

تحلیل عملکرد محدودکننده ترکیبی مبدل‌های منبع ولتاژ در حضور سطح کنترل دوم ریزشبه‌های جزیره‌ای

ایمان صادق‌خانی

استادیار، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۱۰/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۱۶

خلاصه: با افزایش ظرفیت و تعداد منابع انرژی پراکنده، حفظ اتصال این منابع در حین وقوع اختلالات ضروری است. از جمله اقداماتی که برای این منظور باید انجام شوند، فراهم کردن ولتاژ با کیفیت مطلوب برای تغذیه بارهای مهم و محدودسازی جریان و ولتاژ منابع مبتنی بر مبدل‌های الکترونیک قدرت در حین خطا است. این مقاله به بررسی عملکرد ساختار متعادل کنترل سلسله مراتبی ریزشبه‌های جزیره‌ای در حین و پس از رفع خطا می‌پردازد. در سطح کنترل اول این ساختار از محدودکننده ترکیبی برای محدودسازی جریان و ولتاژ مبدل استفاده شده است. اثر استفاده از روش کنترل مستقل هر فاز در سطوح کنترل اول و دوم ریزشبه در بهبود عملکرد ریزشبه در حین خطا و اثر استفاده از روش انتگرال‌گیری مشروط در کنترل‌کننده ولتاژ سطح کنترل دوم در ارتقاء عملکرد ریزشبه پس از رفع خطا بررسی شده است. نتایج استفاده از این روش‌ها با شبیه‌سازی زمانی خطاهای متقارن و نامتقارن نشان داده شده است.

کلمات کلیدی: انتگرال‌گیری مشروط، اینورتر منبع ولتاژ، ریزشبه، کنترل سلسله مراتبی، کنترل ولتاژ، قاب مرجع فاز، محدودسازی.

Analysis of Hybrid Reference Frame Limiting Strategy Performance in the Presence of Secondary Control of Inverter Based Islanded Microgrids

Iman Sadeghkhani

Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
i.sadeghkhani@ec.iut.ac.ir

Abstract

With increasing the capacity and number of distributed energy resources (DERs), it is necessary to keep them connected to the microgrid during the disturbances. Two of the most important measures for satisfying this requirement are to provide the high quality voltage for feeding the critical loads and to limit the electronically-coupled DERs current and voltage. This paper investigates the performance of balanced hierarchical control structure of islanded microgrids during and after the fault conditions. The primary control level of this control structure is equipped with the hybrid reference frame limiting strategy to limit the voltage-sourced converter (VSC) current and voltage. The effect of employing the method of independent control of each phase in both primary and secondary control levels and the influence of using the conditional integration method in the voltage controller of secondary control level on the microgrid performance during and after fault condition are investigated. The results of employing these methods are demonstrated through several time-domain simulations of symmetrical and asymmetrical faults.

Index Terms: Conditional integration, hierarchical control, limiting, microgrid, natural reference frame, voltage control, voltage-sourced inverter.

۱- مقدمه

امروزه ریزشبه‌کها به عنوان یکی از مهمترین اجزای شبکه‌های هوشمند به سرعت در حال توسعه می‌باشند [۱]. یک ریزشبه‌ک شامل انواع منابع تولید پراکنده از قبیل سیستم‌های فتوولتائیک، توربین‌های بادی، دیزل ژنراتورها، میکروتوربین‌ها و پیل‌های سوختی، انواع ذخیره‌سازهای انرژی از قبیل باتری‌ها، چرخ‌های طیار و ابرخازن‌ها و انواع بارهای مهم و غیر مهم می‌باشد [۲]. این شبکه‌ها همچنین دارای ارتباطات مخابراتی، سیستم‌های کنترل و ادوات حفاظتی هستند. در حالت کاری متصل به شبکه، ریزشبه‌کها علاوه بر کمک به تأمین انرژی شبکه اصلی، قادر به فراهم کردن خدمات جانبی همچون کنترل ولتاژ می‌باشند. اگر اختلالی در عملکرد شبکه اصلی به وجود آید، یک ریزشبه‌ک قادر خواهد بود که در حالت جزیره‌ای به کار خود ادامه دهد.

منابع انرژی پراکنده را می‌توان از نظر نوع واسط آنها به دو دسته منابع مبتنی بر ماشین‌های الکتریکی و منابع مبتنی بر ادوات الکترونیک قدرت دسته‌بندی کرد. با توجه به قابلیت انعطاف بالای سیستم کنترل منابع مبتنی بر ادوات الکترونیک قدرت در تأمین ولتاژ تنظیم شده و با کیفیت بالا و با توجه به این نکته که منابع انرژی مدرن معمولاً به واسطه این نوع ادوات به شبکه متصل می‌شوند، دسته دوم محبوبیت بالایی را میان صنایع و شرکت‌های برق کسب کرده‌اند [۳، ۴]. یکی از روش‌های اصلی کنترل ریزشبه‌کهای مبتنی بر منابع اینورتری ساختار کنترل سلسله مراتبی است [۵]. این ساختار از سه سطح کنترل اصلی تشکیل شده است که سطوح اول و دوم در حالت کار جزیره‌ای فعال بوده در حالی که در حالت کاری متصل به شبکه هر سه سطح کنترلی کار می‌کنند. برای جلوگیری از جاری شدن جریان‌های گردشی بین منابع موازی، معمولاً در سطح کنترل اول ریزشبه‌کها از کنترل افتی استفاده می‌شود [۶، ۷]. محاسبات این سطح کنترلی را می‌توان در یکی از قاب‌های مرجع سنکرون، ساکن و یا فاز انجام داد [۸].

با توجه به افزایش ظرفیت و تعداد منابع پراکنده، قطع آنها در حین وقوع خطا مشکلاتی را در تأمین بارهای ریزشبه‌کها فراهم می‌کند. بنابراین این منابع باید قادر به تأمین انرژی با کیفیت بالا در حین خطا باشند. با توجه به اینرسی حرارتی کم یک اینورتر، جریان آن باید در حین وقوع خطا در ۲ تا ۳ برابر جریان نامی محدود شود تا به کلیدهای نیمه هادی آن آسیبی وارد نشود [۹-۱۱].

روش‌های ارائه شده به منظور محدود کردن جریان اینورترها در حین خطا را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد: (۱) روش‌های مبتنی بر استفاده از ادوات اضافی و (۲) روش‌های مبتنی بر استفاده از قابلیت‌های سیستم کنترل اینورتر. در روش اول از یک محدودکننده جریان خطا برای محدود کردن جریان مبدل استفاده می‌شود [۱۲]. هر چند که این دسته به خوبی وظیفه خود را انجام می‌دهند، اما باعث افزایش هزینه‌ها و کاهش قابلیت اطمینان سیستم می‌شوند. علاوه بر این، تعیین مقدار دقیق محدودکننده جریان خطا خود چالش مهمی است [۱۳]. محدودسازی جریان مبدل با استفاده از قابلیت سیستم کنترل مبدل توسط دو روش اصلی محدودکننده اشباع لحظه‌ای و محدودکننده

قفل شده پیاده‌سازی می‌شود. این محدودکننده‌ها در سطح اول کنترل سلسله مراتبی قرار دارند. در محدودکننده اشباع لحظه‌ای، اگر سیگنال جریان مرجع مبدل از حد آستانه جریان مجاز تجاوز کند، در مقدار آستانه باقی خواهد ماند. علیرغم سادگی، محدودکننده اشباع لحظه‌ای منجر به اعوجاج شدید شکل موج‌های خروجی مبدل به دلیل برش قله‌های سینوسی جریان مرجع می‌شود. همچنین هنگام استفاده از قاب‌های مرجع ساکن و سنکرون، این محدودکننده دارای دقت کافی در محدود کردن جریان نیست. در محدودکننده قفل شده، سیگنال جریان مرجع مبدل در حین خطا، با یک سیگنال از پیش تعریف شده جایگزین می‌شود. عیب اصلی این روش وقوع اضافه ولتاژ در فازهای سالم در حین وقوع خطاهای نامتقارن هنگام استفاده از قاب‌های مرجع ساکن و سنکرون است. در [۱۴] با کاهش ولتاژ مرجع فاز دارای خطا توسط کنترل سطح دوم، جریان مبدل محدود می‌شود. اما محدودسازی جریان در این روش وابسته به حضور کنترل سطح دوم بوده که این امر قابلیت اطمینان را کاهش می‌دهد. همچنین در این طرح به یک کنترل کننده ولتاژ سطح دوم مجزا برای هر منبع نیاز است.

در [۱۵] محدودکننده ترکیبی ارائه شده است که در سطح اول کنترل سلسله مراتبی پیاده‌سازی شده و علاوه بر محدودسازی دقیق جریان مبدل، قادر به حفظ کیفیت شکل موج‌های خروجی مبدل و محدودسازی دامنه ولتاژ در فازهای سالم هنگام وقوع انواع خطاهای متقارن و نامتقارن می‌باشد. در این مقاله عملکرد ساختار کنترل سلسله مراتبی متعادل مجهز به محدودکننده ترکیبی در حالت کار جزیره‌ای در حین و پس از رفع خطا بررسی می‌شود. همچنین عملکرد ساختار کنترل سلسله مراتبی هنگام استفاده از مفهوم کنترل مستقل هر فاز و غیرفعالسازی خروجی اینترگرال‌گیر ولتاژ سطح دوم در حین و پس از رفع خطا نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در ادامه ساختار متعادل کنترل سلسله‌مراتبی ریزشبه‌کهای جزیره‌ای در بخش دوم ارائه می‌شود. در بخش سوم عملکرد این ساختار کنترلی در حین و پس از رفع خطا بررسی شده و مفهوم استفاده از کنترل مستقل فاز و اینترگرال‌گیری مشروط ارائه خواهد شد. بخش چهارم به ارائه نتایج شبیه‌سازی می‌پردازد. در نهایت نتایج حاصل از این بررسی در بخش پنجم ارائه می‌شوند.

۲- کنترل سلسله مراتبی

استفاده از روش‌های کنترلی پیشرفته برای تحقق مفهوم ریزشبه‌کها ضروری است. وظایف اصلی سیستم کنترل ریزشبه‌ک عبارتند از [۲]: تنظیم ولتاژ و فرکانس، تسهیم مناسب بار، گذار بین حالت‌های کاری جزیره‌ای و متصل به شبکه، کنترل پخش توان بین ریزشبه‌ک و شبکه اصلی و بهینه‌سازی هزینه عملکرد ریزشبه‌ک. از آنجایی که این نیازها دارای اهمیت و مقیاس زمانی متفاوتی هستند، به یک ساختار کنترل سلسله مراتبی نیاز بوده تا هر کدام از آنها در یک سطح کنترلی متفاوت برآورده شوند [۶]. ساختار کنترل سلسله مراتبی از سه سطح کنترل اصلی تشکیل شده است [۵]. سطح کنترل اول وظیفه حفظ پایداری

$$G_v(s) = k_{pv} + \frac{2k_{rv} \cdot \omega_{cv} \cdot s}{s^2 + 2\omega_{cv} \cdot s + \omega_{rv}^2} \quad (4)$$

که در آن k_{pv} ضریب تناسبی و $k_{rv}(k_{iv})$ ضریب رزونانسی (انتگرالی) کنترل کننده ولتاژ هستند. ω_{rv} و ω_{cv} به ترتیب فرکانس قطع و فرکانس رزونانسی کنترل کننده ولتاژ می‌باشند.

وظیفه حلقه کنترل کننده جریان، کنترل جریان عبوری از سلف فیلتر مبدل با هدف بهبود کیفیت توان است. جریان مرجع سلف فیلتر توسط کنترل کننده ولتاژ ساخته می‌شود. خروجی کنترل کننده جریان، سیگنال‌های مرجع کلیدزنی مبدل است. در این مقاله کنترل کننده جریان توسط یک کنترل کننده تناسبی مدل می‌شود؛ بنابراین $G_i(s) = k_{pi}$ است. از آنجایی که مقدار خازن لینک DC معمولاً بزرگ انتخاب می‌شود، در مطالعات خطا از یک منبع ولتاژ DC به عنوان ورودی مبدل استفاده می‌شود [۱۷].

۲-۲- سطح کنترل دوم

همانگونه که در روابط (۱) و (۲) نشان داده شده است، اساس کار کنترل اکتیو، کاهش فرکانس و ولتاژ خروجی مبدل با هدف تسهیم متناسب توان بین منابع می‌باشد. در صورت وجود بارهای حساس در ریزشبهه، بایستی این افت‌ها جبران شوند. برای حل این مشکل، از سطح کنترل دوم ریزشبهه استفاده می‌شود تا جبران انحراف ولتاژ و فرکانس ریزشبهه پس از تغییر بار یا تولید ریزشبهه تضمین گردد. شکل (۱) ساختار متعادل این سطح کنترلی را نشان می‌دهد. ابتدا دامنه ولتاژ E_{MG} و فرکانس ω_{MG} ریزشبهه اندازه‌گیری شده و توسط یک ارتباط مخابراتی با پهنای باند کم به یک کنترل کننده مرکزی فرستاده می‌شوند. این مقادیر با مقادیر مرجع دامنه ولتاژ E_{MG}^{ref} و فرکانس ω_{MG}^{ref} ریزشبهه مقایسه شده و خطای حاصل توسط کنترل کننده‌های تناسبی-انتگرالی سطح دوم پردازش می‌شوند:

$$\delta\omega = k_{pf}(\omega_{MG}^{ref} - \omega_{MG}) + k_{if} \int (\omega_{MG}^{ref} - \omega_{MG}) dt \quad (5)$$

$$\delta E = k_{pe}(E_{MG}^{ref} - E_{MG}) + k_{ie} \int (E_{MG}^{ref} - E_{MG}) dt \quad (6)$$

که در آن $k_{pf}(k_{pe})$ و $k_{if}(k_{ie})$ به ترتیب ضرایب تناسبی و انتگرالی کنترل کننده فرکانس (ولتاژ) سطح کنترل دوم ریزشبهه هستند. $\delta\omega$ و δE مقادیر شیفتم مشخصه‌های اکتیو-توان حقیقی و ولتاژ-توان راکتیو می‌باشند که به کنترل کننده سطح اول کلیه منابع ریزشبهه فرستاده می‌شوند.

۲-۳- محدودکننده ترکیبی

برای محدودسازی جریان خروجی مبدل در حین خطاهای اتصال کوتاه و اضافه بار، معمولاً از یک محدودکننده در خروجی کنترل کننده ولتاژ استفاده می‌شود. برای این کار دو محدودکننده اصلی معرفی شده است: (۱) محدودکننده اشباع لحظه‌ای و (۲) محدودکننده قفل شده. محدودکننده ترکیبی با هدف غلبه بر مشکلات کیفیت پایین شکل موج‌های خروجی، عدم محدودسازی دقیق دامنه جریان و عدم کنترل ولتاژ در فازهای سالم محدودکننده‌های پیشین، اخیراً پیشنهاد شده است.

ولتاژ و فرکانس ریزشبهه و تسهیم بار را بر عهده دارد. سطح کنترل دوم به اصلاح انحراف ولتاژ و فرکانس حاصل از عملکرد کنترل کننده اکتیو سطح اول می‌پردازد. وظیفه سطح کنترلی سوم مدیریت پخش توان بین ریزشبهه و شبکه اصلی می‌باشد. از آنجایی که هدف این مقاله بررسی عملکرد ریزشبهه در هنگام وقوع خطا در حالت کار جزیره‌ای است، تنها سطوح کنترلی اول و دوم مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲-۱- سطح کنترل اول

اکثر منابع مدرن به واسطه یک مبدل منبع ولتاژ به ریزشبهه متصل می‌شوند. سیستم کنترل یک مبدل منبع ولتاژ بسته به هدف مورد نظر، ولتاژ خروجی، جریان خروجی و یا توان خروجی مبدل را کنترل می‌کند. از آنجایی که در حالت کار جزیره‌ای باید ولتاژ و فرکانس ریزشبهه توسط خود منابع اینورتری تنظیم شوند، معمولاً این منابع در حالت کنترل ولتاژ خروجی کار می‌کنند. شکل (۱) ساختار متعادل کنترل سطح اول ریزشبهه را با هدف تنظیم ولتاژ ریزشبهه نشان می‌دهد. این ساختار از حلقه بیرونی کنترل توان و حلقه‌های داخلی کنترل ولتاژ و جریان تشکیل شده است. برای تسهیم متناسب بار و جلوگیری از جاری شدن جریان‌های چرخشی بین منابع اینورتری موازی، از کنترل اکتیو به عنوان حلقه بیرونی کنترل توان استفاده می‌شود. ایده اصلی استفاده از کنترل اکتیو، همانندسازی رفتار یک ژنراتور سنکرون است که هنگام افزایش توان حقیقی، فرکانس را کاهش می‌دهد. در این سیستم کنترل، فرکانس ω و دامنه ولتاژ E مرجع خروجی مبدل توسط مشخصه‌های اکتیو-توان حقیقی و ولتاژ-توان راکتیو و به صورت زیر کنترل می‌شوند [۱۶]:

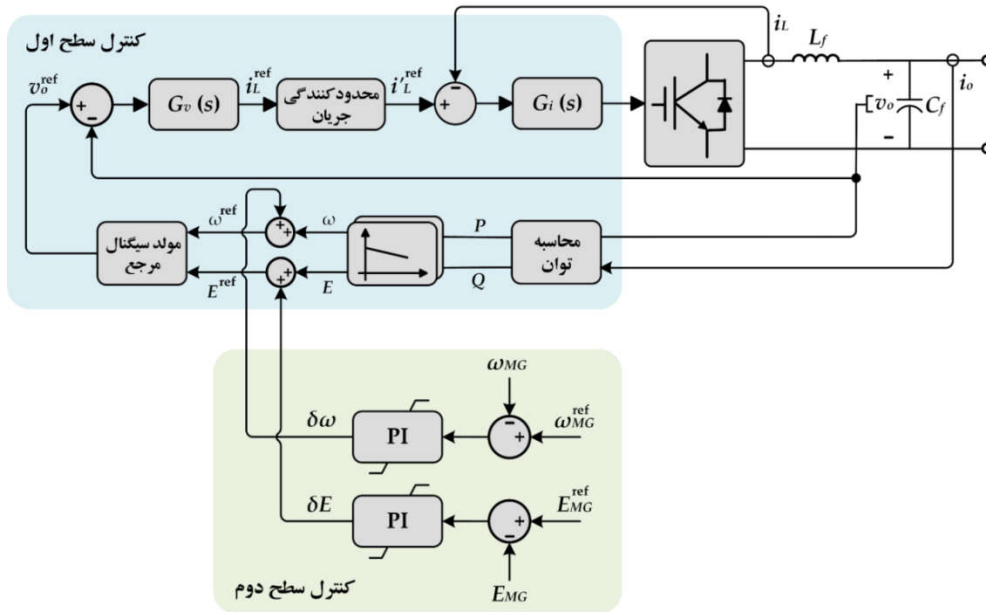
$$\omega = \omega_0 - m_p \times P \quad (1)$$

$$E = E_0 - n_q \times Q \quad (2)$$

که در آن ω_0 و E_0 فرکانس و دامنه ولتاژ خروجی در حالت بی باری، P و Q توان حقیقی و توان راکتیو خروجی مبدل و m_p و n_q ضرایب اکتیو هستند.

وظیفه حلقه داخلی کنترل ولتاژ، تنظیم ولتاژ دو سر خازن فیلتر مبدل می‌باشد. این کار با مقایسه ولتاژ دو سر خازن فیلتر با ولتاژ مرجع حاصل از کنترل اکتیو و استفاده از یک کنترل کننده ولتاژ انجام می‌شود. هنگام استفاده از قاب مرجع سنکرون برای انجام محاسبات سیستم کنترل مبدل، از یک کنترل کننده تناسبی-انتگرالی به عنوان کنترل کننده ولتاژ استفاده می‌شود؛ در حالی که به دلیل ماهیت سینوسی سیگنال مرجع در قاب‌های مرجع ساکن و فاز، باید از یک کنترل کننده تناسبی-رزونانسی استفاده شود. لازم به ذکر است که کنترل محور صفر قاب مرجع سنکرون توسط یک کنترل کننده تناسبی-رزونانسی انجام می‌شود. تابع تبدیل کنترل کننده تناسبی-انتگرالی ولتاژ در رابطه (۳) و کنترل کننده تناسبی-رزونانسی ولتاژ در رابطه (۴) بیان شده است:

$$G_v(s) = k_{pv} + \frac{k_{iv}}{s} \quad (3)$$



شکل (۱): ساختار متعادل کنترل سلسله مراتبی یک ریزشکبه جزیره‌ای
Fig. (1): Balanced structure of hierarchical control of an islanded microgrid

با ۲ pu در نظر گرفته می‌شود. نیز مقدار مؤثر جریان مرجع سلف فیلتر است. لازم به ذکر است که فعالسازی محدودکننده ترکیبی هنگام تجاوز جریان از حد مجاز در یکی از فازها بوده در حالی که غیرفعالسازی آن، هنگام بازیابی ولتاژ در هر سه فاز انجام خواهد شد. برای حفظ قابلیت کنترل دامنه ولتاژ در فازهای سالم در هنگام استفاده از قاب‌های مرجع ساکن و سنکرون، سیستم کنترل اصلی مبدل در هنگام وقوع خطا با یک سیستم کنترل کمکی جایگزین می‌شود که در آن حلقه‌های کنترلی در قاب مرجع فاز پیاده‌سازی شده‌اند.

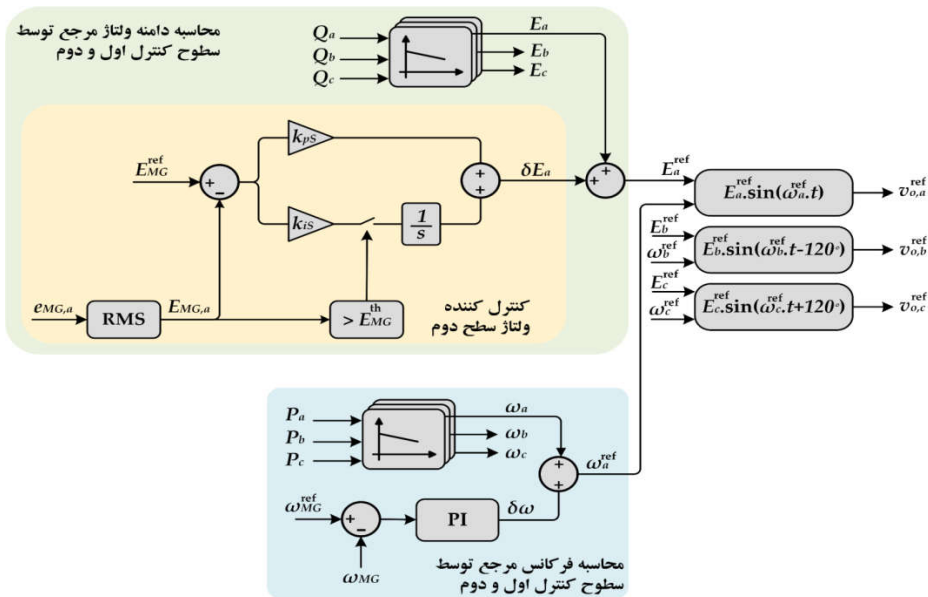
در محدودکننده ترکیبی، جریان مرجع سلف فیلتر i_L^{ref} (خروجی کنترل کننده ولتاژ) در قاب مرجع فاز با استفاده از یک ضریب محدودکنندگی جریان CLF کاهش می‌یابد [۱۵]:

$$i_L^{ref} = CLF_j \times i_{L,j}^{ref}, \quad j = a, b, c \quad (7)$$

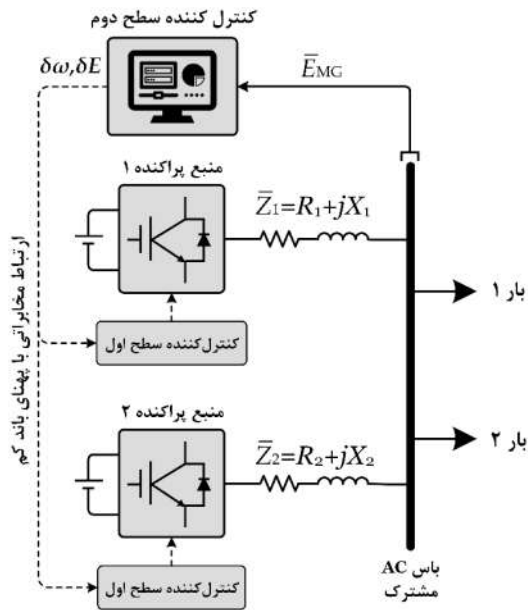
که در آن:

$$CLF_j = \begin{cases} \frac{i_{th}}{\sqrt{2} \times I_{L,j}^{ref}} & I_{L,j}^{ref} > \frac{i_{th}}{\sqrt{2}} \\ 1 & \text{در غیر اینصورت} \end{cases} \quad (8)$$

که در آن i_L^{ref} جریان مرجع محدود شده سلف فیلتر است. i_{th} مقدار مجاز پیک جریان یا جریان آستانه مبدل می‌باشد که در این مقاله برابر



شکل (۲): محاسبه ولتاژ مرجع مبدل به صورت مستقل در هر فاز و غیرفعالسازی انتگرال‌گیر کنترل کننده ولتاژ سطح دوم
Fig. (2): Converter voltage reference calculation in natural reference frame and deactivation of voltage control integrator of secondary level



شکل (۳): سیستم تحت مطالعه
Fig. (3): Study test system

Table (1): Study test system parameters
جدول (۱): پارامترهای سیستم تحت مطالعه

مقدار	نماد	پارامتر
۱۵ kVA	S_{n1}	توان نامی منبع ۱
۱۰ kVA	S_{n1}	توان نامی منبع ۲
۴۰۰ V	V_n	ولتاژ نامی
۱۰۰۰ V	V_{DC}	ولتاژ باس DC
۵۰ Hz	f_0	فرکانس نامی
۲۰ kHz	f_{sw}	فرکانس کلیدزنی
۵ mH	L_f	سلف فیلتر
۱۰۰ μ F	C_f	خازن فیلتر
۰/۶۱	m_{p1}	ضریب افقی توان حقیقی منبع اول
۰/۰۷۵	n_{Q1}	ضریب افقی توان راکتیو منبع اول
۰/۹۲	m_{p2}	ضریب افقی توان حقیقی منبع دوم
۰/۱۱۳	n_{Q2}	ضریب افقی توان راکتیو منبع دوم
۵	k_{pv}	ضریب تناسبی کنترل کننده ولتاژ
۵۰۰	k_{rv}	ضریب رزونانسی کنترل کننده ولتاژ
۲ rad/s	ω_{cv}	فرکانس قطع کنترل کننده ولتاژ
۱۰۰۰	k_{pi}	ضریب تناسبی کنترل کننده جریان
۰/۱۲۵	k_{pf}	ضریب تناسبی کنترل فرکانس سطح دوم
۲/۲	k_{if}	ضریب انتگرالی کنترل فرکانس سطح دوم
۰/۲۵	k_{pE}	ضریب تناسبی کنترل ولتاژ سطح دوم
۱/۱	k_{iE}	ضریب انتگرالی کنترل ولتاژ سطح دوم
۰/۸ / $\sqrt{2}$ pu	E_{MG}^{th}	ولتاژ آستانه فعالسازی انتگرال گیر
۰/۱+j۱/۲ Ω	\bar{Z}_{Line1}	امپدانس فیدر اول
۰/۳+j۱/۸ Ω	\bar{Z}_{Line2}	امپدانس فیدر دوم
۵kW, ۲kVAr	P_1, Q_1	توان بار اول
۸kW, ۶kVAr	P_2, Q_2	توان بار دوم

۳- اصلاح ساختار متعادل کنترل سلسله مراتبی با هدف بهبود

قابلیت محدودکننده مبدل

هنگام وقوع خطا در ریزشبه، ساختار متعادل کنترل سلسله مراتبی منجر به بروز دو مشکل می‌شود. مشکلی که برای فازهای سالم رخ می‌دهد از آنجا ناشی می‌شود که همانگونه که در شکل (۱) نشان داده شده است، ساختار متعادل کنترل سلسله مراتبی برای سیستم‌های متعادل طراحی شده است. از یک طرف دامنه ولتاژ محاسبه شده توسط کنترل افی در هر سه فاز برابر در نظر گرفته می‌شود. از طرف دیگر کنترل سطح دوم ولتاژ یکی از فازهای ریزشبه را اندازه‌گیری کرده و بر اساس آن، مقدار شیفت مشخصه ولتاژ-توان راکتیو را محاسبه می‌نماید که این امر منجر به تغییر مشابه دامنه ولتاژ در هر سه فاز می‌گردد. این مسئله باعث می‌شود که هنگام وقوع خطاهای نامتقارن، اگر دامنه ولتاژ فاز دارای خطا توسط کنترل سطح دوم اندازه‌گیری شود، دامنه ولتاژ فازهای سالم افزایش یابد.

برای رفع این مشکل، از قابلیت کنترل مستقل هر فاز در قاب مرجع فاز استفاده می‌شود [۱۹، ۱۸]. برای این منظور در سطح کنترل اول، از سه مشخصه افی ولتاژ-توان راکتیو مستقل برای هر فاز استفاده شده و بر این اساس ولتاژ مرجع هر فاز به طور جداگانه محاسبه می‌شود. از طرف دیگر در سطح دوم کنترل سلسله مراتبی نیز، از سه کنترل کننده مستقل ولتاژ استفاده شده تا مقدار شیفت دامنه ولتاژ هر فاز به طور جداگانه محاسبه گردد. این طرح در شکل (۲) نشان داده شده است.

از طرف دیگر مشکلی که وجود سطح کنترل دوم ایجاد می‌کند آن است که هنگام وقوع خطا، ولتاژ فازهای دارای خطا به شدت افت می‌کند. برای جبران این افت ولتاژ، کنترل کننده ولتاژ سطح دوم مقدار شیفت دامنه ولتاژ را افزایش می‌دهد. اما از آنجایی که معمولاً مقدار شیفت مورد نیاز بسیار بزرگ بوده و مبدل ظرفیت جبران افت ولتاژ را ندارد، انتگرال‌گیر قادر به صفر کردن خطای ورودی به خود نشده و خروجی آن مرتباً افزایش می‌یابد. این امر باعث می‌شود که هنگام برطرف شدن خطا، کنترل کننده ولتاژ به سرعت به شرایط قبل از خطا باز نگردد و در نتیجه ولتاژ در لحظات اولیه پس از رفع خطا بیشتر از مقدار مرجع باشد.

برای رفع این مشکل دو راه کار وجود دارد؛ می‌توان کنترل کننده ولتاژ سطح دوم در فاز دارای خطا را به طور کلی در حین خطا از مدار خارج کرد [۱۹] و یا از آنجایی که مشکل از انتگرال‌گیر ناشی می‌شود، تنها انتگرال‌گیر را در حین خطا غیر فعال کرد. به دلیل سرعت بازیابی بیشتر روش دوم، این مقاله از روش انتگرال‌گیری مشروط [۲۰] برای غیر فعالسازی انتگرال‌گیر در کنترل کننده ولتاژ سطح دوم استفاده می‌کند. همانگونه که در شکل (۲) نشان داده شده است، فعالسازی و غیرفعالسازی انتگرال‌گیر کنترل کننده هر فاز با پایش مقدار مؤثر ولتاژ آن فاز انجام می‌شود. اگر مقدار مؤثر ولتاژ ریزشبه از حد آستانه کمتر شود، این به معنای وقوع اختلال در ریزشبه بوده و در نتیجه عمل انتگرال‌گیری در کنترل کننده مربوط به فاز دارای اختلال متوقف می‌شود. پس از رفع اختلال و بازیابی ولتاژ ریزشبه، عمل انتگرال‌گیری مجدداً از سر گرفته می‌شود.

۴- نتایج مطالعات

برای بررسی مباحث ارائه شده از سیستم تست شکل (۳) استفاده می‌شود. این ریزشبه دارای دو منبع اینورتری چهار-شاخه مجهز به محدودکننده ترکیبی بوده که محاسبات کنترل کننده آنها در قاب مرجع فاز انجام می‌شود و به طور موازی بارهای ریزشبه را تغذیه می‌کنند. لازم به ذکر است که تنها کنترل ولتاژ سطح دوم و کنترل افی با استفاده از قاب مرجع فاز پیاده‌سازی می‌شوند و امکان بکارگیری کنترل مستقل هر فاز هنگام استفاده از قاب‌های مرجع ساکن و سنکرون برای انجام محاسبات کنترل کننده‌های سطح اول وجود دارد. پارامترهای سیستم تست در جدول (۱) ارائه شده‌اند. در مطالعات صورت گرفته ابتدا تنها کنترل سطح اول فعال است و پس از گذشت $0.8 S$ کنترل کننده سطح دوم فعال می‌شود. سپس خطاهای متقارن و نامتقارن در دو سر بار شبیه‌سازی می‌شوند. مقاومت خطا نیز $1/2 \Omega$ در نظر گرفته می‌شود.

۴-۱- خطای تکفاز به زمین

ابتدا یک خطای تکفاز به زمین $a-g$ در دو سر بار در $t = 1 S$ رخ داده که پس از گذشت 25 سیکل به طور اتوماتیک برطرف می‌شود. شکل (۴) شکل موج ولتاژ بار، جریان سلف مبدل اول و شیفت ولتاژ حاصل از کنترل سطح دوم را هنگام استفاده از ساختار متعادل کنترل سلسله مراتبی نشان می‌دهد. در ابتدا تنها کنترل سطح اول کار می‌کند و به دلیل عملکرد مشخصه افی، دامنه ولتاژ $0.98 pu$ است. در لحظه $0.8 S$ کنترل سطح دوم فعال شده و به خوبی ولتاژ ریزشبه را در مقدار $1 pu$ بازیابی می‌کند. اما هنگامی که خطای تکفاز به زمین در فاز a رخ می‌دهد، علیرغم محدودسازی مناسب جریان مبدل در مقدار $2 pu$ از آنجایی که کنترل سطح دوم ولتاژ فاز a ریزشبه را اندازه‌گیری می‌کند و ولتاژ این فاز به دلیل وقوع خطا افت کرده است، مشخصه افی ولتاژ فازها شیفت پیدا کرده و ولتاژ فاز سالم به $1.35 pu$ افزایش می‌یابد.

نتایج حاصل از استفاده از کنترل مستقل ولتاژ هر فاز در سطوح کنترل اول و دوم ریزشبه در شکل (۵) نشان داده شده است. با وجود اینکه هم دامنه جریان مبدل و هم دامنه ولتاژ فازهای سالم به خوبی در حین خطا تحت کنترل هستند، اما پس از رفع خطا، ولتاژ فازها تحت کنترل نمی‌باشد و دامنه آن در لحظات اول $1.15 pu$ می‌باشد. همانگونه که در شکل (۵) نشان داده شده است، خروجی کنترل کننده ولتاژ فاز a در سطح کنترل دوم مرتباً در حال افزایش است. این امر باعث می‌شود پس از رفع خطا حدود $3 S$ طول بکشد تا ولتاژ به مقدار $1 pu$ بازگردد.

شکل (۶) شکل موج‌های ولتاژ بار و جریان خروجی مبدل و همچنین خروجی کنترل کننده ولتاژ سطح دوم ریزشبه را هنگام استفاده از کنترل مستقل هر فاز و روش انتگرال‌گیری مشروط نشان می‌دهد. در هنگام وقوع خطا روند انتگرال‌گیری متوقف شده و از افزایش صعودی خروجی کنترل کننده جلوگیری شده است. این امر باعث می‌شود که پس از رفع خطا، کنترل کننده ولتاژ به سرعت به کار عادی خود ادامه داده و ولتاژ ریزشبه را در مقدار مرجع تنظیم نماید. جدول (۲) نتایج عددی حاصل از این سناریو را نشان می‌دهد.

۲-۴- خطای سه فاز

بازیابی نمی‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در حالت استفاده از ساختار متعادل کنترل سلسله مراتبی، ولتاژ فاز سالم در حین خطا $1/24$ pu و حداکثر ولتاژ بین سه فاز پس از رفع خطا $1/15$ pu می‌باشد. نتایج حاصل از شکل (۱۰) و جدول (۲) نشان می‌دهند که با پیاده‌سازی مستقل کنترل افقی و کنترل‌کننده ولتاژ سطح دوم برای هر فاز و غیر فعالسازی انتگرال‌گیر کنترل‌کننده ولتاژ سطح دوم در حین خطا، ولتاژ فاز سالم در حین خطا و ولتاژ همه فازها پس از رفع خطا در مقدار pu ۱ قرار دارند.

۵- نتیجه‌گیری

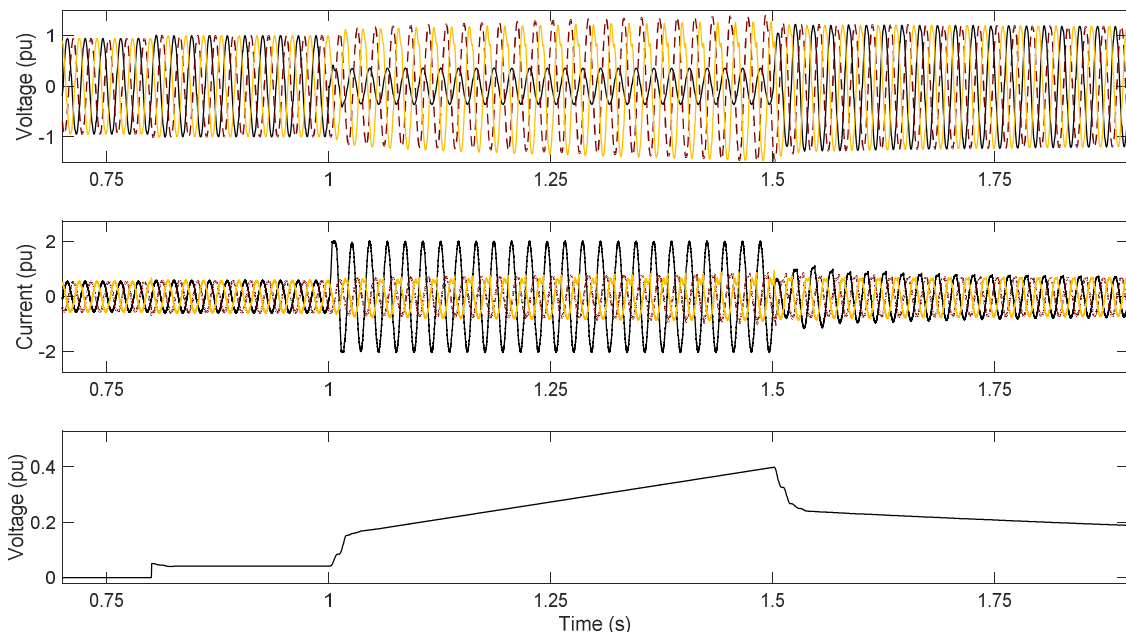
در این مقاله به بررسی عملکرد محدودکننده ترکیبی جریان و ولتاژ مبدل منبع ولتاژ در یک ریزشبه جزیره‌ای در هنگام فعال بودن کنترل سطح دوم پرداخته شد. ساختار متعادل کنترل سلسله مراتبی از یک طرف می‌تواند منجر به افزایش ولتاژ فازهای سالم در حین خطا و از طرف دیگر باعث افزایش ولتاژ همه فازها پس از رفع خطا شود. اثر استفاده از قابلیت کنترل مستقل هر فاز در حلقه کنترل توان سطح اول و در کنترل‌کننده ولتاژ سطح دوم و بکارگیری روش انتگرال‌گیری مشروط در کنترل‌کننده ولتاژ سطح دوم در بهبود عملکرد ریزشبه‌که در حین و پس از رفع خطا با شبیه‌سازی یک سیستم تست نشان داده شد

در سناریوی دوم یک خطای متقارن در دو سر بار در لحظه $t = 1$ s شبیه‌سازی می‌شود که این خطا در لحظه $t = 1/5$ s به طور اتوماتیک برطرف می‌شود. شکل (۷) نتایج حاصل از استفاده از ساختار متعادل کنترل سلسله‌مراتبی را نشان می‌دهد. همانگونه که مشاهده می‌شود، به دلیل افزایش صعودی خروجی کنترل‌کننده ولتاژ هر سه فاز، ولتاژ ریزشبه‌که پس از رفع خطا تحت کنترل نبوده و از مقدار مرجع بیشتر می‌شود.

هنگامی که از کنترل مستقل هر فاز و انتگرال‌گیری مشروط برای پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌های سطوح کنترل اول و دوم استفاده می‌شود، در کنار محدودسازی مناسب جریان مبدل در حین خطا، ولتاژ ریزشبه‌که نیز پس از رفع خطا تحت کنترل است. همچنین حداکثر مقدار اعوجاج هارمونیک کل ولتاژ و جریان خروجی مبدل به ترتیب 0.19% و 0.15% می‌باشد که در محدوده مجاز استاندارد IEEE std 519 [۲۱] قرار دارد. نتایج نشان داده شده در شکل (۸) و جدول (۲) مؤید این مطالب است.

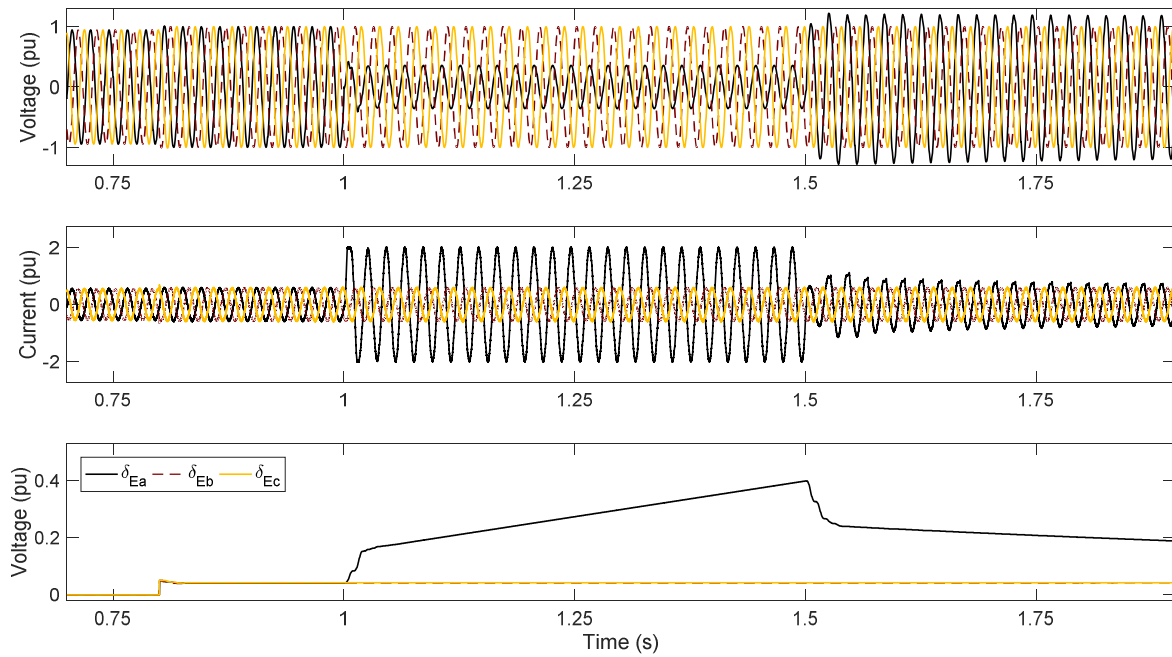
۳-۴- خطای دو فاز

در سناریوی سوم یک خطای نامتقارن دو فاز $a-b$ در دو سر بار در لحظه $t = 1$ s شبیه‌سازی می‌شود که این خطا در لحظه $t = 1/5$ s به طور اتوماتیک برطرف می‌شود. همانگونه که در شکل (۹) نشان داده شده است، پس از رفع خطا کنترل‌کننده ولتاژ سطح دوم به سرعت



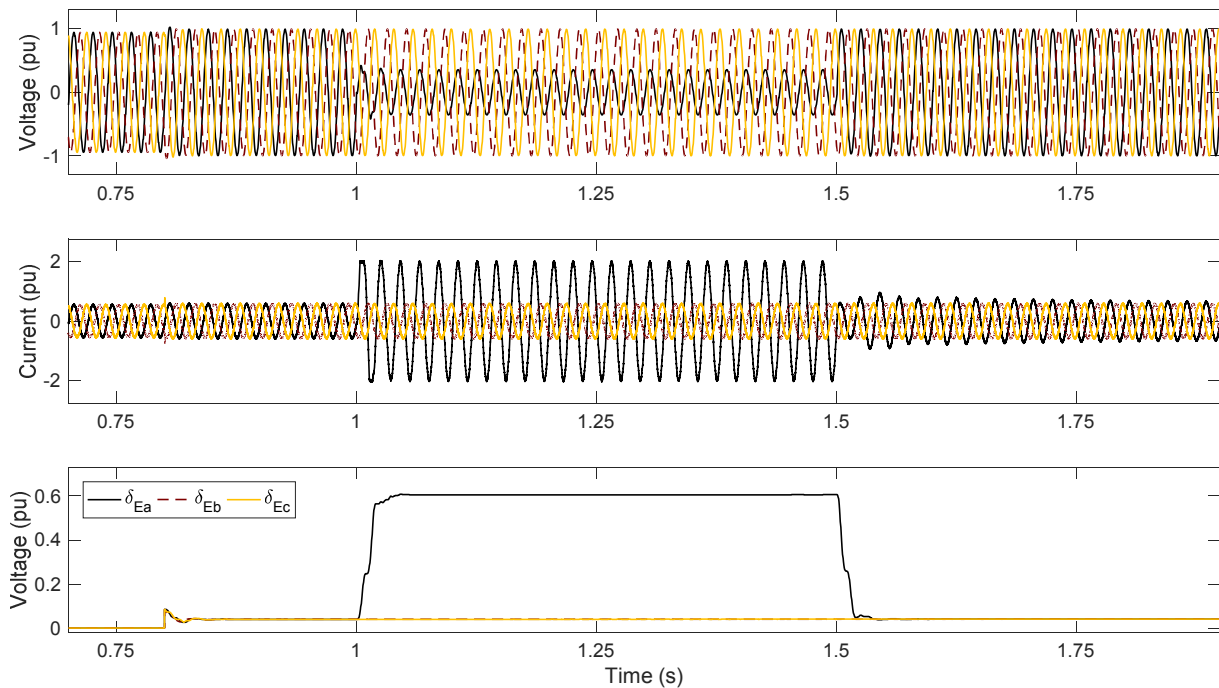
شکل (۴): ولتاژ دو سر بار، جریان سلف فیلتر مبدل اول و خروجی کنترل‌کننده ولتاژ سطح دوم در حین خطای $a-g$ هنگام استفاده از ساختار متعادل کنترل سلسله‌مراتبی

Fig. (4): Load voltage, filter inductor current of converter 1, and output of voltage controller of secondary control level during an $a-g$ fault when balanced structure of hierarchical control is employed



شکل (۵): ولتاژ دو سر بار، جریان سلف فیلتر میدل اول و خروجی کنترل‌کننده ولتاژ سطح دوم در حین خطای a-g هنگام استفاده از کنترل مستقل فاز بدون استفاده از روش انتگرال‌گیری مشروط در کنترل‌کننده ولتاژ

Fig. (5): Load voltage, filter inductor current of converter 1, and output of voltage controller of secondary control level during an a-g fault when the concept of independent control of each phase is employed without using the conditional integration strategy for voltage controller



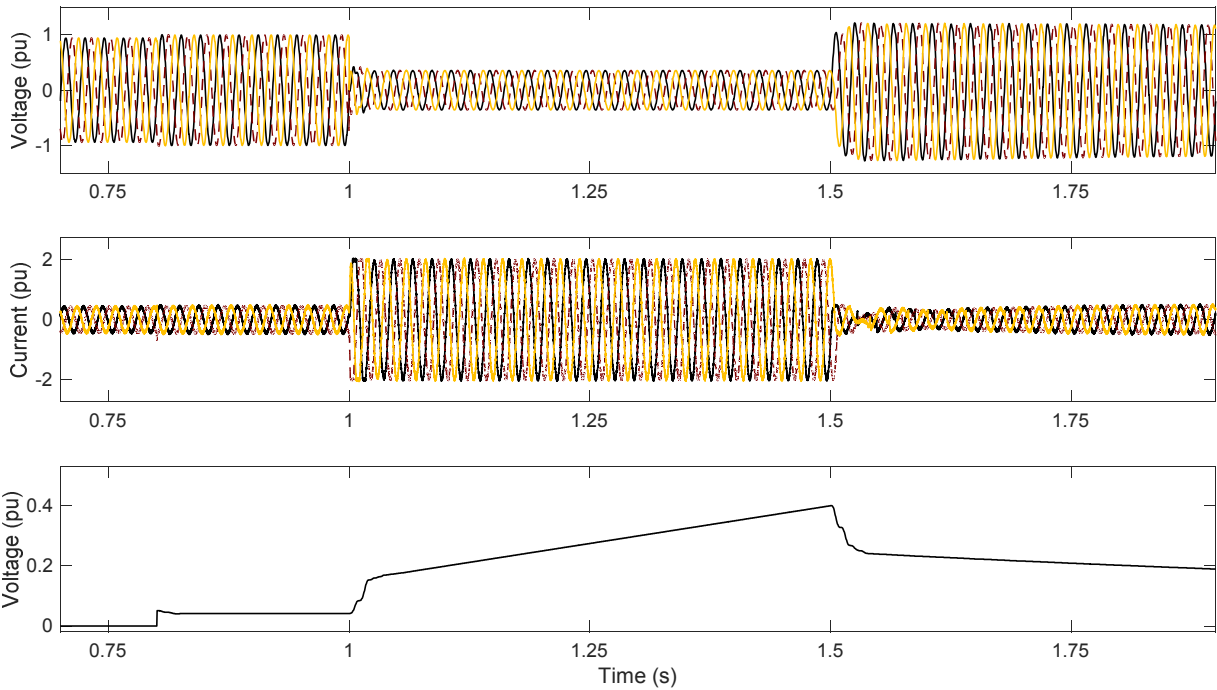
شکل (۶): ولتاژ دو سر بار، جریان سلف فیلتر میدل اول و خروجی کنترل‌کننده ولتاژ سطح دوم در حین خطای a-g هنگام استفاده از کنترل مستقل فاز و انتگرال‌گیری مشروط

Fig. (6): Load voltage, filter inductor current of converter 1, and output of voltage controller of secondary control level during an a-g fault when the concept of independent control of each phase and conditional integration are employed

Table (2): Performance of the balanced and independent control of each phase structures of hierarchical control

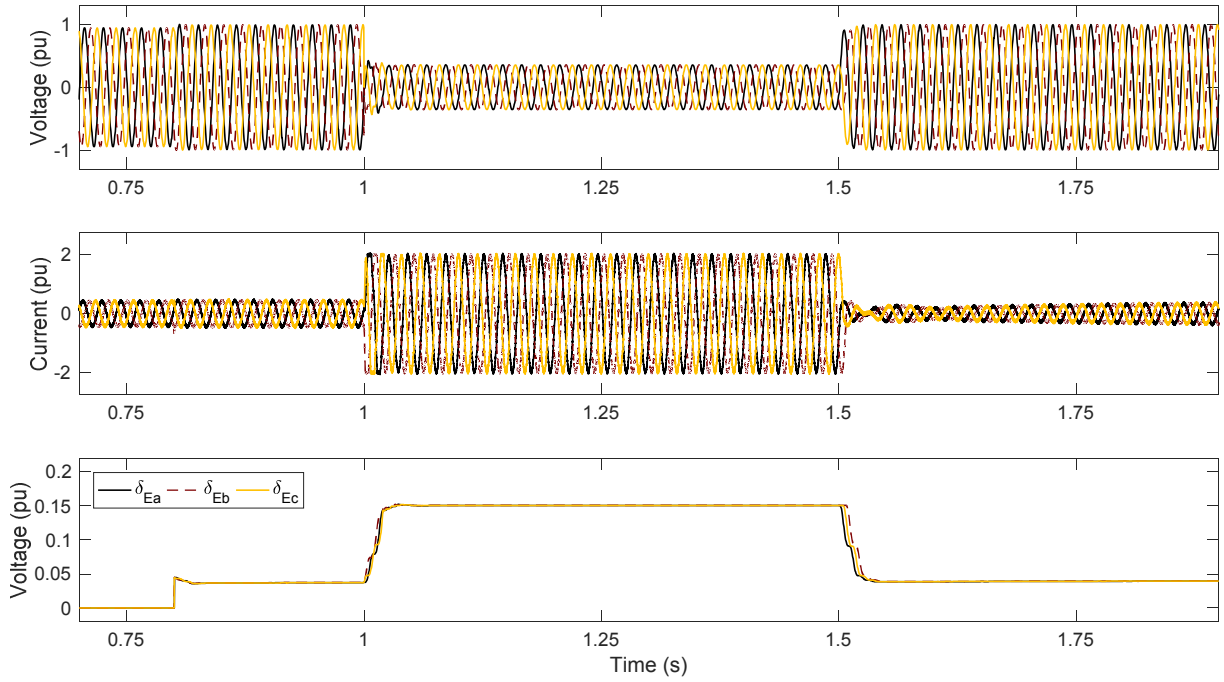
جدول (۲): عملکرد ساختارهای متعادل و کنترل مستقل هر فاز کنترل سلسله‌مراتبی

سناریو	ولتاژ فاز سالم در حین خطا (pu)	حداکثر ولتاژ در لحظات اول بعد از رفع خطا (pu)	جریان سلف فیلتر مبدل (pu)	اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ مبدل (%)	اعوجاج هارمونیکی کل جریان مبدل (%)
خطای a-g کنترل متعادل	۱/۳۵	۱/۱۵	۲	۱۰/۲۸	۶/۸۶
خطای a-g؛ کنترل مستقل بدون روش انتگرال‌گیری مشروط	۱	۱/۱۵	۲	۰/۲۳	۰/۱۲
خطای a-g؛ کنترل مستقل با روش انتگرال‌گیری مشروط	۱	۱	۲	۰/۱۸	۰/۱۷
خطای a-b-c-g کنترل متعادل	۰/۳۶	۱/۱۵	۲	۰/۲۴	۰/۱۰
خطای a-b-c-g؛ کنترل مستقل با روش انتگرال‌گیری مشروط	۰/۳۶	۱	۲	۰/۱۹	۰/۱۵
خطای a-b کنترل متعادل	۱/۲۴	۱/۱۵	۲	۱/۵۱	۲/۱۲
خطای a-b؛ کنترل مستقل با روش انتگرال‌گیری مشروط	۱	۱	۲	۰/۲۱	۰/۰۷



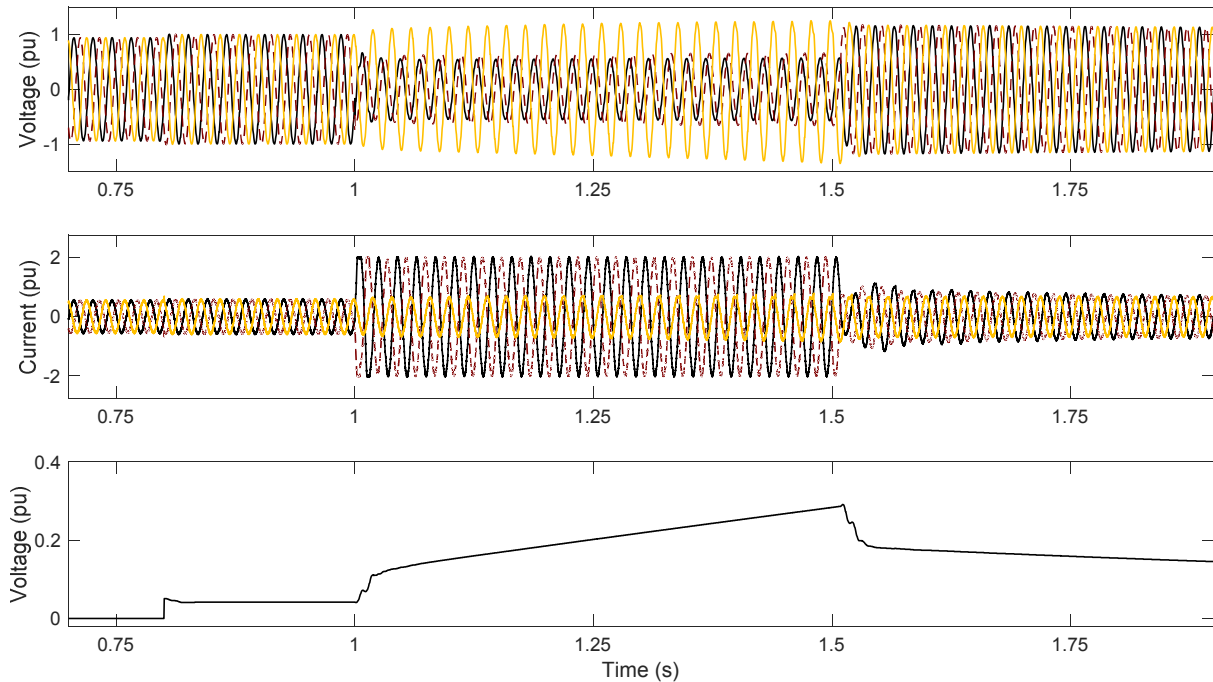
شکل (۷): ولتاژ دو سر بار، جریان سلف فیلتر مبدل دوم و خروجی کنترل‌کننده ولتاژ سطح دوم در حین خطای a-b-c-g هنگام استفاده از ساختار متعادل کنترل سلسله‌مراتبی

Fig. (7): Load voltage, filter inductor current of converter 2, and output of voltage controller of secondary control level during an a-b-c-g fault when balanced structure of hierarchical control is employed



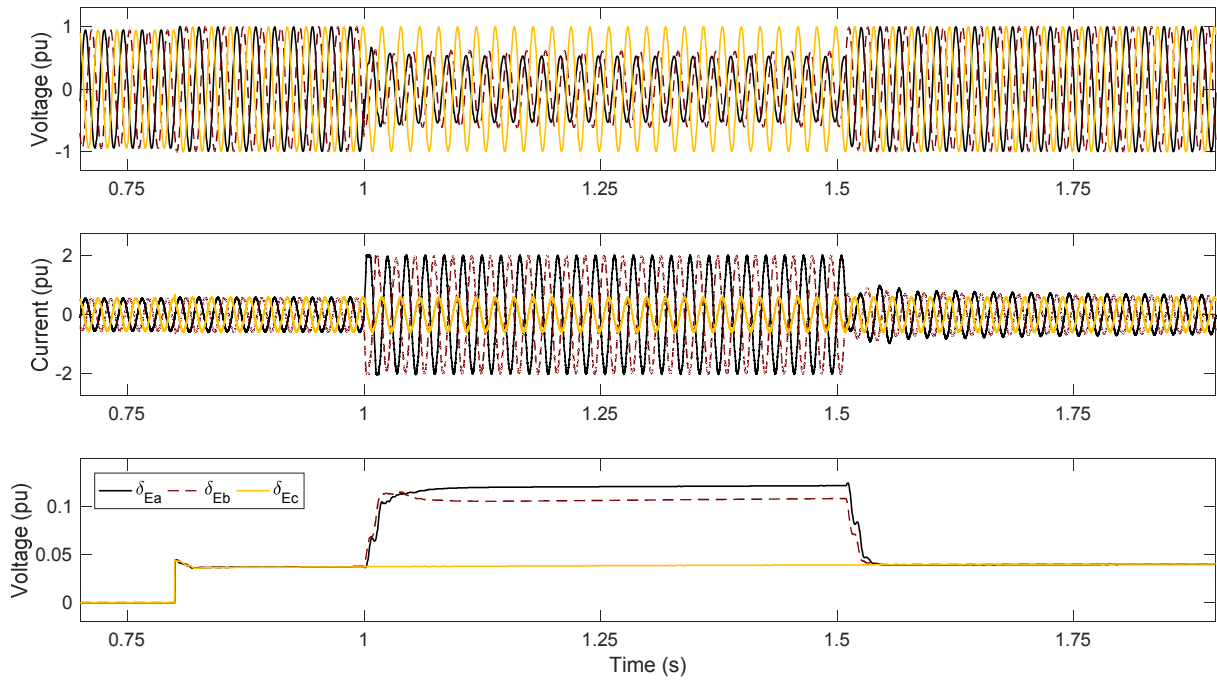
شکل (۸): ولتاژ دو سر بار، جریان سلف فیلتر میدل دوم و خروجی کنترل کننده ولتاژ سطح دوم در حین خطای a-b-c-g هنگام استفاده از کنترل مستقل فاز و انتگرال گیری مشروط

Fig. (8): Load voltage, filter inductor current of converter 2, and output of voltage controller of secondary control level during an a-b-c-g fault when the concept of independent control of each phase and conditional integration are employed



شکل (۹): ولتاژ دو سر بار، جریان سلف فیلتر میدل اول و خروجی کنترل کننده ولتاژ سطح دوم در حین خطای a-b هنگام استفاده از ساختار متعادل کنترل سلسله مراتبی

Fig. (9): Load voltage, filter inductor current of converter 1, and output of voltage controller of secondary control level during an a-b fault when balanced structure of hierarchical control is employed



شکل (۱۰): ولتاژ دو سر بار، جریان سلف فیلتر مبدل اول و خروجی کنترل کننده ولتاژ سطح دوم در حین خطای a-b هنگام استفاده از کنترل مستقل فاز و انتگرال گیری مشروط

Fig. (10): Load voltage, filter inductor current of converter 1, and output of voltage controller of secondary control level during an a-b fault when the concept of independent control of each phase and conditional integration are employed

References

- [1] D.P. Mishra, S.R. Samantaray, G. Joos, "A combined wavelet and data-mining based intelligent protection scheme for microgrid", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 7, No. 5, pp. 2295-2304, Sep. 2016.
- [2] I. Sadeghkhan, "Management of inverter-based microgrids performance during and after short-circuit and overload faults," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Comp. Eng., Isfahan Univ. Tech., Isfahan, Iran, Jan. 2017. (in Persian)
- [3] M. Monfared, S. Golestan, J. Guerrero, "Analysis, design, and experimental verification of a synchronous reference frame voltage control for single-phase inverters", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 61, No. 1, pp. 258-269, Jan. 2014.
- [4] M. Zamani, A. Yazdani, T. Sidhu, "A communication-assisted protection strategy for inverter-based medium-voltage microgrids", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 3, No. 4, pp. 2088-2099, Dec. 2012.
- [5] J.M. Guerrero, J.C. Vasquez, J. Matas, L.G. de Vicuña, M. Castilla, "Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—A general approach toward standardization", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. 58, No. 1, pp. 158-172, Jan. 2011.
- [6] A. Bidram, A. Davoudi, "Hierarchical structure of microgrids control system", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 3, No. 4, pp. 1963-1976, Dec. 2012.
- [7] A. Milczarek, M. Malinowski, J.M. Guerrero, "Reactive power management in islanded microgrid—Proportional power sharing in hierarchical droop control", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 6, No. 4, pp. 1631-1638, Jul. 2015.
- [8] N. Bottrell, T.C. Green, "Comparison of current-limiting strategies during fault ride-through of inverters to prevent latch-up and wind-up", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 29, No. 7, pp. 3786-3797, Jul. 2014.
- [9] A. Plet, M. Graovac, T.C. Green, R. Iravani, "Fault response of grid-connected inverter dominated networks", Proceeding of the in Proc. IEEE/PES, pp. 1-8, Providence, RI, USA, July 2010.
- [10] M.A. Haj-Ahmed, M.S. Illindala, "The influence of inverter-based DGs and their controllers on distribution network protection", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 50, No. 4, pp. 2928-2937, Jul./Aug. 2014.
- [11] M.S. Golsorkhi Esfahani, D.D.C. Lu, "A decentralized control method for islanded microgrids under unbalanced conditions", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 31, No. 3, pp. 1112-1121, June 2016.
- [12] I. Ngamroo, T. Karaipoom, "Improving low-voltage ride-through performance and alleviating power fluctuation of DFIG wind turbine in DC microgrid by optimal SMES with fault current limiting function", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, Vol. 24, No. 5, pp. 1-5, Oct. 2014.
- [13] W. Lee, J. Sim, K.B. Park, I.S. Oh, "Practical application issues of superconducting fault current limiters for electric power systems", IEEE Trans. on Applied Superconductivity, vol. 18, no. 2, pp. 620-623, Jun. 2008.

- [14] S. Beheshtaein, M. Savaghebi, J.M. Guerrero, J.C. Vasquez, "A secondary-control based fault current limiter for four-wire three phase inverter-interfaced DGs", Proceeding of the IEEE/IECON, Beijing, China, Nov. 2017.
- [15] I. Sadeghkhan, M. Hamedani Golshan, J. Guerrero, A. Mehrizi-Sani, "A current limiting strategy to improve fault ride-through of inverter interfaced autonomous microgrids", IEEE Trans. Smart Grid, Vol. 8, No. 5, pp. 2138-2148, Sep. 2017.
- [16] J.A. Peas Lopes, C. Moreira, A. Madureira, "Defining control strategies for microgrids islanded operation", IEEE Trans. on Power System, Vol. 21, No. 2, pp. 916-924, May 2006.
- [17] M.E. Baran, I. El-Markaby, "Fault analysis on distribution feeders with distributed generators", IEEE Trans. on Power System, Vol. 20, No. 4, pp. 1757-1764, Nov. 2005.
- [18] C.T. Lee, C.C. Chu, P.T. Cheng, "A new droop control method for the autonomous operation of distributed energy resource interface converters," IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 28, No. 4, pp. 1980-1993, April 2013.
- [19] I. Usunariz, M. Santamaria, K. Montesidi, M. Aguado, "A modified control scheme of droop-based converters for power stability analysis in microgrids", Journal of Solar Energy, Vol. 2015, Article ID 393527, 2015.
- [20] A. Ghoshal, V. John, "Anti-windup schemes for proportional integral and proportional resonant controller", Proceeding of the NPEC, 2010.
- [21] "IEEE recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems", IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992), pp. 1-29, Jun. 2014.