ستاد ملی هفته پژوهش و فناوری

دانشگاه بوعلی سینا
دانشکده مهندسی

تنظیم ولتاژ بهینه مبتنی بر مدل امپدانس تطبیقی برای واحدهای تولید پراکنده با واسطه‌ی اینورتر

گروه آموزشی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی‌سینا، همدان

- راضیه جباری، دانشجوی کارشناسی ارشد برق – مهندسی کنترل، دانشگاه بوعلی سینا
- دکتر محمدحسن مرادی، استاد دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده مهندسی گروه برق
- دکتر زهرا سهرابی، استادیار دانشگاه بوعلی سینا، دانشکده مهندسی گروه برق

rz.Jabari@yahoo.com

چکیده

- عملکرد پایدار سیستم‌های قدرت متداول تا حد زیادی به امپدانس‌های ثابت عناصر شبکه‌های برق بستگی دارد. نفوذ واحدهای تولید توزیع شده با واسطه‌ی اینورتر (IIDG) ، پایداری سیستم‌های قدرت مدرن را به دلیل امپدانس خروجی ناشناخته و رندوم واحدهای IIDG ، در معرض خطر قرار می‌دهد. علاوه بر این، مشخصات امپدانس IIDG ها فقط با استفاده از یک حلقه‌ی امپدانس مجازی قابل احراز است که نیاز به تلاش کنترلی بیشتری دارد و همچنین افت ولتاژ را تحمیل می‌کند. همچنین امپدانس مجازی وابسته به جریان خروجی است و بنابراین نمی‌توان مستقیما آن را تنظیم کرد. برای این منظور، یک تنظیم‌کننده‌ی ولتاژ بهینه (OVR) برای کنترل واحدهای IIDG برای دستیابی به یک محدوده‌ی آزاد یا گسترده‌ای از مدل امپدانس پیشنهاد شده است. OVR مدل امپدانس بهینه را بر اساس نیاز کنترل و مشخصات امپدانس شبکه تسهیل می‌کند که باعث می‌شود واحدهای IIDG با شبکه برق سازگار باشند و در نتیجه به پایدارسازی سیستم‌های قدرت مدرن کمک می‌کند. سیستم کنترل OVR مبتنی بر کنترل فیدبک حالت است، مدل امپدانس مطلوب از طریق تنظیم بهره‌ی فیدبک مناسب به صورت تطبیقی حاصل می‌شود.

- IIDG: inverter interfaced distributed generation
- OVR: Optimal Voltage Regulator

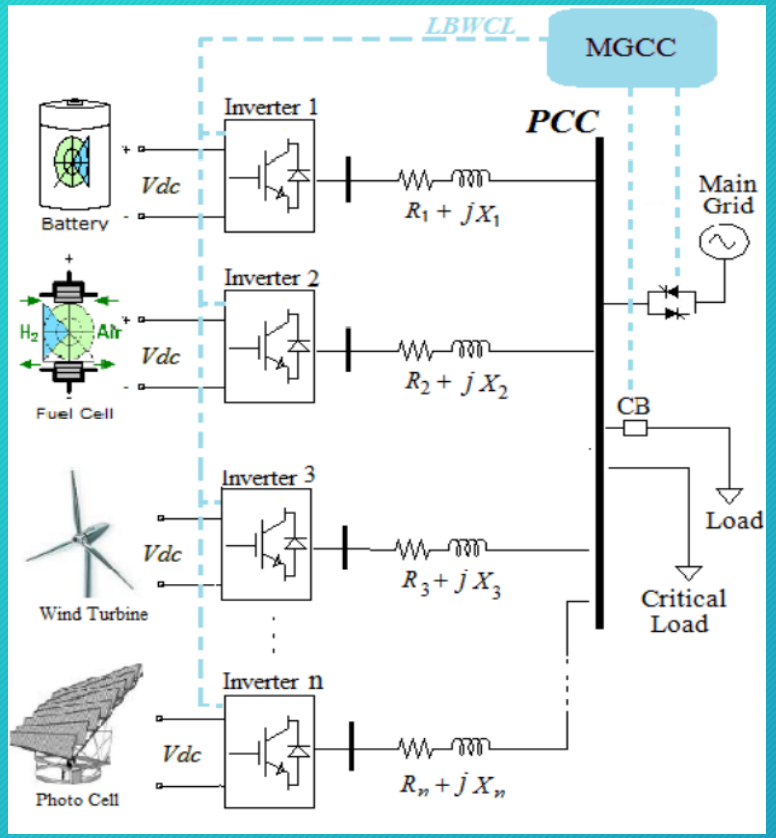
کلمات کلیدی: میکروگرید، مدل امپدانس، تولید توزیع شده با واسطه‌ی اینورتر، کنترل فیدبک حالت، کنترل بهینه.

مقدمه

- منابع تجدیدناپذیر، مانند گازوئیل، زغال سنگ و گاز، منابع اصلی انرژی الکتریکی تولیدشده توسط تولیدکنندگان برق سنتی در سراسر جهان هستند. افزایش تقاضا برای انرژی الکتریکی، کاهش ذخایر منابع تجدیدناپذیر و تولید انرژی الکتریکی از منابع تجدیدناپذیر منجر به آلودگی محیط زیست شده است. با افزایش نگرانی‌ها در مورد آلودگی محیط‌زیست و بحران انرژی فسیلی، تولید برق متمرکز سنتی جذابیت خود را از دست داده است. بنابراین، توسعه یک سیستم تولید پراکنده (DG) ممکن است جایگزین امیدوارکننده‌ای باشد زیرا می‌تواند اتصال منابع انرژی تجدیدپذیر (RES) مانند فتوولتائیک، توربین‌های بادی و نیروگاه‌های آبی را تسهیل کند. همچنین الزامات زندگی مدرن همچون تأمین انرژی الکتریکی پاک و مقرون به صرفه، مهندسان برق را تشویق کرده است تا بر تولید پراکنده مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر متمرکز شوند و آنها را در شبکه‌های توزیع و نزدیک به مراکز بار تجمیع کنند[۲-۱].
- از آنجایی که DG با پیشرفت‌هایی مانند بهینه‌سازی هزینه‌های نصب، قابل استفاده بودن برای افرادی که در مناطقی دور از شهرهای بزرگ زندگی می‌کنند و ایجاد یک سیستم گسترده از مصرف انرژی، موجب می‌شود تا بر مسائل ارائه شده در تولید متمرکز غلبه کند، از این رو تولید توزیع‌شده به یک سیستم کلیدی برای تولید برق تبدیل شده است[۳].

- DG: Distributed Generation
- RES: Renewable Energy Sources

مقدمه



ساختار میکروگرید

- با ادغام منابع انرژی توزیع شده، میکروگریدها به عنوان راه‌حلی برای مقابله با چالش‌های جدید در سیستم‌های قدرت پدیدار شده‌اند. میکروگرید رابطی بین منابع تجدیدپذیر توزیع شده و شبکه اصلی است.
- میکروگرید به عنوان یک شبکه‌ی محلی شامل تولید واحدهای توزیع شده، سیستم‌های ذخیره انرژی، بارهای محلی، سیستم کنترلی و تجهیزات حفاظتی پیشنهاد شده است. همانند شکل مقابل که نمونه‌ای از یک میکروگرید را نشان می‌دهد، منابع انرژی توزیع شده (DER) و همچنین سیستم‌های ذخیره‌ی انرژی از طریق رابط‌های مبتنی بر الکترونیک قدرت مانند اینورترها به MG در نقطه‌ی اتصال مشترک (PCC) به واسطه‌ی فیدرهای توزیع متصل شده‌اند[۵-۴].
- در مواقعی که شبکه بالادستی در دسترس نیست، عملکرد جزیره‌ای با تأمین بار بی‌وقفه MG موجب افزایش قابلیت اطمینان، مدیریت انرژی و بهبود کیفیت برق می‌شود[۲-۱].

- MG: MicroGrid
- DER: Distributed Energy Resources
- PCC: point of common coupling

مقدمه

- ساختارهای کنترلی برای عملکرد کارآمد و پایدار MG ضروری هستند. این ساختارهای کنترلی باعث می‌شوند تا در بین واحدهای DG و در ارتباط با شبکه‌ی اصلی نقش‌های اساسی حاصل شود که عبارتند از: تنظیم فرکانس و ولتاژ، کنترل توان اکتیو و توان راکتیو[۶].
- در طول عملکرد جزیره‌ای، یکی از الزامات اصلی این است که اطمینان حاصل شود که توان بار به درستی توسط واحدهای DG با توجه به توان آنها تقسیم می‌شود. برای برآورده شدن تقسیم توان بدون وابستگی به لینک‌های ارتباطی بین واحدهای DG، کنترل افتی فرکانس - توان اکتیو (f-P) و دامنه ولتاژ - توان راکتیو (V-Q)، که ویژگی‌های یک ژنراتور سنکرون را تقلید می‌کند، پیشنهاد شده است[۷].
- اگرچه مبدل سنکرون ارتباط $f - P$ را در سیستم کنترل IIDG برقرار می‌کند، اما مشخصات امپدانس خطوط برق متصل، نیاز کنترلی را برآورده نمی‌کند. به همین دلیل، مدل امپدانس مهم است و مبدل سنکرون به یک حلقه‌ی امپدانس مجازی برای مدل امپدانس نیاز دارد تا دینامیک خود را بهبود دهد. همه اهداف کنترلی صرفاً با استفاده از یک حلقه‌ی امپدانس مجازی نمی‌تواند برآورده شود. علاوه بر این، شبکه‌های توان پایین و متوسط دارای ویژگی‌های امپدانس خاص خود هستند که باید برای طراحی امپدانس خروجی اینورترها در نظر گرفته شود تا به یک هارمونی پایدارکننده در سیستم قدرت مدرن یا یک میکروگرید مستقل رسید[۸].
- بنابراین به منظور خنثی کردن پیچیدگی سیستم‌های قدرت مدرن ضمن حفظ سازگاری مشخصات امپدانس خروجی واحدهای IIDG با شبکه و اهداف کنترلی، یک سیستم کنترل جدید در این **پژوهش** ارائه شده است که محدوده‌ی وسیعی از آزادی را برای امپدانس فراهم می‌کند[۹].

روش انجام تحقیق

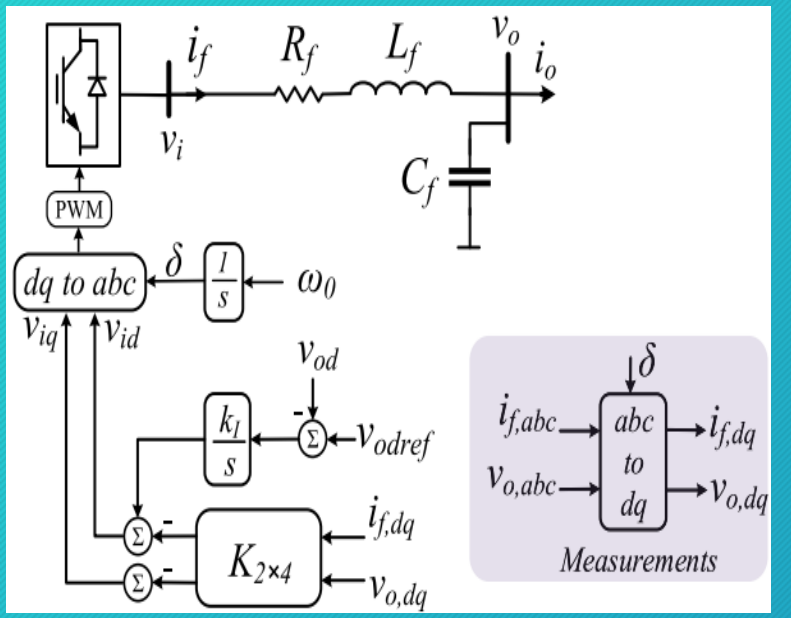
بخش‌های جدید روش پیشنهادی به شرح زیر است:

- رگولاتور ولتاژ بهینه (OVR) مبتنی برکنترل فیدبک حالت، به عنوان منبع ولتاژ برای کنترل واحدهای IIDG در سیستم قدرت مدرن اتخاذ می‌شود. حلقه‌ی فیدبک حالت از طریق انتخاب بهره‌های مناسب فیدبک حالت، مدل امپدانس خروجی دلخواه را برای OVR تسهیل می‌کند. OVR تنها شامل یک انتگرال‌گیر است در مقایسه با VSI های مبتنی بر کنترل‌کننده‌ی PI با چهار انتگرال‌گیر
- رگولاتور خطی درجه دوم (LQR) برای تعیین ماتریس بهره‌ی فیدبک استفاده شده است. با این وجود، عملکرد LQR تحت تأثیر ماتریس‌های معیار است. بنابراین، یک تابع هزینه‌ی چند هدفه غیرخطی مبتنی بر مدل امپدانس خروجی OVR (عملکرد دینامیکی) و همچنین مقاوم بودن آن در رد اغتشاش، برای تعیین ماتریس‌های بهینه‌ی معیار پیشنهاد شده است.

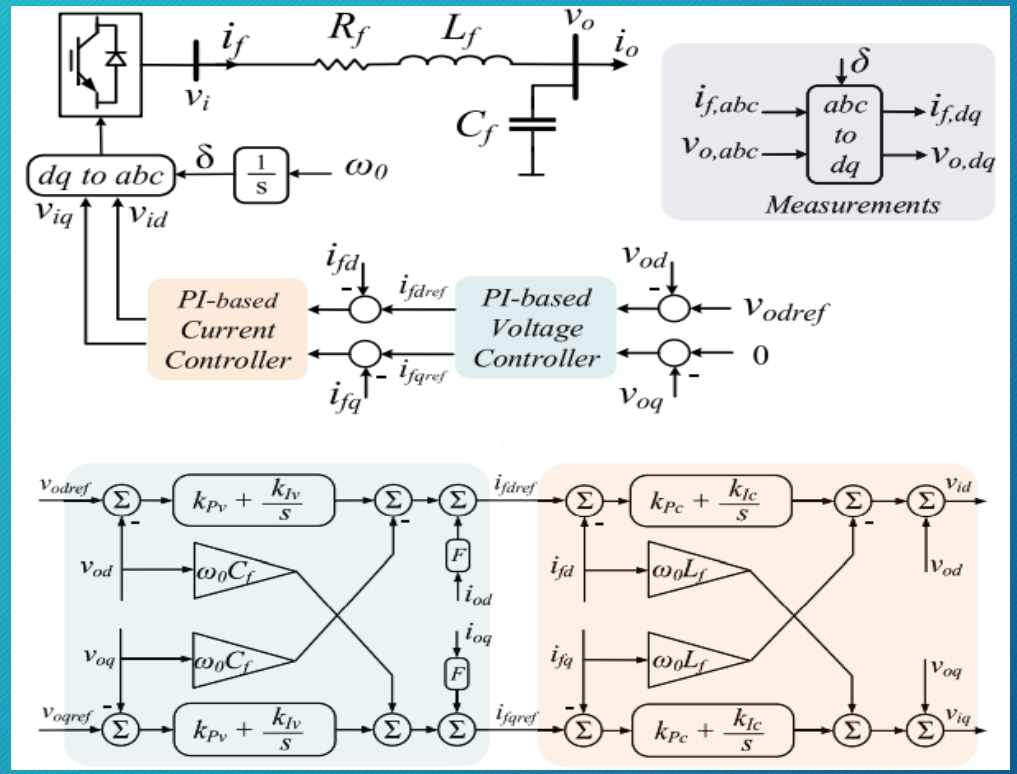
- VSI: VOLTAGE SOURCE INVERTER
- LQR: Linear Quadratic Regulator

روش انجام تحقیق

- نمودار شماتیک OVR پیشنهادی در شکل نشان داده شده است. در مقایسه با VSI معمولی، که شامل چهار انتگرال‌گیر برای حلقه های داخلی است، OVR پیشنهادی فقط شامل یک انتگرال‌گیر است.
- حلقه‌ی انتگرال به طور موازی با حلقه فیدبک حالت کار می‌کند و مولفه d ولتاژ خروجی را به مقدار مرجع تعیین شده توسط حلقه‌ی کنترل توان - افتی بیرونی هدایت می‌کند. حلقه‌ی فیدبک حالت برای جابجایی قطب‌های سیستم به مکان‌های مطلوب برای بدست آوردن شکل امپدانس مطلوب به عنوان معیار عملکرد دینامیک و پایداری اتخاذ شده است. این عمل با تنظیم ماتریس بهره‌ی فیدبک حالت اجرا می شود.



سیستم کنترل پیشنهادی برای رگولاتور ولتاژ بهینه (OVR)



دیاگرام تک فاز و سیستم کنترل اینورتر منبع ولتاژ (VSI)

روش انجام تحقیق

- اثربخشی OVR پیشنهادی از طریق مثال‌ها و شبیه‌سازی های عددی در MATLAB / Simulink و با استفاده از تولباکس Simscape ارزیابی می‌شود. پارامترهای الکتریکی و مشخصات مبدل در جدول زیر آورده شده است. پارامترهای کنترل VSI مبتنی بر PI از [۱۰] گرفته شده است که برای دستیابی به بهترین عملکرد دینامیکی ساخته شده‌اند.

ELECTRICAL AND CONTROL PARAMETERS OF PI-BASED VSI

LC filter	R_f	L_f	C_f
	0.1 Ω	1e-3 H	50e-6 F
Voltage control	k_{Pv}	k_{Iv}	F
loop	0.5	390	0.75
Current control loop	k_{Pc}	k_{Ic}	-
	10.5	16000	-
Power Converter	ω_s	Rated power	Voltage (L-L)
	8 kHz	30 kW	400 V

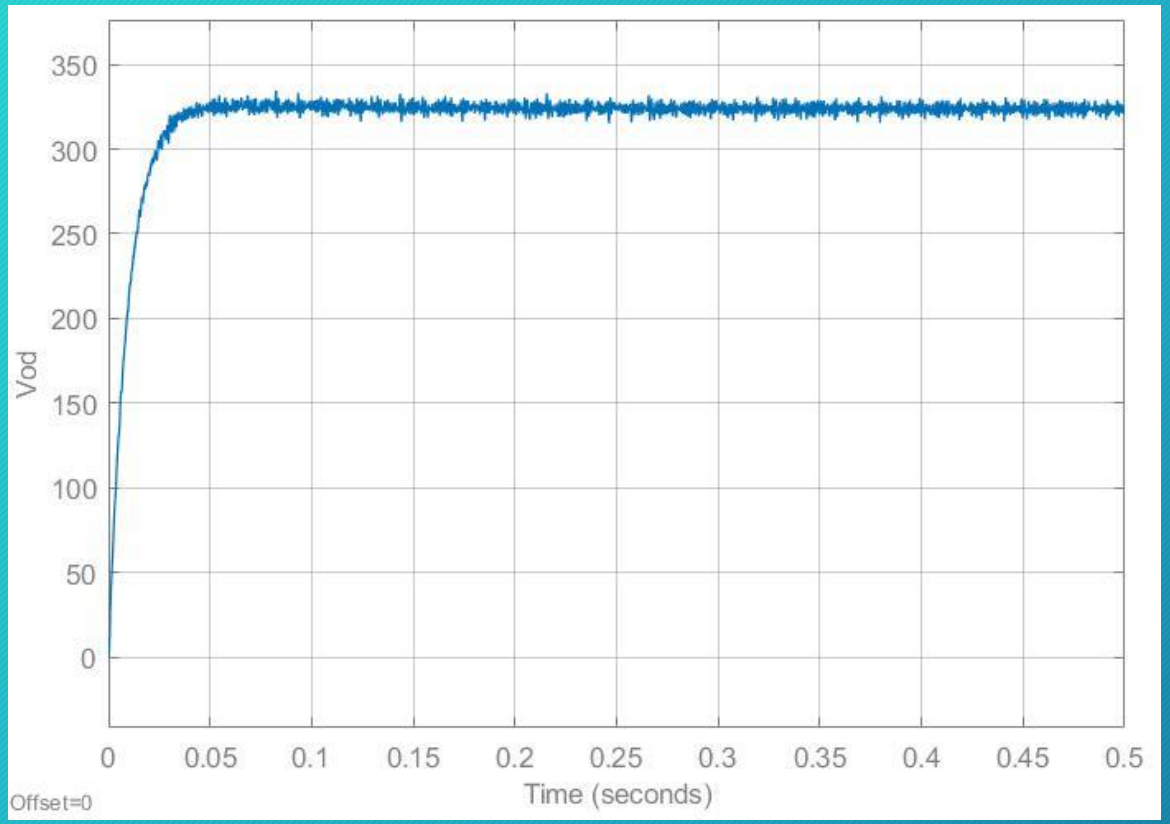
بحث و نتیجه‌گیری

- اهمیت مدل امپدانس واحدهای IIDG در ایجاد پایداری در سیستم‌های قدرت مدرن و میکروگریدهای مستقل بررسی شده است. برای این منظور، یک سیستم کنترل جدید مبتنی بر مدل امپدانس، به نام تنظیم کننده‌ی ولتاژ بهینه (OVR)، برای کنترل واحدهای IIDG پیشنهاد شده است.
- به دلیل هدف قرار دادن شکل بهینه‌ی امپدانس، بهینه بودن به روند تنظیم اشاره دارد که از طریق تنظیم بهره‌ی فیدبک حالت از روش بهینه LQR حاصل می‌شود.
- علاوه بر این ساختار کنترل در یک فرم بهینه برای تسهیل مدل امپدانس مناسب یا ساده طراحی شده است. OVR می‌تواند عملکرد دینامیکی و حاشیه پایداری را بهبود بخشد و مرتبه و پیچیدگی سیستم‌های قدرت مدرن را کاهش دهد [۱۶].
- از چالش کنترلی مربوط به روش این است که فرآیند بهینه‌سازی برای تنظیم بهره‌ی فیدبک در مورد کاربردهای زمان حقیقی (real-time) که مدل امپدانس قرار باشد به صورت تطبیقی تنظیم شود، وقت‌گیر است.

بحث و نتیجه‌گیری

- امپدانس خروجی برای مدل‌سازی عملکرد دینامیکی OVR ارائه می‌شود و جریان خروجی باعث افت ولتاژ نسبت به امپدانس خروجی نمی‌شود. به عبارت دیگر، اینورتر در نظر گرفته شده است تا ولتاژ مرجع (vodref) را در خروجی خود دنبال کند و امپدانس خروجی، دینامیک ولتاژ را وقتی به مقدار مرجع نزدیک می‌شود، مشخص می‌کند.

- در عملکرد یک OVR مستقل در تنظیم ولتاژ، برای شکل موج ولتاژ خروجی در حالت ماندگار عبارت vo = vodref حاصل می‌شود یا که در مقدار اسمی Vod = 326 (V) ثابت شده است. بنابراین، افت ولتاژ که اشکال اصلی حلقه‌ی امپدانس مجازی است، برطرف می‌شود.



شکل موج مولفه ی مستقیم ولتاژ خروجی

تقدیر و تشکر

از زحمات اساتید محترم کمال تشکر را دارم.

منابع

- [1] Moradi, M.H., Eskandari, M. and Hosseinian, S.M.: ‘Operational strategy optimization in an optimal sized smart microgrid. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6, (3), pp 1087-1095.
- [2] Moradi, M.H., Eskandari, M. and Hosseinian, S.M.: ‘Cooperative control strategy of energy storage systems and micro sources for stabilizing microgrids in different operation modes. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016. 78, pp.390-400.
- [3] Clairand, J.M.; Chinchero-Villacís, H.; Serrano-Guerrero, X.; Gonzalez-Zumba, A. Microgrids as Electrification Alternatives for the Amazon Region in Ecuador. In Proceedings of the 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT Asia), Chengdu, China, 21–24 May 2019; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2019; pp. 4286–4291.
- [4] Ahmadi S, Shokoohi S, Bevrani H. A fuzzy logic-based droop control for simultaneous voltage and frequency regulation in an AC microgrid. Int J Electr Power Energy Syst 2015;64:148–55. doi:10.1016/j.ijepes.2014.07.024.
- [5] Moradi, M.H., Eskandari, M. and Showkati, H.: ‘A hybrid method for simultaneous optimization of DG capacity and operational strategy in microgrids utilizing renewable energy resources. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 56, pp.241- 258.

منابع

- [6] Advanced Control Methods and Renewable Energy System Integration Edited by MAGDI S. MAHMOUD © 2017 Elsevier Ltd. All rights reserved.
- [7] J. M. Guerrero, L. Hang, and J. Uceda, “Control of distributed uninterruptible power supply systems,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no. 8, pp. 2845–2859, Aug. 2008.
- [8] J. Liu, Y. Miura, H. Bevrani, and T. Ise, “Enhanced virtual synchronous generator control for parallel inverters in microgrids,” IEEE Trans. Smart Grid, vol. 8, no. 5, pp. 2268–2277, Sep. 2017.
- [9] P. Monshizadeh, N. Monshizadeh, C. De Persis, and A. van der Schaft, “Output impedance diffusion into lossy power lines,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 34, no. 3, pp. 1659–1668, May 2019.
- [10] N. Pogaku, M. Prodanovic, and T. C. Green, “Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid,” IEEE Trans. Power Electron., vol. 22, no. 2, pp. 613–625, Mar. 2007.
- [11] M. Eskandari, L. Li, M. H. Moradi, P. Siano, and F. Blaabjerg, “Optimal voltage regulator for inverter interfaced DG units-part I: Control system,” IEEE Trans. Sustain. Energy, 2020.