

Estrategias de optimización y gestión activa de red en entornos multi-microrredes

Moliner-Heredia, R.^{a,*}, Vivas, C.^a, R. Rubio, F.^a

^aDpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática, Escuela Técnica Superior de Ingeniería (Universidad de Sevilla)
Camino de los Descubrimientos, s/n, 41092, Sevilla.

To cite this article: Moliner-Heredia, R., Vivas, C. Strategies for optimization and active network management in multi-microgrid environments. Actas del I Simposio CEA de los GT: Ingeniería de Control - Modelado, Simulación y Optimización - Educación en Automática. Sevilla, España.

Resumen

En este artículo se plantea la formulación de dos métodos de coordinación de gestión óptima de energía en sistemas de múltiples microrredes (MMG). Ambos métodos de gestión están basados en control predictivo basado en modelo (MPC). Primero, se propone una formulación centralizada del problema de optimización asociado. Con el objeto de hacer el problema más escalable, posteriormente se propone un algoritmo para resolver el problema de optimización de manera distribuida mediante el método de los multiplicadores de direcciones alternadas (ADMM). Los resultados obtenidos se validan mediante simulación.

Palabras clave: Microrredes, Entornos multi-microrredes, Gestión energética, Control Predictivo basado en Modelo, Control distribuido, Método ADMM

Optimization Strategies and Active Network Management in Multi-Microgrid Environments

Abstract

This article presents the formulation of two optimal energy management coordination methods for multi-microgrid (MMG) systems. Both management methods are based on model predictive control (MPC). First, a centralized formulation of the associated optimization problem is proposed. To enhance scalability, an algorithm is then introduced to solve the optimization problem in a distributed manner using the alternating direction method of multipliers (ADMM). The obtained results are validated through simulation.

Keywords: Microgrids, Multi-Microgrid systems, Energy Management, Model Predictive Control, Distributed Control, ADMM Method

1. Introducción

Para abordar los problemas globales de contaminación ambiental y escasez de energía, las fuentes de energía renovable distribuidas, como la eólica y la solar, han recibido una atención significativa en los últimos años. Una microrred (MG, por sus siglas en inglés) es una red eléctrica de baja potencia que incorpora generación distribuida, en muchos casos renovables, así como cargas controlables o no. Está diseñada para abastecer pequeñas localidades, unidades residenciales o puntos de consumo que carecen o necesitan complementar su acceso a una red eléctrica convencional. Las microrredes, gracias a su capacidad de integración flexible y eficiente, se han destacado como

una solución efectiva para aprovechar los recursos energéticos distribuidos, además de convertirse en una parte clave de las redes de distribución activas (ADN, por sus siglas en inglés).

Asimismo, las microrredes de diferentes regiones pueden interconectarse para formar sistemas de multi-microrredes (MMG). En este esquema, cada microrred dentro del sistema MMG puede comprar o vender energía a la ADN en modo conectado a la red. Esta interconexión permite mejorar significativamente la estabilidad operativa y la eficiencia económica de las microrredes. Sin embargo, lograr esto requiere optimizar el funcionamiento de cada microrred individual y gestionar el sistema MMG de forma integrada dentro de la ADN.

*Autor para correspondencia: rmoliner@us.es
Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0)

2. Gestión de la energía en microrredes

Una microrred consiste generalmente en un bus de potencia común, AC o DC, a través del que intercambian energía sistemas de producción y consumo de energía eléctrica. Las MGs pueden operar en modo aislado, o bien estar conectadas a una red de distribución eléctrica general.

Debido a la inherente incertidumbre en la generación de potencia en las fuentes de generación y en las cargas demandadas, para realizar una correcta gestión de la energía en una microrred es necesario aplicar métodos de control que permitan tratar dichas perturbaciones en el sistema. Un método comúnmente utilizado es el control predictivo de horizonte deslizante basado en modelo (MPC, por sus siglas en inglés). La manera más directa de modelizar una microrred es aproximar los sistemas de almacenamiento como integradores que dependen de la potencia intercambiada, generalmente asumiendo eficiencias asimétricas para carga y descarga, junto con un balance instantáneo de flujos de potencia en la microrred. El modelo debe incluir además restricciones asociadas los límites físicos y de operación de la planta (potencias máximas/mínimas tolerables por los elementos de la instalación, capacidades de los sistemas de almacenamiento, etc). Por otro lado, el método MPC requiere de una función objetivo $J(x)$ que es optimizada para un horizonte de predicción determinado. La función objetivo codifica objetivos de interés para la correcta y eficiente operación de la microrred, frecuentemente relacionados con términos económicos, eficiencia energética, o políticas reducción de la degradación del equipamiento.

3. Coordinación de la gestión de la energía en sistemas de múltiples microrredes

En los últimos años, la implementación de microrredes se ha popularizado notablemente, debido tanto a su flexibilidad y facilidad de integración en el sistema eléctrico, como con el objetivo de reducir las emisiones generadas por el consumo de electricidad (Chen et al. (2023)). Esta popularidad ha fomentado la aparición de multimicrorredes (MMG, por sus siglas en inglés), microrredes interconectadas entre sí que intercambian energía entre ellas y con la red general mediante sistemas de distribución activa (ADS en inglés).

En este trabajo se ensaya un procedimiento de optimización para la coordinación de múltiples microrredes en una ADN. Para formular el método es necesario incorporar, además de los modelos individuales de cada microrred, la descripción de la topología y restricciones de la red de interconexión del MMG. La topología de un típico sistema de distribución con multimicrorredes (MMG) se ilustra en la figura 1b. Cada microrred integra algunas o todas las unidades de generación distribuida (DGU), como sistemas fotovoltaicos (PV) o turbinas eólicas (WT), y sistemas de almacenamiento de energía (ESS) en forma de sistemas de almacenamiento de energía en baterías (BESS) o almacenamiento de energía a largo plazo basado en hidrógeno (H_2) (Electrolizador + Celdas de Combustible + Tanque de H_2). En escenarios donde la generación de las MMG excede o es insuficiente para la demanda local, la MMG interactúa con la red de distribución activa (ADN) para equilibrar el flujo de potencia. De manera similar, la ADN gestiona su demanda de carga

a través de generadores distribuidos controlables (DG) y coordina el intercambio de energía con la red de transmisión.

Si consideremos que la ADN está compuesta por N_b buses con N_l líneas de potencia interconectadas, N_m microrredes y consideramos un horizonte de predicción N_p , podemos modelar de forma compacta el problema de optimización centralizada del MMG como

$$\min_{\mathbf{x}, \mathbf{v}} \sum_{k=1}^{N_p} [c^T \mathbf{x}_k], \quad (1a)$$

$$\text{s.t.} \quad H_1 \mathbf{x}_k + V \mathbf{v}_k + h_1 \leq 0, \quad (1b)$$

$$H_2 \mathbf{x}_k + h_2 = 0, \quad (1c)$$

$$G_1 \mathbf{x}_k + g_1 \leq 0, \quad (1d)$$

$$G_2 \mathbf{x}_k + g_2 = 0, \quad (1e)$$

El vector de variables de decisión en este problema es $\mathbf{x}_k = [P_k, Q_k, P_k^{inj}, Q_k^{inj}, V_k^{sq}, I_k^{sq}, P_k^{ex}, Q_k^{ex}, P_k^{bat}, P_k^{curt}, Soc_{k+1}]^T$ donde P_k, Q_k representa los vectores de potencia activa/reactiva en ramas de la ADN, P_k^{inj}, Q_k^{inj} es la potencia activa/reactiva inyectada por las microrredes, V_k^{sq}, I_k^{sq} son las tensiones e intensidades nodales al cuadrado, P_k^{bat} la potencia intercambiada con el BESS, y Soc_{k+1} es el estado de carga del BESS.

Se considera además la posibilidad de curtailment en el término P_k^{curt} , tanto en las unidades de generación PV como en las cargas, es decir, en caso de que el sistema no pueda dar aprovechamiento, bien local o remoto, de la energía producida, parte de ella puede quedar sin uso (ej: se regular el inesor de los paneles fotovoltaicos para que no inyecten a la red la totalidad de la energía solar potencialmente disponible). Del mismo modo, si la carga solicitada por la microrred en algún momento, no puede satisfacerse, también es posible reducirla hasta límite admisibles (ej: desconectar bombas de calor o consumo prescindible transitoriamente).

El objetivo de la ADN es minimizar el costo total $c^T \mathbf{x}_k = \sum_{k=1}^{N_p} [\beta_k^p P_k^{ex} + \sum_{l=1}^{N_l} \beta_l^{loss} I_{l,k}^{sq} r_l + \sum_{j=1}^{N_b} \beta_j^c P_{j,k}^{curt} + \sum_{j=1}^{N_m} \beta_j^b]$, que incluye el costo de la compra de potencia activa desde la TN, que equivale a $\beta_k^p P_k^{ex}$, donde β_k^p es la tarifa de compra de energía, la penalización por las pérdidas resistivas en las líneas de la ADN, definida como $\sum_{l=1}^{N_l} \beta_l^{loss} I_{l,k}^{sq} r_l$, el costo operativo de los BESS y el costo debido al curtailment, definido como $\sum_{j=1}^{N_b} \beta_j^c P_{j,k}^{curt}$, suponiendo un valor razonable para el factor de penalización β_k^c .

Codificamos además específicamente las siguientes restricciones y ecuaciones en el modelo: los límites de flujo de línea, la magnitud del voltaje en (1b); las ecuaciones linealizadas de flujo de potencia en (1c); las restricciones de desigualdad relativas a los inversores de microrred y los sistemas de almacenamiento de energía en batería (BESSs) en (1d); y las ecuaciones de balance de energía y potencia de (1e). Cabe destacar que las ecuaciones (1b) y (1c) abarcan restricciones relacionadas con toda la red ADN, mientras que las ecuaciones (1d) y (1e) representan restricciones locales específicas de las microrredes. El problema descrito constituye un caso de un programa lineal de enteros mixtos (MILP).

4. Planteamiento distribuido

Debido a la heterogeneidad de los agentes individuales en un ADS con MMGs, usualmente el operador del sistema de dis-

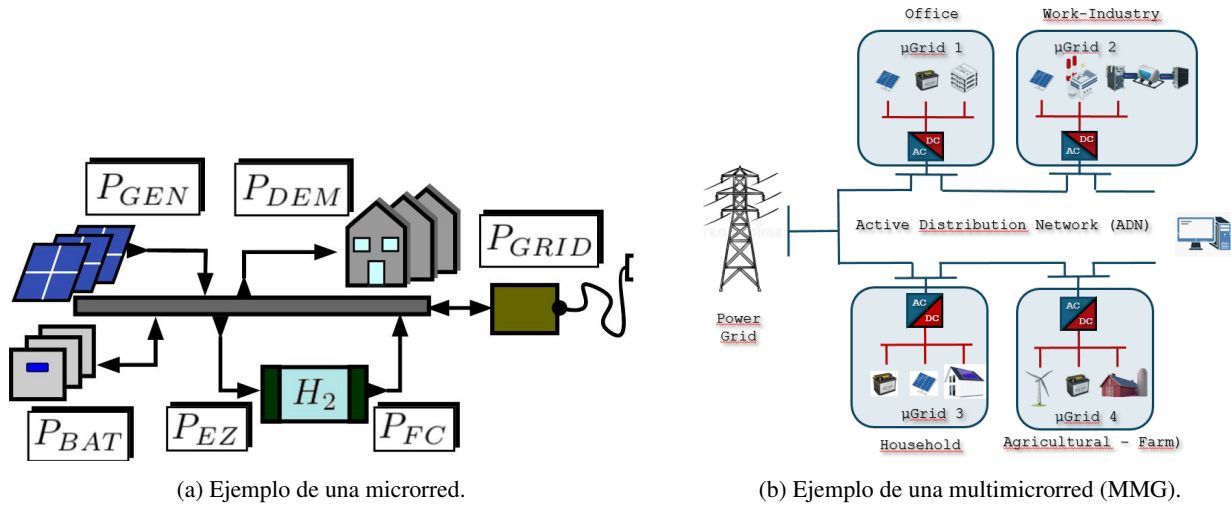


Figura 1: Esquemas de microrred aislada y en configuración MMG

tribución (DSO) y los operadores de las microrredes (MGO) son entidades diferentes. Este hecho plantea desafíos técnicos para una optimización centralizada Zhai et al. (2022). Desde una perspectiva práctica, un marco descentralizado resulta más favorable, ya que no siempre es eficiente centralizar toda la información local para su procesamiento debido a la gran dimensión del problema, el volumen significativo de datos locales y las preocupaciones relacionadas con la privacidad. En los últimos años, se han desarrollado investigaciones sobre la gestión energética descentralizada o distribuida para sistemas de distribución activa con MMG. Algunos de estos métodos incluyen: métodos de cascada de objetivos analíticos (ATC) (Chen et al. (2023)), algoritmo de descomposición de Benders (BD) (Lin et al. (2017)) o algoritmos de descomposición por condiciones de optimalidad (OCD) (Wang et al. (2020)).

Entre estos métodos, el método de los multiplicadores de direcciones alternadas (ADMM) (Chen et al. (2021)) destaca por sus propiedades de convergencia. Inspirados en los resultados de Mallick et al. (2024), presentamos en esta sección una formulación del problema del apartado anterior empleando dicha metodología. Se divide el problema en un conjunto de $N_m + 1$ agentes: un agente responsable de cada microrred y un agente que corresponde al operador de la red de distribución activa (ADN). De este modo, puede dividirse el vector de decisión $\mathbf{x}_k$ del problema de optimización centralizado de la siguiente manera: Definimos $\mathbf{z}_{0,k} := [P_k, Q_k, V_k^{sq}, I_k^{sq}, P_k^{ex}, Q_k^{ex}]$ como el vector de decisión del ADN (agente 0). De manera similar, el vector de decisión para la i -ésima microrred (agente i) se define como $\mathbf{z}_{i,k} := [P_{i,k}^{bat}, P_{i,k}^{curt}, Soc_{i,k+1}]$, donde $i \in [N_m]$. Además, parece natural tratar las restricciones (1d) y (1e) como restricciones internas de las microrredes, y las restricciones (1b) y (1c) como restricciones internas del ADN. Sin embargo, las variables $\{P_{j,k}^{inj}, Q_{j,k}^{inj}\}_{j \in \mathcal{M}}$, que corresponden al intercambio de potencia activa y reactiva entre la j -ésima microrred y el ADN, son importantes tanto para las microrredes como para el ADN para satisfacer sus restricciones internas. Por lo tanto, definimos $\mathbf{y}_k := \{P_{j,k}^{inj}, Q_{j,k}^{inj}\}_{j \in \mathcal{V}}$ como variables compartidas, de modo que cada agente mantiene una copia de estas variables, y el problema distribuido se formula de manera que los agentes busquen alcanzar un consenso sobre estas variables, además de minimi-

zar su costo local.

Esta separación permite transformar el problema centralizado en un problema de consenso que converge cuando los agentes alcanzan un acuerdo sobre el valor de las variables compartidas. A grandes rasgos, el ADN es responsable de minimizar el costo de consumo de potencia activa en los nodos, mientras que cada microrred es responsable de su propio costo de consumo de potencia activa. Tanto el ADN como las microrredes evalúan el costo de consumo de potencia activa al precio establecido por el operador del sistema de transmisión (TSO).

La figura (2) muestra la estructura de resolución del problema distribuido, donde el nodo del ADN (agente 0) únicamente debe intercambiar con los nodos de las microrredes los valores de la potencia inyectada por cada microrred en la ADN, $\mathbf{y}_k := \{P_{j,k}^{inj}, Q_{j,k}^{inj}\}_{j \in \mathcal{V}}$.

5. Resultados

Se presentan brevemente los resultados de simulación aplicados sobre la red ADN descrita en la figura. Por simplicidad se ha considerado unos límites de flujo en las potencias de las ramas de la ADN uniformes e iguales a $15kW$. Se observa en la figura (3a) como los flujos en las diferentes ramas no exceden los límites establecidos más allá de pequeñas y breves excusiones fuera de estos límites motivados por la incertidumbre de predicción en el modelo. El uso del Curtailment se minimiza también como consecuencia de la gestión planificada activa de horizonte deslizante. Los balances de potencia en las diferentes micro redes reflejan el aprovechamiento que el sistema hace del almacenamiento de energía para modular los flujos de potencia sin exceder los límites operativos.

Agradecimientos

Trabajo financiado gracias a los proyectos PID2020-115561RB-C32, TED2021-131604B-I00 y ENGREEN.

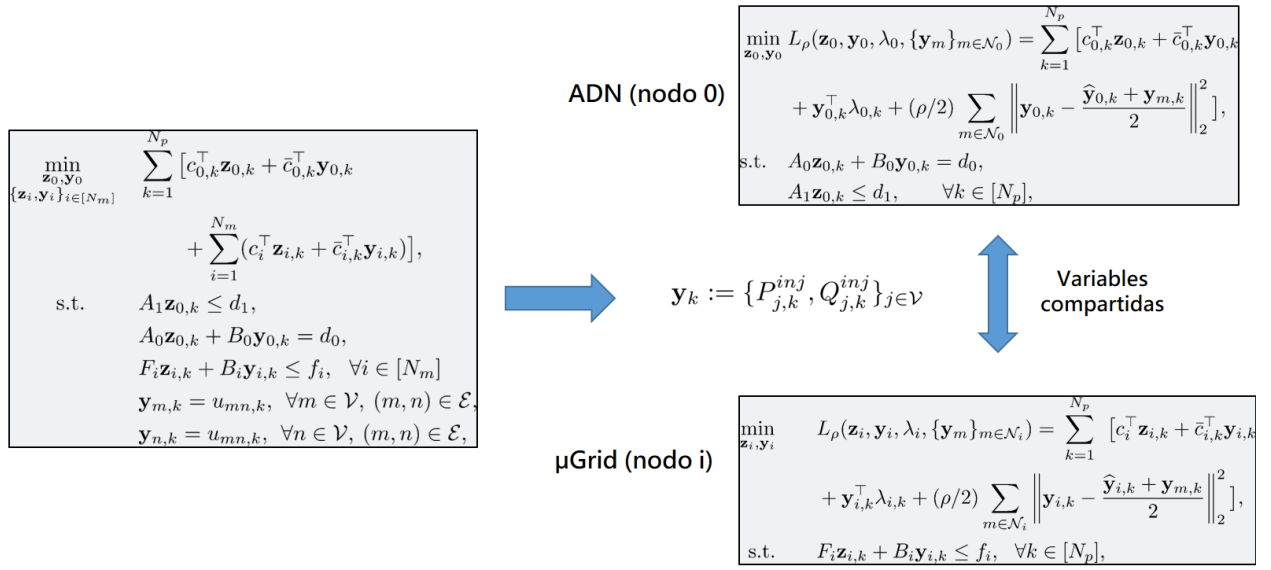
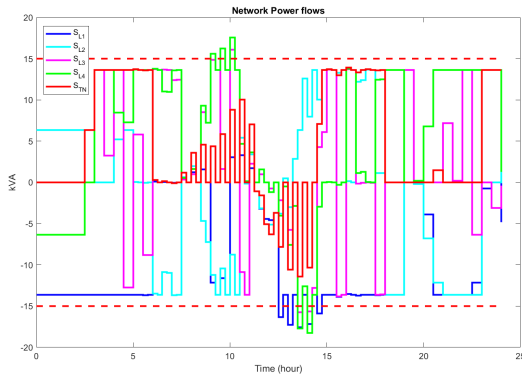
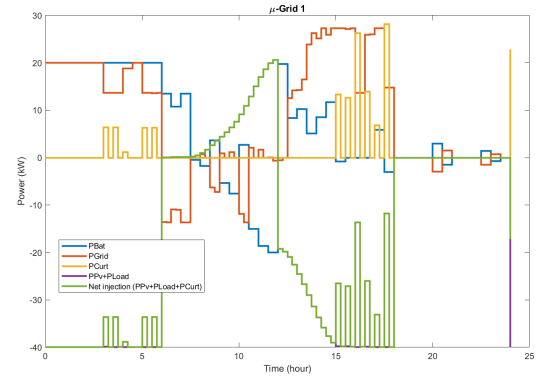


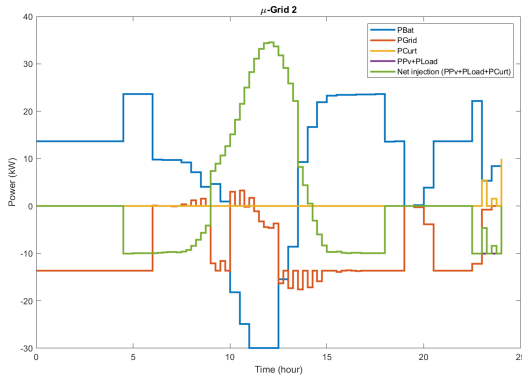
Figura 2: Ecuaciones del algoritmo ADMM distribuido.



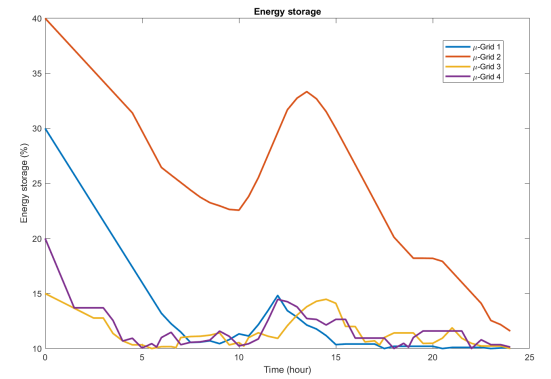
(a) Flujos de potencia por las líneas



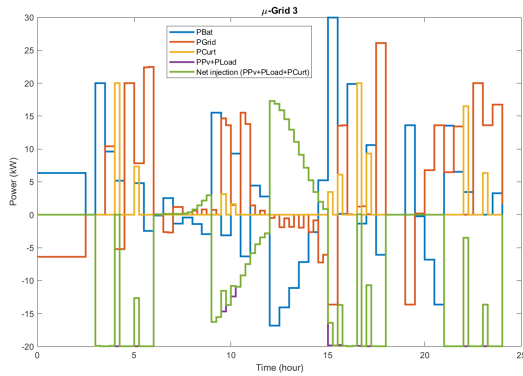
(b) Balance de potencia μ-grid 1



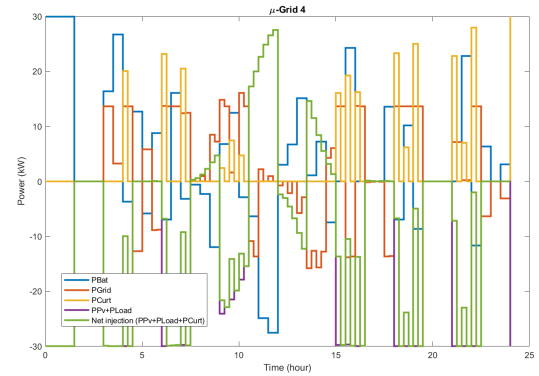
(c) Balance de potencia μ-grid 2



(d) Almacenamiento de energía



(e) Balance de potencia μ -grid 3



(f) Balance de potencia μ -grid 4

Figura 3: Resultados de simulación para un sistema de cuatro microrredes interconectadas.

Referencias

- Chen, X., Zhai, J., Jiang, Y., Ni, C., Wang, S., Nimmegeers, P., 2023. Decentralized coordination between active distribution network and multi-microgrids through a fast decentralized adjustable robust operation framework. *Sustainable Energy, Grids and Networks* 34, 101068.
- Chen, Z., Guo, C., Dong, S., Ding, Y., Mao, H., 2021. Distributed robust dynamic economic dispatch of integrated transmission and distribution systems. *IEEE Transactions on Industry Applications* 57 (5), 4500–4512.
- Lin, C., Wu, W., Zhang, B., Sun, Y., 2017. Decentralized solution for combined heat and power dispatch through benders decomposition. *IEEE Transactions on sustainable energy* 8 (4), 1361–1372.

- Mallick, A., Mishra, A., Hota, A. R., Bajpai, P., 2024. Distributed coordination of multi-microgrids in active distribution networks for provisioning ancillary services. *IEEE Systems Journal*.
- Wang, J., Zhong, H., Yang, Z., Lai, X., Xia, Q., Kang, C., 2020. Incentive mechanism for clearing energy and reserve markets in multi-area power systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 11 (4), 2470–2482. DOI: 10.1109/TSTE.2019.2961780
- Zhai, J., Dai, X., Jiang, Y., Xue, Y., Hagenmeyer, V., Jones, C. N., Zhang, X.-P., 2022. Distributed optimal power flow for vsc-mtcd meshed ac/dc grids using aladin. *IEEE Transactions on Power Systems* 37 (6), 4861–4873. DOI: 10.1109/TPWRS.2022.3155866