

# Protección de sistemas eléctricos de potencia

Ramón M. Mujal Rosas

# Protección de sistemas eléctricos de potencia

La presente obra fue galardonada en el \_\_\_\_\_ concurso  
"Ajut a l'elaboració de material docent" convocado por la UPC.

Primera edición: septiembre de 2002

Diseño de la cubierta: Manuel Andreu

© Ramón M. Mujal, 2002

© Edicions UPC, 2002  
Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL  
Jordi Girona Salgado 31, 08034 Barcelona  
Tel.: 934 016 883 Fax: 934 015 885  
Edicions Virtuals: [www.edicionsupc.es](http://www.edicionsupc.es)  
E-mail: [edicions-upc@upc.es](mailto:edicions-upc@upc.es)

Producción: CPET (Centre de Publicacions del Campus Nord)  
La Cup. Gran Capità s/n, 08034 Barcelona

Depósito legal: B-30770-2002  
ISBN: 84-8301-607-9

Quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización escrita de los titulares del copyright, bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos.

## Prólogo

La idea de crear un libro sobre protección de sistemas eléctricos de potencia surgió ante la necesidad de disponer en una única obra tanto de los aspectos teóricos como prácticos que rigen en la actualidad las disciplinas de Ingeniería de Segundo Ciclo que tratan temas afines, ya que si bien existen excelentes libros teóricos sobre el tema, escasean o son prácticamente nulos los que lo hacen de forma práctica.

Debe recordarse que un análisis completo de los sistemas eléctricos exige no sólo contemplar el régimen de funcionamiento anómalo, sino también el régimen funcionamiento normal. Por este motivo, se remite al lector a la obra, Cálculo de líneas y redes eléctricas, de la misma editorial y autor, para un mejor y más completo estudio global de los sistemas eléctricos de potencia.

Esta es una obra eminentemente práctica, sin más pretensiones que las de ofrecer, en un sólo libro, los aspectos teóricos y prácticos más importantes que rigen tanto la técnica como la seguridad y la economía en el transporte de la energía eléctrica.

La obra ha sido estructurada en dos módulos, con un total de cuatro capítulos bien diferenciados.

El primer módulo es teórico y está formado por los capítulos primero y segundo. Con éste módulo se pretende acometer el estudio de los sistemas de potencia trabajando en régimen transitorio, es decir, con situaciones anómalas como pueden ser las provocadas por los cortocircuitos u otros fallos eléctricos. Así, el primer capítulo (Cortocircuitos en las instalaciones eléctricas) realiza un exhaustivo estudio de los fallos eléctricos más importantes, los cortocircuitos. De estos defectos se exponen los tipos existentes, las variaciones temporales que sufren las magnitudes eléctricas, los efectos térmicos y dinámicos que se producen y un amplio estudio de los diferentes sistemas para limitar las corrientes de falta. Finalmente, el cálculo de las impedancias de cortocircuito y el cálculo de las corrientes de cortocircuito mediante las directrices de la Norma VDE 0102 completarán este extenso capítulo. Por su parte el segundo capítulo (Redes de secuencia y componentes simétricas en los sistemas de potencia), nos introduce en el análisis de los fallos eléctricos tanto simétricos como asimétricos mediante el método de las redes de secuencia y las componentes simétricas. El capítulo describe las redes de secuencia (redes directa, inversa y homopolar) para posteriormente entrar en el análisis de las componentes simétricas, demostrándose gracias a ellas las fórmulas básicas que permiten el cálculo de los diversos tipos de cortocircuitos.

El segundo módulo, eminentemente práctico, está formado por dos capítulos bien diferenciados, ya que mientras que el capítulo III (Problemas resueltos de cálculo de fallos en sistemas de potencia) está formado por problemas completamente resueltos y razonados, en el capítulo IV (Problemas propuestos de fallos en sistemas eléctricos de potencia) se pretende ofrecer una serie de problemas propuestos con sus correspondientes soluciones, para que el lector pueda ejercitarse en su resolución y comprobar así el nivel de asimilación obtenido a lo largo del estudio de la materia del presente libro. Concretamente, en el capítulo III, se resuelven de forma completa y razonada diez problemas correspondientes a funcionamientos anómalos de los sistemas de potencia, es decir, con fallos eléctricos. Así, el cálculo de sobrecargas, de las corrientes y tensiones de cortocircuito, dimensionado de sistemas de protección, puestas a tierra, o la selectividad entre protecciones entran a formar parte de este capítulo. Por su parte, el capítulo IV, nos ofrece veinte enunciados de problemas con sus respectivas soluciones de fallos eléctricos

en sistemas de potencia, lo que permite afianzar y consolidar los conocimientos teóricos y prácticos adquiridos.

Finalmente unos anexos dedicados a las fórmulas, tablas y gráficos necesarios, tanto para un conocimiento general de la materia como para la correcta resolución de los problemas, se adjuntan al final del libro.

No quisiera terminar esta introducción, sin dar las gracias a todos los que de alguna forma han ayudado en la confección de este libro mediante sus observaciones, rectificaciones o consejos, siempre de gran utilidad. A todos ellos, y en especial a mi esposa y familia por su comprensión y paciencia, les pido que acepten mi más sincera gratitud.

El autor

Terrassa. Enero de 2002

## Índice

<b>I</b>	<b>Fallos eléctricos y método de las componentes simétricas</b>	11
<b>1</b>	<b>Cortocircuitos en las instalaciones eléctricas</b>	13
1.1	Introducción a los fallos eléctricos	13
1.2	Tipos de cortocircuitos	13
1.3	Parámetros eléctricos a considerar en los cortocircuitos. Norma VDE 0102	14
1.4	Corrientes de cortocircuito. Magnitudes y variaciones temporales	15
1.5	Métodos para limitar las corrientes de cortocircuito	24
1.6	Efectos electrodinámicos y térmicos de las corrientes de cortocircuitos	29
1.7	Determinación práctica de las corrientes de cortocircuito	31
1.8	Impedancias directa, inversa y homopolar	31
1.9	Cálculo de la impedancia de dispositivos eléctricos y de cortocircuito de la red	32
1.10	Cálculo de las corrientes de cortocircuito según la norma VDE 0102	40
1.11	Cuestiones y problemas	42
<b>2</b>	<b>Redes de secuencia y componentes simétricas</b>	45
2.1	Introducción a las redes de secuencia	45
2.2	Redes de secuencia	46
2.3	Componentes simétricas	56
2.4	Cálculo de las corrientes de cortocircuito	60
2.5	Cuestiones y problemas	72
<b>II</b>	<b>Problemas resueltos y propuestos de cálculo de sistemas de potencia</b>	75
<b>3</b>	<b>Problemas resueltos de cálculo fallos en sistemas de potencia</b>	77
3.1	Dimensionado de los dispositivos de protección de una red formada por una acometida, una central eléctrica y unos consumidores	77
3.2	Dimensionado de los dispositivos de protección de una red formada por una acometida, un grupo de motores asíncronos y unos consumidores	87
3.3	Cálculo de las magnitudes de cortocircuito en el punto de falta para una red con dos niveles de tensión mediante el método de las redes de secuencia	97
3.4	Cálculo de las magnitudes de cortocircuito en el punto de falta para una red con tres niveles de tensión mediante el método de las redes de secuencia	105
3.5	Cálculo de las magnitudes de cortocircuito en el punto de falta para una red con conexión mixta y dos niveles de tensión mediante las redes de secuencia	112
3.6	Cálculo de las magnitudes de cortocircuito en el punto de falta para una red con conexión triángulo y dos niveles de tensión mediante las redes de secuencia	120

3.7	Cálculo de un cortocircuito monofásico a tierra mediante las componentes simétricas	127
3.8	Cálculo de un cortocircuito bifásico mediante las componentes simétricas	135
3.9	Cálculo de un cortocircuito bifásico a tierra mediante las componentes simétricas	142
3.10	Cálculo de un cortocircuito monofásico a tierra en bornes de un generador	151
<b>4</b>	<b>Enunciados de problemas de cálculo de fallos en sistemas de potencia</b>	<b>155</b>
4.1	Problemas del 1 al 4. Cálculo de los interruptores de protección en redes eléctricas	155
4.2	Problemas del 5 al 7. Cálculo de cortocircuitos por el método de las redes de secuencia	161
4.3	Problemas 8 y 9. Cálculo de cortocircuitos en redes extensas	165
4.4	Problemas del 10 al 15. Circuitos con un generador. Método de las componentes simétricas	167
4.5	Problemas del 15 al 20. Circuitos con varios generadores. Método de las componentes simétricas	171
	<b>Anexos</b>	<b>177</b>
I	Constantes de magnitudes físicas, terrestres y cuánticas	177
II	Resistividad ( $\psi$ ), coeficiente de temperatura ( $\zeta$ ), punto de fusión ( $^{\circ}\text{C}$ ) y densidad ( $\tau$ ) de diversos materiales y aleaciones	178
III	Coefficientes de resistividad de los aislantes	179
IV	Magnitudes y unidades magnéticas	180
V	Conductores eléctricos	181
VI	Conductancia, autoinducción y susceptancia	182
VII	Método de las constantes auxiliares	183
VIII	Método del circuito equivalente en "T" y en "M"	185
IX	Fórmulas para el cálculo de líneas eléctricas	187
X	Resumen de fórmulas para líneas eléctricas	189
XI	Fórmulas para el cálculo de cortocircuitos por componentes simétricas	190
XII	Factores correctores según la VDE 0102 ( $\chi$ , $\mu$ , $q$ y $\gamma$ )	194
	<b>Bibliografía</b>	<b>197</b>