

VSC کنترل شده فازی سیستم ذخیره‌سازی باتری برای انتقال یکپارچه ریزشبکه بین حالت متصل به شبکه و حالت جزیره‌ای

علیرضا عبادی زاهدان، دانشجوی کارشناسی ارشد، ^۱alireza.ebadi@srbiau.ac.ir

فرید آدابی*، دکتری، استادیار گروه مهندسی برق قدرت، ^۲farid.adabi@iausdj.ac.ir

سودابه سلیمانی، دکتری، استاد تمام گروه مهندسی برق قدرت، ^۳s.soleymani@srbiau.ac.ir

چکیده

این مقاله انتقال یکپارچه بین حالت متصل به شبکه و حالت جزیره‌ای ریزشبکه را ارائه می‌دهد. اهمیت انتقال یکپارچه حفظ ولتاژ و فرکانس بار و همچنین تحویل توان ثابت در طول هر دو حالت کارکرد ریزشبکه است. در این مقاله مبدل منبع ولتاژ (VSC) واحد تولید PV به دلیل ویژگی‌های متناوب آن در حالت کنترل PQ در هر دو حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای ریزشبکه کار می‌کند. در حالی که VSC سیستم ذخیره باتری (BSS) در حالت کنترل PQ در طول عملیات متصل به شبکه و در حالت کنترل VF در طول عملیات جزیره‌ای ریزشبکه عمل می‌کند. یک کنترل کننده منطق فازی برای کنترل VF در طول حالت جزیره‌ای عملکرد ریزشبکه طراحی شده است. کنترل کننده منطق فازی می‌تواند به طور موثر با غیر خطی بودن سیستم قدرت مقابله کند زیرا به مدل ریاضی سیستم بستگی ندارد. همچنین کنترل کننده منطق فازی پیشنهادی، گذرای سوئیچینگ و همچنین تورم و کاهش ولتاژ را در طول خطا محدود می‌کند. نتایج شبیه‌سازی کار بهینه استراتژی کنترل پیشنهادی را در دستیابی به انتقال یکپارچه بین حالت‌های عملیاتی متصل به شبکه و حالت جزیره‌ای ریزشبکه ثابت می‌کند.

واژه‌های کلیدی: ریزشبکه، مولد PV، کنترل کننده منطق فازی (FLC)، تابع عضویت (MFC)، سیستم ذخیره‌سازی باتری (BSS)، مبدل منبع ولتاژ (VSC).

۱- مقدمه

ریزشبکه نفوذ بالایی از واحدهای تولید کننده انرژی تجدیدپذیر توزیع شده (DG) را به شبکه برق بدون هیچ تغییر قابل توجهی در شبکه برق امکان پذیر می‌کند. ادغام بین ریزشبکه و شبکه برق باید استانداردهای اتصال متقابل را برآورده کند تا اطمینان حاصل شود که پخش توان از نقطه کوپلینگ مشترک صاف است [۱]. ریزشبکه می‌تواند در دو حالت کار کند: (۱) حالت متصل به شبکه و (۲) حالت جزیره‌ای/خودکار. در شرایط خطای شدید در شبکه اصلی، ریزشبکه خود را از شبکه اصلی جدا می‌کند و در حالت جزیره‌ای کار می‌کند. به محض رفع عیب در شبکه برق، دوباره به شبکه اصلی وصل می‌شود. انتقال یکپارچه ریزشبکه بین دو حالت عملکرد برای اطمینان از حداقل اختلال در بارها مهم است. در [۲]-[۳] کنترل کننده droop برای انتقال یکپارچه ریزشبکه بین دو حالت کار استفاده می‌شود. با این حال ویژگی‌های متناوب واحدهای DG منبع انرژی تجدیدپذیر برای طراحی کنترل کننده برای اینورتر در نظر گرفته نشده است. بسته به حالت عملکرد ریزشبکه،

^۱دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

^۲دانشگاه آزاد اسلامی واحد سنندج

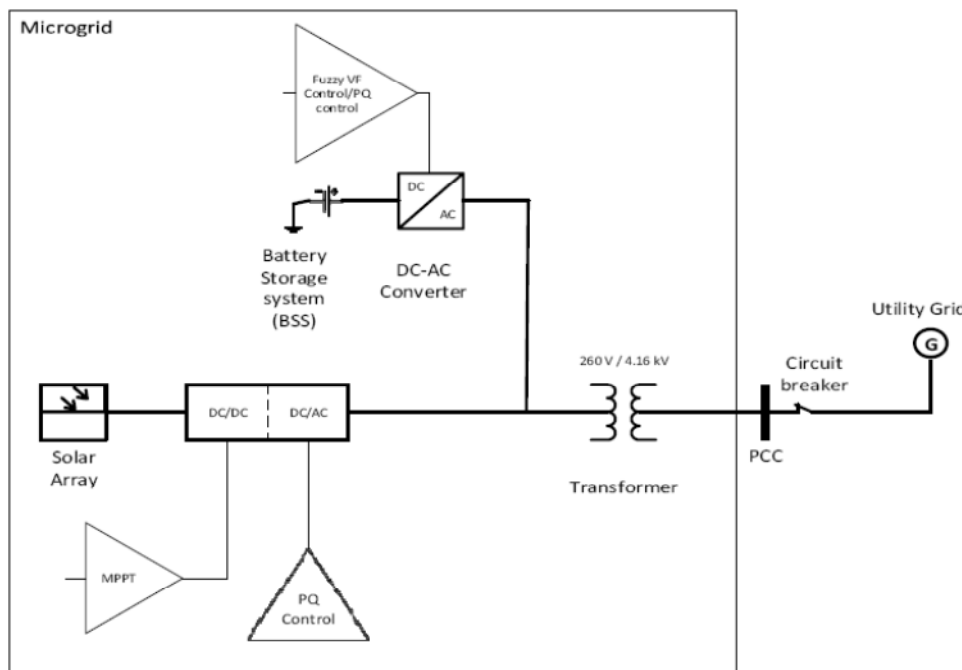
^۳دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

VSCها می‌توانند در حالت کنترل PQ در حالت متصل به شبکه یا حالت کنترل VF زمانی که ریزش‌بکه در حالت جزیره‌ای است، کار کنند. از آنجایی که توان اکتیو تولید شده توسط منبع انرژی تجدیدپذیر DG دارای محدودیت‌های وابسته به آب و هوا است، برای منبع انرژی تجدیدپذیر DG مناسب نیست که در حالت کنترل VF کار کند. از هر سیستمی با توان اکتیو ثابت مانند VSC سیستم ذخیره باتری (BSS) باید خواسته شود تا در حالت کنترل VF برای حفظ ولتاژ و فرکانس در طول حالت جزیره‌ای عملکرد ریزش‌بکه کار کند. این شرایط هنگام طراحی یک کنترل کننده برای VSC در این مقاله در نظر گرفته شده است. در [۴] سیستم کنترل چند متغیره برای حالت جزیره‌ای عملکرد ریزش‌بکه اعمال می‌شود، اما طراحی کنترل کننده پیچیده است و به مدل فضای حالت ریزش‌بکه بستگی دارد. یک کنترل کننده PI در [۵] برای حالت متصل به شبکه و حالت جزیره‌ای عملکرد ریزش‌بکه استفاده می‌شود، اما کنترل کننده PI از حساسیت به تغییرات پارامتر و غیر خطی بودن سیستم رنج می‌برد. کنترل کننده منطق فازی (FLC) عملکرد را نسبت به استراتژی‌های کنترل معمولی بهبود بخشیده است و یک رویکرد جایگزین در کنترل سیستم‌هایی ارائه می‌کند که درجه بالایی از عدم قطعیت را نشان می‌دهند. مزایای بسیاری از FLC وجود دارد [۶]:

- ۱) آن‌ها می‌توانند به طور موثر با سیستم‌های غیرخطی مقابله کنند. (۲) طراحی آن‌ها نیازی به مدل ریاضی سیستم ندارد. (۳) در صورت تنظیم دقیق، آن‌ها می‌توانند عملکرد بهتری نسبت به کنترل کننده‌های معمولی داشته باشند. در این مقاله، FLC ساده برای حالت کنترل VF of VSC برای سیستم ذخیره باتری (BSS) برای انتقال یکپارچه ریزش‌بکه از هر دو حالت عملکرد پیشنهاد شده است. برای شبیه سازی سیستم مورد نظر از MATLAB/Simulink استفاده شده است.

۲- سیستم مطالعه موردی

ریزش‌بکه در نظر گرفته شده در این مقاله شامل یک DER و آرایه PV است که از بارهای محلی و سیستم ذخیره باتری (BSS) برای ذخیره انرژی اضافی از آرایه PV یا تزریق انرژی در صورت نیاز پشتیبانی می‌کند. شکل ۱ زیر سیستم در نظر گرفته شده برای شبیه سازی را نشان می‌دهد. سیستم ریزش‌بکه در محیط MATLAB/Simulink شبیه سازی شده است.



شکل ۱ - ریزش‌بکه متصل به شبکه اصلی

مدل آرایه PV در نظر گرفته شده SunPower SPR-305E-WHT-D است. آرایه PV از تعداد زیادی ماژول PV کوچک تشکیل شده است. در این سیستم ۵ سری ماژول در هر رشته وصل شده و ۶۶ رشته موازی آرایه PV را ایجاد می‌کند که می‌تواند ولتاژ DC ۲۶۰ ولت و توان اکتیو ۱۰۰ کیلو وات را ایجاد کند. مشخصه‌های I-V و P-V آرایه PV با معادلات زیر تعریف می‌شوند:

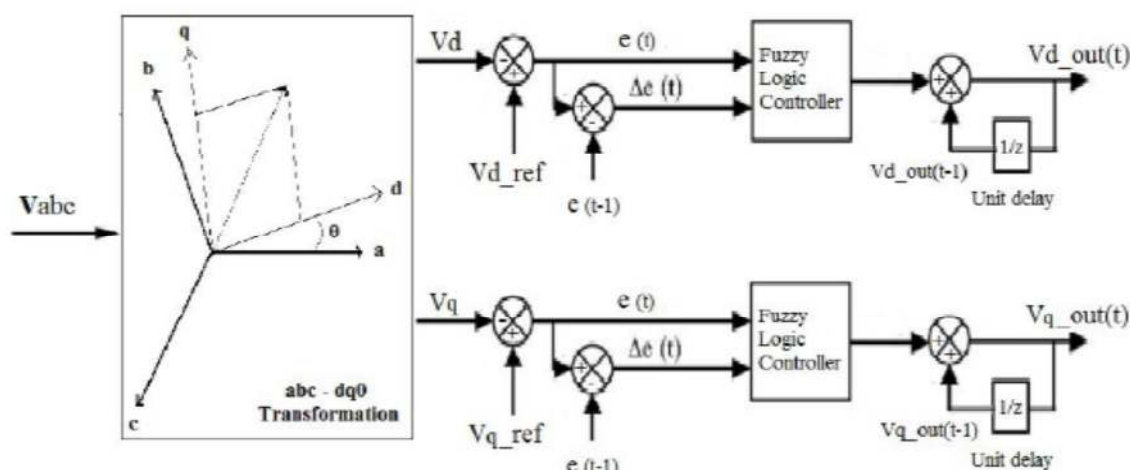
$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{V_d}{V_T}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

$$V_T = \frac{k_T}{q} \times nI \times [N_{cell}] \quad (2)$$

یک آرایه PV از طریق تقویت کننده DC/DC به یک شبکه برق ۴/۱۶ کیلوولت ادغام می‌شود که توسط الگوریتم P&O ردیابی حداکثر توان (MPPT) و مبدل منبع ولتاژ سه سطح (VSC) کنترل می‌شود. خروجی تقویت کننده DC/DC ۵۰۰ ولت DC است. سیستم ذخیره سازی باتری (BSS) در نظر گرفته شده از باتری لیتیوم یونی تشکیل شده است. مجموع ولتاژ DC سیستم ذخیره‌ساز باتری ۳۶۰ ولت و ظرفیت کل آن (آمپرساعت) ۱۰۰ Ahr است. در حالت متصل به شبکه، اگر وضعیت شارژ^۴ (SOC) کمتر از ۲۰ درصد باشد، در حالت شارژ و اگر SOC بیشتر از ۸۰ درصد باشد، هیچ توانی را جذب یا تزریق نمی‌کند. در حالت متصل به شبکه، BSS VSC در حالت کنترل PQ عمل می‌کند در حالی که در حالت جزیره‌ای در مود^۵ (حالت) کنترل VF عمل می‌کند.

۳- کنترل کننده پیشنهادی

کنترل کننده منطق فازی (FLC) برای انتقال یکپارچه ریزشبهه از حالت متصل به شبکه به حالت جزیره‌ای و بالعکس پیشنهاد شده است. در حالت متصل به شبکه، کنترل توان BSS بر اساس درصد SOC باتری است که در بخش قبل توضیح داده شد. با رخ دادن خطا و جدا شدن ریزشبهه از شبکه برق، BSS از طریق VSC کنترل شده با FLC برای کنترل ولتاژ و فرکانس ریزشبهه به ریزشبهه متصل می‌شود. در حالت جزیره‌ای مرجع فرکانس توسط PLL مشخص می‌شود که فرکانس سیستم ۶۰ هرتز است. ولتاژ ریزشبهه اندازه گیری شده ابتدا از قاب abc به فریم (قالب) dq0 تبدیل می‌شود. ولتاژ محور dq، یعنی V_d و V_q با ولتاژ مرجع مقایسه می‌شود. خطای بدست آمده از آن اولین ورودی FLC خواهد بود. نرخ تغییر این خطا به عنوان ورودی دوم به FLC داده می‌شود. شکل ۲ بلوک دیاگرام کنترل کننده منطق فازی را نشان می‌دهد.

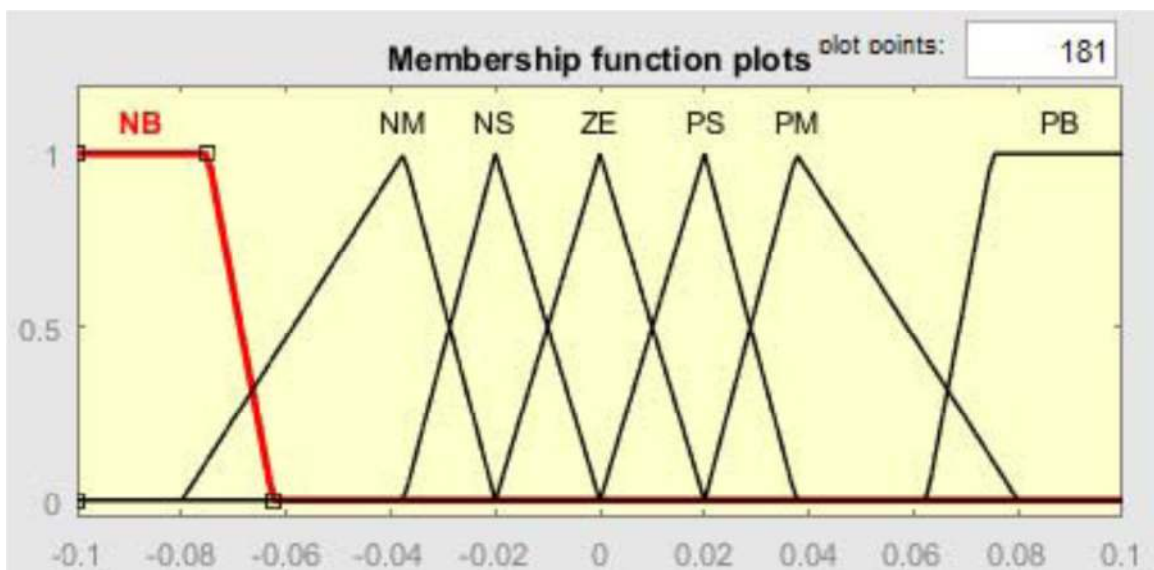


شکل ۲- بلوک دیاگرام FLC

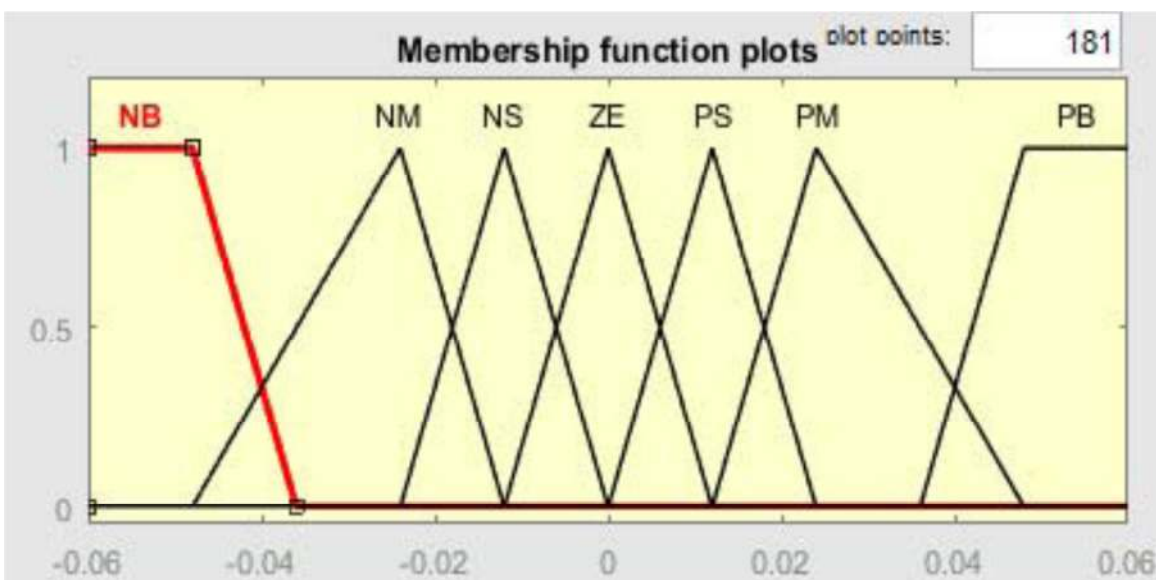
⁴ State of charge

⁵ Mode

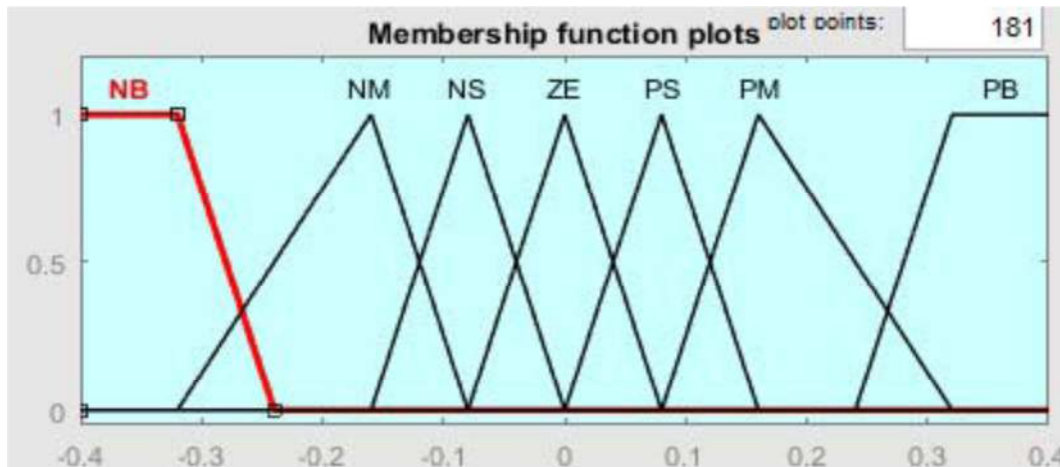
قوانین کنترل کننده منطق فازی بدون هیچ مدل یا پارامتر ریاضی طراحی شده است. بهینه سازی قوانین را می توان از طریق روش آزمون و خطا بر اساس نتایج شبیه سازی به دست آمده از طریق شبیه سازی Matlab/Simulink انجام داد. یک مجموعه اولیه از پارامترها برای مقاردهی اولیه شبیه سازی در Simulink استفاده می شود و سپس نتایج به دست آمده با مقادیر مرجع مقایسه می شوند تا پارامترهای جدید به دست آید و فرآیند تا تعیین مجموعه بهینه از پارامترها تکرار می شود. تابع عضویت برای ورودی و خروجی با پارامترهای بهینه برای کنترل کننده منطق فازی در شکل ۳ نشان داده شده است.



(الف) ورودی ۱ [خطای ولتاژ]



(ب) ورودی ۲ [نرخ تغییر خطای ولتاژ]



(ج) خروجی Q

شکل ۳- تابع عضویت (MFC)

جدول ۱- ورودی/خروجی جدول قوانین FLC

Output (Vout)		Rate of change of error ($\Delta ed/q$)						
		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
Error (e)	NB	Z	Z	Z	PB	PB	PB	PB
	NM	Z	Z	Z	PM	PM	PM	PM
	NS	Z	Z	Z	PS	PS	PS	PS
	Z	PS	Z	Z	Z	Z	Z	NS
	PS	NS	NS	NS	NS	Z	Z	Z
	PM	NM	NM	NM	NM	Z	Z	Z
	PB	NB	NB	NB	NB	Z	Z	Z

قوانین فازی بر اساس تابع عضویت و قوانین if-then مطابق جدول ۱ تعریف می‌شوند. مجموعه‌های فازی برای تشکیل قوانین فازی به صورت بزرگ منفی^۶ (NB)، متوسط منفی^۷ (NM)، کوچک منفی^۸ (NS)، صفر^۹ (Z)، بزرگ مثبت (PB)، متوسط مثبت (PM)، کوچک مثبت (PS) تعریف می‌شوند. سیستم استنتاج فازی^{۱۰} (FIS) ممدانی برای شبیه سازی در نظر گرفته شده است. از روش مرکز ثقل برای فازی زدایی برای به دست آوردن خروجی (Vout) استفاده می‌شود.

⁶ Negative big

⁷ Negative medium

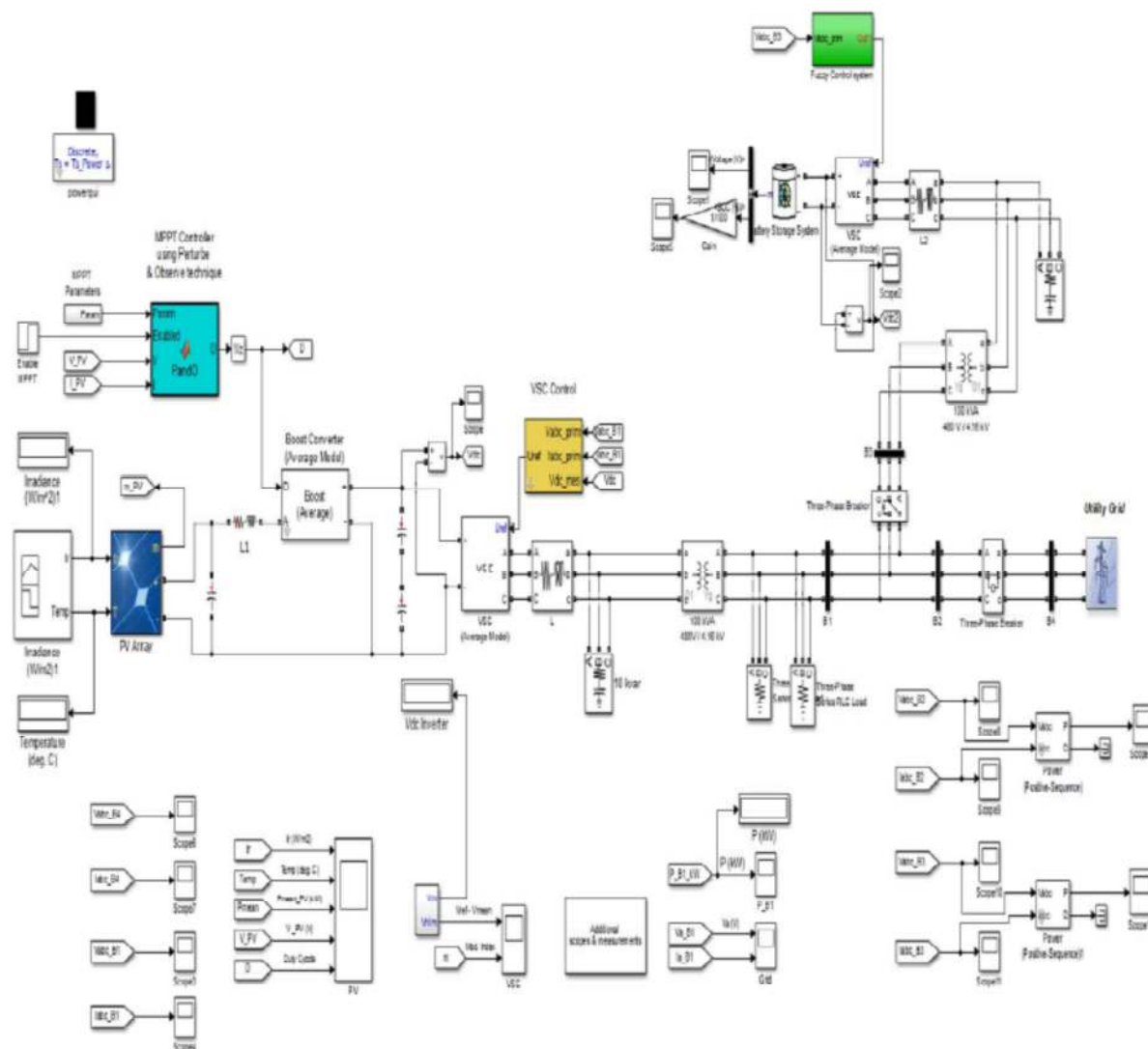
⁸ Negative small

⁹ Zero

¹⁰ Fuzzy inference system

۴- نتایج شبیه سازی

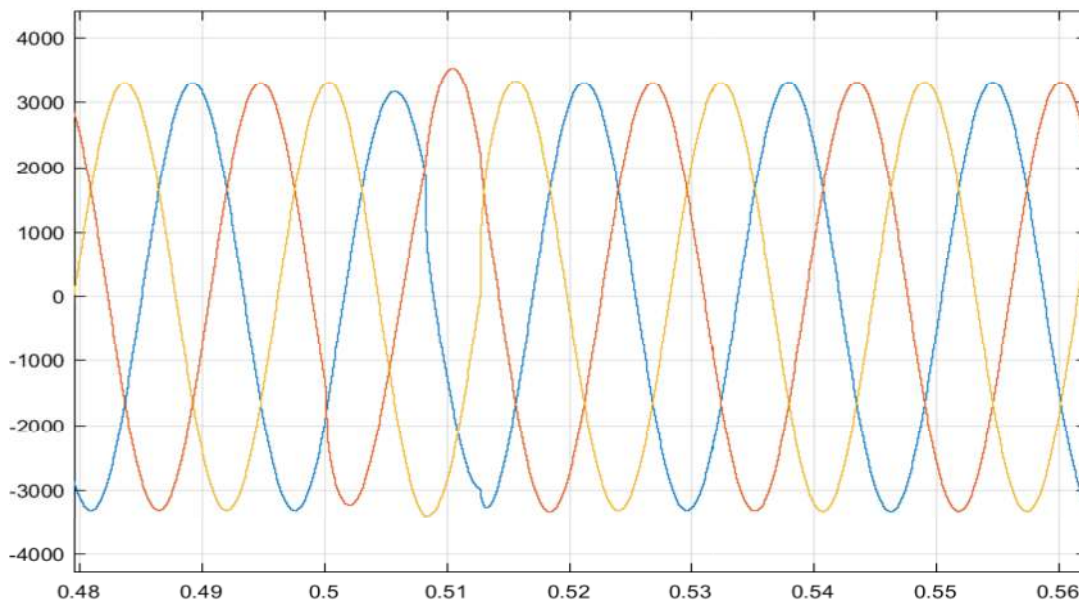
هدف اصلی کار فعلی انتقال یکپارچه ریزشبكة با استفاده از کنترل کننده منطق فازی (FLC) است و از این رو تنها یک آرایه PV، یک سیستم ذخیره باتری (BSS) و بار محلی ۴۰ کیلووات در نظر گرفته شده است. برای سیستم مورد مطالعه، شبیه‌سازی با شرایط تست استاندارد شروع می‌شود (یعنی ۲۵ درجه سانتی‌گراد، 1000 W/m^2 برای PV و SOC ۹۰٪ برای باتری). مدل شبیه‌سازی ریزشبكة در شکل ۴ نشان داده شده است.



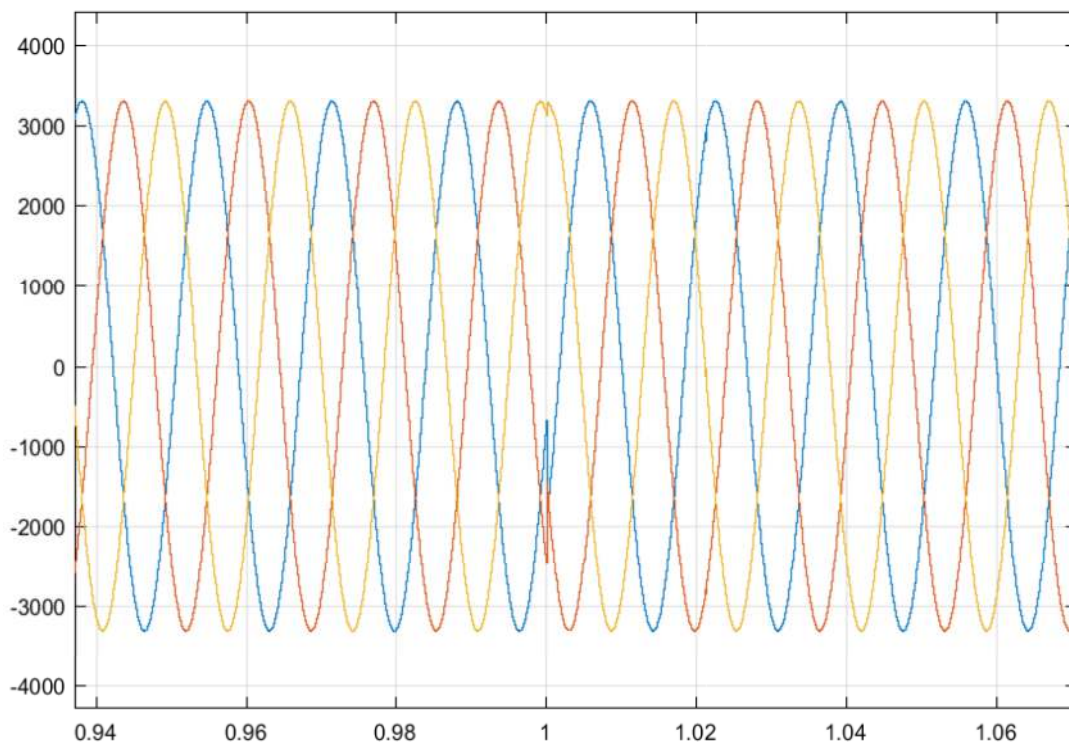
شکل ۴- مدل سیمولینک ریزشبكة

از زمان $t=0\text{s}$ تا $t=0.5\text{s}$ ، ریزشبكة در حالت متصل به شبکه است. ولتاژ ریزشبكة در PCC با ولتاژ شبکه هماهنگ است. در $t=0.5\text{s}$ هنگامی که خطا رخ می‌دهد، قطع کننده مدار باز می‌شود و ریزشبكة از شبکه اصلی، جزیره (جدا) می‌شود. آرایه PV و سیستم ذخیره باتری (BSS)، بار محلی (۴۰ کیلووات) را تغذیه می‌کند و BSS ولتاژ و فرکانس سیستم را از طریق کنترل VF فازی در سطح دلخواه حفظ می‌کند. در $t=1\text{s}$ مشکل پیش آمده رفع شده و ریزشبكة دوباره به شبکه متصل می‌شود. از شکل ۵ (الف) و (ب) مشاهده می‌شود که در PCC در طول انتقال

ریزشبکه از حالت متصل به شبکه به حالت جزیره‌ای و انتقال مجدد به حالت متصل به شبکه، افت ولتاژ یا اضافه ولتاژ وجود ندارد. شکل ۶ (الف) و (ب) پخش توان اکتیو و جریان بار را از طریق ریزشبکه در هر دو حالت عملیاتی متصل به شبکه و جزیره‌ای نشان می‌دهد.

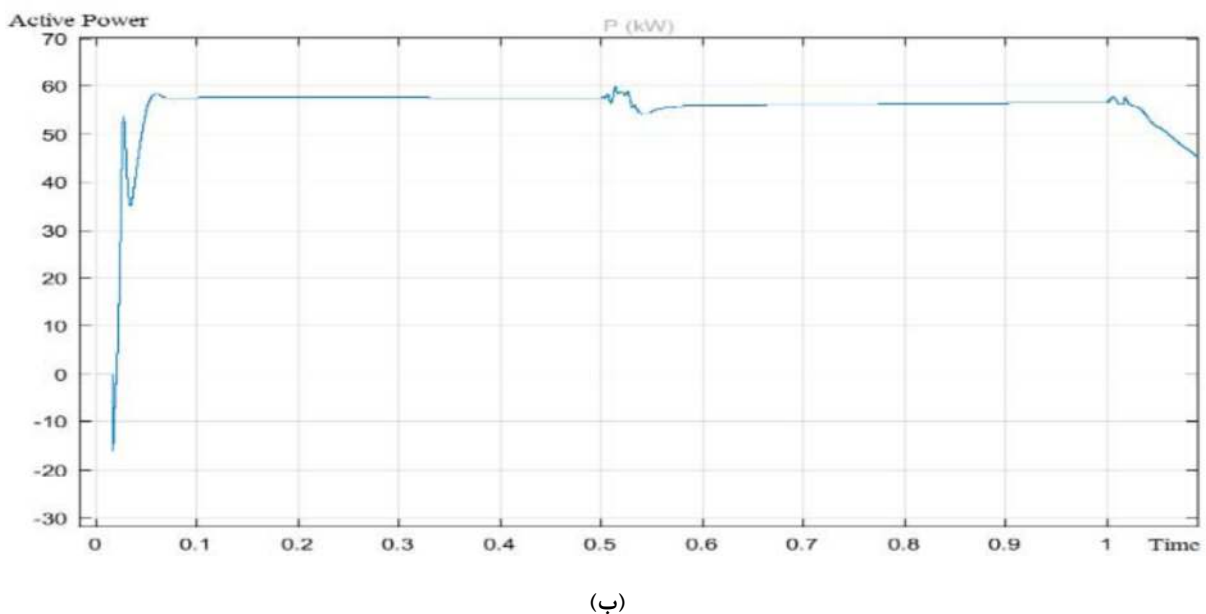
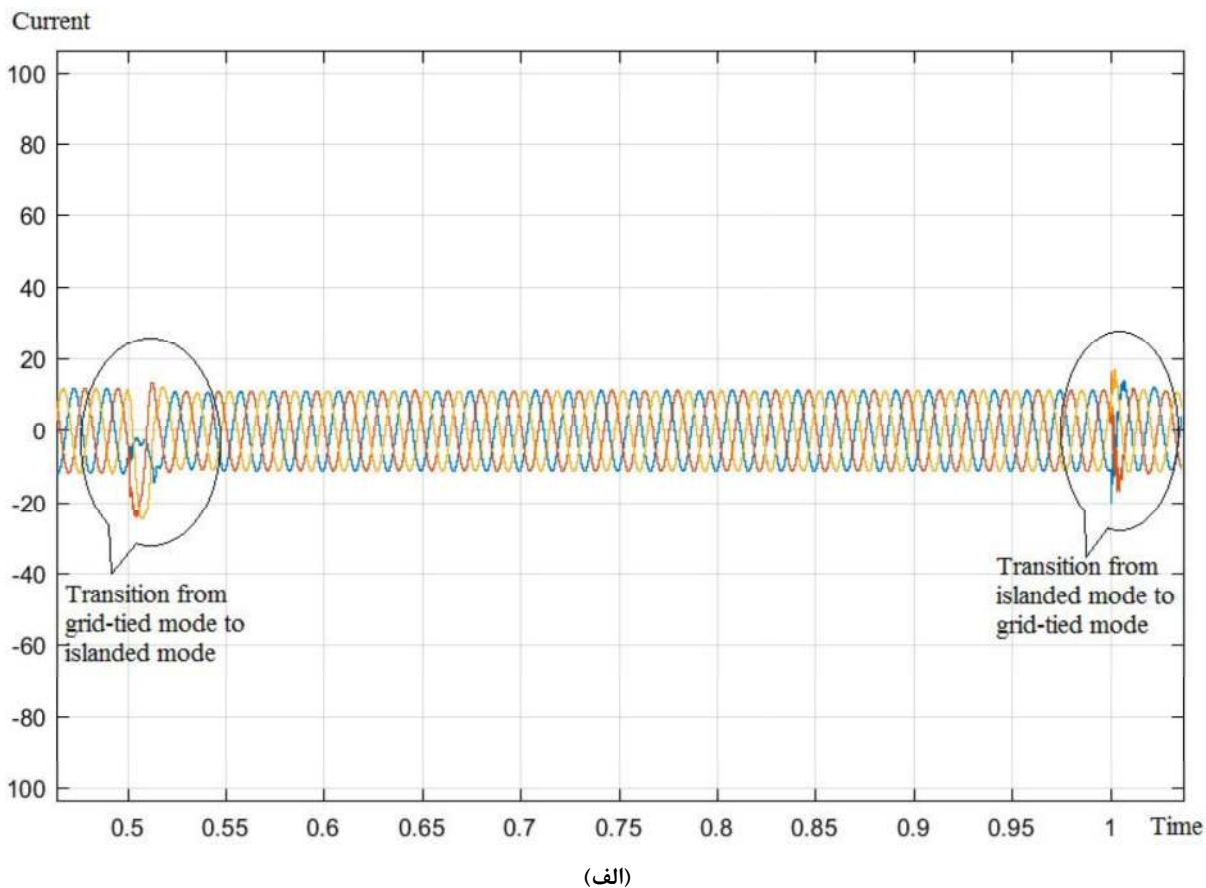


(الف)



(ب)

شکل ۵- (الف) ولتاژ PCC ریزشبکه (انتقال از حالت اتصال به شبکه به حالت جزیره‌ای در $t=0.5s$) (ب) ولتاژ PCC ریزشبکه (انتقال از حالت جزیره‌ای به حالت متصل به شبکه در $t=1s$)



شکل ۶- (الف) جریان بار در ریزشبكة (ب) پخش توان اکتیو در ریزشبكة تغذیه شده توسط PV و BSS

نتایج تحت شرایط مختلف آزمایش مانند تغییر در تابش آرایه PV خورشیدی، SOC باتری زیر ۲۰٪، کاهش بار در حالت جزیره‌ای به دست می‌آید، اما به دلیل محدودیت در تعداد صفحات، نتایج برای شرایط مختلف آزمایش در این مقاله ارائه نشده است.

۵- نتیجه گیری

یک استراتژی کنترل برای انتقال یکپارچه ریزشبه بین هر دو حالت عملیات در این مقاله توسعه داده شده است. هنگامی که ریزشبه به شبکه متصل است، کنترل کننده VSC برای PV در حالت کنترل PQ کار می‌کند و توان مشخص شده را با استفاده از مرجع ولتاژ و فرکانس از شبکه اصلی ارائه می‌دهد.

در طول عملیات جزیره‌ای، مرجع ولتاژ و فرکانس از شبکه اصلی در دسترس نیست و از این رو کنترل کننده BSS VSC در حالت کنترل VF عمل می‌کند تا ولتاژ و فرکانس ریزشبه را در نقطه کار پایدار حفظ کند. کنترل فازی مورد استفاده برای کنترل VF، گذر جریان سوئیچینگ و همچنین کاهش و افزایش ولتاژ را در هنگام خطا محدود می‌کند. از نتایج شبیه‌سازی واضح است که به دلیل استراتژی کنترل پیشنهادی، انتقال یکپارچه ریزشبه تحت شرایط مختلف آزمایش موفقیت‌آمیز است.

منابع

- [1] L. Chang, C. Diduch, P. Song, "Development of Standards for Interconnecting Distributed Generators with Electric Power Systems", IEEE Power Electronics Specialists Conf., June 2005, pp. 2501-2507
- [2] Shang-Hung Hu Chun-Yi Kuo Tzung-Lin Lee, "Droop-Controlled Inverters with Seamless Transition between Islanding and Grid-Connected Operations", Joseph M. Guerrero Dept. Energy Technology Aalborg University DENMARK, 2011 IEEE
- [3] Andrew T. Moore, Jin Jiang, The University of Western Ontario London, Ontario, Canada, N6A 5B9, "Design and implementation of a microgrid controller for bumpless transitions between grid-connected and island operation".
- [4] B. Bahrani, M. Saeedifard, A. Karimi, and A. Rufer, "A multivariable design methodology for voltage control of a single- DG-unit microgrid," IEEE Trans. Ind. Informat., vol.9, no. 2, pp. 589-599, May 2013.
- [5] Yanlin Li, Mingyan Wang, "Control Strategies for grid-connected and island dual mode operated Inverter under Unbalanced Grid Voltage Conditions", 2012 IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference - ECCE
- [6] Hany M. Hasanien and Mahmoud Matar, Senior Member IEEE, "A Fuzzy Logic Controller for Autonomous Operation of a Voltage Source Converter-Based Distributed Generation System", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol.6, January 2015.