

Prefacio

En un momento en el que la transición energética se está convirtiendo en una necesidad mundial por razones climáticas y para impulsar la renovación de un crecimiento económico más responsable, este libro es, en muchos sentidos, valioso. El aborda la principal barrera tecnológica que dificulta la difusión a gran escala de nuevos sistemas de generación de energía renovable, como la eólica terrestre y marítima, la solar y la microhidráulica. El enfoque de este libro está centrado en el almacenamiento de energía, como la única solución capaz de afianzar la producción de estas fuentes intermitentes de energía sujetas a las condiciones naturales del viento o de la luz solar.

Si bien la mayoría de los libros sobre el tema describen en detalle los avances de determinadas tecnologías de almacenamiento, este libro es uno de los pocos, si no el único, que trata de la gestión energética de sistemas que combinan una o más fuentes de energía renovables con unidades de almacenamiento con el fin de integrar armoniosamente dichos sistemas en las redes eléctricas existentes. El gran mérito del profesor Robyns y sus coautores es proponer, a través de este libro y en forma progresiva, una metodología completa para el desarrollo de supervisores para la gestión energética de sistemas que combinen fuentes de energía intermitentes y unidades de almacenamiento. Estos supervisores se basan en la lógica difusa y las leyes que los rigen se basan en el conocimiento experto. Debido a este enfoque, se pueden perseguir simultáneamente varios objetivos y controlar perfectamente las transiciones entre los diferentes modos de funcionamiento. Además, se describe todo el proceso de diseño hasta los detalles de su realización y validación experimental. Se presentan varios ejemplos de combinaciones, como un generador de turbina eólica de velocidad variable combinado con almacenamiento inercial y una red eléctrica que integra unidades de energía eólica y almacenamiento adiabático de aire comprimido. Para este último ejemplo, la optimización económica también forma parte de los objetivos del supervisor.

En definitiva, este libro tiene un alcance práctico innegable y sin duda servirá de referencia en el diseño de los supervisores de los sistemas de generación de energía renovable y de unidades de almacenamiento de energía y de potencia.

Eric MONMASSON

Introducción

El almacenamiento de energía eléctrica es un problema ya conocido que hasta ahora sólo se ha resuelto parcialmente, especialmente desde un punto de vista económico. Hasta ahora, la electricidad se produce principalmente en un flujo *just-in-time* a partir de recursos flexibles (hidráulicos y térmicos sobre la base de combustibles no renovables). El desarrollo de las energías renovables y la necesidad de medios de transporte con bajas emisiones de dióxido de carbono (CO₂) están despertando un nuevo interés por el almacenamiento, que se está convirtiendo en un elemento clave del desarrollo sostenible. El objetivo de este libro es contribuir a una mejor comprensión de las tecnologías de almacenamiento antiguas o en desarrollo, y en particular de su gestión y valorización.

Los objetivos de este libro son:

- destacar la importancia del almacenamiento de electricidad en el contexto del desarrollo sostenible de las redes inteligentes o *smart grids*;
- mostrar los diversos servicios que el almacenamiento de energía eléctrica puede proporcionar;
- introducir herramientas metodológicas que permitan la construcción de un sistema de gestión energética para el almacenamiento con un enfoque general y pedagógico. Estas herramientas se basan en los formalismos causales, la inteligencia artificial y las técnicas de optimización explícitas que se presentarán a lo largo del libro junto con estudios de casos concretos;
- ilustrar estos enfoques metodológicos con numerosos ejemplos concretos y pedagógicos relativos a la integración de las energías renovables en las redes eléctricas.

El primer capítulo presenta el problema del almacenamiento de energía eléctrica, una energía que no se almacena directamente en corriente alterna. Esto ha dado forma al sistema eléctrico actual basado en el consumo de la electricidad tan pronto como se produce. Sin embargo, el desarrollo de fuentes renovables intermitentes y la evolución hacia redes eléctricas más inteligentes, en particular en lo que se refiere a la distribución de energía, están fomentando la aplicación del almacenamiento de energía. En este capítulo se presentan los diferentes servicios que el almacenamiento puede aportar a la red, contribuyendo así a su valor económico y al problema de su gestión. Se introduce una metodología para construir esta gestión, basada en la inteligencia artificial, especialmente adecuada para la gestión de sistemas complejos que integran incertidumbres en la producción, el consumo y la red eléctrica, con varios objetivos y que deben ser procesados en tiempo real. Este es un gran reto para las futuras redes inteligentes *smart grids*.

En el segundo capítulo se presentan brevemente las diferentes tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica que se utilizan en la actualidad, ya sea industrialmente o en forma de prototipos. Se introducen las principales características de estas tecnologías de almacenamiento, permitiendo una comparación entre ellas. Estas tecnologías se ilustran con algunos ejemplos.

El tercer capítulo desarrolla las características generales de los componentes de un sistema eléctrico. Los métodos de gestión de las redes de transporte y distribución se presentan poniendo énfasis en los servicios necesarios para su buen funcionamiento, incluidos los servicios auxiliares del sistema que contribuyen a la regulación de la tensión y de la frecuencia. Se discute la contribución potencial del almacenamiento a estos servicios. Los operadores de estas redes se ven directamente afectados por estos servicios, como también los productores de energía, los consumidores y los nuevos agentes resultantes de la liberalización del mercado de la electricidad. Se presentan ejemplos de la contribución del almacenamiento al tratamiento de la congestión y al mantenimiento dinámico de la frecuencia en caso de desequilibrio repentino en una red aislada.

El cuarto capítulo presenta la lógica difusa, un método de inteligencia artificial utilizado en el resto del libro. Los conceptos básicos de la lógica difusa se aplican a la gestión de un sistema de almacenamiento de energía de tipo inercial que es parte de un sistema eólico híbrido grupo electrógeno diésel que alimentan un sitio aislado.

El quinto capítulo desarrolla una metodología que permite la construcción sistemática de un supervisor de energía para un sistema que integra el almacenamiento de energía eléctrica. Esta metodología, que integra pasos gráficos, no requiere modelos matemáticos, ya que se basa en la experiencia del sistema

representado por reglas difusas. Las entradas pueden ser aleatorias y la supervisión puede tener varios objetivos simultáneamente. Las transiciones entre modos de operación son graduales, ya que están determinadas por variables difusas. Finalmente, esta metodología permite la gestión del almacenamiento por convergencia a un nivel de carga y el control de complejidad para el procesamiento en tiempo real. Se aplica a la combinación de un sistema de almacenamiento de energía inercial con un generador eólico de velocidad variable, constituyendo un sistema capaz de prestar servicios de sistema o de operar en modo aislado. Una aplicación experimental permite discutir la realización en tiempo real de tal supervisor. Las pruebas experimentales permiten comparar diferentes variantes de supervisores.

En el sexto capítulo se aplica la metodología de construcción de un supervisor de energía a un sistema de múltiples fuentes y almacenamiento múltiple. El sistema de múltiples fuentes, estudiado en este capítulo, consiste en un generador eólico acoplado a una fuente predecible y controlable y dos sistemas de almacenamiento con características diferentes. Los objetivos son integrar este sistema en una red convencional comprometiéndose con un programa de producción, a pesar de la naturaleza aleatoria de la fuente eólica y los errores de previsión de producción asociados, y participar en la estabilidad de la red contribuyendo a la regulación de la frecuencia. La metodología de diseño del supervisor se prueba en diferentes topologías de sistemas de múltiples fuentes para ilustrar su naturaleza sistemática y modular. Mediante el uso de indicadores cuantitativos, se compara el funcionamiento de las diferentes topologías.

El séptimo capítulo trata de la gestión y la valorización del almacenamiento adiabático de aire comprimido incorporado en una red eléctrica con producción de energía eólica renovable. El objetivo de este capítulo es analizar la valoración económica y el interés y, por tanto, los usos para la red eléctrica de los dispositivos de almacenamiento de media y alta potencia (de entre varias decenas y centenas de MW). Se desarrolla una estrategia de supervisión de almacenamiento en tiempo real para maximizar los servicios prestados y su rentabilidad, considerando el dimensionamiento y la localización previas, de acuerdo con el método de construcción del supervisor introducido en los capítulos anteriores. Se comparan tres variantes de supervisor: un supervisor limitado a la valoración tradicional basada en la oferta y la demanda planificada el día anterior para el día siguiente, el supervisor en tiempo real propuesto basado en la lógica difusa y, finalmente, una variante booleana de este último supervisor. Los resultados de la simulación muestran una ganancia económica significativamente más interesante del almacenamiento si participa en servicios de sistema con gestión en tiempo real.

En los ejemplos de este libro, se asume que las características de diseño de los sistemas de almacenamiento (potencia, energía y dinámica) están predefinidas. Los parámetros correspondientes a estas características pueden ser optimizados de la misma manera que los parámetros del supervisor, integrando la gestión de la energía en el proceso de optimización; el objetivo es reducir este dimensionamiento y, por tanto, el costo asociado, gracias a la inteligencia integrada en el supervisor, lo que constituye un desafío para el desarrollo del almacenamiento en condiciones económicamente viables. Los ejemplos desarrollados pueden extenderse a otros tipos de fuentes renovables intermitentes (fotovoltaicas, pequeñas centrales hidroeléctricas o marinas) y otras tecnologías de almacenamiento. También se pueden considerar otros objetivos, como el envejecimiento de los sistemas de almacenamiento para controlar su evolución.