مدیریت بهینه قیمت‌های محلی در بازار برق با استفاده از برنامه پاسخ بار اضطراری و الگوریتم رقابت استعماری

محسن گیتی‌زاده[*1]، مرتضی محمدی[2]

*1- استادیار دانشکده برق و الکترونیک، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران، gitizadeh@sutech.ac.ir

2- گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول، دزفول، ایران، msc.mohammadi@yahoo.com

چکیده: در سیستم‌های تجدیدساختارشده، قیمت‌های محلی[1] در زمان‌های پیک بار و در مواقع اضطراری که خطایی در سیستم رخ داده است شدیداً افزایش می‌یابد. یکی از ابزارهایی که می‌تواند به بهره‌بردار مستقل سیستم[2] در کنترل قیمت‌های محلی کمک کند استفاده از برنامه‌های مدیریت انرژی، به ویژه برنامه پاسخ باراضطراری[3] می‌باشد. در این مقاله اجرای بهینه برنامه پاسخ بار اضطراری برای کنترل قیمت‌های محلی مدنظر می‌باشد. به این صورت که از الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری[4] برای بهینه کردن مبالغ پیشنهادی به مصرف‌کننده‌های متصل به شین‌های مختلف و برای هر یک از ساعات پیک و اضطراری استفاده شده است که منجر به حداقل شدن هزینه کل سیستم و در نتیجه ماکزیمم شدن منفعت همگانی ناشی از اجرای برنامه پاسخ بار اضطراری می‌شود. برای تست روش پیشنهادی از منحنی بار منطقه‌ای در نیویورک و شبکه 14 شینه IEEE استفاده شده است که نتایج حاصل، با حالت بدون اجرای برنامه‌های مدیریت انرژی و حالتی که مبلغ پیشنهادی به همه مصرف‌کننده‌ها یکسان است، مقایسه می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم رقابت استعماری، برنامه پاسخ بار اضطراری، تجدیدساختار، قیمت‌گذاری محلی.

1- مقدمه

هدف از تجدید ساختار در سیستم‌های قدرت، کاهش هزینه تامین انرژی الکتریکی و افزایش قابلیت اطمینان شبکه است. مصرف کننده‌ها عموماً فعالیت چندانی در بازار ندارند و این رقابت بین تولیدکنندگان است که قیمت را تعیین می‌کند [1]. یکی از راه‌های کاهش قیمت‌ها، افزایش رقابت در بازار می‌باشد. بنابراین اگر بتوان به طریقی مصرف-کننده‌ها را در بازار فعال‌تر کرد می‌تواند منجر به کاهش قیمت‌ها شود. مسئله دیگری که بر رقابت در بازار تاثیر می‌گذارد محدودیت‌های شبکه است. اگر شبکه محدودیت تلفات و تراکم خطوط نداشته باشد می‌توان تمام مصرف‌کننده‌ها را متصل به یک شین در نظر گرفت و قیمت در تمام شین‌ها برابر می‌شود [2]. ولی در تمام شبکه‌های واقعی خطوط انتقال ظرفیت محدودی برای انتقال توان دارند و انتقال توان با تلفات همراه است. این محدودیت‌ها باعث تفاوت قیمت در شین‌ها و قیمت‌گذاری به صورت محلی می‌شود. همچنین سبب می‌شود تامین توان مورد نیاز بارها از منابع ارزان قیمت با مشکل مواجه شود و به اجبار قسمتی از بارها به‌وسیله منابع گران‌قیمت‌تر تغذیه شوند که هزینه تامین توان را افزایش می‌دهد و در بعضی مواقع می‌تواند برای تولیدکنندگان در مناطق با محدودیت، قدرت بازار به وجود آورد [3]. در شرایط پیک بار و در مواقع بروز خطا مانند خروج ژنراتورها و خطوط انتقال، این محدودیت‌ها بیشتر خود را نشان می‌دهد و باعث افزایش شدید قیمت در بعضی شین‌ها می‌شود. یکی از راه‌های بهبود مشکلات فوق استفاده از تولیداتی در شین‌های با محدودیت است. راه‌حل دیگر، کاهش مصرف بارها در شرایط فوق می‌باشد که مانند منابع تولید، عمل می‌کند. مصرف‌کننده‌ها در صورتی مصرف خود را کاهش یا الگوی مصرف خود را تغییر می‌دهند که برای آنها سودآور باشد. مکانیزمی که

Archive of SID
www.SID.ir

می‌تواند باعث تغییر الگوی مصرف‌کنندگان شود و منفعت مصرف-کنندگان و سیستم را به دنبال داشته باشد، استفاده از برنامه‌های پاسخگویی بار[5] می‌باشد. برنامه‌های پاسخگویی بار به دو گروه کلی برنامه‌های انگیزشی و برنامه‌های زمانی و چند زیر گروه به‌صورت زیر تقسیم بندی می‌شوند [4]:

الف. برنامه‌های انگیزشی:

1. کنترل مستقیم بار[6]
2. قطع یا کاهش بار
3. باز فروش مقدار تقاضا
4. برنامه پاسخگویی بار اضطراری
5. برنامه بازار ظرفیت
6. برنامه خدمات جانبی

ب. برنامه‌های زمانی:

1. برنامه زمان استفاده
2. برنامه قیمت‌گذاری زمان واقعی[7]
3. برنامه قیمت‌گذاری زمان پیک بحرانی[8]

یکی از روش‌های موثر برای تغییر الگوی مصرف بارها و کنترل قیمت‌های محلی استفاده از برنامه پاسخ بار اضطراری می‌باشد. در این برنامه‌ها در شرایط پیک بار و در مواقع اضطراری که قیمت‌ها زیاد است ISO به مصرف‌کننده‌ها مبلغی جهت ایجاد انگیزه در راستای کاهش مصرف‌شان پیشنهاد می‌دهد و مصرف‌کننده‌ها با توجه به منفعتی که از اجرای این برنامه نصیب‌شان می‌شود به صورت اختیاری بار خود را کاهش می‌دهند [5]. این کاهش بار باعث می‌شود محدودیت‌های شبکه تا حدودی بهبود یابد و همچنین نیاز به کارکرد ژنراتورهای پرهزینه‌تر کاهش پیدا کند. در نتیجه هزینه کل با احتساب هزینه اجرای برنامه پاسخگویی بار اضطراری، کاهش می‌یابد و قیمت‌ها متعادل‌تر می‌شود. یکی دیگر از اهداف ISO از اجرای این برنامه‌ها تامین امنیت شبکه است. ISO برای تامین امنیت شبکه نیاز به رزرو کافی دارد و از آنجایی که کاهش بارها مانند منابع تولید عمل می‌کند نیاز به منابع رزرو را کاهش می‌دهد [6]. با توجه به توضیحات ذکر شده استفاده از برنامه پاسخگویی بار اضطراری می‌تواند منفعت مصرف-کنندگان و شبکه را به دنبال داشته باشد. در مرجع [7] از برنامه پاسخ بار اضطراری به عنوان ابزاری برای مدیریت تراکم خطوط استفاده شده است. در مرجع [8] برای تامین رزرو چرخان از برنامه پاسخ بار اضطراری استفاده کرده است. در مرجع [9] از برنامه پاسخ بار اضطراری برای افزایش ظرفیت آزاد انتقال بین شین‌ها استفاده شده است. در مرجع [10] برای کنترل قیمت‌های محلی در شرایط پیک و اضطراری از برنامه پاسخ بار اضطراری استفاده کرده است. در تمامی مقالات اشاره‌شده برای اجرای برنامه پاسخ بار اضطراری به همه مصرف‌کننده‌ها مبلغی یکسان پیشنهاد شده است. با توجه به این که موقعیت مصرف‌کننده‌ها در شبکه متفاوت است ارائه پیشنهاد یکسان به همه آنها مناسب‌ترین پیشنهاد نیست و می‌توان با ارائه مبالغ بهینه به مصرف‌کنندگان واقع در هر شین منفعت ناشی از اجرای برنامه پاسخ بار اضطراری را افزایش داد. در این مقاله برای بررسی تاثیر انتخاب بهینه مبالغ پیشنهادی در سود حاصل از اجرای برنامه پاسخ بار اضطراری، اجرای بهینه و غیربهینه برنامه پاسخ بار اضطراری برای مدیریت قیمت‌های محلی در شرایط پیک و اضطراری مورد بررسی قرار می‌گیرد. در اینجا برای تعیین بهینه‌ترین مبالغ پیشنهادی به مصرف-کننده‌های متصل به شین‌های مختلف در هر یک از ساعات پیک و اضطراری از الگوریتم رقابت استعماری با توجه به قدرت و دقتش در بهینه‌سازی استفاده می‌گردد.

ساختار این مقاله در بخش‌های زیر خلاصه می‌شود. در بخش2 مدل بار برای اجرای برنامه پاسخگویی بار ارائه می‌شود. در بخش 3 روابط ریاضی مورد استفاده برای محاسبه قیمت‌ها بیان می‌شود. در بخش 4 الگوریتم رقابت استعماری معرفی می‌گردد. در بخش 5 نتایج شبیه‌سازی انجام شده بر روی شبکه IEEE با 14 شین و منحنی بار منطقه‌ای در نیویورک ارائه می‌شود و در بخش 6 از مباحث بیان شده در مقاله نتیجه‌گیری می‌شود.

2- مدل برنامه پاسخ بار اضطراری

برای بررسی رفتار پاسخگویی بارها و تاثیر آنها در بازار باید مدل ریاضی از بارها در اختیار داشته باشیم. مدل‌سازی بارها بر اساس الاستیسیته تقاضا که بیان‌کننده حساسیت بارها به تغییرات قیمت می‌باشد صورت می‌گیرد. الاستیسیته تقاضای بارها به صورت زیر بیان می‌شود [11]:

$$E(i,j)=\frac{\rho_0(j)}{d_0(i)}\cdot\frac{\partial d(i)}{\partial \rho(j)} \quad (1)$$

$$E(i,j)\le 0 \quad if \quad i=j \qquad \text{الاستیسیته خودی} \quad (2)$$

$$E(i,j)\ge 0 \quad if \quad i\ne j \qquad \text{الاستیسیته ضربدری} \quad (3)$$

در معادلات بالا d میزان تقاضا (MWh)، ρ قیمت انرژی الکتریکی ($/MWh)، ρ_0 قیمت اولیه انرژی الکتریکی ($/MWh)، d_0 میزان تقاضای اولیه (MWh) و i,j اندیس ساعت می‌باشند.

الاستیسیته خودی بیانگر حساسیت بارها به تغییر قیمت در همان ساعت می‌باشد که همیشه کوچکتر یا مساوی صفر است. یعنی با افزایش قیمت در یک ساعت، بار آن ساعت کاهش می‌یابد. الاستیسیته ضربدری بیانگر حساسیت بارها به تغییر قیمت در ساعات دیگر می‌باشد و همیشه بزرگتر یا مساوی صفر است، به این معنی که افزایش قیمت در ساعتی باعث انتقال بار آن به ساعات دیگر می‌شود. با توجه به الاستیسیته بارها و تلاش آنها برای ماکزیمم کردن سود خود، مدل زیر برای برنامه پاسخ بار اضطراری به دست می‌آید:

Archive of SID

www.SID.ir

$$d(i)=\left\{d_0(i)+\sum_{i=1}^{24}E_0(i,j).\frac{d_0(i)}{\rho_0(j)}.A(j)\right\}\cdot\left\{1+\frac{E(i).A(i)}{\rho_0(i)}\right\}\quad i=1,2,...,24 \tag{4}$$

3- محاسبه قیمت‌های محلی

یکی از مکانیزم‌های مورد استفاده ISO برای اجرای بازار و محاسبه قیمت‌های محلی، مینیمم کردن هزینه تولید می‌باشد[12]. در این روش میزان تولید هر ژنراتور طوری تعیین می‌شود که با توجه به قیود و محدودیت‌های شبکه، هزینه تولید مینیمم شود. یکی از روش‌های مینیمم کردن هزینه تولید استفاده از تابع لاگرانژ می‌باشد که در آن قیود شبکه با ضرایبی به نام ضرایب لاگرانژ یا قیمت‌های سایه‌ای به آن اضافه می‌شود. قیمت‌های محلی، همان ضرایب لاگرانژ مربوط به معادلات توازن توان اکتیو تزریقی در شین‌ها می‌باشد [10].

بنابراین تابع هدف به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Min\sum_{i\in n_g}(C_i(P_{gi}))=\sum_{i\in n_g}(a_{gi}+b_{gi}P_{gi}+c_{gi}P_{gi}^2) \tag{5}$$

قیود تساوی که معادلات توازن توان اکتیو و راکتیو می‌باشند به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$P_i=P_{g_i}-P_{d_i}=\sum_{j=1}^{N_b}V_iV_j[G_{ij}\cos(\delta_i-\delta_j)+B_{ij}\sin(\delta_i-\delta_j)]\quad \forall i=1,..,N_b \tag{6}$$

$$Q_i=Q_{g_i}-Q_{d_i}=\sum_{j=1}^{N_b}V_iV_j[G_{ij}\sin(\delta_i-\delta_j)-B_{ij}\cos(\delta_i-\delta_j)]\quad \forall i=1,..,N_b \tag{7}$$

$$Ploss=\sum_{i\in N_b}P_{g_i}-\sum_{i\in N_b}P_{d_i}=\sum_{i=1}^{N_b}\sum_{j=1}^{N_b}\left\{\frac{R_{ij}}{V_iV_j}\left[\begin{matrix}P_jP_i\cos(\delta_i-\delta_j)+Q_iQ_j\cos(\delta_i-\delta_j)-\\P_iQ_j\sin(\delta_i-\delta_j)+P_jQ_i\sin(\delta_i-\delta_j)\end{matrix}\right]\right\} \tag{8}$$

$$Qloss=\sum_{i\in N_b}Q_{g_i}-\sum_{i\in N_b}Q_{d_i}=\sum_{i=1}^{N_b}\sum_{j=1}^{N_b}\left\{\frac{R_{ij}}{V_iV_j}\left[\begin{matrix}P_jQ_i\cos(\delta_i-\delta_j)-P_iP_j\sin(\delta_i-\delta_j)-\\Q_iQ_j\sin(\delta_i-\delta_j)-P_iQ_j\cos(\delta_i-\delta_j)\end{matrix}\right]\right\} \tag{9}$$

محدوده توان اکتیو و راکتیو تولیدی ژنراتورها، محدوده مجاز ولتاژ و زاویه فاز شین‌ها و محدوده توان انتقالی از خطوط به عنوان یک سری قیود نامساوی به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$P_{g_i}^{\min}\le P_{g_i}\le P_{g_i}^{\max} \tag{10}$$

$$V_i^{\min}\le V_i\le V_i^{\max} \tag{11}$$

$$Q_{g_i}^{\min}\le Q_{g_i}\le Q_{g_i}^{\max} \tag{12}$$

$$\delta_i^{\min}\le\delta_i\le\delta_i^{\max} \tag{13}$$

$$s_{ij}\le s_{ij}^{\max} \tag{14}$$

بنابراین تابع لاگرانژ برای محاسبه قیمت‌های محلی به صورت زیر تشکیل می‌شود:

$$\begin{aligned}L(P_i,Q_i)=&\sum_{i\in n_g}(C_i(P_{g_i}))+\sum_{i\in N_b}(LMP_{p_i})\\&\times\left[P_i-\sum_{j=1}^{N_b}V_iV_j[G_{ij}\cos(\delta_i-\delta_j)+B_{ij}\sin(\delta_i-\delta_j)]\right]\\&+\sum_{i\in N_b}(LMP_{q_i})\times\left[\begin{matrix}Q_i-\sum_{j=1}^{N_b}V_iV_j\left[G_{ij}\sin(\delta_i-\delta_j)\right.\\\left.+B_{ij}\cos(\delta_i-\delta_j)\right]\end{matrix}\right]\\&+\beta_{Ploss}\left(\sum_{i\in N_b}P_{g_i}-\sum_{i\in N_b}P_{d_i}\right.\\&\left.-\sum_{i=1}^{N_b}\sum_{j=1}^{N_b}\left\{\frac{R_{ij}}{V_iV_j}\left[P_jP_i\cos(\delta_i-\delta_j)+Q_iQ_j\cos(\delta_i-\delta_j)\right.\right.\right.\\&\left.\left.\left.-P_iQ_j\sin(\delta_i-\delta_j)+P_jQ_i\sin(\delta_i-\delta_j)\right]\right\}\right)\\&+\beta_{Qloss}\left(\sum_{i\in N_b}Q_{g_i}-\sum_{i\in N_b}Q_{d_i}\right.\\&\left.-\sum_{i=1}^{N_b}\sum_{j=1}^{N_b}\left\{\frac{R_{ij}}{V_iV_j}\left[P_jQ_i\cos(\delta_i-\delta_j)+P_iP_j\sin(\delta_i-\delta_j)\right.\right.\right.\end{aligned}$$

Archive of SID

www.SID.ir

$$-Q_iQ_j\sin(\delta_i-\delta_j)+P_iQ_j\cos(\delta_i-\delta_j)]\}\Big)$$
$$+\sum_{i=1}^{N_g}\omega_i^{\max}(P_i^{\max}-P_i)+\sum_{i=1}^{N_g}\omega_i^{\min}(P_i-P_i^{\min})$$
$$+\sum_{i=1}^{N_g}\sigma_i^{\max}(Q_i^{\max}-Q_i)+\sum_{i=1}^{N_g}\sigma_i^{\min}(Q_i-Q_i^{\min})$$
$$+\sum_{i=1}^{N_b}\nu_i^{\max}(V_i^{\max}-V_i)+\sum_{i=1}^{N_g}\nu_i^{\min}(V_i-V_i^{\min})$$
$$+\sum_{i=1}^{N_b}\gamma_i^{\max}(\delta_i^{\max}-\delta_i)+\sum_{i=1}^{N_g}\gamma_i^{\min}(\delta_i-\delta_i^{\min})$$
$$+\sum_{ij=1}^{N_i}\alpha_{ij}^{\max}(S_{ij}^{\max}-S_{ij}) \qquad (15)$$

قیمت‌های محلی از مساوی صفر قرار دادن مشتقات جزئی تابع لاگرانژ نسبت به توان تزریقی شین‌ها به دست می‌آید.

$$LMP_i=\frac{\partial L(P_i,Q_i)}{\partial P_i}=0\Rightarrow LMP_i$$
$$=\frac{\partial\left(\sum_{i\in n_g}(C_i(P_{gi}))\right)}{\partial P_i}+\omega_i^{\max}-\omega_i^{\min}$$
$$+\beta_{Ploss}\left(1-\frac{\partial Ploss}{\partial P_i}\right)-\beta_{Qloss}\left(1-\frac{\partial Qloss}{\partial P_i}\right) \qquad (16)$$

متغیرهای به‌کاررفته در معادلات بالا به صورت زیر تعریف می‌شوند:

تابع هزینه برای ژنراتور i	$C_i(P_{gi})$
توان اکتیو تولیدی ژنراتور i	P_{gi}
توان اکتیو مصرفی بوسیله بار i	P_{di}
توان راکتیو تولیدی ژنراتور i	Q_{gi}
توان اکتیو مصرفی بوسیله بار i	Q_{di}
دامنه ولتاژ در باس i	V_i
مینیمم دامنه ولتاژ در باس i	$V_i^{\min}$
ماکزیمم دامنه ولتاژ در باس i	$V_i^{\max}$
زاویه فاز در باس i	δ_i
مینیمم زاویه فاز در باس i	$\delta_i^{\min}$
ماکزیمم زاویه فاز در باس i	$\delta_i^{\max}$
مینیمم توان اکتیو خروجی ژنراتور i	$P_{gi}^{\min}$
ماکزیمم توان اکتیو خروجی ژنراتور i	$P_{gi}^{\max}$
مینیمم توان راکتیو خروجی ژنراتور i	$Q_{gi}^{\min}$
ماکزیمم توان راکتیو خروجی ژنراتور i	$Q_{gi}^{\max}$
توان انتقالی از خط i به j	S_{ij}
ماکزیمم توان انتقالی از خط i به j	$S_{ij}^{\max}$
تابع لاگرانژ	$L(P_i,Q_i)$
قیمت محلی توان حقیقی باس i	LMP_i

برای محاسبه قیمت‌های محلی در صورت اجرای برنامه پاسخ بار اضطراری نیاز به ارائه روابط جدیدی نمی‌باشد بلکه ابتدا با استفاده از مدل بار بدست‌آمده در بخش قبل و مبلغ پیشنهادی به مصرف‌کننده‌ها برای اجرای برنامه پاسخ بار اضطراری، میزان بار مصرف‌کننده‌ها بعد از اجرای برنامه پاسخ بار اضطراری به دست می‌آید. سپس تابع لاگرانژ بر اساس این میزان بار مشخص شده حل می‌شود. ضرایب لاگرانژ محاسبه‌شده مربوط به معادلات توازن توان اکتیو تزریقی به شین‌ها، قیمت‌های محلی بعد از اجرای برنامه پاسخ بار اضطراری می‌باشد. برای محاسبه قیمت در مواقع بروز خطا نیز باید خط یا ژنراتور آسیب‌دیده را از تابع لاگرانژ حذف کرد.

4- الگوریتم رقابت استعماری

این الگوریتم برگرفته از مدل‌سازی ریاضی رقابت‌های امپریالیستی می‌باشد [13]. در این الگوریتم کشورها که همان نقاط اولیه هستند به دو گروه امپریالیست و مستعمره تقسیم می‌شوند. کشورهای استعمارگر برای افزایش نفوذ و گسترش مستعمرات خود سعی در تصاحب مستعمرات دیگر استعمارگران دارند. این کشورها همچنین برای جلب حمایت مردمی و در راستای سیاست یکسان‌سازی سعی دارند با پیشرفت و ارتقای کشورهای مستعمره خود در زمینه‌های مختلف و آموزش و فرهنگ‌سازی، آنها را به خودشان نزدیک کنند. با این وجود ممکن است این فعالیت‌ها نتیجه‌های متفاوتی داشته باشد. گاهی نتیجه مثبت وگاهی منفی و گاهی ممکن است چنان باعث پیشرفت مستعمره شود که از خود آن استعمارگر قدرتمندتر شده و جای آن را بگیرد. در جریان رقابت استعماری ممکن است استعمارگری قدرت خود را از دست داده و از رقابت خارج شود. این پیشرفت‌ها و رقابت بین کشورها که همان نقطه‌های اولیه هستند بیانگر جست‌وجوی الگوریتم جهت پیدا کردن نقطه بهینه برای تابع هدف می‌باشد. معیار همگرایی برای این الگوریتم، به سلطه درآمدن تمامی کشورها توسط یک استعمارگر می‌باشد.

4-1- پیاده‌سازی الگوریتم

کشورها در الگوریتم رقابت استعماری توسط ویژگی‌های سیاسی- اجتماعی آنها مثل زبان، فرهنگ، دین و . . . معرفی می‌شوند و متغیرهای تابع هدف به عنوان این ویژگی‌ها در نظر گرفته می‌شود. به عنوان مثال اگر هدف مینیمم کردن تابع $Z=f(X)$ که X یک متغیر n بعدی از $x_1,x_2,\ldots,x_n$ باشد هر متغیر x_1 تا x_n به عنوان یک ویژگی و Z به عنوان هزینه آن کشورها در نظر گرفته می‌شود. هر چه

Archive of SID

www.SID.ir

هزینه یک کشور کمتر باشد آن کشور قوی‌تر است. در ابتدا تعدادی از این کشورها به صورت تصادفی در محدوده قابل قبول برای تابع هدف، تولید می‌شود. سپس تعدادی از کشورهای قوی‌تر به عنوان استعمارگر و بقیه به عنوان مستعمره در نظر گرفته می‌شود. تقسیم‌بندی کشورهای مستعمره بین استعمارگران با توجه به قدرت کشورهای استعمارگر انجام می‌شود و تعداد کشورهای مستعمره هر امپریالیست از مراحل زیر به دست می‌آید.

ابتدا هزینه و قدرت نرمالیزه شده هر امپریالیست به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C_n = \max_i\{c_i\} - c_n \qquad (17)$$

$$P_n = \left| \frac{C_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} C_i} \right| \qquad (18)$$

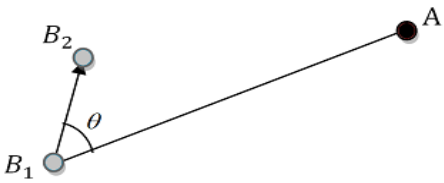
دراین معادلات c_n هزینه امپریالیست n ام و ماکزیمم هزینه امپریالیست‌ها و C_n هزینه نرمالیزه‌شده امپریالیست n ام، N_{imp} تعداد امپریالیست‌ها و P_n قدرت نرمالیزه شده امپریالیست n ام می‌باشد. سپس با توجه به فرمول زیر تعداد اولیه کشورهای مستعمره هر استعمارگر بدست می‌آید:

$$N_{C_n} = round\{P_n \times N_{col}\} \qquad (19)$$

که در آن N_{Cn} تعداد اولیه کشورهای مستعمره‌ی امپریالیست n ام و N_{col} تعداد کل کشورهای مستعمره و round تابعی است برای گردکردن عدد اعشاری به نزدیک‌ترین عدد صحیح. بعد از تقسیم کشورهای مستعمره میان استعمارگران، مدل‌سازی پیشرفت‌ها و حرکت کشورهای مستعمره در جهت آموزش‌ها و فعالیت‌های کشورهای استعمارگر با وجود انحرافات، انجام می‌شود. اگر A موقعیت یک استعمارگر و B_1 موقعیت اولیه یک مستعمره‌اش باشد. موقعیت جدید مستعمره به صورت زیر به‌دست می‌آید :

$$B_2 = Rand \times (A - B_1) \times 1\angle\theta \qquad (20)$$

B_2 موقعیت جدید مستعمره، Rand عددی تصادفی بین صفر و یک معرف زاویه انحراف از راستای موقعیت استعمارگر می‌باشد که به صورت تصادفی در هر حرکت تعیین می‌شود و در شکل (1) نشان داده شده است.



شکل (1): حرکت کشورهای مستعمره به سوی کشورهای استعمارگر

در این حرکت اگر مستعمره از خود استعمارگر قوی‌تر شد یعنی به جواب بهتری نسبت به استعمارگر دست پیدا کرد جای آن دو عوض می‌شود. در مرحله بعد برای مدل‌سازی رقابت استعمارگران برای تصاحب مستعمرات یکدیگر ابتدا هزینه کل و هزینه کل نرمالیزه و قدرت نرمالیزه هر امپراتوری به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$TC_n = C_{imp_n} + \alpha \times \frac{1}{N_{col_n}} \sum_{i=1}^{N_{col_n}} C_{col_i} \qquad (21)$$

$$NTC_n = \max_i\{TC_i\} - TC_n \qquad (22)$$

$$P_{p_n} = \left| \frac{NTC_n}{\sum_{i=1}^{N_{imp}} NTC_i} \right| \qquad (23)$$

در معادلات بالا TC_n هزینه کل و NTC_n هزینه کل نرمالیزه امپراتوری n ام، P_{Pn} قدرت نرمالیزه امپراتوری n ام، C_{imp_n} هزینه امپریالیست n ام، C_{col_i} هزینه مستعمره i ام، N_{imp} تعداد کشورهای امپریالیست، N_{col_n} تعداد مستعمرات امپریالیست n ام و α ضریبی بین صفر و یک است که بیان‌کننده میزان تاثیر هزینه مستعمرات در هزینه کل یک امپراتوری می‌باشد.

کشورهای استعمارگر ضعیف‌ترین مستعمرات را مورد هدف قرار می‌دهند. هر امپراتوری که قدرت بیشتری داشته باشد احتمال تصاحب بیشتری دارد ولی همیشه قویترین امپراتوری پیروز نمی‌شود. جهت مشخص کردن استعمارگر پیروز در رقابت برای تصاحب مستعمرات می‌توان از چرخ رولت یا روش پیشنهادی در [13] استفاده کرد. در این روش قدرت همه امپراتوری‌ها در یک بردار به صورت زیر مرتب می‌شود:

$$P = [P_{p_1}, P_{p_2}, ..., P_{p_{N_{imp}}}] \qquad (24)$$

سپس بردار D از تفریق بردار P و بردار R با درایه‌های تصادفی بین صفر و یک تشکیل داده می‌شود.

$$R = [r_1, r_2, ..., r_{N_{imp}}] \qquad (25)$$

Archive of SID

www.SID.ir

$$D = P - R = [d_1, d_2, ..., d_{N_{imp}}] \quad (26)$$

کشور مستعمره مورد رقابت به استعمارگری تعلق می‌یابد که درایه بردار D مربوط به آن از سایرین بزرگتر باشد. بعد از این مرحله، الگوریتم به مرحله حرکت کشورهای مستعمره باز می‌گردد. در هر تکرار یک یا چند کشور مستعمره بدین طریق بین استعمارگران رد و بدل می‌شود. اگر استعمارگری تمامی مستعمرات خود را از دست داد از رقابت خارج می‌شود. زمانی که تمامی مستعمرات به دست یک استعمارگر افتاد، الگوریتم همگرا شده و قوی‌ترین کشور به عنوان جواب مسئله در نظر گرفته می‌شود.

4-2- استفاده ازالگوریتم رقابت استعماری برای اجرای بهینه برنامه پاسخ بار اضطراری

همان‌گونه که قبلاً اشاره شد هر چه مبالغ پیشنهادی به مصرف‌کنندگان در برنامه پاسخ بار اضطراری مناسب‌تر انتخاب شوند، کاهش هزینه‌ها و منفعت کلی افزایش می‌یابد. در اینجا از الگوریتم بهینه‌سازی رقابت استعماری برای بهینه‌کردن این مبالغ استفاده شده‌است. برای این منظور مبلغ پیشنهادی به مصرف‌کنندگان متصل به هر شین و در هر ساعت به عنوان یک متغیر و مینیمم کردن هزینه کل که شامل هزینه تولید و هزینه پرداختی به مصرف‌کننده‌ها برای اجرای برنامه پاسخ بار اضطراری است، به عنوان هدف برای الگوریتم بهینه‌سازی در نظر گرفته می‌شود. در الگوریتم رقابت استعماری هر کشور از قرار دادن تمامی متغیرها در یک سطر تشکیل می‌شود. اگر n تعداد شین‌های بار و k تعداد ساعات مورد نظر برای اجرای برنامه پاسخ بار اضطراری باشد، ابعاد کشورها $1\times kn$ خواهد بود. فلوچارت الگوریتم رقابت استعماری برای اجرای بهینه برنامه پاسخ بار اضطراری در شکل (2) نشان داده شده‌است.

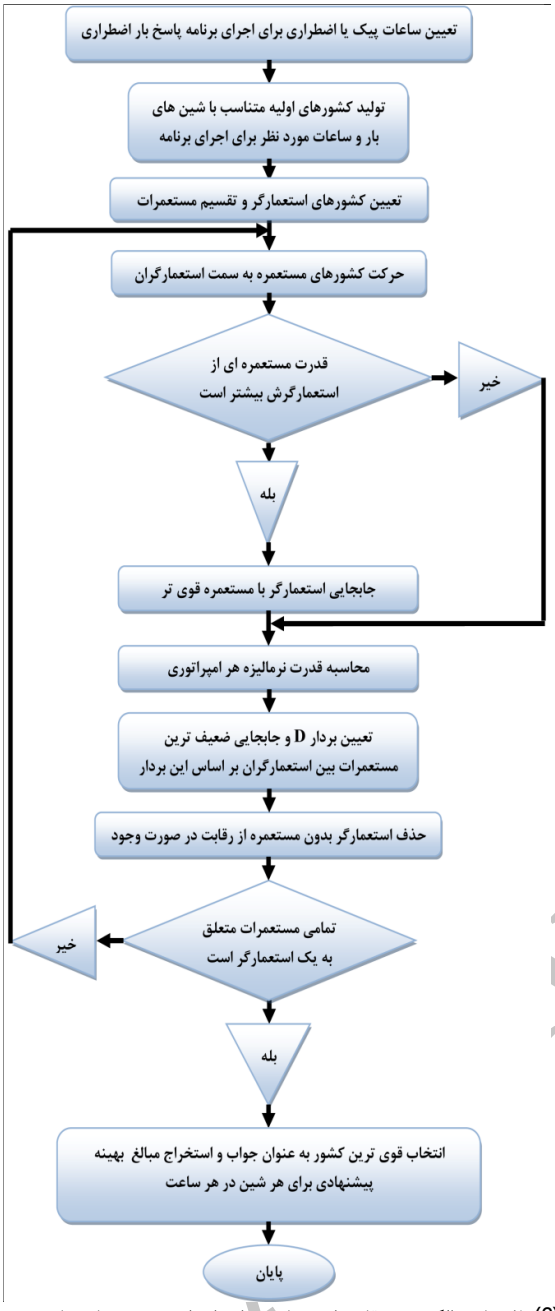
5- مطالعه موردی

برای بررسی تاثیر اجرای بهینه برنامه پاسخ بار اضطراری در شرایط پیک بار و اضطراری از سیستم 14 شینه IEEE و منحنی بار منطقه‌ای در نیویورک استفاده شده است. سیستم 14 شینه در شکل (3) و منحنی بار در شکل (4) نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، می‌توان منحنی بار را بر اساس میزان بار به سه قسمت زیر تقسیم‌بندی کرد:

1. دوره کم‌باری: ساعات (0 تا 10)
2. دوره غیرپیک: ساعات (10 تا 14) و (19 تا 24)
3. دوره پیک: ساعات (14 تا 19)

الاستیسیته خودی و ضربدری بارها برای دوره های پیک، غیر پیک و کم باری در جدول (1) نشان داده شده است.

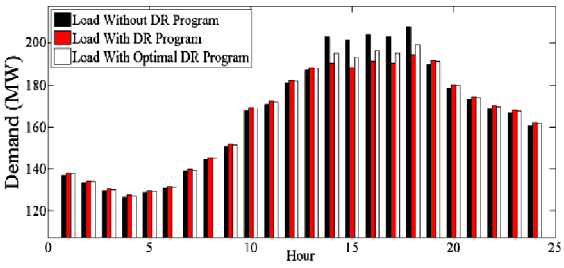


شکل (2): فلوچارت الگوریتم رقابت استعماری برای اجرای بهینه برنامه پاسخ بار اضطراری

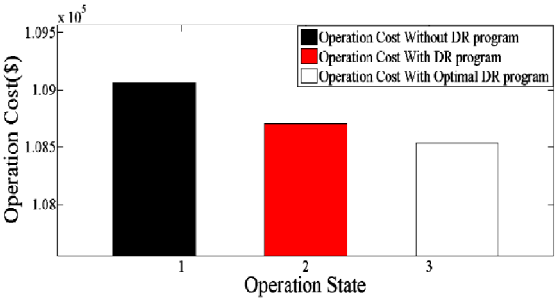
جدول (1): الاستیسیته خودی و ضربدری بارها

	پیک	غیر پیک	کم باری
پیک	-0/02	0/0032	0/0024
غیر پیک	0/0032	-0/02	0/002
کم باری	0/0024	0/002	-0/02

www.SID.ir



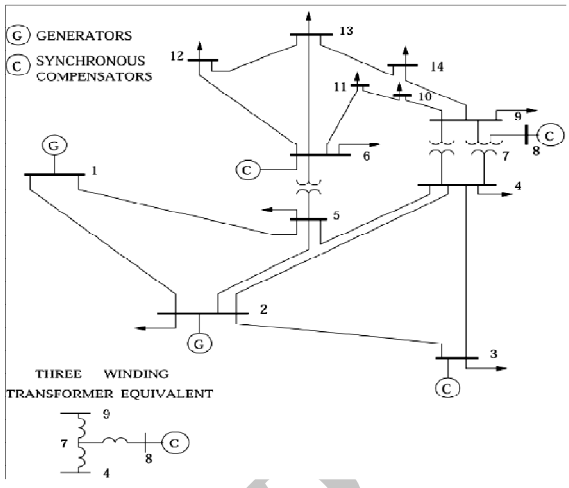
شکل (5): بار کل سیستم



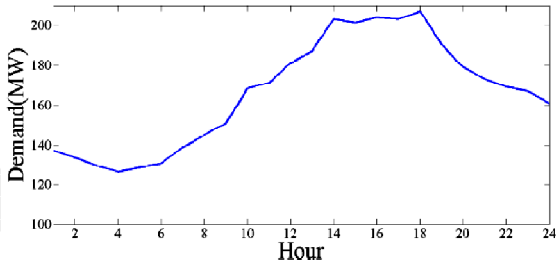
شکل (6): هزینه کل سیستم

با اجرای برنامه پاسخ بار اضطراری، قیمت در ساعات پیک به دلیل کاهش بار، کاهش می‌یابد که در اینجا برای نمونه، منحنی قیمت در بعضی از شین‌های بار برای هر سه حالت اجرای بهینه، غیربهینه و بدون اجرای برنامه پاسخ بار اضطراری در شکل‌های (7) تا (9) آورده شده است.

همانگونه که مشاهده می‌شود در اجرای بهینه برنامه پاسخ بار اضطراری، پیک‌سایی نسبت به حالت غیربهینه کمتر بوده است و قیمت در شین ها نیز نسبت به حالت غیر بهینه افت کمتری داشته-است اما هزینه کل بدون اجرای برنامه پاسخ بار اضطراری $ 109063 و با اجرای غیربهینه و بهینه برنامه پاسخ بار اضطراری به ترتیب به $108701 و $ 108528 کاهش یافته‌است که هزینه کل در حالت بهینه کمتر از حالت غیربهینه می‌باشد. این بدان علت است که در حالت غیربهینه مبالغ پیشنهادی به مصرف‌کننده‌ها بالاتر از مقدار مورد نیاز بوده است که منجر به هزینه اضافی برای اجرای برنامه پاسخ بار اضطراری شده‌است و سود اضافی مصرف‌کنندگان در ازای ضرر ISO به وقوع پیوسته است. بنابراین گزینه مناسب‌تر اجرای بهینه برنامه پاسخ بار اضطراری می‌باشد که علاوه بر پیک‌سایی و کاهش قیمت شین‌ها در حد مطلوب منجر به حداقل شدن هزینه کل می‌شود.



شکل (3): سیستم 14 شینه IEEE



شکل (4): منحنی بار منطقه ای در نیویورک

ابتدا با فرض این که خطایی در سیستم رخ نداده و ISO از برنامه پاسخ بار اضطراری برای پیک‌سایی استفاده کرده است، انتخاب بهینه و غیربهینه مبالغ پیشنهادی به مصرف کنندگان با هم مقایسه می‌شود. در حالت غیربهینه فرض بر این است که ISO با توجه به منحنی بار پیش‌بینی شده و شناختش از رفتار بارها، برای حذف مطلوب پیک بار و تعادل قیمت‌ها، به همه مصرف‌کنندگان مبلغ یکسان 20 $/MWh پیشنهاد می‌کند. در حالت بهینه ISO با استفاده از منحنی بار پیش‌بینی‌شده، الاستیسیته بارها و الگوریتم رقابت استعماری مبالغ پیشنهادی به مصرف‌کنندگان را تعیین می‌کند که این مبالغ بهینه در جدول (2) نشان داده شده است.

نتایج تغییر بار کل سیستم ناشی از اجرای بهینه و غیربهینه برنامه پاسخ بار اضطراری در شکل (5) نشان داده شده است. همچنین هزینه کل سیستم که شامل هزینه تولید و هزینه اجرای برنامه پاسخ بار اضطراری است در شکل (6) نشان داده شده‌است.

Archive of SID

www.SID.ir

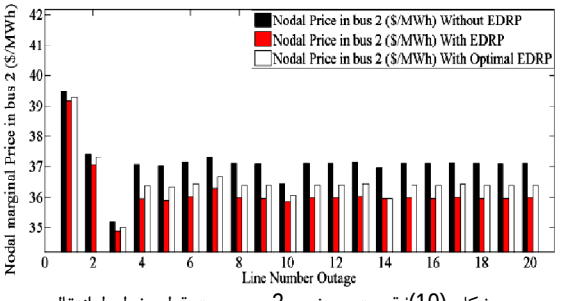
جدول (2): مبالغ بهینه‌شده پیشنهادی به بارها در برنامه پاسخ بار اضطراری در هر ساعت پیک ($/MWh)

	شماره شین									
ساعت	2	3	4	5	6	9	10	11	12	13	14
14	12/24	13/01	12/78	12/61	12/62	12/78	12/81	12/75	12/79	12/84	13/03
15	12/56	13/37	13/12	12/95	12/95	13/12	13/15	13/09	13/13	13/19	13/38
16	12/12	12/88	12/64	12/48	12/48	12/64	12/67	12/61	12/65	12/71	12/89
17	12/24	13/01	12/78	12/61	12/62	12/78	12/81	12/75	12/79	12/84	13/02
18	11/61	12/32	12/11	12/95	11/96	12/11	12/14	12/08	12/11	12/17	12/33

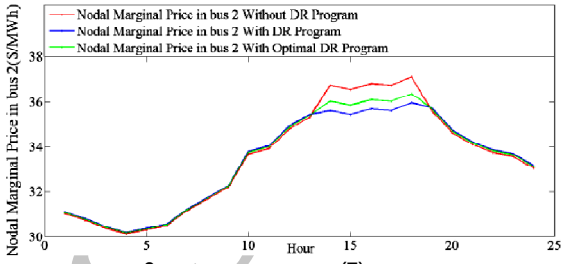
همانگونه که مشاهده می‌شود هزینه کل در حالت بدون اجرای برنامه پاسخ بار اضطراری و با اجرای غیربهینه و بهینه آن در صورت قطع خط شماره 2 به ترتیب $ 111424، $ 110994 و $ 110858 و در صورت قطع خط شماره 3، $112084 ، $111738 و $111566 و در صورت قطع خط شماره 4، $109708 ،$109325 و $109164 می‌باشد که در تمامی حالات هزینه مینیمم مربوط به اجرای بهینه برنامه پاسخ بار اضطراری می‌باشد. در صورتیکه در حالت غیربهینه با وجود کاهش بیشتر قیمت شین‌ها، هزینه کل به خاطر بالا بودن هزینه اجرای برنامه پاسخ بار اضطراری به حداقل نمی‌رسد. بنابراین با بهینه‌کردن مبالغ پیشنهادی به مصرف‌کنندگان در برنامه پاسخ بار اضطراری برای شرایط پیک و اضطراری می‌توان سود ناشی از اجرای برنامه پاسخ بار اضطراری را با مینیمم کردن هزینه کل به حداکثر رساند.

جدول (3): شماره‌گذاری خطوط

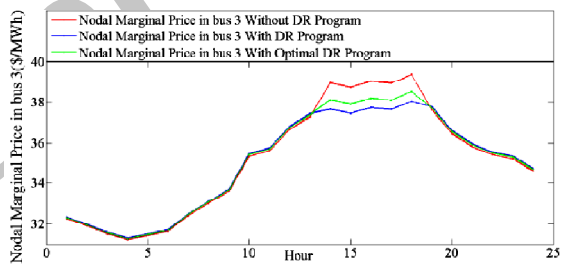
شین های متصل به خط	1-2	1-5	2-3	2-4	2-5	3-4	4-5
شماره خط	1	2	3	4	5	6	7
شین های متصل به خط	4- 7	4-9	5-6	6-11	6-12	6-13	7-8
شماره خط	8	9	10	11	12	13	14
شین های متصل به خط	7-9	9-10	9-14	10-11	12-13	13-14	
شماره خط	15	16	17	18	19	20	



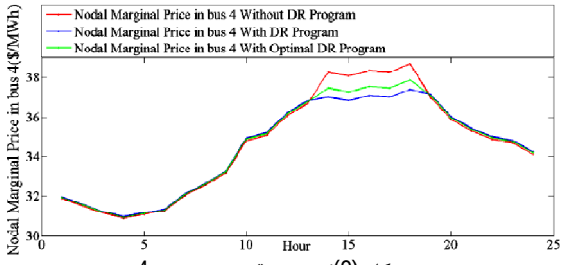
شکل (10): قیمت در شین 2 در صورت قطع خطوط انتقال



شکل (7): منحنی قیمت در شین 2



شکل (8): منحنی قیمت در شین 3



شکل (9): منحنی قیمت در شین 4

برای بررسی تاثیر اجرای بهینه برنامه پاسخ بار اضطراری در شرایط بروز خطا، این بار با فرض قطع خطوط انتقال، شبیه‌سازی انجام می‌شود. برای مقایسه اثر اجرای بهینه، غیربهینه و عدم اجرای برنامه پاسخ بار در شرایط اضطراری، به طور نمونه نمودار قیمت در بعضی از شین‌های بار به ازای قطع خطوط، در شکل‌های (10) تا (12) و نمودار هزینه کل در صورت قطع چندی از خطوط در شکل‌های (13) تا (15) نشان داده شده‌است. در این شکل‌ها خطوط انتقال مطابق جدول (3) شماره‌گذاری شده‌اند.

Archive of SID

www.SID.ir

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله اجرای بهینه برنامه پاسخ بار اضطراری برای کنترل قیمت‌های محلی و کاهش هزینه‌ها در زمان پیک بار و در شرایط اضطراری مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به این که انتخاب بهینه مبالغ پیشنهادی به مصرف‌کنندگان برای اجرای برنامه پاسخ بار اضطراری می‌تواند هزینه کل سیستم را به حداقل برساند، بهینه کردن این مبالغ می‌تواند برای همگان سودآور باشد. در این مقاله از الگوریتم رقابت استعماری برای بهینه کردن این مبالغ استفاده شد. سپس اجرای بهینه برنامه پاسخ بار اضطراری با حالت غیربهینه، در شرایط پیک و اضطراری مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که با وجود کاهش بیشتر قیمت‌ها در اجرای غیر بهینه برنامه پاسخ بار اضطراری نسبت به حالت بهینه، کاهش هزینه کل ناشی از اجرای بهینه بیشتر از حالت غیر بهینه خواهد بود. بنابراین ISO می‌تواند با بهینه کردن مبالغ پیشنهادی به مصرف‌کنندگان متصل به شین‌های مختلف و برای هر یک از ساعات پیک یا اضطراری، منفعت همگانی ناشی از اجرای برنامه پاسخ بار اضطراری را به حداکثر برساند.

مراجع

[1] D. Kirschen and G. Strbac, "*Fundamentals of Power System Economics*", John Wiley & Sons, pp.73 -102, 2004.

[2] Y.Y. Hong, C. N. C. Chien, K. L. Wu and M. S. Yang, "*Determination of Congestion Zones in Deregulated Electricity Markets Using Fuzzy Clustering*", 14th PSCC, Sevilla, pp.24-28, 2002.

[3] A. K. David, F. Wen, "*Market power in electricity supply,*" IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 16, no.4, pp.352-360, Dec 2001.

[4] US Department of Energy. "*Benefits of demand response in electricity markets and recommendations of achieving them*". Report to the United States Congress, February 2006. Available online: http://eetd.lbl.gov

[5] NYISO Auxiliary Market Operations: "*Demand response premier*". New York Independent System Operator. May, 2005. Available online: http://www.nyso.com

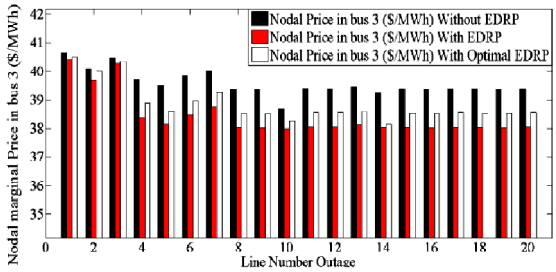
[6] Daniel S. Kirschen, "*Demand-Side View of Electricity Markets,*" IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 18, NO. 2, MAY 2003.

[7] E.Shayesteh, M.Parsa Moghaddam, S.Taherynejhad and M.K. Sheikh-EL-Eslami, "*Congestion Management Using Demand Response Programs in Power Market,*" IEEE PES General Meeting 2008, Pittsburg, USA, July 2008.

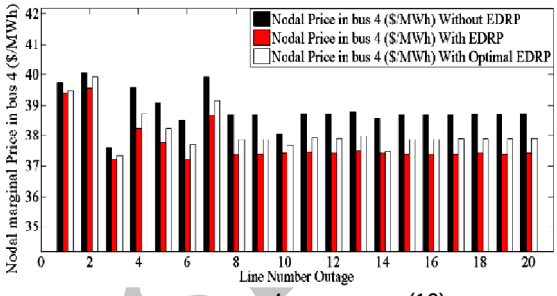
[8] A.Yousefi, E.Shayesteh, F.Daneshvar, and M.Parsa Moghaddam, "*A Risk-Based Approach for Provision of Spinning Reserve by Means of Emergency Demand Response Program,*" Int Conf. on Power and Energy, 1-3 December, 2008.

[9] E. Shayesteh, A.yousefi, M.Parsa Moghaddam and M. K.Sheikh-EL-Eslami, "*ATC Enhancement Using Emergency Demand Response Program,*" IEEE PSCE Conference, Seattle, USA, March 2009.

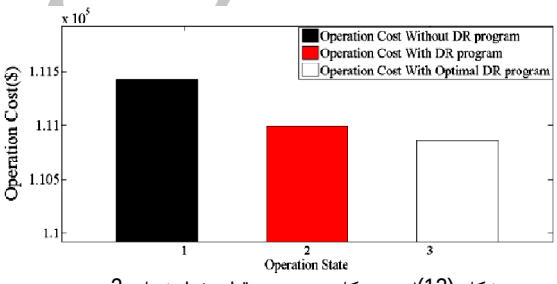
[10] R.Aazami, K.Aflaki and M.R.Haghifam, "*A demand response based solution for LMP management in power markets,*" Electrical Power and Energy Systems, vol.33, pp.1125-1132, 2011.



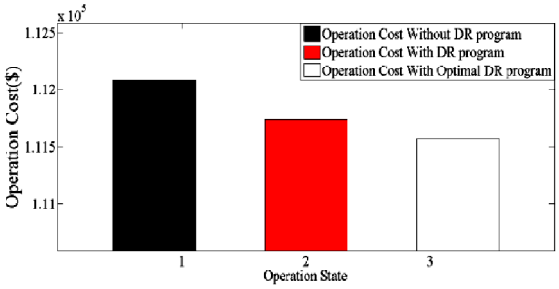
شکل (11): قیمت در شین 3 در صورت قطع خطوط انتقال



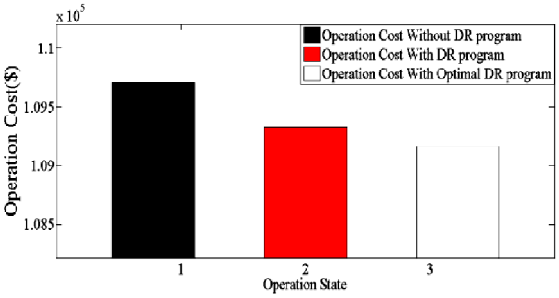
شکل (12): قیمت در شین 4 در صورت قطع خطوط انتقال



شکل (13): هزینه کل در صورت قطع خط شماره 2



شکل (14): هزینه کل در صورت قطع خط شماره 3



شکل (15): هزینه کل در صورت قطع خط شماره 4

www.SID.ir

[11] H.Aalami, G.R.Yousefi and M.Parsa Moghadam, "*Demand Response Model Considering EDRP and TOU Programs*," IEEE Transmission and Distribution Conference 2008, Chicago, USA, April 2008.
[12] N. Amjady, J.Aghaei and H.Shayanfar, "*Market clearing of joint energy and reserves auctions using augmented payment minimization*," Energy, pp.1-8, 2009.
[13] اسماعیل آتش‌پز گرگری، **توسعه الگوریتم بهینه‌سازی اجتماعی و بررسی کارایی آن**، پایان‌نامه کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران، 1387.

رزومه

محسن گیتی‌زاده در شیراز متولد شده است (1354). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- الکترونیک از دانشگاه شیراز (1377)، کارشناسی‌ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه علم و صنعت ایران (1379) و دکتری مهندسی برق- قدرت از دانشگاه دانشگاه علم و صنعت ایران (1388) سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه مدیریت انرژی، ادوات FACTS، توان راکتیو و بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت است.

مرتضی محمدی در استان فارس، شهرستان فراشبند متولد شده است (1363). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون (1388) و کارشناسی‌ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول (1391) سپری نموده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه بهره‌برداری اقتصادی از سیستم قدرت، نیروگاه‌های بادی مدرن، دینامیک و کنترل سیستم های قدرت و ادوات FACTS است.

زیرنویس‌ها

[1] Locational Marginal Prices(LMP)
[2] Independent Overhead System(ISO)
[3] Emergency Demand Response Program(EDRP)
[4] Imperialist Competition Algorithm(ICA)
[5] Demand Response(DR)
[6] Direct Load Control(DLC)
[7] Real Time Pricing(RTP)
[8] Critical Peak Time Pricing(CPTP)

Archive of SID

www.SID.ir