

Estado del arte despacho óptimo de energía en plantas virtuales de generación basado en flujos dinámicos de potencia

State of the art optimal energy dispatch in virtual generation plants based on dynamic power flows

Darwin Mesías Canacuan Quishpe ^{1*}, Diego Francisco Carrión Galarza ¹

¹Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica de Salesiana, Ecuador

*Autor de correspondencia: darwin.canacuanq@gmail.com

RESUMEN— En el presente documento se presenta una revisión de investigaciones orientadas a centrales virtuales de generación (VPP) y metodologías para incluir este nuevo concepto dentro de los sistemas eléctricos de potencia. La naturaleza estocástica y aleatoria de las fuentes de energía renovable no convencionales crean problemas en la planificación del despacho de energía en sistemas eléctricos de potencia. Para determinar la operación conjunta de las diferentes fuentes de energía renovable no convencionales y los centrales de generación térmicas e hídricas, se ha desarrollado el concepto de planta virtual de generación, la cual considera en su formación fuentes de energía renovables no convencionales (eólica, solar) y al menos una planta de generación convencional, la misma que es utilizada para entregar la energía mínima que el mercado eléctrico contrate. Por lo tanto, para establecer un escenario que considere el ingreso de una central de generación virtual al sistema eléctrico de potencia y realizar el despacho óptimo de energía, se propone abordar el problema a través de flujos de potencia dinámicos tomando en cuenta las respectivas restricciones técnicas y económicas de equipos y elementos que conforman el sistema eléctrico de potencia.

Palabras clave— *Despacho Económico, Flujos de potencia, Fuentes de energía renovable (RES), Optimización, Planificación, VPP (Central virtual de generación), Sistema de administración de energía (EMS).*

ABSTRACT— This document presents a review of research aimed at virtual generation plants and methodologies to include this new concept in the electrical power systems. The stochastic nature and randomness of nonconventional renewable energy sources creates problems in the planning of energy dispatch. To determine the joint operation of the different renewable energy sources (distributed generation units), the concept of virtual power plants has been developed. Virtual power plants consider in their formation, unconventional renewable energy sources and at least one conventional generation plant, the same that is used to generate the minimum energy that is required in the market. Therefore, to establish optimal criteria for dispatching electric power in a virtual power plant, it is proposed to address the problem through dynamic power flow considering the respective economic and technical restrictions of electrical power systems.

Keywords— *Economic Dispatch, Energy management system (EMS), Power Flow, Renewable energy source (RES), Optimization, Planning, Virtual Power Plant (VPP).*

1. Introducción

El desarrollo e investigación de tecnologías para el uso de energías renovables en el proceso de generación de electricidad ha tenido grandes progresos, destacándose las energías eólica y solar, además de la contribución para tener un desarrollo sostenible de la sociedad y así reducir la contaminación ambiental, debido a que la energía renovable no convencional ha

comenzado a ser utilizada en mediana escala en el sistema eléctrico de potencia [1].

La estocacidad y aleatoriedad de las energías renovables no convencionales influyen en el funcionamiento del sistema eléctrico de potencia en términos de confiabilidad del sistema y la calidad de la energía entregada. La variación de la demanda hora a hora y día a día, hace que la operación del sistema eléctrico sea crítica por lo que la estabilidad del sistema

que integre una planta virtual de generación depende de una buena coordinación y supervisión entre la generación y abastecimiento de la carga. Una de las medidas propuestas para la integración de energías renovables no convencionales en la redes de transmisión sin causar efectos secundarios que afectan el correcto funcionamiento de la red eléctrica es la unión de generación de energía eléctrica renovable no convencional y sistemas de almacenamiento, que pertenezcan a un mismo territorio, para formar una micro red dentro del sistema eléctrico global [1]. La micro red formada sería capaz de operar aislada y conectada al sistema de potencia general de acuerdo con los requerimientos de operación. El desarrollo de este concepto es posible debido al gran avance en tecnologías de comunicación y transferencia de datos, lo que ha permitido un gran avance en los sistemas de control y monitoreo de las redes eléctricas, permitiendo la aparición de las redes eléctricas inteligentes [2]. Dentro del estudio de las redes eléctricas inteligentes y debido a las diferentes necesidades que aparecen en los sistemas de potencia y la utilización de energías limpias para la reducción del impacto ambiental, emerge el concepto de planta de generación virtual (VPP) [3].

Previas investigaciones para resolver problemas relacionados con el despacho óptimo de energía eléctrica, han empleado diferentes métodos de programación y técnicas de optimización, los métodos convencionales incluyen programación lineal, programación no lineal, método del gradiente, programación cuadrática, programación dinámicas, etc. [4], [5]. Estos métodos requieren demasiada memoria computacional y tiempo para su ejecución, por lo cual su aplicación en el mundo de los sistemas de potencia al ser de características no lineales es compleja. Estas debilidades pueden ser superadas utilizando algoritmos metaheurísticos o algoritmos evolutivos (EA) [4], [5]. Las soluciones al problema de optimización son definidas como casos particulares dentro de un conjunto de soluciones. La evolución del conjunto de resultados ayuda a encontrar mejores resultados, se pueden utilizar métodos como algoritmos genéticos (GA), Evolución estratégica (ES), Programación genética (GP), y Programación evolutiva (EP) [6].

El objetivo de este artículo es establecer una base

teórica acerca de las plantas virtuales de generación y su integración a sistemas eléctricos de potencia convencionales, con la realización de un despacho óptimo de la energía eléctrica por medio de flujos dinámicos de potencia.

En la sección dos del artículo se presenta el concepto de una planta virtual de generación. La sección tres aborda el concepto de flujos dinámicos de potencia. En la sección se presenta el problema de la optimización en sistemas eléctricos. En la sección cinco y seis se presentan una base teórica para la solución del despacho óptimo en una planta de generación virtual.

2. Planta virtual de generación (VPP)

Una planta de generación virtual (VPP) es una entidad virtual que involucra varios interesados y comprende tecnologías heterogéneas descentralizadas, formada por la inclusión de fuentes de energía renovables no convencionales, sistemas de almacenamiento, cargas controladas, central de energía térmica o hidroeléctrica.

Este conjunto de elementos deben actuar como una unidad acorde a un sistema de comunicación, sistema de control y sistema de gestión interno, para el despacho óptimo de energía eléctrica en el mercado eléctrico, con el objetivo de minimizar pérdidas y costos de generación [7]. En la figura 1 se representa un esquema general de una planta de generación virtual.

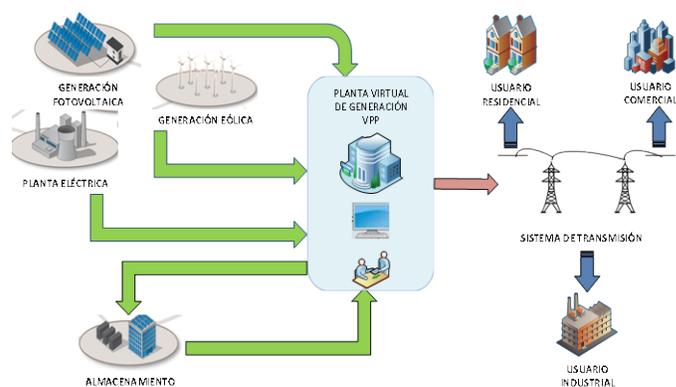


Figura 1. Planta de generación virtual (VPP).

El concepto de central o planta eléctrica virtual es un nuevo término en el sistema eléctrico asociado al desarrollo de la teoría e implementación de las redes eléctricas inteligentes. La base para el desarrollo del concepto de una planta virtual de generación es la unión

de centrales de generación de energía renovable no convencional (eólica y solar), sistemas de almacenamiento de energía y una planta de generación eléctrica con capacidad de inercia, como una entidad individual en el sistema eléctrico de potencia, debido a que una sola central de energía eólica o solar no pueden participar en el mercado de energía eléctrica por sus pequeñas capacidades de generación, por lo cual una VPP debe tener un sistema interno de gestión de la energía eléctrica (EMS), el cual debe actuar acorde a los contratos definidos en el mercado eléctrico, ya que si no entrega la energía contratada, la VPP obtendrá una penalización por parte del ente regulador del mercado eléctrico [8]. En las referencias [9], [10] se modela la entrega de energía en una VPP en dos etapas, en la primera etapa se considera las condiciones del mercado eléctrico, mientras que en la segunda etapa se regula la operación de la VPP.

El software y hardware relacionados con el sistema de potencia en una VPP deben considerar a los productores, consumidores y consumidores flexibles, en su modelo. Un consumidor flexible requiere de la existencia de tecnologías de comunicación y control, de forma que se pueda desplazar el consumo eléctrico hacia las horas del día más convenientes sin que signifique inconvenientes para el usuario.

La tecnología para la comunicación dentro de una planta de generación virtual se pueden considerar tecnologías y estándares como IEEE802.11ac, LTE, IEC 61850, IEC 62746, IEC 61968, IEC 62325, Protocolos de comunicación TCP-IP, etc.[11]. En [12] se presenta un estudio con la norma IEC 61850 basada en un protocolo de presencia de mensajes (XMPP). En [13] se analiza el despacho económico en una VPP bajo una red no ideal de comunicación.

La gestión de una VPP, es el proceso de organizar y gestionar todos los recursos y actividades, para optimizar los recursos energéticos en el sistema de generación, transmisión o distribución, alcanzando objetivos técnicos o económicos por los cuales se ha implementado la VPP [7].

Para que una planta de generación virtual entre a competir en el mercado eléctrico debe considerar los principios de la oferta y la demanda para implementar los costos respectivos, se prioriza el despacho de energía desde una VPP a pesar de sus elevados costos ya que están conformadas de plantas de generación energías

renovables no convencionales [14]. En [15] se analiza una configuración óptima de una VPP considerando riesgos y beneficios para inversionistas. Por otro lado [16] muestra que una configuración óptima económica de una VPP varía dependiendo de la disponibilidad de la energía y los costos marginales. En [17] se analiza la operación de una VPP dentro del mercado eléctrico mayorista, con el objetivo de maximizar ganancias económicas y a la vez satisfacer la demanda de energía. En [18] se analiza la formación tecnológica de una VPP versus los precios al por mayor en diferentes mercados eléctricos.

3. El problema de la optimización

El planteamiento general del problema de optimización en un SEP conduce a un modelo general, el cual puede ser resuelto por algoritmos que utilizan técnicas de optimización. Se describen los elementos básicos a tener en cuenta para la optimización de una función, dentro de sistemas eléctricos de potencia en programas computacionales [19].

Las plantas virtuales de generación en [20] son consideradas como plantas convencionales de generación, con las respectivas restricciones, mediante programación lineal. En [19] se realiza el despacho de energía tomando en cuenta restricciones en intervalos de tiempo. Particularmente en [1] se presenta el despacho óptimo de energía dentro de una planta virtual de generación.

En [6] la VPP debe satisfacer el consume flexible, mediante recursos energéticos distribuidos. Los autores en [21] consideran para el despacho de energía el costo total de generación, costos de tratamiento de contaminación, costos establecidos de arranque y parada de unidades generación, mediante algoritmos de enjambre de partículas. En [22] se presenta un modelo matemático para el despacho de energía de una VPP que se adapta a diferentes mercados, considerando restricciones del sistema.

La referencia [23] presenta un modelo matemático para el despacho económico de energía en una VPP hacia mercado eléctrico. En [24] se considera un algoritmos genético para el despacho de energía. La determinación de un estado óptimo de la red es el propósito general, en estudios de planificación la utilidad buscada es conocer como expandir o mejorar una red por ejemplo minimizar las pérdidas de potencia activa analizando diferentes

escenarios de carga. Otro problema es la minimización de costos del despacho de generación futura. Los valores estadísticos para variaciones en la carga deben ser considerados para nuevos generadores, así como predicciones, hipótesis o incertidumbres.

Otra importante área donde el flujo óptimo, es usado es para determinar la operación en tiempo real de una red, el propósito en esta área es tomar los resultados del flujo óptimo y realizar los cálculos con valores en tiempo real en una red. La optimización en tiempo real de una red es usualmente realizada por el operador, por ejemplo, los valores óptimos calculados son analizados por el operador quien cambia los controles actuales para mejorar el estado de la red tal como se obtiene en la simulación. Los resultados deben ser obtenidos dentro de un tiempo razonable, empezando desde el instante que se obtienen los datos de la red. La velocidad de cálculo es una combinación entre el hardware y el algoritmo de cálculo utilizado.

Generalmente, hay dos tipos de variables relevantes en problemas de optimización [25].

3.1 Variables independientes (control o decisión)

Son magnitudes que pueden ser modificadas para satisfacer la relación entre demanda y generación, considerando los límites operacionales del sistema. Se consideran variables de control en un sistema de potencia las siguientes magnitudes: Potencia activa y reactiva en un nodo PV, tap de transformador, voltaje en barras de generación, etc. [25].

3.2 Variables dependientes (estado)

Conjunto de variables que describen un único estado del sistema eléctrico de potencia. Se consideran variables de estado en un sistema de potencia las siguientes magnitudes: magnitud y ángulo del voltaje en las barras, potencia reactiva de generación, cargas de líneas de transmisión, etc. [25].

Para resolver el problema de optimización se debe calcular el valor óptimo para las variables de control y en base a estos valores se calculan las magnitudes de las variables de estado [25].

3.3 Restricciones

Las restricciones normalmente se clasifican en dos tipos, restricciones de igualdad y restricciones de desigualdad, estas restricciones limitan el punto de solución que satisface todas las condiciones del problema

de optimización. Las restricciones de las variables del sistema eléctrico de potencia están relacionados a características de equipos y elementos eléctricos, así como de la configuración de conexión de los mismo dentro del sistema. Las ecuaciones del flujo de potencia se encuentran dentro de las restricciones de igualdad y las restricciones de desigualdad representan los límites de operación de los equipos y elementos del sistema de potencia. Se consideran restricciones de desigualdad: restricciones de potencia activa y reactiva, voltaje en barras de generación y carga en la red se establece valores máximos y mínimos, restricciones de corriente por razones de estabilidad, posición del tap en transformadores, conexión de banco de capacitores. Las restricciones no deben superar sus límites ya que podrían causar daño al equipo o llevar al sistema eléctrico de potencia a estados inseguros de operación [25].

3.4 Función objetivo

El componente principal de un problema de optimización es la función objetivo, también llamado índice de rendimiento o criterio de elección. Este es el elemento utilizado para decidir los valores adecuados de las variables de control que resuelvan el problema de optimización. Algunos de estos criterios pueden ser por ejemplo de tipo económico (coste total, beneficio), de tipo tecnológico (energía mínima, máxima capacidad de carga, máxima tasa de producción) o de tipo temporal (tiempo de producción mínimo) entre otros.

Existen diferentes funciones objetivo en el análisis de sistemas eléctricos de potencia, que se tratan de optimizar considerando las restricciones y variables del sistema de potencia [25]:

- Costo de generación de potencia activa.
- Costo de generación de potencia reactiva.
- Energía suministrada a la red desde una fuente externa.
- Pérdidas de potencia activa.
- Emisión de gases contaminantes.
- Reducción de carga.
- Posición de tap en transformadores.
- Ajuste de carga.

La formación de cada función objetivo es diferente para alcanzar los resultados deseados, para el presente documento se considera el análisis de la minimización de costos de generación activa.

3.5 Despacho óptimo dinámico de energía

La planificación y fijación de la generación en las unidades disponibles de un sistema eléctrico de potencia se lo debe hacer de manera económica, segura y confiable [23].

El problema del despacho económico tiene dos formulaciones diferentes en la literatura, el problema de despacho económico dinámico en el cual se considera las restricciones de velocidad del generador y despacho económico estático [26]. La aplicación de tal criterio asume como variables la potencia activa generada en las barras asociadas a generadores, que se determinan de tal manera que los costos de generación sean mínimos.

Los generadores mostrarán diferentes características en el despacho económico dinámico bajo diferentes modos de operación y estrategias de programación [26]. El modelo que sea considerado para realizar el despacho óptimo de energía debe considerar las respectivas restricciones de operación del sistema de potencia y las restricciones de operación de elementos y equipos eléctricos, restricciones de generación de centrales eólicas y fotovoltaicas considerando pronósticos de clima. En [27] se analiza el despacho óptimo considerando la respuesta a la demanda y el mercado de carbón.

3.6 Flujo óptimo dinámico de potencia

El flujo de potencia es uno de los problemas básicos en el cual la carga o generación son dadas o fijadas, en la actualidad este problema puede ser resuelto con herramientas computacionales para cualquier tamaño de sistema eléctrico. El objetivo es determinar todos los voltajes nodales a partir de los cuales se encuentran las restantes magnitudes del sistema como: flujo de potencia a través de las líneas de transmisión, corrientes y las pérdidas asociadas.

El planteamiento y solución del problema es determinístico debido a que las variables independientes son fijas o consideradas exactas en el problema y de esta forma la solución factible es única para un tipo de escenario dado. Cuando se tiene incertidumbre sobre el valor de las variables independientes, la solución no se la puede tomar como exacta ya que en esta se refleja la incertidumbre de las variables independientes; entonces para tener una idea aproximada de la solución se recurre a resolver varios flujos determinísticos para diferentes valores de las variables dependientes, este proceso constituye un método de solución a estos flujos de potencia que por su naturaleza son probabilísticos [40].

El flujo óptimo de potencia considera un escenario de operación constante en un determinado instante de tiempo y en general no es posible modelar restricciones relacionadas con el tiempo por ejemplo tasas de aumento, contrato de generación, almacenamiento de combustible, capacidad de embalse, etc. Con restricciones relacionadas al tiempo y la energía el flujo óptimo de potencia se transforma en un problema dinámico (DOPF) flujo dinámico óptimo de potencia. El problema de optimización clásico en sistemas de potencia es complejo, agregar restricciones relacionadas al tiempo y nuevas variables de decisión crean un problema de mayor complejidad que abarca tanto el tiempo como las características de la red. Por lo tanto el método de solución es muy crucial para el éxito del procedimiento de solución [28].

En [28] se analiza el problema para minimizar costos de generación en un intervalo de tiempo, utilizando un método de doble punto interior no lineal. En [29], [30] se presenta un flujo dinámico óptimo de potencia de múltiples etapas considerando el ingreso de generadores eólicos.

En la referencias [31], [32] se introduce el criterio de flujo estocástico dinámico óptimo de potencia (DSOPF), para la operación de sistema eléctrico de potencia con la integración de energías renovables no convencionales.

4. Métodos de solución

La complejidad numérica de problemas de optimización se relacionan a la solución estática o dinámica del mismo. En este sentido las soluciones basadas en el método de Newton Raphson son útiles en problemas estáticos en los cuales ninguna variable es dependiente del tiempo. Para la solución de problemas en el dominio del tiempo se utilizan algoritmos basados en programación dinámica de búsqueda recursiva [25].

La separación de métodos de cálculo en dos clases se rige principalmente por existir diferentes métodos para resolver un flujo de potencia que proporcionan soluciones intermedias, además la solución óptima esta generalmente cerca de una solución existente del flujo de carga, por lo tanto existe una clase de algoritmo que se basa en un flujo de carga resuelto y el segundo método parte de una formulación rigurosa del problema a ser optimizado sin tener una solución base empleando las condiciones y técnicas de optimización. Estos dos tipos

de soluciones tienen ventajas y desventajas dependiendo de la función objetivo, tamaño del problema y aplicación.

Problemas de optimización en sistemas eléctricos de potencia se pueden resolver mediante técnicas de optimización y en general pueden clasificarse en métodos matemáticos y métodos heurísticos [25]. Algunos de los métodos matemáticos como Programación Lineal (LP), la función objetivo y las restricciones son lineales. La Programación no Lineal tiene la función objetivo y restricciones como funciones no lineales de las variables, Programación dinámica la cual consiste en tomar varias decisiones en distintas etapas de la solución, Programación de enteros, en la cual las variables de control tienen valores enteros [4], [5]. La mayoría de estas soluciones pueden garantizar una solución óptima a nivel local del problema, aunque no necesariamente alcance una solución óptima global. Los métodos matemáticos no son capaces de resolver problemas altamente complejos [25].

Los algoritmos heurísticos eliminan los principales inconvenientes de los enfoques matemáticos y pueden resolver problemas muy complejos en un tiempo computacional razonable. La mayoría de estos algoritmos se basan en comportamientos biológicos, básicamente empiezan desde un punto o un conjunto de puntos (población) y a través de una búsqueda direccionada se converge hacia una mejor solución [25].

En las referencias [4], [5] se describen varios métodos matemáticos para resolver problemas convencionales de optimización en los sistemas de potencia. En [33] se presenta una solución basada en programación cuadrática de enteros mixtos, para el despacho óptimo de energía diario en una VPP.

Los métodos convencionales para resolver problemas de optimización no presentaban soluciones efectivas, por lo cual se propone la solución con enfoques metaheurísticos. Algunos de los cuales incluye la aplicación de PSO y evolución diferencial, enfoques híbridos con redes neuronales artificiales (ANN) y técnicas de algoritmos evolutivos (EA). Con la aparición de las redes eléctricas inteligentes se tienen nuevos enfoques en la función objetivo y consideraciones adicionales en las restricciones del problema [25].

En [34] se establece un modelo de despacho económico de una VPP resuelto por un algoritmo aleatorio distribuido sin gradiente. En [35] establece un modelo de despacho estocástico en una VPP, para abordar los

riesgos asociados con la incertidumbre de los precios en el mercado eléctrico y la disponibilidad de potencia fotovoltaica. En la referencia [36] se combina una optimización a intervalos y optimización determinista para resolver el problema del despacho económico en una VPP. En [37] se integran procesos de optimización y pronóstico en el modelo para resolver el problema, considerando restricciones operativas y del mercado eléctrico. En [38] se realiza un algoritmo de optimización estocástico para el despacho de energía generado.

Tabla 1. Tendencias en investigaciones, plantas virtuales de generación.

DATOS		TEMÁTICA				SOLUCIÓN PROPUESTA		
AÑO DE PUBLICACIÓN	AUTOR	OPTIMIZACIÓN	ENERGÍAS RENOVABLES	DESPACHO	PLANTA VIRTUAL DE GENERACIÓN	ALGORITMOS LINEALES	ALGORITMOS NO LINEALES	HEURÍSTICA
2013	Narkhede [1]	*	*		*		*	
2013	Pandžic [2]			*	*		*	
2014	Petersen [6]	*			*			*
2018	Peikherfeh [8]	*	*				*	
2019	Gao [9]	*		*	*			*
2019	Ju [10]	*		*				*
2017	Cao [13]	*	*		*			
2019	Yusta [17]	*			*		*	
2007	Kuzle [20]	*			*	*		
2012	Hropko [21]			*	*			*
2014	Narkhede [24]	*		*	*			*
2001	Xie [28]	*					*	
2005	Chen [29]	*	*					*
2013	Liang [31]	*	*					*
2012	Liang [32]		*	*				*
2019	Ko [33]			*	*		*	
2017	Xie [34]	*			*		*	
2019	Sun [35]			*	*			*
2018	Liu [36]	*			*			*
2019	Hany [37]	*	*				*	
2020	Tan [38]	*		*	*			*

5. Conclusiones

El concepto de planta virtual de generación (VPP), tiene la capacidad de adaptarse a la naturaleza estocástica de las fuentes de energía renovable no convencionales, la dinámica de la demanda y la oferta de energía, lo cual representa una característica positiva para integrar una VPP dentro de los mercados eléctricos de forma competitiva y eficiente.

En problemas de optimización altamente complejos, los métodos no convencionales de solución presentan soluciones factibles en intervalos de tiempo pequeños en relación a la cantidad de datos analizada, por lo cual para la solución de este tipo de problemas estocásticos se han desarrollado métodos heurísticos que obtienen una solución óptima global entre mayor sea el conjunto solución analizado, en la actualidad analizar este tipo de problemas es posible gracias al incremento de la capacidad de las computadoras y desarrollo de software especializado.

Resolver un problema de optimización con corrección implica identificar claramente el tipo de función objetivo que representa, las restricciones correspondientes, las variables de decisión a tomar en cuenta y seleccionar un método de solución que se adapte a la realidad del problema, para alcanzar el objetivo final de reducir o maximizar la variable deseada.

Se ha realizado una base teórica basado en despacho óptimo de energía considerando plantas virtuales de generación, para realizar un trabajo posterior donde se debe considerar el modelamiento de la planta de generación virtual (VPP), la cual interactúe dentro de un sistema eléctrico de potencia y de esta manera realizar el despacho óptimo de energía considerando las respectivas restricciones asociadas a los elementos y equipos eléctricos, además de las restricciones de operación.

REFERENCIAS

- [1] M. S. Narkhede, S. Chatterji, and S. Ghosh, "Optimal dispatch of renewable energy sources in smart grid pertinent to virtual power plant," *Proc. 2013 Int. Conf. Green Comput. Commun. Conserv. Energy, ICGCE 2013*, pp. 525–529, 2013.
- [2] H. Pandžić, I. Kuzle, and T. Capuder, "Virtual power plant mid-term dispatch optimization," *Appl. Energy*, vol. 101, pp. 134–141, 2013.
- [3] V. Power, P. Emerge, A. New, and B. Model, "Virtual Power Plants Emerge As New Business Model," *Electr. J.*, vol. 31, no. 10, pp. 60–61, 2018.
- [4] J. A. Momoh, M. E. El-Hawary, and R. Adapa, "A review of selected optimal power literature to 1993. Part planning in large scale power systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 2, pp. 668–676, 1999.
- [5] J. A. Monoh, M. E. El-Hawary, and R. Adapa, "A review of selected optimal power flow literature to 1993 part ii: newton, linear programming and Interior Point Methods," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 1, pp. 105–111, 1999.
- [6] M. K. Petersen, L. H. Hansen, J. Bendtsen, K. Edlund, and J. Stoustrup, "Heuristic optimization for the discrete virtual power plant dispatch problem," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 6, pp. 2910–2918, 2014.
- [7] K. O. Adu-Kankam and L. M. Camarinha-Matos, "Towards collaborative Virtual Power Plants: Trends and convergence," *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 16, pp. 217–230, 2018.
- [8] M. Peikherfeh, H. Seifi, and M. K. Sheikh-El-Eslami, "Optimal dispatch of distributed energy resources included in a virtual power plant for participating in a day-ahead market," *3rd Int. Conf. Clean Electr. Power Renew. Energy Resour. Impact, ICCEP 2011*, pp. 204–210, 2011.
- [9] R. Gao *et al.*, "A Two-Stage Dispatch Mechanism for Virtual Power Plant Utilizing the CVaR Theory in the Electricity Spot Market," *Energies*, vol. 12, no. 17, p. 3402, 2019.
- [10] L. Ju, P. Li, Q. Tan, Z. Tan, and G. De, "A CVaR-robust risk aversion scheduling model for virtual power plants connected with wind-photovoltaic-hydropower-energy storage systems, conventional gas turbines and incentive-based demand responses," *Energies*, vol. 11, no. 11, 2018.
- [11] L. Hernandez *et al.*, "A multi-agent system architecture for smart grid management and forecasting of energy demand in virtual power plants," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 1, pp. 106–113, 2013.
- [12] F. Nadeem *et al.*, "Virtual power plant management in smart grids with XMPP based IEC 61850 communication," *Energies*, vol. 12, no. 12, 2019.
- [13] C. Cao *et al.*, "Distributed Economic Dispatch of Virtual Power Plant under a Non-Ideal Communication Network," *Energies*, vol. 10, no. 2, 2017.
- [14] L. Toma, B. Otomega, and I. Tristiu, "Market strategy of distributed generation through the virtual power plant concept," *Proc. Int. Conf. Optim. Electr. Electron. Equipment, OPTIM*, pp. 81–88, 2012.
- [15] J. Wang, W. Yang, H. Cheng, L. Huang, and Y. Gao, "The optimal configuration scheme of the virtual power plant considering benefits and risks of investors," *Energies*, vol. 10, no. 7, 2017.
- [16] D. I. Candra, K. Hartmann, and M. Nelles, "Economic optimal implementation of virtual power plants in the German power market," *Energies*, vol. 11, no. 9, 2018.
- [17] J. M. Yusta, N. Naval, and S. Raul, "A virtual power plant optimal dispatch model with large and small-scale distributed renewable generation," *Renew. Energy*, no. xxxx, 2019.
- [18] B. Moreno and G. Díaz, "The impact of virtual power plant

- technology composition on wholesale electricity prices: A comparative study of some European Union electricity markets,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 99, no. September 2018, pp. 100–108, 2019.
- [19] M. Petersen, J. Bendtsen, and J. Stoustrup, “Optimal dispatch strategy for the Agile Virtual Power Plant,” *Proc. Am. Control Conf.*, pp. 288–294, 2012.
- [20] I. Kuzle, M. Zdrilić, and H. Pandžić, “Virtual power plant dispatch optimization using linear programming,” *2011 10th Int. Conf. Environ. Electr. Eng. IEEEIC.EU 2011 - Conf. Proc.*, pp. 1–4, 2011.
- [21] D. Hropko, J. Ivanecký, and J. Turček, “Optimal dispatch of renewable energy sources included in virtual power plant using accelerated particle swarm optimization,” *Proc. 9th Int. Conf. ELEKTRO 2012*, pp. 196–200, 2012.
- [22] J. Naughton, M. Cantoni, and P. Mancarella, “A Modelling Framework for a Virtual Power Plant with Multiple Energy Vectors Providing Multiple Services,” *2019 IEEE Milan PowerTech*, pp. 1–6, 2019.
- [23] Y. Yang, B. Wei, and Z. Qin, “Sequence-based differential evolution for solving economic dispatch considering virtual power plant,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 13, no. 15, pp. 3202–3215, 2019.
- [24] M. S. Narkhede, S. Chatterji, and S. Ghosh, “Multi objective optimal dispatch in a virtual power plant using genetic algorithm,” *Proc. - 2013 Int. Conf. Renew. Energy Sustain. Energy, ICRESE 2013*, pp. 238–242, 2014.
- [25] H. Abdi, S. D. Beigvand, and M. La Scala, “A review of optimal power flow studies applied to smart grids and microgrids,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 71, no. December 2016, pp. 742–766, 2017.
- [26] F. D. Santillán-Lemus, H. Minor-Popocatl, O. Aguilar-Mejía, and R. Tapia-Olvera, “Optimal economic dispatch in microgrids with renewable energy sources,” *Energies*, vol. 12, no. 1, 2019.
- [27] Z. Liu *et al.*, “Optimal dispatch of a virtual power plant considering demand response and carbon trading,” *Energies*, vol. 11, no. 6, p. 121693718, 2018.
- [28] K. Xie and Y. H. Song, “Dynamic optimal power flow by interior point methods,” *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 148, no. 1, pp. 76–83, 2001.
- [29] H. Chen, J. Chen, and X. Duan, “Multi-stage dynamic optimal power flow in wind power integrated system,” *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, vol. 2005, pp. 1–5, 2005.
- [30] G. Chen, J. Chen, and X. Duan, “Power flow and dynamic optimal power flow including wind farms,” *1st Int. Conf. Sustain. Power Gener. Supply, SUPERGEN '09*, 2009.
- [31] J. Liang, D. D. Molina, G. K. Venayagamoorthy, and R. G. Harley, “Two-level dynamic stochastic optimal power flow control for power systems with intermittent renewable generation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 2670–2678, 2013.
- [32] J. Liang, G. K. Venayagamoorthy, and R. G. Harley, “Wide-area measurement based dynamic stochastic optimal power flow control for smart grids with high variability and uncertainty,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 59–69, 2012.
- [33] R. Ko, D. Kang, and S. K. Joo, “Mixed integer quadratic programming based scheduling methods for day-ahead bidding and intra-day operation of virtual power plant,” *Energies*, vol. 12, no. 8, 2019.
- [34] J. Xie and C. Cao, “Non-convex economic dispatch of a virtual power plant via a distributed randomized gradient-free algorithm,” *Energies*, vol. 10, no. 7, 2017.
- [35] G. Sun *et al.*, “Stochastic adaptive robust dispatch for virtual power plants using the binding scenario identification approach,” *Energies*, vol. 12, no. 10, 2019.
- [36] Y. Liu, M. Li, H. Lian, X. Tang, C. Liu, and C. Jiang, “Optimal dispatch of virtual power plant using interval and deterministic combined optimization,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 102, no. May, pp. 235–244, 2018.
- [37] A. Hany Elgamel, G. Kocher-Oberlehner, V. Robu, and M. Andoni, “Optimization of a multiple-scale renewable energy-based virtual power plant in the UK,” *Appl. Energy*, vol. 256, no. April 2019, p. 113973, 2019.
- [38] Z. Tan *et al.*, “Dispatching optimization model of gas-electricity virtual power plant considering uncertainty based on robust stochastic optimization theory,” *J. Clean. Prod.*, vol. 247, 2020.
- [39] S. Yu, F. Fang, Y. Liu, and J. Liu, “Uncertainties of virtual power plant: Problems and countermeasures,” *Appl. Energy*, vol. 239, no. December 2018, pp. 454–470, 2019.
- [40] D.M. Canacúan. Flujo óptimo de Potencia Linealizado para Minimizar Costos Operativos de Generación en Sistemas Eléctricos de Potencia. Quito, Ecuador, 2017, pp. 15-31.