

ارایه یک استراتژی کنترلی بهینه برای حفاظت منبع تغذیه بی‌وقفه مبتنی بر اینورتر منبع ولتاژ در مقابل انواع اضافه جریان

احسان آرامی^۱، بابک صفری چاپک^{۲*}، سینا یزدانی^۳

سجاد غلامرضایی سرولات^۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۰۲

کد مقاله: ۶۷۳۶۳

چکیده

مبدل‌های منبع تغذیه بی‌وقفه مورد استفاده در سیستم‌های تشخیص خطا و حفاظت، نقش مهمی در بهبود کیفیت توان شبکه بازی می‌کنند. در این مقاله، یک استراتژی جدید کنترلی برای حفاظت آن‌ها در مقابل رخداد اضافه جریان شامل اتصال کوتاه و اضافه بار ارائه می‌شود و برای بهینه‌سازی ضرایب کنترلی در حلقه‌های ولتاژی و جریانی بکارگرفته شده از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌گردد. به منظور اعتبارسنجی و تایید کارایی استراتژی کنترلی پیشنهادی، مطالعات عددی برای شرایط اتصال کوتاه سه فاز متقارن و اضافه بار در یک فاز بکار گرفته می‌شود. نتایج شبیه‌سازی گواه این حقیقت است که طرح کنترلی پیشنهادی می‌تواند گذرای جریانی و ولتاژی ایجاد سیستم را در هنگام اتصال کوتاه با کمترین زمان نشست و ماکزیمم اورشوت میراسازی نموده و عملکرد سیستم را به مقدار مطلوب بازیابی نماید، بعلاوه، قادر است تا وظیفه مقابله با گذاری حاصل از رخداد اضافه بار را با کمترین چالش انجام دهد.

واژگان کلیدی: منبع تغذیه بی‌وقفه (UPS)، اینورتر منبع ولتاژ (VSI)، حفاظت اضافه جریان، سیستم تشخیص خطا-حفاظت، ضرایب کنترلی-تناسبی-انترالی، و الگوریتم ژنتیک.

۱- کارشناس ارشد مهندسی برق، مدیریت و برنامه‌ریزی انرژی الکتریکی، فارغ‌التحصیل دانشگاه آزاد کرج

۲- کارشناس ارشد مهندسی برق-قدرت، رئیس شرکت کهکشان پژوهش گستر برق (نویسنده مسئول)

Babak.safari9941@gmail.com

۳- کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت، دانشجوی دانشگاه گیلان

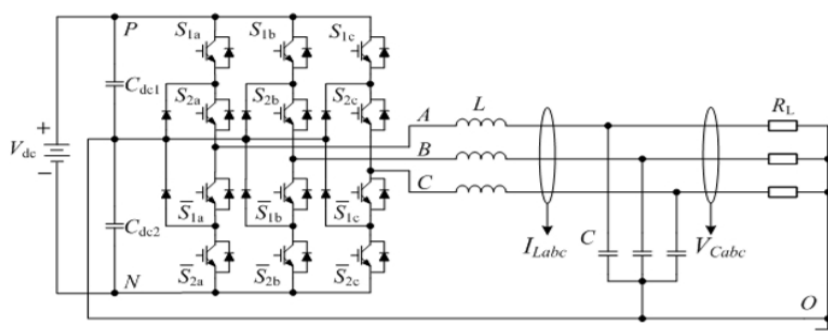
۴- کارشناس ارشد مهندسی برق-الکترونیک، مربی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

مبدل‌های منبع تغذیه بی وقفه (UPS) برای مقابله با مشکلات کیفیت توان در برخی از سیستم‌های ویژه طراحی و بکار گرفته می‌شوند. سیستم تشخیص خطا و حفاظت جایگاه مهمی را در سیستم‌های UPS دارد. به طور کلی، برای این تجهیزات دو نوع روش حفاظت اضافه جریان وجود دارد که شامل روش‌های مبتنی بر سخت افزار و روش‌های مبتنی بر نرم افزار می‌باشد. برای جلوگیری از آسیب‌های ناشی از گرمای بیش از حد و تخریب کلیدهای مبدل الکترونیک قدرت VSI در UPS، تشخیص سریع خطای اضافه جریان شامل اتصال کوتاه یا اضافه بار بسیار ضروری است (Martins, A. P, 1995:584-589). با توجه به اهمیت بحث مطالعات زیادی در این حوزه برای بسط و توسعه روش‌های حفاظت اضافه جریانی انواع UPS انجام شده است. برای مثال، مرجع (Iwade, T, 2003:480-484) طرحی برای عملکرد موازی سیستم‌های UPS تکفاز و سه فاز پیشنهاد شده است که در آن قادر به افزودن هر تعداد مطلوب از UPS به طور موازی با هدف افزایش قابلیت اطمینان سیستم هستیم. مرجع (Guerrero, J.M, 2008:2845-2859) طرح کنترلی برای بهره‌برداری موازی سیستم‌های UPS ارائه می‌کند. تکنیک‌های تقسیم بار اکتیو و رهیافت‌های کنترل دروپی بحث می‌شود و مزایای طرح کنترلی پیشنهادی در مقایسه با روش‌های دیگر تشریح می‌گردد. مرجع (Faiz, J., 2008:29-49) عملکرد فیلتر خروجی متوالی دو مرحله‌ای برای اینورتر تکفاز منبع ولتاژ UPS را مورد تحقیق قرار داده است و با فیلتر خروجی LC مقایسه کرده است. نتایج شبیه‌سازی، کاهش هارمونیک تولیدی به کمتر از ۴ درصد را تایید می‌کند. در مرجع (Aamir, M, 2016:276-289) یک مطالعه جامع برای انواع ساختار و تکنیک‌های کنترلی سیستم UPS فراهم می‌گردد و مقایسه این سیستم‌ها بر اساس عملکرد، اندازه، هزینه و راندمان آنها ارائه می‌گردد. در مرجع (Zhang, C, 2016: 5176-5188)، یک استراتژی کنترلی دو لایه برای بهره‌برداری موازی اینورترهای سه فاز به شکل UPS آنلاین ارائه گردید. در مرجع (Hussain-Bukhari, S. S, 2017:1149-1156) یک سیستم UPS آنلاین معرفی می‌شود که با بکارگیری طرح کنترلی جریان ویژه‌ای قادر به حذف هارمونیک‌های تولیدی بواسطه جریان هجومی کشیده شده در زمان راه‌اندازی ترانسفر موتورهای تحت بار می‌باشد. در مرجع (Katir, H, 2022:145-150) یک روش کنترل بازگشتی تطبیقی برای حفظ پایداری عملکرد اینورترهای هابرید متوالی بکار گرفته شده در سیستم‌های UPS ارائه گردید. در مرجع (Bloemink, J. M, 2012:2122-2132) روشی برای کنترل یک ریزش‌بکه با حضور منابع انرژی پراکنده مجهز به واسطه‌های VSI تحلیل شده است. در مرجع (Koseoglu, C, 2019:1-7) یک الگوریتم محدود کننده جریان ترکیبی برای اینورترهای کنترل شده ولتاژی ارائه شده است. این الگوریتم از الحاق الگوریتم‌های دیجیتال و آنالوگ یک سیستم با قابلیت پاسخگویی سریع و شکل موج ولتاژ خروجی با کیفیت بالا حتی حین رخدادهای گذار فراهم می‌کند. همان طور از مرور مقالات اخیر استنباط می‌شود، پژوهش‌های کمی در حوزه حفاظت سیستم‌های UPS مبتنی بر VSI و CSI انجام شده است. بنابراین، در این مقاله یک استراتژی کنترلی جدید برای حفاظت تجهیز UPS مبتنی بر VSI در مقابل رخداد انواع اضافه جریان‌ها شامل اتصال کوتاه و اضافه بار ارائه می‌گردد. برای بهینه‌سازی ضرایب کنترلی تناسبی و رزونانسی در حلقه‌های ولتاژی و جریانی بکار گرفته شده از الگوریتم ژنتیک استفاده می‌گردد. مابقی بخش‌های مقاله به صورت ذیل سازماندهی می‌شود: در بخش دوم، طرح پیشنهادی حفاظت UPS مبتنی بر VSI در مقابل اضافه جریان ارائه می‌شود و سپس طرح حفاظت در مقابل اتصال کوتاه و اضافه بار بر اساس روابط حاکم آنالیز می‌شود. در بخش سوم، کدسازی مسئله بهینه‌سازی مذکور برای حل توسط الگوریتم ژنتیک تشریح می‌گردد. در بخش چهارم، مطالعات عددی و شبیه‌سازی با هدف ارزیابی عملکرد استراتژی کنترلی پیشنهادی برای حفاظت سیستم UPS مبتنی بر VSI تست در مقابل رخداد اضافه جریان شامل اتصال کوتاه سه فاز متقارن و اضافه بار بکار گرفته می‌شود و در بخش پنجم نیز نتایج مفهومی حاصل از شبیه‌سازی ارائه می‌گردد.

۲- استراتژی کنترلی پیشنهادی برای حفاظت UPS مبتنی بر VSI در مقابل اضافه جریان

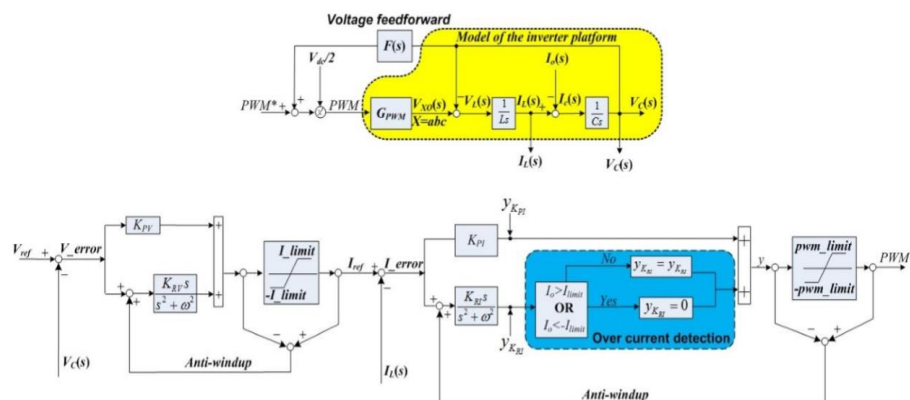
در این بخش، استراتژی کنترلی پیشنهادی ما برای حفاظت سیستم UPS مبتنی بر VSI در مقابل رخداد اضافه جریان شامل اتصال کوتاه و اضافه بار تشریح می‌شود. بمنظور دستیابی به قابلیت اطمینان و دسترسی‌پذیری بالای UPS، طرح حفاظتی اتصال کوتاه و اضافه بار ضروری می‌باشد. وقتی اضافه بار رخ می‌دهد با استفاده از روش کنترلی پیشنهادی دامنه جریان خروجی را می‌توان به مقدار ثابتی محدود نمود، که این مقدار از طرف مصرف‌کننده برای اجتناب از خرابی کانورتر و همچنین برای فراهم‌سازی بازایی سریعتر قابل تنظیم می‌باشد. روش حفاظت پیشنهادی اساساً سه بخش کنترلی برای محدودسازی جریان را شامل می‌شود، بخش اول شامل آنتی-ویندآپ در کنترلرهای جریان و ولتاژ است، بعدی بخش فیدفوروارد ولتاژ خازن برای حلقه کنترل جریان است و نهایتاً، بخش سوم برای بازنشانی سریع قسمت رزونانسی کنترلر جریان وقتی که اضافه جریان رخ می‌دهد، است. در روش کنترلی پیشنهادی، ضرایب تناسبی-رزونانسی حلقه‌های کنترلی ولتاژ و جریان بترتیب شامل K_{PV} و K_{RV} و K_{PI} و K_{RI} را به

طور بهینه از طریق الگوریتم هوشمند ژنتیک تعیین می‌گردد تا بهترین پاسخ کنترلی حاصل شود. روش حفاظت اتصال کوتاه و اضافه بار پیشنهادی ما در واقع بر مبنای کاربرد یک الگوریتم جدید می‌باشد که در این طرح کنترلی، حلقه فیدفوروارد اضافه می‌شود، و وقتی اضافه جریان رخ می‌دهد دیگر اصلا مهم نیست زیرا که اضافه بار یا اتصال کوتاه در فازهای خروجی، خروجی قسمت رزونانسی کنترلر جریان با مقدار صفر تنظیم مجدد می‌شود که این امر مانع تجاوز جریان‌های خروجی از مقادیر از پیش تعیین شده خواهد شد. استفاده از ولتاژ خروجی به صورت فیدفوروارد یک پاسخ سریع برای فرآیند حفاظتی توسط حذف اثر ولتاژ خازن ایجاد خواهد کرد. بعلاوه، حلقه آنتی-ویندآپ همچنین به کنترلر رزونانسی اضافه می‌شود. برای یک سیستم UPS سه فاز، سه خروجی طوری ساخته می‌شود که قادر به عملکرد تکفاز یا سه فاز باشد تا اینکه برای اتصال به انواع بارها به طور همزمان مناسب بوده و از انعطاف‌پذیر برخوردار باشد. بنابراین، کنترل تحت قاب هماهنگی ایستا است، که کار برای تست کارایی استراتژی فاز به فاز و سه فاز باهم بسیار ساده و آسان می‌گردد. شکل (۱) ساختار اینورتر NPC سه فاز سه سطحی با فیلتر LC در سمت خروجی را نشان می‌دهد. شکل (۲) طرح کنترلی پیشنهادی ما را نشان می‌دهد. به طور متداول، حلقه‌های آنتی ویندآپ به کنترلرهای رزونانسی جریان و ولتاژ برای اجتناب از امکان اورشوت بیش از حد در خروجی آنها اضافه می‌گردد. به هر حال، این نوع کنترل به تنهایی کفایت لازم برای یک عملکرد عالی حفاظتی در مقابل اتصال کوتاه یا اضافه بار را نخواهد داشت. اما در طرح کنترل پیشنهادی، بمنظور داشتن یک پاسخ مناسب و سریع در جهت محدودسازی جریان اضافه بار یا اتصال کوتاه، اگر جریان خروجی از مقدار از پیش تعیین شده تجاوز نمود، قسمت رزونانسی کنترلر PR در حلقه کنترلی، جریان را با مقدار صفر جایگزین خواهد نمود.



شکل ۱- ساختار اینورتر NPC سه فاز سه سطحی با فیلتر LC در سمت خروجی

بعلاوه، در مقایسه با حلقه‌های کنترل جریان و ولتاژ متداول، ولتاژ خازن فیلتر V_C به طور مستقیم به عنوان ورودی حلقه جریان خروجی را تغذیه می‌کند. با هماهنگی سه قسمت در این طرح کنترلی که شامل حلقه آنتی ویندآپ در کنترلرهای ولتاژ و جریان، کنترل فیدفوروارد ولتاژ خازن و قسمت رزونانسی کنترلر جریان، در زمان اضافه جریان یک محدودسازی سریع و مناسب جریان فراهم می‌گردد. قسمت فیدفوروارد ولتاژ خازن به هنگام وقوع اضافه جریان بویژه تحت شرایط اتصال کوتاه می‌تواند اثر ولتاژ خازن بر روی جریان خروجی را حذف نماید. قسمت رزونانسی کنترلر جریانی می‌تواند به سرعت شکل موج مدولاسیون را به مقدار محدودسازی از پیش تعیین شده با هدف اجتناب از ورود به شرایط غیرقابل کنترل یا اورشوت جریان کاهش دهد. بنابراین، هر یک از سه بخش یک وظیفه مهم را برای محدودسازی جریان تحت شرایط اضافه بار و اتصال کوتاه بازی می‌کنند.



شکل (۲): طرح کنترلی پیشنهادی برای حفاظت UPS مبتنی بر VSI در مقابل اضافه جریان

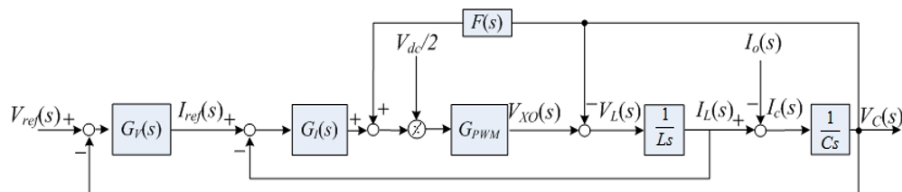
شکل (۳) مدل کنترلی خطی ساده شده برای VSI در UPS را نشان می‌دهد. که در آن، تابع تبدیل کنترلر ولتاژ $G_V(s)$ مطابق رابطه (۱)، تابع تبدیل کنترلر جریان $G_I(s)$ مطابق رابطه (۲) و تابع تبدیل اینورتر $G_{PWM}(s)$ مطابق رابطه (۳) اشاره دارد.

$$G_V(s) = K_{PV} + \frac{K_{RV}S}{S^2 + \omega^2} \quad (۱)$$

$$G_I(s) = K_{PI} + \frac{K_{RI}S}{S^2 + \omega^2} \quad (۲)$$

$$G_{PWM}(s) = K_{PWM} + \frac{1}{1+1.5T_S} \quad (۳)$$

که K_{PV} و K_{RV} بترتیب ضرایب تناسبی و رزونانسی کنترلر ولتاژ **PR** هستند، که K_{PI} و K_{RI} بترتیب ضرایب تناسبی و رزونانسی کنترلر جریان **PR** هستند، برای **VSI** سه سطحی مقدار گین K_{PWM} برابر با $V_{dc}/2$ است. به هر حال، به منظور سرکوب و حذف تاثیر ولتاژ باس **DC**، این باس همیشه در کنترل مورد توجه می‌باشد، سیگنال PWM به مقدار $V_{dc}/2$ قبل از ارسال به مدار درایور تقسیم خواهد شد به نحوی که گین مسیر از خروجی کنترلر جریان به خروجی اینورتر، از نقطه PWM^* به نقطه $V_{XO}(s) (X = A, B, C)$ در شکل (۲) معادل مقدار عددی ۱ خواهد بود. متعاقبا، یک واحد کنترل فیدفوروارد در اینجا $F(s) = 1$ بکار گرفته می‌شود. آنالیز کنترلر **PR** برای تشریح روش کنترلی پیشنهادی ضروری است زیرا آن یک بخش مهم در رهیافت کنترلی پیشنهادی محسوب می‌شود. دیاگرام کلی کنترلر **PR** در شکل (۳) نمایش شده است.



شکل (۳): مدل کنترلی ساده شده برای VSI در UPS

تابع تبدیل کنترلر **PR** در رابطه (۴) بیان می‌شود. با توجه به سیگنال خطای ورودی فرکانس مشابه با **PR** نظیر $u_{error}(t) = M \sin(\omega t + \phi)$ ، تبدیل لاپلاس $u_{error}(t)$ مطابق رابطه (۵) خواهد شد. در بخش رزونانسی کنترلر **PR**، خروجی $y_{KR}(s)$ مشاهده می‌شود و از رابطه (۵) برای نوشتن رابطه (۶) استفاده می‌شود. با گرفتن عکس لاپلاس از رابطه (۶) مطابق ذیل رابطه (۷) حاصل می‌شود.

$$G_{PR}(s) = K_P + \frac{K_R S}{S^2 + \omega^2} \quad (۴)$$

$$u_{error}(s) = \ell[M \sin(\omega t + \phi)] = \ell[M \sin(\omega t) \cos \phi + M \cos(\omega t) \sin \phi] \quad (۵)$$

$$= M(\cos \phi) \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} + M(\sin \phi) \frac{s}{s^2 + \omega^2} \quad (۶)$$

$$y_{KR}(s) = KR.M \left\{ (\cos \phi) \frac{\omega s}{(s^2 + \omega^2)^2} + \frac{\sin \phi}{2} \left[\frac{s^2 - \omega^2}{(s^2 + \omega^2)^2} + \frac{1}{(s^2 + \omega^2)} \right] \right\} \quad (۷)$$

$$y_{KR}(t) = \left[M(\cos \phi) \frac{\omega}{s^2 + \omega^2} + M(\sin \phi) \frac{s}{s^2 + \omega^2} \right] \frac{KR.s}{s^2 + \omega^2}$$

$$= KR.M \left\{ \frac{\cos \phi}{2} t \sin(\omega t) + \frac{\sin \phi}{2} \left[t \cos(\omega t) + \frac{1}{\omega} \sin(\omega t) \right] \right\}$$

می‌توان به این نکته توجه کرد که خروجی با زمان افزایش می‌یابد تا وقتی که سیگنال ورودی صفر شود. بنابراین، مقدار نهایی کنترلر رزونانسی مقدار ثابتی با خطای حالت دائمی صفر خواهد شد البته اگر کنترلر به درستی تنظیم شده باشد. کنترلر رزونانسی زمانی عملکرد دارد که یک سیگنال خطا موجود باشد. بعلاوه، باید توجه داشت که کنترل رزونانسی فقط با یک سیگنال ورودی غیر صفر کار می‌کند بدین معنی که همواره خروجی کنترل رزونانسی به گردآوری سیگنال خطا با گذر زمان ادامه می‌دهد. بنابراین، یک خطای کوچک می‌تواند منجر به یک اصلاح بزرگ شود اگر زمان کافی باشد. از آنجایی که خطا جمع می‌شود، سیستم تحت فشار خواهد بود تا خطا را اصلاح کند تا در حالت دائمی به مقدار صفر برسد. به هر حال، با کنترلر رزونانسی یا انتگرالی همیشه اورشوت روی سیگنال کنترلی رخ می‌دهد. بمنظور ارزیابی عملکرد یک کنترلر در دیاگرام کنترلی، برخی ابزار را می‌توان بکار گرفت. پاسخ پله اغلب برای تایید کارایی و پایداری یک طرح کنترلی بکار گرفته می‌شود. پاسخ دینامیکی سریع برای یک سیستم قدرت ضروری است و آن می‌تواند انحراف ولتاژ و جریان خروجی را طی خطاهای گذرا با کنترل موثر کاهش دهد. پاسخ پله واحد به طور گسترده در سیستم قدرت استفاده می‌شود، این یک رفتار زمانی از خروجی سیستم است وقتی که در یک زمان

کوتاه ورودی از مقدار صفر به یک پریونیت تغییر می‌کند. از دیدگاه عملی، دانستن اینکه سیستم چگونه به یک ورودی ناگهانی پاسخ خواهد داد بسیار حائز اهمیت است زیرا انحرافات تا حد ممکن سریع و بزرگ از وضعیت حالت دائمی طولانی مدت ممکنه اثرات شدیدی بر کنترلر و تمامی بخش‌های دیگر کل سیستم که وابسته به این کنترلر هستند، داشته باشد. بعلاوه، سیستم قادر به فعالیت نیست تا اینکه خروجی کنترلر به مجاورت حالت دائمی خود برسد. به طور نرمال، دانستن پاسخ پله یک سیستم دینامیکی اطلاعاتی در ارتباط با پایداری اینچنین سیستمی و توانایی آن برای رسیدن به حالت ثابت و استاتیک جدید می‌دهد. به طور نرمال، از طریق پاسخ پله سیستم می‌توان اطلاعاتی نظیر ماکزیمم اورشوت، زمان نشست و پاسخ حالت دائمی سیستم را تعیین کرد. هنگامی که یک اضافه بار یا اتصال کوتاه رخ می‌دهد، سیستم به سمت یک نقطه کار جدید حرکت می‌کند، از دیدگاه بار، می‌توان یک تغییر بزرگ پله‌ای بار را مشاهده کرد، و جریان بیشتری که باید از طریق کانورترها فراهم شود، برای حفاظت سخت افزاری، ما نیاز به تمرکز بر روی این سه جنبه خواهیم داشت: کاهش ماکزیمم اورشوت و زمان نشست و همچنین دستیابی به یک حفاظت محدودساز جریانی مناسب. بنابراین، آنالیز پاسخ پله سیستم حلقه-بسته برای استراتژی کنترلی پیشنهادی می‌تواند یک رهیافت بهینه برای بهبود فرآیند کنترلی سیستم ارائه دهد. در اینجا سه ساختار کنترلی متفاوت برای تحلیل پاسخ پله طرح کنترلی پیشنهادی مورد توجه قرار می‌گیرد. **مورد ۱**، استفاده تنها از کنترلر تناسبی K_{PI} در حلقه کنترلی جریان با کنترل فیدفوروارد ولتاژ خازن V_C منجر می‌شود که تابع تبدیل حلقه بسته در نتیجه شامل حلقه کنترلی جریان مطابق رابطه (۸) شود. **مورد ۲**، استفاده از کنترلر **PR** در حلقه کنترلی جریان بدون کنترل فیدفوروارد V_C منجر می‌شود که تابع تبدیل حلقه بسته شامل حلقه کنترل جریان مطابق رابطه (۹) خواهد شد که با توجه به رابطه (۱۰) می‌توان رابطه (۹) را به شکل رابطه (۱۱) بازنویسی کرد. در رابطه (۹) به روشنی نشان داده می‌شود که بدون کنترل فیدفوروارد $V_C(s)$ ، تاثیر ولتاژ خازن بر روی جریان سلف قابل حذف نمی‌باشد. در رابطه (۸) مولفه $I_0(s)$ را می‌توان به عنوان یک وقفه خارجی مشاهده نمود. **مورد ۳**، برای مجزاسازی ولتاژ خازن $V_C(s)$ و جریان سلف $I_L(s)$ ، کنترل فیدفوروارد به حلقه کنترل جریان اضافه می‌شود، پس تابع تبدیل حلقه بسته حلقه کنترلی جریان مطابق رابطه (۱۲) خواهد شد. در مطالعه وضعیت سوم می‌توان متوجه شد که تاثیر ولتاژ خازن بر روی جریان سلف حذف می‌شود.

$$I_L(s) = \frac{G_I(s) \frac{1}{Ls+r_L}}{1+G_I(s) \frac{1}{Ls+r_L}} I_{ref}(s) = \frac{K_{PI}}{Ls+r_L+K_{PI}} I_{ref}(s) \quad (8)$$

$$I_L(s) = \frac{G_I(s) \frac{1}{Ls+r_L}}{1+G_I(s) \frac{1}{Ls+r_L}} I_{ref}(s) - \frac{\frac{1}{Ls+r_L}}{1+G_I(s) \frac{1}{Ls+r_L}} V_C(s) \quad (9)$$

$$= \frac{K_{PI}s^2 + K_{RI}s + K_{PI}\omega_0^2}{Ls^3 + (K_{PI} + r_L)s^2 + (\omega_0^2 L + K_{RI})s + (K_{PI} + r_L)\omega_0^2} I_{ref}(s) - \frac{s^2 + \omega_0^2}{Ls^3 + (K_{PI} + r_L)s^2 + (\omega_0^2 L + K_{RI})s + (K_{PI} + r_L)\omega_0^2} V_C(s)$$

$$V_C(s) = \frac{I_L(s) - I_0(s)}{Cs} \quad (10)$$

$$I_L(s) = \frac{K_{PI}Cs^3 + K_{RI}Cs^2 + K_{PI}\omega_0^2 Cs}{A(s)} I_{ref}(s) - \frac{s^2 + \omega_0^2}{B(s)} I_0(s) \quad (11)$$

$$A(s) = LCs^4 + K_{PI}Cs^3 + [(\omega_0^2 L + K_{RI})C + 1]s^2 + K_{PI}\omega_0^2 Cs + \omega_0^2$$

$$B(s) = LCs^4 + (K_{PI} + r_L)Cs^3 + [(\omega_0^2 L + K_{RI})C + 1]s^2 + (K_{PI} + r_L)\omega_0^2 Cs + \omega_0^2$$

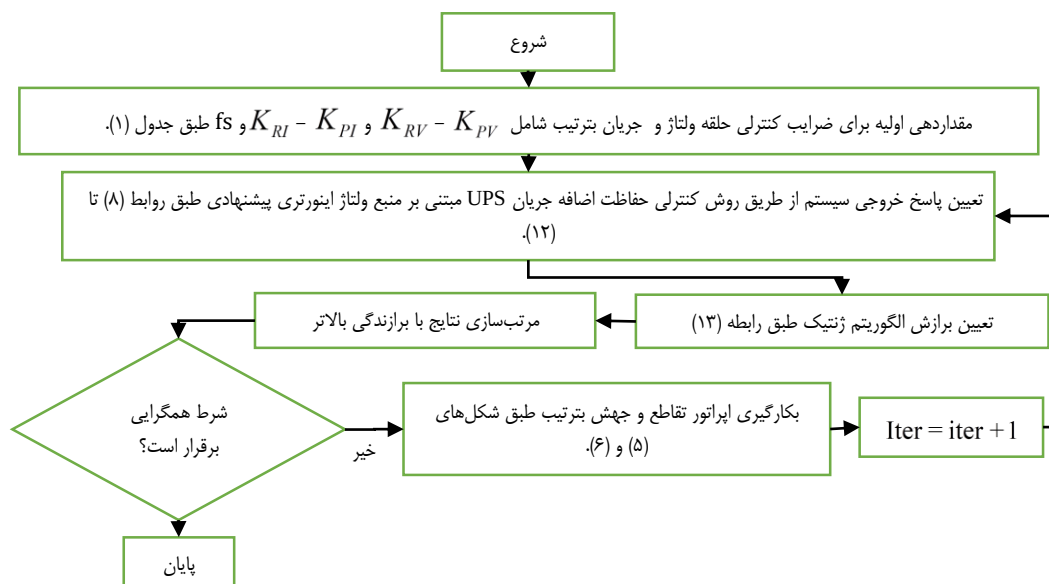
$$I_L(s) = \frac{G_I(s) \frac{1}{Ls+r_L}}{1+G_I(s) \frac{1}{Ls+r_L}} I_{ref}(s) \quad (12)$$

$$= \frac{K_{PI}s^2 + K_{RI}s + K_{PI}\omega_0^2}{Ls^3 + (K_{PI} + r_L)s^2 + (\omega_0^2 L + K_{RI})s + (K_{PI} + r_L)\omega_0^2} I_{ref}(s)$$

۳- کدسازی مسئله حفاظت اضافه جریانی UPS مبتنی بر VSI توسط الگوریتم ژنتیک

در این بخش، ابتدا فلوچارت کار بمنظور دستیابی به پاسخی مطلوب‌تر از طریق روش کنترلی پیشنهادی ارائه می‌گردد و سپس نحوه کدسازی مسئله بهینه‌سازی کنترل حفاظت اضافه جریانی **UPS** مبتنی بر **VSI** در الگوریتم هوشمند ژنتیک با هدف تعیین

مقادیر بهینه ضرایب تناسبی-رزونانسی حلقه‌های کنترلی ولتاژ و جریان و فرکانس سوئیچینگ **VSI** بترتیب شامل K_{PV} - K_{RV} و K_{PI} - K_{RI} و f_s تشریح می‌گردد. فلوچارت کلی کار در شکل (۴) به نمایش در آمده است. در این بخش، الگوریتم هوشمند ژنتیک به منظور تعیین مقادیر بهینه ضرایب تناسبی و رزونانسی حلقه‌های ولتاژ و جریان کنترلر پیشنهادی بکار گرفته می‌شود.



شکل (۴): فلوچارت کار بمنظور دستیابی به پاسخی مطلوب‌تر از طریق روش کنترلی پیشنهادی

به طور کلی، برای ساخت مدل بهینه‌سازی کنترلی با هدف حفاظت **UPS** مبتنی بر **VSI** در مقابل اضافه بار و اتصال کوتاه با بکارگیری الگوریتم ژنتیک چهار جزء مهم آن باید درست طراحی گردد: اول، دستور زبان یا گرامر کروموزم که در واقع کدبندی و رمزگذاری یک قالب اطلاعاتی است که در فرمت کروموزم کدسازی می‌شود. دوم، تعبیر و تفسیر اطلاعات درون هر کروموزم در واقع کشف رمز از آن می‌باشد. سوم، محاسبه و تعیین برازندگی کروموزم که معادل تنظیمات حفاظتی بهتر برای اینورتر منبع ولتاژ **VSI** در مقابل اضافه بار و اتصال کوتاه می‌باشد. چهارم، عملگرهای مناسب برای امور آمیزش و انتزاج و جهش کروموزم‌ها بخش دیگری از کار است که باعث می‌شود تا تنظیمات حفاظتی نامناسب برای حلقه کنترلی ولتاژ و جریان طرح کنترلی منبع تغذیه بی-وقفه **UPS** مبتنی بر **VSI** با مقادیر بهتر جایگزین کنند. الگوریتم هوشمند ژنتیک به جای اینکه روی پارامترها یا متغیرهای مسئله کار کند، با شکل کد شده آنها به طور مناسب سروکار دارد. متداولترین روش کدگذاری کاربرد اعداد حقیقی در رشته‌های بیتی است. در این روش پارامترها با دنباله‌های مناسب از اعداد حقیقی جایگزین می‌شوند. تعداد بیت‌هایی که برای کدگذاری متغیرها استفاده می‌شود وابسته به محدوده تغییرات پارامترها و رابطه بین متغیرها می‌باشد. برای نمونه، در کنترلر حلقه ولتاژ مقدار عددی K_{PV} بین ۰٫۵ تا ۰٫۹ آمپر به ولت و K_{RV} بین ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ آمپر ثانیه بر ولت می‌باشد و برای کنترلر حلقه جریانی K_{PI} در محدوده ۱ تا ۲ آمپر به ولت و K_{RI} بین ۲۰۰ تا ۸۰۰ آمپر ثانیه بر ولت و f_s بین ۱۵ تا ۲۵ کیلوهرتز است. از آنجایی که در حل مسئله بهینه‌سازی پاسخ روش کنترلی با هدف حفاظت **UPS** مبتنی بر **VSI** در مقابل اضافه جریان مورد توجه قرار گرفته است ساختار کروموزم کدسازی شده معادل حل مسئله مطابق جدول (۱) می‌شود.

جدول (۱): کروموزم نمونه بعنوان تنظیم پارامترهای بهینه روش حفاظت **UPS** مبتنی بر **VSI** در مقابل اضافه جریان

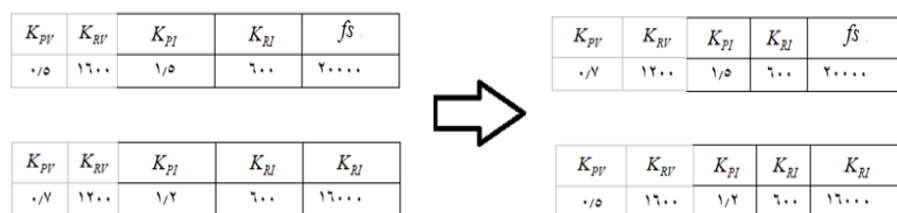
K_{PV}	K_{RV}	K_{PI}	K_{RI}	f_s
۰٫۷	۱۲۰۰	۱٫۵	۶۰۰	۲۰۰۰

از آنجایی که اجرای فرآیند کنترل سیستم **UPS** مبتنی بر **VSI** در مقابل اضافه جریان هدف نهایی کار می‌باشد. بنابراین، باید پاسخ این سیستم در مقابل رخداد اضافه جریان توسط عملکرد کنترلر پیشنهادی با پارامترهای تنظیم حلقه ولتاژ و جریان شامل $K_{RV} - K_{PI}$ و $K_{RI} - K_{RI}$ و همچنین فرکانس سوئیچینگ اینورتر منبع ولتاژ f_s تولیدی الگوریتم ژنتیک در هر تکرار برازش شوند. در اینجا، برازندگی هر مجموعه تنظیم پارامترهای کنترلی از طریق مجموع وزندار شده ماکزیمم اورشوت و زمان نشت پاسخ سیستم به رخداد اضافه بار تعیین می‌گردد. برای مثال، فرکانس سوئیچینگ اینورتر منبع ولتاژ f_s معادل ۲۰ کیلوهرتز در

نظر گرفته می‌شود و دامنه جریان در خروجی اینورتر به ۲۰ آمپر محدود گردد و فرکانس پایه سیستم ۳۱۴ رادیان بر ثانیه باشد. بعلاوه، ولتاژ نامی خروجی اینورتر ۲۳۰ ولت موثر باشد. رابطه برازش تنظیم پارامترهای کنترلی مطابق رابطه (۱۳) تعیین می‌گردد.

$$Fitness_{Control Method} = \alpha.(MAX_{overshoot}) + \beta.(Settling time) \quad (13)$$

با توجه به محاسبه برازش برای جمعیت اولیه کروموزوم‌ها یا به عبارت دیگر پارامترهای تنظیم روش کنترلی برای حفاظت اضافه جریان سیستم **UPS** مبتنی بر **VSI**، اجرای الگوریتم **GA** در تکرار بعد نیاز به مرتب‌سازی کروموزوم‌های والد بهتر بر اساس نتایج برازش بر اساس پاسخ مطلوب سیستم دارد. عملگر تقاطع بر روی یک جفت از کروموزوم‌ها شامل پارامترهای تنظیم روش کنترلی عمل می‌کند و می‌تواند به صورت نقطه‌ای و یا چند نقطه‌ای باشد. عملگر جابجایی تک نقطه‌ای، دو کروموزوم را به طور تصادفی از یک نقطه شکسته و بخش‌های دو کروموزوم را جابه‌جا می‌کند بدین ترتیب دو کروموزوم جدید بدست می‌آید. به کروموزوم‌های اولیه، کروموزوم‌های والد و به کروموزوم‌های حاصل شده از عمل جابه‌جایی و عمل جهش، کروموزوم‌های فرزند گویند. عملگر تقاطع با احتمال **pc** بر روی کروموزوم‌های والد عمل می‌کند. بدین معنی که با احتمال **pc** عمل جابجایی انجام می‌گیرد. در عمل جابجایی، ابتدا نقطه‌ای در حد فاصل دو بیت مجاور از کروموزوم‌های والدین به تصادف انتخاب شده و سپس جابه‌جایی از آن نقطه صورت می‌گیرد. معمولاً اگر کروموزوم از کدگذاری چندین متغیر بوجود آمده باشد، بهتر است که نقطه جابجایی، محل اتصال متغیرها انتخاب شود. در شکل (۵) کروموزوم‌ها از شکل کد شده متغیرهای $K_{PI} - K_{PV}$ و $K_{RV} - K_{RL}$ و **fs** ساخته شده‌اند و محل اتصال متغیرها می‌تواند به عنوان نقطه جابجایی باشد. برای مثال در این شکل محل اتصال متغیرهای K_{RV} و K_{PI} بعنوان نقطه جابجایی انتخاب شده است. تفاوت بین عملگر جابه‌جایی در مقایسه با عملگر جابه‌جایی تک نقطه‌ای در این است که نقطه شکست دو کروموزوم بیش از یکی است و جابه‌جایی در بخش‌های شکسته شده دو کروموزوم به صورت یک در میان انجام می‌گیرد. عملگر جهش به طور تصادفی یک ژن از یک کروموزوم را انتخاب کرده که در اینجا شامل محتوی یک پارامتر تنظیم روش کنترلی است که با تغییر آن به طور تصادفی یک کروموزوم جدید مطابق شکل (۶) ساخته می‌شود.



شکل (۵): تقاطع در کروموزوم‌های معادل پارامتر تنظیم روش کنترلی حفاظت اضافه جریان سیستم **UPS**

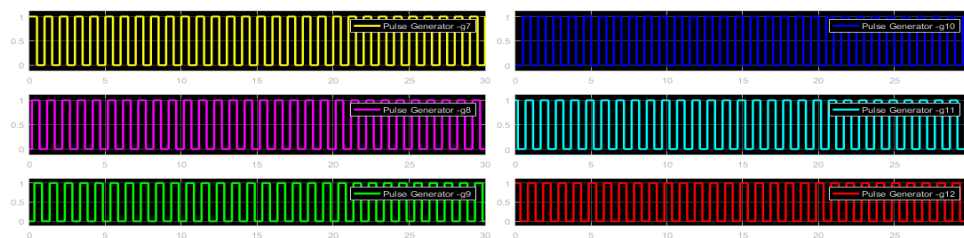


شکل (۶): جهش در کروموزوم معادل پارامتر تنظیم روش کنترلی حفاظت اضافه جریانی تجهیز **UPS**

عملگر انتخاب با انتخاب تعدادی از کروموزوم‌های یک جمعیت، جمعیت جدیدی را تشکیل می‌دهد. این انتخاب به گونه‌ای است که احتمال حضور کروموزوم‌های با برآزندگی بالاتر در جمعیت نهایی، بیشتر از سایر کروموزوم‌ها است.

۴- مطالعات عددی و نتایج شبیه‌سازی

بمنظور اعتبارسنجی و تایید کارایی مدل پیشنهادی حفاظت اضافه جریان **UPS** مبتنی بر **VSI** سه فاز، مطالعات عددی بر روی سیستم تست مطابق شکل (۷) بکار گرفته می‌شود. پارامترهای طرح کنترلی سیستم شامل فرکانس برق **ac** خروجی **UPS**، خازن، سلف فیلتر و مقاومت بار و همچنین محدودیت جریان عبوری از اینورتر منبع ولتاژ سه فاز **VSI** در جدول (۲) نمایش شده است. پیاده‌سازی مدل کنترلی پیشنهادی برای سیستم خطی‌سازی شده مطابق شکل (۸) در محیط نرم افزار متلب بر روی کامپیوتر **ASUS** با پردازشگر چهار هسته‌ای ۲،۴ گیگاهرتزی انجام شده است و از الگوریتم هوشمند ژنتیک **GA** برای مسئله بهینه‌سازی تنظیم پارامترهای کنترلی در حلقه جریانی و ولتاژی و همچنین فرکانس سوئیچینگ **VSI** استفاده گردیده است.

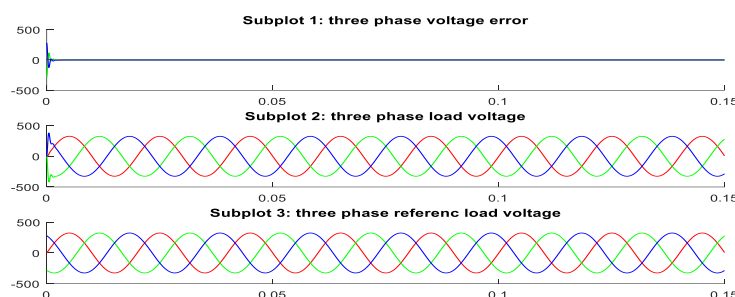


شکل (۱۰): فرمان کنترلی به گیت ترانزیستورهای اینورتر منبع ولتاژ VSI تحت شرایط نرمال

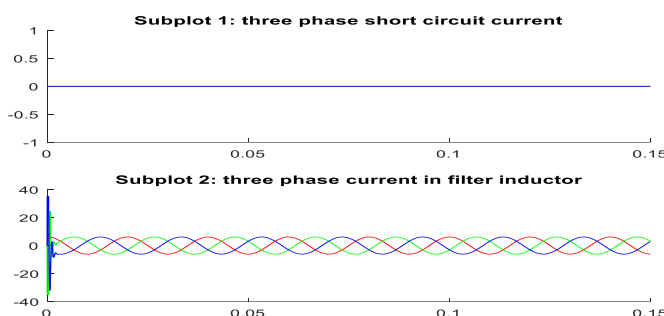
جدول (۳): نتایج شبیه‌سازی برای پارامترهای تنظیم روش کنترلی UPS مبتنی بر VSI در مقابل اضافه جریان

K_{PV}	K_{RV}	K_{PI}	K_{RI}	f_s
0.5	500	1.2456	500	15342

مقایسه ولتاژ رفرنس و ترمینال UPS مبتنی بر VSI تحت شرایط نرمال و همچنین خطای ولتاژ در شکل (۱۱) به نمایش در آمده است. مطابق انتظار تحت شرایط عدم وقوع اضافه بار و اتصال کوتاه، مقدار خطای ولتاژ دو سر ترمینال بار پس از عبور از گذرای لحظه راه اندازی سیستم همواره صفر است. مقایسه جریان سلف فیلتر و جریان اتصالی برای UPS مبتنی بر VSI تحت شرایط نرمال در شکل (۱۲) نشان داده شده است.



شکل (۱۱): ولتاژ دو سر بار و خطای ولتاژ در ترمینال UPS مبتنی VSI تحت شرایط نرمال



شکل (۱۲): نتایج شبیه‌سازی برای جریان سلف فیلتر و جریان اتصالی UPS مبتنی VSI تحت شرایط نرمال

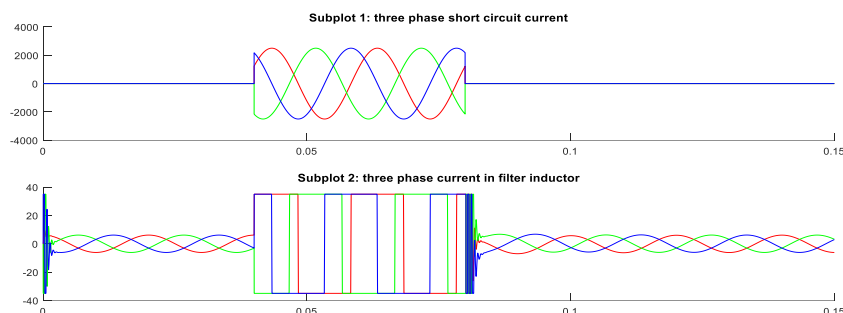
مطابق انتظار جریان اتصال کوتاه و اضافه بار محاسبه شده صفر و دامنه جریان سلف فیلتر معادل ۵ آمپر می‌باشد. بمنظور انجام اعتبارسنجی و تایید کارایی روش کنترلی پیشنهادی، مطالعات موردی برای دو رخداد اضافه جریان شامل اتصال کوتاه سه فاز متقارن با جریانی معادل ۲۵۰۰ آمپر و اضافه بار ۵۰ آمپر برای سیستم شبیه‌سازی می‌گردد و نتایج متناظر با هر مطالعه با جزییات بحث و بررسی می‌شود.

۴-۱- اتصال کوتاه سه فاز متقارن به زمین با جریانی معادل ۲۵۰۰ آمپر

در این مطالعه موردی روش کنترلی پیشنهادی برای حفاظت UPS مبتنی بر VSI در مقابل اتصال کوتاه سه فاز متقارن رخ داده با جریان نامی ۲۵۰۰ آمپر تست می‌گردد. الگوریتم ژنتیک پس از ۲۴ تکرار به جواب بهینه مسئله مذکور همگرا می‌شود و ضرایب کنترلی بهینه مطابق جدول (۴) تعیین می‌شود. تحت شرایط اتصال کوتاه سه فاز رخ داده با جریان نامی ۲۵۰۰ آمپر، نتایج شبیه‌سازی برای جریان سلف فیلتر و جریان اتصالی UPS مبتنی بر VSI در فازهای A و B و C در شکل (۱۳) آورده شده است.

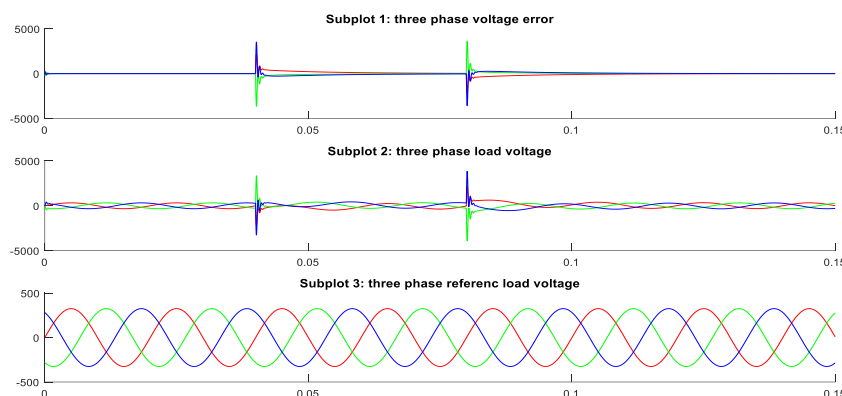
جدول (۴): نتایج شبیه‌سازی برای پارامترهای کنترلی بهینه UPS مبتنی بر VSI در شرایط اتصال کوتاه سه فاز متقارن

K_{PV}	K_{RV}	K_{PI}	K_{RI}	f_s
1	1500	1.5	1000	18199



شکل (۱۳): نتایج شبیه‌سازی برای جریان سلف فیلتر و اتصال UPS مبتنی بر VSI هنگام اتصال کوتاه سه فاز متقارن

جریان سه فاز در زمان اتصالی بین ۰,۰۴ تا ۰,۰۸ ثانیه در سیکل منفی و مثبت در ماکزیمم مقدار ۳۵ آمپر محدود گردیده است که پس از طی گذاری بعد پاکسازی خطا در سیستم به شرایط نرمال ۵ آمپری باز می‌گردد. با توجه به تغییرات جریان سیستم مقایسه نتایج ولتاژ رفرنس و ترمینال بار و همچنین اختلاف ولتاژ واقعی ترمینال UPS مبتنی بر VSI از مقدار مطلوب تحت شرایط اتصال کوتاه سه فاز متقارن رخ داده با جریان نامی ۲۵۰۰ آمپر در فازهای A و B و C در شکل (۱۴) به نمایش در آمده است.



شکل (۱۴): مقایسه نتایج ولتاژ رفرنس، ولتاژ ترمینال بار و همچنین اختلاف ولتاژ واقعی ترمینال UPS مبتنی بر VSI از مقدار مطلوب تحت شرایط جریان اتصال کوتاه سه فاز متقارن ۲۵۰۰ آمپر

همان طور که دیده می‌شود طرح کنترلی پیشنهادی در مواجهه با رخداد اتصال کوتاه سه فاز متقارن که در واقع بدترین حالت ممکن برای رخداد خطا در تجهیز UPS مبتنی بر VSI است نیز عملکرد مناسبی از خود نشان داده و گذرای جریانی و ولتاژی ایجاد می‌کند را با کمترین ماکزیمم اورشوت و زمان نشست پاسخ به مقدار مطلوب باز می‌گرداند.

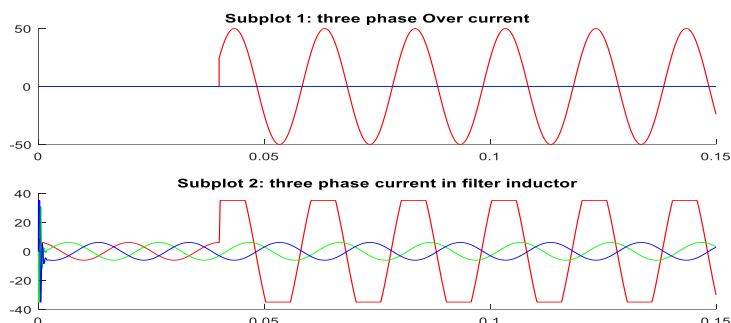
۴-۲- اضافه بار با جریان ۵۰ آمپر در فاز A

در این مطالعه موردی روش کنترلی پیشنهادی برای حفاظت UPS مبتنی بر VSI در مقابل اضافه بار رخ داده با جریان نامی ۵۰ آمپر در فاز A از زمان ۰,۰۴ ثانیه تا ۰,۱۵ ثانیه بکار گرفته می‌شود. الگوریتم ژنتیک پس از ۱۹ تکرار به حل بهینه مسئله همگرا می‌شود و در نتیجه ضرایب کنترلی بهینه بمنظور حفاظت UPS مبتنی بر VSI در مقابل رخداد اضافه بار با جریان نامی ۵۰ آمپر در فازهای A مطابق جدول (۵) تعیین می‌کند.

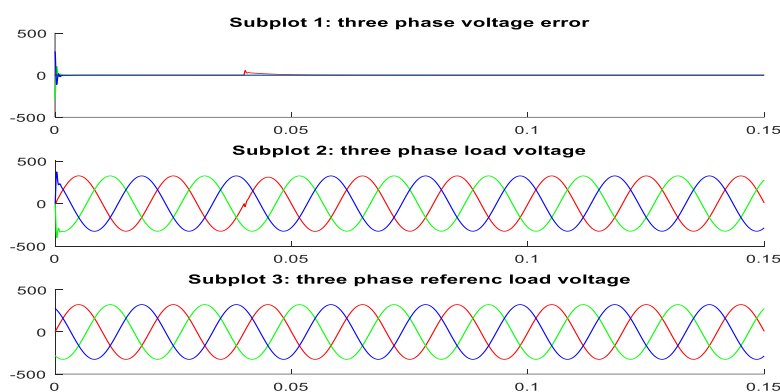
جدول (۵): نتایج شبیه‌سازی برای پارامترهای ضرایب کنترلی بهینه UPS مبتنی بر VSI در مقابل اضافه بار ۵۰ آمپری

K_{PV}	K_{RV}	K_{PI}	K_{RI}	f_s
0.71702	500	1.5	520	21339

تحت شرایط جدید اضافه بار رخ داده با جریان نامی ۵۰ آمپر در فاز A از زمان ۰.۰۴ تا ۰.۱۵ ثانیه، نتایج شبیه سازی برای جریان سلف فیلتر و جریان اتصال UPS مبتنی بر VSI در فازهای A و B و C مطابق شکل (۱۵) به نمایش در آمده است. شکل (۱۶) مقایسه نتایج ولتاژ رفرنس و ترمینال بار و همچنین اختلاف ولتاژ واقعی ترمینال UPS مبتنی بر VSI از مقدار مطلوب تحت شرایط اضافه بار رخ داده با جریان نامی ۵۰ آمپر در فاز A را نشان می دهد.



شکل (۱۵): نتایج شبیه سازی برای جریان سلف فیلتر و جریان UPS مبتنی بر VSI تحت شرایط اضافه بار رخ داده در فاز A با جریان نامی ۵۰ آمپر



شکل (۱۶): نتایج شبیه سازی ولتاژ رفرنس، ولتاژ ترمینال بار و همچنین اختلاف ولتاژ واقعی ترمینال UPS مبتنی بر VSI از مقدار مطلوب طی اضافه بار رخ داده با جریان ۵۰ آمپری فاز A

نتایج شبیه سازی نشان می دهد ولتاژ ترمینال UPS مبتنی بر VSI در وضعیت اضافه بار گذاری چندان چشمگیر و چالش برانگیزی برای کنترلر پیشنهادی ایجاد نمی کند بدین معنی که کنترلر حلقه ولتاژی برای بازگرداندن سیستم به شرایط نرمال از نظر ولتاژی عملکرد مناسبی دارد و این در حالی است که حلقه جریان کنترلر پیشنهادی نیز در زمان رخداد جریان بیش از مقدار محدودیت جریانی UPS معادل ۵۰ آمپر در مقدار ۳۵ آمپر محدود می شود تا از رسیدن آسیب به تجهیزات جلوگیری شود.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، یک استراتژی کنترلی جدید برای حفاظت UPS مبتنی بر VSI پیشنهاد شد و در ادامه نحوه کدسازی پارامتریک ضرایب کنترلی حلقه های جریانی و ولتاژی در الگوریتم ژنتیک برای حل مسئله بیان گردید. بمنظور اعتبارسنجی و تایید کارایی روش کنترلی پیشنهادی برای حفاظت UPS مبتنی بر VSI در مقابل اتصال کوتاه و اضافه بار، مطالعات عددی و شبیه سازی بر روی سیستم تست بکار گرفته شد. دو رخداد اضافه بار شامل اتصال کوتاه سه فاز متقارن با جریانی معادل ۲۵۰۰ آمپر و همچنین اضافه بار در فاز A با جریان ۵۰ آمپر شبیه سازی گردید. نتایج گواه این حقیقت است که طرح کنترلی پیشنهادی عملکرد مناسبی داشته و گذرای جریانی و ولتاژی ایجاد می دهد که گذرای حاصل از رخداد اضافه بار در مقایسه با اتصال کوتاه مطلوب باز می گرداند. بعلاوه، مطالعات اضافه بار نیز نشان می دهد که گذاری حاصل از رخداد اضافه بار در مقایسه با اتصال کوتاه برای کنترلر پیشنهادی چندان چشمگیر و چالش برانگیزی ایجاد نمی باشد بدین معنی که کنترلر حلقه ولتاژی برای بازگرداندن سیستم به شرایط نرمال از نظر ولتاژی کار سختی در پیش نخواهد داشت و ضمناً حلقه جریانی کنترلر نیز جریانی UPS را در کمترین زمان پس از افزایش به بیش از محدودیت معادل ۳۵ آمپر محدود می سازد تا از رسیدن آسیب جدی به تجهیز جلوگیری شود.

1. Martins, A. P., Carvalho, A. S., and Arajo, A. S. (1995). Design and implementation of a current controller for the parallel operation of standard UPSs, Proc. IEEE IECON, pp. 584-589.
2. Iwade, T., Komiyama, S., Tanimura, Y., Yamanaka, M., Sakane, M., and Hirachi, K. (2003). A novel small-scale UPS using a parallel redundant operation system, Proc. 25th Int. Telecommun. Energy Conference, pp. 480-484.
3. Guerrero, J. M., Hang, L., and Uceda, J. (2008). Control of distributed uninterruptible power supply systems, IEEE Trans. Ind. Electron 55, 8, pp. 2845-2859.
4. Faiz, J., Shahgholian, G., and Ehsan, M. (2008). Stability analysis and simulation of a single-phase voltage source UPS inverter with two-stage cascade outputfilter, European Transactions on Electrical Power 18, 1, pp. 29- 49.
5. Aamir, M., Kalwar, K. A., and Mekhilefn, S. (2016). Uninterruptible power supply systems - A review", Electromotion13, 4, pp. 276-289.
6. Zhang, C., Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., and Coelho, E. A. A. (2016). Control architecture for parallel-connected inverters in uninterruptible power systems, IEEE Transaction on Power Electronics 31, 7, pp. 5176- 5188.
7. Hussain-Bukhari, S. S., Lipo, T. A., and Kwon, B. (2017). An online UPS system that eliminates the inrush current phenomenon while feeding multiple load transformers, IEEE Transact on Industry Applications 53, 2, pp. 1149-1156.
8. Katir, H., Abouloifa, A., Noussi, K., Lachkar I., and Giri, F. (2022). Cascaded Hybride inverters for UPS applications: Adaptive backstepping control and formal stability analysis, IEEE Control Systems Letters 6, pp. 145-150.
9. Bloemink, J. M. and Iravani, M. R. (2012). Control of a Multiple Source Micro-Grid With Built in Islanding Detection and Current Limit, IEEE Transaction on Power Delivery 27, 4, pp. 2122-2132.
10. Koseoglu, C., Altin, N., Zengin, F., Kelebek, H., and Sefa, I. (2019). A Hybrid Overload Current Limiting and Short Circuit Protection Scheme: A Case Study on UPS Inverter, 8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), pp. 1-7.