

**ESTADO DEL ARTE
SOBRE
ESTRATEGIAS
PARA LA REGULACIÓN DE
VOLTAJE EN REDES DE
DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA
CON ALTO GRADO DE
GENERACIÓN
DISTRIBUIDA
RENOVABLE**

Alejandro Palacios
Universidad del Valle
Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Directores:
Diego Fernando Echeverry
Sandra Milena Londoño

INTRODUCCIÓN

Los *sistemas de distribución eléctrica* (DS *Distribution System*) son la última etapa en el transporte de energía eléctrica desde los generadores hasta los *usuarios finales* dentro del sistema eléctrico de potencia (EPS *electrical power system*) [1]. La electricidad transportada a través de los DS en las dos décadas anteriores se ha caracterizado por provenir en mayor grado de fuentes hidráulicas, nucleares y fósiles (como carbón, petróleo, gas, etc) [2]. Estas últimas al ser empleadas tanto para la generación eléctrica como en el sector del transporte [3] han traído como consecuencia un incremento del calentamiento global a raíz de los gases de efecto invernadero que se liberan en su proceso de combustión [4].

Como respuesta a esta problemática en los años recientes se ha dado paso al incremento de la generación a pequeña escala instalada dentro del DS conocida como generación distribuida (DG *Distributed Generation*) ya sea de carácter renovable (Renewable Energy Sources RES) como la fotovoltaica, solar térmica, eólica, biomasa y micro turbinas hidráulicas [5] o no renovable. Algunas de estas fuentes renovables son intermitentes y su generación depende de condiciones ambientales [6]. Esto causa problemas de estabilidad, confiabilidad, aumento en las pérdidas y mala *calidad de energía* [7][8].

Entre los parámetros más importantes de calidad de la energía se encuentra el *nivel de tensión*, el cual se ve afectado por los flujos de potencia bidireccionales [9], la ubicación de la DG [10], la topología de la red y las impedancias del DS. En este trabajo se abarcan las soluciones más destacadas para realizar el control de la tensión en un DS cuando hay presencia de DG de tipo RES.

Capítulo 1

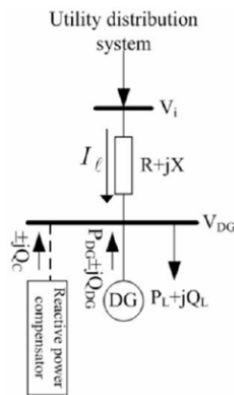
MARCO TEÓRICO

1.1. CAIDA DE Tensión CON GENERACIÓN DISTRIBUIDA

Con el crecimiento de la GD [11] en los DS se ha dado lugar a la aparición de flujos de potencia inversos (desde la carga hacia el DS) lo cual, acompañado por los altos valores en la relación R/X (resistencia reactancia) principalmente en los circuitos de LV, dan lugar a la aparición de sobre tensiones en los nodos del DS [12][13].

Para ilustrar este fenómeno se parte del diagrama unifilar de la figura 1.1 en el que se representan las características básicas de un sistema de potencia con GD. Este esta conformado por la carga que demanda una potencia $P_L + jQ_L$, la DG que genera o absorbe una potencia $P_{DG} \pm jQ_{DG}$, la compensación reactiva que inyecta o absorbe una potencia $\pm jQ_C$, la impedancia de línea $R + jX$, los nodos V_i de entrada y V_{DG} en la carga y el equivalente de red del sistema.

Figura 1.1: Diagrama unifilar de una red simplificada



De acuerdo a la definición de potencia compleja se tiene la siguiente expresión [14]:

$$P + jQ = V_{DG} \cdot I_l^* \quad (1.1)$$

De la ecuación 1.1 se puede obtener la corriente de línea en función de la potencia activa y reactiva :

$$I_l = \frac{P + jQ}{\overrightarrow{V_{DG}^*}} \quad (1.2)$$

Aplicando el la ley de *Kirchoff* de tensiones en el nono V_{GD} , este puede ser expresado como:

$$\overrightarrow{V_{DG}} = \overrightarrow{V_i} + I_l(R + X_L) \quad (1.3)$$

Remplazando I_l de la ecuación 1.2 en la ecuación 1.3 se tiene:

$$\begin{aligned} \overrightarrow{V_{DG}} &= \overrightarrow{V_i} + \frac{P + jQ}{\overrightarrow{V_{DG}^*}}(R + X_L) \\ \overrightarrow{V_{DG}} &= \overrightarrow{V_i} + \frac{RP + X_L Q}{\overrightarrow{V_{DG}^*}} + j \frac{RP - X_L Q}{\overrightarrow{V_{DG}^*}} \end{aligned} \quad (1.4)$$

Cuando el ángulo entre los fasores de tensión V_{DG} y V_i es pequeño, es decir cuando la potencia activa entregada por el *DS* tiende a cero [14] (esto puede darse porque no hay demanda de energía o la *DG* abastece la demanda de la carga en una condición de auto consumo de los usuarios o de la micro red), y si además de ello se considera el voltaje en el nodo V_{DG} como referencia fasorial (ángulo 0) la caída de tensión en la línea puede ser escrita como:

$$\Delta V \cong V_{DG} - V_i \cong \frac{RP - X_L Q}{V_{DG}} \quad (1.5)$$

Donde, ΔV es la caída de tensión a través del alimentador. Si también asumimos que la tensión en el nodo V_{DG} es la tensión base, entonces podemos reescribir la ecuación 1.5 como:

$$\Delta V \cong V_{DG} - V_i \cong RP - X_L Q \quad (1.6)$$

Donde $P = (P_{DG} - P_L)$ y $Q = (\pm Q_{DG} \pm Q_c - Q_L)$.

De este modo la ecuación 1.6 puede ser reescrita así:

$$V_{DG} \cong V_i + R(P_{DG} - P_L) + X(\pm Q_{DG} \pm Q_c - Q_L) \quad (1.7)$$

De este modo de la ecuación 1.7 se puede determinar el nivel máximo de generación que puede albergar un circuito.

Para tal caso se plantean dos escenarios críticos en los cuales se presentan las máximas desviaciones de tensión [15]:

Caso	Carga	Generación
1	Mínima	Máxima
2	Máxima	Máxima

1.1.1. Caso crítico (carga mínima y máxima generación)

Se considera este primer escenario en el cual la demanda de la carga es mínima, por ejemplo para una carga residencial típica esto es en las horas de la madrugada. La otra condición de máxima generación se presenta por ejemplo para fuentes fotovoltaicas en el medio día, con lo cual se podría tener que para un caso típico de carga residencial con generación fotovoltaica esta condición se alcanzaría en medio día.

Esto se puede cuantificar a partir de la ecuación 1.7 se tenga un factor de potencia igual a uno en el nodo V_{DG} , entonces se puede deducir que la máxima tensión en este nodo se obtiene cuando hay la mínima carga ($P_L = 0$, $Q_L = 0$) y la generación máxima ($P_G = P_{GMAX}$). En estas condiciones el OR puede operar incluso sin que exista generación distribuida. la tensión en el nodo V_{DG} , queda determinado entonces por la ecuación 1.7 así [16] :

$$V_{DG} = V_i + P_{GMAX} \quad (1.8)$$

Donde:

P_{GMAX} Es la potencia máxima permisible en el DS.

En estas condiciones la potencia máxima permisible en el sistema es :

$$P_{GMAX} \leq \frac{V_{DGMAX} - V_i}{R} \quad (1.9)$$

Donde:

V_{DGMAX} Es la tensión máxima permisible en el DS.

Se puede notar en la ecuación 1.9 la potencia máxima generada es función de la resistencia de línea, de modo tal que la resistencia de la línea (que depende del calibre del conductor y la longitud) determina la máxima potencia que puede ser inyectada al sistema.

1.1.2. Caso critico máxima carga y mínima generación

Se considera este segundo escenario en el cual la demanda es alta , por ejemplo para una carga residencial típica esto es en el inicio de la noche o iniciando la mañana y ademas la generación producida por los diferentes DS es baja.

Considerando igualmente un factor de potencia unitario por tanto la ecuación 1.7 puede ser escrita para este caso así:

$$V_{DG} = V_i - RP_{Lmax}$$

O

$$P_{Lmax} = \frac{V_i - V_{DG}}{R}$$

Consideremos ahora que V_{DGmin} es el mínimo voltaje permisible en el DS. Por tanto para mantener el voltaje bajo los limites permisibles se debe cumplir que:

$$P_{Lmax} \leq \frac{V_i - V_{DGmin}}{R}$$

1.1.3. Dependencia del factor R/X

Otro indicador importante al momento de establecer el control de tensión es el factor R/X del equivalente de red, donde R y X son respectivamente la resistencia y la reactancia *Thevenin* del DS en el nodo V_{GD} . Para *valores bajos* del parámetro R/X (es decir donde el equivalente de red es principalmente reactivo) la potencia activa tiene muy poca influencia en los perfiles de tensión, mientras conforme el parámetro R/X crece, el efecto de la potencia activa sobre las tensiones es mas determinante. Dicho de otro modo, en *media tensión* y baja tensión la inyección de potencia activa por parte de la GD provoca aumentos de la tensión en el PCC.

De algún modo este efecto de la potencia activa en los niveles de tensión debe ser mantener la tensión en el punto de nominal compensado mediante la absorción de potencia reactiva para devolver los niveles de tensión a su condición de diseño.

La potencia reactiva necesaria para mantener la tensión en el nodo V_{DG} (figura ??), en cuanto mayor es el parámetro R/X es necesario absorber una mayor cantidad de potencia reactiva para mantener la tensión en el PCC. Nótese que en redes de media tensión (R/X alrededor de la unidad) la cantidad de reactiva necesaria para compensar el efecto de la potencia activa es 2 a 1. [17].

1.2. ELEMENTOS DE CONTROL DE TENSIÓN

1.2.1. CAMBIADOR DE TAPS BAJO CARGA (ON LOAD TAP CHANGER OLTC)

El cambiador de tomas bajo carga (OLTC por sus siglas en ingles) es un equipo cuya función es conmutar las conexiones de derivación del devanado de un transformador (puede estar el primario o en el secundario) en estado energizado o en carga, estos son diseñados bajo los criterios de la norma IEC 60214-1 [18]. El equipo encargado de operar el OLTC es conocido como AVG (*Automatic Voltage Control*), el cual conmuta las sus derivaciones del transformador de acuerdo a la desviación que se presente con respecto a la tensión de referencia o tensión objetivo, esto se puede ilustrar en la figura 1.2 [19]. Este control debe asegurarse que el voltaje se encuentre siempre por encima del nivel mínimo de tensión el cual decrece a lo largo del circuito [19] para el caso de un circuito radial sin DG. Las mediciones realizadas en la figura 1.2 son usadas para calcular la caída de tensión en el nodo remoto, esta técnica es conocida como LDC (*Load Drop Control*).

1.3. REGULADOR DE TENSIÓN

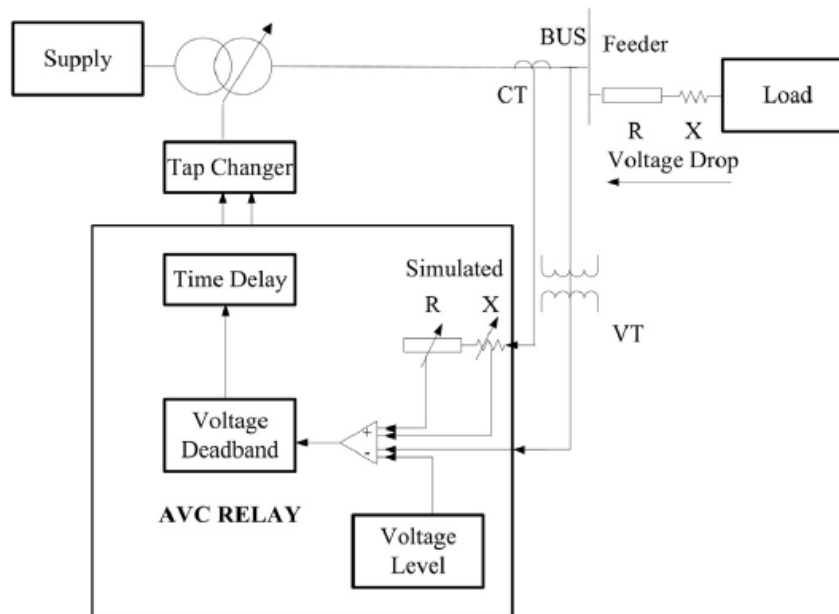
Otro dispositivo similar al este es el SRV (*Step Regulator Voltage*)

1.4. CONVERSORES DE POTENCIA

1.4.1. Inversores

1.4.2. Conversores back to back

Figura 1.2: Esquema de controlador para OLTC con LDC [19]



Capítulo 2

TOPICOS DE INVESTIGACIÓN

En este capitulo se destacan los principales resultados de investigacion obtenidos, permitiendo clasificarlos :

2.1. RECONEXION DE CIRCUITOS DE DISTRIBUCIÓN

En [11] se propone el uso de dispositivos electronicos para transferir potencia reactiva en las fonteras de los circuitos del DS, esto lo realiza mediante conversores back to back. Se noto que se mejora el desbalance de la red a su vez que se minimizan las perdidas, logrando mayor efectividad cuando se usa en combinacion con la DG y la reconfiguracion de circuitos manteniendo la tensión en los niveles esperados.

2.2. CONTROL LOCAL

En [20] se propone un sistema hibrido para el control de tensión en LV empleando de manera combinada OLTC y control de potencia activa y reactiva mediante inversores monifásicos, en tal caso el OLTC resulta ser el método mas efectivo para controlar los percentiles de la tensión.

En [5] se presenta un método de control basado en redes neuronales capaz de controlar la tensión el los nodos de forma autonoma maximizando la potencia activa inyectada por los DS. El controlador usa solamente la modulación en potencia activa si la modulación de potencia reactiva no es suficiente, este método es probado tanto en fuentes fotovoltaicas como en eólicas.

2.3. CONTROL CENTRALIZADO

2.4. CAPACIDAD DE ALOJAMIENTO (HOSTING CAPACITY)

La capacidad de alojamiento (HC *hosting Capacity*) consiste en cuantificar el impacto que tendrá un incremento de la DG [21].

En [22] se plantea una estrategia de control de tensión sobre los DER ubicados dentro de usuarios finales en el contexto de madurez de las *smart grid*, lo que permite emplear la infraestructura de comunicación, distribuyendo el área del DS en zonas las cuales se comunican mediante tokens para realizar el control de tensión.

En [23] se realiza un estudio sobre el HC teniendo en cuenta un DS individual, sino todos los alimentadores de un OR, permitiendo determinar así tanto un indicador global como un indicador para cada uno de los circuitos. De esta manera el HC es influenciado por tres variables: regulación de tensión, capacidad térmica y las protecciones, de los cuales se notó que el parámetro más influyente es la capacidad térmica del DS.

Capítulo 3

METODOLOGIA

La investigación a desarrollar es del tipo *correlacional*, está parte de realizar un estudio *descriptivo* del fenómeno, explorando sus contenidos y evaluando sus tópicos de manera analítica. Una vez obtenido esto se pasa a un trabajo comparativo en el cual se establecen las *relaciones* que describan de modo cualitativo y/o cuantitativo el tema en estudio . La técnica a emplear en este trabajo sera el *análisis documental* que buscan describir y representar los documentos de forma unificada sistemática para facilitar su recuperación. Para lograr este objetivo se plantean tres etapas de la investigación de la siguiente manera:

1. **Plantación y diseño** : consiste en la selección de los *criterios de clasificación* que se aplican a la muestra documental, estos son como autor, palabras claves, bibliografía, etc que permitan manipular grandes volúmenes documentales de forma ordenada. tambien se deben establecer los *criterios de análisis* que son los tópicos de interés que permitan comparar las distintas fuentes bibliográficas y realizar una trazabilidad sobre ellas.
2. **Gestión y análisis** : En está etapa se construyen la *matriz bibliografica* y la *matriz de análisis*. La primera es un compendio ordenado de las fuentes bibliográficas que constituyen la muestra, mientras que la segunda consiste en la síntesis de lo que cada fuente bibliográfica le aporta a los *criterios de análisis*.
3. **Formalización y elaboración**: en está etapa se retoma la *matriz de análisis* y se evalua en funcion de los criterios, estableciendo las similitudes, diferencias, coyunturas, tendencias y correlaciones a fin de resolver los objetivos específicos de la investigación.
4. **Escritura documental y socialización** : en está se toman cada uno de los *criterios de análisis* como base para la escritura de los capítulos del documento final.

3.1. PLANIFICACION Y DISEÑO

Para la realizacion de la busqueda documental se partio se la seleccion de las siguientes palabras claves (*key words*) como *criterios de clasificación* :

- *control voltage*
- *distributed generation*

Se uso el gestor documental SCOPUS, y a partir de sus resultados se seleccionaron los documentos en cuya temática tienen pertinencia, permitiendo así la construcción de la matriz bibliográfica como se muestra en la tabla 3.1. en ella se ordenaron los textos encontrados de acuerdo a los siguientes criterios o temas :

- Microredes
- Planeamiento de la red
- Fuentes fotovoltaicas
- Potencia activa y reactiva
- Fuentes Eólicas
- Capacidad de alojamiento
- Análisis tecnico - económico
- Almacenamiento de energía
- Redes en DC
- Cambiador de tomas bajo carga

Se adiciona entonces una columna a la matriz bibliografica en donde se pondera la relación que tiene el contenido del articulo con la temática de estudio en una escala de uno a diez (1 a 10) , en diez es la relación más alta.

Tabla 3.1: Matriz bibliográfica

Tema	Año	Autor	Titulo	Puntuación
Planeamiento de la red	2016	Wanyu Cao	Benefits analysis of Soft Open Points for electrical distribution network operation. [11]	9
	2014	Partha Kayal	Selection of Distributed Generation for Distribution Network: A Study in Multi-criteria Framework. [24]	7
	2016	N. Efkarpidis	Technical assessment of centralized and localized voltage control strategies in low voltage networks. [20]	8
	2014	V. Calderaro	Active management of renewable energy sources for maximizing power production.[5]	9
	2013	Rui Jovita G.C. da Silva	Decentralized secondary voltage control using voltage drop compensator among power plants.[25]	2
	2017	Wai Lip Theo	Review of distributed generation (DG) system planning and optimisation techniques: Comparison of numerical and mathematical modelling methods [26]	
Capacidad de almacenamiento	2015	R. Caldon	Distributed active network management strategy including DG and storage systems [22]	9
	2017	Chengshan Wang	Optimal siting and sizing of soft open points in active electrical distribution networks	9
	2016	Matthew Rylander	Application of New Method for Distribution-Wide Assessment of Distributed Energy Resources [23]	7

3.2. GESTION Y ANALISIS

3.3. FORMALIZACION Y ELABORACION

Capítulo 4

FRONTERAS DE INVESTIGACION

En [11] se destaca el alto costo de los reconvertidores y de los sistemas de comunicacion, junto a la ventaja del uso de convertidores back to back en lo cual se deben hacer estudios para conocer su impacto economico.

Bibliografía

- [1] T. S. Basso and R. DeBlasio, "Ieee 1547 series of standards: interconnection issues," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 5, pp. 1159–1162, 2004.
- [2] S. Bacha, D. Picault, B. Burger, I. Etxeberria-Otadui, and J. Martins, "Photovoltaics in microgrids: An overview of grid integration and energy management aspects," *IEEE Ind. Electron. Mag.*, vol. 9, no. 1, pp. 33–46, 2015.
- [3] B. Bahmanifirouzi, E. Farjah, T. Niknam, and E. Azad Farsani, "A new hybrid hbmo-sfla algorithm for multi-objective distribution feeder reconfiguration problem considering distributed generator units," *Iran. J. Sci. Technol. - Trans. Electr. Eng.*, vol. 36, no. E1, pp. 51–66, 2012.
- [4] M. Hauck, Z. J. Steinmann, A. M. Schipper, F. Gorrisen, A. Venkatesh, and M. A. Huijbregts, "Estimating the Greenhouse Gas Balance of Individual Gas-Fired and Oil-Fired Electricity Plants on a Global Scale," *J. Ind. Ecol.*, vol. 21, pp. 127–135, feb 2017.
- [5] V. Calderaro, G. Conio, V. Galdi, G. Massa, and A. Piccolo, "Active management of renewable energy sources for maximizing power production," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 57, pp. 64–72, 2014.
- [6] N. Mahmud and A. Zahedi, "Review of control strategies for voltage regulation of the smart distribution network with high penetration of renewable distributed generation," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 64, pp. 582–595, 2016.
- [7] S. B. Karanki and D. Xu, "Voltage droop control of dual active bridge for integrating battery energy storage to utility grid," *2014 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2014*, pp. 2227–2232, 2014.
- [8] P. Dinakara Prasad Reddy, V. Veera Reddy, and T. Gowri Manohar, "Optimal renewable resources placement in distribution networks by combined power loss index and whale optimization algorithms," *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, pp. 1–17, 2017.
- [9] N. C. Koutsoukis, D. O. Siagkas, P. S. Georgilakis, and N. D. Hatziargyriou, "Online Reconfiguration of Active Distribution Networks for Maximum Integration of Distributed Generation," *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 14, no. 2, pp. 437–448, 2017.

- [10] M. M. Othman, W. El-Khattam, Y. G. Hegazy, and A. Y. Abdelaziz, "Optimal placement and sizing of voltage controlled distributed generators in unbalanced distribution networks using supervised firefly algorithm," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 82, pp. 105–113, 2016.
- [11] W. Cao, J. Wu, N. Jenkins, C. Wang, and T. Green, "Benefits analysis of Soft Open Points for electrical distribution network operation," *Appl. Energy*, vol. 165, pp. 36–47, 2016.
- [12] C. Su, "Comparative analysis of voltage control strategies in distribution networks with distributed generation," in *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1–7, IEEE, 2009.
- [13] b. T. L. Zhiyuan Tanga, David J. Hilla, "Two-stage voltage control of subtransmission networks with high penetration of wind power,"
- [14] S. Akagi, R. Takahashi, A. Kaneko, J. Yoshinaga, M. Ito, Y. Hayashi, H. Asano, and H. Kon-da, "Upgrading the Voltage Control Method Based on the Photovoltaic Penetration Rate," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3053, no. c, pp. 1–1, 2017.
- [15] M. E. Elkhatab, R. El-Shatshat, and M. M. A. Salama, "Novel coordinated voltage control for smart distribution networks with DG," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 2, no. 4, pp. 598–605, 2011.
- [16] G. Strbac, N. Jenkins, M. Hird, P. Djapic, and G. Nicholson, "Integration of operation of embedded generation and distribution networks," *University of Manchester Institute of Science and Technology (UMIST)*, 2002.
- [17] D. Treballe Treballe, P. Frías Marín, M. Ortega, J. María, and J. L. Martínez Ramos, "El control de tensión en redes de distribución con generación distribuida (i)," 2012.
- [18] IEC, *Tap-changers Part 1: Performance requirements and test methods*.
- [19] C. R. Sarimuthu, V. K. Ramachandaramurthy, K. R. Agileswari, and H. Mokhlis, "A review on voltage control methods using on-load tap changer transformers for networks with renewable energy sources," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 62, pp. 1154–1161, 2016.
- [20] N. Efkarpidis, T. De Rybel, and J. Driesen, "Technical assessment of centralized and localized voltage control strategies in low voltage networks," *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 8, pp. 85–97, 2016.
- [21] Y. Y. M. H. J. Bollen and F. Hassan, "Integration of distributed generation in the power system - a power quality approach,"
- [22] R. Caldon, M. Coppo, and R. Turri, "Distributed active network management strategy including DG and storage systems," *2014 AEIT Annu. Conf. - From Res. to Ind. Need a More Eff. Technol. Transf. AEIT 2014*, 2015.

- [23] M. Rylander, M. J. Reno, J. E. Quiroz, F. Ding, H. Li, R. J. Broderick, B. Mather, and J. Smith, "Methods to determine recommended feeder-wide advanced inverter settings for improving distribution system performance," *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, vol. 2016-Novem, pp. 1393–1398, 2016.
- [24] P. Kayal and C. K. Chanda, "Selection of Distributed Generation for Distribution," *2014 Int. Conf. Control. Instrumentation, Energy Commun.*, pp. 269–274, 2014.
- [25] R. J. G. C. Da Silva, A. C. Zambroni De Souza, R. C. Leme, and D. Sonoda, "Decentralized secondary voltage control using voltage drop compensator among power plants," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 47, no. 1, pp. 61–68, 2013.
- [26] W. L. Theo, J. S. Lim, W. S. Ho, H. Hashim, and C. T. Lee, "Review of distributed generation (DG) system planning and optimisation techniques: Comparison of numerical and mathematical modelling methods," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 531–573, 2017.