

کنترل همراه با تشخیص خطا در ریزشبکه‌های DC با استفاده از رویتگر - کنترلگر SDRE

یزدان باتمانی^۱ مهران تخت آبنوس^۲

۱- استادیار- گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، ایران

y.batmany@uok.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد- گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه کردستان، ایران

mehran.abnus@gmail.com

چکیده: در این مقاله، با استفاده از روش معادله ریگاتی وابسته به حالت (SDRE)، رویتگر-کنترلگر زیربهبینه‌ای برای یک ریزشبکه DC منفصل از شبکه طراحی می‌شود. اهداف مورد نظر، کنترل ولتاژهای خروجی سلول خورشیدی، باتری، بانک خازنی و باس بار DC و امکان تشخیص به موقع خطاهای احتمالی می‌باشند. در فرایند طراحی رویتگر-کنترلگر SDRE، از یک مدل غیرخطی برای مدل-سازی رفتار دینامیکی ریزشبکه در شرایط کاری مختلف استفاده می‌شود. عملکرد ریزشبکه مورد مطالعه در حضور عدم قطعیت در پارامترهای سیستم و نویز اندازه‌گیری مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، حاکی از توانایی بالای روش پیشنهادی در تشخیص به موقع خطا، عدم تشخیص اغتشاش به عنوان خطا و همچنین عملکرد موثر و مقاوم کنترلگر پیشنهادی حتی در حضور اغتشاشات وارده به سیستم است.

کلمات کلیدی: ریزشبکه، رویتگر SDRE، کنترلگر SDRE، تشخیص خطا

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۹۶/۰۹/۲۴

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۷/۰۴/۳۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۰۷

نام نویسنده‌ی مسئول: یزدان باتمانی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - سنندج - دانشگاه کردستان - دانشکده مهندسی

گونه‌ای است که خروجی واقعی سیستم با خروجی نامی آن که بر اساس یک مدل ریاضی محاسبه شده است مقایسه می‌شود و در صورت اختلاف این دو، جریان مانده غیر صفری تشکیل خواهد شد که با توجه به آن امکان تشخیص خطا فراهم می‌شود.

روش طراحی معادلات ریکاتی وابسته به حالت (SDRE) برای اولین بار توسط پیرسون^۲ در سال ۱۹۶۲ به منظور حل تقریبی مساله کنترل بهینه برای سیستم‌های غیرخطی پیشنهاد شد [۱۳]. نمایش یک سیستم غیرخطی به صورت یک سیستم خطی وابسته به حالت که شبه‌خطی‌سازی (SDC^۳) نامیده می‌شود [۱۴]، ایده اصلی این روش است. پس از آن، روش‌های بسیاری بر اساس شبه‌خطی‌سازی برای حل مسائل مختلف مانند طراحی فیلتر H_{∞} مقاوم [۱۵]، طراحی کنترل-کننده مد لغزشی زیربهینه برای سیستم‌های تاخیردار [۱۶]، طراحی رویکر برای سیستم‌های غیرخطی تاخیردار [۱۷] و ... توسعه داده شده‌اند. این روش‌ها به طور موثری در زمینه‌های کاربردی بسیاری به کار گرفته شده‌اند [۱۸-۱۹]. از جمله ویژگی‌های بسیار جذاب این روش‌ها آن است که طراح می‌تواند توسط تنظیم توابع وزنی، عملکرد سیستم را به صورت پیش‌بینی‌شده‌ای تحت تأثیر قرار دهد. به عنوان مثال، جهت سرعت بخشیدن به پاسخ می‌توان تابع وزنی مربوط به حالت‌های سیستم را افزایش داد که منجر به افزایش تلاش کنترلی نیز خواهد شد. درعین حال، طراح به دلیل وجود بی‌شمار نمایش SDC برای سیستم غیرخطی، دارای درجه آزادی بیشتری بوده که می‌تواند آن را به منظور بهبود عملکرد کلی سیستم مورد استفاده قرار دهد. از سوی دیگر روش SDRE خصوصیات غیرخطی سیستم را حفظ می‌کند که از نقطه نظر عملی به ویژه زمانی که دینامیک سیستم پیچیده باشد، بسیار حائز اهمیت است. در [۱۴-۱۳] به مروری بر روش SDRE و نظریه‌های مرتبط با آن پرداخته شده است.

در این مقاله، با توجه به ویژگی‌های جذاب رویکرها و کنترلگرهای SDRE و وجود عوامل غیرخطی در دینامیک ریزشبه‌های DC، روشی جدید جهت تشخیص خطا و کنترل این ریزشبه‌ها بر مبنای رویکر-کنترلگر غیرخطی SDRE پیشنهاد می‌شود. چنانچه برخلاف حفاظت‌های رایج که بدان اشاره شد، نیاز به یک سیستم حفاظت تطبیقی همانند رله اضافه جریان که باید با تغییرات شبکه وفق پیدا کند نیست. این روش جهت تشخیص خطا، دارای سرعت و دقت مناسبی بوده و می‌تواند خطاهای کوچک سیستم را نیز تشخیص داده و در مقابل اغتشاش و نویز نیز مقاوم باشد.

سایر بخش‌های این مقاله به صورت زیر سازمان‌دهی شده‌اند. بخش دوم به معرفی سیستم شامل قسمت‌های مختلف ریزشبه و مدل فضای حالت آن می‌پردازد. بخش سوم به بررسی رویکر و کنترلگر SDRE و گام‌های لازم جهت طراحی و نظریه‌های پایداری آن اختصاص دارد. در بخش چهارم، نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام‌شده در محیط نرم‌افزار MATLAB همراه با تحلیل آن‌ها ارائه

به دلیل کاهش سوخت‌های فسیلی و مسائل زیست محیطی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در سیستم‌های قدرت به سرعت در حال افزایش می‌باشند. وجود منابع تولید پراکنده در شبکه می‌تواند بر روی ولتاژ و توان جاری شده شبکه تأثیرگذار باشد و بر روی پارامترهای عملکردی سیستم تأثیرات مثبت یا منفی داشته باشند. از جمله مزایای مثبت یک ریزشبه، می‌توان به افزایش قابلیت اطمینان، بهبود کیفیت توان، بهبود پروفیل ولتاژ، کاهش تلفات و ... اشاره نمود [۲-۱].

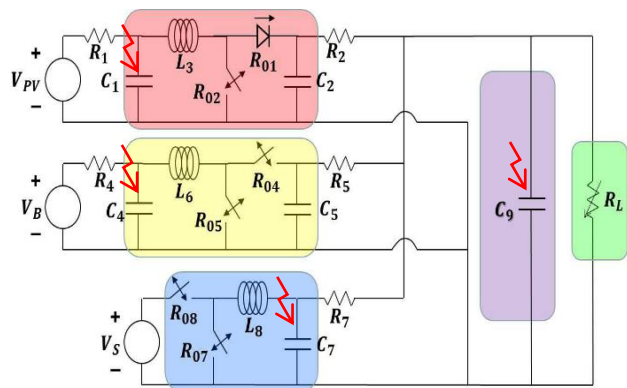
ریزشبه‌ها با وجود مزایایی که دارند، در هنگام پیاده‌سازی هنوز دارای مشکلاتی از جمله حفاظت و حفظ پایداری داخلی ریزشبه در حضور خطا و تغییرات توان تولیدی می‌باشند. ریزشبه‌های DC که به صورت جریان مستقیم مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند، به نسبت ریزشبه‌های AC به هنگام تشخیص خطا با چالش‌های بیشتری همراه هستند. از جمله دلایل این موضوع می‌توان به بالا بودن جریان عبوری در هنگام خطا، هزینه بالای تجهیزات جهت قطع این جریان بالا و ... اشاره نمود [۳]. در مطالعات اخیر، روش‌هایی جهت تشخیص خطا در ریزشبه‌های DC ارائه شده است. یکی از این روش‌ها، استفاده از حفاظت دیفرانسیلی است که وابسته به ارتباط دو سر خط می‌باشد [۴-۳]. در این روش، ولتاژ و جریان ابتدا و انتهای خط را سنجیده و در صورت اختلاف این دو خطای سیستم را تشخیص داده و ناحیه خطا را ایزوله می‌نماید. مهم‌ترین عیب این روش پایین بودن ضریب اطمینان سیستم حفاظتی است. یکی دیگر از حفاظت‌های موجود، حفاظت اضافه جریان است [۶-۵]. عملکرد این رله به گونه‌ای است که باید جریان زیادی تا حد آستانه تحریک رله از سیستم عبور کرده تا رله تشخیص خطا داده و فرمان قطع را صادر نماید. عبور چنین جریان زیادی حتی در مدت زمان کوتاه نیز می‌تواند مشکل‌ساز باشد. مرجع [۷] استفاده از رله ریزپردازنده جهت تشخیص خطا را در ریزشبه‌های ولتاژ پایین پیشنهاد کرده است. در آخر چند روش حفاظت وابسته به ارتباطات بین نواحی تحت پوشش نیز برای شبکه‌های توزیع با نفوذ بالای توربین‌های بادی متصل به شبکه پیشنهاد شده است [۹-۸].

روش‌های مبتنی بر رویکر می‌توانند جهت تشخیص خطا در ریزشبه‌ها به صورت مدون به کار گرفته شوند. مرجع [۱۰] استفاده از رویکر خطی جهت حفاظت از خط انتقال، در یک ریزشبه AC را مورد ارزیابی قرار داده است. از جمله مزایا و معایب این روش به ترتیب می‌توان به تشخیص سریع خطا و مقاوم نبودن رویکر در برابر اغتشاش اشاره نمود. مرجع [۱۱] به بررسی استفاده از رویکر خطی جهت حفاظت از خط و ترانسفورماتور با استفاده از حداقل حسگر اندازه‌گیری پرداخته است. مرجع [۱۲] نیز از رویکر غیرخطی مبتنی به معادله ریکاتی وابسته به حالت (SDRE^۱) جهت تشخیص خطا در توربین‌های بادی استفاده کرده است. نتایج به دست آمده از مراجع [۱۰-۱۲] حاکی از توانمندی استفاده از رویکرهای خطی و غیرخطی جهت تشخیص خطا در ریزشبه‌ها می‌باشد. نحوه کارکرد این روش‌ها به

می‌شود. در انتها، بخش پنجم به نتیجه‌گیری مقاله اختصاص داده می‌شود.

۲- معرفی ریزشبه

شکل (۱) ساختار ریزشبه DC منفصل از شبکه را نشان می‌دهد. در این شکل، نقاطی که خطا در آن به وجود آمده مشخص شده‌اند. این ریزشبه شامل یک سلول خورشیدی، باتری، بانک خازنی و یک بار اهمی متغیر جهت شبیه‌سازی می‌باشد. طرح مدیریتی این ریزشبه بدین صورت است که توان تولیدی سلول خورشیدی که در طول روز به صورت متناوب تغییر پیدا می‌کنند بار مصرفی را تأمین نماید. در صورتی که ذخیره‌سازها خالی باشند، مقداری از توان تولیدی ریزشبه صرف شارژ شدن ذخیره‌سازها می‌گردد. اما چنانچه توان تولیدی سلول خورشیدی کمتر از توان مصرفی باشد، ذخیره‌سازها شروع به خالی شدن می‌نمایند و در نتیجه ولتاژ ریزشبه ثابت باقی می‌ماند. لازم به ذکر است که در این ریزشبه، خازن C_9 به منظور کم کردن ریپل ولتاژ خروجی مورد استفاده قرار گرفته است. در ادامه به شرح مختصری از قسمت‌های مختلف ریزشبه DC خواهیم پرداخت. سپس به بررسی مدل ریاضی ریزشبه مورد مطالعه می‌پردازیم.



شکل (۱): ریزشبه مورد مطالعه [۲۰]

۲-۱- سلول خورشیدی

همان طور که از شکل (۱) مشاهده می‌گردد، سلول خورشیدی با استفاده از یک مبدل DC/DC به باس بار DC متصل شده است. متغیرهای اندازه‌گیری شده V_{C_1} و V_{C_2} هستند که به ترتیب جریان سلف L_3 ، ولتاژ C_1 و ولتاژ C_2 می‌باشند. ورودی کنترل $0 \leq u_1 \leq 1$ دوره کاری مبدل مورد استفاده می‌باشد.

۲-۲- باتری

باتری نیز به وسیله مبدل DC/DC به باس بار ریزشبه متصل شده است. در این مدل متغیرهای اندازه‌گیری شده V_{C_4} و V_{C_5} هستند که به ترتیب جریان سلف L_6 ، ولتاژ C_4 و ولتاژ C_5 می‌باشند. ورودی کنترل $0 \leq u_2 \leq 1$ نیز دوره کاری مبدل نظیر خود می‌باشد.

۲-۳- بانک خازنی

بانک خازنی نیز توسط یک مبدل DC/DC به باس بار متصل شده است. متغیرهای اندازه‌گیری شده I_{L_8} و V_{C_7} هستند که به ترتیب جریان سلف L_8 و ولتاژ C_7 می‌باشند. ورودی کنترل $0 \leq u_3 \leq 1$ دوره کاری مبدل مربوط به بانک خازنی می‌باشد.

۲-۴- مدل ریزشبه مورد مطالعه

با تعریف متغیرهای حالت $x_1 = V_{C_1}$ ، $x_2 = V_{C_2}$ ، $x_3 = I_{L_3}$ ، $x_4 = V_{C_4}$ ، $x_5 = V_{C_5}$ ، $x_6 = I_{L_6}$ ، $x_7 = V_{C_7}$ ، $x_8 = I_{L_8}$ و $x_9 = V_{C_9}$ نمایش حالت ریزشبه مورد مطالعه به صورت زیر می‌باشد [۲۰].

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -\frac{1}{R_1 C_1} x_1 - \frac{1}{C_1} x_3 + \frac{1}{R_1 C_1} V_{PV} \\ \dot{x}_2 &= -\frac{1}{R_2 C_2} x_2 + \frac{1}{C_2} x_3 - \frac{1}{C_2} u_1 x_3 + \frac{1}{R_2 C_2} x_9 \\ \dot{x}_3 &= \frac{1}{L_3} (x_1 - x_2 - R_{01} x_3) + \frac{1}{L_3} (x_2 + (R_{01} - R_{02})) u_1 \\ \dot{x}_4 &= -\frac{1}{R_4 C_4} x_4 - \frac{1}{C_4} x_6 - \frac{1}{R_4 C_4} V_B \\ \dot{x}_5 &= -\frac{1}{R_5 C_5} x_5 - \frac{1}{C_5} x_6 + \frac{1}{C_5} u_2 x_5 + \frac{1}{R_5 C_5} x_9 \\ \dot{x}_6 &= \frac{1}{L_6} (x_4 - x_5 - R_{04} x_6 + u_2 x_5) \\ \dot{x}_7 &= -\frac{1}{R_7 C_7} x_7 + \frac{1}{C_7} x_8 + \frac{1}{R_7 C_7} x_9 \\ \dot{x}_8 &= \frac{1}{L_8} (V_S u_3 - R_{08} x_8 - x_7) \\ \dot{x}_9 &= \frac{1}{C_9} \left(\frac{x_2 - x_9}{R_2} + \frac{x_5 - x_9}{R_5} + \frac{x_7 - x_9}{R_7} - \frac{x_9}{R_L} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

پارامترهای این مدل در جدول (۱) آورده شده است [۲۰]. لازم به ذکر است معادله (۱) معرف یک سیستم غیرخطی می‌باشد که دلیل آن وجود عوامل ضربی $u_2 x_5$ و $u_1 x_3$ در این معادله می‌باشد.

جدول (۱): پارامترهای ریزشبه مورد مطالعه

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
C_1	0.1 F	L_3	0.033 H
C_2	0.01 F	L_6	0.033 H
C_4	0.1 F	L_8	0.0033 H
C_5	0.01 F	R_2	0.1 Ω
C_7	0.01 F	R_4	0.1 Ω
C_9	0.0001 F	R_5	0.01 Ω
R_1	0.1 Ω	R_{04}	0.01 Ω
R_7	0.1 Ω	R_{05}	0.01 Ω
R_{01}	0.01 Ω	R_{07}	0.01 Ω
R_{02}	0.01 Ω	R_{08}	0.01 Ω
V_{bus}	1000 V		

۳- کنترلرگر-رویتگر زیر بهینه غیر خطی SDRE

در این بخش، به بررسی مختصر روند طراحی کنترلرگر و رویتگر غیرخطی SDRE می‌پردازیم.

۳-۱- کنترلرگر SDRE

سیستم غیرخطی زیر را در نظر بگیرید:

$$\dot{x}(t) = f(x(t)) + Bu(t), x(0) = x_0 \quad (2)$$

که در آن $x(t) \in R^n$ بردار حالت، $u(t) \in R^m$ ورودی کنترل و x_0 شرایط اولیه می‌باشد. ایده اصلی مورد استفاده در روش SDRE، نمایش این سیستم غیرخطی به شکل شبه خطی است [۱۱]. به این صورت که یک فاکتورگیری به صورت $f(x(t)) = A(x(t))x(t)$ انجام می‌شود، که در آن $A(x(t)): R^n \rightarrow R^{n \times n}$ یک ماتریس وابسته به حالت می‌باشد. نکته قابل توجه در این فاکتورگیری وجود بی‌شمار امکان برای تجزیه $f(x(t))$ به صورت ضربی از $x(t)$ است. برای نمونه چنانچه تابع $f(x(t))$ به صورت $f(x(t)) = A_1(x(t))x(t)$ و $f(x(t)) = A_2(x(t))x(t)$ باشد، آنگاه هر ترکیب خطی دیگری از $A_1(x(t))$ و $A_2(x(t))$ نیز یک ساختار شبه خطی دیگر را به صورت $A(x(t)) = \alpha(x(t))A_1(x(t)) + (1 - \alpha(x(t)))A_2(x(t))$ تشکیل می‌دهند، که در آن $\alpha(x(t))$ تابعی معلوم از $x(t)$ است. این موضوع خود یکی از مزیت‌های روش SDRE بوده که درجه آزادی بیشتری را در اختیار طراح قرار می‌دهد. در طراحی یک پایدارساز بهینه، هدف یافتن قانون کنترلی است که با استفاده از آن بتوان حالات سیستم را به نقطه تعادل دلخواه رساند و یک تابع هزینه از پیش تعیین شده نیز کمینه شود. در روش SDRE، این تابع هزینه به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود [۱۲]:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T(t)Q(x(t))x(t) + u^T(t)R(x(t))u(t)) dt \quad (3)$$

که در آن $Q(x(t))$ و $R(x(t))$ ماتریس‌های وزنی وابسته حالت هستند و به ترتیب به صورت نقطه‌ای مثبت معین و مثبت نیمه معین می‌باشند. حل مسئله کنترل بهینه توصیف شده با (۲) و (۳) نیاز به یافتن جواب معادله هامیلتون-ژاکوبی-بلمن (HJB) مربوط را دارد. از طرفی این معادله HJB در حالت کلی بسیار پیچیده می‌باشد. در روش SDRE، نشان داده شده است که می‌توان از قانون کنترل تقریبی این مسئله کنترل بهینه استفاده کرد که در آن ماتریس $P(x(t))$ ، حل مثبت معین یکتای معادله وابسته به حالت زیر است.

$$A^T(x(t))P(x(t)) + P(x(t))A(x(t)) - P(x(t))B(x(t))R^{-1}(x(t))B^T(x(t))P(x(t)) + Q(x(t)) = 0 \quad (4)$$

نکته بسیار مهم آن است که معادله (۴) دارای حل یکتای مثبت معین متقارن است اگر و تنها اگر زوج‌های $(A(x(t)), B(x(t)))$ و

$(A(x(t)), Q^{1/2}(x(t)))$ به ترتیب پایدارپذیر نقطه به نقطه و آشکارپذیر نقطه به نقطه باشند [۱۲].

در [۱۲] نشان داده شده است که تعادل واقع در مبدا سیستم حلقه بسته ناشی از کنترل کننده SDRE به صورت محلی پایدار مجانبی است.

نکات مهم ۱: گرچه روش‌هایی جهت انتخاب مدون ماتریس

$A(x(t))$ وجود دارند [۱۲]، اما از میان بی‌شمار نمایش SDC ممکن، فقط یکی از آن‌ها منجر به عملکرد بهینه سیستم حلقه بسته خواهد شد که البته یافتن آن کار بسیار دشواری است. در نتیجه قید مورد نظر جهت انتخاب $A(x(t))$ آن است که در رابطه $f(x(t)) = A(x(t))x(t)$ برقرار باشد.

۳-۲- رویتگر SDRE

سیستم غیرخطی زیر را در نظر بگیرید.

$$\dot{x} = f(x), y = h(x) \quad (5)$$

که در آن $x \in R^n$ بردار حالت سیستم و $y \in R^m$ خروجی سیستم است. مسئله کنترلی مد نظر یافتن تخمین بردار حالت x می‌باشد. اگر تخمین \hat{x} را \hat{x} نمایش دهیم. مطابق قضیه ۱ در مرجع [۱۶]، خطای تخمین $e = x - \hat{x}$ حاصل رویتگر SDRE به طور مجانبی به صفر میل خواهد کرد. ساختار رویتگر SDRE به صورت زیر است:

$$\dot{\hat{x}} = A(\hat{x})\hat{x} + L(\hat{x})(y - C(\hat{x})\hat{x}) \quad (6)$$

که در آن $f(\hat{x}) = A(\hat{x})\hat{x}$ ، $h(\hat{x}) = C(\hat{x})\hat{x}$ و همان بهره رویتگر است. که از رابطه $L(\hat{x}) = P(\hat{x})C^T(\hat{x})V^{-1}$ حاصل می‌شود. در این رابطه $\Sigma(\hat{x})$ حل معادله ریکاتی وابسته به حالت (۷) است.

$$A(\hat{x})\Sigma(\hat{x}) + \Sigma(\hat{x})A^T(\hat{x}) - \Sigma(\hat{x})C^T(\hat{x})V^{-1}C(\hat{x})\Sigma(\hat{x}) + W = 0 \quad (7)$$

مطابق قضیه ۱ در مرجع [۱۵] جهت رسیدن به رویتگر SDRE پایدار لازم است که زوج $(A^T(\hat{x}), C^T(\hat{x}))$ به ازای تمام $\hat{x} \in R^n$ پایدارپذیر باشد. ماتریس‌های وزنی $W \in R^{n \times n}$ و $V \in R^{p \times p}$ متقارن بوده و توسط طراح تعیین می‌شوند. لازم به ذکر است که W و V به ترتیب مثبت نیمه معین و مثبت معین هستند. قابل ذکر است که منظور از پایداری رویتگر آن است که خطای تخمین $e(t)$ به طور مجانبی به صفر میل کند.

۴- نتایج شبیه‌سازی

نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده در این بخش، به دو قسمت تقسیم می‌شوند. قسمت اول نتایج به کنترل ولتاژ خروجی سلول خورشیدی، باتری، بانک خازنی و باس بار DC در حضور نامعینی‌های پارامتری و کنترلرگر SDRE می‌پردازد. قسمت دوم به تحلیل نتایج حاصل از

اعمال روتینگر SDRE جهت تشخیص به موقع خطا اختصاص داده می‌شود.

۱-۴- کنترل SDRE

اهداف کنترلی مورد نظر در ریزشبهه مورد مطالعه، تنظیم ولتاژهای خروجی سلول خورشیدی، باتری و باس بار DC می‌باشد که با استفاده از ورودی‌های $u_1(t)$ ، $u_2(t)$ و $u_3(t)$ می‌توان به اهداف کنترلی مدنظر رسید. برای این منظور، ابتدا نقطه تعادل مطلوب سیستم را با صفر قرار دادن طرف سمت راست معادله (۱) به دست می‌آوریم. در این حالت، یک دستگاه ۹ معادله-۱۲ مجهول خواهیم داشت. با در نظر گرفتن مقادیر مطلوب ولتاژهای خروجی سلول خورشیدی، باتری و باس بار DC که به ترتیب ۳۰۰ ولت، ۴۰۰ ولت و ۱۰۰۰ ولت در نظر گرفته می‌شوند، دستگاه مد نظر تبدیل به یک دستگاه ۹ معادله-۹ مجهول می‌شود. ذکر این نکته لازم است که با توجه به سمت راست معادله (۱)، حل دستگاه حاصل ساده بوده چرا که در واقع نیاز به حل سه دستگاه ۳ معادله-۳ مجهول مستقل می‌باشد. برای پارامترهای ریزشبهه مورد مطالعه، تعادل زیر به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} x_1^* &= 300, x_2^* = 1000, x_3^* = 0, x_4^* = 400, x_5^* = 1000, x_6^* = 0, \\ x_7^* &= 1000, x_8^* = 5, x_9^* = 1000, u_1^* = 0.7, u_2^* = 0.6, u_3^* = 0.5 \end{aligned} \quad (۸)$$

با تعریف متغیرهای جدید $\Delta x_i = x_i - x_i^*$ ($i = 1:9$) و $\Delta u_i = u_i - u_i^*$ ($i = 1:3$) حالت زیر به دست می‌آید که تعادل آن در مبداء است:

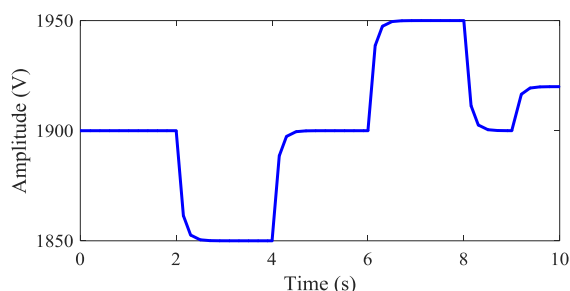
$$\begin{aligned} \Delta \dot{x}_1 &= -\frac{1}{R_1 C_1} \Delta x_1 - \frac{1}{C_1} \Delta x_3 \\ \Delta \dot{x}_2 &= -\frac{1}{R_2 C_2} \Delta x_2 + \frac{0.3}{C_2} \Delta x_3 - \frac{1}{R_2 C_2} \Delta u_1 \Delta x_3 + \frac{1}{R_2 C_2} \Delta x_9 \\ \Delta \dot{x}_3 &= \frac{1}{L_3} (\Delta x_1 - 0.3 \Delta x_2 - R_{01} \Delta x_3) + \frac{\Delta x_2}{L_3} \Delta u_1 \\ \Delta \dot{x}_4 &= -\frac{1}{R_4 C_4} \Delta x_4 - \frac{1}{C_4} \Delta x_6 \\ \Delta \dot{x}_5 &= -\frac{1}{R_5 C_5} \Delta x_5 - \frac{0.004}{R_5 C_5} \Delta x_6 + \frac{1}{C_5} \Delta u_2 \Delta x_5 + \frac{1}{R_5 C_5} \Delta x_9 \\ \Delta \dot{x}_6 &= \frac{1}{L_6} (\Delta x_4 - 0.4 \Delta x_5 - R_{04} \Delta x_6 + \Delta u_2 \Delta x_5) \\ \Delta \dot{x}_7 &= -\frac{1}{R_7 C_7} \Delta x_7 + \frac{1}{C_7} \Delta x_8 + \frac{1}{R_7 C_7} \Delta x_9 \\ \Delta \dot{x}_8 &= \frac{1}{L_8} (V_5 \Delta u_3 - R_{08} \Delta x_8 - \Delta x_7) \\ \Delta \dot{x}_9 &= \frac{1}{C_9} \left(\frac{\Delta x_2 - \Delta x_9}{R_2} + \frac{\Delta x_5 - \Delta x_9}{R_5} + \frac{\Delta x_7 - \Delta x_9}{R_7} - \frac{\Delta x_9}{R_L} \right) \end{aligned} \quad (۹)$$

جهت طراحی کنترل کننده و روتینگر SDRE لازم است یک نمایش SDC از سیستم (۹) در نظر گرفته شود. با توجه به اینکه این سیستم دارای ۹ متغیر حالت می‌باشد بی‌شمار نمایش SDC برای آن وجود دارد. در شبیه‌سازی‌های انجام شده، از نمایش SDC با ماتریس‌های A و $B(x(t))$ رابطه (۱۰) استفاده شده است. ماتریس‌های وزنی انتخابی در شبیه‌سازی‌های انجام شده به صورت زیر انتخاب می‌شوند.

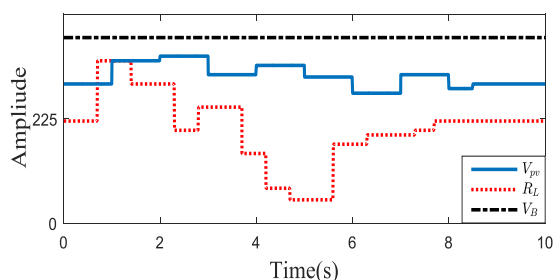
$$Q = 10I_9, R = 10^{-6} \text{diag}(0.009, 7, 2)$$

نکات مهم ۲: در انتخاب این ماتریس‌های وزنی از روش ارائه شده در مرجع [۲۱] استفاده شده است.

در شبیه‌سازی‌های انجام شده فرض بر این است که ریزشبهه مورد مطالعه در معرض اغتشاشات مختلفی از جمله ولتاژ سلول خورشیدی V_{pv} ، ولتاژ باتری V_B ، ولتاژ بانک خازنی V_s و تغییرات بار مصرفی و نویز اعمال شده به ریزشبهه می‌باشد. لازم به ذکر است که در ادامه، فرض می‌شود که این اغتشاشات به طور مستقل تغییر می‌کنند که منحنی آن‌ها در شکل (۲) و (۳) آورده شده‌اند.

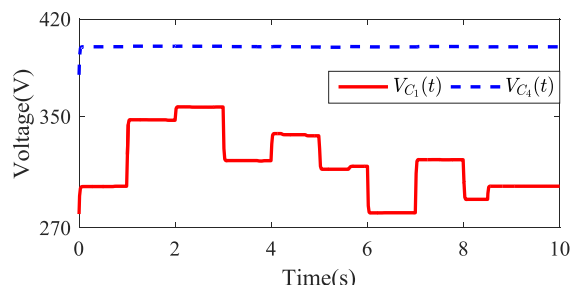


شکل (۲): تغییرات ولتاژ بانک خازنی V_s



شکل (۳): تغییرات ولتاژ V_{pv} ، V_B و بار مصرفی

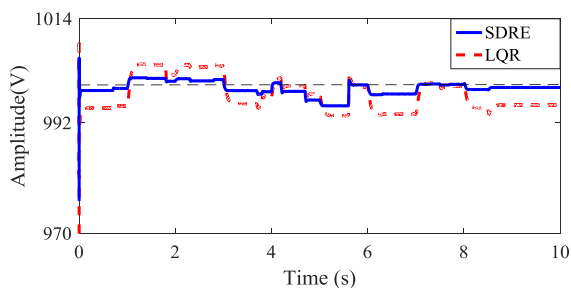
نتایج حاصل از شبیه‌سازی انجام شده در حضور کنترل کننده SDRE در شکل (۴) آورده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با وجود تغییرات شدید در ولتاژ C_1 و C_4 کنترل کننده SDRE توانسته به خوبی پایداری سیستم را حفظ نماید.



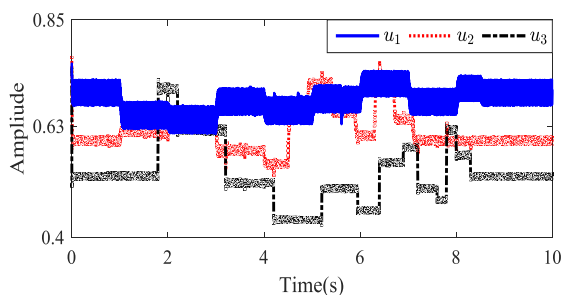
شکل (۴): ولتاژ خازن‌های C_1 و C_4 در حضور کنترل کننده SDRE

شکل (۵) و شکل (۶) مشاهده می‌شود، با اعمال هم‌زمان اغتشاش‌های V_{pv} ، V_B ، V_s ، R_L در حضور کنترل کننده SDRE، ولتاژ و جریان خروجی سلول خورشیدی و باتری بعد از گذشت چند لحظه کنترل گردیده و به حال تعادل خود باز گرداننده است.

کار می‌رود، با وجود اغتشاشات و نویز وارده شده به ریزشبهه، کنترل-کننده SDRE توانسته به خوبی ولتاژ را کنترل و پایداری سیستم را تضمین نماید. شکل (۱۰) سیگنال‌های اعمالی به سیستم مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود دامنه ورودی کنترلی با وجود تغییرات شدید در ولتاژهای خروجی سلول خورشیدی، بانک خازنی، تغییر بار و همچنین نویز اعمالی به تمامی متغیرهای اندازه-گیری، کوچک بوده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام‌گرفته توانمندی روش پیشنهادی در خصوص سیستم‌های مقید و در معرض اغتشاش را نشان می‌دهد.



شکل (۹): ولتاژ باس DC در حضور کنترل‌کننده SDRE



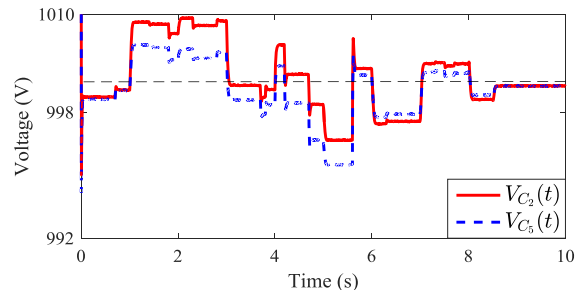
شکل (۱۰): سیگنال‌های ورودی اعمال شده به ریزشبهه

۴-۲- کنترل همراه با تشخیص خطا مبتنی بر SDRE

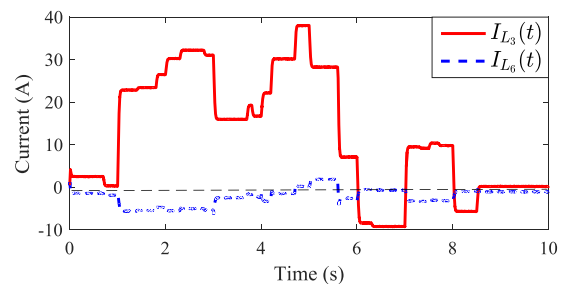
در ادامه به بررسی عملکرد سیستم تشخیص خطا مبتنی بر رویکرد SDRE می‌پردازیم. برای این منظور، از نمایش SDC حاصل از رابطه (۹) استفاده می‌شود. ماتریس‌های وزنی V و W به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند.

$$V = 10^{-4} I_9, W = 10^6 \text{diag}(1, 50, 1, 1, 50, 1, 50, 1, 50) \quad (11)$$

در شبیه‌سازی‌های این زیر بخش فرض بر این است که یک خطا در زمان ۱٫۵ میلی‌ثانیه در خازن C_1 و در زمان ۳٫۵ میلی‌ثانیه خطای دیگری در خازن C_4 اتفاق افتاده است. همان طور که از شکل (۱۱) مشاهده می‌شود در این زمان، ولتاژ C_1 از ۳۰۰ ولت به مقدار ۱۰ ولت و ولتاژ خازن C_4 از ۴۰۰ به ۱۰ ولت افت پیدا کرده است و متناظر با آن در شکل (۱۲) جریان خروجی سلول خورشیدی و باتری کاهش داشته است.

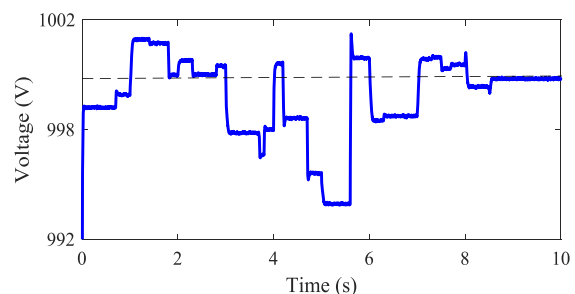


شکل (۵): ولتاژ سلول خورشیدی و باتری در حضور کنترل‌گر SDRE

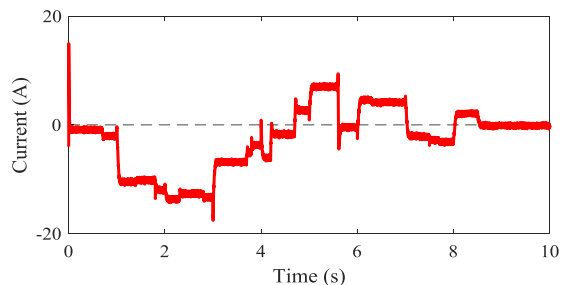


شکل (۶): جریان سلول خورشیدی و باتری در حضور کنترل‌گر SDRE

شکل‌های (۷) و (۸) مربوط به تغییرات ولتاژ و جریان بانک خازنی با وجود تغییرات توان تولیدی و بار مصرفی می‌باشند. همان طور که مشاهده می‌گردد، با وجود اغتشاشات قابل توجه این کنترل‌کننده پیشنهادی ولتاژ و جریان را بعد از گذشت چند ثانیه به نقاط تعادل خود بازگردانده است و پایداری سیستم را حفظ نموده است.



شکل (۷): ولتاژ بانک خازنی در حضور کنترل‌کننده SDRE

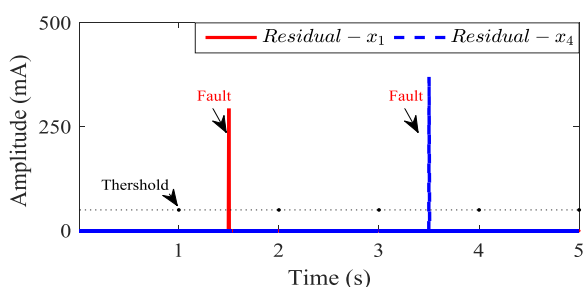


شکل (۸): جریان خروجی بانک خازنی در حضور کنترل‌کننده SDRE

شکل (۹) ولتاژ خازن C_9 باس DC را نشان می‌دهد که جهت برقراری شرایط پایدار به هنگام تغییرات بار و همچنین توان تولیدی به

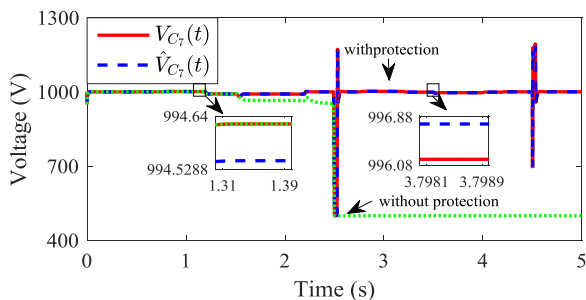
$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_1 C_1} & 0 & -\frac{1}{C_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_2 C_2} & \frac{0.3}{R_2 C_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_2 C_2} \\ \frac{1}{L_3} & -\frac{0.3}{L_3} & -\frac{0.01}{L_6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_4 C_4} & 0 & -\frac{1}{C_4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_5 C_5} & \frac{0.004}{R_5 C_5} & 0 & 0 & -\frac{1}{R_5 C_5} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L_6} & -\frac{0.4}{L_6} & -\frac{0.01}{L_6} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{R_7 C_7} & \frac{1}{C_7} & \frac{1}{R_7 C_7} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{L_8} & -\frac{R_{08}}{L_8} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_2 C_9} & 0 & 0 & -\frac{1}{R_5 C_9} & 0 & -\frac{1}{R_7 C_9} & 0 & \frac{1}{C_9} \left(-\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_5} - \frac{1}{R_7} - \frac{1}{R_L} \right) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$B(x(t)) = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{x_3}{C_2} & \frac{x_2+1000}{L_5} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{x_6}{C_5} & \frac{x_5+1000}{L_6} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1900}{L_8} & 0 \end{bmatrix}^T$$



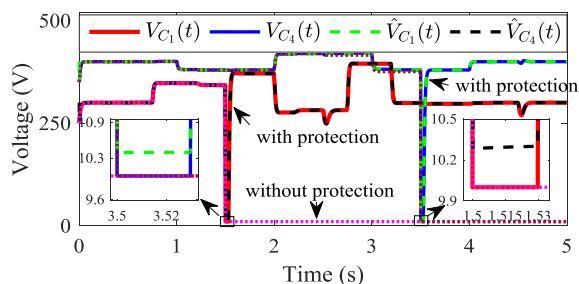
شکل (۱۳): جریان باقی مانده خازن های C_4 و C_1 به هنگام وقوع خطا

به منظور نشان دادن توانایی سیستم تشخیص و کنترل خطایی پیشنهادی و عدم وابستگی آن به محل وقوع خطا، خطایی در زمان ۲،۵ میلی ثانیه بر روی خروجی خازن C_7 اتفاق افتاده و در زمان ۴،۵ میلی ثانیه خطای دیگری بر روی باس بار اتفاق افتاده است. از شکل های (۱۴) و (۱۵) مشاهده می شود در لحظه ۲،۵ میلی ثانیه ولتاژ خازن C_7 از ۱۰۰۰ ولت به مقدار ۵۰۰ ولت و ولتاژ باس بار از مقدار ۱۰۰۰ ولت به ۵۰۰ ولت افت پیدا کرده است. در این حالت، همان طور که از شکل (۱۶) مشاهده می شود، جریان خروجی بانک خازنی افزایش داشته است. از شکل (۱۷) مشاهده می شود با در نظر گرفتن سطح آستانه مناسب تشخیص خطا امکان تشخیص خطا حاصل شده است.

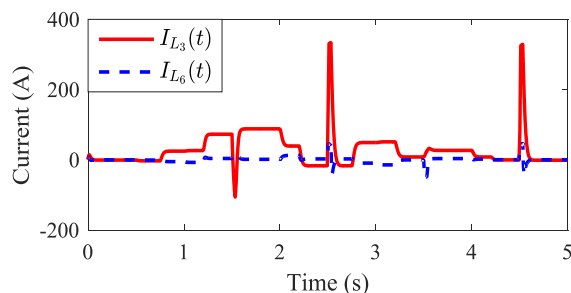


شکل (۱۴): ولتاژ خروجی بانک خازنی هنگام وقوع خطا در خازن C_7

در این حین، سیستم تشخیص خطا با مقایسه خروجی واقعی سیستم با خروجی روتینگر SDRE جریان مانده غیر صفری را طبق شکل (۱۳) تشکیل داده که با تعریف آستانه مناسب (در اینجا آستانه ۵۰ فرض کرده ایم) امکان تشخیص خطا ممکن شده است. همان طور که گفته شد، از جمله مسائل بسیار مهم در میحث تشخیص خطا، عدم تشخیص ناصحیح اغتشاش به عنوان خطا است. همان طور که در بخش قبل بدان اشاره شد با وجود اغتشاشات نامبرده، از شکل (۱۲) مشاهده می شود سیستم هشدار وقوع خطا در این زمان ها فعال نمی گردد.



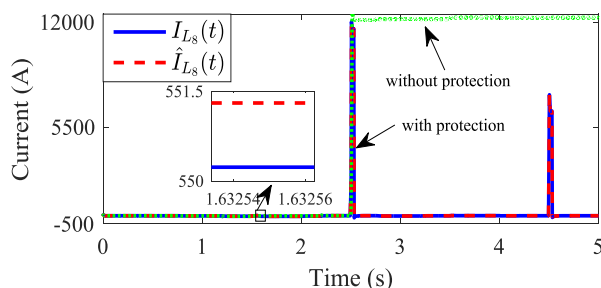
شکل (۱۱): ولتاژ خازن های C_4 و C_1 در هنگام وقوع خطا



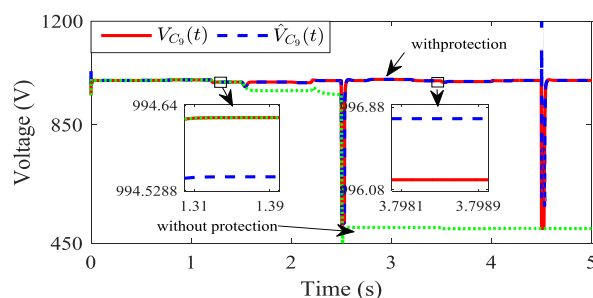
شکل (۱۲): جریان سلف های L_6 و L_3 در هنگام وقوع خطا

مراجع

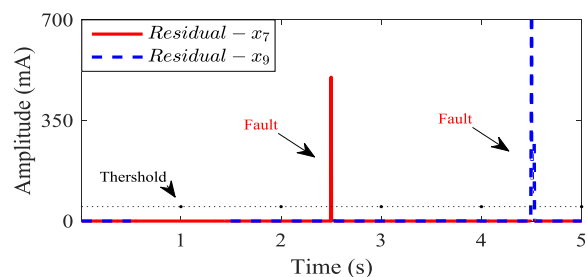
- [1] M. Saedifard, M. Graovac, R. F. Dias, and R. Iravani, "DC power systems: Challenges and opportunities," In IEEE PES General Meeting, pp. 1–7, 2010.
- [2] ستاره محمد، قاسمی حسن، "مدیریت توان در ریزشبه متعادل جزیره‌ای با در نظر گرفتن پایداری سیگنال کوچک و پاسخ دینامیک"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال دوازدهم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۳۹۴.
- [3] J. Park, and J. Candelaria. "Fault detection and isolation in low-voltage DC-bus microgrid system," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, no. 2, pp. 779–787, 2013.
- [4] J. Park, J. Candelaria, M. Liuyan, and K. Dunn, "DC ring-bus microgrid fault protection and identification of fault location," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 28, no. 4, pp. 2574–2584, 2013.
- [5] M. E. Baran, and N. R. Mahajan, "Overcurrent protection on voltage-source-converter-based multiterminal DC distribute- on systems," IEEE Transactions on Power Delivery 22, no. 1, pp. 406–412, 2007.
- [6] صادق جمالی، حسین رضایی فرشه، نوید رضا رفیع "همه‌انگهی بهینه رله‌های اضافه جریان چپتی در شبکه‌های توزیع با در نظر گرفتن پایداری گزرای منابع تولید پراکنده سنکرون"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، سال چهاردهم، شماره اول، بهار ۱۳۹۶.
- [7] M. Amir Zamani, T. S. Sidhu, and A. Yazdani, "A protection strategy and microprocessor-based relay for low-voltage microgrids," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, no. 3, pp.1873–1883, 2011.
- [8] S. M. Brahma, and A. A. Girgis, "Development of adaptive protection scheme for distribution systems with high penetration of distributed generation," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 19, no. 1, pp. 56–63, 2004.
- [9] N. Perera, A. D. Rajapakse, and T. E. Buchholzer, "Isolation of faults in distribution networks with distributed generators," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 23, no. 4, pp. 2347–2355, 2008.
- [10] M. Esreraig, and J. Mitra, "An observer-based protection system for microgrids." In IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp. 1–7, 2011.
- [11] M. Esreraig, and J. Mitra, "Microgrid protection using system observer and minimum measurement set," International Transactions on Electrical Energy Systems, vol. 25, no. 4 pp. 607–622, 2015.
- [12] A. Hwas, and R. Katebi, "Nonlinear observer-based fault detection and isolation for wind turbines," In Control and Automation Mediterranean Conference of, pp. 870–875, 2014.
- [13] T. Cimen, "Systematic and effective design of nonlinear feedback controllers via the statedependent Riccati equation (SDRE) methode," Annual Reviews in Control, vol. 34, no. 1, pp. 32–51, 2010.
- [14] T. Cimen, "Survey of state-dependent Riccati equation in nonlinear optimal feedback control synthesis," Journal of Guidance, Control, and Dynamics, vol. 35, no. 4, pp. 1025–1047, 2012.
- [15] K. Reif, F. Sonnemann, and R. Unbehauen, "Nonlinear state observation using –filtering Riccati design," IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 44, no. 1, pp. 203–208, 1999.



شکل (۱۵): جریان خروجی بانک خازنی



شکل (۱۶): ولتاژ باس بار هنگام وقوع خطا در خازن C_9



شکل (۱۷): جریان باقی‌مانده خازن‌های C_7 و C_9 به هنگام وقوع خطا

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش تشخیص خطا بر پایه‌ی رویکرد SDRE جهت حفاظت از ریزشبه‌های DC ارائه شده است. طرح حفاظتی پیشنهادی به گونه‌ای است که خروجی واقعی سیستم با خروجی نامی آن که بر اساس یک رویکرد غیرخطی، محاسبه شده مقایسه می‌شود و در صورت وجود اختلاف در این دو جریان مانده غیر صفری تشکیل می‌شود که می‌تواند امکان وقوع خطا را در کمترین زمان ممکن فراهم سازد. از جمله مزیت‌های روش پیشنهادی می‌توان به سرعت تشخیص خطا، عدم تشخیص نادرست اغتشاش بجای خطا اشاره نمود. طبق شبیه‌سازی‌های انجام شده، روش پیشنهادی به خوبی توانسته که خطا را تشخیص داده و عملکرد ریزشبه را در برابر اغتشاشات خارجی و نویز اندازه‌گیری به صورت قابل قبولی حفظ نماید. ضمناً از یک کنترل-کننده SDRE جهت تنظیم ولتاژهای خروجی ریزشبه استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده نشان می‌دهد که کنترل‌کننده طراحی شده نیز به خوبی توانسته است اهداف مدنظر را برآورده نماید.

- [16] Y. Batmani and H. Khaloozadeh, "On the design of suboptimal sliding manifold for a class of nonlinear uncertain time-delay systems," *International Journal of Systems Science*, vol. 47, no. 11, pp. 1–10, 2015.
- [17] Y. Batmani "On the design of observer for nonlinear time-delay systems," *Asian Journal of Control*, vol. 16, no. 4, pp. 1191–1201, 2014.
- [18] Y. Batmani and H. Khaloozadeh, "Optimal chemotherapy in cancer treatment: state dependent Riccati equation control and extended Kalman filter," *Optimal Control Applications and Methods*, vol. 34, no. 5, pp. 562–577, 2013.
- [19] T.D. Do, H.H. Choi "SDRE based nonlinear optimal control system design for PM synchronous motor," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 11, pp.4063-4074, 2012.
- [20] A. Iovine and S. B. Siad, "Nonlinear control of a DC microgrid for the integration of photovoltaic panels," *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, vol. 14, no. 2, pp. 524–535, 2017.
- [21] Y. Batmani, M. Davoodi, N. Meskin, "Nonlinear suboptimal tracking controller design using state-dependent Riccati equation technique," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 25, no. 5, pp. 1833–1839, 2017.

¹State-Dependent Riccati Equation

²Pearson

³State-Dependent Coefficient