تعیین سهم نقاط تبادلی در تلفات انتقال شبکه‌ی برق منطقه‌ای باختر

محمد بیات[۱]، علی اصغر قدیمی[۱] و محمد گودرزی[۲]

[۱]دانشگاه اراک، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی برق، m-baiat@araku.ac.ir، a-ghadimi@araku.ac.ir

[۲]شرکت برق منطقه‌ای باختر، معاونت بهره‌برداری، m.goodarzi89@gmail.com

چکیده - توان تولیدی توسط ژنراتورهای سیستم قدرت با توجه به تقاضای مورد نیاز بارها و نیازمندی‌های شبکه در سیستم شارش می‌یابد. خطوط انتقال و تجهیزاتی نظیر ترانسفرمرها بستر این شارش توان را فراهم می‌نمایند که تلفات ناخواسته‌ای را در سیستم قدرت ایجاد می‌کنند. مشخص نمودن سهم هر یک از بارهای سیستم که عامل ایجاد این تلفات هستند را "تخصیص تلفات" می‌نامند. ردیابی شارش توان چگونگی جاری شدن توان در خطوط ارتباطی میان منابع و بارها را مشخص می‌نماید. در نتیجه می‌توان با استفاده از الگوریتم‌های ردیابی شارش توان و روابط تلفات سیستم که از این شارش‌ها ناشی می‌شوند سهم هر یک از بارها در ایجاد این تلفات را مشخص نمود. در این مقاله الگوریتم ردیابی شارش توان استفاده شده به صورت مختلط بوده و توان حقیقی و راکتیو به صورت همزمان مد نظر قرار گرفته‌است. الگوریتم پیشنهادی بر روی یک سیستم نمونه تست شده و پس از صحت سنجی، نتایج شبیه‌سازی شبکه‌ی انتقال واقعی برق منطقه‌ای باختر برای سه حالت کاری بار پیک، میان باری و کم‌باری ارائه شده است و سهم نقاط تبادلی (شبکه‌های مجاور) و بارهای داخلی شبکه‌ی باختر در تلفات سیستم در هر حالت مشخص شده‌است.

کلید واژه- برق منطقه‌ای باختر، تخصیص تلفات، ردیابی شارش توان، نقاط تبادلی.

۱- مقدمه

فرآیند مشخص‌نمودن سهم هر یک از منابع و بارها در تلفات ایجادشده در سیستم قدرت را تخصیص تلفات (Loss Alocation) می‌نامند [۱]. این فرآیند به‌دلیل این‌که شارش توان عبوری مورد تقاضای هر بار از خطوط انتقال سیستم دارای درجه‌ی آزادی زیادی است و این‌که تلفات سیستم انتقال تابعی غیرخطی از شارش خطوط می‌باشد، کار ساده‌ای نیست [۲].

تا کنون چندین روش با رویکردهای متفاوت برای تخصیص تلفات انتقال معرفی شده است [۱]-[۱۵]. در [۱] با استفاده از نتایج شارش توان (Power Flow) و استفاده از ماتریس Z-bus سهم تلفات تخصیص‌داده شده به هر یک از باس‌های سیستم مشخص شده است. این در حالی‌ست که در [۳] از یک Y-bus اصلاح شده برای تعیین ارتباط میان جریان‌های شاخه‌ها و تزریق‌های جریان بار/ژنراتور استفاده می‌شود و بر این اساس تلفات هر خط، بر حسب تزریق‌های جریان، بیان شده است. در [۴] ضرایب توزیع جابجایی تزریق مبتنی بر پخش توان AC، برای محاسبه‌ی ضرایب توزیع تعمیم یافته و ضرایب توزیع جابجایی تعمیم یافته استفاده می‌شود و از طریق آن‌ها سهم هر یک از بازیگران بازار در تلفات انتقال مشخص می‌شود. فرآیند تخصیص تلفات در [۴] با درنظر گرفتن معاملات دو جانبه (Bilateral Transactions) مورد بررسی قرار گرفته است.

روش‌های مبتنی بر محاسبه‌ی ضرایب تلفات انتقال (Transmission Loss Factors :TLFs) در [۵] و [۶] ارائه شده است. در [۵] TLFs به صورت احتمالاتی از منحنی تقاضای بار محاسبه می‌شود و در [۶] ضرایب جریمه‌ی تلفات انتقال، برای مبادله‌ی انرژی با شبکه‌های مجاور، بر اساس روش ژاکوبین و با در نظر گرفتن مسافت الکتریکی بین باس‌های دریافت و ارسال انرژی و مکان‌های بین آن نواحی، محاسبه شده‌اند.

[۷] به مقایسه‌ی میان رایج‌ترین الگوریتم‌های عملی برای تخصیص تلفات پرداخته است. در [۸] مفهوم جدیدی به نام مرکز تلفات معرفی شده است. روش‌های تسهیم تناسبی (Proportional Sharing) در [۹]-[۱۲] به منظور تخصیص تلفات مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این روش‌ها نتایج یک شارش توان همگرا شده به همراه یک فرآیند تسهیم تناسبی خطی مورد استفاده قرار گرفته است تا تلفات انتقال را به بارها و ژنراتورها تخصیص دهد. در [۹]-[۱۱] وارون‌گیری ماتریس‌های تعریف شده در روش، جزئی از فرآیند تخصیص تلفات می‌باشد که با

بزرگ شدن سیستم مورد مطالعه فرآیندی بسیار زمان‌بر خواهد بود. در [۱۱] توان حقیقی و راکتیو به صورت جداگانه مد نظر قرار می‌گیرند و یک ضریب استخراج (Extraction Factor) ثابت در تمام طول خط انتقال در نظر گرفته می‌شود. این فرض بر جداسازی و تفکیک تلفات خط با نسبت مستقیم، بر صرف نظر کردن تأثیرات متقابل توان حقیقی و راکتیو بر روی تلفات حقیقی و راکتیو دلالت دارد. تئوری گراف در [۱۲] به کار گرفته شده است تا ردیابی شارش توان (Power Flow Tracing) را برای سیستم‌های بدون شارش‌های حلقه‌ای انجام دهد. فرآیند ردیابی بر اساس فرضیه‌ی خطوط بدون تلفات استوار است که طبق آن، با تلفات توان خط همانند یک تقاضا در هر دو پایانه (انتهای) خط، رفتار می‌شود. در [۱۳]، روشی برای تفکیک و جداسازی تلفات حقیقی و راکتیو انتقال معرفی شده است و در [۱۴] روش ارائه شده می‌تواند به صورت مستقل هم برای ردیابی توان حقیقی و هم توان راکتیو به کار گرفته شود.

از آن‌جا که توان‌های مورد تقاضای بارها چگونگی شارش توان در شبکه‌ی قدرت و در نتیجه میزان تلفات سیستم را مشخص می‌نمایند، در بسیاری از مطالعات، تلفات را صرفاً به بارهای سیستم تخصیص می‌دهند. به طور خلاصه در تحقیقات اخیر، تخصیص تلفات انتقال همراه با فرآیند ردیابی شارش توان همراه است. در این مقاله با استفاده از ایده‌ی مطرح شده در [۱۵] از ردیابی مختلط که توان حقیقی و راکتیو را به صورت همزمان در نظر گرفته است، استفاده شده است. بدین‌ترتیب اثرات متقابل شارش توان‌های حقیقی و راکتیو بر روی یکدیگر لحاظ شده و نتایج حاصل به واقعیت نزدیکتر خواهد بود. لازم به ذکر است که روش ارائه شده نیازی به هیچ‌گونه فرآیند وارون‌سازی ماتریس ندارد و در نتیجه محاسبات پیچیده‌ای نخواهد داشت.

در ادامه در بخش دوم اصول ردیابی شارش توان پیشنهادی تشریح شده است. الگوریتم تخصیص تلفات در بخش سوم به‌صورت گام به گام و مدون در بخش سوم بیان شده است. در بخش چهارم شبکه‌ی انتقال برق منطقه‌ای باختر تشریح شده و نتایج حاصل از تخصیص تلفات در این شبکه ارائه شده است و در نهایت در بخش پنجم جمع‌بندی و نتیجه‌گیری این مقاله بیان شده است.

۲- اصول ردیابی شارش توان

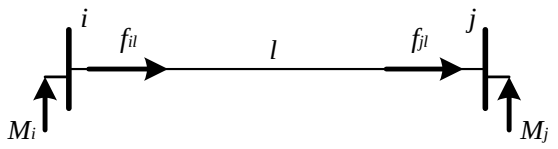
الگوریتم ردیابی معرفی شده در این مقاله از نتایج شارش توان و اصل تسهیم تناسبی استفاده می کند تا سهم هر بار از توان مختلط شارش‌یافته بین دو باس سیستم را مشخص کند. ترانسفرمرهای سیستم قدرت و خطوط انتقال بستر این شارش توان را فراهم می‌نمایند. در این کار امپدانس ترانسفرمرها به‌صورت سری با خطوط در نظر گرفته شده‌است. لازم به ذکر است که صرفاً توان خروجی و ورودی به هر باس در فرآیند ارائه شده مهم است و فرض فوق، صرفاً برای تشریح ساده‌تر مسأله درنظر گرفته شده است. پس از فرایند ردیابی شارش توان، سهم هر یک از بارهای سیستم در تلفات تحمیل‌شده به آن خط مشخص می‌شود. یکی از چالش‌های این فرآیند، تخصیص تلفات در خطوطی است که دارای بارگذاری سنگین و یا سبک باشند. چرا که در این حالت خط به صورت منبع یا مصرف‌کننده‌ی توان راکتیو رفتار می‌کند. برای نشان دادن این مطلب علاوه بر بارگذاری نرمال شبکه، بارگذاری سنگین و سبک شبکه‌ی برق منطقه‌ای باختر در نظر گرفته شده است.

۲-۱- نمایش خط انتقال در الگوریتم پیشنهادی

هر خط انتقال می تواند توسط مدار معادل π، نمایش داده شود. برای خطوطی با طول متوسط، ادمیتانس موازی در هر پایانه، برابر با نصف ادمیتانس کل موازی خط می باشد و برای خطوط طولانی، پارامترهای شبکه‌ی معادل از مدار تعمیم یافته‌ی خط قابل محاسبه‌اند. عناصر موازی مدار معادل خط، از جنس راکتیو بوده و به صورت تزریق‌های راکتیو توان در گره‌های انتهایی آن در نظر گرفته شده‌اند. بدین ترتیب هر خط انتقال با توان‌های مختلط سری ارسالی و دریافتی در ابتدا و انتهای آن مشخص می‌شود. الگوریتم ردیابی پیشنهادی، از این توان‌ها برای محاسبه‌ی ضرایب استخراج هر باس (گره) از هر خط استفاده می‌نماید.

۲-۲- ضرایب استخراج یک خط انتقال

در این مقاله، خط انتقال با دو مجموعه از ضرایب استخراج نمایش داده شده است که یکی از آن ها، در پایانه‌ی ارسال و دیگری در پایانه‌ی دریافت خط تعریف می‌شود. هر مجموعه حاوی دو ضریب استخراج، یکی برای توان حقیقی و دیگری برای توان راکتیو است. ضرایب پایانه‌ی ارسال مثبت و ضرایب پایانه‌ی دریافت منفی می‌باشند. علامت های متفاوت برای ضرایب استخراج نمایانگر جهت‌های شارش توان حقیقی/راکتیو خواهند بود. در شکل ۱ یک خط نشان داده شده است. از آن‌جاکه ضرایب استخراج برای توان حقیقی و راکتیو به طریقی مشابه تعریف



شکل ۱: مدل خط انتقال [۱۵]

می‌شود؛ f_{il} نشان‌دهنده‌ی توان شارش‌یافته (هم حقیقی و هم راکتیو) از طریق خط l است که از گره i خارج می‌شود. اگر تزریق شبکه در گره i را با M_i و توان کل عبوری از گره i را با F_i نشان دهیم، آن‌گاه [۱۵]:

$$M_i = \sum_{l \in \varphi_i} f_{il} \qquad (۱)$$

$$F_i = \begin{cases} \sum_{l \in \varphi_{pi}} f_{il}, & M_i \geq 0 \\ \sum_{l \in \varphi_{ni}} -f_{il}, & M_i < 0 \end{cases} \qquad (۲)$$

که φ_i مجموعه خطوطی هستند که با گره i تلاقی دارند؛ φ_{pi} مجموعه خطوطی هستند که توان خروجی از گره i در آن‌ها شارش می‌یابد؛ و φ_{ni} مجموعه خطوطی هستند که توان ورودی به گره i در آن‌ها شارش می‌یابد.

بدین ترتیب ضریب استخراج در پایانه‌ی ارسال به‌صورت (۳) تعریف می‌شود که بیانگر بخشی از توان عبوری از گره i است که توسط خط l حمل می‌شود [۱۵].

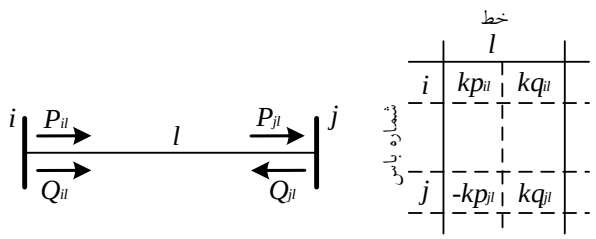
$$kf_{il} = \frac{f_{il}}{F_i} \qquad (۳)$$

در پایانه‌ی دریافت، ضریب استخراج بیانگر بخشی از بار در گره j است که توسط خط l تأمین شده است. این ضریب به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$kf_{jl} = \begin{cases} \frac{M_j}{F_j}, & M_j < 0 \\ -\alpha, & M_j \geq 0 \end{cases} \qquad (۴)$$

اگر گره j یک گره باری نباشد، $M_j \geq 0$، آن‌گاه هیچ توانی از هیچ خطی در این گره استخراج نمی‌شود. بنابراین ضرایب استخراج پایانه‌ی دریافت تمام خطوطی که شارش توانی را به این گره حمل می‌کنند، صفر خواهد بود. با این وجود، این مقدار در یک عدد منفی کوچک، $-\alpha$، تنظیم شده است، تا الگوریتم ردیابی شارش توان با مشکل مواجه نشود [۱۵].

ضرایب استخراج تعریف‌شده در بالا به مقدار توان‌های شارش‌یافته در ابتدا و انتهای خطوط بستگی دارد. برای سادگی در محاسبات و روند الگوریتم ردیابی، ماتریس‌های شارش خط برای توان حقیقی، **FP**، و راکتیو، **FQ**، که هر یک دارای N_b سطر



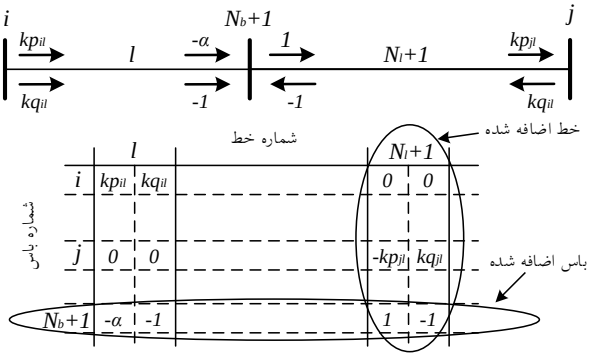
شکل ۲: خط انتقال با بارگذاری سنگین -که از دو انتها توان راکتیو جذب می‌کند- و ستون مربوط به آن در ماتریس ضرایب استخراج [۱۵]

و N_l ستون می‌باشند، تعریف می‌شود. علامت درایه‌ها با توجه به جهت توان شارش‌یافته مشخص می‌شود و برای شارش‌های خروجی از هر باس، مثبت و برای شارش‌های ورودی به باس، منفی می‌باشد.

۲-۳- ماتریس‌های ضرایب استخراج

با استفاده از ماتریس‌های **FP** و **FQ** و روابط (۱)-(۴)، دو ماتریس **KP** و **KQ** که اولی برای توان حقیقی و دومی برای توان راکتیو می‌باشند را تشکیل می‌دهیم. در ابتدای مرحله‌ی ردیابی، هر ستون تنها دو درایه‌ی غیر صفر دارد؛ یک درایه‌ی مثبت، که ضریب استخراج را در پایانه‌ی ارسال خط نشان می‌دهد و یک درایه‌ی منفی که بیان‌کننده‌ی ضریب استخراج درپایانه‌ی دریافت است.

در برخی موارد، برخی ستون‌های **FQ**، می‌توانند حاوی دو درایه‌ی مثبت و یا دو درایه‌ی منفی باشند. حالت اول وقتی رخ می‌دهد که یک خط بارگذاری سنگینی دارد و در هر دو پایانه‌ی خود توان راکتیو جذب می‌کند. این موضوع در شکل ۲ نشان داده شده‌است. توان راکتیو جذب شده توسط خط، مصرف می‌شود تا توان حقیقی مورد نیاز را انتقال دهد. بنابراین، باید به بارهایی تخصیص داده شود که سبب پخش توان حقیقی از طریق خط می‌شوند. در حالت دوم، بار کمی از خط انتقال عبور داده شده‌است و به علت افزایش اثر خازنی خط در این حالت، خط انتقال همچون یک منبع توان راکتیو عمل می‌کند و به هر دو پایانه‌ی خود توان راکتیو تزریق می‌نماید. در این مقاله، یک گره اضافی در امتداد خطی که داری توان راکتیو ورودی/خروجی در هر دو پایانه‌اش است، اضافه می‌شود. این گره اضافه شده، یک گره جاذب/تولیدکننده راکتیو با تقاضای توان حقیقی صفر است و در نتیجه‌ی با اضافه کردن این گره، این خط به دو خط تقسیم می‌شود. در نتیجه به ازای هر خطی از هر یک از این دو حالت، یک سطر و یک ستون به ابعاد **KP** و **KQ** اضافه می‌شود. شکل ۳ معادل خط شکل ۲ و نیز تغییرات انجام شده در **KP** و **KQ** را



شکل ۳: مدار معادل و ماتریس‌های ضرایب استخراج اصلاح شده‌ی خط انتقال شکل ۲

نشـان می‌دهد. با این اصلاح، الگوریتم ردیابی بدون هیچ مشکلی به کار خود ادامه می‌دهد، زیرا هر خط سیستم اصلاح شده دارای دو پایانه اسـت: یکی که شارش ورودی به خط را حمل می‌کند و دیگری که شـارش خروجی از آن را دریافت می‌کند. لازم به ذکر اسـت از آن جا که چنین اصـلاحاتی در **KP** و **KQ** اتفاق افتاده اسـت، بنابراین نیازی نیسـت که مکان دقیق باس اضافه شده که جاذب/تولیدکننده‌ی توان راکتیو می‌باشد را تعیین کنیم.

در انتهـای مرحلـه‌ی ردیـابی پخش توان، بـاس‌هـا و خطوط اضـافه‌شـده به سطرها و ستون‌های **KP** و **KQ** باید حذف شوند. حذف سـطرها و سـتون‌های اضـافه از **KP** تنها با حذف آن‌ها و بدون تأثیر گذاشـتن بر درایه‌های باقیمانده از **KP** انجام می‌شود. حال آن‌که حذف خط اضافه‌ی r و گره اضافه‌ی n، درایه‌های **KQ** را طبق معادله‌ی زیر تغییر می‌دهد [۱۵]:

$$kq_{il} = kq_{il} - kq_{ir} \cdot kq_{nl}, \qquad i = 1:N_b; l = 1:N_l \tag{۵}$$

۲-۴- تفکیک و جداسازی تلفات خط انتقال

فرض کنید که بار مجزای n در انتهای خط l تغذیه می‌شـود کـه توان حقیقی $P_{jl,n}$ و توان راکتیو $Q_{jl,n}$ را در بـاس j دریافت می‌نماید. همچنین توان کل شارش‌یافته از این خط در انتهای آن برابر باشـد با $S_{jl} = P_{jl} + jQ_{jl}$. به سادگی می‌توان اثبات کرد که تلفات توان حقیقی و راکتیوی که توسـط بار فوق در خط l ایجاد شده است، یعنی $P_{l,n}^{loss}$ و $Q_{l,n}^{loss}$، به ترتیب توسط روابط (۶) و (۷) محاسبه می‌شوند [۱۳]:

$$P_{l,n}^{loss} = \frac{P_{jl} \cdot P_{jl,n} + Q_{jl} \cdot Q_{jl,n}}{\left|S_{jl}\right|^2} P_l^{loss} \tag{۶}$$

$$Q_{l,n}^{loss} = \frac{P_{jl} \cdot P_{jl,n} + Q_{jl} \cdot Q_{jl,n}}{\left|S_{jl}\right|^2} Q_l^{loss} \tag{۷}$$

کـه P_l^{loss} و Q_l^{loss} بـه ترتیـب کـل تلفات حقیقی و راکتیو خط l می‌باشند. در روابط فوق اثر متقابل توان حقیقی و راکتیو بر تلفات توان حقیقی و راکتیو در نظر گرفته شده است.

توان حقیقی و راکتیو تقاضاشده توسط بار n در سمت ارسال خط l، یعنی $P_{il,n}$ و $Q_{il,n}$، می‌تواند به‌ترتیب با اضافه‌کردن تلفات حقیقی و راکتیو (۶) و (۷) بـه $P_{jl,n}$ و $Q_{jl,n}$ بـه‌دسـت آینـد. به‌سـادگی و با اندکی محاسـبات می‌توان به رابطه‌ی (۸) دسـت یافت.

$$\begin{bmatrix} kp_{il,n} \\ kq_{il,n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{l,pp} & T_{l,pq} \\ T_{l,qp} & T_{l,qq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} kp_{jl,n} \\ kq_{jl,n} \end{bmatrix} \tag{۸}$$

که ماتریس انتقال T_l که در (۸) تعریف شـده‌اسـت به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$T_l = \begin{bmatrix} n_{l,p} + \left(1 - n_{l,p}\right) \cdot \cos^2\left(\phi_l\right) & \left(1 - n_{l,p}\right) \cdot \sin^2\left(\phi_l\right) \\ \left(1 - n_{l,q}\right) \cdot \cos^2\left(\phi_l\right) & n_{l,q} + \left(1 - n_{l,q}\right) \cdot \sin^2\left(\phi_l\right) \end{bmatrix} \tag{۹}$$

کـه $n_{l,p} = P_{jl}/P_{il}$ بـازده خـط، $n_{l,q} = Q_{jl}/Q_{il}$، $\cos(\phi_l) = P_{jl}/\left|S_{jl}\right|$ ضـریـب تـوان در انـتـهـای خـط و $\sin(\phi_l) = Q_{jl}/\left|S_{jl}\right|$ می‌باشد.

در نهایت با استفاده از روابط (۶)-(۹) به سادگی سهم تلفات تحمیل‌شـده به خط l توسط بار n براساس ضرایب استخراج ابتدا و انتهای خط به صورت زیر بیان می‌شود.

$$\begin{aligned} P_{l,n}^{loss} &= kp_{jl,n} \cdot P_{jl} + kp_{il,n} \cdot P_{il} \\ Q_{l,n}^{loss} &= kq_{jl,n} \cdot Q_{jl} + kq_{il,n} \cdot Q_{il} \end{aligned} \tag{۱۰}$$

۳- الگوریتم پیشنهادی ردیابی شارش توان و تخصیص تلفات

هدف اصـلی فرآیند ردیابی شارش توان پیشنهادی این است که سهم هر یک از بارهای سیستم در توان‌های شارش‌یافته از هر خط و در نتیجه تلفات ایجاد شـده توسط هر بار از طریق هر خط را تعیین کنیم. این فرآیند از ضرایب استخراج در پایانه‌ی دریافت یک خط داده شـده‌ی l استفاده می‌کند که سهم بارهای مجزا که از طریق این خط تأمین شـده‌اند را مشـخص می‌کنند. سـپس با اسـتفاده از (۸) ضـرایب اسـتخراج آن بارها در سمت ارسال خط محاسـبه می‌شـوند. سـپس این ضرایب برای محاسبه‌ی سهم هر یک از بارها از توان‌ها جزئی جاری‌شده در خطوط بالادست خط l مورد استفاده قرار می‌گیرند. الگوریتم فرآیند ردیابی پیشنهادی و گام‌های محاسباتی آن به‌صورت زیر خلاصه می‌گردد [۱۵]:

۱) با استفاده از داده‌های شارش توان، ماتریس‌های شارش خطوط **FP** و **FQ** را تشکیل دهید.

۲) برای هر یک از خطوط، ماتریس انتقال T پایانه‌ی انتها به ابتدا را مطابق (۹) تعیین کنید.

۳) با استفاده از **FP** و **FQ** ماتریس‌های استخراج **KP** و **KQ** را با استفاده از (۱) تا (۴) تشکیل دهید.

۴) تا زمانی که هنوز درایه‌های مثبت در **KP** و **KQ** وجود دارد، گامهای زیر را انجام دهید:

- یک خط انتهایی را درنظر بگیرید، یک ستون که جمع درایه‌های منفی آن ۱- شود. فرض‌کنید ستون lام باشد.

- سمت ارسال خط l را پیدا کنید. یعنی سطری که درایه‌ی مربوط به ستون lام آن مثبت است. فرض‌کنید که باس (گره) i باشد.

- برای هر درایه‌ی منفی در سطر iام، kp_{im}، که معرف یک خط m است که از لحاظ جهت شارش توان در بالادست خط l قرار دارد، برای هر یک از درایه‌های منفی در ستون lام، kp_{jl}،که نشان‌دهنده‌ی یک بار در گره j است که موجب شارش‌های جزئی در خط l شده است، ضرایب استخراج توان حقیقی و راکتیو را از خط m محاسبه نمایید. این ضرایب به‌صورت زیر تعیین می‌شوند:

$$\begin{aligned} kp_{jm} &= kp_{jm} + kp_{il} \cdot \left(T_{l,pp} \cdot kp_{jl} + T_{l,pq} \cdot kq_{jl}\right) \\ kq_{jm} &= kq_{jm} + kq_{il} \cdot \left(T_{l,qp} \cdot kp_{jl} + T_{l,qq} \cdot kq_{jl}\right) \end{aligned} \qquad (۱۱)$$

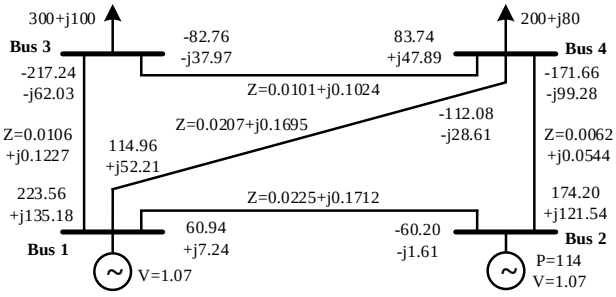
زمانی که تمام عناصر منفی در ستون l استفاده شدند، مقادیر kp_{il} و kq_{il} را صفر قرار دهید.

۵) این فرآیند زمانی پایان می‌پذیرد که تمام درایه‌های مثبت **KP** و **KQ** صفر شوند. در این مرحله مجموع هر ستون **KP** و **KQ** برابر ۱- خواهد شد.

۳-۱- مثال عددی ساده

برای این که نشان دهیم فرآیند ردیابی پیشنهادی چگونه کار می‌کند، یک سیستم ساده‌ی چهارباسه را که دیاگرام تک‌خطی آن در شکل ۴ نشان داده شده‌است را درنظر بگیرید. اطلاعات خطوط و باس‌ها و توان‌های شارش‌یافته در خطوط در شکل مشخص شده‌است. ولتاژها و امپدانس‌ها بر حسب پریونیت و توان‌های حقیقی و راکتیو به ترتیب برحسب MW و MVAR می‌باشند.

ماتریس‌های **FP** و **FQ** و بردارهای M_i و F_i برای توان‌های حقیقی و راکتیو به‌صورت زیر خواهد بود (گام ۱).



شکل ۴: سیستم نمونه‌ی چهار باسه

شماره باس	ماتریس **FP**					Mi حقیقی	Fi حقیقی
	خط ارتباطی بین باس‌ها						
	1-2	1-3	1-4	2-4	3-4		
1	۶۰/۹۴	۲۲۳/۵۶	۱۱۴/۹۶	۰/۰	۰/۰	۳۹۹/۴۶	۳۹۹/۴۶
2	-۶۰/۲۰	۰/۰	۰/۰	۱۷۴/۲۰	۰/۰	۱۱۴/۰۰	۱۷۴/۲۰
3	۰/۰	-۲۱۷/۲۴	۰/۰	۰/۰	-۸۲/۷۶	-۳۰۰/۰۰	۳۰۰/۰۰
4	۰/۰	۰/۰	-۱۱۲/۰۸	-۱۷۱/۶۶	۸۳/۷۴	-۲۰۰/۰۰	۲۸۳/۷۴
	ماتریس **FQ**					M_i راکتیو	F_i راکتیو
1	۷/۲۴	۱۳۵/۱۸	۵۲/۲۱	۰/۰	۰/۰	۱۹۴/۶۳	۱۹۴/۶۳
2	-۱/۶۱	۰/۰	۰/۰	۱۲۱/۵۴	۰/۰	۱۱۹/۹۳	۱۲۱/۵۴
3	۰/۰	-۶۲/۰۳	۰/۰	۰/۰	-۳۷/۹۷	-۱۰۰/۰۰	۱۰۰/۰۰
4	۰/۰	۰/۰	-۲۸/۶۱	-۹۹/۲۸	۴۷/۸۹	-۸۰/۰۰	۱۲۷/۸۹

ماتریس‌های انتقال خطوط سیستم با استفاده از (۹) محاسبه می‌شوند. به‌عنوان نمونه ماتریس‌های مربوط به خطوط بین باس‌های 1-2، 2-4 و 3-4 ارائه شده‌اند (گام ۲).

T_{12}=	۱/۰	۰/۰	T_{24}=	۰/۹۹۶۳	۰/۰۰۳۷	T_{34}=	۰/۹۹۸۰	۰/۰۰۲۰
	۰/۷۷۷۱	۰/۲۲۲۹		۰/۱۳۷۲	۰/۸۶۲۸		۰/۱۷۱۱	۰/۸۲۸۹

با استفاده از (۱)-(۴) ماتریس‌های ضرایب استخراج به‌صورت زیر خواهد شد (گام ۳).

شماره باس	ماتریس **KP**					ماتریس **KQ**				
	خط ارتباطی بین باس‌ها					خط ارتباطی بین باس‌ها				
	1-2	1-3	1-4	2-4	3-4	1-2	1-3	1-4	2-4	3-4
1	۰/۱۵	۰/۵۶	۰/۲۹	۰	۰	۰/۰۴	۰/۶۹	۰/۲۷	۰	۰
2	-α	۰	۰	۱	۰	-α	۰	۰	۱	۰
3	۰	-۱	۰	۰	-۱	۰	-۱	۰	۰	-۱
4	۰	۰	-۰/۷	-۰/۷	۰/۳	۰	۰	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۳۷

حال مطابق گام ۴ فرآیند ردیابی با خطوط انتهایی که مجموع درایه‌های منفی ستون مربوطه برابر با ۱- است، شروع می‌شود. ستون ۲ و ۵، یعنی خط‌های 1-3 و 3-4 این شرایط را دارند. برای خط دوم، باس ارسالی Bus 1 است که هیچ المان منفی‌ای در سطر اول وجود ندارد، که به این معنی است که توان شارش‌یافته از این خط از خط دیگری نشأت نگرفته و به‌صورت

مستقیم از یک گره منبع ایجاد شده‌است. بنابراین درایه‌های مثبت kp_{12} و kq_{12} را صفر قرار می‌دهیم. برای خط پنجم، l=5، باس ارسالی Bus 4 است، i=4، که دو المان منفی در ستون ۳ و ۴ وجود دارد، m=3,4. درایه‌ی منفی در ستون ۵، k_{P35} است، یعنی j=3 با به‌کارگیری (۱۱) برای **KP**،

$$kp_{33} = kp_{33} + kp_{45} \cdot \left(T_{5,pp} \cdot kp_{35} + T_{5,pq} \cdot kq_{35}\right)$$
$$= 0 + 0.3\left(0.998 \times -1 + 0.002 \times -1\right) = -0.3$$

با به‌کارگیری (۱۱) برای **KQ**،

$$kq_{33} = 0 + 0.37\left(0.1711 \times -1 + 0.8289 \times -1\right) = -0.37$$

و به‌طریق مشابه درایه‌های kp_{34} و kq_{34} محاسبه می‌شوند. پس از این اصلاحات ماتریس‌های **KP** و **KQ** به‌صورت زیر می‌شوند.

شماره باس	ماتریس **KP**					ماتریس **KQ**				
	خط ارتباطی بین باس‌ها					خط ارتباطی بین باس‌ها				
	1-2	1-3	1-4	2-4	3-4	1-2	1-3	1-4	2-4	3-4
1	۰/۱۵	۰/۰	۰/۲۹	۰	۰	۰/۰۴	۰/۰	۰/۲۷	۰	۰
2	-α	۰	۰	۱	۰	-α	۰	۰	۱	۰
3	۰	−۱	−۰/۳	−۰/۳	−۱	۰	−۱	۰/۳۷	۰/۳۷	−۱
4	۰	۰	−۰/۷	−۰/۷	۰/۰	۰	۰	۰/۶۳	۰/۶۳	۰/۰

حال خطوط ۳ و ۴ خط انتهایی می‌شوند. مشابه الگوریتم پیشنهادی و محاسبات مرحله‌ی قبل، تغییرات لازم را انجام خواهیم داد. در پایان این مرحله فقط خط ۱ باقی می‌ماند که دارای درایه‌ی مثبت خواهد بود. در مرحله‌ی آخر این خط، خط انتهایی می‌شود و گام ۴ الگوریتم را مشابه قبل برای آن انجام می‌دهیم. در پایان این مرحله، تمام درایه‌های مثبت **KP** و **KQ** از بین رفته‌اند و ماتریس‌های **KP** و **KQ** به صورت زیر خواهد شد.

شماره باس	ماتریس **KP**					ماتریس **KQ**				
	خط ارتباطی بین باس‌ها					خط ارتباطی بین باس‌ها				
	1-2	1-3	1-4	2-4	3-4	1-2	1-3	1-4	2-4	3-4
1	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰	۰	۰/۰	۰/۰	۰/۰	۰	۰
2	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰
3	۰/۳۰۱	−۱	−۰/۳	−۰/۳	−۱	۰/۳۶۰	−۱	−۰/۳۷	−۰/۳۷	−۱
4	۰/۶۹۹	۰	−۰/۷	−۰/۷	۰	۰/۶۴۰	۰	−۰/۶۳	−۰/۶۳	۰

حال ضرایب استخراج بارها در سمت ارسال هر یک از ۵ خط با استفاده از (۸) محاسبه می‌شوند و در نهایت با استفاده از (۱۰) سهم هر یک از بارها در تلفات ایجادشده در هر یک از خطوط و

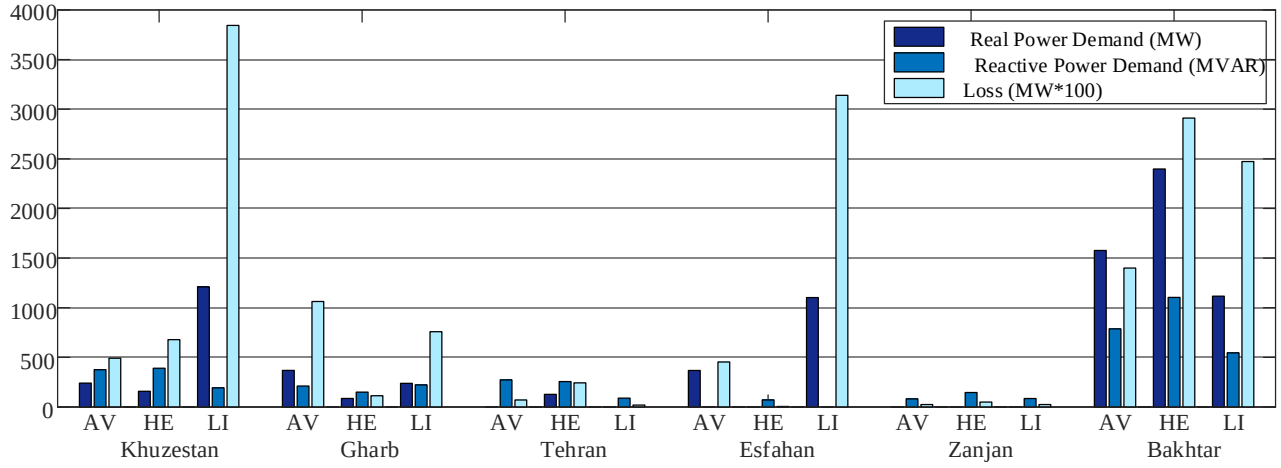
جدول ۱: شارش‌ها و تلفات حقیقی ایجاد شده توسط بارهای سیستم

خط	1-2	1-3	1-4	2-4	4-3	
باس	شارش‌های توان حقیقی در سمت دریافت (MW)					
3	۱۷/۷۸	۲۱۷/۲۴	۳۳/۰۸	۵۰/۶۶	۸۲/۷۶	
4	۴۲/۴۲	–	۷۹/۰۰	۱۲۱/۰۰	–	
	شارش‌های توان حقیقی در سمت ارسال (MW)					
3	۱۸/۰۰	۲۲۳/۵۶	۳۳/۹۴	۵۱/۴۶	۸۳/۷۴	
4	۴۲/۹۴	–	۸۱/۰۲	۱۲۲/۷۴	–	
	تلفات توان حقیقی (MW)					مجموع
3	۰/۲۲	۶/۳۲	۰/۸۶	۰/۸۰	۰/۹۸	۹/۱۸
4	۰/۵۲	–	۲/۰۲	۱/۷۴	–	۴/۲۸

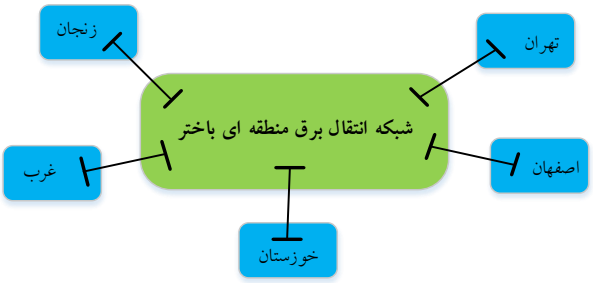
در نتیجه کل تلفات سیستم به‌صورت جدول (۱) به‌دست می‌آید. شارش‌های توان راکتیو و تلفات آن به‌طریق مشابه قابل محاسبه‌اند. بر اساس این جدول از کل تلفات MW ۱۳/۴۶ که در سیستم ایجاد شده‌است، MW ۹/۱۸ آن سهم بار قرارگرفته در باس ۳ و MW ۴/۲۸ مابقی مربوط به بار قرار گرفته در باس ۴ است. مجموع تلفات تخصیص داده‌شده به هر یک از بارها با کل تلفات سیستم دقیقاً برابر است.

۴- تخصیص تلفات شبکه‌ی انتقال برق منطقه‌ای باختر

شرکت برق منطقه ای باختر با بیش از km ۱۰۰۰۰ خط انتقال و فوق توزیع وظیفه‌ی برق‌رسانی در محدوده‌ی سه استان مرکزی، لرستان و همدان با وسعت km^2 ۷۶۷۸۹ را بر عهده دارد. این شرکت با توجه به موقعیت قرارگیری خاص در تبادل انرژی شمال-جنوب شبکه‌ی سراسری، از طریق ارتباط با پنج شرکت برق منطقه‌ای تهران، خوزستان، غرب، اصفهان و زنجان بیشترین حجم تبادل انرژی را به خود اختصاص داده‌است. این شبکه دارای ۳۵ مشترک اختصاصی در لایه‌ی فوق توزیع و ۳ مشترک بزرگ در لایه‌ی انتقال، ایرالکو، فولاد ویان و فروآلیاژ ازنا می‌باشد. اثرات این بارها در شارش‌های توان شبکه و در نتیجه تلفات تحمیل‌شده به شبکه‌ی برق باختر، اهمیت بررسی این تلفات و تعیین سهم هر یک از شرکت‌کنندگان در این تبادلات (شامل بارهای درون شبکه و تبادلات با شرکت‌های مجاور) را بیش از پیش نموده است. شکل ۵ شمای کلی شبکه‌ی انتقال برق باختر و ارتباطات آن با شبکه‌های مجاور را نشان می‌دهد. در این بخش نتایج پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی و تخصیص تلفات بارهای شبکه‌ی انتقال برق باختر و تبادلات با شبکه‌های مجاور تشریح می‌شود. اطلاعات شبکه‌ی برق منطقه‌ای باختر تا سطح فوق توزیع در محیط نرم‌افزار Digsilent موجود می‌باشد. در این کار، ابتدا با استفاده از قابلیت برنامه‌نویسی این نرم‌افزار (DPL) باس‌های



شکل ۶ : توان‌های حقیقی و راکتیو مورد تقاضای هر یک از شرکت‌های برق منطقه‌ای مجاور و شبکه باختر و سهم هر یک از آن‌ها در تلفات ایجاد شده در شبکه‌ی انتقال باختر (AV: بار متوسط، HE: بار پیک و LI: کم‌باری)



شکل ۵ : شمای کلی شبکه‌ی انتقال برق باختر و ارتباطات آن با شبکه‌های مجاور

انتقال (که دارای سطوح ولتاژی KV ۴۰۰ و KV ۲۳۰ می‌باشند)، خطوط ارتباطی و ترانسفرمرهای KV ۴۰۰/ KV ۲۳۰ مشخص و شارش‌های توان در آن‌ها در قالب یک فایل Excele تهیه می‌شود. بر این اساس تعداد ۶۱ باس، ۸۰ خط و ۱۱ ترانسفرمر KV ۴۰۰/ KV ۲۳۰ در این شبیه‌سازی در نظر گرفته شده‌است. سپس با توجه به قابلیت بالای محاسباتی نرم‌افزار MATLAB با استفاده از داده‌های شارش توان در شبکه، الگوریتم ردیابی شارش توان و تخصیص تلفات در این نرم‌افزار کدنویسی و گزارش شده است.

به منظور بررسی دقیق شبکه و نشان‌دادن حالت‌های خاص تشریح‌شده در بخش ۲-۳ (حالتی که برخی از خطوط شبکه از دو سو توان راکتیو جذب می‌کنند، یعنی بارگذاری سنگین، و حالتی که برخی خطوط به دو پایانه‌اشان توان راکتیو تزریق می‌کنند، یعنی بارگذاری سبک) تخصیص تلفات برای سه نقطه‌ی کاری بار متوسط، بار پیک و کم‌باری انجام شده‌است. لازم به ذکر است که نام‌گذاری این نقاط کاری از منظر تقاضاهای داخلی مصرف‌کنندگان داخلی شبکه‌ی باختر صورت پذیرفته است.

جدول ۲: میزان تقاضاهای حقیقی و راکتیو خالص داخلی باختر و تبادل از طریق باختر در سه حالت کاری مختلف

شرایط	تقاضای خالص باختر		مجموع تقاضای تبادل	
	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)
متوسط	۱۵۷۶/۹۷	۷۸۷/۱۲	۹۷۸/۶۶	۹۴۲/۳۳
پیک	۲۳۹۸/۰۷	۱۱۰۴/۵۵	۳۷۳/۸۴	۱۰۱۵/۵۱
کم‌باری	۱۱۱۶/۵۲	۵۴۵/۷۸	۲۵۵۱/۸۰	۵۹۰/۶۷

تلفات واقعی سیستم در سه حالت کاری فوق به ترتیب برابر MW ۳۳/۷۴، MW ۳۹/۸۱ و MW ۱۰۲/۰۴ می‌باشد که مجموع تلفات تخصیص‌داده شده با استفاده از الگوریتم پیشنهادی به‌ترتیب برابر MW ۳۵/۰۶، MW ۴۰/۰۴ و MW ۱۰۲/۶۱ می‌باشد و خطایی کمتر از ۴٪ در بدترین حالت را دارد.

شکل ۶ نتایج حاصل از تخصیص تلفات انتقال شبکه‌ی برق باختر را نشان می‌دهد. در این شکل توان‌های حقیقی و راکتیو مورد تقاضا و سهم تلفات هر یک از برق منطقه‌ای‌های مجاور و تقاضاهای داخلی و سهم تلفات باختر در سه حالت کاری مشخص شده است. به عنوان نمونه در برق منطقه‌ای خوزستان علی‌رغم کاهش تقاضای حقیقی در حالت بار پیک نسبت به بار متوسط و تقریباً ثابت بودن تقاضای راکتیو، سهم تلفات افزایش یافته است. در حالت کم‌باری شبکه‌ی باختر (که بار مورد تقاضای حقیقی خوزستان افزایش چشم‌گیری داشته است) سهم تلفات خوزستان بسیار افزایش داشته است و بیشترین سهم را به‌خود اختصاص داده است.

در جدول ۲ مجموع تقاضاهای حقیقی و راکتیو داخلی باختر و مجموع تقاضای تبادل پنج برق منطقه‌ای مجاور ارائه شده

جدول ۳: سهم تقاضای داخلی باختر و تبادل در تلفات انتقال و درصد آن‌ها نسبت به تلفات کل در آن حالت بهره‌برداری

شرایط	تلفات باختر		تلفات تبادل		مجموع
	P_{loss} (MW)	P_{loss} (%)	P_{loss} (MW)	P_{loss} (%)	P_{loss} (MW)
متوسط	۱۴/۰۰	۳۹/۹۴	۲۱/۰۶	۶۰/۰۶	۳۵/۰۶
پیک	۲۹/۱۱	۷۲/۷۱	۱۰/۹۲	۲۷/۲۹	۴۰/۰۴
کم‌باری	۲۴/۷۳	۲۴/۱۱	۷۷/۸۷	۷۵/۸۹	۱۰۲/۶۱

است. همانگونه که پیشتر اشاره شد تقاضاهای داخلی باختر در حالت بار متوسط از شرایط بار پیک کمتر و از شرایط بار سبک بیشتر است. در جدول ۳ نیز سهم برق منطقه‌ای باختر و نقاط تبادلی از تلفات ایجادشده در هر حالت کاری مشخص شده است.

بر اساس شکل ۶ و جداول ۲ و ۳ واضح است که علی‌رغم تصور عامیانه که در حالت کم‌باری تلفات نیز به نسبت بار متوسط و بار پیک کاهش می‌یابد، در حالت کم‌باری شبکه‌ی باختر (که تقریباً مقارن با فصل زمستان است)، صرفاً تقاضای داخلی باختر کاهش یافته است و حال آن‌که تقاضای تبادل به‌صورت چشم‌گیری افزایش یافته است. همین تقاضای تبادل بسیار زیاد در حالت کم‌باری موجب شده است که تلفات ۷۷/۸۷ MW به شبکه‌ی باختر تحمیل شود.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله الگوریتمی برای تخصیص تلفات انتقال با استفاده از ردیابی شارش توان ارائه شد. در این فرآیند سهم هر یک از تقاضاهای شبکه در تلفات ایجاد شده در هر یک از خطوط انتقال و ترانسفرمرها و در نتیجه تلفات کل تحمیل‌شده به سیستم مشخص می‌گردد. الگوریتم ردیابی پیشنهادی به صورت مختلط بوده و توان حقیقی و راکتیو به صورت همزمان برای ردیابی شارش توان مد نظر قرار گرفته است. برای نشان‌دادن روند کار، الگوریتم پیشنهادی بر روی یک سیستم چهار باسه نمونه تست شد و پس از صحت سنجی، بر روی شبکه‌ی انتقال برق منطقه‌ای باختر پیاده‌سازی گردید. نتایج برای سه حالت کاری بار متوسط، پیک و کم‌باری ارائه شد و سهم هر یک از نقاط تبادلی در تلفات شبکه‌ی باختر مشخص گردید. با تحلیل نتایج مشخص شد که سهم تبادلات در تلفات ایجاد شده در شبکه‌ی باختر در حالت بار متوسط بیشتر از سهم تلفات ناشی از تقاضاهای داخلی است که این موضوع در حالت بار پیک برعکس می‌شود. همچنین در حالت کم‌باری تلفات شبکه به علت تقاضای تبادل بسیار زیاد به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است.

سپاسگزاری

این کار با حمایت مالی شرکت برق منطقه‌ای باختر انجام شده است.

مراجع

[1] A. J. Conejo, F. Galiana, and I. Kockar, "Z-Bus loss allocation," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 16, No. 1, pp. 105–110, Feb. 2001.

[2] G. Gross and S. Tao, "A physical-flow-based approach to allocating transmission losses in a transaction framework," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 15, No. 2, pp. 631–637, May 2000.

[3] J. S. Daniel, R. S. Salgado, and M. R. Irving, "Transmission loss allocation through a modified Ybus," *Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Transm., Distrib.*, Vol. 152, No. 2, pp. 208–214, Mar. 2005.

[4] Y. C. Chang and C. N. Lu, "Bus-oriented transmission loss allocation," *Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Transm., Distrib.*, Vol. 149, No. 4, pp. 402–406, Jul. 2002.

[5] T. K. Hann, J. H. Kim, and J. K. Park, "Calculation of transmission loss factor considering load variation," *in Proc. IEEE Power Eng. Soc. Meeting*, pp. 21–25, Jul. 2002.

[6] Q. C. Lu and S. R. Brammer, "Transmission loss penalty factors for area energy interchange," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 11, No. 3, pp. 1185–1193, Aug. 1997.

[7] A. J. Canejo et al., "Transmission loss allocation: A comparison of different practical algorithms," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 17, No. 3, pp. 571–576, Aug. 2002.

[8] A. M. Leite and J. G. Carvalho Costa, "Transmission loss allocation: Part I- Single energy market," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 18, No. 4, pp. 1395–1401, Nov. 2003

[9] J. W. Bialek, "Topological generation and load distribution factors for supplement charge allocation in transmission open access," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 12, No. 3, pp. 1387–1392, Aug. 1996.

[10] M. Pantosˆ, G. Verbicˆ, and F. Gubina, "Modified topological generation and load distribution factors," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 20, No. 4, pp. 1998–2005, Nov. 2005.

[11] F. Gubina, D. Grgicˆ, and I. Banicˆ, "A method for determining generators' share in a customer load," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 15, No. 4, pp. 1376–1381, Nov. 2000.

[12] F. Fu, et al., "Power transfer allocation for open access using graph theory- Fundamentals and applications in systems without loop flow," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 15, No. 3, pp. 923–929, Aug. 2000.

[13] S. Abdelkader, "Transmission loss allocation in a deregulated energy market," *Elect. Power Syst. Res.*, Vol. 76, No. 11, pp. 962–967, Jul. 2006.

[14] S. Abdelkader, "Efficient computation algorithm for calculating load contributions to line flows and losses," *Proc. Inst. Elect. Eng., Gen., Transm., Distrib.*, Vol. 153, No. 4, pp. 391–398, Jul. 2006., 1989.

[15] S. Abdelkader, "Transmission loss allocation through complex power flow tracing," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 22, No. 4, pp. 2240–2248, May 2007.