

Prólogo

Las nuevas tecnologías y regulaciones emergentes se encuentran entre las fuerzas que están impulsando los cambios en los sistemas energéticos. Esta circunstancia favorable allana el camino para el diseño de arquitecturas energéticas más avanzadas y efectivas, la solución a viejos problemas con nuevos medios y la solución a problemas no resueltos por la falta de herramientas y metodologías.

Las fuentes de energía renovables (FER), como la energía eólica y la solar, se están convirtiendo rápidamente en la columna vertebral del futuro sistema de energía eléctrica, ya que son respetuosas con el medio ambiente, aunque crean un gran desgaste en redes eléctricas que deberían dar cabida a cantidades cada vez mayores de generación de energía intermitente. Con el aumento de la eficiencia en la conversión de energía y en la electrónica de potencia, los sistemas de almacenamiento se han vuelto más fiables, menos costosos y más limpios, haciendo viable la opción de almacenar una cantidad significativa de energía bajo cualquier forma de energía química, térmica, mecánica o eléctrica. El potencial de los vehículos eléctricos en los sistemas energéticos también es enorme. En relación con el balance general del consumo de energía, la extensión de estos vehículos podría desplazar una cantidad significativa de energía de los combustibles convencionales para el transporte a la electricidad, lo que requeriría un rediseño completo de la mayoría de las redes eléctricas de distribución. Introducirán una nueva aleatoriedad en las operaciones del sistema eléctrico debido a la “movilidad” de las cargas.

A nivel residencial y urbano, la creciente penetración de los vehículos eléctricos y de la generación distribuida transformará rápidamente a los consumidores en “prosumidores” capaces de operar sus propios dispositivos para generar, almacenar y utilizar energía. La gestión de estos microsistemas energéticos requerirá la obtención de una mayor eficiencia, cosa que sólo puede alcanzarse mediante una integración radical de todos los servicios energéticos a nivel urbano y residencial

(suministro eléctrico, suministro de gas natural, calefacción, refrigeración, agua, transporte, etc.).

Un muy buen ejemplo de una tecnología capacitadora fundamental (TCF) que puede impulsar la transformación de las infraestructuras energéticas es el concepto de red inteligente. Las redes inteligentes combinan una serie de tecnologías con soluciones para el usuario final y abordan nuevos paradigmas en la generación, el almacenamiento y utilización dispersa de la energía eléctrica, que pueden encontrar una aplicación eficaz en un nuevo entorno regulatorio.

En este escenario multifacético, el centro de energía constituye otro paradigma clave. Puede concebirse como una unidad en la que se pueden convertir y acondicionar múltiples portadores de energía utilizando un amplio espectro de tecnologías, como la tecnología de cogeneración de calor y electricidad, los dispositivos electrónicos de potencia y los intercambiadores de calor. Por consiguiente, los centros energéticos podrían considerarse como el puente entre diferentes infraestructuras energéticas (es decir, redes eléctricas, sistemas de distribución de gas natural, sistemas de distribución de calor) y/o usuarios de energía (es decir, productores y consumidores) que permiten una mayor eficiencia energética y de mercado, aumentando la fiabilidad y facilitando la penetración de la generación intermitente. Este modelo puede aplicarse a diferentes escalas, incluyendo plantas industriales, grandes edificios, distritos urbanos y sistemas energéticos aislados.

Partiendo de la experiencia en el sector energético, en este libro se muestra cómo algunos de los conceptos y las metodologías desarrollados en este campo pueden ser utilizados eficazmente en otros ámbitos. Diferentes infraestructuras energéticas comparten las mismas necesidades de mayor automatización, optimización de las operaciones, más herramientas de planificación e integración entre múltiples vectores energéticos para conseguir mejor rendimiento y eficiencia. Estos problemas requieren nuevos métodos y software de aplicación cuyo núcleo principal, en general, reside en las herramientas de optimización.

El foco de este libro recae sobre los sistemas de distribución de energía y las infraestructuras energéticas urbanas, ya que presentan el potencial para mejorar su eficiencia y flexibilidad a través de la implementación de monitorización inteligente, nuevas funciones de control y la integración con otros portadores de energía. Este supuesto se aduce con la firme creencia de que, en estas áreas, las redes inteligentes proporcionarán cambios más profundos en respuesta a problemas complejos tales como: una amplia generación dispersa debida principalmente a las FER intermitentes, producción integrada, utilización y almacenamiento de energía térmica y eléctrica para mejorar la eficiencia energética, sistemas de distribución doméstica más avanzados, respuesta a la demanda, etc.

Los dramáticos cambios a los que se enfrentan las ciudades modernas durante estos años requieren un funcionamiento más inteligente de las redes eléctricas de acuerdo con el marco general del paradigma de la “ciudad inteligente”. Una nueva urbanización está dando lugar a las llamadas “megaciudades”, que requieren infraestructuras energéticas más avanzadas y seguras. La introducción de nuevas tecnologías, como la fotovoltaica, ampliamente utilizada en edificios residenciales y del sector de servicios, los vehículos eléctricos, los sistemas de trigeneración (CCHP, por sus siglas en inglés), las bombas de calor para responder a la demanda y los sistemas colectivos de gestión energética, cambia la forma habitual en que las redes de energía han funcionado hasta ahora en las ciudades. Otras cuestiones están relacionadas con una actitud diferente de los clientes, que están dispuestos a participar más activamente en el mercado de la energía y a elegir entre nuevos servicios energéticos, objetivo que se nutre de una regulación del sector con visión de futuro.

El objetivo del libro es proporcionar una visión integrada de los problemas a investigadores, ingenieros y profesionales, definiendo el perfil de los nuevos temas en la optimización del sistema energético. Los autores involucrados en este libro se sintieron alentados por una motivación común: reunir temas que, aunque en continuidad con su experiencia previa, plantean un nuevo escenario en los sistemas energéticos.

El libro comienza con las aplicaciones de las redes inteligentes en el sector de la energía y concluye con las aplicaciones a los sistemas de distribución urbana en los que intervienen otros vectores energéticos como el gas natural, la distribución urbana de frío/calor y el hidrógeno. Esta contaminación y novedad cultural se encuentra tanto en la teoría como en las aplicaciones del mundo real. Se deriva de los sistemas de energía, la cual es sin duda la infraestructura energética más compleja y tecnológicamente avanzada, la primera en hacer un uso generalizado de la automatización y las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) y en experimentar una drástica re-regulación del mercado y avances tecnológicos drásticos en todo el mundo.

Se presta especial atención a la aplicación real de los métodos aquí propuestos. De hecho, la mayoría de los capítulos se refieren a aplicaciones desarrolladas en actividades de investigación que ya se han finalizado para dar paso a la ejecución de proyectos piloto. Estos proyectos se describen brevemente y los recursos de financiación se reconocen a lo largo del libro. Algunos de los proyectos piloto aquí abordados impulsaron las necesidades de equipamiento y materiales de la actividad investigadora y alimentaron el apoyo de algunas empresas, dando lugar a un nuevo laboratorio llamado LabZERO ubicado en el Politecnico de Bari y en el Centro de Investigación ENEA en Brindisi, Italia. Este se creó con el fin de llevar a cabo las actividades del “Proyecto ZERO”, relativas al desarrollo de actividades de

investigación y experimentación en el campo de las tecnologías inteligentes verdes y al uso de herramientas y equipos de simulación para la creación rápida de prototipos con el fin de reducir los riesgos de la investigación aplicada y apoyar la innovación de productos en el camino “del concepto al mercado”. Lab ZERO fue concebido como un laboratorio viviente, un ecosistema de innovación abierta y centrada en el usuario que combina procesos de investigación, desarrollo e innovación dentro de una asociación público-privada. Esta experiencia es digna de mención para subrayar el vínculo del libro con las aplicaciones reales y para mostrar cómo los proyectos piloto constituyen un buen instrumento para llamar la atención de las instituciones públicas y las empresas sobre las cuestiones de investigación en ingeniería.

Las ideas arriba mencionadas inspiraron el libro cuyos temas se resumen aquí.

En la introducción se introducen la terminología, las definiciones y los factores económicos y técnicos que impulsan las redes inteligentes. Las redes inteligentes se definen en un sentido amplio que incluye todas las redes de energía y la integración de redes de distribución avanzadas. Los potenciales de mejora de la operación y el medio ambiente, las operaciones seguras y protegidas y la eficiencia energética se abordan con una visión especial del entorno urbano y su evolución hacia ciudades inteligentes.

En el capítulo 1 se resumen las características de los sistemas avanzados de gestión de la distribución y se presenta el flujo de potencia óptimo (OPF, por sus siglas en inglés) como función básica, que se puede aplicar eficazmente para controlar las redes de distribución de energía tanto a nivel de media tensión (MT) como de baja tensión (BT). Se desarrollan formulaciones especializadas, basadas en algoritmos de programación no lineal y una representación trifásica desequilibrada de la red eléctrica para el control de recursos activos y reactivos en los sistemas de distribución. Se presta especial atención al sistema de distribución de BT debido a la falta de automatización y de herramientas, así como a los profundos cambios que están experimentando estas redes en la actualidad.

En el capítulo 2, se presentan algoritmos de programación lineal en enteros mixta (PLEM o MILP, por sus siglas en inglés) para la solución de dos problemas de optimización que caracterizan las operaciones de la red de distribución de energía, a saber: la configuración de pérdidas mínimas de la red, el llamado problema de optimización Volt/VAR (VVO). La calidad de los resultados y los efectos de la linealización propuesta se evalúan en los sistemas de prueba de MT mediante una comparación con cálculos no lineales para obtener configuraciones óptimas.

En el capítulo 3, se han tratado los algoritmos de optimización basados en metaheurísticas para resolver problemas complejos en el dominio de las redes inteligentes. En este capítulo se presenta una revisión de los algoritmos

metaheurísticos más avanzados en la tarea de resolver problemas complejos de optimización de redes inteligentes y un análisis exhaustivo de las prestaciones esperadas de los algoritmos de optimización en términos de convergencia, robustez y precisión. Los beneficios y las limitaciones de las diferentes técnicas de solución se ponen de manifiesto a través de los resultados de la simulación obtenidos en redes eléctricas realistas y en una red eléctrica urbana real.

En el capítulo 4, se presenta una revisión de los enfoques del estudio de los sistemas energéticos urbanos. Los sistemas de energía urbana se proponen como redes de centros de energía híbridos de fuentes múltiples, en los que se recogen diferentes flujos de energía en el mismo bus que pueden almacenarse, entregarse o transformarse según sea necesario. Dado que los recursos y las infraestructuras interactúan entre sí, la definición y los límites de estos sistemas energéticos a nivel urbano y la posibilidad de generar nuevos modelos operativos basados en las infraestructuras urbanas críticas existentes constituyen un reto. La explotación de las infraestructuras térmicas, eléctricas y de movilidad se consideran elementos clasificatorios del centro de operaciones. Un diseño optimizado del sistema energético que abastece a dos distritos diferentes se considera una función de estas características urbanas. El análisis, del que se informa en el capítulo, muestra cómo existe un vínculo entre la planificación energética y las características urbanas a nivel de distrito, lo que allana el camino hacia una planificación territorial basada en la energía para contextos urbanos.

La planificación de sistemas energéticos integrados en las ciudades implica un diseño complejo, que debe tener en cuenta también un funcionamiento diferente de las redes subyacentes. Las interdependencias entre los diferentes sistemas deben describirse cuidadosamente y se requieren soluciones especiales para su optimización. En el capítulo 5, se formuló y probó un enfoque de optimización para ser aplicado en operaciones en presencia de múltiples fuentes de energía y sistemas de almacenamiento de acuerdo con dos estrategias enfocadas a aprovechar al máximo las instalaciones de almacenamiento: un algoritmo voraz y un control óptimo. Además, se propuso una metodología de diseño para maximizar el rendimiento de la inversión en la planificación de nuevos sistemas de energía híbrida multifuente, teniendo en cuenta las operaciones optimizadas durante la vida útil de la infraestructura. El enfoque se pone a prueba en un caso real de un proyecto de regeneración urbana destinado al desarrollo de instalaciones energéticas para proporcionar servicios energéticos con descuento en zonas suburbanas degradadas con el fin de atraer nuevas inversiones. El proyecto incluye la instalación de una planta de trigeneración, calefacción y refrigeración urbana y un reformador de vapor in situ para suministrar hidrógeno a una flota de vehículos de transporte público.

En el capítulo 6, se muestra cómo las redes de distribución de gas urbanas están experimentando cambios similares a los de las redes de distribución eléctrica debido

al despliegue de medidores inteligentes de gas y al uso cada vez más generalizado de herramientas TIC y de automatización que permiten operaciones más eficaces, seguras y protegidas. En este capítulo se presentan los resultados seleccionados de un proyecto piloto para la implementación de una red de gas inteligente en la ciudad de tamaño medio de Bari, en Italia. Un prototipo SCADA (Supervisión, Control y Adquisición de Datos) y un algoritmo de optimización del flujo de gas (algoritmo de flujo óptimo de gas) para el control de la presión a través de la red de gas natural se describen en su implementación real. Este tipo de control en tiempo real muestra el potencial de aumentar la potencia generada por los turboexpansores en las entradas urbanas de gas, reducir los errores de medición y facturación debidos a desviaciones excesivas de la presión, garantizar una distribución segura de los gases odorantes y proporcionar alivio de la carga y nivelación de los picos de voltaje en condiciones de emergencia. Lo que se describe en este capítulo es un ejemplo interesante de una “transposición” y un cambio de experiencias procedentes de dos ámbitos diferentes: el de la red eléctrica inteligente y el de la distribución urbana de gas natural.

Una vez presentados los temas relevantes para la integración de los diferentes sustratos energéticos en las futuras ciudades y los cambios esenciales en el proceso de planificación y optimización, en el capítulo 7 el enfoque se centra en la optimización simultánea de las redes de distribución de dos principales vectores energéticos: la energía eléctrica y el gas natural. La complejidad de ambas redes en términos de su estructura, una posible arquitectura futura de centro de energía, ecuaciones de flujo de energía y diferentes restricciones relacionadas con la igualdad y la desigualdad hacen que el problema de optimización sea altamente no lineal, no convexo y de alta dimensión. Se propone un método heurístico de optimización, a saber, el algoritmo de búsqueda gravitacional del coeficiente de aceleración variable en el tiempo (TVAC-GSA, por sus siglas en inglés), para resolver los problemas de OPF en sistemas de energía multiportadora, centrándose en las interacciones entre la red eléctrica y la red de gas. El algoritmo propuesto se basa en las leyes newtonianas de la gravedad y el movimiento. La eficacia del enfoque se pone a prueba en una arquitectura de energía multiportadora caracterizada por la supuesta presencia de múltiples centros de energía. La solución concurrente de las dos redes proporciona mejores resultados que las asociadas a la solución de los dos sistemas separados. En consecuencia, la optimización simultánea de múltiples redes parece ser una buena alternativa para los sistemas de distribución inteligentes, ganando eficiencia en el sistema global.

Después de este esfuerzo, los autores comparten la sensación de que muchos resultados están todavía en el cajón y muchos otros siguen saliendo de los proyectos piloto y, en general, lo que aquí se describe no concluye el tema. De alguna manera, este libro puede aparecer vinculado a la experiencia y regulación italianas. Esto se debe, principalmente, a la base territorial de los proyectos piloto y a la afiliación de la mayoría de los autores. Se cree que esto no es en sí mismo contraproducente, ya

que la experiencia italiana en el desarrollo de redes y ciudades inteligentes presenta algunas peculiaridades, como el despliegue temprano y a gran escala de tecnologías de medición inteligente y el establecimiento de un marco regulador avanzado.

El libro cubre una amplia gama de temas y aplicaciones y no podría haber sido escrito sin beneficiarse de los esfuerzos publicados por otros investigadores e instituciones que aparecen en las referencias al final de cada capítulo. Los autores agradecen el apoyo financiero del Ministerio Italiano de Desarrollo Económico y del Gobierno de la Región de Apulia, así como el apoyo técnico del Ayuntamiento de Bari, por la prestación de asistencia técnica y el apoyo en la ejecución de algunos proyectos piloto. Los autores también reconocen el aporte de las muchas personas que, de diversas maneras, contribuyeron a la realización de los proyectos mencionados en el libro.

Este trabajo no hubiera sido posible sin la paciencia de nuestras familias y la ayuda alentadora de los editores, a los que expreso, en nombre de todos los autores, nuestra gratitud.

Por último, deseo expresar mi sincero agradecimiento a todos los autores que contribuyeron a la publicación de este libro. Después de todo, el libro relata la historia de los esfuerzos cooperativos de un grupo de investigadores entusiastas que trabajan en el tema desafiante del traslado de resultados teóricos a demostradores reales útiles para la vida diaria.

Massimo LA SCALA

Bari, Italia

Octubre de 2016