طراحی یک کنترل‌کننده مقاوم برای پایداری ولتاژ یک ریزشبکه در حالات مختلف کاری

علی حسامی نقشبندی[۱] فرشید حبیبی[۲] حسن بیورانی[۳]

۱- استادیار-گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان
hesami@uok.ac.ir
۲- دانش آموخته- کارشناسی ارشد- گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان
habibi.farshid@gmail.com
۳- دانشیار- گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان
bevrani@ieee.org

چکیده: در چند دهه اخیر سیستم‌های قدرت مرسوم با مشکلاتی مانند افزایش چشمگیر مصرف انرژی، کمبود سوخت‌های فسیلی، آلایندگی و هزینه بالای این سوخت‌ها مواجه شدند. برای حل این مشکلات، ریزشبکه‌ها مطرح شدند که باید در هر دو حالت وصل و قطع از شبکه اصلی توانایی ادامه کار و تغذیه بارها را داشته باشند. در این مقاله سعی شده است که ولتاژ یک ریزشبکه در حالت‌های گذار از وصل به قطع و در حضور اغتشاش توسط روش کنترلی ارائه شده، مورد بررسی و کنترل قرار گیرد. روش کنترلی ارائه شده شامل یک اسیلاتور داخلی برای کنترل فرکانس و یک کنترل‌کننده PI کلاسیک برای کنترل ولتاژ می‌باشد. کنترل‌کننده PI توسط یک از تئوری‌های کارآمد مقاوم با عنوان تئوری خاریتانف به صورت اولیه و توسط الگوریتم تکاملی D-Stability به صورت بهینه تنظیم خواهد شد. کارآمدی و نحوه عملکرد کنترل‌کننده در حضور عدم قطعیت در پارامترهای سیستم مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

کلمات کلیدی: تولید پراکنده، ریزشبکه، حالت کاری جزیره‌ایی، کنترل مقاوم، تئوری خاریتانف، D-Stability

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۰/۶/۳۰
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱/۱۹
نام نویسنده‌ی مسئول: فرشید حبیبی
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران – کردستان – سنندج – خیابان پاسداران – دانشگاه کردستان – دانشکده فنی و مهندسی – گروه برق

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol10- No.1 Spring & Summer 2013
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر با رشد چشمگیر مصرف انرژی الکتریکی، واحدهای تولید مرسوم در سیستم‌های قدرت با مشکلات مختلفی مانند گرمایش جهانی، کمبود سوخت‌های فسیلی، هزینه بالای احداث نیروگاه‌های جدید و ... روبرو شده‌اند. برای حل این مشکلات و هم‌چنین به منظور بالا بردن قابلیت اطمینان در سیستم‌های قدرت، استفاده از منابع تولید پراکنده[1](DG) 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 [۱]. در مورد منابع موجود در ریزشبکه‌ها در مراجع [۱-۳] توضیحاتی ارائه گردیده است.

هرچند وجود این منابع باعث حل شدن مسائل زیادی شده است اما افزایش تعداد آن‌ها مشکلات دیگری برای سیستم‌های قدرت به وجود می‌آورد، که به عنوان مثال می‌توان به پیچیده‌تر شدن سیستم توزیع و مشکلات ایجاد شده توسط این منابع برای طراح‌های حفاظتی اشاره کرد. در همین راستا دستورالعمل‌هایی برای چگونگی اتصال منابع انرژی پراکنده به سیستم‌های توزیع توسط مؤسسات مختلف تدوین شده است. از آن جمله استاندارد IEEE Std 1547-2003 تحت عنوان استانداردی برای اتصال منابع پراکنده به شبکه قدرت می‌باشد [۴]. تمرکز این استانداردها بر این مسأله است که منابع پراکنده در هنگام وقوع مشکلی در سیستم قدرت به صورت خودکار از مدار خارج شوند. پس به منظور حفظ محیط زیست، مسائل اقتصادی و بالا بردن قابلیت اطمینان در سیستم‌های قدرت، در تأمین انرژی مورد نیاز مصرف کنندگان، در سال‌های اخیر نظریه دیگری در مورد چگونگی رفتار منابع متصل به شبکه قدرت مطرح شده است که ریزشبکه (MG)[2] نام دارد. ریزشبکه‌ها شامل چندین منبع تولید پراکنده (DG)، بارها و کنترل‌کننده‌های 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 ریزشبکه فراهم شود [۵]. ریزشبکه‌ها در شرایط عادی به شبکه قدرت متصل بوده و می‌توانند بخشی از انرژی مورد نیاز خود را از شبکه تأمین کند و یا در مواردی توان مازاد تولید کننده‌های داخلی خود را به شبکه سراسری تحویل دهد. اما طراحی، کنترل و استراتژی‌های عملکرد آن به گونه ایست که می‌توانند در صورت نیاز جدا از شبکه قدرت با تأمین حداقل بخشی از بارهای خود به صورت جزیره‌ایی و خودگردان به کار خود ادامه دهند. از آنجایی که یک ریزشبکه توانایی کار به صورت مستقل و جزیره‌ایی (جدا از شبکه سراسری) را داراست، برای عملکرد مناسب این شبکه‌ها لازم است که کنترل‌کننده‌هایی طراحی کرد تا ریزشبکه‌ها هم در حالت جزیره‌ایی و هم در حالت متصل به شبکه سراسری توانایی کسب پایداری را داشته باشند. پایداری یک ریزشبکه که انرژی مورد نیاز بارهای محلی را تأمین می‌کند از اهمیت بسیار برخوردار است چرا که علاوه بر موارد ذکر شده در حالت متصل به شبکه بر پایداری و کیفیت توان سیستم سراسری نیز تأثیرگذار خواهند بود. اگرچه تا کنون هیچ استاندارد بین‌المللی برای این‌گونه سیستم‌ها، یعنی سیستم‌های ریزشبکه منفک تعیین نشده است اما کیفیت توان [۶] تولید شده توسط این سیستم‌ها باید همانند سیستم‌های متصل به شبکه سراسری باشد، چرا که مصرف‌کننده‌های هر دو یعنی سیستم‌های منفک و سیستم‌های به هم پیوسته همانند یکدیگرند [۷, ۸]. در حالت وصل به شبکه، سیستم اصلی قدرت مسئول حفظ و کنترل ولتاژ، فرکانس و سایر پارامترهای اساسی سیستم است. در این حالت VSC[3] با کنترل کردن توان اکتیو و راکتیو دریافتی از DG ها، سعی می‌کند توان ثابتی به سیستم تزریق شود. به این روش، کنترل به روش PQ گفته می‌شود. اما در حالت قطع از شبکه اصلی، ریزشبکه بایستی قادر باشد به عنوان یک سیستم مستقل، خود را کنترل و بارهای محلی را هم چنان تغذیه نماید. در این حالت VSC با تغییر در میزان دریافتی توان اکتیو و راکتیو از DG ها، اقدام به کنترل ولتاژ و فرکانس می‌کند. در حقیقت در این روش، مبدل منبع ولتاژ (VSC) در ریزشبکه ایزوله نقش یک ژنراتور سنکرون را ایفا می‌کند. این روش مبتنی بر کنترل VSI[4] است [۷, ۹]. در مورد روش‌های کنترلی در ریزشبکه‌ها در مراجع [۸-۱۳] توضیحات کاملی ارائه شده است. در زمینه کنترل ولتاژ، همانند مراجع [۱۴-۱۶]، اقدام به بررسی پایداری ولتاژ در لحظات گذار از وصل به قطع و برعکس نموده‌اند و برای این کار اغلب از سیستم‌های آزمون نسبتاً ساده‌ایی استفاده کرده‌اند.

با در نظر گرفتن ماهیت غیر قابل پیش بینی منابع تولید پراکنده و هم چنین با در نظر گرفتن احتمال همیشگی رخداد اغتشاش در سیستم‌های قدرت، همیشه این امکان که ریزشبکه و شبکه اصلی از یکدیگر جدا شوند وجود دارد. پس در حضور این عدم قطعیت‌ها، استفاده از روش‌های مقاوم بسیار مناسب خواهد بود. در این مقاله برای اعمال کنترل مقاوم، از روش تئوری خاریتانف استفاده شده است. تئوری خاریتانف با بررسی پایداری چهار چند جمله‌ایی که بر اساس تئوری خاریتانف بدست می‌آیند، مقاوم بودن کنترل‌کننده را تضمین می‌کند. از روش تئوری خاریتانف تعداد بسیار زیادی از مقادیر مناسب K_p و K_i برای کنترل‌کننده PI بدست می‌آید که بعضی از این مقادیر، مناسب‌تر هستند. عمل جداسازی مقادیر بهینه ضرایب تناسبی و انتگرالی با روش D-Stability صورت خواهد گرفت. این کنترل‌کننده PI که به صورت مقاوم و بهینه تنظیم شده، عمل کنترل ولتاژ را در یک ریزشبکه منفک از شبکه اصلی، به عهده خواهد داشت. عمل کنترل فرکانس در ریزشبکه منفک توسط یک اسیلاتور داخلی صورت خواهد گرفت.

این مقاله در پنج بخش ارائه گردیده است. در بخش دوم، ریزشبکه و یک مدل ریاضی از سیستم جهت یافتن معادله مشخصه آن ارائه می-

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.10- No.1 Spring & Summer 2013

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]

شود. اعمال تئوری خاریتانف بـه عنـوان روش کنترلـی مقـاوم در نظـر گرفته شده، جهت تضمین پایداری ولتاژ ریزشبکه در قسمت سوم آمده است. در بخش‌های چهارم و پنجم مقالـه، بـه ترتیـب بـه سـناریوهای مختلف شبیه‌سازی جهت ارزیابی روش کنترلی در نظر گرفتـه شـده و یک نتیجه‌گیری کلی از مقاله اشاره می شود.

۲- مدل سیستم

ریزشبکه مورد بحث در این مقاله در شکل ۱ نشان داده شده است. این ریزشبکه شامل یک منبع ولتاژ DC که می‌تواند مجموعه‌ایی از سلول-های خورشیدی، سلول‌های سوختی یا هر منبع پراکنـده دیگـری نیـز باشد. یک مبدل منبع ولتاژ (VSC)، که به صورت واسـط میـان منبـع ولتاژ DC و خطوط انتقال در ریزشبکه قرار گرفته و ولتاژ DC منبع را به AC تبدیل می‌کند، یک فیلتـر RL کـه بـا پارامترهـای R_t و L_t مشخص شده است و عمل جدا سازی فرکـانس پایـه و اصـلی ولتـاژ را انجام می‌دهد، یک ترانسفورماتور سه فـاز بـا اتصـال Yn/Δ کـه ولتـاژ ۶۰۰V را به ۱۳/۸ kV تبدیل می‌کند، یک بار محلی سـه فـاز کـه بـه صورت یک RLC موازی نشان داده شده است. شبکه اصلی قـدرت بـا یک منبع ولتاژ متناوب و پارامترهای R_S و L_S در شکل نشـان داده شده‌اند. ریزشبکه از طریق یک مدارشکن (CB[۵]) به شبکه اصلی قدرت در نقطه اتصال مشترک (PCC[۶]) متصل شده است. اگـر اغتشاشـی در سیستم رخ دهد که حفظ پایداری در حالـت وصـل بـودن ریزشـبکه و شبکه اصلی قدرت امکان نداشـته باشـد، مـدار شـکن بـاز مـی‌شـود و ریزشبکه به حالت منفک یا جدا از سیستم اصلی قدرت سوئیچ می‌کند [۱۴, ۱۵].

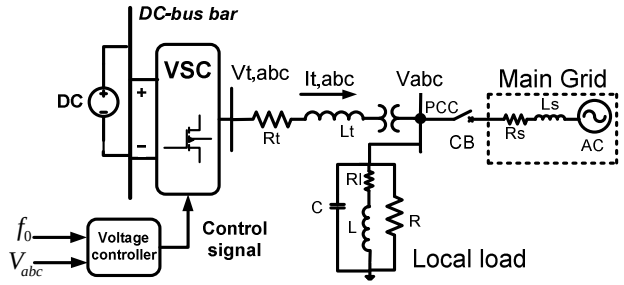
یک کنترل‌کننده محلی که مسـئول حفـظ پایـداری در هـر دو حالـت وصل و قطع از شبکه اصلی است، نیز در آن وجود دارد که بـا جزئیـات در بخش‌های بعدی ساختار آن توضیح داده خواهد شد.

برای چنین مواردی طراحی کنترل‌کننده مناسب و مقاوم نیاز به مدل-سازی ریاضی سیستم وجود دارد تا با شناختی کـه از سیسـتم بدسـت می‌آید، طراحی کنترل‌کننده به صورتی مناسب و بهینـه باشـد کـه در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

آن چنان که از شکل ۱ قابل مشاهده است، مدل فضای حالت سیسـتم در دستگاه متغیرهای فیزیکی سـه فـاز سیسـتم، abc، تحـت شـرایط متعادل به صورت معادله زیر خواهد بود:

$$\begin{cases} V_{t,abc} = L_t \dfrac{di_{t,abc}}{dt} + R_t i_{t,abc} + V_{abc} \\ I_{t,abc} = \dfrac{1}{R} V_{abc} + i_{L,abc} + C \dfrac{dv_{abc}}{dt} \\ V_{abc} = L \dfrac{di_{L,abc}}{dt} + R_l i_{L,abc} \end{cases} \qquad (۱)$$

با استفاده از تبدیل مختصـات و بـا اسـتفاده از یـک قـاب مرجـع چرخان که با جزئیات در مراجع [۱۴, ۱۵] آمـده اسـت مـی‌تـوان مدل فضای حالت متغیرهای سیستم را در دستگاه پارک، dq[۷]، بـه صورت روابط داده شده در معادله (۲) بدست آورد.



شکل (۱) : ریزشبکه منفک شده از شبکه اصلی

هدف از این روابط ریاضی بدست آوردن تابع تبـدیل مؤلفـه افقـی ولتاژ PCC، v_d، نسبت به مؤلفه افقی ولتـاژ ترمینـال اینـورتر، v_{td} می‌باشد.

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = AX(t) + bu(t) \\ y(t) = CX(t) \\ u(t) = v_{td} \end{cases} \qquad (۲)$$

که در آن :

$$A = \begin{pmatrix} -\dfrac{R_t}{L_t} & \omega_0 & 0 & -\dfrac{1}{L_t} \\ \omega_0 & -\dfrac{R_t}{L_t} & -2\omega_0 & \dfrac{R_t C \omega_0}{L} - \dfrac{\omega_0}{R} \\ 0 & \omega_0 & -\dfrac{R_t}{L} & \dfrac{1}{L} - \omega_0^2 C \\ \dfrac{1}{C} & 0 & -\dfrac{1}{C} & -\dfrac{1}{RC} \end{pmatrix} \qquad (۳)$$

$$b^T = \begin{pmatrix} \dfrac{1}{L_t} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$X^T = \begin{pmatrix} i_{td} & i_{tq} & i_{Ld} & v_d \end{pmatrix}$$

با توجه به معادلات (۲) و (۳)، تابع تبدیل v_d / v_{td} که v_d و v_{td} بـه ترتیب مؤلفه افقی ولتاژ PCC، و مؤلفه افقی ولتاژ ترمینال اینـورتر، در شکل ۱ هستند به صورت معادله (۴) خواهد بود:

$$\begin{aligned} N(s) &= b_2 s^2 + b_1 s + b_0 \\ D(s) &= a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0 \end{aligned} \qquad (۴)$$

که در آن:

$$\begin{aligned} a_4 &= L_t R L^2 C \\ a_3 &= \left(L_t L^2 + R_t R L^2 C + 2R_t L_t R L C\right) \\ a_2 &= (L_t R L + R L^2 + R_t L^2 + 2R_t R_l R L C + 2R_l L_t + R_l^2 L_t R C) \\ a_1 &= (R_t R L + 2R_l R L + R_t R_l^2 R C + R_l L_t R + 2R_t R_l L \\ &\quad + R_t \omega_0^2 R L^2 C + R_l^2 L_t + \omega_0^2 L_t L^2 - 2\omega_0^2 L_t R_l R L C) \\ a_0 &= R_t R_l R + \omega_0^2 R L^2 + R_t \omega_0^2 L^2 + R_l^2 R + R_t R_l^2 + \omega_0^2 L_t R L \\ &\quad - \omega_0^2 L_t R_l^2 R C - \omega_0^4 L_t R L^2 C \\ b_2 &= R L^2 \\ b_1 &= R L^2 \left(\frac{2R_l}{L}\right) \\ b_0 &= R L^2 \left(\frac{\omega_0^2 L^2 + R_l^2}{L^2}\right) \end{aligned} \qquad (۵)$$

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol10- No.1 Spring & Summer 2013
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]

$N(s)$ و $D(s)$ به ترتیب صورت و مخرج تابع تبدیل مذکور هستند. با جایگذاری مقادیر نامی سیستم که در جدول (۱) آمده‌اند در معادلات (۴) و (۵)، تابع تبدیل سیستم حلقه باز مطابق معادله (۶) خواهد بود. آنچنان که از معادله (۶) مشخص است سیستم دارای دو صفر و چهار قطب است. پس معادله مشخصه سیستم حلقه باز، از مرتبه چهار است.

$$g_n(s)=\frac{7.778e7s^2+1.101e6s+2.462e14}{s^4+144.2s^3+7.789e7s^2+2.777e8s+1.105e13} \qquad (۶)$$

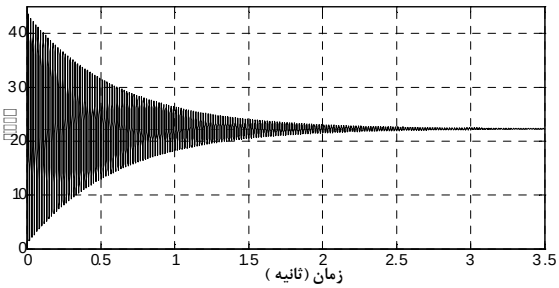
پاسخ پله سیستم حلقه باز، $g_n(s)$، در شکل ۲ آورده شده است، با توجه به آن می‌توان دید که سیستم دارای بالازدگی زیادی است. در شکل ۳ نیز دیاگرام بُد، (Bode)، سیستم حلقه باز رسم شده که نشان می‌دهد که سیستم حاشیه فاز و بهره پایینی دارد.

۳- استراتژی طراحی کنترل‌کننده

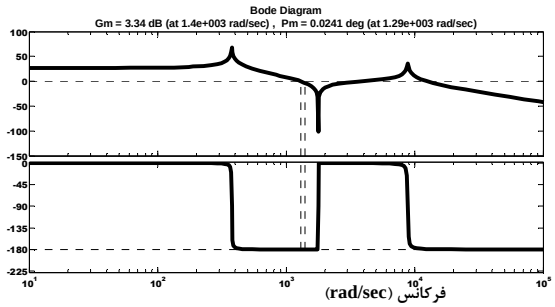
در این بخش یک سری از ویژگی‌های سیستم حلقه باز و دلایل استفاده از یک کنترل‌کننده در آن، سپس مراحل طراحی یک کنترل کننده PI کلاسیک به صورت مقاوم بر اساس تئوری خاریتانف ذکر خواهد شد. خواص سیستم حلقه بسته در حضور کنترل‌کننده طراحی شده بر اساس تئوری خاریتانف و بهینه شده بر اساس روش D-Stability و ساختار کنترلی در نظر گرفته شده برای تضمین پایداری ولتاژ ریزشبکه در حالت‌های مختلف کاری در قسمت‌های بعدی این بخش خواهد آمد.

جدول (۱) : مقادیر نامی پارامترهای سیستم

پارامتر	مقدار
R_t	$1.5m\Omega$
L_t	$300\mu H$
توان نامی VSC	$2.5MW$
ولتاژ ترمینال VSC	$600V$
فرکانس حامل PWM	$1980Hz$
منبع ولتاژ DC	$1500v$
R	76Ω
L	$111.9mH$
C	$62.855\mu F$
Q	1.8
f_0	$60Hz$
نرخ تبدیل ترانسفورماتور	$0.6/13.8Kv\ (Y\ /\ \Delta)$



شکل (۲): پاسخ پله سیستم حلقه باز



شکل (۳): دیاگرام بد سیستم حلقه باز

۳-۱- ویژگی‌های سیستم حلقه باز

در بخش قبلی پاسخ پله و دیاگرام بُد سیستم حلقه باز در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شد که با توجه به این شکل‌ها و سایر خصوصیات سیستم حلقه باز که در ادامه خواهد آمد، دلایل استفاده از کنترل-کننده در ریزشبکه و استفاده از روش کنترل مقاوم ارائه خواهد شد.

آنچنان که در بخش قبل ذکر شد تابع تبدیل حلقه باز سیستم، طبق معادله (۶) خواهد بود که ویژگی‌های زیر را دارا می‌باشد:

- $g_n(s)$ دارای دو صفر در $-.0071\pm1.78\mathbf{e3i}$ بوده که نشان می‌دهد سیستم حلقه باز با فاز حداقل است ولی بسیار نزدیک به نیمه راست صفحه S می‌باشد.
- $g_n(s)$ دارای چهار قطب در $-1.66\pm377\mathbf{i}$ و $-70.5\pm8.82\mathbf{e3i}$ است که نشان می‌دهد که سیستم حلقه باز پایدار است ولی بازهم یک جفت از قطب‌ها نزدیک به نیمه راست صفحه S است.

با توجه به ویژگی‌هایی که در بالا ذکر شد و با توجه به شکل‌های ۲ و ۳، می‌توان فهمید که سیستم نوسانی است و لزوم استفاده از یک کنترل کننده در سیستم محرز می‌شود.

چون که سیستم‌های قدرت همیشه در معرض اغتشاش و عدم قطعیت هستند و اگر مقادیر نامی پارامترهای سیستم بنا به هر دلیلی کمی تغییر کند، شاید سبب بروز ناپایداری در سیستم شود، پس به منظور محافظت از ریزشبکه و بارهای محلی اقدام به طراحی یک کنترل کننده با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها در سیستم، بر اساس تئوری خاریتانف که یکی از روش‌های کارآمد کنترل مقاوم است، می‌نماییم. نیاز به عملکرد کنترلی مقاوم از یک سو و عدم استفاده از این روش در مقالات و کارهای تحقیقاتی انجام شده از سوی دیگر، انگیزه انجام این تحقیق بوده است.

۳-۲- تئوری خاریتانف

تئوری خاریتانف با وجود سادگی، ابزار کارآمدی را برای بررسی پایداری و عملکرد مقاوم سیستم‌ها فراهم نموده است. نه تنها در مسائل آنالیز بلکه در سنتز و طراحی کنترل‌کننده‌های مقاوم نیز به خوبی می‌توان از آن استفاده نمود. به کارگیری این تئوری برای سیستم‌هایی که دارای نامعینی با ساختار پارامتری هستند موثر و حائز اهمیت است.

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]

در ادامه، توضیح مختصری از قضیه خاریتانف ذکر می‌شود. این تئوری به صورت کامل و همراه با تمامی جزئیات در مرجع [۱۷] آمده است.

تعریف ۱:

تابع تبدیل عمومی سیستم با نا معینی‌های پارامتری به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$P(s,q,r)=\frac{N(s,q)}{D(s,r)}=\frac{\sum_{i=0}^{m} q_i s^i}{\sum_{i=0}^{n} r_i s^i} \qquad (۷)$$

که برای آن مجموعه‌های مرزی نامعین معرفی می‌شوند:

$$\begin{aligned} Q &= \{q\in\mathbb{R}^m : q_i^- \le q_i \le q_i^+ ; i=1,2,3,\ldots,m\} \\ R &= \{r\in\mathbb{R}^n : r_i^- \le r_i \le r_i^+ ; i=1,2,3,\ldots,n\} \end{aligned} \qquad (۸)$$

علائم (+) و (-) در بالای پارامترها نمایانگر بیشترین و کم‌ترین مقدار هر پارامتر در بازه تغییرات مربوطه هستند. به این ترتیب خانواده‌ای از سیستم‌ها وجود دارند که می‌توان آن‌ها را با نماد P نشان داده و به این صورت تعریف نمود:

$$P=\{P(s,q,r): q\in Q, r\in R\} \qquad (۹)$$

تعریف ۲:

چند جمله‌ای $K(s,q,r)=\sum_{i=0}^{n} a_i(q,r)S^i$ مفروض است. این چند جمله‌ای دارای ساختار نامعینی چند خطی خواهد بود اگر $a_i(q,r)$ یک تابع از این چند خطی به ازای i=۰،۱،۲،۳,... باشد، بدین معنی که اگر تمامی مؤلفه‌های q و r به جز q_k و r_k ثابت نگه داشته شوند آن گاه $a_i(q,r)$ بر حسب q_k و r_k خطی باشد.

قضیه ۱:

خانواده چند جمله‌ای‌های P با ضرایب حقیقی به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند:

$$K(s)=c_0+c_1s+c_2s^2+c_3s^3+c_4s^4+\ldots \qquad (۱۰)$$

این خانواده به صورت مقاوم پایدار خواهد بود اگر و تنها اگر شرط پایداری روث- هرویتز برای چند جمله‌ای‌های (۱۱) صادق باشد. هرویتز بودن، یعنی بررسی این که یک سیستم در چه شرایطی ناپایدار می‌شود و اگر سیستم ناپایدار است چگونه می‌توان آن را پایدار کرد.

$$\begin{cases} K_1(s)=c_0^+ + c_1^+ s + c_2^- s^2 + c_3^- s^3 + \ldots \\ K_2(s)=c_0^- + c_1^- s + c_2^+ s^2 + c_3^+ s^3 + \ldots \\ K_3(s)=c_0^- + c_1^+ s + c_2^+ s^2 + c_3^- s^3 + \ldots \\ K_4(s)=c_0^+ + c_1^- s + c_2^- s^2 + c_3^+ s^3 + \ldots \end{cases} \qquad (۱۱)$$

بر اساس یک لم که در [۱۷, ۱۸] به آن اشاره شده است، برای چند جمله‌ای‌های با مرتبه پایین‌تر از ۵، صورت‌های ساده‌تری از صورت فوق وجود دارد. اگر مرتبه چند جمله‌ای برابر ۳ و $c_0^->0$ باشد شرط لازم و کافی برای پایداری مقاوم P آن است که چند جمله‌ای $k_4(s)$ پایدار باشد. این امر برای چند جمله‌ای‌های مرتبه ۴ به تست پایداری $k_2(s)$ و $k_4(s)$ و برای مرتبه ۵ به تست پایداری $k_1(s)$ و $k_3(s)$ و $k_4(s)$ محدود می‌شود.در تئوری خاریتانف، K(s) معادله مشخصه سیستم حلقه بسته بوده، پس با توجه به معادله (۶) که تابع تبدیل حلقه باز سیستم است، یک کنترل‌کننده PI که در معادله (۱۲) آمده است، در فیدبک گذاشته و ضرایب معادله مشخصه سیستم حلقه بسته به صورت استاندارد شده مطابق با معادله (۱۳) بدست خواهد آمد.

$$K(s)=-(K_p+\frac{K_i}{s}) \qquad (۱۲)$$

$$K_{closedloop}(s)=s^5+c_4s^4+c_3s^3+c_2s^2+c_1s+c_0 \qquad (۱۳)$$

که در آن :

$$\begin{cases} c_4=a_3 \\ c_3=a_2+b_2K_p \\ c_2=a_1+b_2K_i+b_1K_p \\ c_1=a_0+b_1K_i+b_0K_p \\ c_0=b_0K_i \end{cases} \qquad (۱۴)$$

a_iها و b_iها به ترتیب ضرایب صورت و مخرج تابع تبدیل حلقه باز بوده که در معادله (۵) بر اساس پارامترهای شبکه بیان شده‌اند و K_p و K_i نیز به ترتیب بهره تناسبی و بهره انتگرالی یک کنترل‌کننده PI می‌باشد. با توجه به معادله (۱۲) مشخص است که سیستم حلقه بسته از مرتبه ۵ بوده و بر اساس لمی که در بالا به آن اشاره شد، برای اعمال تئوری خاریتانف به سیستم، تنها کافی‌ست چند جمله‌ای‌های زیر را با مقادیر مناسب K_p و K_i هرویتز کرد:

$$\begin{cases} K_1(s)=c_0^+ + c_1^+ s + c_2^- s^2 + c_3^- s^3 + c_4^+ s^4 + c_5^+ s^5 \\ K_3(s)=c_0^- + c_1^+ s + c_2^+ s^2 + c_3^- s^3 + c_4^- s^4 + c_5^+ s^5 \\ K_4(s)=c_0^+ + c_1^- s + c_2^- s^2 + c_3^+ s^3 + c_4^+ s^4 + c_5^- s^5 \end{cases} \qquad (۱۵)$$

۳-۳- اعمال تئوری خاریتانف به سیستم

فرض می‌شود که با ٪۱۰± تغییرات در پارامترهای نامی سیستم که در جدول (۱) آمده است، ضرایب حلقه باز سیستم که در معادله (۵) آمده‌اند، طبق روابط زیر کران دار شوند :

(۱۶)

$$\begin{aligned} &[a_0^+, a_0^-]=[1.2155e+13, 9.9452e+12] \\ &[a_1^+, a_1^-]=[3.0545e+08, 2.4991e+08] \\ &[a_2^+, a_2^-]=[8.5682e+07, 7.0103e+07] \\ &[a_3^+, a_3^-]=[1.5863e+02, 1.2979e+02] \\ &[b_0^+, b_0^-]=[2.7081e+14, 2.2157e+14] \\ &[b_1^+, b_1^-]=[1.2113e+06, 9.9108e+05] \\ &[b_2^+, b_2^-]=[8.5559e+07, 7.0003e+07] \end{aligned}$$

معادله مشخصه استاندارد شده سیستم حلقه بسته و بسط داده شده ضرایب آن به ترتیب در معادلات (۱۳) و (۱۴) آورده شده است. همچنان که در بخش قبلی ذکر شد برای اعمال تئوری خاریتانف به سیستمی با معادله مشخصه از مرتبه ۵، کافی ست که چند جمله‌ای-هایی که در معادله (۱۵) آمده است هرویتز گردند. با توجه به اینکه، ضرایب معادله مشخصه سیستم حلقه بسته، ترکیبی از ضرایب حلقه باز

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol10- No.1 Spring & Summer 2013
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]

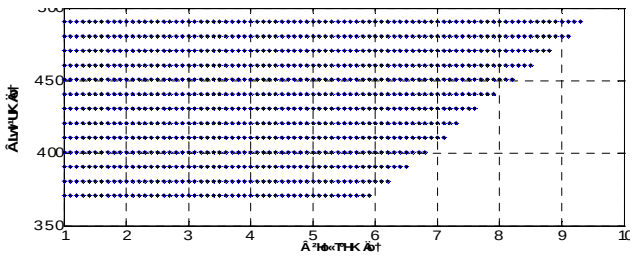
و ضرایب کنترل کننده می‌باشد پس حداکثر و حداقل این ضرایب برای نمونه به صورت روابط زیر خواهد بود.

$$\begin{cases} c^{+}_{3} = a^{+}_{2} + b^{+}_{2}Kp \\ c^{-}_{3} = a^{-}_{2} + b^{-}_{2}Kp \end{cases} \qquad (۱۷)$$

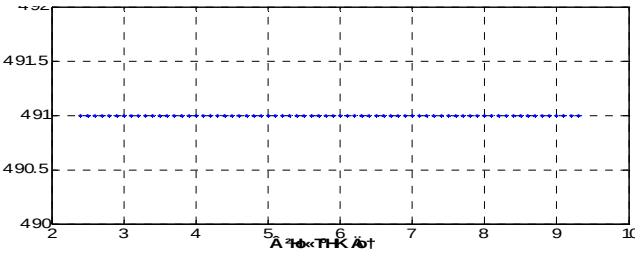
که حداکثر و حداقل ضرایب حلقه باز سیستم در روابط (۱۶) آورده شده‌اند. پس برای اعمال تئوری خاریتانف به این سیستم، بعد از یک سری عملیات جبری برای هرویتز کردن چند جمله‌ای‌هایی که در معادله (۱۵) آورده شده‌اند، ۹ عدد نامعادله حاصل خواهد شد که در قسمت ضمیمه، آمده‌اند. این نامعادلات بر اساس مقادیر مشخصی از K_p و K_i به صورت همزمان برآورده می‌شوند که این مقادیر، در شکل ۴ آورده شده است. این مقادیر بدست آمده همان مقادیر اولیه برای تنظیم کنترل کننده PI کلاسیک است که بر اساس تئوری خاریتانف بدست آمده‌اند.

همچنان که از شکل ۴ دیده می‌شود تعداد زوج‌های بی شماری از K_p و K_i بدست آمده که مسلماً یک سری از این مقادیر عملکرد مناسب‌تر و بهینه‌تری را در سیستم حاصل می‌نمایند، پس برای جدا سازی مقادیر مناسب K_p و K_i که به صورت خام از تئوری خاریتانف بدست آمده‌اند از روش مکملی دیگری با عنوان روش D-Stability استفاده می‌شود. اساس کار 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 K_p و K_i 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 $j\omega$ در صفحه S دورترین هستند. بالاخره کنترل‌کننده را در یکی از زوج‌های بدست آمده در شکل (۵) تنظیم می‌کنیم. مقادیر در نظر گرفته شده برای کنترل کننده PI مطابق مقادیر آورده شده در جدول (۲) خواهد بود.



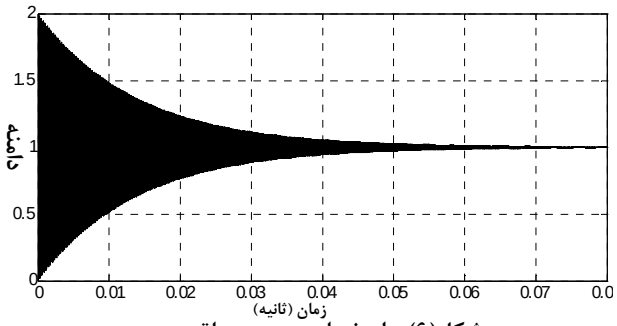
شکل (۴): مقادیر مناسب K_p و K_i برای هرویتز کردن معادلات (۱۱)



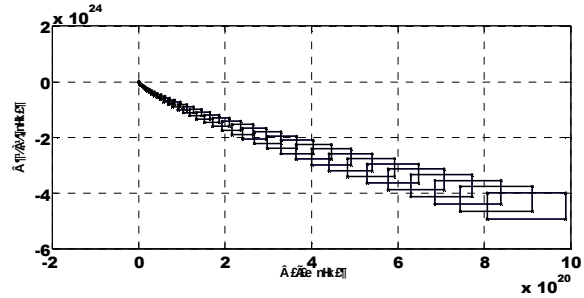
شکل (۵): مقادیر بهینه جدا شده از شکل (۴) توسط D-Stability

جدول (۲) : مقادیر طراحی شده برای کنترل کننده PI

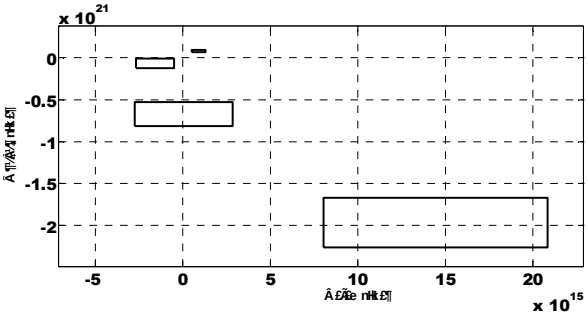
مقدار	پارامتر
۴۹۱	بهره تناسبی (K_p)
۴/۹	بهره انتگرالی (K_i)



شکل(۶): پاسخ پله سیستم حلقه بسته



(الف)



(ب)

شکل (۷): الف)حرکت چهار ضلعی‌های خاریتانف بازای $0<\omega<50Khz$
ب)یک نمای نزدیک حول صفر

با جایگذاری مقادیر بدست آمده برای کنترل‌کننده که در جدول (۲) آمده است، در معادله (۱۲) و بر اساس روابط (۵) و (۱۲) 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 خاریتانف، طراحی صورت گرفته زمانی درست خواهد بود که معیار عدم شمول صفر در چهار ضلعی‌های خاریتانف برآورده گردد. با تغییر فرکانس بین محدوده $0<\omega<50Khz$، چهار ضلعی‌های خاریتانف با رئوس زیر،

$$K_1(s), K_3(s), K_2(s), K_4(s), \quad s = j\omega \qquad (۱۸)$$

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]

مطابق شکل ۷ خواهد بود. آن چنانکه از شکل‌های ۷ الف و ب، معلوم است هیچ چهار ضلعی وجود ندارد که صفر در آن افتاده باشد؛ لذا چون شرط عدم شمول صفر در چهار ضلعی‌های خاریتانف رعایت شده است، طراحی صورت گرفته درست بوده است.

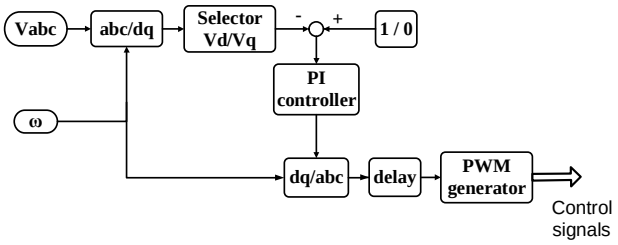
۳-۴- ساختار ارائه شده برای کنترل ولتاژ

در شکل ۸، ساختار در نظر گرفته شده برای کنترل ولتاژ نشان داده شده است. در این ساختار ابتدا ولتاژ سه فاز *PCC* در شکل ۱، v_{abc}، به مؤلفه‌های افقی (d) و عمودی (q) تجزیه می‌شوند سپس این مقادیر با مقادیر مرجع‌شان که به ترتیب یک و صفر می‌باشد، مقایسه می‌شوند. مقادیر خطا توسط یک کنترل‌کننده PI که در بخش قبلی در مقادیر جدول (۲) تنظیم شده است، حداقل می‌گردد. سپس دوباره مؤلفه‌های افقی و عمودی ولتاژ به فرم abc باز می‌گردند و با استفاده از یک بلوک تأخیری و یک بلوک تولیدکننده PWM، سیگنال‌های لازم برای کنترل VSC فراهم می‌شود. در زمینه معرفی روش‌های کنترلی برای تشخیص حالت جزیره‌ایی در مرجع [۱۹] ذکر شده است.

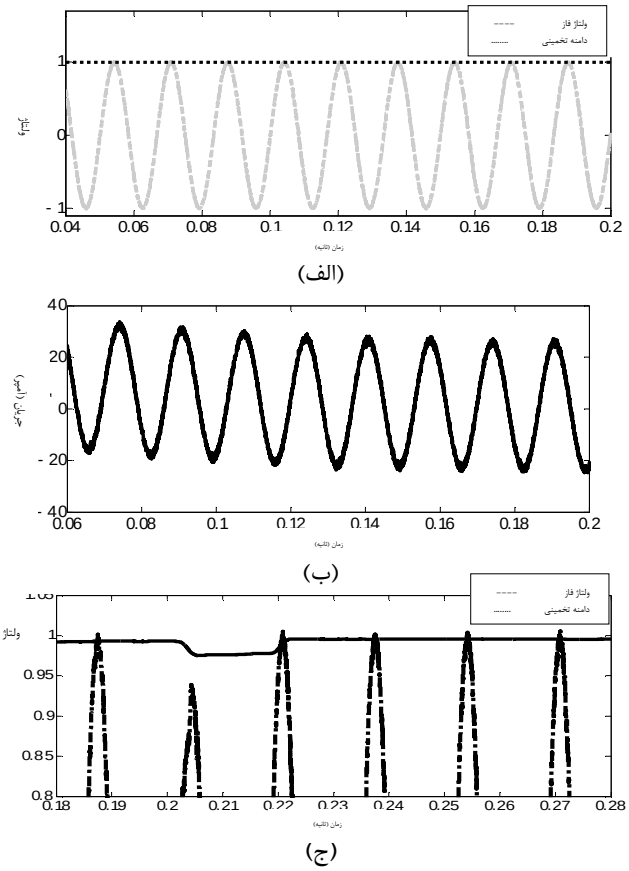
۴- ارزیابی عملکرد کنترل کننده ولتاژ

آن چنانکه در مرجع [۲۰] ذکر شده است، پایداری ولتاژ به توانایی سیستم قدرت در حفظ ولتاژ ماندگار در تمامی شینه‌ها متعاقب بروز یک اغتشاش از یک شرایط کار مشخص اطلاق می‌گردد. پس برای بررسی پایداری ولتاژ در سیستم شکل ۱، یک سری شبیه‌سازی انجام داده و بر مبنای نتایج حاصل در خصوص عملکرد روش کنترلی پیشنهادی می‌توان قضاوت نمود.

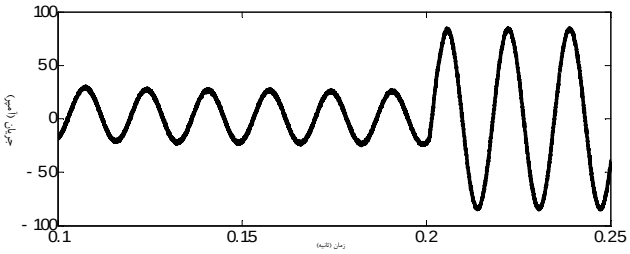
ریزشبکه و شبکه اصلی قدرت یک بار ۱/۴۳ MW را به صورت مشترک تغذیه می‌کنند و یک بار ۷۱۰ KVAR نیز به شبکه اصلی متصل است. قبل از بروز هر گونه اغتشاشی در سیستم، منحنی‌های ولتاژ و جریان گره PCC به صورت شکل‌های الف-۹ و ب-۹ خواهد بود. در زمان ۰/۲ ثانیه یک اغتشاش در سیستم رخ داده و سبب عمل کردن مدارشکن می‌شود. ریزشبکه به حالت جزیره‌ایی سوئیچ می‌کند. نحوه تغییرات ولتاژ و جریان گره PCC در شکل‌های ج-۹ (بزرگ شده) و د-۹ نشان داده شده است، که نشان می‌دهد که سیستم در کمتر از ۰/۰۲ ثانیه (یک سیکل) حالت جزیره ایی را تشخیص داده و خود را کنترل می‌کند که نسبت به مرجع اصلی یعنی [۱۴, ۱۵]، این امر در مدت زمان کوتاه‌تری رخ داده است. در شکل د-۹، آنچنان که دیده می‌شود جریان در ۰/۲ ثانیه از حدود ۲۰ آمپر به ۸۰ آمپر افزایش یافته است. پس 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 عبور کننده از VSC به مقدار نامی و خطرناک نرسیده است. بحث دیگری که در رابطه با منحنی جریان باید در نظر گرفت این است که در لحظه‌های اولیه رخداد خطا، از افزایش بی رویه جریان جلوگیری شده است. که این مسئله در مدارهایی که مبدل منبع ولتاژ در آن‌ها وجود دارد بسیار حائز اهمیت است. منحنی و-۹ سهم شبکه اصلی در تامین بار قبل از رخداد اغتشاش را نشان می‌دهد. شکل نشان می‌دهد که سهم شبکه اصلی بیشتر بوده و استراتژی کنترلی توانسته این سهم زیاد را به خوبی بعد از جزیره‌ایی شدن کنترل کند. شکل ی-۹ نحوه تغییرات توان اکتیو و راکتیو را در ریزشبکه شکل ۱ نشان می‌دهد. قبل از بروز اغتشاش توان‌های اکتیو و راکتیو بین ریزشبکه و شبکه اصلی تقسیم می‌شود اما بعد از رخداد خطا و سوئیچ کردن ریزشبکه به حالت کاری جزیره ایی، ریزشبکه بایستی بارهای محلی خود را به تنهایی تغذیه کند. این امر در شکل هـ-۹ نشان داده شده است. 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 مرجع شان که به ترتیب یک و صفر است تثبیت شوند. نحوه تغیرات این مؤلفه‌ها بعد از رخداد خطا در شکل هـ-۹ نشان داده شده است.



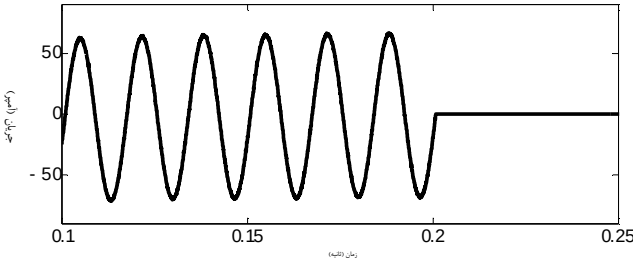
شکل (۸): ساختار کنترلی ارائه شده برای کنترل ولتاژ



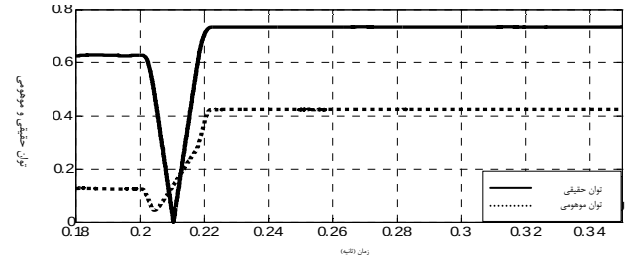
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol10- No.1 Spring & Summer 2013
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]



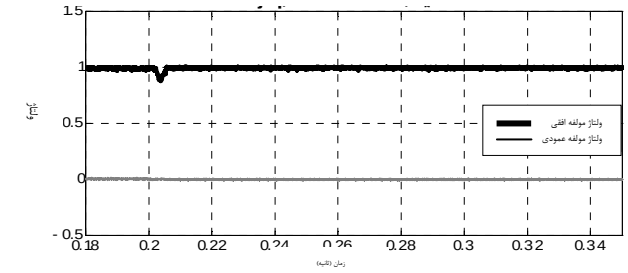
(د)



(و)

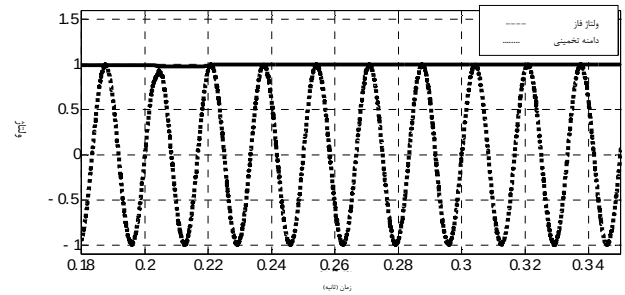


(ی)

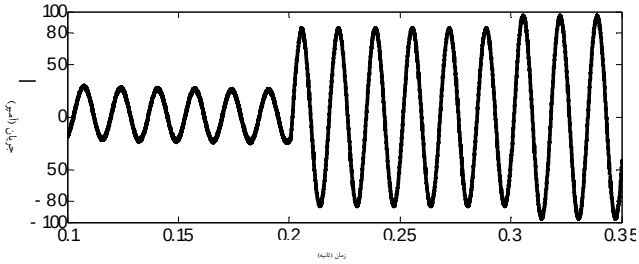


(هـ)

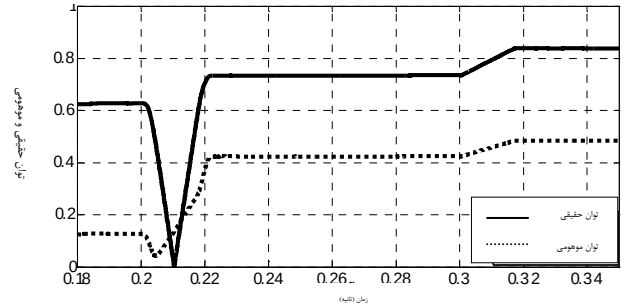
شکل (۹): الف) ولتاژ PCC قبل از رخداد خطا، ب) جریان PCC قبل از رخداد خطا، ج) ولتاژ PCC بعد از رخداد خطا در زمان 0.2 ثانیه (به صورت بزرگ شده)، د) جریان PCC بعد از رخداد خطا و افزایش جریان در زمان 0.2 ثانیه، و) سهم شبکه اصلی در تأمین جریان بار قبل و بعد از رخداد خطا، ی) نحوه تغییرات توان اکتیو و راکتیو در ریزشبکه قبل و بعد از رخداد خطا، هـ)تغییرات مؤلفه‌های ولتاژی.



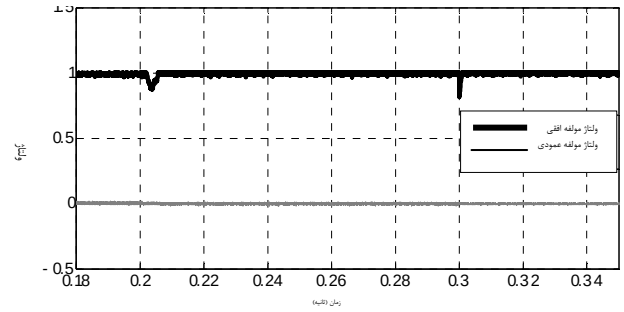
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل (۱۰): الف)منحنی تغییرات ولتاژ پس از یک تغییر پله ایی KW ۲۰۰ 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

با توجه به نتایج حاصله از حالت جزیره‌ایی شدن، می‌توان گفت که ریزشبکه می‌تواند این مد کاری را به شکل مناسبی کنترل کند. اما همان‌طور که در ابتدای این مقاله ذکر شد، این سیستم‌ها همواره با اغتشاشات و عدم قطعیت‌هایی نیز روبرو هستند، پس برای شبیه‌سازی و لحاظ کردن این عدم قطعیت‌ها در سیستم، یک بار پله‌ایی به اندازه KW ۲۰۰ در زمان ۰/۳ ثانیه به سیستم اعمال کرده و نتایج در شکل‌های ۱۰(الف-د) مشاهده شده است. در شکل الف-۱۰ منحنی

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.10- No.1 Spring & Summer 2013

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]

ولتاژ آورده شده است که معلوم است که به صورت آنی کنترل شده است و در شکل ب- ۱۰ منحنی جریان آمده، که مقدار کمی به دامنه جریان در زمان ۰/۳ ثانیه برای کنترل ولتاژ افزوده شده 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.

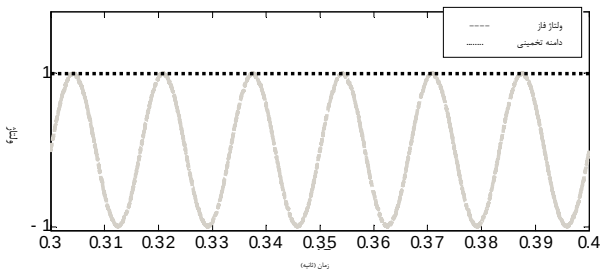
در سناریوی قبلی، تغییرات بار به عنوان عدم قطعیت سیستم در نظر گرفته شد و اثرات آن بروی پروفایل ولتاژ و جریان مشاهده گردید. در سناریوی بعدی تغییراتی در دیگر پارامترهای اساسی سیستم اعمال می‌شود. بر اساس جدول (۳)، تغییرات در ریزشبکه، در حالت کاری جزیره ایی، اعمال می‌شود و پروفایل ولتاژ و جریان ریزشبکه در شکل ۱۱ قابل مشاهده است. همان‌طور که دیده می‌شود، سیستم کنترلی توانسته است در این مورد نیز ریزشبکه را به شکل مناسبی پایدار کند.

۵- نتیجه گیری

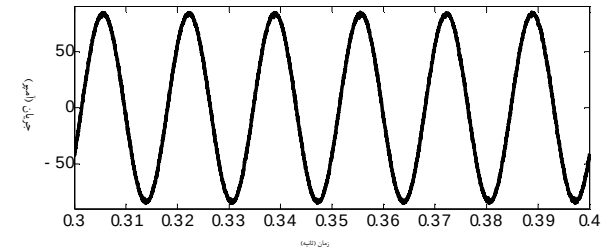
در این مقاله، ابتدا توصیف مختصری از ریزشبکه و دلایل به وجود آمدن آن در سیستم‌های قدرت مدرن مطرح گردید. سپس با توجه دینامیک سیستم، به ویژگی‌های آن اشاره و لزوم استفاده از یک کنترل کننده مقاوم مشخص شد. کنترل کننده پیشنهادی بر اساس یکی از تئوری‌های کنترل مقاوم، یعنی تئوری خاریتانف، به صورت ابتدایی برای کنترل ولتاژ تنظیم گردید سپس با استفاده از یک الگوریتم تکاملی، D-Stability، کنترل‌کننده مورد نظر به صورت بهینه تنظیم شد. مزیت عمده این روش سادگی طراحی آن است. عملکرد کنترل-کننده و ریزشبکه در حالت قطع از شبکه اصلی و در حالت بروز تغیرات پله‌ایی بار، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله از شبیه‌سازی‌ها، مقاوم بودن و عملکرد بسیار مناسب کنترل‌کننده پیشنهادی را به روشنی تایید می‌کند.

جدول (۳) : نحوه تغیرات پارامترهای ریزشبکه

پارامتر	مقدار تغییر
V_{DC}	- 10%
R_t	+ 15%
L_t	−15%



(الف)



(ب)

شکل (۱۱): الف) ولتاژ PCC ناشی از اعمال تغییرات جدول (۳)، ب) جریان ریزشبکه

مراجع

[۱] C. Chowdhury, S. P. Chowdhury, and P. Crossley, Microgrids and Active Distribution Networks: The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, 2009.

[۲] M. Barnes, J. Kondoh, H. Asano, J. Oyarzabal, G. Ventakaramanan, R. Lasseter ,N. Hatziargyriou, and T. Green, "Real-World MicroGrids-An Overview," System of Systems Engineering, pp. 1-8, 16-18 April 2007.

[۳] H. Jiayi, J. Chuanwen, and X. Rong, "A review on distributed energy resources and MicroGrid," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 12, pp. 2472-2483, 2008.

[۴] IEEE, "IEEE Std 1547-2003," in IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems, ed, 2003, pp. 1-16.

[۵] R. H. Lasseter, J. H. Eto, B. Schenkman, J. Stevens, H. Vollkommer ,D. Klapp, E. Linton, H. Hurtado, and J. Roy, "CERTS Microgrid Laboratory Test Bed," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, pp. 325-332, Jan.2011.

[۶] مهدی معلم، امیر فرخ پیام، حسین شیروانی، محمد کیوانفرد و بهزاد میرزائیان دهکردی, "یک روش کارآمد برای تخمین حالت مولفه اصلی و هارمونیکی در شبکه های توزیع شعاعی," مجله انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران، سال هفتم، شماره اول، بهار و تابستان ۸۹.

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers Vol10- No.1 Spring & Summer 2013
[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]

[۷] J. A. P. Lopes, C. L. Moreira, and A. G. Madureira, "Defining control strategies for MicroGrids islanded operation," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 21, pp. 916- 924, May.2006.

[۸] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. de Vicuna, and M. Castilla, "Hierarchical Control of Droop-Controlled AC and DC Microgrids—A General Approach Toward Standardization," Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol. 58, pp. 158-172, 2011.

[۹] B. Awad, J. Wu, and N. Jenkins, "Control of distributed generation," e & i Elektrotechnik und Informationstechnik, vol. 125, pp. 409-414, 2008.

[۱۰] M. C. Chandorkar, D. M. Divan, and R. Adapa, "Control of parallel connected inverters in standalone AC supply systems," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 29, pp. 136-143, Jan/Feb1993.

[۱۱] K. S. Charles and W. L. Peter, "Control and Power Management of Converter Fed Microgrids," IEEE Transactions on power systems, vol. 23, AUGUST 2008

[۱۲] Y. Chung, W. Liu, D. A. Cartes, E. G. Collins, and S. Moon, "Control Methods of Inverter-Interfaced Distributed Generators in a Microgrid System," IEEE Transactions on industry applications, vol. 46 ,MAY/JUNE 2010.

[۱۳] J. Peças Lopes, A. Moreira, and A. G. Madureira, "Defining Control Strategies for MicroGrids Islanded Operation," IEEE Transactions on power systems, vol. 21, pp. 919-920, MAY 2006.

[۱۴] H. Karimi, E. J. Davison, and R. Iravani, "Multivariable Servomechanism Controller for Autonomous Operation of a Distributed Generation Unit: Design and Performance Evaluation," IEEE Transactions on power system, vol. 25, MAY.2010.

[۱۵] H. Karimi, H. Nikkhajoei, and R. Iravani, "Control of an Electronically-Coupled Distributed Resource Unit Subsequent to an Islanding Event," IEEE Transactions on power delivery, vol. 23, JANUARY 2008.

[۱۶] M. Oshiro, K. Tanaka, T. Senjyu, S. Toma, A. Yona, A. Y. Saber, T. Funabashi, and C.-H. Kim, "Optimal voltage control in distribution systems using PV generators," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 33, pp. 485-492, 2011.

[۱۷] B. R. Barmish, New Tools for Robustness of Linear Systems: Macmillian, 1994.

[۱۸] H. Bevrani, P. Babahajyani ,F. Habibi, and T. Hiyama, "Robust Control Design and Implementation for a Quadratic Buck Converter," 2010 International Power Electronics Conference, pp. 99-103, 2010.

[۱۹] حسان واحدی، رضا نوروزیان، ابوالفضل جلیلوند و گئورگ قره پتیان، "ارائه روشی نوین برای بهره برداری و تشخیص حالت جزیره ای تولیدات پراکنده مبتنی بر اینورتر،" مجله انجمن برق و الکترونیک ایران، سال هشتم، شماره دوم. ۱۳۹۰.

[۲۰] P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, D. Hill, J., A. Stankovic, C. Taylor, T. Van Cutsem, and V. Vittal, "Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions," Power Systems, IEEE Transactions on, vol. 19(3), pp. 1387-1401, Aug. 2004.

پیوست

نامعادلات حاصل از محاسبه هرویتز کردن مجموعه معادلات (۱۵)، به شرح زیر لیست شده است:

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

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

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

زیرنویس‌ها

[1] Distributed Generation
[2] Microgrid
[3] Voltage Source Converter
[4] Voltage Source Inverter
[5] Circuit Breaker
[6] Point of Common Coupling
[7] Direct-Quadrature

[Downloaded from jiaeee.com on 2026-07-05]