



دانشگاه سمنی سمن

DOR:

[20.1001.1.23223146.1401.9.2.1.9](https://doi.org/10.1001.1.23223146.1401.9.2.1.9)

نشریه علمی غیرخطی در مهندسی برق

دوره ۱۰ - شماره ۲

پاییز و زمستان ۱۴۰۲

صفحات ۱۲۷ الی ۱۵۰

ISSN: 2322-3146

<http://journals.sut.ac.ir/jnsee>

کاهش تلفات سیستم قدرت با استفاده از پخش بار بهینه توان راکتیو و روش تجزیه خم عمومی GBD

مجید نجارپور^۱، بهروز طوسی^۲ و علیرضا عبادی زاهدان^۳

^۱ کارشناس ارشد، گروه مهندسی برق قدرت، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه ارومیه، ایران.

st_m.najjarpour@urmia.ac.ir

^۲ نویسنده مسئول، استاد تمام، گروه مهندسی برق قدرت، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه ارومیه، ایران.

b.tousi@urmia.ac.ir

^۳ کارشناس ارشد، گروه مهندسی برق قدرت، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

تهران، ایران. alireza.ebadi@srbiau.ac.ir

چکیده

در این مقاله روشی کارآمد جهت به حداقل رساندن تلفات انرژی ارائه شده است. روش ارائه شده از شرایط بارگذاری متناوب، طی بازه زمانی آینده به جای یک وضعیت لحظه‌ای شبکه استفاده می‌کند. این روش، شرایط بهینه را در طی بازه زمانی داده شده با توجه به مقدار کنونی شرایط به دست آورده و بازه زمانی داده شده را به تعداد زیادی زیربازه کوچکتر تقسیم می‌کند. با افزایش تعداد زیربازه‌ها یا پروفیل‌های بار، ابعاد مسئله افزایش می‌یابد که باید برای آن یک مقدار بهینه محاسبه شود. در این روش، متغیرها به گروه متغیرهای کنترلی پیوسته و گسسته تقسیم می‌شوند. در حالی که در هر زیربازه فقط متغیرهای کنترلی پیوسته اجازه تغییر دارند، متغیرهای پیوسته و گسسته در ابتدای هر بازه زمانی تنظیم می‌شوند. این مسئله با به کار بردن روش تجزیه خم عمومی GBD حل می‌شود. با استفاده از این روش، شرایط بار برای هر زیربازه در زیرمسئله NLP حل می‌شود. سپس، نتایج زیرمسئله NLP^۱ در زیرمسئله اصلی به کار برده می‌شوند. همان‌طور که در نتایج شبیه‌سازی نیز نشان داده شده است، روش ارائه شده نه تنها پروفیل ولتاژ را بهبود می‌بخشد، بلکه انرژی کل تلف شده در بازه زمانی مورد نظر را نیز کاهش می‌دهد.

واژه‌های کلیدی

پخش بهینه توان راکتیو،
مینیم‌سازی تلفات انرژی،
مینیم‌سازی تلفات توان،
الگوریتم GBD.



Sahand University
of Technology

DOR:

[20.1001.1.23223146.1401.9.2.1.9](https://doi.org/10.1001.1.23223146.1401.9.2.1.9)

Journal of Nonlinear
Systems in Electrical
Engineering

Vol.10, No.2

Autumn and Winter 2023

ISSN: 2322 – 3146

<http://journals.sut.ac.ir/jnsee>

Reduction of Power System Losses Using Optimal Load Distribution of Reactive Power and General Bend Decomposition (GBD) Method

Majid Najjarpour¹, Behrouz Tousi² and Alireza Ebadi Zahedan³

¹Master graduate, Department of Power Electrical Engineering, Faculty of Electricity and st_m.najjarpour@urmia.ac.ir Computers, Urmia University, Iran,

² **Corresponding author**, full professor, Department of Power Engineering, Faculty of b.tousi@urmia.ac.ir Electrical and Computer Science, Urmia University, Iran,

³ Master graduate, Department of Power Electrical Engineering, Faculty of Electricity and Computer Science, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran, alireza.ebadi@srbiau.ac.ir

ABSTRACT

Keywords

optimal distribution of
reactive power,
minimization of energy
losses,
minimization of power
losses,
GBD algorithm.

In this article, an efficient method to minimize energy losses is presented. The proposed method uses intermittent loading conditions over a future period of time instead of an instantaneous network condition. This method obtains the optimal condition during the given time interval according to the current value of the condition and divides the given time interval into many smaller sub-intervals. By increasing the number of subintervals or load profiles, the dimensions of the problem increase, for which an optimal value must be calculated. In this method, the variables are divided into the group of continuous and discrete control variables. While only continuous control variables are allowed to change in each sub-interval, continuous and discrete variables are set at the beginning of each time interval. This problem is solved by using the General Bend Decomposition (GBD) method. Using this method, the load condition is solved for each subinterval in the NLP sub-problem. Then, the results of the NLP sub-problem are used in the main sub-problem. As shown in the simulation results, the proposed method not only improves the voltage profile, but also reduces the total energy wasted in the desired time period.

۱ - مقدمه

امروزه، کاهش تلفات انرژی، یکی از اساسی ترین مسائل در شبکه‌های قدرت به شمار می‌رود. در تحقق این امر، دانش فنی در کنار الگوریتم‌های بهینه‌سازی، به کمک مهندسين قدرت آمده است. در [۱] یک مدل جریان توان بهینه پویا^۱ (DOPF) ارائه شده که شامل متغیرهای گسسته و پیوسته است. با استفاده از روش GBD، مسئله به یک مسئله اصلی و مسائل فرعی تقسیم می‌شود که محاسبات را ساده می‌کند. هدف این مدل به حداقل رساندن هزینه‌های تولید برق و تلفات شبکه است. شبیه سازی ها نشان می‌دهد که روش پیشنهادی کارایی و دقت محاسباتی را بهبود می‌بخشد.

همچنین [۲] یک الگوریتم جریان قدرت بهینه را با استفاده از الگوریتم GBD برای مدیریت منابع انرژی توزیع شده^۲ (DER) و تنظیم ولتاژ در سیستم‌های توزیع آینده معرفی می‌کند. این الگوریتم از هر دو حالت متصل به شبکه و حالت جزیره ای پشتیبانی نموده و برنامه ریزی چند بازه ای را در یک شبکه توزیع نامتعادل انجام می‌دهد. این الگوریتم با موفقیت بر روی فیدر آزمایشی ۱۲۳ گره IEEE آزمایش شده و پتانسیل را برای کاربردهای در مقیاس بزرگ نشان داده است.

در [۳] یک مدل تبدیل انعطاف پذیری برای واحدهای توان حرارتی سنتی با در نظر گرفتن ادغام نیروی باد و خورشیدی پیشنهاد شده است. با استفاده از الگوریتم تجزیه Benders تعمیم یافته، مسئله به مسایل اصلی و فرعی تقسیم می‌شود. این مدل به طور موثر مصرف انرژی باد و خورشیدی را مدیریت می‌کند و در عین حال هزینه‌ها و کاهش را کاهش می‌دهد. مطالعات موردی اثربخشی مدل را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که یارانه‌های مناسب می‌تواند یکپارچگی انرژی‌های تجدیدپذیر را بیشتر افزایش دهد.

در مطالعه [۴] یک الگوریتم طبقه بندی شده و تجزیه شده^۳ (C&D) برای شبیه سازی کارآمد و قوی سیستم‌های حرارتی بدون ساده سازی پیشنهاد شده است. این رویکرد شبیه‌سازی سیستم را به یک مسئله بهینه‌سازی تبدیل می‌کند، غیرخطی بودن را از طریق تجزیه و با استفاده از اطلاعات گرادیان برای هم‌گرایی سریع‌تر مدیریت می‌کند. الگوریتم C&D که در چرخه برایتون دی اکسید کربن فوق بحرانی اعمال می‌شود، زمان محاسبات را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد و محدوده همگرایی و استحکام را در مقایسه با روش‌های موجود بهبود می‌بخشد.

پژوهش [۵] تجزیه Benders را برای مسائل تصادفی دو مرحله ای در برنامه ریزی انرژی تحت عدم قطعیت آب و هوا اعمال می‌کند. روش‌های مختلف تثبیت، از جمله رویکرد اعتماد-منطقه درجه دوم، مقایسه می‌شوند. الگوریتم معرفی شده، به‌ویژه زمانی که موازی‌سازی می‌شود، به طور قابل توجهی از تجزیه پایه Benders بهتر عمل می‌کند و با افزایش تعداد سناریوها کارآمد باقی می‌ماند. این الگوریتم برنامه ریزی قوی انرژی‌های تجدیدپذیر را تسهیل می‌کند و می‌تواند طیف گسترده ای از تجزیه و تحلیل‌ها را انجام دهد.

^۱ Dynamic Optimal Power Flow

^۲ Distributed Energy Resources

^۳ Categorized and Decomposed

یک روش جدید برای حل جریان قدرت بهینه با محدودیت امنیتی^۱ (SCOPF) ارائه شده است که با استفاده از الگوریتم GBD مشکل را به یک مورد پایه و موارد احتمالی تقسیم می کند [۶]. هر مورد احتمالی به طور مستقل با برنامه ریزی موازی حل می شود. این روش بر روی داده های ARPA-E GO Competition Challenge 2 آزمایش شده است و کارایی آن را در اندازه های مختلف شبکه نشان می دهد.

مطالعه [۷] نیز به طراحی بهینه یک سیستم چند انرژی محلی^۲ (LMES) در یک افق چند فازی می پردازد که به عنوان یک برنامه خطی عدد صحیح مختلط فرموله شده است. یک اقتباس جدید از تجزیه Benders تعمیم یافته پیشنهاد شده است، که از برش های Benders غیرمحدب با توابع نشانگر استفاده می کند. این الگوریتم از نظر تئوری ثابت شده است که به طور بهینه همگرا می شود و از طریق یک مطالعه موردی واقعی، بهتر از حل کننده های سنتی و روش های تجزیه سلسله مراتبی در عملکرد عددی تأیید می شود. مسئله پخش توان بهینه^۳ (OPF) یکی از نیازهای عمده بهره برداری سیستم های قدرت است. این مسئله می تواند به دو زیرمسئله تقسیم شود؛ پخش بهینه توان اکتیو^۴ (OAPF) پخش بهینه توان راکتیو^۵ (ORPF). اهداف اصلی پخش توان راکتیو عبارت است از:

۱- نگهداری پروفیل ولتاژ در دامنه قابل قبول

۲- مینیمم سازی تلفات انتقال کلی

۳- جلوگیری از تنظیم بیش از حد تپ ترانسفورماتورها و کلید زنی بیش از اندازه منابع توان گسسته.

در مورد هدف اول، این امر می تواند برای شرایط پایدار^۶ و شرایط رخداد حادثه بررسی شود. حین شرایط پایدار، تلفات توان کل می تواند با مشخص شدن پخش بهینه توان راکتیو مینیمم سازی شود. متغیرهای کنترلی در این مبحث شامل ولتاژ/ وار ژنراتورها، نسبت تپ ترانسفورماتورها تولید و توان راکتیو منابع توان راکتیو گسسته می باشند. قیود شامل محدودیت های ولتاژ/ وار ژنراتورها، محدودیت های باسبارها، محدودیت نسبت تپ ترانسفورماتورها، محدودیت منابع توان راکتیو گسسته، تعادل پخش توان در تمامی باس ها و قیود پایداری شبکه است. پخش بهینه توان راکتیو متناوباً با گرفتن لحظه ای شرایط لحظه ای شبکه به صورت بهنگام اجرا می شود. در کاربرد بهنگام پخش بهینه توان راکتیو، توابع هدف متفاوت می توانند مینیمم سازی شوند. این توابع هدف شامل مینیمم سازی تلفات توان کل، مینیمم سازی تغییر متغیر کنترلی یا مینیمم سازی تعداد متغیرهای کنترلی جهت رفع نقض قیود باشد. در حالت حداقل تغییر متغیر کنترلی، مجموع مقادیر تغییرات در متغیرهای کنترلی در نظر گرفته می شود، درحالی که در حداقل تعداد تغییرات متغیرهای کنترلی که باید تغییر یابند مینیمم سازی می شود. در هر دو حالت، هدف رفع نقض قیود ولتاژ است. هدف ذکر شده در [۸، ۹] مینیمم سازی تلفات توان کل هنگامی که تمامی قیود رعایت شوند، می باشند. این روش از نظر کاربرد متفاوت است. روش [۸] تلفات توان را منحصراً بر پایه پیش بینی بار مینیمم سازی می کند. درحالی که در روش [۹] تلفات توان بر پایه شرایط بار بهنگام

¹ Security-Constrained Optimal Power Flow

² Local Multi-Energy System

³ Optimal Power Flow

⁴ Optimal Active Power Flow

⁵ Optimal Reactive Power Flow

⁶ Steady State

مینیمم‌سازی می‌شود. مشکل روش اول آن است که شرایط بهنگام را در کارکرد غیربهنگام خود جهت مینیمم‌سازی تلفات توان به کار نمی‌گیرد. در روش دوم تلفات توان بدون در نظر گرفتن پیش‌بینی بار در طی زمان آینده مینیمم‌سازی می‌شود. در روش ارائه شده در این مقاله، تلفات انرژی کل بر پایه شرایط کنونی بار و با توجه به پیش‌بینی بار در طی زمان آینده مینیمم‌سازی می‌شود. جهت پیگیری تغییرات بهنگام بار و نگهداری شبکه در شرایط بهینه، پخش بهینه توان راکتیو باید به‌طور پیوسته و یا حداقل به‌دفعات زیاد اجرا شود. با توجه به مسائل کاربردی و مشکلات اجرایی، پخش بهینه توان راکتیو کمتر اجرا می‌شود. دلایل این امر، نگهداری بار کاری بهره‌بردار در حد قابل قبول و جلوگیری از کلید زنی بیش‌ازحد تجهیزات (تپ‌های ترانسفورماتور، بانک‌های خازنی و سلف‌ها) است. با این شرایط اجرای برنامه پخش توان راکتیو، سیستم می‌تواند از شرایط بهینه دور شود. انحراف از بهینگی به نرخ و تعداد تغییرات بار وابسته است. در اکثر سیستم‌های مدیریت انرژی^۱ (EMS)، مسئله پخش وار استاتیک اجرا می‌شود [۸-۱۰]. استفاده از پخش دینامیکی برای پخش بهینه توان اکتیو، توسط [۱۱، ۱۲] انجام شده است. در این مقاله، یک مسئله پخش بهینه توان راکتیو دینامیک ارائه شده و حل می‌گردد. در این روش تلفات انرژی کل بر مبنای شرایط بهنگام بار و پیش‌بینی بار در طی بازه زمانی داده شده را در مقادیری که در آن بازه زمانی بهینه هستند، ثابت نگه می‌دارد. نقض قیود ولتاژ در ابتدای زیربازه‌های کوتاه‌تر برداشته می‌شوند. تلفات توان تا حد ممکن توسط تنظیم متغیرهای کنترلی پیوسته مانند ولتاژ / وار ژنراتور مینیمم‌سازی می‌شود.

۱-۱- مقایسه پخش بهینه توان استاتیک و دینامیک

در این مقاله دو روش پخش بهینه توان راکتیو^۲ (ORPD) استاتیک انتخاب شده‌اند. در [۱۳] تلفات توان بر اساس پیش‌بینی بار مینیمم‌سازی می‌شود. یک برنامه بهنگام که در هر ۰/۵ ثانیه اجرا می‌شود، تنظیمات لازم را برای هر گونه اختلاف میان پروفیل ولتاژ لحظه‌ای و پیش‌بینی شده را انجام می‌دهد. روش بحث شده در [۱۴] متغیرهای کنترلی را به دو گروه تقسیم می‌کند. متغیرهای گسسته (خازن‌ها، راکتورها، تپ چنجرها) و متغیرهای کنترلی پیوسته (ولتاژ / وار ژنراتورها). برنامه پخش بهینه توان راکتیو با دو هدف متفاوت اجرا می‌شود:

۱- مینیمم‌سازی تلفات توان

۲- رفع نقض قیود ولتاژ.

مورد اول تناوبی به‌اندازه نیم تا یک ساعت دارد و از تمامی متغیرهای کنترلی استفاده می‌کند. مورد دوم دارای تناوبی به‌اندازه ۱۵ دقیقه بوده و برای رفع نقض قیود ولتاژ فقط از متغیرهای کنترلی پیوسته استفاده می‌کند. تحقیقات زیادی جهت پخش بهینه توان دینامیک صورت گرفته است. در [۱۵] پخش بهینه توان اکتیو به‌طور همزمان برای زیربازه بهنگام و دوازده زیربازه پیش‌بینی شده در ساعت آینده حل شده و از عملیات موازی شبکه عصبی برای حل مسئله استفاده می‌شود. در [۱۶-۱۸] پخش دینامیک برای تولید زمان‌بندی مورد استفاده قرار گرفته و یک بازه زمانی شامل تعدادی زیربازه یک‌ساعته انتخاب شده است. سطح بار در طی هر ساعت با آن که از یک ساعت تا ساعت بعدی تغییر می‌کند، ثابت فرض شده است. این روش به تولید زمان‌بندی بهینه برای کل زمان بازه می‌پردازد. روشی که در اینجا ارائه شده است، پخش توان راکتیو بهنگام دینامیک می‌باشد که دارای سه مزیت عمده است:

^۱ Energy Management System

^۲ Optimal Reactive Power Distribution

۱- کاهش تلفات انرژی: روش ارائه شده تلفات انرژی کل را در طی بازه زمانی داده شده به عنوان هدف اصلی مینیمم سازی می کند [۱۳].

۲- کاهش تغییرات ساختار فیزیکی: این روش نسبت تپ چنجر و منابع توان راکتیو را در طی کل بازه زمانی ثابت نگه می دارد. این امر تعداد تغییرات ساختار فیزیکی، فرسودگی و هزینه نگهداری غیرضروری را کاهش می دهد که از نظر اقتصادی نیز قابل توجه است.

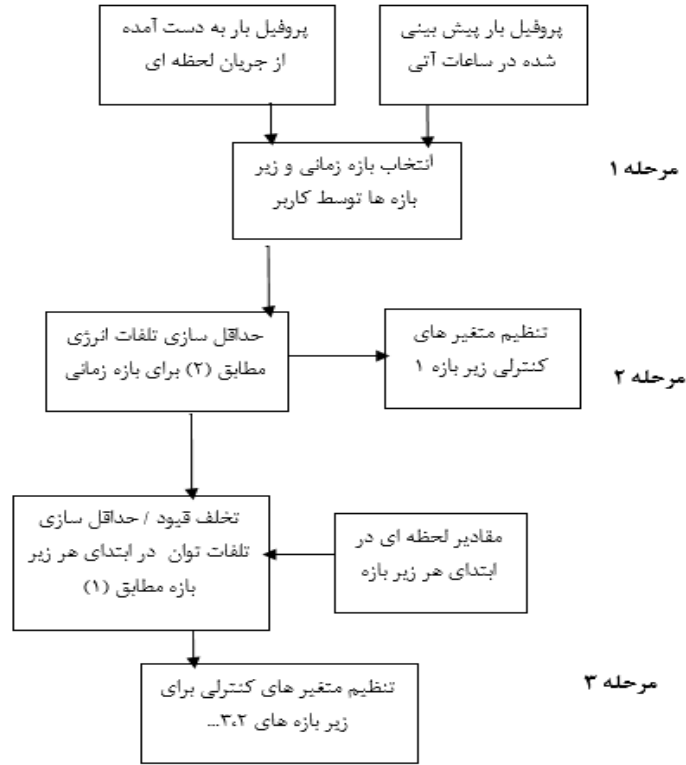
۳- کاهش تعداد متغیرهای کنترلی: در این روش تعداد متغیرهای کنترلی در ابتدای هر زیربازه به جز اولین زیربازه به متغیرهای کنترلی پیوسته محدود می شوند.

مراحل اصلی روش ارائه شده در شکل ۱ نشان داده شده و به شرح زیر است.

مرحله اول - انتخاب مدت بازه زمانی: پروفیل بهنگام بار و پیش بینی بار برای ساعات آینده مورد بررسی قرار گرفته و وابسته به اندازه تغییرات بار و تجربه کاربرد بازه زمانی که از نیم تا چند ساعت تغییر می کند انتخاب می شود. با در نظر گرفتن اطلاعات مشابه، بازه زمانی به N زیربازه تقسیم می شود. تعداد و مدت زمان زیربازه ها به تغییرات پروفیل بار بستگی دارد.

مرحله دوم - پخش دینامیک توان راکتیو: در ابتدای هر بازه زمانی، پخش دینامیک توان راکتیو جهت مینیمم سازی تلفات انرژی کل برای بازه زمانی انجام می پذیرد [۱۹] که شرایط بهنگام بار و پیش بینی بار برای N زیربازه را نیز شامل می شود. در این مرحله تمامی متغیرهای کنترلی پیوسته و گسسته در ابتدای بازه زمانی تقسیم می شوند.

مرحله سوم - پخش توان استاتیک توان راکتیو: در ابتدای هر زیربازه، یک پخش بهینه توان راکتیو انجام می شود. در هر اجرا، نقض قیود برای شرایط بار بهنگام برداشته می شود. اگر هیچ نقضی از قیود باقی نماند، تلفات توان مینیمم سازی می شود. در این مرحله فقط متغیرهای کنترلی پیوسته اجازه تغییر دارند.



شکل ۱- فلوچارت روش مینیمم سازی تلفات انرژی

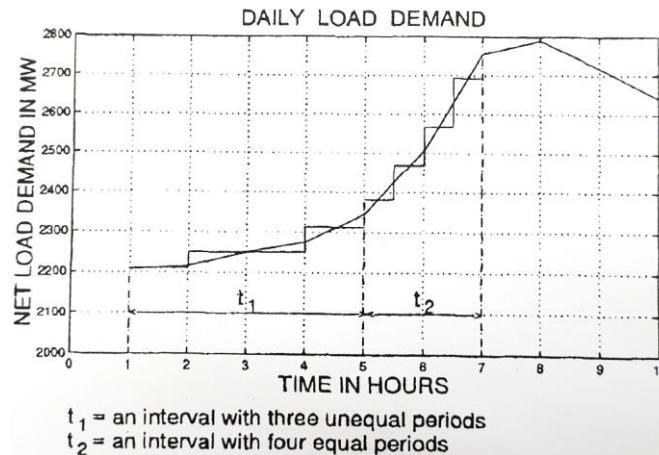
۲- فرمول بندی مسئله

فرمول های این مسئله در دو مرحله مورد بررسی قرار می گیرد. در مرحله اول، مینیمم سازی تلفات توان و نقض قیود بررسی شده و در مرحله دوم فرمول های مینیمم سازی جهت انرژی کل داده شده است.

۲-۱- فرمول های نقض قیود و حداقل سازی تلفات توان

فرض می شود که پخش توان اکنون انجام پذیرفته است و تولید توان اکتیو تمامی ژنراتورها به جز باس مبنا ثابت می باشند. با این فرض فرمول بندی مسئله به صورت زیر می باشد.

$$\begin{aligned}
 & \min_x f(x, y^*) \\
 & h(x, y^*) = 0 \\
 & g(x, y^*) \leq 0
 \end{aligned} \tag{1}$$



شکل ۲- انتخاب بازه‌های زمانی و زیر بازه‌ها [۱۶]

به طوری که f تلفات توان انتقالی یا میزان نقض قیود، X بردار متغیرهای پیوسته و γ^* متغیرهای گسسته که در طی زیربازه ثابت می‌باشند، است. قیود تساوی $h(x)$ ، به معادلات تعادل پخش توان وابسته بوده و قیود نامساوی $g(x)$ شامل قیود عملیاتی و ساده بر روی متغیرهای پیوسته است. این فرمول‌ها در پخش توان راکتیو استاتیک در ابتدای هر زیربازه مورد استفاده قرار می‌گیرند. روابط ذکر شده، در ادامه به صورت کامل تر آورده می‌شوند. همچنین در ادامه به فرمول‌بندی مدل غیرکوپله جهت ساده‌سازی کاربرد روش ارائه شده، اشاره خواهد شد. همان‌گونه که گفته شد، در این مدل، تولید توان اکتیو تمامی ژنراتورها به جز باس مبنا مشخص و ثابت می‌باشند. تابع هدف، تلفات توان کل بوده و متغیرهای کنترلی شامل ولتاژ / وار ژنراتورها، نسبت تپ ترانسفورماتورهای دارای تپ چنجر و تولید توان راکتیو منابع توان راکتیو گسسته (خازنی و سلفی) است. قیود مسئله نیز، محدودیت‌های ولتاژ بر روی باسبارها، محدودیت‌های ولتاژ / وار ژنراتورها، محدودیت‌های نسبت تپ‌ها و محدودیت‌های منابع تولید توان راکتیو گسسته می‌باشند. قیود دیگر مانند محدودیت‌های عبور توان از شاخه‌های شبکه نیز می‌توانند در نظر گرفته شوند. این تابع هدف به صورت زیر است:

$$\min P_L = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1, j \neq i}^M g(i, j) [V_i^2 + V_j^2 - 2V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j)] \quad (1)'$$

به طوری که:

P_L تلفات توان کل خطوط انتقال

M تعداد باس‌ها

$g(i, j)$ هدایت الکتریکی خط بین باس i و باس j برای $j \neq i$

V_i اندازه ولتاژ در باس i

δ_i اندازه زاویه ولتاژ در باس i

قیود مسئله نیز شامل موارد زیر است:

۱- قیود متغیرهای پیوسته

$$V_L^{min} \leq V_L \leq V_L^{max}$$

$$V_g^{min} \leq V_g \leq V_g^{max}$$

$$Q_g^{min} \leq Q_g \leq Q_g^{max}$$

۲- قیود تساوی پخش بار

$$\Delta P = 0$$

$$\Delta Q = 0$$

به طوری که:

V_L اندازه ولتاژ در باس های بار

V_g اندازه ولتاژ در باس های ژنراتور

Q_g تولید توان راکتیو ژنراتور

ΔP عدم تعادل توان اکتیو در تمامی باس ها به جز باس مبنا

ΔQ عدم تعادل توان راکتیو در تمامی باس ها به جز باس مبنا

این مسئله قابلیت حل با هر یک از برنامه های پخش بهینه توان راکتیو را دارد.

۲-۲- فرمول بندی مینیمم سازی تلفات انرژی

مسئله مینیمم سازی تلفات انرژی در ابتدای هر بازه زمانی اجرا می شود. هر بازه زمانی شامل N زیربازه است. متغیرهای پیوسته دارای مقادیر متفاوتی برای هر زیربازه می باشند؛ درحالی که متغیرهای گسسته دارای مقادیر ثابتی در طول بازه زمانی هستند. این دو استراتژی باعث کاهش تغییرات ساختار فیزیکی شده و در نتیجه، از فرسودگی و هزینه نگهداری غیر ضروری جلوگیری می شود. تابع هدف روش مینیمم سازی تلفات انرژی به شکل زیر است.

$$\min E_L = \sum_{N=1}^N P_L^n * t^n \quad (2)$$

با توجه به:

$$, n=1,2,\dots,Nh^n(x^n, y) = 0$$

$$, n=1,2,\dots,Ng^n(x^n, y) \leq 0$$

$$y_{min} \leq y \leq y_{max}$$

به طوری که E_L تلفات انرژی کل در طی بازه زمانی، P_L^n تلفات توان زیربازه n ، t^n مدت زمان زیربازه n و x^n (زیر بردار x) بردار متغیرهای پیوسته مربوط به زیربازه n است. h^n و g^n نیز قیود تساوی و نامساوی برای زیربازه n می باشند.

روابط ذکر شده، در ادامه به صورت کامل ارائه خواهد شد. در فرمول‌های مسئله مینیمم‌سازی تلفات توان (۱) تلفات انرژی کل در طی یک بازه زمانی جایگزین می‌شود. برای انجام محاسبات فرض می‌شود که بارهای باس‌ها در هر زیربازه ثابت باقی می‌مانند. ولتاژ باس‌ها در طی هر زیربازه نیز ثابت بوده ولی از یک زیربازه تا زیربازه بعدی تغییر می‌کنند. به همین دلیل، با محاسبه تلفات توان در ابتدای n امین زیربازه، P_L^n تلفات انرژی می‌تواند با ضرب P_L^n در t^n ، مدت زمان زیربازه n ، و جمع کردن تقریب زده شود. از این دو تابع هدف تلفات انرژی می‌تواند به صورت (۲) ارائه شود.

قیود مسئله به شرح زیر است:

۱- قیود متغیرهای پیوسته

$$, n=1,2,\dots,NV_L^{min} \leq V_L^n \leq V_L^{max}$$

$$, n=1,2,\dots,NV_g^{min} \leq V_g^n \leq V_g^{max}$$

$$, n=1,2,\dots,NQ_g^{min} \leq Q_g^n \leq Q_g^{max}$$

۲- قیود متغیرهای گسسته

$$Q_C^{min} \leq Q_C \leq Q_C^{max}$$

$$Q_L^{min} \leq Q_L \leq Q_L^{max}$$

$$T^{min} \leq T \leq T^{max}$$

۳- قیود تساوی پخش بار

$$, n=1,2,\dots,N\Delta P^n = 0$$

$$, n=1,2,\dots,N\Delta Q^n = 0$$

به طوری که اندیس n بیانگر مقادیری است که برای هر زیربازه تنظیم می‌شوند، است.

$$V_L^n \quad \text{اندازه ولتاژ در باس‌های بار در زیربازه } n$$

$$V_g^n \quad \text{اندازه ولتاژ در باسهای ژنراتور در زیربازه } n$$

Q_g^n تولید توان راکتیو ژنراتور در زیربازه n

Q_C تولید توان راکتیو خازن

Q_L تولید توان راکتیو سلف

T نسبت تپ ترانسفورماتور

ΔP^n عدم تعادل توان اکتیو در تمامی باس ها به جز باس مبنا در زیربازه n

ΔQ^n عدم تعادل توان راکتیو در تمامی باس ها به جز باس مبنا در زیربازه n

همان گونه که پیش تر گفته شد، متغیرهای کنترلی گسسته در طی یک بازه زمانی ثابت نگه داشته می شوند. از این رو استهلاک تجهیزات به حداقل می رسد. به همین دلیل آن ها بدون اندیس n نشان داده شده اند.

۳- روش حل

مسئله مینیم سازی تلفات انرژی با فرمول های (۲) می تواند با استفاده از روش های تجزیه متفاوت حل شود [۱۳, ۱۷, ۲۰]. در این مقاله کاربرد الگوریتم GBD برای مسئله مینیم سازی تلفات انرژی ارائه شده است.

در GBD گروه متغیرها به دو زیرگروه X و Y تقسیم می شوند. متغیرهای Y به عنوان متغیرهای پیچیده محسوب می شوند. با ثابت کردن متغیرهای Y حل مسئله بسیار ساده تر می شود. این الگوریتم برای سه نوع از مسائل مناسب است [۲۰]. برای نوع مسئله بحث شده در اینجا، با ثابت کردن متغیرهای Y، مسئله تبدیل به N زیر مسئله مستقل می شود.

در GBD بهینه سازی متغیرهای X و Y به دو زیر مسئله ابتدایی و اصلی تقسیم می شود. در زیر مسئله ابتدایی، متغیرهای Y در مقادیر اولیه (تکرار اول) یا مقادیر بهینه ای که در زیر مسئله اصلی پیشین پیدا شده است ثابت می شوند. بهینه سازی با استفاده از متغیرهای X انجام می شود. در زیر مسئله اصلی مسئله بر روی متغیرهای Y بهینه سازی می شود. مسائل اولیه و اصلی متناوباً تا زمان برآورده شدن معیار همگرایی حل می شوند.

در فرمول های داده شده در (۲) گروه متغیرها تاکنون به دودسته تقسیم شده اند. در GDB، منابع توان راکتیو گسسته و نسبت تپ ترانسفورماتورها به عنوان متغیرهای پیچیده Y در نظر گرفته می شوند. متغیرهای پیوسته (همانند ولتاژ / وار ژنراتورها) به عنوان متغیرهای X در نظر گرفته می شوند. فرمول بندی مربوط به زیر مسئله های ابتدایی و اصلی در ادامه آورده خواهد شد.

۳-۱- فرمول های زیر مسئله ابتدایی

فرمول های زیر مسئله ابتدایی همانند (۲) می باشند. به جز این که مقادیر Y باید با مقادیر ابتدایی یا بهینه یافت شده در آخرین اجرای زیر برنامه اصلی، جایگزین شود. با ثابت کردن متغیرهای Y، مسئله ابتدایی به N زیر برنامه مستقل تقسیم می شود که هر یک شامل زیربردار متفاوت X است.

$$\min_{x^n} E_L^n = P_L^n * t^n \quad (۳)$$

$$, n=1,2,\dots,N, h^n(x^n, y^*) = 0$$

$$, n=1,2,\dots,N, g^n(x^n, y^*) \leq 0$$

در حالی که y^* ، y ثابت شده در مقادیر اولیه (تکرار اول) یا مقادیر بهینه یافت شده در زیر مسئله اصلی قبل است.

در مسئله ابتدایی، N زیر مسئله (۳) به طور مستقل (به صورت سری یا موازی) حل می شوند. در زیر مسئله ۸ تلفات انرژی در آن زیربازه با استفاده از x^n مینیمم سازی می شود. هر زیر مسئله ممکن است دارای حل امکان پذیر و یا غیر امکان پذیر باشد. در حالت امکان ناپذیر، مسئله به صورت امکان پذیر حل می شود. اگر تمامی زیر مسئله ها دارای راه حل امکان پذیر باشند آنگاه مقدار تلفات انرژی کل، E_L ، بیشتر از تابع هدف داده شده در (۲)، UB ، خواهد بود. در هر تکرار UB به روز رسانی می شود. در هر دو حالت، مقادیر بهینه متغیرهای پیوسته x^* و ضرایب لاگرانژ به زیر مسئله اصلی ارسال می شوند.

۳-۲- فرمول های زیر مسئله اصلی

در مسئله اصلی، متغیرهای x در مقادیر بهینه خود که در مسئله های ابتدایی قبلی پیدا شده اند، x^* ثابت می باشند. در این زیر برنامه، تلفات انرژی کل برای بازه زمانی با متغیرهای y ، متغیرهای گسسته، بهینه سازی می شود. فرمول های مسئله به صورت زیر است.

$$\min_{y, L_M} L_M \quad (۴)$$

$$, i=1,2,\dots,IL(x_i^*, y, \lambda_i, \mu_i) \leq L_M$$

$$, j=1,2,\dots,JL^{\wedge}(x_j^*, y, \lambda_j^{\wedge}, \mu_j^{\wedge}) \leq 0$$

$$y_{min} \leq y \leq y_{max}$$

به طوری که i و j به ترتیب تکرارها برای مسائل ابتدایی امکان پذیر و امکان ناپذیر می باشند و:

$$L(x_i^*, y, \lambda_i, \mu_i) = E_L(x_i^*, y) + \sum_{n=1}^N \lambda_i^n h^n(x_i^*, y) + \sum_{n=1}^N \mu_i^n g^n(x_i^*, y)$$

$$L^{\wedge}(x_j^*, y, \lambda_j^{\wedge}, \mu_j^{\wedge}) = \sum_{n=1}^N \lambda_j^n h^n(x_j^*, y) + \sum_{n=1}^N \mu_j^n g^n(x_j^*, y)$$

به طوری که λ_i و μ_i به ترتیب بردار ضریب لاگرانژ تساوی و نامساوی به دست آمده از مسئله امکان ناپذیر ابتدایی می باشند. در تمامی حالت ها بالانویس های n شماره زیربازه گرفته شده است.

مقدار بهینه L_M در حد کمتری از مقادیر تابع هدف داده شده در (۲)، LB ، است. با حل مسئله اصلی، مقادیر بهینه متغیرهای y و x^* به دست خواهند آمد. در هر تکرار LB به روز رسانی می شود و به زیر مسئله ابتدایی جهت تکرار بعدی فرستاده می شود.

۴- بررسی سیستم

جهت مقایسه روش‌های مینیمم‌سازی توان و انرژی بسیاری از شبکه‌های قدرت کوچک و بزرگ مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این مقاله، سیستم‌های ۶ باسه و ۳۰ باسه استاندارد IEEE بررسی شده است. اطلاعات خط و اطلاعات باس‌های سیستم ۶ باسه به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ داده شده است. اطلاعات جدول ۲ مربوط به شرایط بار کامل است. محدودیت‌های ولتاژ باس‌ها، نسبت‌های تپ، خازن‌های موازی و توان راکتیو ژنراتورها در جدول ۳ داده شده‌اند. این سیستم بررسی می‌شود تا روش‌های مینیمم‌سازی تلفات توان و مینیمم‌سازی تلفات انرژی مورد مقایسه قرار گیرند. اطلاعات خط و باس سیستم ۳۰ باسه IEEE نیز در جدول‌های ۵ و ۶ داده شده است. نمودار بار برای بازه زمانی یک‌ساعته با چهار زیربازه برابر مورد آزمایش قرار گرفته است. همانند سیستم ۶ باسه، بارهای باس به‌طور یکنواخت از ۱۰۰٪ تا ۵۰٪ بار کامل در طی یک ساعت کاهش پیدا می‌کند.

جدول ۱- اطلاعات خط‌های سیستم ۶ باسه بر مبنای 100MVA

Line number	Bus number		Impedance(p.u)		Tap Ratio
	from	to	R	X	
1	1	6	0.123	0.518	-
2	1	4	0.080	0.370	-
3	4	6	0.097	0.407	-
4	6	5	0.000	0.300	1.025
5	5	2	0.282	0.640	-
6	2	3	0.723	1.050	-
7	4	3	0.000	0.133	1.100

جدول ۲- اطلاعات باس‌های سیستم ۶ باسه در شرایط بار کامل

Line number	Voltage		Load	
	V (p.u)	δ (deg)	P (MW)	Q(MVar)
1	1.04	0.0	0.0	0.0
2	1.11	-6.6	0.0	0.0
3	0.85	-14.0	55.0	11.0
4	0.95	-10.1	0.000	0.0
5	0.92	-13.6	30.0	18.0
6	0.91	-12.8	50.0	10.0

جدول ۳- محدودیت‌های پایین و بالای متغیرها

Variable	Limits	
	Low	High
V_{g1}	1.00	1.10
V_{g2}	1.10	1.15
V_{l3}	0.90	1.00
V_{l4}	0.90	1.00
V_{l5}	0.90	1.00
V_{l6}	0.90	1.00
Q_{g1}	-20.0	100.0
Q_{g2}	-20.0	100.0
Q_{C4}	0.0	15.0
Q_{C6}	0.0	30.0
T_{43}	0.9	1.10
T_{65}	0.9	1.10

جدول ۴- نمودار بار برای چهار بازه زمانی

Load Period	Period1		Period2		Period3		Period4	
	P	Q	P	Q	P	Q	P	Q
Bus Number	(MW)	(MVar)	(MW)	(MVar)	(MW)	(MVar)	(MW)	(MVar)
3	55.0	11.0	50.0	10.0	45.0	9.0	44.0	9.0
5	30.0	18.0	26.0	16.0	23.0	14.0	22.0	14.0
6	50.0	10.0	45.0	9.0	40.0	8.0	40.0	9.0

روش‌های مینیمم‌سازی تلفات توان و مینیمم‌سازی تلفات انرژی بر روی سیستم ۳۰ شینه اعمال شده است. در دو روش، تمامی متغیرهای کنترلی در ابتدای بازه زمانی تنظیم شده و متغیرهای پیوسته در ابتدای هر زیربازه بعدی تنظیم می‌شوند. در روش مینیمم‌سازی

تلفات توان، تلفات توان در ابتدای بازه زمانی و در روش مینیمم سازی تلفات انرژی، تلفات انرژی برای تمام بازه زمانی مینیمم سازی می شوند.

جدول ۵: اطلاعات خطوط شبکه ۳۰ باسه IEEE اصلاح شده

LINE NO.	BETWEEN BUSES	R(PU)	X(PU)	SUPESTANCE(PU)
1	1-2	0.0192	0.0575	0.0528
2	1-3	0.0452	0.1852	0.0408
3	2-4	0.0570	0.1737	0.368
4	3-4	0.0132	0.0379	0.0084
5	2-5	0.0472	0.1983	0.0418
6	2-6	0.0581	0.1763	0.0374
7	4-6	0.0119	0.0414	0.009
8	5-7	0.0460	0.1160	0.0204
9	6-7	0.0267	0.0820	0.017
10	6-8	0.0120	0.0420	0.009
11	6-9	0.0	0.2080	0.0
12	6-10	0.0	0.5560	0.0
13	9-11	0.0	0.2080	0.0
14	9-10	0.0	0.1100	0.0
15	4-12	0.0	0.2560	0.0
16	12-13	0.0	0.1400	0.0
17	12-14	0.1231	0.2559	0.0
18	12-15	0.0662	0.1304	0.0
19	12-16	0.0945	0.1987	0.0
20	14-15	0.2210	0.1997	0.0
21	16-17	0.0824	0.1932	0.0
22	15-18	0.1070	0.2185	0.0
23	18-19	0.0639	0.1292	0.0

24	19-20	0.340	0.0680	0.0
25	10-20	0.0936	0.2090	0.0
26	10-17	0.0324	0.0845	0.0
27	10-21	0.0348	0.0749	0.0
28	10-22	0.0727	0.1499	0.0
29	21-22	0.0116	0.0236	0.0
30	15-23	0.100	0.2020	0.0
31	22-24	0.1150	0.1790	0.0
32	23-24	0.1320	0.2700	0.0
33	24-25	0.1885	0.3292	0.0
34	25-26	0.2544	0.3800	0.0
35	25-27	0.1093	0.2087	0.0
36	28-27	0.0	0.3960	0.0
37	27-29	0.2198	0.4153	0.0
38	27-30	0.3202	0.6027	0.0
39	29-30	0.2399	0.4533	0.0
40	8-28	0.0636	0.0636	0.0428
41	6-28	0.0169	0.0599	0.013

جدول ۶ - اطلاعات شین‌های شبکه ۳۰ باسه IEEE اصلاح شده

Bus Info		Load	
Bus NO.	Voltage	MW	MVar
1	1.05	0.0	0.0
2	1.0338	21.7	12.7
3	-	2.4	1.2
4	-	7.6	1.6
5	1.0058	94.2	19.0
6	-	0.0	0.0

7	-	22.8	10.9
8	1.0230	30.0	30.0
9	-	0.0	0.0
10	-	5.8	2.0
11	1.0913	0.0	0.0
12	-	11.2	7.5
13	1.0833	0.0	0.0
14	-	6.2	1.6
15	-	8.2	2.5
16	-	3.5	1.8
17	-	9.0	5.8
18	-	3.2	0.9
19	-	9.5	3.4
20	-	2.2	0.7
21	-	17.5	11.2
22	-	0.0	0.0
23	-	3.2	1.6
24	-	8.7	6.7
25	-	0.0	0.0
26	-	3.5	2.3
27	-	0.0	0.0
28	-	0.0	0.0
29	-	2.4	0.9
30	-	10.6	1.9

۴-۱- روش مینیمم‌سازی تلفات توان

با اجرای برنامه پخش توان راکتیو بهینه توان کلی سیستم ۶ باسه در شرایط بار کامل مینیمم‌سازی می‌شود. تابع هدف و قیود، در رابطه (۱) داده شده‌اند. تلفات توان کل برای حالت ابتدایی این سیستم برابر $10/90 \text{ MW}$ است. تلفات توان پس از اجرای پخش بهینه توان راکتیو داده شده در زیربازه ۱ جدول ۸ داده شده است. همچنین مقادیر تمامی متغیرها پس از اجرای برنامه پخش بهینه توان راکتیو در زیربازه ۱ جدول ۹ داده شده است. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد، مینیمم‌سازی تلفات توان تغییرات بار پیش‌بینی شده را در نظر نمی‌گیرد، بنابراین فرض می‌شود که مقادیر "زیربازه ۱" مربوط به یک ساعت است.

جدول ۷ - اطلاعات ژنراتورهای سیستم ۳۰ باسه IEEE اصلاح شده

Bus No.	Min MW	Max MW	Min MVar	Max MVA	Cost Coefficients		
					a	B	c
1	50	200	-20	250	0.0	0.0	0.00375
2	20	80	-20	100	0.0	1.75	0.0175
5	15	50	-15	80	0.0	1.0	0.0625
8	10	35	-15	60	0.0	3.25	0.00834
11	10	30	-10	50	0.0	3.0	0.025
13	12	20	-15	60	0.0	3.0	0.025

جدول ۸ - تلفات توان برای چهار زیربازه از روش PLM (MW)

Time Period	1	2	3	4
Power Loss	8.47	6.93	5.79	5.62

فرض می‌شود که شرایط حقیقی بار در طی زیربازه ۱۵ دقیقه‌ای ثابت باشد. دیاگرام بار برای تمامی چهار زیربازه در جدول ۴ داده شده است. همان‌گونه که در بخش ۳-۲ ذکر شد، تنها متغیرهای کنترلی که می‌توانند در طی بازه زمانی تغییر کنند، Q_{g1} و Q_{g2} می‌باشند. از این دو در ابتدای زیربازه‌های ۲ تا ۴ پخش بهینه توان راکتیو تنها با استفاده از این متغیرهای کنترلی جهت برداشتن هرگونه نقض قیود ولتاژ اجرا می‌شود. با توجه به جدول ۸، با تغییر تمامی متغیرها در طی بازه زمانی، تلفات توان نیز تغییر می‌کند. تلفات انرژی کل به دست آمده با مینیمم‌سازی تلفات توان می‌تواند به صورت زیر حاصل شود:

$$E_L = \frac{P_L^1 + P_L^2 + P_L^3 + P_L^4}{4} = 6.70 \text{ MWh}$$

جدول ۹ - متغیرهای باس و کنترلی حاصل از روش PLM

Variable	Time periods			
	1	2	3	4
V_{g1}	1.07	1.04	1.00	1.00
V_{g2}	1.11	1.10	1.10	1.10
V_{l3}	1.00	0.99	0.98	0.98
V_{l4}	1.00	0.99	0.97	0.97
V_{l5}	1.00	1.00	1.00	1.00
V_{l6}	1.00	1.00	0.98	0.98
Q_{g1}	19.37	11.49	0.26	0.56
Q_{g2}	9.15	7.55	10.60	10.48
Q_{C4}	10.0	10.0	10.0	10.0
Q_{C6}	30.0	30.0	30.0	30.0
T_{43}	0.98	0.98	0.98	0.98
T_{65}	1.05	1.05	1.05	1.05

اندازه ولتاژ و متغیرهای کنترلی که با برنامه پخش بهینه توان راکتیو برای تمامی چهار زیربازه محاسبه شده‌اند، در جدول ۹ آورده شده است. تلفات توان سیستم ۳۰ باسه IEEE اصلاح شده در شرایط بار کامل مینیمم‌سازی شده است. تلفات توان به دست آمده توسط این روش برای چهار زیربازه در جدول ۱۰ داده شده است. مقادیر ولتاژهای بهینه باس‌ها و متغیرهای کنترلی گسسته به ترتیب در جدول‌های ۱۱ و ۱۲ آورده شده است. همان‌طور که گفته شد، روش مینیمم‌سازی تلفات توان پیش‌بینی تغییر بار را در نظر نمی‌گیرد؛ بنابراین مقادیر متغیرهای کنترلی گسسته در "زیربازه ۱" در طی بازه زمانی در مدت مینیمم‌سازی بدون تغییر باقی می‌ماند.

جدول ۱۰ - تلفات توان برای چهار زیربازه از روش PLM (MW)

Time Period	1	2	3	4
Power Loss	39.42	28.40	18.45	11.64

جدول ۱۱- ولتاژ باس‌ها با استفاده از روش ELM (PLM)

Variable	Periods			
	1	2	3	4
V_{g1}	1.05 (1.05)	1.05 (1.05)	1.05 (1.05)	1.04 (0.99)
V_{g2}	1.04 (1.04)	1.04 (1.03)	1.03 (1.02)	1.02 (0.97)
V_{g5}	0.99 (0.99)	1.00 (1.00)	1.00 (0.97)	0.98 (0.95)
V_{g8}	1.01 (1.01)	1.01 (0.99)	1.00 (0.97)	0.99 (0.96)
V_{l12}	1.05 (1.05)	1.05 (1.04)	1.05 (1.01)	1.02 (1.01)
V_{l14}	1.03 (1.03)	1.03 (1.02)	1.03 (1.00)	1.01 (1.00)
V_{l15}	1.02 (1.03)	1.03 (1.02)	1.03 (1.00)	1.02 (1.00)
V_{l28}	1.00 (1.01)	1.01 (1.00)	1.00 (0.99)	0.99 (0.97)

جدول ۱۲- تنظیم‌های متغیرهای کنترلی گسسته از روش‌های ELM و PLM

Variable	PLM	ELM	variable	PLM	ELM
Q_{C17}	54	57	$T_{8.28}$	1.01	1.04
Q_{C18}	12	9	$T_{9.10}$	1.02	1.00
Q_{C23}	27	20	$T_{10.17}$	1.04	1.04
Q_{C27}	26	21	$T_{12.13}$	1.05	1.02
$T_{1.3}$	0.90	0.9	$T_{18.19}$	0.99	0.99
$T_{2.4}$	0.98	1.00	$T_{23.24}$	0.94	0.95
$T_{5.7}$	0.98	0.98	$T_{27.29}$	0.98	1.00

آن‌چنان‌که در بخش ۳-۲ آورده شد تنها متغیرهای کنترلی که در طی بازه زمانی می‌توانند تغییر کنند $Q_{g1}, Q_{g2}, Q_{g3}, Q_{g5}, Q_{g8}, Q_{g11}$ و Q_{g13} می‌باشند. بنابراین در ابتدای زیربازه‌های ۲ تا ۴، پخش بهینه توان راکتیو فقط با این

متغیرهای کنترلی اجرا شده و برای رفع هرگونه نقض قیود ولتاژ یا مینیمم‌سازی تلفات توان مورد استفاده قرار می‌گیرد. وابسته به تغییرات بار در هر زیربازه، تلفات توان آن چنانکه در جدول ۱۰ نشان داده شده است تغییر پیدا می‌کنند. تلفات انرژی کل محاسبه شده توسط مینیمم‌سازی تلفات توان، به صورت زیر بدست می‌آید:

$$E_L = \frac{P_L^1 + P_L^2 + P_L^3 + P_L^4}{4} = 24.32 \text{ MWh}$$

دیگر دیاگرام‌های بار نیز مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. یکی از مشکلاتی که در طی این بررسی‌ها مشاهده شده است، امکان‌ناپذیری راه‌حل است. ممکن است بارهای باس زیربازه‌های بعدی با مقادیر زیربازه ۱ تفاوت زیادی داشته باشند. در این حالت، برنامه پخش توان راکتیو توانایی پیدا کردن هیچ راه‌حل امکان‌پذیری را با تنظیم صرف متغیرهای کنترلی پیوسته، در رابطه با عملکرد کنترلی محدود شده ندارد. روش مینیمم‌سازی تلفات انرژی فاقد این ایراد است؛ زیرا این روش از پیش‌بینی بار جهت تنظیم متغیرهای کنترلی گسسته برای مقادیری که به طور مناسب تغییرات بار مورد انتظار را پیش‌بینی می‌کند، بهره می‌برد.

۴-۲- مینیمم‌سازی تلفات انرژی

سیستم ۶ باسه با دیاگرام بار مشابه (جدول ۴) جهت مینیمم‌سازی تلفات انرژی مورد استفاده قرار گرفته است. تلفات انرژی با استفاده از رابطه (۲) و تحت قیود مربوطه مینیمم‌سازی شده است. تلفات انرژی به دست آمده در این روش برابر $6/59 \text{ MW}$ است. این مقدار کمتر از تلفات انرژی به دست آمده از روش مینیمم‌سازی تلفات توان ($6/70 \text{ MWh}$) است. ولتاژهای باس و متغیرهای کنترلی برای این روش برای تمامی ۴ زیربازه در جدول ۱۳ داده شده است.

جدول ۱۳- متغیرهای باس و کنترلی به دست آمده از روش ELM

Variable	Time periods			
	1	2	3	4
V_{g1}	1.07	1.06	1.04	1.04
V_{g2}	1.12	1.10	1.10	1.10
V_{l3}	1.00	1.00	1.00	1.00
V_{l4}	1.00	1.00	1.00	1.00
V_{l5}	0.99	0.99	1.00	1.00
V_{l6}	1.00	1.00	1.00	1.00
Q_{c1}	21.32	16.12	7.74	8.12
Q_{c2}	13.74	9.17	8.75	8.63
Q_{c4}	9.0	9.0	9.0	9.0
Q_{c6}	25.0	25.0	25.0	25.0
T_{43}	0.98	0.98	0.98	0.98
T_{65}	1.03	1.03	1.03	1.03

سیستم ۳۰ باسه IEEE اصلاح شده با نمودار بار یکسان برای مینیمم سازی تلفات انرژی مورد استفاده قرار گرفته است. تلفات انرژی با استفاده از (۲) حداقل می شود. تلفات انرژی کل یافت شده در این روش برابر $23/89$ MWh است. این مقدار کمتر از تلفات انرژی به دست آمده توسط روش مینیمم سازی تلفات توان است ($24/32$ MWh) تعدادی از ولتاژهای باس و متغیرهای کنترلی گسسته محاسبه شده توسط این روش برای تمامی چهار زیربازه به ترتیب در جدول های ۱۱ و ۱۲ آورده شده اند.

با مقایسه نتایج به دست آمده در جدول ها و دیگر شبیه سازی ها، موارد زیر نتیجه گیری می شود:

- ✓ پروفیل های ولتاژ به دست آمده از روش مینیمم سازی تلفات انرژی، مطلوب تر بوده و نسبت به پروفیل های ولتاژ به دست آمده از روش مینیمم سازی تلفات توان، تقریباً ثابت است. از این رو پایداری سیستم از نقطه نظر ولتاژ در روش مینیمم سازی تلفات انرژی بسیار بالاتر است.
- ✓ تلفات انرژی در روش مینیمم سازی تلفات انرژی در مثال اول $1/6\%$ و در مثال دوم $1/8\%$ کمتر از تلفات در روش مینیمم سازی تلفات توان است.
- ✓ مزایای روش مینیمم سازی تلفات انرژی هنگامی که بار به طور قابل توجهی تغییر می کند مشخص می شود. در حالت هایی که دیاگرام بار در طی بازه زمانی تقریباً هموار باشد، روش مینیمم سازی تلفات انرژی، نتایج بهتری ارائه می دهد.
- ✓ در حالت هایی که تغییرات بار در بازه زمانی بعدی بزرگ است، دست یابی به حل امکان پذیر توسط مینیمم سازی تلفات توان همیشه ممکن نیست. در این حالت ها روش مینیمم سازی تلفات انرژی، امکان یافتن راه حل امکان پذیر بیشتری دارد. دلیل این امر آن است که شرایط بار که برای تمامی زیربازه ها در روابط پخش بار در نظر گرفته شده است، در روابط روش مینیمم سازی تلفات انرژی به صورت قید در نظر گرفته شده اند. از این رو مقادیر بهینه متغیرهای کنترلی گسسته به دست آمده با استفاده از روش مینیمم سازی تلفات انرژی، معمولاً می توانند تغییرات بار پیش بینی شده با پیش بینی بار را پشتیبانی کند. تنها حالتی که روش مینیمم سازی تلفات انرژی توانایی پیدا کردن راه حل امکان پذیر را ندارد هنگامی است که تغییرات بار در طی بازه زمانی به قدری بزرگ باشد که متغیرهای کنترلی گسسته باید جهت جلوگیری از نقض قیود ولتاژ تنظیم شوند.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله یک روش جدید جهت پخش بهینه توان راکتیو ارائه شده است. این روش تلفات انرژی کل را در درحالی که پروفیل ولتاژ در دامنه قابل قبول نگه داشته می شود، طی بازه زمانی آینده مینیمم سازی می کند. برای مینیمم سازی تلفات انرژی واقعی، مدت زمان زیربازه ها باید بسیار کوتاه باشد. با افزایش تعداد زیربازه ها، ابعاد مسئله نیز افزایش می یابد. با استفاده از روش GBD مسئله به صورت دوجزئی حل می شود. با این روش، شرایط باری هر زیربازه در یک زیر مسئله NLP حل خواهد شد. نتایج زیر برنامه NLP با مسئله اصلی هماهنگ می شود. با مقایسه نتایج شبیه سازی، به دست می آید که روش مینیمم سازی تلفات انرژی پروفیل ولتاژ بهتری را نسبت به روش مینیمم سازی تلفات توان ارائه می کند.

از نتایج شبیه سازی می توان به نتایج زیر دست یافت:

۱- سیستم ۶ باسه تلفات انرژی کل یافت شده در این روش برابر $6/59$ MWh است و تلفات انرژی شبکه برابر $6/70$ MWh است.

۲- سیستم ۳۰ باسه IEEE اصلاح شده، تلفات انرژی کل یافت شده در این روش برابر $23/89$ MWh است و تلفات انرژی شبکه برابر ($24/32$ MWh) است. اشاره کرد.

در نتایج شبیه سازی، روش ارائه شده پروفیل ولتاژ تقریباً ثابت را در طی بازه زمانی داده شده ارائه می کند. علاوه بر این، همان گونه که از روش مینیمم سازی تلفات توان استفاده شده است، تلفات انرژی همزمان با تعداد تغییرات متغیرهای کنترلی گسسته یکسان، کاهش می یابد. روش مینیمم سازی تلفات انرژی بر پایه عدم تنظیم زیاد متغیرهای کنترلی خاص، استوار است؛ زیرا این امر ممکن است باعث استهلاک و کوتاه تر شدن طول عمر تجهیزات مربوطه شود. در این مقاله، دو گروه متغیرهای کنترلی در نظر گرفته شده اند. متغیرهای کنترلی پیوسته و متغیرهای کنترلی گسسته که در ابتدای هر بازه زمانی تنظیم می شوند؛ در حالی که طی بازه زمانی، فقط متغیرهای کنترلی پیوسته تنظیم می شوند. تعداد دسته ها می تواند افزایش یافته و تناوب تنظیم ذکر شده نیز جهت برآورده شدن شرایط، می تواند تنظیم گردد. احتمال یافتن حل غیرممکن با روش مینیمم سازی تلفات انرژی بسیار کندتر از روش مینیمم سازی تلفات توان است. این مزیت روش مینیمم سازی تلفات انرژی با در نظر گرفتن پیش بینی بار و اطمینان حاصل کردن از تغییرات بار پیش بینی شده در طی بازه زمانی آینده می تواند حاصل شود. مزیت دیگر روش مینیمم سازی تلفات انرژی ارائه تلفات انرژی کمتر نسبت به روش مینیمم سازی تلفات توان است.

مراجع

- [1] B. Liu, J. Li, H. Ma, and Y. Liu, "Generalized Benders Decomposition Based Dynamic Optimal Power Flow Considering Discrete and Continuous Decision Variables," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 194260-194268, 2020.
- [2] R. Jamalzadeh and M. Hong, "Microgrid Optimal Power Flow Using the Generalized Benders Decomposition Approach," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 10, no. 4, pp. 2050-2064, 2019.
- [3] W. Li, W. Sun, B. Li, Y. Han, and Y. He, "Flexibility transformation strategy of thermal power units for typical scenario considering wind and solar consumption based on generalized Benders decomposition algorithm," *Electrical Engineering*, vol. 105, no. 6, pp. 3423-3432, 2023/12/01 2023.
- [4] Y.-L. Xin, Q.-H. Sun, T. Zhao, X. Li, and Q. Chen, "A categorized and decomposed algorithm for thermal system simulation based on generalized benders decomposition," *Energy*, vol. 282, p. 128954, 2023/11/01/ 2023.
- [5] L. Göke, F. Schmidt, and M. Kendzioriski, "Stabilized Benders decomposition for energy planning under climate uncertainty," *European Journal of Operational Research*, vol. 316, no. 1, pp. 183-199, 2024/07/01/ 2024.
- [6] P. Tangtatswas, "Solving Very Large Security-Constrained Optimal Power Flow (SCOPF) Problem for Power Grid of the future," Case Western Reserve University School of Graduate Studies, 2023.
- [7] B. Liu, C. Bissuel, F. Courtot, C. Gicquel, and D. Quadri, "A generalized Benders decomposition approach for the optimal design of a local multi-energy system," *European Journal of Operational Research*, vol. 318, no. 1, pp. 43-54, 2024/10/01/ 2024.
- [8] S. Corsi, P. Marannino, N. Losignore, G. Moreschini, and G. Piccini, "Coordination between the reactive power scheduling function and the hierarchical voltage control of the EHV ENEL system," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 686-694, 1995.
- [9] M. El-Kady, B. Bell, V. Carvalho, R. Burchett, H. Happ, and D. Vierath, "Assessment of real-time optimal voltage control," *IEEE transactions on power systems*, vol. 1, no. 2, pp. 98-105, 1986.
- [10] M. Najjarpour and B. J. I. J. o. E. Tousi, "Probabilistic Reactive Power Flow Optimization of Distribution System in Presence of Distributed Units Uncertainty Using Combination of Improved Taguchi Method and Dandelion Algorithm," vol. 37, no. 1, pp. 37-47, 2024.
- [11] Y. Fukuyama and Y. Ueki, "An application of neural network to dynamic dispatch using multi processors," *IEEE transactions on power systems*, vol. 9, no. 4, pp. 1759-1765, 1994.

- [12] B. E. Rimoldi, "A decomposition approach to CPM," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 34, no. 2, pp. 260-270, 1988.
- [13] A. M. Shaheen, R. A. El-Sehiemy, A. Ginidi, A. M. Elsayed, and S. F. J. E. Al-Gahtani, "Optimal allocation of pv-statcom devices in distribution systems for energy losses minimization and voltage profile improvement via hunter-prey-based algorithm," vol. 16, no. 6, p. 2790, 2023.
- [14] M. Najjarpour, B. Tousi, and A. Ebadi Zahedan, "Improving Reliability of Active Distribution Networks Using Probabilistic Assessment of Renewable Resource Units %J International Journal of Engineering," pp. -, 2024.
- [15] A. Gabash and P. J. I. T. o. P. S. Li, "Active-reactive optimal power flow in distribution networks with embedded generation and battery storage," vol. 27, no. 4, pp. 2026-2035, 2012.
- [16] S. Gill, I. Kockar, and G. W. J. I. T. o. P. S. Ault, "Dynamic optimal power flow for active distribution networks," vol. 29, no. 1, pp. 121-131, 2013.
- [17] A. Ebadi Zahedan, F. Adabi, and S. Soleymani, "Frequency and Voltage Stability of Distribution Network using Photovoltaic Stabilization System and Battery Storage System," *Journal of Electrical Engineering and Automation*, vol. 4, no. 4, pp. 257-276, 2022.
- [18] M. Basu, C. Jena, and B. J. I. R. P. G. Khan, "Dynamic optimal power flow for multi-operator renewable energy-based virtual power plants," vol. 17, no. 10, pp. 2625-2637, 2023.
- [19] M. Najjarpour and B. Tousi, "Loss Reduction of Distribution Network by Optimal Reconfiguration and Capacitor Placement Using Cuckoo and Cultural Algorithms," in *2023 8th International Conference on Technology and Energy Management (ICTEM)*, 2023, pp. 1-5.
- [20] C. Yuan, Y. Lu, K. Liu, G. Liu, R. Dai, and Z. Wang, "Exploration of Bi-Level PageRank Algorithm for Power Flow Analysis Using Graph Database," in *2018 IEEE International Congress on Big Data (BigData Congress)*, 2018, pp. 143-149.