



UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS

VERITATE SOLA NOBIS IMPONETUR VIRILIS TOGA

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética

TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Aplicación computacional sobre transformaciones trifásicas y grupos de conexión

Autor: Luis Javier Peña González

Tutores: MSc. Alicia Hernández Maldonado

Ing. Patricia Rodríguez Roqueta

Santa Clara

2015

"Año 57 de la Revolución"

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética



TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Aplicación computacional sobre transformaciones trifásicas y grupos de conexión.

Autor: Luis Javier Peña González

lpena@uclv.edu.cu

Tutores: MSc. Alicia Hernández Maldonado, Profesora Auxiliar

Mailto: aliciah@uclv.edu.cu

Ing. Patricia Rodríguez Roqueta, Profesora

Mailto: patriciarr@uclv.cu

Santa Clara

2015

"Año 57 de la Revolución"



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería Eléctrica, autorizo a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Tutor

Firma del Jefe de
Departamento donde se
defiende el trabajo

Firma del Responsable de
Información Científico-Técnica

PENSAMIENTO

“Debe evitarse hablar a los jóvenes del éxito como si se tratase del principal objetivo en la vida. La razón más importante para trabajar en la escuela y en la vida es el placer de trabajar, el placer de su resultado y el conocimiento del valor del resultado para la comunidad”.

Albert Einstein

DEDICATORIA

Dedico el fruto de este trabajo que es la culminación de mi propósito como
estudiante:

A mis padres, por el amor y apoyo que siempre me han brindado.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer de forma especial a:

Mis padres, mis guías y soporte para lograr alcanzar esta meta en mi vida.

A mi hermano, mi ejemplo de superación.

A mi novia, consuelo y apoyo en todo momento.

Mis tutoras Alicia Hernández Maldonado y Patricia Rodríguez Roqueta por su colaboración, experiencia y paciencia en la realización de este trabajo.

A Víctor Jara, por su ayuda incondicional.

A toda mi familia por haber confiado todo este tiempo en mí.

A mis compañeros y amigos.

En general agradezco a todas las personas que de una forma u otra me han brindado su apoyo en estos cinco años.

Muchas gracias a todos!

TAREA DE INVESTIGACIÓN

1. Revisión bibliográfica integral relacionada con el transformador monofásico, las transformaciones trifásicas, tanto en bancos de transformadores monofásicos como en transformadores trifásicos.
2. Caracterizar del comportamiento de transformaciones trifásicas, bancos de transformadores monofásicos y transformadores trifásicos, en relación con los grupos de conexión y relación de fase de los voltajes de línea de primario y secundario.
3. Elaboración de una aplicación computacional que dados el tipo y grupo de conexión posibilite la observación del desfase de los voltaje de línea por secundario en relación con los voltajes de línea por primario.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

Este trabajo detalla lo relacionado con la aplicación computacional Estudio de Grupos de Conexión (EGC). Esta aplicación se desarrolló en el MatLab 10.0 y posibilita visualmente captar la incidencia en el desfasaje del voltaje de línea por secundario del transformador en relación con el voltaje de línea del primario acorde al grupo de conexión, la polaridad del transformador y el tipo de conexión.

Se describe en este informe, de manera muy general, la importancia que reporta el uso del transformador, así como los principales tipos y formas de conexión trifásica según la polaridad que presenten los bancos abiertos y cerrados de transformadores monofásicos en conexión trifásica y los transformadores trifásicos. Se trata detalladamente lo relacionado con grupos de conexión para cada tipo de conexión y las posibilidades de conexión acorde a la polaridad del transformador.

Se aborda lo relacionado con el diseño de la aplicación computacional EGC, sus ventajas y cómo debe operar el usuario con ésta. Se presentan diversos ejemplos para diferentes tipos y grupos de conexión y polaridad.

Por último se concluye que la aplicación computacional EGC, así como la fundamentación teórica sobre los grupos de conexión en transformaciones trifásicas pueden ser de utilidad para fines docentes.

ÍNDICE

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
TAREA DE INVESTIGACIÓN	iv
RESUMEN	v
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. TRANSFORMADORES	5
1.1 Introducción	5
1.2 El transformador	5
1.3 Tipos de transformadores	7
1.4 Transformadores monofásicos y trifásicos.....	8
1.5 Polaridad en los transformadores	10
1.6 Transformaciones trifásicas	13
1.7 Funciones del transformador en los Sistemas Eléctricos de Potencia	14
1.8 Consideraciones finales del Capítulo	15
CAPÍTULO 2. GRUPOS DE CONEXIÓN PARA LAS TRANSFORMACIONES TRIFÁSICAS	17
2.1 Introducción	17
2.2 Grupos de conexión	17
2.3 Bancos cerrados con transformadores monofásicos	19
2.4 Bancos abiertos con transformadores monofásicos	30
2.5 Transformadores trifásicos.....	36

2.6 Consideraciones finales del capítulo	41
CAPÍTULO 3. Descripción de la aplicación computacional	42
3.1 Estructura del programa	42
3.2 Ventajas de la aplicación	44
3.3 Interfaz del usuario	45
3.4 Ejemplos.....	51
3.5 Consideraciones finales del capítulo	60
CONCLUSIONES	61
RECOMENDACIONES	61
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

INTRODUCCIÓN

El sistema eléctrico de potencia (SEN) está compuesto por un grupo de componentes, entre los que se destaca el transformador. El desarrollo de la sociedad moderna depende en gran medida de la utilización de la energía eléctrica, y para ello este dispositivo es considerado una de las máquinas eléctricas de mayor uso ya que permite modificar la potencia eléctrica, lo que aumenta o disminuye los niveles de corriente y voltaje según la necesidad requerida.

Los transformadores están diseñados para el suministro o transporte de energía a través de las líneas de transmisión. Desde el surgimiento de los sistemas de corriente alterna trifásicos, el uso de los transformadores cobró un alto valor ya que se hizo necesario el transporte de la energía procedente de las plantas de generación hasta los consumidores.

Las centrales generadoras de energía por razones constructivas y de seguridad, poseen un voltaje en los terminales de salida mucho menor que el voltaje utilizado en la transmisión, generalmente en el rango de seis a 20 kV. Es por ello que se colocan a la salida de las plantas de generación transformadores o autotransformadores trifásicos para elevar el nivel de voltaje hasta 110 o 220 kV. Algo similar ocurre a nivel de distribución tanto primaria como secundaria, ya que las cargas conectadas no requieren de valores elevados de voltaje y se colocan entonces transformadores reductores al comienzo de la distribución.

Regularmente los transformadores que se usan en el SEN son habitualmente unidades trifásicas aunque pueden encontrarse unidades monofásicas que forman los bancos de transformadores monofásicos en conexión trifásica y en diferentes tipos de conexiones. Estos bancos de transformadores se utilizan convenientemente en sistemas de distribución para posibilitar una gran flexibilidad de operación, debido a la diversidad de cargas monofásicas y trifásicas que hay en la distribución.

En las conexiones trifásicas de transformadores o transformaciones trifásicas cuando se conectan uno o varios transformadores trifásicos o varios bancos de

transformadores monofásicos en conexión trifásica en paralelo, debe tenerse muy presente que no pueden existir desbalance de voltaje en las conexiones ni desfasajes de voltaje para una misma fase por secundario ya que esto provoca una muy alta corriente por los devanados secundarios y si no actúan las protecciones se dañan dichos transformadores. De ahí la necesidad de conocer el desfasaje de los voltajes por secundario de cada transformador a operar en paralelo y esto da lugar al término de grupo de conexión.

En los libros de texto y otras bibliografías todo lo relacionado con los grupos de conexión se aborda de una forma muy general, sin especificar las diferentes posibilidades reales que existen en los diferentes tipos de transformaciones trifásicas. Aspecto que se considera importante para el profesional que labora en el sector eléctrico.

De ahí que en este trabajo el problema de investigación que se declara es el siguiente:

¿Cómo contribuir al fondo bibliográfico relacionado con los grupos de conexión en los diferentes tipos de conexiones trifásicas en específico en las relaciones de fase entre los voltajes de línea de secundario respecto a primario?

El Objetivo General de este trabajo diploma es el siguiente:

Implementar una aplicación computacional que posibilite visualmente captar la incidencia en el desfasaje del voltaje de línea por secundario del transformador en relación con el voltaje de línea del primario acorde al grupo de conexión y la polaridad del transformador.

Los Objetivos Específicos que se establecen para dar cumplimiento al objetivo general son:

1. Analizar integralmente las transformaciones trifásicas, tanto en bancos de transformadores monofásicos como en transformadores trifásicos.
2. Caracterizar el comportamiento de transformaciones trifásicas, bancos de transformadores monofásicos y transformadores trifásicos, en relación con

los grupos de conexión y relación de fase de los voltajes de línea de primario y secundario.

Las tareas de investigación son las siguientes:

4. Revisión bibliográfica integral relacionada con el transformador monofásico, las transformaciones trifásicas, tanto en bancos de transformadores monofásicos como en transformadores trifásicos.
5. Caracterizar del comportamiento de transformaciones trifásicas, bancos de transformadores monofásicos y transformadores trifásicos, en relación con los grupos de conexión y relación de fase de los voltajes de línea de primario y secundario.
6. Elaboración de una aplicación computacional que dados el tipo y grupo de conexión posibilite la observación del desfase de los voltaje de línea por secundario en relación con los voltajes de línea por primario.

Este trabajo de diploma puede ser de utilidad para los estudiantes de pregrado de la carrera de Ingeniería eléctrica y otros profesionales del sector eléctrico. Su pertinencia está dada por disponerse de una aplicación computacional que contribuya al desarrollo de habilidades en cuanto a grupo de conexión en los usuarios potenciales, lo cual es necesario actualmente. A su vez esta aplicación computacional constituye el aporte práctico de este trabajo.

La estructura del informe está compuesta por la portada, el resumen, el índice, la introducción, el desarrollo consta de tres capítulos, además las conclusiones, las recomendaciones y las referencias bibliográficas.

En el Capítulo 1 se abordaron los transformadores de forma general, se resaltan los tipos de transformadores, de manera muy general en específico alguna panorámica sobre transformadores monofásicos, trifásicos y transformaciones trifásicas en conjunto, influencia de la polaridad en transformadores, así como el papel que juegan en el sistema eléctrico de potencia.

En el Capítulo 2 se detallan distintas transformaciones trifásicas y los grupos de conexión para éstas. Además se abordan los bancos abiertos y cerrados de

transformadores monofásicos en conexión trifásica, y en transformadores trifásicos se particulariza la conexión en zigzag.

En el Capítulo 3 se describe la aplicación computacional, constituida por el software implementado, una explicación detallada de la estructura del programa, las ventajas que reporta su uso y aplicación, así como la descripción de la interfaz del usuario. Además se exponen ejemplos prácticos donde se presentan y explican los resultados obtenidos.

Para la realización de este trabajo se revisaron libros de textos clásicos en máquinas eléctricas, así como documentos y artículos de páginas web de diferentes instituciones. Fue necesario el estudio de algunos aspectos relacionados con la programación en MatLab en su versión 10.0. Muchos de los textos y documentos que se revisaron se referencian en este trabajo.

CAPÍTULO 1. TRANSFORMADORES

1.1 Introducción

En el mundo actual se hace común encontrarse con transformadores eléctricos, debido a la amplia gama de aplicaciones que este dispositivo brinda al desarrollo de la sociedad moderna en su conjunto. Basta con salir a las calles y mirar a los postes del tendido eléctrico para observar estos dispositivos con detalles. Incluso en el interior de los hogares es indispensable el uso de los mismos, presentes en muchos de los equipos electrodomésticos que utilizamos a diario.

El transformador es un dispositivo que convierte energía eléctrica de un cierto nivel de voltaje, en energía eléctrica de otro nivel de voltaje, por medio de la acción de un campo magnético. Está constituido por dos o más bobinas de alambre, aisladas entre si eléctricamente por lo general y enrolladas alrededor de un mismo núcleo de material ferromagnético. El devanado que recibe la energía eléctrica se denomina devanado de entrada, con independencia si se trata la mayor (alta tensión) o menor tensión (baja tensión). El devanado del que se toma la energía eléctrica a la tensión transformada se denomina devanado de salida. En concordancia con ello, los lados del transformador se denominan lado de entrada y lado de salida [1].

1.2 El transformador

En sus comienzos, la electricidad se producía en su forma continua, por lo que era prácticamente innecesario el uso del transformador. En el año 1831, Faraday descubre lo que, medio siglo después, se denominó transformador, con la ejecución de los experimentos en los que posteriormente descubriría la inducción electromagnética [2].

Con el paso del tiempo, comenzaron a aparecer los problemas relativos al transporte de energía y las pérdidas energéticas que se producían en forma de calor. Fue entonces, en el año 1884, cuando los ingenieros húngaros Zipernowsky, Bláthy y Deri, trabajadores todos de la compañía Ganz, crearon en

Budapest el modelo “ZBD” (iniciales de sus apellidos) de transformador de corriente alterna, basada su estructura y principio de funcionamiento en el anillo de Faraday [3], el cual puede apreciarse en la figura 1.1.

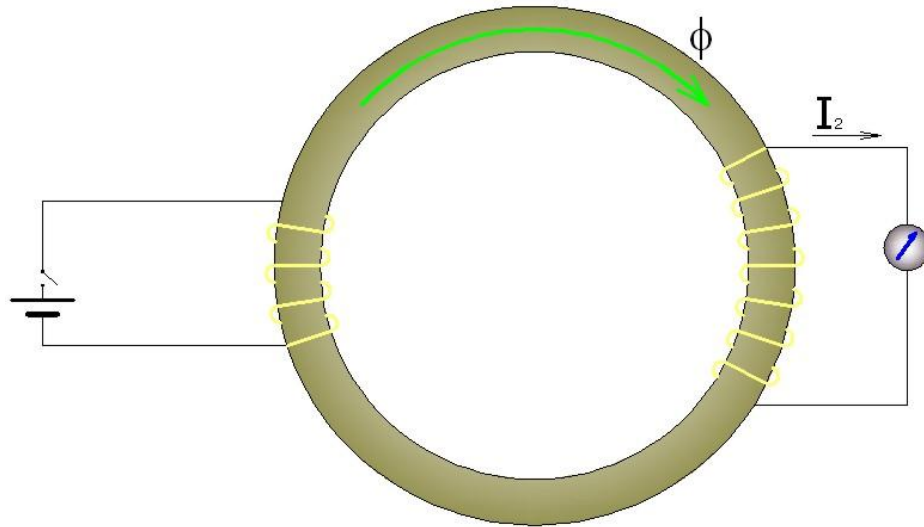


Figura 1.1. Anillo de Faraday

El anillo de Faraday, figura 1.1, está basado en dos bobinas enrolladas, una sobre la otra. Al variar la corriente que pasaba por una de ellas, al cerrar o abrir el interruptor, el flujo magnético, a través de la segunda bobina variaba y se inducía una fem que en el circuito cerrado hace circular una corriente eléctrica. Este es precisamente un transformador eléctrico [3].

El primer sistema comercial de corriente alterna con fines de distribución de la energía eléctrica que usaba transformadores, se puso en operación en los Estados Unidos de América, en el año de 1886 en Great Barington, Massachusetts. En ese mismo año, la energía eléctrica se transmitió a 2000 volts de corriente alterna a una distancia de 30 kilómetros, por una línea construida en Cerchi, Italia. A partir de estas pequeñas aplicaciones iniciales, la industria eléctrica en el mundo, ha recorrido en tal forma, que actualmente es factor de desarrollo de los pueblos, y forma parte importante en esta industria el transformador [4].

1.3 Tipos de transformadores

En la sociedad moderna los transformadores se encuentran de distintos tipos y formas, cumplen con las necesidades específicas donde se encuentran instalados, ya sea conectado en plantas de generación y subestaciones, a la red eléctrica nacional, o simplemente a la radio de la casa. Existen diversas aplicaciones de los transformadores, que no los atan solamente a su finalidad primordial de aumentar o reducir las magnitudes eléctricas en el transporte de energía, por lo que resulta interesante hacer una clasificación de los mismos y de alguno de ellos extenderse la información un poco más dada su importancia.

El transformador puede ser [5]:

- Según la funcionalidad que poseen:
 - De Potencia: tienen como finalidad facilitar el transporte de la energía eléctrica en alta tensión.
 - De Medida: permiten reducir los valores elevados de tensión o intensidad a otros menores pero proporcionales para así poder realizar medidas sin necesidad de adaptar los aparatos de medida.
 - De Comunicación
- Según los sistemas de tensión:
 - Monofásico: con una fase de entrada y otra de salida.
 - Trifásico: formado por tres arrollamientos primarios y tres secundarios.
- Según la tensión del secundario:
 - Elevadores: Elevan la tensión a la salida.
 - Reductores: La tensión en el secundario es menor de la del primario.
- Según el elemento refrigerante:
 - Por aire
 - Por aceite
 - Por pyraleno: es una mezcla de hidrocarburos clorados que no origina mezclas explosivas con calor y oxígeno.
 - Gas
 - Aislante sólido

- Según la refrigeración:
 - Natural: lleva unas aletas que facilitan la disipación del calor asociado a las pérdidas.
 - Forzada: mediante ventiladores.

Existen además los transformadores secos encapsulados en resina epoxi, utilizados en media tensión y ubicados en lugares donde los espacios reducidos y los requerimientos de seguridad en caso de incendio, imposibilitan el manejo de transformadores refrigerados en aceite. Los transformadores herméticos de llenado integral que se usan para distribución de energía eléctrica en mediana tensión, ya sea a la intemperie o protegidos del medio circundante. Los transformadores de corriente, utilizados para tomar muestras de corriente de la línea y reducirla a un nivel seguro y medible, para las gamas normalizadas de instrumentos, aparatos de medida, u otros dispositivos de medida y control [6].

1.4 Transformadores monofásicos y trifásicos

Como bien se comentó en el epígrafe anterior los transformadores según el sistema de tensión donde se encuentren instalados pueden clasificarse en monofásicos y trifásicos. El diseño de los mismos permite el trabajo con valores elevados de corriente y voltaje, mantienen en todo su proceso una estabilidad absoluta de la frecuencia de la red de distribución [7, 8]. En cualquier sistema trifásico, la explotación de los mismos se hace indispensable debido al amplio potencial tecnológico que reporta su utilización en favor del desarrollo de la propia industria eléctrica [9].

Comúnmente los transformadores de tamaño más pequeño son todos monofásicos y se caracterizan por trabajar con bajo o muy bajo voltaje. Estos transformadores tienen múltiples usos como, por ejemplo, suministrar corriente eléctrica a diferentes equipos eléctricos industriales y domésticos. Se pueden encontrar también transformadores monofásicos todavía más pequeños destinados al funcionamiento de infinidad de equipos y dispositivos electrónicos que se utilizan a diario. Algunos de ellos, además de emplearse para reducir la

tensión o voltaje, pueden convertir también la corriente alterna (C.A.) de entrada en corriente directa (C.D.) a la salida, a través del puente rectificador compuesto por diodos semiconductores de silicio que se ubica a la salida de sus terminales de salida [10]. En la figura 1.2, se simbolizan dos tipos de transformadores monofásicos: reductor de tensión y elevador de tensión.

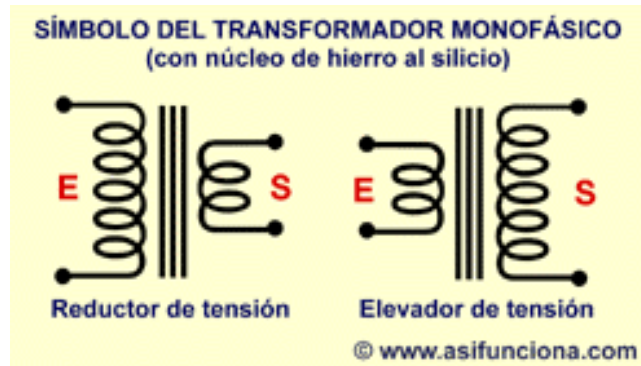


Figura 1.2. Símbolo del transformador monofásico reductor de tensión y elevador de tensión

Obsérvese en la figura 1.2, que el transformador de la izquierda posee mayor número de vueltas en el devanado primario o de entrada (E) y menos en el devanado secundario o de salida (S), lo cual lo caracteriza como un transformador reductor de tensión, pues cuando se aplica determinado voltaje o tensión en la entrada (E) se obtiene otro más reducido en la salida (S). Contrariamente, el transformador de la derecha muestra un devanado con menor número de vueltas en la entrada y mayor número de vueltas a la salida. Por tanto, cuando se aplica un voltaje de determinado valor en la entrada, se obtiene otro voltaje mucho más alto en la salida [10].

En la práctica los transformadores monofásicos se pueden encontrar en bancos trifásicos. Estos requieren de una determinada capacidad en kVA, lo que resulta ventajoso pues en caso de falla o avería, solo se reemplaza la unidad dañada del banco, lo que asegura en las dos restantes un voltaje trifásico a capacidades reducidas que puede continuar el servicio de cargas prioritarias, debido a que los circuitos magnéticos son completamente independientes lo que posibilita que no se produzca reacción o interferencia alguna entre los flujos respectivos [11, 12].

Los transformadores trifásicos, figura 1.3, o transformadores de potencia como también se les conoce, se utilizan en los sistemas de transmisión, donde se precisa de equipamientos de alta fiabilidad capaz de operar a altos valores de tensiones, puesto que, mientras mayor sea el voltaje de las líneas de transmisión menores serán las pérdidas.



Figura 1.3. Transformador trifásico de potencia

El transformador de potencia que se muestra en la figura 1.3, se utiliza para subtransmisión y transmisión de energía eléctrica en alta y media tensión. Son de aplicación en subestaciones transformadoras, centrales de generación y en grandes usuarios. Se caracterizan por construirse en potencias normalizadas desde 1.25 hasta 20 MVA, en tensiones de 13.2, 33, 66 y 132 kV y frecuencias de 50 y 60 Hz [6].

El uso de los transformadores trifásicos proporciona un alto grado de ventajas con respecto a los bancos de transformadores monofásicos ya que tienen un menor volumen de acero, por lo que ocupan menos espacio, poseen una mejor eficiencia, utilizan menos conductores para conexiones externas, en fin, son mucho más fiables [9, 13].

1.5 Polaridad en los transformadores

Cuando se habla de transformadores, es imprescindible precisar un aspecto fundamental a tener en cuenta para la obtención de resultados reales y explicación

de fenómenos que atenten con la operatividad, y el suministro a las distintas cargas que satisfacen los mismos, se trata de la polaridad de los transformadores [14].

La polaridad de los transformadores indica el sentido relativo instantáneo del flujo magnético en los terminales de alta tensión con respecto a la dirección del flujo magnético en los terminales de baja tensión, así como la dirección relativa del voltaje de cada transformador, cuando están conectadas dos o más unidades juntas.

En un transformador de distribución monofásico la polaridad puede ser aditiva o sustractiva. Una simple prueba para determinar la polaridad de un transformador es conectar dos bornes adyacentes de los devanados de alta y baja tensión y aplicar un voltaje reducido siempre por el lado de alto voltaje, que es lo único que garantiza que sean válidos los resultados.

La polaridad es aditiva si el voltaje medido entre los otros dos bornes de los devanados es mayor que el voltaje en el devanado de alta tensión. La polaridad es sustractiva si el voltaje medido entre los dos bornes de los devanados es menor que el voltaje del devanado de alta tensión [15].

De acuerdo con las normas industriales, todos los transformadores de distribución monofásicos de hasta 200 kVA con voltajes en el lado de alta de hasta 8,660 volts (voltaje del devanado) tienen polaridad aditiva. Todos los demás transformadores monofásicos tienen polaridad sustractiva [16].

Polaridad Aditiva

La polaridad aditiva está dada cuando, tanto el devanado primario como el secundario de un transformador están enrollados en el mismo sentido. Esto hace que los flujos de ambos enrollados estén en igual sentido y algebraicamente se sumen. Los terminales H1 y X1 están cruzados. Como resultado, la f.e.m. del devanado secundario se desfasa 180 grados con respecto al primario, como se muestra en la figura 1.4.

Polaridad Aditiva

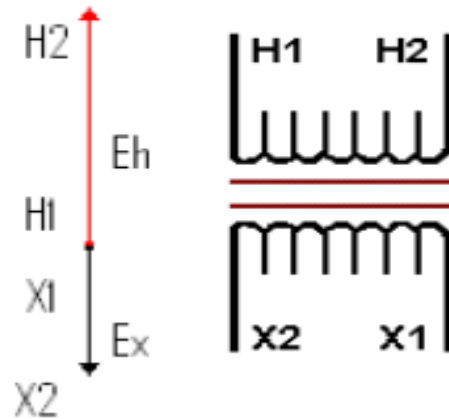


Figura 1.4. Polaridad aditiva en un transformador.

Polaridad Sustractiva

La polaridad sustractiva está dada cuando, el devanado primario con respecto al secundario de un transformador está enrollado en antifase, es decir, en sentido opuesto. Esto hace que los flujos de ambos enrollados estén en sentido contrario y algebraicamente se resten. Los terminales H1 y X1 se encuentran en línea. En esta polaridad no existe desfase entre las f.e.m. como se observa en la figura 1.5.

Polaridad Sustractiva

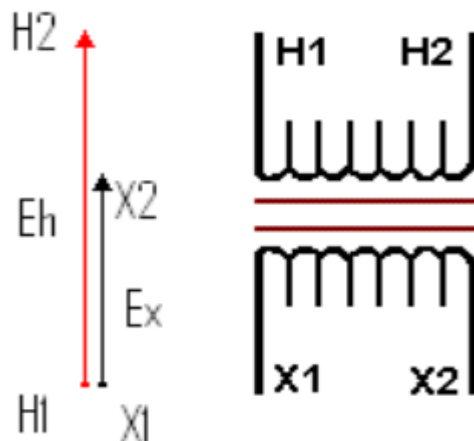


Figura 1.5. Diagrama de polaridad sustractiva en un transformador

1.6 Transformaciones trifásicas

Se denomina transformaciones trifásicas a los bancos de transformadores monofásicos en conexión trifásica y los transformadores trifásicos propiamente dichos. El uso de ellas se generaliza en las redes de transmisión, sub-transmisión y distribución, donde su accionar juega un papel fundamental para lograr un suministro de energía lo más ideal posible y con la calidad requerida.

Es conveniente el uso de los bancos de transformadores monofásicos en los sistemas de distribución donde existen grandes mezclas de cargas monofásicas y trifásicas, lo que posibilita una alta flexibilidad de operación. Estos pueden encontrarse de dos tipos diferentes: bancos cerrados, cuando se dispone del uso de tres transformadores monofásicos, y bancos abiertos, cuando se usan solo dos transformadores.

Un aspecto esencial en el estudio de las transformaciones trifásicas son los distintos tipos de conexiones que se pueden utilizar para el acople de los transformadores trifásicos en su conjunto. Básicamente se utilizan cuatro tipos de conexiones (estrella-estrella, delta-delta, estrella-delta y delta-estrella). Estas se obtienen cuando se ajusta el devanado primario, ya sea en delta o en estrella, se utilizan letras mayúsculas para el lado de alta tensión y letras minúsculas para el de baja tensión. No es necesario tener en el devanado secundario igual conexión que en el primario (Estrella-estrella o Delta-delta) [17]. En la figura 1.6, se muestra cada tipo de conexión descrito.

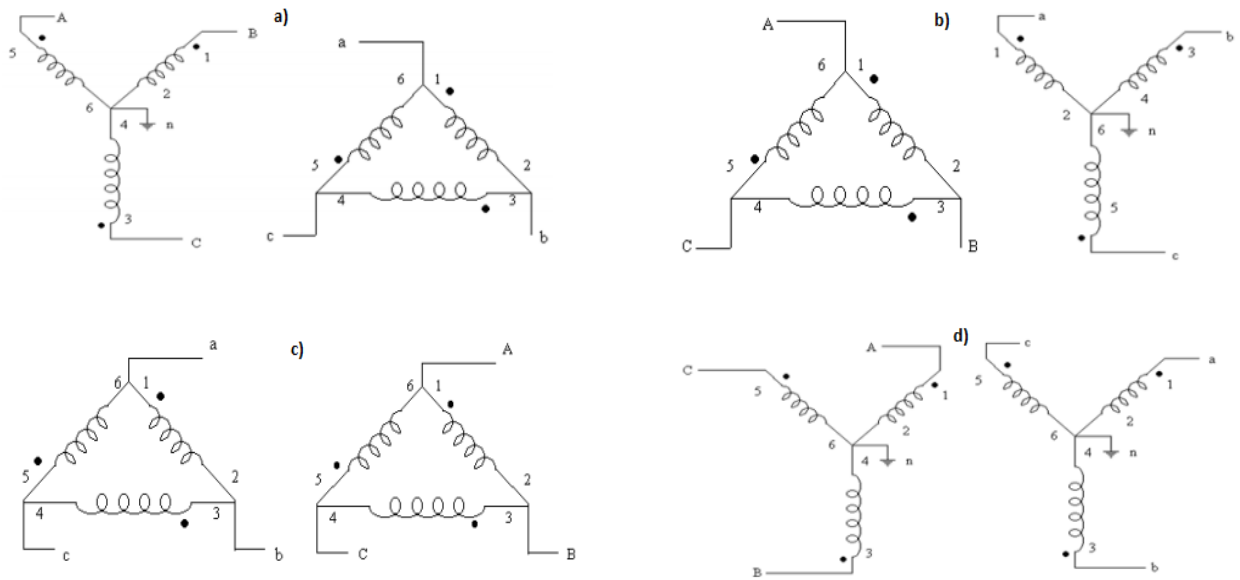


Figura 1.6. Tipos de conexiones. a) Estrella-delta, b) Delta-estrella, c) Delta-delta, d) Estrella-estrella

Estas conexiones se usan tanto para elevar la tensión como para reducirlas, y gracias a las mismas se le puede dar al equipamiento, transformadores en este caso, un mayor uso sin restarle la eficacia y la posibilidad de adaptar los mismos a las condiciones requeridas por el medio donde se demande su uso.

1.7 Funciones del transformador en los Sistemas Eléctricos de Potencia

El transformador reporta al Sistema Eléctrico de Potencia una amplia gama de funcionalidades, que lo hace un dispositivo imprescindible, para lograr y cumplimiento de las necesidades energéticas actuales.

En un elevado porcentaje de los casos, las plantas productoras de electricidad se encuentran a distancias considerables respecto a las zonas residenciales e industriales, principales explotadoras del producto final. Para que el transporte de energía gane en rentabilidad, se hace necesario que en la planta de generación eléctrica halla un transformador de unidad que eleve los niveles de voltaje, lo que reduce la intensidad y logra así una disminución gradual de pérdidas ocasionadas por las líneas de alta tensión [18]. Por tanto, "...la potencia eléctrica de corriente alterna (CA) puede generarse en una estación central; su voltaje puede elevarse

para transmitirlo a largas distancias con muy pocas pérdidas y disminuirlo nuevamente para el uso final. Puesto que las pérdidas por la transmisión en las líneas de un sistema de potencia son proporcionales al cuadrado de la corriente en dichas líneas...” [19]. En la figura 1.7, se detalla lo antes descrito.

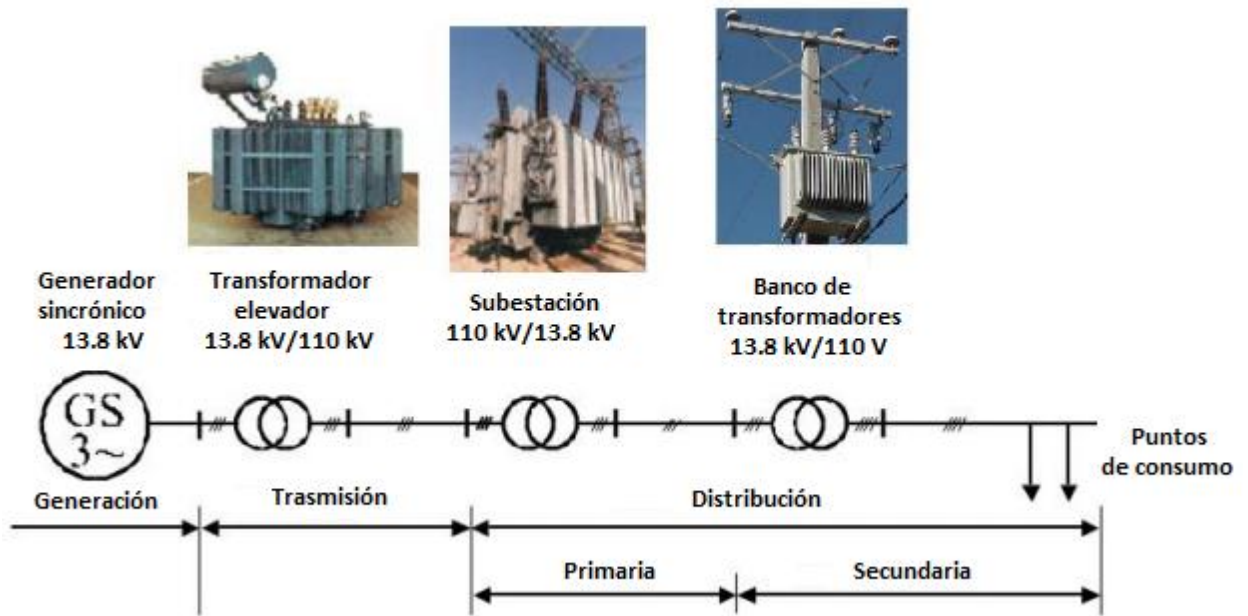


Figura 1.7. Esquema de los subsistemas clásicos de generación, transmisión y distribución.

En el extremo receptor los transformadores de subestación invierten el proceso, figura 1.7, es decir, reducen el voltaje y aumentan los valores de intensidad hasta llegar a los niveles requeridos por las industrias y viviendas. Según Chapman “...Los transformadores bajan luego el voltaje al rango de 12 a 34,5 kV para la distribución local y permitir finalmente el uso de la potencia en los hogares, oficinas y fábricas, a voltajes tan bajos como 120 V...” [19].

1.8 Consideraciones finales del Capítulo

Desde el surgimiento del transformador hasta la actualidad existe un desarrollo de este dispositivo, en consecuencia con los cambios y transformaciones sociales que ha experimentado el hombre y su ola de perfeccionamiento que le rodea, que con el paso del tiempo crecerá conjuntamente con las necesidades de la sociedad

futura. “...Sin el transformador, sencillamente no sería posible usar la potencia eléctrica en muchas de las formas en que se utiliza hoy en día...” [19].

Lo que sí es seguro es que su funcionalidad y uso van a estar fijados al desarrollo sostenible de cualquier civilización, pues el transformador conjuntamente con la energía eléctrica, son las condicionantes principales para obtener avances y dar soluciones a la gran mayoría de los problemas universales.

CAPÍTULO 2. GRUPOS DE CONEXIÓN PARA LAS TRANSFORMACIONES TRIFÁSICAS

2.1 Introducción

Para el dominio de los conceptos en el estudio del transformador es de relevante importancia tener en cuenta los grupos de conexión, los cuales dependen explícitamente del tipo de conexión que presenten estos dispositivos, en este caso el transformador trifásico o un conjunto de transformadores monofásicos que forman bancos. Estos pueden producir variaciones importantes en las transformaciones trifásicas, esto proporciona en muchas de las ocasiones resultados no deseados si no se toman en cuenta las consecuencias de su manejo negligente.

En este capítulo se detallarán aspectos esenciales a tener en cuenta para la obtención de los diferentes grupos de conexión, así como las variaciones que pueden surgir, cuando se acoplan bancos de transformadores monofásicos abiertos y cerrados en conexión trifásicas, o transformadores trifásicos, en consecuencia con los sus distintos grupos de conexión.

2.2 Grupos de conexión

Los grupos de conexión se establecen en dependencia del desfase que existe entre los voltajes de línea de secundario respecto a los voltajes de línea del primario. Las diferencias de fase de secundario con respecto al primario se miden con el llamado índice horario [20].

¿Cómo se establece el índice horario? Para que esta diferencia de fase quede unívocamente determinada se supondrá que el transformador se alimenta por medio de un sistema equilibrado de tensiones de sentido directo, de esta manera los ángulos de retraso del lado de menor tensión en relación con el lado de alta que se obtienen, son positivos.

Los ángulos se miden en múltiplos de 30 grados, se identifica por el grupo 1 cuando el desfase es de 30 grados, grupo 2 a 60 grados, grupo 3 a 90 grados, etc. Esto permite nombrar los ángulos como se nombrarían las horas del reloj [20].

Para la determinación del índice horario se considera que al unir imaginariamente los extremos de los fasores de los voltajes de línea, en este caso del devanado primario, ver figura 2.1, con una circunferencia se obtiene una esfera de reloj, donde las cero horas y las 12 horas coinciden, y se considera el minutero al fasor del devanado primario. De manera similar se procede con los voltajes de línea por secundario, que se considera la aguja horaria, y si, el voltaje V_{ab} del secundario está en fase con el voltaje V_{AB} del primario al superponerse se dice que el grupo de conexión es cero. Para obtener los otros grupos se procede a desplazar en el sentido de las manecillas del reloj los fasores de fase [9].

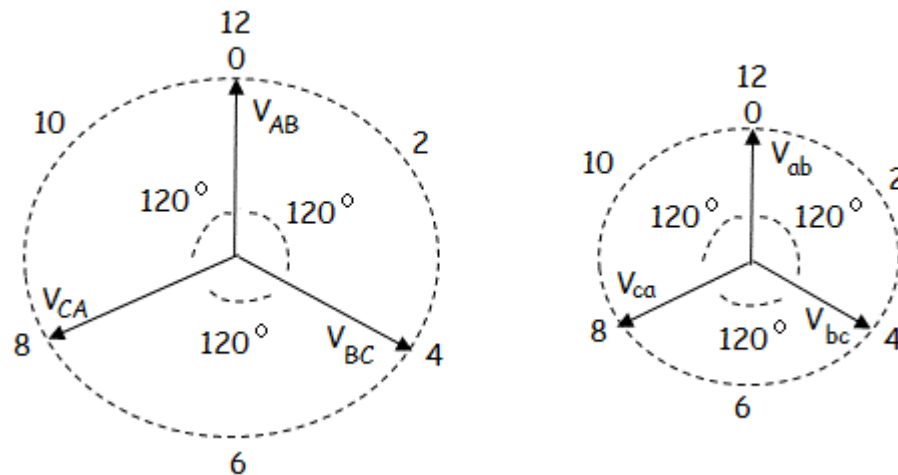


Figura 2.1. Representación fasorial del grupo de conexión Yy0.

Para las conexiones Yy y Dd, el voltaje de referencia V_{AB} siempre apunta a las cero horas del reloj, lo que da lugar con la rotación de los fasores de secundario 30 grados a la obtención de los grupos de conexión (grupos: 0, 2, 4, 6, 8, 10), correspondientes a estos tipos de conexión. Lo mismo ocurre para los tipos de conexión Yd y Dy, con la diferencia de que el voltaje por secundario V_{ab} comienza a rotar a partir de la una del reloj, que da paso a la aparición de sus respectivos grupos de conexión (grupos: 1, 3, 5, 7, 9, 11). Importante señalar que esto se

cumple siempre que se trabaje con cargas balanceadas, es decir, los voltajes de primario y secundario de cada una de las fases se encuentran a 120 grados uno del otro.

2.3 Bancos cerrados con transformadores monofásicos

Lemozy expresa que el uso de transformadores en conexión trifásica en sistemas de potencia es de primera importancia, pues prácticamente toda la energía eléctrica es generada y transmitida por intermedio de líneas de transmisión trifásicas, y además regularmente es necesario subir varias veces la tensión entre los generadores y las cargas [21].

El banco de transformadores monofásicos también sirve para poder cambiar el número de fases del sistema, es decir, un sistema trifásico puede convertirse en un sistema bifásico, de seis fases, de doce fases, etc.

Los núcleos de los transformadores monofásicos normalmente son acorazados, ya que tienen menor altura y permiten economizar material ferromagnético. Al poseer circuitos magnéticos independientes e iguales para cada fase, resultan perfectamente simétricos, lo que en general es ventajoso.

Las conexiones más utilizadas para formar bancos cerrados con transformadores monofásicos en conexión trifásica son: estrella-estrella (Yy), delta-delta (Dd), estrella-delta (Yd) y delta-estrella (Dy).

Conexión estrella-estrella (Yy)

Para la conexión estrella Yy, la corriente de línea es la misma que la que circula por cada devanado del transformador. En cambio el voltaje en bornes de una bobina del devanado es un 58 % menor que el voltaje de línea. Como primario y secundario están en estrella, la relación de transformación será directamente la relación entre el número de espiras [20], o la relación de los voltajes nominales de fase que aparecen en la chapa del transformador, también pueden hallarse como la relación de los voltajes de línea de cada devanado sin carga. En la figura 2.2, se muestra una representación esquemática y fasorial de la conexión estrella-estrella.

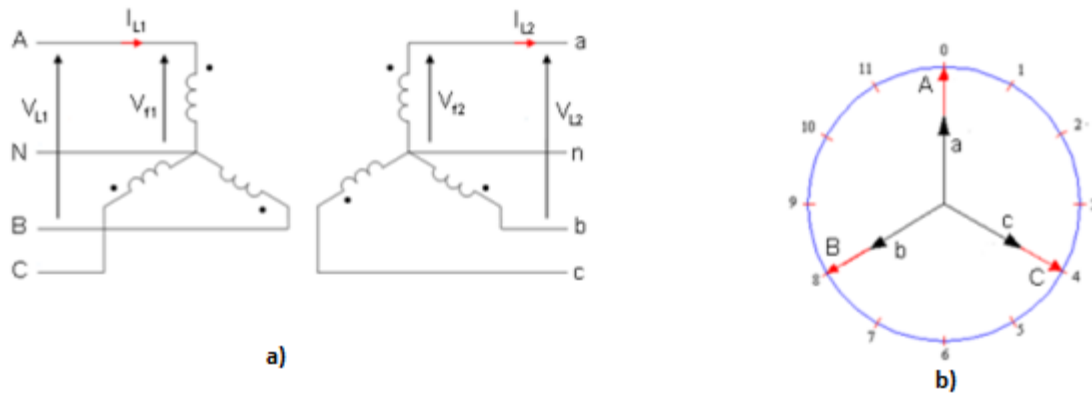


Figura 2.2. Conexión Yy a) Representación esquemática, b) Representación fasorial.

De la figura 2.2b, se puede deducir que los voltajes por primario y secundario del transformador trifásico se encuentran en fase, así mismo ocurre con las corrientes de línea primaria y secundaria, formándose así el grupo de conexión Yy0.

La conexión Yy debe evitarse a menos que se haga una conexión neutra muy sólida (de baja impedancia) entre el primario y la fuente de potencia. Si no se proporciona neutro, los voltajes de fase tienden a desequilibrarse severamente cuando la carga es desequilibrada. Cuando el neutro de los primarios no está sólidamente conectado a tierra, su potencial será flotante con respecto a la tierra del sistema. En dependencia de si la condición de operación es balanceada o no, los voltajes de fase a neutro a través de los devanados primarios del transformador no podrá ser la misma como las tensiones de fase correspondientes al neutro de la fuente. También surgen problemas con las armónicas terceras [20].

Si es necesario tener una conexión Yy con un neutro primario débil o sin uno, cada transformador de fase debe tener un tercer devanado además del primario y del secundario al que se llama terciario. Este tercer devanado se conecta en triángulo y permite anular los problemas debidos a armónicos o a desequilibrios de cargas. Aunque no es necesario, estos devanados suelen disponerse con terminales hacia el exterior para aprovechar su potencia en servicios auxiliares [20].

Los grupos de conexión más usuales para la conexión estrella-estrella son: Yy0 y el Yy6, que se muestran en la figura 2.3. Estos grupos de conexión se deben

utilizar, sin precauciones especiales, solo en transformadores con circuitos magnéticos trifásicos con tres columnas y cuando la carga prevista entre fase y neutro no sobrepasa el 10% de la potencia nominal del transformador [20].

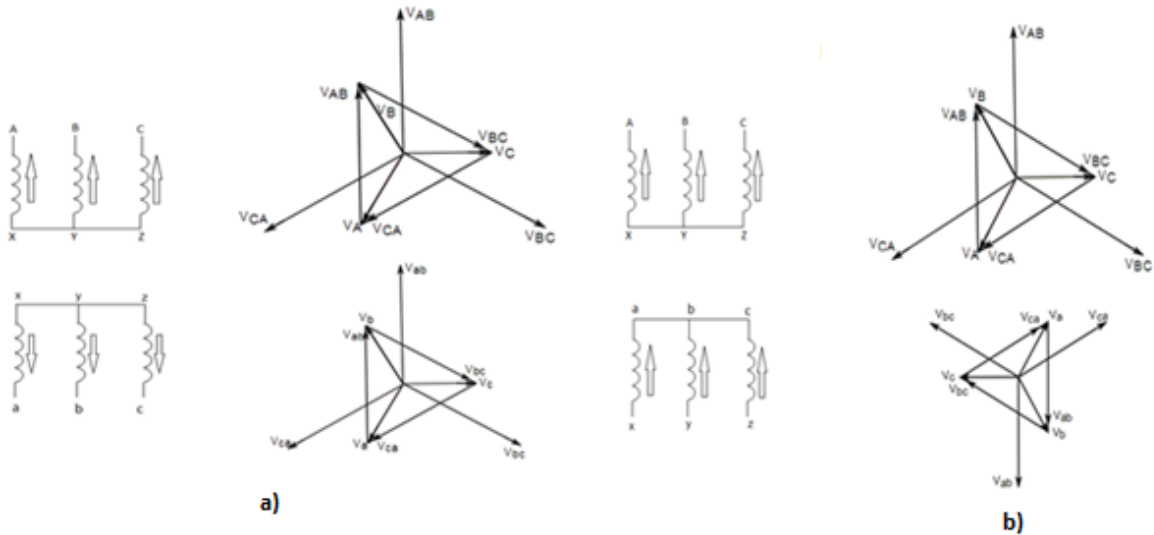


Figura 2.3. a) Diagrama de conexión y representación fasorial de la conexión Yy0,

b) Diagrama de conexión y representación fasorial de la conexión Yy6

Obsérvese que en esta figura 2.3, es fácil determinar que la referencia que toman es de cero, es decir, el fasor V_{AB} apunta al cero. En el secundario de la figura 2.3a, el fasor V_{ab} se encuentra en fase con respecto a la referencia, por lo que forma el grupo Yy0, mientras que en la figura 2.3b, los fasores V_{AB} y V_{ab} , del primario y secundario respectivamente, se encuentran en antifase. Si se superponen los dos diagramas fasoriales se nota claramente que V_{ab} apunta hacia las seis lo que da lugar al grupo de conexión Yy6. Para ambos diagramas de conexión es necesario aclarar que están bajo la influencia de polaridad sustractiva.

Para obtener el grupo Yy0 con polaridad aditiva se tendría que hacer un cambio de conexión en el secundario del transformador, debido a que la dirección del flujo con respecto al primario es contraria en cada transformador. Se unirán en un punto común los terminales a, b y c y se alimentaría luego a través de x, y, z, lo que da lugar a la formación del grupo 0, ante los cambios que experimenta el cambio de polaridad. En la figura 2.4, se muestra el diagrama de conexión necesario para obtener la conexión Yy0 con polaridad aditiva.

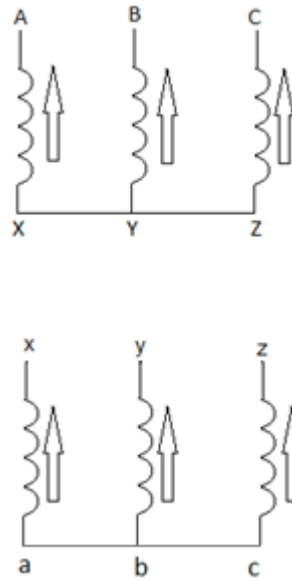


Figura 2.4. Diagrama de conexión Yy0 con polaridad aditiva.

Conexión delta-delta (Dd)

Este tipo de conexión es utilizado en sistemas trifásicos donde la tensión no es muy elevada, su uso se generaliza principalmente en transformadores de baja tensión (B.T), ya que se necesitan más espiras de menor sección. Esto es así porque la corriente por los devanados del transformador es un 58% menor que la de línea. Sin embargo la tensión que soportan es la propia tensión compuesta de la línea.

En esta conexión el voltaje de fase es igual al de línea $V_f = V_L$. Sin embargo, la corriente de línea I_L es $\sqrt{3}$ veces la corriente de fase I_f , esta característica se da tanto en la parte primaria como en el secundario del transformador [9].

Los sistemas trifásicos acoplados en delta se usan preferentemente para grandes potencias en baja tensión, ideal para cargas desequilibradas. En los bancos Dd es recomendable la utilización de transformadores monofásicos idénticos o un transformador trifásico, para minimizar la subutilización, debido a que los mismos distribuyen la carga entre sus elementos acorde a sus respectivas impedancias de dispersión [9].

De la conexión Dd se pueden definir un grupo de ventajas y desventajas, para lograr un mejor aprovechamiento de su utilidad, ellas son [20]:

Ventajas

- En este tipo de conexión, aunque las cargas no estén bien equilibradas, las tensiones mantienen un buen equilibrio.
- En caso de avería, uno de los transformadores puede ser separado del conjunto sin que esto impida la continuidad en el funcionamiento del sistema trifásico, aunque con una potencia total menor.

Inconvenientes

- Esta conexión no dispone de ningún neutro, tanto en el primario como el secundario del transformador, esto no permite la distribución con dos niveles de voltaje diferentes.
- El aislamiento eléctrico utilizado para esta conexión, resulta más caro que el utilizado en una conexión en estrella, para las mismas especificaciones técnicas.

Esta conexión se utiliza con frecuencia para alimentar cargas de potencia trifásica y sistemas de alumbrado monofásico simultáneamente, no presenta problemas de cargas desbalanceadas y se emplea tanto para elevar la tensión, como para reducirla.

Además, como los devanados están diseñados para soportar distintos niveles de tensiones entre fases, la conexión delta-delta puede operar a bajas tensiones por primario y secundario, menores de 30 kV. En estos niveles de tensión, los valores elevados de corriente de línea, se ven afectados en $\frac{1}{\sqrt{3}}$ en los devanados, es por ello que ésta no es tan crítica [22].

En la figura 2.5, puede verse una representación esquemática y fasorial de la conexión delta-delta con el grupo de conexión cero.

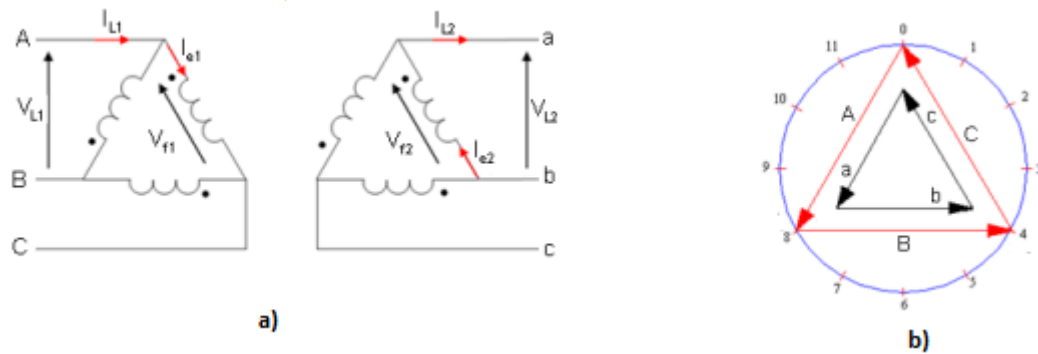


Figura 2.5. Conexión Dd a) Representación esquemática, b) Representación fasorial

Como se puede ver en la figura 2.5, los voltajes por primario y secundario del transformador trifásico se encuentran en fase, y coincide con la conexión Dd0 antes descrita.

Para esta conexión, los grupos de conexión más usuales son: Dd0 y Dd6. Estos grupos se utilizan bien poco, su principal ventaja reside en la posibilidad, cuando se tiene un grupo de tres transformadores monofásicos de potencia total S , de permitir su funcionamiento con potencia reducida $0,575 S$, con solo dos transformadores conectados en delta cuando el tercero está fuera de servicio. En la figura 2.6, se representa el diagrama de conexión y representación fasorial del grupo Dd0 [20].

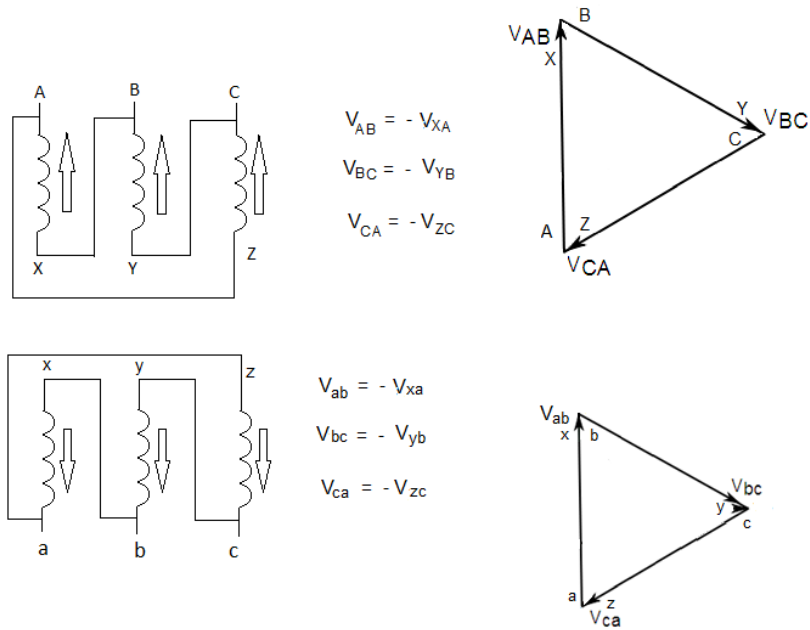


Figura 2.6. Grupo de conexión Dd0 y relación de fase de los voltajes

Al hacer una superposición de los diagramas fasoriales de primario y secundario de este grupo (Dd0), figura 2.6, se puede determinar con claridad que los voltajes están completamente en fase y apuntan a las cero horas del reloj, además de la polaridad sustractiva a la que está sometido este banco específico.

Conexión estrella-delta (Yd)

La conexión Yd es muy utilizada en Cuba en los sistemas de distribución, sin aterrizar el neutro. Con la aplicación de esta conexión se reduce el voltaje ya que, además de la propia relación de transformación debida a las espiras, interviene el valor $\sqrt{3}$ para reducir la tensión del secundario. Elimina los terceros armónicos de los voltajes y corrientes por línea por secundario.

Debido a este factor reductor añadido, esta conexión se usa en subestaciones de alta tensión reductoras, subestaciones de reparto y de distribución [20].

Ventajas

- No tiene problemas con las componentes del tercer armónico de tensión, ya que ellos prácticamente se compensan.

- Se comporta bien ante cargas desequilibradas, ya que la delta redistribuye posibles desequilibrios.

Inconvenientes

La conexión estrella-delta, en su conexión más frecuente, da como resultado un desplazamiento de fase de 30 grados entre los voltajes primarios y secundarios, lo cual puede dar inconvenientes al conectar en paralelo dos grupos de transformadores. Los ángulos d fase de los secundarios de los transformadores deben ser iguales si se supone que se van a conectar en paralelo, lo que significa que se debe poner mucha atención a la dirección de desplazamiento de 30 grados de la fase, que sucede en cada banco de transformadores que van a ser puestos en paralelo [21].

Los transformadores acoplados en Yd, se usan como transformadores reductores al final de líneas de alto voltaje [23]. En sistemas de distribución es poco usual pues no tiene neutro y se emplea en algunas ocasiones para distribución rural a 20kV. En la figura 2.7, se detallan el esquema de conexión y la representación fasorial de la conexión Yd11.

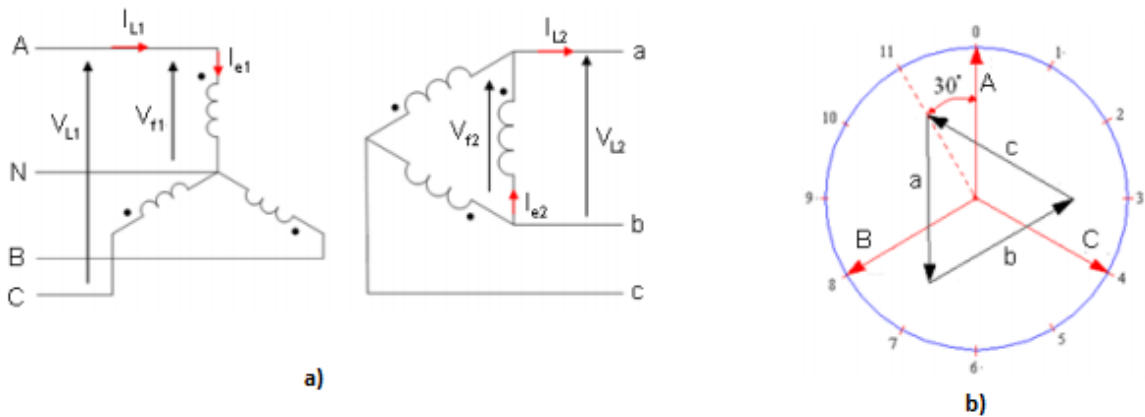


Figura 2.7. Conexión Yd. a) Representación esquemática, b) Representación fasorial.

Con este tipo de conexión, la corriente en el devanado de las bobinas secundarias es de un 58% respecto a la corriente de carga. Las distorsiones de las tensiones de salida no resultan tan severas como en una conexión Yy. En la figura 2.7 el

voltaje del secundario se encuentra desfasado 30 grados hacia la izquierda con respecto al voltaje de referencia del primario, apunta hacia las 11 horas del reloj y da paso al grupo de conexión Yd11 con polaridad sustractiva, considerado uno de los grupos más comunes de la conexión estrella-delta.

Para el correcto manejo de los bancos conectados en Yd se precisa tener un dominio adecuado de las variantes de conexión que posee, debido a que la misma es capaz de ofrecer de acuerdo a la forma de conexión y polaridad distintos grupos de conexión. Con polaridad sustractiva, se puede formar la conexión Yd11 como se muestra en la figura 2.8.

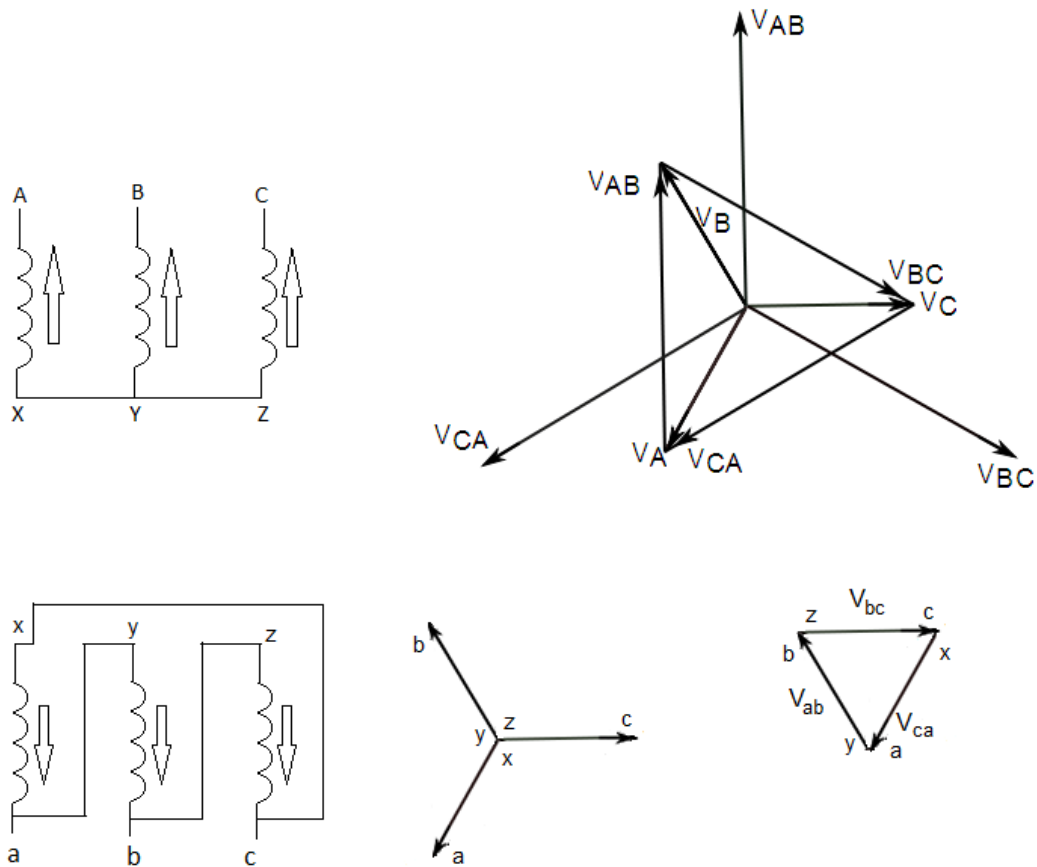


Figura 2.8. Diagrama de conexión por secundario para la conexión Yd11 con polaridad sustractiva.

En la figura 2.8, se puede apreciar cómo con solo variar la conexión de los terminales de los secundarios de los transformadores que forman el banco se obtiene el grupo Yd1 con polaridad sustractiva.

Con la polaridad aditiva se puede formar el grupo Yd11, se sale hacia la carga por x, y, z, como muestra la figura 2.9.



Figura 2.9. Diagrama de conexión por secundario para Yd11 con polaridad aditiva.

Conexión delta-estrella (Dy)

La conexión delta-estrella (Dy) posibilita abastecer cargas a dos niveles de voltaje, a voltaje de fase y a voltaje de línea. Se utiliza bastante en Cuba en subtransmisión con la estrella aterrada. Al ser una delta por primario garantiza que no haya corrimiento del neutro por secundario. La relación de transformación para esta conexión se determina a través de la expresión siguiente:

$$a = \frac{V_{f1}}{V_{f2}} = \frac{V_{L1}}{V_{f2}}$$

La conexión Dy, se utiliza para elevar la tensión, ya que, además de la propia relación de transformación debida a las espiras, interviene el factor $\sqrt{3}$ que multiplica el voltaje del secundario. Esta conexión se utiliza mucho como transformador elevador en las redes de alta tensión (A.T). En este caso la alta tensión está en el lado de la estrella, lo cual permite poner a tierra el punto neutro, con lo que queda limitado del potencial sobre cualquiera de las fases a la tensión simple del sistema [20].

Ventajas

- La principal ventaja de este tipo de conexión es que reduce considerablemente el gasto económico en el aislamiento interno del transformador.

Inconvenientes

- El desfase de 30 grados puede ser negativo, lo que trae consigo que la conexión en paralelo con otra fuente de energía sea imposible. No ocurre así cuando el banco de transformadores tenga que alimentar a un grupo de cargas aisladas, en este caso el desfase no representaría ningún inconveniente.
- La carga entre sus transformadores se distribuye acorde a la impedancia de dispersión de los transformadores que componen el banco.

Esta configuración se puede utilizar en los terminales de salida de centrales generadoras, ya que disponen de un neutro en alto voltaje que se pone a tierra, con esto se logra que el voltaje en cualquiera de las fases quede limitado al voltaje de fase del sistema.

Otra de las aplicaciones es como transformador de distribución donde se precise alimentar cargas monofásicas y trifásicas. Los desbalances en las cargas monofásicas tienden a ser compensados por el primario conectado en delta. En los sistemas de distribución industrial, su uso es conveniente debido a que se tiene acceso a dos voltajes distintos, el voltaje de fase y el de línea. Los armónicos triples no afectan esta conexión debido a que estos circulan por el devanado conectado en delta.

El caso de tener una delta por primario en su configuración, la conexión Dy garantiza que no exista corrimiento del neutro por secundario, sin embargo, tiene como desventaja que la carga entre sus transformadores se distribuya acorde a la impedancia de dispersión de las unidades que componen el banco [24].

En la figura 2.10, se observa la descripción esquemática y fasorial de la conexión delta-estrella.

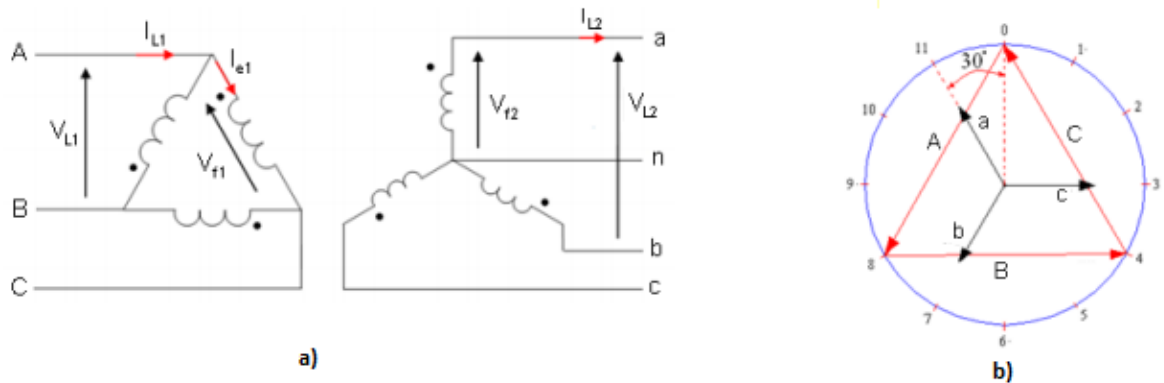


Figura 2.10. Conexión Dy. a) Representación esquemática, b) Representación fasorial

Esta conexión se desfasa 30 grados al igual que la conexión Yd antes descrita, se obtiene con ello el grupo de conexión Dy11, figura 2.10, considerado uno de los más usuales para la conexión delta-estrella.

2.4 Bancos abiertos con transformadores monofásicos

Los bancos abiertos de transformadores monofásicos en conexión trifásica, en la práctica son bien utilizados. Están compuestos por dos unidades monofásicas conectadas de manera que sean capaces de suministrar energía eléctrica a cargas trifásicas, al igual que lo hacen los bancos cerrados y los transformadores trifásicos.

Para el acople de bancos abiertos, las conexiones más utilizadas son la delta abierta (delta-abierta), estrella abierta (Y-abierta) y la conexión T (Teaser).

La conexión delta abierta es utilizada principalmente para brindar servicio en casos de emergencia cuando en un banco cerrado se daña o deja de funcionar una de las tres unidades monofásicas conectadas, el uso de la misma reporta grandes pérdidas de potencia en las líneas por lo que su explotación a largo plazo no es recomendable.

Para obtener la conexión estrella abierta es necesario tener acceso al menos a dos líneas del sistema trifásico y al neutro, de esta manera se puede utilizar para ofrecer servicio trifásico a pequeños clientes comerciales que lo necesiten en

áreas rurales donde no estén disponibles las tres fases. En Cuba se utiliza con frecuencia en distribución.

Al igual que las conexiones delta abierta y estrella abierta, la conexión T es utilizada para obtener un sistema de voltajes trifásicos por el secundario del transformador con solamente dos unidades monofásicas conectadas en el banco. Para ello es necesario tener acceso a las tres líneas de alimentación por el lado de alta tensión.

En el epígrafe se detallan cada una de estas conexiones, y se comenta sobre las ventajas y desventajas que reportan según su utilización, así como la aplicabilidad en la práctica de las mismas.

Conexión estrella abierta (Y-abierta)

Esta conexión surge del banco Yd cuando se suprime un elemento, para llevar a cabo esta conexión se necesita tener acceso a dos líneas del sistema trifásico y al neutro. El banco se forma, tal como se muestra en la figura 2.11, donde se pueden observar el diagrama de conexión y la relación fasorial de los voltajes.

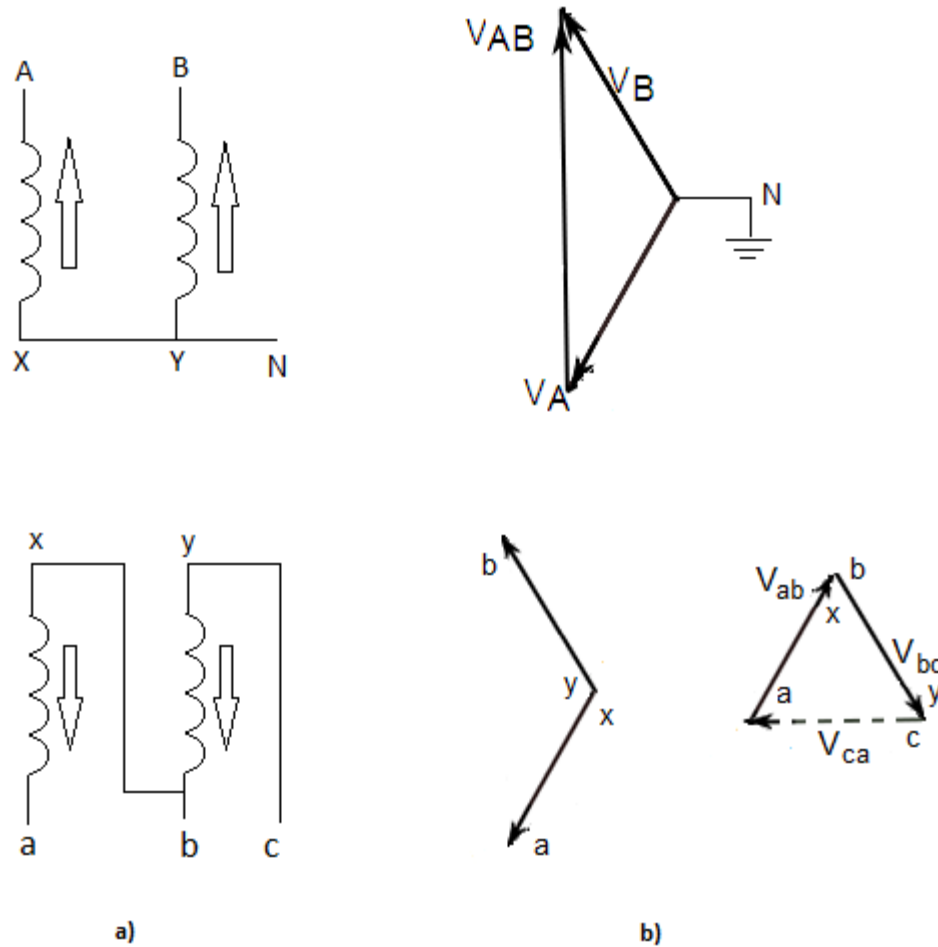


Figura 2.11. a) Diagrama de conexión, b) Relación de fase de los voltajes.

En la figura 2.11, se puede observar que el secundario está conectado en delta, al igual ocurre con la conexión delta abierta, figura 2.12. Esto da la posibilidad de obtener un sistema trifásico balanceado. En la práctica le llaman estos tipos de conexión delta abierta, refiriéndose al secundario del transformador, sin embargo la denominación correcta es cuando la conexión se refiere por primario [9].

Las pérdidas son las mismas que para el caso de la delta abierta. La pérdida de capacidad con respecto al grupo trifásico total es del 42,3 %, es decir, sólo puede aprovecharse un 57,7 % de la potencia que suministraría el grupo trifásico al completo.

Su principal desventaja es que por el neutro del circuito primario debe fluir una corriente de retorno muy alta [20].

Conexión delta-abierta (D-abierta)

En la vida práctica, este tipo de conexión es poco utilizada pues su manejo reporta grandes pérdidas de potencia en las líneas, en torno al 13.4 %. El empleo de la misma es en casos significativos cuando, por ejemplo, se daña un transformador en un banco determinado, es decir, la función esencial es brindar servicio en caso de emergencia. En la figura 2.12, se puede ver el diagrama de conexión y la relación de fase de esta conexión.

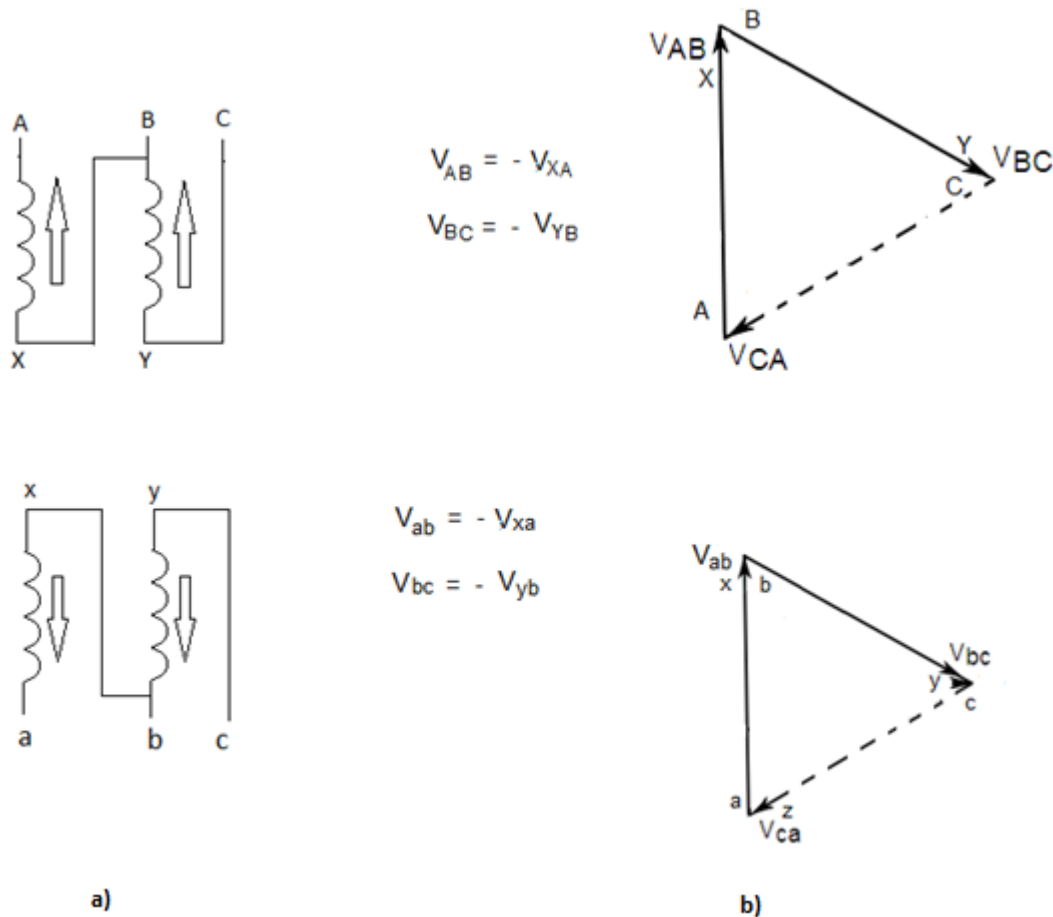


Figura 2.12. a) Diagrama de conexión, b) Relación de fase de los voltajes.

En la figura 2.12, se puede observar que con solo dos transformadores se obtienen tres voltajes desfasados 120 grados por secundario

La conexión delta abierta reporta grandes pérdidas de capacidad con respecto al grupo trifásico, con valores que están en el orden de un 42.3 %, en un final, la

potencia total que los dos transformadores restantes pueden suministrar equivale a dos tercios del valor nominal del banco original [19]. Solamente se puede aprovechar un 57,7 % de la potencia que suministraría el grupo trifásico al completo, en lugar del esperado 66.77 % [25].

¿Cuándo se usa?

- Como una solución temporal cuando se daña una fase de un grupo trifásico en conexión Dd.
- En áreas que esperan un crecimiento de carga y se prevé para el futuro la adición de un tercer transformador para completar la conexión Dd del banco trifásico.
- Para soportar cargas que son una combinación de una carga monofásica grande y una carga trifásica más pequeña.
- Cuando esta conexión puede ser más económica en el uso de materiales. Por ejemplo, ciertos autotransformadores trifásicos (como en el caso de un compensador de arranque para un motor de inducción).

La conexión delta abierta es utilizada además, en el caso que se deseen suministrar pequeñas cantidades de potencia trifásica combinada con carga monofásica tal como se muestra en la figura 2.13, para esta aplicación el transformador T2 es mucho más grande que T1 [25].

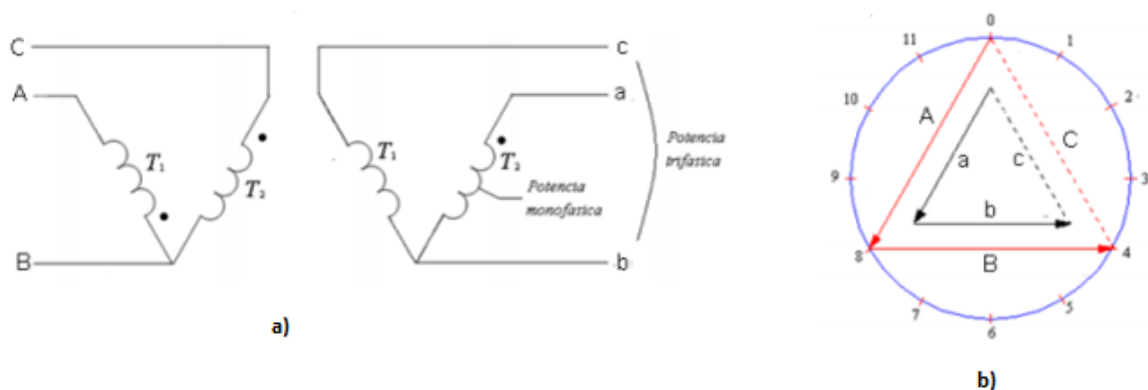


Figura 2.13. a) Utilización de una conexión de transformador en delta abierta, b) Fasores de la conexión delta abierta.

En la figura 2.13, se muestra que esta conexión no produce desfasaje del voltaje por secundario entre la carga trifásica y la monofásica.

Conexión Teaser (T)

Esta conexión es utilizada para obtener por secundario un sistema de voltajes trifásicos con solo dos unidades monofásicas conectadas. Para ello se hacen necesarias las tres líneas de alimentación por primario, obteniéndose relaciones de fase entre primario y secundario, tal como ocurre en los bancos Yy y Dd. También se pueden lograr desfasajes similares a la conexión Yd, figura 2.14, llamada conexión a 30 grados.

A pesar de que con el uso de esta conexión puede aparecer una ligera subutilización de la potencia instalada, algunos fabricantes producen transformadores trifásicos de distribución con la conexión T, esto ahorra acero electrotécnico para los núcleos, y presentan una simple tecnología de fabricación, pues se hacen con las chapas de los transformadores monofásicos [9].

¿Cuándo se utiliza? En la construcción de algunos transformadores de distribución, pues sus costos menores compensan la desventaja de su pérdida de capacidad.

Una de sus ventajas es que puede conectarse un neutro tanto al primario como al secundario del grupo. Su pérdida de capacidad es sólo del 7,1811 % respecto con la capacidad propia de los dos transformadores [20]. En la figura 2.14, se muestra el diagrama de conexión y la relación de fase de los voltajes de esta conexión.

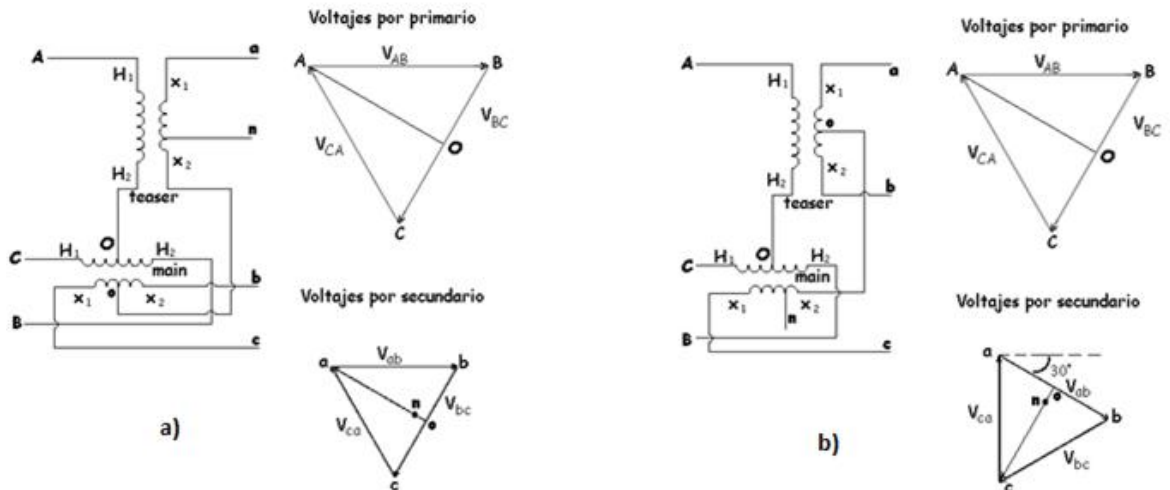


Figura 2.14. Diagrama de conexión y relación de fase de los voltajes. a) Conexión en fase, b) Conexión a 30 grados.

2.5 Transformadores trifásicos

El transformador trifásico se considera el más utilizado actualmente en la sociedad. Esto se debe a que la producción, la distribución y el consumo de energía eléctrica se realizan en corriente alterna trifásica. Se entiende por transformador trifásico aquel que es utilizado para transformar un sistema trifásico equilibrado de tensiones en otro sistema equilibrado de tensiones trifásico pero con diferentes valores de tensiones e intensidades [26].

En relación con los bancos de transformadores monofásicos, el transformador trifásico suele ser menos caro, esto se debe a que los devanados de la unidad trifásica están colocados sobre un núcleo magnético común en vez de tres independientes, ahorrando técnica y materiales para su ensamble [27].

Los transformadores trifásicos pueden ser de dos tipos según la disposición de su circuito magnético: de tipo núcleo o columna, donde el circuito magnético es un núcleo rodeado por los devanados, y tipo acorazado, en los que el circuito magnético es una coraza que rodea a los devanados. En las figuras 2.15 y 2.16, se muestran detalles gráficos de los tipos de núcleos magnéticos.

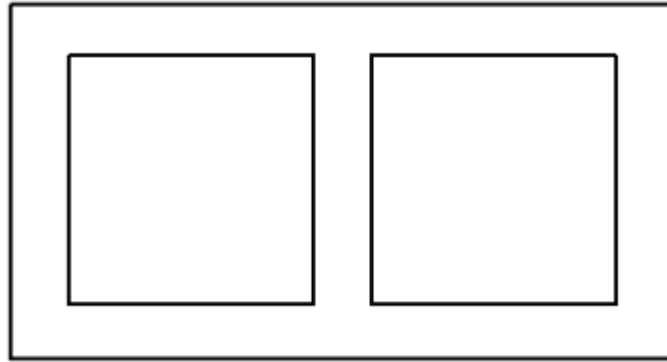


Figura 2.15. Esquema de estructura tipo núcleo o columna para transformador trifásico

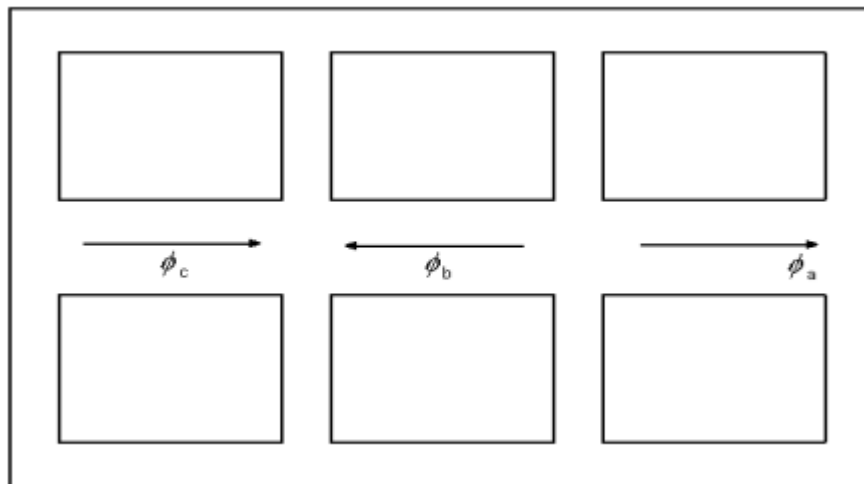


Figura 2.16. Esquema de estructura tipo acorazado para transformador trifásico.

El diseño básico de los transformadores trifásicos es a partir de la estructura tipo núcleo o columna, propuesto en el año 1889 por M.O.Dolivo-Dobrovolski. Dicho diseño está compuesto por láminas de estructura tipo núcleo de tres y cinco columnas respectivamente. En cada una de estas columnas se disponen los devanados de cada fase, el devanado de baja tensión se ubica más cercano a la estructura ferromagnética y por encima el devanado de alta tensión. Las columnas están unidas por la parte superior e inferior del núcleo, lo que cierra el circuito magnético. Este núcleo no es simétrico totalmente, para la fase central la longitud del núcleo es algo menor que para las extremas, sin embargo, el efecto de esta asimetría no se considera [28].

A esta estructura se pueden añadir dos columnas adicionales, lo que da lugar a núcleos de cinco columnas que disminuyen el flujo por los yugos superiores e inferiores a razón de $\sqrt{3}$ veces, con ello se puede disminuir la altura del núcleo magnético y el volumen del transformador. Esto se recomienda generalmente para transformadores de potencias elevadas. Esta forma de núcleo está diseñada según *Winders*, para garantizar que el flujo tenga un camino alrededor de las tres columnas y entre la parte superior e inferior del transformador [29]. En la figura 2.17, se muestra una representación general del diseño del núcleo de cinco columnas.

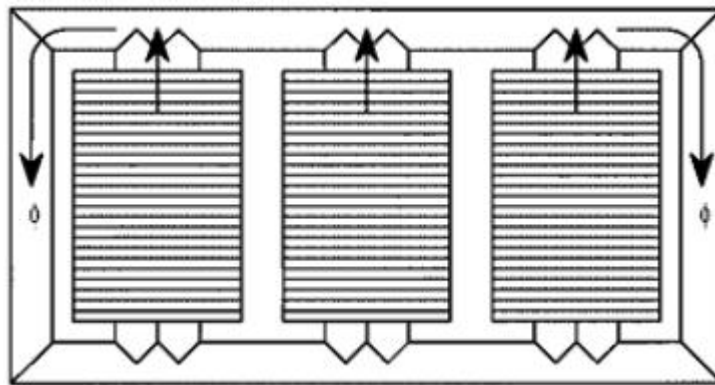


Figura 2.17. Transformador trifásico de láminas de estructura tipo núcleo de cinco columnas.

Se denomina flujo residual ϕ , al flujo total que sale de la parte superior de las tres columnas de las fases. Las otras columnas restantes, cuarta y quinta, garantizan dos caminos de retorno para el flujo residual antes mencionado, lo que permite que el flujo total que sale por la parte superior retorne por la parte inferior. Debido a que no tienen que soportar todo el flujo complementario por cada fase, las partes superiores e inferiores del núcleo están construidas con un área transversal reducida.

La reducción de las áreas de las partes superiores e inferiores trae como inconveniente, que una proporción del flujo normal de las fases tenga que recorrer el camino a través de la cuarta y quinta columna. Esto trae consigo que el camino del flujo real sea desconocido, lo que dificulta los cálculos de las pérdidas del núcleo.

Las características eléctricas del diseño de un núcleo magnético de cinco columnas es muy similar a un banco que tenga tres transformadores monofásicos, sus fases operan más o menos independientes, con interacción magnética muy pequeña entre si [28].

La estructura tipo acorazado de un transformador trifásico, figura 2.16, se puede estudiar como tres transformadores monofásicos acorazados, colocados uno sobre otro o en hilera. Los devanados de cada una de sus fases se colocan en la columna del centro, similar al tipo núcleo, debe garantizarse que este devanado ubicado en la columna central se disponga en sentido contrario a los de las columnas de sus extremos, lo que posibilita que la dirección del flujo se mantenga como muestra la figura 2.16, además, con esta disposición de los devanados se asegura que en cualquier parte del yugo, el flujo magnético sea igual a la mitad del flujo de la columna.

Es importante resaltar que estos transformadores tipo acorazado son mucho más complejos que los de tipo núcleo de tres o cinco columnas, y sus coeficientes de acoplamiento entre los devanados, son mayores en comparación con los coeficientes de los tipo núcleo, es por ello se dice que los transformadores que poseen la estructura tipo acorazado son más perfectos en cuanto a relaciones electromagnéticas [28].

Por lo general la distribución de energía eléctrica de corriente alterna es en su mayoría en tres fases. Cuando el sistema de tres fases se encuentra en operación bajo condiciones de equilibrio, se puede representar para realizar estudios una representación equivalente de una sola fase con la que se experimenta grandes ahorros en el esfuerzo computacional. Para condiciones de funcionamiento desequilibrados, el sistema de tres fases tiene que estar representado por una combinación de redes de secuencia.

En general, la característica de funcionamiento de un transformador depende en gran medida del circuito magnético de su núcleo. Cuando los devanados de las distintas fases comparten un núcleo común que proporciona una ruta magnética al flujo mutuo, habrá acoplamiento mutuo entre ellos.

Tipos y conexiones habituales

Al igual que ocurre en los bancos cerrados de transformadores monofásicos en conexión trifásica las conexiones básicas de los transformadores trifásicos son: Yy; Yd; Dy; Dd; además de la estrella-zigzag (Yz). El comportamiento de estas conexiones en transformadores trifásicos es semejante al que poseen cuando se trata de tres unidades monofásicas en bancos trifásicos. Los grupos de conexión para las conexiones Yy y Dd coinciden con los grupos que forman los bancos trifásicos (grupos: 2, 4, 6, 8, 10), lo mismo sucede con las conexiones Yd y Dy (grupos: 1, 3, 5, 7, 9, 11).

Conexión Yz (zigzag)

Se consigue la conexión zigzag al descomponer cada fase del bobinado secundario en dos mitades, las cuales se colocan en columnas sucesivas del núcleo magnético y enrollado en sentido inverso, conectan los finales en estrella.

Esta conexión se emplea únicamente en el lado de baja tensión. Tiene un buen comportamiento frente a desequilibrios de carga. Este montaje se utiliza en redes de distribución ya que permite el uso de un neutro en el secundario. Se comporta bien frente a desequilibrios de carga. Debido a la composición de tensiones del lado del secundario se requiere un 15 % más de espiras que una conexión en estrella (Y) convencional.

Su principal aplicación está dada en transformadores con grupo de conexión Yz5, los cuales cumplen la función de ser transformadores de red donde la carga del neutro coincide con la carga nominal, y presenta una potencia limitada de 400 kVA [30]. En la figura 2.18, se muestra el diagrama fasorial de esta conexión.

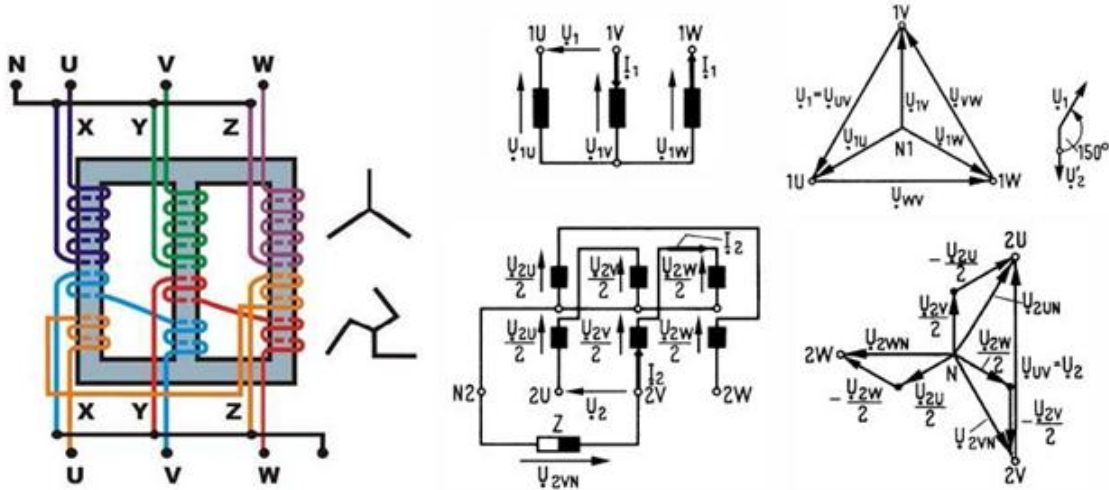


Figura 2.18. Diagrama de conexión estrella-zigzag.

En la figura 2.18, los devanados de las tres fases están ubicados sobre un núcleo común de tres columnas. Por el primario, al estar acoplado en Y, uno de los extremos de los devanados está conectado a la línea mientras que el otro se encuentra conectado al neutro del sistema. En el secundario los devanados de cada fase se dividen y se disponen en el núcleo en forma de zigzag, como indica el nombre del tipo de conexión establecido.

2.6 Consideraciones finales del capítulo

Se constata la importancia que tiene el conocimiento de lo relacionado con los grupos de conexión, específicamente cuando se dispone a conectar transformadores en paralelo, y de forma gráfica se muestran los tipos de conexiones concretos, para lograr conectar bancos abiertos y cerrados de transformadores monofásicos en conexión trifásica y transformadores trifásicos, así como los grupo de conexión para los bancos cerrados y los transformadores trifásicos

CAPÍTULO 3. Descripción de la aplicación computacional

Para el diseño del software “Estudio de Grupos de Conexión (EGC)”, se utilizó el lenguaje de programación de MatLab en su versión 10.0, con el empleo en específico del GUIDE (contexto visual de dicho software).

El programa creado se basa en una interfaz principal en la cual se introducen datos correspondientes al transformador, principalmente la polaridad, voltaje por primario, relación de transformación, así como tipo y grupo de conexión específicos del mismo.

El software EGC en su versión 1.0, para estudiantes, usa funciones con variables globales dentro de las mismas, para optimizar el proceso de programación y lograr una mejor forma de mostrar los resultados. Al final de cada corrida, el usuario tiene la posibilidad de observar los resultados numéricos correspondientes al secundario del transformador (voltaje de línea y ángulo de desfase), además de visualizar un diagrama fasorial que muestra dichas variables, tanto para el primario como para el secundario.

3.1 Estructura del programa

Para detallar la estructura del programa se utiliza el diagrama de flujo del software, que se muestra en la figura 3.1. A través del mismo se facilita la comprensión del software, ya que se ponen cada uno de los menús y las opciones que brindan los mismos para obtener los resultados que se requiera.

En el menú Polaridad se disponen de los dos tipos de polaridad (aditiva y sustractiva) para escoger una u otra. Luego está el menú Conexiones a través del cual se puede seleccionar el transformador de estudio, con su tipo y grupo de conexión. En el menú Resultados se tiene acceso a los resultados de la corrida, y el menú Ayuda brinda al usuario una guía para el uso del programa y elementos teóricos de importancia para el uso eficiente del EGC.

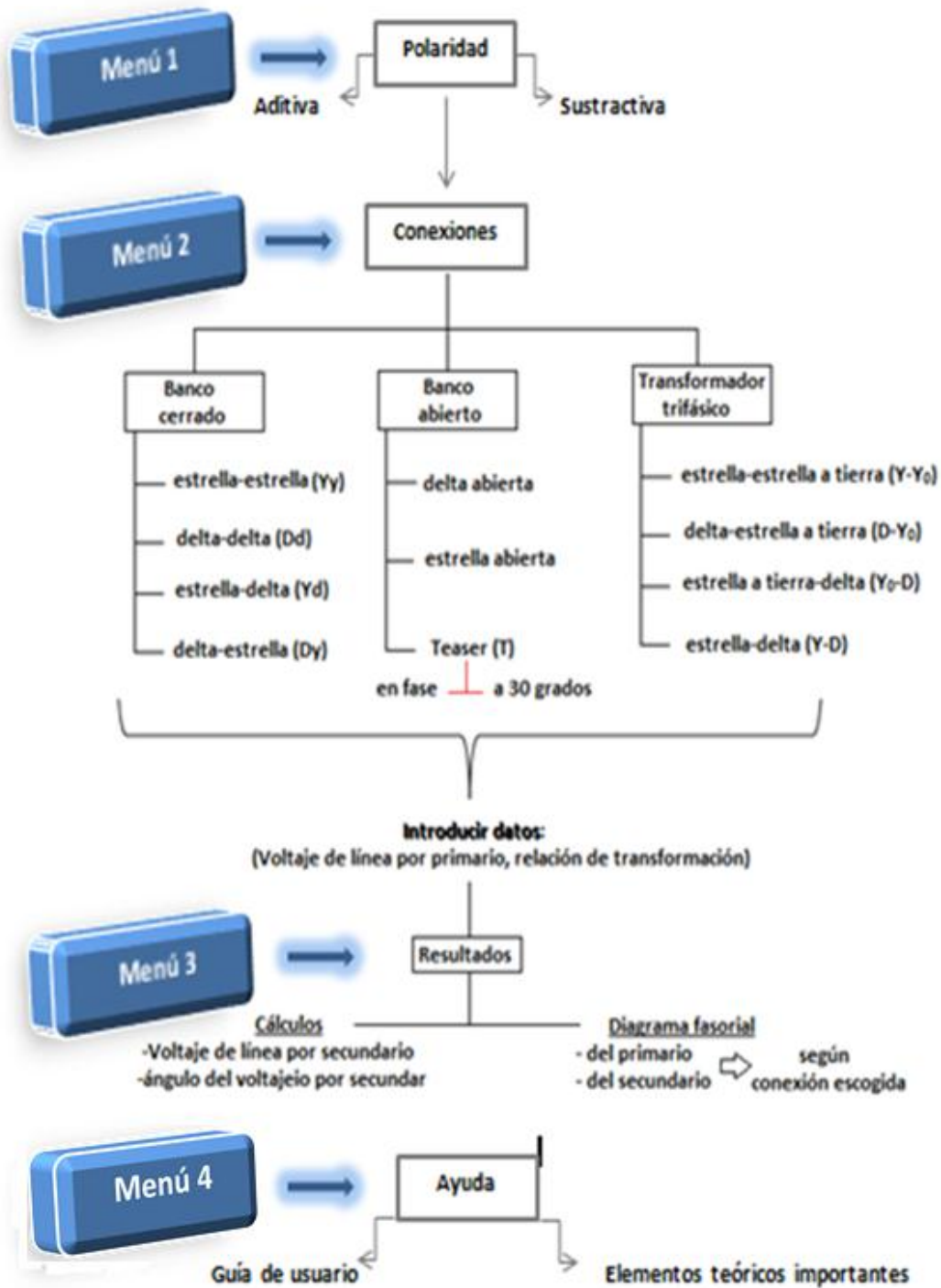


Figura 3.1. Diagrama de flujo del software

El ordenamiento y optimización del software se basa en la utilización de variables genéricas que permiten una fácil manipulación de los conceptos de programación.

A continuación se muestran una serie de los principales elementos usados en la confección del EGC.

Elementos de programación usados:

1. General

- Variables estructurales en forma de arreglo
 - ✓ DatosT==> aquí se almacenan todas las variables de los datos del transformador escogido (polaridad, tipo y grupo de conexión, valor del voltaje de línea por primario y relación de transformación).
 - ✓ DatosR==> aquí se almacenan todas las variables de los resultados obtenidos (amplitud del voltaje de línea por secundario, ángulo de desfasaje del secundario respecto al primario y diagrama fasorial resultante).
- Uso de la condicional *if* para la toma de decisiones con respecto a los valores de las variables.

2. Entrada de datos

- Uso del comando *inputdlg* para introducir todos los datos a través de una ventana con varios *edittext*, de manera genérica mediante el uso de líneas de código.

3. Gráfico

- Uso del comando *line* para unir los puntos declarados en el diagrama fasorial.
- Uso del comando *text* para etiquetar las líneas creadas con el nombre de la fase correspondiente.
- Uso de los comandos
 - ✓ *hold on*
 - ✓ *grid on*
 - ✓ *figure*

3.2 Ventajas de la aplicación

El software diseñado propone al usuario un gran grupo de ventajas, a través de las cuales pueden sentirse motivados para el estudio de las transformaciones

trifásicas y los grupos de conexión de transformadores, de forma amena e interactiva se contribuyen a la comprensión de los temas que aborda el mismo. Estas ventajas son:

- Es un software de fácil maniobrabilidad.
- Permite al usuario, a través de su uso, el dominio consecuente de los distintos tipos de conexiones según el tipo de transformador.
- A través de una interfaz gráfica, se puede observar el comportamiento de las conexiones tanto por primario como por secundario, de un transformador cualquiera, con la variación del grupo de conexión.
- Con relativa sencillez y rapidez, posibilita la visualización de las relaciones de fase de los voltajes de línea por primario y secundario para diferentes grupos de conexión y diferentes tipos de conexión.
- Es un software que no necesita una potente computadora para su uso.
- Se puede almacenar y utilizar sobre dispositivos de almacenamiento de poca capacidad.

La aplicación computacional, puede ser de utilidad para profesores en la planeación de actividades docentes, así como en tareas para trabajo independiente. Para los alumnos y otros usuarios, constituye un material complementario que puede contribuir al aprendizaje de la temática.

3.3 Interfaz del usuario

La funcionalidad del programa depende en gran medida de la interfaz principal, ver figura 3.2, donde se muestran los diferentes menús necesarios para lograr la comunicación entre la computadora y el usuario, de una forma sencilla, cómoda y eficiente.

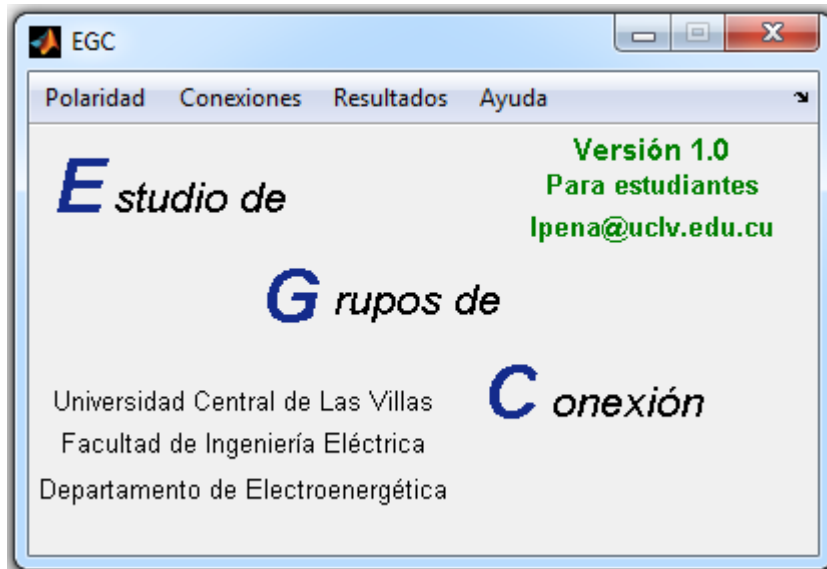


Figura 3.2. Interfaz principal del software

Esta ventana brinda información adicional sobre la versión del software (Versión 1.0 Para estudiantes), correo electrónico del autor (lpena@uclv.edu.cu), institución a la cual pertenecen los derechos de autor de la aplicación y el nombre completo de la misma.

En la barra superior aparecen diversos menús, los cuales se describen seguidamente:

Menú Polaridad

Este menú consta de dos sub-menús que permiten al usuario escoger el tipo de polaridad aditiva o sustractiva, como se muestra en la figura 3.3.

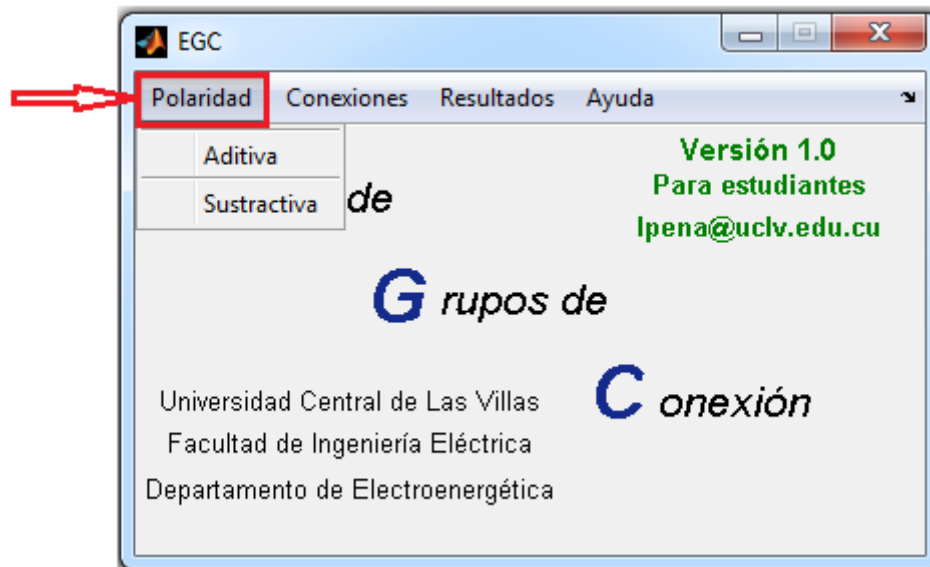


Figura 3.3. Menú Polaridad

El programa está diseñado para que en dependencia de la polaridad seleccionada, los resultados finales se adecúen a los cambios que uno u otro tipo de polaridad puedan provocar.

Menú Conexiones

Este menú muestra a través de distintos sub-menús, el transformador trifásico o banco de transformadores, ya sean bancos abiertos o cerrados de transformadores monofásicos en conexión trifásica, a seleccionar. Estas opciones pueden observarse en la figura 3.4.

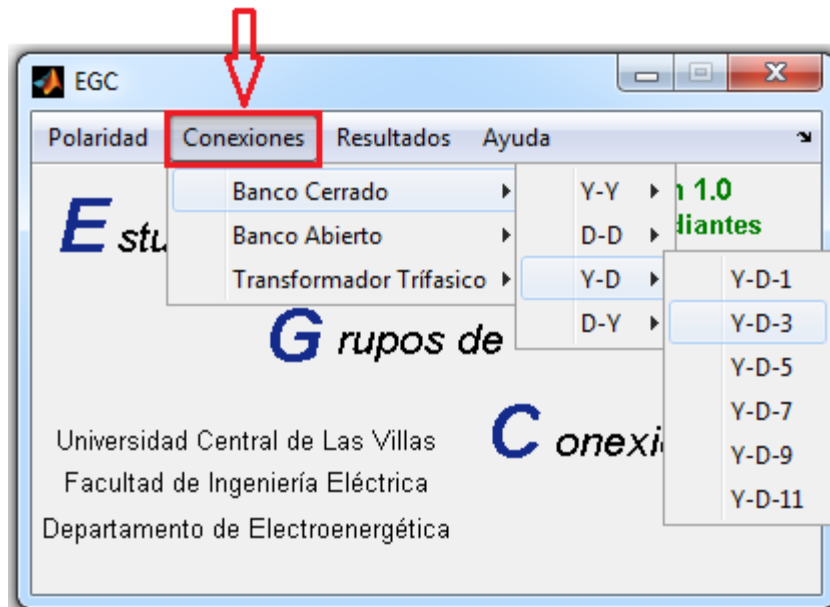


Figura 3.4. Menú Conexiones con sus distintos-submenús

Al seleccionar el tipo de dispositivo de transformación trifásica a analizar, figura 3.4, se puede escoger el tipo de conexión y grupo correspondiente de la misma. Luego de seleccionadas estas condiciones, el software muestra al usuario una nueva ventana (Datos del Transformador), figura 3.5, que le permite introducir valores (Voltaje de línea por primario y Relación de transformación), para posteriormente ver los resultados de la corrida en el menú Resultados.

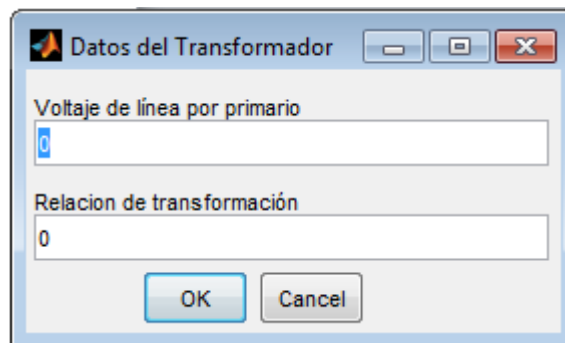


Figura 3.5. Ventana Datos del Transformador

Menú Resultados

A través de Resultados, se puede tener acceso a los resultados finales de la corrida, apoyándose en los sub-menús correspondientes (Cálculos y Diagrama Fasorial), ver figura 3.6.

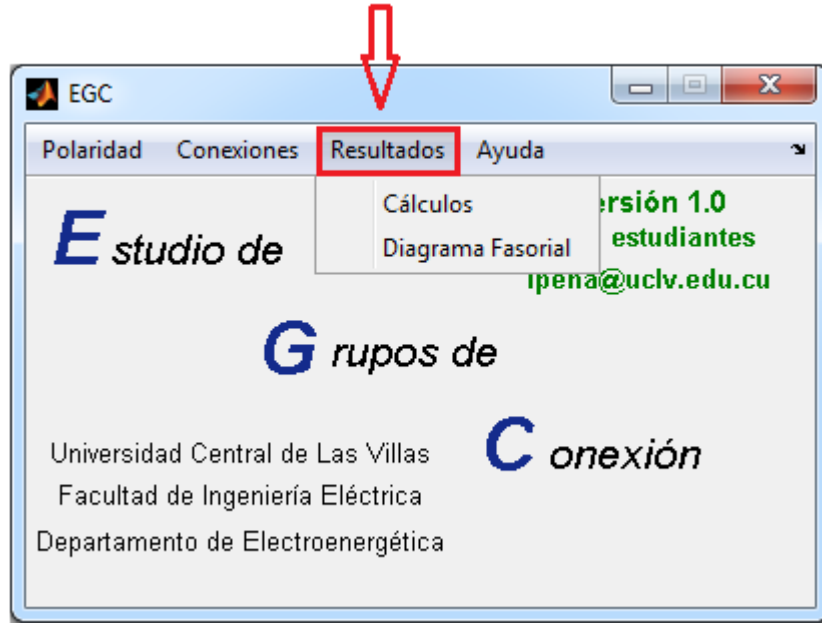


Figura 3.6. Menú Resultados con sus distintos sub-menús

A partir de la selección del sub-menú Cálculos se obtiene una ventana que muestra el valor de voltaje de línea por secundario y ángulo del voltaje de línea por secundario. La selección del sub-menú Diagrama Fasorial permite, a través de una interfaz gráfica, ver el diagrama fasorial tanto del primario como el secundario del transformador de estudio conjuntamente con las amplitudes de sus voltajes. En la figura 3.7, se muestra lo descrito, a través de la selección de una conexión Yd3 con voltaje de línea por primario de 220 V y relación de transformación igual a dos.

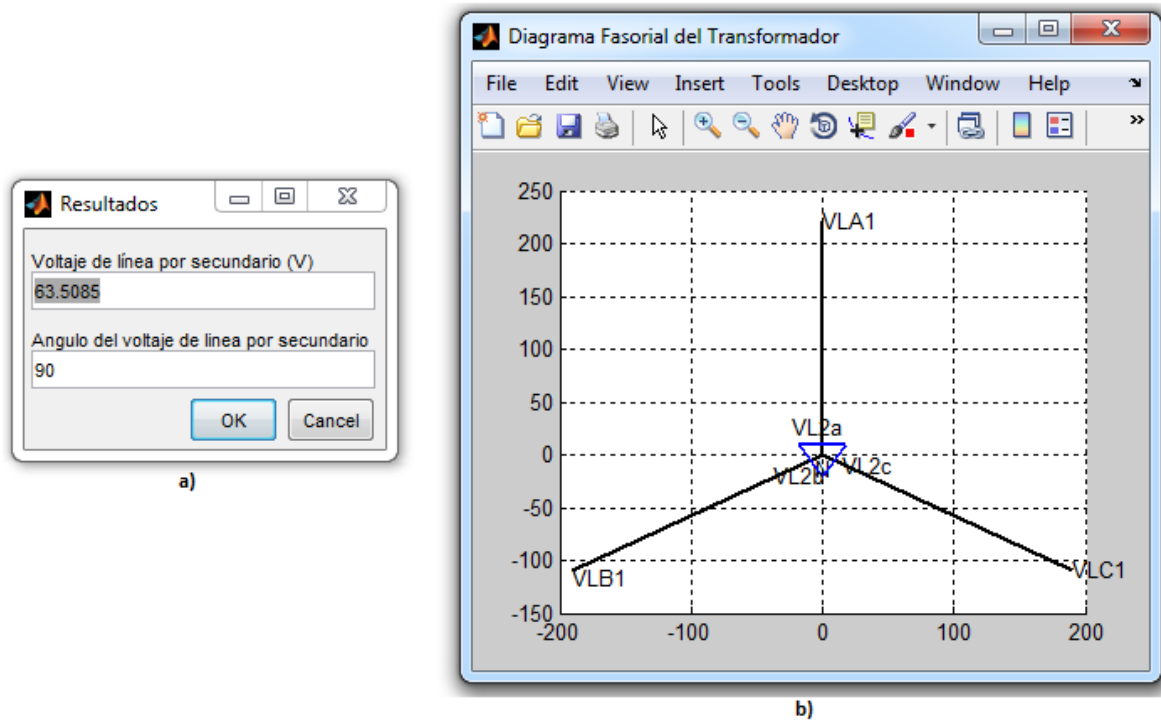


Figura 3.7. a) Resultados obtenidos de voltaje de línea por secundario y ángulo de desfase de secundario con relación a primario, b) Diagrama fasorial del transformador.

Obsérvese que para el caso de la conexión delta, el devanado secundario en la Figura 3.7b, como el punto de referencia para graficar es el punto (0,0) que es cuando el valor de voltaje es cero y que se indica en el gráfico con la letra N. Es por ello que los voltajes en la delta no siguen la misma referencia que en la estrella.

Es necesario resaltar que el menú Resultados siempre deja almacenados los resultados de la última corrida. Si el software se usa por primera vez, es preciso escoger cada una de las opciones que proponen en los menús anteriores a éste para obtener los resultados correspondientes a los datos que aporta el usuario, comienza con el menú Polaridad, luego el tipo y grupo de conexión, para obtener los resultados.

Menú Ayuda

Este menú tiene la función de asesorar tanto práctica como teóricamente al usuario principiante que disponga del uso de este software, a través de los submenús Guía de Usuario y Elementos Teóricos Importantes respectivamente, como se muestra en la figura 3.8.

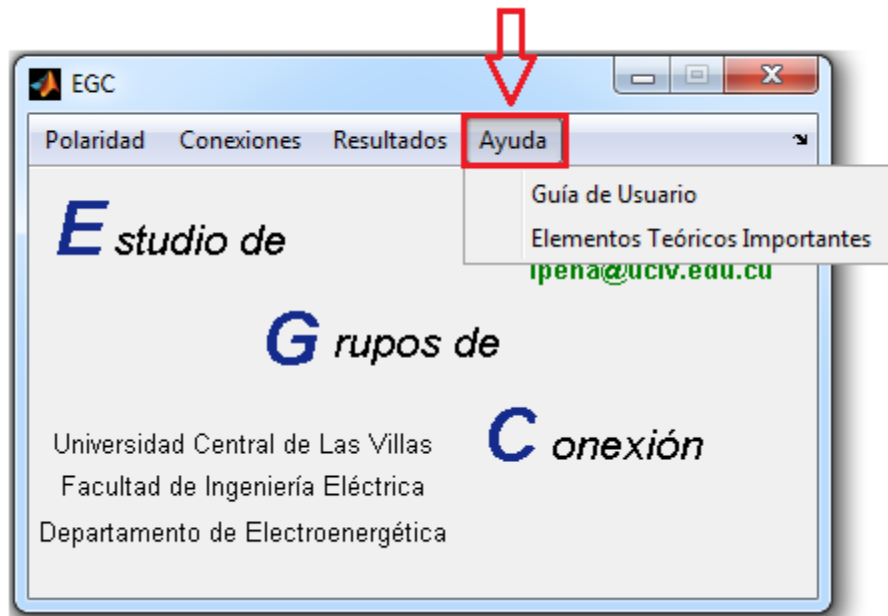


Figura 3.8. Menú Ayuda

3.4 Ejemplos

Luego de realizar un conjunto de corridas en el software se puede llegar a resultados en cada conexión y grupo de conexión escogido. Es necesario aclarar que la selección del tipo de polaridad (aditiva o sustractiva), en esta versión de la aplicación, no aporta la información de cómo se logra el grupo de conexión pues no se muestran los diagramas de conexión, aunque sí se tiene en consideración para los resultados. A continuación se describen algunos de los resultados obtenidos.

Conexión estrella-estrella (Yy)

La Tabla 3.1 muestra los datos de entrada de dos variantes que se ejecutaron para la conexión Yy con el software EGC.

# de corridas	Polaridad	Transformador	Tipo de conexión	Grupo de conexión	Voltaje de línea por primario (V)	Relación de transformación
1	aditiva	banco cerrado	Yy	grupo 0	220	2
2	aditiva	banco cerrado	Yy	grupo 6	220	2

Tabla 3.1. Resultados para diferentes grupo de conexión en el banco Yy

En la figura 3.9, se muestra el valor de los voltajes de línea por secundario, ángulo de desfase del secundario respecto a primario y el diagrama de conexión de las conexiones Yy0 y Yy6 respectivamente, obtenidos de las corridas.

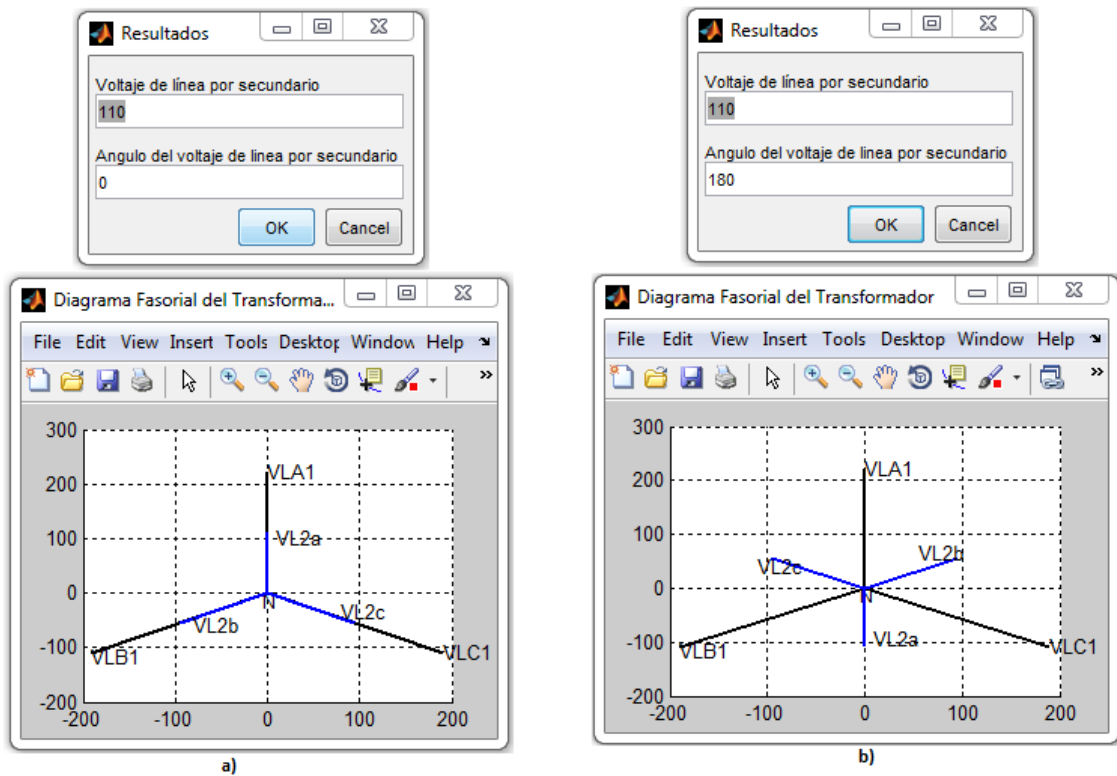


Figura 3.9. Valor de voltaje por secundario, ángulo de desfase de secundario respecto a primario y diagrama fasorial. a) Conexión Yy0, b) Conexión Yy6.

En la figura 3.9, se muestra cómo rotan los fasores de secundario según el grupo que se escoja, siempre se toma como referencia el fasor VLA1 que apunta hacia las cero horas del reloj. En la figura 3.9a, se puede determinar que los fasores de

secundario de la conexión Yy0 están desfasados 180 grados en relación con los fasores de secundario de la conexión Yy6, figura 3.9b, como pasa con las cero y seis horas en un reloj convencional.

Conexión delta-delta (Dd)

Para esta conexión se realizaron dos corridas en EGC con los datos de entrada que se muestran en la Tabla 3.2.

# de corridas	Polaridad	Transformador	Tipo de conexión	Grupo de conexión	Voltaje de línea por primario(V)	Relación de transformación
1	aditiva	banco cerrado	Dd	grupo 2	440	2
2	sustractiva	banco cerrado	Dd	grupo 8	440	2

Tabla 3.2. Resultados para diferentes grupo de conexión en el banco Dd.

La figura 3.10 muestra el valor de los voltajes de línea por secundario, ángulo de desfase del secundario respecto a primario y el diagrama de conexión de las conexiones Dd2 y Dd8 respectivamente.

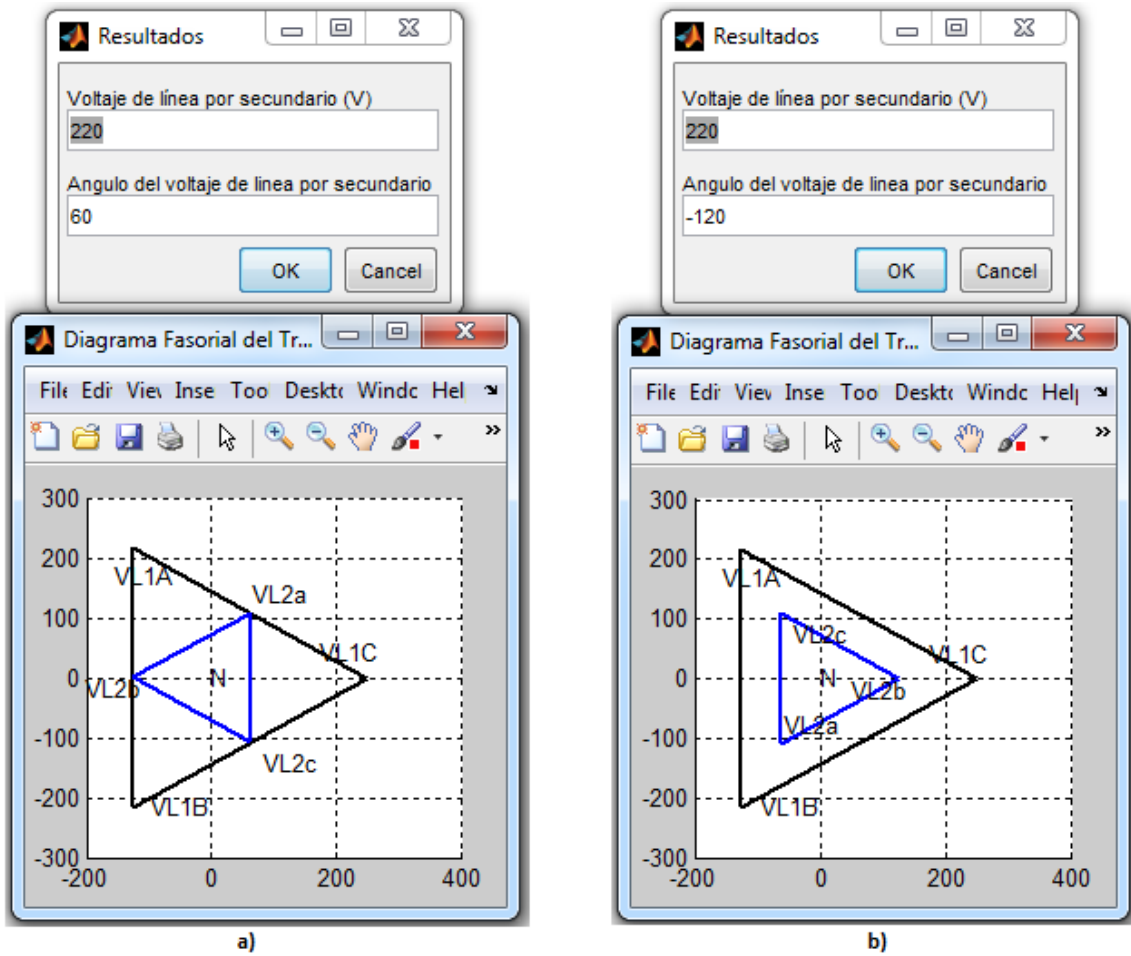


Figura 3.10. Valor de voltaje por secundario, ángulo de desfase de secundario respecto a primario y diagrama fasorial. a) Conexión Dd2, b) Conexión Dd8.

En la figura 3.10 se muestra la rotación de los fasores de secundario según el grupo que se escoja, siempre como referencia el fasor VLA1 que apunta hacia las cero horas del reloj. En la figura 3.10a, se puede determinar que los fasores de secundario de la conexión Dd2 están desfasados 180 grados en relación con los fasores de secundario de la conexión Dd8, figura 3.10b, como pasa con las dos y ocho horas en un reloj convencional.

Conexión estrella-delta (Yd)

Las variables que se seleccionan como datos de entrada aparecen en la Tabla 3.3 para ambas corridas.

# de corridas	Polaridad	Transformador	Tipo de conexión	Grupo de conexión	Voltaje de línea por primario (V)	Relación de transformación
1	sustractiva	banco cerrado	Yd	grupo 1	220	2
2	aditiva	banco cerrado	Yd	grupo 11	220	2

Tabla 3.3. Resultados para diferentes grupo de conexión en el banco Yd.

La figura 3.11 muestra el valor de los voltajes de línea por secundario, ángulo de desfase del secundario respecto a primario y el diagrama de conexión de las conexiones Yd1 y Yd11 respectivamente.

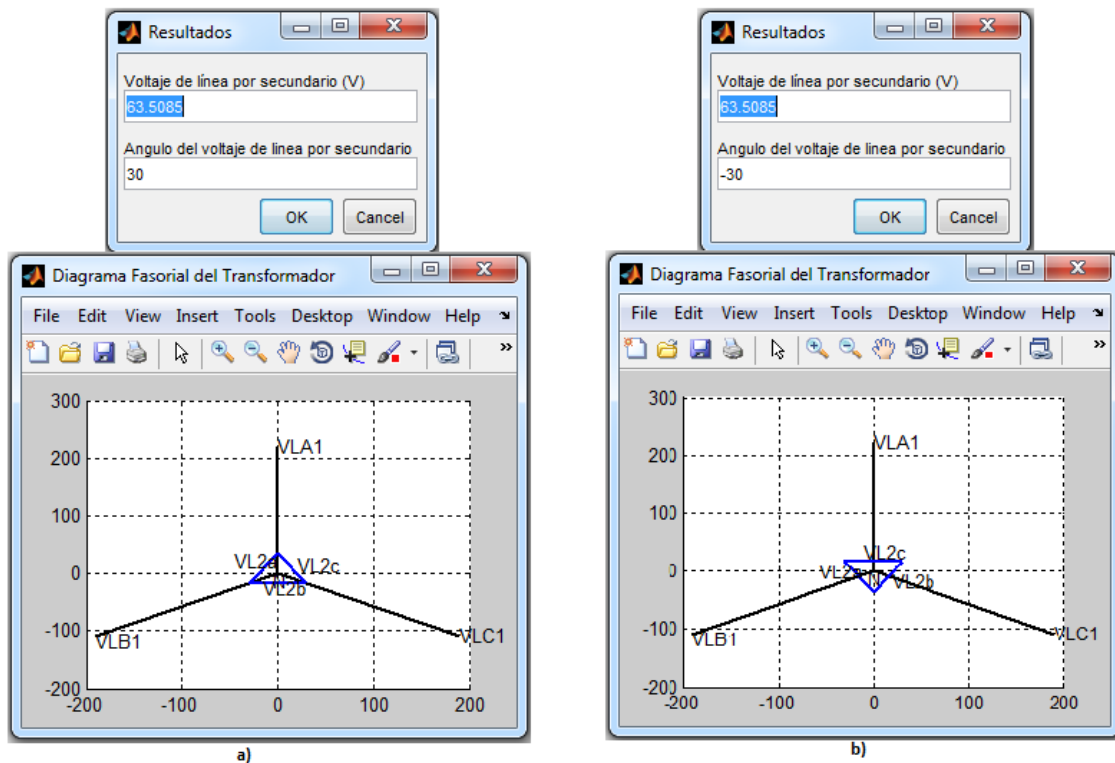


Figura 3.11. Valor de voltaje por secundario, ángulo de desfase de secundario respecto a primario y diagrama fasorial. a) Conexión Yd1, b) Conexión Yd11.

Entre la figura 3.11a y 3.11b, se establece como diferencia que los fasores de secundario no apuntan a la misma hora si se superponen sobre la esfera de un reloj, en la figura 3.11a el fasor VL2a apunta hacia la una del reloj lo que

constituye la conexión Yd1 mientras que en la figura 3.11b el fasor VL2a apunta hacia las 11 horas del reloj que se corresponde con la conexión Yd11.

Conexión delta-estrella (Dy)

Los datos de entrada que se muestran en la Tabla 3.4 se introducen en el EGC, primeramente se realiza una corrida y seguidamente la otra.

# de corridas	Polaridad	Transformador	Tipo de conexión	Grupo de conexión	Voltaje de línea por primario (V)	Relación de transformación
1	sustractiva	banco cerrado	Dy	grupo 3	220	2
2	sustractiva	banco cerrado	Dy	grupo 9	220	2

Tabla 3.4. Resultados para diferentes grupo de conexión en el banco Dy.

Los resultados que se obtienen en las dos corridas para sus respectivos grupos de conexión se muestran en la figura 3.12.

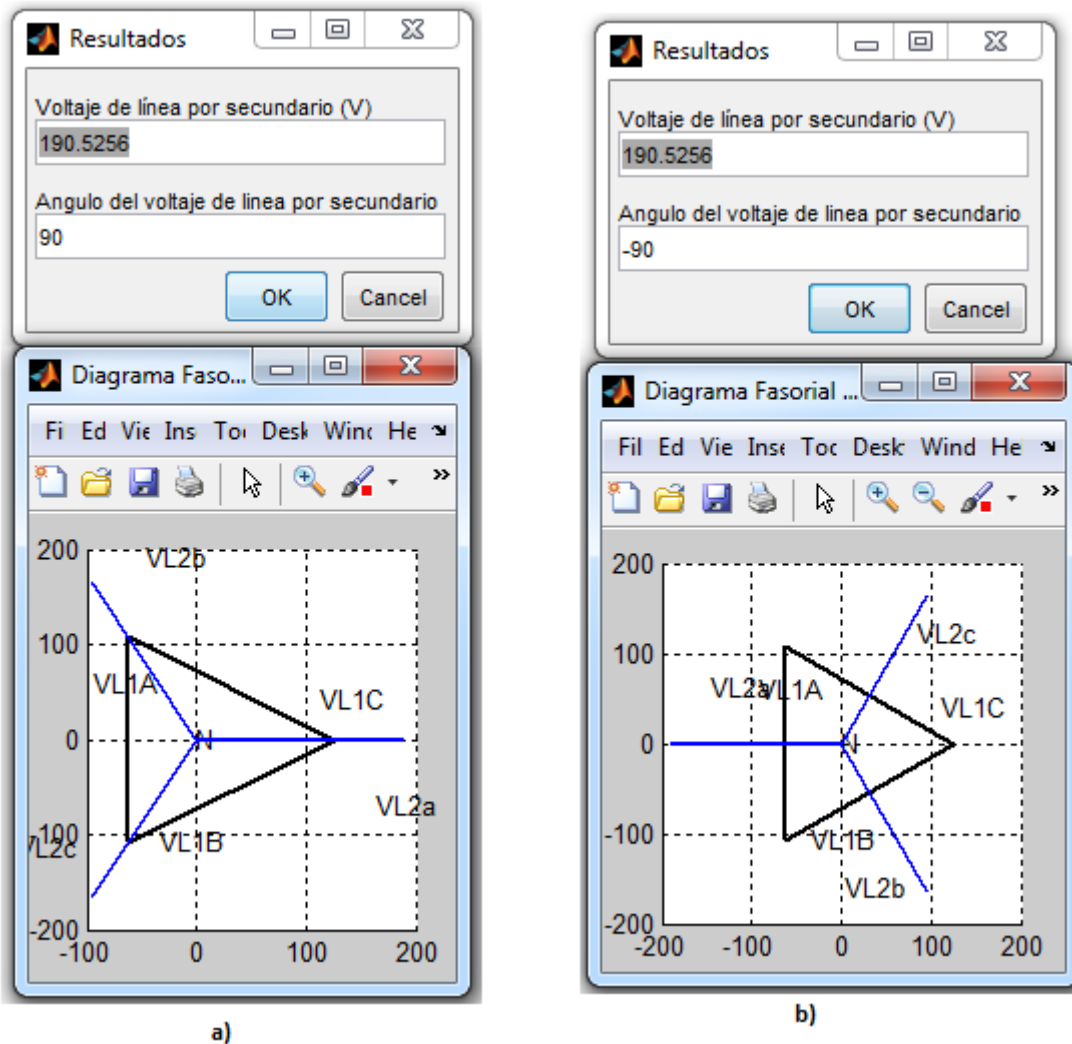


Figura 3.12. Valor de voltaje por secundario, ángulo de desfase de secundario respecto a primario y diagrama fasorial. a) Conexión Dy3, b) Conexión Dy9.

En ambas Figuras, 3.12a y 3.12b, se puede ver con claridad que los fasores del secundario de los bancos seleccionados se encuentran en antifase ya que apuntan a las tres y nueve horas de un reloj, y forman así las conexiones Dy3 y Dy9 respectivamente.

Conexión estrella-abierta (Y-abierta)

En la Tabla 3.5 se muestran las variables de entrada que se utilizan para realizar la corrida en EGC.

# de corridas	Polaridad	Transformador	Tipo de conexión	Grupo de conexión	Voltaje de línea por primario (V)	Relación de transformación
1	sustractiva	banco abierto	Y-abierta	-	220	2

Tabla 3.5. Resultados para diferentes grupo de conexión en el banco Y-abierta

En la figura 3.13, se muestran los resultados que se obtienen de la corrida que se realizó.

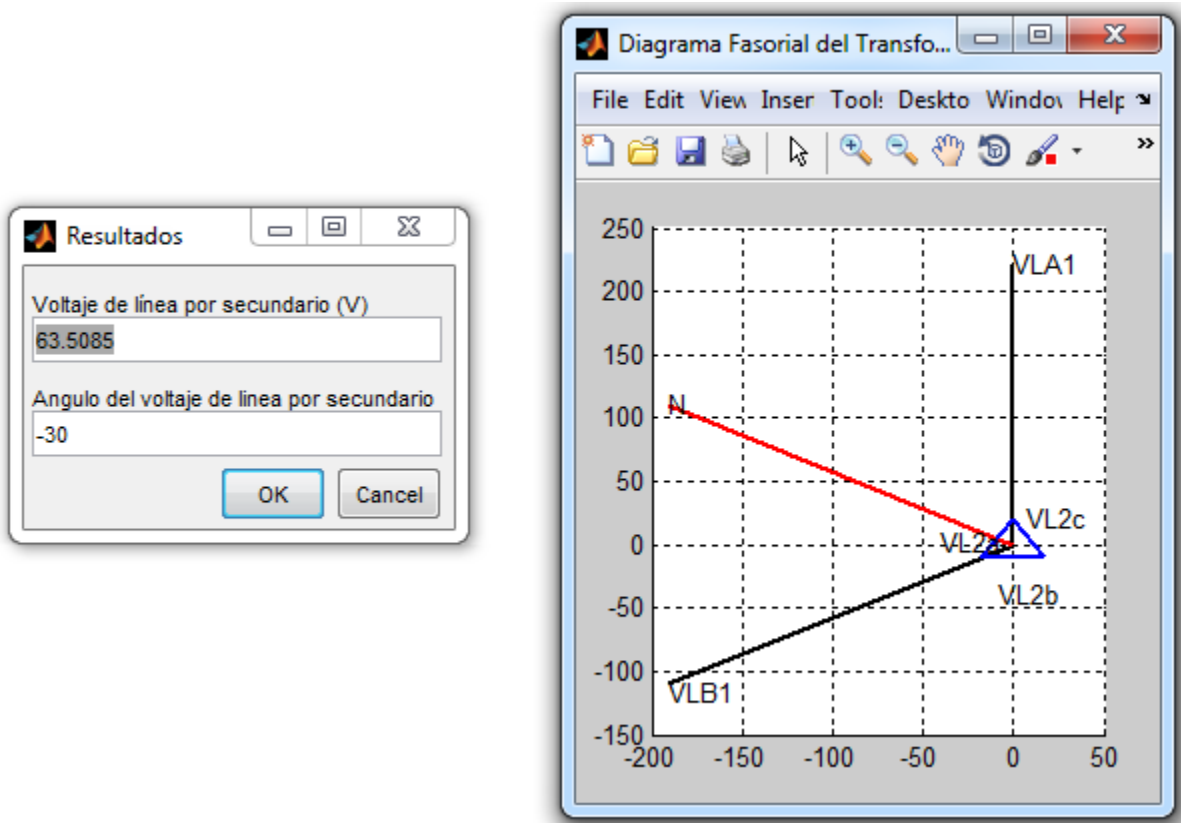


Figura 3.13. Valor de voltaje por secundario, ángulo de desfasaje de secundario respecto a primario y diagrama fasorial de la conexión Y-abierta.

Con solo dos líneas por el primario del banco y el neutro de igual magnitud que los voltajes de entrada, figura 3.13, se puede alimentar un sistema trifásico.

Conexión delta-abierta (D-abierta)

En la Tabla 3.6, se muestran los datos de entrada que se introducen en el EGC, para realizar la corrida para la delta-abierta.

# de corridas	Polaridad	Transformador	Tipo de conexión	Grupo de conexión	Voltaje de línea por primario (V)	Relación de transformación
1	sustractiva	banco cerrado	D-abierta	-	220	2

Tabla 3.6. Resultados para diferentes grupo de conexión en el banco Dy.

Los resultados que se obtienen en la corrida se muestran en la figura 3.14.

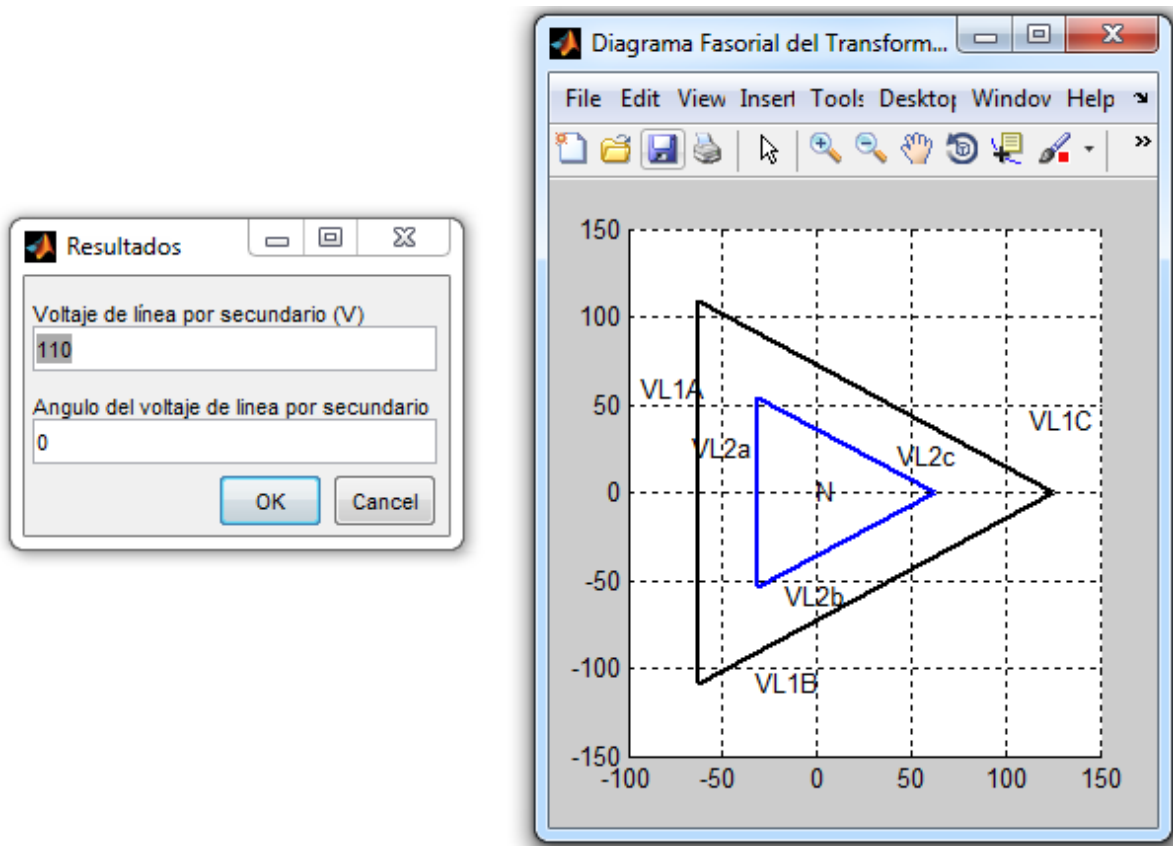


Figura 3.14. Valor de voltaje por secundario, ángulo de desfase de secundario respecto a primario y diagrama fasorial de la conexión D-abierta

En la figura 3.14, los fasores de primario y secundario están en fase el uno del otro, luego se obtiene un sistema trifásico de voltajes por secundario similar al banco delta-delta.

3.5 Consideraciones finales del capítulo

La aplicación EGC posibilita analizar el desfasaje de los voltajes línea de secundario respecto a los voltajes de línea de primario de una forma sencilla, lo que puede ayudar a la adquisición de habilidades relacionadas con los grupos de conexión a los usuarios. Los ejemplos muestran cómo se presenta la información.

A través de la compilación del software, el usuario no tiene acceso a los elementos de programación que se utilizan para su diseño que evita que cualquier cambio inadecuado altere los resultados reales. Sin embargo, el EGC permite facilidades en cuanto a la posibilidad de modificar lo programado, de manera que se pueda actualizar esta versión 1.0, para estudiantes, con la incorporación de nuevas opciones.

CONCLUSIONES

- Este trabajo presenta información detallada y suficientemente completa en relación con el comportamiento de las transformaciones trifásicas en bancos de transformadores monofásicos y trifásicos y en específico con los grupos de conexión. Esta información puede ser utilizada tanto en la docencia como en otras actividades de ciencia y técnica.
- Se analizan, describen y caracterizan las cuatro conexiones habituales de las transformaciones trifásicas en bancos cerrados y tres en bancos abiertos. En transformadores trifásicos se presenta la conexión estrella-zigzag. Para los bancos cerrados y los transformadores trifásicos se aborda lo referente a los grupos de conexión.
- La implementación del software Estudio de Grupos de Conexión (EGC) posibilita la obtención de diagramas fasoriales a través de los cuales se visualiza la incidencia en el desfase del voltaje de línea por secundario del transformador en relación con el voltaje de línea del primario acorde al grupo de conexión y la polaridad.

RECOMENDACIONES

- Proponer el uso del software Estudio de Grupos de Conexión (EGC) a los docentes de máquinas eléctricas como material de apoyo docente a estudiantes de la carrera de Ingeniería Eléctrica.
- Incorporar a la aplicación computacional EGC un menú que permita observar mediante esquema de conexión cómo se realiza la interconexión de los devanados de fase por primario y secundario en dependencia del tipo y grupo de conexión así como la polaridad.
- Realizar mejoras en el software EGC que posibilite para el caso de la conexión delta que el diagrama fasorial comience en el punto (0,0) del gráfico para el voltaje de línea correspondiente al primario de la fase A.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] "Máquinas eléctricas: Tipos de Transformadores - Monografias.com," 2015.
- [2] (2012). *1.2. Origen y antecedentes del transformador*. Available: http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3015/html/12_origen_y_antecedentes_del_transformador.html
- [3] (2015). *El transformador eléctrico, su historia*. | *transformadoreselectricos*. Available: <https://transformadoreselectricos.wordpress.com/2013/05/07/el-transformador-electrico-su-historia/>
- [4] (2015). *BREVE HISTORIA DEL TRANSFORMADOR transformadores*. Available: http://maquinaselectas.mex.tl/891242_BREVE---HISTORIA-DEL-TRANSFORMADOR.html
- [5] (2012). *1.5. Tipos de transformadores*. Available: http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3015/html/15_tipos_de_transformadores.html
- [6] (2014). *Tipos y aplicacioes de transformadores*. Available: http://patricioconcha.ubb.cl/transformadores/gral_tipos_y_aplicacioes.htm
- [7] (2014). *Importancia del Transformador*. Available: <http://importanciadeltransformador.blogspot.com/>
- [8] (2015). *Importancia de los transformadores*. Available: <http://es.slideshare.net/patogm1980/importancia-de-los-transformadores>
- [9] "Transformaciones Trifásicas,," presented at the Conferencia 7, 2014.
- [10] (2015). *QUÉ ES UN TRANSFORMADOR ELÉCTRICO MONOFÁSICO (o TRAFÓ)*. Available: http://www.asifunciona.com/electrotecnia/ke_trafo_mono/ke_trafo_mono_1.htm
- [11] (2015). *Transformadores trifásicos - Monografias.com*. Available: <http://www.monografias.com/trabajos82/transformadores-trifasicos-corriente/transformadores-trifasicos-corriente.shtml>
- [12] J. J. G. W. D. S. S. M. Salazar. (2015). *Análisis de Sistemas de Potencia*. Available: http://www.academia.edu/7276069/An%C3%A1lisis_de_Sistemas_de_Potencia_-_John_J._Grainger_William_D._Stevenson
- [13] (2014). *TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS. Tipos de transformadores trifásicos. Transformador trifásico de núcleo. Transformador acorazado*. Available: <http://www.nichese.com/trans-trif.html>
- [14] E. A. C. Cruz, *Pruebas principales a un transformador de distribución para su puesta en servicio*. Instituto Politécnico Nacional: México, 2008.
- [15] (2015). *FARADAYOS*. Available: <http://faradayos.blogspot.com/>

- [16] (2015). *Polaridad de un transformador eléctrico* | *Electrónica Unicrom*. Available: http://www.unicrom.com/Tut_polaridad_transformador.asp
- [17] J. Chuya, Coronel, W., *Transformadores Trifásicos*. Facultad de Ingeniería Electrónica, Universidad Politécnica Salesiana: Ecuador, 1981.
- [18] (2015). *Funcionamiento de los transformadores* | *ENDESA EDUCA*. Available: http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/conceptos-basicos/funcionamiento-de-los-transformadores
- [19] S. J. Chapman, *Maquinas Eléctricas*, Segunda edición ed. Universidad de Houston., 1984.
- [20] (2015). *Global Specialist in Energy Management - Schneider Electric Global*. Available: <http://www.schneider-electric.com/ww/en/>
- [21] N. A. Lemozy, *Paralelo de transformadores*, 2010.
- [22] L. Vargas, *Conversion de la energia y sistemas electricos*. Universidad de Chile, 2010.
- [23] J. C. Cancio, *Armónicos en Transformadores*. Departamento Electroenergético. Universidad central de las Villas, 2005.
- [24] A. Hernández, Blázquez, M. y otros, *Curso de transformadores* Departamento Electroenergética. Universidad Central de las Villas, 2006.
- [25] P. A. S. Cordero, *Análisis sobre transformadores trifásico*.
- [26] (2012). *1.4. El transformador trifásico y su conexionado*. Available: http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/3000/3015/html/14_el_transformador_trifasico_y_su_conexionado.html
- [27] (2015). *Circuitos magnéticos y transformadores - E.E. Staff - Google Books*. Available: <https://books.google.com/cu/books?id=8x4519XSLhgC&pg=PA585&lpg=PA585&dq=Transformadores+trif%C3%A1sicos&source=bl&ots=oEzFVc2o69&sig=j1n480FqAmYN1T5ej9rxxR0p30g&hl=es-419&sa=X&ved=0CDcQ6AEwAzgKahUKEwjrl0LsjonGAhWFQpIKHV11AOw#v=onepage&q=Transformadores%20trif%C3%A1sicos&f=false>
- [28] A.I.Voldek, *Maquinas eléctricas*, 1974.
- [29] J. J. Winders, *Power Transformers Principles and Applications*. PPL Electric Utilities Allentown. Pennsylvania, 2002.
- [30] (2013). *Microsoft Word - CEE-TPL3-Transformador Trifásico-2 - CEE-TPL3-Transformador Trifasico-V2.pdf*. Available: <http://www.ingelec.uns.edu.ar/cee2553/docs/CEE-TPL3-Transformador%20Trifasico-V2.pdf>