacer coincidir el diagrama del reloj con el diagrama fasorial, quedando ambos superpuestos.

-Iniciar el diagrama fasorial pintando el vector de A.T. de la fase bajo estudio en la posición 0/12. Por ejemplo para la fase A, secuencia ABC, la f.e.m A-X está a 0° eléctricos, los vectores para las demás fases se dibujan respetando la secuencia. Figura 4(a).

-Asumir que los vectores de las tensiones de línea rotan en el sentido de giro en wt si para una secuencia definida constituyen un triángulo equilátero sobre los vectores de las f.e.m de fase, cerrando en contra del giro de las manecillas del reloj y tienen la secuencia de las f.e.m de fase, figura 4(b). En caso contrario rotan en contra del sentido de giro en wt como se muestra en la figura 5(b).

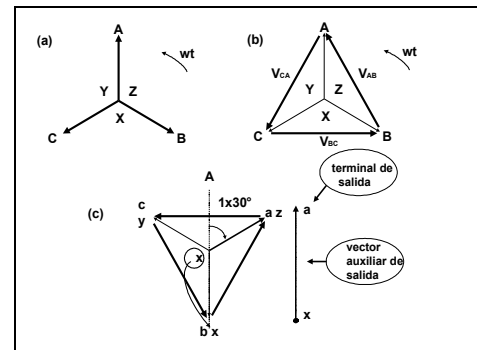


Figura 4. Sentido de giro y cierre de tensiones de línea (a)y(b) En el lado primario (A.T) (c) En el lado secundario (B.T).

-Los terminales de salida de los devanados secundarios en cada tipo, quedan definidos por el rótulo superior del vector auxiliar de f.e.m de salida, el cual se obtiene pintando una línea vertical al lado derecho de la estrella de f.e.m secundaria. El sentido de ésta f.e.m auxiliar (hacia arriba o hacia abajo) se obtiene proyectando la f.e.m de la fase estudiada, por ejemplo el vector auxiliar de f.e.m de salida presentado en la figura

4(c) corresponde a la proyección del vector de la fase A, y su mayor potencial está definido por el de la misma fase.

-La letra superior en el vector de f.e.m auxiliar indica si el devanado secundario del transformador tendrá sus terminales de salida por principios ó finales de bobina. En la figura 4(c), el vector de f.e.m auxiliar indica que los principios de bobina son los terminales de salida a bornes, en el secundario del transformador, tanto para la fase A como para las otras fases.

-Para determinar el sentido adecuado de cierre de las deltas primarias se toma como indicadores de vectores en adelanto, respecto a la referencia 0° (índice 0/12) así, los índices 11 ó 5 para índice impar y 10 ó 4 incluyendo 0/12, 6, para índice par. Para determinar el sentido adecuado de cierre de las deltas secundarias se toma como indicadores de vectores en atraso, respecto a la referencia 0° (índice 0/12), los índices 1 ó 7(para índice impar), 2 ó 8 incluyendo 0/12, 6 (para índice par).

3.4 Implementación de la metodología en la construcción de cada tipo de conexión

A continuación se indica cómo se deben conectar los devanados, de manera independiente en cada lado del transformador, para lograr obtener el tipo de conexión deseado.

- Cierre de las deltas primarias para tipos impares**

Si el transformador Dy es del tipo con índice 11 ó 5, los vectores de las tensiones de línea de la delta se deben cerrar en el sentido de giro de wt como se muestra en la figura 5(a). Para otro tipo se debe cerrar en sentido contrario, como se muestra en la figura 5(b). Los extremos de cada vector de línea se deben rotular, el uno con la letra de la fase que le impone el mayor potencial y el otro con la letra del menor potencial de la misma fase. Al final el doble rotulo en cada extremo de la delta indicará los terminales de las bobinas que deben conectarse físicamente. Se debe observar que los finales de las bobinas de una fase quedan conectados con los principios de las bobinas de otra fase.

- Cierre de las deltas primarias para tipos pares**

Si el transformador Dd ó Dz, es del tipo con índice 10 ó 4 (Los tipos 0/12, 6 deben ser incluidos en

esta clase pues no representan ni atraso ni adelanto), los vectores de las tensiones de línea de la delta se deben cerrar en el sentido de giro de wt como se muestra en la figura 6(a). Para otro tipo se debe cerrar en sentido contrario, como se muestra en la figura 6(b). Los extremos de cada vector de línea se deben rotular, el uno con la letra de la fase que le impone el mayor potencial y el otro con la letra del menor potencial de la misma fase. Al final el doble rotulo en cada extremo de la delta indicará los terminales de las bobinas que deben conectarse físicamente.

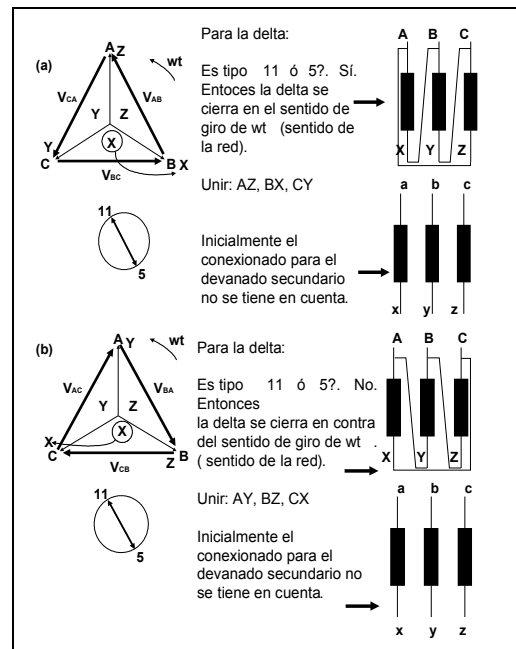


Figura 5. Conexión del devanado primario y sentido de las tensiones de línea primarias. (a) Tipos 11 ó 5. (b) Tipos 1 ó 7.

- Cierre de las deltas secundarias para tipos impar**

Si el transformador Yd es del tipo con índice 1 ó 7, los vectores de las tensiones de línea de la delta se deben cerrar en el sentido de giro hacia donde apunta el vector auxiliar de f.e.m de salida como se muestra en la figura 7(a). Para otro tipo se debe cerrar en sentido contrario, como se muestra en la figura 7(b). Los extremos de cada vector de línea se deben rotular, el uno con la letra de la fase que le impone el mayor potencial y el otro con la letra del menor potencial de la misma fase. Al final el doble rotulo en cada extremo de la delta indicará los terminales de las bobinas que deben conectarse físicamente.

- **Cierre de las deltas secundarias para tipos par**

Si el transformador Dd ó Dz, es del tipo con índice 2 ó 8, los vectores de las tensiones de línea de la delta se deben cerrar en el sentido de giro hacia donde apunta el vector auxiliar de f.e.m de salida como se muestra en la figura 8(a). Incluya en este caso los tipos 0/12, 6 porque sus índices no representan ni atraso ni adelanto. Para otro tipo se debe cerrar en sentido contrario, como se muestra en la figura 8(b). Los extremos de cada vector de línea se deben rotular, el uno con la letra de la fase que le impone el mayor potencial y el

vector de la f.e.m auxiliar indica que la salida es

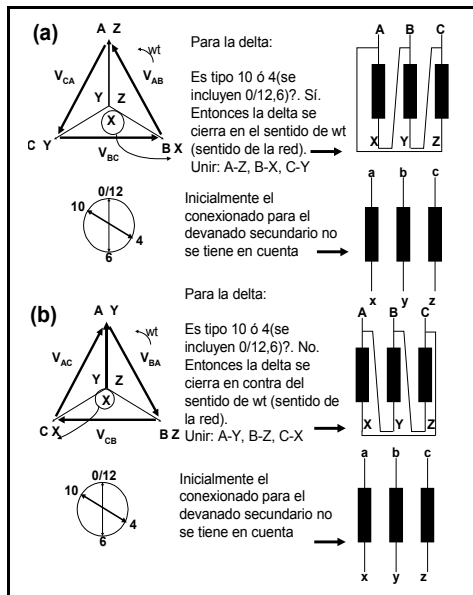


Figura 6. Sentido de las tensiones de línea primarias y cierre de los conexionados. (a) Tipos 10 ó 4, 0/12 ó 6. (b) Tipos 2 ó 8.

otro con la letra del menor potencial de la misma fase. Al final el doble rotulo en cada extremo de la delta indicará los terminales de las bobinas que deben conectarse físicamente

- **Conexionado de la Y primarias.**

Para cualquier tipo de conexionado que involucre una Y primaria, ésta será obtenida conectando los finales de bobina de todas las fases como se muestra en la figura 9(a).

- **Conexionado de la Y secundaria.**

Para cualquier tipo de transformador que involucre una conexión del devanado secundario en Y, se unen los finales de bobina de todas las fases si el

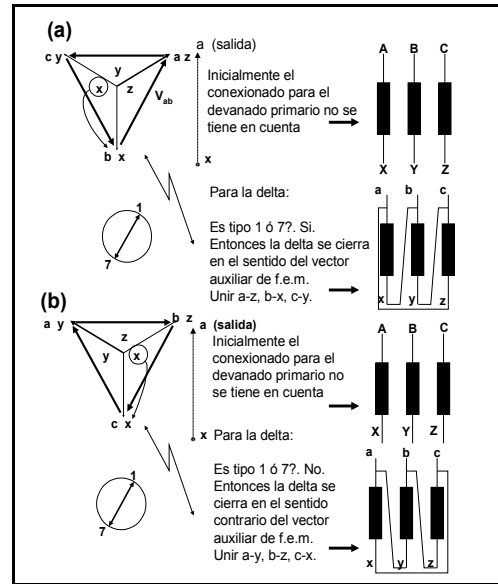


Figura 7. Sentido de las tensiones de línea secundarias y cierre de los conexionados. (a) Tipos 1 ó 7. (b) Tipos 11 ó 5.

por principios de bobina, como se muestra en la figura 9(b) (para tipos normalizados 1, 11, 0/12). En caso contrario se conectarán todos los principios de bobina, como se muestra en la figura 9(c) (para los tipos normalizados 5, 6, 7).

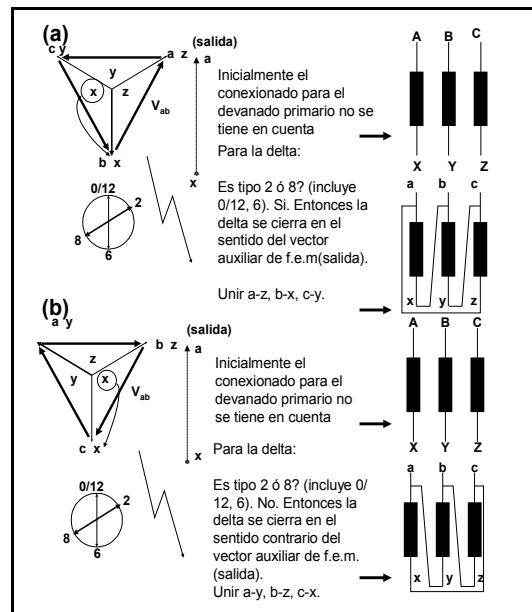


Figura 8. Sentido de las tensiones de línea secundarias y cierre de los conexionados. (a) Tipos 2 ó 8, 0/12 ó 6. (b) Tipos 10 ó 4.

- **Conexionado de las Z secundarias.**

Los conexiones en Z para los devanados secundarios se obtienen de la siguiente forma:

Se dibujan con líneas punteadas los vectores de las f.e.m resultantes (f.e.m virtuales indicadas con líneas punteadas en las figuras 10(a) y (b)) de acuerdo al tipo de conexionado. El índice del tipo de transformador es el que indica cuántos grados hay de la f.e.m de fase de A.T.(f.e.m real por fase), a la f.e.m virtual resultante secundaria, por fase de B.T. de la z. La f.e.m virtual por fase es la resultante de la suma de las f.e.m de dos semifases de fases diferentes.

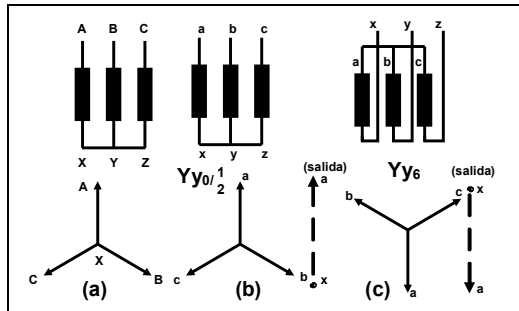


Figura 9. Posibles conexiones en estrella. (a) Del devanado primario (b) y (c) Del devanado secundario.

-Como se indicó en 3.3(e), con el vector auxiliar de salida se determina, para cada fase cuál es la semifase y su terminal de devanado por donde saldrán la f.e.m de cada fase, así en la figura 10(a) el vector auxiliar indica que las semifases de salida adecuadas corresponden a aquellas porciones de devanado (semifases) que contienen los finales de bobina, mientras que en la figura 10(b) las semifases adecuadas son aquellas que contienen los principios de bobina.

-El conexionado de las semifases en la z, (para un transformador Yz) queda determinado como sigue: de la figura 10(a) y para la fase A, el vector de f.e.m virtual de fase es la suma vectorial de las f.e.m. de semifases $-V_a$ y V_b . La primera, por ser de salida con los terminales de finales de bobina, es el negativo de la f.e.m inducida $-V'_{AX}$ y su vector está en la estrella de la z, a la salida, contrario y paralelo al vector V_{AX} que lo induce, de acuerdo a 3.1. La segunda f.e.m, completa la suma de las f.e.m con el vector del mismo sentido al vector V_{BY} que lo induce, y el adecuado es el mostrado en la figura 10(a). Por tanto se conectan entre sí, todos los finales de las primeras semifases (x' , y' , z') y se conectan los principios (a, b, c) con los principios de las semifases de

salida (a' , b' , c'). Finalmente los conductores de salida al secundario se conectan desde (x, y, z).

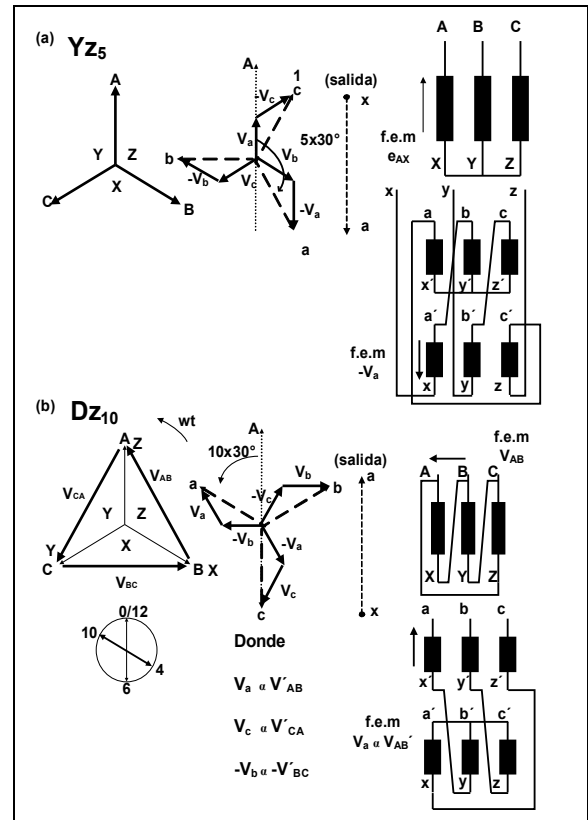


Figura 10. Formación de la f.e.m virtual de fase para la conexión de los devanados Z. (a) En tipos Yz (b) En tipos Dz.

-El conexionado de las semifases en la z, (para un transformador Dz) queda determinado como sigue: de la figura 10(b) y para la fase A, el vector de f.e.m virtual de fase es la suma vectorial de las f.e.m. de semifases V_a y $-V_b$. La primera, por ser de salida con los terminales de principio de bobina, es el positivo de la f.e.m inducida proporcional a V'_{AB} y su vector está en la estrella de la z, a la salida, del mismo sentido y paralelo al vector V_{AB} que lo induce, como se indicó en 3.1. La segunda f.e.m, $-V_b \propto (-V'_{BC})$ completa la suma con un vector de sentido contrario al vector primario V_{BC} que lo induce, y el adecuado, para cerrar el triángulo vectorial, es el mostrado en la figura 10(b). Por tanto se conectan entre sí, todos los principios de las segundas semifases (a' , b' , c') y sus finales (x, y, z) con los finales de las semifases de salida (x' , y' , z'). Finalmente los conductores de salida al secundario se conectan desde (a, b, c).

4. CONCLUSIONES

Los ensayos planteados por las normas actuales no establecen ninguna verificación para los grupos de conexión III y IV, tampoco definen cómo se determinan las conexiones de grupos normalizados de transformadores sin placa característica o información disponible de su grupo de conexión. La metodología planteada permite determinar cuáles deben ser las conexiones adecuadas de las bobinas de un transformador trifásico de dos devanados para obtener el tipo normalizado de conexión que previamente ha sido definido en los casos donde por razones técnicas, académicas, de mantenimiento ó diseño se requiera. La metodología permite determinar el tipo de conexión de un transformador trifásico sin placa o información de su tipo de conexión con la condición de que se disponga de la información visible de los conexionados de los devanados de cada lado del transformador, en tal caso la metodología también permite verificar el tipo de conexión para transformadores trifásicos con placa característica. Con la metodología propuesta se demostró porqué es válido intercambiar estratégicamente los transformadores del grupo II con los del grupo IV, cuando se hace necesario la puesta en paralelo entre transformadores pertenecientes a estos dos grupos. La validación de la metodología propuesta se logró aplicándose con éxito con todos y cada uno de los 26 tipos normalizados de conexión para transformadores trifásicos de dos devanados, tanto en la determinación del tipo de conexión como en la determinación de la conexión adecuada de los devanados para lograr el tipo de conexión requerido.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] KOSTENKO, M. P. y PIOTROVSKI, L.M. Máquinas eléctricas. 2ed. Moscú: MIR, 1979.Tomo I. 599p.
- [2] IVANOV – SMOLENSKI, A.V. Máquinas eléctricas, Moscú: MIR, 1984.Tomo I. 472p.
- [3] RAS, Enrique. Transformadores de potencia de medida y de protección. 7ed. Santa Fe de Bogotá: Alfaomega.1998. 283p.
- [4] PROTECTIVE RELAYS. Application guide. 3ed. England: Gec Alsthom T&D. 1995. il: 463p.
- [5] IEEE STANDARD TEST CODE FOR LIQUID-IMMERSED DISTRIBUTION, POWER, AND REGULATING TRANSFORMERS. 1999. New York : IEEE, 1999 87p. : il. (IEEE C.57.12.90).
- [6] IEEE STANDARD TEST CODE FOR DRY-TYPE DISTRIBUTION AND POWER TRANSFORMERS. New York : IEEE, 2001 82p. : il. (IEEE C.57.12.91)
- [7] IEEE STANDARD TERMINAL MARKINGS AND CONNECTIONS FOR DISTRIBUTION AND POWER TRANSFORMERS. 2001 33p. : il. (IEEE C.57.12.70)
- [8] NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. TRANSFORMADORES. RELACIÓN DE TRANSFORMACIÓN VERIFICACIÓN DE LA POLARIDAD Y RELACIÓN DE FASE. Santa Fé de Bogotá: ICONTEC, 1999 12p. (NTC 471)
- [9] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. POWER TRANSFORMERS. España : AENOR, 1998 48p.(UNE-EN 60076-1:1998)



AUTOR

Eduardo Marlés Sáenz. Ingeniero Electricista.

Universidad del Valle. 1997.

Magíster en

Sistemas de Generación de Energía Eléctrica. Universidad del Valle. 2001.

Universidad del Valle. Profesor Auxiliar. Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. GRALTA. 333 42 52 ext. 110. Cali – Valle –Colombia.

Líneas de investigación
Análisis Matemático Aplicado.

- Modelamiento de Campos Electromagnéticos.
- Análisis y Operación de Sistemas de Potencia.

E-mail: edmarles@univalle.edu.co