

## کنترل هماهنگ بهینه ولتاژ در شبکه‌های توزیع در حضور مولدهای بادی و خورشیدی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها

علی‌رضا توکلی\*<sup>۱</sup>، مجید مقامی<sup>۲</sup>

\* ۱- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران، a.tavakoli@iauhvaz.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی برق، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران، majid.maghami81@gmail.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۱۱

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۰۵

**چکیده:** در دهه اخیر میزان تولیدات پراکنده متصل به شبکه توزیع در حال افزایش است. حضور منابع تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع تأثیرات زیادی بر رفتار آن می‌گذارد و لازم است تأثیر این منابع در طراحی شبکه توزیع لحاظ شود. در این تحقیق روش کنترل هماهنگ بهینه ولتاژ (OCVC) با استفاده از مولدهای بادی و خورشیدی با در نظر گرفتن عدم قطعیت مولدها به منظور حل مسئله بهینه‌سازی چند هدفه، با هدف حداقل کردن خطای ولتاژ در باس نمونه، تغییرات توان راکتیو و خطای ولتاژ در مولدها ارائه می‌شود. کنترل هماهنگ بهینه ولتاژ از بهینه‌سازی پارتو برای یافتن مقادیر بهینه ولتاژ استفاده می‌کند. این روش با استفاده از ترکیب مولدهای بادی و خورشیدی بر روی شبکه‌های تست ۱۳ و ۳۴ شینه IEEE شبیه‌سازی شده و عدم قطعیت مولدهای بادی و خورشیدی نیز به وسیله روش مونت کارلو مدل‌سازی شده است. نتایج به دست آمده مؤثر بودن روش ارائه شده در کنترل ولتاژ و کاهش تلفات را نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** کنترل هماهنگ بهینه ولتاژ، منابع تولید پراکنده، بهینه‌سازی پارتو، عدم قطعیت، مونت کارلو.

### ۱- مقدمه

موجود در شبکه توزیع می‌باشد. سپس مقادیر بهینه به گونه‌ای پیدا می‌شود تا شبکه کمترین تلفات را داشته باشد.

امروزه رشد روزافزون قیمت گاز طبیعی و نفت، کاهش سوخت‌های فسیلی، افزایش گازهای گلخانه‌ای و آلودگی‌های زیست محیطی موجب شده است که استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان منبعی تمیز، نامحدود و سازگار با محیط زیست مورد توجه بیشتری قرارگیرد. همچنین با توجه به افزایش مصرف انرژی الکتریکی و هزینه مصرف آن نیاز شدیدی به افزایش راندمان تولید، توزیع و مصرف الکتریسیته به وجود آمده است. با تحقیقات گسترده‌ای که در زمینه انرژی صورت گرفته، یکی از گزینه‌های حل این مشکل حرکت به سمت منابع تولید پراکنده (DG)<sup>۱</sup> به ویژه منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد. اما در بین منابع تولید پراکنده، انرژی بادی و خورشیدی به دلایل فراوانی، دسترسی آسان و سهولت تبدیل شدن به انرژی

در شبکه‌های توزیع تجهیزات تنظیم‌کننده ولتاژ و توان راکتیو به صورت غیرمتمرکز، محلی و با فرض کاهش ولتاژ در طول فیدر براساس یک برنامه زمانی از پیش تعیین شده کنترل می‌شوند. این نحوه کنترل احتمال عملکرد ناهماهنگ تجهیزات را افزایش می‌دهد. همچنین افزایش بهره‌برداری از تولیدات پراکنده منجر به تغییر پروفیل ولتاژ و ایجاد اختلال در نحوه عملکرد تجهیزات تنظیم‌کننده ولتاژ می‌گردد. بنابراین لازم است ساختارهای کنترلی به نحوی طراحی شوند، تا اثر این واحدها در فرآیند کنترل در نظر گرفته شود. در این مقاله روش کنترل هماهنگ بهینه ولتاژ (OCVC) ارائه می‌شود که قادر به هماهنگی نواحی مختلف شبکه از جمله تمام منابع توان راکتیو و راکتیو

به دست آمده در این مرجع، اندازه و محل نامناسب منابع تولید پراکنده سبب افزایش تلفات توان و ایجاد مشکلات در پروفیل ولتاژ می شود. بررسی نتایج صورت گرفته در این مقاله نشان می دهد که روش مذکور نتوانسته است هماهنگی در کنترل ولتاژ و تلفات ایجاد کند. در [۷] یک روش کنترل هماهنگ بهینه ولتاژ برای شبکه توزیع در حضور منابع تولید پراکنده را ارائه شد. در این مرجع تابع هدف به صورت مجموع سه تابع تغییرات ولتاژ در باس نمونه، تغییرات توان راکتیو و ولتاژ در باس ژنراتور می باشد. الگوریتم بهینه سازی که در اینجا برای حل مسأله استفاده شده است الگوریتم ژنتیک می باشد. نتایج به دست آمده عملکرد مناسب روش پیشنهادی را نشان می دهد.

مرجع [۸] یک مدل جدید چند هدفه جهت برنامه ریزی تولید پراکنده شبکه های توزیع با استفاده از روش های فازی و بهینه سازی ازدحام ذرات برای انتخاب راه حل نهایی ارائه کرده است. مدل پیشنهادی سه تابع هدف یعنی ضعف ولتاژ، هزینه ها و مشکلات زیست محیطی را به حداقل می رساند. سطح جریان اتصال کوتاه شبکه به عنوان محدودیتی در نظر گرفته شده که نمی تواند به وسیله واحدهای تولید پراکنده فراتر رود. در [۹] روش بهینه سازی را جهت تعیین مکان و اندازه بهینه واحدهای تولید پراکنده مورد مطالعه قرار داده است. نتایج به دست آمده این تحقیق با روش تکرار پخش بار مقایسه شده است. نتایج نشان می دهند اندازه و مکان نامناسب مولدهای پراکنده سبب افزایش تلفات توان و ایجاد مشکلات در پروفیل ولتاژ می شود. در [۱۰] مدل دینامیکی احتمالی برای برنامه ریزی تولید پراکنده چند هدفه با استفاده از الگوریتم ژنتیک رتبه بندی نامغلوب ارائه شد. همچنین تقویت شبکه در حضور عدم قطعیت مولد پراکنده همراه مقادیر بار، توان تولیدی توربین های بادی و قیمت بازار برق در نظر گرفته شده است. فرایند برنامه ریزی با مسأله تابع دو هدفه مطرح می باشد. هدف اول کاهش قیمت نهایی هزینه سرمایه گذاری و بهره برداری واحدهای تولید پراکنده است که شامل پرداخت هزینه های خرید انرژی از شبکه اصلی و تقویت شبکه می باشد. هدف دوم کاهش ریسک فنی تعریف شده است که شامل احتمال نقص بهره برداری ایمن محدودیت های فنی است. در [۱۱] نصب تپ چنجر زیر بار (OLTC) <sup>۴</sup> به منظور بهینه سازی شبکه هوشمند متناوب را مطرح کرده است. همچنین در این مرجع تپ چنجرهای مختلف ارزیابی شده اند. تپ چنجر زیر بار در فرمول بندی مسأله بهینه سازی به وسیله محدودیت های ولتاژ اضافی و کم کردن محدودیت هایی در قالب تابع جریمه استفاده می شود.

در مرجع [۱۲] روش کنترل هماهنگ بهینه ولتاژ در شبکه توزیع برای حل مسأله بهینه سازی چند هدفه با هدف حداقل کردن خطای ولتاژ در باس های نمونه، تغییرات توان راکتیو و خطای ولتاژ در ژنراتورها ارائه شد. این مقاله اغتشاشات در شبکه توزیع، مشارکت بهینه توان راکتیو مولد پراکنده در شبکه توزیع نامتعادل، حداقل کردن تلفات و دستیابی به اهداف تابع چند هدفه را به صورت جداگانه بررسی می کند.

الکتریکی از محبوبیت ویژه ای برخوردارند. یکی از مهم ترین ویژگی های این نوع انرژی ها عدم قطعیت خروجی آن ها می باشد. از این رو باید در برنامه ریزی تولید و بهره برداری سیستم های قدرت این عدم قطعیت ها به نحو مناسبی در نظر گرفته شوند. سیاست گذاران انرژی در آینده امیدوارند انرژی های نو سهم به سزایی در تأمین انرژی مورد نیاز بشر داشته باشند. اتصال تولیدات پراکنده به شبکه توزیع منجر به ظهور مشکلات مختلفی در زمینه حفاظت، پایداری، کنترل ولتاژ، کیفیت توان، تلفات و ولتاژ حالت ماندگار می گردد. مولدهای پراکنده ممکن است باعث تغییرات ولتاژ در شبکه توزیع شوند و جهت پخش توان را در شبکه توزیع تغییر دهند. افزایش ولتاژ بستگی به مقدار توان اکتیو و راکتیو تزریق شده به وسیله آن ها دارد و جهت کنترل ولتاژ و توان راکتیو نیاز به روش های کنترلی جدیدی می باشد [۱].

کنترل هماهنگ ولتاژ (CVC)<sup>۲</sup> در شبکه توزیع، ولتاژ را در باس های اصلی تنظیم می کند. کنترل هماهنگ به این معنی است که تجهیزات کنترل ولتاژ و توان راکتیو علاوه بر عملکرد محلی، از راه دور با هماهنگی جامع و گسترده کنترل و تنظیم خواهند شد، تا پروفیل ولتاژ و پخش توان راکتیو بهینه ای فراهم شود. این روش برای حداقل کردن تغییرات ولتاژ در باس نمونه که آسیب پذیرترین باس در برابر تغییرات ولتاژ شبکه است از تابع چند هدفه (MO)<sup>۲</sup> استفاده می کند. بنابراین مسأله ای که باید حل شود، مینیمم کردن تغییرات ولتاژ در باس نمونه، توان راکتیو و ولتاژ مولدها می باشد سپس حل بهینه سازی منجر به مقدار واحدی می شود که مصالحه ای میان تمام اهداف ایجاد می کند. تحقیقات کمی وجود دارد که نواحی مختلف شبکه توزیع را هماهنگ کند و بر استفاده بهتر از توان راکتیو مولدهای پراکنده در شبکه های توزیع با بار نامتعادل تمرکز کند. از آنجایی که بیشتر اهداف با همدیگر متناقض بوده اما به دست آوردن جواب بهینه ای که توابع هدف را کمینه کند امکان پذیر است [۲].

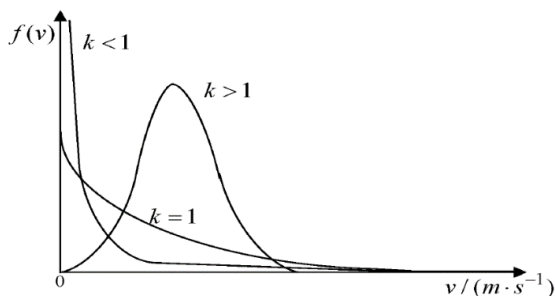
مرجع [۳] مسأله کنترل ولتاژ و توان راکتیو در حضور توربین بادی و با استفاده از کنترل محلی و متمرکز انجام شده است. در این مرجع خازن های فیدر از طریق کنترل کننده محلی نوع ولتاژ کنترل می شوند. ولی خازن های پست و تپ چنجر قابلیت کنترل از راه دور را داشته و از این طریق بر اساس پیش بینی بار روزانه کنترل می شوند. در [۴] کنترل ولتاژ و توان راکتیو در حضور منابع تولید پراکنده مبتنی بر ژنراتور سنکرون صورت گرفته است و فرض بر این است که تمام تجهیزات تنها قابلیت کنترل محلی را دارا می باشند. در [۵] یک روش چند سطحی برای مشارکت بهینه مزارع بادی به منظور تعادل توان راکتیو در سیستم توزیع انرژی را مورد بررسی قرار داده اند. در این مقاله از روش کنترلی استفاده شده که مزیت اصلی آن مقاوم بودن و عدم تأثیر پذیری در برابر تغییرات ناگهانی سرعت باد می باشد. از جمله معایب اصلی این مرجع چند هدفه نبودن تابع هدف می باشد.

مرجع [۶] تأثیر بر روی ولتاژ، کاهش تلفات و تعیین اندازه و محل بهینه مولدهای پراکنده را مورد مطالعه قرار داده است. مطابق نتایج

می‌شود. آزمایش‌های زیادی نشان داده است که سرعت تصادفی باد از تابع توزیع ویبول پیروی می‌کند. زیرا تابع توزیع ویبول مطابقت بهتری با داده‌های باد دارد و تا حد زیادی مشخصات باد یک منطقه را مدل می‌کند. تابع توزیع احتمالاتی ویبول به وسیله رابطه (۱) بیان می‌شود:

$$f(v) = \frac{k}{c^k} v^{(k-1)} e^{-(v/c)^k}, \quad 0 \leq v \leq \infty \quad (1)$$

در معادله فوق  $V$  سرعت باد (m/s)،  $K$  ضریب شکل و  $C$  ضریب مقیاس (m/s) است. تابع فوق در شکل (۱) ترسیم شده است [۱۳].



شکل (۱): توزیع ویبول سرعت باد [۱۳]

در نتیجه تابع توزیع احتمال توان خروجی یک واحد بادی به صورت معادله (۲) می‌باشد:

$$P_w = \begin{cases} 0 & V \leq V_{ci} \quad \text{or} \quad V \geq V_{co} \\ P_r \cdot \frac{V - V_{ci}}{V_r - V_{ci}} & V_{ci} \leq V \leq V_r \\ P_r & V_r \leq V \leq V_{co} \end{cases} \quad (2)$$

$P_w$ : توان خروجی توربین بادی (کیلووات)

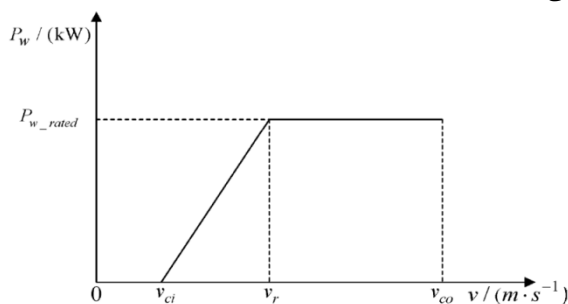
$V_{ci}$ : سرعت وصل توربین بادی یا حداقل سرعت باد (متر بر ثانیه). یعنی کمترین مقدار سرعت بادی که برای سرعت‌های کمتر از آن توربین قادر به تولید برق نمی‌باشد.

$V$ : سرعت باد (متر بر ثانیه)

$V_{co}$ : سرعت قطع توربین بادی یا حداکثر سرعت باد (متر بر ثانیه). در این سرعت توربین‌های بادی به دلیل حفظ ایمنی خاموش می‌شود چون در سرعت‌های بالای باد نیرویی از سوی باد بر پره‌های توربین اعمال و چرخش مناسب پره‌ها جلوگیری می‌کند.

$P_r$ : توان نامی یا توان تثبیت شده (کیلووات)

بنابراین رابطه توان خروجی و سرعت باد مطابق شکل (۲) می‌باشد [۱۳].



شکل (۲): رابطه بین توان خروجی و سرعت باد [۱۳]

امروزه با تولید انبوه و اقتصادی انواع توربین‌های بادی و خورشیدی، استفاده از انرژی‌های بادی و خورشیدی برای تأمین نیاز انرژی ساختمان‌ها و استقلال انرژی آن‌ها و حتی فروش انرژی مازاد آن‌ها به شرکت‌های برق بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق روش کنترل هماهنگ بهینه ولتاژ (OCVC) با استفاده از مولدهای بادی و خورشیدی با در نظر گرفتن عدم قطعیت آن‌ها ارائه خواهد شد که می‌تواند بین نقاط مختلف شبکه از جمله منابع توان اکتیو و راکتیو شبکه توزیع تعادل برقرار کند. برای حل مسأله کنترل هماهنگ بهینه ولتاژ از الگوریتم بهینه‌سازی پارتو برای حل اهداف گوناگون تابع چند هدفه به طور جداگانه استفاده می‌شود و مقادیر بهینه به گونه‌ای پیدا می‌شود که شبکه کمترین تلفات را داشته باشد. لازم به ذکر است که کلیه شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار MATLAB/SIMULINK صورت می‌گیرد.

در بخش ۲ به بیان مدل‌سازی مسأله عدم قطعیت مولدهای بادی و خورشیدی پرداخته شده است. در بخش ۳ مسأله کنترل هماهنگ ولتاژ در شبکه توزیع مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش ۴ به بیان نتایج شبیه‌سازی مولدهای بادی و خورشیدی و عدم قطعیت آن‌ها برای شبکه‌های استاندارد ۱۳ و ۳۴ باس IEEE پرداخته شده است و نتیجه‌گیری از مقاله ارائه شده نیز در بخش ۵ آمده است.

## ۲- مدل‌سازی عدم قطعیت مولدهای بادی و خورشیدی

برای بررسی عدم قطعیت انرژی‌های تجدیدپذیر به توزیع احتمالی سرعت باد و تابش خورشید نیاز می‌باشد. به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت توان تولیدی واحدهای تجدیدپذیر بادی و خورشیدی در ابتدا توزیع احتمالی سرعت باد و تابش خورشید بررسی می‌شود. جهت بررسی احتمالی تغییرات مقادیر کمیت‌های سرعت باد و تابش خورشید از تابع چگالی احتمال<sup>۷</sup> این متغیرها استفاده می‌شود.

### ۱-۲- عدم قطعیت توان بادی

تابع توزیع ویبول دارای بیشترین کاربرد در عدم قطعیت تولید بادی می‌باشد و در مقالات مدل قابل قبولی برای انرژی باد می‌باشد. در این مقاله نیز از این مدل استفاده شده است. عدم قطعیت توان بادی یکی از مشخصه‌های ذاتی این نوع انرژی می‌باشد. لذا در هنگام بهره‌برداری از این نوع تولیدکننده‌ها در نظر گرفتن عدم قطعیت آنها امری ضروری می‌باشد. عدم قطعیت انرژی بادی اساساً به علت عدم قطعیت سرعت باد در ساعات مختلف می‌باشد. با مطالعه اطلاعات گذشته سرعت باد می‌توان توزیع سرعت باد برای مناطق مختلف را به دست آورد. توزیع سرعت باد برای یک منطقه مشخص نشان‌دهنده انرژی باد در دسترس آن منطقه می‌باشد. در نتیجه با به دست آوردن توزیع احتمالاتی سرعت باد پتانسیل انرژی باد مشخص

## ۲-۲- عدم قطعیت توان خورشیدی

اغلب شدت تابش به عنوان یک عامل اصلی در تولید واحدهای خورشیدی به حساب می آید. توان خروجی سلول های خورشیدی مرتبط با تابش خورشیدی است. بنابراین مدل سازی توان خروجی آن به مدل سازی تابش خورشیدی بستگی دارد. توان خروجی سلول خورشیدی به عنوان تابعی از تابش به نام منحنی توان-تابش بیان می شود. مراحل تعیین تابع چگالی احتمال تابش خورشید مشابه نحوه تعیین تابع چگالی احتمال سرعت باد می باشد با این تفاوت که میزان تابش خورشید در برخی از ساعات شبانه روز صفر است و برای این ساعات نیازی به محاسبه تابع چگالی احتمال نمی باشد.

بنابراین رابطه بین شدت تابش و توان خروجی به صورت زیر می باشد:

$$P_s = \begin{cases} P_{s\_rated} \frac{s}{s_r}, & 0 \leq s \leq s_r \\ P_{s\_rated}, & s_r \leq s \end{cases} \quad (3)$$

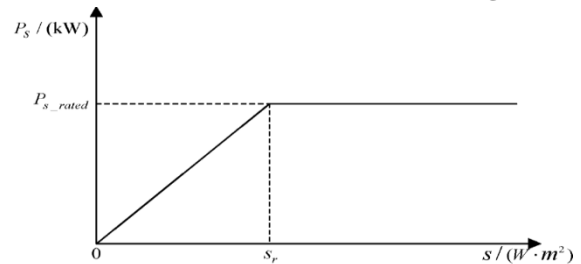
$P_s$ : توان خروجی سلول خورشیدی (کیلووات)

$P_{s\_rated}$ : توان نامی سلول خورشیدی (کیلووات)

$S$ : شدت تابش (وات بر مترمربع)

$S_r$ : شدت تابش استاندارد (وات بر مترمربع)

و منحنی توان-تابش آن نیز در شکل (۳) آمده است [۱۴].



شکل (۳): رابطه بین توان خروجی و شدت تابش [۱۴]

## ۲-۳- مدل سازی به روش مونت کارلو

مونت کارلو یکی از روش های شبیه سازی پرکاربرد می باشد. که بر مبنای تولید اعداد تصادفی و استفاده از روابط احتمالی جهت مدل سازی رفتار سیستم می باشد. الگوریتم ارائه شده برای روش مونت کارلو بدین صورت است که پس از تولید تابع چگالی احتمال سرعت باد و تابش خورشید جمعیت اولیه تعیین می شود. جمعیت اولیه باید به گونه ای تعیین شود که همه ذرات در فضای شدنی پاسخ مسأله قرار گیرند. به همین دلیل پس از تولید هر ذره، ابتدا شاخص های ولتاژ و تلفات با در نظر گرفتن عدم قطعیت توان تولیدی واحدهای تجدیدپذیر برای آن سناریو محاسبه می شود. در صورتی که شاخص ولتاژ و تلفات تعیین شده در فضای شدنی مسئله قرار داشته باشد، این ذره در جمعیت اولیه قرار می گیرد و این روند تا زمان تعیین جمعیت اولیه مورد نظر ادامه می یابد.

## ۳- مسأله کنترل هماهنگ ولتاژ در شبکه توزیع

ولتاژ در شبکه توزیع در تعدادی از باس های انتخاب شده (باس های نمونه)، تولید توان راکتیو و تغییرات ولتاژ ژنراتور هم گره می شوند. هر افزایش یا کاهش ولتاژ در باس های نمونه، به ترتیب تولید توان راکتیو و ولتاژ ژنراتور را افزایش یا کاهش می دهد. در شبکه های توزیع، CVC ولتاژ را در باس های نمونه تنظیم می کند. در یک فرم ریاضی، مسأله را می توان به صورت زیر نوشت [۱۵].

$$F_1 = \sum_{i \in P} \lambda_i \left[ k (V_i^{ref} - V_i) - \sum_{k \in G} C_{i,k}^V \cdot \Delta V_k \right]^2 \quad (4)$$

در رابطه بالا P و G مجموعه شاخص های باس نمونه و ژنراتور هستند.  $V_i, V_i^{ref}, \Delta V_k$ ، ولتاژ نقطه تنظیم، ولتاژ واقعی و تغییرات ولتاژ در شین  $i$  یعنی اختلاف در مقدار ولتاژ دو گام محاسباتی است.  $C_{i,k}^V$  ضریب ماتریس حساسیت است که به ترتیب تغییر ولتاژ در شین  $i$  و  $k$  را به هم مرتبط می کند.  $\lambda_i$  و  $k$  به ترتیب ضریب وزنی و بهره رگولاتور هستند.

هدف دوم انحراف نسبت تولید توان راکتیو است. در OCVC این موضوع بیانگر مدیریت توان راکتیو DG در یک ناحیه کنترل شده است. این هدف به صورت زیر فرمول بندی می شود [۱۶].

$$F_2 = \sum_{i \in G} \lambda_i^q \left[ k (q_i^{ref} - \frac{Q_i}{Q_i^{MAX}}) - \sum_{k \in G} C_{i,k}^V \cdot \Delta V_k \right]^2 \quad (5)$$

در رابطه بالا  $Q_i$  و  $Q_i^{MAX}$  به ترتیب توان راکتیو و ماکزیمم توان راکتیو تولید شده در شین  $i$  است.  $q_i^{ref}$  مقدار مرجع توان راکتیو در ناحیه کنترل شده است.

کنترل هماهنگ بهینه ولتاژ در شبکه های توزیع ولتاژ ژنراتورها را تنظیم می کند. مدل ریاضی برای سومین هدف به صورت زیر است.

$$F_3 = \sum_{i \in G} \lambda_i^v \left[ k (V_i^{ref} - V_i) - \Delta V_i \right]^2 \quad (6)$$

## ۳-۱- روش کنترل هماهنگ بهینه ولتاژ (OCVC)

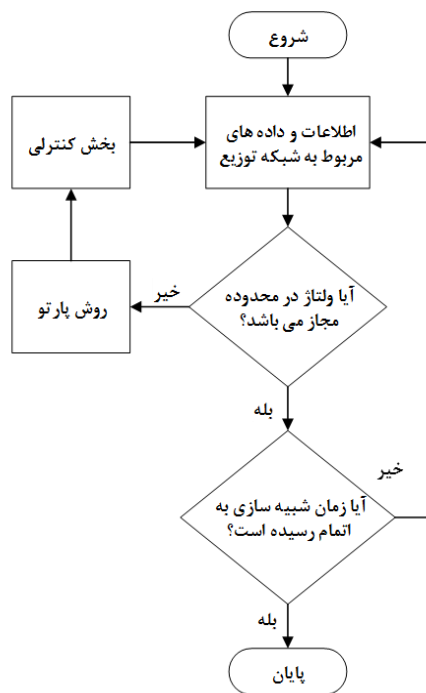
### مورد مطالعه

کنترل هماهنگ بهینه ولتاژ یک روش چند سطحی برای مشارکت بهینه در متعادل کردن توان راکتیو مولد پراکنده متصل به شبکه توزیع ارائه می دهد و ضرایب وزنی را به صورت دینامیکی بر اساس مقدار ولتاژ در باس نمونه، مقدار ولتاژ در باس ژنراتور و مقدار توان راکتیو موجود تنظیم می کند. کنترل هماهنگ بهینه ولتاژ از روش بهینه سازی پارتو برای پیدا کردن بهترین ضرایب استفاده می کند و وزن ها را بر اساس دسترس پذیری منابع در شبکه تغییر می دهد [۱۲ و ۱۸].

### ۳-۲- مراحل کنترل ولتاژ در روش OCVC

برای انجام کنترل ولتاژ لازم است که حلقه کنترلی به‌ازای هر بازه محاسبات شبکه تکرار شود. در هر بار اجرای الگوریتم کنترلی مراحل زیر انجام می‌شود [۱۷]:

- ۱ - محاسبات پخش بار شبکه توزیع باتوجه به توپولوژی تعریف شده برای شبکه.
- ۲ - در صورتی که پس از انجام محاسبات شبکه، ولتاژ باس نمونه در محدوده مجاز قرار نداشته باشد، الگوریتم OCVC فعال می‌شود. در غیر این صورت مرحله ۶ ادامه می‌یابد.
- ۳ - توابع هدف  $F_1$ ،  $F_2$  و  $F_3$  که به ترتیب خطای ولتاژ باس نمونه، تغییرات توان راکتیو و تغییرات ولتاژ مولدهای پراکنده را نشان می‌دهند، محاسبه و بهینه‌سازی می‌شوند. از آنجا که مسأله دارای سه تابع هدف است از بهینه‌سازی پارتو برای پیدا کردن مجموعه نقاط بهینه پارتو استفاده می‌شود.
- ۴ - از یک الگوریتم بهینه برای تصمیم‌گیری درباره ضرایب وزنی توابع هدف استفاده می‌شود. با مشخص شدن این ضرایب وزنی، نقطه بهینه از بین مجموعه نقاط بهینه پارتو انتخاب می‌شود.
- ۵ - با داشتن ولتاژ مرجع، ولتاژ بهینه تپ‌چنجر که ابزار کنترلی این روش است محاسبه می‌شود.
- ۶ - پس از اعمال کنترل بر روی ولتاژ و توان راکتیو (در صورت لزوم) شبیه‌سازی برای زمان محاسباتی بعدی انجام می‌گیرد. برای این منظور مراحل محاسبه و کنترل از مرحله ۱ مجدداً آغاز می‌شود. شکل (۴) فلوچارت روش مورد استفاده در این تحقیق که مطابق مراحل فوق بوده را نشان می‌دهد.



شکل (۴): فلوچارت الگوریتم ارائه شده در مقاله

لازم به ذکر می‌باشد که روش بهینه‌سازی پارتو<sup>۱</sup>، تابع چند هدفه را به‌صورت جداگانه حل می‌کند. هدف آن پیدا کردن و مقایسه راه‌حل‌های قابل قبول و ارائه آن‌ها به تصمیم‌گیرندگان (بهره برداران) است که در بین آن‌ها راه‌حل نهایی را انتخاب می‌کنند.

### ۳-۳- قیود بهینه‌سازی

قیود مسأله کنترل هماهنگ ولتاژ در شبکه‌های توزیع، مسائل فنی و اقتصادی را در شبکه توزیع در نظر گرفته‌اند. در این مسأله مهم‌ترین قیود عبارتند از: قید حدود ولتاژ، قید توان راکتیو و قید وزن‌ها [۱۸].

### ۳-۴- قیود ولتاژ

بهره برداری مناسب از سیستم‌های توزیع مستلزم ثابت نگه داشتن پروفیل ولتاژ باس‌های شبکه می‌باشد. قیود ولتاژ در باس‌های ژنراتور و نمونه برای تعیین مقادیر عملکرد ایمن استفاده می‌شود. در شبکه‌های توزیع یک محدوده ولتاژ پایدار قابل قبول در نظر گرفته می‌شود [۱۷].

$$|V_i| \leq \Delta V_i^{MAX} \quad \text{for } i \in G \quad (7)$$

### ۳-۵- قیود توان راکتیو

در این مسأله، کنترل تولید توان راکتیو بسیار مهم است بنابراین می‌توان تابع زیر را تعریف نمود.

$$q^{nf} = \frac{\sum_{i \in G} Q_i}{\sum_{i \in G} Q_i^{MAX}} \quad (8)$$

Where  $|Q_i| \leq Q_i^{MAX}$

### ۳-۶- قیود وزن‌ها

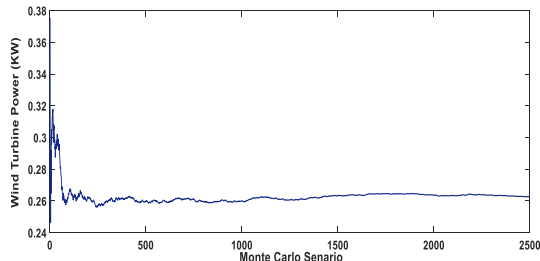
وزن اهداف به دلیل اینکه بیانگر اولویت اهداف بوده و به شرایط کاری وابسته هستند، اهمیت دارند. رابطه این وزن‌ها به‌صورت زیر توصیف می‌شود:

$$\lambda_i^q + \lambda_i^v + \lambda_i^w = 1 \quad (9)$$

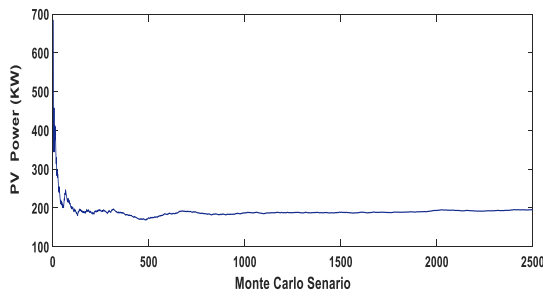
مسأله بهینه‌سازی ۱ تا ۶ از یک پروفیل ولتاژ بهینه در شبکه توزیع اطمینان می‌دهد. حل بهینه‌سازی منجر به مقدار واحدی می‌شود که بیانگر مصالحه در بین تمام اهداف است.

## ۴- نتایج شبیه‌سازی

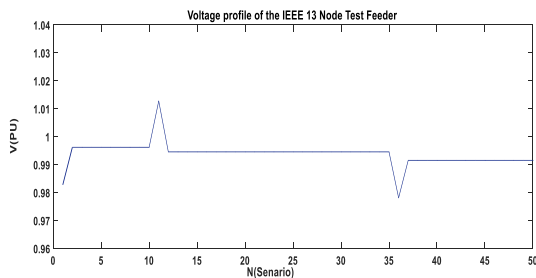
شکل‌های (۶) و (۷) به ترتیب توان توربین بادی و خورشیدی در طی سناریوهای مختلف روش مونت کارلو را نشان می‌دهد که تقریباً پس از ۲۵۰۰ مرحله سیستم همگرا می‌شود. در اینجا ۲۵۰۰ سناریو تولید می‌شود که در هر یک مقدار وزش باد و نیز میزان تابش خورشید مشخص می‌شوند. انتخاب تعداد سناریوهای بیشتر منجر به دقت بیشتری خواهد شد اما حجم محاسبات را افزایش می‌دهد. همچنین شکل‌های (۸)، (۹) و (۱۰) به ترتیب منحنی‌های مربوط به پروفیل ولتاژ، تلفات توان اکتیو و راکتیو با بررسی عدم قطعیت مولدهای بادی و خورشیدی برای شبکه ۱۳ باس را نشان می‌دهد.



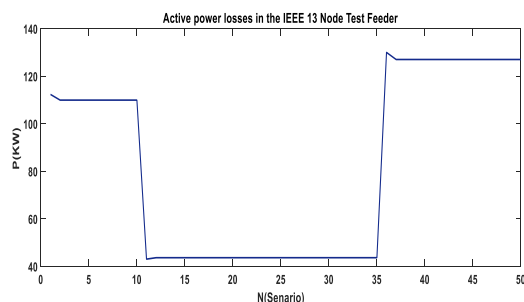
شکل (۶): توان توربین بادی در سناریوهای مختلف روش مونت کارلو (شبکه ۱۳ باس)



شکل (۷): توان منبع خورشیدی در سناریوهای مختلف روش مونت کارلو (شبکه ۱۳ باس)



شکل (۸): همگرایی پروفیل ولتاژ با در نظر گرفتن عدم قطعیت (شبکه ۱۳ باس)



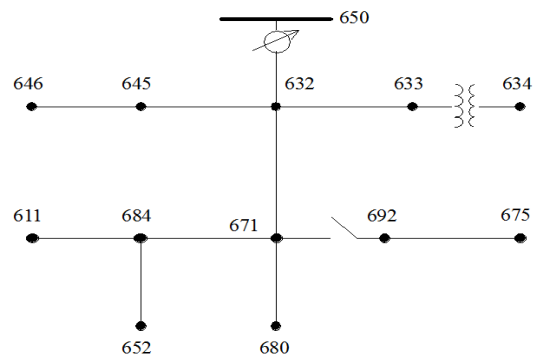
شکل (۹): همگرایی تلفات توان اکتیو با در نظر گرفتن عدم قطعیت (شبکه ۱۳ باس)

در این مقاله مولدهای بادی و خورشید به صورت ترکیبی و همزمان و همچنین بار سه فاز متعادل به سیستم متصل می‌شوند. این دو منبع توسط توابع احتمالی‌شان مدل‌سازی شده‌اند و حال عدم قطعیت ورود این منابع به شبکه به روش مونت کارلو مورد بررسی قرار می‌گیرد. جهت شبیه‌سازی مولدهای بادی و خورشیدی در این مقاله از اطلاعات باد منطقه لوتک زابل [۱۹] و اطلاعات تابش خورشید ایالت کلیفرنیای آمریکا [۲۰] استفاده شده است. هدف در این شبیه‌سازی این است که آیا در این حالت و با حضور سیستم کنترلی همگرایی حاصل می‌شود یا خیر. در واقع اگر همگرایی در تعداد سناریوهای مختلف حاصل شد آنگاه می‌توان گفت که سیستم مذکور و روش کنترلی در برابر عدم قطعیت منابع بادی و خورشیدی به خوبی عمل کرده‌اند.

به منظور بررسی عملکرد و مؤثر بودن روش پیشنهادی بر روی دو شبکه استاندارد ۱۳ و ۳۴ باس IEEE پیاده‌سازی شده است. برای مطالعه رفتار کنترلر در برابر تغییرات ولتاژ در هر شبکه، مولدهای بادی و خورشیدی و یک بار سه‌فاز نامتعادل در سناریوهای مختلف به شبکه اضافه شده و تغییرات پروفیل ولتاژ، تلفات توان اکتیو و تلفات توان راکتیو و واکنش کنترلر به آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت.

### ۴-۱- نتایج شبکه استاندارد ۱۳ باس IEEE

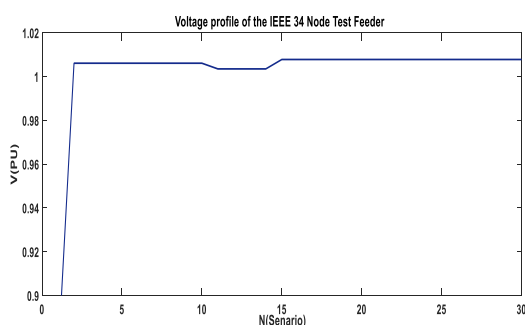
شبکه توزیع ۱۳ باس IEEE دارای سطح ولتاژ توزیع ۴٫۱۶ کیلوولت در بیشتر باس‌های خود است. توپولوژی این شبکه، محل باس نمونه، مقدار بار نامتعادل باس‌ها و همچنین محل OLTC در شکل (۵) نمایش داده شده است. مشخصات شبکه استاندارد ۱۳ باس مطابق جداول (۱) و (۲) می‌باشد.



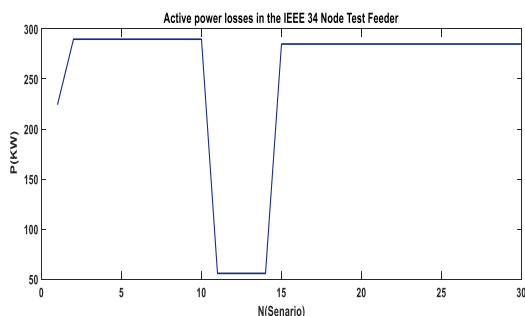
شکل (۵): شبکه استاندارد ۱۳ باس IEEE [۱۲]

دو مولد بادی و خورشیدی به ترتیب با ظرفیت‌های ۳۸۰ کیلووات و ۷۰۰ کیلووات به صورت ترکیبی و همزمان به باس ۶۷۵ در لحظه شروع شبیه‌سازی وارد می‌شود. سپس یک بار سه‌فاز نامتعادل به مقدار ۱۲۰۰ کیلووات و ۸۰۰ کیلووار در باس نمونه (باس ۶۷۱) به منظور بررسی اغتشاشات شبکه توزیع در سناریوهای مختلف به شبکه اضافه می‌شود.

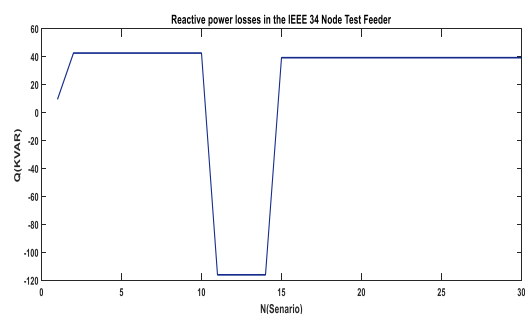
توان راکتیو خروجی منابع تولید پراکنده کنترل کرد. هم‌چنین تأثیر منابع تولید پراکنده بر روی تلفات بستگی به اندازه و محل مولدهای پراکنده دارد. هم‌چنین شکل (۱۲) منحنی مربوط به پروفیل ولتاژ شبکه ۳۴ باس را نشان می‌دهد که ولتاژ شبکه با ورود واحدهای تجدیدپذیر در محدوده مجاز و قابل قبول قرار دارد. شکل‌های (۱۳) و (۱۴) منحنی‌های تلفات اکتیو و راکتیو شبکه ۳۴ باس را نشان می‌دهد که اضافه شدن مولدهای بادی و خورشیدی باعث کاهش تلفات در شبکه توزیع شده است. شکل (۱۵) توان توربین بادی شبکه ۳۴ باس با در نظر گرفتن عدم قطعیت را نشان می‌دهد که در سناریو ۲۵۰۰ به مقدار خروجی ۲۶۵ کیلووات رسیده است. شکل (۱۶) توان واحد خورشیدی با وجود عدم قطعیت می‌باشد که در سناریو ۲۵۰۰ به مقدار توان خروجی ۲۰۰ کیلووات رسیده است.



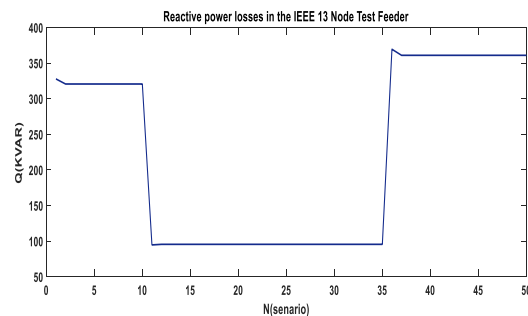
شکل (۱۲): همگرایی پروفیل ولتاژ با در نظر گرفتن عدم قطعیت (شبکه ۳۴ باس)



شکل (۱۳): همگرایی تلفات توان اکتیو با در نظر گرفتن عدم قطعیت (شبکه ۳۴ باس)



شکل (۱۴): همگرایی تلفات توان راکتیو با در نظر گرفتن عدم قطعیت (شبکه ۳۴ باس)

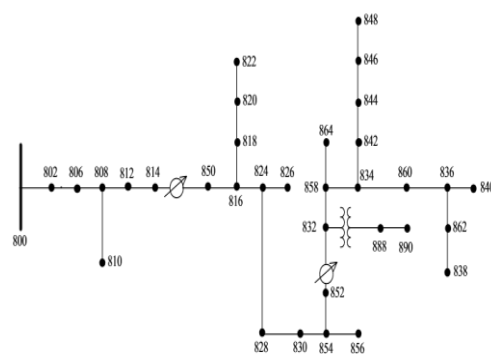


شکل (۱۰): همگرایی تلفات توان راکتیو با در نظر گرفتن عدم قطعیت (شبکه ۱۳ باس)

همان‌گونه که مشاهده می‌شود تلفات اکتیو در روش OCVC به دلیل مدیریت بهینه توان راکتیو در شبکه کمتر است. زیرا در این مورد OCVC به صورت بهینه تحویل توان راکتیو را برای کاهش تلفات هماهنگ می‌کند. مطابق نتایج به دست آمده مقادیر ولتاژ با استفاده از روش OCVC کمترین تغییرات را در اثر اغتشاشات و ورود و خروج مولدهای پراکنده در شبکه نشان می‌دهند. این عملکرد سلسله مراتبی در تلفات اکتیو و راکتیو نیز صدق می‌کند و باعث کاهش تلفات اکتیو و راکتیو در سیستم شده است.

#### ۲-۴- نتایج شبکه استاندارد ۳۴ باس IEEE

شبکه توزیع ۳۴ باس IEEE دارای دو سطح ولتاژ توزیع ۴،۱۶ و ۲۴،۹ کیلوولت در باس‌های خود است. توپولوژی این شبکه، محل باس نمونه، مقدار بار نامتعادل باس‌ها و هم‌چنین محل OLTC در شکل (۱۱) نمایش داده شده است. مشخصات شبکه استاندارد ۳۴ باس مطابق جداول (۳) و (۴) می‌باشد.



شکل (۱۱): شبکه استاندارد ۳۴ باس [۱۷]

نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی رفتار کنترلر در این شبکه در سناریوهای مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. لازم به ذکر می‌باشد که برای مطالعه رفتار کنترلر در برابر تغییرات ولتاژ، مولدهای بادی و خورشیدی به ترتیب با ظرفیت‌های ۳۲۰ کیلووات و ۷۰۰ کیلووات و به صورت ترکیبی و هم‌زمان در ابتدا با نصف ظرفیت، سپس با تمام ظرفیت در باس شماره ۸۴۴ وارد می‌شود. هم‌چنین در ادامه یک بار سه‌فاز نامتعادل به مقدار ۱۰۰۰ کیلووات و ۶۶۶ کیلووات در باس ۸۳۲ به شبکه اضافه می‌شود. در OCVC تغییر ولتاژ را می‌توان به وسیله

حذف سرمایه‌گذاری‌های آینده در تنظیم کلاسیک توان راکتیو و ولتاژ باشد. نتایج نشان می‌دهد که کنترل هماهنگ بهینه ولتاژ منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع باعث بهبود پروفیل ولتاژ و حفظ آن در محدوده مجاز و کاهش تلفات می‌شود. همچنین بررسی نتایج نشان می‌دهد در نظر گرفتن مسأله عدم قطعیت در سیستم مورد مطالعه موجب می‌شود نتایج به‌دست آمده به واقعیت نزدیک‌تر باشد و بتوان از خروجی‌های نتایج در شرایط واقعی نیز استفاده کرد. همچنین استفاده از مولدهای بادی و خورشیدی به صورت ترکیبی باعث کاهش عدم قطعیت منابع بادی و خورشیدی می‌شود.

### ضمایم

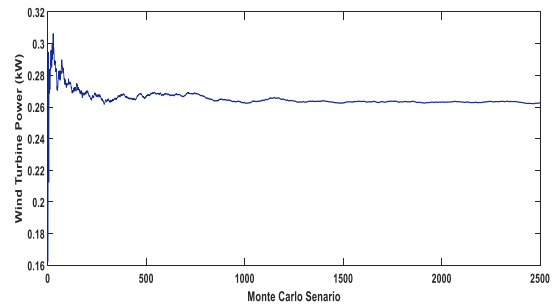
اطلاعات شبکه های ۱۳ و ۳۴ باسه

جدول (۱): اطلاعات خطوط بین باس‌های شبکه ۱۳ باس [۱۲]

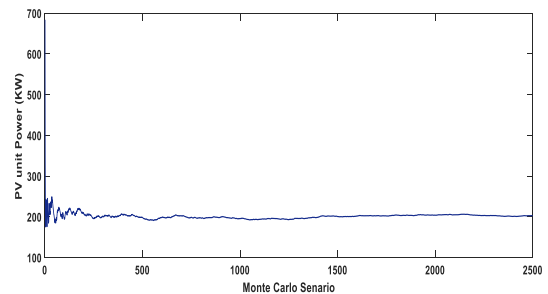
طول (فوت)	گره B	گره A
۵۰۰	۶۴۵	۶۳۲
۵۰۰	۶۳۳	۶۳۲
.	۶۳۴	۶۳۳
۳۰۰	۶۴۶	۶۴۵
۲۰۰۰	۶۳۲	۶۵۰
۸۰۰	۶۵۲	۶۸۴
۲۰۰۰	۶۷۱	۶۳۲
۳۰۰	۶۸۴	۶۷۱
۱۰۰۰	۶۸۰	۶۷۱
.	۶۹۲	۶۷۱
۳۰۰	۶۱۱	۶۸۴
۵۰۰	۶۷۵	۶۹۲

جدول (۲): اطلاعات بارهای شبکه ۱۳ باس [۱۲]

گره	فاز ۱ kW	فاز ۱ kVAr	فاز ۲ kW	فاز ۲ kVAr	فاز ۳ kW	فاز ۳ kVAr
۶۳۴	۱۶۰	۱۱۰	۱۲۰	۹۰	۱۲۰	۹۰
۶۴۵	.	.	۱۷۰	۱۲۵	.	.
۶۴۶	.	.	۲۳۰	۱۳۲	.	.
۶۵۲	۱۲۸	۸۶	.	.	.	.
۶۷۱	۳۸۵	۲۲۰	۳۸۵	۲۲۰	۳۸۵	۲۲۰
۶۷۵	۴۸۵	۱۹۰	۶۸	۶۰	۲۹۰	۲۱۲
۶۹۲	.	.	.	.	۱۷۰	۱۵۱
۶۱۱	.	.	.	.	۱۷۰	۸۰
مجموع	۱۱۵۸	۶۰۶	۹۷۳	۶۲۷	۱۱۳۵	۷۵۳



شکل (۱۵): توان توربین بادی در سناریوهای مختلف روش مونت کارلو (شبکه ۳۴ باس)



شکل (۱۶): توان منبع خورشیدی در سناریوهای مختلف روش مونت کارلو (شبکه ۳۴ باس)

همان‌گونه که مشاهده می‌شود در شبکه ۳۴ باس نیز سیستم مذکور همگرایی خود را حفظ کرده است و منحنی‌های مربوط به آن مشابه حالتی است که عدم قطعیت وجود ندارد. ورود مولدهای بادی و خورشیدی به شبکه نیز باعث کاهش تلفات اکتیو و راکتیو و بهبود پروفیل ولتاژ در شبکه توزیع شده است. لازم به ذکر است که عدم قطعیت در منابع به‌طور کلی سبب افزایش تلفات توان در سیستم قدرت می‌شود که با توجه به اینکه در این جا بسیار ناچیز است روش کنترل هماهنگ بهینه ولتاژ در شبکه توزیع و همچنین ترکیب واحدهای بادی و خورشیدی باعث کاهش عدم قطعیت منابع مذکور در شبکه شده است.

### ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق روش کنترل هماهنگ بهینه ولتاژ براساس مرز پارتو ارائه شد که برای بهینه‌سازی چند هدفه مسأله ولتاژ استفاده شده است. این روش به‌عنوان یک بهینه‌سازی چند سطحی با مشارکت توان اکتیو و راکتیو تولیدات پراکنده متصل به شبکه توزیع ارائه شد. برای این منظور از روش مرز پارتو به منظور حل تمام سه هدف مختلف مسأله چند هدفه به‌صورت جداگانه با وزن‌های دینامیکی استفاده شد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش OCVC تمام مسائل مربوط به ولتاژ از جمله اضافه ولتاژ منابع تولید پراکنده را برطرف می‌کند و پروفیل ولتاژ شبکه توزیع در یک محدوده ثابت در اطراف مقادیر مرجع باقی می‌ماند. همچنین OCVC می‌تواند یک روش مؤثر برای کاهش یا



[2] Ahmed, Musse Mohamed, and W. L. Soo.; "Supervisory control and data acquisition system (scada) based customized remote terminal unit (rtu) for distribution automation system. " Power and Energy Conference, 2008. PECon 2008. IEEE 2nd International. IEEE, 2008.

[3] Ebrahimi A, Ahmadian M, Shivaie M, Ghouadi M.; "Real time volt & var controls in distribution networks considering distributed generation by imperialist competitive algorithm and fuzzy theory". JEM, 2011.

[4] El-Ela, AA Abou, Sm M. Allam, and M. M. Shatla.; "Maximal optimal benefits of distributed generation using genetic algorithms. " Electric Power Systems Research 80.7, pp.869-877,2010.

[5] Moradi, Mohammad Hasan, and M. Abedini.; "A combination of genetic algorithm and particle swarm optimization for optimal DG location and sizing in distribution systems. " International Journal of Electrical Power & Energy Systems 34.1,pp.66-74 ,2012.

[6] Agalgaonkar, Yashodhan P., Bikash C. Pal, and Rabih A. Jabr.; "Distribution voltage control considering the impact of PV generation on tap changers and autonomous regulators. " IEEE Transactions on Power Systems 29.1,pp.182-192, 2014.

[7] Richardot, Olivier, et al.; "Coordinated voltage control in distribution networks using distributed generation. " Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2005/2006 IEEE PES, 2006.

[8] Habibi, A.; Nayeripour, M.; Aghaei, J.; "Secure multi-objective distributed generation planning in distribution network", 21st Iranian conference on electrical engineering, pp.1- 6,2013.

[9] Anwar, A.; Pota.; HR.; "Loss reduction of power distribution network using optimum size and location of distributed generation", 21st Australasian universities power engineering conference (AUPEC), pp. 1-6,2011.

[10] Soroudi, A.; Caire, R.; Hadjsaid, N.; Ehsan, M.; "Probabilistic dynamic multi-objective model for renewable and non-renewable distributed generation planning", IET Gener Transm Distrib, No.5, pp.1173-82,2011.

[11] Nijhuis, M.; M, Gibescu.; J, F.; G, Cobben.; "Incorporation of on-load tap changer transformers in low-voltage network planning", PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), 2016.

[12] José Raúl, Castro.; Maarouf, Saad.; Serge, Lefebvre.; Dalal, Asber.; Laurent, Lenoir.; "Optimal voltage control in distribution network in the presence of DGs", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, No. 78, pp. 239-247, 2016

[13] میلاد غلامی فرد، نیما امجدی، حسین شریفزاده. «پخش بار بهینه احتمالاتی به منظور تعیین قیمت‌های حاشیه‌ای محلی در حضور تولید بادی»، مدل‌سازی در مهندسی، ۱۸۲-۱۶۵، ۱۳۹۶.

[14] " Stochastic Planning of Renewable Energy sources and Demand Response in a Stand-alone Microgrid Under Uncertainties", Quarterly Journal of Energy Policy and Planning Research., 2018, pp.29-56

[15] Viawan, Ferry A., and Daniel Karlsson.; "Voltage and reactive power control in systems with synchronous machine-

جدول (۳): اطلاعات خطوط بین باس‌های شبکه ۳۴ باس [۱۲]

طول (فوت)	گره B	گره A
۲۵۸۰	۸۰۲	۸۰۰
۱۷۳۰	۸۰۸	۸۰۲
۳۲۲۳۰	۸۱۰	۸۰۶
۵۸۰۴	۸۱۲	۸۰۸
۳۷۵۰۰	۸۱۴	۸۰۸
۲۹۷۳۰	۸۵۰	۸۱۲
۱۰	۸۱۸	۸۱۴
۱۷۱۰	۸۲۴	۸۱۶
۱۰۲۱۰	۸۲۰	۸۱۶
۴۸۱۵۰	۸۲۲	۸۱۸
۱۳۷۴۰	۸۲۶	۸۲۰
۳۰۳۰	۸۲۸	۸۲۴
۸۴۰	۸۳۰	۸۲۸
۵۲۰	۸۵۴	۸۳۰
۴۹۰۰	۸۵۸	۸۳۲
۰	۸۸۸	۸۳۲
۲۰۲۰	۸۶۰	۸۳۴
۲۸۰	۸۴۲	۸۳۴
۸۶۰	۸۴۰	۸۳۶
۲۸۰	۸۶۲	۸۳۶
۱۳۵۰	۸۴۴	۸۴۲
۳۶۴۰	۸۴۶	۸۴۴
۵۳۰	۸۴۸	۸۴۶
۳۱۰	۸۱۶	۸۵۰
۳۱۰	۸۳۲	۸۵۲
۲۳۳۳۰	۸۵۶	۸۵۴
۱۰۵۶۰	۸۹۰	۸۸۸

جدول (۴): اطلاعات بارهای شبکه استاندارد ۳۴ باس [۱۲]

گره	فاز ۱ kW	فاز ۱ kVAr	فاز ۲ kW	فاز ۲ kVAr	فاز ۳ kW	فاز ۳ kVAr
۸۶۰	۲۰	۱۶	۲۰	۱۶	۲۰	۱۶
۸۴۰	۹	۷	۹	۷	۹	۷
۸۴۴	۱۳۵	۱۰۵	۱۳۵	۱۰۵	۱۳۵	۱۰۵
۸۴۸	۲۰	۱۶	۲۰	۱۶	۲۰	۱۶
۸۹۰	۱۵۰	۷۵	۱۵۰	۷۵	۱۵۰	۷۵
۸۳۰	۱۰	۵	۱۰	۵	۲۵	۱۰
مجموع	۳۴۴	۲۲۴	۳۴۴	۲۲۴	۳۵۹	۲۲۹

## مراجع

[1] Theo, Wai Lip, et al.; "Review of distributed generation (DG) system planning and optimisation techniques: Comparison of numerical and mathematical modelling methods. "Renewable and Sustainable Energy Reviews 67,pp.531-573, 2017.

و دکتری مهندسی برق - قدرت از دانشگاه شیراز (۱۳۹۵) سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه دینامیک سیستم‌های قدرت و کنترل ماشین‌های الکتریکی است و در حال حاضر استادیار گروه برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز می‌باشد.

**مجید مقامی** در شوشتر متولد شده است (۱۳۶۰). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق - قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد شوشتر (۱۳۸۴) و از سال ۱۳۹۴ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت در گروه مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز می‌باشد. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه پست‌های برق فشار قوی و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت است و در حال حاضر کارشناس بهره‌برداری پست برق ۴۰۰ کیلوولت شوشتر در شرکت برق منطقه‌ای خوزستان می‌باشد.

## زیر نویس‌ها

- ۱ Distributed Generation
- ۲ Coordinated Voltage Control
- ۳ Multi-Objective
- ۴ On Load Tap Changer
- ۵ Optimal Coordinated Voltage Control
- ۶ Pareto Optimization
- ۷ Probability Density Function
- ۸ Pareto Front

based distributed generation. " IEEE Transactions on Power Delivery 23.2, pp.1079-1087, 2008.

[16] Ouyang, Wu, et al.; "Distribution network planning method considering distributed generation for peak cutting." Energy Conversion and Management 51.12, pp.2394-2401, 2010.

[17] Saravanakathir, B., and R. M. Sasiraja.; "Optimal Coordinated Voltage Control Method for Distribution Network in Presence of Distributed Generators." International Journal of Engineering Science 12117, 2017.

[18] Saini, Sunaina, and Gagandeep Kaur.; "Real power loss reduction in distribution network through Distributed Generation integration by implementing SPSO." Electrical Power and Energy Systems (ICEPES), International Conference on. IEEE, 2016.

[۱۹] محمد ساتکین، «تحلیل رژیم باد و مدل‌سازی یک نیروگاه بادی ۵۰۰ مگاواتی در منطقه لوتک زابل»، بیست و چهارمین کنفرانس بین المللی برق، تهران، شرکت توانیر، پژوهشگاه نیرو، ۱۳۸۸.

[20] "Optimal placement of solar power plants in Distribution Network for Improvement of loss and Reliability using Multi-objective particle Swarm Optimization Method" , pp.46-54, 2016

## رزومه

**علی‌رضا توکلی** در اهواز متولد شده است (۱۳۶۳). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق - قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب (۱۳۸۵)، کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول (۱۳۸۸)

# Optimal Coordinated Voltage Control in Distribution Networks in presence of Solar and Wind Power Plants Considering Uncertainties

Alireza Tavakoli<sup>1\*</sup>, Majid Maghami<sup>2</sup>

\*1-Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran, a.tavakoli@iauahvaz.ac.i

2- MSc Student, Department of Electrical Engineering, Ahvaz Branch, Islamic Azad University, Ahvaz, Iran

**Abstract:** In the last decade, the amount of distributed generation connected to the distribution network is increasing. The presence of distributed generation resources in distribution systems has a great influence on its behavior and it is necessary to consider the impact of these resources on the distribution network design. In this study, Optimal Coordinated Voltage Control (OCVC) using wind and solar power plants considering uncertainty of generators for solving multi-objective optimization problem, with the aim of minimizing voltage error in pilot bus, reactive power variations and voltage error in generators is presented. Optimal Coordinate Voltage Control uses Pareto optimization to find the optimal voltage. This method is performed using a combination of wind and solar power plants on the IEEE 13-bus and 34-bus test networks and the uncertainty of solar and wind power plants is also modeled by the Monte Carlo method. The obtained results show the effectiveness of proposed method in controlling voltage and reducing losses.

**Keywords:** Optimal Coordinated Voltage Control, Distributed generation, Pareto optimization, Uncertainty, Monte Carlo method.