اصلاح روش ردگیری بار در قیمت‌گذاری انتقال با در نظر گرفتن ضرایب همبستگی

محمدتقی عاملی و میثم انصاری

چکیده: با تجدید ساختار در صنعت برق، قیمت‌گذاری انتقال به یکی از مسایل مهم صنعت برق مبدل شده است. برای دست‌یابی به یک محیط رقابتی سالم باید قیمت‌گذاری به‌صورت منصفانه صورت گیرد. در این مقاله روش ردگیری بار مورد بحث قرار می‌گیرد که هزینه انتقال برای هر بازیگر قبل از اجرای بازار با استفاده از داده‌های آماری برآورد می‌شود. در این مقاله از ترکیب ضرایب رگرسیون خطی و ضرایب همبستگی، ضرایب مشارکت به‌دست می‌آید که توصیف مناسبی از هزینه انتقال ارائه می‌دهد. برای این منظور ابتدا با استفاده از داده‌های آماری نقاط کار مختلفی حول نقطه کار نامی ساخته می‌شود. سپس برای هر نقطه کار پخش بار شبکه محاسبه شده و ضرایب رگرسیون خطی و همبستگی بین میزان تولید/ مصرف هر تولیدکننده/ مصرف‌کننده و توان عبوری از هر خط به‌دست می‌آید و از ترکیب این ضرایب سهم بازیگران از هزینه انتقال محاسبه می‌شود. در پایان ضرایب مشارکت برای شبکه ۳۹شینه IEEE محاسبه شده و نتایج آن با روش‌های قبلی مقایسه می‌شود. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که روش‌های بررسی‌شده هزینه انتقال را پوشش می‌دهند اما سهم تعیین‌شده برای هر بازیگر با استفاده از روش این مقاله، تناسب بیشتری با میزان استفاده از شبکه انتقال دارد.

کلید واژه: **ردگیری بار، ضریب همبستگی، Ex - ante Transmission Pricing، ضریب رگرسیون خطی.**

فهرست نمادهای به‌کار رفته

ΔP_k	تخمین تغییر توان خط k با استفاده از روش‌های بررسی‌شده
ΔP_{real_k}	مقدار واقعی تغییر توان خط k به‌دست آمده از آنالیز حساسیت
$\varepsilon g_k^{(n)}$	خطای ناشی از رگرسیون‌گیری برای خط k و بر اساس داده‌های مرحله n برای گروه ژنراتورها
$\varepsilon l_k^{(n)}$	خطای ناشی از رگرسیون‌گیری برای خط k و بر اساس داده‌های مرحله n برای گروه بارها
σ_x	واریانس متغیر تصادفی x
σ_{xy}	کواریانس بین متغیرهای تصادفی x و y
σ_y	واریانس متغیر تصادفی y
CG_{ik}	سهم ژنراتور i از هزینه خط k
CL_{jk}	سهم بار jاز هزینه خط k
$F_k^{(n)}$	توان عبوری از خط k در مرحله n
F_k	توان عبوری از خط k
$P_{l.}$	مقدار نامی توان مصرفی بار
PG_i	توان تولیدی ژنراتور i
PL_j	توان مصرفی بار j
$P_{g.}$	مقدار نامی توان تولیدی ژنراتور
P_{real_k}	توان عبوری از خط k
$V_{g.}$	اندازه ولتاژ نامی در شین‌های دارای ژنراتور
WG_k	سهم تولیدکنندگان از هزینه خط k
WL_k	سهم مصرف‌کنندگان از هزینه خط k
W_k	کل هزینه استفاده از خط k
$a_{.}$ و a_i	ضرایب رگرسیون خطی برای ژنراتورها
$b_{.}$ و b_j	ضرایب رگرسیون خطی برای بارها
er_k	درصد خطای ناشی از تعیین سهم از توان عبوری از خط k
rg_{ik}	ضریب همبستگی بین ژنراتور i و خط k
rl_{jk}	ضریب همبستگی بین بار jو خط k
α_{ik}	ضریب مشارکت ژنراتور i در توان خط k
a_{ik}	ضرایب رگرسیون خطی برای ژنرتورها و برای خط k
β_{jk}	ضریب مشارکت بار jدر توان خط k
b_{jk}	ضرایب رگرسیون خطی برای بارها و برای خط k
σ_l	واریانس توزیع احتمال برای توان مصرفی بارها
σ_g	واریانس توزیع احتمال برای توان تولیدی ژنراتور
σ_v	واریانس توزیع احتمال برای ولتاژ نامی در شین‌های ژنراتور
ng	تعداد ژنراتورها
nl	تعداد بارها
$total_er$	درصد خطای ناشی از تعیین هزینه هر بازیگر

۱- مقدمه

قیمت‌گذاری انتقال به یکی از مهم‌ترین مسایل صنعت برق مبدل شده است. شبکه انتقال دارای هزینه ثابت زیاد و هزینه متغیر بسیار کم است، لذا باید ساز و کار متفاوتی برای قیمت‌گذاری انتقال فراهم شود. برای دست‌یابی به یک محیط رقابتی سالم باید قیمت‌گذاری به‌صورت منصفانه صورت گیرد و از طرفی قیمت‌گذاری باید به‌گونه‌ای باشد که مالکین شبکه انتقال را به افزایش ظرفیت شبکه تشویق کند تا در آینده شبکه با کمبود ظرفیت مواجه نشود. بر این اساس روش‌های گوناگونی برای قیمت‌گذاری پیشنهاد شده‌اند. این روش‌ها هر یک به‌گونه‌ای هزینه انتقال را پوشش می‌دهند ولی معیار تعیین قیمت در این روش‌ها با هم متفاوت است. بهترین معیار برای قیمت‌گذاری، سهم هر بازیگر در استفاده از شبکه انتقال است. به‌دست آوردن سهم هر بازیگر در توان عبوری از یک خط کار مشکلی است و تا کنون روش دقیقی برای آن ارائه نشده است. از طرفی سهم هر بازیگر به نقطه کار شبکه بستگی دارد. بدین ترتیب باید به دنبال روشی بود که بتوان توسط آن ضرایبی را معرفی کرد که با وجود

این مقاله در تاریخ ۹ آبان ماه ۱۳۸۸ دریافت و در تاریخ ۲۶ مرداد ماه ۱۳۹۱ بازنگری شد.

محمدتقی عاملی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعت آب و برق، تهران، (email: ameli@pwut.ac.ir).

میثم انصاری، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه یزد، یزد، (email: ansari.meisam@gmail.com).

Archive of SID

www.SID.ir

تغییرات بار شبکه توصیف مناسبی از سهم هر بازیگر از هزینه انتقال داشته باشد.

۲- بررسی روش‌های معمول

۲-۱ روش برچسب پستی[1]

در این روش هزینه انتقال به‌صورت مساوی بین مشترکین تقسیم می‌شود. البته برای حمایت از تولیدکنندگان و تشویق آنها به‌منظور ارتقای ظرفیت نصب‌شده، ممکن است سهم مصرف‌کنندگان از هزینه انتقال بیشتر از تولیدکنندگان باشد. این روش بسیار ساده و قابل پیاده‌سازی است و هزینه‌های انتقال را پوشش می‌دهد اما روش منصفانه‌ای برای دریافت هزینه از مشترکان نیست [۱].

۲-۲ روش مسیر قراردادی[2]

در این روش یک مسیر به‌صورت قراردادی برای انتقال توان بین یک مصرف‌کننده و یک تولیدکننده فرض می‌شود. این روش در قراردادهای دوجانبه مورد استفاده قرار می‌گیرد و مسیر انتخاب‌شده از قوانین پخش بار پیروی نمی‌کند. در این روش با بالابردن افق زمانی می‌توان برخی از هزینه‌های ثابت انتقال را پوشش داد [۲].

۲-۳ روش مگاوات مایل[3]

در این روش هزینه انتقال با فاصله مصرف‌کننده تا محل تولید رابطه مستقیم دارد و بر این اساس سهم هر بازیگر با توجه به پخش بار DC محاسبه می‌شود. مقادیر به‌دست آمده با راکتانس خطوط رابطه عکس دارد و هرچه بار به محل تولید نزدیک‌تر باشد، هزینه کمتری به او تعلق می‌گیرد. این روش هزینه انتقال را پوشش می‌دهد و بهتر از روش‌های قبل سهم بازیگران را تعیین می‌کند اما مشکل این روش دقت نسبتاً پایین پخش بار DC است. همچنین پخش بار DC بر اساس توان تزریقی شین‌ها کار می‌کنند و به‌صورت جداگانه سهم گروه تولیدکنندگان و گروه مصرف‌کنندگان را مشخص نمی‌کند [۳].

۲-٤ روش حق عضویت[4]

در این روش بازیگران باید قبل از شرکت در بازار به اندازه نیاز ظرفیت انتقال خریداری کنند. میزان ظرفیت انتقال خریداری‌شده با توجه به ضرایب سهم بازیگران تعیین می‌شود و ضرایب سهم بازیگران با توجه به توان تزریقی در هر شین محاسبه می‌شود. این روش هزینه‌های ثابت را پوشش می‌دهد [۴].

۲-۵ روش ردگیری بار[5]

در این روش بر اساس محاسبات آماری و رگرسیون‌گیری خطی، رابطه بین توان مصرفی/ تولیدی هر بازیگر و سهم بازیگر از توان عبوری خطوط به‌صورت تابعی خطی تخمین زده می‌شود. بدین ترتیب هزینه انتقال هر خط به نسبت سهم بازیگران از توان عبوری از خط مورد نظر بین آنها تقسیم می‌شود [۵] و [۶].

1. Postage Stamp
2. Contract Path
3. MW Mile
4. Counter Flow
5. Load Following

۲-٦ روش خرید حقوق اقتصادی انتقال[6] (FTR)

در این روش قراردادی بین بازیگران بازار و مالکین شبکه بسته می‌شود و بازیگران بازار برای مدتی به اندازه نیاز خود ظرفیت انتقال را خریداری می‌کنند. مدت این قرارداد ممکن است بین چند ماه تا چند سال و می‌تواند اجباری و یا اختیاری باشد که در صورت اختیاری‌بودن، بازیگران را در مقابل افزایش ناگهانی هزینه انتقال بیمه می‌کند. در این روش برای جلوگیری از احتکار ظرفیت انتقال، باید قوانین مناسبی وضع شود [۷].

۲-۷ روش ضرایب توزیع[7]

در این روش سهم بازیگران بازار از هزینه انتقال با استفاده از ضرایب توزیع محاسبه می‌شود. ضرایب توزیع برای بارها و ژنراتورها به‌صورت جداگانه محاسبه می‌شود، سپس هزینه انتقال به سه بخش هزینه تلفات، هزینه قیمت‌گذاری گرهی و هزینه انباشتگی تقسیم شده و با محاسبه هر بخش در نهایت هزینه انتقال محاسبه می‌شود. در این روش قیمت‌های تعیین‌شده به انتخاب شین مرجع بستگی ندارد و تنها تابع نقطه کار سیستم می‌باشد [۸] و [۹].

برای به‌کار بردن هر یک از روش‌های نام‌برده، به یک نهاد نظارتی[8] قوی و کارآمد نیاز است. تجارب کشورهای گوناگون مانند آرژانتین، السالوادور، پرو و ... نشان می‌دهد در صورت ضعف نهاد نظارتی هیچ یک از روش‌های یادشده کارایی لازم را نخواهد داشت [۱۰].

۳- روش ردگیری بار اصلاح‌شده

به‌طور کلی قیمت‌گذاری انتقال به عواملی مانند تلفات و انباشتگی خطوط بستگی دارد. روش ردگیری بار یکی از روش‌های قبل از وقوع[9] در قیمت‌گذاری انتقال است. در روش پیشنهادی موجود در [۶]، برای به‌دست آوردن سهم بازیگران فقط از ضرایب رگرسیون خطی استفاده شده است در حالی که رگرسیون خطی به تنهایی توصیف خوبی از وابستگی دو متغیر به‌دست نمی‌دهد. برای به‌دست آوردن مفهوم بهتری از وابستگی بین دو متغیر باید ضرایب رگرسیون را در کنار ضرایب همبستگی مورد استفاده قرار داد و سهم هر بازیگر را با توجه به ترکیب ضرایب رگرسیون و ضرایب همبستگی تعیین کرد. برای قیمت‌گذاری منصفانه، ابتدا باید سهم هر بازیگر از توان عبوری خطوط تعیین شود. توان عبوری هر خط، متشکل از توان تولیدی ژنراتورها از یک طرف و از طرف دیگر متشکل از توان مصرفی بارها است. بدین ترتیب می‌توان توان خطوط را به‌صورت ترکیب خطی توان تولیدی ژنراتورها و نیز به‌صورت ترکیب خطی از توان مصرفی بارها در نظر گرفت. روابط (۱) و (۲) چگونگی این امر را نشان می‌دهند

$$F_k = \sum_{i=1}^{ng} \alpha_i . PG_i + \alpha_0 \qquad (1)$$

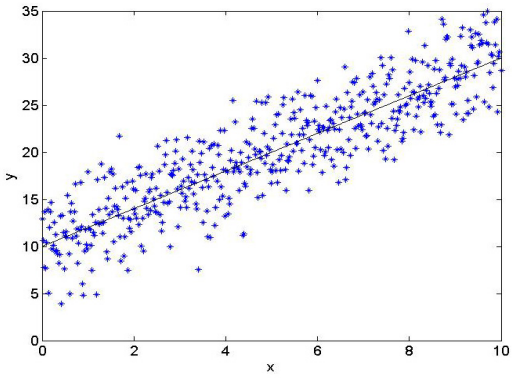
$$F_k = \sum_{j=1}^{nl} b_j . PL_j + b_0 \qquad (2)$$

در مرحله بعد برای گروه تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان ضرایبی تحت عنوان ضرایب مشارکت محاسبه می‌شود. این ضرایب برای هر گروه به‌صورت جداگانه به‌دست می‌آید که با داشتن ضرایب مشارکت می‌توان سهم هر بازیگر را از هزینه انتقال به‌دست آورد.

6. Financial Transmission Right
7. Distributed Factor
8. Regulator
9. Ex - Ante

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱: منحنی رگرسیون یک توزیع آماری با ضریب همبستگی کم.

۳-۱ محاسبه سهم هر بازیگر از هزینه انتقال

برای محاسبه سهم هر بازیگر از هزینه انتقال، ابتدا باید سهم او از توان عبوری تک تک خطوط محاسبه شود. سهم نهایی بازیگر از مجموع سهم او از خطوط شبکه به‌دست می‌آید. اگر هزینه خط k به نسبت γ بین گروه تولیدکنندگان و گروه مصرف‌کنندگان تقسیم شود، در این صورت سهم گروه تولیدکنندگان و گروه مصرف‌کنندگان به‌صورت (۳) به‌دست می‌آید

$$\begin{aligned} WG_k &= (1-\gamma).W_k \\ WL_k &= \gamma.W_k \end{aligned} \qquad (3)$$

در مرحله بعد با استفاده از ضرایب مشارکت، هزینه تعیین‌شده بین بازیگران بازار تقسیم می‌شود. بدین ترتیب سهم هر بازیگر به‌صورت (۴) و (۵) به‌دست می‌آید

$$CL_{jk} = \frac{\beta_{jk}}{\sum_{j=1}^{nl}\beta_{jk}} \quad , \quad j = 1,2,\ldots,nl \qquad (4)$$

$$CG_{ik} = \frac{\alpha_{ik}}{\sum_{i=1}^{ng}\alpha_{ik}} \quad , \quad i = 1,2,\ldots,ng \qquad (5)$$

در این مرحله ممکن است سهم برخی بازیگران از هزینه برخی خطوط منفی به‌دست آید. در چنین شرایطی حضور بازیگر مربوطه باعث جاری‌شدن توانی در خلاف جهت توان عبوری از خط شده و بدین ترتیب مقداری از ظرفیت خط آزاد می‌شود. به همین دلیل حضور بازیگر به نفع شبکه است و از این رو باید هزینه‌ای بابت استفاده از شبکه به او پرداخت شود.

۳-۲ ساخت نقاط کار نمونه برای محاسبه ضرایب مشارکت

ضرایب مشارکت با توجه به ضرایب رگرسیون خطی و ضرایب همبستگی به‌دست می‌آید. برای محاسبه این ضرایب به تعداد زیادی نقطه کار نمونه نیاز است. نقاط کار مورد نیاز با تغییر ولتاژ ژنراتورها، توان مصرفی بارها و توان تولیدی ژنراتورها حول مقدار نامی خود ساخته می‌شوند. این تغییرات با توزیع نرمال و واریانس مشخص صورت می‌گیرند. رابطه (۶) به‌صورت مفهومی چگونگی این امر را نشان می‌دهد

$$\begin{cases} P_G \sim N(P_{g.}, \sigma_g) \\ V_g \sim N(V_{g.}, \sigma_v) \\ P_L \sim N(P_{l.}, \sigma_l) \end{cases} \qquad (6)$$

برای به‌دست آوردن نتایج بهتر باید در انتخاب واریانس‌ها دقت کرد. واریانس زیاد نقاط کار پراکنده‌ای ایجاد می‌کند و واریانس کم باعث می‌شود نقاط کار به‌دست آمده تفاوت چندانی با هم نداشته باشند. معمولاً این ضرایب به‌صورت تجربی و با آزمون و خطا انتخاب می‌شوند. این واریانس‌ها به نوعی بیانگر عدم قطعیت در پیش‌بینی آرایش بار و تولید در شبکه است.

۳-۳ محاسبه ضرایب رگرسیون

در این مقاله برای به‌دست آوردن رابطه بین توان عبوری از خطوط و الگوی تولید و مصرف در شبکه از رگرسیون‌گیری خطی استفاده می‌شود. برای به‌دست آوردن ضرایب رگرسیون خطی، ابتدا توان عبوری از هر خط به‌صورت ترکیب خطی از توان مصرفی بارها و توان تولیدی ژنراتورها تعریف می‌شود. روابط (۷) و (۸) چگونگی این امر را نشان می‌دهند

$$F_k^{(n)} = \sum_{i=1}^{ng} a_{ik}.PG_i^{(n)} + a_{.k} + \varepsilon g_k^{(n)} \qquad (7)$$

$$F_k^{(n)} = \sum_{j=1}^{nl} b_{jk}.PL_j^{(n)} + b_{.k} + \varepsilon l_k^{(n)} \qquad (8)$$

تابع هدف برای محاسبه ضرایب رگرسیون به‌صورت (۹) تعریف می‌شود

$$\begin{aligned} &E_g = \sum_{n=1}^{N}(\varepsilon g_k^n)^2 \\ &\qquad\Rightarrow \\ &E_l = \sum_{n=1}^{N}(\varepsilon l_k^n)^2 \end{aligned}$$

$$obj: \begin{cases} \min\{\sum_{n=1}^{N}[F_k^{(n)} - (F_k^{(n)} = \sum_{i=1}^{ng} a_{ik}.PG_i^{(n)} + a_{.k})]^2\} \\ \min\{\sum_{n=1}^{N}[F_k^{(n)} - (F_k^{(n)} = \sum_{j=1}^{ng} b_{jk}.PL_j^{(n)} + b_{.k})]^2\} \end{cases} \qquad (9)$$

با مشتق‌گیری از توابع هدف نسبت به ضرایب رگرسیون و برابر صفر قرار دادن آنها می‌توان ضرایب رگرسیون را به‌دست آورد. رابطه (۱۰) چگونگی این امر را نشان می‌دهد

$$\begin{cases} \frac{\partial E_g}{\partial \alpha_{ik}} = 0 \quad , \quad i = 1,2,\ldots,ng \\ \frac{\partial E_l}{\partial \beta_{jk}} = 0 \quad , \quad j = 1,2,\ldots,nl \end{cases} \qquad (10)$$

۳-۴ محاسبه ضرایب همبستگی

ضریب همبستگی میزان وابستگی خطی بین دو متغیر را نشان می‌دهد. تعریف ضریب همبستگی بین دو متغیر x و y در (۱۱) آمده است

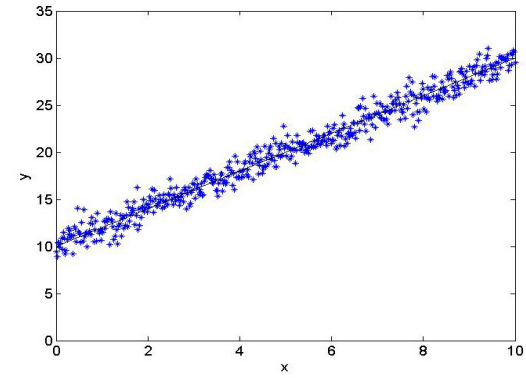
$$r_{xy} = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x.\sigma_y} \qquad (11)$$

علامت ضریب همبستگی و مقدار عددی آن وابستگی بین دو متغیر را توصیف می‌کند. ضرایب رگرسیون به تنهایی نمی‌تواند رابطه بین دو متغیر را بیان کند. برای مثال در شکل‌های ۱ و ۲، دو توزیع آماری با ضریب رگرسیون برابر و ضریب همبستگی متفاوت نشان داده شده‌اند.

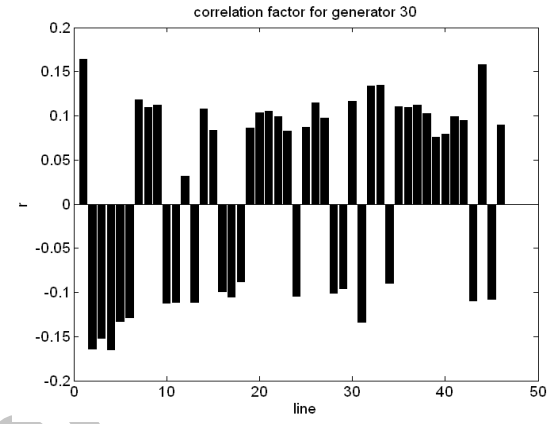
در این مقاله برای به‌دست آوردن ضریبی که وابستگی بین دو متغیر را به خوبی نشان دهد از حاصل‌ضرب ضرایب رگرسیون و ضرایب همبستگی استفاده می‌شود. بدین ترتیب ضرایب به‌دست آمده متأثر از ضرایب رگرسیون خطی و ضرایب همبستگی خواهد بود. بر این اساس (۱۲) و (۱۳) چگونگی محاسبه ضرایب مشارکت را نشان می‌دهند

Archive of SID

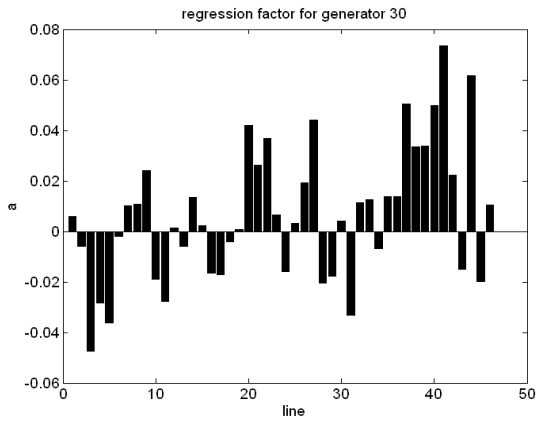
www.SID.ir



شکل ۲: منحنی رگرسیون یک توزیع آماری با ضریب همبستگی زیاد.



شکل ۳: ضرایب همبستگی برای ژنراتور شماره ۳۰.



شکل ۴: ضرایب رگرسیون خطی برای ژنراتور شماره ۳۰.

$$\beta_{jk} = |rl_{jk}|\, b_{jk} \qquad (۱۲)$$

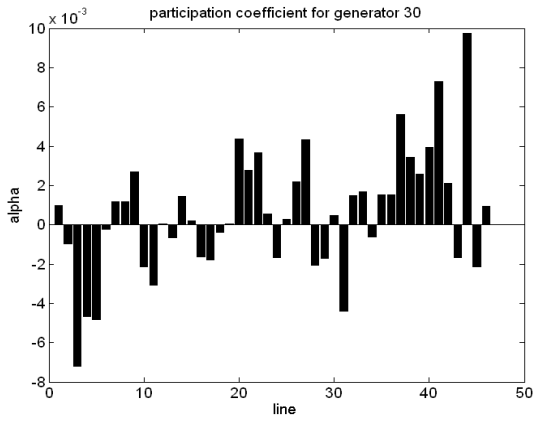
$$\alpha_{ik} = |rg_{ik}|\, a_{ik} \qquad (۱۳)$$

علامت ضرایب رگرسیون و ضرایب همبستگی یکسان است و هر دو راستای وابستگی را نشان می‌دهند، به همین دلیل در (۱۲) و (۱۳) از قدر مطلق استفاده شده است.

٤- مطالعات عددی

در این مقاله برای مطالعات عددی، شبکه ۳۹شینه IEEE استفاده شده که شامل ۹ ژنراتور، ۱۹ بار و ۴۶ خط انتقال است [۵]. جداول ۱ و ۲ مشخصات بار و تولید شبکه را در نقطه کار نامی خود نشان می‌دهند.

برای ساختن نقاط کار نمونه مقادیر واریانس‌ها به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شود



شکل ۵: ضرایب مشارکت برای ژنراتور شماره ۳۰.

جدول ۱: آرایش بارهای شبکه.

N.O BUS	MW	Mvar	N.O BUS	MW	Mvar
۳	۳۲۲	۲/۴	۲۳	۲۴۷/۵	۸۴/۶
۴	۵۰۰	۱۸۴	۲۴	۳۰۸/۶	-۹۲
۷	۲۳۳/۸	۸۴	۲۵	۲۲۴	۴۷/۲
۸	۵۲۲	۱۷۶	۲۶	۱۳۹	۱۷
۱۲	۷/۵	۸۸	۲۷	۲۸۱	۷۵/۵
۱۵	۳۲۰	۱۵۳	۲۸	۲۰۶	۲۷/۶
۱۶	۳۲۹	۳۲/۳	۲۹	۲۸۳/۵	۲۶/۹
۱۸	۱۵۸	۳۰	۳۱	۹/۲	۴/۶
۲۰	۶۲۸	۱۰۳	۳۹	۱۱۰۴	۲۵۰
۲۱	۲۷۴	۱۱۵	–	–	–

جدول ۲: آرایش تولید در شبکه.

N.O BUS	MW	Mvar	N.O BUS	MW	Mvar
۳۰	۲۵۰	۱۸۴	۳۵	۶۵۰	۲۳۹
۳۱	۰	۵۴	۳۶	۵۶۰	۱۹۹
۳۲	۶۵۰	۲۰۰	۳۷	۵۴۰	۲۷
۳۳	۶۳۲	۴۴	۳۸	۸۳۰	۵۳
۳۴	۵۰۸	۱۶۷	۳۹	۱۰۰۰	۲۱۵

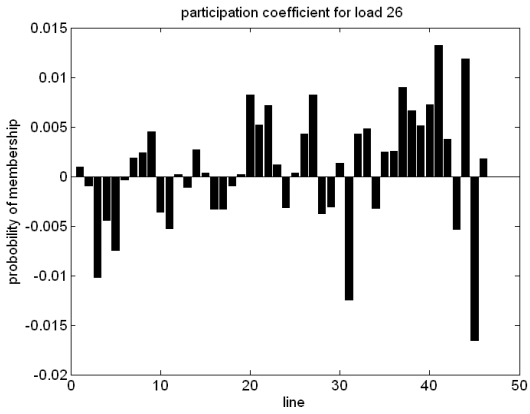
$$\begin{cases} \sigma_l = ۳\% \\ \sigma_g = ۳\% \\ \sigma_v = ۱\% \end{cases}$$

بدین ترتیب با تغییر پارامترهای شبکه ۱۰۰۰ نقطه نمونه به‌دست می‌آید.

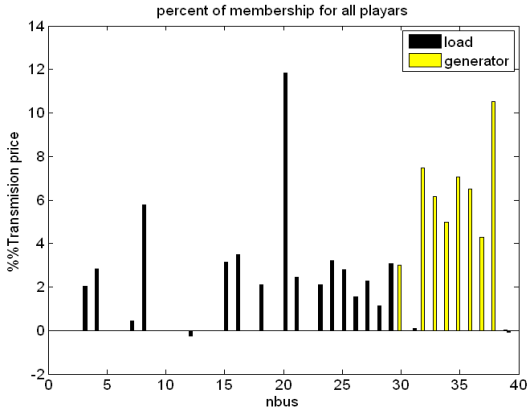
به‌عنوان مثال نتایج به‌دست آمده برای ژنراتور شماره ۳۰ و بار شماره ۲۶ بررسی می‌شوند. شکل‌های ۳ و ۴ به‌ترتیب ضرایب رگرسیون خطی و ضرایب همبستگی را برای ژنراتور شماره ۳۰ نشان می‌دهند. همان طور که مشاهده می‌شود، هیچ یک از این ضرایب به تنهایی توصیف درستی از رابطه بین توان خطوط و توان تولیدی ژنراتور شماره ۳۰ ارائه نمی‌کنند. شکل ۵ ضرایب مشارکت را برای ژنراتور شماره ۳۰ نشان می‌دهد. این ضرایب در نهایت به‌عنوان ملاک تعیین سهم این ژنراتور از هزینه انتقال در نظر گرفته می‌شوند. شکل ۶ ضرایب مشاکت را برای بار شماره ۲۶ نشان می‌دهد.

برای به‌دست آوردن سهم هر بازیگر از هزینه انتقال هر خط، از (۴) و (۵) استفاده می‌شود. اگر هزینه همه خطوط با هم برابر باشد، در این صورت شکل ۷ درصد سهم بازیگران را از هزینه انتقال نشان می‌دهد.

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۶: ضرایب مشارکت برای بار ۲۶.



شکل ۷: درصد سهم بازیگران از هزینه انتقال.

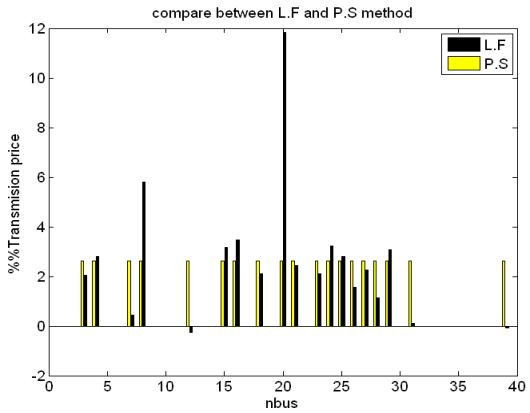
در این شکل هزینه انتقال به‌صورت مساوی بین ژنراتورها و بارها تقسیم شده است ($\gamma=0/5$). در عمل تقسیم هزینه بین تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان به قوانین بازار بستگی دارد. مثلاً در برخی کشورها برای حمایت از تولیدکنندگان و تشویق بخش خصوصی به سرمایه‌گذاری در بخش تولید، هزینه انتقال فقط بر عهده مصرف‌کنندگان می‌باشد. همان طور که مشاهده می‌شود سهم بارهای ۱۲ و ۳۹ از هزینه انتقال عددی منفی است. این بدان معنی است که حضور این بارها در کل باعث آزادشدن ظرفیت خطوط شده است و برای همین هم باید بابت استفاده از شبکه به آنها هزینه‌ای پرداخته شود.

۵- مقایسه روش پیشنهادی با روش‌های موجود

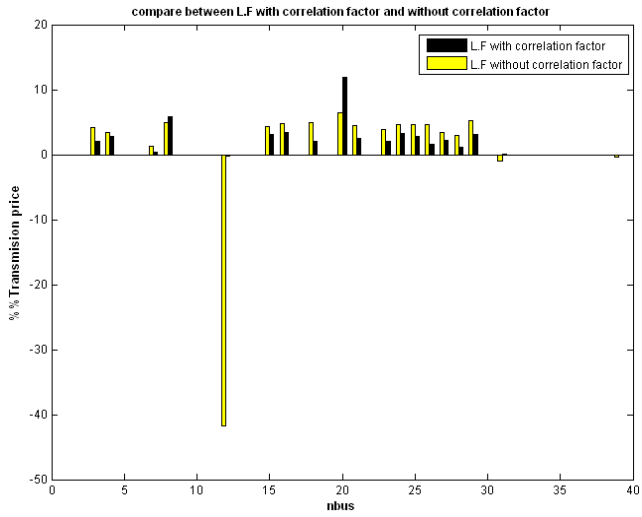
۵-۱ مقایسه با روش برچسب پستی

همان طور که اشاره شد در روش برچسب پستی هزینه انتقال به‌طور مساوی از تمامی بازیگران و یا گروهی از آنها دریافت می‌شود. در این مثال فرض می‌شود هزینه انتقال از همه بارها و ژنراتورها به‌طور مساوی به‌ازای مگاوات دریافت شود. شکل ۸ سهم بارها را از هزینه انتقال در دو روش ردگیری بار و برچسب پستی نشان می‌دهد.

این روش بسیار ساده است و بیشتر کشورهای صنعتی دنیا از این روش و یا ترکیب آن با سایر روش‌ها استفاده می‌کنند. در این روش هزینه انتقال بدون در نظر گرفتن میزان توان بازیگران برآورد می‌شود که روش منصفانه‌ای به نظر نمی‌رسد. به‌عنوان نمونه بار شماره ۲۰ سهم زیادی در هزینه انتقال دارد. این مصرف‌کننده از نظر اندازه توان مصرفی در حد سایر مصرف‌کنندگان است اما موقعیت آن در شبکه به‌گونه‌ای است که بخش عمده توان جاری‌شده ناشی از آن، در جهت توان عبوری از خطوط



شکل ۸: مقایسه روش برچسب پستی (P.S) و ردگیری بار (L.F) در تعیین هزینه انتقال برای بارها.



شکل ۹: مقایسه روش ردگیری بار با در نظر گرفتن ضرایب همبستگی و بدون در نظر گرفتن آن در تعیین سهم بارها از هزینه انتقال.

است و در پرکردن ظرفیت بیشتر خطوط نقش مثبت دارد. بار شماره ۱۲ شرایط متفاوتی دارد. موقعیت این بار به‌گونه‌ای است که توان جاری‌شده ناشی از آن در خلاف جهت توان عبوری از خطوط است و در کل موجب آزادسازی ظرفیت خطوط می‌شود. به همین دلیل هزینه انتقال آن منفی به‌دست می‌آید.

۵-۲ مقایسه با روش ردگیری بار بدون ضرایب همبستگی

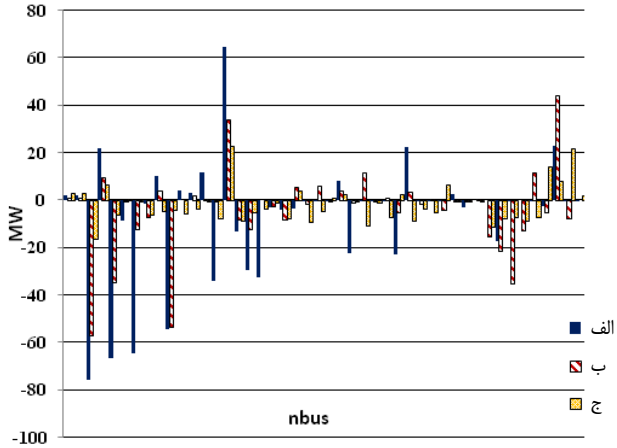
در روش ردگیری بار موجود در [۶] ضرایب همبستگی در نظر گرفته نشده‌اند و سهم بازیگران تنها با استفاده از ضرایب رگرسیون به‌دست آمده است. شکل ۹ نتایج حاصل از مقایسه این دو روش را نشان می‌دهد.

مقایسه نتایج نشان می‌دهد دو روش در تعیین هزینه انتقال بار ۱۲ تفاوت زیادی دارند. همان‌طور که در بخش ۳ توضیح داده شد، ضرایب رگرسیون به تنهایی توصیف خوبی از رابطه خطی بین دو متغیر ارائه نمی‌کنند. استفاده ترکیبی از ضرایب رگرسیون و ضرایب همبستگی می‌تواند نتایج را به واقعیت نزدیک‌تر کند.

۶- محاسبه خطای روش‌های بررسی‌شده

برای مقایسه کارایی روش‌های یادشده در این مقاله ابتدا با استفاده از آنالیز حساسیت، سهم ژنراتور شماره ۳۰ از توان خطوط شبکه محاسبه و سپس نتایج حاصل با نتایج روش‌های بررسی‌شده در قسمت قبل

Archive of SID
www.SID.ir



شکل ۱۰: (الف) مقدار واقعی تغییر توان به‌دست آمده از آنالیز حساسیت، (ب) مقدار به‌دست آمده از روش ردگیری بار با ضرایب همبستگی و (ج) مقدار به‌دست آمده از روش ردگیری بار بدون ضرایب همبستگی.

جدول ۳: خطای تعیین سهم ژنراتور شماره ۳۰ از هزینه انتقال در پیک بار.

روش ردگیری بار بدون ضرایب همبستگی	روش ردگیری بار با ضرایب همبستگی	روش برچسب پستی
۱۶٫۶۷٪	۱۵٫۸٪	۳۰٫۲۷٪

مقایسه می‌شود.

ابتدا یک مگاوات از توان تولیدی ژنراتور ۳۰ کم کرده و تغییر توان خطوط محاسبه می‌شود. سپس با استفاده از نرخ تغییر توان خطوط شبکه می‌توان سهم ژنراتور ۳۰ را از توان خطوط بار به‌دست آورد. شکل ۱۰ میزان سهم ژنراتور شماره ۳۰ را از تمامی خطوط بر حسب مگاوات در سه حالت نشان می‌دهد. این نتایج برای بار پیک به‌دست آمده است و با تغییر بار سهم ژنراتور از توان خطوط نیز تغییر می‌کند.

خطای تعیین سهم هر بازیگر از توان عبوری از خطوط شبکه به‌صورت زیر محاسبه می‌شود

$$er_k = \frac{\Delta P_k - \Delta P_{real_k}}{P_{real_k}} \times ۱۰۰ \qquad (۱۴)$$

$$total_er = \frac{\sqrt{\sum er_k^2}}{nl} \qquad (۱۵)$$

جدول ۳ خطای ناشی از تعیین هزینه انتقال را برای ژنراتور ۳۰ نشان می‌دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود استفاده همزمان از ضرایب رگرسیون خطی و ضرایب همبستگی خطای کمتری را به دنبال داشته است. البته این محاسبات برای بار پیک انجام شده است و با تغییر بار نتایج نیز دچار تغییر می‌شوند.

۷- نتیجه‌گیری

روش ردگیری بار پیشنهادشده در تحقیقات صورت‌گرفته قبلی، تنها مبتنی بر ضرایب رگرسیون خطی است. در این مقاله با استفاده از ترکیب ضرایب همبستگی و ضرایب رگرسیون خطی، توصیف بهتری از سهم بازیگران در هزینه انتقال ارائه شد. دقت این روش از روش‌های قبلی بیشتر است و می‌توان با خطای کمتری سهم هر بازیگر را از توان عبوری از هر خط به‌دست آورد. این روش به‌طور کامل هزینه‌های انتقال را پوشش می‌دهد. همچنین به دلیل استفاده از پخش بار ac سهم توان راکتیو بارها نیز به‌گونه‌ای در قیمت‌گذاری دیده می‌شود. با توجه به قبل از وقوع بودن این روش می‌توان هزینه انتقال تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان را از قبل تعیین کرد. این روش نیز مانند بیشتر روش‌های دقیق به موقعیت شین مرجع بستگی دارد و باید در انتخاب شین مرجع دقت کرد.

مراجع

[1] C. Adsoongnoen, "Proposal for transmission pricing based on a combined postage stamp method and sensitivity indices for electricity cross - border trade in the ASEAN power grid," in *Power Engineering Conf.*, vol. 2, pp. 848-852, Nov./Dec. 2005.

[2] R. Baldick and E. Kahn, "Contract paths, phase - shifters, and efficient electricity trade," *IEEE Trans. on Power Systems,* vol. 12, no. 2, pp. 749-755, Aug. 2002.

[3] Q. Chen, Q. Xia, and C. Kang, "Novel transmission pricing scheme based on point - to - point tariff and transaction pair matching for pool market," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, no. 4, pp. 481-488, Apr. 2010.

[4] C. Kirby and M. A. Rahman, "Generator contribution coefficients for pricing transmission services," in *Proc. IEEE Winter Meeting*, vol. 2, pp. 968-974, Singapore, Jan. 2000.

[5] T. Kristiansen, "Comparison of transmission pricing models," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 33, no. 4, pp. 947-953, May 2011.

[6] M. Pantos and F. Gubina, "Ex-ante transmission service pricing based on load- flow patterns," in *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 19, no. 2, pp. 796-801, May 2004.

[7] V. Parmeshwaran and K. Muthuraman, "FTR - option formulation and pricing," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 7, pp. 1164–1170, Jul. 2009.

[8] M. Shahidehpur, H. Yamin, and Z. Li, *Market Operations in Electric Power Systems: Forecasting, Scheduling, and Risk Management*, Chapter 10, John Wiley & Sons, Inc, 2002.

[9] A. Galetovic and R. Palma - Behnke, "Can generalize distribution factors lead to objective transmission toll allocations? some lessons from the recent Chilean experience," *Energy Economics*, vol. 30, no. 2, pp. 249-270, Mar. 2008.

[10] M. A. Abdala, "Governance of competitive transmission investment in weak institutional systems," *Energy Economics*, vol. 30, no. 4, pp. 1306-1320, Jul. 2008.

محمدتقی عاملی تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی در دانشگاه فنی شهر اسنابروک و کارشناسی ارشد و دکتری خود را در رشته مهندسی برق در دانشگاه صنعتی برلین در کشور آلمان به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۶۹ ، ۱۳۷۲ و ۱۳۷۶ به پایان رسانده است و هم‌اکنون دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور) می‌باشد. نام‌برده به عنوان مدیرعامل موسسه تحقیقات ماشین‌های الکتریکی ایران تا سال ۱۳۸۳ و همچنین در پروژه‌های مختلف صنعتی از جمله به عنوان مدیر بخش بهره برداری پروژه مطالعات جامع شبکه برق ایران از سال ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۸ و از سال ۱۳۸۹ تا کنون به عنوان مدیر طرح تحقق دستاوردهای بخش بهره برداری شرکت مدیریت شبکه برق ایران فعالیت می‌نماید. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: شبیه سازی سیستم‌های قدرت، بهره‌برداری، برنامه‌ریزی و کنترل سیستم‌های قدرت، ریزشبکه‌ها، شبکه‌های هوشمند برق و استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر در سیستم‌های قدرت.

میثم انصاری تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش قدرت به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۸۹ از دانشگاه شهید باهنر کرمان و دانشگاه صنعت آب و برق تهران به پایان رسانده است و هم‌اکنون مدیر عامل شرکت پیشگامان نیروی اصفهان مستقر در شهرک علمی و تحقیقاتی اصفهان می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: بازار برق، منابع تولید پراکنده، هوش مصنوعی و پایداری شبکه های قدرت.

Archive of SID

www.SID.ir