

یک روش مداری مبتنی بر اصل تسهیم یکسان جملات تداخلی به منظور تخصیص هزینه‌های ثابت انتقال - منطق نظریه بازی

سعید پویافار^۱، دکتر؛ مهرداد طرفدار حق^۲، استاد؛ کاظم زارع^۳، دانشیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - s.pouyafar@gmail.com

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - tarafdar@tabrizu.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - kazem.zare@tabrizu.ac.ir

چکیده: این مقاله، روشی جدید برای تخصیص هزینه‌های ثابت انتقال بین مشترکین شبکه در یک بازار تسهیلات اشتراکی برق ارائه می‌کند. پروسه تخصیص مبتنی بر قوانین مداری بوده و از ماتریس امیدانس تغییر یافته بهره می‌گیرد. روند تخصیص هزینه‌ها در دو گام مستقل برای مجموعه ژنراتورها و بارها اجرا می‌شود. ابتدا به منظور تعیین سهم مشارکت ژنراتورها در استفاده از تجهیزات انتقال، ژنراتورها به صورت جریان‌های تزریقی معادل و بارها به صورت امیدانس‌های معادل مدل می‌شوند. سپس جهت تعیین سهم مشارکت بارها در استفاده از تجهیزات انتقال، بارها و ژنراتورها به ترتیب به صورت جریان‌های تزریقی و امیدانس‌های معادل مدل می‌شوند. به منظور تفکیک جملات تداخلی بین مولفه‌های تشکیل دهنده، از اصل تسهیم یکسان استفاده شده و منطقی بودن اصل مذکور توسط دو روش حل منتخب نظریه بازی یعنی مقادیر شاپلی و اومان - شاپلی به اثبات رسیده است. همچنین با استفاده از روش پیشنهادی، سهم مشارکت ژنراتورها در بارها نیز قابل تعیین بوده و لذا مفهومی جدید تحت عنوان مبادلات دو جانبه معادل مبتنی بر نظریه مداری معرفی شده است. در نهایت به منظور اعتبار سنجی روش پیشنهادی تخصیص هزینه، نتایج عددی گزارش و بحث شده است.

واژه‌های کلیدی: تخصیص هزینه‌های انتقال، روش‌های مبتنی بر نظریه مداری، تسهیم جملات تداخلی، نظریه بازی.

A Circuit Theory Based Method for Transmission Fixed Cost Allocation Based on the Equal-Sharing of Mutual Terms- A Game-Theoretic Rationale

Saeid Pouyafar¹, Ph.D; Mehrdad Tarafdar Hagh², Professor; Kazem Zare³, Associate Professor

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: s.pouyafar@tabrizu.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: tarafdar@tabrizu.ac.ir

3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran, Email: kazem.zare@tabrizu.ac.ir.

Abstract: This paper proposes a new method to allocate the transmission fixed costs among the network participants in a pool based electricity market. The allocation process relies on the circuit laws, utilizes the modified impedance matrix, and is performed in two individual steps for generators and loads. First: to identify the generators contributions into the usage of the transmission facilities, the generators are modelled as current injections and the loads as equivalent impedances. Second: to identify the load's contributions into the usage of the transmission facilities, the loads are modelled as current injections and the generators as impedances. To split the mutual terms between the involved components, the equal sharing principle is used and proved to be rational by the Shapley and Aumann-Shapley values as two preferred game-theoretic solutions. The proposed approach is also applied to determine the generators contributions into the loads, thus, a new concept, named, circuit-theory based equivalent bilateral exchange, is introduced. Numerical results are reported and discussed to validate the proposed cost allocation method.

Keywords: Transmission cost allocation, circuit-theory based methods, sharing of mutual-terms, game theory.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۰۷

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۸/۱۲ و ۱۳۹۷/۱۱/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۱۹

نام نویسنده مسئول: مهرداد طرفدار حق

نشانی نویسنده مسئول: ایران - تبریز - بلوار ۲۹ بهمن - دانشگاه تبریز - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱. مقدمه

در سیستم قدرت مقررات زدایی شده، تعیین سهم کاربران در بهره‌مندی از خدمات انتقال در قالب یک روش منطقی امری ضروری به نظر می‌رسد. با این حال با توجه به رفتار غیرخطی سیستم انتقال، بدست آوردن میزان واقعی استفاده کاربران از شبکه انتقال موضوع بحث برانگیزی است.

روشهای متعددی در رابطه با مساله تخصیص هزینه‌های انتقال پیشنهاد شده است. روش تمبر پستی یکی از روشهای سنتی تخصیص هزینه‌های انتقال است که با وجود عملی بودن و از نظر اجرا آسان بودن روش، به دلیل فراهم سازی سیگنال‌های اقتصادی نادرست برای کاربران منجر به شکل‌گیری شبکه آینده ناکارآمد می‌گردد. اخیراً، روش تمبر پستی با استفاده از تکنیک‌هایی بهبود یافته و به منظور تعیین سهم مشارکت کاربران در هزینه‌های مربوط به ظرفیت استفاده شده تجهیزات انتقال مورد استفاده قرار گرفته است [۱، ۲]. روش MWMile را می‌توان به عنوان اولین استراتژی قیمت‌گذاری ارائه شده برای پوشش هزینه‌های ثابت انتقال در نظر گرفت که براساس استفاده واقعی مشترکین از شبکه انتقال طراحی شده است [۳، ۴].

روشهای توپولوژیکی [۵-۷]، از مفهوم اصل تسهیم نسبی (PSP) به منظور ردیابی توان جاری در شبکه استفاده می‌کند. اصل مذکور در [۵] معرفی و اعتبار آن در [۶] با استفاده از مفهوم نظریه بازی ائتلافی مورد تأیید واقع شده است. از طرفی، روش پیشنهادی [۷]، وجود و منحصر به فرد بودن جواب مساله ردیابی را به اثبات رسانده است. ایراد اصلی وارده بر روش‌های توپولوژیکی، عدم امکان اثبات و یا رد اصل تسهیم نسبی است. قیمت‌گذاری گرهی یکی دیگر از روش‌های تخصیص هزینه‌های انتقال است که مبتنی بر اختلاف قیمت‌های حاشیه‌ای محلی بوده و امروزه به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش قیمت‌گذاری گرهی، سیگنال‌های اقتصادی درستی را برای مشارکت‌کنندگان شبکه فراهم می‌کند ولی قادر به پوشش کامل هزینه‌های ثابت انتقال نیست. به منظور رفع ایراد ذکر شده، برخی محققین سعی در تغییر قیمت‌های حاشیه‌ای محلی با استفاده از مفهوم قیمت‌گذاری رامزی [۸]، و یا با تعریف و دخالت دادن ضرائب جریمه تولید و تزریق توان در مساله پخش اقتصادی بار [۹]، نمودند. یکی دیگر از طرح‌های پرکاربرد در زمینه تخصیص هزینه‌های انتقال، قیمت‌گذاری‌های حاشیه‌ای و افزایشی است که اساس کار آنها استفاده از شاخص‌های حساسیت بوده و اخیراً نیز مقالاتی با محوریت موضوع یاد شده ارائه شده است [۱۰]. ایراد اصلی روش‌های تخصیص هزینه مبتنی بر ضرائب حساسیت، حساسیت نتایج نسبت به انتخاب باس مرجع است. دو راه حل برای این موضوع در مقالات مطرح شده است: یکی استفاده از ضرائب توزیع مستقل از باس مرجع [۱، ۳]، و دیگری اعمال باس مرجع پراکنده [۱۱]. روش‌های تخصیص هزینه انتقال مبتنی بر مدل‌هایی از مبادلات معادل در [۱۲] معرفی و در [۱۳، ۱۴] به ترتیب

به صورت مدل‌های مبادلات دوجانبه معادل مبتنی بر بهینه‌سازی و ردیابی بسط داده شده است. تکنیک بهینه‌سازی یکی دیگر از انتخاب‌هایی است که اخیراً به همراه معیار منصفانه min-max [۱۵] به منظور ردیابی توان در شبکه قدرت مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از تکنیک‌های هوش مصنوعی در زمینه سیستم‌های قدرت به‌ویژه مساله ردیابی نیز به یک مقوله مرسوم تبدیل شده است. مرجع [۱۶]، به مقایسه تکنیک‌های رایج هوش مصنوعی مورد استفاده در زمینه ردیابی توان پرداخته است. همچنین در [۱۷] مدل ترکیبی تکنیک‌های هوش مصنوعی و بهینه‌سازی به منظور یافتن مقادیر بهینه پارامترهای اصلی الگوریتم هوش مصنوعی ارائه شده است. به دلیل پیچیدگی فزاینده و افزایش زمان محاسباتی در روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و بهینه‌سازی، از اثر تداخل‌های ممکن مولفه‌ها چشم‌پوشی می‌شود که این امر در برخی موارد منجر به نتایج غیردقیق می‌شود.

مجموعه‌ای از مقالات نیز وجود دارند که بر مبنای مفاهیم اقتصادی، مفهوم نظریه بازی همیاری [۲۰-۱۸] را وارد مساله تخصیص هزینه‌های انتقال نموده‌اند به طوری که انتخاب بهترین جواب با استفاده از مقادیر هستک [۱۸]، شاپلی [۱۹] و اومان-شاپلی [۲۰] حاصل شده است. با وجود مشخصات مطلوب روش و استفاده گسترده در زمینه‌های مختلف اقتصادی بازار انرژی نظیر مطالعه رفتار شرکت‌کنندگان بازار برق [۲۱] و رقابت بین نواحی و یا منابع توزیع‌شده انرژی جهت اخذ سود بالاتر در شبکه‌های هوشمند [۲۲]، در صورت اعمال به یک سیستم قدرت بزرگ زمان محاسباتی قابل توجه خواهد بود. همچنین، اخیراً در [۲۳] طرح تخصیص هزینه‌های انتقال مبتنی بر منافع اقتصادی مشترکین مطرح شده است. البته بایستی توجه داشت که یافتن میزان سود واقعی که هر کاربر از تجهیزات انتقال برخوردار می‌شود، هنوز موضوع چالش برانگیزی است. مرجع [۲۴]، طرحی جدید برای قیمت‌گذاری انتقال ارائه کرده است که بر اساس روش انعطاف‌پذیر ترکیب و تطبیق است. هدف طرح پیشنهادی، ایجاد یک جعبه ابزار انعطاف‌پذیر به منظور لحاظ کردن دیدگاه‌ها و ترجیحات سهامداران در اصول مربوط به قیمت‌گذاری انتقال است.

استفاده از نظریه مداری برای تخصیص هزینه‌ها، یکی دیگر از طرح‌های قیمت‌گذاری انتقال است که به‌طور گسترده‌ای در متون تخصصی مشاهده شده است [۳۰-۲۵]. روش‌های مبتنی بر نظریه مداری شامل مدل Z-bus [۲۶، ۲۵] و مدل تغییر یافته آن [۳۰، ۲۸]، مدل معادلات گرهی تغییر یافته [۲۷] و مدل تمثیل ترانس [۲۹]، در قیاس با سایر روش‌های تخصیص هزینه انتقال دارای یک مزیت بارز است. این روش‌ها با لحاظ کردن معادلات و قوانین شبکه در محاسبات، مشخصات شبکه را به صورت مستقیم در روند محاسبات دخالت می‌دهند. با این وجود، تعیین مشارکت واقعی مشترکین در استفاده از تجهیزات انتقال از طریق روش‌های مبتنی بر نظریه مداری به دلیل وجود جملات تداخلی در معادلات توان شبکه به صورت حاصل ضرب دو عبارت، امکان‌پذیر نیست. بنابراین نتایج بدست آمده منحصر به فرد نبوده و به‌طور عمده

- روش پیشنهادی با حل مشکل منفرد شدن ماتریسی مشهود در روش‌های مداری مشابه در پروسه تشکیل ماتریس امیدانس شبکه، قابل اعمال بر روی ساختارهای مختلف شبکه است.

۲. نظریه ماتریس امیدانس تغییر یافته

با توجه به محدودیت صفحات مقاله، صرفاً سهم ژنراتورها در میزان استفاده از تجهیزات انتقال مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین ژنراتورها به صورت جریان‌های تزریقی معادل و بارها به صورت ادمیتانس‌های معادل مدل می‌شوند. برای یک سیستم انتقال N باسه با N_I خط، فرض می‌شود تعداد باس‌های تولید (با در نظر گرفتن باس مرجع) N_g و تعداد باس‌های مصرف N_L است. پس از حصول نتایج پخش بار همگرا، جریان‌های تزریقی معادل ژنراتورها و ادمیتانس‌های معادل بارها به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$I_n = \left(\frac{P_n + jQ_n}{V_n} \right)^* \quad (۱)$$

که در آن، P_n و Q_n به ترتیب توان اکتیو و راکتیو تولیدی و V_n ولتاژ باس ژنراتوری n است.

ادمیتانس معادل مربوط به باس مصرفی d نیز برابر خواهد بود با:

$$y_d = \frac{P_d - jQ_d}{|V_d|^2} \quad (۲)$$

که در آن P_d و Q_d به ترتیب توان اکتیو و راکتیو مصرفی و V_d ولتاژ باس مصرفی d است.

با دخالت دادن ادمیتانس‌های معادل بارها در ماتریس ادمیتانس شبکه (Y_{bus}) و تشکیل ماتریس ادمیتانس تغییر یافته سیستم (Y_{mod}) و به دنبال آن با معکوس کردن ماتریس ادمیتانس تغییر یافته و دستیابی به ماتریس امیدانس تغییر یافته سیستم (Z_{mod})، می‌توان رابطه بین ولتاژ باس‌ها و جریان‌های تزریقی معادل را به کمک ماتریس Z_{mod} نوشت. ولتاژ باس نوعی k برابر می‌شود با:

$$V_k = \sum_{n \in \Omega_g} z_{kn} \cdot I_n \quad (۳)$$

که در آن ضریب z_{kn} مولفه (k, n) ماتریس Z_{mod} و Ω_g مجموعه باس ژنراتورها است. مطابق (۳)، سهم ژنراتور واقع در باس n در تشکیل ولتاژ باس k برابر است با:

$$V_k^n = z_{kn} \cdot I_n \quad (۴)$$

در صورتی که باس k باس مصرف باشد، توان مختلط مصرفی باس را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$S_k = V_k \cdot I_k^* = y_k^* \cdot V_k \cdot V_k^* \quad (۵)$$

با جای گذاری معادل ولتاژها از (۳) در (۵)، توان باس k برابر می‌شود با:

$$S_k = y_k^* \cdot \sum_{n \in \Omega_g} z_{kn} \cdot I_n \cdot \sum_{n \in \Omega_g} z_{kn}^* \cdot I_n^* \quad (۶)$$

وابسته به اصلی است که برای تفکیک جملات تداخلی بین مشترکین، اعمال شده است. برخی مقالات از اصول رایج تسهیم شامل تسهیم نسبی [۲۹، ۳۱]، تسهیم درجه دوم [۳۲]، و تسهیم یکسان [۳۰]، به منظور تفکیک جملات تداخلی استفاده می‌کنند و برخی دیگر از مقالات [۲۵-۲۸]، با تک متغیری لحاظ کردن مساله، به نوعی از شکل گیری جملات تداخلی ممانعت می‌کنند. البته مطابق نتایج [۳۱]، اصول تسهیم نسبی و یکسان در قیاس با اصل تقسیم تک متغیری نتایج منطقی تری را به دنبال دارد.

با توجه به مطالب عنوان شده، این مقاله روشی جدید مبتنی بر نظریه مداری به منظور تخصیص هزینه‌های انتقال بین ژنراتورها و بارها ارائه می‌کند. روش پیشنهادی با ارائه یک راهکار منطقی برای تفکیک جملات تداخلی بین متغیرهای تشکیل دهنده با استفاده از منطق نظریه بازی و البته اثبات ریاضی اصل تسهیم یکسان جملات تداخلی، سهم مشترکین در کمیت‌های شبکه را فارغ از محدودیت‌های مرتبط با زمان محاسباتی، پیچیدگی و شفاف نبودن روند محاسبات، به صورت روابط ریاضی صریح مشخص کرده و بدین ترتیب طراحی شفاف را به منظور تخصیص هزینه‌ها ارائه می‌کند.

دستاوردهای حاصل از مقاله به شرح زیر است:

- روش پیشنهادی قابل اعمال بر روی سیستم‌های بسیار گسترده است چرا که دارای فرایندهای محاسباتی نسبتاً کم بوده و محدودیت‌های مربوط به معکوس کردن ماتریسهای پراکنده با ابعاد بزرگ را مانند آنچه در روشهای Z-bus و PSP مشهود است، ندارد.
- روش پیشنهادی تخصیص هزینه‌ها، عادلانه و موثر است. دلیل بر اینکه اولاً منطق روش پیشنهادی از طریق حل‌های نظریه بازی که دارای مشخصه بارز عادلانه و موثر بودن است، اثبات شده و ثانیاً نتایج حاصل از روش به خوبی منعکس کننده ظرفیت توانی و موقعیت قرارگیری ژنراتورها و بارها در شبکه است.
- روش پیشنهادی، گرایش به سمت انعکاس شارش‌های معکوس با دامنه‌های قابل توجه را مانند آنچه در روش Z-bus مشهود است، تعدیل کرده و لذا منجر به کاهش سوبسید متقابل در بازار برق می‌گردد. این ویژگی به واقع ارزش شمندها است چرا که وجود شارش‌های معکوس دامنه زیاد با پاداش‌های مازاد منجر به شکل گیری رقابتهای ناعادلانه شده و همچنین نتایج را به شدت وابسته به نوع قیمت گذاری MW-Mile می‌کند.
- در مقایسه با روش‌های Z-bus و PSP، روش پیشنهادی دارای بیشترین پایداری تعرفه نسبت به تغییرات موقتی به وجود آمده در سیستم است.
- نتایج حاصل از روش پیشنهادی بر خلاف روش Z-bus، حساسیت کمتری نسبت به انتخاب توان جاری ابتدا و یا انتهای خطوط به عنوان مرجع محاسباتی دارند.

$$\alpha_i = \alpha_j = 1 \quad (۱۲)$$

هیچ یک از اصل‌های تسهیم، اصل فیزیکی نبوده و لذا لازم است منطق هر یک مورد ارزیابی قرار گیرد. در اقتصاد، مسائلی نظیر (۹) قالب تقسیم هزینه تجهیز مشترک بین کاربران تحت یک مشارکت تعاونی، تعریف و حل می‌شود. برای این منظور، نظریه بازی تعاونی با توجه به اینکه یک راه حل مطلوب برای تخصیص دقیق هزینه‌ها یا منافع مشترک فراهم ساخته و در عین حال عدالت را نیز برای تک تک اعضای مشمول برقرار می‌کند، به نظر می‌رسد گزینه مناسبی است. در این مقاله، منطق اصل تسهیم یکسان جملات تداخلی با استفاده از نظریه بازی تعاونی توجیه شده است. برای این منظور، مساله ساده تقسیم جملات تداخلی بیان شده در (۹)، به صورت معادل با مساله تشکیل بازی تعاونی هزینه مشترک در نظر گرفته شده است. بازی تعریف شده در واقع، یک بازی مجازی بوده که با هدف تشریح و توجیه منطق اصل تسهیم یکسان جملات تداخلی و نشان دادن اینکه در مورد تقسیم جملات تداخلی، فرض تسهیم یکسان منطبق با نتایج حاصل از حل مساله با روش‌های حل مقدار شاپلی و اومان-شاپلی است، شکل گرفته است.

۴. تئوری بازی هزینه‌ها

به منظور تخصیص هزینه‌های انتقال بین کاربران بر اساس تئوری بازی، قبل از هر چیز لازم است یک بازی هزینه به صورت زوج مرتب (N, c) تعریف شود که $N = \{1, 2, \dots, n\}$ مجموعه بازیگرها و c تابعی است که یک مقدار حقیقی برای هر یک از ائتلاف‌های ممکن از N تعیین می‌کند.

یک حل بازی هزینه عبارت است از بردار تخصیص هزینه $X \in R^n$ که در آن هر یک از مولفه‌های x_i مربوط به بردار x هزینه اختصاص یافته به بازیگر i است. یک حل زمانی داخل هسته محسوب می‌شود که دارای سه شرط عقلانیت فردی، گروهی و کلی به صورت زیر باشد:

$$\sum_{i \in N} x_i = c(N) \quad \text{شرط عقلانیت کلی} \quad (۱۳الف)$$

$$\sum_{i \in S} x_i \leq c(S) \quad \text{for all } S \subseteq N \quad \text{شرط عقلانیت انفرادی اگرهوی} \quad (۱۳ب)$$

مقدار شاپلی یکی از روش‌های حل تک نقطه‌ای است که البته در تعریف آن، شرط عقلانیت گروهی وجود ندارد. لذا حل مقدار شاپلی الزاماً متعلق به هسته نیست. باین حال، در اغلب موارد بازی هزینه در مقیاس کل شبکه، شرط عقلانیت گروهی برای حل مقدار شاپلی صدق کرده و در نتیجه حل مدنظر در داخل هسته قرار می‌گیرد [۳۳]. حل مقدار شاپلی در صورتی که داخل هسته باشد، به حل هستک ترجیح داده می‌شود چرا که قواعد تقارن، بهره‌وری و جمع‌پذیری در آن صدق می‌کند [۳۴]. برای یک بازی ائتلافی n بازیگری با تابع بهره $v(\cdot)$ ، امپیوتیشن منحصر به فرد از تابع بهره متناظر با بازیگر i ، φ_i ($i=1, 2, \dots, n$) است که از طریق مقدار شاپلی محاسبه می‌شود:

به طرز مشابهی با نوشتن توان جاری خط نوعی ab به صورت:

$$S_{ab} = V_a \cdot I_{ab}^* = V_a \cdot [y_{ab}^* \cdot (V_a^* - V_b^*) + \frac{1}{2} y_{a-sh}^* \cdot V_a^*] \quad (۷)$$

که در آن S_{ab} و I_{ab} به ترتیب توان و جریان جاری و y_{a-sh} و y_{ab} به ترتیب ادمیتانس سری و موازی خط ab است، و جای گذاری معادل ولتاژها از (۷) در (۷)، توان جاری خط ab برابر می‌شود با:

$$S_{ab} = y_{ab}^* \cdot \left(\sum_{n \in \Omega_g} z_{an} \cdot I_n \right) \cdot \left(\sum_{n \in \Omega_g} (z_{an}^* - z_{bn}^*) \cdot I_n^* \right) + \frac{1}{2} y_{a-sh}^* \cdot \sum_{n \in \Omega_g} z_{an} \cdot I_n \cdot \sum_{n \in \Omega_g} z_{an}^* \cdot I_n^* \quad (۸)$$

لازم به ذکر است مدل جریان-ادمیتانس معادل مربوط به ژنراتورها و بارها با دخالت دادن ادمیتانس‌های معادل در ماتریس ادمیتانس شبکه و لذا رفع مشکل منفرد شدن ماتریس، پرو سه معکوس سازی ماتریس ادمیتانس و تشکیل ماتریس امپدانس را تحت ساختارهای مختلف سیستم میسر می‌سازد.

۳. اصل‌های رایج تسهیم جملات تداخلی

لازمه تخصیص عبارت‌های توانی بین مولفه‌های تشکیل دهنده، تفکیک جملات تداخلی است. هدف از این بخش بیان اصل‌های رایج تسهیم در قالب یک مسئله ساده تقسیم جملات تداخلی است.

به طور کلی یک مسئله ساده تقسیم جملات تداخلی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\begin{cases} f(x_i, x_j) = 2x_i x_j = \alpha_i x_i x_j + \alpha_j x_i x_j \\ \text{s.t. constraint: } \alpha_i + \alpha_j = 2 \end{cases} \quad (۹)$$

که در آن x_i و x_j دو مولفه تشکیل دهنده جمله تداخلی $2x_i x_j$ و α_i و α_j به ترتیب ضرائب مشارکت مولفه‌ها در جمله تداخلی است. جملات تداخلی بر اساس نوع معیار انتخابی جهت محاسبه ضرائب مشارکت بین مولفه‌های تشکیل دهنده، تقسیم می‌شوند. رایج‌ترین اصل‌های تسهیم عبارتند از تسهیم نسبی، تسهیم درجه دوم و تسهیم یکسان.

اصل تسهیم نسبی، ضرائب مشارکت α_i و α_j را متناسب با مولفه

های مربوطه در نظر می‌گیرد یعنی $\frac{\alpha_i}{x_i} = \frac{\alpha_j}{x_j}$. با اعمال فرض مذکور

در قید مساله (۹)، ضرائب مشارکت برابر خواهند بود با:

$$\alpha_i = \frac{2x_i}{x_i + x_j}, \quad \alpha_j = \frac{2x_j}{x_i + x_j} \quad (۱۰)$$

در اصل تسهیم درجه دوم، ضرائب مشارکت با توان مرتبه دوم از مولفه‌های مربوطه متناسب است بنابراین:

$$\alpha_i = \frac{2x_i^2}{x_i^2 + x_j^2}, \quad \alpha_j = \frac{2x_j^2}{x_i^2 + x_j^2} \quad (۱۱)$$

در نهایت مطابق اصل تسهیم یکسان، مقادیر ضرائب مشارکت برابر با هم در نظر گرفته می‌شود:

$$\begin{cases} v(\emptyset) = 2 \times 0 \times 0 = 0; \\ v(\{i\}) = 2x_i \times 0 = 0; \\ v(\{i, j\}) = 2x_i x_j \end{cases} \begin{cases} v(\{j\}) = 2 \times 0 \times x_j = 0 \end{cases} \quad (15)$$

حال مقدار شاپلی مربوطه بازیگر x_i با جای گذاری مقادیر مربوطه از (۱۵) در (۱۴) حاصل می‌شود:

$$f^{x_i} = \frac{0!(2-0-1)!}{2} [v(\{i\}) - 0] + \frac{1!(2-1-1)!}{2} [v(\{i, j\}) - v(\{j\})] = x_i x_j \quad (16)$$

به طرز مشابهی، مقدار شاپلی مربوطه بازیگر x_j نیز محاسبه می‌شود. نتایج حاصله، مطابق با اصل تسهیم یکسان جملات تداخلی است.

این بار، مساله ساده تفکیک جمله تداخلی بین متغیرهای تشکیل دهنده را با روش مقدار اومان-شاپلی حل می‌شود. براساس مفهوم حل مقدار اومان-شاپلی، مشارکت واحد (UP^x) متغیر x_i در تابع f برابر خواهد بود با:

$$UP_{(x_i \rightarrow f)} = \int_{t=0}^1 \frac{\partial f(tx)}{\partial x_i} dt \quad (17)$$

$$= \int_{t=0}^1 2(tx_j) dt = t^2 x_j \Big|_0^1 = x_j$$

به طرز مشابهی با حل (۱۷) برای x_j ، مشارکت واحد متغیر x_j در تابع f برابر خواهد بود با x_i .

همچنین مشارکت کلی متغیر در تابع به صورت حاصل ضرب مقدار متغیر در مشارکت واحد متغیر در تابع حاصل می‌شود:

$$TP_{(x_i \rightarrow f)} = UP_{(x_i \rightarrow f)} \times x_i = x_j x_i \quad (18)$$

نتایج بدست آمده، گویای اصل تسهیم یکسان جملات تداخلی است. لازم به ذکر است، مولفه‌های x_i و x_j می‌تواند مقادیر حقیقی و یا مختلط اتخاذ کند. به عبارتی، با پذیرفتن اصل تسهیم یکسان جملات تداخلی برای عبارت‌های حقیقی، درمورد عبارت‌های مختلط نیز این اصل صدق می‌کند. اثبات ریاضی موضوع مطرح شده در پیوست ۱ ارائه شده است.

۵-۲- مشارکت ژنراتورها در توان مصرفی بارها

با اعمال مدل تسهیم یکسان به منظور تفکیک جملات تداخلی عبارت توان مصرفی (۶) بین جریان‌های تزریقی معادل، مشارکت ژنراتور واقع در باس n در توان مصرفی باس k برابر خواهد بود با:

$$S_k^n = \frac{1}{2} y_k^* (z_{kn} \cdot I_n \cdot \sum_{n \in \Omega_g} z_{kn}^* \cdot I_n^* + z_{kn}^* \cdot I_n \cdot \sum_{n \in \Omega_g} z_{kn} \cdot I_n) \quad (19)$$

با جایگذاری (۳) و (۴) در (۱۹)، فرم ساده شده عبارت است از:

$$S_k^n = \frac{1}{2} y_k^* (V_k^n \cdot V_k^* + V_k^{n*} \cdot V_k) \quad (20)$$

$$\phi_i = \sum_{S \in N \setminus \{i\}} \frac{S!(n-|S|-1)!}{n!} [v(S \cup \{i\}) - v(S)] \quad (14)$$

که در آن S زیرمجموعه دلخواهی از N است که بازیگر i در آن حضور ندارد (نشان داده شده با $\setminus \{i\}$). همچنین $|S|$ تعداد اعضای زیرمجموعه S است.

روش حل تک نقطه‌ای دیگری نیز تحت عنوان مقدار اومان-شاپلی وجود دارد که از روش مقدار شاپلی استخراج شده است. ایده اصلی روش مقدار اومان-شاپلی این است که هر نماینده به بخش‌های بی نهایت کوچک تقسیم شده و با فرض هر یک از ریزنماینده‌های شکل گرفته به عنوان بازیگر مستقل، روش مقدار شاپلی در مورد تک تک ریز بازیگرها، اعمال شود [۲۰].

گرچه روش‌های حل مبتنی بر نظریه بازی اغلب منجر به نتایج موثر و عادلانه می‌شود، با این وجود، این روش‌ها جزو روش‌های مرسوم تخصیص هزینه‌های انتقال به شمار نمی‌آید. دلیل این امر در چند عامل خلاصه می‌شود. اول اینکه، در رابطه با روش حل مقدار شاپلی، پیچیدگی محاسباتی بالای ناشی از افزایش داده‌های ورودی مربوطه بازی هزینه در سطح سیستم‌های گسترده انتقال، اداره کردن ابعاد بازی را به یک موضوع چالش برانگیز تبدیل می‌کند. از طرف دیگر، حتی در صورت رفع مشکل یاد شده با روش‌های حل تحلیلی اومان-شاپلی، لازمه تعریف و دستیابی به حل مطلوب هر نوع مساله‌ای براساس مفهوم نظریه بازی تعاونی، در وهله اول برقراری ویژگی تعاونی بودن مساله یعنی سود آوری مشارکت جمعی برای تک تک اعضا و در وهله دوم برقراری سه شرط عقلانیت به منظور قرار گرفتن حل در داخل هسته بازی است. به عنوان مثال، بازی هزینه انتقال در سطح کل شبکه تعاونی بوده و در نتیجه حل‌های حاصله نیز عادلانه خواهد بود. این در حالی است که بازی هزینه در سطح تک تک خطوط انتقال در بازار تسهیلات اشتراکی تعاونی نیست.

۵. روش پیشنهادی

۵-۱- اعتبارسنجی اصل تسهیم یکسان

به منظور اثبات منطقی بودن اصل تسهیم یکسان جملات تداخلی، مساله ساده تفکیک جملات تداخلی (رابطه ۹) به کمک روش‌های مقدار شاپلی و مقدار اومان-شاپلی نظریه بازی حل و نتایج حاصل از آن‌ها با نتایج مربوطه تفکیک جملات تداخلی با اصل تسهیم یکسان مقایسه شده است. بنابراین، مساله مورد مطالعه عبارت است از نحوه تقسیم عبارت $2x_i x_j$ بین متغیرهای x_i و x_j با فرض x_i و x_j به عنوان بازیگرها و $2x_i x_j$ به عنوان تابع بهره. جهت حل مساله به کمک روش مقدار شاپلی، در وهله اول لازم است مقادیر تابع بهره تحت حالت‌های مختلف حضور و عدم حضور بازیگرهای x_i و x_j تعیین گردد.

سیستم ۲۳۸۳ باسه مربوط به شبکه واقعی ۴۰۰، ۲۲۰ و ۱۱۰ کیلوولت لهستان تحت شرایط بهره‌برداری پیک بار زمستان سال ۱۹۹۹-۲۰۰۰ است. در بخش قیمت‌گذاری هزینه استفاده از شبکه انتقال، تعرفه هر یک از خطوط سیستم‌های مورد آزمایش برحسب $\$/h$ و معادل با هزار برابر اندازه راکتانس سری خط در نظر گرفته شده است. قیمت‌گذاری‌ها براساس روش ZCF-MWmile^۳ بوده و لذا مشترکین با سهم توانی منفی در توان جاری هر یک از خطوط انتقال، متوجه پاداش یا هزینه‌ای از بابت استفاده از خط مدنظر نخواهند شد.

۱-۶- سیستم آزمایشی ۶ باسه

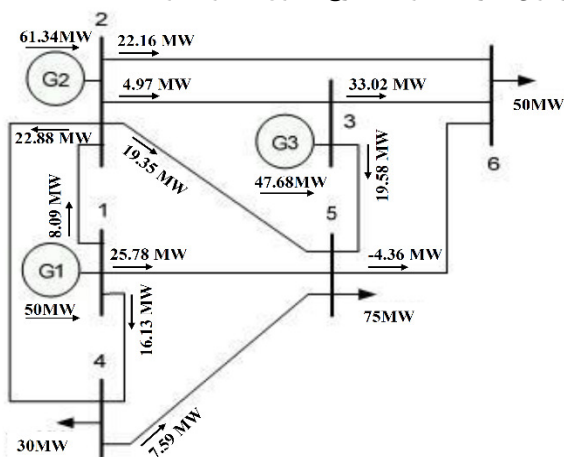
سیستم ۶ باسه (شکل ۱) استفاده شده در مرجع [۳۵] در نظر گرفته شده است. سیستم مدنظر شامل ۱۱ شاخه با پارامترهای آورده شده در جدول ۱ است.

با اعمال روش پیشنهادی به همراه دو روش مرسوم ردیابی توان

جدول ۱: پارامترهای سری و موازی خطوط شبکه ۶ باسه

خط	امپدانس سری		ادمیتانس موازی
	x (p.u)	r (p.u)	
۲-۱	۰/۱	۰/۲	۰/۰۲
۴-۱	۰/۰۵	۰/۲	۰/۰۲
۵-۱	۰/۰۸	۰/۳	۰/۰۳
۳-۲	۰/۰۵	۰/۲۵	۰/۰۳
۴-۲	۰/۰۵	۰/۱	۰/۰۱
۵-۲	۰/۱	۰/۳	۰/۰۲
۶-۲	۰/۰۷	۰/۲	۰/۰۲۵
۵-۳	۰/۱۲	۰/۲۶	۰/۰۲۵
۶-۳	۰/۰۲	۰/۱	۰/۰۱
۵-۴	۰/۲	۰/۴	۰/۰۴
۶-۵	۰/۱	۰/۳	۰/۰۳

سیستم ۶ باسه مورد بررسی، نتایج مربوط به میزان مشارکت ژنراتورها در توان جاری خطوط به شرح جدول ۲ خواهد بود.



شکل ۱: سیستم آزمایشی ۶ باسه

مطابق جدول ۲، در مورد روش پیشنهادی و روش ردیابی بیالک، مجموع مشارکت ژنراتورها در توان جاری خطوط با توان جاری خطوط برابر است. این در حالی است که روش Z-bus از این اصل تبعیت نمی‌کند. دلیل این موضوع این است که پرو سه تسهیم میزان استفاده از

عبارت (۲۰)، سهم ژنراتور واقع در باس n در تامین بار واقع در باس k است.

همانطوری که در بخش مقدمه نیز اشاره شد، در رابطه با تعیین مبادلات دو جانبه معادل، سه مدل رایج شامل مدل پایه [۱۲] و مدل‌های بسط داده شده مبتنی بر مفاهیم ردیابی و بهینه‌سازی [۱۳، ۱۴] در مراجع قبلی مطرح شده است. با در نظر گرفتن $Real(S_k^n)$ مربوط به عبارت (۲۰) به عنوان توان حقیقی مبادله شده بین ژنراتور واقع در باس n با بار متصل به باس k، روش پیشنهادی مفهوم جدیدی را تحت عنوان مبادلات دو جانبه معادل مبتنی بر روابط مداری شبکه مطرح می‌کند.

۵-۳- مشارکت ژنراتورها در توان جاری خطوط

مجدداً با اعمال اصل تسهیم یکسان به منظور تفکیک جملات تداخلی عبارت (۸) بین جریان‌های تزریقی معادل، مشارکت ژنراتور واقع در باس n در توان جاری خط ab برابر خواهد بود با:

$$S_{ab}^n = \frac{1}{2} y_{ab}^* \cdot [z_{an} I_n \cdot \sum_{m \in \Omega_g} (z_{am}^* - z_{bm}^*) \cdot I_m^*] + \frac{1}{2} y_{ab}^* [(z_{an}^* - z_{bn}^*) \cdot I_n^* \cdot \sum_{m \in \Omega_g} z_{am} I_m] + \frac{1}{4} y_{a-sh}^* \cdot [z_{an} \cdot I_n \cdot \sum_{m \in \Omega_g} z_{am}^* \cdot I_m^* + z_{an}^* \cdot I_n^* \cdot \sum_{m \in \Omega_g} z_{am} I_m] \quad (21)$$

با جایگذاری (۳) و (۴) در (۲۱)، فرم ساده شده مشارکت ژنراتور واقع در باس n در توان جاری خط ab برابر می‌شود با:

$$S_{ab}^n = \frac{1}{2} y_{ab}^* [V_a^n \cdot (V_a^* - V_b^*) + V_a \cdot (V_a^{n*} - V_b^{n*})] + \frac{1}{4} y_{a-sh}^* [V_a^n \cdot V_a^* + V_a^{n*} \cdot V_a] \quad (22)$$

لازم به ذکر است، برای باس‌های با بیش از یک ژنراتور متصل به باس، برای تعیین سهم هر یک از ژنراتورهای متصل به باس مشترک در کمیت‌های شبکه، کافی است جریان‌های معادل هر یک از ژنراتورها را از بدست آورده و جایگزین جریان تزریقی معادل باس مشترک در عبارت‌های مربوط به سهم جریان تزریقی معادل باس مشترک در کمیت‌ها نمود. به عنوان مثال، برای باس n با فرض اتصال دو ژنراتور g1 و g2 به باس، سهم ژنراتور g1 در ولتاژ باس k، توان مصرفی باس k و توان جاری خط ab، با محاسبه $I_{n,g1}$ به عنوان جریان تزریقی معادل ژنراتور g1 از (۱)، و جای گذاری به جای I_n به ترتیب در (۴)، (۱۹) و (۲۱) بدست می‌آید.

۶. نتایج عددی

نتایج حاصل از اعمال روش پیشنهادی به همراه دو روش رایج Z-bus و ردیابی بیالک به منظور تسهیم میزان استفاده از شبکه و همچنین تخصیص هزینه‌های انتقال شبکه‌های آزمایشی مورد مطالعه، گزارش و مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. شبکه‌های مورد مطالعه شامل سیستم آزمایشی ۶ باسه، شبکه آزمایشی ۳۰ باسه IEEE و در نهایت

که شارش‌های معکوس دامنه زیاد در تمامی استراتژی‌های قیمت‌گذاری شبکه به‌ویژه قیمت‌گذاری مبتنی بر هزینه-پاداش (مگاوات مایل مبتنی بر توان‌های خالص) به دلیل پرداخت پاداش‌های کلان به مشترکین از بابت ایجاد شارش‌های معکوس، زمینه را برای به‌وجود آمدن رقابت‌های ناعادلانه فراهم ساخته و لذا منجر به تشکیل بازارهای برق ناکارآمد می‌گردد.

جدول 2: تسهیم توان حقیقی جاری خطوط سیستم آزمایشی 6 باسه

خط	P _{line} (MW)	روش تسهیم	مشارکت باس ژنراتورها (MW)		
			باس 1	باس 2	باس 3
2-1	8/09	پیشنهادی	1/07	-2/08	0/10
		Z-bus	18/11	-6/40	-1/62
		PSP	8/09	0	0
4-1	16/13	پیشنهادی	9/75	2/95	3/43
		Z-bus	16/11	0/29	1/12
		PSP	16/13	0	0
5-1	25/78	پیشنهادی	11/68	8/38	5/72
		Z-bus	15/78	6/12	0/49
		PSP	25/78	0	0
3-2	4/97	پیشنهادی	3/52	5/89	-4/44
		Z-bus	7/11	11/75	-8/62
		PSP	0/58	4/39	0
4-2	22/88	پیشنهادی	15/3	12/61	8/74
		Z-bus	10/6	14/51	6/32
		PSP	22/88	0	0
5-2	19/35	پیشنهادی	4/51	9/61	5/23
		Z-bus	3/79	1/75	1/53
		PSP	2/25	17/10	0
6-2	22/16	پیشنهادی	7/22	11/88	3/06
		Z-bus	7/51	13/18	-4/45
		PSP	22/16	0	0
5-3	19/58	پیشنهادی	2/09	5/57	11/92
		Z-bus	0/60	4/64	15/21
		PSP	0/21	1/63	17/74
6-3	33/02	پیشنهادی	5/67	8/61	18/74
		Z-bus	0/71	0/21	18/05
		PSP	0/35	2/74	29/93
5-4	7/59	پیشنهادی	2/72	3/54	1/33
		Z-bus	6/10	7/36	2/01
		PSP	3/49	4/10	0
6-5	-4/36	پیشنهادی	-0/36	-1/56	-3/16
		Z-bus	4/42	1/97	-1/6
		PSP	-1/21	-1/77	-2/38

جدول 3: نتایج تخصیص هزینه‌های انتقال (TCA^y) بین ژنراتورها و همچنین تعرفه استفاده از سیستم انتقال مربوط به ژنراتورها را در مورد روش پیشنهادی، روش Z-bus و روش ردیابی بیالک نشان می‌دهد. بعد از تعیین مشارکت ژنراتورها در توان جاری خطوط، هزینه شبکه از طریق روش ZCF-MWmile بین مشترکین تقسیم می‌شود. مطابق جدول 3، روش پیشنهادی و روش ردیابی بیالک هزینه هر یک از خطوط شبکه را به نسبت 50-50 بین ژنراتورها و بارها تقسیم می‌کند. این در حالی است که در مورد روش Z-bus، این پارامترهای شبکه است که نسبت تقسیم هزینه‌ها بین ژنراتورها و بارها را تعیین می‌کنند که

شبکه بین ژنراتورها و بارها تحت روش پیشنهادی و بیالک به‌صورت کاملاً مستقل از هم و با تقسیم اولیه سهم مجموعه ژنراتورها و بارها بر اساس معیار 50-50 یا هر معیار توافق‌شده‌ای انجام می‌شود. این ویژگی روش پیشنهادی، امکان تخصیص نسبت هزینه‌های مختلف شبکه انتقال بین مجموعه ژنراتورها و بارها را با توجه به سیاست‌های اتخاذی بازارهای مختلف برق فراهم می‌سازد. ولی در روش Z-bus به دلیل مدل CC² ژنراتورها و بارها، سهم ژنراتورها و بارها به‌صورت همزمان بر اساس روابط مداری شبکه حاصل می‌شود.

نکته دیگری که در مورد نتایج مشارکت ژنراتورها در توان حقیقی جاری خطوط (جدول 2) وجود دارد موضوع مشارکت‌های غالب و همچنین ویژگی اثر مجاورتی شبکه‌های توان است. گرچه مقادیر مشارکت ژنراتورها در توان جاری خطوط شبکه تحت سه روش مورد مطالعه متفاوت است، با فرض جهت شارش توان به‌عنوان جهت خطوط، مشارکت‌های غالب با جهت توان مثبت در هر سه روش مورد مطالعه مشترک و مربوط به ژنراتور یا ژنراتورهای است که نزدیک به باس‌های ارسالی خطوط می‌باشند. به‌عنوان مثال بر مبنای نتایج روش پیشنهادی، ژنراتور واقع در باس 1 به‌عنوان نزدیک‌ترین منبع به باس‌های ارسالی خطوط 1-2، 1-4 و 1-5، بیشترین مشارکت مثبت را در توان جاری خطوط ذکر شده دارد. همچنین ژنراتور واقع در باس 2 به‌عنوان باس ارسالی خطوط 2-3، 2-4، 2-5، و 2-6 دارای بیشترین مشارکت در توان جاری خطوط مذکور است. خطوط 3-6، 4-5 و 5-6 نیز از این قاعده مستثنی نیست. این ویژگی در واقع اثر مجاورتی شبکه‌های انتقال است که به‌شکل برجسته‌ای در نتایج مربوط به روش ردیابی بیالک مشهود بوده و البته در روش پیشنهادی نیز به‌خوبی منعکس شده‌است. با استفاده از نتایج جدول 2، همچنین می‌توان روش پیشنهادی را از نقطه‌نظر شارش‌های معکوس با روش‌های Z-bus و ردیابی بیالک مقایسه کرده و ارزیابی بهتری از روش پیشنهادی به‌عمل آورد. مطابق جدول 2، در نتایج مربوط به روش مداری پیشنهادی و روش Z-bus شارش‌های معکوس مشهود است. این در حالی است که روش توپولوژیکی ردیابی بیالک به دلیل ردیابی توان بر اساس یک پروسه تریبویی غیرمداری مبتنی بر اصل اثبات‌ناپذیر تسهیم نسبی توان‌ها، شامل مشارکت‌های منفی مشترکین در توان جاری خطوط و به‌عبارت بهتر شارش‌های معکوس نمی‌باشد. با بررسی دقیق‌تر نتایج می‌توان به این نکته پی برد که روش پیشنهادی با در برداشتن شارش‌های معکوس با دامنه کمتر، گرایش روش Z-bus به سمت انعکاس شارش‌های معکوس با دامنه‌های قابل توجه را تعدیل می‌کند. به‌عنوان مثال، مشارکت ژنراتور واقع در باس 1 در توان جاری خط 5-6 تحت روش Z-bus برابر با 4/42 MW شارش معکوس است، در حالی که همان مشارکت تحت روش پیشنهادی برابر 0/36 MW شارش معکوس است. در مورد ژنراتور واقع در باس 2، مشارکت ژنراتور در توان جاری خط 1-2 شارش معکوس بوده که این مقدار تحت روش Z-bus برابر با 6/4 و تحت روش پیشنهادی برابر با 2/08 MW است. لازم به ذکر است

در مقایسه با میزان استفاده ژنراتور واقع در باس ۱، به مراتب کمتر است. مساله مهم تر اینکه ویژگی های مطلوب ذکر شده در مورد روش پیشنهادی، فارغ از نوع سیاست قیمت گذاری اتخاذ شده اعم از قیمت گذاری ZCF-MW Mile^۸، AV-MW Mile^۹ و NV-MW Mile^۹ در اغلب موارد صدق می کند. مصداق بارز این موضوع، اختلاف نه چندان زیاد هزینه استفاده از شبکه ژنراتورها با تعیین میزان مشارکت ژنراتورها در توان جاری خطوط با استفاده از روش پیشنهادی تحت دو استراتژی قیمت گذاری ZCF-MW Mile و AV-MW Mile است. هزینه استفاده از شبکه مربوط به ژنراتورهای واقع در باس های ۱ تا ۳ تحت روش پیشنهادی با قیمت گذاری ZCF به ترتیب برابر با \$/h ۴۳۹/۰۵، \$/h ۴۹۳/۹۴ و \$/h ۳۷۲/۰۱ و با قیمت گذاری AV با تغییرات نه چندان زیادی به ترتیب برابر با \$/h ۴۱۷/۸۲، \$/h ۴۸۲/۳۲ و \$/h ۴۰۴/۸۶ گردید. در نقطه مقابل روش پیشنهادی، روش Z-bus است که نتایج آن به شدت وابسته به نوع طرح قیمت گذاری اتخاذ شده است. تحت روش Z-bus، با اتخاذ طرح قیمت گذاری مگاوات مایل ZCF، هزینه استفاده از شبکه ژنراتورها به ترتیب برابر با \$/h ۸۱۰/۲۷، \$/h ۶۵۶/۵ و \$/h ۳۰۹/۵۱ شده و با اتخاذ طرح قیمت گذاری مگاوات مایل AV، هزینه ها به ترتیب برابر با \$/h ۶۳۵/۸۰، \$/h ۵۲۰/۳۷ و \$/h ۳۲۲/۹۳ گردید. دلیل اختلاف های فاحش در نتایج، وجود شارش های معکوس دامنه زیاد در نتایج تعیین مشارکت در توان جاری خطوط مربوط به روش Z-bus است.

مطابق نتایج جدول ۳ تحت هر یک از سه مورد بررسی، ژنراتور واقع در باس ۳ کمترین هزینه و ژنراتور واقع در باس ۱ بیشترین هزینه را از بابت استفاده از شبکه انتقال می پردازند. با این حال، تعرفه استفاده از شبکه مربوط به ژنراتورهای ۱ و ۲ در مورد روش Z-bus از آنجائی که تحت این روش با توجه به ساختار شبکه و پارامترهای آن ۶۸/۰۶ % هزینه شبکه به گروه ژنراتورها تحمیل شده است، نسبت به دو روش دیگر بیشتر است.

یکی دیگر از ویژگی های مطلوب قابل استنتاج در مورد روش پیشنهادی، حساسیت کم نتایج به انتخاب ابتدا یا انتهای خطوط به عنوان مرجع محاسباتی است. به عبارت دیگر، نتایج مربوط به مشارکت ژنراتورها در توان جاری خطوط و به دنبال آن سهم ژنراتورها در هزینه خطوط با در نظر گرفتن شارش های واردشونده یا خارج شونده خطوط در محاسبات تفاوت چندانی نمی کند. این در حالی است که در مورد روش Z-bus، نتایج به شدت وابسته به انتخاب ترمینال های ابتدایی و یا انتهایی خطوط به عنوان مرجع محاسباتی است. به عنوان مثال تحت روش پیشنهادی، مشارکت ژنراتور واقع در باس ۱ در توان جاری و هزینه خط ۱-۲ با ملاک قراردادن P1-2 (ابتدای خط به عنوان مبنای محاسباتی) به ترتیب برابر با MW ۰/۰۷ و \$/h ۹۸/۹۹ و در صورت انتخاب P2-1 (انتهای خط به عنوان مبنای محاسباتی) با تغییرات ناچیزی برابر با MW ۹/۹۵ و \$/h ۹۸/۹۳ می گردد. با انجام محاسبات مشابه با روش Z-bus جهت تعیین مقادیر مشارکت در توان جاری و سهم هزینه

البته این نسبت برای هر یک از خطوط شبکه عددی متفاوت است. به عنوان نمونه، در مورد خط ۱-۵ با هزینه خط برابر با \$/h ۳۰۰، تحت روش Z-bus از کل هزینه خط ۲۲۶/۸۹ به ژنراتورها و \$/h ۷۳/۱۱ به بارها اختصاص یافته است. در حالیکه در مورد خط ۵-۶ با همان تعرفه خط \$/h ۳۰۰، تحت روش Z-bus سهم ژنراتورها و بارها در پرداخت هزینه خط به ترتیب برابر \$/h ۲۵/۴۱ و \$/h ۲۷۴/۵۹ شده است.

با ارزیابی نتایج جدول ۳ می توان نتیجه گرفت که روش پیشنهادی، شاخص های مقدار توان تولیدی، محل اتصال به شبکه و همچنین میزان استفاده موثر از خطوط مربوط به ژنراتورها را در پروسه تخصیص هزینه ها لحاظ می کند. به عنوان مثال، به دلیل جهت شارش توان خط ۱-۲ از باس ۱ به باس ۲، میزان استفاده ژنراتور واقع در باس ۲ از خط

جدول ۳: تخصیص هزینه خطوط سیستم آزمایشی ۶ باسه (\$/h)

خط	هزینه کل	روش تخصیص	هزینه ژنراتورها		
			باس ۱	باس ۲	باس ۳
۲-۱	۲۰۰	پیشنهادی	۹۸/۹۹	۰	۱/۰۱
		Z-bus	۱۸۰/۰۳	۰	۱۹/۹۷
		PSP	۱۰۰	۰	۱۰۰
۴-۱	۲۰۰	پیشنهادی	۶۰/۴۸	۱۸/۲۷	۲۱/۲۵
		Z-bus	۱۵۳/۶۸	۲/۷۲	۱۰/۷۰
		PSP	۱۰۰	۰	۱۰۰
۵-۱	۳۰۰	پیشنهادی	۶۷/۹۳	۴۸/۷۷	۳۳/۳۰
		Z-bus	۱۵۹/۸۷	۶۲/۰۰	۵/۰۲
		PSP	۱۵۰	۰	۱۵۰
۳-۲	۲۵۰	پیشنهادی	۴۶/۷۶	۷۸/۲۴	۰
		Z-bus	۸۶/۲۴	۱۴۲/۶۰	۰
		PSP	۱۴/۵۶	۱۱۰/۴۴	۰
۴-۲	۱۰۰	پیشنهادی	۳/۳۴	۲۷/۵۵	۱۹/۱۱
		Z-bus	۰	۴۰/۰۵	۱۷/۴۵
		PSP	۵/۸۲	۴۴/۱۸	۰
۵-۲	۳۰۰	پیشنهادی	۳۴/۹۷	۷۴/۴۷	۴۰/۵۶
		Z-bus	۴۵/۳۸	۱۲۸/۳۵	۱۸/۳۴
		PSP	۱۷/۴۸	۱۳۲/۵۲	۰
۶-۲	۲۰۰	پیشنهادی	۳۲/۵۷	۵۳/۶۰	۱۳/۸۳
		Z-bus	۴۴/۰۰	۷۷/۲۴	۰
		PSP	۱۱/۶۵	۸۸/۳۵	۰
۵-۳	۲۶۰	پیشنهادی	۱۳/۸۸	۳۶/۹۸	۷۹/۱۴
		Z-bus	۵/۴۲	۴۱/۷۷	۱۳۷/۰۴
		PSP	۱/۴۳	۱۰/۸۵	۱۱۷/۷۲
۶-۳	۱۰۰	پیشنهادی	۸/۵۹	۱۳/۰۲	۲۸/۳۹
		Z-bus	۲۰/۰۲	۰/۵۹	۵۱/۳۳
		PSP	۰/۵۵	۴/۱۷	۴۵/۳۸
۵-۴	۴۰۰	پیشنهادی	۷۱/۵۴	۹۳/۳۴	۳۵/۱۲
		Z-bus	۱۳۳/۶۶	۱۶۱/۱۷	۴۴/۲۴
		PSP	۹۶/۳۱	۱۰۳/۶۹	۰
۶-۵	۳۰۰	پیشنهادی	۰	۴۹/۷۱	۱۰۰/۲۹
		Z-bus	۰	۰	۲۵/۴۱
		PSP	۸/۰۱	۶۰/۷۱	۸۱/۲۸
هزینه شبکه	۲۶۱۰	پیشنهادی	۴۳۹/۰۵	۴۹۳/۹۴	۳۷۲/۰۱
		Z-bus	۸۱۰/۲۷	۶۵۶/۵	۳۰۹/۵۱
		PSP	۵۰۵/۸۱	۵۵۴/۹۰	۲۴۴/۲۹
تعرفه ها (\$/MWh)	-		۸/۷۸	۸/۰۵	۷/۸۰
			۱۶/۳۰	۱۰/۷۰	۶/۴۹
			۱۰/۱۲	۹/۰۵	۵/۱۲

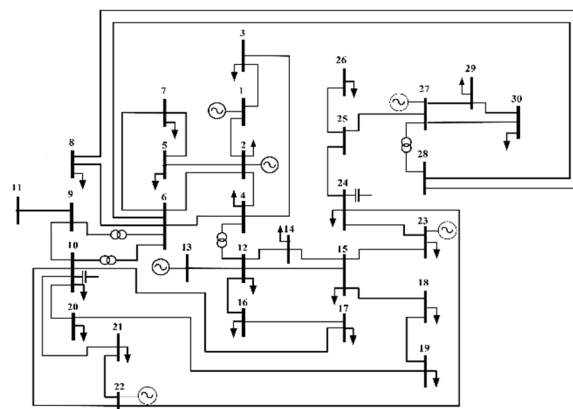
جدول ۴: نتایج پخش بار سیستم ۳۰ باسه IEEE

باس	ولتاژ		توان تولید		توان مصرفی	
	اندازه (p.u)	زاویه (deg.)	حقیقی (MW)	موهومی (MVAR)	حقیقی (MW)	موهومی (MVAR)
۱	۱/۰۵	۰	۵۱/۰۷	-۱/۳۹	۲۰	۰
۲	۱/۰۵	-۰/۳۴	۶۵/۸۲	۳۵/۵۵	۱۳	۲۰
۳	۱/۰۳	-۲/۳۴	۰	۰	۲۸	۰/۹
۴	۱/۰۳	-۲/۲۴	۰	۰	۲۵	۱/۲
۵	۱/۰۳	-۱/۵۲	۰	۰	۰	۰
۶	۱/۰۳	-۲/۱۲	۰	۰	۰	۰
۷	۱/۰۲	-۲/۳۱	۰	۰	۲۰	۲۰
۸	۱/۰۳	-۲/۳۱	۰	۰	۱۵	۱۰
۹	۱/۰۳	-۲/۶۰	۰	۰	۰	۰
۱۰	۱/۰۳	-۲/۸۵	۰	۰	۴	۳
۱۱	۱/۰۳	-۲/۶۰	۰	۰	۰	۰
۱۲	۱/۰۲	-۲/۳۰	۰	۰	۲	۳
۱۳	۱/۰۱	-۰/۸۵	۱۷/۳۲	-۲/۵۵	۰	۰
۱۴	۱/۰۱	-۲/۵۳	۰	۰	۳	۵
۱۵	۱/۰۱	-۲/۹۱	۰	۰	۳	۲
۱۶	۱/۰۲	-۲/۶۱	۰	۰	۱	-۰/۵
۱۷	۱/۰۳	-۲/۹۱	۰	۰	۶	۵
۱۸	۱/۰۰	-۴/۹۱	۰	۰	۱۲	-۰/۸
۱۹	۱/۰۰	-۵/۳۴	۰	۰	۲۰	۳
۲۰	۱/۰۱	-۴/۶۷	۰	۰	۱/۵	-۰/۴
۲۱	۱/۰۴	-۲/۵۷	۰	۰	۳	۱۰
۲۲	۱/۰۵	-۲/۵۲	۲۶/۶۳	۳۴/۰۸	۰	۰
۲۳	۱/۰۴	-۲/۳۰	۱۶/۷۳	۶/۸۸	۵	۱/۴
۲۴	۱/۰۴	-۲/۵۵	۰	۰	۱۵	۲
۲۵	۱/۰۵	-۰/۷۱	۰	۰	۰	۰
۲۶	۱/۰۵	-۰/۸۶	۰	۰	۱	-۰/۴
۲۷	۱/۰۶	-۰/۵۱	۴۸/۶۸	۱۵/۵۸	۰	۰
۲۸	۱/۰۳	-۱/۹۴	۰	۰	۰	۰
۲۹	۱/۰۱	-۱/۵۹	۰	۰	۵	۵
۳۰	۱/۰۰	-۳/۳۷	۰	۰	۲۰	۲

ژنراتور واقع در باس ۱ از خط ۱-۲، با انتخاب P1-2 به عنوان مرجع محاسباتی مقادیر به ترتیب برابر با ۱۸/۱۱ MW و ۱۸۰/۰۳ \$/h و با انتخاب P2-1، مقادیر با تغییرات قابل ملاحظه‌ای به ترتیب برابر با ۱۴/۳۵ MW و ۱۱۷/۷۸ \$/h می‌شود.

۲-۶- سیستم ۳۰ باسه IEEE

به منظور اعتبار سنجی روش پیشنهادی، سیستم ۳۰ باسه IEEE نشان داده شده در شکل ۲ به عنوان سیستم آزمایشی انتخاب شده است. اطلاعات مربوط به پارامترهای خطوط سیستم در [۳۶] قابل دستیابی است. نتایج پخش بار سیستم در جدول ۴ آورده شده است.

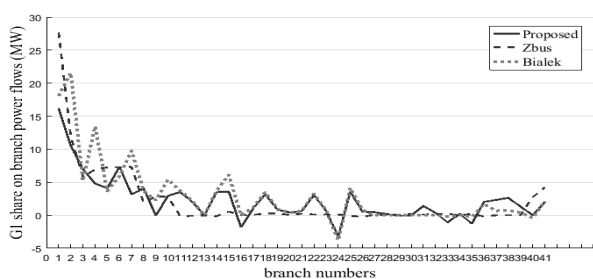


شکل ۲: سیستم آزمایشی ۳۰ باسه IEEE

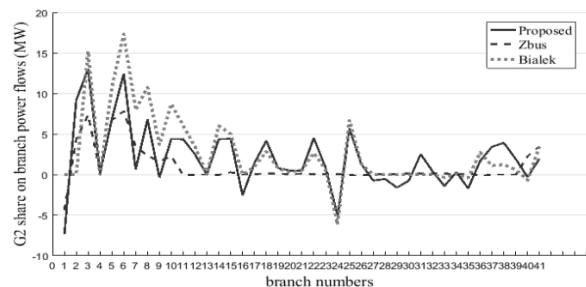
۶-۲-۱- مشارکت ژنراتورها در توان جاری خطوط

ژنراتورها در باس‌های (۱، ۲، ۲۲، ۲۷، ۲۳، ۱۳) واقع شده است. شکل‌های ۳-۴، مشارکت ژنراتورها در توان حقیقی جاری خطوط شبکه را برای هر سه روش مورد مطالعه یعنی روش پیشنهادی، روش مداری Z-bus و روش PSP نشان می‌دهد. مطابق شکل‌های ۳-۴، موارد زیر قابل استنتاج است:

- پروفایل کلی مربوط به نمودار مشارکت ژنراتورها در توان جاری خطوط برای هر سه روش مشابه هم است. به عبارتی در هر سه روش مورد مطالعه با وجود متفاوت بودن اصول روش‌ها، سهم مشارکت ژنراتورها در توان جاری خطوط مجاورشان بیشتر است. ژنراتورهای واقع در باس ۱ و ۲، بیشترین مشارکت را در خطوط ۱ تا ۱۵ (شکل ۳a و ۳b) دارند. در مورد سایر ژنراتورها نیز این موضوع صدق می‌کند. این ویژگی را می‌توان اثر مجاورتی شبکه‌های توان نامید.
- نمودارهای مربوط به روش PSP، دارای نقاط متعددی بر روی محور افقی نمودارها با مفهوم مشارکت صفر ژنراتور مورد مطالعه در توان جاری خطوط متناظر با نقاط است. علت این امر، عدم لحاظ شدن شارش‌های معکوس در فرایند محاسباتی روش PSP با وجود حائز اهمیت بودن شارش‌های معکوس در مسائل مرتبط با پخش بار شبکه است.



(a)

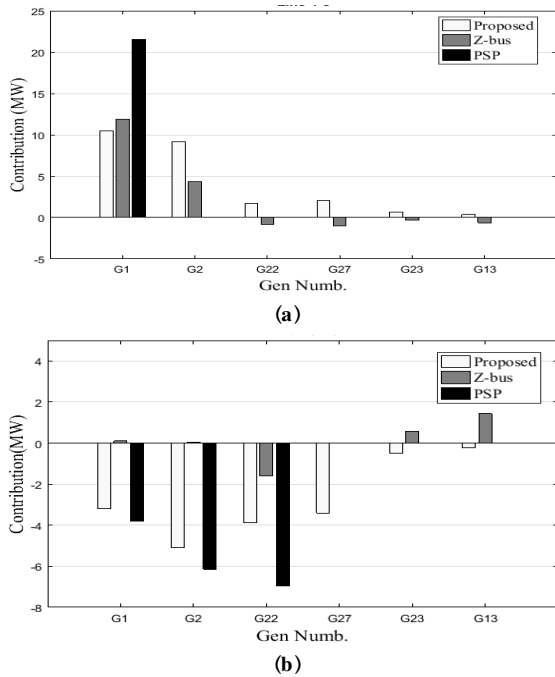


(b)

شکل ۳: مشارکت ژنراتور (a) G1 و (b) G2 در توان جاری خطوط

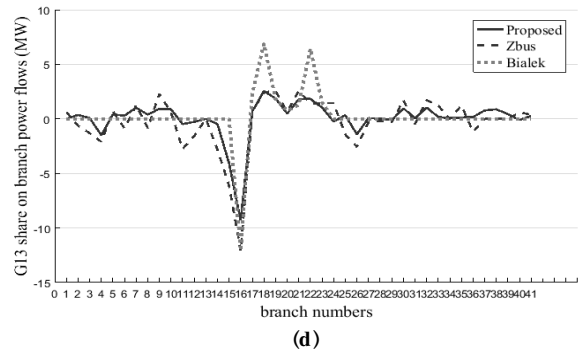
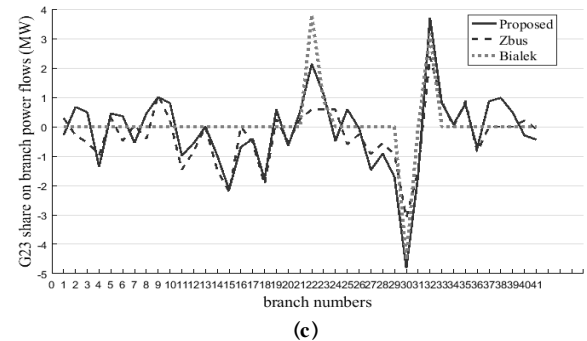
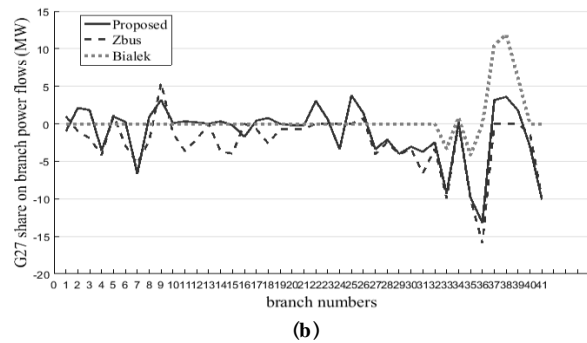
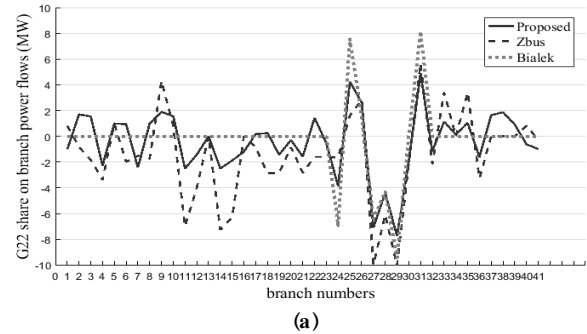
سیستم ۳۰ باسه IEEE

مربوط به دو روش مداری، استراتژی‌های متفاوت اتخاذی دو روش در قبال جملات تداخلی به‌عنوان مشخصه غیرخطی سیستم قدرت است.



شکل ۵: تسهیم توان حقیقی جاری خطوط (a) ۱-۳ و (b) ۱۹-۲۰ بین ژنراتورها

در مورد خط ۱-۳ (شکل ۵a)، هر سه روش مورد مطالعه بیش‌ترین سهم مشارکت در توان جاری خط را به ژنراتورهای واقع در با سهای ۱ و ۲ اختصاص داده است. این در حالی است که سهم سایر ژنراتورها در توان جاری خط ۱-۳ برای هر سه روش کاملاً متفاوت است. فرایند ردیابی توان PSP و در نتیجه مشارکت ژنراتورها در توان جاری خطوط تحت روش مذکور با توجه به عدم لحاظ‌شدن شارش‌های معکوس در اصل تسهیم نسبی، به‌شدت وابسته به مسیرهای جهت‌دار ایجادشده در شبکه به‌واسطه توان‌های جاری خطوط است. از بین ژنراتورهای شبکه، فقط از ژنراتور G1 مسیر جهت‌دار به توان جاری خط ۱-۳ وجود دارد. در مورد روش Z-bus و روش پیشنهادی، به‌دلیل لحاظ‌شدن شارش‌های معکوس در فرایند ردیابی توان در هر دو روش مداری مورد مطالعه، برخلاف روش PSP، سایر ژنراتورها نیز سهمی در توان جاری خط ۱-۳ دارند که این مشارکت به غیر از ژنراتورهای ۱ و ۲ که تحت هر دو روش به صورت مشارکت هم‌سو است، در مورد سایر ژنراتورها تحت روش Z-bus به صورت مشارکت معکوس و تحت روش پیشنهادی به صورت مشارکت هرچند ناچیز ولیکن مثبت است. در مورد خط ۱۹-۲۰ (شکل ۵b)، سهم مشارکت ژنراتورها در توان جاری خط تحت روش Z-bus به مراتب کمتر از آنچه در روش PSP و روش پیشنهادی مشهود می‌باشد، است. دلیل این موضوع، تخصیص هم‌زمان توان جاری خطوط و هزینه استفاده از شبکه بین ژنراتورها و بارها با مدل کردن به صورت جریان‌های تزریقی و استخراجی معادل ژنراتورها و بارها تحت روش Z-bus است که این امر منجر به شکل‌گیری سهم‌های مشارکت متفاوت برای ژنراتورها و بارها در توان جاری خطوط شبکه می‌گردد. همچنین در



شکل ۴: مشارکت ژنراتورهای (a) G_{۲۲}، (b) G_{۲۷}، (c) G_{۲۳} و (d) G_{۱۳} در توان جاری خطوط سیستم ۳۰ باسه IEEE

شکل ۵، نحوه تخصیص توان جاری مربوط به دو خط پر بار ۱-۳ و ۱۹-۲۰ با توان‌های حقیقی جاری به ترتیب برابر با ۲۴/۵۲ مگاوات و ۱۶/۲۸ مگاوات را بین ژنراتورهای شبکه نشان می‌دهد. نتایج تحت روش PSP مکانی‌تر است. دلیل این موضوع، اصل تسهیم نسبی عملی و لذا در نظرنگرفتن شارش‌های معکوس در فرایند ردیابی توان است. با توجه به شکل‌های ۳-۵، نتایج مربوط به تخصیص توان جاری خطوط تحت روش Z-bus در مقایسه با روش پیشنهادی، دارای دامنه شارش‌های معکوس بیشتری است. دلیل اختلاف‌های به‌وجودآمده در نتایج

بررسی تعرفه استفاده از شبکه ژنراتورها تحت نقاط بهره‌برداری شکل گرفته، قابل ملاحظه است.

روش پیشنهادی در قیاس با دو روش دیگر مورد مطالعه، تعرفه استفاده از شبکه پایدارتری نسبت به تغییرات بار را برای ژنراتورها فراهم می‌سازد. همانطوری که در جدول ۵ قابل مشاهده است، با قطع بار ۲۰ مگاواتی متصل به باس ۱ از شبکه، تعرفه استفاده از شبکه متناظر با ژنراتور متصل به باس ۱ تحت هر سه روش و همچنین متناظر با باس ۱۳ تحت روش PSP دچار تغییرات بیشتری شده است. در مورد سایر حالت‌های متناظر با تغییرات بار شبکه نیز شرایطی مشابه با آنچه در مورد بار متصل به باس ۱ بحث شد، پیش می‌آید. حالت نهایی، مطالعه تاثیر به مدار آوردن باری نسبتاً بزرگ بر روی تعرفه استفاده از شبکه ژنراتورها با اتصال بار ۲۰ مگاواتی به باس ۲۷ شبکه است. بیشترین تغییرات تعرفه، مربوط به ژنراتور واقع در باس ۲۷ محاسبه شده به روش Z-bus با کاهش ۴۴/۸٪ است.

۶-۳- سیستم واقعی ۲۳۸۳ باسه

اطلاعات مربوط به سیستم در [۳۷] آورده شده است. به منظور تاکید بر قابل اعمال بودن روش پیشنهادی بر سیستم‌های واقعی بزرگ، سیستم ۲۳۸۳ باسه مربوط به شبکه ۴۰۰، ۲۲۰ و ۱۱۰ کیلوولت لهستان تحت شرایط پیک بار دوره زمستان ۱۹۹۹-۲۰۰۰ در نظر گرفته شده است. در مورد روش پیشنهادی بر خلاف روش Z-bus و روش PSP که به ترتیب با مشکل منفرد شدن ماتریسی در تشکیل ماتریس امپدانس و تشکیل ماتریس‌های توزیع ردیابی مواجه است، پروسه مداری تسهیم توان و تخصیص هزینه‌ها به راحتی قابل اجرا است. به منظور اجرای برنامه، سیستم با مشخصات سخت افزاری Intel Core i5-2410M 2.3GHz با 6GB رم در نظر گرفته شده است. مدت زمان اجرای برنامه طبق گزارش MATLAB R2016a برابر با ۱۸/۷۳ ثانیه ثبت شد که به واقع مدت زمان اجرایی کوتاهی است.

۷. نتیجه گیری

این مقاله، روشی جدید مبتنی بر نظریه مداری در مورد مساله تخصیص هزینه‌های انتقال ارائه می‌کند. برخلاف اغلب روش‌های مشابه، روش پیشنهادی سعی در اثبات منطقی بودن نحوه برخورد با رفتار غیرخطی سیستم به منظور تعیین رابطه ریاضی سهم مشترکین در کمیت‌های توانی شبکه، دارد. اصل اعمالی تفکیک جملات تداخلی معادلات توان به عنوان مشخصه غیرخطی سیستم، از طریق دو روش حل برگزیده بازی هزینه انتقال شامل مقادیر شاپلی و اومان شاپلی مورد تایید قرار گرفته است. همچنین، یک مفهوم جدید تحت عنوان مبادله دوجانبه معادل مبتنی بر نظریه مداری معرفی شده است.

روش پیشنهادی با دو تکنیک رایج تخصیص هزینه‌های انتقال یعنی روش Z-bus و روش PSP مقایسه شده است. نتایج عددی حاصل از سیستم‌های آزمایشی ۶ باسه و ۳۰ باسه IEEE مورد مطالعه، حاکی از

روش پیشنهادی، با توجه به اینکه سهم مشارکت مشترکین در میزان استفاده از شبکه بر اساس میزان مشارکت آنها در جریان‌های جاری خطوط و ولتاژ باس‌های شبکه و به عبارتی توان جاری خطوط تعیین می‌شود، موقعیت کلی ژنراتورها نسبت به بارها تعیین کننده نتایج تخصیص هزینه است. این امر منجر به شکل گیری نتایج پایدارتر و با حساسیت کمتر نسبت به تغییرات ناگهانی بار در روش پیشنهادی در قیاس با روشهای PSP و حتی Z-bus می‌شود. این مطلب به خوبی در نتایج مربوط به تعرفه استفاده از شبکه انتقال ژنراتورها منعکس شده است.

۶-۲-۲- تعرفه استفاده از شبکه انتقال متناظر با ژنراتورها

جدول ۵، هزینه واحد و یا به عبارت بهتر تعرفه استفاده از شبکه انتقال متناظر با ژنراتورها را برای حالت بهره‌برداری پایه شبکه و همچنین برای حالت‌های با بارهای تغییر یافته شبکه، نشان می‌دهد.

جدول ۵: تعرفه استفاده از شبکه ژنراتورها مربوط به نقاط

بهره برداری مختلف سیستم ۳۰ باسه برای سه روش مورد مطالعه

نقطه بهره برداری	روشها	هزینه پریونیت انتقال ژنراتورها (\$/MWh)					
		G1	G2	G22	G27	G23	G13
حالت پایه	Prop.	۱۵/۳۳	۱۶/۰۹	۱۶/۹۹	۱۹/۶۲	۲۱/۳۶	۲۳/۵۵
	Z-bus	۳/۴۷	۴/۱۲	۱۴/۸۸	۲۰/۳۶	۱۳/۸۵	۳۱/۳۶
	PSP	۳/۸۲	۱۰/۷۲	۱۲/۹۵	۳۴/۲۸	۱۹/۴۰	۴۴/۷۹
PL(1)=0	Prop.	۱۷/۲۳	۱۸/۵۳	۱۷/۶۰	۲۳/۱۷	۲۰/۲۹	۲۱/۹۲
	Z-bus	۷/۴۴	۳/۸۷	۱۳/۰۵	۲۱/۰۶	۱۱/۹۸	۲۷/۹۸
	PSP	۸/۲۹	۱۳/۴۶	۱۳/۰۳	۳۸/۳۶	۱۹/۷۵	۳۵/۷۷
PL(7)=0	Prop.	۱۷/۷۱	۱۹/۰۹	۱۶/۸۹	۲۲/۸۶	۱۹/۵۶	۲۱/۸۴
	Z-bus	۳/۶	۴/۵۲	۱۳/۰۹	۲۱/۴۷	۱۲/۱۵	۲۸/۲۸
	PSP	۴/۰۳	۱۶/۸۳	۱۳/۰۷	۳۸/۹۸	۱۹/۴۳	۳۵/۸۸
PL(27)=20	Prop.	۱۴/۰۰	۱۴/۳۳	۱۴/۷۰	۱۹/۴۴	۱۸/۹۵	۲۱/۲۴
	Z-bus	۳/۵۲	۴/۰۵	۱۵/۳۳	۱۱/۲۴	۱۴/۶۰	۳۰/۰۸
	PSP	۴/۰۴	۱۱/۵۵	۱۱/۸۷	۲۷/۸۴	۱۷/۸۱	۴۲/۱۸

مطابق جدول ۵ برای حالت بهره‌برداری پایه شبکه، کمترین تعرفه‌های استفاده از شبکه تحت هر سه روش مورد مطالعه مربوط به ژنراتورهای واقع در باسهای ۱، ۲ و ۲۲ است. دلیل آن، در مجاورت بارهای بزرگ قرار گرفتن ژنراتورهای مذکور است. بارهای بزرگ متصل به باسهای ۱، ۲، ۳، ۴ برای ژنراتورهای ۱ و ۲ و باس ۲۴ برای ژنراتور ۲۲ عامل اصلی این موضوع است. بیشترین تعرفه نیز در هر سه روش مربوط به ژنراتور واقع در باس ۱۳ است. تحت روش پیشنهادی، تعرفه ژنراتور واقع در باس ۲۲ به دلیل موقعیت مداری مشابه با ژنراتورهای ۱ و ۲، تقریباً با تعرفه ژنراتورهای ۱ و ۲ برابر است. با تغییر بارهای شبکه، تعرفه مربوط به ژنراتورهای واقع در مجاورتی بار دستخوش تغییرات بیشتری در قیاس با سایر ژنراتورها می‌شود. البته میزان این تغییرات به نوع روش اتخاذی تخصیص هزینه‌ها نیز وابسته است. این مشخصه در جدول ۵ با تغییر بارهای متصل به باس‌های ۱، ۷، ۱۹، ۳۰ و ۲۷ و

همچنین با توجه به اینکه y_1 و y_2 نیز دو عدد حقیقی است، بنابراین اصل تسهیم یکسان در مورد y_1 و y_2 نیز صدق می‌کند. یعنی:

$$f(y_1, y_2) = y_1 \cdot y_2 \rightarrow f^{y_1} = f^{y_2} = \frac{1}{2} y_1 \cdot y_2 \quad (۲پ)$$

می‌توان ثابت کرد با جایگذاری اعداد مختلط Z_1 و Z_2 در تابع f سهم هر یک از متغیرهای مختلط در f نیز از اصل تسهیم یکسان تبعیت می‌کند. ابتدا تابع $f(z_1, z_2)$ به صورت زیر تشکیل می‌شود:

$$f(z_1, z_2) = z_1 \cdot z_2 = (x_1 + jy_1) \cdot (x_2 + jy_2) \quad (۳پ)$$

$$= \frac{f(x_1, x_2)}{x_1 x_2} - \frac{f(y_1, y_2)}{y_1 y_2} + j \left(\frac{f(x_1, y_2)}{x_1 y_2} + \frac{f(x_2, y_1)}{x_2 y_1} \right)$$

سهم Z_1 در f به صورت سهم x_1 در $f(x_1, x_2)$ و سهم y_1 در $f(y_1, y_2)$ و $f(x_2, y_1)$ ، و به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$f^{z_1} = f^{x_1}(x_1, x_2) - f^{y_1}(y_1, y_2) + j(f^{x_1}(x_1, y_2) + f^{y_1}(x_2, y_1))$$

$$= \frac{1}{2} x_1 x_2 - \frac{1}{2} y_1 y_2 + \frac{1}{2} j(x_1 y_2 + x_2 y_1)$$

$$= \frac{1}{2} x_1 x_2 + \frac{1}{2} (j y_1)(j y_2) + \frac{1}{2} x_1 (j y_2) + \frac{1}{2} x_2 (j y_1) \quad (۴پ)$$

$$= \frac{1}{2} x_1 (x_2 + j y_2) + \frac{1}{2} (j y_1)(x_2 + j y_2)$$

$$= \frac{1}{2} (x_1 + j y_1)(x_2 + j y_2) = \frac{1}{2} z_1 \cdot z_1$$

سهم Z_2 در f نیز به طرز مشابهی قابل اثبات است. بنابراین، در صورت پذیرفتن اصل تسهیم یکسان برای عبارات حقیقی، برای عبارات مختلط نیز اصل صدق می‌کند.

پیوست ۲ (اثبات ریاضی اصل تسهیم یکسان)

برای تعیین سهم متغیرهای تشکیل دهنده یک تابع غیرخطی در تغییرات تابع ناشی از تغییرات متغیرهای تشکیل دهنده، می‌توان از مدل تقریب‌سازی خطی استفاده کرد. به عنوان مثال برای تابع دومتغیره غیرخطی f به صورت $f(x_1, x_2) = x_1 \cdot x_2$ ، با فرض (x_1^0, x_2^0) و (x_1^*, x_2^*) به ترتیب به عنوان زوج مرتب مقادیر اولیه و نهایی متغیرهای تشکیل دهنده، تغییرات Δf ناشی از تغییرات متغیرهای تشکیل دهنده از مقادیر اولیه به نهایی را می‌توان به صورت رابطه زیر تقریب زد:

$$\Delta f = f(x_1^*, x_2^*) - f(x_1^0, x_2^0)$$

$$\approx \frac{\partial f}{\partial x_1} \Big|_{x=x^0} \Delta x_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \Big|_{x=x^0} \Delta x_2 \quad (۵پ)$$

که در آن، Δf^{x_1} و Δf^{x_2} به ترتیب سهم متغیرهای x_1 و x_2 در تغییرات Δf تابع f است. بدیهی است هرچقدر میزان تغییرات Δx_1 و Δx_2 کوچکتر باشد، مدل خطی تقریب بهتری از تابع غیرخطی فراهم کرده و نتایج حاصله به نتایج واقعی نزدیکتر خواهد بود.

با توجه به مطالب عنوان شده، برای تعیین سهم متغیرهای x_1^* و در $f(x_1^*, x_2^*) = x_1^* \cdot x_2^*$ ، مراحل زیر طی می‌شود:

این مطلب است که روش پیشنهادی عملکرد بهتری در قیاس با دو روش دیگر دارد. مطابق نتایج، روش پیشنهادی روشی موثر و عادلانه است، چرا که توپولوژی شبکه و همچنین توان خروجی و موقعیت ژنراتورها در شبکه را به خوبی در نتایج منعکس می‌کند. اگرچه در روش PSP سیگنال‌های مکانی با شدت بیشتری مشخص می‌شوند، اساس اصل تسهیم نسبی اعمالی ردیابی توان، غیر قابل اثبات بوده و صرفاً با یک سری دلایل منطقی قابل توجیه است. همچنین در روش PSP به دلیل صرف نظر کردن از شارش‌های معکوس، ناپایداری قابل ملاحظه‌ای در تعرفه استفاده از شبکه مشترکین مشهود است. روش پیشنهادی با تعدیل کردن گرایش‌های شدید مشهود در روش Z-bus به شارش‌های معکوس دامنه زیاد، در عین حال که از شارش‌های معکوس در پرو سه تسهیم توان جاری خطوط صرف نظر نمی‌کند، با کاهش دامنه این شارها منجر به کاهش سوپرسید متقابل می‌شود. این ویژگی به‌واقع ارزشمند است، زیرا شارش‌های معکوس بالا توام با پاداش‌های اضافی، زمینه را برای شکل‌گیری رقابت‌های غیرعادلانه فراهم می‌سازد. علاوه بر این، بر اساس یک مقایسه انجام شده در سیستم ۶باسه، نتایج تخصیص هزینه مربوط به روش Z-bus با تغییر طرح قیمت‌گذاری MW-Mile به شدت دستخوش تغییر می‌شود. در مقابل، روش پیشنهادی نتایج به مراتب پایدارتری را فراهم می‌سازد.

روش پیشنهادی همچنین از نقطه نظر پایداری تعرفه‌ها در سیستم ۳۰باسه مورد ارزیابی قرار گرفته است. با توجه به نتایج بدست آمده، روش پیشنهادی تعرفه‌های با پایداری نسبی بالایی را در مقابل تغییرات ناگهانی بار و استراتژی‌های توزیع تولید فراهم می‌سازد. علاوه بر این، بر اساس نتایج بدست آمده از سیستم ۶باسه، روش پیشنهادی در مقایسه با روش Z-bus حساسیت کمتری نسبت به انتخاب ابتدا و یا انتهای خطوط به عنوان مرجع محاسباتی دارد. به عنوان یک مزیت دیگر، روش پیشنهادی با حل مشکل منفرد شدن ماتریسی رایج در روش Z-bus و PSP در معکوس کردن ماتریس‌های پراکنده بزرگ، سازگار با انواع ساختارهای شبکه است. عملکرد محاسباتی روش پیشنهادی با اعمال بر روی سیستم عملی ۲۳۸۳ باسه لهستان حاکی از سرعت اجرایی بالا و همچنین قابل اعمال بودن روش بر روی سیستم‌های قدرت واقعی گسترده دارد.

پیوست‌ها

پیوست ۱

دو عدد مختلط $Z_1 = x_1 + jy_1$ و $Z_2 = x_2 + jy_2$ را در نظر بگیرد. با تعریف تابع دو متغیری f به صورت حاصلضرب دو متغیر و با فرض اینکه اصل تسهیم یکسان برای اعداد حقیقی پذیرفته شده است، سهم هر یک از متغیرهای حقیقی x_1 و x_2 در $f(x_1, x_2) = x_1 \cdot x_2$ برابر است با:

$$f^{x_1} = f^{x_2} = \frac{1}{2} x_1 \cdot x_2 \quad (۱پ)$$

$$f_c^{x1} = \int_c df^{x1} = \int_0^{x_1^*} \left. \frac{\partial f}{\partial x_1} \right|_{x=x^*} \cdot \underbrace{dx_1}_{x_1^* dt} \Big|_{x=x^*} dt \tag{۶پ}$$

$$= x_1^* \int_0^{x_2^*} t dx_2 = \frac{1}{2} x_1^* x_2^* [t^2]_0 = \frac{1}{2} x_1^* x_2^*$$

در صورت انتخاب مسیره‌های افقی یعنی تغییرات x_1 و ثابت ماندن مقدار x_2 ، سهم متغیر x_1 در تغییرات کلی f ناشی از مجموع تغییرات جزئی x_1 در مسیره‌های افقی، به صورت مقدار متوسط تغییرات کلی f ناشی از تغییرات جزئی x_1 در تمامی مسیره‌های افقی ممکن خواهد بود:

$$f_h^{x1} = \frac{1}{x_2^*} \int_0^{x_2^*} \left(\int_h df^{x1} \right) dx_2 = \frac{1}{x_2^*} \int_0^{x_2^*} \left(\int_0^{x_1^*} \left. \frac{\partial f}{\partial x_1} \right|_{(x_1, x_2)} \cdot \underbrace{dx_1}_{x_1^* dt} \right) dx_2$$

$$= \frac{1}{x_2^*} \int_0^{x_2^*} \left(\int_0^{x_1^*} \left. \frac{\partial f}{\partial x_1} \right|_{(t, x_1^*, t_2, x_2^*)} dt_1 \right) dx_2$$

$$= \frac{1}{x_2^*} \int_0^{x_2^*} \left(\int_0^{x_1^*} \left. \frac{\partial f}{\partial x_1} \right|_{(t_1, x_1^*, t_2, x_2^*)} dt_1 \right) dt_2 \tag{۷پ}$$

$$= x_1^* \int_0^1 \int_0^1 \left. \frac{\partial f}{\partial x_1} \right|_{(t_1, x_1^*, t_2, x_2^*)} dt_1 dt_2$$

$$= x_1^* \int_0^1 x_2 dt_2 = x_1^* x_2^* \int_0^1 t_2 dt_2 = \frac{1}{2} x_1^* x_2^*$$

در صورت انتخاب مسیره‌های عمودی، سهم x_1 در تغییرات f برابر صفر خواهد بود.

با توجه به روابط فوق، سهم متغیر x_1 و x_2 در تغییرات تابع f از مقدار اولیه صفر به مقدار نهایی $f(x_1^*, x_2^*) = x_1^* x_2^*$ ناشی از تغییرات متغیرهای تشکیل دهنده یعنی x_1 و x_2 تحت هر الگوی تغییرات متغیرها، یکسان بوده و برابر با $\frac{1}{2} x_1^* x_2^*$ است. مطالب عنوان شده، اثبات اصل تسهیم یکسان جملات تداخلی است.

مراجع

[1] N. H. Radzi, R. C. Bansal and Z. Y. Dong, "New Australian NEM transmission use of system charging methodologies for integrating renewable generation to existing grid," *Renewable Energy*, vol. 76, pp. 72-81, 2015.

[2] N. H. Radzi, R. C. Bansal, Z. Y. Dong, M. Y. Hassan and K. P. Wong, "An efficient distribution factors enhanced transmission pricing method for Australian NEM transmission charging scheme," *Renewable Energy*, vol. 53, pp. 319-328, 2013.

[3] Z. Yang, H. Zhong, Q. Xia, C. Kang, T. Chen and Y. Li, "A structural transmission cost allocation scheme based on capacity usage identification," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 4, pp. 2876 - 2884, July 2016.

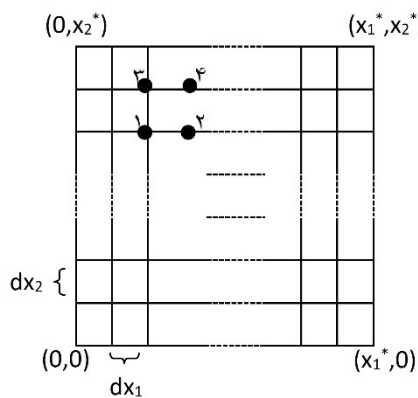
[4] S. Nojeng, M. Y. Hassan, D. M. Said, M. P. Abdullah and F. Hussin, "Improving the MW-Mile method using the power factor-based approach for pricing the transmission services," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 5, pp. 2042-2048, 2014.

[5] J. Bialek, "Tracing the flow of electricity," *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 143, no. 4 pp. 313-320, 1996.

(۱) مقادیر اولیه متغیرهای x_1 و x_2 برابر صفر در نظر گرفته می شود. با جایگذاری مقادیر اولیه در تابع f ، مقدار اولیه f نیز برابر صفر می شود. با جایگذاری در (پ۵)، $f(x_1^*, x_2^*)$ به صورت تغییرات کلی تابع f ناشی از تغییرات متغیرهای تشکیل دهنده از مقدار اولیه صفر به مقدار نهایی x_1^* و x_2^* تعریف می شود. هدف، تعیین سهم متغیرها در تغییرات کلی تابع f است.

(۲) برای تقریب هر چه بهتر تغییرات f با مدل خطی، بازه تغییرات متغیرها بسیار کوچک و به صورت جزءهای دیفرانسیلی در نظر گرفته شده و در هر یک از بازه تغییرات، سهم متغیرها در تغییرات جزئی f با تقریب خوبی از رابطه خطی فوق به دست می آید. سهم هر متغیر در تغییرات کلی تابع f نیز به صورت مجموع سهم آن متغیر در تغییرات جزئی f در بازه های دیفرانسیلی ناشی از تغییرات جزئی متغیر مورد بررسی، به دست می آید.

(۳) الگوی تغییرات متغیرها برای رسیدن از مقدار اولیه به مقدار نهایی، مسیر انتگرال گیری را مشخص می کند. با توجه به تقسیم بازه تغییرات متغیرها به بازه های بسیار کوچک t ، نحوه تغییر بین دو نقطه متوالی متناظر با بازه های دیفرانسیلی با تقریب خوبی به صورت خطی است. شکل زیر الگوهای ممکن تغییرات متغیرهای x_1 و x_2 را نشان می دهد. مطابق شکل، با فرض نقطه ۱ به عنوان وضعیت فعلی متغیرها، وضعیت های بعدی قابل دستیابی متغیرها نقاط ۲، ۳، ۴ است که به ترتیب از طریق مسیر افقی ۱-۲، مسیر عمودی ۲-۳ و مسیر مورب ۳-۴ حاصل می شود. مسیر افقی ۱-۲ تغییر x_1 با ثابت ماندن x_2 است، مسیر عمودی ۲-۳ تغییر x_2 با ثابت ماندن x_1 است، و مسیر مورب ۳-۴، تغییر همزمان x_1 و x_2 است.



شکل پ۱: نحوه تغییرات متغیرهای x_1 و x_2 از مقدار اولیه $(0,0)$ به مقدار نهایی (x_1^*, x_2^*)

(۴) با انتخاب مسیر مورب یعنی تغییرات همزمان متغیرها برای رسیدن از مقدار اولیه به مقدار نهایی، سهم متغیر x_1 در تغییرات کلی f ناشی از مجموع تغییرات جزئی x_1 برابر خواهد بود با:

- [۲۱] معصومه جوادی، موسی مرزبند، سیدمازیار میرحسینی مقدم، «مدیریت بهینه ریزش‌بکه‌ها به همراه استراتژی قیمت‌گذاری بر پایه روش تئوری بازی با در نظر گرفتن ائتلاف منابع تولید»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۶، شماره ۴، صفحه ۹۵-۱۰۸، ۱۳۹۵.
- [۲۲] فاطمه آذرینژادیان، موسی مرزبند، «مدیریت شیفت تقاضای مقید در برنامه ریزی نواحی انرژی با در نظر گرفتن تشکیل ائتلاف بهینه و تخصیص سود در سیستم‌های همسایه‌ای»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۷، شماره ۲، صفحه ۳۵۵-۳۷۰، ۱۳۹۶.
- [23] M. Roustaei, M. K. Sheikh-El-Eslami and H. Seifi, "Transmission cost allocation based on the users' benefits," *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 61, pp. 547-552, 2014.
- [24] V. N. Bharatwaj, A. R. Abhyankar and P. R. Bijwe, "Flexible mix and match approach for network fixed cost allocation," *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 42, pp. 8-15, 2012.
- [25] J.-H. Teng, "Power flow and loss allocation for deregulated transmission systems," *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 27, pp. 327-333, 2005.
- [26] A. J. Conejo, J. Contreras, D. A. Lima and A. Padilha-Feltrin, "Zbus transmission network cost allocation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 1, pp. 342-349, 2007.
- [27] S. N. Khalid, H. Shareef, M. W. Mustafa, A. Khairuddin and A. M. Oo, "Evaluation of real power and loss contributions for deregulated environment," *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 38, pp. 63-71, 2012.
- [28] J. Nikoukar, M. R. Haghifam and A. Parastar, "Transmission cost allocation based on the modified Z-bus," *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 42, pp. 31-37, 2012.
- [29] S. M. Abdelkader, D. J. Morrow and A. J. Conejo, "Network usage determination using a transformer analogy," *IET Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 8, no. 1, pp. 81-90, 2014.
- [30] Y. P. Molina, O. R. Saavedra and C. Portugal, "Allocation of transmission network cost using modified Zbus matrix," *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 63, pp. 323-330, 2014.
- [31] M. De and S. K. Goswami, "Reactive support allocation using improved Y-bus matrix method," *IET Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 5, no. 4, pp. 448-460, 2011.
- [32] Y. A. Alturki and K. L. Lo, "Real and reactive power loss allocation in pool-based electricity markets," *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 32, pp. 262-270, 2010.
- [33] X. Tan and T. T. Lie, "Application of the Shapley Value on transmission cost allocation in the competitive power market environment," *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 149, no. 1, pp. 15-20, 2002.
- [34] G. C. Stamtsis and I. Erlich, "Use of cooperative game theory in power system fixed-cost allocation," *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 151, no. 3, pp. 401-406, 2004.
- [35] A. J. Wood, B. F. Wollenberg and G. B. Sheble, *Power Generation, Operation, and Control, Third edition*, Wiley Publishing, 2013.
- [36] M. A. Pai, *Computer techniques in power system analysis*, McGraw-Hill, New Delhi, 2006, pp. 228-231.
- [37] R. Zimmermann and D. Gan, *MATPOWER: a MATLAB power system simulation package*, User's Manual Version 4.1, 2011.
- [6] J. W. Bialek and P. A. Kattuman, "Proportional sharing assumption in tracing methodology," *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 151, no. 4, pp. 526-532, 2004.
- [7] C. Achayuthakan, C. J. Dent, J. W. Bialek and W. Ongsakul, "Electricity tracing in systems with and without circulating flows: physical insights and mathematical proofs," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 2, pp. 1078-1087, 2010.
- [8] M. Ghayeni and R. Ghazi, "Transmission network cost allocation with nodal pricing approach based on Ramsey pricing concept," *IET Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 5, no. 3, pp. 384-392, 2011.
- [9] H. A. Gil, F. D. Galiana and E. L. d. Silva, "Nodal price control: a mechanism for transmission network cost allocation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 1, pp. 3-10, 2006.
- [10] A. M. L. d. Silva, J. G. d. C. Costa and L. H. L. Lima, "A new methodology for cost allocation of transmission systems in interconnected energy markets," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 740-748, 2013.
- [11] M. S. S. Rao and S. A. Soman, "Marginal pricing of transmission services using min-max fairness policy," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 2, pp. 573-584, March 2015.
- [12] F. D. Galiana, A. J. Conejo and H. A. Gil, "Transmission network cost allocation based on equivalent bilateral exchanges," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 4, pp. 1425-1431, 2003.
- [13] E. Telles, D. A. Lima, A. Street and J. Contreras, "Min-max long run marginal cost to allocate transmission tariffs for transmission users," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 101, pp. 25-35, 2013.
- [14] Y. Xiao, X. Wang, X. Wang and C. Du, "Transmission cost allocation by power tracing based equivalent bilateral exchanges," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, vol. 2, no. 2, pp. 1-10, 2016.
- [15] M. S. S. Rao, S. A. Soman, P. Chitkara, R. K. Gajbhiye, N. Hemachandra and B. L. Menezes, "Min-max fair power flow tracing for transmission system usage cost allocation: a Large system perspective," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 3, pp. 1457-1468, 2010.
- [16] H. Shareef, S. A. Khalid, M. W. Mustafa and A. Khairuddin, "Preference comparison of AI power tracing techniques for deregulated power markets," *Advances in Artificial Intelligence*, vol. 2012, pp. 1-9, 2012.
- [17] M. H. Sulaiman, M. W. Mustafa, H. Shareef and S. N. A. Khalid, "An application of artificial bee colony algorithm with least squares support vector machine for real and reactive power tracing in deregulated power system," *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 37, pp. 67-77, 2012.
- [18] E. Bjonrdal, G. C. Stamtsis and I. Erlich, "Finding core solutions for power system fixed cost allocation," *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 152, no. 2, pp. 173-179, 2005.
- [19] R. Bhakar, V. S. Sriram, N. P. Padhy and H. O. Gupta, "Probabilistic game approaches for network cost allocation," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 1, pp. 51-58, 2010.
- [20] Y. P. Molina, O. R. Saavedra and H. Amarís, "Transmission network cost allocation based on circuit theory and the aumann-shapley method," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 4, pp. 4568-4577, 2013.

زیر نویس‌ها

⁶ Nearby Effect

⁷ Transmission Cost Allocation

⁸ Absolute Value MW-Mile

⁹ Net Value MW-Mile

¹ Proportional Sharing Principle

² Unitary Participation

³ Zero Counter Flow MW-Mile

⁴ Proportional Sharing Principle

⁵ Current-Current