



## آنالیز هزینه‌های تولید توان راکتیو جهت مشارکت در بازار توان راکتیو (مطالعه موردی نیروگاه توس مشهد)

علی رمضانیان\*  
ati.ramezaniyan@gmail.com  
دانشجوی کارشناسی ارشد برق

حبیب رجیبی مشهدی\*  
h\_mashhadi@um.ac.ir  
دانشیار گروه برق

محمد عظیم آرمین\*  
az.armin@gmail.com  
دانشجوی کارشناسی ارشد برق

حمید رضا نی‌ساز\*\*  
Eng.hrn@gmail.com  
کارشناسی ارشد انرژی

مهدی علومی بایگی\*\*  
me\_oloomi@yahoo.com  
کارشناسی ارشد برق

\* دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه برق  
\*\* شرکت برق منطقه‌ای خراسان، دفتر بازار برق

واژه‌های کلیدی: بازار برق، خدمات جانبی، توان راکتیو، تلفات، هزینه ثابت، هزینه متغیر

### چکیده

جهت حفظ پایداری شبکه‌های قدرت و انتقال توان مطمئن علاوه بر تامین سرویس‌های جانبی می‌باشد. یکی از مهمترین این سرویس‌ها، سرویس توان راکتیو می‌باشد که برای بهبود ایمنی سیستم بایستی توسط بهره‌بردار سیستم قدرت بصورت بهینه تأمین گردد. سوال اساسی این است که هزینه تولید توان راکتیو برای هر واحد چه مقدار است. و آیا مبلغ پرداخت شده از طرف بازار به این واحد هزینه تولید توان راکتیو را پوشش می‌دهد. پاسخ به این سوال بدلیل ماهیت توان راکتیو چندان ساده نیست زیرا که ظاهراً برای تولید توان راکتیو، سوختی مصرف نمی‌شود و نمی‌توان به سادگی تابع هزینه‌ای برای آن معین کرد. هدف از این مقاله ارائه روشی جهت تعیین هزینه‌های متغیر تولید توان راکتیو در ژنراتور است. البته هزینه تولید توان راکتیو دارای بخشهای متعددی است که در این جا به اختصار تشریح خواهند شد. در این مقاله سعی شده با بررسی پارامترهای تولید، روش مشخصی برای محاسبه هزینه‌های متغیر تولید توان راکتیو ارائه گردد. برای این منظور یک روش بر پایه محاسبه تلفات توان راکتیو برای محاسبه هزینه‌های تولید توان راکتیو بسط و گسترش داده شده است و در نهایت هزینه توان راکتیو برای واحدهای تولیدی نیروگاه توس محاسبه شده است.



## آنالیز هزینه‌های تولید توان راکتیو جهت مشارکت در بازار توان راکتیو (مطالعه موردی نیروگاه توس مشهد)

علی رمضانیان\*  
ali.ramezaniyan@Gmail.com  
دانشجوی کارشناسی ارشد برق

حبیب رجبی مشهدی\*  
h\_mashhadi@um.ac.ir  
دانشیار گروه برق

محمد عظیم آرمین\*  
az.armin@Gmail.com  
دانشجوی کارشناسی ارشد برق

حمید رضا نی‌ساز\*\*  
Eng.hrn@gmail.com  
کارشناسی ارشد انرژی

مهدی علمی بایگی\*\*  
me\_oloomi@yahoo.com  
کارشناسی ارشد برق

\* دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده مهندسی، گروه برق  
\*\* شرکت برق منطقه‌ای خراسان، دفتر بازار برق

واژه‌های کلیدی: بازار برق، خدمات جانبی، توان راکتیو، تلفات، هزینه ثابت، هزینه متغیر

### چکیده

نمی‌توان به سادگی تابع هزینه‌ای برای آن معین کرد. هدف از این مقاله ارائه روشی جهت تعیین هزینه‌های متغیر تولید توان راکتیو در زنراتور است. البته هزینه تولید توان راکتیو دارای بخشهای متعددی است که در این جا به اختصار تشریح خواهند شد. در این مقاله سعی شده با بررسی پارامترهای تولید، روش مشخصی برای محاسبه هزینه‌های متغیر تولید توان راکتیو ارائه گردد. برای این منظور یک روش بر پایه محاسبه تلفات توان راکتیو برای محاسبه هزینه‌های تولید توان راکتیو بسط و گسترش داده شده است و در نهایت هزینه توان راکتیو برای واحدهای تولیدی نیروگاه توس محاسبه شده است.

جهت حفظ پایداری شبکه‌های قدرت و انتقال توان مطمئن علاوه بر تامین توان اکتیو نیاز به تامین سرویس‌های جانبی می‌باشد. یکی از مهمترین این سرویس‌ها، سرویس توان راکتیو می‌باشد که برای بهبود ایمنی سیستم بایستی توسط بهره‌بردار سیستم قدرت بصورت بهینه تأمین گردد. سوال اساسی این است که هزینه تولید توان راکتیو برای هر واحد چه مقدار است. و آیا مبلغ پرداخت شده از طرف بازار به این واحد هزینه تولید توان راکتیو را پوشش می‌دهد. پاسخ به این سوال بدلیل ماهیت توان راکتیو چندان ساده نیست زیرا که ظاهراً برای تولید توان راکتیو، سوختی مصرف نمی‌شود و

۱- مقدمه

در بازارهای برق، تامین توان راکتیو توسط اپراتور مستقل سیستم (ISO) صورت می‌گیرد تا امنیت قراردادهای توان راکتیو را برآورده سازد. تامین خدمات توان راکتیو باید با احتساب بار، ترکیب بار و دسترسی منابع راکتیو صورت گیرد. اغلب تولیدکنندگان مستقل و برخی از مصرف‌کنندگان بزرگ مالک منابع راکتیو نظیر ژنراتورهای سنکرون، کندانسورهای سنکرون، بانک‌های خازنی، راکتور و جبران کننده‌های استاتیکی یا دیگر ادوات FACT هستند که ISO برای تامین توان راکتیو با آنها وارد قرارداد می‌شود و هزینه‌های توان راکتیو را به آنها پرداخت می‌کند. قیمت‌گذاری توان راکتیو به مانند قیمت‌گذاری توان راکتیو در یک دسته‌بندی کلی به قیمت‌گذاری طولانی مدت و قیمت‌گذاری کوتاه مدت تقسیم می‌شود. در قیمت‌گذاری بلند مدت به دلیل ناچیز بودن هزینه بهره‌برداری توان راکتیو در مقایسه با توان حقیقی، از آن صرف‌نظر شده است. در قیمت‌گذاری کوتاه مدت، از دو روش برای قیمت‌گذاری سرویس‌های جانبی از جمله سرویس توان راکتیو استفاده می‌شود. روش اول قیمت‌گذاری بر مبنای بازار و به مانند بازار توان راکتیو بر مبنای منحنی‌های عرضه و تقاضا است. روش دوم قیمت‌گذاری توان راکتیو روش مبتنی بر هزینه‌های فراگیر می‌باشد. در این روش با تعریف یک تابع هدف و یک سری از قیود، یک مساله بهینه سازی تعریف می‌شود که هدف آن بدست آوردن تولید موثر هر نیروگاه به گونه‌ای است که هزینه بهره‌برداری برای تولید توان راکتیو حداقل گردد [۱].

در بریتانیا، پس از خصوصی سازی ساختار صنعت برق و شبکه انتقال و توزیع در اوایل دهه ۱۹۹۰، بازار برق انگلستان و ولز بر اساس روش پرداخت بر مبنای هزینه جهت تشویق به توان راکتیو، شروع به کار کرد. در اواسط دهه ۱۹۹۰، یک روش مبتنی بر بازار برای توان راکتیو در نظر گرفته شد [۲]. در بازار PJM سرویس توان راکتیو به دو مولفه تقسیم می‌گردد. نخست قابلیت راکتیو در ظرفیت نامی ژنراتور و دوم قابلیت راکتیو از کاهش یافته‌ی خروجی. تحت نظارت اپراتور

PJM به تمامی ژنراتورها پرداخت ثابتی برابر درآمد ماهیانه توافق شده در کمیسیون پرداخت می‌گردد. PJM همچنین در صورت کاهش سطح تولید توان راکتیو مبلغی را بابت هزینه‌ی فرصت از دست رفته پرداخت می‌کند. در بازار نیویورک، NYISO مسئول تدارک سرویس توان راکتیو بوده و در قیمت‌گذاری بر اساس هزینه‌های فراگیر صورت می‌گیرد. NYISO همچنین هزینه فرصت از دست رفته را نیز برای واحدهای تولیدی و یک جریمه برای واحدهای که قادر به انجام تعهدات نباشند در نظر می‌گیرد [۶].

در آلبرتا، چنان چه واحدهای تولیدی قادر به جذب یا تولید توان راکتیو در محدوده ۰/۹ پس‌فاز و ۰/۹۵ پیش‌فاز نباشند، برای آنها جریمه منظور خواهد شد. این جریمه‌ها ممکن است تولید توان راکتیو را برای مدت زمان خاصی (بطور مثال برای شش ماه) محدود کند و اگر تولید توان راکت [ولتاژ خارج از این بازه باشد هزینه تولید توان راکتیو به واحدها پرداخت می‌شود [۲]. در هلند، شرکت‌های بهره‌بردار شبکه مالک تجهیزات توان راکتیو محلی هستند. این شرکت‌ها به صورت محلی اقدام به تأمین توان راکتیو از طریق بستن قرارداد با واحدهای تولیدی یا از طریق تبادل توان با دیگر شبکه‌ها می‌نمایند. قرارداد با واحدهای تولیدی، برای تأمین خدمات توان راکتیو تنها شامل هزینه‌ی ظرفیت واحدهای تأمین توان است و هیچ مبلغی برای تأمین توان پرداخت نمی‌گردد [۲].

در محیط بازار برق ایران، واحدهای نیروگاهی موظف به تامین توان راکتیو در محدوده ۰/۹ پس‌فاز تا ۰/۹۵ پیش‌فاز هستند و در صورت عدم پیروی از این موضوع از سوی شرکت مدیریت شبکه جریمه خواهند شد. میزان تولید توان راکتیو توسط هر واحد از سوی شرکت مدیریت شبکه تعیین می‌شود. اگر مقدار توان راکتیو خارج از محدوده تعیین شده باشد، مبلغی به واحدهای تامین کننده توان راکتیو پرداخت خواهد شد. بهای توان راکتیو بر اساس نرخ پایه آمادگی ولتاژ نرخ متوسط موزون تعیین می‌شود [۳].

## ۲- محاسبه هزینه‌های تولید توان راکتیو:

هزینه تولید توان راکتیو معمولاً به سه بخش هزینه ثابت و هزینه متغیر و هزینه فرصت از دست رفته تقسیم می‌شود [۴] که در ادامه تشریح شده‌اند.

### ۱-۲- هزینه‌های ثابت:

هزینه‌های ثابت از مقدار تولید مستقل هستند و در آن‌ها هزینه‌های سرمایه‌گذاری و تعمیرات در نظر گرفته می‌شود. هزینه‌های ثابت تولید توان راکتیو در نیروگاه‌ها به بخش‌های سرمایه‌گذاری، هزینه‌های ثابت و متغیر و هزینه‌های جایگزین تقسیم می‌شود. عملاً هزینه‌های سرمایه‌گذاری توان راکتیو از هزینه‌های سرمایه‌گذاری توان اکتیو جدا نمی‌گردد و این هزینه‌ها به صورت بخشی از هزینه‌های توان اکتیو و خدمات جانبی که شامل توان راکتیو نیز می‌باشد، دیده می‌شود [۷].

### ۲-۲- هزینه‌های فرصت از دست رفته:

هنگامی که اپراتور سیستم تشخیص دهد یک واحدی باید از تولید توان اکتیو خود بکاهد و به تولید توان راکتیو اقدام کند موظف به پوشش هزینه منابع جایگزین شده خواهد بود. کاهش مقدار تولید توان اکتیو به معنی از دست دادن درآمد برای ژنراتور است [۸].

### ۳-۲- هزینه‌های متغیر توان راکتیو:

برای تولید توان راکتیو ظاهراً سوخت مصرف نمی‌شود اما در عمل تولید توان راکتیو باعث افزایش تلفات می‌گردد بنابراین در این مقاله به محاسبه مقدار تلفات ناشی از تولید توان راکتیو پرداخته شده است. این تلفات شامل تلفات اکتیو در ژنراتور و ترانسفورماتورهای افزایشدهنده است که بواسطه تولید توان راکتیو ایجاد می‌شود [۵].

در این مقاله سه مرحله زیر برای تخمین هزینه‌های متغیر توان راکتیو انتخاب شده است که عبارتند از:

۱- محاسبه تلفات ناشی از تولید توان اکتیو ولتاژ راکتیو.

۲- محاسبه تلفات در نقطه کار یا در هر نقطه‌ای که به

عنوان مرجع در نظر گرفته می‌شود

۳- محاسبه اختلاف بین این دو مقدار بر این اساس

تلفات در سه بخش از روند تولید شامل استاتور،

روتور و ترانسفورماتور افزایشدهنده مورد مطالعه قرار

گرفته است.

لازم به ذکر است که در این مقاله، صرفاً به بررسی بخشی از هزینه‌های متغیر تولید توان راکتیو (هزینه‌های ژنراتور و ترانسفورماتور افزایشدهنده) پرداخته شده است. هزینه‌های کامل تولید توان راکتیو در این مقاله دیده نشده است و از این رو انجام بهینه‌سازی برای یافتن نقطه کار بهینه امکان پذیر نیست. بخشی از هزینه‌های تولید توان راکتیو، در بازه‌ای قرار می‌گیرد که نسبت به آن، پرداختی صورت نمی‌گیرد. تولید یا مصرف بیشتر از بازه‌ی مذکور، مشمول سرویس خدمات جانبی خواهد بود که در این مقاله، مرز این دو ناحیه (۰/۹۵) پیش‌فاز و ۰/۹ پس‌فاز) به عنوان مرجع محاسبات در نظر گرفته شده است [۳].

## ۳- تلفات استاتور:

تلفات استاتور را می‌توان در سه بخش کلی دسته‌بندی کرد:

۱- تلفات مسی، که متناسب با مجذور جریان است

۲- تلفات فوکو و هیستریزیس، که متناسب با مجذور B

فاصله هوایی میدان القایی است.

۳- تلفات پراکندگی، که ۱۰٪ از تلفات مسی را شامل

می‌شود.

تلفات هیستریزیس و فوکو از آن جهت که وابسته به مقدار ولتاژ داخلی هستند، تقریباً ثابت هستند. فرض کنید ژنراتور متصل به شین بی‌نهایت باشد. در این حالت تلفات اکتیو توسط ژنراتور چنین خواهد بود:

$$L_{\text{Fe}} = R_{\text{Fe}} |I|^2 = R_{\text{Fe}} \left( \frac{|S|}{|V|} \right)^2 =$$

$$R_{\text{Fe}} \times \left[ \left( \frac{|S|}{|V|} \right)^2 \cos^2 \varphi + \left( \frac{|S|}{|V|} \right)^2 \sin^2 \varphi \right] = \quad (1)$$

$$R_{\text{Fe}} \times \left[ \frac{P^2}{|V|^2} + \frac{Q^2}{|V|^2} \right]$$

**بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق**

بدین ترتیب جریان خروجی از مدار ژنراتور خواهد بود:

$$I_s = I_f - I_m = I_f \angle (\beta_{0e} - \frac{\pi}{2}) - \frac{V_t \angle 0}{jX_s} \quad (6)$$

معادله توان را می‌توان بر اساس پارامترهای موجود به شکل زیر نوشت:

$$\begin{cases} P = V_t I_f \sin \beta_{0e} \\ Q = -\frac{V_t^2}{X_s} + V_t I_f \cos \beta_{0e} \end{cases} \quad (7)$$

از حل دستگاه معادلات فوق:

$$\begin{cases} \beta_{0e} = \tan^{-1} \left( \frac{P}{Q + \frac{V_t^2}{X_s}} \right) \\ I_f = \frac{P}{V_t \sin \beta_{0e}} \end{cases} \quad (8)$$

که از این طریق مقدار جریان DC در مدار روتور بدست می‌آید:

$$I_f = \frac{P}{V_t \sin \beta_{0e}} \times \frac{X_s}{X_{ms} n'} = \frac{P}{n' V_t \sin \beta_{0e}} \quad (9)$$

از جایگذاری معادلات ۸ و ۹ در معادله تلفات روتور ( $L_r = R_f I_f^2$ ) می‌توان معادلات تلفات را بر اساس توان خروجی ژنراتور محاسبه کرد.

$$L_r = R_f \left( \frac{P}{n' V_t} \right)^2 \frac{1}{\sin^2 \left( \tan^{-1} \left( \frac{P}{Q + \frac{V_t^2}{X_s}} \right) \right)} = \frac{R_f \frac{P^2 + (Q + \frac{V_t^2}{X_s})^2}{(n' V_t)^2}}{1} \quad (10)$$

برای بدست آوردن میزان تغییرات این تلفات بر حسب توان راکتیو، از معادله فوق نسبت به پارامتر Q مشتق گرفته شده است و نتیجه به صورت معادله زیر خواهد بود:

$$\frac{\partial L_r}{\partial Q} = \frac{2R_f}{(n' V_t)^2} \left( Q + \frac{V_t^2}{X_s} \right) = \frac{2R_f}{(n' V_t)^2} (P \tan \phi + \frac{V_t^2}{X_s}) \quad (11)$$

با صرف نظر از مقدار راکتانس نشتی در معادله فوق ( $X_s \cong X_{ms}$ )

$$n'' = \frac{X_{ms}}{X_s} n' \cong n' \quad (12)$$

که زاویه ضریب توان ژنراتور است. با خطی‌سازی معادله فوق و با در نظر گرفتن شرایط نقطه کار ژنراتور، اگر  $\Delta P = 0$  نتیجه می‌شود:

$$\frac{\Delta L_r}{\Delta Q} = \frac{2R_f}{|V|^2} Q = \left[ \frac{2R_f}{|V|^2} P \right] \tan \phi \quad (2)$$

که بیان‌گر رابطه افزایش تلفات توان اکتیو با توجه به تغییرات توان راکتیو است. در این رابطه تغییرات، متناسب با توان اکتیو خروجی و  $\tan \phi$  در نقطه کار خواهد بود.

**۴- تلفات روتور:**

تلفات روتور نیز در سه بخش کلی دسته‌بندی می‌شود:

۱- تلفات مسی، که متناسب با مجذور جریان تحریک است

۲- تلفاتی که به موجب عدم کارایی ایده‌آل اکسایتر ایجاد می‌شود که از روی منحنی بازدهی اکسایتر قابل محاسبه است. این تلفات به تقریب برابر ۱۰٪ تلفات مسی روتور است.

۳- تلفات باد و اصطکاک

برای محاسبه این تلفات از مدل ماشین در حالت دائمی استفاده شده است. جریان روتور ارجاع شده به سمت استاتور از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$I_f' = \frac{n' X_{ms}}{X_s} I_f \quad (3)$$

که در آن  $X_s = X_L + X_{ms}$  است. که در آن زاویه بین محور مغناطیس شونگی روتور و محور مغناطیس شونگی استاتور،  $I_f'$  جریان واقعی DC موتور و  $n'$  نسبت سیم‌پیچی روتور به سیم‌پیچی استاتور است و:

$$n' = \frac{\sqrt{2} N_{r\phi}}{3 N_{f\phi}} \quad (4)$$

با فرض اینکه ژنراتور سنکرون در سرعت ثابت و ولتاژ ترمینال ثابت عمل می‌کند:

$$I_f' = \frac{E_s}{X_s} = \frac{n' X_{ms}}{X_s} I_f \angle \left( \beta_{0e} - \frac{\pi}{2} \right) = n' I_f \angle \left( \beta_{0e} - \frac{\pi}{2} \right) \quad (5)$$

### بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

$$\frac{\partial L}{\partial Q} = \left[ \frac{2R_s}{V_c^2} P \right] \tan\phi + \left[ \frac{2R_r'}{V_c^2} P \right] \tan\phi \quad (15)$$

$$+ \frac{2R_r'}{X_s} + \left[ \frac{2R_r'}{V_c^2} P \right] \tan\phi$$

که در نهایت ساده خواهد شد:

$$\frac{\partial L}{\partial Q} = \left( \frac{2P}{V_c^2} \right) (R_s + R_r' + R_r') \tan\phi + \frac{2R_r'}{X_s} \quad (16)$$

اگر تلفات سرگردان مکانیکی و همچنین تلفات هسته، ثابت فرض شود، با محاسبه تقریبی مقدار تلفات پراکندگی برابر با ۱۰ درصد از تلفات مسی، در نهایت مقدار هزینه متغیر تولید توان راکتیو به شکل زیر بیان می‌شود:

$$C_{GVQ} = 1.1 \times L \times C_p \quad (17)$$

که در آن  $C_p$  هزینه تولید توان راکتیو یا قیمت توان راکتیو است، که ممکن است محاسبه شده یا از قیمت بازار تعیین گردد.

### ۷- مطالعه موردی نیروگاه توس:

روابط ارائه شده در بخش‌های پیشین برای محاسبه هزینه‌های متغیر نیروگاه توس استفاده شده و مقدار تلفات و مبلغ هزینه متغیر تولید توان راکتیو محاسبه شده است. نتایج بدست آمده در جدول ۱ در ضمیمه آورده شده است. در این جدول توان راکتیو و توان راکتیو تولیدی واحدهای نیروگاه توس در چند نقطه کار مختلف (در یک روز کاری) و مقدار تلفات ناشی از تولید توان راکتیو و هزینه تولید توان راکتیو نشان داده شده است. همچنین تنها بخشی از توان راکتیو که به عنوان خدمات ارائه می‌شده است به عنوان مبنای محاسبه هزینه متغیر در نظر گرفته شده است و آن بخش از توان راکتیو که طبق قرارداد [۳] واحد ملزم به تامین آن است، برای محاسبه هزینه متغیر کنار گذاشته شده است.

در این جدول مقدار تولید توان راکتیو زیر عنوان توان راکتیو خازنی در ستون سوم نشان داده شده است. برای روز کاری خاص نشان داده شده، مقدار مصرف توان راکتیو (توان راکتیو سلفی) برابر صفر بوده است که در ستون چهارم نشان داده شده است. مقدار تلفات حاصل از تولید توان راکتیو در

با همانندسازی معادلات نوشته شده برای ماشین سنکرون با معادلات انتقال در ترانسفورماتورها، می‌توان نوشت:

$$\frac{\partial L_r}{\partial Q} = 2 \times \frac{R_r'}{n} \times \left[ \frac{(P \tan\phi + V_c^2 / X_s)}{V_c^2} \right] = \left[ \frac{2R_r'}{V_c^2} P \right] \tan\phi + \frac{2R_r'}{X_s} \quad (13)$$

که در آن  $R_r'$  مقاومت روتور منتقل شده به سمت استاتور است.

### ۵- تلفات ترانسفورماتور افزایشنده:

در صورتی که کنترل توان راکتیو صرفاً توسط ولتاژ تحریک انجام شود و تپ ترانسفورماتور ثابت نگهداشته شود، تلفات ترانسفورماتور را به طریق مشابه تلفات استاتور، می‌توان در سه بخش کلی دسته‌بندی کرد:

- ۱- تلفات مسی، که متناسب با مجذور جریان است
- ۲- تلفات فوکو و هیستریزیس، که متناسب با مجذور B فاصله هوایی میدان القایی است.
- ۳- تلفات پراکندگی، که ۱۰٪ از تلفات مسی را شامل می‌شود.

با نگاهی کلی به منابع ایجاد تلفات در ترانسفورماتور و مقایسه آن با همین منابع در استاتور و همچنین، مدل کردن ساده ترانسفورماتور می‌توان به این نتیجه شهودی دست یافت که تغییرات تلفات ترانسفورماتور مشابه تغییرات تلفات در ژنراتور خواهد بود اما با ضرایب متفاوت که از متفاوت بودن مقاومت در ترانسفورماتور نتیجه می‌شود. پس می‌توان نوشت:

$$\frac{\Delta L_r}{\Delta Q} = \frac{2R_r'}{|V|^2} Q = \left[ \frac{2R_r'}{|V|^2} P \right] \tan\phi \quad (14)$$

اما بایستی در این مسئله دقت نمود که اضافه شدن تپ ترانس (t) در مقدار مقاومت ترانسفورماتور، معادلات را تحت تاثیر قرار خواهد داد.

### ۶- تلفات متغیر کل:

آنچنان که گفته شد کل تلفات مسی، مجموع تلفات بوجود آمده در استاتور، روتور و ترانسفورماتور افزایشنده خواهد بود.



پیشنهاد می‌گردد که سایر هزینه‌های تولید توان نیز محاسبه گردد و از جمله با توجه به این که افزایش تلفات ناشی از تولید توان راکتیو باعث کاهش عمر ژنراتور می‌گردد مقدار این کاهش عمر در محاسبه هزینه تولید توان راکتیو اضافه گردد.

#### مراجع:

- [1] J. Horacio Tovar Hernandez, Miguel Jimenez-Guzman, Guillermo Gutierrez-Alcaraz, "Ancillary reactive power service allocation cost in deregulated markets: a methodology", Programa de Graduados e Investigación en Ingeniería Eléctrica, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica del Instituto Tecnológico de Morelia, Morelia, Mich., Mexico 2004
- [2] US. Federal Energy Regulation Commission, "Principals for Efficient and Reliable Reactive Power Supply and Consumption", Docket No. AD05-1-000, Feb 4, 2005
- [3] دبیرخانه هیئت تنظیم بازار برق ایران، "رویه مدیریت توان راکتیو"، ۱- ر م خ ت ر، ۲۱ آذر ۸۵
- [4] - B. Kirby, E. Hirst, "Ancillary-Service Costs for 12 U.S. Electric Utilities", ORNL/CON-427, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, March 1996
- [5] - Fernando Alvarado, Blagoy Borissov, Laurence D. Kirsch, "REACTIVE POWER AS AN IDENTIFIABLE ANCILLARY SERVICE", Laurits R. Christensen Associates, Inc., March 18, 2003
- [6] - I. El-Samahy, K. Bhattacharya, C. A. Cañizares, "A Unified Framework for Reactive Power Management in Deregulated Electricity Markets"
- [7] - J. Stein, "Fixed Costs of Providing Ancillary Services from Power Plants", Eprigen Final Report, TR-107270-V5, Dec. 1998
- [8] - Y. Dai, X.D. Liu, Y.X. Ni, F.S. Wen, Z.X. Han, C.M. Shen, Felix F. Wu, "A cost allocation method for reactive power service based on power flow tracing", Electric Power Systems Research 64 (2003) 59\_ 65, June 2002

ستون پنجم نمایش داده شده است. اما تنها بخشی از این توان راکتیو، ارائه خدمات اضافی محسوب می‌گردد که در ستون ششم نمایش داده شده است. مقدار تلفات حاصل از آن بر اساس معادله (۱۶) محاسبه شده است که بر اساس معادله (۱۷) مقدار هزینه برای این مقدار از تلفات محاسبه شده است و در ستون نهم نمایش داده شده است.

در جدول دیده می‌شود که بخش عمده‌ای از تلفات مربوط به توان راکتیو در محدوده‌ای روی می‌دهد که برای واحدهای بازار ارائه خدمات توان راکتیو محسوب نمی‌شود. چنان که مشاهده می‌شود بیشتر هزینه‌ها در ساعات میانی روز و بدلیل کاهش ضریب قدرت واحد روی داده است.

برای نیروگاه توس، این هزینه (ستون شماره ۹)، هزینه‌های متغیر تولید توان راکتیو است و تمام هزینه‌های تولید را پوشش نمی‌دهد و نمی‌تواند مبنایی برای محاسبه پرداختی به واحدها قرار بگیرد.

مقادیر محاسبه شده، هزینه‌ای است که نیروگاه در ژنراتور برای تامین توان راکتیو پرداخت خواهد کرد و در دیگر اجزای نیروگاه نیز هزینه‌هایی وجود دارد که در این جدول دیده نمی‌شود.

#### ۸- نتیجه‌گیری و پیشنهادات:

هدف از ارائه این مقاله محاسبه هزینه متغیر تولید توان راکتیو است. اگر چه ظاهراً برای تولید توان راکتیو سوخت مصرف نمی‌گردد ولی در حقیقت تولید توان راکتیو باعث افزایش تلفات می‌شود. این افزایش تلفات باعث افزایش سوخت شده که در این مقاله، ابتدا مقدار تلفات محاسبه شده است. جهت محاسبه هزینه تولید توان راکتیو در این مقاله تنها بخشی از هزینه‌های توان راکتیو مورد مطالعه قرار گرفته است و بخش‌های دیگری نظیر هزینه‌های سرمایه‌گذاری و ثابت و همچنین هزینه‌های فرصت از دست رفته محاسبه نشده است. در این مقاله با ارائه یک سری از معادلات ریاضی، روشی برای تعیین هزینه‌های متغیر تولید توان راکتیو ارائه شده است. این هزینه‌ها، برای نیروگاه توس مشهد، در یک روز کاری، با بارهای متفاوت محاسبه شده است.

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

ضمیمه:

جدول ۱- مقدار تلفات و هزینه متغیر تولید توان راکتیو در چند نقطه کار

۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
Hour	Active Power (MW)	Capacitive Reactive Power (Mvar)	Inductive Reactive Power (Mvar)	Total Losses due to Reactive Power (MW)	Reactive Power Service (Mvar)	Losses due to Reactive Power Service (MW)	Active Power Price (R/MWh)	R. Power Variable Cost (R)
1	150	65	0	0.95	0.00	0.00	75317	0.00
2	146	60	0	0.85	0.00	0.00	75187	0.00
3	149	60	0	0.85	0.00	0.00	78335	0.00
4	140	60	0	0.85	0.00	0.00	73680	0.00
5	132	45	0	0.58	0.00	0.00	72271	0.00
6	120	40	0	0.50	0.00	0.00	70837	0.00
7	86	45	0	0.58	3.35	0.04	69990	3233.21
8	76	60	0	0.85	23.19	0.28	126803	39138.61
9	97	65	0	0.95	18.02	0.23	109758	28309.03
10	143	75	0	1.16	5.75	0.09	81755	7754.65
11	142	86	0	1.42	17.23	0.26	84701	24019.94
12	144	86	0	1.42	16.26	0.24	81047	21817.59
13	145	85	0	1.40	14.78	0.22	81173	19914.35
14	150	81	0	1.30	8.36	0.13	80362	11308.84
15	146	83	0	1.35	12.29	0.19	79718	16316.45
16	143	83	0	1.35	13.75	0.21	84057	19072.30
17	130	83	0	1.35	20.04	0.29	86302	27476.48
18	133	83	0	1.35	18.59	0.27	84823	25273.77
19	126	78	0	1.23	16.98	0.24	80825	21538.29
20	140	82	0	1.32	14.20	0.21	82456	19157.72
21	145	72	0	1.10	1.78	0.03	81390	2402.49
22	150	72	0	1.10	0.00	0.00	80222	0.00
23	145	65	0	0.95	0.00	0.00	82021	0.00
24	131	22	0	0.24	0.00	0.00	89421	0.00