بسمه تعالی

هفتمین کنفرانس شبکه‌های توزیع نیروی برق

انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران

کد مقاله: DNOP117

نوع پذیرش: ارائه

متعادل سازی بار وکاهش تلفات در شبکه توزیع بوشهر به کمک کنترل توان راکتیو

محمدرضا آقامحمدی
دانشکده صنعت آب و برق
تهران - ایران

غلامرضا آگاه
شرکت توزیع برق بوشهر
بوشهر - ایران

کلمات کلیدی : بار نامتعادل - مؤلفه های متقارن جریان - کنترل توان راکتیو -کاهش تلفات

چکیده : عدم تعادل بار بعنوان یکی از مشکلات رایج شبکه های توزیع می باشد. عدم تعادل بار به دو شکل استاتیکی و دینامیکی وجود دارد. عدم تعادل استاتیکی مربوط به بارهای امپدانس ثابت می باشد که همواره دارای یک رفتار مشخص ومعین می باشند. اما عدم تعادل دینامیکی مربوط به رفتار جمعی بارهای مرکب می باشد. بار فیدرهای شبکه توزیع فشار ضعیف از نوع بارهای جمعی و مرکب می باشد که بعلت رفتار تصادفی و غیر همزمان مصرف کنندگان تکفاز از یک طرف و توزیع غیر یکنواخت آنها بین فازهای مختلف منشأ پیدایش عدم تعادل بار و جریان در خطوط فازها میباشد. عدم تعادل بار و جریان دارای عوارض سوء بسیاری برروفتار شبکه و سایر تجهیزات و مصرف کنندگان موجود در شبکه می باشد. افزایش تلفات، برقدار شدن نقطه نول شبکه، گرم شدن موتورهای الکتریکی و ترانسفورماتورها و به اشباع رفتن هسته های مغناطیسی نمونه هائی از عوارض سوء عدم تعادل بار می باشند.
عدم تعادل بار دارای سهم نسبتا قابل توجهی در افزایش تلفات اهمی شبکه میباشد بگونه أی که صرفنظر از مسائل فنی بتنهائی اصلاح آن را توجیه مینماید. جبران سازی و کنترل توان راکتیو یکی از ابزارهای مؤثر در حذف و یا کاهش عدم تعادل بار می باشد.
در این مقاله وضعیت عدم تعادل بار در شبکه توزیع فشار ضعیف بوشهر بررسی گردیده و میزان تاثیر آن بر افزایش تلفات اهمی شبکه محاسبه شده است. همچنین با استفاده از الگوریتم و نرم افزار تهیه شده میزان تاثیر کنترل توان راکتیو بر متعادل سازی بار فیدرهای شبکه بررسی گردیده است. نتایج بررسی ها سهم تلفات ناشی از عدم تعادل بار و همچنین تاثیر کنترل توان راکتیو بر متعادل سازی بار را قابل توجه نشان داده است.

۱- مقدمه:

عدم تعادل بار یکی از مسایل و مشکلات رایج در شبکه های توزیع می باشد. عدم تعادل بار باعث عدم تعادل جریان فازهای خطوط شبکه های توزیع گردیده که دارای آثار و عوارض سوء در کیفیت انرژی الکتریکی بوده و باعث افزایش تلفات اهمی

شبکه میگردد. امروزه میزان عدم تعادل بار به عنوان یکی از شاخص های کیفیت انرژی الکتریکی تلقی میگردد.

عدم تعادل بار و جریان در خطوط شبکه های توزیع میتواند بنابر دلایل زیر ایجاد گردد.

الف- توزیع ناهمگون و غیر یکنواخت مصرف کنندگان مختلف خانگی ،اداری و صنعتی تکفاز بین فازهای خطوط.

ب- رفتارتصادفی و غیرهمزمان بارهای تکفاز . یعنی در واقع حتی اگر بارهای تکفاز به صورت تقریباً یکنواخت بین فازها توزیع گردند، اما به علت رفتار تصادفی و غیر همزمان آنها امکان پیدایش عدم تعادل بار وجود خواهد داشت ، بخصوص اگر نوع بارهای تکفاز با یکدیگر متفاوت باشد. مصرف کنندگان تکفاز در شبکه های توزیع فشار ضعیف ٤٠٠ ولت منشاء اساسی ایجاد عدم تعادل بار در این شبکه ها بوده که در صورت عدم اصلاح، امکان سرایت آن به شبکه های ۲۰ کیلو ولت و یا حتی بالاتر وجود خواهد داشت.

عدم تعادل بار می تواند به دو شکل استاتیکی و دینامیکی وجود داشته باشد. عدم تعادل استاتیکی مربوط به بارهای امپدانسی ثابت می باشد که همواره دارای یک رفتار مشخص و معین هستند. اما عدم تعدل دینامیکی مربوط به رفتار جمعی و غیر هزمان بارهای مرکب می باشد. بار فیدرهای فشار ضعیف از نوع بارهای مرکب جمعی است که دارای عدم تعادل دینامیکی می باشد.

عدم تعادل بار و جریان خطوط دارای عوارض سوء متعددی بر رفتار شبکه ، تجهیزات و مصرف کنندگان موجود در آن می باشد. افزایش تلفات اهمی خطوط ، برقدار شدن نقطه نول شبکه ، گرم شدن موتورهای الکتریکی و ترانسفورماتورها ، اشباع هسته های مغناطیسی ، اعوجاج در عملکرد یکسوسازها ، اختلال در عملکرد سیستم های حفاظتی و القاء ولتاژ در مدارات مخابراتی مجاور شبکه های توزیع به علت ظاهر شدن مولفه های منفی وصفر جریان در خطوط شبکه ، نمونه هایی از عوارض سوء عدم تعادل بار می باشند [۲]. با توجه به عوارض سوء فنی و اقتصادی ناشی از عدم تعادل بار ، کاهش و یا رفع آن امری ضروری و لازم می باشد بطوریکه امروزه به عنوان یکی از فعالیت های جاری بهره برداری در شبکه هایی است که از وجود عدم تعادل بار رنج می برند.

در این مقاله وضعیت عدم تعادل بار در شبکه توزیع فشار ضعیف بوشهر بررسی شده و تاثیر کنترل توان راکتیو بر متعادل سازی بار و کاهش تلفات مطالعه گردیده است.

۲- مدلسازی تاثیر عدم تعادل بار بر تلفات

در یک فیدر سه فاز ٤ سیمه با مقاومت اهمی R , Rn بترتیب برای سیم های فاز و نول، میتوان توان اکتیو سه فاز P را بدو صورت متعادل و نامتعادل انتقال داد. در حالت بار نامتعادل جریان فازها نامساوی و برابر مقادیر زیر در نظر گرفته میشوند.

$$I_a = I \,,\; I_b = I + \alpha \;,\; I_c = I - \beta$$

بطوریکه α و β معرف میزان انحراف جریان فازهای C, B ازجریان فاز A بوده که میتوانند مثبت و یا منفی باشند

مقدار متوسط جریان های سه فاز برابر است با :

$$I_{av} = \frac{I_a + I_b + I_c}{3} = \frac{3I + (\alpha - \beta)}{3} \qquad (1)$$

در حالت بار متعادل جریان فازها برابر مقدار متوسط جریان در حالت بار نامتعادل می باشد ، البته با فرض اینکه ضریب قدرت بار فازها یکسان باشد بنابراین :

$$I_a = I_b = I_c = I_{av}$$

تلفات اهمی سیم های فاز و نول در حالت بار نامتعادل برابر است با

$$P_{lossunsy} = RI_a^2 + RI_b^2 + RI_c^2 + R_n I_n^2 \qquad (2)$$

چنانچه در رابطه (۲) مقاومت سیم نول را بصورت K برابر مقاومت سیم فاز مدل کرده و جریان آنرا (In) برحسب جریان سیم های فاز قرار دهیم خواهیم داشت

$$P_{lossunsy} = RI^2 + R(I+\alpha)^2 + R(I-\beta)^2 + kR(I_a - \frac{1}{2}I_b - \frac{1}{2}I_c)^2$$

$$P_{lossunsy} = 3RI^2 + R(\alpha+\beta)^2 + 2RI(\alpha-\beta) + \frac{kR}{4}(\alpha-\beta)^2 \qquad (3)$$

تلفات اهمی سیم های فاز در حالت بار متعادل برابر است با :

$$P_{loss_{sy}} = 3RI_{av}^2$$

$$P_{loss_{sy}} = 3R(I + \frac{\alpha - \beta}{3})^2$$

$$P_{loss_{sy}} = 3RI^2 + \tfrac{1}{3}R(\alpha - \beta)^2 + 2RI(\alpha - \beta) \qquad (4)$$

تفاوت تلفات حالت بار نامتعادل و بار متعادل خواهد شد.

$$\Delta P_{loss_{unsy}} = P_{loss_{unsy}} - P_{loss_{sy}}$$

$$= R(\alpha^2 + \beta^2) + \frac{kR}{4}(\alpha - \beta)^2 - \tfrac{1}{3}R(\alpha - \beta)^2$$

$$= \tfrac{2}{3}R(\alpha - \beta)^2 + \tfrac{2}{3}\alpha\beta + \frac{kR}{4}(\alpha - \beta)^2$$

$$\Delta P_{loss_{unsy}} = R[(\tfrac{2}{3} + \tfrac{k}{4})(\alpha - \beta)^2 + \tfrac{2}{3}\alpha\beta] \qquad (5)$$

در صد افزایش تلفات نسبت به حالت بار متعادل خواهد شد.

$$\%\Delta P_{loss_{unsy}} = \frac{\Delta P_{loss_{unsy}}}{P_{loss_{sy}}} = \frac{R[(\frac{2}{3} + \frac{k}{4})(\alpha - \beta)^2 + \frac{2}{3}\alpha\beta]}{3RI_{av}^2}$$

$$\%\Delta P_{loss_{unsy}} = (2 + \tfrac{3}{4}k)(\frac{\alpha - \beta}{I_{av}})^2 + 2(\frac{\alpha}{I_{av}})(\frac{\beta}{I_{av}}) \qquad (6)$$

با استفاده از رابطه (۱) مقدار (α- β) را بر حسب I_{av} محاسبه نموده و در رابطه (٦) قرار می دهیم.

$$\%\Delta P_{loss_{unsy}} = (6 + \tfrac{9}{4}k)(\frac{I_{av} - I}{I_{av}})^2 + 2(\frac{\alpha}{I_{av}})(\frac{\beta}{I_{av}}) \qquad (7)$$

همانگونه که ملاحظه میگردد مقدار درصد تغییر همواره مثبت است که نشان دهنده افزایش تلفات بوده و از مؤلفه های زیر تشکیل میگردد.

(Iav-I)/Iav = شاخص عدم تعادل بار

α /Iav = انحراف نسبی جریان فاز b از جریان فاز a

β / Iav = انحراف نسبی جریان فاز c از جریان فاز a

بنابراین ملاحظه میگردد که با افزایش درصد عدم تعادل بار که توسط سه مؤلفه فوق مشخص میشود میزان درصد افزایش تلفات اهمی فیدر افزایش خواهد یافت.

۲-اصول متعادل سازی بار

عدم تعادل بار در فازهای شبکه توزیع را می توان به یکی از دو روش زیر اصلاح نمود.

۲-۱- توزیع یکنواخت مصرف کنندگان بر روی فازها

در این روش با تقسیم یکنواخت مصرف کنندگان تکفاز بین فازها بار آنها را متعادل مینمایند. این روش اگرچه از نظر فنی نسبتاً ساده می باشد اما به علت رفتار تصادفی و غیر هزمان بار مصرف کنندگان تکفاز ، علیرغم اینکه می تواند تا حدی عدم تعادل بار را کاهش دهد اما بطور کامل و موثر قادر به اصلاح نخواهد بود. در این روش لازم است که بطور مرتب با اندازه گیری میزان عدم تعادل جریان اقدام به جابجایی فیزیکی مصرف کنندگان تکفاز بر روی فازها نمود که از نظر اجرایی ساده نمی باشد .

۲-۲- متعادل سازی بار بکمک کنترل توان راکتیو

در این روش با استفاده از تکنیک جبران سازی توان راکتیو می توان با دقت دلخواهی در هر لحظه عدم تعادل جریان بار در خطوط را اصلاح و بر طرف نمود. این روش در مقایسه با روش یکنواخت سازی توزیع بار مصرف کنندگان بر روی فازها قادر است هر میزان و هر نوعی از عدم تعادل را با دقت دلخواه و مناسبی برطرف و اصلاح نماید.

روش متعادل سازی بارها با استفاده از کنترل توان راکتیو در این مقاله استفاده شده است. این روش علاوه بر اینکه قادر است نا متعادلی را اصلاح نماید همچنین توانایی اصلاح ضریب قدرت و کنترل دامنه ولتاژ شین ها را نیز دارا می باشد. با انتخاب الگوریتم مناسب کنترل توان راکتیو می توان به طور همزمان عدم تعادل بار و ضریب قدرت فیدر را نیز اصلاح نمود.

در این مقاله یک الگوریتم عمومی برای کنترل توان راکتیو به منظور متعادل سازی عدم تعادل بار ارایه گردیده است بطوریکه قادر است هرگونه عدم تعادل اعم از استاتیکی و دینامیکی را متعادل نماید.

۳- اصول متعادل سازی بار بکمک جبران سازی توان راکتیو

در شبکه های توزیع با بارهای نامتعادل ، جریان بار خطوط از نظر مقدار و میزان عدم تعادل دایماً در حال کم یا زیاد شدن می باشد. همچنین از طرفی به علت اینکه در شبکه های توزیع واقعی اطلاع دقیق و مشخصی از مقدار امپدانس بار مصرف کنندگان

وجود ندارد لذا آنچه که قابل اندازه گیری و نشان دادن می باشد صرفاً جریان ، ولتاژ و ضریب قدرت توان جاری در خطوط است. بنابراین هرگونه مکانیزم و روش متعادل سازی با استفاده از کنترل توان راکتیو می باید با استفاده از اطلاعات و کمیات ولتاژ و جریان اندازه گیری شده خطوطا انجام پذیرد. مکانیزم کنترلی مورد نظر باید بتواند با استفاده از کمیات اندازه گیری شده ولتاژ وجریان ، در هر لحظه میزان عدم تعادل بار را تعیین نموده و سپس قادر باشد میزان توان راکتیو مورد نیاز برای متعادل سازی را محاسبه نماید.

شاخص و الگوریتم انتخاب شده برای اندازه گیری عدم تعادل بار و تنظیم توان راکتیو جبران سازها بر اساس شاخص مولفه های متقارن جریان تهیه گردیده است [۱] ، [۲] ، [۶]. وجود مولفه های منفی و صفر جریان در خطوط شبکه معرف عدم تعادل بار و بزرگی آنها میباشد. بنابرین چنانچه بتوان جریان جبران سازها را طوری کنترل و تنظیم نمود که در هر لحظه مولفه های منفی و صفر جریان خطوط حذف گردند دراینصورت علیرغم نا متعادل بودن بارها ولیکن جریان عبوری از خطوط متعادل شده و بدین ترتیب کلیه عوارض سوء فنی-اقتصادی ناشی از آن مرتفع خواهد شد.

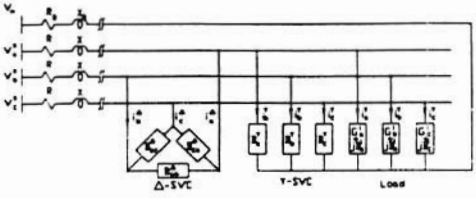
۱-۳- الگوریتم کنترل توان راکتیو بمنظور متعادل سازی بار

چنانچه جریان سه فاز یک فیدر، متعادل و متقارن باشد، در سیستم مولفه های متقارن تنها مولفه مثبت وجود داشته و مولفه های منفی و صفر وجود نخواهند داشت.

با توجه به اینکه وجود مولفه های منفی و صفر جریان در خطوط شبکه معرف عدم تعادل بار می باشد و از طرفی بزرگی این مولفه ها نشانه شدت عدم تعادل است. بنابرین چنانچه در هر لحظه از زمان با اندازه گیری مقادیر جریان فازها بتوانیم بزرگی مولفه های منفی و صفر جریان را محاسبه و تعیین نماییم بدین ترتیب قادر خواهیم بود که میزان عدم تعادل بار را تشخیص داده و سپس متناسب با آن مقدار توان راکتیو مورد نیاز برای متعادل سازی را محاسبه نماییم.

الگوریتم کنترل توان راکتیو بدین گونه است که سوسپتانس آنها طوری تنظیم میگردد تا جریانهای مولفه های منفی و صفر تولید نموده که مقدار آنها برابر با مولفه های منفی و صفر جریان خطوط اما با پلاریته عکس میباشند. بدین ترتیب مولفه های منفی و صفر جریان برآیند عبوری از خطوط صفر شده که نشانه متعادل شدن آنها است.

در یک شبکه سه فاز ٤ سیمه برای اینکه بتوانیم هر دو مولفه منفی و صفر جریان را خنثی نماییم همان گونه که خواهیم دید می باید از دو نوع جبران ساز ستاره و مثلث استفاده نمود. شکل (۱) دیاگرام یک فیدر سه فاز ٤ سیمه با بار نامتعادل و همراه با دو نوع جبران ساز ستاره و مثلث را نشان میدهد.



شکل (۱) : یک فیدر شعاعی سه فاز ٤ سیمه با بار نامتعادل و جبران سازهای ستاره و مثلث

بطوریکه :

X , R : به ترتیب مقاومت و راکتانس خطوط

X_n , R_n : به ترتیب مقاومت و راکتانس سیم نول

V_c^s , V_b^s , V_a^s : دامنه ولتاژ فازهای c , b , a منبع تغذیه

i_c^L , i_b^L , i_a^L : جریان بار در فازهای c , b , a خطوط

B_c^Y , B_b^Y , B_a^Y : سوسپتانس جبران ساز ستاره در فازهای c , b , a

i_c^Y , i_b^Y , i_a^Y : جریان جبران ساز ستاره در فازهای c,b , a خطوط.

$B_{ab}^\Delta , B_{bc}^\Delta , B_{ca}^\Delta$:سوسپتانس جبران ساز مثلث در شاخه های ca , bc , ab.

$i_c^\Delta , i_b^\Delta , i_a^\Delta$: جریان جبران ساز مثلث در فازهای c ,b , a

برای استخراج معادلات مربوط به الگوریتم جبران سازی، ولتاژ نقطه بار را ثابت فرض می نماییم که البته بعدا خواهیم دید این فرض با واقعیت عملکرد جبران سازها هماهنگ می باشد . ولتاژ سه فاز متقارن در نقطه بار به شکل زیر است :

$$V_a^L = \bar{V} \quad , \quad V_b^L = a^2\bar{V} \quad , \quad V_c^L = a\bar{V}$$

بطوریکـه :

$$\bar{V} = V\angle 0 \quad \text{و} \quad a = e^{j(2\pi/3)} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

با توجه به اینکه عدم تعادل بار در رفتار ماندگار شبکه های توزیع مورد توجه می باشد، لذا می توان با استفاده از کمیات فازوری بـه تحلیل و بررسی آن پرداخت . بنابراین علی رغـم اینکه بـار یـک فیدر از نوع بار مرکب می باشد اما در هر لحظه مورد مطالعـه مـی توان آن را با یک امپدانس معادل در هـر یـک از فازهـا بـه شـکل زیر معادل سازی نمـود بطوریکـه $\mathbf{B_c^L}$, $\mathbf{B_b^L}$, $\mathbf{B_a^L}$ بـه ترتیـب سوسپتانس بار و $\mathbf{G_c^L}$, $\mathbf{G_b^L}$, $\mathbf{G_a^L}$ به ترتیب کنداکتانس بـاردر فازهای a ,b ,c میباشند .

با استفاده از ادمیتانس معادل بار روابط فازوری ولتاژ- جریـان بـار در هر یک از فازها به شکل زیر میباشد.

$$\begin{aligned} I_a^L &= (G_a^L + jB_a^L)V_a = (G_a^L + jB_a^L)V \\ I_b^L &= (G_b^L + jB_b^L)V_b = a^2(G_b^L + jB_b^L)V \\ I_c^L &= (G_c^L + jB_c^L)V_c = a(G_c^L + jB_c^L)V \end{aligned} \qquad (8)$$

مولفه های متقارن جریان بار را می توان برحسب جریان فازهـا بـه صورت زیر نوشت :

$$\begin{aligned} I_0^L &= \left(\frac{1}{3}\right)\left[(G_a^L + a^2G_b^L + aG_c^L) + j(B_a^L + a^2B_b^L + aB_c^L)\right]V \\ I_1^L &= \left(\frac{1}{3}\right)\left[(G_a^L + G_b^L + G_c^L) + j(B_a^L + B_b^L + B_c^L)\right]V \\ I_2^L &= \left(\frac{1}{3}\right)\left[(G_a^L + aG_b^L + a^2G_c^L) + j(B_a^L + aB_b^L + a^2B_c^L)\right]V \end{aligned}$$

(۹)

واضح است که در صورت عدم تعادل بار مقادیر ادمیتانس معادل بـار در فازهایکسـان نبـوده و در نتیجـه مولفـه هـای منفـی و صفـر جریان مقدار خواهند داشت.برای متعادل سازی بار می باید مولفـه منفی و صفر جریان را حذف نمود و برای این کار می باید جبران سازهای ستاره و مثلث را به قسمی تنظیم نماییم تا مولفه های منفی و صفر آنها در جهت خنثی نمودن مولفه های منفی و صفر جریان بار عمل نمایند .جریان های سه فاز ناشی از جبران سازهای ستاره و مثلث در خطوط شبکه به شکل زیر محاسبه می گردند .

$$\begin{aligned} I_a^\Upsilon &= jB_a^\Upsilon V_a^L = jB_a^\Upsilon V \\ I_b^\Upsilon &= jB_b^\Upsilon V_b^L = jB_b^\Upsilon a^\Upsilon V \\ I_c^\Upsilon &= jB_c^\Upsilon V_c^L = jB_c^\Upsilon aV \end{aligned} \qquad (10)$$

$$I_a^\Delta = jB_{ab}^\Delta(1-a^\Upsilon)V - jB_{ca}^\Delta(a-1)V$$

$$= j\left[B_{ab}^\Delta - a^2B_{ab}^\Delta - aB_{ca}^\Delta + B_{ca}^\Delta\right]V$$

$$\begin{aligned} I_b^\Delta &= jB_{bc}^\Delta(a^\Upsilon - a)V - jB_{ab}^\Delta(1-a^\Upsilon)V \\ &= j\left[a^\Upsilon B_{bc}^\Delta - aB_{bc}^\Delta - B_{ab}^\Delta + a^\Upsilon B_{ab}^\Delta\right]V \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_c^\Delta &= jB_{ca}^\Delta(a-1)V - jB_{bc}^\Delta(a^\Upsilon - a)V \\ &= j\left[aB_{ca}^\Delta - B_{ca}^\Delta - a^\Upsilon B_{bc}^\Delta + aB_{bc}^\Delta\right]V \end{aligned}$$

(۱۱)

چنانچه مولفه های متقارن جریان جبران سازها ی ستاره ومثلـث را محاسبه نماییم به شکل زیر خواهند شد .

$$\begin{aligned} I_0^\Upsilon &= j\left(\frac{1}{3}\right)\left[B_a^\Upsilon + a^\Upsilon B_b^\Upsilon + aB_c^\Upsilon\right] \\ I_1^\Upsilon &= j\left(\frac{1}{3}\right)\left[B_a^\Upsilon + B_b^\Upsilon + B_c^\Upsilon\right] \\ I_2^\Upsilon &= j\left(\frac{1}{3}\right)\left[B_a^\Upsilon + aB_b^\Upsilon + a^2B_c^\Upsilon\right] \end{aligned} \qquad (12)$$

$$I_0^\Delta = 0$$

$$I_1^\Delta = j\left[B_{ab}^\Delta + B_{bc}^\Delta + B_{ca}^\Delta\right]$$

$$I_2^\Delta = -j\left[a^2B_{ab}^\Delta + B_{bc}^\Delta + aB_{ca}^\Delta\right] \qquad (13)$$

شرط اساسی جبران سازی برای متعادل سازی بـار، حـذف مولفـه های منفی و صفر بار به شکل زیر است .

$$I_\Upsilon^L + I_\Upsilon^\Delta + I_\Upsilon^\Upsilon = 0$$

(۱۴)

$$I_0^L + I_0^\Delta + I_0^\Upsilon = 0$$

همچنین برای اصلاح ضریب قدرت بار به یک و یا هر مقدار دلخواه PF ، می باید بین بخش موهومی و حقیقی برآیند مولفه های مثبت جریان بار و جبران سازهای ستاره ومثلث رابطه زیر برقرار گردد .

$$I_m(I_1^L) + I_m(I_1^\Delta) + I_m(I_1^Y) = k[Real(I_1^L) + Real(I_1^\Delta) + Real(I_1^Y)] \qquad (15)$$

بطوریکه :

$$k = Tan\,[Arc\cos(PF)]$$

بنابرین با انتخاب ضریب قدرت دلخواه برای فیدر میتوان ضریب k را در معادله (۱۵) تعیین نمود. در بررسی متعادل سازی شبکه توزیع بوشهر ضریب قدرت مطلوب یک در نظر گرفته شده است.

چنانچه معادلات (١٤) را به دو بخش حقیقی و موهومی تجزیه نماییم با معادله (۱۵) مجموعاً ٥ معادله تشکیل خواهند داد در حالیکه تعداد مجهولات مسأله ، ٦ متغیر سوسپتانس جبران سازهای ستاره ومثلث می باشد. بنابراین برای حل معادلات لازم است که یک معادله دیگر به معادلات فوق اضافه نماییم . معادله ششم در حقیقت یک شرط اضافی جدید برای تنظیم و کنترل جبران سازها است که می تواند بر اساس واقعیت های رفتاری جبران سازها تعیین گردد. در نرم افزار تهیه شده ، معادله ششم بر اساس این شرط که بخش موهومی مولفه مثبت جریان بار صرفاً توسط جبران ساز ستاره خنثی گردد به دست آمده است. این بدین معنی است که مولفه مثبت جریان جبران ساز مثلث نبایستی دارای مولفه موهومی باشد که به صورت معادله زیر بیان می گردد.

$$B_{ab}^{\Delta} + B_{bc}^{\Delta} + B_{ca}^{\Delta} = 0 \qquad (16)$$

حال با کمک معادله جدید مجموعه معادلات مربوط به جبران سازها را حل کرده و مقادیر سوسپتانس آنها را در هر لحظه بر حسب سوسپتانس و کنداکتانس معادل بار به شکل زیر تعیین می نماییم.

$$B_a^Y = -B_a^L + (\frac{1}{\sqrt{3}})G_b^L - (\frac{1}{\sqrt{3}})G_c^L$$

$$B_b^Y = -B_b^L + (\frac{1}{\sqrt{3}})G_c^L - (\frac{1}{\sqrt{3}})G_a^L$$

$$B_c^Y = -B_c^L + (\frac{1}{\sqrt{3}})G_a^L - (\frac{1}{\sqrt{3}})G_b^L$$

$$B_{ab}^{\Delta} = (\frac{2}{3\sqrt{3}})(G_a^L - G_b^L)$$

$$B_{bc}^{\Delta} = (\frac{2}{3\sqrt{3}})(G_b^L - G_c^L)$$

$$B_{ca}^{\Delta} = (\frac{2}{3\sqrt{3}})(G_c^L - G_a^L) \qquad (17)$$

از معادلات (۱۷) ملاحظه می گردد که سوسپتانس جبران سازها مستقل از ولتاژ شین بار می باشند و درواقع فرض ابتدای مسأله برای متعادل بودن ولتاژ بار با اعمال جبران سازی تحقق یافته است. در معادلات (۱۷) مقادیر سوسپتانس و کنداکتانس معادل بار را در هر لحظه می توان برحسب مقادیر فازوری ولتاژ و جریان بار در همان لحظه طبق روابط زیر محاسبه نمود:

$$G_a^L + jB_a^L = \frac{I_a^L}{V_a^L}(\cos\phi_a - j\sin\phi_a)$$

$$G_b^L + jB_b^L = \frac{I_b^L}{V_b^L}(\cos\phi_b - j\sin\phi_b)$$

$$G_c^L + jB_c^L = \frac{I_c^L}{V_c^L}(\cos\phi_c - j\sin\phi_c) \qquad (18)$$

بنابراین در هر لحظه با اندازه گیری مقادیر فازورهای ولتاژ و جریان سه فاز در خطوط می توان مقادیر سوسپتانس جبران سازهای ستاره و مثلث را به قسمی تنظیم نمود که جریان خطوط متعادل گردیده و ضریب قدرت فیدر واحد شود.

٤- مطالعه عدم تعادل شبکه توزیع بوشهر

با استفاده از الگوریتم و نرم افزار تهیه شده وضعیت عدم تعادل بار شبکه توزیع بوشهردر طی یک پروژه پژوهشی بررسی و مطالعه گردیده است. در این مطالعات هدف این بوده است که سهم عدم تعادل بار در ایجاد تلفات اهمی در شبکه تعیین گردد و دیگر اینکه میزان تاثیر جبران سازی توان راکتیو در اصلاح و بهبود آن مشخص شود.

٤-١- نرم افزار متعادل ساز بار

به منظور پیاده سازی الگوریتم تشریح شده بـرای انجام مطالعات شبیه سازی و بررسی تاثیر عملکرد جبران سازهای توان راکتیو در متعادل سازی بارهای نامتعادل یک بسته نـرم افـزاری بنـام ULC در محیط MATLAB تهیه گردیده است. این نرم افـزار دارای ویژگی ها و قابلیت های زیر می باشد :

١- این الگوریتم بر اساس کمیات فازوری ولتاژ و جریـان فازهـا عمل می نماید و با توجه بـه اینکـه تغییرات عـدم تعـادل بـار اصولاً سریع نمی باشند لذا تنظیم و کنترل جبـران سـازها بـر اساس کمیات فازوری از نظر مهندسی صحیـح و عملـی مـی باشد.

٢- اسـاس محاسـبات شـبیه سـازی عـدم تعـادل بـار بـر مبنـای محاسبات پخش بار سه فاز برای شبکه های سـه فـاز ٤ سـیمه می باشد.

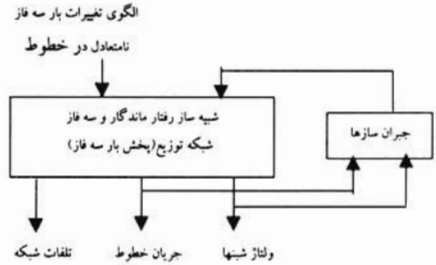
٣- قابلیت مدل سازی هر یک از انواع جبران سـازهای سـتاره و مثلث و یا ترکیب آنها در هر یک از نقاط فیدر وجود دارد.

٤- قابلیت شبیه سازی عدم تعادل بـار در یـک فیـدر شـعاعی بـا الگوی مختلف عدم تعادل بـرای هـر یـک از شـین هـای بـار وجود دارد .

٥- قابلیت شبیه سازی عدم تعادل بـار و عملکـرد جبـران سـازها برای هر محدوده زمانی دلخواه وجود دارد .

٦- با توجه به کنـد و آهسـته بـودن تغییـرات عـدم تعـادل بـار از اثرات هارمونیک زایی جبران سازها صرفنظر شده است .

شکل (٢) ساختار و مکانیزم عملکرد نرم افزار را برای یک لحظه زمانی از فرایند جبران سازی نشان می دهد .



شکل (٢)- ساختار و مکانیزم عملکرد نرم افزار متعادل ساز بار بکمک کنترل توان راکتیو

٤-٢- متعا دل سازی بار فیدرها و تعیین سهم تلفات آنها

برای انجام مطالعات متعادل سازی با توجه به گسترده گی و تعـداد نسبتا زیاد فیدرهـای شـبکه فشـار ضعیـف، تعـدادی از فیـدر هـای مختلف شبکه انتخاب گردیده و بـا نصـب دسـتگاه انـدازه گیـر و ثبات دیجیتالی از نوع ٣٧٢٠ وضعیت بارگیری و عدم تعادل آنـها برای دوره زمـانی ٢٤ سـاعته و در فواصـل زمـانی ١٥ دقیقـه ثبـت گردید.

با توجه به اینکه اصول بررسی و متعادل سـازی بـار کلیـه فیـدر هـا یکسـان میباشد لذا بعنوان نمونـه یکـی از فیدرهـای شـبکه انتخاب شده ونتایج بررسی ها بـرای آن نشـان داده شـده اسـت. سـپس بـا مقایسه و بررسی آماری کلیـه فیدرهـا و بـار شـبکه توزیـع بوشـهر بررسی و نتیجه گیری نهائی بعمل آمده است.

برای این منظور فیدر ٤٠٠ ولت بهمنی و خواجه ها واقع در پسـت 20 kv / 400 v بهمنی انتخاب گردیده و در تـاریخ ٦/١٣ /١٣٧٨ با نصب دسـتگاه انـدازه گیـر و ثبـات دیجیتـالی در ابتـدای فیـدر تغییرات زمانی ولتاژ، جریان و ضریب قدرت هر یـک از فازهـا و سیم نول را برای مدت ٢٤ سـاعت (یـک شبانه روز) در فواصـل زمانی ١٥ دقیقه اندازه گیری نمودیم.

چون بـرای متعـادل سـازی بـار و محاسـبات پخـش بـار نیـاز بـه مدلسازی بارهـا بصورت توانهای اکتیـو و راکتیـو میباشـد لـذا بـا استفاده از اطلاعات اندازه گیری شـده مربـوط بـه ولتـاژ و جریـان فیدر، توانهای اکتیو وراکتیو آن محاسبه شده و بین بارهای تکفـاز و سه فاز فیدر تقسیم گردیده است. شـکل (٣) تغییرات زمـانی توانهای اکتیو و راکتیو فیدرخط ٤٠٠ ولت بهمنی و خواجه هـا را نشان میدهد.

با استفاده از مشخصات امپدانسی داده شده برای فازها و سیم نـول فیدر مورد نظر و همچنین مقادیرمبنای ولتاژ و توان و بکمک نرم افزار تهیه شده محاسبات پخـش بـار سـه فـاز نـا متعـادل را بـرای مدت ٢٤ ساعت انجام دادیم .

S_{base} = ٢٥٠ (KVA) ، V_{base} = ٢٣٠ V

$Z_a=Z_b=Z_c$ = ٠/٠٥ + j ٠/٠٣ (p.u)

Z_n = ٠/٨ + j٠/٢ (p.u)

شکل (٤) نتایج محاسبات پخش بار را به ترتیب بـرای تغییرات دامنه ولتاژ شینها و جریان خطـوط سـه فـاز در مـدت ٢٤ سـاعت نشان میدهد. باتوجه به اینکـه نـرم افـزار مذکـور قـادر اسـت کـه

مولفه های متقارن جریان ها را محاسبه نماید. این مولفه ها در شکل (۵) برای حالت بار نا متعادل بدون وجود جبران ساز نشان داده شده اند. ملاحظه می گردد که میزان عدم تقارن ولتاژ و جریان ها برحسب زمان تغییر مینماید و به همین دلیل نیز مقدار مولفه های منفی و صفر جریان نیز ثابت نبوده و با زمان تغییر می نمایند.

برای متعادل سازی بار ، جبران سازهای ستاره و مثلث هر دو در محل بار نصب شده و توان راکتیو آنها طبق الگوریتم جبران سازی تنظیم شده و تغییرات ولتاژ، جریان و همچنین توان راکتیو جبران سازها محاسبه گردیده اند. در محاسبات شبیه سازی جبران سازی فواصل زمانی نمونه برداری از جریان فازها برای تعیین میزان عدم تعادل بار و تنظیم جبران سازها یک دقیقه بوده است.

شکل (٦) به ترتیب تغییرات دامنه ولتاژ و جریان خطوط را بعد از متعادل سازی بار بکمک جبران سازها نشان می دهد. ملاحظه می گردد که جبران سازها توانسته اند عدم تعادل بار را کاملا" اصلاح نمایند. شکل (۷) به ترتیب توان های راکتیو مورد نیاز جبران سازهای ستاره و مثلث را نشان می دهند. مقادیر مثبت و منفی توان راکتیو جبران سازها به ترتیب معرف عملکرد سلفی و خازنی آنها می باشند.

شکل (۸) به ترتیب تغییرات توان تلفات فیدر را برای دو حالت بار نا متعادل و بار متعادل شده نشان میدهد.

همانگونه که گفته شد یکی از آثار مثبت متعادل سازی بار کاهش تلفات فیدر می باشد. بر اساس نتایج محاسبات ، تلفات انرژی فیدر برای حالت قبل از جبران سازی با بار نا متعادل و حالت جبران سازی شده با بار متعادل در مدت ٢٤ ساعت به ترتیب برابر ٤٦/٦٦ کیلو وات ساعت و ۳۳/۳۳ کیلو وات ساعت گردیده است. کاهش تلفات انرژی بواسطه متعادل سازی بار برابر ۱۳/۳۳ کیلو وات ساعت شده که معادل ۲۸/۵ ٪ تلفات فیدر است .

با توجه به اینکه حداکثر بار مصرفی شبکه توزیع شهر بوشهر برابر ۱۵۰ مگاوات بوده و ضریب قدرت آن برابر ٤/. (٤٠ در صد) میباشد ، با فرض اینکه سهم تلفات شبکه توزیع برابر ۸ درصد کل انرژی یکساله در نظر گرفته شود در اینصورت سهم تلفات انرژی یکساله شبکه خواهد شد.

$$W_{loss} = 0.08 \times 150 \times 0.4 \times 24 \times 365 = 42048 \quad MWh$$

سهم کاهش تلفات شبکه بواسطه متعادل سازی بار خواهد شد.

$$\Delta W_{loss} = 0.285 \times 42048 = 11983.68 \quad MWh$$

با توجه به اینکه ارزش و قیمت تلفات را بر اساس هزینه های تولید ، انتقال و توزیع محاسبه مینمایند ، بنابرین چنانچه ارزش و هزینه هر KWh تلفات انرژی را بوابر ۲۰۰ ریال در نظر بگیریم در اینصورت میزان صرفه اقتصادی حاصل از متعادل سازی بار بواسطه کاهش تلفات در یکسال خواهد شد.

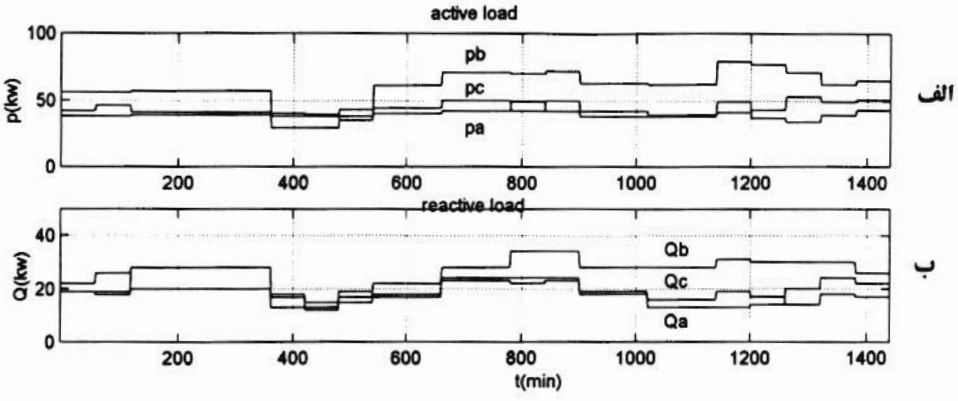
$$\Delta C = 11983.68 \times 1000 \times 150 = 2396'736'000 \ Rials$$

همانگونه که ملاحظه میگردد رقم فوق نسبتا قابل توجه بوده بقسمی که اجرای طرح متعادل سازی بار را از نظر اقتصادی و جبران هزینه های توان راکتیو توجیه مینماید.

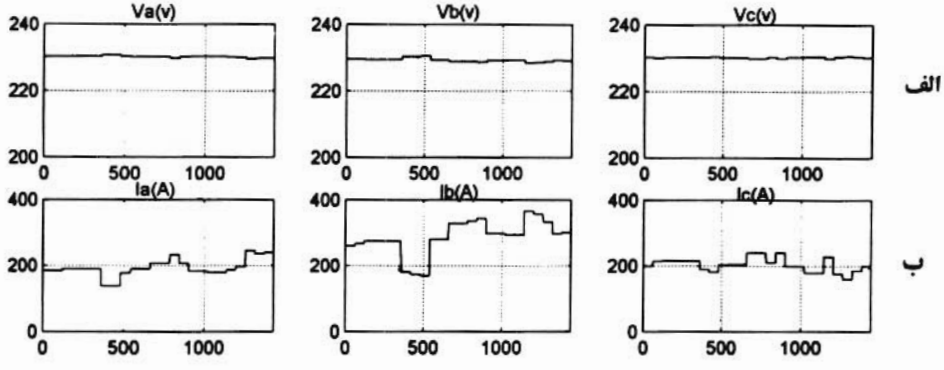
۵- نتیجه گیری

نتایج شبیه سازی با استفاده از نرم افزار تهیه شده بر روی شبکه توزیع بوشهرکارایی و تاثیر جبران سازی توان راکتیو را برای اصلاح عدم تعادل بار و کاهش تلفات به خوبی نشان می دهد. همانگونه که از نتایج بدست می آید میزان توان راکتیو جبران سازها متناسب با افزایش مولفه های منفی و صفر جریان که شاخص شدت عدم تعادل هستند ، افزایش می یابد. همچنین جبران سازها بایستی به هر دو منابع توان راکتیو سلفی و خازنی مجهز باشند . در مطالعات انجام شده پریود نمونه برداری و کنترل توان راکتیو جبران سازها یک دقیقه در نظر گرفته شده است، اما با توجه به طبیعت نسبتا" کند تغییرات عدم تعادل بار و همچنین نتایج شبیه سازی های دیگر، می توان آنرا طولانی تر از یک دقیقه در نظر گرفت بدون اینکه تاثیر سویی در متعادل سازی بار ایجاد نماید. میزان صرفه حاصله بواسطه کاهش تلفات ناشی از متعادل سازی بار رقم قابل توجهی است که انگیزه اقتصادی قابل قبولی را برای متعادل سازی بار در شبکه های توزیع ایجاد می نماید.

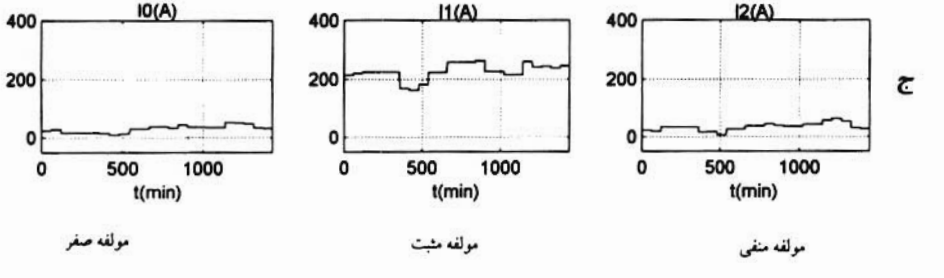
تشکر و قدردانی : از پشتیبانی شرکت برق فارس و توزیع بوشهر که در انجام این پروژه و اندازه گیریها و ارائه اطلاعات ما را کمک نموده اند تشکر می شود.



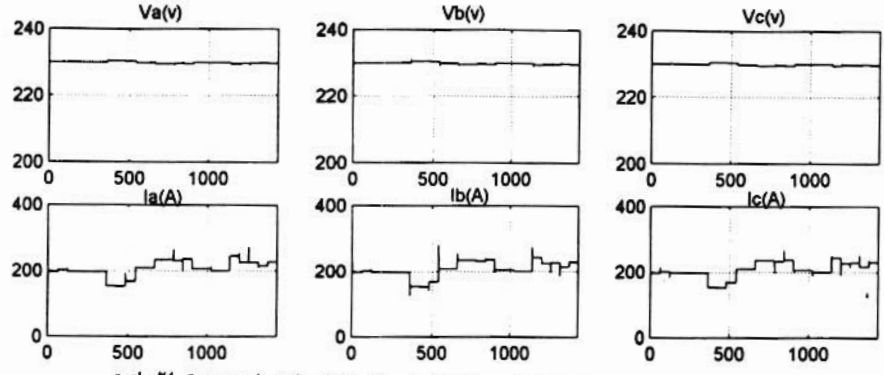
شکل (۳)- تغییرات زمانی توانهای اکتیو و راکتیو بار نا متعادل فیدر در مدت ۲٤ ساعت



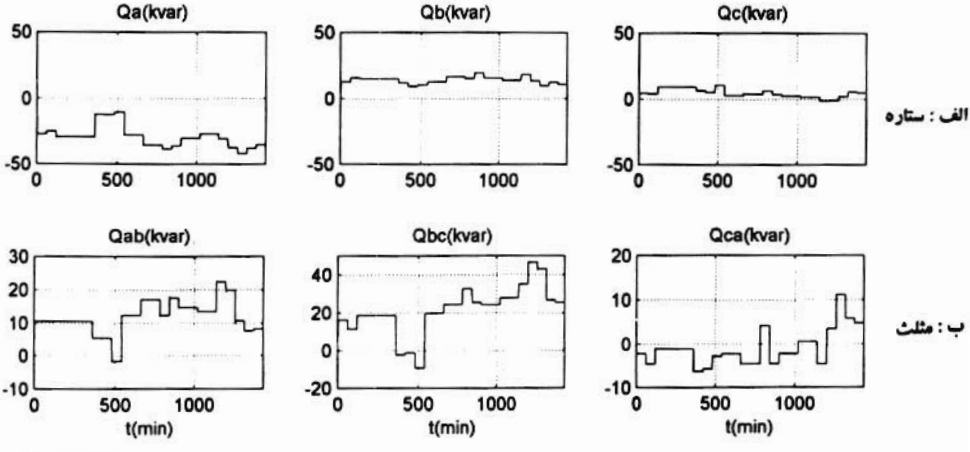
شکل (٤)- تغییرات زمانی ولتاژ و جریان سه فاز بار نا متعادل فیدر در مدت ۲٤ ساعت



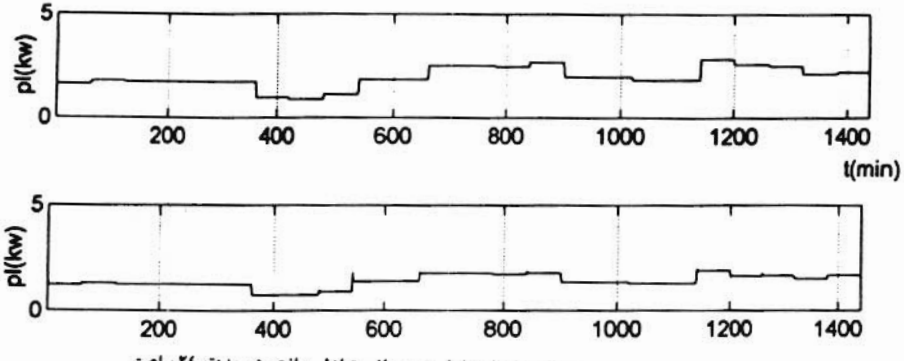
شکل (٥)- تغییرات زمانی مولفه های مثبت ، منفی و صفر جریان بار نا متعادل فیدر در مدت ۲٤ ساعت



شکل (٦)- تغییرات زمانی دامنه ولتاژ و جریان فیدر پس از متعادل سازی بار در مدت ٢٤ ساعت



شکل (٧)- تغییرات زمانی توانهای راکتیو مصرفی جبران سازهای ستاره و مثلث برای متعادل سازی بار در مدت ٢٤ ساعت



شکل (٨)- تغییرات زمانی تلفات کل فیدر در حالت بار نا متعادل و پس از متعادل سازی در مدت ٢٤ ساعت

مراجع :

1- T.J.E.Miller, Reactive Power Control in Electric Systems, newyork 1982.

2- Son-Yilee, Chi-Jui, "On-Line Reactive Power Compensation Schemes for Unbalanced Three Pahse Four Wire Distribution Feeders", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.8, No.4, PP.1958-1965, October 1993.

3- JUANA.MARTINEZ, "EMTP Simulation of adigitally-Controlled Static VAR System for Optimal Load compensation", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.10, No.3, PP.1408-1415, July 1995.

4- A.G.Exposito, F.G. Vazquez, "Microprocessor-Based Control of An SVC for Optimal Load Compensation", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.7, No.2, PP. 706-712, April 1992.

5- A.Premoli, F.Tosato, "The Delta Resonator: A New Approach to Load Compensation Theory in Three-Phase Power Systems", IEE Proceedings, Vol. 136, pt.c, No.6, PP. 381-384, November 1989.

6- G.Gueth, P.Enstedt and A.Rey "Individual Phase Control of A Static Compensator for Load Compensation and Voltage Balancing and Regulation", IEEE Transactions on Power System, Vol. PWRS. 2, No. 4, PP. 898-905, November 1987.

۷- گزارش (۱) : روشها و الگوریتمهای متعادل سازی بار پروژه متعادل نمودن جریان فازهای خطوط توزیع بوشهر با استفاده از جبران سازی توان راکتیو بشماره ت-ف-۷۰۰/۷۷
محمد رضا آقامحمدی – دانشکده صنعت آب و برق

۸- سعید سپاسی ، " متعادل سازی بار با استفاده از جبران سازی توان راکتیو"
پایان نامه کارشناسی- دانشکده صنعت آب و برق ، ۱۳۷۹