نشریه علمی‌پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی
سال هشتم، شمارهٔ سوم/ پاییز ۱۳۹۷/ صفحه ۲ـ۱۳

روش نوین قیمت‌گذاری هزینهٔ نهایی بلندمدت برای جبران کمبود درآمد شبکهٔ انتقال در سیستم قدرت تجدید ساختارشده

علیرضا صداقتی

استادیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه شهاب دانش، قم، ایران
ars@shahabdanesh.ac.ir

چکیده: رویکردهای افزایشی و نهایی، دو رویکرد متفاوت در قیمت‌گذاری شبکه‌های انتقال و توزیع انرژی است. تفاوت اصلی این دو روش در نحوهٔ محاسبهٔ هزینهٔ استفاده از شبکه است. در رویکرد اول، از شبیه‌سازی و در رویکرد دوم، از روش‌های تحلیل حساسیت برای تعیین هزینه استفاده می‌شود. در این مقاله، یک روش نوین با رویکرد نهایی بر مبنای روش‌های تحلیلی که بتواند اثر هزینه‌های بلندمدت را نسبت به تزریق توان در باس‌ها نشان دهد، معرفی می‌گردد. تحلیل حساسیت شامل سه مشتق جزئی است که عبارت‌اند از: ۱. حساسیت پخش توان خطوط شبکه در اثر افزایش تزریق توان در باس‌ها، ۲. حساسیت زمان توسعهٔ شبکه برحسب تغییر توان خطوط شبکه، ۳. حساسیت ارزش فعلی تقویت شبکه برحسب زمان توسعهٔ شبکه. یک شبکهٔ توزیع عملی که قسمتی از شبکهٔ انتقال است، برای نشان دادن اصول تئوری و عملی روش پیشنهادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج رویکردهای افزایشی و نهایی در شرایط مختلف سیستم مقایسه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که قیمت‌های به‌دست‌آمده از روش پیشنهادی، نه‌تنها هزینه‌های توسعهٔ آیندهٔ شبکه را دربرمی‌گیرد بلکه به فاصلهٔ بین تولید و مصرف نیز بستگی دارد. همچنین روش پیشنهادی عواملی را که در تعرفه‌های شبکه تأثیرگذارند، نشان خواهد داد.

واژه‌های کلیدی: قیمت‌گذاری شبکه، بازار برق، نرخ رشد بار، رویکرد نهایی بلندمدت (LRMC)، رویکرد افزایشی بلندمدت (LRIC)، جبران کمبود درآمد شبکهٔ انتقال.

۱. مقدمه

تعرفهٔ شبکهٔ توزیع یا انتقال تعرفه‌ای است که مشتری اعم از مصرف‌کننده یا تولیدکننده برای استفاده از شبکه باید آن را بپردازد. در روش‌های تعیین تعرفه، باید هزینه‌های اولیه، بهره‌برداری و نگهداری شبکه لحاظ شود. علاوه بر آن، با ظهور بازارهای برق و تجدید ساختار سیستم قدرت، یکی از شروط اساسی تعیین تعرفه، ایجاد سیگنال اقتصادی لازم برای مصرف فعلی و توسعهٔ آیندهٔ شبکه به مشتریان است [۱ـ۶]. برای رسیدن به این هدف، تعرفهٔ شبکه باید هزینه یا سود حاصل از مصرف شبکه توسط مشتریان جدید را نشان دهد. به همین سبب، دو مفهوم افزایشی و نهایی در قیمت‌گذاری شبکه معرفی شده است تا بتوان هزینه‌های بهره‌برداری و توسعهٔ آیندهٔ شبکه را برای مشتریان جدید اعم از واحدهای تولید یا مصرف‌کنندگان محاسبه کرد [۱ و ۷ـ۸].

توسعهٔ مدل قیمت‌گذاری بلندمدت کار بسیار دشواری است. روش‌های قبلی به دو دسته تقسیم شدند [۱ و ۹ــ۱۳]. قیمت‌گذاری بلندمدت افزایشی[1] (LRIC) و قیمت‌گذاری بلندمدت نهایی[2] (LRMC). بزرگ‌ترین تفاوت بین این دو روش در نحوهٔ محاسبهٔ تأثیر تزریق توان در باس‌ها روی هزینهٔ توسعهٔ بلندمدت شبکه است. تعرفهٔ بلندمدت افزایشی برای یک باس، از مقایسهٔ ارزش فعلی و ارزش آیندهٔ شبکه با و بدون تزریق توان در باس محاسبه می‌شود. این نوع قیمت‌گذاری کار ساده‌ای است، ولی برای سیستم‌های بزرگ، زمان محاسباتی زیادی صرف می‌شود. از طرف دیگر، در روش‌های نهایی از معادلات تحلیلی برای محاسبهٔ تأثیر تزریق توان باس‌ها روی هزینهٔ توسعهٔ شبکه استفاده می‌شود [۱۴ـ۱۵]. این روش از نظر محاسباتی کارآمد است، ولی محدودیتی که دارد این است که شیب تغییرات بزرگ توان در باس‌ها باید برابر شیب تغییرات کوچک آن باشد. اما از آنجا که رابطهٔ تزریق توان در باس‌ها نسبت به هزینهٔ توسعهٔ شبکه کاملاً غیرخطی است، نتایج این روش دقیق نخواهد بود.

مقالات بسیاری دربارهٔ اختلاف و ارتباط بین این دو نوع قیمت‌گذاری [۱۴ و ۱۶] و استفاده از آن‌ها در تعیین تعرفهٔ شبکه‌های واقعی وجود دارد [۱۷–۲۰]. با وجود این، در بیشتر این روش‌ها برای تعیین هزینهٔ توسعهٔ شبکه برحسب تزریق توان در باس‌ها لازم است تا شبکه با حداقل هزینه طراحی شود. از طرف دیگر، توسعهٔ شبکه یا رشد مصرف در آینده یک فرایند قطعی نیست. علاوه بر این، روش‌های موجود، عکس‌العمل انفعالی در قبال پروژه‌های جدید تولید یا مصرف از خود نشان می‌دهند و نمی‌توان با استفاده از آن‌ها مشوق مالی کافی برای مکان‌یابی مشتریان جدید شبکه فراهم کرد تا هزینهٔ توسعهٔ شبکه به حداقل برسد [۲۱].

اولین روشی که هزینهٔ توسعهٔ شبکه را مستقیماً از تزریق توان در باس‌ها به دست می‌آورد، در [۲۲] ارائه شد. در روش قیمت‌گذاری LRIC پیشنهادی این مرجع، از ظرفیت استفاده‌نشدهٔ خطوط موجود در شبکه به‌عنوان معیاری برای هزینه‌های تعجیلی یا تعویقی توسعهٔ شبکه با ورود اولین مشتری (اعم از تولید یا مصرف) در هر باس استفاده شده است. برای تعیین تعرفهٔ LRIC در هر باس، باید دو پخش بار اجرا شود تا تعیین کنیم آیا افزایش توان در باس باعث تعجیل یا تعویق توسعهٔ شبکه می‌شود. اجرای این روش بسیار ساده است و در عین حال سیگنال اقتصادی لازم برای میزان استفاده از شبکه توسط کاربر جدید را فراهم می‌کند. مشکل این روش با توجه به اینکه زمان محاسباتی برحسب اندازهٔ سیستم به شکل نمایی افزایش می‌یابد، این است که برای تعیین تعرفه در سیستم‌های بزرگ زمان محاسباتی زیادی صرف می‌شود. علاوه بر آن در سیستم‌های بزرگ، شناسایی خطای محاسباتی کار دشواری است.

در این مقاله یک روش نوین برای LRMC مشابه مرجع [۲۲] معرفی می‌شود با این تفاوت که در روش نوین با استفاده از تحلیل جدیدی برای محاسبه حساسیت، بار محاسباتی در سیستم‌های بزرگ به‌طور قابل توجهی کاهش داده شده است به گونه‌ای که این روش را می‌توان مکمل مدل LRIC به حساب آورد. در روش پیشنهادی با رویکرد نهایی تغییر ارزش فعلی توسعه آینده شبکه نسبت به تزریق توان در باس با سه مولفه مشتق جزئی زیر محاسبه می‌شود:

- حساسیت توان خطوط نسبت به تزریق توان در باس؛
- حساسیت زمان توسعهٔ شبکه نسبت به توان خطوط؛
- حساسیت ارزش فعلی توسعهٔ آیندهٔ شبکه نسبت به زمان توسعه.

برای نشان دادن مفهوم اساسی و نشان دادن کارایی روش از یک شبکهٔ توزیع واقعی در انگلستان که در یک باس به سیستم انتقال انرژی متصل است، استفاده خواهد شد [۲۳]. در این تحقیق، برای مطالعهٔ روش LRMC پیشنهادی با روش‌های LRIC از دو نرخ رشد بار[3] و سطوح بارگیری متفاوت استفاده شده است. علاوه بر این، برای مقایسهٔ سیگنال اقتصادی حاصل از دو مدل تعرفه به کاربران شبکه، دو روش اصلاحی برای جبران کمبود درآمد به نام روش جمع‌کنندهٔ ثابت و روش ضرب‌کنندهٔ ثابت معرفی می‌شود.

در بخش ۲، مقدمه‌ای از تعرفه‌گذاری با رویکرد LRIC بیان

1. Long-Run Incremental Cost Pricing (LRIC)
2. Long-Run Marginal Cost Pricing (LRMC)
3. Load Growth Rate (LGR)

می‌شود. در بخش ۳، روش نوین LRMC نشان داده می‌شود. در بخش ۴، دو رویکرد از نظر مفهوم ریاضی با هم مقایسه می‌شوند. در بخش ۵، مسئلهٔ جبران کمبود درآمد شبکه و دو روش متداول برای حل آن معرفی می‌گردد. در بخش ۶، نتایج روش‌های دو رویکرد نهایی و افزایشی روی یک سیستم عملی توزیع نشان داده شده است و نهایتاً بحث و نتیجه‌گیری در بخش ۷ خواهد بود.

۲. مدل قیمت‌گذاری با رویکرد افزایشی (LRIC)

مدل اصلی این روش در مرجع [۳] آمده است. این روش در سه مرحلهٔ اجرایی زیر به‌ترتیب شرح داده شده است.

۱.۲. ارزش فعلی سرمایه‌گذاری آینده

فرض کنید C_l توان حداکثر خط l و P_l توان فعلی‌اش باشد. اگر نرخ رشد بار را r در نظر بگیریم، n_l سال طول می‌کشد که توان خط به مقدار حداکثر خود برسد. مقدار n_l از رابطهٔ (۱) به دست می‌آید. در سال آخر n_l باید برای تقویت شبکه، سرمایه‌گذاری انجام شود [۳].

$$C_l = P_l.(1+r)^{n_l} \qquad (۱)$$

به عبارت دیگر خواهیم داشت:

$$n_l = \frac{\log C_l - \log P_l}{\log(1+r)} \qquad (۲)$$

فرض بر این است که سرمایه‌گذاری در سال n_l رخ خواهد داد که میزان استفاده از خط به C_l می‌رسد. در این حالت، اگر نرخ استهلاک بانکی d فرض شود و هزینهٔ تجهیزات جدید در سال n_l برابر Cost_l باشد، ارزش فعلی هزینهٔ سال n_l که با PV_l نشان داده می‌شود، برابر است با:

$$PV_l = \frac{\mathrm{Cost}_l}{(1+d)^{n_l}} \qquad (۳)$$

در واقع در روش نوین، نه‌تنها هزینهٔ فعلی بلکه هزینهٔ سرمایه‌گذاری آینده نیز حساب می‌شود و هر مشتری به میزانی که در سرمایه‌گذاری آینده تأثیر بیشتری دارد، هزینه را به‌اندازهٔ ارزش فعلی آن پرداخت می‌کند.

۲.۲. هزینهٔ افزایش توان بیشتر از نرخ رشد

باید توجه کرد که نمی‌توان نرخ رشد بار را به‌صورت ثابت فرض یا پیش‌بینی کرد. در حالتی که یک بار اضافه پیش‌بینی‌نشده در بازه زمانی مورد نظر رخ دهد، چه باید کرد؟ طبعاً در این حالت باید سال جدیدی را برای سرمایه‌گذاری تعیین کرد و این سال یا از n_l کمتر است که نتیجهٔ بار اضافی است یا از n_l بیشتر است که یک تولید اضافی را نشان می‌دهد. البته حالت تولید اضافی و بدون برنامه تقریباً محال و فقط یک بحث نظری است و تمرکز اصلی روی بار اضافی خواهد بود. طبق روابط قبلی، سال سرمایه‌گذاری جدید را به دست می‌آید:

$$C_l = (P_l + \Delta P_l).(1+r)^{n_{\mathrm{new}}} \qquad (۴)$$

از رابطهٔ (۴) سال سرمایه‌گذاری جدید n_{new} برابر است با:

$$n_{\mathrm{new}} = \frac{\log C_l - \log(P_l + \Delta P_l)}{\log(1+r)} \qquad (۵)$$

با توجه به نرخ استهلاک بانکی و هزینهٔ کل سرمایه‌گذاری در سال وقوع سرمایه‌گذاری، ارزش فعلی سرمایه‌گذاری جدید به شکل زیر به دست می‌آید:

$$PV_{\mathrm{new}} = \frac{\mathrm{Cost}_l}{(1+d)^{n_{\mathrm{new}}}} \qquad (۶)$$

حال باید تغییر ارزش فعلی سرمایه‌گذاری را محاسبه کرد تا فهمید یک تزریق (تولید یا مصرف) بدون پیش‌بینی، چه مقدار ارزش فعلی را کمتر از مقدار برنامه‌ریزی‌شده کرده و این اختلاف چقدر است. اختلاف ارزش فعلی سرمایه‌گذاری آینده برابر است با:

$$g(r) = \Delta PV_l = \mathrm{Cost}_l.\left(\frac{1}{(1+d)^{n_{\mathrm{new}}}} - \frac{1}{(1+d)^{n_l}}\right) \qquad (۷)$$

اگر رابطهٔ (۷) را در ضریب سالانه ضرب کنیم، ΔIC_l هزینهٔ افزایشی خط l که برابر تغییر سالانهٔ ارزش فعلی سرمایه‌گذاری آینده خط در سال سرمایه‌گذاری است، به شکل زیر به دست می‌آید:

$$\Delta IC_l = \Delta PV_l.AF \qquad (۸)$$

که در آن AF ضریب اقساط سالیانهٔ است که برای اقساط بلندمدت تجهیزات جدید به کار می‌رود. مثلاً با نرخ استهلاک بانکی d و مدت‌زمان استهلاک N ضریب اقساط سالیانه برابر $1/(1+d)^{N-1}$ است. تغییر هزینهٔ افزایشی رابطهٔ (۸) که باعث تغییر تعرفهٔ مصرف‌کنندگان می‌شود، از ویژگی‌های روش پیشنهادی می‌باشد و بدان معنی است که هزینهٔ توسعهٔ آیندهٔ شبکهٔ انتقال در تعرفهٔ فعلی منظور شده است.

۳.۲. محاسبهٔ هزینهٔ افزایشی بلندمدت (LRIC)

تعرفهٔ هر باس با جمع تمام هزینه‌های افزایشی هر خط متصل به آن باس که در بخش قبل به دست آمد، به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$LRIC_i = \frac{\sum_l \Delta IC_l}{\Delta PI_i} \qquad (۹)$$

که در آن، $LRIC_i$ هزینهٔ افزایشی بلندمدت باس iام و ΔPI_i تغییرات توان تزریقی در باس iام است.

۳. مدل قیمت‌گذاری بلندمدت با رویکرد نهایی

در مدل قیمت‌گذاری LRMC موضوعات زیر لحاظ می‌شود:

- چگونگی تأثیر تزریق توان در یک باس بر ظرفیت مازاد توان خطوطی که به آن باس متصل هستند.
- چگونگی تأثیر تغییر ظرفیت مازاد[1] خطوط شبکه بر مدت‌زمان توسعهٔ آن.
- چگونگی تأثیر تغییر مدت‌زمان توسعهٔ شبکه بر ارزش فعلی سرمایه‌گذاری آیندهٔ شبکه.

این تأثیرات را می‌توان با سه مرحلهٔ مشتق‌گیری جزئی در رابطهٔ (۱۰) به‌طور تقریبی محاسبه کرد که در واقع هستهٔ مدل قیمت‌گذاری بلندمدت نهایی را تشکیل می‌دهد:

$$\frac{\partial PV_l}{\partial PI_n}=\frac{\partial PV_l}{\partial n_l}.\frac{\partial n_l}{\partial P_l}.\frac{\partial P_l}{\partial PI_n} \qquad (۱۰)$$

که در آن، P_l توان خط l است که باس‌های i و j را به هم متصل می‌کند. n_l مدت‌زمان توسعهٔ خط l و PV_l ارزش فعلی توسعهٔ آیندهٔ خط l است. به‌صورت ریاضی، قیمت‌گذاری نهایی بلندمدت طی مراحل زیر انجام می‌شود.

۱.۳. حساسیت توان خط به تزریق توان در باس

معادلهٔ (۱۱) توان اکتیو خط متصل از باس i به باس j را نشان می‌دهد:

$$P_{ij}=V_i^2.G_{ij}-V_i.V_j.(G_{ij}.\cos\theta_{ij}+B_{ij}.\sin\theta_{ij}) \qquad (۱۱)$$

اگر مقدار کوچکی PI_n به باس n تزریق شود، تأثیر آن بر P_{ij} به شکل زیر محاسبه می‌گردد:

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial PI_n}=\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i}.\frac{\partial V_i}{\partial PI_n}+\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j}.\frac{\partial V_j}{\partial PI_n}+\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i}.\frac{\partial \theta_i}{\partial PI_n}+\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j}.\frac{\partial \theta_j}{\partial PI_n} \qquad (۱۲)$$

که در آن $\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i}$، $\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j}$، $\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i}$ و $\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j}$ با مشتق‌گیری جزئی از معادلهٔ (۱۱) نسبت به پارامترهای V_i، V_j، θ_i و θ_j به دست می‌آیند؛ یعنی داریم:

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_i}=V_i^2G_{ij}-V_iV_j\left(-G_{ij}sin\theta_{ij}+B_{ij}cos\theta_{ij}\right) \qquad (۱۳)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial \theta_j}=V_i^2G_{ij}-V_iV_j\left(G_{ij}sin\theta_{ij}-B_{ij}cos\theta_{ij}\right) \qquad (۱۴)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_i}=2V_iG_{ij}-V_j\left(G_{ij}sin\theta_{ij}-B_{ij}cos\theta_{ij}\right) \qquad (۱۵)$$

$$\frac{\partial P_{ij}}{\partial V_j}=-V_i\left(G_{ij}sin\theta_{ij}-B_{ij}cos\theta_{ij}\right) \qquad (۱۶)$$

برای محاسبهٔ جملات دیگر معادلهٔ (۱۲)، از تحلیل حساسیت معادلهٔ (۱۷) برای محاسبهٔ ارتباط بین تغییر در توان تزریقی یک باس نسبت به تغییرات ولتاژ و زاویه استفاده شده است.

$$\begin{bmatrix}\Delta P\\ \Delta Q\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V}\\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V}\end{bmatrix}.\begin{bmatrix}\Delta\theta\\ \Delta V\end{bmatrix}=[J].\begin{bmatrix}\Delta\theta\\ \Delta V\end{bmatrix} \qquad (۱۷)$$

ماتریس ژاکوبین[2] J در معادلهٔ (۱۷) در آخرین تکرار پخش بار محاسبه می‌شود که به شکل زیر به دست می‌آید:

$$[J]^{-1}=\Gamma=\begin{bmatrix}\Gamma_{11} & \Gamma_{12}\\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22}\end{bmatrix}$$
$$\Delta\theta=\Gamma_{11}\Delta P \qquad (۱۸)$$
$$\Delta V=\Gamma_{21}\Delta P$$

با استفاده از روابط (۱۱) تا (۱۸) می‌توان رابطهٔ بین تزریق توان در یک باس نسبت به توان هر خط را به دست آورد.

۲.۳. حساسیت مدت‌زمان توسعهٔ خط به توان خط

با مشتق‌گیری مدت‌زمان توسعهٔ خط از رابطهٔ (۲) نسبت به توان خط داریم:

$$\frac{\partial n_l}{\partial P_l}=-\frac{1}{P_l.\log(1+r)} \qquad (۱۹)$$

برای r یا نرخ رشد بار ثابت فقط توان خط بر این حساسیت تأثیر می‌گذارد. مقدار حساسیت رابطهٔ (۱۹) می‌تواند مثبت یا منفی باشد. علامت منفی نشان‌دهندهٔ این است که افزایش ظرفیت خط باعث کاهش مدت‌زمان توسعهٔ آن یا کاهش ظرفیت خط باعث افزایش مدت‌زمان توسعهٔ خط می‌شود. به عبارت دیگر، زمان توسعهٔ خط را به تعویق می‌اندازد.

۳.۳. حساسیت ارزش فعلی سرمایه‌گذاری آینده به مدت‌زمان توسعه

به‌طور مشابه با استفاده از رابطهٔ (۳) و مشتق‌گیری ارزش فعلی خط PV_l نسبت به مدت‌زمان توسعهٔ خط n_l داریم:

$$\frac{\partial PV_l}{\partial n_l}=-\frac{Cost_i\log(1+d)}{\log(1+r)^{n_l}} \qquad (۲۰)$$

این رابطه تغییر مدت‌زمان توسعه نسبت به ارزش فعلی سرمایه‌گذاری آینده را نشان می‌دهد. از آنجا که هزینهٔ خطوط شبکه و نرخ استهلاک بانکی ثابت فرض شدند، تنها عامل مؤثر در رابطهٔ (۲۰)

1. Spare Capacity

2. Jacobian Matrix

مدت‌زمان توسعه است. علامت منفی نشان‌دهندهٔ این واقعیت است که افزایش مدت‌زمان توسعه، ارزش فعلی سرمایه‌گذاری آینده را کاهش و کاهش مدت‌زمان توسعه، ارزش فعلی سرمایه‌گذاری آینده را افزایش می‌دهد.

۴.۳. حساسیت ارزش فعلی سرمایه‌گذاری خط به تزریق توان در باس

با ترکیب روابط (۱۲)، (۱۹) و (۲۰) در رابطهٔ (۲۱) و جای‌گذاری n_l از رابطهٔ (۲) حساسیت ارزش فعلی سرمایه‌گذاری آینده به تزریق توان در باس به شکل زیر به دست می‌آید:

$$\frac{\partial PV_l}{\partial PI_n}=\frac{Cost_l}{P_l}\cdot\frac{\log(1+d)}{\log(1+r)}\cdot\left(\frac{P_l}{C_l}\right)^{\frac{\log(1+d)}{\log(1+r)}}\cdot\frac{\partial P_l}{\partial PI_n} \qquad (۲۱)$$

که $\frac{\partial P_l}{\partial PI_n}$ از رابطهٔ (۱۲) محاسبه می‌شود.

در رابطهٔ (۱۶) هزینه، نرخ رشد بار r و نرخ استهلاک بانکی برای خطوطی که به باس n متصل هستند، ثابت فرض شده است. بنابراین جملاتی که بر حساسیت ارزش فعلی سرمایه‌گذاری آینده به تزریق توان در باس n تأثیر می‌گذارد، شامل ظرفیت خطوط و مشتق ظرفیت خطوط به تزریق توان در باس است. برای خطوطی که مشتق ظرفیت آن‌ها نسبت به تزریق توان در باس کم است، حتی اگر توان خطوط زیاد باشد، تعرفهٔ LRMC برای آن باس پایین خواهد بود. به عبارت دیگر، تزریق توان در باس باعث تغییر کوچکی در مدت‌زمان توسعهٔ آن خطوط خواهد شد. از طرف دیگر، خطوطی که توان کمی دارند ولی مشتق ظرفیت آن‌ها نسبت به تزریق توان در باس زیاد است، تعرفهٔ LRMC بزرگ‌تری دارند و تزریق توان در باس، تغییر زیادی در مدت‌زمان توسعهٔ آن خطوط ایجاد می‌کند. نرخ رشد بار نیز عامل دیگری است که بر تعرفهٔ LRMC تأثیر می‌گذارد. مقدار کم LGR منجر به تعرفهٔ بیشتر و مقدار زیاد آن منجر به تعرفهٔ کمتر (برحسب اینکه توان خط چقدر باشد) خواهد شد.

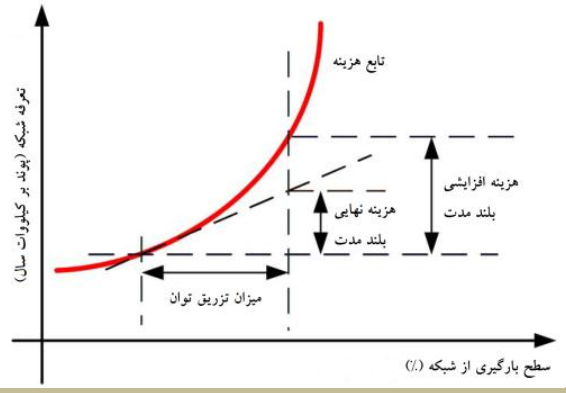
۵.۳. هزینهٔ بلندمدت با رویکرد نهایی LRMC

تعرفهٔ LRMC برای باس n برابر مجموع هزینه‌های LRMC تمام خطوطی است که به باس n متصل هستند و در ضریب سالانه ضرب شده است. تعرفهٔ فوق با رابطهٔ زیر بیان می‌شود:

$$LRMC_n=\sum_l\frac{\partial PV_l}{\partial PI_n}.AF \qquad (۲۲)$$

۴. مقایسهٔ قیمت‌گذاری LRIC و LRMC

تفاوت واضح بین تعرفه‌های LRIC و LRMC در مفهوم ریاضی آن‌هاست. این موضوع در شکل (۱) نشان داده شده است. در تعرفهٔ LRIC از تفاوت ارزش فعلی سرمایه‌گذاری آینده با و بدون تزریق توان در باس‌ها استفاده می‌شود، درحالی‌که برای محاسبهٔ تعرفهٔ LRMC سه مشتق جزئی محاسبه‌شده برای تزریق توان باس‌ها در هم ضرب می‌شوند. اگر هزینهٔ شبکه با منحنی قرمز نشان داده شود، هزینهٔ افزایشی بلندمدت LRIC برابر تغییر در مقدار تابع هزینه به‌ازای نقطهٔ ابتدا و انتهایی بازه تزریق توان باس است، ولی هزینهٔ نهایی بلندمدت LRMC برابر تغییر در مشتق تابع هزینه به‌ازای نقطهٔ ابتدایی و انتهایی بازه تزریق توان باس خواهد بود.



شکل (۱): بیان ریاضی تفاوت دو رویکرد نهایی و افزایشی

۵. جبران کمبود درآمد شبکهٔ انتقال

باید توجه کرد که نه با تعرفه‌های افزایشی و نه با تعرفه‌های نهایی، نمی‌توان درآمد مجاز برای بهره‌بردار شبکهٔ انتقال را پوشش داد. بنابراین برای جبران کمبود درآمد شبکه لازم است که قیمت نهایی یا قیمت افزایشی باس‌ها طوری تنظیم شود که درآمد حاصل از تعرفه‌های شبکه، درآمد مورد نظر بهره‌بردار شبکه را تأمین کند [۲۴]. سازوکار بهره‌بردار شبکه برای جبران کمبود درآمد به اندازهٔ قیمت‌گذاری باس‌ها مهم است. روش‌های سادهٔ ابتدایی وجود دارد که با استفاده از آن می‌توان کمبود درآمد شبکه را جبران کرد. اگر برای این منظور بهره‌بردار شبکه بخواهد قیمت باس‌ها را در یک عدد ضرب کند، ممکن است اقتصادی بودن سیگنال حاصل از قیمت باس‌ها را بسیار کاهش دهد. در مرجع [۲۵] به‌جای تغییر سیگنال اقتصادی حاصل از قیمت باس‌ها، روشی بر مبنای اصول اقتصادی مستقیماً برای جبران کمبود درآمد شبکه طراحی شده است. با وجود این، برای بیان ساده‌تر اصول روش پیشنهادی، تعرفه‌های بلندمدت افزایشی یا نهایی مورد توجه است که تا حد ممکن سیگنال اقتصادی برای توسعهٔ شبکه در آینده نیز لحاظ شده باشد. بنابراین در این

مقاله، از روش‌های متداول کمبود درآمد شبکه در شبیه‌سازی استفاده خواهیم کرد. دو روش رایجی که برای جبران کمبود درآمد وجود دارد [۲۶] عبارت‌اند از:

- روش جمع‌کنندهٔ ثابت[1]
- روش ضرب‌کنندهٔ ثابت[2]

در روش جمع‌کنندهٔ ثابت، قیمت باس‌ها در حالت کمبود درآمد شبکه با مقدار ثابت مثبتی جمع و در حالت مازاد درآمد شبکه، از مقدار ثابت مثبت کم می‌شوند که در معادلهٔ زیر نشان داده شده است.

$$Tariff_i = Charge_i + Adder \qquad (۲۳)$$

در روش ضرب‌کنندهٔ ثابت برای تأمین درآمد مورد نظر، قیمت باس‌ها در یک عدد ثابت ضرب می‌شوند. معادلهٔ (۱۹) چگونگی تنظیم قیمت باس‌ها را توصیف می‌کند.

$$Tariff_i = Charge_i(1 + Multiplier) \qquad (۲۴)$$

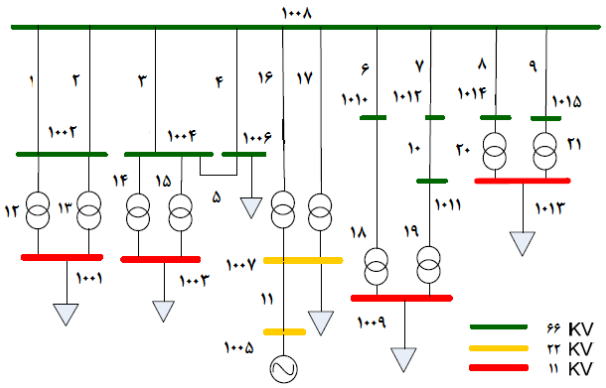
در قسمت بعدی، از این دو روش برای جبران کمبود درآمد شبکه استفاده شده و تأثیر قیمت‌های حاصل از رویکرد افزایشی یا نهایی بلندمدت را بر تعرفه‌های شبکه نشان داده شده است.

۶. شبیه‌سازی با شبکهٔ واقعی

در این بخش، مقایسهٔ رویکردهای نهایی و افزایشی بر روی یک شبکهٔ توزیع واقعی که در یک نقطه به شبکهٔ انتقال ملی انگلیس [۲۳] در شکل (۲) متصل است، انجام می‌شود.

منطق استفاده از یک شبکهٔ عملی برای مقایسهٔ دو رویکرد موجود این است که در بیشتر موارد عملی، افزایش تزریق توان در باس‌ها منجر به تغییر توان در خطوط فراوانی از شبکه می‌شود که در شبکهٔ واقعی انتخاب‌شده، این پدیده مشهود است. تفاوت بین دو رویکرد برای هر خط ممکن است مقدار کمی باشد، اما جمع این تغییرات برای تمام خطوط شبکه به‌ازای تغییر تزریق توان در یک باس، اختلاف بزرگی را بین دو رویکرد نشان می‌دهد. مقایسهٔ دو رویکرد با دو شرط زیر انجام می‌شود:

- دو نرخ برای رشد بار (LGR) یکی ۱٪ و دیگری ۵٪
- دو سطح بارگیری: سطح بارگیری پایه و سطح بارگیری به‌اندازهٔ ۲۰٪ بیشتر.



شکل (۲): نمونهٔ یک سیستم توزیع واقعی که در یک باس به شبکهٔ انتقال ملی متصل شده است.

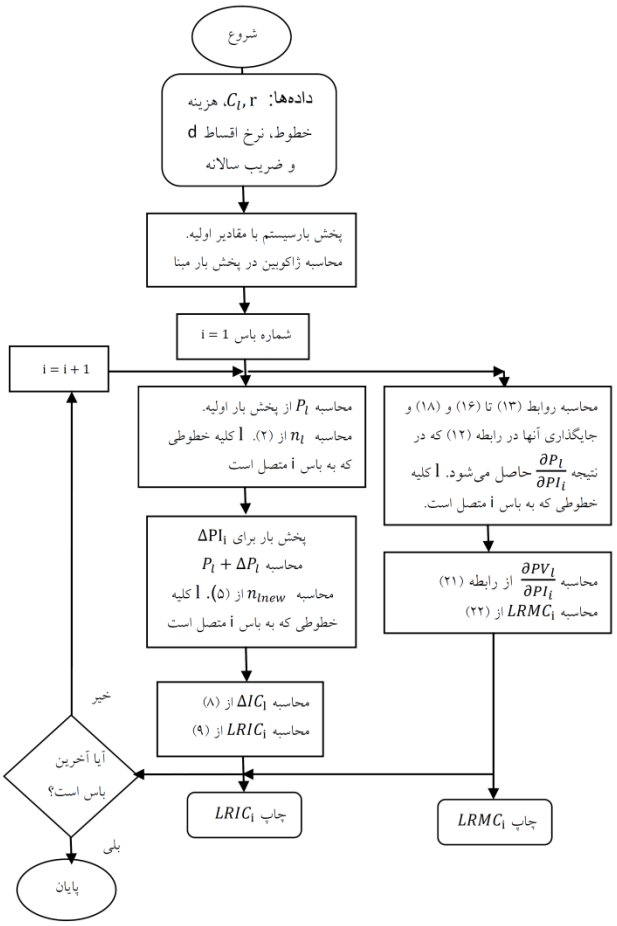
برای مدل افزایشی در باس‌ها ۱ مگاوات توان تزریق می‌شود. مقایسهٔ بین رویکردهای نهایی و افزایشی برحسب تعرفهٔ باس‌ها خواهد بود.

روندنما برای محاسبات تعرفه با دو رویکرد افزایشی و نهایی در شکل (۳) آمده است. به‌منظور سنجش کارآمدی رویکردها، زمان محاسبه در دو حالت مقایسه شده است. در رویکرد افزایشی (LRIC) زمان محاسبه برای تعرفهٔ هر باس حدود ۱۵۷ میلی‌ثانیه است، درحالی‌که در روش نهایی (LRMC) تعیین تعرفه برای هر باس حدود ۵۱ میلی‌ثانیه زمان می‌برد. با انجام محاسبات برای شبکه‌های دیگر می‌توان استنباط کرد زمان محاسباتی رویکرد نهایی یک‌سوم زمان محاسباتی رویکرد افزایشی است. برای یک سیستم بزرگ با ۲۰۰۰ باس زمان محاسبه برای قیمت یک باس با رویکرد افزایشی ۱۲ ثانیه است که برای کل باس‌ها حدود ۶ ساعت و ۴۰ دقیقه زمان می‌برد. در مقابل، زمان برای محاسبهٔ قیمت هر باس با رویکرد نهایی ۵ ثانیه می‌شود که در مجموع ۱۷ دقیقه زمان صرف می‌شود.

۱.۶. سطح بارگیری پایه

در جدول (۱) قیمت باس‌ها با دو رویکرد افزایشی و نهایی در شرایط بار پایه دیده می‌شود. برای سادگی استنتاج، شکل (۴) میزان استفاده از خطوط را برای بار پایه نشان می‌دهد. همان طور که از این شکل دیده می‌شود، خط شمارهٔ ۴ که باس‌های ۱۰۰۸ و ۱۰۰۶ را به هم متصل می‌کند، توان زیادی را عبور می‌دهد. ترانسفورمرهای ۱۲ تا ۱۷ نیز حامل توان زیادی هستند.

1. Fixed Adder
2. Fixed Multiplier

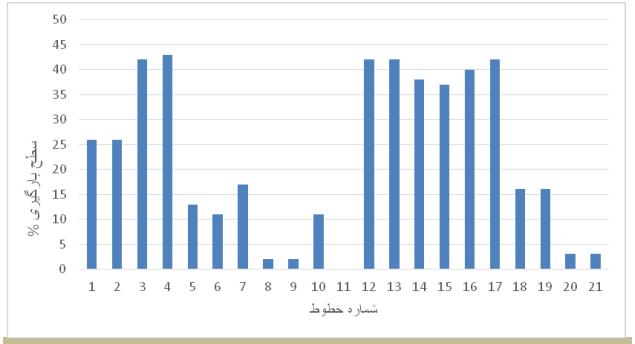


شکل (۳): روندنما برای محاسبه تعرفه باس‌ها با دو رویکرد افزایشی و نهایی

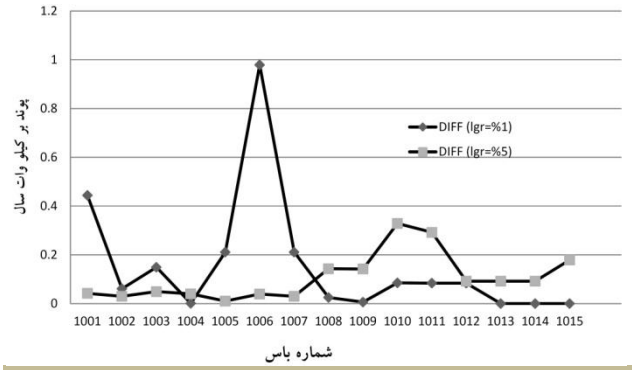
برای LGR برابر ۱٪، تفاوت تعرفه با دو رویکرد در باس‌های ۱۰۰۱ تا ۱۰۰۷ مقدار بزرگی است؛ زیرا آن‌ها به خطوطی متصل هستند که توان نسبتاً زیادی دارند. همچنین می‌توان دید که باس‌های ۱۰۰۹ تا ۱۰۱۵ به خطوط با توان کم متصل هستند و تعرفهٔ به‌دست‌آمده برای آن‌ها نزدیک صفر است. وقتی LGR برابر ۵٪ باشد، تعرفهٔ باس‌های ۱۰۰۹ تا ۱۰۱۵ به‌صورت قابل توجهی افزایش می‌یابند؛ چراکه وقتی LGR بزرگ باشد، زمان توسعهٔ شبکه نزدیک‌تر شده و تزریق توان در باس، اثر بیشتری روی ارزش فعلی سرمایه‌گذاری آینده خواهد گذاشت. در مقابل باس‌های ۱۰۰۳ تا ۱۰۰۶ که به خطوط پرتوان متصل هستند، با افزایش LGR تعرفهٔ آن‌ها کاهش یافته است. به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که تفاوت تعرفه‌های LRIC و LRMC برای LGR های کوچک و سطوح بارگیری بزرگ بیشتر است. برعکس این حالت نیز صادق است. تفسیر نتایج جدول (۱) در شکل (۵) به‌صورت نمودار ترسیم شده است. تفاوت تعرفه‌های با دو رویکرد مختلف برای دو نرخ رشد بار در این شکل مشاهده می‌شود.

جدول (۱): مقایسهٔ تعرفه‌های دو رویکرد برای دو نرخ رشد بار (پوند بر کیلووات سال)

شمارهٔ باس	LGR=٪۱			LGR=٪۵		
	LRIC	LRMC	DIFF	LRIC	LRMC	DIFF
۱۰۰۱	۴/۲۶۵	۳/۸۲	۰/۴۴۴	۵/۸۸۳	۵/۸۴	۰/۰۴۲
۱۰۰۲	۰/۶۰۷	۰/۵۴۵	۰/۰۶۱	۴/۴۱۹	۴/۳۹	۰/۰۳
۱۰۰۳	۲۰/۲۱	۱۹/۰۶	۰/۱۴۹	۱۰/۱۴	۱۰/۱۰	۰/۰۴۹
۱۰۰۴	۱۷/۶۱	۱۷/۶۱	۰/۰۰۱	۱/۰۴	۰/۹۹۷	۰/۰۴
۱۰۰۵	۱/۹۶۳	۱/۷۵	۰/۲۱۱	۱/۲۸۵	۱/۲۷۵	۰/۰۱
۱۰۰۶	۱۸/۱۶	۱۷/۱۸	۰/۹۷۹	۶/۶۹۸	۶/۶۶	۰/۰۳۹
۱۰۰۷	۱/۹۶۳	۱/۷۵۲	۰/۲۱۱	۱/۲۸۵	۱/۲۷۵	۰/۰۳
۱۰۰۸	۰/۱۲۲	۰/۰۹۷	۰/۰۲۵	۱۰/۱۶	۱۰/۰۲	۰/۱۴۳
۱۰۰۹	۰/۰۲۵	۰/۰۱۹	۰/۰۰۶	۶/۱۱۶	۵/۹۷۴	۰/۱۴۲
۱۰۱۰	۰/۲۴۵	۰/۱۶	۰/۰۸۵	۱۲/۹۴	۱۲/۶۱	۰/۳۲۹
۱۰۱۱	۰/۲۴۱	۰/۱۵۷	۰/۰۸۴	۱۱/۴۳	۱۱/۱۴	۰/۲۹۲
۱۰۱۲	۰/۲۴۱	۰/۱۵۷	۰/۰۸۴	۱۱/۴۳	۱۱/۱۴	۰/۲۹۲
۱۰۱۳	۰	۰	۰	۲/۰۵۳	۱/۹۶۱	۰/۰۹۲
۱۰۱۴	۰	۰	۰	۱/۲۴۳	۱/۱۵	۰/۰۹۲
۱۰۱۵	۰	۰	۰	۲/۳	۱/۱۲۱	۰/۱۷۹



شکل (۴): سطح توان خطوط در بار پایه



شکل (۵): نمودار اختلاف تعرفه با دو رویکرد افزایشی و نهایی برای دو نرخ رشد بار متفاوت در سطح بارگیری پایه

در این مقاله، روش‌های جمع‌کنندهٔ ثابت و ضرب‌کنندهٔ ثابت برای نشان دادن درجهٔ تنظیم قیمت باس‌ها برای رسیدن به درآمد لازم برای شبکه و تأثیر آن‌ها بر تعرفه‌های افزایشی و نهایی به کار رفته است. تعرفه‌های حاصل در جداول (۲) و (۳) دیده می‌شود. از جدول (۲)

می‌توان دید که وقتی LGR، ۱٪ است، تعرفهٔ باس‌های ۱۰۱۳ تا ۱۰۱۵ تفاوت زیادی به میزان ۰/۵۹۲ (پوند بر کیلووات سال) دارد.

هرچند قیمت این باس‌ها صفر است، برای جبران کمبود درآمد شبکه با روش جمع‌کنندهٔ ثابت، مقدار ثابتی به قیمت تمام باس‌ها اضافه می‌شود. در نتیجه با رویکرد LRIC تعرفهٔ هر سه باس برابر ۲/۳۹۴ (پوند بر کیلووات سال) و با رویکرد LRMC تعرفه برابر ۲/۹۸۶ (پوند بر کیلووات سال) خواهد شد.

جدول (۲): مقایسهٔ تعرفه‌های دو رویکرد با استفاده از روش جمع‌کنندهٔ ثابت (پوند بر کیلووات سال)

شمارهٔ باس	LGR=٪۱		LGR=٪۵	
	LRIC	LRMC	LRIC	LRMC
۱۰۰۱	۶/۶۹۵	۶/۸۰۶	۱۱/۰۷۳	۱۱/۰۷۳
۱۰۰۲	۳/۰۰۱	۴/۵۴۲	۹/۶۰۶	۹/۶۲۳
۱۰۰۳	۲۲/۶۰۴	۲۲/۰۴۶	۱۵/۳۲۷	۱۵/۴۴۴
۱۰۰۴	۲۱/۰۰۴	۲۰/۵۹۶	۱۴/۲۲۷	۱۴/۲۳۱
۱۰۰۵	۴/۳۵۷	۴/۷۴۶	۶/۴۷۲	۶/۵۰۸
۱۰۰۶	۲۰/۵۵۷	۲۰/۱۶۶	۱۱/۸۸۵	۱۱/۸۹۴
۱۰۰۷	۴/۳۵۷	۴/۷۴۸	۶/۴۷۲	۶/۵۰۸
۱۰۰۸	۲/۵۱۶	۳/۰۸۳	۱۵/۳۴۷	۱۵/۲۵۴
۱۰۰۹	۲/۴۱۹	۳/۰۰۵	۱۱/۳۰۳	۱۱/۲۰۷
۱۰۱۰	۲/۶۳۹	۳/۱۴۶	۱۸/۱۲۷	۱۷/۸۴۳
۱۰۱۱	۲/۶۳۵	۳/۱۴۳	۱۶/۶۱۷	۱۶/۴۷۴
۱۰۱۲	۲/۳۹۲	۲/۹۸۶	۷/۲۴۰	۷/۱۹۴
۱۰۱۳	۲/۳۹۴	۲/۹۸۶	۶/۴۲۹	۶/۶۸۳
۱۰۱۴	۲/۳۹۴	۲/۹۸۶	۶/۴۲۹	۶/۶۸۳
۱۰۱۵	۲/۳۹۴	۲/۹۸۶	۷/۴۸۷	۷/۳۵۴

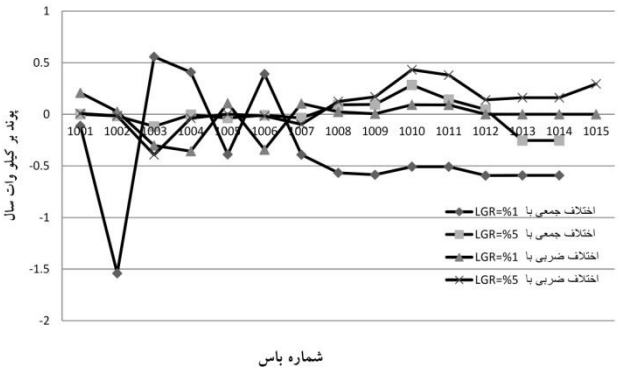
جدول (۳): مقایسهٔ تعرفه‌های دو رویکرد با استفاده از روش ضرب‌کنندهٔ ثابت (پوند بر کیلووات سال)

شمارهٔ باس	LGR=٪۱		LGR=٪۵	
	LRIC	LRMC	LRIC	LRMC
۱۰۰۱	۵/۳۴۲	۵/۱۳۴	۱۰/۶۰۰	۱۰/۵۹۲
۱۰۰۲	۰/۷۶۰	۰/۷۳۴	۷/۹۵۸	۷/۹۷۲
۱۰۰۳	۲۵/۳۱۵	۲۵/۶۱۷	۱۸/۰۲۶	۱۸/۴۱۸
۱۰۰۴	۲۳/۳۱۱	۲۳/۶۶۸	۱۶/۲۸۰	۱۶/۳۱۸
۱۰۰۵	۲/۴۵۹	۲/۳۵۲	۲/۳۱۴	۲/۳۱۲
۱۰۰۶	۲۲/۷۴۷	۲۳/۰۹۰	۱۲/۰۶۲	۱۲/۰۷۹
۱۰۰۷	۲/۴۵۹	۲/۳۵۵	۲/۳۱۴	۲/۴۱۲
۱۰۰۸	/۱۵۳	۰/۱۳۰	۱۸/۲۹۷	۱۸/۱۷۲
۱۰۰۹	۰/۰۳۱	۰/۰۲۶	۱۱/۰۱۴	۱۰/۸۴۵
۱۰۱۰	۰/۳۰۷	۰/۲۱۵	۲۳/۳۰۳	۲۲/۸۷۱
۱۰۱۱	۰/۳۰۲	۰/۲۱۱	۲۰/۵۸۴	۲۰/۲۰۴
۱۰۱۲	۰	۰	۳/۶۹۷	۳/۵۵۷
۱۰۱۳	۰	۰	۲/۲۴۷	۲/۰۸۶
۱۰۱۴	۰	۰	۲/۲۴۷	۲/۰۸۶
۱۰۱۵	۰	۰	۴/۱۴۲	۳/۸۴۷

وقتی LGR به ۵٪ افزایش می‌یابد، بزرگ‌ترین تفاوت برابر ۰/۲۸۴ در باس ۱۰۱۱ است. برای باس‌های دیگر تعرفه با دو رویکرد افزایشی و نهایی نزدیک به هم هستند و اختلاف کمی دارند. در مقایسه با LGR برابر ۱٪، تعرفه‌های این حالت خیلی بیشتر است؛ زیرا وقتی نرخ رشد بار بزرگ‌تر باشد، زمان تقویت شبکه زودتر فرامی‌رسد و در نتیجه تعرفه‌های بالاتری خواهیم داشت.

از جدول (۲) می‌توان دید که با روش جمع‌کنندهٔ ثابت اختلاف تعرفهٔ باس‌ها تغییری نمی‌کند و در نتیجه، اعوجاج سیگنال اقتصادی حداقل خواهد بود. در روش ضرب‌کنندهٔ ثابت، تفاوت قیمت باس‌ها در دو رویکرد افزایشی و نهایی افزایش می‌یابند؛ در نتیجه قیمتِ بیشتر منجر به تعرفهٔ بزرگ‌تر و قیمت صفر منجر به تعرفهٔ صفر می‌شود که در جدول (۳) نشان داده شده است. این موضوع در شکل (۶) نیز بهتر مشاهده می‌شود. در این شکل، نتایج حاصل از جداول (۲) و (۳) به‌صورت یکجا نشان داده شده است.

برای LGR کوچک‌تر، بزرگ‌ترین اختلاف تعرفه دو رویکرد برابر ۰/۳۵۷ (پوند بر کیلووات سال) در باس ۱۰۰۴ است. اختلاف تعرفه در حالت اصلی که از ضرب‌کنندهٔ ثابت استفاده نکردیم برابر ۱/۰۰۱ (پوند بر کیلووات سال) است؛ زیرا تعرفهٔ LRIC در ۰/۲۵ و تعرفهٔ LRMC در ۰/۳۴ ضرب شده‌اند.

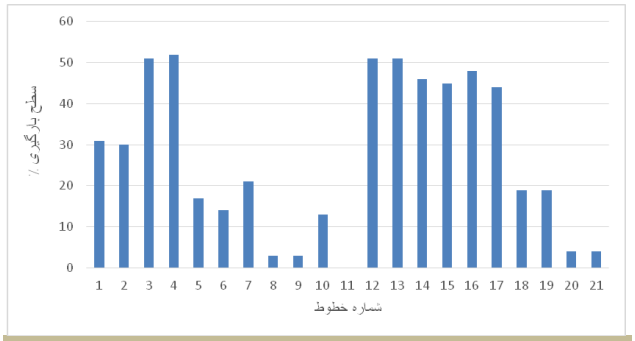


شکل (۶): نمودار اختلاف تعرفه جبران شده جمعی و ضربی برای دو رویکرد افزایشی و نهایی و دو نرخ رشد بار متفاوت در سطح بارگیری پایه

وقتی LGR بزرگ‌تر شود، تعرفه‌های اصلاح‌شده برای جبران کمبود درآمد در دو رویکرد نهایی و افزایشی کاملاً به هم نزدیک شده و بزرگ‌ترین اختلاف آن دو در باس ۱۰۱۱ و برابر ۰/۴۳۳ (پوند بر کیلووات سال) است که اگر با بزرگ‌ترین اختلاف دو تعرفه در جدول (۱) یعنی ۰/۳۲۹ (پوند بر کیلووات سال) مقایسه شود، این تفاوت تعرفه به‌سبب ضرب‌کنندهٔ ثابت افزایش یافته است. به‌طور کلی، در حالت ضرب‌کنندهٔ ثابت اگر قیمت یک باس بیش از حد زیاد باشد، منجر به تعرفهٔ خیلی زیادی خواهد شد.

۲.۶. سطح بارگیری برای ۲۰ درصد بیشتر

در این قسمت، تمام بارها تا ۲۰٪ افزایش داده شدند. بنابراین توان تمام خطوط شبکه حدود ۲۰٪ زیاد خواهد شد. سطح توان خطوط در این حالت در شکل (۷) نشان داده شده است.



شکل (۷): سطح توان خطوط در بار ۲۰٪ بیشتر از بار پایه

در جدول (۴)، تعرفه‌های دو رویکرد برای دو نرخ رشد بار ۱٪ و ۵٪ دیده می‌شود. به‌وضوح تعرفه‌ها همان الگوی بار پایه را دارند که مقداری افزایش یافتند. با مقایسهٔ نتایج جدول (۱) دیده می‌شود که افزایش در تعرفه‌ها برای دو رویکرد یکسان است. برای LGR کوچک‌تر افزایش تعرفه بیشتر و برای LGR بزرگ‌تر افزایش تعرفه کمتر است.

جدول (۴): مقایسهٔ تعرفه‌های دو رویکرد برای دو نرخ رشد بار و سطح بارگیری ۲۰٪ بیشتر (پوند بر کیلووات سال)

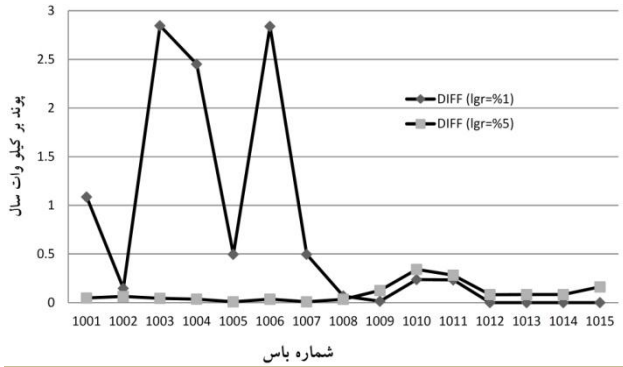
شمارهٔ باس	LGR=٪۱			LGR=٪۵		
	LRIC	LRMC	DIFF	LRIC	LRMC	DIFF
۱۰۰۱	۱۲/۵۲	۱۱/۴۳	۱/۰۸۶	۶/۲۹	۶/۲۵	۰/۰۴۷
۱۰۰۲	۱/۷۵۷	۱/۶۱	۰/۱۴۶	۴/۷۰	۶/۶۸	۰/۰۶۳
۱۰۰۳	۶۰/۱۹	۵۷/۳۵	۲/۸۴۶	۱۰/۸۷	۱۰/۸۳	۰/۰۴۴
۱۰۰۴	۵۵/۲۱	۵۲/۶۷	۲/۴۵۱	۹/۶۶	۹/۶۲	۰/۰۳۶
۱۰۰۵	۵/۳۹	۵/۸۹۴	۰/۴۹۶	۱/۳۸	۱/۳۸	۰/۰۰۸
۱۰۰۶	۵۳/۸۷	۵۱/۴۲	۲/۸۳۹	۷/۱۶	۷/۱۲	۰/۰۳۵
۱۰۰۷	۵/۴۹	۴/۸۹	۰/۴۹۶	۱/۴۸	۱/۴۶	۰/۰۰۸
۱۰۰۸	۰/۴۹	۰/۰۳۲	۰/۰۶۸	۱۱/۲۱	۱۱/۰۸	۰/۰۳۴
۱۰۰۹	۰/۰۷۶	۰/۰۶	۰/۰۱۴	۶/۵۷	۶/۴۵	۰/۱۲۵
۱۰۱۰	۰/۷۸	۰/۵۴	۰/۲۳۷	۱۴/۴۵	۱۴/۱۴	۰/۳۴۱
۱۰۱۱	۰/۷۷	۰/۵۴	۰/۲۳۳	۱۲/۸۵	۱۲/۵۶	۰/۲۸۲
۱۰۱۲	۰	۰	۰	۲/۱۸	۲/۱۰	۰/۰۸۲
۱۰۱۳	۰	۰	۰	۱/۳۱	۱/۲۳	۰/۰۸۳
۱۰۱۴	۰	۰	۰	۱/۳۱	۱/۲۳	۰/۰۸۳
۱۰۱۵	۰	۰	۰	۲/۴۳	۲/۲۷	۰/۱۶۲

در جدول (۵)، تعرفه‌های محاسبه‌شده با روش جمع‌کنندهٔ ثابت نشان داده شده است. برای LGR کم، روش جمع‌کنندهٔ ثابت در بعضی از باس‌ها منجر به تعرفهٔ منفی می‌شود. این بدان علت است که قیمت باس‌ها تحت‌الشعاع قیمت بالای باس‌های ۱۰۰۱، ۱۰۰۴ و ۱۰۰۶ است که به خطوط پربار متصل‌اند.

جدول (۵): مقایسهٔ تعرفه‌های دو رویکرد با استفاده از روش جمع‌کنندهٔ ثابت و سطح بارگیری ۲۰٪ بیشتر (پوند بر کیلووات سال)

شمارهٔ باس	LGR=٪۱		LGR=٪۵	
	LRIC	LRMC	LRIC	LRMC
۱۰۰۱	-۵/۱۹۶	-۴/۸۳۴	۹/۰۳۶	۹/۰۴۲
۱۰۰۲	-۱۵/۱۹۶	-۱۴/۶۵۴	۷/۴۴۶	۷/۴۷۲
۱۰۰۳	۴۲/۳۷۴	۴۱/۰۸۶	۱۳/۶۱۶	۱۳/۶۲۲
۱۰۰۴	۳۷/۴۹۴	۳۶/۴۹۶	۱۲/۴۰۶	۱۲/۴۱۲
۱۰۰۵	−۱۲/۳۲۶	-۱۱/۳۷۰	۴/۱۲۶	۴/۱۷۲
۱۰۰۶	۳۶/۱۵۴	۳۵/۲۰۶	۹/۹۰۶	۹/۹۱۲
۱۰۰۷	-۱۲/۳۲۶	-۱۱/۳۷۴	۴/۱۲۶	۴/۱۵۲
۱۰۰۸	-۱۷/۳۲۶	-۱۵/۹۴۴	۱۳/۹۵۶	۱۳/۸۷۲
۱۰۰۹	-۱۷/۶۴۰	-۱۶/۲۰۴	۹/۳۱۶	۹/۲۴۲
۱۰۱۰	-۱۶/۹۳۶	-۱۵/۷۲۴	۱۷/۱۹۶	۱۶/۹۳۲
۱۰۱۱	-۱۶/۹۴۶	-۱۵/۷۲۴	۱۵/۵۹۶	۱۵/۳۵۲
۱۰۱۲	-۱۷/۷۱۶	-۱۶/۲۴۶	۴/۹۲۶	۴/۸۹۲
۱۰۱۳	-۱۷/۷۱۶	-۱۶/۲۴۶	۴/۰۵۶	۴/۰۲۲
۱۰۱۴	-۱۷/۷۱۶	-۱۶/۲۴۶	۴/۰۵۶	۴/۰۲۲
۱۰۱۵	-۱۷/۷۱۶	-۱۶/۲۴۶	۵/۱۷۶	۵/۰۶۲

درآمد حاصل از این سه باس قبل از اعمال روش جمع‌کنندهٔ ثابت، از درآمد مجاز بیشتر بوده است. در نتیجه با استفاده از روش جمع‌کنندهٔ ثابت، یک عدد منفی حاصل می‌شود که وقتی به قیمت باس‌های شبکه اضافه شود، بیشتر باس‌ها تعرفهٔ منفی پیدا می‌کنند. وقتی که LGR تا ۵٪ افزایش یابد، تعرفه برای تمام باس‌ها مثبت می‌شود؛ زیرا در این حالت، عدد مثبتی به قیمت تمام باس‌ها اضافه شده و اختلاف تعرفه‌ها در مقایسه با حالت LGR برابر ۱٪ کمتر خواهد شد. تفسیر نتایج جدول (۴) در شکل (۸) که به‌صورت نمودار رسم شده، مشهودتر است. تفاوت تعرفه‌های با دو رویکرد مختلف برای دو نرخ رشد بار و سطح بارگیری ۲۰٪ بیشتر در این شکل مشاهده می‌شود.



شکل (۸): نمودار اختلاف تعرفه با دو رویکرد افزایشی و نهایی برای دو نرخ رشد بار متفاوت در سطح بارگیری ۲۰٪ بیشتر

نتایج تعرفه با استفاده از روش ضرب‌کنندهٔ ثابت در جدول (۶) نشان داده شده است. در مقایسه با نتایج جدول (۱) تعرفه‌ها برای تمام باس‌ها کمی کوچک‌تر شده‌اند؛ زیرا در این حالت تقاضا برای مصرف افزایش یافته است.

جدول (۶): مقایسه تعرفه‌های دو رویکرد با استفاده از روش ضرب‌کنندهٔ ثابت و سطح بارگیری ۲۰٪بیشتر (پوند بر کیلووات سال)

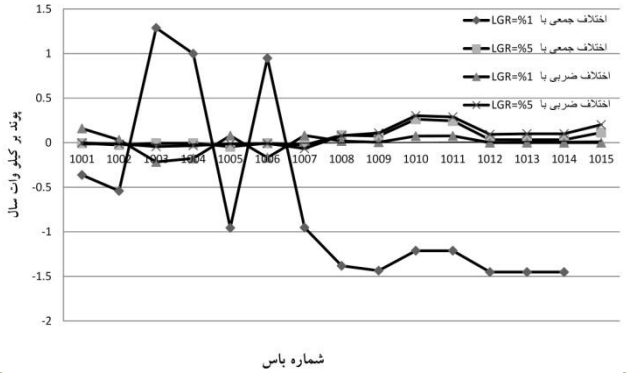
شمارهٔ باس	LGR=٪۱		LGR=٪۵	
	LRIC	LRMC	LRIC	LRMC
۱۰۰۱	۴/۴۳۶	۴/۲۷۶	۸/۷۶۷	۸/۷۶۹
۱۰۰۲	۰/۶۳۳	۰/۶۰۲	۶/۵۵۱	۶/۵۶۶
۱۰۰۳	۲۱/۲۳۸	۲۱/۴۵۴	۱۵/۱۵۰	۱۵/۱۹۴
۱۰۰۴	۱۹/۵۶۰	۱۹/۷۴۷	۱۳/۴۶۴	۱۳/۴۹۷
۱۰۰۵	۱/۹۱۰	۱/۸۳۱	۱/۹۲۳	۱/۹۳۶
۱۰۰۶	۱۹/۰۸۶	۱۹/۲۵۴	۹/۹۷۹	۹/۹۸۹
۱۰۰۷	۱/۹۱۰	۱/۸۲۹	۱/۹۲۳	۱/۹۸۹
۱۰۰۸	۰/۱۳۸	۰/۱۲۰	۱۵/۶۲۴	۱۵/۵۴۵
۱۰۰۹	۰/۰۲۷	۰/۰۲۲	۹/۱۵۷	۹/۰۴۹
۱۰۱۰	۰/۲۷۶	۰/۲۰۲	۲۰/۱۴۰	۱۹/۸۳۸
۱۰۱۱	۰/۲۷۴	۰/۱۹۸	۱۷/۹۱۰	۱۷/۶۲۱
۱۰۱۲	۰	۰	۳/۰۳۸	۲/۹۴۶
۱۰۱۳	۰	۰	۱/۸۲۶	۱/۷۲۶
۱۰۱۴	۰	۰	۱/۸۲۶	۱/۷۲۶
۱۰۱۵	۰	۰	۳/۳۸۷	۳/۱۸۵

برخلاف روش جمع‌کنندهٔ ثابت در این روش برای LGR برابر ۱٪ تعرفه منفی وجود ندارد. از طرف دیگر، تمام تعرفه‌های به‌دست‌آمده در این روش در مقایسه با جدول (۴) کوچک‌تر شدند؛ زیرا مضرب کوچک‌تری به تمام تعرفه‌ها اعمال شده است.

سازوکار جبران کمبود درآمد توسط بهره‌بردار شبکهٔ توزیع بسیار مهم است؛ چراکه این نهاد تصمیم می‌گیرد چگونه تعرفه‌های به‌دست‌آمده از رویکردهای بلندمدت نهایی و افزایشی، به‌گونه‌ای تغییر کند تا تعرفه بر اساس استفادهٔ مشتری از شبکه باشد.

در عمل قسمت زیادی از درآمد بهره‌بردارهای شبکهٔ توزیع از طریق این سازوکار حاصل می‌شود. در روش جمع‌کنندهٔ ثابت اختلاف بین تعرفه باس‌ها تقریباً ثابت است. بنابراین اعوجاج سیگنال اقتصادی برای قیمت‌های با رویکرد نهایی و یا افزایشی حداقل خواهد بود.

در مقابل در روش ضرب‌کنندهٔ ثابت اختلاف بین تعرفهٔ باس‌ها در یک عدد ثابت ضرب شده که منجر به اعوجاج بیشتری در سیگنال اقتصادی ارسال‌شده برای مشتریان شبکه می‌شود. بنابراین با این تحلیل روش جمع‌کنندهٔ ثابت توسط اکثر بهره‌بردارهای شبکهٔ توزیع برای جبران کمبود درآمد شبکه پذیرفته شده است. در شکل (۹) تفسیر نتایج حاصل از جداول (۵) و (۶) به‌صورت یکجا با چهار نمودار اختلاف تعرفهٔ جبران‌شدهٔ جمعی و ضربی برای دو رویکرد افزایشی و نهایی و دو نرخ رشد بار متفاوت در سطح بارگیری ۲۰٪ بیشتر نشان داده شده است.



شکل (۹): نمودار اختلاف تعرفه جبران شده جمعی و ضربی برای دو رویکرد افزایشی و نهایی و دو نرخ رشد بار متفاوت در سطح بارگیری ۲۰٪ بیشتر

۷. نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش نوین با تحلیل حساسیت بر پایهٔ LRMC ارائه شد. در این روش، یک رابطهٔ تحلیلی برای تغییر ارزش فعلی سرمایه‌گذاری آینده نسبت به افزایش توان باس‌ها به دست آمد. نتایج حاصل از یک شبکهٔ توزیع عملی و مقایسهٔ آن‌ها با روش پایهٔ LRIC حاکی از آن است که:

۱. از نظر دقت، مادامی که تغییر توان تزریقی در باس کوچک است، تعرفه با رویکردهای LRIC و LRMC نتایج کاملاً مشابهی دارد. در شرایطی که شبکه در اوج بارگیری خود و نرخ رشد بار (LGR) کم است، اختلاف تعرفهٔ دو رویکرد به بیشترین حالت خود می‌رسد. برعکس وقتی تغییرات توان تزریقی در باس زیاد باشد، تفاوت بین دو تعرفه آشکارتر شده و بیشترین اختلاف دو تعرفه زمانی اتفاق می‌افتد که شبکه در اوج بارگیری خود و نرخ رشد بار زیاد باشد. تعرفه‌ها وابسته به قیمت باس‌ها هستند و همان الگوی قیمت باس‌ها را دنبال می‌کنند.

۲. از نظر سرعت، تعرفهٔ LRIC نیاز به دو بار اجرای پخش بار برای تزریق با و بدون توان در هر باس دارد تا بتوان اثر تزریق توان را در هزینهٔ بلندمدت تعیین کرد. برای سیستم‌های بزرگ، بار محاسباتی برحسب اندازهٔ سیستم به شکل نمایی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، روش پیشنهادشدهٔ تحلیلی با رویکرد LRMC بار محاسباتی را برای سیستم‌های با اندازهٔ بزرگ کاهش می‌دهد؛ زیرا با استفاده از تحلیل حساسیت نیازی به اجرای پخش بار مجدد برای هر تزریق توان در باس وجود ندارد.

۳. از نظر انعطاف‌پذیری، در مدل LRIC می‌توان اثر تزریق توان با

هر اندازه‌ای را روی خطوط شبکه با استفاده از شبیه‌سازی به دست آورد. ولی نتایج روش پیشنهادی LRMC فقط برای تغییرات کوچک تزریق توان بسیار دقیق است. برای تغییرات بزرگ تزریق توان تعرفه‌های به‌دست‌آمده از روش پیشنهادی LRMC می‌تواند بسیار متفاوت از تعرفه‌های LRIC باشد.

۴. در نهایت، فرایند جبران کمبود درآمد از این حیث که چگونه باعث اختلاف تعرفهٔ LRIC و LRMC می‌شود، بسیار مهم است. روش جمع‌کنندهٔ ثابت به‌طور یکنواخت، قیمت کل باس‌ها را کم و زیاد می‌کند و در نتیجه، اختلاف تعرفه‌ها تقریباً ثابت است. از طرف دیگر، در روش ضرب‌کنندهٔ ثابت، قیمت تمام باس‌ها به‌طور نسبی افزایش می‌یابد. اگر با این مضرب قیمت یک باس خیلی بزرگ شود، ممکن است سیگنال اقتصادی هزینهٔ توسعهٔ آیندهٔ شبکه نسبت به تزریق توان در یک باس را تخریب کند. برای همین در بیشتر شبکه‌ها ترجیح می‌دهند از روش جمع‌کنندهٔ ثابت استفاده کنند.

به‌طور خلاصه، نتایج روش پیشنهادی LRMC در بیشتر شرایط بهره‌برداری شبکه، مشابه نتایج روش LRIC است؛ با این تفاوت که نه‌تنها از نظر محاسباتی کارآمد است، بلکه به‌سبب رویکرد نهایی آن، سیگنال اقتصادی فعلی و مهم‌تر از آن نیاز سرمایه‌گذاری آینده را نیز نشان می‌دهد.

مراجع

[1] Shirmohammadi, D., "*Some Fundamental, Technical Concepts about Cost Based Transmission Pricing*", IEEE Transaction on Power System, Vol. 11, No. 2, pp. 1002–1008, May 1996.

[2] Jing, Z., "*Review of Transmission Fixed Costs Allocation Methods*", In Proceeding. IEEE Power Engineering Society. General Meeting, Toronto, Canada, pp. 2585–2592, Jul. 13–17, 2003.

[3] Lai, L. L., "*Power System Restructuring and Deregulation: Trading, Performance and Information Technology*", John Wiley & Sons, Chichester, UK, 2001.

[4] Willis, H. L., Philipson, L., "*Understanding Electric Utility and De-regulation*", 2016.

[5] Perez-Arriaga, I. J., Rudnick, H., Stadlin, W. O., "*International Power System Transmission Open Access Experience*", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 10, No. 1, pp. 554-564, 1995.

[6] Marangon Lima, J. W., "*Invested Related Pricing for Transmission Use: Drawbacks and Improvements in Brazil"*, Power Technology, 2007 IEEE Lausanne, pp. 887-910, 2007.

[7] Shirmohammadi, D., "*Cost of Transmission Transactions: An Introduction*", IEEE Transaction on Power System, Vol. 6, No. 3, pp. 1006–1016, Aug. 1991.

[8] Marangon Lima, J. W., Oliverira, E. J., "*The Long-Term Impact of Transmission Pricing*", IEEE Transaction on Power System, Vol. 13, No. 4, pp. 1514–1520, Nov. 1998.

[9] Ponce De Leao, M. T., Saraiva, J. T., "*Solvin the Revenue Reconciliation Problem of Distribution Network Providers Using Long-Term Marginal Prices*", IEEE Power Engineering Review, Vol. 22, No. 11, pp. 55-55, 2002.

[10] Li, F., "*Long-Run Marginal Cost Pricing Based on Network Spare Capacity*", IEEE Transaction on Power System, Vol. 22, No. 2, pp. 885–886, May 2007.

[11] Rubio-Oderiz, F. J., Perez-Arriaga, I. J., "*Marginal Pricing of Transmission Services: A Comparative Analysis of Network Cost Allocation Methods*", IEEE Transaction on Power System, Vol. 15, No. 1, pp. 448–454, Feb. 2000.

[12] Li, F., Tolley, D. L., "*Long-Run Incremental Cost Pricing Based on Unused Capacity*", IEEE Transaction on Power System, Vol. 22, No. 4, pp. 1683-1689, 2007.

[13] Wang, J., "*Lon-Run Marginal Cost Pricing Methodologies in Open Access Electricity Networks*", PhD: University of Bath, 2007.

[14] Heng, H. Y., Li, F., "*Literature Review of Long-Run Marginal Cost Pricing and Long-Run Incremental Cost Pricing*", In Universities Power Engineering Conference, 2007. UPEC 2007. pp. 73-77, 2007.

[15] Gu, C., Li, F., "*Sensitivity Aanalysis of Long-Run Incremental Charge Based on Analytical Approach*", In Electricity Distribution – Part1, 2009. CIRED 2009. 20th International Conference and Exhibition on, pp. 1-5, 2009.

[16] Kovacs, R. R., Leverett, A. L., "*A Load Flow Based Method for Calculating Embedded, Incremental and Marginal Cost of Transmission Capacity*", IEEE Transaction on Power System, Vol. 9, No. 1, pp. 272–278, Feb., 1994.

[17] Limpasuwan, T., Tipmabutr, S., "*Comparison in Varied Aspects of Transmission Pricing Used on Long Run Average Incremental Cost*", In Proceeding IEEE/PES Asia Pacific Transmission and Distribution Conference Exhibition, pp. 1990–1995, 2002.

[18] Bakirtzis, A., "*Comparison of Two Methods for Long-Run Marginal Cost-Based Transmission Use-of-System Pricing*", Proc. Inst. Elect. Eng. Gen., Transm., Distrib., Vol. 148, No. 5, pp. 477–481, Sep., 2001.

[19] Méndez, V. H., "*Impact of Distributed Generation on Distribution Investment Deferral*", Int. J. Elect. Power Energy Syst., Vol. 28, No. 4, pp. 244–252, 2006.

[20] Sotkiewicz, P. M., Vignolo, J. M., "*Allocation of Fixed Costs in Distribution Networks with Distributed Generation*", IEEE Transaction on Power System, Vol. 21, No. 2, pp. 639–652, May 2006.

[21] Pan, J., "*Review of Usage-Based Transmission Cost Allocation Methods under Open Access*", IEEE Transaction on Power System, Vol. 15, No. 4, pp. 1218–

1224, Nov., 2000.

[22] Li, F., Tolley, D. L., "*Long-Run Incremental Cost Pricing Based on Unused Capacity*", IEEE Transaction on Power System, Vol. 22, No. 4, pp. 1683–1689, Nov., 2007.

[23] National Grid. Electricity Ten-Year Statement, M. T., 2013.

[24] Ponce De Leao, Saraiva, J. T., "*Solving the Revenue Reconciliation Problem of Distribution Network Providers Using Long-Term Marginal Prices*", Power Engineering Review, IEEE, Vol. 22, pp. 55-55, 2012.

[25] Sedaghati, A., "*Cost of Transmission System Usage Based on an Economic Measure*", IEEE Transaction on Power System, Vol. 21, No. 2, May 2006.

[26] Kim, H., Baughman, M. L., "*The Economic Efficiency Impacts of Alternatives for Revenue Reconciliation*", IEEE Transaction on Power System, Vol. 12, No. 3, pp. 1129–1135, Aug., 1997.