

مقایسه متروی تهران با متروی تبریز و بهبود کیفیت توان متروی تبریز

میترا سرهنگ زاده

شرکت توزیع نیروی برق تبریز

سید حسین حسینی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تبریز

کلمات کلیدی: مترو، Statcom، فیلتر اکتیو، PSCAD/EMTDC

خلاصه

در این مقاله، متروی تهران با متروی تبریز مقایسه شده است و از یک Statcom به همراه فیلتر پسیو، برای بهبود کیفیت توان شبکه متروی تبریز استفاده شده است که ساختار آن، اینورتر منبع ولتاژ کنترل شده با جریان می باشد. این Statcom در یک بازه زمانی به صورت فیلتر اکتیو، برای جبران توان راکتیو بار متغیر (قطار) و حذف هارمونیک عمل می کند و در یک بازه زمانی به صورت اینورتر، برای برگشت انرژی ایجاد شده توسط قطار به شبکه، عمل می کند.

۱- مقدمه

امروزه با پیشرفت صنعت، تعداد بارهای تزریق کننده هارمونیک افزایش یافته است. در سیستم قطار برقی تبریز نیز پستهای یکسوساز دیودی، عامل مهمی در تولید هارمونیک در سمت AC می باشند. در این مقاله از یک Statcom استفاده شده است که در حالت اتصال قطار به شبکه، برای جبران توان راکتیو بار متغیر (قطار برقی) و حذف هارمونیکها به صورت فیلتر اکتیو عمل خواهد کرد. در حالت ترمز، برای برگشت انرژی به شبکه به صورت اینورتر عمل خواهد کرد. در وضعیت موجود متروی تبریز، انرژی ایجاد شده در حالت ترمز، توسط بانکهای مقاومتی که در پست یکسوساز قرار دارند، تلف می شود (مطابق شکل ۵). در این مقاله، این انرژی، توسط اینورتر به شبکه برگردانده خواهد شد که باعث کاهش هزینه خواهد شد.

۲- انتخاب نوع موتور

انتخاب نوع موتور به مشخصه سرعت - گشتاور بستگی دارد و در همه موتورها با کاهش سرعت، گشتاور افزایش می یابد. میزان افزایش گشتاور با کاهش سرعت، در انواع موتورهای جریان مستقیم شنت و سری و موتورهای AC القایی متفاوت است. [1]

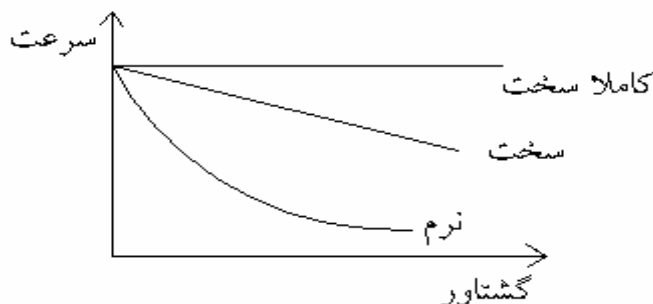
۲-۱- مشخصه های سرعت - گشتاور موتورهای الکتریکی

مشخصه سرعت - گشتاور موتورهای الکتریکی که در شکل ۱ نشان داده شده است به صورت زیر طبقه بندی می شوند: [1]

۱- مشخصه سرعت - گشتاور کاملاً سخت که در آن با کاهش گشتاور، سرعت تغییر چندانی نمی کند.

۲- مشخصه سرعت - گشتاور سخت که در آن با کاهش گشتاور، سرعت کمی افزایش می یابد.

۳- مشخصه سرعت - گشتاور نرم که در آن با کاهش گشتاور، سرعت افزایش می یابد.



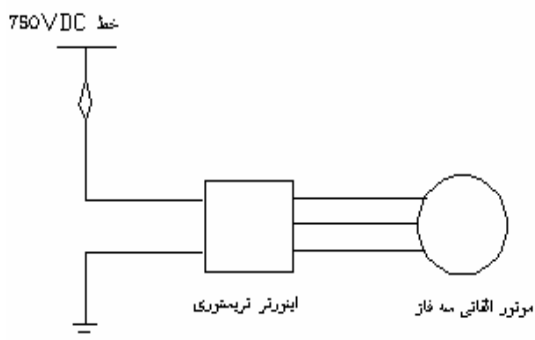
شکل ۱: مشخصه سرعت - گشتاور موتورهای الکتریکی

۲-۲- مقایسه موتورهای جریان مستقیم سری و شنت برای قطار برقی

- ذیلاً موتورهای الکتریکی جریان مستقیم سری و شنت را با توجه به مشخصه سرعت - گشتاور شکل ۲ مورد مقایسه قرار می دهیم: [1]
- ۱- موتور سری توانایی اعمال گشتاور بزرگی را در لحظه راه اندازی دارد.
 - ۲- در موتور سری مطابق مشخصه گشتاور - سرعت نرم، با افزایش گشتاور، سرعت کاهش می یابد و به این ترتیب موتور در مقابل اضافه بار حفاظت می شود. در حالیکه موتور شنت دارای مشخصه گشتاور - سرعت سخت می باشد.
 - ۳- چرخهای با قطرهای نابرابر سبب می شود که موتورهای کوپل شده به هم دارای سرعتهای متفاوتی باشند. به مشخصه گشتاور - سرعت موتور سری نشان می دهد که اختلاف در سرعت، اختلاف کمی را در گشتاور ایجاد می کند در حالیکه در موتور شنت اختلاف زیادی را ایجاد می کند.
 - ۴- افزایش ناگهانی در ولتاژ موتور باعث ایجاد جریان هجومی در موتور می گردد که دامنه آن به امپدانس مدار موتور و EMF موتور بستگی دارد. در یک موتور سری امپدانس معادل شامل امپدانس آرمیچر و میدان است ولی در موتور شنت فقط شامل امپدانس آرمیچر است، بنابراین دامنه جریان هجومی در موتور سری کمتر از شنت می باشد.
- با توجه به موارد بالا دیده می شود که در سیستمهای DC، موتور جریان مستقیم سری مناسبتر از موتور شنت می باشد.

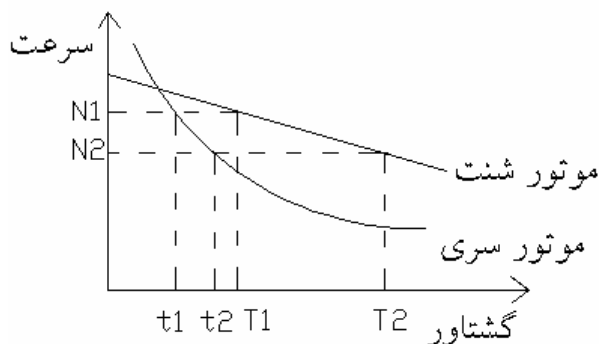
۲-۳- کاربرد موتورهای القایی برای قطار برقی

موتورهای القایی از نوع قفس سنجابی دارای مقاومت بالایی می باشند و نیاز به نگهداری کم و در نتیجه هزینه پائینی دارند این عوامل و همچنین رشد تکنولوژی الکترونیک قدرت از سال ۱۹۷۰ باعث به کار بردن موتورهای القایی در قطارهای برقی شده است. با به کار بردن اینورترهای ولتاژ و فرکانس متغیر به همراه موتورهای القایی می توان به مشخصه گشتاور - سرعت موتورهای جریان مستقیم سری دست یافت. شکل ۳ نمونه ای از لکوموتیو قطار برقی با موتور القایی را نشان می دهد. [1]



شکل ۳: بلوک دیاگرام تغذیه قطار برقی

شامل موتور القایی سه فاز



شکل ۲: مشخصه سرعت - گشتاور موتورهای

جریان مستقیم سری و شنت

۲-۴- مقایسه موتورهای القایی و جریان مستقیم سری [1]

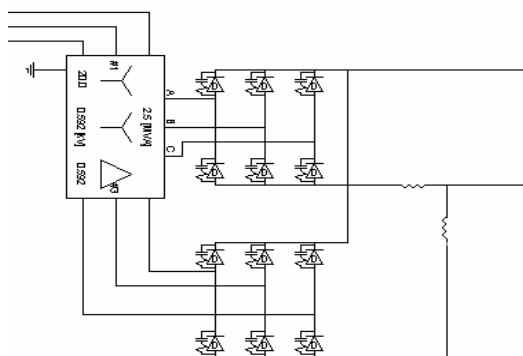
- i موتور القایی دارای راندمان بالایی نسبت به موتور جریان مستقیم سری می باشد.
- ii موتور القایی نیاز به نگهداری کمی دارد.
- iii موتور القایی دارای توان خروجی و سرعت بالایی است. بنابراین وزن آن برای توان معینی کمتر از وزن موتور جریان مستقیم سری است.
- iv در موتور القایی برای ترمز ترتیب فازها عوض می شود ولی در موتور جریان مستقیم سری جهت میدان عوض می شود

۳- ترمز دینامیکی و مولدی

در محرکه های ac سرعت متغیر، ممکن است برای کاهش سرعت ماشینها نیاز به ترمز الکتریکی داشته باشیم. در این حالت موتور در حالت ژنراتوری کار کرده و انرژی جنبشی ذخیره شده در سیستم به انرژی الکتریکی تبدیل می شود. سپس انرژی حاصله در یک مقاومت موازی با سیستم محرک، تلف شده و یا اینکه به منبع تغذیه برمی گردد. مورد اول به عنوان ترمز دینامیکی و مورد دوم به عنوان ترمز مولدی شناخته می شود. یک موتور القایی می تواند در سرعت فوق سنکرون به عنوان ژنراتور کار کند، این عمل را می توان با پائین آوردن فرکانس اینورتر به زیر سرعت ماشین $\omega_e < \omega_r$ ممکن ساخت. وقتی ماشین، بار کامل را به حرکت در می آورد نیز چنین شرایطی قابل دستیابی است. موتور سنکرون را نیز می توان با تغییر زاویه بار از مقدار منفی به مقدار مثبت، به ژنراتور تبدیل کرد. [2]

۴- مقایسه متروی تهران و تبریز [8]

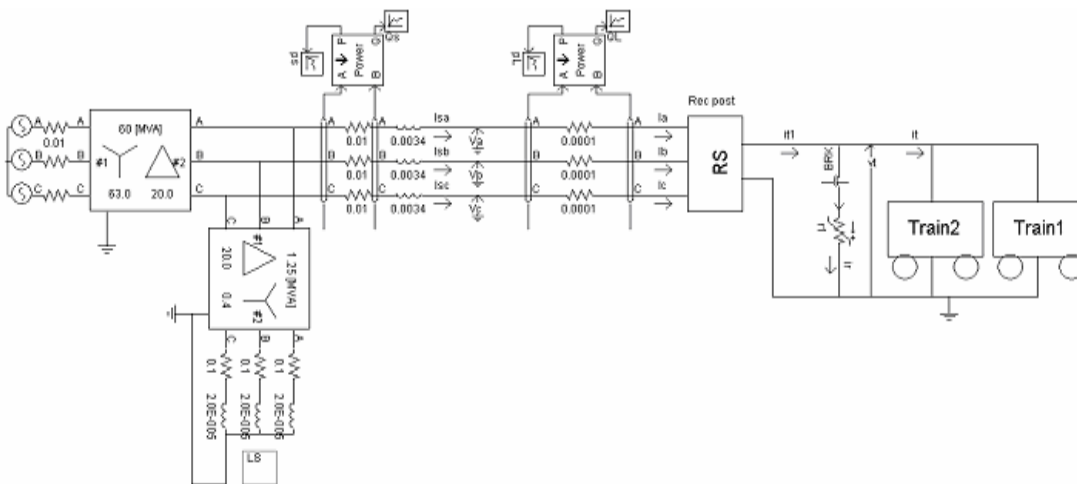
- i هر دوی متروی تهران و تبریز دارای سیستم تغذیه ۷۵۰ VDC می باشند که این ولتاژ DC در متروی تهران از طریق ریل سوم و در متروی تبریز از طریق خط بالاسری در اختیار قطار قرار می گیرد.
- ii هر قطار متروی تهران دارای ۲۴ موتور جریان مستقیم ۱۳۲ KW، ۷۵۰ VDC و هر قطار متروی تبریز دارای ۴ موتور القایی ۴۰۰ V، ۵۰ Hz، ۱۵۰ KW می باشد.
- iii در متروی تهران کنترل دور موتور dc توسط چاپر و ترتیب به هم بستن موتورها انجام می شود و در متروی تبریز توسط یک اینورتر متصل به موتور القایی انجام می شود که در شکل ۳ نشان داده شده است.
- iv در متروی تهران و تبریز برای ایجاد ولتاژ ۷۵۰ VDC از یک ترانس سه سیم پیچه ۵۹۲/۰، ۵۹۲/۰، ۲۰/۰ و دو یکسوکننده ۶ پالس موازی دیودی استفاده شده است که در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: پست یکسو کننده

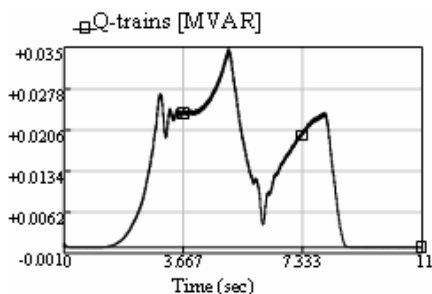
- v در متروی تهران برای تامین ولتاژ ۲۰ KV از پستهای فوق توزیع ۶۳/۲۰ KV و در متروی تبریز از پستهای فوق توزیع ۱۳۲/۲۰ KV استفاده می شود.
- vi در متروی تهران، انرژی ایجاد شده توسط ماشین DC در حالت ژنراتوری که در زمان ترمز و سرازیری ایجاد می گردد در مقاومتی در داخل واگنها تلف می شود که باعث ایجاد هزینه بالایی می گردد. ولی در متروی تبریز این مقاومتها در داخل واگنها قرار ندارند و در پست یکسو کننده قرار می گیرند و انرژی ایجاد شده توسط ماشین القایی در زمان ترمز توسط اینورتر به خط DC بر می گردد تا اگر قطاری در مسیر باشد توسط آن مصرف گردد ولی اگر قطاری در مسیر نباشد انرژی ایجاد شده در مقاومتی

نصب شده تلف می گردد که در شکل ۵ نشان داده شده است. بنابراین تلف انرژی در متروی تبریز کمتر از متروی تهران خواهد بود. در شکل فوق پستهای LP نشان داده شده پستهای مربوط به مصارف عمومی ایستگاهها می باشند.

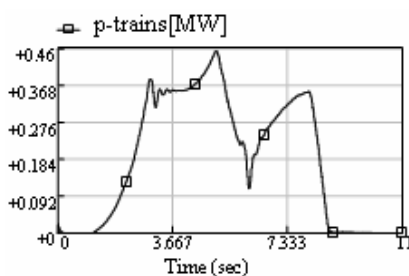


شکل ۵: شبکه قطار برقی تبریز

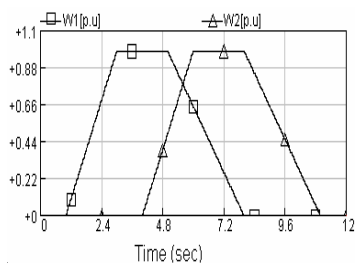
اگر وضعیت موجود متروی تبریز را بررسی کنیم با فرض اینکه منحنی سرعت دو قطار در سیستم واحد، مطابق شکل ۶ باشد، توان اکتیو و راکتیو بار مطابق شکل های ۷ و ۸ خواهند بود جریان سمت ac دارای هارمونیک و اختلاف فاز با ولتاژ می باشد (مطابق شکل ۹). شکل ۱۰ جریان بار DC خط بالاسری و شکل ۱۱ جریان بار سمت DC پست یکسو کننده و شکل ۱۲ جریان مقاومت فرار گرفته در پست یکسو کننده را نشان می دهند.



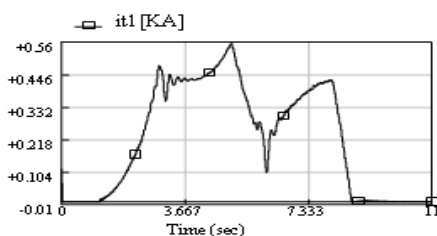
شکل ۸: توان راکتیو بار به مگاوار قبل از وصل Statcom



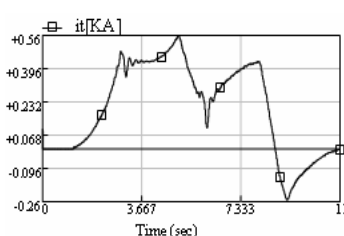
شکل ۷: توان اکتیو بار به مگاوات قبل از وصل Statcom



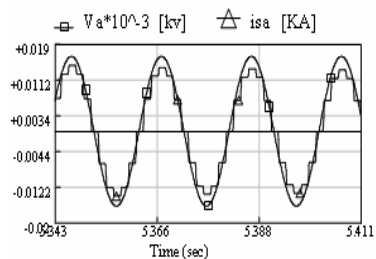
شکل ۶: منحنی سرعت موتورهای در سیستم واحد



شکل ۱۱: جریان بار سمت DC پست یکسو کننده



شکل ۱۰: جریان بار DC خط بالاسری به

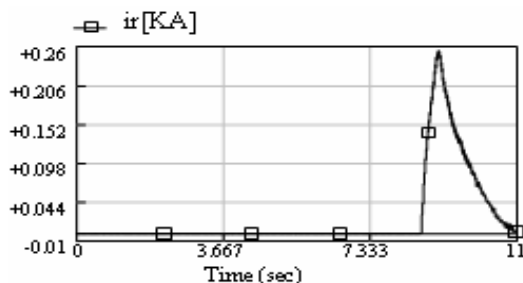


شکل ۹: جریان و ولتاژ فاز در سمت ac به

کیلوآمپر قبل از وصل Statcom

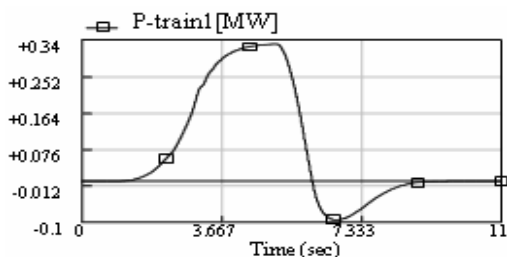
کیلوآمپر قبل از وصل Statcom

کیلوآمپر قبل از وصل Statcom

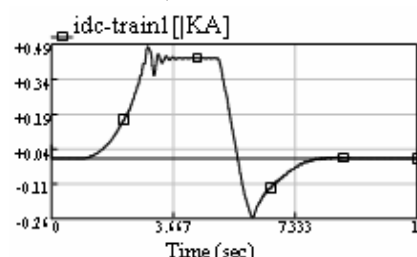


شکل ۱۲: جریان مقاومت سمت DC به کیلوآمپر قبل از وصل Statcom

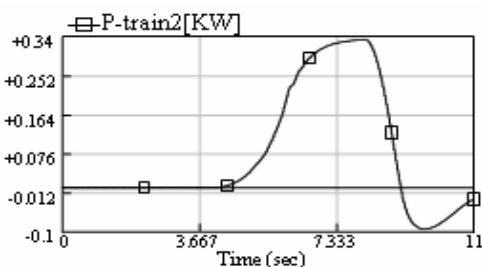
و جریانهای کشیده شده توسط هر کدام از قطارها و توان اکتیو آنها مطابق شکل‌های ۱۳ و ۱۴ و ۱۵ و ۱۶ خواهند بود.



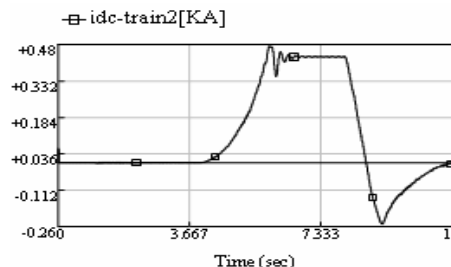
شکل ۱۴: توانهای اکتیو قطار ۱ به مگا وات



شکل ۱۳: جریان قطار ۱ به کیلو آمپر



شکل ۱۶: توان اکتیو قطار ۲ به مگا وات



شکل ۱۵: جریان قطار ۲ به کیلو آمپر

دیده می شود زمانی که قطار ۱ به حالت ترمز می رود ($t=5\text{sec}$)، انرژی برگشتی توسط آن در قطار دوم استفاده می شود. ولی زمانیکه قطار دوم به حالت ترمز می رود ($t=5\text{sec}$) انرژی برگشتی از آن در مقاومت‌های قرار گرفته در پست یکسو کننده تلف می شود.

۵- ساختمان Statcom

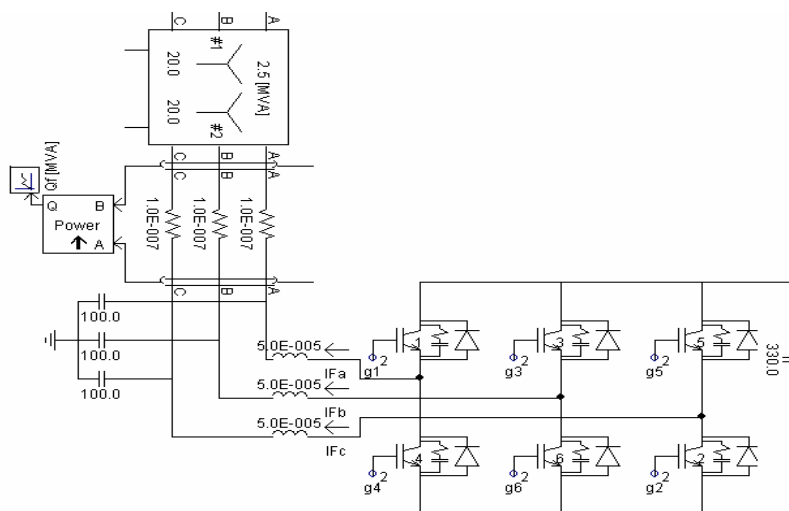
جبران بار عبارت است از مدیریت توان راکتیو که به منظور بهبود بخشیدن به کیفیت تغذیه در سیستم قدرت ac انجام می گیرد. هدف از جبران سازی، اصلاح ضریب توان، تنظیم ولتاژ و متعادل‌سازی بار است. اصلاح ضریب توان به این معنی است که توان راکتیو مورد نیاز بار به جای آنکه از نیروگاه دور تامین شود، در محل نزدیک بار تولید می شود. پاره ای از بارها در برابر جریان ac امپدانس غیر خطی دارند و شکل موج جریان آنها نسبت به شکل موج خالص سینوسی فرکانس پایه اعوجاج پیدا می کند یعنی دارای هارمونیک می باشند. مثالی از بارهای بزرگ که تولید هارمونیک می کنند یکسوکننده ها می باشند امروزه برای حذف هارمونیک ها و بهبود کیفیت توان از فیلترهای اکتیو استفاده می شود که شامل مدارات الکترونیک قدرت و مدارات ذخیره کننده خازن و سلف می باشند. در گذشته مطالعات زیادی درباره فیلتر اکتیو انجام گرفته و روشهای کنترل پیشرفته ای پیشنهاد گردیده است. [5], [4] مدار قدرت فیلتر می تواند به صورت سری و یا موازی به بار مورد نظر متصل گردد که از نوع سری برای متعادل‌سازی ولتاژ سه فاز و محدودسازی هارمونیکهای شکل

موج ولتاژ ایده آل و از نوع موازی برای حذف هارمونیکهای جریان بار و متعادلسازی بار و جبرانسازی توان راکتیو استفاده می شود. برای کنترل سوچینگ فیلتر اکتیو مورد نظر باید سیگنالهای مرجع محاسبه شوند برای محاسبه، روشهای زیر به کار می رود: [3],[4],[5],[8].

۱- تئوری قاب مرجع سنکرون

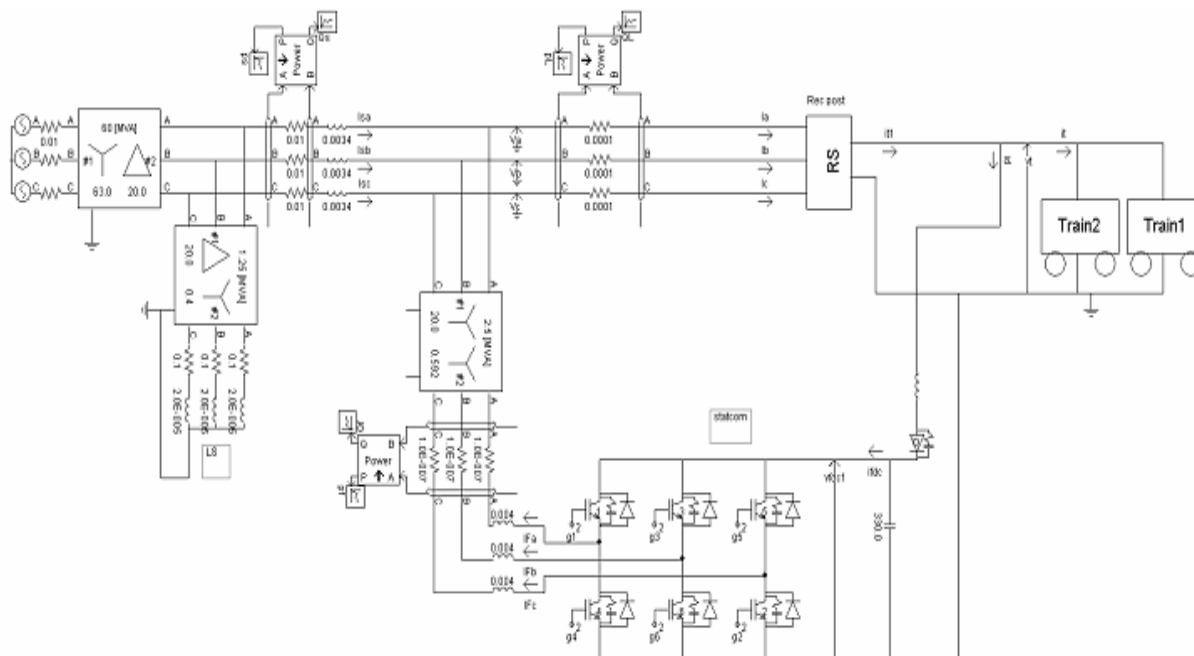
۲- تئوری pq

۳- محیط abc



شکل ۱۷: مدل فیلتر اکتیو

برای کنترل زمانهای روشن و خاموش شدن Statcom روشهای PWM و SPWM و باند هیستریزس و... وجود دارد. در این مقاله، روش تئوری pq پیشرفته و باند هیستریزس به کار رفته است. همچنین جهت تزریق جریانهای جبرانسازی می توان از ساختارهای مختلف فیلترهای اکتیو کمک گرفت که در این مقاله از اینورتر منبع ولتاژ کنترل شده با جریان (CC-VSI) استفاده شده است (مطابق شکل ۱۷). شکل ۱۸، شبکه متروی تبریز را به همراه Statcom نشان می دهد.



شکل ۱۸: سیستم متروی تبریز به همراه Statcom

۶- تئوری pq جهت محاسبه جریانهای مرجع جبران ساز در Statcom مورد نظر

در تئوری pq توان های اکتیو و راکتیو به صورت زیر بیان می شوند: [4]

$$p = v_o i_o + v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \quad (1)$$

$$q = v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha \quad (2)$$

که دارای رابطه تبدیل زیر است:

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \\ X_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

که x نشان دهنده جریانها و یا ولتاژها است و اگر سیم نول نباشد $i_0=0$ است. بنابراین در این حالت خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

در اینصورت جریانها به وسیله توانهای q, p به صورت زیر بیان می شود:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (5)$$

که در آن:

$$\Delta = v_\alpha^2 + v_\beta^2 \quad (6)$$

می باشد. توان های اکتیو و راکتیو q, p می توانند به قسمت های متوسط و نوسانی تبدیل شوند:

$$\begin{aligned} P &= P_{av} + P_{os} \\ q &= q_{av} + q_{os} \end{aligned} \quad (7)$$

اگر جبران سازی توان راکتیو و حذف هارمونیک مد نظر باشد:

$$P_f = P_{(os)}, \quad q_f = q_L \quad (8)$$

$$P_s = P_{L(av)}, \quad q_s = 0 \quad (9)$$

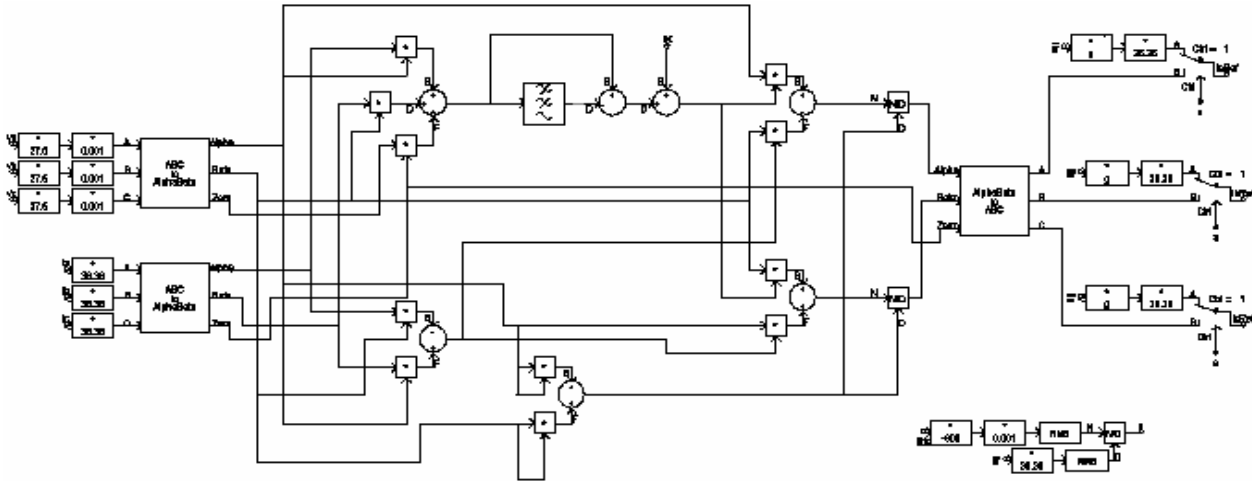
بنابراین جریانهای منبع با استفاده از رابطه (۵) به صورت زیر بیان می شود.

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha}^* \\ i_{s\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{L(av)} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

که در آن $i_{s\alpha}$ و $i_{s\beta}$ جریانهای ایده آل منبع و $i_{L\alpha}$ و $i_{L\beta}$ جریانهای اندازه گیری شده بار هستند. در این مقاله با استفاده از روش جبران سازی pq بهبود یافته، جبران سازی توان راکتیو و حذف هارمونیک انجام گرفته است. [3] تنظیم ولتاژ طرف DC فیلتر اکتیو با استفاده از یک مدار کنترل حلقه به سادگی میسر می شود. با مقایسه سیگنال مرجع باس DC با سیگنال اندازه گیری شده ولتاژ دو سر خازن، سیگنال خطا بدست می آید. از یک کنترلر PI برای کنترل ولتاژ دو سر خازن استفاده می شود. با ضرب خروجی کنترلر در جریان خازن DC تلفات PC محاسبه می شود و به مقدار توان اکتیو جبران شده توسط فیلتر اکتیو اضافه می گردد در این روش جریانهای مرجع فیلتر اکتیو به صورت زیر می باشد: [3]

$$\begin{bmatrix} i_{f\alpha}^* \\ i_{f\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{L(os)} + P_C \\ q_L \end{bmatrix} \quad (11)$$

وزمانی که قطار برقی در حالت ژنراتوری قرار می گیرد، انرژی الکتریکی تولید شده توسط آن، بوسیله Statcom به شبکه برگردانده می شود که می تواند قسمتی از جریان پستهای LP را تامین کند. بنابراین جریانهای مرجع Statcom مورد نظر را درصدی از جریان پست LP در نظر می گیریم که دامنه آن بستگی به دامنه جریان DC برگشتی دارد. بلوگ دیاگرام محاسبه جریانهای مرجع جبران ساز در دو حالت فیلتر اکتیو و اینورتر در شکل ۱۹ نشان داده شده است.

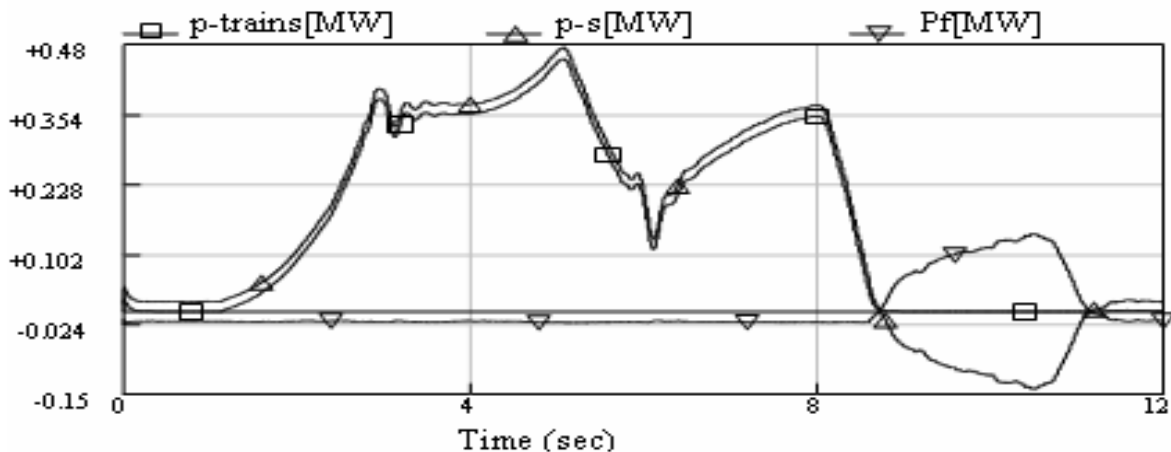


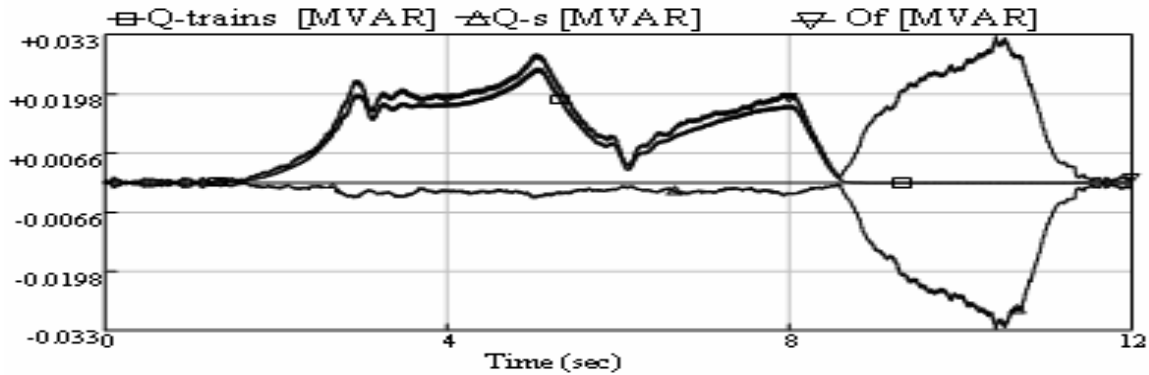
شکل ۱۹: بلوگ دیاگرام محاسبه جریانهای مرجع جبران ساز در حالت کلی

۷- نتایج شبیه سازی

در این مقاله بانکهای مقاومتی خط متروی تبریز حذف و انرژی ایجاد شده در زمان ترمز و سرازیری همانند متروی تهران با استفاده از یک دیود که در مسیر بین باس DC و Statcom قرار می گیرد (مطابق شکل ۱۸) به شبکه برمی گردد. [6],[7]. همانند متروی تهران، مدار کنترلی محاسبه جریانهای مرجع باید طوری باشد که دو حالت فیلتر و اینورتری را تشخیص دهد. بنابراین وقتی دردیود جریان وجود داشته باشد در حالت اینورتری خواهیم بود [9],[10]. بعد از محاسبه جریانهای مرجع با استفاده از روش باند هیستریزس، ترانزیستورها را کلید زنی می کنیم. با افزودن فیلتر اکتیو در شبکه توان راکتیو پست یکسو کننده و هارمونیکهای آن جبران می شود. شکل ۲۰ توان اکتیو بار

(p-trains) و استاتاکام (pf) توان اکتیو قبل از نقطه اتصال بار و استاتاکام (p-s) را نشان می دهد. دیده می شود زمانیکه استاتاکام به صورت فیلتر اکتیو عمل می کند، توان اکتیو آن نزدیک صفر است و زمانیکه به صورت اینورتر عمل می کند (با توجه به شکل ۶، بعد از لحظه $t=0.8s$) توان مثبتی را به شبکه تزریق می کند. شکل ۲۱ توان راکتیو بار (q-trains) و استاتاکام (qf) و توان راکتیو قبل از نقطه اتصال بار و استاتاکام (q-s) را نشان می دهد. دیده می شود زمانیکه استاتاکام به صورت فیلتر اکتیو عمل می کند، توان راکتیو قبل از نقطه اتصال بار و استاتاکام (q-s) نزدیک صفر است و زمانیکه به صورت اینورتر عمل می کند (با توجه به شکل ۶، بعد از لحظه $t=0.8s$)، توان راکتیوی را به شبکه تزریق می کند.

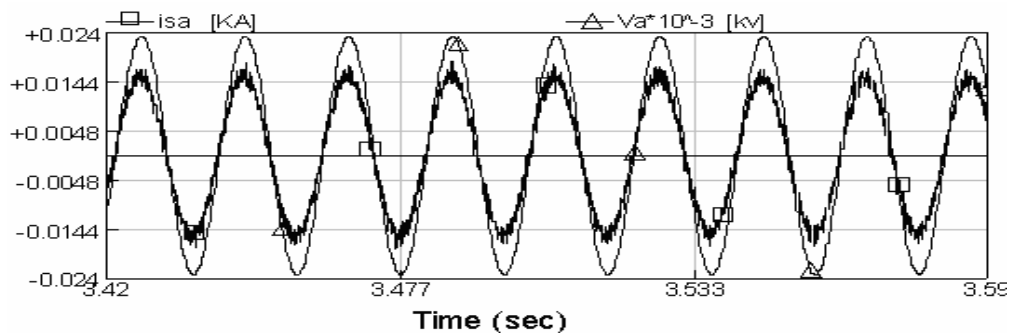




شکل ۲۰: توان اکتیو بار و استاتکام و منبع به مگا وات بعد از وصل Statcom

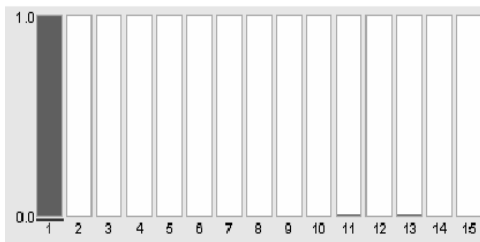
شکل ۲۱: توان راکتیو بار و استاتکام و منبع به مگا وار بعد از وصل Statcom

شکل ۲۲ جریان بار را نشان می دهد که هارمونیکهای آن جبران شده است. شکل‌های ۲۳ و ۲۴ طیف هارمونیکهای جریان را قبل و بعد از استفاده از استاتکام نشان می دهد و دیده می شود هارمونیکهای ۱۱ و ۱۳ بعد از بکارگیری Statcom حذف می شوند.

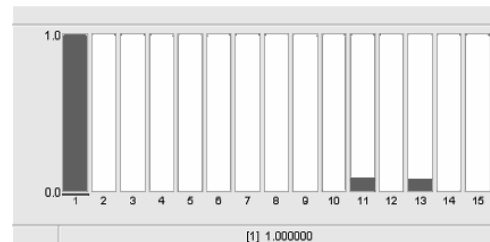


شکل ۲۲: جریان بار به کیلو آمپر و اختلاف فاز آن با ولتاژ بعد از وصل Statcom

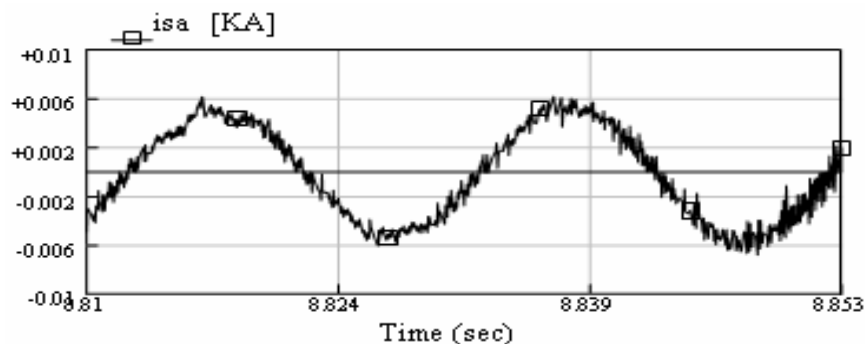
شکل ۲۴: طیف هارمونیکهای جریان بعد از به کار بردن Statcom



شکل ۲۳: طیف هارمونیکهای جریان قبل از به کار بردن Statcom



جریان برگردانده شده توسط استاتکام در حالت اینورتری نیز در شکل ۲۵ دیده می شود.



شکل ۲۵: جریان برگردانده شده توسط Statcom در حالت اینورتری به کیلو آمپر

۸- نتیجه

در این مقاله از یک Statcom به همراه فیلتر پسیو، استفاده شده است. این Statcom در یک بازه زمانی به صورت فیلتر اکتیو، برای جبران توان راکتیو بار متغیر (قطار) و حذف هارمونیکهای پست یکسوکننده عمل می کند و در یک بازه زمانی به صورت اینورتر، برای برگشت انرژی ایجاد شده توسط قطار به شبکه، عمل می کند و وضعیت غیر اقتصادی تلف انرژی را از بین می برد. نتایج شبیه سازیها که با استفاده از نرم افزار PSCAD/EMTDC انجام شده اند، در شکل های ۲۰ الی ۲۵ نشان داده شده اند و مشاهده می شود که سیستم پیشنهادی هارمونیکها را حذف و توان راکتیو را جبران می کند و انرژی ایجاد شده در حالت ترمزی به شبکه برگردانده می شود. با مقایسه متروی تبریز با متروی تهران [8] دیده می شود که متروی تبریز از نظر اقتصادی بهتر از متروی تبریز می باشد، زیرا قطارهای متروی تبریز، انرژی ایجاد شده در حالت ژنراتوری را به شبکه DC برمی گرداند تا اگر قطاری در شبکه باشد انرژی برگردانده شده را مصرف کند و اگر قطاری در شبکه نباشد این انرژی در مقاومت های قرار داده شده در پست یکسوکننده تلف خواهد شد در حالیکه در متروی تهران انرژی ایجاد شده در حالت ژنراتوری در مقاومت های داخل واگنها تلف می شود. با بکار بردن Statcom انرژی فوق را می توان در متروی تبریز و تهران [8] به شبکه برگرداند.

۹- مراجع

- 1- Upadhyay, J and .Mahendra, S.N.2000. Electric Traction..Allied pub.
- 2- Bose. Bimal K.2001. Power Electronics and Ac Drives. Prentice Hall Pub.
- 3- Fang Zheng Peng; Ott, G.W., Jr.; Adams, D.J., "Harmonic and reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive power theory for three-phase four-wire systems". Power Electronics, IEEE Transactions on Published: Nov.1998, Volume: 13 6 , Page(s): 1174 -1181
- 4- Marques, G.D. Industrial Electronics Society, "A comparison of active power filter control methods in unbalanced and non-sinusoidal conditions", IECON '98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Published: 1998 Volume: 1 , Page(s): 444 -449 vol.1
- 5- Soares, V.; Verdelho, P.; Marques, G.D , "An instantaneous active and reactive current component method for active filters", Power Electronics, IEEE Transactions on Published: July.2000, Volume: 15 4 , Page(s): 660 -669
- 6- Horn, A.; Wilkinson, R.H.; Enslin, T.H.R., "Evaluation of converter topologies for improved power quality in DC traction substations. Industrial Electronics", ISIE '96., Proceedings of the IEEE International Symposium on Published: 1996 Volume: 2 , Page(s): 802 -807 vol.2
- 7- Yii Shen Tzeng; Ruay-Nan Wu, "Electric network solutions of DC transit systems with inverting substations. Nanming Chen Vehicular Technology", IEEE Transactions on Published: Nov.1998, Volume: 47 4 , Page(s): 1405 -1412

۸ - میترا سرهنگ زاده و دکتر سید حسین حسینی. بهبود کیفیت توان متروی تهران با استفاده از Statcom. نوزدهمین کنفرانس بین المللی برق ایران. آذر ۱۳۸۳.