

حذف بار بهینه در سیستم‌های تجدید ساختار یافته و بررسی عوامل موثر بر آن با استفاده از روش پیشگویی و تصحیح نقطه درونی

مجتبی افشاری^(۱) - سعید ابادری^(۲)

(۱) کارشناسی ارشد گروه برق - دانشکده برق - دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد

(۲) استادیار گروه قدرت - دانشکده برق - دانشگاه شهرکرد

تاریخ دریافت: پاییز ۱۳۸۷

تاریخ پذیرش: زمستان ۱۳۸۸

خلاصه: در این مقاله ابتدا مقدمه‌ای در مورد بازار برق در سیستم‌های تجدید ساختار یافته و بارزدایی بهینه با روش نقطه درونی در اینگونه سیستم-ها ارائه و در ادامه روش پیشگویی و تصحیح نقطه درونی مورد بررسی قرار گرفته و با بررسی یک شبکه 6 شینه IEEE، پخش بار بهینه با استفاده از نرم افزار PSAT مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در ادامه با معرفی قراردادهای دوجانبه در سیستم‌های تجدید ساختار یافته، روش ارائه شده به منظور پیاده‌سازی حذف بار بهینه در شبکه 30 شینه IEEE به کار گرفته می‌شود. در این راستا، عوامل موثر بر تغییرات الگوی حذف بار از قبیل تغییرات قیمت گذاری، پرشدگی خطوط (ناشی از حذف یک یا چند خط) و حداکثر حذف بار مجاز در هر شین به صورت کامل مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

کلمات کلیدی: حذف بار، نقطه درونی، تابع هدف، سیستم‌های تجدید ساختار یافته.

۱- مقدمه

سیستم‌های تجدید ساختار یافته در بسیاری از کشورها جایگزین سیستم‌های مرسوم گردیده‌اند. اساس این سیستم‌ها بر پایه شاخص‌های اقتصادی بوده و در حقیقت ترکیبی از سیستم قدرت و بازار برق می‌باشند. بازار برق در سیستم‌های تجدید ساختار یافته معمولاً به دو شکل بازار اشتراکی^۱ و بازار دوجانبه^۲ پیاده‌سازی می‌گردند. در سیستم بازارهای اشتراکی، کلیه فروشنده‌های توان پیشنهاد خود را به یک سیستم سرمایه‌گذاری مشترک^۳ ارائه می‌نمایند و پس از انجام تحلیل‌های مختلف قیمت به خریداران توان اعلام می‌گردد. در سیستم بازارهای دوجانبه که اساس مطالعات این مقاله می‌باشد، هر یک از فروشندگان از شرکت‌های تولید توان (GENCO)، انتقال توان (TRANSCO)، توزیع توان (DISCO)، شرکت‌های خرده فروشی (RETAILCO) و مصرف کننده انتهایی، به صورت دو جانبه قرارداد فروش توان را منعقد نموده و یک نهاد دولتی (ISO) بر نحوه قراردادها نظارت خواهد داشت. یکی از موارد تاثیرگذار بر عملکرد ISO در سیستم‌های تجدید ساختار یافته،

به کارگیری یک سیستم پایش بازار^۴ مناسب با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف است [۱]. یکی از ابزارهای مورد بررسی در سیستم‌های پایش، بهینه‌سازی بهره‌برداری شبکه در جهت حداقل نمودن هزینه‌ها و حداکثر نمودن سود برای تولید کننده و مصرف کننده بخصوص در شرایط بروز ناپایداری می‌باشد که همواره در برگیرنده قیود متعددی خواهد بود.

به‌منظور بهینه‌سازی بهره‌برداری در شرایط ناپایداری، الگوریتم‌های ریاضی متعددی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله یکی از جدیدترین روش‌های بهینه‌سازی با نام نقطه درونی^۵ [۲، ۳] به منظور اعمال حذف بار بهینه در شرایط اضافه‌بار به کار گرفته شده که مبنی بر فرآیندهای پیشگویی و تصحیح^۶ می‌باشد که علاوه بر حذف بار بهینه کاهش هزینه را نیز در بردارد. حذف بار در سیستم‌های تجدید ساختار یافته در دو نوع بازار، بازارهای اشتراکی و بازارهای دوجانبه، صورت می‌گیرد.

در بازارهای اشتراکی حذف بار بر مبنای پیش‌بینی قیمت انجام می‌گردد [۴]. در روش‌های پیشنهادی در این خصوص محاسبه و تحلیل پاسخ

نامساوی می‌باشند [۳].

در رابطه فوق، y, z_1, z_2, z_3, z_4 بردارهای ضرایب لاگرانژ می‌باشند. با گرادینان گرفتن از تابع لاگرانژ نسبت به متغیرهای آن رابطه (۳) به دست می‌آید [۳]. معادلات رابطه به عنوان شرایط KKT در حل مسائل بهینه‌سازی به کار می‌رود.

$$f(w) = \begin{bmatrix} -\mu^k S_1^{-1} e + Z_1 \\ -\mu^k S_2^{-1} e + Z_2 + Z_1 \\ -\mu^k S_2^{-1} e + Z_3 \\ -\mu^k S_3^{-1} e + Z_3 + Z_4 \\ s_3 + s_4 + x^1 - x^u \\ \hat{I}x + s_4 - x^u \\ s_1 + s_2 + h^1 - h^u \\ h(x) + s_2 - h^u \\ \nabla f(x) - Jg(x)^T y + Jh(x)^T z_2 + \hat{I}z_4 \\ -g(x) \end{bmatrix} \quad (3)$$

در رابطه (۳) $f(x)$ و $Jg(x)$ و $Jh(x)$ به ترتیب ژاکوبین معادلات با قیود تساوی و قیود نامساوی است. همچنین S و Z معرف ماتریس‌های قطری $i \times i$ با مقادیر $S_{ii}=s_i$ و $Z_{ii}=z_i$ می‌باشد. با تشکیل رابطه نیوتن [۳] به صورت زیر:

$$JF(w^k)\Delta(w) = -F(w^k) \quad (4)$$

پیش‌بینی متغیرها به وسیله رابطه (۵) محاسبه خواهد شد.

$$\Delta w_i^{k+1} = w_i^k + \alpha_{p,d}^k \Delta w_i \quad (5)$$

در این رابطه، α_p^k و α_d^k به ترتیب اندازه‌های گام اولیه و ثانویه در هر فرایند تکرار k می‌باشند. اندازه گام بیشینه در هر تکرار به صورت رابطه (۶) انتخاب می‌گردد [۳، ۱۱].

$$\alpha_p^k = \min \left\{ 1, \gamma \min_{\Delta s_1 < 0} \left(\frac{-s_1^k}{\Delta s_1} \right), \gamma \min_{\Delta s_2 < 0} \left(\frac{-s_2^k}{\Delta s_2} \right), \gamma \min_{\Delta s_3} \left(\frac{-s_3^k}{\Delta s_3} \right), \gamma \min_{\Delta s_4} \left(\frac{-s_4^k}{\Delta s_4} \right) \right\}$$

$$\alpha_d^k = \min \left\{ 1, \gamma \min_{\Delta z_1 < 0} \left(\frac{-z_1^k}{\Delta z_1} \right), \gamma \min_{\Delta z_2 < 0} \left(\frac{-z_2^k}{\Delta z_2} \right), \gamma \min_{\Delta z_1 + \Delta z_2 < 0} \left(\frac{-z_1^k - z_2^k}{\Delta z_1 + \Delta z_2} \right), \gamma \min_{\Delta z_3 + \Delta z_4} \left(\frac{-z_3^k - z_4^k}{\Delta z_3 + \Delta z_4} \right) \right\} \quad (6)$$

کمیت عددی γ دارای مقدار بین صفر و یک است که معمولاً مقدار آن به یک بسیار نزدیک است. این کمیت فاکتور مناسبی جهت اطمینان از شرایط غیرمنفی نقاط بعدی است. بر اساس رابطه (۶)، در روش نقطه درونی، یک فاکتور تکمیلی ρ^k در هر فرایند تکرار k تعریف می‌گردد که اساسی بر همگرایی روش IPM است و به صورت رابطه (۷) نشان داده شده‌است:

$$\rho^k = (z_1^k)^T s_1^k + (z_1^k + z_2^k)^T s_2^k + (z_3^k)^T s_3^k + (z_3^k + z_4^k)^T s_4^k \quad (7)$$

در هر تکرار k ، مقدار μ^k بر اساس روند رو به کاهش ρ^k به صورت (۸) قابل محاسبه می‌باشد.

$$\mu^k = \beta \frac{\rho^k}{2(ndx + ndh)} \quad (8)$$

در رابطه فوق، مقدار β بین صفر و یک می‌باشد و با توجه به مسئله به

فرکانسی شبکه انجام شده و بر اساس قیود استخراج شده از مدل فرکانسی و سایر قیود شبکه و همچنین مدنظر قرار دادن تغییرات قیمت مزایده‌های بار حذف بار بهینه انجام خواهد گردید. نتایج این مدل‌سازی ایجاد یک ارتباط دینامیک بین بازار برق و سیستم قدرت به منظور ارائه یک مدل دینامیکی کارآمد در مسائل حذف بار مطابق مراجع [۵، ۶] می‌باشد.

در بازارهای دو جانبه، قیمت بین هر DISCO و RETAILCO به صورت مجزا با سایر کمپانی‌ها تثبیت شده و خسارات مربوط به بارزدایی به صورت واحد در هر بخش تعیین می‌گردد. لذا در صورت بروز ناپایداری و الزام اعمال حذف بار، کم هزینه‌ترین حذف بار جهت بازگرداندن شبکه به حالت نرمال اعمال خواهد گردید. در این مقاله روش حذف بار بهینه در بازارهای دوجانبه مورد بررسی و تحلیل قرار خواهد گرفت. قیود مربوط به مسئله حذف بار بهینه در بازارهای دوجانبه شامل دو دسته قیود تساوی و نامساوی بوده که پس از معرفی روش نقطه درونی و تابع هدف موارد مربوطه ارائه خواهد گردید.

۲- روش نقطه درونی در حل مسائل بهینه غیر خطی

به منظور اعمال یک روش بهینه‌سازی غیرخطی، گام اول تشکیل یک تابع هدف مشابه با مسائل برنامه‌ریزی غیرخطی می‌باشد. این تابع هدف می‌تواند به صورت رابطه (۱) ارائه گردد [۷].

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & f(x) \\ \text{subject to:} \quad & g(x) = 0 \\ & h^1 \leq h(x) \leq h^u \\ & x^1 \leq \hat{I} \leq x^u \end{aligned} \quad (1)$$

در رابطه فوق، $f(x)$ تابع هدف بوده که دو دسته قیود را در بر دارد. اولین دسته، قیود تساوی بوده که در رابطه فوق به صورت بردار $g(x)$ نشان داده شده‌است. دسته دوم، قیود نامساوی می‌باشد که بر اساس یک محدوده مجاز دارای حد بیشینه و کمینه می‌باشد و به صورت $h(x)$ مشخص شده است.

دومین گام در جهت اعمال بهینه‌سازی غیرخطی که در روشهای لاگرانژ و نقطه درونی به کار برده شده است، تشکیل تابع لاگرانژ تبدیل می‌باشد. به منظور گسترش تابع لاگرانژ در روابط فوق، گام اول تبدیل قیود نامساوی به قیود مساوی است. این عمل با استفاده از متغیرهای کمکی مثبت صورت می‌گیرد [۱۰]-[۸]. با اعمال ضرایب ممانعتی لگاریتمی تابع لاگرانژ با رابطه (۲) معرفی می‌شود [۳].

$$L = f(x) - \mu \sum_{j=1}^{ndh} (\ln s_{1j} + \ln s_{2j}) - \mu^k \sum_{j=1}^{ndx} (\ln s_{3j} + \ln s_{4j})$$

$$y - y^T g(x) - z_1^T (-s_1 - s_2 - h^1 + h^u) - z_2^T (-h(x) - s_2 + h^u) - z_3^T (-s_3 - s_4 - x^1 + x^u) - z_4^T (-\hat{I}x - s_4 + x^u) \quad (2)$$

s_1, s_2, s_3, s_4 متغیرهای کمکی و $\mu^k > 0$ یک پارامتر مرزی است و با افزایش بیشتر مقادیر k این پارامتر به سمت صفر میل خواهد نمود. همچنین ndx و ndh به ترتیب تعداد متغیرهای کنترل و تعداد قیود

ج- گام تصحیح کننده روش Mehrotra

در گام تصحیح کننده کلیه پارامترها به صورت رابطه (۱۳) ارائه خواهد شد. در این عملکرد بعد از تخمین پارامترهای دلتا و μ در گام پیشگویی کننده با استفاده از رابطه زیر مقادیر Δw قابل محاسبه‌اند.

$$J_F(W^k) \times \begin{bmatrix} \Delta S_1 \\ \Delta S_2 \\ \Delta S_3 \\ \Delta S_4 \\ \Delta z_1 \\ \Delta z_2 \\ \Delta z_3 \\ \Delta z_4 \\ \Delta x \\ \Delta y \\ g(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_1^{-1}(\mu^{af}e - \Delta S_1^{af} \Delta z_1^{af}) - z_1 \\ S_2^{-1}(\mu^{af}e - \Delta S_2^{af}(\Delta z_1^{af} + \Delta z_2^{af})) - z_1 - z_2 \\ S_3^{-1}(\mu^{af}e - \Delta S_3^{af} \Delta z_3^{af}) - z_3 \\ S_4^{-1}(\mu^{af}e - \Delta S_4^{af}(\Delta z_3^{af} + \Delta z_4^{af})) - z_3 - z_4 \\ -s_3 - s_4 - x^l + x^u \\ -\hat{1}x - s_4 - x^u \\ -s_1 - s_2 - h^l - h^u \\ -h(x) - s_2 - h^u \\ -\Delta f(x) + Jg(x)^T y - Jh(x)^T z_2 - \hat{1}^T z_4 \end{bmatrix} \quad (12)$$

که در آنها $\Delta S_i^{af}, \Delta S_j^{af}, \Delta z_i^{af}, \Delta z_j^{af}$ ماتریسهای قطری هستند که $(i, j = 1, 2, 3)$.

د- روش پیشگویی - تصحیح چند مرحله‌ای (MPC)

با بررسی روش Mehrotra به نظر می‌رسد که چنانچه بتوانیم گام تصحیح کننده را تا چند تکرار انجام دهیم باعث خواهد شد که تعداد تکرارهای کل (k) در همگرایی کاهش یابد. نتایج این بررسی که به روش MPC (پیشگویی - تصحیح چند مرحله‌ای) معروف گشت کاملاً برتری آن را نشان داده است. در این روش همانند روش PCM از دو گام پیشگویی - تصحیح کننده استفاده می‌شود. روابط گام پیشگویی در MPC همانند روش PCM است ولی در گام تصحیح کننده تفاوتی وجود دارد. با توجه به افزایش تعداد تکرار در این گام روابط به صورت زیر تبدیل خواهند شد [۳، ۱۱].

۳- معرفی تابع هدف و قیود مربوطه

در این مقاله روش نقطه درونی به منظور اعمال یک حذف بار بهینه در سیستم‌های تجدید ساختار یافته پیاده‌سازی شده است. در واقع اساس حذف بار در سیستم‌های تجدید ساختار یافته، کم هزینه‌ترین بار حذف شده می‌باشد. این در حالیست که در سیستم‌های مرسوم، حذف بار بهینه کمترین میزان بار حذف شده به منظور بازگرداندن سیستم به حالت نرمال بهره‌برداری می‌باشد. به منظور اعمال حذف بار بهینه در سیستم‌های تجدید ساختار یافته، نیاز به تعریف یک تابع هدف وجود دارد. این تابع هدف به منظور حداقل نمودن هزینه قطع بار در سیستم‌های تجدید ساختار یافته طرح‌ریزی می‌گردد و شامل دو پارامتر مقدار بار قطع شده و هزینه قطع بار می‌باشد که به صورت رابطه (۱۳) قابل ارائه است:

$$L = \min \sum_{i=1}^m \lambda_i C_i \quad (13)$$

تابع هدف رابطه فوق در برگزیده دو دسته قیود می‌باشد که در ادامه

صورت تجربی مقدار آن قابل تعیین می‌باشد. با افزایش مقدار β و نزدیکی آن به یک، معیارهای همگرایی روش IPM افزایش می‌یابد [۳، ۱۲].

الف- روشهای نقطه درونی مرتبه بالا

بر اساس مطالعات انجام گرفته، روشهای بهینه‌سازی مرتبه اول که فاقد عملکردهای پیش‌گویی - تصحیح می‌باشند، به دلیل تکرارهای بالاتر و حجم عملیاتی کمتر در مسائل گسترده وقتگیر خواهند بود. به همین دلیل با اعمال فرآیندهای پیشگویی و تصحیح در طول هر تکرار، سرعت همگرایی روش بخصوص در سیستم‌های گسترده‌تر افزایش خواهد یافت. بنابراین لازم است که عملکردهای مختلف روش‌های نقطه درونی مرتبه بالا (HOIPM) مورد بررسی قرار گیرد. در ادامه دو روش نقطه درونی مورد بررسی قرار خواهد گرفت که مهمترین اختلاف این دو روش در گامهای پیشگویی - تصحیح می‌باشد.

ب- روش پیشگویی - تصحیح Mehrotra (PCM)

بر اساس روش Mehrotra ابتدا بردار Δw^{af} با رابطه (۹) تعریف می‌شود.

$$f(w) = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 + z_1 \\ z_3 \\ z_3 + z_4 \\ s_3 + s_4 + x^l - x^u \\ \hat{1}x + s_4 - x^u \\ s_1 + s_2 + h^l - h^u \\ h(x) + s_2 - h^u \\ \nabla f(x) - Jg(x)^T y + Jh(x)^T z_2 + \hat{1}z_4 \\ -g(x) \end{bmatrix} \quad (9)$$

Δw^{af} برای به دست آوردن یک تخمین برای بردارهای مستقل گام تصحیح کننده و ضریب ممانعتی μ^{af} می‌باشد. بردارهای مستقل در ضریب تصحیح کننده نشان داده خواهند شد. برای پیش بینی μ^{af} گام اولیه - ثانویه با استفاده از رابطه (۸) محاسبه می‌شود که یک پیش بینی برای فاکتور تکمیلی ρ_{af} با استفاده از رابطه (۱۰) به دست می‌آید [۳، ۹].

$$\rho_{af} = (Z_1^K + \alpha_d^{af} \Delta Z_1^{af})^T (S_1^K + \alpha_p^{af} \Delta S_1^{af}) + (Z_1^K + \alpha_d^{af} \Delta Z_1^{af} + Z_2^K + \alpha_d^{af} \Delta Z_2^{af}) (S_2^K + \alpha_p^{af} \Delta S_2^{af}) + (Z_3^K + \alpha_d^{af} \Delta Z_3^{af})^T (S_3^K + \alpha_p^{af} \Delta S_3^{af}) + (Z + \alpha \Delta Z) + (Z_3^K + \alpha_d^{af} \Delta Z_3^{af} + Z_4^K + \alpha_d^{af} \Delta Z_4^{af})^T (S_4^{af} + \alpha_p^{af} \Delta S_4^{af}) \quad (10)$$

به دست آوردن یک تخمین μ^{af} بر اساس مرجع [۳] با رابطه (۱۱) به دست می‌آید.

$$\mu^{af} = \min \left\{ \left(\frac{\rho_{af}}{\gamma^k} \right), 0.2 \right\} \frac{\rho_{af}}{2(ndx + ndh)} \quad (11)$$

$$P_{li\min} \leq P_{li} \leq P_{li\max} \quad (18)$$

$$Q_{li\min} \leq Q_{li} \leq Q_{li\max}$$

در صورتی که R_{\min} و R_{\max} به ترتیب مقادیر کمینه و بیشینه ظرفیت ذخیره چرخان باشند، ذخیره چرخان سیستم نیز باید به صورت رابطه (۱۹) در نظر گرفته شود.

$$R_{\min} \leq \sum_{i=1}^{ng} R_i \leq R_{\max} \quad (19)$$

در رابطه فوق، ng بیانگر تعداد واحدهای تولید کنندگان توان در شبکه می‌باشند. انواع بازارهای ذخیره در این ارتباط بر مدل فوق تاثیرگذار خواهند بود که در مرجع [۱۱] تاثیرات استراتژی‌های اعمالی بازار بر ملاحظات ذخیره چرخان به صورت کامل بیان شده است.

محدودیت قطع بار:

$$0 \leq \lambda_i \leq \lambda_{\max i} \quad (20)$$

$$i = 1, \dots, nb$$

محدودیت تغییر دهنده تپ ترانسفورماتورها

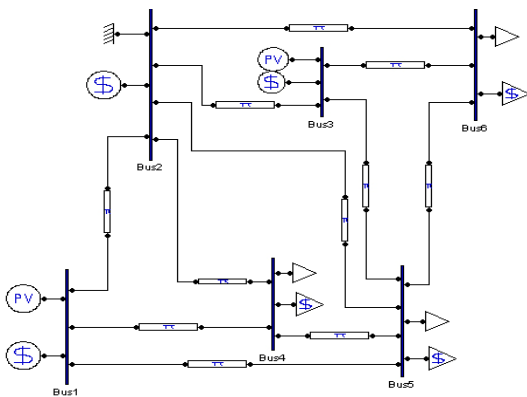
$$Tap_i^{\min} \leq Tap_i \leq Tap_i^{\max} \quad (21)$$

$$i = 1, \dots, nT$$

در رابطه فوق nT بیانگر تعداد ترانسفورماتورها در شبکه می‌باشند.

۴- پخش بار بهینه به وسیله نرم افزار PSAT به منظور مقایسه دو روش بهینه سازی

به منظور مقایسه سرعت و روند همگرایی دو روش مرتبه اول و روش پیشنهادی Mehrotra ابتدا یک شبکه 6 شینه بر اساس استاندارد IEEE به صورت شکل (۱) ارائه می‌گردد. پیاده‌سازی این شبکه در یکی از toolboxes نرم‌افزار MATLAB به نام PSAT انجام می‌گردد.



شکل (۱): شبکه ۶ شینه استاندارد IEEE بمنظور مدل‌سازی OPF
Fig. (1): The 6 standard IEEE sheens for OPF modeling

با توجه به موارد مربوط به شاخصهای همگرایی مشخص شده در مراجع [۱۲،۳] و مقایسه سرعت همگرایی دو روش مذکور، یک روش پخش بار بهینه در شبکه 6 شینه اعمال می‌گردد که نتایج آن در دیاگرام‌های (۲) و (۳) ارائه شده است. مقادیر γ و μ_k در فرض اولیه به ترتیب 0.9992 و 0.02 در نظر گرفته شده است. در این دیاگرام چگونگی

مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

الف- قیود تساوی تابع هدف

قیود مربوط به پخش بار توان اکتیو و راکتیو می‌باشد. در شرایط معمول سیستم که هیچگونه اضافه باری وجود ندارد، معادلات پخش بار اکتیو و راکتیو به صورت (۱۴) می‌باشد:

$$g_{pi} = P_{gi} - P_{di} - \sum_{j=1}^{nb} V_i V_j |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}) = 0$$

$$g_{qi} = Q_{gi} - Q_{di} - \sum_{j=1}^{nb} V_i V_j |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}) = 0$$

$$i = 1, \dots, nb \quad (14)$$

در رابطه ارائه شده، g_p و g_q بیانگر معادلات توازن توان در شبکه و nb مشخص کننده تعداد شینها در شبکه می‌باشد. همچنین توان تولیدی و مصرفی به ترتیب با پسوندهای g و d مشخص شده‌اند. در صورت وجود شرایط اضافه بار، معادلات پخش بار (۱۲) پاسخگو نخواهد بود و نیاز است که با در نظر گرفتن ضرایب قطع بار در شبکه معادلات پخش بار اکتیو و راکتیو به صورت رابطه (۱۵) پیاده‌سازی گردد [۳].

$$g_{pi} = P_{gi} - P_{di}(1 - \lambda_i) - \sum_{j=1}^{nb} V_i V_j |Y_{ij}| \cos(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}) = 0$$

$$g_{qi} = Q_{gi} - Q_{di}(1 - \lambda_i) - \sum_{j=1}^{nb} V_i V_j |Y_{ij}| \sin(\theta_i - \theta_j - \delta_{ij}) = 0$$

$$i = 1, \dots, nb \quad (15)$$

معادله فوق در هر فرآیند تکرار و تصحیح بر اساس روش نیوتون رافسون تحلیل می‌گردد.

ب- قیود نامساوی تابع هدف

قیود نامساوی در نظر گرفته شده شامل محدودیت‌های ولتاژ، توان اکتیو و راکتیو تولیدی، تراکم شبکه، ذخیره چرخان، حداکثر حذف بار مجاز و عملکرد تغییر دهنده‌های تپ ترانسفورماتورها می‌باشند که به صورت زیر در تابع هدف اعمال گردیده‌اند:

$$V_{i\min} < V_i < V_{i\max} \quad (16)$$

در رابطه فوق $V_{i\min}$ و $V_{i\max}$ به ترتیب محدوده بالا و پایین ولتاژ مجاز در شین i می‌باشد.

$$P_{Gi\min} < P_{Gi} < P_{Gi\max} \quad | \quad i = 1, \dots, ng$$

$$Q_{Gi\min} < Q_{Gi} < Q_{Gi\max} \quad (17)$$

در رابطه فوق، ng بیاهر تعداد ژنراتورها و nc بیانگر تعداد جبران‌کننده‌های موازی می‌باشند.

محدودیت‌های تراکم شبکه در روش حذف بار بهینه اعمال شده بر اساس حداکثر و حداقل توان اکتیو و راکتیو جاری در خطوط انتقال به صورت رابطه (۱۸) بیان می‌گردد که بر اساس شرایط در نظر گرفته شده قابل تغییر خواهند بود.

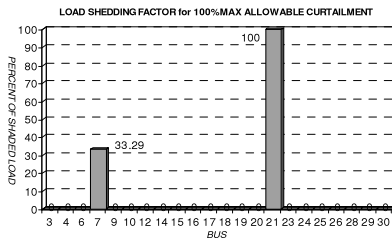
- تاثیر تغییرات هزینه‌های حذف بار بر ضرایب حذف بار محاسبه شده.
 - تاثیر قید پرشدگی شبکه در اثر خارج شدن یک یا چند خط انتقال بر ضرایب حذف بار در شین‌ها.

الف- تاثیر تغییرات قید حداکثر حذف بار مجاز در هر شین

به منظور ارائه نتایج در ابتدا با در نظر گرفتن 100% حداکثر قطع بار مجاز در هر شین از شبکه IEEE-30 ضرایب حذف بار بهینه به صورت شکل (۴) ارائه می‌گردد.

با توجه به نتایج ارائه شده، مشاهده می‌گردد که به شین‌های شماره 21 و 7، به ترتیب 100% و 33% حذف بار تحمیل می‌گردد.

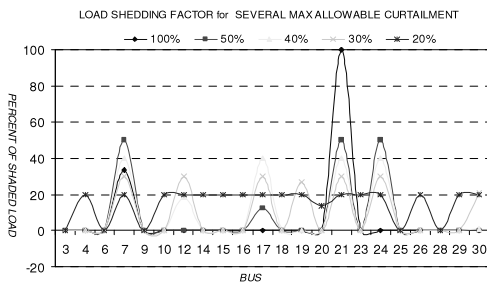
به صورت کلی با ایجاد اضافه بار در شبکه، هرگونه تغییری در λ_{max} ضرایب حذف بار متفاوتی را به همراه خواهد داشت. در شکل (۵) مقادیر ضرایب قطع بار ناشی از تغییرات در λ_{max} ارائه شده است که با توجه به دیاگرام ارائه شده مشخص است که با کاهش λ_{max} ، ضرایب حذف بار به شین‌های بیشتری اختصاص خواهد یافت.



شکل (۴): درصد حذف بار اختصاص یافته در شبکه 30 شینه با توجه به

$$\lambda_{max}=100\%$$

Fig. (4): The percentage of allocated load in 30 sheens network with $\lambda_{max}=100\%$



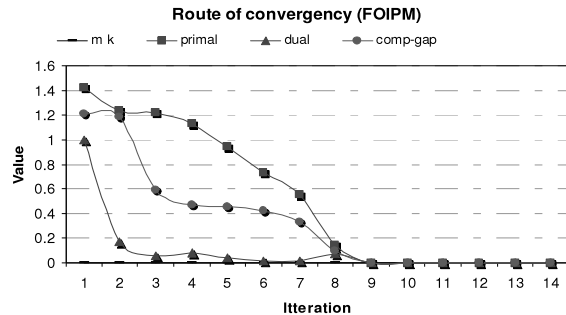
شکل (۵): تاثیر تغییر پارامتر λ_{max} در ضرایب حذف بار سیستم

Fig. (5): The effect of the variations of λ_{max} parameter in eliminating the system load

در صورتی که λ_{max} برابر با 15% انتخاب گردد، روش حذف بار واگرا خواهد گردید. این مورد بدان علت است که مقدار بار قابل قطع مجاز در شبکه کمتر از مقدار حذف بار مورد نیاز جهت برآورد تمامی قیود مسئله بارزدایی می‌باشد.

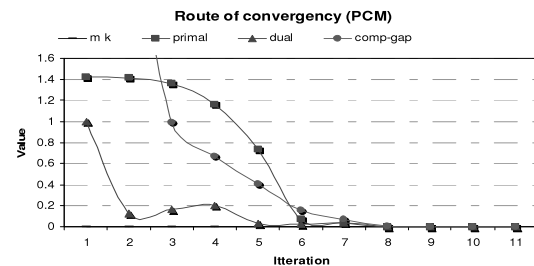
تغییرات λ_{max} بر مقادیر تابع هدف، سرعت همگرایی و همچنین توانهای تولیدی و مصرفی تاثیر گذار خواهد بود. در شکل (۶) تاثیر کاهش حداکثر حذف بار مجاز در هر شین بر تغییرات تابع هدف و

همگرایی پارامترهای مشخص شده در روش نقطه درونی ارائه شده است. با توجه به نتایج ارائه شده، روش PCM پس از 11 فرآیند تکرار و روش FOIPM پس از 14 فرآیند تکرار به بیشترین حد قابلیت بارگذاری خواهند رسید و به عبارت دیگر همگرا خواهند شد. وجود گام پیش‌بینی و تصحیح در روش PCM مهمترین عامل سرعت پاسخگویی مطلوب‌تر نسبت به FOIPM می‌باشد. از این رو در صورت اعمال سیستم‌های آزمایشی بزرگتر و دستیابی به روش سریع محاسبه راه حل بهینه، لزوم به کارگیری الگوریتم‌های HOIPM احساس خواهد گردید.



شکل (۲): روند همگرایی تابع هدف با اعمال FOIPM

Fig. (2): The process of the membership function convergence applying FOIPM



شکل (۳): روند همگرایی تابع هدف با اعمال PCM

Fig. (3): The process of the membership function convergence applying PCM

در بخش بعد با در نظر گرفتن بازارهای دوجانبه و قیود ارائه شده در بخش (۴)، حذف بار بهینه در یک سیستم نمونه 30 شینه پیاده سازی خواهد گردید.

۵- نتایج حذف بار بهینه در یک سیستم 30 شینه و عوامل موثر بر آن

در این بخش نتایج شبیه‌سازی حذف بار بهینه با فرض دو برابر شدن دیماند در یک سیستم 30 شینه IEEE بر اساس نرم‌افزار ارائه می‌گردد. کلیه نتایج ارائه شده قابل تعمیم به سایر سیستم‌های آزمایشی نیز می‌باشند. نتایج ارزیابی شده در این بخش را می‌توان به صورت زیر دسته‌بندی نمود:

- تاثیر تغییرات قید حداکثر حذف بار مجاز (λ_{max}) در هر شین بر ضرایب قطع بار محاسبه شده، توانهای تولیدی، مصرفی و تلفات و همچنین سرعت همگرایی روش.

بارزدایی در چهار شین مرحله اول، بارزدایی مورد نیاز جهت بازگرداندن سیستم به شرایط نرمال از شین 24 به شین 12 منتقل گردید. در مرحله سه و چهار با افزایش هزینه بارزدایی در شین شماره 7 به 12 دلار و 14 دلار، بارزدایی به شین‌های دیگری منتقل گردید. باید توجه داشت که همواره هزینه بارزدایی در یک شبکه سایر مشخصات سیستم را تحت تاثیر خود قرار می‌دهد. در واقع هدف از ارائه شکل (۷) بیان نمونه‌ای از این تاثیرات می‌باشد.

ج- تاثیر قید پرشدگی شبکه در عملکرد حذف بار بهینه

یکی دیگر از دلایل ایجاد اضافه‌بار در شبکه، قطع خطوط انتقالی است که با ایجاد پرشدگی باعث بالا رفتن میزان بارزدایی در سیستم خواهد گردید. به منظور نشان دادن اثر پرشدگی در فرآیند بارزدایی، تاثیر قطع خطوط به صورت مرحله به مرحله نشان داده می‌شود. این عملکرد با تغییر وضعیت خطوط از 1 به صفر در سیستم ورودی نرم‌افزار OLS انجام می‌پذیرد. در ادامه بررسی پر شدگی با فرض $\lambda_{max}=50\%$ در یک سیستم استاندارد 30 شینه IEEE انجام می‌گردد. به منظور بررسی اثر پرشدگی خطوط بر نتایج حذف بار بهینه موارد ذیل قابل ارزیابی می‌باشد:

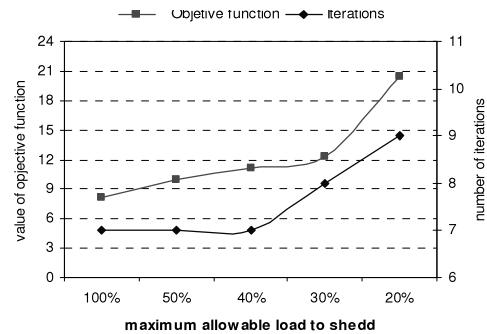
- تغییرات سطوح تولید و مصرف با توجه به اعمال پرشدگی

- تغییرات استراتژی حذف بار بهینه با توجه به خارج شدن خطوط انتقال. در اثر اعمال قطعی خط به صورت مرحله به مرحله سطوح تولید و مصرف تغییر خواهند نمود. در شکل (۸) تغییرات توان تولیدی و مصرفی کل شبکه 30 شینه برای دو حالت $\lambda_{max}=50\%$ مشخص شده است.

در دیاگرام ارائه شده، قطعی خطوط به صورت مرحله به مرحله اعمال گردیده و در هر مرحله تغییرات ایجاد شده ثبت می‌گردد. در دیاگرام ارائه شده در شکل (۸)، مشاهده می‌گردد که با خارج سازی خطوط سطوح تولید و مصرف توان اکتیو و راکتیو کاهش می‌یابد. در صورت بررسی توپولوژی شبکه 30 شینه IEEE و با توجه به ظرفیت خط قطع شده، کاهش سطح تولید در کل شبکه به دلیل جلوگیری از بروز پرشدگی در یک سری از خطوط می‌باشد که در صورت قطع خطوط اصلی مانند خط ارتباطی بین شین‌های شماره 4 و 6 در دیاگرام شکل (۸)، سطح کاهش بیشتر بوده که برای نمونه مقادیر تابع هدف در این حالت از 11.786 به 20.545 افزایش خواهد یافت.

این در حالی است که مواردی از قبیل قطع خطوط ارتباطی شینهای شماره 6 و 8 منجر به واگرایی حذف بار بهینه خواهد گردید. این مورد به دلیل عدم وجود حذف بار آزادانه در شینهای مختلف است که در زمان بروز اضافه‌بار در شبکه منجر به عدم تطابق تولید و مصرف خواهد گردید.

تعداد تکرارها نشان داده شده است. با توجه به نتایج شکل (۶)، مشهود است که با افزایش محدودیت بارزدایی در هر شین مقدار تابع هدف که هزینه حذف بار است، افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش محدودیتها همواره مقادیر تابع هدف افزایش خواهد یافت.



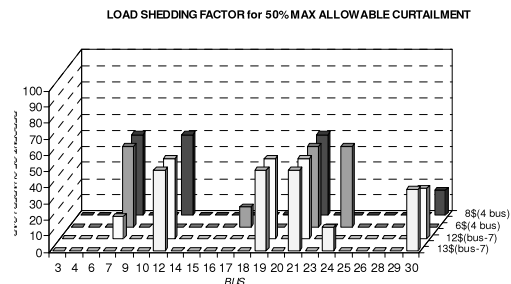
شکل (۶): تاثیر تغییرات λ_{max} بر تکرارها و مقادیر تابع هدف

Fig. (6): The effect of variations of λ_{max} on iterations and the membership function values

حداکثر حذف بار مجاز در هر شین بر توان اکتیو تولیدی و مصرفی شبکه نیز تاثیرگذار خواهد بود که مقادیر آن در یک سیستم 6 شینه جزئی می‌باشد.

ب- تاثیر تغییرات هزینه حذف بار در نتایج محاسبه شده

به منظور مطالعه تاثیر تغییرات قیمت بر مقدار ضرایب حذف بار محاسبه شده، با منظور نمودن بار دو برابر در سیستم 30 شینه، با ایجاد محدودیت $\lambda_{max}=50\%$ ، حذف بار بهینه اعمال می‌گردد که مطابق دیاگرام (۷) مشخص است که شین‌های شماره 7، 21 و 24 متحمل 50% حذف بار و شین شماره 17 متحمل 12.41% حذف بار می‌گردند. با تغییر هزینه حذف بار این شین‌ها از 6\$ به 8\$ در مرحله دوم و تغییر هزینه حذف بار شین شماره 7 به 12\$ و 13\$ در مرحله سوم و چهارم، حذف بار بهینه با شرایط قبل اعمال می‌گردد.



شکل (۷): درصد حذف بار اختصاص یافته در شبکه 30 شینه در شرایط

$\lambda_{max}=50\%$

Fig.(7): The percent of eliminated load in 30 sheens network for $\lambda_{max}=50\%$

با توجه نتایج به دست آمده در شکل فوق، مشخص است که در حالت اول به دلیل حداقل بودن هزینه حذف بار در شین‌های شماره 7، 21 و 24، حداکثر حذف بار در این سه شین انجام می‌گردد. با افزایش قیمت

۷- نتیجه گیری

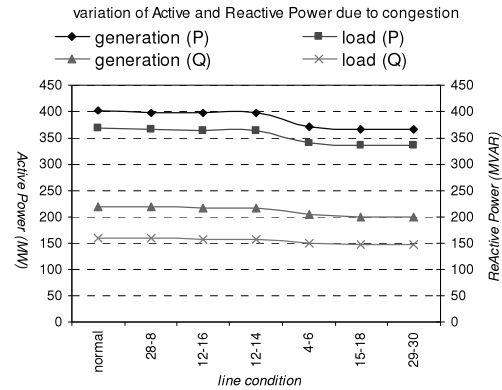
به کارگیری روش نقطه درونی نسبت به سایر روشهای بهینه‌سازی بسیار کارآمدتر بوده و علاوه سرعت همگرایی بسیار بالایی را دارا می‌باشد و در مسائل بهینه‌سازی غیر خطی، بر خلاف سایر روشهای حذف بار، بررسی کاهش هزینه را نیز انجام می‌دهد. روش نقطه درونی مرتبه بالای MPC به دلیل اعمال عملکرد چندمرحله‌ای تصحیح در هر فرایند تکرار از سرعت بالاتری نسبت به روشهای مرتبه اول نقطه درونی برخوردار است و به کارگیری آنها در مسائل بهینه‌سازی با ابعاد مختلف و محاسبات زمان واقعی، همگرایی سریعتری را موجب خواهد گردید که زمان محاسباتی رابطه‌ای غیرخطی با گستردگی مسئله دارد.

بر اساس نتایج اثر تغییرات حداکثر محدودیت حذف بار مجاز در هر شین بر عملکرد بارزدایی بهینه، می‌توان گفت که با افزایش محدودیتهای قابلیت‌های تولید و مصرف بار کاهش خواهد یافت. همچنین زمان محاسبه وابسته به آزادی عمل روش بهینه‌سازی به منظور رسیدن به نقطه بهینه در فضای امکان‌پذیری می‌باشد. با کاهش هزینه حذف بار در یک یا چند شین نوعی عملکرد بارزدایی در طی ایجاد اضافه بار در شبکه به سمت کمترین هزینه گرایش پیدا می‌کند و همواره رسیدن به حداقل تابع هدف قابل اهمیت است.

در صورت خارج شدن یک یا چند خط در طی بروز اضافه بار در شبکه، لازم است که استراتژی حذف بار بهینه با توجه به احتمال وقوع پر شدگی در شبکه تغییر نماید. در این حالت افزایش محدودیت حذف بار مجاز در شینها، تأثیری مستقیم در عملکرد آزادانه ISO در جهت اعمال بارزدایی بهینه داشته و می‌تواند منجر به بروز ناپایداری در صورت خارج شدن خطوط پربار شبکه گردد.

پی نوشت:

1. Pool Market
2. Bilateral Market
3. Pool Company
4. Market Monitoring
5. Interior Point Method
6. Predictor-Corrector
7. Higer Order Interior Point Method
8. Mehrotras Predictor – Corrector Method
9. Network Congestion
10. Spinning Reserve
11. Tap Changer
12. Real Time

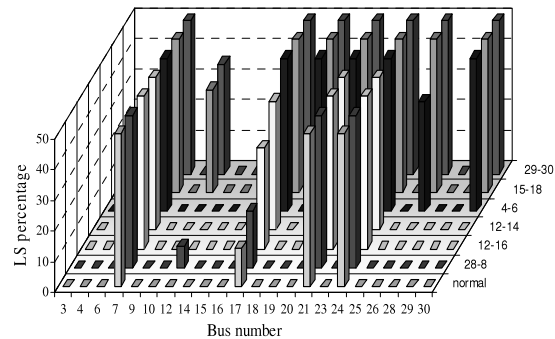


شکل (۸): توانهای تولیدی، مصرفی و تلفات کل شبکه ۳۰ شینه IEEE برای حالت $\lambda_{max}=50\%$

Fig. (8): The generated and consumed power and total power loss of 30 IEEE sheens for $\lambda_{max}=50\%$

از این رو می‌توان گفت با افزایش محدودیتهای حذف بار مجاز (کاهش λ_{max})، پرشدگی در مواقع بروز اضافه‌بار یکی از عوامل ناپایداری شبکه می‌باشد. در دیاگرام شکل (۹) تغییرات ضرایب بارزدایی در شین‌های مختلف ناشی از قطع چند مرحله‌ای خطوط ارتباطی ارائه شده است.

با توجه به نتایج ارائه شده در دیاگرام شکل (۹) مشخص است که بروز پر شدگی در یک شبکه نمونه انتقال یکی از عوامل بروز اضافه بار ناگهانی بوده و گسترش قطعی خطوط همواره ضرایب بارزدایی را افزایش خواهد داد.



شکل (۹): ضرایب بارزدایی در شین‌های مختلف شبکه 30 شینه IEEE برای حالت $\lambda_{max}=50\%$

Fig. (9): The coefficients of load elimination in different 30 IEEE sheens for $\lambda_{max}=50\%$

References

- [1] A.F. Rahimi, A.Y. Sheffrin, "Effective market monitoring in deregulated electricity market", IEEE Trans. on Pow. Sys., Vol.18, No.2, pp.486-493, May 2003.
- [2] G.L.L. David, Ye Yinyu, "Linear and non linear programming", Third Edition, Stanford, California, pp.111-140, July 2007.
- [3] M.J. Rider, C.A. Castro, V.L. Paucar, A.V. Garcia, "Higher order interior point method for minimizing load shedding in a competitive electric power market", IEE Proceeding, Vol 151, No.4, pp.434- 440, July 2004.
- [4] Xu Ding, A.G. Adly, "Optimal load shedding with dynamic market modeling", IEEE Pow. Sys. Conf., pp.906-911, 2002.
- [5] F.L. Alvarado, J. Meng, C.L. DeMarco, W.S. Mota, "Dynamic coupling between power markets and power

- systems", IEEE PES Summer Meeting, Vol.4, pp.2201-2205, 2000.
- [6] W.S. Mota, F.L. Alvarado, "Dynamic coupling between power markets and power systems with congestion constraints", IEEE Pow. Tech. Conf., 2001.
- [7] Yu-Chi Wu, S.D. Atif, E.M. Roy, "A direct nonlinear predictor-corrector primal-dual interior point algorithm for optimal power flow", IEEE Trans. on Pow. Sys., Vol.9, No.2, pp.876-883, May 1994.
- [8] G.L. Terres, V.H. Quintana, "An interior-point methods for non-linear optimal power flow using voltage rectangular coordinates", IEEE Trans. Pow. Sys., Vol.13, No.4, pp.373-395, 1998.
- [9] V.H. Quintana, G.L. Torres, J. Medina-Paloma, "Interior-point methods and their applications power systems: A classification of publications and software codes", IEEE Trans. Pow. Sys., Vol.15, No.1, pp.170-176, 2000.
- [10] S. Granville, "Optimal reactive dispatch through interior point methods", IEEE Trans. Pow. Sys., Vol.9, No.1, pp.136-146, 1996.
- [11] M.J. Rider, V.L. Paucar, A.V. Garcia, M.F. Bedrinana, "A higher order interior point method to minimize active power loss in electric energy systems", IEEE Pow. Tech. Conf., pp 189- 193, 2003.
- [12] M.j. Reader, V.L. Paucar, A.V. Garcia, "Enhanced higher- order interior point method to minimize active power losses in electric energy systems", IEE Proc. Gene.. Trans. Dist., Vol.151, No.4, pp.517- 525, July 2004.
- [13] K. Xie, Y.H. Song, "Power market oriented optimal power flow via an interior point method", IEE Proc., Vol.148, No.6, pp.549- 556, July 2001.

رزومه



مجتبی افشاری متولد یکم فروردین سال ۱۳۵۶، دارای مدرک لیسانس از دانشگاه دولتی یزد در رشته برق - الکترونیک در سال ۱۳۸۱ و مدرک فوق لیسانس از دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد در رشته برق - قدرت در سال ۱۳۸۷ در گرایش سیستم می‌باشد. زمینه تحقیق پایان نامه کارشناسی ارشد، حذف بار بهینه در سیستمهای قدرت با توجه به کمترین هزینه بار زدایی بوده است و در حال حاضر مشغول به خدمت در شرکت مهندسی دانشمند، مشاور طراحی و نظارت در شبکه‌های توزیع استان اصفهان می‌باشد



سعید ابادری متولد شهر اصفهان دارای مدرک دکتری مهندسی برق - قدرت از دانشگاه صنعتی شریف در سال ۱۳۸۱ می‌باشد. وی مدارک کارشناسی و کارشناسی ارشد خود را در رشته مهندسی برق به ترتیب در سالهای ۱۳۶۶ و ۱۳۷۰ از دانشگاه صنعتی اصفهان اخذ نمود. وی اکنون به عنوان استادیار دانشگاه شهرکرد مشغول به کار می‌باشد. زمینه تخصص وی الکترونیک قدرت می‌باشد و در زمینه‌های دینامیک سیستمهای قدرت و جبران کننده‌ها نیز فعالیت داشته است.