

Comparison of Decomposition Methods in Solving the Voltage and Reactive Power Control Problem in Multi-Area Power Systems

Sajad Mehrabi, Farid Karbalaei*

Faculty of Electrical Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran.
E-mails: Mehrabi@sru.ac.ir; F_Karbalaei@sru.ac.ir;

Abstract

Due to the limitations that exist in the centralized control method, nowadays mainly distributed methods are used to solve the problem of optimal power flow in multi-area power systems. In distributed methods, each area solves its optimization problem by coordinating the neighboring areas, but completely independently, that is, the optimization problem is divided into several sub-problems. In this article, three decomposition methods, namely the adjustment at the dummy boundary bus method, the exchange of adjacent boundary variables method and the coordination method by the power of the tie line, to solve the problem of control of voltage and reactive power in multi-area power systems, are introduced and compared with each other and with the centralized method. The common point of these three methods is that they all use the Lagrange relaxation method to remove complex constraints. Examining the simulation results shows that the adjustment at the dummy boundary bus requires more iterations than the other two methods to achieve convergence, but the results of this method are closer to the results of the centralized solution method, it means, this method has lower sub-optimality. Also, unlike the centralized method that requires a lot of information exchange, the decomposition methods are less dependent on the exchange of information between areas, and among them, the method of adjustment at the dummy boundary bus requires the least exchange.

Keywords

Multi-Area power systems, Reactive Power and Voltage Control, Distributed Optimization, Decomposition Methods.

Introduction

Due to the disadvantages of the centralized solution methods, today the distributed solution methods of optimization problems are more attention. To distributed solution of voltage and reactive power optimization problem, two methods, external network equivalent and decomposition methods have been used. decomposition methods have different approaches. In this article, we will introduce these approaches and also compare the results of these methods with each other and with the centralized solution method.

Proposed Work and Methodology

In this paper, three decomposition approaches called adjustment at dummy bus, exchange adjacent boundary variables and the P and Q equivalent method have been investigated. These methods have been compared from the point of view of three important criteria for evaluating distributed solution methods, i.e., the number of iterations required to convergence, the amount of suboptimality, and the amount of information exchanged between areas. The results of solving the voltage and reactive power optimization problem by these solution methods have been compared with each other and with the results of the benchmark solution method which is the centralized method.

Conclusion

In examining the results obtained from solving multi-area optimization problem by different decomposition methods, we find that the method of adjustment at dummy bus, which is one of the optimization problem decomposition approaches, has less sub-optimality, but in this method the number of iterations needed to achieve convergence is more. Also, the method of exchange adjacent boundary variables, which is another approach to decomposition the optimization problem, converges with a higher sub-optimal value, despite the required number of iterations being less. Solving the distributed problem by the P and Q equivalent solution method also obtains similar results to the exchange adjacent boundary variables method.

مقایسه روش‌های تجزیه در حل مسئله کنترل ولتاژ و توان راکتیو در سیستم‌های قدرت چند ناحیه‌ای

سجاد مهربابی

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

فرید کربلایی

دانشیار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران

چکیده

به سبب محدودیت‌هایی که در روش کنترل مرکزی وجود دارد، امروزه عمدتاً از روش‌های توزیع شده برای حل مسئله پخش بار بهینه در سیستم‌های قدرت چند ناحیه‌ای استفاده می‌شود. در روش‌های توزیع شده، هر ناحیه مسئله بهینه سازی خود را با هماهنگی نواحی مجاور ولی کاملاً مستقل حل می‌کند یعنی مسئله بهینه سازی به چند زیر مسئله تجزیه می‌شود. در این مقاله سه روش تجزیه به نام‌های روش تنظیم در شین مرزی جعلی، روش تبادل متغیرهای مرزی مجاور و روش هماهنگی توسط توان‌های خط رابط برای حل مسئله کنترل ولتاژ و توان راکتیو در سیستم‌های قدرت چند ناحیه‌ای، معرفی و با یکدیگر و با روش حل مرکزی مقایسه می‌شوند. نقطه اشتراک این سه روش این است که همگی از روش آزادسازی لاگرانژ برای حذف قیود پیچیده استفاده می‌کنند. بررسی نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که روش تنظیم در شین مرزی جعلی به نسبت دو روش دیگر تکرارهای بیشتری برای دستیابی به همگرایی نیاز دارد اما نتایج حاصل از این روش به نتایج روش حل مرکزی نزدیکتر است، یعنی این روش دارای زیر بهینگی کمتری است. همچنین بر خلاف روش مرکزی که به تبادل اطلاعات زیادی نیاز دارد، روش‌های تجزیه به تبادل اطلاعات کمتری بین نواحی وابسته بوده و در بین آن‌ها نیز روش تنظیم در شین مرزی جعلی کمترین تبادل را نیاز دارد.

کلمات کلیدی

سیستم‌های قدرت چند ناحیه‌ای، کنترل ولتاژ و توان راکتیو، بهینه سازی توزیع شده، روش‌های تجزیه.

نام نویسنده مسئول: دکتر فرید کربلایی

ایمیل نویسنده مسئول: f_karbalaee@sru.ac.ir

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۱۹

تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۰۷

۱- مقدمه

مربوط به عدم قطعیت را لحاظ نمود در [۳] از تئوری تصمیم‌گیری مبتنی بر شکاف اطلاعاتی برای حل مسئله پخش بار بهینه توان مقید به پایداری ولتاژ در حضور مزارع بادی استفاده شده است. برخلاف روش‌هایی نظیر مونت کارلو و برنامه‌ریزی تصادفی، روش ارائه شده در این مرجع نیازی به تابع چگالی احتمال پارامترهای غیرقطعی ندارد.

کنترل ولتاژ و توان راکتیو یکی از مسائل مهم سیستم قدرت است که اگر به درستی اجرا شود هم از نظر اقتصادی و هم از نظر ایمنی موجب ارتقا سیستم می‌شود. اما اجرای این کنترل در سیستم‌های قدرت چند ناحیه‌ای اگر بدون هماهنگی نواحی انجام شود می‌تواند آثار منفی به همراه داشته باشد [۱]. در مسئله کنترل ولتاژ و توان راکتیو، با استفاده از منابع کنترل مانند مولدها، جبران‌کننده‌های توان راکتیو و تغییر دهنده‌های تپ ترانسفورماتورها، اهدافی از قبیل کاهش تلفات، کاهش انحراف ولتاژ شین‌های بار، افزایش حاشیه پایداری ولتاژ و همچنین افزایش رزرو توان راکتیو دنبال می‌شود.

رویکردهای اصلی برای ایجاد هماهنگی بین نواحی، روش‌های کنترل مرکزی و توزیع شده هستند. در روش حل مرکزی، یک کنترل‌کننده مرکزی (CCC) اطلاعات همه نواحی (شامل اطلاعات تابع هدف، قیود و اطلاعات

در سیستم‌های قدرت به جهت وجود منابع نامعین، تامین مطمئن برق دائماً تهدید می‌شود. این عدم قطعیت‌ها، معمولاً به دلیل وقوع حوادث و یا نفوذ بالای انرژی‌های تجدیدپذیر در سیستم قدرت است. متصل نمودن چند سیستم قدرت با اپراتور سیستم انتقال (TSO) مستقل از هم، مزایایی همچون بهره برداری اقتصادی تر و کاهش ریسک‌های بهره برداری را به همراه دارد. با اتصال نواحی به یکدیگر و تبادل اقتصادی توان بین آن‌ها، هزینه های تولید کاهش می‌یابد و همچنین این امکان میسر می‌شود که در مواقع نیاز تبادل اضطراری توان بین نواحی انجام شود. امروزه مدیریت سیستم‌های قدرت چند ناحیه‌ای (MAPS) دارای پیچیدگی بیشتری است و بررسی روش‌های تحلیل این سیستم‌ها مطابق با چالش‌ها و نیازهای جدید امری مهم تلقی می‌شود [۱].

هدف از انجام پخش بار بهینه در سیستم‌های قدرت، تامین بار شبکه به صورت اقتصادی و ایمن است. مسئله یک بهینه سازی غیرخطی است که دارای یک تابع هدف به همراه تعدادی قیود است. تابع هدف این مسئله می‌تواند اهداف متفاوتی مانند کمینه کردن هزینه کل، بیشینه کردن سود کل و یا حداکثر کردن رفاه اجتماعی باشد [۲]. با توجه به اینکه می‌توان در مسئله OPF مباحث

^۳ Central Control Center

^۱ Transmission System Operator

^۲ Multi Area Power System

پخش بار بهینه توزیع شده با وجود متغیرهای گسسته در شبکه های توزیع، یک روش حل بر پایه روش ADMM^۵ ارائه شده است، همچنین نویسندگان این مقاله در [۱۳] بهینه سازی توان راکتیو در سیستم های قدرت چند ناحیه در حضور متغیرهای گسسته توسط روش ADMM را نیز ارائه داده اند.

در تمامی روش های تجزیه اشاره شده از روش آزادسازی لاگرانژ برای حذف قیود پیچیده استفاده می شود. در این روش، قیود پیچیده با ضرایب وزنی مناسبی در تابع هدف قرار داده می شود. با این کار امکان حل مستقل ما هماهنگ نواحی فراهم می شود. به منظور افزایش سرعت همگرایی محاسبات هنگام به کارگیری شین جعلی، مراجع [۱۹] و [۳۰] از روش آزادسازی لاگرانژ بهبود یافته^۶ استفاده کرده اند. این روش سرعت همگرایی را افزایش می دهد اما تاکنون مقایسه دقیقی بین روش مذکور و روش بیان شده در مراجع [۱۰] و [۲۸] انجام نشده است که مقاله حاضر به آن می پردازد.

۲- روش حل مرکزی

روش بهینه سازی مرکزی در مراجع [۱۴-۱۸] بررسی شده است. از آنجا که در MAPS نواحی مشخص هستند و هر ناحیه دارای TSO مربوط به خود است، مسئله کنترل مرکزی، نواحی مختلف را به عنوان یک ناحیه با چندین بخش در نظر می گیرد و مسئله بهینه سازی برای همه نواحی توسط یک کنترل کننده مرکزی حل می کند [۱۵]. در این روش هر ناحیه دارای تابع هدف و قیود مساوی و نامساوی خود است که تابع هدف می تواند یک هدفه و یا ترکیب مختلفی از چند هدف باشد [۱۸]. مدل مرکزی مسئله OPF مورد نظر به صورت رابطه (۱) تا (۵) است:

$$\text{Min } OF \quad (1)$$

s.t:

$$P_{Gi} - P_{Li} - P_i(V, \theta) = 0 \quad \forall i \in (pq \cup pv) \quad (2)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} - Q_i(V, \theta) = 0 \quad \forall i \in pq \quad (3)$$

$$Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max} \quad \forall i \in (pv \cup slack) \quad (4)$$

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$$

در اینجا تابع هدف به حداقل رساندن مجموع تلفات توان اکتیو نواحی است. pq و pv به ترتیب شین های PQ و PV را نشان می دهند. حرف n نیز تعداد کل شین ها را مشخص می کند. روابط (۲) و (۳) معادلات توازن توان هستند. رابطه (۴) محدودیت کمینه و بیشینه تولید توان راکتیو مولدها و رابطه (۵) محدوده قابل قبول اندازه ولتاژ شین ها را نشان می دهند. در مسئله مورد نظر متغیرهای کنترل، مقدار ولتاژ در شین های PV و Slack هستند.

معضل اصلی بهینه سازی مرکزی تلاش هر ناحیه برای دستیابی به اهداف خود است. در این شرایط احتمال دارد تابع هدف مورد نظر یک ناحیه بر توابع هدف نواحی دیگر تأثیر منفی بگذارد [۱۷]. اگرچه روش بهینه سازی مرکزی می تواند حل بهینه سیستم را منجر شود، اما دارای اشکالاتی نیز هستند که در زیر تعدادی از معضلات روش مرکزی آورده شده است:

- ۱- حساسیت بالا به خطای مرکز کنترل.
- ۲- برخورداری از مسئله بهینه سازی بزرگ.
- ۳- تبادل حجم زیاد اطلاعات.
- ۴- عدم تمایل نواحی برای اشتراک اطلاعات خود.
- ۵- دستیابی به یک حل منصفانه برای همه نواحی.
- ۶- هزینه بالای اجرا به دلیل وجود لینک های ارتباطی.
- ۷- مقاوم نبودن (نیاز به آگاهی داشتن از اطلاعات کل سیستم).

شبکه را دریافت و نتایج به دست آمده از حل مسئله بهینه سازی را به همه نواحی ارسال می کند. با حل مسئله به کمک روش مرکزی، حل بهینه سراسری به دست می آید اما وجود معایبی در این روش باعث شده است که توجه بیشتری به روش های توزیع شده شود. در روش توزیع شده هر ناحیه مسئله بهینه سازی خود را با هماهنگی نواحی مجاور ولی کاملاً مستقل حل می کند یعنی مسئله بهینه سازی به چند زیر مسئله تجزیه می شود.

همان طور که گفته شد بهره برداری یک سیستم قدرت چند ناحیه ای بدون ایجاد هماهنگی بین نواحی می تواند باعث عملکرد غیر بهینه این سیستم شود [۴]. در مرجع [۵] نشان داده شده است که عملکرد بدون هماهنگی می تواند موجب افزایش تلفات در کل سیستم و همچنین ایجاد ولتاژهای غیر قابل قبول شود. رویکردهای ایجاد هماهنگی بین نواحی در روش های توزیع شده، به دو دسته روش های معادل سازی شبکه خارجی و تجزیه تقسیم می شوند.

در روش معادل سازی شبکه خارجی هنگام حل مسئله هر ناحیه سایر نواحی با یک شبکه کوچک معادل سازی می شوند [۶]. نیاز به تعیین پارامترهای شبکه معادل، وابستگی نتایج به نوع معادل انتخاب شده [۷]، معضل انتخاب معادل های مختلف توسط هر ناحیه، نیاز به اندازه گیری کمیت های خط رابط بین نواحی و مشکلات معادل سازی وقتی خطوط رابط بین نواحی بیشتر از یکی است از معایب این روش هستند [۹، ۸]. در روش های تجزیه، عمل معادل سازی که مسلماً دارای خطا می باشد انجام نمی شود. هدف این است که در هر ناحیه، اقدامات کنترلی بهینه به صورت هماهنگ با نواحی دیگر و البته به صورت مستقل تعیین شوند.

اتصال الکتریکی بین نواحی دو موضوع را ایجاد می کند، اول اینکه اجازه تشکیل یک مسئله بهینه سازی مستقل برای هر ناحیه را نمی دهد زیرا به عنوان مثال، در معادلات توازن توان شین های مرزی هر ناحیه که بخشی از قیود مساوی مسئله بهینه سازی هستند، حتماً اندازه و زاویه ولتاژ شین های مرزی نواحی مجاور هم وجود دارد. نکته دوم اینکه به علت وجود این اتصال، اعمال هر گونه اقدام کنترلی در یک ناحیه، سبب تغییر ولتاژ و به تبع آن تغییر جریان و تلفات در نواحی مجاور نیز می شود. هدف از روش های تجزیه این است که با حداقل تبادل اطلاعات بین نواحی، امکان تعیین مستقل و البته هماهنگ اقدامات کنترلی هر ناحیه فراهم شود.

روش های تجزیه را می توان به دو دسته کلی تقسیم کرد. در دسته اول یک شین جعلی^۴ در هر خط ارتباطی بین دو ناحیه تعریف می شود و فرض می شود که نقطه انتهایی هر ناحیه در آن خط ارتباطی همان شین جعلی باشد [۱۱]. با این کار در واقع دو ناحیه کاملاً از هم جدا می شوند. البته برای آنکه همان شرایط مسئله اصلی حفظ شود یک قید کوپلینگ که بیانگر یکسان بودن متغیرهای این شین برای دو ناحیه مجاور است اضافه می شود. با به کارگیری این قید کوپلینگ، علاوه بر اینکه امکان حل مستقل مسئله بهینه سازی نواحی فراهم می شود تأثیر اقدامات هر ناحیه در نواحی مجاور نیز لحاظ می شود که موجب هماهنگی نواحی خواهد شد. در دسته دیگر از روش های تجزیه، شین جعلی تعریف نمی شود و هماهنگی بین نواحی از طریق تبادل اطلاعات مربوط به شین های دو طرف خطوط ارتباطی نواحی مجاور انجام می شود [۱۰] و [۲۸]. در هنگام حل مسئله بهینه سازی مربوط به هر یک از نواحی، اطلاعات دریافتی از نواحی مجاور به عنوان ثابت های معلوم در نظر گرفته می شوند.

در هر دو دسته روش های تجزیه، مسئله مربوط به کل سیستم به تعدادی زیر مسئله که مربوط به نواحی مختلف هستند تجزیه می شود. در [۱۲]، برای

^۶ Augmented Lagrange

^۴ Dummy Bus

^۵ Alternating Direction Method of Multipliers

روش‌های بهینه‌سازی توزیع شده ولتاژ و توان راکتیو در سیستم‌های قدرت چند ناحیه‌ای، روش‌های مدل‌سازی شبکه خارجی (ENM^A) و روش‌های تجزیه هستند که بخش‌های بعد ارائه می‌شوند.

۳-۱- روش مدل‌سازی شبکه خارجی

در این روش، هر ناحیه یک معادل کوچک برای سیستم قدرت نواحی مجاور خود در نظر می‌گیرد و بهینه‌سازی خود را بدون در نظر گرفتن توابع هدف نواحی مجاور حل می‌کند [۸]. در این روش حل، معادل‌های شبکه خارجی به عنوان یک قید مساوی در نظر گرفته می‌شوند [۲۳]. در این روش حل، هر ناحیه مسئله بهینه‌سازی مربوط به خود را به صورت مستقل اما هماهنگ با نواحی دیگر حل می‌کند. پارامترهای این معادل شبکه خارجی در هر تکرار محاسبه و برای استفاده در تکرار بعد بروز می‌شوند. یعنی این متغیرها در تکرار قبلی محاسبه شده و در تکرار کنونی مقدار ثابت در نظر گرفته می‌شوند. در این روش فرض بر این است که همه نواحی نتایج حل را برای سیستم‌های خود به عنوان بخشی از یک سیستم بهم پیوسته اعمال می‌کنند و هر ناحیه متغیرهایی را برای تنظیم پارامترهای معادل شبکه خارجی اندازه‌گیری و یا دریافت می‌کند. هر ناحیه معادل شبکه خارجی خود را مطابق با توان‌های خط رابط بهبود می‌بخشد. در این روش، هر ناحیه از یک روش برازش پارامتر در نتایج پخش بار خطوط رابط استفاده می‌کند تا پارامترهای معادل شبکه خارجی خود را بدست آورد [۸]. در این روش مدل‌های مختلف شبکه خارجی از جمله، معادل PQ، PV و تونن و همچنین معادل‌های پیشرفته‌تر مانند، معادل REI، WARD و معادل سیستم قدرت کاهش نیافته مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. البته قابل ذکر است که روش‌های مبتنی بر معادل‌سازی نواحی خارجی موضوع بحث و مطالعات این مقاله نمی‌باشند.

۳-۲- روش تجزیه

روش‌های تجزیه مسئله بهینه‌سازی نیز برای حل توزیع شده مسئله کنترل ولتاژ و توان راکتیو استفاده شده‌اند. سه دیدگاه اصلی برای تجزیه مسئله نواحی از یکدیگر تا کنون ارائه شده است که هماهنگی در یک سیستم قدرت چند ناحیه‌ای را ایجاد می‌کنند:

الف- ایجاد هماهنگی توسط یک شین مرزی موجود یا جعلی.

ب- هماهنگی توسط تبادل متغیرهای مرزی با نواحی مجاور.

ج- ایجاد هماهنگی توسط توان‌های خط رابط

الف: تجزیه توسط تنظیم در شین مرزی موجود یا جعلی

در این روش، در صورتی که یک شین مرزی مشترک بین نواحی وجود نداشته باشد، یک شین مرزی ساختگی در وسط خط رابط بین نواحی تعریف می‌شود. برای این شین چهار متغیر شامل اندازه و زاویه ولتاژ و توان اکتیو و راکتیو تعریف می‌شود (V_D, θ_D, P_D, Q_D) که این متغیرها بردار y نام دارند و همچنین بین نواحی A و B مشترک هستند [۲۴]. در این روش حل، هر ناحیه یک مسئله بهینه‌سازی که در آن هم متغیرهای مربوط به ناحیه خودی و هم متغیرهای مرزی مشترک با ناحیه مجاور هستند را حل می‌کند. در شکل ۲ ساختار این روش در سیستم قدرت دو ناحیه مورد نظر نشان داده شده است. برای تجزیه مسئله کلی به نواحی، متغیرهای مرزی مشترک در مسئله هر دو ناحیه به کار برده می‌شوند. قیود کوپلینگ یا همان قیود برابر بودن متغیرهای مرزی، برای دستیابی به مسئله بهینه‌سازی مشابه روش حل مرکزی به مسئله اضافه می‌شوند. این قیود کوپلینگ که در رابطه (۶) تا (۹) نشان داده شده‌اند،

۸- قابلیت اطمینان کم (به دلیل خطای ارتباطات).

۹- اجرای زمان‌بر (دریافت و ارسال اطلاعات).

۱۰- مشکل وجود مقررات متفاوت در نواحی.

۱۱- مشکل در ایجاد ORPF^Y یکسان برای همه نواحی.

۱۲- وجود رقابت و تعارض منافع بین نواحی.

۱۳- ...

با توجه به مشکلات فوق روش کنترل توزیع شده جایگزین روش کنترل مرکزی شده است. در روش توزیع شده، به جای حل یک مسئله بزرگ با حل چند مسئله کوچکتر روبرو هستیم که البته برخلاف روش کنترل مرکزی به چندین تکرار برای رسیدن به نقطه بهینه نیاز دارد. البته روش مرکزی نیز با دستیابی به حل بهینه سراسری و عدم نیاز به حل تکراری در برخی موارد می‌تواند ترجیح داده شود.

۳-۲- روش حل توزیع شده (غیرمرکزی)

در روش حل توزیع شده، مسئله بهینه‌سازی در یک سیستم قدرت بهم پیوسته به چند زیر-مسئله تقسیم می‌شود [۲۰، ۱۹]. برای نمایش مدل‌های حل توزیع شده از یک سیستم قدرت ۲ ناحیه‌ای به هم پیوسته مانند شکل ۱ استفاده می‌شود. شین‌های L و K را شین‌های مرزی و خط بین آنها را خط رابط می‌نامند.



شکل ۱- سیستم قدرت به هم پیوسته ۲ ناحیه‌ای

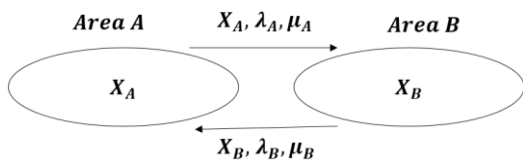
در این روش حل، هدف این است که مسئله OPF برای هر ناحیه به طور مستقل اما در یک روش هماهنگ با سایر نواحی حل شود [۲۱]. با این حال، معادلات توازن توان در شین‌های مرزی (که قیود پیچیده نامیده می‌شوند) و معادلات تلفات در خط رابط، مانع از حل مستقل نواحی می‌شوند [۲۲]. لذا پیچیدگی روش توزیع شده به ایجاد شرایط هماهنگی بین نواحی برمی‌گردد. این معضل را می‌توان با استفاده از روش‌های تجزیه حل کرد که حل توزیع شده OPF را در یک فرآیند تکراری ممکن می‌کند [۱۰]. به این منظور توسط روش‌های مختلف، قیود پیچیده در توابع هدف قرار داده می‌شوند و با به کارگیری ضرایب وزنی مناسب، امکان هماهنگی بین نواحی ایجاد می‌شود. در روش‌های توزیع شده تعداد خطوط رابط بین نواحی، تعداد شین‌های مرزی را مشخص می‌کند. مسلماً هرچه تعداد این خطوط بیشتر باشد پیچیدگی روش کنترل توزیع شده نیز بیشتر می‌شود در مراجع [۱۱، ۱۰] مستقیماً به این موضوع اشاره شده است که سرعت همگرایی روش‌های توزیع شده به نسبت بین شین‌های مرزی به شین‌های داخلی هر ناحیه بستگی دارد. هرچه این نسبت بزرگتر باشد تعداد تکرارهای لازم برای رسیدن به همگرایی افزایش می‌یابد.

البته در روش حل توزیع شده نتایج بدست آمده در مقایسه با نتایج روش حل مرکزی بهینه‌تر نخواهد بود. با توجه به چالش‌های، عدم تمایل نواحی به فاش کردن اطلاعات خود و امکان ارسال اطلاعات اشتباه (اطلاعات سود دار) توسط نواحی، میل به استفاده از روش‌های توزیع شده بیشتر است. البته در فضای مشارکتی، نواحی ملزم به رعایت عدم ارسال اشتباه هستند، هر چند که روش‌های توزیع شده نیز چون اطلاعات کمتری بین نواحی تبادل می‌شود معمولاً به ارسال اطلاعات اشتباه تا حدود زیادی مقاوم هستند.

در معادلات بالا β و γ ثابت مثبت و K شاخص تکرار است. pq_a و pq_b و pv_a و pv_b به ترتیب مجموعه شین های PQ و PV در ناحیه A (ناحیه B) هستند. روش های مختلفی برای انتخاب زاویه مرجع و شین اسلک در OPF سیستم های قدرت چند ناحیه ای وجود دارد. یکی از آنها در نظر گرفتن یک شین اسلک برای هر یک از نواحی است. یعنی به تعداد نواحی، شین اسلک داشته باشیم. روش دیگر، در نظر گرفتن یک شین اسلک برای کل سیستم است. در این مقاله ما فقط یک شین اسلک با زاویه ولتاژ برابر با صفر برای کل سیستم انتخاب کرده ایم که در طی تکرارهای حل مسئله، به مرور زوایا به زاویه های ناحیه دارای شین اسلک همگرا می شوند. ضرائب لاگرانژ λ در هر تکرار با کمک رابطه (۱۷) به روز می شود. تکرارهای حل تا زمانی که همه اجزای بردار $y_a - y_b$ از یک مقدار مشخص شده کوچکتر شوند ادامه می یابند. در این روش اطلاعات تبدیلی بین نواحی فقط اطلاعات مربوط به شین مرزی مشترک بین نواحی هستند. در این مقاله، این روش حل را روش تجزیه اول می نامیم.

ب: تجزیه بر اساس تبادل متغیرهای مجاور

همانطور که در زیر بخش های قبل گفته شد معادلات توازن توان در شین های مرزی (برای مثال شین های L و K در شکل ۱) و یا معادله تلفات توان در خط رابط، به دلیل شامل شدن مقدار اندازه و فاز ولتاژ هر دو شین، از حل مستقل OPF در هر ناحیه جلوگیری می کنند. در این روش متغیرهای شین مرزی هر ناحیه برای ایجاد هماهنگی با ناحیه مجاور تبادل می شوند و همچنین متغیرهای مشترک در این روش وجود ندارند [۲۲]. در این روش تجزیه، قیودی در مسئله وجود دارند که شامل متغیرهای هر دو ناحیه هستند که به آنها قیود پیچیده گفته می شود و از حل مستقل مسئله در نواحی جلوگیری می کند. شکل ۳ ساختار روش تجزیه با تبادل متغیرهای شین مرزی را نشان می دهد.



شکل ۳- روش ایجاد هماهنگی با تبادل متغیرهای مجاور

با در نظر گرفتن x_A^i به عنوان متغیرهای داخلی و x_A^B متغیرهای مرزی در ناحیه A و همچنین x_B^i به عنوان متغیرهای داخلی و x_B^A متغیرهای مرزی در ناحیه B مسئله بهینه سازی مرکزی ارائه شده در معادلات (۱۸) تا (۲۴) به صورت زیر نوشته می شود.

$$\text{Min } OF_{Area}^A(x_A^i, x_A^B, x_B^B) + OF_{Area}^B(x_B^i, x_B^A, x_A^A) \quad (18)$$

s.t:

$$g_A^i(x_A^i, x_A^B) = 0 \quad (19)$$

$$g_A^B(x_A^i, x_A^B, x_B^B) = 0 \quad (20)$$

$$g_B^i(x_B^i, x_B^A) = 0 \quad (21)$$

$$g_B^A(x_B^i, x_B^A, x_A^A) = 0 \quad (22)$$

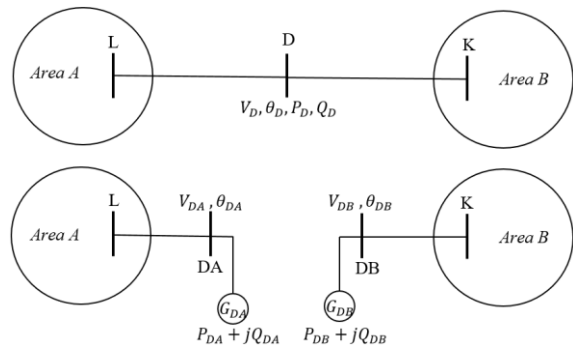
$$h_A(x_A^i, x_A^B) \leq 0 \quad (23)$$

$$h_B(x_B^i, x_B^A) \leq 0 \quad (24)$$

مسئله بهینه سازی روش تجزیه با تبادل متغیرهای شین مرزی، برای سیستم قدرت دو ناحیه شکل ۱، به صورت رابطه (۲۵) تا (۳۱) بدست می آید:

$$\text{Min } OF_{Area}^A(x_A^i, x_A^B, x_B^B) + OF_{Area}^B(x_B^i, x_B^A, x_A^A) \quad (25)$$

مقدار متغیرهای مرزی را مجبور به برابری می کنند و از این طریق هماهنگی بین نواحی حاصل می شود [۱۰].



شکل ۲- روش هماهنگی تنظیم در سطح تماس

$$V_{DA} - V_{DB} = 0 \quad (6)$$

$$\theta_{DA} - \theta_{DB} = 0 \quad (7)$$

$$P_{DA} + P_{DB} = 0 \quad (8)$$

$$Q_{DA} + Q_{DB} = 0 \quad (9)$$

با استفاده از روش آزادسازی لاگرانژ، قیود پیچیده تابع هدف اضافه می شوند تا اجازه حل مستقل مسئله نواحی بدست آید. که منجر به تابع هدف نشان داده شده در رابطه (۱۰) می شود.

$$\text{Min } OF_{Area}^A(x_A, y_A) + OF_{Area}^B(x_B, y_B) + \lambda_V(V_{DA} - V_{DB}) + \lambda_\theta(\theta_{DA} - \theta_{DB}) + \lambda_P(P_{DA} + P_{DB}) + \lambda_Q(Q_{DA} + Q_{DB}) \quad (10)$$

در رابطه بالا OF_{Area}^A و OF_{Area}^B به ترتیب تابع هدف در نواحی A و B هستند. بردار x_A متغیرهای کنترلی و وابسته ناحیه A به جز اجزای y_A (متغیرهای مرزی مشترک) و x_B متغیرهای کنترلی و وابسته ناحیه B به جز اجزای y_B را نشان می دهند. $\lambda_P, \lambda_\theta, \lambda_V$ و ضرائب لاگرانژ هستند که مقادیر آنها تأثیر قابل توجهی بر نرخ همگرایی روش حل توزیع شده دارد. از آنجایی که قیود پیچیده حذف شده اند مسئله OPF در هر ناحیه به طور مستقل قابل حل است. اما این عبارت اضافه شده به تابع هدف باعث کاهش سرعت همگرایی می شود [۲۶]. برای افزایش نرخ همگرایی، از تکنیک تجزیه لاگرانژ تقویت شده [۲۷، ۲۵] استفاده می شود که در آن تابع هدف به صورت رابطه (۱۱) می شود:

$$\text{Min } OF_{Area}^A(x_A, y_A) + OF_{Area}^B(x_B, y_B) + \lambda^T(y_A - y_B) + \frac{\gamma}{2} \|y_A - y_B\|^2 \quad (11)$$

که $\lambda^T = [\lambda_Q, \lambda_P, \lambda_\theta, \lambda_V]$ و γ نیز یک عدد ثابت مثبت است. با توجه به عبارت $\frac{\gamma}{2} \|y_A - y_B\|^2$ ، تابع هدف دیگر قابل تجزیه نیست و در نتیجه حل مستقل OPF امکان پذیر نیست. می توان با استفاده از روش (APP⁹) تابع هدف را خطی کرد که مسئله OPF به شکل رابطه (۱۲) تا (۱۶) تغییر می کند، این مسئله می تواند به صورت تکراری اما مستقل برای هر ناحیه حل شود [۲۶].

$$(x_a^{K+1}, x_b^{K+1}, y_a^{K+1}, y_b^{K+1}) = \underset{(x_A, y_A, x_B, y_B)}{\text{arg min}} \{P_{Loss}^A(x_a, y_a) + P_{Loss}^B(x_b, y_b) + \frac{\beta}{2} \|y_a - y_a^K\|^2 + \frac{\beta}{2} \|y_b - y_b^K\|^2 + \gamma(y_a - y_b)^T(y_a^K - y_b^K) + \lambda^K(y_a - y_b)\} \quad (12)$$

s.t:

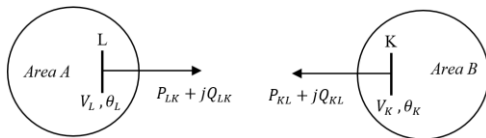
$$P_{Gi} - P_{Li} - P_i(V, \theta) = 0 \quad \forall i \in (pq_a, pv_a, pq_b, pv_b) \quad (13)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} - Q_i(V, \theta) = 0 \quad \forall i \in (pq_a, pq_b) \quad (14)$$

$$Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max} \quad \forall i \in (pv_a, pv_b, slack) \quad (15)$$

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad i = 1, \dots, n \quad (16)$$

$$\lambda^{K+1} = \lambda^K + \alpha(y_a^{K+1} - y_b^{K+1}) \quad (17)$$



شکل ۴- تجزیه سیستم قدرت با روش تجزیه سوم

$$P_{GL} - P_{LL} - P_L(x_A^i, V_L, \theta_L) - P_{LK} = 0 \quad \lambda_{LP} \quad (40)$$

$$Q_{GL} - Q_{LL} - Q_L(x_A^i, V_L, \theta_L) - Q_{LK} = 0 \quad \lambda_{LQ} \quad (41)$$

$$P_{LK} = P_{tieLK}(V_L, \theta_L, V_K, \theta_K) \quad (42)$$

$$Q_{LK} = Q_{tieLK}(V_L, \theta_L, V_K, \theta_K) \quad (43)$$

در این روابط، P_{GL} و P_{LL} به ترتیب تولید و مصرف توان اکتیو و Q_{GL} و Q_{LL} به ترتیب توان اکتیو و راکتیو تزریق شده از شین L هستند. P_L و Q_L نیز به ترتیب توان اکتیو و راکتیو جاری از طریق خط رابط بین شین های L-K است و تابعی از اندازه و فاز ولتاژ شین های L و K است. P_{LK} و Q_{LK} بارهای اکتیو و راکتیو ساختگی در شین L هستند که به عنوان متغیرهای کنترلی استفاده می شوند. به عنوان مثال برای ناحیه A توسط روش تجزیه دوم مسئله بهینه سازی زیر را حاصل می شود:

$$\min P_{Loss}^A(x_A^i, V_L, \theta_L) + \bar{\lambda}_{KP} P_{tieLK}(V_L, \theta_L, \bar{V}_K, \bar{\theta}_K) + \bar{\lambda}_{KQ} Q_{tieLK}(V_L, \theta_L, \bar{V}_K, \bar{\theta}_K) \quad (44)$$

$$g_A^i(x_A^i, V_L, \theta_L) = 0 \quad (45)$$

$$h_A(x_A^i, V_L, \theta_L) \leq 0 \quad (46)$$

$$h_A(x_A^i, V_L, \theta_L) \leq 0 \quad (47)$$

شرط همگرایی در این روش و توقف مراحل حل، برابری توان های ساختگی در دو شین L و K است. البته قابل ذکر است که مقدار تلفات خط رابط نیز باید در نظر گرفته شود و شروط همگرایی به صورت روابط (۴۸) و (۴۹) تعیین میشوند:

$$|P_{LK} + P_{KL}| - P_{lossLK} \leq E_P \quad (48)$$

$$|Q_{LK} + Q_{KL}| - Q_{lossKL} \leq E_Q \quad (49)$$

مقادیر تلرانس (E_P, E_Q) معمولاً ۰.۰۰۱ یا کمتر انتخاب می شوند.

۴- شبیه سازی و نتایج

نتایج حاصل از حل مسئله بهینه سازی توسط روش های توزیع شده را می توان براساس فاصله تا نتایج حاصل از حل با روش مرکزی ارزیابی کرد که این اختلاف به عنوان زیر بهینگی یا هزینه اضافی بهره برداری با روش توزیع شده ذکر می شود [۱۴]. همچنین نتایج روش بهینه سازی توزیع شده را می توان با استفاده از تعداد تکرار مورد نیاز برای دستیابی به همگرایی مورد ارزیابی قرار داد. یک معیار دیگر ارزیابی مقدار ارتباطات و تبادل اطلاعات مورد نیاز بین نواحی است [۲۱]. یکی دیگر از معیارهای ارزیابی زمان شبیه سازی است که با تعداد تکرارها و اندازه مسئله مرتبط است.

در این بخش نتایج شبیه سازی روش های مختلف تجزیه جهت حل توزیع شده مسئله کنترل ولتاژ و توان راکتیو در سیستم های قدرت چند ناحیه ای ارائه شده است. مسئله پخش بار بهینه که مقاله حاضر به بررسی روش های حل آن در یک سیستم قدرت چند ناحیه ای می پردازد بر پایه مدل حالت ماندگار عناصر است. به این منظور یک سیستم تست ۶ شینه و دو سیستم ۹ و ۲۴ شینه IEEE مورد استفاده قرار گرفته اند. قابل ذکر است در این مقاله هدف بررسی و مقایسه دیدگاه های مختلف تجزیه برای حل مسئله کنترل ولتاژ و توان راکتیو بوده است لذا این روش ها با یکدیگر و با روش حل مرکزی مورد مقایسه قرار گرفته اند. این روش های حل که مورد مقایسه قرار گرفته اند در زیر نام برده شده اند:

- ۱- روش حل مرکزی
- ۲- روش تجزیه اول
- ۳- روش تجزیه دوم
- ۴- روش تجزیه سوم

$$s.t: \quad g_A^i(x_A^i, x_A^B) = 0 \quad (26)$$

$$g_A^B(x_A^i, x_A^B, x_B^B) = 0 \quad (27)$$

$$g_B^i(x_B^i, x_B^B) = 0 \quad (28)$$

$$g_B^B(x_B^i, x_B^B, x_A^B) = 0 \quad (29)$$

$$h_A(x_A^i, x_A^B) \leq 0 \quad (30)$$

$$h_B(x_B^i, x_B^B) \leq 0 \quad (31)$$

در روابط بالا، g_A^i و g_A^B (g_B^i و g_B^B) به ترتیب معادلات توازن توان شین های داخلی و مرزی ناحیه A (g_B^i و g_B^B) هستند. h_A و h_B به ترتیب قیود نامساوی ناحیه A و B هستند. یک روش برای تجزیه مسئله به نواحی، آزاد سازی قیود پیچیده و اضافه نمودن آنها به تابع هدف توسط روش آزادسازی لاگرانژ است [۱۰]. به این صورت که قیود پیچیده ای که ناحیه مجاور به عنوان قید در مسئله خودش در نظر گرفته است به تابع هدف ناحیه خودی اضافه می شوند، و قیود پیچیده ناحیه خودی نیز با ثابت در نظر گرفتن متغیرهای ناحیه مجاور به عنوان قید در معادلات قرار می گیرند [۲۸]. این مسئله برای ناحیه A توسط روابط (۳۲) تا (۳۵) نشان داده شده است.

$$\min P_{Loss}^A(x_A^i, x_A^B, \bar{x}_B^B) + \bar{\lambda}_B^T g_B^B(\bar{x}_B^i, \bar{x}_B^B, x_A^B) \quad (32)$$

$$s.t: \quad g_A^i(x_A^i, x_A^B) = 0 \quad (33)$$

$$g_A^B(x_A^i, x_A^B, \bar{x}_B^B) = 0, \lambda_A^B \quad (34)$$

$$h_A(x_A^i, x_A^B) \leq 0 \quad (35)$$

و همچنین مسئله حاصل از این روش برای ناحیه B توسط روابط (۳۶) تا (۳۹) ارائه می شود.

$$\min P_{Loss}^B(x_B^i, x_B^B, \bar{x}_A^A) + \bar{\lambda}_A^T g_A^A(\bar{x}_A^i, \bar{x}_A^A, x_B^B) \quad (36)$$

$$s.t: \quad g_B^i(x_B^i, x_B^B) = 0 \quad (37)$$

$$g_B^B(x_B^i, x_B^B, \bar{x}_A^A) = 0, \lambda_B^B \quad (38)$$

$$h_B(x_B^i, x_B^B) \leq 0 \quad (39)$$

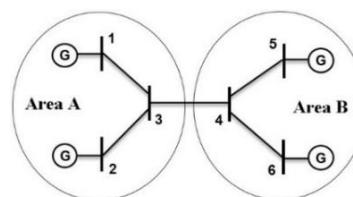
در این روابط $\bar{x}_A^A, \bar{x}_A^B, \bar{x}_B^A, \bar{x}_B^B$ متغیرهای به دست آمده از تکرار قبلی حل برای ناحیه A و B هستند. λ_A^B و λ_B^A متغیرهای دوگان هستند که از اطلاعات مهمی تشکیل شده اند و در صورت استفاده آنها به عنوان ضریب لاگرانژ، نرخ همگرایی بهبود می یابد. این متغیرها حساسیت تابع هدف را به مقدار متغیرهای مرزی نشان می دهند و از حل زیر مسئله نواحی در تکرار قبلی حل به دست می آیند. در این روش قیود پیچیده مساوی قیود توازن توان در شین های مرزی هستند. قید پیچیده نامساوی نیز می توانند حد بارگذاری در خطوط رابط باشند. در برخی مقالات قیود پیچیده، معادلات شارش توان اکتیو و راکتیو در خطوط رابط در نظر گرفته شده اند [۲۹]. برای معیار همگرایی، تفاضل توان های جاری در خط رابط که توسط هر دو طرف خط محاسبه شده، استفاده می شود. در این مقاله از این روش حل با روش تجزیه دوم نام برده می شود.

ج- ایجاد هماهنگی توسط توان های خط رابط

در این روش تجزیه، مشابه روش تجزیه دوم از متغیرهای دوگان مربوط به ناحیه مجاور به عنوان ضریب لاگرانژ استفاده می شود. در این روش، در تابع هدف به جای معادلات توازن توان شین مرزی در ناحیه همسایه، از توان عبوری در خط رابط بین نواحی استفاده می شود. در این روش تجزیه که در این مقاله روش تجزیه سوم نام دارد، نواحی در سیستم قدرت دو ناحیه ارائه شده در شکل ۱ مطابق شکل ۴ از هم جدا می شوند. مطابق با این روش، معادلات توازن توان برای شین L در ناحیه A به صورت معادله (۴۰) تا (۴۳) نوشته می شوند.

۴-۱- نتایج سیستم قدرت ۶ شینه

این سیستم قدرت شامل ۶ شین و ۴ مولد است. در این سیستم دو ناحیه وجود دارد که توسط یک خط رابط به یکدیگر متصل شده‌اند. در شکل ۵ ساختار این سیستم نشان داده شده است. در این سیستم، شین ۱ به عنوان شین اسلک در نظر گرفته شده است.



شکل ۵- سیستم قدرت ۶ شینه با دو ناحیه

اطلاعات خطوط سیستم قدرت ۶ شینه در جدول ۱ آورده شده است. در این جدول برای شین جعلی از حرف D استفاده شده است.

جدول ۱- اطلاعات خطوط سیستم ۶ شینه

| ناحیه ۱ | | | | |
|---------|-------|-------|----|----|
| B(pu) | X(pu) | R(pu) | به | از |
| ۰ | ۰.۱۲۲ | ۰.۰۴۹ | ۳ | ۱ |
| ۰ | ۰.۱۲۲ | ۰.۰۴۹ | ۳ | ۲ |
| ۰ | ۰.۰۵ | ۰.۰۵ | D | ۳ |
| ناحیه ۲ | | | | |
| B(pu) | X(pu) | R(pu) | به | از |
| ۰ | ۰.۱۲۲ | ۰.۰۴۹ | ۴ | ۵ |
| ۰ | ۰.۱۲۲ | ۰.۰۴۹ | ۴ | ۶ |
| ۰ | ۰.۰۵ | ۰.۰۵ | D | ۴ |

تابع هدف در نظر گرفته شده حداقل کردن تزریق توان راکتیو توسط عناصر جبران کننده موازی در شین‌های ۳ و ۴ است. رابطه (۵۰) تابع هدف مورد نظر را نشان می‌دهد.

$$\min \sum_{k \in sh} (c_{1k} * y_{1k} + c_{2k} * y_{2k}) \quad (50)$$

در رابطه (۵۰)، y_{1k} و y_{2k} به ترتیب اندازه ادمیتانس سلفی و خازنی در شین k ام را نشان می‌دهند. c_{1k} و c_{2k} نیز هزینه‌های به کارگیری جبران کننده‌ها هستند. در جدول ۲ اطلاعات شین‌های دارای جبران کننده آمده است.

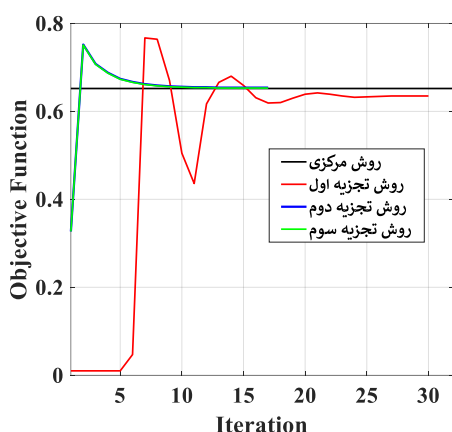
جدول ۲- اطلاعات شین دارای عناصر جبران کننده

| شین | c_1 | c_2 | $y_{1 \min}$ | $y_{1 \max}$ | $y_{2 \min}$ | $y_{2 \max}$ |
|-----|-------|-------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| ۳ | ۰.۵ | ۰.۱ | ۰ | ۱ | ۰.۱ | ۱ |
| ۴ | ۰.۵ | ۰.۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۱ |

نتایج مقدار تابع هدف به دست آمده توسط روش‌های مختلف در شکل ۶ نشان داده شده است. همچنین در جدول ۳ معیارهای معرفی شده برای ارزیابی روش‌های توزیع شده (زیر بهینگی-تعداد تکرار- حجم تبادل اطلاعات) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. برای تعیین عناوین ستون حجم تبادل اطلاعات در جدول، هر چهار روش مورد مقایسه با توجه به تعداد و مقدار اطلاعات تبدیلی بین نواحی به ترتیب دسته بندی شده و سپس از عنوان‌های زیاد، متوسط، کم و خیلی کم برای هر روش استفاده شده است.

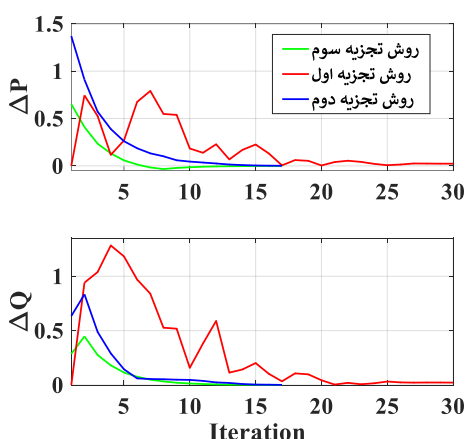
جدول ۳- مقایسه روش‌های حل در سیستم ۶ شینه

| معیار روش حل | حجم تبادل اطلاعات | تعداد تکرار | زیر بهینگی |
|--------------|-------------------|-------------|------------|
| مرکزی | زیاد | ۱ | ۰ |
| تجزیه اول | خیلی کم | ۳۰ | -۲.۶ % |
| تجزیه دوم | متوسط | ۱۷ | ۰.۳ % |
| تجزیه سوم | کم | ۱۷ | ۰.۱ % |



شکل ۶- مقدار تابع هدف در سیستم ۶ شینه

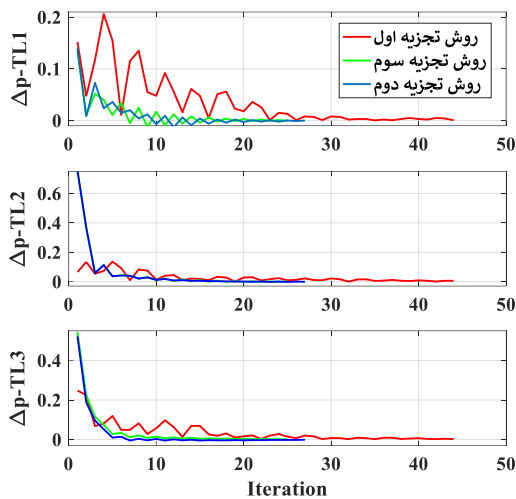
از نتایج بدست آمده مشخص است که روش تجزیه اول به تعداد تکرارهای بیشتری برای همگرایی نیاز دارد. همچنین همانطور که از نتایج نمودار همگرایی توابع هدف و جدول مقایسه معیارها مشخص است، در روش تجزیه اول مقدار تابع هدف بهینه از مقدار بهینه به دست آمده توسط روش حل مرکزی نیز کمتر شده است که به دلیل عدم همگرایی دقیق مقدار توان شین‌های مرزی، دو ناحیه است. در شکل ۷ مقدار اختلاف بین توان‌های اکتیو و راکتیو در خط رابط دو ناحیه را نشان می‌دهد. قابل مشاهده است که در روش تجزیه اول همگرایی کمتری در توان‌های دو ناحیه که وارد خط رابط شده‌اند اتفاق افتاده است.



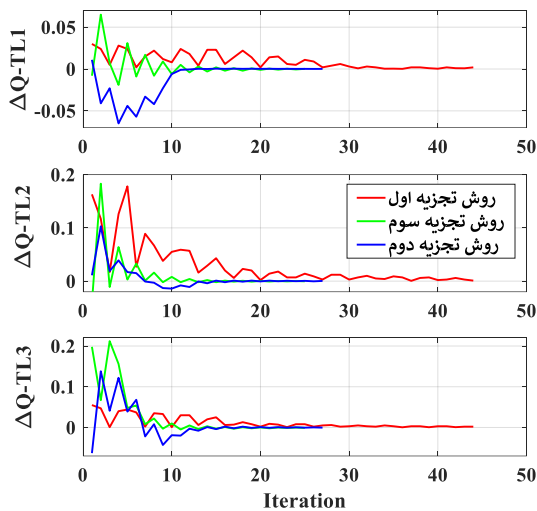
شکل ۷- تفاضل توان‌های اکتیو و راکتیو در خط رابط

۴-۲- نتایج سیستم قدرت ۹ شینه IEEE

برای حل مسئله کنترل ولتاژ و توان راکتیو چند ناحیه‌ای در سیستم قدرت ۹ شینه IEEE، این سیستم مطابق شکل ۸ به سه ناحیه تقسیم می‌شود. در این سیستم هر ناحیه توسط یک خط رابط به ناحیه مجاور متصل است. با در نظر



شکل ۱۰- تفاضل توان اکتیو در خطوط رابط



شکل ۱۱- تفاضل توان راکتیو در خطوط رابط

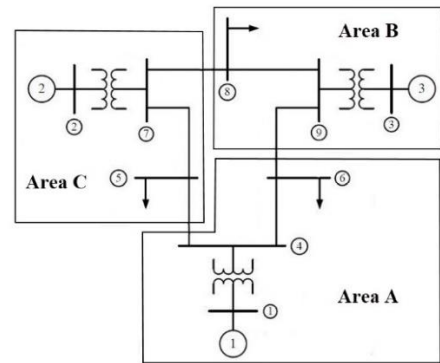
جدول ۴- مقایسه روش‌های حل در سیستم ۹ شینه

| معیار / روش حل | حجم تبادل اطلاعات | تعداد تکرار | زیر بهینگی |
|----------------|-------------------|-------------|------------|
| مرکزی | زیاد | ۱ | ۰ |
| تجزیه اول | خیلی کم | ۴۴ | ۴.۳۵ % |
| تجزیه دوم | متوسط | ۲۷ | ۱۳.۰۴ % |
| تجزیه سوم | کم | ۲۵ | ۱۵.۲۲ % |

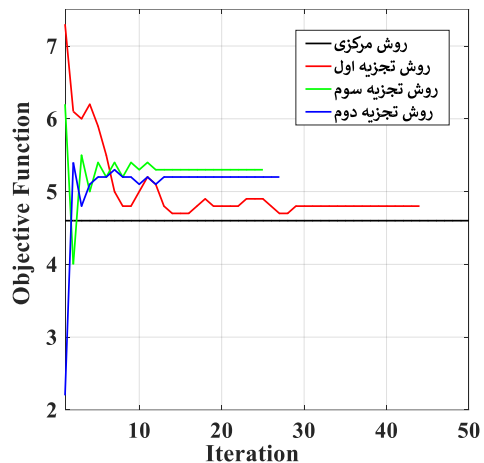
۳-۴ نتایج سیستم قدرت ۲۴ شینه IEEE

در این بخش نتایج حل مسئله کنترل ولتاژ و توان راکتیو در سیستم قدرت ۲۴ شینه IEEE که به دو ناحیه مستقل تقسیم گردیده، ارائه شده است. در شکل ۱۲ ساختار سیستم دو ناحیه‌ای مذکور نشان داده شده است. در این سیستم نیز تابع هدف، حداقل کردن تلفات توان اکتیو در نظر گرفته شده است. شکل ۱۳ نتایج به کارگیری روش‌های مختلف را نشان می‌دهد.

گرفتن کاهش تلفات توان اکتیو به عنوان تابع هدف، نتایج حاصل از به کارگیری روش‌های مختلف تجزیه در شکل ۹ نشان داده شده‌اند. با مشاهده منحنی همگرایی توابع هدف قابل مشاهده است که در اینجا نیز روش تجزیه اول به نسبت روش‌های دیگر دارای زیر بهینگی کمتری است، یعنی مقدار تابع هدف بهینه در این روش به نتیجه حل روش مرکزی نزدیکتر است اما برای همگرایی به تعداد تکرار بیشتری نیاز دارد.



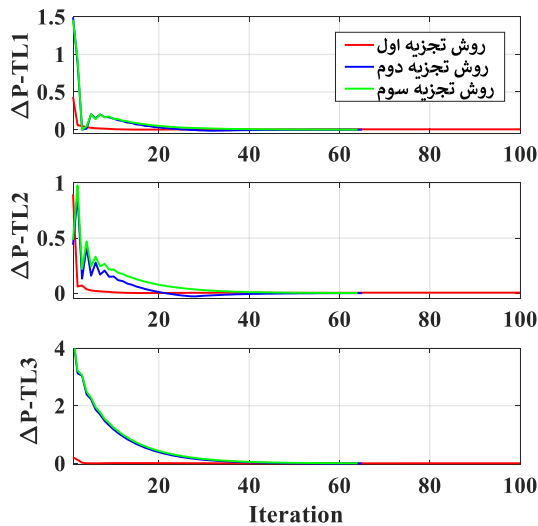
شکل ۸- سیستم قدرت ۹ شینه IEEE با سه ناحیه



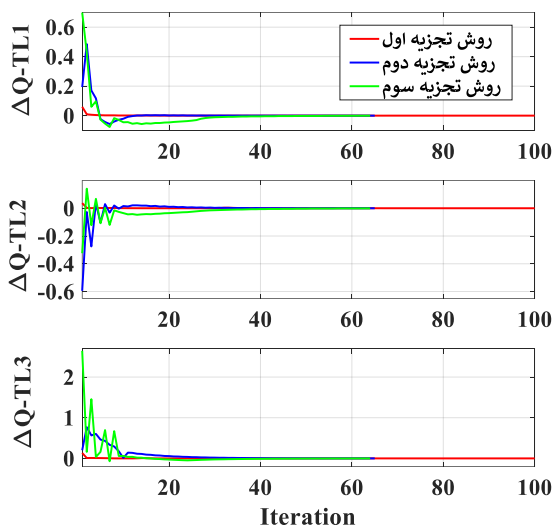
شکل ۹- مقدار تابع هدف در سیستم ۹ شینه IEEE

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب تفاضل توان اکتیو و راکتیو محاسبه شده توسط دو ناحیه مجاور در هر کدام از خطوط رابط موجود در سیستم، که باید در نهایت با یکدیگر برابر شوند نشان داده شده‌اند. در این شکل‌ها خط رابط بین شین‌های ۶ و ۹ به عنوان TL1، خط رابط بین شین‌های ۴ و ۵ به عنوان TL2 و خط رابط بین شین‌های ۷ و ۸ به عنوان TL3 نام گذاری شده‌اند.

در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نیز مشاهده می‌شود که همگرایی توان‌های عبوری از خط رابط در روش تجزیه اول نیاز به تکرار بیشتری دارد. در جدول ۵ خلاصه نتایج به دست آمده برای سیستم ۹ شینه آورده شده است.



شکل ۱۴- تفاضل توان اکتیو در خطوط رابط

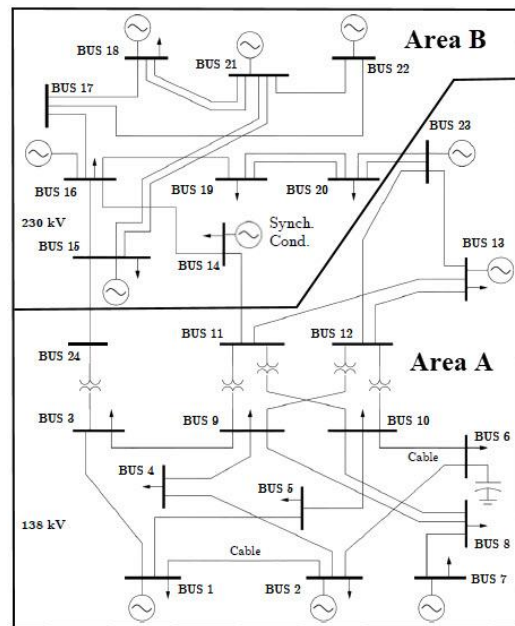


شکل ۱۵- تفاضل توان راکتیو در خطوط رابط

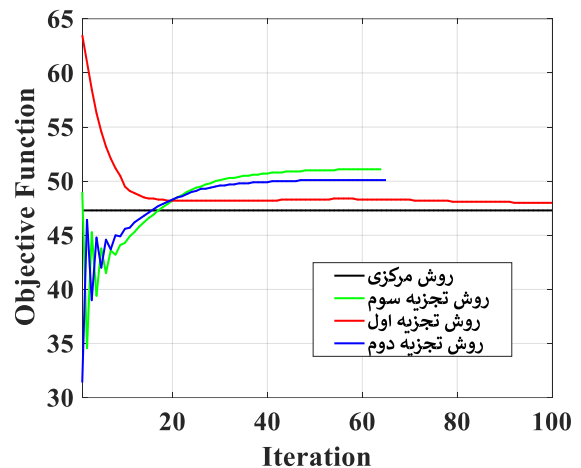
با توجه به شکل‌های ۱۴ و ۱۵ مشاهده می‌شود که همگرایی توان‌های اکتیو و راکتیو خطوط رابط در روش تجزیه اول تا تکرارهای ۴۰ تا ۵۰ اتفاق می‌افتد. اما از شکل ۱۳ ملاحظه می‌شود که عدم همگرایی تابع هدف در این روش تا حدود تکرار ۱۰۰ ادامه پیدا می‌کند، علت این موضوع عدم همگرایی اندازه زاویه ولتاژ شین‌های جعلی محاسبه شده در نواحی مجاور است. در جدول ۵ خلاصه نتایج برای سیستم ۲۴ شینه آورده شده است. شکل ۱۶ نیز تغییرات ΔV و $\Delta \theta$ را در شین‌های جعلی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که همگرایی تا حدود تکرار ۱۱۰۰ حاصل نمی‌شود.

جدول ۵- مقایسه روش‌های حل در سیستم ۲۴ شینه

| معیار روش حل | حجم تبادل اطلاعات | تعداد تکرار | زیر بهینگی |
|-----------------|----------------------|----------------|---------------|
| مرکزی | زیاد | ۱ | ۰ |
| تجزیه اول | خیلی کم | ۹۴ | ۱.۴۸ % |
| تجزیه دوم | متوسط | ۶۵ | ۵.۹۲ % |
| تجزیه سوم | کم | ۶۴ | ۸.۰۳ % |



شکل ۱۲- سیستم قدرت ۲۴ شینه IEEE با دو ناحیه



شکل ۱۳- مقدار تابع هدف در سیستم قدرت ۲۴ شینه

از نتایج شکل ۱۳ مشخص است که در اینجا نیز روش تجزیه اول به مقدار به دست آمده از روش حل مرکزی نزدیکتر بوده و زیر بهینگی کمتری دارد اما برای دستیابی به همگرایی تعداد تکرار بیشتری نیاز دارد. پس از آن، روش تجزیه دوم دارای زیر بهینگی کمتری است. روش تجزیه سوم بیشترین اختلاف را با نتایج روش مرکزی دارد، اما کمترین تعداد تکرار نیز متعلق به این روش می‌باشد.

در شکل‌های ۱۴ و ۱۵ به ترتیب نتایج روند همگرایی توان‌های اکتیو و راکتیو در خطوط رابط برای روش‌های مختلف ارائه شده‌اند. در این شکل‌ها TL1، TL2 و TL3 به ترتیب به ترتیب بیانگر خطوط رابط بین شین‌های (۱۱ و ۱۴)، (۲۳ و ۲۰) و (۲۴ و ۱۵) است.

[6] Liu, Zhi-wen, and Ming-bo Liu. "Distributed reactive power optimization computing in multi-area power systems using ward equivalent", 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering. IEEE, 2010.

[7] Y. Phulpin, M. Begovic and M. Petit, "External Network Modeling for MVar Scheduling in Multi Area Power Systems", in PowerTech, Lausanne, 2007.

[8] Y. Phulpin, M. Begovic, M. Petit and J. Heyberger, "Evaluation of network equivalents for voltage optimization in multi-area power systems", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 24, no. 2, pp. 729-743, 2009.

[9] Liu, Zhi-wen, Ming-bo Liu, and Wen-bo Xia. "Comparison of multi-area reactive power optimization parallel algorithm based on Ward and REI equivalent", Energy Procedia vol.14, pp. 1580-1589, 2012.

[10] M. Arnold, S. Knopfli and G. Andersson, "Improvement of OPF Decomposition Methods Applied to Multi-Area Power Systems", in PowerTech, Lausanne, pp. 1308-1313, 2007

[11] W. Yan, L. Wen, W. Li, C. Chung and K. Wong, "Decomposition-coordination interior point method and its application to multi-area optimal reactive power flow", International Journal of Electric Power Energy Systems, vol. 33, pp. 55-60, 2011.

[12] Lu, Wentian, et al. "Incremental-Oriented ADMM for Distributed Optimal Power Flow With Discrete Variables in Distribution Networks", IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 10, no. 6, pp. 6320-6331, 2019.

[13] Shen, Zhijun, et al. "Coordinated decentralized reactive power optimization of multi-area power systems with discrete variables based on the alternating direction method of multipliers and Ward equivalence", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 106, pp. 266-273, 2019.

[14] Y. Phulpin, "Coordination of Reactive Power Scheduling in a Multi-Area Power System Operated by Independent Utilities", PhD Thesis, The University of Georgia Institute of Technology, 2009.

[15] M. Arnold and S. Knöpfli, "Multi-Area Control in Electric Power Systems", Master's Thesis, The University of ETH Zürich, 2006.

[16] Y. Phulpin, M. Begovic, M. Petit and D. Ernst, "A fair method for centralized optimization of multi TSO power system", International Journal of Electric Power Energy Systems, vol. 31, pp. 482-488, 2009.

[17] Y. Phulpin, M. Begovic, M. Petit and D. Ernst, "On the fairness of centralized decision making strategies in multi TSO power systems", in 16th Power Systems Computation Conference (PSCC), Glasgow, 2008.

[18] Phulpin, Yannick, et al. "On the fairness of centralised decision-making strategies in multi-TSO power systems", Power Systems Computation Conference, PSCC08, 2008.

[19] Granada, Mauricio, et al. "Multi-areas optimal reactive power flow", 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America. IEEE, 2008.

[20] Zhao, Jinqun, Yuejin Ji, and Zemei Dai. "A distributed reactive power optimization method for multi-area interconnected power grid", 2014 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT ASIA). IEEE, 2014.

[21] Y. Phulpin, M. Begovic, M. Petit and D. Ernst, "Decentralized reactive power dispatch for a time varying multi TSO system", in Hawaii International Conference on Systems Science, 2009.

[22] G. Hug-Glanzmann and G. Andersson, "Decentralized Optimal Power Flow Control for Overlapping Areas in Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 24, no.1, pp. 327-336, 2009.

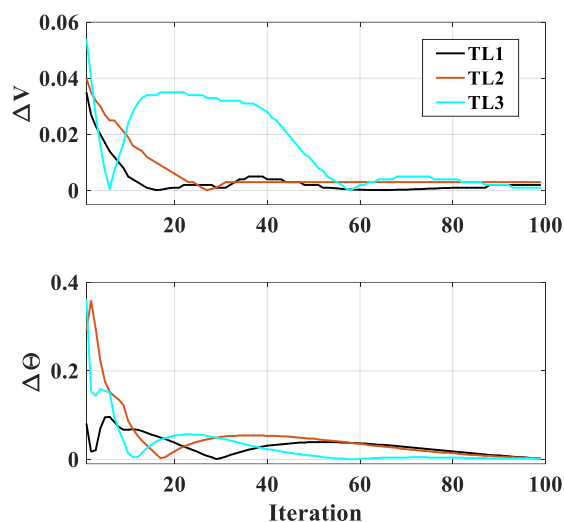
[23] Phulpin, Yannick, M. Begovic, and Marc Petit. "External Network modeling for MVar scheduling in multi area power systems", 2007 IEEE Lausanne Power Tech. IEEE, 2007.

[24] Lu, Wentian, et al. "Fully decentralized optimal power flow of multi-area interconnected power systems based on distributed interior point method", IEEE Transactions on Power Systems, vol. 33, no.1, pp. 901-910, 2017

[25] G.-Y. Cao and D. Hill, "Power system voltage small-disturbance stability studies based on the power flow equation", IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 4, no. 7, pp.873 - 882, 2010.

[26] C. W. Taylor, "Power system voltage stability", McGraw-Hill Ryerson, vol. 29, 1994.

[27] H. Song, B. Lee, S.-h. Kwon and V. Ajjarapu, "Reactive Reserve-Based Contingency Constrained Optimal Power Flow (RCCOPF) for Enhancement of Voltage Stability margins", vol. 18, no. 4, pp. 1538-1546, 2003



شکل ۱۶- تفاضل اندازه و زاویه ولتاژ در شین‌های جعلی

۵- نتیجه‌گیری

در بررسی نتایج به دست آمده از حل مسئله پخش بار بهینه در سیستم چند ناحیه‌ای توسط روش‌های مختلف تجزیه به این مهم دست پیدا می‌کنیم که روش تجزیه تنظیم در شین جعلی، دارای زیر بهینگی کمتری است، اما تعداد تکرارهای مورد نیاز آن برای دستیابی به همگرایی نیز بیشتر است. همچنین روش تجزیه تبادل متغیرهای مجاور، علی‌رغم تعداد تکرار مورد نیاز کمتر، با مقدار زیر بهینگی بیشتری همگرا می‌شود. در حل مسئله توزیع شده توسط روش تجزیه توسط توان‌های خط رابط نیز تا حدودی نتایج مشابه روش تجزیه تبادل متغیرهای مجاور به دست می‌آید. از نظر معیار میزان اطلاعات تبدیلی بین نواحی، در روش حل مرکزی چون نواحی باید اطلاعات کل سیستم خود به همراه تابع هدف و قیود به مرکز کنترل ارسال کنند بیشترین تبادل اطلاعات را در بین روش‌های حل دارد. در روش تجزیه دوم قیود شین مرزی برای اضافه شده به تابع هدف با ناحیه مجاور تبادل می‌شوند که از نظر حجم تبادل اطلاعات این روش در جایگاه بعدی قرار دارد. در روش تجزیه سوم نیز اطلاعات شین‌های مرزی (توان‌ها و اندازه و زاویه ولتاژ) به همراه ضرائب لاگرانژ با ناحیه مجاور تبادل می‌شوند که از نظر حجم تبادل در مرتبه بعدی قرار دارد. و کمترین حجم تبادل اطلاعات مربوط به روش تجزیه اول است که در آن نواحی فقط اطلاعات شین مرزی را تبادل می‌کنند و ضرائب لاگرانژ در هر ناحیه محاسبه می‌شوند.

مراجع

- [1] O. Alizadeh Mousavi and R. Cherkaoui, "On the inter-area optimal voltage and reactive power control", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 52, pp.1-13, 2013.
- [2] A. Rabiei, M. Mohammadi, "Probabilistic Optimal Power Flow Subject to Transient Stability: A Stochastic Programming Approach", Tabriz Journal of Electrical Engineering, Vol. 46. No. 1, Pages 183-169, 2016.
- [3] A. Rabiei, E. Houshmand, S. Nikkhah, "Using Information Gap-Based Decision Theory to Solve the Problem of Optimal Power Flow Subject to Voltage Stability in the Presence of Wind Farms", Tabriz Journal of Electrical Engineering, Vol. 46. No. 4, Pages 109-122, 2016.
- [4] Y. Phulpin, M. Begovic and M. Petit, "Impact of non-Coordinated MVar Scheduling Strategies in Multi Area Power Systems", in IEEE Power Engineering Society General Meeting, Florida, 2007.
- [5] A. Zhang, H. Li, F. Liu and H. Yang, "A coordinated voltage/reactive power control method for multi-TSO power systems", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 43, pp. 20-28, 2012.

[30] Kim, Balho H., and Ross Baldick. "Coarse-grained distributed optimal power flow." IEEE Transactions on Power Systems, vol. 12.2, pp.932-939, 1997.

[28] M. Granada, M. Rider, J. Mantovani and M. Shahidehpour, "A decentralized approach for optimal reactive power dispatch using a Lagrangian decomposition method", Electric Power Systems Research, vol. 89, pp. 148-156, 2012.

[29] P. Biskas and A. Bakirtzis, "Decentralised OPF of large multiarea power systems," IEE Proceeding Generation, Transmission and Distribution, vol. 153, pp. 99-105, 2006.