



University of Kurdistan

Dept. of Electrical and Computer Engineering

Smart/Micro Grid Research Center

smgrc.uok.ac.ir

Robust voltage controller design for an islanded microgrid using Kharitonov theorem (in Persian)

Naghshbandi A H, Habibi f, Bevrani H

Published (to be published) in: 20th Iranian Conf. on Electrical Engineering ICEE-2012

(Expected) publication date: 2012

Citation format for published version:

Naghshbandi A H, Habibi f, Bevrani H (2012) Robust voltage controller design for an islanded microgrid using Kharitonov theorem (in Persian). 20th Iranian Conf. on Electrical Engineering ICEE-2012, Tehran, Iran.

Copyright policies:

- Download and print one copy of this material for the purpose of private study or research is permitted.
- Permission to further distributing the material for advertising or promotional purposes or use it for any profit-making activity or commercial gain, must be obtained from the main publisher.
- If you believe that this document breaches copyright please contact us at smgrc@uok.ac.ir providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

طراحی یک کنترل کننده مقاوم ولتاژ برای یک ریزشبهک منفک بر اساس تئوری خاریتائف

علی حسامی نقشبندی^۱، فرشید حبیبی^۲ و حسن بیورانی^۳

^۱ گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، hesami@uok.ac.ir

^۲ گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، farshid.habibi@uok.ac.ir

^۳ گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، bevrani@ieee.org

چکیده - در این مقاله یک روش جدید، برای کنترل مقاوم ولتاژ در یک ریزشبهک منفک مطرح گردیده است. در ریزشبهکها غالباً از منابع تجدیدپذیر انرژی برای تولید انرژی الکتریکی استفاده می‌شود. پس در حضور این منابع، کنترل مقاوم برای حفظ پایداری، روش مناسبی خواهد بود. ساختار کنترلی ارائه شده در این مقاله، شامل یک اسیلاتور داخلی برای کنترل فرکانس و یک کنترل کننده PI کلاسیک برای کنترل ولتاژ است. کنترل کننده PI ، توسط تئوری خاریتائف که یک از روش‌های مطرح در کنترل مقاوم است به صورت اولیه و توسط روش D -Stability به صورت بهینه تنظیم خواهد شد. نتایج شبیه سازی‌ها عملکرد مناسب کنترل کننده پیشنهادی را به روشنی تایید می‌کنند. کلید واژه- ریزشبهک، مد جزیره ای، تولید پراکنده، کنترل مقاوم، تئوری خاریتائف.

همیشه این امکان که ریزشبهک و شبکه اصلی از یکدیگر جدا شوند، وجود دارد. پس در حضور این عدم قطعیت‌ها، استفاده از روش‌های مقاوم برای کنترل سیستم، بسیار مناسب خواهد بود. در این مقاله برای اعمال کنترل مقاوم به سیستم، از روش تئوری خاریتائف استفاده شده است.

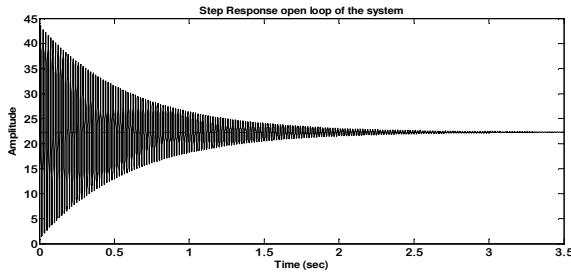
از روش تئوری خاریتائف، کنترل کننده ولتاژ PI به صورت اولیه و از روش D -Stability به صورت بهینه تنظیم خواهد شد. کارایی روش پیشنهادی با شبیه سازی در محیط MATLAB/SIMULINK بررسی شده است.

۲- معرفی مدل سیستم

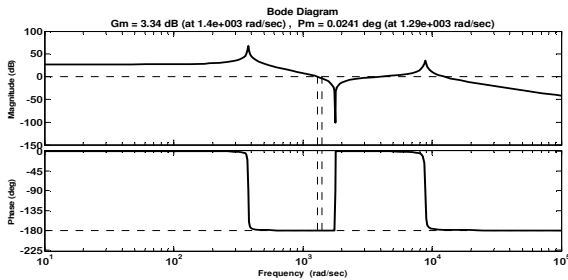
ریزشبهک مورد بحث در این مقاله در شکل ۱ نشان داده شده است. این ریزشبهک شامل یک منبع ولتاژ DC و AC ، یک مبدل منبع ولتاژ (VSC^3)، یک فیلتر RL که عمل جداسازی فرکانس پایه و اصلی ولتاژ را انجام می‌دهد، یک ترانسفورماتور سه فاز با اتصال Yn/Δ که ولتاژ $600V$ را به $13/8 kV$ تبدیل می‌کند، یک بار محلی سه فاز که به صورت یک RLC موازی نشان داده شده است. شبکه اصلی قدرت با یک منبع ولتاژ متناوب و پارامترهای R_s و L_s در شکل نشان داده شده‌اند. ریزشبهک از طریق یک مدارشکن به شبکه اصلی قدرت در نقطه اتصال مشترک PCC^4

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با رشد چشمگیر مصرف انرژی الکتریکی، واحدهای تولید مرسوم انرژی با مشکلات مختلفی مانند مشکلات گرمایش جهانی، کمبود سوخت‌های فسیلی، هزینه بالای احداث نیروگاه‌های جدید و... روبرو شده‌اند. برای حل این مشکلات و هم چنین به منظور بالابردن قابلیت اطمینان در سیستم‌های قدرت، استفاده از منابع تولید پراکنده (DG)^۱ در چندین دهه گذشته مطرح گردید. در منابع تولید پراکنده غالباً انرژی اولیه برای تولید برق، منابع انرژی تجدیدپذیر همچون انرژی بادی، انرژی خورشیدی، انرژی گرمایشی زمین، سلول‌های سوختی و مانند این‌هاست. با ورود این منابع، مفاهیم جدید دیگری همچون شبکه‌های کوچک قدرت یا ریزشبهک‌ها^۲ نیز مطرح گردیدند. ریزشبهک‌ها شامل چندین منبع تولید پراکنده، بارها و کنترل کننده‌های محلی است که به صورت مجتمع در سطح ولتاژ توزیع یا فوق توزیع به سیستم قدرت مرسوم متصل می‌شوند. اساس طراحی در این شبکه‌ها بایستی چنان باشد که قابلیت ادامه کار و تغذیه بارها در هر دو حالت وصل و قطع از شبکه اصلی برای ریزشبهک فراهم شود [۱]. با در نظر گرفتن ماهیت غیر قابل پیش بینی منابع تولید پراکنده و احتمال همیشگی رخداد اغتشاش،



شکل ۲: پاسخ پله سیستم حلقه



شکل ۳: دیاگرام بد سیستم حلقه باز

$$g_n(s) = \frac{(7.778e7s^2 + 1.101e6s + 2.462e14)}{(s^4 + 144.2s^3 + 7.789e7s^2 + 2.777e8s + 1.105e13)} \quad (3)$$

۳- استراتژی طراحی کنترل کننده

در این بخش با توجه به نوسانی بودن سیستم حلقه باز، اقدام به طراحی یک کنترل کننده PI کلاسیک به صورت مقاوم بر اساس تئوری خاریتائف و بهینه شده بر اساس روش D-Stability خواهد شد.

نیاز به عملکرد کنترلی مقاوم از یک سو و عدم استفاده از این روش طراحی مقاوم در مقالات و کارهای تحقیقاتی انجام شده از سوی دیگر، انگیزه انجام این تحقیق بوده است.

۳-۱- تئوری خاریتائف

بر اساس تئوری خاریتائف هر سیستمی با چند جمله ای مشخصه با ضرایب حقیقی مانند $K(s)$ ، به صورت:

$$K(s) = c_0 + c_1s + c_2s^2 + c_3s^3 + c_4s^4 + \dots \quad (4)$$

دارای پایداری مقاوم است اگر و فقط اگر چند جمله ای های (۵) که بر اساس حداکثر "+"، و حداقل "-"، ضرایب بدست می آید، هرویتر باشند [۲] و [۵]. هرویتر بودن، یعنی بررسی این که یک سیستم در چه شرایطی ناپایدار می شود و اگر سیستم ناپایدار است چگونه می توان آن را پایدار کرد. در تئوری خاریتائف، $K(s)$ معادله مشخصه سیستم حلقه بسته است. پس با توجه به معادله

متصل شده است [۳] و [۴]. در حالت وصل به شبکه، سیستم اصلی قدرت مسئول حفظ و کنترل پارامترهای اساسی شبکه بوده اما در حالت قطع از شبکه اصلی، ریزش شبکه بایستی قادر باشد به عنوان یک سیستم مستقل، خود و بارهای محلی را هم چنان تغذیه نماید [۶] و [۱۰]. در چنین مواردی، برای طراحی کنترل کننده مناسب و مقاوم نیاز به مدل سازی ریاضی سیستم وجود دارد که در ادامه به آن پرداخته می شود.

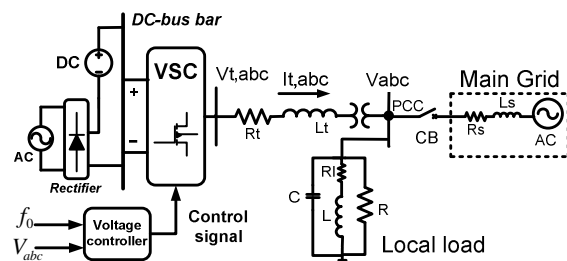
آن چنان که از شکل ۱ قابل مشاهده است، مدل فضای حالت سیستم در دستگاه متغیرهای فیزیکی سه فاز سیستم، abc، تحت شرایط تعادل به صورت معادله زیر خواهد بود:

$$\begin{cases} V_{t,abc} = L_t \frac{di_{L,abc}}{dt} + R_t i_{t,abc} + V_{abc} \\ I_{t,abc} = \frac{1}{R} V_{abc} + i_{L,abc} + c \frac{dV_{abc}}{dt} \\ V_{abc} = L \frac{di_{L,abc}}{dt} + R_l i_{L,abc} \end{cases} \quad (1)$$

با استفاده از تبدیل مختصات و با استفاده از یک قاب مرجع چرخان که با جزئیات در مراجع [۳] و [۴] ذکر شده است می توان تابع تبدیل V_d/V_{td} که V_d و V_{td} به ترتیب مؤلفه افقی ولتاژ نقطه اتصال مشترک (PCC)، و مؤلفه افقی ولتاژ ترمینال اینورتر، در شکل ۱ هستند به صورت معادله (۲) نوشت.

$$\begin{cases} N(s) = b_2s^2 + b_1s + b_0 \\ D(s) = a_4s^4 + a_3s^3 + a_2s^2 + a_1s + a \end{cases} \quad (2)$$

روابط ضرایب a_i ها و b_i ها، در مرجع [۳] به صورت کامل بیان شده است. $N(s)$ و $D(s)$ به ترتیب صورت و مخرج تابع تبدیل مذکور هستند. با جایگذاری مقادیر نامی سیستم که در مراجع [۳] و [۴] آمده است، تابع تبدیل سیستم حلقه باز مطابق معادله (۳) خواهد بود. پاسخ پله و دیاگرام بُد (Bode)، سیستم حلقه باز در شکل های ۲ و ۳ آورده شده اند، با توجه به آنها می توان دید که سیستم دارای حاشیه فاز و بهره پایینی دارد.



شکل ۱: یک ریزش شبکه متفک از شبکه اصلی قدرت

می‌شود تعداد زوج‌های بی‌شماری از Kp و Ki بدست آمده است، که مسلماً یک سری از این مقادیر عملکرد مناسب‌تر و بهینه‌تری را دارند که از روش مکملی دیگری با عنوان روش D-Stability استفاده می‌شود.

$$[a_0^+, a_0^-] = [1.2155e + 13, 9.9452e + 12]$$

$$[a_1^+, a_1^-] = [3.0545e + 08, 2.4991e + 08]$$

$$[a_2^+, a_2^-] = [8.5682e + 07, 7.0103e + 07]$$

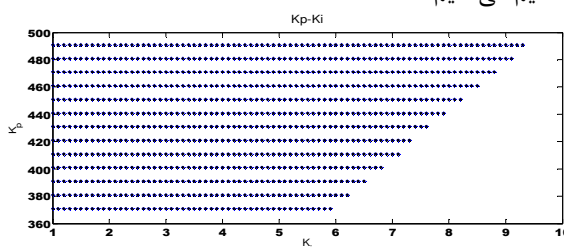
$$[a_3^+, a_3^-] = [1.5863e + 02, 1.2979e + 02]$$

$$[b_0^+, b_0^-] = [2.7081e + 14, 2.2157e + 14]$$

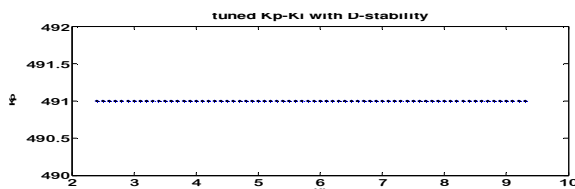
$$[b_1^+, b_1^-] = [1.2113e + 06, 9.9108e + 05]$$

$$[b_2^+, b_2^-] = [8.5559e + 07, 7.0003e + 07]$$

اساس این روش بر این مبناست که مقادیری از Kp و Ki که ریشه‌های معادله مشخصه سیستم حلقه بسته را در فاصله دورتری در نیمه چپ صفحه S قرار می‌دهند را جدا سازی می‌کند. این مقادیر بهینه از Kp و Ki در شکل ۵ نشان داده شده است. در حقیقت این مقادیر، ریشه‌های معادله مشخصه سیستم حلقه بسته را در ناحیه مشخصی (D-region) نگه داشته، و در ضمن اینکه ریشه‌ها نسبت به سمت راست محور w در صفحه S دورترین هستند [۲] و [۵]. بالاخره کنترل‌کننده را در یکی از زوج‌های بدست آمده در شکل (۵)، بر اساس مقادیر جدول (۱) تنظیم می‌کنیم.



شکل ۴: مقادیر مناسب Kp و Ki برای هرویتز کردن معادلات (۸)



شکل ۵: مقادیر بهینه جدا شده از شکل ۴ توسط D-Stability

جدول (۱): مقادیر طراحی شده برای کنترل‌کننده PI

پارامتر	مقدار
بهره تناسبی (Kp)	۴۹۱
بهره انتگرالی (Ki)	۹/۴

(۳) که تابع تبدیل حلقه باز سیستم است، یک کنترل‌کننده PI در فیدبک گذاشته و ضرایب معادله مشخصه سیستم حلقه بسته به صورت استاندارد شده مطابق با معادله (۶) بدست خواهد آمد.

$$\begin{cases} K_1(s) = c_0^+ + c_1^+s + c_2^-s^2 + c_3^-s^3 + \dots \\ K_2(s) = c_0^- + c_1^-s + c_2^+s^2 + c_3^+s^3 + \dots \\ K_3(s) = c_0^- + c_1^+s + c_2^+s^2 + c_3^-s^3 + \dots \\ K_4(s) = c_0^+ + c_1^-s + c_2^-s^2 + c_3^+s^3 + \dots \end{cases} \quad (5)$$

$$K_{\text{closed-loop}}(s) = s^5 + c_4s^4 + c_3s^3 + c_2s^2 + c_1s + c_0 \quad (6)$$

که در آن :

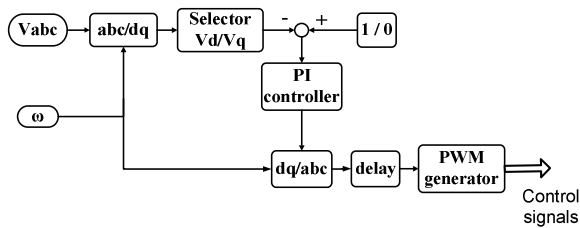
$$\begin{cases} c_4 = a_3 \\ c_3 = a_2 + b_2Kp \\ c_2 = a_1 + b_2Ki + b_1Kp \\ c_1 = a_0 + b_1Ki + b_0Kp \\ c_0 = b_0Ki \end{cases} \quad (7)$$

a_i ها و b_i ها به ترتیب ضرایب صورت و مخرج تابع تبدیل حلقه باز و Kp و Ki نیز به ترتیب بهره تناسبی و بهره انتگرالی یک کنترل‌کننده PI می‌باشند. با توجه به معادله (۶) مشخص است که سیستم حلقه بسته از مرتبه ۵ بوده و بر اساس یک لم که در [۲] و [۵] به آن اشاره شده است، برای اعمال تئوری خاریتائف به این سیستم، تنها کفایت چند جمله‌ای‌های زیر را با مقادیر مناسب Kp و Ki هرویتز کرد:

$$\begin{cases} K_1(s) = c_0^+ + c_1^+s + c_2^-s^2 + c_3^-s^3 + c_4^+s^4 + c_5^+s^5 \\ K_3(s) = c_0^- + c_1^+s + c_2^+s^2 + c_3^-s^3 + c_4^-s^4 + c_5^+s^5 \\ K_4(s) = c_0^+ + c_1^-s + c_2^-s^2 + c_3^+s^3 + c_4^+s^4 + c_5^-s^5 \end{cases} \quad (8)$$

۳-۲- اعمال تئوری خاریتائف به سیستم مورد نظر

فرض می‌شود که با $\pm 10\%$ تغییرات در پارامترهای نامی سیستم، ضرایب حلقه باز سیستم طبق روابط (۹) کران‌دار شوند. همچنان که در بخش قبلی ذکر شد برای اعمال تئوری خاریتائف به سیستمی با معادله مشخصه از مرتبه ۵، کفایت که چند جمله‌هایی که در معادله (۸) آمده است هرویتز گردند. با یک سری عملیات جبری برای هرویتز کردن این چند جمله‌ای‌ها، ۹ عدد نامعادله که در قسمت ضمیمه آمده است حاصل می‌شود. این نامعادلات بر اساس مقادیر مشخصی از Kp و Ki به صورت همزمان برآورده می‌شوند که این مقادیر، در شکل ۴ آورده شده است. این‌ها همان مقادیر اولیه برای تنظیم کنترل‌کننده PI، بر اساس تئوری خاریتائف است. همچنان که از شکل ۴ دیده



شکل ۸: ساختار کنترلی ارائه شده برای کنترل ولتاژ.

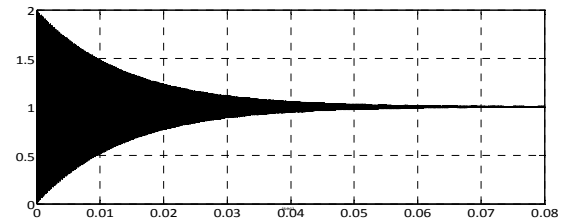
۳-۲ - ساختار کنترلی ارائه شده برای کنترل ولتاژ

در شکل ۸، ساختار کنترلی ارائه شده برای کنترل ولتاژ نشان داده می‌شود. در این ساختار ابتدا ولتاژ سه فاز، V_{abc} ، به مؤلفه‌های افقی (d) و عمودی (q) تجزیه می‌شوند سپس با مقادیر مرجعشان که به ترتیب یک و صفر می‌باشند، مقایسه می‌شوند. مقادیر خطا توسط یک کنترل‌کننده PI که در بخش قبلی در مقادیر جدول (۱) تنظیم شد، حداقل می‌گردد. سپس دوباره مؤلفه‌های افقی و عمودی ولتاژ به فرم abc باز می‌گردند و با استفاده از یک بلوک تأخیری و یک بلوک تولید کننده PWM، سیگنال‌های لازم برای کنترل مبدل منبع ولتاژ فراهم می‌شوند.

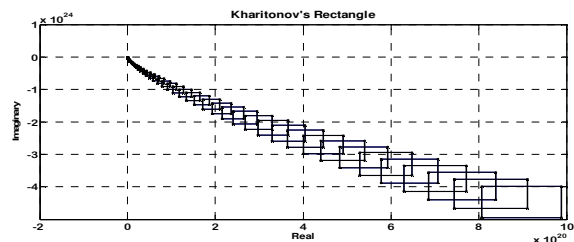
۴ - ارزیابی نحوه عملکرد کنترل‌کننده ولتاژ

پایداری ولتاژ به توانایی سیستم قدرت در حفظ ولتاژ ماندگار در تمامی شینه‌ها متعاقب بروز یک اغتشاش از یک شرایط کار مشخص اطلاق می‌گردد [۷]. پس برای بررسی پایداری ولتاژ در سیستم شکل ۱، یک سری شبیه سازی انجام داده و بر مبنای نتایج حاصل، در خصوص عملکرد روش کنترلی پیشنهادی می‌توان قضاوت نمود.

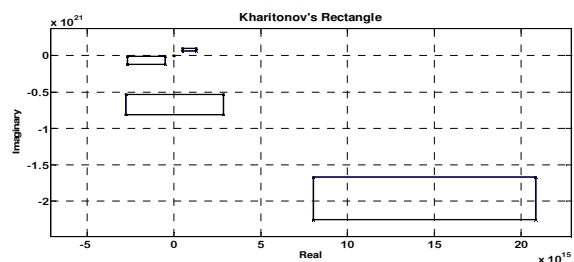
ریزشبکه و شبکه اصلی قدرت یک بار $1/43 \text{ MW}$ را به صورت مشترک تغذیه و یک بار 710 KVAR نیز به شبکه اصلی متصل است. قبل از بروز هر گونه اغتشاشی، منحنی‌های ولتاژ و جریان گره PCC، به صورت شکل‌های الف-۹ و ب-۹ خواهد بود. در زمان $0/2$ ثانیه یک اغتشاش رخ داده و سبب عمل کردن مدارشکن می‌شود. ریزشبکه به حالت جزیره‌ای سوئیچ می‌کند. نحوه تغییرات ولتاژ و جریان گره PCC در شکل‌های ج-۹ و د-۹ نشان داده می‌شود. معلوم است که سیستم در کمتر از $0/02$ ثانیه (یک سیکل) حالت جزیره ایی را تشخیص داده و خود را کنترل می‌کند. همین سرعت مناسب در بازیابی پروفایل ولتاژ بعد از حالت جزیره‌ای، کارایی مناسب‌تر روش پیشنهادی را در مقایسه با مرجع [۳]، که حالت جزیره‌ای را سه سیکل کنترل کرده است نشان می‌دهد. در شکل د-۹، دیده می‌شود جریان در



شکل ۶: پاسخ پله سیستم حلقه بسته



(الف)



(ب)

شکل ۷: الف) حرکت چهار ضلعی‌های خاریتائف برای $0 \leq w \leq 50 \text{ kHz}$ ب) یک نمای نزدیک حول صفر.

پاسخ پله سیستم حلقه بسته مطابق شکل ۶ خواهد بود. با توجه به شکل ۶ مشهود است که در مقایسه با شکل ۲، عملکرد سیستم از لحاظ بالازدگی، زمان نشست و مقدار نهایی به مراتب بهبود یافته است.

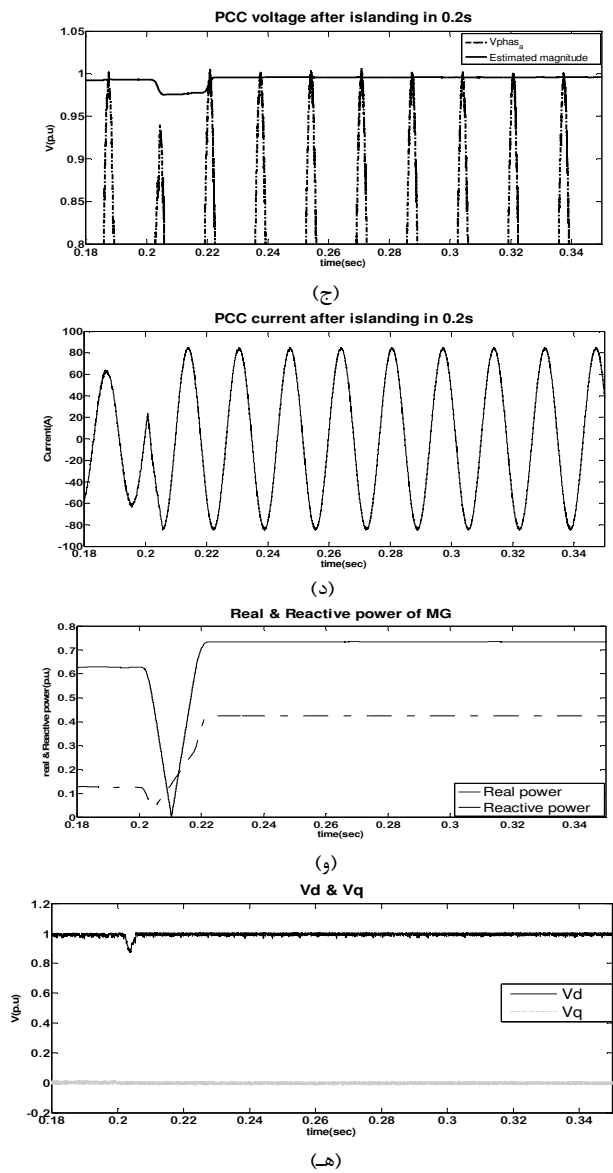
بر اساس تئوری خاریتائف طراحی صورت گرفته زمانی درست است که معیار عدم شمول صفر (مبدا) در چهار ضلعی‌های خاریتائف برآورده گردد. با تغییر فرکانس بین محدوده $0 \leq w \leq 50 \text{ kHz}$ ، چهار ضلعی‌های خاریتائف با رئوس،

$$K_1(s), K_3(s), K_2(s), K_4(s), s = j\omega \quad (10)$$

مطابق شکل (۷) خواهد بود [۲] و [۵]. آن چنانکه از شکل‌های الف-۷ و ب-۷، معلوم است هیچ چهار ضلعی وجود ندارد که مبدا در آن افتاده باشد؛ لذا چون شرط عدم شمول مبدا در چهار ضلعی‌های خاریتائف رعایت شده است، طراحی صورت گرفته درست بوده است.

۰/۲ ثانیه از ۶۰ به ۸۰ آمپر افزایش می‌یابد. با توجه به ولتاژ نامی PCC که ۱۳/۸ kV بوده و توان نامی VSC که در حدود ۲/۵ MW است، پس جریان نامی VSC در حدود ۱۸۰ آمپر خواهد بود؛ لذا می‌توان نتیجه گرفت که هنوز جریان به مقدار خطرناک نرسیده است. بحث دیگری که در رابطه با منحنی جریان باید در نظر گرفت این است که در لحظه‌های اولیه رخداد خطا، زیر گذرا و گذرا، از افزایش بی رویه جریان جلوگیری شده است. منحنی و-۹ نحوه تغییرات توان اکتیو و راکتیو را نشان می‌دهد؛ همان‌طور که در ساختار کنترلی شکل ۸ نشان داده شده است، سعی می‌شود که مؤلفه‌های افقی (d) و عمودی (q) ولتاژ گره PCC، در مقادیر مرجعشان تثبیت شوند. نحوه تغییرات این مؤلفه‌ها بعد از رخداد خطا در شکل ه-۹ نشان داده شده است.

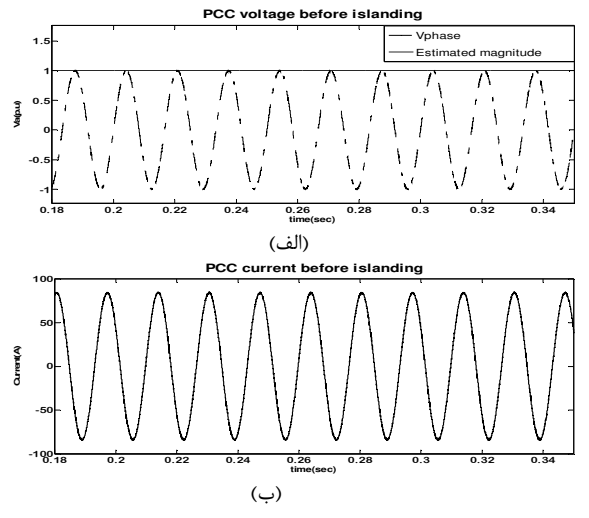
اما همان‌طور که در ابتدای این مقاله ذکر شد، این سیستم‌ها همواره با اغتشاشات و عدم قطعیت‌هایی نیز روبرو هستند، پس برای شبیه‌سازی این عدم قطعیت‌ها در سیستم، یک بار پله‌ایی به اندازه ۲۰۰ KW در زمان ۰/۳ ثانیه به سیستم اعمال کرده و نتایج را در شکل‌های ۱۰ (الف-د) مشاهده می‌کنیم. در شکل الف-۱۰ منحنی ولتاژ و در شکل ب-۱۰ منحنی جریان آمده است. وضعیت توان اکتیو و راکتیو در ریزش‌بکه بعد از رخداد این اغتشاش در شکل ج-۱۰ و منحنی مؤلفه‌های افقی و عمودی ولتاژ در شکل د-۱۰ آمده است که بازهم روی مقادیر مرجعشان تثبیت شده‌اند. با توجه به عملکرد ریزش‌بکه در طی این دو مرحله شبیه‌سازی، یعنی حالت گذار از حالت وصل به حالت قطع از شبکه اصلی قدرت و حالت رخداد یک تغییر پله‌ایی در بار، می‌توان به کارایی مقاوم و عملکرد مناسب کنترل‌کننده پیشنهادی پی برد.



شکل ۹: ولتاژ PCC قبل از رخداد خطا (الف)، جریان PCC قبل از رخداد خطا (ب)، ولتاژ PCC بعد از رخداد خطا در زمان ۰/۲ ثانیه (ج)، جریان PCC بعد از رخداد خطا و افزایش جریان در زمان ۰/۲ ثانیه (د)، نحوه تغییرات توان اکتیو و راکتیو در ریزش‌بکه قبل و بعد از رخداد خطا (و)، تغییرات مؤلفه‌های ولتاژی (ه).

نتیجه گیری

در این مقاله، ابتدا توصیف مختصری از ریزش‌بکه و دلایل به وجود آمدن آن در سیستم‌های قدرت مدرن مطرح گردید. سپس با توجه دینامیک سیستم، به ویژگی‌های آن اشاره و لزوم استفاده از یک کنترل کننده مقاوم مشخص شد. کنترل کننده پیشنهادی بر اساس یکی از تئوری‌های کنترل مقاوم، یعنی تئوری خاریتائف، به صورت ابتدایی برای کنترل ولتاژ تنظیم گردید سپس با



مراجع

- [1] Robert Lasseter, Abbas Akhil, Chris Marnay, JohnStephens,Jeff Dagle, Ross Guttromson, A. Sakis Meliopoulos, Robert Yinger, and Joe Eto, " Consortium for Electric Reliability Technology Solutions", April, 2002.
- [2] Bevrani, H.; Babahajyani, P.; Habibi, F.; Hiyama, T.; , "Robust control design and implementation for a quadratic buck converter," Power Electronics Conference (IPEC), 2010 International , vol., no., pp.99-103, 21-24 June 2010.
- [3] Karimi, H.; Nikkhajoei, H.; Iravani, R.;, "Control of an Electronically-Coupled Distributed Resource Unit Subsequent to an Islanding Event," Power Delivery, IEEE Transactions on , vol.23, no.1, pp.493-501, JANUARY 2008.
- [4] Karimi, H.; Davison, E.J.; Iravani, R.; , "Multivariable Servomechanism Controller for Autonomous Operation of a Distributed Generation Unit: Design and Performance Evaluation," Power Systems, IEEE Transactions on , vol.25, no.2, pp.853-865, May 2010.
- [5] B.R . Barmish, " New Tools for Robustness of Linear Systems". Macmillian, 1994.
- [6] B. Awad, J. Wu, N. Jenkins, "Control of distributed generation", Elektrotechnik & Informationstechnik (2008) 125/12: 409-414. DOI 10.1007/s00502-008-0591-3, July 11, 2008
- [7] Kundur, P.; Paserba, J.; Ajarapu, V.; Andersson, G.; Bose, A.; Canizares, C.; Hatziargyriou, N.; Hill, D.; Stankovic, A.; Taylor, C.; Van Cutsem, T.; Vittal, V.; , "Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions," Power Systems, IEEE Transactions on , vol.19, no.3, pp. 1387- 1401, Aug. 2004.

ضمیمه

نامعادلات حاصل از محاسبه هرویتز کردن مجموعه معادلات (۸)، به شرح زیر لیست شده است:

$$\begin{cases} a_2^- < a_3^- a_4^+ \\ -(a_2^-)^2 + a_2^- a_3^- a_4^+ - (a_4^+)^2 a_1^+ > -a_0^+ a_4^+ \\ -(a_4^+)^3 (a_1^+)^2 + 2a_0^+ a_1^+ (a_4^+)^2 + a_0^+ a_2^- a_3^- \\ + a_1^+ a_2^- a_3^- (a_4^+)^2 \\ -a_1^+ a_4^+ (a_2^-)^2 > (a_0^+)^2 a_4^+ + a_0^+ (a_3^- a_4^+)^2 \end{cases}$$

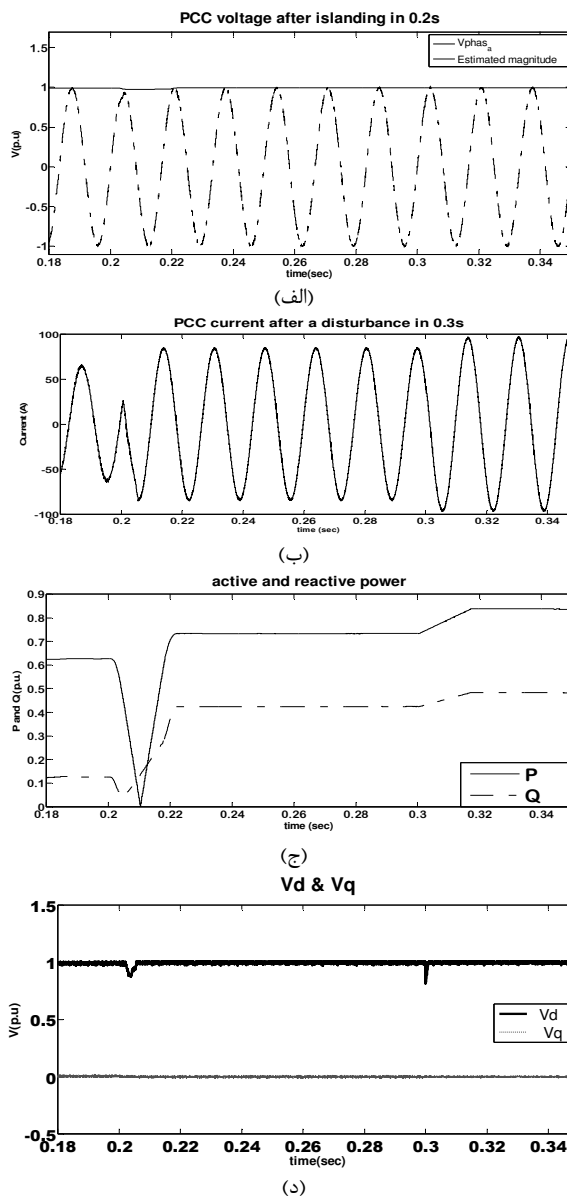
$$\begin{cases} a_2^+ < a_3^- a_4^- \\ -(a_2^+)^2 + a_2^+ a_3^- a_4^- - (a_4^-)^2 a_1^+ > -a_0^- a_4^- \\ -(a_4^-)^3 (a_1^+)^2 + 2a_0^- a_1^+ (a_4^-)^2 + a_0^- a_2^+ a_3^- a_4^- \\ + a_1^+ a_2^+ a_3^- (a_4^-)^2 - a_1^+ a_4^- (a_2^+)^2 > (a_0^-)^2 a_4^- + a_0^- (a_3^- a_4^-)^2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} a_2^- < a_3^+ a_4^+ \\ -(a_2^-)^2 + a_2^- a_3^+ a_4^+ - (a_4^+)^2 a_1^- > -a_0^+ a_4^+ \\ -(a_4^+)^3 (a_1^-)^2 + 2a_0^+ a_1^- (a_4^+)^2 + a_0^+ a_2^- a_3^+ a_4^+ \\ + a_1^- a_2^- a_3^+ (a_4^+)^2 - a_1^- a_4^+ (a_2^-)^2 > (a_0^+)^2 a_4^+ + a_0^+ (a_3^+ a_4^+)^2 \end{cases}$$

پانوشت

1. Distributed Generation (DG)
2. Microgrid (MG)
3. Voltage Source Converter (VSC)
4. Point of Common Coupling (PCC)

استفاده از یک الگوریتم تکاملی، D-Stability، کنترل کننده مورد نظر به صورت بهینه تنظیم شد. مزیت عمده این روش سادگی طراحی بر اساس آن است. عملکرد کنترل کننده و ریزشکه در حالت قطع از شبکه اصلی و در حالت بروز تغییرات پله‌ای بار، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله از شبیه سازی‌ها، مقاوم بودن و عملکرد بسیار مناسب کنترل کننده پیشنهادی را به روشنی تایید می‌کند.



شکل ۱۰: الف) منحنی تغییرات ولتاژ پس از یک تغییر پله ایی ۲۰۰ KW در زمان ۰/۳ ثانیه، ب) منحنی تغییرات جریان، ج) منحنی تغییرات توان اکتیو و راکتیو، د) نحوه تغییرات مؤلفه‌های افقی و عمودی ولتاژ پس پله در بار