

ارائه یک روش کنترلی جهت کاهش توان دریافتی از آرایه‌های فتولتائیک متصل به شبکه در زمان وقوع خطای افت ولتاژ

مهدی کاظمی جروکانی، مهدی نیرومند، سید محمد مدنی

دانشکده مهندسی برق

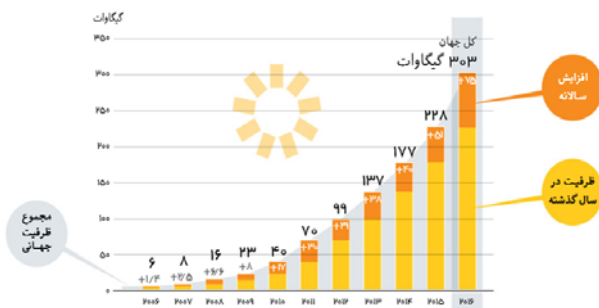
دانشگاه اصفهان

اصفهان، ایران

mehdi_niroomand@yahoo.com

۱. مقدمه

نیروگاه‌های فتولتائیک یکی از محبوب‌ترین منابع تجدیدپذیر برای تولید برق به شمار می‌آیند. به علت کاهش شدید هزینه ساختار سلول فتولتائیک، ظرفیت نصب آرایه‌های فتولتائیک روز به روز در حال افزایش است و انتظار می‌رود که این روند صعودی ادامه یابد. «شکل ۱» نمودار ظرفیت تولید برق جهانی به روش فتولتائیک را تا سال ۲۰۱۶ نشان می‌دهد [۱].



شکل ۱: نمودار ظرفیت تولید برق جهانی به روش فتولتائیک [۱].

وقتی که سیستم‌های فتولتائیک در زمان وقوع خطای افت ولتاژ به طور ناگهانی از شبکه قطع شوند، مشکلاتی از قبیل قطعی برق و لرزش ولتاژ در شبکه رخ می‌دهد. به منظور حل این مشکلات، یک سری الگوهای برای شبکه وضع شده است [۲-۶].

چکیده — به دلیل سطح نفوذ بالای واحدهای تولید برق پراکنده، تزریق توان راکتیو برای واحدهای متصل به شبکه ضروری است. به خاطر محدودیت جریان اینورترهای فتولتائیک متصل به شبکه و جلوگیری از اضافه ولتاژ در خازن لینک DC، باید در تمام شرایط کاری، توان دریافتی از آرایه‌های فتولتائیک با توان تزریقی به شبکه برابر باشد (با فرض نادیده گرفتن تلفات توان). بنابراین، در زمان وقوع خطای افت ولتاژ، به دلیل محدود شدن تزریق توان، دریافت توان از آرایه‌های فتولتائیک باید کاهش یابد. در این مقاله یک تکنیک کنترلی برای کاهش توان دریافتی از آرایه‌های فتولتائیک در زمان وقوع خطای افت ولتاژ، پیشنهاد شده است. این تکنیک در زمان وقوع خطای افت ولتاژ، پاسخ دینامیکی سیستم را بهبود می‌بخشد و همچنین به دلیل کاهش نوسانات گذرای ولتاژ، خطای ردیابی توان کاهش می‌یابد. صحت تکنیک پیشنهادی به عنوان قابلیت عبور از خطای افت ولتاژ، به وسیله شبیه سازی‌های ارائه شده روی یک سیستم سه فاز ۱۰۰ کیلووات متصل به شبکه، تأیید شده است.

واژه‌های کلیدی — آرایه‌های فتولتائیک؛ خطای افت ولتاژ؛ خروج

از نقطه توان پیشینه؛ لینک DC؛ استانداردهای شبکه؛ الگوهای شبکه؛

تزریق توان راکتیو.

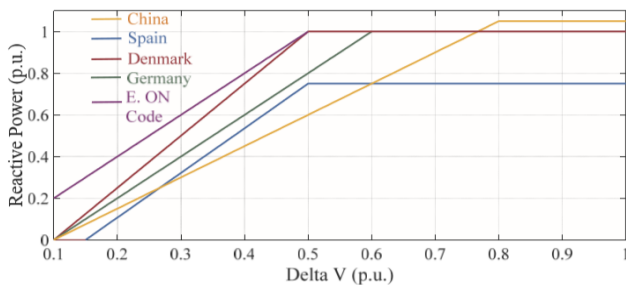
متصل به شبکه در زمان وقوع خطای افت ولتاژ پرداخته است. روش‌های خروج از نقطه توان بیشینه در زمان وقوع خطای افت ولتاژ برای کاهش توان دریافتی از آرایه‌های فتولتائیک در قسمت ۳ بیان شده است. اصل تکنیک پیشنهادی به همراه نتایج شبیه‌سازی در قسمت ۴ تشریح شده است و در نهایت جمع بندی کارهای صورت گرفته در این مقاله در قسمت ۵ انجام شده است.

۲. الزامات تعریف شده برای سیستم‌های

فتولتائیک متصل به شبکه

امروزه سیستم‌های فتولتائیک به طور سریع در حال توسعه می‌باشند. در حال حاضر این سیستم‌ها از چند کیلووات تا چند مگاوات در حال اجرا هستند. سیستم‌های فتولتائیک، امروزه به عنوان منبع مهمی از سیستم‌های تولید پراکنده شناخته می‌شوند. لذا به منظور حفظ و پایداری شبکه و انتقال انرژی الکتریکی به شبکه به صورت یکپارچه، نیاز دارند تا از یک سری الزامات استاندارد که توسط کشورهای مختلف وضع شده است، پیروی کنند [۲-۴].

الزامات شبکه بیان می‌کند که سیستم‌های فتولتائیک باید همانند ژنراتورهای قدیمی در هنگام افت ولتاژ شبکه، جریان راکتیو به شبکه تزریق کنند تا ولتاژ شبکه به حالت نامی خود برگردد این حالت، قابلیت عبور از افت ولتاژ^۱ نامیده می‌شود [۲-۴]. «شکل ۲» الزامات قابلیت عبور از افت ولتاژ را برای چند کشور مختلف نشان می‌دهد.



شکل ۲: الزامات قابلیت عبور از افت ولتاژ برای چندین کشور مختلف [۵].

«شکل ۲» بیان می‌دارد که سیستم‌های فتولتائیک در زمان وقوع خطای افت ولتاژ، باید خطای افت ولتاژ را تحمل کنند، توان راکتیو تزریق کنند و در صورت امکان توان اکتیو به شبکه تزریق نمایند [۵]. «شکل ۳» الگوی تزریق توان راکتیو تعریف شده برای سیستم‌های فتولتائیک در شبکه برق آلمان را نشان می‌دهد.

در زمان وقوع خطای افت ولتاژ، دامنه ولتاژ شبکه کوچکتر از مقدار نامی می‌شود. بنابراین، جهت ثابت نگه داشتن توان اکتیو تزریقی به شبکه، جریان تزریقی به شبکه باید افزایش یابد. از طرفی دیگر برای بهبود سطح ولتاژ شبکه، سیستم‌های فتولتائیک متصل به شبکه باید در زمان وقوع خطای افت ولتاژ، توان راکتیو به شبکه تزریق کنند. در نتیجه، برای جلوگیری از اضافه جریان در کلیدهای اینورتر و همچنین اضافه ولتاژ در خازن لینک DC، باید توان اکتیو تزریقی به شبکه در زمان وقوع خطای افت ولتاژ توسط تکنیک‌های خاصی کاهش یابد. در غیر این صورت، کلیدهای اینورتر آسیب می‌بینند و انرژی اضافی در خازن لینک DC ذخیره شده و منجر به اضافه ولتاژ مضر در خازن لینک DC می‌شود [۷-۸].

برای کاهش توان دریافتی از آرایه‌های فتولتائیک در زمان وقوع خطای افت ولتاژ، کافی است که آرایه‌های فتولتائیک را از نقطه توان بیشینه خارج کرد. از جمله روش‌های خروج از نقطه توان بیشینه عبارتند از: روش مستقیم، استفاده از یک مقاومت برای جذب توان اکتیو اضافی، و استفاده از یک سیستم ذخیره کننده انرژی [۹-۱۱]. از میان این روش‌ها، روش مستقیم از تکنیک ساده‌تری برخوردار بوده و برای پیاده سازی آن احتیاج به المان‌های اضافی نیست. از دیگر روش‌های مستقیم برای کاهش توان دریافتی، می‌توان به اتصال کوتاه کردن و مدار باز کردن آرایه‌های فتولتائیک اشاره کرد. پیاده‌سازی این روش‌ها آسان بوده ولی در زمان وقوع خطای افت ولتاژ، توان اکتیو دریافتی را به صفر کاهش می‌دهد که باعث قطع تزریق توان به شبکه می‌شود. یک روش کنترل کاهش توان براساس ولتاژ لینک DC در [۱۲-۱۳] معرفی شده است که برای خروج از نقطه توان بیشینه، یک ولتاژ اضافی با ولتاژ نقطه توان بیشینه جمع می‌شود.

در این مقاله یک ساختار کنترلی به منظور کاهش توان دریافتی از آرایه‌های فتولتائیک در زمان وقوع خطای افت ولتاژ، ارائه شده است. در شرایط عادی شبکه «بدون وقوع خطای افت ولتاژ»، به روش آزمون و مشاهده، توان بیشینه از آرایه‌های فتولتائیک دریافت شده و توسط اینورتر به شبکه تزریق می‌شود. در این حالت، کنترل کننده اول وظیفه ردیابی نقطه توان بیشینه را برعهده دارد. در شرایط غیر عادی شبکه «وقوع خطای افت ولتاژ»، سیستم در حالت کاهش توان قرار می‌گیرد و کنترل کننده دوم توان دریافتی از آرایه‌های فتولتائیک را روی مقدار مشخصی محدود می‌کند. مزیت تکنیک ارائه شده نسبت به سایر روش‌ها در این است که در زمان وقوع خطای افت ولتاژ، سرعت دینامیکی سیستم بالا رفته و خطای ردیابی در هر دو حالت کاری به نسبت زیادی کاهش یافته است. مطالب این مقاله به صورت زیر طبقه بندی شده است.

قسمت ۲ این مقاله به الزامات تعریف شده برای سیستم‌های فتولتائیک

¹ Low Voltage Ride-Through(LVRT)

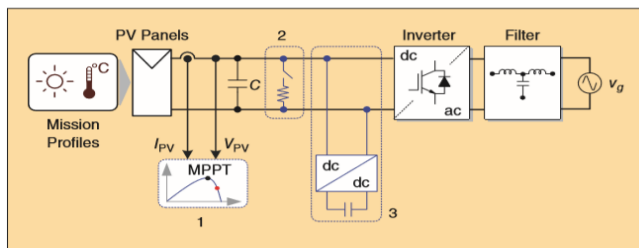
در رابطه (۴)، دامنه ولتاژ شبکه قبل از وقوع خطای افت ولتاژ می‌باشد. در میان تکنیک‌های معرفی شده، تکنیک‌های توان اکتیو ثابت و جریان اکتیو ثابت، راندمان انرژی سیستم را در زمان وقوع خطای افت ولتاژ، به حداکثر می‌رسانند ولی امکان اضافه جریان در کلیدهای اینورتر ممکن است رخ دهد. در تکنیک جریان بیشینه ثابت، راندمان انرژی سیستم نسبت به دو تکنیک قبل، کاهش پیدا می‌کند اما مزیت عمده آن، این است که در تمام بازه‌های خطای افت ولتاژ، امکان اضافه جریان در کلیدهای اینورتر وجود ندارد [۳].

۳. روش‌های خروج از نقطه توان بیشینه در

سیستم‌های فتوولتائیک متصل به شبکه

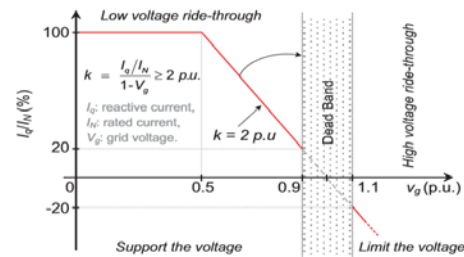
همانطور که قبلاً اشاره شد، اگر در زمان وقوع خطای افت ولتاژ، توان اکتیو دریافتی از آرایه‌های فتوولتائیک کاهش پیدا نکند، ممکن است که قطعات الکترونیک قدرت از جمله کلیدهای اینورتر و خازن لینک DC به شدت آسیب ببینند. از این رو، برای جلوگیری از این مشکل، توان اکتیو تزریقی به شبکه باید به نحوی کاهش یابد [۷-۸].

همانطور که در «شکل ۴» نشان داده شده است، روش‌های ارائه شده برای کاهش توان اکتیو در زمان وقوع خطای افت ولتاژ عبارتند از: (۱) تغییر دادن نقطه توان بیشینه «روش مستقیم»، (۲) استفاده از یک مقاومت برای جذب توان اکتیو اضافی، و (۳) استفاده از یک سیستم ذخیره کننده انرژی برای ذخیره توان اکتیو اضافی. دو روش اول منجر به اتلاف انرژی تولیدی در زمان وقوع خطای افت ولتاژ می‌شوند ولی پیاده‌سازی آنها به مراتب ساده‌تر از روش سوم خواهد بود. در روش سوم انرژی تولیدی تلف نمی‌شود و راندمان سیستم افزایش می‌یابد ولی برای پیاده‌سازی آن نیاز به المان‌های اضافه دارد و از پیچیدگی کنترلی برخوردار می‌باشد. در اکثر مقالات برای کاهش توان تزریقی به شبکه در زمان وقوع خطای افت ولتاژ، از روش اول استفاده می‌شود زیرا برای پیاده‌سازی آن هیچ المان اضافه‌ای استفاده نمی‌شود و ساختار کنترلی آن ساده می‌باشد [۹].



شکل ۴: روش‌های خروج از نقطه توان بیشینه در سیستم فتوولتائیک متصل به

شبکه [۹].



شکل ۳: الگوی تزریق توان راکتیو برای سیستم‌های فتوولتائیک در شبکه برق

آلمان [۲].

طبق «شکل ۳» میزان جریان راکتیو تزریقی از رابطه (۱) بدست می‌آید:

$$\begin{cases} \text{deadband} & 0.9 pu < v_g < 1.1 pu \\ k \cdot \frac{v_g - v_{g0}}{v_{gN}} \cdot I_N + I_{Q0} & 0.5 pu < v_g < 0.9 pu \\ -I_N + I_{Q0} & v_g < 0.5 pu \end{cases} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، v_{g0} ، v_{gN} به ترتیب ولتاژ لحظه‌ای شبکه، ولتاژ اولیه شبکه قبل از وقوع خطا، و ولتاژ نامی شبکه هستند. I_N و I_{Q0} ، به ترتیب جریان نامی شبکه و جریان راکتیو قبل از وقوع خطا می‌باشد. همانطور که از قبل توضیح داده شد، برای بهبود سطح ولتاژ شبکه در زمان وقوع خطای افت ولتاژ، باید توان راکتیو به شبکه تزریق کرد. از این رو، تکنیک‌های تزریق توان راکتیو به شبکه در [۳] و [۱۴-۱۵] بیان شده است که این تکنیک‌ها شامل تکنیک توان اکتیو ثابت، تکنیک جریان اکتیو ثابت، و تکنیک جریان بیشینه ثابت می‌باشند. در این مقاله به منظور کاهش اضافه جریان اینورتر در زمان وقوع خطای افت ولتاژ، از تکنیک جریان بیشینه ثابت استفاده شده است. در تکنیک جریان بیشینه ثابت، زمانی که ولتاژ شبکه در بازه $0.5 pu \leq v_g \leq 0.9 pu$ قرار گیرد، جریان در قاب مرجع dq به صورت رابطه (۲) تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} I_d = \sqrt{1 - 4(1 - v_g)^2} I_N \\ I_q = 2(1 - v_g) I_N \end{cases} \quad (2)$$

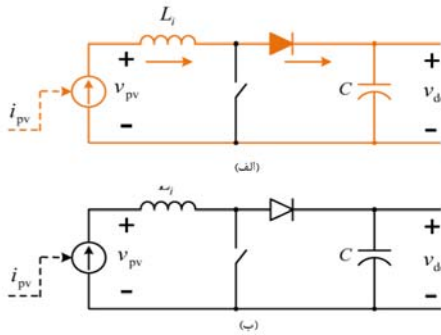
اگر ولتاژ شبکه زیر $0.5 pu$ قرار گیرد آنگاه جریان در قاب مرجع dq به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} I_d = 0 \\ I_q = I_N \end{cases} \quad (3)$$

در روابط (۲) و (۳)، I_d و I_q به ترتیب جریان اکتیو و راکتیو در قاب مرجع dq هستند. طبق روابط (۲) و (۳) به منظور تزریق مقدار مناسب توان راکتیو به شبکه در زمان وقوع خطای افت ولتاژ، توان اکتیو تزریقی به شبکه طبق رابطه (۴) کاهش می‌یابد.

$$P = \frac{1}{2} v_{gm} I_d \quad (4)$$

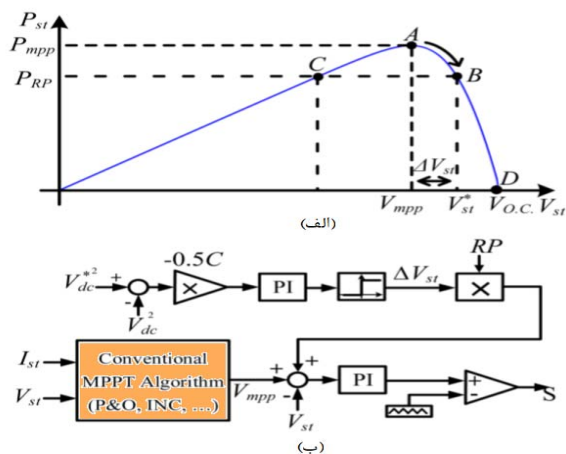
DC اعمال نمی‌شود. شکل موج‌های توان تولیدی از آرایه‌های فتوولتائیک و همچنین توان اکتیو تزریقی به شبکه همانند «شکل ۶» می‌باشد.



شکل ۷: مسیر جریان در مبدل DC-DC زمانی که کلید مبدل خاموش است: (الف) حالت گذرا (ب) حالت ماندگار [۱۲].

۳. خارج کردن آرایه فتوولتائیک از نقطه توان بیشینه برای کاهش توان اکتیو دریافتی:

در دو روش اول، در زمان وقوع خطای افت ولتاژ، هیچ توان اکتیوی توسط آرایه‌های فتوولتائیک تولید نمی‌شود. و فقط جریان راکتیو به شبکه تزریق می‌شود. بنابراین، اپراتورهای شبکه مجاز هستند که در زمان خطای افت ولتاژ، شبکه را از طریق نیروگاه‌های تولیدی تغذیه کنند. از این رو، سیستم-های فتوولتائیک متصل به شبکه باید در زمان وقوع خطای افت ولتاژ بتوانند شبکه را با توان اکتیو تغذیه کنند. بنابراین، یک الگوریتم کاهش توان با کنترل ولتاژ لینک DC در «شکل ۸» پیاده سازی شده است. برای کاهش توان گرفته شده از آرایه فتوولتائیک، یک سیگنال توان کاهش‌ی «RP» تعریف شده است.

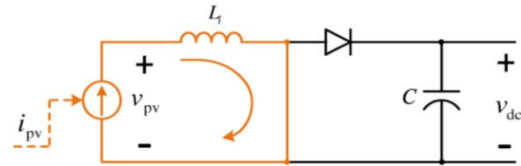


شکل ۸: تکنیک کاهش توان آرایه‌های فتوولتائیک در زمان وقوع خطای افت ولتاژ: (الف) منحنی ولتاژ-توان آرایه فتوولتائیک، (ب) کنترل کننده مبدل DC-DC [۱۳].

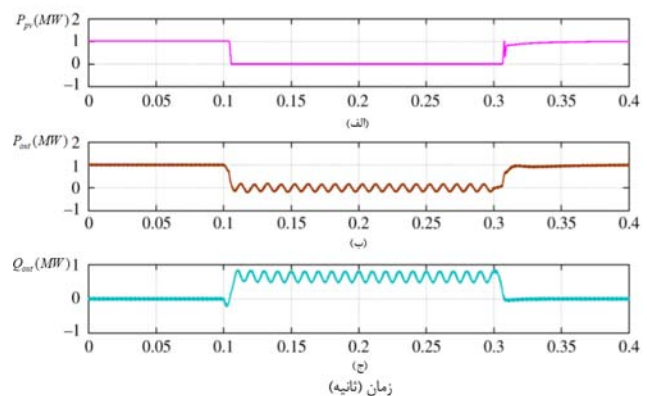
روش‌های مستقیم خروج از نقطه توان بیشینه در سیستم‌های فتوولتائیک شامل موارد زیر می‌باشد:

۱. اتصال کوتاه کردن ماژول‌های فتوولتائیک:

در این روش همانطور که در «شکل ۵» نشان داده شده است، در زمان وقوع خطای افت ولتاژ، کلید مبدل DC-DC روشن است «ضریب وظیفه یک می‌شود» در نتیجه، هیچ توانی از آرایه‌های فتوولتائیک به لینک DC فرستاده نمی‌شود به خاطر این که ولتاژ دو سر ماژول‌های فتوولتائیک « V_{pv} » صفر می‌شود. «شکل ۶» توان تولیدی از آرایه‌های فتوولتائیک و همچنین توان اکتیو تزریقی به شبکه را نشان می‌دهد.



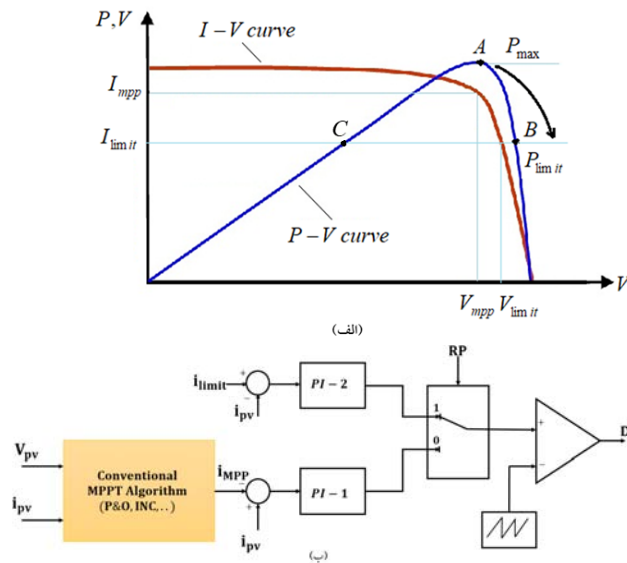
شکل ۵: اتصال کوتاه کردن ماژول‌های فتوولتائیک [۱۲].



شکل ۶: اتصال کوتاه آرایه‌های فتوولتائیک: (الف) توان تولیدی از آرایه‌های فتوولتائیک، (ب) توان تزریقی به شبکه، (ج) توان راکتیو تزریقی به شبکه [۱۲].

۲. مدار باز کردن آرایه‌های فتوولتائیک:

یکی دیگر از روش‌های جلوگیری از انتقال توان از آرایه‌های فتوولتائیک به لینک DC، این است که در زمان وقوع خطای افت ولتاژ، کلید مبدل DC-DC خاموش نگه داشته شود «ضریب وظیفه صفر می‌شود» همانطور که در «شکل ۷» نشان داده شده است، در زمان وقوع خطای افت ولتاژ، جریان آرایه‌های فتوولتائیک « i_{pv} » شارژ شده در سلف مبدل DC-DC، به طور کامل دشارژ می‌شود « $i_{pv} = 0$ » و سپس دیود مبدل DC-DC قطع می‌شود. با قطع شدن دیود، دو سر آرایه‌های فتوولتائیک مدار باز شده و هیچ توانی به لینک



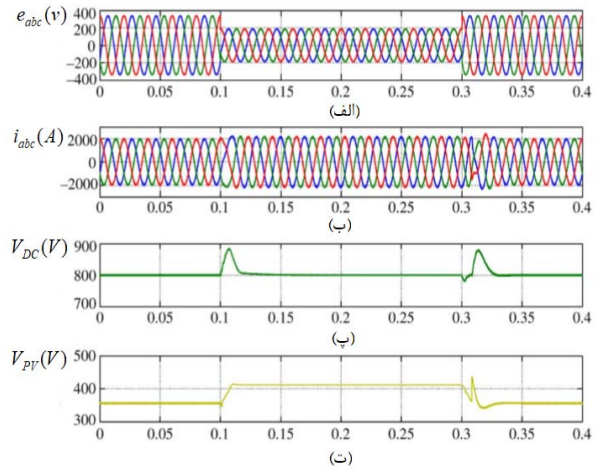
شکل ۱۰: تکنیک پیشنهادی برای کاهش توان اکتیو دریافتی در زمان وقوع خطای افت ولتاژ: (الف) منحنی‌های ولتاژ-توان و جریان-ولتاژ، (ب) تکنیک کنترلی پیشنهادی.

زمانی که شبکه در حالت عادی خود باشد، سیگنال توان کاهشی صفر شده و سیستم فتوولتائیک در حالت نقطه توان بیشینه قرار می‌گیرد و کنترل کننده اول «PI-1» ضریب وظیفه مورد نیاز را برای مبدل DC-DC فراهم می‌کند. زمانی که شبکه دچار خطای افت ولتاژ می‌شود، سیگنال توان کاهشی یک شده و سیستم فتوولتائیک وارد حالت کاهش توان قرار می‌گیرد. کنترل کننده دوم «PI-2» ضریب وظیفه مورد نیاز برای خروج از نقطه توان بیشینه را فراهم می‌کند و باعث می‌شود آرایه‌های فتوولتائیک روی مقدار توان مشخصی قرار گیرد. با توجه به روابط (۴-۱) و (شکل ۲-۳) مقدار توان کاهش یافته در زمان وقوع خطای افت ولتاژ « P_{limit} » مشخص می‌شود. با مشخص بودن « P_{limit} » و ولتاژ لینک DC، مقدار جریان کاهش یافته در زمان وقوع خطای افت ولتاژ « I_{limit} » به دست می‌آید. در این تکنیک پیشنهادی نقطه کار آرایه‌های فتوولتائیک در زمان وقوع خطای افت ولتاژ، نقطه کار آرایه‌های فتوولتائیک از A به B جابه‌جا می‌شود (سمت راست نقطه بیشینه توان). لازم به ذکر است که حرکت نقطه کار به نقطه B یا C منجر به کاهش توان می‌شود.

از جمله دلایل انتقال نقطه کار به نقطه B می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

(۱) اختلاف ولتاژ نقاط A و B « $|V_A - V_B|$ » کوچکتر از « $|V_A - V_C|$ » است. از این رو، جابه‌جایی نقطه کار از نقطه A به B سریعتر انجام می‌شود که این منجر به افزایش پاسخ دینامیکی سیستم می‌شود.

این سیگنال در زمان وقوع خطای افت ولتاژ یک و در زمان شرایط عادی شبکه صفر است. همانطور که در «شکل ۸» نشان داده شده است، در $RP=1$ ولتاژ ΔV_{st} با V_{mpp} جمع می‌شود که در نتیجه باعث حرکت نقطه کار از A به B می‌شود. برای کنترل کردن ولتاژ لینک DC در زمان وقوع خطای افت ولتاژ، از انرژی ذخیره شده در خازن لینک DC استفاده می‌شود. بنابراین، ΔV_{st} با هدف کنترل انرژی لینک DC محاسبه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی تکنیک فوق، در شرایط خطای افت ولتاژ در «شکل ۹» نشان داده شده است.



شکل ۹: کنترل مبدل DC-DC برای کاهش توان دریافتی در زمان وقوع خطای افت ولتاژ: (الف) ولتاژهای شبکه، (ب) جریان‌های شبکه، (پ) ولتاژ لینک DC، (ت) ولتاژ ورودی مبدل DC-DC [۱۲].

۴. تکنیک پیشنهادی برای کاهش توان اکتیو دریافتی از آرایه‌های فتوولتائیک در زمان وقوع خطای افت ولتاژ

تکنیک ارائه شده در این مقاله، در «شکل ۱۰» نشان داده شده است. در این تکنیک کنترلی یک سیگنال توان کاهشی «RP» تعریف شده است که در زمان وقوع خطای افت ولتاژ، سیگنال توان کاهشی یک و در شرایط عادی شبکه صفر می‌شود. در این تکنیک پیشنهادی، از دو کنترل کننده تناسبی-انتگرالی «PI» به منظور تولید ضریب وظیفه «D» مجزا برای مبدل DC-DC استفاده شده است.

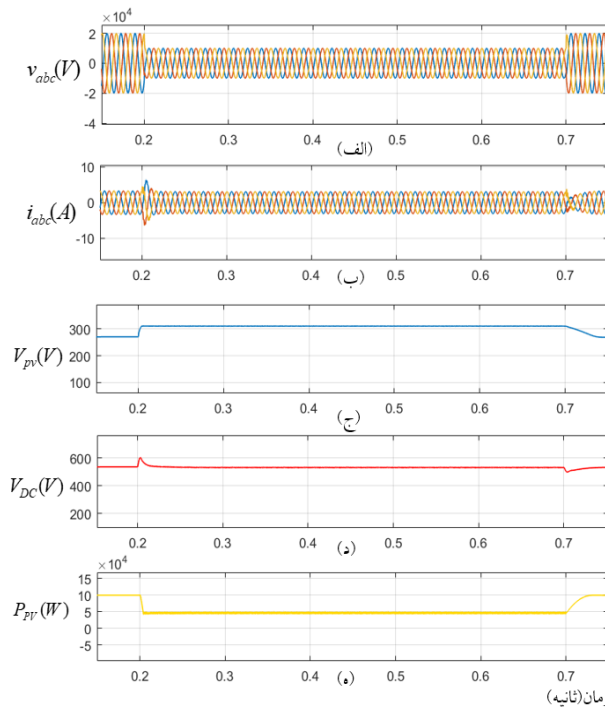
۵. نتیجه گیری

در این مقاله، یک تکنیک کنترلی برای کاهش توان دریافتی از آرایه‌های فتوولتائیک در زمان وقوع خطای افت ولتاژ توضیح داده شده است. مزیت تکنیک پیشنهادی نسبت به سایر تکنیک‌ها این است که، در این تکنیک کنترلی، با کنترل جریان آرایه‌های فتوولتائیک عمل جابه‌جایی نقطه کار از A به B صورت می‌گیرد که این باعث بهبود سرعت پاسخ دینامیکی سیستم می‌شود و همچنین به دلیل کاهش خطای ردیابی توان در زمان وقوع خطای افت ولتاژ، دقت سیستم افزایش پیدا می‌کند. صحت تکنیک پیشنهادی به عنوان قابلیت عبور از خطای افت ولتاژ به وسیله شبیه‌سازی‌های ارائه شده، تأیید شده است.

منابع

- [1] RENE21, "Renewables 2013: Global Status Report (GSR)," [Online] Available: <http://www.ren21.net/>, Jnu 2017.
- [2] Y. Yang, F. Blaabjerg, and H. Wang, "Low-voltage ride-through of single-phase transformerless photovoltaic inverters," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 3, pp. 1942-1952, May 2014.
- [3] Y. Yong, H. Wang and F. Blaabjerg, "Reactive Power Injection Strategies for Single-Phase Photovoltaic Systems Considering Grid Requirements," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 6, pp. 4065-4076, Nov-Dec 2014.
- [4] Y. Yang, F. Blaabjerg, and Z. Zou, "Benchmarking of grid fault modes in single-phase grid-connected photovoltaic systems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 5, p. 2167-2176, Sept-Oct 2013.
- [5] E. Afshari, G.R. Moradi, R. Rahimi, B. Farhangi, Y. Yang, F. Blaabjerg and S. Farhangi, "Control Strategy for Three-Phase Grid Connected PV Inverters Enabling Current Limitation under Unbalanced Faults," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 11, pp. 8908 - 8918, Nov 2017.
- [6] C. Y. Tang, Y. T. Chen and Y. M. Chen, "PV Power System With Multi-Mode Operation and Low-Voltage Ride-Through Capability," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 12, pp. 7524-7533, Dec 2015.
- [7] Y. Yang, A. Sangwongwanich, H. Liu and F. Blaabjerg, "Low voltage ride-through of two-stage grid-connected photovoltaic systems through the inherent linear power-voltage characteristic," *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, pp. 2470-6647, 26-30 March 2017.
- [8] G. Ding et al., "Adaptive DC-Link Voltage Control of Two-Stage Photovoltaic Inverter During Low Voltage Ride-Through Operation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 31, no. 6, pp. 4182-4194, June 2016.
- [9] Y. Yang, P. Enjeti, F. Blaabjerg, and H. Wang, "Wide-scale adoption of photovoltaic energy: Grid code modifications are explored in the distribution grid," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 21, no. 5, pp. 21-31, Sept 2015.
- [10] M.M. Shabestary and Y. Mohamed, "Advanced Voltage Support and Active Power Flow Control in Grid-Connected Converters Under Unbalanced Conditions," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 2, pp. 1855 - 1864, Feb 2018.
- [11] Y. Shen, D.P. Ke, W. Qiao, Y.Z. Sun, D.S. Kirschen and C. Wei, "Transient Reconfiguration and Coordinated Control for Power Converters to Enhance the LVRT of a DFIG Wind Turbine With an Energy Storage Device," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 30, no. 4, pp. 1679 - 1690, Dec 2015.

(۲) برای مراجع توان کوچکتر، انتقال نقطه کار به نقطه C، باعث می‌شود که ولتاژ آرایه فتوولتائیک به ولتاژ اتصال کوتاه نزدیک شود که در این حالت، کنترل کردن مبدل DC-DC مشکلتر خواهد شد و نوسانات زیادی ممکن است که در ولتاژهای ورودی و خروجی ظاهر شوند. نتایج شبیه‌سازی تکنیک پیشنهادی فوق تحت یک سیستم فتوولتائیک سه فاز ۱۰۰ کیلووات در «شکل ۱۱» نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در این شبیه‌سازی، افت ولتاژ شبکه در بازه زمانی «۰،۷-۰،۲» ثانیه به ۵۰ درصد ولتاژ نامی رسیده است.



شکل ۱۱: نتایج شبیه‌سازی تکنیک پیشنهادی: (الف) ولتاژهای شبکه، (ب)

جریان‌های شبکه، (ج) ولتاژ خروجی آرایه‌های فتوولتائیک، (د) ولتاژ لینک DC، (ه) توان آرایه‌های فتوولتائیک.

همانطور که در «شکل ۱۱» مشاهده می‌شود، در این تکنیک پیشنهادی مانند تکنیک‌های ارائه شده در [۱۲-۱۳]، نقطه کار آرایه فتوولتائیک به طرف راست نقطه توان بیشینه در منحنی ولتاژ-توان انتقال می‌یابد. مزیت تکنیک پیشنهادی نسبت به تکنیک‌های دیگر این است که در این تکنیک کنترلی، با کنترل جریان آرایه‌های فتوولتائیک عمل جابه‌جایی نقطه کار صورت می‌گیرد که این باعث بهبود پاسخ دینامیکی سیستم می‌شود و همچنین با توجه به «شکل ۱۱-ه» به دلیل کاهش خطای ردیابی توان در زمان وقوع خطای افت ولتاژ، تکنیک پیشنهادی از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد.

- [12] M.Mirhosseini, J.Pou and V.G.Agelidis, "Single- and two-stage inverter-based grid-connected photovoltaic power plants with ride-through capability under grid faults," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 6, no. 3, p. 1150–1159, July 2015.
- [13] H. D.Tafti, A.I.Maswood, G.Konstantinou, J.Pou, K.Kandasamy, Z.Lim and G.H.P.Ooi, "Low-voltage ride-through capability of photovoltaic gridconnected neutral-point-clamped inverters with active/reactive power injection," *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 8, pp. 1182 - 1190, 2017.
- [14] A.Anurag, Y.Yang and F.Blaabjerg, "Thermal Performance and Reliability Analysis of Single-Phase PV Inverters With Reactive Power Injection Outside Feed-In Operating Hours," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 4, pp. 870 - 880, Dec 2015.
- [15] Y. Yang, H. Wang, and F. Blaabjerg, "Reduced junction temperature control during low-voltage ride through for single-phase photovoltaic inverters," *IET Power Electron*, vol. 7, no. 8, p. 2050–2059, Aug 2014.