

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA INDUSTRIAL
TRABAJO FIN DE GRADO

***ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE
TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS ANTE
CARGAS ASIMÉTRICAS***

Alumno/Alumna: Caballero Abad, Ana Cecilia

Director/Directora: Valverde Santiago, Víctor

Curso: <2017-2018>

Fecha: Julio 2018

RESUMEN TRILINGÜE DEL TRABAJO FIN DE GRADO:

- Alumna: Ana Cecilia Caballero Abad
- Director del Trabajo Fin de Grado: Víctor Valverde Santiago
- Departamento: Ingeniería Eléctrica
- Título del Trabajo: Análisis del comportamiento de transformadores trifásicos ante cargas asimétricas.
- Resumen: El objetivo principal de este trabajo es analizar el comportamiento de los transformadores trifásicos ante cargas asimétricas según su tipo de conexión, utilizando para ello la herramienta software MatLab. Mediante esta herramienta, se estudiará cómo actúan los transformadores al conectarles diferentes cargas asimétricas monofásicas dependiendo de cómo estén conectados los devanados primario y secundario.
- Palabras clave: transformadores trifásicos, cargas asimétricas, tipo de conexión.
- Lanaren izenburua: Transformadore trifasikoak karga asimetrikoen aurrean duten erantzunaren analisia.
- Laburpena: Lan honen helburu nagusia transformadore trifasikoak duten konexioaren arabera karga asimetrikoen aurrean izango duten erantzuna aztertzea da. Horretarako MatLab softwarea erabiliko da. Programa honen bitartez, karga asimetriko monofasiko desberdin konektatzean, eta transformadoreen lehenengo eta bigarren harilak duten konexioen arabera transformadoreek izango duten erantzuna ikertuko da.
- Hitzgakoak: transformadore trifasikoa, karga asimetrikoa, konexio moduak.
- Title: Analysis of the behavior of three-phase transformers to asymmetric loads.
- Abstract: The main object of this project is to analyze the behavior of three-phase transformers to asymmetric loads according to their type of connection, using the software tool MatLab. Using this tool, it will be studied how do three-phase transformers perform when connecting different single-phase asymmetric loads depending on how the primary and secondary windings are connected.
- Keywords: three-phase transformers, asymmetric loads, type of connection.

ÍNDICE:

| | |
|---|----|
| 1. Introducción..... | 9 |
| 2. Contexto..... | 10 |
| • 2.1 El Sistema Eléctrico de Potencia..... | 10 |
| • 2.2 Importancia del transformador de potencia | 11 |
| 3. Objetivos y alcance | 13 |
| • 3.1 Estudiar y analizar el comportamiento del transformador trifásico ante cargas asimétricas | 13 |
| • 3.2 Profundizar en el conocimiento de los tipos de cargas..... | 13 |
| • 3.3 Profundizar en el conocimiento de la herramienta software MatLab..... | 14 |
| 4. Beneficios del Proyecto | 15 |
| • 4.1 Beneficios técnicos | 15 |
| • 4.2 Beneficios económicos | 15 |
| • 4.3 Beneficios sociales..... | 16 |
| 5. Estado del arte | 17 |
| • 5.1 Transformadores de potencia trifásicos..... | 17 |
| ○ 5.1.1 Conexiones posibles | 19 |
| ○ 5.1.2 Ventajas e inconvenientes según el tipo de conexión | 20 |
| • 5.2 Cargas simétricas y asimétricas..... | 22 |
| ○ 5.2.1 Cargas desequilibradas | 22 |
| ○ 5.2.2 Faltas..... | 22 |
| • 5.3 Tensiones e intensidades equilibradas y desequilibradas | 24 |
| ○ 5.3.1 Efectos y consecuencias..... | 28 |
| 6. Análisis de alternativas..... | 30 |
| • 6.1 Análisis de alternativas para el estudio de los transformadores | 30 |
| ○ 6.1.1 Pruebas de campo..... | 30 |
| ○ 6.1.2 Modelos físicos a escala..... | 31 |
| ○ 6.1.3 Simulación software..... | 31 |
| ○ 6.1.4 Criterios de selección | 31 |
| ○ 6.1.5 Solución adoptada..... | 33 |
| • 6.2 Elección de la herramienta software | 33 |
| ○ 6.2.1 MATLAB (MATrix LABoratory)..... | 34 |
| ○ 6.2.2 ATP (Alternative Transients Program) | 34 |
| ○ 6.2.3 PSCAD..... | 35 |
| ○ 6.2.4 Criterios de selección | 35 |

| | | |
|-----|---|----|
| o | 6.2.5 Solución adoptada..... | 36 |
| 7. | Descripción de la solución..... | 38 |
| • | 7.1 Modelización de un transformador trifásico | 38 |
| o | 7.1.1 Modelo presentado en el ToolBox de MatLab..... | 38 |
| o | 7.1.2 Circuito equivalente | 39 |
| o | 7.1.3 Tres transformadores monofásicos..... | 40 |
| • | 7.2 Definición de la carga asimétrica..... | 41 |
| o | 7.2.1 Simulaciones con cargas monofásicas | 41 |
| o | 7.2.2 Simulaciones adicionales que podrían hacerse para complementar el estudio | 42 |
| • | 7.3 Modelización del sistema y simulaciones para cada tipo de conexión..... | 44 |
| o | 7.3.1 Estrella Estrella..... | 44 |
| o | 7.3.2 Estrella Triángulo..... | 44 |
| o | 7.3.3 Estrella Zig-Zag | 45 |
| o | 7.3.4 Triángulo Estrella..... | 46 |
| o | 7.3.5 Triángulo Triángulo..... | 46 |
| o | 7.3.6 Triángulo Zig-Zag | 47 |
| 8. | Metodología | 48 |
| • | 8.1 Simulaciones y resultados..... | 48 |
| o | 8.1.1 Simulaciones y resultados de la conexión Estrella-Estrella Yy0..... | 48 |
| o | 8.1.2 Simulaciones y resultados de la conexión Estrella-Triángulo Yd5..... | 51 |
| o | 8.1.3 Simulaciones y resultados de la conexión Estrella-Zigzag Yz5..... | 53 |
| o | 8.1.4 Simulaciones y resultados de la conexión Triángulo-Estrella Dy11..... | 55 |
| o | 8.1.5 Simulaciones y resultados de la conexión Triángulo-Triángulo Dd0 | 56 |
| o | 8.1.6 Simulaciones y resultados de la conexión Triángulo-Zigzag Dz6..... | 58 |
| 9. | Descripción de tareas. Diagrama de Gantt..... | 60 |
| 10. | Presupuesto | 62 |
| • | 10.1 Horas internas..... | 62 |
| • | 10.2 Amortizaciones | 62 |
| • | 10.3 Gastos | 63 |
| • | 10.4 Total..... | 63 |
| 11. | Conclusiones..... | 64 |
| 12. | Referencias y fuentes de información..... | 65 |
| 13. | Anexo I: Normativa Aplicable..... | 67 |
| 14. | Anexo II: Resultados | 68 |
| • | 14.1 Simulaciones y resultados adicionales de la conexión Estrella-Estrella Yy0..... | 68 |

- 14.2 Simulaciones y resultados adicionales de la conexión Estrella-Triángulo Yd5 71
- 14.3 Simulaciones y resultados adicionales de la conexión Estrella-Zigzag Yz5..... 74
- 14.4 Simulaciones y resultados adicionales de la conexión Triángulo-Estrella Dy11 77
- 14.5 Simulaciones y resultados adicionales de la conexión Triángulo-Triángulo Dd0 80
- 14.6 Simulaciones y resultados adicionales de la conexión Triángulo-Zigzag Dz6..... 83

LISTA DE ABREVIATURAS:

| | |
|-------|--------------------------------------|
| TFG | Trabajo de Fin de Grado |
| SEP | Sistema Eléctrico de Potencia |
| HS | Herramienta Software |
| A.T. | Alta Tensión |
| B.T. | Baja Tensión |
| U | Tensión compuesta o tensión de línea |
| V | Tensión simple o tensión por fase |
| SI | Sistema Internacional |
| t_s | Tiempo de simulación |

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES:

| | |
|--|----|
| Ilustración 1: Esquema del sistema eléctrico actual, de la generación al consumo | 11 |
| Ilustración 2: Transformador de potencia | 12 |
| Ilustración 3: Tipos de conexiones | 20 |
| Ilustración 4: Conexión Estrella-Estrella con neutro accesible y carga asimétrica | 25 |
| Ilustración 5: Diagramas vectoriales de tensiones en primario (izquierda) y secundario (derecha) | 26 |
| Ilustración 6: Conexión Estrella-Zigzag con neutro accesible y carga asimétrica | 26 |
| Ilustración 7: Conexión Estrella-Triángulo con carga asimétrica | 27 |
| Ilustración 8: Conexión Triángulo-Estrella con neutro accesible y carga asimétrica | 28 |
| Ilustración 9: Modelos presentados en el Toolbox de MatLab | 38 |
| Ilustración 10: Circuito monofásico equivalente del transformador | 39 |
| Ilustración 11: Tres transformadores monofásicos unidos en conexión Estrella-Estrella | 40 |
| Ilustración 12: Modelo conectado en Estrella-Estrella a una carga monofásica | 41 |
| Ilustración 13: Modelo conectado en Estrella-Estrella a una carga bifásica | 42 |
| Ilustración 14: Modelo conectado en Estrella-Estrella a una carga trifásica | 43 |
| Ilustración 15: Modelo conectado en Estrella-Estrella a una falta trifásica | 43 |
| Ilustración 16: Conexión Estrella-Estrella Yy0 | 44 |
| Ilustración 17: Conexión Estrella-Triángulo Yd5 | 45 |
| Ilustración 18: Conexión Estrella-Zigzag Yz5 | 45 |
| Ilustración 19: Conexión Triángulo-Estrella Dy11 | 46 |
| Ilustración 20: Conexión Triángulo-Triángulo Dd0 | 46 |
| Ilustración 21: Conexión Triángulo-Zigzag Dz6 | 47 |
| Ilustración 22: Simulación Yy0 para analizar el devanado primario | 49 |
| Ilustración 23: Simulación Yy0: Intensidades y tensiones simples en el primario | 49 |
| Ilustración 24: Simulación Yy0: Tensiones compuestas en el primario | 50 |
| Ilustración 25: Simulación Yy0: Tensiones simples en el primario al poner un hilo adicional | 51 |
| Ilustración 26: Simulación Yd5 para analizar el devanado primario | 51 |
| Ilustración 27: Simulación Yd5: Intensidades y tensiones simples en el primario | 52 |
| Ilustración 28: Simulación Yd5: Tensiones compuestas en el primario | 52 |
| Ilustración 29: Simulación Yz5 para analizar el devanado primario | 53 |
| Ilustración 30: Simulación Yz5: Intensidades y tensiones simples en el primario | 54 |
| Ilustración 31: Simulación Yz5: Tensiones compuestas en el primario | 54 |
| Ilustración 32: Simulación Dy11 para analizar el devanado primario | 55 |
| Ilustración 33: Simulación Dy11: Intensidades y tensiones simples en el primario | 56 |
| Ilustración 34: Simulación Dd0 para analizar el devanado primario | 57 |
| Ilustración 35: Simulación Dd0: Intensidades y tensiones simples en el primario | 58 |
| Ilustración 36: Simulación Dz6 para analizar el devanado primario | 59 |
| Ilustración 37: Simulación Dz6: Intensidades y tensiones simples en el primario | 59 |
| Ilustración 38: Diagrama de Gantt | 61 |

ÍNDICE DE TABLAS:

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Selección de la alternativa en función de los criterios de selección | 32 |
| Tabla 2: Selección de la HS en función de los criterios de selección | 36 |
| Tabla 3: Partida de Horas Internas del Presupuesto | 62 |
| Tabla 4: Partida de Amortizaciones del Presupuesto | 63 |
| Tabla 5: Partida de Gastos del Presupuesto | 63 |
| Tabla 6: Presupuesto total | 63 |

1. Introducción

Este documento contiene el Trabajo de Fin de Grado (en adelante TFG) denominado *Análisis del comportamiento de transformadores trifásicos ante cargas asimétricas*. Su estructura comienza con el contexto del trabajo donde se explica el Sistema Eléctrico de Potencia y la importancia del transformador, siguiendo con sus objetivos, alcance y beneficios (técnicos, económicos y sociales) que se esperan conseguir con este TFG.

Seguidamente, en el estado del arte se detalla más en profundidad qué son los transformadores trifásicos, se explican los tipos de cargas existentes y cómo afectan éstas a las tensiones e intensidades.

A continuación, se presentan las diferentes alternativas para analizar dicho comportamiento y éstas se valoran y comparan para averiguar cuál es la idónea para abordar este TFG.

Una vez tomada la decisión acerca de qué opción es la más conveniente, se describe dicha solución, los modelos a utilizar y se introducen las simulaciones elaboradas en base a dicha elección.

Posteriormente, en la metodología se explican los resultados obtenidos de las simulaciones, qué efectos se han observado y se comprueba su coherencia.

Después, se presenta un Diagrama de Gantt mediante el cual se representa la evolución cronológica del proyecto y se acompaña de un presupuesto desglosado en varias partidas con el fin de conocer cuál es la inversión necesaria para llevar a cabo este proyecto.

Para finalizar, se presentan unas conclusiones que resumen todo el contenido del TFG atendiendo a los resultados obtenidos y se adjuntan tanto las fuentes de información así como varios anexos.

2. Contexto

En este capítulo se presenta el contexto en el cual se enfoca este TFG, comenzando con una breve descripción del Sistema Eléctrico de Potencia, mostrando su definición, sus componentes y una ilustración en la cual se recogen todos ellos, y finalizando con la importancia del transformador de potencia dentro de este Sistema.

2.1 El Sistema Eléctrico de Potencia

El Sistema Eléctrico de Potencia (en adelante SEP) es un conjunto de elementos que tiene como objetivos generar la cantidad exacta de energía que se le pida para cubrir la demanda exigida por los clientes en tiempo real teniendo en cuenta las estimaciones a futuro, transportar la energía hasta los consumidores, transformar esa energía hasta unos niveles aceptables para el usuario y distribuirla de tal forma que se logre la mayor calidad al menor precio posible. Cada parte del SEP posee sus propios niveles de tensión, pero todas ellas conforman un sistema trifásico a frecuencia constante (50 Hz en Europa y 60 Hz en América).

Un SEP posee los siguientes subsistemas:

- Plantas de generación: Son las centrales eléctricas que producen la energía eléctrica que consumen las cargas. Existen distintos tipos en función del tipo de fuente primaria de energía que utilizan: Hidroeléctricas, térmicas, nucleares, eólicas, solares,...
- Una red de transporte y distribución para transportar esa energía desde las plantas a los puntos de consumo. Por transporte se entiende que la provisión se realiza desde las plantas de generación hasta las subestaciones a través de líneas de tensión igual o superior a 220 kV. Con distribución se indica que el reparto se realiza dentro de un núcleo de consumidores a un nivel de tensión inferior. Esta red está compuesta por líneas aéreas (desde la generación hasta los núcleos urbanos) y subterráneas (dentro de los núcleos urbanos).
- Centros de consumo: Hasta ellos llega la energía que se genera en las plantas de generación. Este consumo se realiza a distintos niveles de tensión dependiendo de la potencia demandada.

Análisis del comportamiento de transformadores trifásicos ante cargas asimétricas

- El equipo adicional necesario para lograr que el suministro de energía se realice con las características de continuidad de servicio, regulación de tensión y de intensidad y control de frecuencia requeridas. Dentro de este grupo se incluyen los transformadores de servicios auxiliares, los descargadores de sobretensión, los sistemas de control, los sistemas de protección, las reactancias shunt, las impedancias a tierra y el sistema de comunicaciones.

En resumen, para asegurar el funcionamiento del SEP es necesario convertir unas fuentes primarias de energía en energía eléctrica, transportar y distribuir esta energía hasta los consumidores y adaptarla a unos niveles de tensión adecuados para cada caso. Todo esto debe hacerse al nivel de tensión óptimo y al menor coste posible.

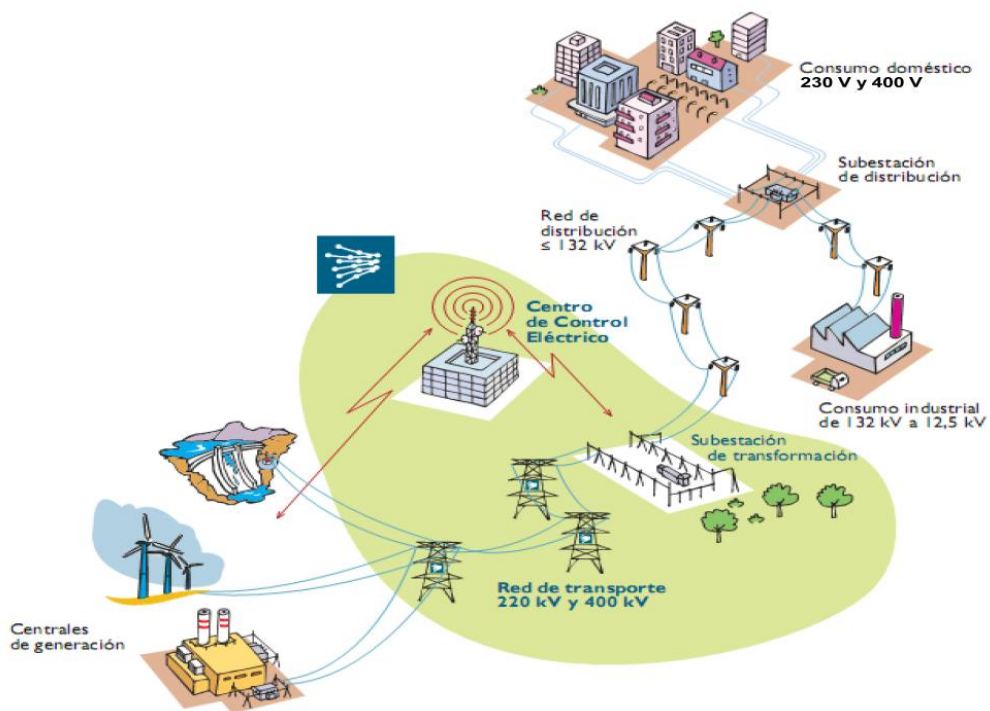


Ilustración 1: Esquema del sistema eléctrico actual, de la generación al consumo

2.2 Importancia del transformador de potencia

Para llevar a cabo las conversiones de energía y los cambios en los niveles de tensión mencionados anteriormente, se utilizan máquinas eléctricas de corriente alterna. Dentro de este tipo de máquinas destaca por su relevancia el transformador de potencia.

El transformador de potencia es un dispositivo eléctrico que se sirve de la inducción electromagnética para elevar y disminuir la tensión, modificar la frecuencia y equilibrar o

Análisis del comportamiento de transformadores trifásicos ante cargas asimétricas

desequilibrar circuitos eléctricos según las necesidades de la demanda. Además, también posee la capacidad de aislar circuitos de corriente alterna de circuitos de corriente continua.

La utilización del transformador de potencia dentro del SEP reviste gran importancia, ya que gracias a ellos es posible modificar la amplitud de la tensión para conseguir el valor óptimo para cada etapa (aumentándola para realizar el transporte y la distribución y disminuyéndola para el consumo) y transmiten potencia a diferentes niveles de tensión manteniendo dicha potencia constante (exceptuando las pérdidas que se producen en el interior del transformador y en la red).

Se debe tener en cuenta que la transmisión de la energía eléctrica desde las centrales hasta los puntos de consumo es tanto más económica cuanto mayor es el nivel de tensión en la línea, ya que la corriente disminuye, y con ello la sección de los conductores.

Por todo ello, los transformadores eléctricos de potencia han sido uno de los inventos más relevantes en el campo de la electricidad. Sin ellos, no sería posible ni siquiera consumir energía eléctrica en los hogares, ya que para realizar el suministro doméstico es necesario un conjunto de transformadores que adecúen el nivel de tensión hasta unos valores aceptables para el consumo. [1]



Ilustración 2: Transformador de potencia

3. Objetivos y alcance

En este capítulo se exponen tanto los objetivos como el alcance de este TFG. Los tres objetivos principales son estudiar y analizar el comportamiento del transformador trifásico ante cargas asimétricas (el cual constituye el objetivo más importante y la base de este TFG), profundizar en el conocimiento de los tipos de cargas para saber cómo reaccionar ante una variación o accidente y por último, profundizar en el conocimiento de la herramienta software MatLab, la cual será la herramienta con la que se van a realizar las simulaciones de este TFG.

3.1 Estudiar y analizar el comportamiento del transformador trifásico ante cargas asimétricas

El objetivo principal que se pretende conseguir con este TFG es analizar cómo se comportan los transformadores trifásicos de potencia cuando son conectados a cargas asimétricas o sufren una falta dependiendo de cómo estén conectados sus devanados primario y secundario.

Para lograrlo, en primer lugar se estudian los tipos de conexiones que pueden existir entre los bobinados de un transformador y se analizan las ventajas e inconvenientes que presenta cada modo de conexión en términos de la posibilidad de utilizarlos ante cargas asimétricas según los efectos que provocan.

A continuación, se continúa resolviendo los otros dos objetivos secundarios que plantea este proyecto.

3.2 Profundizar en el conocimiento de los tipos de cargas

En este punto se analizan los tipos de cargas que pueden ser conectadas al devanado secundario del transformador. Las cargas se pueden clasificar según muy variados tipos, pero en este TFG en concreto se analizarán las cargas simétricas y asimétricas.

Asimismo, se describirá en qué consisten las cargas desequilibradas y cómo afectan éstas a las tensiones e intensidades en ambos devanados del transformador.

Por último y no menos importante, se describirán las faltas, las cuales constituyen una de las mayores amenazas a las que este dispositivo está sometido y cómo pueden afectar

en su correcto funcionamiento.

3.3 Profundizar en el conocimiento de la herramienta software MatLab

Para llevar a cabo este objetivo, en primer lugar se elaborará un modelo de transformador y en él se llevarán a cabo las simulaciones. Se debe asegurar que el modelo posee la fiabilidad suficiente, ya que será el objeto de estudio y en el futuro podrá ser utilizado nuevamente para realizar tareas de mantenimiento, predicción y prevención de riesgos.

Además, al emplear una herramienta software para analizar el comportamiento de un transformador pueden elaborarse tantos ensayos como se desee así como incluir todos los tipos de cargas imaginables, gracias al Toolbox SimPowerSystems que incluye este software y que es de especial utilidad en proyectos de Ingeniería Eléctrica.

Seguidamente se procederá a realizar tantos ensayos como se consideren necesarios para ilustrar el comportamiento de los transformadores trifásicos ante cargas asimétricas según su tipo de conexión.

Por último, con la ayuda esta herramienta software se elaboran varios gráficos de tensiones e intensidades donde se observan los equilibrios o desequilibrios existentes entre las distintas fases.

4. Beneficios del Proyecto

Los beneficios obtenidos al implantar este proyecto se dividen en beneficios técnicos, económicos y sociales. Teniendo en cuenta la tipología de este trabajo, se deduce que los beneficios técnicos son los más importantes, y de ellos se derivan los beneficios económicos y los beneficios sociales.

4.1 Beneficios técnicos

Como ya se ha mencionado anteriormente, actualmente el SEP se encarga de la generación, transformación, transporte y distribución de la energía. Para llevar a cabo sus objetivos, se sirve de transformadores trifásicos y para asegurar la continuidad del suministro y evitar comprometer a la demanda, se debe garantizar que éstos van a responder ante las situaciones más adversas.

Por ello, el estudio del transformador trifásico ante cargas asimétricas presenta un beneficio técnico fundamental, ya que al analizar su comportamiento ante distintos tipos de cargas asimétricas se puede prever su funcionamiento ante ellas y poner las soluciones pertinentes ante posibles problemas.

4.2 Beneficios económicos

Al poder modelizar el transformador y sus diferentes conexiones mediante una herramienta software, se puede llegar a conocer con precisión su comportamiento ante distintos tipos de cargas de una manera económica y sencilla, y se pueden observar sus posibles efectos negativos sobre los equipos. De esta manera, se hace posible encontrar soluciones para reducir o incluso evitar los posibles contratiempos que se puedan originar sin llegar a deteriorar los equipos, lo cual causaría unos cuantiosos gastos imprevistos.

Algunas de las posibles soluciones pasan por efectuar una gran inversión económica y pueden ser labores de mantenimiento preventivo y predictivo de forma periódica o reemplazar aquellos componentes dañados o elementos que puedan suponer un riesgo para la integridad del transformador y de todo el sistema, lo cual se engloba en tareas de mantenimiento correctivo.

Aplicando dichas soluciones, se reduce el envejecimiento prematuro de los componentes del transformador, se optimizan los recursos humanos y materiales y se consigue un

ahorro considerable, aunque éste se observa a largo plazo en términos de mejora de la vida útil de la maquinaria y de sus componentes.

4.3 Beneficios sociales

Hoy en día, el SEP no puede permitirse un fallo en la cobertura de la demanda debido al gran volumen de consumidores y a la calidad del suministro exigida. Aquí radica la importancia clave de conocer el comportamiento del transformador trifásico ante distintos tipos de cargas y sus posibles soluciones.

El estudio de este comportamiento se traduce en una mejor capacidad de respuesta ante los problemas que puedan surgir, lo cual ayuda a la hora de prever posibles defectos y aplicar las soluciones anteriormente propuestas.

Al implementar estas medidas correctamente, se asegura la calidad y la estabilidad del suministro eléctrico. Asimismo, se puede mejorar la explotación de la red de transporte y distribución al actuar sobre los elementos encargados de la transformación.

Todo ello se traduce en una serie de beneficios percibidos por los clientes, como son el bienestar y una mejor calidad de vida.

5. Estado del arte

En este apartado se desarrollan los fundamentos teóricos en los que se basa este TFG. Dada su temática, se describirá en profundidad el transformador trifásico, los distintos tipos de cargas y los efectos y consecuencias de los equilibrios o desequilibrios existentes en tensiones e intensidades.

5.1 Transformadores de potencia trifásicos

Se denominan transformadores de potencia aquellas máquinas eléctricas estáticas encargadas de adaptar los niveles de tensión de las distintas partes que componen el SEP funcionando con corriente alterna. Al ser estáticos, los transformadores llegan a alcanzar valores de rendimiento superiores al 99.7%. [2]

La importancia de los transformadores se debe a que gracias a ellos ha sido posible el enorme desarrollo en la utilización de energía eléctrica, haciendo realidad la realización práctica y económica del transporte de la energía a grandes distancias.

El transformador está formado básicamente por un circuito magnético y dos devanados eléctricos por fase. De estos devanados, se denomina devanado primario a aquel por el cual se alimenta el transformador (lado por donde recibe la energía) y devanado secundario a aquel al cual se conecta la carga (lado por donde entrega la energía). [3]

Dependiendo de cómo sea la tensión de salida respecto de la de entrada, se tienen dos tipos de transformadores:

- Elevadores: La tensión de entrada es menor que la de salida
- Reductores: La tensión de entrada es mayor que la de salida

El bobinado de mayor tensión se denomina lado de alta tensión (A.T.) y el de menor tensión, lado de baja tensión (B.T.).

Para construir un transformador trifásico hay dos opciones: partir de un único núcleo o unir tres núcleos magnéticos idénticos e independientes. Tras analizar sus principales ventajas e inconvenientes, se concluye que la opción más conveniente es la de núcleo único, ya que sólo necesita una carcasa y un menor número de bornas de protección, lo que conlleva un considerable ahorro, aunque se tenga el hándicap de que disponer de una unidad de reserva es más costoso que en el otro caso.

Los principales elementos constituyentes de un transformador de potencia son:

- Núcleo: Es aquel que conforma el circuito magnético y a su alrededor, en columnas, se arrollan los devanados. Está formado por chapa magnética apilada de acero al silicio de grano orientado sometida a un tratamiento químico llamado carlite para reducir las pérdidas en el hierro.
- Bobinados: Son conjuntos de espiras que forman el circuito eléctrico. Suelen ser de cobre y se recubren de una capa aislante.
- Sistema de entrada/salida: Este sistema posibilita la conexión de las bobinas del transformador con las líneas eléctricas de entrada y salida. Se compone de unos bornes de alta tensión, los cuales son altos y con conductores de menor sección, y unos de baja tensión, más bajos y con unos conductores de sección mayor. Estos bornes, en el caso de transformadores de media tensión, se sacan de la cuba mediante unos pasatapas de porcelana que pueden estar rellenos de aire o aceite.
- Sistema de refrigeración: Durante el funcionamiento del transformador, se dan unas pérdidas de potencia, como son las pérdidas en el hierro debidas al circuito magnético y unas pérdidas en el cobre como consecuencia del circuito eléctrico. Estas pérdidas se presentan en forma de calor aumentando la temperatura interna de la máquina. Para evitar el deterioro en la vida útil de los aislamientos y para asegurar que la temperatura interna permanece en unos límites admisibles, se instalan estos sistemas. El enfriamiento se lleva a cabo a través de un fluido refrigerante que suele ser aceite mineral y se encuentra alojado en el interior de la cuba y puede complementarse con el que se produce por la superficie del transformador, con aletas de refrigeración y/o ventiladores.
- Sistema aislante: Su objetivo es aislar entre sí los componentes que actúan a diferentes valores de tensión. Suele formar parte de este sistema el aceite mineral que también actúa como refrigerante.
- Sistema de protección: Este sistema debe abarcar los ámbitos eléctrico, mecánico y de seguridad de los empleados. Las protecciones de tipo eléctrico protegen al transformador frente a alteraciones externas e internas. Para evitar que el fluido

refrigerante esté en contacto con agentes externos, se utiliza un depósito de expansión y un filtro de entrada de aire. El relé Buchholz protege al transformador frente a sobrecargas peligrosas y fallos en el aislamiento, entre otros problemas.

- Sistema de regulación y control: Muestran el estado del transformador y hacen que funcione en sus condiciones óptimas. Cuenta con un sistema de captación de información y otro de actuación.
- Placa de características: Se trata de una cartulina metálica en la que se muestran las propiedades del transformador: Potencia nominal, tensiones e intensidades nominales para primario y secundario, relación de transformación, tipo de conexión,...

5.1.1 Conexiones posibles

En los devanados primario y secundario de un transformador, se pueden efectuar múltiples conexiones, las tres principales son:

- Estrella: En esta conexión, se juntan en un punto los tres extremos de los bobinados que tienen idéntica polaridad. Se utiliza cuando se precisa de un neutro para referenciar la red a tierra y en redes de A.T., ya que se pueden conseguir altas tensiones de línea con una tensión por fase $\sqrt{3}$ veces menor ($U = \sqrt{3} * V$). Se denomina como *Y* en el lado de A.T. e *y* en el de B.T..
- Triángulo: En este caso, se unen sucesivamente los extremos de polaridad contraria de cada dos devanados hasta que el circuito se cierra. Se aplica en muchas redes de media tensión que no necesitan neutro. Se cumple que $U = V$. Se denomina como *D* en el lado de A.T. y *d* en el de B.T..
- Zig-zag: Este enlace en general sólo se utiliza en el lado de B.T. y se basa en dividir en dos partes iguales los bobinados secundarios, una parte se une en estrella y después, cada extremo se conecta en serie con los devanados invertidos de las fases contiguas, siguiendo un orden cíclico. Se verifica que $U = 3 * V$. Se denomina como *z* en el lado de B.T..

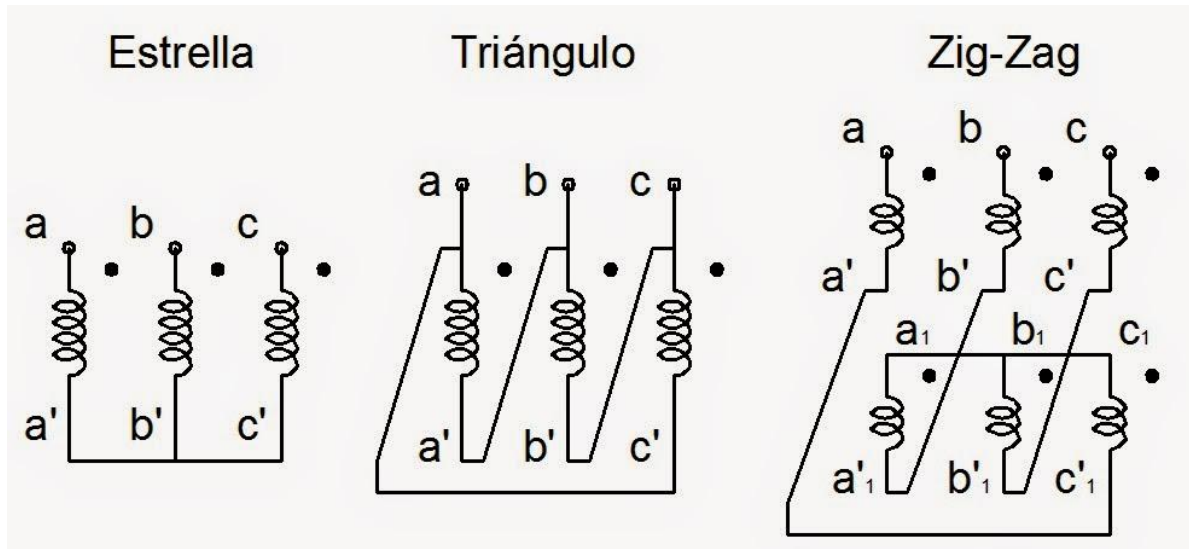


Ilustración 3: Tipos de conexiones

En caso de que el neutro sea accesible, se incluye una n en el nombre de la conexión: N para el lado de A.T. y n para el lado de B.T..

Las conexiones más frecuentes en los transformadores trifásicos son combinaciones de las tres anteriores y pueden ser: Y-y (Estrella-Estrella), Y-d (Estrella-Triángulo), Y-z (Estrella-Zigzag), D-y (Triángulo-Estrella), D-d (Triángulo-Triángulo) y D-z (Triángulo-Zigzag). [4]

5.1.2 Ventajas e inconvenientes según el tipo de conexión

A continuación se pasa a analizar las principales ventajas e inconvenientes de los principales tipos de conexión:

- Estrella-Estrella (Y-y): Entre sus ventajas, cabe mencionar que requiere menos espiras por fase que aquellos transformadores cuyos bobinados se encuentren conectados en triángulo, por lo que es la conexión más barata para transformadores de tamaño reducido sometidos a alta tensión, y que el material aislante tendrá una mayor vida útil debido a que estará sometido a unas condiciones de funcionamiento menos agresivas en comparación con los transformadores en triángulo. Sin embargo, si los transformadores con este tipo de conexión se conectan a cargas desequilibradas, aparecen componentes homopolares: para mejorar la respuesta ante desequilibrios, se conectan los neutros de las estrellas a tierra, aunque esta solución no es muy apropiada ya que

se posibilita la circulación de los armónicos de la corriente de vacío. Otra desventaja de esta conexión es la aparición de armónicos de tercer orden y para evitarlo se puede conectar un tercer bobinado en triángulo.

- Estrella-Triángulo (Y-d): Su principal aplicación es como transformadores reductores ya que la conexión de tipo estrella en el lado de A.T. posibilita ahorrar en aislantes. En cuanto a su comportamiento ante cargas desequilibradas se observa que es admisible, ya que no aparecen armónicos de tercer orden. Por otro lado, la desventaja más notoria es la aparición de un desfase entre las tensiones del devanado primario y del secundario, cuya magnitud viene dada por el índice horario del transformador.
- Estrella-Zigzag (Y-z) : Este tipo de conexión se utiliza normalmente en redes de distribución, ya que su conexión de secundario habilita el uso del neutro. Los transformadores así conectados presentan un buen comportamiento ante cargas desequilibradas, siendo su principal inconveniente su necesidad de aproximadamente un 15% más de espiras que un transformador estrella-estrella, lo cual encarece el precio final de la máquina.
- Triángulo-Estrella (D-y): Los transformadores con este tipo de conexión suelen ser utilizados como transformadores elevadores por tener la conexión de B.T. en estrella. También son empleados en distribución y su utilización se debe a que posibilita alimentar cargas trifásicas y monofásicas por medio del neutro de la estrella en B.T.. Sus virtudes e inconvenientes son análogas a las mencionadas para el caso de la conexión estrella-triángulo.
- Triángulo-Triángulo (D-d): Su principal aplicación es en B.T., lo cual se justifica ya que a pesar de que necesita más espiras por fase, su sección es menor y eso los convierte en uno de los transformadores más económicos para esta aplicación. En lo referente a su comportamiento ante cargas desequilibradas, se concluye que actúan de manera correcta, pero al no tener neutro pueden aparecer problemas. Una particularidad de este tipo de conexión es que en el caso de tres transformadores monofásicos, se puede llegar a un nivel del 58% de la potencia nominal en conexión triángulo abierto si alguno de ellos se deteriora.

5.2 Cargas simétricas y asimétricas

Las cargas que se pueden acoplar a los transformadores, en general, pueden ser simétricas o asimétricas.

Un sistema de cargas simétrico es aquel en el que las impedancias de las tres fases son iguales en módulo y las tensiones e intensidades tienen la misma amplitud y están desfasadas un ángulo de 120°.

En el caso de cargas asimétricas, la magnitud de las cargas que están en cada fase son diferentes, lo cual puede llegar a provocar desequilibrios en las tensiones e intensidades según como estén conectadas estas cargas.

5.2.1 Cargas desequilibradas

En la práctica, no todas las impedancias conectadas tienen por qué ser iguales, por lo que lo más común es encontrar cargas distintas conectadas en cualquiera de los tipos de conexión mencionados anteriormente formando un sistema desequilibrado. Al ser las cargas diferentes, las intensidades de fase que circulan por ellas serán desiguales y por ello por el neutro circulará cierta intensidad no nula, la cual será la suma vectorial de las intensidades de fase:

$$\vec{I}_N = \vec{I}_1 + \vec{I}_2 + \vec{I}_3 \neq 0$$

5.2.2 Faltas

Una falta es una anomalía que causa una disminución en la eficacia del aislamiento entre conductores de fases o entre conductores y tierra, por debajo de los valores nominales de la impedancia de carga.

Dentro del SEP, aproximadamente un 80% de las faltas que ocurren son monofásicas, un 10% son faltas bifásicas a tierra, un 5% son faltas bifásicas y el 5% restante corresponde a faltas trifásicas. Dentro de estos tipos de faltas, pueden existir derivaciones fase-fase (faltas trifásicas y bifásicas) y derivaciones fase-tierra (faltas trifásicas, bifásicas y monofásicas).

De entre todas ellas, las que peores efectos producen son las faltas trifásicas.

Estas faltas pueden producirse en cualquier punto del SEP, pero se producen en mayor proporción en las líneas de transmisión, siguiendo por equipos de interrupción, transformadores, cables, equipos de control y transformadores de tensión e intensidad.

El cambio en las condiciones que generan estas faltas producen alteraciones en la tensión, la intensidad y la frecuencia, en concreto se puede producir un aumento notable de la corriente o de la tensión.

En el caso de corriente elevada, pueden surgir dos inconvenientes:

- Esfuerzos dinámicos que son provocados por las fuerzas magnéticas que se generan
- Un sobrecalentamiento excesivo en el equipo y en sus componentes debido a la disipación de potencia en forma de calor.

Para proteger al sistema frente a las faltas eléctricas, en un primer lugar se detectan los valores de las tensiones e intensidades que éstas causan mediante un sistema de captación de datos. A continuación se analiza si los valores obtenidos son perjudiciales o no para el sistema y en el caso de que constituyan un peligro para los equipos, se desconecta en el menor tiempo posible aquella porción del SEP que se encuentre afectada, la cual a su vez tiene que ser la menor parte del sistema posible para evitar comprometer en exceso a la demanda.

Las faltas pueden tener multitud de causas, pero en general se engloban dentro de 5 categorías, que son:

- Equipos: Un fallo en el aislamiento de un equipo o todo aquel fallo que pueda provocar un desequilibrio entre las tensiones e intensidades del sistema.
- Humanas: En la gran mayoría de los accidentes, el factor humano ha sido el causante de los mismos.
- Animales: Pueden causar faltas en las líneas de transporte
- Naturaleza
- Clima: Como por ejemplo, los rayos.

Las faltas eléctricas se pueden clasificar según su tipo en dos grupos principalmente:

- Primarias: Son aquellas que se producen en las líneas debido a animales, elementos de la naturaleza o a las condiciones meteorológicas y aquellas que se dan en las máquinas eléctricas.
- Secundarias: Son producidas por diversas causas y pueden ser defectos de protecciones, ajustes incorrectos, error en el diseño de control y protección o disparos indeseados causados por factor humano.

5.3 Tensiones e intensidades equilibradas y desequilibradas

Generalmente, se intenta conectar cargas simétricas, es decir, con idéntica magnitud en todas las fases, a los transformadores trifásicos aunque en la realidad no siempre es así ya que se producen ciertas caídas de tensión.

Los transformadores actúan de manera diferente ante las cargas asimétricas según su tipo de conexión.

Para introducir los tipos de desequilibrios que se pueden producir dependiendo del tipo de conexión, se analizan tres escenarios de funcionamiento del transformador monofásico:

- Transformador en vacío sometido a tensión nominal: La intensidad que recorre el devanado primario es I_{10} .
- Transformador en carga sometido a tensión nominal: En este caso, puesto que tiene una carga conectada, la intensidad que circula por el bobinado primario es I_1 , mayor que I_{10} .
- Transformador en vacío sometido a una tensión diferente de la nominal: La intensidad que recorre el primario es I'_{10} , distinta de I_{10} ya que la tensión es diferente.

Por todo ello, se deduce que si la intensidad de primario cambia puede ser debido a que hay distintas cargas conectadas o que la tensión en la alimentación ha cambiado. Todo ello deberá considerarse a la hora de estudiar los desequilibrios que se originan en los

transformadores trifásicos conectados a cargas asimétricas.

Al examinar cómo actúan los transformadores con distintos tipos de conexión ante cargas asimétricas hay que tener en cuenta que los posibles desequilibrios son más notables en el caso de tres transformadores monofásicos unidos en comparación con los transformadores de núcleo único, puesto que como sólo existe un núcleo magnético para las tres fases, en cierto modo se genera una compensación de los flujos magnéticos que circulan por él.

A continuación se pasa a estudiar los principales tipos de conexión con sus particularidades al conectarles una carga asimétrica en el bobinado secundario:

- Estrella-Estrella con neutro accesible (Y- y_n):

Se conecta una carga entre la primera fase del secundario y su neutro y se origina una intensidad I por esa fase. Esta intensidad provoca la circulación de otra intensidad I_1 por la primera fase del bobinado primario.

En el punto n (neutro) del devanado primario debe verificarse la primera ley de Kirchhoff, la cual expone que la suma de intensidades en el punto n debe ser nula, por lo que esta intensidad I_1 deberá dividirse en dos componentes que circularán por la fase 2, I_2 , y por la fase 3, I_3 , las cuales serán diferentes con respecto a las que circulan cuando el transformador está trabajando en vacío nominal (I_{20} e I_{30}).

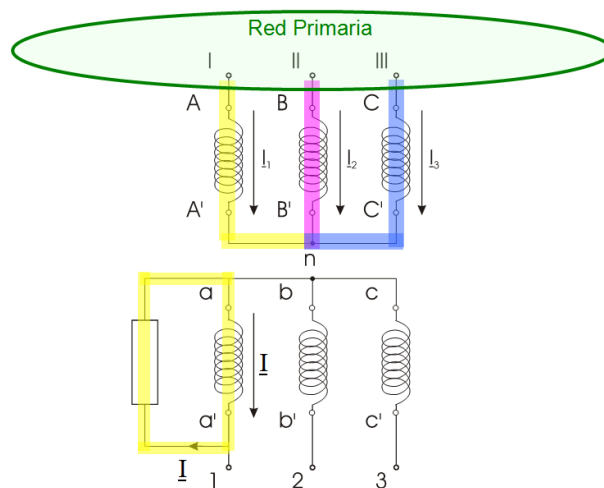


Ilustración 4: Conexión Estrella-Estrella con neutro accesible y carga asimétrica

Por todo ello, en este tipo de conexión, los desequilibrios en las cargas causan:

- Desequilibrios en las intensidades de los devanados primario y secundario.

Análisis del comportamiento de transformadores trifásicos ante cargas asimétricas

- Desequilibrios en las tensiones simples (V) en los devanados primario y secundario.

En las tensiones compuestas (U) no se produce desequilibrio alguno.

Para corregir el desequilibrio de las tensiones simples de primario, una posible solución sería poner un hilo neutro en la estrella de dicho bobinado, así, el excedente de intensidad de I_1 circularía por dicho hilo y por las otras dos fases circularían I_{20} e I_{30} .

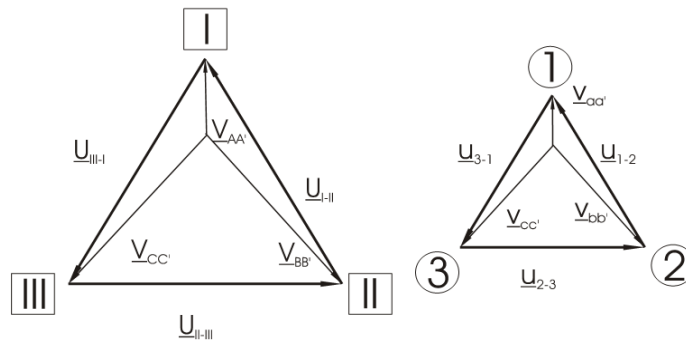


Ilustración 5: Diagramas vectoriales de tensiones en primario (izquierda) y secundario (derecha)

- Estrella-Zigzag con neutro accesible ($Y-Z_n$):

Se conecta una carga entre la primera fase del secundario y su neutro. Esta carga estará sometida a la tensión simple V_{1n} , lo que provoca la circulación de una intensidad de valor I por los devanados de las fases 1 y 2 del secundario.

Esto causa que en las dos primeras fases del bobinado primario surjan unas intensidades de valor I_1 e I_2 , las cuales son proporcionales y tratan de compensar la intensidad I del secundario. Por la fase 3 del devanado primario seguirá circulando la intensidad de vacío.

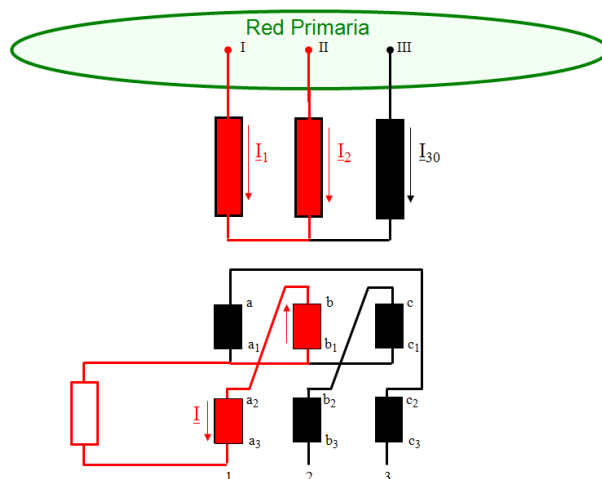


Ilustración 6: Conexión Estrella-Zigzag con neutro accesible y carga asimétrica

Análisis del comportamiento de transformadores trifásicos ante cargas asimétricas

En el caso de este tipo de conexión, se observan desequilibrios en las intensidades de primario y de secundario, mientras que las tensiones simples y compuestas permanecen equilibradas.

- Estrella-Triángulo (Y-d):

Se conecta una carga entre la primera fase del secundario y la segunda, y por ella circula una intensidad que se distribuye por las tres fases del secundario. Estas corrientes hacen que en todas las fases del devanado primario surjan intensidades de mayor valor que las de vacío, aunque las tensiones por fase no se desequilibran, ya que se compensan con las que circulan por el bobinado secundario.

De esto se deduce que en aquellos bobinados conectados en triángulo aparecen desequilibrios de intensidades pero no de tensiones.

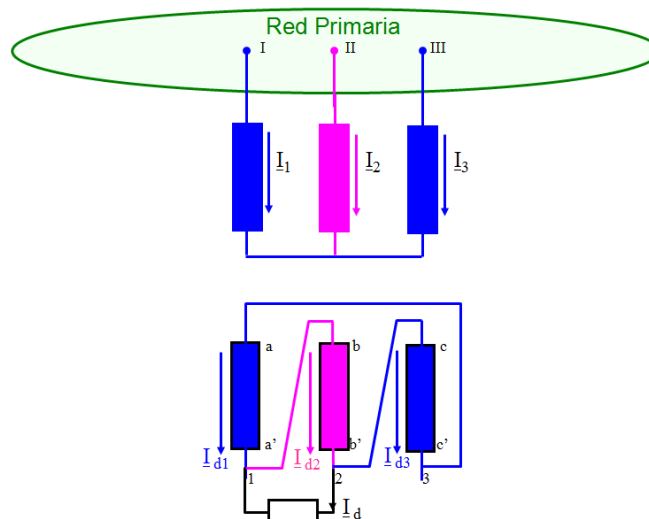


Ilustración 7: Conexión Estrella-Triángulo con carga asimétrica

- Triángulo-Estrella con neutro accesible (D-yn):

Se conecta una carga entre la primera fase del secundario y su neutro y se origina una intensidad I por esa fase. Esta intensidad hará que circule otra intensidad por la primera fase del bobinado primario, sin pasar por los bobinados de la segunda y tercera fase de primario.

Por todo ello, en este tipo de conexión se aprecian desequilibrios en las intensidades de primario y secundario y equilibrios en las tensiones de fase (V) y en las compuestas (U).

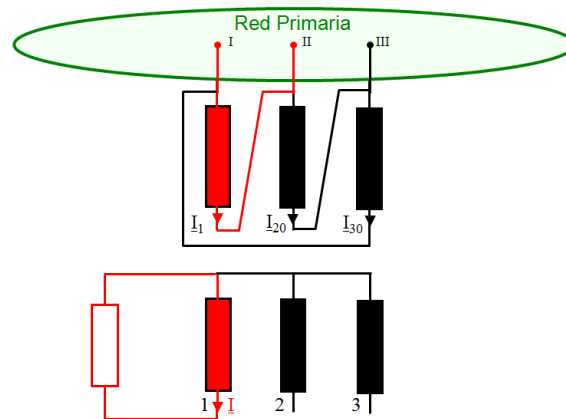


Ilustración 8: Conexión triángulo-estrella con neutro accesible y carga asimétrica

A la vista de todo lo anterior, se concluye que las cargas asimétricas producen siempre desequilibrios en las intensidades de los devanados primario y secundario y que en el caso de las tensiones se debe analizar cada caso, teniendo en cuenta el tipo de conexión, el tipo de carga conectada y el tipo de campo magnético existente.

5.3.1 Efectos y consecuencias

Los desequilibrios se producen más en B.T. que en A.T.. Esto se debe a que en A.T. las cargas son trifásicas y equilibradas mientras que en B.T. normalmente se tienen cargas monofásicas no repartidas uniformemente, habiendo una fase por piso de edificio.

Los efectos y consecuencias de los desequilibrios son similares a los que producen las faltas y posteriormente se explicarán los más importantes [5] [6]:

- Al producirse condiciones anormales de funcionamiento, como pueden ser defectos fase-tierra, fase-fase o la rotura de un conductor, se provocan caídas de tensión en las fases implicadas, lo cual puede hacer que se produzcan sobretensiones en las demás fases y sus dieléctricos fallen.
- En el caso de que por alguna de las fases circule una sobreintensidad, si es en B.T. las protecciones saltarán, pero en caso de que éstas fallen o se produzca en A.T., los conductores pueden llegar a quemarse y las caídas de tensión en la impedancia de línea serán muy altas, lo que provocará que la tensión que le llega a la carga tenga un valor menor al nominal de funcionamiento.

Análisis del comportamiento de transformadores trifásicos ante cargas asimétricas

- Al existir desequilibrios en las intensidades por fase, aparecerán corrientes por el neutro.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se ve que los desequilibrios comprometen en gran medida la calidad del suministro y de las líneas, por lo que conviene remediarlos en la medida de lo posible. Algunas de las medidas que se pueden adoptar para solucionar los desequilibrios son:

- Reorganizar las cargas para intentar que el sistema esté lo más equilibrado posible.
- Disminuir la impedancia interna del transformador, de esta manera la influencia de las corrientes de secuencia negativa disminuye. Esto puede conseguirse conectando las cargas desequilibradas en aquellos puntos donde el nivel de cortocircuito sea mayor.
- Utilizando transformadores especiales, como los de Scott, que son 2 transformadores monofásicos con unas determinadas relaciones de transformación, o de Steinmetz, los cuales son transformadores trifásicos que poseen una carga adicional para equilibrar la energía.

En el caso de este TFG no se van a llevar a cabo soluciones tan complejas sino que se harán las simulaciones según los distintos tipos de conexión y se irán observando los desequilibrios.

6. Análisis de alternativas

En este capítulo, en primer lugar se analizan las tres alternativas existentes para estudiar el comportamiento de los transformadores: pruebas de campo, modelos físicos a escala y simulación software, se presentan unos criterios para seleccionar una de las opciones y posteriormente, éstas se ponderan y en base a ello se elige una solución.

Seguidamente se realiza una comparativa similar para escoger la herramienta software óptima para este TFG según ciertos parámetros y se opta por una de ellas.

6.1 Análisis de alternativas para el estudio de los transformadores

Para estudiar el comportamiento de los transformadores trifásicos ante cualquier situación de conexión y carga existen varios métodos.

En este TFG en particular, se contemplan 3 posibles alternativas para llevar a cabo este estudio, se explican con detalle, se definen los criterios para decidir qué método es el más conveniente para el proyecto y finalmente, tras un proceso de comparación, se selecciona una solución óptima.

6.1.1 *Pruebas de campo*

Este método consiste en realizar los experimentos necesarios sobre un transformador real y estudiar sobre él los distintos efectos que causan las cargas asimétricas, es decir, en el caso particular de este TFG, se conectarían cargas monofásicas a transformadores con distintos tipos de conexión y mediante voltímetros, amperímetros y otros aparatos de medida se determinarían los equilibrios o desequilibrios existentes entre tensiones e intensidades.

Es la única alternativa que se lleva a cabo sobre un equipo real, lo que hace que los resultados obtenidos sean muy exactos y muy próximos a la realidad, lo cual es muy conveniente ya que se pretende extrapolar al final todos los resultados a un sistema real.

Sin embargo, este método presenta varias desventajas principales, y es que existe el riesgo de dañar el equipo o la red en la que se realizan las pruebas, pueden aparecer variables incontroladas que influyen en los resultados finales y resulta excesivamente caro.

6.1.2 Modelos físicos a escala

En esta alternativa se hace uso de un modelo físico a escala de un transformador real.

En este prototipo se realizan los experimentos necesarios conectándole las cargas pertinentes y se almacenan los resultados. En este caso, para aproximar estos experimentos a un escenario real es necesario aplicar las relaciones de semejanza eléctrica y pueden llegar a obtenerse unos resultados bastante acordes con la realidad.

En esta ocasión, al ser también un sistema físico, pueden aparecer variables que no pueden ser controladas y que pueden influir negativamente en los resultados finales. Además, para llevar a cabo estos ensayos hace falta una inversión menor que en el caso de las pruebas de campo, ya que las instalaciones y los elementos son más económicos, pero aun así elevada.

6.1.3 Simulación software

Esta opción consiste en diseñar un modelo del transformador trifásico en una herramienta software y realizar todos los experimentos que se consideren oportunos para sacar conclusiones acerca de su comportamiento, dependiendo del tipo de conexión, ante cargas asimétricas.

Esta posible solución presenta una ventaja muy notoria ya que es la que menor inversión requiere por no llevarse a cabo en un escenario físico real y sólo precisa de la compra de la licencia de la herramienta software que se vaya a utilizar.

Como desventaja se podría mencionar que el uso de una herramienta software obliga al usuario a poseer unos conocimientos adicionales en dicho programa informático, ya que se debe controlar con cierto nivel para poder obtener los resultados deseados.

6.1.4 Criterios de selección

Para elegir la opción más conveniente en el caso de estudio, se hace uso de unos criterios de selección, los cuales ayudan a comparar las diferentes opciones planteadas. Estos criterios se muestran a continuación:

- Coste económico: A la hora de realizar los experimentos, se debe procurar que éstos resulten lo más económico posible para que el coste total no resulte

desorbitado.

- Recursos humanos y materiales: En concordancia con lo anterior, lo ideal es que se precise la menor cantidad de empleados y de materiales posible a la hora de desarrollar el proyecto para reducir costes.
- Recopilación de resultados: Con cada experimento realizado se busca conseguir el mayor número de resultados que sea posible. Así, cuanto mayor sea la cantidad de resultados, el modelo se podrá caracterizar con más precisión y se comprenderá mejor el funcionamiento del transformador en las condiciones de operación.
- Calidad de resultados: Dentro de todos los resultados obtenidos a través de las diversas pruebas, no todos son válidos, por lo que se debe realizar un análisis de datos para averiguar qué valores son fieles a la realidad y cuales suponen una desviación de resultados. Una vez escogidos los valores correctos, a mayor volumen de información se disponga, mayor precisión podremos obtener a la hora de extrapolar resultados.

A continuación se elabora una tabla en la cual se muestra, a modo de comparativa, una ponderación de cada alternativa, y dentro de cada una, una valoración de los criterios de selección siendo 0 lo más contraproducente, 5 una puntuación intermedia y 10 lo más favorable:

| | PONDERACIÓN | VALORACIÓN DE 0 A 10 | | |
|-------------------------------|-------------|----------------------|--------------------------|---------------------|
| | | Pruebas de campo | Modelos físicos a escala | Simulación software |
| Coste económico | 50% | 0 | 5 | 10 |
| Recursos humanos y materiales | 10% | 0 | 5 | 10 |
| Recopilación de resultados | 20% | 5 | 5 | 10 |
| Calidad de resultados | 20% | 10 | 5 | 5 |
| TOTAL SOBRE 10 | | 3 | 5 | 9 |

Tabla 1: Selección de la alternativa en función de los criterios de selección

6.1.5 Solución adoptada

A la vista de la tabla anterior se pueden extrapolar una serie de conclusiones para, finalmente, con la ayuda de los indicadores seleccionados, elegir la opción idónea.

En el caso de las pruebas de campo se observa que se requiere una inversión muy elevada en cuanto a recursos económicos, humanos y materiales debido principalmente a que durante los ensayos, la instalación debe permanecer parada, haciendo que el tiempo para realizar las pruebas y las medidas pertinentes sea escaso y que el coste aumente. A pesar de estos inconvenientes, como ventaja principal de este método destaca la precisión y fiabilidad de los resultados, ya que se han obtenido de equipos reales.

En lo referente a los modelos físicos a escala, aunque la inversión económica es menor que en las pruebas de campo, el coste final sigue siendo elevado debido a que las pruebas se realizan sobre un modelo físico. Como ventaja frente a las pruebas de campo, se extrae que el número de experimentos que se pueden llevar a cabo es mayor, pero son menos fiables ya que al aplicar las relaciones de semejanza se pierde información y se van acumulando errores.

Finalmente se tienen las simulaciones software. Esta solución es la que menor inversión de recursos precisa y permite que se puedan realizar ilimitadas simulaciones, haciendo posible analizar muchas más situaciones que con los métodos anteriores y así poder extraer mayor cantidad de resultados sin gastos adicionales y con la seguridad de no dañar una instalación eléctrica real.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se deduce que la mejor opción para estudiar el comportamiento de los transformadores trifásicos ante cargas asimétricas dependiendo de su tipo de conexión será la simulación software, ya que posee las características más convenientes para el desarrollo del proyecto.

6.2 Elección de la herramienta software

Una vez se concluye que la simulación software es la mejor opción para realizar el análisis de los transformadores trifásicos ante cargas asimétricas según su tipo de conexión, se debe escoger una Herramienta Software, en adelante HS, para llevarlo a cabo. Para este propósito existen varias HS y se deberán analizar todas las posibilidades

para, tras un estudio de sus ventajas y desventajas principales, elegir la opción más conveniente para este TFG.

Dentro de las HS adecuadas para este proyecto, se seleccionan 3:

6.2.1 *MATLAB (MATrix LABoratory)*

Esta HS constituye un programa muy potente, con un entorno intuitivo, herramientas de cálculo científico, técnico y de visualización gráfica y un lenguaje de programación de alto nivel. Dentro de este programa, se incluye el entorno de simulación Simulink, en el cual a su vez se encuentra el Toolbox *Simpowersystems*. Este Toolbox está diseñado específicamente para el ámbito de la Ingeniería Eléctrica y permite diseñar el modelo de simulación.

Esta HS posee una clara ventaja sobre las demás puesto que es un software que se utiliza en numerosas ocasiones a lo largo del grado cursado, y por ello se poseen conocimientos más que suficientes como para realizar las simulaciones que requiere este proyecto en este programa. Asimismo, ya que la Universidad posee una licencia de uso, este recurso resulta gratuito para la alumna, lo cual resulta otro punto a favor.

6.2.2 *ATP (Alternative Transients Program)*

Se trata de una HS en la cual se pueden simular digitalmente fenómenos electromagnéticos y electromecánicos transitorios mediante modelos que caracterizan su comportamiento. Un ejemplo de aplicación de este software puede ser la simulación de redes eléctricas y de sistemas de control. Se trata de un programa gratuito, pero para utilizarlo se hace necesario poseer una licencia del Grupo de Usuarios de EMPT o de un grupo de usuarios regional autorizado, lo cual puede llegar a ser bastante complicado.

Un inconveniente de este programa es que, al no haber sido utilizado con anterioridad, requiere invertir varias horas en aprender a utilizarlo para realizar las simulaciones, lo cual supone un alargamiento importante del tiempo de proyecto y un aumento de presupuesto en la partida de horas internas.

6.2.3 PSCAD

Es una HS que permite simular el comportamiento de un circuito eléctrico en un entorno gráfico de manejo sencillo e intuitivo y posee múltiples librerías para poder representar todo tipo de componentes. Se pueden diseñar y estudiar el comportamiento de sistemas que trabajan con valores continuos y puede acoplarse con MatLab. [7]

La principal ventaja de este programa es que tanto los manuales como la propia aplicación están accesibles de forma gratuita, lo que supone cierto ahorro económico. Sin embargo, surge el mismo problema que con ATP: al ser un programa que no se ha empleado antes, se deben invertir unas horas extra para profundizar en el conocimiento de esta HS.

6.2.4 Criterios de selección

A la hora de elegir la HS idónea para este proyecto deberán tenerse en cuenta que cumple los siguientes criterios [8]:

- Experiencia del usuario: De este criterio depende la curva de aprendizaje y eficiencia, lo cual puede causar más o menos gastos en la partida de horas internas, por lo que se valorará positivamente aquella HS que ya sea conocida.
- Funcionalidad: Según las especificaciones que se le pidan al programa, funcionalidades extra pueden causar un aumento en costes de aprendizaje. Asimismo, interesa que en la HS se puedan medir todas las variables necesarias para analizar el caso de estudio.
- Modularidad: Hay que comprobar si la HS posee un módulo específico para poder realizar el modelo y que éste sea sencillo.
- Tiempos de simulación: Si el tiempo de simulación es bajo, se pueden realizar más simulaciones y el número de resultados obtenidos crece.
- Precisión y fiabilidad: Se tendrá en cuenta que la HS ofrezca unos resultados precisos y próximos a la realidad.
- Coste económico: se valorará positivamente que la HS sea gratuita frente a

aquellas que requieren una licencia de usuario.

A continuación se muestra una tabla en la cual se pondera cada criterio, y dentro de cada uno, una valoración de cada HS siendo 0 la más desfavorable, 5 una puntuación intermedia y 10 la más conveniente:

| | PONDERACIÓN | VALORACIÓN DE 0 A 10 | | |
|-------------------------|-------------|----------------------|-----|-------|
| | | MATLAB | ATP | PSCAD |
| Experiencia del usuario | 20% | 10 | 0 | 0 |
| Funcionalidad | 10% | 10 | 5 | 5 |
| Modularidad | 10% | 10 | 0 | 0 |
| Tiempos de simulación | 15% | 5 | 0 | 5 |
| Precisión y fiabilidad | 30% | 10 | 10 | 10 |
| Coste económico | 15% | 5 | 10 | 10 |
| TOTAL SOBRE 10 | | 8.5 | 5 | 5.75 |

Tabla 2: Selección de la HS en función de los criterios de selección

6.2.5 Solución adoptada

Teniendo en cuenta la tabla anterior se pueden extrapolar una serie de conclusiones para, finalmente, con la ayuda de los criterios seleccionados, elegir la HS más conveniente.

Atendiendo a la experiencia del usuario, MatLab es claro vencedor ya que ha sido utilizado con anterioridad y se conoce su funcionamiento, mientras que los otros dos programas resultan desconocidos.

En cuanto a la funcionalidad, aunque todos dan la posibilidad de analizar todas las variables necesarias, en el caso de MatLab se presentan de una manera más intuitiva, lo cual la hace idónea para sacar conclusiones a través del análisis de gráficas.

En lo referente a la modularidad, se valora positivamente MatLab por tener un Toolbox especializado en el mundo de la Ingeniería Eléctrica y por su simplicidad de uso.

Respecto a los tiempos de simulación, ATP es el que presenta mayores tiempos de

Análisis del comportamiento de transformadores trifásicos ante cargas asimétricas

simulación, por lo que en ese aspecto quedaría descartado.

En cuanto a la precisión y fiabilidad todos poseen unas características más que aceptables y por último, en lo referente al coste económico, ATP y PSCAD se presentan como mejores alternativas ya que son programas de libre acceso y gratuitos.

Teniendo en mente todo lo anterior, se concluye que la HS más conveniente para llevar a cabo el análisis del comportamiento de los transformadores trifásicos ante cargas asimétricas dependiendo de su tipo de conexión es MatLab, ya que presenta la mejor puntuación de entre las tres alternativas.

7. Descripción de la solución

En este apartado se muestran en primer lugar las distintas opciones existentes a la hora de modelizar un transformador trifásico y se adopta la alternativa más conveniente en base a sus ventajas e inconvenientes. A continuación, se define la carga asimétrica mostrando cómo quedaría el modelo al conectarle cargas monofásicas, bifásicas, trifásicas desequilibradas o faltas y por último se muestra la modelización de cada tipo de conexión.

7.1 Modelización de un transformador trifásico

Habiendo elegido ya la HS idónea, en este caso MatLab, se procederá a diseñar un modelo de transformador sobre el cual se realizarán las diferentes conexiones y al cual se acoplarán las cargas monofásicas. Para modelizar el sistema, se presentan tres opciones, las cuales se analizarán para ver cuál resulta más conveniente:

7.1.1 Modelo presentado en el Toolbox de MatLab

Al utilizar esta HS, parece lógico que se utilice el modelo que presenta el Toolbox *SimPowerSystems*. En MatLab, podemos encontrar varios modelos según el tipo de conexión y tienen el siguiente aspecto:

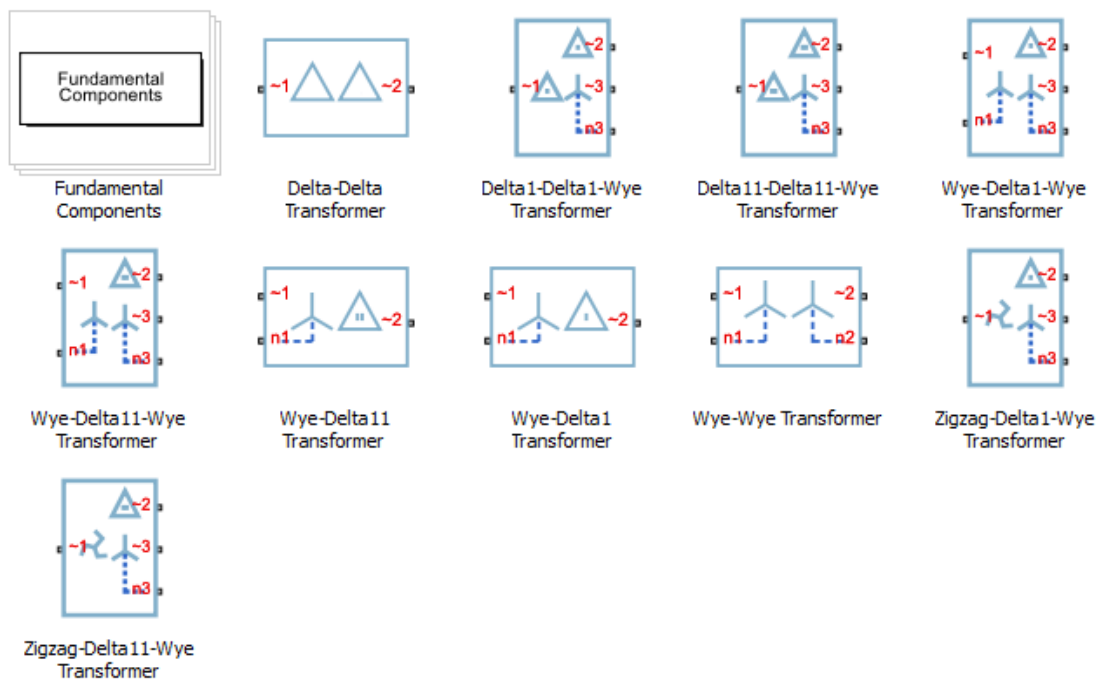


Ilustración 9: Modelos presentados en el Toolbox de MatLab

Estos modelos presentan una indudable ventaja: su simplicidad de aplicación, ya que no es necesario elaborar el modelo a partir de componentes más pequeños lo que supone un ahorro de tiempo importante y la disminución de probabilidad de error a la hora de emplearlos, ya que son elementos propios de la HS. Sin embargo, al utilizar estos modelos, no se pueden observar las conexiones a simple vista, por lo que desde el punto de vista didáctico son los menos indicados.

7.1.2 Circuito equivalente

Otra manera de representar un transformador trifásico, tanto para emplear en una HS como a la hora de hacer cálculos a mano, es el circuito monofásico equivalente, el cual tiene el siguiente aspecto:

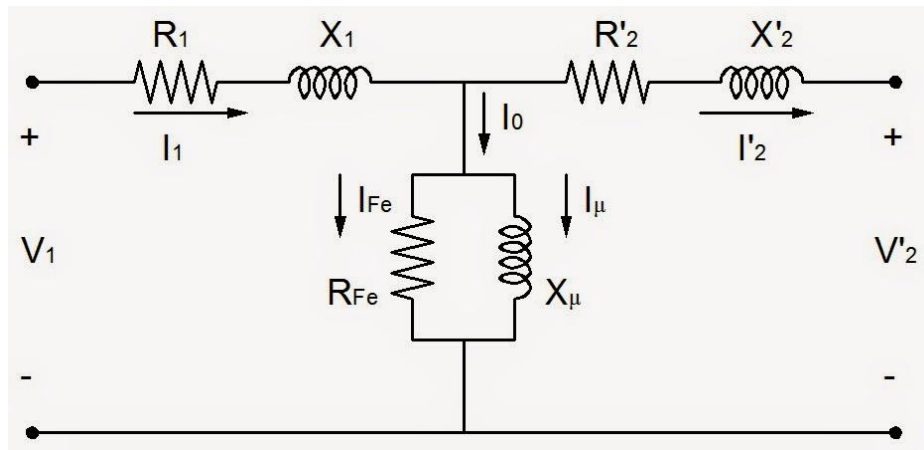


Ilustración 10: Circuito monofásico equivalente del transformador

En esta figura se ha representado el circuito monofásico equivalente del transformador reducido a valores del primario y con los siguientes valores:

- V_1 : Tensión en el primario
- I_1 : Intensidad en el primario
- R_1 : Resistencia que representa las pérdidas por efecto Joule en el primario
- X_1 : Reactancia que representa el flujo de dispersión en el primario
- I_0 : Intensidad de vacío
- I_{Fe} : Intensidad de vacío correspondiente a las pérdidas en el hierro
- I_μ : Intensidad magnetizante
- R_{Fe} : Resistencia que representa las pérdidas en el hierro
- X_μ : Reactancia que representa la componente magnetizante
- V'_2 : Tensión en el secundario referida a primario
- I'_2 : Intensidad en el secundario referida a primario

Análisis del comportamiento de transformadores trifásicos ante cargas asimétricas

- R'_2 : Resistencia que representa las pérdidas por efecto Joule en el secundario referida a primario
- X'_2 : Reactancia que representa el flujo de dispersión en el secundario referida a primario

Este modelo es muy completo y permite visualizar todos los parámetros del transformador, lo que hace que sea muy descriptivo. [9] A pesar de ello, al ser un circuito monofásico equivalente, para realizar el estudio se hace necesario crear tres circuitos y unirlos posteriormente, lo cual puede llegar a resultar muy confuso e ineficaz para la finalidad buscada. Asimismo, calcular el valor exacto de las resistencias y reactancias por fase puede llegar a ser trabajoso y consumir un tiempo que podría ser invertido en realizar más simulaciones.

7.1.3 Tres transformadores monofásicos

Por último, se presenta como último modelo el caso de tres transformadores monofásicos unidos. Este caso se muestra en la siguiente figura:

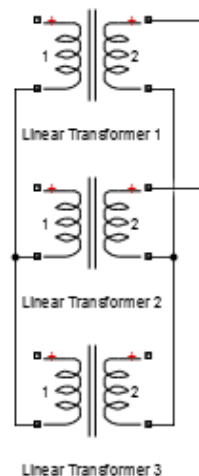


Ilustración 11: Tres transformadores monofásicos unidos en conexión Estrella-Estrella (Y-y)

Las principales ventajas de este modelo son:

- No se hace necesario calcular las resistencias y reactancias por fase, ya que la propia HS proporciona por defecto unos valores que son muy próximos a la realidad.
- Al ser un modelo reducido, se pueden realizar las conexiones entre las fases según nos esquemas vistos anteriormente y éstas no resultan caóticas.

- Al hilo del punto anterior, al poder ver y realizar las conexiones entre fases, resulta más didáctico que los modelos anteriores ya que, de alguna manera, se asemeja más a la situación de un transformador real.

Por otro lado, a pesar de todas las ventajas mencionadas anteriormente, presenta el inconveniente de que este modelo no es el más simple (como lo es el propio de la HS), por lo que elaborarlo requerirá un tiempo adicional.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, se deduce que el modelo que mejor se ajusta a las necesidades del presente análisis es este último: tres transformadores monofásicos, por lo que de ahora en adelante es el que se va a emplear en las simulaciones.

7.2 Definición de la carga asimétrica

Como ya se ha mencionado en el apartado “5. Estado del arte”, no todas las cargas que se conectan a un transformador trifásico son necesariamente simétricas, por lo que se procederá a simular y a observar qué sucede al conectar una carga monofásica al transformador según los distintos tipos de conexión. En todos estos casos se analizarán los posibles desequilibrios tanto en tensiones como en intensidades.

7.2.1 Simulaciones con cargas monofásicas

En primer lugar, se procederá a conectar una carga monofásica al modelo de transformador anterior. Esta carga monofásica, en el caso de estudio, será una rama RLC en serie. El escenario obtenido será el siguiente:

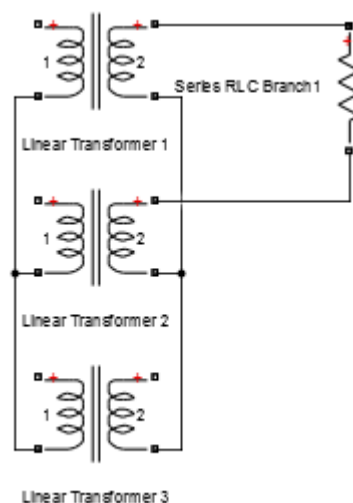


Ilustración 12: Modelo conectado en Estrella-Estrella a una carga monofásica

Análisis del comportamiento de transformadores trifásicos ante cargas asimétricas

Hecho esto, se procederá a realizar las simulaciones pertinentes. Cabría esperar que en estas simulaciones se observen desequilibrios en intensidades de ambos bobinados y ciertos desequilibrios en tensiones dependiendo del tipo de conexión.

7.2.2 Simulaciones adicionales que podrían hacerse para complementar el estudio

Para completar el estudio del comportamiento del transformador ante cargas asimétricas según el tipo de conexión, podrían realizarse simulaciones con cargas bifásicas, cargas trifásicas diferentes o con faltas, pero las conclusiones extraídas no cambian con respecto a la carga monofásica y los resultados tampoco aportan información adicional a lo que ya se ha observado, pero por mero interés científico aquí se muestran unos ejemplos:

En primer lugar, se conecta una carga bifásica al modelo, quedando el siguiente esquema:

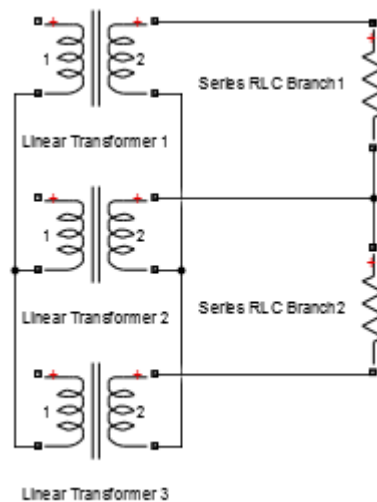


Ilustración 13: Modelo conectado en Estrella-Estrella a una carga bifásica

Por simplicidad, ambas cargas bifásicas tendrán el mismo valor. Como en el caso de la carga monofásica anterior, según como estén conectados los devanados de primario y secundario podrán verse ciertos desequilibrios en las magnitudes estudiadas.

En segundo lugar, se presenta el esquema de un transformador conectado a una carga trifásica asimétrica. En este caso en la primera fase posee una carga resistiva, en la segunda fase una inductiva y en la tercera fase una capacitiva.

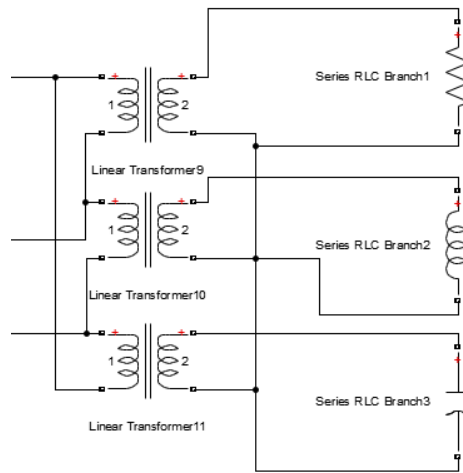


Ilustración 14: Modelo conectado en Estrella-Estrella a una carga trifásica

Por último, se podría realizar un estudio sobre las faltas. En este caso, se acoplaría un elemento de MatLab que simula una falta y se ajustan sus parámetros para que sea monofásica, bifásica o trifásica.

Como ya se ha mencionado en apartados anteriores, de entre estos tres tipos de faltas, la falta trifásica es la más catastrófica en lo que se refiere a los efectos que produce aunque es de las menos probables (solamente el 5% de las faltas producidas son trifásicas), frente a las faltas monofásicas que ocurren con una probabilidad del 80%.

El modelo conectado a la falta se muestra en la siguiente figura:

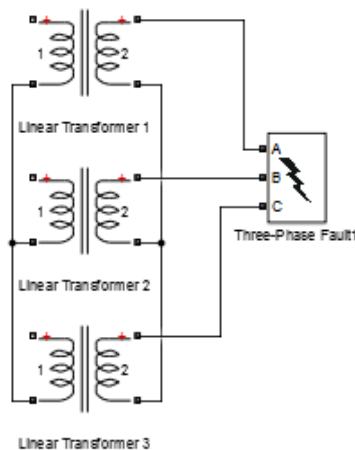


Ilustración 15: Modelo conectado en Estrella-Estrella a una falta trifásica

Al igual que en los casos anteriores, se estudiarían los desequilibrios que estas faltas causan.

7.3 Modelización del sistema y simulaciones para cada tipo de conexión

En este apartado se presentarán los modelos de simulación con los distintos modos de conexión que van a ser estudiados. Asimismo, se mencionarán los desequilibrios que cabe esperar en tensiones e intensidades según cómo estén conectados los devanados de primario y secundario.

7.3.1 Estrella Estrella

En este caso, se emplea la conexión **Yy0** que queda según la siguiente figura:

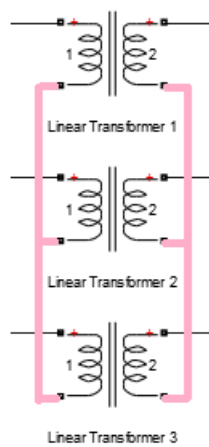


Ilustración 16: Conexión Estrella-Estrella Yy0

Como ya se ha mencionado en apartados anteriores, en este tipo de conexión cabe esperar que se formen armónicos de tercer orden y que aparezcan componentes homopolares al conectar cargas asimétricas. Relacionado con cargas asimétricas, se observarán desequilibrios en las intensidades de primario y secundario y desequilibrios en las tensiones simples o por fase en primario y secundario.

7.3.2 Estrella Triángulo

En este estudio se va a realizar la conexión **Yd5**, la cual se muestra a continuación:

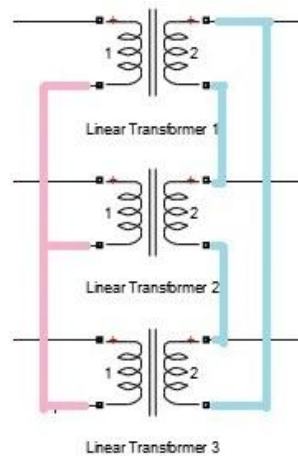


Ilustración 17: Conexión Estrella-Triángulo Yd5

En esta conexión se observarán desequilibrios en las intensidades de primario y secundario, mientras que las tensiones permanecerán equilibradas.

7.3.3 Estrella Zig-Zag

Ahora se presenta la conexión **Yz5**. Según la teoría, en este modelo surgirán desequilibrios en las intensidades del devanado primario y en las del devanado secundario, pero en lo referente a las tensiones, tanto las simples como las compuestas permanecerán equilibradas.

Este tipo de conexión se presenta en la siguiente imagen:

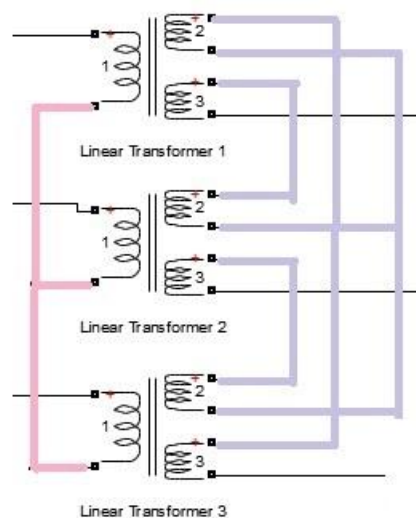


Ilustración 18: Conexión Estrella-Zigzag Yz5

7.3.4 Triángulo Estrella

Seguidamente, se emplea la conexión **Dy11** que queda según la siguiente figura:

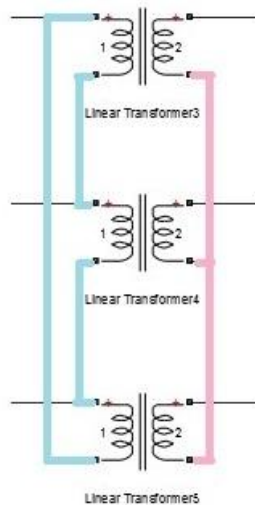


Ilustración 19: Conexión Triángulo-Estrella Dy11

En la conexión Dy11 se producirán desequilibrios en las intensidades de primario y de secundario, pero no en las tensiones simples ni en las compuestas.

7.3.5 Triángulo Triángulo

En este caso, se emplea la conexión **Dd0** que queda según la siguiente figura:

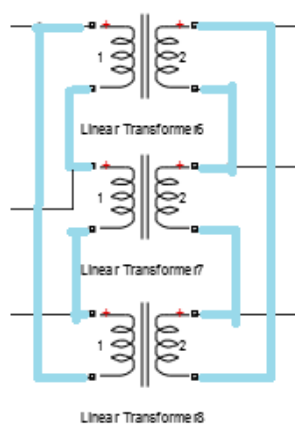


Ilustración 20: Conexión Triángulo-Triángulo Dd0

Este tipo de conexión posee un buen comportamiento ante cargas asimétricas, habiendo desequilibrio tan sólo en las intensidades de primario y secundario y será estudiado en las simulaciones posteriores.

7.3.6 Triángulo Zig-Zag

Por último, se realiza la conexión **Dz6**, la cual se muestra a continuación:

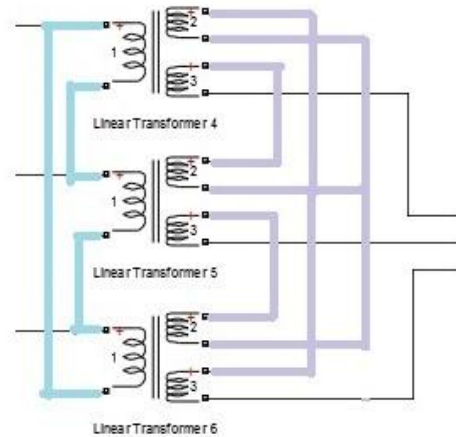


Ilustración 21: Conexión Triángulo-Zigzag Dz6

Esta conexión será también objeto de estudio en las siguientes simulaciones. En este tipo de conexión se aprecia como las intensidades de primario y de secundario están desequilibradas.

8. Metodología

En este capítulo se presentan los resultados que se han obtenido en base a las simulaciones con cargas monofásicas presentadas anteriormente. En el caso de este TFG se han realizado una serie de simulaciones para cada tipo de conexión.

Las imágenes de los modelos de estas simulaciones se complementarán con gráficas en las que se representarán las variables de estudio, que en este caso serán intensidades y tensiones del bobinado primario. Asimismo se incluirán explicaciones de estas gráficas y se comprobará su coherencia con lo expuesto según la teoría.

En cuanto a las variables del bobinado secundario se ha decidido no visualizarlas ya que no aportan información adicional: en el caso de las intensidades, éstas serán desequilibradas por estar el transformador conectado a una carga asimétrica y las tensiones serán proporcionales a las de primario en función de la relación de transformación.

Cabe mencionar que todos los parámetros se medirán en las unidades del Sistema Internacional (en adelante SI). Asimismo, en estas simulaciones se desprecia el efecto que podría provocar la impedancia de la línea, ya que se considera que la caída de tensión en ella es despreciable y la carga conectada es una carga resistiva pura de valor 1000 ohmios (en el Anexo II se encontrarán más simulaciones para más tipos de carga).

8.1 Simulaciones y resultados

8.1.1 Simulaciones y resultados de la conexión Estrella-Estrella Yy0

En esta simulación, la carga monofásica se ha conectado entre la primera fase del secundario y el neutro.

A continuación se presenta la simulación para este tipo de conexión a la hora de analizar qué sucede en el devanado primario junto con unas gráficas en las que se observan las intensidades y las tensiones simples (fase-neutro) del devanado primario con un tiempo de simulación (en adelante t_s) de 0.25 segundos:

Análisis del comportamiento de transformadores trifásicos ante cargas asimétricas

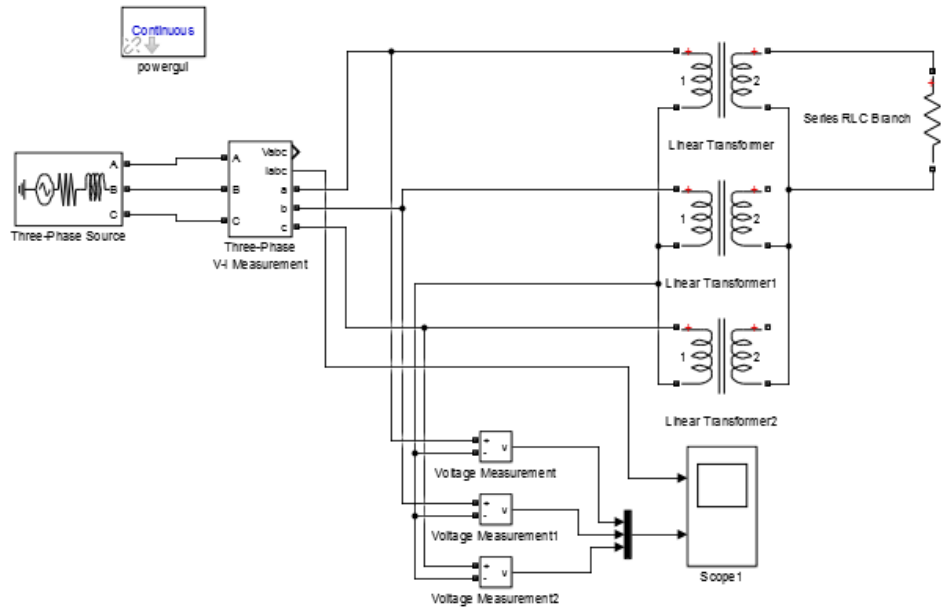


Ilustración 22: Simulación Yy0 para analizar el devanado primario

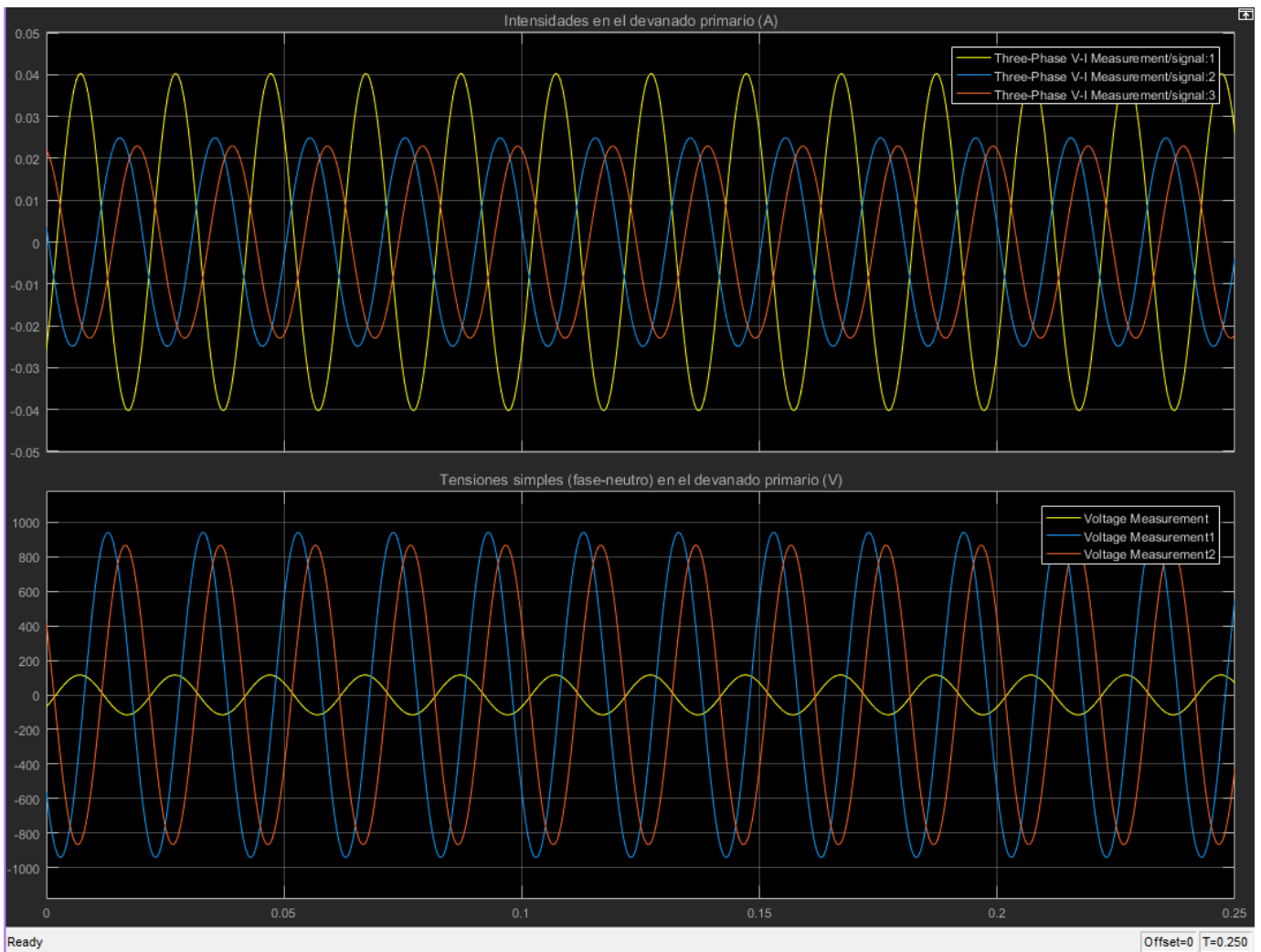


Ilustración 23: Simulación Yy0: Intensidades y tensiones simples en el primario

Análisis del comportamiento de transformadores trifásicos ante cargas asimétricas

Como cabía esperar, se producen desequilibrios en las intensidades y en las tensiones simples del primario. En el caso de las intensidades se ve como la intensidad de la primera fase es mayor con respecto a las de las otras dos fases debido a que en esta fase se induce la mayor intensidad por estar la carga conectada a la primera fase del secundario. En cuanto a las tensiones, es precisamente la de la primera fase menor ya que experimenta una caída de tensión en la carga.

A continuación se observa la situación de las tensiones compuestas del primario:

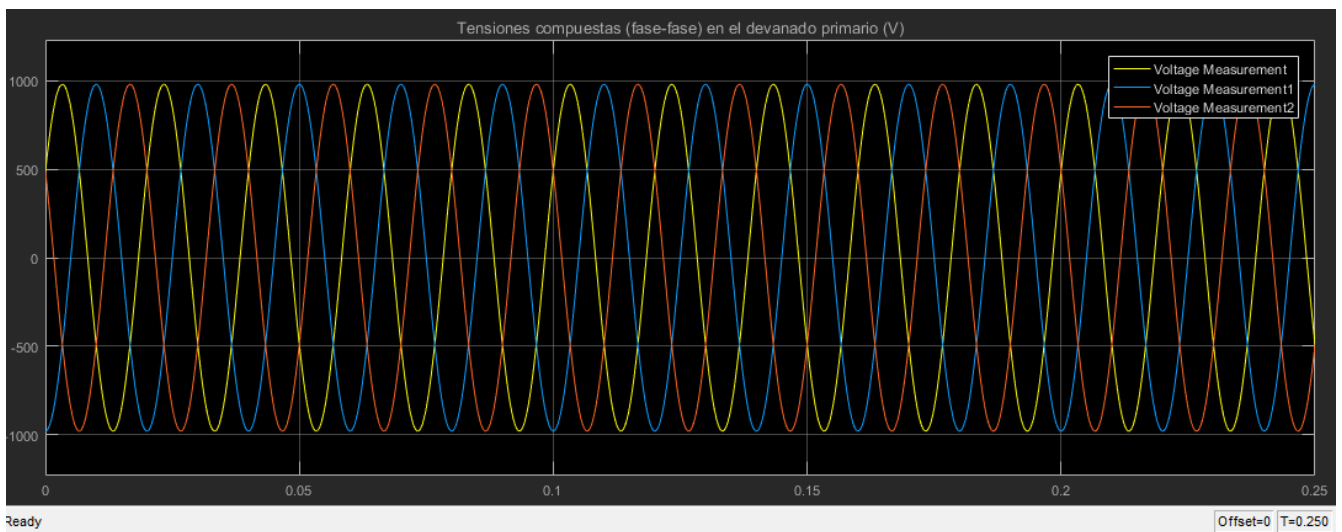


Ilustración 24: Simulación Yy0: Tensiones compuestas en el primario

Como ya se había predicho en los apartados teóricos, las tensiones compuestas del primario están equilibradas.

Para intentar solucionar los desequilibrios en las tensiones del primario una solución es colocar un hilo adicional en el neutro de la estrella del primario que esté conectado al neutro de la fuente de alimentación. Al hacerlo, se obtiene la siguiente gráfica:

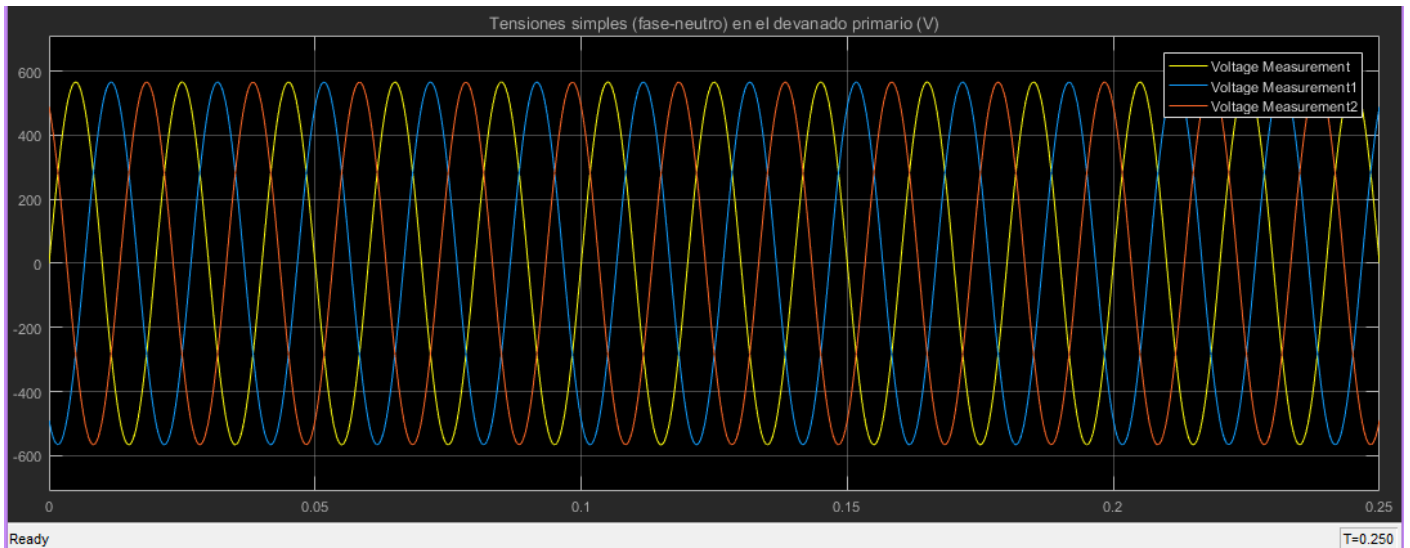


Ilustración 25: Simulación Yy0: Tensiones simples en el primario al poner un hilo adicional

Como se puede comprobar, este método puede solucionar los desequilibrios de tensiones simples en el primario.

8.1.2 Simulaciones y resultados de la conexión Estrella-Triángulo Yd5

La simulación de este tipo de conexión para analizar el bobinado primario queda:

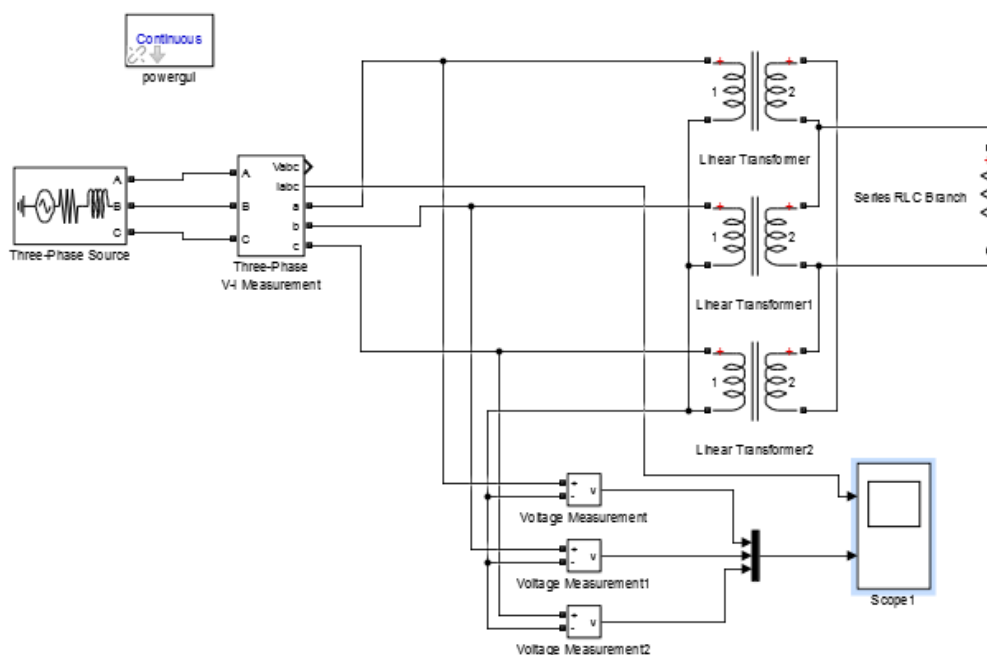


Ilustración 26: Simulación Yd5 para analizar el devanado primario

Análisis del comportamiento de transformadores trifásicos ante cargas asimétricas

En esta simulación, la carga monofásica se ha conectado entre la primera y la segunda fase del secundario y seguidamente se presentan unas gráficas en las que se muestran las intensidades y las tensiones simples (fase-neutro) y compuestas (fase-fase) del devanado primario con un $t_s = 0.25$ segundos:

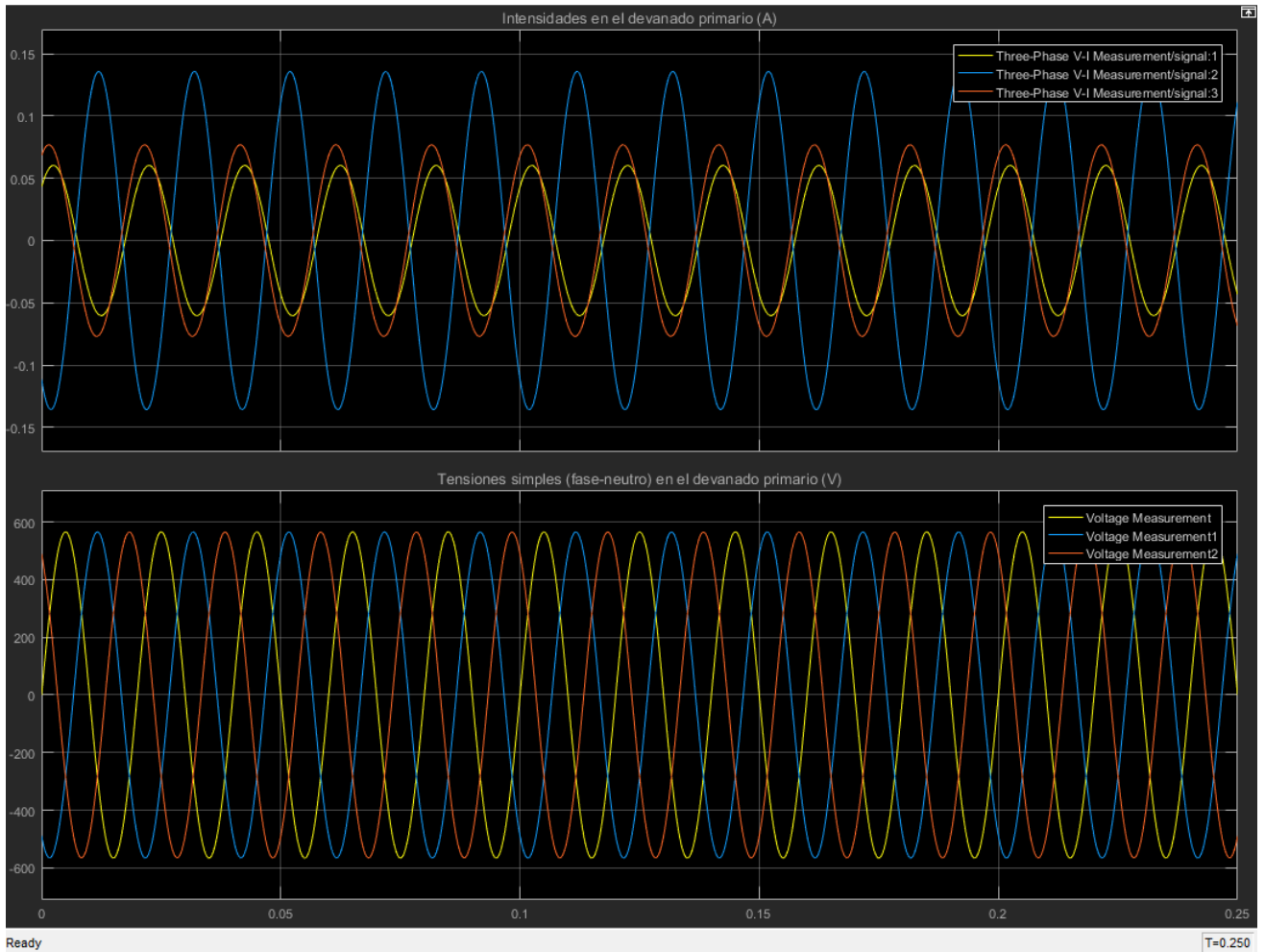


Ilustración 27: Simulación Yd5: Intensidades y tensiones simples en el primario

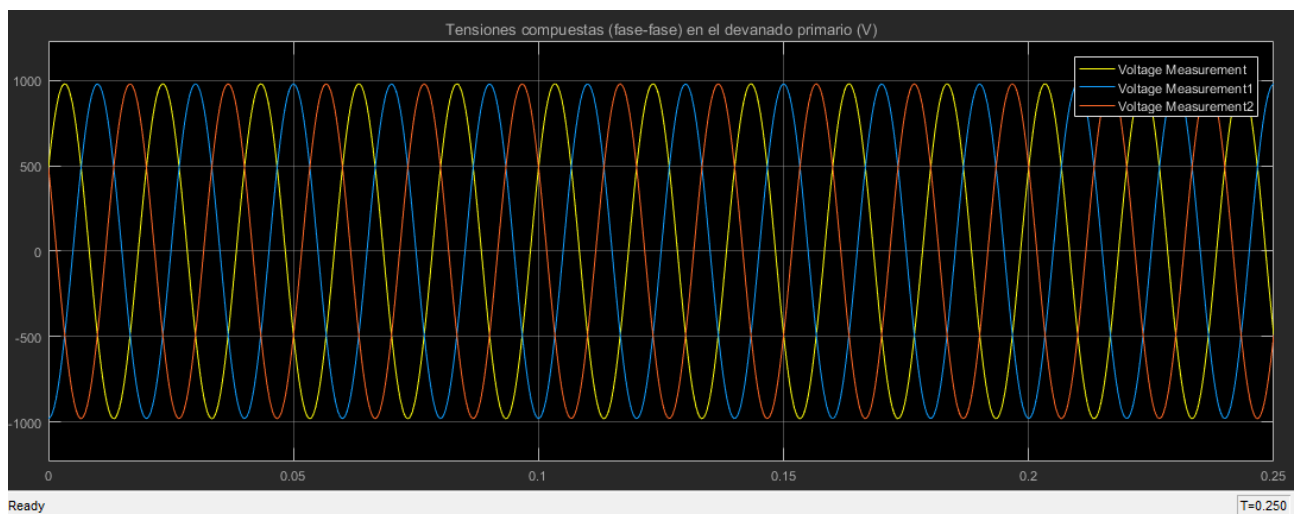


Ilustración 28: Simulación Yd5: Tensiones compuestas en el primario

Como ya se ha explicado anteriormente, en la conexión Yd5 solamente se produce desequilibrio en las intensidades, siendo, entre las intensidades de primario, la de la tercera fase la mayor. Las tensiones simples y compuestas de primario permanecen equilibradas como explica la teoría y como se demuestra a través de las gráficas mostradas anteriormente.

8.1.3 Simulaciones y resultados de la conexión Estrella-Zigzag Yz5

La simulación para este tipo de conexión a la hora de analizar qué sucede en el devanado primario queda de la siguiente manera:

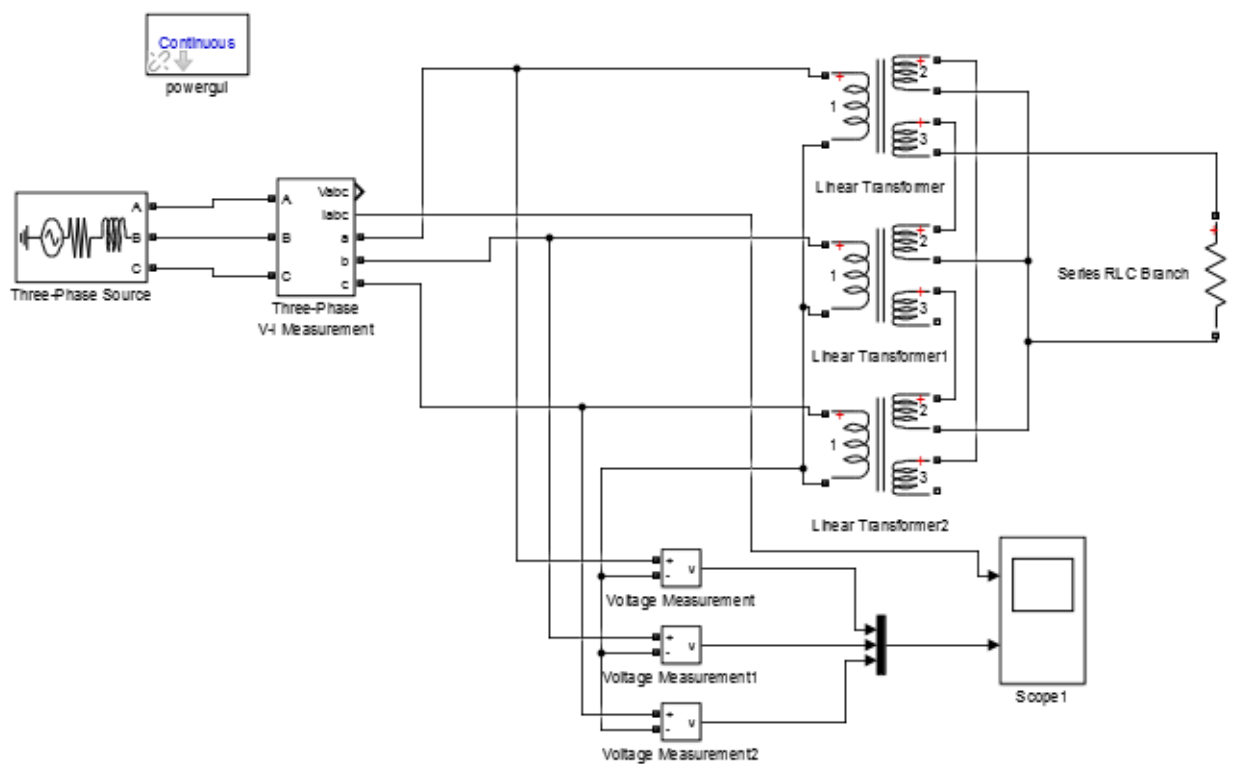


Ilustración 29: Simulación Yz5 para analizar el devanado primario

Como se ha mencionado en apartados anteriores, en el caso de la conexión Yz5, solamente se produce desequilibrio en las intensidades, mientras que las tensiones fase-neutro y las tensiones fase-fase permanecen equilibradas.

A continuación se presentan unas gráficas en las que se observa el desequilibrio en las intensidades y se verifica que las tensiones simples (fase-neutro) y las tensiones compuestas, es decir, entre fases, del devanado primario son simétricas.

Análisis del comportamiento de transformadores trifásicos ante cargas asimétricas

Esta simulación se lleva a cabo con un $t_s=0.25$ segundos:

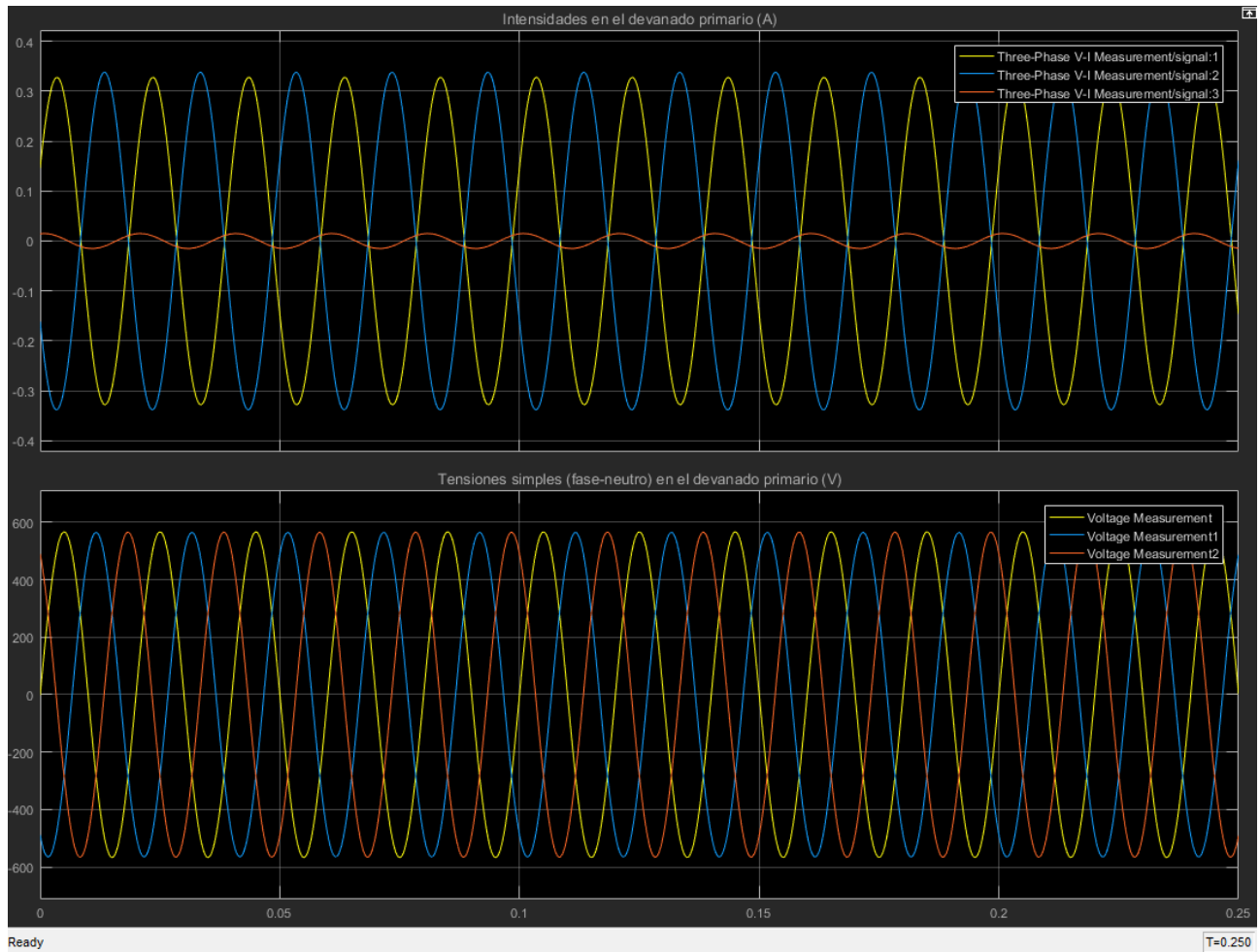


Ilustración 30: Simulación Yz5: Intensidades y tensiones simples en el primario

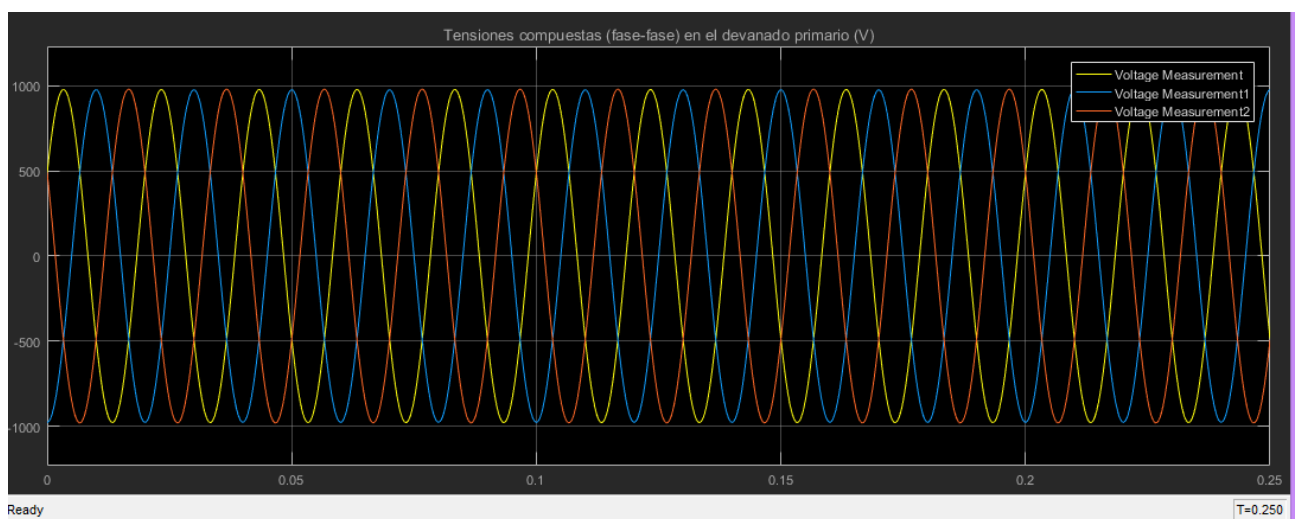


Ilustración 31: Simulación Yz5: Tensiones compuestas en el primario

A la vista de estas gráficas, se concluye que conectar el bobinado secundario en zig-zag estando el primario en estrella es una posible solución para los desequilibrios en las tensiones tanto del devanado primario como del secundario.

8.1.4 Simulaciones y resultados de la conexión Triángulo-Estrella Dy11

La simulación de este tipo de conexión para analizar el bobinado primario queda:

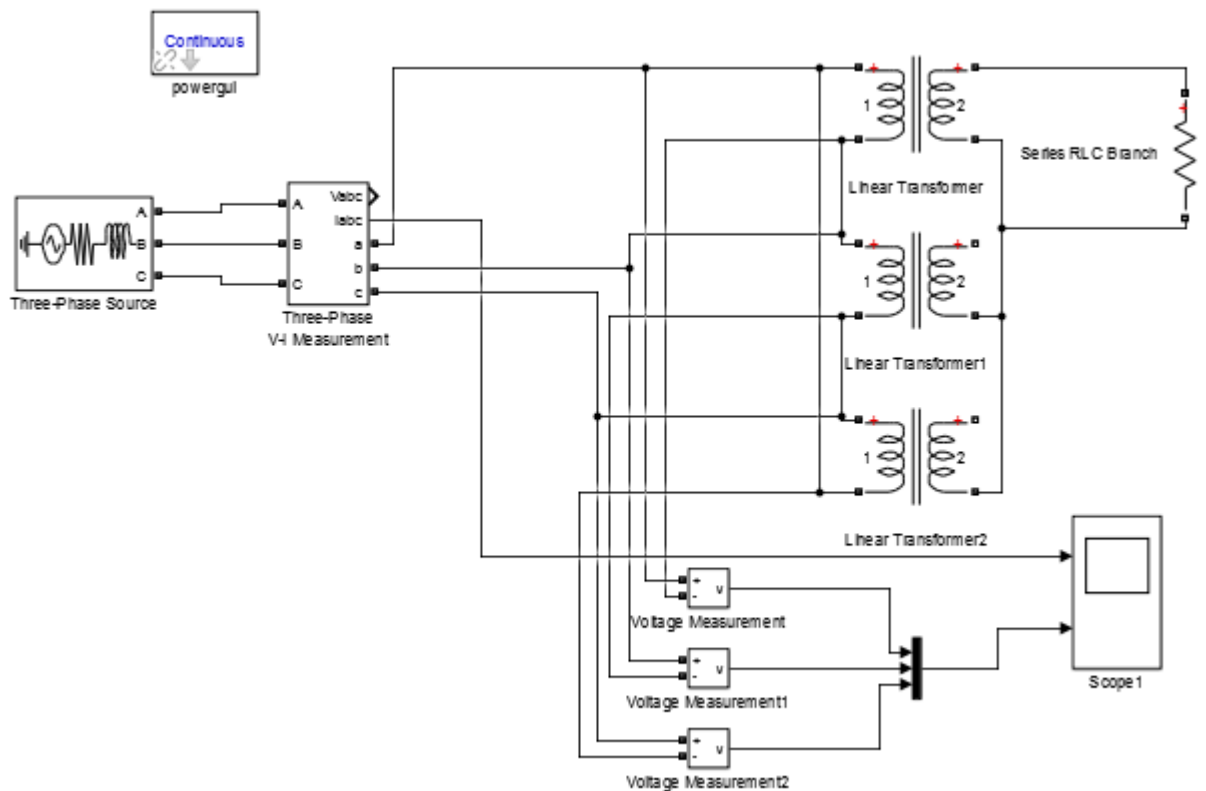


Ilustración 32: Simulación Dy11 para analizar el devanado primario

En esta simulación, la carga monofásica se ha conectado entre la primera fase del secundario y el neutro. A continuación se presentan unas gráficas en las que se observan las intensidades de línea y las tensiones simples del devanado primario con un $t_s=0.25$ segundos:

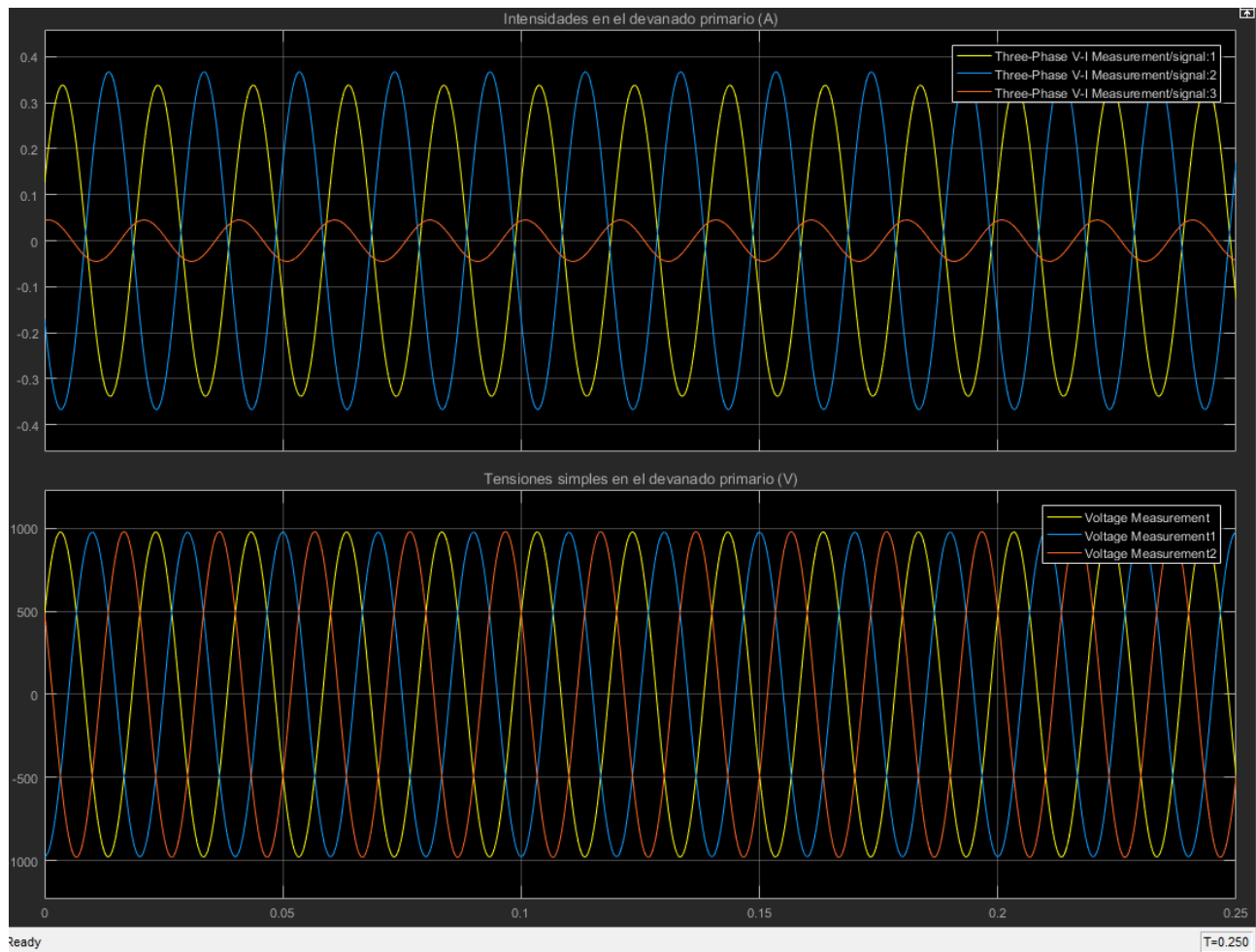


Ilustración 33: Simulación Dy11: Intensidades y tensiones simples en el primario

Se observa que estas gráficas verifican lo que se ha comentado en los apartados teóricos: Hay desequilibrio en las intensidades y las tensiones simples son equilibradas. Como en un triángulo las tensiones simples y las tensiones compuestas son iguales, se cumple que éstas últimas son equilibradas.

8.1.5 Simulaciones y resultados de la conexión Triángulo-Triángulo Dd0

La simulación para este tipo de conexión a la hora de analizar qué sucede en el devanado primario queda de la siguiente manera:

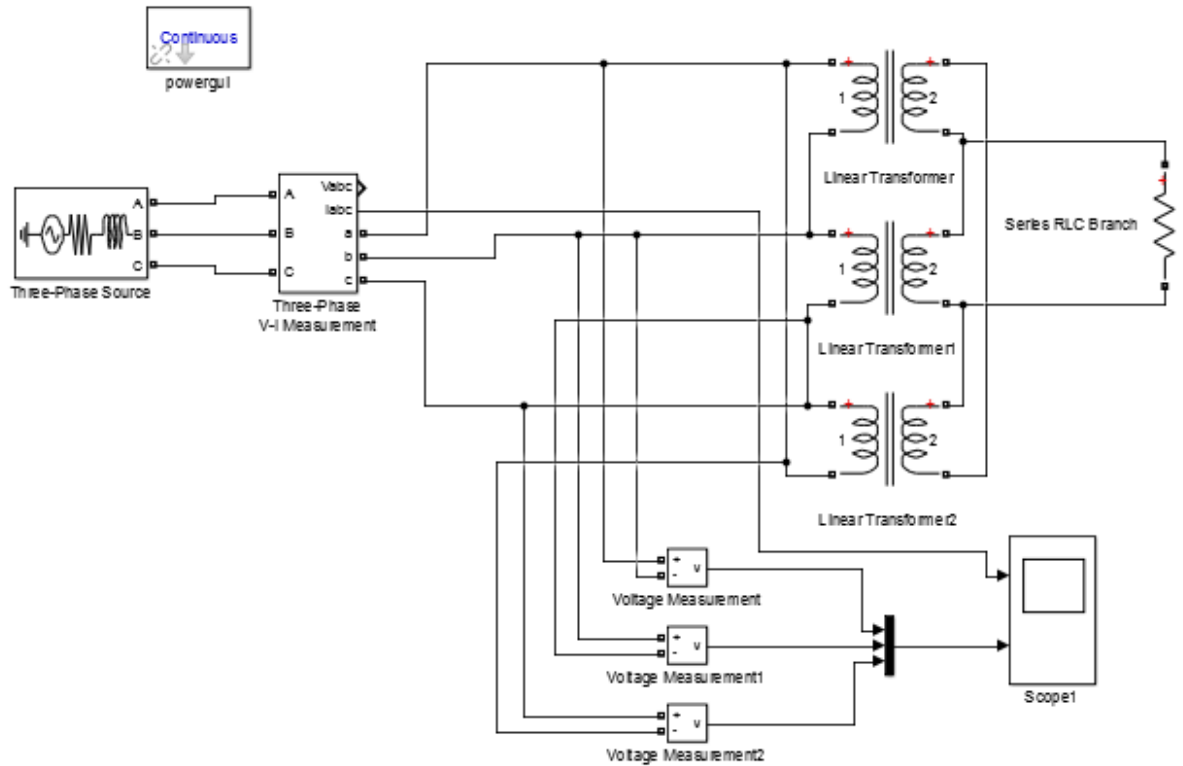


Ilustración 34: Simulación Dd0 para analizar el devanado primario

En esta simulación, la carga monofásica se ha conectado entre la primera y la segunda fase del secundario y seguidamente se presentan unas gráficas en las que se muestran las intensidades de línea y las tensiones simples del devanado primario con un $t_s = 0.25$ segundos.

En estas gráficas se aprecia que las intensidades están desequilibradas y que las tensiones simples son simétricas.

A la hora de analizar las tensiones compuestas, puesto que la conexión es en triángulo y las tensiones simples y las compuestas son iguales, se deduce que entre ellas no se produce desequilibrio ninguno.

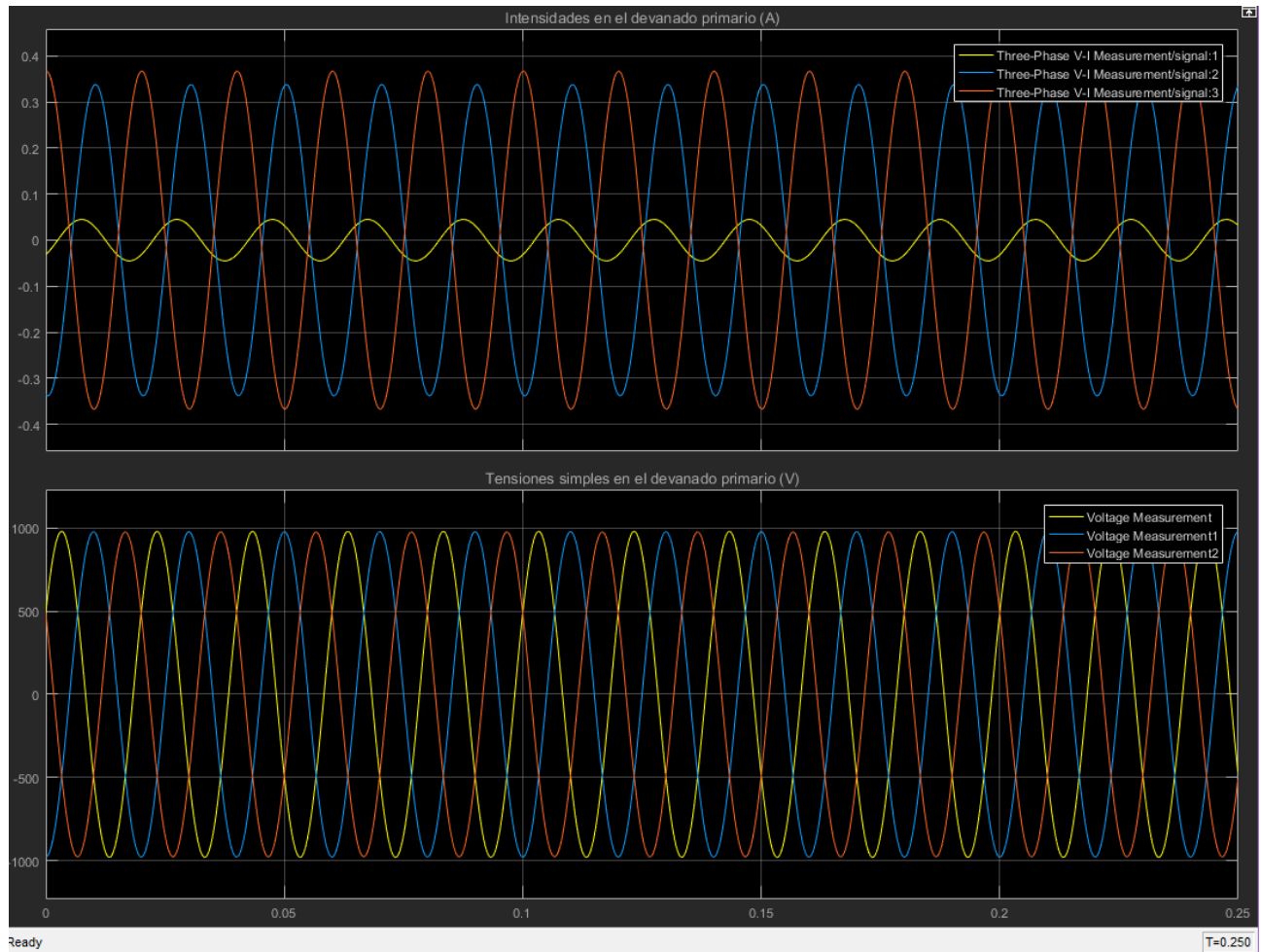


Ilustración 35: Simulación Dd0: Intensidades y tensiones simples en el primario

8.1.6 Simulaciones y resultados de la conexión Triángulo-Zigzag Dz6

A continuación se presenta la simulación de este tipo de conexión para analizar el bobinado primario acompañada de unas gráficas en las que se observan las intensidades de línea y las tensiones simples del devanado primario con un $t_s=0.25$ segundos.

De estas gráficas se extraen conclusiones similares a las obtenidas para el tipo de conexión Dd0: Las intensidades son desequilibradas mientras que las tensiones simples son simétricas. Como en un triángulo las tensiones simples y las compuestas son iguales, éstas últimas también serán equilibradas.

Análisis del comportamiento de transformadores trifásicos ante cargas asimétricas

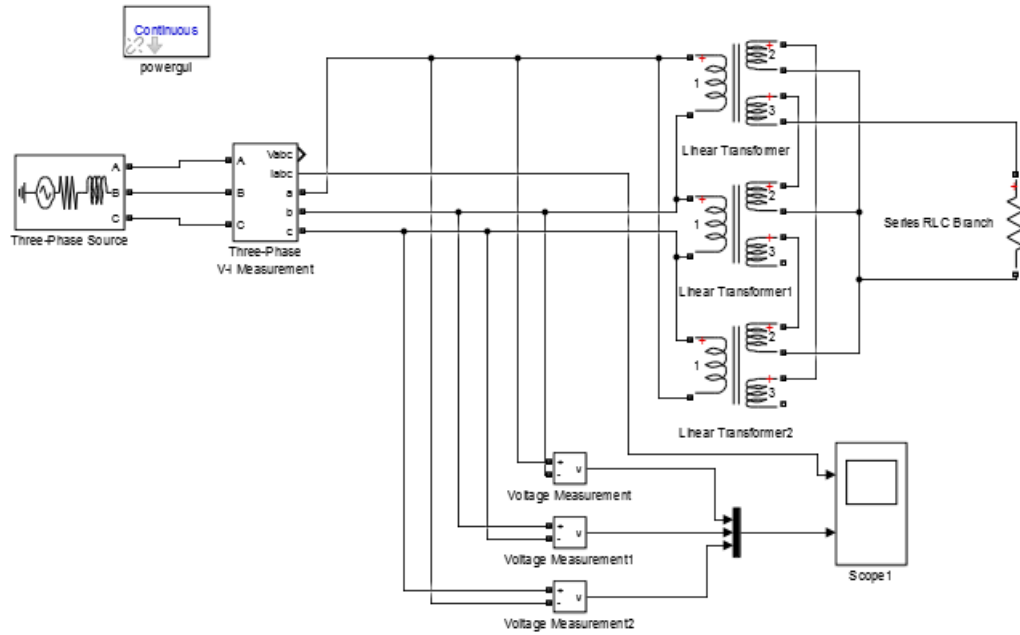


Ilustración 36: Simulación Dz6 para analizar el devanado primario

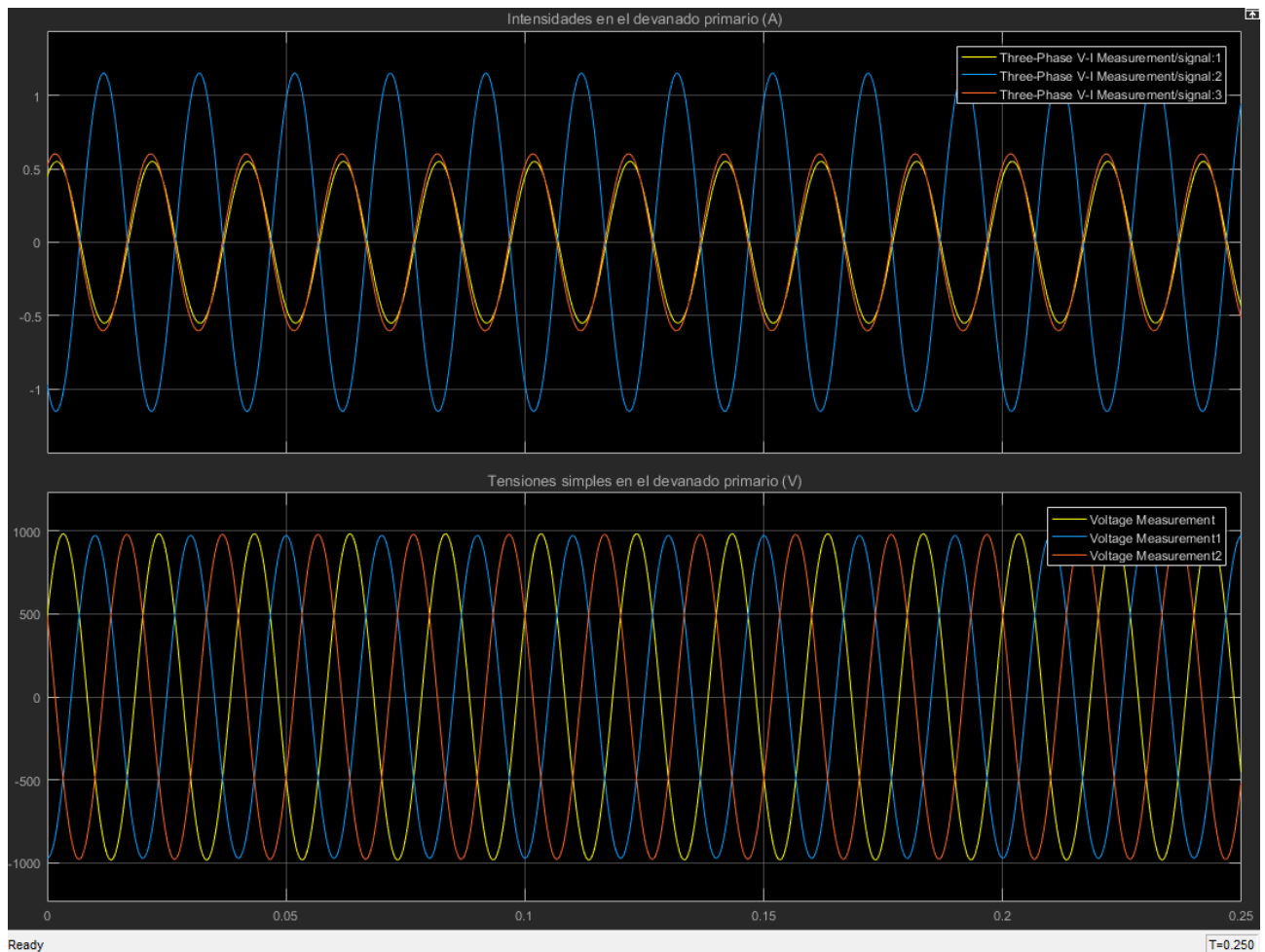


Ilustración 37: Simulación Dz6: Intensidades y tensiones simples en el primario

9. Descripción de tareas. Diagrama de Gantt

En este capítulo se presenta la secuencia de tareas que han sido necesarias para la elaboración de este TFG. En el desarrollo de este proyecto ha habido dos participantes: Un Ingeniero Senior, que se trata del director del presente TFG y una Ingeniera Junior, la cual ha llevado a cabo la realización del trabajo.

Las tareas que se han realizado para conseguir completar este TFG con éxito son las siguientes:

- **Planteamiento del TFG y búsqueda de información (P.T.1):** Comienza el Martes 13 de Junio de 2017, fecha en la cual comienza el proyecto después de una reunión (R1) entre el Ingeniero Senior y la Ingeniera Junior. En esta reunión, el Ingeniero Senior presenta una serie de propuestas de TFG, la estudiante elige la que le resulta más atractiva y comienza a buscar información, tanto en libros como en Internet acerca de la temática del TFG propuesto. Esta fase concluye el Martes 3 de Octubre de 2017 con una carga de trabajo de 40 horas.
- **Redacción de los 7 primeros apartados de la memoria del TFG (P.T.2):** Comienza el Martes 3 de Octubre de 2017 después de una reunión (R2) entre el Ingeniero Senior y la Ingeniera Junior. En esta reunión, el Ingeniero Senior establece las pautas para elaborar el TFG y la Ingeniera Junior procede a redactar los apartados teóricos de la memoria. Esta fase termina el Viernes 2 de Febrero de 2018 con una carga de trabajo de 70 horas.
- **Modelización y Simulaciones en MatLab (P.T.3):** Comienza el Viernes 2 de Febrero de 2018 tras otra reunión (R3) entre el Ingeniero Senior y la Ingeniera Junior. En esta reunión, el Ingeniero Senior da unas indicaciones acerca de cómo debería ser el modelo de simulación en MatLab y se procede a realizar dichas simulaciones. Esta fase acaba el Martes 10 de Abril de 2018 con una carga de trabajo de 40 horas.
- **Resolución de las últimas dudas (P.T.4):** Comienza el Martes 10 de Abril de 2018 después de una reunión (R4) entre el Ingeniero Senior y la Ingeniera Junior. En esta reunión, el Ingeniero Senior resuelve las dudas planteadas por la Ingeniera Junior y ésta procede a incluir las resoluciones en el TFG, así como redactar el resto de la memoria. Esta fase concluye el Miércoles 2 de Mayo de

2018 con una carga de trabajo de 40 horas.

- **Últimos detalles y entrega del TFG (P.T.5):** Comienza el Miércoles 2 de Mayo de 2018 después de una reunión (R5) entre el Ingeniero Senior y la Ingeniera Junior. En esta reunión, la estudiante presenta al director del TFG su proyecto, el Ingeniero Senior lo da por finalizado y se da vía libre para su entrega. Esta fase termina el Martes 8 de Mayo de 2018 con una carga de trabajo de 20 horas.

A continuación se presenta un diagrama de Gantt elaborado con la herramienta *SmartSheet* que está disponible On-Line y que ilustra gráficamente todas las tareas anteriormente mencionadas:

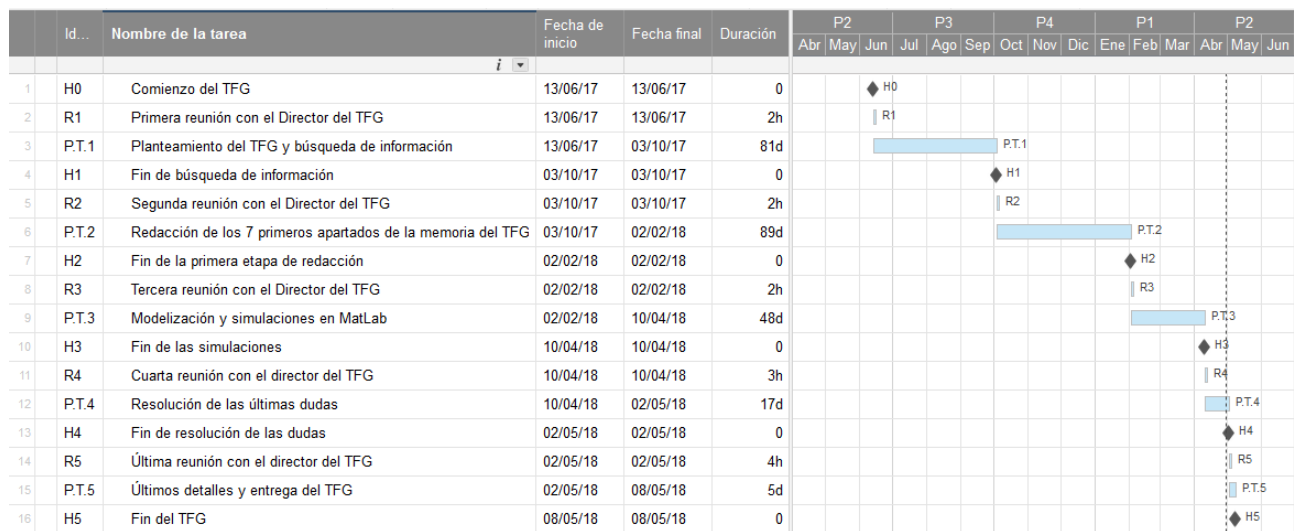


Ilustración 38: Diagrama de Gantt

10. Presupuesto

En este apartado se presenta la inversión necesaria para llevar a cabo este TFG. El presupuesto se define como el cálculo de costes que se realiza antes de llevar a cabo el proyecto, introduciendo todos los gastos posibles y se encuentra desglosado en varias partidas, las cuales se pasan a definir a continuación y se acompañan de su correspondiente valor.

10.1 Horas internas

En esta partida se incluyen las horas de trabajo del personal implicado en este TFG y para calcularlas se requiere una estimación horaria por tarea y participante, se multiplican esas horas por la tasa horaria individual y se suma todo.

En el caso de TFG, las personas implicadas son un Ingeniero Senior y una Ingeniera Junior. En la siguiente tabla, se incluyen todos los términos mencionados anteriormente y se obtiene el subtotal correspondiente a horas internas:

| HORAS INTERNAS | | | |
|------------------|-----------|-----------|---------|
| Concepto | Horas | €/Hora | |
| Ingeniero Senior | 15 horas | 70 €/Hora | 1.050 € |
| Ingeniera Junior | 210 horas | 35 €/Hora | 7.350 € |
| SUBTOTAL | | | 8.400 € |

Tabla 3: Partida de Horas Internas del Presupuesto

10.2 Amortizaciones

En esta partida se incluyen las valoraciones del uso en este TFG de los activos fijos. En este caso se incluirían la licencia de uso de MatLab y el equipo informático utilizado. Para calcular la amortización de un elemento, se divide el precio de adquisición entre la vida útil del mismo y posteriormente se multiplica por el tiempo de utilización para el proyecto, aunque también se emplea el término de tasa horaria, el cual incluye, además de la amortización, un término que considera los consumos de la máquina.

En la tabla siguiente se incluye el uso de cada elemento en relación a las horas que han sido empleados:

| AMORTIZACIONES | | | | |
|--------------------|--------|-------------|-----------|---------|
| Concepto | Coste | Vida útil | Uso | |
| Ordenador | 500 € | 4.800 horas | 210 horas | 21,88 € |
| Licencia de MatLab | 1200 € | 1.600 horas | 80 horas | 60 € |
| SUBTOTAL | | | | 81,88 € |

Tabla 4: Partida de Amortizaciones del Presupuesto

10.3 Gastos

En esta partida se incluyen aquellos gastos que, una vez han sido utilizados en el proyecto, no pueden ser reutilizados. En el caso de este TFG se incluye el material fungible que ha sido necesario para la realización de este proyecto.

En la tabla siguiente se incluye este gasto:

| GASTOS | |
|-------------------|-------|
| Concepto | Coste |
| Material fungible | 150 € |
| SUBTOTAL | 150 € |

Tabla 5: Partida de Gastos del Presupuesto

10.4 Total

Por último se presenta una tabla resumen que incluye todas las partidas del presupuesto anteriormente mencionadas, así como los costes indirectos, que son aquellos que no se pueden imputar a ningún proyecto y constituyen un porcentaje (10%) de los gastos directos.

| PRESUPUESTO | |
|---------------------|-------------------|
| HORAS INTERNAS | 8.400 € |
| AMORTIZACIONES | 81,88 € |
| GASTOS | 150 € |
| SUBTOTAL | 8.631,88 € |
| COSTES INDIRECTOS | 863,19 € |
| <u>TOTAL</u> | 9.495,07 € |

Tabla 6: Presupuesto total

11. Conclusiones

En este último apartado se hace una recapitulación de los principales resultados que cabe esperar de las variables analizadas en cada tipo de conexión y consideraciones a tener en cuenta.

- Estrella-Estrella: Intensidades desequilibradas y tensiones desequilibradas.
- Estrella-Triángulo: Intensidades desequilibradas y tensiones equilibradas.
- Estrella-Zigzag: Intensidades desequilibradas y tensiones equilibradas.
- Triángulo-Estrella: Intensidades desequilibradas y tensiones equilibradas.
- Triángulo-Triángulo: Intensidades desequilibradas y tensiones equilibradas.
- Triángulo-Zigzag: Intensidades desequilibradas y tensiones equilibradas.
- Tan sólo los grupos de conexión Estrella-Estrella son inadecuados ante cargas desequilibradas, lo cual se puede solucionar mediante un hilo adicional en el neutro de la estrella de primario o utilizando la conexión zig-zag en el secundario para obtener un equilibrio en las tensiones simples y compuestas.
- El equilibrado de la tensión de las fases es esencial para poder trabajar en unos valores altos de potencia instalada y así poder sacar el máximo partido a la instalación, así como evitar problemas que puedan surgir, como los armónicos.
- En resumen, y teniendo en cuenta todo lo anteriormente expuesto se extrae que los tipos de conexión más convenientes en caso de que el sistema esté conectado ante cargas asimétricas son: Estrella-Triángulo, Estrella-Zigzag y Triángulo-Estrella.

12. Referencias y fuentes de información

Las referencias y las fuentes de información que han sido utilizadas para elaborar este TFG son las siguientes:

[1] Maracay PSM, Blogtx, “*La importancia de los transformadores en los sistemas eléctricos*”, Jueves, 29 de Octubre de 2015. Disponible en World Wide Web [En línea]. Último acceso 10/04/2018.

<https://transformadorespsm.wordpress.com/2015/10/29/importancia-de-los-transformadores-en-los-sistemas-electricos/>

[2] J. Fraile Mora, “*Máquinas eléctricas*”, Página 161, 2003.

[3] J. Mazón, J.F. Miñambres, M.A. Zorrozua, G. Buigues, V. Valverde, “*Guía de autoaprendizaje de máquinas eléctricas*”, Bilbao, Página 124, 2008.

[4] Fravedsa, “*Blog dedicado a temas de Ingeniería Eléctrica en general donde se explican desde los conceptos más básicos hasta aplicaciones particulares: Conexiones en el transformador*”, Martes, 25 de noviembre de 2014. Disponible en World Wide Web [En línea]. Último acceso 10/04/2018.

<http://ingenieriaelectricafravedsa.blogspot.com.es/2014/11/conexiones-transformador.html>

[5] Valles, Marcos, “*Quinto armónico.es, El lugar donde reside la energía: Desequilibrios y sus consecuencias en los Centros de Transformación*”, 2 de Agosto de 2009, Disponible en World Wide Web [En línea]. Último acceso 10/04/2018.

<http://quintoarmonico.es/2009/08/02/desequilibrios-y-sus-consecuencias-en-los-centros-de-transformacion/>

[6] Power Quality Initiative, Leonardo, “*Desequilibrio de tensión*”, Revista online Constructor Eléctrico, 23 de Julio de 2014, Disponible en World Wide Web [En línea]. Último acceso 10/04/2018.

<https://constructorelectrico.com/desequilibrio-de-tension/>

[7] Carrillo González, Camilo José, “*Introducción al PSCAD*”, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Vigo, 2014, Disponible en World Wide Web [En línea]. Último acceso 10/04/2018.

<http://carrillo.webs.uvigo.es/publicaciones/IndroduccionPSCAD.pdf>

[8] Caballero, Paco, “*10 criterios para elegir una herramienta software*”, Miércoles, 27 de Julio de 2016, Disponible en World Wide Web [En línea]. Último acceso 10/04/2018.

<http://kolab.korumadvisor.com/10-criterios-para-elegir-una-herramienta-software>

[9] Fravedsa, “*Blog dedicado a temas de Ingeniería Eléctrica en general donde se explican desde los conceptos más básicos hasta aplicaciones particulares: Circuito equivalente del transformador*”, Viernes, 5 de Diciembre de 2014. Disponible en World Wide Web [En línea]. Último acceso 10/04/2018.

<http://ingenieriaelectricafravedsa.blogspot.com.es/2014/12/circuito-equivalente-transformador.html>

13. Anexo I: Normativa Aplicable

Las normativas aplicables a este TFG son las siguientes:

- Reglamento de líneas de Alta Tensión: Real Decreto 3151/1968.
- Reglamento de líneas de Baja Tensión: Real Decreto 842/2002.
- Para transformadores: ITC RAT 07 + UNE 21428

14. Anexo II: Resultados

A continuación se presentan más resultados de las simulaciones realizadas en el modelo desarrollado en MatLab. Todas se han elaborado con un $t_s=0.25$ segundos.

Al igual que en el apartado 8, se ha convenido mostrar únicamente las variables del bobinado primario ya que las del bobinado secundario no aportan información adicional.

14.1 Simulaciones y resultados adicionales de la conexión Estrella-Estrella Yy0

A continuación se realizan las mismas simulaciones que en el apartado 8.1.1 pero variando la carga. Ahora se va a emplear una carga resistiva de 10000 ohmios.

Las intensidades y tensiones simples en el primario quedan de la siguiente manera:

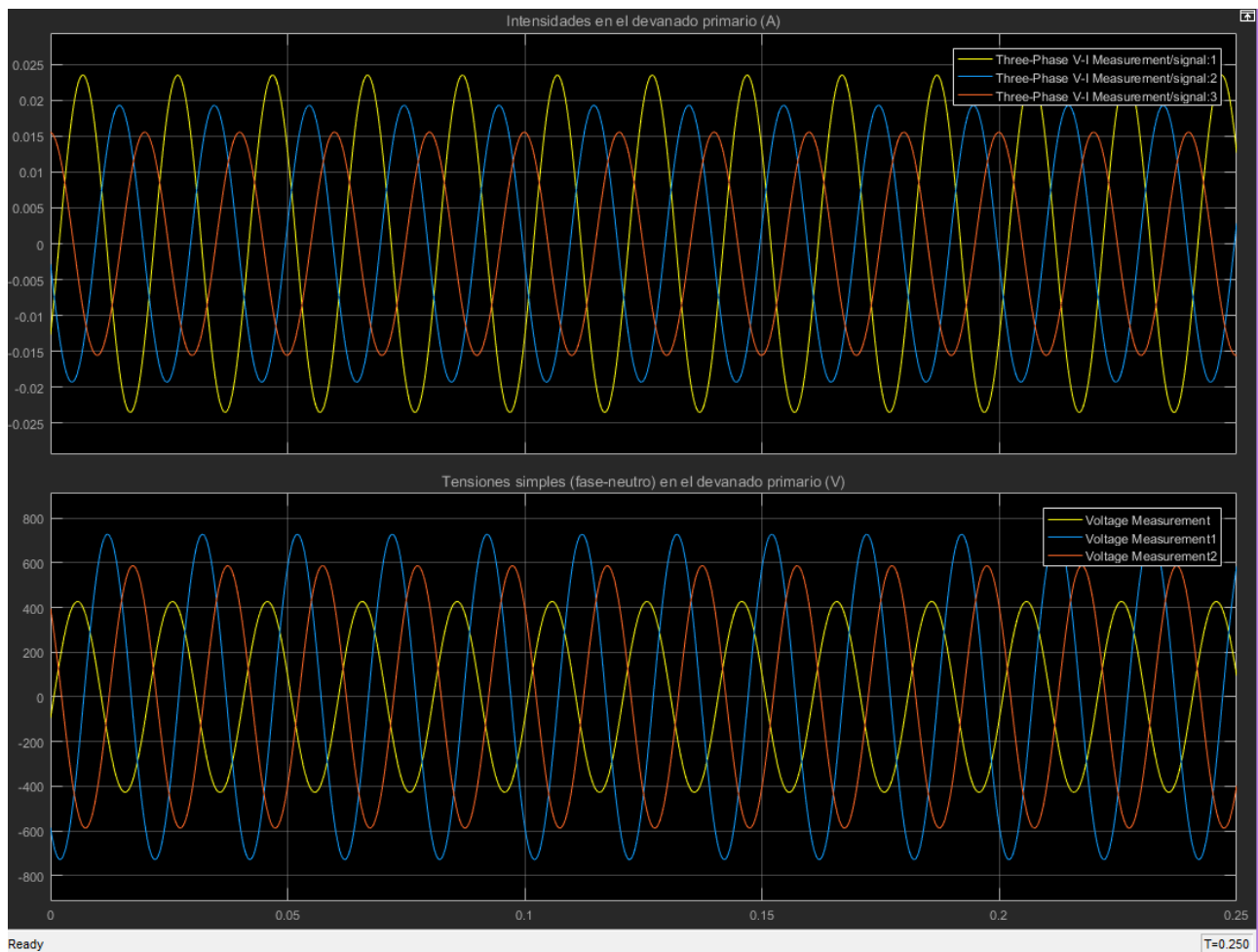


Figura A2 1: Simulación Yy0: Carga resistiva: Intensidades y tensiones simples en el primario

Análisis del comportamiento de transformadores trifásicos ante cargas asimétricas

Al ir aumentando el valor de la carga se observa cómo va desapareciendo el desequilibrio y tanto tensiones simples como intensidades se equilibran en el primario.

En el caso de poner una carga inductiva de valor 10^{-3} Henrios, se espera que tanto intensidades como tensiones simples sean desequilibradas como en el caso de carga resistiva.

Al analizar el bobinado primario, se observa que la tensión simple de la fase uno es menor que en casos anteriores, pero se verifican las hipótesis de partida como se muestra en la siguiente imagen:

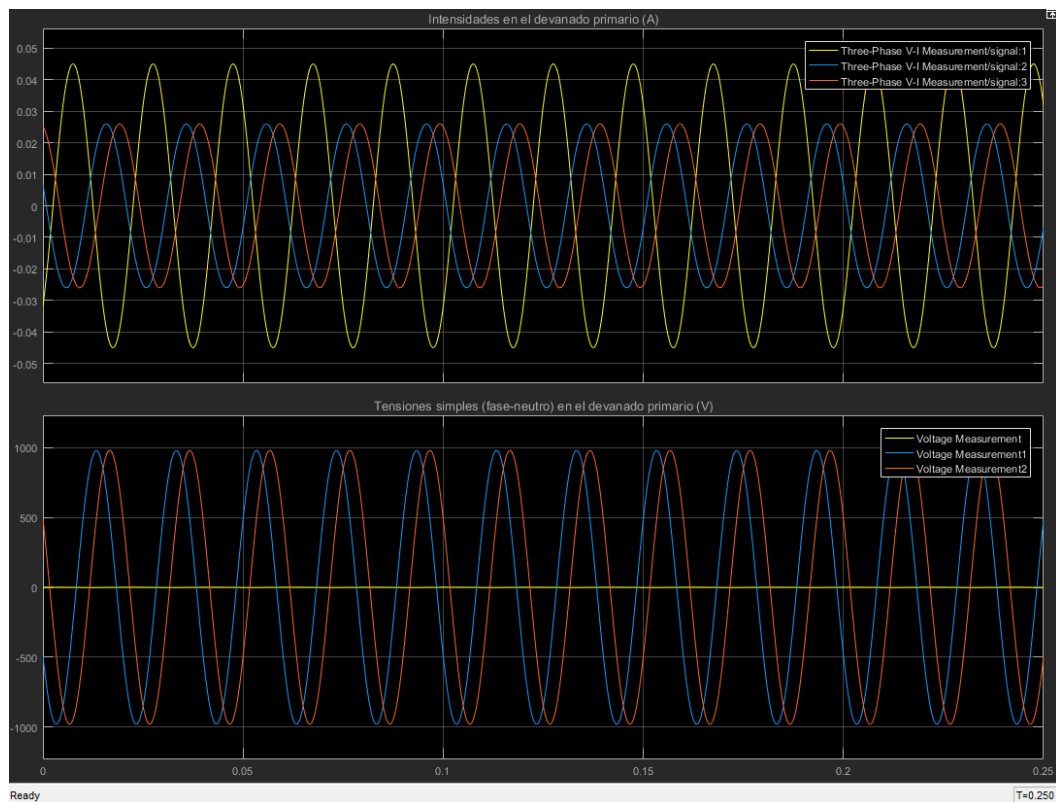


Figura A2 2: Simulación Yy0: Carga inductiva: Intensidades y tensiones simples en el primario

A continuación se procede a analizar qué sucede al conectar una carga capacitiva de valor 10^{-6} Faradios.

Entonces se procederá a analizar que pasa en el devanado primario. Al visualizar el *Scope* se observa que existe un desequilibrio tanto en tensiones como en intensidades y ninguna de las fases es igual, cosa que no sucede con cargas inductivas o resistivas.

Todas estas conclusiones vienen de la gráfica que se presenta a continuación.

Análisis del comportamiento de transformadores trifásicos ante cargas asimétricas

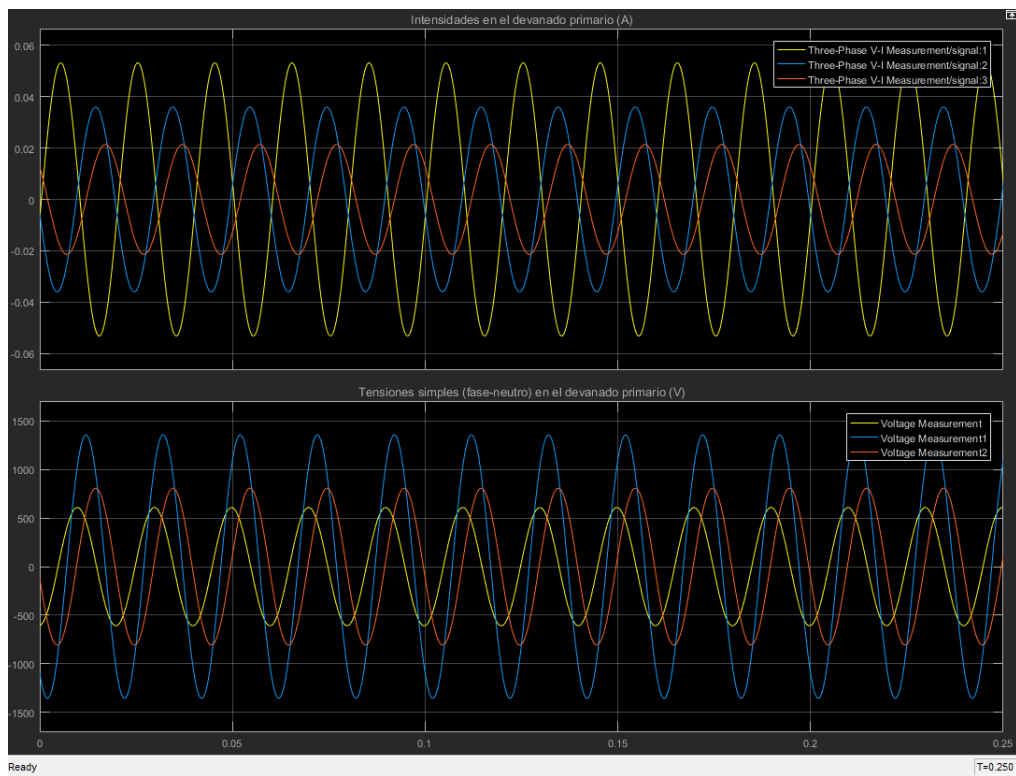


Figura A2 3: Simulación Yy0: Carga capacitiva: Intensidades y tensiones simples en el primario

14.2 Simulaciones y resultados adicionales de la conexión Estrella-Triángulo Yd5

A continuación se realizan las mismas simulaciones que en el apartado 8.1.2 pero empleando una carga resistiva de 10000 ohmios.

Las intensidades y tensiones simples en el primario obtenidas son:

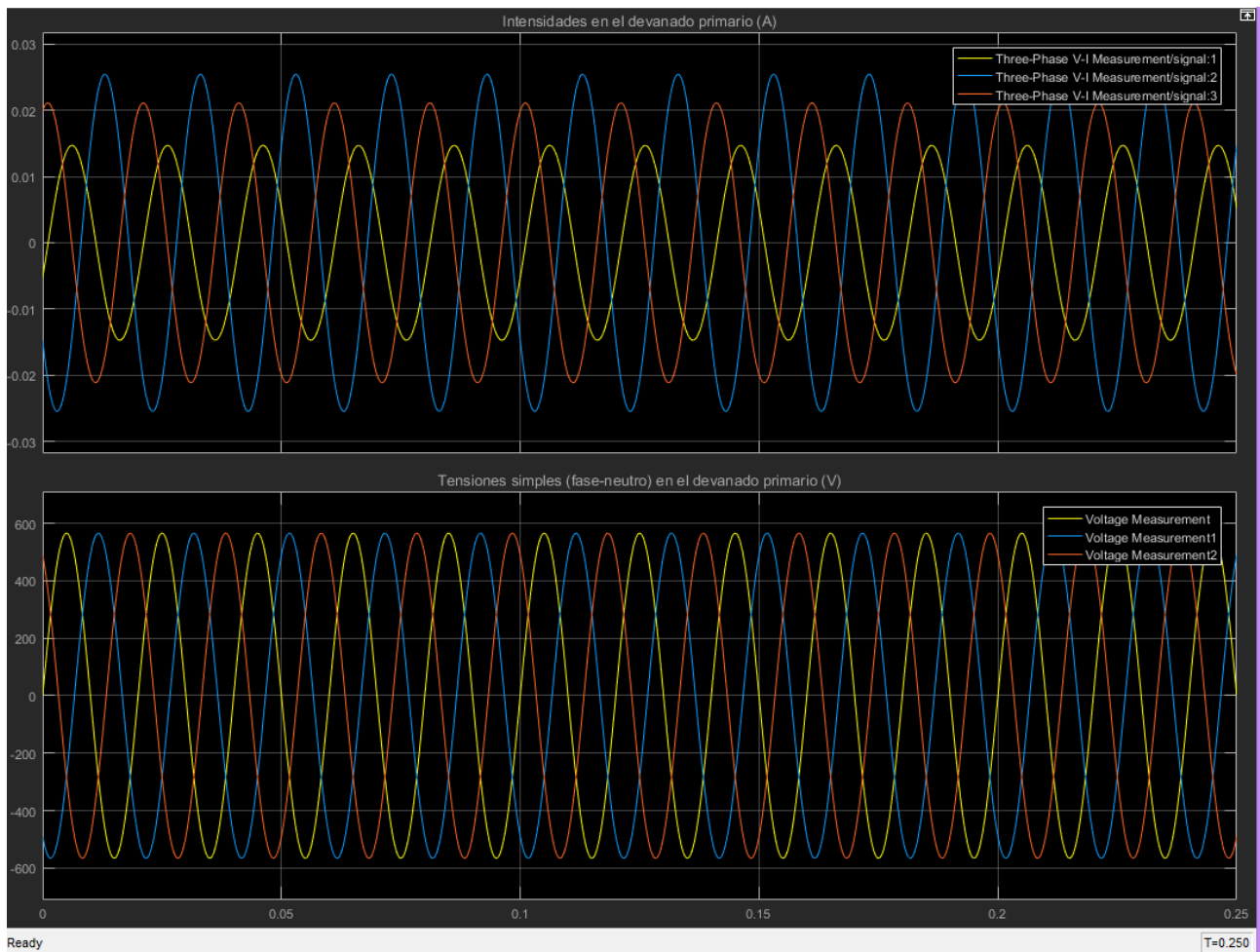


Figura A2 4: Simulación Yd5: Carga resistiva: Intensidades y tensiones simples en el primario

Conforme se aumenta el valor de la carga resistiva el desequilibrio de las intensidades en primario va desapareciendo. En lo referente a tensiones simples se observa que están equilibradas.

Al colocar una carga inductiva de valor 10^{-3} Henrios, se obtienen las siguientes gráficas:

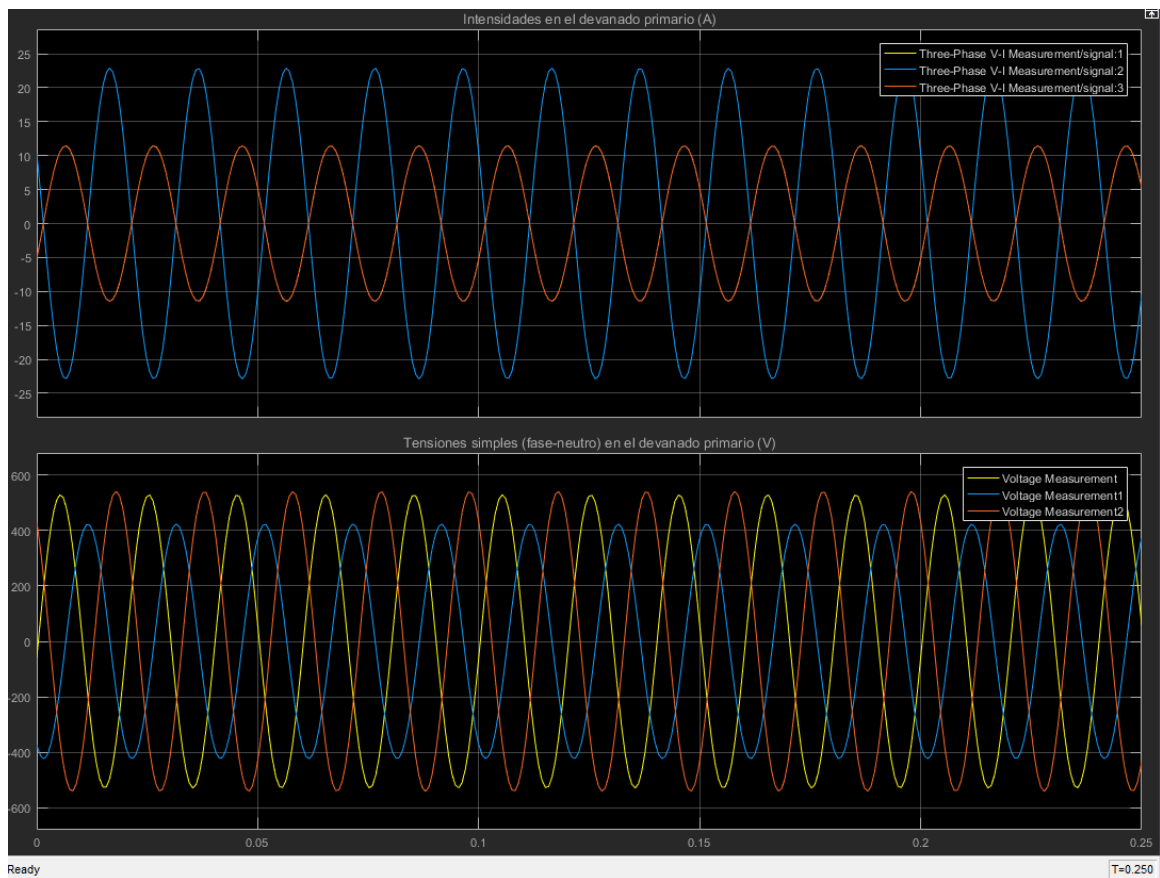


Figura A2 5: Simulación Yd5: Carga inductiva: Intensidades y tensiones simples en el primario

Con esta carga se observa que tanto intensidades como tensiones simples se desequilibran, aunque en el caso de las tensiones simples, el desequilibrio es pequeño en comparación con las intensidades, las cuales sufren un desequilibrio bastante notable ya que éstas toman valores muy elevados en comparación con los demás casos.

A continuación se procede a conectar una carga capacitiva de valor 10^{-6} Faradios y se observa qué ocurre en su devanado primario:

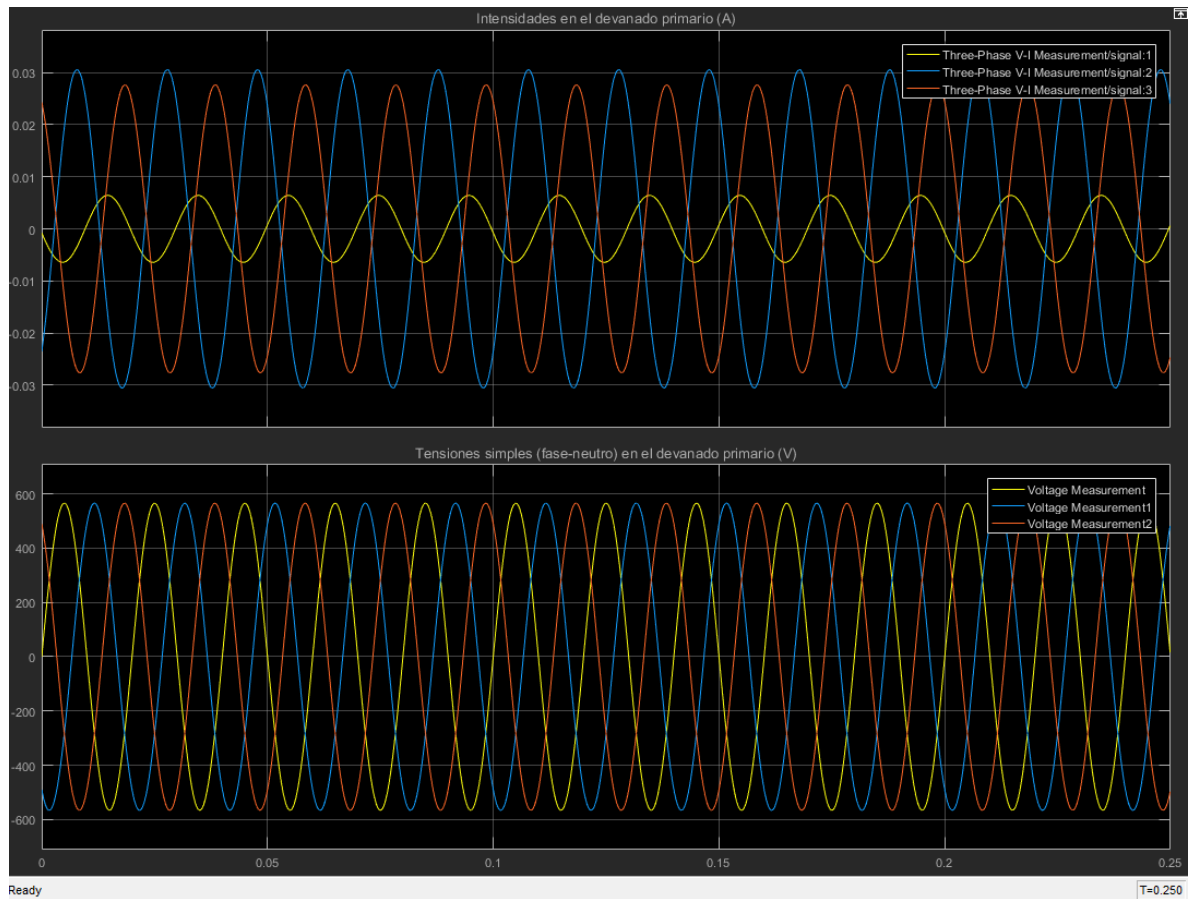


Figura A2 6: Simulación Yd5: Carga capacitiva: Intensidades y tensiones simples en el primario

En este caso se ve como las intensidades están desequilibradas, mientras que las tensiones simples son simétricas.

14.3 Simulaciones y resultados adicionales de la conexión Estrella-Zigzag Yz5

A continuación se realizan las mismas simulaciones que en el apartado 8.1.3 pero variando la carga. Ahora se va a emplear una carga resistiva de 10000 ohmios.

Al estudiar el devanado primario se obtiene:

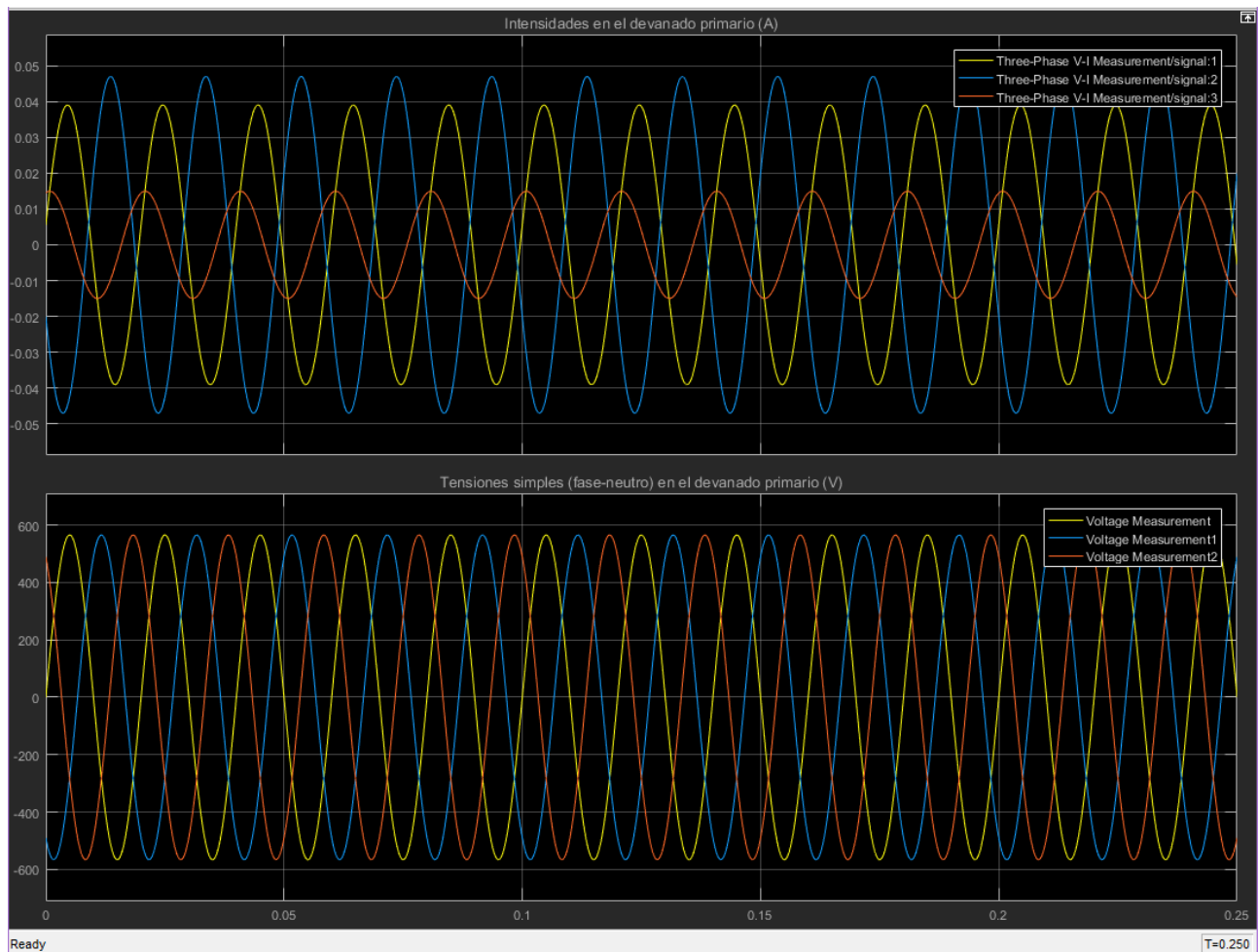


Figura A2 7: Simulación Yz5: Carga resistiva: Intensidades y tensiones simples en el primario

Las conclusiones que se extraen de estas gráficas son análogas a las que se ven en el apartado 8.1.3: se aprecia que las intensidades están desequilibradas mientras que las tensiones simples permanecen equilibradas. En el caso de las intensidades se puede ver que conforme aumenta el valor de la carga, el desequilibrio se va atenuando.

A continuación, se pasa a analizar qué sucede en el caso de que se conecte una carga inductiva con un valor de 10^{-3} Henrys:

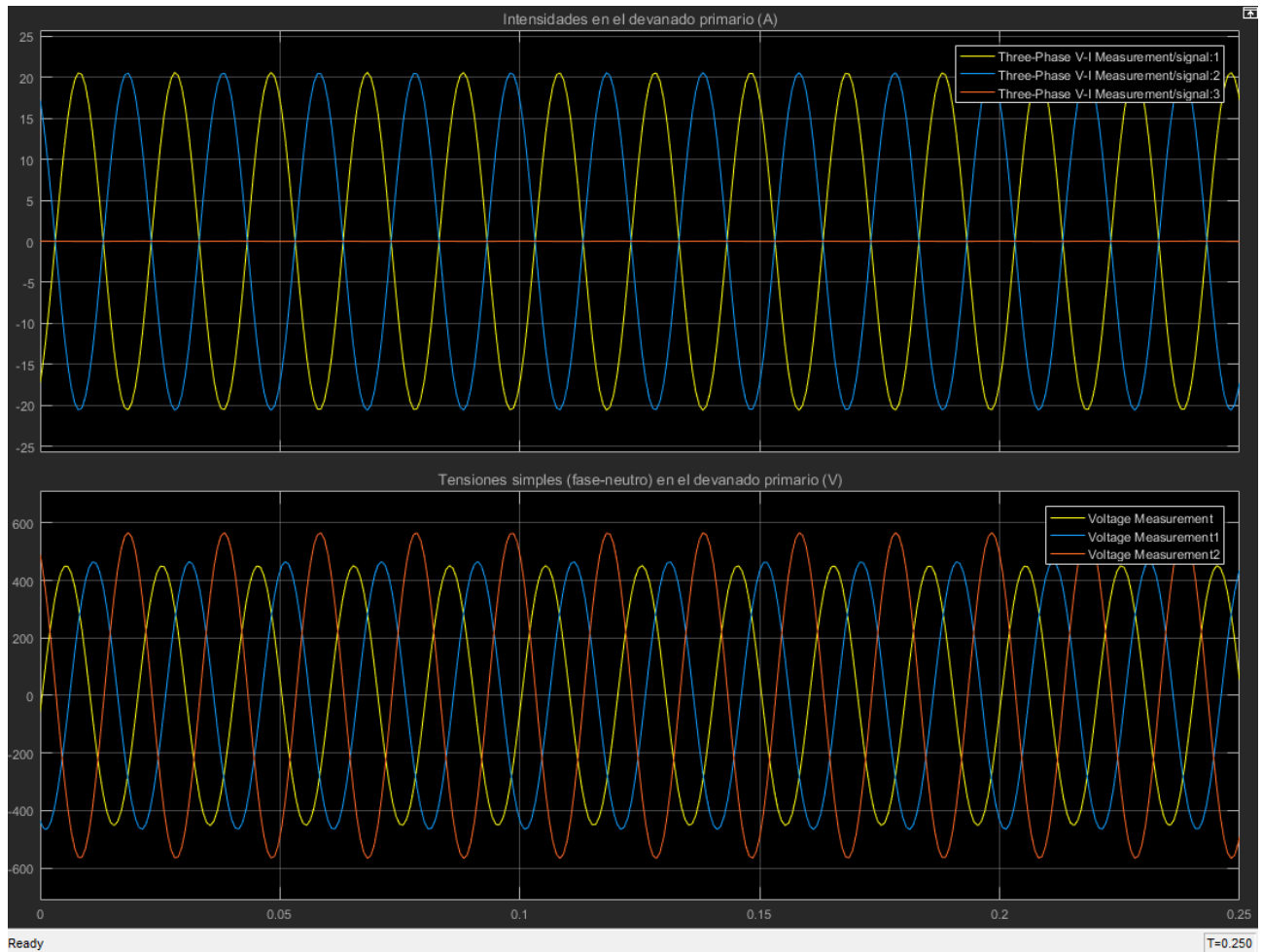


Figura A2 8: Simulación Yz5: Carga inductiva: Intensidades y tensiones simples en el primario

Con este tipo de carga se observa que tanto intensidades como tensiones simples se desequilibran. A pesar de ello, el desequilibrio de las tensiones simples es menos notable que el de las intensidades.

A continuación se estudia qué sucede en el bobinado primario al conectar una carga capacitiva de valor 10^{-6} Faradios.

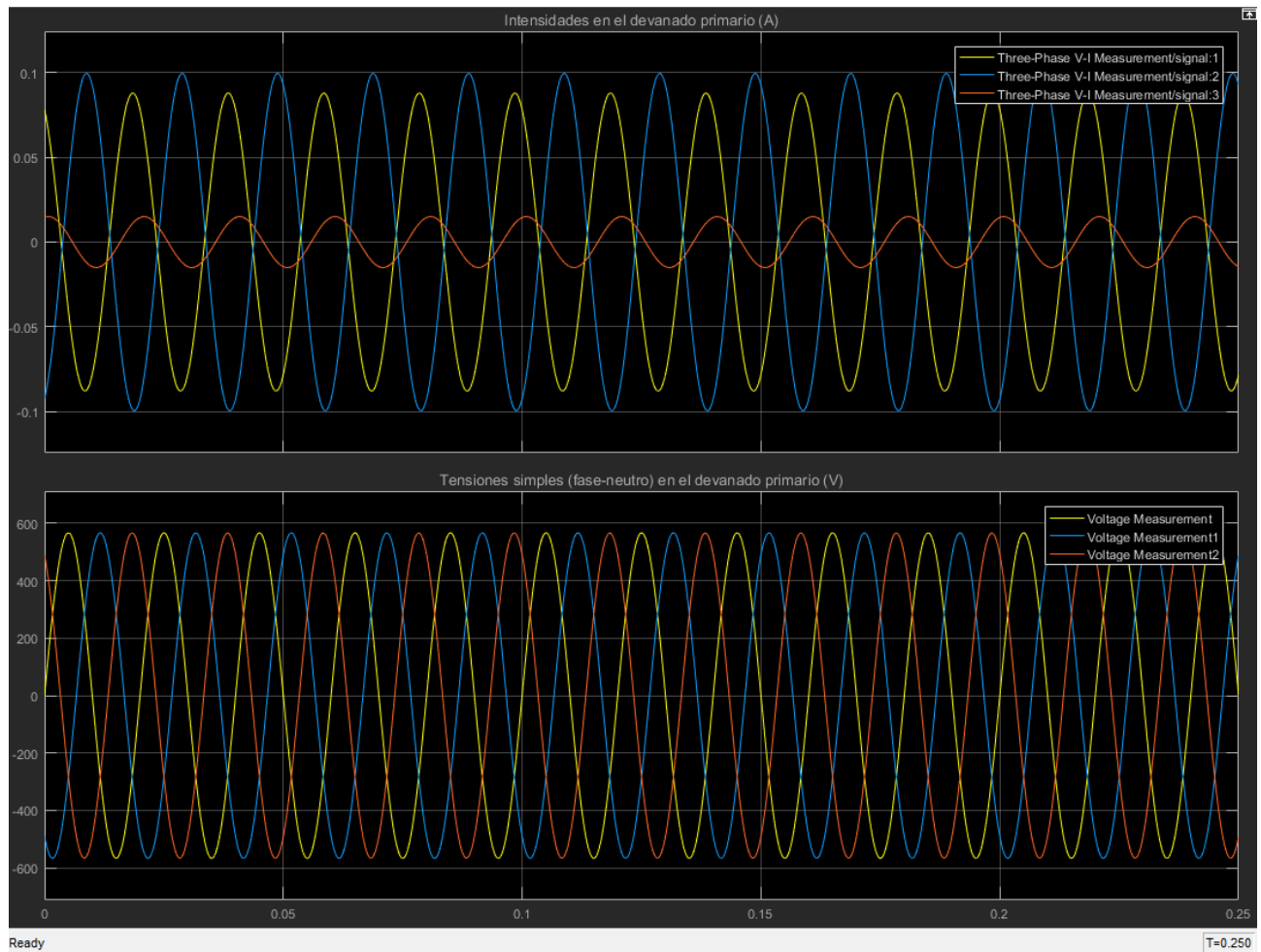


Figura A2 9: Simulación Yz5: Carga capacitiva: Intensidades y tensiones simples en el primario

Las gráficas muestran cómo se produce un desequilibrio en las intensidades mientras que las tensiones simples son equilibradas, como cabría esperar.

14.4 Simulaciones y resultados adicionales de la conexión Triángulo-Estrella Dy11

A continuación se realizan las mismas simulaciones que en el apartado 8.1.4 pero variando la carga. Ahora se va a emplear una carga resistiva de 10000 ohmios.

Al simular y ver qué sucede en el devanado primario se obtiene:

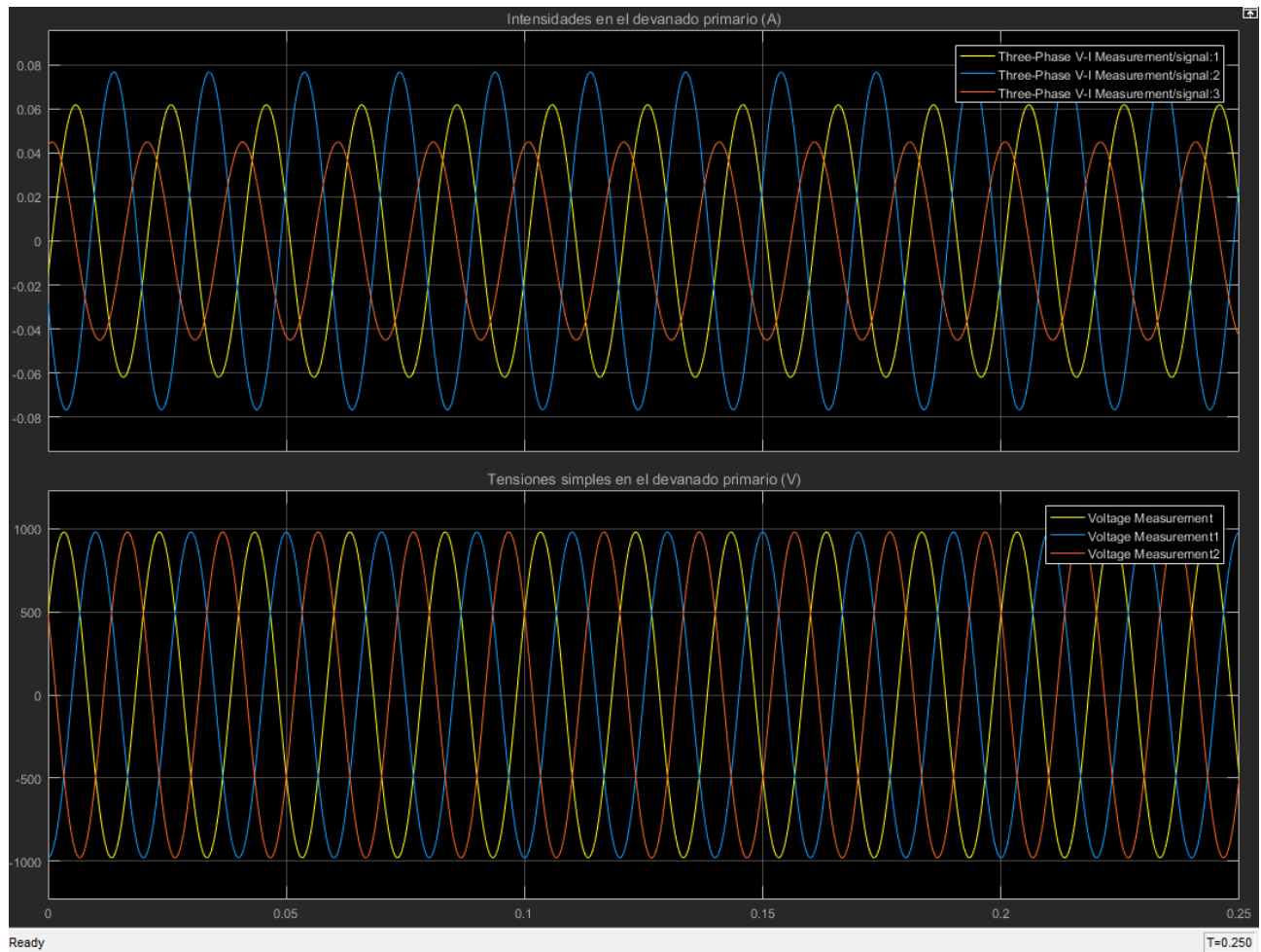


Figura A2 10: Simulación Dy11: Carga resistiva: Intensidades y tensiones simples en el primario

En esta gráfica se verifica, al igual que en el caso de una carga resistiva de 1000 ohmios, que las intensidades de línea están desequilibradas y las tensiones simples son simétricas.

Al colocar una carga inductiva de valor 10^{-3} Henrys, se obtienen las siguientes gráficas.

Al estudiar el primer bobinado, se ve como tanto tensiones como intensidades de línea están desequilibradas.

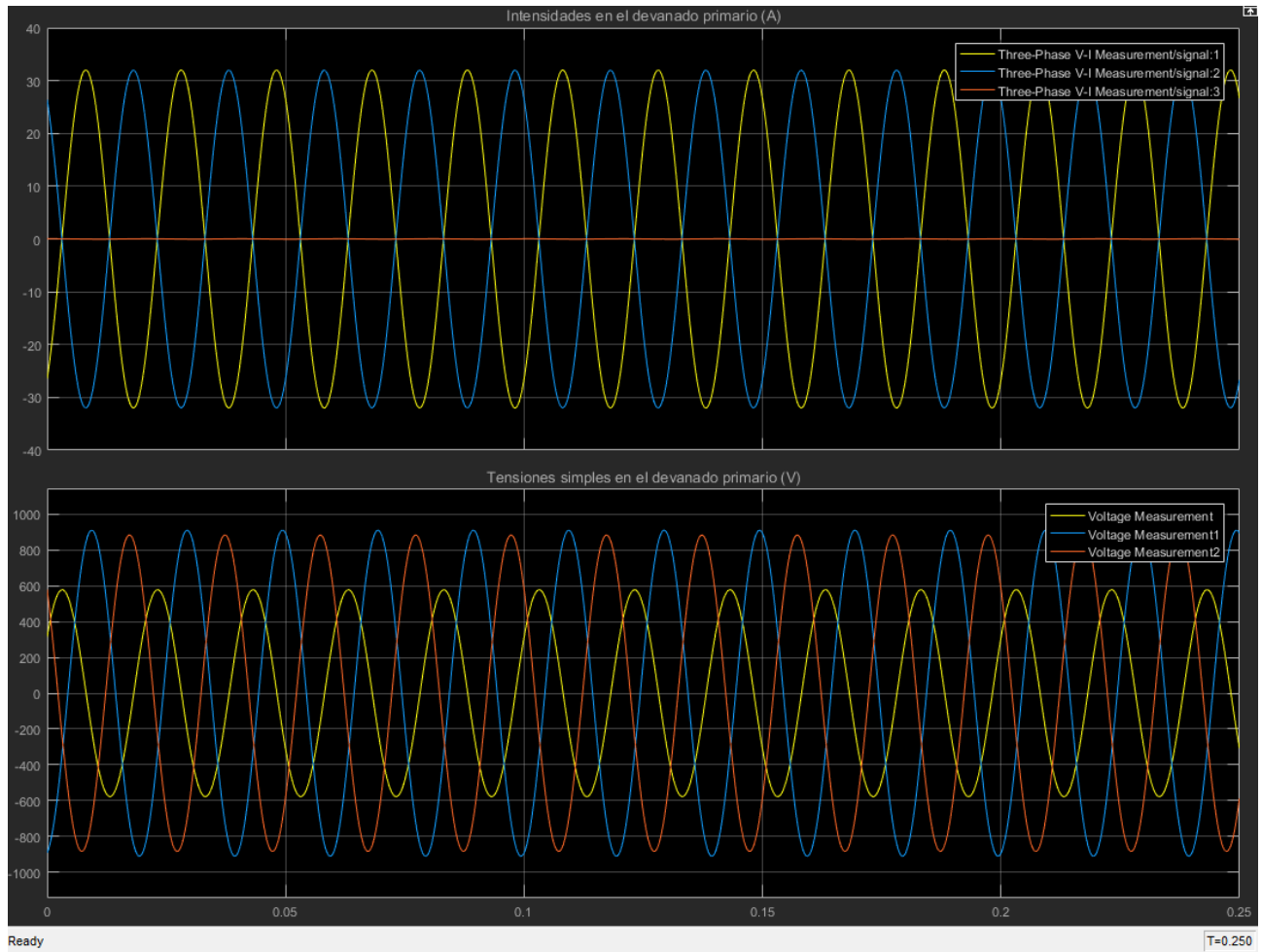


Figura A2 11: Simulación Dy11: Carga inductiva: Intensidades y tensiones simples en el primario

Por último, se coloca una carga de 10^{-6} Faradios y se realizan las simulaciones.

En el caso del devanado primario, se extraen estas gráficas, en las cuales se aprecia como las intensidades de línea están desequilibradas mientras que las tensiones simples son simétricas:

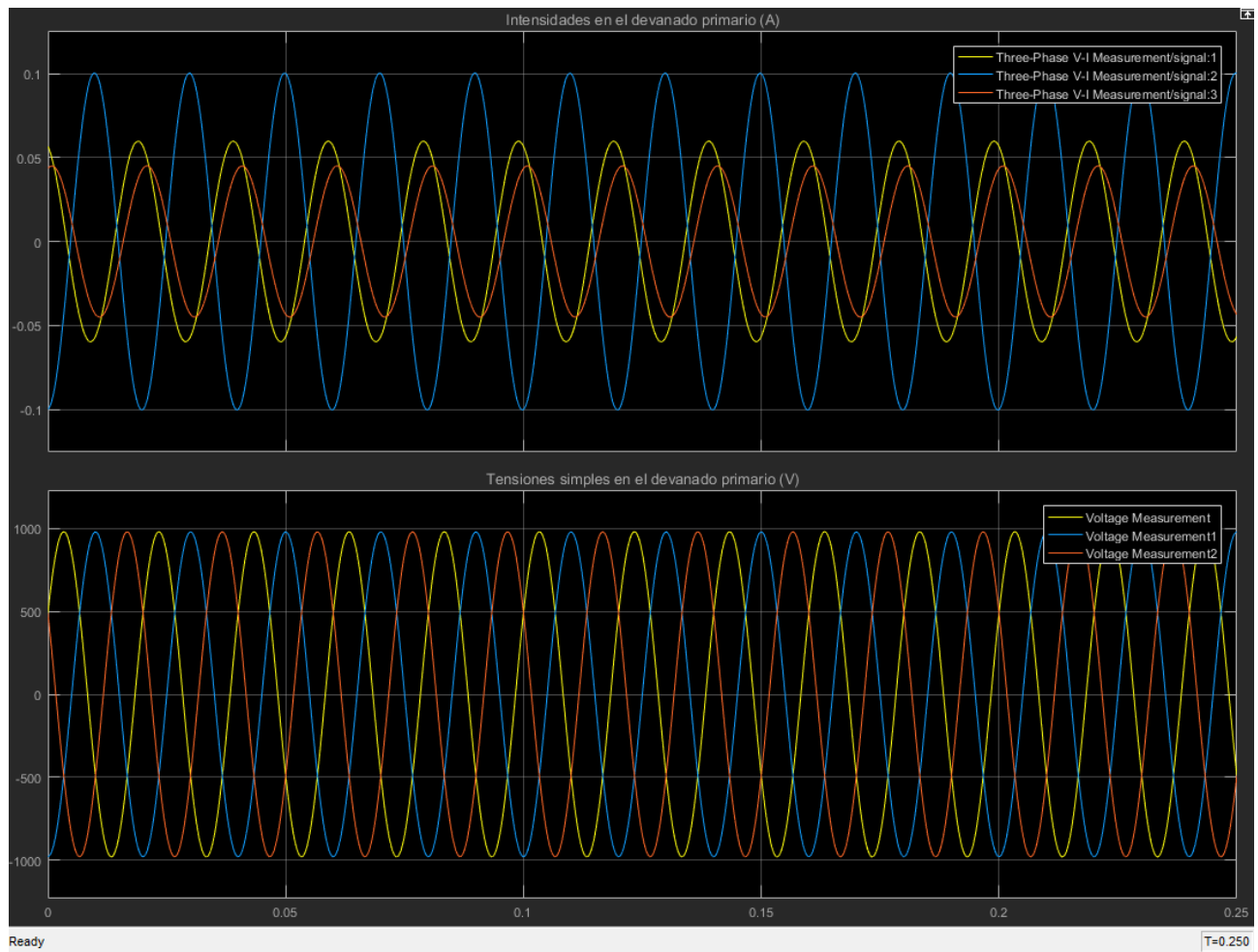


Figura A2 12: Simulación Dy11: Carga capacitiva: Intensidades y tensiones simples en el primario

14.5 Simulaciones y resultados adicionales de la conexión Triángulo-Triángulo Dd0

A continuación se realizan las mismas simulaciones que en el apartado 8.1.5 pero variando la carga. Ahora se va a emplear una carga resistiva de 10000 ohmios.

Al estudiar el devanado primario se obtiene:

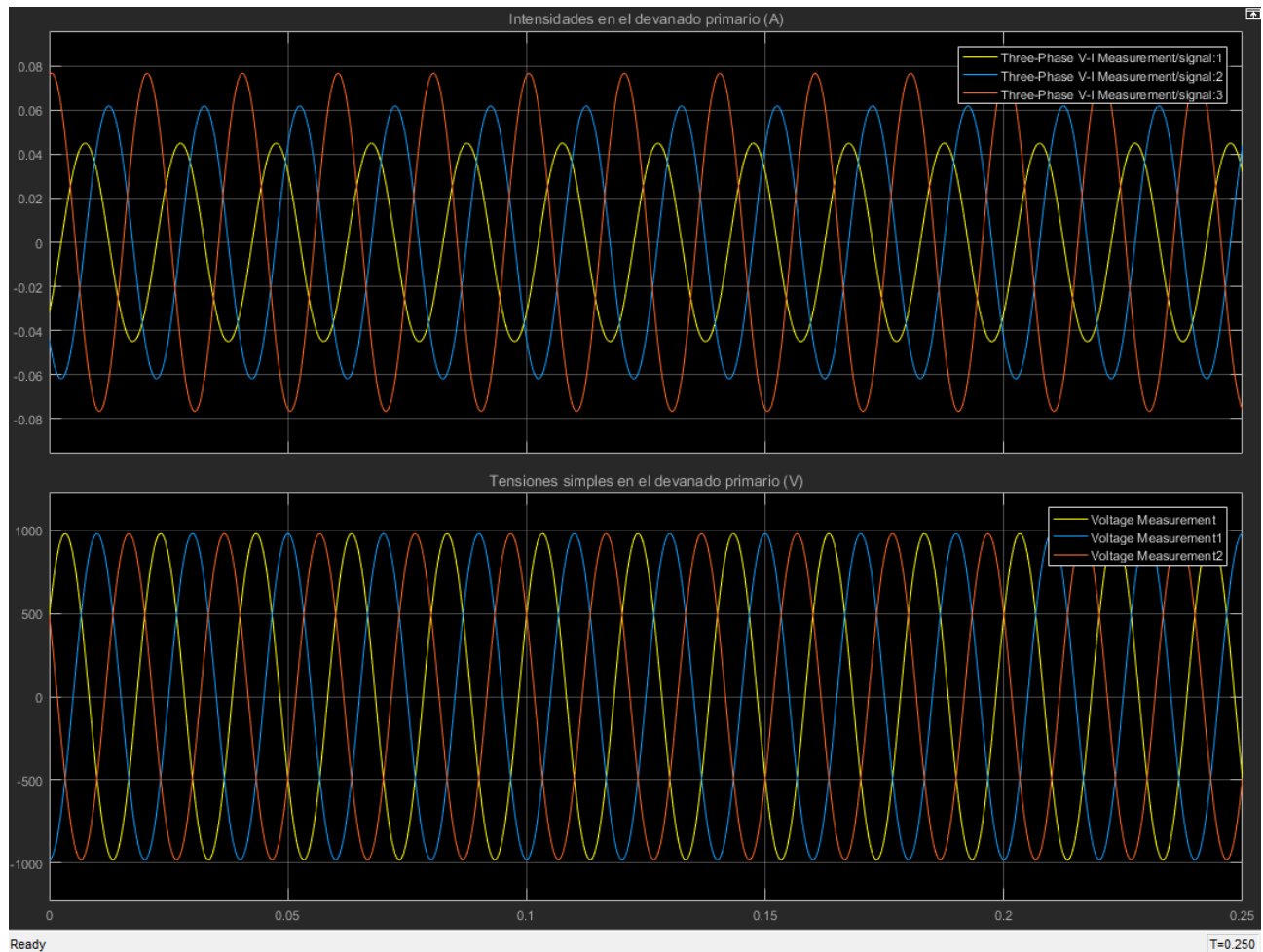


Figura A2 13: Simulación Dd0: Carga resistiva: Intensidades y tensiones simples en el primario

De estas gráficas se sacan conclusiones equivalentes a las observadas en el apartado 8.1.5: En este tipo de conexión las intensidades de línea son desequilibradas y se aprecia que al aumentar el valor de la carga, el desequilibrio va desapareciendo. En cuanto a las tensiones simples, éstas son equilibradas y como en la conexión triángulo tensiones simples y compuestas son iguales, se cumple que hay equilibrio en tensiones tanto simples como compuestas.

Análisis del comportamiento de transformadores trifásicos ante cargas asimétricas

A continuación, se pasa a conectar una carga inductiva con un valor de 10^{-3} Henrios.

En esta situación se aprecia como las intensidades de línea y las tensiones simples de primario se desequilibran, lo cual se ve en la siguiente gráfica:

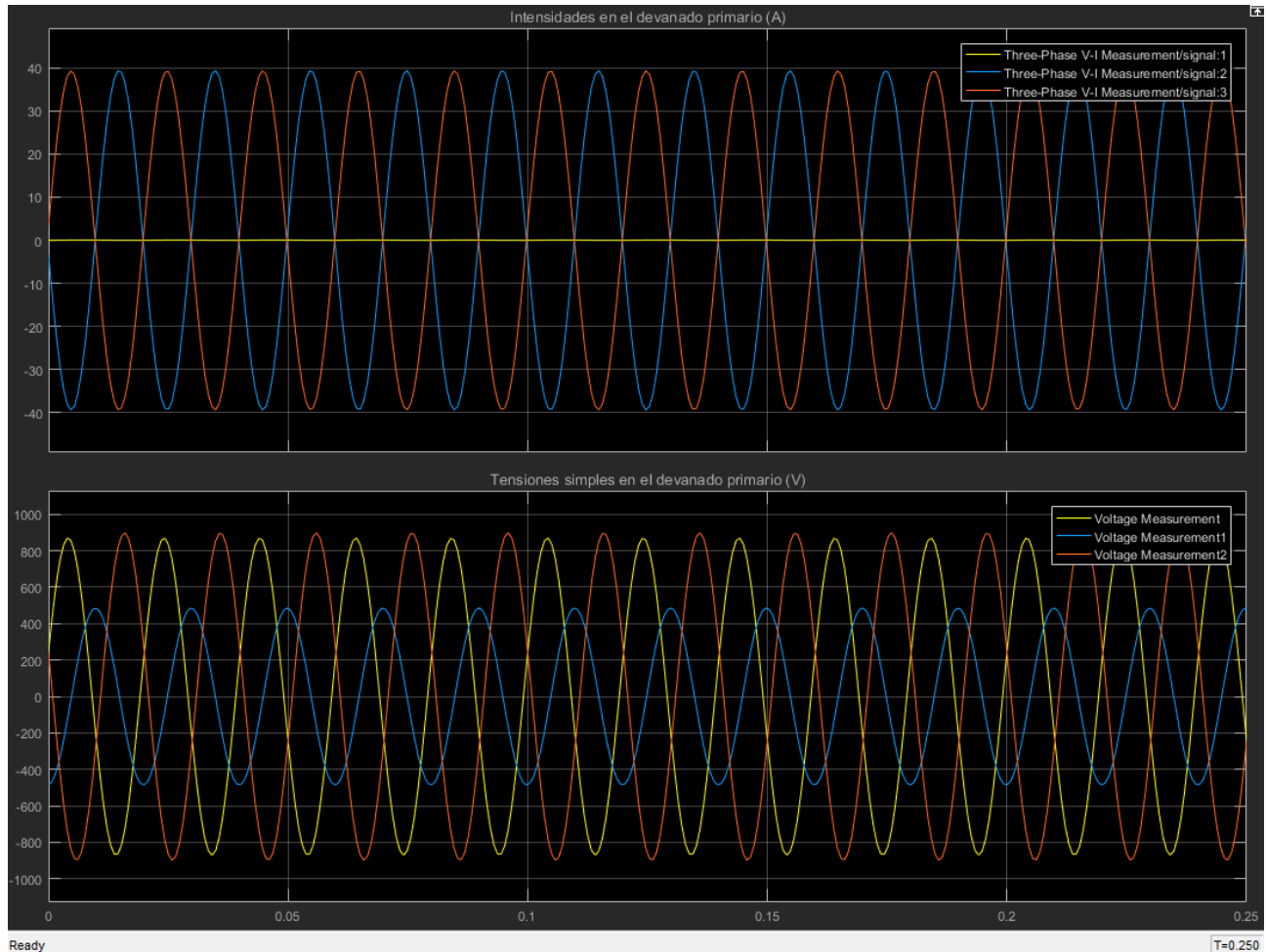


Figura A2 14: Simulación Dd0: Carga inductiva: Intensidades y tensiones simples en el primario

A continuación se estudia qué sucede en el bobinado primario al conectar una carga capacitiva de valor 10^{-6} Faradios.

A la vista de la gráfica se puede deducir que, como en el caso de carga resistiva, las intensidades de línea son desequilibradas y las tensiones simples son simétricas.

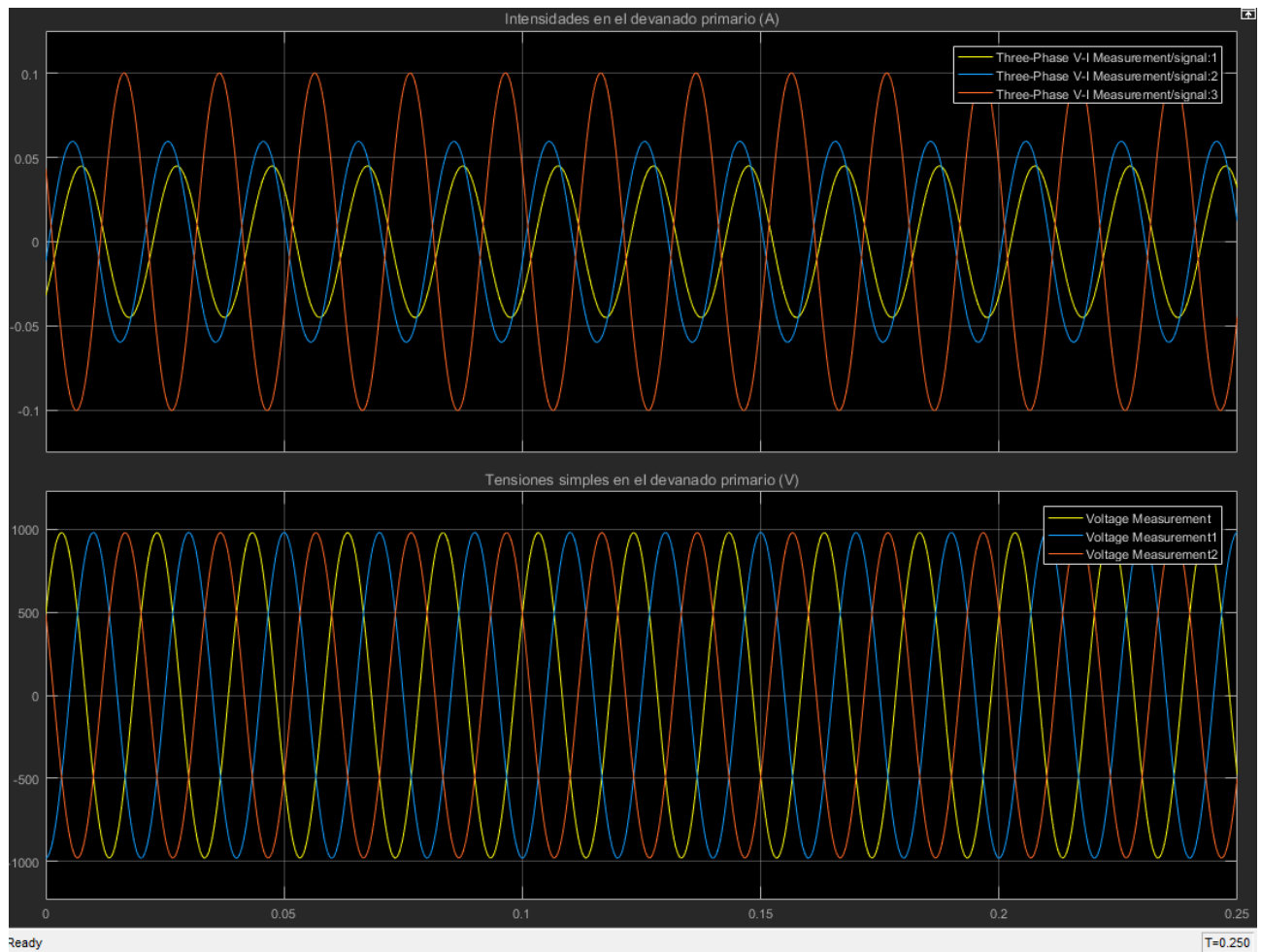


Figura A2 15: Simulación Dd0: Carga capacitiva: Intensidades y tensiones simples en el primario

14.6 Simulaciones y resultados adicionales de la conexión Triángulo-Zigzag Dz6

A continuación se realizan las mismas simulaciones que en el apartado 8.1.6 pero variando la carga. Ahora se va a emplear una carga resistiva de 10000 ohmios.

Al simular y ver qué sucede en el devanado primario se obtiene:

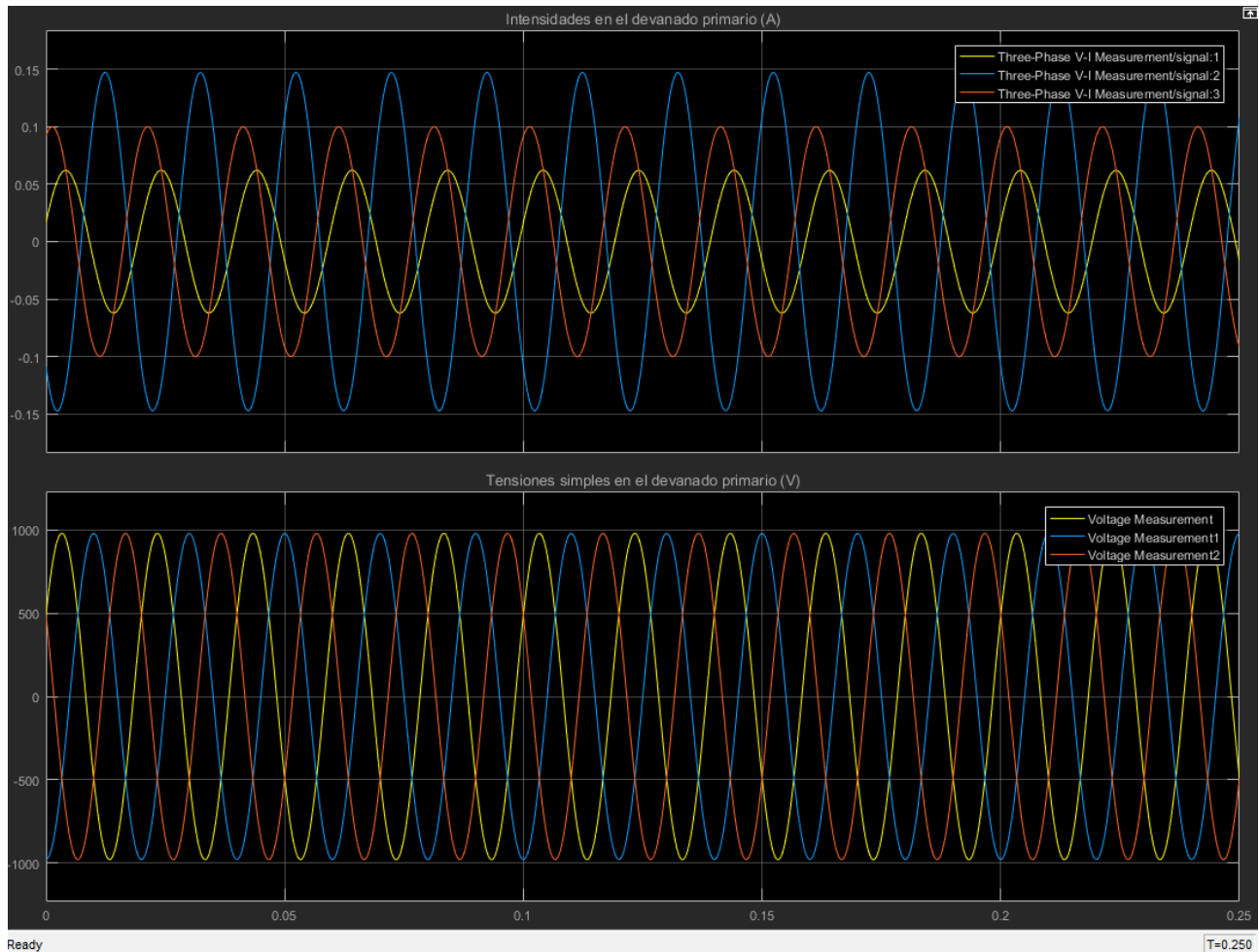


Figura A2 16: Simulación Dz6: Carga resistiva: Intensidades y tensiones simples en el primario

Al observar estas gráficas se extraen conclusiones análogas a las que se muestran en el apartado 8.1.6: En este tipo de conexión las intensidades de línea son desequilibradas y se aprecia que al aumentar el valor de la carga, el desequilibrio se va atenuando. En cuanto a las tensiones simples, éstas son equilibradas y como en la conexión triángulo tensiones simples y compuestas son de igual valor, se cumple que ambas son simétricas.

Análisis del comportamiento de transformadores trifásicos ante cargas asimétricas

Seguidamente, se conecta una carga de valor 10^{-3} Henrios y se estudia qué sucede en su devanado primario. Al conectar este tipo de carga, las intensidades de línea y las tensiones simples de primario experimentan desequilibrios, lo cual se observa en las gráficas que se presentan a continuación:

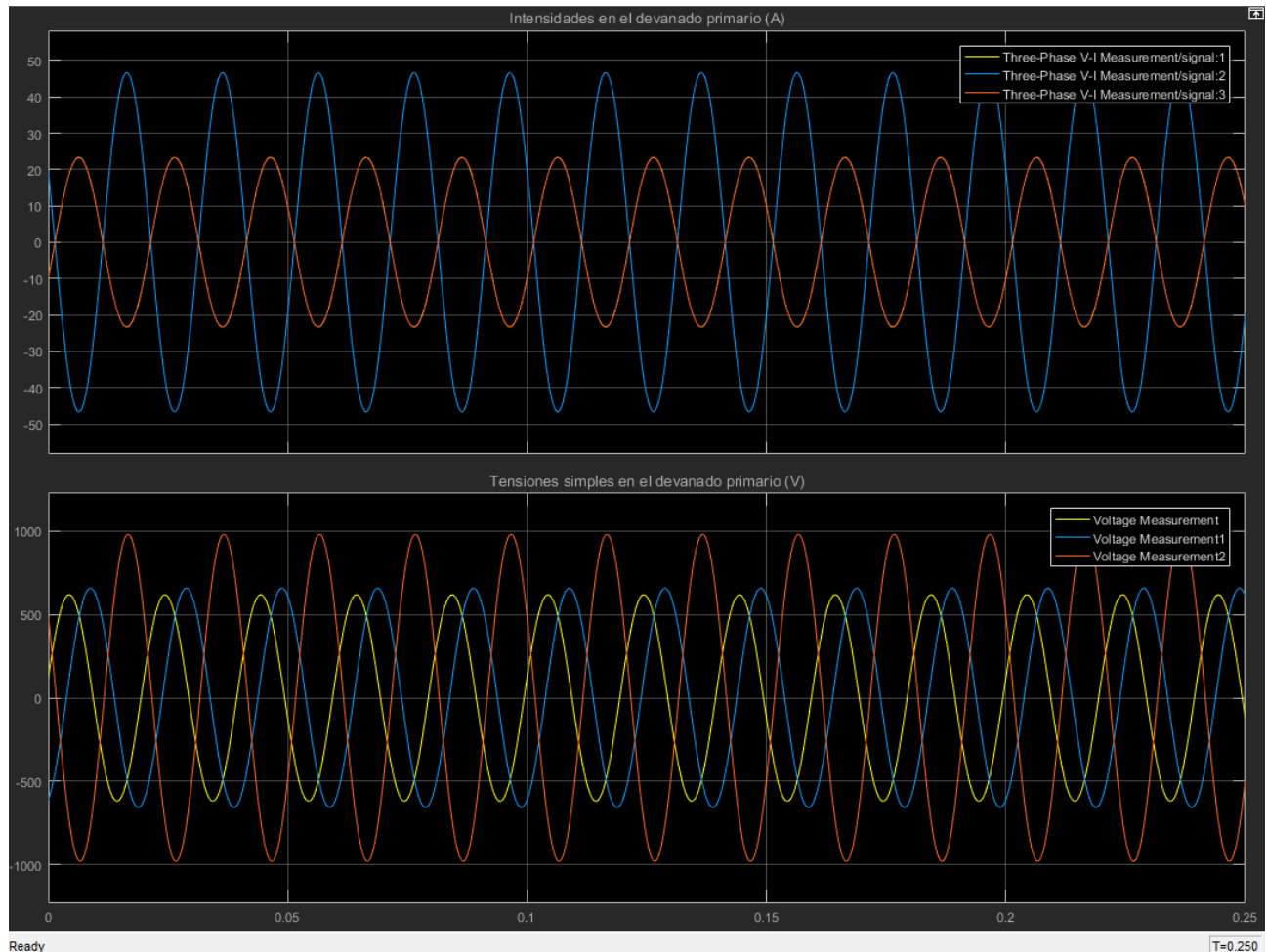


Figura A2 17: Simulación Dz6: Carga inductiva: Intensidades y tensiones simples en el primario

Por último, se coloca una carga de 10^{-6} Faradios y se realiza la simulación en el bobinado primario.

En este caso, se observa que el transformador tiene un comportamiento similar al que muestra ante carga resistiva: intensidades de línea desequilibradas y tensiones simples simétricas.

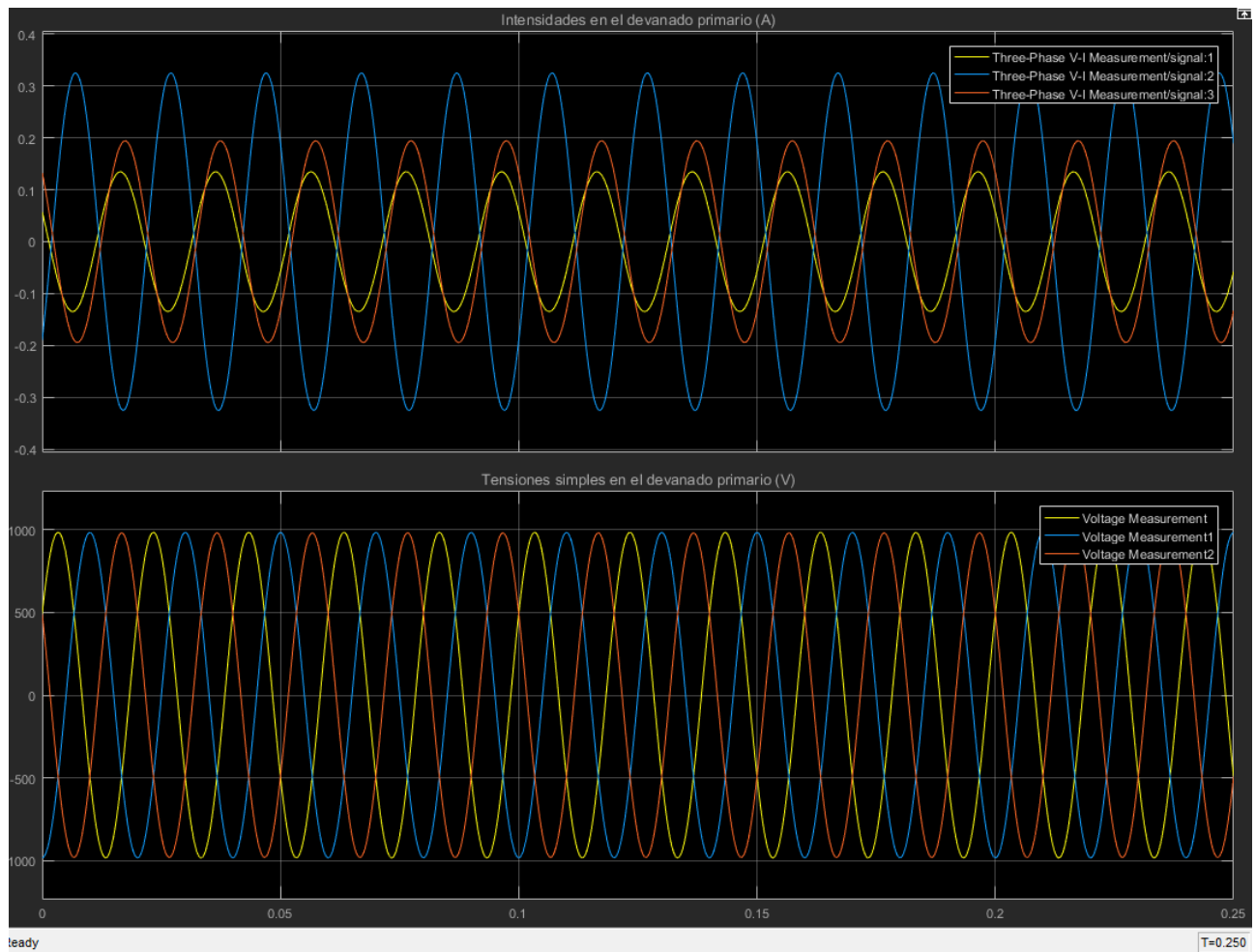


Figura A2 18: Simulación Dz6: Carga capacitiva: Intensidades y tensiones simples en el primario