

بررسی تاثیرات محل نصب فیلترهای اکتیو موازی در سیستم‌های قدرت بر ویژگی‌های جبران سازی و پایداری شبکه

فرهاد شهینیا^۱ - سید حسین حسینی^۲

^۱ دفتر تحقیقات و استاندارد - شرکت توزیع نیروی برق آذربایجان شرقی

^۲ دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز

واژه‌های کلیدی: فیلتر اکتیو، کیفیت توان، هارمونیک، تحلیل حساسیت ولتاژ، پایداری شبکه

چکیده

استفاده از فیلترهای اکتیو موازی یکی از روشهای موثر جبران سازی توان راکتیو و حذف یا محدود نمودن هارمونیکهای شبکه های توزیع است ولی در این میان توجه به محل نصب آن در شبکه اهمیت خاصی دارد. از آنجاییکه فیلترهای اکتیو همانند منابع جریان کنترل شده عمل نموده و با مقایسه جریان بار، جریان منبع و یا ولتاژ منبع با شکل موجهای سینوسی، جریانهای هارمونیک را به مدار تزریق می کنند تا شکل موجهای شبکه توزیع سینوسی گردد، در صورت عدم انتخاب محل صحیح نصب فیلتر اکتیو، امکان افزایش میزان هارمونیکها در بعضی از باسهای شبکه وجود دارد که موجب کاهش کیفیت توان کلی شبکه می گردد. همچنین سیستم کنترلی بکار رفته برای کنترل فیلتر اکتیو می تواند در صورت عدم انتخاب صحیح محل نصب آن موجب ناپایداری فیلتر اکتیو و حتی شبکه توزیع گردد. در این مقاله به بررسی تاثیر محل نصب فیلتر اکتیو و روش کنترلی آن بر میزان جبران سازی و بهبود کیفیت توان شبکه های توزیع و نیز پایداری سیستم کنترلی فیلتر و شبکه توزیع پرداخته شده و روشی برای این منظور پیشنهاد و مورد استفاده قرار گرفته

است. در این روش، ابتدا به بررسی پاسخ فرکانسی و تحلیل حساسیت ولتاژ شبکه توزیع در باسهای مختلف شبکه در صورت نصب فیلتر در باسهای مختلف پرداخته و میزان اعوجاج قبل از نصب فیلتر و پس از آن را در تمامی باسهای شبکه مورد بررسی قرار دهیم تا بهترین محل نصب فیلتر را انتخاب نماییم. در انتها نیز نتایج شبیه سازیهای انجام شده برای یک شبکه توزیع توسط نرم افزار *MATLAB/SIMULINK* و روند انتخاب بهترین محل نصب فیلتر آورده شده است.

۱- مقدمه

استفاده از فیلترهای اکتیو موازی بعنوان یک روش موثر برای جبران سازی توان راکتیو و حذف یا محدود نمودن هارمونیکهای شبکه های توزیع می باشد. جبران سازی توان راکتیو شبکه های توزیع منجر به جبران سازی ولتاژ، تصحیح ضریب توان و رفع هارمونیکهای جریان بارهای مصرفی شبکه می گردد [۱]. هدف اصلی استفاده از فیلترهای اکتیو موازی حذف مولفه هایی از جریان نظیر هارمونیکها و توان راکتیو است که بازدهی شبکه توزیع را تحت تاثیر قرار می دهد [۲]. در صورت اتصال صحیح یک فیلتر اکتیو در شبکه توزیع و

بیستمین کنفرانس بین‌المللی برق

استفاده از الگوریتم‌های استاندارد ریاضی، این روش می‌تواند برای شبکه‌های توزیع با هر تعداد باس بکار رود. همچنین به بررسی پایداری سیستم کنترلی فیلتر اکتیو و شبکه توزیع و رعایت ویژگی‌های مربوط به آن در صورت استفاده از فیلتر اکتیو موازی در شبکه پرداخته و عوامل موثر بر آن را بررسی می‌نماییم. در انتها نیز نتایج شبیه‌سازی‌های انجام شده برای یک شبکه توزیع توسط نرم افزار *MATLAB/SIMULINK* بر اساس این روش آورده شده و نشان داده می‌شود که در صورت عدم انتخاب محل صحیح برای نصب فیلتر اکتیو می‌توان شاهد کاهش کیفیت توان ناخواسته در شبکه توزیع و همچنین ناپایدار گشتن آن بود و تعیین محل نصب فیلتر اکتیو تا چه میزان بر امر جبران‌سازی و بهبود کیفیت توان شبکه و پایداری آن تأثیر گذار است.

۲- تعیین بهترین محل اتصال فیلتر اکتیو به شبکه

هر شبکه توزیع را می‌توان توسط تعدادی معادله جبری در حوزه فرکانس نمایش داد. هر معادله جبری نشان‌دهنده ارتباط میان تعدادی متغیر وابسته $X(s)$ با همان تعداد منبع جریان $I(s)$ و ولتاژ $V(s)$ از طریق ماتریس‌های تبدیل جریان و ولتاژ شبکه توزیع بترتیب H_I و H_V است. جریان باسها I_{bus} برابر مجموع بارهای غیرخطی I_{NL} ، جریان مدار معادل نرتن شبکه I_{norton} و جریان‌های تولید شده توسط منابع جریان کنترل شده موجود در شبکه نظیر فیلترهای اکتیو می‌باشد. ماتریس جریان هر باسی در شبکه توزیع از حاصلضرب ماتریس‌های ادمیتانس در ولتاژ آن باس و مطابق رابطه ۱ حاصل می‌شود.

$$I_{bus} = Y_{bus} \times V_{bus} \quad (1)$$

رابطه ۱ را با مد نظر قرار دادن هر یک از پارامترهای تشکیل دهنده جریان باسها می‌توان مطابق رابطه ۲ بیان نمود که در آن A_{NL} و A_{norton} بترتیب ماتریس‌های مربوط به جریان ناشی از بارهای غیرخطی و مدار معادل نرتن شبکه می‌باشند.

$$Y_{bus} \times V_{bus} = A_{NL}^T \times I_{NL} + A_{norton}^T \times I_{norton} \quad (2)$$

محدود نمودن مولفه‌های ناخواسته به یک محدوده مشخص می‌توان بازدهی و قابلیت اطمینان کل شبکه توزیع را بهبود بخشید [۱-۲]. محل اتصال فیلتر اکتیو در شبکه‌های توزیع بطور جدی بر عملکرد و جبران‌سازی جریان و ولتاژ شبکه توزیع تأثیر می‌گذارد [۳]. نحوه جبران‌سازی فیلتر اکتیو به مشخصات بار بستگی داشته و این فیلترها برای جبران‌سازی بارهایی با مشخصه یک منبع جریان بسیار مناسب هستند. چنین تحلیلی می‌تواند براحتی بر روی شبکه‌های توزیع کوچک و بر روی مدار معادل آنها شامل منبع ولتاژ، امپدانس تونن و بار غیرخطی براحتی صورت گیرد. با این وجود در شبکه‌های توزیع گسترده و شامل چندین باس و بارهای متفاوت و پراکنده، محل اتصال فیلتر اکتیو، عمل جبران‌سازی و موثر بودن استفاده از آنرا شدیداً تحت تأثیر قرار می‌دهد [۵-۴]. لازم به یادآوری است که انتخاب محل اتصال فیلتر اکتیو بایستی با در نظر گرفتن ساختار شبکه توزیع و نحوه قرار گرفتن بارهای مختلف در آن صورت گیرد در غیر اینصورت جریان‌های هارمونیک ایجاد شده توسط فیلتر اکتیو می‌توانند منجر به افزایش هارمونیکها و در نتیجه افزایش اعوجاج در شکل موج جریان و ولتاژ شبکه توزیع شده و احتمال بوجود آمدن تشدید و رزونانس در شبکه افزایش می‌یابد [۴-۵].

نکته بسیار مهم دیگر در تعیین محل نصب فیلترهای اکتیو موازی در شبکه‌های توزیع، بررسی پایداری سیستم کنترلی فیلتر اکتیو و نتیجتاً شبکه توزیع بعد از نصب فیلتر اکتیو با مطالعه دیگرام بود تابع تبدیل آن است که با مطالعه حد فازی می‌توان پایداری و ناپایداری آنرا بررسی نمود [۶]. بالطبع نصب فیلتر اکتیو در یک باس و اعمال سیستم کنترلی نایستی موجب ناپایدار شدن شبکه یا کاهش پایداری آن گردد.

در این مقاله یک روش تحلیلی بر اساس ماتریس انتقال ولتاژ و جریان شبکه توزیع برای تشخیص مناسبترین محل برای اتصال فیلتر اکتیو موازی به یک شبکه توزیع گسترده پیشنهاد و مورد استفاده قرار می‌گیرد. این بررسی بر مشاهده و مقایسه مشخصه امپدانس شبکه توزیع در صورت استفاده از فیلترهای اکتیو در باسهای متفاوت استوار است. بدلیل

بیستیمین کنفرانس بین‌المللی برق

$$H_{branchI} = Y_p \times A_{branch} \times H_I \quad (12)$$

$$H_{branchV} = Y_p \times A_{branch} \times H_V + Y_p \quad (13)$$

$$I_{branch} = H_{branchI} \times I_{NL} + H_{branchV} \times V_p \quad (14)$$

ماتریسهای تبدیل جریان H_I و $H_{branchI}$ ارتباط بین ماتریسهای ولتاژ و جریان القا شده به شاخه‌های شبکه توزیع را در صورت تزریق جریانی به یک باس شبکه نشان می‌دهند. از این روش می‌توان برای اندازه‌گیری میزان تأثیر جبران‌سازی فیلتر اکتیو در شبکه‌های توزیع گسترده و دارای چندین باس در صورت اتصال فیلتر اکتیو به یک باس مشخص در سایر باسهای شبکه صورت می‌گیرد. در این روش با مطالعه مشخصه‌های امپدانس شبکه توزیع و بررسی حالات ایجاد رزونانس در شبکه در صورت وجود المانهای سلفی پرداخته و بهترین محل اتصال فیلتر اکتیو را انتخاب می‌نماییم. از آنجائیکه فیلترهای اکتیو همانند منابع جریان کنترل شده عمل تزریق جریانهای هارمونیک به مدار جهت سینوسی شدن جریان باس اصلی شبکه توزیع برعهده دارند لذا عدم انتخاب محل صحیح و عدم بررسی محل نصب فیلتر اکتیو در شبکه می‌تواند موجب افزایش هارمونیکها و اعوجاج شکل موجهای برخی باسهای شبکه گردد از اینرو بررسی نتایج محل نصب فیلتر اکتیو میزان هارمونیکهای تزریق شده به هر باس بر اندازه هارمونیکهای جریان در باسهای دیگر شبکه ضروری است.

با رسم اندازه تغییرات هر یک از اعضای ماتریس جریان H_I بر حسب تغییرات فرکانس برای تمامی باسهای شبکه توزیع می‌توان فرکانسهای رزونانس شبکه را تعیین نموده و تأثیرگذاری آنها را بر باسهای مختلف بررسی نمود. همچنین به کمک این ماتریس می‌توان حساسیت ولتاژ شاخه‌های مدار معادل شبکه توزیع را بررسی نموده و باسی را که در صورت اتصال فیلتر اکتیو بدان میزان تأثیر جبران‌سازی در شبکه بیشترین مقدار می‌باشد، تعیین نمود. این بررسی را می‌توان با تعیین ماتریس H_I برای تمامی باسهای که فیلتر اکتیو را می‌توان به آنها متصل نمود انجام داده و برای هر ردیف آن ماتریس تغییرات فرکانسی را مورد بررسی قرار داد

با توجه به ویژگیهای هر شاخه شبکه توزیع و با فرض Y_p برابر ماتریس ادمیتانس و V_p برابر بردار ولتاژ، روابط ۳ برقرار بوده و با جایگذاری آنها در رابطه ۲، رابطه ۴ حاصل می‌گردد.

$$I_{norton} = Y_p \times V_p \quad , \quad A_{branch} = -A_{norton} \quad (3)$$

$$Y_{bus} \times V_{bus} = A_{NL}^T \times I_{NL} + \left(-A_{branch}^T \right) \times (Y_p \times V_p) \quad (4)$$

حال می‌توان ماتریس V_{bus} را با ضرب ماتریس Y_{bus}^{-1} در دو سمت رابطه ۴ مطابق رابطه ۵ بدست آورد.

$$V_{bus} = Y_{bus}^{-1} \times A_{NL}^T \times I_{NL} + Y_{bus}^{-1} \times \left(-A_{branch}^T \right) \times (Y_p \times V_p) \quad (5)$$

حال با فرض ماتریسهای تبدیل جریان و ولتاژ شبکه توزیع مطابق روابط ۶ و ۷ و با جایگذاری آنها در رابطه ۵ می‌توان ماتریس ولتاژ باسهای شبکه توزیع را از رابطه ۸ بدست آورد.

$$H_I = Y_{bus}^{-1} \times A_{NL}^T \quad (6)$$

$$H_V = Y_{bus}^{-1} \times \left(-A_{branch}^T \right) \times Y_p \quad (7)$$

$$V_{bus} = H_I \times I_{NL} + H_V \times V_p \quad (8)$$

با توجه به وابستگی ماتریس ولتاژ باس به ماتریس ولتاژ شاخه‌های شبکه توزیع از طریق ماتریس A_{branch} بصورت رابطه ۹ و با جایگذاری رابطه ۸ در آن، ماتریس ولتاژ شاخه را می‌توان بر حسب ماتریسهای انتقال جریان و ولتاژ مطابق رابطه ۱۰ نوشت.

$$V_{branch} = A_{branch} \times V_{bus} \quad (9)$$

$$V_{branch} = A_{branch} \times H_I \times I_{NL} + A_{branch} \times H_V \times V_p \quad (10)$$

ماتریس جریان هر شاخه شبکه توزیع I_{branch} برابر حاصلضرب ماتریس ادمیتانس در ماتریس ولتاژ است. چنانچه شاخه‌ای دارای یک منبع ولتاژ متصل به آن نباشد ماتریس ولتاژ برابر صفر می‌گردد ولی در صورتیکه ماتریس ولتاژ غیر صفر باشد، بایستی ماتریس V_p به ولتاژ شاخه اضافه گردد بنابراین ماتریس I_{branch} را می‌توان از رابطه ۱۱ بدست آورد.

$$(11)$$

$$I_{branch} = Y_p \times A_{branch} \times H_I \times I_{NL} + (Y_p \times A_{branch} \times H_V + Y_p) \times V_p$$

حال با فرض ماتریس تبدیل جریان و ولتاژ شاخه‌های شبکه توزیع بصورت $H_{branchI}$ و $H_{branchV}$ بصورت روابط ۱۲ و ۱۳، رابطه ۱۱ را می‌توان بصورت رابطه ۱۴ نمایش داد.

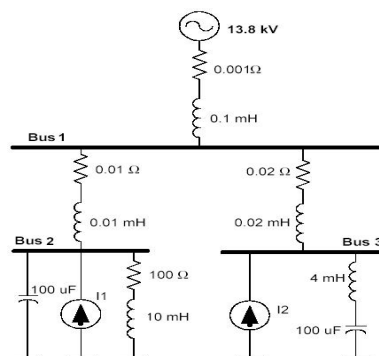
بیستین کنفرانس بین‌المللی برق

و $f = 50\text{Hz}$ ، ماتریس ادمیتانس شبکه Y_p و ماتریس A_{branch} بر واحد پریونیت بصورت رابطه ۱۵ محاسبه می‌شود. بکمک رابطه ۱۵ می‌توان ماتریس ادمیتانس شبکه Y_{bus} را از رابطه ۱۶ محاسبه نمود.

ماتریس A_{NL} مربوط به جریانهای بارهای غیرخطی دارای ستونهایی برابر تعداد باسهای شبکه و ردیفهایی برابر تعداد جریانهای غیرخطی با فرض ۱ برای ورود جریان به باس، ۱- برای خروج جریان از باس و صفر در صورت عدم وجود جریان غیر خطی در آن باس برای شبکه توزیع فوق بصورت $A_{NL} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ می‌باشد. آنگاه می‌توان ماتریس تبدیل جریان برای شبکه توزیع فوق H_I را بصورت رابطه ۱۶ محاسبه نمود.

حال به بررسی تغییرات هر یک از اعضای ماتریس H_I بر حسب فرکانس بصورت شکل ۲ پرداخته و فرکانس رزونانس هر یک را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

تا بتوان باسی را تعیین کرد که جبرانسازی ولتاژ ناشی از فیلتر اکتیو بیشترین تاثیرگذاری را دارد. نحوه انجام محاسبات و استفاده از این روش برای شبکه توزیع ساده شکل ۱ آورده شده است.



شکل ۱- تصویر شماتیک یک شبکه توزیع ساده

دو منبع جریان I_1 و I_2 بارهای غیرخطی شبکه توزیع هستند که به باسهای ۲ و ۳ متصلند. همچنین مشخصات هادیهای بین باسهای شبکه و نیز مشخصات بانک خازنی و فیلتر پسیو متصل به باسهای ۲ و ۳ نیز بر روی شکل مشخص می‌باشد. با فرض $V_{base} = 13.8\text{Kv}$ ، $S_{base} = 10\text{MVA}$

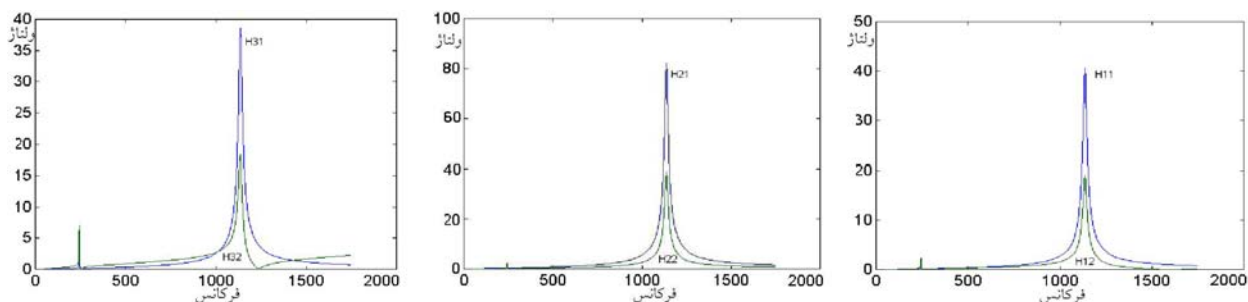
$$Y_p = \begin{bmatrix} 0.0008 - j0.9095 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.0083 - j0.9094 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0041 - j0.4547 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0045 - j0.005 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & j0.996 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -j0.0232 \end{bmatrix}, A_{branch} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$Y_{bus} = A_{branch}^T \times Y_p \times A_{branch} = \begin{bmatrix} 0.0132 - j2.2735 & -0.0083 + j0.9094 & -0.0041 + j0.4547 \\ -0.0083 + j0.9094 & 0.0128 + j0.1852 & 0 \\ -0.0041 + j0.4547 & 0 & 0.0041 - j0.4779 \end{bmatrix} \quad (16)$$

(۱۷)

$$H_I = Y_{bus}^{-1} \times A_{NL}^T = \begin{bmatrix} 0.01 + j0.1586 & 0.0116 - j0.7785 & 0.0095 + j0.1509 \\ 0.017 - j0.7785 & 0.017 - j1.5761 & 0.0114 - j0.7407 \\ 0.0095 + j0.1509 & 0.0114 - j0.7407 & 0.027 + j2.2359 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0116 - j0.7785 & 0.0095 + j0.1509 \\ 0.017 - j1.5761 & 0.0114 - j0.7407 \\ 0.0114 - j0.7407 & 0.0271 + j2.2539 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \\ H_{31} & H_{32} \end{bmatrix}$$

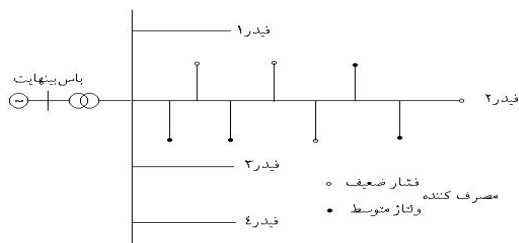
بیستیمین کنفرانس بین‌المللی برق



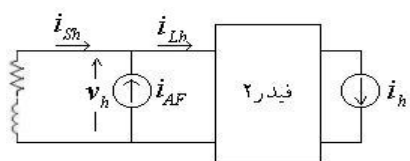
شکل ۲- تحلیل حساسیت ولتاژ اعضای ماتریس H_1 بر حسب تغییرات فرکانس و تعیین فرکانس رزونانس آنها

۳- تأثیر محل نصب فیلتر اکتیو بر پایداری شبکه

در صورت نصب فیلترهای اکتیو موازی در شبکه‌های توزیع برای بهبود کیفیت توان در این شبکه‌ها لازم است تا به بررسی پایداری شبکه پس از نصب این فیلترها پردازیم تا از ناپایدار شدن و یا کاهش پایداری شبکه‌ها جلوگیری گردد. پایداری فیلتر اکتیو به محل نصب فیلتر و سیستم کنترلی آن وابسته می‌باشد. برای این منظور لازم است تا مدار معادل شبکه توزیع با فرض وجود فیلتر اکتیو موازی رسم و تابع تبدیل آن برای سیستم‌های کنترلی مختلف بررسی گردد. با در نظر گرفتن شبکه توزیع بصورت شعاعی و دارای چندین فیدر موازی که بارهای غیرخطی را در شبکه ولتاژ متوسط و فشار ضعیف آن تغذیه می‌نماید و تصویر شماتیک آن بصورت شکل ۴ می‌باشد مدار معادل شبکه را با فرض فیلتر اکتیو موازی بصورت منبع جریان کنترل شده i_{AF} که جریانهای هارمونیک را به شبکه تزریق می‌نماید و بارهای شبکه بصورت منبع جریان هارمونیک i_h بصورت شکل ۵ می‌باشد.



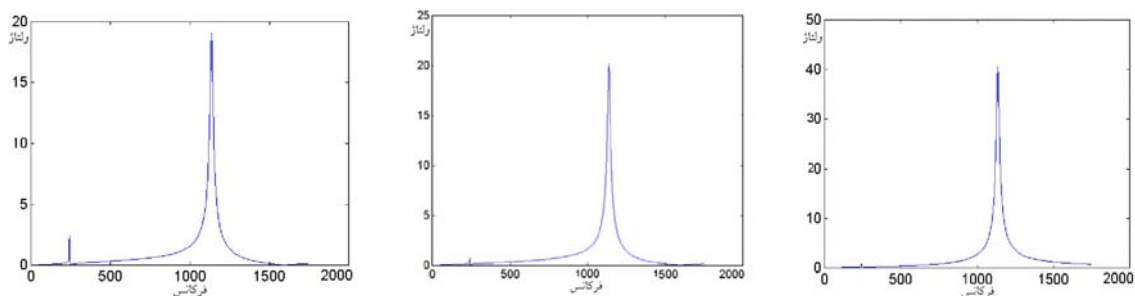
شکل ۴- تصویر شماتیک یک شبکه توزیع شعاعی



شکل ۵- مدار معادل شبکه توزیع دارای فیلتر اکتیو بعنوان منبع جریان

بررسی تحلیلهای حساسیت ولتاژ امکان تعیین بهترین باس برای نصب فیلتر اکتیو را جهت بهترین تأثیر در جبران‌سازی بر باس اصلی مهیا می‌کند. برای این منظور بایستی یک فیلتر اکتیو موازی به هر یک از باسهای شبکه وصل و میزان تغییر اندازه هارمونیکهای ولتاژ تمامی باسهای شبکه مورد بررسی قرار گیرد. ماتریس A_{NL} مربوط به جریانهای بارهای غیرخطی ماتریس قطری بوده و در صورت وجود فیلتر اکتیو در هر باس، عضو مربوطه در قطر اصلی آن ۱ و در صورت عدم وجود فیلتر اکتیو متصل به هر باسی، عضو مربوطه در قطر اصلی آن صفر خواهد بود که با فرض امکان نصب فیلتر اکتیو به باسهای ۱، ۲ و ۳ شبکه فوق، ماتریس $A_{NL} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ برقرار می‌باشد. حال می‌توان ماتریس تبدیل جریان شبکه H_I را از حاصلضرب ماتریس امپدانس شبکه Z_{bus} در ماتریس A_{NL}^T بدست آورد. آنگاه می‌توان تحلیل حساسیت ولتاژ را با ترسیم تغییرات هر یک از اعضای ماتریس H_I بر حسب تغییرات فرکانسی انجام داد. با انجام این تحلیل می‌توان نمودارهای شکل ۳ را بدست آورد که نتایج آن عبارتست از آنکه در صورت اتصال فیلتر اکتیو موازی به باس ۱ و تزریق جریانی برابر یک آمپر با فرکانس ۱۱۳۶ هرتز، ولتاژی برابر ۲۰ پریونیت در آن باس تولید می‌شود. همچنین اگر جریان یک آمپری با همان فرکانس به باس ۲ تزریق گردد، ولتاژی برابر ۴۰ پریونیت و در صورت تزریق همان جریان به باس ۳، ولتاژی برابر ۱۹ پریونیت در باس ۱ ایجاد می‌گردد که بترتیب از چپ به راست در شکل ۳ دیده می‌شود. به کمک این بررسی می‌توان دریافت در صورت اتصال فیلتر اکتیو به باس ۲، میزان جبران‌سازی در باس ۱ نسبت به اتصال فیلتر به باسهای ۱ و ۳ بسیار بهتر می‌باشد.

بیستین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل ۳- تحلیل حساسیت ولتاژ اعضای ماتریس H_I بر حسب تغییرات فرکانس با حضور فیلتر اکتیو بترتیب در باسهای ۱، ۲ و ۳ از راست به چپ

ولتاژ بار بترتیب از چپ به راست بصورت نشان داده شده در رابطه ۲۰، می‌توان بلوک دیاگرام کنترلی سیستم شبکه توزیع را بصورت نشان داده شده در شکل ۵ رسم نمود.

$$\begin{aligned} G_V(s) &= \frac{V_h(s)}{I_{AF}(s)} \\ G_S(s) &= \frac{I_{Sh}(s)}{I_{AF}(s)} \\ G_L(s) &= \frac{I_{Lh}(s)}{I_{AF}(s)} \end{aligned} \quad (20)$$

حال با فرض $K_V = 2$ و $K_S = 20$ برای شبکه توزیع شعاعی فوق و با فرض فیدرهای ۱، ۳ و ۴ قطع شده و بار فیدر ۲ برابر ۳ مگاوات، دیاگرامهای اندازه و فاز بود توابع تبدیل $G_L(s)$ ، $G_S(s)$ و $G_V(s)$ برای روشهای کنترلی فیلتر اکتیو موازی بر اساس تعیین جریان بار، جریان منبع و ولتاژ منبع برای حالات بارداری کامل و بی باری شبکه بترتیب از چپ به راست در شکل ۷ دیده می‌شود.

در نمودارهای شکل ۷ اگر برای زاویه صفر درجه، اندازه دامنه بیشتر از صفر دسی بل باشد، سیستم ناپایدار می‌گردد. برای روش کنترلی بر اساس جریان بار شکل ۷ (چپ)، سیستم کنترلی دارای حد فاز ۷-۶ درجه است لذا در حالت عملی بدلیل وجود تاخیر زمانی سیستم ناپایدار می‌گردد. همچنین برای روش کنترلی بر اساس جریان منبع شکل ۷ (وسط)، سیستم کنترلی دارای حد فاز برابر ۳۷ درجه در حالت بارداری کامل و ۲۲ درجه در حالت بی باری است لذا در حالت عملی سیستم ناپایدار می‌گردد. ولی برای روش کنترلی بر اساس ولتاژ منبع شکل ۷ (راست)، سیستم کنترلی دارای حد فاز بیشتر از ۹۰ درجه بوده و در حالت عملی سیستم پایدار خواهد بود.

سه روش کلی برای کنترل فیلتر اکتیو وجود دارد که شامل تعیین هارمونیکهای جریان بار، جریان منبع و ولتاژ منبع می‌باشد. با در نظر گرفتن شکل ۵ می‌توان جریان فیلتر اکتیو را برای حالات کنترلی ذکر شده بترتیب از چپ به راست در رابطه ۱۸ مشاهده نمود.

$$\begin{aligned} i_{AF} &= K_V \cdot v_h \\ i_{AF} &= K_S \cdot i_{Sh} \end{aligned} \quad (18)$$

$$i_{AF} = i_{Lh}$$

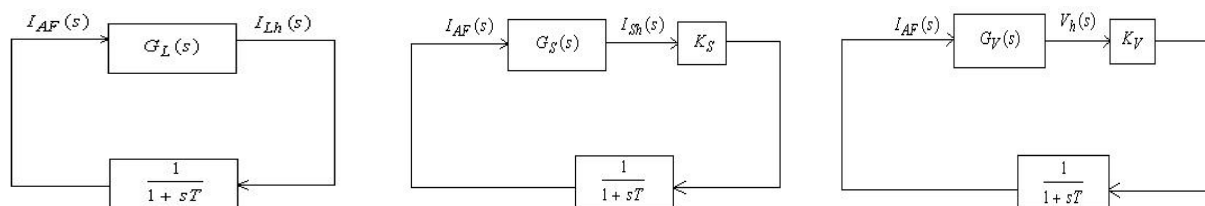
که در آن K_S بدون بعد و K_V دارای بعد $1/\Omega$ می‌باشد. اما از آنجاییکه در سیستمهای واقعی نمی‌توان از تاخیر زمانی محاسبه جریان و ولتاژ سیستم و تولید جریانهای هارمونیک فیلتر اکتیو صرفنظر نمود و با فرض تاخیر بصورت سیستم مرتبه اول می‌توان توابع تبدیل را برای سه حالت کنترلی بر اساس تعیین جریان بار، جریان منبع و ولتاژ منبع بترتیب از چپ به راست از رابطه ۱۹ بدست آورد.

$$\begin{aligned} I_{AF}(s) &= \frac{K_V}{1+sT} V_h(s) \\ I_{AF}(s) &= \frac{K_S}{1+sT} I_{Sh}(s) \\ I_{AF}(s) &= \frac{1}{1+sT} I_{Lh}(s) \end{aligned} \quad (19)$$

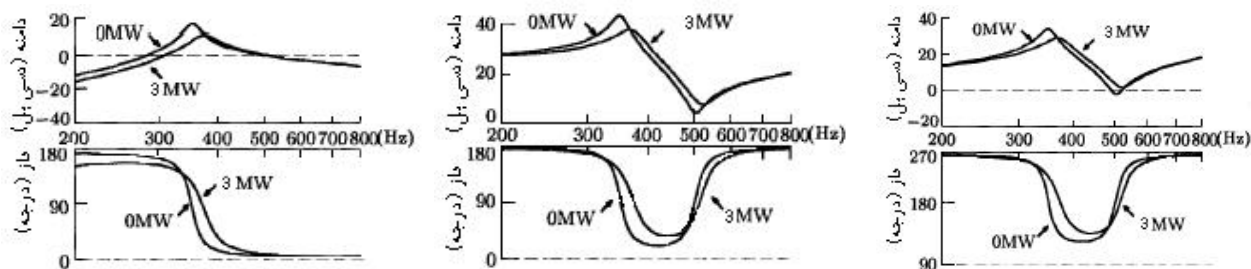
که برای روش کنترلی بر اساس تعیین ولتاژ منبع می‌توان رابطه فوق را بصورت $\frac{V_h(s)}{I_{AF}(s)} = \frac{1}{K_V} (1+sT)$ نوشت پس در اینحالت می‌توان فیلتر اکتیو را همانند یک بار اهمی سلفی با مقادیر $R_{AF} = \frac{1}{K_V}$ و $L_{AF} = \frac{T}{K_V}$ بترتیب بر حسب اهم و هانری نوشت.

حال با تعریف ماتریسهای تبدیل مربوط به هر یک از روشهای کنترلی تعیین بر حسب جریان بار، جریان منبع و

بیستیم کنفرانس بین‌المللی برق



شکل ۶- بلوک دیاگرام کنترلی حلقه باز فیلتر اکتیو به ترتیب از چپ به راست بر اساس روشهای تعیین جریان بار، جریان منبع و ولتاژ منبع



شکل ۷- دیاگرامهای بود توابع تبدیل $G_L(s)$ ، $K_S.G_S(s)$ و $K_V.G_V(s)$ برترتیب از چپ به راست برای حالات بارداری کامل و بی باری فیدر ۲

روشهای کنترلی فیلتر اکتیو با تشخیص جریان بار، جریان منبع و ولتاژ منبع در جدول ۱ دیده می شود.

در یک بررسی انجام شده برای شبکه توزیع شعاعی فوق با فرض نصب فیلتر اکتیو در ابتدا، وسط و انتهای فیدر ۲ اندازه حد فاز برای حالات بارداری کامل و بی باری و بر اساس

جدول ۱- مقایسه اندازه حد فاز برای تابع تبدیل سیستم کنترلی فیلتر اکتیو

بر اساس تشخیص جریان بار، جریان منبع و ولتاژ منبع در بارداری کامل و بی باری فیدر ۲

انتهای فیدر			وسط فیدر			ابتدای فیدر			محل نصب فیلتر اکتیو
ولتاژ	جریان	جریان	ولتاژ	جریان	جریان	ولتاژ	جریان	جریان	روش کنترل فیلتر اکتیو
منبع	منبع	بار	منبع	منبع	بار	منبع	منبع	بار	
۹۸	۸۳	پایدار	۹۶	۱۶	ناپایدار	۱۲۵	۳۷	۷	بارداری کامل
۹۴	۴۸	۲۷	۹۳	۹	ناپایدار	۱۱۰	۳۲	۶	بی باری

بر اساس تشخیص جریان بار یا جریان منبع و در صورت عدم وجود فیلتر پسیو یا بانک خازنی در بین محل نصب فیلتر اکتیو تا انتهای فیدر، سیستم پایدار خواهد بود. در صورت استفاده از روش کنترلی بر اساس تعیین ولتاژ منبع مستقل از محل نصب فیلتر اکتیو همواره اندازه حد فاز بیشتر از ۹۰ درجه است لذا این روش برای نصب فیلتر اکتیو در شبکه های توزیع گسترده و دارای فیلترهای پسیو و بانکهای خازنی پخش شده در شبکه از نقطه نظر پایداری سیستم بسیار مطلوب می باشد. از آنجاییکه برای ایده آل ترین حالت بهبود

با مطالعه جدول فوق می توان دریافت اندازه حد فازی به محل نصب فیلتر اکتیو در یک فیدر شعاعی شبکه توزیع وابسته بوده و در صورت نصب فیلتر اکتیو در وسط فیدر، دلیل منفی شدن اندازه فاز در روش تشخیص بر اساس جریان بار، سیستم ناپایدار می گردد و همچنین با همین روش کنترلی و در صورت نصب فیلتر اکتیو در انتهای فیدر آنکه دامنه تابع تبدیل برای تمامی فرکانسها کمتر از صفر دسی بل است، سیستم همواره پایدار خواهد بود. در حالت کلی در صورت نصب فیلتر اکتیو موازی در شبکه توزیع و کنترل آن

بیستمین کنفرانس بین‌المللی برق

۲ و ۳ نصب گردد، اندازه THD ٪ در آن باسها کاهش یافته ولی بدلیل رزونانس در باسهای ۴، ۵ و ۶ افزایش می‌یابد. لذا بهترین محل نصب فیلتر اکتیو در شبکه توزیع فوق، باس ۴ و کنترل آن به روش تعیین ولتاژ منبع است تا سیستم کنترلی نیز پایدار گردد.

۵- نتیجه گیری

در بررسی استفاده از فیلترهای اکتیو موازی بعنوان روشی موثر در جبران‌سازی توان راکتیو و حذف یا محدود کردن هارمونیکهای شبکه‌های توزیع، توجه به محل نصب فیلتر برای بهبود کیفیت توان تمامی باسهای موجود در شبکه و حفظ پایداری آن اهمیت خاصی دارد. از آنجاییکه فیلترهای اکتیو همانند منابع جریان کنترل شده عمل نموده و با مقایسه جریان بار، جریان منبع و یا ولتاژ منبع با شکل موجهای سینوسی، جریانهای هارمونیک را به مدار تزریق می‌کنند تا شکل موجهای شبکه سینوسی گردد، در صورت عدم انتخاب محل صحیح فیلتر اکتیو، امکان افزایش میزان هارمونیکها در بعضی از باسهای شبکه وجود دارد که موجب کاهش کیفیت توان کلی شبکه می‌گردد. همچنین سیستم کنترلی بکار رفته برای کنترل فیلتر اکتیو می‌تواند در صورت عدم انتخاب صحیح محل نصب آن موجب ناپایداری فیلتر اکتیو و حتی شبکه توزیع گردد. در این مقاله به بررسی تأثیرات محل نصب فیلتر اکتیو و روش کنترلی آن بر میزان جبران‌سازی و بهبود کیفیت توان شبکه‌های توزیع و نیز پایداری سیستم کنترلی فیلتر و شبکه پرداخته شد و توسط روش پیشنهاد شده، ابتدا به بررسی پاسخ فرکانسی و تحلیل حساسیت ولتاژ شبکه توزیع در باسهای مختلف شبکه در صورت نصب فیلتر در باسهای مختلف پرداخته و میزان اعوجاج قبل از نصب فیلتر و پس از آن را در تمامی باسهای شبکه مورد بررسی قرار دادیم تا بهترین محل نصب فیلتر را انتخاب نماییم. این نتایج با نتایج شبیه‌سازیهای انجام شده توسط نرم افزار $MATLAB/SIMULINK$ برای شبکه مورد بررسی بطور کامل مطابقت نموده و تأثیر محل نصب فیلتر اکتیو آشکار گردید.

کیفیت توان لازم است تا در کنار هر یک از بارهای مصرفی هارمونیک‌ها از فیلترها استفاده گردد ولی بدلائیل اقتصادی مناسب تر است تا فیلتر اکتیو تنها در انتهای هر فیدر شعاعی شبکه توزیع برای حذف و کاهش هارمونیکهای شبکه نصب و به روش تعیین ولتاژ منبع کنترل گردد زیرا به این ترتیب امپدانسهای فرکانسهای هارمونیک شبکه در تمام طول فیدر کاهش داده شده و برتری بیشتری در مقایسه با نصب فیلتر در ابتدای فیدر دارد که امپدانسهای مسیر فیدر را کاهش نمی‌دهد.

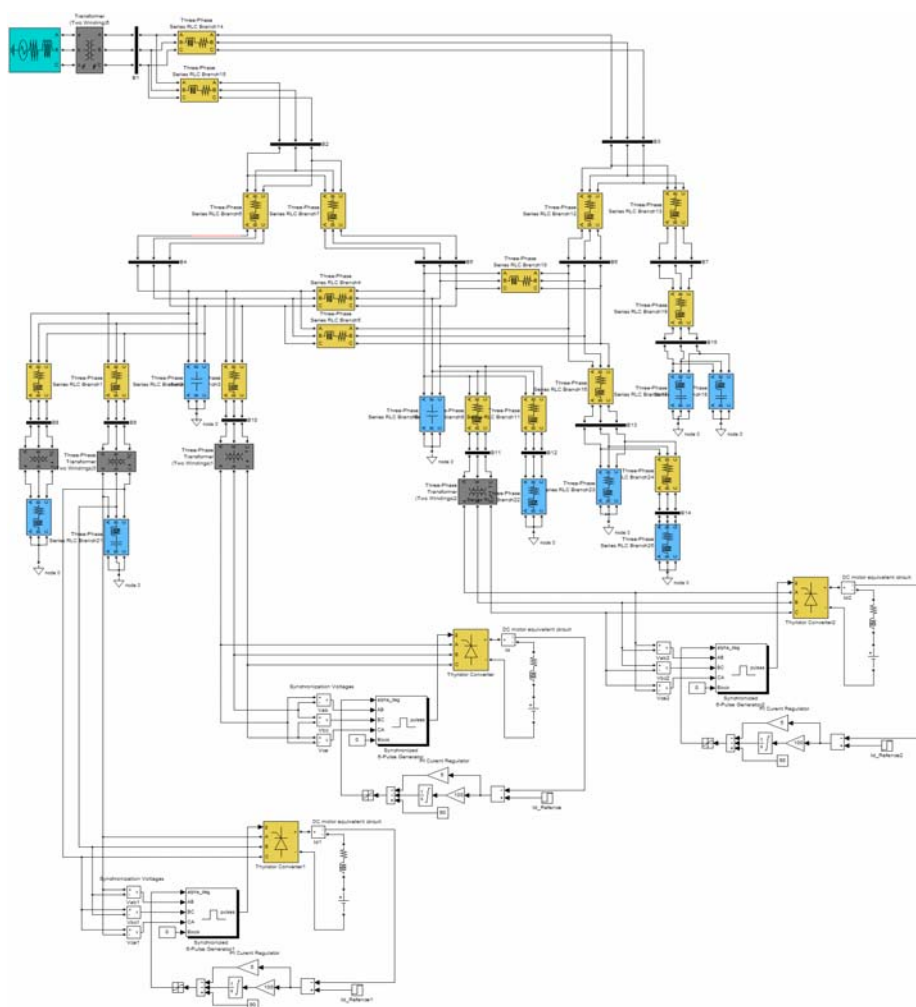
۴- نتایج تحلیل و شبیه‌سازی

در این قسمت برای بررسی تأثیر محل نصب فیلتر اکتیو بر میزان جبران‌سازی و بهبود کیفیت توان در باسهای مختلف شبکه‌های توزیع گسترده، یک شبکه بصورت شکل ۸ توسط نرم افزار $MATLAB/SIMULINK$ شبیه‌سازی شده و تأثیر استفاده از فیلترهای اکتیو نصب شده در باسهای ۱ تا ۷ آن را بر میزان هارمونیکهای دیده شده در سایر باسها مورد مطالعه قرار دادیم. بارهای غیرخطی بصورت منابع جریان کنترل شده در باسهای انتهایی دیده شده و در ساختار شبکه سه عدد فیلتر پسو توزیع شده در باسهای ۹ و ۱۵ برای حذف هارمونیکها بکار می‌رود. باس اصلی نیز دارای امپدانس کم بوده و مشابه یک باس بینهایت است.

با توجه به ساختار شبکه توزیع جریانهای هارمونیک تزریق شده به باسهای مختلف دارای مقادیر مختلفی هستند که اندازه آنها و نیز مقدار THD ٪ ایجاد شده ناشی از آن در تمامی باسهای شبکه در جدول ۲ دیده می‌شود.

بررسیهای تحلیل حساسیت ولتاژ نشان می‌دهند در صورت نصب فیلتر اکتیو در باس ۴ میزان جریان تزریقی توسط فیلتر اکتیو در مقایسه با حالات نصب در سایر باسها کاهش یافته و نیز میزان THD ٪ در تمامی باسهای دیگر کاهش یافته است. مقادیر جدول ۲ نیز بیان می‌کنند که در صورت نصب فیلتر در باس ۴ میزان THD ٪ در تمامی باسهای دیگر کاهش یافته است ولی در صورتیکه فیلتر در باسهای ۱،

بیستمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل ۸- شبکه توزیع دارای باسهای متعدد و بارهای غیرخطی

جدول ۲- اندازه هارمونیک‌های تزریق شده توسط فیلتر اکتیو در باسهای مختلف و میزان $THD\%$ ناشی از آن در سایر باسها

میزان $THD\%$ موجود در باسهای مختلف

میزان جریان تزریقی توسط فیلتر اکتیو

باس ۶	باس ۵	باس ۴	باس ۳	باس ۲	باس ۱	بدون فیلتر	h_{17}	h_{13}	h_{11}	h_7	h_5	h_1	I_{RMS}	
۰	۰	۰	۰	۰	۰	۳/۹۲	۶۵	۳۲۹	۳۰۷	۲۴۹	۳۰۹	۱۰۷۱	۱۲۳۰	باس ۱
۰/۱۶	۰	۰	۱/۴۷	۰/۵۹	۱/۵۱	۵/۱۵	۸۶	۳۶۶	۲۶۷	۲۴۲	۳۰۹	۱۰۷۳	۱۲۳۳	باس ۲
۰/۱۶	۰	۰	۱/۴۷	۰/۵۸	۰/۶۴	۴/۴۰	۷۴	۳۵۹	۲۹۳	۲۵۱	۳۱۰	۱۰۷۲	۱۲۳۷	باس ۳
۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۲۷	۰/۲۵	۱۲/۵۷	۱۴/۲۲	۵۹	۸۷	۱۰۹	۱۹۷	۲۹۷	۱۰۷۵	۱۱۴۴	باس ۴
۱/۲۷	۱/۲۲	۱/۱۳	۱۱/۳۹	۱۰/۶۱	۱۱/۶۹	۱۳/۳۵	۶۶	۹۳	۱۱۶	۲۰۵	۳۰۹	۱۰۷۳	۱۱۵۰	باس ۵
۲/۵۵	۰/۰۶	۰/۰۶	۹/۳۵	۹/۰۹	۹/۹۹	۱۲/۰۲	۹۳	۱۱۱	۱۲۹	۲۱۰	۳۰۶	۱۰۷۵	۱۱۷۹	باس ۶
۰/۱۶	۰	۰	۱/۴۶	۰/۵۸	۰/۶۴	۴/۳۶	۷۵	۳۶۲	۲۹۶	۲۵۵	۳۱۰	۱۰۷۱	۱۲۳۹	باس ۷

- [1] H. Akagi, S. Srianthumrong, Y. Tamai, "Comparisons in circuit configuration and filtering performance between hybrid and pure shunt active filters", *IEEE 38th Conf. on Industry Applications*, Vol. 2, pp.1195-1202, Oct. 2003.
- [2] D. Rivas, L. Moran, J. Dixon, J.R. Espinoza, "Improving passive filter compensation performance with active techniques", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 50, No. 1, pp. 161-170, Feb. 2003.
- [3] L. Moran, J. Mahomar, J. Dixon, "Selecting the best point of connection for shunt active filters in multi-bus power distribution systems", *IEEE/IAS 37th Conf. on Industry Applications*, Vol. 3, pp. 1703-1709, Oct. 2002.
- [4] F. Yamamoto, A. Kitamura, N. Fujita, Y. Nakanishi, M. Nagasawa, "A study on optimal locations and sizes of active filters as an additional function of distributed generation systems", *IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics*, Vol. 6, pp. 515-520, Oct. 1999.
- [5] Y. Y. Hong, Y. K. Chang, "Determination of locations and sizes for active power line conditioners to reduce harmonics in power systems", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 1, No. 1, pp. 1610-1617, July 1996.
- [6] H. Akagi, "Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 12, No. 1, pp. 354-