

روشی جدید در تحلیل عملکرد حفاظت‌های ضدجزیره‌ای فرکانسی در حالت جزیره‌ای چند اینورتری

محسن حمزه^۱ شاهرخ فرهنگی^۲ مجید صنایع پسند^۳

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تهران - تهران - ایران

m.hamzeh@ece.ut.ac.ir

۲- استاد - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تهران - تهران - ایران

farhangi@ut.ac.ir

۳- استاد - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تهران - تهران - ایران

msanaye@ut.ac.ir

چکیده: با روند افزایش استفاده از منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع، تحلیل عملکرد حفاظت‌های ضدجزیره‌ای در حالت جزیره‌ای چند اینورتری از اهمیت بسزایی برخوردار می‌باشد. در این مقاله روش جدیدی در تحلیل عملکرد حفاظت‌های ضدجزیره‌ای منابع تولید پراکنده که اساس روش آنها انحراف فرکانس می‌باشد، در حالت چند اینورتری ارائه می‌شود. این روش فراگیر بوده و می‌تواند عملکرد انواع روش‌های حفاظت جزیره‌ای فرکانسی فعال و غیرفعال را در حالت چند اینورتری مورد تحلیل قرار دهد. ناحیه غیر قابل تشخیص در حالت چند اینورتری در صفحه‌ای متشکل از پارامترهای بار جزیره تعیین می‌شود. با توجه به روش تحلیلی ارائه شده عملکرد روش‌های مختلف حفاظت ضدجزیره‌ای بر مبنای انحراف فرکانس در حالت چند اینورتری با یکدیگر مقایسه می‌شوند. شبیه‌سازی‌هایی در نرم افزار PSCAD انجام می‌شود و صحت روش پیشنهادی اثبات می‌گردد.

کلمات کلیدی: حفاظت ضدجزیره‌ای، انحراف فرکانس، ناحیه غیرقابل تشخیص، جزیره چند اینورتری، فیدبک مثبت، ضریب برش.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۸۷/۶/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۸/۱۵

نام نویسنده‌ی مسئول: محسن حمزه

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران، تهران، خیابان آزادی، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده‌ی برق

۱- مقدمه

معرفی روش‌های حفاظت ضدجزیره‌ای مبتنی بر انحراف فرکانس در بخش دوم انجام می‌شود. با دسته بندی این روش‌ها تحلیل عملکرد آنها در حالت چند اینورتری ساده‌تر خواهد شد. در بخش سوم این مقاله روش پیشنهادی در تحلیل عملکرد حفاظت‌های ضدجزیره‌ای در حالت چند اینورتری بیان می‌شود. در انتها روش معرفی شده با انجام شبیه‌سازی در حالت جزیره‌ای دو اینورتری مورد بررسی قرار می‌گیرد و نتایج حاصل از این مقاله بیان می‌گردد.

۲- روش‌های حفاظت ضدجزیره‌ای فرکانسی

روش‌های حفاظت ضدجزیره‌ای فرکانسی، از فرکانس جریان خروجی منبع تولید پراکنده جهت تشخیص حالت جزیره‌ای استفاده می‌کنند. پس از وقوع حالت جزیره‌ای بسته به اختلاف توان راکتیو تولیدی منبع و مصرفی بار، فرکانس به نقطه‌ای منحرف می‌شود. اگر این نقطه خارج از محدوده مجاز فرکانس باشد، حفاظت فرکانسی منبع فعال شده و آن را از شبکه جدا می‌سازد و در غیر این صورت منبع بدون اینکه حالت جزیره‌ای را تشخیص دهد به کار خود ادامه می‌دهد.

در روش‌های غیرفعال فرکانسی، انحراف فرکانس بر اساس تفاوت توان راکتیو مصرفی و تولیدی انجام می‌شود و فرکانس به فرکانس تشدید بار نزدیک می‌شود چون اینورتر سعی می‌کند با ضریب توان واحد کار کند. در شرایطی که مصرف یا تولید توان راکتیو بارهای جزیره کم باشد انحراف فرکانس ناچیز بوده و عملکرد جزیره‌ای قابل تشخیص نخواهد بود [6]. در روش‌های حفاظت ضدجزیره‌ای فعال فرکانسی، سیستم همزمان ساز اینورتر حتی در شرایط انطباق توان بین بار و منبع، پس از وقوع حالت جزیره‌ای فرکانس را به نقطه‌ای خارج از محدوده مجاز سوق می‌دهد تا ناحیه غیر قابل تشخیص به حداقل برسد. در این روش‌ها با ایجاد شرط فاز و همچنین فیدبک مثبت فرکانس منحرف شده حالت جزیره‌ای تشخیص داده می‌شود. بدین منظور همواره اختلالاتی در جریان خروجی اینورتر ایجاد می‌شود. این اختلالات در شرایط اتصال به شبکه تأثیری روی فرکانس ندارد، اما پس از وقوع حالت جزیره‌ای فرکانس را به نقطه‌ای خارج از محدوده مجاز منحرف می‌کند [7].

برای تحلیل عملکرد اینورترها در حالت جزیره‌ای چند اینورتری ابتدا لازم است اصول هر یک از حفاظت‌های ضدجزیره‌ای فرکانسی مشخص شود به همین دلیل ابتدا به طور مختصر این روش‌ها توضیح داده می‌شود.

۲-۱- روش انحراف فرکانس فعال^۲

در این روش با دستکاری فرکانس جریان خروجی اینورتر اندکی انحراف فرکانس در جهت افزایشی یا کاهششی، اعمال می‌شود. چنانچه اینورتر از شبکه جدا شود، فرکانس از محدوده مجاز خارج شده و با فعال شدن حفاظت فرکانسی اینورتر بصورت خودکار فعالیت خود را

هنگام قطع شبکه توزیع، اگر پردازشگر توان متصل به شبکه به تغذیه بارهای موجود در شبکه ادامه دهد، پردازشگر به صورت جزیره‌ای عمل خواهد کرد [۱]. کارکرد جزیره‌ای امری نامطلوب است و پردازشگرهای توان متصل به شبکه مجاز به عملکرد جزیره‌ای نیستند. پردازشگر توان متصل به شبکه، مولد توان کوچکی است که امکان حفظ ولتاژ و فرکانس نامی شبکه را ندارد. بنابراین امکان آسیب رسیدن به بارهای موجود شبکه و پردازشگر توان در عملکرد جزیره‌ای وجود دارد. بعلاوه ممکن است شبکه به منظور رسیدگی و تعمیرات مورد نیاز قطع گردد. در این حالت چنانچه پردازشگر توان به کار خود ادامه دهد، برای کارگرانی که انتظار قطع کامل شبکه را دارند ایجاد خطر می‌کند [۲]. البته در ریزشبکه‌ها^۱ با حفظ شرایط خاص، منابع می‌توانند به صورت جزیره‌ای کار کنند. تشخیص حالت جزیره‌ای به منظور تداوم عملکرد منابع ریزشبکه ضروری می‌باشد. بنابراین تشخیص حالت جزیره‌ای در شبکه‌های معمولی و ریزشبکه‌ها از مهمترین شاخصه‌های منابع تولید پراکنده است.

امروزه با افزایش استفاده از منابع تولید پراکنده در سطح شبکه‌های توزیع، احتمال اینکه پس از وقوع حالت جزیره‌ای چند منبع در یک جزیره قرار داشته باشند قابل توجه است. به همین دلیل تحلیل عملکرد همزمان حفاظت‌های ضدجزیره‌ای منابع کانونتری پس از تشکیل جزیره اهمیت بسزایی دارد. آزمایش‌های معرفی شده در استانداردها برای تشخیص حالت جزیره‌ای همگی به صورت تک-اینورتری می‌باشند و آزمایشی جهت تشخیص حالت جزیره‌ای چند اینورتری ارائه نشده است. امروزه اکثر منابع کانونتری متصل به شبکه از روش‌های فعال جهت تشخیص حالت جزیره‌ای استفاده می‌کنند و در حالت چند اینورتری امکان تداخل اختلالات مربوط به آنها و ایجاد اشتباه در عملکرد حفاظت ضدجزیره‌ای وجود دارد [3]. با توجه به این مسائل لزوم تدوین استاندارد برای تشخیص عملکرد جزیره‌ای در حالت چند اینورتری در آینده‌ای نزدیک احساس می‌شود. به این ترتیب یکی از فاکتورهای مهم حفاظت ضدجزیره‌ای عملکرد مناسب آنها در حالت چند اینورتری خواهد بود.

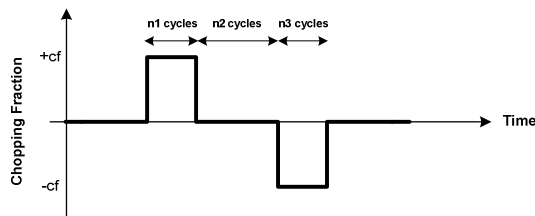
مقالات معدودی در زمینه تحلیل عملکرد همزمان چند اینورتر در یک جزیره وجود دارد. در [4] راه حلی جهت رفع مشکل روش اندازه‌گیری امپدانس در حالت جزیره‌ای چند اینورتری بیان شده است. همچنین مرجع [5] به بررسی تداخل حفاظت‌های مبتنی بر انحراف فرکانس در عملکرد جزیره‌ای چند اینورتری پرداخته است.

در این مقاله روش جدیدی جهت تعیین ناحیه غیرقابل تشخیص پس از وقوع حالت جزیره‌ای چند اینورتری ارائه می‌شود همچنین عملکرد همزمان حفاظت‌های ضدجزیره‌ای فرکانسی در حالت چند اینورتری به صورت جامع مورد تحلیل قرار خواهد گرفت.

محدوده مجاز می‌شود. اما چنانچه اینورتر از شبکه جدا شده باشد، با طی فرآیندی مشابه آنچه در توضیح روش انحراف فرکانس فعال ذکر شد، اینورتر از محدوده فرکانسی مجاز خارج می‌شود. ناحیه غیرقابل تشخیص در این روش همانگونه که در قسمت بعد نشان داده خواهد شد به مراتب کوچکتر از ناحیه غیرقابل تشخیص روش انحراف فرکانس فعال معمولی می‌باشد.

۲-۳- روش انحراف فرکانس فعال پالسی^۴

برای کاهش THD جریان خروجی اینورتر می‌توان مقدار ضریب برش را به صورت متناوب در بعضی سیکل‌ها صفر قرار داد. این کار اگرچه سرعت تشخیص حالت جزیره‌ای را کاهش می‌دهد اما کیفیت توان خروجی اینورتر را به صورت قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌بخشد [9]. برای اینکه ناحیه غیرقابل تشخیص به حد قابل قبولی برسد در بعضی سیکل‌ها ضریب برش مثبت و در بعضی سیکل‌ها ضریب برش منفی است. شکل (۲) تغییرات ضریب برش در این روش را نشان می‌دهد.



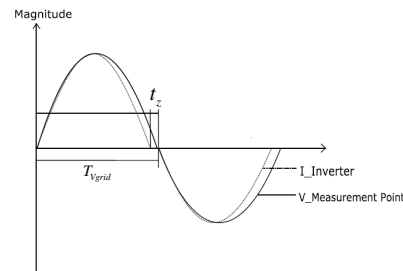
شکل (۲): تغییرات ضریب برش در طول زمان در روش انحراف فرکانس فعال پالسی

۳- روش ارائه شده در تعیین ناحیه غیر قابل تشخیص در حالت چند اینورتری

در [7] روشی جهت تعیین ناحیه غیر قابل تشخیص در صفحه بار بر حسب C_{nom} و L در حالت تک اینورتری ارائه شده است. این روش در ترسیم ناحیه غیرقابل تشخیص دارای محدودیت‌هایی می‌باشد. از جمله اینکه ناحیه غیرقابل تشخیص نمایش داده شده در این روش برای یک مقاومت خاص بار می‌باشد و با تغییر مقاومت بار ناحیه غیرقابل تشخیص باید مجدداً ترسیم شود. علاوه بر آن تاثیر ضریب کیفیت بار بر روی ناحیه غیرقابل تشخیص، معلوم نیست. با نمایش ناحیه غیرقابل تشخیص در صفحه $Q_f - f_{res}$ ، که در آن Q_f ضریب کیفیت بار و f_{res} فرکانس تشدید بار می‌باشد مشکلات مذکور حل خواهد شد. در صفحه $Q_f - f_{res}$ ، Q_f وضعیت مقاومت بار را نیز منعکس می‌کند و لزومی به تحلیل حالت‌های مختلف مقاومت بار نیست. ناحیه غیر قابل تشخیص در این صفحه با توجه به زاویه بار و زاویه قدرت اینورتر تعیین می‌شود. زاویه بار جزیره بر حسب ضریب کیفیت بار، فرکانس تشدید بار و فرکانس شبکه مطابق رابطه (۳) بدست می‌آید.

$$\phi_{load} = \tan^{-1} \left[Q_f \left(\frac{f_{res}}{f} - \frac{f}{f_{res}} \right) \right] \quad (3)$$

متوقف می‌کند. شکل (۱) نحوه تغییر اعمال شده در جریان خروجی در جهت افزایشی را نشان می‌دهد.



شکل (۱): شکل موج ولتاژ شبکه و جریان خروجی پردازشگر توان جریان اینورتر به نحوی کنترل می‌شود که در فاصله t_z از پایان نیم سیکل مثبت صفر شود. t_z می‌تواند مثبت یا منفی باشد و بر حسب علامت آن تغییر اعمالی در فرکانس نیز، به ترتیب، افزایشی یا کاهش می‌باشد. نیم‌سیکل منفی قرینه نیم‌سیکل مثبت است اما صفر شدن جریان در انتهای سیکل تابعی از رفتار بار بوده و جریان لزوماً در فاصله زمانی t_z از انتهای پریود صفر نخواهد شد. با آغاز نیم‌سیکل مثبت ولتاژ این چرخه تکرار می‌شود. در این صورت مقدار ضریب برش به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود [8]:

$$C_f = \frac{\omega t_z}{\pi} \quad (1)$$

که در آن ω فرکانس زاویه‌ای اینورتر است. نتیجه این تغییرات ایجاد اختلاف فاز $\omega t_z / 2$ بین ولتاژ شبکه و هارمونیک اول جریان است. از آنجا که زاویه فاز برابر اختلاف فاز $\omega t_z / 2$ نیست، الگوریتم فرکانس را افزایش یا کاهش داده تا اختلاف فاز جریان و ولتاژ برابر فاز بار شده و اینورتر به نقطه کار پایدار برسد. حاصل این پدیده انحراف بیشتر فرکانس است و فرآیند تا جایی ادامه می‌یابد که فرکانس کار اینورتر از محدوده مجاز خارج شود. البته موفقیت روش مشروط بر آنست که نقطه کار جدید خارج محدوده مجاز فرکانس واقع شود.

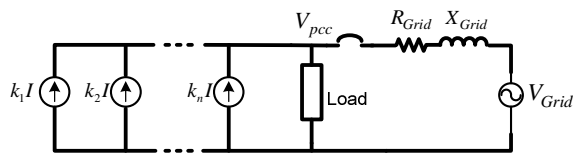
۲-۲- روش انحراف فرکانس فعال با فیدبک مثبت^۳

این روش در واقع بهبود یافته روش انحراف فرکانس فعال محسوب شده و به همین دلیل گاهی انحراف فرکانس فعال شتاب داده شده خوانده می‌شود. اصول عملکرد آن همانند روش انحراف فرکانس فعال بوده با این تفاوت که مقدار ضریب برش در فرکانس f از رابطه (۲) محاسبه می‌شود [8]:

$$C_f = C_{f0} + K_{drift} (f_k - f_0) \quad (2)$$

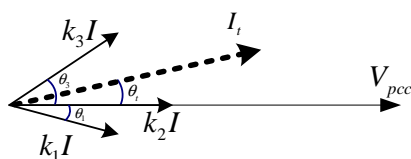
در این رابطه، K_{drift} ضریب شتاب‌دهنده، f_0 فرکانس نامی شبکه و C_{f0} مقدار ضریب برش در مواقعی است که خطای فرکانس وجود ندارد. f_k نیز فرکانس اندازه‌گیری شده در سیکل جاری می‌باشد. با تغییر فرکانس، ضریب برش نیز هم‌جهت با آن تغییر می‌کند. چنانچه اینورتر به شبکه متصل باشد، تغییرات ضریب برش ناشی از تغییرات فرکانس شبکه بوسیله شبکه پایدار شده و باعث حفظ نقطه کار اینورتر در

به صورت یک جا در نظر گرفته شوند. منابع نیز به صورت منابع جریان موازی با یکدیگر در نظر گرفته می‌شوند.



شکل (۴): مدل اینورترهای موجود در جزیره به همراه شبکه اصلی

ولتاژ این منابع یکسان و مساوی ولتاژ شبکه می‌باشند اما جریان آنها با اندازه و فازهای مختلفی می‌باشد. کلیه منابع را نیز می‌توان یک جا به صورت یک منبع جریان نشان داد که جریان آن جمع برداری منابع جریان می‌باشد. اندازه هر یک از منابع جریان در شکل (۴) به صورت $k_i I$ نشان داده شده است و زاویه هر یک نسبت به V_{pcc} می‌باشد. در این شکل I اندازه مجموع دامنه‌های جریان کلیه منابع و k_i عددی بین صفر و یک است. جمع برداری جریان منابع را با I_t و زاویه آن نسبت به ولتاژ با θ_t نمایش می‌دهیم. شکل (۵) نمایش فازوری جریان‌ها را برای حالت $n=3$ نشان می‌دهد. منبع ۱ با اختلاف فاز منفی نسبت به ولتاژ جریان تزریق می‌کند. منبع ۲ همفاز با ولتاژ و منبع ۳ با اختلاف فاز مثبت جریان به شبکه تزریق می‌کند.



شکل (۵): نمایش فازوری ولتاژ شبکه و جریان اینورترها

θ_t جریان معادل از رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$\theta_t = \tan^{-1} \left[\frac{k_1 \sin(\theta_1) + k_2 \sin(\theta_2) + \dots + k_n \sin(\theta_n)}{k_1 \cos(\theta_1) + k_2 \cos(\theta_2) + \dots + k_n \cos(\theta_n)} \right] \quad (5)$$

حال با مشخص شدن θ_t می‌توان ناحیه غیرقابل تشخیص را با توجه به رابطه (۴) در صفحه $Q_f - f_{res}$ برای حالت جزیره‌ای چند اینورتری رسم کرد. در روش حفاظت ضد جزیره‌ای غیرفعال فرکانسی مقدار θ_i صفر می‌باشد. در روش‌های انحراف فرکانس فعال با ضریب برش مثبت مقدار θ_i منفی و در روش‌های انحراف فرکانس فعال با ضریب برش منفی مقدار θ_i مثبت می‌باشد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

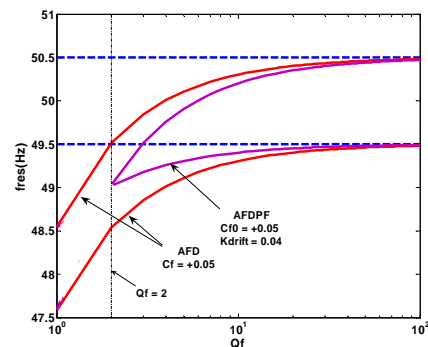
برای شبیه‌سازی حالت جزیره‌ای چند اینورتری، دو پردازشگر توان فتولتاییک در یک جزیره در نظر گرفته می‌شوند. شبیه‌سازی در نرم-افزار PSCAD انجام می‌شود. کنترل‌کننده استفاده شده برای اینورترها اگرچه روی پاسخ گذرای آنها پس از وقوع حالت جزیره‌ای مؤثر است اما پاسخ حالت دائمی اینورتر ربطی به نوع کنترل‌کننده ندارد. اینورتر ۱ از کنترل‌کننده تناسبی - تشدید و اینورتر ۲ از کنترل‌کننده پیش‌بین برای تزریق جریان استفاده می‌کند. می‌توان نتایج حاصل از

پس از وقوع حالت جزیره‌ای با مساوی قرار دادن زاویه بار و زاویه قدرت اینورتر در رابطه (۳) معادله درجه ۲ رابطه (۴) بدست می‌آید. با حل این معادله رابطه بین f_{res} و Q_f مشخص شده و می‌توان با ازای f_{min} (حداکثر فرکانس مجاز شبکه) و f_{max} (حداقل فرکانس مجاز شبکه) ناحیه غیر قابل تشخیص را ترسیم کرد.

$$f_{res}^2 - \frac{f_{is} \tan(\theta)}{Q_f} f_{res} - f_{is}^2 = 0 \quad (4)$$

در این رابطه f_{is} فرکانس جزیره و θ زاویه قدرت اینورتر می‌باشد. در روش حفاظت غیرفعال اضافه - زیر فرکانس مقدار θ صفر می‌باشد و در روش انحراف فرکانس فعال مقدار آن $-\frac{\pi C_f}{2}$ و در روش انحراف فرکانس فعال با فیدبک مثبت این زاویه $-\frac{\pi(C_{f0} + K_{drift} \Delta f)}{2}$ می‌باشد.

ناحیه غیرقابل تشخیص روش انحراف فرکانس فعال معمولی با $C_f = +0.05$ و روش انحراف فرکانس فعال با فیدبک مثبت برای $C_{f0} = +0.05$ و $K_{drift} = +0.04$ در حالت تک اینورتری در شکل (۳) رسم شده است (این شکل برای حالتی رسم شده که حداکثر فرکانس مجاز شبکه ۵۰/۵ هرتز و حداقل فرکانس مجاز شبکه ۴۹/۵ هرتز باشد).

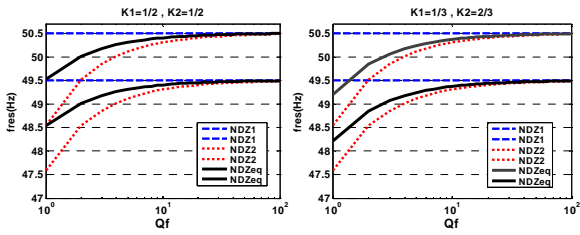


شکل (۳): ناحیه غیرقابل تشخیص روش انحراف فرکانس فعال با فیدبک مثبت

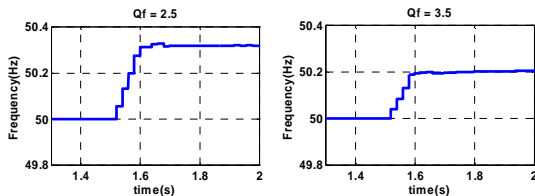
همانطور که مشاهده می‌شود ناحیه غیرقابل تشخیص در روش انحراف فرکانس فعال با فیدبک مثبت به مراتب کوچکتر از روش انحراف فرکانس معمولی می‌باشد.

در حالت چند اینورتری شرط فاز ولتاژ و جریان برای اینورترهای متعددی در جزیره باید برقرار شود. در صورتیکه فرکانس جزیره شامل اینورترها، از حدود مجاز خود خارج شود آن جزیره برای کلیه منابع داخل آن قابل تشخیص است و در صورتیکه خارج نشود برای کلیه منابع داخل آن قابل تشخیص نیست. منابع کانونتری به صورت کنترل توان ثابت یا جریان ثابت می‌باشند که هر دو حالت نهایتاً تأثیری روی زاویه بار و زاویه قدرت اینورتر نخواهد داشت و پس از وقوع حالت جزیره‌ای فرکانس به سمتی منحرف می‌شود.

در شکل (۴) جزیره‌ای با تعداد n اینورتر متصل به شبکه در نظر گرفته شده است که جریان خروجی آنها از I_1 تا I_n می‌باشد. بار حقیقی کل جزیره P_{load} و بار راکتیو کل جزیره Q_{load} می‌باشد. کل بارها می‌توانند

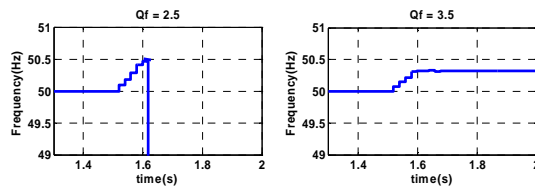


شکل (۷): ناحیه غیرقابل تشخیص برای حالات مختلف ارسال توان همان گونه که ملاحظه می شود بسته به مقدار k_1 و k_2 ناحیه غیرقابل تشخیص جدیدی برای کل جزیره تعیین خواهد شد. یعنی در حالت چنداینورتی ناحیه غیرقابل تشخیص برای هر دو منبع یکسان خواهد بود. برای منبع ۱ ناحیه غیرقابل تشخیص تا حدودی بهبود می یابد اما برای منبع شماره ۲ ناحیه غیرقابل تشخیص به سمت بارهای سلفی متمایل شده و این مطلوب نیست. شکل (۸) فرکانس جزیره پس از وقوع حالت جزیره ای را در حالت $k_1=0.5$ و $k_2=0.5$ برای ضریب کیفیت بار $2/5$ و $3/5$ نشان می دهد.



شکل (۸): فرکانس جزیره پس از وقوع حالت جزیره ای

در هر دو حالت عملکرد جزیره ای قابل تشخیص نبوده است چون فرکانس در ناحیه مجاز خود ($50/5 \text{ Hz} < f < 49/5 \text{ Hz}$) باقی مانده است. همان گونه که از شکل (۷) ملاحظه می شود $Q_f=3/5$ و $Q_f=2/5$ هر دو در ناحیه غیرقابل تشخیص قرار دارند که نشان دهنده صحت روش پیشنهادی برای تحلیل ناحیه غیرقابل تشخیص می باشد. شکل (۹) فرکانس اینورتر را در حالت $k_1=0.33$ و $k_2=0.67$ نشان می دهد. در این حالت سهم منبع ۲ در تعیین ناحیه غیرقابل تشخیص معادل، بیشتر می باشد. در این حالت عملکرد جزیره ای با بار $Q_f=2/5$ تشخیص داده شده است اما عملکرد جزیره ای با بار $Q_f=3/5$ تشخیص داده نشده است. در حالت تک اینورتری که از روش انحراف فرکانس فعال با $C_f=+0.05$ استفاده می کند هر دو حالت $Q_f=3/5$ و $Q_f=2/5$ قابل تشخیص می باشد.



شکل (۹): فرکانس جزیره پس از وقوع حالت جزیره ای

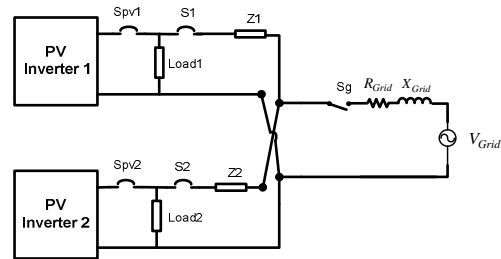
حالت دوم: هر دو اینورتر دارای حفاظت انحراف فرکانس فعال معمولی می باشند. دو حالت می تواند وجود داشته باشد: ۱ - ضریب برش آنها هم علامت باشد. ۲ - ضریب برش آنها هم علامت نباشد.

شبه سازی را برای حالت سه اینورتری و بیشتر از آن نیز تعمیم داد. جدول (۱) مقادیر پارامترهای سیستم مورد مطالعه را نشان می دهد.

جدول (۱): مقادیر پارامترهای سیستم مورد مطالعه

P_{pv1}, P_{pv2}	1.5 kW
V_{dc}	450 V
$f_{switching}$	10 kHz
L_{ac}	7.2 mH
V_{grid}	220 Vrms
f_{grid}	50 Hz
R_{grid}	0.2 Ω
X_{grid}	0.2 Ω

در این شبه سازی مجموع بار جزیره ۳kW، توان راکتیو مصرفی صفر و ضریب کیفیت بار $2/5$ می باشد (شکل (۶)). مجموع توان دو اینورتر ۳kW است (سخت ترین شرایط برای تشخیص حالت جزیره ای می باشد) و سهم توان هر کدام از آنها با ضرایب k_1 و k_2 مشخص می شود.



شکل (۶): عملکرد همزمان دو منبع فتوولتاییک متصل به شبکه در

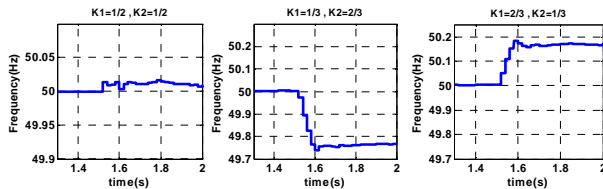
حالت جزیره ای چند اینورتری

در لحظه $t=1/5s$ کلید S_g باز می شود و حالت جزیره ای دو اینورتری اتفاق می افتد. حفاظت ضد جزیره ای هر یک از اینورترها می تواند یکی از انواع حفاظت های ضد جزیره ای باشد. اگر این حفاظت ها به چهار دسته: ۱- حفاظت فرکانسی غیرفعال ۲- حفاظت انحراف فرکانس فعال ۳- حفاظت انحراف فرکانس فعال با فیدبک مثبت ۴- حفاظت انحراف فرکانس فعال پالسی، تقسیم شوند برای حالت دو اینورتری ۱۶ حالت مختلف می تواند در نظر گرفته شود. در این مقاله ۵ حالت برجسته از بین حالات انتخاب می شود. برای سایر حالات می توان مشابه این حالت ها ناحیه غیر قابل تشخیص را تعیین کرد.

حالت اول: اینورتر ۱ حفاظت غیرفعال فرکانسی و اینورتر ۲ دارای

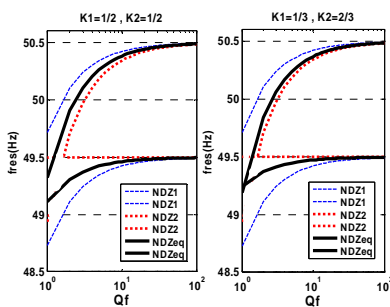
حفاظت انحراف فرکانس فعال معمولی با $C_f=+0.05$ می باشد. ناحیه غیرقابل تشخیص با توجه به روش گفته شده برای حالت $k_1=0.33$ و $k_2=0.67$ در شکل (۷) رسم شده است (k_1 سهم اینورتر ۱ و k_2 سهم اینورتر ۲ از کل توان می باشد). ناحیه غیرقابل تشخیص برای هر کدام از اینورترها به تنهایی و همچنین حالت دو اینورتری در یک صفحه رسم شده تا بتوان تاثیر متقابل اینورترها را در حالت عملکرد جزیره ای چند اینورتری نسبت به حالت تک اینورتری مورد بررسی قرار داد. در این شکل $f_{min}=49/5 \text{ Hz}$ و $f_{max}=50/5 \text{ Hz}$ می باشد.

حالت جزیره‌ای برای هر دو اینورتر قابل تشخیص بود. در این شکل در حالت $k_1=0/5$ و $k_2=0/5$ فرکانس در مقدار 50 Hz باقی مانده، در حالت $k_1=0/33$ و $k_2=0/67$ فرکانس به پایین منحرف شده چون تاثیر منبع ۲ با ضریب برش منفی در تعیین فرکانس جزیره بیشتر بوده و در حالت $k_1=0/67$ و $k_2=0/33$ فرکانس به بالا منحرف شده چون تاثیر منبع ۱ با ضریب برش مثبت در تعیین فرکانس جزیره بیشتر می‌باشد.

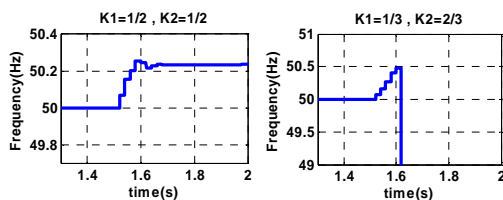


شکل (۱۳): فرکانس جزیره پس از وقوع حالت جزیره‌ای

حالت سوم: اینورتر ۱ دارای حفاظت انحراف فرکانس فعال معمولی با $C_f=+0/02$ ، و اینورتر ۲ انحراف فرکانس فعال با فیدبک مثبت $(C_{f0}=+0/02$ و $K_{drift}=0/04$) می‌باشد. ناحیه غیرقابل تشخیص در این حالت مختلف ارسال توان در شکل (۱۴) رسم شده است. در این حالت ناحیه غیرقابل تشخیص معادل نسبت به حالت تک‌اینورتری، برای اینورتر ۱ کاهش یافته و برای اینورتر ۲ افزایش یافته است.



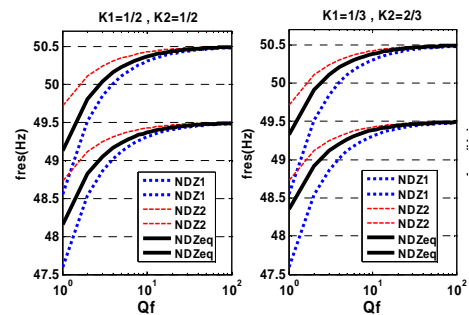
شکل (۱۴): ناحیه غیرقابل تشخیص برای حالات مختلف ارسال توان شکل (۱۵) فرکانس جزیره را برای حالت‌های مختلف ارسال توان پس از وقوع حالت جزیره‌ای در $t=1/5\text{ s}$ در حالیکه ضریب کیفیت بار $2/5$ است، نشان می‌دهد. در حالت $k_1=0/33$ و $k_2=0/67$ عملکرد جزیره‌ای تشخیص داده شده است چون در این حالت سهم اینورتر ۲ در تعیین ناحیه غیرقابل تشخیص معادل بیشتر بوده است.



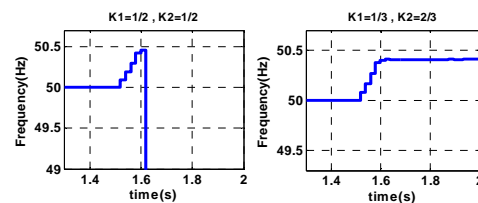
شکل (۱۵): فرکانس جزیره پس از وقوع حالت جزیره‌ای

حالت چهارم: اینورتر ۱ دارای حفاظت انحراف فرکانس فعال با فیدبک مثبت با پارامترهای $C_{f0}=+0/02$ و $K_{drift}=0/04$ و اینورتر ۲ هم دارای همین حفاظت با پارامترهای $C_{f0}=-0/02$ و $K_{drift}=0/08$

ضریب برش‌ها هم‌علامت: اینورتر ۱ با $C_f=+0/05$ و اینورتر ۲ با $C_f=+0/02$ در نظر گرفته می‌شود. شکل (۱۰) ناحیه قابل تشخیص را در دو حالت مختلف ارسال توان توسط منابع نشان می‌دهد.

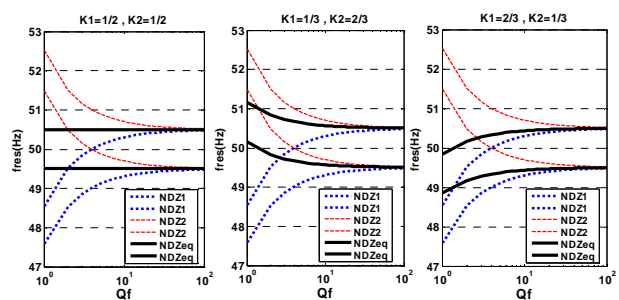


شکل (۱۰): ناحیه غیرقابل تشخیص برای حالات مختلف ارسال توان همانند حالت قبلی، ناحیه غیرقابل تشخیص برای یکی از اینورترها بهبود می‌یابد و برای دیگری بدتر می‌شود. شکل (۱۱) فرکانس جزیره را برای حالت‌های مختلف ارسال توان پس از وقوع حالت جزیره‌ای در $t=1/5\text{ s}$ نشان می‌دهد. در حالیکه $k_1=0/33$ و $k_2=0/67$ می‌باشد حالت جزیره‌ای با بار $Q_f=2/5$ تشخیص داده نشده است و در حالت دیگر، عملکرد جزیره‌ای تشخیص داده شده است.



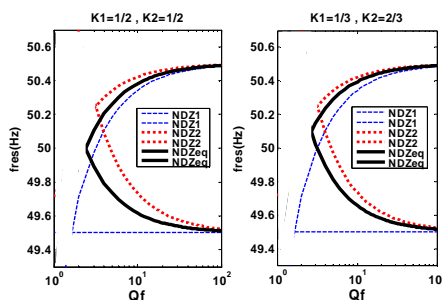
شکل (۱۱): فرکانس جزیره پس از وقوع حالت جزیره‌ای

ضریب برش‌ها غیرهم‌علامت: اینورتر ۱ با $C_f=+0/05$ و اینورتر ۲ با $C_f=-0/05$ در نظر گرفته می‌شود. شکل (۱۲) ناحیه غیرقابل تشخیص را در سه حالت مختلف ارسال توان نشان می‌دهد.



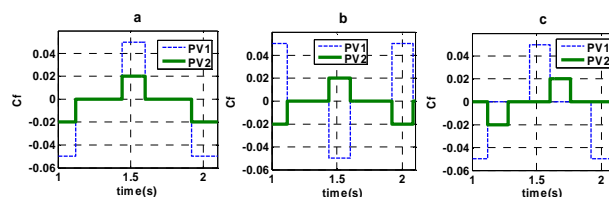
شکل (۱۲): ناحیه غیرقابل تشخیص برای حالات مختلف ارسال توان در این حالت ناحیه غیرقابل تشخیص معادل در هر صورت نسبت به حالت تک‌اینورتری برای هر دو اینورتر بدتر می‌شود. در حالت $k_2=0/5$ و $k_1=0/5$ ناحیه غیرقابل تشخیص دقیقاً شبیه ناحیه غیرقابل تشخیص روش غیرفعال خواهد شد. شکل (۱۳) فرکانس جزیره‌ای را برای حالت‌های مختلف ارسال توان پس از وقوع حالت جزیره‌ای در $t=1/5\text{ s}$ نشان می‌دهد. در هیچکدام از حالت‌ها عملکرد جزیره‌ای تشخیص داده نشده است، در حالیکه در حالت تک‌اینورتری با شرایط مشابه بار محلی

می‌باشد. ناحیه غیرقابل تشخیص معادل چند اینورتی در شکل (۱۶) نشان داده شده است.



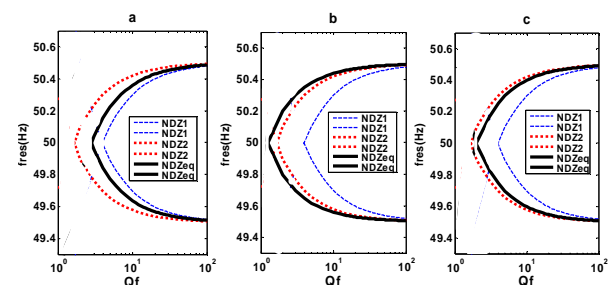
شکل (۱۶): ناحیه غیرقابل تشخیص برای حالات مختلف ارسال توان در این حالت بر خلاف حالت دوم اگر ضریب برش‌ها هم علامت نباشند، ناحیه غیرقابل تشخیص تغییر زیادی نسبت به حالت تک-اینورتی نمی‌کند. این نشان می‌دهد که استفاده از فیدبک مثبت دارای این مزیت مهم در حالت عملکرد چند اینورتی می‌باشد که در صورت هم علامت نبودن ضریب برش‌ها هم ناحیه غیرقابل تشخیص در حد مطلوب باقی می‌ماند.

حالت پنجم: حفاظت هر دو اینورتی به صورت انحراف فرکانس فعال پالسی باشد. اینورتی اول با $C_f = \pm 0.05$ و اینورتی دوم با $C_f = \pm 0.02$ می‌باشد. سه صورت مختلف از نظر تداخل حالت‌های مختلف ضریب برش می‌تواند اتفاق بیفتد که در شکل (۱۷) نشان داده شده است.



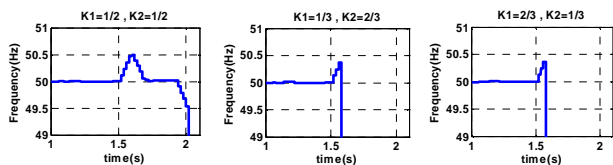
شکل (۱۷): وضعیت‌های مختلف دو اینورتی دارای حفاظت انحراف فرکانس پالسی از نظر ضریب برش

در وضعیت a ضریب برش هر دو اینورتی هم جهت با هم و در یک زمان اعمال شده است. در وضعیت b ضریب برش دو اینورتی بر خلاف جهت هم می‌باشد و در وضعیت c هنگامیکه ضریب برش یکی از اینورتی‌ها مخالف صفر است ضریب برش اینورتی دیگر صفر است. ناحیه غیرقابل تشخیص معادل برای این سه وضعیت در شکل (۱۸) نشان داده شده است.

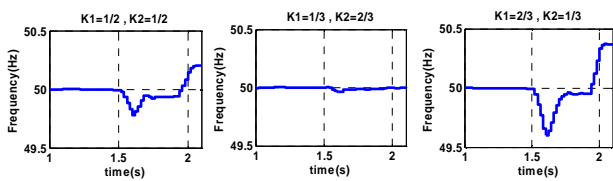


شکل (۱۸): ناحیه غیرقابل تشخیص برای حالات مختلف ارسال توان

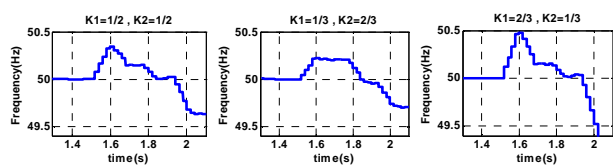
بهترین وضعیت برای تشخیص حالت جزیره‌ای وضعیت a می‌باشد که ضریب برش‌ها هم جهت و در یک زمان اعمال شده اند. در این حالت ناحیه غیرقابل تشخیص معادل نسبت به حالت تک اینورتی، اینورتی ۱ بدتر شده و نسبت به اینورتی ۲ بهتر شده است. در وضعیت b بدترین حالت می‌باشد ناحیه غیرقابل تشخیص معادل نسبت به ناحیه غیرقابل تشخیص تک اینورتی هر دو اینورتی بدتر شده است. در وضعیت c هم، ناحیه غیرقابل تشخیص معادل نسبت به ناحیه غیرقابل تشخیص تک اینورتی (اینورتی شماره ۲) بهتر شده است. شکل (۱۹) فرکانس جزیره را در وضعیت a هنگام عملکرد جزیره‌ای در $t=1/5s$ برای حالت‌های مختلف ارسال توان نشان می‌دهد. ضریب کیفیت بار $2/5$ می‌باشد. در وضعیت a در کلیه حالات ارسال توان حالت جزیره‌ای قابل تشخیص بوده است. در وضعیت b (شکل (۲۰)) در هیچکدام از حالات ارسال توان، حالت جزیره‌ای قابل تشخیص نبوده است. در وضعیت c (شکل (۲۱)) در حالت $k_1=0.67$ و $k_2=0.33$ حالت جزیره‌ای قابل تشخیص بوده است.



شکل (۱۹): فرکانس جزیره پس از وقوع حالت جزیره‌ای (وضعیت a)



شکل (۲۰): فرکانس جزیره پس از وقوع حالت جزیره‌ای (وضعیت b)



شکل (۲۱): فرکانس جزیره پس از وقوع حالت جزیره‌ای (وضعیت c)

با انجام شبیه‌سازی‌های فوق نتایج زیر حاصل می‌شود:

- استفاده از روش‌های انحراف فرکانس در تشخیص حالت جزیره‌ای چند اینورتی اگرچه در بعضی حالات باعث افزایش ناحیه غیرقابل تشخیص و یا جابه‌جایی آن می‌شود، بر خلاف روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری امپدانس از تریپ-های نابجای پردازشگر توان می‌کاهد.
- استفاده از روش‌های انحراف فرکانس فعال در تشخیص حالت جزیره‌ای چند اینورتی هنگامی حداکثر کارایی را

[۲] بابک فرهنگی، شاهرخ فرهنگی، مجید صنایع پسند، " پیشنهاد تدوین استاندارد برای سیستم های فتوولتائیک متصل به شبکه، " بیستمین کنفرانس بین المللی برق، آبان ۱۳۸۴.

- [3] M.Hamzeh, Sh.Farhangi, B.Farhangi "A New Control Method in PV Grid Connected Inverters for Anti-Islanding Protection by Impedance Monitoring" *Eleventh IEEE Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL 2008)*.
- [4] Lucian Asiminoaei, Remus Teodorescu, Frede Blaabjerg, "Online Grid Impedance Measurement Suitable for Multiple PV Inverters Running in Parallel" *IEEE Transaction on Power Delivery*, pp 907-911, 2006.
- [5] Luiz A. C. Lopes, Yongzheng Zhang "Islanding Detection Assessment of Multi-Inverter Systems With Active Frequency Drifting Methods" *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 23, No. 1 pp 507-515, January 2008
- [6] Z. Ye, A. Kowalkar, Y. Zhang, P. Du, and R.Walling, "Evaluation of anti islanding schemes based on non detection zone concept" *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 5, pp. 1171-1176, Sep. 2004.
- [7] M.Ropp, M.Begovic, A.Rohatgi, G. A. Kern, R. H. Bonn, and S. Gonzalez, "Determining the relative effectiveness of islanding detection methods using phase criteria and nondetection zones." *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 15, no. 3, pp. 290-296, Sep. 2000.
- [8] D. Bower, M. Ropp, "Evaluation of Islanding Detection Methods for Photovoltaic Utility-interactive Power Systems." Task V Report IEA-PVPS T5-09: 2002, March 2002.
- [9] V. John, Z. Ye, and A. Kolwalkar, "Investigation of anti-islanding protection of power converter based distributed generators using frequency domain analysis." *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 19, no. 5, pp. 1177-1183, Sept. 2004.
- [10] A. C. Lopes, . and Huili Sun : ' Performance Assessment of Active Frequency Drifting Islanding Detection Methods' *IEEE Transaction On Energy Conversion*, Vol. 21, No. 1, March 2006.
- [11] IEEE recommended practice for utility interface of photovoltaic (PV) systems. Apr. 3, 2000.

زیر نویس ها

- 1-Microgrids
- 2-Active Frequency Drift (AFD)
- 2-Active Frequency Drift with Positive Feedback (AFDPF)
- 3-Active Frequency Drift with Pulsation of Chopping Fraction

دارد که اینورترهای موجود در جزیره، در انحراف فرکانس هم جهت باشند یعنی ضریب برش آنها هم علامت باشد.

- روش های انحراف فرکانس فعال با فیدبک مثبت و روش انحراف فرکانس فعال پالسی تا حدودی از مشکلات ناشی از غیر هم جهت بودن انحراف فرکانس در تشخیص حالت جزیره ای چند اینورتری می کاهد. با این حال در صورت استفاده از این روش ها نیز هم جهت بودن انحراف فرکانس اینورترها باعث کاهش هرچه بیشتر ناحیه غیر قابل تشخیص خواهد شد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله روش جدیدی برای تحلیل عملکرد حفاظت های ضد جزیره ای فرکانسی در حالت جزیره ای چند اینورتری ارائه شد. در این روش ناحیه غیر قابل تشخیص در حالت چند اینورتری در صفحه ای شامل پارامترهای بار جزیره تعیین می شود. استفاده از صفحه $Q_f - f_{res}$ در تعیین ناحیه غیر قابل تشخیص باعث شد که بسیاری از پارامترهای بار به صورت یک جا در تعیین ناحیه غیر قابل تشخیص به کار رود.

در روش ارائه شده کلیه منابع تولید پراکنده به صورت منابع جریان موازی با یکدیگر مدل شده و بار جزیره نیز به صورت یک جا در نظر گرفته شد. طبقه بندی روش های حفاظت ضد جزیره ای فرکانسی و تعیین زاویه قدرت اینورتر در هر یک از این روش ها، امکان تعیین زاویه قدرت کلی اینورترها را برای جزیره شامل چندین اینورتر فراهم ساخت.

شبیه سازی ها در حالت جزیره ای دو اینورتری، برای دو منبع فتوولتائیک، در حالت های مختلف حفاظتی در نرم افزار PSCAD انجام شد و صحت روش پیشنهادی در تعیین ناحیه غیر قابل تشخیص تایید شد. همچنین در این مقاله عملکرد حفاظت های ضد جزیره ای فرکانسی در حالات مختلف ارسال توان در حالت جزیره ای چند اینورتری مورد تحلیل قرار گرفت. حفاظت های ضد جزیره ای فرکانسی در حالت چند اینورتری هنگامی حداکثر کارایی را دارند که ضریب برش آنها هم علامت باشد و در غیر این صورت ناحیه غیر قابل تشخیص در حالت چند اینورتری نسبت به حالت تک اینورتری منابع بدتر خواهد شد. همچنین نشان داده شد که روش های حفاظت ضد جزیره ای انحراف فرکانس فعال با فیدبک مثبت و روش انحراف فرکانس فعال پالسی در حالت جزیره ای چند اینورتری، حتی هنگامیکه ضریب برش آنها هم علامت نباشد، عملکرد بهتری در مقایسه با سایر روش ها دارند.

مراجع

- [۱] حمزه، محسن؛ فرهنگی، شاهرخ؛ "حفاظت ضد جزیره ای شبکه های توزیع دارای منابع فتوولتائیک به روش انحراف فرکانس فعال" دومین دوره کنفرانس تخصصی حفاظت و کنترل سیستم های قدرت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دی ماه ۱۳۸۶