

Multivariable Control Structure Design for Voltage Regulation in Active Distribution Networks

Pablo G. Rullo, Lautaro Braccia, Diego Feroldi, and David Zumoffen

Abstract—The distributed generation (DG) paradigm has driven the growth of small and medium-scale renewable generation systems located close to demand centers. As a consequence, traditional distribution networks are in a transition towards the so-called Active Distribution Networks (ADNs). However, the intermittent nature of renewable generation causes rapid voltage fluctuations that are difficult to manage and deteriorate power quality. In the literature, the tasks corresponding to the design of voltage control in ADNs are addressed in a heuristic and sequential manner. In this work, a systematic strategy is proposed for the analysis, design and implementation of controllers for voltage regulation in ADNs with DG, based on the Plant Wide Control (PWC) theory of the Process Systems Engineering (PSE) community. This strategy allows us to find control structures that optimize the hardware necessary for its implementation and have good dynamic performance. The general PWC design procedure is formulated as a mixed integer two-level nonlinear programming with cost functions that only depend on the steady state models of the network. To evaluate the proposed methodology, the IEEE 33 distribution network model is used, to which 6 DGs are incorporated. The application of the proposed methodology to identify and evaluate different control structures contributes to the generation of systematic tools to approach the ADN control design process in a comprehensive manner, based on quantitative information.

Index Terms—Distributed Generation, Active Distribution Network, Voltage Control, Multivariable Control design, Process System Engineering.

I. INTRODUCCIÓN

El paradigma de la generación distribuida (GD) ha fomentado el crecimiento de sistemas de generación de energía de pequeña y mediana escala situados cercanos a los centros de demanda [1]. Como consecuencia, en los últimos años las redes de distribución tradicionales con flujos de potencia unidireccionales se encuentran en una transición hacia lo que se denomina Redes de Distribución Activas (RDAs), con posibles flujos de potencia bidireccionales debidos a la inserción de GD y otros tipos de recursos energéticos distribuidos (REDs) en diversos nodos de la red [2]. Esto, junto a la alta relación R/X de las líneas de media y baja tensión, y la característica intermitente de las fuentes de generación basadas en energías

renovable no convencional, pueden generar fluctuaciones y desviaciones en los perfiles de tensión de los alimentadores. El diseño e implementación de un adecuado sistema de control que permita una operación eficiente, económicamente óptima y que cumpla con requisitos de seguridad y calidad de energía resulta fundamental. En este sentido, la utilización de la capacidad de control de potencia activa y/o reactiva de los convertidores electrónicos de potencia que sirven de interfaz entre los REDs y la RDA es clave para un control eficiente de la tensión [3].

En este trabajo se propone abordar el diseño del sistema de control a partir de herramientas metodológicas provenientes de la disciplina denominada Ingeniería de Sistemas de Procesos (PSE, por sus siglas en inglés). La PSE aborda de manera multidisciplinaria y en forma global el comportamiento de sistemas complejos tales como sistemas biológicos, procesos industriales, sistemas de generación de energía, etc [4]. La integración entre las áreas de PSE y sistemas de potencia, en particular el control de tensión en RDAs permite un abordaje más eficiente e integral [5].

Uno de los principales objetivos en el control de tensión en RDAs es la regulación de tensión en alguno nodos de la red y mantener a la totalidad de ellos dentro de determinados límites. En [6] los autores plantean para el caso de RDA y microrredes que los requerimientos de control son diversos y operan en diferentes escalas de tiempo por lo que pueden abordarse a partir de una estructura de control jerárquica. Desde esta perspectiva, en este trabajo se abordan los desafíos correspondientes a una capa de control secundario. A su vez, un tema importante que debe abordarse en la etapa de diseño del control tiene que ver con la interacción del sistema en lazo cerrado. En particular, en la regulación de tensión a partir de múltiples REDs pueden existir interacciones que produzcan desde un deterioro de la respuesta dinámica hasta oscilaciones o inestabilidad [7]. En este sentido, resulta beneficioso considerar a las RDAs como sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) [8]. En la literatura que aborda el problema de la regulación de tensión en RDAs estas tareas en general son abordadas de manera heurística y secuencial. La definición de que variables utilizar como manipuladas, que nodos de la red medir y/o controlar, o que tipo de implementación de controlador realizar, con el consecuente requerimiento de infraestructura de comunicación, son decisiones tomadas de manera aislada sin considerar la interrelación que existe entre las mismas.

Una de las primeras decisiones en el mencionado abordaje secuencial, es la definición del tipo de implementación del controlador y su correspondiente infraestructura de comunicación necesaria. Esto se realiza basándose en criterios

Pablo G. Rullo, CIFASIS-CONICET, Rosario, Argentina. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Facultad Regional San Nicolás (FRSN-UTN), San Nicolás, Buenos Aires, Argentina. (e-mail: prullo@frsn.utn.edu.ar // rullo@cifasis-conicet.gov.ar).

Lautaro Braccia, CIFASIS-CONICET, Rosario, Argentina. (e-mail: braccia@cifasis-conicet.gov.ar)

Diego Feroldi, CIFASIS-CONICET, Rosario, Argentina. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA-UNR) (e-mail: feroldi@cifasis-conicet.gov.ar)

David Zumoffen, CIFASIS-CONICET, Rosario, Argentina. Facultad Regional Rosario (FRRo-UTN) (e-mail: zumoffen@cifasis-conicet.gov.ar)

tecnológicos o de costos, aunque sin incorporar elementos referidos al desempeño del control [9]. Con respecto a los diferentes abordajes posibles, en [10] los autores realizan una clasificación primordialmente determinada por la necesidad o no de comunicación. De esta manera, los esquemas de control *local* son aquellos que sólo utilizan mediciones en el punto de conexión común (PCC) para definir las acciones de control en cada uno de los REDs [11]. Luego, se presenta una clasificación adicional entre aquellos esquemas basados en comunicación que tiene que ver con la forma en que la misma es intercambiada entre los elementos que conforman el sistema de control: (i) centralizado, (ii) descentralizado, (iii) distribuido. En un enfoque *centralizado*, un controlador recibe las mediciones necesarias de diversos puntos de la red y luego reparte las referencias a cada uno de los REDs involucrados en la estructura de control. En un control *distribuido* cada una de las unidades de control sólo requiere algunas mediciones de unidades vecinas. De esta manera todas cooperan para alcanzar un objetivo común [12]. Finalmente, el esquema *descentralizado* es una combinación de estos últimos, donde existen agrupamientos de nodos en la red que son controlados con un criterio centralizado local mientras que la comunicación se da entre cada uno de los estos controladores. En [10] se presenta una extensa revisión de estrategias distribuidas y descentralizadas para el control del voltaje en RDAs. Para cada estrategia se detalla el esquema de coordinación, las variables de control utilizadas, los objetivos de control, el modelo de la red de distribución y la metodología de solución.

Los enfoques de control centralizados en general se basan en modelos de la red y resuelven una optimización en línea (realizan el flujo de carga óptimo) para obtener las referencias de las variables manipuladas intervinientes en cada instante de control, en general la potencia reactiva y/o activa de los REDs. Si bien este tipo de estrategias presentan ventajas en cuanto a la optimalidad del resultado, o la posibilidad de incorporar criterios económicos de manera directa en la formulación, la carga computacional como así también los requerimientos de comunicación resultan un escollo para su implementación en el problema de regulación de tensión. Es por esto que en el marco del estado actual de la infraestructura y tecnologías disponibles en las redes de distribución tradicionales, los esquemas de control del tipo local o distribuidos representan un camino más factible en cuanto a su implementación en el corto-mediano plazo [9].

Una vez definido el tipo de implementación y por lo tanto el esquema de comunicación necesario, se deben seleccionar las variables controladas y manipuladas. Uno de los principales criterios es considerar que sólo son medidos y controlados aquellos nodos donde existe inserción de GD [13]. Otro abordaje ampliamente utilizado es la utilización de zonas de control. En este caso, se divide la red en diferentes zonas en base a algún criterio, por ejemplo, distancia eléctrica, sensibilidad de la tensión con respecto a las variable manipuladas, etc., y para cada una de ellas se considera un nodo representativo. Este tipo de abordaje es utilizado en implementaciones tanto centralizadas como descentralizadas.

Dentro de los esquemas de control centralizados, en [14] se propone un control predictivo basado en modelos (MPC)

para coordinar de manera óptima el despacho de potencia activa y reactiva de múltiples GD, la potencia activa de almacenadores de energía y cambios en el cambiador de tomas del transformador de la subestación. Se utiliza un criterio de control por zonas, donde se divide la red a partir de una estrategia de “clustering” basada en índices de sensibilidad de la tensión con respecto a la potencia activa y reactiva, y luego se seleccionan como variable controlada un nodo representativo en cada zona. Dicha selección se realiza de manera heurística: en caso de existir en la zona un nodo con GD, dicho nodo será el representativo, en caso contrario se selecciona la punta de la rama mas lejana a la subestación. En [15], los autores también adoptan una estrategia centralizada basada en MPC. Las potencias activas y reactivas de los GD, y el cambiador de tomas de los transformadores son las variables manipuladas. En este caso se asumen pesos diferenciados en la función objetivo para jerarquizar el uso de las mismas. Luego, para la selección de las variables controladas se adopta un criterio de distribución homogéneo, por lo que se miden los nodos necesarios para que no haya una distancia de más de dos nodos entre una carga y un nodo controlado. De esta manera se adicionan los sensores necesarios considerando que todos los puntos donde existe GD son medidos. Al igual que en los casos anteriores, en [16] se presenta una estrategia para la regulación de tensión en una RDA basada en la resolución de un problema de optimización. Sin embargo, en este caso se adopta un estrategia de optimización distribuida a partir del método de ascendente dual lográndose tiempos de resolución que permiten su implementación en línea. En este caso los autores consideran que existe un GD en cada nodo de la red, y seleccionan la totalidad de los mismos como variables controladas. En [17] se presenta el diseño de una estructura de control local basada en lazos PI. El ajuste de los controladores se realiza teniendo en cuenta criterios de estabilidad nominal y robusta, como así también capacidad de manejo de falla frente a la pérdida total en un generador. Si bien en este trabajo los autores abordan el problema de la regulación de tensión a partir de una óptica de sistemas MIMO, sólo se aborda el ajuste del controlador, no así el diseño integral del mismo, con la selección óptima de variables manipuladas, controladas y estructura del controlador. En [18] se propone un control local dentro de un esquema de control por zonas. La definición de las mismas se realiza a partir de criterios de sensibilidad de tensión. En este caso, las definiciones de las zonas de control son dinámicas de acuerdo a la actualización del punto operativo de la red. El controlador se implementa a partir de lazos PI, aunque a diferencia de [17], el control no regula la tensión a una referencia determinada.

Como vemos, en las estrategias propuestas en la literatura, al menos para conocimiento de los autores, no existe un abordaje integral que permita tomar las principales decisiones referidas al diseño e implementación de la estructura de control de manera unificada. Esto puede repercutir en una sobre o subselección de variables, o en requisitos de infraestructura de comunicación innecesarios o sobredimensionados en relación a los beneficios obtenidos, con el consecuente incremento de costos, aumento de la posibilidad de fallas o deterioro en el desempeño general del control. Una metodología sistemática

e integrada que aporte elementos para el análisis, diseño e implementación de los controladores en las RDAs desde una óptica global, donde se optimicen la cantidad de nodos a controlar (variables controladas), la cantidad de REDs que participarán del control (variables manipuladas) y la estructura del controlador resultantes es un área no abordada para el problema de regulación de tensión en RDAs.

En este trabajo se propone una estrategia sistemática para el análisis, diseño e implementación de controladores para la regulación de tensión en RDAs con inclusión de REDs basado en la teoría de Control de Plantas Completas (PWC, por sus siglas en inglés). Esta estrategia permite encontrar controladores que optimicen el *hardware* necesario para su implementación y tengan un buen desempeño dinámico.

Para evaluar la metodología propuesta se utiliza el modelo típico de red de distribución radial de IEEE de 33 nodos presentado en [19]. A dicha red se le incorporan 6 REDs distribuidos en diferentes nodos de la red. Los cálculos de estado estacionario se realizan con el paquete MATPOWER [20]. Finalmente, las estructuras de control diseñadas son implementadas y testeadas dinámicamente con SimPowerSystems de Matlab.

II. SOBRE EL PROBLEMA DE PWC

La mayoría de las teorías de control asumen que la estructura de control viene dada desde un principio. Por lo tanto, no responden algunas preguntas básicas: ¿cuántas y cuáles variables de salida deben ser controladas?, ¿cuántas y cuáles variables de entrada necesitan ser manipuladas?, ¿cuál es el vínculo que debería existir entre dichos conjuntos?, ¿qué interacción del controlador, política de implementación (local, descentralizada, distribuida, centralizada) y tecnología debe definirse?, ¿qué ajuste del controlador debe seleccionarse? El área de investigación conocida como diseño de estructuras de control multivariable (ECM) o PWC intenta abordar estas decisiones de manera sistemática [21].

A. Definición del Problema de Control

De forma general, partimos de considerar un proceso estable con n_y potenciales variables controladas (VCs, $\mathbf{y}(s)$), n_u variables manipuladas disponibles (VMs, $\mathbf{u}(s)$) y n_d variables de perturbación (VPs, $\mathbf{d}(s)$). Asumimos que el modelo de dicho proceso viene dado en matrices de funciones de transferencia en el dominio de Laplace $\mathbf{G}(s)$ y $\mathbf{D}(s)$, con dimensiones $n_y \times n_u$ y $n_y \times n_d$, respectivamente. Entonces, una de las finalidades de toda estrategia de PWC es lograr particionar el proceso original como se muestra en (1).

$$\mathbf{y}(s) = \mathbf{G}(s)\mathbf{u}(s) + \mathbf{D}(s)\mathbf{d}(s),$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}_s(s) \\ \mathbf{y}_r(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_s(s) & \mathbf{G}_s^*(s) \\ \mathbf{G}_r(s) & \mathbf{G}_r^*(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_s(s) \\ \mathbf{u}_r(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{D}_s(s) \\ \mathbf{D}_r(s) \end{bmatrix} \mathbf{d}(s), \quad (1)$$

donde los subsistemas involucrados tienen la siguiente descripción:

- $\mathbf{G}_s(s)$ y $\mathbf{D}_s(s)$ forman parte del subproceso a ser controlado con dimensiones $n_q \times n_q$ y $n_q \times n_d$, respectivamente
- $\mathbf{G}_r(s)$ y $\mathbf{D}_r(s)$ conforman el subproceso no controlado con dimensiones $(n_y - n_q) \times n_q$ y $(n_y - n_q) \times n_d$, respectivamente,
- $\mathbf{G}_s^*(s)$ y $\mathbf{G}_r^*(s)$ matrices remanentes con dimensiones $n_q \times (n_u - n_q)$ y $(n_y - n_q) \times (n_u - n_q)$, respectivamente,

siendo $n_q \leq \min(n_y, n_u)$ el número de variables que deben ser controladas. Las variables $\mathbf{u}_s(s)$ son las VMs seleccionadas para controlar las salidas $\mathbf{y}_s(s)$ a las trayectorias deseadas $\mathbf{y}_s^{sp}(s)$. Las variables de entradas remanentes $\mathbf{u}_r(s)$ ($(n_y - n_q) \times 1$) podrían o no ser utilizadas para fines de control. En este trabajo se suponen fijas. Debido a que trabajaremos con modelos normalizados, entonces $\mathbf{u}_r(s) = 0$. El vector de salidas $\mathbf{y}_r(s)$ agrupa todas las variables no controladas (VNCs). En nuestro caso, las VMs serán las Q_{DG}^m , mientras que las potencias activas P_{DG}^m serán consideradas variables de perturbación (VPs). Las potenciales VCs serán las tensiones en los nodos de la red. De esta manera, es el propio algoritmo el que realiza la selección óptima de los nodos a controlar y su apareamiento con respecto a las VMs.

III. DISEÑO DE PWC

El enfoque general de la metodología propuesta se basa un problema de optimización mixto entero no lineal de doble nivel (BLMINLP) con funciones costo que sólo dependen de modelos de estado estacionario (EE) de la red [22]. Como modelos de EE se utilizan las matrices de sensibilidad de la RDA [23]. Las mismas pueden obtenerse a partir de la inversa del Jacobiano que se obtiene en el cálculo del flujo de potencia, o también a partir de ensayos con pequeños saltos de tipo escalón en las variables de interés [24], [25]. Dicha propuesta representa un problema de optimización en donde las decisiones clásicas relacionadas con la selección de variables controladas y/o manipuladas, el apareamiento entrada-salida, el criterio de robustez/estabilidad y la estructura del controlador (*diagonal, sparse, full*) se parametrizan en una superestructura a través de variables de selección binarias. La estrategia parte de considerar que se dispone de un sistema estable o estabilizado. Esta metodología consta de dos contribuciones de estado estacionario llamadas suma de desviaciones cuadráticas (SSD) e índice de evaluación de carga neta (NLE), que tienen una fuerte conexión con las propiedades de controlabilidad y rendimiento del control. La SSD cuantifica las desviaciones producidas en las variables no controladas y/o manipuladas por cambios en las referencias y perturbaciones. Por otra parte, el NLE cuantifica el impacto de la interacción del controlador multivariable a lazo cerrado.

Considerando la partición del proceso dado en la Ec. (1), la metodología puede resumirse en la Ec. (2) y sus principales conceptos serán descriptos en las próximas secciones. En este caso el problema BMINLP es resuelto a partir de algoritmos genéticos (AG) utilizando la herramienta correspondiente de MATLAB, mientras que en [26] se propone una reformulación MIQP del problema implementado en GAMS y resuelto utilizando el solver CPLEX.

Para contextualizar el enfoque general de esta estrategia a continuación se desarrollaran breves comentarios sobre estos índices.

$$\min_{\mathbf{z}^I, \mathbf{z}^O, \mathbf{z}^S} [\text{SSD} + \text{NLE}] \quad (2a)$$

$$\text{s.t. SSD} = \|\mathbf{G}_r \mathbf{G}_s^{-1}\|_F^2 + \|(\mathbf{D}_r - \mathbf{G}_r \mathbf{G}_s^{-1} \mathbf{D}_s)\|_F^2 \quad (2b)$$

$$\text{NLE} = \|\mathbf{I} - \tilde{\mathbf{G}}_s \mathbf{G}_s^{-1}\|_F^2 + \|\tilde{\mathbf{G}}_s \mathbf{G}_s^{-1} \mathbf{D}_s\|_F^2 \quad (2c)$$

$$q \leq \min\{m, n\} \quad (2d)$$

$$\|\mathbf{z}^I\|_1 = \|\mathbf{z}^O\|_1 = q \quad (2e)$$

$$\mathbf{T}_O = \text{nre}[\text{diag}(\mathbf{z}^O)], \quad \mathbf{T}_I = \text{nce}[\text{diag}(\mathbf{z}^I)] \quad (2f)$$

$$\mathbf{G}_s = \mathbf{T}_O \mathbf{G} \mathbf{T}_I, \quad \mathbf{D}_s = \mathbf{T}_O \mathbf{D} \quad (2g)$$

$$\mathbf{G}_r = \bar{\mathbf{T}}_O \mathbf{G} \bar{\mathbf{T}}_I, \quad \mathbf{D}_r = \bar{\mathbf{T}}_O \mathbf{D} \quad (2h)$$

$$\tilde{\mathbf{G}}_s = \mathbf{G}_s \otimes (\mathbf{z}^P + \mathbf{z}^S) \quad (2i)$$

$$\Gamma = \mathbf{z}^P + \mathbf{z}^S \quad (2j)$$

$$\text{Re} \left[\lambda_i \left(\mathbf{G}_s (\tilde{\mathbf{G}}_s^{-1}) \right) \right] > 0, \quad i = 1, \dots, q \quad (2k)$$

$$\sum_i \sum_j \mathbf{z}^S(i, j) \mathbf{z}^P(i, j) = 0 \quad (2l)$$

$$\mathbf{z}^I \in \mathbb{B}^m, \quad \mathbf{z}^O \in \mathbb{B}^n, \quad \mathbf{z}^S \in \mathbb{B}^{q \times q} \quad (2m)$$

$$\left[\begin{array}{l} \min_{\mathbf{z}^P} \Lambda_n \\ \text{s.t. } \Lambda = \mathbf{G}_s \otimes (\mathbf{G}_s^{-1})^T \\ \Lambda_n = \|\mathbf{z}^P - \Lambda\|_{\text{sum}} \\ \sum_i \mathbf{z}^P(i, j) = \sum_j \mathbf{z}^P(i, j) = 1 \\ \mathbf{z}^P \in \mathbb{B}^{q \times q} \end{array} \right] \quad (2n)$$

A. Selección de VCs y VMs

Supongamos que el subproceso $\mathbf{G}_s(s)$ de la Ec. (1) es controlado con una estructura de control con acción integral, en estado estacionario ($s = 0$) tenemos que todas las variables de salida alcanzan su valor de set-point $\mathbf{y}_s = \mathbf{y}_s^{\text{sp}}$, \mathbf{y} ,

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_s &= \mathbf{G}_s^{-1} \mathbf{y}_s^{\text{sp}} - \mathbf{G}_s^{-1} \mathbf{D}_s \mathbf{d}^* = \mathbf{u}_s^{\text{sp}} + \mathbf{u}_s^{\text{d}}, \\ \mathbf{y}_r &= \mathbf{G}_r \mathbf{G}_s^{-1} \mathbf{y}_s^{\text{sp}} + (\mathbf{D}_r - \mathbf{G}_r \mathbf{G}_s^{-1} \mathbf{D}_s) \mathbf{d}^* = \mathbf{y}_r^{\text{sp}} + \mathbf{y}_r^{\text{d}}, \end{aligned} \quad (3)$$

donde $\mathbf{u}_s^{\text{sp}} = \mathbf{G}_s^{-1} \mathbf{y}_s^{\text{sp}}$ y $\mathbf{u}_s^{\text{d}} = -\mathbf{G}_s^{-1} \mathbf{D}_s \mathbf{d}^*$ las componentes de las variables manipuladas \mathbf{u}_s vinculadas a los cambios de set-point y a los efectos de las perturbaciones, respectivamente. De manera similar, las variables no controladas pueden particionarse como $\mathbf{y}_r^{\text{sp}} = \mathbf{G}_r \mathbf{u}_s^{\text{sp}}$ y $\mathbf{y}_r^{\text{d}} = \mathbf{G}_r \mathbf{u}_s^{\text{d}} + \mathbf{D}_r \mathbf{d}^*$.

De esta manera, podemos observar que el índice SSD en la Ec. (2b) cuantifica las desviaciones de las variables no controladas \mathbf{y}_r respecto de sus puntos de operación nominal cuando cambios de set-point y perturbaciones ocurren individualmente en la planta (principio de superposición). Las propiedades relacionadas con la minimización del índice SSD fueron analizadas con mayor detalle en [22]. Allí, los autores demuestran que la minimización de dicho índice tiende a maximizar el mínimo valor singular del subproceso \mathbf{G}_s , es decir, se obtiene un subproceso bien condicionado que es fácil de controlar [22].

Las Ecs. (2d)-(2h) permiten seleccionar parte del modelo original de la planta, representado por las matrices \mathbf{G} y \mathbf{D} . Por otro lado, las matrices de transformación \mathbf{T}_O y \mathbf{T}_I dependen de las variables de decisión binarias \mathbf{z}^O y \mathbf{z}^I , respectivamente. Estas matrices indican las filas (VCs) y columnas (VMs) de las matrices del proceso que deben ser seleccionadas.

Por otro lado con la Ec. (2e) exigimos igual número de variables controladas y variables manipuladas. Finalmente, las funciones $\text{nre}(\cdot)$ y $\text{nce}(\cdot)$ se utilizan para eliminar las filas y columnas de ceros de las matrices diagonales.

B. Estructura del Controlador

Una vez que se definió la partición del modelo según la Ec. (1), es necesario diseñar un controlador multivariable para $\mathbf{G}_s(s)$. Asumimos, sin pérdida de generalidad, que utilizaremos un control basado en control por modelo interno (IMC, por sus siglas en inglés). Luego, el controlador vendría dado por

$$\mathbf{G}_c(s) = \tilde{\mathbf{G}}_s^{-1}(s) \mathbf{F}(s), \quad (4)$$

donde $\tilde{\mathbf{G}}_s(s)$ es una selección particular de $\mathbf{G}_s(s)$ y $\mathbf{F}(s)$ es una matriz diagonal que representa el filtro pasa bajo. En este contexto, las VCs a lazo cerrado están definidas por:

$$\mathbf{y}_s(s) = \mathbf{F}(s) \mathbf{y}_s^{\text{sp}}(s) + (\mathbf{I} - \mathbf{F}(s)) \mathbf{y}_s^{\text{net}}(s), \quad (5)$$

donde

$$\mathbf{y}_s^{\text{net}}(s) = \mathbf{A}_n(s) \mathbf{y}_s^{\text{sp}}(s) + \mathbf{B}_n(s) \mathbf{d}^*(s), \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_n(s) &= \left[\mathbf{I} + \left(\mathbf{G}_s(s) - \tilde{\mathbf{G}}_s(s) \right) \mathbf{G}_c(s) \right]^{-1} \\ &\quad \left(\mathbf{G}_s(s) - \tilde{\mathbf{G}}_s(s) \right) \mathbf{G}_c(s), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\mathbf{B}_n(s) = \left[\mathbf{I} + \left(\mathbf{G}_s(s) - \tilde{\mathbf{G}}_s(s) \right) \mathbf{G}_c(s) \right]^{-1} \mathbf{D}_s(s). \quad (8)$$

La Ec. (6) es conocida como efecto de carga neta y permite cuantificar la interacción multivariable del proceso a lazo cerrado. Si observamos la Ec. 5, podemos deducir que el segundo término, asociado con el efecto de carga neta, es una perturbación desde el punto de vista de las variables de salida. Un análisis exhaustivo de este término puede encontrarse en [22] donde se propone un nuevo índice de llamado evaluación de carga neta (NLE) que se basa en la minimización de $\mathbf{y}_s^{\text{net}}$ en estado estacionario usando la suma de los desvíos cuadráticos (Ec. (2c)). La expresión de $\mathbf{y}_s^{\text{net}}$ en estado estacionario viene dada por:

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_s^{\text{net}} &= \left(\mathbf{I} - \tilde{\mathbf{G}}_s \mathbf{G}_s^{-1} \right) \mathbf{y}_s^{\text{sp}} + \left(\tilde{\mathbf{G}}_s \mathbf{G}_s^{-1} \mathbf{D}_s \right) \mathbf{d}^* \\ &= \mathbf{y}_s^{\text{sp}} - \tilde{\mathbf{G}}_s \mathbf{u}_s^{\text{sp}} - \tilde{\mathbf{G}}_s \mathbf{u}_s^{\text{d}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Básicamente, el índice NLE propuesto permite definir una diferencia específica planta-modelo de manera de lograr la mejor interacción del IMC. Esta interacción es la que genera el mejor rendimiento a lazo cerrado.

La selección de la diferencia planta-modelo es realizado en la Ec. (2i) a partir de las matriz de decisión binaria $\Gamma = \mathbf{z}^P + \mathbf{z}^S$ que tiene tamaño $q \times q$. La matriz \mathbf{z}^P representa el mejor apareamiento entrada-salida descentralizado y es obtenida a partir de la minimización interna, i.e. Ec. (2n). Por otro lado,

\mathbf{z}^S es la selección del modelo sparse que minimiza el índice NLE y que está dado a partir de \mathbf{z}^P . Según podemos observar en la Ec. (2n) la selección de \mathbf{z}^P se realiza a partir de la minimización del índice conocido como el número RGA (RGA-number), $\Lambda_n = \|\mathbf{z}^P - \Lambda\|_{\text{sum}}$, que depende de la matriz de ganancias relativas (RGA), $\Lambda = \mathbf{G}_s \otimes (\mathbf{G}_s^{-1})^T$. Finalmente, la Ec. (2l) representa restricciones estructurales y la Ec. (2j) es un criterio de estabilidad/robustez para estructuras de control multivariantes basados en la teoría de IMC [26]. En esta última ecuación $\text{Re}[\cdot]$ es una función que obtiene la parte real de los i -ésimos autovalores representados por $\lambda_i(\cdot)$.

IV. CASO DE ESTUDIO

A. Características de la RDA

La metodología de diseño DCM se evalúa en la red de distribución radial IEEE de 33 nodos y 13.2 kV de tensión nominal originalmente propuesta por [19]. Esta red es utilizada en la literatura como la red estándar para estudios en el área de redes de distribución activas [27]. La topología de la misma se muestra en la Fig. 1. A la topología original presentada en [19] se le agregaron 6 GDs en los nodos 14, 18, 21, 25, 30 y 33, donde cada GD está compuesto un arreglo de paneles PV con potencia nominal activa y reactiva de 500 kW y 500 kVAr, respectivamente. Las especificaciones de nodos y ramas de la red pueden consultarse en [19]. Tanto la ubicación como las potencias nominales de los GDs tienen un importante impacto en el diseño y desempeño del control. Sin embargo, su localización y dimensionamiento óptimo no se encuentran dentro de los alcances de este trabajo.

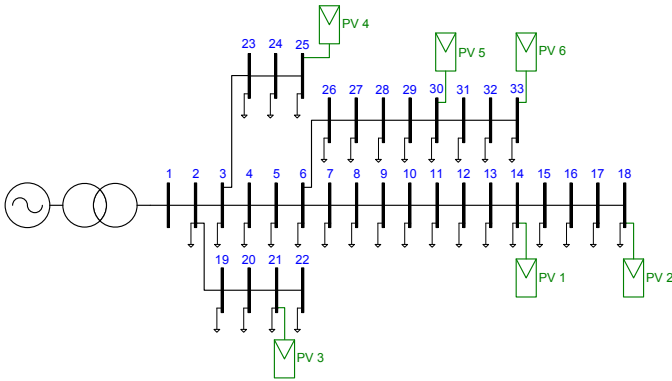


Fig. 1. Red de distribución de 33 nodos IEEE. Generadores fotovoltaicos distribuidos en los nodos 14, 18, 21, 25, 30 y 33.

Cada GD es controlado en un esquema de soporte de red. Las tensiones y corrientes internas se consideran perfectamente controlados. Mayores detalles pueden encontrarse en [3]. En nuestro caso las referencias de potencia activa (P_{DG}^r) será definida por un algoritmo de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT). Luego, se utiliza la capacidad de regulación de potencia reactiva de los inversores para el control de tensión a través del controlador MIMO $G_c(s)$. Este bloque es el encargado, por lo tanto, de definir las referencias de potencia reactiva de los REDs (Q_{DG}^r) con el objetivo de controlar la tensión de determinados nodos (v_j^m) de acuerdo a un perfil de tensión determinado (v_j^r). Las referencias de tensión de

los nodos controlados son definidas por un control supervisor cuyo objetivo puede ser: minimizar pérdidas, minimizar desviaciones en las tensiones con respecto a una referencia determinada, etc [28]. El abordaje de este control supervisor se encuentra fuera del alcance de este trabajo.

B. Diseño de Estructuras de Control

Como primer paso para el diseño de estructuras de control identificamos las variables que caracterizan el problema de control. Las potenciales VCs son las tensiones en cada uno de los nodos de la red (v_j^m), las VMs son las potencias reactivas (Q_{GD}^m) de los GDs, mientras que las DVs son las potencias activas de cada GD (P_{GD}^m). Si bien a partir de la metodología propuesta es posible realizar una evaluación en cuanto a los grados de libertad a utilizar para el diseño del control, en este trabajo adoptamos el criterio de utilizar la totalidad de ellos (esto es, $n_q = n_u$). De esta manera, el análisis se centrará en la elección de las VCs y el grado de interacción. Luego, un estudio de las diferentes opciones que resultan al variar la cantidad de VCs y VMs será abordado en trabajos posteriores.

El punto de operación inicial del sistema, y sobre el que se calculan las matrices de ganancia de estado estacionario esta determinado por la tensión en el nodo conectado a la subestación $v_1 = 1 p.u.$, las potencias activas de los GDs $P_{DG_i} = 300 kW$ y las potencias reactivas $Q_{DG_i} = 0 kVAr$, con $i = 1 \dots 6$. Luego, las matrices de ganancia de estado estacionario (6 matrices de sensibilidad en nuestro caso) de entradas y perturbaciones G y D son calculadas introduciendo saltos tipos escalón en cada una de las VMs y DVs, y obteniendo las respectivas variaciones en las tensiones a partir del cálculo del flujo de potencia [24]. Una vez obtenidas las matrices de estado estacionario, son normalizadas considerando excursiones máximas, para cada VM se usó $Q_{norm} = 500 kVAr$, para las VCs $v_{norm} = 0,03 p.u.$ y para las DVs $P_{norm} = 300 kW$.

B1. Diseño Óptimo: A partir de la resolución del problema de optimización definido en la Ec. (2), con las matrices de estado estacionario calculadas en la sección anterior, y definiendo $n_q = n_u = 6$, obtenemos la estructura óptima Γ_{op} . Cabe destacar que si bien la etapa de diseño de la estructura de control es un proceso que se realiza fuera de línea, los tiempos de cómputo requeridos para la resolución del problema propuesto no superan los 5 minutos. El mismo fue resuelto en una computadora con un procesador Intel i5 8250U y 32 Gb de memoria RAM. En nuestro caso, la estrategia encuentra como solución óptima una estructura *full*. Las VCs seleccionadas resultan $[v_{14}, v_{18}, v_{22}, v_{25}, v_{30}, v_{33}]$. A su vez, es interesante observar el perfil de valores que se obtiene de la función objetivo ($SSD + NLE$) variando la cantidad de componentes del modelo a considerar en el modelo interno \mathbf{G}_s , lo que se traduce al grado de interacción del controlador $\mathbf{G}_c(s)$ según la Ec. (4). Esto es factible de realizar fijando la cantidad de elementos no nulos en \mathbf{z}^S . En la Fig. 2 se muestra la variación en la función objetivo, y de los índices desagregados SSD y NLE . Una estructura sin componentes adicionales ($q_a = 0$), es una estructura descentralizada o diagonal (Γ_d), mientras que la interacción

completa o (full) en este caso tiene $q_a = 30$. El subsistema seleccionado \mathbf{G}_s , esto es la elección de las CVs a controlar, se mantiene constante (a partir de la Eq. (2c), vemos que el índice SSD depende directamente de \mathbf{G}_s). Podemos ver que la principal disminución en el valor de la función objetivo se da incorporando hasta 4 componentes adicionales. De allí en más, si bien el valor del índice NLE continua disminuyendo, lo hace muy levemente. Partiendo de esta observación es posible elegir una estructura *sparse* subóptima (Γ_s) con un valor de la función objetivo muy similar al óptimo. Cada uno de los modelos internos $\tilde{\mathbf{G}}_s$ correspondientes a las estructuras antes mencionadas pueden calcularse según la Ec. (2k), con las matrices binarias de selección dadas en la Ec. (10).

$$\begin{aligned} \Gamma_d &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ \Gamma_{op} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \\ \Gamma_s &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (10)$$

Nótese que la estructura Γ_s en la Ec. (10) captura la mayor parte de los beneficios posibles mediante la incorporación de la información de interacción en el controlador, aunque con una necesidad de infraestructura de comunicación mucho menor a Γ_{op} . El controlador determinado por Γ_s a su vez presenta una característica interesante en cuanto a facilidades de implementación, ya que la información a incorporar sólo son de nodos cercanos. En este caso los valores de Q_{DG_1} y Q_{DG_2} se construirán incorporando a los lazos de control locales la información del error de tensión de v_{18} y v_{14} respectivamente. De la misma manera se procede con Q_{DG_5} , Q_{DG_6} , v_{33} y v_{30} . Es importante destacar que la aplicación de la metodología propuesta para identificar y evaluar diferentes estructuras de control nos brinda información valiosa a la hora de decidir el tipo de implementación a realizar y la infraestructura de comunicación necesaria: descentralizada, distribuida o centralizada. En este trabajo la implementación del controlador se realiza según la estrategia IMC, sin embargo tanto en el caso de Γ_d como de Γ_s sería factible implementarlo a partir de lazos PID [29].

B2. Descentralizado Local Base: En las RDAs la definición de esquemas de control local son preferidos por su menor costo y simplicidad de implementación. En general, en aquellos nodos donde se encuentran instalados GDs, ya se dispone de equipamiento de medición de la tensión en el

PCC, como así también de las potencias activas y reactivas intercambiadas con la red. Este criterio de diseño puede ser incorporado en la metodología prefijando tanto las MVs (en nuestro caso usamos todas las disponibles) como las CVs. De esta manera el subsistema \mathbf{G}_s queda determinado, al igual que el valor del índice SSD . Luego, la metodología permitirá evaluar la incidencia del grado de interacción en la performance a partir del índice NLE . Para nuestro caso particular, la selección óptima de VCs obtenida en la sección anterior resulta muy similar a definir como VCs los nodos donde se conectan los GDs. Las diferencias que se obtienen son muy poco significativas, mientras que las facilidades en cuanto a implementación son relevantes. Luego, el perfil de la función objetivo resulta muy similar al caso anterior, y coinciden Γ_{op} y Γ_s .

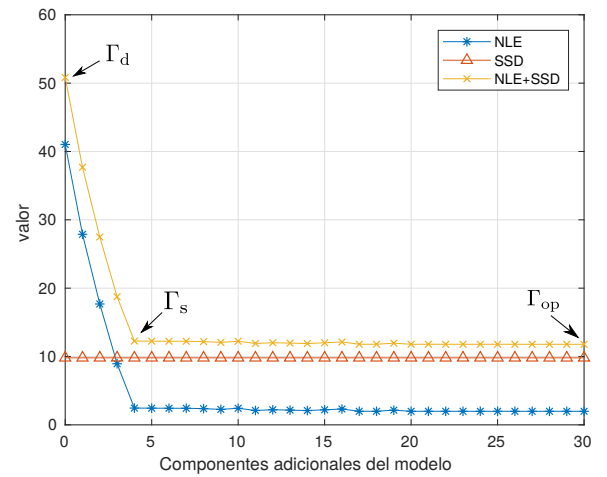


Fig. 2. Perfil funcional costo $SSD + NLE$ según la cantidad de componentes adicionales del modelo a incorporar sobre una estructura descentralizada.

Estas últimas tres estructuras son simuladas dinámicamente considerando diversos escenarios donde se evaluaron los errores absolutos integrales (IAEs) de las VCs, y la energía de control (E_u) de las VMs. El punto de operación inicial del sistema es el descrito en la sección B. Se evalúa el comportamiento tipo servo y regulador mediante los escenarios detallados en la Tabla I. Los valores de los IAEs para cada una de las VCs con las tres estructuras de control ensayadas en cada escenario simulado se muestran en la Tabla II. Por otro lado la energía de control de cada VM para los mismos casos se muestran en la Tabla III.

TABLA I
DESCRIPCIÓN ESCENARIOS DE SIMULACIÓN.

Escenario	Descripción
d0	Reducción de potencia activa de todos los GDs a $100kW$
d1	Reducción de potencia activa en $GD_1 - P_{DG_1} = 100kW$
sp0	Punto de operación para minimizar pérdidas
sp1	Cambio de SP individual en v_{14}
sp2	Cambio de SP individual en v_{18}

En cuanto al comportamiento como regulador, no se encuentran cambios significativos en la respuesta dinámica de

TABLA II
VALORES DE IAE.

		v_{14}	v_{18}	v_{21}	v_{25}	v_{30}	v_{33}
d0	Γ_d	0.635	0.674	0.151	0.223	0.520	0.501
	Γ_s	0.971	1.165	0.150	0.222	0.681	0.763
	Γ_{op}	1.262	1.454	0.173	0.330	0.933	1.013
d1	Γ_d	0.439	0.354	0.008	0.013	0.043	0.051
	Γ_s	0.451	0.452	0.008	0.017	0.079	0.078
	Γ_{op}	0.459	0.460	0.012	0.033	0.120	0.119
sp0	Γ_d	0.808	0.938	0.081	0.134	0.570	0.653
	Γ_s	1.362	1.690	0.081	0.155	0.972	1.187
	Γ_{op}	1.744	2.07	0.107	0.284	1.295	1.507
sp1	Γ_d	0.989	0.925	0.002	0.012	0.088	0.046
	Γ_s	0.413	0.047	0.002	0.012	0.088	0.087
	Γ_{op}	0.378	0.012	0.0001	0.0005	0.002	0.002
sp2	Γ_d	0.680	1.115	0.0012	0.0069	0.033	0.026
	Γ_s	0.011	0.443	0.0003	0.0003	0.001	0.001
	Γ_{op}	0.011	0.444	0.0004	0.0008	0.003	0.003

TABLA III
VALORES DE ENERGÍA DE CONTROL (E_u).

		$MV1$	$MV2$	$MV3$	$MV4$	$MV5$	$MV6$
d0	Γ_d	982.72	299.47	437.27	960.74	1622.1	198.99
	Γ_s	997.30	280.69	437.61	964.61	1710.0	162.34
	Γ_{op}	984.71	280.62	435.83	950.30	1684.2	162.36
d1	Γ_d	438.42	4.062	1.265	1.839	2.396	0.059
	Γ_s	471.34	0.321	1.263	1.847	2.898	0.001
	Γ_{op}	473.11	0.321	1.249	1.699	2.001	0.001
sp0	Γ_d	1560.7	791.21	124.66	345.33	1982.9	1057.0
	Γ_s	1556.0	768.38	125.06	351.13	1981.2	1025.7
	Γ_{op}	1533.9	768.04	123.93	338.01	1944.6	1025.5
sp1	Γ_d	2075.39	700.57	0.064	2.759	40.020	0.242
	Γ_s	2382.85	833.57	0.068	2.966	46.683	1e-07
	Γ_{op}	2390.67	833.58	0.069	3.020	48.631	3e-06
sp2	Γ_d	959.325	1045.7	0.001	0.023	0.273	0.022
	Γ_s	1141.14	1200.4	0.001	0.001	0.001	1e-05
	Γ_{op}	1141.05	1200.4	0.001	0.001	0.001	2e-05

las CVs entre las tres estructuras de control ensayadas. Esto se puede corroborar tanto en los valores de IAE como en las simulaciones dinámicas presentadas en la Fig. 3.

Sin embargo la energía de control requerida principalmente en el caso de la estructura óptima Γ_{op} es en general menor. A su vez, la estructura subóptima Γ_s presenta valores similares a esta última. Una característica interesante de la reducción en la energía se manifiesta en el recorte de los picos en la respuesta de las Q_{DG_2} y Q_{DG_6} tal como se muestra en la Fig. 4.

Al analizar el comportamiento como servo, vemos que al realizar los cambios de setpoint simultáneos tal como se propone en el escenario *sp0*, las respuestas de las CVs, como las MVs resultan muy similares para todas las estructuras de control ensayadas. Al realizar cambios de setpoint de manera individual, esto son los escenarios *sp1* y *sp2*, las mejores performance en las CVs las podemos encontrar para el caso de las estructuras Γ_{op} y Γ_s , mientras que al igual que en el caso del rechazo a perturbaciones, se reducen picos en las respuestas de las MVs. Las evoluciones dinámicas de las MVs

para el escenario *sp2* se muestra en la Fig. 5, mientras que la Fig. 6 muestra la evolución de las CVs.

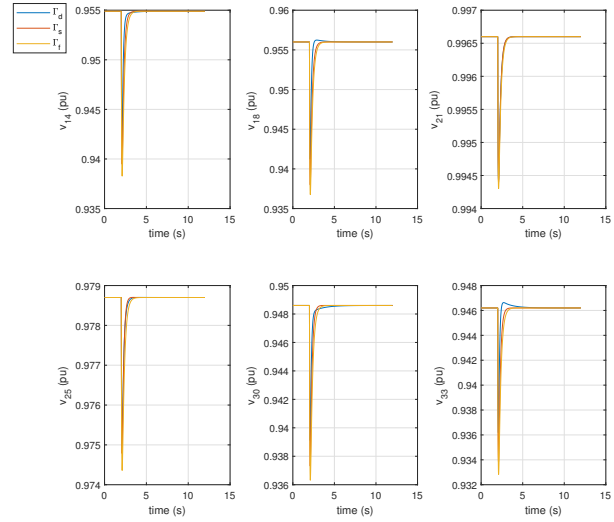


Fig. 3. Escenario d0: Respuesta de CVs.

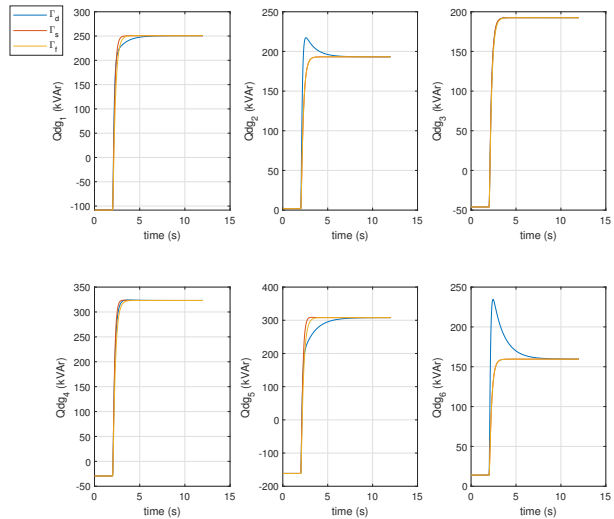


Fig. 4. Escenario d0: Respuesta de MVs.

Las respuestas analizadas previamente muestran comportamientos similares en las CVs para los tres tipos de estructuras ensayadas. Mientras que se obtuvieron ciertas mejoras en el caso de las MVs para las estructuras óptima Γ_{op} y subóptima Γ_s . Tal como fue comentado en párrafos previos, Γ_s es capaz de llegar a niveles de performance similares a la estructura *full*, aunque los requisitos en cuanto a estructura de comunicación resultan significativamente menores. Esto resulta importante frente a propuestas en la literatura que priorizan una implementación del tipo centralizada y con requisitos de comunicación en gran cantidad de nodos de la red. Como vemos, esto no necesariamente implica un beneficio directo en la performance. Es posible que con la incorporación de

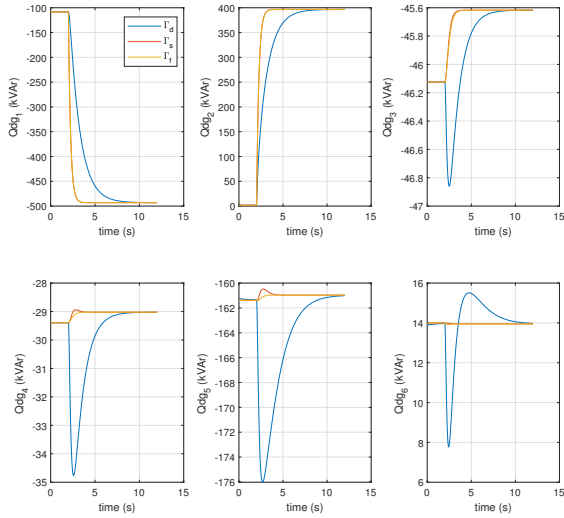


Fig. 5. Escenario sp2: Respuesta de MVs.

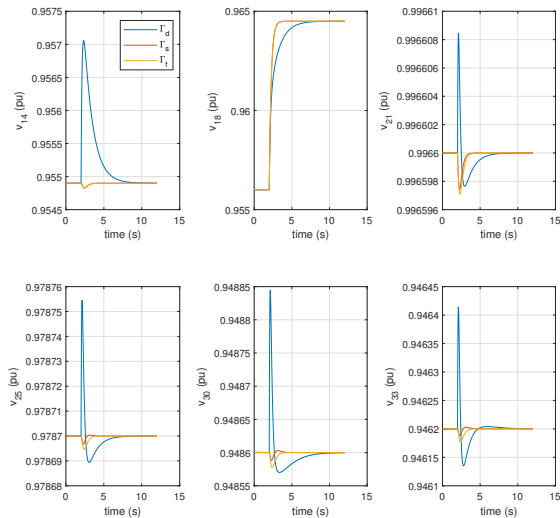


Fig. 6. Escenario sp2: Respuesta de CVs.

menores grados de interacción en el controlador se obtengan mejores resultados, o al menos, como es el caso del ejemplo considerado, sólo incorporando cierto grado de interacción, lo que se traduce en elementos adicionales de comunicación, es posible obtener beneficios similares a la estructura *full*. En este sentido la metodología propuesta brinda herramientas sistemáticas que permiten afrontar el proceso de diseño del controlador basándose en información cuantitativa.

V. CONCLUSION

En este trabajo se presenta una metodología sistemática que brinda herramientas para el análisis, diseño e implementación de estructuras de control multivariable para el control de tensión en redes de distribución activas. Esta metodología se basa en información de estado estacionario, fácilmente

obtenible a partir de cálculos de flujos de potencia de la ADN. La herramienta propuesta aporta criterios sistemáticos basados en índices de performance para la selección de las variables a controlar (y por ende a medir), frente a las estrategias presente en la literatura en general basadas en heurística. A su vez, es posible analizar el impacto del grado de interacción a incorporar en el controlador en los índices de performance propuestos. Lo que permite optimizar el costo de instalación de los equipos físicos. Esta característica significa una información relevante a la hora de optar por la tecnología de implementación y la estructura de comunicación necesaria. En la literatura esta decisión en general es tomada previo al diseño mismo del controlador.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo económico del CONICET, UTN (PID ENINISN0005404TC) y ANPCYT (PICT 2019-00605). Los autores también quieren agradecer la motivación proporcionada por MEIHAPER-CYTED.

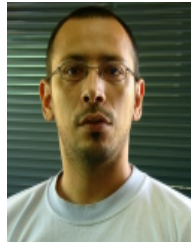
REFERENCIAS

- [1] M. E. Samper and R. A. Reta, "Regulatory analysis of distributed generation installed by distribution utilities," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 13, no. 3, pp. 665–672, 2015.
- [2] B. B. Zad, H. Hasanvand, J. Lobry, and F. Vallée, "Optimal reactive power control of DGs for voltage regulation of MV distribution systems using sensitivity analysis method and PSO algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 68, pp. 52–60, 2015.
- [3] J. Rocabert, A. Luna, F. Blaabjerg, and P. Rodriguez, "Control of power converters in AC microgrids," *IEEE transactions on power electronics*, vol. 27, no. 11, pp. 4734–4749, 2012.
- [4] G. Stephanopoulos and G. V. Reklaitis, "Process systems engineering: From solvay to modern bio-and nanotechnology.: A history of development, successes and prospects for the future," *Chemical engineering science*, vol. 66, no. 19, pp. 4272–4306, 2011.
- [5] P. Daoutidis, J. H. Lee, I. Harjunkoski, S. Skogestad, M. Baldea, and C. Georgakis, "Integrating operations and control: A perspective and roadmap for future research," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 115, pp. 179–184, 2018.
- [6] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. De Vicuña, and M. Castilla, "Hierarchical control of droop-controlled ac and dc microgrids—a general approach toward standardization," *IEEE Transactions on industrial electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 158–172, 2010.
- [7] M. Kashem and G. Ledwich, "Multiple distributed generators for distribution feeder voltage support," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, no. 3, pp. 676–684, 2005.
- [8] G. Fusco and M. Russo, "Robust MIMO design of decentralized voltage controllers of pv systems in distribution networks," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 6, pp. 4610–4620, 2017.
- [9] Z. Cheng, J. Duan, and M.-Y. Chow, "To centralize or to distribute: That is the question: A comparison of advanced microgrid management systems," *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 12, no. 1, pp. 6–24, 2018.
- [10] K. E. Antoniadou-Plytaria, I. N. Kouveliotis-Lysikatos, P. S. Georgilakis, and N. D. Hatzigryriou, "Distributed and decentralized voltage control of smart distribution networks: Models, methods, and future research," *IEEE Transactions on smart grid*, vol. 8, no. 6, pp. 2999–3008, 2017.
- [11] M. Russo and G. Fusco, "Robust decentralized PI controllers design for voltage regulation in distribution networks with DG," *Electric Power Systems Research*, vol. 172, pp. 129–139, 2019.
- [12] O. D. Montoya, A. Grajales, A. Garces, and C. A. Castro, "Distribution systems operation considering energy storage devices and distributed generation," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 15, no. 5, pp. 890–900, 2017.
- [13] S. Bolognani, R. Carli, G. Cavraro, and S. Zampieri, "Distributed reactive power feedback control for voltage regulation and loss minimization," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 60, no. 4, pp. 966–981, 2014.

- [14] Y. Guo, Q. Wu, H. Gao, X. Chen, J. Østergaard, and H. Xin, "MPC-based coordinated voltage regulation for distribution networks with distributed generation and energy storage system," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 10, no. 4, pp. 1731–1739, 2018.
- [15] G. Valverde and T. Van Cutsem, "Model predictive control of voltages in active distribution networks," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 4, pp. 2152–2161, 2013.
- [16] J. Li, Z. Xu, J. Zhao, and C. Zhang, "Distributed online voltage control in active distribution networks considering PV curtailment," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 10, pp. 5519–5530, 2019.
- [17] G. Fusco and M. Russo, "Tuning of multivariable PI robust controllers for the decentralized voltage regulation in grid-connected distribution networks with distributed generation," *International Journal of Dynamics and Control*, vol. 8, no. 1, pp. 278–290, 2020.
- [18] L. Vargas, J. Quirós-Tortós, and G. Valverde, "Voltage regulation of active distribution networks considering dynamic control zones," in *2020 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition-Latin America (T&D LA)*. IEEE, pp. 1–6.
- [19] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing," *IEEE Power Engineering Review*, vol. 9, no. 4, pp. 101–102, 1989.
- [20] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, and D. Gan, "Matpower," *PSERC.[Online]. Software Available at: <http://www.pserc.cornell.edu/matpower>*, 1997.
- [21] J. J. Downs and S. Skogestad, "An industrial and academic perspective on plantwide control," *Annual Reviews in Control*, vol. 35, no. 1, pp. 99–110, 2011.
- [22] D. Zumoffen, "Plant-wide control design based on steady-state combined indexes," *ISA transactions*, vol. 60, pp. 191–205, 2016.
- [23] A. Keane, L. F. Ochoa, E. Vittal, C. J. Dent, and G. P. Harrison, "Enhanced utilization of voltage control resources with distributed generation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 1, pp. 252–260, 2010.
- [24] R. Tonkoski, L. A. Lopes, and T. H. El-Fouly, "Coordinated active power curtailment of grid connected pv inverters for overvoltage prevention," *IEEE Transactions on sustainable energy*, vol. 2, no. 2, pp. 139–147, 2010.
- [25] F. Tamp and P. Ciufu, "A sensitivity analysis toolkit for the simplification of mv distribution network voltage management," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 559–568, 2014.
- [26] L. Braccia, P. A. Marchetti, P. Luppi, and D. Zumoffen, "Multivariable control structure design based on mixed-integer quadratic programming," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 56, no. 39, pp. 11 228–11 244, 2017.
- [27] S. H. Dolatabadi, M. Ghorbanian, P. Siano, and N. D. Hatzigiorgiou, "An enhanced IEEE 33 bus benchmark test system for distribution system studies," *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020.
- [28] A. R. Di Fazio, G. Fusco, and M. Russo, "Decentralized control of distributed generation for voltage profile optimization in smart feeders," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 3, pp. 1586–1596, 2013.
- [29] D. A. Zumoffen, "Oversizing analysis in plant-wide control design for industrial processes," *Computers & chemical engineering*, vol. 59, pp. 145–155, 2013.



Diego Feroldi Received the degree in electronic engineering from the National University of Rosario in 2001 and a Phd degree in Engineering Sciences from the Polytechnic University of Catalonia in 2009. He is a researcher at the CIFASIS-CONICET-UNR institute and a professor at the FCEIA-UNR. Currently his research is focused in the area of Optimal Control applied to Electrical Power Systems.



David Zumoffen Received both, the Electronic Engineering and the Ph.D. degree at the National University of Rosario (UNR), Rosario, Argentina, in 2002 and 2008, respectively. He is Independent Researcher of CONICET and Adjunct Professor at the National Technological University (UTN-FRRO). Currently, he is the head of the Process Systems Engineering Group (PSEG) at the French-Argentine Center for Information and Systems Sciences (CIFASIS), Rosario, Argentina. He is the author of two books and more than one hundred works. His main research topics are plant-wide control, process monitoring, and control performance assessment.



Pablo G. Rullo Received the degree in electronic engineering from the National University of Rosario (UNR), Rosario, Argentina, in 2009 and Ph.D. degree in 2017. He is assistant researcher of CONICET and Associate Professor of the electrical engineering department of San Nicolás Regional Faculty (FRSN), National Technological University (UTN). His main interests are renewable generation systems and multivariable control design strategies applied to microgrids and distributed generation.



Lautaro Braccia Lautaro Braccia received the degree in chemical engineering from the National Technological University (UTN), Rosario, Argentina, in 2014 and Ph.D. degree at the National University of Rosario (UNR), Rosario, Argentina, in 2019. He is assistant researcher of CONICET. His main research topics are energy integration, process operability assessment, and simultaneous strategies for process synthesis and control.