

CONTROL DISTRIBUIDO PARA EL CONSENSO DEL ESTADO DE CARGA EN UNA MICRORRED AC AISLADA

Maria Camila Merchan-Riveros
Universidad de Sevilla, Sevilla, mmriveros@us.es

Carolina Albea
Universidad de Sevilla, Sevilla, albea@us.es

Resumen

En este trabajo se presenta el diseño de un algoritmo robusto de control distribuido para los lazos de control primario y secundario en microrredes AC en modo aislado. El lazo de control secundario es diseñado a partir de la teoría de sistemas multi-agentes con el objetivo de conducir a un consenso los estados de descarga de los sistemas de almacenamiento de las baterías. Igualmente, un lazo de control primario es diseñado en función de un “droop control” modificado y un doble lazo de control convencional para establecer las referencias de los inversores. Además, esta estrategia distribuida asegura robustez con respecto a cualquier evento “plug-and-play” que se presente. Consecuentemente, los controladores propuestos mejoran aspectos cruciales de las microrredes: alta eficiencia, fiabilidad, robustez, y escalabilidad. El resultado de control fue validado por medio de resultados de simulación para diversos escenarios de una microrred.

Palabras clave: Teoría de sistemas multi-agente, microrredes AC, droop control.

1 INTRODUCCIÓN

Las microrredes compuestas por fuentes de energía renovable son de especial importancia ante el inminente aumento de la demanda energética global, considerándose como una solución alternativa frente a las fuentes de energía convencionales basadas en combustibles fósiles, cuyo principal foco de contaminación es la polución generada por las emisiones de CO₂. Las microrredes están compuestas por generadores distribuidos o DG¹ (*Distributed Generator*), cargas distribuidas y sistemas de almacenamiento de energía o ESSs (*Energy Storage Systems*), estos últimos suelen ser baterías o BESS (*Battery Energy Storage System*).

Una microrred puede ser diseñada para operar

¹DG es una fuente de generación de potencia eléctrica conectada directamente a la red de distribución o al consumidor, incluyendo la fuente y los convertidores electrónicos [10].

en dos modos de funcionamiento: el primero, en modo “*grid-following*”, la cual funciona en paralelo con la red a través de un control de corriente [5], y el segundo, en modo “*grid-forming*”, operando como un sistema de potencia aislado a través de un control de tensión [21]. Estos sistemas de microrred suelen ser los bloques principales de las “*smart grids*” y pueden interactuar con sistemas de mayor capacidad formando lo que se conoce como una macrorred [12].

Las principales características de las microrredes son: alta eficiencia, debido a la reducción de las líneas de transmisión de energía frente a la red convencional; fiabilidad, gracias a la incorporación de DGs, y, flexibilidad ante la incorporación de distintos elementos. Por lo tanto sus leyes de control deben ser diseñadas garantizando o mejorando estas propiedades.

Al conectar los diferentes componentes de una microrred (DGs, ESSs y cargas) es necesario utilizar convertidores electrónicos de potencia apareciendo diferentes lazos de control en varios niveles de gestión de energía: nivel primario, secundario y terciario [19]. Uno de los objetivos de las estructuras de control primario y secundario es reducir las corrientes circulantes entre los componentes de una microrred. Según la literatura una primera propuesta para este tipo de estructuras, planteada en principio para microrredes DC, es la del denominado control de caída o “*droop control*” [4], [16], que gestiona la conexión de las ESSs en el punto común de acople (o más conocido como “*Point of Common Coupling*”, PCC) con un valor de tensión o corriente, según la red sea aislada o conectada, respectivamente.

Análogamente para microrredes AC, el “*droop control*” consiste en establecer una misma referencia de tensión o corriente tanto de amplitud como de frecuencia, pero siendo estas dependientes tanto de la potencia activa como de la reactiva de salida de cada DG, respectivamente [9], [22].

Estas estructuras de control son de gran interés en la literatura debido a su escalabilidad. Sin embargo, también presentan importantes inconvenientes [8], como son: desviaciones en amplitud

y frecuencia, incertidumbres en las impedancias de línea, y presencia de cargas con contenido armónico. Para mitigar estos inconvenientes se han propuesto algunas soluciones de control que básicamente se enfocan en mejorar el “*droop control*”. Por ejemplo, en [15] se propone un “*droop control*” basado en consenso cuyo objetivo es reducir el efecto de las impedancias de línea no ideales utilizando una reducida red de comunicación.

Para el caso de las microrredes AC en modo isla, el uso del “*droop control*” basado en consenso es primordialmente lograr un balance entre los estados de carga conocidos en inglés como “*State Of Charge*” (SOC) de las ESSs que se encuentran en modo fuente o descarga. En [20] se propone un algoritmo centralizado para el balance de los SOC, el cual consiste en comparar el SOC de cada unidad con el valor promedio de todas y utilizar un controlador PI para modificar el coeficiente del “*droop control*” de la frecuencia. De manera similar en [6], los coeficientes del “*droop control*” son modificados en función del SOC y de la frecuencia de la red, para conseguir un reparto equitativo de potencia activa entre los DGs. En [23] se presenta un algoritmo distribuido para el balance de los SOC, el cual usa un controlador no lineal en modo deslizante para regular localmente el SOC de cada BESS al mismo valor, el cual es el promedio global estimado por medio de un observador. En [14] se propone un “*droop control*” mejorado basado en la teoría de planificación de frecuencia conocida en inglés como “*frequency scheduling*” y de sistemas multi-agente conocida en inglés como “*Multi-Agent System*” (MAS) (usada previamente en microrredes DC [1], [17]) para lograr un consenso entre los SOC. Siguiendo la idea: “pensar globalmente, actuar localmente”. La teoría de MAS usa un esquema de comunicación entre sus agentes modelado por medio de la teoría de grafos [18]. De manera similar es presentado en [13] el uso de la teoría de MAS para el mismo objetivo. Este trabajo fue extendido en [7] incorporando un algoritmo de control distribuido reduciendo las comunicaciones. En general, los controles propuestos en estos trabajos no presentan garantías de estabilidad o únicamente para sistemas de pequeña señal.

El objetivo de este trabajo es gestionar las tasas de descarga de las unidades BESS para microrredes AC en modo aislado. La idea es diseñar un lazo de control secundario que genere las referencias de los SOC de cada unidad BESS a partir de un algoritmo de consenso que tome en cuenta las referencias de los SOC vecinos. Inspirado por [1], se diseña este control distribuido basado en

la teoría de MAS para garantizar robustez con respecto a cualquier evento “*plug and play*”, así como también ante fallo de conexión, y variaciones paramétricas. Los valores de salida de las referencias de los SOC (o salidas del lazo secundario de control) generan las referencias para el control de los convertidores DC-AC (o lazo primario de control) a través del “*droop control*” [19].

La propuesta de este trabajo difiere de las existentes en la literatura en presentar unos controladores que por su estructura se puede dar garantías de estabilidad de sistemas de gran señal, como se hizo en [1].

Este artículo se organiza de la siguiente manera: la sección 2 describe el modelo de una microrred AC en modo aislado y define el problema principal de este trabajo. En la sección 3, se propone un esquema de control para la microrred global. Seguidamente, en la sección 4 se presentan escenarios de simulación validando el principal resultado. Finalmente, el trabajo termina con la sección de conclusiones.

Notación: A lo largo del artículo \mathbb{R} y \mathbb{Z} denotan el conjunto de los números reales y enteros, respectivamente. \mathbb{R}^n el espacio euclidiano de dimensión n . $\text{diag}\{a_1, a_2, \dots, a_N\}$ es la matriz diagonal cuyos elementos son a_1, a_2, \dots, a_N .

2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Este artículo considera una microrred AC compuesta por N_S DGs, N_L cargas y N_B BESSs que almacenan el excedente de energía producida por los DGs, el cual será revertido a la red cuando la potencia consumida sea mayor que la producida. Todos estos elementos están conectados al PCC (ver Figura 1) utilizando convertidores de potencia. En el caso particular de las BESSs, estos convertidores son bidireccionales.

Respecto al flujo de la potencia activa, se cumple lo siguiente:

$$P_n = \sum_{l=1}^{N_L} P_{D,l} - \sum_{s=1}^{N_S} P_{S,s} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{N_B} (\alpha_i - \alpha_{l,i}) P_i = P_n, \quad (2)$$

donde P_n es la potencia neta, $P_{S,s}$ es la potencia generada por los DGs, $P_{D,l}$ es la potencia demandada por las cargas l , P_i es la potencia de las BESS $_i$, y $\alpha_i, \alpha_{l,i} \in \{0, 1\}$. Una BESS $_i$, puede trabajar en modo carga o descarga, es decir, en modo fuente de potencia o descarga ($\alpha_i = 1$ y $\alpha_{l,i} = 0$) o como carga de potencia ($\alpha_i = 0$ y $\alpha_{l,i} = 1$) demandando energía al bus AC. Un evento de “*plug-and-play*” ocurre si se presenta un fallo o desconexión

de cualquier DG, BESS o carga. Cabe señalar que para cualquier unidad $BESS_i$, un fallo se detectaría si $\alpha_i = \alpha_{l,i}$.

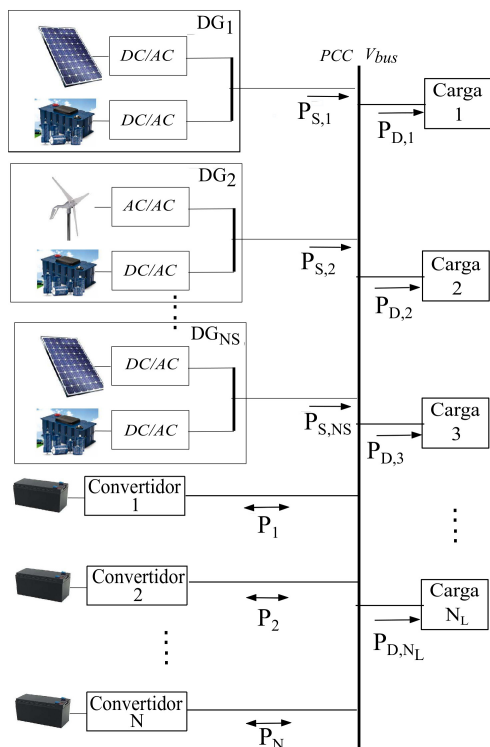


Figura 1: Microrred.

Es bien conocido que las dinámicas de los SOC_i de las $BESS_i$ [2], están definidas en función de la potencia activa, de la siguiente manera:

$$\frac{dSOC_i}{dt} = -\delta_{k,i}(\alpha_i - \alpha_{l,i})P_i \quad (3)$$

donde $\delta_{k,i} = \frac{\eta_i}{C_{max,i}}$, siendo $C_{max,i}$ la máxima capacidad de la BESS en unidades de energía y η_i el coeficiente de eficiencia de almacenamiento, el cual vale η_i en modo carga y $1/\eta_i$ en modo descarga. El objetivo es diseñar controladores para las $N \leq N_B$ BESSs en modo descarga para una microrred AC aislada.

Problema: Diseñar controladores primarios y secundarios que aseguren que todas las referencias de los SOC_s ($SOC_{r,i}(x_i)$) de las unidades BESS en modo fuente converjan a un valor de consenso, y se garantice robustez respecto a cualquier evento “plug-and-play” o cambio paramétrico. Siendo x_i el vector de la salida de tensión y variable de corriente de los inversores de cada unidad BESS.

3 ESQUEMA DE CONTROL

En la Figura 2 se representa el control propuesto. El control primario se toma por defecto como un

lazo doble de regulación de controladores convencionales que decide la u_i que asegure que la tensión y la corriente de un inversor x_i tiendan a sus referencias, $x_{r,i}$, las cuales están en función de la referencia de frecuencia, w_r , y de amplitud de tensión, V_r , dadas por la salida del “droop control”. La existencia de un doble lazo de control garantiza una regulación de tensión de salida [3]. Por otra parte, en el control secundario, se desea lograr un consenso entre las referencias de los SOC_s de las N unidades BESS en modo descarga con el objetivo de reducir las corrientes circulantes y garantizar robustez respecto a cualquier variación paramétrica del sistema, y evento “plug-and-play” de cualquier DG, BESS o carga. Este lazo secundario genera las referencias, $SOC_{r,i}$, las cuales serán entradas al “droop control”, generando las referencias $\omega_{r,i}$ y $V_{r,i}$ mencionadas anteriormente, cuyos valores garantizan la sincronización de todos los SOC_s a un consenso de sus referencias.

3.1 MODELO DEL INVERSOR

Cada inversor i conectado al bus AC, es representado en la Figura 3. El modelo dinámico de este inversor i puede escribirse de la siguiente forma:

$$\dot{x}_i = A_i x_i + B_i u_{\sigma_i} \quad (4)$$

donde $x_i = [x_{i,1}, x_{i,2}]^T \in \mathbb{R}^n$ es el vector de estado compuesto por las variables de tensión y corriente. $x_{i,2} \in \mathbb{R}$ representa la tensión de salida y $x_{i,1} \in \mathbb{R}^{n-1}$ las otras variables de estado. A_i y B_i son matrices de dimensiones definidas, $u_{\sigma_i} \in \mathbb{R}$ es la señal de control cuya variable σ_i conmuta en $\mathbb{K} \in \mathbb{Z}$, y es calculada por un control clásico PI cuya salida esta modulada por un PWM.

3.2 DROOP CONTROL

El “droop control”, tal como se define en [13], es usado para ajustar la frecuencia y la amplitud de la tensión de referencia de los inversores. Teniendo en cuenta que es la herramienta a través de la cual se modifica el punto de funcionamiento deseado para conseguir un consenso entre distintos componentes, en este trabajo vamos a definir nuestro “droop control”, de la siguiente manera:

$$\omega_{r,i} = \omega_n - K_{SOC,i}(SOC_i - SOC_{r,i}) - K_{\omega,i}(P_i - \frac{1}{\delta_{k,i}} \frac{dSOC_{r,i}}{dt}) \quad (5)$$

$$V_{r,i} = V_n - K_{V,i}Q_i, \quad (6)$$

donde ω_n y V_n , son la frecuencia y amplitud nominal, respectivamente, $K_{SOC,i}, K_{\omega,i}, K_{V,i} > 0$ son parámetros de ajuste del “droop control”. Señalamos que la ecuación (5) modifica ω_n en

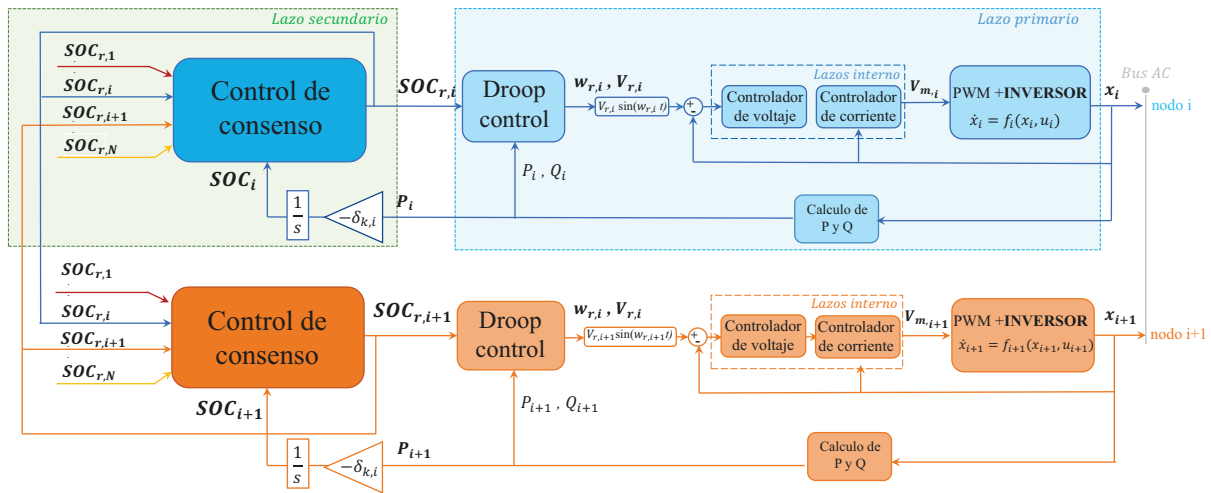


Figura 2: Lazos de control en la microrred.

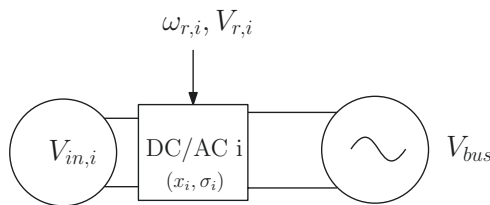


Figura 3: Inversor i in la microrred

$A(\alpha) = [a_{ij}(\alpha)]$, donde

$$a_{ij}(\alpha) : \begin{cases} \alpha_i \alpha_j & \text{if } i \neq j \\ 0 & \text{if } i = j \end{cases} \quad \forall i, j \in \mathcal{E} \quad (7)$$

y la matriz diagonal $\Delta(\alpha) = [\delta_{ih}(\alpha)]$, con

$$\delta_{ij}(\alpha) : \begin{cases} 0 & \text{if } i \neq j \\ \sum_{p \in \mathcal{N}, p \neq i} \alpha_{ip}(\alpha) & \text{if } i = j \end{cases} \quad \forall i, j \in \mathcal{E}. \quad (8)$$

función del error entre el SOC estimado y su referencia $SOC_{r,i}$, y el error entre la potencia activa de salida del inversor y su valor de referencia calculado a partir del $SOC_{r,i}$. La ecuación (6) describe la convencional recta Q-V del “droop control”.

3.3 CONTROL EXTERNO DE CONSENSO

En esta sección vamos a proponer un control distribuido externo para alcanzar un consenso entre todos los $SOC_{r,i}$. El valor de consenso depende de todos estos $SOC_{r,i}$ a pesar de que compartan la información localmente.

3.3.1 Red de comunicación

La red de comunicación multiagente de la microrred se modela como un grafo indirecto e interconectado $\mathcal{G}(\mathcal{L}, \mathcal{E})$, el cual se define como un conjunto de N agentes o nodos y un conjunto de \mathcal{E} conexiones, donde cada conexión $\{i, j\} \in \mathcal{E}$ representa un lazo de comunicación bidireccional entre dos agentes distintos [18]. Este grafo se representa por medio de la siguiente matriz laplaciana: $L(\alpha) = \Delta(\alpha) - A(\alpha)$, siendo $\alpha := \text{diag}\{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N\}$, $A(\alpha)$ es la matrix adjunta

3.3.2 Dinámica de consenso

La dinámica de $SOC_{r,i}$ esta definida como:

$$\frac{dSOC_{r,i}}{dt} = -\alpha_i K_c \left(\sum_{j=1}^N \alpha_j (SOC_{r,i} - SOC_{r,j}) \right) - \alpha_i K_e (SOC_{r,i} - SOC_i(x_i)), \quad (9)$$

donde el primer término de la ecuación representa los errores entre el $SOC_{r,i}$ y sus vecinos, y el segundo término asegura que haya un correcto seguimiento de los SOC's respecto a sus referencias en cada nodo. Los parámetros K_c y K_e , permiten ajustar la velocidad del control secundario. Una elección convencional es hacer K_c suficientemente grande para garantizar que haya separación en escala de tiempo entre el control primario y el secundario. Esta elección junto al segundo termino de (9) permite aplicar el principio de perturbaciones singulares [11] como herramienta para garantizar propiedades de estabilidad para sistemas de grandes señales (estas propiedades se presentarán en trabajo futuro). Considerando lo anterior se selecciona $K_c \gg K_e$, de modo que las dinámicas de las referencias de los SOC's serán más rápidas que las dinámicas de los inversores y de los SOC's. Por tanto, x_i y SOC_i serán parámetros constantes o que cambian muy lentamente para el lazo de control externo de consenso de los SOC's.

4 RESULTADOS DE SIMULACIÓN

El esquema de control propuesto anteriormente se implementa en una microrred AC trifásica compuesta por 3 BESSs (o nodos) en modo fuente. El conjunto de BESS_{*i*} e inversor se modela con una fuente de tensión controlada seguida de un filtro LC como se muestra en la Figura 4. Siendo así, la dinámica de cada inversor según (4) sería la siguiente:

$$\dot{x}_i = A_i x_i + B_i V_m \quad (10)$$

donde $x_{i,1} = i_L$ sería la corriente que atraviesa la bobina y $x_{i,2} = v_C$ la tensión en el condensador. La señal de entrada al inversor es la tensión modulada V_m representada por la fuente controlada, siendo ésta la salida generada por el lazo interno del lazo primario de control como se ve en la Figura 2.

Los 3 nodos de la microrred están conectados con la siguiente matriz Laplaciana,

$$L = \begin{bmatrix} \alpha_1 \alpha_2 + \alpha_1 \alpha_3 & -\alpha_1 \alpha_2 & -\alpha_1 \alpha_3 \\ -\alpha_2 \alpha_1 & \alpha_2 \alpha_1 + \alpha_2 \alpha_3 & -\alpha_2 \alpha_3 \\ -\alpha_3 \alpha_1 & -\alpha_3 \alpha_2 & \alpha_3 \alpha_1 + \alpha_3 \alpha_2 \end{bmatrix}$$

Los parámetros de simulación para los lazos de control y para los inversores están dados en la Tabla 1 y 2, respectivamente. Para todos los escenarios la tensión en el bus es $V_{bus} = 320 \sin(2\pi 50t)V$.

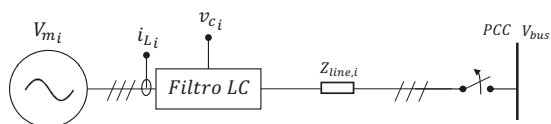


Figura 4: Nodo *i* para el esquema de simulación

Tabla 1: Parámetros del inversor.

Parámetro	Símbolo	Valor
Inductancia del filtro	$L_i, i = \{1, 2, 3\}$	1.8mH
Resistencia del inductor	$R_{LS,i}, i = \{1, 2, 3\}$	0.02Ω
Capacitancia del filtro	$C_i, i = \{1, 2, 3\}$	9μF
Impedancia de línea	$Z_{line,i}, i = \{1, 2, 3\}$	R=0.01Ω, L=1.8mH
Frecuencia nominal	$\omega_n/2\pi, i = \{1, 2, 3\}$	50Hz
Voltaje nominal	$V_n, i = \{1, 2, 3\}$	320V

A continuación se presentan 2 escenarios de simulación para diferentes condiciones y eventos en

Tabla 2: Parámetros de los lazos de control.

Parámetro	Símbolo
K_c	1000
K_e	1
$\delta_{k,i}, i = \{1, 2, 3\}$	0.00004Wh ⁻¹
$K_{SOC,i}, i = \{1, 2, 3\}$	1
$K_{\omega,i}, i = \{1, 2, 3\}$	5·10 ⁻⁶
$K_{V,i}, i = \{1, 2, 3\}$	4·10 ⁻⁶

la microrred que validan el funcionamiento del esquema de control propuesto.

4.1 ESCENARIO 1

En este escenario se muestra el desempeño de la microrred frente a cambios de carga. Las condiciones iniciales de los SOC_{*i*} y de sus referencias son: $SOC(0) = SOC_r(0) = [1.0, 0.9, 0.8]^T$. Se inicia con una carga de $P_l = 6000W$. En el momento $T_1 = 3s$ otra carga adicional de 6000W se conecta al bus AC, que luego en el instante $T_2 = 6s$ se desconectará. La Figura 5 muestra los SOC_{*i*} y sus referencias durante todo este escenario. En esta figura se nota como las referencias de los SOC_{*i*} (SOC_{*r,i*}) convergen más rápido que los SOC_{*i*} a un consenso antes y después del cambio de carga. Nota que los SOC_{*i*} convergen a un consenso porque siguen a sus respectivas referencias.

Asimismo la Figura 6 muestra la evolución de $w_{r,i}$ y P_i de cada unidad BESS. Las potencias activas y las referencias de frecuencia evolucionan conforme a estas variaciones en el bus AC.

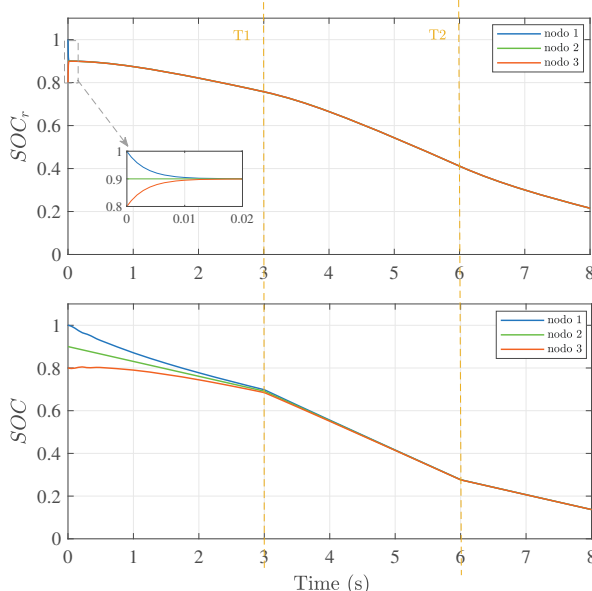


Figura 5: Evoluciones de las referencias de los SOC_{*i*}, SOC_{*r,i*} y los SOC_{*i*}, para el escenario 1.

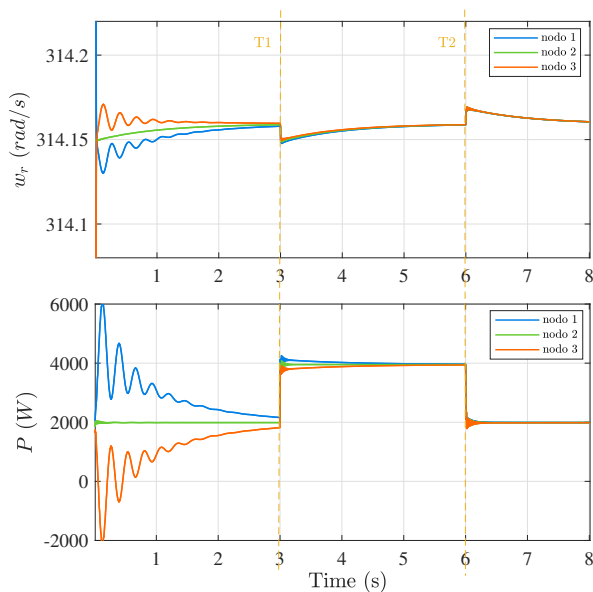


Figura 6: Evoluciones de las frecuencias de referencia $w_{r,i}$ y las potencias activas P_i , para $i = \{1, 2, 3\}$, para el escenario 1.

4.2 ESCENARIO 2

En este escenario se muestra el funcionamiento del algoritmo de consenso cuando ocurre un evento “plug and play” en una BESS, es decir un α_i conmuta de valor. Se considera una carga $P_l = 6000W$ y las mismas condiciones iniciales que en el escenario 1 para SOC_i y $SOC_{r,i}$. En el momento $T_1 = 3s$ el nodo 1 se desconecta, y luego se reconecta en $T_2 = 5s$. La Figura 7 muestra como las referencias de los SOC’s convergen a un valor de consenso antes y después del evento “plug and play”, evidenciando una dinámica mas rápida que la convergencia de los SOC’s a sus referencias. Además, la Figura 8 muestra la evolución de $w_{r,i}$ y P_i de cada unidad BESS en modo fuente durante este escenario.

4.3 CONCLUSIONES

Este trabajo presenta un nuevo paradigma basado en la teoría de MAS para el diseño de los lazos de control primario y secundario en una microrred AC en modo aislado. Por una parte, el lazo primario se encarga de controlar los convertidores DC-AC a través de un “droop control” modificado. Por otra parte un lazo secundario garantiza un consenso de los estados de descarga para todas las unidades BESS conectadas al bus AC. Este control diseñado basado en la teoría MAS conduce a un control distribuido que garantiza robustez respecto a cualquier evento “plug and play” y variación de los parámetros

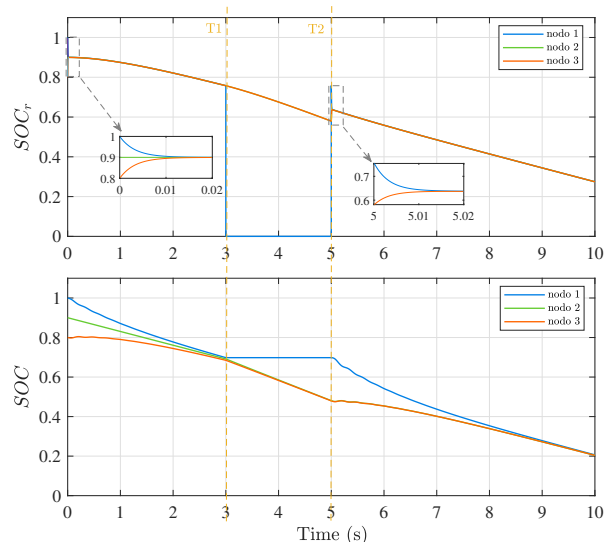


Figura 7: Evoluciones de las referencias de los SOC’s, $SOC_{r,i}$ y los SOC_i , para $i = \{1, 2, 3\}$, para el escenario 2.

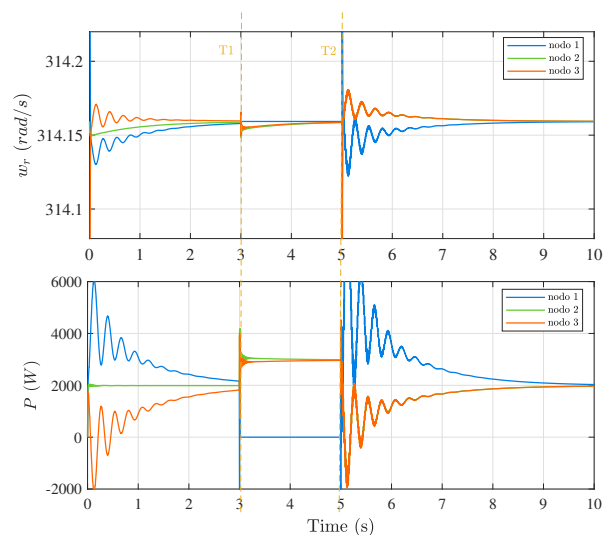


Figura 8: Evoluciones de las frecuencias de referencia $w_{r,i}$ y las potencias activas P_i , para $i = \{1, 2, 3\}$, para el escenario 2.

de la microrred. A través de este esquema de control se podrá dar garantías de estabilidad para sistemas de gran señal. Esto será tratado en un trabajo futuro. Dos escenarios con distintas conexiones de DGs, BESSs y cargas validan el funcionamiento de los controladores propuestos. Aunque estos resultados son presentados con 3 nodos, el algoritmo es diseñado para funcionar con n número de nodos conectados únicamente con sus vecinos inmediatos, lo que muestra el potencial distribuido y multi-agente del diseño. Como trabajo futuro sería interesante aplicar

el algoritmo de consenso propuesto para otras variables presentes en los diferentes los niveles gestión de energía en una microrred, como por ejemplo la potencia reactiva de salida de cada nodo.

Agradecimientos

Este trabajo es financiado por la subvención PID2019-105890RJ-I00 y PID2019-109071RB-I00 del MCIN/ AEI /10.13039/501100011033/ y por la Agencia Nacional de Investigación (ANR)-Francia bajo la subvención “HISPALIS” ANR-18-CE40-0022-01.

English summary

DISTRIBUTED CONTROL FOR DISCHARGING RATE CONSENSUS IN AN ISLANDED AC MICROGRID.

Abstract

In this work a robust distributed algorithm is proposed for primary and secondary control loops of AC-bus microgrids in islanded mode. A secondary control loop is designed from multi-agent system theory leading to a consensus among the discharging rates of the battery energy storage systems. Likewise, a primary control loop is designed based on a modified droop controller and on a conventional double control loop to establish the references for DC-AC electronic power converters. Moreover, this distributed strategy ensures robustness with respect to any plug-and-play event. Consequently, the proposed controllers improve the crucial aspects of the microgrids: high efficiency, reliability, robustness, and scalability. Simulations results are presented to validated the main results for different scenarios in the microgrid.

Keywords: Multi-Agent Systems theory, AC-microgrids, droop control.

Referencias

- [1] C. Albea. Hybrid dynamical control based on consensus algorithms for current sharing in

dc-bus microgrids. *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, 39:100972, 2021.

- [2] C. Albea, C. Bordons, and M.A. Ridao. Robust hybrid control for demand side management in islanded microgrids. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 12(6):4865–4875, 2021.
- [3] C. Albea and G. Garcia. Robust hybrid control law for a boost inverter. *Control Engineering Practice*, 101:104492, 2020.
- [4] S. Anand, B.G. Fernandes, and J.M. Guerrero. Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low-voltage DC microgrids. *IEEE Trans. on Power Electronics*, 28(4):1900–1913, 2013.
- [5] K. De Brabandere, B. Bolsens, J. Van den Keybus, A. Woyte, J. Driesen, and R. Belmans. A voltage and frequency droop control method for parallel inverters. *IEEE Trans. on power electronics*, 22(4):1107–1115, 2007.
- [6] S.I. Gkavanoudis, K.O. Oureilidis, and C.S. Demoulias. An adaptive droop control method for balancing the soc of distributed batteries in ac microgrids. In *2016 IEEE 17th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, pages 1–6, 2016.
- [7] Y. Guan, L. Meng, C. Li, J.C. Vasquez, and J.M. Guerrero. A dynamic consensus algorithm to adjust virtual impedance loops for discharge rate balancing of AC microgrid energy storage units. *IEEE Trans. on Smart Grid*, 9(5):4847–4860, 2017.
- [8] H. Han, X. Hou, J. Yang, J. Wu, M. Su, and J.M. Guerrero. Review of power sharing control strategies for islanding operation of AC microgrids. *IEEE Trans. on Smart Grid*, 7(1):200–215, 2016.
- [9] H. Han, Y. Liu, Y. Sun, M. Su, and J.M. Guerrero. An improved droop control strategy for reactive power sharing in islanded microgrid. *IEEE Trans. on Power Electronics*, 30(6):3133–3141, 2014.
- [10] B.G. Kamdem and E. Shittu. Optimal commitment strategies for distributed generation systems under regulation and multiple uncertainties. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80:1597–1612, 2017.
- [11] P. Kokotović, H.K. Khalil, and J. O’reilly. *Singular perturbation methods in control: analysis and design*. SIAM, 1999.

- [12] R.H. Lasseter and P. Paigi. Microgrid: A conceptual solution. In *2004 IEEE 35th annual power electronics specialists conference*, volume 6, pages 4285–4290, 2004.
- [13] C. Li, E.A.A. Coelho, T. Dragicevic, J. Guerrero, and J. Vasquez. Multiagent-based distributed state of charge balancing control for distributed energy storage units in ac microgrids. *IEEE Trans. on Industry Applications*, 53(3):2369–2381, 2016.
- [14] D. Li, Z. Wu, B. Zhao, and L. Zhang. An improved droop control for balancing state of charge of battery energy storage systems in ac microgrid. *IEEE Access*, 8:71917–71929, 2020.
- [15] L.Y. Lu and C.C. Chu. Consensus-based droop control synthesis for multiple dies in isolated micro-grids. *IEEE Trans. on Power Systems*, 30(5):2243–2256, 2014.
- [16] X. Lu, J.M. Guerrero, K. Sun, and J.C. Vasquez. An improved droop control method for DC microgrids based on low bandwidth communication with DC bus voltage restoration and enhanced current sharing accuracy. *IEEE Trans. on Power Electronics*, 29(4):1800–1812, 2014.
- [17] T. Morstyn, A.V. Savkin, B. Hredzak, and V.G. Agelidis. Multi-agent sliding mode control for state of charge balancing between battery energy storage systems distributed in a dc microgrid. *IEEE Trans. on smart grid*, 9(5):4735–4743, 2017.
- [18] R. Olfati-Saber and R.M. Murray. Graph rigidity and distributed formation stabilization of multi-vehicle systems. In *IEEE Decision and Control, (CDC)*, volume 3, pages 2965–2971, 2002.
- [19] D.E. Olivares, A. Mehrizi-Sani, A.H. Etemadi, Claudio A. Cañizares, R. Iravani, M. Kazerani, A.H. Hajimiragha, O. Gomis-Bellmunt, M. Saeedifard, R. Palma-Behnke, et al. Trends in microgrid control. *IEEE Transactions on smart grid*, 5(4):1905–1919, 2014.
- [20] O. Palizban and K. Kauhaniemi. Power sharing for distributed energy storage systems in ac microgrid: Based on state-of-charge. In *2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, pages 1–5, 2015.
- [21] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodriguez. Control of power converters in AC microgrids. *IEEE Trans. on Power Electronics*, 27(11):4734–4749, 2012.
- [22] U.B. Tayab, M.A.B. Roslan, L.J. Hwai, and M. Kashif. A review of droop control techniques for microgrid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76:717–727, 2017.
- [23] R. Zhang and B. Hredzak. Nonlinear sliding mode and distributed control of battery energy storage and photovoltaic systems in ac microgrids with communication delays. *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, 15(9):5149–5160, 2019.



© 2022 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC-BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).