

ارائه یک روش جدید در جایابی بهینه منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع ایزوله با در نظر گرفتن مدهای کنترل ولتاژ و توان

علی کریمی^۱، دانشجوی دکتری؛ مجید نیری پور^۲، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی شیراز - شیراز - ایران - alikarimi.ep@gmail.com

۲- دانشکده مهندسی برق و الکترونیک - دانشگاه صنعتی شیراز - شیراز - ایران - nayeri@sutech.ac.ir

چکیده: با توجه به یکپارچگی و نفوذ منابع تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع، جایابی بهینه آن‌ها در ریزشبکه‌ها و شبکه‌های توزیع ایزوله بر اساس توابع هدفی مانند کاهش تلفات، بهبود ولتاژ شین‌ها و... صورت می‌گیرد. منابع تولید پراکنده با استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت به شبکه‌های فشار ضعیف متصل می‌گردند، به طوری که این مبدل‌ها در دو مد کنترل ولتاژ و توان کار می‌کنند. جایابی منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن مدهای کنترل ولتاژ و توان مبدل‌ها تأثیرات مثبتی بر شبکه‌های قدرت دارد. در این مقاله یک روش جدید به منظور جایابی مکان بهینه با افزودن واحدهای تولید پراکنده به شبکه توزیع ایزوله با در نظر گرفتن مد کنترل ولتاژ و توان با استفاده از توابع هدف کاهش تلفات، تحلیل حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو و میزان توان اکتیو در رسیدن ولتاژ به ۰/۹ پریونیت ارائه شده است. روش پیشنهادی بر روی شبکه توزیع استاندارد ۳۳ و ۱۳ شینه IEEE در حالت جزیره‌ای با استفاده از نرم‌افزار DigSilent شبیه‌سازی شده است.

واژه‌های کلیدی: جایابی منابع تولید پراکنده، حساسیت ولتاژ به توان اکتیو، مدهای کنترل توان و ولتاژ.

A new optimal Distribution Generations placement method in an islanded distribution networks considering voltage and power control modes

A. karimi¹, PhD Student; M. Nayeripour², Associate Professor

1- Department of Electrical Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran, Email: nayeri@sutech.ac.ir

2- Department of Electrical Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran, Email: alikarimi.ep@gmail.com

Abstract: Due to integration and penetration of Distributed Generations (DGs) in power distribution systems, an efficient method to locate different types of DGs in microgrids and isolated distribution networks took place with considering objectives such as power losses and improve the voltage profile. DGs are connected to low voltage networks by power electronic converters, as these converters operate in power control mode (PCM) or voltage control modes (VCM). DGs placement by considering PCM and VCM of converters has a positive effect on power networks. This paper presents a new method to find optimal placement by adding DG units to islanded distribution network with considering PCM and VCM by using Power loss, voltage sensitivity analysis and active power margin with considering voltage limitation as objective functions. The performance of the method by DigSilent software is applied on IEEE 13-bus and IEEE 33-bus distribution networks in islanded mode.

Keywords: distributed generation placement, voltage sensitivity analysis to active power, voltage and power control modes.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۱/۲۴

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۰۹

نام نویسنده مسئول: مجید نیری پور

نشانی نویسنده مسئول: ایران - شیراز - بلوار مدرس - دانشگاه صنعتی شیراز - دانشکده مهندسی برق و الکترونیک.

۱- مقدمه

در چند دهه اخیر با توجه به مشکلات موجود در نیروگاه‌های سوخت فسیلی، استفاده از انواع تولیدات پراکنده قابل توجه بسیاری از کشورهای دنیا قرار گرفته است. این تولیدکننده‌های توان، دارای ویژگی‌های منحصر به فردی مانند کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی، کاهش تلفات شبکه‌های توزیع برق، افزایش قابلیت اطمینان، بهبود پروفیل ولتاژ و به تعویق انداختن ساخت نیروگاه‌های جدید هستند. در سراسر دنیا متناسب با میزان توان نامی، سطح ولتاژ تولیدی و موارد دیگر، تعاریف مختلفی مختص هر کشور برای تولیدات پراکنده وجود دارد. در کاربرد منابع تولیدات پراکنده با توجه به عدم پیوستگی تولید و غیرهمزمانی در تولید و مصرف در شبکه، معمولاً نیاز به وسایل ذخیره‌سازی انرژی مانند باتری و ابرخازن می‌باشد. اتصال برخی از تولیدات پراکنده به شبکه شامل فتوولتائیک، سلول‌های سوختی، میکروتوربین، توربین‌های بادی و تعدادی از ماشین‌های احتراق داخلی از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت صورت می‌پذیرد. سیستم کنترل مبدل‌های منابع تولید پراکنده در دو مد کاری یعنی مدهای کنترل ولتاژ و کنترل توان کار می‌کند. منابع تولید پراکنده برای اتصال به ریزشبکه‌ها نیاز به مبدل‌های الکترونیک قدرت دارند که این مبدل‌ها در دو حالت کنترل ولتاژ و توان کار می‌کنند. اگر ریزشبکه به شبکه سراسری متصل باشد منابع تولید پراکنده در مد کنترل توان کار می‌کنند در صورتی که ریزشبکه از شبکه سراسری جدا می‌گردد یکی از مبدل‌ها به‌عنوان مبدل کنترل ولتاژ در نظر گرفته می‌شود که فرکانس و ولتاژ مرجع سایر منابع تولید پراکنده را مشخص می‌کند. سایر مبدل‌ها که توان خروجی خود را کنترل می‌کنند به‌عنوان مبدل کنترل توان می‌باشند. کنترل صحیح مبدل‌ها بر روی شبکه باعث بهبود پروفایل ولتاژ، کاهش توان تلفاتی و بهبود پایداری ولتاژ می‌گردد. برای شاخص حساسیت ولتاژ جایابی مناسب منبع تولید پراکنده با مد کنترل ولتاژ، تغییرات ولتاژ شین‌های شبکه را کنترل می‌کند به طوری که می‌تواند با تزریق توان اکتیو این تغییرات به حداقل مقدار خود برساند. بنابراین جایابی منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن مدهای کنترلی از اهمیت خاصی برخوردار می‌گردد. در ادامه ابتدا به بررسی مطالعات انجام‌شده و پیشینه تحقیق در زمینه جایابی منابع تولید پراکنده بر اساس توابع هدف مختلف و سپس به بررسی مدهای کنترلی این منابع پرداخته می‌گردد.

در مرجع [۱]، با استفاده از الگوریتم تکاملی به جایابی و مقدارریابی بهینه منابع تولید پراکنده در یک شبکه استاندارد به‌منظور کاهش تلفات و افزایش قابلیت اطمینان پرداخته می‌شود. در مرجع [۲]، مسئله جایابی بهینه منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن بار متغیر بررسی شده است. در این مرجع تأثیر منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن بار متغیر بر روی هزینه بهره‌برداری سیستم و قابلیت اطمینان سیستم نیز بررسی شده است. در مرجع [۳]، تأثیر انواع مختلف مدل‌های بار بر روی مسئله جایابی بهینه منابع تولید پراکنده بررسی شده است. به‌منظور حل مسئله از روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات استفاده شده است. اهداف مسئله کمینه نمودن تلفات اکتیو و راکتیو و ظرفیت انتقالی خطوط می‌باشد. در مرجع [۴]، تخمین مکان و اندازه واحدهای تولید پراکنده در

سیستم‌های توزیع با مدل‌های بار مختلف نشان داده شده است که یک بهینه‌سازی چندهدفه برای برنامه‌ریزی واحدهای تولید پراکنده می‌باشد. در مرجع [۵]، روشی که به منظور جایابی واحدهای تولید پراکنده در شبکه توزیع به‌کار رفته است مبتنی بر تحلیل تداوم پخش بار و تعیین شین‌های با بیش‌ترین حساسیت به فروپاشی ولتاژ بوده ضمن اینکه تأثیر بازده و کارایی روی بهبود پروفیل ولتاژ و کاهش تلفات توان بررسی می‌شود. در مرجع [۶]، تحلیل جایابی بهینه واحدهای تولید پراکنده با در نظر گرفتن کاهش تلفات و بهبود ولتاژ شین‌ها در شبکه توزیع را نشان می‌دهد. در این مرجع اثر بارهای مختلف و حساس به ولتاژ و فرکانس در تخصیص بهینه منبع تولید پراکنده به لحاظ اندازه و مکان و به‌منظور کاهش تلفات حقیقی و حفظ ولتاژ در محدوده مشخص در شین‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک در شبکه توزیع بررسی می‌شود. در مرجع [۷]، جایابی بهینه چند واحد تولید پراکنده با استفاده از روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات وزندار تطبیقی را پیشنهاد می‌دهد. روش بهینه‌سازی اجتماع ذرات وزندار تطبیقی توانایی کنترل سرعت ذرات را داشته و هدف آن کمینه کردن تلفات توان حقیقی با حفظ محدوده ولتاژ می‌باشد. در مرجع [۸]، تخصیص بهینه واحدهای تولید پراکنده و کلیدهای کنترل از راه دور که به‌طور قابل توجهی روی قابلیت اطمینان و تلفات انرژی شبکه مؤثر بوده مدنظر می‌باشند. در مرجع [۹]، یک روش ابتکاری برای جایابی بهینه و اندازه مناسب واحدهای تولید پراکنده به‌منظور کمینه کردن هزینه شرکت‌های برق توزیع و جنبه‌های اقتصادی مانند هزینه انرژی، سرمایه‌گذاری، هزینه عملکردی منبع تولید پراکنده و هزینه تلفات و جنبه‌های فنی نظیر تلفات انرژی و سطوح ولتاژ ارائه می‌شود. در مرجع [۱۰]، یک روش تحلیلی برای تخصیص بهینه و اندازه مناسب واحدهای تولید پراکنده با در نظر گرفتن کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ بر اساس روش پخش بار برای شبکه‌های شعاعی لحاظ شده و یک روش مبتنی بر محاسبه فاکتور حساسیت تلفات و لیست حق تقدم ارائه شده و با روش فاکتور حساسیت سنتی مقایسه می‌شود. در مرجع [۱۱]، روش جدیدی در جایابی بهینه خازن‌ها و منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع با استفاده از الگوریتم جستجوی باکتری‌های جهت داده شده بهینه سازی توده ذرات ارائه شده است. در مرجع [۱۲]، جایابی بهینه منابع تولید پراکنده به‌منظور افزایش حد پایداری ولتاژ در شبکه توزیع استفاده شده است. در این مرجع پایداری ولتاژ به‌عنوان فاصله نقطه کاری سیستم تا نقطه فروپاشی ولتاژ تعریف شده و به جایابی منابع تولید پراکنده در تابع هدف حساسیت و منحنی‌های پایداری ولتاژ صورت می‌گیرد و مشاهده می‌گردد که از هر دو روش مکان قرارگیری منابع تولید پراکنده یکسان می‌باشد. در مرجع [۱۳]، با استفاده از روش سیگنال باس فرکانسی، عملکرد هماهنگی تنظیم توان بین اجزاء ریزشبکه در حالت غیرمتمرکز و تغییر مدهای کاری (توان ثابت-ولتاژ ثابت) منابع تولید پراکنده با استفاده از حد آستانه فرکانس-ولتاژ پیاده سازی می‌گردد. علاوه‌براین یک کنترل‌کننده ثانویه متمرکز اختیاری برای محاسبه بازگرداندن فرکانس باس تعریف می‌گردد. در مراجع [۱۶]-[۱۴]، روش سیگنال دادن باس با استفاده از حد آستانه فرکانس-ولتاژ باس‌های متفاوت به‌منظور تغییر مد ولتاژ و توان برای هماهنگی منبع

مبدل‌ها با تنظیم مناسب این کنترل‌کننده‌ها می‌توانند در دو مد کنترل توان و ولتاژ کار کنند. کنترل دروپ کلیدزنی هموار بر اساس توابع $G_p(s)$ و $G_Q(s)$ به ترتیب در روابط (۳) و (۴) بیان می‌گردد [۱۷].

$$G_p(s) = m_p + m_d \cdot s + \frac{m_i}{s} \cdot MD \quad MD = [0, 1] \quad (3)$$

$$G_Q(s) = n_q \quad (4)$$

که m_p ، m_d و پارامترهای کنترل‌کننده دروپ PID برای تنظیم توان اکتیو می‌باشند. ضریب n_q تنظیم توان راکتیو می‌باشد. سیگنال MD سیگنال راه انداز می‌باشد به طوری که برای وضعیت $MD=0$ ، واحد تولید در مد کنترل ولتاژ می‌باشد و در صورتی که $MD=1$ باشد در مد کنترل توان می‌باشد. با استفاده از این روش اگر ریزشبهه یا شبکه توزیع در حالت جدا از شبکه قرار گیرد یکی از مبدل‌ها در مد کنترل ولتاژ و بقیه مبدل‌ها در مد کنترل توان کار می‌کنند.

۳- جایابی بهینه منابع تولید پراکنده اضافه‌شده به شبکه توزیع ایزوله با در نظر گرفتن مدهای کنترل توان و ولتاژ

در این مرحله به بررسی روش پیشنهادی به منظور جایابی منابع تولید پراکنده اضافه‌شده به شبکه توزیع ایزوله پرداخته می‌شود. در این مقاله جایابی بهینه منابع با توجه به سه شاخص زیر صورت می‌گیرد:

۱- تلفات

۲- حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو

۳- میزان توان تزریقی به منظور رساندن ولتاژ به ۰/۹ پرینوئیت

اولین شاخص جایابی منابع، توان تلفاتی در سیستم می‌باشد که با قرار دادن منبع تولید پراکنده بر روی هر یک از شین‌ها، توان تلفاتی کل برای تمام حالات در نظر گرفته می‌شود و بهینه‌ترین حالت یا حالات انتخاب می‌گردد. تلفات کل ریزشبهه با قرار دادن منبع تولید پراکنده بر روی شین λ_m ریزشبهه، از رابطه (۵) به دست می‌آید.

$$(P_{loss})_j = \sum_{i=1}^n R_i I_i^2 \quad (5)$$

در معادله (۵)، I_i جریان عبوری از خط λ_m و R_i مقاومت خط λ_m در یک شبکه n شینه می‌باشند. توان تلفاتی بسته به نوع مد کنترل منبع تولید پراکنده و جایابی مناسب در ساختار مشخص شبکه تغییر می‌کند. با قرارگیری منبع تولید پراکنده با مد کنترل ولتاژ در انتهای شبکه‌های توزیع توان تلفاتی زیاد را ایجاد می‌نماید و در صورتی که این منبع تولید پراکنده با مد کنترل توان در انتهای شبکه‌های توزیع قرار گیرد، توان تلفات کم‌تری را ایجاد می‌نماید در حالت کلی مبدل با مد کنترل توان اکثراً بیشینه توان خود را تولید نموده و در ایجاد تلفات به‌عنوان بار مصرفی با علامت منفی عمل می‌کند. تلفات شبکه به‌طور عمده با تغییر مبدل کنترل ولتاژ تعیین می‌گردد.

تولید پراکنده و منابع ذخیره‌ساز انرژی استفاده شده است. در مرجع [۱۷]، یک ساختار هماهنگ‌شده ریزشبهه AC جزیره‌ای با استفاده از کنترل دروپ کلیدزنی هموار به دست می‌آید. با استفاده از این روش، کنترل توان هر یک از مبدل‌های منابع ذخیره‌ساز انرژی می‌تواند بدون تغییرات گذرا صورت پذیرد. در مراجع [۲۰-۱۸]، به بررسی نحوه اتصال منابع تولید پراکنده به شبکه با استفاده از ساختار کنترل مناسب می‌پردازند.

در مطالعات گذشته جایابی منابع تولید پراکنده با توجه به توابع هدف گوناگونی مانند بهبود پروفیل ولتاژ، کاهش توان تلفاتی، در نظر گرفتن عدم قطعیت و ... صورت می‌گیرد که تاکنون جایابی با در نظر گرفتن مدهای کنترل ولتاژ و توان صورت نگرفته است. در این مقاله یک روش جدید به منظور جایابی منابع تولید پراکنده افزوده شده به یک شبکه توزیع ایزوله بر اساس توابع هدف تلفات سیستم، حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو، میزان توان اکتیو در رسیدن ولتاژ به ۰/۹ پرینوئیت با در نظر گرفتن مدهای کنترل توان و ولتاژ صورت می‌گیرد. با استفاده از این روش محل‌های بهینه کنترل‌کننده‌ها تعیین می‌گردد. در این مقاله ابتدا به بررسی کنترل مبدل‌های منابع تولید پراکنده پرداخته می‌گردد. سپس روش پیشنهادی جایابی منابع تولید پراکنده اضافه‌شده به شبکه ایزوله با در نظر گرفتن مد کنترل ولتاژ و توان بر اساس توابع هدف ارائه می‌گردد. در ادامه نتایج روش پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار DigSilent پیاده‌سازی می‌شود و در انتها نتیجه‌گیری بیان می‌گردد.

۲- کنترل مبدل‌های منابع تولید پراکنده

با توجه به اینکه توان منابع تولید پراکنده متغیر می‌باشد، اتصال این‌گونه منابع به‌صورت مستقیم به شبکه فشار ضعیف مناسب نمی‌باشد. بنابراین از مبدل‌های الکترونیک قدرت به منظور اتصال منابع به شبکه استفاده می‌شود. این مبدل‌ها به منظور کنترل ولتاژ و فرکانس ریزشبهه‌ها در حالت ایزوله یا متصل به شبکه در دو مد کنترل توان و ولتاژ کار می‌کنند. زمانی که ریزشبهه به شبکه سراسری متصل می‌باشد با توجه به اینکه تمام منابع ولتاژ و فرکانس خود را از شبکه اصلی می‌گیرند، در مد کنترل توان کار می‌کنند. اگر ریزشبهه از شبکه اصلی جدا گردد یکی از مبدل‌ها به‌صورت مد کنترل ولتاژ و بقیه مبدل‌ها به‌صورت مد کنترل توان کار می‌کنند. در حالت کلی هر مبدل می‌تواند در دو مد کنترل توان یا ولتاژ کار کند که اگر چندین مبدل در ریزشبهه باشد برای تقسیم توان بین آن‌ها می‌توان از روش دروپ استفاده نمود. بنابراین طبق روش دروپ به‌منظور کنترل توان اکتیو و راکتیو خروجی هر واحد به ترتیب روابط (۱) و (۲) استفاده می‌گردند [۱۷].

$$\omega = \omega^* - G_p(s) \cdot (P_C - P^*) \quad (1)$$

$$E = E^* - Q_p(s) \cdot (Q_C - Q^*) \quad (2)$$

که $G_p(s)$ و $G_Q(s)$ همان کنترل‌کننده‌های توان اکتیو و راکتیو می‌باشند. تابع تبدیل $G_p(s)$ می‌تواند به‌صورت تناسبی، تناسبی-انتگرالی، تناسبی-اشتقاقی و تناسبی-انتگرالی-اشتقاقی استفاده گردد.

که بیشترین تغییرات بار را تحمل می‌کند تا ولتاژ آن به ۰/۹ پرینویت برسد بهترین گزینه برای شین کنترل ولتاژ می‌باشد.

ساختار کلی روش پیشنهادی به گونه‌ای است که در هر مرحله با افزودن یک واحد تولید به شبکه، جایابی صورت گیرد به طوری که فرض می‌گردد n واحد تولید وجود دارد و در مرحله اول فقط یک منبع تولید پراکنده وجود دارد. در مرحله اول، جایابی اولین منبع تولید پراکنده با در نظر گرفتن مد کنترل ولتاژ بر اساس شاخص‌های مذکور صورت می‌گیرد. لیست حق تقدم پنج حالت مکانی بر اساس این شاخص‌ها تعیین می‌گردد. در مرحله دوم با قرار دادن اولین منبع تولید پراکنده در پنج حالت انتخاب شده با اولویت بالا، دومین منبع تولید پراکنده در تمام شین‌ها قرار می‌گیرد. توابع هدف برای حالت‌های موجود با در نظر گرفتن مدهای کنترل ولتاژ و توان محاسبه می‌گردد. با توجه به توابع هدف سه منظوره، بهترین جواب با استفاده از روش پیشنهادی یافتن جواب بهینه، به دست می‌آید. در نهایت جایابی بهینه دو منبع تولید پراکنده با در نظر گرفتن مد کنترل ولتاژ و صورت می‌گیرد. مطابق شکل ۱ این الگوریتم برای جایابی تمام منابع تولید پراکنده اضافه شده قابل اجرا است، به طوری که با افزودن n امین واحد تولید پراکنده جایابی n-۱ امین واحد تولید طبق الگوریتم مذکور صورت می‌گیرد و پنج حالت با اولویت بیش‌تر انتخاب می‌گردد. با قرار دادن n امین واحد در تمام شین‌های شبکه، محاسبات توابع هدف با در نظر گرفتن مد کنترل این واحد تولید صورت می‌گیرد. با توجه به اینکه تابع هدف سه‌منظوره می‌باشد بنابراین سه مکان مناسب به دست می‌آید. با استفاده از روش پیشنهادی یافتن جواب بهینه، بهترین مکان برای این واحد نیز مشخص می‌گردد. نهایتاً مکان بهینه برای تمامی واحدها با در نظر گرفتن مدهای کنترل ولتاژ و توان در هر شبکه مشخص می‌گردد. با توجه به اینکه سه تابع هدف وجود دارد و در هر مکان یک تابع هدف بهینه می‌باشد بنابراین باید بتوان یک مکان را طوری انتخاب نمود که بهینه‌ترین جواب را داشته باشد. روش پیشنهادی یافتن جواب بهینه به صورت زیر می‌باشد.

به طور کلی اگر ماتریس $X = [a_{ij}]_{n \times n}$ مفروض باشد که n تعداد جواب بهینه مسئله باشد و در هر سطر فقط و فقط یک جواب بهینه وجود داشته باشد که فرض می‌گردد در درایه‌های قطر اصلی قرار دارند، آن‌گاه جواب بهینه بردار سطری پیدا نمی‌گردد که شامل تمام جواب‌های بهینه باشد. روش زیر برای پیدا کردن بردار سطری بهینه‌ای که به تمام درایه‌های بهینه نزدیک باشد ارائه می‌گردد.

گام اول: تمام مقادیر بهینه باید حداقل باشند به طوری که اگر یک مقدار حداکثر باشد باید تمام درایه‌های مربوط به ستون آن درایه بهینه را قرینه نموده تا این درآیه نیز حداقل گردد.

گام دوم: بردارهای مربوط به تمام سطرها را به شکل معادله (۱۰) بیان می‌کنیم و تمام درایه‌های بهینه را در معادله (۱۱) به صورت بردار A_{opt} قرار می‌دهیم.

$$A_1 = [a_{1opt} \ a_{12} \ \dots \ a_{1n}], \ A_2 = [a_{21} \ a_{2opt} \ \dots \ a_{2n}], \ \dots \ A_n = [a_{n1} \ a_{n2} \ \dots \ a_{nopt}] \quad (10)$$

یکی از روش‌های مناسب جهت تحلیل استاتیکی پایداری ولتاژ (بار اکتیو و راکتیو شین‌ها و تولید توان اکتیو و راکتیو ژنراتورها) تحلیل و محاسبه حساسیت پارامترهای مختلف سیستم می‌باشد [۲۱]. در این روش مشخصه‌های پایداری ولتاژ سیستم را می‌توان با استفاده از حساسیت ولتاژ نسبت به توان‌های اکتیو و راکتیو که از ماتریس ژاکوبین معادله (۶) مشخص می‌شود، به دست آورد.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{QV} & J_{QV} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (6)$$

که در آن:

ΔP = تغییر نموی در توان حقیقی شین، ΔQ = تغییر نموی در تزریق توان راکتیو شین، $\Delta \theta$ = تغییر نموی در زاویه ولتاژ شین، ΔV = تغییر نموی در دامنه ولتاژ شین است. با توجه به اینکه در سطح توزیع سیستم خاصیت مقاومتی دارد تغییرات توان تولیدی سیستم در سطح توزیع با مطالعه رابطه نموی بین P و V در نقاط مختلف کار، در نظر گرفته می‌شود. با توجه به ماتریس معادله (۶) می‌توان معادله (۷) را نوشت.

$$\Delta P = J_R \cdot \Delta V \quad (7)$$

که در آن J_R از معادله (۸) به دست می‌آید.

$$J_R = J_{PV} - J_{Q\theta}^{-1} \cdot J_{QV} \quad (8)$$

که J_R ماتریس ژاکوبین کاهش یافته سیستم است و از معادله (۷) می‌توان معادله (۸) را نوشت.

$$\Delta V = J_R^{-1} \cdot \Delta P \quad (9)$$

به طوری که، ماتریس J_R^{-1} ، ژاکوبین P-V کاهش یافته است که اُمین عنصر قطری آن بیانگر حساسیت P-V در شین اُم است. همان‌طور که بیان گردید به منظور جایابی منبع تولید پراکنده بر اساس حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو، شینی که با قرار دادن منبع تولید پراکنده بر آن کمترین حساسیت را دارد به‌عنوان شین کنترل توان در نظر گرفته می‌شود. حساسیت P-V در یک شین، شیب منحنی P-V را در نقطه کار داده شده نمایش می‌دهد. مقدار مثبت حساسیت نشان‌دهنده عملکرد پایدار است و مقدار منفی حساسیت، نشان‌دهنده عملکرد ناپایدار سیستم است. با قرار دادن منبع تولید پراکنده بر روی هر یک از شین‌ها، حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو برای خود شین و مجموع سایر شین‌ها محاسبه می‌گردد. شینی که با قرار گرفتن منبع تولید پراکنده بر روی آن دارای کمترین حساسیت ولتاژ می‌باشد بهترین گزینه جهت مد کنترل توان می‌باشد به دلیل اینکه در مد کنترل توان تغییرات ولتاژ کنترل نمی‌گردد و باید شینی به‌عنوان مد کنترل توان انتخاب گردد که با تزریق توان اکتیو کمترین تغییرات ولتاژ را داشته باشد. برای شینی که با تزریق توان اکتیو منبع تولید پراکنده به شبکه توزیع بیشترین تغییرات ولتاژ را دارد مد کنترل ولتاژ به‌عنوان مد کنترل منبع تولید پراکنده در نظر گرفته می‌شود تا بتواند این تغییرات را کنترل نماید. شاخص دیگری که برای جایابی منبع تولید پراکنده میزان توان اکتیو تزریقی به شین تا رساندن ولتاژ به ۰/۹ پرینویت می‌باشد، بنابراین شینی

۴- نتایج شبیه‌سازی

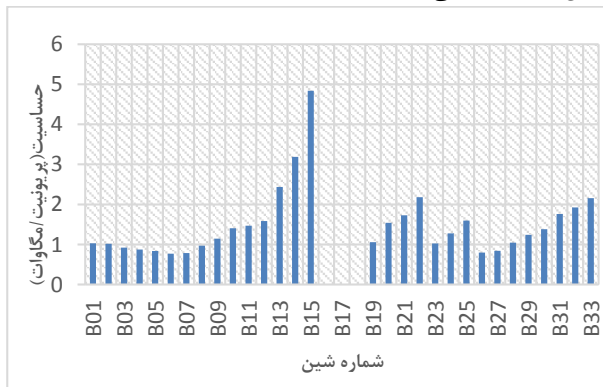
شبیه‌سازی روش پیشنهادی به منظور مکان‌یابی منبع تولید پراکنده با در نظر گرفتن مد کنترل ولتاژ و توان بر روی شبکه ۳۳ و ۱۳ باسه ایزوله توزیع IEEE با استفاده از نرم‌افزار DigSilent پیاده‌سازی گردیده است. دیاگرام تک خطی و مشخصات این شبکه در [۲۲-۲۳] آمده است. در ابتدا این روش با جزئیات مراحل ذکر شده بر روی شبکه ۳۳ باسه پیاده سازی می‌گردد و در انتها نیز روش برای شبکه ۱۳ باسه نیز منظور خواهد شد و فقط جواب‌های نهایی آورده می‌شود.

۴-۱- پیاده‌سازی روش برای شبکه توزیع ۳۳ باسه

این شبکه توزیع ۳۳ باسه استاندارد توزیع می‌تواند در یکی از حالات اتصال به شبکه و جدا از شبکه اصلی کار کند. مراحل گوناگونی به‌منظور جایابی منابع تولید پراکنده (جایابی تک منبع تولید پراکنده و یا دو منبع تولید پراکنده) در این شبکه توزیع ۳۳ باسه در حالت جزیره‌ای بررسی می‌گردد. منبع تولید پراکنده در مد کنترل توان، توان اکتیو بیشینه ۱/۵ مگاوات را ردیاب می‌نماید و کل بار مصرفی در شبکه ۳/۷۱ مگاوات می‌باشد. در جدول‌های (۱۰-۱) شاخص اول توان تلفاتی برحسب مگاوات، شاخص دوم مجموع حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو بر روی تمام شین‌ها به‌غیر از شینی که بر روی آن قرار دارد که برحسب مگاوات برپریونیت و شاخص سوم میزان تزریق توان اکتیو تا رسیدن ولتاژ به ۰/۹ پریونیت که برحسب مگاوات می‌باشد. بر اساس الگوریتم بیان‌شده جایابی بهینه برای دو منبع تولید پراکنده به‌صورت زیر پیاده‌سازی و شبیه‌سازی می‌گردد.

۴-۱-۱- مرحله اول: جایابی اولین منبع تولید پراکنده

در مرحله اول فرض می‌گردد که تنها یک منبع تولید پراکنده در شبکه توزیع جزیره‌ای وجود دارد. در این مرحله با قرارگیری منبع تولید پراکنده بر روی هر یک از شین‌ها تمام این توابع هدف محاسبه می‌گردند. با قرار دادن منبع تولید پراکنده در تمام شین‌ها، منحنی‌های مجموع حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو و توان تلفاتی طبق شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده می‌شوند. همان‌طور که در این شکل‌ها مشاهده می‌گردد با قرار دادن منابع تولید پراکنده در شین‌های ۱۶-۱۸، پخش بار سیستم به‌علت اضافه بار و افت ولتاژ خطوط که منجر به تلفات زیاد و ناپایداری می‌گردد و اگر می‌شود. بنابراین قرار دادن منابع تولید پراکنده در این مکان‌ها مناسب نمی‌باشد.



شکل ۲: منحنی مجموع حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو تزریقی

به شین‌ها به‌غیر از شینی که بر روی آن قرار دارد

$$A_{opt} = [a_{1opt} \ a_{2opt} \ \dots \ a_{nopt}] \quad (11)$$

گام سوم: انحراف معیار هر یک از بردارهای $A_1 \dots A_n$ تا بردار بهینه A_{opt} به‌صورت با استفاده از رابطه (۱۲) به‌دست می‌آوریم.

$$A_{1o} = |A_1 - A_{opt}| = \sqrt{(a_{1opt} - a_{1opt})^2 + (a_{12} - a_{2opt})^2 + \dots + (a_{1n} - a_{nopt})^2}$$

$$A_{2o} = |A_2 - A_{opt}| = \sqrt{(a_{21} - a_{1opt})^2 + (a_{2opt} - a_{2opt})^2 + \dots + (a_{2n} - a_{nopt})^2}$$

$$\dots$$

$$A_n = |A_n - A_{opt}| = \sqrt{(a_{nopt} - a_{1opt})^2 + (a_{n2} - a_{2opt})^2 + \dots + (a_{nopt} - a_{nopt})^2} \quad (12)$$

گام چهارم: مینیمم اندازه‌های $A_{1o} \dots A_{no}$ بهترین جواب می‌باشد که به جواب بهینه نزدیک می‌باشد و طبق معادله (۱۳) به‌دست می‌آیند.

$$A_{opt} = \min\{A_{1o}, \dots, A_{no}\} \quad (13)$$



شکل ۱: الگوریتم روش پیشنهادی

رسیدن ولتاژ به ۰/۹ پروینیت شاخص مناسبی نمی‌باشد و در این مرحله استفاده نمی‌گردد.

۴-۱-۲- مرحله دوم: جایابی دومین منبع تولید پراکنده با در نظر گرفتن مد کنترل ولتاژ و توان

در مرحله دوم، با توجه به پنج حالت برگزیده در مرحله اول، اولین منبع تولید پراکنده در این پنج حالت قرار می‌گیرد که مد کنترل آن در مرحله اول مشخص گردید. دومین منبع تولید پراکنده نیز در تمام شین‌ها شبکه قرار می‌گیرد و برای پنج حالت زیر که در مرحله اول به‌عنوان مکان‌هایی با اولویت بالاتر انتخاب گردیدند، توابع هدف به‌دست می‌آیند. با مقایسه و تحلیل این حالات بهترین مکان برای منبع تولید پراکنده دومی با در نظر گرفتن مد کنترل آن نیز مشخص می‌گردد.

الف- در صورتی که اولین منبع تولید پراکنده در شین ۶ باشد:

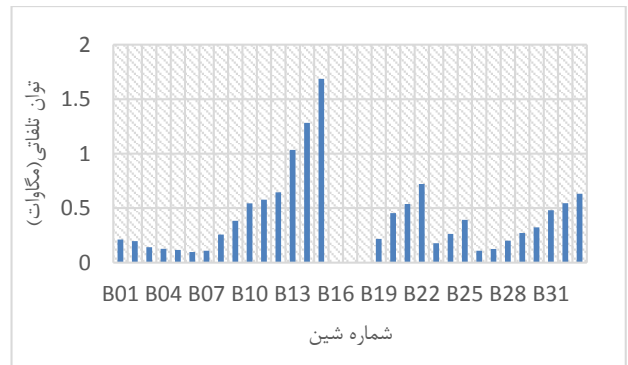
در این حالت اولین منبع تولید پراکنده با مد کنترل توان در شین ۶ قرار می‌گیرد و دومین منبع تولید پراکنده با مد کنترل ولتاژ در تمام شین‌ها قرار می‌گیرد. جدول ۲ محاسبات و تحلیل مربوط به سه شاخص ذکر شده را نشان می‌دهد. مطابق جدول ۲، با توجه به اینکه دومین منبع تولید پراکنده در مد کنترل ولتاژ می‌باشد بنابراین بر روی هر شینی که قرار گیرد حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو در آن شین صفر می‌باشد. با توجه به شاخص تلفات با قرار دادن دومین منبع تولید پراکنده با مد کنترل ولتاژ در شین ۳ تلفات سیستم کم‌ترین مقدار است. در دو ردیف آخر این جدول با قرار گرفتن دومین منبع تولید پراکنده در شین‌های ۷ و ۱۸ سیستم به ترتیب دارای کم‌ترین و بیش‌ترین حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو است. با تحلیل منحنی پایداری ولتاژ و با توجه به اینکه توان مصرفی ۳/۷۱ مگاوات می‌باشد، با قراردادن دومین منبع تولید پراکنده با مد کنترل ولتاژ در شین ۷، سیستم دارای بیش‌ترین میزان توان اکتیو در رساندن ولتاژ به ۰/۹ پروینیت است.

جدول ۲: تحلیل توابع هدف به منظور جایابی منبع تولید پراکنده در حالت الف

شین اولین واحد (مد کنترل)	شین دومین واحد (مد کنترل)	شاخص اول	شاخص دوم	شاخص سوم
۲۴- (ولتاژ)	۰/۰۶۲	۰/۰۶۲	۰/۶۶۲	۷/۱۴
۲۵- (ولتاژ)	۰/۰۶۶	۰/۰۶۶	۰/۶۷۵	۹/۲۹
۲۳- (ولتاژ)	۰/۰۶۹	۰/۰۶۹	۰/۶۴۸	۵/۳۴
۱۸- (ولتاژ)	۰/۱۹۶	۰/۱۹۶	کمینه (۰/۴۹۷)	۷۰/۴۹
۱- (ولتاژ)	بیشینه (۰/۰۸۹)	بیشینه (۰/۰۸۸)	بیشینه (۰/۹۸۸)	۰/۰

ب- در صورتی که اولین منبع تولید پراکنده در شین ۲۶ باشد:

در این حالت اولین منبع تولید پراکنده با مد کنترل توان در شین ۲۶ قرار می‌گیرد و دومین منبع تولید پراکنده با مد کنترل ولتاژ در تمام شین‌ها قرار می‌گیرد. جدول ۳ محاسبات و تحلیل مربوط به سه شاخص ذکر شده را نشان می‌دهد.



شکل ۳: منحنی تلفات توان اکتیو در ریز شبکه با قرار گرفتن منبع تولید پراکنده در هر یک از شین‌ها

پس از قرار گرفتن منبع تولید پراکنده بر روی هر یک از شین‌ها و با توجه به تابع هدف توان تلفات و حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو ۵ مکان مناسب انتخاب می‌گردد. جدول ۱ تحلیل مربوط به مکان‌یابی منبع تولید پراکنده بر اساس توابع کاهش تلفات سیستم و کاهش مجموع حساسیت‌های ولتاژ نسبت به توان اکتیو تزریقی به تمام شین‌ها را نشان می‌دهد. در این مرحله میزان توان اکتیو به‌منظور رساندن ولتاژ به ۰/۹ پروینیت، به‌علت اینکه مبدل در هر شینی که قرار گیرد به صورت مد کنترل ولتاژ می‌باشد، استفاده نمی‌گردد.

جدول ۱: تحلیل حساسیت ولتاژ بر حسب توان و توان تلفاتی برای جایابی اولین منبع تولید پراکنده

شماره شین	شاخص اول	حساسیت ولتاژ به توان اکتیو بر روی شینی که قرار می‌گیرد. (مگاوات/پروینیت)	شاخص دوم
۶	۰/۰۹۷۱	۰	۰/۷۶۹
۲۶	۰/۱۰۸	۰	۰/۷۹۷
۷	۰/۱۰۹	۰	۰/۷۸۴
۵	۰/۱۱۵	۰	۰/۸۲۶
۱۵	۱/۶۸۷	۰	بیشینه (۴/۸۳۶)

طبق جدول ۱، با قرار دادن منبع تولید پراکنده در تمامی شین‌ها، محل‌های مناسب از نظر کم‌ترین تلفات و حساسیت به ترتیب شین‌های ۶، ۲۶، ۷ و ۵ می‌باشد. همچنین طبق شکل‌های ۲ و ۳، بدترین مکان نیز مربوط به استقرار در شین ۱۵ می‌باشد، که شبکه طبق جدول ۱ بیش‌ترین حساسیت ولتاژ و توان تلفاتی را دارا می‌باشد. بنابراین چهار حالت بهینه و بدترین حالت بر اساس توابع هدف مشخص می‌گردد. با توجه به اینکه در این مرحله جایابی اولین منبع تولید پراکنده صورت می‌گیرد و این منبع باید ولتاژ و فرکانس شبکه را کنترل کند، بنابراین در مد کنترل ولتاژ کار می‌کند و بر روی هر شینی که قرار گیرد به‌عنوان شین کنترل ولتاژ می‌باشد. بنابراین حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو در هر شینی که قرار می‌گیرد صفر می‌باشد. با قرار دادن منبع تولید پراکنده بر روی شین ۶ کم‌ترین تلفات و حساسیت و با قرار گرفتن بر روی شین ۱۵ بیش‌ترین حساسیت و تلفات را دارد. با توجه به اینکه مبدل کنترل ولتاژ در هر شینی که قرار گیرد ولتاژ آن را در یک پروینیت قرار می‌دهد بنابراین در این مرحله شاخص میزان تزریق توان اکتیو تا

جدول ۳: تحلیل توابع هدف به منظور جایابی منبع تولید پراکنده در

حالت ب

شین اولین واحد (مد کنترل)	شین دومین واحد (مد کنترل)	شاخص اول	شاخص دوم	شاخص سوم
۳- (ولتاژ)	۰/۰۷۰	۰/۸۹۱	۷/۱۴	
۴- (ولتاژ)	۰/۰۷۴	۰/۸۵۵	۹/۲۹	
۲۳- (ولتاژ)	۰/۰۷۵	۰/۹۸۱	۵/۳۴	
۶- (ولتاژ)	۰/۰۹۵	کمینه (۰/۷۶۹)	۷۰/۴۹	
۱۸- (ولتاژ)	بیشینه (۰/۶۱۱)	بیشینه (۳/۸۷۹)	۰/۰	

مطابق جدول ۳، با توجه به اینکه دومین منبع تولید پراکنده در مد کنترل ولتاژ می‌باشد بر روی هر شینی که قرار گیرد حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو در آن شین صفر می‌باشد. با توجه به قرار دادن اولین منبع تولید پراکنده با مد کنترل توان در شین ۲۶، با قراردادن دومین منبع تولید پراکنده با مد کنترل ولتاژ در شین ۳ کم‌ترین تلفات در سیستم ایجاد می‌گردد. همچنین با استقرار دومین منبع تولید پراکنده با مد کنترل ولتاژ در شین‌های ۶ و ۱۸ سیستم به ترتیب دارای کم‌ترین و بیش‌ترین حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو و در شین ۶ دارای بیش‌ترین میزان توان اکتیو در رساندن ولتاژ به ۰/۹ پر یونیت است.

ج- در صورتی که منبع تولید پراکنده در شین ۷ باشد: در این حالت اولین منبع تولید پراکنده با مد کنترل توان در شین ۷ قرار می‌گیرد و دومین منبع تولید پراکنده با مد کنترل ولتاژ در تمام شین‌ها قرار می‌گیرد. جدول ۴ محاسبات و تحلیل مربوط به سه شاخص ذکر شده را نشان می‌دهد.

جدول ۴: تحلیل توابع هدف به منظور جایابی منبع تولید پراکنده در

حالت ج

شین اولین واحد (مد کنترل)	شین دومین واحد (مد کنترل)	شاخص اول	شاخص دوم	شاخص سوم
۳- (ولتاژ)	۰/۰۷۲	۰/۲۳۹	۷/۴۵	
۴- (ولتاژ)	۰/۰۷۶	۰/۱۸۳	۱۰/۷۴	
۲۳- (ولتاژ)	۰/۰۷۷	۰/۳۳۱	۵/۷۹	
۷- (ولتاژ)	۰/۰۹۸	کمینه (۰/۰۴۷)	۵۲/۵۴	
۱۸- (ولتاژ)	۰/۶۱۹	بیشینه (۳/۹۱)	۰/۰	

مطابق جدول ۴، با توجه به این‌که دومین منبع تولید پراکنده در مد کنترل ولتاژ می‌باشد، بنابراین بر روی هر شینی که قرار گیرد حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو در آن شین صفر می‌باشد. با توجه به قرار دادن اولین منبع تولید پراکنده با مد کنترل توان در شین ۷، با قرار دادن دومین منبع تولید پراکنده با مد کنترل ولتاژ در شین ۲۴ کم‌ترین تلفات در سیستم ایجاد می‌گردد، همچنین با استقرار دومین منبع تولید پراکنده با مد کنترل ولتاژ در شین‌های ۱۸ و ۱ سیستم به ترتیب دارای کم‌ترین و بیش‌ترین حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو و در نهایت با استقرار در شین ۱۸ سیستم دارای بیش‌ترین میزان توان اکتیو در رساندن ولتاژ به ۰/۹ پر یونیت است.

د- در صورتی که اولین منبع تولید پراکنده در شین ۵ باشد: در این حالت اولین منبع تولید پراکنده با مد کنترل توان در شین ۵ قرار می‌گیرد و دومین منبع تولید پراکنده با مد کنترل ولتاژ در تمام شین‌ها قرار می‌گیرد. جدول ۵ محاسبات و تحلیل مربوط به سه شاخص ذکر شده را نشان می‌دهد.

جدول ۵: تحلیل توابع هدف به منظور جایابی منبع تولید پراکنده در

حالت د

شین اولین واحد (مد کنترل)	شین دومین واحد (مد کنترل)	شاخص اول	شاخص دوم	شاخص سوم
۶- (ولتاژ)	۰/۰۷۸۲	۰/۷۶۷	۱۶/۹۴	
۲۶- (ولتاژ)	۰/۰۷۸۵	۰/۷۹۱	۱۳/۳۹	
۷- (ولتاژ)	۰/۰۷۹۳	۰/۷۷۷	۱۲/۵۴	
۲۶- (ولتاژ)	۰/۰۷۸۲	کمینه (۰/۷۶۶)	۱۶/۹۴	
۱۸- (ولتاژ)	۰/۵۵۵۳	بیشینه (۳/۶۳۰)	۰/۰	

مطابق جدول ۵، با توجه به اینکه دومین منبع تولید پراکنده در مد کنترل ولتاژ می‌باشد، بنابراین بر روی هر شینی که قرار گیرد حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو در آن شین صفر می‌باشد. با توجه به قرار دادن اولین منبع تولید پراکنده با مد کنترل توان در شین ۵، با قرار دادن دومین منبع تولید پراکنده با مد کنترل ولتاژ در شین ۶ کم‌ترین تلفات در سیستم ایجاد می‌گردد، همچنین با استقرار دومین منبع تولید پراکنده با مد کنترل ولتاژ در شین‌های ۲۶ و ۱۸ سیستم به ترتیب دارای کم‌ترین و بیش‌ترین حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو و در شین ۲۶ دارای بیش‌ترین میزان توان اکتیو در رساندن ولتاژ به ۰/۹ پر یونیت است.

ح- در صورتی که اولین منبع تولید پراکنده در شین ۱۵ باشد: این حالت مربوط به بدترین وضعیت در مکان‌یابی اولین منبع تولید پراکنده می‌باشد. در این حالت اولین منبع تولید پراکنده در شین ۱۵ با توجه به این‌که تغییرات ولتاژ بیش‌ترین مقدار را دارا می‌باشد در مد کنترل ولتاژ قرار می‌گیرد و دومین منبع تولید پراکنده در مد کنترل توان در تمام شین‌ها قرار می‌گیرد. جدول ۶ محاسبات و تحلیل مربوط به سه شاخص ذکر شده را نشان می‌دهد.

جدول ۶: تحلیل توابع هدف به منظور جایابی منبع تولید پراکنده در

حالت ح

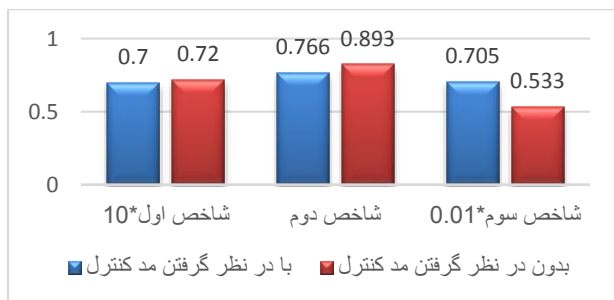
شین اولین واحد (مد کنترل)	شین دومین واحد (مد کنترل)	شاخص اول	شاخص دوم	شاخص سوم
۲۳- (توان)	۰/۲۷۶	۱/۸۷۴	۰/۰	
۳- (توان)	۰/۲۷۸	۱/۸۸۴	۰/۰	
۲- (توان)	۰/۲۸۶	۱/۸۷۴	۰/۰	
۱۹- (توان)	۰/۲۸۹	کمینه (۱/۸۷۳)	۰/۰	
۱۸- (توان)	۱/۷۲۹	بیشینه (۴/۸۱۸)	۷/۰۶۵	

طبق جدول ۶ با توجه به قرار دادن اولین منبع تولید پراکنده با مد کنترل ولتاژ در شین ۱۵ (به‌علت داشتن بیش‌ترین تغییرات ولتاژ نسبت به توان اکتیو)، با قرارگیری دومین منبع تولید پراکنده با مد کنترل توان

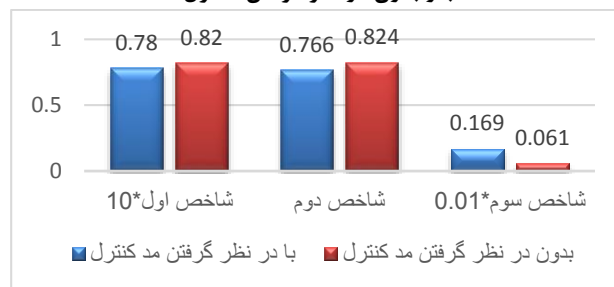
مد کنترل نسبت به حالتیکه کنترل کننده‌ها در نظر گرفته نمی‌شود برای سه حالات انتخابی که به ترتیب (۳/۲۶)، (۶/۵) و (۶/۲۶) می‌باشند را نشان می‌دهند. شکل ۷ مقایسه بین بردار بهینه توابع هدف با و بدون در نظر گرفتن کنترل کننده را نشان می‌دهد. در این اشکال با توجه به اینکه مقیاس‌های توابع هدف متفاوت است و مشاهده مقادیر توابع هدف مربوط به هر شاخص در یک شکل اختلاف زیادی داشتند بنابراین شاخص اول را در ۱۰، شاخص دوم را بدون تغییر و شاخص سوم را در ۰/۰۱ ضرب نموده تا بتوان مقادیر این توابع را در یک شکل به راحتی مقایسه نمود.

جدول ۸: جایابی منابع تولید پراکنده بدون در نظر گرفتن کنترل کننده‌های ولتاژ و توان بر اساس شاخص‌های سه گانه

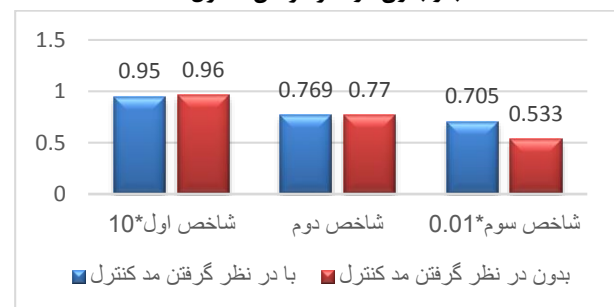
شاخص اولین واحد	شین دومین واحد	شاخص اول	شاخص دوم	شاخص سوم
۲۶	۳	کمینه (۰/۰۷۳)	۰/۷۸۵	۵/۶
۵	۶	۰/۸۲۳	کمینه (۰/۷۰۲)	۶/۱
۲۶	۶	۰/۰۹۷	۰/۷۵۹	بیشینه (۵۳/۳۳)



شکل ۴: منحنی مقایسه بین مقادیر توابع هدف برای زوج جایابی (۳/۲۶) با و بدون در نظر گرفتن کنترل کننده‌ها



شکل ۵: منحنی مقایسه بین مقادیر توابع هدف برای زوج جایابی (۶/۵) با و بدون در نظر گرفتن کنترل کننده‌ها



شکل ۶: منحنی مقایسه بین مقادیر توابع هدف برای زوج جایابی (۶/۲۶) با و بدون در نظر گرفتن کنترل کننده‌ها

در شین ۲۳ کمترین تلفات در سیستم، با استقرار در شین‌های ۱۹ و ۱۸ سیستم به ترتیب دارای کمترین و بیشترین حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو و در نهایت با استقرار در شین ۱۸ بیشترین میزان توان اکتیو در رساندن ولتاژ به ۰/۹ پریونیت را دارد.

در این روش جایابی منابع تولید پراکنده به نحوی صورت می‌پذیرد که کمترین حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو و بیشترین توان اکتیو در رساندن ولتاژ به ۰/۹ پریونیت و همچنین حداقل توان تلفاتی برای شبکه ایجاد گردد. با استفاده نتایج حاصل از اجرای دو مرحله مذکور، در نتیجه اولویت سه مکان اصلی جایابی منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن مد کنترل توان و ولتاژ مطابق جدول ۷ تعیین می‌گردد.

جدول ۷: جایابی منبع تولید پراکنده با در نظر گرفتن مد کنترل بر اساس وضعیت‌های بهینه

شین اولین واحد (مد کنترل)	شین دومین واحد (مد کنترل)	شاخص اول	شاخص دوم	شاخص سوم
۲۶-(توان)	۳-(ولتاژ)	کمینه (۰/۰۷۰)	۰/۸۹۱	۷/۱۴
۵-(توان)	۶-(ولتاژ)	۰/۰۷۸	کمینه (۰/۷۶۶)	۱۶/۹۴
۲۶-(توان)	۶-(ولتاژ)	۰/۰۹۵	۰/۷۶۹	بیشینه (۷۰/۴۹)

طبق جدول ۷ بر اساس تابع هدف داریم:

- اگر شاخص تلفات مهم‌ترین تابع هدف باشد، آنگاه منبع تولید پراکنده با مد کنترل توان باید در شین ۲۶ و منبع تولید پراکنده با مد کنترل ولتاژ در شین ۳ قرار گیرد.

- اگر شاخص حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو مهم‌ترین تابع هدف باشد، آنگاه منبع تولید پراکنده با مد کنترل توان باید در شین ۵ و منبع تولید پراکنده با مد کنترل ولتاژ در شین ۶ قرار گیرد.

- اگر شاخص میزان تزریق توان اکتیو تا رساندن ولتاژ به ۰/۹ پریونیت مهم‌ترین تابع هدف باشد، آنگاه منبع تولید پراکنده با مد کنترل توان باید در شین ۲۶ و منبع تولید پراکنده با مد کنترل ولتاژ در شین ۶ قرار گیرد. بر اساس الگوریتم مذکور، مقادیر توابع هدف بهینه در هر حالت به دست آمده و سه بردار سطری با یک درایه بهینه مشخص می‌گردد. با توجه به روش پیشنهادی یافتن بهترین جواب، با قرار دادن منبع تولید پراکنده با مد کنترل توان در شین ۵ و منبع تولید پراکنده با مد کنترل ولتاژ در شین ۶ بهینه‌ترین جواب به دست می‌آید. از طرفی برای نشان دادن تأثیر مثبت جایابی با در نظر گرفتن کنترل کننده‌های توان و ولتاژ، جایابی منابع تولید پراکنده بدون در نظر گرفتن این کنترل کننده‌ها بررسی می‌گردد. دو مرحله تحلیل جایابی منابع تولید پراکنده بر اساس شاخص‌های سه گانه بدون در نظر گرفتن کنترل کننده‌های توان و ولتاژ در جدول ۸ آمده است.

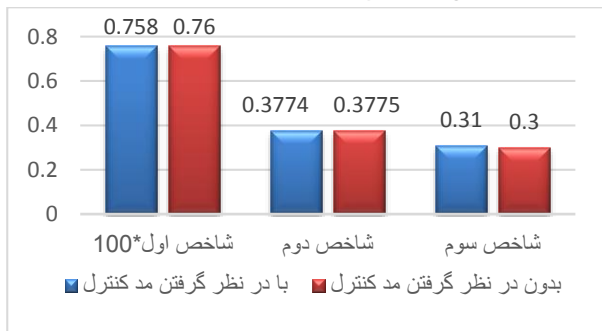
با مقایسه جدول‌های ۷ و ۸ مشاهده می‌گردد که جایابی منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن مد کنترل ولتاژ و توان نسبت به حالتی که این کنترل کننده‌ها در نظر گرفته نمی‌شود باعث بهبود توابع هدف گردیده است. شکل‌های (۶-۴) مقایسه بین توابع هدف جایابی با در نظر گرفتن

بهینه‌ترین جواب به دست می‌آید. از طرفی برای نشان دادن تأثیر مثبت جایابی با در نظر گرفتن کنترل‌کننده‌های توان و ولتاژ، جایابی منابع تولید پراکنده بدون در نظر گرفتن این کنترل‌کننده‌ها بررسی می‌گردد. دو مرحله تحلیل جایابی منابع تولید پراکنده بر اساس شاخص‌های سه گانه بدون در نظر گرفتن کنترل‌کننده‌های توان و ولتاژ در جدول ۱۰ آمده است.

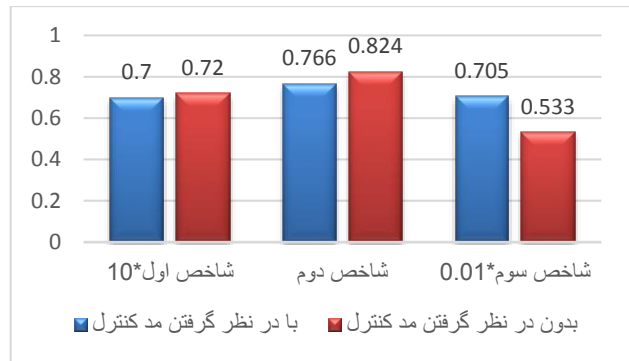
جدول ۱۰: جایابی منابع تولید پراکنده بدون در نظر گرفتن کنترل‌کننده‌های ولتاژ و توان بر اساس شاخص‌های سه‌گانه

شاخص اولین واحد	شاخص دومین واحد	شاخص اول	شاخص دوم	شاخص سوم
۶۹۲	۶۳۲	کمینه (۰/۰۰۷۶۰)	۰/۳۷۷۵	۰/۳۰
۶۷۱	۶۵۲	۰/۰۰۷۶۵	کمینه (۰/۳۷۷۱)	۰/۲۹
۶۷۱	۶۳۴	۰/۰۰۷۶۶	۰/۳۷۸۰	بیشینه (۰/۳۱)

با مقایسه جدول‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌گردد که جایابی منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن مد کنترل ولتاژ و توان نسبت به حالتی که این کنترل‌کننده‌ها در نظر گرفته نمی‌شود باعث بهبود توابع هدف گردیده است. شکل‌های (۸-۱۰) مقایسه بین توابع هدف جایابی با در نظر گرفتن مد کنترل نسبت به حالتی که کنترل‌کننده‌ها در نظر گرفته نمی‌شود برای سه حالت انتخابی که به ترتیب (۶۳۲/۶۹۲)، (۶۵۲/۶۷۱) و (۶۳۴/۶۷۱) می‌باشند را نشان می‌دهند. شکل ۱۱ مقایسه بین بردار بهینه توابع هدف با و بدون در نظر گرفتن کنترل‌کننده را نشان می‌دهد. در این اشکال با توجه به این‌که مقیاس‌ها متفاوت است و مشاهده مقدار تابع هدف مربوط به هر شاخص در یک شکل اختلاف زیادی داشتند بنابراین شاخص اول را در ۱۰۰ تا مقادیر این توابع در یک شکل را به‌توان به‌راحتی مقایسه نمود. با توجه به شکل‌های (۸-۱۰) مشاهده می‌گردد که جایابی منابع تولید پراکنده برای سه حالت انتخابی با در نظر گرفتن مد کنترل ولتاژ و توان نسبت به حالتی که این کنترل‌کننده‌ها در نظر گرفته نمی‌شود موجب کاهش تلفات توان اکتیو سیستم، کاهش حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو و بیش‌ترین میزان تزریق توان اکتیو تا رسیدن ولتاژ به ۰/۹ پریونیت می‌گردد. شکل ۱۱ مقادیر توابع هدف برای بردار بهینه طبق روش پیشنهادی در دو حالت با و بدون استفاده از کنترل‌کننده نشان می‌دهد. از شکل ۶ شکل مشاهده می‌گردد که استفاده از کنترل‌کننده موجب بهبود توابع هدف می‌گردد.



شکل ۸: منحنی مقایسه بین مقادیر توابع هدف برای زوج جایابی (۶۳۲/۶۹۲) با و بدون در نظر گرفتن کنترل‌کننده‌ها



شکل ۷: منحنی مقایسه بین مقادیر توابع هدف بردار بهینه با و بدون در نظر گرفتن کنترل‌کننده‌ها

با توجه به شکل‌های (۴-۶) مشاهده می‌گردد که جایابی منابع تولید پراکنده برای سه حالت انتخابی با در نظر گرفتن مد کنترل ولتاژ و توان نسبت به حالتی که این کنترل‌کننده‌ها در نظر گرفته نمی‌شود موجب کاهش تلفات توان اکتیو سیستم، کاهش حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو و بیش‌ترین میزان تزریق توان اکتیو تا رسیدن ولتاژ به ۰/۹ پریونیت می‌گردد. شکل ۷ مقادیر توابع هدف برای بردار بهینه طبق روش پیشنهادی در دو حالت با و بدون استفاده از کنترل‌کننده نشان می‌دهد. از شکل ۶ شکل مشاهده می‌گردد که استفاده از کنترل‌کننده موجب بهبود توابع هدف می‌گردد.

۴-۲- پیاده‌سازی روش پیشنهادی برای شبکه توزیع ۱۳ باسه

روش پیشنهادی برای شبکه توزیع ۱۳ باسه نیز پیاده‌سازی می‌گردد. منبع تولید پراکنده در مد کنترل توان، توان اکتیو بیشینه ۰/۵ مگاوات را ردیاب می‌نماید و کل بار مصرفی در شبکه ۰/۹۰ مگاوات می‌باشد. بر اساس الگوریتم ذکر شده جایابی بهینه برای دو منبع تولید پراکنده به صورت جایابی برای شبکه ۱۳ باسه پیاده‌سازی و شبیه‌سازی می‌گردد. با اجرای مراحل مذکور و تعیین سناریوهای مشخص جایابی منابع تولید پراکنده به نحو مطلوبی صورت می‌گیرد. با استفاده نتایج حاصل از اجرای دو مرحله مذکور، در نتیجه اولویت سه مکان اصلی جایابی منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن مد کنترل توان و ولتاژ مطابق جدول ۹ تعیین می‌گردد.

جدول ۹: جایابی منبع تولید پراکنده با در نظر گرفتن مد کنترل بر اساس وضعیت‌های بهینه

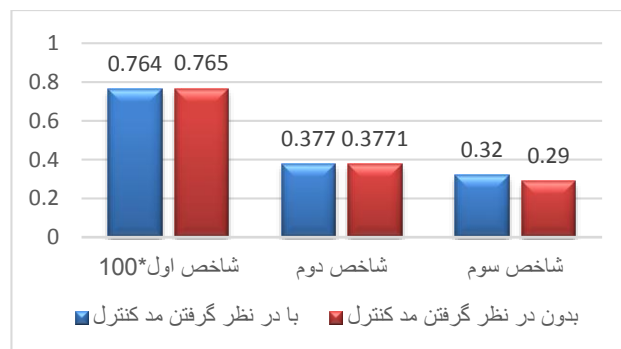
شاخص اولین واحد (مد کنترل)	شاخص دومین واحد (مد کنترل)	شاخص اول	شاخص دوم	شاخص سوم
۶۹۲- (توان)	۶۳۲- (ولتاژ)	کمینه (۰/۰۰۷۵۸)	۰/۳۷۷۴	۰/۳۱
۶۷۱- (توان)	۶۵۲- (ولتاژ)	۰/۰۰۷۶۴	کمینه (۰/۳۷۷۰)	۰/۳۲
۶۷۱- (توان)	۶۳۴- (ولتاژ)	۰/۰۰۷۶۱	۰/۳۷۷۷	بیشینه (۰/۳۳)

بر اساس الگوریتم مذکور با قرار دادن منبع تولید پراکنده با مد کنترل توان در شین ۶۹۲ و منبع تولید پراکنده با مد کنترل ولتاژ در شین ۶۳۲

منبع تولید پراکنده با مد کنترل توان در شین ۵ و منبع تولید پراکنده با مد کنترل ولتاژ در شین ۶ برای شبکه ۳۳ شینه استاندارد IEEE و همچنین با قراردادن منبع تولید پراکنده با مد کنترل توان در شین ۶۹۲ و منبع تولید پراکنده با مد کنترل ولتاژ در شین ۶۳۲ برای شبکه ۱۳ شینه، کمترین تلفات توان اکتیو، بیشترین میزان تزریق توان اکتیو تا رسیدن ولتاژ به ۰/۹ پریونیت و کمترین تغییرات ولتاژ نسبت به توان اکتیو ایجاد می‌گردد. همچنین مشاهده گردید که جایابی منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن مدهای کنترلی نسبت به حالتی که این مدهای کنترلی در نظر گرفته نمی‌شوند موجب افزایش تلفات توان اکتیو سیستم، حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو و کاهش بیشترین میزان تزریق توان اکتیو تا رسیدن ولتاژ به ۰/۹ پریونیت می‌گردد.

مراجع

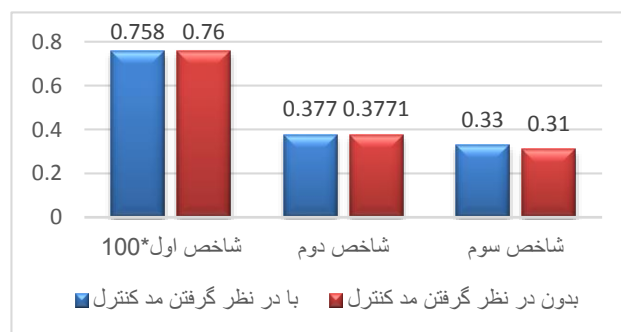
- [1] یوسف پورجمال و علی عجمی، «یک روش جدید برای جایابی منابع تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع با هدف کاهش تلفات و افزایش قابلیت اطمینان»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۲، شماره ۲، ۱۳۹۰.
- [2] D. Zhu, R. P. Broadwater, T. Kwa-Sur, R. Seguin, and H. Asgerirsson, "Impact of DG placement on reliability and efficiency with time-varying loads," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, pp. 419-427, 2006.
- [3] A. M. El-Zonkoly, "Optimal placement of multi-distributed generation units including different load models using particle swarm optimisation," *Generation, Transmission & Distribution, IET*, vol. 5, pp. 760-771, 2011.
- [4] D. Singh and K. Verma, "Multi-objective optimization for DG planning with load models," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, pp. 427-436, 2009.
- [5] H. Hedayati, S. Nabaviniaki, and A. Akbarimajd, "A method for placement of DG units in distribution networks," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, pp. 1620-1628, 2008.
- [6] R. K. Singh, N. B. D. Choudhury, and S. Goswami, "Optimal allocation of distributed generation in distribution network with voltage and frequency dependent loads," *Industrial and Information Systems, ICIS 2008. IEEE Region 10 and the Third international Conference on*, pp. 1-5, 2008.
- [7] W. Prommee and W. Ongsakul, "Optimal multi-distributed generation placement by adaptive weight particle swarm optimization," *Control, Automation and Systems, ICCAS 2008. International Conference on*, pp. 1663-1668, 2008.
- [8] A. Khoshbakht and M. Raoufat, "Optimal allocation of DGs and RCSs to improve distribution network reliability and network energy loss," *Power and Energy Conference, PECon 2008. IEEE 2nd International*, pp. 1586-1591, 2008.
- [9] C. Tautiva, A. Cadena, and F. Rodriguez, "Optimal placement of distributed generation on distribution networks," *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2008 IEEE/PES*, pp. 1-5, 2009.
- [10] P. Alemi and G. Gharehpetian, "DG allocation using an analytical method to minimize losses and to improve voltage security," *Power and Energy Conference, PECon 2008. IEEE 2nd International*, pp. 1575-1580, 2008.
- [11] رحمت الله هوشمند، حسین محکمی، امین خدابخشیان، «روش جدیدی در جایابی بهینه خازن‌ها و ژنراتورهای توزیع شده در



شکل ۹: منحنی مقایسه بین مقادیر توابع هدف برای زوج جایابی (۶۵۲/۶۷۱) با و بدون در نظر گرفتن کنترل کننده‌ها



شکل ۱۰: منحنی مقایسه بین مقادیر توابع هدف برای زوج جایابی (۶۳۴/۶۷۱) با و بدون در نظر گرفتن کنترل کننده‌ها



شکل ۱۱: منحنی مقایسه بین مقادیر توابع هدف برای بردار بهینه با و بدون در نظر گرفتن کنترل کننده‌ها

۵- نتیجه‌گیری

منابع تولید پراکنده با توجه به نوع عملکرد خود در دو مد کنترل توان و ولتاژ کار می‌کنند. جایابی مناسب منابع تولید پراکنده در شبکه‌های فشار ضعیف بر اساس توابع هدف گوناگونی مانند نوع واحد تولید پراکنده، کاهش تلفات، بهبود پروفایل ولتاژ و ... صورت می‌گیرد. در این مقاله یک روش جدید به منظور جایابی مناسب منابع تولید پراکنده با در نظر گرفتن مد کنترل ولتاژ و توان در شبکه توزیع ایزوله بر اساس توابع هدف حساسیت ولتاژ نسبت به توان اکتیو، تلفات و میزان پایداری ولتاژ در رسیدن به ۰/۹ پریونیت ولتاژ بیان می‌گردد. در این مقاله از این روش برای جایابی مناسب کنترل کننده‌های دو منبع تولید پراکنده استفاده می‌گردد. با استفاده از روش پیشنهادی مشاهده می‌گردد که با قراردادن

- [17] D. Wu, F. Tang, T. Dragicevic, J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, "A control architecture to coordinate renewable energy sources and energy storage systems in islanded microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 3, pp. 1156–1166, 2015.
- [18] L. Yan and Y. W. Li. "Power management of inverter interfaced autonomous microgrid based on virtual frequency-voltage frame." *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, no. 1, pp. 30-40, 2011.
- [19] T. L. Vandoorn and et al. "A control strategy for islanded microgrids with dc-link voltage control," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 2, pp. 703-713, 2011.
- [20] Ch. Changhee and et al. "Active synchronizing control of a microgrid," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 12, pp. 3707-3719, 2011.
- [21] P. S. Kundur, *Power System Stability And Control*, Mc Grow Hill, 1994.
- [22] زینب پیران، سعید حسنونند، مجید نیری پور، «جایابی تولیدات پراکنده با هدف بهبود قابلیت اطمینان، پروفایل ولتاژ و کاهش تلفات»، هفتمین کنفرانس ملی مهندسی برق و الکترونیک ایران، دانشگاه آزاد گناباد، ۱۳۹۴.
- [23] S. Adhikari, F. Li, "Coordinated V-f and P-Q Control of Solar Photovoltaic Generators With MPPT and Battery Storage in Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid Electronics*, vol. 5, Issue. 3, pp. 1270-1281, 2014.
- شبكة‌های توزیع با استفاده از الگوریتم جستجوی باکتری‌های جهت داده شده با PSO»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۳۹، شماره ۲، ۱۳۸۸.
- [12] R. S. Al Abri, E. F. El-Saadany, and Y. M. Atwa, "Optimal Placement and Sizing Method to Improve the Voltage Stability Margin in a Distribution System Using Distributed Generation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. PP, pp. 1-1, 2012.
- [13] Dan Wu; Fen Tang; Dragicevic, T.; Vasquez, J.C.; Guerrero, J.M. "Autonomous Active Power Control for Islanded AC Microgrids With Photovoltaic Generation and Energy Storage System," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 24, Issue: 4, pp. 882–889, 2014.
- [14] D. Boroyevich, I. Cvetkovic, D. Dong, R. Burgos, F. Wang, and F. Lee, "Future electronic power distribution systems a contemplative view," in *Proc. Int. Opt. Elect. Electron. Equipment Conf.*, pp. 1369–1380, 2010.
- [15] J. Schonberger, R. Duke, and S. D. Round, "DC-bus signaling: A distributed control strategy for a hybrid renewable nanogrid," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 53, no. 5, pp. 1453–1460, Oct. 2006.
- [16] D. Wu, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, T. Dragicevic, and F. Tang, "Coordinated power control strategy based on primary-frequency-signaling for islanded microgrids," *IEEE Energy Convers. Congress Expo*, pp. 1033–1038.