



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

Increasing Wind Power Penetration in Power Systems for Minimizing Transmission Line Losses

Shahriar Abbasi ^{a,*}

^a Department of Electrical Engineering, National University of Skills (NUS), Tehran, Iran.

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2023-10-23

Revised: 2024-02-25

Accepted: 2024-08-31

Keywords:

Wind power generation,
Transmission line loss,
Genetic Algorithm (GA),
Multi-Objective
optimization.

ABSTRACT

Increase in electricity demand and the concern about climate change have led to an increase in penetration of wind power generation into the power systems. However, the transmission network infrastructure is not equipped for such amount of wind power generation. Transmission grids are responsible for transferring electrical energy from generation section to load centers and consumers. In this transmission process, the transmission lines suffer losses that affect the power quality and increase the energy final price. Therefore, such losses should be minimized to improve power quality and economic efficiency. Along with increase in the rate of penetration of wind power generation into power systems, the losses of transmission lines also increase. To tackle this problem, in this paper, a Remedial Action Scheme (RAS) is proposed to increase the penetration of wind power generation into power systems with minimal transmission losses. For this purpose, the proposed method uses a multi-objective optimization problem that is solved using genetic algorithm (GA). To change the transmission losses, a multi-objective optimization problem determines the optimal generation of wind power generators. The proposed method is tested on the New England 39-bus system and the simulation results confirm its efficiency in maximizing the injection of wind power generation.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.32138.2552>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: shabbasi@tvu.ac.ir

How to cite this article:

Abbasi, S. (2025). Increasing wind power penetration in power systems for minimizing transmission line losses. Journal of Modeling in Engineering, 23(Special Issue 81), 77-90. doi: 10.22075/jme.2024.32138.2552

افزایش نفوذ تولید توان بادی در سیستم‌های قدرت برای کمینه‌سازی تلفات خطوط انتقال

شهریار عباسی^{۱*}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۰۱ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۰۶ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۱۰	
واژگان کلیدی: تولید توان بادی، تلفات خطوط انتقال، الگوریتم ژنتیک (GA)، بهینه‌سازی چندهدفه.	افزایش تقاضای برق و نگرانی در مورد تغییرات آب و هوایی منجر به افزایش نفوذ تولید توان بادی به سیستم‌های قدرت شده است. با این حال، زیرساخت‌های سیستم انتقال برای چنین انتقالی تجهیز نشده‌اند. خطوط انتقال وظیفه انتقال انرژی الکتریکی از بخش تولید به مراکز بار و مصرف‌کنندگان را بر عهده دارند. در این فرآیند انتقال، خطوط انتقال متحمل تلفاتی می‌شوند که بر کیفیت توان اثر گذاشته و افزایش قیمت را نیز به دنبال دارد. بنابراین، باید چنین تلفاتی را به حداقل رساند تا کیفیت توان بهبود یافته و بهره‌وری اقتصادی نیز بهبود یابد. با افزایش نرخ نفوذ تولید توان بادی در سیستم‌های قدرت، تلفات خطوط انتقال نیز افزایش می‌یابد. برای رفع این مشکل، در این مقاله، یک طرح اقدام اصلاحی (RAS) برای افزایش نفوذ تولید توان بادی در سیستم‌های قدرت با حداقل تلفات انتقال پیشنهاد شده است. بدین منظور، روش پیشنهادی از یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه استفاده می‌کند که با استفاده از الگوریتم ژنتیک حل می‌گردد. برای تغییر تلفات انتقال، در مسئله بهینه‌سازی چندهدفه، تولید بهینه ژنراتورهای بادی محاسبه می‌شود. روش پیشنهادی روی سیستم ۳۹ شینه نیوانگلند آزمایش شده و نتایج شبیه‌سازی موید کارایی آن در به حداقل رساندن تزیق تولید توان بادی است.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2024.32138.2552>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، میزان انرژی‌های تجدیدپذیر جهانی، به ویژه نفوذ تولید توان بادی در سیستم‌های قدرت به سرعت افزایش یافته است. این افزایش به دلیل نگرانی‌های زیست محیطی در مورد گرم شدن کره زمین و تغییرات آب و هوایی است [۱، ۲]. با این حال، تصادفی بودن، متناوب بودن و عدم قطعیت تولید توان بادی به طور جدی بر قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت تأثیر می‌گذارد [۳، ۴]. لذا، تنظیم نرخ نفوذ تولید توان بادی در سیستم‌های قدرت به یک چالش بزرگ تبدیل شده است [۵، ۶].

مزارع بادی^۲ دور از مراکز بار و مصرف‌کنندگان قرار دارند. توان تولیدی مزارع بادی باید از طریق خطوط انتقال به

مراکز بار و مصرف‌کنندگان منتقل شود. سیستم قدرت به سه بخش تقسیم می‌شود: الف- تولید، ب- انتقال و ج- توزیع. تلفات خطوط انتقال یک جنبه مهم در ارزیابی سیستم‌های انتقال توان بالا است [۷]. تلفات در سیستم انتقال را می‌توان به عنوان تلفات فنی و تلفات غیرفنی^۳ طبقه‌بندی کرد. تلفات فنی به توان مورد استفاده برای جبران تلفات خطوط انتقال و ترانسفورماتورها اشاره دارد. سرقت برق، خطاهای پردازش داده‌ها و خطاهای اندازه‌گیری نمونه‌هایی از تلفات غیرفنی هستند. تلفات غیرفنی در سیستم انتقال کمتر و در سیستم توزیع بیشتر است [۸]. تلفات فنی در سیستم انتقال را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: تلفات در خطوط انتقال و تلفات در ترانسفورماتورها،

² Wind farms³ Technical and nontechnical

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: shabbasi@tvu.ac.ir

۱. گروه مهندسی برق، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

استناد به این مقاله:

عباسی، شهریار. (۱۴۰۴). افزایش نفوذ تولید توان بادی در سیستم‌های قدرت برای کمینه‌سازی تلفات خطوط انتقال. مدل سازی در مهندسی، ۲۳ (شماره ویژه ۸۱)،

doi: 10.22075/jme.2024.32138.2552 .۹۰-۷۷

است. بهینه‌سازی ازدحام ذرات تطبیقی-سرعت آشفته دیفرانسیلی برای کاهش تلفات توان در مرجع [۱۸] پیاده‌سازی شده است. بهینه‌سازی ازدحام ذرات کاملاً آگاهانه برای کاهش تلفات انتقال توان در مرجع [۱۹] استفاده شده است.

سوئیچینگ انتقال به عنوان یک روش کاهش تلفات در مرجع [۲۰] استفاده شده است. لازم به ذکر است که، تمامی روش‌های فوق تنها بر کاهش تلفات خطوط انتقال در سیستم بدون توجه به حداکثر نمودن تزریق توان بادی متمرکز شده‌اند. هدف واحد آنها کاهش تلفات سیستم انتقال است.

نوآوری این مقاله، کاهش تلفات خطوط انتقال همراه با حداکثر نمودن تزریق توان بادی در سیستم‌های قدرت است. با این کار، همزمان با افزایش سهم تولید توان بادی در سیستم، تلفات سیستم انتقال حداقل می‌گردد و به وضوح اثر مفید جایگزینی ژنراتورهای متعارف با نوع بادی مشاهده می‌گردد. در ابتدا، کل تلفات خط انتقال در سیستم و ضرایب تلفات کرون B سیستم محاسبه می‌شود. داده‌های ورودی برون خطی مورد نیاز برای انجام محاسبات عبارتند از ۱- داده‌های شین، ۲- داده‌های خط و ۳- داده‌های ژنراتور و بار. محاسبات با استفاده از Matpower انجام شده انجام می‌شود. شرایط اولیه با کمک داده‌های بلادرنگ زاویه ولتاژ شین به دست آمده از PMU ارزیابی می‌شود. ضرایب B به همراه مجموعه‌ای از ژنراتورهای بادی موجود در سیستم در مسئله بهینه‌سازی چندهدفه استفاده می‌شود. مسئله بهینه‌سازی چندهدفه، تولید بهینه را از هر ژنراتور بادی برای تغییر تلفات خطوط انتقال فراهم می‌کند. مسئله بهینه‌سازی چندهدفه به کمک الگوریتم ژنتیک حل می‌شود. لذا با این روش پیشنهادی، می‌توان ژنراتورهای متعارف را با نوع بادی به صورت بهینه و با حداقل تلفات شبکه انتقال جایگزین نمود. نتایج شبیه‌سازی اجرا شده روی سیستم ۳۹ شینه نیوانینگند [۲۱] موید کارایی این روش در سیستم‌های جهان واقعی است.

در سیستم‌های قدرت هوشمند مدرن به طور گسترده‌ای از داده‌های بلادرنگ^{۱۰} برای بهینه‌سازی بهره‌برداری آنها استفاده می‌کنند. چندین رویکرد در سیستم‌های قدرت

که تلفات در خطوط انتقال اولویت دارند [۹، ۱۰]. در مرجع [۱۱]، روشی برای برنامه‌ریزی توسعه شبکه انتقال در بازار برق در حضور تولید توان بادی با رویکرد همزمان بهینه‌سازی بهره‌برداری از این منابع با در نظر گرفتن هزینه قطع تولید بادی و نیز کاهش تلفات توان و انرژی تامین نشده ارائه شد. جهت دستیابی به این هدف، از یک مدل دوسطحی تصادفی مقید به ریسک استفاده شده است که سعی در افزایش نفوذ تولید توان بادی همراه با تامین معیار قابلیت اطمینان شبکه دارد. تلاشی مشابه در مرجع [۱۲] به منظور تخصیص بهینه منابع تجدیدپذیر با هدف کمینه‌سازی هزینه تلفات توان و هزینه بهبود قابلیت اطمینان و با در نظر گرفتن عدم قطعیت تولید و مصرف انجام شده است.

در مرجع [۱۳]، کاهش تلفات خطوط انتقال به کمک سیستم‌های انتقال متناوب AC انعطاف‌پذیر^۴ (FACTS) و الگوریتم غذایابی باکتری‌ها^۵ (BFA) انجام شده است. با بهینه‌سازی مقادیر تپ‌های ترانسفورماتور با تپ متغیر زیر بار^۶ (OLTC) موجود در یک سیستم قدرت چند ماشینی، تلفات توان اکتیو سیستم به حداقل می‌رسد. با تثبیت موقعیت‌های تپ در مقادیر بهینه شده، یک کنترل‌کننده پخش توان یکپارچه^۷ (UPFC) در سیستم معرفی می‌شود. در مرجع [۱۴]، از کنترل‌کننده‌های پخش توان بین خطی^۸ (IPFC) برای کاهش تلفات خطوط انتقال استفاده شده است. IPFC یک دستگاه جدید FACTS است که می‌تواند جریان برق را در سیستم‌های قدرت کنترل کند. IPFC از مبدل‌های سری چندگانه تشکیل شده است. پخش توان خط را می‌توان با کنترل هر دو دامنه و زاویه ولتاژهای سری تزریق شده توسط IPFC تنظیم کرد. اما تمامی این راهکارها نیازمند سرمایه‌گذاری و نصب تجهیزات جدید در سیستم قدرت است.

در مرجع [۱۵]، نویسندگان روش‌های کاهش تلفات را با استفاده از تغییرات در تاسیسات سخت‌افزاری و همچنین بهینه‌سازی مقید مبتنی بر نرم‌افزار توصیف می‌کنند. تکنیک ازدحام ذرات اصلاح شده^۹ برای کاهش تلفات توان در مرجع [۱۶] اجرا شده است. در مرجع [۱۷]، بهینه‌سازی ازدحام ذرات هیبریدی برای کاهش تلفات توان اجرا شده

⁸ Interline Power Flow Controllers

⁹ Modified Particle Swarm Optimization

¹⁰ Real time

⁴ Flexible AC Transmission System

⁵ Bacteria Foraging Algorithm

⁶ On Load Tap Changer

⁷ Unified Power Flow Controller

تلفات خطوط انتقال ایجاد می‌کند. RAS پیشنهادی با هر نوع ژنراتور بادی سازگار بوده و خروجی مستقل از نوع ژنراتور بادی در نظر گرفته می‌شود.

ادامه این مقاله بدین صورت مرتب شده است: بخش ۲ به طور خلاصه در مورد جمع‌آوری داده‌ها با کمک واحد اندازه‌گیری فازور^{۱۷} (PMU) بحث می‌کند. RAS پیشنهادی برای به حداکثر رساندن تزریق تولید توان بادی با در نظر گرفتن حداقل تلفات خطوط انتقال در بخش ۳ شرح داده شده است. نتایج به دست آمده برای مجموعه‌های مختلف ژنراتورهای بادی برای تنظیم تلفات خطوط انتقال متغیر در بخش ۴ ارائه شده است. بخش ۵ به تحلیل نتایج اختصاص داده شده است و نتیجه‌گیری در بخش ۶ ارائه شده است.

۲- اکتساب داده

داده‌های بلادرنگ مورد نیاز برای بهینه‌سازی عملکرد سیستم قدرت از واحد اندازه‌گیری فازور (PMU) نصب شده در سیستم کسب می‌شود. PMU داده‌های آنالوگ و دیجیتال همگام‌سازی شده را برای یک سیستم گسترده فراهم می‌کند [۳۳]. داده‌های آنالوگ شامل فازهای ولتاژ و جریان با توالی مثبت و داده‌های دیجیتالی شامل وضعیت قطع کننده مدار، رله و سایر تجهیزات است. همزمانی بین داده‌های اندازه‌گیری شده از شین‌های مختلف با کمک شکل موج ولتاژ و جریان با استفاده از سیگنال‌های زمان‌بندی به دست آمده از سیستم موقعیت‌یابی جهانی^{۱۸} (GPS) به دست می‌آید [۳۴].

هزینه نصب PMU باعث می‌شود نصب PMU در تمامی شین‌های سیستم میسر نباشد. بنابراین جایابی بهینه PMU در سیستم به یک موضوع مهم تبدیل شده است. در نتیجه ظرفیت PMU برای نظارت ولتاژ گره و جریان‌های خطوط حادث به آن گره، جانمایی بهینه PMU‌ها در سیستم برای دستیابی به قابلیت مشاهده کامل سیستم با حداقل تعداد PMU مورد نیاز است. محل بهینه PMU برای سیستم ۳۹ شینه نیوانگلند در شکل (۱) نشان داده شده است. برای مشاهده کامل سیستم در شرایط عملیاتی عادی، تعداد ۱۳ واحد PMU در این شین‌ها نیاز است: ۲، ۶، ۹، ۱۰، ۱۳، ۱۴، ۱۷، ۱۹، ۲۰، ۲۲، ۲۳، ۲۵، و ۲۹/۲۸

برای بهبود کارایی آنها با استفاده از اطلاعات بلادرنگ استفاده شده است.

در سیستم‌های قدرت هوشمند مدرن به طور گسترده‌ای از داده‌های بلادرنگ^{۱۱} برای بهینه‌سازی بهره‌برداری آنها استفاده می‌کنند. چندین رویکرد در سیستم‌های قدرت برای بهبود کارایی آنها با استفاده از اطلاعات بلادرنگ استفاده شده است. طرح‌های اقدام اصلاحی^{۱۲} (RAS) توسط استاندارد همکاری قابلیت اطمینان الکتریکی آمریکای شمالی^{۱۳} (NERC) [۲۲] به عنوان طرح‌هایی تعریف می‌شوند که برای شناسایی شرایط از پیش تعیین شده سیستم ارائه شده‌اند و به طور خودکار اقدامات اصلاحی مانند تنظیم یا خاموش کردن تولید، قطع بار، یا پیکربندی مجدد یک سیستم را انجام می‌دهند. بر اساس اصل عملکرد، RAS به طور کلی به سه نوع طبقه بندی می‌شود [۲۳]:

۱- RAS مبتنی بر رویداد^{۱۴} [۲۶-۲۴]، ۲- RAS مبتنی بر پارامتر^{۱۵} [۲۹-۲۷]، و ۳- RAS مبتنی بر پاسخ^{۱۶} [۳۰، ۳۱]. یک روش RAS مبتنی بر پارامتر را می‌توان برای به حداکثر رساندن تزریق توان بادی به سیستم با در نظر گرفتن حداقل تلفات خط انتقال اجرا کرد. با این کار می‌توان راه‌حلی آسان و مقرون به صرفه برای افزایش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر بدون نیاز به خطوط انتقال جدید ارائه داد [۳۲]. RAS پیشنهادی یک تابع چندهدفه را تشکیل می‌دهد که با حداقل نمودن تلفات خطوط انتقال، تزریق تولید توان بادی به سیستم را به حداکثر می‌رساند. این موضوع به صورت یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه فرمول‌بندی شده است. تابع هدف اول تزریق تولید توان بادی به سیستم را از طریق هر ژنراتور بادی به حداکثر می‌رساند و تابع هدف دوم، تلفات خطوط انتقال را به حداقل می‌رساند. حداکثر کردن تزریق تولید توان بادی به سیستم با حداقل تلفات خط انتقال می‌تواند با نصب خطوط انتقال جدید به موازات خطوط موجود انجام شود. این کار یک پروژه بلند مدت بوده و مستلزم سرمایه‌گذاری زیادی است. از این رو، این یک راه‌حل مقرون به صرفه نیست. RAS پیشنهادی در این مقاله، روی سیستم موجود عمل کرده و نیازی به سرمایه‌گذاری ندارد. RAS پیشنهادی افزایش قابل توجه‌ای در تزریق تولید توان بادی به همراه کاهش

¹⁵ Parameter

¹⁶ Response

¹⁷ Phasor Measurement Unit

¹⁸ Global Positioning System

¹¹ Real time

¹² Remedial Action Scheme

¹³ North American Electric Reliability Cooperation

¹⁴ Event

$$\sum_j P_{ij} = P_i^g - P_i^d, \quad \forall i, j \in N \quad (2)$$

$$P_{i \min}^g \leq P_i^g \leq P_{i \max}^g, \quad \forall i \in N \quad (3)$$

$$\delta_{i \min} \leq \delta_i \leq \delta_{i \max}, \quad \forall i \in N \quad (4)$$

تابع هدف اول ($f_1(\cdot)$) مجموع تولید توان فعال توسط ژنراتورهای بادی بوده و به صورت زیر بیان می‌شود:

$$f_1(\cdot) = \sum_{i=1}^w P_{w_i} \quad (5)$$

تابع هدف دوم ($f_2(\cdot)$) به عنوان معادله تلفات خط انتقال یا فرمول تلفات کرون [۳۹] تعریف می‌شود که به صورت است:

$$f_2(\cdot): P_{Loss} = P^T B P + B_0^T P + B_{00} \quad (6)$$

مجموع تلفات خطوط انتقال سیستم با استفاده از فرمول تلفات کرون محاسبه می‌شود. این فرمول در حقیقت تولید توان اکتیو هر ژنراتور و ضرایب B سیستم انتقال را در نظر می‌گیرد. پارامترهای خطوط انتقال (مقاومت و راکتانس) برای تعیین ضرایب B یا ضرایب تلفات سیستم استفاده می‌شود. معادله تعادل توان اکتیو در سیستم با رابطه (۲) به دست می‌آید. ژنراتورها باید بین حداقل و حداکثر حد تولید توان اکتیو خود که با رابطه (۳) بیان شده است، کار کنند. معادله (۴) زاویه ولتاژ شین را در محدوده حداقل و حداکثر آن محدود می‌کند.

۳-۲- داده‌های مورد نیاز

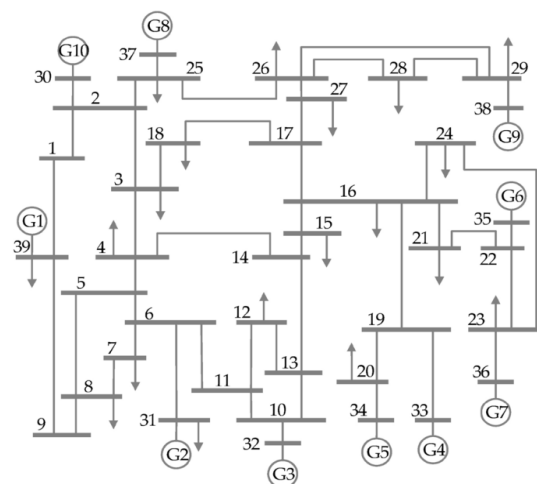
داده‌های ورودی برای روش پیشنهادی به سه دسته تقسیم می‌شوند.

- داده‌های بلادرنگ: داده‌های بلادرنگ شامل زاویه ولتاژ شین است که از PMU های نصب شده در سیستم به دست می‌آید. شرایط اولیه با استفاده از داده‌های به دست آمده از PMU ها ارزیابی می‌شود.

- داده‌های برون خطی^{۲۰}: داده‌های سیستم، بار و تولید از مراکز توزیع توان^{۲۱} به دست می‌آید. برای محاسبه تلفات کل خط انتقال (P_{Loss}) و ضرایب B استفاده می‌شود.

- داده‌های پیش‌بینی^{۲۲}: پیش‌بینی آب و هوای موجود از اداره هواشناسی برای انتخاب مجموعه ژنراتورهای بادی برای جایگزینی ژنراتورهای معمولی در سیستم استفاده

[۳۷-۳۵]. اگر فازورهای ولتاژ تمام شین‌های سیستم مشخص باشد، فازهای جریان تمام شاخه‌های سیستم نیز مشخص شده و سیستم کاملاً مشاهده شده در نظر گرفته می‌شود [۳۸]. PMU نصب شده در شین ۶ شکل (۱)، دامنه و زاویه ولتاژ این شین و جریان خطوط حادث شده به آن ارائه می‌دهد. با استفاده از این داده‌ها، دامنه و زاویه ولتاژ شین و جریان خطوط حادث شده به شین‌های ۵، ۷، ۱۱ و ۳۱ محاسبه می‌گردد.



شکل ۱- سیستم ۳۹ شینه نیواینکلند [۲۱].

۳- روش پیشنهادی

در این مقاله، یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه^{۱۹} برای به حداکثر رساندن نفوذ تولید توان بادی و به حداقل رساندن تلفات خطوط استفاده می‌شود. تابع چندهدفه از دو تابع هدف تشکیل شده است: اولین تابع هدف مربوط به حداکثر نمودن مقدار استخراج تولید توان از طریق هر ژنراتور بادی است. تابع هدف دوم تلفات خط انتقال را به حداقل می‌رساند. در نتیجه، مسئله بهینه‌سازی به دنبال ارائه مقادیر بهینه تولید از هر ژنراتور بادی برای مقدار مشخصی از تلفات خط انتقال است.

۳-۱- مسئله بهینه‌سازی چندهدفه پیشنهادی

مسئله بهینه‌سازی چندهدفه پیشنهادی زیر دارای دو هدف -۱- به حداکثر رساندن تزریق تولید توان بادی به سیستم و -۲- حداقل نمودن تلفات خط انتقال است.

$$\max_{P_w, P_B, B_0, B_{00}} [f_1(P_w) - f_2(P, P_B, B_0, B_{00})] \quad (1)$$

که،

²¹ Power dispatch

²² Forecasting

¹⁹ Multi-objective

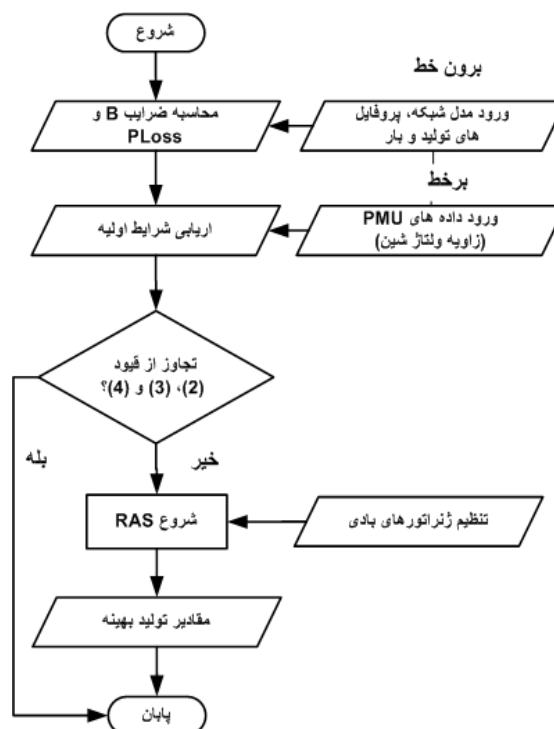
²⁰ Offline

تولید بهینه را از هر ژنراتور بادی برای تغییر تلفات خطوط انتقال فراهم می‌کند. مسئله بهینه‌سازی چندهدفه با استفاده از جعبه ابزار بهینه‌سازی متلب [۴۲] با کمک الگوریتم ژنتیک [۴۳-۴۴] حل می‌شود.

۴- الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ژنتیک

الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی^{۲۵} مختلفی برای یافتن تعادل^{۲۶} بین اهداف یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه پیشنهاد شده است. این الگوریتم‌ها بر اساس مفهوم بهینه‌سازی پارتو^{۲۷} عمل می‌کنند. از میان آنها، الگوریتم بهینه‌سازی چندهدفه ژنتیک موسوم به الگوریتم NAGA II^{۲۸} قابلیت بالایی در حل مسائل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط غیر محدب^{۲۹} مشابه مسئله مورد نظر در این مقاله را دارد. این الگوریتم با موفقیت در بسیاری از مسایل بهینه‌سازی چندهدفه شبکه انتقال سیستم‌های قدرت اجرا شده است. الگوریتم ژنتیک یک الگوریتم جمعیت محور بوده و این توانایی را دارد که از گیر افتادن در یک پاسخ بهینه محلی^{۳۰} جلوگیری کند. این الگوریتم در سطح جهانی^{۳۱} با نرخ همگرایی خوب جستجو کرده و از قوانین احتمالی استفاده می‌کند [۴۳-۴۴]. لذا، در این تحقیق از الگوریتم NAGA II استفاده شده است. الگوریتم با یک جمعیت اولیه تصادفی شروع شده و مجموعه پاسخ‌های پارتو را ارائه می‌دهد. پاسخ‌های پارتو براساس مفهوم عدم تسلط رتبه‌بندی^{۳۲} می‌شوند. پاسخ‌های با مقادیر بالاتر برازندگی^{۳۳} در رتبه بالاتری قرار می‌گیرند. فاصله ازدحام^{۳۴} برای هر پاسخ محاسبه شده و نوع^{۳۵} جمعیت با میانگین مقادیر فواصل ازدحام ارزیابی می‌شود. والدین بر اساس رتبه‌های عدم تسلط و فواصل ازدحام برای تولید جمعیت فرزندان با استفاده از عملگرهای ترکیب^{۳۶} (با نرخ ۰/۷)، جهش^{۳۷} (۰/۳) و انتخاب نسل برای تولید نسل بعدی انتخاب می‌شوند. این روش تا برآرده شدن معیار (رسیدن به تعداد تکرار ۱۰۰) خاتمه ادامه می‌یابد. خروجی الگوریتم مجموعه پاسخ‌های پارتو است. این پاسخ‌ها تعادل بین اهداف مسئله بهینه‌سازی چندهدفه را نشان می‌دهد.

می‌شود. خروجی این مجموعه از ژنراتورهای بادی باید با استفاده از RAS پیشنهادی حداکثر گردند.



شکل ۲- نمودار گردش RAS.

۳-۳- روش شناسی

نمودار گردش^{۲۳} RAS پیشنهادی به صورت شکل (۲) است. در ابتدا، کل تلفات خط انتقال (PLOSS) در سیستم و ضرایب B برای سیستم محاسبه می‌شود. داده‌های ورودی برون خطی مورد نیاز برای انجام محاسبات عبارتند از ۱- داده‌های شین، ۲- داده‌های خط و ۳- داده‌های ژنراتور و بار. محاسبات با استفاده از Matpower [۴۰] انجام شده که متشکل از مجموعه‌ای از توابع تحلیل سیستم قدرت است که در محیط MATLAB [۴۱] اجرا می‌شود. شرایط اولیه با کمک داده‌های بلادرنگ زاویه ولتاژ شین به دست آمده از PMU ارزیابی می‌شود. علاوه بر این، قبل از اعمال به RAS، محدودیت‌های موجود در معادلات (۲)، (۳) و (۴) تایید می‌گردند. ضرایب B به همراه مجموعه‌ای از ژنراتورهای بادی موجود در سیستم در مسئله بهینه‌سازی^{۲۴} چندهدفه استفاده می‌شود. مسئله بهینه‌سازی چندهدفه،

³¹ Global level

³² Nondominancy ranking

³³ Fitness

³⁴ Crowding distance

³⁵ Diversity

³⁶ Crossover

³⁷ Mutation

³⁸ Selection

²³ Flowchart

²⁴ Optimization problem

²⁵ Evolutionary

²⁶ Trade-off

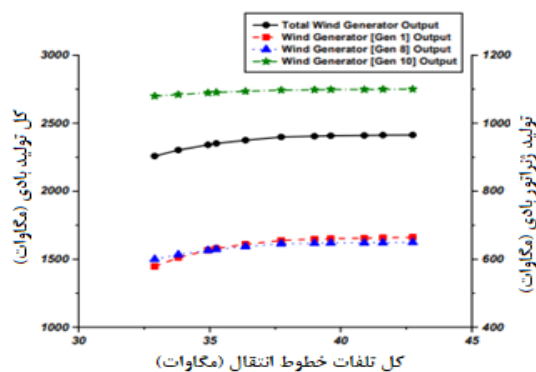
²⁷ Pareto

²⁸ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II

²⁹ Mixed integer nonlinear and nonconvex programming

³⁰ Local optimal

که افزایش 624 MW (۳۴/۸۶٪) تولید توان بادی بدون افزایش تلفات خط انتقال وجود دارد. مقادیر بهینه تزریق توان از ژنراتورهای بادی مذکور برای کاهش تلفات خط انتقال در شکل (۳) نشان داده شده است. ملاحظه می‌گردد، با تزریق تولید توان بادی کل 2258 MW از ژنراتورهای بادی ۱، ۸ و ۱۰، تلفات خط انتقال 32.902 MW است. توان خروجی ژنراتورهای معمولی در همان مکان‌ها در شرایط بار پایه (بدون ژنراتور بادی) 1790 MW است. بنابراین، تزریق تولید توان بادی 26.15% افزایش یافته و منجر به کاهش 24.21% تلفات خط انتقال گردد. دلیل این موضوع این است که بارها در این شرایط بهره‌برداری به ژنراتورهای بادی نزدیکتر هستند. بنابراین تولید بیشتر توان بادی باعث کاهش تلفات کلی خطوط می‌شود. بسته به تغییر شرایط بارگذاری، روش پیشنهادی می‌تواند تزریق تولید توان بادی را به سیستم بهینه کرده تا حداکثر نفوذ انرژی بادی با حداقل تلفات میسر گردد.



شکل ۳- مقادیر بهینه تولید توان بادی ژنراتورهای ۱، ۸ و ۱۰ برای کاهش تلفات خطوط انتقال.

۵-۲- نصب چهار ژنراتور تولید توان بادی
در این حالت، ژنراتورهای معمولی ۱، ۸ و ۱۰ سیستم مذکور با نوع بادی جایگزین می‌شوند. توان خروجی حداکثر هر ژنراتور بادی 1100 MW است. با تلفات خطوط انتقال 43.608 MW ، توان خروجی بهینه این ژنراتورهای بادی به صورت زیر است:

- ژنراتور ۳ 677.44 MW
- ژنراتور ۴ 752.32 MW
- ژنراتور ۵ 719.46 MW
- ژنراتور ۷ 572.13 MW

در این حالت، افزایش تولید توان بادی به میزان 381 MW (۱۶.۲۸٪) نسبت به شرایط بار پایه حاصل شده است.

۵- نتایج شبیه‌سازی

RAS پیشنهادی روی سیستم ۳۹ شینه نیوانگلند شکل (۱) آزمایش شده می‌شود. سطح ولتاژ در نظر گرفته شده برای سیستم ۳۹ شینه نیوانگلند 345 kV است. مشخصات این سیستم به شرح زیر است:

ژنراتورها: تعداد ۱۰ ژنراتور سنکرون معمولی به شماره‌های ۱ تا ۱۰ به ترتیب در شین‌های ۳۹، ۳۱، ۳۲، ۳۳، ۳۴، ۳۵، ۳۶، ۳۷، ۳۸ و ۳۰ با حداکثر توان خروجی هر ژنراتور 1100 MW مگاوات نصب شده است. در این سیستم، ۱۲ ترانسفورماتور، ۱۹ شین بار و ۳۴ خط انتقال وجود دارد. بار پایه سیستم 6097.1 MW و 1409.1 MVAR است.

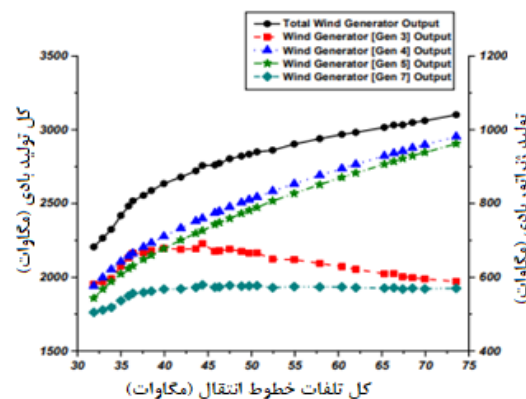
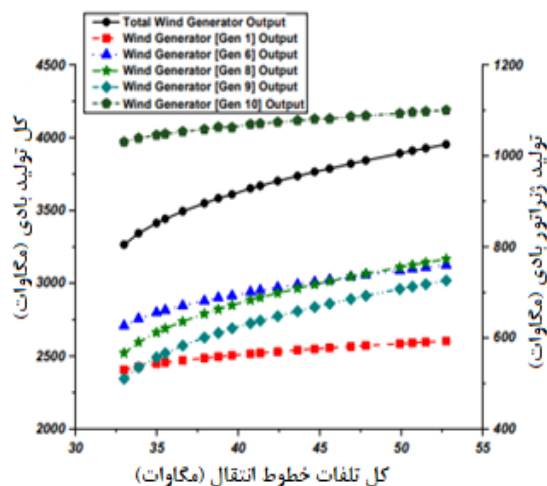
در ابتدا، سیستم با تقاضای بار پایه (6097.1 MW) و مقادیر پایه ژنراتورها به صورت ژنراتور ۱ 250 MW ، ژنراتور ۲ اسلک، ژنراتور ۳ 650 MW ، ژنراتور ۴ 630 MW ، ژنراتور ۵ 500 MW ، ژنراتور ۶ 650 MW ، ژنراتور ۷ 560 MW ، ژنراتور ۸ 540 MW ، ژنراتور ۹ 830 MW و ژنراتور ۱۰ 1000 MW بهره‌برداری شده است. با این شرایط، مجموع تلفات خطوط انتقال 43.411 MW است. متعاقباً، RAS پیشنهادی برای حالات مختلف با در نظر گرفتن جایگزینی مجموعه‌ای از ژنراتورهای معمولی با ژنراتورهای بادی آزمایش می‌شود. ژنراتورهای بادی در مکان‌های مختلف سیستم جایگزین ژنراتورهای معمولی موجود می‌شوند. نتایج شبیه‌سازی موید کارایی روش پیشنهادی در استخراج حداکثر خروجی ژنراتورهای بادی است. در هر حالت، خروجی هر ژنراتور بادی نیز محاسبه می‌شود.

۵-۱- نصب سه ژنراتور تولید توان بادی

در این حالت، ژنراتورهای معمولی ۱، ۸ و ۱۰ سیستم ژنراتورهای بادی جایگزین می‌شوند که هر کدام حداکثر خروجی 1100 MW مگاوات دارند. با در نظر گرفتن شرایط بار پایه که در آن تلفات خطوط انتقال 43.411 MW است، روش پیشنهادی تلاش می‌کند تا تزریق تولید توان بادی را به حداکثر برساند. با استفاده از روش پیشنهادی، مقادیر تزریق توان این ژنراتورهای بادی به صورت زیر می‌گردد:

- ژنراتور ۱ : 664.35 MW
- ژنراتور ۲ : 649.46 MW
- ژنراتور ۳ : 1099.94 MW

در این حالت، تلفات خط انتقال 42.747 MW و مجموع تزریق تولید توان بادی 2414 MW است. مشاهده می‌شود



شکل ۴- مقادیر بهینه تولید توان بادی ژنراتورهای ۳، ۴، ۵ و ۷ برای کاهش تلفات خطوط انتقال.

شکل ۵- مقادیر بهینه تولید توان بادی ژنراتورهای ۱، ۶، ۸، ۹ و ۱۰ برای کاهش تلفات خطوط انتقال.

۶- تحلیل نتایج شبیه‌سازی

کاربرد روش پیشنهادی مستقل از مکان ژنراتورهای بادی در سیستم است. این روش بر اساس داده‌های بلادرنگ در دسترس بودن تولید توان بادی و شرایط بارگذاری سیستم قدرت، تولید توان بادی را بهینه می‌کند. توان خروجی مجموعه‌های مختلف ژنراتورهای بادی در جدول ۲ فهرست شده است. در این جدول، مقادیر بهینه تولید توان بادی برای تلفات خطوط انتقال در حالت بار پایه و حالت حداقل تلفات خطوط انتقال ارائه شده است. تغییر مربوطه تولید توان بادی (بر حسب درصد) نسبت به بار پایه نیز نوشته شده است. افزایش تولید توان بادی به اندازه ۲۲.۹٪ (۳۸۷ MW) است. برای مجموعه‌های مختلف ژنراتورهای بادی، حداقل تلفات خطوط انتقال متفاوت است. در حالتی که بار از نظر الکتریکی نزدیک به ژنراتورهای بادی است، تلفات با افزایش خروجی ژنراتورهای بادی کاهش می‌یابد. با این حال، در برخی موارد، اگر بارها از نظر الکتریکی از ژنراتورها دور باشند، برای دستیابی به حداقل تلفات خطوط انتقال، باید تولید ژنراتورهای بادی کاهش یابد. این حالت عملکرد در نتایج ۳ جدول ۲ برجسته شده است. در این حالت، برای دستیابی به حداقل تلفات خطوط انتقال ۳۰.۷۶۴ MW، کاهش ۵٪ از کل تولید توان بادی نیاز است. در این حال، برای تلفات برابر با شرایط بارگذاری پایه، تولید توان بادی ۱۱.۰۳٪ افزایش می‌یابد. مشاهده شده است که برای تلفات خطوط انتقال در بار پایه، صرف نظر از مجموعه ژنراتورهای انتخابی، کل تولید توان بادی افزایش یافته است.

حداکثر تولید چهار ژنراتور بادی منتخب برای تلفات مختلف خطوط انتقال در شکل (۴) نشان داده شده است. مشاهده شده است که برای تلفات ۳۵.۸۸ MW که ۷.۵۳۱ MW (۱۷.۳۵٪) کمتر از شرایط بار پایه است، کل تولید ژنراتورهای بادی را ۱۴۳ مگاوات (۶.۱۱٪) افزایش یافته است. بنابراین با روش پیشنهادی، با کاهش استفاده از ژنراتورهای معمولی و افزایش استفاده از منابع تجدیدپذیر، تلفات انتقال توان کاهش می‌یابد.

۵-۳- نصب پنج ژنراتور تولید توان بادی

در این حالت، ژنراتورهای بادی با حداکثر ظرفیت ۱۱۰۰ MW برای جایگزینی پنج ژنراتور معمولی ۱، ۶، ۸، ۹ و ۱۰ به کار گرفته شده‌اند. تولید بهینه توان این ژنراتورهای بادی برای بار پایه و برای و حداقل تلفات خطوط انتقال در جدول ۱ فهرست شده است. در بارگذاری بار پایه، افزایش ۴۶۷ MW (۱۴.۲۸٪) تولید توان بادی حاصل شده است. برای کاهش تلفات انتقال ۴.۶۲۹ MW (۱۰.۶۶٪) نسبت به حالت پایه، کل تولید توان بادی ۳۱۴ MW (۹.۶٪) افزایش یافته است. حداکثر تولید پنج ژنراتور بادی منتخب برای تلفات مختلف خطوط انتقال در شکل (۵) نشان داده شده است.

جدول ۱- تولید بهینه ژنراتورهای بادی.

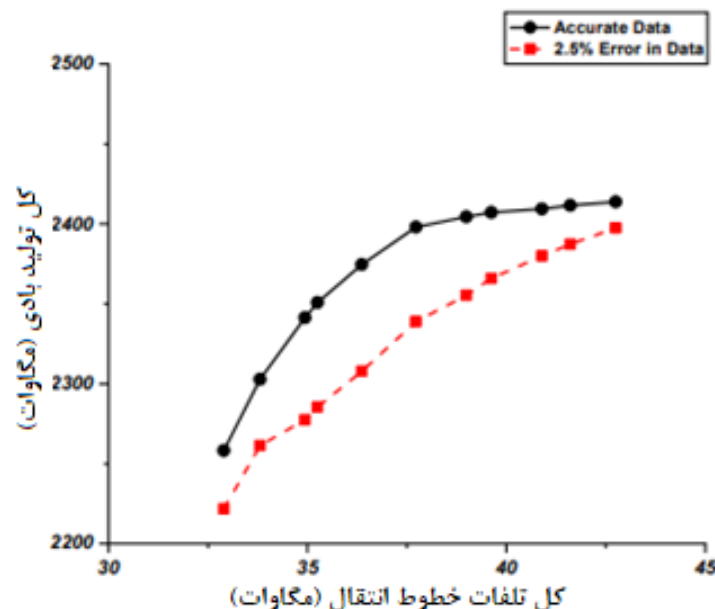
تلفات خطوط انتقال (MW)	تولید بهینه ژنراتورهای بادی (MW)				
	ژنراتور ۱	ژنراتور ۶	ژنراتور ۸	ژنراتور ۹	ژنراتور ۱۰
۴۳.۶۴	۵۷۳	۷۱۸	۷۰۹	۶۵۹	۱۰۷۸
۳۸.۷۸۲	۵۵۹	۶۸۸	۶۶۳	۶۱۱	۱۰۶۳

۷- تحلیل خطای داده

خروجی RAS پیشنهادی شدیداً به کیفیت داده‌های ورودی وابسته است. در این بخش، اثر خطا داده‌های ورودی به RAS ارزیابی شده است. سه ژنراتور معمولی یعنی ژنراتورهای ۱، ۸ و ۱۰ سیستم با ژنراتورهای بادی با حداکثر توان تولیدی MW ۱۱۰۰ جایگزین می‌شوند. برای تلفات خط انتقال MW ۴۲.۷۴۷، کل تولید توان بادی با داده‌های دقیق سیستم، بار و تولید MW ۲۴۱۴ است. با در نظر گرفتن خطای ۲.۵٪ داده‌های سیستم، بار و تولید، مجموع تولید توان بادی برای همین مقدار تلفات خطوط انتقال به MW ۲۳۹۷ کاهش می‌یابد. خطای ۲.۵٪ در داده‌های سیستم، بار و تولید در هر شین سیستم در نظر گرفته شده است. داده‌های واقعی تولید اکتیو در شین ۳۶ MW ۵۶۰

و تقاضای توان اکتیو در شین ۲۰ MW ۶۲۸ است. داده‌های اندازه‌گیری شده با در نظر گرفتن خطای ۲.۵٪، تولید توان اکتیو در شین ۳۶ MW ۵۴۶ و تقاضای توان اکتیو در شین ۲۰ MW ۶۱۲.۳ است.

برای خطای ۲.۵٪ داده‌های هر شین سیستم، خروجی RAS خطای ۰.۷٪ در کل تولید توان بادی ارائه می‌دهد. بنابراین، RAS پیشنهادی در برابر چنین مقدار قابل توجهی از خطای داده مستحکم است. کل تولید توان بادی با داده‌های دقیق و اشتباه سیستم، بار و تولید به ترتیب MW ۲۳۵۱ و MW ۲۲۸۵ برای تلفات خطوط انتقال MW ۳۵/۲۵۵ است. علاوه بر این، کل تولید توان بادی از این سه ژنراتور بادی با داده‌های دقیق و اشتباه برای تغییر تلفات خطوط انتقال به صورت شکل (۶) است.



شکل ۶- اثر خطای داده روی تولید توان بادی کل برای تنظیم تلفات خطوط انتقال.

جدول ۲ - تولید توان بادی مجموعه‌های مختلف ژنراتورهای بادی.

حداقل تلفات خطوط انتقال (MW)			تلفات خطوط انتقال در بار پایه (MW)		مجموعه ژنراتورها
تولید کل (MW) [تغییر (%)]	تولید بهینه ژنراتور بادی (MW)	تلفات خطوط (MW) [کاهش (%)]	تولید کل (MW) [تغییر (%)]	تولید بهینه ژنراتور بادی (MW)	
۱۷۰۷ [+۱.۰۱]	۶۰۳.۶۸	۳۳.۵۹۹ [۲۲.۶]	۲۰۷۷ [+۲۲.۹]	۷۲۱.۷۸	ژنراتور ۴
	۴۷۷.۳۴			۵۴۴.۶۱	ژنراتور ۵
	۶۲۶.۶			۸۱۰.۲	ژنراتور ۷
۲۴۰۲ [+۱.۳۵]	۵۱۵.۳۷	۳۸.۹۱۲ [۱۰.۳۶]	۲۵۰۲ [+۵.۵۷]	۵۵۳.۰۵	ژنراتور ۸
	۸۴۰.۹۵			۹۰۰.۳۶	ژنراتور ۹
	۱۰۴۵.۶			۱۰۴۸.۴۹	ژنراتور ۱۰
۱۹۳۸ [-۵]	۶۴۸.۶۲	۳۰.۷۶۴ [۲۹.۱۳]	۲۲۶۵ [+۱۱.۰۳]	۶۵۶.۵۲	ژنراتور ۶
	۶۳۳.۰۳			۹۳۹.۳۹	ژنراتور ۷
	۶۵۶			۶۶۸.۹۳	ژنراتور ۹
۳۰۲۶ [+۰.۲]	۶۰۳.۶۸	۴۱.۷۳۱ [۳.۸۷]	۳۰۷۰ [+۱.۶۶]	۵۳۵.۲۳	ژنراتور ۶
	۴۷۷.۳۴			۵۲۷.۳۹	ژنراتور ۸
	۶۲۶.۰۶			۹۳۱	ژنراتور ۹
	۶۲۶.۰۶			۱۰۷۶.۳	ژنراتور ۱۰
۲۷۲۰ [+۱.۸۷]	۷۷۶.۵	۴۰.۲۳۶ [۷.۳۱]	۲۸۳۱ [+۶.۰۳]	۸۲۸.۳۵	ژنراتور ۴
	۷۸۳.۵۸			۸۳۲.۸۹	ژنراتور ۶
	۵۵۳.۱۸			۵۵۱.۹۱	ژنراتور ۷
	۶۰۶.۲۵			۶۱۸.۲۶	ژنراتور ۹
۳۲۱۴ [+۶.۰۷]	۵۶۸.۹۶	۳۳.۲۵۶ [۲۳.۳۹]	۳۶۳۵ [+۱۹.۹۷]	۹۳۴.۱۷	ژنراتور ۱
	۶۲۴.۷۶			۶۱۶.۵۲	ژنراتور ۳
	۴۸۹.۲۸			۵۶۱.۵۳	ژنراتور ۴
	۵۰۳.۳۸			۵۴۹.۷۱	ژنراتور ۵
	۱۰۲۷.۳			۹۷۲.۸۹	ژنراتور ۱۰
۳۱۰۰ [+۳.۶۸]	۵۷۷.۴۵	۳۹.۲۴۱ [۹.۶۱]	۳۲۲۶ [+۷.۸۹]	۵۸۸.۸۷	ژنراتور ۳
	۵۶۹.۶۷			۵۸۲.۴۵	ژنراتور ۴
	۶۳۶.۸۵			۶۵۳.۰۶	ژنراتور ۵
	۵۹۵.۵۲			۶۰۸	ژنراتور ۶
	۷۲۰.۴۳			۷۹۳.۱۵	ژنراتور ۷

۸- نتیجه گیری

افزایش نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر در سیستم‌های قدرت می‌تواند سهم ژنراتورهای معمولی را در این سیستم‌ها و به تبع انتشار کربن را کاهش دهد. در این مقاله، روشی برای بهینه‌سازی میزان تولید توان بادی به سیستم‌های قدرت با در نظر گرفتن حداقل تلفات خطوط انتقال ارائه شده است. بدین منظور، مسئله بهینه‌سازی چندهدفه مبتنی بر الگوریتم ژنتیک پیشنهاد شده است. نتایج در سیستم ۳۹ شینه نیوانگلند برای مجموعه‌های مختلف ژنراتورهای تولید توان بادی شبیه‌سازی شده است. مشاهده می‌شود که با اعمال این روش می‌توان در سیستم مذکور نفوذ تولید توان بادی را به میزان ۳۴.۸۶٪ بدون افزایش تلفات افزایش داد. به علاوه، می‌توان مقادیر حداکثر تولید توان بادی با در نظر گرفتن مقادیر مختلف تلفات خطوط انتقال به دست آورد. بنابراین، روش پیشنهادی یک راه‌حل مناسب و اقتصادی برای حداکثر استفاده از منابع تولید توان بادی موجود بدون متحمل شدن تلفات بیشتر ارائه می‌کند. به عبارت دیگر، نوآوری این مقاله، کاهش تلفات خطوط انتقال همراه با حداکثر نمودن تزریق توان بادی در سیستم‌های قدرت است. با این کار، همزمان با افزایش سهم تولید توان بادی در سیستم، تلفات سیستم انتقال حداقل گردید و به وضوح اثر مفید جایگزینی ژنراتورهای متعارف با نوع بادی مشاهده شد. در ابتدا، کل تلفات خط انتقال در سیستم و ضرایب تلفات کرون B سیستم با استفاده از Matpower محاسبه شد و شرایط اولیه با کمک داده‌های بلادرنگ زاویه ولتاژ

شین به دست آمده از PMU ارزیابی گردید. مسئله بهینه‌سازی چندهدفه، تولید بهینه را از هر ژنراتور بادی برای تغییر تلفات خطوط انتقال فراهم نمود. مسئله بهینه‌سازی چندهدفه به کمک الگوریتم ژنتیک حل شد. لذا با این روش پیشنهادی، می‌توان ژنراتورهای متعارف را با نوع بادی به صورت بهینه و با حداقل تلفات شبکه انتقال جایگزین نمود.

تقدیر و تشکر

از تمامی اساتید و دانشجویان گرامی در دانشگاه ملی مهارت که در آماده‌سازی این کار پژوهشی به هر نحوی به اینجانب کمک نمودند، صمیمانه تقدیر و تشکر می‌گردد.

تعارض منافع

نویسنده اعلام می‌کند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی

نویسنده متعهد می‌شود که مطالب این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرساند است.

مشارکت‌های نویسندگان

تنها نویسنده این مقاله آقای شهریار عباسی تمامی مراحل تالیف این مقاله از قبیل مطالعه نوشتارهای قبلی، شبیه‌سازی، نوشتن مقاله و ... را انجام داده است.

منابع مالی

تمامی منابع مالی این مقاله توسط نویسنده تامین گردید. از هیچ شخص یا سازمان حقیقی یا حقوقی در تامین منابع مالی این مقاله کمک گرفته نشده است.

نمادها

بردار با ابعاد $W \times 1$ تولید ژنراتورهای بادی	P_w
بردار با ابعاد $G \times 1$ تولید ژنراتورها	P
ماتریس مربعی $G \times G$ مربوط به ضرایب تلفات	B
بردار $G \times 1$ مربوط به ضرایب تلفات	B_0
ثابت تلفات	B_{00}
توان اکتیو عبوری از خط ij	P_{ij}
تولید توان اکتیو در شین i	P_i^g
بار اکتیو در شین i	P_i^d
زاویه ولتاژ شین i	δ_i
تعداد شین‌ها	N
تعداد ژنراتورهای بادی	W
تعداد ژنراتورها	G

مراجع

- [1] W. Wang, L. Liu, J. Liu, and Z. Chen. "Energy management and optimization of vehicle-to-grid systems for wind power integration." *CSEE Journal of Power and Energy Systems* 7, no. 1 (2020): 172-180.
- [2] S. Abbasi, and H. Abdi. "Return on investment in transmission network expansion planning considering wind generation uncertainties applying non-dominated sorting genetic algorithm." *Journal of Operation and Automation in Power Engineering* 6, no. 1 (2018): 89-100.
- [3] S. Abbasi, H. Abdi, S. Bruno, and M. La Scala. "Transmission network expansion planning considering load correlation using unscented transformation." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 103 (2018): 12-20.
- [4] S. Abbasi, and H. Abdi. "Multiobjective transmission expansion planning problem based on ACOPF considering load and wind power generation uncertainties." *International Transactions on Electrical Energy Systems* 27, no. 6 (2017): e2312.
- [5] Y. Shu, and Y. Tang. "Analysis and recommendations for the adaptability of China's power system security and stability relevant standards." *CSEE Journal of Power and Energy Systems* 3, no. 4 (2017): 334-339.
- [6] S.D. Ahmed, F.S. Al-Ismail, M. Shafiullah, F.A. Al-Sulaiman, and I.M. El-Amin. "Grid integration challenges of wind energy: A review." *IEEE Access* 8 (2020): 10857-10878.
- [7] A. Habiburrahman, and L.D. Arya. "Comparison of transmission losses and voltage regulation of overhead and gas insulated transmission line." In *2020 IEEE International Conference on Advances and Developments in Electrical and Electronics Engineering (ICADEE)*, pp. 1-3. IEEE, 2020.
- [8] I. Pavičić, I. Ivanković, A. Župan, R. Rubeša, and M. Rekić. "Advanced prediction of technical losses on transmission lines in real time." In *2019 2nd International Colloquium on Smart Grid Metrology (SMAGRIMET)*, pp. 1-7. IEEE, 2019.
- [9] L. Rudolf. "Software solution of technical losses of the transmission network system line." *Transactions on Electrical Engineering* 2, no. 4 (2013): 97-101.
- [10] A. Ombua, and H. Abba Labane. "High voltage lines: energy losses in insulators." *The International Journal of Engineering and Science* 6, no. 10 (2017): 10.
- [11] T. Barforoushi, and R. Heydari. "Risk-constrained transmission network expansion planning in competitive electricity markets considering expected energy not supplied and wind curtailment." *Journal of Modeling Engineering* 20, no. 70 (2022): 209-223.
- [12] R. Fathi, B. Tousi, and S. Galvani. "Optimal Allocation of Renewable Resources in Distribution Networks Considering Uncertainty Based on Info-Gap Decision Theory Using Improved Salp Swarm Algorithm." *Journal of Modeling Engineering* 20, no. 67 (2022): 207-223.
- [13] M. Tripathy, S. Mishra, L. Lei Lai, and Q.P. Zhang. "Transmission loss reduction based on FACTS and bacteria foraging algorithm." In *International Conference on Parallel Problem Solving from Nature*, pp. 222-231. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [14] S. Jangjit, P. Kumkratug, and P. Laohachai. "Reduction of transmission line loss by using Interline Power Flow Controllers." In *ECTI-CON2010: The 2010 ECTI International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology*, pp. 450-453. IEEE, 2010.
- [15] J.H. Gurney, R.J. Koessler, J.S. Mumick, F.S. Prabhakara, and G. Shen. "Loss reduction opportunities in EHV transmission systems." In *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1-7. IEEE, 2009.
- [16] A.Y. Abdelaziz, S.F. Mekhamer, M.A.L. Badr, F.M. Mohamed, and E.F. El-Saadany. "A modified particle swarm algorithm for distribution systems reconfiguration." In *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1-8. IEEE, 2009.
- [17] A.A. Esmin, G. Lambert-Torres, and A.Z. De Souza. "A hybrid particle swarm optimization applied to loss power minimization." *IEEE Transactions on Power Systems* 20, no. 2 (2005): 859-866.
- [18] K. Vaisakh, M. Sridhar, and K.S. Linga Murthy. "Adaptive PSO-DV algorithm for minimization of power loss and voltage instability." In *2009 International Conference on Advances in Computing, Control, and Telecommunication Technologies*, pp. 140-144. IEEE, 2009.

- [19] H. Tehzeeb-Ul-Hassan, R. Zafar, S.A. Mohsin, and O. Lateef. "Reduction in power transmission loss using fully informed particle swarm optimization." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 43, no. 1 (2012): 364-368.
- [20] R. Bacher, and H. Glavitsch. "Loss reduction by network switching." *IEEE Transactions on Power Systems* 3, no. 2 (1988): 447-454.
- [21] <https://icseg.iti.illinois.edu/ieee-39-bus-system/>
- [22] R. Liu, A.K. Srivastava, D.E. Bakken, A. Askerman, and P. Panciatici. "Decentralized state estimation and remedial control action for minimum wind curtailment using distributed computing platform." *IEEE Transactions on Industry Applications* 53, no. 6 (2017): 5915-5926.
- [23] P. Kundu, and A. Kumar Pradhan. "Enhanced protection security using the system integrity protection scheme (SIPS)." *IEEE Transactions on Power Delivery* 31, no. 1 (2015): 228-235.
- [24] T. Weckesser, H. Jóhannsson, and J. Østergaard. "Real-time remedial action against aperiodic small signal rotor angle instability." *IEEE Transactions on Power Systems* 31, no. 1 (2015): 387-396.
- [25] M. Derafshian Maram, and N. Amjady. "Event-based remedial action scheme against super-component contingencies to avert frequency and voltage instabilities." *IET Generation, Transmission & Distribution* 8, no. 9 (2014): 1591-1603.
- [26] U. Rudez, and R. Mihalic. "WAMS-based underfrequency load shedding with short-term frequency prediction." *IEEE Transactions on Power Delivery* 31, no. 4 (2015): 1912-1920.
- [27] T. Shekari, A. Gholami, F. Aminifar, and M. Sanaye-Pasand. "An adaptive wide-area load shedding scheme incorporating power system real-time limitations." *IEEE Systems Journal* 12, no. 1 (2016): 759-767.
- [28] Y. Zhou, H. Huang, Z. Xu, W. Hua, F. Yang, and S. Liu. "Wide-area measurement system-based transient excitation boosting control to improve power system transient stability." *IET Generation, Transmission & Distribution* 9, no. 9 (2015): 845-854.
- [29] J. Gou, Y. Liu, J. Liu, G.A. Taylor, and M.M. Alamuti. "Novel pair-wise relative energy function for transient stability analysis and real-time emergency control." *IET Generation, Transmission & Distribution* 11, no. 18 (2017): 4565-4575.
- [30] Z. Liu, Z. Chen, H. Sun, and Y. Hu. "Multiagent system-based wide-area protection and control scheme against cascading events." *IEEE Transactions on Power Delivery* 30, no. 4 (2014): 1651-1662.
- [31] N. Liu, and P. Crossley. "Assessing the risk of implementing system integrity protection schemes in a power system with significant wind integration." *IEEE Transactions on Power Delivery* 33, no. 2 (2017): 810-820.
- [32] P.M. Joshi, and H.K. Verma. "Synchrophasor measurement applications and optimal PMU placement: A review." *Electric Power Systems Research* 199 (2021): 107428.
- [33] D. Zolin, and E. Ryzhkova. "Synchronized Phasor Measurements for Power System Digital Control Applications." In *2021 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM)*, pp. 42-47. IEEE, 2021.
- [34] S. Kumar, B. Tyagi, V. Kumar, and S. Chohan. "Optimization of phasor measurement units placement under contingency using reliability of network components." *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 69, no. 12 (2020): 9893-9906.
- [35] A.K. Sinha, R. Kumar, C. Saikia, S. Rudrapaul, and B. Saikia. "An optimal PMU placement technique for the topological observability of a part of the NER grid of India." In *2013 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, pp. 142-146. IEEE, 2013.
- [36] G.C. Patil, and A.G. Thosar. "Optimal placement of PMU for power system observability using integer programming." In *2017 International Conference on Innovative Research In Electrical Sciences (IICIRES)*, pp. 1-6. IEEE, 2017.
- [37] Z. Lu, Z. Xu, and Z. Shi. "State estimation of voltage phasors based on part of voltage and current phasors measurement." *Autom Electr Power Syst* 24 (2000): 42-44.
- [38] North American Electric Reliability Cooperation (NERC), "PRC-012-2 – Remedial Action Schemes (Final Draft)," North American Electric Reliability Cooperation (NERC) PRC-012- 2, Tech. Rep., Apr. 2016.
- [39] W.S. Meyer, and V.D. Albertson. "Improved loss formula computation by optimally ordered elimination techniques." *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* 1 (1971): 62-69.

- [40] R.D. Zimmerman, C.E. Murillo-Sánchez, and R.J. Thomas. "MATPOWER: Steady-state operations, planning, and analysis tools for power systems research and education." *IEEE Transactions on Power Systems* 26, no. 1 (2010): 12-19.
- [41] MATLAB version 9.6.0.1072779 (R2019a), The Mathworks, Inc., Natick, Massachusetts, 2019.
- [42] "Matlab optimization toolbox." The Mathworks, Inc., Natick, Massachusetts, 2019.
- [43] S.A. Mirjalili. "Genetic algorithm." In *Evolutionary Algorithms and Neural Networks*. Springer, (2019): 43–55.
- [44] S. Katoch, S.S. Chauhan, and V. Kumar. "A review on genetic algorithm: past, present, and future." *Multimedia Tools and Applications* 80 (2021): 8091-8126.