

OCW Integración de energías renovables en la red eléctrica

Control de tensión en redes eléctricas

Pablo Ledesma

Índice

1. Tensión y potencia en líneas eléctricas	1
2. Control de tensión y potencia reactiva	5
3. Transformadores con cambio de tomas	7
A. Atribución de imágenes	8

Cuando hablamos de la tensión en un nudo de la red nos referimos siempre a la tensión fase-fase o *tensión de línea*, salvo que se especifique lo contrario. En este texto suponemos que las tensiones trifásicas de los sistemas eléctricos están equilibradas, de manera que las tres tensiones de línea son iguales en magnitud y desfasadas un tercio de ciclo, es decir 120 grados, y la magnitud de la tensión fase-tierra es la de la tensión de línea dividida por $\sqrt{3}$. Para mayor claridad trabajamos en por unidad y con equivalentes monofásicos, pero la equivalencia con el sistema trifásico completo puede consultarse en [1]. El estudio de sistemas desequilibrados, necesario para analizar faltas desequilibradas, queda fuera del alcance de este texto pero queda explicado en [2].

Los operadores de sistema deben mantener las tensiones en los nudos dentro de unos límites especificados, tanto para entregar la energía en condiciones aceptables de calidad a los consumidores como para proteger a los propios equipos de la red. El control de tensión en un sistema eléctrico está estrechamente ligado a la potencia reactiva, y es necesario entender esta relación para comprender cómo podemos actuar sobre las tensiones y cuál es el efecto de la generación renovable. Este capítulo trata sobre el fundamento físico de la relación entre potencia reactiva y tensión y sobre los dispositivos que se han usado tradicionalmente para conseguir un perfil aceptable de tensiones en una red eléctrica.

1. Tensión y potencia en líneas eléctricas

Para comprender el papel de la tensión en el transporte de energía planteamos las ecuaciones eléctricas en una rama del circuito, primero en una red de transporte y luego de distribución.

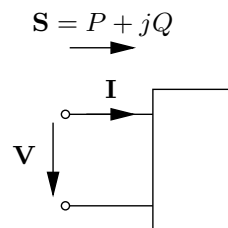


Figura 1: Referencias de tensión, corriente y potencia

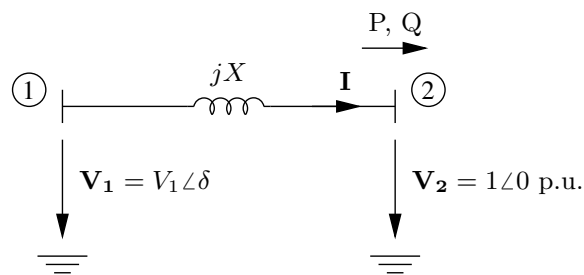


Figura 2: Línea sin pérdidas

Partimos del equivalente monofásico de una red trifásica de corriente alterna equilibrada y de la representación de las variables eléctricas mediante fasores. Usamos las ecuaciones básicas de un circuito eléctrico: las leyes de Kyrchhoff, la ley de Ohm y la expresión de la potencia compleja:

$$\mathbf{S} = P + jQ = \mathbf{V}\mathbf{I}^* \quad (1)$$

tomando las referencias dibujadas en la figura 1.

Línea de transporte

El modelo más sencillo de línea aérea de transporte es el modelo de línea corta sin pérdidas, representado en la figura 2 y compuesto únicamente por una reactancia en serie. Los conductores desnudos de las tres fases de una línea aérea de transporte se mantienen separados para alcanzar un aislamiento efectivo, lo cual refuerza el efecto inductivo de la línea y el peso relativo de la reactancia respecto a otros parámetros eléctricos. En una línea de transporte la reactancia puede ser hasta diez veces mayor que la resistencia, por lo que despreciar la resistencia es en general una buena aproximación.

La línea de la figura 2 alimenta una carga de potencia activa P y potencia reactiva Q en el nudo 2, donde la tensión es 1 por unidad. La figura 3 muestra los diagramas fasoriales de las tensiones y la corriente en la línea en distintos casos correspondientes a distintos valores de P y Q . En todos los casos, el diagrama fasorial puede obtenerse fácilmente siguiendo estos pasos:

1. Dibujamos $\mathbf{V}_2$ en la dirección horizontal porque le hemos asignado el ángulo cero.
2. Obtenemos la corriente en la carga $\mathbf{I} = (P - jQ)/\mathbf{V}_2^*$.
3. Obtenemos la caída de tensión en la línea $jX\mathbf{I}$.
4. Aplicando la ley de Kyrchhoff de las tensiones, dibujamos $\mathbf{V}_1 = \mathbf{V}_2 + jX\mathbf{I}$.

Los casos analizados son los siguientes:

El nudo 2 consume potencia activa. La figura 3 a) muestra este caso en el que la corriente $\mathbf{I}$ está en fase con $\mathbf{V}_2$. Las tensiones $\mathbf{V}_1$ y $\mathbf{V}_2$ tienen una magnitud similar pero $\mathbf{V}_1$ está adelantada respecto a $\mathbf{V}_2$.

El nudo 2 inyecta potencia activa. La potencia activa P circula en sentido contrario al caso anterior, es decir desde el nudo 2 hacia el nudo 1. La figura 3 b) muestra la corriente $\mathbf{I}$ en contrafase con $\mathbf{V}_2$. Las tensiones $\mathbf{V}_1$ y $\mathbf{V}_2$ tienen una magnitud similar pero $\mathbf{V}_1$ está retrasada respecto a $\mathbf{V}_2$.

Considerando las figuras 3 a) y b) vemos que la potencia activa circula en ambos casos desde la tensión adelantada hacia la tensión retrasada.

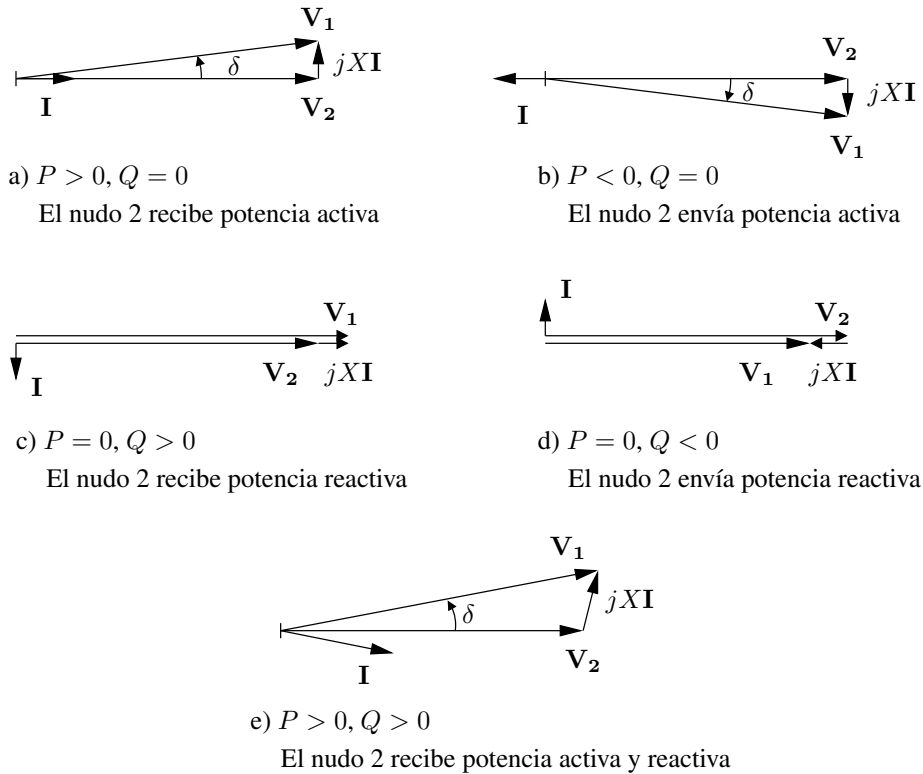


Figura 3: Diagramas de fasores en una línea corta sin pérdidas

El nudo 2 consume potencia reactiva. Este caso, representado en la figura 3 c), corresponde a la conexión de una bobina en el nudo 2. La corriente I está retrasada 90 grados respecto a la tensión V_2 , por lo que en el diagrama fasorial está apuntando hacia abajo. La tensión V_1 es mayor en módulo que V_2 , y ambas están en fase.

El nudo 2 inyecta potencia reactiva. Este caso está representado en la figura 3 d) y corresponde a la conexión de un condensador en el nudo 2. La corriente I está adelantada 90 grados respecto a la tensión V_2 y por lo tanto está apuntando hacia arriba en el diagrama fasorial. La tensión V_2 es mayor en módulo que V_1 , y ambas están en fase.

Considerando las figuras 3 c) y d) vemos que en ambos casos la potencia reactiva circula desde el nudo con tensión mayor hacia el nudo con tensión menor.

El nudo 2 consume potencia activa y reactiva. La figura 3 e) representa este caso en el que el mismo razonamiento que en los casos anteriores es aplicable. La tensión V_1 está adelantada respecto a V_2 porque envía potencia activa, y es mayor porque envía potencia reactiva.

Los casos descritos ilustran la relación estrecha entre ángulos de tensión y potencia activa, por un lado, y magnitudes de tensión y potencia reactiva, por otro:

- La potencia activa circula desde nudos con tensión adelantada hacia nudos con tensión retrasada.
- La potencia reactiva circula desde nudos con tensión mayor hacia nudos con tensión menor.

Ambas relaciones están relativamente desacopladas, es decir, modificar el flujo de potencia activa afecta poco a la magnitud de las tensiones, y modificar el flujo de potencia reactiva afecta poco al desfase angular entre las tensiones.

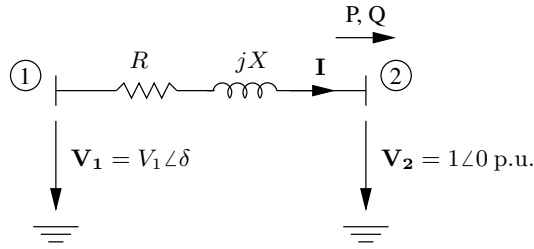


Figura 4: Línea con pérdidas

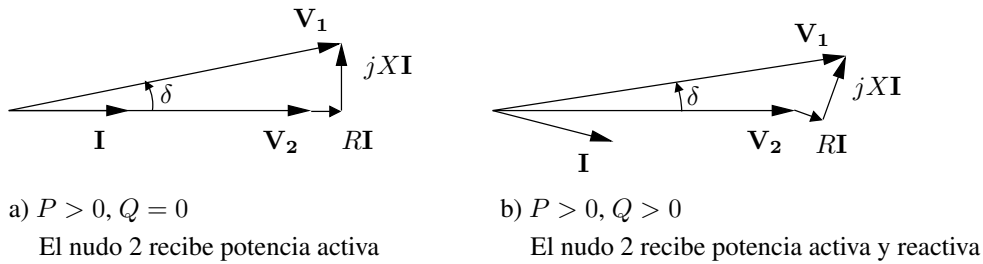


Figura 5: Diagramas de fasores en la línea con pérdidas

Este desacoplamiento, aunque imperfecto¹, es la base del control de tensiones en una red eléctrica. Para modificar las tensiones en una red actuamos sobre los flujos de potencia reactiva. Si en un nudo donde la tensión es baja conectamos un condensador, la potencia reactiva inyectada por el condensador viaja hacia los nudos vecinos y la tensión en el nudo sube.

Al no producir trabajo útil, la producción y el consumo de potencia reactiva apenas tiene coste económico. Los operadores de sistema suelen distribuir en sus redes fuentes y sumideros de potencia reactiva que constituyen recursos para controlar el perfil de tensiones. Este control se concibe de manera independiente al de la potencia activa aprovechando el desacoplamiento entre ambos.

Línea de distribución

En las líneas de distribución aplicamos un razonamiento similar, pero no podemos despreciar la resistencia de los conductores porque tiene un peso significativo. Al contrario que en las líneas de transporte, en los escalones más bajos de tensión de las redes de distribución el valor de la resistencia de las líneas es similar al de la reactancia.

La figura 4 es el modelo más sencillo de una línea sin despreciar las pérdidas y consiste en una resistencia y una reactancia en serie. Consideremos el caso en el que la línea se emplea para transportar potencia activa, representado en el diagrama fasorial de la figura 5 a). Como puede verse, la componente de la caída de tensión debida al término RI provoca que la magnitud de la tensión en el nudo 1 V_1 sea mayor que la magnitud de la tensión en el nudo 2 V_2 . El desacoplamiento entre V-Q y P-δ deja de producirse, y el transporte de potencia activa provoca una caída de tensión significativa.

Consideremos ahora el caso más general representado en la figura 5 b), en el que la línea transporta tanto potencia activa P como potencia reactiva Q. Como en el nudo 2 la potencia compleja recibida es

$$S = P + jQ = V_2 I^*,$$

¹El desacoplamiento es menos perfecto cuando la línea está muy cargada: contemplando la figura 3 a) vemos que si la corriente I es muy grande porque la línea transporta mucha potencia P, entonces la magnitud de V_1 comienza a ser significativamente mayor que la de V_2

podemos despejar la corriente y escribir

$$\mathbf{I} = \frac{\mathbf{S}^*}{\mathbf{V}_2^*} = \frac{P - jQ}{V_2 \angle 0}.$$

Aplicando la ley de Kirchhoff de las tensiones,

$$\mathbf{V}_1 = \mathbf{V}_2 + (R + jX)\mathbf{I} = V_2 \angle 0 + \frac{(R + jX)(P - jQ)}{V_2 \angle 0},$$

y separando la parte real y la imaginaria:

$$\mathbf{V}_1 = \left(V_2 + \frac{RP + XQ}{V_2} \right) + j \left(\frac{XP - RQ}{V_2} \right).$$

Consideremos de nuevo la figura 5 b). Las diferencias entre tensiones en redes eléctricas son pequeñas, normalmente menos de un 10 %. En estas condiciones, la parte real de la última ecuación es la responsable de casi toda la diferencia de magnitud entre $\mathbf{V}_1$ y $\mathbf{V}_2$, la parte imaginaria es responsable de casi toda la diferencia de ángulo. Como lo que aquí nos interesa es la magnitud de tensión, podemos escribir

$$V_1 - V_2 \approx \frac{RP + XQ}{V_2}$$

y si trabajamos en por unidad y $V_2 = 1$,

$$V_1 - V_2 \approx RP + XQ.$$

La última ecuación indica que en una línea de distribución el flujo de potencia activa puede provocar variaciones de tensión importantes, representadas por el término RP . El operador de la red de distribución no puede modificar el flujo de potencia activa porque queda determinado por el consumo de las cargas conectadas a su red, pero puede controlar la variación de tensión actuando sobre el flujo de potencia reactiva a través del término XQ . El operador puede por ejemplo conectar condensadores, que son fuentes de potencia reactiva, para compensar el efecto de la potencia activa.

2. Control de tensión y potencia reactiva

El control de tensión es distribuido porque debe aplicarse en nudos repartidos por la red eléctrica para conseguir un perfil adecuado de tensiones. El resto de este capítulo repasa los recursos tradicionalmente utilizados para controlar la tensión: máquinas síncronas, condensadores y bobinas y transformadores con cambio de tomas. El capítulo siguiente explica los compensadores de tensión basados en electrónica de potencia y la contribución al control de tensión de los propios convertidores de los parques eólicos y fotovoltaicos.

Máquinas síncronas

Los generadores síncronos directamente conectados a la red han sido la tecnología dominante para producir energía eléctrica durante décadas hasta la irrupción de los parques eólicos y fotovoltaicos. Además de producir potencia activa, un generador síncrono también puede controlar la tensión en su nudo de conexión mediante la generación o el consumo de potencia reactiva. Para modular la potencia reactiva intercambiada con la red el regulador de tensión del generador varía la excitación de la máquina a través de la corriente continua en el devanado de campo. Cuando aumenta la corriente de campo la máquina produce más potencia reactiva y, como hemos visto en la sección anterior, la tensión en los terminales crece. Cuando disminuye la corriente de campo la máquina produce menos potencia reactiva y la tensión en los terminales decrece.

El generador síncrono puede por tanto producir y consumir potencia reactiva dentro de sus límites de operación. El resultado es un control de tensión continuo que permite alcanzar un valor

de tensión especificado por el operador en el nudo de conexión, o en un nudo próximo de la red. El dispositivo que regula la corriente de campo se llama excitatriz, y el sistema de control de tensión se conoce como *Automatic Voltage Regulator* (AVR).

Un compensador síncrono es una máquina síncrona conectada a la red sin una fuente de energía primaria. Al contrario que un generador síncrono, un compensador síncrono no se acopla a una turbina que aplique un par mecánico sobre su eje. Por tanto el compensador síncrono no produce potencia activa, y sólo consume una pequeña cantidad de potencia necesaria para compensar sus pérdidas.

Los compensadores síncronos juegan un papel creciente en los sistemas eléctricos conforme la generación renovable no síncrona sustituye a plantas que queman combustibles fósiles. Aún no produciendo energía eléctrica, los compensadores síncronos proporcionan servicios importantes tradicionalmente provistos por los generadores síncronos:

- Control continuo, sin armónicos y sin transitorios electromagnéticos de la tensión.
- Aporte de corriente de cortocircuito en caso de falta.
- Aporte de inercia, especialmente en redes pequeñas.

En este capítulo nos interesa el primer punto, la importancia de la corriente de cortocircuito y de la inercia se trata en temas posteriores.

Condensadores y bobinas

La ecuación en fasores que representa a un condensador es

$$\mathbf{I} = j\omega C\mathbf{V} = jB\mathbf{V},$$

Por tanto, la potencia consumida por un condensador es

$$\mathbf{S} = P + jQ = \mathbf{V}\mathbf{I}^* = -jB\mathbf{V}\mathbf{V}^* = -jBV^2$$

como el signo de Q es negativo, decimos que el condensador *produce* una potencia reactiva BV^2 .

De manera similar, la ecuación en fasores que representa a una bobina es

$$\mathbf{V} = j\omega L\mathbf{I} = jX\mathbf{I},$$

Por tanto, la potencia consumida por una bobina es

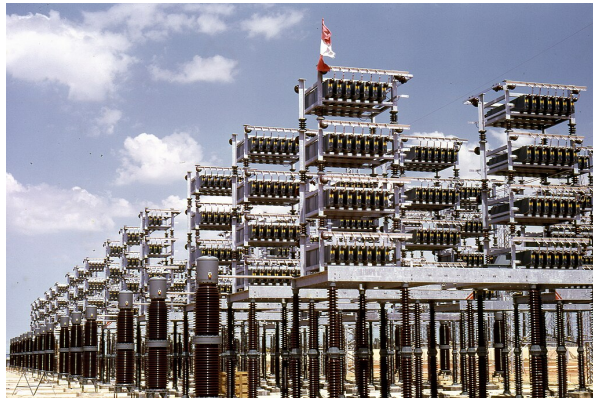
$$\mathbf{S} = P + jQ = \mathbf{V}\mathbf{I}^* = \mathbf{V} \left(\frac{\mathbf{V}}{jX} \right)^* = j\frac{1}{X}V^2$$

como el signo de Q es positivo, decimos que la bobina *consume* una potencia reactiva XI^2 .

Si hacemos los cálculos en por unidad y suponemos $V = 1$ p.u., la potencia reactiva producida coincide con la susceptancia B . Por ejemplo, un condensador con susceptancia $B = 0,1$ p.u. en un sistema en el que la potencia base es $S_{base} = 100$ MVA producirá una potencia reactiva $Q_c = 0,1$ p.u. = 10 Mvar al conectarse a la tensión nominal.

Las bobinas y condensadores son dispositivos muy utilizados para controlar la tensión por su sencillez y economía. Son elementos pasivos que imponen una relación lineal entre la tensión y la corriente, y por tanto no introducen armónicos. La relación entre la tensión y la potencia reactiva que inyectan (condensadores) o consumen (bobinas) es cuadrática.

Los condensadores suelen disponerse en baterías, de manera que se conectan más o menos elementos según las necesidades y se reduce el tamaño de los escalones de control. Cuando la tensión es demasiado baja se conectan más condensadores, y viceversa. Por tanto, el control que proporcionan estos dispositivos es escalonado. La conexión de cada nuevo condensador provoca un transitorio electromagnético si la tensión en la red en el momento de la conexión no coincide con la del condensador.

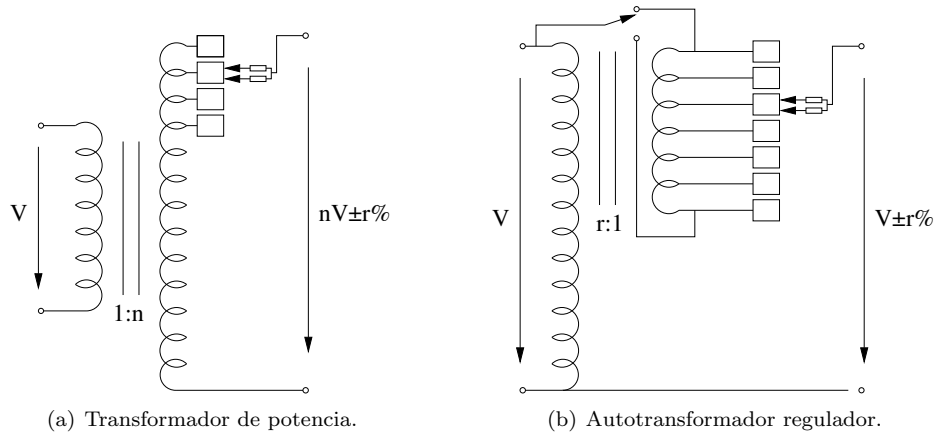


(a) Baterías de condensadores en una subestación en construcción.



(b) Bobinas.

Figura 6: Dispositivos pasivos de compensación. Ver atribuciones de las imágenes en A.



(a) Transformador de potencia.

(b) Autotransformador regulador.

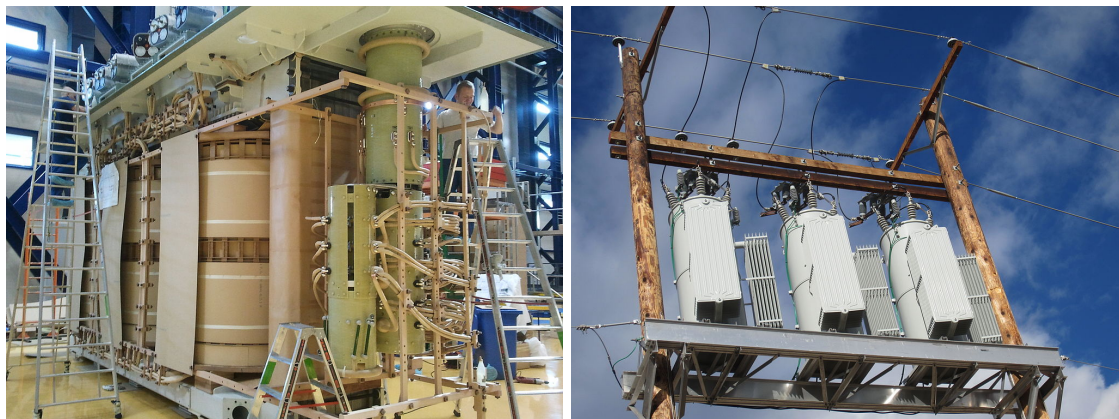
Figura 7: Esquemas básicos de funcionamiento de transformadores con cambio de tomas.

Las bobinas son a menudo sólo una por fase, dejando a las baterías de condensadores el trabajo de ajustar el número de escalones a conectar. Existen también bobinas regulables, que pueden variar el número de espiras del arrollamiento mediante la actuación de un cambiador de tomas. Las figuras 6 a) y b) muestran un ejemplo de baterías de condensadores y otro de bobinas en subestaciones eléctricas.

3. Transformadores con cambio de tomas

Los transformadores con cambio de tomas permiten variar la relación de transformación entre el devanado primario y el secundario mediante la conexión en distintos puntos de acceso o *tomas* de uno de los arrollamientos. Para controlar la tensión en una red eléctrica se utilizan transformadores con cambiadores de toma bajo carga, es decir capaces de cambiar de toma sin desconectar el transformador.

La figura 7 a) muestra el principio de funcionamiento de un transformador de potencia con relación de transformación $1:n$ y equipado con un cambiador de tomas. Mediante la selección de una u otra toma es posible variar ligeramente la relación de transformación nominal, en el ejemplo de la figura un $r\%$. Así, podemos encontrar por ejemplo un transformador de potencia con relación



(a) Transformador de potencia en construcción, con el cambiador de tomas en primer término. (b) Autotransformadores reguladores de tensión en una línea de distribución.

Figura 8: Transformadores con cambio de tomas. Ver atribuciones de las imágenes en A.

de transformación $132\text{kV}/20\text{kV} \pm 10\%$. Al contrario que las máquinas síncronas y los dispositivos pasivos de compensación, los transformadores con cambio de tomas no regulan la tensión mediante la inyección o consumo de potencia reactiva.

El cambio de una toma a la siguiente se realiza de manera que el contacto con el arrollamiento no se interrumpa en ningún momento, porque de lo contrario se establecería un arco eléctrico que dañaría al transformador. Por eso durante el cambio de una toma a otra existe un momento en el que ambas tomas están conectadas a la vez. La figura 8 a) muestra, en primer plano y de color verde, el cambiador de tomas de un transformador trifásico de potencia en construcción. Un cambiador de tomas consta de un selector, con conexiones a las distintas tomas de los arrollamientos, y un conmutador, cuya función es el paso rápido y continuo de una posición a la siguiente.

En líneas de distribución largas a veces es deseable controlar la tensión sin cambiar la tensión nominal. En tal caso es posible recurrir a autotransformadores reguladores con relación de transformación 1:1, que al contrario de los transformadores no tienen separación galvánica entre el primario y secundario. El devanado secundario está conectado en serie como muestra la figura 7 b), sumando o restando una pequeña tensión a la tensión de entrada. La figura 8 b) muestra tres autotransformadores reguladores de tensión monofásicos en un poste de una línea de distribución. Puede observarse cómo el primario y el secundario se conectan a la misma tensión nominal.

A. Atribución de imágenes

1. Figure 6 (a): Por Herbert Hönigsperger, CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Apollo_converter_station_under_construction_01.jpg.
2. Figure 6 (b): Por VARsity, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:NoxonReactor.jpg>.
3. Figure 8 (a): Por Kklemenn, GNU Free Documentation License, https://de.wikipedia.org/wiki/Datei:Izgradnja_240_MWA_transformatorja_narejena_v_Sloveniji.jpg.
4. Figure 8 (b): Por Wtshymanski, CC BY-SA 4.0, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Distribution_Voltage_regulators.JPG.

El resto de figuras son de elaboración propia.

Referencias

- [1] B. García, “Fundamentos de Ingeniería Eléctrica: Material de clase.”
- [2] J. J. Grainger and W. D. Stevenson, *Análisis de sistemas de potencia*. McGraw-Hill, 1996.