

Designing Online Controller using Differential Evolution Optimization Algorithm for Inverter-based Distributed Generation in Islanded Microgrid

Farid Hashemi¹, Mohammad Mohammadi², Mahdi Alah Bakhshi²

1. Ph.D Student of Electrical Engineering, University of Shiraz, Fars, Iran

2. Dept. of Electrical Engineering, University of Shiraz, Fars, Iran

Abstract:

In this paper, online controller scheme is proposed for voltage control of inverter-based distributed generations in islanded microgrid (MG). The MG has a completely nonlinear structure and its dynamics is constantly changing. As a result, linear controllers with constant and non-flexible coefficients are unable to provide a proper performance over a wide range of operating conditions. In response to this challenge, the present paper addresses an optimal online and nonlinear controller based on fuzzy logic. To improve the performance of the proposed controller, the differential evolution optimization algorithm is used to optimal tune its coefficient for the different MG operating scenarios. The goal of the proposed scheme is to control the voltage of the islanded MG at the standard level with the least transient state after the island's occurrence, as well as during load changes in island MG. In the proposed control scheme, proportional-resonant controller is used due to the advantages in order to voltage and current control of distributed generation units in the static frame space. The simulation results indicate the changing of the voltage controller coefficients, resulting in a better transient response, the elimination of the steady-state error and less harmonic distortion.

Keywords: Microgrid, Distributed Generation, Proportional-resonant Controllers, Fuzzy Logic, Differential Evolution Optimization.

طراحی و تنظیم کنترل‌کننده بهنگام با الگوریتم تکامل تفاضلی برای واحدهای تولید

پراکنده مبتنی بر اینورتر در ریزشبکه جزیره‌ای

فرید هاشمی^۱، محمد محمدی^۲، مهدی الله بخشی^۳

۱- دانشجوی دکتری برق، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شیراز - فارس - ایران

farid_hashemi@shirazu.ac.ir

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شیراز - فارس - ایران

m.mohammadi@shirazu.ac.ir

۳- استادیار، دانشکده مهندسی برق - دانشگاه شیراز - فارس - ایران

allahbakhshi@shirazu.ac.ir

چکیده: در این مقاله طرح کنترلی بهنگام به منظور کنترل واحدهای تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر ریزشبکه پس از وقوع وضعیت جزیره‌ای ارائه شده است. با توجه به اینکه ریزشبکه، ساختار کاملاً غیرخطی دارد و دینامیک آن همواره در حال تغییر است، کنترل‌کننده‌های خطی با ضرایب ثابت و غیرمنعطف نمی‌توانند پاسخ مناسب خود را در گستره وسیعی از نقاط کار حفظ کنند؛ از این رو در این مقاله کنترل‌کننده ولتاژ غیرخطی ارائه شده است که ضرایب آن به صورت بهنگام مبتنی بر منطق فازی تنظیم می‌شوند. در راستای بهبود عملکرد کنترل‌کننده بهنگام پیشنهادی، پارامترهای سیستم فازی آن با الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی به صورت خارج از خط طی شرایط کاری مختلف ریزشبکه تعیین شده‌اند. در طرح کنترل پیشنهادی، با توجه به مزایای کنترل‌کننده‌های تناسبی - رزونانسی در فضای قاب ایستا ($\alpha\beta$) برای کنترل ولتاژ و جریان واحدهای تولید پراکنده ریزشبکه استفاده شده است. قابلیت و کارآمدی طرح کنترلی پیشنهادی طی سناریوهای مختلف کاری ریزشبکه در نرم‌افزار MATLAB/Simulink ارزیابی شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند تغییر ضرایب کنترلی به صورت بهنگام و متناسب با شرایط عملکرد به دستیابی پاسخ بهینه و مطلوب ولتاژ حین وقوع وضعیت جزیره‌ای و نیز در تغییرات بار در ریزشبکه جزیره‌ای منجر می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ریزشبکه، تولید پراکنده، کنترل‌کننده تناسبی - رزونانسی، منطق فازی، بهینه‌سازی تکامل تفاضلی

۱- مقدمه

پراکنده دچار تحول اساسی شده است. گسترش حضور منابع تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع، مفهوم جدیدی به نام ریزشبکه را در حوزه سیستم‌های انرژی الکتریکی مطرح می‌کند. ریزشبکه معمولاً شامل مجموعه‌ای از منابع تولید پراکنده، سیستم ذخیره انرژی و مصرف‌کننده‌ها است که باید قابلیت عملکرد به صورت (۱) متصل به شبکه^۱ (۲) مستقل از شبکه^۲ (۳) گذر بین دو وضعیت متصل به شبکه و مستقل از شبکه را داشته باشد [۱،۲]. حرکت به سمت این شکل از شبکه‌های توزیع دارای محاسن متعددی است؛ از جمله

در دهه‌های اخیر ساختار سنتی شبکه‌های قدرت در اثر رشد و گرایش تولید انرژی الکتریکی از واحدهای تولید

^۱ تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۱۲/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۲۹

نام نویسنده مسئول: محمد محمدی

نشانی نویسنده مسئول: ایران - شیراز - دانشگاه شیراز -

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

یک واحد تولید پراکنده در وضعیت عملکرد جزیره‌ای ارائه شده است. در روش پیشنهادی به محاسبه تابع تبدیل کل سیستم مورد مطالعه برای طراحی و تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده نیاز است که از معایب روش فوق است. علاوه بر این، با بزرگ‌تر شدن سیستم مورد مطالعه محاسبه تابع تبدیل کل سیستم سخت‌تر و پیچیده‌تر نیز می‌شود. در مراجع [۸-۹]، روش آنالیز پایداری سیگنال کوچک به منظور بررسی جزئیات عملکرد سیستم کنترلی و تعیین مناسب ضرایب کنترل‌کننده در ریزشبکه جزیره‌ای استفاده شده است. در روش‌های پیشنهادی ابتدا سیستم غیرخطی ریزشبکه حول نقطه کار نامی با روش آنالیز سیگنال کوچک خطی‌سازی می‌شود و پایداری و عملکرد آن در ضرایب مختلف کنترل‌کننده‌ها بررسی می‌شوند. روش خطی‌سازی سیگنال کوچک، تکنیک متداول برای تعیین پارامترهای کنترل‌کننده‌ها است؛ ولی این روش ذاتاً وابستگی زیادی به حول نقطه کار خود دارد. همچنین این روش برای وقوع تغییرات سریع و یا زیاد بار در سیستم، پاسخ دینامیکی ضعیفی به همراه داشته و یا حتی ممکن است به ناپایداری منجر شود. اصلی‌ترین مشکل برای تعیین بهینه پارامترهای کنترلی در این زمینه پیچیدگی کل سیستم با توجه به وجود حالت‌ها با ابعاد بزرگ و غیرخطی بودن ریزشبکه است. در راستای حل این مشکل، در این مقاله از مدل شبیه‌سازی شده ریزشبکه در محیط نرم‌افزار Matlab/Simulink برای تعیین ضرایب کنترل‌کننده استفاده شده است. در واقع در این پژوهش مسئله کنترلی به صورت مسئله بهینه‌سازی فرموله می‌شود؛ به این ترتیب که ضرایب کنترل‌کننده به طور مستقیم به مدل شبیه‌سازی غیرخطی اعمال می‌شوند و نتایج مربوط به اعمال ضرایب مختلف در تابع هزینه مشخص می‌شوند. هدف نهایی بهینه‌سازی و تعیین مناسب پارامترهای مربوط به کنترل‌کننده بهنگام ولتاژ طی وضعیت‌های کاری مختلف است؛ به طوری که ضرایب کنترل‌کننده به صورت بهنگام و متناسب با شرایط کاری به منظور دستیابی به کنترل ولتاژ ریزشبکه با کمترین حالت گذرا هنگام وقوع وضعیت جزیره‌ای، بروز اغتشاشات و تغییرات بار در ریزشبکه جزیره‌ای تنظیم شوند.

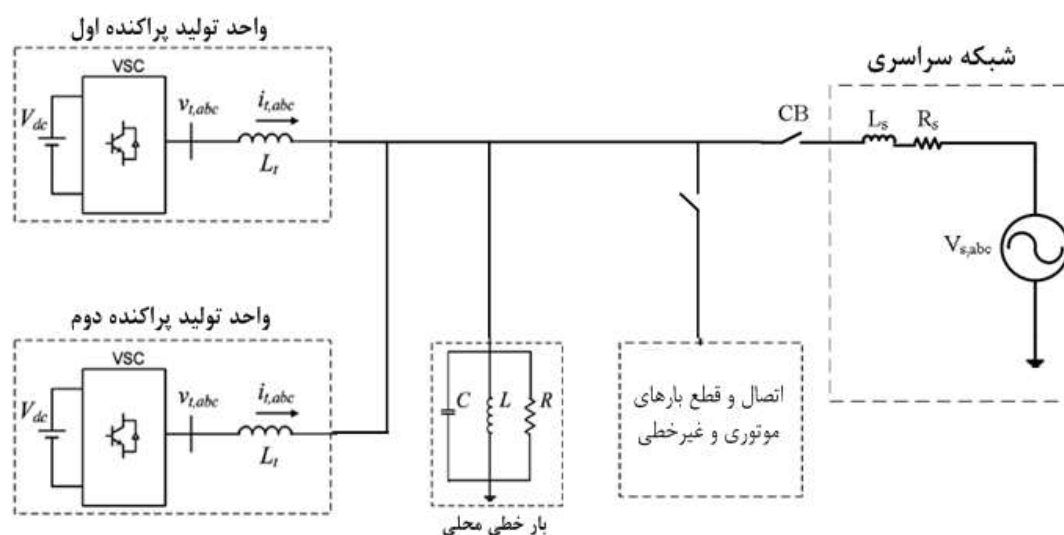
افزایش قابلیت اطمینان، کاهش گرفتگی خطوط انتقال و فیدرهای توزیع و کاهش تلفات شبکه. واحدهای تولید پراکنده در ریزشبکه در حالت اتصال به شبکه سراسری مثل منبع جریان و در حالت مستقل از شبکه سراسری مثل منبع ولتاژ عمل می‌کنند. در وضعیت عملکرد متصل به شبکه، ولتاژ و فرکانس محل نقطه اتصال مشترک^۳ با شبکه سراسری دیکته می‌شود و واحدهای تولید پراکنده موجود در ریزشبکه به منظور تزریق مقدار توان اکتیو و راکتیو از پیش تعیین شده به شبکه در مُد کنترلی توان ثابت (جریان ثابت) بهره برداری می‌شوند. در این شرایط، میزان توان تزریقی با واحدهای تولید پراکنده یک مقدار ثابتی را دارد و معمولاً سعی می‌شود توان تحویلی واحد تولید پراکنده با استفاده از الگوریتم‌هایی پیشینه شود. در این وضعیت عملکردی هر گونه تغییرات بار در ریزشبکه با شبکه سراسری پاسخ‌دهی می‌شوند. از سوی دیگر، زمانی که ریزشبکه از شبکه سراسری جدا می‌شود و وضعیت جزیره‌ای رخ می‌دهد واحدهای تولید پراکنده با تغییر دادن میزان توان تولیدی اکتیو و راکتیو اقدام به کنترل ولتاژ و فرکانس ریزشبکه می‌کنند. اگر واحدهای تولید پراکنده در وضعیت جزیره‌ای همچنان از الگوریتم‌های کنترلی پیش از جزیره‌شدن استفاده کنند، به دلیل نامتعادل بودن بین توان تولید شده و مصرفی در ریزشبکه پارامترهای ولتاژ و فرکانس از مقادیر نامی خود منحرف می‌شوند و یا حتی ریزشبکه به سمت ناپایداری پیش می‌رود [۵-۳]. در واقع کنترل ولتاژ، فرکانس و مدیریت توان از بحث‌های بسیار چالش‌برانگیز در زمینه بهره‌برداری از ریزشبکه جزیره‌ای است. دلیل این امر دخالت‌نداشتن شبکه سراسری در تنظیم ولتاژ و فرکانس و نیز وابستگی شدید دینامیک سیستم جزیره‌ای به تغییرات بار محلی است؛ بنابراین واحدهای تولید پراکنده باید مجهز به کنترل‌کننده‌های ولتاژ و فرکانس باشند تا از تغییرات مقادیر ولتاژ و فرکانس در وضعیت جزیره‌ای از محدوده استاندارد جلوگیری کنند و نیز در شرایط جزیره‌ای تولیدات پراکنده باید تغییرات بار را با دقت زیادی دنبال کنند [۶]. تا کنون روش‌های مختلفی در راستای کنترل واحدهای تولید پراکنده در ریزشبکه جزیره‌ای ارائه شده‌اند. در مرجع [۷]، کنترل‌کننده‌ای مبتنی بر روش کنترلی کلاسیک برای کنترل

ریزشبکه به صورت یک منبع ولتاژ DC ثابت که توسط مبدل الکترونیک قدرت با یک فیلتر پایین گذر به شبکه سراسری و بار محلی متصل شده در شبیه سازی مدل سازی شده است. نقش اصلی مبدل واسط، کنترل توان اکتیو و راکتیو تزریقی با تولید پراکنده به ریزشبکه است. بلوک دیاگرام سیستم کنترلی جریان ثابت در فضای ایستا در شکل (۲) نمایش داده شده است. مقادیر پارامترهای مربوط به ریزشبکه مورد مطالعه در جدول (۱) ارائه شده است. ریزشبکه از طریق کلید قدرت (CB) به شبکه توزیع سراسری متصل شده است. در لحظه بازشدن کلید قدرت و وقوع وضعیت جزیره ای با توجه به نامتعادل بودن توان تولیدی و مصرفی داخل ریزشبکه ممکن است پارامترهای ولتاژ و فرکانس ریزشبکه از مقادیر نامی خود منحرف شوند و یا حتی رو به سمت ناپایداری بروند. تنها در شرایطی که توان مصرفی بار محلی برابر مقدار توان واحدهای تولید پراکنده باشد، ولتاژ و فرکانس ریزشبکه تغییر نخواهد کرد؛ ولی در ادامه بر اثر تغییر در توان بار محلی ممکن است باز ریزشبکه به سوی ناپایداری پیش رود؛ بنابراین باید وضعیت جزیره ای تشخیص داده شود و کنترل کننده متناسب با وضعیت عملکرد جزیره ای فعال شود.

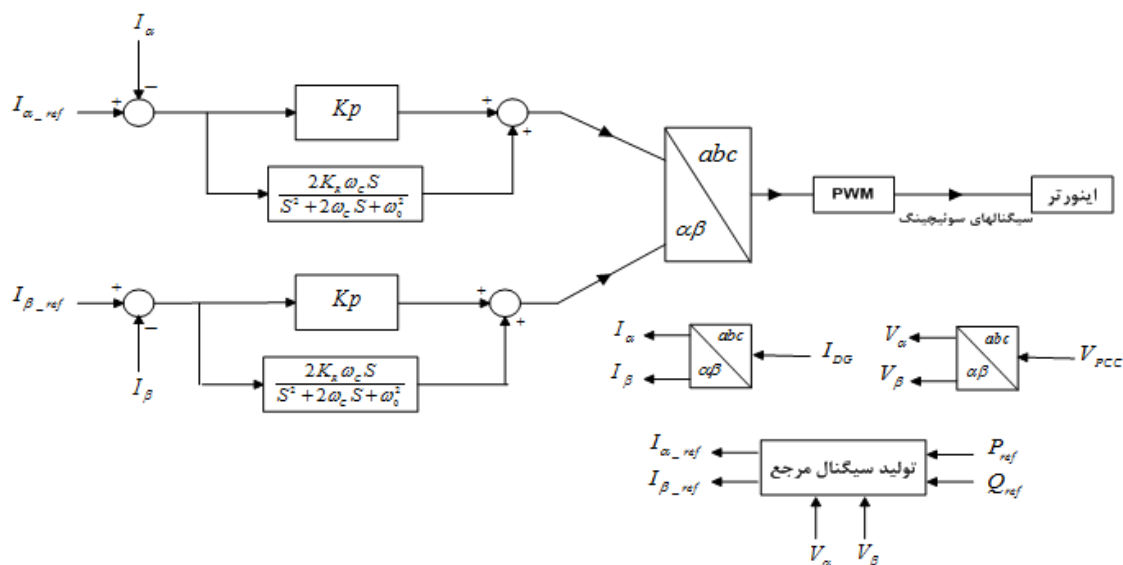
به طور کلی مباحث ارائه شده در این مقاله به این ترتیب خواهد بود. در بخش دوم، ریزشبکه مورد مطالعه معرفی می شود. ساختار طرح کنترلی پیشنهادی واحدهای تولید پراکنده در وضعیت عملکرد جزیره ای ریزشبکه و نحوه تنظیم پارامترهای کنترل کننده ولتاژ بهنگام در بخش سوم ارائه می شود. در بخش چهارم نتایج عملکرد طرح کنترلی پیشنهادی در سناریوهای عملکردی مختلف ریزشبکه نمایش داده می شوند. در نهایت در بخش پنجم نتیجه گیری ارائه می شود.

۲- معرفی ریزشبکه مورد مطالعه

دیاگرام تک خطی ریزشبکه مورد مطالعه در شکل (۱) نمایش داده شده است. ریزشبکه مورد مطالعه قابلیت کار به صورت متصل به شبکه سراسری و مستقل از شبکه سراسری (جزیره ای) را داراست. شبکه سراسری در این مطالعه با منبع یک ولتاژ، مقاومت و سلف و بارهای محلی در ریزشبکه به صورت بار RLC موازی مدل سازی شده است. ریزشبکه مورد مطالعه شامل دو واحد تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر است و ظرفیت تولیدی منابع تولید پراکنده یکسان در نظر گرفته شده است. واحدهای تولید پراکنده در



شکل (۱): دیاگرام تک خطی ریزشبکه مورد مطالعه

شکل (۲): کنترل جریان ثابت منابع تولید پراکنده در فضای $(\alpha\beta)$ در وضعیت متصل به شبکه سراسری

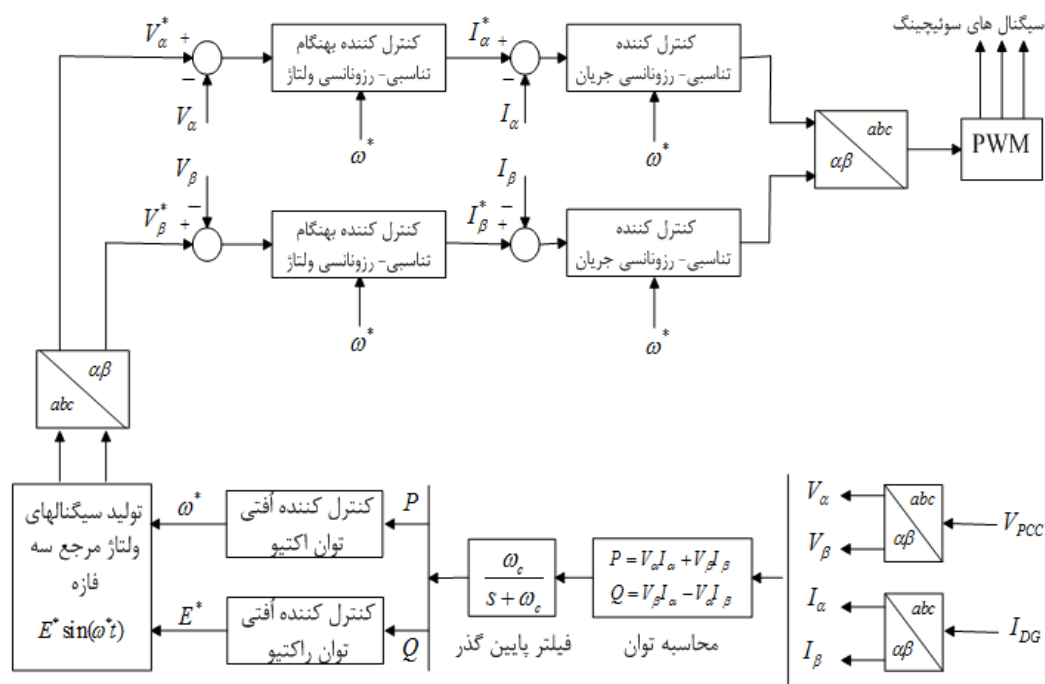
ایمن و مناسب از ریزشبهه جزیره ای به ایجاد تغییرات اساسی در وظایف و اهداف کنترلی واحدهای تولید پراکنده ریزشبهه جزیره ای نیاز است. به علت قابلیت بهره برداری از ریزشبهه در هر دو وضعیت متصل و مستقل از شبکه باید واحدهای تولید پراکنده مجهز به کنترل کننده هایی متناسب با وضعیت هایی باشند که اشاره شد. علاوه بر این، کنترلر عملکرد مناسبی در حین روند انتقال بین این دو وضعیت را نیز باید داشته باشد. همان طور که بیان شد در وضعیت متصل به شبکه سراسری، واحدهای تولید پراکنده در ریزشبهه به طور معمول در مُد کنترل توان (جریان) ثابت بهره برداری می شوند. در صورتی که وضعیت جزیره ای با الگوریتم تشخیص وضعیت جزیره ای تشخیص داده شود، کنترل کننده جریان غیرفعال و طرح کنترلی پیشنهادی برای واحدهای تولید پراکنده در ریزشبهه جزیره ای شده فعال می شود. در این مقاله فرض شده است تشخیص وضعیت جزیره ای مطابق روش پیشنهادی در مرجع [۱۰] است. هدف طرح کنترلی پیشنهادی کنترل ولتاژ ریزشبهه جزیره ای در مقدار نامی و با کمترین حالت گذرا هنگام وقوع وضعیت جزیره ای، بروز اغتشاشات و تغییرات بار در ریزشبهه جزیره ای است. بلوک دیاگرام طرح کنترل پیشنهادی برای منابع تولید پراکنده در وضعیت عملکرد جزیره ای ریزشبهه در شکل (۳) نمایش داده شده است.

جدول (۱): پارامترهای مربوط به ریزشبهه

مقدار	پارامتر	
۸۰kW	توان اکتیو تولید پراکنده	واحدهای تولید پراکنده
۸۰۰V	ولتاژ DC ورودی اینورتر	
۲۰۰۰Hz	فرکانس کلید زنی	
۱/۸mH	L_{t1}	
۳/۶mH	L_{t2}	
۱۰	K_P	
۵۰۰	K_R	
$2\pi \times 50$	ω_0	
۴	ω_c	
$380V_{(L-L)}$	ولتاژ شبکه سراسری	
۵۰Hz	فرکانس شبکه	
۱/۵mΩ	R_s	
۰/۲mH	L_s	بار محلی
۰/۹۰Ω	R_L	
۱/۶mH	L_L	
۰/۶۴mF	C_L	

۳- طرح پیشنهادی برای کنترل واحدهای تولید پراکنده ریزشبهه جزیره ای

با وجود امکان طراحی ریزشبهه با قابلیت عملکرد جزیره ای، انتقال از حالت متصل به شبکه سراسری به حالت جزیره ای بسیار چالش برانگیز است. در راستای بهره برداری



شکل (۳): ساختار طرح کنترل کننده پیشنهادی منابع تولید پراکنده ریزشبه جزیره‌ای

کنترل کننده اُفتی (دروپ) برای کنترل توان اکتیو و راکتیو، کنترل کننده‌های تناسبی - رزونانسی در فضای ایستا ($\alpha\beta$) برای حلقه خارجی ولتاژ و حلقه داخلی جریان واحدهای تولید پراکنده در ریزشبه جزیره‌ای استفاده شده است. تولید توان‌های اکتیو و راکتیو مرجع خروجی هر واحد تولید پراکنده ریزشبه با استفاده از مشخصه‌های اُفتی فرکانس و ولتاژ مطابق رابطه‌های (۳) و (۴) تعیین می‌شود:

$$P_{ref} = P_0 + K_{pf}(f_0 - f) \quad (۳)$$

$$Q_{ref} = Q_0 + K_{qv}(V_0 - V) \quad (۴)$$

که در آن P_0 ، Q_0 مقادیر پیش فرض توان اکتیو و راکتیو هر واحد تولید پراکنده در وضعیت متصل به شبکه سراسری است. پارامترهای f_0 ، V_0 به ترتیب مقادیر فرکانس و ولتاژ نامی و پارامترهای f ، V به ترتیب فرکانس و ولتاژ شینه نقطه اتصال مشترک و ضرایب K_{pf} و K_{qv} مربوط به کنترل کننده دروپ‌اند. پارامترهای P_{ref} ، Q_{ref} مقادیر مرجع توان اکتیو و راکتیو اصلاح شده هر واحد تولید

به منظور کنترل واحدهای تولید پراکنده در ریزشبه جزیره‌ای و برای حصول اطمینان از عملکرد مناسب طرح پیشنهادی در حضور بارهای نامتعادل و غیرخطی دو حلقه کنترلی داخلی جریان و خارجی ولتاژ طراحی شده است. در طرح کنترلی پیشنهادی ولتاژ پایانه تولید پراکنده V_{PCC} و جریان خروجی تولید پراکنده I_{DG} با استفاده از تبدیل کلارک از فضای abc به $\alpha\beta$ منتقل می‌شود. براساس مرجع [۱۱] توان‌های لحظه‌ای اکتیو و راکتیو با استفاده از رابطه‌های (۱) و (۲) با مؤلفه‌های ولتاژ و جریان در فضای $\alpha\beta$ قابل محاسبه خواهند بود.

$$P = v_{\alpha} i_{\alpha} + v_{\beta} i_{\beta} \quad (۱)$$

$$Q = v_{\beta} i_{\alpha} - v_{\alpha} i_{\beta} \quad (۲)$$

با استفاده از دو فیلتر پایین گذر^۴ مرتبه اول مؤلفه DC توان‌های اکتیو و راکتیو استخراج و به کنترل کننده توان اُفتی اعمال می‌شود. فرکانس قطع (ω_c) فیلتر پایین گذر 10 rad/s در نظر گرفته شده است. در طرح پیشنهادی از

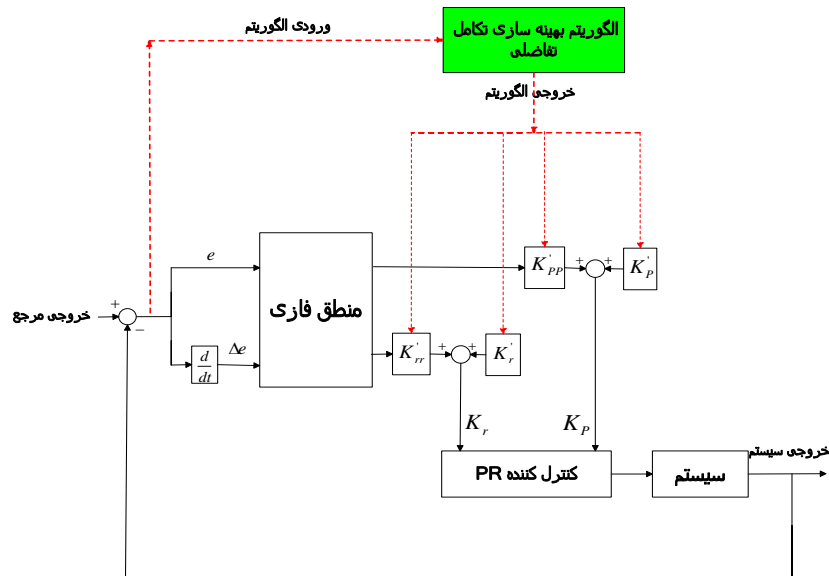
پراکنده در وضعیت جزیره‌ای هستند. خروجی کنترل‌کننده اُفتی توان اکتیو و راکتیو شامل مقادیر مرجع برای فرکانس و دامنه ولتاژ سیستم سه فاز خواهد بود. تولید سیگنال‌های ولتاژ مرجع سه فاز نیز با تبدیل کلارک از فضای abc به $\alpha\beta$ منتقل می‌شود. مقادیر مرجع V_α^* و V_β^* به صورت مداوم با ولتاژ پایانه تولید پراکنده V_α و V_β مقایسه می‌شوند و خطا به سیستم کنترل فازی تناسبی - رزونانسی بهنگام اعمال می‌شود. ضرایب کنترل‌کننده تناسبی - رزونانسی متناسب با دامنه خطا (e) و تغییرات خطا (Δe) در دو محور α و β برای رسیدن به مقدار مطلوب مرجع تغییر می‌کند. با توجه به نبود عملکرد صحیح بخش انتگرال گیر کنترل‌کننده رزونانسی در اثر عواملی نظیر تغییرات فرکانس سیگنال ورودی و متفاوت شدن سیگنال ورودی با فرکانس رزونانسی کنترل‌کننده، در طرح پیشنهادی برای رفع مشکل فوق پارامتر فرکانس مرجع تولیدشده توسط کنترل‌کننده اُفتی توان به‌عنوان یک ورودی برای کنترل‌کننده تناسبی - رزونانسی ولتاژ و جریان در نظر گرفته شده است. کنترل‌کننده جریان به صورت کنترل‌کننده تناسبی - رزونانسی با ضرایب ثابت در طرح پیشنهادی لحاظ شده است. در نهایت خروجی کنترل‌کننده جریان مجدداً از فضای $\alpha\beta$ به abc تبدیل و سیگنال‌های کلیدزنی واحد تولید پراکنده، فراهم و به اینورتر واحد تولید پراکنده ارسال می‌شود.

خطی کلاسیک با ضرایب ثابت نمی‌تواند پاسخ مناسب خود را در گستره وسیعی از نقاط کار حفظ کند؛ بنابراین استفاده از کنترل‌کننده‌های غیرخطی بهنگام که ضرایب آن متناسب با وضعیت کاری تغییر کند، امری ضروری است. در واقع هدف اصلی کنترل‌کننده پیشنهادی تنظیم بهنگام ضرایب کنترل‌کننده ولتاژ به منظور حفظ سطح ولتاژ نامی و بهبود پاسخ گذرا در حین وقوع وضعیت جزیره‌ای و نیز حین وقوع تغییرات بار در ریزشبه جزیره‌ای است. در روش کنترلی پیشنهادی ضرایب کنترل‌کننده متناسب با شرایط براساس یک منطق فازی بهینه شده تغییر می‌کنند. کنترل‌کننده فازی برخلاف کنترل‌های کلاسیک، بدون نیاز به مدل ریاضی سیستم با استفاده از تعدادی قوانین که در قالب اگر - آنگاه فازی بیان می‌شوند، به کنترل سیستم می‌پردازند. عملکرد بهینه کنترل‌کننده‌های فازی، بستگی به تنظیم مناسب پارامترهای آن دارد. از جمله پارامترهای قابل تنظیم سیستم فازی، ضرایب مقیاس، توابع عضویت، قواعد فازی، ضرایب وزنی قواعد، الگوریتم‌های استنتاج فازی‌سازی و غیرفازی‌کننده هستند. تنظیم کلیه این پارامترها نیازمند آزمایش‌های مکرر و در واقع براساس سعی و خطا است. در این مقاله برای تنظیم دقیق پارامترها این موضوع در قالب مسئله بهینه‌سازی مطرح شده است؛ البته با توجه به کثرت زیاد پارامترها به منظور کاهش حجم بار محاسباتی فقط ضرایب مقیاس به منظور تنظیم با الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی^۹ انتخاب شده است. استراتژی تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده ولتاژ مبتنی بر منطق فازی با الگوریتم بهینه‌سازی در شکل (۴) نمایش داده شده است. ورودی‌های کنترلر شامل خطا و تغییرات خطا ولتاژ و خروجی آن ضرایب ترم تناسبی و رزونانسی است.

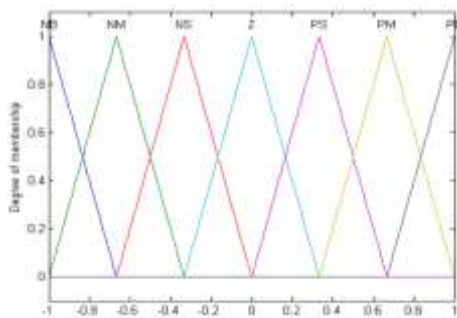
۳-۱- ساختار کنترل‌کننده بهنگام تناسبی -

رزونانسی ولتاژ

با توجه به اینکه ریزشبه، ساختار کاملاً غیرخطی دارد و دینامیک آن همواره در حال تغییر است، کنترل‌کننده‌های



شکل (۴): استراتژی تنظیم پارامترهای کنترل کننده ولتاژ تناسبی- رزونانسی با الگوریتم بهینه سازی تکامل تفاضلی



شکل (۵): توابع عضویت سیگنال‌های ورودی و خروجی

جدول (۲): قوانین سیستم استنتاج فازی برای ضریب تناسبی

$e(k)$	$\Delta e(k)$						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	PS	ZE
NM	PB	PB	PM	PM	PS	ZE	ZE
NS	PM	PM	PM	PS	ZE	NS	NM
ZE	PM	PS	PS	ZE	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZE	NS	NS	NM	NM
PM	ZE	ZE	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZE	NS	NS	NM	NM	NB	NB

سیستم استنتاج فازی کنترلر پیشنهادی از نوع ممدانی به دلیل کاربودن آن در محیط‌های مبهم و استفاده از دانش انسانی انتخاب شده است. توابع عضویت برای متغیرهای ورودی و خروجی برای کاهش بار محاسباتی و حافظه مورد نیاز از نوع تابع مثلثی و متقارن در نظر گرفته شده است. در کنترل کننده پیشنهادی متغیرهای ورودی و خروجی سیستم فازی با هفت متغیر زبانی تعریف شده‌اند. این متغیرها با برچسب‌های مثبت بزرگ^۱، مثبت متوسط^۲، مثبت کوچک^۳، صفر^۴، منفی کوچک^۵، منفی متوسط^۶ و منفی بزرگ^۷ و با ۵۰٪ همپوشانی در نظر گرفته شده‌اند. در شکل (۵) توابع عضویت در نظر گرفته شده برای سیگنال‌های ورودی و خروجی در بازه [-۱ ۱] نشان داده شده است. در سیستم فازی پیشنهادی عملگر فازی (AND) از نوع Min است و مقدار عددی خروجی سیستم فازی با به‌کارگیری روش مرکز ثقل ناحیه^{۱۳} در مرحله غیرفازی سازی حاصل می‌شود. قوانین سیستم استنتاج فازی و توابع عضویت براساس ارزیابی کیفی از سیستم قدرت تحت مطالعه و به صورت تجربی با انجام شبیه سازی‌های مختلف طی سناریوهای مختلف ریز شبکه، انتخاب و تعیین شده اند که به ترتیب در جدول (۲) و (۳) مشخص شده‌اند.

جدول (۳): قوانین سیستم استنتاج فازی برای ضریب رزونانسی

		$\Delta e(k)$						
$e(k)$		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB		NB	NB	NB	NM	NM	ZE	ZE
NM		NB	NB	NM	NM	NS	ZE	ZE
NS		NM	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
ZE		NM	NS	NS	ZE	PS	PS	PM
PS		NS	NS	ZE	PS	PS	PM	PM
PM		ZE	ZE	PS	PM	PM	PB	PB
PB		ZE	ZE	PS	PM	PB	PB	PB

۳-۲- الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی

الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی روشی از الگوریتم‌های تکاملی است و توانایی کاوش در فضاهای جستجوی وسیع با ابعاد بالا را داراست. سرعت همگرایی بالا و احتمال پایین گرفتادن در کمینه‌های محلی نیز از دیگر ویژگی‌های این روش بهینه‌سازی است [۱۲]. سه عامل اصلی این الگوریتم، جهش، تقاطع و انتخاب است. سه پارامتر کنترلی الگوریتم تکامل تفاضلی شامل اندازه جمعیت NP ، ضریب مقیاس F و احتمال تقاطع CR است. فرآیند مراحل عملکردی این الگوریتم به ترتیب زیر است. الف) تولید جمعیت اولیه:

جمعیت اولیه شامل NP عضو به صورت تصادفی تولید می‌شود؛ به طوری که هر یک از جواب‌ها در محدوده فضای جواب مسئله باشند. در یک مسئله با فضای جستجوی m بعدی ساختار i امین عضو به صورت $X^i = (x_1^i, x_2^i, \dots, x_m^i)$ است.

ب) عمل جهش:

طی این عمل در هر تکرار عضوهای جدیدی توسط سه عضو از بین اعضای جمعیت به صورت تصادفی و کاملاً متفاوت از هم ایجاد می‌شوند. روند ایجاد یک عضو جدید در تکرار t مطابق رابطه (۵) تولید می‌شود.

$$Y^i(t) = x^{r3}(t) + F \cdot (x^{r1}(t) - x^{r2}(t)) \quad (5)$$

که در آن $r1, r2, r3 \in [1, NP]$ سه عدد صحیح تصادفی نامساوی و پارامتر F عدد ثابت و مثبت است که بیشتر $0/5$ در نظر گرفته می‌شود.

ج) عمل تقاطع:

طی این عمل تعدادی جمعیت جدید Z با ترکیب عضوهای X^i و Y^i مطابق رابطه (۶) حاصل می‌شود که خواص خود را از X^i و Y^i به ارث می‌برند.

$$Z^i = \begin{cases} Y^i, & \text{if } rand \leq CR \\ X^i, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

که در آن $jrand \in [1, 2, \dots, m]$ است.

د) عمل انتخاب:

اگر مقدار برازندگی جواب جدید تولیدشده بهتر از جواب قبلی باشد، جایگزین آن می‌شود؛ در غیر این صورت همان جواب قبلی در تکرار بعد جستجو باقی می‌ماند.

$$X^i(t+1) = \begin{cases} Z^i, & \text{fit}(X^i(t)) > \text{fit}(Z^i(t)) \\ X^i, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

که در آن $\text{fit}(X^i(t))$ و $\text{fit}(Z^i(t))$ میزان برازندگی عضوهای X^i و Z^i است.

ه) توقف:

فرآیند جستجو تا زمانی ادامه می‌کند که معیار توقف الگوریتم برآورده شود.

در الگوریتم تکامل تفاضلی همه جواب‌ها شانسی مساوی برای انتخاب شدن دارند. پس از اینکه یک جواب جدید با عمل جهش و عمل تقاطع تولید شد، جواب جدید با مقدار قبلی مقایسه می‌شود و در صورت بهبودن میزان برازندگی جایگزین می‌شود.

۳-۳- تابع هدف

انتخاب تابع هدف مناسب در فرآیند بهینه‌سازی عامل بسیار مهمی است. در این مقاله یکی از اهداف اصلی طراحی کنترلر، بهبود پاسخ زمانی سیستم است. کاهش خطای ماندگار سیستم، کاهش میزان فراجاهش و فروجهش مناسب از عوامل تأثیرگذار در بهبود پاسخ سیستم‌اند. در این مقاله برای تأمین اهداف فوق در پارامتر ولتاژ ریزشبهکه تابع هدف به صورت انتگرال حاصل ضرب زمان در قدر مطلق خطا (ITAE) مطابق رابطه (۸) در نظر گرفته شده است.

$$\text{Fitness_function} = \int_0^{T_s} t \left| V_{ref_{\alpha\beta}} - V_{\alpha\beta} \right| \quad (8)$$

شبیه‌سازی‌های مختلف در بازه [۰/۰۱-۱۰۰]، تعداد کل تکرار برای الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی ۱۰۰ و جمعیت اولیه ۵۰ در نظر گرفته شده است. پارامترهای به‌دست‌آمده از الگوریتم بهینه‌سازی مربوط به ضرایب بهینه کنترل‌کننده بهنگام تناسبی - رزونانسی ولتاژ و نیز ضرایب در نظر گرفته شده برای کنترل‌کننده جریان تناسبی - رزونانسی، فرکانس قطع کنترلرهای تناسبی - رزونانسی، ضریب کنترل آفتی توان اکتیو - ولتاژ در طرح کنترلی پیشنهادی - که در شکل (۳) نمایش داده شده است - در جدول (۵) ارائه شده‌اند.

جدول (۵): پارامترهای مربوط به طرح کنترلی پیشنهادی

K_p'	۳	
K_{pp}'	۲۵	کنترل‌کننده
K_r'	۵۰	تناسبی - رزونانسی ولتاژ
K_{rr}'	۸	
ω_c	۴	
K_p	۵	کنترل‌کننده
K_r	۲۰	تناسبی - رزونانسی
ω_c	۴	جریان
K_{pf}	۰/۰۰۰۱	کنترل‌کننده
K_{QV}	۰/۰۰۲	آفتی توان

۴- ارزیابی و بررسی نتایج شبیه‌سازی

به‌منظور نشان‌دادن عملکرد و کارایی روش کنترل پیشنهادی طی سناریوهای وقوع وضعیت جزیره‌ای در وضعیت‌های تولیدی مختلف واحدهای تولید پراکنده و تغییرات بار محلی در وضعیت جزیره‌ای ریزشکبه در این بخش ارزیابی شده است.

۴-۱- وقوع جزیره‌ای در شرایط عدم تعادل توان

در این آزمایش مقدار توان منابع تولید پراکنده و بار محلی به گونه‌ای در نظر گرفته شده است که میزان نامتعادل بودن توان تولیدی و مصرفی ریزشکبه قبل و بعد از

پارامتر T_s مدت زمان انجام محاسبات بعد از وقوع جزیره‌ای یا تغییرات بار در ریزشکبه جزیره‌ای است. تکنیک ITAE خطاهایی که بعد از مدت طولانی وجود دارند را بسیار سنگین‌تر از خطاها در شروع پاسخ وزن‌دهی می‌کند. وجود ضرب زمانی در تابع هدف، خطا را بیشتر در مراحل ماندگار جریمه می‌کند، بنابراین به‌طور مؤثر زمان نشست را کاهش می‌دهد. همچنین به سبب وجود خطای مطلق در تابع هدف حداکثر درصد اضافه جهش نیز حداقل‌سازی می‌شود.

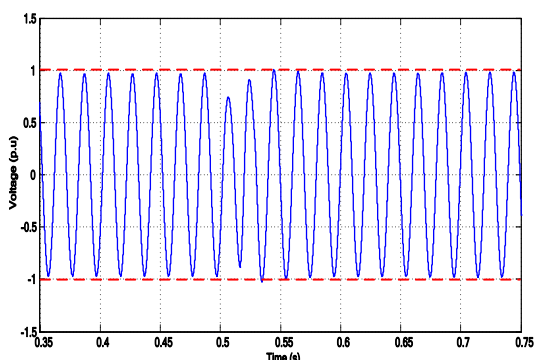
۳-۴- سناریوهای مختلف عملکرد

ریزشکبه مورد مطالعه در سناریوهای عملکردی مختلف برای تنظیم بهینه ضرایب سیستم فازی کنترل‌کننده تناسبی - رزونانسی ولتاژ با الگوریتم بهینه‌سازی بهره‌برداری شده است. در جدول (۴) سناریوهای مختلف کاری شبیه‌سازی شده روی ریزشکبه مورد مطالعه برای تنظیم بهینه ضرایب سیستم فازی کنترل‌کننده ولتاژ مشخص شده‌اند.

جدول (۴): سناریوهای مختلف عملکردی ریزشکبه

سناریو	تعداد	رنج تغییرات
وقوع جزیره‌ای	۲۰	$S_{Localload} = [10 - 160]KVA$ $S_{DG1} = [10 - 80]KVA$ $S_{DG2} = [10 - 80]KVA$
تغییرات بار در ریزشکبه	۲۰	$S_{Localload} = [10 - 160]KVA$ $S_{Motor} = [20 - 100]KVA$ $P_{Nonlinear} = [50 - 100]KW$

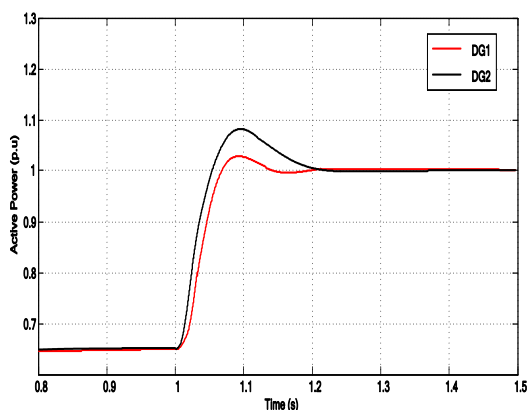
برای هر عضو جمعیت از الگوریتم بهینه‌سازی مقدار تابع هدف برای کل سناریوهای در نظر گرفته شده محاسبه می‌شود. این فرآیند به‌طور پیوسته در تعداد تکرارهای تعیین‌شده برای الگوریتم بهینه‌سازی، انجام و در نهایت مقادیر بهینه برای ضرایب K_p' ، K_{pp}' ، K_r' و K_{rr}' با الگوریتم بهینه‌سازی تکامل تفاضلی با مینیمم‌سازی تابع هدف تعیین می‌شوند. درخور ذکر است محدوده تغییرات برای پارامترهای کنترل‌کننده با توجه به ملاحظات پایداری و حفظ عملکرد مناسب کنترل‌کننده پیشنهادی طی انجام



شکل (۷): ولتاژ پایانه واحد تولید پراکنده ریزشبه

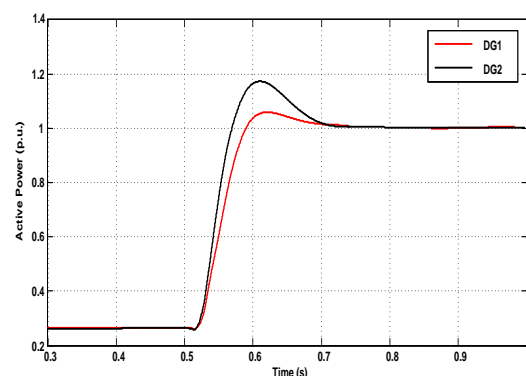
۴-۲- تغییر بار در ریزشبه جزیره‌ای

در این آزمایش ریزشبه در وضعیت عملکرد جزیره‌ای بوده و مقدار بار محلی ۱۰۰ کیلووات است. در لحظه $t=1$ ثانیه یک بار موتوری با ظرفیت ۶۰ کیلوولت آمپر با ضریب توان $0/8$ پس فاز به شبکه متصل می‌شود. سیستم کنترل پیشنهادی به منظور پاسخ دهی به بار متصل شده سریعاً اقدام به افزایش توان تولیدی واحدهای تولید پراکنده می‌کنند. توان خروجی و ولتاژ نقطه اتصال مشترک واحدهای تولید پراکنده قبل و بعد از اتصال بار موتوری به ترتیب در شکل (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است. با بررسی شکل موج ولتاژ پایانه تولید پراکنده مشخص می‌شود کنترل‌کننده پیشنهادی پاسخ مطلوبی را برای حفظ ولتاژ ریزشبه در مقدار نامی و دستیابی به پاسخ نهایی پس از زمان گذرای کوتاه فراهم می‌کند.

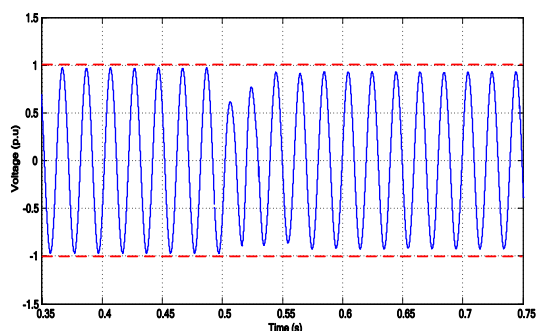


شکل (۸): توان خروجی واحدهای تولید پراکنده ریزشبه

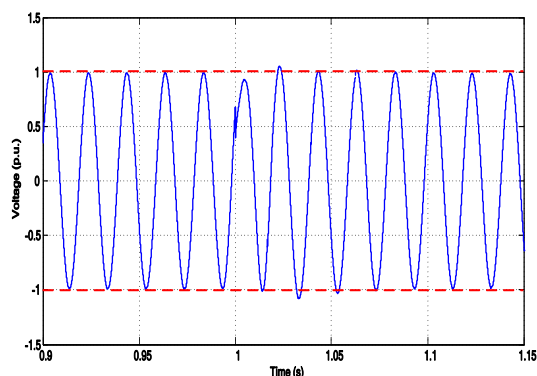
وقوع وضعیت جزیره‌ای درخور توجه باشد تا شرایطی سخت برای کنترل ریزشبه جزیره‌ای حکم فرما باشد. به همین منظور در وضعیت متصل به شبکه سراسری مقدار مصرف بار محلی در مقدار ۱۶۰ کیلووات و مقادیر P_{ref} و Q_{ref} واحدهای تولید پراکنده به‌طور یکسان به‌ترتیب در مقادیر ۲۰ کیلووات و صفر کیلووات تنظیم شده است. در لحظه $t=0/5$ ثانیه کلید قدرت (CB)، باز و ریزشبه از شبکه سراسری جدا می‌شود و وضعیت جزیره‌ای رخ می‌دهد. وضعیت جزیره‌ای به سبب افت ولتاژ شدید سریع‌تر از سناریو قبل و در زمان $t=0/51$ ثانیه با الگوریتم تشخیص وضعیت جزیره‌ای مطابق مرجع [۱۰]، شناسایی و در همان زمان فرمان برای غیرفعال‌شدن کنترل‌کننده جریانی و فعال‌شدن طرح کنترل پیشنهادی برای واحدهای تولید پراکنده صادر می‌شود. بلافاصله بعد از فعال‌شدن طرح کنترلی پیشنهادی برای تأمین بار محلی ریزشبه توان واحدهای تولید پراکنده، افزایش می‌یابد و هر دو واحد در مقدار توان نامی قرار می‌گیرند. توان مصرفی خروجی و ولتاژ پایانه واحدهای تولید پراکنده قبل و بعد از وقوع جزیره‌ای به‌ترتیب در شکل (۸) و (۹) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است کنترل‌کننده پیشنهادی پاسخ مطلوب را برای تنظیم ولتاژ ریزشبه و دستیابی به پاسخ نهایی پس از زمان گذرای کوتاه در این سناریو بسیار سخت فراهم می‌کند.



شکل (۹): توان خروجی واحدهای تولید پراکنده ریزشبه



شکل (۱۲): ولتاژ تولید پراکنده در کنترل کننده با ضرایب ثابت



شکل (۹): ولتاژ پایانه واحد تولید پراکنده ریزشبه

۴-۳- مقایسه عملکرد روش پیشنهادی

در این بخش به منظور نمایش قدرت کنترل کننده پیشنهادی عملکرد آن با کنترل کننده پیشنهادی در مرجع [۱۳] و کنترل کننده فازی با ضرایب ثابت طی شرایط وقوع وضعیت جزیره ای در لحظه $t=0/5$ در مقدار بار محلی ۱۲۰ کیلووات مقایسه شده است. شکل موج ولتاژ پایانه واحد تولید پراکنده برای هر یک از کنترل کننده به ترتیب در شکل های (۱۲)، (۱۳) و (۱۴) نشان داده شده است.

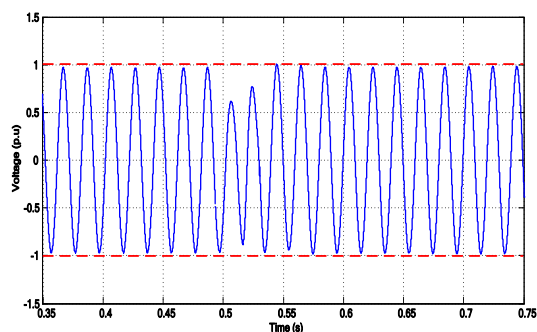
همان طور که مشخص است شکل موج ولتاژ در کنترل کننده پیشنهادی با طی زمان گذرای کوتاه در مقدار نامی ۱ p.u تثبیت می شود. این در حالی است که کنترل کننده پیشنهادی مرجع [۱۳] زمان گذرای طولانی تری برای رسیدن به مقدار مطلوب ۱ p.u دارد و کنترل کننده فازی با ضرایب ثابت نیز با قدری خطای حالت ماندگار همراه است.

۵- نتیجه گیری

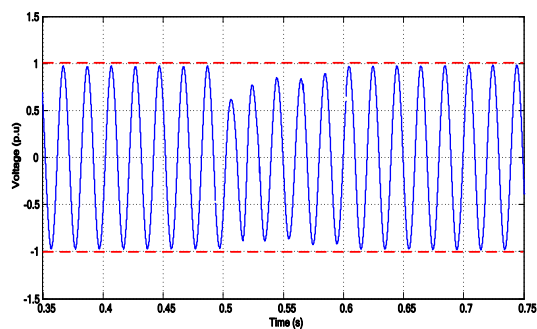
به سبب ماهیت غیرخطی ساختار ریزشبه و تغییرات مداوم توپولوژی ریزشبه دسترسی به پاسخ بهینه با کنترل کننده هایی با ضرایب ثابت برای همه وضعیت ها و شرایط عملکرد ریزشبه امکان پذیر نخواهد بود. طراحی مناسب کنترلرهای واحدهای تولید پراکنده در ریزشبه به منظور بهبود پاسخ گذرا، نگهداشتن پارامترهای اساسی ریزشبه در نزدیکی مقادیر نامی و همچنین به حداقل رساندن تغییرات آنها در حالت گذر و تغییرات بار در وضعیت عملکرد جزیره ای از اولویت های مهم و اساسی برای بهره برداری صحیح از ریزشبه است. در این پژوهش چالش کنترل ولتاژ ریزشبه به صورت مسئله بهینه سازی مطرح و برای تعیین پارامترهای کنترل کننده ولتاژ بهنگام از الگوریتم بهینه سازی تکامل تفاضلی استفاده شده است.

مراجع

- [1] P. Basak, S. Chowdhury, S. H. Dey, S.P. Chowdhury: "A literature review on integration of distributed energy resources in the perspective of control, protection and stability of microgrid", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 16, No. 8, pp.5545-5556, 2012.



شکل (۱۰): ولتاژ تولید پراکنده در کنترل کننده پیشنهادی



شکل (۱۱): ولتاژ تولید پراکنده در کنترل کننده مرجع [۱۳]

- [8] N. Pogaku, M. Prodanovic', and T. Green, "Modeling analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 22, No. 2, pp. 613 – 624, 2007.
- [9] B. F. Katiraei, M. Irvani, and P. Lehn, "Small signal dynamic model of a micro-grid including conventional and electronically interfaced distributed resources", *IET Gener. Transmiss. Distr.*, Vol. 1, No. 3, pp. 369-378, 2007.
- [10] F. Hashemi, M. Mohammadi and A. Kargarian "Islanding detection method for microgrid based on extracted features from differential transient rate of change of frequency", *IET Gener. Transmiss. Distr.*, Vol. 1, No. 3, pp. 1-14, 2016.
- [11] H. Akagi, Y. Kanagawa, and A. Nabase, "Instantaneous reactive power compensator comprising switching devices without energy storage components", *IEEE Trans. Ind.*, Vol. 20, No. 3, pp. 625-630, 1984.
- [12] R. Storn and K. Price, "Differential evolution – a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces", *Journal of Global Optimization*, Vol. 11, pp. 341-359, 1997.
- [13] S. Seidi Khorramabadi and A. Bakhshai "Critic-Based Self-Tuning PI Structure for Active and Reactive Power Control of VSCs in Microgrid system" *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 6, No. 1, pp.92-103, 2015.
- [2] R. Lasseter, A. Akhil, and C. Marnay, "White paper on integration of distributed energy resources: The CERTS microgrid concept," Consortium for Electric Reliability Technology Solutions, California Energy Commission, Berkeley, CA, USA, Formal Rep. LBNL-50829, 2002.
- [3] Fang Gao, and M.R Irvani, "A Control Strategy for a Distributed Generation Unit in Grid-Connected and Autonomous Modes of Operation," *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 23, No. 2, pp.850-859, 2008.
- [4] F. Katiraei, and M.R. Irvani, "Micro-Grid autonomous operation during and subsequent to islanding process", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 20, No. 1, pp.248-257, 2005.
- [5] Nagaraju Pogaku, Milan Prodanovic', Timothy C. Green, "Modeling, Analysis and Testing of Autonomous Operation of an Inverter-Based Microgrid," *IEEE Trans. Power Electronics*, Vol. 22, No. 2, pp.613-625, 2007.
- [6] K. De Brabandere, K. Vanthournout, J. Driesen, G. Deconinck, and R. Belmans, "Control of microgrids", in *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meeting*, Tampa, FL, USA, pp. 24-28, 2007.
- [7] H. Karimi, H. Nikkhajoei and R. Irvani, "Control of an Electronically Coupled Distributed Resource Unit Subsequent to an Islanding Event", *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 23, No. 1, pp.493-501, 2008.

¹ Grid Connected

² Autonomous Islanding

³ Point of Common Coupling (PCC)

⁴ Low pass filter (LPF)

⁵ Differential Evolution

⁶ Positive Big (PB)

⁷ Positive Medium (PM)

⁸ Positive Small (PS)

⁹ Zero (Z)

¹⁰ Negative Small (NS)

¹¹ Negative Medium (NM)

¹² Negative Big (NB)

¹³ Centroid of area