

## Microred eléctrica: operación en estado estable

Antonio José Ramón Martínez Rangel, Dr. Francisco Bañuelos Ruedas y  
Dr. Jesús Manuel Rivas Martínez

**Resumen**—La operación y control de las microredes eléctricas, es parte fundamental para mantener la seguridad del sistema, la operación óptima y la reducción de gases contaminantes. Las microredes eléctricas operan interconectadas a la red eléctrica principal, en modo aislado o en modo dual. El documento propone el análisis en estado estable de una microred interconectada a la red principal del Campus Siglo XXI de la Universidad Autónoma de Zacatecas. El análisis muestra los resultados del estado de operación de la microred, como límites de voltaje en los buses de la red, seguridad del sistema y la distribución de los flujos de potencia en líneas de distribución y transformadores.

**Palabras clave**—Microred, operación óptima, estado estable.

### Introducción

Desde 1990 ha habido un especial interés en conectar fuentes de generación distribuida (GD) a las redes de distribución. Esto implica entender la operación y el control de las diferentes plantas de generación. Usualmente es requerido un estudio para evaluar el rendimiento del sistema eléctrico con las nuevas fuentes de generación, bajo condiciones normales y anormales de operación. El rendimiento de la red junto con las fuentes de GD es estudiado con programas computacionales.

El objetivo principal de un sistema eléctrico es satisfacer la demanda de los consumidores; esto representa un gran reto para el sistema en la parte de diseño y en la parte operacional. En un sistema tan complejo se toman en cuenta algunas políticas operacionales que garanticen la estabilidad del sistema; por ejemplo, la magnitud de los voltajes en los nodos y la frecuencia del sistema deben mantenerse dentro de los límites establecidos, las formas de onda de corriente y voltaje deben mantener su forma sinusoidal, las líneas de transmisión y distribución deben operar bajo los límites térmicos y de estabilidad, y las interrupciones deben ser mínimas. Además, los generadores deben satisfacer la demanda y las pérdidas, y operar dentro de los límites especificados de potencia activa y reactiva.

El estudio de flujos de potencia en los sistemas eléctricos permite determinar las condiciones de operación del sistema en estado estable, cuyo estado es determinado al encontrar los flujos de potencia activa y reactiva, la magnitud de voltaje y su ángulo de voltaje en todos los buses para ciertas condiciones de carga. En este documento le proporcionamos un patrón para el formato de su manuscrito. Por favor sea consistente y observe los tamaños de letra y de estilo. Continúa aquí la introducción.

### Estado del arte

El problema de flujos de potencia reside en determinar el estado estable de los voltajes complejos de todos los buses de la red, además de calcular los flujos de potencia activa y reactiva de las líneas de transmisión y transformadores. El sistema eléctrico es representado por un conjunto de ecuaciones no lineales cuya solución numérica es encontrada mediante técnicas iterativas.

El problema de flujos de potencia parte del diagrama unifilar del sistema, de donde se pueden obtener los datos de entrada para la solución. Los datos de entrada consisten en obtener parámetros en los buses, líneas de transmisión y transformadores. Para cada bus del sistema hay cuatro variables asociadas, magnitud de voltaje  $V_k$ , ángulo de fase  $\Delta_k$ , potencia real neta  $P_k$  y la potencia reactiva suministrada al bus  $Q_k$ . La figura 1 muestra un bus con las cuatro variables mencionadas. Nótese que al haber un par de sub-secciones en la sección II, hemos introducido subtítulos con letra *inclinada*. Las sub-secciones deberán ser arregladas como mostramos aquí.

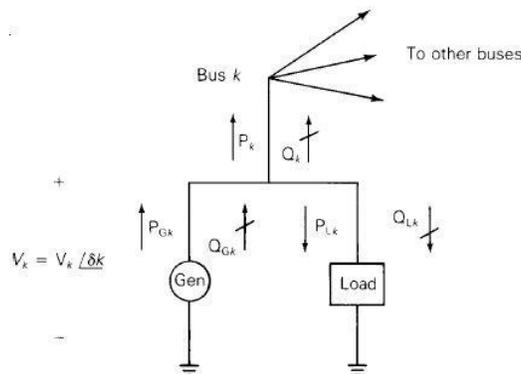


Figura 1. Bus de variables  $V_k$ ,  $\Delta k$ ,  $P_k$  y  $Q_k$

Por conveniencia, la potencia entregada al bus  $k$  es separada en términos de potencia generada y potencia de carga como se indica en las Ec. 1 y 2.

$$P_k = P_{Gk} - P_{Lk} \quad (1)$$

$$Q_k = Q_{Gk} - Q_{Lk} \quad (2)$$

Para la selección de las variables de bus se debe analizar y entender la categorización de cada bus, de acuerdo con los tres tipos de buses o barras existentes.

Bus slack o Bus de compensación.

Bus de carga (PQ).

Bus de voltaje controlado (PV).

Las líneas de transmisión se representan por su circuito  $\pi$  equivalente monofásico, con sus valores relevantes de impedancia serie y admitancia en derivación, los buses a los que la línea es conectada y el valor máximo de potencia reactiva.

El estudio de flujos de potencia comienza con la construcción de la matriz de admitancias “ $Y_{bus}$ ”, la cual se construye a partir de los datos de admitancia de los elementos del sistema, y tiene como parámetros en la diagonal principal, los elementos  $Y_{kk}$  que corresponden a la suma de admitancias conectadas al bus  $k$ , mientras que en los elementos fuera de la diagonal son elementos  $Y_{km}$ .

La evaluación del estado estable de un sistema de potencia se enfoca en escribir las ecuaciones de cada bus de la red para mostrar la relación entre las potencias de generación  $P_G$ , la carga o demanda  $P_L$ , y las potencias intercambiadas ( $P_{k,calc}$ ) a través de los elementos de transmisión conectados a los buses, donde la suma de las potencias debe de ser cero. Este enfoque permite llegar a la definición del error ( $\Delta P_k$ ), definido como el valor programado ( $P_{k,prog}$ ) menos el valor calculado ( $P_{k,calc}$ ) como se indica en las Ec. 3 y 4.

$$\Delta P = P_{k,prog} - P_{k,calc} = P_{Gk} - P_{Lk} - P_{k,calc} = 0 \quad (3)$$

$$\Delta Q = Q_{k,prog} - Q_{k,calc} = Q_{Gk} - Q_{Lk} - Q_{k,calc} = 0 \quad (4)$$

Para el desarrollo de las ecuaciones de flujo de potencia es necesario encontrar la relación entre las corrientes inyectadas y los voltajes de los buses. La corriente compleja de bus, denotada por  $I_k$ , es expresada en términos del voltaje complejo de buses,  $E_k$  y  $E_m$  (Ec. 5 y 6).

$$I_k = \frac{1}{Z_{km}} (E_k - E_m) = Y_{km} (E_k - E_m) \quad (5)$$

$$I_m = \frac{1}{Z_{mk}}(E_m - E_k) = Y_{mk}(E_m - E_k) \quad (6)$$

La potencia aparente compleja inyectada al bus k (Ec. 7) consiste en las componentes de la potencia activa y reactiva y puede ser expresada en función del voltaje de nodo y la corriente inyectada al bus.

$$S_k = P_k + jQ_k = E_k I_k^* = E_k(Y_{kk}E_k + Y_{km}E_m)^* \quad (7)$$

Un sistema de potencia que consiste en más de dos buses y elementos de transmisión, se puede expresar en términos más generales en cuanto a los flujos netos de potencia inyectados al bus analizado (potencia activa y reactiva). Esto llama a las Ec. 3 y 4 a ser expresadas en términos más generales; con los flujos netos de potencia inyectados al bus k expresados como la suma del flujo de potencias de cada uno de los elementos de transmisión conectados a dicho bus.

Las ecuaciones 3 y 4 son reescritas como se indica en las Ec. 8 y 9.

$$\Delta P_k = P_{Gk} - P_{Lk} - \sum_{i=1}^n P_{k,calc^i} = 0 \quad (8)$$

$$\Delta Q_k = Q_{Gk} - Q_{Lk} - \sum_{i=1}^n Q_{k,calc^i} = 0 \quad (9)$$

La potencia compleja que fluye a través de los elementos de transmisión se puede calcular a partir de los parámetros que interactúan entre dos nodos, como las admitancias, susceptancias, conductancias y voltajes. Los modelos correspondientes a la potencia activa y reactiva se muestran en las Ec. 10 y 11.

$$P_{k,calc} = V_k^2 G_{kk} + V_k V_m [G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)] \quad (10)$$

$$Q_{k,calc} = -V_k^2 B_{kk} + V_k V_m [G_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)] \quad (11)$$

donde: V es el voltaje, G es la conductancia, B es la susceptancia y  $\theta$  es el ángulo de fase.

#### Método de Newton-Raphson

El estudio de flujos de potencia es analizado comúnmente por el método Newton-Raphson, caracterizado por ser un método de rápida convergencia. La base del método es la expansión de la serie de Taylor para una función de dos o más variables, para resolver el problema de flujos de potencia. El método resuelve un conjunto de ecuaciones no lineales (Ec. 12).

$$\begin{aligned} F(X) &= f_1(x_1, x_2, \dots) = 0 \\ &f_2(x_1, x_2, \dots) = 0 \\ &f_N(x_1, x_2, \dots) = 0 \end{aligned} \quad (12)$$

donde F es el conjunto de n ecuaciones no lineales y X es el vector de n variables de estado desconocidas.

El método consiste en determinar el vector de variables de estado X mediante la expansión de la serie de Taylor de F(X) sobre una estimación inicial de X(0) (Ec. 13).

$$F(X) = F(X^0) + j(X^0)(X - X^0) + \text{términos de orden mayor} \quad (13)$$

donde J(X<sup>0</sup>) es una matriz de derivadas parciales de primer orden de F(X) con respecto a X, evaluado en X=X(0).

La forma generalizada de la expresión anterior para el caso de la iteración (i) es expresada en Ec. 14.

$$F(X^0) \approx F(X^{i-1}) + j(X^{i-1})(X^{(i)} - X^{(i-1)}) \quad (14)$$

donde  $i = 1, 2, \dots$ . Además, si se asume que  $X(i)$  está suficientemente cercano a la solución  $X^*$ , entonces  $F(X^{(i)}) \approx F(X^*) = 0$ .

Por tanto, la expresión se convierte en la Ec. 15, al resolver para  $X^{(i)}$ .

$$X^{(i)} = X^{(i-1)} - J^{-1}(X^{(i-1)})F(X^{(i-1)}) \quad (15)$$

La solución iterativa puede ser expresada como una función del vector de corrección (Ec. 16). Por tanto, la Ec. 16 se reescribe como se expresa en la Ec. 17, y las estimaciones iniciales se actualizan con la Ec. 18.

$$\Delta X^{(i)} = X^{(i)} - X^{(i-1)} \quad (16)$$

$$\Delta X^{(i)} = -J^{-1}(X^{(i-1)})F(X^{(i-1)}) \quad (17)$$

$$X^{(i)} = X^{(i-1)} + \Delta X^{(i)} \quad (18)$$

Los cálculos se repiten tantas veces como sea necesario usando la mayoría de los datos que se tengan disponibles de  $X$ , hasta que el error  $\Delta X$  esté dentro de la tolerancia prescrita (usualmente es un valor de  $1e^{-12}$ ).

### Caso de estudio

El caso de estudio analiza una posible microred conectada a la red eléctrica principal del Campus Siglo XXI de la Universidad Autónoma de Zacatecas. Las microredes son sistemas eléctricos limitados por fuentes de GD en el punto de consumo. Usualmente, esta clase de sistemas incluye fuentes de generación renovables y tradicionales y un sistema de cargas o demanda. Además, presentan una alternativa para la generación de energía limpia y sustentable, y los beneficios son diversos. La GD puede ser conectada en un amplio rango de niveles de voltaje, desde 120/240 V a 230 kV. Los beneficios de una microred para el usuario implican el incremento en la confiabilidad, aumento en la calidad de la energía, reducción de las interrupciones y menor costo de la energía.

La microred propuesta está conformada por tres fuentes de GD, un sistema solar fotovoltaico (SFV), celdas de combustible (CC) y una microturbina. Las fuentes de GD suministran el 80% de la demanda total, y el resto es tomado de la red de Comisión Federal de Electricidad (CFE).

El análisis se realizó con NEPLAN® para encontrar el comportamiento de la microred conectada a la red eléctrica principal del campus.

### Comentarios Finales

#### Resultados

La simulación de la red eléctrica principal con los módulos de GD conectados a la red son analizados en este apartado. El SFV se conectó al nodo 11, los generadores de celdas de combustible y microturbina se conectan a los nodos 12 y 15.

Los resultados con GD conectada muestran al nodo slack que aporta 2,176 kW y 100.3 kVar. El SFV aporta 77 kW, el sistema de celdas de combustible aportan 66.5 kW y la microturbina aporta 30 kW. La generación total de potencia activa en la red es de 2,360.5 kW. Los niveles de penetración de cada fuente de generación son: SFV 3.28%, celdas de combustible 2.86% y microturbina 1.26%.

#### Conclusiones

De los resultados del análisis en estado estable en el escenario de carga y generación máxima, se observa que la microred presenta un buen comportamiento. Los sistemas de GD conectados a la red principal de distribución operan sin problemas, el sistema es seguro, la regulación de voltaje está dentro de los límites permitidos y las líneas de transmisión y transformadores no tienen problemas de sobrecarga. Para expansiones futuras de la red, el sistema existente sería capaz de agregar nuevas fuentes de GD a la microred e incrementar la carga sin ningún problema, aunque para asegurarse de tal propósito se realizaría un nuevo estudio de flujos de potencia.

### Referencias

- P. Asmus, "Why microgrids are inevitable," [Online]. Foresternetwork, pp. 44-47, 2011. Disponible en: <http://foresternetwork.com/weekly/energy-storage-solutions-weekly/why-microgrids-are-inevitable/>.
- A. Rodríguez, "La generación distribuida y su posible integración al sistema interconectado nacional," Taller sobre Generación Distribuida, CREG, 2009.
- N. Jenkins, J.B. Ekanayake and G. Strbac, "Introduction," in Distributed Generation, London, UK: The institution of Engineering and Technology, pp. 1-20, 2010.
- C.E. Lang, "Generación distribuida, energía de calidad," [Online]. CONUEE, 2013. Disponible en: [www.conuee.gob.mx/wb/CONAE/generacion\\_distribuida\\_1?page=1](http://www.conuee.gob.mx/wb/CONAE/generacion_distribuida_1?page=1).
- Siemens AC, "Microgrids white paper," Siemens AC, Munich, Germany, 2011.
- S. Chowdhury, S.P. Chowdhury and P. Crossey, Microgrids and active distribution networks, London, UK: The institution of Engineering and Technology, 2010.
- G. Enríquez-Harper, Elementos de diseño de subestaciones eléctricas, Editorial Limusa, 2005.
- J. L. Viramontes-Miranda, "Potencial solar 2010 para Zacatecas y análisis comparativo de 3 años consecutivos de mediciones de irradiancia," Tesis de licenciatura, Unidad Académica de Ciencias Químicas, Programa de Ingeniería Química, Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, 2014.
- G.M. Masters, Renewable and efficient electric power systems, WILEY: New Jersey, 2004.