

قیمت‌گذاری سرویس توان راکتیو در صنعت برق با دسترسی باز با در نظر گرفتن بهینه توأم پروفیل و پایداری ولتاژ

غلامرضا یوسفی*، حسین سیفی** و محمدصادق قاضی‌زاده*
مرکز خدمات غرب میانه، شیکاگو
بخش مهندسی برق، گروه قدرت، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس
دانشکده صنعت آب و برق

(دریافت مقاله: ۷۹/۱۱/۳ - دریافت نسخه نهایی: ۸۰/۹/۲۶)

چکیده - در برخی از کشورهای دنیا، که صنعت برق از شکل سنتی^۱ به شکل تجدید ساختار شده^۲ مبدل شده، قیمت‌گذاری سرویسهای جانبی انتقال از اهمیت بیشتری برخوردار شده است. در صنعت برق سنتی، یک ارگان دولتی یا شبه دولتی موظف به تحویل انرژی الکتریکی در نقطه مصرف به مشترکین است. در حالی که در صنعت برق تجدید ساختار شده، بسته به نوع آن، در سطوح مختلف تولید و توزیع، بین شرکتهای مختلف رقابت ایجاد شده است و صنعت برق به یک بازار رقابتی انرژی مبدل شده است. در هر صورت، سیستم انتقال در محیطهای تجدید ساختار شده، منحصر به فرد است و وظیفه کنترل و بهره‌برداری از آن در اختیار اپراتور مستقل سیستم^۳ قرار دارد. اپراتور مستقل سیستم در انجام وظایف خود، ملزم به فراهم‌سازی و ارائه سرویسهایی برای انتقال مطمئن توان از فروشندگان به خریداران انرژی الکتریکی است. از این سرویسها تحت عنوان سرویسهای جانبی انتقال^۴ یاد می‌شود. از مهمترین این سرویسها، سرویس توان راکتیو در سیستم قدرت است. با توجه به اهمیت توان راکتیو، در پروفیل و پایداری ولتاژ، در این مقاله به قیمت‌گذاری زمان-واقعی سرویس توان راکتیو با هدف دستیابی به بهترین پروفیل و پایداری ولتاژ در کمترین هزینه ممکن به طور توأم، در شبکه قدرت با امکان دسترسی باز، پرداخته شده است. در این خصوص یک مسئله پخش بار بهینه توسعه یافته چند هدفی ارائه شده است که با استفاده از ایده روش Lexico Graphic Method به حل آن مبادرت ورزیده شده است. از مفهوم هزینه‌های حدی^۵ در قیمت‌گذاری زمان-واقعی سرویس توان راکتیو استفاده شده که با توجه به نتایج محاسبات بر روی یک شبکه آزمون، اثر پروفیل و پایداری مطلوب ولتاژ بر قیمت زمان-واقعی توان راکتیو نشان داده شده است.

واژگان کلیدی: قیمت‌گذاری سرویس توان راکتیو، پایداری ولتاژ، پروفیل ولتاژ، هزینه‌های حدی

Reactive Power Pricing in an Open Access Environment Considering Combined Optimum Voltage Profile and Voltage Stability

Gh. Yousefi, H. Seifi and M. S. Ghazi-zadeh
Department of Electrical Engineering, Tarbiat Modarres University
College of Water and Power Technology

Abstract: In a de-regulated open access environment, reactive power is one of the ancillary services which must be provided by an Independent System Operator (ISO). In this paper, a new algorithm is proposed in which reactive power resources are

** - استاد

* - استادیار

initially so tuned that optimum security in terms of voltage profile and voltage stability are achieved while at the same time, the system losses are minimized. The resulting optimization case is solved as an Extended Multi-objective Optimal Power Flow (EMOPF) problem using Lexico Graphic Method (LGM). Thereafter, using the concept of Fair Resource Allocation (FRA), the reactive powers generated are distributed among existing transactions so that the costs incurred are properly and fairly recovered. The algorithm is successfully tested on a typical power system.

Keywords: *Reactive Power, Reactive Power Management, Reactive Power Pricing, Voltage Profile, Voltage Stability, De-regulated Environment, Open Access.*

۱- مقدمه

پیشرفت تکنولوژی و شرایط اقتصادی در برخی از کشورهای دنیا، موجب حرکت سیستمهای «ستی صنعت برق» به سمت صنعت برق تجدید ساختار شده است. در صنعت برق سنتی، تولید، انتقال، توزیع و فروش انرژی الکتریکی، بر عهده ارگانهای دولتی یا شبه دولتی قرار دارد. در حال حاضر در بسیاری از کشورهای دنیا، از جمله ایران، صنعت برق به سبک سنتی، بهره‌برداری می‌شود. از طرفی، در دو دهه اخیر در برخی از کشورهای دنیا، بسته به عواملی همچون تکنولوژی، اقتصاد و فرهنگ مصرف، صنعت برق در سطوح مختلفی دچار تجدید ساختار شده است. «تجدید ساختار» بر تغییر در ساختار قوانین و فعالیت‌های اقتصادی دلالت دارد که دولت برای کنترل و بهره‌برداری هرچه بهتر از صنعت برق تبیین می‌کند؛ در یک تقسیم‌بندی کلی صنعت برق تجدید ساختار شده به یکی از سه صورت ائتلافی^۱، تبادل دو طرفه^۲ و تبادل توان^۳ بهره‌برداری می‌شود [۱]. در هر صورت، سیستم انتقال، در صنعت برق تجدید ساختار شده، به صورت منحصر به فرد باقی می‌ماند و وظیفه کنترل و بهره‌برداری از آن بر عهده اپراتور مستقل سیستم یا به اختصار ISO نهاده می‌شود. جامعترین صورت تجدید ساختار در صنعت برق، امکان دسترسی باز^۴ در سیستم است. در چنین سیستمی تولید کنندگان انرژی برق، در رقابت با یکدیگر مبادرت به انعقاد قرارداد با خریداران انرژی در قالب قراردادهای دو جانبه، می‌پردازند. بر اساس این قراردادها، تولیدکنندگان موظف به تزریق میزان مشخصی از توان حقیقی به شبکه انتقال در یک بازه زمانی مشخص اند [۲ و ۳]. وظیفه ISO، آماده‌سازی سیستم انتقال است به نحوی که انجام قراردادهای فوق‌الذکر در یک حاشیه امنیت مناسب، امکانپذیر

باشد. لذا باید ISO قادر باشد اولاً؛ سیستم انتقال و امکانات جانبی آن را فراهم سازد، ثانیاً؛ هزینه دسترسی فروشندگان و خریداران به سیستم انتقال در شرایط مکانی و زمانی مختلف را در قبال هر قرارداد مشخص سازد. از این رو سیستم انتقال، یک سری از سرویسهای جانبی انتقال را فراهم می‌آورد تا انتقال توان بین خریداران و فروشندگان میسر باشد و از طرف دیگر به تعیین قیمت سرویسهای فوق مبادرت می‌ورزد. از جمله سرویسهای انتقال، می‌توان به انتقال توان حقیقی، بهره‌برداری از سیستم قدرت، بالانس توان راکتیو در سیستم، جبران تلفات در انجام قراردادها، جبران‌سازی تغییرات لحظه‌ای بار و ذخیره چرخان اشاره کرد [۱]. در مرجع [۴] بحث کاملی روی ISO، انواع ساختار و وظایف آن انجام شده است.

همچنان که ذکر شد، بالانس توان راکتیو، از جمله سرویسهای جانبی انتقال است که بر عهده ISO است. از طرف دیگر، هزینه سرویس توان راکتیو باید توسط ISO اعلام شود. با توجه به ارتباط مستقیم توان راکتیو با پروفیل ولتاژ و پایداری ولتاژ در شبکه، فراهم کردن تجهیزات تأمین توان راکتیو و قیمت‌گذاری سرویس توان راکتیو در سیستم از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در یک سیستم قدرت با دسترسی باز، با توجه به اینکه قراردادهای دو جانبه، بین خریداران و فروشندگان انرژی بر مبنای توان حقیقی منعقد می‌شود، اگر چارچوب قیمت‌گذاری مناسبی در خصوص توان راکتیو وجود نداشته باشد، نیروگاهها هیچ انگیزه‌ای برای تولید و یا جذب توان راکتیو نداشته و در نتیجه ISO در کنترل پروفیل و پایداری ولتاژ در شبکه، با مشکل مواجه می‌شود.

در این مقاله، هدف، تعیین هزینه زمان-واقعی سرویس توان راکتیو با توجه به دستیابی به پروفیل و پایداری ولتاژ بهینه در

یک سیستم قدرت با امکان دسترسی باز است. اساس نظری و تحلیل قیمت‌گذاری زمان-واقعی توان حقیقی در مراجع [5-7] انجام شده است. بر اساس روش مشابه با روش مرجع [7]، مرجع [8] به قیمت‌گذاری زمان-واقعی توان راکتیو در صنعت برق سنتی پرداخته است که نویسندگان مقاله یاد شده، با کامل کردن فرمولبندی مسئله، دو مرجع [9 و 10] را در تئوری و کاربرد قیمت‌گذاری زمان-واقعی توان حقیقی و راکتیو ارائه کرده‌اند. مشابه با روش مرجع [8]، مطالعات دیگری در خصوص قیمت‌گذاری زمان-واقعی توان حقیقی و راکتیو صورت گرفته است که اساس کار آنها استفاده از پخش بار بهینه است و تفاوت عمده آنها در تابع هدف و قیود انتخاب شده، است [11-16]. لازم به ذکر است در هیچ یک از مقالات یاد شده، در زمینه قیمت‌گذاری زمان-واقعی توان راکتیو با لحاظ کردن پروفیل و پایداری ولتاژ، تحقیقی صورت نگرفته است. در مرجع [17]، ابتدا در مرحله طراحی به جایابی و اندازه‌یابی جبرانگرهای توان راکتیو پرداخته شده است به نحوی که در کمترین هزینه و تلفات، بهترین پایداری و پروفیل ولتاژ، نتیجه شود. سپس با استفاده از مفهوم «ارزیابی منصفانه منابع» [18] به تعیین سهم تولید توان راکتیو هر منبع تولید توان راکتیو در قبال هر مصرف‌کننده، پرداخته شده و از این طریق سرویس توان راکتیو قیمت‌گذاری شده است. همچنین در مرجع [19] هزینه زمان-واقعی سرویس توان راکتیو با هدف دستیابی به بهترین پروفیل ولتاژ صورت گرفته است. در این مقاله، هدف، دستیابی به بهترین پروفیل و پایداری ولتاژ به صورت توأم و تعیین قیمت سرویس توان راکتیو در نیل به اهداف یاد شده، به صورت زمان-واقعی است.

در این مقاله، ابتدا توضیحی در خصوص چگونگی پروفیل و پایداری ولتاژ در صنعت برق با دسترسی باز ارائه شده است. سپس نحوه استفاده از مسئله پخش بار بهینه توسعه یافته چند هدفی در قیمت‌گذاری زمان-واقعی سرویس توان راکتیو، در بخش (3) ارائه می‌شود. فرمولبندی مسئله در زیربخش (3-1) و روند حل مسئله در زیربخش (3-2) تشریح شده است.

زیربخش (3-3) به نحوه استفاده از هزینه‌های حدی در قیمت‌گذاری زمان-واقعی سرویس توان راکتیو می‌پردازد. بخش (4) به نتایج محاسبات و در نهایت، بخش (5) به ارائه جمع‌بندی و پیشنهادات اختصاص یافته است.

۲- توان راکتیو در صنعت برق با دسترسی باز

با توجه به تأثیر قابل توجه توان راکتیو بر چگونگی پروفیل و پایداری ولتاژ، سرویس جانبی تأمین این نوع توان، به خصوص در شرایطی که در بازار رقابتی انرژی الکتریکی، بسته به نحوه انجام قراردادها، سیستم قدرت به مرزهای بهره‌برداری خود نزدیک می‌شود، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

از طرف دیگر مسئله قیمت‌گذاری سرویسهای جانبی، در شرایط مختلف بهره‌برداری سیستم حائز اهمیت است. به خصوص تعیین چارچوبی در قیمت‌گذاری توان راکتیو، با توجه به کیفیت برق تحویل داده شده به خریداران نیاز به توجه خاص دارد. در بخش (3)، روشی جدید برای قیمت‌گذاری زمان-واقعی توان راکتیو با توجه به دستیابی به پروفیل بهینه ولتاژ و پایداری بهینه ولتاژ در کمترین هزینه تولید توسط ISO، ارائه می‌شود.

۳- تعیین نرخ زمان-واقعی سرویس توان راکتیو با

توجه به پروفیل و پایداری بهینه ولتاژ در صنعت

برق با دسترسی باز

همچنان که ذکر شد، وظیفه کنترل و بهره‌برداری از سیستم انتقال در صنعت برق با دسترسی باز بر عهده ISO قرار دارد. ISO موظف به فراهم کردن تجهیزات مورد نیاز برای انتقال مطمئن توان از فروشندگان توان به خریداران توان است. فراهم کردن تجهیزات تولید توان راکتیو و تأمین توان راکتیو مورد نیاز شبکه قدرت از مهمترین وظایف ISO است. همچنین تعیین یک نرخ منصفانه و معقول برای توان راکتیو در قبال هر قرارداد انجام شده در سیستم، از دیگر وظایف ISO است.

اهداف توأم در مسئله تعیین هزینه زمان-واقعی سرویس توان راکتیو با توجه به پروفیل بهینه و پایداری ولتاژ در شبکه و حداقل سازی تلفات سیستم است. قیود مسئله بهینه‌سازی یاد شده، کلیه قیود مساوی و نامساوی در بهره‌برداری از یک شبکه قدرت با دسترسی باز است. بدین ترتیب مسئله به یک پخش بار بهینه توسعه یافته چند هدفی در سیستم قدرت با دسترسی باز تبدیل می‌شود. در تعیین نرخ زمان-واقعی سرویس توان راکتیو، از مفهوم هزینه‌های حدی استفاده شده که توضیح جزییات آن در زیربخش (۳-۳) آورده شده است. در ضمن در مرجع [۱۹] به تعیین هزینه زمان-واقعی سرویس توان راکتیو با توجه به پروفیل بهینه ولتاژ در صنعت برق با دسترسی باز پرداخته شده است. در این مقاله، هدف دستیابی به پروفیل بهینه ولتاژ به صورت توأم با پایداری بهینه ولتاژ لحاظ شده و به قیمت‌گذاری زمان-واقعی سرویس توان راکتیو پرداخته شده است.

در زیربخش (۳-۱) فرمولبندی مسئله، ارائه شده است. نحوه حل مسئله «پخش بار بهینه توسعه یافته چند هدفی» در زیربخش ۳-۲ و چگونگی تعیین قیمت زمان-واقعی سرویس توان راکتیو در زیربخش (۳-۳) آورده شده است.

۳-۱- فرمولبندی مسئله پخش بار بهینه توسعه یافته چند هدفی
در صنعت برق با دسترسی باز، ISO در انجام سرویسهای جانبی انتقال که بر عهده دارد به واحد یا واحدهای نیروگاهی متعلق به خود نیاز دارد. از طرفی در محیط با دسترسی باز، قراردادهای دو جانبه انرژی بین فروشندگان و خریداران توان، بر مبنای میزان مشخصی از توان در یک بازه زمانی معین صورت می‌پذیرد و فروشندگان توان (تولید کنندگان) به تزیق توان حقیقی به شبکه، بر اساس قراردادهای از پیش تنظیم شده، می‌پردازند. بدین ترتیب ISO موظف به فراهم کردن امکاناتی است که با کمترین هزینه، قراردادهای منعقد شده در سیستم در یک حاشیه امنیت مناسب انجام پذیرد. لذا حداقل سازی هزینه تلفات در یک محیط با دسترسی باز، هم‌ارز حداقل سازی هزینه

تولید واحد یا واحدهای نیروگاهی متعلق به ISO است [۱۵]. بنابراین اولین تابع هدف، حداقل سازی تابع

$$F1 = \sum_{i \in NG_ISO} C_i(P_{gi}) \quad (1)$$

تعریف می‌شود. $C_i(P_{gi})$ هزینه تولید (واحد پول بر ساعت) واحد نیروگاهی i متعلق به ISO در میزان تولید P_{gi} (مگاوات) است. NG_ISO تعداد کل واحدهای نیروگاهی متعلق به ISO است. تابع

$$F2 = \sum_{i \in N} \alpha_i \cdot (|V_i| - V_{ref,i})^2 \quad (2)$$

به عنوان تابع هدف در رابطه با پروفیل ولتاژ تعریف شده است. با حداقل سازی $F2$ ، $|V_i|$ تا سرحد امکان به $V_{ref,i}$ نزدیک خواهد شد. N تعداد کل شین‌های شبکه، α_i ، $|V_i|$ و $V_{ref,i}$ به ترتیب ضریب اهمیت، اندازه و میزان مطلوب ولتاژ شین i است. پایداری ولتاژ در شبکه، در ارتباط مستقیم با میزان توانایی سیستم در تأمین توان راکتیو مورد نیاز شبکه است. به عبارت دیگر هر چه بیشتر بودن رزرو توان راکتیو در سیستم منجر به درجه بالاتری از پایداری ولتاژ در سیستم خواهد بود [۲۱]. بدین ترتیب، حداقل سازی تابع

$$F3 = \sum_{i \in NG} \left[\frac{Q_{gi}}{Q_{gi}^{max} - Q_{gi}^{min}} \right]^2 \quad (3)$$

معادل حداکثر رزرو توان راکتیو در شبکه است. با توجه به نتایج محاسبات حداقل سازی $F3$ ، معادل رسیدن به پایداری ولتاژ بهینه در سیستم است. این مطلب، با استفاده از محاسبه فاصله نقطه کا تا ناپایداری ولتاژ، با استفاده از روش تحلیل حساسیت [۲۳] نشان داده شده است. در تابع $F3$ ، NG تعداد کل منابع تولید توان راکتیو در شبکه، Q_{gi} ، Q_{gi}^{max} و Q_{gi}^{min} به ترتیب میزان تولید، حداکثر و حداقل مجاز تولید توان راکتیو منبع تولید توان راکتیو i است. تعریف $F3$ به صورت فوق باعث خواهد شد در روند بهینه‌سازی، هر منبع تولید توان راکتیو با توجه به ظرفیت نصب شده‌اش، به حداقل ممکن تولید توان راکتیو بپردازد.

بدین ترتیب، نمایش فشرده پخش بار بهینه توسعه یافته

چند هدفی به صورت زیر خواهد بود:

$$\text{Min } F1 \quad \& \quad (4)$$

$$\text{Min } F2 \quad \& \quad (5)$$

$$\text{Min } F3 \quad (6)$$

s.t.

$$G(\underline{P}_g, \underline{Q}_g, \underline{V}, \underline{\delta}) = 0 \quad (7)$$

$$H(\underline{P}_g, \underline{Q}_g, \underline{V}, \underline{\delta}) \leq 0 \quad (8)$$

قیود تساوی شامل قیود موازنه توان (حقیقی و راکتیو) در هر شین و میزان تزریق توان حقیقی توسط فروشندگان توان (تولیدکنندگان) بر طبق قراردادهای منعقد شده است:

$$P_{gi} - P_{di} - \sum_{j=1}^N |V_i| \cdot |V_j| \cdot |Y_{ij}| \cdot \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) = 0 \quad (9)$$

$$i \in \{1, 2, \dots, N\}$$

$$Q_{gi} - Q_{di} + \sum_{j=1}^N |V_i| \cdot |V_j| \cdot |Y_{ij}| \cdot \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i) = 0 \quad (10)$$

$$i \in \{1, 2, \dots, N\}$$

$$P_{gi} = P_{gi}^{cte} \quad i \notin \{1, \dots, NG_ISO\}, \quad i \in \{1, \dots, NG\} \quad (11)$$

که در روابط فوق، $P_{gi}(P_{di})$ و $Q_{gi}(Q_{di})$ به ترتیب میزان تولید (مصرف) توان حقیقی و راکتیو در شین i -ام است. θ_{ij} و $|Y_{ij}|$ اندازه و زاویه المان ij از ماتریس Y_{BUS} است. $|V_i|$ و δ_i نشانگر دامنه و زاویه ولتاژ شین i -ام و بالاخره P_{gi}^{cte} میزان تزریق توان حقیقی توسط فروشنده i -ام به سیستم است.

قیود نامساوی عبارت است از حدود دامنه ولتاژ شین‌ها، حدود تولید توان راکتیو منابع تولید توان راکتیو، حدود تولید توان حقیقی ژنراتورهای متعلق به ISO و بالاخره حدود ظرفیت انتقال توان حقیقی خطوط که به ترتیب در زیر نمایش داده شده است:

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad i \in \{1, 2, \dots, N\} \quad (12)$$

$$Q_{gi}^{\min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{\max} \quad i \in \{1, 2, \dots, NG\} \quad (13)$$

$$P_{gi}^{\min} \leq P_{gi, ISO} \leq P_{gi}^{\max} \quad i \in \{1, \dots, NG_ISO\} \quad (14)$$

$$P_{ij}^{\min} \leq P_{ij} \leq P_{ij}^{\max} \quad i, j \in \{1, 2, \dots, N\}, \quad i \neq j \quad (15)$$

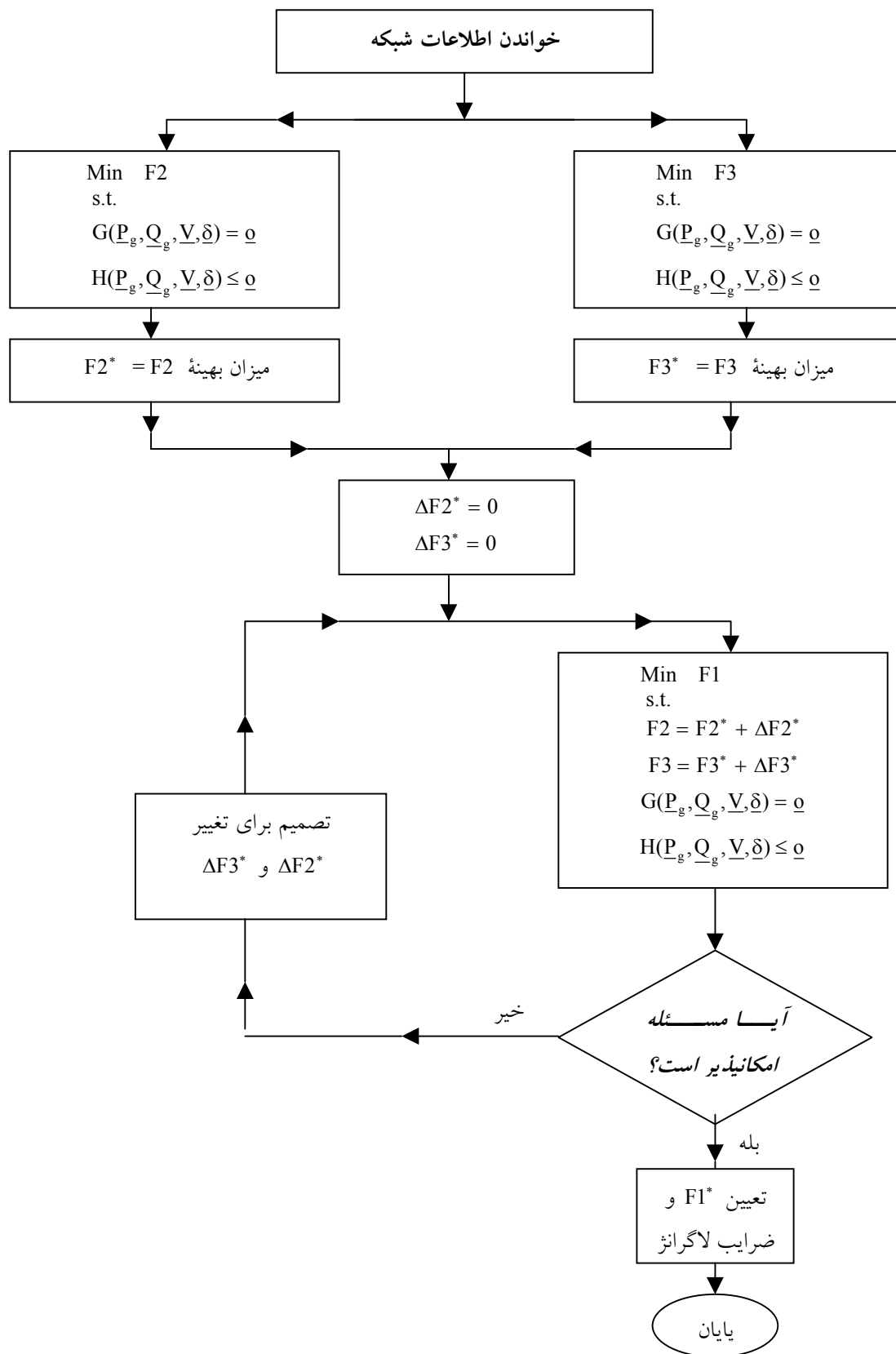
با حل مسئله پخش بار بهینه توسعه یافته چند هدفی، روابط (۴) تا (۸)، میزان تولید واحدهای نیروگاهی متعلق به ISO، Q_g میزان توان راکتیو تولیدی منابع تولید توان راکتیو، \underline{V} و $\underline{\delta}$ اندازه و زاویه ولتاژ شین‌ها تعیین می‌شود. نحوه حل مسئله فوق در زیر بخش (۲-۳) ارائه شده است.

۲-۳ روند حل مسئله پخش بار بهینه توسعه یافته چند هدفی

به منظور حل مسئله پخش بار بهینه توسعه یافته چند هدفی، روابط (۴) تا (۸)، از ایده روش Lexico Graphic Method [۲۰] و یا به اختصار LMG استفاده شده است. روش LMG در حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفی به کار می‌رود. با استفاده از روش فوق در بهینه‌سازی توأم n تابع هدف، تحت یک سری از قیود، ابتدا $n-1$ زیرمسئله بهینه‌سازی تشکیل می‌شود. در این $n-1$ زیرمسئله، قیود، همان قیود مسئله اصلی است اما فقط یکی از n تابع هدف منظور می‌شود. با حل $n-1$ زیرمسئله بهینه‌سازی، حل بهینه برای $n-1$ تابع هدف تحت قیود اصلی مسئله تعیین می‌شود. هر حل بهینه، یک کران برای تابع مورد نظر بدست می‌دهد. در این مرحله، n -امین زیرمسئله بهینه‌سازی تشکیل و حل می‌شود. در زیر مسئله اخیر، تابع هدف، n -امین تابع هدف و قیود شامل قیود مسئله اصلی به انضمام جوابهای بهینه $n-1$ تابع هدف قبلی است. با حل آخرین زیرمسئله بهینه‌سازی، حل بهینه مسئله اصلی تعیین می‌شود.

با توجه به توضیحات فوق، نمودار جریان شکل (۱)، روند حل مسئله پخش بار بهینه توسعه یافته چند هدفی (که از ایده LGM استفاده می‌کند) را به نمایش می‌گذارد. با توجه به شکل (۱)، پس از خواندن اطلاعات شبکه و تعیین حل بهینه (کران پایین) برای تابع هدف پروفیل ولتاژ، $F2^*$ ، و برای تابع هدف پایداری ولتاژ، $F3^*$ ، آخرین زیرمسئله بهینه‌سازی به هدف حداقل‌سازی تلفات سیستم قدرت با دسترسی باز، $F1$ ، تشکیل می‌شود.

از آنجایی که حداقل‌سازی $F2$ ، تنها با قیود حداقل و حداکثر تولید توان راکتیو منابع تولید توان راکتیو صورت



شکل ۱- نمودار جریان‌ی روند حل مسئله پخش بار بهینه توسعه یافته چند هدفی با استفاده از ایده LGM

می‌گیرد و قید دیگری روی تولید توان راکتیو وجود ندارد، امکان دارد در روند رسیدن به بهترین پروفیل ولتاژ، برخی از منابع تولید توان راکتیو به حدود بهره‌برداری خود نزدیک شوند. از طرف دیگر، در حداقل‌سازی تابع $F3$ و رسیدن به بهترین حد پایداری ولتاژ، برای داشتن بیشترین رزرو توان راکتیو، تا سرحد امکان تولید توان راکتیو منابع تولید توان راکتیو، نزدیک به صفر باقی می‌ماند. لذا بسته به شرایط شبکه قدرت تحت آزمون، برقراری همزمان $F2 = F2^*$ و $F3 = F3^*$ مورد سؤال است و ممکن است وارد شدن همزمان آنها به عنوان قید در مسئله، منجر به ناممکن شدن مسئله شود. از این رو در صورت امکان ناپذیر بودن مسئله، بسته به شبکه قدرت مورد نظر، باید اجازه داده شود که تابع هدف پروفیل ولتاژ یا تابع هدف پایداری ولتاژ و یا هر دوی آنها مقداری از کران پایین خود ($F3^*$ و $F2^*$) به میزان $\Delta F2^*$ و $\Delta F3^*$ فاصله بگیرند تا در ازای از دست دادن بهینگی مطلق در پروفیل و یا پایداری ولتاژ، مسئله به یک مسئله امکانپذیر تبدیل شود. برای محاسبه مقادیر $\Delta F2^*$ و $\Delta F3^*$ راههای مختلفی می‌توان پیشنهاد کرد. روش به کار گرفته شده در این مقاله، بر این مبنا استوار است که ابتدا میزان $\Delta F2^*$ به صورت زیر تعیین می‌شود:

(الف) با در نظر گرفتن $F1$ ، به عنوان تنها تابع هدف و حل مسئله، مقدار تابع $F2$ محاسبه می‌شود.

(ب) میزان بهینه مطلق $F2$ (با در نظر گرفتن $F2$ به عنوان تنها تابع هدف و حل آن)، محاسبه می‌شود.

اکنون میزان مطلوب برای پروفیل ولتاژ، قرارگرفتن مقدار تابع $F2$ در میانگین دو عدد به دست آمده از حالت‌های (الف) و (ب) قرار داده می‌شود. روشن است که $\Delta F2^*$ برابر تفاضل میزان بهینه $F2$ (حالت ب)، از مقدار میانگین یاد شده است. در شرایط فوق و در یک روند تکراری، مطابق شکل (۱)، سعی می‌شود کوچکترین مقدار ممکن برای $\Delta F3^*$ به دست آید تا بدین ترتیب، تا سرحد امکان، بهترین پایداری ولتاژ در سیستم حاصل شود.

بدین ترتیب حداقل هزینه تولید واحدهای نیروگاهی متعلق

به ISO یعنی $F1 = F1^*$ و ضرایب لاگرانژ تعیین می‌شود. توضیح در خصوص ضرایب لاگرانژ و نحوه استفاده از آنها در تعیین هزینه زمان-واقعی سرویس توان راکتیو در زیربخش (۳-۳) آورده شده است.

۳-۳- استفاده از هزینه‌های حدی در قیمت‌گذاری زمان-واقعی سرویس توان راکتیو

طبق تعریف، هزینه حدی به مفهوم میزان تغییر تابع هدف بهینه‌سازی در اثر تغییر یک متغیر بهینه‌سازی است. در این مقاله، به منظور قیمت‌گذاری زمان-واقعی سرویس توان راکتیو با توجه به پروفیل و پایداری بهینه ولتاژ از هزینه‌های حدی استفاده شده است [۹ و ۱۰]. در ادامه، ارتباط هزینه‌های حدی با ضرایب لاگرانژ ارائه می‌شود.

برای حل یک مسئله بهینه‌سازی با استفاده از روش لاگرانژ، معادله لاگرانژ تشکیل و حل می‌شود. با توجه به نمودار جریانی موجود در شکل (۱)، حل آخرین زیرمسئله (حداقل‌سازی $F1$)، با استفاده از روش لاگرانژ، منجر به تشکیل معادله لاگرانژ زیر می‌شود:

$$L(\underline{P}_g, \underline{Q}_g, \underline{V}, \underline{\delta}) = F1 - \lambda_{profile} \cdot [F2 - F2^* - \Delta F2^*] - \lambda_{stability} \cdot [F3 - F3^* - \Delta F3^*] - \lambda_{\leq}^t \cdot G(\underline{P}_g, \underline{Q}_g, \underline{V}, \underline{\delta}) - \mu_{\leq}^t \cdot H(\underline{P}_g, \underline{Q}_g, \underline{V}, \underline{\delta}) \quad (16)$$

در رابطه فوق، L تابع لاگرانژ، $\lambda_{profile}$ ، $\lambda_{stability}$ ، λ_{\leq}^t و μ_{\leq}^t به ترتیب، ضرایب لاگرانژ در رابطه با تابع پروفیل ولتاژ، تابع پایداری ولتاژ، قیود مساوی و قیود نامساوی است. t نشانگر ترانهاده است. گسترده معادله لاگرانژ در پیوست (الف) آورده شده است. با توجه به روابط (۹) تا (۱۵)، λ_{\leq}^t و μ_{\leq}^t شامل درایه‌های زیر است:

$$\lambda_{\leq}^t = [MC_{pi}, MC_{qi}, \Gamma_{P_{gi}}] \quad (17)$$

$$\mu_{\leq}^t = [v_i^{\min}, v_i^{\max}, \varphi_i^{\min}, \varphi_i^{\max}, \Gamma_{P_{gi}}^{\min}, \Gamma_{P_{gi}}^{\max}, \Gamma_{P_{gi}, ISO}^{\min}, \Gamma_{P_{gi}, ISO}^{\max}, \eta_{P_{ij}}^{\min}, \eta_{P_{ij}}^{\max}] \quad (18)$$

واحد هر یک از ضرایب لاگرانژ مندرج در روابط (۱۷) و (۱۸) با استفاده از رابطه (۱۶) مشخص می‌شود؛ $F1$ ، بر حسب واحد

پول بر ساعت و قید مربوط به توان راکتیو در هر شین، رابطه (۱۰)، بر حسب مگاوار است، لذا ضریب لاگرانژ مربوطه، MC_{qi} ، بر حسب واحد پول بر مگاوار ساعت است، در نتیجه با توجه به تابع لاگرانژ، معادله (۱۶) و تعریف هزینه‌های حدی، قیمت زمان-واقعی توان راکتیو در شین مصرف i -ام در یک بازه زمانی مشخص، عبارت است از $\frac{\partial L}{\partial Q_{di}}$ که با توجه به روابط (۱۶) و (۱۷):

$$\frac{\partial L}{\partial Q_{di}} = MC_{qi} \quad i \in \{1, 2, \dots, ND\} \quad \text{واحد پول بر مگاوار ساعت} \quad (19)$$

که در رابطه فوق ND تعداد کل شین‌های بار است. توان راکتیو تولیدی، Q_{gi} ، جزو متغیرهای بهینه‌سازی است؛ لذا $\frac{\partial L}{\partial Q_{gi}} = 0$ خواهد بود و با توجه به روابط (۱۶) تا (۱۸):

$$\frac{\partial L}{\partial Q_{gi}} = -MC_{qi} - \varphi_i^{\min} + \varphi_i^{\max} = 0 \quad i \in \{1, 2, \dots, NG\} \quad (20)$$

$$MC_{qi} = \varphi_i^{\max} - \varphi_i^{\min} \quad i \in \{1, 2, \dots, NG\} \quad \text{واحد پول بر مگاوار ساعت} \quad (21)$$

لازم به ذکر است، صفر شدن $\frac{\partial L}{\partial Q_{gi}}$ در یک شین تولیدی توان راکتیو، لزوماً به مفهوم صفر شدن هزینه حدی در آن شین نیست؛ اگر منبع تولید توان راکتیو فوق، در روند حل، به یکی از حدود بالا یا پایین خود برسد، در این صورت، ضرایب لاگرانژ در خصوص محدودیت مربوطه، غیر صفر شده و در نتیجه هزینه حدی توان راکتیو، در شین یاد شده، غیر صفر خواهد بود و برعکس. همچنان که مشاهده می‌شود، با تعیین ضرایب لاگرانژ که در نتیجه حل مسئله بهینه‌سازی به دست می‌آید، قیمت‌های زمان-واقعی توان راکتیو در کلیه شین‌های سیستم، با توجه به روابط (۱۹) و (۲۱) تعیین می‌شود.

۴- نتایج محاسبات

یک شبکه ۹ شینه که نمودار تک‌خطی و اطلاعات مربوط به آن در ضمیمه (ب) آورده شده است، برای انجام آزمون و ارائه نتایج این تحقیق انتخاب شده است. در این شبکه، واحد

نیروگاهی شین 1، متعلق به ISO و واحدهای نیروگاهی موجود روی شین‌های 2 و 3 فروشندگان توان در سیستم فرض شده است. همچنین، در جدول (۱) قراردادهای دوجانبه بین تولیدکنندگان توان (فروشنندگان) و مصرف‌کنندگان توان (خریداران) ارائه شده است. میزان هر سه قرار داد، 20 MW فرض شده تا در نهایت، امکان انجام مقایسه بین قیمت زمان-واقعی سرویس توان راکتیو در قبال هر یک از قراردادها امکانپذیر باشد.

با توجه به اطلاعات شبکه آزمون و قراردادهای دوجانبه مندرج در جدول (۱)، فرمولبندی مسئله پخش بار بهینه توسعه یافته چند هدفی، منطبق بر روابط (۴) تا (۸) انجام شد. به منظور حل مسئله اخیر، بر طبق روش ارائه شده در زیربخش (۲-۳)، مبتنی بر استفاده از روش Lexico Graphic Method [۲۰] و با توجه به نمودار جریانی شکل (۱)، ابتدا میزان بهینه تابع هدف پروفیل ولتاژ، و $F2^*$ ، و میزان بهینه تابع هدف پایداری ولتاژ، $F3^*$ ، تعیین شد. در حل مسائل بهینه‌سازی، از برنامه‌نویسی توسط نرم‌افزار GAMS استفاده شده است [۲۲]. همچنین در این تحقیق، α_i ، ضریب اهمیت و $V_{ref,i}$ ، ولتاژ مطلوب شین i -ام در تابع هدف پروفیل ولتاژ، برابر واحد فرض شده است $F2 = \sum_{i \in N} \alpha_i \cdot (|V_i| - V_{ref,i})^2$ که بسته به شبکه قدرت مورد مطالعه، مقادیر یاد شده می‌تواند متفاوت انتخاب شود.

در جدول (۲)، نتایج حل بهینه، برای دو زیر مسئله با توابع هدف $F2$ (پروفیل ولتاژ) و $F3$ (پایداری ولتاژ) درج شده است. همچنین به منظور ایجاد امکان مقایسه، حل بهینه زیر مسئله، با تابع هدف $F1$ (هزینه تولید واحد نیروگاهی متعلق به ISO) نیز در جدول (۲) آورده شده است.

لازم به تذکر است که در این مقاله برای انجام مسائل پخش بار بهینه توسعه یافته، اندازه مجاز ولتاژ شین اسلک بین 0.9 تا 1.1 پریونیت و اندازه مجاز ولتاژ بقیه شین‌ها بین 0.95 تا 1.05 پریونیت فرض شده است.

با توجه به جدول (۲)، مشاهده می‌شود که برای دستیابی به

جدول ۱- قراردادهای دوجانبه منعقد شده در سیستم آزمون

قرارداد	شین تولید (فروشنده)	شین مصرف (خریدار)	میزان قرارداد (مگاوات)
T1	2	8	20
T2	3	5	20
T3	2	6	20

جدول ۲- نتایج حل بهینه، برای دو زیرمسئله با توابع هدف F1، F2 و F3

تابع هدف	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V ₇	V ₈	V ₉	Q _{g1}	Q _{g2}	Q _{g3}	Q _{g7}	Q _{g8}	Q _{g9}
F1	1.06	1.05	1.05	1.034	1.00	1.001	1.033	1.027	1.03	0.43	-0.075	0.1087	0.0883	0.182	0.0896
F2	1.041	1.005	1.008	1.004	0.971	0.975	0.999	1.000	1.000	0.711	-0.343	-0.014	0.1	0.2928	0.1325
F3	1.091	1.05	1.033	1.048	1.02	1.025	0.996	0.979	0.988	0.827	0.0118	0.0127	0.0001	0.0014	0.0013

همه مقادیر در جدول فوق برحسب پریونیت است.

پایداری ولتاژ که مطابق با کمترین مقدار برای F3، یعنی F3* = 0.0028 است، مقدار محاسبه شده برای تابع پروفیل ولتاژ F2 = 0.0158 است که با توجه به جدول (۲) در این حالت ولتاژ شین‌های 1، 2 و 4 به مرزهای مجاز خود نزدیک شده است.

در ادامه حل مسئله پخش بار بهینه توسعه یافته چند هدفی منطبق بر نمودار جریانی موجود در شکل (۱)، آخرین زیرمسئله بهینه‌سازی با هدف حداقل‌سازی F1، هزینه تولید ژنراتور متعلق به ISO و قیود بهره‌برداری سیستم قدرت با دسترسی باز، به انضمام دو قید مقدار مطلوب پروفیل ولتاژ و مقدار مطلوب پایداری ولتاژ، تشکیل شده است. با توجه به توضیحی که در زیربخش (۳-۲) ارائه شد، زیرمسئله اخیر در حالتی که قید پروفیل ولتاژ و قید پایداری ولتاژ، هر دو به صورت توأم در کران پایین خود قرار گیرند، یا به عبارت دیگر $\Delta F2^* = 0$ و $\Delta F3^* = 0$ ، ناممکن خواهد بود. لذا بسته به شرایط سیستم قدرت، باید اجازه داده شود تا میزان پروفیل ولتاژ مطلوب، یا میزان پایداری ولتاژ مطلوب و یا هر دوی آنها قدری از میزان بهینه مطلق خود دور شود. بدین ترتیب آخرین زیرمسئله، دارای جواب خواهد بود و با توجه به توضیحات مندرج در زیربخش (۳-۳)، با استفاده از هزینه‌های حدی قیمت زمان-واقعی سرویس توان راکتیو تعیین می‌شود.

بهترین پروفیل ولتاژ در شبکه (هنگامی که تابع هدف F2 در نظر گرفته شود)، SVC موجود روی شین 7، به حد بالای عملکرد خود و SVC موجود روی شین 8 به نزدیکی محدوده عملکرد خود رسیده است. اما در این حالت پراکندگی ولتاژ از مقدار مطلوب (1.0 پریونیت) بسیار اندک است. از طرفی، با لحاظ کردن تابع هدف F3 (برای رسیدن به بهترین پایداری ولتاژ)، میزان رزرو توان راکتیو در شبکه، به مراتب بالا رفته است. در جدول (۳)، مقادیر بهینه هریک از توابع هدف مندرج در جدول (۲) و همچنین میزان محاسبه شده توابع هدف دیگر، آورده شده است. به منظور مقایسه نتایج بدست آمده در این تحقیق، در هریک از حالات فوق ضریب پایداری ولتاژ، VSI، منطبق بر روند استفاده از تحلیل حساسیت در محاسبه فاصله نقطه کار تا ناپایداری ولتاژ [۲۳] آورده شده است. به طور خلاصه VSI بیانگر میزان مجاز افزایش مگاوار در سیستم است تا جایی که اولین شین در سیستم دچار ناپایداری ولتاژ شود.

با توجه به جدول (۳)، برای دستیابی به پروفیل بهینه ولتاژ، VSI در پایینترین حد خود قرار دارد. این مسئله، همان طور که در جدول (۲) دیده می‌شود به دلیل نزدیک شدن برخی از منابع تولید توان راکتیو به محدوده‌های عملکرد خود و کم شدن رزرو توان راکتیو است. از طرفی، در نیل به بهترین

جدول ۳- مقادیر بهینه و محاسبه شده توابع F1 تا F3 و میزان VSI در هریک از حالتها منطبق بر جدول (۲)

تابع هدف	مقدار F1	مقدار F2	مقدار F3	VSI (p.u.)
F1	F1*=11108	0.0125	0.3146	9.092
F2	11121	F2*=0.0033	0.5715	7.739
F3	11125	0.0158	F3*=0.0028	9.924

در جدول (۳)، * بیانگر میزان بهینه می باشد.

خریدار برق و اندیس پایداری ولتاژ VSI، در هر یک از حالت‌های مندرج در جدول (۴) آورده شده است. VSI منطبق بر روش ارائه شده در مرجع [۲۲] محاسبه شده است.

همچنان که در جدول (۵) مشاهده می شود، در یک پروفیل ولتاژ مطلوب یکسان ($F2=0.008$) و در مقادیر مختلف پایداری ولتاژ مطلوب ($F3=0.01115$ و $F3=0.042$)، قیمت زمان-واقعی سرویس توان راکتیو در شبکه (MC_{qi})، برای F3 کوچکتر (پایداری ولتاژ بزرگتر) بیشتر است (مقایسه سطر سوم و پنجم جدول (۵)). همچنین در یک سطح مطلوب برای تابع هدف پایداری ولتاژ ($F3=0.042$) و مقادیر مختلف مطلوب برای تابع هدف پروفیل ولتاژ ($F2=0.008$ و $F2=0.05$)، قیمت زمان-واقعی سرویس توان راکتیو در شبکه (MC_{qi})، برای F2 کوچکتر (پروفیل ولتاژ بهتر)، بیشتر است (مقایسه سطر چهارم و پنجم از جدول (۵)). همچنین در شرایط مختلف (انتخابهای متفاوت از F2 و F3)، ضریب پایداری ولتاژ شبکه VSI، محاسبه شده است. ضمناً برای مقایسه قیمت‌های زمان-واقعی، در سطر اول جدول (۵)، مقادیر زمان-واقعی سرویس توان راکتیو، وقتی تابع هدف، تنها F1 (هزینه تولید ژنراتور متعلق به ISO) در نظر گرفته شود، آورده شده است. لازم به ذکر است گرچه اندیس پایداری ولتاژ در حالت اخیر $VSI=9.092$ p.u. به دست آمده است، اما با توجه به جدول (۳)، در این حالت میزان تابع پروفیل ولتاژ $F2=0.0125$ است. این مقدار از F2، به نسبت دیگر مقادیر در جدول (۵) از میزان کمتری در مطلوبیت پروفیل ولتاژ بهره مند است. با توجه به اینکه هر سه قرارداد در میزان 20 MW بین خریداران و فروشندگان منعقد شده است، جدول (۱)، مشاهده می شود که قیمت زمان-واقعی سرویس توان راکتیو بسته به شین مصرف، میزان مطلوب پروفیل ولتاژ

همان طور که در جدول (۳) مشاهده می شود، وقتی تابع هدف، F1، هزینه تولید ژنراتور متعلق به ISO باشد، پس از حل مسئله، میزان تابع F2، 0.0125 محاسبه شده و میزان بهینه مطلق F2، $F2^*=0.0033$ به دست آمده است. لذا مقدار میانگین در دو حالت یاد شده، به عنوان میزان مطلوب برای پروفیل ولتاژ پیشنهاد می شود ($F2 \cong 0.08$). در این صورت، با توجه به نمودار جریانی موجود در شکل (۱)، در یک روند حل تکراری، بهترین میزان مطلوب ممکن برای تابع پایداری ولتاژ $F3=0.01115$ تعیین می شود. در این شرایط حداقل هزینه تولید ژنراتور متعلق به ISO، معادل 11118 واحد پول بر ساعت تعیین می شود. با انتخاب $F2=0.08$ ، مقدار $F3=0.01115$ یک کران پایین برای تابع پایداری ولتاژ است. بسته به شرایط شبکه قدرت، ممکن است اجازه داده شود میزان F3 از کران پایین یاد شده، عدد بزرگتری انتخاب شود. از طرفی، اگر مقدار مطلوب F2، توسط معیار دیگری انتخاب شود، کران پایین برای F3، متفاوت خواهد بود. به عنوان مثال اگر میزان مطلوب $F2=0.005$ انتخاب شود (یعنی پروفیل ولتاژ از حالت قبل، $F2=0.008$ ، در وضعیت بهتری قرار گیرد)، در نتیجه در روند حل تکراری منطبق بر نمودار جریانی شکل (۱)، کران پایین برای F3 (بهترین حد پایداری ولتاژ) معادل $F3=0.042$ تعیین خواهد شد. در جدول (۴) نتایج حل بهینه، در هر یک از حالت‌های مطروحه فوق ارائه شده است. همچنین برای انجام مقایسه، در جدول (۴) نتایج حل، در حالتی که $F2=0.008$ و $F3=0.042$ در نظر گرفته شود و حالتی که فقط تابع هدف F1، هزینه تولید واحد نیروگاهی متعلق به ISO لحاظ شود، درج شده است.

در جدول (۵)، F1 هزینه تولید واحد ژنراتوری متعلق به ISO، قیمت زمان-واقعی سرویس توان راکتیو در شین‌های

جدول (۴) نتایج حل «پخش بار بهینه توسعه یافته چند هدفی»

تابع هدف	$ V_1 $	$ V_2 $	$ V_3 $	$ V_4 $	$ V_5 $	$ V_6 $	$ V_7 $	$ V_8 $	$ V_9 $	Q_{g1}	Q_{g2}	Q_{g3}	Q_{g7}	Q_{g8}	Q_{g9}
F1	1.06	1.05	1.05	1.034	1.00	1.001	1.033	1.027	1.03	0.43	-0.075	0.109	0.088	0.182	0.09
F1 & F2=0.008 & F3=0.01115	1.063	1.041	1.03	1.03	0.997	0.9998	0.993	0.979	0.988	0.596	0.087	0.116	0.003	0.027	0.025
F1 & F2=0.005 & F3=0.042	1.043	1.034	1.028	1.015	0.981	0.981	0.955	0.986	0.994	0.437	0.103	0.163	0.008	0.078	0.067
F1 & F2=0.008 & F3=0.042	1.055	1.048	1.042	1.028	0.994	0.995	1.009	1.001	1.008	0.417	0.111	0.156	0.008	0.079	0.067

در جدول فوق تمام مقادیر بر حسب پریونیت است.

جدول ۵- مقدار F1، قیمت زمان-واقعی سرویس توان راکتیو در شین‌های خریدار و VSI در هر یک از حالت‌های جدول (۴)

تابع هدف	$F1=C(P_{g1})$	MC_{q5}	MC_{q6}	MC_{q8}	VSI (p.u.)
F1	11108	0.4	0.42	0.0	9.092
F1 & F2=0.008 & F3=0.01115	11118	0.53	0.51	0.91	9.059
F1 & F2=0.005 & F3=0.042	11114	0.6	0.61	0.49	8.621
F1 & F2=0.008 & F3=0.042	11111	0.43	0.45	0.32	8.728

در جدول فوق F1 بر حسب واحد پول بر ساعت، MC_{qi} بر حسب واحد پول بر مگاوار ساعت و VSI بر حسب p.u. است.

و میزان مطلوب پایداری ولتاژ در شبکه، متغیر است.

شبکه قدرت و تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان در شبکه دارد. در این مقاله ضریب اهمیت تمام شین‌ها برابر واحد در نظر گرفته شده است و پروفیل و پایداری ولتاژ در کل شبکه مد نظر بوده است. امکان تکرار مطالعات با توجه خاص به یک شین در رسیدن به یک سطح مطلوب از پروفیل و پایداری ولتاژ در آن شین و قیمت‌گذاری در شرایط ذکر شده، امکانپذیر است. در ضمن مسئله ذخیره چرخان نیز به عنوان یک سرویس جانبی انتقال در محیط با دسترسی باز، مطرح است که باید در صورت لزوم توسط مشتریان خریداری شود. ذخیره چرخان مسئله مورد نظر در این مقاله نیست و تعیین میزان و نحوه قیمت‌گذاری آن، تحقیقات جداگانه‌ای را می‌طلبد.

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

در این مقاله، با فرمولبندی یک مسئله پخش بار بهینه توسعه یافته چند هدفی و حل آن با استفاده از ایده روش LGM، به قیمت‌گذاری زمان-واقعی سرویس توان راکتیو در سیستم قدرت با دسترسی باز پرداخته شده و اثر میزان مطلوبیت پروفیل ولتاژ و پایداری ولتاژ در شبکه، بر قیمت‌گذاری نشان داده شده است. همچنین از روش تحلیل حساسیت در تعیین فاصله پایداری شبکه در نقطه کار منتج از حل مسئله پخش بار بهینه توسعه یافته چند هدفی استفاده شده است. انتخاب میزان مطلوب پروفیل ولتاژ و پایداری ولتاژ، وابستگی مستقیم به

واژه نامه

1. regulated
2. re-regulated
3. independent system operator (ISO)
4. ancillary services
5. marginal costs

- | | | |
|-----------------------|-------------------|-----------------------------|
| 6. POOLCO | 8. power exchange | 10. voltage stability index |
| 7. bilateral exchange | 9. open access | |

مراجع

- Philipson, L., and Willis, H. L., *Understanding Electric Utilities and De-Regulation*, Marcel Dekker, Inc., 1999.
- Ilic, M., Galiana, F., and Fink, L., *Power System Restructuring: Engineering and Economics*, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- Galiana, F. D., and Ilic, M. A., "Mathematical Framework for the Analysis and Management of Power Transactions Under Open Access" *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 13, No. 2, May, pp. 681-7, 1998.
- Shirmohammadi, D., Wollenberg, B., Vojdani, A., Sandrin, P., Pereira, M., Rahimi, F., Schneider, T., and Stott, B., "Transmission Dispatch and Congestion Management in the Emerging Energy Market Structures," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 13, No. 4, Nov., pp. 1466-74, 1998.
- Caramanis, M. C., Bohn, R. E., and Schweppe, F. C., "Spot Pricing of Electricity: Practice and Theory," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No. 9, pp. 3234-3245, Sep. 1982.
- Bohn, R. E., Caramanis, M. C., and Schweppe, F. C., "Optimal Pricing in Electrical Network Over Space and Time," *The Rand Journal of Economics*, Vol. 15, No. 3, pp.360-376, 1984.
- Schweppe, F. C., Caramanis, M. C., Tabors, R. D. and Bohn, R. E., *Spot Pricing of Electricity*, Kluwer Academic Publishers, 1988.
- Baughman, M. L., and Siddiqi, S. N., "Real-time Pricing of Reactive Power: Theory and Case Study Results," *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 6, No. 2, pp. 23-9, Feb. 1991.
- Baughman, M. L., Siddiqi, S. N., and Zarnikau, J. W., "Advanced Pricing in Electrical Systems. I. Theory," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 12, No. 1, pp. 489-95, Feb. 1997.
- Baughman, M. L., Siddiqi, S. N., and Zarnikau, J. W., "Advanced Pricing in Electrical Systems. II. Implications," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 12, No. 1, pp. 496-502, Feb. 1997.
- Li, Y. Z., and David, A. K., "Pricing Reactive Power Conveyance," *IEE-Proceedings-C- (Generation, Transmission-and-Distribution)* Vol. 140, No. 3, May, pp.174-80, 1993.
- Li, Y. Z., and David, A. K., "Wheeling Rates of Reactive Power Flow Under Marginal Cost Pricing," *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 9, No. 3, pp.1263-9, Aug. 1994.
- Muchayi, M., and El-Hawary, M. E., "A Summary of Algorithms in Reactive Power Pricing," 1995 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (Cat. No.95TH8103). *IEEE*, New York, NY, USA, Vol. 2, pp. 692-6, 1995.
- Chattopadhyay, D., Bhattacharya, K., and Parikh, J., "Optimal Reactive Power Planning and its Spot-Pricing: An Integrated Approach," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 10, No. 4, pp. 2014-20, Nov. 1995.
- El-Keib, A. A., and Ma, X., "Calculating Short-Run Marginal Costs of Active and Reactive Power Production," *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 12, No. 2, pp. 559-65, May 1997.
- Choi, J. Y., Rim, S. H., and Park, J. K., "Optimal Real Time Pricing of Real and Reactive Powers," *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 13, No. 4, pp. 1226-31, Nov. 1998.
- یوسفی، غ.، سیفی، ح.، قاضی‌زاده، م. ص.، و سبوحی، ی. "قیمت‌گذاری سرویس توان راکتیو در صنعت برق با دسترسی باز،" در مجله علمی و پژوهشی امیرکبیر، سال دوازدهم، پاییز ۱۳۸۰، ص ۳۶۰-۳۷۶ شماره ۴۸.
- Baran, M. E., Banunarayanan, V., and Gerren, K. E. A., "Transaction Assessment for Allocation of Transmission Services," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14, No. 3, pp. 920-928, Aug. 1999.
- یوسفی، غ.، سیفی، ح.، قاضی‌زاده، م. ص.، و سبوحی، ی. "مدیریت توان راکتیو در صنعت برق با دسترسی باز با توجه به پروفیل بهینه ولتاژ،" ارسال شده به مجله علمی و پژوهشی امیرکبیر.
- Hwang, C. L., and Masud, A. S. M., *Multiple Objective Decision Making Methods and Applications*, Springer-Vrelag, 1979.
- پایداری و کنترل سیستم‌های قدرت، تألیف پ.ش. کندور، ترجمه حسین سیفی، علی خاکی صدیق، ۱۳۷۶.
- Brooke, A., and et al, "GAMS, A User's Guide," GAMS Development Corporation, Dec. 1998.
- Flatabo, N., Ogendal, R., and Carlsen, T. "Voltage Stability Condition in a Power Transmission System Calculation by Sensitivity Methods," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 5, No. 4, pp. 1286-1293, 1990.

پیوست الف - گسترده معادله لاگرانژ

حل مسئله پخش بار بهینه توسعه یافته چند هدفی، منطبق بر روابط (۴) تا (۸)، با استفاده از روش لاگرانژ، منجر به تشکیل معادله لاگرانژ، رابطه (۱۶)، می‌شود. گسترده معادله لاگرانژ به صورت زیر است:

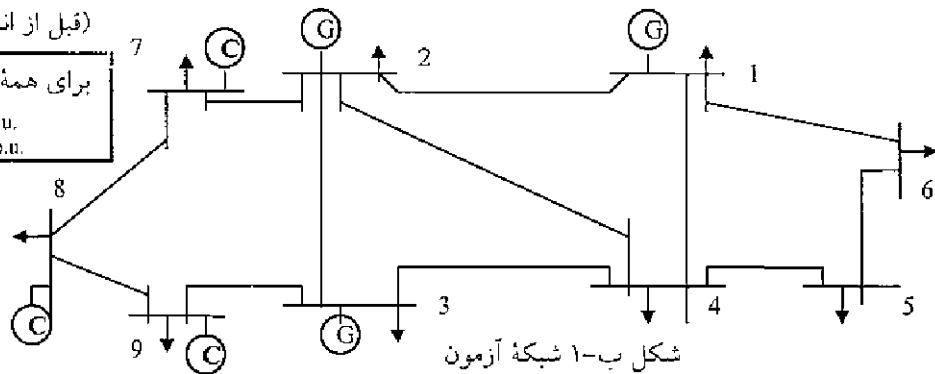
$$\begin{aligned}
 L(\underline{P}_g, \underline{Q}_g, \underline{V}, \underline{\delta}) = & \sum_{i \in NG-ISO} C_i(P_{gi}) \quad \text{(الف-۱)} \\
 & - \lambda_{\text{profil}} \cdot \left[\sum_{i=1}^N (|V_i| - V_{\text{ref},i})^2 - F2^* - \Delta F2^* \right] \\
 & - \lambda_{\text{stability}} \cdot \left[\sum_{i=1}^{NG} \left(\frac{Q_{gi}}{Q_{gi}^{\text{max}} - Q_{gi}^{\text{min}}} \right)^2 - F3^* - \Delta F3^* \right] \\
 & - \sum_{i=1}^N MC_{pi} \cdot (P_{gi} - P_{di} - \sum_{j=1}^N |V_i| \cdot |V_j| \cdot |Y_{ij}| \cdot \cos(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i)) \\
 & - \sum_{i=1}^N MC_{qi} \cdot (Q_{gi} - Q_{di} + \sum_{j=1}^N |V_i| \cdot |V_j| \cdot |Y_{ij}| \cdot \sin(\theta_{ij} + \delta_j - \delta_i)) \\
 & - \sum_{\substack{i=1 \\ i \notin NG_ISO}}^{NG} \Gamma_{P_{gi}} \cdot (P_{gi} - P_{gi}^{\text{cte}}) \\
 & - \sum_{i=1}^N v_i^{\text{min}} \cdot (|V_i| - V_i^{\text{min}}) + \sum_{i=1}^N v_i^{\text{max}} \cdot (|V_i| - V_i^{\text{max}}) \\
 & - \sum_{i=1}^{NG} \varphi_i^{\text{min}} \cdot (Q_{gi} - Q_{gi}^{\text{min}}) + \sum_{i=1}^{NG} \varphi_i^{\text{max}} \cdot (Q_{gi} - Q_{gi}^{\text{max}}) \\
 & - \sum_{i=1}^{NG_ISO} \Gamma_{P_{gi},ISO}^{\text{min}} \cdot P_{gi} + \Gamma_{P_{gi},ISO}^{\text{max}} \cdot (P_{gi} - P_{gi}^{\text{max}}) \\
 & - \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N \eta_{ij}^{\text{min}} \cdot (P_{ij} - P_{ij}^{\text{min}}) + \sum_{i=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^N \eta_{ij}^{\text{max}} \cdot (P_{ij} - P_{ij}^{\text{max}})
 \end{aligned}$$

پیوست ب- شبکه آزمون

اطلاعات بارهای اولیه

(قبل از انعقاد قراردادها)

برای همه شین‌ها
 $P=0.2$ p.u.
 $Q=0.1$ p.u.



شکل ب-۱ شبکه آزمون

$S_{base}=100$ MVA, $V_{base}=138$ kV

G=Generator C=Condensor

جدول ب-۲ اطلاعات ژنراتورها

Gen. Bus	P_{gmax} (MW)	Q_{gmin} (MVar)	Q_{gmax} (Mvar)
1	1000	-800	800
2	300	-90	100
3	300	-90	100
7	0.0	-100	100
8	0.0	-300	300
9	0.0	-300	300

$C(P_{gi}) = 169.5 * P_{gi}^2 + 1622 * P_{gi} + 9326.0$
 C بر حسب واحد پول بر ساعت
 P_{gi} بر حسب بریونیت

جدول ب-۱ اطلاعات خطوط

Line	R(p.u.)	X(p.u.)	Y(p.u.)
1-2	0.042	0.168	0.041
1-4	0.031	0.126	0.031
1-6	0.053	0.21	0.051
2-3	0.031	0.126	0.031
2-4	0.084	0.336	0.082
2-7	0.053	0.21	0.051
3-4	0.053	0.21	0.051
3-9	0.053	0.126	0.051
4-5	0.03	0.126	0.031
5-6	0.031	0.126	0.031
7-8	0.03	0.126	0.031
8-9	0.015	0.0513	0.015