

Impactos de la generación distribuida en la red inteligente: un análisis documental

Impacts of distributed generation on the smart grid: a documentary analysis

Impactos da geração distribuída na rede inteligente: uma análise documental

Jorge Daniel Mercado-Bautista

jmercado0070@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-6055-1670>

Instituto de Posgrado de la Universidad Técnica de Manabí-Ecuador

Byron Fernando Chere-Quiñónez

bchere8077@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-1886-6147>

Instituto de Posgrado de la Universidad Técnica de Manabí-Ecuador

Alejandro Javier Martínez-Peralta

amartinez8875@utm.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-1176-5001>

Instituto de Posgrado de la Universidad Técnica de Manabí-Ecuador

RESUMEN

El presente artículo discute los impactos de la generación distribuida en la tecnología Smart Grid, en particular identifica y determina si el sistema permanece estable o no después de instalar la generación distribuida en los sistemas Smart Grid. La metodología aplicada es de carácter cualitativo-documental, ya que el objeto del mismo es realizar una revisión bibliográfica para evaluar la evolución de la generación centralizada actual en forma de generación distribuida y redes inteligentes ofrece una gran oportunidad para erradicar varios problemas asociados con la eficiencia energética, la seguridad energética, la calidad de la energía y el inconveniente del envejecimiento de las infraestructuras de sistemas eléctricos. Con el fin de satisfacer la creciente demanda de energía eléctrica y aumentar la calidad del servicio, así como reducir la contaminación, la infraestructura de la red eléctrica existente debe desarrollarse en una red inteligente que tenga la flexibilidad de permitir la interconexión con la generación distribuida. Sin embargo, la integración de la generación distribuida a los sistemas de energía causa varios problemas técnicos, especialmente la estabilidad del sistema. Por lo tanto, para abordar completamente el problema, los sistemas de energía existentes actuales deben actualizarse a Smart Grid. Para hacer que la red eléctrica se vuelva "más inteligente", particularmente en términos de estabilidad y flexibilidad, se utilizan dispositivos de sistema de transmisión de CA flexible (FACTS), especialmente compensadores estáticos de VAR (SVC).

Palabra Clave: Smart Grid, Red Inteligente y Generación Distribuida.

ABSTRACT

This article discusses the impacts of distributed generation on Smart Grid technology, in particular identifies and determines whether the system remains stable or not after installing distributed generation on Smart Grid systems. The methodology applied is of a qualitative-documentary nature, since its purpose is to carry out a bibliographical review to evaluate the evolution of the current centralized generation in the form of distributed generation and intelligent networks, offering a great opportunity to eradicate several problems associated with efficiency, energy, energy security, energy quality and the inconvenience of aging electrical system infrastructures. In order to meet the growing demand for electrical energy and increase the quality of service, as well as reduce pollution, the existing electrical grid infrastructure must be developed into a smart grid that has the flexibility to allow interconnection with distributed generation. However, the integration of distributed generation to power systems causes several technical problems, especially system stability. Therefore, to fully address the issue, current existing power systems need to be upgraded to Smart Grid. To make the power grid "smarter", particularly in terms of stability and flexibility, Flexible AC Transmission System (FACTS) devices are used, especially Static VAR Compensators (SVC).

Keywords: Smart Grid, Intelligent Network and Distributed Generation.

RESUMO

Este artigo discute os impactos da geração distribuída na tecnologia Smart Grid, em particular identifica e determina se o sistema permanece estável ou não após a instalação da geração distribuída em sistemas Smart Grid. A metodologia aplicada é de natureza qualitativo-documental, pois tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica para avaliar a evolução da atual geração centralizada na forma de geração distribuída e redes inteligentes, oferecendo uma grande oportunidade para erradicar diversos problemas associados à eficiência energética, segurança energética, qualidade da

energía e os inconvenientes do envelhecimento das infra-estruturas do sistema eléctrico. Para atender à crescente demanda por energía eléctrica e aumentar a qualidade do serviço, bem como reduzir a poluição, a infraestrutura da rede eléctrica existente deve ser desenvolvida em uma rede inteligente que tenha flexibilidade para permitir a interconexão com a geração distribuída. No entanto, a integração da geração distribuída aos sistemas de energía causa diversos problemas técnicos, principalmente a estabilidade do sistema. Portanto, para resolver completamente o problema, os atuais sistemas de energía existentes precisam ser atualizados para Smart Grid. Para tornar a rede eléctrica “mais inteligente”, principalmente em termos de estabilidade e flexibilidade, são utilizados dispositivos de Sistema de Transmissão de CA Flexível (FACTS), especialmente os Compensadores Estáticos VAR (SVC).

Palavras-chave: Smart Grid, Rede Inteligente e Geração Distribuída.

Introducción

El objetivo principal de este capítulo es proporcionar los antecedentes esenciales de la generación distribuida y los desarrollos recientes en tecnologías de redes inteligentes, incluidos los conceptos, así como algunos conceptos básicos del análisis de estabilidad transitoria. Este capítulo también revisa las investigaciones anteriores realizadas sobre el impacto de la generación distribuida en los sistemas de energía.

La industria actual de la energía eléctrica se enfrenta a grandes desafíos en la conversión de la generación centralizada en generación descentralizada, como resultado de los avances en la tecnología del sistema de energía. Estos avances en la tecnología han creado un rápido crecimiento en la utilización de la generación distribuida, lo que lleva a que el mercado de la energía se vuelva más atractivo y competitivo. Además, debido a la desregulación de la electricidad, los problemas ambientales y los incentivos gubernamentales, esta tecnología ha creado un alto nivel de interés en un mayor desarrollo entre los países industriales de todo el mundo. Este número también introduce la plataforma Smart Grid para poner fin a la industria tradicional de energía eléctrica integrada verticalmente, que en el pasado ha resultado en mayores costos de energía.

Hoy en día, la mayoría de las estaciones de sistemas de energía remotas antiguas y grandes con despacho central sufren perturbaciones debido a la falta de servicios de interoperabilidad inteligentes. El sistema también se vuelve vulnerable cuando hay anomalías en la utilidad, por ejemplo, en la protección o fallas en la coordinación del control y errores de operación humana. Por lo tanto, existe la necesidad de transformar este modelo en una red inteligente que mejore la calidad de la energía y se integre completamente con elementos avanzados de la red, como la detección inteligente y la medición digital.

Smart Grid es reconocida como la plataforma para el futuro de la industria energética. El rápido aumento de este problema también está llevando al rápido crecimiento de los mercados de tecnología de generación distribuida, como en pilas de combustible (FC), fotovoltaica (PV) y turbinas eólicas (WT). Esta tendencia tendrá un profundo impacto en la futura tecnología eléctrica, que permite que las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) y los dispositivos electrónicos de potencia avanzados se instalen e integren en todas las redes. Este es el desafío donde la generación a granel actual y la generación distribuida coexistirán con una mayor confiabilidad y calidad de energía en forma de Smart Grid.

Metodología

Tipo de estudio

La metodología aplicada es de carácter cualitativo-documental, ya que el objeto del mismo es realizar una revisión bibliográfica para evaluar los impactos de la generación distribuida en la red inteligente. En esta investigación se analizaron una serie de documentos en torno a la temática mencionada, con apoyo de la herramienta Google Académico y otros materiales bibliográficos complementarios.

Técnica de análisis

El estudio fue realizado mediante la técnica de análisis documental de fuentes bibliográficas con énfasis en el análisis de contenido y análisis crítico, lo que permitió la generación de los constructos de la investigación. En función de esta búsqueda se expone los hallazgos sobre impactos de la generación distribuida en la red inteligente.

Para alcanzar el objetivo de estudio, la investigación documental se ha realizado utilizando las palabras clave generación distribuida, red inteligente mediante la búsqueda a través de Google Académico y de otras fuentes complementarias como, artículos de investigación científica, trabajos de grados, tesis de doctorado, libros que abordan la temática. Cada documento debió cumplir los siguientes criterios para ser seleccionado:

1. Búsqueda de documentos con las palabras claves mencionadas.
2. Seleccionar los artículos, informes de conferencia, libros inherentes a la temática.
3. Identificar la publicación.
4. Asegurar la fiabilidad y la veracidad seleccionando el perfil de las publicaciones realizadas (autor, tipo de estudio, responsable de la edición: editorial, universidad o revista, país, idioma, etc.).

Generación distribuida

Durante los últimos cinco años, varios clientes de energía han estado instalando generación distribuida independiente para sus necesidades en unidades pequeñas. Esta tendencia indica que las aplicaciones de generación distribuida han ganado más interés, debido al continuo avance de las tecnologías de generación distribuida y su efectividad como fuente de energía local, donde la generación está muy cerca de la carga o el consumidor. La generación distribuida proporciona energía de unos pocos vatios (W) a diez megavatios (MW) y ofrece varios beneficios en comparación con la generación de energía convencional. La conciencia de la sociedad sobre la utilización de la energía verde también conduce al aumento de la instalación y operación de generación distribuida. Además, las limitaciones a la nueva construcción de líneas de generación y transmisión o distribución de energía a granel han creado las condiciones para utilizar esta generación a pequeña escala acoplada a redes locales de transmisión o distribución.

La generación distribuida es un concepto de generación de energía eléctrica a pequeña escala que se opera e instala cerca del sitio del cliente. Por lo general, se conecta a través de un convertidor electrónico de potencia u otros dispositivos electrónicos de potencia al sistema de distribución. La mayoría de los sistemas de generación distribuida funcionan actualmente con energía renovable, incluidas las fotovoltaicas, las turbinas eólicas, las pilas de combustible y las microturbinas. Estas tecnologías respetuosas con el medio ambiente son más eficaces en la utilización de RES, que está abundantemente disponible en la naturaleza, libre de contaminación y una forma sostenible de energía.

La generación distribuida es una tendencia relativamente nueva en el mercado de la energía y la industria eléctrica. Hasta hace poco, había varias definiciones utilizadas para describir las terminologías de generación distribuida, y se llama con diferentes nombres en diferentes países de todo el mundo. En América del Sur, los países utilizan el término "generación integrada", mientras que la "generación dispersa" se utiliza en América del Norte, y los países asiáticos y Europa utilizan el término "generación descentralizada". Driesen y Belmans definen la generación distribuida como una generación de energía eléctrica a pequeña escala, que se encuentra cerca de la carga del consumidor, generalmente tiene una calificación de <10 MW y no se incluye como una planta de energía importante (Driesen & Belmans, 2006). Mientras tanto, el Instituto de Investigación de Energía Eléctrica (EPRI) define la generación distribuida como la generación desde unos pocos kilovatios hasta 50 MW".

El Instituto de Investigación lo define como generación que es típicamente entre 20 y 25 MW' (Benoit, 2003). Sin embargo, esta definición no es obligatoria ya que no existen acuerdos universales sobre la definición de generación distribuida. Por lo tanto, cada país y grupo de trabajo de energía tiene diferentes puntos de vista sobre la definición de la generación distribuida; algunos países describen esta tecnología en términos de nivel de tensión, mientras que otros la basan en la capacidad de generación, la interconexión y la ubicación (Driesen & Belmans, 2006). El objetivo principal de la generación distribuida es conseguir que la electricidad desde el punto de generación se acerque al punto de consumo.

Beneficios de la generación distribuida

El aumento de las expectativas de confiabilidad del sistema de energía se ha convertido en el crecimiento de la generación distribuida. Los principales impulsores de ese crecimiento se pueden dividir en tres categorías, que son las preocupaciones ambientales, las políticas comerciales y las políticas energéticas. Estos factores han contribuido al alto interés y penetración de la utilización de la generación distribuida. Las cuestiones relacionadas con el funcionamiento y la interconexión de la generación distribuida en las redes de sistemas de energía, como la calidad de la energía, la fiabilidad, la estabilidad y las protecciones, han sido el foco de las partes interesadas, incluidos los operadores de energía, los diseñadores, los responsables políticos, los ingenieros y los consumidores (Mehigan, Deane, Gallachóir, & Bertsch, 2018). Sin embargo, a pesar de desencadenar estos problemas, la generación distribuida también ofrece varias ventajas.

Los principales beneficios de la generación distribuida se pueden dividir en dos categorías: económicos y operativos (Abdmouleh, Gastli, Ben-Brahim, Haouari, & Al-Emadi, 2017). Desde un punto de vista económico, la generación distribuida proporciona soporte de energía cuando la carga aumenta durante los períodos de máxima demanda, reduciendo así la interrupción que puede conducir a interrupciones del sistema. También reduce el peligro de la inversión, debido a la flexibilidad de su capacidad y la colocación de la instalación. La generación distribuida reduce los costos operativos cuando se instala cerca de la carga del cliente porque evita la actualización o configuración de una nueva red de transmisión y distribución, lo que proporciona un ahorro de costos. Desde el punto de vista operativo, la generación distribuida garantiza la fiabilidad y estabilidad del suministro y reduce las pérdidas de energía. Además, esta tecnología también juega un papel crítico en la reducción de los Gases de efecto invernadero, dado que la energía renovable es su principal fuente y casi no se emiten gases durante su operación, en comparación con la generación de energía con combustibles fósiles. El uso de fuentes de energía renovables locales (FER) ayudará a reducir la dependencia de los combustibles fósiles importados y disminuirá la escalada internacional de los precios de la energía.

Modelos de generación distribuida

Desde un punto de vista técnico, la presencia de la generación distribuida en los sistemas de energía conduce a cambios en el flujo de energía. Además, la mayoría de la topología actual de los sistemas de potencia es radial. Por lo tanto, antes de resolver los problemas de flujo de carga, hay cuatro variables de limitación en el flujo de potencia que deben conocerse; a nombre de la vista: ángulo de voltaje, magnitud de voltaje, las potencias reales (P) y reactivas (Q). Estas variables pueden determinar la característica de los buses, ya sea como bus PQ o bus FOTOVOLTAICO. En el bus PQ no hay fuente de generación de energía y estos suelen ser buses de carga donde se especifican las potencias netas P y Q, siendo lo desconocido las magnitudes de ángulo y voltaje. Mientras tanto, los buses fotovoltaicos son buses generadores, donde se conoce la potencia activa P de salida del generador y la magnitud del voltaje, mientras que la potencia reactiva Q y los ángulos son desconocidos. Estos buses normalmente son controlados por el regulador de voltaje automático (AVR), que mantiene la magnitud del voltaje en un nivel constante ajustando la corriente de campo del generador y su salida de potencia reactiva. Una generación distribuida se puede modelar como un bus PQ o PV. También se puede modelar como una carga negativa, donde la P y la Q se inyectan en los sistemas de potencia (Moghaddam et al., 2020).

Tecnología de generación distribuida

La liberalización de los mercados de la electricidad y la política medioambiental han aumentado el uso de unidades de generación distribuida para una amplia gama de aplicaciones, como el afeitado independiente, el afeitado de carga máxima y las aplicaciones remotas. Estas unidades se pueden clasificar en dos categorías diferentes:

Generación basada en generación distribuida, incluyendo micro turbinas, fotovoltaica, pilas de combustible, turbinas eólicas y biomasa.

Almacenamiento basado en generación distribuida, incluyendo volantes, batería, súper condensador y sistema de bobina superconductora.

Todas estas tecnologías se están utilizando actualmente y están ganando popularidad. Algunos de los diferentes tipos de generación distribuida se discuten a continuación (González-Longatt, 2004):

Turbina eólica

En los últimos años, la generación de turbinas eólicas se ha desarrollado rápidamente como una fuente competitiva y efectiva de generación distribuida. Las turbinas eólicas utilizan la energía eólica para generar electricidad y tienen varias clasificaciones desde unos pocos kW hasta unos pocos MW (Mahadanaarachchi & Ramakumar, 2008). Para producir energía eléctrica, WT se puede operar a velocidades variables o constantes y se acopla a generadores de inducción. Hoy en día, los generadores de inducción son ampliamente utilizados en WT y un generador de velocidad variable es la opción preferida en las instalaciones de WT más nuevas. A través del rectificador y el inversor, se podría acoplar un generador de inducción de ardilla a la red de CA como se muestra en la Figura 1.

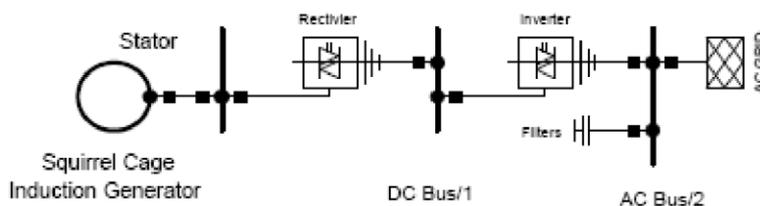


Figura 1. Generadores de inducción de velocidad variable

Además, otro método para operar generadores de inducción es conectando el estator directamente a la red de CA y conectando el rotor a través de un dispositivo electrónico de potencia, por lo que la máquina de inducción de rotor enrollado se puede utilizar como un generador de inducción doblemente alimentado (DFIG) como se ilustra en la Figura 2.

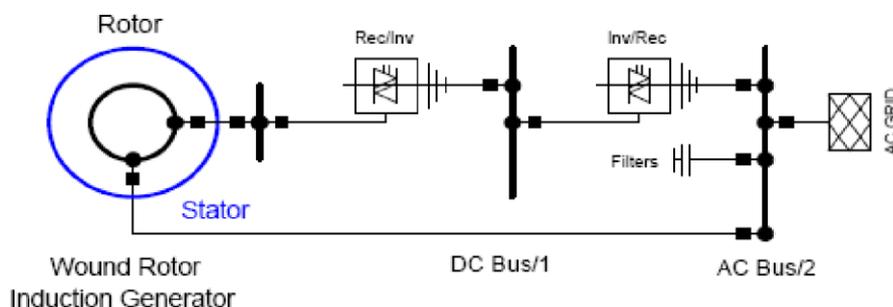


Figura 2. Generador de inducción de velocidad variable doblemente alimentado

En los últimos años, los generadores de inducción doblemente alimentados parecen ser la opción principal en la instalación de nuevos parques eólicos, ya que respaldan la estabilidad y confiabilidad del sistema de energía durante el pico de carga o perturbaciones. El WT con DFIG también requiere

dispositivos electrónicos de potencia más pequeños, por lo que el control del WT por DFIG se vuelve más flexible, donde la potencia activa y reactiva se puede controlar de forma independiente.

Micro turbina

Las turbinas de gas se pueden producir en masa con un bajo costo en el rango de 25 a 100 kW. Estas tecnologías están diseñadas para combinar la confiabilidad de los generadores de aviones comerciales a bordo con turbocompresores automotrices de bajo costo. Estos sistemas de microturbinas son generadores de alta frecuencia, equipados con cojinetes de lámina de aire y funcionan a altas velocidades (50,000-90,000 RPM). No se pueden acoplar directamente al sistema de alimentación, por lo que se utiliza un dispositivo electrónico de potencia (Slootweg, De Haan, Polinder, & Kling, 2002). Antes de inyectar el voltaje en la red de CA, el voltaje generado debe rectificarse primero utilizando un rectificador de diodo y vincularse a un inversor de CC-CA para sincronizarse con la red como se muestra en la Figura 3.

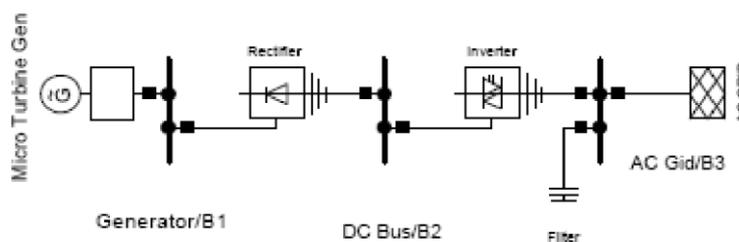


Figura 3. Sistema eléctrico de microturbina

Fotovoltaica

El módulo fotovoltaico es una fuente de alimentación de CC no regulada que utiliza células semiconductoras. Genera voltaje directo y corriente a partir de la luz solar que cae sobre las celdas. Para interconectar la matriz con los sistemas de potencia, primero debe acondicionarse y se debe usar un inversor de CC / CA. Además, para fines de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), se utiliza un convertidor CC/CC en la salida de la matriz, como se muestra en la Figura 4. Está destinado a extraer la potencia máxima disponible a un nivel de aislamiento determinado, lo que significa mantener el nivel de tensión lo más cerca posible del punto de máxima potencia (Slootweg et al., 2002). Los sistemas fotovoltaicos no tienen partes móviles y, por lo tanto, requieren menos mantenimiento y generan electricidad sin producir CO₂.

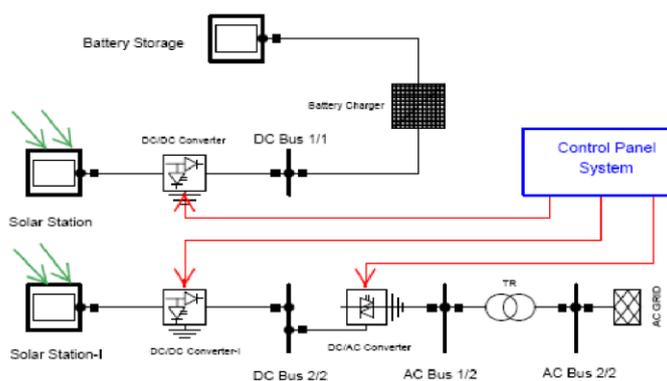


Figura 4. Operación fotovoltaica y sistema de conexión a la red

Pilas de combustible

Las pilas de combustible son dispositivos electroquímicos que convierten el combustible (hidrógeno) y el aire directamente en energía eléctrica y proporcionan energía térmica a través de procesos electroquímicos. FC no quema hidrógeno y no hay partes móviles durante las operaciones, por lo tanto, menos pérdidas y bajas emisiones. A diferencia de otras generaciones distribuidas, la

eficiencia f_c es superior al 60 por ciento, que se considera el doble que la de las generaciones de energía convencionales (Sekaran et al., 2018).

Como se muestra en la Figura 5, FC consta de tres partes, que son catalizador de ánodo, membrana de electrolito de polímero y catalizador de cátodo. El hidrógeno, como combustible, pasa a través del catalizador del ánodo y el oxígeno, como oxidante, pasa a través del catalizador del cátodo. Para producir energía eléctrica ambos se reformulan a través de procesos electroquímicos que resultan en la liberación de electrones. Este proceso ocurre en la membrana electrolítica del polímero, que separa los iones y los electrones. Los electrones crean voltaje de CC que se puede utilizar como electricidad de alta calidad y requiere un inversor para convertir a voltaje de CA.

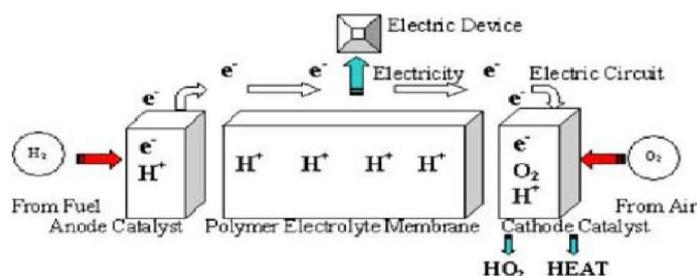


Figura 5. Componentes de la membrana electrolítica de las pilas de combustible

Generación distribuida y calidad de la energía

El término "calidad de energía" se puede asociar con la fiabilidad de la fuente de alimentación. Sin embargo, los ingenieros y los proveedores de energía lo definen de manera diferente según la característica del parámetro que se está midiendo, como el voltaje, la corriente o la frecuencia.

Agregar generación distribuida a los sistemas de energía generalmente aumenta la confiabilidad del sistema y la calidad de la energía, por ejemplo, como soporte de voltaje. En este caso, la generación distribuida asiste a la generación central cuando se produce una sobrecarga en el sistema, evitando así la caída de tensión y, en consecuencia, mejorando el perfil de tensión del sistema. Sin embargo, existe la posibilidad de eventos inesperados que influyen en la calidad de la energía del sistema, como las absorciones reactivas de energía, la sobre inyección de la corriente y la variabilidad de la fuente de generación distribuida renovable. Los problemas relacionados con la calidad de la energía son muy importantes y no deberían convertirse en un obstáculo importante contra el despliegue de la generación distribuida y la utilización de RES. Sin embargo, debería ser un desafío para los enfoques novedosos en la gestión y el monitoreo de la calidad de la energía (Thong & Driesen, 2008).

Generación distribuida y sus impactos técnicos

La mayoría de la topología de los sistemas de potencia se da por sentada como un sistema radial, lo que significa que la energía fluye de la fuente a la carga o de la generación a los consumidores. Sin embargo, con la presencia de la tecnología de generación distribuida, este paradigma ha cambiado y la fuente de energía no solo proviene de fuentes centralizadas sino también de otra fuente como la generación distribuida. La generación distribuida puede ser operada como una fuente de energía o como una carga o ninguna; se basa en las circunstancias particulares del entorno, por lo que la energía fluye de la fuente central a la generación distribuida o viceversa.

La integración de la generación distribuida a las redes eléctricas siempre tiene problemas técnicos en la operación del sistema eléctrico. Por lo tanto, analizar y determinar el impacto de la generación distribuida en los sistemas de energía durante la interconexión y la operación es un tema crítico. También implica una investigación intensiva, dependiendo de los parámetros que se requieren para ser evaluados. A nivel operativo, por ejemplo, el efecto puede analizarse en las perspectivas de generación, transmisión y distribución, mientras que a nivel de funcionamiento del

sistema la evaluación de impacto puede realizarse en los ámbitos del análisis en estado estacionario, el análisis dinámico, la calidad de la energía, la fiabilidad y la protección (Pecas Lopes, 2002).

Durante la última década, se ha realizado mucha investigación en el área de la generación distribuida. Además, la presencia de la generación distribuida puede tener impactos positivos y negativos en las redes del sistema eléctrico. Investigaciones anteriores muestran que la inserción de la generación distribuida en los sistemas de distribución o transmisión cambiará la dirección de los flujos de energía, lo que tiene un grave impacto en el funcionamiento del sistema (Khederzadeh, Javadi, & Mousavi, 2019; Qian, Zhou, Yuan, Shi, & Allan, 2008). presenta que el acoplamiento de la generación distribuida a las redes de distribución tiene una contribución significativa a la mejora de la fiabilidad del sistema, la prevención de caídas de tensión y el mantenimiento de los niveles de tensión en rangos aceptables durante los períodos de carga máxima. Sin embargo, debido a la integración de la generación distribuida, la variación de voltaje y la violación aún pueden ocurrir. Por lo tanto, el límite de inyección de energía al sistema debe verificarse antes de instalar la generación distribuida en el sistema. Además, los niveles de variación de voltaje también deben considerarse y no deben variar más del ± 5 por ciento (PU) (Kabalcı, Kabalcı, & Siano, 2022).

Por el contrario, debido a la conexión de generación distribuida, el cortocircuito o el nivel de falla en la red tienden a aumentar y pueden dañar los componentes del sistema, por lo que se debe considerar una protección adecuada (Mahadanaarachchi & Ramakumar, 2008). Esta protección se puede identificar en varios aspectos, como la protección en equipos de generación que se utilizan para prevenir fallas internas, la protección en el sistema de distribución contra la corriente de falla como resultado de la interconexión de generación distribuida y la anti-isla. Todos estos aspectos son extremadamente importantes y deben abordarse para determinar el impacto de la integración de la generación distribuida en el sistema.

Desde una perspectiva de calidad de energía, la presencia de tecnología de generación distribuida definitivamente influirá en la variación transitoria de voltaje y la distorsión armónica del voltaje del sistema durante la conexión y desconexión (Pecas Lopes, 2002). Sin embargo, es interesante observar que en algunos casos la generación distribuida también ha mejorado la calidad de la energía. Por ejemplo, cuando se producen caídas de voltaje o con un alto nivel de demanda de carga, se puede utilizar como generación de respaldo, proporcionando así soporte de voltaje. Además, los sistemas de generación distribuida también pueden reducir las pérdidas de línea, si se instalan cerca de las cargas o se colocan en ubicaciones óptimas a lo largo de los alimentadores.

La generación distribuida también afectará a la estabilidad transitoria de la red. Kumar *et al.* investigó el impacto positivo de la generación distribuida en DS durante el período de fallas (Srivastava, Kumar, & Schulz, 2012). El resultado muestra que la desviación del ángulo del rotor y la caída de voltaje disminuyen. Esto significa que la estabilidad transitoria del sistema se mejora con un mayor nivel de penetración de la generación distribuida. Sin embargo, la caída de voltaje y las fluctuaciones de voltaje a lo largo de los alimentadores de distribución aún pueden ocurrir, por lo tanto, el control de voltaje es necesario para mantener el nivel de voltaje de la red dentro del rango permitido.

A medida que aumenta el nivel de penetración de la generación distribuida en los sistemas de distribución o transmisión, es obvio que todos los problemas discutidos anteriormente se harán evidentes y ya no se pueden descuidar. Desafortunadamente, de la revisión de la literatura se puede ver que, en general, los objetivos de la investigación recientemente completada o actual y en curso son analizar el impacto de la generación distribuida en los sistemas de distribución. Sin embargo, no se ha hecho ningún esfuerzo con respecto al análisis del impacto de la generación distribuida en los sistemas de redes inteligentes. Por lo tanto, es importante investigar estos problemas en relación con la red inteligente también.

Red inteligente

Los sistemas de energía eléctrica son la columna vertebral del desarrollo de la sociedad humana y de los países industriales de todo el mundo. El aumento de la demanda de electricidad, tras el aumento de la preocupación por la eficiencia energética, hace que el sistema eléctrico se enfrente a numerosos desafíos, incluida la reducción de GEI, la gestión de la respuesta a la demanda (DRM), la conservación de la energía y la calidad de la energía, la fiabilidad, la disponibilidad y la seguridad (PQRAS). Es evidente que no se pueden descuidar esas cuestiones críticas (González López Directores & Eloy-García Carrasco Manuel García Plaza, 2012).

Característicamente, alrededor del diez por ciento de la energía producida por las redes existentes actuales se desperdicia, lo que contribuye a aumentar los precios de la energía, los costos de producción y el calentamiento global. En los Estados Unidos (EE.UU.), por ejemplo, más de la mitad de la electricidad producida se pierde como resultado de ineficiencias en las líneas de generación, transmisión y distribución de energía (Lui, Stirling, & Marcy, 2010). Además, debido a la topología convencional de sus utilidades, el control limitado y la restauración manual y otros problemas, el sistema de energía existente sufre perturbaciones y fallas catastróficas que pueden conducir a apagones. Es un hecho que en los próximos años la red eléctrica actual requerirá un mayor desarrollo para satisfacer las expectativas de la sociedad de altos PQRAS.

Para abordar estos desafíos, la próxima generación de energía eléctrica debe coexistir con las tecnologías de información digital y los dispositivos avanzados de la red. Este esquema cambiará el paradigma de los sistemas de energía pasiva, donde la mayoría de las empresas de servicios públicos tienen un acceso de interoperabilidad limitado, a redes eléctricas flexibles y activas. La Figura 6. muestra la visión de una red futura que integra la comunicación en las redes de sistemas de energía con sensores distribuidos y dispositivos de energía avanzados.

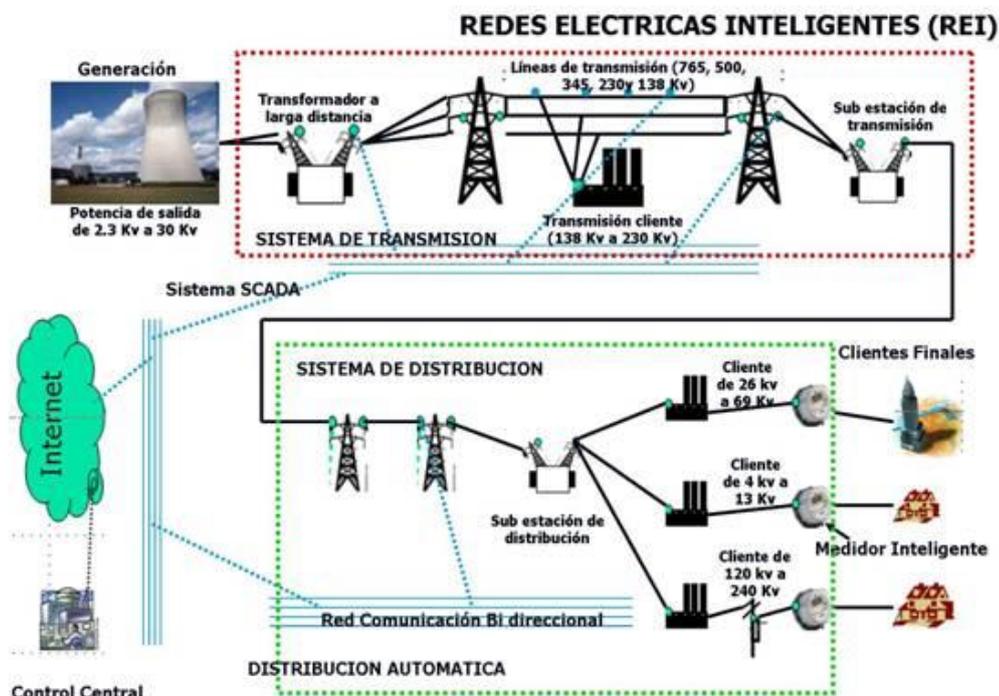


Figura 6. Arquitectura de la comunicación integrada en el sistema de energía

Beneficios de la red inteligente

Smart Grid es un sistema de energía eléctrica complejo e implica un amplio conocimiento y tecnologías avanzadas para su operación e implementación. El término 'Smart Grid', también

llamado 'Intelligent Grid', es un término relativamente nuevo en el área del sistema de energía. Hay muchas definiciones de Smart Grid y diferentes personas tienen diferentes puntos de vista sobre su definición. La breve definición de smart grid, tal como propone la Plataforma Tecnológica Europea, es: «Una red inteligente es una red eléctrica que puede integrar de forma inteligente la acción de todos los usuarios conectados a ella (generadores, consumidores y aquellos que hacen ambas cosas) con el fin de ofrecer de manera eficiente suministros de electricidad sostenibles, económicos y seguros» (Luè et al., 2016).

Otra definición de Smart Grid, propuesta por el proyecto Distribution Energétique Intelligente, Segure de Eficiente (DENISE), es "The Smart Grid integra electricidad y comunicaciones en una red eléctrica que soporta la nueva generación de servicios interactivos de energía y comunicación y suministra electricidad digital de calidad para el cliente final. En este sentido, la red eléctrica debe estar siempre disponible, en vivo, interactiva, interconectada y estrechamente acoplada con las comunicaciones en una compleja red de energía e información en tiempo real». (Roncero, 2008). Sin embargo, debido a la complejidad del sistema, el significado preciso de Smart Grid aún no se ha definido claramente; además, la norma y su escenario están en curso para su desarrollo.

Smart Grid es la visión de la futura entrega del sistema de energía eléctrica, la industria eléctrica y los mercados. La creciente preocupación sobre este tema es un efecto del rápido desarrollo económico que hace que el sistema de energía existente esté bajo presión para cumplir con las expectativas de los consumidores. La implementación de redes inteligentes ofrece una solución y puede ofrecer varios beneficios clave potenciales a la sociedad, no solo para la seguridad y la calidad del suministro de energía, sino también para lograr el desarrollo energético sostenible. Los principales beneficiarios que utilizan Smart Grid pueden ser la empresa de servicios públicos o el cliente. Los beneficios para las utilidades son:

- Reducir las perturbaciones y cortes del sistema de energía;
- Posiblemente reducir las pérdidas de energía, caídas de tensión y apagones;
- Mejorar la eficiencia energética;
- Habilitar la aplicación de microrredes y el sistema de gestión de energía (ems);
- Permitir la reducción de la demanda máxima y drms;
- Aumentar la integración de la energía renovable a gran escala y la generación distribuida;
- Aumentar el pqr;
- Acelerar la generación de energía verde y limpia;
- Beneficios ambientales y reducción de gei;
- Impulsar el crecimiento económico a través de mercados de energía limpia; y
- Reducir los costos de mantenimiento y operaciones.

Desde el punto de vista de los clientes, la implementación de Smart Grid también ofrece beneficios como:

- Permitir la gestión del consumo de electricidad;
- Ahorro de costos a través de ems;
- Permitir que los consumidores sean productores de energía a través de la generación distribuida; y
- Mejorar los servicios al consumidor.

Estos beneficios prometedores obviamente tendrán un impacto positivo en la sociedad. Además, estimulará una mayor innovación en las nuevas redes de sistemas de energía asociadas con la tecnología de la información, así como alentará a múltiples ingenieros de diversos orígenes a realizar más investigaciones que acelerarán la implementación de la red inteligente.

Las nuevas redes eléctricas

Para lograr estos objetivos, los cambios más importantes deben ser tomados por todos los interesados. Uno de los aspectos fundamentales que deben cambiar es la implementación de una nueva red eléctrica diferente de la que tenemos hoy en día, que tiene una serie de limitaciones que hacen que sea incompatible con las necesidades futuras (Carolina Toro, 2016).

para la red eléctrica futuras deben ser:

- **Flexible:** satisface las necesidades de los clientes mientras responde a los cambios y desafíos futuros.
- **Accesible:** otorgar acceso de conexión a todos los usuarios de la red, particularmente para fuentes de energía renovables y generación local de alta eficiencia con cero o bajas emisiones de carbono.
- **Fiable:** garantizar y mejorar la seguridad y la calidad del suministro, en consonancia con las exigencias de la era digital para ser resiliente a los peligros e Incertidumbres.
- **Económico:** proporcionar el mejor valor a través de la innovación, la gestión energéticamente eficiente y la competencia y la regulación de la "igualdad de condiciones".

Los principales desafíos de las nuevas redes eléctricas, según la SDD (Strategy Deployment Document), documento sobre las redes inteligentes en la UE, que harán mejorar la eficiencia del uso de la energía y la reducción del consumo del Carbono entre el 2020 y el 2050, así como la reducción de la dependencia con los sistemas de distribución de energía y la seguridad de las líneas son (SMVITM, 2018):

- Asegurar que exista suficiente capacidad de transmisión para interconectar las fuentes de energía, especialmente las renovables.
- Desarrollar conexiones eficientes para el máximo aprovechamiento de las energías renovables.
- Desarrollar arquitecturas descentralizadas, habilitando sistemas de suministro de energía de menor magnitud para operar de manera armoniosa con el sistema completo.
- Crear la infraestructura de comunicación necesaria para lograr la operación de las distintas partes y su manejo en un único mercado.
- Permitir que los consumidores con o sin sus propios generadores, sean capaces de jugar un rol activo en la operación del sistema.
- Permitir la generación, demanda y uso de energía inteligente.
- Utilizar los beneficios del almacenamiento de la energía.
- Preparar el camino para el uso de vehículos eléctricos, acomodando todas las necesidades de los consumidores.

En función a lo anterior, las nuevas redes de energía deberán entonces cumplir con las siguientes funciones (Carolina Toro, 2016):

Auto sanación:

El manejo de la información en tiempo real, permitiendo la utilización de sensores y controles que permitan detectar y anticipar la caída de alguna parte del sistema, esto ayudará a evitar el colapso de los mismos, ya sea reduciendo la carga o redireccionándola.

Motivar a los consumidores a participar activamente en la operación de las redes:

Las redes inteligentes son un intento por cambiar las costumbres de los usuarios en su consumo, o bien disminuyendo su consumo durante los momentos de pico de uso o bien, pagando los altos precios que implica el privilegio de utilizar la energía en esos periodos de tiempo. Este sistema ofrece a los consumidores las herramientas necesarias (equipos, informe sobre el comportamiento de la red, operaciones y comunicación). Esto permite que los mismos tengan un mejor control de sus aplicaciones o sistemas inteligentes en los hogares y negocios, interconectando los sistemas de manejo eficiente de energía. Las capacidades avanzadas del sistema, equipan al usuario final con las herramientas para explotar los precios de la electricidad en tiempo real.

Esta comunicación de dos sentidos, compensa los esfuerzos del usuario final de ahorro y venta de energía a través de los medidores, habilitando la generación distribuida (Carolina Toro, 2016).

Proporcionar una mayor calidad en la provisión de energía:

La integración de fuentes de distribución a baja escala, permitirá a las casas, comercios e industrias autogenerar y comercializar el exceso de energía a la red local teniendo en cuenta ciertas barreras técnicas y regulatorias. Esto mejorará enormemente la calidad confiabilidad del sistema, reduciendo los costos de la electricidad y ofreciendo mayores opciones a los consumidores.

Volver el mercado eléctrico más competitivo:

La distribución inteligente de las redes permitirá que pequeños productores puedan generar y vender localmente utilizando recursos de generación alternativos como paneles solares, etc. Las necesidades de esta nueva red deben tener en cuenta las oportunidades y desafíos enfrentados por todos los interesados. La introducción de la comunicación de dos vías mayor eficiencia, la generación a partir de nuevas tecnologías, así como sistemas de almacenamiento de energía entre otros, son algunas de las necesidades y los beneficios previsibles que vienen y que fueron previamente mencionados en este documento. De esta manera, además de los generadores tradicionales, los gestores de redes de transporte (TSO), operadores de los sistemas de distribución (DSO), comercializadores, consumidores y autoridades; nuevos actores están entrando al sector. Estos comprenden las instituciones de investigación y desarrollo (I + D), Empresas de Servicios de Energía (ESCO's), vendedores de equipos, OEM (Original Equipment Manufacturer) (Carolina Toro, 2016). Sin embargo, la dificultad para alcanzar esta situación ideal tiene una serie de problemas que son los que constituyen barreras para el despliegue masivo de nuevas redes.

Uno de los problemas es la falta de una tecnología desarrollada, parcialmente debido a no tener normas consolidadas. Otro problema está relacionado con la falta de adopción de un esquema común: diferentes enfoques adoptados por distintos países. El resultado es la falta de nuevos servicios que podrían ser responsables de la justificación económica de las nuevas inversiones.

Fiabilidad de la red inteligente

La fiabilidad de la generación de energía es un parámetro vital para la entrega de energía y el desarrollo económico. Hoy en día, el funcionamiento del sistema de energía es limitado en interoperabilidad entre aplicaciones. La información en estas áreas generalmente se proporciona

solo para redes locales y no en tiempo real. Por lo tanto, las implicaciones de esto resultan en un nuevo desafío para los PQRAS altos.

Con la aparición del paradigma Smart Grid, se agregarán a la red un gran número de sensores, dispositivos electrónicos de potencia, generaciones distribuidas y dispositivos de comunicaciones para abordar el desafío como se muestra en la Figura 7. Por lo tanto, el sistema se vuelve más inteligente y complejo, lo que requiere la integración de los procesos de información y datos en todo el sistema (Roncero, 2008).

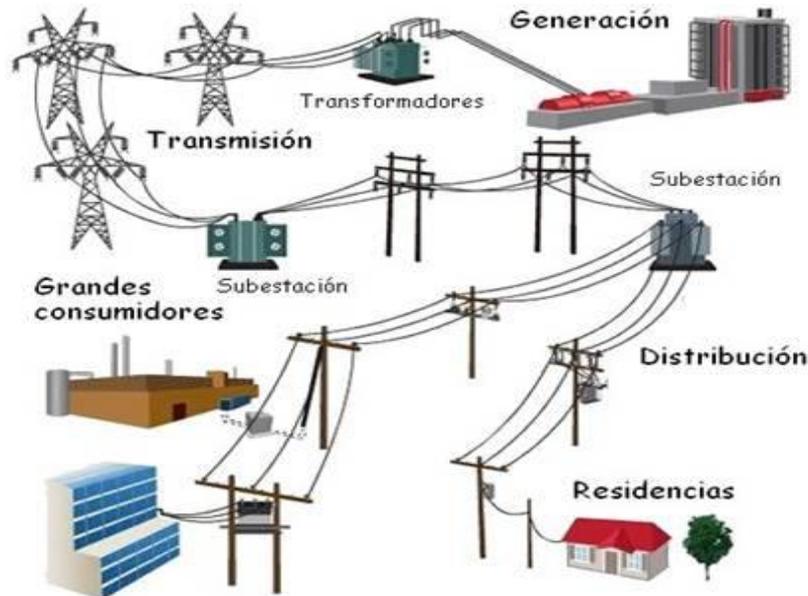


Figura 7. Elemento de los sistemas de redes inteligentes

Smart Grid es un nuevo modelo para sistemas de energía que implica una comunicación sofisticada y tecnologías de control avanzadas para su implementación. Las características y la tecnología clave de Smart Grid incluyen (Roncero, 2008):

- Autocuración;
- Incorpora y empodera al usuario;
- Tolera los ataques de seguridad;
- Ofrece mejora de la calidad de la energía;
- Acomoda varias fuentes de generación;
- Apoya plenamente el mercado de la energía; y
- Optimiza la utilización de los activos y reduce los gastos de operaciones y mantenimiento del sistema.

La tecnología que está involucrada en el concepto de Smart Grid incluye:

- Métodos de control avanzados que tienen como objetivo proporcionar, monitorear y analizar datos de todos los dispositivos de red esenciales. Si se produce una perturbación, por ejemplo, es capaz de tomar las medidas adecuadas y ofrecer soluciones a los operadores humanos. Las metodologías de control avanzadas admitirían diversas aplicaciones, como la automatización de subestaciones (IEC 61850), la gestión de precios de la energía y DRM.
- Sensores digitales, medición y medición mediante comunicaciones bidireccionales, en las que se comunican diversas señales como el uso de energía en tiempo real, la tarifa de

temporada alta y la calidad de la energía entre los consumidores, el operador y el generador.

- Utilidades avanzadas de la red: permite la producción de un funcionamiento del sistema de energía fuerte, totalmente controlable, flexible y confiable, así como la mejora del rendimiento. Estas tecnologías incluyen FACTS, dispositivos de corriente continua de alto voltaje (HVDC), cables de transmisión superconductores (STC) y limitadores de corriente de falla (FCL). La instalación de estas tecnologías será el papel clave para transformar las redes actuales del sistema eléctrico en redes inteligentes.

Análisis y discusión de los resultados

Estabilidad de la red inteligente

El análisis de estabilidad en Smart Grid es absolutamente importante durante la planificación, el diseño y la operación. Por lo general, evalúa el rendimiento del sistema en circunstancias particulares, como antes y después de cambios repentinos en la generación, cargas, fallas o interrupciones en los elementos. El parámetro de robustez de Smart Grid se puede definir por la capacidad del sistema para mantener la estabilidad en condiciones normales o perturbadas y proporcionar una restauración rápida después de fallas. Por lo tanto, es vital estudiar el comportamiento dinámico de smart grid para garantizar que el sistema permanezca estable y no sufra pérdida de sincronización, por ejemplo, durante la interconexión de la generación distribuida.

Desde la década de 1920, la estabilidad del sistema de energía ha sido reconocida como un problema crítico para el funcionamiento seguro del sistema de energía (Kabalcı et al., 2022). Varias perturbaciones e inestabilidad en los sistemas de energía pueden resultar en la pérdida de sincronismo del generador, lo que también conduce a interrupciones del sistema y apagones. Esta ocurrencia indica la importancia de la estabilidad del sistema de energía, donde la mayoría de los proveedores de energía están realmente preocupados en este caso particular. Con el rápido crecimiento de la demanda de energía y las integraciones de generación distribuida en Smart Grid, que involucra muchos dispositivos de control y energía avanzada, la estabilidad del sistema se vuelve de mayor preocupación.

La estabilidad del sistema de potencia es la capacidad de un sistema de energía eléctrica, para una condición de funcionamiento inicial dada, para recuperar el equilibrio operativo del estado después de ser sometido a perturbaciones físicas, con la mayoría de las variables del sistema limitadas de modo que prácticamente todo el sistema permanece intacto (Kabalcı et al., 2022). Sin embargo, en general, la estabilidad del sistema describe la capacidad de los sistemas de potencia para mantener la sincronización y la estabilidad en cualquier configuración de parámetro clave dada. En este sentido, hay tres clasificaciones que a menudo se asocian con la estabilidad del sistema de potencia: estabilidad del rotor o del ángulo de potencia, estabilidad de la frecuencia y estabilidad del voltaje. La figura 8. muestra la clasificación general de la estabilidad del sistema de potencia (Kabalcı et al., 2022).

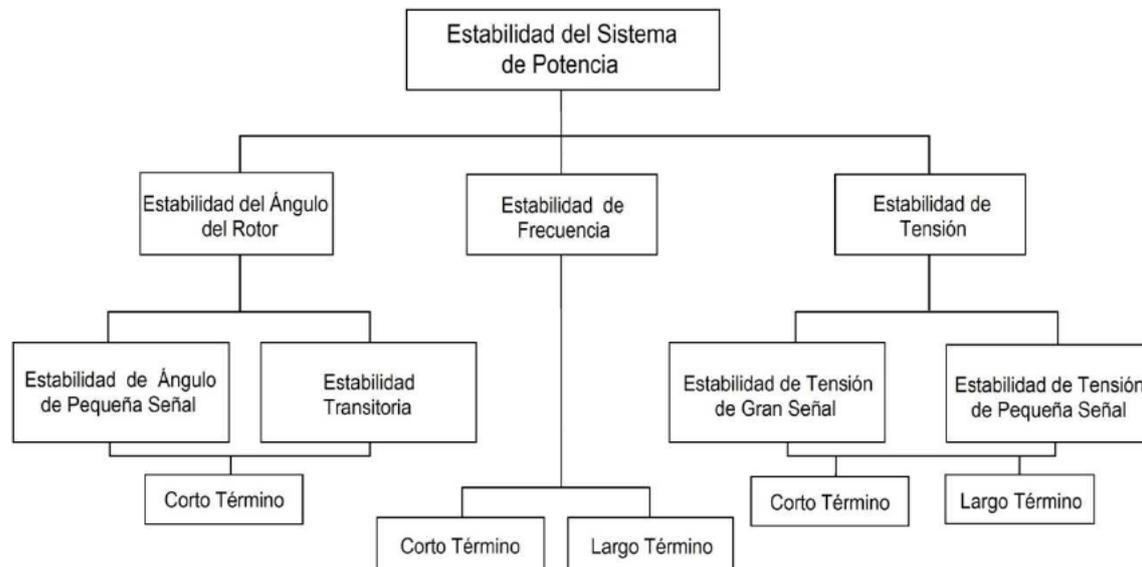


Figura 8. Clasificación de la estabilidad del sistema de potencia

Las siguientes son breves explicaciones de los principales fenómenos de estabilidad del sistema de energía (Kabalcı et al., 2022). Esta teoría fundamental se ha aplicado al análisis de estabilidad de redes inteligentes.

Estabilidad del ángulo del rotor

El ángulo del rotor o la estabilidad del ángulo de potencia significa la capacidad de los generadores síncronos para recuperarse en sincronismo o volver a condiciones normales después de haber sido sometidos a perturbaciones físicas. El problema de estabilidad del ángulo del rotor requiere el estudio de la oscilación electromecánica en los sistemas de potencia. Una cuestión crucial en este caso es el comportamiento en el que la potencia de salida de las máquinas síncronas fluctúa a medida que cambia el ángulo de su rotor (Durán Tovar & Flórez Cediel, 2010). En una situación de estado estacionario, la velocidad permanece constante y la entrada de par mecánico y par eléctrico de cada máquina está equilibrada. Si se produce una perturbación en el sistema, aleja al sistema del equilibrio, lo que hace que el rotor de las máquinas se acelere o disminuya la velocidad. Si una máquina gira momentáneamente más rápido que otra, las velocidades de giro de todas las máquinas no coinciden entre sí, lo que resulta en diferencias angulares en la posición. Esto tiende a inyectar o absorber alternativamente la energía de la máquina rápida a la máquina lenta. Además, si la separación angular se incrementa posteriormente, la transferencia de potencia disminuye o se produce una disminución en el voltaje del bus, lo que conduce a la inestabilidad. Un sistema inestable podría provocar fallas en el sistema y cortes en cascada para los componentes principales del sistema de energía. Los problemas de estabilidad del ángulo del rotor o del ángulo de potencia se pueden clasificar en dos áreas distintas (Abur, Alvarado, Bel, & Canizares, 2010):

- La estabilidad del ángulo del rotor de señal pequeña (estado estacionario) es la capacidad del sistema de potencia para mantener el sincronismo bajo pequeñas perturbaciones. Los problemas habituales pueden causar pequeñas perturbaciones de estabilidad, como el control HVDC, el controlador FACTS, el modo de oscilación entre áreas y los cambios de carga. El marco de tiempo para pequeños problemas de estabilidad de la señal es de diez a veinte segundos después de las perturbaciones.
- La estabilidad del ángulo del rotor de señal grande (estabilidad transitoria) es la capacidad del sistema de potencia para mantener el sincronismo después de haber sido sometido a perturbaciones severas, como cortocircuitos y operación de conmutación. El marco de tiempo para el problema de estabilidad de la señal grande es de tres a cinco segundos después de la perturbación.

Estabilidad de frecuencia

La estabilidad de frecuencia se refiere a la capacidad de los sistemas de potencia para mantener una frecuencia constante dentro de un rango permisible después de una perturbación severa del sistema. La frecuencia inestable resulta en un desequilibrio considerable entre la generación y la carga, por lo que afecta a grandes excursiones de frecuencia, voltaje, flujos de potencia y otros parámetros del sistema. Los problemas de estabilidad de frecuencia generalmente son causados por la insuficiencia de las utilidades del sistema para responder a las perturbaciones, la falta de coordinación de control y los dispositivos de protección avanzados. El marco de tiempo para los problemas de estabilidad de frecuencia se extiende de un segundo a minutos, dependiendo del control y la respuesta del dispositivo (SÁNCHEZ OÑATE, 2020).

Estabilidad de voltaje

La estabilidad de voltaje es la capacidad de los sistemas de energía para mantener un voltaje constante dentro de los rangos permisibles en todos los autobuses en condiciones normales y después de haber sido sometidos a una perturbación severa del sistema. La inestabilidad del voltaje puede resultar en un aumento o caída significativo de los voltajes en algunos autobuses. El factor clave que contribuye a la inestabilidad del voltaje es la caída de voltaje que ocurre cuando la potencia activa y reactiva fluye a través de la reactancia inductiva en las líneas de transmisión. En consecuencia, limita la capacidad del sistema de transmisión para el soporte de voltaje y la transferencia de potencia. Además, las cargas dinámicas también contribuyen a la inestabilidad del voltaje cuando se produce una perturbación. La carga tiende a responder restaurando la potencia consumida, lo que puede aumentar el consumo de energía reactiva y el estrés de la red de alto voltaje causa una mayor reducción de voltaje (Sánchez & Barrera, 2018).

La estabilidad de voltaje se puede clasificar en dos categorías de subsistemas distintos:

- La estabilidad de voltaje de gran perturbación se refiere a la capacidad de los sistemas de energía para mantener y controlar los voltajes después de grandes perturbaciones, como la pérdida de generación o fallas del sistema.
- La estabilidad de pequeñas perturbaciones se refiere a la capacidad de los sistemas de potencia para mantener y controlar los voltajes después de pequeñas perturbaciones, como el cambio incremental en las cargas.

Mientras tanto, el tiempo de duración de los problemas de estabilidad de voltaje puede variar de unos pocos segundos a decenas de minutos. Por lo tanto, el grado de estabilidad del voltaje podría ser un fenómeno a corto o largo plazo.

Conclusiones

Este capítulo revisa el trabajo previo realizado sobre la tecnología de generación distribuida y su impacto en los sistemas de energía. Muestra que la generación distribuida tiene impactos positivos y negativos en los sistemas de energía, como mejorar la confiabilidad del sistema, prevenir la caída de subtensión, influir en la estabilidad transitoria y la distorsión armónica durante la conexión o desconexión. Además, este capítulo proporciona un análisis exhaustivo de los conceptos de smart grid, los marcos y el estado del arte de la tecnología smart grid, así como algunos conceptos básicos de la estabilidad de Smart Grid.

Smart Grid como un nuevo concepto para la generación futura del sistema de energía implica ampliar el conocimiento y las tecnologías, lo que requiere características estándar y de interoperabilidad para la operación e implementación. La realización de los marcos de redes inteligentes tomará etapas graduales y posiblemente muchos años.

Referencias

- Abdmouleh, Z., Gastli, A., Ben-Brahim, L., Haouari, M., & Al-Emadi, N. A. (2017). Review of optimization techniques applied for the integration of distributed generation from renewable energy sources. *Renewable Energy*, Vol. 113, pp. 266–280. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.087>
- Abur, A., Alvarado, F. L., Bel, C. A., & Canizares, C. (2010). *Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica*.
- Benoit, I. (2003). Center for Economic Studies Working Paper Series Distributed Generation : Definition , Benefits and Issues. *Energy*, Vol. 32, pp. 0–21.
- Carolina Toro. (2016). *Redes inteligentes Benchmarking Latinoamérica*.
- Driesen, J., & Belmans, R. (2006). Distributed generation: Challenges and possible solutions. *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting, PES*, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/pes.2006.1709099>
- Durán Tovar, I. C., & Flórez Cediél, O. D. (2010). Análisis de la estabilidad del ángulo del rotor de un sistema máquina-barra infinita. *Revista Clepsidra*, Vol. 6, pp. 13–20. <https://doi.org/10.26564/19001355.65>
- González-Longatt, F. M. (2004). Tecnologías de Generación Distribuida : Costos y Eficiencia. *I Seminario de Ingeniería Eléctrica, Unexpo, Puerto Ordaz*, p. 11.
- González López Directores, Á. J., & Eloy-García Carrasco Manuel García Plaza, J. (2012). Gestión De La Energía En Una Red Inteligente. *Gestion de La Energia En Una Red Electrica*, pp. 60–115.
- Kabalci, E., Kabalci, Y., & Siano, P. (2022). Design and implementation of a smart metering infrastructure for low voltage microgrids. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 134, p. 107375. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107375>
- Khederzadeh, M., Javadi, H., & Mousavi, S. M. A. (2019). IMPACT OF DISTRIBUTED GENERATION (DG) ON THE DISTRIBUTION SYSTEM NETWORK. *IET Conference Publications*, Vol. 2019, pp. 165–170. <https://doi.org/10.1049/cp.2010.0299>
- Luè, A., Bresciani, C., Colorni, A., Lia, F., Maras, V., Radmilović, Z., ... Anoyrkati, E. (2016). Future priorities for a climate-friendly transport: A European strategic research agenda toward 2030. *International Journal of Sustainable Transportation*, Vol. 10, pp. 236–246. <https://doi.org/10.1080/15568318.2014.893043>
- Lui, B. T. J., Stirling, W., & Marcy, H. O. (2010). Using Demand Response with. *Energy*.
- Mahadanaarachchi, V. P., & Ramakumar, R. (2008). Impact of Distributed Generation on distance protection performance - A review. *IEEE Power and Energy Society 2008 General Meeting: Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, PES*, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1109/PES.2008.4596707>
- Mehigan, L., Deane, J. P., Gallachóir, B. P. Ó., & Bertsch, V. (2018). A review of the role of distributed generation (DG) in future electricity systems. *Energy*, Vol. 163, pp. 822–836. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.08.022>
- Moghaddam, M. J. H., Kalam, A., Shi, J., Nowdeh, S. A., Gandoman, F. H., & Ahmadi, A. (2020). A New Model for Reconfiguration and Distributed Generation Allocation in Distribution Network Considering Power Quality Indices and Network Losses. *IEEE Systems Journal*, Vol. 14, pp. 3530–3538. IEEE. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2963036>
- Pecas Lopes, A. (2002). *Integration of dispersed generation on distribution networks- impact studies* (Vol. 00). Vol. 00.
- Qian, K., Zhou, C., Yuan, Y., Shi, X., & Allan, M. (2008). Analysis of the environmental benefits of Distributed Generation. *IEEE Power and Energy Society 2008 General Meeting: Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, PES*, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/PES.2008.4596137>
- Roncero, J. R. (2008). Integration is key to smart grid management. *IET Seminar Digest*, Vol. 2008, pp. 23–24. <https://doi.org/10.1049/ic:20080430>
- Sánchez, D., & Barrera, C. (2018). Estabilidad de voltaje en sistemas eléctricos de potencia incluyendo curvas de capacidad para líneas de transmisión basado en el método cpf. *IEEE Latin America Transactions*, p. 30.
- SÁNCHEZ OÑATE, P. S. (2020). *Estabilidad De Frecuencia En Sistemas Eléctricos De Potencia Considerando Generación No Inercial* (p. 34). p. 34.
- Sekaran, Holliday, C. O. J., Schmidheiny, S., Watts, P., Schmidheiny, S., Watts, P., ... Branch, B. (2018). USO DEL HIDRÓGENO COMO FUENTE ALTERNATIVA PARA ALIMENTAR PILAS DE COMBUSTIBLE. *Pakistan Research Journal of Management Sciences*, Vol. 7, pp. 1–2.
- Slootweg, J. G., De Haan, S. W. H., Polinder, H., & Kling, W. L. (2002). Modeling new generation and storage technologies in power system dynamics simulations. *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, Vol. 2, pp. 868–873. <https://doi.org/10.1109/pess.2002.1043466>
- SMVITM. (2018). *Strategic Planning And Deployment Document* (pp. 1–20). pp. 1–20.
- Srivastava, A. K., Kumar, A. A., & Schulz, N. N. (2012). Impact of distributed generations with energy storage devices on the electric grid. *IEEE Systems Journal*, Vol. 6, pp. 110–117. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2011.2163013>
- Thong, V. Van, & Driesen, J. (2008). Distributed Generation and Power Quality. *Handbook of Power Quality*, pp. 521–528. <https://doi.org/10.1002/9780470754245.ch16>