

بررسی عوامل تأثیرگذار در روش‌های تشخیص حالت جزیره‌ای مبتنی بر بازخورد مثبت و لتاژ بر روی پایداری سیکنال کوچک منابع تولید پراکنده اینورتی

فرید کربلایی^۱، سید مصطفی عباسی^۲، رضا قندهاری^۳

چکیده

یکی از مسائل مهم در به کارگیری منابع تولید پراکنده، تشخیص سریع کارکرد جزیره‌ای آنها است. اعمال بازخورد مثبت در روش‌های تشخیص حالت جزیره‌ای با این هدف انجام می‌شود که منابع تولید پراکنده در هنگام وقوع حالت جزیره‌ای، ناپایدار شوند. با این ناپایداری، متغیرهای تحت اندازه‌گیری (ولتاژ یا فرکانس) به سرعت از محدوده مجاز خارج می‌شوند و رله‌های حفاظتی به راحتی حالت جزیره‌ای را تشخیص می‌دهند. اما اعمال بازخورد مثبت می‌تواند در حالت وصل به شبکه نیز موجب ناپایداری ناخواسته گردد. با توجه به این که تا کنون مطالعه اندکی در این زمینه انجام شده است، این مقاله به بررسی تأثیر اعمال بازخورد مثبت ولتاژ بر روی پایداری منابع تولید پراکنده در هنگام وصل به شبکه می‌پردازد. در این بررسی، تأثیر پارامترهای مختلف نظیر شیوه کنترل مولد (توان ثابت یا جریان ثابت)، مکان مولد و میزان بار محلی آن در نظر گرفته می‌شود.

کلید واژه

تولید پراکنده، تشخیص جزیره، بازخورد مثبت، پایداری

مقدمه

استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به لحاظ روند رو به کاهش سوخت‌های فسیلی و اثرات مخرب آنها بر محیط زیست، در چند دهه اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در این میان کاربرد انرژی فتولتائیک در سال‌های اخیر رشد قابل ملاحظه‌ای داشته است. اگرچه ظرفیت تولید برق فتولتائیک کمتر از سایر انواع انرژی‌های تجدیدپذیر است و تا پایان سال ۲۰۱۲ در جایگاه سوم بعد از انرژی بادی و آبی قرار دارد [۱]، ولی با توجه به رشد سریع این صنعت و کاهش قیمت آن در آینده و کارکرد طولانی مدت آنها بدون نیاز به مخارج نگهداری بالا، این انرژی درصد قابل توجهی از انرژی الکتریکی بشر را در سال‌های آینده تأمین خواهد کرد.

سیستم‌های فتولتائیک به دو صورت منفرد^۴ و متصل به شبکه^۵ مورد استفاده قرار می‌گیرند. کاربرد سیستم‌های منفرد به علت

صرفه اقتصادی در نقاط دور از شبکه قدرت پیشینه طولانی‌تری داشته و از سال ۱۹۸۲ میلادی در کشور آغاز شده است [۲]. کاربرد سیستم‌های متصل به شبکه به عنوان یکی از منابع تولید پراکنده^۶ از دهه ۱۹۹۰ میلادی آغاز شده و رو به گسترش است. قسمت اعظم انرژی فتولتائیک به صورت سیستم‌های متصل به شبکه مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر طبق مرجع [۳] در بیست و سه کشور عضو IEA^۷، اساساً ۸۹/۵ GW سیستم‌های فتولتائیک نصب شده از نوع سیستم‌های متصل به شبکه هستند. در برخی کشورها مانند کانادا و پرتغال ۹۹٪ از سیستم‌های نصب شده از نوع متصل به شبکه می‌باشند و در استرالیا سهم این نوع سیستم‌ها ۹۵٪ است [۴].

یکی از جنبه‌های چالشی طراحی سیستم‌های الکتریکی در حضور منابع تولید پراکنده اینورتی مانند منابع فتولتائیک و پیل‌های سوختی، فراهم آوردن حفاظت ضدجزیره‌ای برای این منابع است [۵]-[۶]. این حفاظت مولد را قادر می‌سازد تا در هنگام وقوع حالت جزیره‌ای، خود را از شبکه توزیع جدا کند.

جزیره‌ای شدن ناخواسته عواقب سوئی مانند اختلال در کنترل ولتاژ و فرکانس، افت شدید کیفیت توان، خطرات جانی برای پرسنل تعمیر خط، احتمال کوپل شدن دو سیستم غیر سنکرون

^۱ استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی،

F_Karbalaee@srttu.edu

^۲ کارشناسی ارشد برق - قدرت، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

^۳ استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

^۴ Stand alone

^۵ Grid Connected

^۶ Distributed Generation
^۷ International Energy Agency

تاریخ دریافت: ۱۸ خرداد ۱۳۹۲ تاریخ پذیرش: ۳۰ دی ۱۳۹۲

بازخورد مثبت ولتاژی مد نظر قرار گرفته است. البته در [۱۴] ضمن محاسبه محدوده بهره بازخورد مثبت ولتاژی به مسئله پایداری نیز اشاره شده است اما عوامل تأثیرگذار مورد بررسی قرار نگرفته اند. در مرجع [۱۵] نیز پایداری ولتاژ شین متصل به منبع تولید پراکنده هنگام اعمال بازخورد مثبت ولتاژی به صورت بسیار مختصر مورد مطالعه قرار می گیرد.

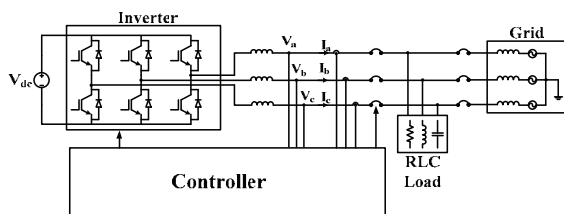
در ادامه، تأثیر پارامترهای مختلف نظیر شیوه کنترلی مولد (توان ثابت یا جریان ثابت)، مکان مولد و بار محلی آن بر پایداری سیگنال کوچک مورد مطالعه قرار گرفته است. شبیه سازی ها با نوشتن معادلات دیفرانسیل و جبری منابع تولید پراکنده و شبکه و سپس حل آنها با استفاده از نرم افزار MATLAB انجام می شود. ضمن این که مقادیر ویژه ماتریس حالت سیستم نیز محاسبه شده اند که مقادیر آنها با پاسخ های زمانی مطابقت دارد.

مدل سازی مولد تولید پراکنده اینورتری متصل به شبکه

در این بخش انواع روش های مدل کردن منابع تولید پراکنده اینورتری و شیوه های کنترل آنها مورد بحث قرار می گیرد. به علاوه به منظور انجام شبیه سازی باید مدل شبکه و بار نیز آورده شود.

مدل کلیدی

شکل ۱ یک مولد تولید پراکنده اینورتری را همراه با بار امپدانس ثابت و شبکه نشان می دهد که اینورتر در آن به صورت مدل کلیدی آمده است. برای تجهیزات کلید زنی اینورتر می توان از IGBT استفاده کرد. همچنین می توان از کلیدهای قطع و وصل ایده آل به جای IGBT در مدل سازی استفاده کرد که نشان دهنده وضعیت کلیدزنی گسسته برای اینورتر هستند. مدل کلیدی نه تنها اعوجاج ولتاژ و جریان را نشان می دهد بلکه زمان تأخیر IGBT ها و مدار تولید سیگنال و ... را نیز شامل می - شود [۵].



شکل ۱- مدل کلیدی مولد تولید پراکنده اینورتری همراه با بار RLC و شبکه

مدل متوسط

در استفاده از مدل کلیدی دو محدودیت وجود دارد. یکی این که مدت زمان لازم برای شبیه سازی زیاد است. مثلاً برای چند ثانیه

و در نهایت اختلال در عملکرد سیستم های باز- بست را به دنبال دارد و باید به موقع تشخیص داده شده و رفع شود [۷]. از آنجا که تأخیر مکانیزم باز- بست تنها بازه زمانی موجود برای تشخیص است، هر روشی که برای تشخیص به کار گرفته می - شود باید دارای توانایی تشخیص جزیره در این بازه زمانی باشد. استانداردهای UL ۱۷۴۱ ، IEEE ۱۵۷۴ ، IEC ۶۲۱۱۶ و استاندارد ۱-۱-۱۲۶-۰ DIN VDE حداکثر زمان مجاز برای تشخیص حالت جزیره ای را ۲ ثانیه تعیین کرده اند.

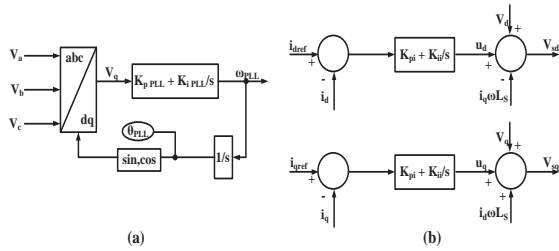
روش های زیادی برای تشخیص حالت جزیره ای در منابع تولید پراکنده اینورتری ارائه شده است. روش های غیرفعال با اندازه گیری و پایش برخی کمیت های سیستم مثل جریان، ولتاژ، فرکانس و مشتقات آنها به تشخیص عملکرد جزیره ای می پردازند. مثلاً در [۸] با توجه به اینکه شکل موج های گذرای جریان و ولتاژ در شبکه دارای آثار منحصر به فردی هستند که دلیل متناظر با حادثه به وجود آورنده خود را آشکار می کنند، ابتدا از سیگنال های گذرای ولتاژ و جریان تبدیل ویولت گسسته گرفته شده و چهار ویژگی از آنها استخراج می شود. سپس با استفاده از یک تکنیک دسته بندی هوشمند یعنی درخت تصمیم، از روی این داده ها مشخص می شود که حادثه پیش آمده رخداد جزیره ای است یا خیر. اما روش های تشخیص فعال مقاوم تر و مؤثرتر هستند [۹] چرا که روش های غیر فعال به دلیل ناحیه عدم تشخیص قابل توجه و خطا در تشخیص رخداد جزیره ای از حادثه غیر جزیره ای کم دقت هستند، لذا برای رفع این نقص روش های تشخیص فعال مورد توجه قرار می گیرند.

روش های فعال تشخیص جزیره ای شدن با ایجاد اختلال عمدی در فرکانس یا ولتاژ واحد تولید پراکنده و بررسی پاسخ سیستم به آن، جزیره شدن تولید پراکنده را ارزیابی می کنند. دسته ای از این روش ها از یک بازخورد مثبت برای بیشتر کردن اختلال به جهت تشخیص سریع تر حالت جزیره ای استفاده می کنند. در این حالت اگر مولد به شبکه متصل باشد انتظار می رود که این اختلالات میرا شوند، اما در حالت جزیره ای این اختلالات بزرگتر شده و منجر به فعال شدن حفاظت های فرکانسی و ولتاژی می - گردد [۱۰].

بنابراین، روش های بازخورد مثبت سعی در ناپایدار کردن مولد تولید پراکنده بدون توجه به این که حالت جزیره ای رخ داده است یا خیر، دارند. به دلیل امکان ایجاد ناپایداری ناخواسته توسط روش های بازخورد مثبت در حالت کار عادی سیستم، بررسی تأثیر آنها بر پایداری منابع تولید پراکنده دارای اهمیت بسزایی می باشد که در این مقاله به این موضوع پرداخته شده است.

با توجه به این که در کارهای انجام شده قبلی، بیشتر بازخورد فرکانسی مورد مطالعه بوده است [۱۱]- [۱۳]، در این مقاله

انجام می‌شود که جریان محوره‌های d و q خروجی اینورتر برابر مقادیر انتخاب شده برای i_{dref} و i_{qref} گردند.



شکل ۳- (a) ساختار داخلی PLL؛ (b) بلوک دیاگرام مدار کنترلی یک مولد تولید پراکنده با کنترل جریان ثابت

معادلات کنترل کننده جریان به صورت روابط (۳) تا (۶) می‌باشند:

$$u_d = L_s \frac{di_d}{dt} \quad (3)$$

$$u_q = L_s \frac{di_q}{dt} \quad (4)$$

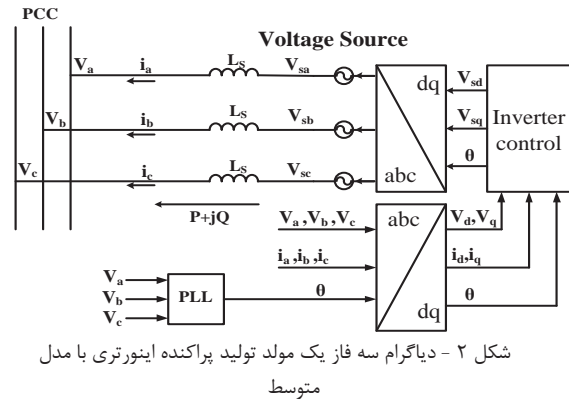
$$u_d = \left(K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s} \right) (i_{dref} - i_d) \quad (5)$$

$$u_q = \left(K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s} \right) (i_{qref} - i_q) \quad (6)$$

به منظور اعمال حفاظت ضد جزیره‌ای، فیدبک مثبت ولتاژ به صورت شکل (a) ۴ در مدار کنترلی مولد پیاده سازی می‌شود. ساختار درونی بلوک فیدبک مثبت ولتاژ (GEVS) در شکل (b) ۴ آمده است. رابطه ۷ بیانگر معادله حاکم بر آن می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش در ولتاژ، جریان اختلالی i_{dp} با توجه به مقدار این تغییر (ΔV_d) ساخته می‌شود و به جریان مرجع محور d (i_{dref}) اضافه می‌گردد. این موضوع باعث افزایش در توان اکتیو تولیدی می‌شود. با افزایش توان اکتیو به دلیل مشخصه بار، باز هم ولتاژ افزایش می‌یابد. این فرآیند به صورت مشابه برای حالتی که ولتاژ کاهش می‌یابد نیز برقرار می‌شود و منجر به کاهش مداوم ولتاژ می‌گردد. در نتیجه یک فیدبک مثبت برای ولتاژ ایجاد شده است. هنگامی که مولد تولید پراکنده به شبکه متصل است و حالت جزیره‌ای وجود ندارد، تغییر در توان اکتیو خروجی، تغییر چندانی در ولتاژ ایجاد نمی‌کند البته به شرطی که بهره K_v خیلی زیاد نباشد. کوچک بودن این بهره نیز مانعی در تشخیص سریع حالت جزیره‌ای خواهد بود که بیانگر اهمیت اندازه آن است. در ادامه به این موضوع پرداخته خواهد شد.

شبیه سازی بیش از ۱۰ دقیقه وقت مورد نیاز می‌باشد. به همین دلیل در فرآیند توسعه روش‌های جدید تشخیص جزیره‌ای شدن استفاده از مدل کلیدی ناکارآمد خواهد بود.

محدودیت دیگر عدم توانایی این مدل در اجرای آنالیز سیگنال کوچک است. این دو محدودیت را می‌توان با استفاده از مدل متوسط برطرف کرد [۵]. در سیستم شکل ۱ دو مجموعه نیاز به ارائه مدل متوسط دارند. یکی تجهیزات کلید زنی هستند که می‌توان آنها را با منبع ولتاژ یا جریان کنترل شده جایگزین نمود. دیگری بخش کنترل است که به جای استفاده از کدهای واقعی زبان‌های برنامه نویسی می‌توان از کنترل کننده‌های تناسبی (P) یا تناسبی-انتگرالی (PI) استفاده کرد. شکل ۲ مدل متوسط منبع تولید پراکنده اینورتری را به همراه کنترل مربوطه نشان می‌دهد. در این مدل اندازه، فرکانس و فاز منابع ولتاژ V_{sa} ، V_{sb} و V_{sc} به گونه‌ای تعیین می‌شوند که متغیرهای تحت کنترل (جریان یا توان خروجی منبع) در مقادیر مرجع قرار گیرند. در مراجع [۱۱] و [۱۲] نیز از مدل متوسط استفاده شده است.



شکل ۲- دیاگرام سه فاز یک مولد تولید پراکنده اینورتری با مدل متوسط

بلوک حلقه قفل کننده فاز (PLL) در شکل ۲ با دریافت ولتاژ نقطه مشترک با شبکه (PCC) به عنوان ورودی، فرکانس آن را اندازه می‌گیرد و با به کارگیری زاویه θ_{PLL} ، خروجی اینورتر را با ولتاژ شبکه سنکرون می‌کند. شکل (a) ۳ مدار داخلی بلوک PLL را نشان می‌دهد. روابط (۱) و (۲) نیز معادلات حاکم بر آن را بیان می‌کنند.

$$\omega_{PLL} = \left(K_{pPLL} + \frac{K_{iPLL}}{s} \right) v_q + \omega_0 \quad (1)$$

$$\omega_{PLL} = \frac{d\theta_{PLL}}{dt} = \frac{d}{dt} (\omega_0 t + \delta_{PLL}) \quad (2)$$

بخش کنترلی در شکل ۲ نیز یک کنترل کننده تناسبی-انتگرالی است که مدار داخلی بلوک آن برای شیوه کنترلی جریان ثابت به صورت شکل (b) ۳ می‌باشد. کنترل به گونه ای

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \cos(\delta_{PLL}) \\ -E \sin(\delta_{PLL}) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} = \frac{1}{R_L} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_L \frac{d}{dt} & -\omega_{PLL} L_L \\ \omega_{PLL} L_L & L_L \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ld} \\ i_{lq} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_L \frac{d}{dt} & -\omega_{PLL} C_L \\ \omega_{PLL} C_L & C_L \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} \quad (13)$$

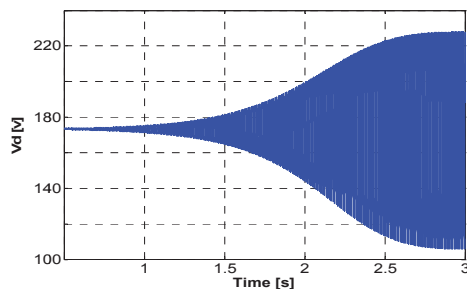
اکنون روابط مولد و شبکه تکمیل شده‌اند و می‌توان با حل آنها تأثیر حفاظت ضد جزیره‌ای را بر پایداری مولد بررسی کرد.

مدل خطی

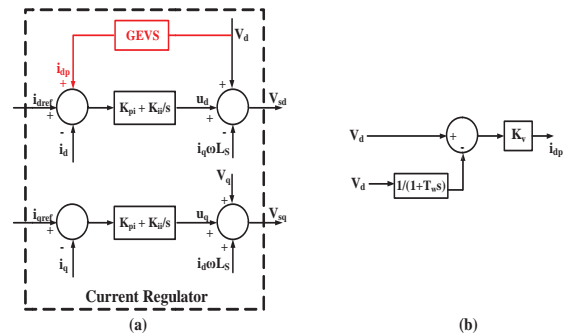
با خطی سازی روابط حاکم بر مدل متوسط حول نقطه کار، مدل خطی شده سیستم حاصل می‌شود [۱۱] - [۱۲]. مجموعه روابط خطی شده برای یک مولد تولید پراکنده اینورتری با کنترل جریان ثابت در بخش پیوست آمده است. از مقادیر ویژه ماتریس سیستم در روابط خطی شده نیز می‌توان پایداری مولد را ارزیابی کرد.

مقایسه نتایج مدل متوسط و خطی با یکدیگر

قبل از پرداختن به تأثیر پارامترهای مختلف در پایداری منبع تولید پراکنده، دقت نتایج حاصل از خطی سازی بررسی می‌گردد. این کار با مقایسه نتایج به دست آمده از حل روابط غیر خطی مدل متوسط (پاسخ زمانی) با مقادیر ویژه ماتریس حالت سیستم که از روابط خطی سازی شده به دست می‌آیند انجام می‌شود. اطلاعات مربوط به سیستم شکل ۵ که شبیه سازی بر روی آن انجام می‌شود در پیوست ۲ آورده شده است. شبیه سازی در حالتی که مولد به شبکه وصل است انجام می‌شود. با افزایش K_v مولد تولید پراکنده به سمت ناپایداری حرکت می‌کند. حل معادلات غیر خطی نشان می‌دهد که در $K_v = 0.51$ اولین ناپایداری اتفاق می‌افتد. در این شرایط تغییرات ولتاژ محور d مولد مطابق شکل ۷ است.



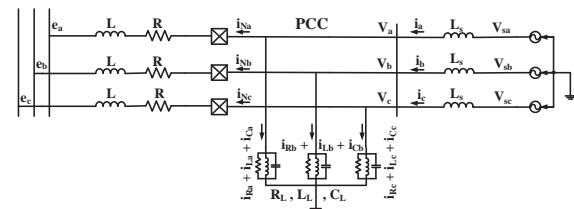
شکل ۷ - ولتاژ محور d مولد سیستم شکل ۵ به ازای $K_v = 0.51$



شکل ۴ - (a) پیاده سازی روش تشخیص با بازخورد مثبت ولتاژی در مدار کنترلی یک مولد تولید پراکنده اینورتری؛ (b) بلوک دیاگرام بازخورد مثبت ولتاژ

$$i_{dq} = K_v \left(1 - \frac{1}{1 + T_w s} \right) \cdot V_d \quad (7)$$

در نهایت برای تکمیل مجموعه روابط غیر خطی مدل متوسط باید روابط بار و شبکه نیز به روابط قبلی اضافه شوند. با در نظر گرفتن شکل ۵ و نوشتن KVL از نقطه PCC تا شبکه و همچنین KCL در نقطه PCC روابط (۸) و (۹) حاصل می‌شوند.

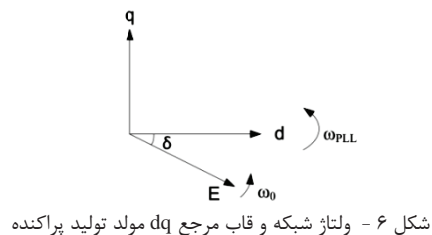


شکل ۵ - دیاگرام سه فاز یک مولد تولید پراکنده اینورتری با مدل متوسط متصل به شبکه و بار

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R + L \frac{d}{dt} & -\omega_{PLL} L \\ \omega_{PLL} L & R + L \frac{d}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Nd} \\ i_{Nq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} \quad (8)$$

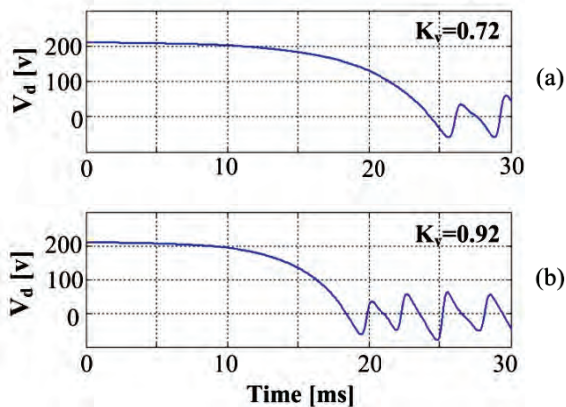
$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{ld} \\ i_{lq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{cd} \\ i_{cq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{Nd} \\ i_{Nq} \end{bmatrix} \quad (9)$$

با در نظر گرفتن شبکه به عنوان یک باس بی نهایت با زاویه صفر و دامنه ولتاژ E، اگر قاب dq مولد را به عنوان قاب مرجع در نظر بگیریم، آنگاه با توجه به شکل ۶، مقدار ولتاژ شبکه مطابق رابطه (۱۰) خواهد بود. برای بار RLC موازی نیز معادلات (۱۱) تا (۱۳) برقرار هستند.



شکل ۶ - ولتاژ شبکه و قاب مرجع dq مولد تولید پراکنده

می‌نماید. این مطلب در شکل ۹ با شبیه سازی زمانی سیستم شکل ۵ برای کنترل جریان ثابت نشان داده شده است. همان طور که دیده می‌شود به ازای $K_v=0.92$ ولتاژ زودتر از محدوده مجاز خارج می‌شود.



شکل ۹- تغییرات ولتاژ V_d مولد در هنگام جزیره‌ای شدن

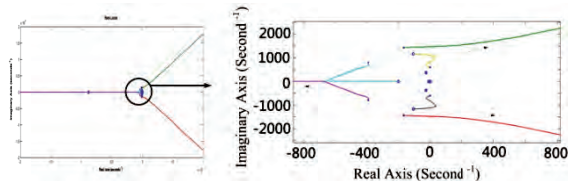
تأثیر تغییر پارامترهای مختلف بر پایداری یک مولد تولید پراکنده جریان ثابت

با دور شدن مکان مولد تولید پراکنده از ابتدای مسیر تغذیه و یا به عبارتی با افزایش دامنه امپدانس خط ارتباطی، مطابق شکل (a) حداکثر بهره بازخورد مثبت کاهش می‌یابد یعنی مولد تولید پراکنده پتانسیل ناپایدار شدنش زیاد می‌شود. دلیل این امر ضعیف شدن ارتباط الکتریکی مولد با شبکه به دلیل افزایش امپدانس می‌باشد.

حال برای بررسی تغییر در ساختار امپدانس ارتباطی مولد با شبکه، اندازه امپدانس خط ارتباطی را ثابت نگه داشته و نسبت X/R آن را تغییر می‌دهیم. شکل (b) ۱۰ بیانگر این مطلب است که هر چه مقاومت خطوط شبکه نسبت به راکتانس آنها بیشتر شود K_v بزرگتری می‌توان انتخاب کرد و مولد پایدارتر است. دلیل این موضوع افزایش ظرفیت انتقال توان خطوط به دلیل آزاد شدن بخشی از ظرفیت آنها می‌باشد که در اختیار انتقال توان راکتیو بوده است.

در شکل (c) ۱۰ مشاهده می‌شود که با افزایش مقاومت بار (کم شدن توان مصرفی بار)، K_v حداکثر کاهش می‌یابد. به عبارتی با کم شدن بار محلی مولد تولید پراکنده، باید توان تولیدی مولد به شبکه منتقل شود و چون خط انتقال نیز ظرفیت محدودی دارد پس در این شرایط امکان ناپایدار شدن مولد بیشتر می‌باشد. در حالتی که بار محلی بیشتر می‌شود (کاهش مقاومت بار)، مولد توان تولیدی خود را بدون این که امپدانس بر سر راه آن باشد به بار منتقل می‌کند. به همین دلیل در این وضعیت پایدارتر است.

محاسبه مقادیر ویژه ماتریس حالت سیستم به ازای مقادیر مختلف K_v نیز نتیجه مشابهی دارد. تعدادی از این مقادیر در $K_v = 0.52$ دارای قسمت حقیقی مثبت می‌شوند که بیانگر آغاز ناپایداری است. از این رو، مدل خطی می‌تواند برای مطالعه تأثیر پارامترهای مختلف بر پایداری مولد مورد استفاده قرار گیرد. شکل ۸ مکان هندسی مقادیر ویژه ماتریس حالت را نشان می‌دهد.



شکل ۸- مکان هندسی مقادیر ویژه ماتریس حالت با کنترل جریان ثابت برای مولد

بررسی تأثیر پارامترهای مختلف بر پایداری مولد

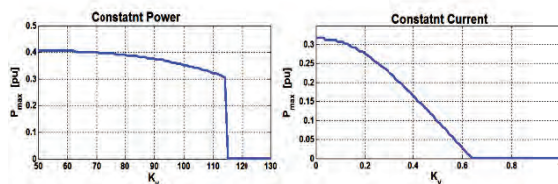
در این بخش تأثیر پارامترهای مختلف بر پایداری مولد تولید پراکنده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. پارامترهای مورد بررسی عبارتند از:

مکان مولد، نسبت X/R امپدانس خط ارتباطی مولد با شبکه، اندازه مقاومت بار (سطح بارگذاری)، ضریب کیفیت بار و شیوه کنترلی مولد تولید پراکنده.

به منظور انجام این مطالعه به ازای تغییر هر کدام از پارامترهای یاد شده، حداکثر بهره بازخورد مثبت به دست آورده می‌شود و تغییرات حداکثر مقدار K_v بر حسب تغییرات پارامتر مورد بررسی رسم می‌گردد. منظور از حداکثر بهره بازخورد مثبت، مقداری برای K_v است که به ازای آن سیستم پایدار است و بیشتر از آن مقدار، قطب‌ها وارد سمت راست صفحه مختلط می‌شوند و سیستم ناپایدار می‌گردد. هر چه حداکثر K_v بزرگتر باشد باشد به این معنی است که سیستم پایداری بیشتری داشته است که برای ناپایدار کردن آن به گین بزرگتری نیاز بوده است.

برای به دست آوردن حداکثر مقدار K_v در هر نقطه کاری سیستم، ابتدا مقادیر ویژه ماتریس حالت را با استفاده از روابط مدل خطی به ازای مقدار مشخصی از K_v که قطب‌های سیستم هستند به دست می‌آوریم، اگر تمام قطب‌ها در سمت چپ صفحه مختلط بودند سیستم پایدار است و مقدار K_v را یک پله افزایش می‌دهیم (پله‌های ۰/۱) و دوباره پایداری سیستم را به وسیله قطب‌ها بررسی می‌کنیم تا جایی که دیگر با افزایش یک پله K_v قطب‌ها وارد سمت راست صفحه مختلط شوند. این مقدار K_v به عنوان حداکثر بهره بازخورد مثبت در آن نقطه کاری ثبت می‌شود. حال همین کار برای نقطه کاری بعدی انجام می‌دهیم. شایان ذکر است که هرچه بهره بازخورد مثبت بالاتر باشد زمان تشخیص جزیره‌ای شدن کمتر می‌شود و حفاظت سریع‌تر عمل

تولید پراکنده را که به ازای بیشتر از آن مقدار، مولد پایداری سیگنال کوچک خود را از دست می‌دهد محاسبه کرد. شکل ۱۲ منحنی حداکثر توان تولیدی مولد را بر حسب گین K_v برای هر کدام از حالت‌های کنترلی نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود در حالت توان ثابت، حداکثر توان تولیدی مولد بیشتر از حالت جریان ثابت است و تا مقدار ۴/۰۶ KW امکان افزایش توان وجود دارد در حالی در وضعیت جریان ثابت این عدد KW ۳/۱۶ است. می‌توان مقایسه را به صورت دیگری نیز انجام داد. به ازای زمان تشخیص یکسان برای حالت جزیره‌ای، مثلاً ۱ s، در شیوه کنترلی توان ثابت باید تقریباً $K_v=80$ باشد. در این شرایط حداکثر توان تولیدی مولد ۳/۹ KW است. اما در شیوه کنترلی جریان ثابت، برای رسیدن به این زمان تشخیص، K_v باید تقریباً ۰/۲ باشد که در این حالت حداکثر توان تولیدی KW ۲/۷ است. بنابراین، می‌توان گفت کنترل توان ثابت در برابر تغییرات بهره بازخورد مثبت نسبت به کنترل جریان ثابت مقاوم تر است. دلیل آن را نیز می‌توان در وجود یک جفت کنترل کننده اضافه در شیوه توان ثابت دانست که i_{dref} و i_{qref} را کنترل می‌کنند.



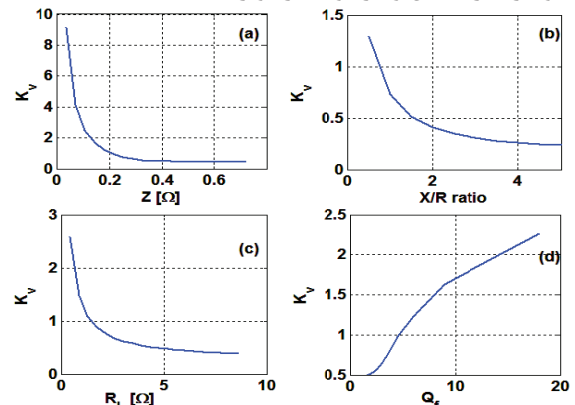
شکل ۱۲ - حداکثر توان قابل تولید مولد بر حسب K_v برای شیوه‌های کنترلی توان ثابت و جریان ثابت

نتیجه گیری

در این مقاله تأثیر اعمال بازخورد مثبت ولتاژ بر روی پایداری منابع تولید پراکنده در هنگام وصل به شبکه مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی پارامترهای مختلفی از جمله مکان مولد، نسبت X/R امپدانس خط ارتباطی مولد با شبکه، اندازه مقاومت بار (سطح بارگذاری)، ضریب کیفیت بار و شیوه کنترلی مولد در نظر گرفته شده است.

مشاهده شد که هر چه امپدانس خط ارتباطی زیادتر یا غیر اهمی‌تر باشد مولد بیشتر در معرض ناپایداری قرار می‌گیرد. همچنین هر چه بار محلی مولد کمتر شود شانس وقوع ناپایداری در حضور بازخورد مثبت ولتاژ بیشتر می‌شود. افزایش خاصیت سلفی بار نیز موجب افزایش احتمال ناپایداری می‌گردد. از بررسی تأثیر شیوه کنترلی مولد تولید پراکنده مشخص شد که مولدهای با کنترل توان ثابت در برابر افزایش بهره بازخورد مثبت ولتاژ، نسبت به مولدهای با کنترل جریان ثابت مقاوم تر بوده و به ازای گین های بزرگتری ناپایدار می‌شوند.

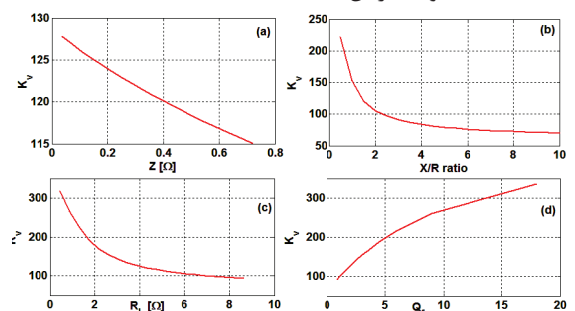
با افزایش ضریب کیفیت، خازن بار افزایش یافته و سلف بار کاهش می‌یابد. این تغییرات به صورتی است که همواره فرکانس تشدید بار برابر فرکانس نامی بماند (این مسئله جزو شرایط مدار تست جزیره‌ای شدن است [۱۶]-[۱۷]). همان طور که در شکل (d) مشخص است با زیاد شدن خازن، پایداری مولد نیز بیشتر می‌شود (K_v بزرگتری می‌توان انتخاب نمود). دلیل آن را می‌توان در تأمین توان راکتیو سلف بار و خط توسط خازن، و در نتیجه آزاد شدن ظرفیت خط ارتباطی دانست. ضمن این که خازن در جلوگیری از کاهش ولتاژ مولد نیز مؤثر است.



شکل ۱۰ - تغییرات K_v بر حسب تغییر پارامترهای مختلف برای یک مولد جریان ثابت؛ (a) تغییر مکان مولد، (b) تغییر نسبت X/R در امپدانس خط ارتباطی، (c) تغییر مقاومت بار، (d) تغییر ضریب کیفیت بار

بررسی تأثیر تغییر پارامترهای مختلف بر پایداری یک مولد تولید پراکنده توان ثابت

مشابه حالت جریان ثابت، چهار نمودار شکل ۱۰ برای حالت توان ثابت نیز آورده شده‌اند. مشاهده می‌شود که شکل ۱۱ نیز همان مفاهیم شکل ۱۰ را بیان می‌کند. یعنی تأثیر پارامترهای مختلف مشابه مولد جریان ثابت است.

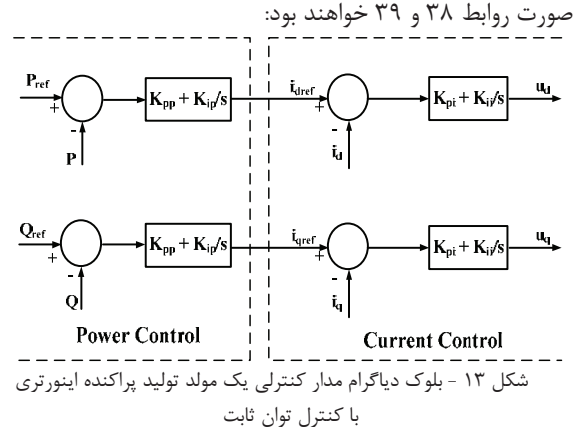


شکل ۱۱ - تغییرات K_v بر حسب تغییر پارامترهای مختلف برای یک مولد توان ثابت؛ (a) تغییر مکان مولد، (b) تغییر نسبت X/R در امپدانس خط ارتباطی، (c) تغییر مقاومت بار، (d) تغییر ضریب کیفیت بار

به منظور مقایسه بین شیوه‌های کنترلی توان ثابت و جریان ثابت می‌توان برای هر کدام از این حالت‌ها، حداکثر توان تولیدی مولد

کوچک مولد اظهار نظر کرد؛ بدین معنی که اگر یکی از قطب های سیستم (مقادیر ویژه ماتریس A) دارای قسمت حقیقی مثبت باشد، نقطه کار پایدار نبوده و مولد دچار ناپایداری می-گردد.

برای مولد با کنترل توان ثابت، دو رابطه جبری ۳۴ و ۳۵ و دو رابطه دیفرانسیلی ۳۶ و ۳۷ به مجموع روابط ۱۴ تا ۳۰ اضافه می-شود. در این حالت بردار متغیرهای حالت و بردار ورودی به صورت روابط ۳۸ و ۳۹ خواهند بود:



$$\Delta P = v_d \cdot \Delta i_d + i_d \cdot \Delta v_d + v_q \cdot \Delta i_q + i_q \cdot \Delta v_q \quad (34)$$

$$\Delta Q = v_d \cdot \Delta i_q + i_q \cdot \Delta v_d - v_q \cdot \Delta i_d - i_d \cdot \Delta v_q \quad (35)$$

$$p\Delta i_{dref} = K_{pp}p(\Delta P_{ref} - \Delta P) + K_{ip}(\Delta P_{ref} - \Delta P) \quad (36)$$

$$p\Delta i_{qref} = K_{pp}p(\Delta Q_{ref} - \Delta Q) + K_{ip}(\Delta Q_{ref} - \Delta Q) \quad (37)$$

$$\Delta x = [\Delta i_{Nd} \quad \Delta i_{Nq} \quad \Delta i_{Ld} \quad \Delta i_{Lq} \quad \Delta v_d \quad \Delta v_q \quad \Delta i_d \quad \Delta i_q \quad \Delta \omega_{PLL} \quad \Delta \delta_{PLL} \quad \Delta u_d \quad \Delta u_q \quad \Delta i_{dp} \quad \Delta i_{dref} \quad \Delta i_{qref}]^T \quad (38)$$

$$\Delta u = [\Delta P_{ref} \quad \Delta Q_{ref}]^T \quad (39)$$

همانطور که ملاحظه می-شود ΔP_{ref} و ΔQ_{ref} ورودی بوده و مقدار $p\Delta Q_{ref}$ و $p\Delta P_{ref}$ در روابط ۳۶ و ۳۷ صفر خواهند بود.

پیوست ۲

مشخصات سیستم شبیه سازی شده در شکل ۵

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
$E_{rms(ph-ph)}$	۲۰۸ V	R_L	۴/۳۲ Ω
K_{pi}	۰/۵	L_L	۶/۳۷ mH
K_{ii}	۵۰۰	C_L	۱/۱۱ mF
K_{pPLL}	۵۰	R	۰/۲ Ω
K_{iPLL}	۵۰۰	L	۰/۷۹۶ mH
K_{pp}	۰/۵	R_v	۰/۱۵ Ω
K_{ip}	۱۰۰	L_v	۰/۶۶۳ mH
T_w	۱۰	L_s	۱ mH
K_v (Constant Current)	۰/۵	f.	۶۰ Hz
i_{dref} (Constant Current)	۴۸/۰۸ A	P_{ref}	۱۰ KW
i_{qref} (Constant Current)	۰	Q_{ref}	۰
K_v (Constant Power)	۷۷		

از نتایج گفته شده می-توان در تحلیل و طراحی مولدهای تولید پراکنده مجهز به روش تشخیص با بازخورد مثبت ولتاژی استفاده کرد. همچنین با استفاده از مدل خطی ارائه شده می-توان حداکثر بهره بازخورد مثبت که کمترین زمان تشخیص و کمترین ناحیه عدم تشخیص را به دنبال دارد به سهولت پیدا کرد.

پیوست ۱

فرم خطی سازی شده روابط (۱) تا (۱۳) به شرح زیر است.

$$\Delta v_d = R\Delta i_{Nd} + Lp\Delta i_{Nd} - \omega \cdot L\Delta i_{Nq} - L\dot{i}_{Nq} \cdot \Delta \omega_{PLL} - E\sin\delta \cdot \Delta \delta_{PLL} \quad (14)$$

$$\Delta v_q = R\Delta i_{Nq} + Lp\Delta i_{Nq} + \omega \cdot L\Delta i_{Nd} + L\dot{i}_{Nd} \cdot \Delta \omega_{PLL} - E\cos\delta \cdot \Delta \delta_{PLL} \quad (15)$$

$$\Delta i_d = \Delta i_{Rd} + \Delta i_{Ld} + \Delta i_{Cd} + \Delta i_{Nd} \quad (16)$$

$$\Delta i_q = \Delta i_{Rq} + \Delta i_{Lq} + \Delta i_{Cq} + \Delta i_{Nq} \quad (17)$$

$$\Delta i_{Rd} = \frac{1}{R_L} \Delta v_d \quad (18)$$

$$\Delta i_{Rq} = \frac{1}{R_L} \Delta v_q \quad (19)$$

$$\Delta v_d = L_L p \Delta i_{Ld} - \omega \cdot L_L \Delta i_{Lq} - L_L \dot{i}_{Lq} \cdot \Delta \omega_{PLL} \quad (20)$$

$$\Delta v_q = L_L p \Delta i_{Lq} + \omega \cdot L_L \Delta i_{Ld} + L_L \dot{i}_{Ld} \cdot \Delta \omega_{PLL} \quad (21)$$

$$\Delta i_{Cd} = C_L p \Delta v_d - \omega \cdot C_L \Delta v_q - C_L v_q \cdot \Delta \omega_{PLL} \quad (22)$$

$$\Delta i_{Cq} = C_L p \Delta v_q + \omega \cdot C_L \Delta v_d + C_L v_d \cdot \Delta \omega_{PLL} \quad (23)$$

$$\Delta u_d = L_s p \Delta i_d \quad (24)$$

$$\Delta u_q = L_s p \Delta i_q \quad (25)$$

$$p\Delta u_d = K_{pi}p(\Delta i_{dref} + \Delta i_{dp} - \Delta i_d) + K_{ii}(\Delta i_{dref} + \Delta i_{dp} - \Delta i_d) \quad (26)$$

$$p\Delta u_q = K_{pi}p(\Delta i_{qref} - \Delta i_q) + K_{ii}(\Delta i_{qref} - \Delta i_q) \quad (27)$$

$$p\Delta \omega_{PLL} = K_{pPLL}p\Delta v_q + K_{iPLL}\Delta v_q \quad (28)$$

$$p\Delta \delta_{PLL} = \Delta \omega_{PLL} \quad (29)$$

$$p\Delta i_{dp} = K_v p \Delta v_d - \frac{1}{T_w} \Delta i_{dp} \quad (30)$$

در روابط ۱۴ تا ۳۰ اندیس ۰ بیانگر مقدار اندازه متغیر در نقطه کار ماندگار است. برای کنترل جریان ثابت، $p\Delta i_{dref}$ در رابطه ۲۶ و $p\Delta i_{qref}$ در رابطه ۲۷ صفر خواهند بود.

با جایگزینی روابط جبری ۱۶ تا ۱۹ در سایر معادلات، مجموعه روابط بالا را می-توان به فرم فضای حالت مطابق رابطه ۳۱ نوشت:

$$p\Delta x = A\Delta x + B\Delta u \quad (31)$$

در رابطه ۳۱، بردار متغیرهای حالت Δx و بردار ورودی است که به صورت زیر تعریف می-شوند:

$$\Delta x = [\Delta i_{Nd} \quad \Delta i_{Nq} \quad \Delta i_{Ld} \quad \Delta i_{Lq} \quad \Delta v_d \quad \Delta v_q \quad \Delta i_d \quad \Delta i_q \quad \Delta \omega_{PLL} \quad \Delta \delta_{PLL} \quad \Delta u_d \quad \Delta u_q \quad \Delta i_{dp}]^T \quad (32)$$

$$\Delta u = [\Delta i_{dref} \quad \Delta i_{qref}]^T \quad (33)$$

ماتریس A در رابطه ۳۱ ماتریس حالت سیستم است که با به دست آوردن مقادیر ویژه آن می-توان درباره پایداری سیگنال

December 2010, Vol. 25, No. 12, pp. 2941-2948.

- [10] H. H. Zeineldin, James L. Kirtley, Jr, "Performance of the OVP/UVF and OFP/UFV Method With Voltage and Frequency Dependent Loads" IEEE Transactions on Power Delivery, April 2009, Vol. 24, No. 2, pp. 772-778.
- [11] XiaoyuWang ,WalmirFreitas, "Impact of Positive-Feedback Anti-Islanding Methods on Small-Signal Stability of Inverter-Based Distributed Generation " IEEE Transactions on Energy Conversion, September 2008, Vol. 23, No. 3, pp. 923-931.
- [12] Xiaoyu Wang, Walmir Freitas, Venkata Dinavahi, Wilsun Xu, "Investigation of Positive Feedback Anti-Islanding Control for Multiple Inverter-Based Distributed Generators" IEEE Transactions on Power Systems, May 2009, Vol. 24, No. 2, pp. 785-795.
- [13] Seul-Ki Kim, Jin-Hong Jeon, Jong-Bo Ahn, Byongjun Lee, Sae-Hyuk Kwon, "Frequency-Shift Acceleration Control for Anti-Islanding of a Distributed-Generation Inverter " IEEE Transactions on Industrial Electronics, February 2010, Vol. 57, No. 2, pp. 494-504.
- [14] Seul-Ki Kim, Jin-Hong Jeon, Heung-Kwan Choi, Jong-Yul Kim, "Voltage Shift Acceleration Control for Anti-Islanding of Distributed Generation Inverters " IEEE Transactions on Power Delivery, October 2011, Vol. 26, No. 4, pp. 2223-2234.
- [15] Xiaoyu Wang, WalmirFreitas, "Influence of Voltage Positive Feedback Anti-Islanding Scheme on Inverter-Based Distributed Generator Stability" IEEE Transactions on Power Delivery, April 2009, Vol. 24, No. 2, pp. 972-973.
- [16] Inverters, Converters, and controllers for Use in Independent Power Systems, UL standard 1741, 2001.
- [17] IEEE Standard Conformance Test Procedures for Equipment Interconnecting Distributed Resources With Electric Power Systems, IEEE Std.1547.1-2005, 2005.
- [1] G. Masson, M. Latour, M. Reking, T. Theologitis and M. Papoutsis, "Global Market Outlook For PhotoVoltaics 2013-2017", European Photovoltaic Industry Association, May 2013.
- [2] M. S. Zabihi, E. A. Soleimani, S. Farhangi, "Photovoltaic Manufacturing, System Design and Application Trend in Iran," Elsevier Science, Renewable Energy, September 1998, Vol.15, No.1, pp. 496-501.
- [3] "Photovoltaic Power Systems Programme, A Snapshot of Global PV 1992-2012", International Energy Agency, May 2013, IEA-PVPS T1-22:2013.
- [4] "Photovoltaic Power Systems Programme, PVPS Annual Report 2012", International Energy Agency, April 2013.
- [5] Z. Ye, R. Walling, L. Garces, R. Zhou, L. Li, and T. Wang, "Study and development of anti-islanding control for grid-connected inverters," Nat.Renewable Energy Lab., Golden, CO, May 2004, Tech. Rep. NREL/SR-560-36243.
- [6] V. John, Z. Ye, and A. Kolwalkar, "Investigation of anti-islanding protection of power converter based distributed generators using frequency domain analysis," IEEE Trans. Power Electron., September 2004, vol. 19, no. 5, pp. 1177- 1183.
- [7] محسن حمزه، "بهبود حفاظت ضد جزیره‌ای شبکه‌های توزیع دارای منابع فتوولتاییک"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، شهریور ۱۳۸۷.
- [8] N. W. A. Lidula, A. D. Rajapakse, "A Pattern Recognition Approach for Detecting Power Islands Using Transient Signals—Part I: Design and Implementation" IEEE Transactions on Power Delivery, October 2010, Vol. 25, No. 4, pp. 3070-3077.
- [9] Pengwei Du, Zhihong Ye, Erick E. Aponte, J. Keith Nelson, Lingling Fan, "Positive-Feedback-Based Active Anti-Islanding Schemes for Inverter-Based Distributed Generators: Basic Principle, Design Guideline and Performance Analysis " IEEE Transactions on Power Electronics,