PSC2009
24rd International Power System Conference
09-F-PSS-0178
بیست و چهارمین
کنفرانس بین‌المللی برق

جایابی بهینه ادوات FACTS به منظور کاهش قدرت بازار در بازار توان راکتیو

محمد جواد فروغی — **رضا قاضی**

دانشجوی کارشناسی ارشد — **استاد**

Mjavad_foroghi@yahoo.com — **rghazi@um.ac.ir**

گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد–ایران

واژه‌های کلیدی: قدرت بازار، بازار توان راکتیو، ظرفیت اجبارا – در مدار، ادوات FACTS

چکیده

توانایی واحدهای تولیدی در بالا بردن قیمت بازار فراتر از سطح رقابتی آن، قدرت بازار[1] نامیده می‌شود. قدرت بازار هم در بازار توان اکتیو و هم در بازار توان راکتیو محتمل است اما با توجه به ماهیت محلی توان راکتیو احتمال به وجود آمدن قدرت بازار در بازار توان راکتیو بیشتر است. روش‌های مختلفی برای تحلیل و اندازه‌گیری میزان قدرت بازار ارائه شده است. در این مقاله با بهره بردن از شاخص ظرفیت اجبارا–در مدار واحدهای تولیدی، قدرت بازار مورد بررسی قرار گرفته و با استفاده از مفهوم فروپاشی ولتاژ، برای جایابی بهینه ادوات FACTS برای کاهش قدرت بازار راکتیو پیشنهادی ارائه شده است . روش پیشنهادی برروی شبکه ۵۷ باس IEEE مورد آزمایش قرار گرفته است.

[1] Market Power

۱– مقدمه

با تجدید ساختار در صنعت برق و به وجود آمدن بازارهای برق مسائل و مشکلات جدیدی در این صنعت به وجود آمد. یکی از مسائل مهمی که اپراتور مستقل سیستم[2] باید به آن توجه ویژه داشته باشد وجود قدرت بازار می باشد. قدرت بازار وقتی به وجود می آید که یک شرکت تولیدی[3] توانایی تغییر قیمت را فراتر از سطح رقابتی آن به نفع خود داشته باشد. به عبارت دیگر وقتی می‌گوییم که یک شرکت تولیدی دارای قدرت بازار است که آن شرکت بتواند بر روی قیمت بازار تاثیرگذار باشد. این توانایی وقتی به وجود می آید که اپراتور مستقل سیستم برای حفظ پایداری سیستم، برابری تولید ومصرف و یا مسائل دیگر مجبور به خرید بخشی از توان یک شرکت خاص باشد. معمولا وقتی بخش زیادی از توان در یک باس توسط یک شرکت خاص تامین می شود

[2] Independent System Operator
[3] GenCo

احتمال به وجود آمدن قدرت بازار بیشتر است. در سالهای اخیر قدرت بازار در بازار توان اکتیو یکی از مسائل مهم وحیاتی به شمار می‌رود. اما با توجه به اینکه بازار توان راکتیو هنوز به صورت گسترده مورد توجه کشورها قرار نگرفته است قدرت بازار نیز در آن کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. اما دلایل محکمی برای حرکت به سمت بازار توان راکتیو وجود دارد. برای مثال برای یک ژنراتور که در نزدیکی حد حرارتی خود و در ضریب قدرت ۰.۹ کار می‌کند تولید یک کیلووار توان راکتیو اضافی منجر به کاهش تولید توان اکتیو تقریبا به میزان ۰.۵ کیلووات می‌شود[۱]. این مسئله بدین معناست که یک شرکتی که در شرایط پرباری کار می‌کند برای تولید اندکی توان راکتیو بیشتر بخشی از تولید توان اکتیو و در نتیجه بخشی از سود خود را از دست می‌دهد. براین اساس برای یک شرکت تولیدی انگیزه‌ای برای تولید توان راکتیو در ساعتهای پرباری وجود ندارد. بنابراین باید با به وجود آوردن یک بازار رقابتی مناسب برای توان راکتیو انگیزه کافی برای شرکتهای تولیدی برای تولید توان راکتیو به وجود آید[۲].

با توجه به ماهیت محلی توان راکتیو، مشکل قدرت بازار برای بازار توان راکتیو جدی‌تر از بازار توان اکتیو به نظر می‌رسد. به وجود آمدن قدرت بازار راکتیو باعث می‌شود که یک شرکت تولیدی بتواند از نیاز شبکه به تولید توان راکتیو خود سوء استفاده کرده و قیمت را در بازار توان راکتیو به نفع خود افزایش دهد. حتی در برخی شرایط یک شرکت تولیدی می‌تواند با خودداری از تولید توان راکتیو قیمت توان اکتیو خود را نیز افزایش دهد[۳].

قدرت بازار راکتیو به عواملی همچون ساختار شبکه و محل قرار گرفتن منابع تولید توان راکتیو و مصرف کننده‌ها بستگی دارد. همچنین قدرت بازار راکتیو به میزان بارگذاری شبکه نیز بستگی دارد. با افزایش بارگذاری شبکه احتمال به وجود آمدن قدرت بازار راکتیو بیشتر می‌شود[۴].

هدف مقاله حاضر بکارگیری ادوات FACTS[1] به منظور کاهش قدرت بازار راکتیو می‌باشد. تاکنون مقالات زیادی قدرت بازار را در بازار توان راکتیو مورد بررسی قرار داده‌اند[۵-۸]. با بررسی‌های انجام شده به نظر می‌رسد که در زمینه کاهش قدرت بازار کار جدی صورت نگرفته است. تنها در مرجع[۴] توضیح مختصری در مورد خازن‌گذاری در باس‌های شبکه به منظور کاهش شاخص‌های قدرت بازار ارائه شده است. در این مقاله برای کاهش قدرت بازار در بازار توان راکتیو، ضمن مقایسه چند روش، روش بهینه‌ای برای جایابی ادوات FACTS برای این منظور ارائه می‌گردد.

۲-مروری بر روش‌های تشخیص قدرت بازار راکتیو

تاکنون مقالات زیادی برای بدست آوردن قدرت بازار راکتیو ارائه شده است. برای مثال در[۵] از شاخص HHI[2] برای بدست آوردن قدرت بازار یک منبع تولید توان راکتیو در یک باس خاص نموده است که با رابطه(۱) تعریف می‌شود:

$$HHI = \sum_{i=1}^{N} S_i^2 \qquad (۱)$$

در این رابطه N تعداد کل منابع تولید توان راکتیو و S_i سهم تولید هر منبع در یک باس خاص است. برای بدست آوردن سهم هر منبع در یک باس خاص از عناصر ماتریس ژاکوبین استفاده شده است. به این صورت که ابتدا حساسیت ولتاژ باس مورد نظر نسبت به تزریق توان راکتیو هر یک از منابع توان راکتیو محاسبه می‌شود. سپس سهم هر یک از منابع را به صورت حاصل ضرب حساسیت بدست آمده و ظرفیت تولید توان راکتیو منبع مورد نظر(تفاضل حداکثر و حداقل توان راکتیو در دسترس) بدست می‌آوریم. در مرجع [۶] قدرت بازار به روشی مشابه مورد استفاده قرار گرفته است با این تفاوت که ظرفیت یک منبع توان راکتیو از تفاضل حداکثر توان راکتیو و توان راکتیو تولیدی فعلی آن منبع بدست آمده است. مشکل روش HHI این است که مرز بین وجود و عدم قدرت بازار راکتیو را به خوبی مشخص نمی‌کند. روش بهتری که ارائه شده است استفاده از شاخص‌های مبتنی بر ظرفیت

[1] Flexible AC Transmission System

[2] Herfindahl-Hirschman Index

اجبارا-در مدار[1] می‌باشد[۷و۸]. وقتی می‌گوییم یک واحد دارای ظرفیت اجبارا-در مدار می‌باشد که اپراتور مستقل سیستم برای حفظ پایداری سیستم و نگهداشتن ولتاژ باس‌ها در بازه مطلوب مجبور به خرید بخشی از توان راکتیو واحد مورد نظر باشد. در مقاله حاضر تحلیل قدرت بازار با روش مبتنی بر ظرفیت اجبارا در مدار انجام می‌شود. در ادامه این مقاله روش تشخیص قدرت بازار مبتنی بر ظرفیت اجبارا در مدار مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳- تشخیص قدرت بازار راکتیو به روش مبتنی بر ظرفیت اجبارا-در مدار[۷]

برای تشخیص ظرفیت اجبارا -در مدار یک واحد، یک سیستم قدرت را در نظر می‌گیریم که در حال کارکرد در شرایط عادی است. فرض می‌کنیم ولتاژ باس j در این حالت V_j^0 و توان راکتیو تولیدی ژنراتور i برابر Q_i^0 باشد. حال حالتی را در نظر می‌گیریم که توان راکتیو تولیدی ژنراتور i به صفر کاهش پیدا می‌کند. اگر در این حالت بتوان به وسیله توان راکتیو تولیدی سایر ژنراتورها و ادوات تولید توان راکتیو ولتاژ باس j را در محدوده مجاز آن نگه داشت در این صورت ژنراتور i در باس j دارای ظرفیت اجبارا-در مدار نمی‌باشد. در حالتی که نتوان ولتاژ باس j را در محدوده مجاز نگه داشت ژنراتور i در باس j دارای ظرفیت اجبارا در مدار است و باید مقدار آن را بدست آورد. روش بدست آوردن ظرفیت اجبارا-در مدار در چهار مرحله در زیر توضیح داده شده است:

مرحله اول: حداکثر افت ولتاژ ممکن در باس j ناشی از عدم تولید توان راکتیو توسط ژنراتور i محاسبه می‌شود. این افت ولتاژ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{i\to j}^{-}=\begin{cases}(Q_i^0-\underline{Q_i})\cdot\frac{\partial V_j}{\partial Q_i}, & \frac{\partial V_j}{\partial Q_i}>0\\ (Q_i^0-\overline{Q_i})\cdot\frac{\partial V_j}{\partial Q_i}, & \frac{\partial V_j}{\partial Q_i}<0\\ 0, & \frac{\partial V_j}{\partial Q_i}=0\end{cases} \quad (۲)$$

$V_{i\to j}^{-}$ در این رابطه نشان دهنده افت ولتاژ ناشی از کاهش توان راکتیو ژنراتور i از مقدار فعلی به مقدار مینیمم می‌باشد. حساسیت‌ها را می‌توان از ماتریس ژاکوبین کاهش یافته بدست آورد. در صورت منفی بودن حساسیت، توان راکتیو تولیدی ژنراتور i در مقدار ماکزیمم قرار می‌گیرد. رابطه(۲) را به صورت زیر نیز می‌توان نوشت:

$$V_{i\to j}^{-}=(Q_i^0-\underline{Q_i})\cdot\max\left(\frac{\partial V_j}{\partial Q_i},0\right)+(Q_i^0-\overline{Q_i})\cdot\min\left(\frac{\partial V_j}{\partial Q_i},0\right) \quad (۳)$$

مرحله دوم: در این مرحله تاثیر مثبتی که سایر منابع توان راکتیو در بهبود ولتاژ می‌توانند داشته باشند را در بدست می‌آوریم. تغییر ولتاژ ناشی از سایر منابع تولید توان راکتیو را می‌توان از رابطه(۴) بدست آورد:

$$V_{-i\to j}^{+}=\sum_{k\neq i,k\in G\bigcup C}(\overline{Q_k}-Q_k^0)\cdot\max\left(\frac{\partial V_j}{\partial Q_k},0\right)+\sum_{k\neq i,k\in G\bigcup C}(\underline{Q_k}-Q_k^0)\cdot\min\left(\frac{\partial V_j}{\partial Q_k},0\right) \quad (۴)$$

علامت'+' نشان دهنده تاثیر مثبت سایر منابع و علامت $i\to j$- نشان دهنده همه منابع به جز ژنراتور i می‌باشد. در این رابطه G نشان دهنده مجموعه ژنراتورها و C نشان دهنده سایر منابع تولید توان راکتیو مثل خازن‌های موازی و ادوات FACTS می‌باشد.

مرحله سوم: حال اگر تفاضل بین دو مقدار بدست آمده در مراحل قبل یعنی $V_{i\to j}^{-}-V_{-i\to j}^{+}$ از حاشیه امنیت ولتاژ در باس j یعنی $V_j^0-\underline{V_j}$ بیشتر باشد یعنی جبران افت ولتاژ ناشی از عدم تولید توان راکتیو توسط ژنراتور i ممکن نبوده و ژنراتور i در باس j دارای قدرت بازار است. اما اگر عکس این قضیه اتفاق بیفتد یعنی اینکه ژنراتور i در باس j قدرت بازار ندارد. برای بدست آوردن ظرفیت اجبارا-در مدار ژنراتور i در باس j کمبود ولتاژ در باس j ناشی از ژنراتور i را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

[1] Must-Run

$$\Delta V_{i\to j} = \max\left\{0, \left(V^{-}_{i\to j} - V^{+}_{-i\to j}\right) - \left(V^{0}_{j} - \underline{V_j}\right)\right\} \quad (۵)$$

مرحله چهارم: با بدست آوردن کمبود ولتاژ در رابطه(۵) ظرفیت توان راکتیو اجبارا–در مدار (RMRC[1])ژنراتور i در باس j را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$RMRC_{i\to j} = \frac{\Delta V_{i\to j}}{\left|\frac{\partial V_j}{\partial Q_i}\right|} \quad (۶)$$

$RMRC_{i\to j}$ صرف نظر از مقدار اولیه ولتاژ باس‌ها مقداری بین صفر و $Q_i^0 - \underline{Q_i}$ دارد. اگر همین روند را برای همه باس‌های شبکه انجام دهیم ظرفیت اجبارا–در مدار ژنراتور i از رابطه(۷) بدست می‌آید.

$$RMRC_i = \max_j \left(RMRC_{i\to j}, j \in node\right) \quad (۷)$$

برای راحتی مقایسه بین ژنراتورهای مختلف می‌توان $RMRC_i$ را بر حسب کل ظرفیت توان راکتیو همه ژنراتورها استاندارد سازی کرد. شاخص توان راکتیو اجبارا–در مدار(RMRI[2]) ژنراتور i به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$RMRI_i = \frac{RMRC_i}{\sum_{i\in G}\left(\overline{Q_i} - \underline{Q_i}\right)} \quad (۸)$$

۴- کاهش قدرت بازار راکتیو

با بدست آوردن $RMRC_i$ می توان باس j را که بیشترین $RMRC_{i\to j}$ در آن اتفاق می‌افتد را پیدا کرد. بدیهی است که باید وضعیت توان راکتیو در آن باس بهبود یابد. برای این کار باید تزریق توان راکتیو را در باسی از شبکه انجام دهیم که بیشترین کاهش را در شاخص‌های قدرت بازار داشته باشیم.

این تزریق توان می‌تواند به وسیله ادوات FACTS، کندانسور سنکرون و یا خازن ثابت انجام گیرد. برای این کار چند راه در پیش رو داریم: الف) تزریق توان راکتیو مستقیما در همان باس j انجام شود. ب) تزریق توان راکتیو در باسی انجام شود که ژنراتور آن باس دارای بیشترین قدرت بازار می‌باشد(یعنی باس i). ج) در این روش توان راکتیو را در باسی تزریق می‌کنیم که تزریق توان در آن باس بیشترین تاثیر را در باس j دارد. د) در این روش تزریق توان راکتیو در ضعیفترین باس شبکه از دیدگاه فروپاشی ولتاژ انجام می‌گیرد.

در بخش مطالعه موردی تاثیر تزریق توان راکتیو در روش‌های بیان شده در کاهش قدرت بازار راکتیو با هم مقایسه شده است.

۵- مطالعه موردی

در این بخش شاخص گفته شده برای اندازه‌گیری قدرت بازار راکتیو را بر روی شبکه تست ۵۷ باس IEEE مورد آزمایش قرار می‌دهیم و تزریق توان راکتیو در محل های مختلف را مورد بررسی قرار می‌دهیم. شبکه مورد بررسی دارای ۷ ژنراتور در باس‌های ۱، ۲، ۳، ۶، ۸، ۹ و ۱۲ و سه منبع استاتیکی توان راکتیو در باس‌های ۱۸، ۲۵ و ۵۳ می‌باشد. برای سادگی مسئله در اینجا منابع استاتیکی و همچنین ژنراتور باس اسلک (باس ۱) را در تحلیل قدرت بازار راکتیو در نظر نمی‌گیریم. اطلاعات مربوط به ژنراتورها در جدول(۱) آورده شده است. لازم به ذکر است که ژنراتورهای باس‌های ۲، ۶ و ۹ به عنوان یک کندانسور سنکرون در مدار قرار می‌گیرند.

جدول(۱)- اطلاعات مربوط به ژنراتورهای شبکه

باس ژنراتور	توان اکتیو تولیدی	توان راکتیو تولیدی	حداکثر توان راکتیو	حداقل توان راکتیو
۲	۰	-۰.۰۰۷۵	۰.۵	-۰.۱۷
۳	۰.۴	-۰.۰۰۲۳	۰.۶	-۰.۱
۶	۰	۰.۰۱۲۹	۰.۲۵	-۰.۰۸
۸	۴.۵	۰.۶۲۵۱	۲	-۱.۴
۹	۰	۰.۰۲۵۶	۰.۰۹	-۰.۰۳
۱۲	۳.۱	۱.۲۸۵۹	۱.۵۵	-۱.۵

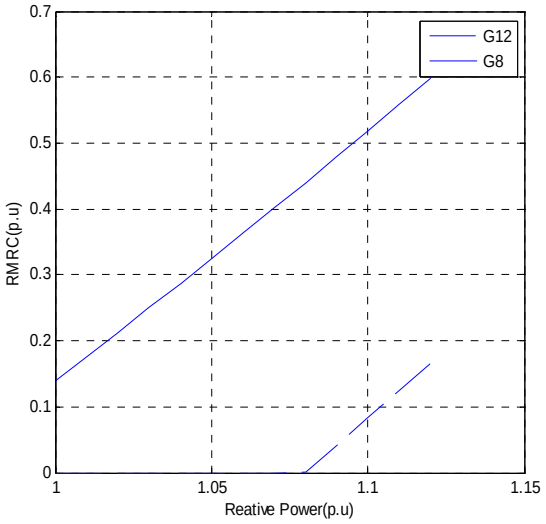
[1] Reactive Must-Run Capacity
[2] Reactive Must-Run Index

از مقادیر جدول فوق مشخص است که ژنراتورهای باس‌های ۸ و ۱۲ اندازه بزرگتری داشته و احتمال دارا بودن قدرت بازار راکتیو در آنها بیشتر است. ابتدا برای حالت معمولی شبکه RMRC ژنراتورها را می‌یابیم. نتایج در جدول(۲) آورده شده است.

جدول(۲)- RMRC ژنراتورها در حالت عادی

باس ژنراتور	۲	۳	۶	۸	۹	۱۲
RMRC p.u	۰	۰	۰	۰.۱۴۰۱	۰	۰

از جدول(۲) مشخص می‌شود که در حالت عادی فقط ژنراتور باس ۸ دارای قدرت بازار است. این مقدار RMRC برای نگهداشتن ولتاژ باس ۳۱ در محدوده مجاز به وجود آمده است. یعنی برای اینکه ولتاژ باس ۳۱ در حداقل مقدار مجاز باقی بماند ژنراتور باس ۸ باید حداقل MVAR ۱۴/۱ توان راکتیو تولید کند(توان پایه ۱۰۰MVA است). حال توان اکتیو مصرفی کل شبکه را از مقدار حالت عادی شبکه تا مقدار ۱.۱۲ آن به تدریج افزایش می‌دهیم. در شکل(۱) قدرت بازار بر حسب توان راکتیو مصرفی شبکه برای دو ژنراتور باس‌های ۸ و ۱۲ رسم شده است. از شکل(۱) مشخص می‌شود که تا قبل از اینکه توان راکتیو مصرفی به ۱.۰۸ مقدار فعلی برسد RMRC ژنراتور باس ۱۲ صفر است و با افزایش از این مقدار شروع به افزایش می کند



شکل(۱)- نمودار RMRC بر حسب توان راکتیو مصرفی شبکه

بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهند که برای توان‌های راکتیو مصرفی مختلف مقادیر RMRC برای هر دو ژنراتور باس‌های ۸ و ۱۲ برای نگهداشتن ولتاژ باس ۳۱ در محدوده مجاز می‌باشد. یعنی باس ۳۱ از لحاظ قدرت بازار راکتیو مشکل ساز می‌باشد.

حال برای جایابی ادوات FACTS برای تزریق توان راکتیو چند راه داریم. راه اول تزریق توان راکتیو به صورت مستقیم در باس ۳۱ است (این تزریق می‌تواند به کمک یکی از ادوات FACTS موازی مثل SVC یا حتی خازن ثابت صورت گیرد) . راه حل دیگر تزریق توان راکتیو در یکی از باس‌های ۸ و یا ۱۲ می‌باشد. روش دیگر تزریق توان راکتیو در باسی است که ولتاژ باس ۳۱ بیشترین حساسیت را نسبت به تزریق توان راکتیو در آن باس دارد. برای باس ۳۱ بیشترین حساسیت ولتاژ این باس نسبت به تزریق توان راکتیو در همان باس ۳۱ است و این از ماهیت محلی توان راکتیو ناشی می‌شود.

برای مقایسه روش‌های فوق شبکه مورد نظر را در حالی که توان راکتیو مصرفی باس ها به ۱.۱ حالت عادی افزایش می‌یابد در نظر می‌گیریم. مقادیر قدرت بازار راکتیو ژنراتورهای مختلف در جدول(۳) آورده شده است.

جدول(۳)- مقادیر RMRC ژنراتورها بعد از افزایش توان راکتیو مصرفی باس‌ها به ۱.۱ مقدار نامی

باس ژنراتور	۲	۳	۶	۸	۹	۱۲
RMRC p.u	۰	۰	۰	۰.۵۰۱۸	۰	۰.۰۶۵۷

حال خازنی با سوسپتانس ۰.۱ پریونیت را در باس‌های مذکور قرار داده و قدرت بازار در ژنراتورها را بدست می‌آوریم. نتایج بدست آمده در جدول(۴) آورده شده است.

جدول(۴)- مقادیر RMRC بعد از تزریق توان راکتیودر باس‌های مختلف

باس تزریقی	RMRC ژنراتور ۸	RMRC ژنراتور ۱۲
۸	۰.۴۰۶۵	۰
۱۲	۰.۴۰۸۲	۰
۳۱	۰.۳۱۴۵	۰.۰۶۶۵

از جدول(۴) مشخص می‌شود که برای کاهش قدرت بازار راکتیو راه کار مناسب تزریق توان به صورت مستقیم در باس-هایی است که موجب به وجود آمدن ظرفیت اجبارا–در مدار برای ژنراتورها می‌شوند نه در باس ژنراتورهایی که دارای قدرت بازار می‌باشند. این نتیجه با نتیجه بدست آمده در مرجع [۴] همخوانی دارد. در این مرجع قدرت بازار با استفاده از روش HHI مورد بررسی قرار گرفته است و این نتیجه بدست آمد که اگر بخواهیم جبران‌سازی را در باسی انجام دهیم که HHI در همه باس‌های شبکه بیشترین کاهش را داشته باشد، مناسبترین باس، ضعیفترین باس شبکه از دیدگاه فروپاشی ولتاژ می‌باشد.اگر با استفاده از تحلیل حساسیت ضعیفترین باس شبکه ۵۷ باس IEEE از دید فروپاشی ولتاژ را بدست بیاوریم به این نتیجه می‌رسیم که باس ۳۱ ضعیفترین باس این شبکه از دید فروپاشی ولتاژ می‌باشد. بنابراین برای کاهش ظرفیت اجبارا–در مدار واحدها کافیست در ابتدا ضعیفترین باس شبکه از دید فروپاشی ولتاژ را یافته و در آن باس به اندازه‌ای توان راکتیو تزریق کنیم که ظرفیت اجبارا–در مدار واحدها را به صفر برسانیم.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله قدرت بازار در بازار توان راکتیو با استفاده از شاخص ظرفیت اجبارا–در مدار واحدها مورد بررسی قرار گرفت. برای جایابی بهینه ادوات FACTS به منظور کاهش قدرت بازار راکتیو ۴ روش پیشنهادی ارائه شد. روش‌های ارائه شده بر روی شبکه ۵۷ باس IEEE مورد بررسی قرار گرفت. پس از مقایسه روش‌های ارائه شده به این نتیجه رسیدیم که بهترین مکان برای تزریق توان راکتیو به منظور کاهش قدرت بازار راکتیو ضعیفترین باس شبکه از دیدگاه فروپاشی ولتاژ می‌باشد.

۷- مراجع

[1] "Reactive Issues - reactive power in restructured markets," IEEE Power and Energy Magazine, Vol. 2, pp. 14 – 17, Nov-Dec 2004.

[2] J. Zhong, K. Bhattacharya, " Toward a Competitive Market for Reactive Power," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17, pp. 1206-1215, Nov. 2002.

[3] W.W. Hogan, “Markets in Real Electric Networks Require Reactive Prices,” Energy J., Vol. 14, No. 3, pp. 171-200, 1993.

[4] A.C.Z de Souza, F. Alvarado and M. Glavic, " The Effect of Loading on Reactive Market Power," IEEE Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 5, 2001.

[5] F.L. Alvarado, T. Overbye, " Measuring Reactive Market Power," IEEE Power Engineering Society 1999 Winter Meeting, Vol. 1, pp. 294 – 296, 31 Jan.-4 Feb. 1999.

[6] L. de Mello Honorio, A.C.Z. de Souza, J.W.M. de Lima, G.L. Torres, F. Alvarado, " Exercising Reactive Market Power Through Sensitivity Studies and HHI," IEEE Power Engineering Society 1999 Winter Meeting, Vol. 1, pp. 447 – 451, 27-31 Jan. 2002.

[7] D. Feng, J. Zhong,, D. Gan, " Reactive Market Power Analysis Using Must-Run Indices," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, No. 2, May 2008.

[8] M. H. Asgari, B. Khaki, A. Mozdawar, R. Riahi, " A New Method for Evaluation Market Power and Identification of Dominant Suppliers in Reactive Power Markets," IEEE SysCon 2009 — 3rd Annual IEEE International Systems Conference, Vancouver, Canada, March 23–26, 2009.