

بهبود قابلیت گذر از خطای منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر با استفاده از محدودکننده جریان خطا

محمد رضا علیزاده پهلوانی¹، امین جلیلیان^{2*}

¹ دانشیار مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

Mr_alizadehp@iust.ac.ir

² همکار تحقیقاتی مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران

Jaliliyan-amin90@ms.tabrizu.ac.ir

چکیده: با گسترش منابع تولید پراکنده (DG) مبتنی بر وارون ساز در شبکه‌های الکتریکی، قابلیت گذر از خطای آن‌ها به یکی از موضوعات مهم نظام‌نامه‌ها تبدیل شده است. در این مقاله، یک روش جدید برای محدود کردن جریان خطای اینورتر مورد استفاده در منابع DG پیشنهاد شده است. در این روش، اینورتر واسط هم در حین کار عادی و هم در هنگام بروز خطا همانند یک منبع کنترل ولتاژ عمل می‌کند. در روش حاضر و به هنگام وقوع خطا، از مازول محدودکننده جریان خطای لینک DC، با هدف محدود کردن جریان خطای اینورتر استفاده شده است. این مازول در حالت کار عادی شبکه قدرت، تأثیر چشمگیری روی عملکرد نیروگاه پراکنده ندارد. اما در هنگام بروز خطا، میزان جریان خروجی نیروگاه پراکنده را با عملکردی مناسب به حداکثر مقدار مجاز سوییچ‌های الکترونیک قدرت کاهش می‌دهد. با این روش، امکان بهره‌برداری پیوسته برای سیستم DG حتی در شرایط صفر بودن ولتاژ شبکه وجود دارد. عملکرد روش پیشنهادی در محیط PSCAD/EMTDC¹ مورد ارزیابی و تحلیل قرار گرفته است. نتایج به دست آمده توانمندی روش پیشنهادی را در محدود کردن جریان خطای اینورتر منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر اثبات می‌کند.

واژه‌های کلیدی: تولید پراکنده، اینورترهای منبع ولتاژی، لینک DC، گذر از خطا، محدودکننده جریان خطای غیر ابرسانا.

* نویسنده مسئول

1. مقدمه

خطا در شبکه به یک مقدار مطلوب محدود می‌شود و اینورتر قادر خواهد بود که از شرایط خطا گذر کند. با این حال CCS نقاط ضعفی نیز دارد: موجب کاهش نیرومندی⁷ کنترل‌کننده اصلی می‌شود و به هر دو سنسور ولتاژ و جریان نیاز دارد. در طرف مقابل، VCS مشخصه خوبی را در حالت دائم از خود نشان می‌دهد. به هر حال، سطح جریان خطای بالا مهم‌ترین مشکل VCS است [12 و 13].

از طرفی، با افزایش نفوذ منابع DG در سیستم‌های توزیع و تمایل به بهره‌برداری جزیره‌ای آن‌ها، استفاده از VCS برای کنترل اینورتر واسط منابع DG نسبت به CCS انتخاب بهینه‌تری است [14]. با توجه به مباحث مطرح شده در منابع مختلف، بررسی‌های گسترده‌ای بر روی محدودسازی جریان خطای VSI‌ها انجام شده است.

مرجع [15] به معرفی یک راهکار جدید با هدف محدودکردن جریان خطای اینورترها در یک ریزش‌بکه با سطح نفوذ بالای منابع IBDG پرداخته است. اما در مرجع [15] نتایج شبیه‌سازی رایانه‌ای و آزمایشگاهی به منظور تصدیق روش پیشنهادی ارائه نشده است. مرجع [16] رفتار منابع IBDG در هنگام وقوع خطا در شبکه قدرت را مورد بررسی و تحلیل قرار داده است. در مرجع [17] برای بهبود قابلیت اطمینان توان الکتریکی تحویلی به مصرف‌کنندگان، یک روش جدید برای حفاظت اینورترهای سه‌فاز توان بالا در هنگام وقوع اتصال کوتاه در شبکه قدرت ارائه شده است.

یک روش دیگر برای کاهش سطوح جریان اتصال کوتاه در شبکه قدرت، استفاده از محدودکننده جریان خطا⁸ (FCL) است. بر همین اساس، در مراجع [18-21] انواع مختلفی از FCL‌ها برای بهبود عملکرد سیستم قدرت، در هنگام وقوع خطا پیشنهاد شده است. به علاوه، با گسترش شبکه‌های قدرت و افزایش نفوذ منابع DG در سیستم‌های قدرت، این انتظار وجود دارد که در آینده، FCL‌ها به منابع DG متصل شده و همراه با آن‌ها فروخته شوند [22].

بر همین اساس در این مقاله، یک روش گذر از خطای نوین مبتنی بر محدودکننده جریان خطای غیر ابرسانا⁹ (NSFCL) لینک DC¹⁰ با قابلیت تنظیم دامنه جریان، به منظور ایجاد قابلیت FRT در منابع IBDG پیشنهاد شده است. در روش پیشنهادی، اینورتر واسط در حالت کار عادی و در هنگام وقوع خطا همانند یک منبع ولتاژ کنترل شده مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد. در هنگام کار عادی شبکه قدرت، مازول NSFCL لینک DC تأثیری روی مشخصه سیستم IBDG ندارد. این مازول دارای قابلیت کنترل دامنه جریان خطاست.

در آینده نزدیک مقدار زیادی از انرژی الکتریکی مصرفی، توسط منابع تولید پراکنده¹ (DG) تأمین خواهد شد [1]. در اغلب نیروگاه‌های DG، برای تأمین بخشی از تقاضای انرژی برق از منابع انرژی تجدیدپذیر استفاده می‌شود. برخلاف نیروگاه‌های متداول، بهره‌برداری و یکپارچه‌سازی این منابع انرژی در سیستم‌های قدرت به دلیل متنوع بودن فناوری‌های به کار گرفته شده در آن‌ها، امر دشواری است. در نیروگاه‌های DG با منابع انرژی تجدیدپذیر، برای تبادل توان عمدتاً از مبدل‌های الکترونیک قدرت و به خصوص اینورترهای منبع ولتاژی² (VSI) استفاده می‌شود. [4-2]. این نوع از منابع تحت عنوان منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر³ (IBDG) شناخته می‌شوند [7-5].

در صورت وجود تعداد زیاد منابع IBDG در شبکه‌های قدرت، به منظور عملکرد امن و مطمئن این شبکه‌ها هنگام وقوع خطا، بهره‌برداران سیستم‌های قدرت باید همانند سایر نیروگاه‌های متداول، منابع IBDG را متصل به شبکه نگه دارند. این نوع بهره‌برداری با عنوان قابلیت گذر از خطا⁴ (FRT) شناخته شده است [8]. از طرفی اینورتر واسط منابع IBDG از سویچ‌های نیمه‌رسانایی ساخته می‌شود که قابلیت تحمل اضافه جریان محدودی را دارند (معمولاً با ظرفیت دو برابر جریان نامی [7]). بنابراین، به منظور کاهش جریان خروجی اینورتر در هنگام وقوع خطا و ایجاد قابلیت FRT در منابع IBDG ملاحظات فنی خاصی باید در نظر گرفته شود.

برای کاهش مشکلات ایجاد شده برای VSI‌ها در هنگام وقوع خطا در شبکه قدرت، دو راه حل وجود دارد: جبران‌سازی افت ولتاژ به وجود آمده و محدودسازی اضافه جریان ایجاد شده. استفاده از بازیاب دینامیکی ولتاژ برای جبران‌سازی افت ولتاژ در شبکه‌های قدرت کاملاً شناخته شده است. اما سیستم مذکور از یک منبع ذخیره‌کننده انرژی بزرگ برای جبران‌سازی افت ولتاژ استفاده می‌کند. این امر هزینه بهره‌برداری از آن را افزایش می‌دهد [8 و 9].

راه حل دیگر برای کاهش جریان خروجی اینورتر واسط در هنگام وقوع خطا در شبکه قدرت، استفاده از استراتژی‌های کنترلی اینورترهاست [10]. استراتژی‌های کنترل اینورترها را می‌توان اساساً به دو دسته اصلی تقسیم کرد [11]: استراتژی کنترل جریان⁵ (CCS) و استراتژی کنترل ولتاژ⁶ (VCS). با استفاده از CCS جریان خروجی اینورتر در هنگام وقوع

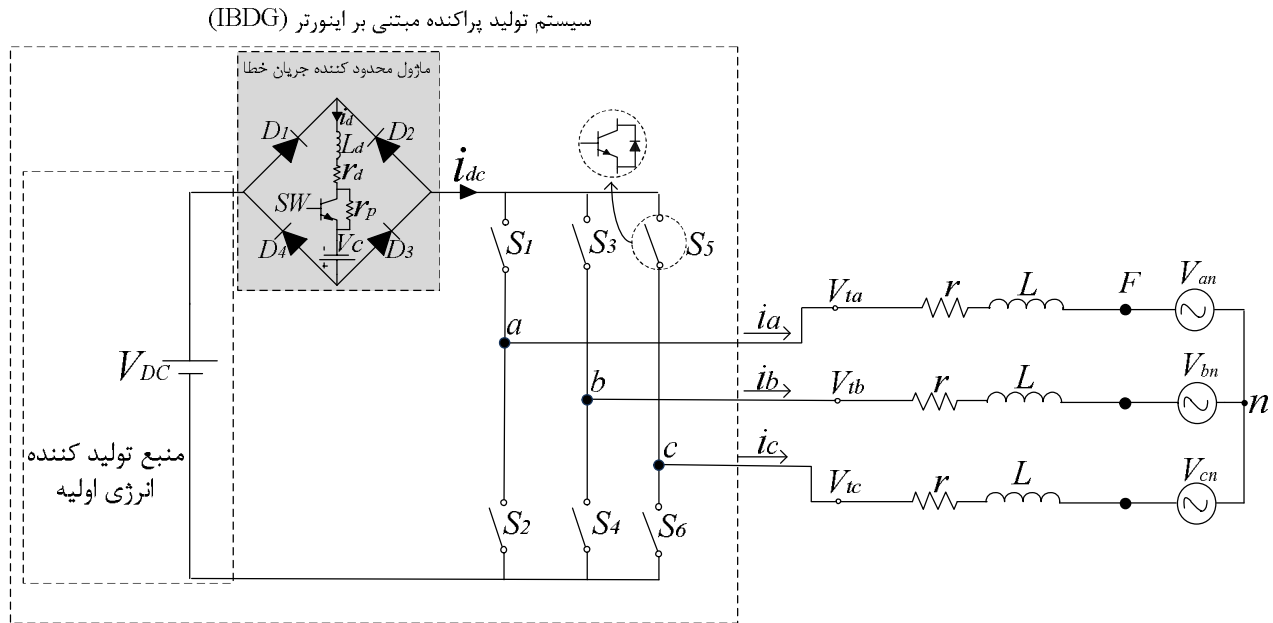
1. Distributed Generation
2. Voltage Source Inverter
3. Inverter Based Distributed Generation
4. Fault Ride Through
5. Current Control Strategy
6. Voltage Control Strategy

7. Robustness

8. Fault Current Limiter

9. Non-Supercouducting Fault Current Limiter

10. Direct Current



شکل (1): مدار قدرت نیروگاه تولید پراکنده با واسط الکترونیک قدرت مجهز به ماژول NSFCL در لینک DC به منظور بهبود گذر از خطای نیروگاه پراکنده

بنابراین در هنگام بروز خطا در شبکه قدرت، جریان خروجی اینورتر را به اندازه ماکزیمم جریان مجاز سویچ‌های الکترونیک قدرت محدود می‌کند. با این روش امکان بهره‌برداری پیوسته برای سیستم DG حتی در شرایط صفر ولتاژ شبکه میسر می‌شود. به علاوه، به دلیل عدم نیاز به استفاده از راکتور ابرسانا در ماژول NSFCL روش پیشنهادی هزینه اجرای پایینی دارد.

به صورت سری با راکتور DC قرار گرفته است. دامنه این منبع ولتاژ DC را می‌توان توسط رابطه (1) تعیین کرد:

$$V_c = V_{sw} + 2V_d + r_d i_d \quad (1)$$

در این رابطه، V_{sw} و V_d به ترتیب افت ولتاژ مستقیم قرار گرفته در دو سر سویچ نیمه‌رسانا (SW) و هر کدام از دیودها است.

از یک اینورتر منبع ولتاژی دوسطحی برای تبدیل توان DC تأمین شده توسط منبع انرژی اولیه به توان AC سازگار با شبکه اصلی استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (1) نشان داده شده، ماژول NSFCL به صورت سری با V_{DC} قرار گرفته است. به علاوه، مقاومت و اندوکتانس کل بین سمت فشار قوی ترانس واسط و ترمینال‌های خروجی اینورتر با مقاومت r و اندوکتانس L در شکل (1) نشان داده شده است. شبکه اصلی با یک سیستم AC سه فاز ایدئال (V_c و V_b ، V_a) با فرکانس و دامنه ثابت مدل‌سازی شده است.

به منظور محدودسازی جریان در سمت AC اینورتر، سه مجموعه مشابه NSFCL باید به صورت سری با هر کدام از فازهای شبکه قرار داده شود. اما با استفاده از روش پیشنهادی، تنها از یک ماژول NSFCL برای محدودسازی جریان در هر سه فاز اینورتر استفاده شده است. بنابراین، روش پیشنهادی باعث کاهش چشمگیری در هزینه محدودسازی جریان خواهد شد.

از دیدگاه مدار قدرت، ماژول NSFCL از یک پل یکسوساز دیودی و یک سویچ نیمه‌هادی قابل کنترل تشکیل شده است. بنابراین، ساختار NSFCL حاضر در مقایسه با ساختارهای پیشنهاد شده در [21] و [23]

آرایش مدار قدرت طرح FRT پیشنهادی برای یک واحد IBDG در شکل (1) نشان داده شده است. ولتاژ ورودی اینورتر واسط منابع IBDG می‌تواند در بازه زمانی بروز خطا (1-0 ثانیه) ثابت فرض شود [3]. این ولتاژ توسط سیستم تولید انرژی اولیه نظیر پیل سوختی، سلول‌های خورشیدی، توربین بادی یا... تأمین می‌شود که در شکل (1) با V_{DC} نشان داده شده است. برای بهبود قابلیت FRT اینورتر واسط، استفاده از یک ماژول NSFCL با قابلیت کنترل دامنه جریان خطا در لینک DC اینورتر واسط نیروگاه IBDG پیشنهاد شده است. ماژول NSFCL از چهار قسمت اساسی به صورت زیر تشکیل شده است:

2. طرح FRT پیشنهادی

یک پل یکسوساز دیودی (دیودهای D_1-D_4). یک سیم‌پیچ غیر ابرسانا (سیم‌پیچ مسی) که برای مدل‌سازی آن از یک مقاومت r_d و یک سلف L_d استفاده شده است. اتصال موازی یک سویچ نیمه‌هادی قابل کنترل و یک مقاومت دشارژکننده که مجموعاً با راکتور DC به صورت سری قرار گرفته است. منبع ولتاژ V_c که به منظور جبران‌سازی افت ولتاژ ایجاد شده در اثر مقاومت راکتور DC و سویچ‌های نیمه‌هادی (دیود -

نیمه‌هادی روشن شود، جریان شروع به افزایش می‌کند. با تنظیم مناسب مدت زمان روشن یا خاموش بودن سویچ نیمه‌هادی و انتخاب مقدار مناسب برای مقاومت دشارژکننده، می‌توان جریان راکتور DC و در نتیجه جریان سه‌فاز در خروجی اینورتر را در هنگام وقوع خطا به یک اندازه مطلوب محدود کرد. بنابراین، سیستم IBDG قادر خواهد بود که در هنگام بروز خطا متصل به شبکه اصلی باقی بماند.

3. آنالیز تحلیلی روش پیشنهادی

به منظور درک بهتر مشخصه روش پیشنهادی، در آنالیزهای تحلیلی اجرا شده معادلات شارژ و دشارژ راکتور DC مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (1) به منظور بررسی عملکرد اینورتر واسط همراه با مازول NSFCL، فرض می‌شود که جریان سه‌فاز در خروجی اینورتر سینوسی خالص است و اینورتر با روش VCS کنترل می‌شود. همچنین سیگنال‌های کلیدزنی اینورتر از طریق استراتژی مدولاسیون پهنای باند سینوسی¹ (SPWM) صادر می‌شود. در تحلیل‌های انجام شده، هر سویچ اینورتر، با اتصال سری افت ولتاژ (V_d) و مقاومت حالت روشن خود (r_{on}) مدل‌سازی شده‌اند. با این مفروضات، جریان لینک DC را می‌توان برحسب جریان‌های سه‌فاز در خروجی اینورتر و حالت‌های کلیدزنی آن به صورت زیر بیان کرد [24]:

$$i_{dc} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \quad (2)$$

در این رابطه، S_a ، S_b و S_c به ترتیب حالت‌های کلیدزنی مربوط به فازهای a ، b و c هستند.

از آنجایی که در اینورترهای PWM مبتنی بر سیگنال حامل²، فرکانس موج حامل در مقایسه با مؤلفه اصلی فرکانس خروجی اینورتر بسیار بزرگتر است، می‌توان مقدار سیگنال مدولاسیون را در طی یک پریود حامل تقریباً ثابت فرض کرد [3 و 24]. بنابراین در این قسمت، مشخصه روش پیشنهادی در طی یک پریود حامل مورد بررسی قرار گرفته است.

در شکل (1) به منظور بررسی کارایی روش FRT پیشنهاد شده، یک اتصال کوتاه سه‌فاز به زمین با مقاومت اتصالی $Z_f = r_f + jL_f\omega$ در نقطه F در نظر گرفته شده است. پس از بروز خطا مدار دارای دو وضعیت عملکرد به صورت زیر است:

وضعیت 1: جریان راکتور DC به یک سطح جریان مشخص نرسیده باشد؛

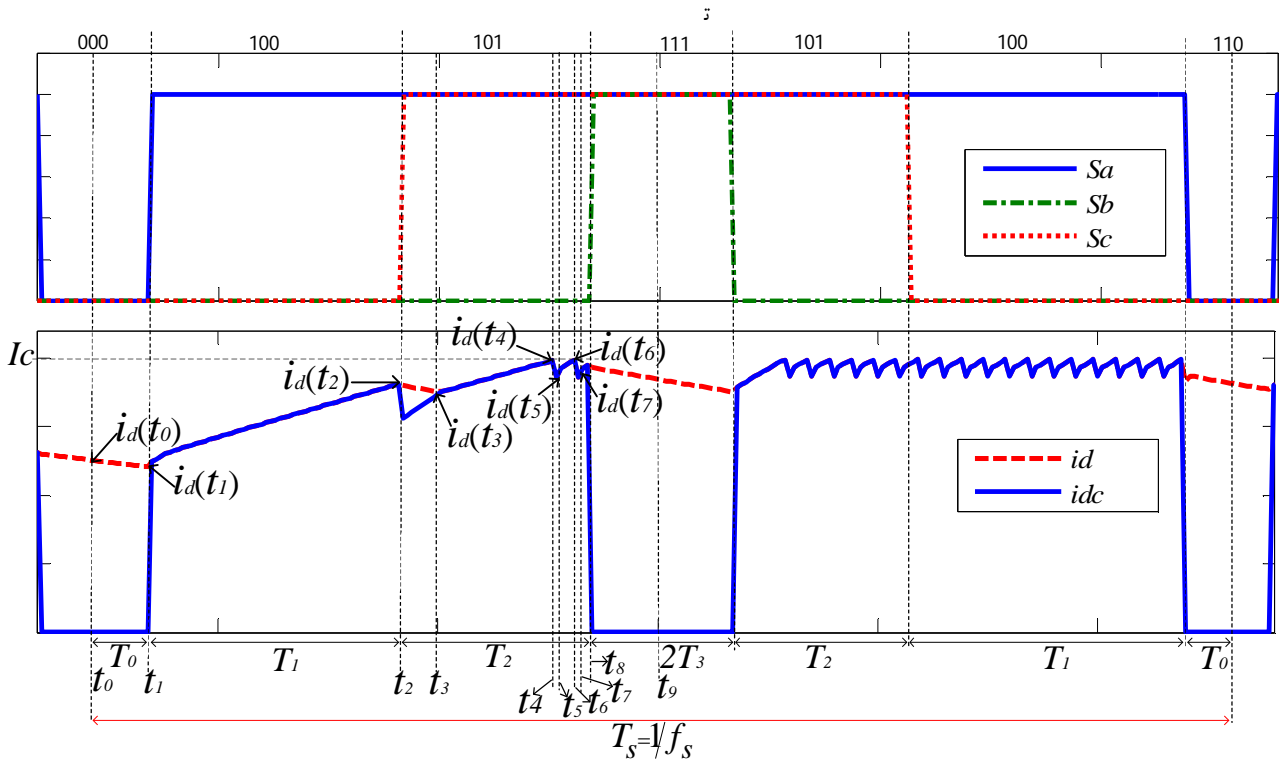
وضعیت 2: جریان راکتور DC به یک سطح جریان مشخص نرسیده باشد.

که از اتصال موازی معکوس دو سویچ نیمه‌هادی بهره می‌گیرند، دارای مزایای زیر است:

- مازول NSFCL لینک DC تنها از یک سویچ نیمه‌هادی قابل کنترل استفاده می‌کند. این سویچ برخلاف موارد دیگر که در سمت AC عمل می‌کنند، در سمت DC به کار رفته است. بنابراین، کنترل این مدار ساده‌تر است؛ زیرا باعث حذف سیگنال‌های سویچینگ در حالت عملکرد دائم خواهد شد.
- قرار دادن راکتور در سمت DC مزایای متعددی را به همراه دارد که صرفاً به دو مزیت آن اشاره می‌شود: اولاً از آسیب رسیدن به سویچ نیمه‌رسانا جلوگیری می‌کند؛ ثانیاً باعث فرونشاندن تغییرات شدید جریان di/dt در لحظات اولیه بروز خطا می‌شود.

1.2. اساس عملکرد مازول NSFCL لینک DC

در هنگام کار عادی شبکه قدرت، سویچ نیمه‌هادی بسته است و دو سر مقاومت دشارژکننده r_p اتصال کوتاه است. با انتخاب مقدار مناسبی برای L_d می‌توان یک جریان تقریباً DC را برای راکتور DC به دست آورد. بدیهی است که با افزایش اندوکتانس L_d ریبیل جریان DC را می‌توان کاهش داد. این عمل باعث اتصال کوتاه شدن L_d در حالت کار عادی شبکه قدرت می‌شود. استفاده از منبع ولتاژ V_c به صورت سری با راکتور DC باعث جبران‌سازی افت ولتاژ ناشی از مقاومت اهمی راکتور DC، سویچ نیمه‌هادی و دیودهای یکسوساز در حالت کار عادی شبکه قدرت شده است. بنابراین، مازول NSFCL تأثیری را بر روی کار عادی نیروگاه تولید پراکنده ندارد. در هنگام وقوع خطا در سیستم قدرت، راکتور DC از تغییرات شدید جریان (di/dt) در لحظات اولیه بروز خطا جلوگیری کرده و جریان آن تقریباً به صورت خطی افزایش می‌یابد. در صورتی که دوره زمانی وقوع خطا برای مدتی طولانی ادامه یابد، جریان عبوری از راکتور DC شروع به افزایش می‌کند. به علاوه، یک مدار کنترل‌کننده وجود دارد که بر جریان عبوری از راکتور DC نظارت می‌کند. این مدار در صورتی که جریان عبوری از راکتور DC از یک مقدار از پیش تعیین شده فراتر برود، سویچ نیمه‌هادی موازی با مقاومت دشارژکننده r_p را خاموش می‌کند. این سویچ در حالت عادی روشن است. میزان این جریان نیز براساس حداکثر جریان قابل تحمل سویچ‌های الکترونیک قدرت موجود در ساختار مبدل واسط نیروگاه پراکنده تعیین می‌شود (معمولاً 2 برابر جریان نامی سویچ‌های الکترونیک قدرت) به این ترتیب مقاومت دشارژکننده به صورت سری با راکتور DC قرار می‌گیرد و انرژی اضافی ذخیره شده در راکتور DC از طریق مقاومت r_p تخلیه می‌شود و جریان عبوری از راکتور DC به یک مقدار از قبل تعیین شده محدود خواهد شد. بدیهی است چنانچه سویچ



شکل (2): توالی کلیدزنی SPWM، مدل واسط نیروگاه پراکنده در طی یک پرپود کریر و جریان لینک DC و جریان راکتور DC اندازه گیری شده در هنگام خطا

$$i_d(t) = e^{-(t-t_0)(r_d+3r_{on})/L_d} \left\{ i_1 + \frac{V_{sw} - V_c + 2V_d}{r_d + 3r_{on}} \right\} - \frac{V_{sw} - V_c + 2V_d}{r_d + 3r_{on}} \quad (4)$$

در این رابطه $i_d(t_0) = i_1$ است.

در لحظه $t = t_1$ حالت کلیدزنی به (100) تغییر کرده است. مدار معادل در طول بازه زمانی t_1 تا t_2 در شکل (3-ب) نشان داده شده است. با توجه به مدار معادل، در طول بازه زمانی T_1 ، تنها دیودهای $D1$ و $D3$ در حال هدایت بوده و راکتور DC در مد شارژ قرار دارد. طی بازه زمانی T_1 ، جریان لینک DC با جریان راکتور DC برابر بوده و با اعمال KVL در حلقه‌های مدار شکل (3-ب)، معادل دیفرانسیل زیر برای راکتور DC به دست می‌آید:

$$\left(\frac{3}{2}L_e + L_d\right) \frac{di_a(t)}{dt} + (r_d + 2r_e + 5r_{on})i_a(t) = V_{DC} + V_c - V_{sw} - 4V_d \quad (5)$$

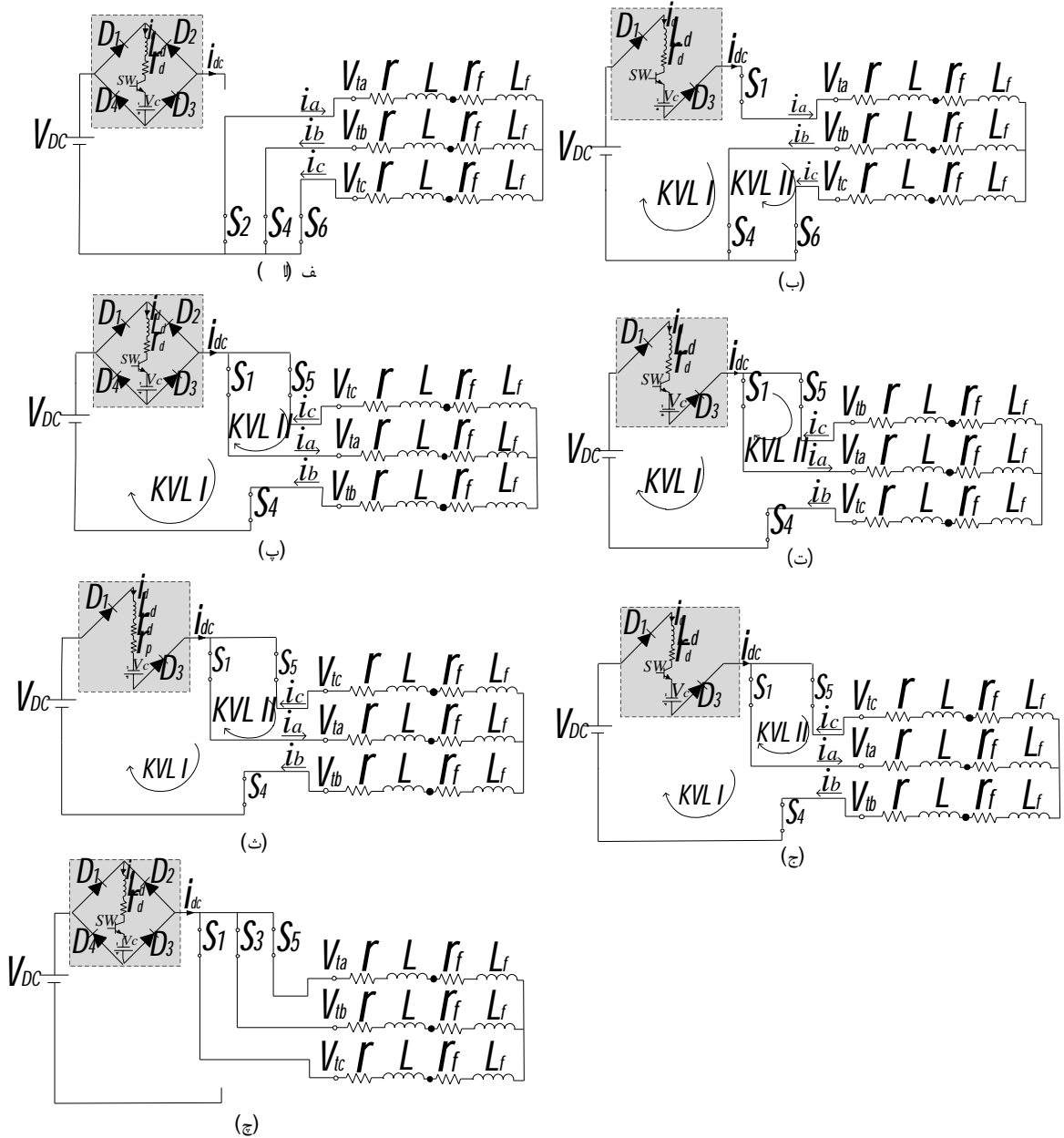
با حل رابطه (5)، رابطه (6) به صورت زیر حاصل می‌شود:

وضعیت 1: در شکل (2)، جریان لینک (i_{DC})، جریان راکتور DC (i_d) و توالی کلیدزنی اینورتر واسط در حین بروز خطا نمایش داده شده است. در طی بازه زمانی t_0 تا t_1 حالت کلیدزنی (000) است. مدار معادل مربوط به این حالت کلیدزنی در شکل (3-الف) نشان داده شده است. با توجه به مدار معادل، در طی بازه زمانی t_0 تا t_1 جریان لینک DC کوچک‌تر از جریان راکتور DC است. در این شرایط، به دلیل جریان شارژ راکتور DC، تمام دیودهای مجموعه NSFCL در وضعیت هدایت قرار دارند و راکتور DC از طریق دیودهای $D2-D3$ و $D1-D4$ در مد دشارژ قرار گرفته است. در این وضعیت ماژول NSFCL همانند اتصال کوتاه عمل کرده و هیچ‌گونه تأثیری روی عملکرد اینورتر ندارد. با توجه به مدار معادل در طی بازه زمانی T_0 اعمال KVL می‌توان معادله زیر را به دست آورد:

$$(r_d + 3r_{on})i_d(t) + L_d \frac{di_d(t)}{dt} + V_{sw} - V_c + 2V_d = 0 \quad (3)$$

با حل (3)، می‌توان جریان راکتور DC در طول بازه زمانی T_0 را

به صورت (4) بیان کرد:



شکل (3): مدارات معادل متناظر با توالی کلیدزنی نشان داده شده در شکل (2)، در طول بازه‌های زمانی مختلف در هنگام وقوع خطا. (الف) حالت کلیدزنی (000): در این وضعیت هر سه سویچ قرار گرفته در قسمت بالای اینورتر S1، S3 و S5 باز هستند و سویچ‌های S2، S4 و S6 واقع در قسمت پایین اینورتر بسته هستند. (ب) حالت کلیدزنی (100): در این وضعیت سویچ S1 قرار گرفته در قسمت بالای اینورتر و دو سویچ S4 و S6 واقع در قسمت پایین اینورتر بسته هستند. (پ)-(ج) حالت کلیدزنی (101): در این وضعیت سویچ‌های S1 و S5 قرار گرفته در قسمت بالای اینورتر و سویچ S4 واقع در قسمت پایین اینورتر بسته هستند. (ج) حالت کلیدزنی (111): در این وضعیت هر سه سویچ قرار گرفته در قسمت بالایی اینورتر S1، S3 و S5 بسته هستند و سویچ‌های S2، S4 و S6 قرار گرفته در قسمت پایین اینورتر باز هستند.

DC به صورت آنی کاهش یافته است. در شکل (3-پ) مدار معادل مربوط به این حالت کلیدزنی نمایش داده شده است. با توجه به شکل (2)، در بازه زمانی t_2 تا t_3 جریان راکتور DC بزرگ‌تر از جریان لینک DC است. همان‌طور که از مدار معادل شکل (3-پ) مشخص است، تمام دیودهای ماژول NSFCL در این وضعیت روشن بوده و راکتور DC در مد دشارژ قرار دارد. با توجه به مدار معادل در بازه زمانی T_3 رابطه (7) به دست می‌آید:

$$i(t) = e^{-(t-t_1)/\tau_1} \left\{ i_2 - \frac{V_{DC} + V_c - V_{sw} - 4V_d}{r_{c1}} \right\} + \frac{V_{DC} + V_c - V_{sw} - 4V_d}{r_{c1}} \quad (6)$$

در روابط بالا $\tau_1 = 3/2(L_e + L_d)/r_{c1}$ ، $r_e = r_s + r_f$ ، $L_e = L_s + L_f$ ، در لحظه $t = t_2$ حالت کلیدزنی به (101) تغییر کرده و جریان لینک

با جریان راکتور DC یکسان بوده و هر دو جریان کاهش می‌یابند. با توجه به مدار معادل نشان داده شده در شکل (3-ث) و با اعمال KVL در حلقه‌های مدار، معادله زیر به دست آید:

$$\left(\frac{3}{2}L_e + L_d\right)\frac{di_b(t)}{dt} + (r_d + r_p + \frac{3}{2}r_e + \frac{7}{2}r_{on})i_b(t) = V_{DC} + V_c - V_{sw} - 3V_d \quad (12)$$

با حل رابطه (12)، رابطه (13) به صورت زیر به دست می‌آید:

$$i_d(t) = i_{dc}(t) = e^{-(t-t_4)/\tau_5} \left\{ i_6 - \frac{V_{DC} + V_c - V_{sw} - 3V_d}{r_{c3}} \right\} + \frac{V_{DC} + V_c - V_{sw} - 3V_d}{r_{c3}} \quad (13)$$

در این رابطه، $i_5 = i_{DC}(t_3) = i_b(t_3)$ ، $\tau_5 = (3/2L_e + L_d)/r_{c3}$ ، $r_{c3} = (r_d + r_p + 3/2r_e + 7/2r_{on})$ است.

باید به این نکته توجه شود که بازه زمانی t_4 تا t_5 درصد بسیار کوچکی از یک تناوب فرکانس کلیدزنی (T_s) است. در لحظه $t = t_5$ ، مدار کنترل سویچ نیمه‌هادی موازی با مقاومت دشارژکننده را روشن می‌کند. مدار معادل مربوط به این وضعیت کلیدزنی در شکل (3-ج) نشان داده شده است. در بازه زمانی t_5 تا t_6 جریان راکتور DC با جریان لینک DC برابر بوده و راکتور DC تا لحظه $t = t_6$ در مدار شارژ قرار گرفته است. در لحظه $t = t_6$ ، مدار کنترل سویچ نیمه‌هادی موازی با مقاومت دشارژکننده را خاموش کرده و یک بار دیگر مقاومت r_p را به صورت سری با راکتور DC قرار داده است. مدار در بازه زمانی t_6 تا t_7 دارای عملکرد مشابه با بازه زمانی t_4 تا t_5 است (مدار معادل مربوط به این وضعیت در شکل 3-ث نشان داده شده است). در لحظه $t = t_7$ با عملکرد سیستم کنترل سویچ نیمه‌هادی روشن شده و مقاومت r_p اتصال کوتاه شده است. در بازه زمانی t_7 تا t_8 مدار دارای عملکرد مشابه با بازه زمانی t_5 تا t_6 است (مدار معادل مربوط به این وضعیت در شکل 3-ج نشان داده شده است). توجه به این نکته ضروری است که در طی بازه زمانی t_2 تا t_8 حالت کلیدزنی 101 است و در لحظه $t = t_8$ حالت کلیدزنی به 111 تغییر پیدا کرده و جریان لینک DC به صورت لحظه‌ای تغییر کرده است. در همین زمان، جریان راکتور DC از طریق دیودهای DI-D3 و D2-D4 در مدار دشارژ قرار گرفته است (شکل 3-ج). این حالت کاری تا لحظه $t = t_9$ ادامه پیدا کرده است. پس از $t = t_9$ تا زمانی که خطا توسط سیستم حفاظت رفع شود، مدار دارای عملکردی مشابه با بازه زمانی t_4 تا t_9 است.

$$\frac{3}{2}L_e \frac{di_b(t)}{dt} + \frac{3}{2}(r_e + r_{on})i_b(t) = V_{DC} + V_c - V_d \quad (7)$$

رابطه (8) با استفاده از رابطه (7) به دست می‌آید و بیان‌کننده رابطه جریان لینک DC در مد دشارژ است:

$$i_b(t) = i_{dc}(t) = e^{-(t-t_2)/\tau_3} \left\{ i_4 - \frac{V_{DC} + V_c - V_d}{r_{c2}} \right\} + \frac{V_{DC} + V_c - V_d}{r_{c2}} \quad (8)$$

در این رابطه $i_4 = i_b(t_2)$ ، $r_{c2} = 3/2(r_e + r_{on})$ ، $\tau_3 = L/(r_e + r_{on})$ است. به علاوه، رابطه جریان راکتور DC در مد دشارژ، در طول بازه زمانی T_3 را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$i_d(t) = e^{-(t-t_2)(r_d + 3r_{on})/L_d} \left\{ i_3 + \frac{V_{sw} - V_c + 2V_d}{r_d + 3r_{on}} \right\} - \frac{V_{sw} - V_c + 2V_d}{r_d + 3r_{on}} \quad (9)$$

در لحظه $t = t_3$ حالت کلیدزنی اینورتر تغییر نکرده است، اما مقدار جریان راکتور DC، با جریان لینک DC برابر شده است. بنابراین، همان‌طور که از شکل (2) مشخص است، راکتور DC تا لحظه $t = t_4$ در مد شارژ قرار گرفته است. مدار معادل مربوط به این وضعیت کلیدزنی در شکل (3-ت) نشان داده شده است. براساس مدار معادل نشان داده شده در شکل (3-ت) می‌توان معادله دیفرانسیل زیر را به دست آورد:

$$\left(\frac{3}{2}L_e + L_d\right)\frac{di_d(t)}{dt} + (r_d + \frac{3}{2}r_e + \frac{9}{2}r_{on})i_d(t) = V_{DC} + V_c - V_{sw} - 3V_d \quad (10)$$

با حل رابطه (10)، رابطه (11) حاصل می‌شود:

$$i_b(t) = i_d(t) = e^{-(t-t_3)/\tau_4} \left\{ i_5 - \frac{V_{DC} + V_c - V_{sw} - 3V_d}{r_{c3}} \right\} + \frac{V_{DC} + V_c - V_{sw} - 3V_d}{r_{c3}} \quad (11)$$

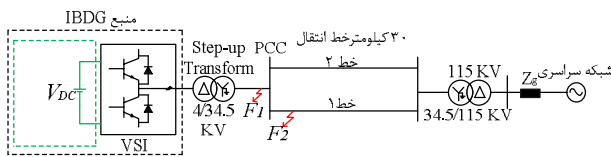
در این رابطه، $i_5 = i_{DC}(t_3) = i_b(t_3)$ ، $\tau_4 = (3/2L_e + L_d)/r_{c3}$ ، $r_{c3} = (r_d + 3/2r_e + 9/2r_{on})$ است.

در لحظه $t = t_4$ جریان راکتور DC به یک حد مشخص از جریان خطا (I_c) رسیده است. در این حالت مدار کنترل، سویچ نیمه‌هادی را خاموش کرده و مقاومت r_p را به صورت سری با راکتور DC قرار می‌دهد. از لحظه $t = t_4$ وضعیت عملکرد 2 آغاز خواهد شد. در ادامه، این وضعیت کاری مورد بررسی قرار گرفته است.

وضعیت 2: در طی بازه زمانی t_4 تا t_5 حالت کلیدزنی (101)

است. براساس شکل (2)، از لحظه t_4 تا t_5 جریان عبوری از لینک DC

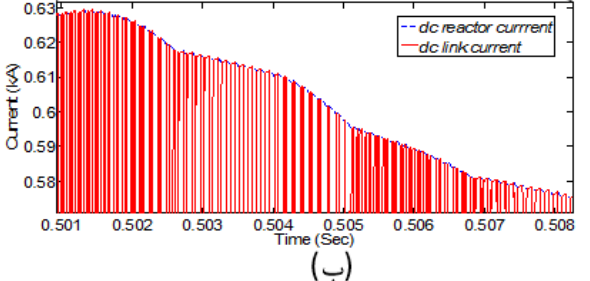
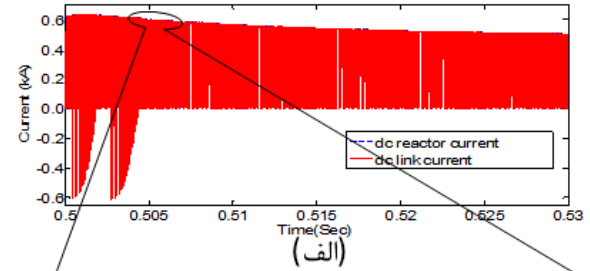
ادامه، نتایج شبیه‌سازی مربوط به خطاهای مختلف ارائه شده است. در شبیه‌سازی‌ها اثبات کارایی روش پیشنهادی در بهبود قابلیت FRT نیروگاه‌های پراکنده و برآورد شرایط فنی تحمیل‌شده از طرف نظام نام‌های جدید، مشخصه FRT تعریف‌شده در نظام نام E.ON مد نظر قرار گرفته است [25]. دلیل انتخاب نظام نام E.ON آن است که شرایط فنی تعیین‌شده توسط این نظام‌نامه به عنوان یک استاندارد توسط دیگر نظام‌نامه‌ها پذیرفته شده و مورد استفاده قرار گرفته است. براساس نمایه ولتاژ تعریف‌شده توسط نظام نام E.ON، نیروگاه پراکنده باید هنگامی که ولتاژ نقطه مرجع اتصال در مدت زمان 150 میلی‌ثانیه به صفر افت کرد، متصل به شبکه باقی بماند. بنابراین در شبیه‌سازی‌های بعدی، بازه زمانی وقوع خطا 150 میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده است.



شکل (5): دیاگرام تک‌خطی سیستم قدرت مورد مطالعه

4-1. بررسی مشخصه روش پیشنهادی در برابر خطای متقارن

در شکل (5)، مشخصه روش پیشنهادی به‌ازای اعمال خطای سه‌فاز به زمین (LLG) در نقطه F1 بررسی شده است. نتایج آن در شکل (6) نشان داده شده است. شکل (6-الف) ولتاژ فازهای A، B و C در نقطه اتصال نیروگاه پراکنده به شبکه قدرت را برای حالت 2 نشان می‌دهد. با توجه به شکل (6-الف)، ولتاژ نقطه PCC قبل از وقوع خطا در مقدار 1 پریونیت قرار دارد. بعد از وقوع خطا ولتاژ نقطه PCC به نزدیکی صفر کاهش یافته است. شکل (6-ب) جریان‌های سه‌فاز در خروجی نیروگاه پراکنده را برای حالت 1 نشان می‌دهد. جریان فازهای خروجی نیروگاه پراکنده متناظر با حالت (2) در شکل (6-ث) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، بدون استفاده از مجموعه NSFCL از زمین لاینک DC، جریان خطا شدیداً NSFCL افزایش یافته است. عبور این جریان‌های شدید باعث آسیب دیدن سویچ‌های الکترونیک قدرت موجود در ساختار اینورتر واسط نیروگاه شده یا با تحریک سیستم حفاظتی مربوط باعث قطع آن از شبکه قدرت می‌شود. اما با استفاده از روش پیشنهادی و با قرار دادن ماژول در لاینک DC اینورتر واسط، جریان خروجی نیروگاه پراکنده در تمام بازه زمانی وقوع خطا به طور کامل به کمتر از دو برابر مقدار نامی آن محدود شده است. جریان عبوری از راکتور DC در شکل (6-ت) نشان داده شده است.

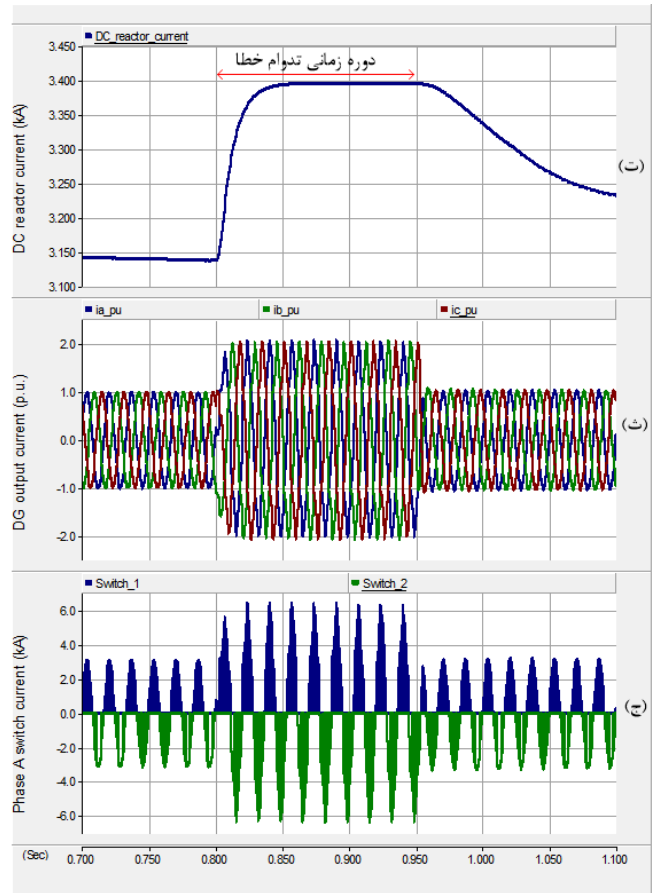
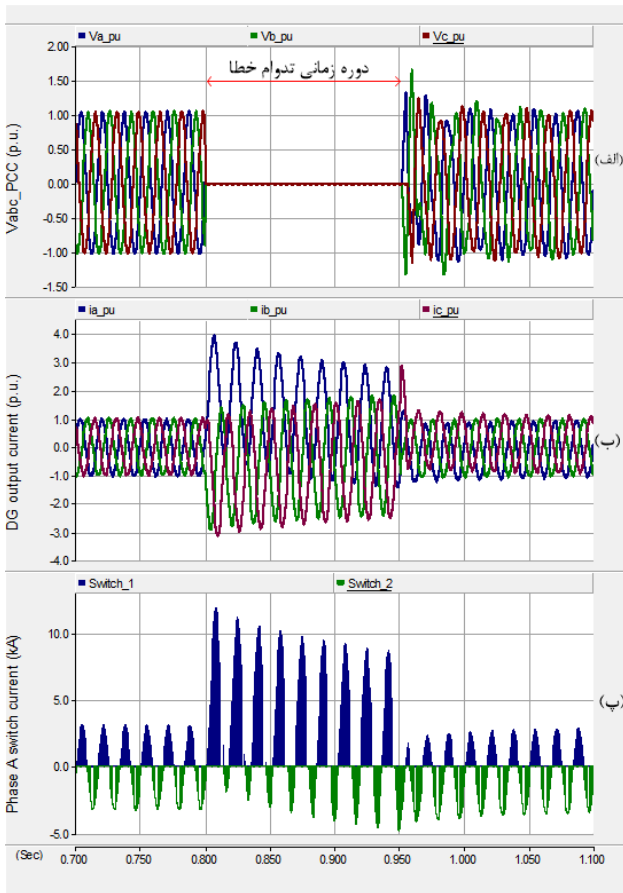


شکل (4): جریان لاینک DC و جریان راکتور DC پس از رفع خطا، (ب) بزرگ‌شده (الف) است.

جریان راکتور DC پس از رفع خطا در شکل (4) نشان داده شده است. پس از رفع اتصال کوتاه، راکتور DC از طریق پل دیودی دشارژ می‌شود تا دوباره به حالت عملکرد عادی خود برسد. گفتنی است که در حالت دشارژ، جریان راکتور DC یا جریان دشارژ از بیشینه مقدار جریان لاینک DC بالاتر است. به همین دلیل، تمام دیودها در زمان دشارژ روشن بوده و مجموعه محدودکننده در حکم اتصال کوتاه است. همان‌طور که از شکل (4) مشخص است، جریان راکتور DC پس از چند میلی‌ثانیه به صورت خودکار، به مقدار قبل از خطا (مقدار پیک جریان لاینک DC) کاهش پیدا می‌کند. به همین ترتیب، ماژول NSFCL به صورت خودکار آماده می‌شود تا جریان خروجی اینورتر را در برابر هر گونه اتصال کوتاه احتمالی در شبکه قدرت محدود سازد.

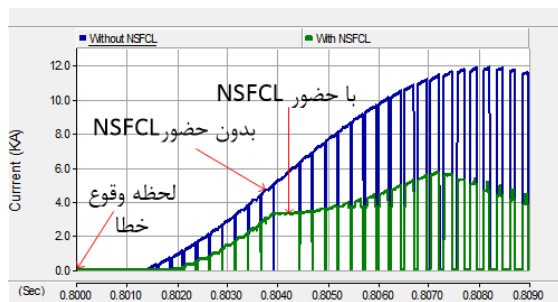
4. نتایج شبیه‌سازی‌ها

مدار نشان‌داده‌شده در شکل (5)، به‌منظور آزمایش عملکرد روش پیشنهادی شبیه‌سازی شده است. در این شکل، یک نیروگاه IBDG از طریق یک ترانسفورماتور افزایشنده و یک خط انتقال دومداره به شبکه سراسری متصل شده است. شبکه سراسری با یک منبع سه‌فاز متعادل با امپدانس معادل Z_g مدل‌سازی شده است. اطلاعات مربوط به نیروگاه پراکنده و پارامترهای سیستم در [3] موجود است. برای اجرای شبیه‌سازی‌ها از نرم‌افزار PSCAD/EMTDC استفاده شده است. در شبیه‌سازی‌ها خطا در $t=0.8$ ثانیه به سیستم اعمال شده است. شبیه‌سازی‌ها برای دو وضعیت متفاوت انجام شده است: 1. حالت بدون استفاده از روش پیشنهادی؛ 2. حالت با استفاده از روش پیشنهادی. در



شکل (6): نتایج شبیه‌سازی مربوط به خطای LLLG؛ (الف) ولتاژهای سه‌فاز در نقطه F1 در حالت 2، (ب) جریان‌های سه‌فاز خط در خروجی نیروگاه پراکنده در حالت 1، (پ) جریان عبوری از سویچ‌های IGBT قرارگرفته بر روی فاز A مبدل وسط در حالت 1، (ت) شکل موج جریان راکتور DC در حالت 2، (ث) جریان‌های سه‌فاز خط در خروجی نیروگاه پراکنده در حالت 2، (ج) جریان عبوری از سویچ‌های IGBT قرارگرفته بر روی فاز A مبدل وسط در حالت 2

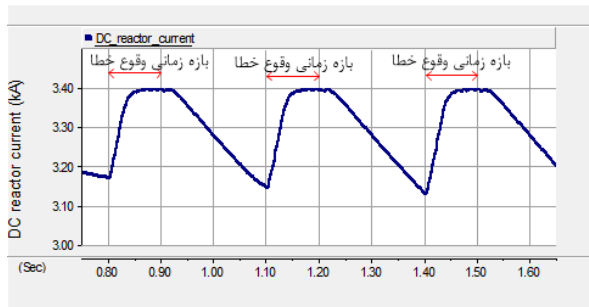
وقوع خطا، نشان داده شده است. با توجه به این شکل، در حالت 2 وجود راکتور DC در ساختار NSFCL، باعث فرونشاندن تغییرات شدید جریان شده است. بنابراین، با استفاده از روش پیشنهادی می‌توان سویچ‌های الکترونیک قدرت مبدل وسط را که به تغییرات شدید جریان در لحظات اولیه وقوع خطا بسیار حساس هستند، در برابر di/dt به‌وجودآمده محافظت کرد.



شکل (7): نرخ تغییرات اولیه جریان عبوری از سویچ‌های IGBT قرارگرفته بر روی فاز A مبدل وسط برای دو حالت 1 و 2

همان‌طور که از شکل (6-ت) مشخص است، جریان راکتور DC در لحظات اولیه بروز خطا تقریباً به‌صورت خطی افزایش می‌یابد. اما با عملکرد به موقع سیستم کنترل مازول NSFCL محدودکننده قادر است در کل بازه زمانی وقوع خطا (150 میلی‌ثانیه) جریان خروجی نیروگاه پراکنده را به مقدار قابل تحمل سویچ‌های الکترونیک قدرت آن محدود سازد. با توجه به شکل (6-ت)، پس از برطرف شدن خطا، جریان راکتور DC تا رسیدن به بیشینه مقدار جریان لینک DC در مد دشارژ قرار می‌گیرد. بنابراین مجموعه NSFCL، به‌طور خودکار آماده می‌شود تا نیروگاه IBDG را در برابر اتصال کوتاه‌های احتمالی بعدی محافظت کند.

جریان عبوری از دو سویچ IGBT واقع بر فاز A مبدل وسط در دو حالت 1 و 2، به‌ترتیب در شکل‌های (6-پ) و (6-ج) نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است، جریان عبوری از سویچ‌های نیمه‌هادی اینورتر به حدود دو برابر مقدار نامی کاهش یافته است. شکل (7) نرخ تغییرات جریان (di/dt) عبوری از سویچ شماره 1 واقع بر فاز A مبدل وسط برای دو حالت 1 و 2 در لحظات اولیه

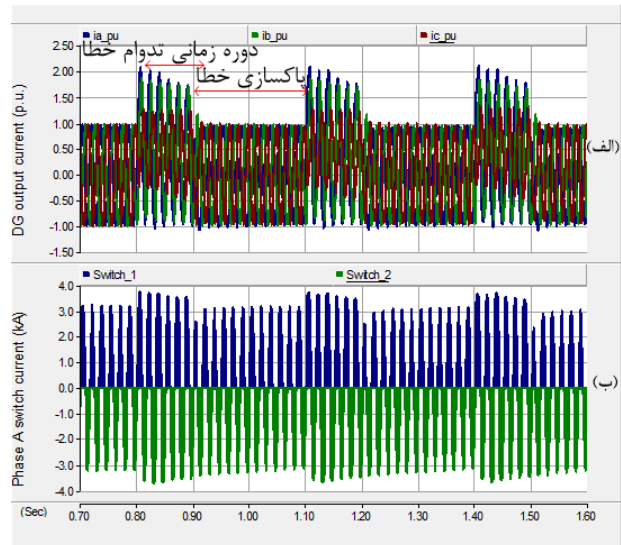


شکل (9): جریان راکتور DC در هنگام خطا گذرا تکرارشونده LG در نقطه F1 در حالت 2

پس از برطرف شدن اولین خطا در لحظه $0/9$ ثانیه، راکتور DC در مد دشارژ قرار می‌گیرد. این مد دشارژ ادامه پیدا می‌کند تا اینکه در لحظه $1/1$ ثانیه، قبل از آنکه جریان راکتور DC به مقدار عادی خود برسد، یک بار دیگر خطای LG در نقطه F2 سیستم را برای مدت زمان $0/1$ ثانیه تحت تأثیر قرار داده است. بنابراین، راکتور DC تا لحظه $1/2$ ثانیه در مد شارژ قرار می‌گیرد. این فرایند شارژ و دشارژ راکتور DC در طول بازه‌های زمانی وقوع و رفع خطا تکرار می‌شود. با توجه به نتایج به دست آمده در این قسمت، روش پیشنهادی قادر است در هنگام وقوع خطاهای گذرای تکرارشونده که احتمال وقوع آنها در شبکه‌های برق هوایی زیاد است، جریان خروجی نیروگاه پراکنده را به مقدار قابل تحمل سویچ‌های الکترونیک قدرت محدود سازد.

5. نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک طرح نوین گذر از خطای مبتنی بر محدودکننده جریان خطای لینک DC با قابلیت کنترل دامنه جریان برای بهبود قابلیت FRT منابع تولید پراکنده با واسط الکترونیک قدرت پیشنهاد شد. در این روش، اینورتر واسط نیروگاه IBDG، هم هنگام کار عادی و هم حین بروز خطا، رفتاری شبیه به یک منبع کنترل ولتاژ دارد. در روش پیشنهادی، برای حذف مشکلات کنترلی به وجود آمده ناشی از تغییر روش کنترل اینورتر از حالت کار عادی به حالت خطا، از ماژول NSFCL در لینک DC نیروگاه پراکنده استفاده شد. روش پیشنهادی را می‌توان به راحتی بر روی اینورترهای منبع ولتاژی با حداقل هزینه مهندسی، طراحی، تست و آزمایشگاهی اجرا کرد. با این روش، امکان بهره‌برداری پیوسته برای منبع IBDG حتی در شرایط صفر ولتاژ شبکه وجود دارد. به منظور اثبات کارایی روش پیشنهادی، شبیه‌سازی‌های گسترده‌ای در محیط PSCAD/EMTDC انجام شد. نتایج به دست آمده کارایی بالای روش پیشنهادی را تصدیق کرد. بنابراین روش پیشنهادی را می‌توان به عنوان یک راه‌حل مؤثر در استراتژی‌های محدودسازی اینورترها در نظر گرفت.



شکل (8): نتایج شبیه‌سازی مربوط به اعمال خطا گذرا تکرارشونده: (الف) جریان‌های سه‌فاز خط در خروجی نیروگاه پراکنده، (ب) جریان عبوری از سویچ‌های IGBT قرارگرفته بر روی فاز A مبدل واسط

2.4. بررسی مشخصه روش پیشنهادی در برابر خطاهای

گذرای تکرارشونده

از آنجایی که بیشتر اتصال کوتاه‌ها در سیستم‌های قدرت، به خصوص شبکه‌های توزیع هوایی، ماهیت گذرای تکرارشونده دارند، هدف از این قسمت شبیه‌سازی، نشان دادن کارایی روش پیشنهادی در برابر چنین شرایط بحرانی در سیستم قدرت است. برای همین یک خطای گذرای تکرارشونده تک‌فاز به زمین (LG) در لحظه $0/8$ ثانیه با مدت زمان تداوم خطای $0/1$ ثانیه و فاصله زمانی شروع خطای $0/2$ ثانیه، در نقطه F2 واقع در انتهای خط انتقال 1 در شکل (5) شبیه‌سازی شده است. نتایج مربوط در شکل (8) نمایش داده شده است.

جریان‌های سه‌فاز در خروجی نیروگاه پراکنده در حالت 2، در شکل (8-الف) نشان داده شده است. با توجه به شکل (8-الف)، بعد از وقوع خطا در هر سه حالت، جریان خروجی نیروگاه پراکنده به حدود 2 برابر مقدار نامی محدود شده است. در شکل (8-ب) جریان عبوری از سویچ‌های IGBT واقع بر فاز A از مبدل واسط برای حالت 2 نشان داده شده است. همان‌طور که از این شکل مشخص است، جریان خروجی نیروگاه پراکنده طی مدت زمان وقوع هر سه خطا، به کمتر از دو برابر مقدار نامی آن محدود شده است. جریان عبوری از راکتور DC در هنگام وقوع خطای گذرای تکرارشونده LG، در شکل (9) نشان داده شده است. با توجه به شکل (9)، پس از بروز خطا با عملکرد مناسب ماژول NSFCL جریان راکتور در کل دوره زمانی خطا به یک مقدار مشخص محدود شده است.

- [1] Pepermansa. G, Driesenb. J, Haeseldonckxc. D, Belmansc. R., and Haeseleer. W. D., "Distributed generation: definition, benefits and issues", Energy Policy, pp. 787-798, 2005.
- [2] Vasquez. Juan C, Guerrero. Josep M, Savaghebi. M., and Teodorescu. R., "Modeling, analysis, and design of stationary-reference-frame droop-controlled parallel three-phase voltage sources inverters", IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 60, no. 4, pp. 1271-1280, April. 2013.
- [3] Nimpitiwan. N, Heydt. Gerald T, Ayyanar. R and Suryanarayanan. S., "Fault current contribution from synchronous machine and inverter based distributed generations", IEEE Trans. Power Delivery., Vol. 22, No. 1, pp. 634-641, January. 2007.
- [4] Taha Selim Ustun, Cagil Ozansoy, and Aladin Zayegh., "Fault current coefficient and time delay assignment for microgrid protection system with central protection unit", IEEE Trans. Power System., Vol. 28, No. 2, pp. 598-606, May. 2013.
- [5] Wang. X, Blaabjerg. F., and Chen. Z., "Autonomous control of inverter-interfaced distributed generation units for harmonic current filtering and resonance damping in an islanded microgrid", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 50, No. 1, pp. 452-461, January/February. 2014.
- [6] Baran. Mesut E, El-Markaby. I., "Fault analysis on distribution feeders with distributed generations", IEEE Trans. Power System., vol. 20, no. 4, pp. 1757-1764, Nov. 2005.
- [7] Miret. J, Castilla. M, Camacho. A, Vicu. L, and Matas. J., "Control scheme for photovoltaic three-phase inverter to minimize peak currents during unbalanced grid-voltage sags", IEEE Trans. Power Elec, Vol. 27, No. 10, pp. 4262-4271. October, 2012.
- [8] Wessels. C, Gebhardt. F., and Wilhelm Fuchs. F., "Fault ride-through of a DFIG wind turbine using a dynamic voltage restorer during symmetrical and asymmetrical grid faults", IEEE Trans. Power Elec., Vol. 26, No. 3, pp. 807-815, March. 2011.
- [9] Vilathamuwa. D. M, Wijekoon. H.M., and Choi. S. S., "A novel technique to compensate voltage sags in multilane distribution system-The interline dynamic voltage restore", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 53, No. 5, pp. 1603-1611, Oct. 2006.
- [10] Bottrell. N., and Green. Timothy C., "Comparison of current limiting strategies during fault ride-through of inverters to prevent latch-up and wind-up", IEEE Trans. Power Electro. Vol. 29, No. 3, pp. 3786-3797, July. 2014.
- [11] Yazdani. A and Iravani. R., *Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications*. Hoboken, NJ:Wiley, 2010.
- [12] Etmadi. Amir H., and Iravani. R., "Overcurrent and overload protection of directly voltage-controlled distributed resources in a microgrid", IEEE Trans. Indust Elect., Vol. 60, No. 12, pp. 5629-5638, December. 2013.
- [13] Bloemink. Jeffrey M., and Iravani. R., "Control of a Multiple Source Microgrid With Built-in Islanding Detection and Current Limiting", IEEE Trans. Power Del., Vol. 27, No. 4, pp. 2122-2132, October. 2012.
- [14] Gao. F., and Iravani. R., "A control strategy for a distributed generation unit in grid-connected and autonomous modes of operation", IEEE Trans. power Delivery., Vol. 23, No. 2, pp. 850-859, April. 2008.
- [15] Loix. T, Wijnhoven. T, Deconinck. G., "Protection of micro-grids with a high penetration of inverter-coupled energy sources", in Proc. IEEE PES/CIGRE Symposium, pp.1-6, 2009.
- [16] Cornelis A. Plet, Maria Brucoli, John D.F. McDonald and Timothy C. Green., "Fault models of inverter-interfaced distributed generators: experimental verification and application to fault analysis", in Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting Conf, pp. 1-8, 2011.
- [17] Xuejun Pei, Yong Kang., "Short-circuit fault protection strategy for high-power three-phase three-wire inverter", IEEE. Trans. Indus Inf, Vol. 8, No. 3, PP. 545-553, 2012.
- [18] Tarafdar Hagh. M, Abapour. M., "Nonsuperconducting fault current limiter with controlling the magnitude of fault currents", IEEE Trans. Power Elec, Vol. 24, No. 3, pp. 613-619. March. 2009.
- [19] Jafari. M, Naderi. S.B, Tarafdar Hagh. M, Abapour. M., and Hosseini. S. H., "Voltage sag compensation of point of common coupling (PCC) using fault current limiter", IEEE Trans. Power Del. Vol. 26, No. 4, pp. 2638-2646. October, 2011.
- [20] Tarafdar Hagh. M and Abapour. M., "Nonsuperconducting fault current limiters", Eur. Trans. Elect. Power, Published Online: Mar. 27, 2008.
- [21] Abapour. M, Hosseini. S.H., and Tarafdar Hagh. M., "Power quality improvement by use of a new topology of fault current limiter", in Proc. ECTICON, pp. 305-308, 2007.
- [22] Selim Ustun. T, Ozansoy. C, and Zayegh. A., "A central microgrid protection system for networks with fault current limiters", in Proc. 10th Int. Conf. Environment and Electrical Engineering (EEEIC), pp.1-4, 2011
- [23] Jiang. D, Lu. Z., and Wu. Z., "A new topology of fault-current limiter and its parameters optimization," in Proc. Chinese Soc. Electrical Eng., Jul., pp. 200-205, 2004
- [24] Keyhani. A and Marwali. M., *Smart Power Grids*. Berlin: Springer, chap. 9, 2011.

13 بهبود قابلیت گذر از خطای منابع تولید پراکنده مبتنی بر اینورتر با استفاده از ...

- [25] "Technical guideline—Generating plants connected to the medium voltage network", Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW), Berlin, Germany, 2008.