

Stability analysis for DC NMGs with active loads and time delay - circuit validation

1rd M. Carnaghi, 2nd P. Cervellini, 3rd R. García Retegui, 4th M. Judewicz, 5th M. Funes

ICYTE, UNMDP, CONICET

Mar del Plata, Argentina

mcarnaghi,paulacervellini,rgarcia,marcosj,mfunes@fi.mdp.edu.ar

Resumen—Networking microgrids (NMGs) have gained prominence as a means to integrate renewable energy sources and improve system resilience. However, such microgrids rely heavily on a communications network, whose inherent delay can significantly affect system stability. In addition, the presence of diverse and often non-linear loads further complicates this scenario. In a previous work, a robust delay-dependent stability analysis for DC NMGs was presented, considering the presence of active loads. This analysis takes into account the uncertain and varying nature of the loads within the microgrid, as well as the communication delay required for distributed control. The present work aims to ratify the results obtained by the previous mathematical formulation, using circuit simulations. To this end, circuit models of a DC NMG are implemented and simulations are carried out for different scenarios, comparing the results with the predictions obtained in the previous work. The results of the simulations confirm the mathematical predictions, demonstrating the validity of the proposed approach for the stability analysis of DC NMGs with active loads.

Index Terms—Networking Microgrids, Robust Stability, CPLs, Consensus based Distributed Control, Time-delay

I. INTRODUCTION

Las microrredes de corriente continua (DCMG) han ganado popularidad por su capacidad de integrar recursos energéticos distribuidos (RESs) y por su elevada eficiencia debida al uso de tecnología DC [1]. Adicionalmente, las microrredes cercanas pueden interconectarse conformando redes (NMGs por sus siglas en inglés) para mejorar la integración de RESs y la robustez del sistema, generalmente apoyandose en estrategias de control distribuido y colaborativo para lograr y sincronizar la acción de las distintas microrredes (MGs). Por medio de dicha acción cooperativa, las NMGs buscan optimizar la utilización de recursos distribuidos, mejorar la estabilidad de la red y promover la sostenibilidad del sistema eléctrico mediante una integración más directa a la red principal [2].

Un desafío que presentan las NMGs es el de garantizar la operación estable, donde, además, existen dos factores principales: la característica de impedancia negativa que presentan las cargas activas y los retardos que existen en las comunicaciones digitales utilizadas en el control distribuido. Comúnmente, las cargas activas en las NMGs actúan como cargas de potencia constante (CPLs), que presentan características no lineales y de impedancia negativa [3]. Además, las estrategias

de control distribuido se basan en redes de comunicación para intercambiar datos entre los controladores líderes de cada MG. En este sentido, los retardos inherentes a la comunicación entre las MGs vecinas afectan significativamente la estabilidad de las NMGs [2]. Estos desafíos se acentúan debido a las incertidumbres en las cargas conectadas al sistema y a la naturaleza intermitente de la generación a partir de fuentes de energía renovable [3]–[5].

En la literatura existen estudios que han abordado la estabilidad en NMGs considerando factores como: CPLs con incertezas, la generación intermitente de las fuentes de energía renovable y los retardos en la comunicación. La mayoría de los estudios se han centrado en la estabilidad considerando CPLs o retardos de forma individual, y algunos pocos han intentado abordar ambos factores simultáneamente.

Por ejemplo, en [3], [6], [7], se aborda la estabilidad considerando multiples cargas activas que presentan además incertezas, pero el análisis presentado no contempla el impacto de los retardos temporales. Por otra parte, en [8]–[11], se proponen modelos de NMG que incluyen la presencia de los retardos para estudiar su estabilidad, sin embargo, los análisis se centran en escenarios de cargas pasivas. En un intento por cubrir este vacío en la literatura, [12] y [13] han estudiado la estabilidad de una MG en presencia de control distribuido, considerando cargas activas y pasivas, y el retardo en las comunicaciones entre los controladores locales. Así, en [12], [13] se logra una primera aproximación en la comprensión de cómo las cargas activas afectan la estabilidad de las DCMG en presencia de retardo temporal. Sin embargo, se necesita continuar con los estudios para abordar de manera integral los desafíos encontrados en los escenarios de NMGs, particularmente con respecto a los cambios en los puntos de equilibrio del sistema debido a la multiplicidad de: CPLs variables y distribuidas en varios buses, y de RESs con variaciones en su potencia generada. En [14], se presenta un modelado en el espacio de estados para representar el sistema de una NMG con control distribuido y consensuado. Posteriormente, se analiza la estabilidad de la NMG a partir de la formulación de condiciones suficientes. Las condiciones de estabilidad planteadas consideran tanto el rango de incerteza en las distintas cargas equivalentes de la NMG como la presencia de un retardo de comunicación variable en el tiempo entre los controladores de las distintas MGs, que conforman la NMG. Por medio de dichas formulaciones, se realizaron distintos

Este trabajo ha sido financiado en parte por la Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMDP), el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICET), Argentina.

estudios sobre una NMG constituida de 4 MGs. Tales estudios buscaban comprender el impacto de diferentes factores sobre la estabilidad del sistema, como: la distribución de potencia y carga sobre las distintas MGs, el valor máximo de carga a manejar, la configuración de ganancias en los controladores y del consenso entre las distintas MGs. Sin embargo, tal estudio requiere ser completado con una evaluación circuital del sistema en el cual se incluyan las MGs con sus elementos de generación y carga y el esquema de control consensuado. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo consiste en desarrollar un entorno de simulación que permita evaluar el comportamiento dinámico del sistema y compararlo con los comportamientos predichos por el estudio presentado en [14]. De esta forma, se busca analizar cuán bien se conciden las conclusiones obtenidas a partir de la formulación matemática reducida con el comportamiento de un modelo circuital.

II. MODELO DE UNA DC NMG

El objetivo de esta sección es presentar el modelo para una DC NMG propuesto en [14] con el fin de lograr un trabajo autocontenido. El modelado de una DC NMG involucra distintos pasos, entre ellos: definir una representación para la NMG, determinar los elementos más relevantes de dicha representación y las interacciones entre dichos elementos.

En primer lugar, para simplificar la complejidad de la NMG y enfocar el análisis en los elementos y dinámicas más relevantes al presente estudio, se propone un enfoque de reducción de orden. Tal reducción de orden propone despreciar las dinámicas de mayor frecuencia que existen dentro de cada MG para centrarse en las interacciones de baja frecuencia que se dan a nivel de NMG o entre MGs [15]–[17]. Para lograr dicha reducción de orden, se parte del siguiente razonamiento. Las NMG, como la ilustrada en la Fig. 1, consisten de DCMGs interconectadas. A su vez, cada una de las DCMGs se constituye de generadores distribuidos (DGs) y cargas que se encuentran relativamente próximos entre sí. Luego, los elementos presentes en una DCMG pueden agruparse, de acuerdo a su naturaleza, en una representación más sencilla, como la mostrada en la Fig. 2, siempre que se tengan en cuenta algunas consideraciones. En primer lugar, es una suposición común el asumir que todos los convertidores de potencia que operan en modo tensión, o como conformadores de red, dentro de una MG comparten una estrategia de control común

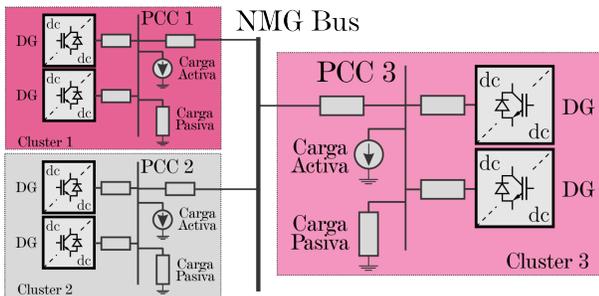


Figura 1. Representación de una NMG.

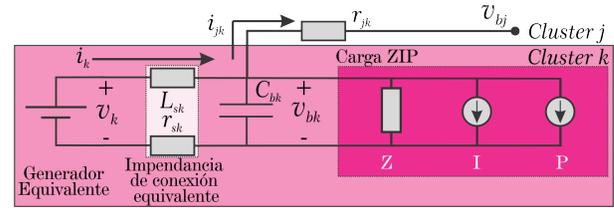


Figura 2. Representación equivalente planteada de cada MG.

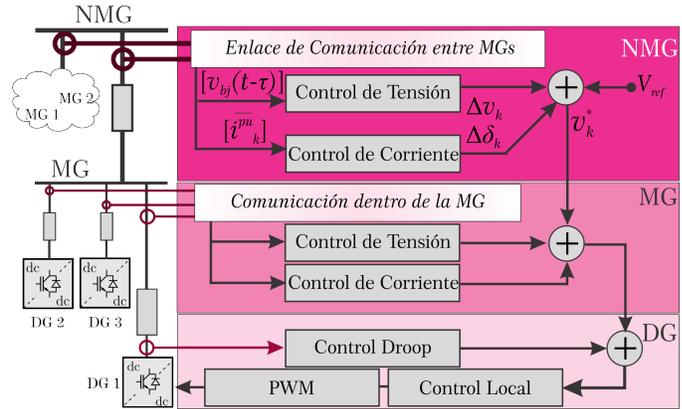


Figura 3. Esquema de control jerárquico.

respecto al consenso entre distintas MGs [2], [10]. Como se muestra en la Fig. 3, el esquema de control en estos casos se organiza siguiendo una configuración en cascada donde:

- El control local determina acciones de control en base a mediciones locales de cada convertidor o generador.
- El control primario, o de nivel MG, define las acciones de control mediante la información intercambiada entre los distintos DGs dentro de la MG y mediciones locales de la MG, como podría ser la tensión del bus.
- El control secundario, o de nivel NMG, determina sus acciones de control basándose en la información intercambiada entre las múltiples MGs en forma distribuida.

El presente análisis se centra en el control secundario, el cual es responsable de establecer una referencia de tensión común (v_k^*) que actuará como entrada común a todos los controladores locales del control primario en una dada MG [10]. Con el objetivo de reducir el orden del sistema, se asume que existe una correcta separación de dinámica entre las distintas jerarquías del control. Luego, los controladores del nivel NMG tienen un ancho de banda significativamente menor comparado a los controladores del nivel MG y los controladores locales [15], [16]. En base a esto y como se muestra en la Fig. 2, se define una fuente controlada de tensión (v_k) equivalente a los distintos DGs dentro de cada MGs. La corriente de salida i_k se define para la fuente v_k y constituye la corriente equivalente de los DGs agregados. Análogamente, se define una impedancia de salida equivalente que conecta la fuente v_k con el bus local k -ésimo, constituida por las impedancias de conexión (L_{sk} y r_{sk}) y la capacitancia del bus DC (C_{bk}). Tal cual se presenta en [17], esta simplificación se

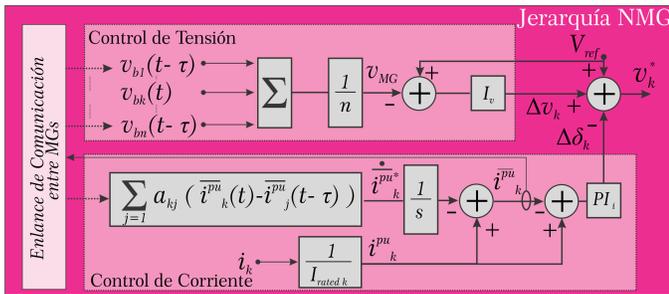


Figura 4. Distributed control framework for the DC NMG model.

basa en asumir cercanía entre los distintos puntos de conexión (PCCs) dentro de la MG y, por ende, las impedancias entre los mismos son despreciables. Adicionalmente, se emplea una carga ZIP equivalente a fin de representar las características de carga de impedancia constante (Z), carga de corriente constante (I) y carga de potencia constante (P) en cada MG.

Luego, para interconectar los distintos buses locales, se consideran impedancias de interconexión resistivas (r_{jk}) entre los buses j -ésimo y k -ésimo. Además, las interconexiones se establecen en base a la topología de la NMG usando los principios de la teoría de grafos, los cuales permiten plantear un modelo de grafo undireccional donde cada nodo representa una MG o bus y cada vértice representa la impedancia que las conecta [2], [8].

II-A. Modelo de la MG k -ésima

En base a lo anteriormente planteado, se define el modelo de cada MG a partir de representar el comportamiento del esquema de control distribuido y las expresiones circuitales de cada bus local.

II-A1. Expresiones de control: El modelo del control se define para la capa NMG, indicada en la Fig. 3. Una representación en mayor detalle de esta capa se muestra en la Fig. 4. El objetivo de esta capa de control es garantizar que la tensión promedio de los buses siga un valor de referencia dado y lograr la distribución de la corriente de la carga entre las MGs. Las expresiones que describen el control, a partir de plantear las variables en la Fig. 4, resultan:

$$v_k^* = V_{ref} + \Delta v_k - \Delta \delta_k \quad (1)$$

$$\Delta v_k = k_{VIk} \int (V_{ref} - v_{MG}) dt \quad (2)$$

Donde, V_{ref} es el valor nominal de referencia para el bus DC. Δv_k es el término de corrección que surge del controlador integral de tensión I_v , cuyo parámetro es k_{VIk} , y su fin es garantizar que la tensión promedio de los distintos buses DC $v_{MG} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^N v_{bj}$ converja a su referencia V_{ref} . Además, $\Delta \delta_k(t)$ es el término de corrección que surge del controlador proporcional-integral de corriente PI_i empleado para lograr una dada distribución de corriente o carga entre las MGs. El control distribuido de corriente implementa una estrategia basada en consenso para definir la referencia de corriente para

la k -ésima MG (i_k^*) en base a los valores de referencia de corriente de las restantes MGs:

$$i_k^* = - \sum_{j=1, j \neq k}^N a_{kj} (i_k^* - i_j^*) \quad (3)$$

donde, a_{kj} son los coeficientes que definen la comunicación entre las MGs y el peso de la información intercambiada. Además, se diseñan para lograr un esquema de comunicación que satisfice la condición de alcanzabilidad, la cual se puede determinar empleando la Teoría de Grafos. [3], [8]. Es habitual el uso de la representación matricial para analizar las características del consenso diseñado. Para ello, se determina la matriz de adyacencia $A_G = [a_{ij}] \in \mathfrak{R}^{(n \times n)}$, mediante la cual, (3) se reescribe como:

$$I^* = -LI^* \quad (4)$$

donde, $I^* = [i_1^*, i_2^*, \dots, i_n^*]$ y $L = D_G^{in} - A_G$, siendo L la matriz Laplaciana y D_G^{in} una matriz diagonal cuyos elementos se definen como $\sum_{j \in N_k} a_{kj}$. Así expresada (3), los autovalores de L determinan la dinámica de las referencias en I^* , es por eso que los coeficientes a_{kj} deben definirse buscando garantizar un comportamiento estable.

Si se analiza (3), se observa que, en régimen permanente, $\dot{I} \rightarrow 0$ y $i_k^* \approx i_j^*$ para $k, j = 1, 2, \dots, n$. Por lo tanto, para definir distribuciones de corriente que respeten los valores nominales de generación de cada MG, es necesario realizar un cambio de variable adicional.

$$\overline{i}_k^{pu} = i_k^* / I_{ratek}, \quad i_k^{pu} = i_k / I_{ratek} \quad (5)$$

donde i_k la corriente inyectada a la k -ésimo bus local y I_{ratek} la corriente equivalente nominal que puede inyectarse a la red desde el bus k -ésimo. Luego, en base a la Fig. 4, la referencia para el control de corriente resulta:

$$\overline{i}_k^{pu}(t) = i_k^{pu}(t) - \int \sum_{j=1}^N a_{kj} (\overline{i}_k^{pu}(t) - \overline{i}_j^{pu}(t)) dt \quad (6)$$

Análogamente, el término de corrección $\Delta \delta_k(t)$ se calcula como:

$$\Delta \delta_k(t) = k_{CPk} (i_k^{pu}(t) - \overline{i}_k^{pu}(t)) + k_{CIk} \int (i_k^{pu}(t) - \overline{i}_k^{pu}(t)) dt \quad (7)$$

donde k_{CPk} y k_{CIk} son los coeficientes proporcional e integral del controlador PI, respectivamente.

Por último, se incorpora el retardo dentro de las expresiones de control que involucran intercambio de información, tal como se ilustra en las Figs. 3 y 4. Luego, las expresiones resultan:

$$\Delta v_k(t) = k_{VIk} \int (V_{ref} - v_{MG}(t - \tau)) dt \quad (8)$$

$$\overline{i}_k^{pu}(t) = i_k^{pu}(t) - \int \sum_{j=1}^N a_{kj} (\overline{i}_k^{pu}(t) - \overline{i}_j^{pu}(t - \tau)) dt \quad (9)$$

Contrariamente, aquellas variables que se derivan exclusivamente de variables locales o propias de cada MG no se

ven afectadas. A su vez, los resultados presentados en [11] sugieren que las mediciones y variables locales de control deben estar sujetas a retardos más breves y lazos de control más rápidos comparados con los de la capa a nivel de NMG. Tal separación ayuda a prevenir una excesiva restricción en las condiciones de operación del sistema.

II-A2. Expresiones de bus local: Las expresiones asociadas al circuito de cada bus local se derivan a partir del modelo equivalente de la Fig. 2:

$$\begin{aligned} \dot{i}_k &= \frac{1}{L_{sk}} [v_k - v_{bk} - r_{sk} i_k] \\ &= \frac{1}{L_{sk}} [V_{ref} + \Delta v_k - \Delta \delta_k - v_{bk} - (r_{sk}) i_k] \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \dot{v}_{bk} &= \frac{1}{C_{bk}} \left[i_k - \sum_{j=1, j \neq k}^n g_{jk} (v_{bk} - v_{bj}) \right. \\ &\quad \left. - g_{load_k} v_{bk} - i_{load_k} - \frac{p_{cpl_k}}{v_{bk}} \right] \end{aligned} \quad (11)$$

$$\frac{p_{cpl_k}}{v_{bk}} \approx \frac{P_{cpl_k}^{eq}}{V_{bk}^{eq}} + \frac{P_{cpl_k}^{eq}}{-(V_{bk}^{eq})^2} v_{ck} \approx I_{cpl_k} + g_{cpl_k} v_{bk} \quad (12)$$

donde:

- $g_{jk} = g_{kj} = r_{jk}^{-1} \in \mathfrak{R}^+$ es la conductancia de las líneas de distribución entre los buses k -ésimo y j -ésimo,
- $g_{load_k} \in \mathfrak{R}^+$ es la conductancia asociada al término de impedancia constante (Z) en el bus k -ésimo,
- $i_{load_k} \in \mathfrak{R}$ es la corriente asociada al término de corriente constante (I) en la carga vinculada al bus k -ésimo,
- $I_{cpl_k} \in \mathfrak{R}$ es la corriente de polarización que define el punto de operación y linealización de la CPL equivalente asociada al bus k -ésimo en (12),
- $g_{cpl_k} \in \mathfrak{R}$ es la conductancia incremental derivada de la linealización de la CPL equivalente asociada al bus k -ésimo,
- $v_k \approx v_k^*$ es la aproximación realizada en base a las consideraciones respecto de la separación dinámicas entre las jerarquías del control.

Es pertinente aclarar que i_{load_k} , I_{cpl_k} , g_{cpl_k} se definen sobre \mathfrak{R} con el objetivo de representar también distintas RESs operando en modo seguimiento de punto de máxima potencia (MPPT), lo cual las convierte en fuentes de potencia constante (CPS), es decir, CPLs con sentido inverso de potencia o corriente [17].

II-A3. Modelo global: En base a las expresiones obtenidas en las secciones previas, se plantea el modelo global de la NMG en formato matricial:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{X} + \mathbf{B} \cdot \mathbf{X}_\tau + \mathbf{H}_1 V_{ref} + \mathbf{H}_2 \mathbf{I}_{tot} \quad (13)$$

donde:

$$\begin{aligned} \mathbf{X} &= [\mathbf{V}_b, \mathbf{\Delta}, \mathbf{I}, \mathbf{I}^{pu}]^T \in \mathfrak{R}^{4n} \\ \mathbf{X}_\tau &= [\mathbf{V}_b(\mathbf{t} - \tau), \mathbf{\Delta}(\mathbf{t} - \tau), \mathbf{I}(\mathbf{t} - \tau), \mathbf{I}^{pu}(\mathbf{t} - \tau)]^T \in \mathfrak{R}^{4n} \\ \mathbf{V}_b &= [v_{b1}, \dots, v_{bn}]^T \in \mathfrak{R}^n \\ \mathbf{I} &= [i_1, \dots, i_n]^T \in \mathfrak{R}^n \\ \mathbf{I}^{pu} &= [\bar{i}_1^{pu}, \dots, \bar{i}_n^{pu}]^T \in \mathfrak{R}^n \\ \mathbf{\Delta} &= [\Delta v_1 - \Delta \delta_1, \dots, \Delta v_n - \Delta \delta_n]^T \in \mathfrak{R}^n \\ \mathbf{I}_{tot} &= [I_{cpl_1} + i_{load_1}, \dots, I_{cpl_n} + i_{load_n}]^T \in \mathfrak{R}^n \end{aligned}$$

Las matrices \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{H}_1 , y \mathbf{H}_2 se deducen de las expresiones (7)-(12) [14].

III. ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

Existen distintos enfoques para analizar la estabilidad de un sistema con retardos, sin embargo, el enfoque planteado se realiza el dominio del tiempo y con dependencia del retardo. Esto significa que el estudio contempla la presencia de un retardo finito y con variaciones en el tiempo, a diferencia de los estudios independientes del retardo que buscan determinar condiciones para las cuales el sistema es estable independientemente del valor del retardo, es decir, que τ podría tomar valores entre cero e infinito. El análisis en el dominio temporal se basa en condiciones suficientes de Lyapunov [18], [19], a diferencia de las formulaciones temporales que se apoyan en representaciones de los autovalores del sistema a lazo cerrado.

En esta sección se explicarán los conceptos empleados para representar las incertezas en el sistema (13), se presenta el teorema empleado para evaluar la estabilidad del sistema y se muestran los resultados obtenidos a partir de dicho teorema sobre un caso particular de estudio. Estos resultados teóricos se van a contrastar con las simulaciones circuitales en la siguiente sección. Por lo tanto, es relevante su comprensión a fin de dar sentido a las simulaciones posteriores.

III-A. Representación de incertezas

A fin de modelar las incertezas del sistema, consecuencia de la multiplicidad de cargas variables y de la generación en base a fuentes renovables, se emplea la formulación de conjuntos politópicos. Dicha formulación permite representar y estudiar el sistema considerando los cambios de estado estacionario. Es decir, que no se requiere información respecto a las dinámicas con las cuales cambian los términos con incertezas, ya que las mismas se consideran del tipo escalón. Más aún, la formulación nos permite obtener conclusiones respecto a los infinitos puntos de operación posibles, a partir de estudiar únicamente las condiciones extremas de operación del sistema. Para lo cual, es importante expresar apropiadamente el modelo planteado en (13) como un sistema con incertezas del tipo politópico, es decir, que las matrices del sistema deben satisfacer las restricciones de un politopo real y convexo:

$$\begin{aligned} [\mathbf{A}\mathbf{B}] &\in \Omega, \\ \Omega &= \{[\mathbf{A}(\epsilon)\mathbf{B}(\epsilon)] = \sum_{j=1}^p \epsilon_j [\mathbf{A}_j \mathbf{B}_j], \sum_{j=1}^p \epsilon_j = 1, \epsilon_j \geq 0\} \end{aligned} \quad (14)$$

donde $\mathbf{A}_j, \mathbf{B}_j, j = 1, \dots, p$ son matrices de términos constantes con dimensiones apropiadas y $\epsilon_j, j = 1, \dots, p$ representan las incertezas en el sistema [20], [21].

Las incertezas en las potencias demandadas por las cargas activas se representan como un conjunto politópico acotado \check{P} . Esto puede lograrse en forma sencilla, definiendo cada p_k como contenida en un rango, resultando:

$$\check{P} = \{p : p_k \in [\underline{p}_k, \overline{p}_k], k = 1, \dots, n\} \quad (15)$$

donde \underline{p}_k y \overline{p}_k representan los valores mínimos y máximos que puede tomar la potencia equivalente consumida o suministrada por las CPLs o CPSs en el bus k -ésimo. Aplicando una representación análoga a las tensiones en los buses locales v_{bk} ,

$$\nu_b^{eq} = \{V_b^{eq} \in \mathbb{R}^n : v_{bk}^{eq} \in [\underline{v}_{bk}, \overline{v}_{bk}], k = 1, \dots, n\} \quad (16)$$

se obtienen los elementos necesarios para definir los rangos que contienen a las conductancias g_{cpl_k} en (12), las cuales representan las conductancias incrementales que surgen de la linearización de las CPLs y son, en última instancia, los elementos que impactan en las matrices \mathbf{A}_j y \mathbf{B}_j de (14).

Una representación similar puede aplicarse a la componente de impedancia constante de la carga ZIP equivalente asociada cada bus local. En este caso, el conjunto politópico se define sobre las conductancias g_{load_k} , resultando:

$$\check{G} = \{g_{load} : g_{load_k} \in [\underline{g}_{load_k}, \overline{g}_{load_k}], k = 1, \dots, n\} \quad (17)$$

donde, representan \underline{g}_{load_k} y \overline{g}_{load_k} los valores mínimos y máximos de la conductancia en el término Z de la carga en el bus k -ésimo.

Notar que, las cargas de corriente constante no impactan en los coeficientes de las matrices \mathbf{A}_j y \mathbf{B}_j , sino que son términos constantes que definen el punto de operación, con lo cual no son consideradas para el análisis.

Una vez definidos los conjuntos \check{G} , ν_b^{eq} y \check{P} , se calculan los casos vértices de las matrices del sistema, es decir, las matrices \mathbf{A}_j y \mathbf{B}_j que surgen a partir de las combinaciones de los valores extremos en \check{G} , ν_b^{eq} y \check{P} . Tal representación del sistema permite ahora la aplicación del siguiente teorema para evaluar su estabilidad para una dada condición de retardo en el sistema [19]–[23]:

Dados los escalares $\tau^* > 0$ y μ , el sistema (13) con incertezas del tipo politópico expresadas satisfaciendo (14) y un retardo variable en el tiempo $0 \leq \tau(t) \leq \tau^*$ que, además satisface $|\tau(t)| \leq \mu$, es robustamente estable si existen las matrices $\mathbf{P}_j = \mathbf{P}_j^T > 0$, $\mathbf{Q}_j = \mathbf{Q}_j^T > 0$, $\mathbf{R}_j = \mathbf{R}_j^T \geq 0$, $\mathbf{Z}_{ij} = \mathbf{Z}_{ij}^T > 0$, $i = 1, 2$, y las matrices de coeficientes libres:

$$\mathbf{N}_j = \begin{bmatrix} \mathbf{N}_{1j} \\ \vdots \\ \mathbf{N}_{4j} \end{bmatrix} \quad \mathbf{S}_j = \begin{bmatrix} \mathbf{S}_{1j} \\ \vdots \\ \mathbf{S}_{4j} \end{bmatrix} \\ \mathbf{M}_j = \begin{bmatrix} \mathbf{M}_{1j} \\ \vdots \\ \mathbf{M}_{4j} \end{bmatrix} \quad \mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{T}_4 \end{bmatrix}, \quad j = 1, \dots, p$$

y el siguiente problema LMI se satisface para $j = 1, \dots, p$:

$$\begin{bmatrix} \Theta^{(j)} & \tau^* \mathbf{N}_j & \tau^* \mathbf{S}_j & \tau^* \mathbf{M}_j \\ * & -\tau^* \mathbf{Z}_{1j} & 0 & 0 \\ * & * & -\tau^* \mathbf{Z}_{1j} & 0 \\ * & * & * & -\tau^* \mathbf{Z}_{2j} \end{bmatrix} < 0 \quad (18)$$

donde

$$\Theta^{(j)} = \Theta_1^{(j)} + \Theta_2^{(j)} + [\Theta_2^{(j)}]^T \quad (19)$$

$$\Theta_1^{(j)} = \begin{bmatrix} \mathbf{Q}_j + \mathbf{R}_j & 0 & 0 & \mathbf{P}_j \\ * & -(1 - \mu) \mathbf{Q}_j & 0 & 0 \\ * & * & -\mathbf{R}_j & 0 \\ * & * & * & \tau^* (\mathbf{Z}_{1j} + \mathbf{Z}_{2j}) \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\Theta_2^{(j)} = [\mathbf{N}_j + \mathbf{M}_j \quad -\mathbf{N}_j + \mathbf{S}_j \quad -\mathbf{M}_j - \mathbf{S}_j \quad 0] \\ + \mathbf{T} \mathbf{A}_j + \mathbf{A}_j^T \mathbf{T}^T \quad (21)$$

$$\mathbf{A}_j = [-\mathbf{A}_j \quad -\mathbf{B}_j \quad 0 \quad \mathbf{I}] \quad (22)$$

La demostración para el teorema presentado puede consultarse en [19], [21]. Sin embargo, es pertinente remarcar que la formulación presentada permite evaluar la estabilidad del sistema (13) bajo la condición de retardo variable en el tiempo $\tau(t)$ acotado y de derivada acotada. A su vez, dicha formulación incorpora en las condiciones a satisfacer las incertezas del sistema, dado que las mismas definen los j casos a ser satisfechos en el problema LMI planteado.

III-B. Evaluación de Estabilidad

En esta subsección se presentan los resultados correspondientes al análisis de una NMG constituida por 4 MGs derivados de la formulación propuestas. Los parámetros del sistema se muestran en la Tabla I. Las curvas presentadas en esta sección fueron obtenidas mediante la resolución iterativa de los problemas LMI correspondientes a distintas condiciones de operación del modelo. Para el cálculo se utilizó la librería CVX de MatLab y, particularmente, el solver Mosek que es apropiado para problemas SDP (semi-definied programming) como es el caso [18], [24] [25]. Además, los análisis mostrados fueron acotados a cargas CPL, ya que los escenarios con cargas resistivas han sido ampliamente abordados en otros trabajos [8], [10], [11].

III-B1. Análisis N°1: El primer análisis busca estudiar cómo impacta en la estabilidad las distribuciones de la carga total sobre las MGs de la NMG. Tal como se realiza en otros trabajos, a fin de cuantificar el margen de estabilidad del sistema se emplea el retardo máximo admisible (τ_{max}^*). Se ha demostrado que el incremento del retardo conlleva un mayor desplazamiento de los polos de baja frecuencia del sistema hacia el semiplano derecho. Por tanto, un mayor τ_{max}^* implica un sistema con menor margen de estabilidad.

En los análisis realizados, el parámetro P_{tot} representa la potencia total equivalente de carga en la NMG. Es decir, la diferencia entre la potencia demandada por las cargas y la potencia inyectada por la generación RES. Por lo tanto, P_{tot} tiene asociado un valor máximo y mínimo consecuencia del rango de incerteza en las potencias individuales. Por ejemplo, $\overline{P}_{tot} = \sum_{k=0}^n \overline{p}_k$ siendo \overline{p}_k la cota superior de la potencia demandada en el cluster k -ésimo.

Tabla I
PARÁMETROS CORRESPONDIENTE A LA NMG DE 4-CLUSTERS

NMG	
r_s	[0,25, 0,53, 0,20, 0,50] Ω
L_s	[0,75, 0,90, 1,25, 0,80] mH
C_b	[1,70, 1,00, 0,80, 1,10] mF
G	$[g_{12} = 1,20, g_{13} = 0,30, g_{14} = 0,00, \dots$ $\dots, g_{23} = 0,00, g_{24} = 1,55, g_{34} = 0,75]\Omega^{-1}$
I_{rate}	[100, 50, 33, 33] A
K	$[k_{VI_k} = 1,00, k_{CI_k} = 10,0, k_{CP_k} = 0,50]$
V_{ref}	$[V_{ref} = 950, \overline{V_{ref}} = 1050]$ V
MGs	
$k_{VIMG_k} = 30$	$k_{CPMG_k} = 10$
$k_{CIMG_k} = 1000$	$k_{CIMG_k} = 1000$
$a_{ijMG_k} = 10$	$\tau_{MG_k} = 0,01 \pm 10\%$ ms
r_{sMG1}	[0,1, 0,125, 0,025] Ω
L_{MG1}	[2,25, 2,25, 2,25] mH
C_{bMG1}	[0,58, 0,85, 0,17] mF
$I_{rateMG1}$	[5, 2,5, 2,5]
$P_{distrMG1}$	[0,6, 1, 0,3, 0,25]
r_{sMG2}	[0,2, 0,3] Ω
L_{MG2}	[1,8, 1,8] mH
C_{bMG2}	[0,4, 0,6] mF
$I_{rateMG2}$	[2,5, 5]
$P_{distrMG2}$	[0,5, 0,5]
r_{sMG3}	[0,06, 0,1, 0,04, 0,05] Ω
L_{MG3}	[6,0, 6,0, 6,0, 6,0] mH
C_{bMG3}	[0,3, 0,5, 0,2, 0,2] mF
$I_{rateMG3}$	[4, 3, 2, 1]
$P_{distrMG3}$	[0,25, 0,4, 0,15, 0,2]
r_{sMG4}	[0,2, 0,1, 0,15, 0,05] Ω
L_{MG4}	[3,2, 3,2, 3,2, 3,2] mH
C_{bMG4}	[0,4, 0,2, 0,3, 0,1] mF
$I_{rateMG4}$	[4, 3, 2, 1]
$P_{distrMG4}$	[0,4, 0,2, 0,3, 0,1]

Tabla II
ESCENARIOS DE DISTRIBUCIÓN DE POTENCIA

Escenario	Lista de Clusters			
	Nº1	Nº2	Nº3	Nº4
1	10 %	30 %	45 %	15 %
2	45 %	30 %	10 %	15 %
3	30 %	45 %	15 %	10 %

Las curvas de Fig. 5 se obtuvieron por medio de un proceso iterativo donde, el valor de $\overline{P_{tot}}$ permanece fijo, mientras se incrementa progresivamente el valor de $\overline{P_{tot}}$ y se determina el valor de τ_{max}^* con base al problema LMI planteado en la seccion anterior. El valor de $\overline{P_{tot}}$ y la distribución de potencia en la NMG se muestran en la Tabla II.

Antes de realizar observaciones con base a las curvas de la Fig. 5, se remarcan las implicancias de operar a la NMG en los distintos puntos del plano $\overline{P_{tot}}$ vs τ_{max}^* .

- Establecer condiciones de operación que permanezcan debajo de la curva garantiza la operación estable del sistema, ya que la formulación LMI provee condiciones suficientes.
- Un punto por encima de la curva representa una condición de operación incierta para la formulación, es decir, que no se garantiza estabilidad, pudiendo suceder que el sistema colapse (ausencia de condición en régimen permanente), sea inestable (comportamiento divergente

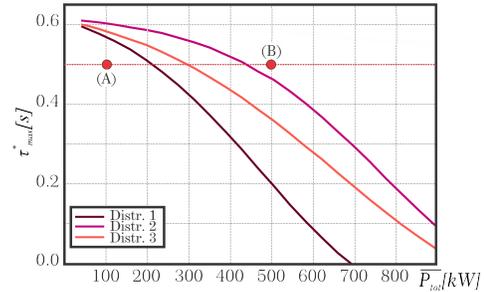


Figura 5. τ_{max}^* vs $\overline{P_{tot}}$ para los escenarios de distribución de potencia estudiados.

frente a una perturbación) o sea, incluso, estable.

A su vez, las infinitas variaciones para cada p_k se encuentran contempladas dentro de cada análisis al considerar la representación de espacios politópicos, siempre que p_k permanezca dentro del rango $[p_k, \overline{p_k}]$ definido al momento de definir el problema LMI.

En la Fig. 5, las curvas que se ubican a la derecha indican que el sistema puede operar con un valor de τ_{max}^* mayor a igual condiciones de carga máxima. Se observa que los escenarios de distribución de potencia más balanceada corresponden a curvas más desplazadas a la derecha. En este sentido, una distribución más balanceada implica que aquellas MGs con mayor demanda también tienen mayor peso en la distribución de potencia, es decir, que tienen una mayor capacidad nominal de inyectar potencia a su bus local. En el caso de estudio planteado y basados en los valores de I_{rate_k} de la Tabla I, puede concluirse que la distribución Nro. 2 es el escenario más balanceado de la Tabla II. Esto condice con lo observado en la Fig. 5. De acuerdo a los resultados presentados en [26], este comportamiento es consecuencia del control distribuido. La ley de control consensuada, definida para la distribución de corriente, genera autovalores de baja frecuencia que no están presentes en las MGs operando en forma aislada e independiente. Cuando los desbalances en la NMGs son relevantes y existe un elevado intercambio de potencia entre las MGs, el control distribuido cobra un papel preponderante en la dinámica del sistema. Caso contrario, cuando las MGs tienden a la autonomía, su interacción pierde relevancia en la estabilidad de la NMG.

III-B2. Análisis N°2: El segundo análisis evalúa el impacto que tienen los cambios de las ganancias integrales del consenso (a_{kj}) sobre la estabilidad del sistema. Es importante aclarar que, para lograr la superficie mostradas en la Fig. 6, se consideró la distribución de potencia Nro. 1 de la Tabla I y una matriz de consenso en la cual $a_{ij} = a$ para $j = i - 1$ y $j = i + 1$; y $a_{ij} = 0$ para cualquier otro elemento. Cambiar la configuración de la matriz conlleva un cambio en sus autovalores y, por lo tanto, en la superficies mostrada.

En la Fig. 6 se observa para el caso con cargas CPLs que existe un deterioro abrupto inicial del valor de τ_{max}^* en función del valor de a . Además, este comportamiento se ve magnificado con el aumento de $\overline{P_{tot}}$, debido al comportamiento de

las CPLs con la potencia, tal como se desprende del análisis realizado en la sección anterior.

Incrementar el valor a conlleva un incremento en la ganancia integral del control consensuado y su ancho de banda, por ende, el impacto del retardo es más notorio aún manteniendo los restantes parámetros del sistema constantes. Dado que las superficies en la Fig. 6 son sensibles a la proporción de cargas lineales y no-lineales, al diseño de la matriz de consenso y las ganancias de la misma, la posibilidad de generar tales representaciones visuales facilita el diseño de una red estable.

Por último, en la Fig. 6 se resalta la intersección de la superficie con el plano $a = 1$, la cual se observa que se corresponde con la curva mostrada en la Fig. 5 para la Distribución Nro. 1. De este modo, se hace evidente la correlación que existe entre ambas figuras.

III-B3. Análisis N°3: En forma similar al estudio previo, también resulta relevante analizar el impacto de la configuración de las ganancias del control distribuido. La representación gráfica propuesta en la Fig. 7 permite visualizar el impacto en τ_{max}^* para distintos valores en $[k_{ii}, k_{pi}]$ mientras k_{iv} y \overline{P}_{tot} permanecen constantes. Las combinaciones de $[k_{ii}, k_{pi}]$ que conducen a un comportamiento no convergente para condiciones sin retardo y bajos \overline{P}_{tot} , son excluidas del análisis.

Tal como se especificó en los estudios III-B1 y III-B2, para condiciones de operación de la NMG debajo de la superficie de la Fig. 7 la estabilidad del sistema está garantizada por el análisis propuesto. Por otra parte, por encima de la superficie corresponden a condiciones inciertas de estabilidad, dado la condición de suficiencia del análisis.

La Fig. 7(b) muestra un corte con distintos planos de τ_{max} de la superficie indicada en Fig. 7(a). Se puede observar que para sistemas con mayor retardo el rango de valores (k_{ii} , k_{pi}) donde el sistema es estable es más restringido.

La Fig. 7(b) busca facilitar la lectura de la superficie 7(a). La misma se generó a partir de tres cortes con distintos planos de τ constantes proyectados sobre el plano (k_{ii} , k_{pi}).

IV. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

Esta sección es la más relevante del presente artículo, ya que una vez presentada la formulación para evaluar la estabilidad del modelo y las superficies/resultados obtenidos a partir

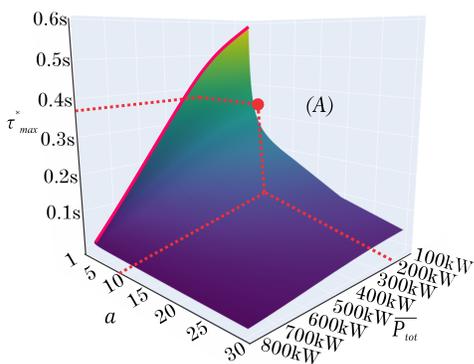


Figura 6. Gráfico de τ_{max}^* en función de \overline{P}_{tot} y la ganancia del control consensuado a .

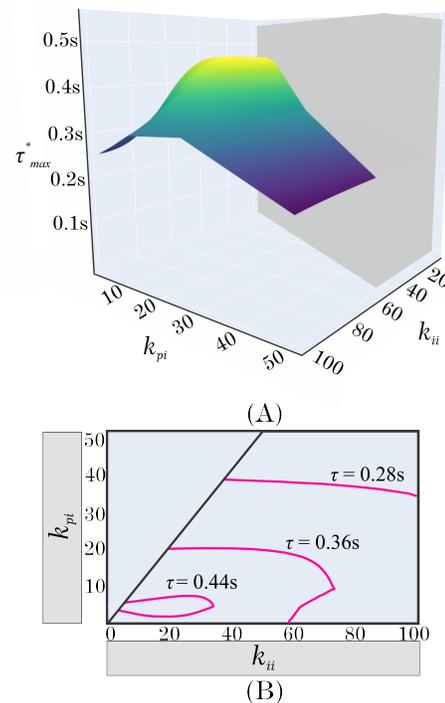


Figura 7. τ_{max}^* graficado como función de k_{ii} y k_{pi} . Además, se representa las curvas de intersección de la superficie con distintos hiperplanos de τ_{max}^* . Para la superficie presentada se consideró la distribución de potencia Nro. 1, la condición $\overline{P}_{tot} = 400$ kW y un valor constante de $k_{iv} = 3$.

de tal formulación, es posible compararlos con simulaciones circuitales del sistema para determinar si el comportamiento del mismo es consistente con lo indicado por el análisis o no.

Con tal objetivo, se desarrolla un entorno de simulación en MatLab/Simulink representando la NMG constituida por 4 MGs estudiada en la sección previa. A fin de hacer una comparación más apropiada, cada MG no es simulada como un único convertidor con una carga ZIP, sino que cada MG se simula constituida por distinto número de convertidores individuales. Los parámetros internos de cada elemento dentro de cada MG pueden consultarse en la Tabla I. Además, los parámetros del control distribuido interno a cada MG (capa primaria) se diseñó para garantizar la correcta separación de dinámicas con el control distribuido de NMG (capa secundaria) coherentemente con la suposiciones hechas al plantear la reducción de modelo en la sección II.

Sin embargo, es importante destacar la condensación de información que representan las superficies graficadas en las Figs. 5, 6 y 7 respecto a una simulación circuital. Las simulaciones presentadas en la corriente sección solo permiten mostrar el comportamiento del sistema en un punto de equilibrio y ante una perturbación concreta a la vez, mientras que las representaciones mostradas en las Figs. 5, 6 y 7 condensan información que representa infinitos puntos de operación e infinitas perturbaciones del sistema posible siempre que \overline{P}_{tot} y τ^* permanezcan debajo de los límites definidos por cada punto de operación en las Figs. 5, 6 y 7. Es decir, que las simulaciones circuitales permiten visualizar un subconjunto

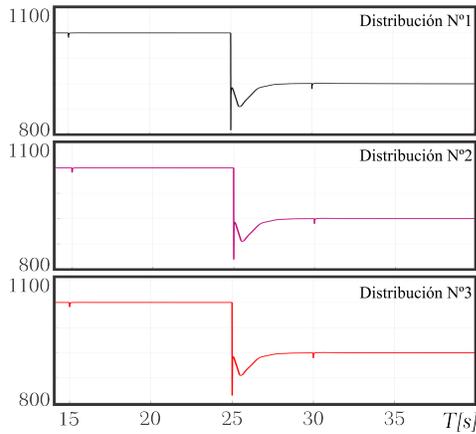


Figura 8. Tensiones de NMG v_{MG} en el punto de operación (A) en la Fig. 5 y las tres distribuciones de potencia consideradas.

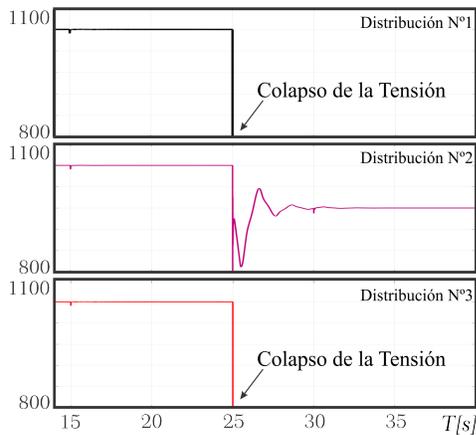


Figura 9. Tensiones de NMG v_{MG} en el punto de operación (B) en la Fig. 5 y las tres distribuciones de potencia consideradas.

acotado de los infinitos comportamientos posibles resumidos en las Figs. 5, 6 y 7.

IV-A. Análisis N°1

Respecto al Análisis N°1, se realizaron 6 simulaciones que incluyen las tres distribuciones descritas en el Cuadro II y las condiciones de operación indicadas como (A) y (B) en la Fig. 5. En las Figs. 8 y 9 la secuencia de eventos es idéntica:

- Para $t < 15$ s el sistema se encuentra operando en condición de carga mínima (P_{tot}).
- En $t = 15$ s, se genera una perturbación de la P de carga de pequeña señal.
- En $t = 25$ s, se produce un cambio del punto de operación de gran señal, el cual lleva al sistema a la condición más desfavorable de carga y tensión en el bus.
- En $t = 30$ s se produce otra perturbación de igual sentido y magnitud a la aplicada en $t = 15$ s para verificar que el sistema responda en forma estable ante una perturbación de pequeña señal.

Se puede observar en Fig. 8 que el sistema responde en forma estable para las tres distribuciones de potencia consi-

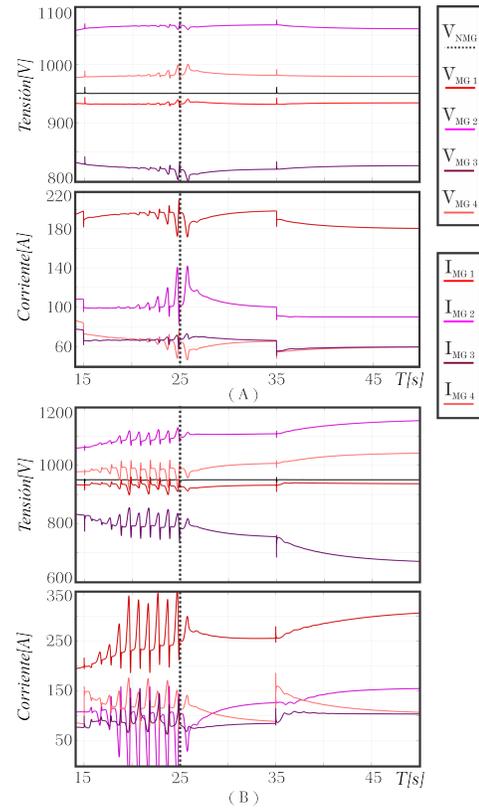


Figura 10. Tensiones de las MGs v_{MGi} y de la NMG v_{MG} , junto a las corrientes I_{MGi} frente a perturbaciones de pequeña señal y cambios en la ganancia a en la Fig. 6

deradas, coincidentemente con lo indicado en la Fig. 5. A su vez, se aprecia que las respuestas del sistema presentan mínimas diferencias debido a que los controladores comparten ganancias a través de los distintos casos, solamente diferenciándose en la amplitud de los sobrepicos. Por otra parte, en la Fig. 9 se observa que las distribuciones Nro. 1 y 3 sufren un colapso de la tensión cuando se intenta establecerlos en la peor condición de operación. En [6], se explica que la principal causa de tal respuesta es la ausencia de un punto de equilibrio estable al cual el sistema pueda converger luego del cambio en las condiciones de operación del sistema. Sin embargo, esto no ocurre para el caso de la distribución Nro. 2, lo cual recuerda que las curvas obtenidas en la Fig. 5 surgen de condiciones de estabilidad suficientes, mas no necesarias, y que son verificadas con caracter conservador, consecuencia de la formulación politópica y LMI empleadas. De este modo, un comportamiento contradictorio con lo predicho sería un comportamiento inestable por parte del sistema, para un conjunto de condiciones de operación establecidos como estable.

IV-B. Análisis N°2

En relación al segundo análisis se realizaron los cuatro ensayos presentados en las Figs. 10 y 11: dos analizando el comportamiento del sistema ante variaciones en el eje a y dos ante variaciones en el eje τ . En todas las simulaciones se comparte la secuencia de eventos:

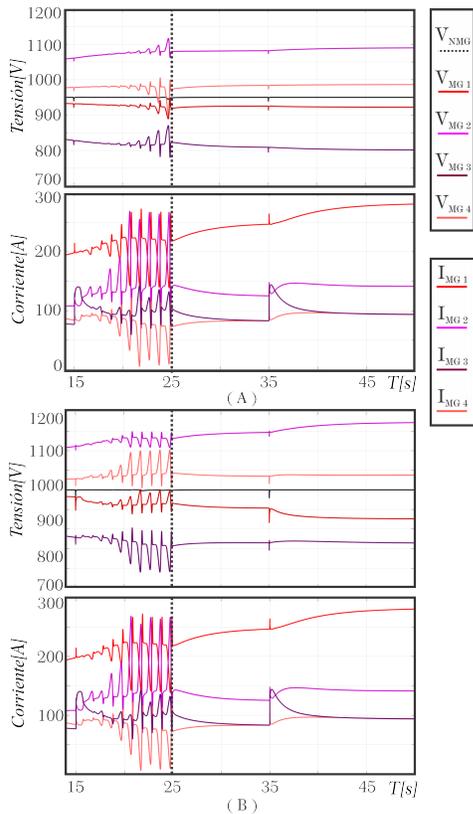


Figura 11. Tensiones de las MGs v_{MGi} y de la NMG v_{MG} , junto a las corrientes I_{MGi} frente a perturbaciones de pequeña señal y cambios en el retardo del sistema basados en la Fig. 6.

- Para $t < 15$ s el sistema se lleva lentamente a la condición de operación denotada como (A) en la Fig. 6.
- En $t = 15$ s, se genera una perturbación en P de pequeña señal y se analiza la evolución del sistema en el entorno al punto B.
- En $t = 25$ s, se produce un cambio en el sistema para desplazar el punto de operación nuevamente hacia adentro de la región determinada estable por la formulación y se deja al sistema evolucionar bajo la nueva condición de operación.
- En $t = 40$ s se produce otra perturbación de igual sentido y magnitud a la aplicada en $t = 15$ s para verificar la respuesta estable del sistema.

Sin embargo, en cada simulación la perturbación aplicada y/o el desplazamiento del punto de operación son distintos.

- En la Fig. 10(a), la perturbación corresponde a un escalón negativo de potencia que se aplica a las 4 MG simultáneamente y con magnitud proporcional a la distribución de potencia. Posteriormente, el sistema se estabiliza reduciendo la ganancia a de 10 a 3.
- En la Fig. 10(b), el proceso de estabilización es el mismo, mientras que la perturbación es ahora un escalón positivo de potencia que se aplica solo en la 3er MG.
- En la Fig. 11(a), la perturbación corresponde a un escalón positivo de potencia que se aplica a las 4 MG simultáneamente y con magnitud proporcional a la distribución de potencia. Mientras que el proceso de estabilización consiste en reducir el τ^* de 0,47 a 0,15.

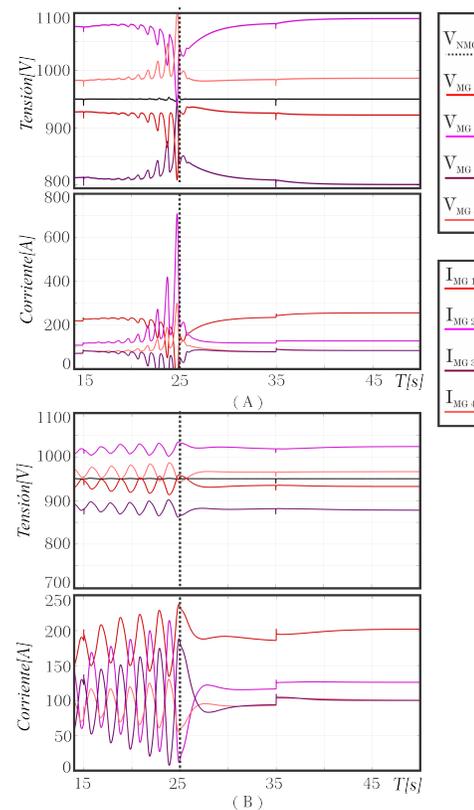


Figura 12. Tensiones de las MGs v_{MGi} y de la NMG v_{MG} , junto a las corrientes I_{MGi} frente a perturbaciones de pequeña señal para distintos cambios en el punto de operación en Fig. 7.

neamente y con magnitud proporcional a la distribución de potencia. Mientras que el proceso de estabilización consiste en reducir el τ^* de 0,47 a 0,15.

- En la Fig. 11(b), el proceso de estabilización es el del ítem anterior, pero la perturbación es un escalón positivo de potencia que en la 4ta MG.

En todos los casos se observa un comportamiento similar a las distintas perturbaciones. El sistema puede establecerse en el punto de operación (A) mediante un incremento gradual y suave de las condiciones P_{tot} y τ^* . Sin embargo, al aplicar una perturbación en forma de escalón, las tensiones individuales (v_{MGi}) y las corrientes totales de cada MG (I_{MGi}) divergen en un intento de mantener la tensión promedio en la NMG (v_{NMG}) de su valor de referencia. Contrariamente, cuando el sistema se establece en la región estable, este converge progresivamente a un estado de régimen permanente estable. A su vez, frente a una perturbación de igual signo y magnitud, el sistema responde en forma estable.

IV-C. Análisis N°3

Siguiendo un enfoque análogo, se realizaron dos ensayos para evaluar y contrastar con la información provista en la Fig. 7. En ambas simulaciones, la secuencia de eventos respeta lo descrito en IV-B, sin embargo, los cambios en el punto de operación se logran realizando distintas modificaciones en los parámetros de la NMG.

- En la Fig. 12 (a), la perturbación corresponde a un escalón positivo de potencia que se aplica a las 4 MG simultáneamente y con magnitud proporcional a la distribución de potencia. Posteriormente, el sistema se estabiliza reduciendo el retardo τ^* de 0,47 a 0,35.
- En la Fig. 12 (b), el sistema se estabiliza al ajustar las ganancias $[k_{ii}, k_{pi}]$ desde el par [80, 20] a [40, 10] para la condición $\tau^* = 0,40$.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo se realiza la validación por medio de simulaciones circuitales del análisis de estabilidad presentado en un trabajo previo. El escenario de simulación desarrollado para tal fin incluye los convertidores, controles, cargas y demás elementos constituyentes de cada MG, las cuales son interconectados considerando retardos en la comunicación para representar un escenario de NMG. Por lo tanto, se diferencia del modelo matemático donde existe una reducción en el orden del modelo y simplificaciones de los lazos de control de alta dinámica. El escenario fue simulado bajo distintos puntos de operación considerando condiciones de retardo, ajustes de las ganancias de los controladores y distribuciones de carga. A fin de contrastar las simulaciones con las condiciones de estabilidad predichas por la formulación, se simularon distintos cambios en el punto de operación del sistema verificando que el mismo se estabilizaba al llevarlo a alguna de las condiciones establecidas como estables, aún partiendo de condiciones inicialmente inciertas o inestables. Esta consistencia en los resultados permite también validar las simplificaciones realizadas para obtener el sistema de orden reducido empleado en la formulación. Además, el escenario de simulación es suficientemente complejo como para representar fenómenos de inestabilidad reportados en la literatura, como el colapso de la tensión en el bus debido a la pérdida de punto de equilibrio. La complejidad asociada con la evaluación circuital de los diferentes casos estudiados, resalta la utilidad de contar con una formulación analítica para el análisis de la estabilidad robusta de la microrred. Dicha formulación permite extraer conclusiones y generar representaciones de los entornos de operación estable utilizando un modelo de orden reducido.

REFERENCIAS

- [1] M. Shahidehpour and M. Khodayar, "Cutting campus energy costs with hierarchical control: The economical and reliable operation of a microgrid," *Electrification Magazine, IEEE*, vol. 1, pp. 40–56, 09 2013.
- [2] Q. Zhou, M. Shahidehpour, A. Paaso, S. Bahramirad, A. Alabdulwahab, and A. Abusorrah, "Distributed control and communication strategies in networked microgrids," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 22, no. 4, pp. 2586–2633, 2020.
- [3] J. Liu, W. Zhang, and G. Rizzoni, "Robust stability analysis of dc microgrids with constant power loads," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 1, pp. 851–860, 2018.
- [4] J. Simpson-Porco, F. Dörfler, and F. Bullo, "Voltage collapse in complex power grids," *Nature Communications*, vol. 7, p. 10790, 02 2016.
- [5] N. Barabanov, R. Ortega, R. Griño, and B. Polyak, "On existence and stability of equilibria of linear time-invariant systems with constant power loads," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 63, pp. 1–8, 11 2015.
- [6] Z. Liu, M. Su, Y. Sun, W. Yuan, H. Han, and J. Feng, "Existence and stability of equilibrium of dc microgrid with constant power loads," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 6, pp. 6999–7010, 2018.

- [7] M. Carnaghi, P. Cervellini, M. Judewicz, R. Garcia Retegui, and M. Funes, "Stability analysis of a networking dc microgrid with distributed droop control and cpls," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 21, p. 966–975, Sep. 2023.
- [8] M. Dong, L. Li, Y. Nie, D. Song, and J. Yang, "Stability analysis of a novel distributed secondary control considering communication delay in dc microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 6, pp. 6690–6700, 2019.
- [9] A. B. Shyam, S. Anand, and S. R. Sahoo, "Effect of communication delay on consensus-based secondary controllers in dc microgrid," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 68, no. 4, pp. 3202–3212, 2021.
- [10] W. Yao, Y. Wang, Y. Xu, and C. Dong, "Small-signal stability analysis and lead-lag compensation control for dc networked-microgrid under multiple time delays," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 38, no. 1, pp. 921–933, 2023.
- [11] Y. Yu, G.-P. Liu, and W. Hu, "Coordinated distributed predictive control for voltage regulation of dc microgrids with communication delays and data loss," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 14, no. 3, pp. 1708–1722, 2023.
- [12] Z. Liu, M. Su, Y. Sun, H. Han, X. Hou, and J. M. Guerrero, "Stability analysis of dc microgrids with constant power load under distributed control methods," *Automatica*, vol. 90, p. 62–72, Apr. 2018.
- [13] M. Carnaghi, P. Cervellini, R. G. Retegui, M. Judewicz, and M. Funes, "Analysis of constant power loads impact on dc microgrid with distributed control," in *2022 IEEE Biennial Congress of Argentina (ARGENCON)*, pp. 1–7, 2022.
- [14] M. Carnaghi, P. Cervellini, R. G. Retegui, M. Judewicz, and M. Funes, "Stability analysis of a dc networking microgrid with consensual control, active and passive loads," in *XX Reunión de Trabajo en Procesamiento de la Información y Control*, pp. 1–7, 2023.
- [15] W. Xie, M. Han, W. Cao, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez, "System-level large-signal stability analysis of droop-controlled dc microgrids," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 36, no. 4, pp. 4224–4236, 2021.
- [16] S. Liu, X. Li, M. Xia, Q. Qin, and X. Liu, "Takagi-sugeno multimodeling-based large signal stability analysis of dc microgrid clusters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 36, no. 11, pp. 12670–12684, 2021.
- [17] A. P. N. Tahim, D. J. Pagano, E. Lenz, and V. Stramosk, "Modeling and stability analysis of islanded dc microgrids under droop control," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 8, pp. 4579–4607, 2015.
- [18] M. Grant and S. Boyd, in *Graph implementations for nonsmooth convex programs*, pp. 95–110, Springer-Verlag Limited, 2008.
- [19] Y. He, Q.-G. Wang, L. Xie, and C. Lin, "Further improvement of free-weighting matrices technique for systems with time-varying delay," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 52, no. 2, pp. 293–299, 2007.
- [20] K. Gu, V. Kharitonov, and J. Chen, *Stability of Time-Delay Systems*. New York: Springer, 2003.
- [21] Y. He, M. Wu, J.-H. She, and G.-P. Liu, "Parameter-dependent lyapunov functional for stability of time-delay systems with polytopic-type uncertainties," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 49, no. 5, pp. 828–832, 2004.
- [22] P. Gahinet, P. Apkarian, and M. Chilali, "Affine parameter-dependent lyapunov functions and real parametric uncertainty," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 41, no. 3, pp. 436–442, 1996.
- [23] M. Mansour, "Sufficient conditions for the asymptotic stability of interval matrices," *International Journal of Control*, vol. 47, no. 6, pp. 1973–1974, 1988.
- [24] M. Grant and S. Boyd, "CVX: Matlab software for disciplined convex programming, version 2.1." <http://cvxr.com/cvx>, 2014.
- [25] M. ApS, *The MOSEK optimization toolbox for MATLAB manual. Version 9.0.*, 2019.
- [26] J. He, X. Wu, X. Wu, Y. Xu, and J. M. Guerrero, "Small-signal stability analysis and optimal parameters design of microgrid clusters," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 36896–36909, 2019.