

Revisión bibliográfica de sistemas de control para gestión de micro-redes de energía

Bibliographic review of control systems for micro energy networks

Vicente Stalin González-Suárez
staling_suarez@hotmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8833-9417>
Maestría en Electricidad, Mención Energías Renovables y Eficiencia Energética, Jefe de Inspección y Monitoreo de la Refinería Esmeraldas - EP Petroecuador

Joseph Eli Izquierdo-Obando
joseph.izquierdo@pucese.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-0610-089X>
Gobierno Autónomo Descentralizado de la Provincia de Esmeraldas, Ecuador

Carlos Alfonso Cali-Pereira
carlos.calipereira7@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0003-0710-315X>
Ingeniero en Administración y Producción Industrial

Marco Julio Salazar-Nájera
mjsalazama@pucese.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-6203-3903>
Maestría en Electricidad, Mención Energías Renovables y Eficiencia Energética en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Esmeraldas, Ecuador

Alex Rafael Zavala-Lucas
alex.zavala@pucese.edu.ec
<https://orcid.org/0009-0009-4152-3127>
Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Sede Esmeraldas, Ecuador

RESUMEN

El presente artículo presenta una revisión de la literatura la cual está enfocada en determinar el grado de importancia que tienen los sistemas de control para la gestión energética en micro-redes. Se describen las principales razones por las que se lleva a cabo el proceso de migración de plantas de uso de combustible fósil hacia plantas industriales de energía renovables, enfatizando en algunos tipos de energía renovable existentes. Adicionalmente, se resumen las técnicas de control existentes, entre las que figuran el control óptimo y jerárquico, para las micro-redes. Asimismo, se esbozan las principales tecnologías utilizadas en la actualidad para la implementación de sistemas de control predictivo basado en modelos (MPC, siglas en inglés) y el control económico predictivo basado en modelos (EMPC siglas en inglés). En este último, se realiza un análisis en términos económicos en función del coste.

Palabras claves: MPC, gestión de energía, micro-redes, función de coste, control jerárquico.

ABSTRACT

This article presents a review of the literature which focuses on determining the degree of importance of control systems for energy management in micro-networks. It describes the main reasons for the migration process from fossil fuel plants to industrial renewable energy plants, emphasizing some existing types of renewable energy. In addition, existing control techniques, including optimal and hierarchical control for micro-networks, are summarized. The main technologies currently used for the implementation of Model-Based Predictive Control (MPC) and Model-Based Predictive Economic Control (EMPC) are also outlined. In the latter, an analysis is made in economic terms as a function of cost.

Keywords: MPC, energy management, micro-grids, cost function, hierarchical control.

INTRODUCCIÓN

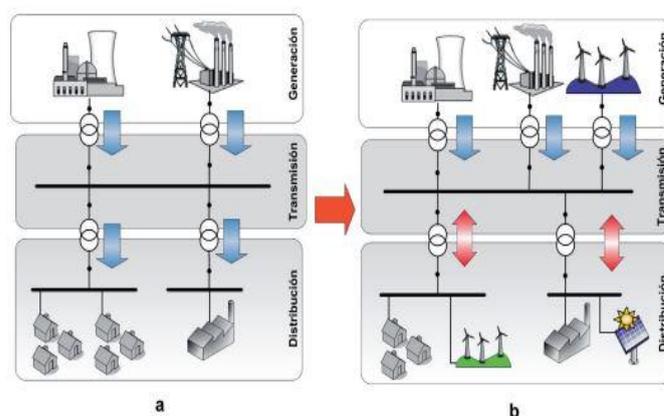
La mayoría de la cantidad de energía usada a nivel mundial está distribuida entre los sectores de generación eléctrica y del transporte, seguidos de industrias de tipo químico, agrónomas, entre otras. Según [1], se proyecta un crecimiento de la población mundial de alrededor de 10 billones de habitantes para el 2050, por lo que se necesitará un promedio de 32,3 [TW] para suplir sus necesidades energéticas, el mismo que es considerablemente mayor a los 13,2 [TW] que se consumen actualmente [2], [3]. Según [47], el consumo de combustibles fósiles es de alrededor del 83%, mientras el restante se divide para las demás fuentes energéticas. Por este motivo, a nivel ambiental, es importare el desarrollo de nuevas técnicas que permitan alcanzar una mayor eficiencia operativa en plantas de energías renovables y que permitan disminuir su coste de operación. El crecimiento del continente asiático en términos económicos, demográficos y urbanísticos, proyectan un alza en la demanda inclusive mayor a la citada. Según [4], si los países asiáticos logran llevar su matriz energética al igual que lo hacen los países occidentales (en términos de consumo de carbón, gas y petróleo) es probable que las previsiones de precios y reservas mundiales deban ser radicalmente revisadas.

Esta realidad, ha desarrollado el interés en la investigación y mejora tanto de la electrónica de los componentes de las fuentes de energía renovable, como de los sistemas de control que se encargan de gestionar su dinámica [5], [6]. Las fuentes de energía renovable que se desarrollan para el reemplazo de las energías fósiles son principalmente la energía nuclear, hidroeléctrica, eólica, geotérmica, la basada en el hidrógeno (pilas de combustible), solar, entre otras [7], [8]. Las pilas de combustible, por ejemplo, se proponen dentro del desarrollo de vehículos eléctricos híbridos (HEV, siglas en inglés) en el campo de los vehículos eléctricos basados en pilas de combustible (FCEV, siglas en inglés) en donde se usan junto a un sistema de almacenamiento de energía (baterías, supercapacitores o ambos inclusive), además del motor eléctrico. Las arquitecturas de este sistema suelen ser en serie, paralelo o una combinación de ambas.

A diferencia de las grandes plantas centralizadas de combustible fósiles, como las termoeléctricas o las turbinas de vapor, las fuentes de energía renovable tienden a tener una arquitectura distribuida. Además de las fuentes de generación, para la mejora de los sistemas de control, se toman en cuenta sistemas auxiliares como el de pronósticos, el mismo que

puede tener en cuenta incertidumbres para robustecer el sistema, o a la vez pueden emplear perfiles ya predefinidos según la estación temporal. La Fig. 1 muestra de manera gráfica los sistemas de energía eléctrica tradicional y de próxima generación. Según [9], los sistemas de energía distribuidos poseen las ventajas de tener un mayor grado de confiabilidad, de ser escalables de manera relativamente más sencilla que los sistemas convencionales y pueden ser flexiblemente controlados. Entonces, aparece el concepto de una micro-red, que se trata de un sistema con varias fuentes de generación distintas que pueden ser controlados de manera individual en un nivel de control inferior y en conjunto en un nivel superior de control [10]. Usualmente, todas las redes individuales (unidades de generación distribuidas) se unen a un bus de energía. Este bus, lleva la energía hasta las cargas, y en la dinámica, el conectar todas las fuentes (unidades de generación) al mismo bus, permite sacar de operación cualquiera de ellas sin afectar el desempeño del sistema. Entonces, se puede definir a una micro-red inteligente como un sistema de generación bidireccional, que permite la distribución de electricidad, tanto desde los proveedores hasta los consumidores, como la venta de electricidad por parte de los segundos. Un aspecto importante, es que se destaca la aparición e integración de las fuentes de generación renovables en ellas.

Fig. 1. Sistemas de energía eléctrica (a) tradicional y (b) próxima generación [11].



Dentro de los esquemas de control para este tipo de tecnología se tiene el control predictivo basado en modelos (MPC, siglas en inglés), controladores difusos, controladores jerárquicos, controladores híbridos entre otros. Principalmente la literatura se diferencia en el tipo de modelamiento que se usa del sistema y los objetivos de control, ya sea a nivel de corrientes, potencias, energía o torques. En el presente artículo en la sección II, se presenta un análisis de algunos trabajos relacionados con los sistemas de tipo micro-red, y en la sección III se realiza un análisis de los sistemas de control planteados para el manejo de la dinámica de estos tipos de sistemas. Finalmente, en la sección IV, se presentan las conclusiones de sobre la aplicabilidad de cada tipo de controlador.

Sistemas de generación eléctrica

Como se mencionó, los sistemas de generación tradicionales suelen estar formados por centrales generadoras de energía que operan siempre a su máxima capacidad, aun en condiciones de vetustez y malas condiciones técnicas. Parte de la dinámica de estos sistemas, es que, en conjunto a estas grandes centrales de generación termoeléctrica o de vapor, por ejemplo, existen algunas de entrada/salida rápida como la de motores de combustión interna, que suplen el consumo en las llamadas horas de máxima demanda. Regularmente, cada planta industrial funciona como un ente autónomo, que luego se integra en una red de transmisión, con subestaciones y los demás elementos. Todas ellas, en su mayoría funcionan con combustibles como el diésel, el fuel oil, entre otro tipo de combustible similares. Una problemática común de estas centrales es que en ocasiones debido a un mal mantenimiento generan una cantidad considerable de contaminación, la misma que en muchos países no es correctamente regulada. A la vez, poseen problemas de eficiencia, daños en los sistemas de expulsión de gases y otros problemas mecánicos que hacen que su operación no sea la más óptima. Otra de sus desventajas es que el suministro a entregar, es regulado por previsiones calculadas previamente por un organismo de control. Esta previsión no se integra al sistema de manera inteligente ni como un parámetro de producción del sistema en sí. No obstante, una manera para mejorar la eficiencia de estos sistemas, es la introducción del control en niveles jerárquicos, que además del control local poseen capas o niveles para la gestión de un sistema completo de energía.

Debido a esta problemática, un nuevo objetivo de los sistemas de gestión energética es gestionar los recursos

energéticos de forma que se aproveche al máximo la energía disponible en cada momento y se minimice el consumo de fuentes de energía fósiles. Ante esta realidad, una de las principales metas al concebir una red de energía más inteligente es el de mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de la infraestructura de generación, lo que permite una generación más barata de energía, con niveles de confiabilidad superiores a los actuales, y que tome en cuenta el tema del cuidado medioambiental. Entonces, es importante tomar en cuenta el balance acorde entre la energía generada y la que se consume, para evitar incrementar drásticamente la generación en ciertos momentos de demanda de carga.

Dentro de este sistema de generación eléctrica inteligente, así como anteriormente para los sistemas tradicionales se consideraban a los motores de combustión, y otros tipos de plantas, en la actualidad se consideran las plantas de generación en base a energías renovables. En [12] se muestra que las fuentes renovables de energía y los sistemas para la generación distribuida se concentran en tres programas importantes. El primero es la generación eléctrica en base a fuentes renovables, como la energía solar, fotovoltaica, biomasa, biogás, generación eólica, energía geotérmica y energía hidroeléctrica. El segundo, la generación de electricidad y calor mediante energías renovables (CHP, siglas en inglés), y el tercero, el aumento en la eficiencia y el uso de bombas de generación de calor en combinación con los CHP para uso residencial, por ejemplo. Dentro de estos tres programas, algunos ejemplos del uso de fuentes de energías renovables se mencionan a continuación.

La fuente de generación solar, por ejemplo, es una de las formas más comunes de producir energía, y dentro de este mencionado contexto, en [13], [14], y [15] se utilizan sistemas de energía solar para alimentar el sistema térmico de edificaciones. En este último se analizan varios tipos de sistemas de absorción solar, para distintas capacidades nominales con varias superficies de absorción, además de analizar las ecuaciones del balance térmico. En [16] en cambio, la energía demandada se suministra por un sistema solar de capacidad limitada. Para este caso particular se usa agua para la transferencia de calor, por lo que la planta solar puede ser operada para producir agua caliente o fría. El ciclo de la energía de un fluido es cerrado, es decir, el fluido retorna a una bomba de impulsión luego de pasar por los subsistemas, mientras el elemento final de intercambio calórico es un serpentín que tiene como elementos de intercambio el agua y el aire externo.

En [17] el sistema descrito consta de generación solar, eólica y pilas de combustible para suministrar energía, entendiéndose las limitaciones de las condiciones del tiempo para la generación (restricciones). Este trabajo a diferencia de [18], no posee una red externa de energía (grid) que puede dar y también puede comprar energía. En [19], en cambio se usa un sistema fotovoltaico y un sistema eólico combinados, los mismos que se accionan individualmente o en conjunto según los requerimientos de carga. También es importante destacar, que en este trabajo se usa un banco de baterías para almacenar energía. Uno de los principales objetivos es mejorar la eficiencia del estado de carga, (SOC, por sus siglas en inglés) de las baterías y los niveles de agua e hidrógeno disponibles para la generación y consumo. En este trabajo, al igual que en [20], [21] y [17] se ve el uso de elementos que almacenan energía. Además de aquello, se puede observar que existe interacción con redes externas. En [22] en cambio se usa un tipo de almacenamiento térmico. En [18] se observa que estrategias de gestión de energía para las diferentes fuentes de generación como las ya mencionadas se formulan para horizontes de 24 horas, al igual que en [17].

Como se puede observar, existen trabajos que estudian la implementación de este tipo de sistemas y en particular de las micro-redes. No obstante, es importante recalcar algunos aspectos que ayudan a la mejora de la eficiencia del sistema. Dentro de estos aspectos, se encuentra el avance en las predicciones del tiempo, por lo que en algunos casos los datos se toman y actualizan en intervalos de usualmente una hora a partir de bases de datos web analíticas de tiempo, que se basan en una combinación de modelos estadísticos y mediciones físicas [23]. Los datos meteorológicos revisados, así como la previsión de precios electricidad de la red, se logran sobre una base horaria que puede ser considerada como de tiempo real con un intervalo de una hora para el envío y seguimiento de carga.

Otro aspecto importante es la factibilidad de integración y comunicación en tiempo real de los sistemas nuevos, con otros tipos de sistemas existentes, la generación descentralizada, los buses de energía, la capacidad y forma de almacenamiento, así como la gestión óptima de los subsistemas en base a las necesidades globales. Otra consideración a tener en cuenta es que las necesidades de consumo energético son dependientes del tiempo. Además de las fuentes y las cargas se dispone de elementos de almacenamiento (o micro almacenamiento) energético que permiten almacenar temporalmente energía (baterías, supercapacitores o sistemas híbridos entre ambos). Esto se apoya en las predicciones climáticas más exactas que se dan con el paso del tiempo. De forma similar, y a partir de históricos, es posible tener estimaciones del consumo de las cargas. Autores de los estudios [24], [25], [26] y [27] han analizado en detalle la arquitectura y funcionalidad de las redes de energía inteligentes.

Entonces, en trabajos de autores como [28], [29], [30], [31], [32], entre otros ya analizados, se observa que el estudio de la migración hacia estas tecnologías es relevante para la comunidad científica actual.

Gestión del control para Micro-redes

Controladores basados en EMPC

Como se conoce, existen diversas técnicas de control para realizar la gestión energética en micro-redes. Algunas, orientadas a manejar sistemas con varias fuentes de generación, con elementos de almacenamiento, y con compra y venta de energía. Entonces, en esta sección se hará un análisis de las técnicas de control usadas en algunos artículos de la literatura. En [20], se argumenta que el aumento en el rendimiento de la generación, puede alcanzarse con el uso óptimo de aproximaciones basadas en heurísticas. No obstante, [21] indica que el tipo de control MPC, puede integrar métodos de previsión, variables óptimas y multicontrol, la consideración de las incertidumbres y las condiciones de tiempo muerto, por lo que es una solución eficiente para resolver problemas de control en generación. Tanto en este trabajo como en [33], se usa un control predictivo económico, EMPC, donde el término económico viene asociado con la energía del mercado. En este último, la estrategia de control se compone de una función de coste económica que representa la combinación de los costos de energía y la demanda del proceso. Las entradas de control vienen del modelo de potencia de la dinámica de la masa térmica de la construcción, y existe un conjunto de restricciones para asegurar el edificio se hace funcionar correctamente. De esta forma, el objetivo económico se lo realiza con la inclusión de un término en una función de coste con coeficientes o pesos de las variables según el coste. La optimización es un problema min-máx y se convierte en un programa lineal. Hay que tener especial cuidado en el EMPC que la función objetivo puede conducir a la inestabilidad, por lo que los argumentos típicos de Leapunov para probar la estabilidad asintótica de un MPC no se pueden aplicar directamente, ya que el coste óptimo no es necesariamente decreciente.

Entonces en [21] se modifica la función objetivo de coste económico para asegurar la estricta disipatividad. Otros trabajos como [34], también cambian la función de coste, modificándola mediante pesos y logrando una disminución en el rendimiento económico. Esta pérdida de rendimiento constituye una solución de compromiso para la estabilidad. También se muestra que el rendimiento en lazo cerrado supera el mejor rendimiento de estado estacionario, mediante el tratamiento de penalizaciones en la región terminal. En [20], se muestra que, en la implementación del control predictivo basado en modelos estándares, primero se obtiene una optimización en el estado estacionario en el punto de equilibrio con coste económico mínimo, no obstante, el mejor punto de equilibrio calculado puede no ser el mínimo global del costo económico y, por lo tanto, la elección de los costes económicos debe ofrecer un potencial para mejorar el rendimiento del sistema. Existen trabajos sobre MPC económico que desarrollan nuevas herramientas para el análisis de la estabilidad e identifican las condiciones suficientes para la estabilidad asintótica, lo que permite que el sistema se estabilice al forzar el estado del mejor punto de equilibrio en el extremo del horizonte.

También existen trabajos como [17] en donde se presenta una metodología para aplicación de técnicas de optimización de retroceso de horizonte hacia el problema de la gestión óptima de los flujos de energía. En el enfoque de horizonte en retroceso, el mismo problema de optimización se resuelve en cada paso de tiempo para lograr una solución óptima para el paso de tiempo actual. Esta formulación se la realiza en el dominio del tiempo discreto con un horizonte temporal finito. La solución al problema de optimización ofrece las trayectorias de referencia de potencia para los subsistemas de generación de energía en el horizonte elegido (es decir, el poder que se distribuya durante cada intervalo de tiempo futuro). En la formulación del problema, se incluye como el principal objetivo económico los costos de generación, además de los costes e ingresos generados por la venta de energía hacia la red pública, término que se resta de la función general. De esta manera, se observa que uno de los principales objetivos del EMPC mostrados hasta ahora, es a disminución del coste de generación y por ende un aumento de la eficiencia del sistema.

Controladores basados en MPC

También ha existido investigación con controladores MPC que no son del tipo económico, ya sean estos MPC estándar, NMPC (Nonlinear Model Predictive Control), DMPC (Distributed Model Predictive Control), entre otros. Se debe recordar que una ventaja del control MPC es la facilidad para colocar las restricciones que son las limitaciones operativas dentro de rangos para cada variable. Por ejemplo, en [17], se presenta una metodología para la aplicación de técnicas de optimización en retroceso de horizonte para la gestión óptima de flujos de energía mediante un sistema híbrido (HRES). La optimización de las estrategias de gestión de energía se realiza a través de un enfoque de horizonte de retroceso formulado en el dominio de tiempo discreto. La primera capa del MPC, realiza una optimización en tiempo real de las variables de la planta, la misma que se actualizará sobre una escala de tiempo de horas o días, para después integrar los resultados a otros sistemas de control de capas inferiores. La solución al problema de optimización ofrece las trayectorias de referencia de potencia para los subsistemas de generación de energía en el horizonte elegido. La asignación óptima de la generación de energía entre los diferentes recursos ofrece un balance entre oferta y demanda y los objetivos planteados para la función de coste. En [18] el problema general se formula mediante programación lineal (MILP). Se emplea un estudio de caso para una estrategia online de control basado en la optimización. Las cargas controlables tienen un nivel deseable, pero su magnitud es flexible, de modo que el nivel de la demanda puede bajar al ser conveniente o necesario (modo en isla), y se atribuye un

cierto costo asociado con la reducción de carga como penalidad de la micro-red. En este trabajo, también existe un sistema de almacenamiento de energía, el mismo que posee un comportamiento dinámico. En [35], el control se realiza con varias leyes de control, y se usan distintos modelos del sistema para realizar una comparativa posterior. Entre las técnicas de control usadas están las referentes al NMPC como por ejemplo NMPC multi etapa, NMPC robusto en bucle abierto, y NMPC robusto variante e invariante en el tiempo.

La robustez de los controladores se logra mediante la aplicación de limitaciones en los nodos, obtenidos mediante la combinación de los valores nominales máximos, mínimos y de los parámetros inciertos. Se trabaja en resolver problemas asociados a la incertidumbre que se presenta al colocar términos económicos a este tipo de controles. La representación de la evolución de la incertidumbre como un árbol de escenarios, hace que sea posible introducir una retroalimentación de forma explícita en la predicción del controlador, en el NMPC multi etapa. La aplicación de este controlador y la inclusión de términos económicos lograrían mejoras en el rendimiento, a la vez que la reducción de tiempos de carga, temperaturas más finas y el no violar continuamente las restricciones relacionadas con la seguridad, como en el caso de los controles estándar. Para este tipo de sistemas se debe tener cuidado en analizar correctamente el equilibrio entre la variabilidad del sistema controlado y los resultados económicos en condiciones de incertidumbre.

En [22], se trata el balance energético para sistemas con muchos componentes, y se usa el método de Douglas-Rachford para dividir el problema general en sub problemas dinámicos y poderlos controlar de forma paralela. Un agregador basado en un MPC es el encargado de hacer el control global del sistema. La función de coste penaliza la desviación en el consumo de energía y el seguimiento de consignas. Existe un sistema de almacenamiento de energía de tipo térmico. Se concluye que los costos de operación se reducen, además de que para los sistemas a gran escala este método es más rápido que la solución del problema original sin dividir. Mientras que en [16], se presenta un modelo predictivo distribuido (DMPC) en comparación con un controlador centralizado para un esquema de gestión eficiente de la distribución de energía en edificios. Se proponen entonces, extensiones para los controladores distribuidos con el objetivo de superar las dificultades que surgen de la aplicación directa de un DMPC para la formulación estándar. En este trabajo, la dinámica del modelo de la temperatura interior es no lineal, no obstante, como resultado final se trabaja mediante una representación del sistema como una red dinámica lineal (LDN). Las modificaciones propuestas al DMPC garantizan una distribución óptima del recurso con una red de acoplamiento flexible. La simplificación principal fue dada por la eliminación de las restricciones de frontera en la disponibilidad de recursos.

Controladores Jerárquicos

Como se había introducido anteriormente, existen ciertos controles que se dividen en capas, ya sean dos o tres, en base de los objetivos de control a alcanzar. Usualmente se tiene un control de alto nivel que se encarga de la gestión de la red de energía y controladores locales que se encargan de asegurar los parámetros de operación de cada subsistema como tal. Por ejemplo, en [36], se presenta una revisión del control jerárquico, que para el presente trabajo se divide en tres etapas. La primera referida a los mecanismos para repartir carga y control de voltaje de salida, la segunda se refiere a la administración de energía del sistema, y su modo de operación y la tercera a la importación/exportación de energía desde la red. En el segundo nivel, se debe tener la coordinación en los instantes de tiempos definidos de las fuentes de energía, los dispositivos de almacenamiento, y las cargas, este balance en el artículo se lo representa como la estabilidad del bus en corriente continua (DC). En la etapa de supervisión, pueden ser usualmente implementadas estrategias de gestión que se pueden dividir en tres categorías principales, en base a la forma en que el control secundario se implementa, y pueden ser centralizado, descentralizado e híbrido. También se mencionan ventajas del bus de DC sobre el de corriente alterna (AC), las mismas que se resumen en alta eficiencia, la calidad de alta potencia, coste reducido, y el control menos complejo.

En [13], se propone un sistema jerárquico al igual que el caso anterior, pero de dos niveles, que recibe información de controles locales y maneja una red en el nivel superior, entonces a bajo nivel se manejan por ejemplo las temperaturas de los componentes del sistema. El controlador según las restricciones de funcionamiento, deberá de actuar con los controles locales para subir o bajar la temperatura en los rangos provistos según las condiciones de carga o descarga (referencia del valor de temperatura). Las condiciones meteorológicas, temperatura externa, entre otras, son tomadas como perturbaciones del sistema. Las principales dificultades se relacionan con la presencia de limitaciones de seguridad y la no linealidad, así como la naturaleza híbrida del sistema. En trabajos como [20], se muestra una combinación de un MPC y MILP para resolver el problema de gestión de energía. Se mantiene la idea de un control superior, al cual se enfoca el desarrollo de consignas para el bajo nivel, y controladores locales para resolver problemas de calidad de energía en los elementos de la red. Son restricciones las capacidades de la red para la producción, y a la vez los costes de producir la energía.

Otros tipos de controladores

Trabajos como [17], [19], [24], [37] y [38] muestran otros tipos de técnicas de control usadas para la gestión de energía. En [19], por ejemplo, se muestra que los sistemas de energía autónomos, operan regularmente al límite de sus especificaciones, muy poco después de la instalación o después de un tiempo suelen surgir necesidades crecientes en la demanda, lo que lleva al fallo del sistema. Una solución a esto es la desconexión de la carga parcial de una manera inteligente. Para la solución, usa la predicción de "Gray" explicada en [38], que elimina el máximo de valores negativos, ya que los mismos no están permitidos, colocándolos en un rango positivo hasta el infinito, para luego pasarlo por un algoritmo de acumulación de primer orden y luego modelarlos en una ecuación diferencial de primer orden.

Finalmente, en la Tabla I, se ha sumariado varios trabajos sobre sistemas micro-red. En esta tabla se han dividido los mismos por tipo de control, ya sea MPC, NMPC, EMPC u otros. También, se han dividido según el modelo usado para el controlador, ya sea lineal o no lineal. Se han separado también, según el tipo de función de coste, y el modo de almacenar energía. Los elementos de la micro-red, se han detallado y se han colocado los trabajos dentro de los mismos.

Tabla 1. Estrategias de control para micro-redes

Enfoque	Estudios relacionados
Según técnicas de gestión	
MPC lineales	[18], [36], [39], [40], [41]
MPC no lineales	[15], [20]
EMPC	[17], [28], [29], [30], [32], [25], [26], [27], [34], [35], [36], [24], [42], [43], [21]
DMPC	[16], [22]
Otras	[24], [37], [17], [19], [38]
Según modelo para el controlador	
Lineal	[17], [18], [28], [32], [24], [26], [16], [22], [39], [40], [42], [43], [17], [21], [19]
No lineal	[30], [25], [27], [34], [35], [36], [41], [37], [15], [20]
Según función de peso utilizada	
Cuadrática	[16], [35], [24], [22], [39], [41], [21]
Otras	[29], [30], [27], [40], [42], [37], [43], [17], [20]
Según el tipo de micro-red	
Solares	[16], [40], [13], [14], [15]
Red pública	[29]
Híbridos	[17], [18], [17], [21], [19], [20]
Según modelo de almacenamiento de energía	
Banco de baterías	[18], [21], [19]
Otros	[24], [22], [39], [41], [13], [14], [15], [43], [17], [19]
	[24], [40], [39], [41], [42], [37], [13], [14], [15], [43]

CONCLUSIONES

El control distribuido es una técnica eficiente para el manejo de grandes sistemas. En el caso de las micro-redes, la generación de cada fuente se integra a un bus de energía DC o AC. Las fuentes que reemplazan a las energías no renovables son la energía solar, energía térmica, energía hidroeléctrica, pilas de combustibles, entre otras. También se incluyen elementos complementarios que permiten mejorar el desempeño del sistema, como las predicciones temporales, datos históricos, y la inclusión del sistema de almacenamiento de energía como baterías y supercapacitores. Una ventaja de estos sistemas de almacenamiento es que poseen una gran capacidad de densidad energética y una gran capacidad de densidad de potencia respectivamente. Dentro de la arquitectura de control, el nivel superior es referido a la distribución de energía del sistema y puede ser implementado con los controladores MPC, EMPC, difusos entre otros. Dentro del control jerárquico, esta sería la capa de nivel superior, o de planificación, en donde las consignas para los controles de bajo nivel se definen. La capa de nivel inferior, incluye los controladores de tipo proporcional, proporcional integral (PI, siglas en inglés) y la proporcional integral derivativo (PID, siglas en inglés), además de los controles para lazos locales.

Dentro del tipo de controladores MPC, tenemos la ventaja de que podemos integrar las limitaciones físicas del sistema como restricciones de operación, las mismas que pueden ser de tipo duras o flexibles. La función de control puede diseñarse para asegurar la estabilidad del sistema. Una desventaja es que necesitamos un optimizador en tiempo real (RTO, siglas en inglés) para dar las consignas de control. Podemos trabajar con sistemas directamente no lineales, o linealizar los sistemas con modelos aproximados, perdiendo un porcentaje de eficiencia en la resolución del sistema de control. La ventana temporal en la que se resuelve el MPC es un aspecto importante en la predicción. Existen modelos del MPC que permiten

hacer el sistema robusto, incluyendo los errores de predicción y de los componentes. Las ventajas del control EMPC es la inclusión de los términos económicos en la función de coste del sistema directamente. Con esto, podemos unir la capa del RTO directamente con la etapa de control superior. Una desventaja es que la estabilidad del sistema no se puede asegurar como en el caso del MPC normal.

El control predictivo clásico y de tipo económico, junto al control jerárquico, permiten entonces un eficiente manejo de las micro-redes, permitiendo el aumento de las prestaciones y asegurando un funcionamiento óptimo. Por este motivo y como se revisó en la literatura, son ampliamente usados en las aplicaciones de micro-redes.

REFERENCIAS

- [1] D. Tomaskovic-devey, "Market Concentration and Structural," in *Industries, Firms, and Jobs*, Springer, Boston, MA, 1988, pp. 141–142.
- [2] J. Conti, P. Holtberg, J. Diefenderfer, A. LaRose, J. T. Turnure, and L. Westfall, *International Energy Outlook 2016 With Projections to 2040*, vol. 0484, no. May. 2016.
- [3] L. G. G. Moncada, F. Asdrubali, and A. Rotili, "Influence of new factors on global energy prospects in the medium term: comparison among the 2010, 2011 and 2012 editions of the IEA's World Energy Outlook reports," *Econ. Policy Energy Environ.*, no. 3, pp. 67–89, 2013.
- [4] A. Galkina, V. Kulagin, and I. Mironova, "Renewable Energy Sources: Global and Russian Outlook Up to 2040," *J. Technol. Innov. Renew. Energy*, vol. 007, no. 499, pp. 185–194, 2014.
- [5] P. H. Shaikh, N. B. M. Nor, P. Nallagownden, I. Elamvazuthi, and T. Ibrahim, "A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 34, pp. 409–429, 2014.
- [6] J. de Matos, F. e Silva, and L. Ribeiro, "Power Control in AC Isolated Microgrids with Renewable Energy Sources and Energy Storage Systems," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 6, pp. 1–1, 2014.
- [7] C. Graves, S. D. Ebbesen, M. Mogensen, and K. S. Lackner, "Sustainable hydrocarbon fuels by recycling CO₂ and H₂O with renewable or nuclear energy," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–23, 2011.
- [8] A. Omri, N. Ben Mabrouk, and A. Sassi-Tmar, "Modeling the causal linkages between nuclear energy, renewable energy and economic growth in developed and developing countries," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 42, pp. 1012–1022, 2015.
- [9] P. G. Arul, V. K. Ramachandaramurthy, and R. K. Rajkumar, "Control strategies for a hybrid renewable energy system: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 42, pp. 597–608, 2015.
- [10] N. Hatzigiorgiou, *Microgrids: architectures and control*. John Wiley & Sons, 2014.
- [11] C. Díaz and D. Hernandez, "Smart Grid: Las TICs y la modernización de las redes de energía eléctrica – Estado del Arte," *Rev. Ssistemas y Telemat.*, vol. 9, pp. 53–81, 2011.
- [12] E. Crisostomi, M. Raugi, A. Franco, and G. Giunta, "The smart gas grid: State of the art and perspectives," in *2013 4th IEEE/PES Innovative Smart Grid Technologies Europe, ISGT Europe 2013*, 2013, pp. 1–5.
- [13] E. Herrera, R. Bourdais, and H. Guéguen, "Predictive and interactive controllers for solar absorption cooling systems in buildings," *J. Process Control*, vol. 24, no. 6, pp. 836–845, 2014.
- [14] B. Prasartkaew and S. Kumar, "The Quasi-steady State Performance of a Solar-Biomass Hybrid Cooling System," in *Proceedings of the Second TSME International Conference on Mechanical Engineering*, 2011.
- [15] Y. L. Yin, Z. P. Song, Y. Li, R. Z. Wang, and X. Q. Zhai, "Experimental investigation of a mini-type solar absorption cooling system under different cooling modes," *Energy Build.*, vol. 47, pp. 131–138, 2012.
- [16] H. F. Scherer, M. Pasamontes, J. L. Guzmán, J. D. Álvarez, E. Camponogara, and J. E. Normey-Rico, "Efficient building energy management using distributed model predictive control," *J. Process Control*, vol. 24, no. 6, pp. 740–749, 2014.
- [17] X. Wang, H. Teichgraeber, A. Palazoglu, and N. H. El-Farra, "An economic receding horizon optimization approach for energy management in the chlor-alkali process with hybrid renewable energy generation," *J. Process Control*, vol. 24, no. 8, pp. 1318–1327, 2014.
- [18] A. Parisio, E. Rikos, and L. Glielmo, "A Model Predictive Control Approach to Microgrid Operation Optimization," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 22, no. 99, p. 1, 2014.
- [19] G. Kyriakarakos, D. D. Piromalis, A. I. Dounis, K. G. Arvanitis, and G. Papadakis, "Intelligent demand side energy management system for autonomous polygeneration microgrids," *Appl. Energy*, vol. 103, pp. 39–51, 2013.
- [20] A. Parisio, E. Rikos, G. Tzamalís, and L. Glielmo, "Use of model predictive control for experimental microgrid optimization," *Appl. Energy*, vol. 115, pp. 37–46, 2014.
- [21] J. Patino, A. Marquez, and J. Espinosa, "An economic MPC approach for a micro grid energy management system," in *Transmission & Distribution Conference and Exposition - Latin America (PES T&D-LA), 2014 IEEE PES*, 2014.
- [22] R. Halvgaard, L. Vandenberghe, N. K. Poulsen, H. Madsen, and J. B. Jørgensen, "Distributed Model Predictive Control for Smart Energy Systems," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 3, pp. 1675 – 1682, 2016.

- [23] W. Analytics, "atehnum analytics," 2013. [Online]. Available at: <http://www.weatheranalytics.com/>.
- [24] V. Chandan and A. G. Alleyne, "Decentralized predictive thermal control for buildings," *J. Process Control*, vol. 24, no. 6, pp. 820–835, 2014.
- [25] L. Lao, M. Ellis, and P. D. Christofides, "Economic model predictive control of parabolic PDE systems: Addressing state estimation and computational efficiency," *J. Process Control*, vol. 24, no. 4, pp. 448–462, 2014.
- [26] A. Ferramosca, D. Limon, and E. F. Camacho, "Economic MPC for a changing economic criterion for linear systems," *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 59, no. 10, pp. 2657–2667, 2014.
- [27] M. Heidarinejad, J. Liu, and P. D. Christofides, "Economic Model Predictive Control of Nonlinear Process Systems Using Lyapunov Techniques," *AIChE J.*, vol. 58, no. 3, pp. 855–870, 2012.
- [28] J. Piccardo and A. Prieto, "Vehículo Eléctrico de Producción Nacional," Universidad de Buenos Aires, 2012.
- [29] J. Arango, F. Sierra, and V. Silva, "Análisis exploratorio de investigaciones sobre los motores de combustión interna que trabajan con biogás," *Tecnura*, vol. 18, no. 39, pp. 152–164, 2014.
- [30] C. Clastres, "Smart grids: Another step towards competition, energy security and climate change objectives," *Energy Policy*, vol. 39, no. 9, pp. 5399–5408, 2011.
- [31] J. Gao, Y. Xiao, J. Liu, W. Liang, and C. L. P. Chen, "A survey of communication/networking in Smart Grids," *Futur. Gener. Comput. Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 391–404, 2012.
- [32] H. Lund, A. N. Andersen, P. A. Østergaard, B. V. Mathiesen, and D. Connolly, "From electricity smart grids to smart energy systems - A market operation based approach and understanding," *Energy*, vol. 42, no. 1, pp. 96–102, 2012.
- [33] J. Ma, S. J. Qin, and T. Salsbury, "Application of economic MPC to the energy and demand minimization of a commercial building," *J. Process Control*, vol. 24, no. 8, pp. 1282–1291, 2014.
- [34] R. Amrit, J. B. Rawlings, and D. Angeli, "Economic optimization using model predictive control with a terminal cost," *Annu. Rev. Control*, vol. 35, no. 2, pp. 178–186, 2011.
- [35] S. Lucia, J. A. E. Andersson, H. Brandt, M. Diehl, and S. Engell, "Handling uncertainty in economic nonlinear model predictive control: A comparative case study," *J. Process Control*, vol. 24, no. 8, pp. 1247–1259, 2014.
- [36] C. N. Papadimitriou, E. I. Zountouridou, and N. D. Hatziaargyriou, "Review of hierarchical control in DC microgrids," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 122, pp. 159–167, 2015.
- [37] N. Jain, J. P. Koeln, S. Sundaram, and A. G. Alleyne, "Partially decentralized control of large-scale variable-refrigerant-flow systems in buildings," *J. Process Control*, vol. 24, no. 6, pp. 798–819, 2014.
- [38] Y. Huang, J. Lu, C. Liu, X. Xu, W. Wang, and X. Zhou, "Comparative study of power forecasting methods for PV stations," *2010 Int. Conf. Power Syst. Technol.*, pp. 1–6, 2010.
- [39] Z. Váňa, J. Cigler, J. Šíroký, E. Žáčková, and L. Ferkl, "Model-based energy efficient control applied to an office building," *J. Process Control*, vol. 24, no. 6, pp. 790–797, 2014.
- [40] Y. Zong, L. Mihet-Popa, D. Kullmann, A. Thavlov, O. Gehrke, and H. W. Bindner, "Model predictive controller for active demand side management with PV self-consumption in an intelligent building," *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur.*, pp. 1–8, 2012.
- [41] C. R. Touretzky and M. Baldea, "Nonlinear model reduction and model predictive control of residential buildings with energy recovery," *J. Process Control*, vol. 24, no. 6, pp. 723–739, 2014.
- [42] W. J. Cole, D. P. Morton, and T. F. Edgar, "Optimal electricity rate structures for peak demand reduction using economic model predictive control," *J. Process Control*, vol. 24, no. 8, pp. 1311–1317, 2014.
- [43] D. I. Mendoza-Serrano and D. J. Chmielewski, "Smart grid coordination in building HVAC systems: EMPC and the impact of forecasting," *J. Process Control*, vol. 24, no. 8, pp. 1301–1310, 2014.