
Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética



TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Estudio y simulación de las formas de onda de salida de la tensión en transformaciones trifásicas

Autor: David Alejandro Valdés González

Tutores: MSc. Arian Ramos Martínez

Santa Clara

2017 "Año 59 de la Revolución"

Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas

Facultad de Ingeniería Eléctrica

Departamento de Electroenergética



TRABAJO DE DIPLOMA

Título: Estudio y simulación de las formas de onda de salida de la tensión en transformaciones trifásicas

Autor: David Alejandro Valdés González

E-mail: dvgonzalez@uclv.cu

Tutores: MSc. Arian Ramos Martínez

E-mail: arian@uclv.edu.cu

Santa Clara

2017 "Año 59 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

“Nuestra recompensa se encuentra en el esfuerzo y no en el resultado. Un esfuerzo total es una victoria completa.”

Mahatma Gandhi

DEDICATORIA

Dedico este trabajo que da culminación a los cinco años de la carrera: A toda mi familia por el amor y apoyo que siempre me han brindado. Pero en especial a mis abuelos que son los pilares fundamentales sobre los que se sustenta mi familia y a los cuales agradezco y agradeceré siempre su fuerza de voluntad, dedicación y cariño.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer de forma especial a:

Mis padres por todos los sacrificios que han hecho para que lograra alcanzar esta meta en mi vida.

Mis abuelos por ser partícipes de forma activa en esta etapa de mi vida.

Mi tutor Arian Ramos Martínez y a la profesora Alicia Hernández Maldonado por su colaboración, experiencia y paciencia en la realización de este trabajo.

A Juan Carlos por su apoyo incondicional durante los cinco años de la carrera.

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

A mis compañeros y amigos sin los cuales la universidad no hubiera sido lo mismo.

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

- ❖ Revisión bibliográfica sobre el tema.
- ❖ Identificar las causas fundamentales que afecten las formas de onda de la corriente de excitación y de las tensiones de salida de las transformaciones trifásicas.
- ❖ Simulación en Matlab las posibles conexiones de transformadores trifásicos.
- ❖ Confeccionar un material didáctico sobre bancos de transformadores y transformadores trifásicos
- ❖ Redacción del informe final de investigación.

Firma del Autor

Firma del Tutor

RESUMEN

En el trabajo se describen, 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. Además, se analizaron las ventajas y desventajas de cada una de las conexiones mencionadas. 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.

Finalmente, se simularon las principales conexiones en el Simulink de Matlab, dentro del cual se utilizó el paquete de funciones especiales: Power System Blockset para obtener las formas de onda de la corriente de excitación, flujo y tensión de salida, así como algunos grupos de conexiones.

Índice

PENSAMIENTO	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
TAREA DE INVESTIGACIÓN	iv
RESUMEN	v
INTRODUCCIÓN	1
Capítulo 1. Transformaciones trifásicas	4
1.1 Introducción	4
1.2 Polaridad de los transformadores	4
1.3 Transformaciones trifásicas	6
1.3.1 Banco de transformadores con conexión delta-delta (Δ - Δ)	8
1.3.2 Banco de transformadores con conexión estrella-estrella (Y-Y)	9
1.3.3 Banco de transformadores con conexión estrella-delta (Y- Δ)	10
1.3.4 Banco de transformadores con conexión estrella-delta (Δ -Y)	11
1.3.5 Banco de transformadores con conexión estrella-zigzag (Y-Z)	13
1.3.6 Banco de transformadores con conexión delta abierta (Δ -abierta)	13
1.3.7 Banco de transformadores con conexión estrella abierta (Y-abierta)	14
1.3.8 Banco de transformadores con conexión T (<i>Teaser</i>)	15
1.3.9 Transformadores trifásicos	17
1.4 Grupos de conexiones	17
1.4.1 Grupos de conexión de la conexión Y-Y	18
1.4.2 Grupos de conexiones de la conexión Δ - Δ	21
1.4.2 Grupos de conexiones de la conexión Y- Δ	22
1.4.2 Grupos de conexiones de la conexión Δ -Y	24
1.4.3 Grupo de conexiones para transformadores trifásicos	25
1.4.4 Grupos de conexiones más utilizados	25

1.5 Consideraciones generales del capítulo	26
Capítulo 2. Formas de onda en transformaciones trifásicas.	27
2.1 Corriente de excitación	27
2.2 Armónicos en los transformadores	30
2.3 Transformaciones trifásicas con el primario en delta	33
2.4 Transformaciones trifásicas con el primario en estrella	36
2.4.1 Conexión estrella-estrella con neutro por primario	36
2.4.2 Conexión estrella-delta con neutro	38
2.4.3 Conexión estrella-delta sin neutro	40
2.4.4 Conexión estrella-estrella sin neutro por primario	41
2.4.5 Conexión estrella-estrella-delta	44
2.5 Conclusiones parciales del capítulo.....	46
Capítulo 3. Simulación de las principales características de las conexiones trifásicas	48
3.1 Introducción.....	48
3.2 Simulación de un transformador monofásico	48
3.2 Simulación de la conexión delta-delta.....	50
3.3 Simulación de la conexión estrella-estrella	52
3.4 Simulación de la conexión estrella-estrella aterrada	54
3.5 Simulación de la conexión estrella-delta	56
3.6 Simulación de la conexión delta-estrella aterrada	57
3.7 Simulación de la conexión estrella-estrella con devanado terciario.....	59
3.8 Simulación de grupos de conexiones.....	61
CONCLUSIONES	65
RECOMENDACIONES	66
REFERENCIAS BIBLIGRÁFICAS:	67

INTRODUCCIÓN

El invento y construcción de los transformadores posibilitó la expansión de la energía eléctrica a grandes distancias de las plantas generadoras y contribuyó de manera decisiva, y contribuye aún, al desarrollo tecnológico y científico de la humanidad.

Constituyen los transformadores un elemento esencial de los sistemas electroenergéticos para la transportación de la energía eléctrica a largas distancias y con pocas pérdidas, es decir, el transformador es el dispositivo encargado de adecuar las magnitudes de las tensiones y por tanto la corriente a lo largo del sistema electroenergético para lograr minimizar las caídas de tensiones y las pérdidas en la línea lo que contribuye una mayor calidad y eficiencia en el suministro de energía eléctrica.

Regularmente los transformadores que se usan en los sistemas eléctricos 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 tensión en las conexiones ni desfasajes de tensión 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 las tensiones por secundario de cada transformador a operar en paralelo y esto da lugar al término de grupo de conexión.

Las formas de ondas de la tensión a la salida de bancos de transformadores y transformadores trifásicos son de gran importancia ya que da una idea de la conexión a utilizar para dar un servicio con calidad. En la bibliografía consultada, el tema de las transformaciones trifásicas se trata de manera parcial,

obteniéndose una información limitada sobre los tipos de conexiones y formas de onda. No existe un material que abarque los tipos de conexiones más utilizadas y la forma de onda de las corrientes de excitación y su tensión de salida, por lo que constituye un tema complicado para los estudiantes de tercer año de Ingeniería Eléctrica.

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

¿Cómo mejorar la escasez de bibliografía y materiales didácticos sobre formas de onda y grupos de conexión en transformaciones trifásicas para la ayuda de la comprensión de estos temas tan complicados por los estudiantes de tercer año de Ingeniería Eléctrica?

El Objetivo General de este trabajo diploma es el siguiente

Elaborar un material didáctico con elementos teóricos y simulaciones que ayuden en el estudio de las formas de ondas de las corrientes de excitación y de las tensiones de salida para las transformaciones trifásicas para los estudiantes de tercer año de Ingeniería Eléctrica.

Los Objetivos Específicos que se establecen

1. Revisión bibliográfica sobre el tema.
2. Identificar las causas fundamentales que afecten las formas de onda de la tensión de salida de los bancos de transformadores y transformadores trifásicos.
3. Analizar las formas de ondas de tensión de salida de cada una de las conexiones existentes de bancos de transformadores y transformadores trifásicos.
4. Simular en Matlab las posibles conexiones trifásicas para obtener las formas de onda de la corriente de excitación, flujos y tensiones por secundarios, así como los diferentes grupos de conexiones.
5. Confeccionar un material didáctico sobre bancos de transformadores y transformadores trifásicos.
6. Redactar el informe final de investigación.

Este trabajo de diploma puede ser de utilidad para los estudiantes de Tercer año de la carrera de Ingeniería eléctrica y otros profesionales del sector eléctrico. Su

importancia reside en disponerse como un material didáctico donde se resumen lo relacionado con las transformaciones trifásicas, lo que propicia un mejor entendimiento de los Transformadores Eléctricos. Así como la simulación de los distintos tipos de conexiones apoyando lo antes explicado.

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 las transformaciones trifásicas en conjunto, la influencia de la polaridad en transformadores, así como el papel que juegan en el sistema eléctrico de potencia. 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 zig-zag.

En el Capítulo 2 se hace un análisis de las causas fundamentales de las formas de onda de la corriente de excitación, flujo y tensión de fase o línea por secundario, todo partiendo de la relación no lineal existente entre la corriente de magnetización y el flujo magnético para cualquier material ferromagnético.

En el Capítulo 3 se explican las diferentes simulaciones realizadas con el Simulink de Matlab para la obtención gráfica de las formas de onda de las corrientes de excitación, flujo y tensiones por secundario. Además, se simulan algunos grupos de conexiones mostrándose el Ángulo de desfasaje entre las tensiones de línea por primario y secundario.

Capítulo 1. Transformaciones trifásicas

1.1 Introducción

Comúnmente la energía eléctrica que se genera y distribuye a través de las diferentes líneas de un sistema eléctrico es trifásica. De ahí la importancia del estudio de los transformadores trifásicos y de los bancos de transformadores. Un aspecto muy importante para realizar la conexión de los bancos de transformadores es la polaridad que presenten los transformadores monofásicos.

1.2 Polaridad de los transformadores

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 de la tensión de cada transformador, cuando están conectadas dos o más unidades juntas [1].

En un transformador monofásico la polaridad puede ser aditiva o sustractiva.

La polaridad aditiva se da cuando en un transformador el devanado secundario está enrollado en el mismo sentido que el devanado primario. Esto hace que los flujos de los dos enrollados estén en el mismo sentido y se sumen. Los terminales “H1” y “X1” están cruzados [2].

Como resultado, la f.e.m. del devanado secundario se desfasa 180° con respecto al primario, como se muestra en la figura 1.1 [3].

Polaridad Aditiva

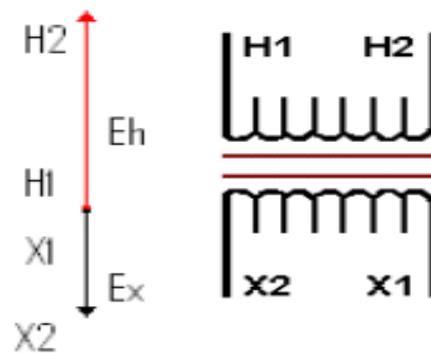


Figura 1.1. Transformador monofásico con polaridad aditiva.

La polaridad sustractiva se da cuando en un transformador el devanado secundario este enrollado en sentido opuesto al devanado primario. Esto hace que los flujos de los dos enrollados estén en sentidos opuestos y se resten. Los terminales “H1” y “X1” están en línea [2]. En esta polaridad no existe desfase entre las f.e.m. como puede verse en la figura 1.2 [3].

Polaridad Sustractiva

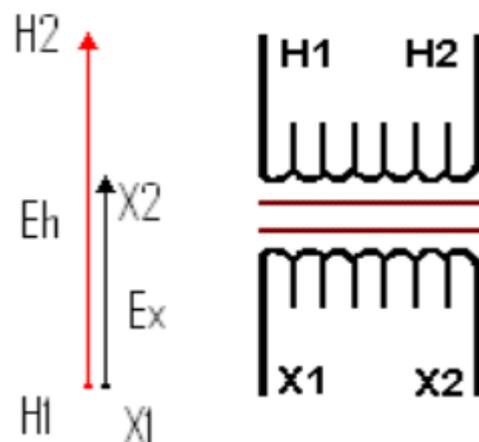


Figura 1.2. Transformador monofásico con polaridad sustractiva.

De acuerdo con las normas industriales, todos los transformadores de distribución monofásicos de hasta 200 kVA con tensiones en el lado de alta de hasta 8,660 volts (tensión del devanado) tienen polaridad aditiva. Todos los demás transformadores monofásicos tienen polaridad sustractiva [1].

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 una tensión reducida siempre por el lado de alta tensión que es lo único que garantiza que sean válidos los resultados [1], como en la figura 1.3.

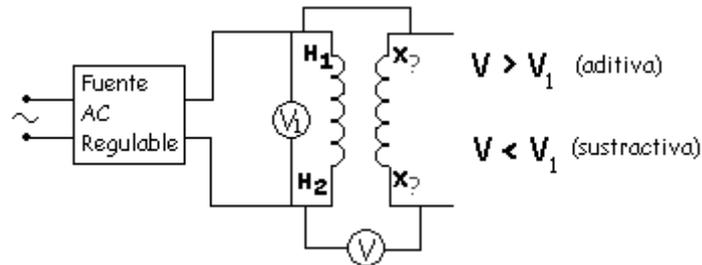


Figura 1.3. Prueba de polaridad a transformadores.

La polaridad es aditiva la tensión medida entre los otros dos bornes de los devanados es mayor que la tensión en el devanado de alta tensión. La polaridad es sustractiva si la tensión medida entre los dos bornes de los devanados es menor que la tensión del devanado de alta tensión [1].

En el caso de un banco trifásico formado por tres unidades monofásicas, se tiene para cada unidad, el concepto de polaridad que se explicó con anterioridad. Lo mismo ocurre para cada fase de un transformador trifásico tipo acorazado.

En el transformador trifásico tipo núcleo, la situación es diferente. La polaridad se puede establecer sólo para los enrollados que están sobre una misma pierna o columna del núcleo.

1.3 Transformaciones trifásicas

Se denomina transformaciones trifásicas a los bancos de transformadores monofásicos que forman una conexión trifásica y a los transformadores trifásicos propiamente dichos.

Los bancos de transformadores monofásicos son convenientes en los sistemas de distribución donde hay gran combinación de cargas monofásicas y trifásicas, lo que posibilita gran flexibilidad de operación.

Los bancos de transformadores monofásicos en conexiones trifásicas pueden ser de dos tipos: cerrados, cuando se utilizan tres transformadores monofásicos, y abiertos, cuando se utilizan dos transformadores [6].

La utilización de bancos de transformadores tiene varias ventajas, a continuación, se presentan las principales:

Cuando la carga a suministrar es combinada, la utilización de los bancos de transformadores resulta mejor.

Los bancos contribuyen a una mejor continuidad del servicio, pues cuando alguno falla los otros pueden asumir la carga más importante que abastecen

El uso de tres transformadores monofásicos en un banco de transformadores, si se requiere de una capacidad extremadamente grande de MVA, como puede ser a la salida de un generador de gran potencia, resulta ventajoso, pues sería muy impráctico y difícil la construcción y transportación de un transformador trifásico en ese caso, aunque el tamaño, peso y costo total de las unidades monofásicas fuera mayor que el de una sola unidad trifásica [7].

En caso de falla de un transformador, sólo se requiere reemplazar una unidad del banco trifásico, mientras los dos restantes, operan como un banco abierto a una capacidad reducida. Tal conexión es llamada delta abierta si el banco original era delta-delta, o estrella abierta si el banco era estrella-delta [8].

En la práctica, las capacidades promedio de MVA requeridas no son tan grandes, por lo tanto, comparado con el empleo de tres unidades monofásicas, será más económico emplear el transformador trifásico, ya que se requiere menos acero para construir el núcleo, menos pérdidas magnéticas, más fiables por necesitar menos conexiones externas y ocupa menos espacio.

Los bancos abiertos de transformadores monofásicos en conexión trifásica, en la práctica tienen buen uso. 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 (Δ -abierta), estrella abierta (Y-abierta) y la conexión T (*Teaser*).

En el sistema de distribución de Cuba es habitual el uso de bancos de transformadores abiertos y cerrados.

1.3.1 Banco de transformadores con conexión delta-delta (Δ - Δ)

La conexión delta-delta de un banco cerrado de transformadores se logra con el esquema de conexión que se muestra en la figura 1.4.

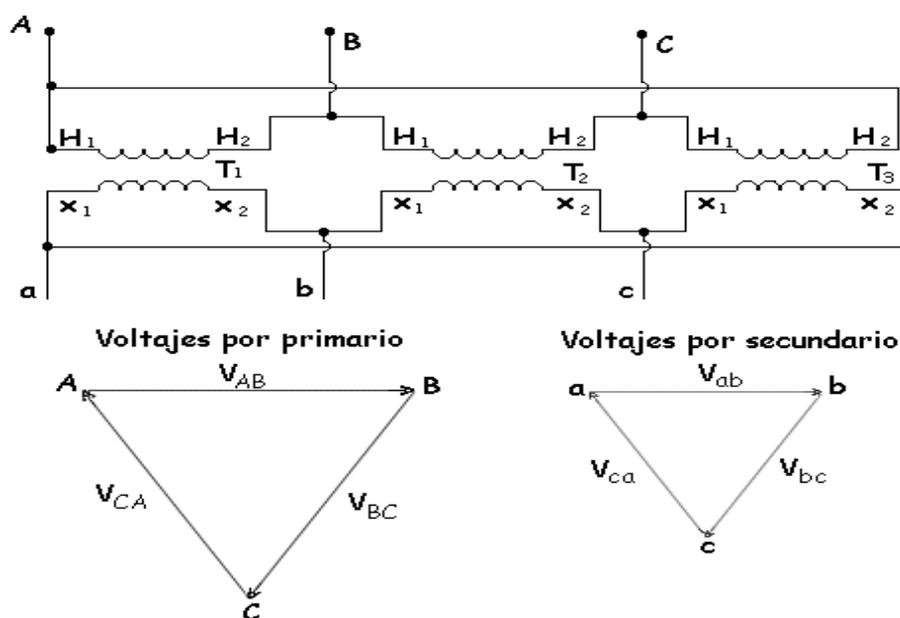


Figura 1.4. Diagrama de conexión y relación de fase de las tensiones de un banco cerrado delta-delta.

Este tipo de conexión se utiliza mucho en transformadores de baja tensión, ya que se necesitan más espiras de menor sección. Esto es así porque la corriente por los devanados del transformador es $\sqrt{3}$ menor que la de línea. Sin embargo, la tensión que soportan es la propia tensión de línea.

Como primario y secundario están en triángulo la relación de transformación será directamente la relación entre el número de espiras.

La conexión delta-delta tiene la ventaja de que, 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.

1.3.2 Banco de transformadores con conexión estrella-estrella (Y-Y)

La conexión Y-Y de un banco cerrado de transformadores se logra mediante el esquema de conexión de la figura 1.5.

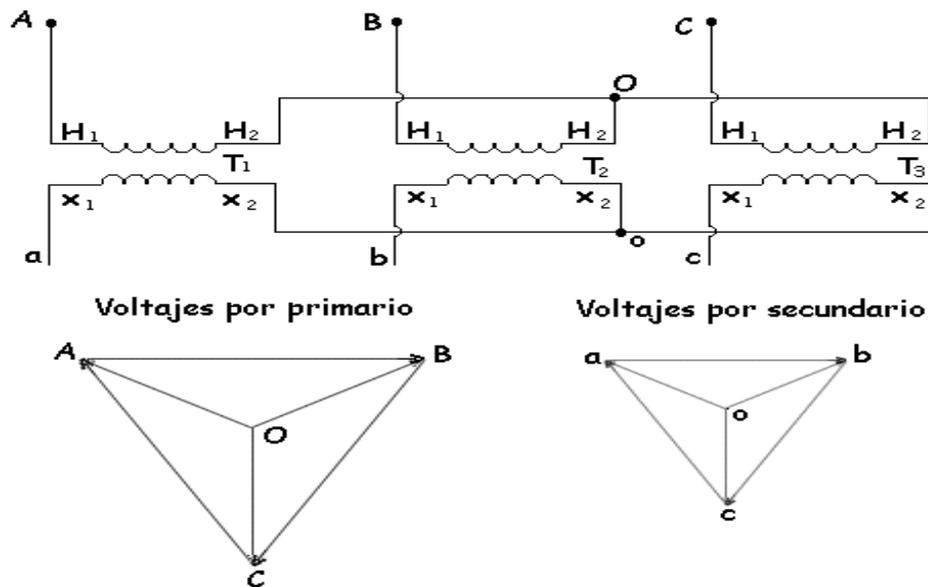


Figura 1.5. Diagrama de conexión y relación de fase de las tensiones de un banco cerrado estrella-estrella.

Para las conexiones Y-Y, la corriente de línea es la misma que la que circula por cada devanado del transformador. En cambio, la tensión en bornes de una bobina del devanado es $\sqrt{3}$ menor que la tensión de línea.

Como primario y secundario están en estrella, la relación de transformación será directamente la relación entre el número de espiras.

Las ventajas de la conexión Y-Y es que permite disponer del neutro tanto en el devanado de alta tensión como en el de baja, y conectar así el neutro del primario del transformador con el neutro de la fuente de energía.

Son más económicos por aplicarse a cada fase una tensión $\sqrt{3}$ veces menor y por tanto, disminuye el número de espiras, aunque aumenta la sección de los

conductores, por circular la misma corriente de línea. Este aumento de sección de conductores favorece la resistencia mecánica a los esfuerzos de cortocircuito.

La conexión Y-Y 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, las tensiones de fase tienden a desequilibrarse severamente cuando la carga es desequilibrada. También surgen problemas con los terceros armónicos.

Si es necesario tener una conexión Y-Y 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 delta 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, tales como alumbrado, ventiladores, bombas, etc.

1.3.3 Banco de transformadores con conexión estrella-delta (Y- Δ)

La conexión Y- Δ de un banco cerrado de transformadores se logra con el esquema de conexión de la figura 1.6.

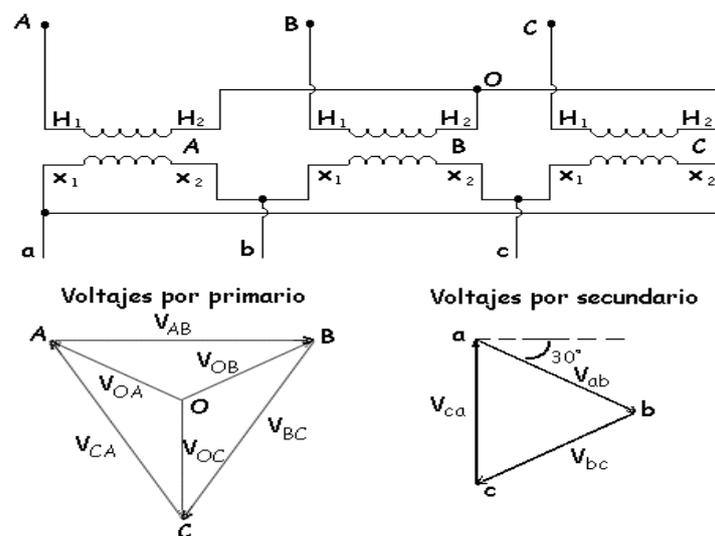


Figura 1.6. Diagrama de conexión y relación de fase de las tensiones de un banco cerrado estrella-delta.

La conexión Y- Δ se utiliza para reducir la tensión, ya que, además de la propia relación de transformación debida a las espiras, interviene el valor $\sqrt{3}$ para reducir la tensión del secundario. Debido a este factor reductor añadido, esta conexión se usa en subestaciones de alta tensión reductora, subestaciones de reparto y de distribución.

La principal ventaja de dicha conexión es que no tiene problemas de armónicos de tensión. Se comporta bien ante cargas desequilibradas, ya que el triángulo redistribuye posibles desequilibrios.

La conexión Y- Δ da como resultado un desplazamiento de fase de 30° entre las tensiones primarias y secundarios, lo cual puede dar inconvenientes al conectar en paralelo dos grupos de transformadores.

1.3.4 Banco de transformadores con conexión estrella-delta (Δ -Y)

La conexión Δ -Y de un banco cerrado de transformadores se muestra en la figura 1.7.

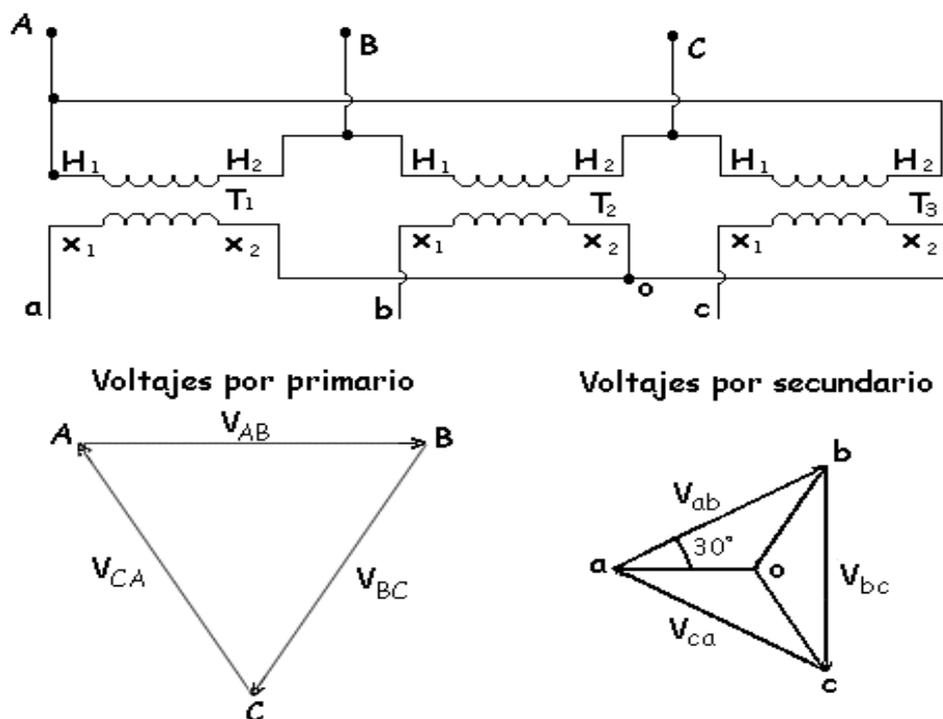


Figura 1.7. Diagrama de conexión y relación de fase de las tensiones de un banco cerrado delta-estrella.

La conexión Δ -Y 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 la tensión del secundario.

Esta conexión se utiliza mucho como transformador elevador en las redes de alta tensión. 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 de fase del sistema.

También se usa mucho esta configuración en transformadores de distribución, para ello se coloca la estrella en el lado de baja tensión. Esto permite alimentar cargas trifásicas y monofásicas entre fase y neutro.

Prácticamente no tiene inconvenientes, aunque su utilización ha de ser adecuada a sus características; por ejemplo, muy empleado como elevador al principio de línea y no al final, ya que cada devanado primario ha de soportar la tensión entre fases de la red.

Al producirse una asimetría en la carga, no motiva asimetría del flujo, por producirse un reparto entre las tres columnas del primario.

Puede distribuirse el neutro en su secundario lo que es muy utilizado para redes de distribución con dos tensiones. No se aconseja conectar el neutro a tierra en las líneas de transporte.

La posibilidad de tener un neutro accesible, permite ponerlo a tierra con protección de la instalación.

Las ventajas anteriores y sus escasos inconvenientes motivan la utilización de este banco de transformadores tanto en transporte como en distribución de energía.

1.3.5 Banco de transformadores con conexión estrella-zigzag (Y-Z)

La conexión zig-zag se emplea únicamente en el lado de baja tensión (B.T). 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 cargas.

Proporciona en el secundario una tensión de línea inferior a la que daría un transformador estrella-estrella del mismo número de espiras en primario y secundario, por tanto, para compensar este inconveniente habrá que aumentar el número de espiras en el secundario un 15,4% en relación con la conexión estrella - estrella con el mismo número de espiras primario para ambos.

Este aumento del número de espiras secundarias da lugar a un mayor costo en relación con el resto de conexiones, lo cual limita sus aplicaciones para potencias elevadas sustituyéndose para estos casos por el transformador delta- estrella.

A pesar de estos inconvenientes se encuentra que no se producen desequilibrios en el primario cuando aparecen cargas desequilibradas en secundario. Permite distribuir el neutro al igual que la conexión estrella, es de aplicación para redes de distribución que suministren dos tensiones.

1.3.6 Banco de transformadores con conexión delta abierta (Δ -abierta)

La conexión delta abierta es utilizada principalmente para brindar servicio en casos de emergencia. El uso de la misma reporta grandes pérdidas de potencia en las líneas por lo que su explotación a largo plazo no es recomendable.

La conexión Δ -abierta de un banco abierto de transformadores se logra con el esquema de conexión de la figura 1.8.

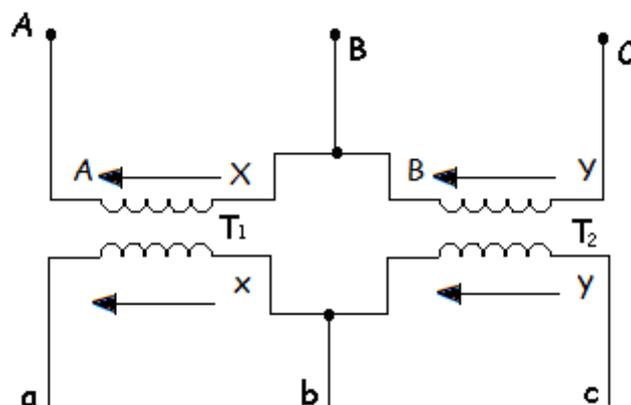


Figura 1.8. Diagrama de conexión de un banco de transformadores delta-abierta.

Dichas conexiones se usan como una solución temporal cuando se daña una fase de un grupo trifásico en conexión Δ - Δ . También en áreas que esperan un crecimiento de carga y se prevé para el futuro la adición de un tercer transformador para completar la conexión Δ - Δ del banco trifásico. Además, para soportar cargas que son una combinación de una carga monofásica grande y una carga trifásica más pequeña.

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.

Al considerar sólo los dos transformadores instalados en el banco, solamente es posible utilizar un 86,7% de la potencia total instalada.

1.3.7 Banco de transformadores con conexión estrella abierta (Y-abierta)

La conexión estrella abierta en Cuba se utiliza con frecuencia en distribución, 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.

La conexión Y-abierta de un banco abierto de transformadores se forma con el esquema de conexión que se muestra en la figura 1.9.

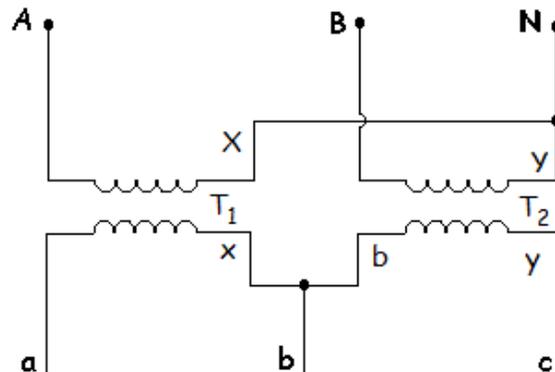


Figura 1.9. Diagrama de conexión de un banco de transformadores estrella-abierta.

Estas conexiones se utilizan para dar servicio a pequeños establecimientos que requieran servicio trifásico en áreas rurales en donde aún no se han instalado las tres fases en los postes de la línea de conducción. Así el usuario puede obtener el servicio de manera provisional, hasta que con el aumento de la demanda se requiera de la tercera fase en los postes de conducción.

Las pérdidas son las mismas que para el caso de la conexión 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.

1.3.8 Banco de transformadores con conexión T (*Teaser*)

Al igual que las conexiones delta abierta y estrella abierta, la conexión T es utilizada para obtener un sistema de tensiones trifásicas 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 [1].

La conexión T de un banco abierto de transformadores se logra con el esquema de conexión que se muestra en la figura 1.10.

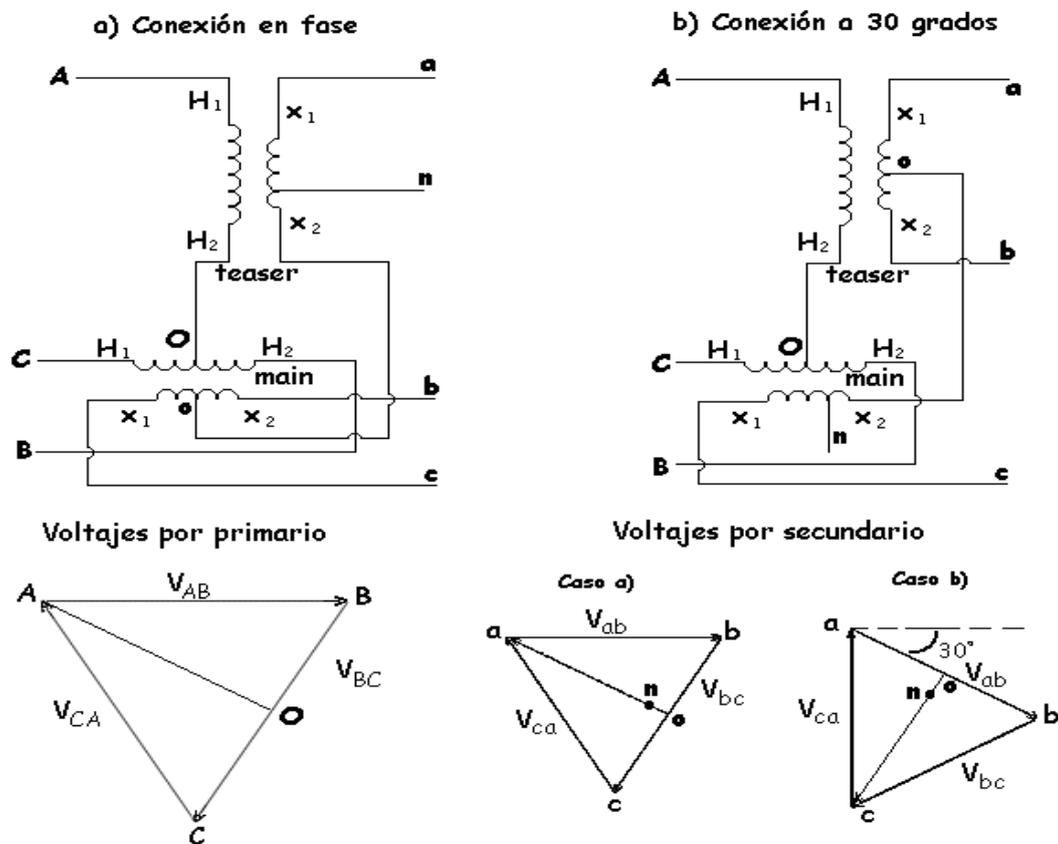


Figura 1.10. Diagrama de conexión y relación de fase de las tensiones de un banco de transformadores con conexión T.

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 7,18 % respecto con la capacidad propia de los dos transformadores.

1.3.9 Transformadores trifásicos

Los transformadores de potencia son habitualmente unidades trifásicas, aunque pueden encontrarse unidades monofásicas. Estos se utilizan en los sistemas de transmisión. Mientras mayor sea la tensión de las líneas de transmisión menores serán las pérdidas.

Para una misma potencia el transformador trifásico respecto al banco de transformadores monofásicos tiene menor volumen de acero, ocupa menos espacio, posee mejor eficiencia, utiliza menos conductores para conexiones externas, mayor fiabilidad. Sin embargo, cuando ocurre alguna avería el servicio se retira a todas las cargas conectadas y este debe ser reemplazado totalmente, en el caso del banco de transformadores es posible dejar conectada parte de la carga, también resulta menos complejo asumir incrementos de carga [6].

1.4 Grupos de conexiones

Los grupos de conexión se establecen en dependencia del desfasaje que existe entre las tensiones de línea de secundario respecto a las tensiones de línea del primario. Se considera que, al unir imaginariamente los extremos de los fasores de las tensiones de línea, en este caso del devanado primario, como se muestra en la figura 1.11, 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 las tensiones de línea por secundario, que se considera la aguja horaria, y si, la tensión del secundario está en fase con la tensión del primario se dice que el grupo de conexión es cero, que es el caso que se presenta en la figura 1.12 [6].

Los grupos de conexión para las transformaciones trifásicas, dependen del tipo de conexión.

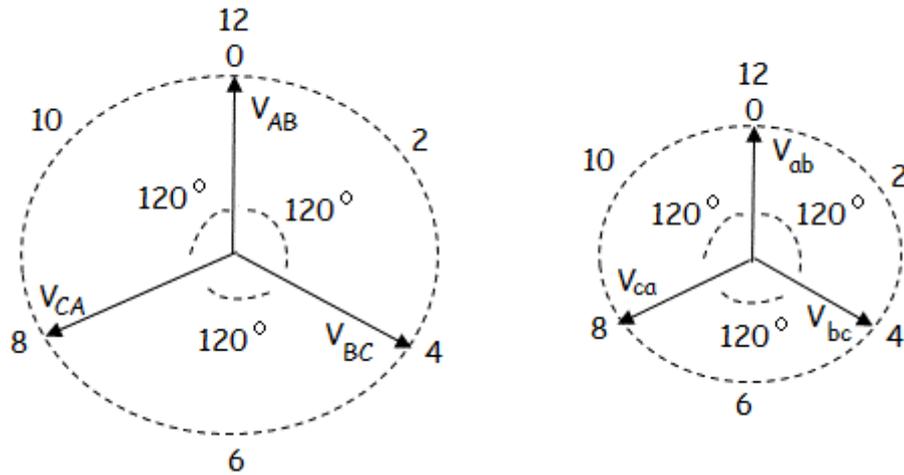


Figura 1.11. Sistema horario para determinar el grupo de conexión de transformaciones trifásicas.

1.4.1 Grupos de conexión de la conexión Y-Y

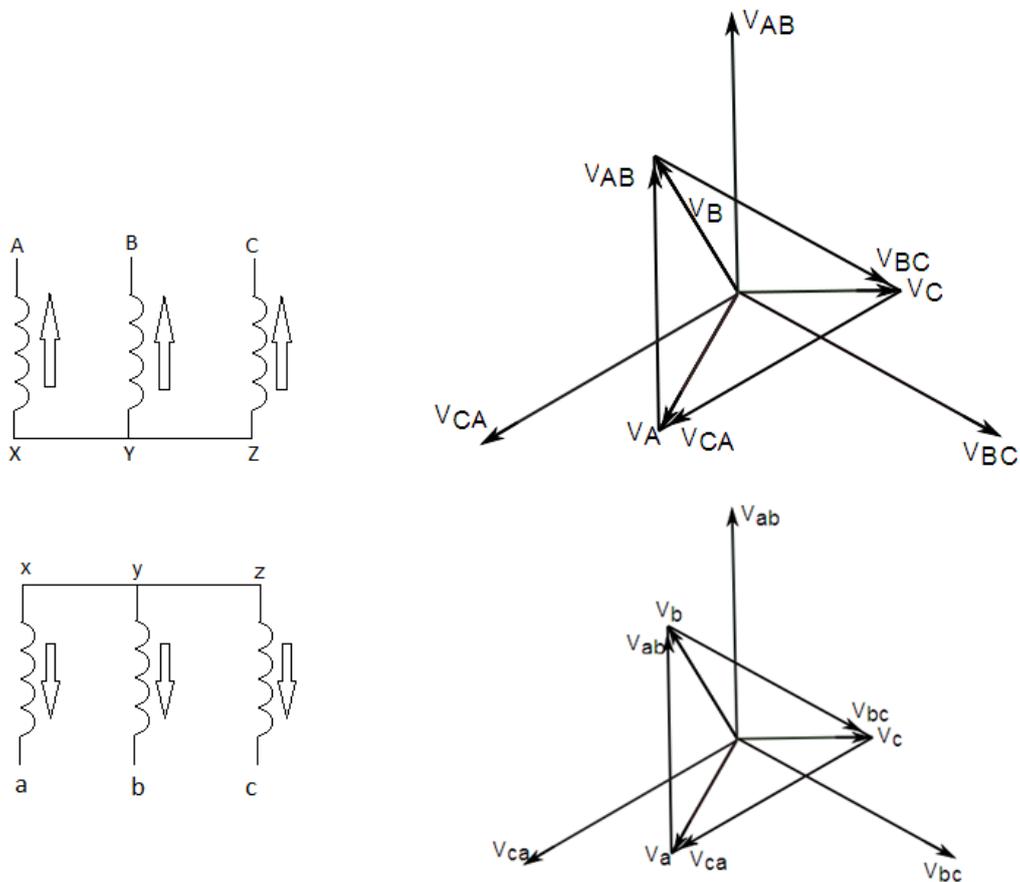


Figura 1.12. Conexión Y-Y con grupo de conexión 0 (Y-Y-0).

Para la conexión de bancos de transformadores y transformadores trifásicos Y-Y son posibles varios grupos de conexiones, se analizarán las más utilizadas.

En la figura 1.12 se muestra una conexión Y-Y, se observa para este caso que las tensiones de primario y secundario de línea y de fase están en fase respectivamente, esta conexión constituye el grupo cero (0) y se denota como Y-Y-0.

Para obtener los otros grupos se procede a desplazar en el sentido de las manecillas del reloj, los fasores de fase, es decir, en la figura 1.12, se ubica por secundario el devanado a donde iba el b y el c pasa a ocupar la posición del a y se obtiene el grupo 4, tal como puede apreciarse en la figura 1.13. Donde se comprueba que la tensión de línea por secundario indica las cuatro horas y tiene una diferencia de fase de 120° respecto a la tensión del primario.

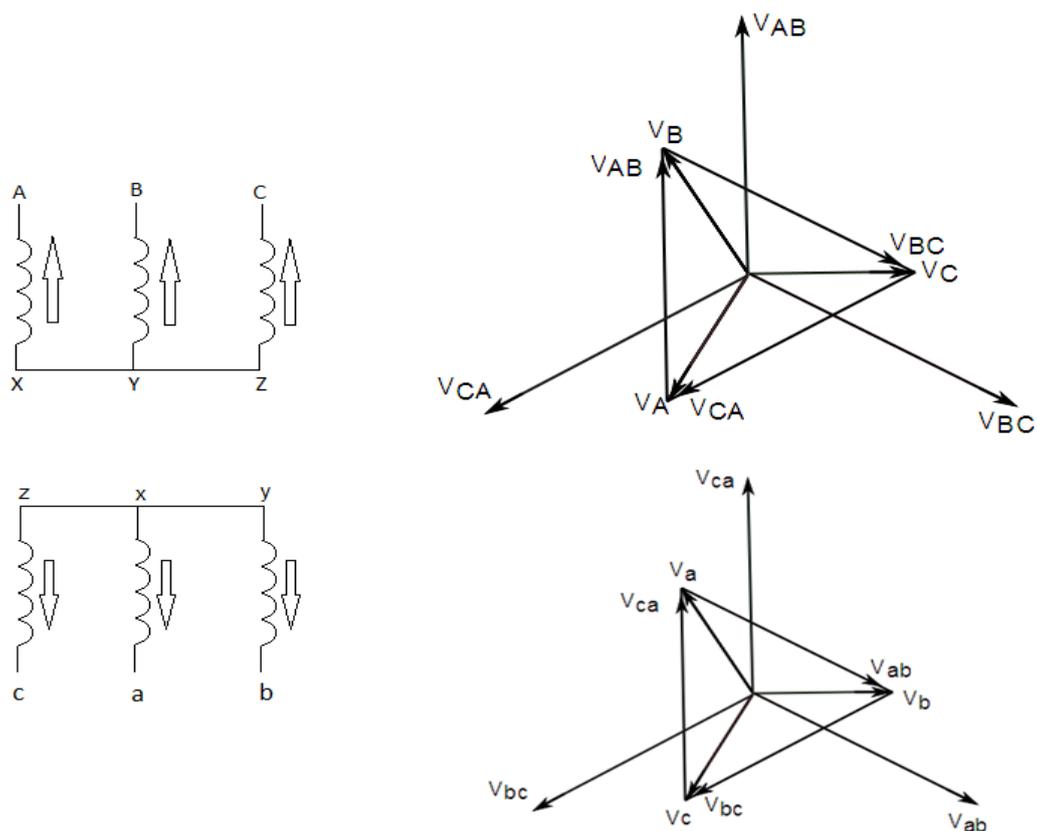


Figura 1.13. Conexión Y-Y con grupo de conexión 4 (Y-Y-4).

Para el grupo ocho (8) se desplazan los secundarios de los transformadores en sentido de las manecillas del reloj de manera que respecto a la figura 1.12, quede, donde iba el devanado a se ubica el b, donde iba el devanado b se ubica el c y donde iba el c ubica el devanado a, tal como se muestra en la figura 1.14.

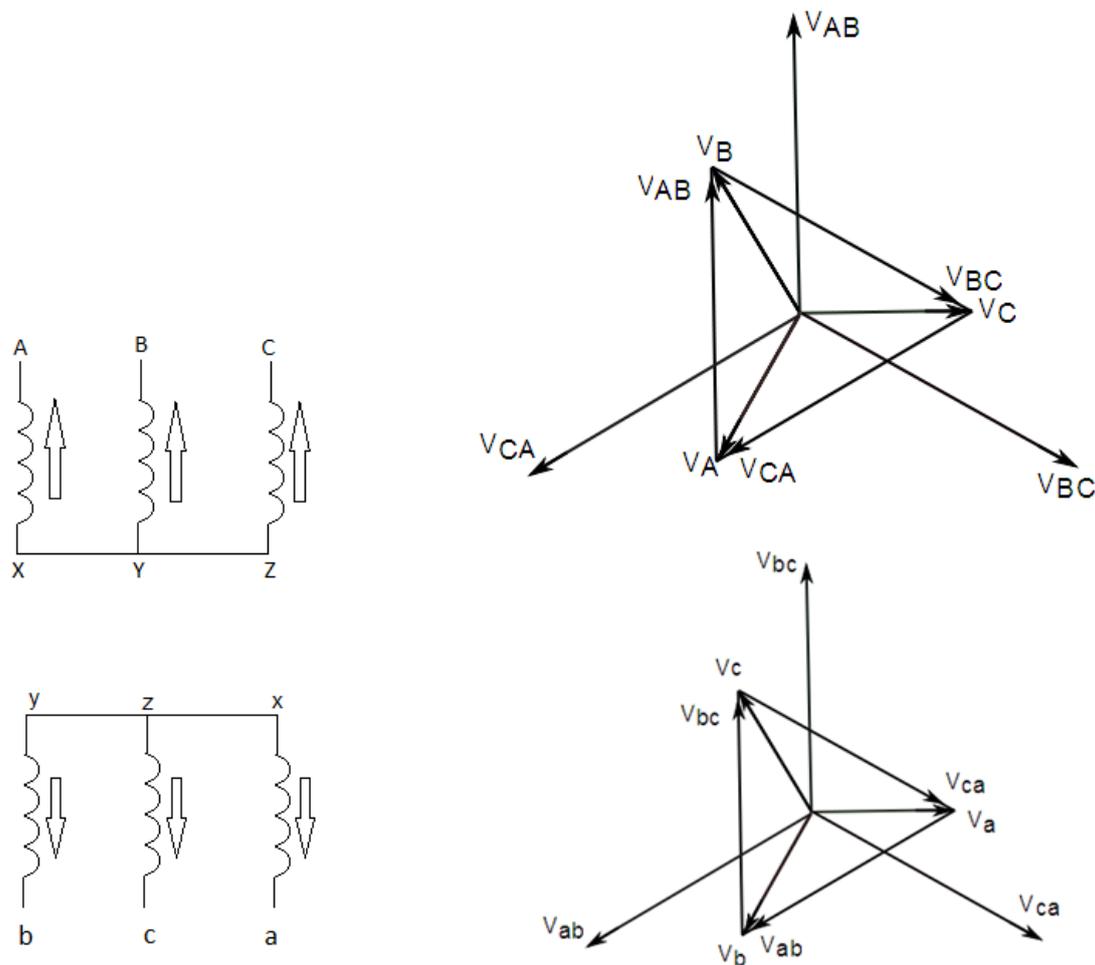


Figura 1.14. Conexión Y-Y con grupo de conexión 8 (Y-Y-8).

Para los demás grupos se invierte el sentido de la conexión por secundario, es decir, pasa a unirse en el punto común de la estrella los terminales a, b, c y se sale por x, y, z. En este caso se obtiene el grupo 6, tal como se muestra en la figura 1.15. Observe en dicha figura, que las tensiones de fase por secundario están en antifase respecto a los del devanado primario. Y si se rota la posición del devanado a, primero hacia el medio y luego al extremo derecho se obtienen los grupos 10 y 2 respectivamente.

El grupo de conexión más usual es el grupo cero (0).

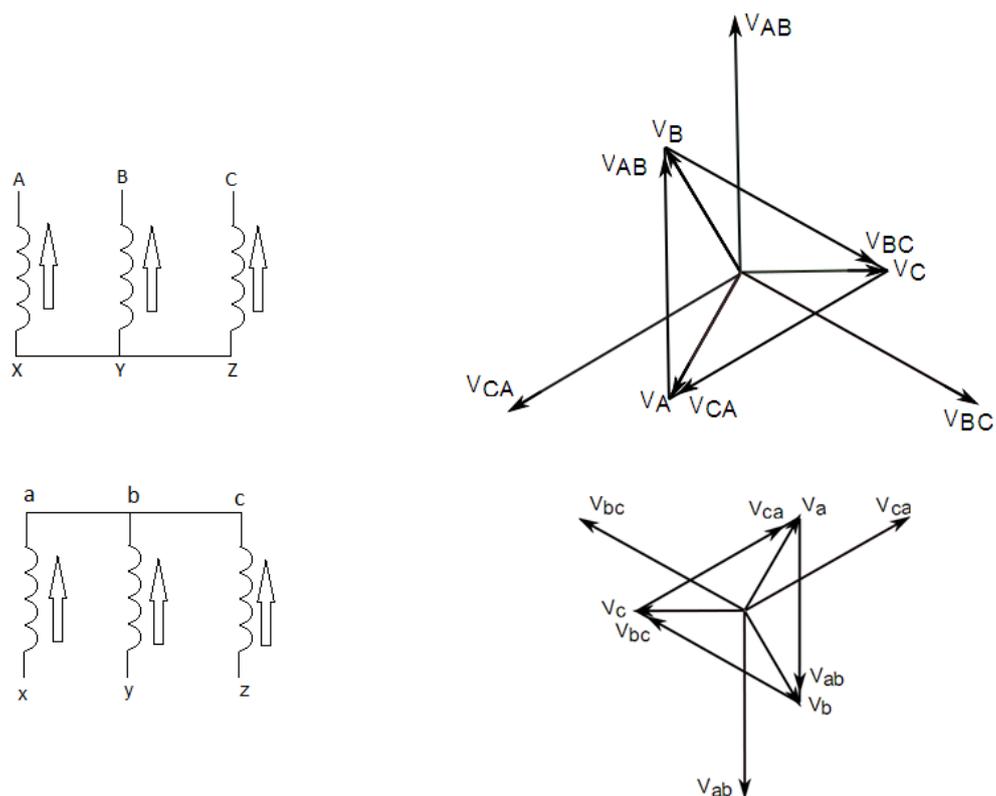


Figura 1.15. Conexión Y-Y con grupo de conexión 6 (Y-Y-6).

1.4.2 Grupos de conexiones de la conexión Δ - Δ

La conexión y la relación de fase de las tensiones pueden verse en la figura 1.16. Obsérvese que las tensiones de línea por primario y secundario están en fase, en este caso se dice que es una conexión Δ - Δ , grupo cero (0). Para este tipo de conexión existen los mismos grupos de conexión que para el banco Y-Y.

Este tipo de banco distribuye la carga entre sus elementos acorde a la impedancia de dispersión de estos y por tanto se aconseja utilizar siempre transformadores monofásicos idénticos, para minimizar la subutilización o un transformador trifásico.

Obsérvese en la figura 1.16 que la polaridad de las tensiones de línea, tanto por primario como por secundario, es contraria respecto al sentido que determina la polaridad de cada transformador.

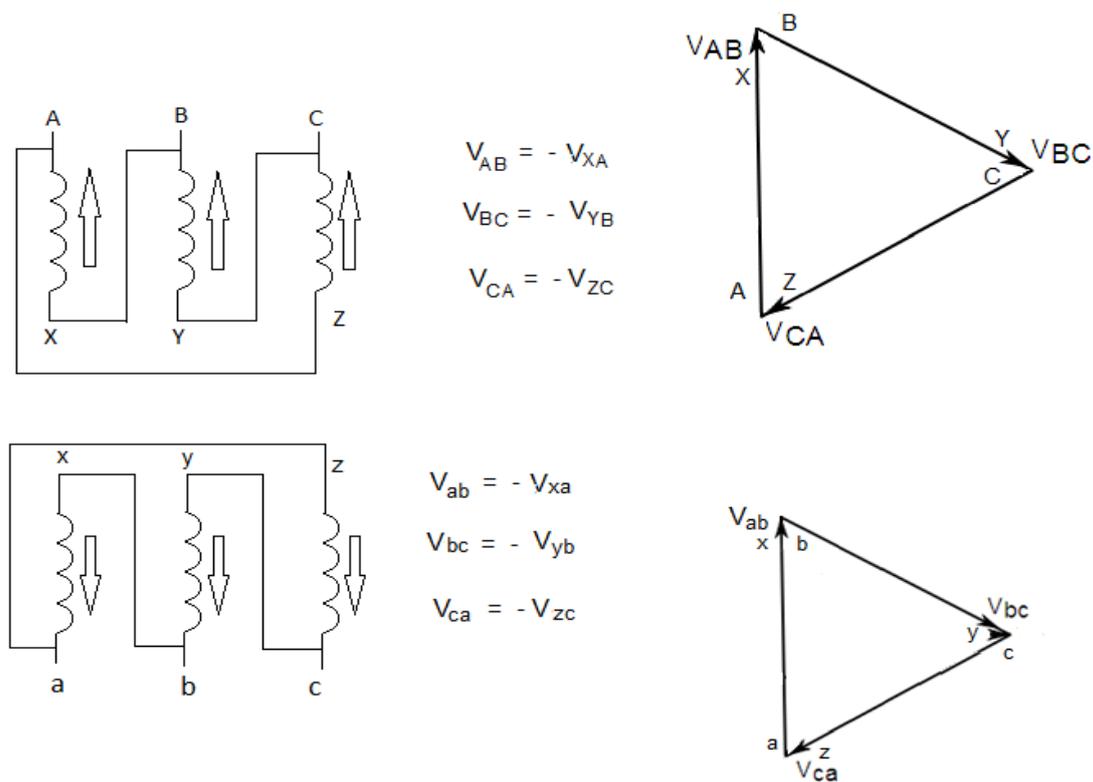


Figura 1.16. Conexión Δ - Δ con grupo de conexión cero (Δ - Δ -0).

1.4.2 Grupos de conexiones de la conexión Y- Δ

En la figura 1.17 se presenta la conexión y las relaciones de las tensiones de fase entre las tensiones de primario y secundario.

En el grupo de conexión 1, el fasor de tensión de línea por secundario en la esfera del reloj marcará la hora uno (1). Para esta conexión existen los grupos 1, 3, 5, 7, 9, 11. El grupo más usual es el 11.

Para formar el grupo 11 basta con invertir las conexiones por secundario como se observa en la figura 1.18.

En este caso el sentido de las tensiones de línea por secundario coincide con los sentidos de las tensiones de fase por primario. En la esfera del reloj, mostrada en la figura 1.19, puede constatarse que efectivamente se forma el grupo 11.

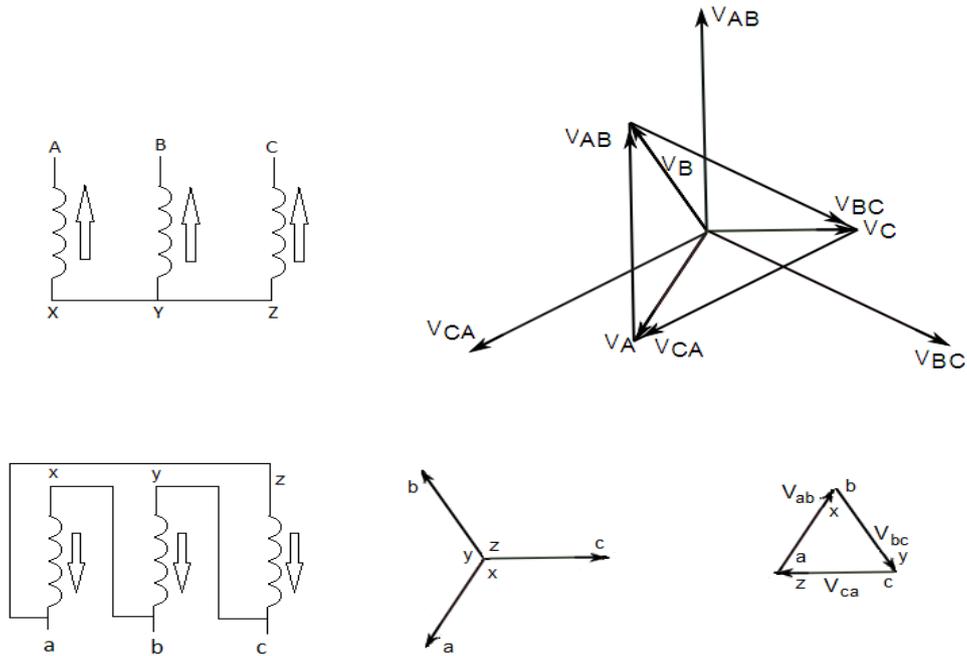


Figura 1.17. Conexión Y-Δ con grupo de conexión uno (1) (Y-Δ-1).

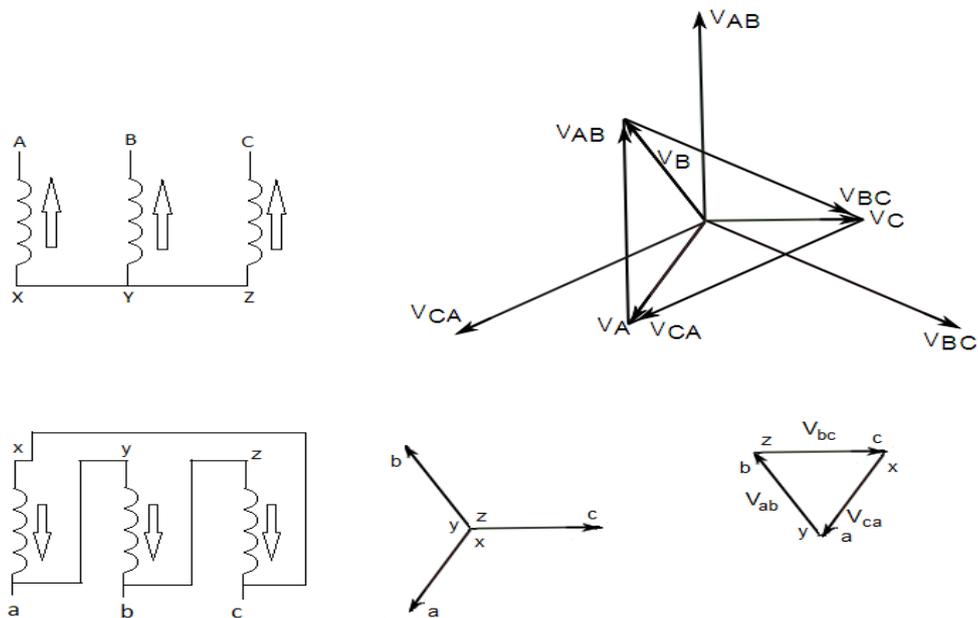


Figura 1.18. Conexión Y-Δ con grupo de conexión 11 (Y-Δ-11).

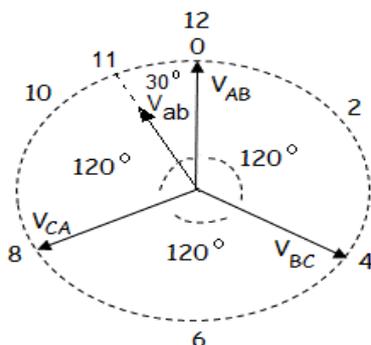


Figura 1.19. Desfasaje de las tensiones de línea en la conexión Y- Δ , grupo 11.

1.4.2 Grupos de conexiones de la conexión Δ -Y

Las tensiones de línea por secundario se atrasan 30° respecto a las tensiones de línea por primario, como puede observarse en la figura 1.20. En este caso es el grupo 1 y en la práctica se usa el grupo 11, el cual se obtiene al invertir los puntos de unión de la estrella, se unen a, b, c y se sale por x, y, z

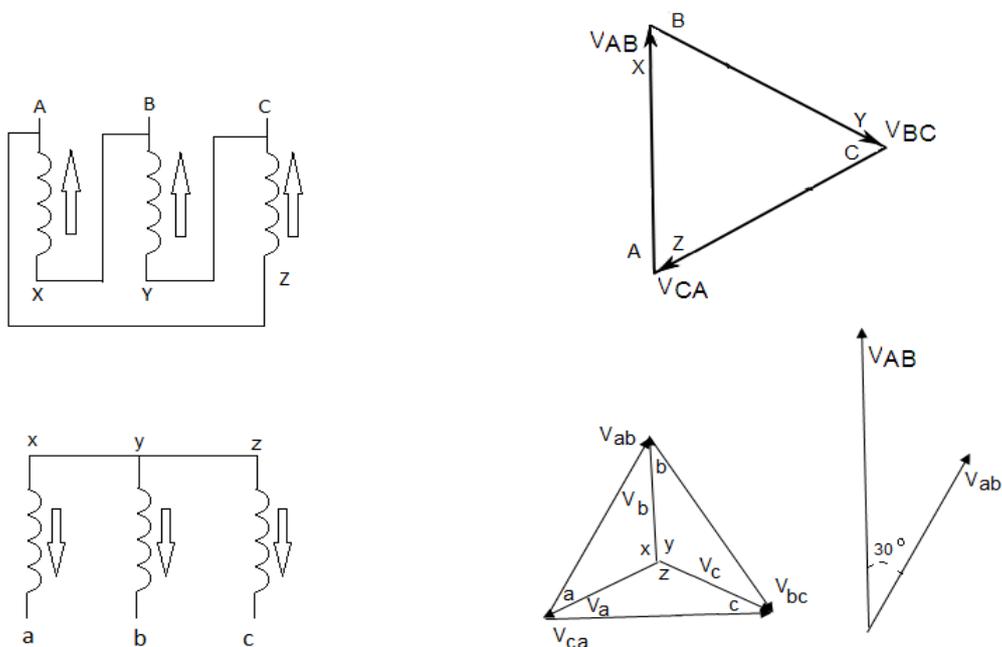


Figura 1.20. Banco Δ -Y-1 (grupo 1) y relación de fase de las tensiones.

1.4.3 Grupo de conexiones para transformadores trifásicos

Las conexiones más comunes en los transformadores trifásicos son similares a las descritas para los bancos cerrados, con la única condicionante que en estos casos los devanados de las tres fases son idénticos, es como si el banco de transformadores monofásico se conformara por tres transformadores iguales. Las conexiones más utilizadas en estos tipos de transformadores son la Y-Y₀ con conductor neutro por secundario, Δ -Y₀, Y₀ - Δ y Y- Δ . Pueden fabricarse también la conexión Y- Δ Y, en este transformador hay dos devanados secundarios uno conectado en estrella y otro en delta.

Al igual que se explicó en los bancos cerrados pueden fabricarse estos transformadores para diferentes grupos de conexión. En la práctica no es deseable poseer, en un sistema electroenergético donde hay interconectado gran número de transformadores, muchos grupos de conexión, y lo que se hace es establecer por norma los permitidos.

Por ejemplo, en la antigua URSS los permitidos son Y-Y₀-0, Δ -Y₀-11, Y- Δ -11 y Y₀- Δ -11. El subíndice cero indica que posee conductor neutro y los números 0 y 11 indican los grupos de conexión [6].

1.4.4 Grupos de conexiones más utilizados

Y-yn-0 - Para transformadores de distribución. El neutro puede cargarse con el 10% o durante 1,5 horas máximo con el 25 % de la intensidad nominal (conexión de bobinas de derivación a tierra).

YN-yn-0 - Con devanado de compensación para grandes transformadores de acoplamiento de redes. El neutro puede cargarse continuamente con la intensidad nominal.

YN- Δ -5 - Transformadores de máquinas y principales de grandes centrales generadoras y transformadoras. El neutro puede cargarse con la intensidad nominal.

Y-zn-5 - Para transformadores de distribución hasta aproximadamente 250 kVA para redes locales. El neutro puede cargarse con la intensidad nominal.

Δ -yn-11 - Para transformadores de distribución superiores a 315 kVA para redes locales e industriales. El neutro puede cargarse con la intensidad nominal. [9].

1.5 Consideraciones generales del capítulo

Se aprecia la importancia que tienen 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 grupos de conexión para los bancos cerrados y los transformadores trifásicos.

Capítulo 2. Formas de onda en transformaciones trifásicas.

2.1 Corriente de excitación

El circuito equivalente del transformador, figura 2.1, es un modelo que permite manejar con exactitud la no linealidad magnética que presenta el núcleo y por tanto sus pérdidas. Esto se debe a que casi todos los elementos de este circuito equivalente son lineales: las dos resistencias que representan las pérdidas de cobre son lineales y las inductancias de dispersión son elementos casi lineales. Esto hace que la relación existente entre las f.e.m. que se inducen en los devanados primario y secundarios sea igual a la relación de transformación y por tanto a la relación del número de vueltas de los devanados de alta y baja tensión. Lo único ilegítimo es asumir que la corriente de excitación es lineal. Aunque vale aclarar que asumir que la corriente de excitación es sinusoidal no trae grandes errores al trabajar con el circuito equivalente cuando se realizan cálculos con él.

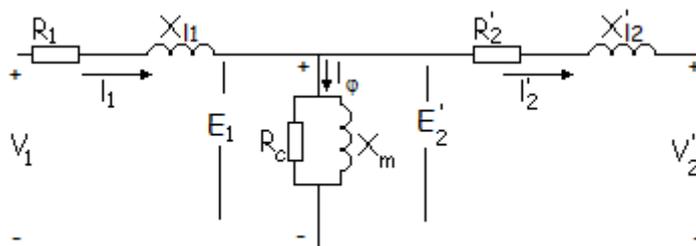


Figura 2.1. Circuito equivalente del transformador.

La corriente de excitación es fácil de medir pues es igual a la de vacío del transformador. Se ha demostrado experimentalmente que cuando se alimenta un transformador con tensión nominal la forma de onda de la corriente de excitación es distorsionada, o sea, no sinusoidal. Esto no quiere decir que la forma de onda del flujo magnético tenga las mismas características, todo lo contrario, es sinusoidal. Esto puede demostrarse experimentalmente también.

La ley de Faraday, ecuación 2.1, No solo nos dice que magnitud de f.e.m. se induce en el devanado primario debido a las variaciones del flujo magnético, nos dice también que cantidad de líneas de flujo circulan por el núcleo para una tensión de alimentación determinado.

$$e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad [2.1]$$

Donde:

e_1 – f.e.m. inducida en el devanado primario.

N_1 – Número de vueltas del devanado primario.

ϕ – Flujo magnético en el núcleo del transformador.

Las caídas de tensión en la resistencia de devanado primario, $i_1 r_1$, y en la inductancia de dispersión del propio devanado, $i_1 x_1$, son muy pequeñas en comparación con la tensión de alimentación del transformador, V_1 . Por tanto, la tensión de alimentación del transformador y la f.e.m. inducida en el devanado primario son prácticamente iguales. El flujo máximo que circula por el núcleo se puede calcular a través de la ecuación 2.2.

$$\phi_{m\acute{a}x} \cong \frac{1}{\sqrt{2}\pi f} \frac{V_1}{N_1} \quad [2.2]$$

Según la ecuación 2.2 el valor máximo del flujo magnético en estado estable es proporcional a la tensión de alimentación e inversamente proporcional al número de vueltas y a la frecuencia y totalmente independiente de la corriente de excitación. Por tanto, si la tensión de alimentación es sinusoidal, también lo será el flujo magnético.

La corriente de excitación es una variable dependiente y depende del valor y forma de onda que presente el flujo magnético.

En la figura 2.2 se muestra la característica de magnetización típica de cualquier material ferromagnético. Como se observa, la relación existente entre flujo magnético y corriente de excitación o f.m.m. es no lineal. Esta no linealidad trae consigo que, para obtener una forma de onda del flujo magnético sinusoidal, la corriente de excitación tiene que ser no sinusoidal.

La forma de onda de la corriente de excitación puede obtenerse gráficamente graficando punto a punto la onda de flujo contra la característica de magnetización.

Por tanto, para obtener un flujo magnético sinusoidal y, por tanto, una f.e.m. inducida en el devanado secundario sinusoidal, la corriente de excitación tiene que tener una forma de onda distorsionada, o sea, no sinusoidal.

Esta forma de onda de la corriente de excitación tiene un alto contenido de tercer armónico, aspecto a tener bien en cuenta a la hora de las conexiones trifásicas. Si por alguna razón, los terceros armónicos de las corrientes de excitación de los transformadores que forman un banco trifásico o que circulan por los devanados de un transformador trifásico no pudieran circular, estas corrientes de excitación serían prácticamente sinusoidales y por tanto el flujo magnético se distorsiona, lo que trae consigo que la f.e.m. inducida en los devanados secundarios serían no sinusoidales y la tensión de fase de salida de estos bancos no sería el ideal. [10]

Este aspecto será analizado en los siguientes epígrafes.

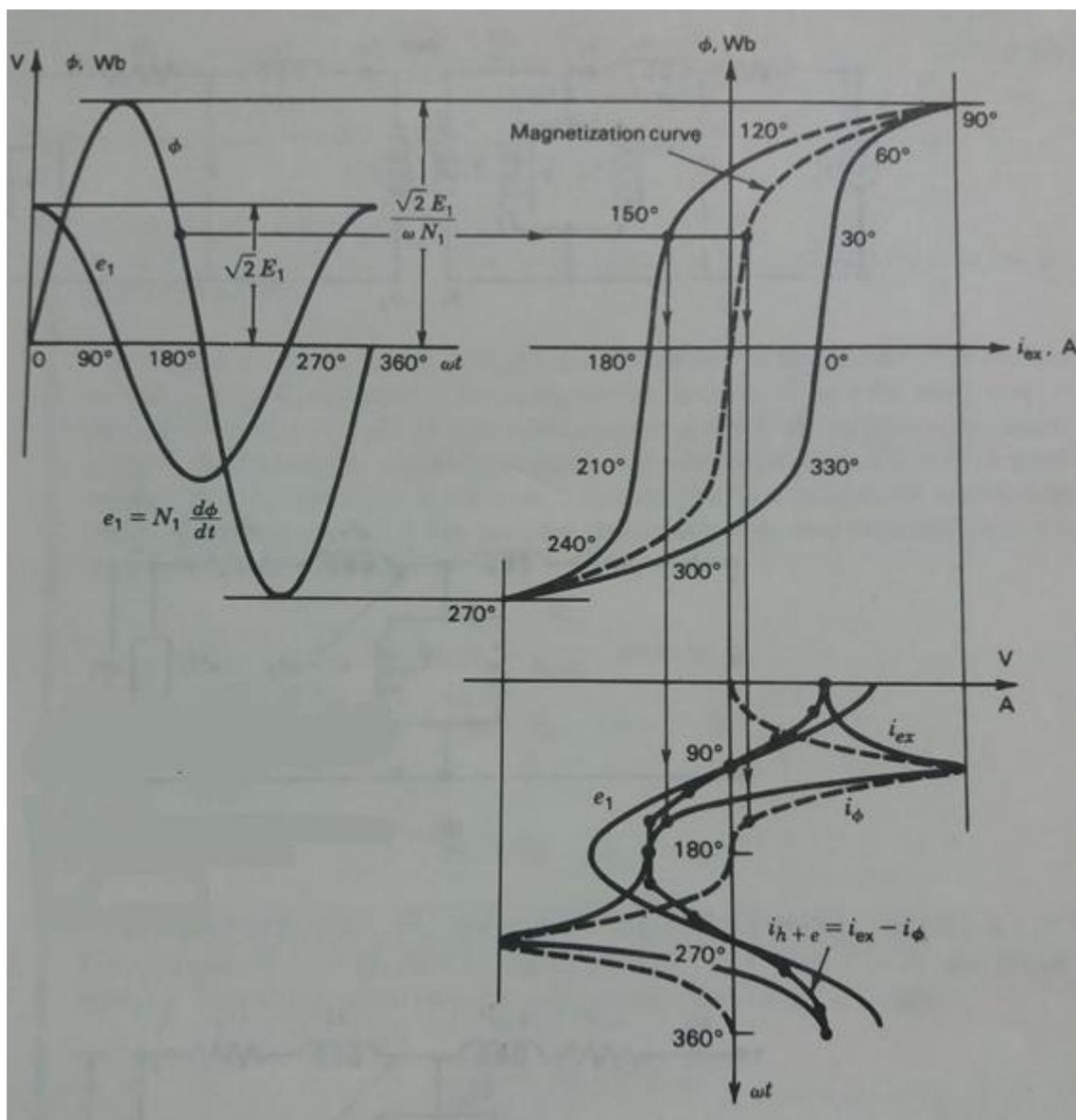


Figura 2.2. Característica de magnetización de un transformador.

2.2 Armónicos en los transformadores

En un sistema eléctrico de potencia ideal, la tensión suministrada a los usuarios y la corriente de carga son ondas perfectamente sinusoidales, en la práctica, sin embargo, las condiciones nunca son ideales, así que las formas de onda son a veces bastante distorsionadas. La desviación de la senoide perfecta se expresa en términos de Distorsión Armónica Total (*Total Harmonic distortion*, THD) de las formas de onda de corriente y tensión. La distorsión armónica no es un fenómeno nuevo, esta fue típicamente causada por la saturación magnética de los transformadores o por ciertas cargas industriales, tales como hornos de arco eléctrico o soldadoras.

El término armónico se origina en el campo de la acústica, y se refiere a la vibración de una cuerda o columna de aire a una frecuencia que es múltiplo de la frecuencia de repetición básica o fundamental. Similarmente, para señales eléctricas una armónica es definida como una componente sinusoidal de una onda periódica cuya frecuencia es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental. [11]

Así en sistemas de potencia de 60 Hz, una onda armónica es una senoide que tiene una frecuencia expresada por:

$$f_n = n \cdot 60 \text{ Hz} \quad [2.3]$$

Donde:

f_n : Frecuencia del armónico n.

n: Orden del armónico, es un número entero.

En la figura 2.3 se muestran las componentes armónicas de una onda sinusoidal de 60 Hz.

Matemáticamente la representación de los armónicos es una serie de Fourier, como se muestra a continuación:

$$f(x) = C_o + \sum_{n=1}^{\infty} (\text{sen}(n\omega t + \varphi_n) \dots) \quad [2.4]$$

El efecto de los armónicos en los transformadores es doblemente perjudicial. Los armónicos de corriente causan un incremento en las pérdidas de cobre y en las

pérdidas en el núcleo. Algunos de los efectos de los armónicos en el transformador son: incrementan el calentamiento, el esfuerzo sobre el aislamiento, pueden ocurrir posibles resonancias a la frecuencia del armónico entre los enrollados del transformador y la capacitancia de la línea y es posible que se produzcan pequeñas vibraciones del núcleo.

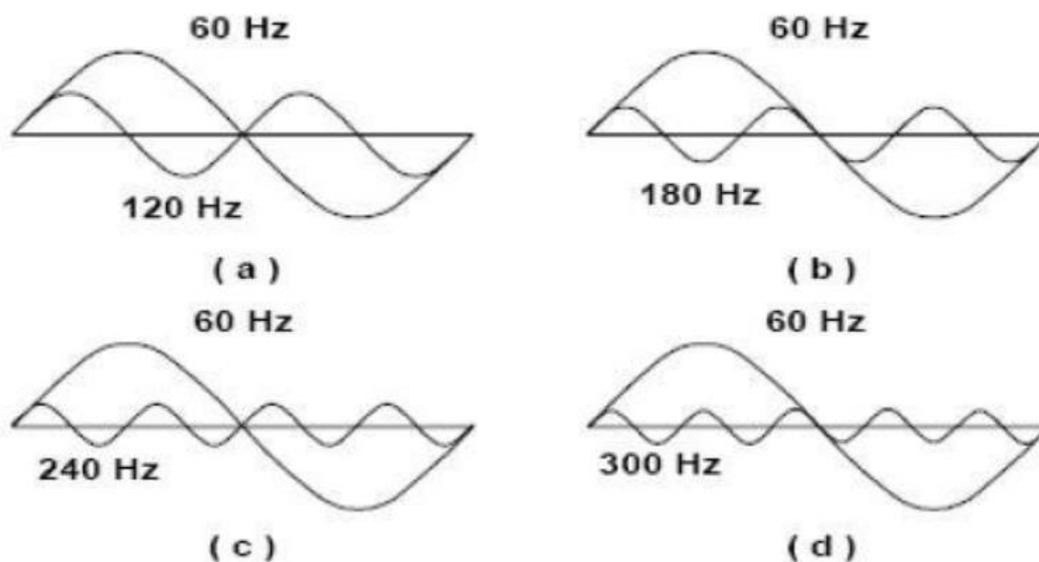


Figura 2.3. Componente de 2^{do}, 3^{ro}, 4^{to} y 5^{to} armónico de una onda de 60 Hz.

Las principales componentes de pérdida son: las pérdidas en los enrollados, las pérdidas por corrientes parásitas y las pérdidas por el flujo de dispersión. Las pérdidas debido a la componente se deben al calentamiento del conductor y al efecto pelicular. Las pérdidas por corrientes parásitas en el conductor se incrementan con el cuadrado de la corriente y con el cuadrado de la frecuencia [12].

El calentamiento adicional causado por los armónicos requiere desvalorizar la capacidad del transformador de forma que su temperatura permanezca dentro de los límites establecidos por el fabricante o usar un transformador de construcción especial diseñado para corrientes de carga no sinusoidales. La vida del transformador se reducirá si el mismo opera por encima de la temperatura establecida. Los transformadores se diseñan para entregar energía a la frecuencia de la red, 50 Hz o 60Hz). Las pérdidas de núcleo están compuestas por las pérdidas de corriente parásitas, que aumentan con el cuadrado de la frecuencia, y las pérdidas de histéresis, que aumentan linealmente con la

frecuencia. Para frecuencias mayores las pérdidas aumentan, causando un calentamiento adicional en el transformador [13].

En los transformadores monofásicos, suele despreciarse los armónicos de la corriente de excitación, debido a su pequeño valor. Sin embargo, los fenómenos de armónicos en sistemas trifásicos pueden, en algunos casos, ejercer efectos importantes en las características del sistema, particularmente, en el comportamiento de los bancos trifásicos estrella-estrella.

Por otra parte, a pesar de su tamaño relativamente pequeño, los armónicos de la corriente de excitación de un banco trifásico pueden, en ciertas ocasiones, inducir en los circuitos de comunicaciones cercanos, tensiones que interfieran seriamente con el funcionamiento adecuado de dichos circuitos.

Como se comentó en el epígrafe anterior, la corriente de excitación de un transformador tiene una forma de onda distorsionada, o sea, no sinusoidal, y por tanto puede descomponerse a través de una serie de Fourier como:

$$i_0(t) = i_{01} \cos(\omega t - \varphi_1) + i_{03} \cos(3\omega t - \varphi_3) + i_{05} \cos(5\omega t - \varphi_5) \quad [2.5]$$

En la realidad, el tercer armónico es el más importante debido a que en muchos casos su valor eficaz es comparativamente grande frente al valor del fundamental y adicionalmente, como su período es un tercio del de éste, las componentes de las tres fases quedan en fase [14], tal como se muestra en la figura 1.29. Según esto, presentan características de componentes de secuencia cero.

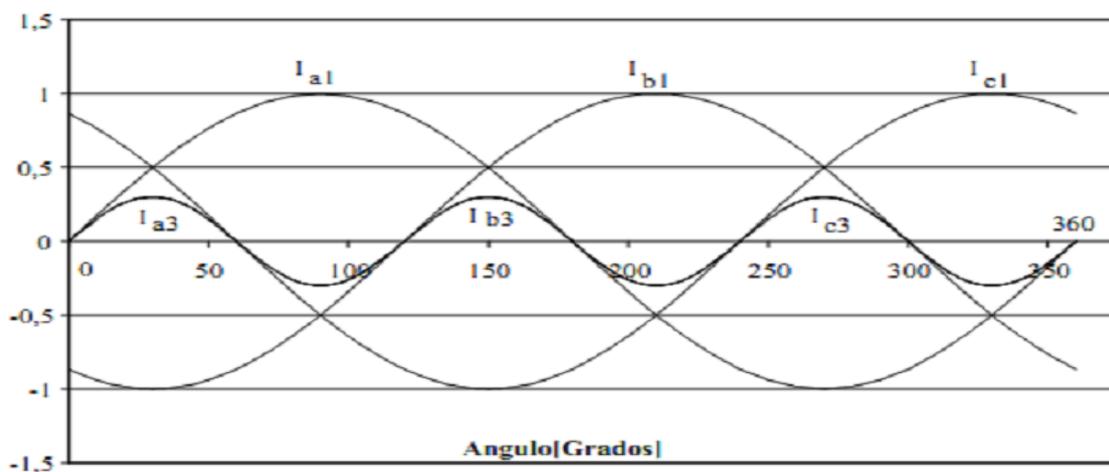


Figura 2.4. Primer y tercer armónico de la corriente de excitación de un transformador trifásico.

En cuanto a los quintos armónicos, de acuerdo con lo que se muestra en la figura 2.5, presentan características de componentes de secuencia negativa; es decir, tienen invertido el orden de las corrientes de las fases [14]

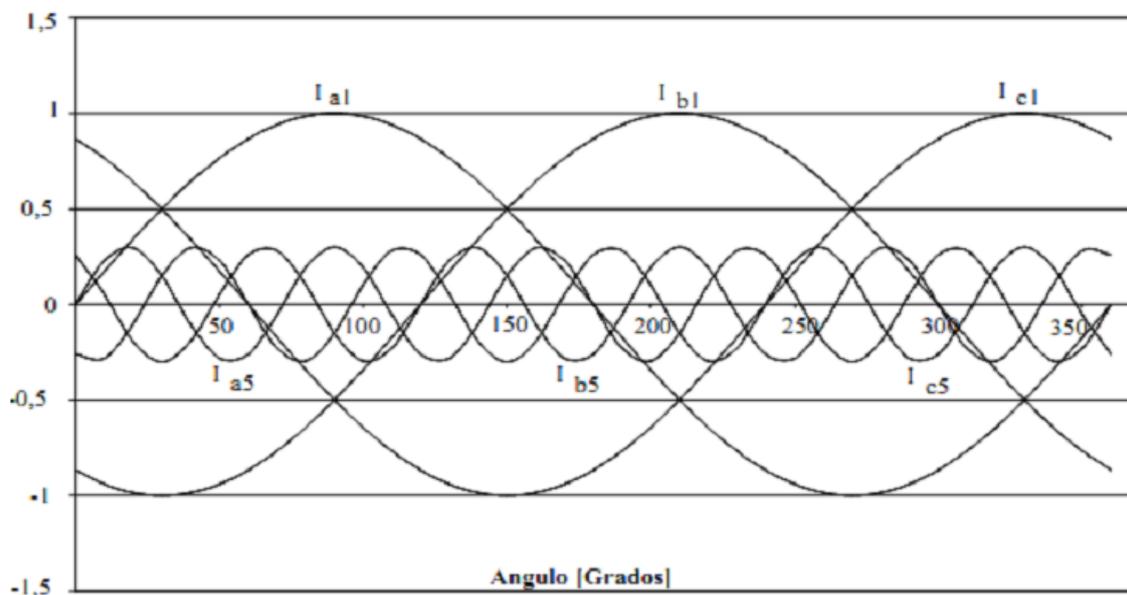


Figura 2.5. Primer y quinto armónico de la corriente de excitación de un transformador trifásico.

2.3 Transformaciones trifásicas con el primario en delta

Consideremos tres transformadores con sus primarios conectados en delta, estando sus secundarios en circuito abierto y no conectados entre sí. Si los transformadores son exactamente iguales y están equilibradas las tensiones de la línea, las formas de onda de la corriente de excitación de los transformadores son iguales, pero están desfasadas 120°. Si las tensiones de líneas varían sinusoidalmente, las formas de onda de la corriente de excitación tienen la forma general indicada en la figura 2.6. En la figura 2.7 se muestran las formas de onda de la corriente de excitación de dos de los transformadores, $i_{\varphi CA}$ e $i_{\varphi AB}$. También se muestra la forma de onda de la corriente de excitación que circula por la línea la cual se calcula de la manera siguiente:

$$i_{\varphi A} = i_{\varphi AB} - i_{\varphi CA} \quad [2.6]$$

Se puede observar en la figura 2.7 que las formas de onda de la corriente de excitación de fase y de línea, cuando el primario está conectado en delta, son totalmente diferentes. Para explicar dicho fenómeno analizaremos primeramente los terceros armónicos de la corriente de excitación.

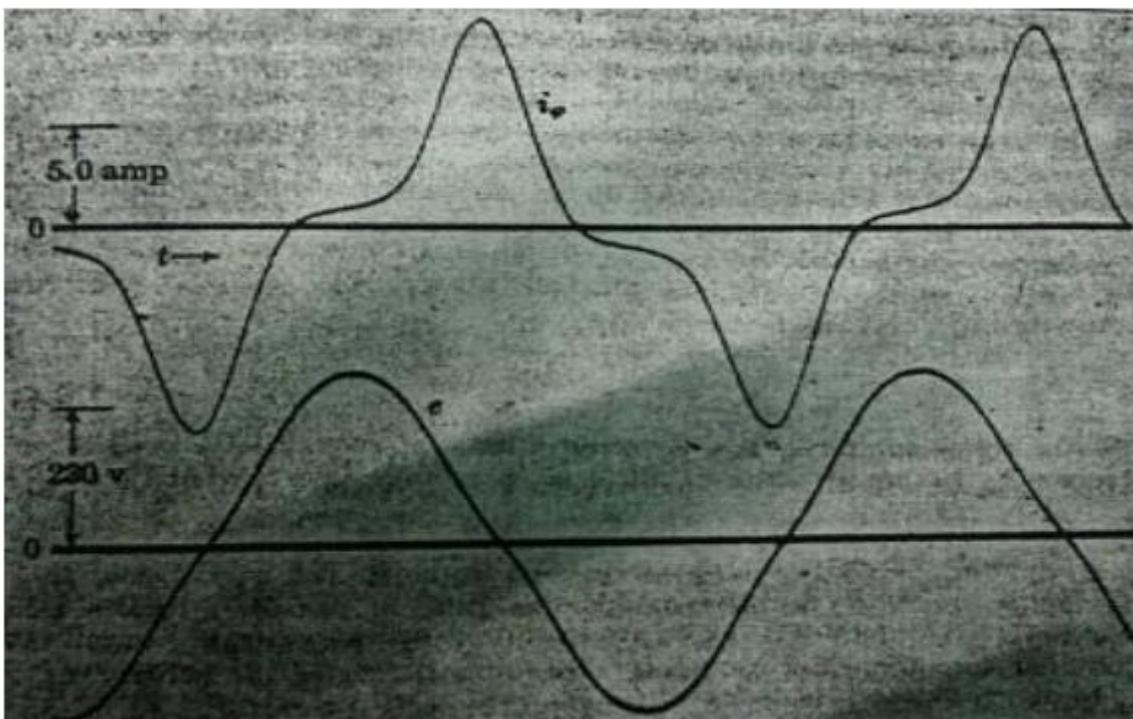


Figura 2.6. Forma de onda de la corriente de excitación de un transformador.

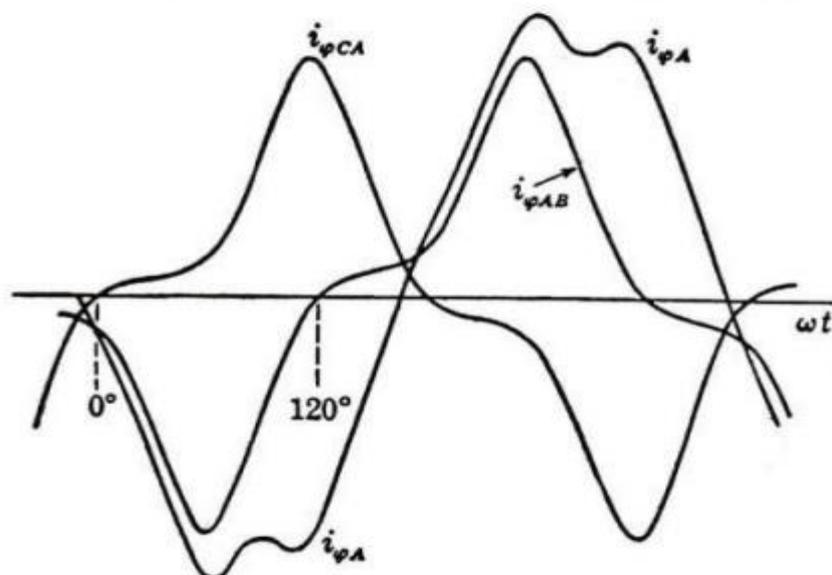


Figura 2.7. Formas de onda de la corriente de excitación de fase y de línea para una conexión delta.

De acuerdo con la figura 2.8a, pueden verse tres corrientes i_{CA} , i_{AB} e i_{BC} que tienen formas de ondas exactamente iguales y desfasadas en un tercio del período, o sea 120° . Estas corrientes contienen terceros armónicos que dan lugar a una forma de onda picuda, análoga a la de las corrientes de excitación.

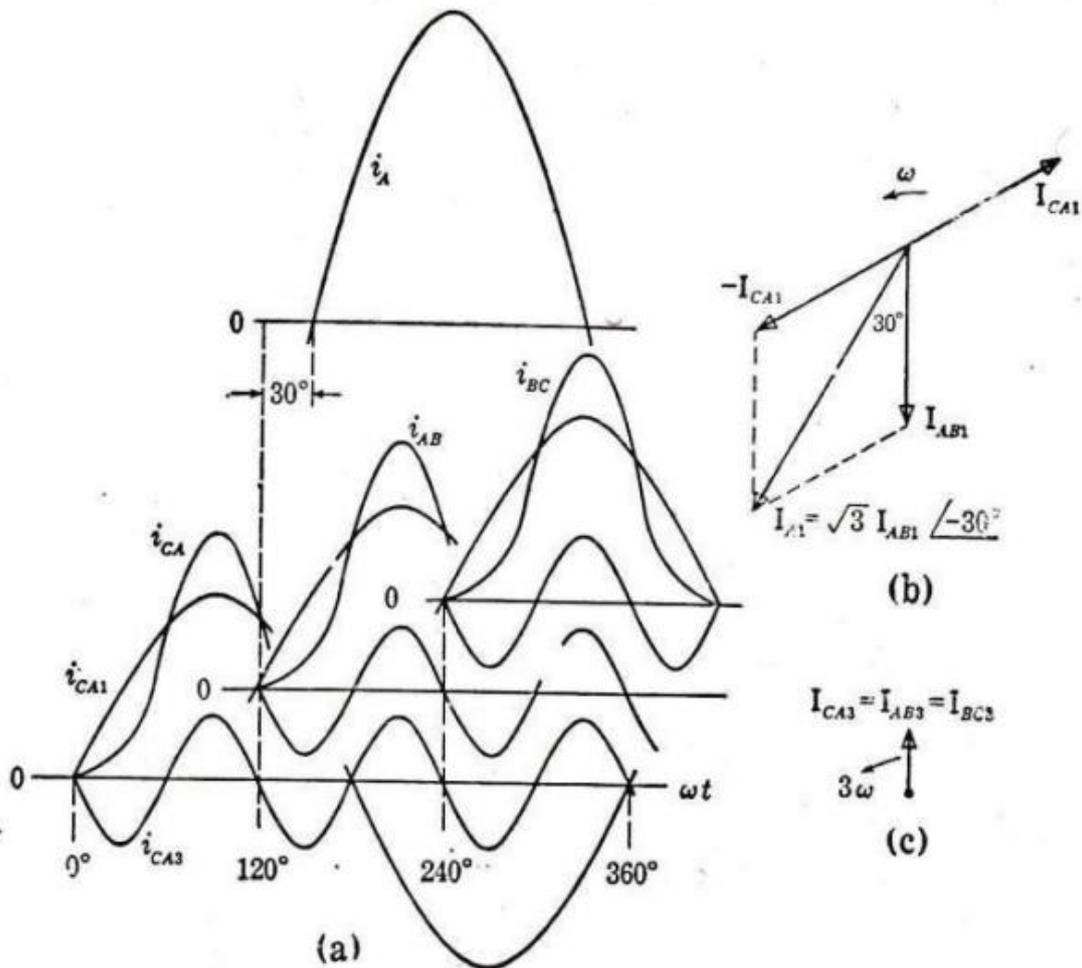


Figura 2.8. Corrientes de excitación con el primario en delta; a) Formas de onda, b) diagrama vectorial y, c) diagrama vectorial de los terceros armónicos.

Como i_{AB} está retrasada respecto a i_{CA} en un tercio del período, el tercer armónico de i_{AB} está retrasado respecto al tercer armónico de i_{CA} en tres tercios de período, o sea un período completo del tercer armónico, según se ve en la figura 2.8a. Los terceros armónicos de las corrientes se encuentran en concordancia de fase, según puede verse también en el diagrama vectorial, figura 2.8c. Si i_{AB} e i_{CA} son las corrientes que circulan por las fases AB y CA de la delta, la corriente i_A en la línea es su diferencia, según indica la ecuación 2.6. La diferencia entre las componentes fundamentales está representada vectorialmente en la figura 2.8b. En cambio, la diferencia entre los terceros armónicos instantáneamente iguales es 0. Por tanto, cuando los transformadores son iguales y las tensiones están equilibradas, no podrían circular por las líneas los terceros armónicos de las corrientes. No obstante, si las tensiones de línea varían sinusoidalmente, las corrientes de excitación de los transformadores

conectados en delta deberán tener terceros armónicos a causa de la no linealidad de las características magnéticas de los núcleos.

Estos terceros armónicos, por ser iguales a cada instante y de igual sentido a lo largo de la delta no hacen más que circular por los primarios de la misma, pero no aparecen en las líneas. Con el mismo razonamiento puede demostrarse que todos los armónicos de orden múltiplo del tercero se comportan en los circuitos trifásicos de igual forma que el tercero. Por ejemplo, el desfase entre los armónicos novenos es de nueve tercios, o sea tres períodos enteros, por lo que dichos armónicos novenos se hallan en concordancia de fase y se comportan como los terceros armónicos.

Así pues, cuando el circuito está perfectamente balanceado, por una delta podrán circular los armónicos terceros, sexto, noveno, etc. de las corrientes sin que circulen por las líneas que alimentan a los transformadores conectados en delta por primario.

Aun cuando tres transformadores de igual diseño pueden tener características casi iguales es imposible alcanzar una identidad exacta en los materiales y conjuntos, y, en consecuencia, por las líneas podrán circular corrientes que tengan un tercer armónico débil y múltiplos del tercer armónico también pequeño, originados por las desigualdades en las características de excitación de los tres transformadores. [15].

2.4 Transformaciones trifásicas con el primario en estrella

Debido a que las características de la conexión en estrella se hayan muy influenciadas por el aislamiento del neutro de los primarios, el estudio a continuación se subdivide en dos partes: primero, que el neutro del primario este aislado o conectado al neutro del generador y segundo, que los secundarios estén conectados en estrella o en delta.

2.4.1 Conexión estrella-estrella con neutro por primario

Teniendo en cuenta, el ejemplo sencillo de un banco estrella-estrella de tres transformadores monofásicos exactamente iguales cuyos secundarios estén en circuito abierto, tal y como se muestra en la figura 2.9a. Aquí, se puede apreciar

que, el neutro de los primarios está conectado al neutro de un generador trifásico conectado en estrellas cuyas tensiones son sinusoidales y están balanceadas.

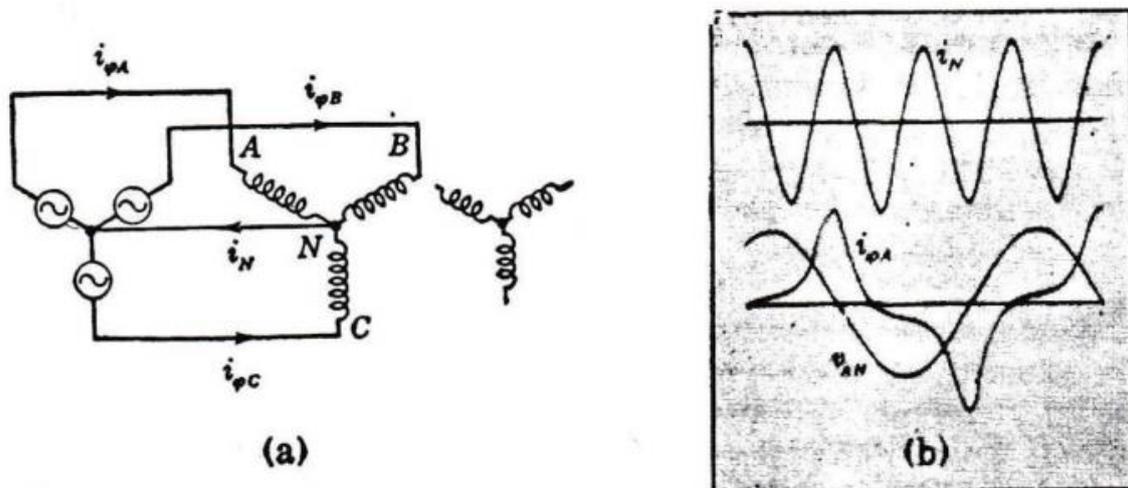


Figura 2.9. Banco estrella-estrella; a) conexiones, b) formas de onda de la tensión de alimentación, de la corriente de excitación y de la corriente por el neutro.

Pueden verse, en la figura 2.9b, las formas de onda de la tensión aplicada a uno de los transformadores, de la corriente de excitación del transformador y de la corriente que circula por el neutro.

Cuando la tensión aplicada es sinusoidal, la corriente de excitación solo contiene armónicos impares, siendo el tercero el más importante de los superiores. Si son iguales los tres transformadores y están balanceadas las tensiones, las corrientes de excitación de las tres fases son iguales pero desfasadas en 120° .

La corriente que circula por el neutro es la suma de las corrientes de excitación de los tres transformadores. Cuando los transformadores son iguales y las tensiones están equilibradas, los armónicos fundamentales de las tres corrientes de excitación son tres ondas sinusoidales de igual amplitud desfasadas 120° , su suma es, pues nula, y, por tanto, por el neutro no circula corriente de frecuencia igual a la fundamental. En cambio, los terceros armónicos de las tres corrientes de excitación están en concordancia de fase, por lo tanto, el tercer armónico de la corriente que circula por el neutro tiene una intensidad triple de la de los terceros armónicos de las corrientes de excitación de los transformadores.

Por tanto, cuando los transformadores son iguales y están equilibrados las tensiones, la corriente que circula por el neutro solo contiene los armónicos

impares de frecuencias múltiples de las del tercero. Los armónicos a partir del noveno suelen ser muy débiles, por lo que la corriente que circula por el neutro suele ser aproximadamente una onda sinusoidal de frecuencia triple cuya intensidad eficaz es aproximadamente igual al triple de la intensidad eficaz del tercer armónico de las corrientes de excitación de los transformadores. En el oscilograma de la figura 2.9b puede verse este hecho. La pequeña componente de frecuencia fundamental de la corriente que circula por el neutro se debe a pequeñas desigualdades entre las características de excitación de los tres transformadores.

La corriente de excitación en un transformador ordinario para sistemas de potencia suele ser un 5% de la intensidad nominal y como el tercer armónico es aproximadamente un 40 % de la corriente de excitación, resulta ser un 2 % de la intensidad nominal. La corriente que circula por el neutro tiene, pues, una intensidad del mismo orden y magnitud que las corrientes de excitación que circulan por los tres hilos de la línea, siendo todas estas intensidades iguales solamente a un pequeño por ciento de la intensidad nominal.

Aun cuando las características de un banco estrella-estrella suelen ser satisfactorias cuando se conecta el neutro de los primarios al neutro del generador, los terceros armónicos de las corrientes de línea resultante de esta conexión pueden ocasionar una interferencia inductiva molesta en los circuitos de comunicaciones paralelos. [15].

2.4.2 Conexión estrella-delta con neutro

Considerando un banco de tres transformadores iguales cuyos primarios estén conectados en estrella y cuyos secundarios estén conectados en serie a punto de ser conectados en delta, tal como se indica en la figura 2.10.

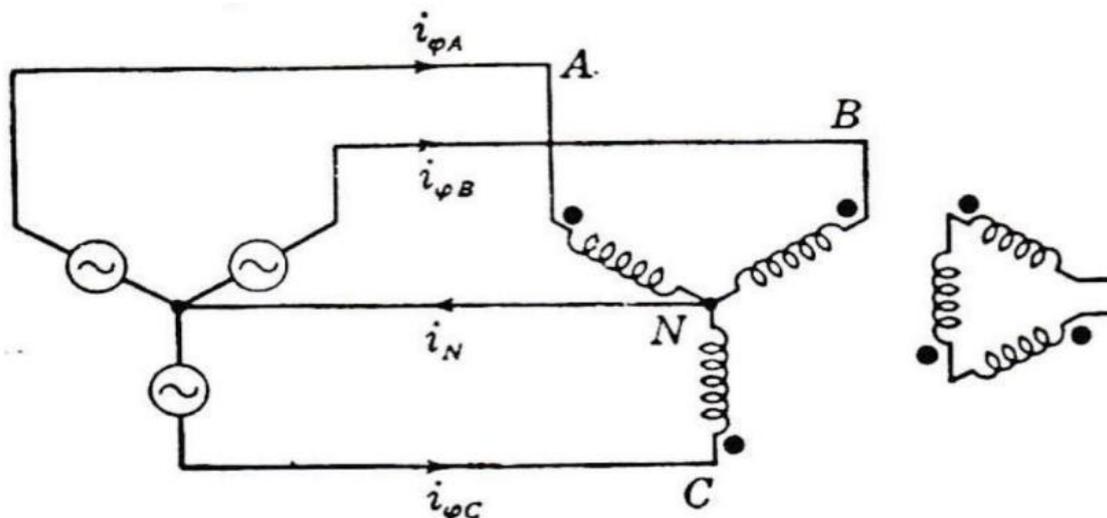


Figura 2.10. Banco de transformadores estrella-delta con la delta abierta en un vértice.

Como se observa, la delta está abierta por un vértice. El neutro de los primarios se conecta al neutro del generador trifásico de tensiones sinusoidales conectado en estrella, en el lado de los primarios el banco se comporta de igual manera que el banco en estrella-estrella visto anteriormente, donde se analizó que las tensiones de los primarios varían sinusoidalmente. Cada transformador recibe su corriente de excitación de las líneas de los primarios y los terceros armónicos de las corrientes de excitación regresan al generador por el neutro, teniendo las formas de onda indicadas por los oscilogramas de la figura 2.9b.

Estos terceros armónicos de las corrientes de excitación crean pequeñas caídas de tensión en las impedancias de dispersión de los transformadores y por tanto las fuerzas electromotrices inducidas por el flujo mutuo contienen terceros armónicos débiles que aparecen como componentes pequeñas de las tensiones de los secundarios de los transformadores, como las fuerzas electromotrices de los terceros armónicos están en fase en los tres transformadores, la tensión en el vértice abierto de la delta contiene un tercer armónico de la fuerza electromotriz inducida en cada secundario con la frecuencia del tercer armónico.

Como los armónicos fundamentales, quinto, séptimo, etc., de las tensiones en los tres secundarios son de igual magnitud y están desfasadas 120° , sus sumas son nulas y por tanto entre los extremos del vértice de la delta no existirán tensiones de estas frecuencias. Si se desprecian los armónicos de orden superior al séptimo, la tensión en el vértice abierto en la delta de secundarios será el triple de la fuerza electromotriz del tercer armónico inducida en cada

secundario, cuando sean iguales los transformadores y las tensiones aplicadas estén equilibradas. Aun cuando esta tensión de la frecuencia del tercer armónico suele ser muy pequeña frente a las tensiones del secundario entre los terminales de cada transformador, cuando se cierra la delta, las fuerzas electromotrices del secundario del tercer armónico tienen un efecto importante sobre los fenómenos de excitación.

Si se cierra la delta, las fuerzas electromotrices de los secundarios del tercer armónico crean una corriente de dicha frecuencia que circula por los secundarios conectados en delta. La acción combinada de las corrientes de excitación de la frecuencia del tercer armónico que circulan por primario y secundario crean las fuerzas magnetomotrices de la frecuencia del tercer armónico necesarias para permitir variaciones casi sinusoidales del flujo en los tres transformadores, como ocurre en la conexión delta-delta mencionada anteriormente, por lo que, al cerrar la delta, se reducen los terceros armónicos de las corrientes de los primarios. [15].

2.4.3 Conexión estrella-delta sin neutro

Si se cierra la delta y se desconecta neutro de la figura 2.10, tendremos el diagrama mostrado en la figura 2.11a, se puede observar cómo será la forma de onda de la tensión respecto al neutro, según la figura 2.11b. De aquí que, la corriente de excitación en uno de los primarios y la corriente de excitación en la delta son las indicadas en los oscilogramas de la figura 2.8b.

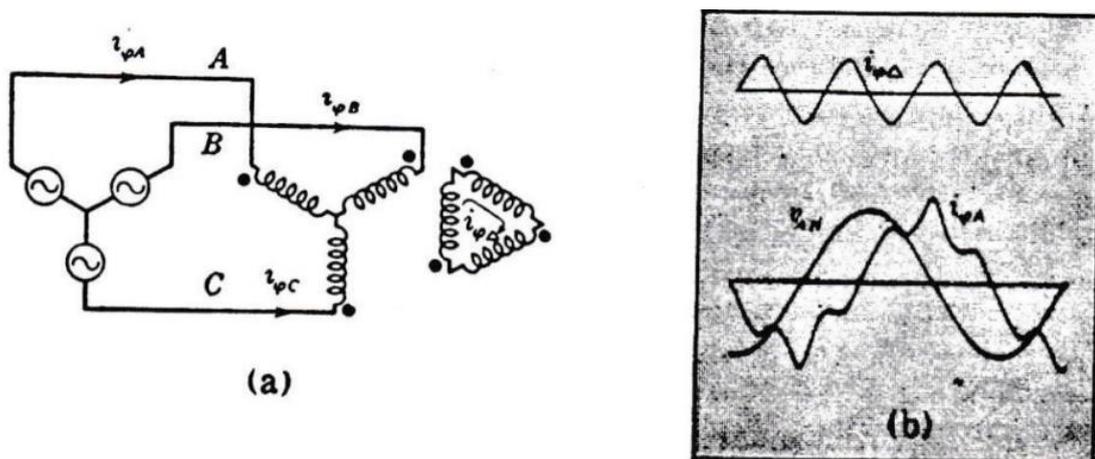


Figura 2.11. Banco estrella-delta sin neutro; a) diagrama de conexión, b) formas de onda de la tensión con respecto al neutro, corriente de excitación por primario y corriente por secundario.

Los terceros armónicos de las corrientes de los primarios ya no pueden existir, por estar interrumpido su camino de retorno por el neutro. Así, pues, la forma de onda de la corriente de excitación de la figura 2.11b es distinta de la forma de onda de la figura 2.9b, siendo su diferencia principal la ausencia de terceros armónicos cuando está aislado el neutro de la estrella.

La conexión en delta cerrada del secundario, en cambio, proporciona un camino para los terceros armónicos de las corrientes y las componentes de la frecuencia del tercer armónico de las fuerzas magnetomotrices necesarias para permitir las variaciones casi sinusoidales de los flujos mutuos que les proporciona la corriente de excitación de la frecuencia del tercer armónico que circula por los secundarios conectados en delta. Como para crear esta corriente de frecuencia del tercer armónico en la delta es necesaria una fuerza electromotriz de dicha frecuencia, el flujo mutuo se ajustará por sí mismo para contener el tercer armónico requerido para generar esta pequeña fuerza electromotriz de secundario de la frecuencia del tercer armónico, por tanto, el flujo mutuo induce un tercer armónico de la tensión respecto al neutro del lado del primario pero, por lo general, este tercer armónico de la tensión es muy pequeño y la forma de onda de la tensión del primario respecto al neutro permanece esencialmente sinusoidal, según se ve en el oscilograma de la figura 2.11b.

2.4.4 Conexión estrella-estrella sin neutro por primario

El estudio que se realiza en este epígrafe es aplicable a un banco de tres transformadores monofásicos conectados en estrella-estrella. Un transformador trifásico del tipo acorazado tiene esencialmente las mismas características que un banco de tres transformadores monofásicos y por tanto el estudio también será aplicable a la conexión estrella-estrella de unidades trifásicas del tipo acorazado. En cambio, el estudio no es aplicable a un transformador trifásico de tipo de núcleo conectado en estrella-estrella ya que sus características de excitación son marcadamente diferentes de las de un banco de tres transformadores monofásicos conectados en estrella-estrella.

Consideremos un banco estrella-estrella de transformadores monofásicos con neutros aislados, excitados por un generador trifásico equilibrado cuyas tensiones tienen forma de onda sinusoidal y supóngase que el banco no está alimentando a ninguna carga. Las conexiones son mostradas en la figura 2.12a.

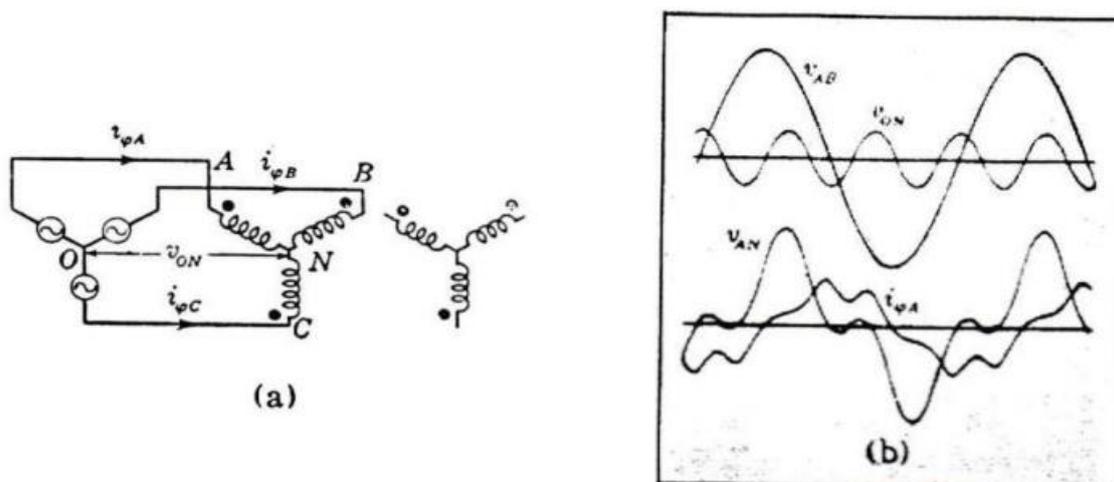


Figura 2.12. Banco de transformadores estrella-estrella; a) Diagrama de conexiones, b) formas de onda de la tensión de línea y de fase, corriente de excitación y la tensión entre el punto neutro del generador y el punto neutro del primario.

Como el neutro de los primarios está aislado al neutro del generador, la suma instantánea de las corrientes de excitación suministradas a un transformador cualquiera a de encontrar su camino de retorno al generador en los primarios de los otros transformadores.

El resultado de esta interdependencia de las corrientes de excitación entre si es que las tensiones en los transformadores están determinadas por sus características de excitación. Como tres transformadores tienen rara vez características de excitación exactamente iguales, aun cuando sea del mismo diseño, las tensiones respecto al neutro suelen estar más o menos desequilibradas, aun cuando estén equilibradas las tensiones entre línea y línea y esta situación no es conveniente.

El neutro aislado tiene también un efecto sobre los armónicos de la corriente de excitación. Para analizar este fenómeno, se supone que los transformadores tienen características de excitación exactamente iguales. En tal caso, las corrientes de excitación suministradas de los transformadores tendrán la misma intensidad y forma de onda, pero estarán desfasadas un tercio de período, por tanto, los terceros armónicos de las tres corrientes de excitación, si existieran, estarían en concordancia de fase y su suma no sería nula.

No obstante, como la suma de las intensidades instantáneas de las corrientes de excitación deben ser siempre nulas a causa del neutro aislado, en las corrientes de excitación no podrá haber armónicos terceros ni de orden múltiplo del tercero y por tanto la forma de onda de la corriente de excitación en cada transformador será diferente de la forma de onda que se requiere para crear una variación sinusoidal del flujo en su núcleo.

El oscilograma de la figura 2.9b es un ejemplo ordinario de forma de onda de las corrientes de excitación en un banco de estrella-estrella sin neutro. Es interesante comparar esta forma de onda con la de la corriente de excitación para flujo variable sinusoidalmente. Cuando la variación del flujo es sinusoidal, la forma de onda de la corriente de excitación presenta un pico muy agudo, correspondiendo al pico de intensidad al instante en que se dobla el ciclo de histéresis en sus extremos. Este pico agudo de las corrientes de excitación es la causa del tercer armónico relativamente intenso de la corriente. Al estar aislado el neutro de la estrella, se reduce la intensidad de pico de la corriente de excitación y la onda presenta frecuentemente una doble cumbre, como en la figura 2.12b. La doble cumbre se debe principalmente a la presencia de quintos armónicos. Es interesante señalar que la doble cumbre de la onda de corriente de excitación indica un lazo del ciclo de histéresis que penetra en el cerca de sus extremos. Al aislar el neutro de los primarios solo se suprimen los armónicos terceros y de frecuencias múltiplos de la de él, todos los restantes armónicos de las tres corrientes de excitación podrán circular, ya que están desfasados en 120° y sus sumas son nulas.

Como para una variación sinusoidal de flujo es necesario un tercer armónico de la corriente de excitación, la supresión de estos terceros armónicos de la corriente de excitación evita que el flujo varíe sinusoidalmente e introduce en los flujos en el núcleo terceros armónicos que inducen terceros armónicos en las tensiones de primario y secundario de cada transformador. A inducciones magnéticas ordinarias en el núcleo, estos terceros armónicos de las tensiones suelen ser de un 30 a un 70 % del armónico fundamental de la tensión respecto al neutro. Luego, aun cuando varían sinusoidalmente las tensiones aplicadas a los terminales de la línea, la forma de onda de las tensiones respecto al neutro no será sinusoidal cuando el neutro del banco este aislado del neutro generador.

Las relaciones entre las tensiones instantáneas de línea y de fase son:

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn} \quad [2.7]$$

$$V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \quad [2.8]$$

$$V_{ca} = V_{cn} - V_{an} \quad [2.9]$$

Como los terceros armónicos de las tres tensiones respecto al neutro y los armónicos de orden múltiplo del tercero están en concordancia de fase y tienen igual valor, las diferencias entre los terceros armónicos de dos tensiones respecto al neutro cualesquiera, tales como las que figuran en los segundos miembros de las ecuaciones (2.7), (2.8) y (2.9), son nulas en condiciones de equilibrio.

En las tensiones respecto al neutro podrá haber armónicos terceros y de ordenes múltiplos del tercero sin que estos armónicos se hallen presentes en las tensiones de línea. Sin embargo, en las tensiones de fase no podrían aparecer otros armónicos, a menos que se hallen presente también en las tensiones de línea. En caso de que estén balanceados las tensiones de línea y varíen sinusoidalmente, las tensiones entre línea y neutro contienen armónicos fundamentales de valor eficaz igual al producto de $1/\sqrt{3}$ o sea 0.577 por el valor eficaz de las tensiones de línea y armónicos terceros y de ordenes múltiplos del tercero, cuyos valores eficaces están determinados por las características magnéticas no lineales del núcleo.

Además, los valores máximos de los armónicos fundamental y tercero de las tensiones respecto al neutro se tienen, aproximadamente, en el mismo instante del ciclo. Por tanto, la forma de onda de las tensiones respecto al neutro presentará un pico agudo, según puede verse en el oscilograma de en la figura 2.12b. La tensión pico en cada transformador es entre un 30 y 70 % mayor que la tensión de pico del armónico y, por tanto, puede ser casi tan grande como el valor pico de las tensiones de línea. Esta condición no es conveniente, ya que se aumentan los esfuerzos a que se somete el aislante debidos a la tensión, a causa de las tensiones de los terceros armónicos. [15].

2.4.5 Conexión estrella-estrella-delta

Los terceros armónicos de las tensiones de fase de un banco de transformadores conectados en estrella-estrella se pueden reducir en gran manera y pueden igualarse las tensiones de los neutros si se añade a cada transformador un tercer devanado, llamado terciario, y se conectan estos devanados en delta, como se indica en la figura 2.13.

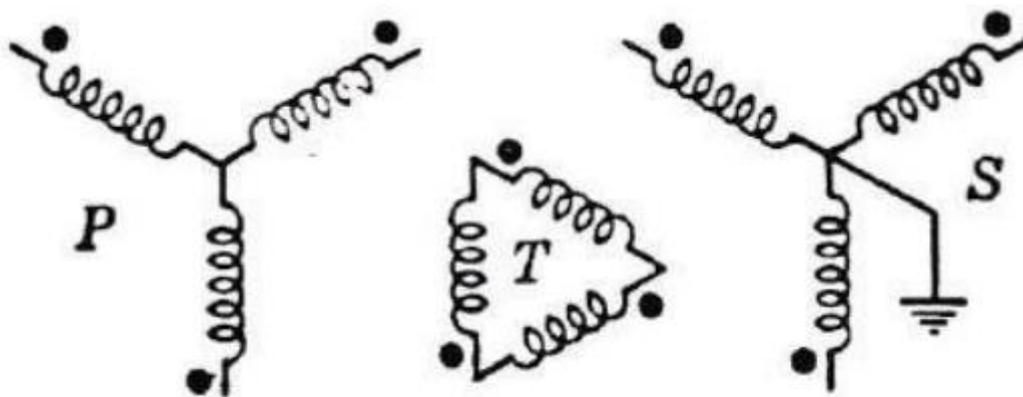


Figura 2.13. Banco de transformadores con conexión estrella-estrella-delta.

Con esta disposición de los circuitos, los terceros armónicos de la corriente de excitación necesarias para mantener las variaciones sinusoidales de los flujos en los núcleos podrán circular por la delta, tal y como se explicó en el epígrafe 2.4.2. La ventaja en este montaje es que los terceros armónicos de la corriente de excitación no necesitan circular por las líneas, donde podrían ocasionar interferencias. Si las características de excitación de los transformadores no fueran exactamente iguales, los devanados terciarios conectados en delta también proporcionan un circuito por el que puede circular una corriente de excitación monofásica, o de secuencia cero, para compensar las desigualdades de las características de excitación y evitar el desequilibrio de las tensiones respecto al neutro que, de otra manera, existiría un banco estrella-estrella con neutros aislados.

El diseño de los devanados terciarios está determinado por las conexiones del sistema y los resultados que se espera obtener de los mismos. Por ejemplo, si están aislados los neutros de los primarios y los secundarios y la delta de devanados terciarios no alimenta a carga alguna, las únicas corrientes que pueden circular por los devanados terciarios son los terceros armónicos o corriente de excitación de secuencia cero y en consecuencia los devanados pueden ser relativamente finos. Sin embargo, el neutro de la estrella de alta tensión suele estar puesto a tierra, y a veces lo están ambos neutros. En estas condiciones las averías de puesta a tierra de las líneas de alta tensión pueden inducir corrientes muy intensas en los devanados terciarios y estos deberán poder soportar el calentamiento y las fuerzas mecánicas ocasionadas por ellas. A menudo, la delta de devanados terciarios alimenta una carga; por ejemplo, circuitos auxiliares de una subcentral, o condensadores estáticos o sincrónicos para la regulación del factor de potencia y de la tensión. En estas condiciones,

la delta de devanados terciarios debe poder soportar los efectos de cortocircuitos entre sus propios terminales. [15].

2.5 Conclusiones parciales del capítulo

Los puntos importantes puestos de manifiesto en el estudio anterior de los fenómenos debidos a los armónicos en circuitos trifásicos equilibrados pueden resumirse de la manera siguiente:

- Los terceros armónicos de corrientes y tensiones en los circuitos trifásicos equilibrados son iguales y están en concordancia de fase (es decir, son cantidades de secuencia cero).
- Por estar en concordancia de fase, los terceros armónicos de las corrientes no pueden circular por las líneas de un sistema trifásico equilibrado, a menos que se les proporcione un camino de retorno a través de una conexión neutra. No obstante, por los circuitos conectados en delta pueden circular corrientes de la frecuencia del tercer armónico que no estén presentes en las líneas conectadas a la delta.
- Por ser nula la suma instantánea de las tensiones de línea de un sistema trifásico, en las tensiones de línea de un sistema trifásico equilibrado no podrán existir terceros armónicos, ya que estarían en concordancia de fase y por tanto su suma no sería nula. En cambio, pueden existir terceros armónicos en las tensiones de la estrella respecto al neutro, sin que estén presentes en las tensiones de línea.
- Las características magnéticas del hierro existen para que el flujo varíe sinusoidalmente y la corriente de excitación de un transformador contenga un tercer armónico cuya intensidad es normalmente de un 40% de la del armónico fundamental de la corriente de excitación.

Las aplicaciones de estos principios generales a las conexiones trifásicas de transformadores monofásicos conducen a las conclusiones siguientes:

- Para que las tensiones de fase de los transformadores sean sinusoidales, deberá permitirse la circulación de los terceros armónicos de las corrientes, o por los devanados conectados en delta o a través de una conexión neutra.
- Aun cuando las características de la conexión estrella-estrella con neutro sea satisfactoria en lo que concierne al comportamiento del banco, la necesidad de un cuarto hilo es un inconveniente y la presencia de terceros armónicos

de las corrientes de excitación en las líneas trifásicas pueden ocasionar interferencia inductiva perjudicial.

- Si se suprimen los terceros armónicos de las corrientes de excitación, como ocurre en la conexión estrella-estrella sin neutros las tensiones de fase pueden desequilibrarse y contener terceros armónicos relativamente intensos. En determinadas condiciones, estos terceros armónicos de las tensiones respecto al neutro pueden aumentar mucho a causa de los fenómenos de resonancia. Por ello la conexión estrella-estrella de transformadores monofásicos deberá utilizarse con precaución.

Capítulo 3. Simulación de las principales características de las conexiones trifásicas

3.1 Introducción

Para la simulación de las principales características de las diferentes conexiones trifásicas se utilizó el programa MatLab en su versión R2014a. Se empleó el simulador Simulink y en especial su paquete de funciones Power System Blockset. Se utilizaron diferentes modelos de transformadores trifásicos y monofásicos saturable sin carga.

La simulación de corrientes de energización de transformadores en una tarea muy complicada, no tanto por el hecho de trabajar sobre los modelos, sino por la información necesaria para realizar una buena simulación. Para ellos se necesita información sobre: flujo residual, datos confiables de pruebas de vacío y cortocircuito del transformador, proyección de la curva de saturación por encima de la tensión al 110%, curva de histéresis, tipo de núcleo del transformador y los tiempos de cierre de los interruptores, además, considerar que las fases no cierran al mismo tiempo, se debe realizar un cierre asimétrico, es decir, dos fases cierran juntas y un ciclo después, justo en el pico de tensión, cierra la tercera fase.

La simulación para obtener las formas de ondas de la corriente de excitación, corriente de magnetización, flujo y tensión de bancos de transformadores trifásicos conformado por unidades monofásicas es extremadamente complicada en el Simulink de Matlab. Los modelos de transformadores monofásicos no permiten este tipo de simulación, por lo que en el presente trabajo solo se trabaja con los modelos de transformadores trifásicos que trae la librería *Power system* de Matlab.

3.2 Simulación de un transformador monofásico

Para la simulación de un transformador monofásico y poder observar las formas de ondas de la corriente de magnetización, de la corriente de excitación, flujo y corriente por el devanado primario se conformó en el Simulink de matlab el circuito que se muestra en la figura 3.1.

La forma de onda de la corriente que consume el transformador se muestra en la figura 3.2. Como puede observarse, esta onda está completamente

distorsionada, debido a la no linealidad existente entre la corriente de magnetización y el flujo magnético, aspectos explicados en el capítulo anterior.

En la figura 3.3 se muestra la forma de onda del flujo que circula por el núcleo del transformador. Se observa que este es sinusoidal, lo cual concuerda con lo expuesto en el capítulo anterior.

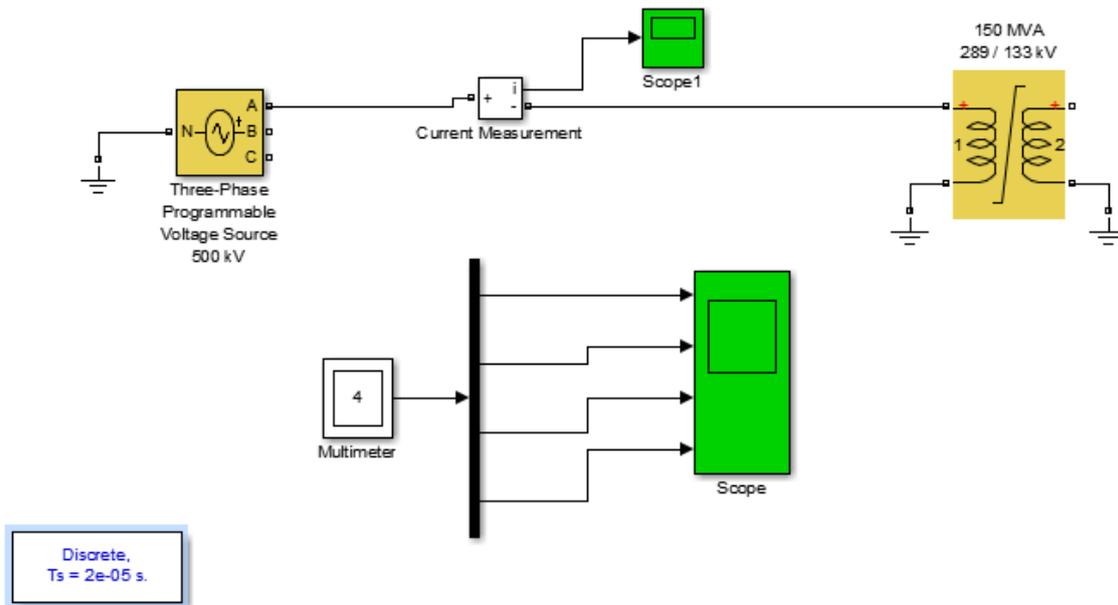


Figura 3.1. Circuito para la simulación de un transformador monofásico.

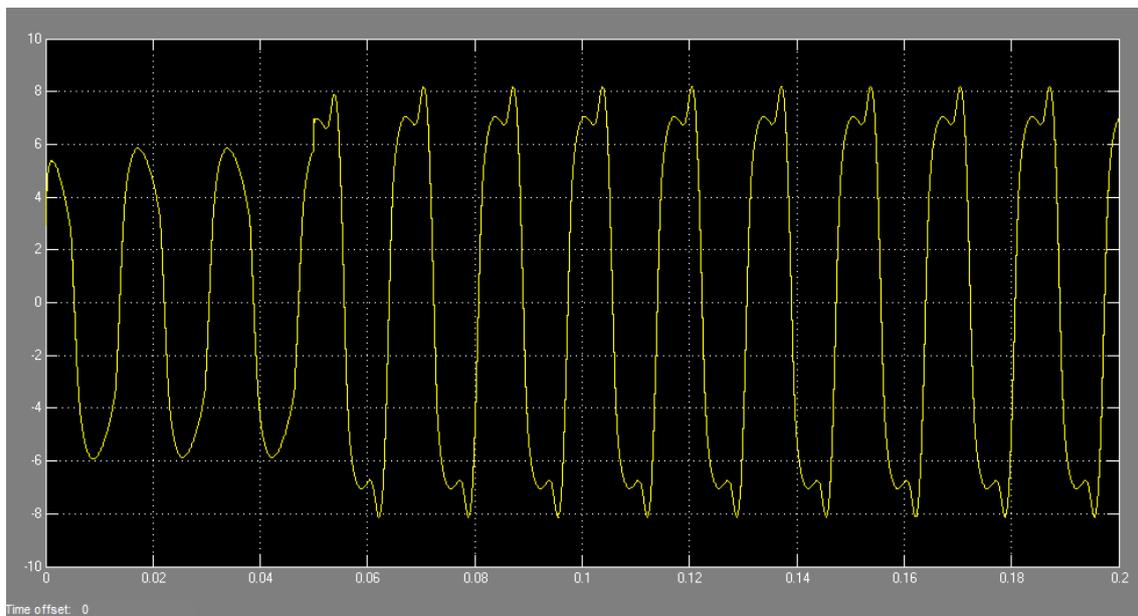


Figura 3.2. Forma de onda de la corriente consumida por el transformador.

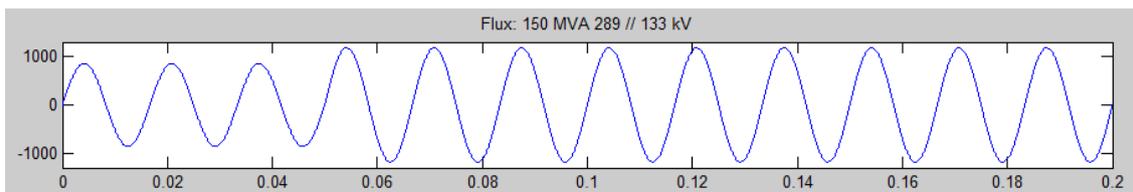


Figura 3.3. Forma de onda del flujo.

En la figura 3.4 se muestra la forma de onda de la corriente de magnetización, la cual, como ya se explicó, está distorsionada.

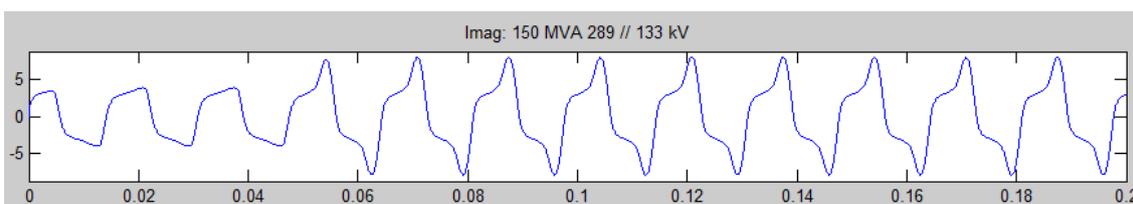


Figura 3.4. Forma de onda de la corriente de magnetización.

En la figura 3.5 se muestra la forma de onda de la corriente de excitación, la cual, según el circuito equivalente exacto es la suma de la corriente de magnetización y la de pérdidas de núcleo. Esta corriente también presenta una forma de onda no sinusoidal.

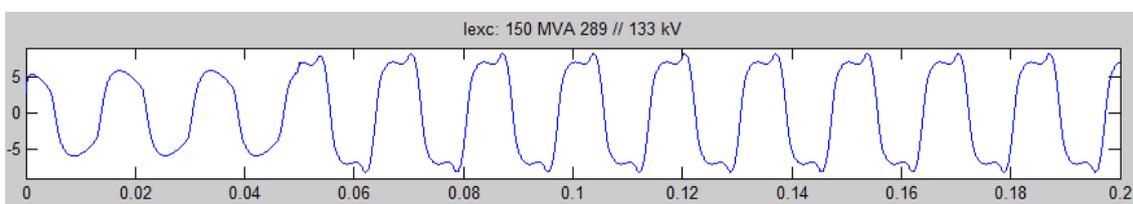


Figura 3.5. Forma de onda de la corriente de excitación.

3.2 Simulación de la conexión delta-delta

En la figura 3.6 se muestra el circuito empleado para la simulación de la conexión delta-delta. Para esta conexión las corrientes de fase y de líneas son no sinusoidales.

La figura 3.7 muestra la forma de onda de la corriente de fase obtenida de la simulación. Como puede apreciarse, esta es no sinusoidal y aunque su forma no se parece a la real de esta conexión, sí puede apreciarse que esta es bien distorsionada.

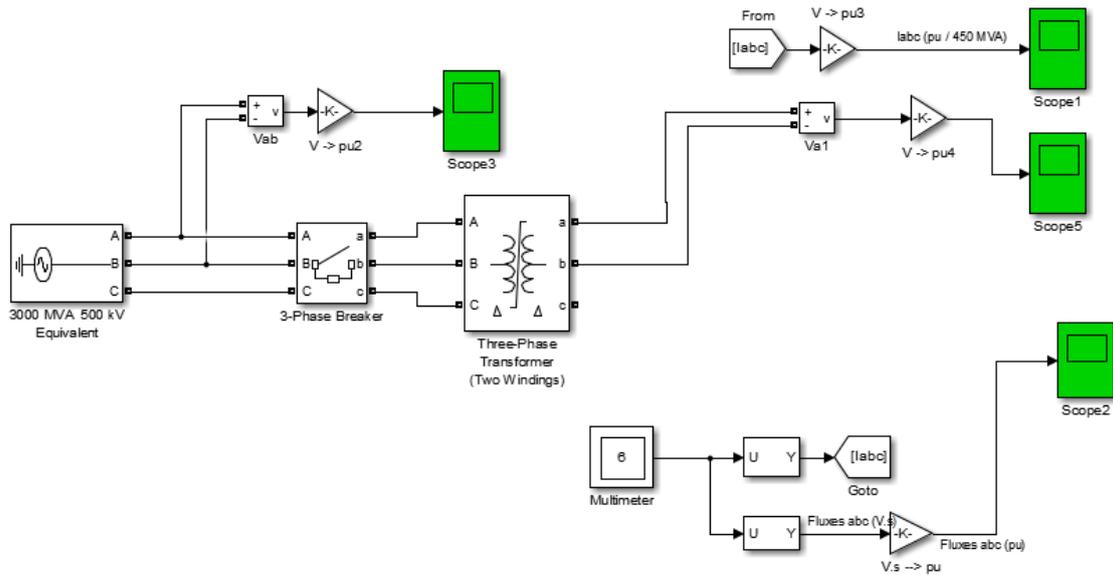


Figura 3.6. Circuito para la simulación de la conexión delta-delta.

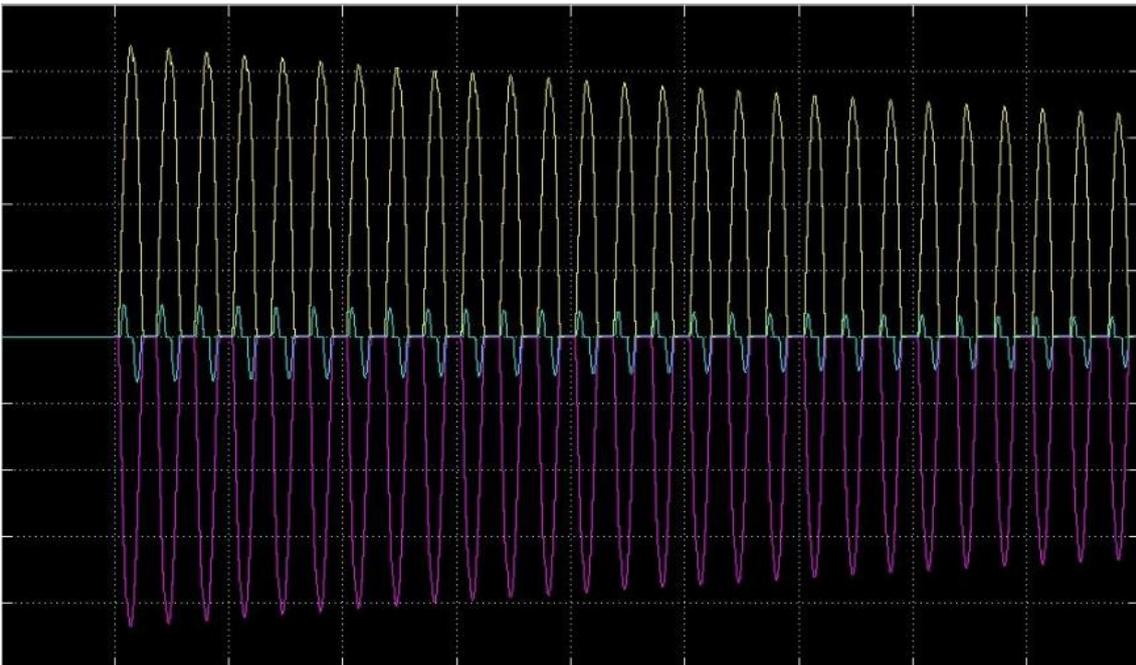


Figura 3.7. Forma de onda de la corriente de fase de la conexión delta-delta.

En la figura 3.8 se muestra la forma de onda de la tensión por primario. Como esta es impuesta por la fuente de alimentación tiene entonces una forma de onda sinusoidal. Al ser la corriente de excitación distorsionada y la tensión de alimentación sinusoidal, el flujo magnético de las tres fases tiene una forma de onda sinusoidal, tal y como se muestra en la figura 3.9. Por tanto, la tensión de línea por secundario es también sinusoidal, como se muestra en la figura 2.10.

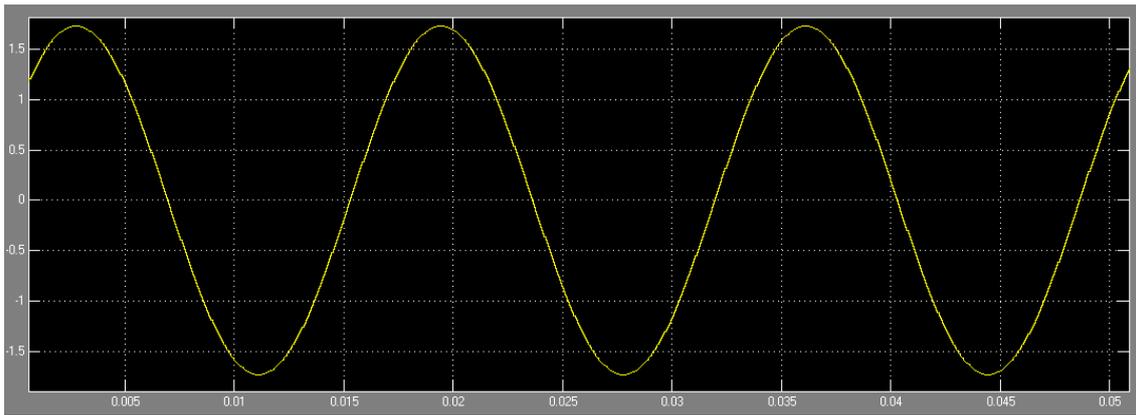


Figura 3.8. Forma de onda de la tensión de alimentación.

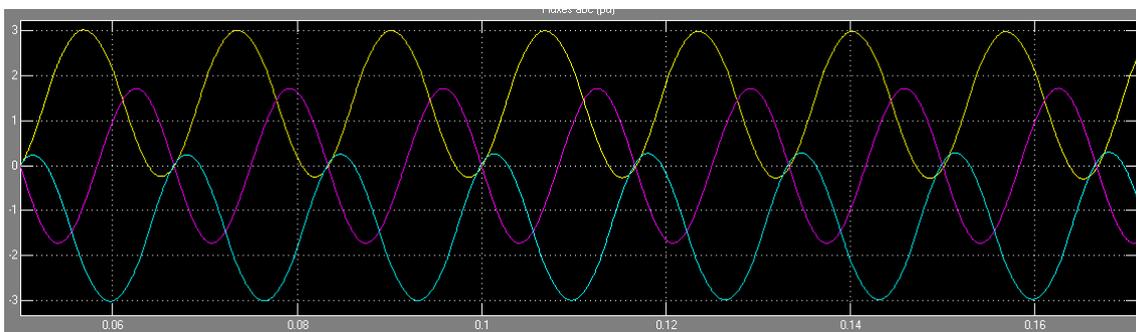


Figura 3.9. Forma de onda de los flujos de las tres fases.

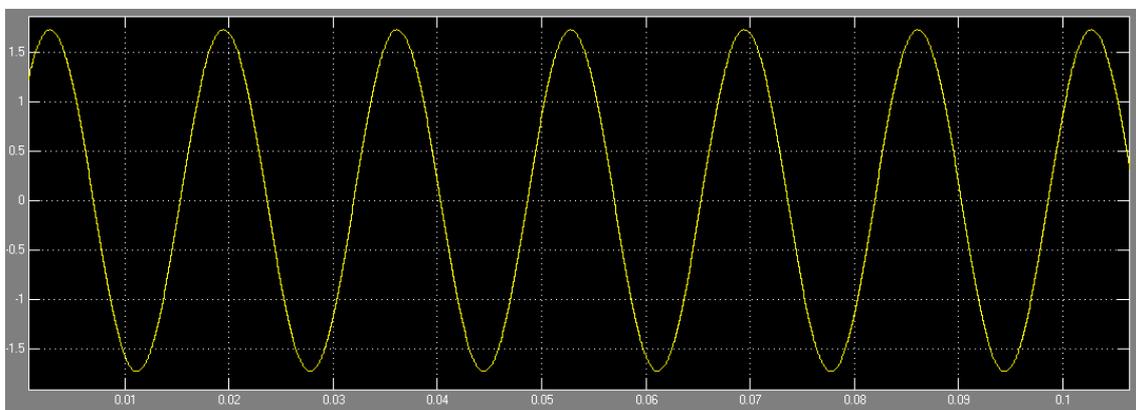


Figura 3.10. Forma de onda de la tensión por secundario.

3.3 Simulación de la conexión estrella-estrella

En la figura 3.11 se muestra el circuito utilizado para la modelación en Simulink de la conexión estrella-estrella. Como no existe retorno para los terceros armónicos de las corrientes de excitación los flujos magnéticos de las tres fases presentarán una forma de onda no sinusoidal, como se muestra en la figura 3.12. Como los flujos tienen formas de onda distorsionadas, las tensiones de fase por

secundario presentarán también una distorsión en su forma de onda, figura 3.13, no sucediendo lo mismo con las tensiones de línea, figura 3.14.

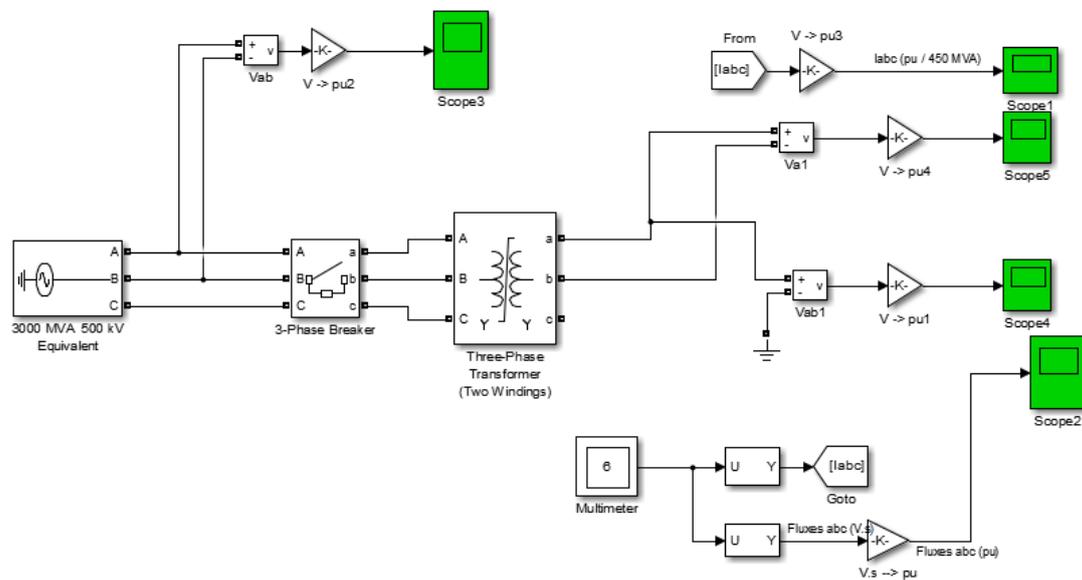


Figura 3.11. Circuito para la simulación de la conexión estrella-estrella.

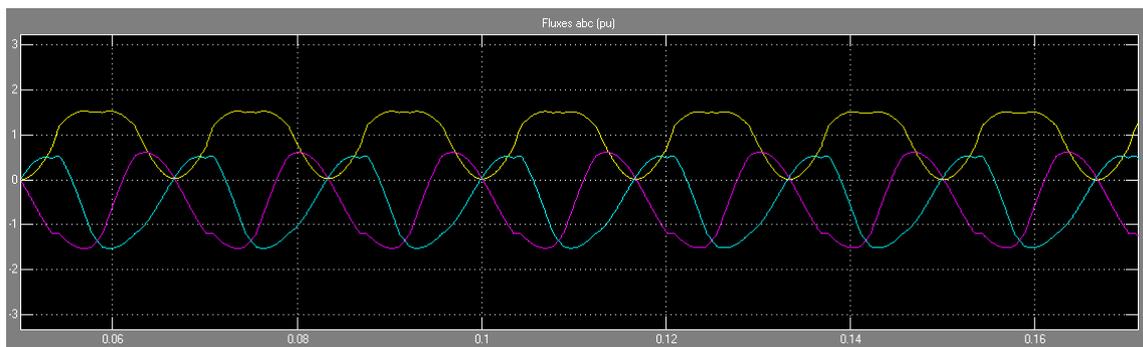


Figura 3.12. Formas de onda de los flujos de la conexión estrella-estrella.

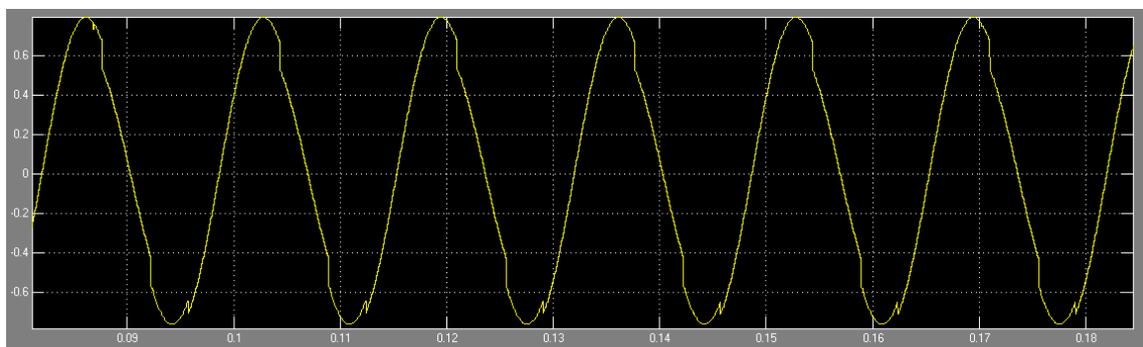


Figura 3.13. Forma de onda de la tensión de fase por secundario de la conexión estrella-estrella.

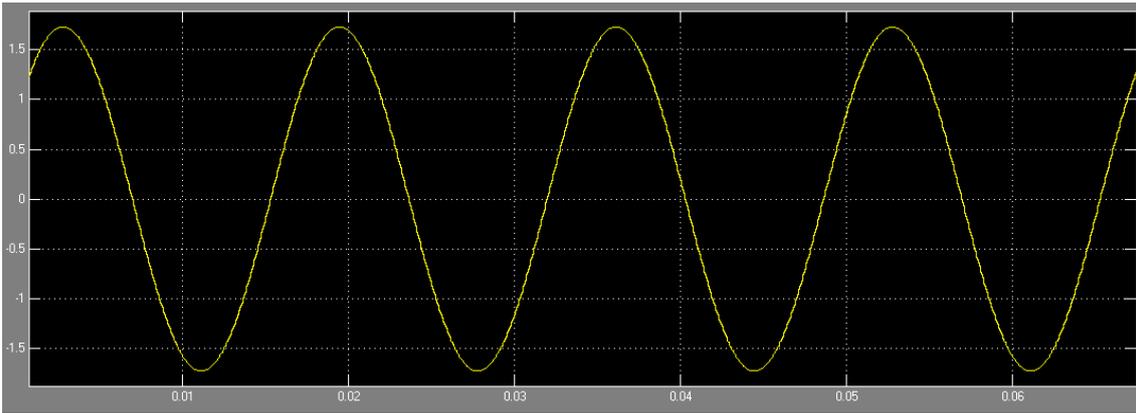


Figura 3.14. Forma de onda de la tensión de línea por secundario de la conexión estrella-estrella.

3.4 Simulación de la conexión estrella-estrella aterrada

La figura 3.15 muestra el circuito confeccionado para la simulación de la conexión estrella-estrella aterrada. Para este caso, a diferencia del epígrafe anterior, existe un camino de retorno que permite la circulación de los terceros armónicos de las corrientes de excitación, por lo que estas tendrán una forma de onda no sinusoidal, figura 3.16. El flujo magnético de las tres fases es sinusoidal, figura 3.17. Las tensiones de fase por secundario serán también sinusoidales, como se muestra en la figura 3.18.

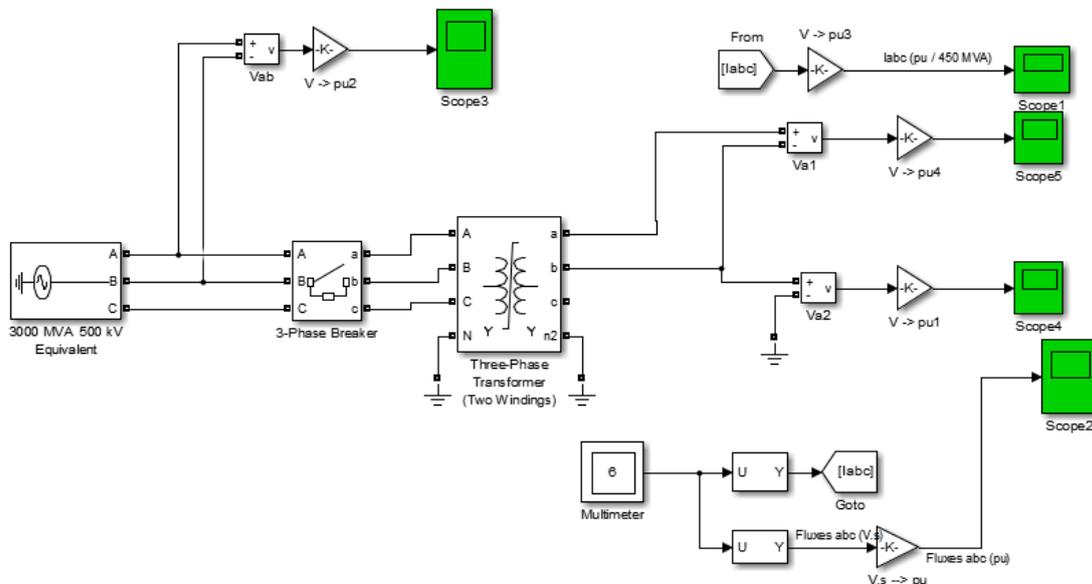


Figura 3.15. Circuito para la simulación de la conexión estrella-estrella aterrada.

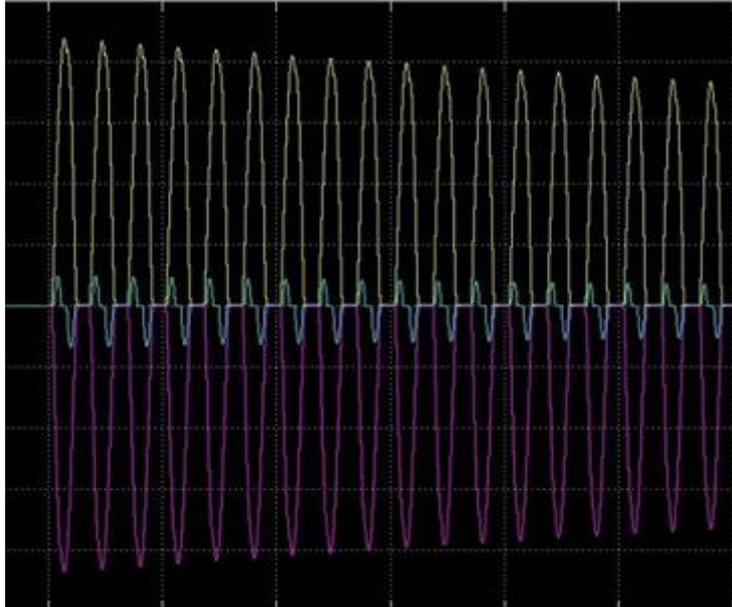


Figura 3.16. Forma de onda de la corriente de excitación para la conexión estrella-estrella aterrada.

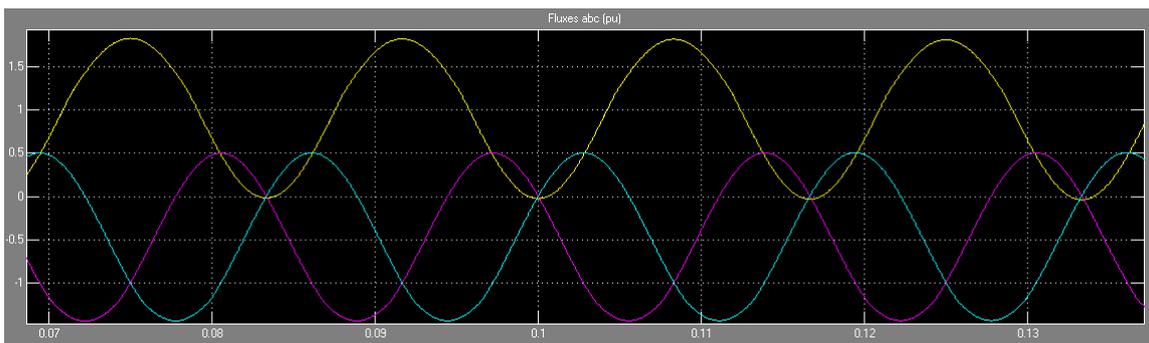


Figura 3.17. Formas de onda de los flujos de la conexión estrella estrella aterrada.

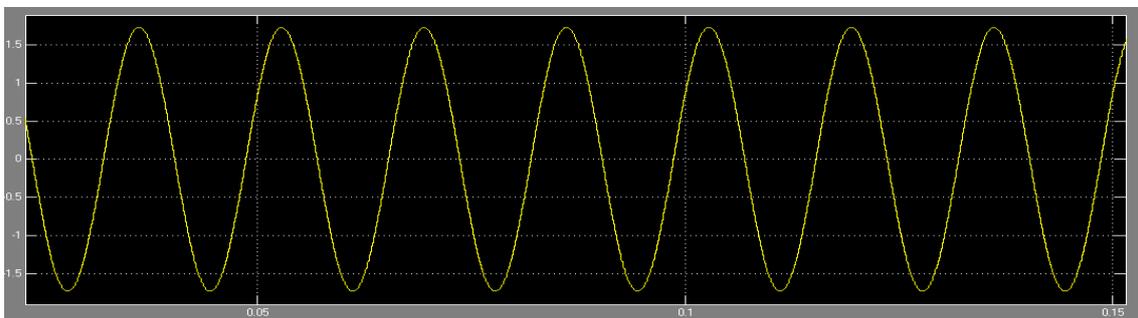


Figura 3.18. Forma de onda de la tensión de fase por secundario de la conexión estrella-estrella aterrada.

3.5 Simulación de la conexión estrella-delta

En la figura 3.19 se muestra el circuito utilizado para la simulación de la conexión estrella-delta. Para este caso, las corrientes de excitación de las tres fases están distorsionadas, como se muestra en la figura 3.20. Los flujos magnéticos establecidos en el núcleo por las tres fases son sinusoidales, como se muestra en la figura 3.21. Por tanto, la tensión por secundario es sinusoidal, como se muestra en la figura 3.22.

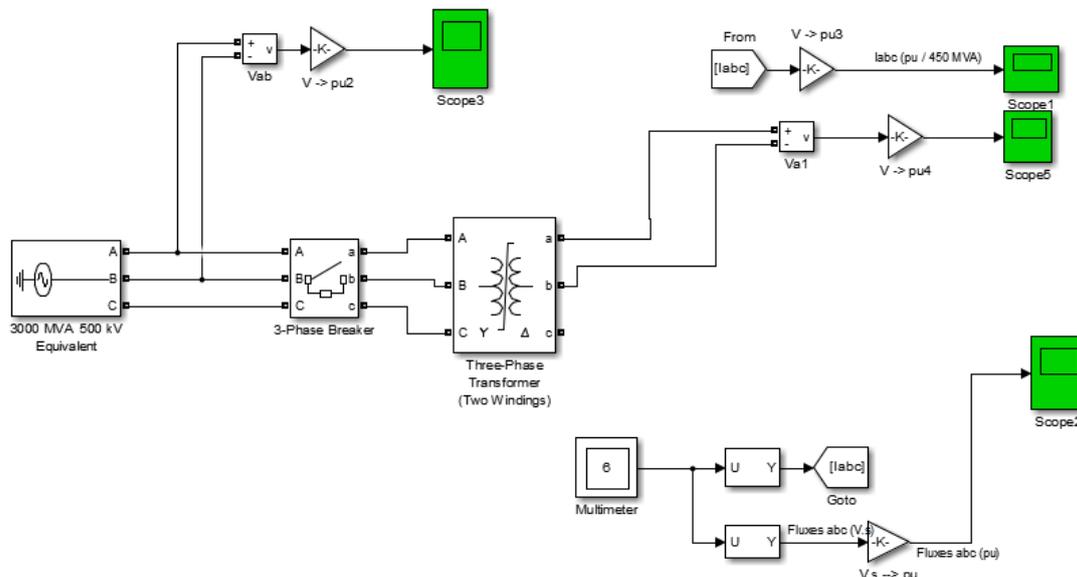


Figura 3.19. Circuito para la simulación de la conexión estrella-delta.

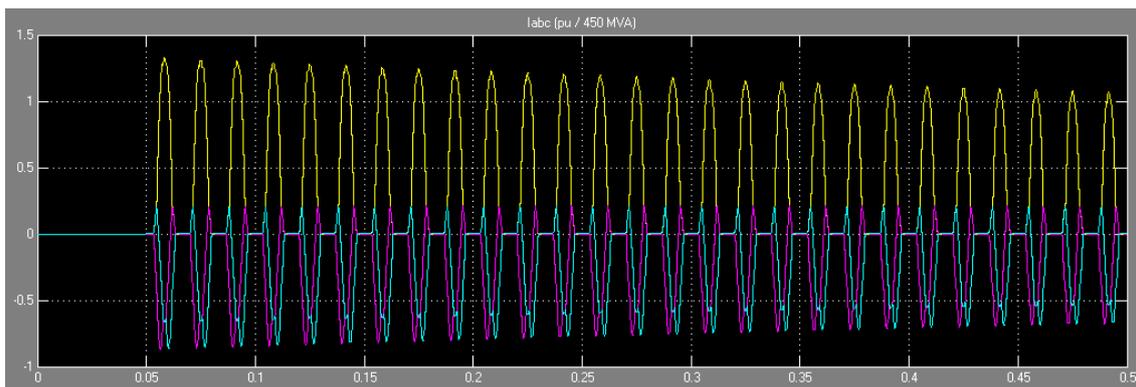


Figura 3.20. Formas de onda de las corrientes de excitación para la conexión estrella-delta.

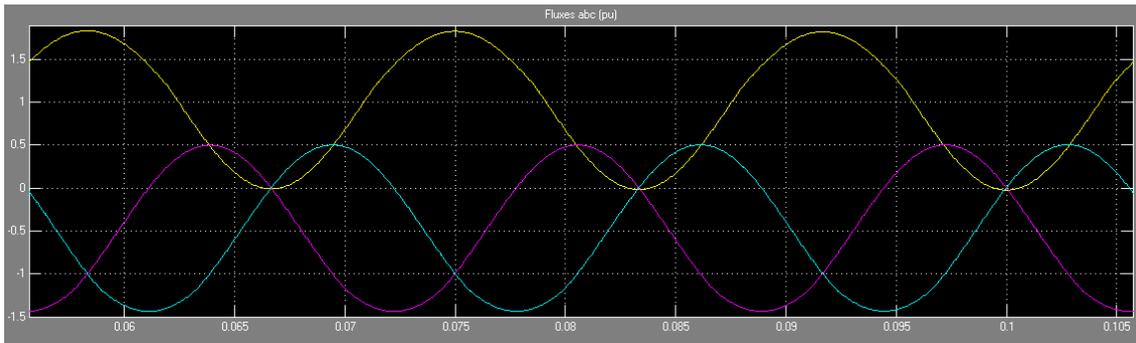


Figura 3.21. Forma de onda de los flujos magnéticos de las tres fases.

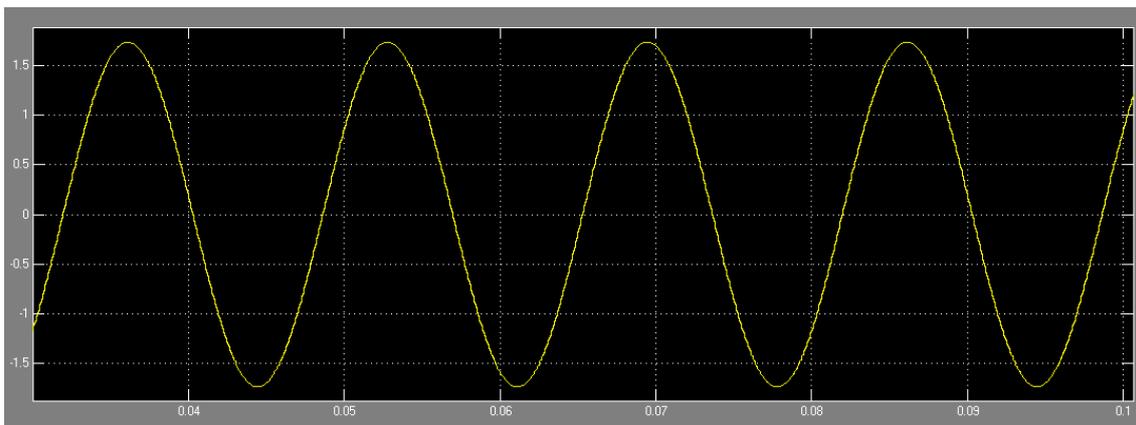


Figura 3.22. Forma de onda de la tensión por secundario.

3.6 Simulación de la conexión delta-estrella aterrada

En la figura 3.23 se muestra el circuito confeccionado para la simulación de la conexión delta-estrella aterrada y poder obtener las formas de onda. Como se enunció en el capítulo anterior, al existir una delta por primario, los terceros armónicos de las corrientes de excitación pueden circular, propiciando esto una forma de onda distorsionada para la corriente de excitación, como se muestra en la figura 3.24. Esto permite que los flujos magnéticos establecidos por las tres fases sean sinusoidales, figura 3.25, al igual que con las tensiones de fase y de línea por secundario, figuras 3.26 y 3.27 respectivamente.

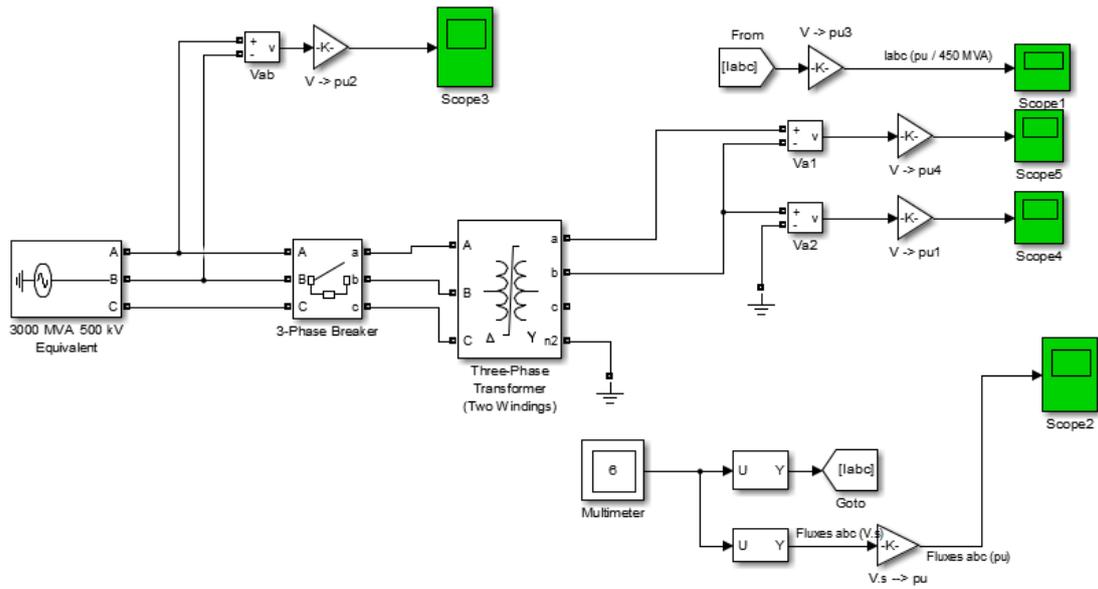


Figura 3.23 Circuito para la simulación de la conexión delta-estrella aterrada.

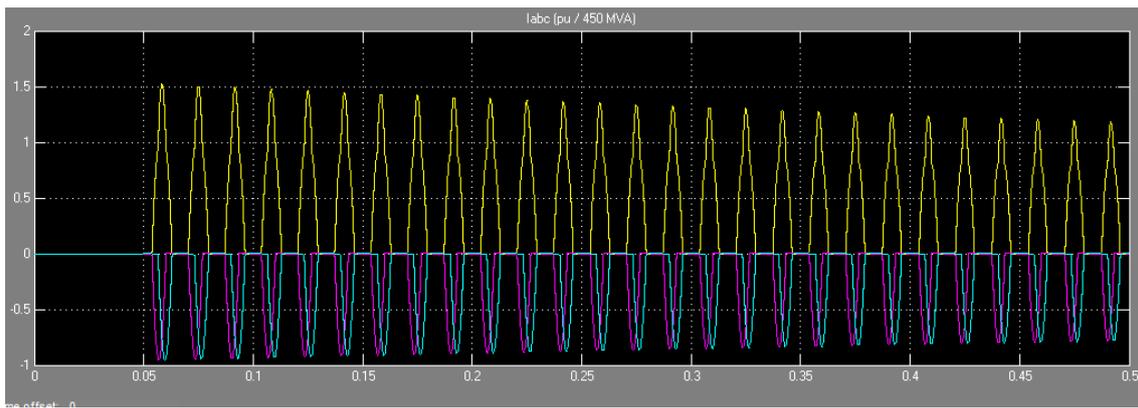


Figura 3.24. Formas de ondas de las corrientes de excitación.

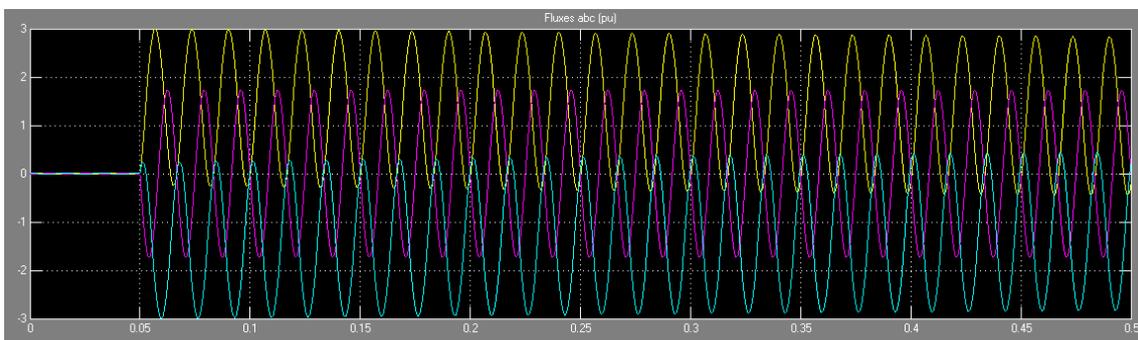


Figura 3.25. Formas de onda de los flujos magnéticos establecidos por las tres fases.

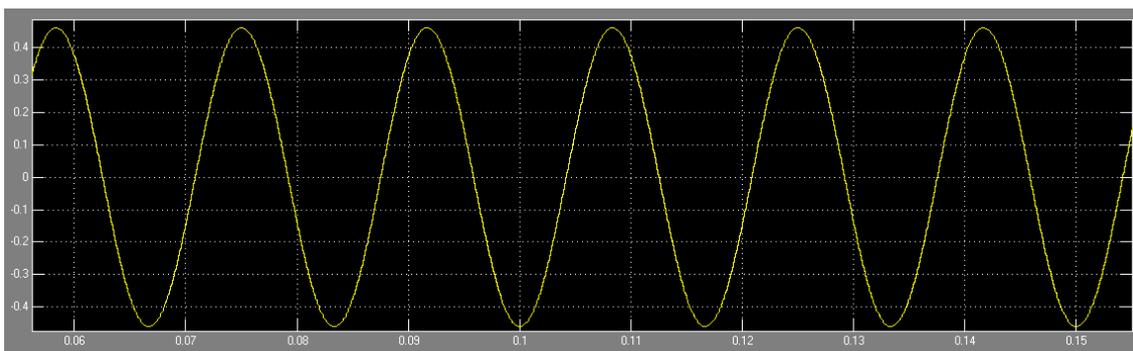


Figura 3.26. Forma de onda de la tensión de fase por secundario.

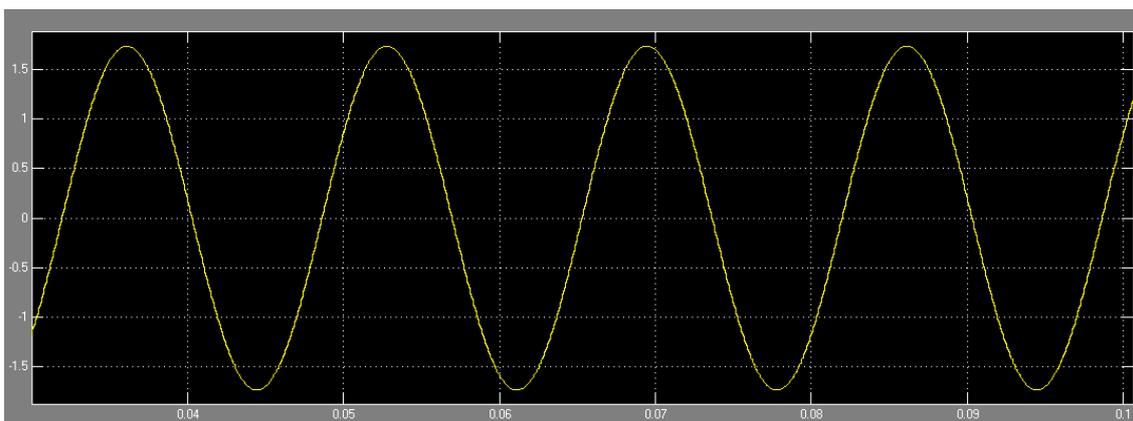


Figura 3.27. Forma de onda de la tensión de línea por secundario.

3.7 Simulación de la conexión estrella-estrella con devanado terciario

La conexión que más problemas presenta en la forma de onda de salida de la tensión por secundario es la estrella-estrella, pues sus tensiones de líneas son sinusoidales según se detalló en el capítulo anterior y se simuló en el epígrafe 3.3. la figura 3.13 muestra que la forma de onda de la tensión de fase por secundario es no sinusoidal. Una forma eficaz de solucionar este problema es colocar un devanado terciario en delta, aspecto explicado en el capítulo anterior.

La figura 3.28 muestra el circuito para la simulación de la conexión estrella-estrella con devanado terciario conectado en delta.

La figura 3.29 muestra, en la parte superior la forma de onda de la tensión de fase por primario, y en la parte inferior la forma de onda de la tensión de línea por primario, ambas tienen una forma de onda sinusoidal. Las corrientes de excitación presentan una forma de onda no sinusoidal, figura 3.30.

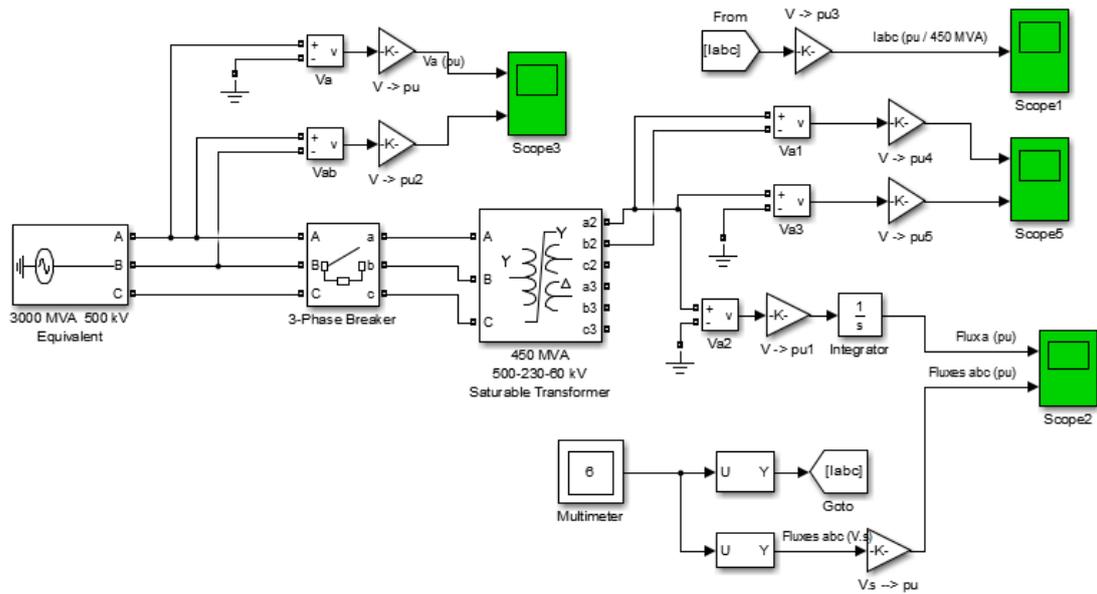


Figura 3.28. circuito de la conexión estrella-estrella con devanado terciario en delta.

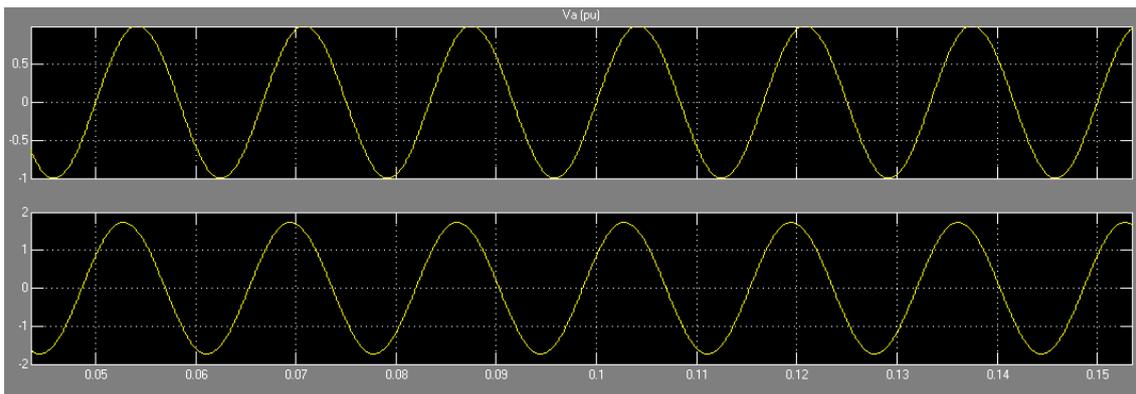


Figura 3.29. Formas de onda de las tensiones de fase y línea por primario.

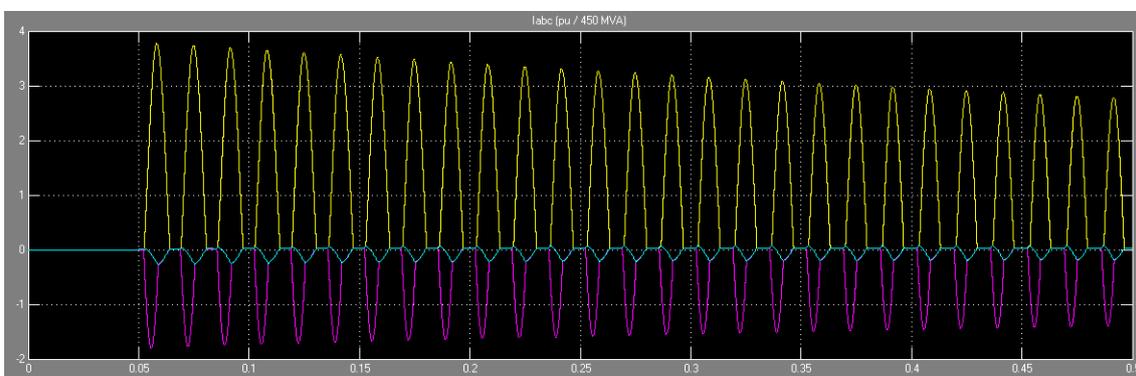


Figura 3.30. Formas de onda de las corrientes de excitación de cada una de las fases.

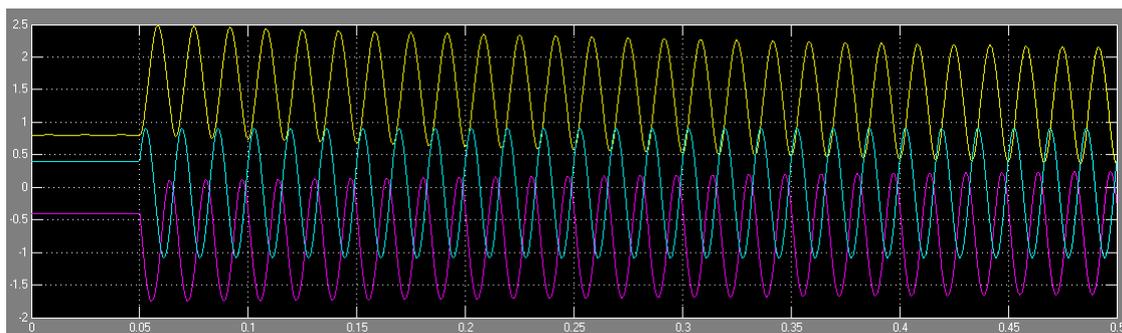


Figura 3.31. Formas de onda de los flujos de las tres fases.

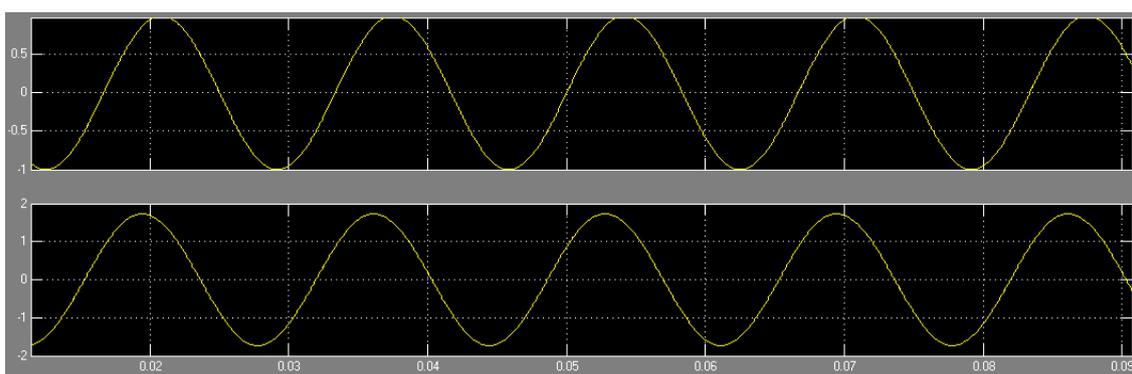


Figura 3.32. Forma de onda de las tensiones de fase y línea por secundario.

Los flujos establecidos en el núcleo del transformador por las tres fases son sinusoidales, como se muestra en la figura 3.31. Las tensiones de fase y de línea por secundario son sinusoidales también, como se muestra en la figura 3.32.

3.8 Simulación de grupos de conexiones

Los modelos de transformadores trifásicos que trae la librería Power System del Simulink del Matlab permiten establecer diferentes grupos de conexiones para los transformadores trifásicos. Abriendo la ventana de diálogos que permite establecer los parámetros y la configuración del transformador trifásico, figura 3.33, podemos establecer las conexiones siguientes tanto para el devanado primario como para el secundario: estrella, estrella con neutro, estrella aterrada y delta con diferentes sentidos de enrollado (D1 y D11). Combinando estos tipos de conexiones podemos obtener diferentes tipos de grupos de conexiones, para comprobarlo se midió el desfase existente entre las tensiones de línea por primario y secundario.

La figura 3.34 muestra el circuito para la simulación del grupo de conexión Y-y0, puede apreciarse que el desfase entre la tensión de línea por primario y secundario es practicamente cero.

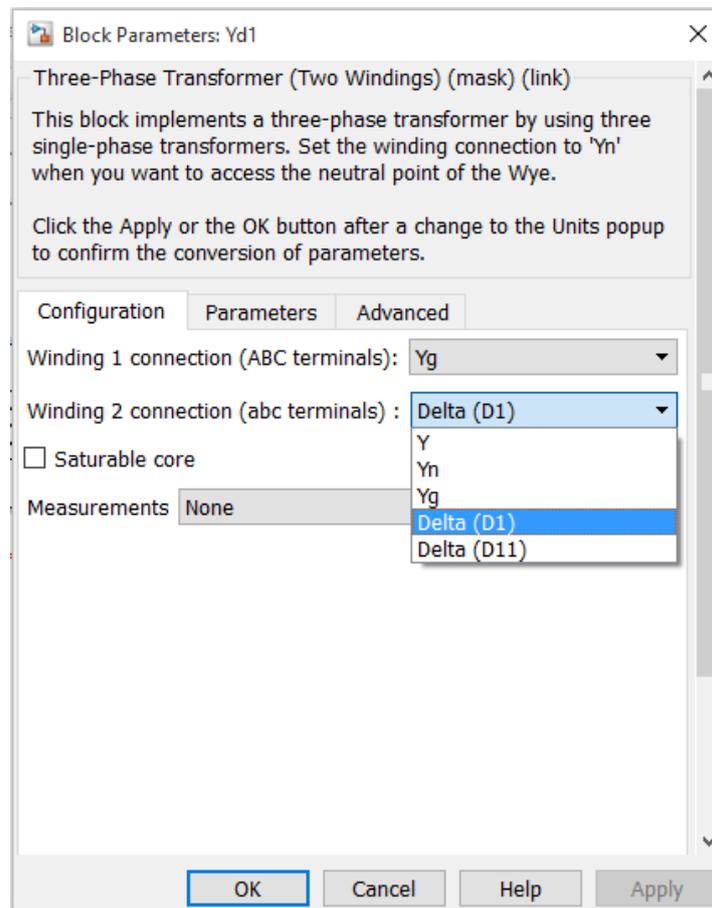


Figura 3.33. Ventana para la configuración de los parámetros del transformador trifásico.

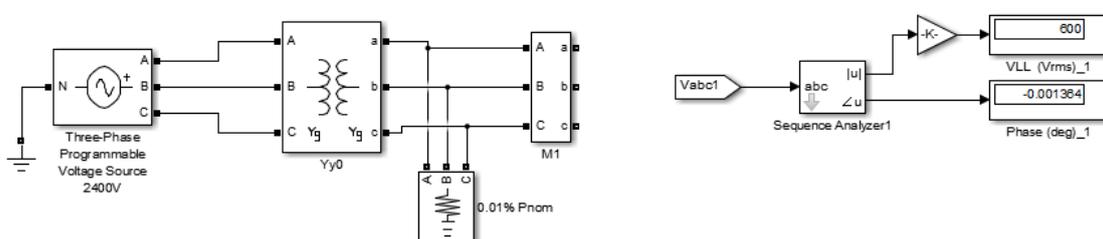


Figura 3.34. Circuito para la simulación del grupo de conexión Y-y0.

La figura 3.35 muestra el circuito para la simulación de la conexión D-d10. Para el devanado primario se estableció la configuración D1 y para el secundario D11. Como se puede apreciar la tensión de línea por secundario está adelantado 60° con respecto a la tensión de línea por primario. Si colocamos ambos fasores

en una esfera y hacemos como si fuese un reloj, tal como se explicó en el capítulo uno, obtendríamos la hora 10.

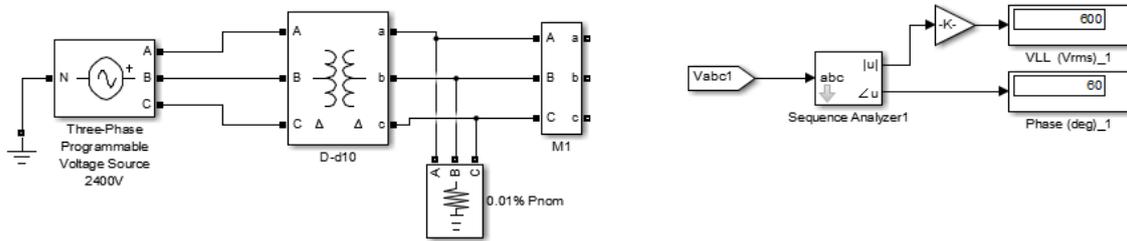


Figura 3.35. Circuito para la simulación de la conexión D-d10.

Si se intercambian la configuración de ambos devanados, o sea, el devanado primario con conexión D11 y el secundario con conexión D1, el resultado sería que la tensión por secundario se atrasaría 60° a la tensión por primario, obteniendo entonces la conexión D-d2, como se muestra en la figura 3.36.

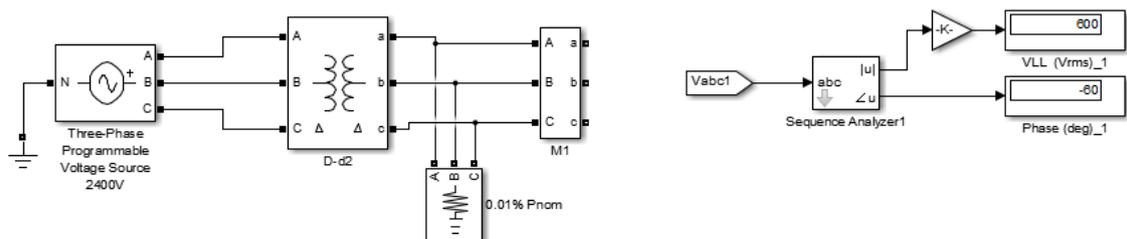


Figura 3.36. Circuito para la simulación de la conexión D-d2.

Si establecemos el devanado primario con conexión estrella aterrada, Yg, y el secundario en delta D1, como se muestra en la figura 3.37, La tensión de línea por secundario se atrasa 30° con respecto a la tensión por primario, por lo que tendríamos la conexión Y-d1.

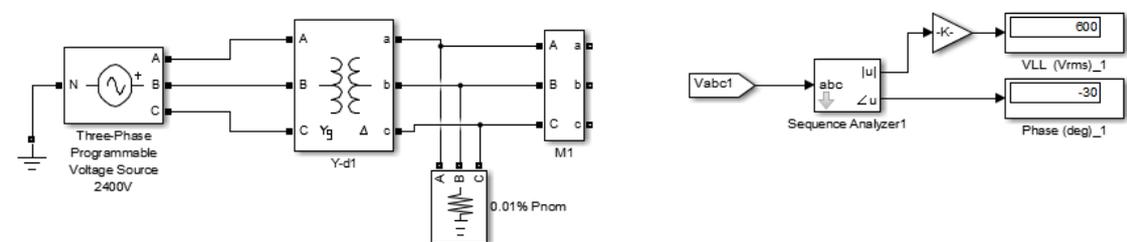


Figura 3.37. Circuito para la simulación de la conexión Y-d1.

De esta forma se pueden ir combinando las diferentes configuraciones para los devanados primario y secundario para ir obteniendo diferentes grupos de

conexiones. Además de los explicados en este trabajo, los restantes grupos de conexiones posibles a obtener con las configuraciones que trae el Matlab son:

- D-y11
- D-y1
- Y-d7
- D-d0

CONCLUSIONES

Tras la finalización del presente trabajo se llegaron a las conclusiones siguientes:

Se comprobó, después de una amplia revisión bibliográfica que la bibliografía existente en la facultad de Ingeniería Eléctrica sobre formas de ondas de las transformaciones trifásicas y los diferentes grupos de conexiones era muy escasa e insuficiente.

No existe una bibliografía que abarque este tema en su totalidad por lo que se confeccionó este trabajo que presenta información detallada y suficientemente completa en relación con el comportamiento de las transformaciones trifásicas y en específico con los grupos de conexión.

La posibilidad de circulación o no del tercer armónico de la corriente de excitación es la causa fundamental de la distorsión de las ondas de flujo y tensión a la salida de las transformaciones trifásicas.

De todas las posibles conexiones en transformaciones trifásicas la que mayores problemas presenta en las formas de onda de flujo y tensión por secundario es la estrella-estrella, problema que se resuelve colocando el conductor neutro, aterrándola o colocando un devanado terciario en delta.

Las simulaciones realizadas en el Simulink del Matlab, a pesar de no obtener en algunos casos la forma de onda con exactitud de algunas variables, resulta muy instructivas y son de gran ayuda para una mejor comprensión del tema.

La confección del material complementario suple la ausencia y escases de bibliografía existente sobre el tema en la disciplina de Máquinas Eléctricas.

RECOMENDACIONES

La utilización en clases de este material didáctico con la esperanza que sea de ayuda para la mejor comprensión de los fenómenos que ocurren en la asignatura Transformadores de tercer año de Ingeniería Eléctrica que muchas veces pasan inadvertidos y son de gran importancia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- [1] L, J, P, Gonzalez *Aplicación computacional sobre transformaciones trifásicas y grupos de conexión*. Departamento Electroenergético. Universidad central de las Villas, 2015.
- [2] Cruz, E.A.C., *Pruebas principales a un transformador de distribución para su puesta en servicio*. 2008, Instituto Politécnico Nacional: México.
- [3] A.I. Voldek, *Maquinas eléctricas* Vol. Tomo 1. 1974: Editorial Pueblo y Educación.
- [4] (2015). *Polaridad de un transformador eléctrico | Electrónica Unicrom*. Available: http://www.unicrom.com/Tut_polaridad_transformador.asp
- [5] (2015). FARADAYOS. Available: <http://faradayos.blogspot.com/>
- [6] Maldonado, M.I.A.H., *Material docente Acerca de los Transformadores, en Departamento Electroenergético*. Universidad central de las Villas Santa Clara., 2004.
- [7] Grainger, J., Stevenson W.D., *Análisis de Sistemas de Potencia*. 2002.
- [8] Winders, J.J., *Power Transformers Principles and Applications*, PPL Electric Utilities Allentown. 2002: Pennsylvania.
- [9] Grupos-de-Conexión, Available: [http:// umh2223.edu.umh.es/wp-content/uploads/sites/188/2013/.../Grupos-de-Conexión.pdf](http://umh2223.edu.umh.es/wp-content/uploads/sites/188/2013/.../Grupos-de-Conexión.pdf).
- [10] McPherson G., Laramore, R. D. *An Introduction to Electrical Machines and Transformers*. Second Edition. Reimpreso en Cuba. 571 pp.
- [11] M.I.J.C.C., *Armónicos en Transformadores*, in *Departamento Electroenergético*. 2005, Universidad central de las Villas.
- Maldonado, M.I.A.H., *Curso de transformadores para Nicaragua*. Universidad central de las Villas Santa Clara., 2006.
- [12] *Material Docente* Universidad de Oviedo.
- [13] M.I.J.C.C., *Armónicos en Transformadores*, in *Departamento Electroenergético*. 2005, Universidad central de las Villas.
- [14] Capítulo3 Available from:
www.inele.ufro.cl/apuntes/Conversion/05CONVERSION3.pdf.

[15] (2015). *Circuitos magnéticos y transformadores* - E.E. Staff - Google

Books. Available:

<https://books.google.com.cu/books?id=8x45l9XSLhgC&pg=PA585&lpg=PA585&dq=Transformadores+trif%C3%A1sicos&source=bl&ots=oEzFVc2o69&sig=j1n480FqAmYN1T5ej9rxxR0p30g&hl=es-419&sa=X&ved=0CDcQ6AEwAzgKahUKEwjr1oLsjonGAhWFQpIKHVI1AOw#v=onepage&q=Transformadores%20trif%C3%A1sicos&f=false>