ارائه روشی نوین برای بهره برداری و تشخیص حالت جزیره‌ای تولیدات پراکنده مبتنی بر اینورتر

حسان واحدی[۱] رضا نوروزیان[۲] ابوالفضل جلیلوند[۳] گئورگ قره‌پتیان[۴]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه زنجان- زنجان- ایران
h_vahedi@znu.ac.ir

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه زنجان- زنجان- ایران
Noroozian@znu.ac.ir

۳- دانشیار- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه زنجان- زنجان- ایران
ajalilvand@znu.ac.ir

۴- استاد- دانشکده مهندسی کامپیوتر- دانشگاه صنعتی امیرکبیر - تهران- ایران
grptian@aut.ac.ir

چکیده: در این مقاله، به معرفی روش کنترلی جدید بهره برداری جزیره ای در تولیدات پراکنده مبتنی بر اینورتر پرداخته شده است که در این روش حفاظت های بار در زمان متصل به شبکه و بهره‌برداری جزیره‌ای به طور کامل در نظر گرفته شده است. همچنین الگوریتم تشخیص حالت جزیره‌ای مبتنی بر رله ROCOF جهت تشخیص پدیده جزیره ای نیز ارائه شده است. الگوریتم ارائه شده به بلوک سنکرون کننده نیز مجهز می‌باشد که در زمان بازگشت مجدد شبکه، قادر به اتصال مجدد شبکه بالادست به تولید پراکنده است. لازم به ذکر است که کلیه شبیه سازی ها و تست های انجام شده درمحیط نرم افزار MATLAB / Simulink می باشد. روش ارائه شده دارای امنیت و تطبیق پذیری می باشد و تداخلی با کارکرد ادوات رگولاسیون ولتاژ در شبکه نخواهد داشت.

کلمات کلیدی: تولید پراکنده، بهره برداری، جزیره‌ای شدن، اینورتر، حفاظت ولتاژی، حفاظت فرکانسی.

تاریخ ارسال مقاله : ۱۳۸۹/۱۰/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله : ۱۳۹۰/۵/۲۳

نام نویسنده‌ی مسئول : دکتر رضا نوروزیان

نشانی نویسنده‌ی مسئول : ایران – زنجان – دانشکده‌ی مهندسی برق – دانشگاه زنجان

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.8- No.2- Fall & Winter 2011

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-11-16]

۱- مقدمه

در این مقاله به معرفی روش جدید بهره برداری جزیره‌ای در تولیدات پراکنده مبتنی بر اینورتر پرداخته شده است. به دلیل نفوذ بالای تولیدات پراکنده در سیستم توزیع و رقابت بسیار بالای تولیدکنندگان توان خصوصی برای هرچه امن تر کردن تولید توان خود، بهره برداری جزیره-ای بسیار قابل توجه قرار گرفته است. همچنین تغذیه بارهای موجود در سیستم، در زمان تشکیل جزایر انرژی توسط تولیدات پراکنده منافع بسیار زیادی همچون بهبود اندیس های کیفیت توان [۱] و قابلیت اطمینان را برای مالکان تولیدات پراکنده و بهره برداران شبکه به همراه دارد [۲] و [۳]. علاوه بر موارد ذکر شده در بالا، منافع مالی مالکان تولیدات پراکنده به دلیل ساعات بیشتر بهره برداری و رضایت مندی مشتریان به خاطر حذف زمان بی برقی در طی روز، از جمله دیگر فواید بهره برداری از تولیدات پراکنده در زمان جزیره‌ای می باشد.

با توجه به اینکه استاندارد IEEE. 929- 2000 قطع تولید پراکنده در زمان جزیره‌ای شدن را اجباری می داند [۴] و به دلیل افزایش نفوذ تولیدات پراکنده در شبکه توزیع و با فرض قطع این تولیدات در زمان تشکیل جزیره، میزان زیادی کسری توان و افزایش اعوجاج در سطح شبکه توزیع به وجود خواهد آمد. بنابراین قطع تولیدات پراکنده در زمان جزیره‌ای شدن، عملی نبوده و راه حل قابل اطمینانی نخواهد بود. از این رو، در قسمتی از استاندارد IEEE 1547-2003 بندی به عنوان بهره برداری در حالت جزیره ای به عنوان یکی از ملاحظات آتی در سیستم آورده شده است [۵].

در چند سال اخیر تحقیقات در این زمینه باعث بر انگیختن انگیزه ها برای مطالعات بیشتر در زمینه بهره برداری در حالت جزیره‌ای شده است به گونه ای که در [۶] روش کنترلی جدید برای اداره تولید پراکنده در حالت جزیره‌ای با کمک اندازه گیری محلی پارامتر های سیستم ارائه شده و سوئیچ کردن بین دو حالت کنترلی در مود متصل به شبکه و جزیره‌ای بدون ایجاد ارتباط بین تولید پراکنده و شبکه بالادست انجام می پذیرد. یک روش کنترلی ترکیبی در تولیدات پراکنده مبتنی به چند اینورتر نیز در حالت جزیره ای در [۷] مورد بررسی قرار گرفته است. در این روش یکی از اینورترها به کنترل ولتاژ ودیگری به کنترل جریان تزریقی مورد نیاز بار اختصاص داده شده است. در [۸] روشی جهت کنترل امن جزیره‌ای ارائه شده است. همچنین در [۹]، تولید پراکنده به منظور تأمین توان راکتیو مورد نیاز در طی بهره برداری در شرایط کاری نرمال جهت بهبود ضریب توان کنترل می شود. در [۱۰] سیستم کنترلی اینورتر با استفاده از مشخصه شیبی برای کنترل توان اکتیو و راکتیو تولید پراکنده به منظور بهره برداری در حالت جزیره ای طراحی شده است.

در این مقاله روش جدیدی جهت بهره برداری در حالت جزیره ای برای تولیدات پراکنده مبتنی به اینورتر ارائه شده است. ایده اصلی این روش بر اساس افزایش قابلیت اطمینان شبکه و تغذیه بارهای حساس در هنگام در دسترس نبودن شبکه توزیع (حالت جزیره ای) می باشد. در چنین شرایطی، رابط کنترلی تولید پراکنده مسئول پایدار نگه داشتن ولتاژ و فرکانس در بین حدود مجاز کاری سیستم در قسمت جزیره شده در شبکه می باشد. همچنین در ادامه با انجام آزمایشهای مشخص شده از طرف استاندارد های معتبر در این زمینه بر روی سیستم مورد مطالعه، صحت ودرستی استفاده از روش پیشنهادی تأیید خواهد شد. لازم به ذکر است که کلیه شبیه سازی ها و تست های انجام شده درمحیط نرم افزار MATLAB / Simulink می باشد. روش ارائه شده دارای امنیت و تطبیق پذیری می باشد و تداخلی با کارکرد ادوات رگولاسیون ولتاژ در شبکه نخواهد داشت.

۲- استراتژی کنترلی تولید پراکنده

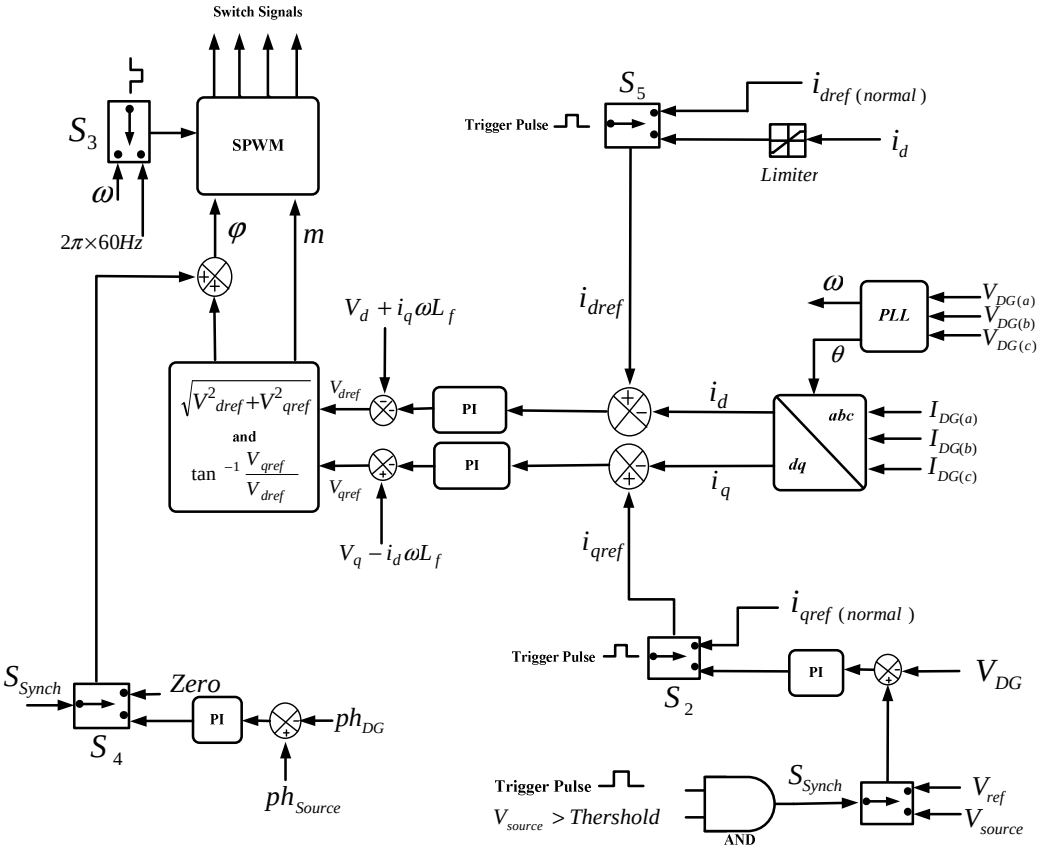
توان خروجی تولید پراکنده وابسته به طراحی صحیح و دقیق رابط کنترلی آن می باشد. اکثریت شبکه های توزیع اجازه تزریق توان راکتیو را به تولیدات پراکنده نمی دهند و این امر به سبب این است که اگر تولید پراکنده توان راکتیو در شبکه جاری کند، ادوات تنظیم ولتاژ دچار خطا می شوند. از این رو تولیدات پراکنده برای شرایط کاری با ضریب توان واحد طراحی و تنظیم می گردند. در حالت کاری نرمال، توان راکتیو بار از طریق شبکه تامین می شود. در حالی که تولیدات پراکنده مجوز تولید توان راکتیو را ندارند و در بهره برداری جزیره‌ای تمام توان اکتیو و راکتیو بایستی از طریق تولید پراکنده تامین شود. به منظور برآوردن خواسته‌های شبکه و تأمین توان راکتیو در حالت بهره برداری جزیره‌ای، تولید پراکنده باید به دو کنترل کننده، یکی برای حالت متصل به شبکه و دیگری برای حالت جزیره‌ای مجهز باشد تا در صورت تغییر وضعیت سیستم از حالتی به حالت دیگر، قادر به کنترل صحیح و دقیق تولید پراکنده باشد. در این مطالعه، برای شبیه سازی وآزمایش سیستم برای حالت های واقعی، تولید پراکنده به یک سیستم حفاظتی مجزا برای تشخیص حالات غیر عادی سیستم در شرایط بهره برداری و بلوک سنکرون ساز جهت اتصال مجدد سیستم به شبکه بالا دست مجهز می باشد. رابط کنترلی پیشنهادی شامل بلوک های زیر می باشد:

۱. استراتژی کنترلی در شرایط متصل به شبکه
۲. استراتژی کنترلی در شرایط بهره برداری جزیره ای
۳. الگوریتم تشخیص جزیره برای یافتن لحظه تشکیل جزیره
۴. الگوریتم حفاظتی برای تشخیص حالات غیر عادی سیستم در زمان بهره برداری جزیره ای
۵. بلوک سنکرون ساز

شکل (۱) روش کنترلی پیشنهادی برای تولیدات پراکنده بر پایه اینورتر را نشان می دهد. توضیحات بیشتر در مورد نحوه عملکرد هریک از بلوک ها به تفکیک در بخش های بعدی بررسی و دنبال خواهد شد.

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.8- No.2- Fall & Winter 2011

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-11-16]



شکل (۱): بلوک کنترلی تولید پراکنده

۲-۱- استراتژی کنترلی در شرایط متصل به شبکه

همانطور که پیشترگفته شد، اغلب اینورترها برای حالت کاری نزدیک به ضریب توان واحد طراحی و بهره برداری می شوند. بلوک کنترلی تولید پراکنده برای حالت متصل به شبکه که در شکل (۱) نمایش داده شده است، به منظور کنترل توان خروجی از طریق کنترل جریان خروجی تولید پراکنده، طراحی شده است. ابتدا جریان خروجی abc تولید پراکنده با استفاده از تبدیل پارک به مؤلفه‌های مستقیم و عمود (dq) تبدیل می شوند. مؤلفه مستقیم جریان خروجی تولید پراکنده یعنی I_d مقدار توان اکتیو تولیدی و مولفه I_q توان راکتیو تولیدی توسط تولید پراکنده را کنترل می نمایند. هردو مولفه I_d و I_q با مقادیر مرجع (I_{qref} و I_{dref}) مقایسه می شوند. در حالت متصل به شبکه، سیگنال فرمان تغییر حالت سیستم در مقدار صفر قرار داشته و تمامی کلید ها به شاخه بالایی خود وصل هستند. برای حالت متصل به شبکه کلید های (S2 , S5) که در شکل (۱) دیده می شوند، مقدار (normal) I_{dref} و I_{qref} (normal) که در یک مقدار ثابت قرار گرفته اند را ارتباط می دهند. سپس مقادیر مقایسه شده جریانی از کنترلر PI عبور کرده و مقادیر V_{dref} و V_{qref} را تشکیل می دهند. بعد از آن، دامنه و زاویه فاز سیگنال مدولاسیون محاسبه و به خروجی بلوک سنکرون ساز که در حالت اتصال به شبکه صفر می باشد (کلید S4 در حالت بالا قرار گیرد)، اضافه می گردد. در این قسمت به اثبات روابط استراتژی کنترلی که در این قسمت بحث شد، پرداخته می‌شود.

توان های اکتیو و راکتیو لحظه‌ای در قالب برداری dq به شرح زیر می باشند:

$$P = \frac{3}{2} v_d \cdot i_{dt} \qquad (۱)$$

$$Q = \frac{3}{2} v_d \cdot i_{qt} \qquad (۲)$$

در فرمول فوق v_d مقدار پیک فاز ولتاژ DG و همچنین i_{dt} و i_{qt} جریان های برداری اینورتر می باشند. مقادیر برداری dq جریان و ولتاژ درحالت دائمی ثابت هستند. بنابراین، کنترل کننده‌ها قادر به رگولاسیون مستقل پارامتر های d و q می باشند. ولتاژ لحظه ای سه فاز به صورت زیر می باشد:

$$\frac{d}{dt} i_{t(abc)} = -\frac{R_f}{L_f} i_{t(abc)} + \frac{1}{L_f}\left(v_{t(abc)} - v_{pcc(abc)}\right) \qquad (۳)$$

بطوری که $i_{t(abc)}$ نمایانگرجریان سه فاز خروجی تولید پراکنده می باشد. همچنین R_f و L_f مقاومت و اندوکتانس فیلتر خروجی اینورتر، $v_{t(abc)}$ و $v_{pcc(abc)}$ به ترتیب نمایانگر ولتاژ ترمینال و ولتاژ نقطه PCC می باشند. بعد از استفاده از تبدیل پارک و انتقال معادله (۳) به قاب مرجع سنکرون گردان داریم:

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.8- No.2- Fall & Winter 2011
[Downloaded from jiaeee.com on 2025-11-16]

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_{dt} \\ i_{qt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_f}{L_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dt} \\ i_{qt} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_f}\begin{bmatrix} v_{dt} - v_{dpcc} \\ v_{qt} - v_{qpcc} \end{bmatrix} \qquad (۴)$$

یا:

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_{dt} \\ i_{qt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & 0 \\ 0 & -\frac{R_f}{L_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dt} \\ i_{qt} \end{bmatrix} + \frac{1}{L_f}\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} \qquad (۵)$$

که در این رابطه :

$$u_d = v_{dt} - v_{dpcc} + \omega L_f i_{qt} \qquad (۶)$$

$$u_q = v_{qt} - v_{qpcc} - \omega L_f i_{dt} \qquad (۷)$$

با استفاده از معادلات فوق کنترل کننده اینورتر اصلاح می شود و دامنه و زاویه سیگنال مدوله محاسبه و جدول کلید زنی اینورتر بدست می آید.

۲-۲- استراتژی کنترلی در شرایط بهره برداری جزیره-ای

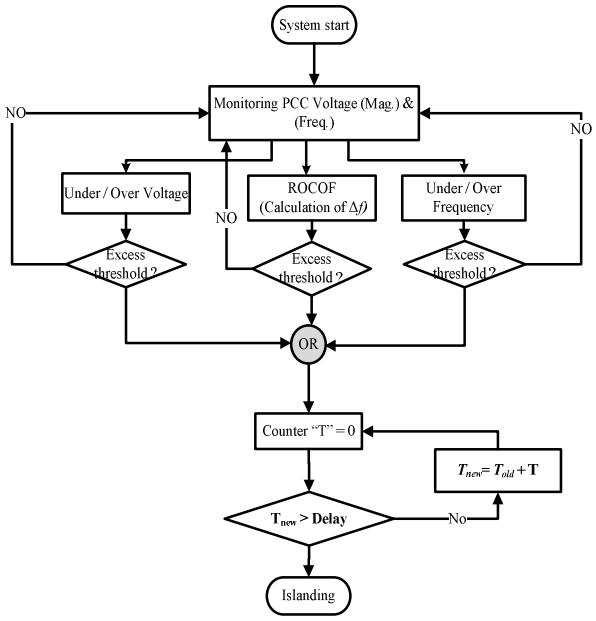
هنگامی که شبکه بالادست قطع می گردد، دیگر شبکه قادر به ثابت نگه داشتن ولتاژ و فرکانس در داخل محدوده مجاز بهره برداری نمی باشد. بنابراین تولید پراکنده به شرایط کنترلی بهره برداری جزیره ای تغییر وضعیت می دهد (S1 و S4 در حالت بالا می مانند و کلید های S2 ، S3 و S5 تغییر حالت داده و به شاخه پایینی متصل می گردند) که در آن تولید پراکنده توان اکتیو مورد نیاز را تأمین و ولتاژ نقطه PCC را از طریق تزریق توان راکتیو ثابت نگه می دارد. در این شرایط، ولتاژ پریونیت PCC با مقدار V_{ref} مقایسه شده و سیگنال خطای حاصله از کنترلر PI عبور می کند تا مقدار I_{qref} را مشخص نماید. از طرف دیگر، جریان I_d خروجی تولید پراکنده اندازه گیری و از المان محدود کننده* عبور داده می شود تا مقدار توان اکتیو تولیدی سیستم تحت کنترل باشد. به طور مشابه، دامنه و فاز سیگنال مدولاسیون محاسبه و به خروجی بلوک سنکرون ساز افزوده می شوند. لازم به ذکر است که فرکانس سیگنال مدولاسیون در طی بهره برداری جزیره ای ثابت نگه داشته می شود.

۳- الگوریتم تشخیص جزیره برای یافتن لحظه ایجاد جزیره

بطور کلی برای تشخیص هر حالت غیر عادی در تغییرات ولتاژ و فرکانس، تولید پراکنده مجهز به الگوریتم تشخیص پدیده جزیره‌ای می باشد. الگوریتم تشخیص جزیره‌ای مسئول تشخیص و قطع تولید پراکنده از شبکه بالادست می‌باشد. در کنترل کننده پیشنهادی، الگوریتم تشخیص جزیره‌ای با اندکی تغییر عمل می کند به این صورت که در هنگام تشخیص پدیده جزیره‌ای با ارسال سیگنال به جای قطع تولید پراکنده، بارهای غیر ضروری را قطع می‌کند تا بارهای حیاتی به صورت بی وقفه تغذیه گردند و همچنین استراتژی کنترلی رابط تولید پراکنده را از حالت متصل به شبکه به حالت بهره برداری جزیره ای تغییر می‌دهد. همچنین الگوریتم تشخیص جزیره‌ای باید توانایی شناسایی تمامی حالت های بارگذاری سیستم را داشته باشد، از این رو دو الگوریتم پیشنهادی که در قسمت های بعد بحث می شوند، برای شبیه سازی در نظر گرفته شده اند. با تشخیص پدیده جزیره‌ای کلید های (S2 ، S3 و S5) به شاخه پایینی خود متصل شده و شرایط بهره برداری جزیره‌ای در هنگام وقوع جزیره تولید پراکنده را فراهم می آورند.

با توجه به اینکه ثابت نگه داشتن ولتاژ و توان اکتیو در حین بهره برداری در شرایط جزیره‌ای بخاطر وابستگی هر دو به یکدیگر امکان پذیر نمی باشد، بنابر این روش های پسیو OVP / UVP و OFP / UFP برای تشخیص جزیره ای کافی بوده و استفاده می شود. این روش ها برای تغییرات بسیار بزرگ فرکانس و ولتاژ در زمان بعد از ایجاد جزیره کاربرد داشته و برای حالتهایی که بار دقیقاً با خروجی نامی تولید پراکنده برابر باشد بسیار نا کارآمد می باشند.

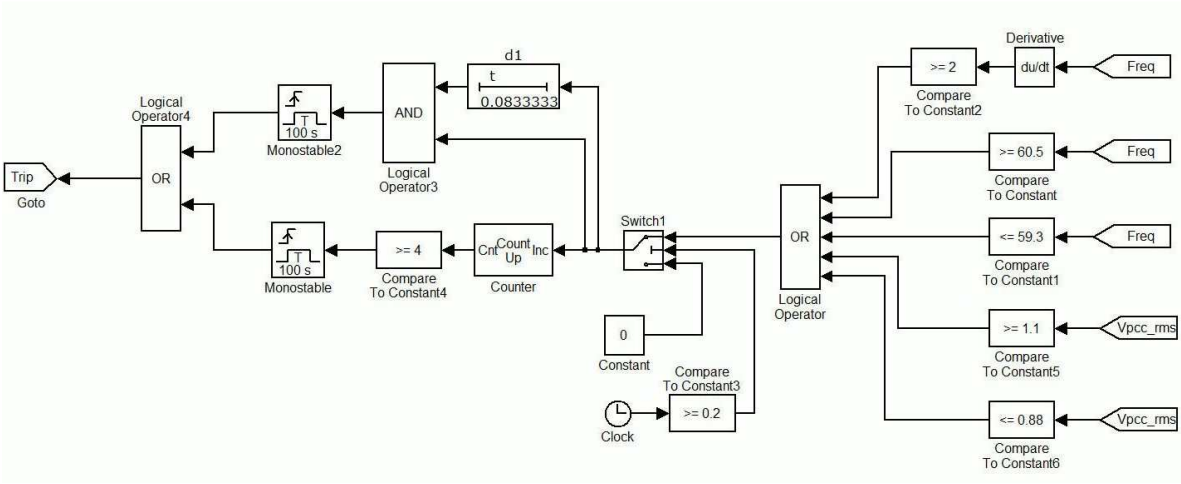
برای غلبه بر تأخیر بسیار زیاد در تشخیص حالت جزیره‌ای برای بارهای منطبق با توان نامی تولید پراکنده، از رله تشخیص نرخ تغییرات فرکانس به موازات OFP / UFP و OVP / UVP استفاده شده است. روش پیشنهادی بر پایه مانیتورینگ ولتاژ، فرکانس ونرخ تغییرات فرکانس در کنار هم می باشد. شکل (۲) شمای کلی سیستم حفاظتی و تشخیص جزیره‌ای را نشان می دهد.



شکل (۲): فلوچارت تشخیص جزیره‌ای با استفاده از روش ترکیب رله های OFP / UFP ، OVP / UVP و ROCOF.

* Limiter

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-11-16]



شکل (۳): سیستم حفاظتی و تشخیص حالت جزیره‌ای با استفاده از روش ترکیبی رله های OFP / UFP ، OVP / UVP و ROCOF.

همانطور که در شکل (۲) مشاهده می شود، در ابتدا ولتاژ و فرکانس PCC به سه حفاظت OFP / UFP ، OVP / UVP و ROCOF تزریق می شود که نتیجه این سه سیگنال با هم OR می شود. همچنین برای اینکه حالت اولیه سیستم به عنوان حالت جزیره‌ای به حساب نیاید، 0.2 ثانیه اول راه اندازی سیستم را چشم پوشی می کنیم. سپس از یک شمارنده برای جلوگیری از قطعی های بی مورد (به ازاء نوسانات سیستم) استفاده کرده تا به ازاء ۴ بار فرمان قطع، حالت جزیره ای اعلام شود. برای حالاتی که تغییرات فرکانس یا ولتاژ نوسانی نیستند و اصطلاحاً Zero Crossing ندارند، حفاظتی به موازات حفاظت قبلی طراحی و در شکل (۳) به طور کامل آورده شده است.

۴- الگوریتم حفاظتی در شرایط بهره برداری جزیره‌ای

در حال بهره برداری جزیره‌ای بارهای سیستم بایستی در مقابل تمامی حالت های تغییر غیر عادی ولتاژ و فرکانس حفاظت شوند. مادامی که فرکانس سیستم در حالت جزیره ای در 60 Hz ثابت نگه داشته می شود، ولتاژ سیستم برای تعیین شرایط غیرعادی اندازه گیری می شود. اگر ولتاژ اندازه گیری شده در مدت زمان بیش از 300 ms از حدود استاندارد تجاوز کند، فرمان قطع برای تولید پراکنده صادر خواهد شد. واحد تاخیر زمانی در این قسمت برای اجتناب از قطع سیستم به ازاء نوسانات در هنگام تغییر شرایط کاری از حالت جزیره‌ای به حالت متصل به شبکه در نظر گرفته شده است.

۵- بلوک سنکرون ساز

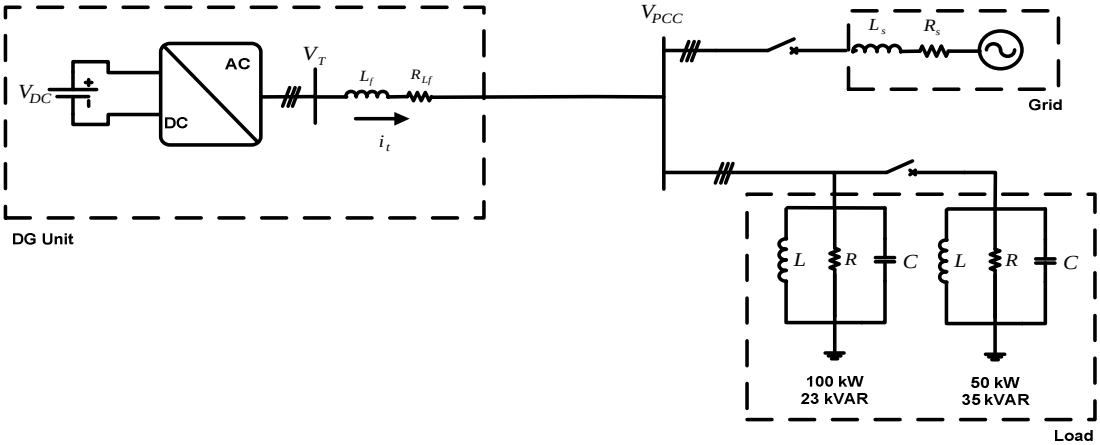
به منظور اتصال مجدد تولید پراکنده به شبکه بالا دست، هردو سیستم یعنی تولید پراکنده و شبکه باید سنکرون باشند. کنترل کننده پیشنهادی شامل حلقه های کنترلی می باشد که مسئولیت کنترل اختلاف زاویه فاز و دامنه ولتاژ بین تولید پراکنده و سمت شبکه را دارا می باشند. دو حلقه کنترلی به محض تشخیص جزیره و تجاوز دامنه ولتاژ شبکه بالادست از حد آستانه فعال می شوند (کلید های S1 و S4 به شاخه پایینی خود متصل می شوند). دامنه ولتاژ سمت تولید پراکنده به نحوی کنترل می شود که برابر سمت شبکه گردد. اختلاف فاز بین شبکه و تولید پراکنده محاسبه شده و سیگنال خطا از کنترل کننده PI عبور می کند. سپس خروجی کنترل کننده به فاز اینورتر افزوده می شود. در ادامه دامنه و فاز سیگنال مدولاسیون مشخص می شوند و زمانی که خطای اختلاف فاز و اختلاف ولتاژ به مقدار مجاز برسد، تولید پراکنده مجدد به شبکه بالادست متصل می گردد. در لحظه اتصال مجدد تمامی کلید ها به حالت اول برگشته و شرایط کاری به حالت نرمال باز می گردد.

۶- سیستم مورد مطالعه

در این قسمت روش کنترلی پیشنهادی بر روی سیستم نشان داده شده در شکل (۴) پیاده و شبیه سازی شده است. سیستم مورد مطالعه از ۲ بار و شبکه بالادست که با ولتاژ معادل و امپدانس مدل شده، تشکیل شده است. همچنین تولید پراکنده که به کنترل کننده پیشنهاد شده در شکل (۱) مجهز می باشد، در نقطه PCC به سیستم متصل می باشد. در سیستم نمونه شکل (۴)، بار اول با اندازه 100 kW و 23 kVAR به عنوان بار حساس و بار دیگر با اندازه 50 kW و 35 kVAR به عنوان بار عادی یا غیر حساس در نظر گرفته شده و توان نامی خروجی تولید پراکنده 100 kW می باشد (پارامتر های سیستم در جدول (۱) آورده شده است). حالت های نمونه زیر برروی سیستم مورد مطالعه برای ارزیابی صحت عملکرد روش کنترلی پیشنهادی انجام می شود:

۱. حالت متصل به شبکه
۲. بهره برداری جزیره ای با اضافه بار
۳. بهره برداری جزیره‌ای و بازگشت شبکه

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.8- No.2- Fall & Winter 2011
[Downloaded from jiaeee.com on 2025-11-16]



شکل (۴): سیستم مورد مطالعه

جدول (۱): پارامترهای سیستم، تولید پراکنده و بار

DG Parameters	
DG Output Active power	100 kW
DG Rated kVA	120 kVA
Switching Frequency	8000 Hz
Input DC Voltage	900 V
Voltage (Line to Line)	480V
Frequency	60 Hz
Grid Parameters	
Grid Resistance	0.02 Ω
Grid Inductance	0.3056 mH
Filter Inductance	2.1 mH
Controller Parameters	
Grid Connected Mode	Kp = 2, Ki = 50, For both PI
Island Mode	Kp = 3, Ki = 40
Phase angle Synch. Block	Kp = 1, Ki = 0.01
Load Parameters	
100 kW, 23 kVAR Load	R1=2.304 Ω, L1= 0.02657 H
50 kW, 35 kVAR Load	R2=4.608 Ω, L2= 0.017461 H

۷- نتایج شبیه سازی

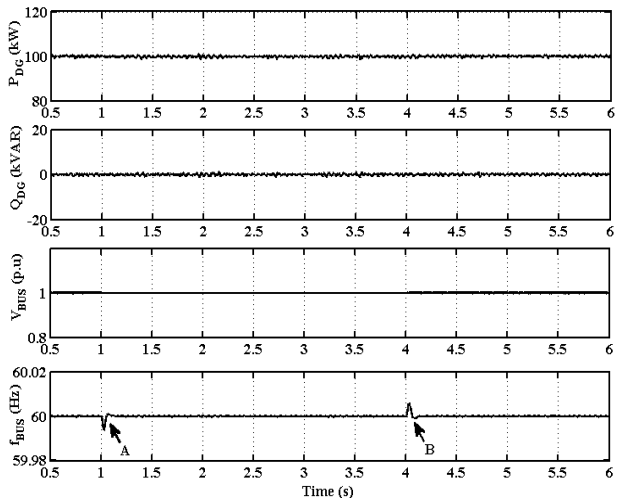
با توجه به اینکه بار سیستم مورد مطالعه توان راکتیو جذب می کند و تولید پراکنده موظف به تأمین این توان راکتیو در حالت بهره برداری جزیره‌ای می باشد، در نتیجه اختلاف بوجود آمده در توان راکتیو (Q) با توجه به رابطه (۸) فرکانس سیستم را تغییر داده و پدیده جزیره‌ای به راحتی قابل تشخیص می باشد.

$$Q = 3\left(\frac{V_{ph}^{2}}{2\pi fL} - V_{ph}^{2}\, 2\pi fC\right) \qquad (۸)$$

۷-۱- متصل به شبکه

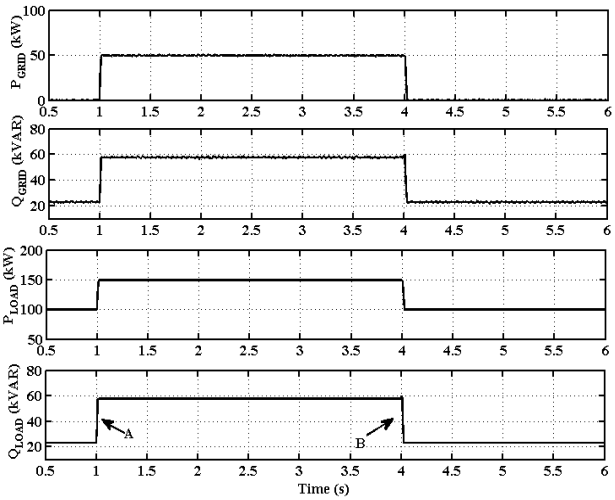
در این قسمت توانایی تولید پراکنده در شرایط نرمال و متصل به شبکه بررسی می شود. برای این منظور، بار 50 kW و 23kVAR در زمان t = 1 ثانیه (نقطه A) به سیستم وارد و در زمان t = 4 ثانیه (نقطه B) خارج می شود. در این زمان همانطور که در شکل (۵) و (۶) مشاهده می شود، تولید پراکنده توان نامی 100 kW را بطور پیوسته و بدون وقفه به بار تحویل می دهد.

در این حالت توان راکتیو خروجی تولید پراکنده در صفر ثابت نگه داشته می شود تا در ضریب توان واحد کار کند. از طرفی شبکه، مابقی توان اکتیو بار را که تولید پراکنده قادر به تأمین آن نمی باشد و تمامی توان راکتیو طلب شده از سوی بار را تغذیه می نماید. در شکل (۵) می توان دید که ولتاژ و فرکانس تغییر چندانی نکرده و در محدوده تغییرات مجاز باقی می مانند و مقادیر ضربه ظاهر شده در ولتاژ و فرکانس توانایی ایجاد سیگنال قطع از سوی الگوریتم حفاظتی شرایط متصل به شبکه را ندارند.



شکل (۵): ارزیابی تولید پراکنده در زمان بهره برداری نرمال شبکه

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-11-16]

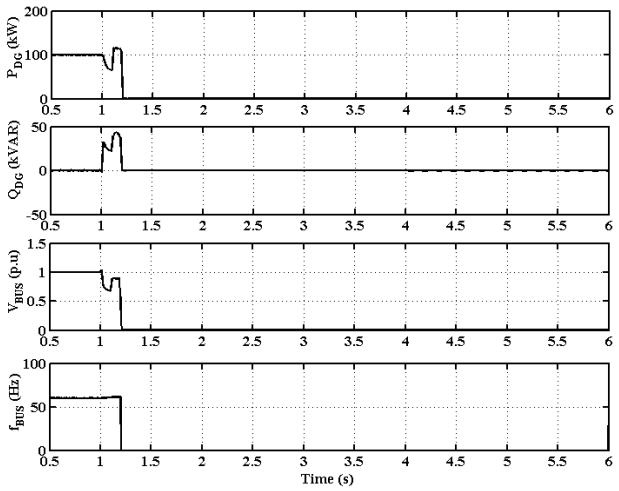


شکل (۶): شرایط شبکه و بار در زمان بهره برداری نرمال شبکه

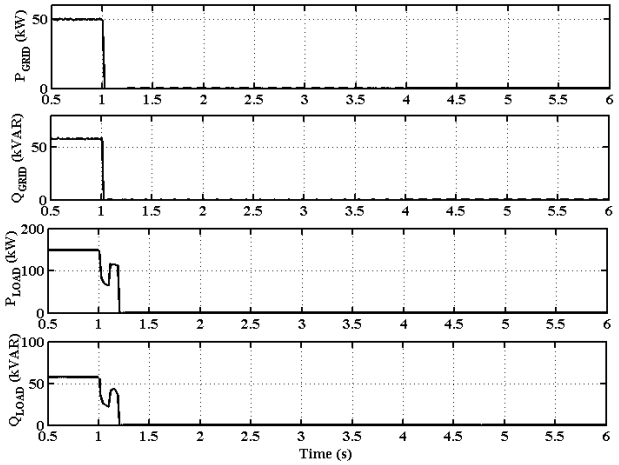
۷-۲- بهره‌برداری جزیره‌ای با اضافه بار

در این قسمت توانایی تولید پراکنده در شرایط متصل به شبکه و الگوریتم تشخیص جزیره‌ای که در سیستم کنترلی پیشنهادی به کار رفته بررسی می شود. هر دو بار نشان داده شده در شکل (۴) از ابتدای شبیه سازی به سیستم متصل بوده و تا بعد از ایجاد جزیره در سیستم باقی می مانند. همچنین شبکه در زمان $t = 1$ ثانیه جدا شده و تولید پراکنده با مجموع بار 150 kW و 58 kVAR در مدار باقی خواهد ماند. در این حالت به دلیل اینکه کنترل کننده جریانی حتی در زمان جزیره ای در سیستم کنترل تولید پراکنده باقی می ماند، ولتاژ و فرکانس مطابق شکل (۷) و (۸) تغییراتی خواهند کرد. بعد از تغییر وضعیت کنترل کننده، سیستم حفاظتی حالت غیر نرمال در تغییرات ولتاژ و فرکانس مولد را احساس کرده و همانطور که در در شکل (۹) دیده می شود، بعد از گذشت حدود 100 ms از زمان جزیره ای شدن سیگنال تغییر وضعیت به تولید پراکنده صادر می شود.

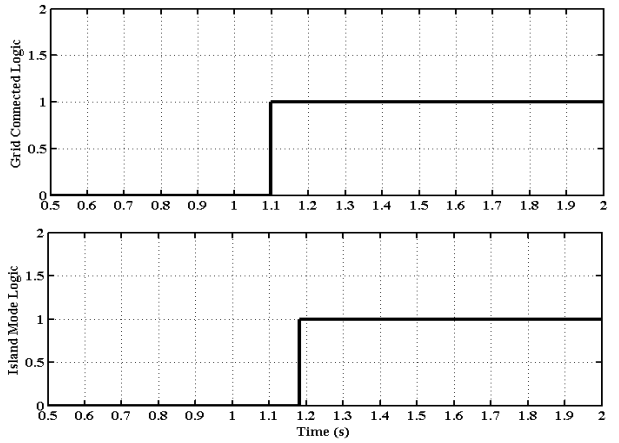
بعد از ارسال سیگنال توسط سیستم حفاظت جزیره ای در زمان اتصال به شبکه، استراتژی کنترلی سیستم تغییر کرده و کنترل کننده تولید پراکنده به حالت بهره برداری جزیره ای تغییر وضعیت می دهد. سپس کنترل کننده حالت بهره برداری جزیره ای تلاش زیادی برای حفظ ولتاژ و فرکانس می کند ولی به دلیل وجود اضافه بار موجود در سیستم (50kW)، ولتاژ به تغییرات خود ادامه می دهد. با توجه به اینکه جزیره با بار مضاعف به کار خود ادامه می دهد و ولتاژ دائماً در تغییر می باشد، با نگاهی به شکل (۷)، دیده می شود که فرکانس سیستم در نزدیکی 60Hz باقی می ماند. در این شرایط مدار حفاظت در زمان بهره برداری از جزیره، شرایط غیر نرمال در ولتاژ و فرکانس را احساس کرده و سیگنال قطع را در کمتر از 250 ms برای تولید پراکنده ارسال می‌کند.



شکل (۷): ارزیابی تولید پراکنده در زمان بهره برداری شبکه با اضافه بار



شکل (۸): شرایط شبکه و بار در زمان بهره برداری شبکه با اضافه بار



شکل (۹): خروجی الگوریتم های حفاظتی

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.8- No.2- Fall & Winter 2011

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-11-16]

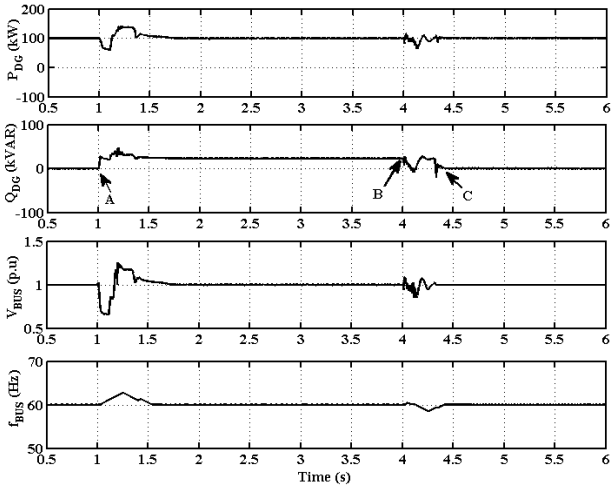
۷-۳- بهره‌برداری جزیره ای امن و بازگشت شبکه

در این قسمت توانایی کنترل کننده پیشنهادی برای تولید پراکنده بطور کلی مورد ارزیابی قرار می گیرد. به طور مشابه در قسمت های قبل، شبکه در زمان t = 1 ثانیه جدا شده و تولید پراکنده با مجموع بار 150 kW و 58 kVAR در مدار باقی می ماند. همانطور که در شکل های (۱۰) و (۱۱) مشاهده می شود، قبل از قطع شبکه، تولید پراکنده توان 100 kW را با توان راکتیو صفر به شبکه تحویل می دهد. همچنین بلوک سنکرون ساز نیز در زمان بازگشت شبکه بالا دست فعال شده و شبکه را (شکل (۱۱و ۱۲)) به سیستم مجدداً متصل می نماید.

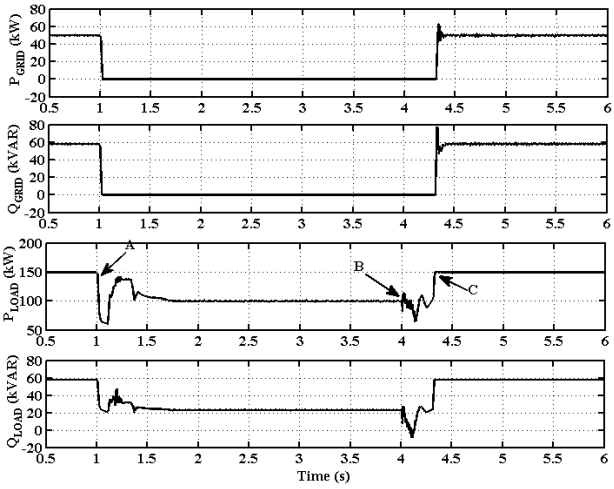
بعد از خروج شبکه ولتاژ و فرکانس به دلیل وجود اضافه بار در مدار، شروع به نوسان می کنند و الگوریتم حفاظتی حالت متصل به شبکه وضعیت غیر نرمال را ثبت می کند. در این شرایط، بعد از 100 ms ، در مرحله اول الگوریتم حفاظتی سیگنال قطع بار غیر ضروری (50 kW and 35 kVAR) و تغییر استراتژی کنترلی تولید پراکنده در نقطه A در شکل (۱۰) ارسال می کند. با توجه به شرایط فوق الذکر، تولید پراکنده به صورت ایمن در حالت جزیره‌ای بهره برداری می شود و توان اکتیو و راکتیو مورد نیاز بار را تأمین می کند و همچنین ولتاژ و فرکانس مجموعه در مقادیر استاندارد خود باقی می مانند. در زمان t = 4 ثانیه که شبکه بالادست آماده بازیابی می‌باشد، بلوک کنترلی سنکرون ساز پیشنهادی، مقادیر دامنه و فاز ولتاژ طرف تولید پراکنده و شبکه را برابر می نماید. همانطور که در شکل (۱۰) مشاهده می شود، اختلاف بین دامنه و فاز ولتاژ در سمت تولید پراکنده و شبکه در (نقطه C) به نزدیکی صفر می رسد و تولید پراکنده در زمان حدود t = 4.4 به شبکه متصل می شود. در این زمان، سیستم کنترلی به حالت اولیه یعنی مود متصل به شبکه تغییر وضعیت داده و بلوک سنکرون ساز غیر فعال می گردد. تولید پراکنده مجدداً در ضریب توان واحد کار کرده و تنها توان اکتیو بار را تغذیه می نماید.

۸- نتیجه گیری

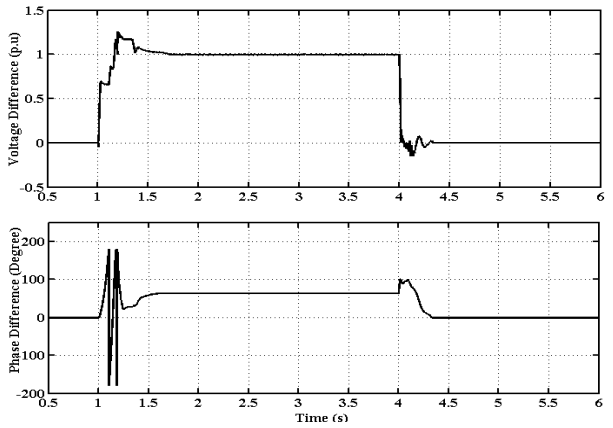
در این مقاله به معرفی روش کنترلی جدید بهره برداری جزیره ای در تولیدات پراکنده مبتنی بر اینورتر پرداخته شد. علاوه بر کنترل ولتاژ و فرکانس در هردو شرایط متصل به شبکه و بهره‌برداری جزیره‌ای، الگوریتمی جهت تشخیص پدیده جزیره ای مبتنی بر رله ROCOF نیز ارائه شد. همچنین حفاظت های بار در زمان متصل به شبکه و بهره-برداری جزیره‌ای به طور کامل در نظر گرفته شده است. الگوریتم ارائه شده به بلوک سنکرون کننده نیز مجهز بوده که در زمان بازگشت مجدد شبکه، قادر به اتصال مجدد شبکه بالادست به تولید پراکنده می باشد و نتایج شبیه سازی بدست آمده، بیانگر امنیت و تطبیق پذیری روش کنترلی ارائه شده می باشد. روش کنترلی مذکور تداخلی با کارکرد ادوات رگولاسیون ولتاژ در شبکه نخواهد داشت و مزیت اصلی روش فوق سهولت پیاده سازی آن بر روی تولیدات پراکنده مبتنی بر اینورتر می باشد.



شکل (۱۰): ارزیابی تولید پراکنده در زمان بهره برداری جزیره‌ای امن



شکل (۱۱): شرایط شبکه و بار در زمان بهره برداری جزیره‌ای امن



شکل (۱۲): اختلاف دامنه و فاز ولتاژ بین شبکه و سمت تولید پراکنده

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-11-16]

مراجع

[۱] مهدی معلم، امیر فرخ پیام، حسین شیروانی، محمد کیوانفرد، بهزاد میرزائیان دهکردی، "یک روش کارآمد برای تخمین حالت مولفه اصلی و هارمونیکی در شبکه های توزیع شعاعی" مجله انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران، سال هفتم، شماره اول، بهار و تابستان ۸۹

[2] K. Nigm, Y. Hegazy, "Intentional Islanding of Distributed Generation for Reliability Enhancement," *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 208 – 213 Oct, 2003.

[3] F .Pilo, G. Celli, "Improve of Reliability in Active Networks With Intentional Islanding ", *IEEE International Conference on Electrical Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies*, pp. 474 – 479, April, 2004.

[4] IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems, *IEEE Standard* 929-2000, Apr, 2000.

[5] IEEE Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems, *IEEE Standard* 1547-2003, Jul, 2003.

[6] S. Barsali, M. Ceraolo, P. Pelacchi, D. Poli, "Control Technique of Dispersed Generators to Improve the Continuity of Electricity Supply", *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 789 – 794, Jan, 2002.

[7] J. Liang, T. C. Green, G Weiss, Q. Zhong, "Hybrid Control of Multiple Inverters in an Islanded Mode Distributed System", *IEEE 34th Annual Conference on Power Electronics Specialist*, pp. 61 – 66, June 2003.

[8] M. Marie, E. F. El-Saadany, M. Salma, "A Novel Control Algorithm for the DG Interface to Mitigate Power Quality Problems", *IEEE Transactions on Power delivery*, Vol. 19, no, 3. July, 2004.

[9] H. Zeineldin, M. I. Marie, E. El-Saadany, M. Salma, "Safe Controlled Islanding of Inverter Based Distributed Generation", *IEEE Power Engineering Specialist Conference* (PESC04), June, 2004.

[10] Y. Li, D.M. Vilathgamuwa, P. loh, "Design, Analysis and Real-Time Testing of Controller for Multibus Microgrid Systems", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 19, pp. 1195 – 1204. Sep, 2004.

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-11-16]

Introducing a New Method for Operation and Islanding Detection of Inverter-Based Distributed Generation

H. Vahedi[1] R. Noroozian[2] A. Jalilvand[3] G. B. Gharehpetian[4]

1- MSc, Department of Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering,
Zanjan University, Zanjan, Iran
h_vahedi@znu.ac.ir

2- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering,
Zanjan University, Zanjan, Iran
Noroozian@znu.ac.ir

3-Associated Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering,
Zanjan University, Zanjan, Iran
ajalilvand@znu.ac.ir

4- Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering,
Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
grptian@aut.ac.ir

Abstract:

This article is introducing a new controlling scheme for islanding operating of inverter-based distributed generations. That in this method load protection at the time of connection to the network and islanding operation is completely intended. Moreover, the islanding detection algorithm which is based on ROCOF relaying, for detecting islanding phenomenon is provided. The algorithm is also equipped with synchronization block that at the time of network retrieval would be able to reconnect the upper network to the distributed generation. It is necessary to mention that all the simulations and tests are carried out in the MATLAB / Simulink environment. Provided method has security and flexibility and will have no interference with operation of voltage regulation instruments in the distribution network.

Keywords: Distributed Generation, Islanding, ROCOF, Inverter, Operation, Voltage Protection.

Submission date: 30 Jan., 2011

Acceptance date: 14 Oct., 2011

Corresponding author: R. Noroozian

Corresponding author's address: Elec. Eng. Dep., Zanjan University, Zanjan, Iran.

[Downloaded from jiaeee.com on 2025-11-16]