



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE EDUCACIÓN A DISTANCIA



Departamento de Ingeniería Eléctrica,
Electrónica y de Control

E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES

“Tecnología Eléctrica”

Adenda

Curso 2012/2013

525021

Tecnología Eléctrica

GUÍA DE LA ASIGNATURA

1) INTRODUCCIÓN.

Se trata de una asignatura que tiene un carácter fundamentalmente tecnológico y es de tipo troncal que requiere de conocimientos de asignaturas anteriores, fundamentalmente de "Teoría de Circuitos" y de "Máquinas Eléctricas". Su objetivo principal es proporcionar al alumno una base científica y técnica que le permita conocer y entender la naturaleza de los factores y elementos que inciden en el diseño de los circuitos eléctricos y los modelos más usuales o relevantes utilizados para su representación, así como algunos de los métodos y herramientas de cálculo adecuadas para su resolución. Al ser común a los alumnos de todas las especialidades, su enfoque es general y se dirige principalmente a los fundamentos, dejando para otras asignaturas de mayor especialización los detalles reglamentarios y más prácticos que aplican a las instalaciones eléctricas.

2) CONTENIDOS.

El programa de la asignatura se ha dividido en doce temas, que siguiendo la metodología de la UNED, se agrupan en tres Unidades Didácticas:

UNIDAD DIDÁCTICA 1. Fundamentos de cálculo y modelos del sistema eléctrico.

Capítulo 1. El sistema eléctrico.

- 1.1. Antecedentes históricos de la Tecnología Eléctrica.
- 1.2. Estructura de un sistema eléctrico.
- 1.3. El Sistema Eléctrico Español
- 1.4. Centrales eléctricas.
- 1.5. Legislación del sector eléctrico español.

Capítulo 2. Principios básicos.

- 2.1. Potencia compleja.
- 2.2. Conservación de la potencia compleja.
- 2.3. Sistemas trifásicos equilibrados.
- 2.4. Análisis por fase.
- 2.5. Potencia trifásica en sistemas equilibrados.
- 2.6. Valores por unidad.

Capítulo 3. Las máquinas eléctricas en un sistema eléctrico.

- 3.1. El transformador.
- 3.2. La máquina síncrona. Principio de funcionamiento y modelo eléctrico.
- 3.3. Generador conectado a un sistema eléctrico. Límites de funcionamiento.
- 3.4. La máquina de inducción o asíncrona.

Capítulo 4. Líneas y cables eléctricos.

- 4.1. Efecto resistivo.
- 4.2. Efecto inductivo.
- 4.3. Efecto capacitivo.
- 4.4. Líneas.
- 4.5. Propagación de sobretensiones.
- 4.6. Conductores y cables eléctricos.

Capítulo 5. Representación del sistema.

- 5.1. Representación de los elementos del sistema: el diagrama unifilar y el diagrama de impedancias y admitancias.
- 5.2. El sistema en valores por unidad.
- 5.3. Modelos de admitancias e impedancias de red.
- 5.4. El problema del flujo de cargas.

Capítulo 6. Faltas simétricas.

- 6.1. Transitorios en circuitos RL.
- 6.2. Corriente y tensión en motores y generadores en condiciones de cortocircuito.
- 6.3. Magnitudes que caracterizan la corriente de cortocircuito.
- 6.4. Cálculo de corrientes de cortocircuito.
- 6.5. Protecciones.
- 6.6. Descripción y clasificación de los fenómenos a proteger. Relés de protección contra cortocircuitos, sobrecargas, sobretensiones, desequilibrios y retorno de energía.
- 6.7. Características de operación.
- 6.8. Requisitos reglamentarios.

UNIDAD DIDÁCTICA 2. Elementos principales de las redes eléctricas de distribución.

Capítulo 7. El centro de transformación.

- 7.1. Tipos de centros de transformación.
- 7.2. Esquema general de la disposición de los aparatos de un centro de transformación.
- 7.3. Requisitos reglamentarios relativos al aislamiento.
- 7.4. Descripción y clasificación de aisladores.
- 7.5. Características asignadas para la elección del aislador.
- 7.6. Normas aplicables a los aisladores.

Capítulo 8. Aparatos de maniobra de circuitos.

- 8.1. Aparatos de maniobra de circuitos. Generalidades.
- 8.2. Seccionadores. Descripción y clasificación.
- 8.3. Interruptores e interruptores automáticos. Descripción y clasificación.
- 8.4. Características asignadas aplicables a la aparamenta.
- 8.5. Ejemplos de cálculo para la selección de aparatos.

Capítulo 9. Transformadores de potencia y distribución.

- 9.1. Clasificación de transformadores.
- 9.2. Transformadores de potencia.
- 9.3. Transformadores de distribución.
- 9.4. Ensayos normativos.

UNIDAD DIDÁCTICA 3. Protecciones de las redes eléctricas de distribución.

Capítulo 10. Esquemas de distribución e instalaciones de puesta a tierra.

- 10.1. Esquemas de distribución TN, TT e IT.
- 10.2. Puesta a tierra.
- 10.3. Cálculo de la resistencia de puesta a tierra.
- 10.4. Tensión de paso y tensión de contacto.
- 10.5. Condiciones de protección y separación.
- 10.6. Instalaciones de puesta a tierra. Esquema general.
- 10.7. Medida de la resistencia de puesta a tierra.

Capítulo 11. Esquemas generales de las instalaciones de baja tensión. Protección contra sobreintensidades y sobretensiones.

- 11.1. Instalaciones de enlace. Esquema general y definiciones.
- 11.2. Intensidades máximas admisibles por los circuitos.
- 11.3. Cálculo de las corrientes de cortocircuito en las instalaciones.
- 11.4. Protección mediante interruptores automáticos y fusibles. Características asignadas.
- 11.5. Condiciones a verificar y selectividad. Criterios de selección.
- 11.6. Sobretensiones en las líneas eléctricas.
- 11.7. Protección frente a las sobretensiones.
- 11.8. Ejemplo de aplicación.

Capítulo 12. Protección contra choques eléctricos.

- 12.1. Tensiones máximas admisibles.
- 12.2. Protección contra los contactos directos
- 12.3. Protección contra los contactos indirectos.
- 12.4. Coordinación de aislamiento en baja tensión. Líneas de fuga, distancias en el aire y distancias a través del aislamiento.
- 12.5. Ejemplo de aplicación.

PROGRAMACIÓN:

El libro seleccionado como texto base es el titulado "*Tecnología Eléctrica*" (la referencia completa de este libro se da en el apartado 3). Toda la materia contenida en el texto base y en esta Adenda es materia que debe estudiar en el curso. Parte de ella es recordatorio de otros temas anteriormente dados con más extensión en las asignaturas de "Teoría de circuitos o "Máquinas Eléctricas", por lo que recomendamos un rápido repaso de las materias correspondientes de dichas asignaturas cuando se aborde el estudio de cada Capítulo de esta asignatura.

Como orientación para cuando planifique el estudio de la asignatura, del tiempo total que le dedique creemos que le debe llevar estudiar la primera Unidad Didáctica un 40% de ese total (aunque es la unidad más amplia de contenido, muchos puntos serán para usted un repaso de lo ya visto en otras asignaturas de la especialidad), un 30% la segunda y un 30% la tercera.

Por último, al final de este documento se explican y desarrollan con más detalle algunos apartados concretos del texto básico y se exponen algunos puntos necesarios que no vienen en el libro. Con esta explicación podrá entender la unidad lógica de contenido que hemos seguido en la concepción del programa de la asignatura.

3) TEXTO BASE

- "*Adenda de Tecnología Eléctrica*", realizada por el equipo docente de la asignatura, DIECC-UNED (es este mismo documento, que se encuentra también en la página que la asignatura tiene en el servidor del Departamento en Internet, <http://www.ieec.uned.es>, en la sección "Docencia del DIEEC").
- "*Tecnología Eléctrica*". R. Guirado; R. Asensi; F. Jurado y J. Cárpio. Ed. McGraw-Hill. 2006.

4) BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

El libro dado como bibliografía básica junto a la Adenda que hemos escrito son suficientes para preparar de forma completa el contenido de la asignatura. Sin embargo, para aquellos alumnos que deseen consultar además otros libros y documentos le indicamos algunas referencias para que pueda profundizar en algún punto de los contenidos si así lo desea, es decir, su consulta es voluntaria y por lo tanto no es necesario que los utilice para el correcto desarrollo del curso.

- J Roger, J. Boch, M. Riera y C. Roldán "*Tecnología eléctrica*". Ed. Síntesis, 2002.
- J.J. Grainger y W.D. Stevenson Jr. "*Análisis de sistemas de potencia*". Ed. McGraw-Hill, 1995.
- Fermín Barrero "*Sistemas de energía eléctrica*". Ed. Thomsom-Paraninfo, 2004.

- Antonio Gómez Expósito (coordinador) “*Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica*”. Ed. McGraw, 2002.

5) OTRO MATERIAL DE APOYO.

Para este curso existe una página de la asignatura en el servidor del Departamento en Internet donde se ofrece información referente a la misma que le puede ser útil, incluyendo la solución de los problemas de las pruebas presenciales de años anteriores para que los utilice como ejercicios de autoevaluación. También incluye enlaces con otros servidores de empresas e instituciones importantes del sector eléctrico. Pretendemos que esta información que vaya enriqueciendo y actualizando a lo largo del curso, para lo que nos gustaría contar con su colaboración.

La dirección de Internet del servidor del Departamento, a la que debe conectarse, es: <http://www.ieec.uned.es> y allí buscar la asignatura en el apartado “*Docencia del DIEEC*”.

6) PRUEBAS DE EVALUACIÓN A DISTANCIA. PRÁCTICAS DE LABORATORIO

En esta asignatura no hay que realizar Pruebas de Evaluación a Distancia. Tampoco hay Prácticas de Laboratorio.

7) PRUEBAS PRESENCIALES

Al ser una asignatura cuatrimestral del 1^{er} cuatrimestre, solamente hay Pruebas Personales finales en febrero y septiembre.

Estas pruebas constarán de varios ejercicios teórico-prácticos en examen eliminatorio de tipo test, junto con el desarrollo de cuestiones y problemas de tipo práctico, similares a los desarrollados en los textos base de la asignatura. Lea atentamente el enunciado de cada uno de los ejercicios antes de resolverlos.

No podrá aprobarse la asignatura si no se supera la prueba tipo test y tenga en cuenta que errores graves de concepto pueden hacer que la Prueba finalmente no se supere, sea cual sea la media obtenida. En cualquier caso, los errores graves, tanto en teoría como en problemas, podrán bajar la nota final. Como ocurrirá posteriormente en su vida profesional como ingeniero, es mejor que si no sabe algo, no conteste cualquier cosa peregrina que se le ocurra.

Las Pruebas Presenciales tienen por objeto evaluar los conocimientos del alumno en las materias tratadas en la asignatura, no a determinar si el alumno sabe resolver mecánicamente los problemas tipo. Por ello le aconsejamos que no “aprenda a hacer problemas”. Desde el principio, trate de comprender las materias propuestas y de conocer y valorar los parámetros de los que dependen cada uno de los temas tratados en el programa. Con ello aprenderá además a juzgar si un resultado es coherente o incoherente y sabrá si ha cometido algún error en el desarrollo de un problema.

En las Pruebas Presenciales no está permitido el uso de ningún tipo de material de consulta; sólo se puede utilizar calculadora. Dispone de dos horas para realizar la Prueba.

8) HORARIO DE ATENCIÓN AL ALUMNO

Las consultas se puede realizar durante la guardia, por teléfono o personalmente, y por correo postal o electrónico.

Horario de guardia: Lunes, de 16:00 a 20:00 horas.

Teléfono: 91 398 7794 (Prof. R. Guirado)

Fax: 91 398 6028

Correo electrónico: rguirado@ieec.uned.es

En Internet: <http://www.ieec.uned.es> y allí buscar la asignatura en el apartado "Docencia del DIEEC".

Dirección: Dpto. de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Control
E.T.S. de Ingenieros Industriales - UNED
Ciudad Universitaria s/n.
28040 MADRID

DIECC-UNED

Tecnología Eléctrica

ADENDA

INTRODUCCIÓN.

En esta Adenda se explica y se desarrolla, con más detalle, algunos aspectos del temario desarrollado en el texto básico. Esos apartados del libro se indican en la Adenda (**en negrita al inicio de cada tema con la referencia de la página y aparatado que se considera**). También se desarrollan algunos ejercicios prácticos adicionales a los de los textos de referencia y de problemas para que el alumno tenga una referencia de los problemas típicos que pueden encontrar en las pruebas presenciales de la asignatura.

Por esta razón esta Adenda no es tan solo un documento con orientaciones que simplemente debe leer al principio de la asignatura, sino que **es parte de la bibliografía que debe estudiar**. Téngalo muy en cuenta.

Es importante señalar desde el principio que para el estudio de los temas de la asignatura es imprescindible conocer los conceptos básicos relativos a los circuitos de corriente alterna y a los sistemas trifásicos. Aunque usted ya los vio en la asignatura “Teoría de circuitos”, y por lo tanto debe saberlos, es conveniente que repase esos apartados para refrescar esos conceptos.

CONTENIDOS.

CAPÍTULO 2. Principios básicos.

2.4. Análisis por fase. Pag.44 - Ejemplo 2.1. En el aparatado 2 las expresiones de U_{bn} y U_{cn} están multiplicadas por I_a , cuando deberían estar por U_{an} en su lugar. El resultado siguiente es correcto no obstante, puesto que es una errata de notación.

2.5. Potencia trifásica en sistemas equilibrados. Pag.48 - Ejemplo 2.3. En el cálculo de la potencia compleja con valor reflejado 495,179 kVAr, debe decirse 495,179 kVA dado que la potencia aparente calculada tiene parte real e imaginaria, tal como indica la expresión anterior a la referida.

2.6. Valores por unidad. Pag.52 - Ejemplos 2.6 y 2.7. El sistema de cálculo en valores por unidad es una forma de calcular los circuitos mediante el equivalente monofásico sin considerar los tipos de conexión del sistema, pero el cálculo requiere cumplir ciertas reglas que implican que al utilizar como bases las tensiones de línea, al convertir los valores por unidad en valores reales, multiplicando por los valores base, obtendremos tensiones de línea.

En los ejemplos 2.6 y 2.7 se calcula la tensión U en cada rama de la impedancia de carga que está conectada en estrella, con lo que la tensión que deseamos calcular es una tensión entre

fase y neutro. Si la base de tensiones es la de línea (20 kV), al multiplicar el valor por unidad por la base se obtendría el valor de la tensión entre líneas en la carga y para obtener el valor en cada rama debería dividirse por raíz de tres, que es lo que se hace en los ejemplos citados. Esto es lo mismo que simular que la base es la original dividido por raíz de tres, como se hace en otros ejemplos, como el 12.1.

En definitiva es una cuestión de dimensión de la base. Si se toman como base las tensiones de fase, hay que conocer inicialmente las tensiones de fase reales y sus correspondientes potencias por fase, para pasarlas a valores por unidad y luego volver a obtener las tensiones de fase al multiplicar por la base.

Pero esto, que es en rigor perfectamente factible, no es práctico, dado que habitualmente los datos en las líneas eléctricas de distribución se dan en valores de línea y las potencias se refieren al circuito trifásico y no a la potencia por fase. Por tanto es más fácil utilizar estas directamente y luego calcular las tensiones, corrientes y potencias por fase que se necesiten a partir de las correspondientes tensiones, corrientes y potencias de línea.

CAPÍTULO 3. Las máquinas eléctricas en el sistema eléctrico.

3.1.2 Transformadores reales. Pag. 61- Figura 3.4. Los fasores $I_2 R_2$ y $jI_2 X_2$ deben ser $I_2 R'_2$ y $jI_2 X'_2$ ya que R_2 y X_2 son, respectivamente, la resistencia y reactancia de dispersión del secundario según la leyenda y R'_2 y X'_2 son las respectivas referidas al primario que es en donde se hace el análisis del circuito.

Ejemplo 3.1- Pag. 65. En el cálculo de la tensión U_1 , el resultado final debe ser $4511,6+j60$ V = 4512 V.

3.1.3 Transformadores trifásicos creados a partir de un banco de transformadores monofásicos. Relación entre tensiones de línea y fase. Tal como se indica en el texto base, una de las posibles formas de crear un transformador trifásico es a partir de transformadores monofásicos conectados en estrella o triángulo entre sus primarios y entre sus secundarios. Las diferentes combinaciones de conexión dan lugar a diferentes tensiones y corrientes para una misma red a las que se conectan. Como ejemplo se va a analizar la relación de tensiones en un banco de transformadores conectados en triángulo en el primario y en estrella en secundario que puede representarse gráficamente como:

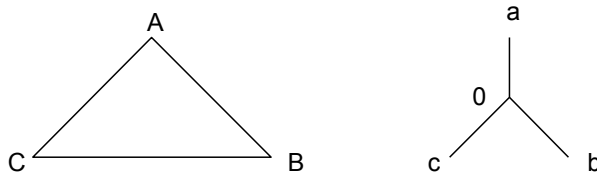


Figura 1

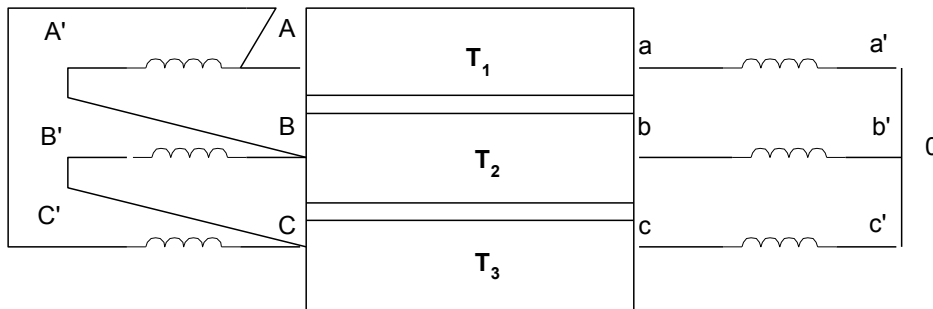


Figura 2

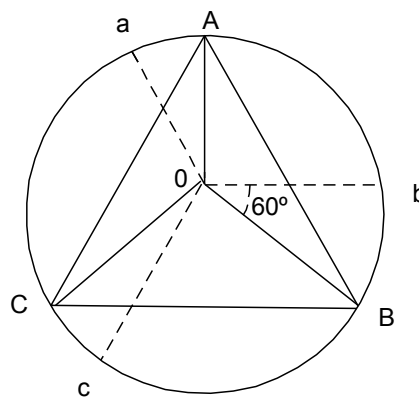


Figura 3

Conforme a lo que se refleja en el esquema de las figuras 1 y 2, las bobinas de los transformadores están conectadas de manera que, en el transformador T_1 , U_{AB} ($U_{AA'}$) se corresponde con U_{a0} ($U_{aa'}$), en el transformador T_2 , U_{BC} con U_{b0} y en el T_3 , U_{CA} con U_{c0} . El sistema de conexiones de los terminales de conexión de cada transformador, por ejemplo AA' y aa' en T_1 , se refleja en la figura 2.

A partir de lo anterior, podemos determinar el módulo y ángulo de la tensión U_{ab} a partir de U_{a0} y U_{b0} y estas, a su vez, de U_{AB} y U_{BC} .

Pero lo que inicialmente conocemos es que el banco de transformadores así dispuesto se conecta a una red trifásica equilibrada en secuencia directa, con lo que tomando como origen de ángulos a la tensión entre línea y neutro de la fase A, tendremos que:

$$U_{A0} = |U_{A0}| \text{sen } \omega t; \quad U_{B0} = |U_{B0}| \text{sen}(\omega t - 120^\circ); \quad U_{C0} = |U_{C0}| \text{sen}(\omega t - 240^\circ)$$

y teniendo en cuenta que en un sistema equilibrado $|U_{A0}| = |U_{B0}| = |U_{C0}|$

$$U_{AB} = U_{A0} - U_{B0} = |U_{A0}| [\text{sen } \omega t - \text{sen}(\omega t - 120^\circ)] = |U_{A0}| \sqrt{(1 + \cos 60^\circ)^2 + \text{sen}^2 60^\circ} \cdot \text{sen}(\omega t - 330^\circ)$$

$$U_{AB} = \sqrt{3} |U_{A0}| \text{sen}(\omega t - 330^\circ) = |U_{AB}| \text{sen}(\omega t + 30^\circ); \text{ e igualmente}$$

$$U_{BC} = \sqrt{3} |U_{A0}| \text{sen}(\omega t - 90^\circ) = |U_{AB}| \text{sen}(\omega t - 90^\circ)$$

$$U_{CA} = \sqrt{3} |U_{A0}| \text{sen}(\omega t - 210^\circ) = |U_{AB}| \text{sen}(\omega t + 150^\circ)$$

De donde se deduce que la tensión entre líneas en el primario tiene un desfase de 330° en retraso (ó 30° en adelanto) respecto a la tensión entre línea y neutro, además de un módulo que es $\sqrt{3}$ veces superior.

En un transformador monofásico ideal no se produce desfase de tensión entre el primario y el secundario. En la realidad, las impedancias del transformador real producen un cierto desfase entre dichas tensiones, dependiente fundamentalmente del módulo y ángulo de la corriente que el transformador suministra y aunque el valor del desfase es muy pequeño y podemos despreciarlo a los efectos del cálculo en muchas ocasiones, en este caso el enunciado de este apartado del problema indica que el transformador está sin carga, lo que supone a estos efectos la igualdad de fases entre las tensiones de entrada y salida.

En la figura 3 se representan los fasores de las tensiones de los lados de AT y BT de los transformadores, pero colocados de manera que las bobinas correspondientes de cada transformador se colocan en paralelo representando los ángulos relativos de las tensiones entre cada fase (AB y a0, BC y b0, CA y c0). En dicha figura se puede comprobar como las tensiones entre líneas U_{AB} , U_{BC} y U_{CA} forman igualmente un sistema de tensiones con desfase de 120° entre sí, en secuencia directa.

Así, a partir de este diagrama podemos obtener el valor de U_{a0} , U_{b0} y U_{c0} y de U_{ab} , U_{bc} y U_{ca} a partir de las tensiones en el primario.

$$U_{a0} = \frac{1}{m} U_{AB} = \frac{1}{m} |U_{AB}| \text{sen}(\omega t + 30^\circ) = \frac{\sqrt{3}}{m} |U_{A0}| \text{sen}(\omega t + 30^\circ); \text{ e igualmente}$$

$$U_{b0} = \frac{1}{m} U_{BC} = \frac{1}{m} |U_{AB}| \text{sen}(\omega t - 90^\circ) = \frac{\sqrt{3}}{m} |U_{A0}| \text{sen}(\omega t - 90^\circ)$$

$$U_{c0} = \frac{1}{m} U_{CA} = \frac{1}{m} |U_{AB}| \text{sen}(\omega t + 150^\circ) = \frac{\sqrt{3}}{m} |U_{A0}| \text{sen}(\omega t + 150^\circ)$$

$$U_{ab} = U_{a0} - U_{b0} = \frac{1}{m} |U_{AB}| [\sin(\omega t + 30^\circ) - \sin(\omega t - 90^\circ)] = \frac{1}{m} |U_{AB}| \sqrt{\sin^2 60^\circ + (1 + \cos 60^\circ)^2} \cdot \sin(\omega t + 60^\circ)$$

$$U_{ab} = \frac{\sqrt{3}}{m} |U_{AB}| \sin(\omega t + 60^\circ); \text{ e igualmente } U_{bc} = \frac{\sqrt{3}}{m} |U_{AB}| \sin(\omega t - 60^\circ) \text{ y } U_{ca} = \frac{\sqrt{3}}{m} |U_{AB}| \sin(\omega t - 180^\circ)$$

Con lo que se verifica que tanto las tensiones entre fase y neutro, como las tensiones entre líneas en el secundario, están desfasadas (adelantadas) en 30° con respecto a sus respectivas tensiones en el primario y la relación de transformación es $m/\sqrt{3}$. Por tanto, la codificación aplicable a la conexión del transformador propuesto es Dy11, tal como se explica en el apartado 9.2.6 del libro.

En las instalaciones eléctricas de distribución de energía, la conexión Dyn11 es la utilizada en todos los transformadores de distribución de baja tensión. La conexión en triángulo en el primario favorece el equilibrio de las corrientes en AT, aun en caso de desequilibrios en el lado de BT. La referencia n indica la distribución del neutro en el lado de BT que es obligatoria en las redes de distribución TT, con el neutro puesto a tierra en el transformador y tierras independientes para los receptores en el punto de utilización. Esta configuración es la de todas las redes públicas de distribución de BT en España.

Los siguientes ejemplos ilustran el cálculo de los valores de tensión e intensidad en un sistema utilizando bancos de transformadores. Para su resolución debe consultarse el capítulo 5 y el apartado 9.2.6.

Ejercicio 3.1. Se construye un transformador trifásico a partir de transformadores monofásicos de 15 kV/100 kV, 100 MVA y $u_{CC} = 6\%$. Si el banco de transformadores se conecta en triángulo en el lado de 15 kV y en estrella en el de 100 kV, determinar la impedancia de cortocircuito por fase, en valores reales y valores por unidad, referidos al lado de 15 kV en el transformador trifásico así construido.

Nota: la parte real de la impedancia de cortocircuito del transformador se desprecia.

Solución: a) $Z_{CCreal} = j0,06 \Omega$ $Z_{CCp.u} = j0,026 \text{ p.u.}$ b) $Z_{CCreal} = j0,135 \Omega$ $Z_{CCp.u} = j0,06 \text{ p.u.}$
 c) $Z_{CCreal} = j0,045 \Omega$ $Z_{CCp.u} = j0,06 \text{ p.u.}$ d) $Z_{CCreal} = j0,135 \Omega$ $Z_{CCp.u} = j0,02 \text{ p.u.}$

Desarrollo:

$$Z_{bm} = \frac{15^2 \cdot 10^6}{100 \cdot 10^6} = 2,25 \Omega$$

La impedancia en valores reales de cada transformador monofásico será

$$Z_{CCm} = j0,06 \cdot 2,25 = j0,135 \Omega$$

Al estar conectador los bobinados primarios en triángulo, la impedancia equivalente por fase (en estrella), tal como se indica en el apartado 2.4 del texto base será

$$Z_{CCT-Y} = \frac{Z_{CCm}}{3} = j0,045 \Omega$$

Por tanto, en valores reales, la impedancia por fase del transformador trifásico puede diferir de la de los monofásicos que lo integran dependiendo de la conexión (nótese que si la conexión fuese en estrella los valores reales serían iguales). Pero por el contrario el valor de la impedancia por fase en valores por unidad es siempre coincidente, independientemente de la conexión.

En el caso que nos ocupa la base de impedancias cambia en el transformador trifásico, dado que la potencia del banco es 3 veces la de los monofásicos. Por tanto,

$$Z_{bT} = \frac{15^2 10^6}{3 \cdot 100 \cdot 10^6} = 0,75 \Omega \quad y$$

$$Z_{CCT,pu} = \frac{Z_{CCT-\Delta}}{Z_{bT}} = \frac{j0,045}{0,75} = j0,06 \text{ p.u.}$$

Si la conexión hubiese sido en estrella en el primario, la impedancia por fase del trifásico, en valores reales, hubiese coincidido con la del monofásico, pero al calcular el valor en por unidad, habría que considerar que además del cambio de base de potencias, como en el caso anterior, ahora también hay un cambio de base de tensiones, dado que para que la tensión aplicada en los terminales del transformador monofásico sea 15 kV, la tensión entre líneas en el banco trifásico será raíz de 3 veces superior, con lo que,

$$Z_{bT} = \frac{(15 \cdot \sqrt{3})^2 10^6}{3 \cdot 100 \cdot 10^6} = 2,25 \Omega \quad y$$

$$Z_{CCT,pu} = \frac{Z_{CCT-Y}}{Z_{bT}} = \frac{j0,135}{2,25} = j0,06 \text{ p.u.}$$

Con lo que las impedancias, en valores por unidad, coinciden.

Ejercicio 3.2. En el sistema eléctrico de la figura, los transformadores trifásicos T_A y T_B se obtienen a partir de transformadores monofásicos con las siguientes características:

Transformador T_A: 3 trans. monof. de 100 MVA, 20/400 kV y u_{cc} = 4% cada uno y conexión DY.

Transformador T_B: 3 trans. monof. de 100 MVA, 400/15 kV y u_{cc} = 4% cada uno y conexión YD.

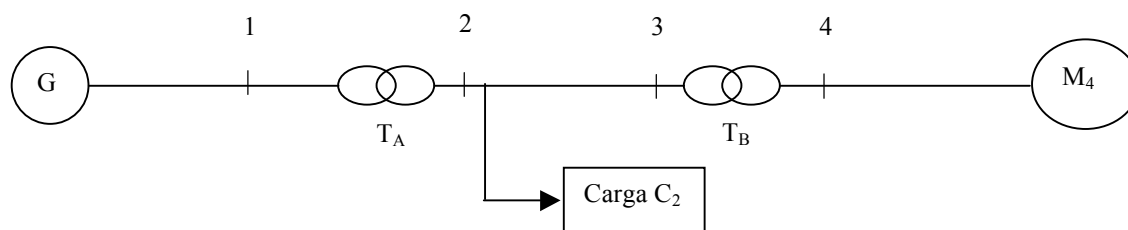
El resto de las características de los elementos del sistema son:

Generador: 300 MVA, 20kV

Líneas: impedancia despreciable

Carga C₂: De impedancia constante, 10 MVA con f.d.p= 0,9 inductivo a 600 kV.

Motor M₄: De potencia constante, de 20 MVA, funcionando a plena carga a 15 kV y f.d.p= 0,8 inductivo.



Tomando como base la tensión y potencia del generador y suponiendo que la tensión en los bornes del generador es 20 kV, determinar la tensión y corriente en la carga C_2 cuando el motor M_4 está desconectado.

Solución: a) $U_{C_2} = 390$ kV e $I_{C_2} = 25,5 \angle -25,8^\circ$ A **b) $U_{C_2} = 685$ kV e $I_{C_2} = 11 \angle -26^\circ$ A** c) $U_{C_2} = 600$ kV e $I_{C_2} = 16,5 \angle -35,8^\circ$ A d) $U_{C_2} = 600$ kV e $I_{C_2} = 9 \angle 26,5^\circ$ A

Desarrollo:

$S_b = 300$ MVA. El desarrollo en caso de un banco de transformadores es el mismo pero teniendo en cuenta que se deben utilizar bases de tensión referidas al mismo sitio, esto es, o a tensión entre líneas, o a tensión entre fase y neutro. Se utilizarán tensiones entre líneas en este caso. También hay que considerar que el banco de transformadores tiene una potencia de tres veces la de los monofásicos que lo componen y la conversión de impedancias de triángulo a estrella (por fase).

Tramo 1

$U_{1b} = 20$ kV $Z_{1b} = 20^2/300 = 1,3333 \Omega$ $X_{CCT1} = 0,04 \cdot 20^2/100 \Omega$ y $X_{CCTA} = X_{CCT1}/3$, al estar en triángulo del lado de 20 kV, con lo que

$$X_{CCTApu} = \frac{X_{CCTA}}{Z_{1b}} = \frac{0,04 \frac{20^2}{100}}{\frac{20^2}{300}} = 0,04 \text{ p.u.}$$

Tramo 2

$U_{2bLL} = 20 \cdot 400 \cdot \sqrt{3}/20 = 692,8$ kV (al estar en estrella, la salida de cada transformador está conectada entre fase y neutro)
 $I_{2b} = 300 \cdot 10^6 / \sqrt{3} \cdot 692,8 \cdot 10^3 = 250$ A
 $Z_{2b} = 692,8^2/300 = 1600 \Omega$
 $Z_{C_2} = 600^2/10 \angle -25,8^\circ = 36000 \angle 25,8^\circ \Omega = 22,5 \angle 25,8^\circ \text{ p.u.} = 20,25 + j9,8 \text{ p.u.}$

$U_G = 1 \angle 0^\circ \text{ p.u.}$ e $I_{C_2} = 1/(20,25 + j9,8 + j0,04) = 0,044 \angle -26^\circ \text{ p.u.} = 11 \angle -26^\circ \text{ A}$ y
 $U_{C_2} = Z_{C_2} \cdot I_{C_2} = 22,5 \angle 25,8^\circ \cdot 0,044 \angle -26^\circ = 0,99 \angle -0,2^\circ \text{ p.u.} = 686 \text{ kV.}$

En realidad el ángulo de la tensión en la carga C_2 tiene un adelanto de 30° respecto al lado del generador, dado que el transformador es DY, con lo que si tomamos la referencia 0° en el generador, la tensión en la carga será $U_{C_2} = 686 \angle 30^\circ$ kV.

Ejercicio 3.3. En el mismo sistema del ejercicio anterior, determine la tensión del generador G y de la carga C₂ cuando el motor se alimenta a 15 kV a plena carga.

Solución: a) U_{C2} = 410 kV y U_G = 21 kV b) U_{C2} = 605 kV e U_G = 20,1 kV c) U_{C2} = 410 kV e U_G = 18 kV
d) U_{C2} = 700 kV e U_G = 20,1 kV

Desarrollo:

Tramo 3

$$U_{3b} = 692,8 \text{ kV}$$

$$I_{3b} = 300 \cdot 10^6 / \sqrt{3} \cdot 692,8 \cdot 10^3 = 250 \text{ A}$$

$$Z_{3b} = 692,8^2 / 300 = 1600 \ \Omega$$

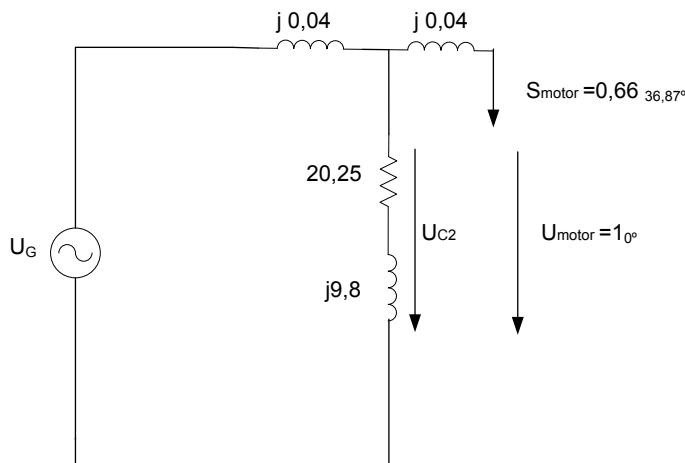
$$X_{CCTBpu} = \frac{X_{CCTB}}{Z_{3b}} = \frac{0,04 \frac{400^2}{100}}{\frac{(\sqrt{3}400)^2}{3 \cdot 100}} = 0,04 \text{ p.u.}$$

Tramo 4

$$U_{4b} = 400 \cdot \sqrt{3} \cdot 15 / 400 \cdot \sqrt{3} = 15 \text{ kV}$$

$$I_{4b} = 300 \cdot 10^6 / \sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3 = 11547 \text{ A}$$

$$S_{4M} = 20 \angle 36,87^\circ / 300 = 0,066 \angle 36,87^\circ \text{ p.u.}$$



$$I_{4M}^* = 0,066 \angle 36,87^\circ / 1 \angle 0^\circ; \quad I_{4M} = 0,066 \angle -36,87^\circ = 0,053 - j0,04 \text{ p.u.}$$

$$U_{C2} = U_M + Z_{CCTB} \cdot I_{4M} = 1 \angle 0^\circ + 0,066 \angle -36,87^\circ \cdot 0,04 \angle 90^\circ = 1,0016 \angle 0,12^\circ \text{ p.u.} = 694 \text{ kV}$$

$$I_{C2} = 1,0016 \angle 0,12^\circ / 22,5 \angle 25,8^\circ = 0,044515 \angle -25,6^\circ \text{ p.u.} = 0,04 - j0,02 \text{ p.u.}$$

$$U_G = U_{C2} + Z_{CCTA} \cdot (I_{4M} + I_{C2}) = 1,004 \angle 0,2^\circ \text{ p.u.} = 20,1 \text{ kV}$$

Ejercicio 3.4. El generador trifásico del ejercicio anterior tiene una reactancia síncrona de 3,5 Ω por fase y una resistencia de estator de 0,15 Ω . Para las condiciones de tensión y corriente de salida del generador correspondientes a la situación del ejercicio anterior, determinar el valor de la f.e.m. generada por fase (E_a) y la potencia máxima que el generador puede suministrar sin pérdida de sincronismo y sin modificar la excitación.

Solución: a) $E_a=23,9$ kV y $P_G=140$ MW b) $E_a=25$ kV y $P_G=90$ MW
c) $E_a=42$ kV y $P_G=340$ MW d) $E_a=29,8$ kV y $P_G=147,5$ MW

Desarrollo:

$$E_G = U_G + (R_G + jX_G) \cdot I_G$$

$$I_G = I_{4M} + I_{C2} = 0,053 - j0,04 + 0,04 - j0,02 = 0,093 - j0,06 = 0,11 \angle -32,8^\circ \text{ p.u.}$$

$$R_G = 0,15 \Omega / 1,3333 \Omega = 0,1125 \text{ p.u.}$$

$$X_G = 3,5 \Omega / 1,3333 \Omega = 2,625 \text{ p.u.}$$

$$E_G = 1,004 \angle 0,2^\circ + (0,1125 + j2,625) \cdot 0,11 \angle -32,8^\circ = 1,195 \angle 11^\circ \text{ p.u.} = 23,9 \text{ kV}$$

$$P = \frac{E_G U_G}{X_G} \sin \delta \quad y \quad P = P_{\max} \quad si \quad \delta = \frac{\pi}{2}$$

$$P_{\max} = \frac{23,9 \cdot 10^3 \cdot 20,1 \cdot 10^3}{3,5} = 137 \text{ MW}$$

De lo explicado en los apartados 3.3.1 y 3.3.2 del texto básico se puede desprender que la potencia activa máxima a suministrar por el generador, con la excitación aplicada para este caso, sólo puede obtenerse si la carga fuera tal que la corriente fuese capacitiva (ángulo de I_G positivo y próximo a 90°) para conseguir que el ángulo de potencia (el de E_G , dado que se toma el de U_G como referencia 0°) se aproxime a 90° , que es el límite máximo de sincronismo.

3.3.1 Generador conectado a un sistema eléctrico. Límites de funcionamiento. Pag.77.

Funcionamiento a tensión constante. La referencia a la Figura 3.14 del final de la página debe ser 3.16 y las referencias del último párrafo a las ecuaciones (3.33) y (3.34) deben ser (3.32) y (3.33) respectivamente.

3.4.1. Funcionamiento en carga de la máquina síncrona. Pag. 83- Ejemplo 3.5. La fórmula del deslizamiento utilizada no es estrictamente errónea pero puede llevar a confusión expresándola como en 3.38 y restándola a 2, cuando el resultado es el mismo si se aplica la misma fórmula pero sustituyendo n_r por el valor con signo negativo (-800 r.p.m), al girar el rotor en sentido contrario al del campo. El valor 2 utilizado no tiene relación alguna con la relación entre espiras entre estator y rotor.

3.4.2. Circuito equivalente de la máquina asíncrona. Pag. 85- Ecuación 3.43. El segundo término de la ecuación debe ser $P_{cu2} = P_{mi} \cdot s / (1-s)$, como puede deducirse fácilmente de la primera igualdad de dicha fórmula y de la ecuación 3.44.

CAPÍTULO 4. Líneas y cables eléctricos.

4.4.2. Línea de longitud media. Pag 105- Admitancia en paralelo. Debe llamarse la atención al hecho de que la admitancia de la línea se representa en la realidad por “ $2 Y$ ”, dado que en el equivalente en “ π ” se usa “ Y ” en cada rama de la línea, a diferencia de lo que hacen otros textos recomendados (Stevenson o Fermín Barrero), que usan $Y/2$. Por eso en la expresión 4.51 se multiplica la admitancia por unidad por la mitad de la longitud de la línea. Pero téngase en cuenta que en ese caso “ Y ” representa la mitad de la admitancia de la línea. Si se hubiese usado el equivalente con $Y/2$ en la expresión de I_0 en (4.56) en donde indica Y , se tendría $Y/2$.

4.4.3. Línea larga. Pag 112- Potencia característica. Las conclusiones numeradas como 2 y 3 tienen una errata en la relación de impedancias. Están cambiados los signos de $>$ y $<$, ya que se indica que con cargas mayores que la de la impedancia característica, entonces ($Z > Z_c$) y la tensión disminuye en la línea desde el origen a la carga. Si la carga es mayor, la impedancia Z es menor, esto es ($Z < Z_c$) y no como se indica en 2. Por eso, en condiciones de cortocircuito de la carga ($Z = 0 < Z_c$), la tensión en ésta es 0 y en cambio, cuando la carga está en circuito abierto ($Z = \infty > Z_c$), se producen sobretensiones en el punto de la carga (véase ejemplo 4.4).

4.6.2 Cálculo de la sección de los conductores en BT. Pag. 118- Caída de tensión en un conductor. La expresión de U_0 de la fórmula (4.94) corresponde a una aproximación de la suma vectorial y existe un error en ella.

El valor correcto puede determinarse considerando que el valor real de la tensión en el origen del circuito es prácticamente igual a su proyección horizontal, tal como se hizo de manera análoga en el cálculo de la caída de tensión de un transformador en el Apartado 3.1.3 (véase Figura 3.6 y Fórmula 3.15). Además y en consecuencia, el signo $-$ de la parte imaginaria debe ser un $+$.

Esta aproximación se justifica en el hecho de que en los circuitos de las instalaciones de baja tensión los valores de ϕ son muy pequeños ya que el factor de potencia de la carga debe ser elevado por requisitos reglamentarios (superior a 0,9 en circuitos de alumbrado o en motores en distribución de baja tensión). Con ello el valor de $\text{sen}\phi$ será muy pequeño y los términos que están multiplicados por él, despreciables, o dicho de otro modo, la tensión en el origen es prácticamente igual a su proyección horizontal.

Otra posibilidad es que, tal y como se indica anteriormente en el texto básico el valor de la inductancia X del conductor sea tan pequeño que se desprece, con lo que en la expresión (4.94) quedaría tal como se indica en el texto básico pero sustituyendo la X por R .

Ejercicio 4.1. Un circuito monofásico de una industria está conectado entre dos fases de un transformador trifásico de 10/0,4 kV, $u_{cc} = 4\%$ y 0,5 MVA, con impedancia de cortocircuito reactiva pura a los efectos del cálculo. El circuito está compuesto por dos conductores de aluminio unipolares, de aislamiento de goma (B en la tabla 11.7 del texto base), de resistividad $0,025 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$, 500 m de longitud y sección mínima correspondiente a la corriente nominal de la carga que alimenta según la tabla. La carga del circuito monofásico es resistiva de 200 kVA a 400 V. Determinar:

- a) La caída de tensión en los bornes de la carga cuando el origen del circuito monofásico, a la salida del transformador, se alimenta a 400 V.
- b) La pérdida de potencia activa en las condiciones indicadas.

Desarrollo:

a) La corriente nominal de la carga y la sección de los conductores se determina por

$$I_{nomC} = \frac{200 \cdot 10^3}{400} = 500 \text{ A} \Rightarrow S = 300 \text{ mm}^2$$

Como la carga es resistiva, se considera de impedancia constante, con lo que la caída de tensión en los bornes de la carga, será

$$R_C = \frac{0,4^2 \cdot 10^3}{200} = 0,8 \text{ } \Omega; \quad R_L = 2\rho \frac{L}{S} = 2 \cdot 0,025 \frac{500}{300} = 0,083$$

$$U_C = 400 \cdot \frac{0,8}{0,8 + 0,083} = 400 \cdot 0,906 = 362,4 \text{ V} \Rightarrow \downarrow 9,4\%$$

b) La corriente del circuito no será ahora la nominal de la carga, dado que la carga es de impedancia constante y no se alimenta a la tensión asignada.

$$I_C = \frac{400}{(0,8 + 0,083)} = 453 \text{ A}$$

$$P_L = 453^2 \cdot 0,083 = 17032 \text{ W}$$

Es importante indicar que en este ejemplo no se ha seguido la expresión (4.97) del texto base, que como en él se indica es un cálculo aproximado de la caída de tensión. El motivo principal de la diferencia radica en que se aplica dicha expresión suponiendo que la corriente de la carga es la nominal, con lo que el valor de caída de tensión que obtendríamos sería 10,4 % . Pero si en su lugar usamos el valor real de corriente de la carga, calculado anteriormente, obtendríamos el mismo valor de caída de tensión.

De la misma manera ocurre con las pérdidas de potencia en la línea si utilizamos como valor de corriente la nominal, con lo que obtendremos unas pérdidas superiores a las calculadas anteriormente (21 kW aproximadamente)

La expresión (4.97) es la forma habitual de calcular las caídas de tensión en los circuitos eléctricos en donde las cargas son variables, o no están definidas, como ocurre por ejemplo en el circuito de tomas de corriente de una vivienda, o una oficina. El cálculo se hace por exceso, suponiendo que la corriente que circula es la máxima que permite el circuito, que es la corriente nominal del interruptor automático que lo protege y además suponiendo que toda la carga está en el extremo del circuito.

Pero si la carga está perfectamente definida y es suficientemente grande, como por ejemplo en el circuito de una industria que alimenta una gran máquina, merece la pena hacer un cálculo mas preciso como el realizado en este ejercicio puesto que la menor caída de tensión y la menores pérdidas podrían favorecer un circuito menos sobredimensionado o un mayor margen para permitir conectar otras cargas.

Pag. 119- Selección de conductores. El método indicado en el apartado de selección de conductores, en lo relativo a la determinación de la sección de los conductores por máxima intensidad admisible tiene una explicación más detallada y un ejemplo de cálculo en el Capítulo 11, Apartados 11.5 y 11.8, dado que este cálculo es dependiente de las características de los dispositivos de protección de la instalación y es en ese capítulo donde se explican sus características. Por el contrario en dicho Capítulo 11 no se desarrollan cálculos por caída de tensión que se explican en este apartado con el fin de no complicar el desarrollo del ejemplo y centrar la atención sobre cada aspecto a considerar de manera separada.

No obstante en los cálculos reales de las instalaciones ambos aspectos deben ser considerados. En la mayoría de las instalaciones de BT la condición de caída de tensión suele ser más restrictiva que la de máxima intensidad admisible, primero porque las corrientes tanto en condiciones nominales como en condiciones de defecto son normalmente inferiores a las admisibles por los conductores que cumplen con la condición de caída de tensión, salvo que la longitud del circuito sea muy pequeña. En cambio en alta y media tensión esto no es siempre así, sobre todo teniendo en cuenta que en centros de transformación y redes de distribución y enlace, las longitudes pueden ser claramente menores y por el contrario, las corrientes de defecto son muy superiores a las que se dan en baja tensión.

CAPÍTULO 5. Representación del sistema.

Pag. 130- Ejemplo 5.1. En la expresión de $X_{cc1,nueva}$ el valor de 0,08 debe ser 0,09, pero el resultado final reflejado es correcto. Por otro lado Z_{lp} debe ser $-j20536 \Omega$ en lugar de $-j20,536 \Omega$, aunque tampoco cambia el resultado final, dado que el valor por unidad es correcto.

Pag. 134- Modelos de admitancias e impedancias de red. La referencia a la Figura 5.10 del final de la página debe ser 5.9.

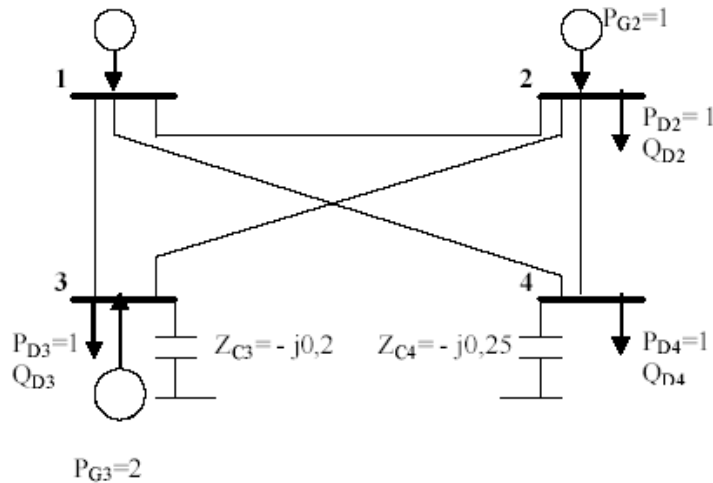
En los ejemplos del Capítulo 3 de esta Adenda ya se han visto casos de cálculo del sistema en valores por unidad y del tratamiento de las cargas de impedancia constante o de potencia constante. Se desarrollan ahora algunos ejemplos de cálculo de los modelos de red y flujo de cargas.

Pag. 138- Potencia inyectada en un nudo. Puede existir cierta confusión entre dos tipos de potencias que se explican en el Apartado 5.4.1. Uno es el de la corriente entrante en el nudo, I_i , determinada a partir de la matriz de impedancias (5.7) que es realmente entrante en el nudo y en donde la potencia calculada en (5.8) es entrante también en el nudo.

El segundo es el de la corriente que circula por la línea entre dos nudos, determinada a partir del equivalente en pi y en donde la expresión (5.5) corresponde a la corriente que va de i a k y que por tanto es saliente de i y entrante en la línea (I_{ik}). La potencia de (5.8) calculada a partir de esta última corriente es entonces saliente del nudo e inyectada en la línea, que es lo que dice el texto de la página 145 antes de (5.15).

En la figura 5.11 a) se ven las dos corrientes, la primera sería la I_i de dicha figura y la segunda, (I_{ik}) serían las I_1, I_2 , etc.

Ejercicio 5.1.



En el sistema de la figura los valores expresados en por unidad tienen una potencia base de 100 MVA y tensión de base de 100 kV. En los nudos 3 y 4 se han colocado baterías de condensadores para compensación de potencia reactiva y la impedancia de todas las líneas de interconexión entre los nudos es, en valores por unidad, de $Z_{ij} = 0,03 + j 0,3$ y la admitancia en paralelo es $y_{ij,0} = j 0,05$. Determinar la matriz de admitancias del sistema

Solución. Las admitancias de las líneas son:

$$z_{ij} = 0,03 + j0,3 \text{ pu} \Rightarrow y_{ij} = 0,33 - j3,3 = 3,333\angle -84,2^{\circ}$$

$$y_{ij,0} = j0,05$$

Y las de los condensadores son

$$y_{C3} = \frac{1}{-j0,2} = j5$$

$$y_{C4} = j4$$

Con lo que los términos de la matriz de admitancias serán:

$$Y_{11} = Y_{22} = 3 \cdot j0,05 + 3 \cdot (0,33 - j3,3) = 1 - j9,75 = 9,8\angle -84,2^{\circ}$$

$$Y_{33} = 2 \cdot j0,05 + 2 \cdot (0,33 - j3,3) + j5 = 0,66 - j1,5 = 1,64\angle -66,25^{\circ}$$

$$Y_{44} = 2 \cdot j0,05 + 2 \cdot (0,33 - j3,3) + j4 = 0,66 - j2,5 = 2,6\angle -75,2^{\circ}$$

$$Y_{12} = Y_{13} = Y_{14} = Y_{21} = Y_{23} = Y_{24} = Y_{31} = Y_{32} = Y_{41} = Y_{42} = -Y_{\text{linea}} = -0,33 + j3,3 = -3,333\angle -84,2^{\circ}$$

$$Y_{34} = Y_{43} = 0$$

Con lo que la matriz de admitancias pedida es

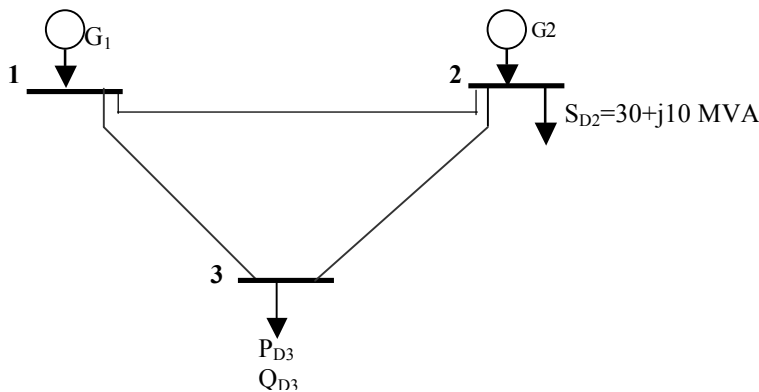
$$Y = \begin{bmatrix} 1 - j9,75 & -0,33 + j3,3 & -0,33 + j3,3 & -0,33 + j3,3 \\ -0,33 + j3,3 & 1 - j9,75 & -0,33 + j3,3 & -0,33 + j3,3 \\ -0,33 + j3,3 & -0,33 + j3,3 & 0,66 - j1,5 & 0 \\ -0,33 + j3,3 & -0,33 + j3,3 & 0 & 0,66 - j2,5 \end{bmatrix}$$

Ejercicio 5.2. En el sistema de la figura se obtienen los siguientes valores de tensión en los nudos después de resolver el flujo de potencias:

$$U_1 = 1 \angle 0^\circ \quad U_2 = 1,04 \angle -1^\circ \quad U_3 = 0,98 \angle -0,5^\circ$$

La línea de interconexión entre los nudos generadores tiene una impedancia en serie, en valores reales, de $Z_{1-2} = 1 + j0,75 \Omega$ y la admitancia en paralelo es $y_{1-2,0} = j0,08 \Omega$. Las líneas que conectan los nudos generadores con el de carga tienen una impedancia en serie de $Z_{i-3} = 0 + j0,5 \Omega$ y admitancia en paralelo despreciable.

Tomando como base de potencia 1000 MVA y base de tensiones 50 kV, determinar la corriente entrante en el nudo 2.



Solución: a) $750 \angle -35^\circ \text{ A}$ **b) $2000 \angle -90^\circ \text{ A}$** c) $13325 \angle -80^\circ \text{ A}$ d) $22132 \angle -70^\circ \text{ A}$

Desarrollo:

$$Z_b = 50^2 / 1000 = 2,5 \Omega \quad I_b = 10^9 / \sqrt{3} \cdot 50 \cdot 10^3 = 11547 \text{ A}$$

En 1-2

$$Z_{1-2} = 1 + j0,75 / 2,5 = 0,4 + j0,3 \text{ p.u.} \quad y_{1-2} = 2 \angle -37^\circ = 1,6 - j1,2 \text{ p.u.}$$

$$y_{12,0} = j0,08 \Omega^{-1} \quad Z_{12,0} = -j12,5 \Omega = -j12,5 / 2,5 = -j5 \text{ p.u.} \quad y_{12,0} = j0,2 \text{ p.u.}$$

En 1-3 y 2-3

$$Z_{i-j} = j0,5 / 2,5 = j0,2 \text{ p.u.} \quad y_{i-j} = -j5 \text{ p.u.} \quad y_{ij,0} = 0$$

$$Y_{11} = Y_{22} = j0,2 + 1,6 - j1,2 - j5 = 1,6 - j6 = 6,2 \angle -75^\circ$$

$$Y_{33} = 2 \cdot (-j0,5) = -j10 = 10 \angle -90^\circ$$

$$Y_{12} = Y_{21} = -1,6 + j1,2 = -2 \angle -37^\circ$$

$$Y_{13} = Y_{23} = Y_{31} = Y_{32} = j5 = 5 \angle 90^\circ$$

$$i_2 = 6,2 \angle -75^\circ \cdot 1,04 \angle -1^\circ - 2 \angle -37^\circ \cdot 1 \angle 0^\circ + 5 \angle 90^\circ \cdot 0,98 \angle -0,5^\circ = -j0,17 = -j1963 \text{ A.}$$

La corriente en el nudo 2 es saliente.

Ejercicio 5.3. En el mismo sistema del ejercicio anterior, determine la corriente de salida del generador G_2 .

Solución: a) $750\angle -35^\circ$ A **b) $2100\angle -90^\circ$ A** c) $13325\angle -80^\circ$ A d) $22132\angle -70^\circ$ A

Desarrollo:

$$S_{D2} = 30 + j10/1000 = 0,03 + j0,01 \text{ p.u.}$$

$$S_2 = U_2 \cdot i_2^* = 0,177\angle 90$$

$$S_{G2} = S_2 + S_{D2} = 0,03 + j0,19 = U_2 \cdot i_{G2}^*$$

$$i_{G2} = 0,182\angle -82^\circ = 2102\angle -82^\circ \text{ A}$$

Pag. 146- Ejemplo 5.5. En el apartado 2, en el cálculo de Q_4 , los términos en coseno deben ser seno, aunque el resultado es correcto pues se trata de un error de edición. Igualmente, en el apartado 3, en la expresión de la potencia, el valor del ángulo de U_3^* debe ser $+1,52^\circ$ en lugar de $-1,52^\circ$, pero el resultado final reflejado es también correcto.

CAPÍTULO 6. Faltas simétricas.

En el Ejemplo 8.2 y en el del cálculo del Apartado 11.8 del texto base, se desarrolla el cálculo de cortocircuitos por el método aproximado del equivalente Thevenin. A fin de clarificar este método y comprobar su equivalencia con el cálculo exacto, se desarrolla el siguiente ejemplo con el mismo circuito que el referido en dicho texto, aunque con diferentes valores de tensiones y potencias.

Por simplicidad el ejemplo se refiere a un generador que alimenta unas cargas, pero que podría representar una red eléctrica real, que lógicamente es más compleja, aunque su equivalente puede ser el mismo que el del enunciado. En este punto es importante que se entienda el significado de las impedancias equivalentes de una red y lo que representan en la realidad, tal como se describe en el capítulo 6.4 del texto base.

Cuando hacemos el cálculo (aproximado, no obstante, como se indica en el libro) de las corrientes de defecto a tierra o de cortocircuito entre fases, estamos calculando una corriente en un circuito suponiendo que el sistema es una fuente ideal de tensión en serie con ciertas impedancias.

En la realidad, cuando se produce un corto, o un defecto a tierra, aguas abajo de un transformador, la corriente sale del secundario de transformador y retorna a él. Si no fuese así, no se cerraría el circuito. Por tanto, la corriente real sólo pasa por las bobinas del transformador y los conductores en caso de corto entre fases o por la bobina del transformador, conductor, la tierra del defecto y la tierra del neutro en caso de defecto a tierra.

Pero el transformador no es una fuente ideal e infinita de corriente. Al hacer un cortocircuito aguas abajo del secundario, la tensión del primario del transformador también se ve afectada, dado que también circula una sobrecorriente por él. Esa caída de tensión viene de la impedancia de la red que lo alimenta, que a su vez parte de un transformador de media tensión

conectado a una red de alta tensión y que también a su vez tiene otra impedancia que producirá la correspondiente caída de tensión.

Por tanto y de manera rigurosa, todas las impedancias hasta el origen de la instalación (la central eléctrica) intervendrán en la corriente de cortocircuito o defecto en baja tensión (y en las de operación también, aunque en menor medida). Las impedancias que nunca van a intervenir son las que estén aguas abajo del defecto, salvo las de los motores de potencia elevada, que a su vez actúan como generadores en condiciones de cortocircuito (no en defecto, en este caso), tal como se explica en el capítulo 6 del libro.

Ahora bien, las diferentes impedancias de la red y transformadores que están aguas arriba del fallo no intervienen de la misma manera en la corriente de cortocircuito o defecto aguas abajo (en baja tensión, por ejemplo), dado que la caída de tensión que se produce en los primarios de los transformadores irá siendo menor a medida que nos alejamos del fallo, teniendo en cuenta que la corriente es menor debido a la relación de transformación.

Por tanto, las impedancias no afectan a la corriente como si estuviesen en serie con sus valores reales y por eso, para el cálculo en valores reales, se van refiriendo las impedancias que están aguas arriba de los transformadores al secundario de éstos, dividiendo por la relación de transformación al cuadrado, que es el efecto real de la caída de tensión en el escalón anterior y se pasan al siguiente hasta llegar al escalón en donde se produce el fallo. En valores por unidad se hace exactamente lo mismo cuando referimos las impedancias a la base correspondiente de cada tramo.

Lo anterior justifica que muchas veces los valores de impedancia de la red influya muy poco en el cálculo, ya que son muy pequeños comparados con los valores de impedancia real de cables o de tierras (más en este segundo caso) y por eso frecuentemente se dice que se considere a toda la red como una impedancia de potencia constante, o se considere de impedancia despreciable a los efectos del cálculo, o no se dan datos de la red y se considera por tanto como fuente ideal.

Este concepto es el que se refleja en los esquemas de fallo de las figuras 11.4 a 11.6 del libro, que representan el circuito equivalente del sistema en condiciones de cortocircuito o defecto, pero que no reflejan las impedancias reales (cables, bobinas, etc) por las que pasa la corriente.

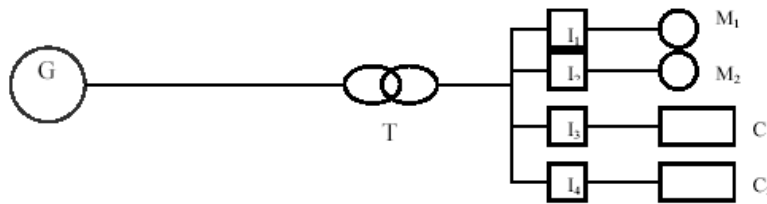
Por otro lado, se recomienda consultar otros ejercicios de los Capítulos 7 y 8, desarrollados a continuación, donde se muestran ejemplos de cálculo de impedancias equivalentes en condiciones de cortocircuito y fallo a tierra que corresponden a lo indicado en este capítulo del texto base.

Ejercicio 6.1.

El sistema de la figura consta de un generador de 27 MVA y 15 kV con $X_d''=15\%$, que se conecta a través de un transformador, de características nominales 27 MVA y 15/7,5 kV y reactancia de dispersión del 10%, a un nudo de carga que alimenta dos motores iguales, M_1 y M_2 y a dos cargas resistivas iguales, C_1 y C_2 . La reactancia subtransitoria X_d'' de cada motor es del 20% sobre una base de 3000 kVA y 7,5 kV. Las cargas resistivas son de 6000 kVA y 7,5 kV. Se desprecian las impedancias de los cables y elementos de conexión

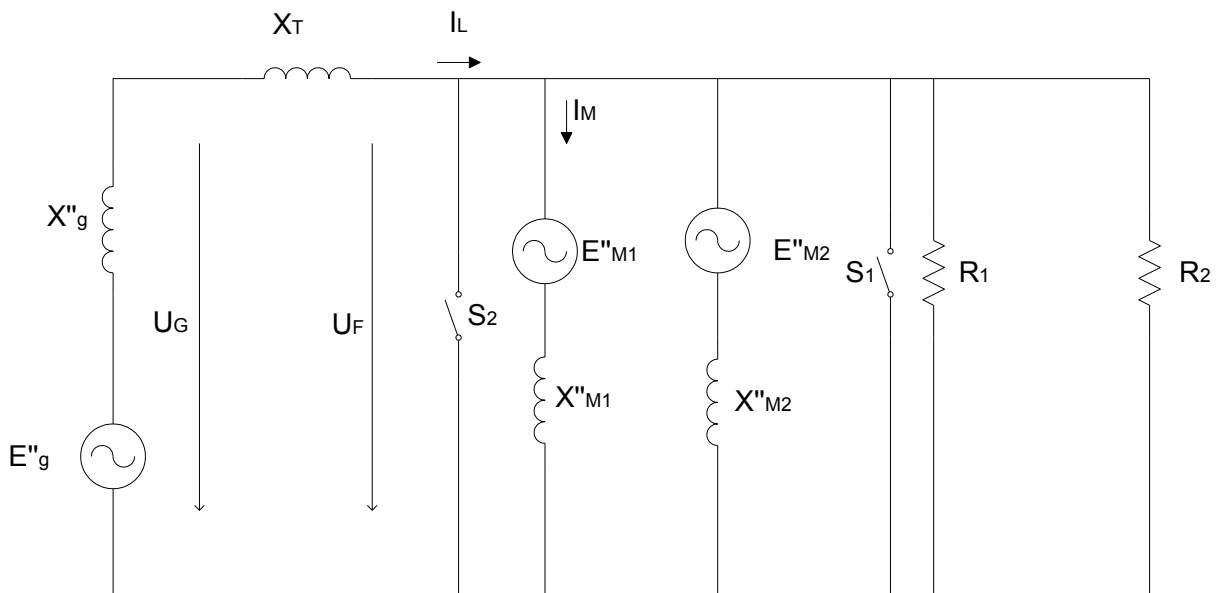
Determinar:

- La corriente de cortocircuito simétrica a interrumpir en los bornes de cada una de las cargas resistivas.
- Lo mismo para cada uno de los motores.
- Tensión interna subtransitoria en los motores inmediatamente antes de producirse el cortocircuito, si estos funcionan a la potencia y tensión nominal con un f.d.p de 0,8 inductivo.



Solución:

El circuito propuesto, antes de producirse el cortocircuito (S_1 y S_2 abiertos), puede representarse, en valores por unidad, mediante:



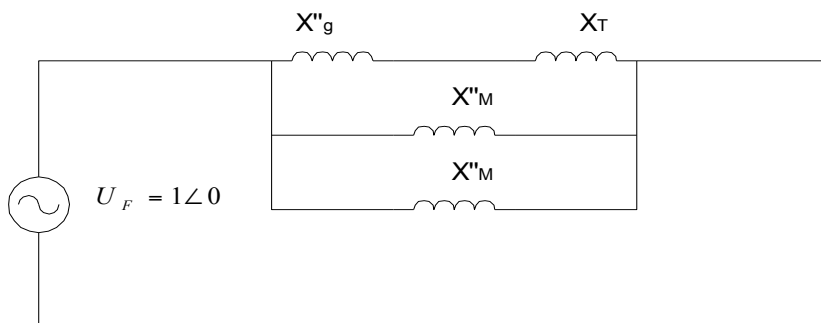
$$S_B = 27 \cdot 10^6 \text{ VA}$$

$$U_{1B} = 15 \text{ kV} \quad I_{1B} = \frac{27 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3} = 1039 \text{ A}$$

$$U_{2B} = 7,5 \text{ kV} \quad I_{2B} = \frac{27 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 7,5 \cdot 10^3} = 2078,5 \text{ A}$$

$$X''_g = 0,15 \text{ p.u} \quad X_T = 0,1 \text{ p.u} \quad X''_M = 0,2 \cdot \frac{27}{3} = 1,8 \text{ p.u}$$

a) Al cerrarse S_1 , la corriente de cortocircuito se obtiene aplicando el método aproximado de la Z_{th} equivalente a tensión nominal descrita en el Apartado 6.4.2 del texto base (Ejemplo 6.5). El circuito equivalente en condiciones de cortocircuito es:



La corriente de cortocircuito resultante se obtiene de:

$$\frac{1}{Z_{th}} = \frac{1}{j(X''_g + X_T)} + \frac{2}{jX''_M} \quad Z_{th} = j0,19 \text{ p.u}$$

$$I_{cc4} = I_{cc3} = \frac{U_F}{Z_{th}} = \frac{1}{j0,19} = -j5,11 \text{ p.u}$$

$$|I_{cc4}| = |I_{cc3}| = 10621 \text{ A} \cong 11 \text{ kA}$$

b) En este segundo caso, cuando el cortocircuito se produce en bornes de uno de los motores, el circuito equivalente es análogo, pero eliminando una de las admitancias de motor, dado que por la protección de la rama de dicho motor (I_1 o I_2) circularía la corriente de todo el sistema, salvo la producida por el propio motor, que se derivaría a tierra aguas abajo de la protección (ver la figura primera). Luego:

$$\frac{1}{Z_{th}} = \frac{1}{j0,25} + \frac{1}{j1,8} \quad Z_{th} = j0,22 \text{ p.u}$$

$$I_{cc4} = I_{cc3} = \frac{1}{j0,22} = -j4,5 \text{ p.u}$$

$$|I_{cc4}| = |I_{cc3}| = 9353 \text{ A} \cong 9,5 \text{ kA}$$

También se podrían haber resuelto los apartados a) y b), directamente, a partir del circuito equivalente de la figura 1 y después de cerrar el interruptor S₁, que simula el cortocircuito en las resistencias. Con ello y dado que los motores son iguales, el circuito queda como sigue.

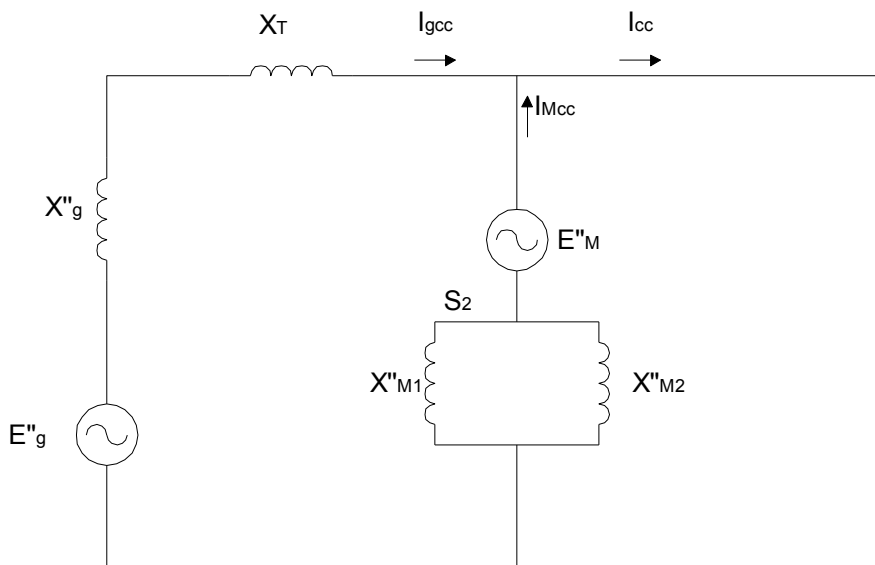


Figura 3

Partiendo de la figura 1, tenemos que:

$$U_F = U_G - I_L jX_T$$

$$I_L = 2I_M + 2I_R$$

$$E_M'' = U_F - I_M'' jX_M''$$

$$E_g'' = U_F + I_L j(X_g'' + X_T)$$

y de la figura 3 se obtiene:

$$I_{cc} = I_{Mcc}'' + I_{gcc}'' = \frac{E_g''}{j(X_g'' + X_T)} + \frac{E_M''}{jX_M''} = \frac{U_F + I_L j(X_g'' + X_T)}{j(X_g'' + X_T)} + \frac{U_F - I_M jX_M''}{jX_M''}$$

$$I_{cc} = \frac{[U_F + (2I_M + 2I_R)j(X_g'' + X_T)] \frac{jX_M''}{2} + (U_F - I_M jX_M'')j(X_g'' + X_T)}{j(X_g'' + X_T) \frac{jX_M''}{2}}$$

$$I_{cc} = \frac{U_F j \left(\frac{X_M''}{2} + X_g'' + X_T \right) + I_R jX_M'' j(X_g'' + X_T)}{j(X_g'' + X_T) \frac{jX_M''}{2}}$$

comparandola con la Z_{th} de la figura 2, la fórmula anterior se puede expresar como

$$I_{cc} = \frac{U_F}{Z_{th}} + 2I_R$$

Que no coincide exactamente con la expresión que se utilizó en la aplicación del método aproximado de la impedancia equivalente como ya cabía esperar de lo expuesto en el Apartado 6.4.2 del texto base. En este ejemplo, la corriente de cortocircuito es la superposición de la corriente previa al cortocircuito de las cargas que no intervienen en éste (cargas pasivas y motores, aguas abajo del cortocircuito), con las corrientes, una vez producido el cortocircuito, de los generadores y motores, aguas arriba de éste.

Pero si comparamos la magnitud de la corriente de cortocircuito obtenida de la impedancia equivalente y la de la corriente de las cargas, se verificará que esta última es muy inferior a la primera, con lo que es en general aceptable que la corriente de las cargas se desprece, máxime si se tiene en cuenta que para seleccionar un interruptor que proteja contra los cortocircuitos, los calibres de corriente normalizados de estos interruptores obligan a elegir uno de corriente de cortocircuito sensiblemente superior a la calculada.

En el caso del circuito considerado, se puede comprobar que $2I_R$ es 924 A frente a los casi 11000 A de la corriente obtenida en a).

c) La tensión subtransitoria en los motores antes de producirse el cortocircuito, cuando estos funcionan a plena carga con factor de potencia 0,8 inductivo, se obtiene a partir del circuito de la figura 1, por:

$$E''_M = U_F - I_M jX''_M \quad y$$

$$S_M = U_F I_M^*$$

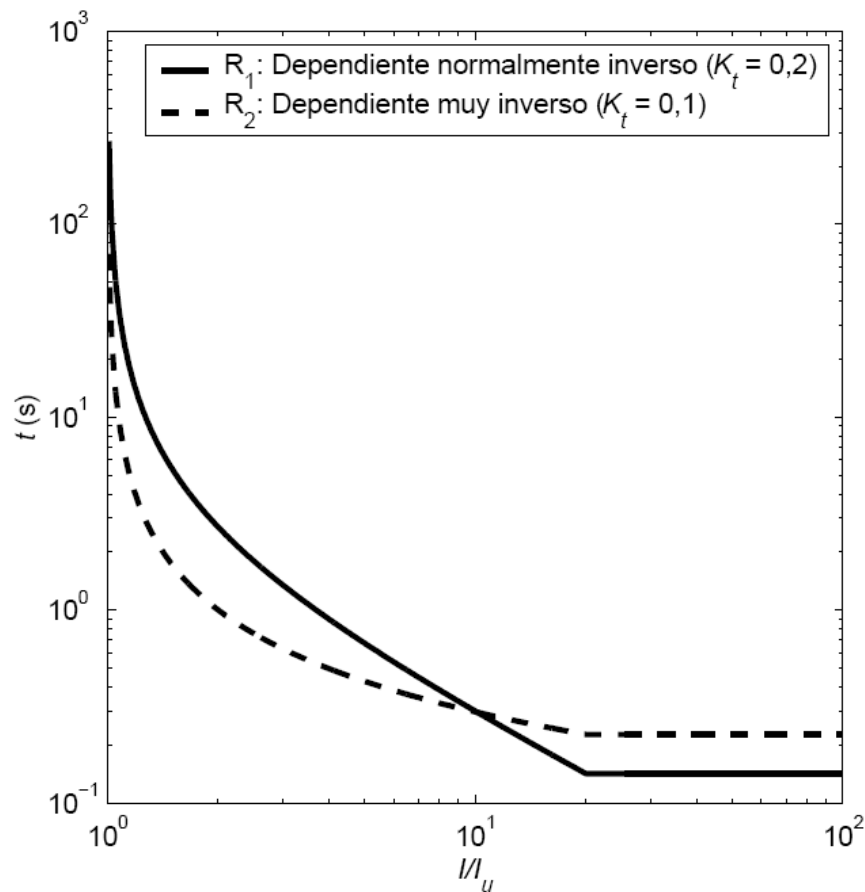
$$\text{Si el fpd es } 0,8 \text{ inductivo} \Rightarrow S_M = 3000_{\angle 36,8} \text{ kVA} = 0,111_{\angle 36,8} \text{ pu}$$

$$I_M^* = \frac{0,111_{\angle 36,8}}{1_{\angle 0}} = 0,111_{\angle 36,8} \Rightarrow I_M = 0,111_{\angle -36,8}$$

$$E''_M = 1_{\angle 0} - 0,111_{\angle -36,8} \cdot 1,8_{\angle 90} = 0,89_{\angle -10,3} \text{ pu} = (0,88 - j0,16) \text{ pu}$$

$$E''_M = 7,5 \text{ kV} \cdot 0,89_{\angle -10,3} = 6,67_{\angle -10,3} \text{ kV} = (6,6 - j1,2) \text{ kV}$$

Pag. 179- Apartado 6.7. Características de operación. Sustituir la figura 6.17 del libro por la siguiente.



Pag. 181- Ejemplo 6.6. Apartado 4. En el segundo párrafo, donde indica $t = 0,3742 + 0,3$, debe decir $t = 0,3538 + 0,3 = 0,6538$ s ya que el enunciado refiere a la máxima corriente I_{cc}^{\max} para la selectividad en los relés.

CAPÍTULO 7. Centros de transformación.

Pag. 200- Ejemplo 7.1. En la Figura 7.12 y en la fórmula de I_d de la página 201 la referencia de R_A debe ser R_t aunque el resultado final del ejemplo no varía.

Para aclarar un poco más los circuitos por donde circula la corriente de defecto en cada caso, hay que resaltar que, para que exista una corriente de defecto, es necesario que haya un circuito cerrado por donde circule dicha corriente. En los casos de los ejemplos, el neutro está referido a tierra y es por eso que, cuando hay una derivación a tierra, la corriente circulará hasta la fuente por el camino de menor impedancia, que en este caso es el neutro, independientemente de que el defecto se produzca en una tierra independiente (alejada), o no.

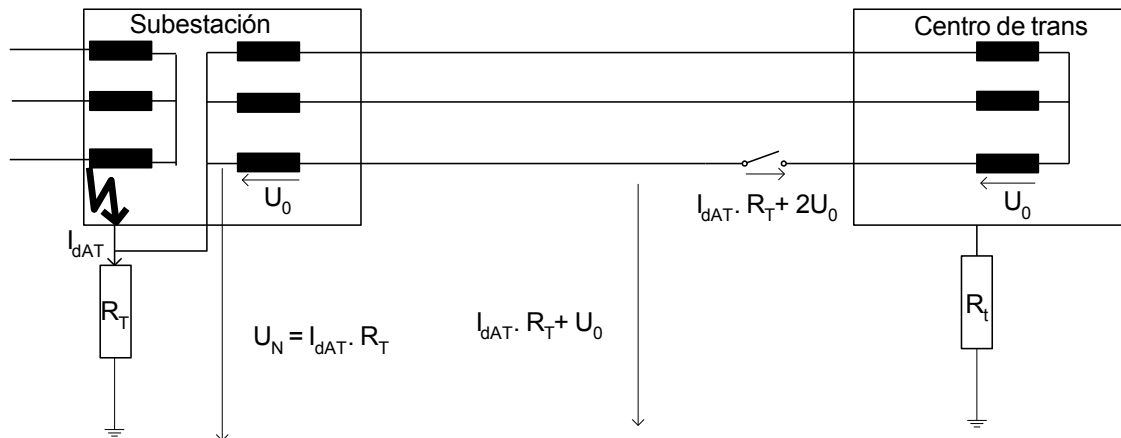
La diferencia entre que el defecto se produzca en una tierra común con la del neutro es que la resistencia de tierra no interviene en el circuito, como se puede ver en la figura 7.11.

Puede sorprender que el cálculo de la corriente de defecto sólo dependa de las respectivas resistencias de tierra y sea independiente de si el defecto se produce a 50 m o 500 m de la fuente, pero eso es lo que se desprende del comportamiento de la tierra explicado en el apartado 10.2 del texto base. A partir de una distancia del punto en el que se inyecta (o retorna) la corriente, el potencial de tierra es 0 y por tanto es como un cortocircuito a los efectos del paso de corriente.

Por último está el caso de redes IT, en donde el neutro está aislado de tierra y en donde el neutro ya no es el camino de menor impedancia para el retorno de la corriente. En ese caso, la impedancia de las líneas respecto a tierra (capacidad de la línea) se convierten en el punto de cierre del circuito de defecto (Figura 12.6) y además, en este caso, la longitud de la línea desde la fuente hasta el punto donde se produce el defecto si afecta al valor de la corriente de defecto, en tanto que la capacidad de la línea depende de su longitud. No obstante los valores de corriente de defecto, en primer defecto, son siempre muy inferiores a los de las redes con neutro referido a tierra.

Ejercicio 7.1. Una subestación conectada a una red de 200 kV y potencia de cortocircuito $S_{CC}=1000$ MVA tiene un transformador de potencia de 200/20 kV con el neutro del lado de media tensión referido a tierra común con la de la subestación y de valor de resistencia $R_t = 30 \Omega$. El transformador alimenta una línea de 20 kV a la que se conecta un centro de transformación. Se desea determinar el valor eficaz de las tensiones de corta duración, más desfavorables a frecuencia industrial, a soportar por los aislamientos del circuito y del centro de transformación que dicho transformador alimenta, tanto en valor común U_{F-T} (entre fase y tierra), como en seccionamiento U_S (fase), cuando se produce un defecto a tierra del lado de alta tensión (200 kV).

Solución: En la siguiente figura se puede observar el esquema del circuito con una representación de las tensiones transferidas a las líneas de 20 kV cuando se produce un fallo a tierra en el lado AT. El circuito es diferente al representado en la Figura 7.7 del texto base, dado que en ella el fallo se producía en el lado de media y el neutro del transformador no estaba referido a tierra, con lo que este ejemplo refleja otra posible situación de sobretensión de corta duración, a frecuencia industrial, para un esquema de circuito que también se puede dar.



Como el cortocircito se produce en la línea de AT de 200 kV, en el primario del transformador de potencia de la subestación, para el cálculo de I_{dAT} las únicas impedancias a considerar serán Z_r y R_T si suponemos que todas las demás impedancias que intervienen en el bucle de defecto son despreciables. De las expresiones (6.29), (6.32) y (6.33) del texto base, obtenemos,

$$Z_r = \frac{(cE)^2}{S_{CC}} = \frac{(1,1 \cdot 200)^2 \cdot 10^6}{1000 \cdot 10^6} = j48,4 \Omega \quad \text{suponiendo } R_r = 0$$

Nótese que parece que se ha tomado aquí un valor de E de 200 kV, cuando la fórmula corresponde al análisis por fase y tendría que ser entonces $\frac{200 \cdot 10^3}{\sqrt{3}}$, pero también entonces la

S_{CC} de la fórmula debería ser $\frac{1000 \cdot 10^6}{3}$, con lo que el cálculo es el mismo. El valor de c se ha tomado de la Tabla 6.1 del texto base para redes de AT y corriente máxima, que es la que se debe calcular en el caso propuesto.

$$I_{dAT} = \frac{cU}{\sqrt{3}|Z_r + R_T|} = 2228 \text{ A}$$

$$U_{F-T} = \frac{20 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} + 30 \cdot 2228 = 78398 \text{ V}$$

$$U_S = 2 \frac{20 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} + 30 \cdot 2228 = 89945 \text{ V}$$

Como puede observarse en la tabla 7.1 del texto base, la aparamenta de la instalación deberá tener un nivel de aislamiento correspondiente a tensión asignada de 52 kV.

CAPÍTULO 8. Aparatos de maniobra de circuitos.

Pag. 226- Ejemplo 8.1. En el párrafo titulado “Poder de cierre asignado”, la última frase debe eliminarse y la primera debe añadir interruptor-seccionador al interruptor automático y al seccionador de puesta a tierra.

Pag. 227- Ejemplo 8.1. En el primer guión de intensidad asignada en servicio continuo, después de 100 A, añadir “(sólo para el SST₃. Para IS₁ e IS₂ dependerá de la potencia nominal de la red en anillo que alimenta el CT)” y en el guión de poder de corte asignado eliminar “100 A (no aplicable al seccionador)” y añadir “(sólo para IS₁ e IS₂ y dependerá de la potencia nominal de la red en anillo que alimenta el CT)”.

Ejercicio 8.1. En la subestación del ejemplo 7.1 se desea determinar la intensidad asignada de corta duración y su valor de cresta, así como el poder de cierre de los aparatos de las celdas de maniobra del centro de transformación en él reflejado y también el poder de corte de los interruptores automáticos de protección a su entrada. El transformador de potencia de la subestación es de 200/20 kV, 100 MVA y $u_{cc}=6\%$. El conductor del circuito de media tensión que conecta el transformador de distribución con el centro es de aluminio y de 240 mm² y tiene 10 km.

Solución: La corriente de cortocircuito a calcular ahora, a diferencia del realizado en el ejercicio 7.1, es la del cortocircuito trifásico detrás de los aparatos donde se desea calcular los valores asignados, esto es, en la entrada al centro de transformación. Para ello hay que determinar primero los valores de las impedancias equivalentes del circuito hasta el punto donde se produce el cortocircuito.

La impedancia equivalente de la red de AT de 200 kV es la ya calculada en módulo en el ejercicio 7.1, con lo que según (6.32) y (6.33).

$$R_r = 0,0995Z_r = 4,81 \Omega$$

$$X_r = 0,995Z_r = 48,16 \Omega$$

Para el transformador de potencia, aplicando las expresiones (6.36), (6.39) y (6.40) del texto base.

$$Z_t = \frac{U_{CC} U_{t\text{nom}}^2}{100 S_{t\text{nom}}} = \frac{6 (200 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 100 \cdot 10^6} = 24 \Omega$$

$$R_t = 24 \cos 72^\circ = 7,416 \Omega$$

$$X_t = 24 \sin 72^\circ = 22,825 \Omega$$

Para los conductores de la red de media tensión, a partir de la expresión (6.43) del texto base y con $\rho = 0,0282 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$, según los valores de la Tabla 4.1 del texto base, tendremos, $R_l = \rho \cdot l/S = 0,0282 \cdot 10 \cdot 10^3 / 240 = 1,175 \Omega$ a 20 °C, con lo que según lo establecido en el Apartado 6.4.1 del texto base, con $\alpha = 0,004 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ y $T = 145 \text{ }^\circ\text{C}$,

$$R_{l\text{CC}} = 1,175(1 + 0,004(145 - 20)) = 1,7625 \Omega$$

$$X_{l\text{CC}} = 0,08 \Omega / \text{km} \cdot 10 \text{ km} = 0,8 \Omega$$

Con estos valores hay dos posibles formas de cálculo de las corrientes, en valores reales, refiriendo las impedancias al lado donde se produce el cortocircuito, o en valores por unidad. Se va a proceder a resolverlo por ambos métodos para comprobar que los resultados son idénticos.

Para referir las impedancias al lado de media tensión, habrá que dividir las impedancias del lado de alta tensión por la relación de transformación al cuadrado del transformador de potencia que está entre ellos, $r_t=200/20=10$, tal como se indica en las expresiones (6.34), (6.35), (6.41) y (6.42).

$$R_{r,MT} = \frac{4,81}{100} = 0,0481 \Omega \quad y \quad X_{r,MT} = \frac{48,16}{100} = 0,4816 \Omega$$

$$R_{t,MT} = \frac{7,416}{100} = 0,07416 \Omega \quad y \quad X_{t,MT} = \frac{22,825}{100} = 0,22825 \Omega$$

La impedancia del cable ya está referida al lado de media tensión, con lo que según la expresión (6.46)

$$Z_{CC,MT} = \sqrt{(0,0481 + 0,07416 + 1,7625)^2 + (0,4816 + 0,22825 + 0,8)^2} = 2,415 \Omega$$

Con lo que a partir de la expresión de la corriente de cortocircuito simétrica expresada en el Apartado 11.9 del texto base.

$$I_{CC,MT} = \frac{cU}{\sqrt{3}Z_{CC,MT}} = \frac{1,1 \cdot 20 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 2,415} = 5259 A$$

Haciendo ahora el cálculo en valores por unidad, se tiene,

Tramo AT

$$U_{b1} = 200 kV \quad I_{b1} = \frac{100 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 200 \cdot 10^3} = 288,7 A \quad Z_{b1} = \frac{200^2 \cdot 10^6}{100 \cdot 10^6} = 400 \Omega$$

$$R_{r,pu} = \frac{4,81}{400} = 0,012 p.u. \quad X_{r,pu} = \frac{48,16}{400} = 0,1204 p.u.$$

$$R_{t,pu} = \frac{7,416}{400} = 0,0185 p.u. \quad X_{t,pu} = \frac{22,825}{400} = 0,057 p.u.$$

Tramo MT

$$U_{b2} = 20 kV \quad I_{b1} = \frac{100 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3} = 2887 A \quad Z_{b1} = \frac{20^2 \cdot 10^6}{100 \cdot 10^6} = 4 \Omega$$

$$R_{l,pu} = \frac{1,7625}{4} = 0,44 p.u. \quad X_{r,pu} = \frac{0,8}{4} = 0,2 p.u. \quad .$$

Con la expresión (6.45), se tiene

$$Z_{CC} = \sqrt{(0,012 + 0,0185 + 0,44)^2 + (0,1204 + 0,057 + 0,2)^2} = 0,6 p.u$$

Con lo que la corriente de cortocircuito máxima en la entrada del transformador de distribución será

$$I_{CC \text{ pu}} = \frac{cU}{Z_{CC}} = 1,82 \text{ p.u} = 5254 \text{ A}$$

Que en la práctica es igual a la obtenida por el otro método, salvando los redondeos. Por tanto el valor de la intensidad asignada de corta duración, a frecuencia industrial, habrá de elegirse de los valores de la serie R10, siendo en este caso el valor inmediatamente superior, **6300 A**, que coincidirá con el poder de corte de los interruptores automáticos.

Para el valor de cresta de la intensidad admisible de corta duración asignada, a partir de lo indicado en el Apartado 6.3 del texto base y de la Figura 6.6, obtenemos

$$\frac{R_{CC}}{X_{CC}} = \frac{0,4705}{0,3774} = 1,2 \quad \text{con lo que } \kappa = 1,05$$

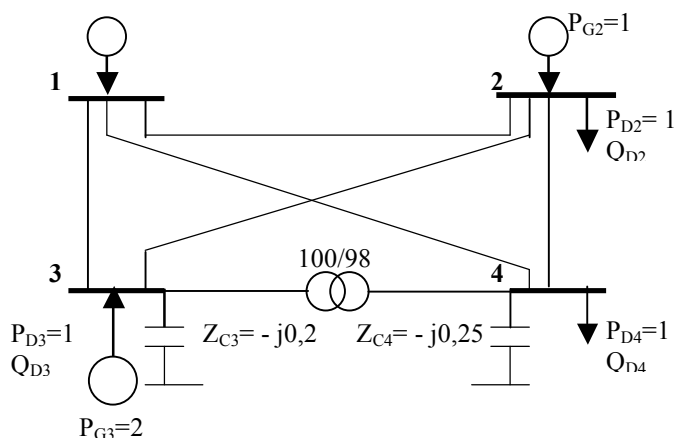
$$I_p = \kappa \sqrt{2} I_{CC} = 1,5 I_{CC} = 7881 \text{ A}$$

Con lo que el valor de la serie R10 asignado para la corriente de cresta será **8000 A**, que corresponde también al poder de cierre de los elementos de maniobra.

Pag. 231- Ejemplo 8.2. En el último aparato debe decirse “**INTERRUPTOR AUTOMÁTICO (IA₃)**” en lugar de “**INTERRUPTOR (IS₃)**” y el poder de corte asignado es, por tanto, 8000 A en lugar de los 100 A indicados.

CAPÍTULO 9. Transformadores de potencia y de distribución.

Ejercicio 9.1. En el mismo sistema que el propuesto en el ejercicio 5.1, si se conecta entre los nudos 3 y 4 un transformador de regulación de módulo de tensión de relación 100/98 kV con tomas en el primario, de 10 MVA y $X_{CC} = j 0,1$. ¿Cuál será, en estas nuevas condiciones, la matriz de admitancias del sistema?



Solución: La relación de tensiones e intensidades, en valores por unidad, en los nudos 3 y 4 cuando se conecta el transformador regulador de módulo de tensión de relación $t:1$ en 3, viene dada por la expresión matricial

$$\begin{bmatrix} i_3 \\ i_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Y_{CC}}{t^2} & -\frac{Y_{CC}}{t} \\ -\frac{Y_{CC}}{t} & Y_{CC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_3 \\ U_4 \end{bmatrix}$$

Donde $t = 100/98 = 1,02$ e Y_{CC} es la admitancia equivalente del transformador en valores por unidad. En este apartado, el valor por unidad de Z_{CC} del enunciado se corresponde con valores de base iguales a los valores nominales de potencia y tensión del transformador, que no son coincidentes con los valores base del sistema, por lo que para referir el valor a la base del sistema

$$Z_{CCN} = Z_{CCA} \frac{S_N}{S_A} = j0,1 \frac{1000 \cdot 10^6}{100 \cdot 10^6} = j1 \Rightarrow Y_{CC} = -j1$$

Por tanto, los términos de la matriz de admitancias del ejercicio 5.1 que cambian son:

$$Y_{33} = 0,66 - j1,5 + \frac{-j1}{1,02^2} = 0,66 - j2,46 = 2,55 \angle -75^\circ$$

$$Y_{44} = 0,66 - j2,5 - j1 = 0,66 - j3,5 = 3,56 \angle -79,3^\circ$$

$$Y_{34} = Y_{43} = -\left(\frac{-j1}{1,02}\right) = j0,98$$

Con lo que la matriz de admitancias pedida ahora es:

$$Y = \begin{bmatrix} 1 - j9,75 & -0,33 + j3,3 & -0,33 + j3,3 & -0,33 + j3,3 \\ -0,33 + j3,3 & 1 - j9,75 & -0,33 + j3,3 & -0,33 + j3,3 \\ -0,33 + j3,3 & -0,33 + j3,3 & 0,66 - j2,46 & j0,98 \\ -0,33 + j3,3 & -0,33 + j3,3 & j0,98 & 0,66 - j3,5 \end{bmatrix}$$

Ejercicio 9.2. Determinar la potencia de pérdidas del sistema en las condiciones del ejercicio 9.1 si la solución al flujo de potencias proporciona los siguientes valores:

$$V_1 = 1 \angle 0^\circ \quad V_2 = 1,03 \angle -0,3^\circ \quad V_3 = 1,01 \angle -0,3^\circ \quad V_4 = 0,96 \angle 0^\circ$$

Solución: Las pérdidas en el sistema se obtienen de la expresión

$$P_{pérdidas} = \sum P_G - \sum P_D = P_{G1} + 1 + 2 - 1 - 1 - 1 = P_{G1}$$

La potencia del generador del nudo 1 se obtiene a partir de la potencia neta P_1 en el nudo 1, ya que $P_{D1} = 0$:

$$P_1 = P_{G1} - P_{D1} \Rightarrow P_{p\acute{e}rdidas} = P_1 = \Re\{U_1 \cdot i_1^*\}$$

$$\text{donde } i_1 = Y_{11} \cdot U_1 + Y_{12} \cdot U_2 + Y_{13} \cdot U_3 + Y_{14} \cdot U_4 = 0,2 \angle 85,6^\circ = 0,0154 + j0,2$$

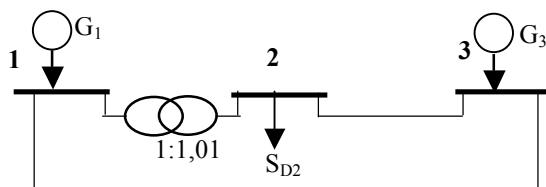
$$S_1 = 1 \angle 0^\circ \cdot 0,2 \angle -85,6^\circ = 0,0154 - j0,2$$

$$P_{p\acute{e}rdidas} = P_1 = 0,0154 \text{ p.u.} = 1,53 \text{ MW}$$

Ejercicio 9.3. En el sistema de la figura se obtienen los siguientes valores de tensión en los nudos después de resolver el flujo de potencias:

$$U_1 = 1 \angle 0^\circ \quad U_2 = 0,97 \angle -3^\circ \quad U_3 = 1,1 \angle -5,7^\circ$$

La línea de interconexión entre el nudo generador 3 y el de carga 2 tiene una impedancia en serie, en valores por unidad, de $Z_{2-3} = 0,01 + j0,1$ y la línea que conecta los nudos generadores tienen una impedancia en serie de $Z_{1-3} = 0,02 + j0,2$. Las admitancias en paralelo son despreciables en todas las líneas. El transformador de regulación de módulo de tensión con tomas en el primario (lado de 1) tiene una relación de tensiones 1:1,01 y una $X_{cc} = 0,1 \text{ p.u.}$ Determinar la potencia de la carga en el nudo 2 (S_{D2}) en valores por unidad.



Solución: a) $1,07 + j20,3$ **b) $0,2 + j2$** c) $10,3 + j2,1$ d) $1,5 + j5$

Desarrollo:

No necesitamos para la resolución del problema propuesto más que los términos de la fila 2 de la matriz de admitancias, con lo que teniendo en cuenta lo indicado en el Apartado 9.2.5 del texto base para un transformador de regulación con tomas en el primario $t:1$, que en el caso del ejemplo tiene un valor $t = 1/1,01 = 0,99$, se obtiene:

$$y_{ccT} = \frac{1}{j0,1} = -j10$$

$$y_{2-3} = \frac{1}{0,01 + j0,1} = 10 \angle -84,3^\circ = 1 - j10$$

$$y_{3-1} = \frac{1}{0,02 + j0,2} = 5 \angle -84,3^\circ = 0,5 - j5$$

$$Y_{12} = Y_{21} = -\frac{y_{ccT}}{t} = -\frac{-j10}{0,99} = j10,1$$

$$Y_{22} = y_{ccT} + y_{2-3} = 1 - j20 = 20 \angle -87^\circ$$

$$Y_{23} = -1 + j10 = -10 \angle -84,3^\circ$$

$$i_2 = Y_{12}U_1 + Y_{22}U_2 + Y_{32}U_3 = j1,6$$

$$\text{Si } S_{G2} = 0 \Rightarrow -S_{D2} = S_2 = U_2 \cdot i_2^* = -0,08 - j1,5$$

El signo $-$ de la potencia S_2 se debe a que, al ser una carga, su potencia es saliente del nudo.

Pag. 261- 9.3. Transformadores de distribución. Para entender bien el modo de conexión de los transformadores de distribución hay que considerar que, en general, las líneas de transporte que van de una subestación a otra se conectan en estrella en los dos extremos y en las que conectan la subestación con los centros de transformación, se conectan en estrella en el extremo de la subestación y en triángulo en la entrada del CT, tal como se indica en el quinto párrafo de la página 261 del texto base.

La razón del uso de la estrella no es sólo un problema de diseño del transformador, es un problema del diseño de la línea en su conjunto. La distribución en triángulo implica que al no tener el neutro referido a un potencial controlado, la línea funciona como un sistema IT en baja tensión, esto es, el fallo de un aislamiento sería muy difícil de detectarlo y controlarlo y los aislamientos entre fase y tierra de toda la línea estarían a raíz de tres veces más tensión hasta detectar el defecto (véase 12.3.2 del texto base).

No obstante, si se refiere el neutro de media tensión a tierra, no tiene sentido hacerlo en los extremos (primario del transformador de distribución del CT), sino en el origen (secundario del transformador de media tensión en la subestación). Si en cada CT conectamos el neutro del primario a tierra, tendríamos el neutro de la red de media tensión referido a tierras diferentes, con la posibilidad de que aparecieran potenciales diferentes en distintos puntos, que es el objetivo opuesto al que se pretende refiriendo el neutro a un potencial común.

Por otro lado, si se quieren compensar desequilibrios y armónicos en las redes, es mejor la conexión en triángulo. Como esos efectos los producen básicamente las cargas es por lo que dicha conexión se usa en la parte de alta tensión de los transformadores de distribución de BT (Dyn11), pero en el otro extremo de la línea de AT se conectan en estrella.

Por último, en baja tensión se distribuye la línea normalmente con neutro (salvo en redes IT) y para permitir la conexión de las cargas entre fase y neutro se conecta el secundario de los transformadores de distribución de BT normalmente en estrella.

Por tanto, la referencia a tierra del neutro se hace siempre en el secundario de los transformadores (en el CT o en la subestación, según sea la red de baja o de media, respectivamente).

Ejercicio 9.4. En un transformador trifásico, con tomas en el primario, de características $5\pm 5 \times 1\%/0,4 \text{ kV}$, 100 kVA , el ensayo de cortocircuito arroja como resultado $U_{CC} = 250 \text{ V}$ y $P_{CC} = 800 \text{ W}$. Despreciando la rama en paralelo del equivalente del transformador y la impedancia de la red de media tensión que alimenta el transformador, determine la toma del transformador a utilizar para mantener la tensión del secundario en el valor mínimo por encima de su valor de tensión nominal cuando alimenta una carga trifásica resistiva de 90 kW .

Nota: Considere que los valores positivos de las tomas corresponden a aumento de la relación de transformación y negativos suponen lo contrario.

Solución: a) +1

b) -1

c) +2

d) -2

Desarrollo:

$$I_{nom1} = \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 5 \cdot 10^3} = 11,55 \text{ A}; \quad Z_{CC} = \frac{U_{CC}}{\sqrt{3} \cdot I_{nom1}} = \frac{250}{\sqrt{3} \cdot 11,55} = 12,5 \Omega; \quad R_{CC} = \frac{P_{CC}}{3 \cdot I_{nom1}^2} = \frac{800}{3 \cdot 11,55^2} = 2 \Omega$$

Con lo que la caída de tensión en el secundario, referida al primario, será $X_{CC} = \sqrt{12,5^2 - 2^2} = 12,3 \Omega$ y la corriente de la carga en el primario es $I_C = \frac{90 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 5 \cdot 10^3} = 10,4 \angle 0^\circ \text{ A}$

$$U'_{2,0} = U_{1,0} - R_{CC} \cdot I_C \cdot \cos\varphi - X_{CC} \cdot I_C \cdot \text{sen}\varphi = \frac{5}{\sqrt{3}} \cdot 10^3 - 2 \cdot 10,4 \cdot 1 - 0 = 2886,8 - 20,8 \text{ V} = 2866 \text{ V} \Rightarrow U'_2 = 4964 \text{ V}$$

Como cada toma corresponde a 50 V en el primario, se necesita 1 toma.

La relación de transformación debe disminuir ya que U_1 es constante y $U_2 = \frac{U_1}{\frac{N_1}{N_2}}$.

Para que U_2 aumente la relación de transformación debe disminuir, por lo que la solución será -I.

CAPÍTULO 10. Tierras.

Pag. 285- Condiciones de protección y separación. En la expresión (10.26) k^n/t debe ser K/t^n e igualmente ocurre en la primera fórmula de la página 289, aunque el cálculo final del ejemplo 10.2 corresponde a la expresión correcta.

Pag. 286, 287 y 288- Ejemplo 10.2. En el enunciado del apartado 2 añadir que para este caso el neutro del transformador de media tensión de la subestación está aislado de tierra y la capacidad de la línea es tal que su impedancia equivalente tiene un valor de módulo $|Z_C| = 350 \Omega$.

En el cálculo de I_{dAT} del apartado 2, teniendo en cuenta el esquema por el que se cerrará la corriente de defecto (parecido al de la figura 12.6 del texto) y para simplificar los cálculos y dado que la impedancia capacitiva es muy superior al valor de resistencia que se prevé calcular, se tiene que $|\bar{Z}_C + R_t| \cong (|\bar{Z}_C| + R_t)$ y entonces

$$I_{dAT} = \frac{U_{AT}}{\sqrt{3}(|\bar{Z}_C| + R_t)} \quad \text{con lo que}$$

$$R_t = 25 \Omega \quad I_{dAT} = 30,8 \text{ A} \quad \text{y} \quad k_r \leq 0,071$$

En estas nuevas condiciones, los valores tomados de la Tabla 10.4 son los indicados en el texto, pero los segundos términos de las condiciones (10.22), (10.23) y (10.24), calculadas en el ejemplo pasan de 1541,5 a 154,15 y de 2716,5 a 271,65, pero las condiciones se cumplen o no igual que antes, como puede comprobarse en el texto.

Por otro lado en la página 287, la expresión de la condición de tensión de paso en acceso (10.24) refleja un valor de $k_{p\text{acceso}}$ de 0,0287 cuando debe ser 0,0868 aunque el resultado final reflejado (3077,5 V) es correcto.

Ejercicio 10.1. En el mismo sistema reflejado en los ejemplos 7.1 y 8.1, el centro de transformación tiene una puesta a tierra consistente en un anillo de conductor de cobre de 50 mm², enterrado en un terreno de resistividad $\rho=1000 \Omega.m$, a 0,5 m de profundidad, en forma de rectángulo de 4x3 m, con 4 picas de 14 mm de diámetro de 2 metros de longitud. Para esta configuración de puesta a tierra, se desea verificar si se cumplen las condiciones establecidas reglamentariamente para la tensión de paso y contacto, sabiendo que el tiempo de actuación de las protecciones del circuito, en cualquiera de las condiciones de defecto posibles, es inferior a 0,9 s, tal y como se refleja en las curvas características de éstas.

Solución: Para determinar las condiciones reglamentarias de la tensión de paso y contacto en el centro de transformación debe considerarse el fallo en el lado de media tensión en éste, tal como fue descrito en el Apartado 10.4 del texto base.

Las condiciones a verificar vienen dadas por las expresiones (10.22) y (10.23)

$$10 \frac{K}{t^n} \left(1 + \frac{6\rho}{1000}\right) \geq I_{dMT} k_p \rho$$

$$\frac{K}{t^n} \left(1 + \frac{1,5\rho}{1000}\right) \geq I_{dMT} k_c \rho$$

Donde, $K=72$ y $n=1$, según los valores indicados en la Tabla 10.5 que da los valores de los factores de cálculo de las tensiones límite aplicables de paso y contacto y

$k_p=0,0231$ y $k_c=0,0506$ según la tabla 10.4 que proporciona los valores de los factores de las tensiones de paso y contacto aplicadas conforme a la configuración establecida para el caso estudiado. Por otro lado, en la misma tabla citada se puede obtener el valor $k_r=0,1$ que corresponde al factor que permite obtener la resistencia de puesta a tierra de la configuración propuesta mediante $R_t=k_r \cdot \rho=0,1 \cdot 1000=100 \Omega$.

Alternativamente, si no se desean utilizar los valores de la Tabla 10.4, o no se contempla en ella la configuración real de la puesta a tierra y, por tanto, no se pueden conocer los valores de k_p y k_c , se puede también aplicar el método de cálculo establecido en el Apartado 10.2, empezando por las expresiones de la Tabla 10.1, donde $R_t=2 \cdot \rho/L$.

Al ser en este caso $L=2(3+4)+4 \cdot 2=22$ m, se obtiene $R_t=1000/11=91 \Omega$, valor muy próximo al obtenido con el método anterior. Seguidamente se aplican los valores aproximados de tensión de paso y contacto de las expresiones (10.22) y (10.23).

$$10 \frac{K}{t^n} \left(1 + \frac{6\rho}{1000}\right) \geq I_{dMT} \frac{R_t}{4} = 22,75 \cdot I_{dMT}$$

$$\frac{K}{t^n} \left(1 + \frac{1,5\rho}{1000}\right) \geq I_{dMT} \frac{R_t}{2} = 45,5 \cdot I_{dMT}$$

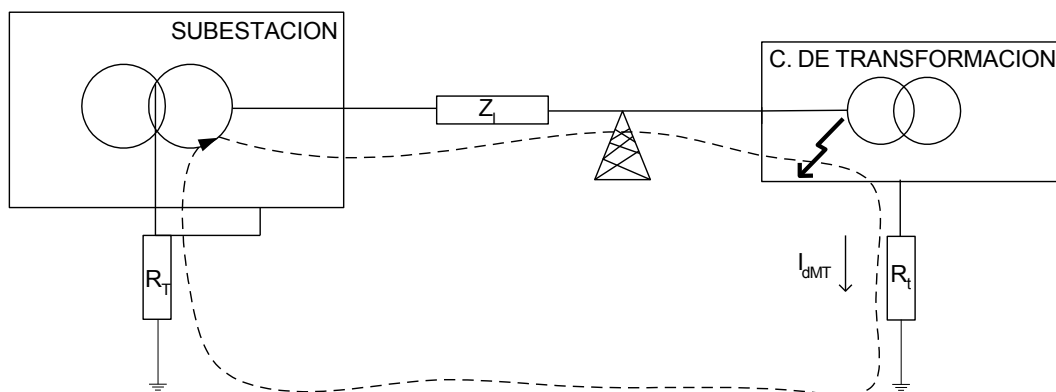
Comparándolas con las expresiones anteriores y los valores de k_p y k_c se tiene

$$10 \frac{K}{t^n} \left(1 + \frac{6\rho}{1000}\right) \geq I_{dMT} k_p \rho = 23,1 \cdot I_{dMT}$$

$$\frac{K}{t^n} \left(1 + \frac{1,5\rho}{1000}\right) \geq I_{dMT} k_c \rho = 50,6 \cdot I_{dMT}$$

Lo que demuestra la equivalencia de los métodos de cálculo, si se recuerda que se trata de un cálculo de estimación y no de un cálculo exacto.

Una vez conocido el valor se debe proceder a la estimación del valor máximo de I_{dMT} , para lo cual, la figura siguiente refleja el circuito equivalente del sistema por el que circula la corriente en las condiciones más desfavorables de defecto para la tensión de paso y contacto.



De la figura y de las expresiones del apartado 11.3 del texto base, podemos calcular el valor requerido a partir de la expresión

$$I_{dMT} = \frac{cU}{\sqrt{3}(Z_{ccMT} + R_T + R_t)}$$

Expresión análoga a la correspondiente al fallo entre fase y tierra en una red TT de baja tensión, dado que el circuito de media tensión ahora analizado equivale a dicha situación en baja tensión. Debe también en este punto consultarse el punto 11.3 de la presente Adenda, donde se hacen algunas consideraciones interesantes para la justificación de esta expresión.

El valor de Z_{ccMT} puede tomarse del obtenido en el ejercicio 8.1 ($2,415 \Omega$, en valores reales), ya que el equivalente de la red para este caso es el mismo que para el cortocircuito simétrico analizado en dicho caso, incluyendo la impedancia del conductor Z_l , que es la única representada en la figura anterior, pero no la única que interviene en el cálculo. Con esto se obtiene $I_{dMT} = 96 \text{ A}$

Con lo que las condiciones aplicables a las tensiones de paso y contacto dan como resultado

$$10 \frac{K}{t^n} \left(1 + \frac{6\rho}{1000}\right) \geq 23,1 \cdot I_{dMT} \Rightarrow 10 \frac{72}{0,9^1} \left(1 + \frac{6 \cdot 1000}{1000}\right) \geq 23,1 \cdot 96 \Rightarrow 5600 V \geq 2218 V \quad \text{Se cumple}$$

$$\frac{K}{t^n} \left(1 + \frac{1,5\rho}{1000}\right) \geq 50,6 \cdot I_{dMT} \Rightarrow \frac{72}{0,9^1} \left(1 + \frac{1,5 \cdot 1000}{1000}\right) \geq 50,6 \cdot 96 \Rightarrow 200 V \geq 4857 V \quad \text{No se cumple}$$

Con lo que habrá que aislar las partes metálicas accesibles o disponer planos de tierra conductores, conectados a la tierra del centro de transformación (por ejemplo planchas metálicas), en el suelo del terreno colindante a las masas conductoras accesibles, con la finalidad de que no exista diferencia de potencial entre la mano en contacto con ella y los pies sobre el plano así dispuesto. En este último caso debe considerarse que existirá una tensión de paso de acceso en el límite en donde se disponga la plancha metálica, así la condición a cumplir sería

$$10 \frac{K}{t^n} \left(1 + \frac{3\rho + 3\rho^*}{1000}\right) \geq I_{dMT} k_{paccso} \rho = 23,1 \cdot I_{dMT} \Rightarrow 10 \frac{72}{0,9^1} \left(1 + \frac{3 \cdot 1000 + 3 \cdot 0}{1000}\right) \geq 50,6 \cdot 96 \Rightarrow 3200 V \geq 4857 V$$

Condición que tampoco se cumple. El valor de ρ^* se ha tomado como 0 al tratarse de una placa conductora que tiene una resistividad despreciable frente a la del terreno, con lo que la solución sería aislar el suelo del acceso al CT, de manera que la resistividad ρ^* aumente suficientemente para cumplir la condición y para que el contacto con el suelo conductor permita soportar la tensión transferida por defecto.

Otra solución es cambiar el suelo conductor por uno aislante de resistividad ρ^* suficiente para cumplir con la condición de tensión de contacto y de paso a la vez.

Ejercicio 10.2. En el centro de transformación del ejercicio 10.1 se desea saber si puede unirse la tierra de la instalación baja tensión conectada al transformador de distribución de 20/0,4 kV, a la misma tierra del centro anteriormente calculada, teniendo en cuenta que la distribución en baja tensión se hace mediante una red TT y que el neutro del transformador está referido a una tierra independiente. En caso de no poder unirse, se desea saber la distancia mínima que debe haber entre la tierra de la instalación y la del centro de transformación.

Solución: Para un a red TT, tal y como se explica en el Apartado 10.5 del texto base la tensión transferida máxima a los aislamientos de baja tensión en caso de fallo a tierra en alta cuando el neutro de baja tensión es independiente de la tierra del centro será $R_t \cdot I_{dMT} + U_0$, siendo U_0 la tensión fase-neutro en baja tensión y $R_t \cdot I_{dMT}$ la tensión trasferida a la masa de los aparatos de la instalación de baja tensión respecto a la tierra de referencia (potencial 0 al que está referido el neutro). Como se indica también en dicho apartado, la tensión transferida entre fase y tierra no debe superar 1000 V que es la admisible por los aislamientos en baja tensión, con lo que la condición que debe cumplirse es

$$R_t \cdot I_{dMT} + U_0 = 100 \cdot 96 + \frac{400}{\sqrt{3}} \leq 1000 V \Rightarrow 9830 V \leq 1000 V$$

Condición que no se cumple y consecuentemente no pueden unirse las tierras. Para estimar la distancia mínima entre las tierras de AT y BT que garantiza una separación efectiva se aplica la expresión (10.27) del texto base, que para redes TT es.

$$D = \frac{\rho \cdot I_{dMT}}{2\pi \cdot 1200} = \frac{1000 \cdot 96}{2\pi \cdot 1200} \cong 13 \text{ m}$$

En este punto hay que indicar que la fórmula de la expresión 10.27 del libro refiere al requisito del RBT como condición de separación entre tierras de AT y BT, pero de lo explicado en el libro referente a la separación de tierras entre AT y neutro (Figura 10.11) se puede deducir que la expresión que es válida para la separación entre tierras de AT y BT, lo es para AT y neutro, dado que la condición que debe cumplirse en ambos casos, para una red TT, es que la tensión transferida a los aislamientos sea inferior a la que estos pueden soportar (1000 V según el texto o 1200 V según el RBT).

La expresión 10.27 se deduce claramente de la expresión 10.5 del libro. Si U es 50 V (o 24V o 12 V, según el caso) las tierras son independientes por definición, ya que la tensión transferida será inferior a la máxima de contacto admisible o a la máxima del aislamiento entre fase y tierra. Si la tensión U es superior a 50 V, al menos deberá ser inferior a los valores que en cada caso suponen una condición de riesgo.

En redes TT, si la tierra de AT y BT están juntas, las masas de los equipos que se tocan con la mano están al mismo potencial que los pies, con lo que el riesgo de la tensión transferida se aplica sólo al aislamiento, y lo mismo ocurre si la tensión se trasfiere al neutro (Fig 10.11) cuando las tierras de AT y N no son independientes. Por tanto, en estos dos casos, en la fórmula de la expresión 10.5, U=1000 V o 1200 V.

Si la red es TN, las masas que se tocan están conectadas al neutro en el transformador, con lo que la masa que se toca y a la que se trasfiere tensión es diferente de la que tocan los pies, por lo que la tensión trasferida (en realidad sólo una parte de ella, ya que la que se estima que se trasfiere a la tierra de los pies es la mitad de la máxima) debe ser inferior a la tensión de contacto admisible. Los siguientes ejemplos adicionales ilustran la explicación anterior

Ejercicio 10.3. Una red de media tensión de 36 kV y de impedancia equivalente despreciable a los efectos del cálculo, que parte del transformador de una subestación cuyo neutro está referido a tierra mediante una resistencia RNMT = 14 Ω, alimenta un centro de transformación para distribución en baja tensión que tiene un transformador de 36/0,4 kV, 0,5 MVA y ucc = 6%. El centro de transformación se sitúa en un terreno de resistividad ρ = 200 Ω.m y su puesta a tierra se hace mediante un anillo de conductor de cobre desnudo de 50 mm², enterrado horizontalmente a 0,5 m de profundidad, en forma de rectángulo de 4m x 3 m y sin picas (véase tabla adjunta).

Determinar el nivel de aislamiento necesario en el cuadro de baja tensión de protección a la salida del transformador del centro de transformación, suponiendo que su masa está referida a la tierra del centro y que la tierra del neutro del transformador del centro es independiente.

Solución: a) 10 kV

b) 15 kV

c) 20 kV

d) 38 kV

Desarrollo:

Como ya fue explicado en el capítulo 10.5 y para el caso propuesto, la tensión trasferida a las masas de los aparatos de baja tensión del centro de transformación se obtiene de $U_{BTCT} =$

$I_{dAT}R_t$ y en la tabla 10.1 se indica la expresión que permite calcular la resistencia de puesta a tierra de un conductor de cobre enterrado horizontalmente

$$R_t = 2 \frac{\rho}{L} = 2 \frac{200}{2 \cdot 4 + 2 \cdot 3} = 28,6 \Omega$$

Teniendo en cuenta que en el centro de transformación la corriente máxima de defecto en el lado de media tensión depende de la resistencia de tierra del propio centro y de la del neutro de la subestación de la que parte la línea de media tensión y considerando despreciables las impedancias de los conductores y de la red, tendremos:

$$I_{dAT} = \frac{U_{AT}}{\sqrt{3}(R_{NAT} + R_t)} = \frac{36 \cdot 10^3}{\sqrt{3}(14 + 28,6)} = 488,23 \text{ A} \quad \text{con lo que}$$

$$U_{BTCT} = 488,23 \cdot 28,6 = 13963 \text{ V}$$

Podría incluso considerarse una situación más desfavorable, como la contemplada en la figura 10.11 del texto base, si consideramos que las fases de baja tensión tienen una tensión de 230 V respecto a la tierra del neutro (potencial 0 de referencia de tierra) y que la tensión calculada es la tensión entre las masas del cuadro y el potencial de referencia, con lo que la sobretensión podría llegar a ser $13963 + 230 = 14193 \text{ V}$.

En la práctica, para baja tensión se toma sólo el valor inicialmente calculado si la tensión fase-tierra es muy inferior a la trasferida, dado que el nivel de aislamiento requerido no va a ser afectado significativamente y teniendo en cuenta que la suma de tensiones es vectorial y sólo se sumarían los módulos cuando hay un desfase entre ellas que coincida con dicha situación.

No obstante, estos desfases existen en la realidad, dado que las impedancias de la red y de los conductores son inductivas, con lo que si el valor de la tensión transferida es de magnitud equivalente a la tensión fase-tierra de la línea, al menos un porcentaje de dicha tensión debe sumarse a la tensión trasferida a la masa. Es lo que se indica en el capítulo 7.3 del texto base respecto a las consideraciones de las normas de coordinación de aislamiento.

Ejercicio 10.4. En el centro de transformación del ejercicio anterior se desea ahora determinar la distancia mínima a la que se debe referir a tierra el neutro del transformador de distribución de baja tensión respecto de la tierra del centro, suponiendo que la red de baja tiene una configuración TT, para estimar que la tensión máxima que soportarán los aislamientos de los aparatos de baja tensión conectados a ella sea de 1200 V.

Solución: a) 5 m

b) 15 m

c) 20 m

d) 50 m

Desarrollo:

La situación ahora planteada es diferente a la anterior, pues lo que se desea ver es cuál debe ser la separación entre la tierra del neutro del centro y la del propio centro para evitar que se transfiera tensión inadecuada a las masas de los aparatos de baja tensión conectados a dicha línea y cuya masa está referida a tierra diferente de la del centro y del neutro (red TT).

Si la tierra de las masas de los aparatos de baja tensión se considera de referencia (potencial 0) y la tensión en el neutro respecto al potencial 0 supera la tensión admisible de rigidez dieléctrica de éstos (1000 o 1200 V), se producirá su destrucción.

En el capítulo 10.2 del texto base se establece la expresión que determina la tensión trasferida a una distancia “x” de un punto donde se inyecta una corriente de defecto I_d (la tierra del

centro en este caso) $U(x) = \frac{\rho I_d}{2\pi x}$

Si llamamos D a la distancia requerida (x) y considerando que la tensión máxima trasferida puede ser 1200 V (U(D)) y que los valores de ρ e I_d son los del anterior ejercicio, tendremos

$$D \geq \frac{\rho I_{dAT}}{2\pi 1200} = \frac{200 \cdot 488,23}{2\pi 1200} = 13 \text{ m}$$

Obsérvese que la expresión ahora calculada coincide con la (10.27) del texto base (capítulo 10.5) para el caso de una red TT. Si la red hubiese sido TN, el problema no sería la destrucción de los aislamientos ya que la masa de los aparatos y el neutro estarían unidos y por tanto al mismo potencial, pero el problema serían ahora las personas que pudiesen tocar las masas accesibles de los aparatos y que tuviesen otras partes de su cuerpo referidas a una tierra diferente (suelo o elementos metálicos del edificio, por ejemplo) y que estén a potencial 0. En ese caso U(x) ahora sería la tensión de contacto admisible, pero considerando que el fenómeno es transitorio y debido a un defecto en alta tensión, con lo que sería aplicable la expresión (10.17) del texto base, como se indica también en la expresión (10.27) para el caso de redes TN.

CAPÍTULO 11. Protección contra sobretensiones y sobreintensidades.

11.3 Cálculo de las corrientes de cortocircuito en las instalaciones. Es necesario precisar en este apartado que el método de cálculo de las corrientes de cortocircuito establecidas en la norma UNE-EN 60909-0 es bastante más complejo que el de las fórmulas reflejadas en este apartado del texto base. Varias son las simplificaciones que para hacer más fácil el cálculo se han realizado para obtener las expresiones (11.10), (11.11), (11.12) y (11.13). En primer lugar las expresiones corresponden a la relación de tensiones e intensidades en sistemas trifásicos equilibrados, lo que, en el caso de defectos, sólo puede considerarse próximo a la realidad en cortocircuitos trifásicos simétricos, que es el caso de la expresión (11.9), pero no lo es en casos de fallo de fase a tierra o entre dos fases.

El cálculo para los casos no simétricos se realiza aplicando un método que descompone los vectores de corriente en componentes que son simétricas y resuelve el problema en ellas por separado, obteniendo el valor final de la corriente por superposición de las corrientes simétricas. La descripción detallada de este método queda fuera de los objetivos del texto base y se puede encontrar en otros textos de análisis de sistemas eléctricos, alguno de los cuales están referidos en la bibliografía del Capítulo 6 ([1] y [3]).

No obstante la aproximación a la realidad calculando las corrientes del defecto como si de un sistema equilibrado se tratase es bastante aceptable en la práctica sobre todo en sistemas y líneas de potencia no muy elevada y en general no se aplica el método de cálculo por componentes simétricas en instalaciones de baja tensión.

Pero lo anteriormente citado no es la única simplificación realizada en las expresiones (11.11), (11.12) y (11.13). Si analizamos en detalle los circuitos y consideramos que las impedancias son complejas, los valores del módulo de la corriente deberían estar divididos por el módulo de la suma de las impedancias y no por la suma de los módulos, así en (11.11) $(Z_{ccBT}+Z_N)$ debería ser $|\bar{Z}_{ccBT} + \bar{Z}_N|$, en (11.12) $(Z_{ccBT}+Z_{CP})$ debería ser $|\bar{Z}_{ccBT} + \bar{Z}_{CP}|$ y en (11.13) $(Z_{ccBT}+R_A+R_t)$ debería ser $|\bar{Z}_{ccBT} + R_A + R_t|$.

Como se puede observar en algunos ejemplos de cálculo de valores de resistencia de puesta a tierra en los ejemplos de los Capítulos 10 y 11, el uso de las expresiones correctas complicaría mucho el cálculo de los valores de resistencia si hubiese que despejar estos de una expresión en raíz cuadrada de una suma cuadrática. Como, por otro lado, el valor de Z_{ccBT} suele ser pequeño en circuitos de media y baja tensión y muy inferior a los valores de R_A y de R_t , la aproximación realizada es perfectamente aceptable para el cálculo y conveniente para la simplificación de los problemas. Pero téngase en cuenta que es válida únicamente para estos casos de derivación a tierra, en otros tipos de cortocircuito esta aproximación no es aplicable.

11.4.2. Pag. 322- Fusibles. En las relaciones entre I_n e I_f , en la primera condición, donde dice $I_n=16$ A, debe decir $I_n \geq 16$ A.

11.8. Pag. 354, 355, 357 y 359- Ejemplo de aplicación de protecciones. Algunos valores de I^2t de fusibles tomados de las tablas 11.6 y 11.7 no son correctos y aunque no afecta al cumplimiento de las condiciones verificadas, los valores indicados pueden llevar a confusión al no corresponder a ningún valor obtenido anteriormente o tomado de dichas tablas. Los valores a corregir son:

- **Pag 354.** En la última expresión, el valor $6,25 \cdot 10^6$, debe ser $6 \cdot 10^3$. La referencia a $(I^2t)_{F1}$ de la primera expresión debe entenderse $(I^2t)_{F4}$.
- **Pag 355.** En las dos primeras expresiones, el valor $6,25 \cdot 10^6$, debe ser $6 \cdot 10^3$, en la penúltima expresión, el valor 7,5 debe ser 6 y consecuentemente el valor 18,75 pasa a ser 15.
- **Pag 357.** En la última expresión, el valor $1,37 \cdot 10^6$, debe ser $1,5 \cdot 10^6$.
- **Pag 359.** En la primera expresión, el valor $1,37 \cdot 10^6$, debe ser $1,5 \cdot 10^6$ y t'_m pasa de 0,0137 s a 0,015 s. En el penúltimo párrafo R_t debe sustituirse por X_r . La referencia a $(I^2t)_{F2}$ de la primera expresión debe entenderse $(I^2t)_{F6}$.

Ejercicio 11.1. Una red de media tensión de 15 kV y 100 MVA de potencia de cortocircuito, alimenta un centro de transformación que tiene una celda de protección con un fusible de media tensión de 160 A, de característica $I^2t = 0,48 \cdot 10^6$ A²s. De la compañía distribuidora de la red de media tensión se sabe que sus protecciones actúan en 0,9 s en condiciones de cortocircuito.

El conductor usado en la conexión del centro es de aluminio, con aislamiento de etileno-propileno (EPR). Se desea determinar la sección mínima del conductor que cumple con la característica I^2t de la instalación, tanto antes como después del fusible.

Solución: Para el cálculo de la corriente de cortocircuito que permita la determinación de la característica I^2t de la instalación se debe considerar el valor máximo en el punto considerado de la red, que en este caso se puede obtener directamente a partir de la potencia de cortocircuito de la red mediante

$$S_{CC} = \sqrt{3}U_L I_{CC}$$

$$I_{CC} = \frac{100 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 15 \cdot 10^3} = 3850 \text{ A}$$

Con lo que antes del fusible el valor de $I^2t = (3850)^2 \cdot 0,9 = 13,34 \cdot 10^6 \text{ A}^2\text{s}$

Por otro lado, para el cable de aluminio aislado con EPR la característica $I^2t \leq k^2 S^2$, donde de la Tabla 11.3 del texto base se obtiene $k=94$, con lo que $S \geq 39 \text{ mm}^2$ y se toma 50 mm^2 que es el valor superior normalizado en conductor de aluminio de media tensión.

Después del fusible $I^2t = 0,48 \cdot 10^6 \text{ A}^2\text{s} \leq k^2 S^2$, con lo que $S \geq 7,4 \text{ mm}^2$ y se toma 16 mm^2 que es el valor superior normalizado.

Ejercicio 11.2. A una red de media tensión de 20 kV y $S_{CC} = 200 \text{ MVA}$ se conecta un transformador de distribución de 20/0,4 kV, 315 kVA y $u_{cc}=4,5\%$. La protección en el lado de media tensión del transformador se realiza mediante un fusible de media tensión de 16 A, de curva característica igual a la reflejada en la Figura 11.31 del texto base. A la salida del transformador de distribución, la protección se realiza igualmente mediante un fusible de 630 A de baja tensión, de curva característica correspondiente de la Figura 11.33. del texto base.

Se desea determinar los tiempos de actuación de los fusibles a los dos lados del transformador cuando se produce un cortocircuito trifásico a la salida del fusible de protección de baja tensión, constatando la selectividad de dichos fusibles.

Solución: Para el cálculo de la corriente de cortocircuito es necesario primero determinar las impedancias equivalentes de la red y el transformador en condiciones de cortocircuito.

Para el caso propuesto, dada la simplicidad del sistema se hará el cálculo en valores reales a partir de las expresiones (6.29), (6.32), (6.33), (6.34), (6.35), (6.36), (6.39), (6.40), (6.41), (6.42) y (6.46) al igual que se hizo en los ejercicios 7.1 y 8.1.

$$Z_r = \frac{(cE)^2}{S_{CC}} = \frac{(1,1 \cdot 20)^2 \cdot 10^6}{200 \cdot 10^6} = 2,42 \text{ } \Omega$$

$$R_r = 0,0995 Z_r = 0,24 \text{ } \Omega$$

$$X_r = 0,995 Z_r = 2,4 \text{ } \Omega$$

$$Z_t = \frac{U_{CC}}{100} \frac{U_{t \text{ nom}}^2}{S_{t \text{ nom}}} = \frac{4,5}{100} \frac{(20 \cdot 10^3)^2}{315 \cdot 10^3} = 57 \text{ } \Omega$$

$$R_t = 50,8 \cos 72^\circ = 17,6 \text{ } \Omega$$

$$X_t = 50,8 \text{ sen } 72^\circ = 54,2 \text{ } \Omega$$

Refiriendo los valores al lado de baja tensión y teniendo en cuenta que $r = 20 \cdot 10^3 / 400 = 50$

$$R_{r_{BT}} = \frac{0,24}{2500} = 0,1 \cdot 10^{-3} \Omega \quad y \quad X_{r_{BT}} = \frac{2,4}{2500} = 0,96 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R_{t_{BT}} = \frac{17,6}{2500} = 7 \cdot 10^{-3} \Omega \quad y \quad X_{t_{BT}} = \frac{54,2}{2500} = 21,7 \cdot 10^{-3} \Omega$$

Con lo que

$$Z_{CC_{BT}} = \sqrt{(0,1+7)^2 + (0,96+21,7)^2} \cdot 10^{-3} = 23,75 \Omega$$

$$e \quad I_{CC_{BT}} = \frac{cU1}{\sqrt{3}Z_{CC_{BT}}} = \frac{1,1 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 23,75 \cdot 10^{-3}} = 10700 \text{ A}$$

Con lo que la corriente en media tensión será

$$I_{CC_{MT}} = \frac{I_{CC_{BT}}}{r} = \frac{10700}{50} = 214 \text{ A}$$

En las curvas de la Figura 11.31 del texto base, para un fusible de media tensión de 16 A el tiempo de actuación con 214 A es $t_{MT} = 6 \cdot 10^{-3}$ s y en las curvas de la Figura 11.33 del texto base, para un fusible de baja tensión de 630 A, el tiempo de actuación con corrientes de 10700 A es $t_{BT} = 1 \cdot 10^{-2}$ s, con lo que $t_{MT} \leq t_{BT}$ y, por tanto, no hay coordinación. Si el fusible elegido para media tensión hubiese sido 20 A, se tendría $t_{MT} = 3 \cdot 10^{-2}$, que es superior ahora al de baja y por tanto habría coordinación, por lo menos en teoría, ya que en la práctica la diferencia en el tiempo de actuación debe ser sensiblemente superior para garantizar la actuación del fusible de baja tensión sin que actúe el de media tensión.

Nótese también que en el cálculo en valores reales y conforme a lo indicado en la tabla 6.1 habría sido más correcto utilizar 1,05 en el cálculo de la I_{cc} , aunque no sería así en cambio para Zr.

No obstante hay que tener cuidado en entender que si el cálculo hubiese sido en valores p.u se habría aplicado el factor 1,1, dado que la I_{cc} se calcularía desde el origen de la instalación del ejercicio y el resultado final sería como el del ejemplo.

Hay que considerar que los factores c son factores prácticos de sobredimensionamiento de la instalación, con lo que puede que su aplicación no dé resultados equivalentes cuando se usan diferentes métodos de cálculo. En ningún caso eso supone errores importantes, sino más bien ajustes diferentes en el cálculo, que siempre quedan absorbidos por la elección de los calibres de los interruptores y la resolución de sus curvas características y que nunca son exactamente correspondientes a los valores obtenidos.

Ejercicio 11.3. Una red de media tensión de 20 kV y $S_{CC} = 300$ MVA (con $R_r/X_r = 0,1$ y factor de tensión de red $c = 1,1$) alimenta un centro de transformación con un transformador de 20/0,4 kV, 250 kVA y $u_{cc} = 4\%$ y su apartamento correspondiente. Si de los datos de la red de media tensión se sabe que sus protecciones actúan antes de 0,5 segundos en la peor condición, determinar la característica de corriente soportada de corta duración de la apartamenta del

centro de transformación, situada antes de la celda de protección de media tensión de dicho centro.

Solución: a) 8 kA b) 18,5 A c) 25 kA d) 336 kA

Desarrollo:

La condición a cumplir para determinar la corriente soportada de corta duración de la aparamenta es que $I_{ccMT}^2 \cdot t_{ccprot} \leq I_{aparamenta}^2 \cdot t_{aparamenta}$, donde $t_{aparamenta} = 1$ s tal como se indica en el texto base de la asignatura si no se indica otra cosa al respecto.

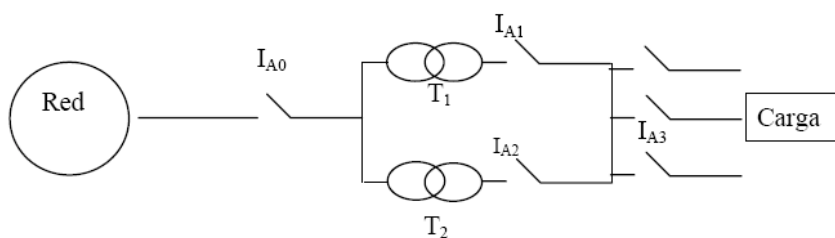
$$Z_{rMT} = \frac{(1,1 \cdot 20 \cdot 10^3)^2}{300 \cdot 10^6} = 1,613 \Omega$$

$$I_{ccMT} = \frac{1,1 \cdot 20 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 1,613} = 7873 A \cong 8 kA$$

$$(8 \cdot 10^3)^2 \cdot 0,5 \leq I_{aparamenta}^2 \cdot 1 \Rightarrow I_{aparamenta} \geq 5657 A$$

Si no consideramos el factor 1,1, dado que la única impedancia que interviene en el cortocircuito es la de la red, la solución sería 6123,5 A. En este caso no tiene sentido aplicar los valores de condición de tensión máxima y mínima de la red dado que afecta al cálculo de la I y de la Z a la vez, de manera que la impedancia depende del cuadrado de la tensión y la intensidad es directamente proporcional a ésta. Por eso el cálculo en tensión máxima da un resultado inferior a si no aplicamos el factor. Los valores de factor de tensión de la red, sea de baja o alta, sólo tienen sentido si en el cortocircuito intervienen impedancias que sean independientes de dichas tensiones (transformadores, cables, tierras, etc).

Ejercicio 11.4. La red trifásica de la figura es de 20 kV y SCC=100 MVA (con resistencia despreciable y factor c de tensión de red AT igual a 1,1 y 1,05 en BT) y alimenta un centro de transformación con dos transformadores en paralelo de 20/0,4 kV, 0,5 MVA y ucc=6% (Rt=0) Uno de los circuitos de baja tensión alimenta a su vez, una carga de potencia constante de 130 kW a 400 V con factor de potencia 0,8 inductivo.



Determinar el poder de corte de los interruptores automáticos IA0, IA1 e IA3 de la figura, suponiendo, para el cálculo, que las tensiones en cada punto son las nominales y utilizando los valores de la serie R10 de la aparamenta de media tensión (100, 200, 630, 800, 1250 y 2500 A y sus múltiplos de 10).

Solución: a) IA0=6,3 kA; IA1= 20 kA; IA3 =63 kA b) IA0= IA1= IA3 = 20 kA
 c) IA0= 6,3 A; IA1= IA3 =20 kA d) IA0=IA1= 20 kA; IA3 =63 kA

Desarrollo:

El poder de corte de los interruptores automáticos es la intensidad asignada de corta duración (valor eficaz de la intensidad de cortocircuito) en la condición más desfavorable para cada uno de ellos, esto es, en condiciones de cortocircuito triásico.

Lo que pide el enunciado es la máxima corriente de cortocircuito que interrumpirán los diferentes interruptores en la peor condición y éstas serán o bien las del cortocircuito que se produzca en un punto aguas abajo de cada interruptor o las del cortocircuito que se produzca aguas arriba (por ejemplo entre el transformador T_1 e IA_1) cuando la corriente de cortocircuito del sistema pueda circular en sentido opuesto al sentido de la corriente en condiciones normales.

En el caso del interruptor IA_1 , si el corto se produce aguas abajo de él, la corriente que viene de la red y de T_1 pasará por los contactos de IA_1 , pero la que viene de IA_2 se drenará por el cortocircuito antes de llegar a IA_1 , luego la impedancia del circuito equivalente será $Z_r + Z_{t1}$. Si el corto se produce en cambio entre T_1 e IA_1 , la corriente de la red por T_1 se drenará al cortocircuito antes de pasar por los contactos de IA_1 , pero la corriente que viene de T_2 pasará por ellos, con lo que el equivalente es $Z_r + Z_{t2}$, igual al anterior al ser T_2 igual a T_1 . Si hubiese un tercer transformador T_3 igual a los anteriores y en paralelo con ellos, la corriente por IA_1 sería entonces la correspondiente al equivalente $Z_r + Z_t/2$, que es también la del interruptor IA_3 de este ejercicio cuando el fallo se produce aguas abajo de él.

Otro aspecto importante a considerar en este ejercicio es el uso de los factores "c" de la red.

El capítulo 6.4.1 indica que el factor c es un factor que tiene en cuenta la situación más desfavorable para la corriente de cortocircuito en un sistema, considerando que se producen fluctuaciones de tensión y que pueden hacer que la corriente sea mayor si la tensión lo es. Pero esto es siempre cierto si el sistema, en condiciones de cortocircuito, se puede asemejar a un circuito de impedancia constante, pero no lo será si el sistema tiene el comportamiento de una carga de potencia constante, ya que la sobretensión afecta tanto a la impedancia, como a la corriente, pero depende cuadráticamente la primera y linealmente de la segunda, con lo que al final la corriente obtenida sería menor a mayor tensión.

Como se explicó en el ejemplo 11.3, el uso de "c" en el cálculo de la corriente de cortocircuito en los bornes de una red de potencia de cortocircuito constante, cuando no intervienen otras impedancias más que la de cortocircuito de la propia red, no tiene sentido, dado que se obtiene valores menores que los del cálculo de la corriente con $c = 1$ (o calculando la corriente directamente de I_{cc}).

Ahora bien, si el sistema es más complejo, de forma que intervienen otras impedancias que pueden considerarse constantes, como la de los cables, transformadores, o tierras, de manera que el equivalente Thevenin sea prácticamente un valor constante (normalmente las impedancias "constantes" son mucho mayores que las de la red), entonces tendrá sentido la aplicación de los factores c correspondientes en AT (1,1) o en BT (1,05).

Por tanto, para este ejercicio no tiene sentido aplicar el factor 1,1 de la impedancia de red para el cálculo de la corriente de IA_0 , pero si se puede usar en cambio para la corriente de IA_1 e IA_3 si el cálculo se hace en valores reales y usando también el factor 1,05 de tensión en baja tensión, aunque se podrá comprobar que la diferencia de valores obtenidos es muy pequeña frente al valor absoluto.

$$I_{ccI_0} = \frac{100 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3} = 2887 \text{ A} \Rightarrow IA_0 = 6,3 \text{ kA}$$

$$Z_{rAT} = \frac{(1,1 \cdot 20 \cdot 10^3)^2}{100 \cdot 10^6} = 4,8 \text{ } \Omega = X_{rAT} \Rightarrow X_{rBT} = \frac{4,8}{\left(\frac{20}{0,4}\right)^2} = 0,00192 \text{ } \Omega$$

$$X_{lAT} = \frac{6}{100} \frac{20^2 \cdot 10^6}{0,5 \cdot 10^6} = 48 \text{ } \Omega \Rightarrow X_{lBT} = \frac{48}{\left(\frac{20}{0,4}\right)^2} = 0,0192 \text{ } \Omega$$

con lo que $I_{ccI_1} = \frac{1,05 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot (0,00192 + 0,0192)} = 11481 \text{ A} \Rightarrow IA_1 = 20 \text{ kA}$ e

$$I_{ccI_3} = \frac{1,05 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot (0,00192 + \frac{0,0192}{2})} = 21049 \text{ A} \Rightarrow IA_3 = 63 \text{ kA}$$

CAPÍTULO 12. Protección contra los choques eléctricos.

Pag. 387 -12.5 Ejemplo de aplicación. En el sexto punto marcado en negrita, la distancia marcada como $d_2 \geq 0,02 \text{ mm}$ debe ser $d_2 \geq 0,05 \text{ mm}$, ya que los valores de tensión de la tabla 12.3, de donde se toma el valor de la distancia, son tensiones de pico y por tanto para la tensión entre fase y neutro de 400 V será $400 \sqrt{2} = 465 \text{ V}$ (interpolando en 12.3 se obtendrá aproximadamente 0,05 mm).

Ejercicio 12.1. Utilizando las tablas 12.1, 12.2 y 12.3 del texto base, se desea determinar la distancia en el aire mínima entre las partes activas y masa de un cuadro de protección de baja tensión de un transformador de distribución de 15/0,4 kV, 160 kVA y $u_{cc}=4\%$, conectado a una red de 15 kV y en donde la compañía eléctrica ha establecido 200 A como corriente máxima de defecto entre fase y tierra. El centro de transformación en donde se encuentra el cuadro de protección tiene una puesta a tierra de resistencia $R_{tCT} = 30 \text{ } \Omega$, independiente de la tierra del neutro del transformador y se ha determinado como de categoría III la protección contra sobretensiones transitorias en baja tensión para dicha ubicación.

Solución: a) 3,0 mm

b) 3,8 mm

c) 7,9 mm

d) 12 mm

Desarrollo:

Las distancias en el aire se determinan a partir de dos valores de sobretensión, tal y como se explica en el Capítulo 12 del texto base, las sobretensiones de baja frecuencia y corta duración (sobretensiones transferidas) y las transitorias rápidas de impulso tipo rayo.

Para determinar la distancia mínima necesaria se debe conocer el valor máximo que pueden tomar dichos fenómenos en el punto considerado y aplicar las tablas correspondientes. La distancia mayor de las obtenidas determinará el requisito mínimo a cumplir.

Con los datos del enunciado tendremos que si la corriente máxima de defecto en media tensión es 200 A, la tensión transferida máxima a las partes metálicas del centro de transformación será $U_{BTCT} = 200 \text{ A} \cdot 30 \text{ } \Omega = 6 \text{ kV}$. En la tabla 12.3 del texto base, la distancia

en el aire correspondiente a $6\sqrt{2} \approx 8,5$ kV es aproximadamente 12 mm (interpolando en la tabla).

Para la sobretensión a impulso tipo rayo se debe considerar que si el cuadro de baja tensión tiene asignada una categoría de sobretensión III, el nivel de tensión asignado a impulso será de 4 kV, tal como corresponde a una red trifásica de 230/400 V en la tabla 12.1 del texto base. A partir de este dato en la tabla 12.2 se comprueba que la distancia mínima requerida es 3,0 mm.

Por tanto, de las dos condiciones a cumplir, la que impone una condición peor es la primera y consecuentemente será 12 mm la distancia mínima requerida.

Esta situación no es habitual en los aparatos e instalaciones de baja tensión ya que, como se indica en el capítulo 10.5 del texto base, para las instalaciones de baja tensión de utilización (usuario) se exige que la tensión transferida máxima sea la que soportan normativamente los aparatos y componentes de baja tensión convencionales (1000 V o 1200 V, que en la tabla 12.3 corresponde a una distancia en el aire inferior a 0,7 mm), con lo que, en la práctica, para estas instalaciones y aparatos la distancia mínima la impone siempre la categoría de sobretensión a impulsos de tipo rayo.

No obstante, además de en los propios centros de transformación, en algunas aplicaciones industriales aparecen situaciones análogas a la que se plantea en el ejercicio, sobre todo cuando no es posible aislar las masas de alta y baja tensión de algunas partes de la instalación y en esos casos ha de tenerse en cuenta que las distancias requeridas por las condiciones de impulso tipo rayo pueden no ser suficientes para la correcta protección.

Ejercicio 12.2. En un centro de transformación de una industria, conectado a una red de media tensión de 20 kV, de impedancia despreciable a los efectos del cálculo y con un transformador de 20/0,4 kV 150 kVA y $u_{CC} = 4\%$. Considerando que el neutro del transformador está referido a una tierra independiente y de resistencia despreciable, se desea determinar:

1) la corriente nominal de descarga del protector contra sobretensiones en modo común, de categoría III, asignado al cuadro de protecciones de los circuitos de baja tensión de la industria y cuya masa está referida a la tierra del propio centro, con valor $R_t = 10 \Omega$.

2) las distancias en el aire mínimas, entre partes activas y masa del cuadro de protecciones de baja tensión, si se colocan entre dichas partes protectores de sobretensión transitoria de 3 kV de nivel de protección.

Solución 1: a) 5 A

b) 50 A

c) 500 A

d) 2500 A

Desarrollo 1:

Para la categoría de sobretensión III, la tensión de impulso asignada en una red trifásica de 230/400 V es 4 kV, con lo que la intensidad nominal de descarga (máxima de tipo impulso, según definición del capítulo 11.7 del texto base) que circulará por el protector será

$$I_n = \frac{4000}{10} = 400 \text{ A} .$$

Debe notarse además que durante el tiempo en que el protector está actuando en el impulso, existirá una derivación a tierra de la fase correspondiente que será franca si el protector es un

descargador, con lo que la corriente de red también se drenará por el en el tiempo de actuación. Esta corriente tendría un valor, para este caso, de 23 A aproximadamente, que es un valor muy pequeño en comparación con el anterior pero que puede tener un efecto de disipación de energía elevado y destructivo para el protector, ya que la corriente calculada es en valor eficaz y mantenida durante el tiempo de actuación, mientras que la de impulso es en valor de pico y de forma de onda 8/20 μ s.

Solución 2: a) 3,8 mm b) 3,0 mm c) 2,4 mm **d) 2,0 mm**

Desarrollo 2:

Si la tensión asignada o nivel de protección del protector es 3 kV (máxima tensión de tipo impulso antes de actuar, según definición del capítulo 11.7 del texto base), el material de baja tensión protegido por él tendrá que tener un nivel de aislamiento mínimo correspondiente a dicha tensión, con lo que de la tabla 12.2 del texto base para 3 kV obtenemos una distancia mínima de 2,0 mm
