

Líneas de transmisión ca

FESTO

FESTO

Electricidad y Nuevas
Energías

LabVolt Series

Manual del estudiante



Alemania

Festo Didactic SE
Rechbergstr. 3
73770 Denkendorf
Tel.: +49 711 3467-0
Fax: +49 711 347-54-88500
did@festo.com

Estados Unidos

Festo Didactic Inc.
607 Industrial Way West
Eatontown, NJ 07724
Tel.: +1 732 938-2000
Sin cargo: +1-800-522-8658
Fax: +1 732 774-8573
services.didactic@festo.com

Canadá

Festo Didactic Ltée/Ltd
675, rue du Carbone
Québec (Québec) G2N 2K7
Tel.: +1 418 849-1000
Sin cargo: +1-800-522-8658
Fax: +1 418 849-1666
services.didactic@festo.com

Manual del estudiante

Líneas de transmisión ca

www.festo-didactic.com Property of Festo Didactic
Sale and/or reproduction forbidden

Festo Didactic
es
8120198



0008120198000000000100

Electricidad y Nuevas Energías
Líneas de transmisión ca

Manual del estudiante

8120198

Nº de artículo: 8120198 (Versión impresa) 8120199 (Versión electrónica)

Primera edición

Actualización: 10/2019

Por el personal de Festo Didactic

© Festo Didactic Ltée/Ltd, Québec, Canada 2019

Internet: www.festo-didactic.com

e-mail: services.didactic@festo.com

Impreso en Canadá

Todos los derechos reservados

ISBN 978-2-89789-567-9 (Versión impresa)

ISBN 978-2-89789-568-6 (Versión electrónica)

Depósito legal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2019

Depósito legal – Library and Archives Canada, 2019

El comprador adquiere un derecho de utilización limitado simple, no excluyente, sin limitación en el tiempo, aunque limitado geográficamente a la utilización en su lugar / su sede.

El comprador tiene el derecho de utilizar el contenido de la obra con fines de capacitación de los empleados de su empresa, así como el derecho de copiar partes del contenido con el propósito de crear material didáctico propio a utilizar durante los cursos de capacitación de sus empleados localmente en su propia empresa, aunque siempre indicando la fuente. En el caso de escuelas/colegios técnicos, centros de formación profesional y universidades, el derecho de utilización aquí definido también se aplica a los escolares, participantes en cursos y estudiantes de la institución receptora.

En todos los casos se excluye el derecho de publicación, así como la inclusión y utilización en Intranet e Internet o en plataformas LMS y bases de datos (por ejemplo, Moodle), que permitirían el acceso a una cantidad no definida de usuarios que no pertenecen al lugar del comprador.

Todos los otros derechos de reproducción, copiado, procesamiento, traducción, microfilmación, así como la transferencia, la inclusión en otros documentos y el procesamiento por medios electrónicos requieren la autorización previa y explícita de Festo Didactic.

La información contenida en este documento está sujeta a cambios sin previo aviso y no representa ningún compromiso por parte de Festo Didactic. Los materiales Festo descritos en este documento se suministran bajo un acuerdo de licencia o de confidencialidad.

Festo Didactic reconoce los nombres de productos como marcas de comercio o marcas comerciales registradas por sus respectivos titulares.

Todas las otras marcas de comercio son propiedad de sus respectivos dueños. Es posible que en este documento se utilicen otras marcas y nombres de comercio para referirse a la entidad titular de las marcas y nombres o a sus productos. Festo Didactic renuncia a todo interés de propiedad relativo a las marcas y nombres de comercio que no sean los propios.

Property of Festo Didactic
Sale and/or reproduction forbidden

Símbolos de seguridad y de uso frecuente

Los siguientes símbolos de seguridad y de uso frecuente pueden encontrarse en este curso y en los equipos:

Símbolo	Descripción
	PELIGRO indica un nivel alto de riesgo que, de no ser evitado, ocasionará la muerte o lesiones de gravedad.
	ADVERTENCIA indica un nivel medio de riesgo, que de no ser evitado, puede ocasionar la muerte o lesiones de gravedad.
	ATENCIÓN indica un nivel bajo de riesgo, que de no ser evitado, puede ocasionar lesiones menores o leves.
	ATENCIÓN utilizado sin el <i>símbolo de riesgo</i>  , indica una situación de riesgo potencial que, de no ser evitada, puede ocasionar daños materiales.
	Precaución, posible riesgo. Consultar la documentación correspondiente.
	Precaución, riesgo de descarga eléctrica
	Precaución, riesgo al levantar
	Precaución, superficie caliente
	Precaución, riesgo de incendio
	Precaución, riesgo de explosión
	Precaución, riesgo de atrapamiento en transmisiones por correa
	Precaución, riesgo de atrapamiento en transmisiones por cadena
	Precaución, riesgo de atrapamiento en transmisiones por engranaje
	Precaución, riesgo de aplastamiento las manos
	Aviso, radiación no ionizante

Property of Festo Didactic
Sale and/or reproduction forbidden

Símbolos de seguridad y de uso frecuente

Símbolo	Descripción
	Consultar la documentación correspondiente.
	Corriente continua
	Corriente alterna
	Corriente alterna y continua
	Corriente alterna trifásica
	Terminal de tierra (común)
	Terminal de conductor protegido
	Terminal de chasis
	Equipotencial
	Encendido (fuente)
	Apagado (fuente)
	Equipo protegido con aislamiento doble o reforzado
	Botón biestable en posición pulsado
	Botón biestable en posición no pulsado

Índice

Prefacio	IX
Acerca de este curso	XI
Introducción Líneas de transmisión ca	1
OBJETIVO DEL CURSO	1
PRINCIPIOS FUNDAMENTALES	1
Introducción a las líneas de transmisión ca.....	1
Ejercicio 1 Características de regulación de tensión	5
PRINCIPIOS	5
Circuito equivalente simplificado de una línea de transmisión ca.....	5
Características de regulación de tensión de una línea de transmisión ca simplificada para cargas resistivas, inductivas y capacitivas	8
Cálculos de tensión para una carga resistiva	9
Cálculos de tensión para una carga inductiva	10
Cálculos de tensión para una carga capacitiva	11
Regulación de tensión de líneas de transmisión ca	11
Introducción al módulo Línea de transmisión trifásica.....	12
PROCEDIMIENTO.....	14
Montaje y conexiones	14
Características de regulación de tensión de una línea de transmisión ca simplificada para cargas resistivas, inductivas y capacitivas	16
Característica de regulación de tensión cuando la línea de transmisión ca simplificada está conectada a una carga resistiva	16
Característica de regulación de tensión cuando la línea de transmisión ca simplificada está conectada a una carga inductiva	17
Característica de regulación de tensión cuando la línea de transmisión ca simplificada está conectada a una carga capacitiva	19
CONCLUSIÓN	22
PREGUNTAS DE REVISIÓN.....	22

Índice

Ejercicio 2	Características de una línea de transmisión ca de alta tensión.....	25
	PRINCIPIOS.....	25
	Circuito equivalente PI corregido de una línea de transmisión ca de alta tensión	25
	Circuito equivalente PI no corregido de una línea de transmisión ca de alta tensión	28
	Tensión del receptor sin carga y característica de regulación de tensión de una línea de transmisión ca de alta tensión.....	30
	Impedancia característica Z_0 y carga natural P_0 de una línea de transmisión ca de alta tensión	31
	Curva de potencia-tensión de una línea de transmisión ca de alta tensión	34
	PROCEDIMIENTO.....	35
	Montaje y conexiones	35
	Cálculo de la impedancia característica Z_0 y de la carga natural P_0 de la línea de transmisión ca	37
	Curva de potencia-tensión de la línea de transmisión ca.....	38
	CONCLUSIÓN.....	42
	PREGUNTAS DE REVISIÓN.....	42
Ejercicio 3	Compensación de tensión de una línea de transmisión ca de alta tensión mediante compensación shunt conmutable.....	45
	PRINCIPIOS.....	45
	Compensación de tensión de una línea de transmisión ca mediante inductores en derivación (shunt) conmutables	45
	Compensación de tensión de una línea de transmisión ca que funciona más allá de la carga natural P_0 de la línea utilizando condensadores en derivación conmutables.....	51
	Potencia máxima transmisible de una línea de transmisión ca con compensación de tensión.....	53
	PROCEDIMIENTO.....	55
	Montaje y conexiones	55
	Compensación de tensión de una línea de transmisión ca utilizando un solo inductor de derivación conmutado	57
	Compensación de tensión de una línea de transmisión ca utilizando compensación shunt conmutable	61
	CONCLUSIÓN.....	68

Índice

	PREGUNTAS DE REVISIÓN.....	69
Ejercicio 4	Efecto de la longitud sobre las características y la compensación de tensión de una línea de transmisión ca de alta tensión.....	71
	PRINCIPIOS	71
	Efecto de la longitud de la línea sobre el circuito equivalente PI corregido de una línea de transmisión ca.....	71
	Efecto de la longitud de la línea sobre la impedancia característica Z_0 y la carga natural P_0 de una línea de transmisión ca.....	73
	Efecto de la longitud de la línea sobre la curva de potencia-tensión de una línea de transmisión ca	73
	Efecto de la longitud de la línea sobre el perfil de tensión a lo largo de una línea de transmisión ca con compensación de tensión	75
	Medición de la tensión en el centro de una línea de transmisión ca larga emulada en el laboratorio.....	78
	PROCEDIMIENTO.....	79
	Montaje y conexiones	79
	Curva de potencia-tensión de la línea de transmisión ca.....	83
	Tensión en el centro de una línea de transmisión ca larga con compensación de tensión en ambos extremos	84
	CONCLUSIÓN.....	87
	PREGUNTAS DE REVISIÓN.....	87
Ejercicio 5	Compensación de tensión de una línea de transmisión ca larga y de alta tensión mediante compensación shunt conmutable distribuida.....	89
	PRINCIPIOS	89
	Corrección del perfil de tensión de una línea de transmisión ca mediante distribución de la compensación shunt conmutable a lo largo de la línea.....	89
	Potencia máxima transmisible de una línea de transmisión ca con compensación de tensión mediante SSC distribuida.	92
	Relación entre la longitud de la línea y el desfase en una línea de transmisión ca con compensación de tensión.....	93
	Efecto de la longitud de la línea sobre la estabilidad de una línea de transmisión ca con compensación de tensión mediante compensación shunt conmutable.....	95

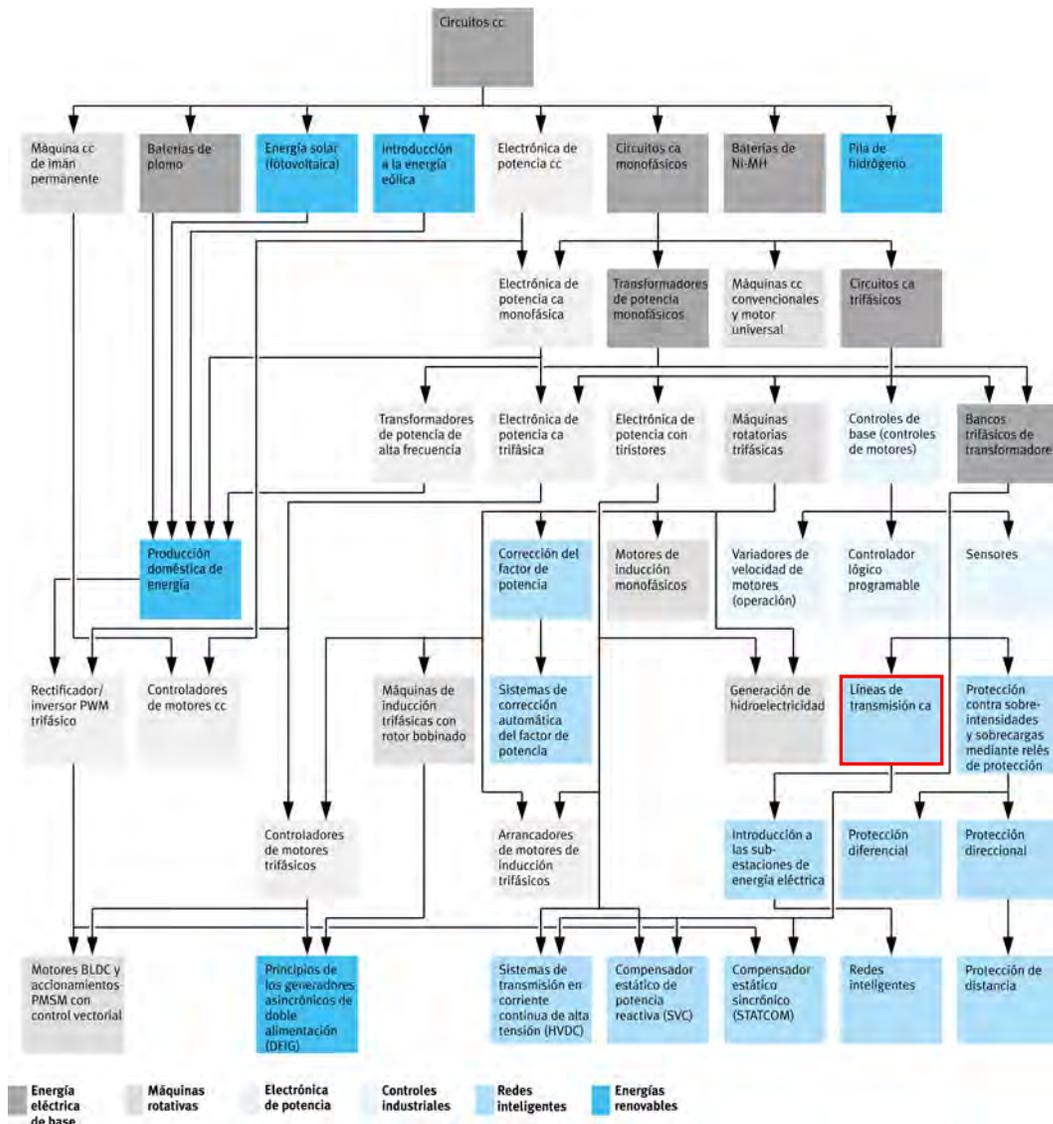
Índice

PROCEDIMIENTO.....	96
Montaje y conexiones	96
Compensación de tensión de una línea de transmisión ca utilizando compensación shunt conmutable distribuida.....	102
CONCLUSIÓN.....	108
PREGUNTAS DE REVISIÓN.....	109
Ejercicio 6 Control de la potencia activa que fluye a través de las líneas de transmisión ca con compensación de tensión....	111
PRINCIPIOS.....	111
Control del flujo de potencia activa en redes eléctricas interconectadas.....	111
Introducción al autotransformador de regulación	117
PROCEDIMIENTO.....	120
Montaje y conexiones	120
Control del flujo de potencia activa en una red eléctrica interconectada	123
CONCLUSIÓN.....	126
PREGUNTAS DE REVISIÓN.....	127
Apéndice A Tabla de utilización del equipo	129
Apéndice B Glosario de términos nuevos.....	131
Apéndice C Tabla de impedancia para los módulos de carga	135
Apéndice D Símbolos de los diagramas de circuitos	137
Índice de términos nuevos	143
Bibliografía	145

Prefacio

La producción de energía a partir de recursos naturales renovables como el viento, la luz solar, la lluvia, las mareas, el calor geotérmico, etc., ha cobrado bastante importancia en los últimos años dado que es un medio eficaz para reducir la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Últimamente, ha surgido como una tendencia importante la necesidad de tecnologías innovadoras para hacer que las redes sean más inteligentes debido a que el aumento de la demanda de energía eléctrica que se observa en todo el mundo hace que para las redes actuales de muchos países resulte cada vez más difícil satisfacer la demanda de energía. Además, en muchas partes del mundo se desarrollan y comercializan vehículos eléctricos (desde bicicletas hasta automóviles) cada vez con más éxito.

Para responder a las crecientes necesidades de formación en el amplio sector de la energía eléctrica, se ha desarrollado el Programa didáctico en tecnologías de la energía eléctrica, un programa de aprendizaje modular destinado a escuelas técnicas, colegios y universidades. El programa se muestra a continuación en forma de un organigrama, en donde cada cuadro representa un curso.



Programa didáctico en tecnologías de la energía eléctrica.

Prefacio

El programa comienza con una variedad de cursos que tratan en profundidad los temas básicos relacionados con el campo de la energía eléctrica, como los circuitos de corriente continua y alterna, transformadores de potencia, máquinas rotatorias, líneas de transmisión de corriente alterna y electrónica de potencia. El programa se basa en los conocimientos adquiridos por el estudiante a través de esos cursos básicos para luego aprender temas más avanzados como la producción doméstica de energía a partir de recursos renovables (viento y luz solar), generación de hidroelectricidad a gran escala, producción de energía eléctrica a gran escala a partir de la energía eólica (utilizando las tecnologías de los generadores de inducción de doble alimentación [DFIG], asíncronos y sincrónicos), tecnologías de redes inteligentes (SVC, STATCOM, transmisión HVDC, etc.), almacenamiento de la energía eléctrica en baterías y sistemas de control para pequeños vehículos y automóviles eléctricos.

Invitamos a los lectores a enviarnos sus opiniones, comentarios y sugerencias para mejorarlo.

Por favor, envíelos a services.didactic@festo.com.

Los autores y Festo Didactic estamos a la espera de sus comentarios.

Acerca de este curso

Las líneas de transmisión ca de alta tensión son un elemento vital de toda red de alimentación ca. Se las utiliza para transferir grandes cantidades de energía eléctrica de las estaciones generadoras de energía al sistema de distribución, que a su vez suministra energía eléctrica a los consumidores. Puesto que las estaciones generadoras de energía en una red eléctrica ca pueden estar muy lejos de los centros de consumo de energía, las líneas de transmisión ca a menudo tienen que transferir energía eléctrica a través de largas distancias. Esta particularidad, junto con el hecho de que las líneas de transmisión ca son tanto inductivas como capacitivas, tiene varios efectos en la operación de las líneas de transmisión ca. Uno de estos efectos es que la tensión en el extremo receptor de una línea de transmisión ca excede significativamente la tensión en el extremo emisor de la línea cuando esta funciona sin carga o con una carga ligera. Por consiguiente, puede producirse una sobretensión y daños en el equipo cuando se pierde la carga. Otro efecto es que la tensión en el extremo receptor de la línea varía significativamente con la cantidad de potencia activa que transmite la línea.

Los dos efectos antes descritos son altamente indeseables, ya que perjudican significativamente la estabilidad de la tensión de la red eléctrica ca. Por lo tanto, la compensación de tensión es necesaria para mantener la tensión en el extremo receptor de una línea de transmisión ca igual a la tensión en su extremo emisor, independientemente de la cantidad de potencia activa que transmite la línea. La compensación de tensión de una línea de transmisión ca se consigue principalmente utilizando un banco de inductores shunt (en derivación) conmutables en el extremo receptor de la línea. Puede incluso ser necesario utilizar bancos de condensadores shunt (en derivación) conmutables para compensar la tensión de una línea de transmisión ca que funciona a niveles de potencia que exceden significativamente la carga natural (P_0) de la línea. Este método de compensación de tensión suele conocerse como compensación shunt (en derivación) conmutable (SSC, del inglés *switched shunt compensation*). En las líneas de transmisión ca que son particularmente largas, la SSC debe distribuirse en varias subestaciones ubicadas a lo largo de la línea para asegurar que la tensión en todo punto de esta se mantenga cerca de la tensión de su extremo emisor.

Acerca de este curso



Líneas de transmisión ca de alta tensión.

Cuando se utilizan líneas de transmisión ca para transferir energía eléctrica en redes eléctricas interconectadas, el flujo de potencia activa entre dos regiones cualesquiera suele necesitar un control cuidadoso. Esto puede lograrse utilizando un transformador de potencia que desfasa la tensión de entrada antes de aplicarla a la línea de transmisión ca. La cantidad de potencia activa que se transfiere de una región a otra se controla seleccionando el desfase que produce el transformador de potencia.

Este manual, Líneas de transmisión ca, introduce a los estudiantes a las características y comportamiento de las líneas de transmisión ca de alta tensión, así como a la compensación de tensión de estas líneas utilizando compensación shunt (en derivación) conmutable (SSC). Los estudiantes primero estudian las características de regulación de tensión de una línea de transmisión ca simplificada, es decir, una línea que consta de inductores en serie solamente. Esto les proporciona a los estudiantes algunos conocimientos básicos que son útiles más adelante en el curso. Los estudiantes se familiarizan con las características fundamentales, impedancia característica (Z_0), carga natural (P_0), circuito equivalente PI corregido y curva potencia-tensión (P-V) de una línea de transmisión ca de alta tensión. Después de esto, se estudia en detalle la compensación de tensión de una línea de transmisión ca de alta tensión que utiliza SSC. En esta sección del curso, los estudiantes también aprenden la relación entre la potencia activa que transmite una línea con compensación de tensión y el desfase entre las tensiones de ambos extremos de la línea, así como a determinar la potencia transmisible máxima de una línea con compensación de tensión. Luego, los estudiantes descubren cómo la longitud de la línea afecta las características y la compensación de tensión de una línea de transmisión ca de alta tensión. Los estudiantes aprenden a remediar los efectos negativos de la longitud de la línea utilizando SSC distribuida. Finalmente, los estudiantes aprenden a controlar el flujo de potencia activa en una línea de transmisión ca utilizando un transformador de cambio de fase.

Property of Festo Didactic
Sale and/or reproduction forbidden

© Festo Didactic 8120198

Acerca de este curso

Consideraciones de seguridad

Los símbolos de seguridad que pueden emplearse en este curso y en los equipos se listan en la tabla Símbolos de seguridad y de uso frecuente al principio de este documento.

Los procedimientos de seguridad relacionados con las tareas que se le pedirá realizar se indican en cada ejercicio.

Asegúrese de emplear el equipo de protección adecuado al realizar las tareas requeridas en los ejercicios prácticos. Nunca realice una tarea si tiene alguna razón para pensar que una manipulación podría ser peligrosa para usted o sus compañeros.

Prerrequisitos

Es requisito previo para este curso haber leído los manuales *Circuitos cc*, n.p. 86350, *Circuitos ca monofásicos*, n.p. 86358, *Transformadores de potencia monofásicos*, n.p. 86377, *Circuitos ca trifásicos*, n.p. 86360 y *Bancos trifásicos de transformadores*, n.p. 86379.

Property of Festo Didactic
Sale and/or reproduction forbidden

Líneas de transmisión ca

OBJETIVO DEL CURSO

Cuando haya completado este manual, usted estará familiarizado con las características de regulación de tensión de una línea de transmisión ca simplificada (representada por un inductor en serie) obtenida con cargas resistivas, inductivas y capacitivas. También estará familiarizado con el diagrama equivalente y las características principales (regulación de tensión, impedancia característica (de sobretensión) Z_0 , carga natural P_0) de las líneas de transmisión ca de alta tensión. Usted sabrá cómo compensar la tensión a lo largo de una línea de transmisión ca de alta tensión utilizando compensación reactiva shunt (en derivación). Usted sabrá cómo la longitud afecta las características principales de una línea de transmisión ca de alta tensión. Usted podrá compensar la tensión a lo largo de una línea de transmisión ca larga de alta tensión utilizando compensación reactiva shunt distribuida. Finalmente, estará familiarizado con el flujo de potencia activa y reactiva en redes eléctricas interconectadas, y sabrá cómo controlar el flujo de ambos tipos de potencia.

PRINCIPIOS FUNDAMENTALES

Introducción a las líneas de transmisión ca

El objetivo principal de las **líneas de transmisión** es transferir energía eléctrica desde las estaciones generadoras de energía (el **extremo emisor** de las líneas de transmisión) a la red de distribución (el **extremo receptor** de las líneas de transmisión), que a su vez suministra energía eléctrica a los consumidores. Por lo tanto, las líneas de transmisión representan el segundo paso en la transferencia de energía eléctrica, como se muestra en la siguiente figura.

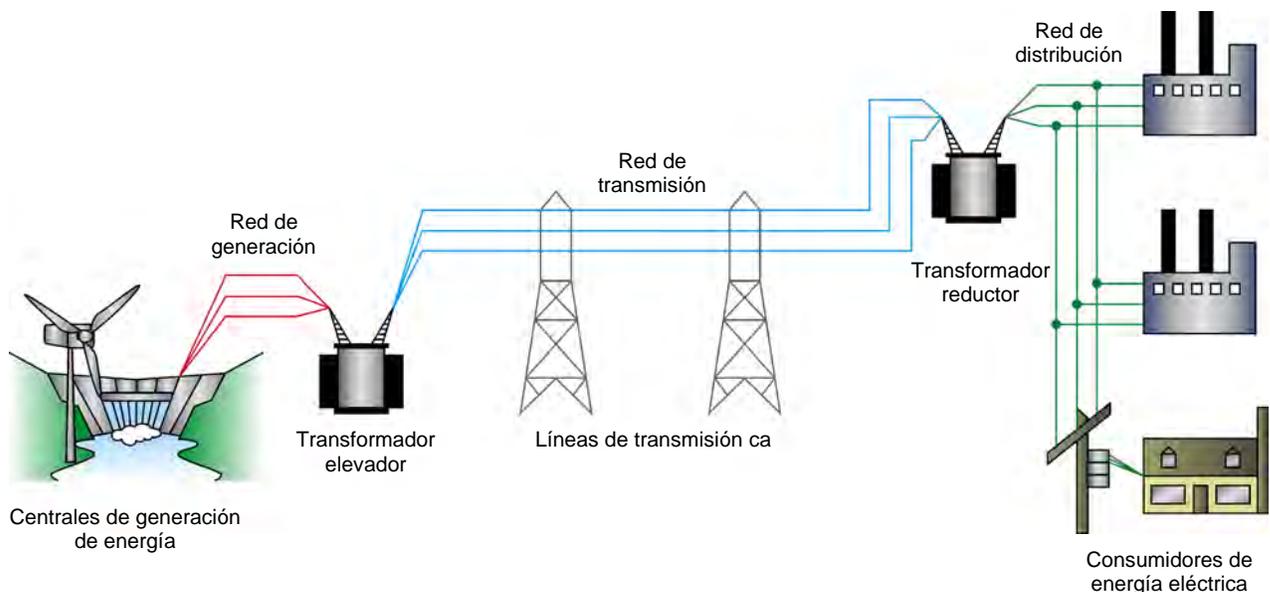


Figura 1. Típica red de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica.

Como se puede ver en la figura, la energía eléctrica se produce en las estaciones generadoras de energía (por ejemplo, plantas hidroeléctricas, plantas de energía solar, turbinas eólicas). La energía eléctrica se transfiere entonces mediante líneas de transmisión que operan a tensiones muy altas (generalmente de unos 150 kV a unos 765 kV). Las muy altas tensiones que se utilizan para las líneas de transmisión permiten que la corriente que fluye por la línea de transmisión se reduzca considerablemente para la misma cantidad de energía transferida. A su vez, un menor flujo de corriente en la línea de transmisión reduce significativamente la cantidad de pérdidas de energía $P_{Perdida}$ en la línea (ya que $P_{Perdida} = RI^2$), y también permite disminuir el tamaño de los conductores utilizados para la línea de transmisión. Ambos factores son críticos para las líneas de transmisión. Esto se debe a que las líneas de transmisión a menudo transfieren energía eléctrica a distancias muy largas, lo que significa que es muy importante reducir las pérdidas de energía y el tamaño de los cables (y, por lo tanto, el peso y el costo de los cables) de las líneas de transmisión. A medida que la energía eléctrica se acerca a los consumidores, la tensión de la energía eléctrica se reduce progresivamente mediante transformadores reductores en las subestaciones de transmisión (véase la figura 2 para un ejemplo de una subestación de transmisión).

La mayoría de las líneas de transmisión transportan corriente alterna trifásica (ca) y consisten en tres cables de línea sin conductor neutro. Las líneas de transmisión suelen ser aéreas (soportadas por grandes torres de transmisión eléctricas) en vez de subterráneas. Esto se debe a que las líneas aéreas, aunque menos estéticas, son mucho más económicas que las líneas subterráneas. Los conductores que se utilizan en las líneas de transmisión ca son casi siempre filamentos de una aleación de aluminio, a menudo reforzados con acero. Esto representa un compromiso entre la conductividad, la rigidez y el bajo costo de las líneas de transmisión.

El propósito fundamental de las líneas de transmisión ca es transferir potencia activa (es decir, potencia que se puede utilizar para realizar trabajo real). Sin embargo, es inevitable que una línea de transmisión ca suministre o absorba algo de potencia reactiva. La proporción entre la potencia reactiva que intercambia una línea de transmisión ca y la potencia activa que transfiere debe mantenerse al mínimo. También es importante que la tensión a través de una línea de transmisión ca se mantenga dentro de los límites de operación normales a lo largo de toda la línea para evitar problemas relacionados con situaciones de sobretensión y subtensión. Además, esto limita las fluctuaciones en la tensión de la energía eléctrica que se les suministra a los consumidores, lo que puede tener efectos negativos en el funcionamiento de muchos aparatos eléctricos.



Figura 2. Subestación de transmisión utilizada para bajar la alta tensión presente en las líneas de transmisión ca antes de que la energía se les distribuya a los consumidores.

Property of Festo Didactic
Sale and/or reproduction forbidden

Características de regulación de tensión

OBJETIVO DEL EJERCICIO Cuando haya completado este ejercicio, estará familiarizado con el circuito equivalente simplificado de una línea de transmisión ca. También estará familiarizado con las características de regulación de tensión de una línea de transmisión ca simplificada cuando esta suministra energía a una carga resistiva, inductiva o capacitiva. Conocerá el concepto de regulación de tensión en una línea de transmisión ca. Sabrá cómo determinar la regulación de tensión de una línea de transmisión ca.

RESUMEN DE LOS PRINCIPIOS

Los Principios de este ejercicio cubren los siguientes puntos:

- Circuito equivalente simplificado de una línea de transmisión ca
- Características de regulación de tensión de una línea de transmisión ca simplificada para cargas resistivas, inductivas y capacitivas
- Regulación de tensión de líneas de transmisión ca
- Introducción al módulo Línea de transmisión trifásica

PRINCIPIOS

Circuito equivalente simplificado de una línea de transmisión ca

Como se menciona en la introducción de este manual, una línea de transmisión ca trifásica de alta tensión generalmente consiste en tres conductores aéreos conectados a grandes torres. Por supuesto, cada conductor tiene algo de resistencia. Asimismo, cada conductor también produce algo de reactancia inductiva, ya que a través de la línea fluye corriente alterna. Finalmente, un campo eléctrico se acumula entre los conductores y la tierra, introduciendo así un efecto capacitivo y cierta reactancia capacitiva. La figura 3 muestra el circuito eléctrico equivalente que representa un segmento corto (por ejemplo, 1 km o 1 milla) de una línea de transmisión ca de alta tensión. Incluye un resistor, un inductor y dos condensadores que reflejan la resistencia, reactancia inductiva y reactancia capacitiva de la línea de transmisión ca que se ha mencionado antes.

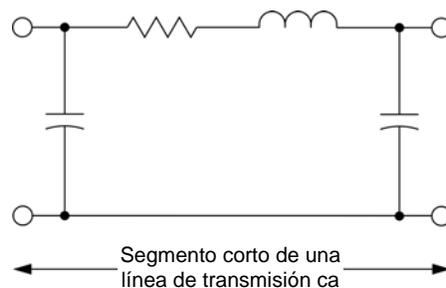


Figura 3. Circuito eléctrico equivalente de un segmento corto (por ejemplo, 1 km o 1 milla) de una línea de transmisión ca de alta tensión (una sola fase).

Observe que el circuito eléctrico equivalente de la figura 3 representa solo una fase de un segmento corto de una línea de transmisión ca de alta tensión. En la figura 4 se muestra el circuito eléctrico equivalente completo que representa las tres fases de un segmento corto de una línea de transmisión ca de alta tensión.

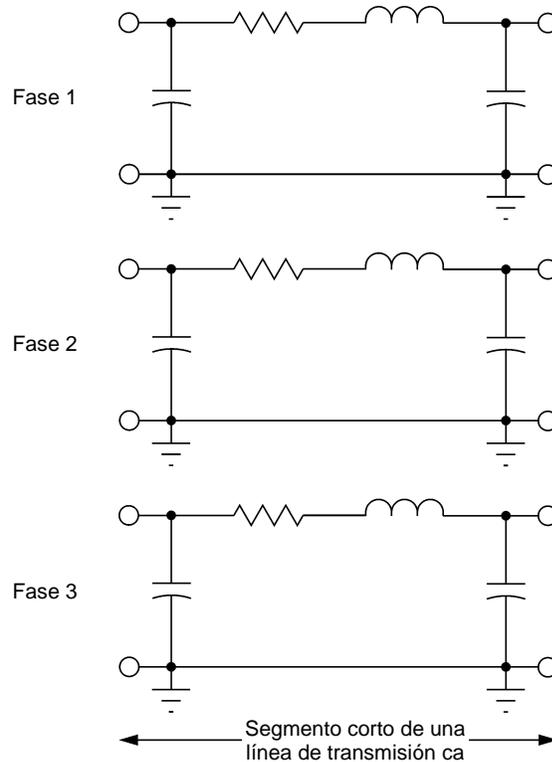


Figura 4. Circuito eléctrico equivalente completo de un segmento corto (por ejemplo, 1 km o 1 milla) de una línea de transmisión ca de alta tensión.

El circuito de la figura 3 debe repetirse tantas veces como sea necesario para obtener el circuito eléctrico equivalente de la línea de transmisión ca completa. En la figura 5 se muestra el circuito equivalente resultante, al que generalmente se hace referencia como **circuito equivalente de parámetros distribuidos**.

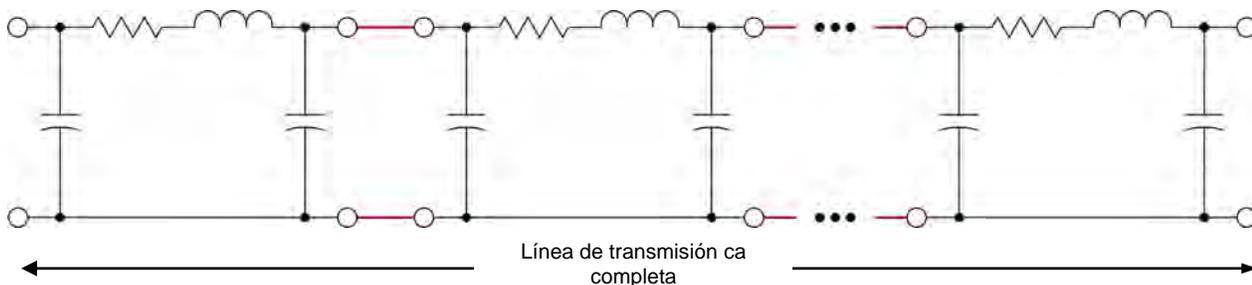


Figura 5. Circuito equivalente de parámetros distribuidos de una línea de transmisión ca de alta tensión (una sola fase).

Este circuito equivalente de parámetros distribuidos es una representación exacta de una línea de transmisión ca de alta tensión y reproduce completamente sus características. Sin embargo, es complejo y no muy adecuado para el estudio de las líneas de transmisión ca. El circuito equivalente de parámetros distribuidos de una línea de transmisión ca mostrado en la figura 5 puede simplificarse mucho retirando todos los resistores y condensadores, dejando solo los inductores conectados en serie. El circuito equivalente simplificado resultante de la línea de transmisión ca consiste en un solo inductor en serie que representa a todos los inductores del circuito equivalente de parámetros distribuidos de la línea de transmisión ca, como se muestra en la figura 6. Como primera aproximación, la reactancia del inductor en serie en el circuito equivalente simplificado de la línea de transmisión ca es igual a la reactancia inductiva por segmento de línea multiplicada por el número de segmentos de línea en el circuito equivalente de parámetros distribuidos. El circuito equivalente simplificado de una línea de transmisión ca que se muestra en la figura 6 es un ejemplo de un circuito equivalente de parámetros concentrados porque todos los inductores en el circuito equivalente de parámetros distribuidos están concentrados o agrupados en un solo inductor en el circuito equivalente simplificado.

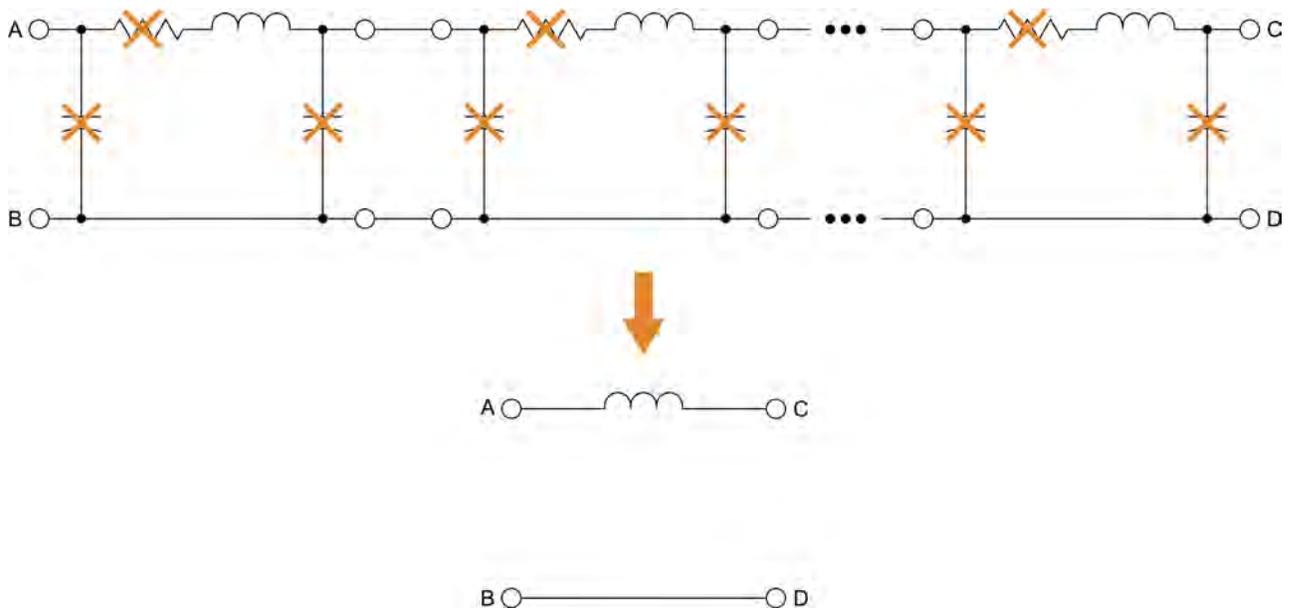


Figura 6. Circuito equivalente simplificado de parámetros concentrados de una línea de transmisión ca (una sola fase).

El circuito equivalente simplificado de parámetros concentrados que se muestra en la figura 6 no reproduce fielmente las características eléctricas y el comportamiento de una línea de transmisión ca de alta tensión. En el mejor de los casos, se puede utilizar para representar una línea que transporta energía eléctrica a una distancia de menos de unos 30 km (unas 20 millas), por ejemplo, una línea de distribución de energía. Sin embargo, el circuito eléctrico equivalente simplificado de parámetros concentrados de la figura 6 es útil para brindar una introducción a las características de regulación de tensión de líneas de transmisión ca. El resto de este ejercicio se basa en el circuito eléctrico equivalente simplificado de parámetros concentrados de una línea de transmisión ca.

Características de regulación de tensión de una línea de transmisión ca simplificada para cargas resistivas, inductivas y capacitivas

Por razones de brevedad, las tensiones en el extremo emisor y en el extremo receptor de las líneas de transmisión ca se abrevian a menudo como tensión del emisor y tensión del receptor, respectivamente, a lo largo de este manual.

La tensión medida en el extremo receptor E_R de una línea de transmisión ca varía dependiendo del tipo de carga a la que se suministra la energía, así como de la corriente de línea I_L que fluye en la línea de transmisión ca. La figura 7 muestra las características de regulación de tensión (es decir, las curvas de la tensión en el extremo receptor E_R de la línea de transmisión ca en función de la corriente de línea I_L que fluye por la línea) de una línea de transmisión ca simplificada (es decir, una línea de transmisión representada por un solo inductor en serie por cada fase) para cargas resistivas, inductivas y capacitivas. Estas características de regulación de tensión se obtienen con una tensión constante en el extremo emisor de la línea de transmisión ca simplificada. Las características muestran que cuando la carga es resistiva o inductiva, la tensión del receptor E_R disminuye cuando la corriente de línea I_L aumenta (es decir, cuando la carga aumenta). Por el contrario, cuando la carga es capacitiva, la tensión del receptor E_R aumenta con la corriente de línea I_L (es decir, con la carga). Por consiguiente, para cualquier corriente significativa I_L que fluye en la línea de transmisión ca, la tensión del receptor E_R es menor que la tensión del emisor E_E cuando la carga es resistiva o inductiva (siendo mayor la diferencia entre la tensión del receptor E_R y la del emisor E_E cuando la carga es inductiva que cuando es resistiva). Por el contrario, la tensión del receptor E_R es mayor que la del emisor E_E cuando la carga es capacitiva.

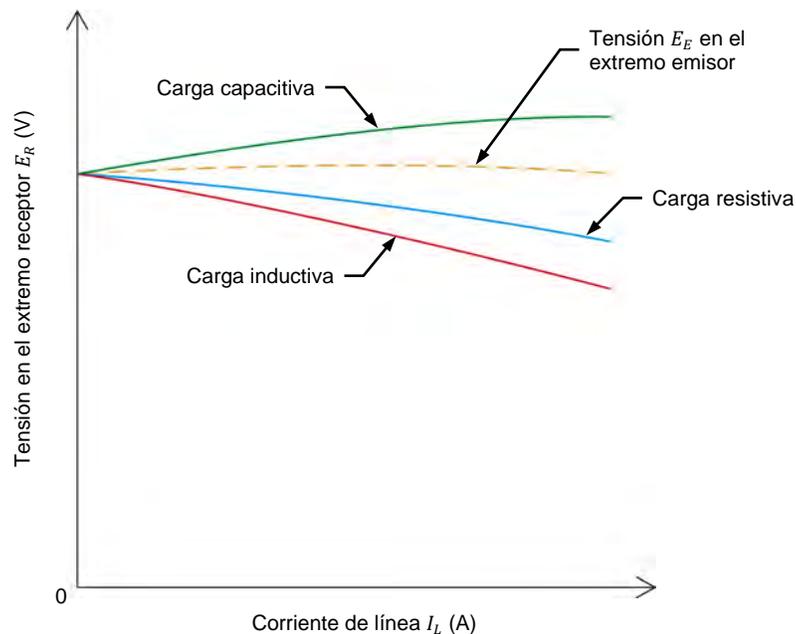


Figura 7. Curvas características típicas de regulación de tensión de una línea de transmisión simplificada, es decir, una línea de transmisión representada por un solo inductor en serie única por cada fase.

Las tendencias indicadas por las características de la figura 7 pueden determinarse fácilmente resolviendo los circuitos formados por una fase de una línea de transmisión ca simplificada conectada sucesivamente a una carga resistiva, una carga inductiva y una carga capacitiva. Por ejemplo, considere el circuito equivalente simplificado de una línea de transmisión ca que se muestra en la figura 8. En la figura, una línea de transmisión ca de 230 kV (tensión de fase del emisor $E_E = 133$ kV) se representa mediante una reactancia

Property of Festo Didactic

Sale and/or reproduction forbidden

inductiva X_L de 120Ω . En los siguientes tres casos, la línea de transmisión ca simplificada se conecta sucesivamente a una carga resistiva, una carga inductiva y una carga capacitiva. La tensión del receptor E_R se calcula para cada tipo de carga.

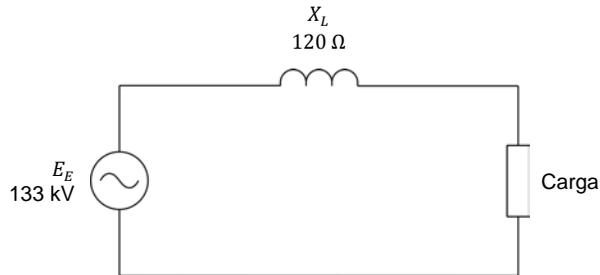


Figura 8. Circuito equivalente simplificado de una línea de transmisión ca de 230 kV (tensión de fase del emisor $E_E = 133 \text{ kV}$).

Cálculos de tensión para una carga resistiva

Cuando la línea de transmisión ca de la figura 8 se conecta a una carga resistiva cuya resistencia R_{carga} es de $10\,000 \Omega$, la tensión del receptor E_R puede calcularse de la siguiente manera:

$$Z = \sqrt{R_{carga}^2 + X_L^2} = \sqrt{(10\,000 \Omega)^2 + (120 \Omega)^2} = 10\,001 \Omega$$

$$I_L = E_S/Z = 133\,000 \text{ V}/10\,001 \Omega = 13,3 \text{ A}$$

$$E_R = I_L \times R_{carga} = 13,3 \text{ A} \times 10\,000 \Omega = 133\,000 \text{ V}$$

Cuando la resistencia de la carga resistiva R_{carga} es igual a 240Ω , la tensión del receptor E_R puede calcularse de la siguiente manera:

$$Z = \sqrt{R_{carga}^2 + X_L^2} = \sqrt{(240 \Omega)^2 + (120 \Omega)^2} = 268 \Omega$$

$$I_L = E_E/Z = 133\,000 \text{ V}/268 \Omega = 496 \text{ A}$$

$$E_R = I_L \times R_{carga} = 496 \text{ A} \times 240 \Omega = 119\,040 \text{ V}$$

Como puede verse, la tensión del receptor E_R se reduce en $13\,960 \text{ V}$ ($133\,000 \text{ V} - 119\,040 \text{ V}$) cuando la corriente de línea I_L aumenta de $13,3 \text{ A}$ a 496 A . La tensión del receptor E_R y la corriente de línea I_L calculadas para la carga resistiva se representan en un gráfico en la figura 9.

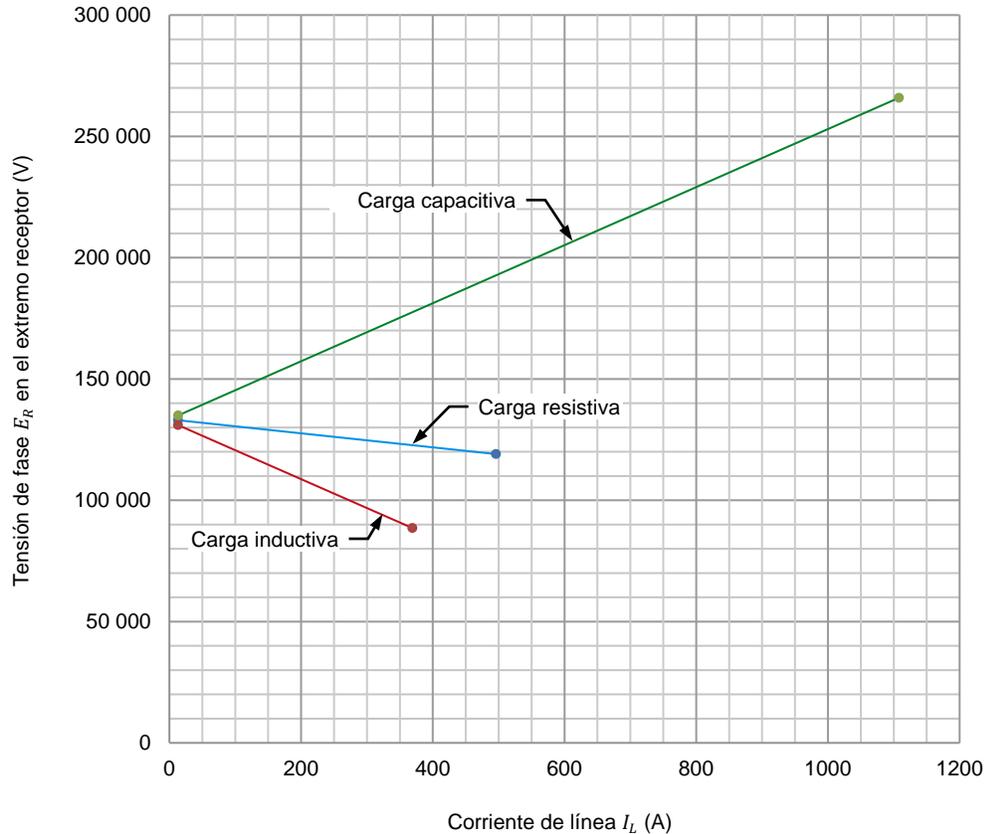


Figura 9. Tensión de fase E_R calculada en el extremo receptor de la línea de transmisión ca de la figura 8 en función de la corriente de línea I_L para cargas resistivas, inductivas y capacitivas.

Cálculos de tensión para una carga inductiva

Cuando la línea de transmisión ca de la figura 8 se conecta a una carga inductiva cuya reactancia inductiva $X_{L,carga}$ es de $10\,000\ \Omega$, la tensión del receptor E_R puede calcularse de la siguiente manera:

$$Z = X_T = X_L + X_{L,carga} = 120\ \Omega + 10\,000\ \Omega = 10\,120\ \Omega$$

$$I_L = E_E / Z = 133\,000\ \text{V} / 10\,120\ \Omega = 13,1\ \text{A}$$

$$E_R = I_L \times X_{L,carga} = 13,1\ \text{A} \times 10\,000\ \Omega = 131\,000\ \text{V}$$

Cuando la reactancia inductiva $X_{L,carga}$ de la carga inductiva es igual a $240\ \Omega$, la tensión del receptor E_R puede calcularse de la siguiente manera:

$$Z = X_T = X_L + X_{L,carga} = 120\ \Omega + 240\ \Omega = 360\ \Omega$$

$$I_L = E_E / Z = 133\,000\ \text{V} / 360\ \Omega = 369\ \text{A}$$

$$E_R = I_L \times X_{L,carga} = 369\ \text{A} \times 240\ \Omega = 88\,560\ \text{V}$$

Como puede verse, la tensión del receptor E_R se reduce en 42 440 V (131 000 V – 88 560 V) cuando la corriente de línea I_L aumenta de 13,1 A a 369 A. La tensión del receptor E_R y la corriente de línea I_L calculadas para la carga inductiva se representan en el gráfico de la figura 9. La tensión del receptor E_R para una carga inductiva es significativamente menor que la tensión del receptor E_R para una carga resistiva cuando la corriente de línea I_L aumenta.

Cálculos de tensión para una carga capacitiva

Cuando la línea de transmisión ca de la figura 8 se conecta a una carga capacitiva cuya reactancia capacitiva $X_{C,carga}$ es de 10 000 Ω , la tensión del receptor E_R puede calcularse de la siguiente manera:

$$Z = X_T = X_L - X_{C,carga} = 120 \Omega - 10\,000 \Omega = -9880 \Omega = 9880 \Omega$$

$$I_L = E_E / Z = 133\,000 \text{ V} / 9880 \Omega = 13,5 \text{ A}$$

$$E_R = I_L \times X_{C,carga} = 13,5 \text{ A} \times 10\,000 \Omega = 135\,000 \text{ V}$$

Cuando la reactancia capacitiva $X_{C,carga}$ de la carga capacitiva es igual a 240 Ω , la tensión del receptor E_R puede calcularse de la siguiente manera:

$$Z = X_T = X_L - X_{C,carga} = 120 \Omega - 240 \Omega = -120 \Omega = 120 \Omega$$

$$I_L = E_E / Z = 133\,000 \text{ V} / 120 \Omega = 1108 \text{ A}$$

$$E_R = I_L \times X_{C,carga} = 1108 \text{ A} \times 240 \Omega = 265\,920 \text{ V}$$

Como puede verse, la tensión del receptor E_R aumenta en 130 920 V (265 920 V – 135 000 V) cuando la corriente de línea I_L aumenta de 13,5 A a 1108 A. La tensión del receptor E_R y la corriente de línea I_L calculadas para la carga capacitiva se representan en el gráfico de la figura 9. La tensión del receptor E_R para una carga capacitiva es significativamente mayor que la tensión del receptor E_R para una carga resistiva cuando la corriente de línea I_L aumenta.

Regulación de tensión de líneas de transmisión ca

La **regulación de tensión** de una línea de transmisión ca indica el grado de variación en la tensión del receptor E_R que ocurre cuando varía la carga conectada a la línea de transmisión ca. Como se ha visto en el apartado anterior, la característica de regulación de tensión de una línea de transmisión ca depende del tipo de carga en el extremo receptor de la línea, así como del valor de la reactancia inductiva X_L de dicha línea.

La regulación de tensión de una línea de transmisión ca puede calcularse mediante la ecuación (1). Como muestra la ecuación, cuanto menor es el valor de la regulación de tensión de una línea de transmisión ca, mejor es la regulación, es decir, menor es la variación de la tensión del receptor E_R cuando varía la carga conectada a la línea de transmisión ca.

$$\text{Regulación de tensión (\%)} = \frac{E_{SC} - E_{PC}}{E_{PC}} \times 100\% \quad (1)$$

donde E_{SC} es la tensión sin carga (en vacío) en el extremo receptor de la línea de transmisión ca, expresada en voltios (V).

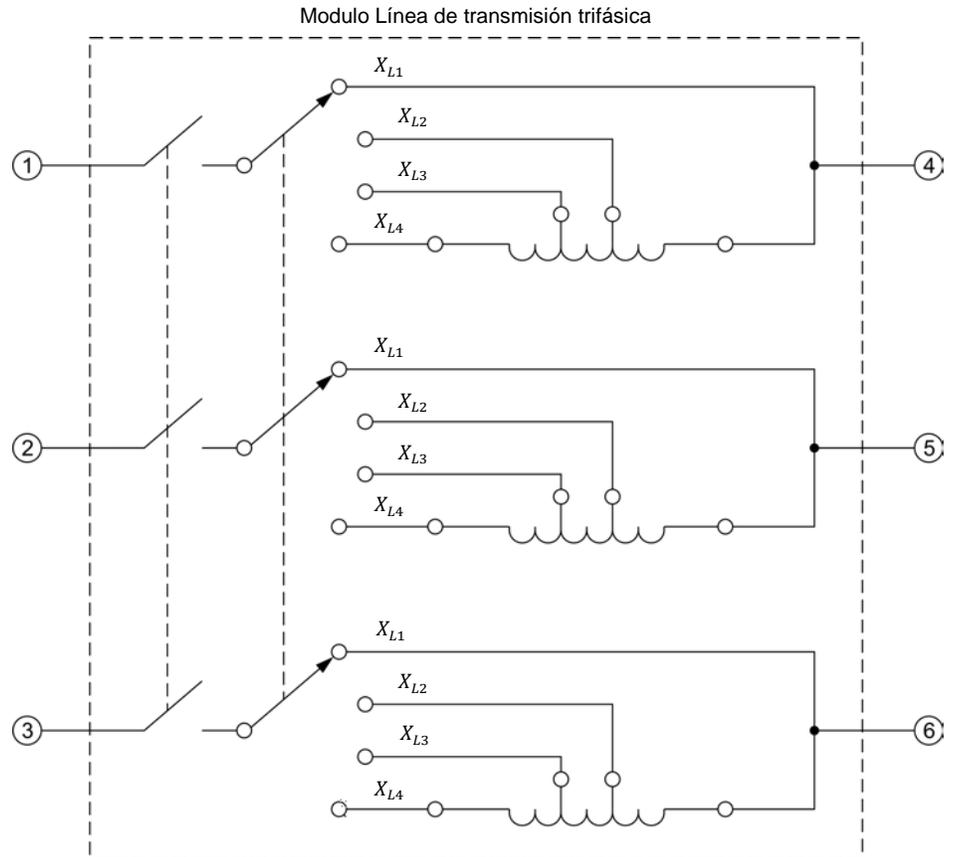
E_{PC} es la tensión a plena carga en el extremo receptor de la línea de transmisión ca, expresada en voltios (V).

En general, las líneas de transmisión ca suelen operar casi a la corriente de plena carga (es decir, corriente nominal) y con una carga resistiva. No obstante, si por alguna razón la carga conectada a una línea de transmisión ca se retira o disminuye considerablemente, es importante que dicha línea tenga una buena regulación de tensión (es decir, un valor de regulación de tensión lo más bajo posible) a fin de minimizar el aumento de tensión en el extremo receptor de la línea. Esto evita que se desarrolle una tensión demasiado alta en el extremo receptor de la línea de transmisión ca que podría disparar la protección contra sobretensión o causar fallas en el equipo. Tener una buena regulación de tensión (de bajo valor) también es deseable porque minimiza las fluctuaciones de tensión en el extremo receptor de la línea de transmisión ca cuando varía la carga.

Introducción al módulo Línea de transmisión trifásica

El módulo Línea de transmisión trifásica tiene esencialmente las mismas propiedades eléctricas que una línea de transmisión ca simplificada representada por tres inductores (uno por fase). La longitud de la línea de transmisión ca simplificada representada por el módulo puede cambiarse variando la reactancia de los inductores en el módulo mediante el selector de reactancia inductiva en el panel frontal del módulo. Cuanto mayor sea la reactancia inductiva seleccionada, mayor será la longitud de la línea de transmisión ca simplificada que representa el módulo Línea de transmisión trifásica. La reactancia inductiva de las líneas de transmisión ca aéreas que funcionan a una frecuencia de 50 Hz suele estar entre 0,25 Ω /km (0,40 Ω /milla) y 0,42 Ω /km (0,68 Ω /milla), mientras que la reactancia inductiva de las líneas de transmisión ca aéreas que funcionan a una frecuencia de 60 Hz suele estar entre 0,30 Ω /km (0,48 Ω /milla) y 0,50 Ω /km (0,80 Ω /milla). Esto es cierto sin importar la tensión de línea a través de la línea de transmisión ca o la potencia activa que transmite la línea.

La figura 10 muestra el circuito equivalente del módulo Línea de transmisión trifásica. La tabla de la figura 10 muestra los valores de reactancia inductiva X_{L1} , X_{L2} , X_{L3} y X_{L4} que pueden obtenerse con el módulo Línea de transmisión trifásica a diferentes tensiones y frecuencias de la red de alimentación ca local.



Red de alimentación ca local		Reactancia inductiva (Ω)			
Tensión (V)	Frecuencia (Hz)	X_{L1}	X_{L2}	X_{L3}	X_{L4}
120	60	0	60	120	180
220	50	0	200	400	600
240	50	0	200	400	600
220	60	0	200	400	600

Figura 10. Circuito equivalente del módulo Línea de transmisión trifásica.

RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO

El Procedimiento consta de las secciones siguientes:

- Montaje y conexiones
- Características de regulación de tensión de una línea de transmisión ca simplificada para cargas resistivas, inductivas y capacitivas

PROCEDIMIENTO



En este ejercicio se trabaja con altas tensiones. No haga ni modifique ninguna conexión con las fichas tipo banana cuando la alimentación esté encendida, a menos que se especifique lo contrario.

Montaje y conexiones

En esta sección, usted conectará un circuito que incluye una línea de transmisión ca simplificada que suministra energía a una carga resistiva trifásica. Después, ajustará el equipo de medición para estudiar las características de regulación de tensión de la línea de transmisión ca simplificada.

1. Consulte en el Apéndice A la Tabla de utilización del equipo, a fin de obtener la lista de los equipos necesarios para realizar este ejercicio.

Instale el equipo requerido en el [Puesto de trabajo](#).

2. Asegúrese de que los interruptores de alimentación ca y cc de la [Fuente de alimentación](#) estén en la posición O (apagado), después conecte dicha fuente a una toma ca trifásica.

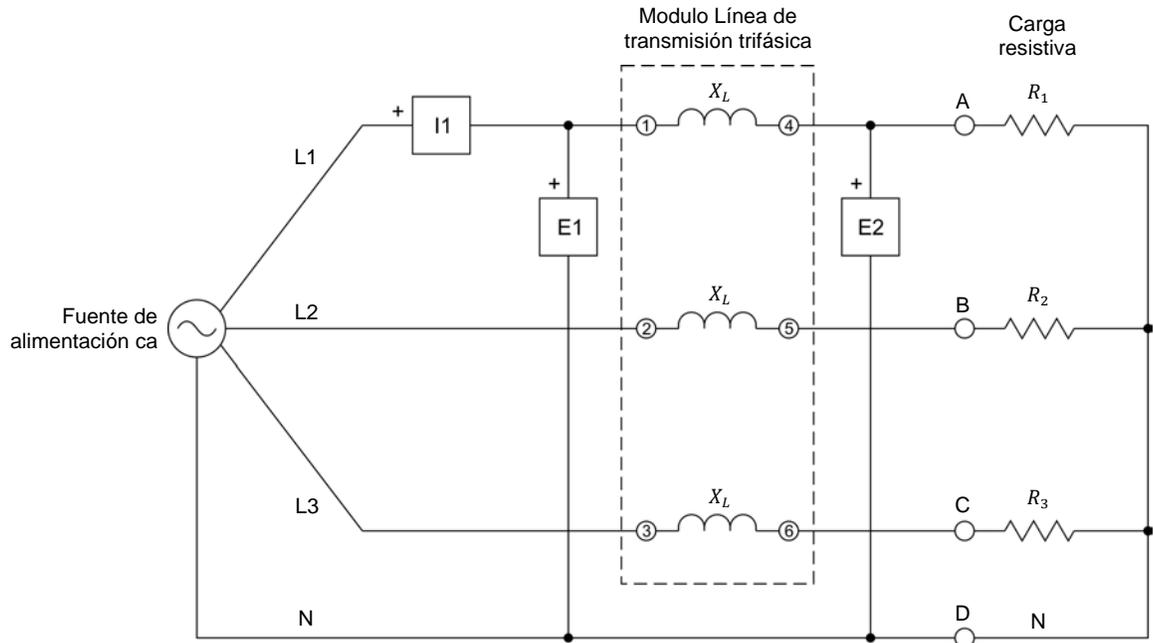
Conecte la entrada [Alimentación](#) de la [Interfaz de adquisición de datos y de control](#) a una fuente de alimentación ca de 24 V. Encienda la fuente de alimentación ca de 24 V.

3. Conecte el Puerto USB de la [Interfaz de adquisición de datos y de control](#) a un puerto USB de la computadora.

4. Encienda la computadora e inicie el software [LVDAC-EMS](#).

En la ventana Arranque de [LVDAC-EMS](#), asegúrese de que la [Interfaz de adquisición de datos y de control](#) haya sido detectada. Asegúrese de que en la [Interfaz de adquisición de datos y de control](#) esté disponible la función [Instrumentación computarizada](#). Seleccione la tensión y frecuencia de la red correspondientes a la tensión y frecuencia de su red eléctrica ca local, y después haga clic en el botón [Aceptar](#) para cerrar la ventana [Arranque de LVDAC-EMS](#).

5. Conecte el equipo como se muestra en la figura 11. Utilice una sección de resistores del módulo **Carga resistiva** para implementar cada uno de los resistores R_1 , R_2 y R_3 .



Red de alimentación ca local		Reactancia inductiva de línea X_L (Ω)	R_1, R_2, R_3 (Ω)
Tensión (V)	Frecuencia (Hz)		
120	60	120	∞
220	50	400	∞
240	50	400	∞
220	60	400	∞

Figura 11. Línea de transmisión ca simplificada conectada a una carga resistiva trifásica.



El valor de la reactancia inductiva de línea, así como el de las cargas resistivas, inductivas y capacitivas que se utilizan en los circuitos de este manual dependen de la tensión y frecuencia de la red de alimentación ca local. Siempre que sea necesario, una tabla debajo del diagrama de circuito indica el valor de cada componente para tensiones de 120 V, 220 V y 240 V, y frecuencias de 50 Hz y 60 Hz de la red ca local. Asegúrese de utilizar los valores del componente que corresponden a la tensión y frecuencia de su red ca local.

6. En la **Línea de transmisión trifásica**, asegúrese de que el interruptor de palanca I/O esté en la posición I, después ajuste el selector de reactancia inductiva al valor que se indica en la tabla de la figura 11.

En la **Carga resistiva**, abra todos los interruptores para que la resistencia de la carga R_{Carga} sea infinita.

Property of Festo Didactic

Sale and/or reproduction forbidden

7. En LVDAC-EMS, abra la ventana [Aparatos de medición](#). Realice los ajustes necesarios para medir los valores eficaces (ca) de la tensión del emisor E_E y de la tensión del receptor E_R (entradas $E1$ y $E2$, respectivamente), así como de la corriente de línea I_L (entrada $I1$). Ajuste los medidores en el modo de regeneración continua.

Características de regulación de tensión de una línea de transmisión ca simplificada para cargas resistivas, inductivas y capacitivas

En esta sección, usted medirá la tensión del emisor de la línea de transmisión ca simplificada y se asegurará de que es igual al valor nominal. Usted registrará la tensión del receptor y la corriente de línea de la línea de transmisión ca simplificada mientras varía la resistencia de la carga resistiva trifásica. Después, sustituirá la carga resistiva por una carga inductiva trifásica y registrará la tensión del receptor, así como la corriente de línea de la línea de transmisión ca simplificada mientras varía la reactancia de la carga inductiva. Finalmente, sustituirá la carga inductiva por una carga capacitiva trifásica, y registrará la tensión del receptor y la corriente de línea de la línea de transmisión ca simplificada mientras varía la reactancia de la carga capacitiva. En el mismo gráfico, usted representará las características de regulación de tensión de la línea de transmisión ca simplificada para una carga resistiva, una carga inductiva y una carga capacitiva. Comparará las características de regulación de tensión resultantes.

Característica de regulación de tensión cuando la línea de transmisión ca simplificada está conectada a una carga resistiva

8. En la [Fuente de alimentación](#), encienda la fuente de alimentación ca trifásica.
9. Mida la tensión en el extremo emisor E_E de la línea de transmisión ca simplificada. Registre el valor a continuación.

Tensión del emisor $E_E = \underline{\hspace{2cm}}$ V

¿Es la tensión en el extremo emisor E_E de la línea de transmisión ca simplificada prácticamente igual a la tensión de la red de alimentación ca?

Sí No

10. En LVDAC-EMS, abra la ventana [Tabla de datos](#).

Ajuste la [Tabla de datos](#) para registrar la tensión del receptor E_R y la corriente de línea I_L que figuran en la ventana [Aparatos de medición](#).

En la [Tabla de datos](#), haga clic en el botón [Registrar datos](#) para registrar los valores de la tensión del receptor E_R y de la corriente de línea I_L .

11. Ajuste la resistencia de los resistores R_1 , R_2 y R_3 sucesivamente a cada uno de los valores de la tabla 1 (los valores de resistencia por utilizar dependen de la tensión y frecuencia de la red de alimentación ca local). Para cada valor de resistencia, registre los parámetros de la línea de transmisión ca simplificada en la [Tabla de datos](#).

Tabla 1. Valores de resistencia utilizados para obtener las características de regulación de tensión de la línea de transmisión ca simplificada.

Red de alimentación ca local		R_1, R_2, R_3 (Ω)						
Tensión (V)	Frecuencia (Hz)							
120	60	1200	600	400	300	240	200	171
220	50	4400	2200	1467	1100	880	733	629
240	50	4800	2400	1600	1200	960	800	686
220	60	4400	2200	1467	1100	880	733	629



El Apéndice C enumera los ajustes necesarios de los interruptores de la *Carga resistiva*, la *Carga inductiva* y la *Carga capacitiva* para obtener diferentes valores de resistencia (o de reactancia).

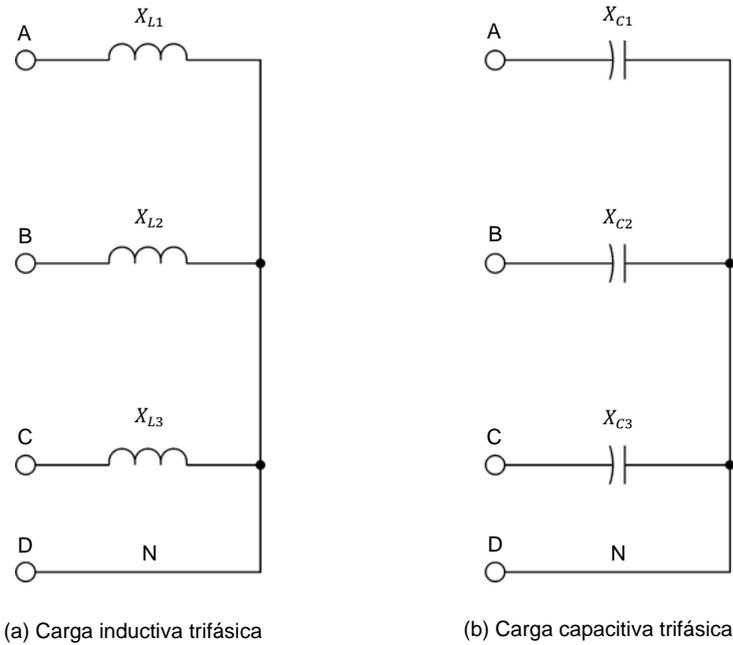
12. En la [Fuente de alimentación](#), apague la fuente de alimentación ca trifásica.
13. En la ventana [Tabla de datos](#), guarde los datos registrados.
14. Borre los datos registrados previamente en la [Tabla de datos](#), pero no elimine los ajustes del registro de datos.

Característica de regulación de tensión cuando la línea de transmisión ca simplificada está conectada a una carga inductiva

15. Retire la carga resistiva trifásica del circuito de la figura 11 desconectando la carga en los puntos A, B, C y D.

Añada la carga inductiva trifásica de la figura 12a al circuito conectando los puntos A, B, C y D de la carga a los puntos correspondientes en el circuito.

16. En la [Carga inductiva](#), abra todos los interruptores para que la reactancia de los inductores de carga (X_{L1} , X_{L2} y X_{L3}) sea infinita.



Red de alimentación ca local		X_{L1}, X_{L2}, X_{L3} X_{C1}, X_{C2}, X_{C3} (Ω)
Tensión (V)	Frecuencia (Hz)	
120	60	∞
220	50	∞
240	50	∞
220	60	∞

Figura 12. Cargas inductivas y capacitivas trifásicas utilizadas para estudiar las características de regulación de tensión de la línea de transmisión ca simplificada.

17. En la Fuente de alimentación, encienda la fuente de alimentación ca trifásica.
18. En la ventana *Tabla de datos*, haga clic en el botón *Registrar datos* para registrar los valores de la tensión del receptor E_R y de la corriente de línea I_L .

19. Ajuste la reactancia de los inductores de carga sucesivamente a cada uno de los valores de la tabla 2 (los valores de reactancia inductiva por utilizar dependen de la tensión y frecuencia de la red de alimentación ca local). Para cada valor de reactancia inductiva, registre los parámetros de la línea de transmisión ca simplificada en la [Tabla de datos](#).

Tabla 2. Valores de reactancia inductiva utilizados para obtener las características de regulación de tensión de la línea de transmisión ca simplificada.

Red de alimentación ca local		X_{L1}, X_{L2}, X_{L3}						
Tensión (V)	Frecuencia (Hz)	(Ω)						
120	60	1200	600	400	300	240	200	171
220	50	4400	2200	1467	1100	880	733	629
240	50	4800	2400	1600	1200	960	800	686
220	60	4400	2200	1467	1100	880	733	629

20. En la [Fuente de alimentación](#), apague la fuente de alimentación ca trifásica.
21. En la ventana [Tabla de datos](#), guarde los datos registrados.
22. Borre los datos registrados previamente en la [Tabla de datos](#), pero no elimine los ajustes del registro de datos.

Característica de regulación de tensión cuando la línea de transmisión ca simplificada está conectada a una carga capacitiva

23. Retire la carga inductiva trifásica del circuito de la figura 11 desconectando la carga en los puntos A, B, C y D.

Añada la carga capacitiva trifásica de la figura 12b al circuito conectando los puntos A, B, C y D de la carga a los puntos correspondientes en el circuito.

24. En la [Carga capacitiva](#), abra todos los interruptores para que la reactancia de los condensadores de carga (X_{C1} , X_{C2} y X_{C3}) sea infinita.
25. En la [Fuente de alimentación](#), encienda la fuente de alimentación ca trifásica.
26. En la ventana [Tabla de datos](#), haga clic en el botón [Registrar datos](#) para registrar los valores de la tensión del receptor E_R y de la corriente de línea I_L .

27. Ajuste la reactancia de los condensadores de carga sucesivamente a cada uno de los valores de la tabla 3 (los valores de reactancia capacitiva por utilizar dependen de la tensión y frecuencia de la red de alimentación ca local). Para cada valor de reactancia capacitiva, registre los parámetros de la línea de transmisión ca simplificada en la [Tabla de datos](#).

ATENCIÓN

Es importante que no disminuya la reactancia de los condensadores de carga por debajo del valor más bajo que se indica en la tabla 3 correspondiente a la tensión y frecuencia de la red de alimentación ca local. De lo contrario, la tensión a través de los condensadores de carga excederá los valores nominales de la [Carga capacitiva](#), lo que puede dañar el módulo.

Tabla 3. Valores de reactancia capacitiva utilizados para obtener las características de regulación de tensión de la línea de transmisión ca simplificada.

Red de alimentación ca local		X_{C1}, X_{C2}, X_{C3} (Ω)	X_{C1}, X_{C2}, X_{C3} (Ω)	X_{C1}, X_{C2}, X_{C3} (Ω)
Tensión (V)	Frecuencia (Hz)			
120	60	1200	600	400
220	50	4400	2200	1467
240	50	4800	2400	1600
220	60	4400	2200	1467

28. En la [Fuente de alimentación](#), apague la fuente de alimentación ca trifásica.
29. En la ventana [Tabla de datos](#), guarde los datos registrados.

Transfiera a una aplicación de hoja de cálculo los datos que ha guardado y, después, trace las curvas de la tensión del receptor E_R en función de la corriente de línea I_L (características de regulación de tensión) medida cuando la línea de transmisión ca simplificada se conecta a una carga resistiva, una carga inductiva y una carga capacitiva. Traza las tres curvas en el mismo gráfico.

30. Compare las características de regulación de tensión que trazó en el paso anterior para los diferentes tipos de carga conectadas a la línea de transmisión ca simplificada.

31. Calcule la regulación de tensión de la línea de transmisión ca simplificada para cada tipo de carga (resistiva, inductiva y capacitiva). La tensión sin carga (en vacío) E_{SC} corresponde al valor de tensión sin carga que usted registró (cuando la corriente de línea I_L es cercana a 0 A). La tensión a plena carga E_{PC} puede estimarse utilizando las características de regulación de tensión que usted ha trazado en el paso 29, determinando para ello el valor de tensión del receptor correspondiente a la corriente a plena carga de la línea de transmisión ca simplificada para cada tipo de carga. La corriente a plena carga de la línea de transmisión ca simplificada depende de la tensión y frecuencia de la red de alimentación ca local, como se indica en la Tabla 4.

Tabla 4. Corriente a plena carga de la línea de transmisión ca.

Red de alimentación ca local		Corriente a plena carga (A)
Tensión (V)	Frecuencia (Hz)	
120	60	0,33
220	50	0,18
240	50	0,20
220	60	0,18

Regulación de tensión con carga resistiva = _____%

Regulación de tensión con carga inductiva = _____%

Regulación de tensión con carga capacitiva = _____%

32. Cierre **LVDAC-EMS** y después apague todos los equipos. Desconecte todos los conductores y devuélvalos a su sitio de almacenamiento.

CONCLUSIÓN

En este ejercicio, usted se familiarizó con el circuito equivalente de una línea de transmisión ca simplificada. También se familiarizó con la característica de regulación de tensión de una línea de transmisión ca simplificada cuando esta se conecta a una carga resistiva, inductiva o capacitiva. Se le presentó el concepto de regulación de tensión en las líneas de transmisión ca. Aprendió a determinar la regulación de tensión de una línea de transmisión ca.

PREGUNTAS DE REVISIÓN

1. ¿Cuál es el propósito principal de las líneas de transmisión ca? ¿Qué elemento de una red de alimentación ca está inmediatamente antes de las líneas de transmisión ca y qué elemento está inmediatamente después?

2. Complete la figura siguiente que representa el circuito equivalente simplificado de una fase de una línea de transmisión ca.



Circuito equivalente simplificado de una fase de una línea de transmisión ca.

3. ¿Qué sucede con la tensión del receptor E_R de una línea de transmisión ca simplificada que se conecta a una carga capacitiva a medida que aumenta la corriente de la línea I_L ?

4. ¿Qué sucede con la tensión del receptor E_R de una línea de transmisión ca simplificada que se conecta a una carga resistiva a medida que aumenta la corriente de la línea I_L ? ¿Qué sucede si la línea de transmisión ca simplificada se conecta a una carga inductiva en vez de a una carga resistiva?

5. Considere dos líneas de transmisión ca: las tensiones en vacío y a plena carga en la primera línea son iguales a 244 kV y 230 kV, respectivamente, mientras que las tensiones en vacío y a plena carga en la segunda línea son iguales a 765 kV y 735 kV, respectivamente. ¿Cuál de las dos líneas de transmisión ca tiene la mejor regulación de tensión? Explique brevemente.

Property of Festo Didactic
Sale and/or reproduction forbidden

Características de una línea de transmisión ca de alta tensión

OBJETIVO DEL EJERCICIO Cuando haya completado este ejercicio, estará familiarizado con el circuito equivalente PI corregido de una línea de transmisión ca de alta tensión. También estará familiarizado con la tensión del receptor sin carga y la característica de regulación de tensión de una línea de transmisión ca de alta tensión. Podrá definir y calcular dos características importantes de una línea de transmisión ca de alta tensión: la impedancia característica Z_0 y la carga natural P_0 . Podrá describir la característica completa de regulación de tensión (curva de potencia-tensión) de una línea de transmisión ca de alta tensión, es decir, para operación sin carga hasta un cortocircuito en el extremo receptor de la línea.

RESUMEN DE LOS PRINCIPIOS

Los Principios de este ejercicio cubren los siguientes puntos:

- Circuito equivalente PI corregido de una línea de transmisión ca de alta tensión
- Circuito equivalente PI no corregido de una línea de transmisión ca de alta tensión
- Tensión del receptor sin carga y característica de regulación de tensión de una línea de transmisión ca de alta tensión.
- Impedancia característica Z_0 y carga natural P_0 de una línea de transmisión ca de alta tensión
- Curva de potencia-tensión de una línea de transmisión ca de alta tensión

PRINCIPIOS

Circuito equivalente PI corregido de una línea de transmisión ca de alta tensión

Como se indicó en el apartado Principios del Ejercicio 1, el circuito eléctrico equivalente de un segmento corto (por ejemplo, 1 km o 1 milla) de una línea de transmisión ca de alta tensión consiste en una resistencia, un inductor y dos condensadores conectados como se muestra en la figura 13. Los componentes de esta figura representan la resistencia R , la reactancia inductiva X_L y la reactancia capacitiva X_C de la línea de transmisión ca. Estos tres parámetros son características eléctricas fundamentales de toda línea de transmisión ca de alta tensión. Estas características suelen expresarse en ohmios por kilómetro (Ω/km) o en ohmios por milla (Ω/milla). En consecuencia, los valores de la resistencia y de la reactancia inductiva del resistor y del inductor en el circuito equivalente de la figura 13 son iguales a la resistencia R y a la reactancia inductiva X_L de la línea de transmisión ca, respectivamente. Por otra parte, puesto que dos condensadores conectados en derivación se utilizan en el circuito equivalente de la figura 13 para representar la reactancia capacitiva de la línea de transmisión ca, la reactancia capacitiva de cada condensador es igual al doble de la reactancia capacitiva X_C de la línea de transmisión ca. Los valores de las características eléctricas fundamentales R , X_L y X_C de la línea de transmisión de la figura 13 son típicos de una línea de transmisión ca de alta tensión.

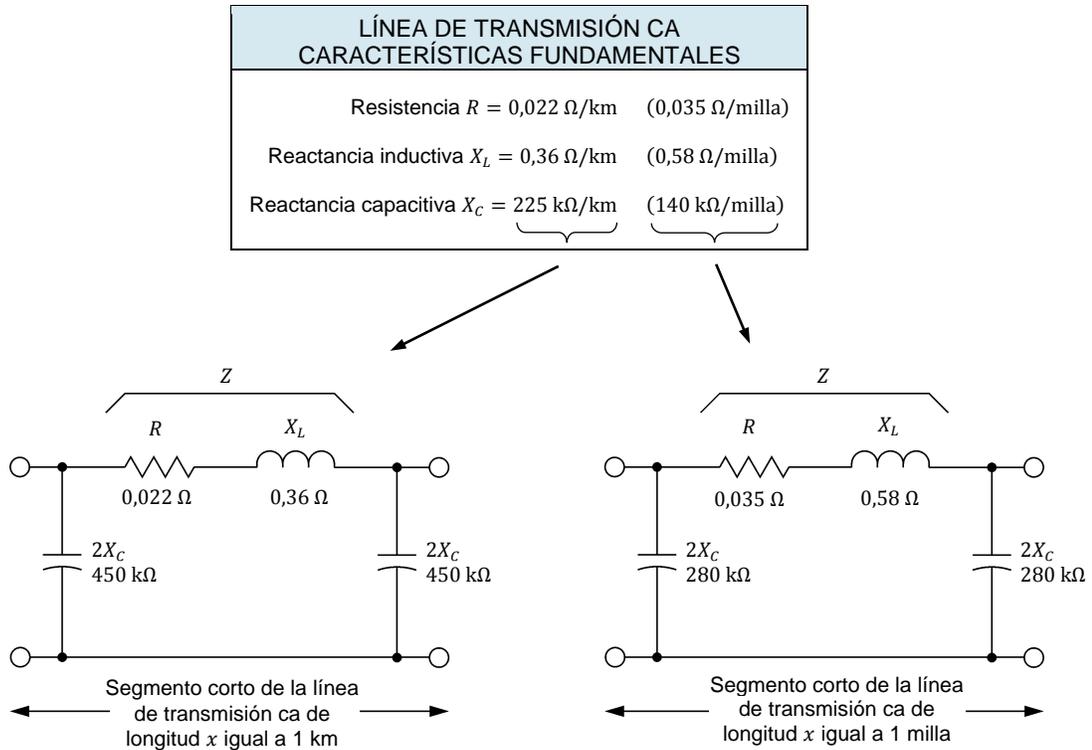


Figura 13. Circuito equivalente de un segmento corto de una línea de transmisión ca de alta tensión (315 kV) típica (una sola fase).

El circuito equivalente de la figura 13 debe repetirse tantas veces como sea necesario para obtener el circuito equivalente de parámetros distribuidos de la línea de transmisión ca completa, como se muestra en la figura 14. Por ejemplo, el circuito se repite 250 veces para obtener el circuito equivalente de parámetros distribuidos de una línea de 250 km o de una línea de 250 millas.

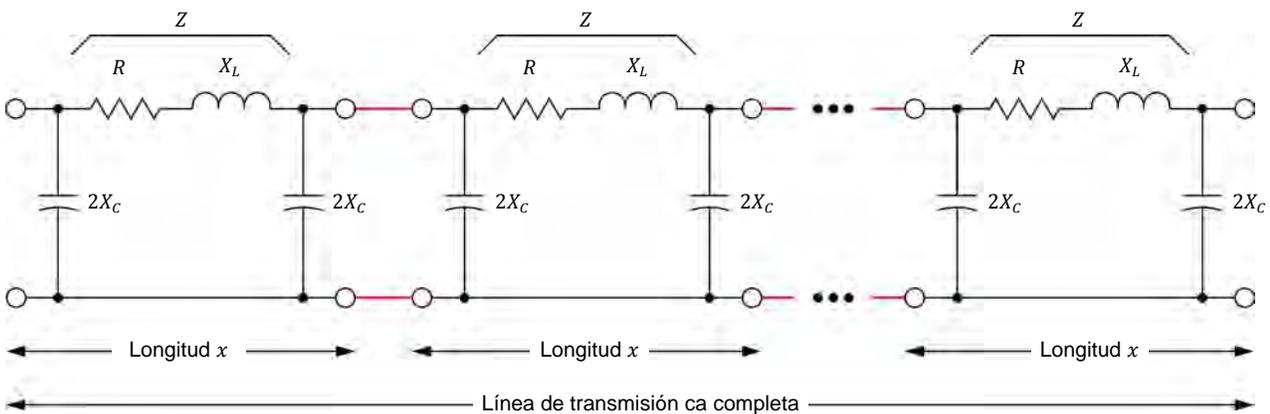
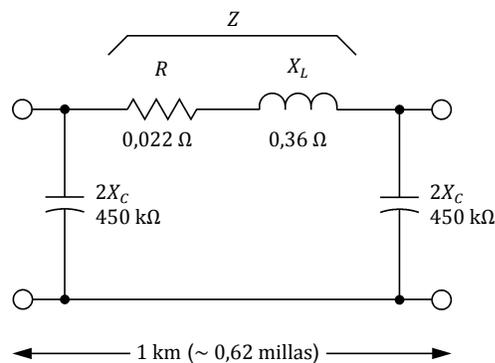


Figura 14. Circuito equivalente de parámetros distribuidos de una línea de transmisión ca de alta tensión (una sola fase).

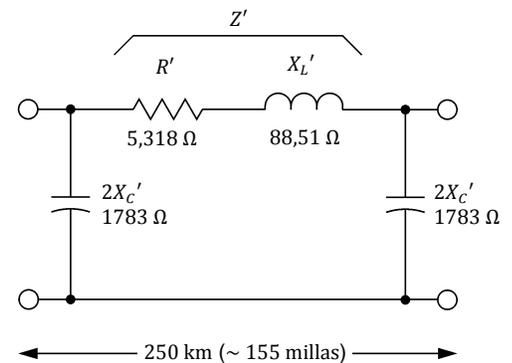
El circuito equivalente de parámetros distribuidos de una línea de transmisión ca de alta tensión que se muestra en la figura 14 es una representación exacta de una línea de transmisión ca, y reproduce completamente sus características y comportamiento eléctrico. Sin embargo, este circuito equivalente no es muy adecuado para el estudio de las líneas de transmisión ca porque resolverlo resulta complejo y lleva mucho tiempo. Afortunadamente, los cálculos matemáticos, que están más allá del alcance de este manual, permiten que el circuito equivalente de parámetros distribuidos de toda línea de transmisión ca de alta tensión se reduzca a un circuito equivalente de parámetros concentrados con la misma configuración (que recuerda a la letra griega π) que el circuito equivalente de un segmento corto de la línea de transmisión ca. Este circuito equivalente de parámetros concentrados se conoce comúnmente como el **circuito equivalente PI (π) corregido** de la línea de transmisión ca. La figura 15 muestra las características fundamentales de una línea de transmisión ca de alta tensión, el circuito equivalente de un segmento corto de esta línea de transmisión, así como su circuito equivalente PI corregido para una longitud de 250 km (unas 155 millas).

LÍNEA DE TRANSMISIÓN CA CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES	
Resistencia $R = 0,022 \Omega/\text{km}$	(0,035 Ω/milla)
Reactancia inductiva $X_L = 0,36 \Omega/\text{km}$	(0,58 Ω/milla)
Reactancia capacitiva $X_C = 225 \text{ k}\Omega/\text{km}$	(140 $\text{k}\Omega/\text{milla}$)

(a) Características fundamentales de la línea de transmisión ca



(b) Circuito equivalente de un segmento corto de la línea de transmisión



(c) Circuito equivalente PI corregido de la línea de transmisión

Figura 15. Características fundamentales de una línea de transmisión ca de alta tensión (315 kV), circuito equivalente (una sola fase) de un segmento corto y circuito equivalente PI corregido (una sola fase) de esta línea de transmisión para una longitud de 250 km (unas 155 millas).

Observe que la resistencia R' del resistor en el circuito equivalente PI corregido (figura 15c) de la línea de transmisión no es exactamente igual a 250 veces la resistencia R del resistor en el circuito equivalente (figura 15b) de un segmento corto de la línea de transmisión. Del mismo modo, la reactancia inductiva X_L' del inductor en el circuito equivalente PI corregido (figura 15c) de la línea de transmisión no es exactamente igual a 250 veces la reactancia inductiva X_L del inductor en el circuito equivalente (figura 15b) de un segmento corto de la línea de transmisión. Además, la reactancia capacitiva $2X_C'$ de los condensadores en el circuito equivalente PI corregido (figura 15c) de la línea de transmisión no es exactamente igual a la reactancia capacitiva $2X_C$ de los condensadores en el circuito equivalente (figura 15b) de un segmento corto de la línea de transmisión dividida por 250.

Aunque simple, el circuito equivalente PI corregido de la línea de transmisión ca de la figura 15c funciona como 250 circuitos equivalentes de un segmento corto de esta línea de transmisión ca conectados en serie. Más concretamente, la tensión y la corriente en los extremos emisor y receptor del circuito equivalente PI corregido de la línea de transmisión ca son las mismas que las que se obtienen en los extremos emisor y receptor de 250 circuitos equivalentes de un segmento corto de esta línea de transmisión ca conectados en serie. Las características y el comportamiento observado con el circuito equivalente PI corregido de una línea de transmisión ca, que son muy similares a los de las líneas de transmisión ca de alta tensión reales, difieren considerablemente de las características y el comportamiento observado con el circuito equivalente simplificado de parámetros concentrados de una línea de transmisión ca (es decir, un inductor en serie) que se utilizó en el Ejercicio 1.

Por último, tenga en cuenta que el circuito equivalente PI corregido de una línea de transmisión ca proporciona resultados muy exactos para longitudes de línea de hasta 625 km (aproximadamente 388 millas) cuando la frecuencia de la red de alimentación ca es de 60 Hz, y para longitudes de línea de hasta 750 km (aproximadamente 466 millas) cuando la frecuencia de la red de alimentación ca es de 50 Hz. Se puede obtener un circuito equivalente para toda línea de transmisión ca de mayor longitud que los límites anteriores dividiéndola en varios segmentos y representando estos segmentos por los correspondientes circuitos equivalentes PI corregidos conectados en serie. Por ejemplo, una línea de transmisión ca de 1200 km (unas 746 millas) puede dividirse en cuatro segmentos de 300 km (unas 186,5 millas) y representarse mediante cuatro circuitos equivalentes PI corregidos de una línea de 300 km (unas 186,5 millas) conectados en serie.

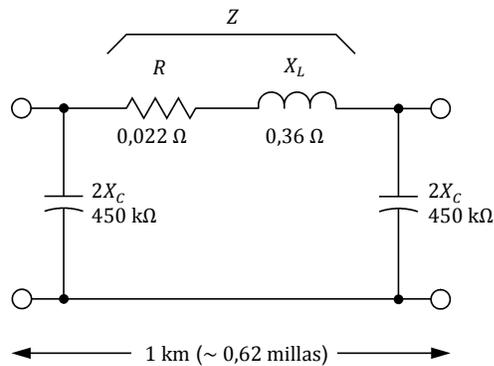
Circuito equivalente PI no corregido de una línea de transmisión ca de alta tensión

También se puede obtener un circuito equivalente PI no corregido de parámetros concentrados de una línea de transmisión ca. Este circuito equivalente proporciona resultados muy exactos para longitudes de línea inferiores a unos 50 km (unas 30 millas). El circuito equivalente PI no corregido se obtiene multiplicando la resistencia R del resistor y la reactancia X_L del inductor en el circuito equivalente de un segmento corto de la línea de transmisión por el número de segmentos de línea en la línea, y dividiendo la reactancia $2X_C$ de los condensadores en el circuito equivalente de un segmento corto de la línea de transmisión por el número de segmentos de línea en la línea. La figura 16 muestra las características fundamentales de una línea de transmisión ca de alta

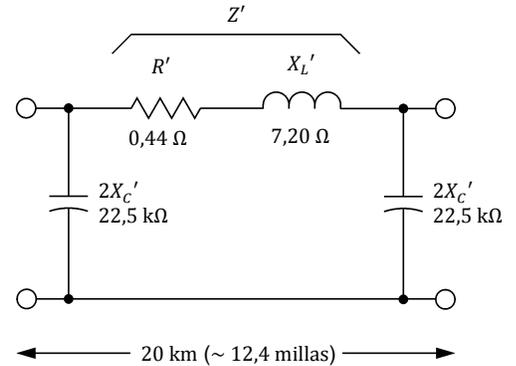
tensión, el circuito equivalente de un segmento corto de esta línea de transmisión, así como su circuito equivalente PI no corregido para una longitud de 20 km (unas 12,4 millas).

LÍNEA DE TRANSMISIÓN CA CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES	
Resistencia $R = 0,022 \Omega/\text{km}$	(0,035 Ω/milla)
Reactancia inductiva $X_L = 0,36 \Omega/\text{km}$	(0,58 Ω/milla)
Reactancia capacitiva $X_C = 225 \text{ k}\Omega/\text{km}$	(140 $\text{k}\Omega/\text{milla}$)

(a) Características fundamentales de la línea de transmisión ca



(b) Circuito equivalente de un segmento corto de la línea de transmisión



(c) Circuito equivalente PI no corregido de la línea de transmisión

Figura 16. Características fundamentales de una línea de transmisión ca de alta tensión (315 kV), circuito equivalente (una sola fase) de un segmento corto y circuito equivalente PI no corregido (una sola fase) de esta línea de transmisión para una longitud de 20 km (unas 12,4 millas).

Tensión del receptor sin carga y característica de regulación de tensión de una línea de transmisión ca de alta tensión.

La figura 17 muestra la característica de regulación de tensión de una línea de transmisión ca de alta tensión para una carga resistiva. Al igual que en la línea de transmisión ca simplificada que se discutió en el Ejercicio 1, la tensión en el extremo receptor E_R de la línea de transmisión ca de alta tensión disminuye cuando la corriente de línea I_L aumenta (es decir, cuando la carga aumenta). No obstante, advierta que la tensión del receptor E_R excede la tensión del emisor E_E cuando no hay carga conectada al extremo receptor de la línea.

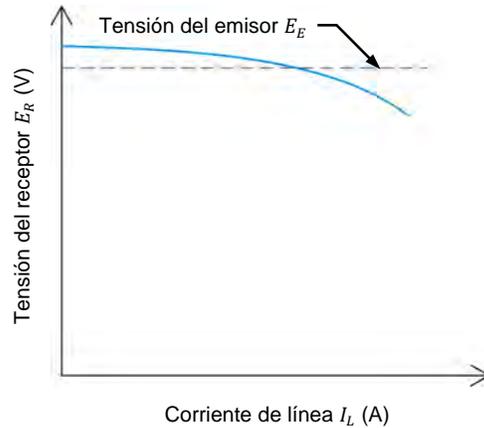


Figura 17. Característica de regulación de tensión de una línea de transmisión ca de alta tensión para una carga resistiva.

En la figura 18 se representa una línea de transmisión ca de alta tensión (representada por su circuito equivalente PI corregido) sin carga en el extremo receptor. La corriente fluye por la línea (a través del resistor R' , la reactancia inductiva X_L' , y la reactancia capacitiva X_C') incluso sin carga en el extremo receptor. Si no se considera el resistor R' en esta situación, la línea de transmisión ca de alta tensión puede representarse por una línea de transmisión ca simplificada (es decir, un inductor en serie) conectada en serie con una carga capacitiva, como se muestra en la figura 18. Una carga capacitiva conectada a una línea de transmisión ca simplificada hace que la tensión del receptor E_R exceda la tensión del emisor E_E , como se demuestra en el Ejercicio 1. Esto explica por qué la tensión del receptor E_R es mayor que la tensión del emisor E_E cuando no hay carga conectada al extremo receptor de una línea de transmisión ca.

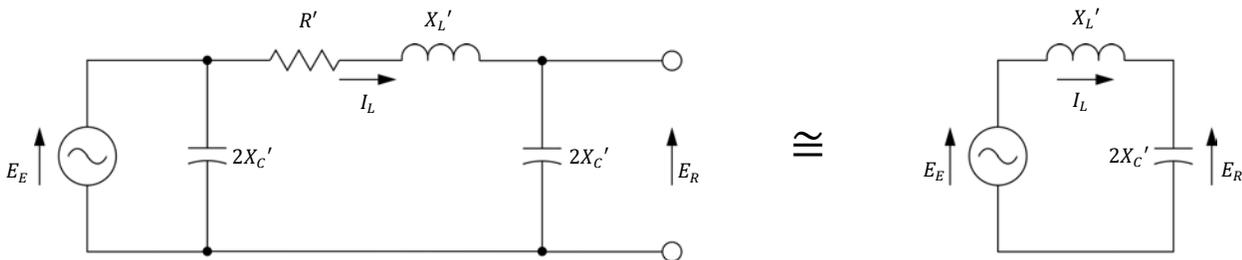
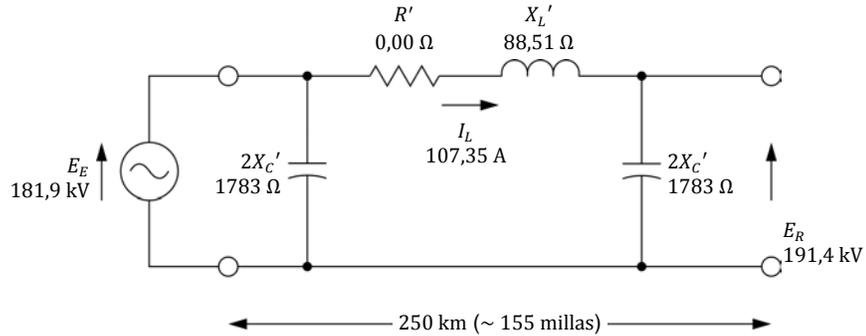


Figura 18. La tensión E_R es mayor que la tensión E_E cuando no se conecta ninguna carga al extremo receptor de una línea de transmisión ca, como cuando se conecta una línea de transmisión ca simplificada a una carga capacitiva. Se muestra una fase de la línea de transmisión ca.

Otra manera de explicar la sobretensión que ocurre cuando una línea de transmisión ca se deja abierta es comparando la potencia reactiva $Q_{L \text{ Línea}}$ debida a la inductancia de la línea con la potencia reactiva $Q_{C \text{ Línea}}$ debida a la capacitancia de la línea (véase la figura 19). En esta situación, la potencia reactiva $Q_{C \text{ Línea}}$ supera por mucho la potencia reactiva $Q_{L \text{ Línea}}$, como se muestra en la figura 19. El gran desequilibrio entre la potencia reactiva $Q_{C \text{ Línea}}$ y la potencia reactiva $Q_{L \text{ Línea}}$ es lo que hace que la tensión del receptor E_R supere a la tensión del emisor E_E .

Adviértase que se asume que en la línea de transmisión ca de la figura 19 no hay pérdidas (es decir, que la resistencia R' es igual a 0Ω).



$$Q_{C \text{ Línea}} = \frac{E_E^2}{2X_C'} + \frac{E_R^2}{2X_C'} = \frac{181,9 \text{ kV}^2}{1783 \Omega} + \frac{191,4 \text{ kV}^2}{1783 \Omega} = 39,1 \text{ Mvar}$$

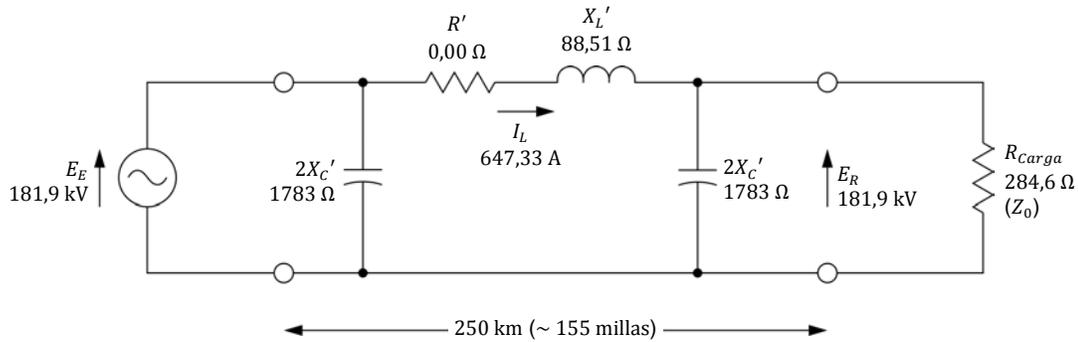
$$Q_{L \text{ Línea}} = X_L' \cdot I_L^2 = 88,51 \Omega \cdot 107,35 \text{ A}^2 = 1,02 \text{ Mvar}$$

Figura 19. La tensión E_R excede a la tensión E_E cuando no hay carga conectada al extremo receptor de una línea de transmisión ca, ya que la línea está muy desequilibrada ($Q_{C \text{ Línea}} \gg Q_{L \text{ Línea}}$). Se muestra una fase de una línea de transmisión ca de 315 kV (longitud de 250 km o unas 155 millas).

Impedancia característica Z_0 y carga natural P_0 de una línea de transmisión ca de alta tensión

Adviértase que se asume que en la línea de transmisión ca de la figura 20 no hay pérdidas (es decir, que la resistencia R' es igual a 0Ω).

La tensión en el extremo receptor E_R de una línea de transmisión ca de alta tensión conectada a una carga resistiva disminuye cuando la corriente de línea I_L aumenta (es decir, cuando la carga aumenta), como se mencionó en la sección anterior de esta discusión. En algún momento, la tensión E_R se vuelve igual a la tensión E_E a medida que la potencia reactiva $Q_{L \text{ Línea}}$ debida a la inductancia de la línea se vuelve igual a la potencia reactiva $Q_{C \text{ Línea}}$ debida a la capacitancia de la línea, como se muestra en la figura 20. En este punto en particular, se dice que la línea está naturalmente equilibrada.



$$Q_{C \text{ Línea}} = \frac{E_E^2}{2X_C'} + \frac{E_R^2}{2X_C'} = \frac{181,9 \text{ kV}^2}{1783 \Omega} + \frac{181,9 \text{ kV}^2}{1783 \Omega} = 37,1 \text{ Mvar}$$

$$Q_{L \text{ Línea}} = X_L' \cdot I_L^2 = 88,51 \Omega \cdot 647,33 \text{ A}^2 = 37,1 \text{ Mvar}$$

Figura 20. La tensión E_R iguala a la tensión E_E cuando el valor de la carga en el extremo receptor iguala a la impedancia característica Z_0 de la línea de transmisión ca, ya que la línea está naturalmente equilibrada (es decir, $Q_{C \text{ Línea}} = Q_{L \text{ Línea}}$). Se muestra una fase de una línea de transmisión ca de 315 kV (longitud de 250 km o unas 155 millas).

El valor de la impedancia de la carga (es decir, la resistencia en el caso de una carga estrictamente resistiva) que se requiere en el extremo receptor de una línea de transmisión ca para hacer que la tensión E_R iguale a la tensión E_E se conoce como la **impedancia característica** Z_0 . La impedancia característica Z_0 de una línea de transmisión ca también se denomina **impedancia de sobretensión**. El valor de la impedancia característica Z_0 depende de las características eléctricas fundamentales de la línea de transmisión ca y puede calcularse utilizando la ecuación (2).

$$Z_0 = \sqrt{X_L \cdot X_C} \quad (2)$$

donde X_L es la reactancia inductiva de la línea de transmisión ca, expresada en Ω/km o Ω/milla .

X_C es la reactancia capacitiva de la línea de transmisión ca, expresada en Ω/km o Ω/milla .

Por ejemplo, la reactancia inductiva X_L y la reactancia capacitiva X_C de la línea de transmisión ca de 315 kV, que se muestra en la figura 19 y la figura 20, son iguales a $0,3600 \Omega/\text{km}$ ($0,5794 \Omega/\text{milla}$) y $225,0 \text{ k}\Omega/\text{km}$ ($139,8 \text{ k}\Omega/\text{milla}$), respectivamente, lo que resulta en una impedancia característica Z_0 de $284,6 \Omega$.

La potencia activa que se le suministra a una carga resistiva cuya resistencia es igual a la impedancia característica Z_0 de la línea de transmisión ca se denomina la **carga natural** P_0 de la línea. La carga natural P_0 de una línea de transmisión ca también se conoce como **carga de impedancia de sobretensión** (SIL, del inglés *surge impedance load*). El valor de la carga natural P_0 puede calcularse mediante la ecuación (3).

$$P_0 = \frac{E_R^2}{Z_0} \cdot 3 \quad (3)$$

donde E_R es la tensión de fase en el extremo receptor de la línea de transmisión ca, expresada en voltios (V).

Z_0 es la impedancia característica de la línea de transmisión ca, expresada en Ω .

Por ejemplo, la carga natural P_0 de la línea de transmisión ca de 315 kV que se muestra en la figura 19 y la figura 20 es de 348,8 MW.

Adviértase que la ecuación (2) y la ecuación (3) se basan en la suposición de que la línea de transmisión ca no tiene pérdidas (es decir, la resistencia de la línea es cero). No obstante, en las líneas de transmisión ca reales la resistencia no es cero. Por lo tanto, la impedancia de carga realmente necesaria para que la tensión del receptor E_R iguale a la tensión del emisor E_E es mayor que la impedancia característica Z_0 que se calcula con la ecuación (2). Por consiguiente, la potencia activa real que se le suministra a la carga es inferior a la carga natural P_0 que se calcula con la ecuación (3). De hecho, cuando la resistencia de la línea no es cero, la potencia reactiva $Q_{C \text{ Línea}}$ debida a la capacitancia de la línea debe exceder ligeramente a la potencia reactiva $Q_{L \text{ Línea}}$ debida a la inductancia de la línea para hacer que la tensión del receptor E_R sea igual a la tensión del emisor E_E . Cuanto mayor sea la resistencia de la línea de transmisión ca por unidad de distancia (es decir, por kilómetro o por milla), mayor será la diferencia entre los valores reales y los valores calculados.

La carga natural P_0 de una línea de transmisión ca no es la cantidad máxima de potencia activa que la línea puede suministrar a la carga y, por tanto, la impedancia característica Z_0 de la línea no es el valor mínimo de carga resistiva que puede conectarse a la línea. No obstante, la carga natural P_0 y la impedancia característica Z_0 de la línea son parámetros de referencia importantes que se obtienen cuando la línea está naturalmente equilibrada (es decir, $Q_{C \text{ Línea}} = Q_{L \text{ Línea}}$). Toda línea de transmisión ca puede funcionar más allá de la carga natural P_0 , siempre que se respeten otros factores limitantes (como las consideraciones térmicas debidas a las pérdidas de la línea). En otras palabras, toda línea de transmisión ca puede funcionar con una carga cuya resistencia sea inferior a la impedancia característica Z_0 , siempre que se respeten otros factores limitantes.

En la curva de potencia-tensión que se muestra en la figura 21 se asume una línea de transmisión ca sin pérdidas ($R' = 0 \Omega$). Esto no tiene ningún efecto sobre las observaciones realizadas utilizando esta curva.

Curva de potencia-tensión de una línea de transmisión ca de alta tensión

La figura 21 muestra la característica de regulación de tensión completa de la línea de transmisión ca de alta tensión de 315 kV que se muestra en las figuras anteriores, es decir, para la operación desde un estado sin carga hasta un cortocircuito en el extremo receptor de la línea. Adviértase que el eje vertical (tensión) de la característica representa la relación (E_R/E_E) de la tensión del receptor E_R sobre la tensión del emisor E_E en lugar de la tensión del receptor E_R . De manera similar, observe que el eje horizontal de la característica representa la relación (P/P_0) de la potencia activa P que la línea transmite sobre la carga natural P_0 en lugar de la corriente de la línea I_L . La característica de regulación de tensión completa de una línea de transmisión ca de alta tensión que se muestra en la figura 21 también se conoce como la curva de potencia-tensión de la línea de transmisión ca. La curva de potencia-tensión es una herramienta útil, ya que permite relacionar fácilmente el punto en el que opera la línea de transmisión ca (es decir, la tensión del receptor E_R y la potencia de la carga P) con la tensión del emisor E_E y la carga natural P_0 .

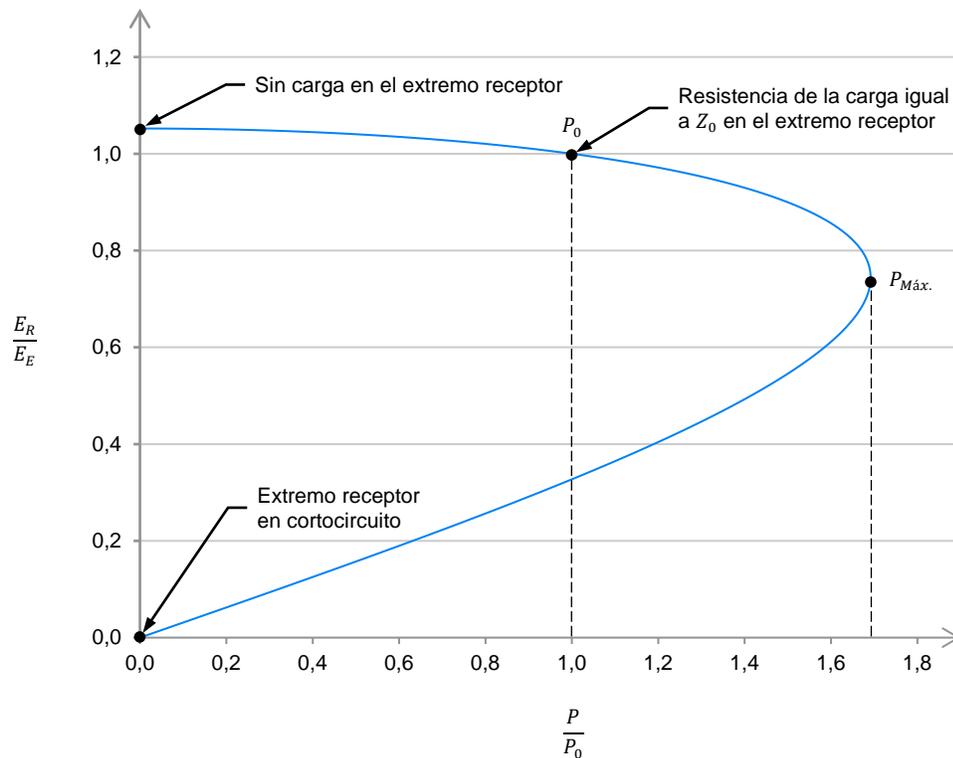


Figura 21. Curva de potencia-tensión de una línea de transmisión ca de alta tensión (línea de transmisión ca de 315 kV mostrada en las figuras anteriores).

Aunque toda línea de transmisión ca puede funcionar más allá de la carga natural P_0 (siempre que se respeten otros factores limitantes) como se mencionó anteriormente en esta discusión, la curva de potencia-tensión de la figura 21 muestra que en realidad existe un límite ($P_{Máx.}$) en cuanto a la cantidad de potencia activa que una línea de transmisión ca puede transmitir a una carga. Este límite es un límite fundamental de toda línea de transmisión ca y no se relaciona con otros factores limitantes como las consideraciones térmicas debidas a las pérdidas de la línea. Para esta línea de transmisión ca específica, la potencia máxima $P_{Máx.}$ es aproximadamente 1,7 veces la carga natural P_0 (348,8 MW), lo que corresponde a unos 593 MW.

Property of Festo Didactic

Sale and/or reproduction forbidden

RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO

El Procedimiento consta de las secciones siguientes:

- Montaje y conexiones
- Cálculo de la impedancia característica Z_0 y de la carga natural P_0 de la línea de transmisión ca
- Curva de potencia-tensión de la línea de transmisión ca

PROCEDIMIENTO



En este ejercicio se trabaja con altas tensiones. No haga ni modifique ninguna conexión con las fichas tipo banana cuando la alimentación esté encendida, a menos que se especifique lo contrario.

Montaje y conexiones

En esta sección, usted conectará un circuito que representa una fase de una línea de transmisión ca de 350 km (217 millas).

1. Consulte en el Apéndice A la Tabla de utilización del equipo, a fin de obtener la lista de los equipos necesarios para realizar este ejercicio.

Instale el equipo requerido en el [Puesto de trabajo](#).

2. Asegúrese de que los interruptores de alimentación ca y cc de la [Fuente de alimentación](#) estén en la posición **O** (apagado), después conecte dicha fuente a una toma ca trifásica.

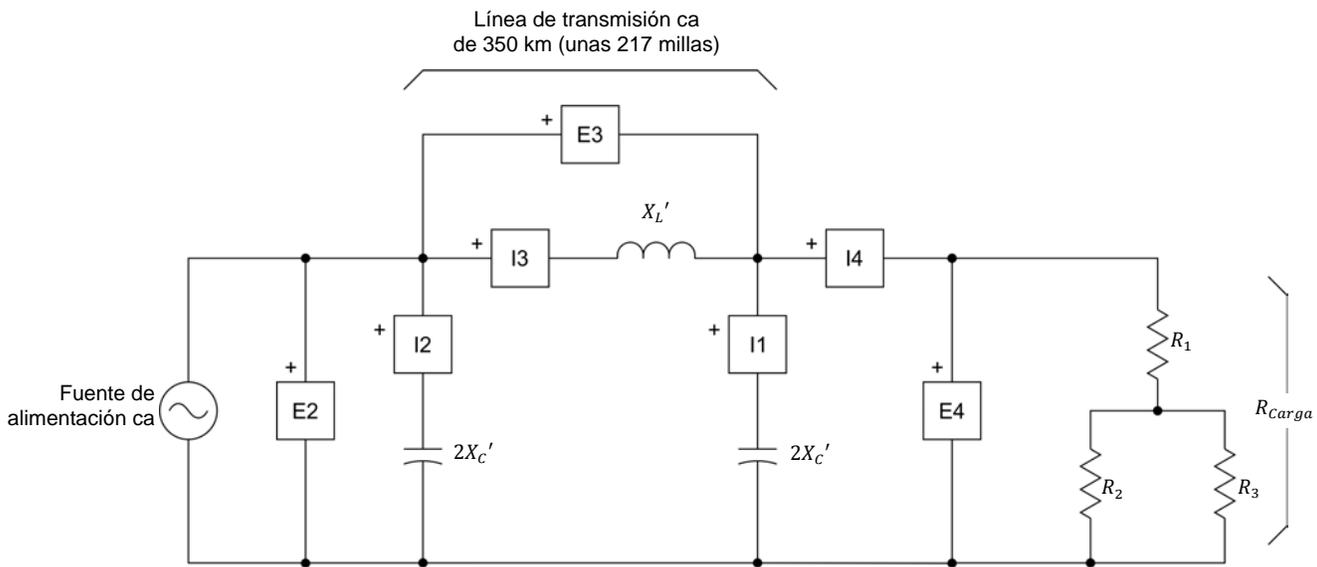
Conecte la entrada [Alimentación](#) de la [Interfaz de adquisición de datos y de control](#) a la fuente de alimentación ca de 24 V. Encienda la fuente de alimentación ca de 24 V.

3. Conecte el Puerto USB de la [Interfaz de adquisición de datos y de control](#) a un puerto USB de la computadora.

4. Encienda la computadora e inicie el software [LVDAC-EMS](#).

En la ventana Arranque de [LVDAC-EMS](#), asegúrese de que la [Interfaz de adquisición de datos y de control](#) haya sido detectada. Asegúrese de que en la [Interfaz de adquisición de datos y de control](#) esté disponible la función [Instrumentación computarizada](#). Seleccione la tensión y frecuencia de la red correspondientes a la tensión y frecuencia de su red eléctrica ca local, y después haga clic en el botón [Aceptar](#) para cerrar la ventana [Arranque de LVDAC-EMS](#).

5. Monte el circuito que se muestra en la figura 22, el cual representa una fase de un sistema trifásico de transmisión de energía. El circuito consiste en una fuente de alimentación ca que alimenta a una carga resistiva a través de una línea de transmisión ca de 350 km (unas 217 millas), representada por su circuito equivalente PI corregido. El inductor de la línea de transmisión se implementa utilizando una fase de la **Línea de transmisión trifásica**. El condensador en cada extremo de la línea se implementa con una sección de condensadores (grupo de 3 condensadores conectados en paralelo) de la **Carga capacitiva**. La carga consiste en una disposición serie-paralelo de tres resistores. Cada uno de estos resistores se implementa con una sección de resistores (grupo de 3 resistores conectados en paralelo) de la **Carga Resistiva**.



Red de alimentación ca local		X_L' (Ω)	$2X_C'$ (Ω)
Tensión (V)	Frecuencia (Hz)		
120	60	120	1200
220	50	400	4400
240	50	400	4800
220	60	400	4400

Figura 22. Línea de transmisión ca de 350 km (217 millas) que suministra energía a una carga resistiva (una sola fase).

6. En la **Línea de transmisión trifásica**, asegúrese de que el interruptor de palanca I/O esté en la posición I, después ajuste la reactancia X_L' del inductor de línea al valor que se indica en la tabla de la figura 22.

En la **Carga capacitiva**, ajuste la reactancia $2X_C'$ del condensador en cada extremo de la línea al valor que se indica en la tabla de la figura 22.

En la **Carga resistiva**, abra todos los interruptores para que la resistencia de la carga R_{carga} sea infinita.

Property of Festo Didactic

Sale and/or reproduction forbidden

Cálculo de la impedancia característica Z_0 y de la carga natural P_0 de la línea de transmisión ca

En esta sección, usted calculará la impedancia característica Z_0 y la carga natural P_0 de la línea de transmisión ca.

7. El circuito equivalente PI corregido de la línea de transmisión ca de la figura 22 representa una línea de 350 km (unas 217 millas) que tiene las características fundamentales de la tabla 5.

Calcule la impedancia característica Z_0 de la línea de transmisión ca utilizando la ecuación (2) del apartado Principios y las características fundamentales de la tabla 5 correspondientes a la tensión y frecuencia de la red de alimentación ca local.

Tabla 5. Características fundamentales de la línea de transmisión ca de 350 km (unas 217 millas) representada por el circuito equivalente PI en la figura 22.

Red de alimentación ca local		Características fundamentales de la línea		
Tensión (V)	Frecuencia (Hz)	R	X_L	X_C
120	60	0,022 Ω /km (0,035 Ω /milla)	0,355 Ω /km (0,571 Ω /milla)	213,6 k Ω /km (132,7 k Ω /milla)
220	50	0,022 Ω /km	1,179 Ω /km	782,2 k Ω /km
240	50	0,022 Ω /km	1,177 Ω /km	852,1 k Ω /km
220	60	0,022 Ω /km	1,179 Ω /km	782,2 k Ω /km



Las características fundamentales X_L y X_C de la línea de transmisión ca de 315 km (unas 217 millas) de la figura 22, a tensiones de 220 V y 240 V en la red de alimentación ca, se han ajustado específicamente para tener en cuenta la potencia nominal de funcionamiento (0,2 kW) del equipo suministrado. Por lo tanto, las características fundamentales X_L y X_C de la línea de transmisión ca a tensiones de 220 V y 240 V en la red de alimentación ca difieren significativamente de las de las líneas de transmisión ca reales. Sin embargo, esto no afecta el comportamiento de la línea de transmisión ca implementada con el equipo que se suministra, el cual es muy similar al de las líneas de transmisión ca reales.

8. Calcule la carga natural P_0 de la línea de transmisión ca utilizando la ecuación (3) del apartado Principios, la impedancia característica Z_0 calculada en el paso anterior, y el valor nominal de la tensión del receptor E_R (es decir, la tensión de fase de la red de alimentación de CA local).

Curva de potencia-tensión de la línea de transmisión ca

En esta sección, usted ajustará el equipo de medición para medir los parámetros de la línea de transmisión ca. Disminuirá gradualmente la resistencia de la carga resistiva conectada al extremo receptor de la línea y registrará (para cada valor de resistencia de la carga) la tensión del emisor y del receptor, la corriente y potencia activa de la carga, así como la potencia reactiva en el inductor de la línea y en los condensadores de los extremos emisor y receptor de la línea. Después utilizará los resultados para trazar la curva de potencia-tensión de la línea y analizará los resultados.

9. En LVDAC-EMS, abra la ventana **Aparatos de medición**, después abra el cuadro de diálogo **Ajustes de adquisición**. Ajuste la **Ventana de muestreo** a 8 ciclos, después haga clic en **Aceptar** para cerrar el cuadro de diálogo. Esto proporciona una mejor exactitud al medir ciertos parámetros (por ejemplo, la potencia reactiva) de la línea de transmisión ca.

En la ventana **Aparatos de medición**, efectúe los ajustes necesarios para medir la tensión del emisor E_E (entrada **E2**), la tensión del receptor E_R (entrada **E4**), la corriente de la carga I_{Carga} (entrada **I4**), la potencia activa P_{Carga} que se le suministra a la carga [**PQS4(E4,I4)**], la potencia reactiva $Q_{L\ Línea}$ en la línea [**PQS3(E3,I3)**], la potencia reactiva $Q_{2X_C' Emisor}$ en el condensador del extremo emisor de la línea [**PQS2(E2,I2)**] y la potencia reactiva $Q_{2X_C' Receptor}$ en el condensador del extremo receptor de la línea [**PQS(E4,I1)**]. Ajuste los medidores en el modo de regeneración continua.

10. En la **Fuente de alimentación**, encienda la fuente de alimentación ca trifásica.
11. En LVDAC-EMS, abra la ventana **Tabla de datos**. Ajuste la **Tabla de datos** para registrar los parámetros del circuito (es decir, la tensión del emisor E_E , la tensión del receptor E_R , la corriente de la carga I_{Carga} , la potencia activa P_{Carga} , la potencia reactiva $Q_{L\ Línea}$, la potencia reactiva $Q_{2X_C' Emisor}$ y la potencia reactiva $Q_{2X_C' Receptor}$).

Registre los parámetros del circuito en la **Tabla de datos**.

12. Examine los datos registrados. ¿Es la tensión del receptor E_R significativamente mayor que la tensión del emisor E_E cuando no hay carga conectada en el extremo receptor de la línea? Explique.

Calcule la potencia reactiva $Q_{C\ Línea}$ en la línea utilizando la ecuación siguiente y los valores de $Q_{2X_C' Emisor}$ y $Q_{2X_C' Receptor}$ registrados en la [Tabla de datos](#).

$$Q_{C\ Línea} = Q_{2X_C' Emisor} + Q_{2X_C' Receptor}$$

Potencia reactiva $Q_{C\ Línea}$ en la línea = _____ var

Compare la potencia reactiva $Q_{C\ Línea}$ de la línea (registrada anteriormente) con la potencia reactiva medida $Q_{L\ Línea}$ en la línea (registrada en la [Tabla de datos](#)). ¿Está la línea fuertemente desequilibrada? Explique.

13. Aumente gradualmente la carga en el extremo receptor de la línea. Para ello, cambie los ajustes de los interruptores de la [Carga resistiva](#) a fin de que la resistencia de la carga R_{Carga} varíe entre los valores máximo y mínimo (en unos 20 pasos) que se indican en la tabla 6 para su red de alimentación ca local. Para cada valor de resistencia de la carga, registre los parámetros del circuito en la [Tabla de datos](#).



El resistor R_1 se debe cortocircuitar para obtener los valores de resistencia más bajos.

Tabla 6. Valores máximos y mínimos de resistencia de la carga R_{Carga} .

Red de alimentación ca local		Resistencia de la carga R_{Carga} (Ω)	
Tensión (V)	Frecuencia (Hz)	Valor máximo	Valor mínimo
120	60	2400	86
220	50	8800	314
240	50	9600	343
220	60	8800	314

14. Cortocircuite el extremo receptor de la línea ($R_{Carga} = 0 \Omega$), después registre los parámetros del circuito en la [Tabla de datos](#).

En la [Fuente de alimentación](#), apague la fuente de alimentación ca trifásica.

En la ventana [Tabla de datos](#), guarde los datos registrados.

15. Transfiera a una aplicación de hoja de cálculo los datos que ha registrado. Utilice los valores de la tensión del receptor E_R y de la potencia activa P_{carga} para trazar la curva de potencia-tensión de la línea de transmisión ca.



La tensión del receptor E_R y la potencia activa P_{carga} se utilizan para trazar la curva de potencia-tensión de la línea de transmisión ca a fin de permitir una comparación directa con los valores de la carga natural P_0 y de la impedancia característica Z_0 de la línea de transmisión ca que se calcularon anteriormente en este ejercicio.

16. Observe la parte superior de la curva de potencia-tensión de la línea de transmisión ca que trazó en el paso anterior. ¿Disminuye la tensión del receptor E_R a medida que la carga aumenta?

Sí No

Adviértase que en algún punto de la curva de potencia-tensión de la línea de transmisión ca la tensión del receptor E_R se vuelve igual a la tensión del emisor E_E . Basándose en los parámetros del circuito registrados en la [Tabla de datos](#), encuentre la cantidad de potencia activa que se le suministra a la carga cuando la tensión del receptor E_R es igual (o prácticamente igual) a la tensión del emisor E_E .

Potencia activa $P_{carga} (E_R = E_E) = \underline{\hspace{2cm}}$ W

Compare la cantidad de potencia activa que se le suministra a la carga cuando la tensión del receptor E_R iguala a la tensión del emisor E_E (valor encontrado arriba) con la carga natural P_0 de la línea de transmisión ca que se calculó en el paso 8 de este ejercicio.



Al efectuar la comparación, la cantidad de potencia activa que se le suministra a la carga cuando la tensión del receptor E_R iguala a la tensión del emisor E_E debe multiplicarse por tres, ya que este valor es para una sola fase.

¿Es la potencia activa que se le suministra a la carga cuando la tensión del receptor E_R iguala a la tensión del emisor E_E significativamente inferior a la carga natural P_0 de la línea de transmisión ca? ¿Por qué?

17. Basándose en los parámetros del circuito registrados en la [Tabla de datos](#), calcule la resistencia de la carga cuando la cantidad de potencia activa que se le suministra a la carga hace que la tensión del receptor E_R sea igual a la tensión del emisor E_E .

18. Compare la resistencia del resistor de carga encontrada en el paso anterior con la impedancia característica Z_0 de la línea de transmisión ca que se calculó en el paso 7 de este ejercicio. ¿Es la resistencia del resistor de carga que se necesita para hacer que la tensión del receptor E_R iguale a la tensión del emisor E_E significativamente mayor que la impedancia característica Z_0 de la línea de transmisión ca? ¿Por qué?

19. Basándose en los parámetros del circuito registrados en la [Tabla de datos](#), determine la cantidad de potencia reactiva $Q_{L\ Línea}$ y de potencia reactiva $Q_{C\ Línea}$ ($Q_{C\ Línea} = Q_{2X_C' \text{ Emisor}} + Q_{2X_C' \text{ Receptor}}$) en la línea cuando la tensión del receptor E_R es igual a la tensión del emisor E_E .

Potencia reactiva $Q_{L\ Línea}$ en la línea ($E_R = E_E$) = _____ var

Potencia reactiva $Q_{C\ Línea}$ en la línea ($E_R = E_E$) = _____ var

¿Excede la potencia reactiva $Q_{C\ Línea}$ a la potencia reactiva $Q_{L\ Línea}$ cuando la tensión del receptor E_R es prácticamente igual a la tensión del emisor E_E ? Explique.

20. Observe de nuevo la curva de potencia-tensión de la línea de transmisión ca de 350 km (unas 217 millas). ¿Confirma esto que existe un límite fundamental ($P_{Máx.}$) en la cantidad de potencia activa que una línea de transmisión ca puede transmitir a la carga? Explique.

21. En la [Fuente de alimentación](#), apague la fuente de alimentación ca trifásica.

Property of Festo Didactic
Sale and/or reproduction forbidden

22. Cierre LVDAC-EMS y después apague todos los equipos. Desconecte todos los conductores y devuélvalos a su sitio de almacenamiento.

CONCLUSIÓN

En este ejercicio, usted se familiarizó con el circuito equivalente PI corregido de una línea de transmisión ca de alta tensión. Observó que cuando se conecta una carga resistiva al extremo receptor de una línea de transmisión ca de alta tensión, la tensión del receptor E_R disminuye cuando la corriente de línea aumenta. También observó que cuando no hay carga conectada al extremo receptor de la línea, la tensión del receptor E_R excede a la tensión del emisor E_E porque la línea está muy desequilibrada (es decir, $Q_C \text{ Línea} \gg Q_L \text{ Línea}$). Aprendió a calcular dos características importantes de una línea de transmisión ca de alta tensión: la impedancia característica Z_0 y la carga natural P_0 . Aprendió que una línea de transmisión ca de alta tensión se considera equilibrada cuando la tensión del emisor E_E y la tensión del receptor E_R son iguales. En ese caso, la potencia reactiva debida a la inductancia de la línea es igual a la potencia reactiva debida a la capacitancia de la línea (suponiendo una línea sin pérdidas). Finalmente, se familiarizó con la característica de regulación de tensión completa (curva de potencia-tensión) de una línea de transmisión ca de alta tensión. Usted aprendió que esta curva facilita relacionar el punto en el que opera la línea con la tensión del emisor y con la carga natural P_0 . Usted observó que aunque toda línea de transmisión ca puede funcionar más allá de la carga natural P_0 , hay un límite fundamental ($P_{M\acute{a}x.}$) en la cantidad de potencia activa que una línea puede transmitir a una carga.

PREGUNTAS DE REVISIÓN

1. Complete la siguiente figura que representa el circuito equivalente PI (π) corregido de una fase de una línea de transmisión ca de alta tensión.



Circuito equivalente PI (π) corregido de una línea de transmisión ca de alta tensión (una sola fase).

2. ¿Qué sucede con la tensión del receptor E_R de una línea de transmisión ca de alta tensión conectada a una carga resistiva a medida que la corriente de línea I_L aumenta? ¿Qué sucede si no se conecta ninguna carga al extremo receptor de la línea de transmisión ca de alta tensión?

3. ¿Cuándo se equilibra naturalmente una línea de transmisión ca de alta tensión que no tiene pérdidas?

4. Explique en qué consisten la impedancia característica Z_0 y la carga natural P_0 de una línea de transmisión ca de alta tensión. Escriba las ecuaciones que se utilizan para calcular los valores de estos parámetros. Suponga que la línea no tiene pérdidas.

5. Describa qué es la característica de regulación de tensión completa de una línea de transmisión ca de alta tensión. De acuerdo con esta característica, ¿se puede operar toda línea de transmisión ca más allá de la carga natural P_0 (siempre que se respeten otros factores limitantes), pero no más allá de un cierto límite ($P_{Máx.}$)? Explique.

Property of Festo Didactic
Sale and/or reproduction forbidden

Compensación de tensión de una línea de transmisión ca de alta tensión mediante compensación shunt conmutable

OBJETIVO DEL EJERCICIO Cuando haya completado este ejercicio, estará familiarizado con la compensación de tensión de las líneas de transmisión ca de alta tensión que utilizan la compensación shunt (en derivación) conmutable. Conocerá la relación entre la potencia activa que transmite una línea de transmisión ca con compensación de tensión y el desfase entre las tensiones en los extremos receptor y emisor de la línea. Podrá calcular la potencia máxima transmisible de una línea de transmisión ca con compensación de tensión.

RESUMEN DE LOS PRINCIPIOS

Los Principios de este ejercicio cubren los siguientes puntos:

- Compensación de tensión de una línea de transmisión ca mediante inductores en derivación (shunt) conmutables
- Compensación de tensión de una línea de transmisión ca que funciona más allá de la carga natural P_0 de la línea utilizando condensadores en derivación conmutables
- Potencia máxima transmisible de una línea de transmisión ca con compensación de tensión

PRINCIPIOS

Compensación de tensión de una línea de transmisión ca mediante inductores en derivación (shunt) conmutables

La figura 23 muestra la curva de potencia-tensión de una línea de transmisión ca de alta tensión. Esta curva indica que la tensión del receptor E_R es igual a la tensión del emisor E_E solo cuando la potencia activa que transmite la línea es igual a la carga natural P_0 de la línea (aquí se asume una línea sin pérdidas). Esta situación es posible en toda red de alimentación eléctrica ca, pero ocurre raramente, ya que la cantidad de potencia activa que deben transportar las líneas de transmisión de la red depende por completo de la demanda de energía de los consumidores, que varía bastante en función de la hora del día. En consecuencia, la tensión del receptor E_R raramente es igual a la tensión del emisor E_E , que se considera la tensión nominal.

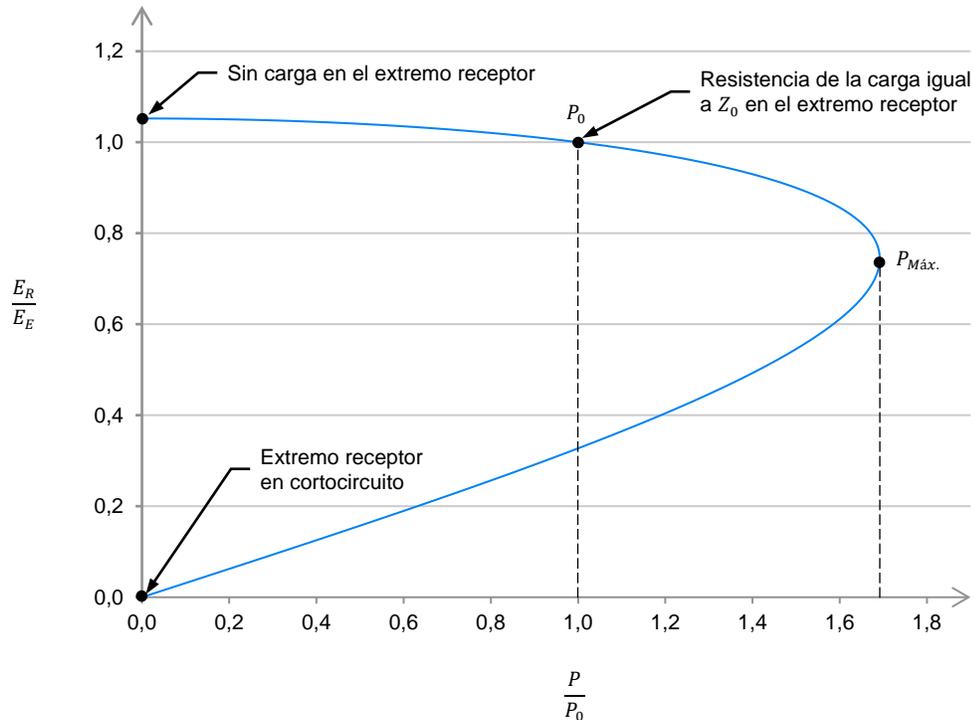


Figura 23. Curva de potencia-tensión de una línea de transmisión ca.

En general, no es deseable que la tensión del receptor E_R difiera demasiado del valor nominal, ya que esto es a menudo una fuente de problemas en toda red de alimentación ca. Por lo tanto, se requieren algunos medios de compensación de tensión para mantener la tensión del receptor E_R igual (o al menos lo más cercana posible) a la tensión del emisor E_E , sin importar la cantidad de potencia activa que tenga que transmitir una línea de transmisión ca.

Por ejemplo, cuando la demanda de potencia es inferior a la carga natural P_0 de la línea, la tensión del receptor E_R excede sistemáticamente a la tensión del emisor E_E , el peor de los casos cuando la línea funciona sin carga. En esta situación, la potencia reactiva $Q_{C\ Línea}$ debida a la capacitancia de la línea excede ampliamente la potencia reactiva $Q_{L\ Línea}$ debida a la inductancia de la línea, como se mencionó en la discusión del ejercicio anterior. El gran desequilibrio entre la potencia reactiva $Q_{C\ Línea}$ y la potencia reactiva $Q_{L\ Línea}$ es lo que hace que la tensión del receptor E_R supere a la tensión del emisor E_E . Este desequilibrio de potencia reactiva puede eliminarse conectando, en cada extremo de la línea, un inductor en derivación con el mismo valor de reactancia que los condensadores en el circuito equivalente PI corregido de la línea, como se muestra en la figura 24. En esta situación, la corriente de la fuente de alimentación ca I_F y la corriente de línea I_L son cero, por lo que la tensión del receptor E_R es igual a la tensión del emisor E_E .

Es común en las redes de alimentación ca ajustar el valor de los inductores en derivación para que la línea de transmisión ca esté perfectamente equilibrada cuando funciona sin carga. Esto asegura que no se produzca ninguna sobretensión en caso de pérdida de carga.

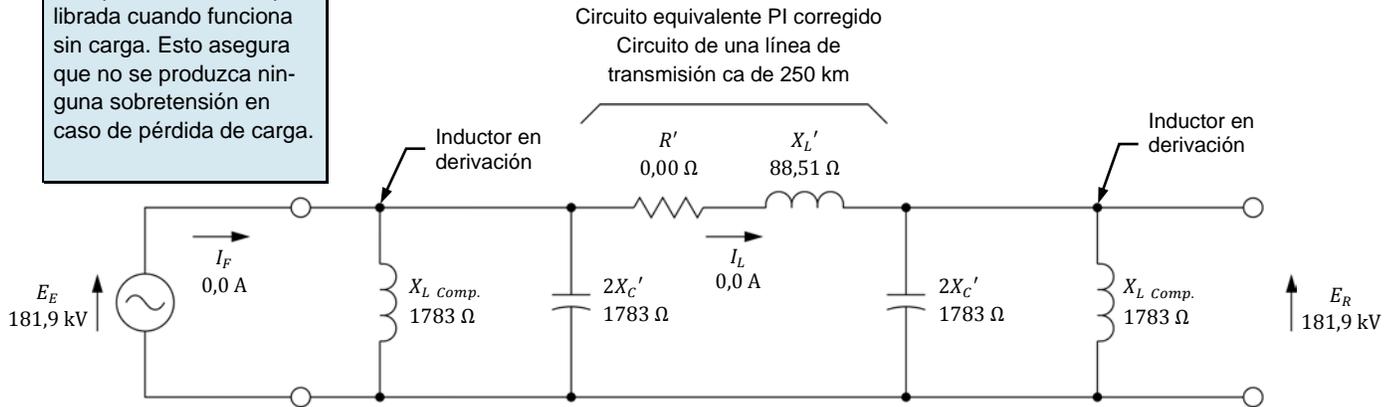


Figura 24. Compensación de tensión de una línea de transmisión ca de 315 kV utilizando un inductor en derivación fijo (de conexión permanente) en ambos extremos (se muestra una fase).

La figura 25 muestra el efecto que tiene añadir inductores en derivación fijos (es decir, de conexión permanente) en la curva de potencia-tensión de la línea de transmisión ca de la figura 24. Como es de esperar, la tensión del receptor E_R es igual a la tensión del emisor E_E cuando no hay carga ($P = 0$) conectada a la línea. No obstante, a medida que la carga P aumenta, la tensión del receptor E_R disminuye y difiere cada vez más de la tensión del emisor E_E . Por lo tanto, la adición de un inductor en derivación fijo en ambos extremos de la línea evita que la tensión del receptor E_R exceda a la tensión del emisor E_E , pero no evita que la tensión del receptor E_R sea cada vez más baja que la tensión del emisor E_E a medida que aumenta la carga P . La zona sombreada en rojo en la figura 25 muestra la diferencia entre la tensión del receptor E_R y la tensión del emisor E_E .

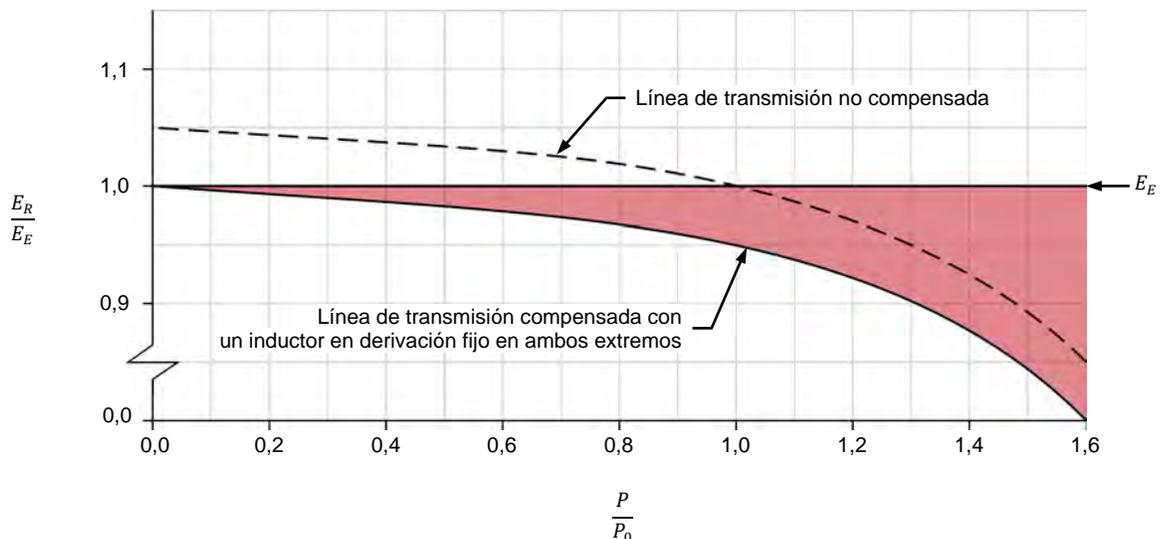


Figura 25. Efecto en la curva de potencia-tensión tras añadir inductores en derivación fijos (es decir, de conexión permanente) en ambos extremos de la línea de transmisión ca de la figura 24.

Una forma de reducir la diferencia entre la tensión del receptor E_R y la tensión del emisor E_E a medida que aumenta la carga es añadir un interruptor en serie con cada inductor en derivación. Los inductores se conectan (ambos interruptores están cerrados) mientras la tensión del receptor E_R siga siendo superior a un determinado límite de tensión mínimo. Cuando la carga P aumenta lo suficiente para que la tensión del receptor E_R disminuya hasta este límite de tensión mínimo, los inductores en derivación se desconectan (ambos interruptores están abiertos).

La figura 26 muestra la curva de potencia-tensión de la línea de transmisión ca de la figura 24 que se obtiene al realizar la compensación de tensión mediante inductores en derivación conmutables. Como muestra la figura 26, la diferencia entre la tensión del receptor E_R y la tensión del emisor E_E (véase el área sombreada en rojo en la figura 26) se reduce significativamente hasta una carga P ligeramente superior a la carga natural P_0 de la línea de transmisión ca (aproximadamente $1,2 P_0$ en este caso). Obsérvese que la tensión del receptor E_R se vuelve ligeramente mayor que la tensión del emisor E_E cuando se desconectan los inductores en derivación porque la potencia reactiva $Q_{L\text{ línea}}$ es menor que la potencia reactiva $Q_{C\text{ línea}}$ en este nivel de carga. La tensión del receptor E_R comienza entonces a disminuir de nuevo a medida que la carga P continúa aumentando. La tensión del receptor E_R disminuye hasta el valor de la tensión del emisor a medida que la carga P aumenta hasta la carga natural P_0 . La tensión del receptor E_R disminuye aún más y vuelve a alcanzar el límite de tensión mínimo cuando la carga P aumenta ligeramente por encima de la carga natural P_0 (valor cercano a $1,2 P_0$ en este caso).

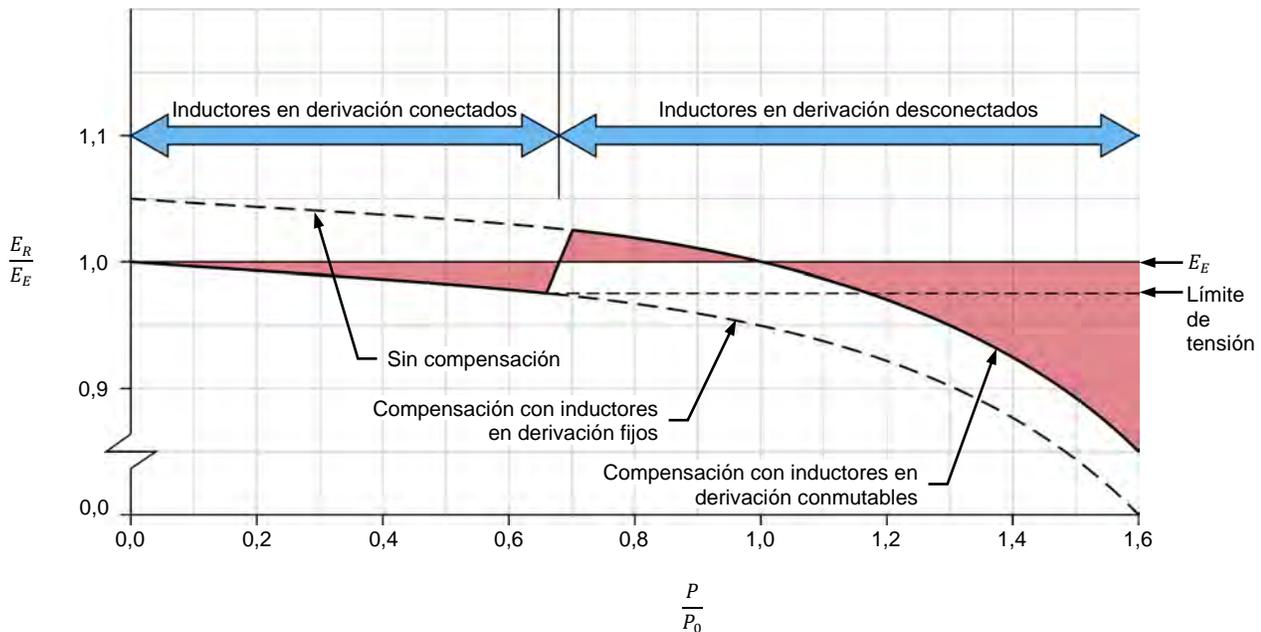


Figura 26. Curva de potencia-tensión de la línea de transmisión ca obtenida al realizar la compensación de tensión mediante inductores en derivación conmutables.

Los inductores en derivación se desconectan cuando la carga P aumenta lo suficiente como para que la tensión del receptor E_R disminuya hasta el límite de tensión mínimo, como se ha mencionado anteriormente. Por el contrario, cuando se desconectan los inductores en derivación y la carga P disminuye, la tensión del receptor E_R aumenta y finalmente supera a la tensión del emisor E_E . Cuando la carga P disminuye lo suficiente para que la tensión del receptor E_R aumente hasta un determinado límite de tensión máximo, se conectan los inductores en derivación (ambos interruptores se cierran), lo que hace que la tensión del receptor E_R disminuya un poco por debajo de la tensión del emisor E_E . Los límites de tensión mínimo y máximo determinan así el margen de variación de la tensión del receptor E_R , como se muestra en la figura 27. Obsérvese que cuando la carga P aumenta lo suficiente como para que la tensión del receptor E_R disminuya hasta el límite de tensión mínimo, se desconectan los inductores y la tensión del receptor E_R aumenta un poco por encima de la tensión del emisor E_E . Esto también hace que la carga P aumente un poco. Por el contrario, cuando la carga P disminuye lo suficiente como para que la tensión del receptor E_R aumente hasta el límite de tensión máximo, se conectan los inductores y la tensión del receptor E_R disminuye un poco por debajo de la tensión del emisor E_E . Esto también hace que la carga P disminuya un poco. Esto causa cierta histéresis en la curva de potencia-tensión resultante.

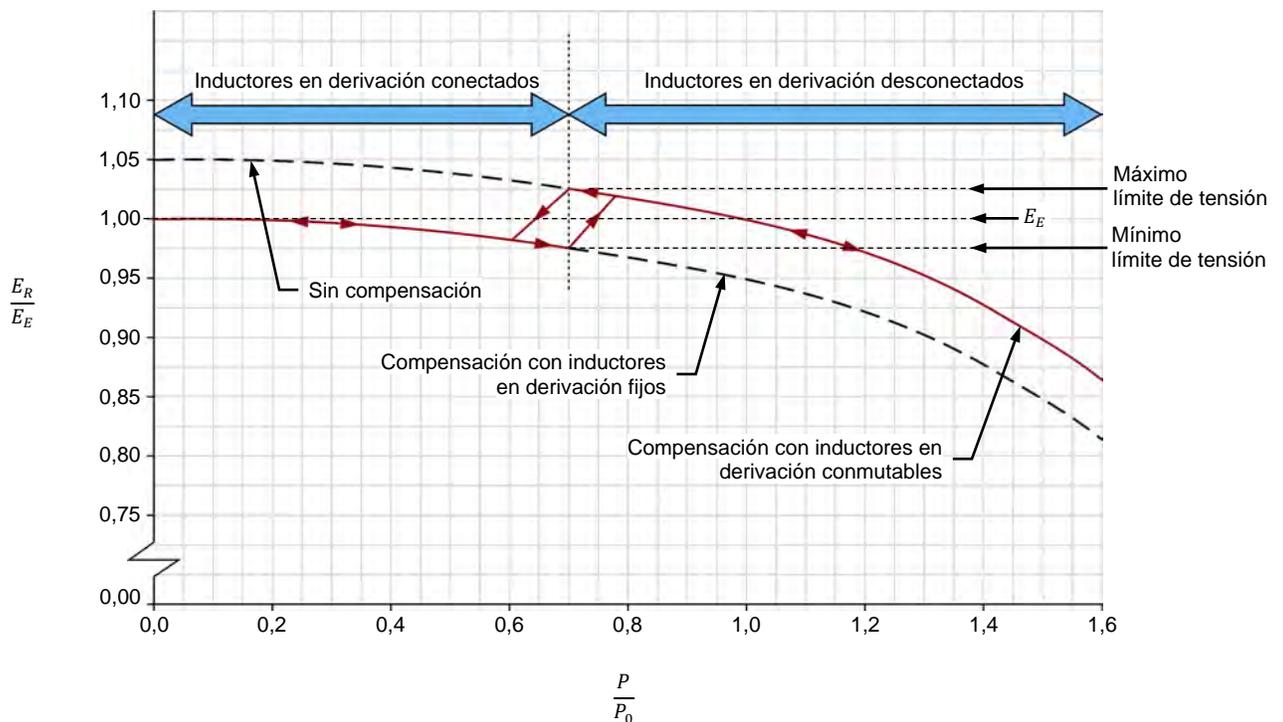


Figura 27. Los límites de tensión máximo y mínimo determinan cuándo se conectan y desconectan los inductores en derivación, respectivamente.

Ejercicio 3 – Compensación de tensión de una línea de transmisión ca de alta tensión mediante compensación shunt conmutable ♦ Principios

La compensación de tensión mediante bancos de inductores en derivación conmutables es suficiente para mantener la tensión del receptor E_R prácticamente igual a la tensión del emisor E_E en las líneas de transmisión ca que no tienen que funcionar a niveles de carga significativamente superiores a la carga natural P_0 , en condiciones normales de funcionamiento.

Para reducir aún más la variación de la tensión del receptor E_R a medida que varía la carga P , se puede utilizar un banco de inductores en derivación conmutables en cada extremo de la línea en lugar de un solo inductor en derivación conmutado, como se muestra en la figura 28. Todos los inductores en derivación se conectan cuando no hay carga conectada a la línea de transmisión ca. Los inductores en derivación se desconectan uno por uno a medida que aumenta la carga P , hasta que se retiran todos. Esto hace que la reactancia ($X_{L\text{Comp}}$) de cada inductor en derivación (es decir, la reactancia de cada banco de inductores en derivación) aumente por pasos a medida que aumenta la carga, manteniendo así la tensión del receptor E_R cerca de la tensión del emisor E_E . Cuanto mayor sea el número de inductores en derivación en los bancos, menor será el margen de variación de la tensión del receptor E_R a medida que varía la carga P (es decir, la tensión del receptor E_R se mantiene cercana a la tensión del emisor E_E a medida que varía la carga P).



El banco de inductores en derivación conmutables en el extremo emisor de la línea de transmisión ca de la figura 28 puede omitirse cuando la fuente de alimentación ca es capaz de absorber la cantidad de potencia reactiva necesaria para compensar la línea.

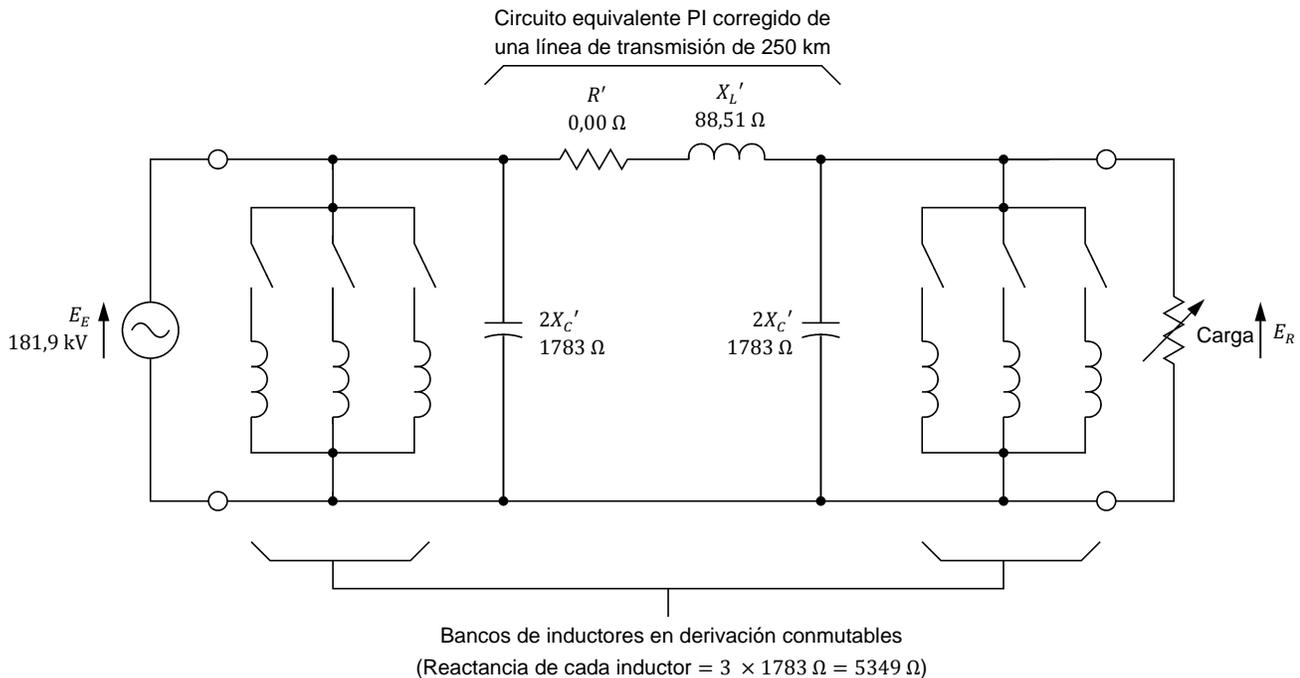


Figura 28. Compensación de tensión de una línea de transmisión ca de 315 kV ca utilizando un banco de inductores en derivación conmutables en ambos extremos (se muestra una fase).

Compensación de tensión de una línea de transmisión ca que funciona más allá de la carga natural P_0 de la línea utilizando condensadores en derivación conmutables

La compensación shunt conmutable (SSC) modifica la reactancia capacitiva X_C de una línea de transmisión ca de modo que la impedancia característica ($Z_{0\ comp.}$) de la línea compensada se acerque lo más posible a la resistencia de carga. En otras palabras, la compensación shunt conmutable hace que una línea de transmisión ca esté prácticamente equilibrada y que la tensión E_R sea prácticamente igual a la tensión E_E , para todo valor de carga. Debido a esto, la compensación shunt conmutable también se conoce como compensación de la impedancia característica o compensación de la impedancia de sobretensión.

La compensación de tensión de una línea de transmisión ca mediante inductores en derivación conmutables permite mantener la tensión del receptor E_R prácticamente igual a la tensión del emisor E_E hasta una carga ligeramente superior a la carga natural P_0 de la línea, como se ha discutido en la sección anterior. En este nivel de carga, todos los inductores en derivación se desconectan, la tensión del receptor E_R es igual al límite de tensión mínimo, y la potencia reactiva $Q_{L\ Línea}$ debida a la inductancia de la línea excede ligeramente a la potencia reactiva $Q_{C\ Línea}$ debida a la capacitancia de la línea. Cuando la carga P aumenta más allá de este nivel de carga, el desequilibrio hacia la potencia reactiva $Q_{L\ Línea}$ continúa aumentando y, por lo tanto, la tensión del receptor E_R continúa disminuyendo y se vuelve más baja que el límite de tensión mínimo. Para evitar que la tensión del receptor E_R disminuya demasiado cuando la carga P excede por mucho a la carga natural P_0 , se puede añadir un banco de condensadores en derivación conmutables en cada extremo de la línea de transmisión ca, como se muestra en la figura 29.

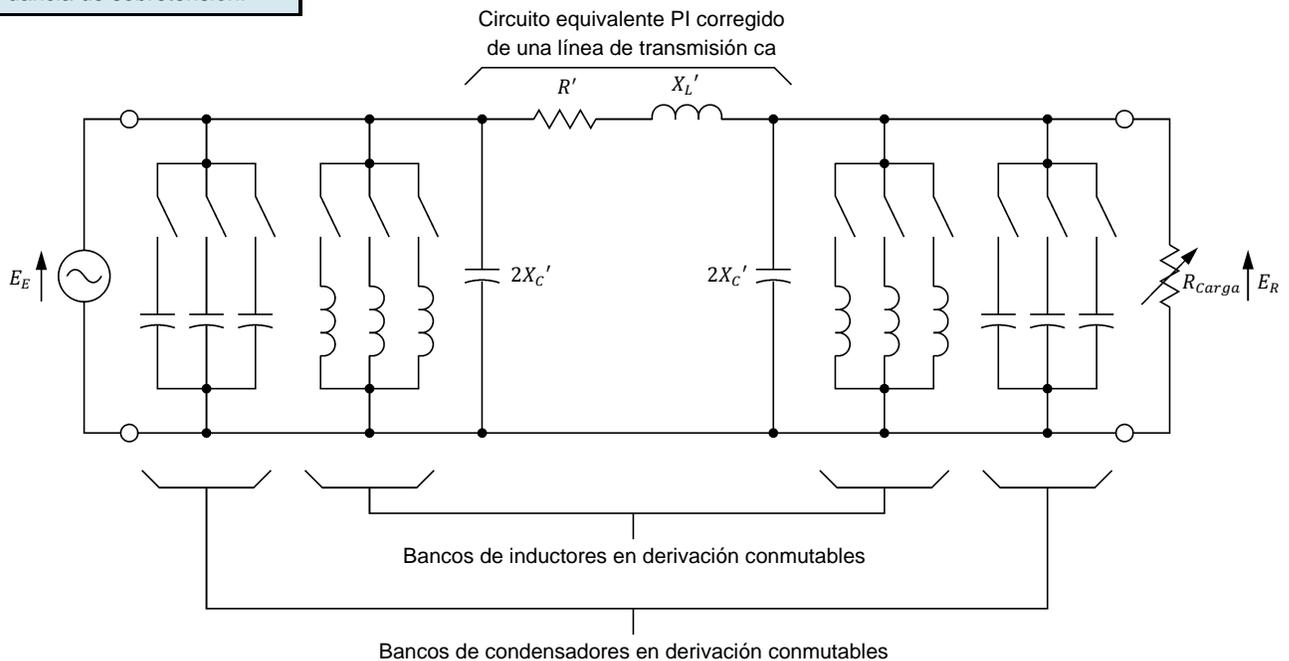


Figura 29. compensación shunt conmutable de una línea de transmisión ca utilizando bancos de inductores y condensadores conmutables. Se muestra una fase de la línea de transmisión ca.



Figura 30. Inductor en derivación (unidad trifásica) utilizado para la compensación de tensión de una línea de transmisión ca de alta tensión. Cada brazo largo en la parte superior de la unidad de la imagen es un aislante que brinda acceso a un extremo de un inductor (©Siemens AG 2014, todos los derechos reservados).



Figura 31. Banco de condensadores en derivación utilizados para compensar la tensión en el extremo receptor de una línea de transmisión ca de alta tensión.

Potencia máxima transmisible de una línea de transmisión ca con compensación de tensión

La cantidad de potencia activa $P_{(Comp.)}$ que transmite una línea de transmisión ca con compensación de tensión puede calcularse mediante la ecuación (4).

$$P_{(Comp.)} = 3 \left(\frac{E_E E_R}{X_L'} \text{sen } \delta \right) \quad (4)$$

- donde E_E es la tensión de fase en el extremo emisor de la línea de transmisión ca con compensación de tensión, expresada en voltios (V).
- E_R es la tensión de fase en el extremo receptor de la línea de transmisión ca con compensación de tensión, expresada en voltios (V).
- X_L' es la reactancia inductiva en el circuito equivalente PI corregido de la línea de transmisión ca, expresada en ohmios (Ω).
- δ es el desfase entre la tensión del receptor E_R y la tensión del emisor E_E , en donde la tensión del receptor E_R se utiliza como el fasor de tensión de referencia [es decir, desfase $\delta = \text{ángulo de fase } E_E - \text{ángulo de fase } E_R$], expresado en grados ($^\circ$).

La ecuación (4) muestra que cuando la tensión del emisor E_E y la tensión del receptor E_R se mantienen constantes, lo que suele ocurrir cuando una línea de transmisión ca se compensa adecuadamente, la potencia activa $P_{(Comp.)}$ que transmite la línea es una función del desfase δ solo porque la reactancia inductiva X_L' de la línea es una constante. La figura 32 muestra la relación entre la potencia activa $P_{(Comp.)}$ y el desfase δ en esta situación. Adviértase que la relación es un gráfico del desfase δ en función de la potencia activa $P_{(Comp.)}$, ya que en las redes eléctricas ca reales es la cantidad de potencia activa que transmite la línea la que determina el desfase δ .

Como lo muestra la figura 32, la potencia activa $P_{(Comp.)}$ aumenta de 0 a un valor máximo $P_{Máx. (Comp.)}$ cuando el desfase δ pasa de 0° a 90° , ya que $\text{sen } \delta$ pasa de 0 a 1 (valor máximo). Por el contrario, la potencia activa $P_{(Comp.)}$ disminuye del valor máximo $P_{Máx. (Comp.)}$ a 0 cuando el desfase δ pasa de 90° a 180° , ya que $\text{sen } \delta$ pasa de 1 a 0. En consecuencia, la cantidad máxima de potencia activa $P_{Máx. (Comp.)}$ que puede transmitir una línea de transmisión ca con compensación de tensión viene dada por la ecuación (5).

$$P_{M\acute{a}x. (Comp.)} = 3 \frac{E_E E_R}{X_L'} \quad (5)$$

- donde E_E es la tensión de fase en el extremo emisor de la línea de transmisión ca con compensación de tensión, expresada en voltios (V).
- E_R es la tensión de fase en el extremo receptor de la línea de transmisión ca con compensación de tensión, expresada en voltios (V).
- X_L' es la reactancia inductiva en el circuito equivalente PI corregido de la línea de transmisión ca, expresada en ohmios (Ω).

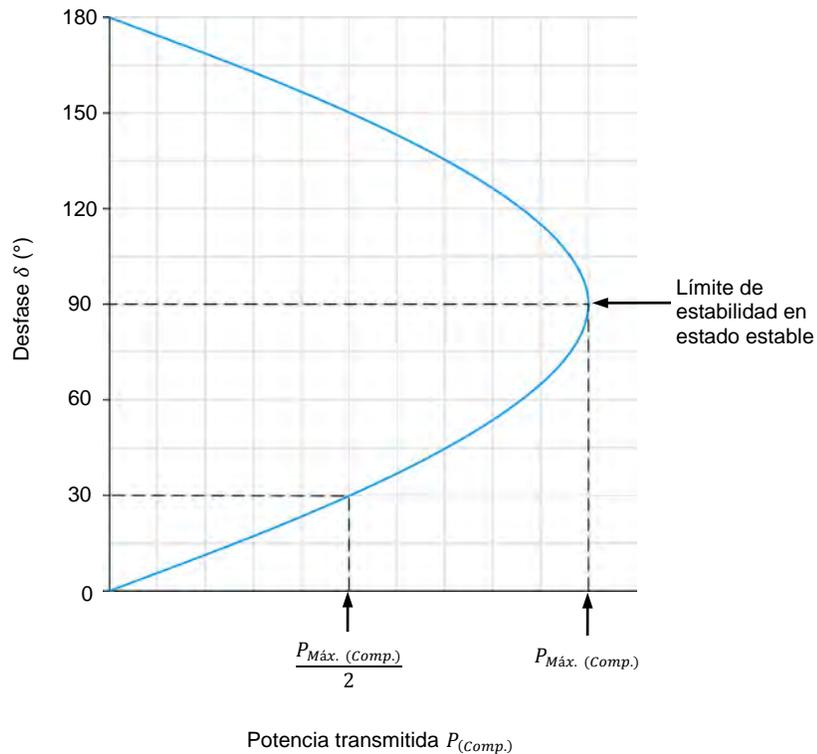


Figura 32. Desfase δ entre la tensión del emisor y la tensión del receptor en función de la potencia activa $P_{(Comp.)}$ que transmite la línea con compensación de tensión.

En condiciones normales de funcionamiento, la cantidad de potencia activa $P_{(Comp.)}$ que transmite toda línea de transmisión ca con compensación de tensión se controla de modo que el desfase δ permanezca por debajo de 90° . Esto es necesario para mantener un funcionamiento estable en la línea de transmisión ca. Incluso es común en las redes de alimentación ca limitar la cantidad de potencia activa $P_{(Comp.)}$ que transmite toda línea de transmisión ca de modo que el desfase δ nunca supere 30° . Esto brinda un margen de seguridad del 100%, es decir, si una línea de transmisión falla, toda la potencia activa que transmite puede transferirse a otra línea de transmisión sin causar que el desfase δ exceda 90° .

RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO

El Procedimiento consta de las secciones siguientes:

- Montaje y conexiones
- Compensación de tensión de una línea de transmisión ca utilizando un solo inductor de derivación conmutado
- Compensación de tensión de una línea de transmisión ca utilizando compensación shunt conmutable

PROCEDIMIENTO



En este ejercicio se trabaja con altas tensiones. No haga ni modifique ninguna conexión con las fichas tipo banana cuando la alimentación esté encendida, a menos que se especifique lo contrario.

Montaje y conexiones

En esta sección, usted conectará un circuito que representa una fase de una línea de transmisión ca de 350 km (217 millas). Después, ajustará el equipo de medición para medir los parámetros de la línea de transmisión ca.

1. Consulte en el Apéndice A la Tabla de utilización del equipo, a fin de obtener la lista de los equipos necesarios para realizar este ejercicio.

Instale el equipo requerido en el [Puesto de trabajo](#).

2. Asegúrese de que los interruptores de alimentación ca y cc de la [Fuente de alimentación](#) estén en la posición O (apagado), después conecte dicha fuente a una toma ca trifásica.

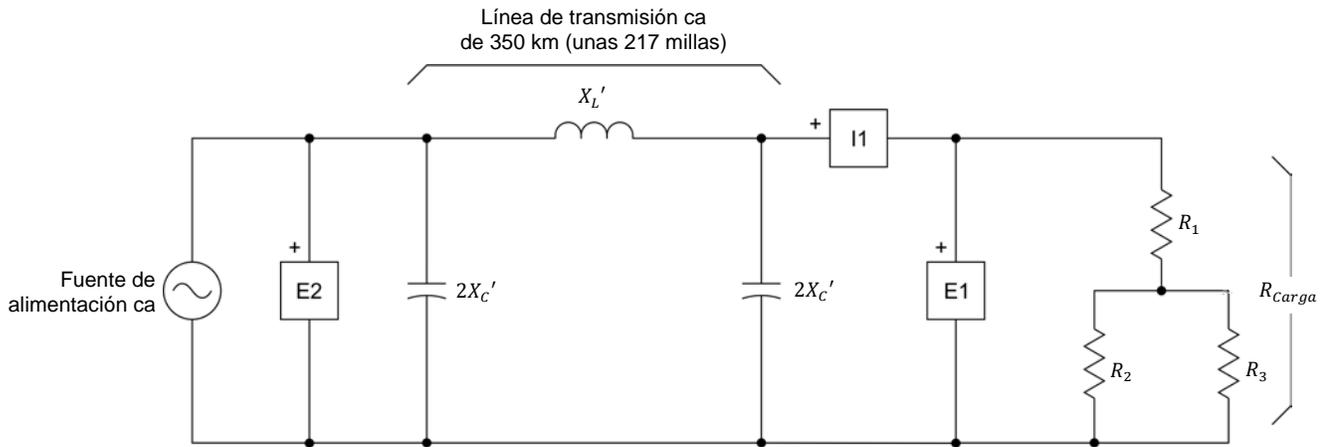
Conecte la entrada [Alimentación](#) de la [Interfaz de adquisición de datos y de control](#) a la fuente de alimentación ca de 24 V. Encienda la fuente de alimentación ca de 24 V.

3. Conecte el Puerto USB de la [Interfaz de adquisición de datos y de control](#) a un puerto USB de la computadora.

4. Encienda la computadora e inicie el software [LVDAC-EMS](#).

En la ventana Arranque de [LVDAC-EMS](#), asegúrese de que la [Interfaz de adquisición de datos y de control](#) haya sido detectada. Asegúrese de que en la [Interfaz de adquisición de datos y de control](#) esté disponible la función [Instrumentación computarizada](#). Seleccione la tensión y frecuencia de la red correspondientes a la tensión y frecuencia de su red eléctrica ca local, y después haga clic en el botón [Aceptar](#) para cerrar la ventana [Arranque de LVDAC-EMS](#).

5. Conecte el circuito que se muestra en la figura 33, el cual representa una fase de un sistema trifásico de transmisión de energía. El circuito, que es el mismo del ejercicio anterior, consiste en una fuente de alimentación ca que alimenta a una carga resistiva a través de una línea de transmisión ca de 350 km (unas 217 millas) representada por su circuito equivalente PI corregido. El inductor de la línea de transmisión se implementa utilizando una fase de la **Línea de transmisión trifásica**. El condensador en cada extremo de la línea se implementa con una sección de condensadores (grupo de 3 condensadores conectados en paralelo) de la **Carga capacitiva**. La carga consiste en una disposición serie-paralelo de tres resistores. Cada uno de estos resistores se implementa con una sección de resistores (grupo de 3 resistores conectados en paralelo) de la **Carga Resistiva**.



Red de alimentación ca local		X_L' (Ω)	$2X_C'$ (Ω)	R_{carga} (Ω)
Tensión (V)	Frecuencia (Hz)			
120	60	120	1200	∞
220	50	400	4400	∞
240	50	400	4800	∞
220	60	400	4400	∞

Figura 33. Línea de transmisión ca de 350 km (unas 217 millas) que suministra energía a una carga resistiva (una sola fase).

6. En la **Línea de transmisión trifásica**, asegúrese de que el interruptor de palanca I/O esté en la posición I y, después, ajuste la reactancia X_L' del inductor de línea al valor que se indica en la tabla de la figura 33.

En la **Carga capacitiva**, ajuste la reactancia $2X_C'$ del condensador en cada extremo de la línea al valor que se indica en la tabla de la figura 33.

En la **Carga resistiva**, abra todos los interruptores para que la resistencia de la carga R_{carga} sea infinita.

7. El circuito equivalente PI corregido de la línea de transmisión ca de la figura 33 representa una línea de 350 km (unas 217 millas) que tiene las características fundamentales de la tabla 7.

Tabla 7. Características fundamentales de la línea de transmisión ca de 350 km (unas 217 millas) representada por el circuito equivalente PI de la figura 33.

Red de alimentación ca local		Características fundamentales de la línea		
Tensión (V)	Frecuencia (Hz)	R	X_L	X_C
120	60	0,022 Ω /km (0,035 Ω /milla)	0,355 Ω /km (0,571 Ω /milla)	213,6 k Ω /km (132,7 k Ω /milla)
220	50	0,022 Ω /km	1,179 Ω /km	782,2 k Ω /km
240	50	0,022 Ω /km	1,177 Ω /km	852,1 k Ω /km
220	60	0,022 Ω /km	1,179 Ω /km	782,2 k Ω /km

8. En LVDAC-EMS, abra la ventana **Aparatos de medición**, después abra el cuadro de diálogo **Ajustes de adquisición**. Ajuste la **Ventana de muestreo** a 8 ciclos, después haga clic en **Aceptar** para cerrar el cuadro de diálogo. Esto proporciona una mejor exactitud al medir ciertos parámetros de la línea de transmisión ca.

En la ventana **Aparatos de medición**, realice los ajustes necesarios para medir la tensión del emisor E_E (entrada **E2**), la tensión del receptor E_R (entrada **E1**), la corriente de la carga I_{Carga} (entrada **I1**), la potencia activa P_{Carga} que se le suministra a la carga [**PQS1(E1,I1)**], y el desfase δ entre la tensión del receptor E_R y la tensión del emisor E_E [**PS(E1,E2)**]. Ajuste los medidores en el modo de regeneración continua.



El desfase δ que indica el medidor de desfase es con respecto a la tensión del receptor E_R , es decir, es igual al ángulo de fase de la tensión del emisor E_E menos el ángulo de fase de la tensión del receptor E_R . Por lo tanto, valores positivos del desfase δ indican que la tensión del emisor E_E está adelantada con respecto a la tensión del receptor E_R .

Compensación de tensión de una línea de transmisión ca utilizando un solo inductor de derivación conmutado

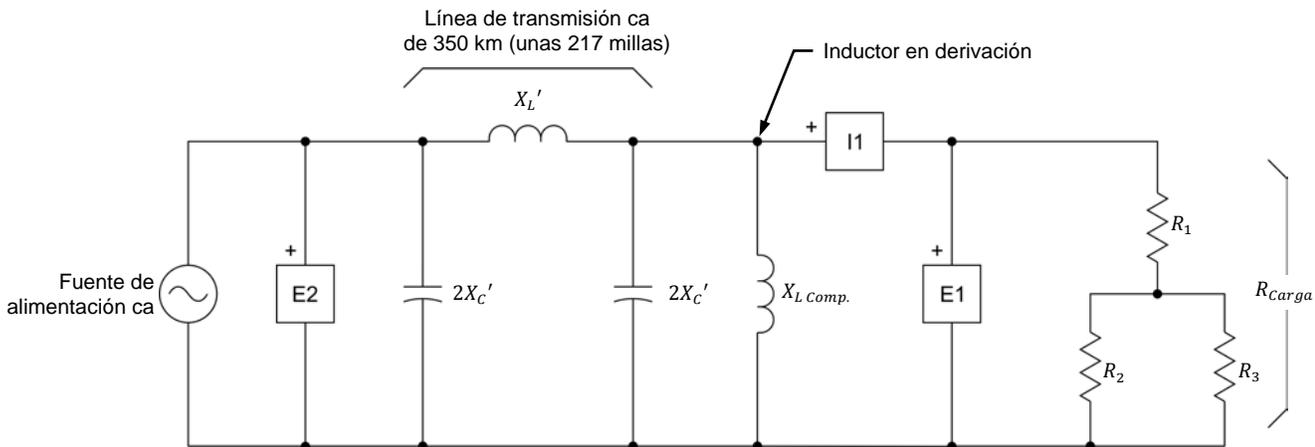
En esta sección, usted conectará un inductor en derivación al extremo receptor de la línea para compensar la tensión del receptor E_R (sin carga en el extremo receptor). Usted disminuirá gradualmente la resistencia de la carga resistiva conectada al extremo receptor de la línea hasta que la tensión del receptor E_R disminuya a un cierto valor mínimo. Para cada valor de resistencia de la carga, registrará los parámetros del circuito. Después desconectará el inductor en derivación del extremo receptor de la línea y continuará disminuyendo la resistencia de la carga resistiva y registrará los parámetros del circuito. Utilizará los resultados para trazar la curva de potencia-tensión de la línea. Analizará los resultados.

9. En la **Fuente de alimentación**, encienda la fuente de alimentación ca trifásica. ¿Excede significativamente la tensión del receptor E_R a la tensión del emisor E_E ? Explique por qué.

10. En la **Fuente de alimentación**, apague la fuente de alimentación ca trifásica. Conecte un inductor en derivación al extremo receptor de la línea, como se muestra en la figura 34. Para ello, utilice una sección de inductores (un grupo de 3 inductores conectados en paralelo) de la **Carga inductiva** para implementar el inductor en derivación. Ajuste la reactancia $X_{L\text{Comp.}}$ del inductor en derivación al valor que se indica en la figura 34. Adviértase que la reactancia $X_{L\text{Comp.}}$ del inductor en derivación es igual a la reactancia $2X_C'$ de los condensadores en el circuito equivalente PI corregido de la línea de transmisión ca.



A fin de limitar la cantidad de equipo necesario para realizar este ejercicio, no se utiliza ningún inductor en derivación en el extremo emisor de la línea de transmisión ca. Esto no representa ningún problema, ya que la fuente de alimentación ca suministra la potencia reactiva necesaria en el extremo emisor de la línea para la compensación de tensión.



Red de alimentación ca local		X_L' (Ω)	$2X_C'$ (Ω)	$X_{L\text{Comp.}}$ (Ω)	R_{Carga} (Ω)
Tensión (V)	Frecuencia (Hz)				
120	60	120	1200	1200	∞
220	50	400	4400	4400	∞
240	50	400	4800	4800	∞
220	60	400	4400	4400	∞

Figura 34. Línea de transmisión ca de 350 km (unas 217 millas) compensada con un inductor en derivación en el extremo receptor (una sola fase).

11. En la **Fuente de alimentación**, encienda la fuente de alimentación ca trifásica. Compare la tensión del receptor E_R con la tensión del emisor E_E . ¿Son prácticamente iguales? ¿Por qué?

12. En **LVDAC-EMS**, abra la ventana **Tabla de datos**. Ajuste la **Tabla de datos** para registrar los parámetros del circuito, es decir, la tensión del emisor E_E , la tensión del receptor E_R , la corriente de la carga I_{carga} , la potencia activa P_{carga} que se le suministra a la carga y el desfase δ entre la tensión del receptor E_R y la tensión del emisor E_E .

Registre los parámetros del circuito en la **Tabla de datos**.

13. Aumente gradualmente la carga en el extremo receptor de la línea hasta que la tensión del receptor E_R sea aproximadamente un 5% menor que la tensión del emisor E_E (por ejemplo, si la tensión del emisor E_E es de 120 V, la carga debe incrementarse hasta que la tensión del receptor E_R disminuya a unos 114 V). Para ello, cambie los ajustes de los interruptores de la **Carga resistiva** para disminuir la resistencia de la carga R_{carga} en pasos, comenzando con el valor inicial que figura en la tabla 8 para su red de alimentación ca local. Para cada valor de resistencia de la carga, registre los parámetros del circuito en la **Tabla de datos**.

Tabla 8. Valor inicial de resistencia de la carga R_{carga} .

Red de alimentación ca local		Valor inicial de resistencia de la carga R_{carga} (Ω)
Tensión (V)	Frecuencia (Hz)	
120	60	2400
220	50	8800
240	50	9600
220	60	8800

14. Cuando la tensión del receptor E_R sea aproximadamente un 5% menor que la tensión del emisor E_E , desconecte el inductor en derivación conectado al extremo receptor de la línea de transmisión ca ajustando a la posición **O** (apagado) el interruptor correspondiente de la **Carga inductiva**. Registre los parámetros del circuito en la **Tabla de datos**.

Adviértase que si se retira el inductor en derivación ahora, la tensión del receptor E_R aumenta significativamente (se hace un 5% mayor que la tensión del emisor E_E). Explique por qué ocurre esto.

15. Continúe aumentando gradualmente la carga en el extremo receptor de la línea hasta que la tensión del receptor E_R sea aproximadamente un 15% menor que la tensión del emisor E_E (por ejemplo, si la tensión del emisor E_E es de 120 V, la carga debe incrementarse hasta que la tensión del receptor E_R disminuya a unos 102 V). Para ello, cambie los ajustes de los interruptores de la **Carga resistiva** a fin de disminuir la resistencia de la carga R_{Carga} paso a paso. Para cada valor de resistencia de la carga, registre los parámetros del circuito en la **Tabla de datos**.



En algún momento, tendrá que cortocircuitar el resistor R_1 para seguir aumentando la carga.

16. En la **Fuente de alimentación**, apague la fuente de alimentación ca trifásica.

En la **Tabla de datos**, guarde los datos registrados.

17. Transfiera a una aplicación de hoja de cálculo los datos que ha registrado. Utilice los valores de la tensión del receptor E_R y de la potencia activa P_{Carga} para trazar la curva de potencia-tensión de la línea de transmisión ca cuando se utiliza un solo inductor en derivación conmutado para la compensación de tensión. Además, utilice los valores registrados para trazar, en el mismo gráfico, una curva de la tensión del emisor E_E en función de la potencia activa P_{Carga} . Este gráfico permite relacionar fácilmente la tensión del receptor E_R con la tensión del emisor E_E .

18. Basándose en los parámetros del circuito registrados en la **Tabla de datos**, encuentre la cantidad de potencia activa que se le suministra a la carga cuando la tensión del receptor E_R es igual (o prácticamente igual) a la tensión del emisor E_E y el inductor en derivación se desconecta (punto de operación en el que la línea se equilibra naturalmente). Esta cantidad de energía se considera la carga natural real $P_{0\ Real}$ de la línea de transmisión ca, ya que tiene en cuenta la resistencia de la línea.

Carga natural real $P_{0\ Real} = \underline{\hspace{2cm}}$ W

Property of Festo Didactic
Sale and/or reproduction forbidden

19. ¿Es suficiente utilizar un inductor en derivación conmutado para mantener la tensión del receptor E_R bastante cerca de la tensión del emisor E_E hasta una potencia de la carga ligeramente mayor que la carga natural real $P_{0\text{ Real}}$ de la línea de transmisión ca? Explique.

Compensación de tensión de una línea de transmisión ca utilizando compensación shunt conmutable

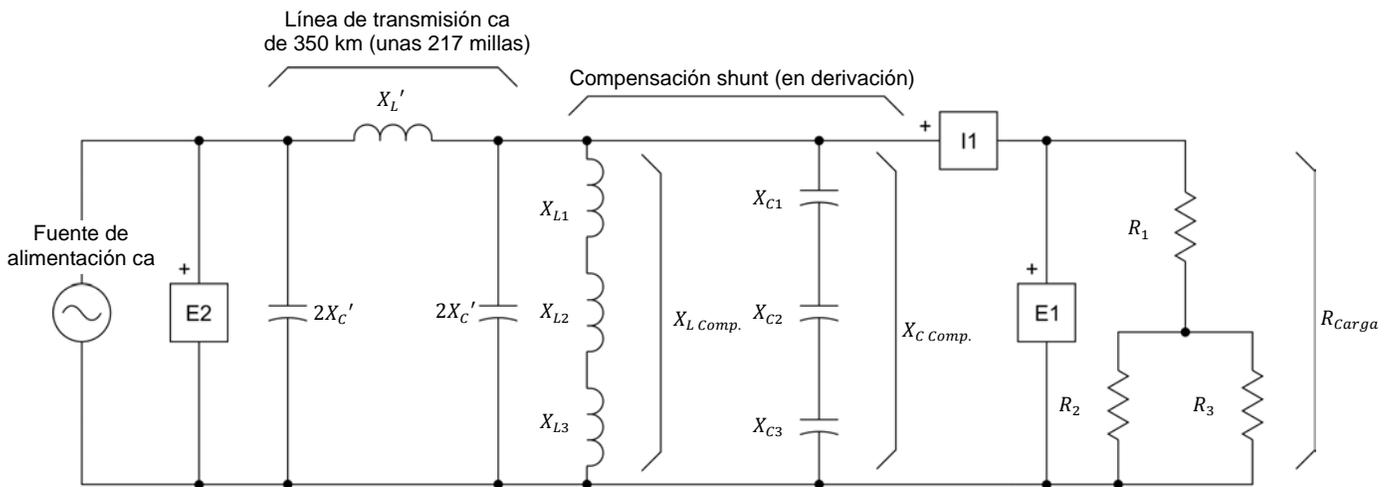
En esta sección, usted conectará un banco de inductores en derivación conmutables y un banco de condensadores en derivación conmutables al extremo del receptor de la línea. Primero conectará todos los inductores en derivación y mantendrá desconectados todos los condensadores en derivación. Reducirá gradualmente la resistencia de la carga resistiva conectada al extremo receptor de la línea, y ajustará la compensación shunt conmutable (desconectando los inductores en derivación y después conectando los condensadores en derivación) de modo que la tensión del receptor E_R permanezca cercana a la tensión del emisor E_E . Mientras hace esto, registrará los parámetros del circuito para cada valor de resistencia de la carga. Utilizará los resultados para trazar la curva de potencia-tensión de la línea. También trazará una curva del desfase δ entre las tensiones E_R y E_E en función de la potencia de la carga P_{carga} . Analizará los resultados.

20. Conecte un banco de inductores en derivación conmutables y un banco de condensadores en derivación conmutables al extremo del receptor de la línea, como se muestra en la figura 35. Conecte las tres secciones de inductores de la **Carga inductiva** en serie para implementar los inductores X_{L1} , X_{L2} y X_{L3} en el banco de inductores en derivación conmutables. Conecte en serie las tres secciones de condensadores de una segunda **Carga capacitiva** para implementar los condensadores X_{C1} , X_{C2} y X_{C3} en el banco de condensadores en derivación conmutables. La reactancia inductiva $X_{L\text{ Comp.}}$ del banco de inductores en derivación conmutables y la reactancia capacitiva $X_{C\text{ Comp.}}$ del banco de condensadores en derivación conmutables en este circuito pueden cambiarse para implementar la compensación shunt conmutable.



*Para obtener el valor máximo de reactancia inductiva $X_{L\text{ Comp.}}$ ($3 \times 2X_C'$) necesario para la compensación shunt conmutable utilizando las secciones de inductores disponibles en la **Carga inductiva**, los inductores (X_{L1} , X_{L2} , y X_{L3}) se conectan en serie, no en paralelo, como es habitual cuando se compensa una línea de transmisión ca real. Sin embargo, la reactancia $X_{L\text{ Comp.}}$ del banco de inductores en derivación conmutables que se implementa con los inductores conectados en serie puede variarse de la misma manera que si se utilizara un banco de tres inductores en derivación conmutables conectados en paralelo (cada inductor con un valor de reactancia de $3 \times 2X_C'$), como se muestra en la figura 28 del apartado Principios. El mismo enfoque se utiliza para implementar el banco de condensadores en derivación conmutables.*

Ejercicio 3 – Compensación de tensión de una línea de transmisión ca de alta tensión mediante compensación shunt conmutable ♦ *Procedimiento*



Red de alimentación ca local		X_L' (Ω)	$2X_C'$ (Ω)	$X_{L\ Comp.}$ (Ω)	$X_{C\ Comp.}$ (Ω)	R_{Carga} (Ω)
Tensión (V)	Frecuencia (Hz)					
120	60	120	1200	1200	∞	∞
220	50	400	4400	4400	∞	∞
240	50	400	4800	4800	∞	∞
220	60	400	4400	4400	∞	∞

Figura 35. Línea de transmisión ca de 350 km (unas 217 millas) compensada con un banco de inductores en derivación conmutables y un banco de condensadores en derivación conmutables en el extremo receptor (una sola fase).

21. En la **Línea de transmisión trifásica**, asegúrese de que la reactancia X_L' del inductor de línea esté ajustada al valor que se indica en la tabla de la figura 35.

En la **Carga capacitiva** utilizada para implementar la línea de transmisión ca, asegúrese de que la reactancia $2X_C'$ del condensador en cada extremo de la línea esté ajustada al valor que se indica en la tabla de la figura 35.

En la **Carga inductiva**, ajuste la reactancia $X_{L\ Comp.}$ del banco de inductores en derivación conmutables al valor que se indica en la tabla de la figura 35.

En la **Carga capacitiva** utilizada para implementar el banco de condensadores en derivación conmutables, abra todos los interruptores para ajustar a infinito la reactancia $X_{C\ Comp.}$ del condensador en derivación. Esto equivale a desconectar todos los condensadores en derivación.

En la **Carga resistiva**, abra todos los interruptores para que la resistencia de la carga R_{Carga} sea infinita.

22. Borre los datos registrados previamente en la [Tabla de datos](#), pero no elimine los ajustes del registro de datos.

En la [Fuente de alimentación](#), encienda la fuente de alimentación ca trifásica y después registre los parámetros del circuito en la [Tabla de datos](#).

23. Aumente gradualmente la carga en el extremo receptor de la línea hasta que la tensión del receptor E_R sea aproximadamente 1,7% menor que la tensión del emisor E_E (por ejemplo, si la tensión del emisor es de 240 V, la carga debe incrementarse hasta que la tensión del receptor E_R disminuya a unos 236 V). Para ello, cambie los ajustes de los interruptores de la [Carga resistiva](#) para disminuir paso a paso la resistencia de la carga R_{Carga} , comenzando con el valor inicial que figura en la tabla 9 para su red de alimentación ca local. Para cada valor de resistencia de la carga, registre los parámetros del circuito en la [Tabla de datos](#).

Tabla 9. Valor inicial de resistencia de la carga R_{Carga} .

Red de alimentación ca local		Valor inicial de resistencia de la carga R_{Carga} (Ω)
Tensión (V)	Frecuencia (Hz)	
120	60	2400
220	50	8800
240	50	9600
220	60	8800

24. Cuando la tensión del receptor E_R es aproximadamente 1,7% menor que la tensión del emisor E_E , cambie los ajustes de los interruptores en la [Carga inductiva](#) a fin de aumentar la reactancia $X_{L\ Comp.}$ del banco de inductores en derivación conmutables hasta el valor que se indica en la tabla 10 para su red de alimentación ca local. Registre los parámetros del circuito en la [Tabla de datos](#).

Tabla 10. Valor de reactancia $X_{L\ Comp.}$.

Red de alimentación ca local		Valor de reactancia $X_{L\ Comp.}$ (Ω)
Tensión (V)	Frecuencia (Hz)	
120	60	1800
220	50	6600
240	50	7200
220	60	6600

25. Continúe aumentando gradualmente la carga en el extremo receptor de la línea hasta que la tensión del receptor E_R vuelva a ser aproximadamente 1,7% menor que la tensión del emisor E_E . Para ello, cambie los ajustes de los interruptores de la **Carga resistiva** a fin de disminuir paso a paso la resistencia de la carga R_C . Para cada valor de resistencia de la carga, registre los parámetros del circuito en la **Tabla de datos**.
26. Cuando la tensión del receptor E_R vuelva a ser aproximadamente 1,7% menor que la tensión del emisor E_E , cambie los ajustes de los interruptores en la **Carga inductiva** a fin de aumentar la reactancia $X_{L Comp.}$ del banco de inductores en derivación conmutables hasta el valor que se indica en la tabla 11 para su red de alimentación ca local. Registre los parámetros del circuito en la **Tabla de datos**.

Tabla 11. Valor de reactancia $X_{L Comp.}$

Red de alimentación ca local		Valor de reactancia $X_{L Comp.}$ (Ω)
Tensión (V)	Frecuencia (Hz)	
120	60	3600
220	50	13 200
240	50	14 400
220	60	13 200

27. Continúe aumentando gradualmente la carga en el extremo receptor de la línea hasta que la tensión del receptor E_R vuelva a ser aproximadamente 1,7% menor que la tensión del emisor E_E . Para ello, cambie los ajustes de los interruptores de la **Carga resistiva** a fin de disminuir paso a paso la resistencia de la carga R_{Carga} . Para cada valor de resistencia de la carga, registre los parámetros del circuito en la **Tabla de datos**.
28. Cuando la tensión del receptor E_R vuelva a ser aproximadamente 1,7% menor que la tensión del emisor E_E , desconecte el inductor en derivación conectado al extremo receptor de la línea de transmisión ca ajustando a la posición **O** (apagado) todos los interruptores de la **Carga inductiva**. Registre los parámetros del circuito en la **Tabla de datos**.
29. Continúe aumentando gradualmente la carga en el extremo receptor de la línea hasta que la tensión del receptor E_R vuelva a ser aproximadamente 1,7% menor que la tensión del emisor E_E . Para ello, cambie los ajustes de los interruptores de la **Carga resistiva** a fin de disminuir paso a paso la resistencia de la carga R_{Carga} . Para cada valor de resistencia de la carga, registre los parámetros del circuito en la **Tabla de datos**.

30. Cuando la tensión del receptor E_R vuelva a ser aproximadamente 1,7% menor que la tensión del emisor E_E , ajuste la reactancia $X_{C\ Comp.}$ del banco de condensadores en derivación conmutables hasta el valor que se indica en la tabla 12 haciendo los ajustes de interruptores apropiados en el módulo **Carga capacitiva** utilizado para implementar los condensadores en derivación conmutables. Registre los parámetros del circuito en la **Tabla de datos**.

Tabla 12. Valor de reactancia $X_{C\ Comp.}$

Red de alimentación ca local		Valor de reactancia $X_{C\ Comp.}$ (Ω)
Tensión (V)	Frecuencia (Hz)	
120	60	3600
220	50	13 200
240	50	14 400
220	60	13 200

31. Continúe aumentando gradualmente la carga en el extremo receptor de la línea hasta que la tensión del receptor E_R vuelva a ser aproximadamente 1,7% menor que la tensión del emisor E_E . Para ello, cambie los ajustes de los interruptores de la **Carga resistiva** a fin de disminuir paso a paso la resistencia de la carga R_{Carga} . Para cada valor de resistencia de la carga, registre los parámetros del circuito en la **Tabla de datos**.



Es posible que tenga que cortocircuitar el resistor R_1 utilizando un cable con conector de seguridad tipo banana para aumentar la carga al valor requerido.

32. Cuando la tensión del receptor E_R vuelva a ser aproximadamente 1,7% menor que la tensión del emisor E_E , reduzca la reactancia $X_{C\ Comp.}$ del banco de condensadores en derivación conmutables hasta el valor que se indica en la tabla 13 cambiando los ajustes de los interruptores del módulo **Carga capacitiva** utilizado para implementar los condensadores en derivación conmutables. Registre los parámetros del circuito en la **Tabla de datos**.

Tabla 13. Valor de reactancia $X_{C\ Comp.}$

Red de alimentación ca local		Valor de reactancia $X_{C\ Comp.}$ (Ω)
Tensión (V)	Frecuencia (Hz)	
120	60	1800
220	50	6600
240	50	7200
220	60	6600

33. Continúe aumentando gradualmente la carga en el extremo receptor de la línea hasta que la tensión del receptor E_R vuelva a ser aproximadamente 1,7% menor que la tensión del emisor E_E . Para ello, cambie los ajustes de los interruptores de la **Carga resistiva** a fin de disminuir paso a paso la resistencia de la carga R_{Carga} . Para cada valor de resistencia de la carga, registre los parámetros del circuito en la **Tabla de datos**.



Es posible que tenga que cortocircuitar el resistor R_1 utilizando un cable con conector de seguridad tipo banana para aumentar la carga al valor requerido.

34. Cuando la tensión del receptor E_R vuelva a ser aproximadamente 1,7% menor que la tensión del emisor E_E , reduzca la reactancia $X_{C Comp.}$ del banco de condensadores en derivación conmutables hasta el valor que se indica en la tabla 14 cambiando los ajustes de los interruptores del módulo **Carga capacitiva** utilizado para implementar los condensadores en derivación conmutables. Registre los parámetros del circuito en la **Tabla de datos**.

Tabla 14. Valor de reactancia $X_{C Comp.}$

Red de alimentación ca local		Valor de reactancia $X_{C Comp.}$ (Ω)
Tensión (V)	Frecuencia (Hz)	
120	60	1200
220	50	4400
240	50	4800
220	60	4400

35. Continúe aumentando gradualmente la carga en el extremo receptor de la línea hasta que la tensión del receptor E_R vuelva a ser aproximadamente 1,7% menor que la tensión del emisor E_E . Para ello, cambie los ajustes de los interruptores de la **Carga resistiva** a fin de disminuir paso a paso la resistencia de la carga R_{Carga} . Para cada valor de resistencia de la carga, registre los parámetros del circuito en la **Tabla de datos**.



Es posible que tenga que cortocircuitar el resistor R_1 utilizando un cable con conector de seguridad tipo banana para aumentar la carga al valor requerido.

36. En la **Fuente de alimentación**, apague la fuente de alimentación ca trifásica.

En la **Tabla de datos**, guarde los datos registrados.

37. Transfiera a una aplicación de hoja de cálculo los datos que ha registrado. Utilice los valores de la tensión del receptor E_R y de la potencia activa P_{carga} para trazar la curva de potencia-tensión de la línea de transmisión ca que se obtiene al utilizar compensación shunt conmutable (inductiva y capacitiva) para compensar la tensión. Además, utilice los valores registrados para trazar, en el mismo gráfico, una curva de la tensión del emisor E_E en función de la potencia activa P_{carga} . Este gráfico permite relacionar fácilmente la tensión del receptor E_R con la tensión del emisor E_E .

38. Compare la curva de potencia-tensión de la línea de transmisión ca que se obtiene al utilizar compensación shunt conmutable (inductiva y capacitiva) con la que se obtiene cuando se utiliza un solo inductor en derivación (shunt) conmutado para compensar la tensión (véase el paso 17). El uso de bancos de múltiples componentes reactivos en derivación para implementar la compensación shunt conmutable, ¿reduce la variación de la tensión del receptor E_R a medida que varía la potencia de la carga? Explique brevemente.

39. Observe la curva de potencia-tensión de la línea de transmisión ca obtenida con la compensación shunt conmutable (inductiva y capacitiva). El uso de la compensación shunt conmutable (inductiva y capacitiva), ¿permite mantener la tensión del receptor E_R cerca de la tensión del emisor E_E hasta una potencia de la carga significativamente superior a la carga natural real $P_{0\ Real}$ (registrada en el paso 18) de la línea de transmisión ca?

40. Utilice los valores registrados en la [Tabla de datos](#) para trazar una curva del desfase δ entre la tensión del receptor E_R y la tensión del emisor E_E en función de la potencia activa P_{carga} que se obtiene cuando se compensa la tensión en la línea de transmisión ca mediante compensación shunt conmutable (inductiva y capacitiva).

41. La curva que se obtiene, ¿confirma que el desfase δ entre la tensión del receptor E_R y la tensión del emisor E_E aumenta a medida que aumenta la potencia activa que se le suministra a la carga?

Sí No

42. ¿Confirman los valores de tensión del emisor E_E , tensión del receptor E_R , potencia activa P_{carga} y desfase δ , registrados en la [Tabla de datos](#), la ecuación que se muestra a continuación (la misma que se muestra en el apartado Discusión)? Explique.

$$P_{(comp.)} = 3 \left(\frac{E_E E_R}{X_L'} \text{sen } \delta \right)$$

43. Cierre LVDAC-EMS y después apague todos los equipos. Desconecte todos los conductores y devuélvalos a su sitio de almacenamiento.

CONCLUSIÓN

En este ejercicio, usted se familiarizó con la compensación de tensión de las líneas de transmisión ca de alta tensión que utilizan compensación shunt (en derivación). Usted aprendió que las líneas de transmisión ca compensadas mediante bancos de inductores en derivación conmutables pueden mantener la tensión del receptor E_R prácticamente igual a la tensión del emisor E_E hasta niveles de carga que exceden ligeramente la carga natural P_0 de la línea. Usted aprendió que cuando las líneas de transmisión ca tienen que funcionar con niveles de carga mucho más altos que la carga natural P_0 , se añaden bancos de condensadores en derivación conmutables para evitar que la tensión del receptor E_R disminuya y se vuelva menor que el límite de tensión mínimo. Se familiarizó con la relación entre la potencia activa que transmite una línea de transmisión ca con compensación de tensión y el desfase δ entre la tensión del receptor E_R y la tensión del emisor E_E . Aprendió que en condiciones normales de funcionamiento, la cantidad de potencia activa $P_{(comp.)}$ que transmite toda línea de transmisión ca con compensación de tensión se controla de modo que el desfase δ permanezca por debajo de 90° , a fin de mantener estable la operación de la línea. Finalmente, aprendió que en las redes de alimentación ca se suele limitar la cantidad de potencia activa $P_{(comp.)}$ que transmite toda línea de transmisión ca, de modo que el desfase δ nunca supere 30° . Esto brinda un margen de seguridad del 100%, a fin de que si una línea de transmisión falla, toda la potencia activa que transmite puede transferirse a otra línea de transmisión sin causar que el desfase δ exceda 90° .

PREGUNTAS DE REVISIÓN

1. Describa la compensación de tensión de una línea de transmisión ca de alta tensión en la que se utiliza un banco de inductores en derivación conmutables en cada extremo de la línea.

2. ¿Qué tipo de compensación de tensión es suficiente para compensar adecuadamente la tensión del receptor E_R en una línea de transmisión ca de alta tensión que opera a niveles de carga hasta la carga natural P_0 de la línea?

3. ¿Qué tipo de compensación de tensión se utiliza para compensar adecuadamente la tensión del receptor E_R en una línea de transmisión ca de alta tensión que puede operar a niveles de carga muy superiores a la carga natural P_0 de la línea?

4. Describa la compensación de tensión de una línea de transmisión ca de alta tensión que opera a niveles de carga significativamente superiores a la carga natural P_0 de la línea. Supongamos que se ha compensado la tensión de la línea mediante compensación conmutable (inductiva y capacitiva).

5. ¿Cómo varía el desfase δ entre la tensión del receptor E_R y la tensión del emisor E_E en función de la cantidad de potencia activa $P_{(comp.)}$ que transmite una línea de transmisión ca con compensación de tensión?

Efecto de la longitud sobre las características y la compensación de tensión de una línea de transmisión ca de alta tensión

OBJETIVO DEL EJERCICIO Cuando haya completado este ejercicio, conocerá los efectos de la longitud de una línea de transmisión ca de alta tensión sobre el circuito equivalente PI corregido, la impedancia característica Z_0 , la carga natural P_0 y la curva de potencia-tensión de la línea. También conocerá el efecto de la longitud de una línea de transmisión ca de alta tensión sobre el perfil de tensión a lo largo de la línea cuando se compensa la tensión en ambos extremos.

RESUMEN DE LOS PRINCIPIOS

Los Principios de este ejercicio cubren los siguientes puntos:

- Efecto de la longitud de la línea sobre el circuito equivalente PI corregido de una línea de transmisión ca
- Efecto de la longitud de la línea sobre la impedancia característica Z_0 y la carga natural P_0 de una línea de transmisión ca
- Efecto de la longitud de la línea sobre la curva de potencia-tensión de una línea de transmisión ca
- Efecto de la longitud de la línea sobre el perfil de tensión a lo largo de una línea de transmisión ca con compensación de tensión
- Medición de la tensión en el centro de una línea de transmisión ca larga emulada en el laboratorio

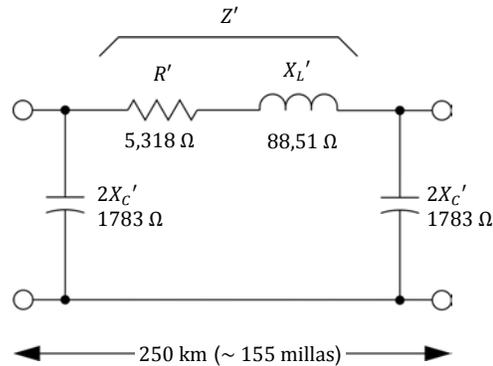
PRINCIPIOS

Efecto de la longitud de la línea sobre el circuito equivalente PI corregido de una línea de transmisión ca

La figura 36 muestra las características fundamentales de una línea de transmisión ca de alta tensión y el circuito equivalente PI corregido (una sola fase) de esta línea para una longitud de 250 km (unas 155 millas).

LÍNEA DE TRANSMISIÓN CA CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES	
Resistencia $R = 0,022 \Omega/\text{km}$	(0,035 Ω/milla)
Reactancia inductiva $X_L = 0,36 \Omega/\text{km}$	(0,58 Ω/milla)
Reactancia capacitiva $X_C = 225 \text{ k}\Omega/\text{km}$	(140 $\text{k}\Omega/\text{milla}$)

(a) Características fundamentales de la línea de transmisión ca



(b) Circuito equivalente PI corregido de la línea de transmisión

Figura 36. Características fundamentales de una línea de transmisión ca de alta tensión (315 kV) y circuito equivalente PI corregido (una sola fase) de esta línea de transmisión ca de alta tensión para una longitud de 250 km (unas 155 millas).

La figura 37 muestra el circuito equivalente PI corregido (una sola fase) de una línea de transmisión ca de alta tensión con las mismas características fundamentales pero con el doble de longitud, es decir, 500 km (unas 310 millas).

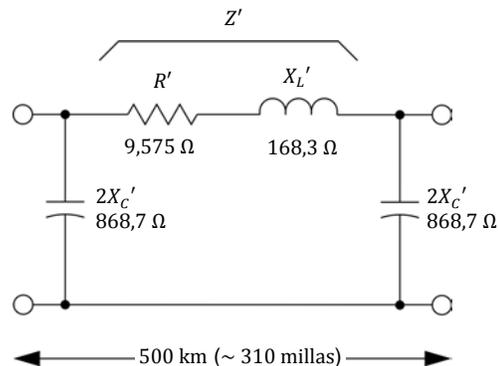


Figura 37. Circuito equivalente PI corregido (una sola fase) de una línea de transmisión ca de alta tensión (315 kV) que tiene el doble de longitud (500 km o unas 310 millas) de la línea que se muestra en la figura 36.

La comparación entre los circuitos equivalentes PI corregidos de estas dos líneas de transmisión muestra que la resistencia R' y la reactancia inductiva X_L' aumentan con la longitud de la línea; en cambio, la reactancia capacitiva $2X_C'$ disminuye.

Efecto de la longitud de la línea sobre la impedancia característica Z_0 y la carga natural P_0 de una línea de transmisión ca

Aunque la longitud de una línea de transmisión ca afecta directamente el valor de los componentes en el circuito equivalente PI corregido de la línea, no tiene ningún efecto sobre las características fundamentales de esta, es decir, la resistencia R , la reactancia inductiva X_L y la reactancia capacitiva X_C de la línea por unidad de longitud. Por consiguiente, la impedancia característica Z_0 de una línea de transmisión ca, que es igual a $\sqrt{X_L \cdot X_C}$, no depende de la longitud de la línea. Asimismo, la carga natural P_0 de una línea de transmisión ca también es independiente de la longitud de la línea, ya que depende de la impedancia característica Z_0 y de la tensión del receptor E_R , como lo indica la ecuación (6).

$$P_0 = \frac{E_R^2}{Z_0} \cdot 3 \quad (6)$$

Como se mencionó en el Ejercicio 2, la ecuación para calcular la impedancia característica Z_0 se basa en la suposición de que la línea de transmisión ca no tiene pérdidas (es decir, la resistencia de la línea es cero). No obstante, en las líneas de transmisión ca reales la resistencia no es cero. Por lo tanto, la impedancia de carga realmente necesaria para que la tensión del receptor E_R iguale a la tensión del emisor E_E es mayor que la impedancia característica Z_0 que se calcula con la ecuación. Por consiguiente, la potencia activa real que se le suministra a la carga es inferior a la carga natural P_0 que se calcula con la ecuación (6). Cuanto mayor sea la resistencia de la línea de transmisión ca por unidad de distancia (es decir, por kilómetro o por milla), mayor será la diferencia entre los valores reales y los valores calculados.

Efecto de la longitud de la línea sobre la curva de potencia-tensión de una línea de transmisión ca

Las curvas de potencia-tensión que se muestran en la figura 38 se basan en la suposición de que las líneas de transmisión ca no tienen pérdidas ($R = 0 \Omega$). Esto no tiene ningún efecto sobre las observaciones realizadas utilizando estas curvas.

La figura 38 muestra las curvas de potencia-tensión de las líneas de transmisión ca de alta tensión (315 kV) de 250 km y 500 km (unas 155 millas y 310 millas) que se muestran en la figura 36 y la figura 37.

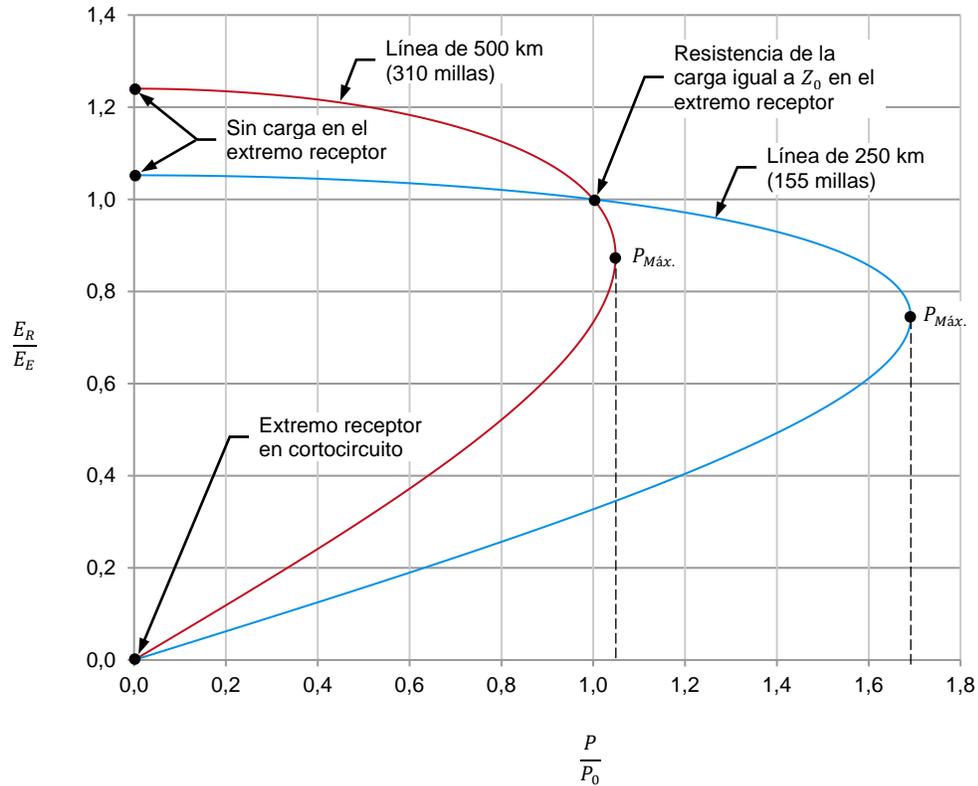


Figura 38. Curvas de potencia-tensión de las líneas de transmisión ca de alta tensión (315 kV) de 250 km y 500 km (unas 155 millas y 310 millas) que se muestran en la figura 36 y la figura 37.

La comparación de las curvas de potencia-tensión de estas dos líneas de transmisión ca permite realizar las siguientes observaciones generales:

1. El aumento de la longitud de una línea de transmisión ca hace que la tensión obtenida en el extremo receptor de la línea aumente significativamente cuando esta se deja abierta. Por ejemplo, en este caso concreto, la tensión en el extremo receptor de la línea pasa de $1,05E_E$ a $1,24E_E$ cuando la longitud de la línea aumenta de 250 km a 500 km (unas 155 millas a 310 millas).
2. Aumentar la longitud de una línea de transmisión ca hace disminuir significativamente la cantidad máxima de potencia activa $P_{Máx.}$ que la línea puede transmitir a una carga. Por ejemplo, en este caso concreto, la cantidad máxima de potencia activa que la línea puede transmitir pasa de aproximadamente $1,7P_0$ a cerca de $1,05P_0$ cuando la longitud de la línea aumenta de 250 km a 500 km (unas 155 millas a 310 millas).
3. El aumento de la longitud de una línea de transmisión ca incrementa significativamente la variación de la tensión del receptor E_R que se produce por un cambio en la cantidad de potencia activa P que transmite la línea. Por ejemplo, en este caso concreto, la tensión del receptor E_R de la línea de 250 km (unas 155 millas) pasa de $1,02E_E$ a $1,00E_E$ cuando la potencia activa P cambia de $0,80P_0$ a $1,00P_0$. Por otro lado, la tensión del receptor E_R de la línea de 500 km (unas 310 millas) pasa de $1,13E_E$ a $1,00E_E$ cuando la potencia activa P cambia de $0,80P_0$ a $1,00P_0$ (una variación 6,5 veces mayor).

Property of Festo Didactic

Sale and/or reproduction forbidden

En resumen, aumentar la longitud de una línea de transmisión ca tiene efectos indeseables. El aumento de tensión que ocurre en el extremo receptor cuando la línea está abierta resulta en una sobretensión más severa cuando se pierde la carga por alguna razón. Esto puede causar daños a la propia línea, así como a los equipos conectados a esta, incluso si se utiliza la compensación de tensión para que la tensión del receptor vuelva a su valor normal. Obviamente, la reducción de la cantidad máxima de potencia activa que la línea puede transmitir no es deseable. Finalmente, la mayor fluctuación de la tensión del receptor E_R con cambios en la potencia de la carga es molesta, ya que vuelve menos estable la operación de la línea de transmisión. Esto, a su vez, puede contribuir a reducir la estabilidad de la red de alimentación ca, lo cual es claramente indeseable.

Efecto de la longitud de la línea sobre el perfil de tensión a lo largo de una línea de transmisión ca con compensación de tensión

Como en cualquier otra línea de transmisión ca, es posible compensar la tensión de la línea de 500 km (unas 310 millas) de la figura 37 utilizando compensación shunt conmutable en ambos extremos, comenzando con un inductor en derivación con una reactancia de 868,7 Ω cuando no se aplica ninguna carga al extremo receptor de la línea. Esto permite mantener la tensión del receptor E_R cercana a la tensión del emisor E_E sobre un amplio margen de potencia de la carga. Sin embargo, ello no impide que la tensión en todo punto intermedio a lo largo de la línea difiera de la tensión del emisor E_E . La razón por la que ello ocurre se explica a continuación.

Recuerde que la reactancia inductiva (X_L) y la reactancia capacitiva (X_C) en toda línea de transmisión ca se distribuyen a lo largo de la línea y no se concentran en unos pocos componentes como en el circuito equivalente PI corregido de la línea. De hecho, la tensión en varios puntos distribuidos a lo largo de la línea de transmisión ca (es decir, el perfil de tensión a lo largo de la línea) se puede hallar resolviendo el circuito equivalente de parámetros distribuidos de la línea. La figura 39 muestra el perfil de tensión resultante a lo largo de una línea de transmisión ca en la que se ha compensado la tensión utilizando compensación shunt conmutable (SSC) en ambos extremos, y que opera a una potencia de la carga inferior a la carga natural P_0 .

Ejercicio 4 – Efecto de la longitud sobre las características y la compensación de tensión de una línea de transmisión ca de alta tensión ♦ *Principios*

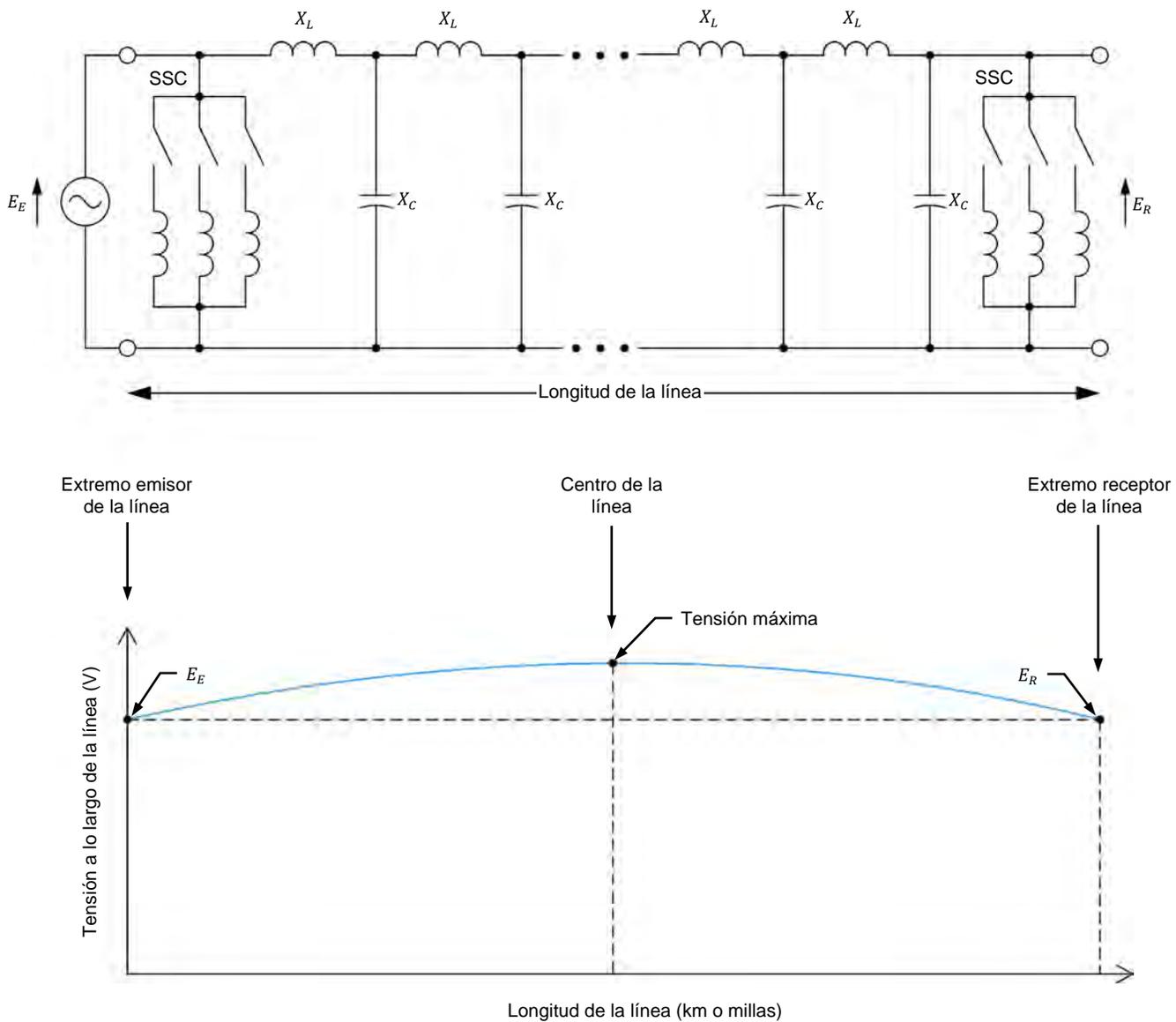


Figura 39. Perfil de tensión a lo largo de una línea de transmisión ca en la que se ha compensado la tensión utilizando compensación shunt conmutable en ambos extremos, y que opera a una potencia de la carga inferior a la carga natural P_0 . Se muestra una fase de la línea de transmisión ca.

Como era de esperar, la tensión es la misma en los extremos emisor y receptor de la línea, ya que se ha compensado la tensión de la línea. Sin embargo, la tensión a lo largo de la línea aumenta a medida que uno se mueve desde cualquier extremo hacia el centro de esta, alcanzando la tensión un valor máximo en el centro de la línea. Esto confirma la afirmación hecha anteriormente de que el uso de compensación de tensión, como la compensación shunt conmutable, en ambos extremos de una línea de transmisión ca, no impide que la tensión en todo punto intermedio de dicha línea difiera de la tensión del emisor E_E .

La longitud de la línea tiene un efecto directo sobre el valor que alcanza la tensión en el centro de la línea de transmisión ca. Cuanto más larga sea la línea, mayor será la tensión en el centro de esta. Esto se ilustra en la figura 40, que muestra los perfiles de tensión a lo largo de las líneas de 250 km y 500 km (unas 155 millas y 310 millas) de la figura 36 y la figura 37, cuando se les compensa la tensión mediante compensación shunt conmutable en ambos extremos, y dichas líneas funcionan sin carga. En este caso concreto, la tensión en el centro de la línea (es decir, la tensión máxima a lo largo de toda la línea) solo alcanza $1,012E_E$ para la línea de 250 km, y $1,052E_E$ para la línea de 500 km.



El perfil de tensión a lo largo de una línea de transmisión ca en la que se compensa la tensión mediante compensación shunt conmutable en ambos extremos también depende de la cantidad de potencia activa que se le transmite a la carga. El perfil de tensión se aplanan a medida que aumenta la potencia que se le transmite a la carga. Suponiendo una línea de transmisión ca sin pérdidas, el perfil de tensión se vuelve perfectamente plano cuando la potencia de la carga aumenta hasta la carga natural P_0 .

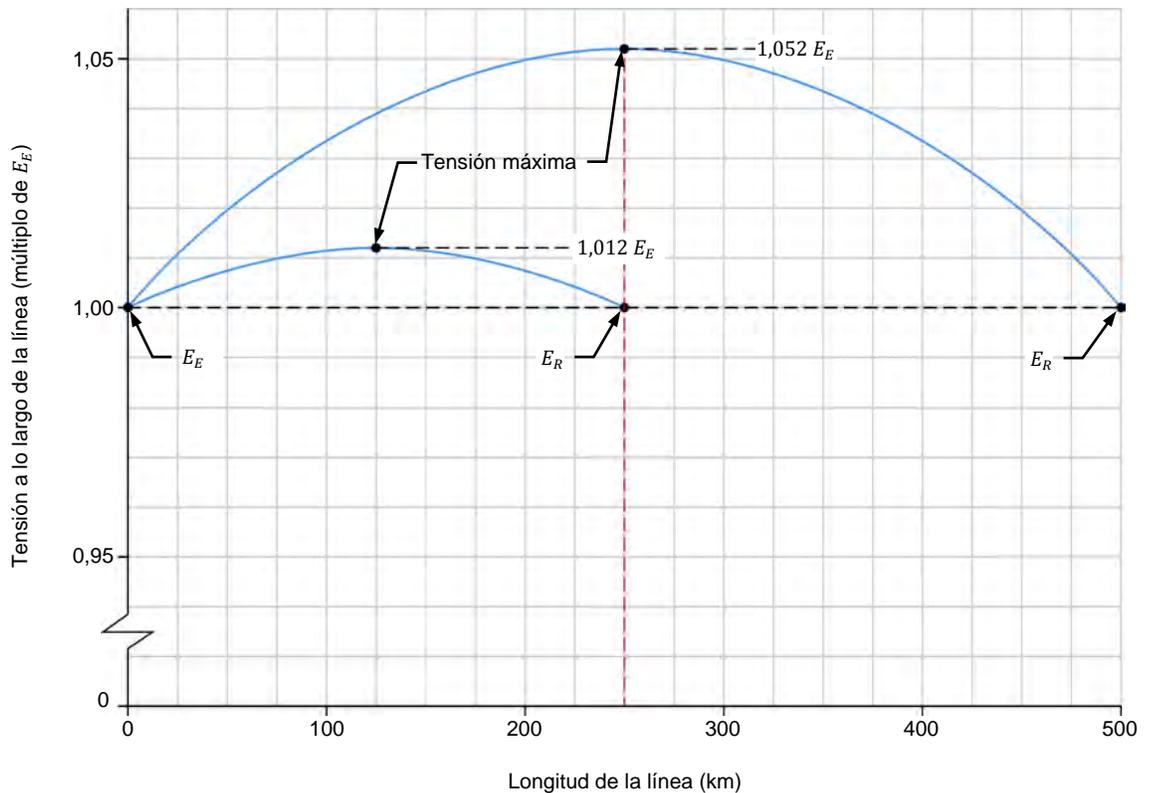


Figura 40. Perfiles de tensión a lo largo de las líneas de transmisión ca de 250 km (155 millas) y 500 km (310 millas), que se muestran en la figura 36 y la figura 37, cuando se les compensa la tensión mediante compensación shunt conmutable en ambos extremos, y funcionan sin carga.

La figura 40 demuestra que, a medida que aumenta la longitud de la línea, la compensación de tensión en ambos extremos de una línea de transmisión ca se vuelve menos eficaz en evitar que la tensión en todo punto a lo largo de la línea difiera de la tensión del emisor E_E . De hecho, la compensación de tensión en ambos extremos de una línea de transmisión ca puede utilizarse eficazmente siempre y cuando la tensión en el centro de esta no exceda el margen de tensión en el que la línea puede operar. Por consiguiente, esto limita la longitud

máxima de la línea para la que se puede utilizar la compensación de tensión en ambos extremos de la línea. Para las líneas de transmisión ca que superan esta longitud máxima, la compensación de tensión debe distribuirse en varios puntos sobre la línea para garantizar que la tensión a lo largo de esta se mantenga dentro del margen de operación normal de la línea. Esto se discute en el próximo ejercicio de este manual.

Medición de la tensión en el centro de una línea de transmisión ca larga emulada en el laboratorio

Toda línea de transmisión ca larga puede representarse conectando, en serie, varios circuitos equivalentes PI corregidos de una línea de transmisión ca más corta que tenga las mismas características fundamentales (es decir, con los mismos valores de R , X_L y X_C por unidad de longitud), como se menciona en el Ejercicio 2 de este manual. Por ejemplo, la línea de transmisión ca de 500 km (unas 310 millas) de la figura 37 puede representarse conectando dos circuitos equivalentes PI corregidos de la línea de 250 km (unas 155 millas) de la figura 36. Esto se muestra en la figura 41.

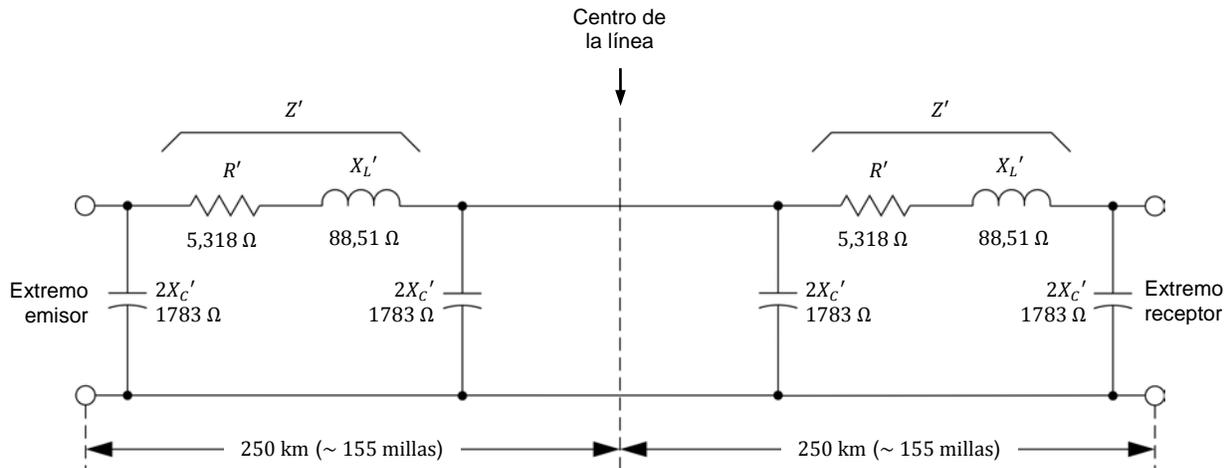


Figura 41. Línea de transmisión ca de 500 km (unas 310 millas) representada mediante dos circuitos equivalentes PI corregidos de una línea de 250 km (unas 155 millas) (con las mismas características fundamentales) conectados en serie. Se muestra una fase de la línea de transmisión ca.

El circuito equivalente PI corregido de toda línea de transmisión ca de longitud razonable proporciona valores muy exactos de la tensión y la corriente en los extremos emisor y receptor de la línea, como se menciona en el Ejercicio 2 de este manual. Por consiguiente, la tensión en el extremo receptor del circuito equivalente PI corregido que representa la primera mitad de la línea de transmisión ca de 500 km (unas 310 millas) en la figura 41 proporciona el valor exacto de la tensión en el centro de la línea, es decir, la tensión máxima a lo largo de toda la línea cuando se compensa adecuadamente la tensión. Esta técnica se utiliza en las manipulaciones prácticas de este ejercicio para emular una línea de transmisión ca larga, ya que permite medir la tensión en ambos extremos de la línea y en el centro de esta.

RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO

El Procedimiento consta de las secciones siguientes:

- Montaje y conexiones
- Curva de potencia-tensión de la línea de transmisión ca
- Tensión en el centro de una línea de transmisión ca larga con compensación de tensión en ambos extremos

PROCEDIMIENTO



En este ejercicio se trabaja con altas tensiones. No haga ni modifique ninguna conexión con las fichas tipo banana cuando la alimentación esté encendida, a menos que se especifique lo contrario.

Montaje y conexiones

En esta sección, usted conectará un circuito que representa una fase de una línea de transmisión ca de 700 km (unas 435 millas). Ajustará el equipo de medición para medir los parámetros de la línea de transmisión ca.

1. Consulte en el Apéndice A la Tabla de utilización del equipo, a fin de obtener la lista de los equipos necesarios para realizar este ejercicio.

Instale el equipo requerido en el [Puesto de trabajo](#).

2. Asegúrese de que los interruptores de alimentación ca y cc de la [Fuente de alimentación](#) estén en la posición O (apagado), después conecte dicha fuente a una toma ca trifásica.

Conecte la entrada [Alimentación](#) de la [Interfaz de adquisición de datos y de control](#) a la fuente de alimentación ca de 24 V. Encienda la fuente de alimentación ca de 24 V.

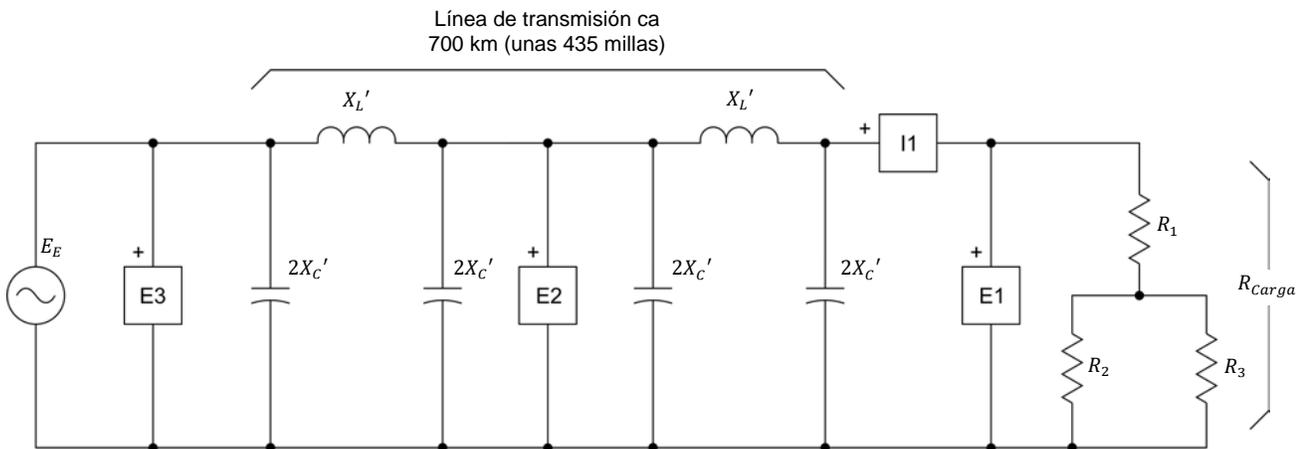
3. Conecte el Puerto USB de la [Interfaz de adquisición de datos y de control](#) a un puerto USB de la computadora.

4. Encienda la computadora e inicie el software [LVDAC-EMS](#).

En la ventana Arranque de [LVDAC-EMS](#), asegúrese de que la [Interfaz de adquisición de datos y de control](#) haya sido detectada. Asegúrese de que en la [Interfaz de adquisición de datos y de control](#) esté disponible la función [Instrumentación computarizada](#). Seleccione la tensión y frecuencia de la red correspondientes a la tensión y frecuencia de su red eléctrica ca local, y después haga clic en el botón [Aceptar](#) para cerrar la ventana [Arranque de LVDAC-EMS](#).

5. Conecte el circuito que se muestra en la figura 42, el cual representa una fase de un sistema trifásico de transmisión de energía. El circuito, que es similar al que se utilizó en el ejercicio anterior, consiste en una fuente de alimentación ca que alimenta a una carga resistiva a través de una línea de transmisión ca de 700 km (unas 435 millas) representada por dos circuitos equivalentes PI corregidos de una línea de 350 km (unas 217 millas) con las mismas características fundamentales. Adviértase que el circuito equivalente PI corregido de la línea de 350 km (unas 217 millas) es idéntico al que se utilizó en los ejercicios anteriores. Un voltímetro (entrada *E2*) conectado entre los dos circuitos equivalentes PI corregidos permite medir la tensión en el centro de la línea de 700 km.

Cada uno de los dos inductores de la línea de transmisión ca se implementa utilizando una fase de la [Línea de transmisión trifásica](#). Cada uno de los cuatro condensadores de la línea de transmisión ca se implementa con una sección de condensadores (grupo de 3 condensadores conectados en paralelo) de uno de los dos módulos [Carga capacitiva](#). La carga consiste en una disposición serie-paralelo de tres resistores. Cada uno de estos resistores se implementa con una sección de resistores (grupo de 3 resistores conectados en paralelo) de la [Carga Resistiva](#).



Red de alimentación ca local		X_L' (Ω)	$2X_C'$ (Ω)	R_{carga} (Ω)
Tensión (V)	Frecuencia (Hz)			
120	60	120	1200	∞
220	50	400	4400	∞
240	50	400	4800	∞
220	60	400	4400	∞

Figura 42. Línea de transmisión ca de 700 km (unas 435 millas) que alimenta a una carga resistiva (una sola fase).

6. En la **Línea de transmisión trifásica**, asegúrese de que el interruptor de palanca I/O esté en la posición I, después ajuste la reactancia X_L' de los inductores de línea al valor que se indica en la tabla de la figura 42.

En los módulos **Carga capacitiva**, ajuste la reactancia $2X_C$ de los condensadores en la línea al valor indicado en la tabla de la figura 42.

En la **Carga resistiva**, abra todos los interruptores para que la resistencia de la carga R_{Carga} sea infinita.

7. La figura 43 muestra las características fundamentales y el circuito equivalente PI corregido de la línea de transmisión ca de 700 km (unas 435 millas) de la figura 42, para las diversas combinaciones de tensión y frecuencia de la red de alimentación ca local.



Las características fundamentales de la línea de transmisión ca de 700 km (unas 435 millas) de la figura 42, a tensiones de 220 V y 240 V en la red de alimentación ca, se han ajustado específicamente para tener en cuenta la potencia nominal de funcionamiento (0,2 kW) del equipo suministrado. Por lo tanto, las características fundamentales X_L y X_C de la línea de transmisión ca a tensiones de 220 V y 240 V en la red de alimentación ca difieren significativamente de las de las líneas de transmisión ca reales. Sin embargo, esto no afecta el comportamiento de la línea de transmisión ca implementada con el equipo que se suministra, el cual es muy similar al de las líneas de transmisión ca reales.

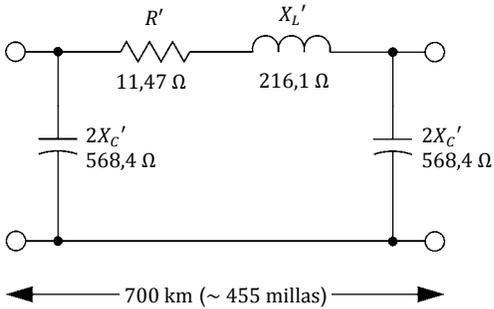
8. En **LVDAC-EMS**, abra la ventana **Aparatos de medición**, después abra el cuadro de diálogo **Ajustes de adquisición**. Ajuste la **Ventana de muestreo** a 8 ciclos, después haga clic en **Aceptar** para cerrar el cuadro de diálogo. Esto proporciona una mejor exactitud al medir ciertos parámetros de la línea de transmisión ca.

En la ventana **Aparatos de medición**, realice los ajustes necesarios para medir la tensión del emisor E_E (entrada **E3**), la tensión E_{Centro} en el centro de la línea (entrada **E2**), la tensión del receptor E_R (entrada **E1**), la corriente de la carga I_{Carga} (entrada **I1**) y la potencia activa P_{Carga} que se le suministra a la carga [**PQS1(E1,I1)**]. Ajuste los medidores en el modo de regeneración continua.

Ejercicio 4 – Efecto de la longitud sobre las características y la compensación de tensión de una línea de transmisión ca de alta tensión ♦ *Procedimiento*

CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES DE LA LÍNEA	
Resistencia $R = 0,022 \Omega/\text{km}$	(0,035 Ω/milla)
Reactancia inductiva $X_L = 0,355 \Omega/\text{km}$	(0,571 Ω/milla)
Reactancia capacitiva $X_C = 213,6 \text{ k}\Omega/\text{km}$	(132,7 $\text{k}\Omega/\text{milla}$)

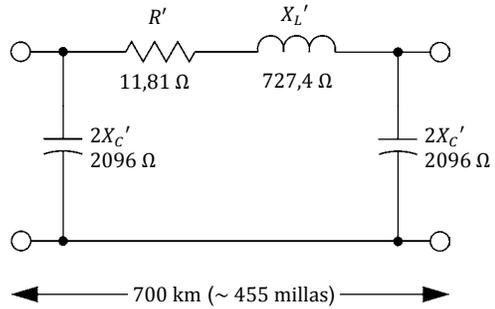
Circuito equivalente PI corregido



(a) 120 V, 60 Hz

CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES DE LA LÍNEA	
Resistencia $R = 0,022 \Omega/\text{km}$	(0,035 Ω/milla)
Reactancia inductiva $X_L = 1,179 \Omega/\text{km}$	(1,898 Ω/milla)
Reactancia capacitiva $X_C = 782,2 \text{ k}\Omega/\text{km}$	(486,0 $\text{k}\Omega/\text{milla}$)

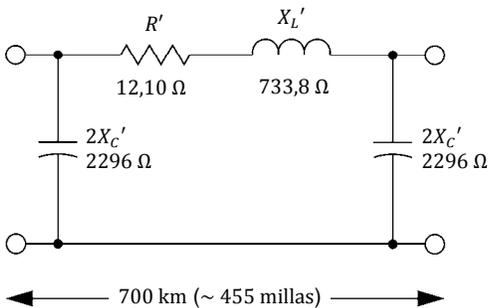
Circuito equivalente PI corregido



(b) 220 V, 50 Hz

CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES DE LA LÍNEA	
Resistencia $R = 0,022 \Omega/\text{km}$	(0,035 Ω/milla)
Reactancia inductiva $X_L = 1,177 \Omega/\text{km}$	(1,894 Ω/milla)
Reactancia capacitiva $X_C = 852,1 \text{ k}\Omega/\text{km}$	(529,4 $\text{k}\Omega/\text{milla}$)

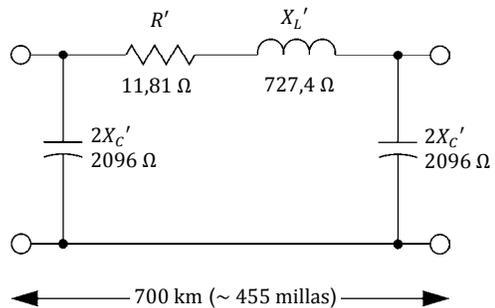
Circuito equivalente PI corregido



(c) 240 V, 50 Hz

CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES DE LA LÍNEA	
Resistencia $R = 0,022 \Omega/\text{km}$	(0,035 Ω/milla)
Reactancia inductiva $X_L = 1,179 \Omega/\text{km}$	(1,898 Ω/milla)
Reactancia capacitiva $X_C = 782,2 \text{ k}\Omega/\text{km}$	(486,0 $\text{k}\Omega/\text{milla}$)

Circuito equivalente PI corregido



(d) 220 V, 60 Hz

Figura 43. Características fundamentales y circuito equivalente PI corregido (una sola fase) de la línea de transmisión ca de 700 km (unas 435 millas) de la figura 42 para las diversas combinaciones de tensión y frecuencia de la red de alimentación ca local.

Curva de potencia-tensión de la línea de transmisión ca

En esta sección, usted disminuirá gradualmente la resistencia de la carga resistiva conectada al extremo receptor de la línea de transmisión ca de 700 km (unas 435 millas) y registrará, para cada valor de resistencia de la carga, la tensión del emisor, la tensión en el centro de la línea, la tensión del receptor, la corriente de la carga y la potencia activa de la carga. Después utilizará los resultados para trazar la curva de potencia-tensión de la línea. Comparará sus resultados con los que se obtuvieron en el Ejercicio 2 para la línea de transmisión ca de 350 km (unas 217 millas).

9. En la Fuente de alimentación, encienda la fuente de alimentación ca trifásica.
10. En LVDAC-EMS, abra la ventana **Tabla de datos**. Ajuste la **Tabla de datos** para registrar los parámetros del circuito, es decir, la tensión del emisor E_E , la tensión E_{Centro} en el centro de la línea, la tensión del receptor E_R , la corriente de la carga I_{Carga} y la potencia activa P_{Carga} que se le suministra a la carga.
11. Registre los parámetros del circuito en la **Tabla de datos**.
12. Aumente gradualmente la carga en el extremo receptor de la línea. Para ello, cambie los ajustes de los interruptores de la **Carga resistiva** a fin de que la resistencia de la carga R_{Carga} varíe entre los valores máximo y mínimo, en unos 20 a 25 pasos, que se indican en la tabla 15 para su red de alimentación ca local. Para cada valor de resistencia de la carga, registre los parámetros del circuito en la **Tabla de datos**.



El resistor R_1 se debe cortocircuitar para obtener los valores de resistencia más bajos.

Tabla 15. Valores máximos y mínimos de resistencia de la carga R_{Carga} .

Red de alimentación ca local		Resistencia de la carga R_{Carga} (Ω)	
Tensión (V)	Frecuencia (Hz)	Valor máximo	Valor mínimo
120	60	2400	86
220	50	8800	314
240	50	9600	343
220	60	8800	314

13. Cortocircuite el extremo receptor de la línea ($R_{Carga} = 0 \Omega$), después registre los parámetros del circuito en la **Tabla de datos**.

En la Fuente de alimentación, apague la fuente de alimentación ca trifásica.

En la ventana **Tabla de datos**, guarde los datos registrados.

Property of Festo Didactic

Sale and/or reproduction forbidden

14. Transfiera a una aplicación de hoja de cálculo los datos que ha registrado. Utilice los valores de la tensión del receptor E_R y de la potencia activa P_{Carga} para trazar la curva de potencia-tensión de la línea de transmisión ca.

15. A fin de responder las siguientes tres preguntas, compare la curva de potencia-tensión de la línea de transmisión ca de 700 km (unas 435 millas) trazada en el paso anterior con la curva de potencia-tensión de la línea de transmisión ca de 350 km (unas 217 millas) que se trazó en el paso 15 del Ejercicio 2.

¿Cómo afecta el aumento de la longitud de la línea a la tensión del receptor E_R que se obtiene al dejar la línea abierta? Explique.

¿Cómo afecta el aumento de la longitud de la línea a la cantidad máxima de potencia activa $P_{Máx.}$ que la línea puede transmitir a una carga? Explique.

¿Cómo afecta el aumento de la longitud de la línea a la variación de la tensión del receptor E_R que se produce por un cambio en la cantidad de potencia activa P que transmite la línea?

Tensión en el centro de una línea de transmisión ca larga con compensación de tensión en ambos extremos

En esta sección, usted conectará un banco de inductores en derivación conmutables al extremo receptor de la línea y ajustará la reactancia $X_{L(Comp.)}$ de este banco de inductores para que la tensión del receptor sea lo más cercana posible a la tensión del emisor. Después, medirá la tensión en el centro de la línea y determinará si la compensación de tensión es suficiente para mantener la tensión a lo largo de la línea cerca de la tensión del emisor.

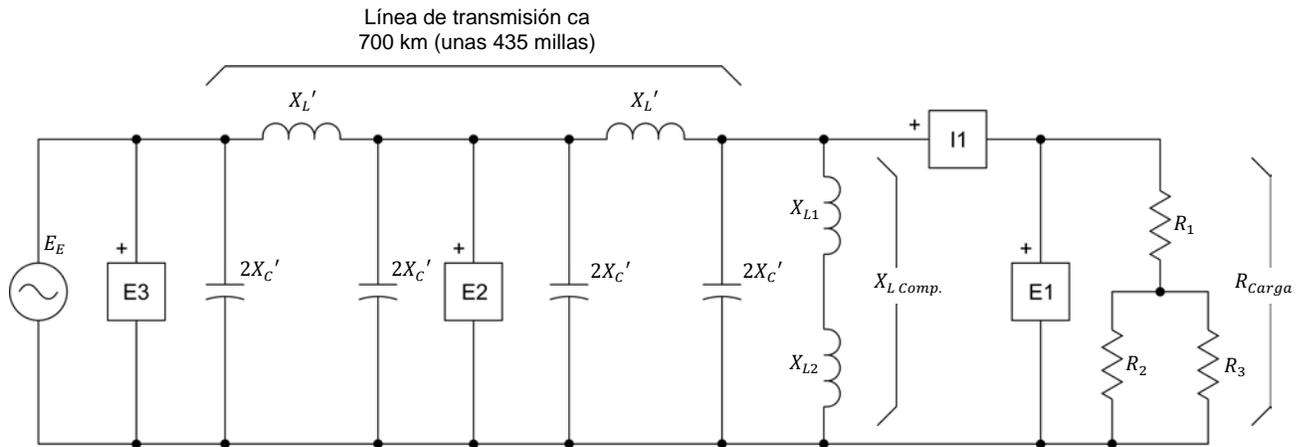
Property of Festo Didactic

Sale and/or reproduction forbidden

16. Conecte un banco de inductores en derivación conmutables al extremo receptor de la línea de 700 km (unas 435 millas), como se muestra en la figura 44. Para ello, conecte en serie dos secciones de inductores (grupos de 3 inductores conectados en paralelo) del módulo **Carga inductiva** para implementar los inductores X_{L1} y X_{L2} en el banco de inductores en derivación conmutables.



A fin de limitar la cantidad de equipo necesario para realizar este ejercicio, no se utiliza ninguna compensación shunt conmutable (SSC) en el extremo emisor de la línea de transmisión ca. Esto no representa ningún problema, ya que la fuente de alimentación ca suministra la potencia reactiva necesaria en el extremo emisor de la línea para la compensación de tensión. En otras palabras, la línea tiene compensación de tensión en ambos extremos de forma similar a cuando se utiliza la compensación shunt conmutable en ambos extremos de la línea.



Red de alimentación ca local		X_L' (Ω)	$2X_C'$ (Ω)	$X_{L Comp.}$ (Ω)	R_{Carga} (Ω)
Tensión (V)	Frecuencia (Hz)				
120	60	120	1200	∞	∞
220	50	400	4400	∞	∞
240	50	400	4800	∞	∞
220	60	400	4400	∞	∞

Figura 44. Línea de transmisión ca de 700 km (unas 435 millas) con compensación shunt conmutable en el extremo receptor (una sola fase).

17. En la **Línea de transmisión trifásica**, asegúrese de que la reactancia X_L' de los inductores de línea esté ajustada al valor que se indica en la tabla de la figura 44.

En los módulos **Carga capacitiva**, asegúrese de que la reactancia $2X_C'$ de los condensadores en la línea estén ajustados al valor que se indica en la tabla de la figura 44.

En la **Carga inductiva**, abra todos los interruptores para ajustar por ahora a infinito la reactancia $X_{L\text{Comp}}$ del banco de inductores en derivación conmutables. La reactancia $X_{L\text{Comp}}$ del banco de inductores en derivación conmutables se reajustará más adelante en el ejercicio.

En la **Carga resistiva**, abra todos los interruptores para que la resistencia de la carga R_{carga} sea infinita.

18. En la **Fuente de alimentación**, encienda la fuente de alimentación ca trifásica. ¿Supera de manera importante la tensión del receptor E_R a la tensión del emisor E_E ? Explique.

19. En la **Carga inductiva**, ajuste la reactancia $X_{L\text{Comp}}$ del banco de inductores en derivación conmutables de modo que la tensión del receptor E_R esté lo más cerca posible de la tensión del emisor E_E . Después, registre el valor de la reactancia $X_{L\text{Comp}}$ del banco de inductores en derivación conmutables.

$X_{L\text{Comp}}$ ($E_R = E_E$), línea abierta = _____ Ω

La reactancia $X_{L\text{Comp}}$ del banco de inductores en derivación conmutables necesaria para la compensación de tensión de la línea abierta, ¿es prácticamente igual a la reactancia $2X_C'$ de los condensadores en el circuito equivalente PI corregido de la línea de transmisión ca de 700 km (unas 435 millas) que se muestra en la figura 43? Explique.

20. Registre el valor de la tensión del emisor E_E , la tensión del receptor E_R y la tensión E_{centro} en el centro de la línea, cuando la línea está abierta (condición sin carga).

$E_E =$ _____ V

$E_R =$ _____ V

$E_{\text{centro}} =$ _____ V

Compare la tensión E_{Centro} medida en el centro de la línea con la tensión del emisor E_E y la tensión del receptor E_R . ¿Son diferentes? Explique.

A partir de sus observaciones, ¿es suficiente la compensación de tensión en ambos extremos de una línea de transmisión ca larga para mantener la tensión a lo largo de toda la línea cerca de la tensión del emisor E_E ?

Sí No

21. Cierre LVDAC-EMS y después apague todos los equipos. Desconecte todos los conductores y devuélvalos a su sitio de almacenamiento.

CONCLUSIÓN

En este ejercicio, usted aprendió que la longitud de una línea de transmisión ca de alta tensión afecta directamente el valor de los componentes en el circuito equivalente PI corregido de la línea. Sin embargo, la longitud de la línea no tiene ningún efecto sobre la impedancia característica Z_0 ni la carga natural P_0 de la línea. También aprendió que el aumento de la longitud de una línea de transmisión ca de alta tensión modifica la curva de potencia-tensión de la línea, y que ello tiene varios efectos indeseables en la operación de la línea. Finalmente, usted observó que a medida que aumenta la longitud de la línea, la compensación de tensión en ambos extremos de una línea de transmisión ca se vuelve menos eficaz en evitar que la tensión en todo punto a lo largo de la línea difiera de la tensión del emisor E_E .

PREGUNTAS DE REVISIÓN

1. ¿Cómo varían los valores de los componentes en el circuito equivalente PI corregido de una línea de transmisión ca de alta tensión cuando la longitud de la línea aumenta?

2. ¿Afecta la longitud de una línea de transmisión ca a los valores de la impedancia característica Z_0 y de la carga natural P_0 de la línea? Explique por qué.

3. Cuando la longitud de una línea de transmisión ca de alta tensión se duplica, por ejemplo, de 250 km a 500 km (de unas 155 millas a unas 310 millas), explique cómo varían los siguientes parámetros: la tensión del receptor E_R que se obtiene al dejar la línea abierta, la cantidad máxima de potencia activa $P_{Máx.}$ que la línea puede transmitir a una carga, y la variación de la tensión del receptor E_R que se produce por un cambio dado en la cantidad de potencia activa P que transmite la línea.

4. Describa los efectos indeseables de aumentar la longitud de una línea de transmisión ca de alta tensión.

5. ¿Qué efecto tiene la longitud de la línea sobre el valor que puede alcanzar la tensión en el centro de una línea de transmisión ca cuando la tensión de la línea se compensa en ambos extremos? Explique.

Compensación de tensión de una línea de transmisión ca larga y de alta tensión mediante compensación shunt conmutable distribuida

OBJETIVO DEL EJERCICIO Cuando haya completado este ejercicio, sabrá cómo suavizar el perfil de tensión de una línea de transmisión ca de alta tensión utilizando compensación shunt conmutable (SSC) distribuida a lo largo de la línea. También sabrá cómo usar las ecuaciones presentadas en el Ejercicio 3 para calcular la potencia transmisible máxima de una línea de transmisión ca de alta tensión compensada mediante SSC distribuida. Conocerá la relación entre la longitud de la línea y el desfase δ entre las tensiones del receptor y del emisor en una línea de transmisión ca con compensación de tensión. También conocerá el efecto que tiene la longitud de la línea sobre la estabilidad de una línea de transmisión ca con compensación de tensión mediante SSC.

RESUMEN DE LOS PRINCIPIOS

Los Principios de este ejercicio cubren los siguientes puntos:

- Corrección del perfil de tensión de una línea de transmisión ca mediante distribución de la compensación shunt conmutable a lo largo de la línea.
- Potencia máxima transmisible de una línea de transmisión ca con compensación de tensión mediante SSC distribuida.
- Relación entre la longitud de la línea y el desfase en una línea de transmisión ca con compensación de tensión
- Efecto de la longitud de la línea sobre la estabilidad de una línea de transmisión ca con compensación de tensión mediante compensación shunt conmutable

PRINCIPIOS

Corrección del perfil de tensión de una línea de transmisión ca mediante distribución de la compensación shunt conmutable a lo largo de la línea.

En el ejercicio anterior, se ha demostrado que, a medida que aumenta la longitud de la línea, la compensación de tensión de una línea de transmisión ca mediante compensación shunt conmutable en ambos extremos de la línea resulta menos eficaz en evitar que la tensión en todo punto a lo largo de la línea difiera de la tensión del emisor E_E . Por consiguiente, esto limita la longitud máxima de la línea para la que puede utilizarse compensación de tensión, mediante compensación shunt conmutable, en ambos extremos a fin de evitar que la tensión a lo largo de la línea exceda a la tensión máxima a la que puede operar la línea. Esto se ilustra en la figura 45, que muestra los perfiles de tensión a lo largo de las líneas de 250 km y 500 km (unas 155 millas y 310 millas) que se muestran en la discusión del Ejercicio 4, cuando en estas se compensa la tensión mediante compensación shunt conmutable en ambos extremos, y operan sin carga.

En este ejemplo, el perfil de tensión a lo largo de la línea de 250 km está siempre por debajo de la tensión máxima a la que la línea puede operar. Por otro lado, el perfil de tensión a lo largo de la línea de 500 km supera ampliamente a la tensión máxima a la que puede la línea puede operar.

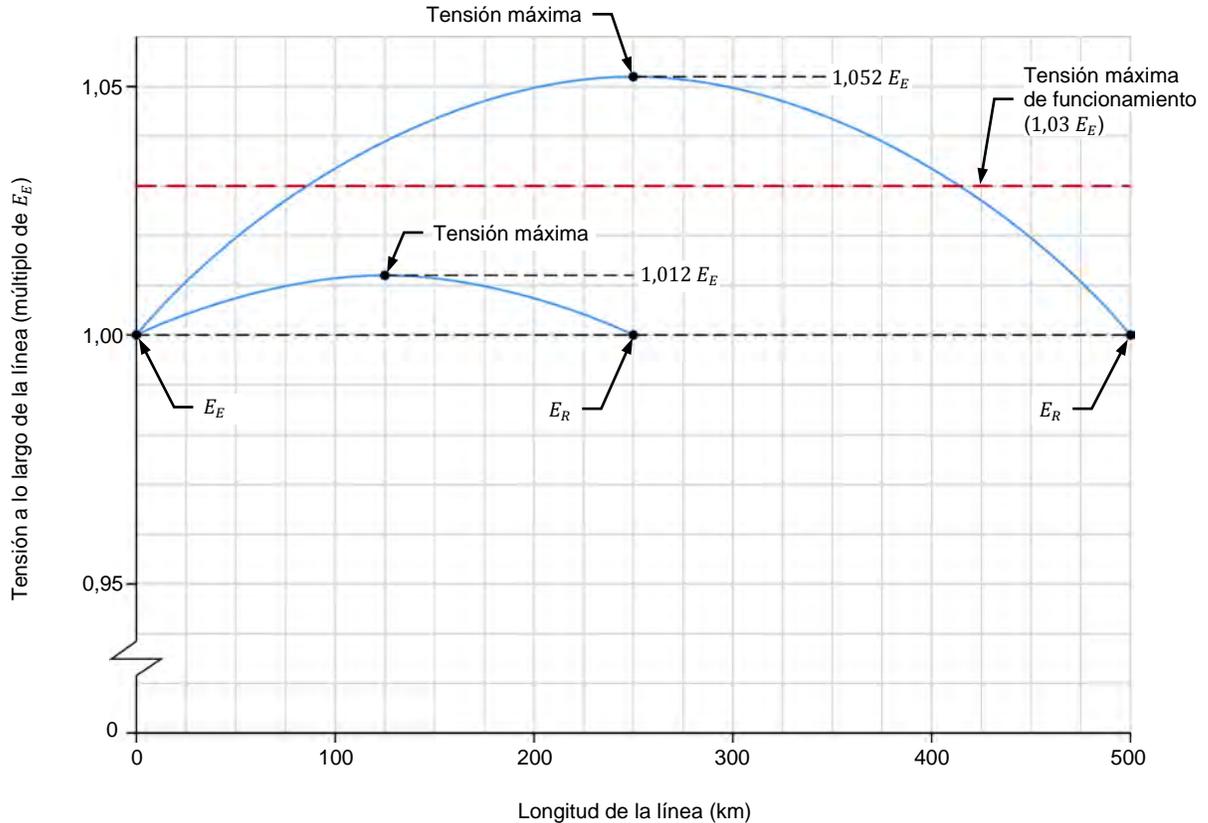


Figura 45. Perfiles de tensión a lo largo de las líneas de transmisión ca de 250 km (155 millas) y 500 km (310 millas), que se muestran en la discusión del Ejercicio 4, cuando se compensa la tensión mediante compensación shunt conmutable en ambos extremos, y funcionan sin carga.

Este problema se puede resolver añadiendo compensación shunt conmutable (SSC) en el centro de la línea de transmisión ca, como se muestra en la figura 46. En este ejemplo, la línea de transmisión ca de 500 km (unas 310 millas), que se mencionó anteriormente, está representada por dos circuitos equivalentes PI corregidos idénticos, conectados en serie, los cuales representan, cada uno, una mitad de la línea. Adviértase que añadir SSC en el centro de la línea de transmisión ca equivale a tener SSC en ambos extremos de cada mitad de la línea.

La adición de SSC en el centro de la línea de transmisión ca mantiene la tensión en ese punto cerca de la tensión del emisor E_E y modifica notablemente todo el perfil de tensión de la línea. La figura 47 muestra los perfiles de tensión a lo largo de la línea de transmisión ca de 500 km (unas 310 millas), que se mencionó anteriormente, cuando la SSC se utiliza solo en ambos extremos de la línea, y cuando se la utiliza en ambos extremos de la línea y en el centro de esta. Adviértase que el perfil de tensión a lo largo de la línea de 500 km no excede la tensión máxima a la que puede operar la línea cuando se utiliza SSC en los dos extremos y en el centro de la línea. Asimismo, obsérvese que en esta

Ejercicio 5 – Compensación de tensión de una línea de transmisión ca larga y de alta tensión mediante compensación shunt conmutable distribuida ♦ Principios

situación el perfil de tensión a lo largo de cada mitad de la línea de 500 km es igual al perfil de tensión (mostrado en la figura 45) a lo largo de la línea de 250 km (unas 155 millas) cuando se compensa la tensión mediante compensación shunt conmutable solo en ambos extremos.

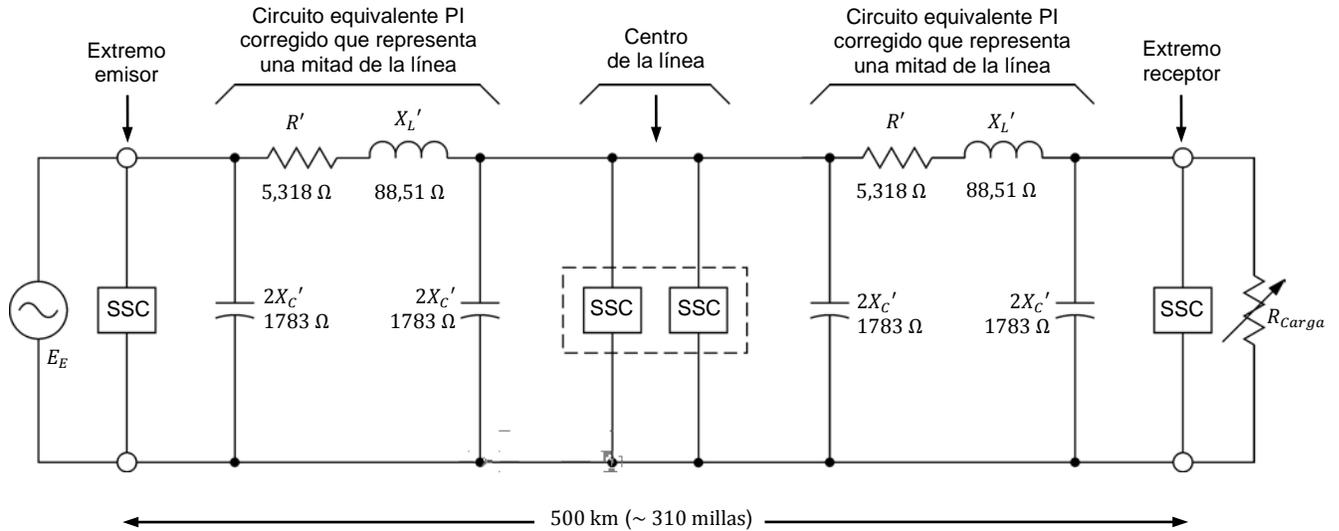


Figura 46. Línea de transmisión ca de 500 km (unas 310 millas) con compensación shunt conmutable (SSC) en ambos extremos y en el centro de la línea. Se muestra una fase de la línea de transmisión ca.

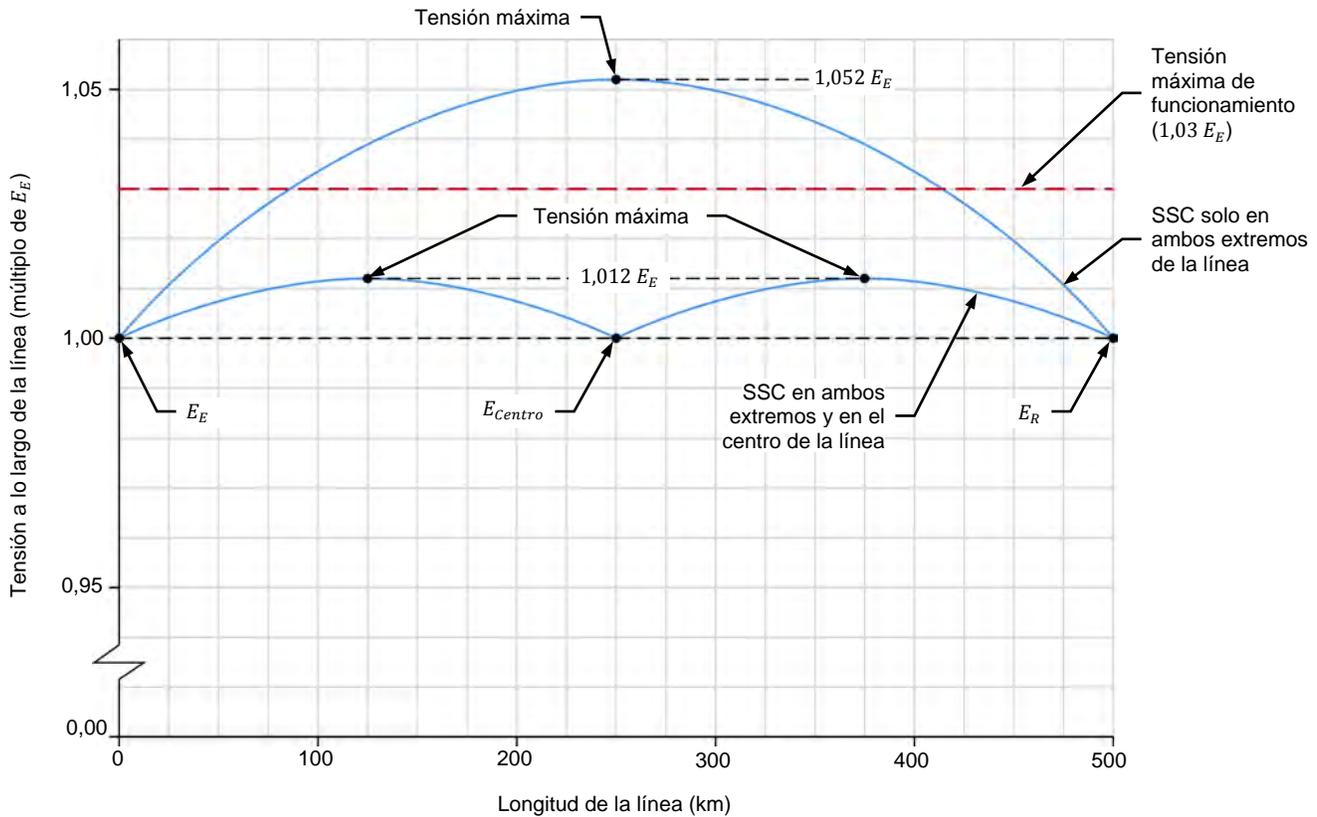


Figura 47. Perfiles de tensión a lo largo de la línea de transmisión ca de 500 km (unas 310 millas), mostrada en la figura 46, cuando la SSC se utiliza solo en ambos extremos de la línea, y cuando se la utiliza en ambos extremos de la línea y en el centro de esta.

En el ejemplo de la figura 47, dividir la línea de transmisión ca en dos segmentos y utilizar SSC en ambos extremos de la línea, así como en la unión entre los dos segmentos (es decir, en el centro de la línea), es suficiente para obtener un perfil de tensión satisfactorio. Las líneas de transmisión ca largas se pueden dividir en tantos segmentos como sea necesario, y la SSC puede aplicarse en ambos extremos de la línea, y entre cada segmento de línea, para obtener un perfil de tensión satisfactorio. Esto se conoce como **compensación shunt conmutable distribuida (SSC distribuida)**.

Potencia máxima transmisible de una línea de transmisión ca con compensación de tensión mediante SSC distribuida.

Cuando en una línea de transmisión ca se compensa la tensión mediante SSC distribuida, cada segmento de línea puede analizarse de manera individual. La cantidad de potencia activa $P_{(Comp.)}$ que transmite un segmento de línea y la cantidad máxima de potencia activa $P_{Máx. (Comp.)}$ que puede transmitir un segmento de línea se calculan utilizando las ecuaciones que se presentaron en la discusión del Ejercicio 3 (estas ecuaciones se repiten a continuación). Sin embargo, cuando se utilizan estas ecuaciones, la tensión del emisor E_E es la tensión de fase en el extremo del segmento de línea que está en el lado de la fuente de alimentación ca; la tensión del receptor E_R es la tensión de fase en el

Property of Festo Didactic

Sale and/or reproduction forbidden

extremo del segmento de línea que está en el lado de la carga; la reactancia X_L' es la reactancia del inductor en el circuito equivalente PI corregido que representa el segmento de línea; y el desfase δ es el desplazamiento de fase entre las tensiones en ambos extremos del segmento de línea.

$$P_{(Comp.)} = 3 \left(\frac{E_E E_R}{X_L'} \sin \delta \right) \quad (7)$$

$$P_{Máx. (Comp.)} = 3 \frac{E_E E_R}{X_L'} \quad (8)$$

El segmento más largo de una línea de transmisión ca con compensación de tensión mediante SSC distribuida tiene la reactancia inductiva más alta X_L' y, por lo tanto, la menor potencia transmisible máxima. En otras palabras, el segmento más largo de la línea de transmisión ca es el más restrictivo. En consecuencia, la potencia transmisible máxima $P_{Máx. (Comp.)}$ de una línea de transmisión ca con compensación de tensión mediante SSC distribuida es igual a la del segmento de línea más largo. No obstante, esta es una ganancia importante en la mayoría de los casos, ya que la potencia transmisible máxima $P_{Máx. (Comp.)}$ de una línea de transmisión ca que se obtiene al utilizar SSC distribuida es significativamente mayor que la que se obtendría si solo se utilizara SSC en ambos extremos de la línea. Esto se debe a que la reactancia inductiva X_L' del segmento más largo de la línea de transmisión ca suele ser mucho menor que la reactancia inductiva X_L' de la línea de transmisión ca completa.

Relación entre la longitud de la línea y el desfase en una línea de transmisión ca con compensación de tensión

El desfase δ entre la tensión del receptor E_R y la tensión del emisor E_E en una línea de transmisión ca con compensación de tensión aumenta con la potencia activa $P_{(Comp.)}$ y la reactancia inductiva X_L' en el circuito equivalente PI corregido que representa la línea. Esto lo confirma la ecuación (9), que se obtiene reordenando la ecuación [ecuación (7)] utilizada para calcular la potencia activa $P_{(Comp.)}$ que transmite una línea de transmisión ca con compensación de tensión.

$$\delta = \arcsen \left(\frac{P_{(Comp.)} X_L'}{3 E_E E_R} \right) \quad (9)$$

- donde $P_{(Comp.)}$ es la cantidad de potencia activa que transmite la línea de transmisión ca con compensación de tensión, expresada en vatios (W).
- X_L' es la reactancia inductiva en el circuito equivalente PI corregido de la línea de transmisión ca, expresada en ohmios (Ω).
- E_E es la tensión de fase en el extremo emisor de la línea de transmisión ca con compensación de tensión, expresada en voltios (V).
- E_R es la tensión de fase en el extremo receptor de la línea de transmisión ca con compensación de tensión, expresada en voltios (V).

Puesto que la reactancia inductiva X_L' de la línea es proporcional a la longitud de esta, el desfase δ aumenta con la longitud de la línea, para todo valor de potencia activa $P_{(Comp.)}$. Esto se entiende fácilmente si se considera una línea de transmisión ca con compensación de tensión mediante SSC distribuida. En este caso, cada segmento de la línea desfasa (retarda) la tensión de entrada cuando la línea transmite potencia activa. El desfase δ entre la tensión del receptor E_R y la tensión del emisor E_E de la línea de transmisión ca es igual a la suma de los desfases que produce cada segmento de línea. Por ejemplo, si una línea de transmisión ca se divide en tres segmentos iguales, y cada segmento desfasa (retarda) la tensión en 20° cuando la línea transmite cierta cantidad de potencia activa, el desfase δ entre la tensión del receptor E_R y la del emisor E_E en esta situación es igual a 60° .

El desfase δ que produce una línea de transmisión ca afecta directamente al ángulo de fase de la tensión del receptor E_R . El ángulo de fase de la tensión es un parámetro importante en toda red eléctrica interconectada, ya que tiene un impacto directo sobre la cantidad de potencia activa que fluye entre los nodos de la red. Esto se discute con más detalle en el próximo ejercicio de este manual.

Efecto de la longitud de la línea sobre la estabilidad de una línea de transmisión ca con compensación de tensión mediante compensación shunt conmutable

El uso de SSC distribuida para compensar la tensión de una línea de transmisión ca mejora el perfil de tensión a lo largo de la línea, así como la potencia transmisible máxima $P_{M\acute{a}x. (Comp.)}$ de la línea, tal como se trató anteriormente en esta discusión. Sin embargo, la SSC distribuida (así como la SSC) no tiene ningún efecto sobre la variación de la tensión del receptor E_R que se produce por un cambio dado en la cantidad de potencia activa que transmite la línea, la cual aumenta con la longitud de la línea, como se mencionó anteriormente en la discusión del Ejercicio 4. Por consiguiente, el margen dentro del que la tensión del receptor E_R puede mantenerse mediante una disposición concreta de compensación shunt conmutable (es decir, la cantidad y los valores de los componentes reactivos utilizados para compensar la tensión de la línea) también aumenta con la longitud de la línea. Esto hace que la operación de una línea de transmisión ca con compensación de tensión mediante SSC o SSC distribuida se vuelva menos estable a medida que aumenta la longitud de la línea.



Figura 48. Para corregir el perfil de tensión de las líneas de transmisión ca de alta tensión, se puede utilizar la compensación shunt conmutable (SSC) distribuida.

RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO

El Procedimiento consta de las secciones siguientes:

- Montaje y conexiones
- Compensación de tensión de una línea de transmisión ca utilizando compensación shunt conmutable distribuida

PROCEDIMIENTO



En este ejercicio se trabaja con altas tensiones. No haga ni modifique ninguna conexión con las fichas tipo banana cuando la alimentación esté encendida, a menos que se especifique lo contrario.

Montaje y conexiones

En esta sección, usted conectará un circuito que representa una fase de una línea de transmisión ca de 700 km (unas 435 millas) con compensación de tensión, mediante compensación shunt conmutable, en el centro de la línea y en el extremo receptor. Ajustará el equipo de medición para medir los parámetros de la línea de transmisión ca.

1. Consulte en el Apéndice A la Tabla de utilización del equipo, a fin de obtener la lista de los equipos necesarios para realizar este ejercicio.

Instale el equipo requerido en el [Puesto de trabajo](#).

2. Asegúrese de que los interruptores de alimentación ca y cc de la [Fuente de alimentación](#) estén en la posición **O** (apagado), después conecte dicha fuente a una toma ca trifásica.

Conecte la entrada [Alimentación](#) de la [Interfaz de adquisición de datos y de control](#) a la fuente de alimentación ca de 24 V. Encienda la fuente de alimentación ca de 24 V.

3. Conecte el Puerto USB de la [Interfaz de adquisición de datos y de control](#) a un puerto USB de la computadora.
4. Encienda la computadora e inicie el software [LVDAC-EMS](#).

En la ventana Arranque de [LVDAC-EMS](#), asegúrese de que la [Interfaz de adquisición de datos y de control](#) haya sido detectada. Asegúrese de que en la [Interfaz de adquisición de datos y de control](#) esté disponible la función [Instrumentación computarizada](#). Seleccione la tensión y frecuencia de la red correspondientes a la tensión y frecuencia de su red eléctrica ca local, y después haga clic en el botón [Aceptar](#) para cerrar la ventana [Arranque de LVDAC-EMS](#).

5. Conecte el circuito que se muestra en la figura 49, el cual representa una fase de un sistema trifásico de transmisión de energía. El circuito, que es similar al que se utilizó en el ejercicio anterior, consiste en una fuente de alimentación ca que alimenta a una carga resistiva a través de una línea de transmisión ca de 700 km (unas 435 millas) representada por dos circuitos equivalentes PI corregidos de una línea de 350 km (unas 217 millas) con las mismas características fundamentales. La tensión de la línea de transmisión ca de 700 km se ha compensado mediante compensación shunt conmutable en el centro y en el extremo receptor de la línea.



A fin de limitar la cantidad de equipo necesario para realizar este ejercicio, no se utiliza ninguna compensación shunt conmutable (SSC) en el extremo emisor de la línea de transmisión ca. Esto no representa ningún problema, ya que la fuente de alimentación ca suministra la potencia reactiva necesaria en el extremo emisor de la línea para la compensación de tensión.

Como se observa en la figura 49, cada uno de los dos inductores de la línea de transmisión ca se implementa utilizando una fase del módulo **Línea de transmisión trifásica**. Cada uno de los cuatro condensadores de la línea de transmisión ca se implementa con una sección de condensadores (grupo de 3 condensadores conectados en paralelo) de uno de los tres módulos **Carga capacitiva**. La carga consiste en una disposición serie-paralelo de tres resistores. Cada uno de estos resistores se implementa con una sección de resistores (grupo de 3 resistores conectados en paralelo) del módulo **Carga Resistiva**.

Dos secciones de inductores (grupos de 3 inductores conectados en paralelo) de un módulo **Carga inductiva** se conectan en serie para implementar los inductores X_{L1} y X_{L2} en el banco de inductores en derivación conmutables en el centro de la línea. Dos secciones de condensadores (grupos de 3 condensadores conectados en paralelo) de un módulo **Carga capacitiva** se conectan en serie para implementar los condensadores X_{C1} y X_{C2} en el banco de condensadores en derivación conmutables en el centro de la línea. La reactancia inductiva $X_{L\text{Comp. centro}}$ del banco de inductores en derivación conmutables y la reactancia capacitiva $X_{C\text{Comp. centro}}$ del banco de condensadores en derivación conmutables en el centro de la línea pueden cambiarse para implementar SSC.o



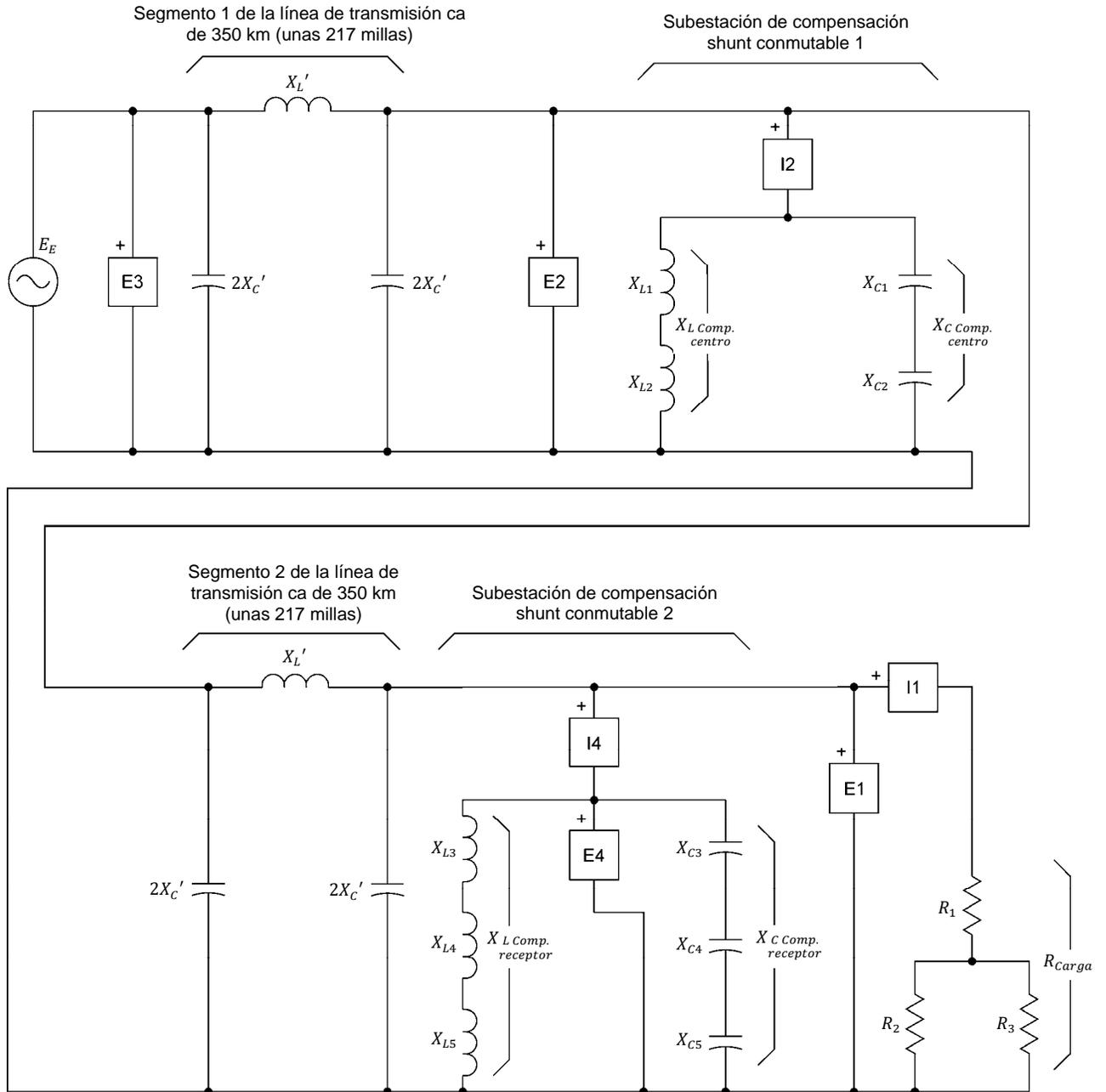
*Para obtener el valor máximo de reactancia inductiva ($1,5 \times 2X_C'$) necesario para la SSC en el centro de la línea utilizando las secciones de inductores disponibles en el módulo **Carga inductiva**, los inductores se conectan en serie, en vez de en paralelo, como es habitual cuando se compensa una línea de transmisión ca real. Sin embargo, la reactancia inductiva $X_{L\text{Comp. centro}}$ que se implementa con los inductores conectados en serie puede variarse de la misma manera que si se utilizara un banco de tres inductores en derivación conmutables conectados en paralelo (cada inductor con un valor de reactancia de $1,5 \times 2X_C'$). El mismo enfoque se utiliza para implementar el banco de condensadores en derivación conmutables.*

Tres secciones de inductores (grupos de 3 inductores conectados en paralelo) de un módulo **Carga inductiva** se conectan en serie para implementar los inductores X_{L3} , X_{L4} y X_{L5} en el banco de inductores en derivación conmutables en el extremo receptor de la línea. Tres secciones de condensadores (grupos de 3 condensadores conectados en paralelo) de un módulo **Carga capacitiva** se conectan en serie para implementar los condensadores X_{C3} , X_{C4} y X_{C5} en el banco de condensadores en derivación conmutables en el extremo receptor de la línea. La reactancia inductiva $X_{L\text{Comp. receptor}}$ del banco de inductores en derivación conmutables y la reactancia capacitiva $X_{C\text{Comp. receptor}}$ del banco de condensadores en derivación conmutables en el extremo receptor de la línea pueden cambiarse para implementar SSC.



*Para obtener el valor máximo de reactancia inductiva ($3 \times 2X_C'$) necesario para la SSC en el extremo receptor de la línea utilizando las secciones de inductores disponibles en el módulo **Carga inductiva**, los inductores se conectan en serie, en vez de en paralelo, como es habitual cuando se compensa una línea de transmisión ca real. Sin embargo, la reactancia inductiva $X_{L\text{Comp. receptor}}$ que se implementa con los inductores conectados en serie puede variarse de la misma manera que si se utilizara un banco de tres inductores en derivación conmutables conectados en paralelo (cada inductor con un valor de reactancia de $3 \times 2X_C'$). El mismo enfoque se utiliza para implementar el banco de condensadores en derivación conmutables.*

Ejercicio 5 – Compensación de tensión de una línea de transmisión ca larga y de alta tensión mediante compensación shunt conmutable distribuida ♦ *Procedimiento*



Red de alimentación ca local		X_L' (Ω)	$2X_C'$ (Ω)	$X_{L \text{ Comp. centro}}$ (Ω)	$X_{C \text{ Comp. centro}}$ (Ω)	$X_{L \text{ Comp. receptor}}$ (Ω)	$X_{C \text{ Comp. receptor}}$ (Ω)	R_{Carga} (Ω)
Tensión (V)	Frecuencia (Hz)							
120	60	120	1200	600	∞	1200	∞	∞
220	50	400	4400	2200	∞	4400	∞	∞
240	50	400	4800	2400	∞	4800	∞	∞
220	60	400	4400	2200	∞	4400	∞	∞

Figura 49. Línea de transmisión ca de 700 km (unas 435 millas) con compensación shunt conmutable en el centro y en el extremo receptor de la línea (una sola fase).

6. En la **Línea de transmisión trifásica**, asegúrese de que el interruptor de palanca I/O esté en la posición I, después ajuste la reactancia X_L' de los inductores de línea al valor que se indica en la tabla de la figura 49.

En los módulos **Carga capacitiva** utilizados para implementar los condensadores (4), ajuste la reactancia $2X_C'$ de dichos condensadores al valor que se indica en la tabla de la figura 49.

En el módulo **Carga inductiva** utilizado para implementar el banco de inductores en derivación conmutables en el centro de la línea, ajuste la reactancia $X_{L\text{Comp. centro}}$ al valor que se indica en la tabla de la figura 49.

En el módulo **Carga capacitiva** utilizado para implementar el banco de condensadores en derivación conmutables en el centro de la línea, ajuste la reactancia $X_{C\text{Comp. centro}}$ a infinito.

En el módulo **Carga inductiva** utilizado para implementar el banco de inductores en derivación conmutables en el extremo receptor de la línea, ajuste la reactancia $X_{L\text{Comp. receptor}}$ al valor que se indica en la tabla de la figura 49.

En el módulo **Carga capacitiva** utilizado para implementar el banco de condensadores en derivación conmutables en el extremo receptor de la línea, ajuste la reactancia $X_{C\text{Comp. receptor}}$ a infinito.

En la **Carga resistiva**, ajuste la resistencia de la carga R_{Carga} a infinito.

7. La figura 50 muestra las características fundamentales y el circuito equivalente PI corregido de la línea de transmisión ca de 700 km (unas 435 millas) de la figura 49, para las diversas combinaciones de tensión y frecuencia de la red de alimentación ca local.

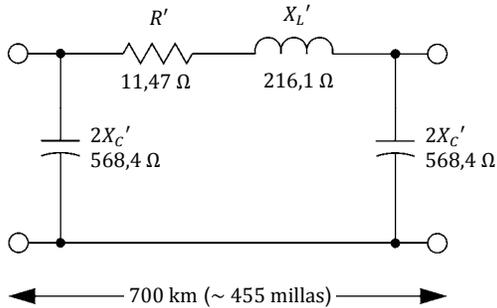


Las características fundamentales de la línea de transmisión ca de 700 km (unas 435 millas) de la figura 49, a tensiones de 220 V y 240 V en la red de alimentación ca, se han ajustado específicamente para tener en cuenta la potencia nominal de funcionamiento (0,2 kW) del equipo suministrado. Por lo tanto, las características fundamentales X_L y X_C de la línea de transmisión ca a tensiones de 220 V y 240 V en la red de alimentación ca difieren significativamente de las de las líneas de transmisión ca reales. Sin embargo, esto no afecta el comportamiento de la línea de transmisión ca implementada con el equipo que se suministra, el cual es muy similar al de las líneas de transmisión ca reales.

Ejercicio 5 – Compensación de tensión de una línea de transmisión ca larga y de alta tensión mediante compensación shunt conmutable distribuida ♦ *Procedimiento*

CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES DE LA LÍNEA	
Resistencia $R = 0,022 \Omega/\text{km}$	(0,035 Ω/milla)
Reactancia inductiva $X_L = 0,355 \Omega/\text{km}$	(0,571 Ω/milla)
Reactancia capacitiva $X_C = 213,6 \text{ k}\Omega/\text{km}$	(132,7 $\text{k}\Omega/\text{milla}$)

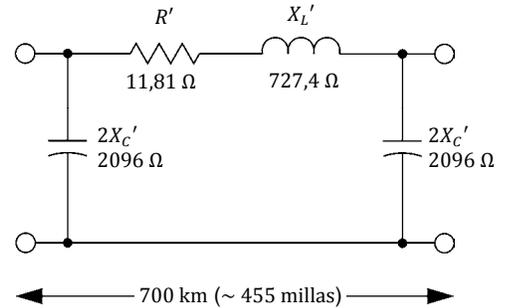
Circuito equivalente PI corregido



(a) 120 V, 60 Hz

CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES DE LA LÍNEA	
Resistencia $R = 0,022 \Omega/\text{km}$	(0,035 Ω/milla)
Reactancia inductiva $X_L = 1,179 \Omega/\text{km}$	(1,898 Ω/milla)
Reactancia capacitiva $X_C = 782,2 \text{ k}\Omega/\text{km}$	(486,0 $\text{k}\Omega/\text{milla}$)

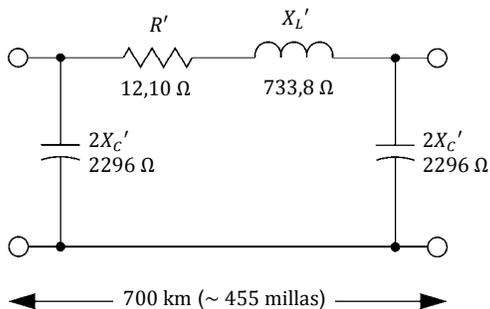
Circuito equivalente PI corregido



(b) 220 V, 50 Hz

CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES DE LA LÍNEA	
Resistencia $R = 0,022 \Omega/\text{km}$	(0,035 Ω/milla)
Reactancia inductiva $X_L = 1,177 \Omega/\text{km}$	(1,894 Ω/milla)
Reactancia capacitiva $X_C = 852,1 \text{ k}\Omega/\text{km}$	(529,4 $\text{k}\Omega/\text{milla}$)

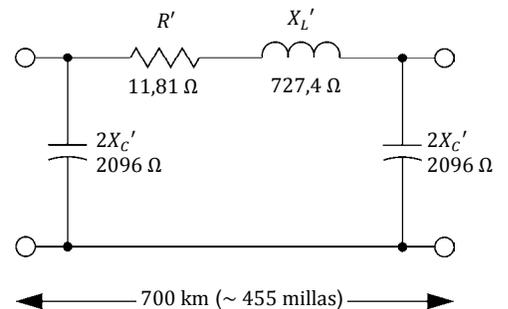
Circuito equivalente PI corregido



(c) 240 V, 50 Hz

CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES DE LA LÍNEA	
Resistencia $R = 0,022 \Omega/\text{km}$	(0,035 Ω/milla)
Reactancia inductiva $X_L = 1,179 \Omega/\text{km}$	(1,898 Ω/milla)
Reactancia capacitiva $X_C = 782,2 \text{ k}\Omega/\text{km}$	(486,0 $\text{k}\Omega/\text{milla}$)

Circuito equivalente PI corregido



(d) 220 V, 60 Hz

Figura 50. Características fundamentales y circuito equivalente PI corregido (una sola fase) de la línea de transmisión ca de 700 km (unas 435 millas) de la figura 49 para las diversas combinaciones de tensión y frecuencia de la red de alimentación ca local.

8. En LVDAC-EMS, abra la ventana **Aparatos de medición**, después abra el cuadro de diálogo **Ajustes de adquisición**. Ajuste la **Ventana de muestreo** a 8 ciclos, después haga clic en **Aceptar** para cerrar el cuadro de diálogo. Esto proporciona una mejor exactitud al medir ciertos parámetros de la línea de transmisión ca.

En la ventana **Aparatos de medición**, efectúe los ajustes necesarios para medir la tensión del emisor E_E (entrada **E3**), la tensión en el centro de la línea E_{Centro} (entrada **E2**), la tensión del receptor E_R (entrada **E1**), la corriente de la carga I_{Carga} (entrada **I1**), la potencia activa P_{Carga} que se le suministra a la carga [**PQS1(E1,I1)**], el desfase δ_{Centro} entre la tensión E_{Centro} en el centro de la línea y la tensión del emisor E_E [**PS(E2,E3)**], el desfase δ entre la tensión del receptor E_R y la tensión del emisor E_E [**PS(E1,E3)**], la reactancia de compensación ($X_{Comp. centro}$) en el centro de la línea [**RXZ(E2,I2)**] y la reactancia de compensación ($X_{Comp. receptor}$) en el extremo receptor de la línea [**RXZ(E4,I4)**]. Ajuste los medidores en el modo de regeneración continua.

Compensación de tensión de una línea de transmisión ca utilizando compensación shunt conmutable distribuida

En esta sección, usted reducirá gradualmente, por pasos, la resistencia de la carga resistiva conectada al extremo receptor de la línea, y ajustará la compensación shunt conmutable en el extremo receptor y en el centro de la línea para que la tensión del receptor E_R y la tensión E_{Centro} en el centro de la línea se mantengan cerca de la tensión del emisor E_E . Mientras hace esto, registrará los parámetros del circuito para cada valor de resistencia de la carga. Utilizará los resultados para trazar la curva de potencia-tensión de la línea, así como la curva de potencia-tensión que se obtiene en el centro de la línea. También trazará una curva del desfase δ entre las tensiones E_R y E_E en función de la potencia de la carga P_{Carga} , y una curva del desfase δ_{Centro} entre las tensiones E_{Centro} y E_E en función de la potencia de la carga P_{Carga} . Analizará sus resultados.

9. En la **Fuente de alimentación**, encienda la fuente de alimentación ca trifásica. La tensión del receptor E_R y la tensión E_{Centro} en el centro de la línea deben estar dentro de $\pm 3\%$ de la tensión del emisor E_E .
10. En LVDAC-EMS, abra la ventana **Tabla de datos**. Ajuste la **Tabla de datos** para registrar los parámetros del circuito, esto es, la tensión del emisor E_E , la tensión E_{Centro} en el centro de la línea, la tensión del receptor E_R , la corriente de la carga I_{Carga} , la potencia activa P_{Carga} que se le suministra a la carga, el desfase δ_{Centro} entre la tensión E_{Centro} en el centro de la línea y la tensión del emisor E_E , el desfase δ entre la tensión del receptor E_R y la tensión del emisor E_E , la reactancia de compensación ($X_{Comp. centro}$) en el centro de la línea y la reactancia de compensación ($X_{Comp. receptor}$) en el extremo receptor de la línea.

Registre los parámetros del circuito en la **Tabla de datos**.

11. Aumente la carga en el extremo receptor de la línea en pequeños pasos mientras ajusta la compensación shunt conmutable para que la tensión del receptor E_R y la tensión E_{Centro} en el centro de la línea permanezcan dentro de $\pm 3\%$ de la tensión del emisor E_E . Aumente la carga mientras pueda mantener la tensión del receptor E_R y la tensión E_{Centro} en el centro de la línea dentro de $\pm 3\%$ de la tensión del emisor E_E . Para ello, lleve a cabo el subprocedimiento siguiente.

Cambie los ajustes de los interruptores de la **Carga resistiva** para disminuir ligeramente la resistencia de la carga (R_{Carga}) en el extremo receptor de la línea.



Es posible que en un momento dado usted tenga que cortocircuitar el resistor R_1 utilizando un cable con conector de seguridad tipo banana para disminuir la resistencia de la carga (R_{Carga}) al valor requerido.

Compruebe que la tensión del receptor E_R sigue estando dentro de $\pm 3\%$ de la tensión del emisor E_E . Si es así, vaya al paso (c) de este subprocedimiento. De lo contrario, ajuste la reactancia ($X_{Comp. receptor}$) de la compensación shunt conmutable en el extremo receptor de la línea para que la tensión del receptor E_R vuelva a estar dentro de $\pm 3\%$ de la tensión del emisor E_E , y después vaya al paso (c) de este subprocedimiento. La tabla 16 muestra la secuencia de valores de reactancia ($X_{Comp. receptor}$) que deben seguirse al ajustar la compensación shunt conmutable en el extremo receptor de la línea. Es la misma secuencia que se utilizó en el Ejercicio 3 para compensar la tensión de la línea de transmisión ca de 350 km (unas 217 millas).



Si la tensión E_R se vuelve 3% más baja que la tensión E_E mientras se aplica la compensación shunt capacitiva máxima en el extremo receptor de la línea, continúe con el paso (c) de este subprocedimiento para completar la compensación de tensión.

Tabla 16. Secuencia de valores de reactancia ($X_{Comp. receptor}$) que deben seguirse al ajustar la compensación shunt conmutable en el extremo receptor de la línea.

Red de alimentación ca local		Secuencia de valores para la reactancia $X_{Comp. receptor}$ (Ω)						
Tensión (V)	Frecuencia (Hz)	Inductiva			4	Capacitiva		
		1 (Sin carga)	2	3		5	6	7 (Carga máx.)
120	60	1200	1800	3600	∞	-3600	-1800	-1200
220	50	4400	6600	13 200	∞	-13 200	-6600	-4400
240	50	4800	7200	14 400	∞	-14 400	-7200	-4800
220	60	4400	6600	13 200	∞	-13 200	-6600	-4400



Los valores positivos indican que la reactancia $X_{Comp. receptor}$ es inductiva. Los valores negativos indican que la reactancia $X_{Comp. receptor}$ es capacitiva.

Compruebe que la tensión E_{Centro} en el centro de la línea sigue estando dentro de $\pm 3\%$ de la tensión del emisor E_E . Si es así, vaya al paso (e) de este subprocedimiento. De lo contrario, ajuste la reactancia ($X_{Comp. centro}$) de la compensación shunt conmutable en el centro de la línea para que la tensión E_{Centro} vuelva a estar dentro de $\pm 3\%$ de la tensión del emisor E_E , y después vaya al paso (d) de este subprocedimiento. La tabla 17 muestra la secuencia de valores de reactancia ($X_{Comp. centro}$) que deben seguirse al ajustar la compensación shunt conmutable en el centro de la línea.

Tabla 17. Secuencia de valores de reactancia ($X_{Comp. centro}$) que deben seguirse al ajustar la compensación shunt conmutable en el centro de la línea.

Red de alimentación ca local		Secuencia de valores para la reactancia $X_{Comp. centro}$ (Ω)							
Tensión (V)	Frecuencia (Hz)	Inductiva				4	Capacitiva		
		1 (Sin carga)	2	3	5		6	7 (Carga máx.)	
120	60	600	900	1800	∞	-1800	-900	-600	
220	50	2200	3300	6600	∞	-6600	-3300	-2200	
240	50	2400	3600	7200	∞	-7200	-3600	-2400	
220	60	2200	3300	6600	∞	-6600	-3300	-2200	



Los valores positivos indican que la reactancia $X_{Comp. centro}$ es inductiva. Los valores negativos indican que la reactancia $X_{Comp. centro}$ es capacitiva.

Compruebe nuevamente que la tensión del receptor E_R esté dentro de $\pm 3\%$ de la tensión del emisor E_E . Si es así, vaya al paso (e) de este subprocedimiento. De lo contrario, ajuste la reactancia ($X_{Comp. receptor}$) de la compensación shunt conmutable en el extremo receptor de la línea para que la tensión del receptor E_R vuelva a estar dentro de $\pm 3\%$ de la tensión del emisor E_E , y después vaya al paso (e) de este subprocedimiento. La tabla 16 muestra la secuencia de valores de reactancia ($X_{Comp. receptor}$) que deben seguirse al ajustar la compensación shunt conmutable en el extremo receptor de la línea.

Registre los parámetros del circuito en la Tabla de datos, y después vuelva al paso (a) de este subprocedimiento.

La figura 51 muestra el subprocedimiento anterior en forma de un algoritmo.

- Una vez que se alcance la carga máxima para la pueden mantenerse la tensión del receptor E_R y la tensión E_{Centro} en el centro de la línea dentro de $\pm 3\%$ de la tensión del emisor E_E , apague la fuente de alimentación ca trifásica de la Fuente de alimentación.

En la ventana [Tabla de datos](#), guarde los datos registrados.

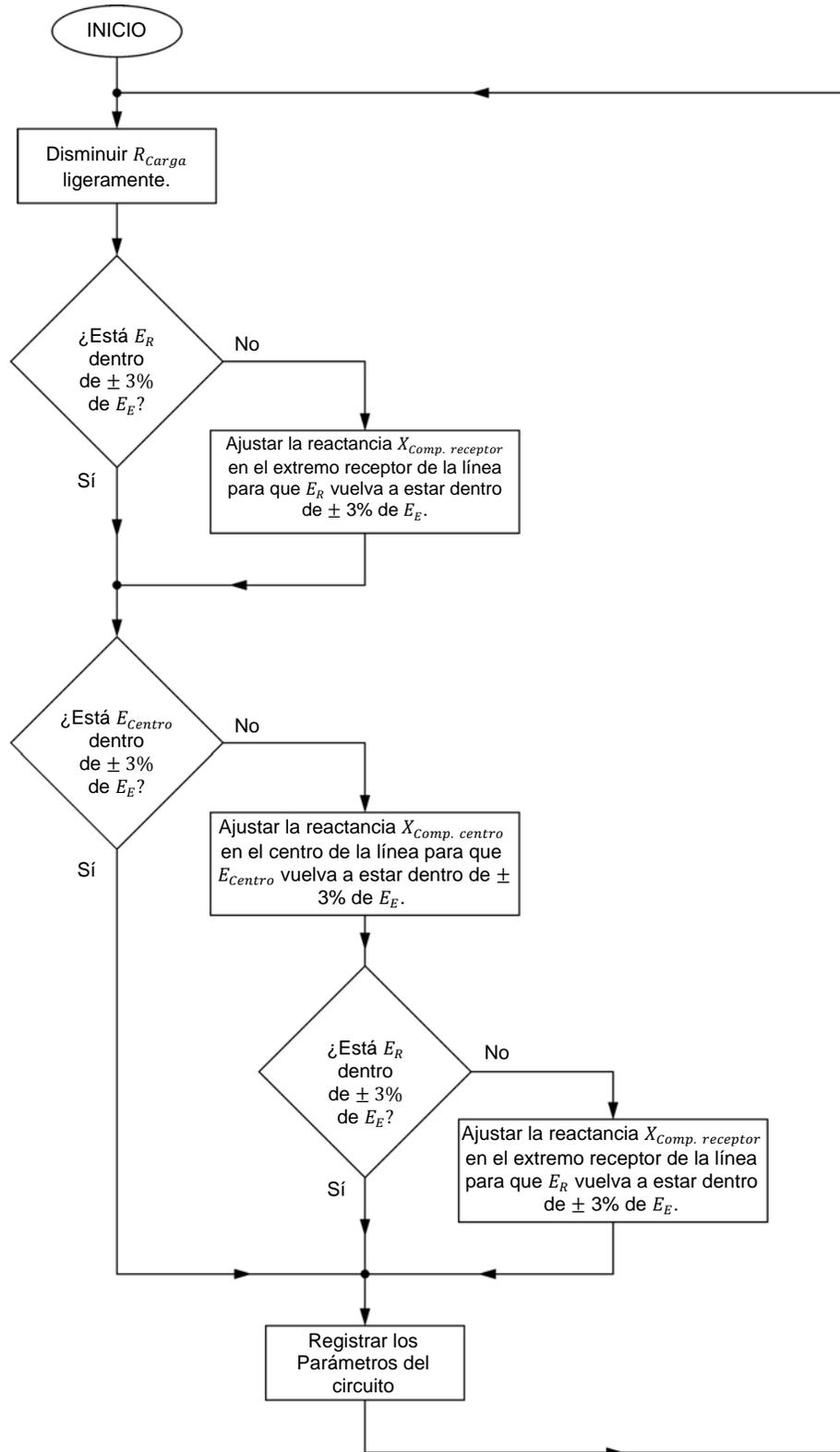


Figura 51. Algoritmo utilizado para controlar la compensación shunt conmutable distribuida.

13. Utilice los valores de la tensión del receptor E_R y de la potencia activa P_{carga} registrados en la [Tabla de datos](#) para trazar la curva de potencia-tensión de la línea de transmisión ca que se obtiene al utilizar compensación shunt conmutable (inductiva y capacitiva) distribuida (es decir, en el centro y en el extremo receptor de la línea) para compensar la tensión. Además, utilice los valores registrados en la [Tabla de datos](#) para trazar, en el mismo gráfico, una curva de la tensión del emisor E_E en función de la potencia activa P_{carga} . Este gráfico permite relacionar fácilmente la tensión del receptor E_R con la tensión del emisor E_E .
14. Compare la curva de potencia-tensión del paso anterior para la línea de transmisión ca de 700 km (unas 435 millas) que se obtiene con SSC (inductiva y capacitiva) distribuida con la curva de potencia-tensión de la línea de transmisión ca de 350 km (unas 217 millas) con SSC (inductiva y capacitiva) solo en el extremo receptor, que se trazó en el paso 37 del Ejercicio 3.

¿Es la línea de transmisión ca de 700 km (unas 435 millas) con SSC distribuida capaz de transmitir una cantidad de potencia activa similar a la que transmite la línea de transmisión ca de 350 km (unas 217 millas) con SSC solo en el extremo receptor, mientras mantiene la tensión del receptor E_R dentro de los límites de tensión? Explique.

¿Cómo afecta la longitud de la línea a la compensación de tensión de una línea de transmisión ca?

15. Utilice los valores de la tensión E_{Centro} en el centro de la línea y de la potencia activa P_{Carga} registrados en la [Tabla de datos](#) para trazar la curva de potencia-tensión en el centro de la línea de transmisión ca que se obtiene al utilizar compensación shunt conmutable (inductiva y capacitiva) distribuida (en el centro y en el extremo receptor de la línea) para compensar la tensión. Además, utilice los valores registrados en la [Tabla de datos](#) para trazar, en el mismo gráfico, una curva de la tensión del emisor E_E en función de la potencia activa P_{Carga} . Este gráfico permite relacionar fácilmente la tensión E_{Centro} con la tensión del emisor E_E .
16. Compare la tensión sin carga en el centro de la línea de transmisión ca de 700 km (unas 435 millas) con SSC distribuida con la tensión sin carga en el centro de la línea de transmisión ca de 700 km con SSC solo en el extremo receptor de la línea (medida y registrada en el paso 20 del Ejercicio 4). El uso de SSC distribuida, ¿evita que la tensión sin carga en el centro de la línea exceda significativamente a la tensión del emisor E_E ? Explique.

El uso de SSC distribuida, ¿permite que la tensión en el centro de la línea de transmisión ca de 700 km (unas 435 millas) se mantenga cerca de la tensión del emisor E_E , sin importar la cantidad de potencia activa que la línea transmita?

Sí No

17. Utilice los valores registrados en la [Tabla de datos](#) para trazar una curva del desfase δ entre la tensión del receptor E_R y la tensión del emisor E_E en función de la potencia activa P_{Carga} que se obtiene cuando se compensa la tensión en la línea de transmisión ca mediante compensación shunt conmutable (inductiva y capacitiva) distribuida (en el centro y en el extremo receptor de la línea). Además, utilice los valores registrados en la [Tabla de datos](#) para trazar, en el mismo gráfico, una curva del desfase δ_{Centro} entre la tensión E_{Centro} en el centro de la línea y la tensión del emisor E_E en función de la potencia activa P_{Carga} .

18. ¿Es el desfase δ entre la tensión del receptor E_R y la tensión del emisor E_E directamente proporcional a la longitud de la línea de transmisión ca? Explique brevemente.

19. ¿Confirman los valores de la tensión del emisor E_E , la tensión E_{Centro} en el centro de la línea, la tensión del receptor E_R , la potencia activa P_{Carga} , el desfase δ y el desfase δ_{Centro} , registrados en la [Tabla de datos](#), la ecuación que se muestra a continuación (ya enunciada en la discusión)? Explique.

$$P_{(Comp.)} = 3 \left(\frac{E_E E_R}{X_L'} \text{sen } \delta \right)$$

20. Cierre **LVDAC-EMS** y después apague todos los equipos. Desconecte todos los conductores y devuélvalos a su sitio de almacenamiento.

CONCLUSIÓN

En este ejercicio, usted aprendió que la adición de compensación shunt conmutable (SSC) en el centro de una línea de transmisión ca de alta tensión mantiene la tensión en ese punto cerca de la tensión del emisor E_E y modifica notablemente todo el perfil de tensión de la línea. Observó que las líneas de transmisión ca largas se pueden dividir en tantos segmentos como sea necesario, y la SSC puede aplicarse en ambos extremos de la línea, y entre cada segmento de línea, para obtener un perfil de tensión satisfactorio. Aprendió que la potencia transmisible máxima $P_{Máx. (Comp.)}$ de una línea de transmisión ca con compensación de tensión mediante SSC distribuida es igual a la del segmento de línea más largo. Finalmente, aprendió que el desfase δ entre la tensión del receptor E_R y la tensión del emisor E_E en una línea de transmisión ca con compensación de tensión, para todo valor de potencia activa $P_{(Comp.)}$, aumenta con la longitud de la línea.

PREGUNTAS DE REVISIÓN

1. Suponga una línea de transmisión ca larga con compensación shunt conmutable (SSC) solo en ambos extremos de la línea. ¿Qué se puede hacer cuando la tensión en el centro de esta línea excede a la tensión máxima a la que la línea puede operar? Explique.

2. Explique brevemente qué es la compensación shunt conmutable distribuida (SSC distribuida) de una línea de transmisión ca larga.

3. ¿Qué segmento de una línea de transmisión ca larga con compensación de tensión mediante SSC distribuida tiene la menor potencia transmisible máxima? ¿Qué implica esto?

4. ¿Cómo afecta la longitud de una línea de transmisión ca en la que se ha compensado la tensión mediante SSC distribuida al desfase δ entre la tensión del receptor E_R y la tensión del emisor E_E ? Explique por qué.

- 5. Describa el efecto que tiene el aumento de la longitud de la línea sobre la estabilidad de operación de una línea de transmisión ca con compensación de tensión mediante SSC o SSC distribuida. Explique brevemente.

Control de la potencia activa que fluye a través de las líneas de transmisión ca con compensación de tensión

OBJETIVO DEL EJERCICIO Cuando haya completado este ejercicio, sabrá cómo controlar el flujo de potencia activa en las líneas de transmisión ca que se utilizan en las redes eléctricas interconectadas. Se le presentarán los principios de funcionamiento de los autotransformadores de regulación.

RESUMEN DE LOS PRINCIPIOS

Los Principios de este ejercicio cubren los siguientes puntos:

- Control del flujo de potencia activa en redes eléctricas interconectadas
- Introducción al autotransformador de regulación

PRINCIPIOS

Control del flujo de potencia activa en redes eléctricas interconectadas

En el Ejercicio 3, usted observó que la tensión del receptor E_R se retrasa con respecto a la tensión del emisor E_E cuando se transmite potencia activa desde el extremo emisor al extremo receptor de una línea de transmisión ca con compensación de tensión. Cuanto mayor sea la potencia activa $P_{(Comp.)}$ que transmita la línea de transmisión ca, mayor será el desfase δ entre la tensión del receptor E_R y la tensión del emisor E_E . Esto es consecuente con la ecuación tratada en la discusión del Ejercicio 3 (repetida más adelante) que relaciona la potencia activa $P_{(Comp.)}$ con la tensión del emisor E_E , la tensión del receptor E_R , la reactancia inductiva X_L' en el circuito equivalente PI corregido de la línea y el desfase δ entre las tensiones E_E y E_R .

$$P_{(Comp.)} = 3 \left(\frac{E_E E_R}{X_L'} \sin \delta \right) \quad (10)$$

El control de la potencia activa $P_{(Comp.)}$ que transmite una línea de transmisión ca con compensación de tensión es relativamente fácil en los circuitos de línea de transmisión ca sencillos que usted ha estudiado hasta ahora, es decir, circuitos donde un extremo de la línea es siempre el emisor y el otro extremo es siempre el receptor. Se trata básicamente de limitar la demanda de potencia (es decir, la carga en el extremo receptor de la línea) a fin de no exceder la potencia transmisible máxima $P_{Máx. (Comp.)}$. Incluso es práctica habitual en las redes de alimentación ca limitar la demanda de potencia a la mitad del valor de $P_{Máx. (Comp.)}$. Esto limita el desfase δ a valores inferiores a 30° y proporciona un margen de seguridad del 100%, como se mencionó en la discusión del Ejercicio 3.

Sin embargo, el control de la potencia activa $P_{(Comp)}$ que transmite una línea de transmisión ca con compensación de tensión no siempre es tan sencillo. Esto se debe a que las redes de alimentación ca suelen tener una configuración más compleja, es decir, a menudo consisten en varias regiones interconectadas por diversas líneas de transmisión ca en lugar de solo dos regiones interconectadas por una sola línea de transmisión ca. En estas redes eléctricas interconectadas, algunas líneas de transmisión ca no tienen extremos emisor y receptor definidos, ya que la potencia activa que transmiten no fluye en todo momento en la misma dirección, dependiendo de la demanda de potencia en las regiones correspondientes. En estas condiciones, se hace cada vez más difícil coordinar el desfase entre las tensiones de cada región (nodo) de la red eléctrica con la cantidad de potencia activa que se necesita intercambiar entre los distintos nodos de la red eléctrica.

Por ejemplo, considere el diagrama de la red eléctrica interconectada que se muestra en la figura 52. En esta figura, cada punto representa una región que puede consumir o suministrar potencia activa, y cada línea representa una línea de transmisión ca.

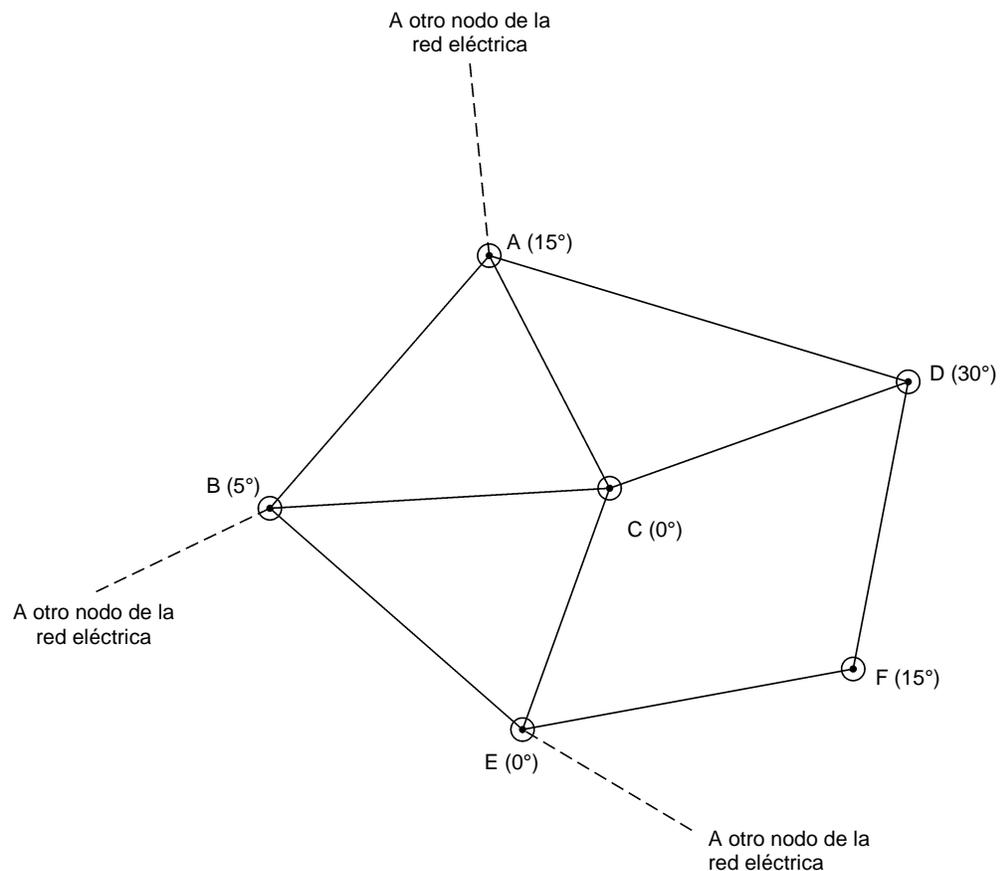


Figura 52. Diagrama de una red eléctrica interconectada.

La parte de la red eléctrica interconectada que se ilustra en la figura 52 muestra 6 regiones que pueden ser un receptor (la región consume potencia activa) o un emisor (la región suministra potencia activa). Dado que la potencia activa $P_{(Comp)}$ que se transfiere a través de una línea de transmisión ca con compensación de tensión es proporcional al desfase δ entre las tensiones en

ambos extremos, solo las regiones entre las que hay un desfase no nulo pueden intercambiar potencia activa. Este es el caso de todas las regiones de la red eléctrica interconectada de la figura 52, excepto las regiones C y E que tienen un ángulo de fase de 0° , lo que conduce a un desfase δ de 0° y ninguna transferencia de potencia activa. Asimismo, se intercambia una cantidad muy limitada de potencia activa entre las regiones B y C, así como entre las regiones B y E, ya que el desfase δ en las líneas de transmisión ca correspondientes (B-C y B-E) es de solo 5° (ángulo de fase de 5° frente a ángulo de fase de 0°).

La polaridad del desfase δ entre las tensiones en dos regiones de una red eléctrica interconectada también es muy importante porque determina el sentido del flujo de potencia activa en la línea de transmisión ca correspondiente. El sentido del flujo de potencia activa entre dos regiones y los correspondientes diagramas de fasores se ilustran en la figura 53.

 En la figura 53, los inductores y condensadores en derivación conmutables utilizados para la compensación de tensión de la línea de transmisión ca no se muestran para una mayor claridad.

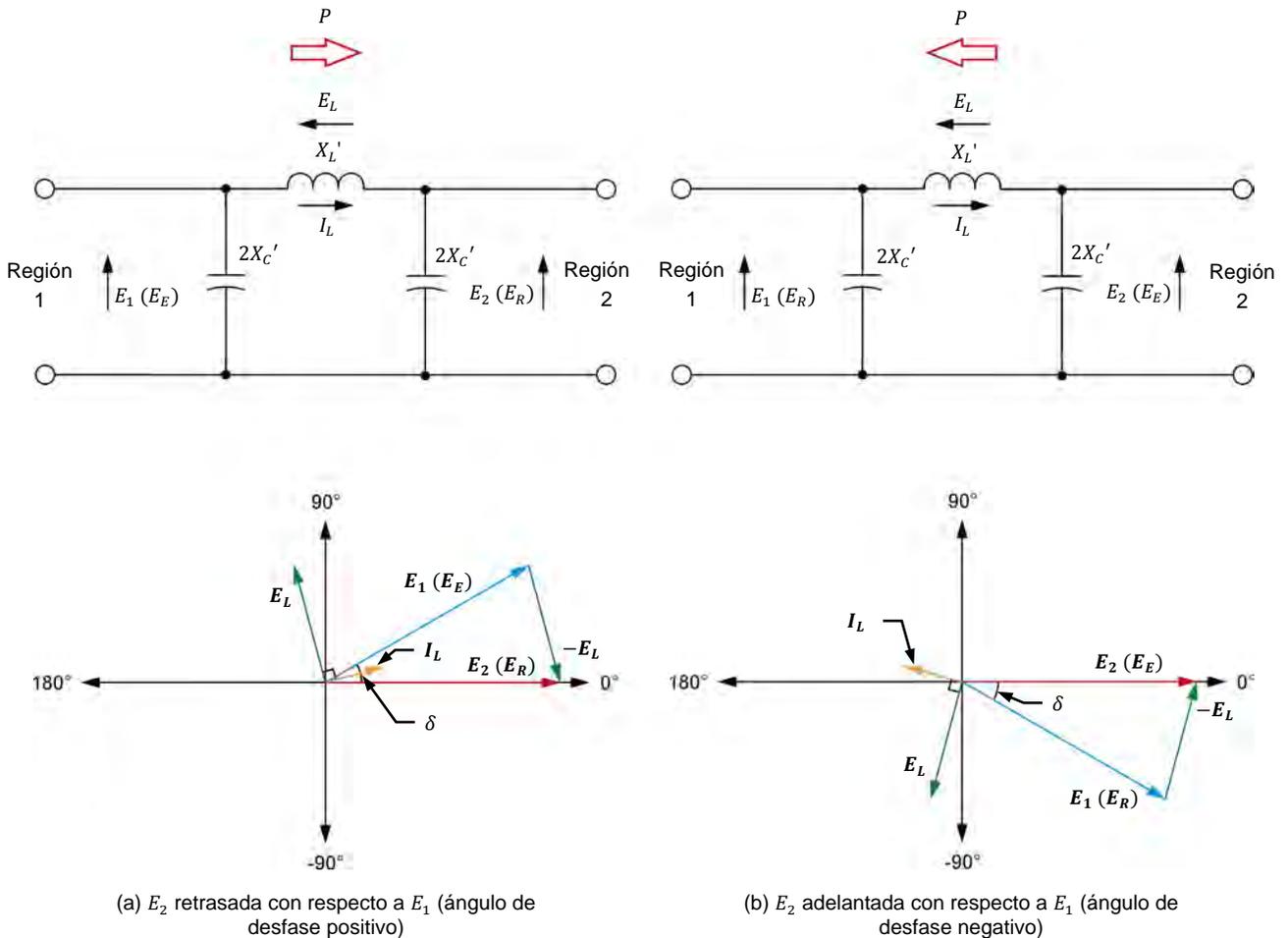


Figura 53. El sentido del flujo de la potencia activa en una línea de transmisión ca con compensación de tensión de una red eléctrica interconectada depende de la polaridad del desfase δ entre las tensiones en ambos extremos de la línea.

Como lo muestra la figura 53, el sentido del flujo de potencia activa entre dos regiones interconectadas es siempre de la región con la tensión adelantada a la región con la tensión retrasada. Así pues, la región cuya onda sinusoidal de tensión está adelantada con respecto a la de la otra región se designa como el extremo emisor de la línea de transmisión ca, mientras que la región cuya onda sinusoidal de tensión está retrasada con respecto a la de la otra región se designa como el extremo receptor de la línea de transmisión ca. Adviértase que en los circuitos equivalentes PI corregidos de la línea de transmisión ca de la figura 53, el desfase δ tiene la misma magnitud, pero la polaridad del desfase en un circuito es opuesta a la polaridad del desfase en el otro circuito. En consecuencia, la misma cantidad de potencia activa se transfiere entre las regiones 1 y 2 en ambos circuitos. Sin embargo, en el circuito de la figura 53a, el flujo de potencia activa es de la región 1 a la región 2, ya que la tensión E_1 está adelantada con respecto a la tensión E_2 , lo que resulta en un desfase que es positivo cuando se toma la tensión E_2 como el fasor de referencia. Por el contrario, en el circuito de la figura 53b, el flujo de potencia activa es de la región 2 a la región 1, ya que la tensión E_1 está retrasada con respecto a la tensión E_2 , lo que resulta en un desfase que es negativo cuando se toma la tensión E_2 como el fasor de referencia.

Cuando se conocen los ángulos de fase de las tensiones en las distintas regiones de una red eléctrica interconectada, es posible determinar el sentido del flujo de potencia activa entre todas las regiones de la red eléctrica. La figura 54 muestra el diagrama de la red eléctrica interconectada de la figura 52 con el sentido del flujo de potencia activa entre cada región.

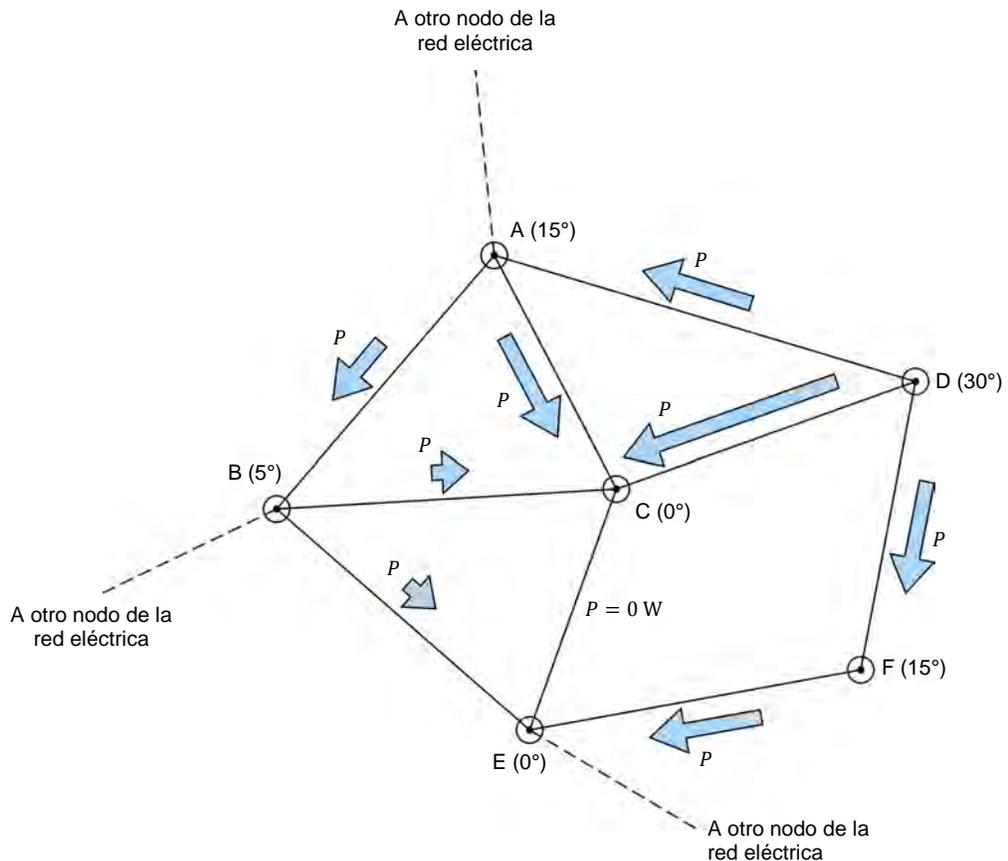


Figura 54. Diagrama de la red eléctrica interconectada de la figura 52 con el sentido del flujo de potencia activa entre cada región.

Observe que la longitud de cada flecha que indica el sentido del flujo de potencia activa, en la figura 54, es proporcional a la cantidad de potencia activa que se transfiere a través de la línea de transmisión ca correspondiente. Como puede verse, la cantidad de potencia activa intercambiada entre las regiones B, C y E está severamente limitada, ya que los ángulos de fase de sus respectivas tensiones son iguales o cercanos entre sí.

La figura 54 muestra que, dado que el ángulo de fase de la tensión en cada región de una red eléctrica interconectada es constante, no se permite ninguna flexibilidad en el flujo de potencia activa entre las diversas regiones de la red. Esto es muy problemático cuando, en situaciones como un apagón, es necesario invertir el sentido del flujo de potencia activa entre dos regiones, o cuando es necesario ajustar la potencia activa transferida entre dos regiones debido a una variación en la demanda de potencia. Debido a esto, se requieren algunos medios para controlar el flujo de potencia activa en las líneas de transmisión ca en redes eléctricas interconectadas complejas.

Este medio de control del flujo de potencia activa consiste en utilizar **transformadores de cambio de fase**. Los transformadores de cambio de fase son un tipo especial de transformador de potencia trifásico que tienen la capacidad de introducir un desfase (normalmente de alrededor de $+30^\circ$ a -30°) entre las tensiones de entrada y las tensiones de salida. Los transformadores de cambio de fase se conectan en serie con líneas de transmisión ca siempre que sea necesario controlar el flujo de potencia activa entre regiones de una red eléctrica interconectada. Los transformadores de cambio de fase permiten modificar el ángulo de fase de la tensión en una región de una red eléctrica interconectada antes de que se le aplique a la línea de transmisión ca, sin modificar el ángulo de fase de la tensión en la región. De esta manera, es posible controlar el flujo de potencia activa entre dos regiones de una red eléctrica interconectada sin modificar el ángulo de fase en ninguna de las regiones.



Figura 55. Transformador de cambio de fase utilizado para controlar el flujo de potencia activa a través de una línea de transmisión ca en una red eléctrica interconectada (©Siemens AG 2014, todos los derechos reservados).

La figura 56 muestra un ejemplo de cómo se puede modificar el flujo de potencia activa entre dos regiones de una red eléctrica interconectada utilizando un transformador de cambio de fase. En este ejemplo, se añade un transformador de cambio de fase entre la central eléctrica de la región E y la línea de transmisión ca que va a la región C, en la red eléctrica interconectada de la figura 54. Inicialmente, cuando el transformador de cambio de fase se ajusta para que no produzca desfase, no fluye potencia activa entre las regiones E y C, ya que el ángulo de fase de la tensión en cada una de estas dos regiones es el mismo (0°). El ajuste del transformador de cambio de fase para hacer avanzar el ángulo de fase de la tensión que se le aplica a la línea de transmisión ca (15° en este ejemplo) hace que la potencia activa fluya de la región E a la región C, como se indica en la figura 56, sin modificar el ángulo de fase de la tensión en las regiones E y C. Por el contrario, si el transformador de cambio de fase se ajustara para retrasar el ángulo de fase de la tensión que se le aplica a la línea de transmisión ca, ello provocaría que la potencia activa fluya de la región C a la región E.

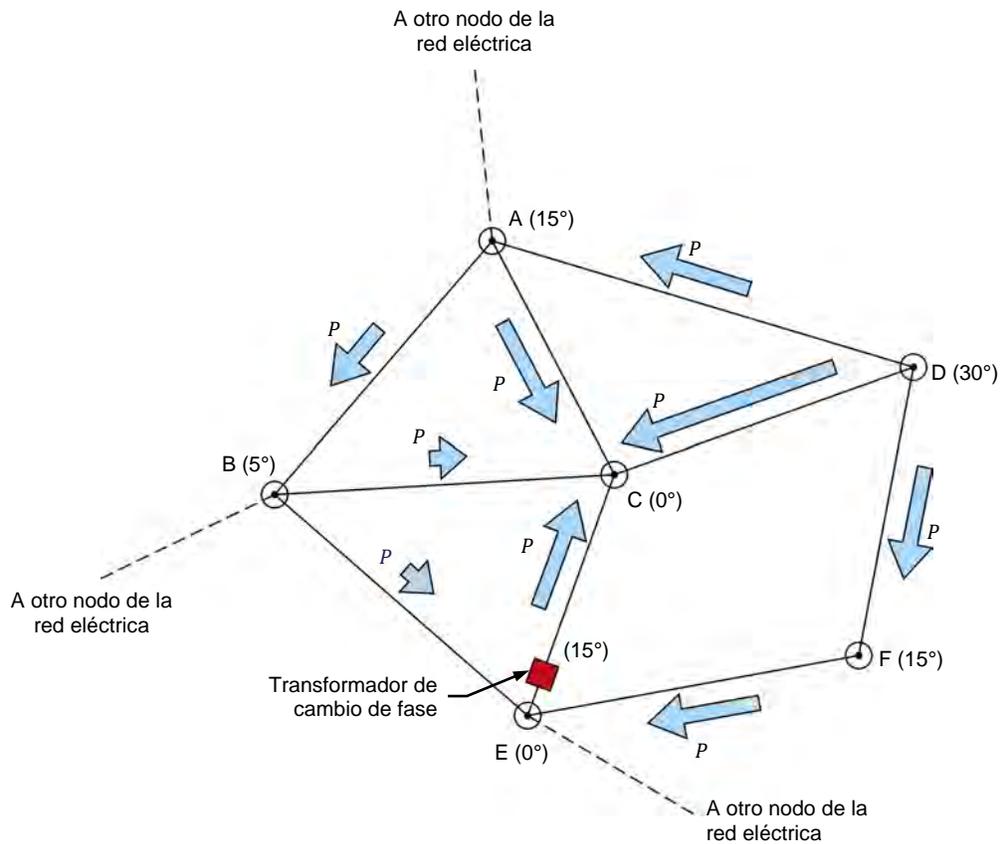


Figura 56. Diagrama de la red eléctrica interconectada de la figura 54 cuando se añade un transformador de cambio de fase entre la región E y la línea de transmisión ca que va a la región C.

Introducción al autotransformador de regulación

Un **autotransformador de regulación** tiene la capacidad de funcionar como un **transformador de cambio de fase**, un **transformador reductor-elevador**, o ambos al mismo tiempo. Esto permite que un autotransformador de regulación controle el flujo de potencia activa en una línea de transmisión ca. La potencia activa puede controlarse disminuyendo o aumentando el ángulo de fase de las tensiones de entrada.

Cuando un autotransformador de regulación funciona como un transformador de cambio de fase, sus principios de funcionamiento pueden entenderse examinando el circuito equivalente del autotransformador de regulación de la figura 57.

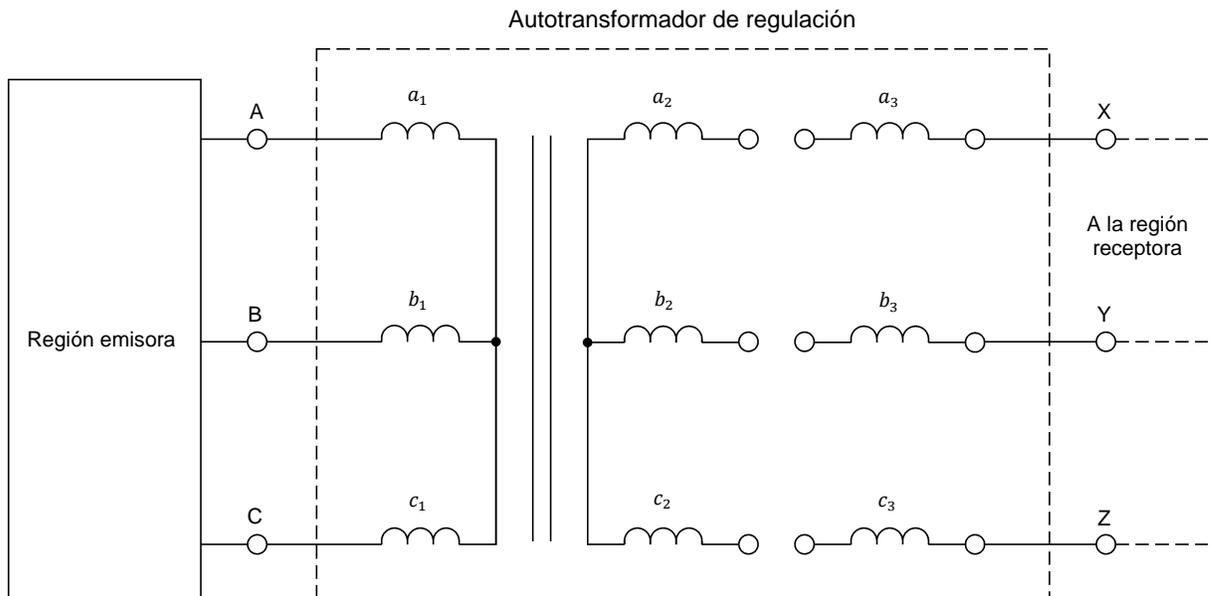
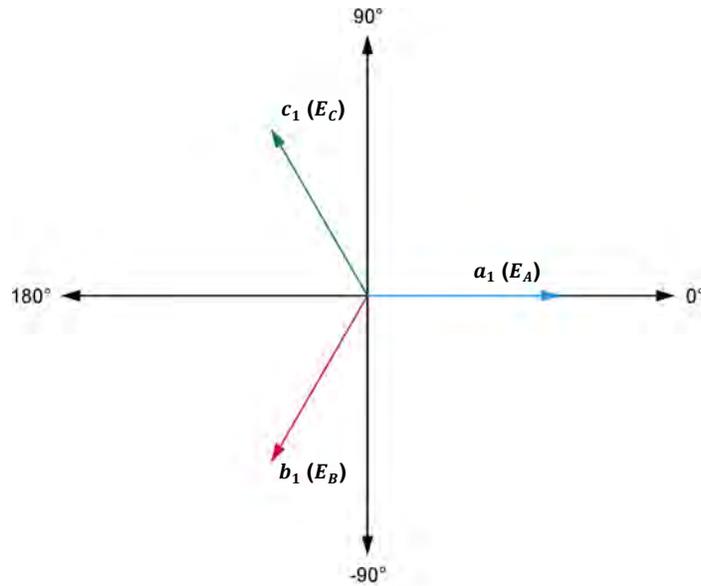


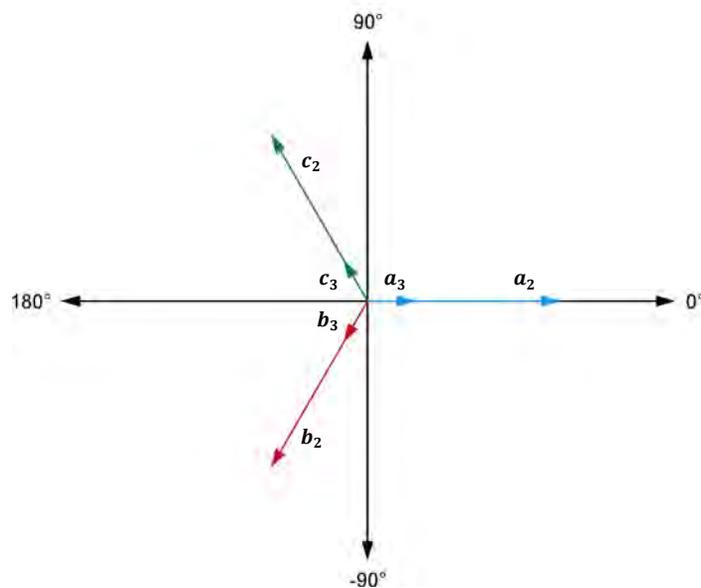
Figura 57. Circuito equivalente de un autotransformador de regulación.

Como se muestra en la figura 57, el autotransformador de regulación es equivalente a un transformador de potencia trifásico con los devanados primarios (a_1 , b_1 , y c_1) y secundarios (a_2 , b_2 , y c_2) conectados en una configuración en estrella-estrella. El transformador también dispone de un conjunto de devanados terciarios (a_3 , b_3 y c_3) que se pueden conectar a los devanados secundarios. Los diagramas de fasores de las tensiones en los devanados primario, secundario y terciario se muestran en la figura 58.

Como se observa en la figura 58, las tensiones relativas a los devanados de la misma fase (por ejemplo, los devanados a_1 , a_2 y a_3) están en fase entre sí. Cuando el autotransformador de regulación se ajusta a 0° de desfase, no se utilizan los devanados terciarios (es decir, los devanados secundarios a_2 , b_2 y c_2 se conectan directamente a los terminales de salida X, Y y Z del autotransformador de regulación) y, por lo tanto, las tensiones de salida (E_X , E_Y , y E_Z) están en fase con las tensiones de entrada (E_A , E_B y E_C). No obstante, cuando los devanados terciarios se conectan a los devanados secundarios, las tensiones de entrada pueden desfasarse, como se muestra en la figura 59.



(a) Diagrama de fasores de las tensiones en los devanados primarios



(b) Diagrama de fasores de las tensiones en los devanados secundario y terciario

Figura 58. Diagramas de fasores de las tensiones en los devanados primario, secundario y terciario del autotransformador de regulación de la figura 57.

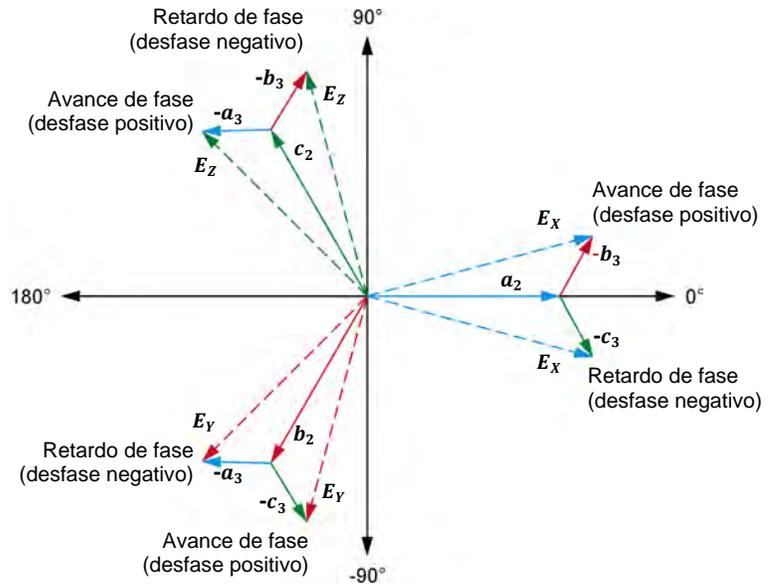


Figura 59. Diagramas de fasores del autotransformador de regulación cuando funciona como transformador de cambio de fase.

La figura 59 muestra que cuando los devanados terciarios b_3 , c_3 y a_3 de un autotransformador de regulación se conectan en serie opuesta a los devanados secundarios a_2 , b_2 y c_2 , respectivamente, las tensiones de salida resultantes E_X , E_Y y E_Z se adelantan con respecto a las tensiones de entrada E_A , E_B y E_C . Por el contrario, cuando los devanados terciarios c_3 , a_3 y b_3 de un autotransformador de regulación se conectan en serie opuesta a los devanados secundarios a_2 , b_2 y c_2 , respectivamente, las tensiones de salida resultantes E_X , E_Y y E_Z se retrasan con respecto a las tensiones de entrada E_A , E_B y E_C .

La modificación de la relación entre la tensión en los devanados terciarios y la tensión en los devanados secundarios de un autotransformador de regulación (es decir, modificar la relación de espiras) permite ajustar la magnitud del desfase entre las tensiones de salida E_X , E_Y y E_Z y las tensiones de entrada E_A , E_B y E_C . Cuanto mayor sea la tensión en los devanados terciarios con respecto a la tensión en los devanados secundarios, mayor será el desfase entre las tensiones de salida y las tensiones de entrada. En los autotransformadores de regulación reales, el desfase entre las tensiones de salida y las tensiones de entrada puede ajustarse generalmente entre $+30^\circ$ y -30° .

La figura 59 también muestra que la magnitud de las tensiones de salida desfasadas E_X , E_Y y E_Z a través del autotransformador de regulación es mayor que la de las tensiones de entrada E_A , E_B y E_C . Para compensar este aumento en la magnitud de las tensiones de salida desfasadas, se dispone de múltiples tomas en los devanados del autotransformador de regulación. Utilizando estas tomas, es posible ajustar la magnitud de las tensiones de salida desfasadas para mantenerla igual a la magnitud de las tensiones de entrada. Las tomas de los devanados del autotransformador de regulación también pueden utilizarse para aumentar o reducir las tensiones de entrada. La relación entre las tensiones de salida y las tensiones de entrada del autotransformador de regulación [es decir, el porcentaje de reducción o elevación de las tensiones de salida con respecto a las tensiones de entrada] se puede ajustar seleccionando las tomas apropiadas en los devanados del autotransformador.

La figura 60 muestra un diagrama de fasores de las distintas tensiones de salida posibles en una fase de un autotransformador de regulación que funciona como un transformador de cambio de fase y como un transformador reductor-elevador.

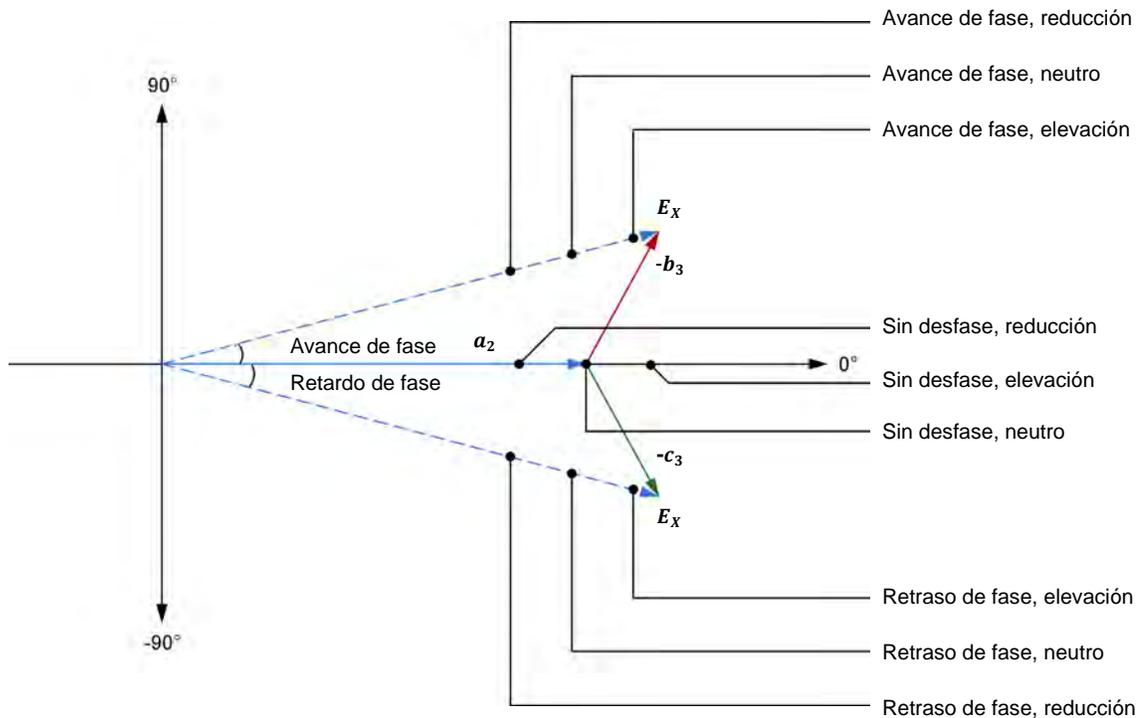


Figura 60. Diagrama de fasores de las tensiones de salida posibles en una fase de un autotransformador de regulación que funciona como un transformador de cambio de fase y como un transformador reductor-elevador.

RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO

El Procedimiento consta de las secciones siguientes:

- Montaje y conexiones
- Control del flujo de potencia activa en una red eléctrica interconectada

PROCEDIMIENTO



En este ejercicio se trabaja con altas tensiones. No haga ni modifique ninguna conexión con las fichas tipo banana cuando la alimentación esté encendida, a menos que se especifique lo contrario.

Montaje y conexiones

En esta sección, usted montará un circuito que represente dos regiones (A y B) de una red eléctrica que están interconectadas a través de una línea de transmisión ca y un autotransformador de regulación (ubicado en la región A). Ajustará el equipo de medición para medir los parámetros de la línea de transmisión ca.

1. Consulte en el Apéndice A la Tabla de utilización del equipo, a fin de obtener la lista de los equipos necesarios para realizar este ejercicio.

Instale el equipo requerido en el [Puesto de trabajo](#).

2. Asegúrese de que los interruptores de alimentación ca y cc de la [Fuente de alimentación](#) estén en la posición **O** (apagado), después conecte dicha fuente a una toma ca trifásica.

Conecte la entrada [Alimentación](#) de la [Interfaz de adquisición de datos y de control](#) a una fuente de alimentación ca de 24 V. Encienda la fuente de alimentación ca de 24 V.

3. Conecte el Puerto USB de la [Interfaz de adquisición de datos y de control](#) a un puerto USB de la computadora.
4. Encienda la computadora e inicie el software [LVDAC-EMS](#).

En la ventana Arranque de [LVDAC-EMS](#), asegúrese de que la [Interfaz de adquisición de datos y de control](#) haya sido detectada. Asegúrese de que en la [Interfaz de adquisición de datos y de control](#) esté disponible la función [Instrumentación computarizada](#). Seleccione la tensión y frecuencia de la red correspondientes a la tensión y frecuencia de su red eléctrica ca local, y después haga clic en el botón [Aceptar](#) para cerrar la ventana [Arranque de LVDAC-EMS](#).

5. Conecte el circuito que se muestra en la figura 61, el cual representa una línea de transmisión ca que interconecta dos regiones (A y B) en una red eléctrica ca interconectada. Cada uno de los tres inductores de la línea de transmisión ca se implementa utilizando una fase de la [Línea de transmisión trifásica](#). Cada uno de los tres condensadores en cada extremo de la línea de transmisión ca se implementa con una sección de condensadores (grupo de 3 condensadores conectados en paralelo) de un módulo [Carga capacitiva](#).



No se requiere ninguna compensación shunt conmutable (SSC) en ambos extremos de la línea de transmisión ca para compensar la tensión. Esto se debe a que la fuente de alimentación ca trifásica suministra la potencia reactiva necesaria en los extremos emisor y receptor de la línea para la compensación de tensión. En otras palabras, la línea de transmisión ca en la figura siguiente tiene compensación de tensión, aunque no se utiliza SSC.

La región A y la región B se identifican en el diagrama de circuito de la figura 61. Dado que la tensión en la región A y la tensión en la región B provienen de la misma fuente de alimentación ca trifásica, el ángulo de fase de la tensión en la región A es igual al de la tensión en la región B. En otras palabras, el desfase δ entre estas dos regiones es cero cuando el [Autotransformador de regulación](#) no introduce ningún desfase. La entrada [E3](#) mide la tensión $E_{Reg. A}$ en la región A. Las entradas [E2](#) e [I2](#) miden la tensión $E'_{Reg. A}$ en la región A después de que el [Autotransformador de regulación](#) la modifica, y la corriente de línea $I_{Reg. A}$ en la región A, respectivamente. Las entradas [E1](#) e [I1](#) miden la tensión $E_{Reg. B}$ y la corriente de línea $I_{Reg. B}$ en la región B, respectivamente.

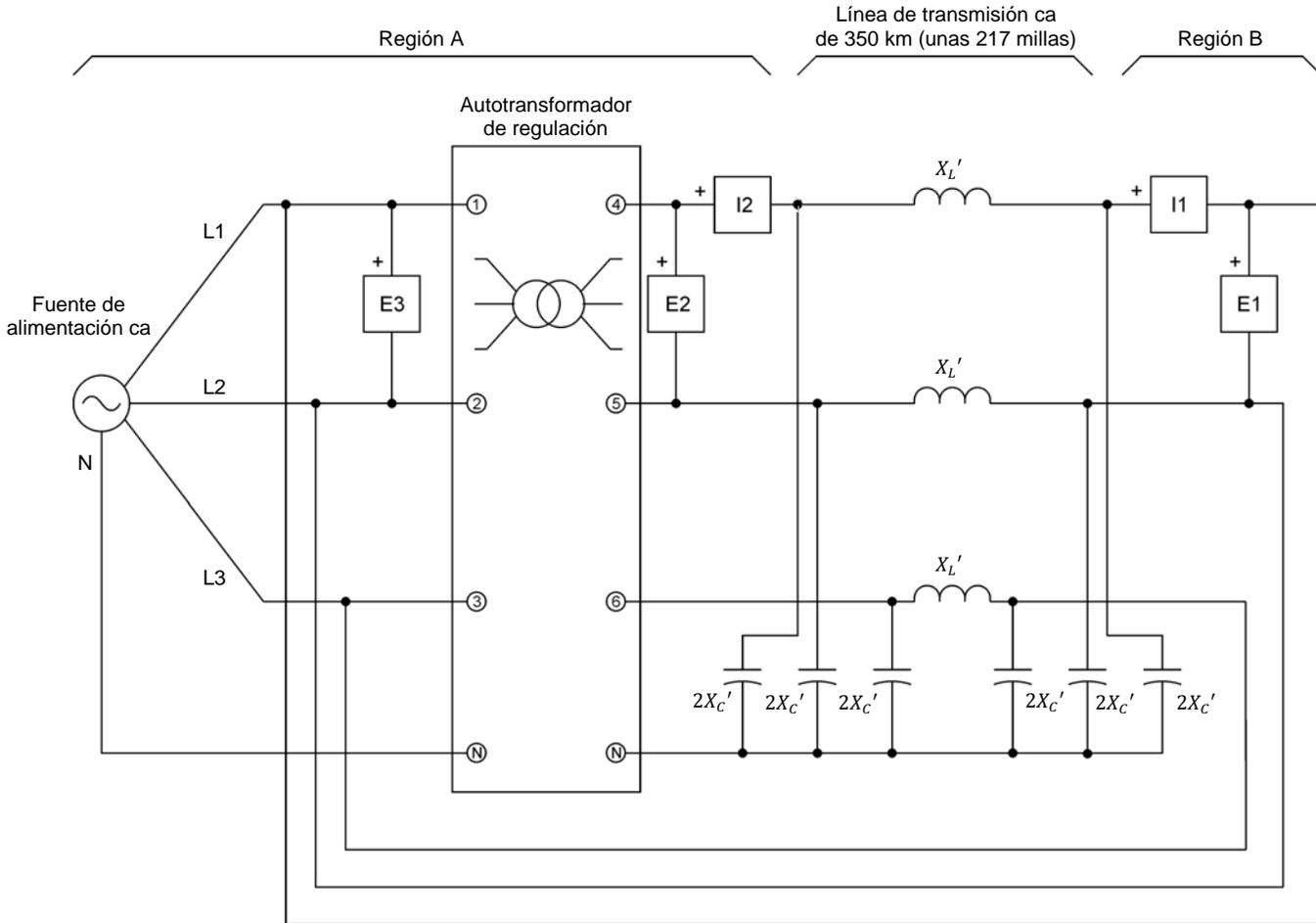
Property of Festo Didactic

Sale and/or reproduction forbidden

6. En la **Línea de transmisión trifásica**, asegúrese de que el interruptor de palanca I/O esté en la posición I, después ajuste la reactancia X_L' de los inductores de línea al valor que se indica en la tabla de la figura 61.

En los módulos **Carga capacitiva**, ajuste la reactancia $2X_C'$ de los condensadores en ambos extremos de la línea al valor que se indica en la tabla de la figura 61.

Asegúrese de que los selectores **Sobretensión** y **Desfasaje** en el **Autotransformador de regulación** estén ajustados a 0% y 0°, respectivamente.



Red de alimentación ca local		X_L' (Ω)	$2X_C'$ (Ω)
Tensión (V)	Frecuencia (Hz)		
120	60	120	1200
220	50	400	4400
240	50	400	4800
220	60	400	4400

Figura 61. Circuito utilizado para observar el control del flujo de potencia activa en una línea de transmisión ca (con compensación de tensión) de una red eléctrica interconectada.

7. En LVDAC-EMS, abra la ventana **Aparatos de medición**, después abra el cuadro de diálogo **Ajustes de adquisición**. Ajuste la **Ventana de muestreo** a 8 ciclos, después haga clic en **Aceptar** para cerrar el cuadro de diálogo. Esto proporciona una mejor exactitud al medir ciertos parámetros de la línea de transmisión ca.

En la ventana **Aparatos de medición**, ajuste tres medidores para medir los valores eficaces (rms) de la tensión $E_{Reg. A}$ en la región A (entrada **E3**), la tensión $E'_{Reg. A}$ en la región A después de la modificación que hace el **Autotransformador de regulación** (entrada **E2**) y la tensión $E_{Reg. B}$ en la región B (entrada **E1**). Ajuste otro medidor para medir el desfase δ entre las tensiones $E'_{Reg. A}$ y $E_{Reg. B}$ en ambos extremos de la línea de transmisión ca [**PS(E1,E2)**].



El desfase δ que indica el medidor de desfase es con respecto a la tensión $E_{Reg. B}$, es decir, es igual al ángulo de fase de la tensión $E'_{Reg. A}$ menos el ángulo de fase de la tensión $E_{Reg. B}$. Por lo tanto, valores positivos del desfase δ indican que la tensión $E'_{Reg. A}$ está adelantada con respecto a la tensión $E_{Reg. B}$.

Finalmente, ajuste otros dos medidores para medir la potencia activa trifásica $P_{Reg. A}$ en la región A [**PQS2 (E2,I2) 3~**] y la potencia activa trifásica $P_{Reg. B}$ en la región B [**PQS1 (E1,I1) 3~**].



*Las funciones de medición **PQS2 (E2,I2) 3~** y **PQS1 (E1,I1) 3~** permiten la medición de potencia trifásica a partir de la tensión y la corriente de línea medidas en un ramal de un circuito trifásico. Las medidas de potencia obtenidas mediante estas funciones de medición solo son válidas si el circuito al que están conectadas las entradas de tensión y corriente está equilibrado.*

Ajuste los medidores en el modo de regeneración continua.

8. En LVDAC-EMS, abra el **Analizador de fasores**. Haga los ajustes necesarios para observar los fasores de la tensión $E_{Reg. A}$ en la región A (entrada **E3**), la tensión $E'_{Reg. A}$ en la región A después de la modificación que hace el **Autotransformador de regulación** (entrada **E2**) y la tensión $E_{Reg. B}$ en la región B (entrada **E1**). Establezca el fasor de la tensión $E_{Reg. B}$ como el fasor de referencia. Ajuste el **Analizador de fasores** en el modo de regeneración continua.

Control del flujo de potencia activa en una red eléctrica interconectada

En esta sección, usted cambiará el desfase δ entre las tensiones en ambos extremos de la línea de transmisión ca y observará el efecto que esto tiene sobre el flujo de potencia activa en la línea.

9. En la **Fuente de alimentación**, encienda la fuente de alimentación ca trifásica.

En el **Analizador de fasores**, ajuste la sensibilidad de la tensión según sea necesario.

Property of Festo Didactic

Sale and/or reproduction forbidden

10. Observe los valores que indican los distintos medidores en la ventana **Aparatos de medición**. Asimismo, observe los fasores de las tensiones $E_{Reg. A}$, $E'_{Reg. A}$ y $E_{Reg. B}$ que figuran en el **Analizador de fasores**. Registre los parámetros del circuito a continuación.

Tensión $E_{Reg. A} = \underline{\hspace{2cm}}$ V

Ángulo de fase de la tensión $E_{Reg. A} = \underline{\hspace{2cm}}$ °

Tensión $E'_{Reg. A} = \underline{\hspace{2cm}}$ V

Ángulo de fase de la tensión $E'_{Reg. A} = \underline{\hspace{2cm}}$ °

Tensión $E_{Reg. B} = \underline{\hspace{2cm}}$ V

Ángulo de fase de la tensión $E_{Reg. B} = \underline{\hspace{2cm}}$ °

Desfase $\delta = \underline{\hspace{2cm}}$ °

Potencia activa trifásica $P_{Reg. A} = \underline{\hspace{2cm}}$ W

Potencia activa trifásica $P_{Reg. B} = \underline{\hspace{2cm}}$ W

¿Fluye potencia activa de una región a otra a través de la línea de transmisión ca? Explique brevemente.



Los valores positivos de potencia activa indican que la potencia activa fluye de la región A a la región B, mientras que los valores negativos de potencia activa indican que la potencia activa fluye de la región B a la región A.

11. En el **Autotransformador de regulación**, ajuste el selector **Desfasaje** a +15°.
12. Observe los valores que indican los distintos medidores en la ventana **Aparatos de medición**. Asimismo, observe los fasores de las tensiones $E_{Reg. A}$, $E'_{Reg. A}$ y $E_{Reg. B}$ que figuran en el **Analizador de fasores**. Registre los parámetros del circuito a continuación.

Tensión $E_{Reg. A} = \underline{\hspace{2cm}}$ V

Ángulo de fase de la tensión $E_{Reg. A} = \underline{\hspace{2cm}}$ °

Tensión $E'_{Reg. A} = \underline{\hspace{2cm}}$ V

Ángulo de fase de la tensión $E'_{Reg. A} = \underline{\hspace{2cm}}$ °

Property of Festo Didactic
Sale and/or reproduction forbidden

Tensión $E_{Reg. B} = \underline{\hspace{2cm}}$ V

Ángulo de fase de la tensión $E_{Reg. B} = \underline{\hspace{2cm}}$ °

Desfase $\delta = \underline{\hspace{2cm}}$ °

Potencia activa trifásica $P_{Reg. A} = \underline{\hspace{2cm}}$ W

Potencia activa trifásica $P_{Reg. B} = \underline{\hspace{2cm}}$ W

¿Fluye potencia activa de una región a otra a través de la línea de transmisión ca? Explique brevemente.

Desfasar la tensión en un extremo de la línea de transmisión ca utilizando el [Autotransformador de regulación](#), ¿afecta al ángulo de fase de la tensión $E_{Reg. A}$ en la región A o al ángulo de fase de la tensión $E_{Reg. B}$ en la región B?

- 13.** En el [Autotransformador de regulación](#), ajuste el selector [Desfasaje](#) a -15° .
- 14.** Observe los valores que indican los distintos medidores en la ventana [Aparatos de medición](#). Asimismo, observe los fasores de las tensiones $E_{Reg. A}$, $E'_{Reg. A}$ y $E_{Reg. B}$ que figuran en el [Analizador de fasores](#). Registre los parámetros del circuito a continuación.

Tensión $E_{Reg. A} = \underline{\hspace{2cm}}$ V

Ángulo de fase de la tensión $E_{Reg. A} = \underline{\hspace{2cm}}$ °

Tensión $E'_{Reg. A} = \underline{\hspace{2cm}}$ V

Ángulo de fase de la tensión $E'_{Reg. A} = \underline{\hspace{2cm}}$ °

Tensión $E_{Reg. B} = \underline{\hspace{2cm}}$ V

Ángulo de fase de la tensión $E_{Reg. B} = \underline{\hspace{2cm}}$ °

Desfase $\delta = \underline{\hspace{2cm}}$ °

Potencia activa trifásica $P_{Reg. A} = \underline{\hspace{2cm}}$ W

Potencia activa trifásica $P_{Reg. B} = \underline{\hspace{2cm}}$ W

Property of Festo Didactic

Sale and/or reproduction forbidden

¿Fluye potencia activa de una región a otra a través de la línea de transmisión ca? Explique brevemente.

15. ¿Son los resultados que usted obtuvo en los pasos 12 y 14 coherentes con la ecuación (que se muestra a continuación) que relaciona la potencia activa $P_{(Comp.)}$ que transmite una línea de transmisión ca con compensación de tensión con la tensión del emisor E_E , la tensión del receptor E_R , la reactancia inductiva X_L' en el circuito equivalente PI corregido de la línea y el desfase δ entre las tensiones E_E y E_R ? Explique brevemente.



Los valores de tensión de línea a línea registrados en los pasos 12 y 14 deben dividirse por $\sqrt{3}$ antes de utilizarlos en la ecuación siguiente.

$$P_{(Comp.)} = 3 \left(\frac{E_E E_R}{X_L'} \sin \delta \right)$$

16. Cierre LVDAC-EMS y después apague todos los equipos. Desconecte todos los conductores y devuélvalos a su sitio de almacenamiento.

CONCLUSIÓN

En este ejercicio, usted aprendió que en las redes eléctricas ca que consisten en varias regiones interconectadas por líneas de transmisión ca con compensación de tensión, solo intercambian potencia activa las regiones en las que hay un desfase δ no nulo entre las tensiones en ambos extremos de la línea. Usted aprendió que el sentido del flujo de la potencia activa en una línea de transmisión ca con compensación de tensión de una red eléctrica interconectada depende de la polaridad del desfase δ entre las tensiones en ambos extremos de la línea. Aprendió que los transformadores de cambio de fase proporcionan un medio para controlar el flujo de potencia activa a través de las líneas de transmisión ca en redes eléctricas interconectadas. Se familiarizó con el funcionamiento de los autotransformadores de regulación, que pueden actuar como transformadores de cambio de fase o como transformadores reductores-elevadores, y por lo tanto pueden utilizarse para controlar el flujo de potencia activa en redes eléctricas interconectadas.

PREGUNTAS DE REVISIÓN

1. ¿Qué determina la cantidad de energía activa $P_{(Comp.)}$ que se transfiere a través de una línea de transmisión ca con compensación de tensión de una red eléctrica interconectada? Explique.

2. ¿Qué determina el sentido del flujo de la potencia activa en una línea de transmisión ca con compensación de tensión de una red eléctrica interconectada?

3. Determine el sentido del flujo de la potencia activa entre las regiones A y B en una red eléctrica interconectada cuando la tensión en la región A está adelantada con respecto a la tensión en la región B.

4. Describa brevemente lo que es un transformador de cambio de fase.

5. ¿Qué se puede hacer para controlar el flujo de potencia activa en las líneas de transmisión ca de una red eléctrica interconectada compleja? Explique.

Property of Festo Didactic
Sale and/or reproduction forbidden

Tabla de utilización del equipo

El siguiente equipo es necesario para realizar los ejercicios de este manual.

Equipo							
Modelo	Descripción	1	2	3	4	5	6
8349	Autotransformador de regulación						1
8951-L	Cables de conexión	1	1	1	1	1	1
8951-N	Cables de conexión	1	1	1	1	1	1
8331	Carga capacitiva	1	1	2	2	3	2
8321	Carga inductiva	1		1	1	2	
8311 ⁽¹⁾	Carga resistiva	1	1	1	1	1	
8990	Computadora personal	1	1	1	1	1	1
8823	Fuente de alimentación	1	1	1	1	1	1
30004-2	Fuente de alimentación ca de 24 V	1	1	1	1	1	1
9063-B ⁽²⁾	Interfaz de adquisición de datos y de control	1	1	1	1	1	1
8329	Línea de transmisión trifásica	1	1	1	1	1	1
8134 ⁽³⁾	Puesto de trabajo	1	1	1	1	1	1

(1) Módulo Carga resistiva con una tensión nominal correspondiente a la tensión de la red de alimentación ca local. Utilice la variante del modelo -00, -01, -02, -05, -06, -07 o 0A.

(2) El modelo 9063-B consiste en la Interfaz de adquisición de datos y de control, modelo 9063, con el conjunto de funciones Instrumentación computarizada, modelo 9069-1.

(3) También puede utilizarse el Puesto de trabajo móvil, modelo 8110.

Property of Festo Didactic
Sale and/or reproduction forbidden

Glosario de términos nuevos

autotransformador de regulación

Un autotransformador de regulación tiene la capacidad de funcionar como un transformador de cambio de fase, un transformador reductor-elevador, o ambos al mismo tiempo. Esto permite que un autotransformador de regulación controle el flujo de potencia activa P . La potencia activa P puede controlarse disminuyendo o aumentando el ángulo de fase de las tensiones de entrada.

carga de impedancia de sobretensión

Véase "Carga natural P_0 ".

carga natural P_0

La carga natural P_0 es la potencia activa que se le suministra a una carga resistiva cuya resistencia es igual a la impedancia característica Z_0 de una línea de transmisión ca. La carga natural P_0 de una línea de transmisión ca también se conoce como carga de impedancia de sobretensión (SIL, del inglés *surge impedance load*).

circuito equivalente de parámetros distribuidos

Circuito eléctrico equivalente de un segmento corto (por ejemplo, 1 km o 1 milla) de una línea de transmisión ca de alta tensión (una sola fase) repetido tantas veces como sea necesario para obtener el circuito eléctrico equivalente de la línea de transmisión ca completa. Este circuito equivalente no es muy adecuado para el estudio de las líneas de transmisión ca porque resolverlo resulta complejo y lleva mucho tiempo.

circuito equivalente PI (π) corregido

El circuito equivalente PI corregido de una línea de transmisión ca de alta tensión es una reducción, que se obtiene mediante cálculos matemáticos, del circuito equivalente de parámetros distribuidos de esta línea. Toma la forma de un circuito equivalente de parámetros concentrados con la misma configuración (que recuerda a la letra griega π) que el circuito equivalente de un segmento corto de la línea de transmisión ca. Las características y el comportamiento observado con el circuito equivalente PI corregido de una línea de transmisión ca son muy similares a los de las líneas de transmisión ca de alta tensión reales.

compensación shunt conmutable (SSC)

Compensación de tensión de una línea de transmisión ca de alta tensión utilizando bancos de inductores en derivación conmutables, y también bancos de condensadores en derivación conmutables cuando la línea tiene que funcionar a niveles de carga muy superiores a la carga natural P_0 . La compensación shunt conmutable modifica la reactancia capacitiva X_C de la línea de modo que la impedancia característica ($Z_{0\text{ comp.}}$) de la línea compensada se acerque lo más posible a la resistencia de la carga. En otras palabras, la compensación shunt conmutable hace que una línea de transmisión ca esté prácticamente equilibrada, y mantiene la tensión del receptor E_R cerca de la tensión del emisor E_E , para todo valor de carga. Debido a esto, la compensación shunt conmutable también se conoce como compensación de la impedancia característica o compensación de la impedancia de sobretensión.

Property of Festo Didactic

Sale and/or reproduction forbidden

compensación shunt conmutable distribuida (SSC distribuida).	Técnica utilizada para la compensación de tensión de líneas de transmisión ca de alta tensión largas. Este método consiste en dividir una línea de transmisión ca larga en tantos segmentos como sea necesario, y aplicar la SSC en los extremos emisor y receptor de la línea, y entre cada segmento de línea, para obtener un perfil de tensión satisfactorio.
extremo emisor	En una línea de transmisión ca, el extremo emisor de la línea es el extremo que suministra potencia activa al otro extremo (extremo receptor) de la línea.
extremo receptor	En una línea de transmisión ca, el extremo receptor de la línea es el extremo que recibe potencia activa del otro extremo (extremo emisor) de la línea.
impedancia característica Z_0	El valor de la impedancia de la carga (es decir, la resistencia en el caso de una carga estrictamente resistiva) necesaria en el extremo receptor de una línea de transmisión ca para hacer que la tensión del receptor E_R iguale a la tensión del emisor E_E . La impedancia característica Z_0 de una línea de transmisión ca también se denomina impedancia de sobretensión. El valor de la impedancia característica Z_0 depende de las características eléctricas fundamentales (es decir, las reactancias inductiva y capacitiva por unidad de longitud) de la línea de transmisión ca.
impedancia de sobretensión	Véase "impedancia característica Z_0 "
transformador de cambio de fase	Un transformador de cambio de fase es un tipo especial de transformador de potencia trifásico que tiene la capacidad de introducir un desfase (normalmente comprendido entre alrededor de $+30^\circ$ y alrededor de -30°) entre las tensiones de entrada y las tensiones de salida. Debido a esta capacidad, los transformadores de cambio de fase pueden utilizarse para controlar el flujo de potencia activa en las líneas de transmisión ca de una red eléctrica interconectada.
transformador reductor-elevador	Un transformador reductor-elevador es un tipo especial de transformador de potencia que tiene la capacidad de reducir o aumentar el valor de las tensiones de entrada.
línea de transmisión	Las líneas de transmisión son el elemento de una red eléctrica que transfiere la energía eléctrica de las estaciones generadoras de energía al sistema de distribución eléctrico. La energía eléctrica generalmente se transfiere sobre largas distancias en líneas de transmisión que operan a una tensión muy alta para mantener los conductores de línea a un tamaño razonable y limitar las pérdidas de energía en dichos conductores. La mayoría de las líneas de transmisión transportan corriente alterna trifásica (ca) y son aéreas (es decir, soportadas por grandes torres) en lugar de subterráneas.

regulación de tensión

La regulación de tensión de una línea de transmisión ca indica el grado de variación en la tensión del receptor E_R que ocurre cuando varía la carga conectada a la línea de transmisión ca. La característica de regulación de tensión de una línea de transmisión ca depende principalmente del tipo de carga en el extremo receptor de la línea, así como del valor de la reactancia inductiva X_L de dicha línea.

Property of Festo Didactic
Sale and/or reproduction forbidden

Tabla de impedancia para los módulos de carga

La siguiente tabla lista los valores de impedancia que pueden obtenerse usando la Carga resistiva, modelo 8311, la Carga inductiva, modelo 8321, o la Carga capacitiva, modelo 8331. La figura 62 muestra los elementos de carga y sus conexiones. Se pueden utilizar otras combinaciones en paralelo para obtener los mismos valores de impedancia listados.

Tabla 18. Tabla de impedancia para los módulos de carga.

Impedancia (Ω)			Posición de los interruptores								
120 V 60 Hz	220/230 V 50 Hz/60 Hz	240 V 50 Hz	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1200	4400	4800									
600	2200	2400									
300	1100	1200									
400	1467	1600									
240	880	960									
200	733	800									
171	629	686									
150	550	600									
133	489	533									
120	440	480									
109	400	436									
100	367	400									
92	338	369									
86	314	343									
80	293	320									
75	275	300									
71	259	282									
67	244	267									
63	232	253									
60	220	240									
57	210	229									

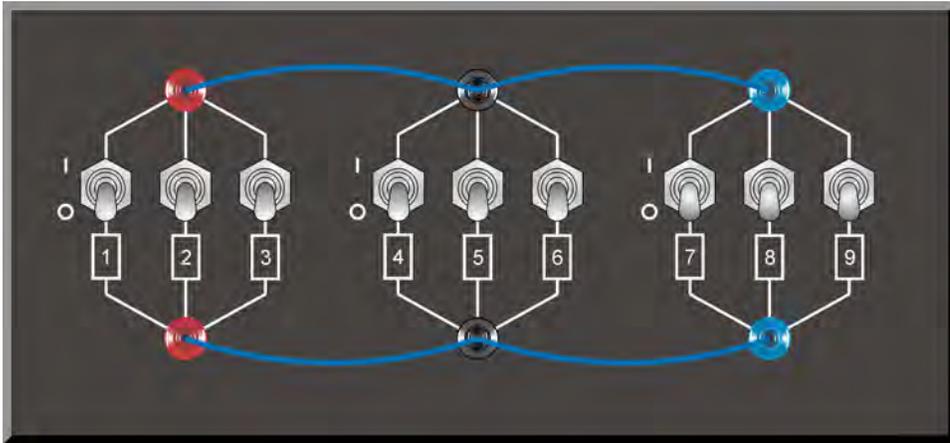


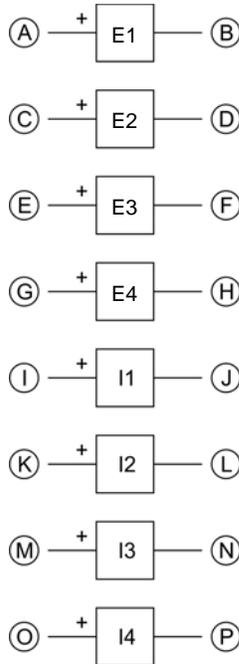
Figura 62. Ubicación de los elementos de carga en la Carga resistiva, Carga inductiva y Carga capacitiva, modelos 8311, 8321 y 8331, respectivamente.

Símbolos de los diagramas de circuitos

En los diagramas de circuitos de este curso se utilizan diferentes tipos de símbolos. Cada símbolo es la representación funcional de un dispositivo eléctrico específico que se puede implementar con los equipos. El empleo de estos símbolos simplifica de manera importante las interconexiones que se deben mostrar en los diagramas de los circuitos y, por lo tanto, facilita la comprensión del funcionamiento de esos circuitos.

Para cada símbolo, a excepción de los que representan fuentes de alimentación, resistores, inductores y condensadores, en este apéndice se encuentra el nombre del dispositivo que el símbolo representa, así como los equipos y conexiones necesarios para conectar adecuadamente el dispositivo a un circuito. Adviértase que los terminales de cada símbolo se identifican mediante letras dentro de un círculo. Esas mismas letras identifican los terminales correspondientes en el diagrama Equipos y conexiones. Asimismo, obsérvese que cuando el diagrama Equipos y conexiones contiene cifras, estas corresponden a los números de los terminales que se emplean en el equipo real.

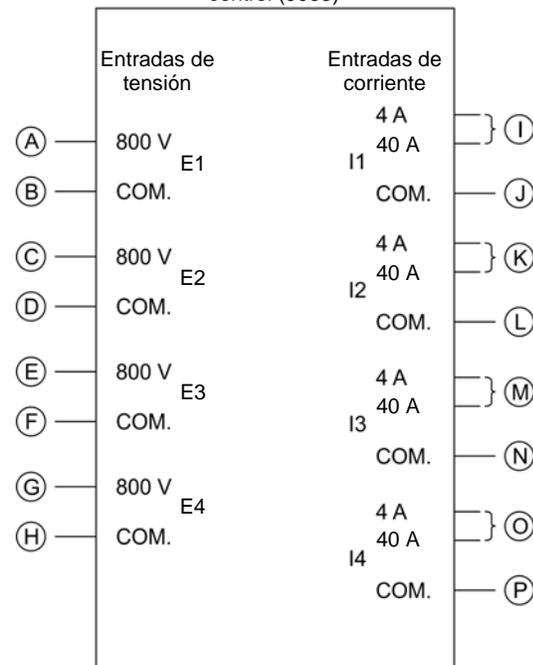
Símbolo



Entradas aisladas para medición de tensión y corriente

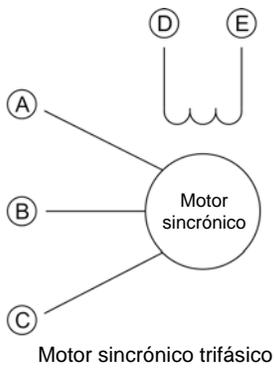
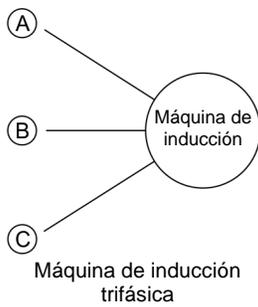
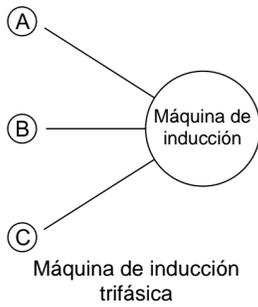
Equipos y conexiones

Interfaz de adquisición de datos y de control (9063)

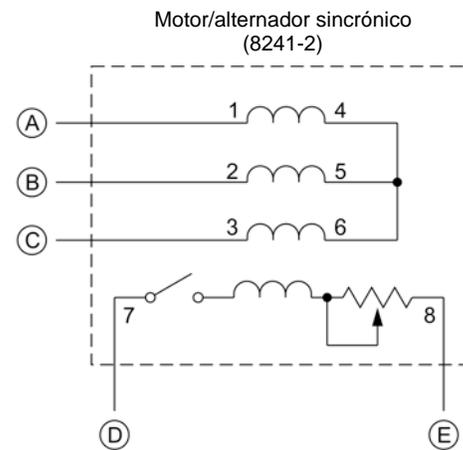
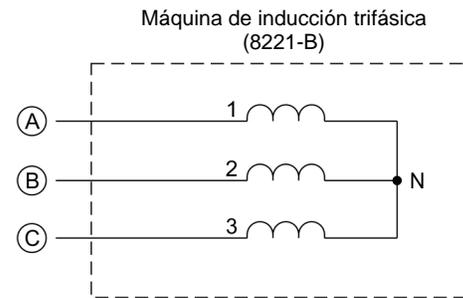
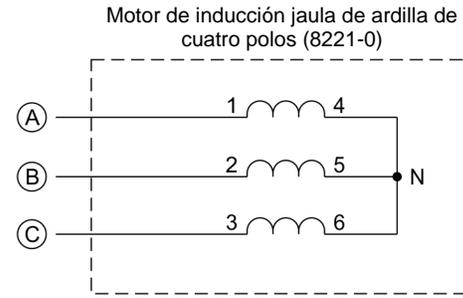


Cuando la corriente en una de las entradas I1, I2, I3 o I4 supera 4 A (de forma permanente o momentánea), utilice el terminal de 40 A de la entrada correspondiente y ajuste el parámetro Gama (nivel) de dicha entrada en Alta, en la ventana Ajustes de la adquisición de datos y de control del software LVDAC-EMS.

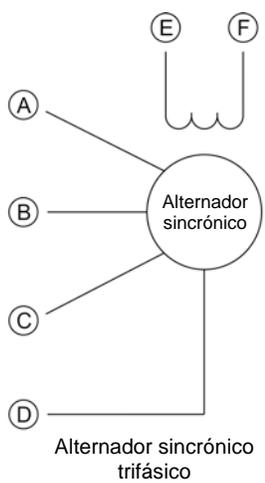
Símbolo



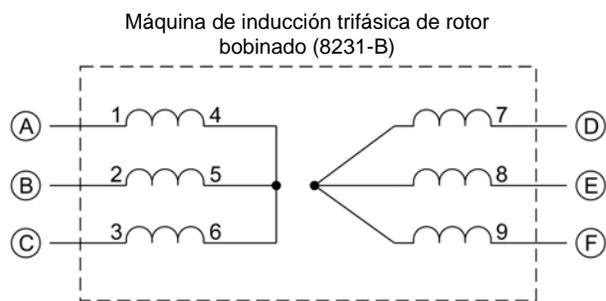
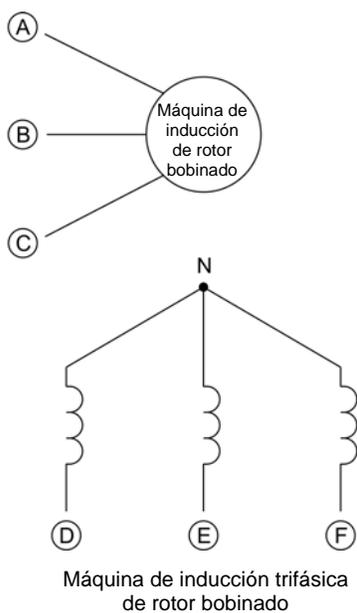
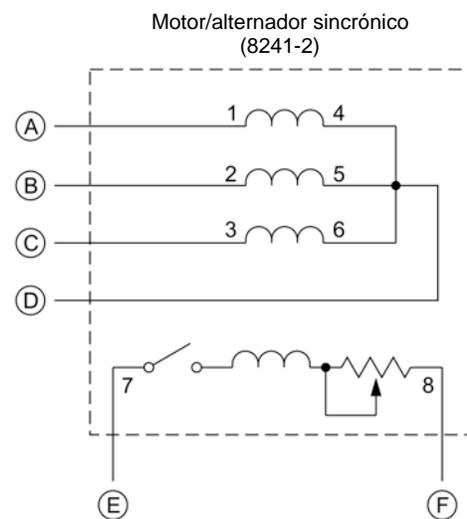
Equipos y conexiones



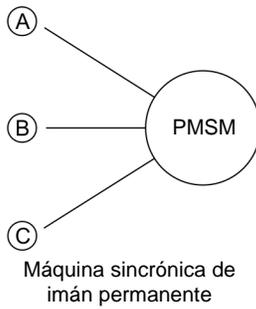
Símbolo



Equipos y conexiones

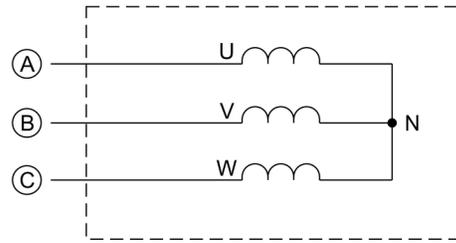


Símbolo

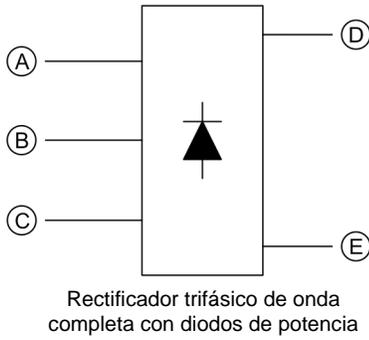
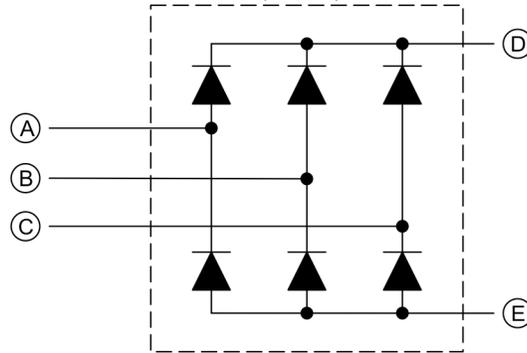


Equipos y conexiones

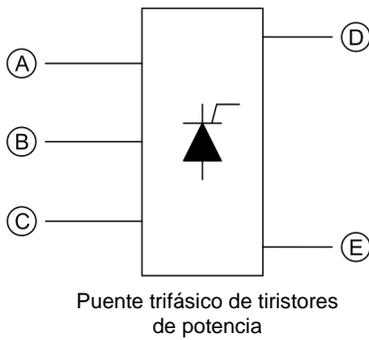
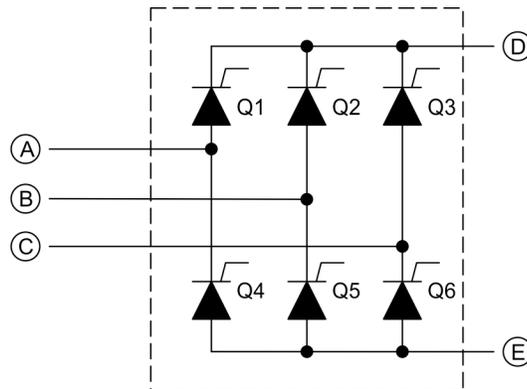
Máquina sincrónica de imán permanente (8245)



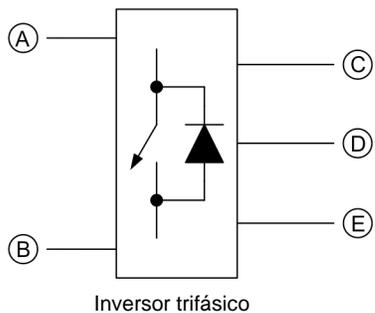
Rectificador y condensadores de filtrado (8842-A)



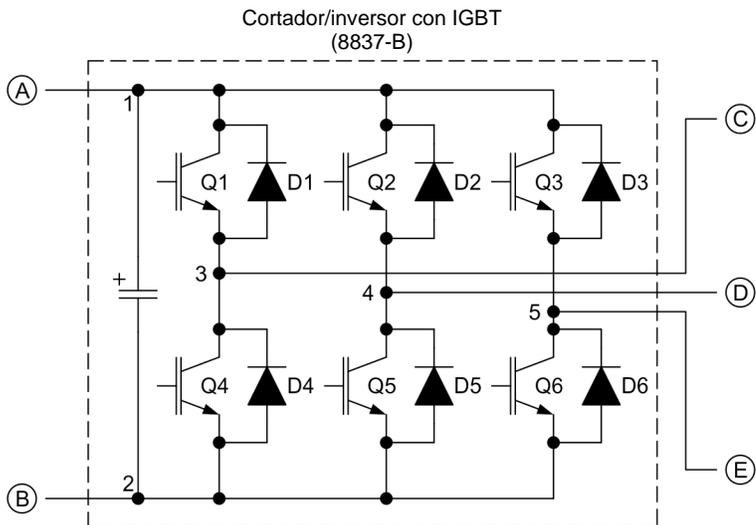
Tiristores de potencia (8841)



Símbolo



Equipos y conexiones



La representación que se utiliza para el interruptor de potencia electrónico en el símbolo del inversor trifásico anterior no es ni un símbolo IEC ni un símbolo ANSI.

Property of Festo Didactic
Sale and/or reproduction forbidden

Índice de términos nuevos



El número de página en negrilla indica la entrada principal. Consulte el Glosario de términos nuevos para obtener las definiciones de dichos términos.

autotransformador de regulación	121
carga de impedancia de sobretensión	32
carga natural P0.....	32
circuito equivalente de parámetros distribuidos.....	6
Circuito equivalente PI (π) corregido	27
compensación shunt conmutable (SSC)	52, 94
compensación shunt conmutable distribuida (SSC distribuida).	96
extremo emisor	1
extremo receptor.....	1
impedancia característica Z0	32
impedancia de sobretensión	32
líneas de transmisión	1
regulación de tensión.....	11
transformador de cambio de fase	119
transformador reductor-elevador	121

Property of Festo Didactic
Sale and/or reproduction forbidden

Bibliografía

Acha E., Agelidis V.G., Anaya-Lara O., Miller T.J.E., *Power Electronic Control in Electrical Systems*, Oxford: Newnes, 2002, ISBN 0-7506-5126-1

Boylestad, Robert L., *Introductory Circuit Analysis*, 11th ed., Upper Saddle River: Prentice Hall, 2006, ISBN 978-0131730441.

Duncan Glover, J. and Sarma, Mulukutla S. and Overbye, Thomas J., *Power Systems Analysis and Design*, 5th ed., Stamford: Cengage Learning, 2012, ISBN 978-1-111-42577-7.

Wildi, Theodore, *Electrical Machines, Drives, and Power Systems*, 6th ed., Upper Saddle River: Prentice Hall, 2005, ISBN 978-0131776913.