



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

محسن حمزه^(۱) شاهرخ فرهنگی^(۲) مجید صنایع پسند^(۲)

(۱) دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی شریف، ایران

(۲) دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران، ایران

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

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. شبیه-

سازی‌هایی در نرم افزار PSCAD انجام می‌شود و صحت روش پیشنهادی اثبات می‌گردد.

مقدمه

هنگام قطع شبکه توزیع، اگر پردازشگر توان متصل به شبکه به تغذیه بارهای موجود در شبکه ادامه دهد، پردازشگر به صورت جزیره ای 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

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

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 نحوه تعیین ناحیه غیر قابل تشخیص در صفحه‌ای که محور افقی آن ضریب کیفیت بار جزیره و محور عمودی آن فرکانس تشدید بار است، در حالت تک اینورتری بیان می‌شود. در بخش چهارم 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.

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

دارند ایجاد خطر می‌کند. از سوی دیگر پردازشگر توان متصل به شبکه، همواره فرکانس خود را با فرکانس شبکه همزمان می‌کند اما شبکه خود را با پردازشگر توان همزمان نمی‌کند. بنابراین کارکرد جزیره‌ای پردازشگر می‌تواند در راه‌اندازی مجدد شبکه ایجاد اختلال کند [2].

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 کانورتی پس از تشکیل جزیره از اهمیت بسزایی برخوردار است. آزمایش‌های معرفی شده در استانداردها برای تشخیص حالت جزیره‌ای همگی به صورت تک‌اینورتری می‌باشند و آزمایشی جهت تشخیص حالت جزیره‌ای چند اینورتری ارائه نشده است. امروزه اکثر منابع کانورتی 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 استانداردی 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 مورد تحلیل قرار خواهد گرفت.

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

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 [۸]:

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

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.

روش انحراف فرکانس فعال با فیدبک مثبت^۲

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 [۸]:

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

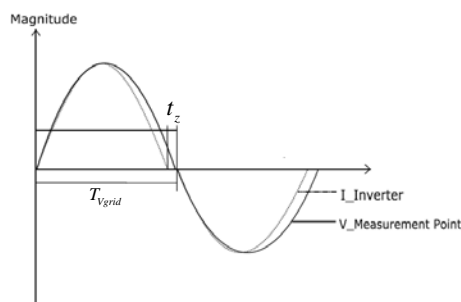
در این رابطه، K_{drift} ضریب شتاب‌دهنده، f_0 فرکانس نامی شبکه و C_{f0} مقدار ضریب برش در مواقعی است که خطای فرکانس وجود ندارد. f_k نیز فرکانس اندازه‌گیری شده در سیکل جاری می‌باشد. با تغییر فرکانس، ضریب برش نیز هم‌جهت با آن تغییر می‌کند. چنانچه اینورتر به شبکه متصل باشد، تغییرات ضریب برش ناشی از تغییرات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

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 [۷].

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.

روش انحراف فرکانس فعال^۱

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 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 کاهششی می‌باشد. نیم سیکل منفی قرینه نیم سیکل مثبت است اما صفر شدن جریان در انتهای سیکل تابعی از

^۲Active Frequency Drift with Positive Feedback (AFDPF)

^۱Active Frequency Drift (AFD)

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

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 $Q_f - f_{res}$ ، وضعیت مقاومت بار را نیز منعکس می‌کند و لزومی به تحلیل حالت‌های مختلف مقاومت بار نیست [۱۰]. 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.

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

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 Q_f و f_{res} مشخص شده و می‌توان با ازای f_{max} (حداکثر فرکانس مجاز شبکه) و f_{min} (حداقل فرکانس مجاز شبکه) ناحیه غیر قابل تشخیص را ترسیم کرد.

$$f_0^2 - \frac{f_{is} \tan(\theta)}{Q_f} f_0 - f_{is}^2 = 0 \quad (4)$$

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 $-\frac{\pi(C_{f0} + K_{drift} Af)}{2}$ می‌باشد.

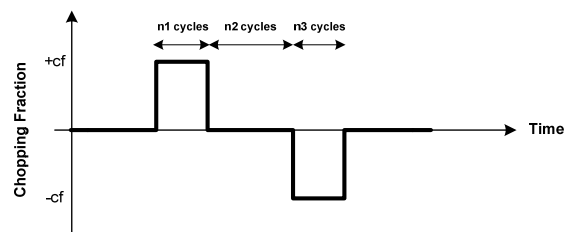
ناحیه غیرقابل تشخیص روش انحراف فرکانس فعال معمولی با $C_f = 40/05$ و روش انحراف فرکانس فعال با فیدبک مثبت برای $C_{f0} = 0/05$ و $K_{drift} = 0/04$ در شکل (۳) رسم شده است (این شکل برای حالتی رسم شده که حداکثر فرکانس مجاز شبکه $50/5$ هرتز و حداقل فرکانس مجاز شبکه $49/5$ هرتز باشد).

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.

روش انحراف فرکانس فعال پالسی^۱

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 [۹].

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

ناحیه غیرقابل تشخیص در صفحه $Q_f - f_{res}$

در روشی جهت تعیین ناحیه غیر قابل تشخیص در صفحه بار بر حسب C_{norm} و L 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

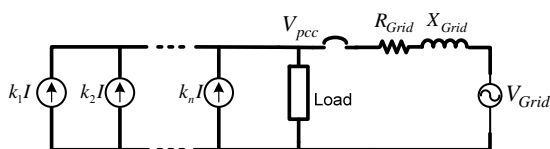
¹ Active Frequency Drift with Pulsation of Chopping Fraction

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

روش ارائه شده در تعیین ناحیه غیرقابل تشخیص در حالت چند اینورتری

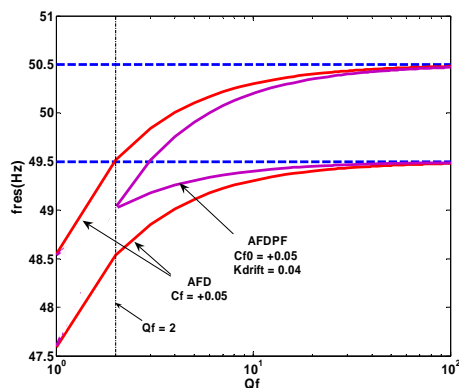
برای تعیین ناحیه غیرقابل تشخیص در صفحه $Q_f - f_{res}$ از شرط فاز بین ولتاژ و جریان استفاده می‌شود. در حالت چند اینورتری شرط فاز ولتاژ و جریان برای اینورترهای متعددی در جزیره باید برقرار شود. در صورتیکه فرکانس جزیره شامل اینورترها، از حدود مجاز خود خارج شود آن جزیره برای کلیه منابع داخل آن قابل تشخیص است و در صورتیکه خارج نشود برای کلیه منابع داخل آن قابل تشخیص نیست. منابع کانورتی 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 (۵) 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 به صورت یک جا در نظر گرفته شوند. منابع نیز به صورت منابع جریان موازی با یکدیگر در نظر گرفته می‌شوند.



شکل (۵): مدل اینورترهای موجود در جزیره به همراه شبکه اصلی

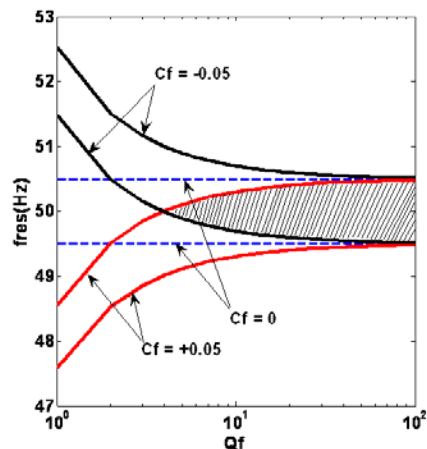
ولتاژ این منابع یکسان و مساوی ولتاژ شبکه می‌باشند اما جریان آنها با اندازه و فازهای مختلفی می‌باشد. کلیه منابع را نیز می‌توان یک جا به صورت یک منبع جریان نشان داد که جریان آن جمع برداری منابع جریان می‌باشد. اندازه هر یک از منابع جریان در شکل (۵) به صورت $k_i I$ نشان داده شده است و زاویه هر یک نسبت به V_{pcc} ، θ_i 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 (۶) نمایش فازوری جریان‌ها را برای حالت $n=3$ نشان می‌دهد. منبع ۱ با



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

همانطور که مشاهده می‌شود روش انحراف فرکانس فعال با فیدبک مثبت ناحیه غیرقابل تشخیص کوچکتری نسبت به روش انحراف فرکانس معمولی دارد.

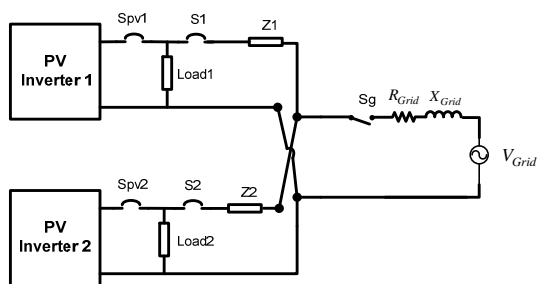
در شکل (۴) ناحیه غیرقابل تشخیص برای روش انحراف فرکانس فعال با ضریب برش $+0.05$ و -0.05 رسم شده است. ناحیه هاشور خورده ناحیه غیر قابل تشخیص روش انحراف فرکانس فعال پالسی با $C_f = \pm 0.05$ می‌باشد که از اشتراک نواحی غیر قابل تشخیص انحراف فرکانس معمولی با $C_f = +0.05$ و $C_f = -0.05$ بدست آمده است. ملاحظه می‌شود که ناحیه غیر قابل تشخیص به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته است.



شکل (۴): ناحیه غیرقابل تشخیص روش انحراف فرکانس فعال با ضریب برش $+0.05$ و -0.05

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

ای می‌باشد) و سهم توان هر کدام از آنها با ضرایب k_1 و k_2 مشخص می‌شود.

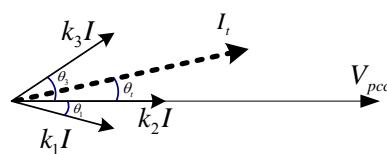


شکل (۷): عملکرد همزمان دو منبع فتوولتائیک متصل به شبکه در حالت جزیره‌ای چند اینورتری

در لحظه $t=1/\omega_s$ کلید S_g باز می‌شود و حالت جزیره‌ای دو اینورتری اتفاق می‌افتد. حفاظت ضدجزیره‌ای هر یک از اینورترها می‌تواند یکی از انواع حفاظت‌های ضدجزیره‌ای باشد. اگر این حفاظت‌ها 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 می‌تواند در نظر گرفته شود. در این مقاله ۵ حالت برجسته از بین حالات انتخاب می‌شود. برای سایر حالات می‌توان مشابه این حالت‌ها ناحیه غیر قابل تشخیص را تعیین کرد. حالت اول:

اینورتر ۱ حفاظت غیرفعال فرکانسی و اینورتر ۲ دارای حفاظت انحراف فرکانس فعال معمولی با $C_f=+0.05$ می‌باشد. ناحیه غیرقابل تشخیص با توجه به روش گفته شده برای حالت $k_1=0.33$ و $k_2=0.67$ و $k_1=0.5$ و $k_2=0.5$ در شکل (۸) رسم شده است. k_1 سهم اینورتر ۱ و k_2 سهم اینورتر ۲ از کل توان می‌باشد. 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 جزیره‌ای چند اینورتری نسبت به حالت تک-اینورتری مورد بررسی قرار داد.

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 (۶): 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 ضدجزیره‌ای غیرفعال فرکانسی مقدار θ_t صفر می‌باشد. در روش‌های انحراف فرکانس فعال با ضریب برش مثبت مقدار θ_t منفی و در روش‌های انحراف فرکانس فعال با ضریب برش منفی مقدار θ_t مثبت می‌باشد.

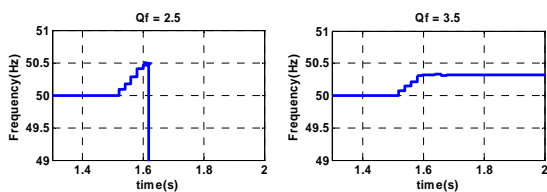
نتایج شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی حالت جزیره‌ای چند اینورتری، دو پردازشگر توان فتوولتائیک در یک جزیره در نظر گرفته می‌شوند. شبیه‌سازی در نرم‌افزار PSCAD انجام می‌شود. نوع 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 این شبیه‌سازی را برای حالت سه اینورتری و بیشتر از آن نیز تعمیم داد.

مجموع بار جزیره ۳kW، توان راکتیو مصرفی صفر و ضریب کیفیت بار ۲/۵ می‌باشد (شکل (۷)). مجموع توان دو اینورتر ۳kW است (سخت‌ترین شرایط برای تشخیص حالت جزیره-

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

$C_{f0}=+0/05$ استفاده می‌کند هر دو حالت $Q_f=2/5$ و $Q_f=3/5$ قابل تشخیص می‌باشد.

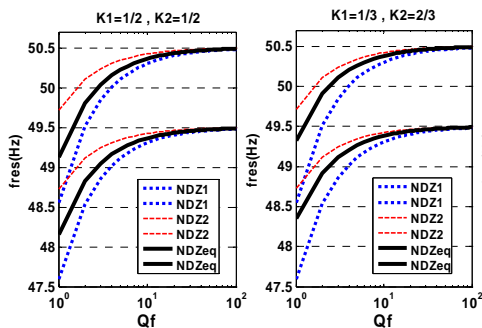


شکل (۱۰): فرکانس جزیره پس از وقوع حالت جزیره‌ای

حالت دوم:

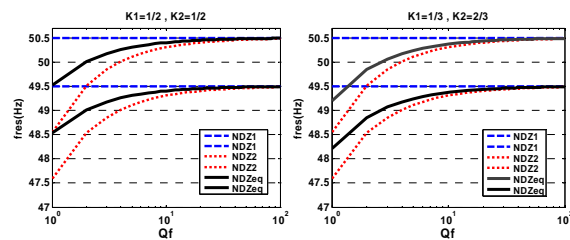
هر دو اینورتر دارای حفاظت انحراف فرکانس فعال معمولی می‌باشند. دو حالت می‌تواند وجود داشته باشد: ۱ - ضریب برش هر دو هم‌علامت باشد. ۲ - ضریب برش آنها هم علامت نباشد.

ضریب برشها هم‌علامت: اینورتر ۱ با $C_f=+0/05$ و اینورتر ۲ با $C_f=+0/02$ در نظر گرفته می‌شود. شکل (۱۱) ناحیه قابل تشخیص را در دو حالت مختلف ارسال توان توسط منابع نشان می‌دهد.



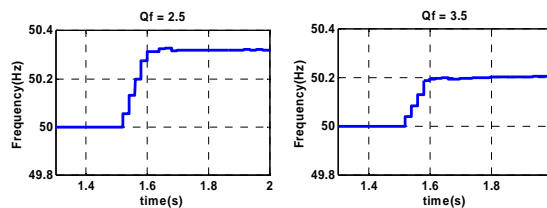
شکل (۱۱): ناحیه غیرقابل تشخیص برای حالات مختلف ارسال توان

همانند حالت قبلی، ناحیه غیرقابل تشخیص برای یکی از اینورترها بهبود می‌یابد و برای دیگری بدتر می‌شود. شکل (۱۲) فرکانس جزیره را برای حالت‌های مختلف ارسال توان پس از وقوع حالت جزیره‌ای در لحظه $t=1/5s$ نشان می‌دهد در حالتیکه $k_2=0/67$ و $k_1=0/33$ می‌باشد حالت جزیره‌ای با بار $Q_f=2/5$ تشخیص داده نشده است در حالت دیگر، عملکرد جزیره‌ای تشخیص داده شده است.



شکل (۸): ناحیه غیرقابل تشخیص برای حالات مختلف ارسال توان

همان‌گونه که ملاحظه می‌شود بسته به مقدار k_1 و k_2 ناحیه غیرقابل تشخیص جدیدی برای کل جزیره تعیین خواهد شد. یعنی در حالت چنداینورتری ناحیه غیرقابل تشخیص برای هر دو منبع یکسان خواهد بود. برای منبع ۱ ناحیه غیرقابل تشخیص تا حدودی بهبود می‌یابد اما برای منبع شماره ۲ ناحیه غیرقابل تشخیص به سمت بارهای سلفی متمایل شده و این مطلوب نیست. شکل (۹) فرکانس جزیره پس از وقوع حالت جزیره‌ای را در حالت $k_1=0/5$ و $k_2=0/5$ برای ضریب کیفیت بار $2/5$ و $3/5$ نشان می‌دهد $f_{max}=50/5Hz$ و $f_{min}=49/5Hz$.

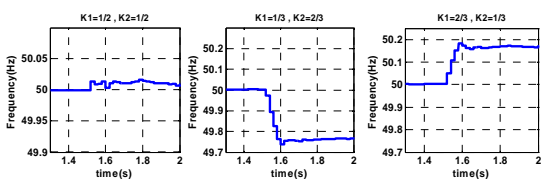


شکل (۹): فرکانس جزیره پس از وقوع حالت جزیره‌ای

در هر دو حالت عملکرد جزیره‌ای قابل تشخیص نبوده است. همان‌گونه که از شکل (۸) ملاحظه می‌شود $Q_f=2/5$ و $Q_f=3/5$ هر دو در ناحیه غیرقابل تشخیص قرار دارند که نشان‌دهنده صحت روش پیشنهادی برای تحلیل ناحیه غیرقابل تشخیص می‌باشد.

شکل (۱۰) فرکانس اینورتر را در حالت $k_1=0/33$ و $k_2=0/67$ نشان می‌دهد. در این حالت سهم منبع ۲ در تعیین ناحیه غیرقابل تشخیص معادل، بیشتر می‌باشد. در این حالت عملکرد جزیره‌ای با بار $Q_f=2/5$ تشخیص داده شده است اما عملکرد جزیره‌ای با بار $Q_f=3/5$ تشخیص داده نشده است. در حالت تک‌اینورتری که از روش انحراف فرکانس فعال با

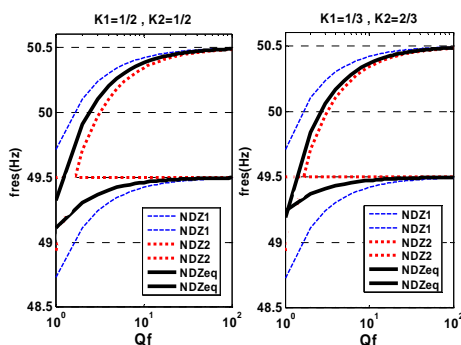
بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل (۱۴): فرکانس جزیره پس از وقوع حالت جزیره‌ای

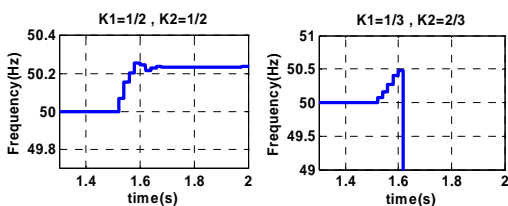
حالت سوم:

اینورتر یک 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 حالات مختلف ارسال توان در شکل (۱۵) 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.

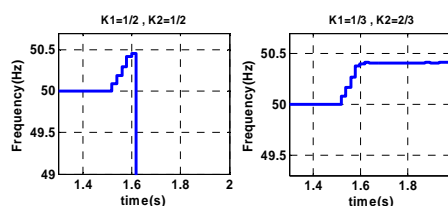


شکل (۱۵): ناحیه غیرقابل تشخیص برای حالات مختلف ارسال توان

شکل (۱۶) فرکانس جزیره را برای حالت‌های مختلف ارسال توان پس از وقوع حالت جزیره‌ای در $t=1/5s$ 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.

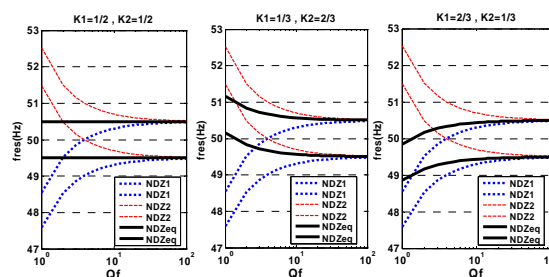


شکل (۱۶): فرکانس جزیره پس از وقوع حالت جزیره‌ای



شکل (۱۲): 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 (۱۳) ناحیه غیرقابل تشخیص را در سه حالت مختلف ارسال توان نشان می‌دهد.

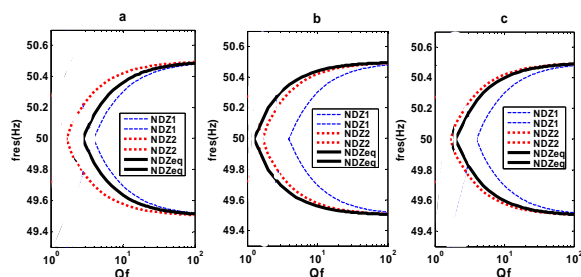


شکل (۱۳): ناحیه غیرقابل تشخیص برای حالات مختلف ارسال توان

در این حالت ناحیه غیرقابل تشخیص معادل در هر صورت نسبت به حالت تک‌اینورتری برای هر دو اینورتر بدتر می‌شود. در حالت $k_1=0/5$ و $k_2=0/5$ ناحیه غیرقابل تشخیص دقیقاً شبیه ناحیه غیرقابل تشخیص روش غیرفعال خواهد شد. شکل (۱۴) فرکانس جزیره‌ای را برای حالت‌های مختلف ارسال توان پس از وقوع حالت جزیره‌ای در $t=1/5s$ نشان می‌دهد. در هیچکدام از حالات عملکرد جزیره‌ای تشخیص داده نشده است، در حالیکه در حالت تک‌اینورتری با شرایط مشابه بار محلی 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 $50Hz$ 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 $k_2=0/33$ و $k_1=0/67$ فرکانس به بالا منحرف شده چون تاثیر منبع ۱ با ضریب برش مثبت در تعیین فرکانس جزیره بیشتر می‌باشد.

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

در وضعیت a ضریب برش هر دو اینورتر هم جهت با هم و در یک زمان اعمال شده است. در وضعیت b ضریب برش دو اینورتر بر خلاف جهت هم می‌باشد و در وضعیت c هنگامیکه ضریب برش یکی از اینورترها مخالف صفر است ضریب برش اینورتر دیگر صفر است. ناحیه غیرقابل تشخیص معادل برای این سه وضعیت در شکل (۱۹) نشان داده شده است.

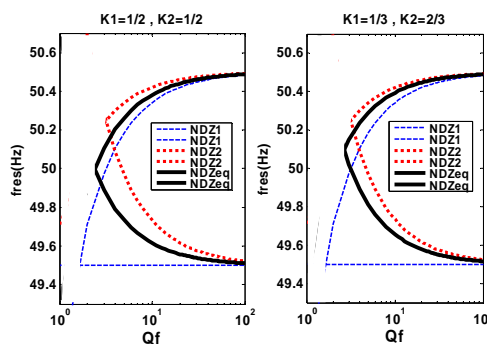


شکل (۱۹): ناحیه غیرقابل تشخیص برای حالات مختلف ارسال توان

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 اینورتری، اینورتر ۱ بدتر شده و نسبت به اینورتر ۲ بهتر شده است. در وضعیت b بدترین حالت می‌باشد ناحیه غیرقابل تشخیص معادل نسبت به ناحیه غیرقابل تشخیص تک اینورتری هر دو اینورتر بدتر شده است. در وضعیت c هم، ناحیه غیرقابل تشخیص معادل نسبت به ناحیه غیرقابل تشخیص تک اینورتری (اینورتر شماره ۲) بهتر شده است. شکل (۲۰) فرکانس جزیره را در وضعیت a هنگام عملکرد جزیره‌ای در لحظه $t=1/5s$ برای حالت‌های مختلف ارسال توان نشان می‌دهد. ضریب کیفیت بار $2/5$ می‌باشد. در این وضعیت در کلیه حالات ارسال توان حالت جزیره‌ای قابل تشخیص بوده است. در وضعیت b (شکل (۲۱)) در هیچکدام از حالات ارسال توان، حالت جزیره‌ای قابل تشخیص نبوده است. در وضعیت c (شکل (۲۲)) در حالت $k_1=0/67$ و $k_2=0/33$ حالت جزیره‌ای قابل تشخیص بوده است.

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 $K_{drift}=0/08$ می‌باشد. ناحیه غیرقابل تشخیص معادل چند اینورتری در شکل (۱۷) نشان داده شده است.

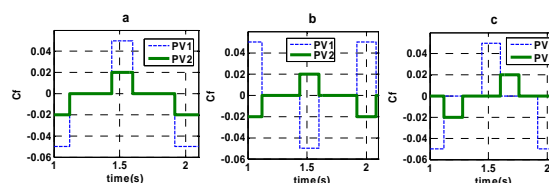


شکل (۱۷): ناحیه غیرقابل تشخیص برای حالات مختلف ارسال توان

در این حالت بر خلاف حالت دوم اگر ضریب برش‌ها هم علامت نباشند، ناحیه غیرقابل تشخیص تغییر زیادی نسبت به حالت تک اینورتری نمی‌کند. این نشان می‌دهد که استفاده از فیدبک مثبت دارای این مزیت مهم در حالت عملکرد چند اینورتری می‌باشد که در صورت هم علامت نبودن ضریب برش‌ها هم ناحیه غیرقابل تشخیص در حد مطلوب باقی می‌ماند.

حالت پنجم:

حفاظت هر دو اینورتر به صورت انحراف فرکانس فعال پالسی باشد. اینورتر اول با $C_f=\pm 0/05$ و اینورتر دوم با $C_f=\pm 0/02$ می‌باشد. سه صورت مختلف از نظر تداخل حالت‌های مختلف ضریب برش می‌تواند اتفاق بیفتد که در شکل (۱۸) نشان داده شده است.



شکل (۱۸): وضعیت‌های مختلف دو اینورتر دارای حفاظت انحراف

فرکانس پالسی از نظر ضریب برش

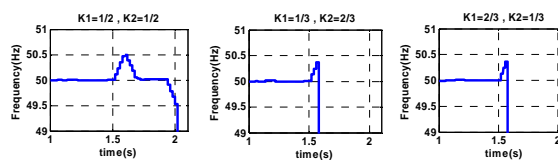
بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

استفاده از این روش‌ها نیز هم‌جهت بودن انحراف فرکانس اینورترها باعث کاهش هرچه بیشتر ناحیه غیرقابل تشخیص خواهد شد.

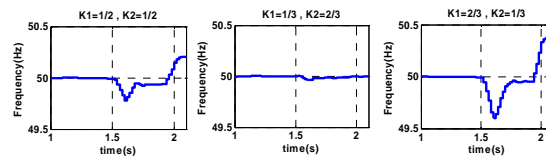
منابع

۱. حمزه، محسن؛ فرهنگی، شاهرخ؛ "حفاظت ضدجزیره‌ای شبکه‌های توزیع دارای منابع فتوولتائیک به روش انحراف فرکانس فعال" دومین دوره کنفرانس تخصصی حفاظت و کنترل سیستم‌های قدرت، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، دی ماه ۱۳۸۶
۲. فرهنگی، بابک؛ فرهنگی، شاهرخ؛ صنایع پسند، مجید "پیشنهاد تدوین استاندارد برای سیستم‌های فتوولتائیک متصل به شبکه،" بیستمین کنفرانس بین‌المللی برق، آبان ۱۳۸۴.

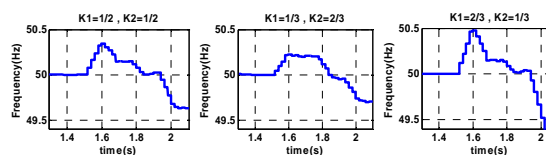
- [1] M.Hamzeh, Sh.Farhangi, B.Farhangi "A New Control Method in PV Grid Connected Inverters for Anti-Islanding Protection by Impedance Monitoring" *Eleventh IEEE Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL 2008)*.
- [2] Lucian Asiminoaei, Remus Teodorescu, Frede Blaabjerg, "Online Grid Impedance Measurement Suitable for Multiple PV Inverters Running in Parallel" *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, pp 907-911, 2006.
- [3] Luiz A. C. Lopes, Yongzheng Zhang "Islanding Detection Assessment of Multi-Inverter Systems With Active Frequency Drifting Methods" *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 23, NO. 1 pp 507-515, JANUARY 2008
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] V. John, Z. Ye, and A. Kolwalkar, "Investigation of anti-islanding protection of power converter based distributed generators using frequency



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



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



شکل (۲۲): فرکانس جزیره پس از وقوع حالت جزیره‌ای (وضعیت c)

نتیجه

استفاده از روش‌های انحراف فرکانس در تشخیص حالت جزیره‌ای چند اینورتری اگرچه در بعضی حالات باعث افزایش ناحیه غیرقابل تشخیص و یا جابه‌جایی آن می‌شود، بر خلاف روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری امپدانس از تریپ‌های نابجای پردازشگر توان، در حالتی که جزیره نمی‌باشد، می‌کاهد. استفاده از روش‌های انحراف فرکانس فعال در تشخیص حالت جزیره‌ای چند اینورتری هنگامی حداکثر کارایی را دارد که اینورترهای موجود در شبکه، در انحراف فرکانس هم‌جهت باشند یعنی ضریب برش آنها هم‌علامت باشد. نتایج شبیه‌سازی بیانگر این است که بزرگترین ناحیه غیرقابل تشخیص معادل زمانی ایجاد می‌شود که انحراف فرکانس‌ها هم‌جهت نباشند.

روش‌های انحراف فرکانس فعال با فیدبک مثبت و روش انحراف فرکانس فعال پالسی تا حدودی از مشکلات ناشی از غیرهم‌جهت بودن انحراف فرکانس در تشخیص حالت جزیره‌ای چند اینورتری می‌کاهد. با این حال در صورت

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

domain analysis,” *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 19, no. 5, pp. 1177-1183, Sept. 2004.

- [8] A. C. Lopes, , and Huili Sun :’ Performance Assessment of Active Frequency Drifting Islanding Detection Methods’ *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, VOL. 21, NO. 1, MARCH 2006.
- [9] IEEE recommended practice for utility interface of photovoltaic (PV) systems, Apr. 3, 2000.
-