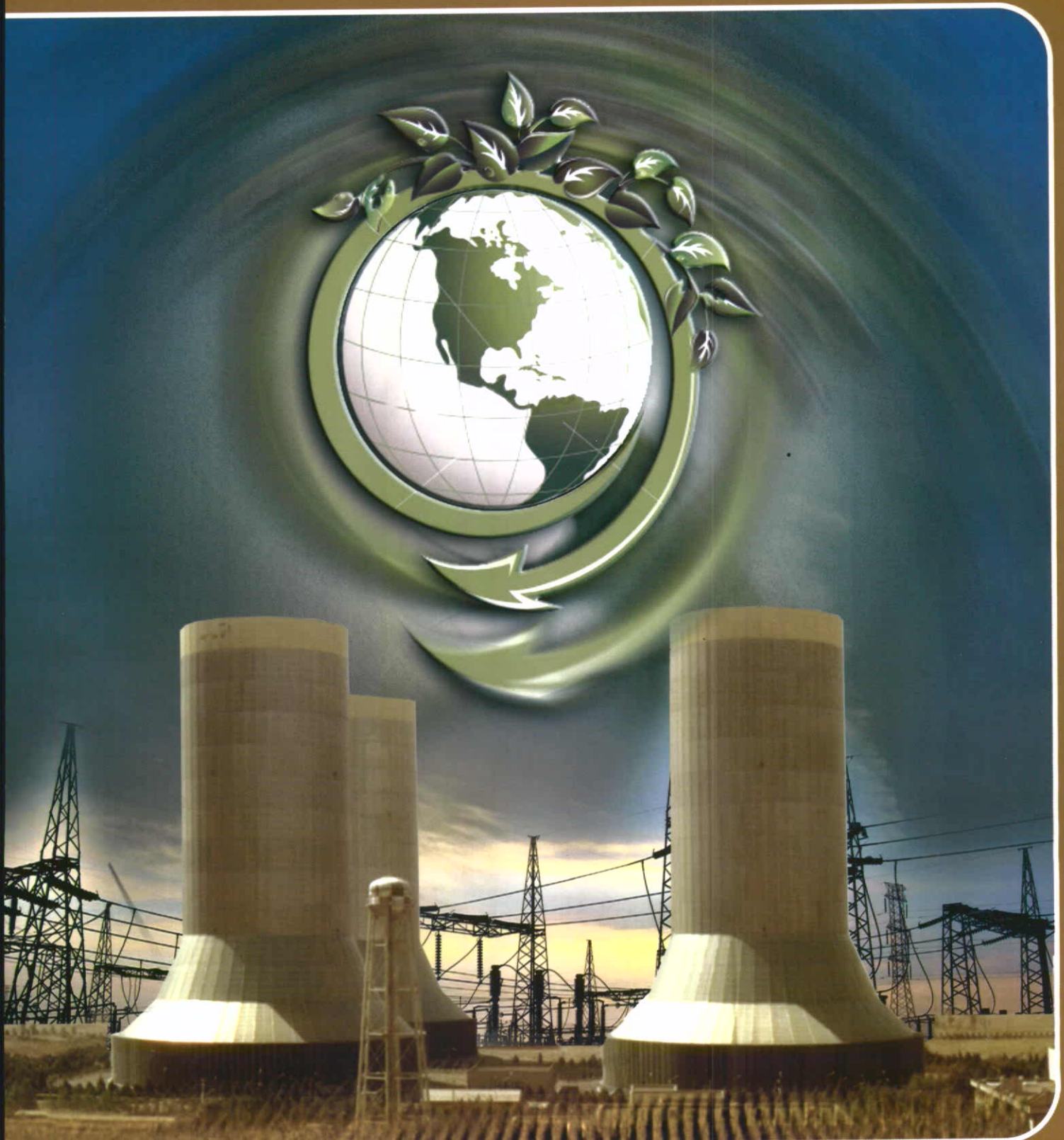


نشریه فنی تخصصی قدس نیرو
شماره ۳۸ - پاییز ۱۳۹۰

شرکت مهندسی

قدس نیرو





واحد مدیریت شبکه های انتقال و توزیع نیرو



امکانات گسترده نرم افزاری و سخت افزاری، کارکنان متخصص، بهره گیری از نرم افزارها و دانش فنی روزآمد و تجربیات گرانبهای سی و پنج ساله در طراحی، نظارت و اجرای بیش از بیست و پنج هزار کیلومتر خطوط انتقال و توزیع نیرو در شرکت مهندسی قدس نیرو پشتوانه وزینی برای طرح های صنعت برق کشور است.

واحد مدیریت شبکه های انتقال و توزیع نیرو در این شرکت در زمینه های زیر همکار امین و مورد اعتماد شماست :

خدمات مشاوره شامل طراحی و نظارت بر اجرای خطوط انتقال نیرو در همه سطوح ولتاژ
خدمات مهندسی و تدارکات برای خطوط انتقال نیرو در همه سطوح ولتاژ
اجرای پروژه های خطوط انتقال نیرو در همه سطوح ولتاژ
خدمات مشاوره شامل طراحی و نظارت بر اجرای شبکه های توزیع شهری و روستایی
خدمات مهندسی و تدارکات برای شبکه های توزیع شهری و روستایی
اجرای طرحهای توزیع به صورت کلید در دست
برنامه ریزی و مطالعات سیستم های قدرت
مطالعات طرحهای جامع کوتاه، میان و بلندمدت شبکه های برق
مطالعات بهینه سازی شبکه های قدرت و رفع معایب
مطالعات ریسک سیستم های قدرت و طراحی روشهای بهبود
مطالعات شبکه های توزیع صنعتی و طراحی اقدامات اصلاحی موردنیاز
طراحی و توسعه نرم افزارهای مهندسی

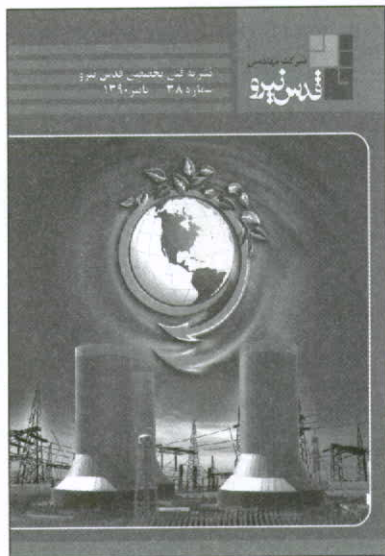


طراحی و ساخت تجهیزات موردنیاز برای مکانیزاسیون شبکه های توزیع
خدمات کامل مهندسی نقشه برداری با ارائه راه حل های جامع و کاربردی با بهره برداری از مدرن ترین سخت افزارها و نرم افزارهای مهندسی

No. 82 Ostad Motahari Ave.
Tehran 1566775353/IRAN
Tel (+9821) 88403613- 82404000
Fax: (+9821) 88411704
WWW.ghods-niroo.com

آدرس : تهران، خیابان استاد مطهری،
بعد از چهارراه سهروردی، شماره ۸۲
کدپستی : ۱۵۶۶۷۷۵۳۵۳
تلفن : ۸۸۴۰۳۶۱۳-۸۲۴۰۴۰۰۰
فاکس : ۸۸۴۱۱۷۰۴

بسمه تعالی



نشریه فنی تخصصی قدس نیرو

شماره ۳۸ - پاییز ۱۳۹۰

مدیر مسئول: دکتر محمود مقدم

سر دبیر: مهندس فتانه دوستدار

با تشکر از همکاری آقایان:

- مهندس احمد اهرابی
- مهندس حسین بختیاری زاده
- مهندس احمد فریدون درافشان
- مهندس میر داود حسینی میلانی
- دکتر همایون صحیحی
- مهندس منصور قزوینی

از مدیر و همکاران محترم امور پشتیبانی سپاسگزاریم.

فهرست مطالب

- معرفی ۱
- کنترل غیر خطی - فرید خزانلی مقدم ۲
- هارمونیک در سیستم های الکتریکی - کاوس قصبه ۱۴
- طراحی عایق بندی خط انتقال HVDC سمنان - دامغان - ۲۶
علیرضا رئیسی، کامران رضایی
- برقگیر پوشینگی - منیره موحیدیان ۴۰
- عوامل موثر در تبدیل شرکتهای مهندسين مشاور به شرکت های
EPC - سعید رحمانی جو ۴۶

هیئت داوران:

مهندس پورنگ پاینده، مهندس مسعود حبیب...زاده،
مهندس فتانه دوستدار، مهندس رضا
رضوی، مهندس داریوش چگینی، مهندس داودزاور،
مهندس فرهاد شاهمنصوریان، دکتر جعفر عسگری،
مهندس آرمین علیدوستی، مهندس امیرهمایون فتحی،
مهندس بهرام کرمانی، مهندس علی اصغر کسائیانی،
مهندس محسن کمالی زاده، مهندس بهزاد مرادی،
مهندس وحید مرتضوی، مهندس مهرداد
مستقیمی، مهندس الهام ملک، مهندس
محمد رضا نصرالهی، مهندس رسول نحوی زاده،
مهندس بهروز هنری.

این نشریه از طریق اینترنت قدس نیرو در دسترس همکاران می باشد. ارتباط مستقیم با مقاله دهندگان از طریق Email یا فاکس
آنان در انتهای هر مقاله و همچنین ارائه نظرات، پیشنهادات و سؤالات احتمالی خوانندگان گرامی از طریق اینترنت قدس نیرو و یا
شماره تلفن نشریه ۸۸۴۴۲۴۸۲ امکان پذیر می باشد.

کنترل غیر خطی STATCOM مبتنی بر اینورتر پل H- در حضور فیلتر

فرید خزانلی مقدم

کارشناس ارشد سیستم های قدرت - SBU شبکه

واژگان کلیدی: استتکام، مدل واقعی شبکه قدرت، کنترل کننده غیرخطی، حذف مولفه های هارمونیک، طراحی فیلتر

چکیده

حرکت انقلابی در راستای به کارگیری جبران سازه های موازی در صنایع به جبران ساز سنکرون ایستا (استتکام)¹ منتهی می شود. این جبران ساز در مواردی که نیاز به دینامیک بالا و قابلیت کنترلی کامل روی سطح ولتاژ و جریان است به صورت گسترده در صنعت مورد استفاده قرار می گیرد؛ لیکن برای کاهش محتوای هارمونیک در خروجی مجموعه و جلوگیری از کاهش کیفیت توان تزریقی به شبکه، نیاز به استفاده از فیلتر به عنوان یکی از مرسوم ترین روش های کاهش مؤلفه های هارمونیک ناخواسته احساس می شود. از طرفی همان طور که می دانیم در صورت استفاده از فیلتر به جهت اثر بارگذاری که شاخه فیلتر دارد معادلات سیستم تغییر یافته و نیازمند طراحی مجدد کنترلر برای مجموعه STATCOM هستیم. در کلیه کارهای تحقیقاتی که پیرامون این مبحث، صورت گرفته اند مدلی سیگنالی از شبکه قدرت و استتکام ارائه گشته است. با به کارگیری چنین مدلی، امکان در نظر گرفتن و پیاده سازی فیلتر بسیار پیچیده و دشوار است. حضور فیلتر در شبکه هایی که شامل ادوات FACTS² و الکترونیک قدرت هستند امری ضروری در جهت کاهش و حذف مولفه های هارمونیک ناخواسته است. از طرف دیگر نیاز به پیاده سازی مدل واقعی یک شبکه قدرت همراه با استتکام همواره احساس می شود. چنین مدلی، ما را توانمند به بررسی کلیه مسائلی که در شبکه قدرت مطرح است می کند. این بررسی ها عبارتند از: آنالیز خطا، آنالیز پایداری و حوادث احتمالی که در تعامل مجموعه استتکام با شبکه امکان رخداد آنها وجود دارد. از دیگر امکاناتی که با بهره گیری از این مدل حاصل می شود می توان به فراهم شدن قابلیت بررسی تغییراتی که از افزوده شدن و یا حذف یک سخت افزار جدید در شبکه قدرت حاصل می شود اشاره نمود. این مقاله، ضمن ارائه مدلی جامع و واقعی از استتکام، کنترل کننده غیرخطی آن و سیستم قدرت، امکان کاهش مولفه های هارمونیک را از طریق طراحی فیلتر قدرت مناسب، ممکن می سازد و این در حالیست که دیگر نیازی به حل معادلات پیچیده ای که در مدل های پیشین (مدل سیگنالی) با آنها روبرو بودیم نخواهیم داشت.

۱-مقدمه

امروزه استفاده از ادوات FACTS در راستای تحقق مسائل مطروحه در کیفیت توان با اهداف کنترل پروفیل ولتاژ و تامین توان راکتیو بار بسیار متداول شده است. دینامیک سریع و کنترل پیوسته ای که روی سطح ولتاژ حاکم است و سایر محاسنی که در ادامه مطرح می شود این وسایل را به تجهیزاتی منحصر به فرد در سیستم قدرت تبدیل کرده است. نمونه ای از ادوات FACTS که امروزه به وفور مورد استفاده قرار می گیرد و به طور گسترده در تحقیقات علمی که پیرامون ادوات FACTS صورت می گیرد عنوان می شود STATCOM (استتکام) است. این تجهیز مزایای بی نظیری از قبیل بهبود مسائل مطرحه در حیطه کیفیت توان از جمله

بهبود ضریب توان، حفظ سطح و پایداری ولتاژ و سایر مواردی که در ادامه عنوان خواهد شد را ارائه می دهد. کاربرد بی نظیر استتکام در جبران توان راکتیو توأم با پاسخ دینامیکی سریع، آن را به یک تجهیز منحصر به فرد جهت استفاده در شبکه های قدرت تبدیل نموده است. مزایای دیگری که استتکام نسبت به دیگر تجهیزات مرسوم FACTS ارائه می دهد سرعت پاسخ، جبران فلیکرا، انعطاف پذیری بیشتر در جبران و کمترین میزان فعل و انفعال با منبع تغذیه است.

1-STATic COM pensator (STATCOM)

2-Flexible AC Transmission System

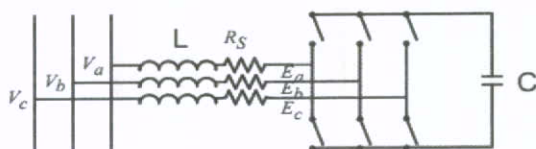
مسائل اصلی پیش روی ما در استفاده از این تجهیز، نوسانات ولتاژ dc منبع (خازن ها) و نیز غیرخطی بودن معادلات حاکم بر این سیستم است. مسئله مهم دیگر که کاربرد این تجهیزات را تحت الشعاع قرار می دهد تزریق هارمونیک ها به شبکه است که کیفیت شبکه را تحت تأثیر قرار می دهد. جهت تحقق اهداف پیش رو، نیاز به طراحی یک سیستم کنترلی مناسب احساس می شود. در جهت تحقق این امر، مقالات متعددی کنترل کننده خطی را پیشنهاد داده اند و عده ای دیگر استفاده از کنترل کننده غیرخطی را مطرح کرده اند. قانون کنترل غیرخطی در واقع نوعی خطی سازی با استفاده از فیدبک است. از آنجاییکه معادلات حاکم بر سیستم، غیرخطی هستند استفاده از کنترل کننده غیرخطی مفیدتر به نظر می رسد. کنترل کننده غیرخطی به خودی خود به دو نوع SISO و MIMO تقسیم می شود؛ که در نوع اول تنها پارامتر خروجی i_q است لذا در این نوع کنترلر ولتاژ dc خازن ها کنترل نمی شود که این امر منجر به اعوجاج در خروجی های سیستم می شود اما در نوع دیگر (MIMO) پارامتر دیگری نیز وجود دارد که کنترل می شود که این پارامتر ID یا VDC می باشد. اگر id انتخاب گردد با متد کنترل غیرمستقیم Vdc روبرو هستیم اما اگر پارامتر کنترلی دیگر Vdc باشد با روش کنترل مستقیم Vdc روبرو هستیم. در روش کنترل مستقیم، ولتاژ خازن ها با حداقل نوسان نسبت به ولتاژ dc کنترل می شود؛ همچنین کنترلر PI که در روش کنترلی غیرمستقیم مورد استفاده قرار می گیرد حذف می شود. در مقابل این مزایای حاصله، مشکلی را نیز در پی دارد و آن کاهش بازه تغییرات δ به علت افزایش نسبی مقدار آن نسبت به روش غیرمستقیم می باشد. بنابراین دستیابی به بالاترین سطح نسبی از مزیت ها نیازمند اعمال روش های کنترل بهینه می باشد. در این مقاله سیستم کنترلی ارائه شده، کنترلی چندرودی چند خروجی (MIMO)، براساس کنترل غیرمستقیم ولتاژ خازن (Vdc) می باشد. همان طور که قبلا گفته شد مسئله مهمی که در به کارگیری ادوات FACTS باید بدان توجه کرد تزریق هارمونیک ها توسط این ادوات به شبکه می باشد. به طور کلی در هر وسیله ای که از تجهیزات الکترونیک قدرت در ساخت آن استفاده می شود حضور مؤلفه های هارمونیک امری طبیعی است.

در برخورد با این مسئله مهم اولین راهی که به ذهن می رسد

استفاده از فیلتر است. اما مسئله مهمی که مطرح است این است که در استفاده از فیلتر به موجب اثر بارگذاری و جریانی که شاخه فیلتر می کشد معادلات حاکم بر سیستم تغییر می کند و طراحی یک سیستم کنترلی جدید متناسب با معادلات تازه سیستم پیش روی (سیستم پیشین همراه با حضور فیلتر) را می طلبد. چنین امری استفاده از فیلتر و طراحی کنترلر را در شرایط جدید پیچیده می کند زیرا که کنترلر پیشین پاسخگوی سیستم فعلی نبوده و از طرف دیگر با توجه به ترم های اضافه شده به معادلات، اعمال تبدیل d,q جهت طراحی کنترلر متناسب با سیستم کنونی، به سادگی روال پیشین نیست. در این مقاله برای حل مشکل مطرح شده، یک سیستم مدل سازی جدید ارائه می شود. که استفاده از فیلتر در خروجی استتکام را بدون هیچ نیازی به تغییر در ساختار سیستم کنترلی که قبل از استفاده از فیلتر مورد استفاده بود ممکن می سازد. مزیت دیگری که با استفاده از این نوع مدل سازی سیستم به دست می آید شبیه سازی یک مدل واقعی از شبکه قدرت است؛ لذا امکان بررسی کلیه وقایعی که در یک شبکه واقعی امکان رخداد آنها وجود دارد بدین وسیله محقق خواهد شد. در بخش اول قانون کنترل غیرخطی بر اساس کنترل غیرمستقیم Vdc را ارائه می دهیم. در بخش دوم در مورد فیلترها و معیارهای کاهش و حذف هارمونیک ها صحبت خواهیم کرد، در ادامه سیستم مدل سازی نوینمان را به همراه کاربرد فیلتر خواهیم آورد؛ سپس در قسمت پایانی نتایج شبیه سازی و نتیجه گیری را پیش رویمان خواهیم داشت.

۲- قانون کنترل غیرخطی STATCOM

رفتار کلی استتکام در اتصال به شبکه قدرت در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل (۱): رفتار کلی استتکام

مدل شبکه همراه با جزئیات بیشتر در ادامه مطرح خواهد شد. در این مدل خطوط انتقال و تجهیزات کلیدزنی که اینورتر را

معادلات حالت سیستم مفروض با به کاربردن رابطه (۱) به صورت رابطه (۳) نوشته می شوند :

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L} \cdot x_1 + \omega \cdot x_2 + \frac{V_s}{L} \\ -\omega \cdot x_1 - \frac{R_s}{L} \cdot x_2 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{x_3}{L} \\ 0 \\ \frac{3x_1}{2C} \end{bmatrix} u_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{x_3}{L} \\ \frac{3x_2}{2C} \end{bmatrix} u_2 \quad (3)$$

بردار حالت X بصورت رابطه (۴) است :

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} id \\ iq \\ v_{dc} \end{bmatrix} \quad (4)$$

و u_1, u_2 که پارامترهای کنترلی ورودی هستند به صورت مطرح شده در رابطه ۵ تعریف می شوند :

$$U = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m \cdot \cos(\delta) \\ m \cdot \sin(\delta) \end{bmatrix} \quad (5)$$

و با ساده سازی v_1, v_2 با تعریف پارامترهای ورودی جدید می توانند به u_1, u_2 معادلاتی که در بخش قبل مطرح شد، صورت ارائه شده در رابطه (۶) نوشته شوند :

$$U = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{L}{x_3} & 0 \\ 0 & -\frac{L}{x_3} \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L} \cdot x_1 + \omega \cdot x_2 + \frac{V_s}{L} \\ -\omega \cdot x_1 - \frac{R_s}{L} \cdot x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{x_3}{L} \left(\frac{R_s}{L} \cdot x_1 - \omega \cdot x_2 - \frac{V_s}{L} + v_1 \right) \\ -\frac{L}{x_3} \left(\omega \cdot x_1 + \frac{R_s}{L} \cdot x_2 + v_2 \right) \end{bmatrix} \right) \quad (6)$$

v_1, v_2 در واقع خطاهای سیستم کنترلی نیز هستند که با الگوریتم خطی سازی با فیدبک مقدار آنها به صفر میل می کند . طراحی سیستم کنترلی به صورت زیر انجام می شود برای شبیه سازی سیستم در گام اول ورودی های سیستم یعنی v_1, v_2 تعیین میشوند . با بررسی و مقایسه معادلات (۳) و (۶) به روابط (۷) و (۸) می رسیم :

مدل می کنند نشان داده شده اند . خازن منبع تغذیه DC را مدل می کند ، اندوکتانس L شار ناشی ترانس را مدل می کند و مقاومت R_s نیز مقاومت مسی سیم پیچ ترانس و تلفات کلیدزنی تجهیزات کلیدزنی را مدل می کند . چنانچه گفته شد در این قسمت به بررسی کنترل غیرخطی استتکام برپایه کنترل غیرخطی V_{dc} می پردازیم . در این نوع مدل کنترلی ورودی های سیستم کنترلی M و δ هستند که به صورت زیر تعریف می شوند :

M : شاخص مدولاسیون

δ : زاویه میان ولتاژ خروجی اینورتر و ولتاژ خط انتقال

در مقایسه با مدل SISO یک ورودی کنترلی جدید است که در معادلات کنترلی سیستم ظاهر می شود که نتیجه چنین عملی کنترل ولتاژ بخش DC با کمترین نوسان ولتاژ و دستیابی به پاسخ دینامیکی مطلوب است . خروجی جدید سیستم کنترلی در قبال این ورودی جدید id است که به واسطه کنترل آن V_{dc} نیز کنترل می شود از این روی به این متد کنترلی کنترل غیرمستقیم V_{dc} گفته می شود . معادلات حاکم بر سیستم در این قسمت ارائه می شوند . به خاطر پیشگیری از پیچیدگی در طراحی کنترلر با کنترلی ۳ بعدی ، تبدیل d, q را بکار می بریم . بنابراین معادلات ۳ فاز نوشته شده تغییر کرده و برپایه تبدیل d, q ساده می شوند .

فرم کلی معادلات حالت به صورت رابطه (۱) می باشد :

$$\dot{x} = f(x) + \sum_{i=1}^m g_i(x) \cdot u_i \quad (1)$$

با نوشتن معادلات KVL و بکارگیری تبدیل d, q معادلات ارائه شده در رابطه (۲) حاصل می شوند :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} id \\ iq \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L} & \omega \\ -\omega & -\frac{R_s}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} id \\ iq \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} V_d - E_d \\ V_q - E_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

id, iq, v_d, v_q با اعمال تبدیل d, q به ولتاژها و جریان های سه فاز حاصل می شوند . ما ولتاژ v_d را منطبق بر فاز a در نظر می گیریم لذا مقدار صفر ($v_q=0$) می گیرد و ولتاژ v_d در سیستم ولتاژ فاز a در نظر گرفته می شود.

حال روش کنترلی پیشنهادی را ارائه می دهیم :

$$V_2 = \lambda 2(i_q^* - i_q) \quad (12)$$

در ادامه به کمک رابطه (۶) u_1 , u_2 محاسبه شده و در نهایت δ , M از طریق رابطه (۵) و به کمک جایگزینی مقادیر فوق حاصل می آیند . موج سینوسی مرجع مناسب جهت اعمال به سوئیچ های قرار گرفته در ساختار اینورتر در مجموعه استتکام با δ , M به دست آمده از سیستم کنترلی (مطالب بخش قبلی) ایجاد شده و بنابراین سیستم کنترلی مطلوبمان که هم توان راکتیو بار را دنبال می کند و هم نوسانات ولتاژ خازن ها را حداقل می کند مهیا می شود .

۳- فیلترها و روش های کاهش هارمونیک ها در شبکه قدرت

اینورتری که در ساختمان استتکام مورد استفاده قرار گرفته است یک اینورتر پل سه سطحی است که از تکنیک سوئیچینگ SPWM^۱ در آن استفاده شده است . در بخش قبلی ، نحوه ساخت سیگنال سینوسی مرجع مناسب جهت آتش کردن مناسب گیت سوئیچ ها مورد بررسی قرار دادیم (این در واقع همان مفهوم کنترل پذیری در استتکام است) . تشکیل سیگنال سینوسی مناسب با ایجاد مقادیر مناسب M , δ توسط سیستم کنترلی امکان پذیر گشت . در واقع مقداری از M که از خروجی سیستم کنترلی حاصل می شود دامنه سیگنال سینوسی را تعیین می کند و زاویه δ حاصل آمده نیز میزان تاخیر فازی این سیگنال را مشخص می کند . همانطور که می دانیم خروجی اینورتر مورد استفاده (و به طور کلی همه اینورترها) ، مربعی است بنابراین حضور هارمونیک ها در شبکه امری طبیعی غیر قابل چشم پوشی است . در قسمت بعد بر روی فاکتورهای بررسی و ارزیابی هارمونیک ها در شبکه تمرکز می کنیم . همچنین شیوه های کاهش و حذف هارمونیک ها در شبکه های قدرت به تشریح ذکر خواهد شد .

۳-۱- فاکتور THD^۲

یکی از کاربردی ترین فاکتورها در بررسی و تعیین محتوای هارمونیکی شبکه THD^۳ است . این فاکتور به کمک رابطه (۱۳) تعریف می شود :

$$v_1 = i_d^* \quad (7)$$

$$v_2 = i_q^* \quad (8)$$

از طرفی i_d , i_q با توابع حلقه بسته ارائه شده در روابط (۹) و (۱۰) تعریف می شوند :

$$\frac{i_d}{i_d^*} = \frac{1}{1 + \frac{s}{\lambda_1}} \quad (9)$$

$$\frac{i_q}{i_q^*} = \frac{1}{1 + \frac{s}{\lambda_2}} \quad (10)$$

i_d^* , i_q^* مقادیر رفرنس i_d , i_q هستند .

λ_1 , λ_2 تعیین کننده سرعت پاسخ کنترلر طراحی شده به میرایی نوسانات ولتاژ منبع DC و دنبال کردن میزان توان راکتیو مورد نیاز بار است .

در مدل ما i_q جریان خروجی مجموعه استتکام است (مؤلفه q جریان خروجی استتکام بعد از اعمال تبدیل d, q) .

i_q^* جریان بار مشخصی از شبکه است که می خواهیم توان راکتیو مورد نیاز آن را از طریق مجموعه استتکام تأمین کنیم .

i_d نیز مؤلفه d جریان خروجی مجموعه استتکام قبل از اتصال آن به شبکه است .

i_d^* که مقدار رفرنس جریان i_d است از طریق قرار دادن یک کنترلر PI بر روی اختلاف مقادیر v_{dc}^* , v_{dc} حاصل می شود .

مقدار واقعی v_{dc} مقدار ولتاژ اندازه گیری شده خازن های مجموعه استتکام است .

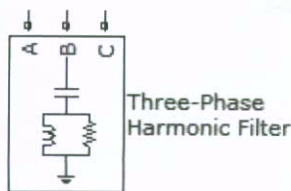
V_{dc}^* مقدار رفرنس v_{dc} است که مقدار آن توسط خودمان و با توجه به مقادیر ولتاژ فاز و فاکتور M و با توجه به شکل ساختمانی اینورتر (پل و نیم- پل) تعیین می شود .

در طراحی، روال زیر را دنبال می کنیم :

در ابتدا v_1 , v_2 را از معادلات زیر که نتیجه معادلات (۹) و (۱۰) هستند به دست می آوریم . نتایج در روابط (۱۱) و (۱۲) آورده شده اند .

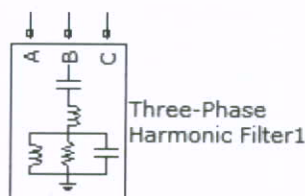
$$V_1 = \lambda_1(i_d^* - i_d) \quad (11)$$

استفاده می کنیم. این گونه فیلترها با ایجاد مسیرهای با مقاومتی به ازای فرکانس تنظیمی خاص، مسیری جهت هدایت مولفه های هارمونیک به زمین ایجاد می کنند و لذا موجب کاهش مولفه های هارمونیک و بهبود کیفیت شبکه می شوند. در طراحی فیلتر بالاگذر تعیین مقادیر خاص R, L, C که به ازای آن مسیر کم مقاومت زمین در برابر بازه فرکانسی مورد نظر ایجاد می شود مورد نظر است (همان طور که می دانیم در اینجا حذف مولفه های فرکانسی بالاتر از مولفه اصلی ($f=50\text{Hz}$) مورد نظر است). بلوک MATLAB چنین فیلتری (بالاگذر موازی) به صورت آمده در شکل ۲ است:



شکل (۲): فیلتر بالاگذر موازی ۳ فاز در نرم افزار مطلب

پارامترهای تنظیمی این فیلتر عبارتند از: Q_n, V_n, f_n ؛ f_c, Q ، فیلترهای میان گذر در دو نوع تک تنظیمه و دو تنظیمه تقسیم بندی می شوند. بلوک MATLAB فیلتر میان گذر دو تنظیمه در شکل ۳ آمده است.



شکل (۳): فیلتر میان گذر موازی ۲ تنظیمه در نرم افزار مطلب

این نوع فیلتر برای کاهش مولفه های هارمونیک خاصی استفاده می شود (احتمالاً یک مولفه هارمونیک مرتبه پایین (۵ و ۷ و ۱۱ و ۱۳ و ۱۷ و ...)). پارامترهای طراحی چنین فیلتری عبارت اند از: $Q_n, V_n, f_n, Fr_1, Fr_2, Q$. پارامترهای این دو نوع فیلتر به صورت زیر تعریف می شوند:

Q_n : توان راکتیو نامی

V_n : ولتاژ نامی

F_n : فرکانس نامی

$$THD_{ph} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (۱۳)$$

در رابطه فوق V_n دامنه مؤلفه هارمونیک n ام است.

در رابطه THD برای ولتاژ خط در حالتی که میان فازها اتصال کامل برقرار است (اتصال مثلث و یا ستاره زمین شده) هارمونیک سوم برابر صفر است. از طرفی باتوجه به تقارن شکل موج، هارمونیک های مرتبه زوج نیز صفر خواهد بود؛ لذا رابطه THD برای ولتاژ خط به صورت رابطه (۱۴) خواهد شد:

$$THD_L = \frac{\sqrt{\sum_{n=5,7,11,\dots}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (۱۴)$$

فاکتور دیگری که در سنجش مؤلفه های هارمونیک استفاده می شود مقدار مولفه های هارمونیک مرتبه پایین است. هارمونیک های مرتبه پایین مولفه های هارمونیک غیر از مولفه مرتبه اول (مولفه اصلی) هستند که مقدارشان در مقایسه با مؤلفه اول قابل توجه است. فاکتوری که در این مقاله به عنوان معیار کاهش هارمونیک مورد استفاده قرار می گیرد THD است.

۳-۲- روش های کاهش هارمونیک

تزریق هارمونیک ها به شبکه مشکلات زیادی را در شبکه قدرت ایجاد می کنند. به عنوان نمونه می توان به مشکلاتی از قبیل کاهش کیفیت توان و مسائل پیرو آن، عملکرد اشتباه در تجهیزات حفاظتی و خطای تجهیزات اندازه گیری، اثر نامطلوب مولفه های هارمونیک فرکانس بالا بر وسایل و سیگنال های مخابراتی و تجهیزات کنترلی اشاره کرد. بنابراین یافتن راه حلی برای غلبه بر این مشکل ضروری است. روش های متنوعی برای کاهش هارمون ها در شبکه مورد استفاده قرار می گیرند که از این جمله می توان به استفاده از فیلتر، ترانس های شیفتر فاز، استفاده از اینورترهای چندسطحی در ساختمان استتکام، استفاده از تکنیک های سوئیچ زنی PWM و ... اشاره کرد. روشی که در این مقاله مورد استفاده قرار می گیرد استفاده از فیلتر است. لذا قسمت بعد به طراحی فیلتر اختصاص پیدا می کند. یک روش رایج جهت کاهش هارمونیک های ایجاد شده توسط مبدل های الکترونیک قدرت استفاده از فیلترهای قدرت موازی (Shunt) است. در این جهت از فیلترهای بالاگذر و میان گذر موازی

Fr1, Fr2: فرکانس های تنظیم، فرکانس های خاصی که می خواهیم تا حد ممکن کاهش یابند.

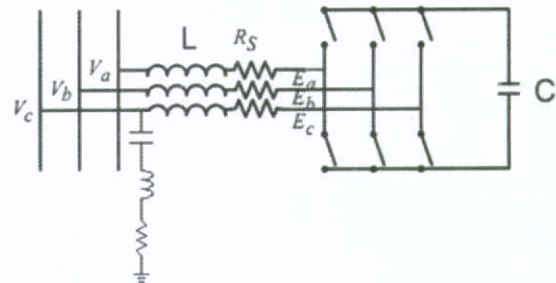
Q: شاخص کیفیت $(R/(L.\omega_0))$ که ω_0 برای یک فیلتر تک تنظیمه تعریف می شود.

Fc: فرکانس تنظیم (فرکانس قطع فیلتر بالاگذر)

۴- سیستم مدل سازی ارائه شده و نتایج شبیه سازی

۴-۱- مدل شبیه سازی شده

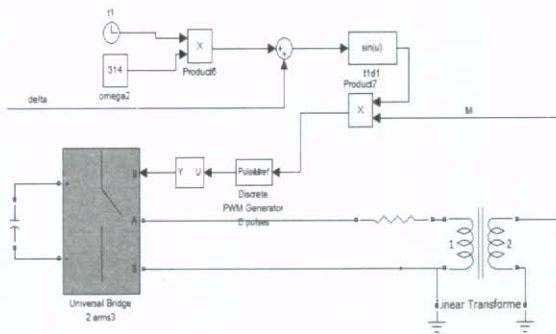
در این قسمت مدل شبیه سازی ما ارائه می شود. در این مدل شبکه واقعی قدرت با تمام عناصر و تجهیزات واقعی آن پیاده می شود و بر خلاف مدل های سیگنالی پیشین نمونه ها و مقادیر رفرنس مورد نیاز برای ساختار کنترلر از خود شبکه استخراج می شوند. به عنوان نمونه i_q^* (مقدار رفرنس i_q) و سایر پارامترهای به کار رفته در سیستم کنترلی مقادیر مورد نیازشان را از مقادیر واقعی در وضعیت لحظه ای شبکه دریافت می کنند.



شکل (۴): استفاده از فیلتر در خروجی مجموعه استتکام

شکل (۴) استفاده از فیلتر در یک شبکه قدرت که استتکام در آن نصب شده است را به نمایش می گذارد. همان گونه که در این شکل مشخص است در استفاده از فیلتر معادلات KVL (۲) تغییر نمی کنند و تنها تغییری که نسبت به قبل داریم این است که این معادلات به ازای جریان جدید i' برقرار می باشند. بنابراین جریانات معادلات کنترلی جدید i_q' , i_d' هستند. اما از آنجایی که در مدل ارائه شده پارامترهای مورد نیاز کنترلر از خود شبکه گرفته می شوند لذا کافی است که نمونه های جریانی از این جریان جدید گرفته شوند. با این کار از آنجایی که معادلات کنترلی ثابت مانده اند همان کنترلر

پیشین پاسخ گوی سیستم جدید (سیستم قبلی در حضور فیلتر) خواهد بود. همان طور که می دانیم در مدل های ارائه شده قبلی با ورود فیلتر، نیازمند به کارگیری تبدیل d,q برای معادلات کنترلی جدید هستیم که این امر دشوار و زمان گیر است و این مسئله به خاطر واقعی نبودن نمونه ها در مدل های سیگنالی است. بنابراین مدل پیشنهادی، ما را توانمند به در نظر گرفتن فیلتر در طراحی شبکه بدون هیچ گونه پیچیدگی و نیازی به تغییر در ساختار اصلی کنترلر است. مدل پیاده شده برای استتکام در یکی از فازها در شکل (۵) آمده است.



شکل (۵): مدل استتکام در هریک از فازها

که δ & M از خروجی های سیستم کنترلی به دست آمده اند و با توجه به شرایط حاکم بر معادلات به گونه ای اختیار شده اند که سیگنال سینوسی مرجع مناسب، جهت اعمال به سوئیچ های پل های اینورتری را ایجاد کند و با این کار خروجی مطلوب و مورد نظر از مجموعه اینورتر و استتکام دریافت می شود و هدفی که از طراحی و استفاده از مجموعه استتکام پیش رو بود محقق می شود. همان گونه که دیده می شود برای مدل سازی تمامی تجهیزات از مدل واقعی آنها استفاده شده است بنابراین نتایج شبیه سازی می توانند با اطمینان زیاد برای کارهای ساخت، مورد استفاده قرار گیرند. مدل شبکه قدرت به همراه لینک های اتصال مجموعه استتکام در شکل (۶) نشان داده شده است. این شبکه قدرت شامل یک ژنراتور، ترانسفورماتورها، خطوط انتقال و نیز یک بار مشخص (که هدف ما جبران توان راکتیو آن از طریق مجموعه استتکام طراحی شده می باشد) است.

$$K_i = -7$$

$$\lambda_1 = 2200$$

$$\lambda_2 = 2200$$

$$T_{1ph} : 580v / 220v$$

$$V_{0c} = 1020v$$

V_{0c} ولتاژ اولیه خازن در $t = 0$ می باشد. پارامترهای مدل شبکه قدرت:

$$G : V_n = 22000v$$

$$T1 : 25000v / 70000v$$

$\Pi 1$: 2 pi section, 160km, R, L, C are specified.

$$T2 : 70000v / 23000v$$

$$\Pi 2 : 1 \text{ pi section, } 20km$$

$$T3 : 23000v / 420v$$

Load : Three phase parallel RLC load
 $V_n = 380v$, $P = 200kw$, $Q = 150kvar$

و پارامترهای فیلتر عبارتند از:

Band pass filter :

$$Q_n = 12000var$$

$$V_n = 380v$$

$$F = 50Hz$$

$$Fr_1 = 5*50$$

$$Fr_2 = 7*50$$

$$Q = 30$$

با داشتن پارامترهای فوق مقادیر R, L, C فیلتر برای هر فاز به آسانی قابل محاسبه است:

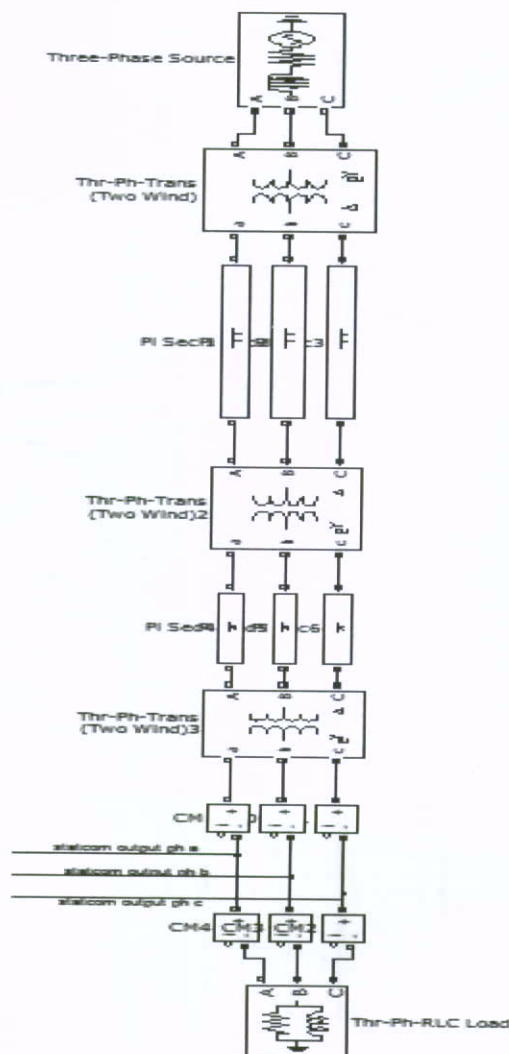
High pass filter:

$$Q_n = 12000var$$

$$V_n = 380v$$

$$F = 50Hz$$

$$F_c = 400Hz$$



شکل (۶): مدل شبکه قدرت

۴-۲- نتایج شبیه سازی

یک سیستم با پارامترهای زیرین برای شبکه قدرت، استتکام و فیلتر در نظر گرفته شده است.

پارامترهای مدل استتکام:

$$C = 4500 \mu F$$

$$F = 50 \text{ Hz}$$

$$R_s = 0.5 \text{ ohm}$$

$$L = 0.001 \text{ H}$$

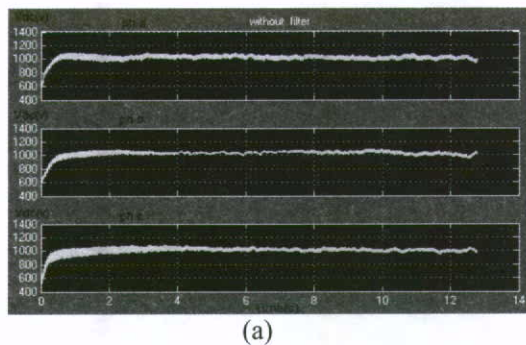
$$V_{dc}^* = 1020 \text{ v}$$

$$K_p = -0.05$$

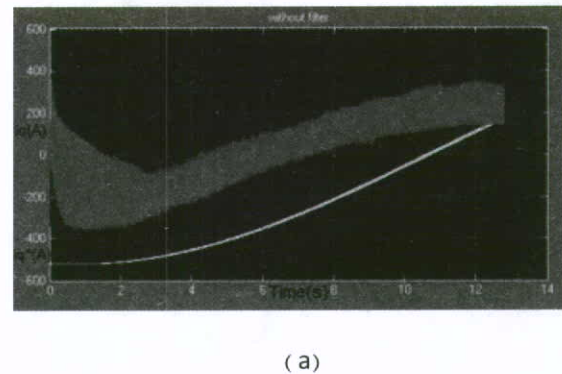
$$Q=30$$

مشابه قسمت قبل مقادیر R, L, C فیلتر بالاگذر به آسانی از پارامترهای فوق قابل محاسبه است. مقادیر $K_p, K_i, \lambda_1, \lambda_2$ برای استکام با امتحان تمامی مقادیر ممکن برای این پارامترها انتخاب شده اند. به ازای مقادیر اختیار شده خروجی های مورد نظر در وضعیت مناسبی قرار می گیرند و اهداف مورد نظر محقق می شود. این اهداف در قسمت بعد به طور کامل مطرح می شوند. هدف اول ما دنبال کردن مقدار رفرنس i_q^* است که این مطلب به معنای جبران توان راکتیو بار توسط مجموعه استکام است. در شکل (۷) شکل موج های i_q, i_q^* در دو وضعیت حضور و عدم حضور فیلتر به نمایش گذاشته شده است. همان گونه که مشاهده می شود در حضور فیلتر نیز سیستم کنترلی، عملکردی را که از آن انتظار می رود را انجام می دهد و i_q کماکان i_q^* را

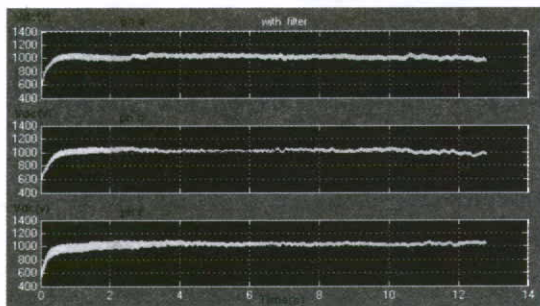
دنبال می کند. این امر عملکرد مناسب سیستم کنترلی را نشان می دهد. همان طور که می بینیم میان i_q و i_q^* اختلافی وجود دارد و این به این دلیل است که ما شبکه قدرت واقعی را با مدل دقیق و واقعی تمام اجزایش پیاده کرده ایم و اقتضای یک مدل واقعی و توان راکتیوی که توسط خود این اجزا تبادل می شود این اختلاف را توجیه می کند. حالت گذرای نیز که در ابتدا با آن مواجه هستیم از همین امر ناشی می شود. همان طور که می بینیم این اختلاف با گذر زمان، کمتر و کمتر می شود. هدف اصلی دیگر ما کنترل ولتاژ خازن (V_{dc}) با حداقل نوسانات است. همان طور که نشان داده شده است کنترل V_{dc} با کمترین میزان نوسان ولتاژ که یکی از اهداف اصلی در طراحی سیستم شکل (۸) کنترل V_{dc} را در دو حالت استفاده و عدم استفاده از فیلتر نشان می دهد.



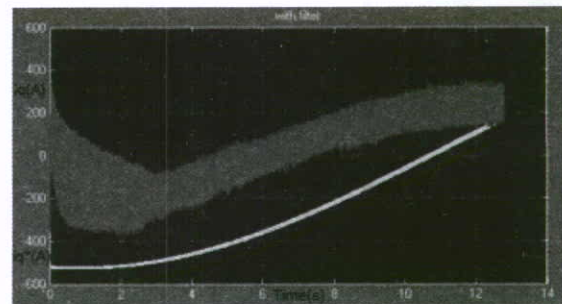
(a)



(a)



(b)

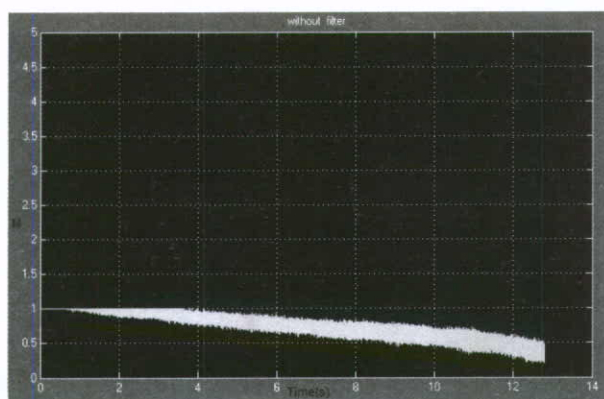


(b)

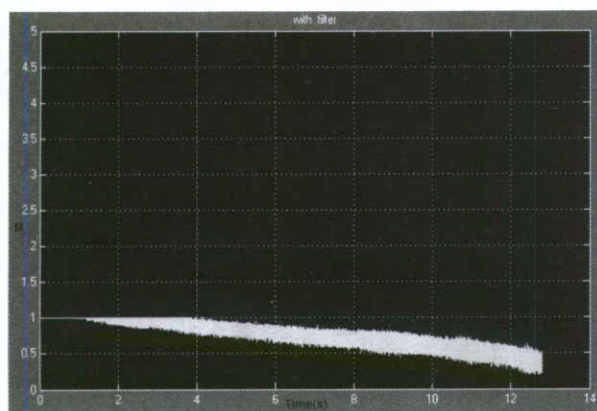
شکل (۸): شکل موج ولتاژ خازن (V_{dc}) بدون فیلتر (a) و با فیلتر (b)

شکل (۷): شکل موج i_q, i_q^* بدون فیلتر (a) و با فیلتر (b)

شاخص مدولاسیون (M) نیز در شکل (۱۰) به نمایش گذاشته شده است. همان طور که دیده می شود مقدار M همواره مقادیری در بازه ($0 < M < 1$) و مقادیری قابل قبول جهت استفاده برای اعمال کنترل بر روی SPWM هستند. این مطلب در دو حالت حضور و یا عدم حضور فیلتر صادق است.



(a)



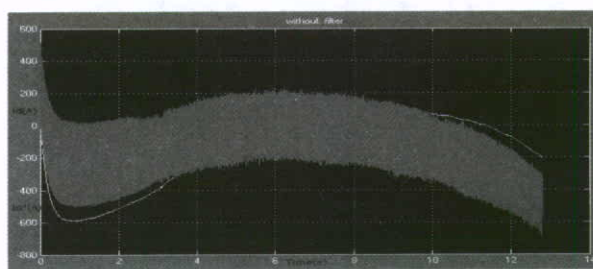
(b)

شکل (۱۰): شکل موج شاخص مدولاسیون (a) بدون فیلتر (b) با فیلتر

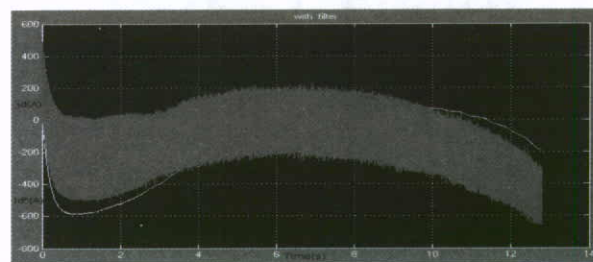
در حضور فیلتر سیستم کنترلی مشابه حالت قبل از حضور فیلتر عملکرد مناسبی داشته و مقدار M در بازه مورد انتظار و مطلوبمان باقی می ماند.

δ (زاویه بین ولتاژ خروجی اینورتر و ولتاژ شبکه) به طور کامل در ناحیه پایدار ($\delta < 90^\circ$) حضور داشته و نسبت به مرز پایداری ($\delta = 90^\circ$) با حاشیه اطمینان مناسبی قرار دارد که این امر یک مزیت بزرگ برای سیستم کنترلی محسوب می شود.

همان طور که نشان داده شده است کنترل v_{dc} با کمترین میزان نوسان ولتاژ که یک از اهداف اصلی در طراحی سیستم کنترلی بود محقق می شود. مشاهده می شود که V_{dc} مقدار V_{dc}^* را دنبال می کند و در نهایت به آن می رسد پس سیستم کنترلی در مورد کنترل ولتاژ مطابق خواسته ما عمل می کند نکته مهم دیگر این است که در صورت استفاده از فیلتر مشابه گذشته (قبل از استفاده از فیلتر) سیستم کنترلی طراحی شده به خوبی با شرایط فعلی تطبیق می یابد و وظیفه ای را که از آن انتظار می رود انجام می دهد و این بدون کوچکترین تغییری در معادلات کنترلی و تنها با تغییری جزئی در نمونه گیری برای تامین ورودی های سیستم کنترلی محقق گردید. بدین ترتیب که مقادیر نمونه گیری i_d , i_q تغییر می کنند و مقادیر جدید i_d' , i_q' اختیار می شوند (i' معادلات KVL در حضور شاخه فیلتری است). همان طور که گفته شد کنترل V_{dc} در روش ارائه شده به صورت غیر مستقیم و با کنترل مستقیم i_d امکان پذیر گشت. شکل (۹) در بخش بعدی برای نمایش این مطلب که چگونه سیستم کنترلی پیاده شده دنبال کردن i_d^* را توسط i_d ممکن می کند به نمایش گذاشته شده است. همان طور که مشاهده می شود در هر دو حالت حضور یا عدم حضور فیلتر، سیستم کنترلی عملکردی مناسبی را ارائه داده و i_d مقادیر i_d^* را با تقریب خوبی دنبال می کند.



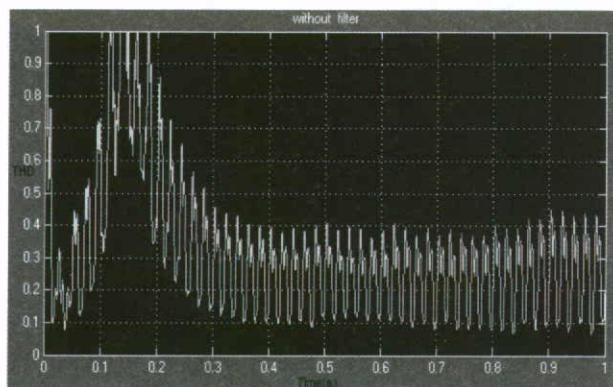
(a)



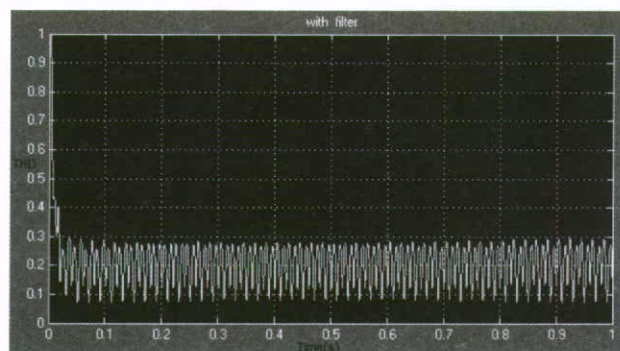
(b)

شکل (۹): شکل موج i_d , i_d^* (a) بدون فیلتر (b) با فیلتر

همچنین مشاهده می شود که در هر دو حالت حضور یا عدم حضور فیلتر صادق است و مشخصه حاصل نیز تنها تفاوتی اندک با مشخصه ماقبل از حضور فیلتر دارد. شکل (۱۱) گواهی بر اثبات این ادعاست.



(a)



(b)

شکل (۱۲): شکل موج فاکتور THD بدون فیلتر (a) و با فیلتر (b)

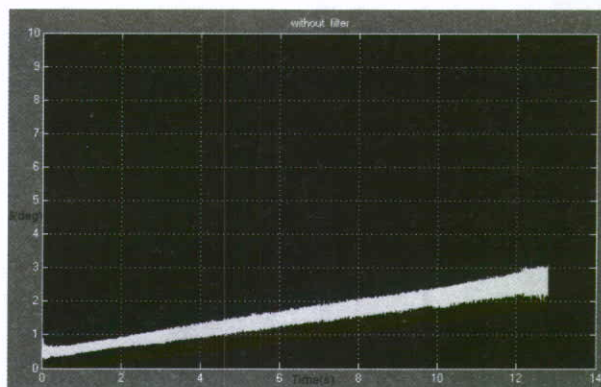
همان طور که مشاهده می شود در استفاده از فیلتر مقدار THD بهبود (کاهش) چشم گیری می یابد؛ علاوه بر این عملکرد گذرای سیستم در زمان های آغازین شروع به کار سیستم بهبود قابل ملاحظه ای پیدا می کند. این امر به بهبود حاشیه پایداری سیستم (پایداری ولتاژ و نیز پایداری کار ماشین های حاضر در شبکه (پایداری زاویه ای)) منتهی می شود. برای روشن کردن این مطلب، مقدار THD به عنوان نمونه در لحظه زمانی $t = 1s$ در دو حالت حضور و عدم حضور فیلتر نشان داده شده است و مقدار بهبود این فاکتور در صورت استفاده از فیلتر طراحی شده، محاسبه شده است.

$$THD(t = 1s) = 16.28 \% \quad \text{در حضور فیلتر}$$

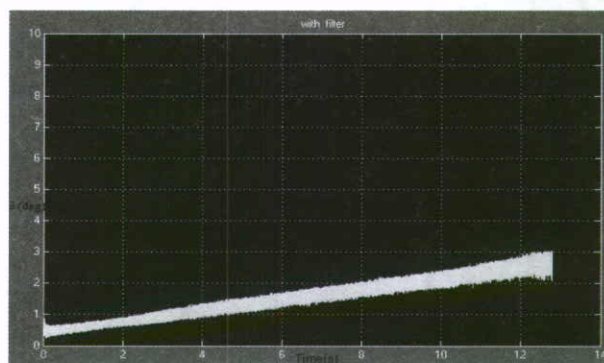
$$THD(t = 1s) = 19.43 \% \quad \text{در غیاب فیلتر}$$

میزان کاهش در مقدار THD:

$$\alpha = ((19.43 - 16.28) / 19.43) \times 100 = 16.21 \%$$



(a)



(b)

شکل (۱۱): شکل موج زاویه δ بدون فیلتر (a) و با فیلتر (b)

هم اکنون میزان بهبود حاصل شده در مقدار THD در صورت استفاده از فیلتر معرفی شده در قسمت قبل را مورد ارزیابی قرار دهیم. فیلتری که در این مطالعه، مورد استفاده قرار گرفته است یک فیلتر جریانی است لذا میزان بهبود در شاخص THD جریان خروجی استتکام در نقطه اتصال آن به شبکه نسبت به حالت عدم استفاده از فیلتر، مورد بررسی قرار گرفته است. در این قسمت، عملکرد موثر فیلتر در کاهش مولفه های هارمونیک در شبکه قدرت به نمایش گذاشته می شود.

شکل (۱۲) مقدار THD برای فاز a را به نمایش می گذارد.

- [3] Schauder, C.; Mehta, H.; "Vector analysis and control of advanced static Var compensators" IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution Volume 140, Issue 4, July 1993 Page(s):299 – 306
- [4] Peng, F.Z.; Jih-Sheng Lai; McKeever, J.W.; VanCoeveing, J.; "A multilevel voltage-source inverter with separate DC sources for static Var generation" *IEEE Transactions on Industry Applications* Volume 32, Issue 5, Sept.-Oct. 1996, Page(s):1130 – 1138
- [5] H. Fujita; S. Tominaga; and H. Akgagi; "Analysis and design of an Advanced Var compensator using quad- series voltage-source inverters" in Proc. *IEEE/IAS'95 Annu.. Meeting*, Oct. 1995, page(s): 2565-2572
- [6] Hanson, D.J.; Horwill, C.; Gemmell, B.D.; Monkhouse, D.R.; "A STATCOM-based relocatable SVC project in the UK for National Grid" In *IEEE PESC*, Jan. 2002 Page(s):532 – 537
- [7] Yiqiao Liang; Nwankpa, C.O.; "A new type of STATCOM based on cascading voltage-source inverters with phase-shifted unipolar SPWM" *IEEE Transactions on Industry Applications* Volume 35, Issue 5, Sept.-Oct. 1999, Page(s):1118 – 1123
- [8] Petitclair, P.; Bacha, S.; Rognon, J.P.; "Averaged Modeling and nonlinear control of an ASVC (advanced static Var compensator)" in Proc. *IEEE/PESC'96 Annu.. Meeting*, Jun. 1996, page(s): 753-758
- [9] Wanki Min; Joonki Min; Jaeho Choi; "Control of Statcom Using Cascade Multilevel Inverter For High Power Application" *IEEE International conference on power electronics & drive systems*, July 1999, page(s):1 - 6
- [10] Isidori, A.; "Nonlinear control systems" Third edition, London,

در این مقاله در ابتدا دو نوع شیوه کنترلی خطی و غیرخطی STATCOM را مطرح نمودیم. سپس به متد کنترل غیرخطی مبتنی بر خطی سازی به کمک فیدبک پرداختیم. در ادامه روش کنترل غیرخطی MIMO مبتنی بر کنترل غیرمستقیم ولتاژ بخش دی-سی (Vdc) را مبنای کار قرار داده و نوآوری را با ارائه یک مدل واقعی از شبکه قدرت به همراه استتکام و در حضور فیلتر مطرح کردیم. با این اقدام انجام کلیه تحلیل ها شامل آنالیز فالت، آنالیز پایداری و بررسی اثرات وسایل و تجهیزات خارجی برای نمونه فیلترهای اکتیو و پسیو، اف سی ال و دیگر تجهیزات که با شبکه و مجموعه استتکام تعامل دارند و بر سازوکار آن تاثیر می گذارند امکان پذیر گشت. در ادامه بر روی فیلتر تمرکز کردیم و در مورد نیاز ضروری به استفاده از فیلتر به همراه استتکام که از تجهیزات الکترونیک قدرت تشکیل شده است صحبت کردیم. در حالت استفاده از فیلتر در خروجی مجموعه استتکام، طراحی کنترلر را انجام دادیم و این عمل را به کمک ارائه مدل پیشنهادی بدون نیاز به تغییرات در معادلات کنترلی و تنها با تغییری جزئی در نمونه های ورودی سیستم کنترلی انجام دادیم و بدین ترتیب پیچیدگی را که طراحی کنترلر در حضور فیلتر و نیز تخمین پارامترهای فیلتر در مدل های قبلی برایمان به همراه داشت رفع گردید. به عنوان کار آینده، بررسی اثر استتکام بر حفاظت های قرار گرفته روی خط (بعنوان نمونه حفاظت دیستانس و ...) پیشنهاد می شود. این بررسی ها با استفاده از مدل واقعی از استتکام و شبکه که در این مقاله ارائه می شود، به سادگی امکان پذیر است.

مراجع

- [1] Farokhnia, N.; Fathi, S.H.; Gharepetian, G.; "a new method of nonlinear controlling of statcom for improving power quality" power system conference of Iran "PSC 23rd conference", 2008, page(s):1 - 8
- [2] Zhichang Yuan; Qiang Song; Wenhua Liu; Qingguang Yu; "Nonlinear Controller for Cascade H-Bridge Inverter- Based STATCOM" *IEEE Transmission and Distribution Conference*, 2005, Page(s):1 – 5



International Conference on,
page(s): 430 – 436

- [20] van Wyk, J.D.; Lee, F.C.; Zhenxian Liang; Rengang Chen; Shuo Wang; Bing Lu; "Integrating active, passive and EMI-filter functions in power electronics systems"; *IEEE Transaction on Power Electronics technologies*, May 2005, page(s): 523 – 536.
- [21] Jacobs, J.; Detjen, D.; Karipidis, C.-U.; De Doncker, R.W.; "Rapid prototyping tools for power electronic systems demonstration with shunt active power filters", *IEEE Transactions on Power Electronics*, March 2004, page(s): 500 – 507.
- [22] Cavalloni, D.; Gagliardi, L.; Pinato, P.; Varalli, L.; Zaninelli, D.; "Design criteria of passive filters for power electronic converters used in electric traction", Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2000, page(s): 134 - 141
- [23] Pham, T.K.; Allen, P.E.; "A design of a low-power, high-accuracy, and constant-Q-tuning continuous-time bandpass filter, Circuits and Systems", *ISCAS IEEE International Symposium*, 2002, page(s): 639-642
- [24] Song Yong Hua, "Flexible AC Transmission Systems", The Institution of Electrical Engineers, 1999, chapter 14
- [11] Petitclair, P.; Bacha, S.; Ferrieux, J.-P.; "Optimized linearization via feedback control law for a STATCOM" *IEEE Industry Applications Conference*, Oct. 1997, Page(s):880 – 885
- [12] Mishra, S.; Panigrahi, B.K.; Tripathy, M., "A hybrid adaptive-bacterial-foraging and feedback linearization scheme based D-STATCOM" In *IEEE International Conference on Power System Technology*, Nov. 2004, Page(s):275 – 280
- [13] Lehn, P.W.; Iravani, M. R.; "Experimental evaluation of STATCOM closed loop dynamics," *IEEE Trans. On Power Delivery*, vol. 13, no. 4, Oct. 1997, page(s): 1378-1384
- [14] Yazdani, A.; Crow, M.L.; Guo, J., "A comparison of linear and nonlinear STATCOM control for power quality enhancement" In *IEEE Power and Energy Society General Meeting Conf.* 20-24 July 2008, Page(s):1 – 6
- [15] Josh, K.; Behalf, A.; Jain, A.K.; Mohan, N.; "A comparative study of control strategies for fast voltage regulation with STATCOMs" *IEEE Industrial Electronics Conference*, Nov. 2004, Page(s):187 – 192
- [16] Farokhnia, N.; Vadizadeh, H.; S. H. Fathi; Anvariasl, F.; "Calculating the Formula of Line Voltage THD in Multilevel Inverter with Unequal DC Source" *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Issue: 99, September 2010, page(s): 1 - 20
- [17] Paul C. Krause; Oleg Wasynczuk; Scott D. Sudhoff; "Analysis Of Electric machinery and drive systems" Second Edition, March 2002, chapter 3.
- [18] A.E. fitzgerard; Charles Kingsey, Jr; Stephen D. Umans; "Electric Machinery" Second Edition, Jul 25, 2002, Appendix C.
- [19] Key, T.S.; Jih-Sheng Lai; "IEEE and international harmonic standards impact on power electronic equipment design", *Industrial Electronics, Control and Instrumentation*, 1997. IECON 97. 23rd

بیوگرافی

آقای فرید خزانلی مقدم فارغ التحصیل رشته کارشناسی برق با گرایش قدرت از دانشگاه صنعتی امیرکبیر و دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد گرایش الکترونیک قدرت و ماشین‌های الکتریکی در دانشگاه صنعتی شریف هستند. ایشان دارای ۲ سال سابقه کاری در زمینه طراحی تابلو و تاسیسات برقی و طراحی سیستم‌های حفاظتی بوده و مقالاتی را در این زمینه‌ها و نیز شاخه‌های مختلف الکترونیک قدرت در کنفرانس‌های معتبر داخلی و خارجی به چاپ رسانیده‌اند.

Email:

fkhazaeli@ghods-niroom.com

farid_khazaeli@yahoo.com

هارمونیک در سیستم‌های الکتریکی

کاوس قصبه

سرپرست گروه تخصصی برق - SBU نیروگاه (صنایع نیروگاهی)

چکیده

افزایش روزافزون بارهای الکترونیکی که از نوع غیر خطی می‌باشند، تولید هارمونیک در سیستم‌های قدرت را به همراه داشته است. وجود هارمونیک در شبکه برق، که یکی از مقوله‌های عمده کیفیت برق^۱ است، اثرات سوئی بر تجهیزات الکتریکی دارد و لذا میزان تولید آن بایستی تحت کنترل قرار گیرد. به همین علت در چند دهه اخیر، پدیده هارمونیک مورد توجه قرار گرفته و استانداردها و ضوابط خاصی برای آن تدوین شده است. در این مقاله اثرات هارمونیک بر تجهیزات الکتریکی، نحوه مطالعه و محاسبه، و اصلاح آن ارائه می‌گردد.

۱- مقدمه

جریان سینوسی با همان فرکانس شبکه اخذ می‌کند در حالیکه بار غیر خطی، نظیر منابع تغذیه الکترونیکی، شارژر، لامپ تخلیه...، جریان غیر سینوسی شامل هارمونیک از شبکه اخذ می‌کند، عبور جریانهای هارمونیک از امپدانس شبکه، افت ولتاژ هارمونیک ایجاد و سبب اعوجاج ولتاژ در باس‌های مسیر شده (شکل ۳) و عدم کارایی تجهیزات را نتیجه می‌دهد.

۲- منابع هارمونیک‌زا

تجهیزاتی که در سیستم‌های قدرت تولید هارمونیک می‌کنند مشتمل هستند بر:

- تجهیزات با هسته مغناطیسی، نظیر ترانسفورماتور و ماشین الکتریکی
- کوره قوسی^۲، جوش قوسی^۳، لامپ تخلیه
- تجهیزات الکترونیک قدرت

۲-۱- ترانسفورمر

دو پدیده در کار با هسته مغناطیسی ترانسفورمر وجود دارد که سبب اعوجاج فرم ولتاژ، شار و جریان مغناطیسی می‌شوند، اولی غیر خطی بودن منحنی مغناطیسی و دومی هیسترسه می‌باشد. نقطه کار

از بدو استفاده از جریان متناوب، پدیده هارمونیک و آثار سوء آن بر کارکرد تجهیزات مورد توجه قرار داشته است ولی با توجه به اینکه بارهای غیر خطی که عامل اصلی تولید هارمونیک جریان می‌باشند، در حد محدودی وجود داشته سیستم‌های قدرت با مشکل چندانی روبرو نبوده‌اند. در چند دهه اخیر با ورود تکنولوژی جدید مبتنی بر استفاده از نیمه هادی‌ها و در نتیجه غیر خطی شدن بارهای مربوطه، مساله از اهمیت خاصی برخوردار شده است.

در یک سیستم الکتریکی متناوب آرمانی، فرم جریان و ولتاژ از نوع سینوسی با یک فرکانس اصلی می‌باشد. ولی در عمل عواملی سبب تغییر فرم^۴ (اعوجاج) این کمیت‌ها از سینوسی به غیر سینوسی می‌گردند. یک موج متناوب غیر سینوسی مجموعه‌ای است از یک موج سینوسی با فرکانس اصلی و چندین موج سینوسی با فرکانس‌های ضریب صحیح از فرکانس اصلی که هارمونیک نامیده می‌شوند. هارمونیک اثرات منفی و مخرب بر تجهیزات دارد، به طوریکه هارمونیک جریان سبب افزایش مقدار موثر جریان و نتیجه افزایش تلفات و دما و اضافه بار می‌شود، و هارمونیک ولتاژ عدم کارایی تجهیزات، افزایش مقدار موثر ولتاژ و نتیجتاً افزایش تنش عایقی را به همراه دارد. عامل عمده ایجاد هارمونیک، وجود بارهای غیر خطی است. بار خطی، (نظیر موتور اندوکسیونی، لامپ رشته‌ای، گرم‌کن برقی و ... با تغذیه از ولتاژ سینوسی،

- 1-Power Quality
- 2-Distortion
- 3-Arc furnace
- 4-Arc Welder



ترانسفورمر در شرایط نرمال زیر نقطه زانوی منحنی مغناطیسی، یعنی در ناحیه خطی قرار دارد و هارمونیک قابل توجهی تولید نمی‌کند ولی در شرایط غیر نرمال، مثلاً افزایش ولتاژ، نقطه کار بالای زانو و در ناحیه غیر خطی قرار می‌گیرد و سبب ایجاد هارمونیک (عمدتاً هارمونیک سوم تا ۶۰ درصد) در جریان مغناطیس‌کنندگی می‌شود. مجوز عبور جریان هارمونیک را نوع اتصال سیم‌پیچ‌ها (ستاره، مثلث، زیگزاگ) و وجود اتصال نقطه خنثی به زمین تعیین می‌کنند، ولی میزان تولید هارمونیک شار و ولتاژ منتج از عدم عبور این جریان، به نوع مستقل^۱ یا غیر مستقل بودن^۲ هسته دارد و نوع غیر مستقل هارمونیک شار و ولتاژ کمتری تولید می‌کند.

۲-۲- ماشین الکتریکی

ماشین‌های اندوکسیونی نیز مشابه ترانسفورمر، جریان مغناطیس‌کنندگی را از منبع تغذیه اخذ می‌کنند ولی وجود شکاف هوایی در مدار مغناطیسی سبب خطی شدن مشخصه و در نتیجه کاهش جریان هارمونیک نسبت به ترانسفورمر می‌گردد. عامل تولید هارمونیک ولتاژ در ماشین‌ها گام قطبی سیم‌پیچ استاتور است که در ماشین‌های بزرگ قابل توجه است. در ژنراتورهای سنکرون، انتخاب بهینه گام قطبی سبب تولید هارمونیک سوم ولتاژ می‌شود که جریان هارمونیک سوم به بار تزریق می‌کند.

۳-۲- کوره قوسی

هارمونیک‌های ایجاد شده توسط کوره قوسی الکتریکی که برای ذوب فلزات به کار می‌رود بسته به مرحله ذوب، متغیر است. در مرحله اولیه ذوب، هارمونیک‌های زوج و فرد، و در مرحله نهایی که قوس پایدار می‌شود، هارمونیک‌های فرد با شدت کمی وجود دارند و فرم جریان به سینوسی نزدیک است. کوره‌های قوسی به علت داشتن قدرت زیاد، تمهیدات خاصی برای کاهش هارمونیک لازم دارند.

۴-۲- لامپ‌های تخلیه

در لامپ فلورسنت، بخار جیوه، بخار سدیم، بالاست مغناطیسی جای خود را به بالاست الکترونیکی داده که از مزایای بیشتری برخوردار است ولی در مقابل تولید

هارمونیک جریان می‌کند که با تجهیز لامپ به خازن اصلاح قدرت کاهش می‌یابد. لامپ‌های کم مصرف^۳ نیز هارمونیک‌زا می‌باشند.

۵-۲- تجهیزات الکترونیکی

مبدل‌های قدرت الکترونیکی عمده‌ترین تجهیزات تولید جریان هارمونیک می‌باشند که با توجه به پیشرفت فن‌آوری نیمه هادی‌ها، بر کاربرد آن در تنظیم سرعت موتور^۴ (ASD)، منابع تغذیه الکترونیکی، شارژر، اینورتر و غیره، مرتباً افزوده می‌شود. منابع تغذیه تک‌فاز که مورد استعمال زیادی در تجهیزات اداری و صنعتی نظیر رایانه شخصی (PC) و پرینتر دارند، دارای یکسو کننده می‌باشند و با استفاده از تکنیک^۵ SMPS ولتاژ DC خروجی را کنترل می‌کنند. از خصوصیات این تکنیک ایجاد جریان هارمونیک سوم زیاد است که یکی از معایب آن عبور از هادی خنثی N و در نتیجه اضافه بار شدن کابل است. منابع تغذیه سه فاز دارای مزیت عدم تولید جریان هارمونیک سوم می‌باشند. تجهیزات تنظیم سرعت موتور از یکسو کننده و اینورتر استفاده می‌کنند و اینورتر نوع جریان ثابت^۶ (CSI) حدود نصف نوع ولتاژ ثابت^۷ (VSI) هارمونیک تولید می‌کند. در جدول (۱) مقادیر متعارف هارمونیک تولید شده توسط برخی از بارهای تک‌فاز و سه‌فاز ارائه شده است.

۳- فاکتورهای هارمونیک

برای سنجش میزان انحراف موج‌های هارمونیک از هارمونیک اصلی، فاکتورهای متعددی تعریف شده است که عمده‌ترین آنها به شرح ذیل است:

- 1- Core Type
- 2- Shell Type
- 3- Compact Fluorescent Lamp
- 4- Adjustable Speed Drive
- 5- Switch Mode Power Supply
- 6- Current Source Invert
- 7- Voltage Source Invert

جدول (۱): مقادیر متعارف هارمونیک های جریان

Example Magnitudes of Harmonic Currents of Selected Single-Phase Loads			
Harmonic Order	Welder [%]	PC [%]	Fluorescent Lamp [%]
1	100	100	100
3	29.6	75	12.3
5	8.8	47.3	13.8
7	2.0	22.9	3.1
9	2.3	9.0	1.1
11	2.3	3.3	0.7
13	1.1	3.0	0.5

Example Magnitudes of Harmonic Currents of Selected Three-Phase Loads				
Harmonic Order	Induction Furnace (With Static Frequency Converter)	DC ASD	DC Arc Furnace	ASD (PWM)
1	100	100	100	100
5	20.9	37.1	18.9	25
7	12.7	1.1	10.3	11
11	7.8	8.6	5.4	7.5
13	7.2	2.5	3.9	5.0
17	4.3	4.7	1.8	4.4
19	4.9	2.3	1.3	3.2

۳-۳- فاکتور ولتاژ هارمونیک^۲

این فاکتور در استاندارد IEC 60034-1 برای ولتاژ تغذیه موتورهای سنکرون و اندوکسیونی تعریف شده است:

$$VHF = \frac{100}{V_1} \sqrt{\sum_{h=2}^h \frac{V_h^2}{h}} \quad [\%]$$

۴-۳- مقدار موثر کمیت هارمونیک

مقدار موثر، اثر حرارتی کلیه هارمونیک ها از جمله هارمونیک اصلی را در نظر می گیرد. توجه گردد که این کمیت توسط ولت متر / آمپر معمولی که فقط مقدار موثر هارمونیک اصلی را اندازه می گیرد، قابل قرائت نمی باشد.

$$V_{eff} = \sqrt{\sum_{h=1}^h V_h^2} \quad [\text{Volt}]$$

$$I_{eff} = \sqrt{\sum_{h=1}^h I_h^2} \quad [\text{Amp}]$$

۴- مقادیر مجاز هارمونیک ها

۱-۴- شبکه

در استانداردهای IEC و IEEE مقادیر مجاز هارمونیک ها در سیستم الکتریکی به شیوه های متفاوت ارائه شده ولی

۱-۳- فاکتورهای اعوجاج تک^۱

این فاکتور میزان دامنه هر یک از هارمونیک ها را بر حسب درصدی از هارمونیک اصلی بیان می کند.

$$IHD_u = (V_h/V_1) 100 \quad [\%] \quad \text{فاکتور ولتاژ}$$

$$IHD_i = (I_h/I_1) 100 \quad [\%] \quad \text{فاکتور جریان}$$

I_h, V_h مقدار مؤثر هارمونیک درجه h, V_1, I_1 مقدار موثر هارمونیک اصلی و اندیس های i, u مربوط به ولتاژ و جریان می باشند.

۲-۳- فاکتور اعوجاج کلی

این فاکتور اثر حرارتی مجموعه هارمونیک ها (به جز هارمونیک اصلی) را مدنظر می گیرد.

$$THD_u = \frac{100}{V_1} \sqrt{\sum_{h=2}^h V_h^2} \quad [\%] \quad \text{فاکتور ولتاژ}$$

$$THD_i = \frac{100}{I_1} \sqrt{\sum_{h=2}^h I_h^2} \quad [\%] \quad \text{فاکتور جریان}$$

1-Individual Harmonic Distortion(IHD)
2-Harmonic Voltage Factor(HVF)

میزان آن در هر دو استاندارد بسیار نزدیک به هم است. استاندارد IEEE519 (مرجع ۴) مقدار مجاز هارمونیک ولتاژ را که شبکه می‌تواند به مصرف کننده اعمال کند طبق جدول (۲) بازاء سه سطح ولتاژ مختلف پیشنهاد داده است.

جدول (۲): حداکثر اعوجاج ولتاژ در شبکه

System Voltage	THDu [%]	IHDu [%]
Up to 69KV	5.0	3.0
69 Up to 161KV	2.5	1.5
161KV & Above	1.5	1.0

مسئولیت کنترل و تنظیم این هارمونیک با برق منطقه‌ای (تولید کننده) می‌باشد. مرجع (۴) مقدار مجاز هارمونیک جریان را که مصرف کننده (بار) مجاز است تولید کند طبق جدول (۳) پیشنهاد داده است. در این جدول دو فاکتور جدید بکار گرفته شده که یکی فاکتور TDD^1 است که مشابه فاکتور تعریف شده در بند ۳-۱ می‌باشد ولی در مخرج به جای جریان هارمونیک اصلی I_1 ، جریان بار I_L قرار می‌گیرد و دیگری نسبت I_{sc}/I_L است که بزرگی بار تعریف شده و بیانگر این است که بارهای بزرگتر لازم است هارمونیک کمتری تولید کنند. I_{sc} جریان اتصال کوتاه سیستم در محل تزریق هارمونیک و I_L جریان باس است. کلیه منابع تولید کننده قدرت الکتریکی، بدون توجه به مقدار I_{sc}/I_L بایستی از جدول (۳) طبیعت کنند.

۴-۲- تجهیزات الکترونیکی

هارمونیک ولتاژ، عدم کارایی تجهیزات الکترونیکی را به همراه دارد. این تجهیزات قادر به تحمل $THDu$ تا 5% و $IHDu$ تا 3% می‌باشند. مبدل‌هایی که از دیود استفاده می‌کنند کمتر از آن‌هایی که از تایریستور استفاده می‌کنند تحت تاثیر هارمونیک قرار دارند.

۴-۳- ترانسفورمر

ترانسفورمر قادر به تحمل $THDi$ تا 5% است و برای مقادیر بیشتر بایستی بار آن کاهش یابد که نحوه محاسبه آن در IEEE57-110 آمده است. اضافه ولتاژ ترانسفورمر که سبب ایجاد هارمونیک در

جریان مغناطیسی می‌شود، در حالت بی‌باری به 10% و در حالت با باری به 5% محدود شده است.

۴-۴- موتور الکتریکی

طبق استاندارد IEC 600 34-1، موتورهای الکتریکی بایستی قادر به کار با ولتاژ تغذیه‌ای باشند که فاکتور ولتاژ هارمونیک (بند ۳-۳) آن تا 2% است.

۵- اثرات هارمونیک

وجود هارمونیک در سیستم الکتریکی اثرات منفی بر تجهیزات سیستم و مصرف کننده دارد به طوریکه جریان هارمونیک سبب افزایش تلفات و دما، و ولتاژ هارمونیک سبب افزایش تنش الکتریکی، تغییر فرم ولتاژ و نتیجتاً عدم کارایی تجهیزات می‌شوند. در ذیل این اثرات بررسی می‌گردند:

۵-۱- تأثیر بر سیستم قدرت

مهم‌ترین اثر هارمونیک، افزایش تلفات حرارتی، عدم کارایی تجهیزات کنترلی و نشان‌دهنده‌ها و تغییر فرم ولتاژ است. این اثرات در شرایط تشدید مسأله آفرین هستند و اگر سیستم در این شرایط نباشد، جریان‌های هارمونیک به طرف منبع تغذیه شبکه که مسیری با امپدانس کم است جاری شده و تغییر فرم ولتاژ ناچیزی تولید می‌کنند. قدرت اتصال کوتاه S_F در یک نقطه از شبکه مقیاسی است برای امپدانس شبکه در فرکانس اصلی. امپدانس شبکه نسبت عکس دارد با S_F و در نتیجه S_F بیشتر سبب کاهش اعوجاج ولتاژ می‌گردد.

جدول (۳): حد مجاز تولید جریان هارمونیک

I_{sc}/IL	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
$v \leq 69 \text{ kV}$						
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.0	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
$69 \text{ kV} < v \leq 161 \text{ kV}$						
<20	2.	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20<50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50<100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100<1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0
$v > 161 \text{ kV}$						
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.5	1.75	1.25	0.45	0.22	3.75

۲-۵- تأثیر بر ماشین الکتریکی

از نظر مسیر جریان هارمونیک، موتورها به صورت پارالل با امپدانس شبکه ظاهر می‌شوند و در نتیجه به علت کاهش امپدانس منتج، سبب افزایش فرکانس تشدید می‌شوند. ولتاژ هارمونیک موجود در منبع تغذیه، شار هارمونیک در استاتور تولید می‌کند که اثر آن مشابه جریان‌های توالی منفی در هارمونیک اصلی است. شارهای درجه $3k + 2$ ($K = 1, 2, 3 \dots$) میدان‌های چپ‌گرد تولید نموده که حرارت زیادی در روتور ایجاد می‌کنند. کاهش راندمان و افزایش سر و صدا و لرزش از عواقب دیگر وجود هارمونیک است.

۳-۵- تأثیر بر ترانسفورمر

جریان هارمونیک سبب افزایش تلفات مسی و گرم شدن تانک ترانسفورمر نوع هسته‌ای می‌شود. ولتاژ هارمونیک سبب افزایش تلفات هسته، تنش الکتریکی بر عایق، نوسان پتانسیل نقطه خنثی سیم‌پیچ و تغییر فرم (اعوجاج) ولتاژ می‌گردد.

۴-۵- تأثیر بر کابل

ولتاژ هارمونیک سبب افزایش تنش دی الکتریک و ایجاد پدیده کرونا می‌شود که خرابی عایق را به همراه دارد. در هارمونیک‌های درجه بالا، پدیده پوستی سبب ایجاد حرارت اضافی و کاهش ظرفیت می‌گردد. جریان هارمونیک سوم و مضربی از سه، می‌تواند از هادی نول عبور نموده و سبب کاهش ظرفیت گردد. استاندارد IEC 60364-5-52، نحوه تعیین کاهش ظرفیت کابل به سبب عبور جریان هارمونیک سوم از هادی نول را ارائه می‌دهد.

۵-۵- تأثیر بر خازن

راکتانس کاپاسیتیو همراه با افزایش فرکانس، کاهش می‌یابد و لذا ولتاژ هارمونیک، جریان هارمونیک بیشتری از خازن عبور داده و ایجاد اضافه بار می‌کند، به طوریکه مثلاً 15% ولتاژ هارمونیک هفتم سبب عبور جریان هارمونیک هفتم $105 = 7 \times 15$ درصدی می‌گردد. ولتاژ هارمونیک سبب افزایش تنش دی الکتریک بر عایق خازن می‌گردد.

۵-۶- تأثیر بر رله‌های حفاظتی

رله‌های الکترونیکی حساسیت چندانی به هارمونیک ندارند. اکثر کنتاکتورها و رله‌ها به اعوجاج ولتاژ کمتر از 20% حساس نمی‌باشند. رله جریانی 50/51 N (به سبب عبور جریان هارمونیک سوم) و رله امپدانس، متأثر از فرکانس می‌باشند.

۵-۷- تأثیر بر لامپ

هارمونیک ولتاژ سبب افزایش پیک ولتاژ و در نتیجه کاهش عمر لامپ رشته‌ای می‌گردد. المان‌های C و L موجود در لامپ فلورسنت می‌توانند عامل ایجاد تشدید موازی گردند.

۵-۸- تأثیر بر خطای فاز به زمین

در سیستم‌های MV که زمین آنها از نوع ایزوله است، امپدانس مسیر خطا از نوع کاپاسیتیو است و لذا با افزایش فرکانس مقدار آن کاهش یافته و جریان زیاد هارمونیک مانع از خاموش شدن قوس الکتریکی در محل خطا می‌گردد.

۵-۹- تأثیر بر تجهیزات الکترونیکی

در کنترل الکترونیکی، از پیک یا صفر ولتاژ استفاده به عمل می‌آید. وجود هارمونیک سبب تغییر این پارامترها گردیده و کارکرد مناسب سیستم را مختل می‌سازد.

۵-۱۰- تأثیر بر هادی نول

در صورت وجود بار غیر خطی تک‌فاز، اگر بار سیستم سه فاز متعادل باشد، جریان هارمونیک سوم و مضربی از سه از هادی نول عبور کرده و سبب اضافه بار هادی می‌شود. در حالت نامتعادل بودن بار سیستم سه فاز، جریان نامتعادلی فازها نیز به جریان هادی اضافه می‌گردد. بارهای غیر خطی سه فاز با اتصال مثلث قادر به اخذ جریان هارمونیک سوم و مضربی از سه، از شبکه نمی‌باشند در حالیکه سیستم‌های ترادف مثبت و منفی را منتقل نموده و سبب افزایش مقدار موثر جریان می‌شوند.

۵-۱۱- تأثیر بر کارکرد فیوز و بریکر

فیوز در برابر عبور جریان مؤثر I_{eff} (که جریان‌های هارمونیک را نیز در برمی‌گیرد) عمل می‌کند و لذا هارمونیک سبب جابجایی منحنی عملکرد آن می‌شود. جریان هارمونیک می‌تواند سبب افزایش di/dt در لحظه صفر جریان گردیده و قطع جریان در بریکر را با مشکل روبرو کند. عدم کارایی بریکر می‌تواند مربوط به بویین دمیدن هوا باشد که عامل آن وجود جریان هارمونیک است.

۵-۱۲- تأثیر بر ضریب قدرت

به طور کلی ضریب قدرت طبق رابطه $PF = P/S$ تعریف می‌شود. در شرایط سینوسی بودن کمیت، فقط هارمونیک اصلی وجود دارد و رابطه $PF_1 = P_1/S_1 = \cos\phi_1$ برقرار است که ضریب قدرت پایه نامیده می‌شود. در شرایط وجود هارمونیک در سیستم، مؤلفه دومی برای ضریب قدرت تعریف شده که در ذیل بررسی می‌گردد:

با تغییر فرم معادلات بند ۳-۴، داریم:

$$V_{eff} = V_1 \sqrt{1 + THD^2 u}$$

$$I_{eff} = I_1 \sqrt{1 + THD^2 i}$$

برای توان ظاهری S ، توان راکتیو P و ضریب قدرت PF داریم:

$$S = V_{eff} \times I_{eff}$$

$$P = \sum_1 P_h = P_1 + P_2 + P_3 \dots$$

$$PF = P/S$$

معادله ساده شده ای برای PF به دست می‌آید با فرض اینکه از توان‌های اکتیو مربوط به هارمونیک‌ها ($P_2, P_3, \dots$) صرف‌نظر شود، یعنی $P \approx P_1$ ، دیگر اینکه V_{eff} برابر V_1 اختیار شود یعنی $THDu$ که عموماً کمتر از ۱۰٪ است تأثیری بر V_{eff} ندارد.



جدول (۴): ضریب قدرت بارهای تک فاز خانگی

Load Type	PF	PF ₁	PF _h	TDHi [%]
Ceiling Fan	0.999	0.999	1.0	1.8
Refrigerator	0.867	0.875	0.991	13.4
Microwave Oven	0.982	0.998	0.984	18.2
Vacuum Cleaner	0.921	0.951	0.988	26
Fluorescent Lamp	0.889	0.956	0.930	39.5
Television	0.629	0.988	0.637	121
Desk Computer & Printer	0.58	0.999	0.581	140

کردن از مقاومت اهمی مدار و استفاده از رابطه $X_L = X_C$ برابر می گردد با :

$$f_r = f_1 \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \text{ [HZ]}$$

که در آن f_1 فرکانس اصلی و X_C , X_L راکتانس های مدار در فرکانس اصلی می باشند. فرکانس طبیعی اکثر سیستم های قدرتی در حدود چند کیلوهرتز است و از آنجا که منبع جریان هارمونیک با این محدوده فرکانسی وجود ندارد، لذا تشدید بازه فرکانس طبیعی ایجاد نمی گردد. مشکل تشدید از آنجا ظاهر می شود که سیستم دارای بارهای غیر خطی و خازن اصلاح ضریب قدرت باشد و فرکانس طبیعی سیستم برابر فرکانس جریان تولید شده توسط بار غیر خطی گردد. در این شرایط جریان و ولتاژ هارمونیک زیادی تولید می گردد.

۵-۱۳-۱- تشدید سری

المان های X_C , X_L در یک مدار الکتریکی می توانند بصورت سری یا موازی ظاهر شوند لذا دو نوع تشدید سری و موازی وجود دارد. در مدار الکتریکی شکل ۱، از دید بار غیر خطی، ترانسفورمر و خازن بصورت سری ظاهر می شوند و لذا با افزایش فرکانس، مقدار امپدانس مدار کاهش یافته و در فرکانس تشدید (f_r) به حداقل مقدار (برابر مقاومت اهمی مدار R) می رسد و مسیری با مقاومت کم به جریان با فرکانس f_r عرضه می کند. تغییرات

$$PF = P / S = [P_1 / V_1 \cdot I_1] \times [1 / \sqrt{1 + THD^2}]$$

$$= PF_1 \times PF_h$$

مشاهده می گردد که ضریب قدرت واقعی^۱ از حاصل ضرب دومولفه تشکیل شده مولفه $PF_1 = \cos \Phi_1$ ضریب قدرت پایه (فقط هارمونیک اصلی) است که توسط دستگاه های اندازه گیری متداول سنجیده شده و هزینه برق مصرفی براساس آن تعیین می شود. مولفه دوم (PF_h)^۲، ضریب قدرت هارمونیک تعریف شده که به میزان هارمونیک های جریان بستگی دارد و قابل بهبود توسط نصب خازن نمی باشد.

ضریب توان واقعی PF مقیاسی برای ظرفیت تولید سیستم (توان S) است و هر چه به PF_1 نزدیک تر باشد از هزینه تولید و تلفات سیستم کاسته می گردد. ضریب PF توسط دستگاه خاصی به نام True Power Meter قابل اندازه گیری است.

۵-۱۳-۲ تشدید هارمونیک

از جمله اثرات عمده وجود هارمونیک در سیستم الکتریکی، ایجاد پدیده تشدید است. تشدید حالت خاصی از مدار الکتریکی است که در آن به ازاء یک فرکانس خاص (فرکانس تشدید) راکتانس اندوکتیو مدار X_L برابر راکتانس کاپاسیتیو X_C می گردد.

هر مدار در فرکانس خاصی که فرکانس طبیعی^۴ نامیده می شود، تشدید می گردد. مقدار این فرکانس با صرف نظر

- 1-True power Factor
- 2--Distortion Power Factor
- 3-Harmonic Resonance
- 4-Natural Frequency



امپدانس مدار بر حسب متغیر فرکانس را مشخصه فرکانسی^۱ می‌نامند که در مطالعات هارمونیکی از اهمیت خاصی برخوردار است. در تشدید سری، ولتاژ در المان‌های C, L به مراتب بزرگتر از ولتاژ کل مدار است.

۵-۱۳-۲- تشدید موازی

در شکل (۲) از دید منبع هارمونیک‌زا، راکتانس‌های خازن و ترانس به صورت پارالل ظاهر می‌شوند. در مدار موازی با افزایش فرکانس، مقدار امپدانس مدار افزایش یافته و در فرکانس تشدید به حداکثر مقدار می‌رسد و سبب ایجاد اضافه ولتاژ در المان‌ها می‌گردد. فرکانس تشدید موازی مشابه تشدید سری است که به صورت ذیل نیز بیان می‌شود:

$$f_r = f_1 \sqrt{X_C / X_L} = \sqrt{S_f / Q_C}$$

S_f قدرت اتصال کوتاه در محل و Q_C ظرفیت بانک خازنی است. X_L راکتانس ترانسفورمر و شبکه، و X_C خازن گسترده خطوط انتقال را نیز در بر می‌گیرد.

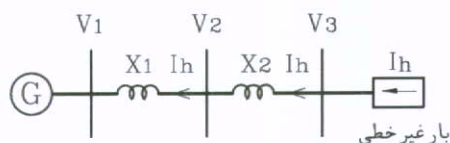
۶- مطالعات هارمونیکی

در مطالعات هارمونیکی، پارامترهایی نظیر اعوجاج، مقادیر موثر کمیت‌های جریان و ولتاژ، و تلف هارمونیکی تعیین می‌شود. این مطالعات در حالت کلی توسط نرم‌افزار صورت می‌گیرد و فقط برای مدارهای بسیار ساده، که دو نمونه آن در بند ۷ ارائه شده، می‌توان از محاسبات دستی استفاده نمود.

۶-۱- مسیر جریان هارمونیکی

جریان هارمونیکی ایجاد شده توسط بار غیر خطی به طرف مسیر با کمترین امپدانس جاری می‌شود. امپدانس شبکه که شامل امپدانس خط و کابل و ترانس‌های موجود تا محل منبع تغذیه می‌باشند، به مراتب کمتر از امپدانس مسیرهای موازی ایجاد شده توسط مصرف‌کننده‌ها می‌باشد و لذا بخش عمده‌ای از این جریان‌ها جذب شبکه می‌شوند. در صورت وجود خازن، جریان هارمونیک‌های درجه بالا بطرف خازن، که امپدانس کمتری در فرکانس‌های بالا دارد، جاری می‌شوند. به هر حال توزیع

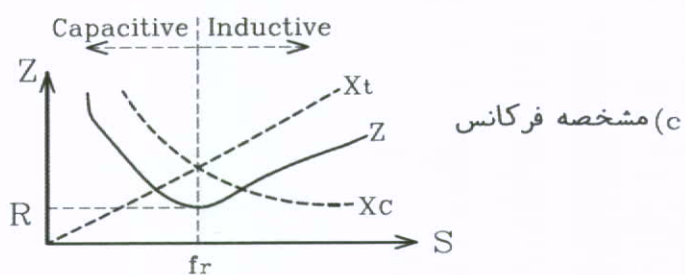
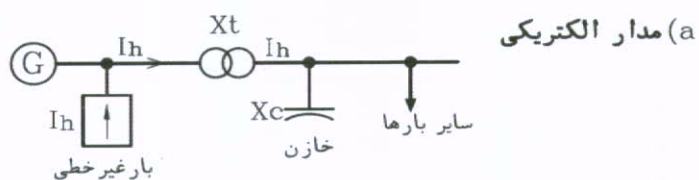
جریان تابع امپدانس‌های مسیر می‌باشد. با عبور جریان هارمونیکی از امپدانس‌های خطی شبکه (ترانسفورمر، خط ...) که به طور سری بین بار خطی و منبع قدرت قرار دارند، افت ولتاژ هارمونیکی ایجاد و سبب تغییر فرم ولتاژ در باس‌ها می‌گردد. در شکل (۳)، بخشی از جریان هارمونیکی I_h به طرف شبکه جاری و در راکتانس‌های $X_1, X_2, \dots$ (خط، ترانسفورمر) افت ولتاژ V_h را ایجاد می‌کند. با اضافه شدن V_h به ولتاژ باس V_1 ، ولتاژ باس V_2, V_3 غیر سینوسی می‌گردد به طوری که بیشترین اعوجاج در باس V_3 پدید می‌آید. میزان تغییر فرم ولتاژ به حاصل ضرب جریان و امپدانس شبکه بستگی دارد و از آنجا که جریان توسط بار هارمونیک‌زا و به میزان معینی تولید می‌شود، لذا کنترل ولتاژ هارمونیکی سیستم توسط امپدانس شبکه صورت می‌گیرد و بایستی در طراحی سیستم بدان پرداخته شود. بطور کلی، کنترل جریان هارمونیکی توسط مصرف‌کننده (بار هارمونیک‌زا) و کنترل ولتاژ هارمونیکی توسط شبکه صورت می‌گیرد.



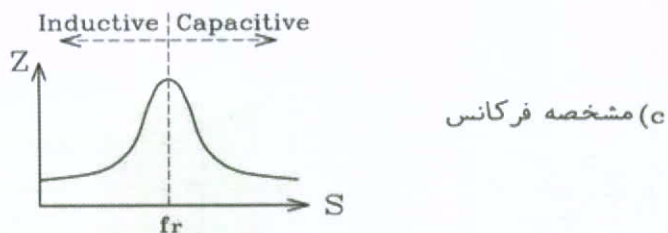
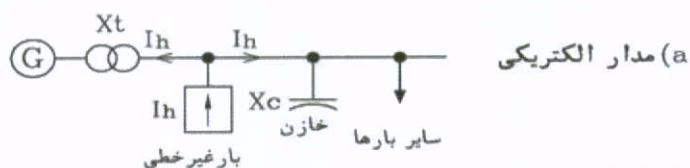
شکل ۳: نحوه تولید ولتاژ هارمونیکی

۷- محاسبات هارمونیکی

در محاسبات هارمونیکی میزان اعوجاج ولتاژ در باس‌ها، اعوجاج جریان در فیدرها، مقادیر موثر جریان و ولتاژ و ظرفیت خازن اصلاح ضریب قدرت تعیین می‌گردد. برای مدار بسیار ساده که یک نمونه آن در مثال ۱ ارائه شده، می‌توان از محاسبات دستی استفاده نمود ولی برای مدارهای پیچیده بایستی از نرم‌افزار مخصوص استفاده بعمل آید. به طور کلی مطالعه هارمونیکی در مواردی صورت می‌گیرد که قدرت اتصال کوتاه S_f کمتر از ۲۰ الی ۳۰ برابر توان بارهای غیرخطی باشد.



شکل ۱: تشدید سری



شکل ۲: تشدید موازی

۴- تعیین مقادیر مؤثر کمیات خازن:

$$I_{eff} = \sqrt{I_1^2 + I_5^2} = 554.5 \text{ A}$$

$$I_1 = (V / \sqrt{3}) / (X_C - X_L) = 438.7 \text{ A}$$

$$I_5 = 0.3 I_n = 0.3 [PL / (\sqrt{3} V)] = 339.2 \text{ A}$$

$$V_{eff} = \sqrt{V_1^2 + V_5^2} = 508.5 \text{ V}$$

$$V_1 = \sqrt{3} \cdot I_1 \cdot X_C = 502.6 \text{ V}$$

$$V_5 = \sqrt{3} \cdot I_5 (X_C / h) = 77.3 \text{ V}$$

$$V_{peak} = V_1 + V_5 = 580 \text{ V}$$

$$Q_{Ceff} = \sqrt{3} \cdot I_{eff} \cdot V_{eff} = 490 \text{ KVAR}$$

۵- مقایسه نتایج محاسبات با مقادیر مجاز

مقادیر مجاز چهار کمیت مربوط به خازن در استاندارد IEEE Std. 18 تعیین شده که در جدول شماره (۵) ارائه گردیده است.

با توجه به اینکه با انتخاب $Q_c = 350 \text{ KVAR}$ ، برخی از کمیات از حد مجاز بیشتند، با افزایش Q_c به 400 KVAR ، کمیت ها در حد مجاز قرار گرفته اند.

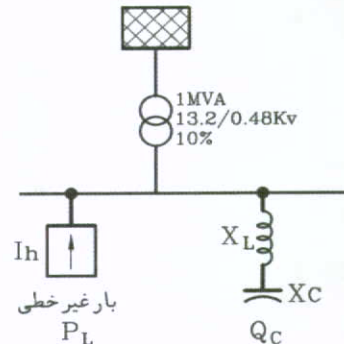
جدول ۵

	$Q_c = 350$ KVAR $I_n = 421 \text{ A}$	مقادیر مجاز	$Q_c = 400$ KVAR $I_n = 481 \text{ A}$
100 (I _{eff} /I _n)	132%	180%	125.8%
100 (V _{eff} /I _n)	106%	110%	105%
100 (V _{peak} /V _n)	121%	120%	118%
100 (Q _{eff} /Q _n)	140%	135%	132%

مثال ۲: در این مثال نحوه محاسبه میزان اعوجاج ولتاژ باس برای هر یک از هارمونیک ها ارائه می شود. مشابه شکل ۴ بار هارمونیک زای $P_L = 240 \text{ KW}$ (مبدل قدرت) با ضریب قدرت 0.8 و خازن $Q_c = 160 \text{ KVA}$ از باس 400 ولت تغذیه می شوند. مشخصات ترانس 6%، 10/0.4 KV، 1 MVA و میزان هارمونیک های جریان مبدل به شرح ذیل است:

h	1	5	7	11	13	17	19
I%	100	20	14.3	9.1	7.7	5.9	5.3

مثال ۱: طبق شکل ۴ بار غیر خطی $P_L = 940 \text{ kw}$ با ضریب قدرت 0.82 از باس 480 ولت تغذیه شده و جریان هارمونیک پنجم $I_5 = 0.3 I_n$ را تولید می کند، با محاسبات ذیل برخی از ویژگی های مطالعات هارمونیک می گردد:



شکل ۴: مدار الکتریکی مثال ۱

۱- تعیین ظرفیت خازن جهت افزایش ضریب قدرت به مقدار 0.95:

$$Q_c = P_L (tg \phi_1 - tg \phi_2) = 940 [tg (\cos^{-1} 0.82) - tg (\cos^{-1} 0.95)] = 347 \text{ KVAR} (\approx 350 \text{ KVAR})$$

۲- تعیین فرکانس تشدید:

$$f_r = f \sqrt{S_f / Q_c} = 267 \text{ Hz} (h = 5.35)$$

$$S_f = S_t / U_k = 1 / 0.1 = 10 \text{ MVA}$$

$$SCR = I_{sc} / I_L = S_f / PL = 10.2 < 20$$

SCR ضریب بزرگی شبکه است و مقیاسی برای Stiffness شبکه است. برای مقادیر کوچکتر از 20، استفاده از فیلتر لازم است.

۳- تعیین فیلتر برای خنثی کردن هارمونیک پنجم جریان:

فیلتر انتخاب شده یک سلف X_L سری شده با خازن است و در هارمونی پنجم تشدید ایجاد می کند: رآکتانس خازن در هارمونیک اصلی:

$$X_c = V^2 / Q_c = 0.658 \Omega$$

رآکتانس سلف در هارمونیک اصلی:

$$X_L = X_c / h^2 = 0.0263 \Omega$$

که از رابطه $X_L = X_c / h$ به دست آمده است.

نتایج محاسبات در جدول (۶) ارائه شده که برای آن از معادلات ذیل استفاده گردیده است:

$X_h = (X_T \cdot X_C) / (X_T - X_C)$	[Ω]	راکتانس مدار موازی
$X_t = [(U_k \cdot V^2) / S_t] \cdot h$	[Ω]	راکتانس ترانسفورمر
$X_C = [V^2 / h \cdot Q_c]$	[Ω]	راکتانس خازن
$V_h = \sqrt{3} \cdot I_h \cdot X_h$	[V]	ولتاژ باس
$I_h = I\% [PL / (\sqrt{3} \cdot V \cdot \cos \phi)]$	[A]	جریان هارمونیک بار
$IHD_u = 100 (V_h / V_1)$	[%]	فاکتور اعوجاج تکی ولتاژ باس
$THD_u = 100 \sqrt{\sum_{h=2}^{19} V_h^2} = 9.8$	[%]	فاکتور اعوجاج کلی ولتاژ باس
$I_c = (V_h / \sqrt{3}) / X_C$	[A]	جریان خازن
$I_{c(eff)} = \sqrt{\sum_{h=1}^{19} I_c^2} = 344$	[A]	جریان موثر خازن

جدول (۶): محاسبات مثال ۲

h	X_t	X_C	X_h	I_h	V_h	IHD_u	I_c
1	0.01	-1.0	0.01	433	-	-	231
5	0.048	-0.2	0.064	87	10	2.4	29
7	0.067	-0.143	0.127	62	14	3.4	57
11	0.106	-0.091	0.49	39	33	8.3	209
13	0.125	-0.077	0.092	33	11	2.8	83
17	0.163	-0.059	0.091	25	4.0	1.0	39
19	0.182	0.053	0.073	23	0.7	0.7	32.5

نتیجه

- ۳- حداکثر فاکتور اعوجاج تکی ولتاژ باس برابر ۸.۳٪ و فاکتور اعوجاج کلی برابر ۹.۸ درصد است که هر دو از مقادیر مجاز (بند ۴-۱) بیشترند.
- ۴- مقدار موثر جریان خازن ۳۳۴ آمپر است که اضافه بار ۴۴٪ را نشان می‌دهد.

- ۱- پدیده تشدید موازی در حدود هارمونیک یازدهم ایجاد می‌شود و راکتانس مدار موازی به حداکثر مقدار می‌رسد.
- ۲- در فرکانس تشدید، جریان خازن به ۲۰۹ آمپر می‌رسد که حدود ۹۰٪ جریان اسمی خازن است در حالیکه جریان هارمونیک یازدهم در بار غیر خطی برابر ۳۹ آمپر است.

۸- کاهش هارمونیک

جهت حذف هارمونیک از راهکارهای ذیل استفاده می‌شود:
اصلاح ساختار بارهای غیرخطی، استفاده از فیلتر، استفاده از ترانسفورمر ایزوله

۸-۱- اصلاح ساختار

بسته به نوع بار غیرخطی، میتوان هارمونیک را با تغییراتی در ساختار و فن‌آوری، کاهش داد. استفاده از سلف در بخش DC یا AC یک کانورتر، سبب کاهش هارمونیک می‌شود. همچنین افزایش تعداد پالس‌های کانورتر، کاهش هارمونیک را به همراه دارد.

۸-۲- استفاده از فیلتر

دو نوع فیلتر فعال^۱ و غیر فعال^۲ وجود دارد که می‌توانند به صورت موازی یا سری در سیستم قرار گیرند. فیلتر غیرفعال موازی از المانهای سری شده L و C تشکیل شده به طوریکه یک مسیر با امپدانس ناچیز به هارمونیک مورد حذف ارائه داده و از ورود آن به شبکه جلوگیری می‌کند. فیلتر غیرفعال سری از المانهای L و C به صورت پارالل استفاده می‌کند که بین شبکه و بار قرار گرفته و امپدانس زیادی در برابر فرکانس مورد حذف ایجاد می‌کند و مانع عبور جریان هارمونیکی به شبکه می‌شود. این امپدانس برای فرکانس اصلی بسیار کم است تا خللی در انتقال قدرت به بار ایجاد نشود. فیلتر فعال از یک سیستم الکترونیکی قدرت استفاده می‌کند که موج جریان در خلاف جهت جریان هارمونیکی تولید نموده و سبب حذف آن می‌گردد. در فیلتر فعال سری، امپدانس فیلتر توسط سیستم الکترونیکی قدرت کنترل می‌شود.

۸-۳- استفاده از ترانسفورمر ایزوله

ترانسفورمر اتصال مثلث، مشابه فیلتر غیرفعال سری عمل کرده و مانع انتقال جریان هارمونیک سوم به شبکه می‌گردد. این جریان در مدار بسته سیم پیچ مثلث باقی می‌ماند. نتیجه مشابهی را اتصال زیگزآگ ترانسفورمر ارائه می‌دهد. در موردی که چند ترانسفورمر با گروه‌برداری متفاوت، بارهای غیر خطی را تغذیه کنند، برخی هارمونیک‌های آنها یکدیگر را خنثی می‌سازند (مرجع 7).

مراجع:

- 1- IEEE Std. 141 Elec. Power Distr. for Industrial Plants
- 2- IEEE Std. 241 Elec. Power Sys. In Commercial Buildings
- 3- IEEE Std. 399, Industrial Power Sys. Analysis
- 4- IEEE Std. 519, Harmonic Control In Elec. Power Sys.
- 5- IEC 61642, Industrial AC Network Affected by Harmonics
- 6- Electrical Power Sys. Quality, by Dugan
- 7- Handbook of Power Quality, by A. Baghini
- 8- Power Quality Primer, by Kennedy
- 9- Power Sys. Harmonics, by Acha

بیوگرافی

آقای کاوس قصبه دارای فوق لیسانس مهندسی برق از آلمان (سال ۱۳۴۵) و دکترای مهندسی برق از انگلستان (سال ۱۳۵۳) می‌باشد. ایشان تا سال ۱۳۶۲ به تدریس در دانشگاه صنعتی شریف پرداخته و ۲۹ سال در شرکت قدس نیرو سابقه کارشناسی و سرپرستی دارد. زمینه فعالیت آقای قصبه، به طور کلی سیستم‌ها و تجهیزات برق نیروگاه بوده و زمینه تخصصی و علاقمندی ایشان ماشین‌های الکتریکی و ترانسفورمرها می‌باشد.

Email:

kghassabei @ ghods-niroom.com



طراحی عایق بندی خط انتقال HVDC سمنان - اصفهان

علیرضا رئیسی

مدیر گروه تخصصی خطوط انتقال نیرو - SBU شبکه

کامران رضایی

کارشناس خطوط انتقال نیرو - SBU شبکه

چکیده

هدف از ارائه این مقاله طراحی عایق بندی، تعیین فاصله بین دو قطب (بر فرض دو قطبی بودن سیستم) و سایر فواصل مجاز الکتریکی خط انتقال HVDC سمنان - اصفهان می باشد. در نهایت با توجه به فواصل الکتریکی به دست آمده دیاگرام الکتریکی برج های آویزی ارائه می گردد.

۱- مقدمه

مبنای محاسبات ایزولاسیون در خطوط انتقال HVDC مشابه خطوط انتقال AC می باشد. هر چند درجه اهمیت اضافه ولتاژهای متفاوت در خطوط HVDC با AC تفاوت دارد. ولتاژها به طور عموم بنا به پارامترهای متفاوتی طبقه بندی می شوند. این پارامترها شامل مدت زمان اثر، سطح ولتاژ عملکرد و شکل اضافه ولتاژهای موثر بر روی عایق بندی تجهیزات می باشند. با توجه به این موارد ۶ کلاس برای ولتاژها و اضافه ولتاژهای موثر در سیستمهای انتقال تعریف می شود (IEC 60071-2):

- ولتاژهای دائم (عملکرد): ولتاژی که تحت شرایط عادی عملکرد به سیستم اعمال می شود.
- اضافه ولتاژهای موقت و گذرا: اضافه ولتاژهایی که ناشی از خطا، عملیات کلید زنی (Switching)، پدیده رزنانس، شرایط عملکرد غیر خطی (فرو رزنانس) می باشند.
- اضافه ولتاژهای slow - front: اضافه ولتاژهایی که ناشی از خطا، عملیات کلید زنی (Switching) یا برخورد مستقیم صاعقه با هادی خطوط انتقال می باشند.
- اضافه ولتاژهای fast - front: اضافه ولتاژهایی که ناشی از خطا، عملیات کلید زنی (Switching) یا برخورد صاعقه می باشند.
- اضافه ولتاژهای very - fast - front: اضافه ولتاژهایی که ناشی از خطا، عملیات کلید زنی (Switching) در پستهای GIS می باشند.
- اضافه ولتاژهای ترکیبی: اضافه ولتاژهایی که ممکن است ناشی از هر یک از موارد فوق باشد. این نوع اضافه ولتاژ مابین فازهای یک سیستم رخ می دهد (فاز به فاز) یا در طول یک فاز در نواحی مختلف سیستم.

خطوط HVDC تحت تاثیر ولتاژهای عملکرد، اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه و اضافه ولتاژهای ناشی از خطاهای القایی (ناشی از کلید زنی) قرار دارند. اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه و اضافه ولتاژهای ناشی از خطاهای القایی، مبنای طراحی اولیه طول زنجیر مقرر و فاصله هوایی می باشند. میزان آلودگی مسیر خط در ولتاژ عملکرد مبنایی برای به دست آوردن فاصله خزشی می باشد.

خطاهای القایی در سیستمهای DC عموماً از امواج کلید زنی (Switching) در سیستمهای AC کمتر است و این به علت خاصیت میرایی در ایستگاه مبدل (Converter) است.

اضافه ولتاژهای موقت یا slow - front معمولاً در سیستمهای HVDC حائز اهمیت نیستند. چنین اضافه ولتاژهای زودگذری معمولاً مختص به امواج القاء شده در قطب سالم هستند که به خاطر ایجاد خطای زمین در قطب دیگر سیستمهای bi polar وجود می آیند. این نوع اضافه ولتاژ معمولاً مقداری کمتر از p.u. ۱/۷ دارند که کمتر از مقدار اضافه ولتاژ معمول ناشی از switching سیستمهای AC می باشد.

اکثر اضافه ولتاژهای fast - front ناشی از صاعقه می باشند. عملکرد خطوط DC در این شرایط مشابه خطوط AC می باشد ولیکن طول زنجیری که برای ولتاژ عملکرد خط طراحی شده است در پی اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه هم عملکرد مطلوبی را تضمین خواهد کرد.

بنابر این با توجه به اضافه ولتاژهای slow front و fast front زنجیره مقرر ای کوتاه تر از آنچه در خطوط AC لحاظ می گردیده نیاز است. پس برای تحمل ولتاژ عملکرد توسط زنجیر مقرر میزان آلودگی تعیین کننده می باشد.

۲- محاسبات ایزولاسیون در ولتاژ عملکرد

ولتاژ عملکرد سیستم DC معادل ولتاژ Power Frequency سیستمهای AC می باشد. این ولتاژی است که به خط در شرایط



عادی اعمال می شود. ملاحظات آلودگی در این ولتاژ بررسی خواهد شد. میزان تجمع آلودگی روی خطوط HVDC چندین برابر بیشتر از خطوط AC است. بنابراین این در طراحی مقرر ها، میزان آلودگی به مراتب برای مقرر های DC از مقرر های AC بیشتر است. (حتی ۱۰ تا ۱۰۰ برابر بیشتر). استفاده از مقرر هایی با فاصله خزشی زیاد برای کوتاه کردن طول زنجیر مقرر باید مد نظر قرار گیرد. با توجه به زیاد بودن اثر آلودگی، مقرر های cap and pin ضد مه که نسبت فاصله خزشی به ارتفاع آنها در محدوده ۲/۸ تا ۳/۲ می باشد برای خطوط HVDC بسیار مناسب می باشند. همچنین مقرر های Composite ضد آب نیز گزینه مناسبی هستند. قابلیت شستشوی طبیعی در خطوط HVDC بسیار اهمیت دارد. چگالی جریان ناشی در نزدیکی گیره (pin) مقرر cap and pin از نقاط دیگر بیشتر است و سبب خشک ماندن آن محدوده می گردد. در این منطقه گرادیان ولتاژ سطحی بسیار بالاست. استفاده از نوار zinc در اطراف گیره (pin) به عنوان الکترود راه حل مناسبی است. تراکنش بین ذرات معلق در هوا در اطراف زنجیر مقرر باعث توزیع غیر خطی آلودگی در طول زنجیره مقرر می شود. این نیروها با توجه به نیروی باد و نیروهای الکتریکی ناشی از شارژ و دشارژ ذرات در یک میدان الکتریکی غیر متقارن به وجود می آیند. بنابراین تحت تاثیر یک میدان الکتریکی نامتقارن، ذرات شارژ شده و حتی شارژ نشده در اطراف زنجیر مقرر به حرکت واداشته می شوند و جذب دو سر برق دار و زمین

شده زنجیر مقرر می شوند (محلی که شدت میدان الکتریکی بیشتر است). توزیع اتفاقی آلودگی باعث توزیع غیر خطی ولتاژ در طول زنجیر مقرر می گردد که کاهش ولتاژ دشارژ (تخلیه) را در پی خواهد داشت. برای کاهش آلودگی مقرر و بهبود توزیع آلودگی در طول زنجیر حلقه های پتانسیل (potential grading rings) (در دو سر زنجیر نصب می گردد. میدان الکترو مغناطیس در اطراف مقرر ها طوری تغییر می کند که گرادیان ولتاژ در سطح حلقه بیشتر باشد و در نتیجه ذرات به جای اینکه جذب مقرر شوند جذب آن حلقه می گردند. کاهش آلودگی با استفاده از حلقه های جمع کننده (collector rings) در قطب مثبت بیشتر از قطب منفی است. همچنین تاثیر حلقه ها بر آلودگی سطوح زیری مقرر ها بیشتر از سطوح بالایی می باشد. جدول (۱) مقدار فاصله خزشی مورد نیاز را طبق استاندارد IEC60815 برای سطوح مختلف آلودگی نشان می دهد. باید در نظر داشت که فاصله خزشی در حالت DC، ۷۳٪ برابر به اضافه ۵٪ می باشد. علت این است که فواصل مورد نیاز طبق استاندارد IEC60815 برای ولتاژ فاز به فاز منظور گردیده است. از آنجائیکه که ولتاژهای نامی خط DC (ولتاژ قطب مثبت یا قطب منفی) هم ارز با ولتاژ فاز به زمین خطوط AC می باشند ضریب ۷۳٪ برای این تبدیل به کار رفته است. همچنین به دلیل حساسیت بالای خطوط DC نسبت به آلودگی، ولتاژ قطبها ۵٪ بالاتر در نظر گرفته شده است.

جدول (۱): سطوح آلودگی و حداقل فاصله خزشی توصیه شده بر اساس استاندارد IEC 60 071-2 و IEC60815

سطح آلودگی	توضیحات	حداقل فاصله خزشی AC mm/kV	حداقل فاصله خزشی DC mm/kV
سبک	- مناطق غیر صنعتی با تعداد اندک خانه های مجهز به سیستم گرمایی - مناطقی با چگالی صنعتی و خانه های کم ولی تحت تاثیر بادهای متناوب / یا باران - مناطق کشاورزی - مناطق کوهستانی - تمامی مناطق فوق باید حداقل در فاصله ۱۰ تا ۲۰ کیلومتری دریا باشند و نباید تحت تاثیر وزش باد مستقیم از سمت دریا قرار داشته باشند	۱۶	۳۰
متوسط	- مناطق صنعتی که دودهای آلوده تولید نمی کنند / چگالی خانه های مجهز به سیستم گرمایی در آنها متوسط است - مناطقی با چگالی صنعتی و خانه های زیاد ولی تحت تاثیر بادهای متناوب / یا باران - مناطق متأثر از وزش باد از سمت دریا که خیلی به ساحل نزدیک نیستند (حداقل چند کیلومتر فاصله دارند)	۲۰	۴۰
سنگین	- مناطقی با چگالی صنعتی زیاد و حومه شهرهای بزرگ با خانه های مجهز به سیستم گرمایی که آلودگی تولید می کنند - مناطق نزدیک دریا یا تحت تاثیر بادهای شدید از سمت دریا	۲۵	۵۰
فوق سنگین	- مناطقی که به طور متوسط تحت تاثیر گرد و غبار هدایت کننده و دودهای صنعتی که آلودگیهای ضخیم هدایت کننده تولید می کنند قرار دارند - مناطقی که معمولاً خیلی نزدیک به ساحلی هستند که تحت تاثیر ذرات آب دریا و یا بادهای قوی آلوده کننده از سمت دریا می باشد - مناطق کویری که میزان بارش باران در آنها کم است و تحت تاثیر بادهایی می باشند که حامل ماسه و نمک هستند	۳۱	۷۰

با توجه به اینکه مسیر خط انتقال HVDC سمنان اصفهان از مناطقی عبور می کند که دارای خاکی با چگالی نمک بالا هستند و همچنین تحت تاثیر وزش بادهایی می باشند که از سمت دریاچه های نمک می آیند، کلاس آلودگی برای این پروژه باید کلاس فوق سنگین در نظر گرفته شود. بنابراین مطابق جدول فوق برای خط DC فاصله خزشی 70 mm/kV در نظر گرفته می شود. در صورتیکه از آرایش V برای مقره های آویزی استفاده شود این مقدار فاصله خزشی مورد نیاز می تواند تا ۱۰٪ کاهش یابد. هرچند در این طراحی این مقدار را به عنوان حاشیه ایمنی در نظر گرفته و فاصله خزشی مطلوب را همان 70 mm/kV در نظر میگیریم. همچنین به علت خاصیت خود شستشویی زنجیره مقره های V شکل در باران، در این پروژه از این نوع آرایش استفاده می شود (این امر مزیت جلوگیری از انحراف زنجیره مقره بر اثر باد را نیز در پی خواهد داشت). اگر ولتاژ خط را ± 500 کیلوولت در نظر بگیریم، فاصله خزشی کل مورد نیاز برابر با:

$$70 \times 500 = 35000 \text{ mm}$$

خواهد بود. در صورتیکه از مقره های ضد مه سرامیکی یا شیشه ای استفاده کنیم که ارتفاع واحد مقره آن ۱۶۵ میلیمتر و فاصله خزشی هر واحد مقره ۵۰۸ میلیمتر باشد تعداد مقره های مورد نیاز و طول مقره به صورت زیر محاسبه می شود:

$$35000 \div 508 = 68/89$$

یعنی ۶۹ واحد مقره با فاصله خزشی فوق لازم است. بنابراین طول کل مقره برابر است با: $m = 11385$ 69×165 که اگر ۴۰ سانتیمتر طول یراق آلات را نیز به آن اضافه کنیم طول زنجیره به حدود ۱۱/۷ خواهد رسید.

اگر ولتاژ خط را ± 400 کیلوولت در نظر بگیریم، فاصله خزشی کل برابر است با:

$$70 \times 400 = 28000 \text{ mm}$$

$$28000 \div 508 = 55/11$$

تعداد مقره های مورد نیاز: یعنی ۵۶ واحد مقره مورد نیاز است. که طول کل مقره برابر است با:

$$165 \times 56 = 9240 \text{ mm} = 9.24 \text{ m}$$

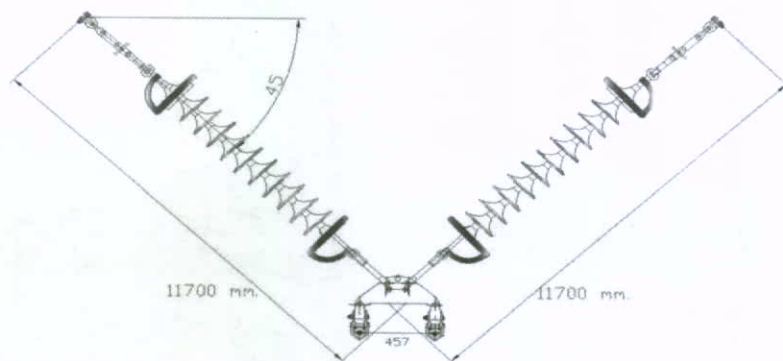
در صورت استفاده از مقره های کامپوزیت متعارف نیز به طولهایی مشابه دست می یابیم. هرچند با توجه به آلودگی منطقه استفاده از مقره های کامپوزیت توصیه می گردد. در این پروژه باید سعی شود مقره هایی مورد استفاده قرار گیرند که فاصله خزشی حداکثر را با کمترین طول (کمترین ارتفاع واحد مقره) دارند. شکل زیر آرایش زنجیره مقره ها را نشان می دهد.

۳- ملاحظات کلیدزنی:

اضافه ولتاژهای ناشی از عملیات کلیدزنی در یک سیستم HVDC هم در بخش DC و هم در بخش AC روی می دهند. در طرف AC اضافه ولتاژهای ناشی از عملیات کلید زنی زیر می باشند:

- برقرار شدن خط
- بسته شدن مجدد خط
- مردود شدن بار
- اعمال خطا
- برطرف کردن خطا
- کلیدزنی بار راکتیو

در سمت AC کلیه اضافه ولتاژهای ناشی از عملیات کلید زنی باید مورد توجه قرار گیرند. در طرف DC نیز کلیه اضافه ولتاژهای ذکر شده فوق در طراحی عایق بندی ایستگاه مبدل مورد توجه قرار می گیرند. با استفاده از surge arrester ها اضافه ولتاژها به مقادیر مربوط به حداکثر سطح ولتاژهای arrester محدود می شوند. توانایی دشوارتر arrester ها باید در مطالعات اضافه ولتاژ تجهیزات مورد بررسی قرار گیرد. از دیدگاه خط انتقال DC تنها اضافه ولتاژهای خطا از بین امواج کلیدزنی قابل توجه می باشند. سایر موارد قابل توجه نیستند؛ چراکه برای مثال در هنگام برقرار شدن خط و بسته شدن مجدد خط ولتاژ DC به آرامی و با شیب کم افزایش می یابد و در فرآیند بسته شدن مجدد، عملیات بی برق شدن موجب از بین رفتن شارژ باقیمانده می شود. همچنین مردود شدن بار معمولاً اضافه باری به طرف DC منتقل نمی کند و کلید زنی راکتیو بار (کلیدزنی فیلتر DC) نیز سبب اضافه ولتاژ نمی گردد.



شکل (۱): آرایش زنجیره مقره های آویزی از نوع V

یک فیلتر سری: $L=489 \text{ mH}$, $C=0/1 \text{ mF}$
 یک فیلتر موازی: $L=51/7 \text{ Mh}$, $C=0/3 \text{ mF}$, $R=467 \Omega$

د- ایستگاههای مبدل: همواره دو تایرستور آتش شده و جریان DC در سیم پیچهای ترانس جریان می یابد. به همین دلیل دو فاز از فازهای ترانس ترسیم شده است. برای مدل کردن ولتاژ DC یک ولتاژ AC کم فرکانس با فرکانس ۱ هرتز برای منابع در نظر گرفته شده است.

ه- خط انتقال DC: خط به هشت قسمت تقسیم شده است که هر قسمت به صورت خطی در نظر گرفته شده که تلفات موج سیر کننده در آن وجود ندارد. تلفات مقاومتی خط در انتهای هر قسمت مدل گردیده است. پارامترهای الکتریکی (مقاومت و اندوکتانس) به هر دو صورت وابسته به فرکانس و ثابت مدل گردیده است. پارامترهای خط به صورت زیر می باشند:

$$R=0/0094 \quad \Omega/\text{km}$$

$$L=0/98 \quad \text{mH}/\text{km}$$

$$C=12 \quad \text{nF}/\text{km}$$

- توالی صفر:

$$R_0=0/011 \quad \Omega/\text{km}$$

$$L_0=3/61 \quad \text{mH}/\text{km}$$

$$C_0=10/5 \quad \text{nF}/\text{km}$$

در این بخش مهمترین اضافه ولتاژ موثر در طراحی عایق بندی یعنی موج کلیدزنی ناشی از بروز خطا بررسی می شود. اضافه ولتاژها توسط برنامه مدل کننده محاسبه می گردند. شکل زیر مدل سیستم HVDC استفاده شده برای محاسبات اضافه ولتاژ های ناشی از خطا را نشان می دهد.

داده های سیستم مدل شده به صورت زیر می باشند:

الف- ژنراتور/سیستم گیرنده به صورت توان اتصال کوتاه شده مدل می شوند و توان مورد نیاز را تامین می کند. برای مثال در یکی از مدلها ظرفیتهای اتصال کوتاه به صورت زیر می باشند:

•• ۲۳۰۰۰ MVA برای اتصال کوتاه تک فاز

•• ۲۰۰۰۰ MVA برای اتصال کوتاه سه فاز

ب- ترانسفورماتورهای مبدل در هر دو ترمینال، معادل با یک ترانس در هر قطب با مشخصات زیر در نظر گرفته شده اند:

- توان: ۱۵۰۰ MVA در هر قطب

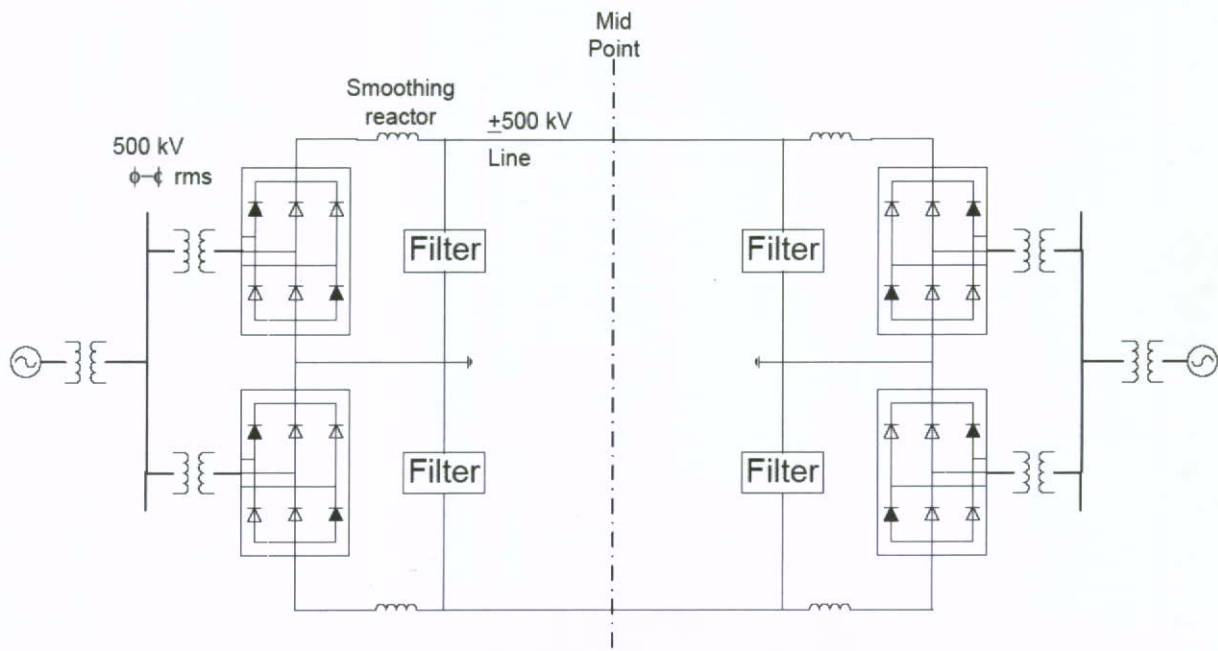
- راکتانس X_{cc} : ۱۸٪

- نسبت تبدیل: ۵۰۰/۳۷۰/۲ kV

ج- فیلترهای DC با مشخصات زیر:

- راکتورهای هموار ساز ۲۰۰ mH

- فیلتر DC برابر در هر دو ترمینال که مرکب از دو شاخه هستند.

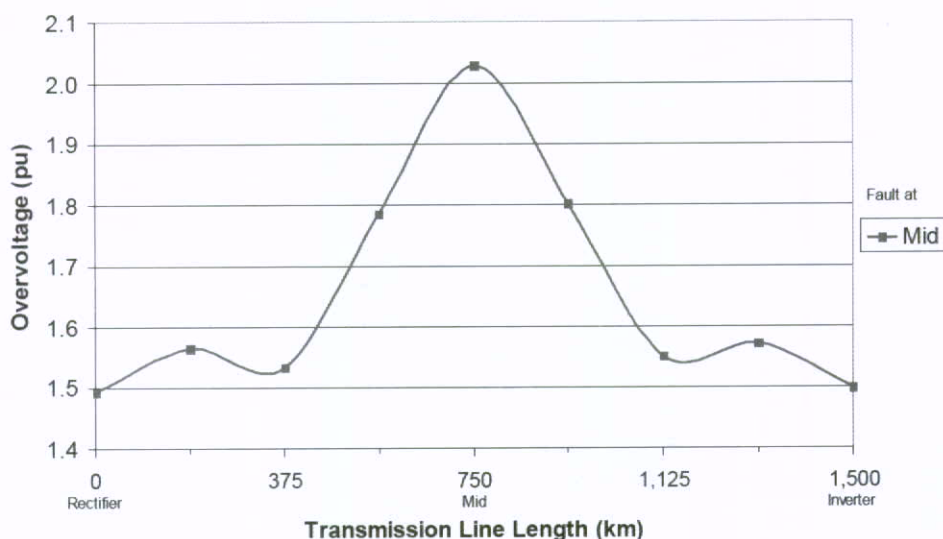


شکل (۲): مدل سیستم HVDC استفاده شده برای محاسبات اضافه ولتاژ های ناشی از خطای کلیدزنی

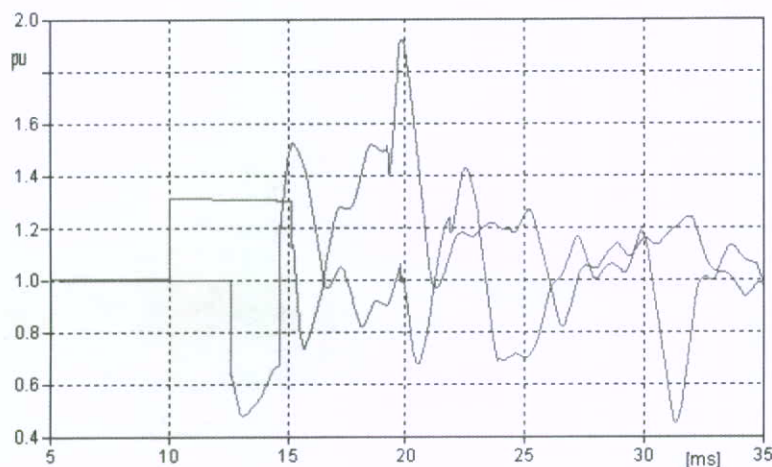


مستقل از فرکانس باشند (مدل Bergeron) شکل (۳) پروفیل حداکثر اضافه ولتاژ در قطب سالم را در صورت بروز خطا در نقطه وسط قطب دیگر نشان می دهد. با توجه به شکل (۳) حداکثر اضافه ولتاژ به $2/03$ پریونیت می رسد و این در حالی است که 25% از طول خط دارای اضافه ولتاژ بالای $1/8$ پریونیت می باشد (یعنی 15% کمتر از مقدار حداکثر). از طرفی انحراف استاندارد برای میزان تحمل عایق بندی در برابر موج کلید زنی 6% می باشد. بنابراین اضافه ولتاژ در قسمت اعظم خط کمکی به کاهش ریسک خطا نمی کند (چون 9% بیشتر از انحراف استاندارد است) و خط بر پایه مقدار حداکثر یعنی $2/03$ پریونیت طراحی می شود. اگر خط را به قسمتهای متعددی تقسیم کنیم به نحوی که هر قسمت کسری از طول کل خط باشد ($3/8$ و $1/4$ و $1/8$ و ...) شکل (۴) پروفیل اضافه ولتاژ را در صورت بروز خطا در سایر نقاط خط نشان می دهد.

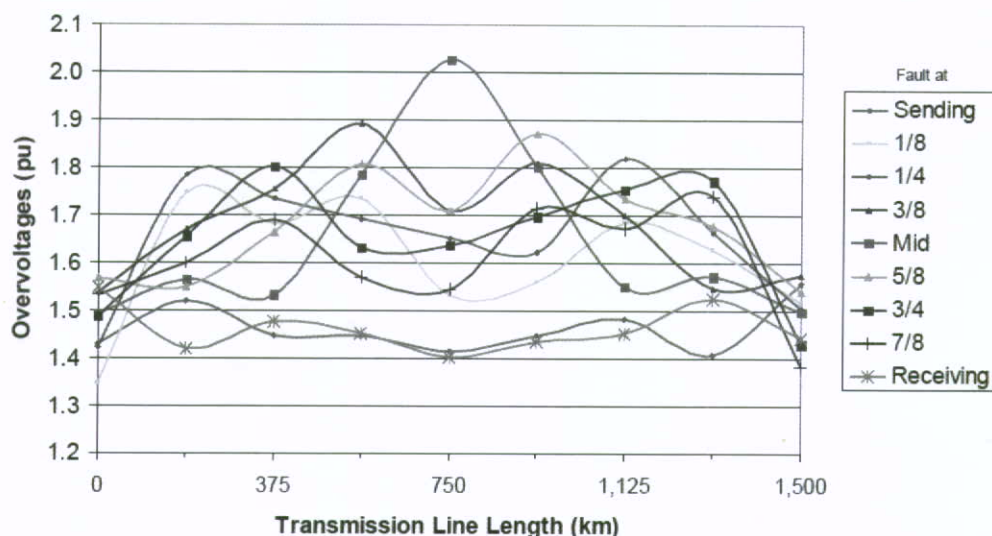
در هنگام شروع خطا در قطب منفی، یک موج مثبت که مقدار آن برابر با ولتاژ خطای اولیه است در نقطه بروز خطا تزریق می گردد. موج به وجود آمده در دو جهت به سمت دو انتهای خط منعکس شده و پس از انعکاس مجدداً به نقطه بروز خطا باز می گردد. موج سیار به قطب مثبت متصل گشته و موجب ایجاد اضافه ولتاژی می شود که مقدار آن بستگی به موجهای منعکس شده و ارسال شده دارد. حداکثر اضافه ولتاژ ناشی از خطا در وسط خط روی می دهد و زمان ماندگاری این اضافه ولتاژ برابر با زمانی است که طول می کشد تا موج به انتهای خط برسد و اولین انعکاس آن مجدداً به نقطه وسط خط بازگردد. بروز خطا در نقاط دیگر، اضافه ولتاژهای کمتری تولید می کند. بدین ترتیب پروفیل اضافه ولتاژ در طول خط، برای هر خطی با هر طولی مشابه است. اگر فرض کنیم طول خط 1500 کیلومتر و منابع در دو سر (رکتیفایر و اینورتر) برابر باشند و همچنین پارامترهای خط



شکل (۳): پروفیل حداکثر اضافه ولتاژ در قطب سالم را در صورت بروز خطا در نقطه وسط قطب دیگر



شکل (۴): نمودار ولتاژ- زمان در نقطه وسط و انتهای قطب سالم در صورت بروز خطا در نقطه وسط قطب دیگر- قرمز: نقطه وسط و سبز: نقطه انتها



شکل (۵): پروفیل اضافه ولتاژ در صورت بروز خطا در نقاط متفاوتی از خط

•• تنها خازنهای مربوط به فیلتر DC در نظر گرفته می شود ولی منبعی در طرف گیرنده مورد استفاده قرار نمی گیرد.

•• تنها خازنهای مربوط به فیلتر DC در نظر گرفته می شود و خط در طرف گیرنده باز در نظر گرفته می شود.

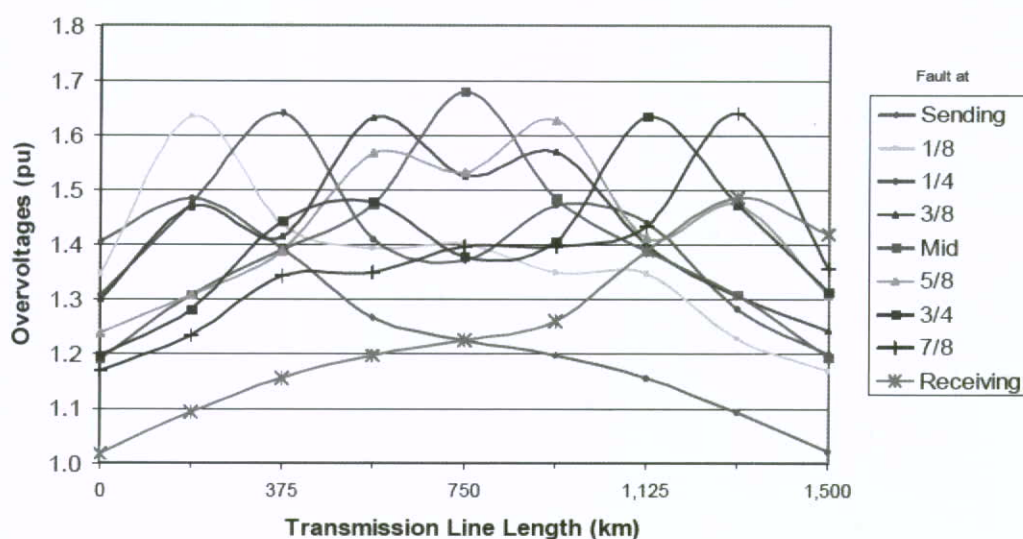
•• فیلتر DC در انتهای خط نصب نمی شود.

•• در دو انتهای خط فیلتر در نظر گرفته می شود ولی فیلترها با هم برابر نیستند.

شکل (۶) نتایج را هنگامیکه پارامترهای خط به فرکانس وابسته هستند نشان می دهد (مدل J.Marti).

مشاهده می شود که تعداد کمی از مقادیر بالای ۱/۸ پریونیت می باشند (خطا در ۳/۸ و ۵/۸ طول خط). بنابراین با در نظر گرفتن این مقادیر (که تعدادشان اندک می باشد) به عنوان اضافه ولتاژ مبنای طراحی، بازهم کمکی به کاهش ریسک خطا نمی شود. برای اینکه حساسیت نتایج را نسبت به یک مدل عملی کاربردی به دست آوریم گزینه های زیر را به حالت اولیه اعمال می نمائیم:

•• تنها خازن مربوط به فیلترهای DC در دو انتها در نظر گرفته شده و یک منبع ولتاژ در طرف گیرنده متصل می گردد.



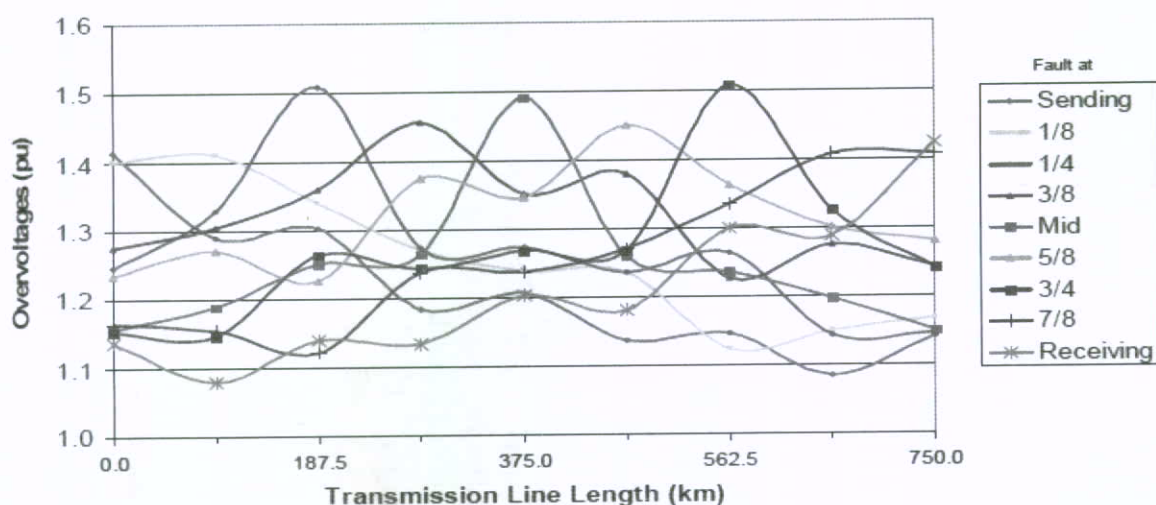
شکل (۶): پروفیل اضافه ولتاژ با پارامترهای وابسته به فرکانس

بود. جدول (۳) مقادیر حداکثر اضافه ولتاژها را برای طولهای مختلف بر حسب دو مدل Bergeron (پارامترهای خط مستقل از فرکانس) و J.Marti (پارامترهای خط وابسته به فرکانس) نشان می دهد با توجه به طول خط انتقال سمنان □ اصفهان که در حدود ۵۰۰ کیلومتر تخمین زده می شود، در نظر گرفتن اضافه ولتاژ ۱/۴ پریونیت برای محاسبات عایق بندی در برابر امواج کلیدزنی مناسب می باشد. (جدول ۳)

همانطور که در شکل (۶) مشاهده می شود وقتی که پارامترهای خط به صورت پارامترهای وابسته به فرکانس تعریف می شوند کلیه اضافه ولتاژها کمتر از ۱/۷ پریونیت می باشند. جدول (۲) مقادیر حداکثر اضافه ولتاژها را در یک قطب در حالیکه خطا در وسط قطب دیگر به وجود آمده است نشان می دهد. اگر طول خط را ۷۵۰ کیلومتر در نظر بگیریم پروفیل اضافه ولتاژ مطابق شکل (۷) خواهد بود. مشاهده می شود که با کاهش طول خط اضافه ولتاژ نیز کاهش می یابد و حداکثر مقدار آن ۱/۵ پریونیت خواهد

جدول (۲): حساسیت نتایج - حداکثر اضافه ولتاژ در وسط یک قطب و خطا در وسط قطب دیگر

اضافه ولتاژ (p.u)	
۲/۰۳	حالت اولیه (مدل Bergeron)
۲/۱۹	تنها خازن مربوط به فیلترهای DC در دو انتها
۲/۰۳	تنها خازن مربوط به فیلترهای DC در دو انتها، بدون در نظر گرفتن منبع ولتاژ در طرف گیرنده
۲/۷	بدون فیلتر DC
۱/۹۸	فیلترهای نابرابر در دو انتها
۱/۶۸	مدلسازی خط با پارامترهای وابسته به فرکانس (J.Marti model)



شکل (۷) پروفیل اضافه ولتاژ با پارامترهای وابسته به فرکانس برای خط ۷۵۰ کیلومتری

جدول (۳): اضافه ولتاژ ناشی از بروز خطا بر حسب پریونیت

مدل J.Marti	مدل Bergeron	طول خط (km)
۱/۴	۱/۶۹	۵۰۰
۱/۵	۱/۸۲	۷۵۰
۱/۶۸	۲/۰۳	۱۵۰۰
۱/۷۸	۱/۹۸	۲۲۵۰
۱/۸۵	۲	۳۰۰۰

۲-۳- محاسبه فاصله هوایی لازم

نظرمی گیریم. رابطه بین فاصله هوایی و ولتاژ بحرانی جرقه به صورت زیر است:

$$CFO = U_{50D} = k \times 500 \times d^{0.6} \quad (Kv)$$

U_{50} : ولتاژ بحرانی جرقه عایق بندی (با احتمال ۵۰٪) بر حسب کیلو ولت.

d : فاصله هوایی بر حسب متر.

k : ضریب فاصله هوایی با توجه به جدول شماره ۴.

معادله فوق برای مواقعی است که $2 < d < 5m$ در صورتی که

$5 < d < 15m$ باشد از معادله جایگزین زیر استفاده می شود :

$$U_{50} = k \frac{3400}{1 + 8/d}$$

اگر برای خط انتقال سمنان- اصفهان ولتاژ سیستم را ± 500 کیلوولت در نظر بگیریم، با ریسک خطای ۰/۵ درصدی (یک بار خطا در طول ۲۰۰ سال) ناشی از اضافه ولتاژهای کلیدزنی، ولتاژ بحرانی جرقه با توجه به رابطه بین ریسک و ولتاژ بحرانی در ضریب ۲/۱۳ ضرب می شود:

$$\Rightarrow U_{50D} = 2/13 * 500 = 1065 \text{ kV}$$

برای اعمال اثر رطوبت و ارتفاع در فاصله هوایی ولتاژ بحرانی فوق با استفاده از روابط زیر در شرایط آب و هوایی مختلف محاسبه می گردد.

$$CFO_1 = CFO_2 (1 + K_f (f_1 - f_2)) \quad \text{اثر رطوبت}$$

f_1, f_2 میزان رطوبت خالص بر حسب g/m^3 می باشند.

K_f ضریبی است که بستگی به فاصله هوایی و چگالی هوا در

ارتفاع از سطح زمین دارد.

$$CFO_\delta = \delta^n CFO$$

اثر چگالی هوا

$$\delta = \text{چگالی هوا}$$

$$n = \text{ضریب اصلاح وابسته به فاصله هوایی}$$

مقاومت الکتریکی مقره ها در برابر اضافه ولتاژهای ناشی از عملیات کلید زنی (switching) بستگی به مقدار اضافه ولتاژ و شکل موج آن و همچنین به شکل فاصله هوایی (gap) و شرایط جوی دارد. در ارتباط با شکل موج مهمترین پارامتر زمان رسیدن موج به حداکثر مقدار خود (time to crest) می باشد. ولتاژ جرقه (flash over voltage) بسیار وابسته به شکل فاصله هوایی دارد. این اثر توسط ضریب فاصله هوایی (gap factor k) نشان داده می شود. با توجه به نتایج محاسبات اضافه ولتاژ در سیستم DC اضافه ولتاژهای ناشی از عملیات کلید زنی به مراتب کمتر از سیستم نرمال AC است. حتی در خطوط بسیار بلند هم اضافه ولتاژها به ندرت از ۱/۸ پریونیت تجاوز می کند. برای محاسبات ایزولاسیون خط سمنان □ اصفهان مقدار ولتاژ استرس ۱/۴ پریونیت و انحراف استاندارد از ولتاژ استرس را ۱۰٪ در نظر می گیریم.

$$(\sigma_s = 10\%)$$

جدول (۴): ضرایب فواصل هوایی بین اجزای مختلف برج و هادی

$k=1.15$	conductor - plane
$k=1.3$	Conductor-structure under
$k=1.35$	structure (lateral or above)
$k=1.40$	conductor - guy wires
$k=1.50$	conductor-cross arms (with insulator string)

در سیستم DC زمان تشخیص خطا، تخلیه، دی یونیزاسیون و شروع مجدد بین ۱۵۰ تا ۳۰۰ میکرو ثانیه است. بنابراین این زمان رسیدن موج ولتاژ استرس به اوج را ۱۵۰ تا ۳۰۰ میکرو ثانیه در

۴- عایق بندی در برابر صاعقه و تعیین زوایای حفاظت

نکات زیر در طراحی عایق بندی در برابر اضافه ولتاژهای ناشی از برخورد صاعقه باید مورد توجه قرار گیرند:

- جریان صاعقه برخوردی به قطبهای سیستم نباید
- اضافه ولتاژی بیشتر از حد تحمل مقرر ها تولید کند.
- هر چه سیمهای محافظ به هادی نزدیکتر باشند عملکرد
- خط در هنگام برخورد صاعقه بهتر است.
- مقاومت پای برج و امپدانس پای برج متناظر آن باید
- کم باشد. بنابراین سیستم اتصال زمین مناسب باید به
- کار رود.

اگر E توانایی تحمل پالس جرقه بحرانی برای امواج صاعقه باشد و Z نیز امپدانس موج هادی، جریان آستانه در هادی که از آن جریان به بالا جرقه ایجاد می شود برابر است با:

$$I_{OC} = \frac{2E}{Z}$$

فاصله حمله (r_{sc}) برابر است با:

$$r_{sc} = k6.7I_{OC}^{0.8}$$

که k ضربی، غیر از ۱ است.

فاصله افقی بین هادی و سیم محافظ (X) از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$X = r_{sc} \left(\sqrt{1 - (k - T)^2} - \sqrt{1 - (1 - (k - R))^2} \right)$$

در صورتی که ارتفاع متوسط خط انتقال سمنان □ اصفهان را ۱۵۰۰ متر از سطح دریا فرض کنیم، مقادیر n و δ با توجه به نمودار چگالی هوا □ ارتفاع و ضریب اصلاح □ فاصله هوایی بدست می آیند:

$$n = .19, \delta = .19 \Rightarrow \delta^n = .1875$$

مقدار ضریب $((1+Kf)(f1-f2))$ با توجه به منحی های رطوبت برحسب ارتفاع از سطح زمین ۱/۰۵ در نظر گرفته می شود. بنابراین ولتاژ بحرانی و در نتیجه فاصله هوایی لازم برابر است با:

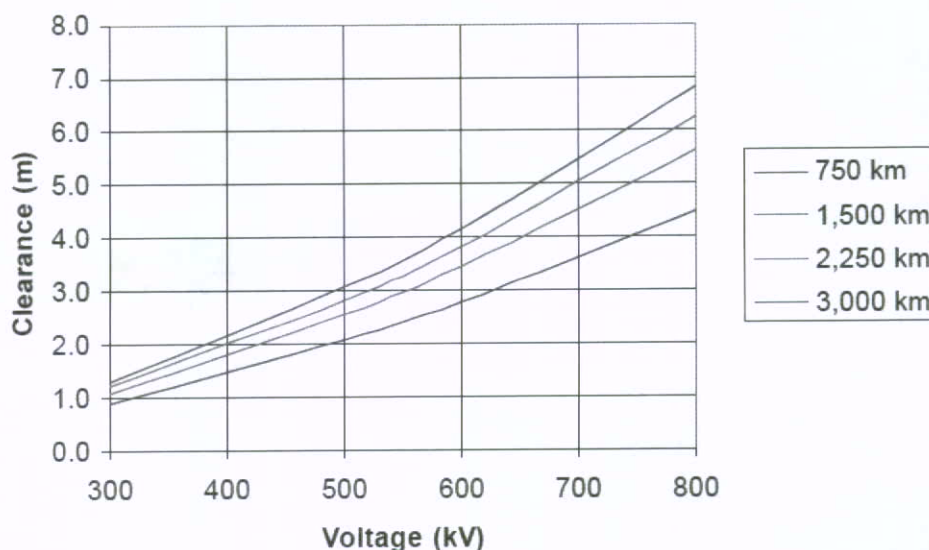
$$CFO_{final} = 13.4 \text{ kV} \Rightarrow d = 3 \text{ nm}$$

اگر ولتاژ خط سمنان □ اصفهان را $400 \pm$ کیلوولت فرض کنیم ، فاصله لازم کاهش می یابد. ملاحظه می شود که با توجه به طراحی عایق بندی انجام شده در بخش ولتاژ عملکرد و ملاحظات آلودگی عملا طول انتخاب شده همواره فاصله هوایی لازم در محاسبات کلیدزنی را پوشش می دهد.

باید متذکر شد که فواصل مجاز بر پایه پروفیل‌های کاربردی خطای اضافه و لذا و به کمک ریسک **flashover failure** تعیین میگردند. (ضوابط طراحی) برای مثال امکان یک بار خاموشی در طول ۵۰ سال یا ۱۰۰ سال.

نمودارهای شکل (۸) زیر فاصله مجاز بین برج و هادی را برحسب ولتاژهای متفاوت برای خطوطی با طولهای مختلف نشان می‌دهد. این نمودار بر مبنای ریسک $failure$ (سال ۱/۵۰) می‌باشد.

Conductor-to-Tower



شکل (۸) تغییرات فاصله مجاز بین برج و هادی بر حسب ولتاژهای متفاوت برای خطوطی با طولهای مختلف (ریسک: ۰/۲)

جدول (۵): ملزومات حفاظت در برابر صاعقه

ولتاژ (kV)	E (kV)	hg (m)	hp (m)	۲ سیم محافظ				۱ سیم محافظ	
				Ioc (kA)	rsc (m)	X (m)	زاویه حفاظت (درجه)	X (m)	PSM (m)
± ۵۰۰	۳۰۰۰	۴۹/۶	۳۶/۸	۱۸/۹	۷۰/۲	۵/۴	۲۲	۵	۱۱/۷

فاصله هوایی لازم برای عایق بندی در برابر صاعقه حدود ۳/۷ تا ۴ متر برای سطح ولتاژ ±۵۰۰ کیلوولت می باشد که طول انتخاب شده با توجه به ملاحظات آلودگی این فاصله را پوشش می دهد.

۵- تعیین فاصله بین دو قطب

آرایش زنجیر مقرر شده ممکن است به صورت I و یا V باشد. روش تعیین فاصله لازم بین دو قطب برای هر دو حالت به شرح زیر است.

۵-۱- فاصله قطبها برای آرایش I زنجیر مقرر شده در ولتاژ عملکرد

با توجه به تاثیر باد در انحراف زنجیر مقرر شده های I، حداقل فاصله بین قطبها DP_{TO} از رابطه زیر به دست می آید:

$$DP_{TO} = (R + d \min + (L + R) \sin \theta) \times 2 + w$$

$d \min$: فاصله مجاز در ولتاژ عملکرد با توجه به جدول

L : طول زنجیر مقرر شده

θ : زاویه انحراف در حالت باد گاست

w : عرض برج در تراز هادی، (با توجه به جدول ۷)

$$R = \frac{a}{2 \sin(\pi / N)} \quad R: \text{ شعاع باندل}$$

a : فاصله باندلی (معمولا ۴۵ سانتیمتر)

N : تعداد هادیا در باندل

$$T = h_g / r_{sc}$$

$$R = h_p / r_{sc}$$

h_g : ارتفاع متوسط سیم محافظ بر حسب متر

h_p : ارتفاع متوسط هادی بر حسب متر

h_g و h_p بستگی به نوع زمین دارند (مسطح، کوهستانی و...).

زاویه حفاظت از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\theta = \arctan \frac{X}{(T - R)S}$$

S : فلش سیم می باشد.

حداکثر فاصله بین دو قطب با توجه به رابطه زیر کنترل می گردد:

$$PSM = 2X + w$$

w عرض برج است و از جدول ۶ جایگزین می شود.

جدول (۶) نتایج محاسبات برای ولتاژ ± ۵۰۰ کیلوولت را نشان می دهد:

جدول (۶): عرض برج فرض شده برلی ولتاژهای مختلف

جهت محاسبه فاصله قطبها

ولتاژ عملکرد (Kv)	عرض برج (m)
±۳۰۰	۱/۲
±۵۰۰	۱/۷
±۶۰۰	۲
±۸۰۰	۲/۵



جدول (۷): زوایای انحراف مورد استفاده همراه با فواصل مجاز کلیدزنی در محاسبات فاصله قطبها (MCM = ۰/۵۰۶۷)

زاویه انحراف بر حسب درجه	MCM	هادی ASCR
۱۳/۴	۲۵۱۵	Joree
۱۳/۸	۲۳۱۲	Thrasher
۱۴/۳	۲۱۶۷	Kiwi
۱۴/۶	۲۰۳۴	2,034
۱۴/۵	۱۷۸۰	Chukar
۱۵/۳	۱۵۹۰	Lapwing
۱۵/۸	۱۴۳۱	Bobolink
۱۶/۱	۱۳۵۱/۵	Dipper
۱۶/۴	۱۲۷۲	Bittern
۱۷	۱۱۱۳	Bluejay
۱۷/۷	۹۵۴	Rail
۱۸/۶	۷۵۹	Tern

نتیجه محاسبات حداقل فاصله بین قطبها با آرایش I زنجیر مقرر شده
برای سطوح مختلف ولتاژ و هادیهای مختلف در جدول (۸) نشان داده شده است.

جدول (۸): فاصله قطبها با زنجیره I در ولتاژ عملکرد بر حسب متر

فاصله قطبها (m)				سطح مقطع (MCM)	هادی ASCR
±۸۰۰ kV	±۶۰۰ kV	±۵۰۰ kV	±۳۰۰ kV		
۱۸/۸	۱۴/۶	۱۲/۵	۸/۲	۲۵۱۵	Joree
۱۹/۱	۱۴/۸	۱۲/۶	۸/۳	۲۳۱۲	Thrasher
۱۹/۳	۱۵	۱۲/۸	۸/۴	۲۱۶۷	Kiwi
۱۹/۵	۱۵/۱	۱۲/۹	۸/۵	۲۰۳۴	2,034
۱۹/۵	۱۵/۱	۱۲/۹	۸/۵	۱۷۸۰	Chukar
۱۹/۸	۱۵/۴	۱۳/۱	۸/۶	۱۵۹۰	Lapwing
۲۰/۱	۱۵/۶	۱۳/۳	۸/۷	۱۴۳۱	Bobolink
۲۰/۲	۱۵/۷	۱۳/۴	۸/۸	۱۳۵۱/۵	Dipper
۲۰/۳	۱۵/۸	۱۳/۴	۸/۸	۱۲۷۲	Bittern
۲۰/۶	۱۶	۱۳/۶	۸/۹	۱۱۱۳	Bluejay
۲۰/۸	۱۶/۲	۱۳/۸	۹	۹۵۴	Rail
۲۱/۱	۱۶/۴	14	۹/۲	۷۵۹	Tern

۵۵-۲- فاصله قطبها برای آرایش I زنجیر مقرر هادر حالت اضافه ولتاژ کلیدزنی

حداقل فاصله لازم بین قطبها با در نظر گرفتن امواج کلیدزنی مشابه فاصله قطبها در ولتاژ عملکرد محاسبه می شود با این تفاوت که زوایای انحراف از جدول (۹) استخراج میگردند.

۵۵-۳- فاصله قطبها برای آرایش V زنجیر مقرر ها در ولتاژ عملکرد و در حالت اضافه ولتاژ کلیدزنی

در این حالت انحراف زنجیر مقرر ناشی از وزش باد وجود ندارد، بنابراین فاصله الکتریکی مجاز برای عملیات کلیدزنی (Switching) تعیین کننده فاصله قطبها می باشد. حداقل فاصله لازم بین قطبها PS_{min} از رابطه زیر به دست می آید:

$$PS_{min} = 2 \times L \times \cos(45^\circ) + w$$

w : عرض برج در تراز هادی ، با توجه به جدول ۶ فرض شده است که زاویه بین بازوهای مقرر V شکل ۹۰ درجه می باشد. در غیر این صورت حداقل فاصله لازم بین قطبها DP_{TO} از رابطه زیر به دست می آید:

$$DP_{TO} = (R + d_{min}) \times 2 + w$$

و این نشان میدهد که:

$$DP_{TO} > PS_{min}$$

با توجه به اینکه طول زنجیر مقرر سمنان- اصفهان با فرض ولتاژ ± 500 کیلوولت حدود ۱۱/۷ متر می باشد و با در نظر گرفتن زاویه ۹۰ درجه بین بازوها و عرض برج ۱/۷ متر، حداقل فاصله بین دو قطب برابر است با :

$$18/2 PS_{min} = 4 m$$

این فاصله برای ولتاژ ± 400 کیلوولت به ۱۴/۷۶ متر خواهد رسید.

۶- دیاگرام الکتریکی برج

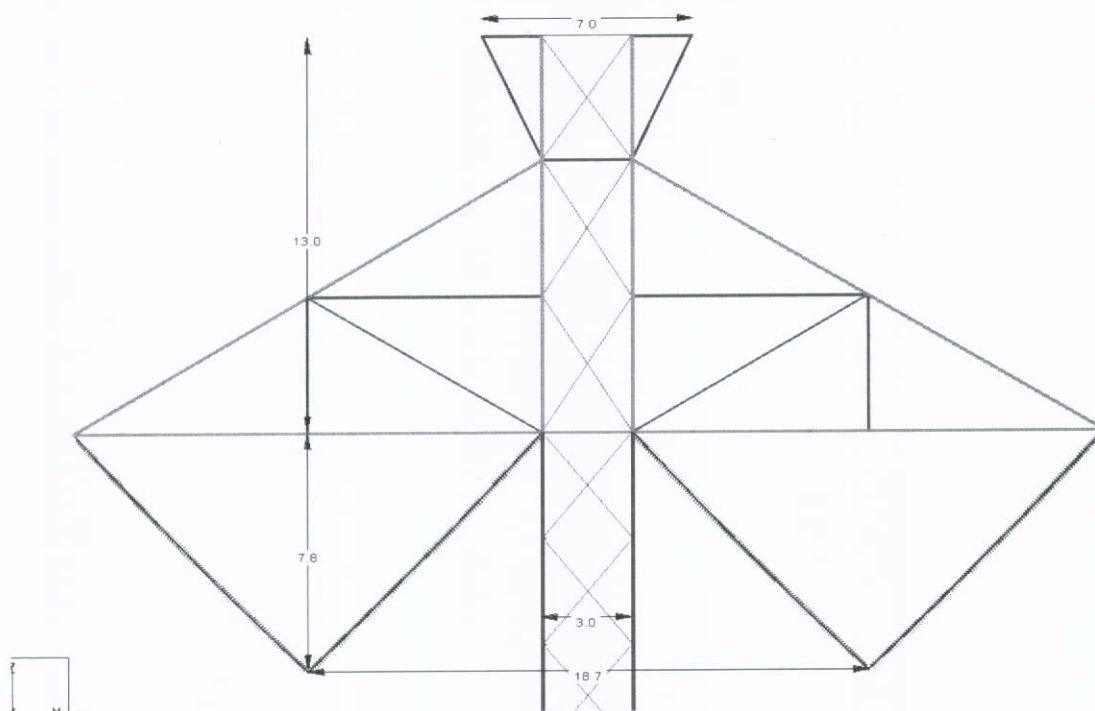
با توجه به آرایش زنجیر مقرر های آویزی انتخابی برای پروژه سمنان □ اصفهان (شکل ۱) و همچنین حداقل فاصله لازم بین دو قطب و برای رسیدن به زوایای حفاظت مناسب، دیاگرام الکتریکی برج به صورت شکل زیر ارائه می گردد. باید متذکر شد که عرض برج جهت رعایت شدن ملزومات بارگذاری برج که مبحث آن خارج از این مقاله می باشد ۳ متر در نظر گرفته شده است. این طرح یک طرح اولیه است و امکان بهینه سازی طرح با توجه به قطعی شدن سطح ولتاژ پروژه سمنان □ اصفهان و تعیین هادی و سیمهای محافظ وجود دارد.

۷- نتیجه گیری

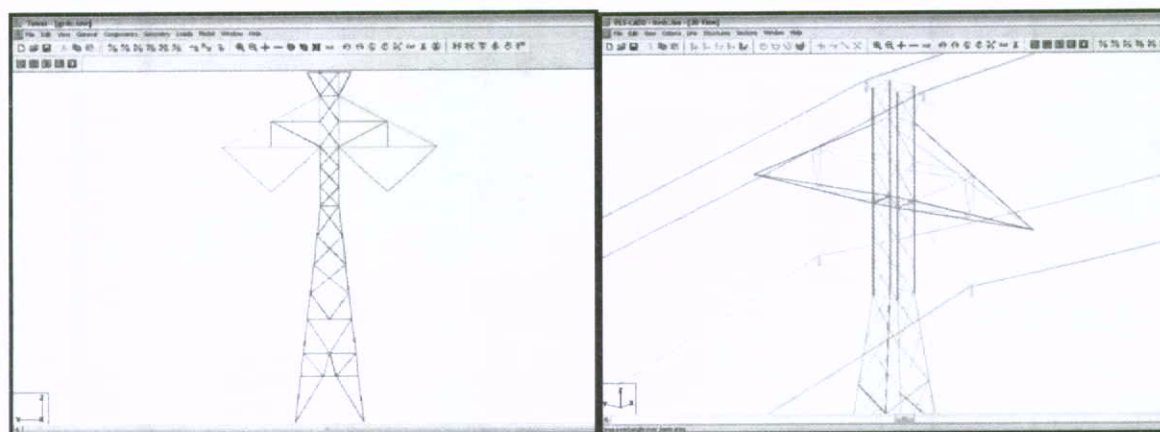
معیار اصلی طراحی عایق بندی پروژه خط انتقال HVDC سمنان □ اصفهان میزان آلودگی منطقه می باشد. فواصل مجاز جهت حفاظت در برابر اضافه ولتاژ های ناشی از عملیات کلید زنی و صاعقه با توجه به طول زنجیر مقرر ها پوشش داده می شوند. استفاده از مقرر های کامپوزیت با فاصله خزشی بالا در واحد مقرر و نسبت فاصله خزشی به ارتفاع بالا باید مد نظر قرار گیرد. استفاده از آرایش V زنجیر مقرر ها موجب می شود از خاصیت خود شستشویی این مقرر ها در باران برای کاهش آلودگی روی مقرر ها استفاده شود و همچنین قابلیت اطمینان سیستم را در شرایط باد شدید افزایش می دهد. هر چند ملاحظات اقتصادی نیز باید در تعیین آرایش زنجیر مقرر مورد توجه قرار گیرند.

جدول (۹) زوایای انحراف مورد استفاده با در نظر گرفتن فواصل مجاز کلیدزنی در محاسبات فاصله قطبها ($IMCM = 0.5067$)

زاویه انحراف بر حسب درجه	MCM	هادی ASCR
۶/۵	۲۵۱۵	Joree
۶/۷	۲۳۱۲	Thrasher
۷	۲۱۶۷	Kiwi
۷/۱	۲۰۳۴	2,034
۷/۱	۱۷۸۰	Chukar
۷/۵	۱۵۹۰	Lapwing
۷/۸	۱۴۳۱	Bobolink
۷/۹	۱۳۵۱/۵	Dipper
۸/۱	۱۲۷۲	Bittern
۸/۴	۱۱۱۳	Bluejay
۸/۸	۹۵۴	Rail
۹/۲	۷۵۹	Tern



شکل (۹) نمای الکتریکی برج آویزی خط انتقال سمنان اصفهان برای سطح ولتاژ ± 500 کیلوولت



شکل (۱۰) برج آویزی خط انتقال سمنان - اصفهان

- [1] Mc Graw Hill "Standard Handbook for Electrical Engineers" 14th, Edition
- [2] CIGRE Brochure 48 "Tower Top Geometry" WG 22-06, June 1995
- [3] IEC 60071-2
- [4] IEC 60815
- [5] IEC 60071-5
- [6] "Addendum to CIGRÉ Document No. 20 (1974)", CIGRÉ Brochure No. 61 Chapter 7, 1996.
- [7] Maruvada P.S., Corona Performance of High-Voltage Transmission Lines, Research Studies Press Ltd., Baldock, Hertfordshire, U.K., 2000.
- [8] Peixoto C A O; Frontin S O; Jardini J A "Engineering Studies for Itaipu Converter Station Design" IEE Proceedings, vol 130, Pt C, no 1, January 1983
- [9] IEC/TR 60 826 Design Criteria of Overhead Transmission Lines, 2003-10, 3rd edition.

بیوگرافی

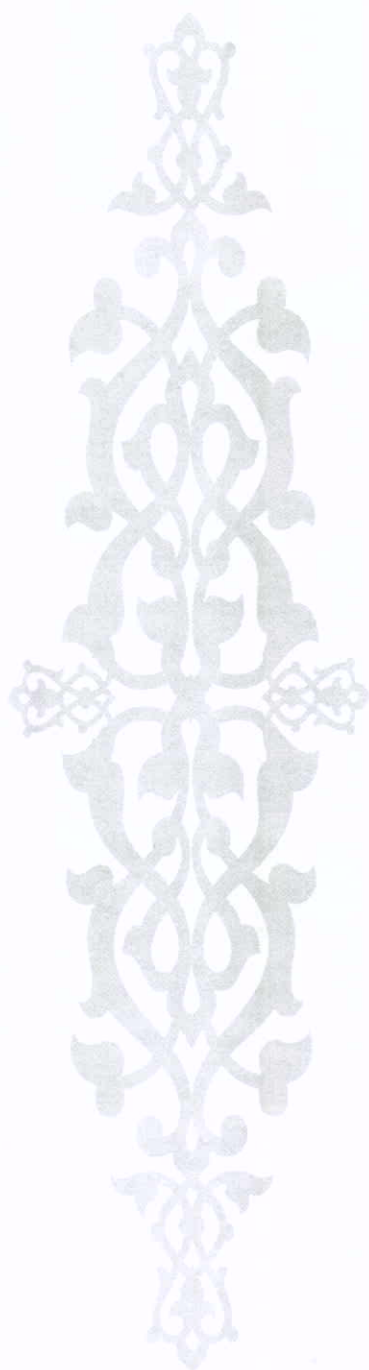
آقای علیرضا رئیسی دارای مدرک لیسانس مهندسی برق گرایش قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی - فنی تهران جنوب می باشند. ایشان بیش از ۱۴ سال در شرکت قدس نیرو تجربه کارشناسی و مدیریت پروژه داشته و هم اکنون مدیریت گروه تخصصی خطوط انتقال را برعهده دارند.

زمینه فعالیت آقای علیرضا رئیسی به طور کلی سیستم های انتقال انرژی الکتریکی بوده و زمینه تخصصی و علاقمندی ایشان علاوه بر مطالعه و پیاده سازی سیستم های مدیریت مهندسی، طراحی، تحلیل و عیب یابی، بهینه سازی و ارتقاء خطوط انتقال نیرو با به کار گیری سیستم های جدید و پیشرفته طراحی به ویژه Power Line Systems- Computer Aided Design and Drafting (PLS-CADD) می باشد.

Email: araisi@ghods-niroo.com

آقای کامران رضایی دارای مدرک لیسانس برق گرایش الکترونیک از دانشگاه آزاد تهران مرکز می باشند. ایشان جمعاً ۸ سال سابقه کار داشته که ۴ سال آن در شرکت قدس نیرو و در مورد طراحی و ارتقاء شبکه های انتقال نیرو می باشد. زمینه کاری و علاقمندی ایشان در زمینه کنترل و ارتقای سیستم های انتقال نیرو و طراحی سیستم های انتقال HVDC می باشد.

Email : krezaei@ghods-niroo.com



برقگیر بوشینگی

منیره موحدیان

کارشناس برق - SBU نیروگاه (صنایع نیروگاهی)

چکیده

این مقاله در مورد یک نوع برقگیر به نام برقگیر بوشینگی است. هدف از این وسیله حفاظت ترانسفورماتورها در مقابل اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه و کلید زنی بدون استفاده از برقگیر اضافی است. در این روش، برقگیر و بوشینگ ترانسفورماتور با یکدیگر ادغام شده و مجموعه آن دو به عنوان برقگیر بوشینگی نامیده می شود. این وسیله در عین برقگیر بودن، کار بوشینگ یا مقره عبوری ترانسفورماتور را هم انجام می دهد. مخترع این برقگیر دکتر محمد رضا مشکوه الدینی عضو هیئت علمی دانشگاه صنعت آب و برق (شهید عباسپور) می باشد.

۱-مقدمه

برقگیر بوشینگی برای حفاظت تجهیزات از وسایل حفاظتی محدود کننده ضربه، برای حفاظت تجهیزات سیستمهای قدرت در برابر اضافه ولتاژها استفاده می شود. یک وسیله حفاظتی محدود کننده ضربه باید اضافه ولتاژهای گذرا یا اضافه ولتاژهای که باعث تخریب تجهیزات شبکه می شوند را محدود و به زمین هدایت کند و بتواند این کار را بدون اینکه آسیبی ببیند به دفعات تکرار کند. برقگیر نسبت به سایر وسایل حفاظتی بهترین حفاظت را انجام می دهند و بیشترین مقدار حذف امواج گذرا را فراهم می کند. برقگیرها به صورت موازی با وسیله تحت حفاظت یا بین فاز و زمین قرار می گیرند و انرژی موج اضافه ولتاژ به وسیله برقگیر به زمین منتقل می شود.

۲-مشخصات یک برقگیر مناسب

- در ولتاژ نامی شبکه، به منظور کاهش تلفات دارای امپدانس بینهایت باشد
- در اضافه ولتاژ به منظور محدود سازی سطح ولتاژ دارای امپدانس کم باشد.
- توانایی دفع یا ذخیره انرژی موج اضافه ولتاژ را بدون اینکه خود صدمه ببیند داشته باشد.
- پس از جلوگیری از عبور اضافه ولتاژ بتواند به شرایط مدار (حالت کار عادی) برگردد.

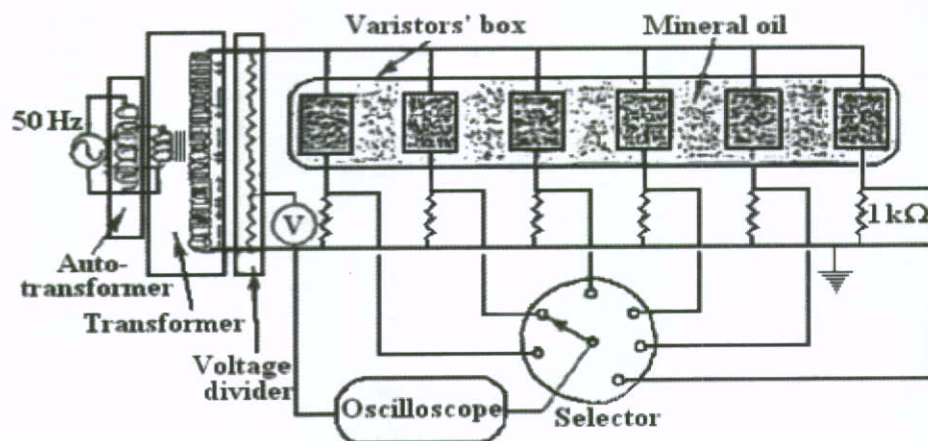
۳-عوامل مهم در آسیب دیدگی برقگیر

- نفوذ رطوبت و آلودگی
- اضافه ولتاژهای گذرا و موقتی
- عدم انطباق شرایط بهره برداری با مشخصه برقگیر (طراحی غلط)
- عوامل ناشناخته

۴-شرح و توصیف برقگیر بوشینگی

در این نوع برقگیر، قرص های وریستور اکسیدروی^۱ به طور مستقیم در داخل بوشینگ ترانسفورماتور قرار داده می شوند و به این ترتیب فاصله بین برقگیر و سیم پیچ ترانسفورماتور به نزدیک صفر می رسد، از این رو، کارایی حفاظت به حداکثر ممکن افزایش می یابد. یکی از مسائل برقگیرهای سنتی آن است که در اثر گذشت زمان و پیری تدریجی ناشی از تنش های الکتریکی وارد شده به آنها، کیفیت قرص ها و عایق هایشان به تدریج تنزل می یابد و به تدریج جریان نشتی بالایی پیدامی کنند.





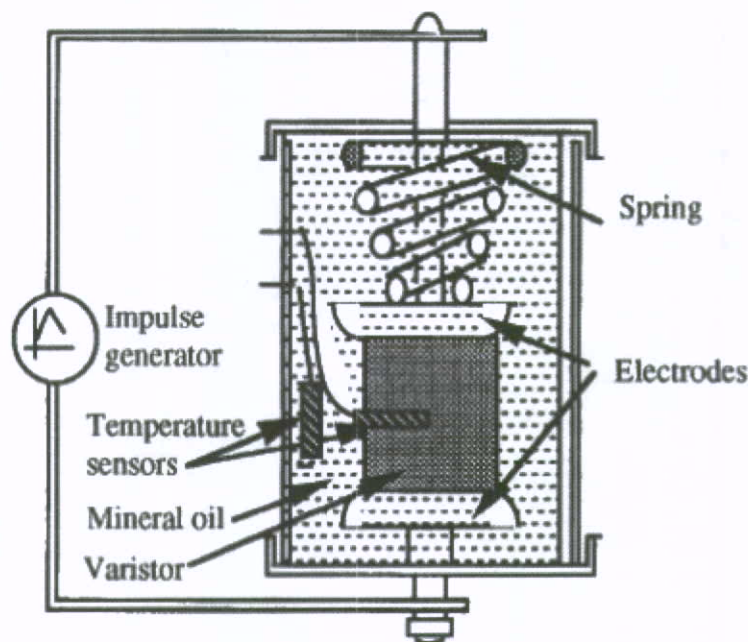
شکل (۱): مدل آزمایشی که برای تست فرسودگی از آن استفاده شده

- از خود برقیگیر نیز، پس از تخلیه اضافه ولتاژها حتی از نوع کلید زنی یا تشدید آهنی^۱ که ممکن است به مدت طولانی روی ترانسفورماتور باقی بمانند، حفاظت بهتری به عمل می آید. علت این امر خنک شدن وریستورها در داخل روغن است. در حالی که برقیگیرهای معمولی در مقابل اضافه ولتاژهای ناشی از کلید زنی و تشدید ضعیف بوده و به سرعت خراب می شوند.
- به علت خنک شدن دائمی توسط روغن در حالت کار معمولی تحت ولتاژ فرکانس قدرت، عمر برقیگیر بوشینگی نسبت به برق گیرهای معمولی طولانی تر خواهد شد.

بنابر این در حال عادی، وقتی تحت ولتاژ معمولی شبکه قرار دارند، نیز از آنها جریانی متناوب با فرکانس ۵۰ هرتز عبور می کند که باعث گرم شدن آن ها می شود. این گرما روز به روز افزایش می یابد تا در نهایت منجر به فروپاشی و انفجارشان می شود، اما در برقیگیرهای بوشینگی، قرص های وریستور در داخل روغن معدنی عایق قرار دارند، از این رو، طبق آزمایش های انجام شده ۳ برابر بیشتر از هوا خنک می شوند و احتمال فروپاشی حرارتی در آنها از بین می رود. البته می توان به جای ریختن روغن عایق در داخل این وسیله، آن را با هوای خشک یا گاز عایق SF₆ نیز پر کرد که در این صورت قابلیت آن از لحاظ خنک شدن مشابه برقیگیرهای معمولی خواهد بود، ولی سایر ویژگی های ممتاز خود را همچنان حفظ خواهد کرد. درستی موارد فوق الذکر طی آزمایش های متعدد به اثبات رسیده است.

۵-قابلیتهای ویژه برقیگیر بوشینگی

- از طریق استفاده از یک وسیله به جای دو وسیله جداگانه (برقیگیر و بوشینگ)، صرفه جویی اقتصادی به عمل می آید.
- از ترانسفورماتور حفاظت بهتری در مقابل سوختن در اثر صاعقه صورت می گیرد. زیرا در این طرح فاصله بین برقیگیر و عایق ترانسفورماتور، به حداقل ممکن می رسد.



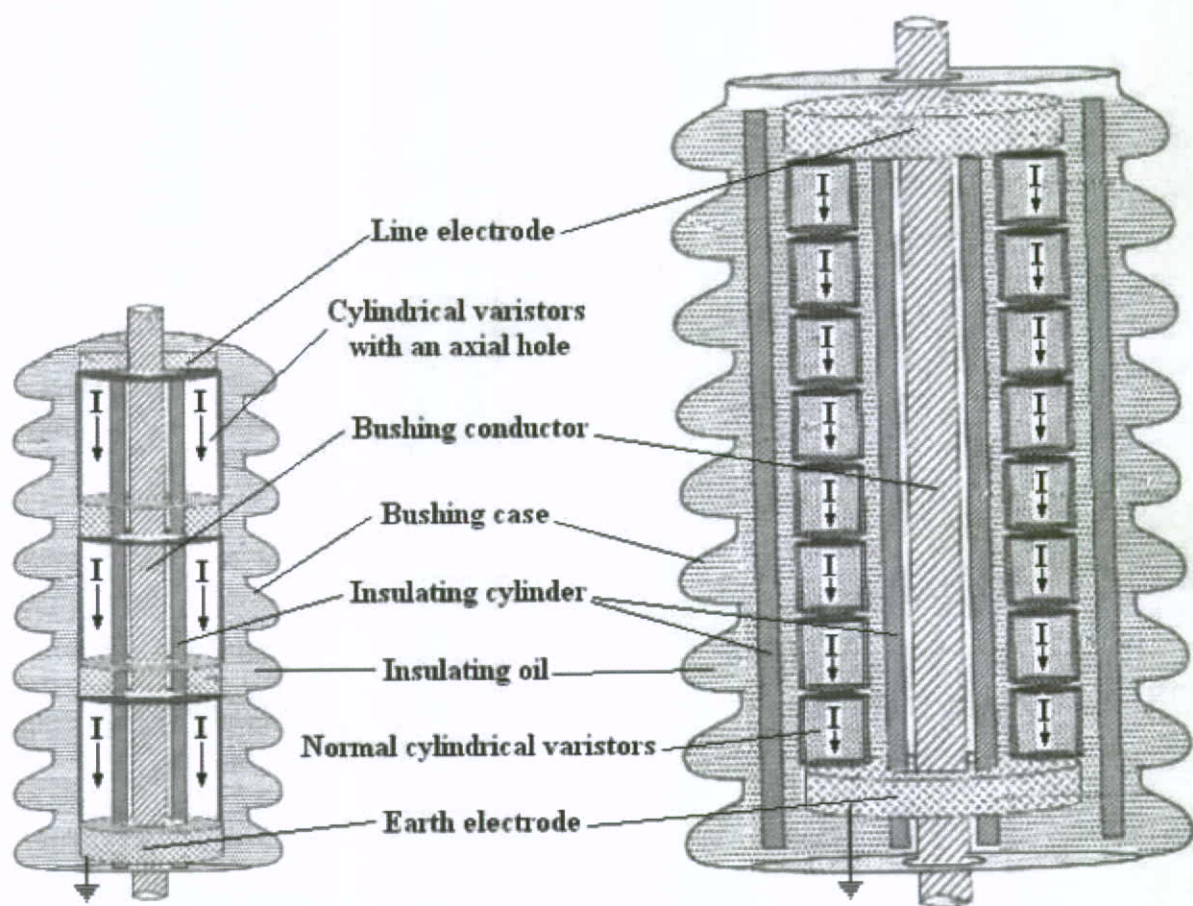
شکل (۲): مدل آزمایشی برای اعمال ضربه به وریستور در روغن

۶- مشخصات برقگیر بوشینگ

بوشینگ به سر سیم پیچ منتقل می شود. هادی وسط بوشینگ از طریق وریستورها به زمین یعنی پتانسیل صفر نیز متصل می شود. در صورت ورود اضافه ولتاژ های گذرا که تحمل نیست، اضافه ولتاژ از طریق وریستورها به زمین منتقل می شود و از ترانسفورماتور در مقابل امواج اضافه محیط خنک کننده آن یعنی روغن به خارج منتقل می شود. برق گیر بوشینگ در سه طرح مختلف برای سطوح فشار ضعیف، فشار متوسط و فشار قوی قابل ساخت و استفاده خواهد بود. اثر پیوستگی بر روی میدان الکتریکی بوشینگها بسیار مهم است و باید در طراحی در نظر گرفته شود. برای مثال تاثیر متقابل اجزاء مجاور هم بر روی توزیع میدان به دقت بررسی شود.

برقگیر بوشینگ از یک مقره تو خالی عایق تشکیل شده که با روغن معدنی ترانسفورماتور پر شده و از بالا و پایین آب بندی شده است. جنس محفظه از پرسن^۱ (سفال) و یا مواد کامپوزیتی و پلیمرهای مناسب مانند لاستیک سیلیکونی^۲ است. در بالا و پایین این محفظه دو در پوش فلزی قرار دارند که نقش ترمینالهای های فشار قوی و زمین برق گیر را بازی می کنند. در میان این دو الکترود، تعدادی مناسب از مقاومت های غیر خطی اکسید فلزی (MOV) در داخل استوانه ای از جنس فیبر شیشه^۳ همراه با رزین قرار دارند که قسمت اصلی این وسیله را تشکیل می دهند. در بین و نیز در بالا و پایین ستون وریستورها تعدادی قطعه استوانه ای توپر از جنس آلومینیوم قرار داده می شوند که نقش فضا ساز و نیز خنک کننده را بازی می کنند. این قطعات به وسیله فتر به یکدیگر فشرده می شوند تا اتصال الکتریکی لازم بین آنها همواره بر قرار باشد. این وسیله در روی محفظه ترانسفورماتور نصب می شود و هادی ارتباطی که از طرفی به خط متصل است، از طرف دیگر به سر ترمینال بالایی بوشینگ متصل و از طریق هادی وسط

- 1-Porcelain
- 2-Silicon
- 3-Fiber-glass

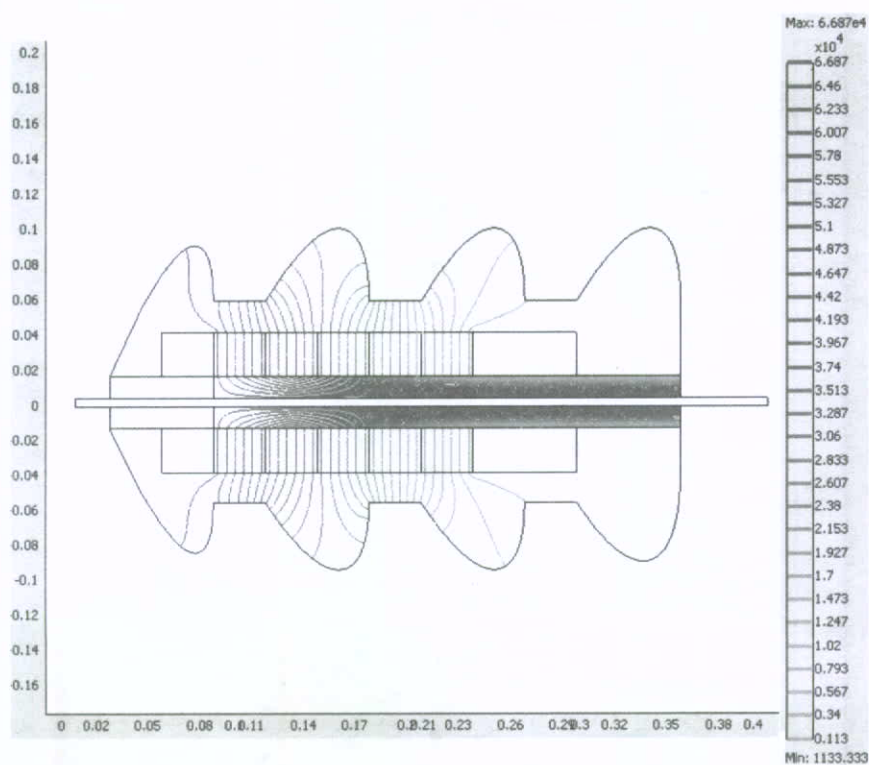
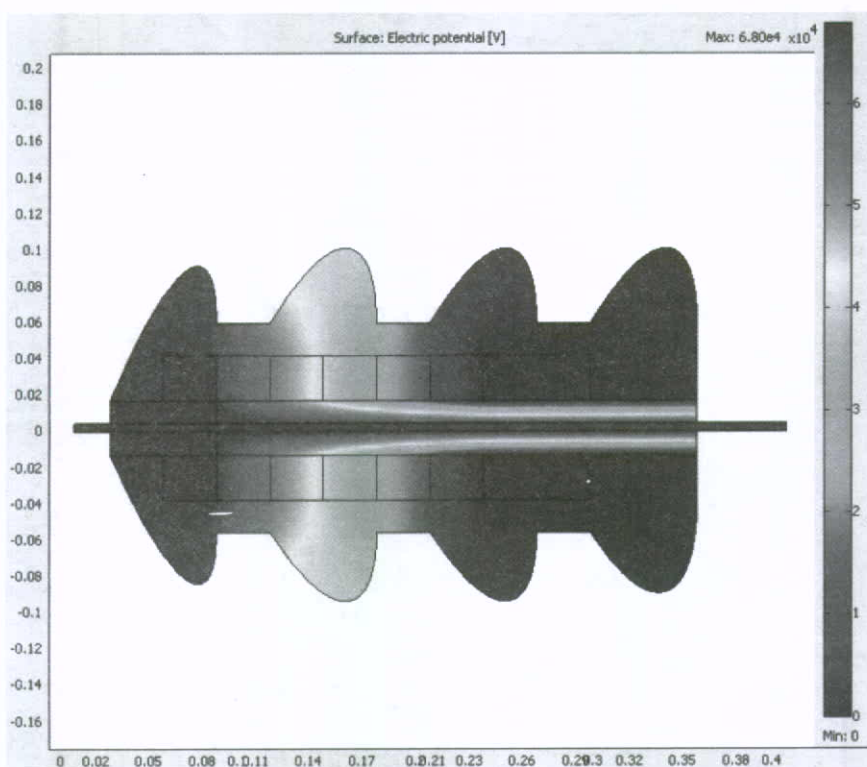


شکل (۳) دو طرح ممکن برای برقگیر پوشینگی

محاسبات میدان و آزمایشات نشان داده اند که راه حل های جامع و بهینه ای امکان پذیر است. ما میدان الکتریکی در داخل برخی از برقگیر های پوشینگی طراحی شده را بررسی کردیم که یک نمونه آن در شکل (۴) دیده می شود.

ممکن است تصور شود که عیب عمده تجمع پوشینگ و برقگیر در این است که کارایی پوشینگ منوط به اضافه بار شدن برقگیر

است. احتمال چنین رویدادی با قابلیت جذب انرژی بالاتر بسیار کم میشود، وقتی ورستور در روغن غوطه ور باشد. بنابراین ما میتوانیم برقگیر کلاس ۲ یا کلاس ۳ استاندارد IEC را جایگزین کلاس ۱ بمانیم. چنین برقگیرهایی خطاها را به شدت کاهش می دهد و بهترین شکل ممکن را فراهم می کند حتی زمانیکه تراکم رعدوبرق بالا باشد. با این حال برقگیر یکپارچه می تواند آزمایش مقاومت عایقی را تحت تاثیر قرار بدهد.



شکل (۴) : خطوط پتانسیل الکتریکی در یک نوع برقگیر پوشینگی ولتاژ متوسط (از نوع برقگیر در شکل ۳ سمت چپ)

نتیجه گیری

استفاده از برقگیر بوشینگی باعث میشود از ترانس و برقگیر حفاظت بهتری به عمل بیاید. علاوه بر آن صرفه جویی اقتصادی به همراه دارد زیرا از یک وسیله به جای دو وسیله استفاده میشود.

مراجع

fa.wikipedia.org

meshkatoddini@ieee.org

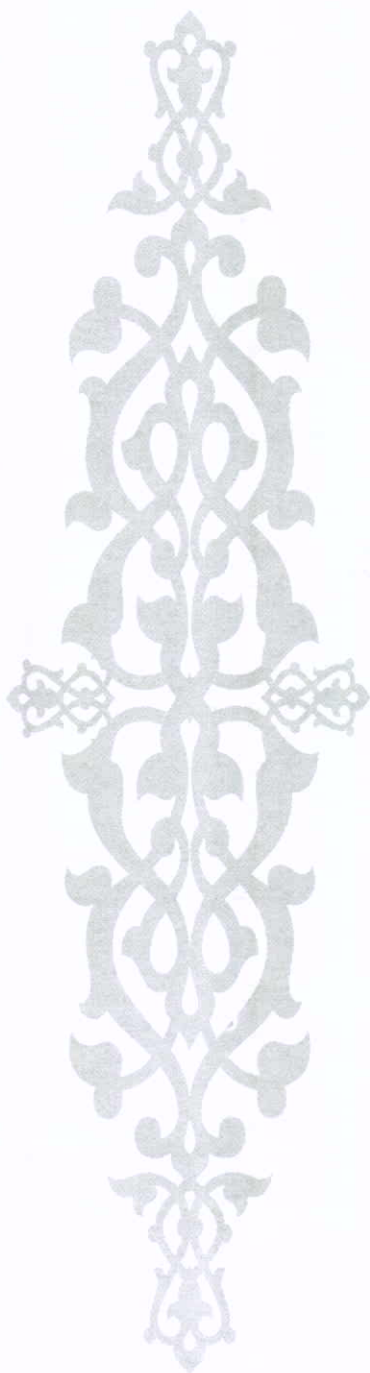
IEEE Transactions on Power Delivery. Vol.
9. No.2. April

بیوگرافی

خانم منیره موحدیان دارای مدرک کارشناسی برق قدرت از دانشگاه شهید چمران اهواز با ۱۰ سال سابقه کار بوده و از سال ۸۸ در شرکت قدس نیرو مشغول به کار می باشد. علاقمندی ایشان در زمینه تجهیزات الکتریکی می باشد.

Email: monireh.movahedian@yahoo.com

نگارنده مقاله از استاد گرامی جناب آقای دکتر قصبه که در تهیه این مقاله راهنمایی های ارزنده ای نمودند مراتب قدردانی خود را ابراز میدارد.



عوامل موثر در تبدیل شرکت های مهندسين مشاور به شرکت های EPC

سعید رحمانی جو

مدیر پروژه پلیمر کرمانشاه و کارشناس ارشد بازاریابی

۱-هدف

هدف از تهیه این سند یکپارچه سازی و مدون سازی ذهنیت مدیران ارشد در شرکت های مهندسين مشاور در ارتباط با اولویت بندی فعالیت های کلیدی سازمان برای ورود به فعالیت های EPC می باشد ، این موضوع بر اساس " پرسشنامه عوامل موثر در تبدیل شرکت های مهندسين مشاور ایرانی به شرکت های EPC بین المللی " تدوین شده است.

۲-دامنه کاربرد

این تحقیق صرفاً جنبه تحلیل پرسشنامه دارد و سند راهبردی محسوب نمی شود. ولی به عنوان یکی از مراجع قابل استفاده برای تهیه اسناد راهبردی نهایی شرکت های مهندسين مشاور می تواند مورد استفاده قرار گیرد .

۳-مقدمه

در تحلیل استراتژیک با توجه به شرایط داخلی و خارجی سازمان جهت گیری های کسب و کار تعیین و نسبت به راهکارهای مختلف تصمیم گیری می شود. این تصمیمات به تصمیمات استراتژیک یا راهبردی معروف هستند. این مهم پس از جمع آوری اطلاعات انجام خواهد گرفت. بخشی از اطلاعات متناسب با نوع و ماهیت آنها از نظرسنجی مدیران ارشد و کارشناسان سازمان و خبرگان صنعت حاصل می گردد. تدوین اهداف کلان، تعیین ارزش ها و تصمیم گیری در مورد حوزه های کاری از جمله اطلاعاتی است که بایستی از این طریق تعیین شوند. علاوه بر این، کارکرد روش مصاحبه و پرسشنامه میدانی در داخل سازمان یکی از روش های مهم ایجاد مشارکت اعضای سازمان در برنامه ریزی و سازماندهی است که علاوه بر ماهیت و کارکرد مثبت مشارکت، بستر همگرایی و نقد نظرات را نیز فراهم می کند. در این تحقیق پرسشهای مطرح شده در " پرسشنامه عوامل موثر در تبدیل شرکت های مهندسين مشاور ایرانی به شرکت های EPC بین المللی " در چند بخش با موضوعات ذیل تدوین شده است :

- جهت گیری استراتژیک سازمان
- تامین منابع مالی
- بخش مهندسی
- ساخت و نصب
- مدیریت منابع انسانی
- دفتر مدیریت پروژه PMO
- بخش بازرگانی

۴-روش و ابزار جمع آوری داده ها

اطلاعات حاصل از تحقیق میدانی از طریق تکمیل پرسشنامه به دست آمده است. این روش گردآوری رایج ترین روش در دانش مدیریت محسوب می شود. پرسشنامه طراحی شده شامل سه ستون اصلی است که در ستون دوم آن شرح پرسش آورده شده و در ستون سوم به هر یک از پرسش ها امتیازدهی می شود. پرسش ها با توجه اهمیت آنها از ۱ تا ۵ امتیازدهی می شوند.

۵-روش محاسبه و تحلیل

پرسش نامه طراحی شده جهت تکمیل در اختیار ۴۰ نفر از مدیران ارشد ، کارشناسان و خبرگان سازمان های مختلف قرار گرفت. در جداول ذیل به تعداد شرکت کنندگان و میزان تحصيلات آنها اشاره میگردد :

جدول شرکتهایی که در پاسخ به پرسشنامه حضور دارند*

ردیف	نام شرکتها	تعداد شرکت کنندةها
۱	شرکت ساخت و نصب (EPC) با گرید بالا*	4
۲	شرکت ساخت و نصب (EPC) با گرید بالا	9
۳	شرکت مهندسی قدس نیرو	17
۴	شرکت مدیریت پروژه های نیروگاهی	7

جدول میزان تحصیلات شرکت کنندگان

مقطع تحصیلی	تعداد نفرات
دانشجوی دکترا	1
دکترای تخصصی عمران	1
فوق لیسانس	22
لیسانس	13

جدول رشته های تحصیلی شرکت کنندگان در پرسشنامه

رشته	۱	۲	۳	۴	تعداد کل
DBA			1		1
MBA		1			1
اقتصاد	1		1		2
برق			2		1
الکترونیک			1		1
شیمی			2		1
عمران			2		1
معماری و شهر سازی			1		1
مهندس مکانیک		1	1		2
مهندسی الکترونیک				1	1
مهندسی برق	1		3	2	6
مهندسی شیمی		2		1	3
مهندسی عمران	1	2		2	5
مهندس عمران - زلزله			1		1
مهندسی کامپیوتر		1			1
مهندسی مکانیک	1	2	2	1	6
جمع	4	9	17	7	34

* به علت عدم مجوز از شرکت های مورد پرسش قرار گرفته جهت چاپ نام آنها در نشریه از ذکر نام آنها معذوریم.

۱- تست کرومباخ

برای تست همبستگی سئوالات از آزمون کرومباخ استفاده شده است که نتیجه آن آلفای ۷۸٪ می باشد که نتیجه خوبیست.

۲- تست فریدمن

برای محاسبه میانگین سئوالات جهت تحلیل ۵ گروه از سئوالات از آزمون فریدمن استفاده شده است که نتایج آن در جداول ذیل آمده است

اعتبار سنجی

به منظور اعتبارسنجی پرسشنامه فوق پس از جمع آوری پاسخ و وارد کردن اطلاعات به برنامه SPSS تست های مورد نیاز بر روی تک تک سئوالات انجام می گیرد. تستهای انجام شده بر روی پرسشنامه فوق در این تحقیق به شرح ذیل می باشد.

Friedman Test			
Ranks		شرح سوالات	ردیف
Mean Rank			
17.91	str.1	تشکیل واحد مستقل (SBU) با قابلیت های بالا برای اجرای پروژه های EPC	1
16.29	str.2	استفاده از منابع مالی خارجی جهت توسعه فعالیت های شرکت	2
23.11	str.3	توسعه فعالیت های شرکت از طریق مشارکت با شرکت های معتبر داخلی	3
24.51	str.4	توسعه فعالیت های شرکت از طریق مشارکت با شرکت های معتبر خارجی	4
13.54	str.5	استفاده از الگوی استاندارد (الگو های شرکت های موفق بین المللی) برای اجرای فعالیت ها	5
30.79	str.6	اخذ گواهی صلاحیت EPC برای پروژه های EPC داخلی از معاونت برنامه ریزی ریاست جمهوری	6
22.86	str.7	اخذ گواهی نامه مدیریت پروژه از EU Project Management برای پروژه های EPC بین المللی	7
16.33	fin.1	تامین منابع مالی طرح ها و پروژه ها از طریق منابع داخلی شرکت	8
23.21	fin.2	تامین منابع مالی طرح ها و پروژه ها از طریق سیستم اعتبارات داخلی	9
14.5	fin.3	تامین منابع مالی طرح ها و پروژه ها از طریق سیستم اعتبارات خارجی	10
24.49	eng.1	جذب نیروی انسانی متخصص دارای تجربه در زمینه طراحی مهندسی پروژه های EPC	11
14.84	eng.2	استفاده از نرم افزار های تخصصی پیشرفته جهت طراحی پروژه های EPC	12
17.12	eng.3	دارا بودن دفاتر کار مجهز به تجهیزات مدرن مهندسی برای انجام پروژه های EPC	13
16.83	eng.4	تهیه دستورالعمل های مورد نیاز با توجه به استاندارد های مورد استفاده در شرکت های معتبر بین المللی (Bench Marking) برای طراحی فاز Basic Design	14
17.71	eng.5	تهیه دستورالعمل های مورد نیاز با توجه به استاندارد های مورد استفاده در شرکت های معتبر بین المللی (Bench Marking) برای طراحی فاز Detail Design	15
20.3	proc.1	تدوین دستورالعمل های مورد نیاز با توجه به استاندارد های مورد استفاده در شرکت های معتبر داخلی (Bench Marking) برای تامین تجهیزات	16
26.57	proc.2	تهیه بانک اطلاعاتی تامین کنندگان داخلی	17
24.68	proc.3	تهیه بانک اطلاعاتی تامین کنندگان خارجی	18
24.46	cons.1	استفاده از پیمانکاران معتبر داخلی (برون سپاری) در اجرای پروژه ها در فاز اجرا (Construction)	19
17.09	cons.2	تامین ماشین آلات مورد نیاز جهت اجرای پروژه ها در فاز اجرا (Construction) - امانی	20
20.61	de.ex.1	رعایت دقیق قوانین و مقررات کشور در ارتباط با پروژه	21
20.12	de.ex.2	رعایت پروتکل های اداره کار برای حفظ سلامت کارگران در محیط پروژه	22
22.71	de.ex.3	رعایت مجموعه قوانین زیست محیطی کشور در اجرای پروژه ها	23
14.11	de.ex.4	توجه مدیریت به مسائل خانواده کارمندان	24
22.18	hrm.1	رعایت شایسته سالاری و شایسته گزینی توسط مدیریت های ارشد شرکت	25
22.7	hrm.2	حفظ و رعایت ارزش و احترام به نقش کارکنان و ایجاد محیطی دوستانه شفاف و قابل اعتماد	26
22.18	hrm.3	سهمیم بودن کارکنان در موفقیت و خوشنامی شرکت	27
21.47	hrm.4	تامین ثبات، امنیت و رضایت شغلی	28
19.33	pmo.1	ایجاد ساختار بخش (Project management office) جهت تدوین استانداردهای مدیریت پروژه های EPC	29
20.29	pmo.2	تدوین دستورالعمل های مورد نیاز بر اساس استاندارد PMBOK برای مدیریت پروژه	30
22.2	pmo.3	تدوین و طراحی ساختار مدیریت پروژه	31
16.64	pmo.4	تهیه برنامه های اجرایی مدیریت پروژه (Project Management Plan)	32
22.13	pmo.5	تهیه برنامه کنترل کیفیت - محیط زیست (QA/QC Plan, HSE Plan)	33
22.61	pmo.6	تهیه برنامه های اجرایی پروژه (Execution Plan)	34
17.72	comm.1	شرکت در نمایشگاه های بین المللی تخصصی جهت آشنایی با حوزه فعالیت EPC	35
17.38	comm.2	طراحی بسته تبلیغاتی که نشان دهنده ورود شرکت به حوزه EPC می باشد	36
21.21	comm.3	جمع آوری اطلاعات مناقصات از سایت ها - جراید - فراخوان ها پروژه های EPC	37
21.7	comm.4	تدوین دستورالعمل مورد نیاز جهت شرکت در مناقصات EPC	38
23.09	comm.5	تدوین دستورالعمل مورد نیاز جهت برآورد مالی مناقصات EPC (Cost Estimate) به منظور پایین آوردن حداقل ریسک	39
22.49	comm.6	ایجاد تیم مستقل جهت تهیه پیشنهاد فنی - مالی مناقصات EPC	40

Friedman Test

Ranks		شرح سوالات	ردیف
Mean Rank			
30.79	str.6	اخذ گواهی صلاحیت EPC برای پروژه های EPC داخلی از معاونت برنامه ریزی ریاست جمهوری	6
26.57	proc.2	تهیه بانک اطلاعاتی تامین کنندگان داخلی	17
24.68	proc.3	تهیه بانک اطلاعاتی تامین کنندگان خارجی	18
24.51	str.4	توسعه فعالیت های شرکت از طریق مشارکت با شرکت های معتبر خارجی	4
24.49	eng.1	جذب نیروی انسانی متخصص دارای تجربه در زمینه طراحی مهندسی پروژه های EPC	11
24.46	cons.1	استفاده از پیمانکاران معتبر داخلی (برون سپاری) در اجرای پروژه ها در فاز اجرا (Construction)	19
23.21	fin.2	تامین منابع مالی طرح ها و پروژه ها از طریق سیستم اعتبارات داخلی	9
23.11	str.3	توسعه فعالیت های شرکت از طریق مشارکت با شرکت های معتبر داخلی	3
23.09	comm.5	تدوین دستور العمل مورد نیاز جهت برآورد مالی مناقصات EPC (Cost Estimate) به منظور پایین آوردن حداقل ریسک	39
22.86	str.7	اخذ گواهی نامه مدیریت پروژه از EU Project Management برای پروژه های EPC بین المللی	7
22.71	de.ex.3	رعایت مجموعه قوانین زیست محیطی کشور در اجرای پروژه ها	23
22.7	hrm.2	حفظ و رعایت ارزش و احترام به نقش کارکنان و ایجاد محیطی دوستانه شفاف و قابل اعتماد	26
22.61	pmo.6	تهیه برنامه های اجرایی پروژه (Execution Plan)	34
22.49	comm.6	ایجاد تیم مستقل جهت تهیه پیشنهاد فنی - مالی مناقصات EPC	40
22.2	pmo.3	تدوین و طراحی ساختار مدیریت پروژه	31
22.18	hrm.1	رعایت شایسته سالاری و شایسته گزینی توسط مدیریت های ارشد شرکت	25
22.18	hrm.3	سهمیم بودن کارکنان در موفقیت و خوشنامی شرکت	27
22.13	pmo.5	تهیه برنامه کنترل کیفیت - محیط زیست (QA/QC Plan , HSE Plan)	33
21.7	comm.4	تدوین دستور العمل مورد نیاز جهت شرکت در مناقصات EPC	38
21.47	hrm.4	تامین ثبات ، امنیت و رضایت شغلی	28
21.21	comm.3	جمع آوری اطلاعات مناقصات از سایت ها - فرایند - فراخوان ها پروژه های EPC	37
20.61	de.ex.1	رعایت دقیق قوانین و مقررات کشور در ارتباط با پروژه	21
20.3	proc.1	تدوین دستورالعمل های مورد نیاز با توجه به استاندارد های مورد استفاده در شرکت های معتبر داخلی (Bench Marking) برای تامین تجهیزات	16
20.29	pmo.2	تدوین دستورالعمل های مورد نیاز بر اساس استاندارد PMBOK برای مدیریت پروژه	30
20.12	de.ex.2	رعایت پروتکل های اداره کار برای حفظ سلامت کارگران در محیط پروژه	22
19.33	pmo.1	ایجاد ساختار بخشی (Project management office) جهت تدوین استانداردهای مدیریت پروژه های EPC	29
17.91	str.1	تشکیل واحد مستقل (SBU) با قابلیت های بالا برای اجرای پروژه های EPC	1
17.72	comm.1	شرکت در نمایشگاه های بین المللی تخصصی جهت آشنایی با حوزه فعالیت EPC	35
17.71	eng.5	تهیه دستورالعمل های مورد نیاز با توجه به استاندارد های مورد استفاده در شرکت های معتبر بین المللی (Bench Marking) برای طراحی فاز Detail Design	15
17.38	comm.2	طراحی بسته تبلیغاتی که نشان دهنده ورود شرکت به حوزه EPC می باشد	36
17.12	eng.3	دارا بودن دفاتر کار مجهز به تجهیزات مدرن مهندسی برای انجام پروژه های EPC	13
17.09	cons.2	تامین ماشین آلات مورد نیاز جهت اجرای پروژه ها در فاز اجرا (Construction) - امانی	20
16.83	eng.4	تهیه دستورالعمل های مورد نیاز با توجه به استاندارد های مورد استفاده در شرکت های معتبر بین المللی (Bench Marking) برای طراحی فاز Basic Design	14
16.64	pmo.4	تهیه برنامه های اجرایی مدیریت پروژه (Project Management Plan)	32
16.33	fin.1	تامین منابع مالی طرح ها و پروژه ها از طریق منابع داخلی شرکت	8
16.29	str.2	استفاده از منابع مالی خارجی جهت توسعه فعالیت های شرکت	2
14.84	eng.2	استفاده از نرم افزارهای تخصصی پیشرفته جهت طراحی پروژه های EPC	12
14.5	fin.3	تامین منابع مالی طرح ها و پروژه ها از طریق سیستم اعتبارات خارجی	10
14.11	de.ex.4	توجه مدیریت به مسائل خانواده کارمندان	24
13.54	str.5	استفاده از الگوی استاندارد (الگو های شرکت های موفق بین المللی) برای اجرای فعالیت ها	5

تحلیل نتایج به دست آمده از پاسخ به سوالات پرسشنامه

میانگین نمرات بخش مربوط به سوالات استراتژیک با استفاده از برنامه SPSS

۱	تشکیل واحد مستقل (SBU) با قابلیت های بالا برای اجرای پروژه های EPC	str.1	3.95
۲	استفاده از منابع مالی خارجی جهت توسعه فعالیت های شرکت	str.2	3.825
۳	توسعه فعالیت های شرکت از طریق مشارکت با شرکت های معتبر داخلی	str.3	4.375
۴	توسعه فعالیت های شرکت از طریق مشارکت با شرکت های معتبر خارجی	str.4	4.425
۵	استفاده از الگوی استاندارد (الگو های شرکت های موفق بین المللی) برای اجرای فعالیت ها	str.5	3.6
۶	اخذ گواهی صلاحیت EPC برای پروژه های EPC داخلی از معاونت برنامه ریزی ریاست جمهوری	str.6	4.825
۷	اخذ گواهی نامه مدیریت پروژه از EU Project Management برای پروژه های EPC بین المللی	str.7	4.282051

		str.1	str.2	str.3	str.4	str.5	str.6	str.7
Total	N	40	40	40	40	40	40	39
	Mean	3.95	3.825	4.375	4.425	3.6	4.825	4.282051
	Std. Deviation	0.932325	0.98417	0.627878	0.635993	0.7779	0.500641	0.686284

تحلیل سوالات بخش Strategy

به طور کلی در شرکت های مهندسی مشاور با توجه به اینکه عمدتاً فعالیت ها از نوع خدمات مشاوره ، مهندسی ، نظارت و MC طرح ها بوده است که با فعالیت در پروژه های EPC بسیار متفاوت است و تجربه نشان داده ، ایجاد واحد EPC استراتژیک مستقل SBU کمک شایانی خواهد نمود که فارغ از فعالیت های عمومی شرکت به صورت متمرکز و با استفاده از نیروهای متخصص و با تجربه در این حوزه فعالیت نمایند و این موضوع با توجه به امتیاز میانگین به دست آمده نشان می دهد که مورد تایید پاسخ دهندگان بوده است. با توجه به هزینه های بالای پروژه های EPC استفاده از منابع داخلی و خارجی می تواند کمک زیادی به شرکت های مهندسی مشاور کند که می خواهند وارد این حوزه شوند ، همچنین استفاده از شرکتهای بزرگ و با تجربه در این حوزه نیز می تواند بنیه مالی و فنی شرکت های مهندسی مشاور را بالا برده و موجب پایین آوردن ریسک پروژه ها شود و همچنین امتیازات فنی مورد نیاز در مناقصات داخلی و خارجی را بهبود

نماید. اخذ گواهی صلاحیت EPC نیز برای مناقصات داخلی جزء الزامات قانونی بوده و با توجه به فرآیند طولانی کسب این مجوز شرکتهای مهندسی مشاور پس از تصمیم گیری برای ورود به حوزه EPC لازم است اقدامات لازم را در این خصوص انجام دهند که این موضوع با اهمیت ترین سؤال بین پاسخ دهندگان بوده است.

تحلیل سوالات بخش Finance

با توجه به جهت گیری دولت برای جذب سرمایه گذار خارجی در طرحهای خود و لزوم شناسایی و ارزیابی سرمایه گذار خارجی و داخلی شرکت های مهندسی مشاور می توانند این موضوع را به عنوان یک برنامه استراتژیک مدنظر قرار داده تا ضمن بهره مندی از منابع داخلی بتواند با استفاده از منابع خارجی نیز کسب سود بیشتری داشته باشد.

میانگین نمرات بخش مربوط به سوالات فاینانس با استفاده از برنامه SPSS

3.85	fin.1	تامین منابع مالی طرح ها و پروژه ها از طریق منابع داخلی شرکت	۱
4.4	fin.2	تامین منابع مالی طرح ها و پروژه ها از طریق سیستم اعتبارات داخلی	۲
3.775	fin.3	تامین منابع مالی طرح ها و پروژه ها از طریق سیستم اعتبارات خارجی	۳

	fin.1	fin.2	fin.3
N	40	40	40
Mean	3.85	4.4	3.775
Std. Deviation	0.80224	0.671775	0.733362

تحلیل سوالات بخش Engineering

برای بخش مهندسی و همچنین تجهیز امکانات و دفاتر متناسب با نیازمندی‌های بخش طراحی با الگوگیری از شرکت‌هایی که در این زمینه تجربه کافی دارند (Bench Marking) بسیار مفید می‌باشد. استفاده از نرم افزار پیشرفته در طراحی نیز می‌تواند قابلیت این بخش را افزایش دهد. بیشترین امتیاز را در این بخش پاسخ دهندگان به سئوالات مربوط به جذب نیروی انسانی و تجهیز دفاتر داده‌اند.

جذب نیروی انسانی متخصص و دارای تجربه در زمینه طراحی مهندسی پروژه‌های EPC می‌تواند باعث توانمند شدن بخش مهندسی (E) شرکت‌های مشاور شده و قابلیت‌ها در این بخش افزایش دهد، عمدتاً شرکت‌های مشاور کار Design Review انجام می‌دهند و با فرآیندهای طراحی پروژه‌های EPC آشنایی کافی ندارند در همین ارتباط تدوین دستورالعمل‌های مورد نیاز

میانگین نمرات بخش مربوط به سوالات مهندسی با استفاده از برنامه SPSS

4.45	eng.1	جذب نیروی انسانی متخصص دارای تجربه در زمینه طراحی مهندسی پروژه‌های EPC	۱
3.692308	eng.2	استفاده از نرم افزارهای تخصصی پیشرفته جهت طراحی پروژه‌های EPC	۲
3.923077	eng.3	دارا بودن دفاتر کار مجهز به تجهیزات مدرن مهندسی برای انجام پروژه‌های EPC	۳
3.775	eng.4	تهیه دستورالعمل‌های مورد نیاز با توجه به استاندارد‌های مورد استفاده در شرکت‌های معتبر بین المللی (Bench Marking) برای طراحی فاز Basic Design	۴
3.9	eng.5	تهیه دستورالعمل‌های مورد نیاز با توجه به استاندارد‌های مورد استفاده در شرکت‌های معتبر بین المللی (Bench Marking) برای طراحی فاز Detail Design	۵

	eng.1	eng.2	eng.3	eng.4	eng.5
N	40	39	39	40	40
Mean	4.45	3.692308	3.923077	3.775	3.9
Std. Deviation	0.503831	0.977479	0.774074	1.049725	0.900142

تحلیل سوالات بخش Procurement

با توجه به اینکه در حدود ۶۵ تا ۷۵ درصد حجم ریالی پروژه‌ها در بخش تأمین تجهیزات داخلی و خارجی می‌باشد، لذا لزوم تهیه بانک اطلاعات تهیه و تأمین تجهیزات از اهمیت بالایی برخوردار است. در این ارتباط استفاده از نرم افزارهای بانکهای اطلاعاتی بسیار مفید می‌باشد این کار علاوه بر بالا رفتن بهره وری می‌توان ریسک پروژه و برآورد بخش تهیه و تأمین تجهیزات را (P) در زمان ارائه پیشنهاد مناقصات داخلی و بین‌المللی پایین بیاورد و در تصمیم‌سازی و تصمیم‌گیری مدیران نقش مهمی را ایفا خواهد کرد. تدوین دستورالعمل‌های مورد نیاز با توجه به استانداردهای موجود نیز می‌تواند قابلیت این بخش را بالا برده و افزایش دهد. همانطور که در جدول زیر هم مشاهده میکنید ارزش میانگین پاسخ با سئوالات این بخش بالا بوده که نشانه اهمیت این موضوع

می باشد .

تحلیل سوالات بخش Construction

نظر به اینکه شرکت های مهندسين مشاور برای اجرای پروژه‌ها به‌صورت EPC نیاز به تأمین ماشین آلات و تجهیزات برای نصب و ساخت تجهیزات پروژه‌ها را دارند اصولاً دو سناریو وجود دارد :
اولاً "می‌توانند با جوینت شدن با شرکتهای معتبر ساخت و نصب نیاز خود را مرتفع سازند. و سناریو دوم در صورت داشتن منابع کافی مالی یک شرکت ساخت و نصب ایجاد کرده و به‌صورت مستقل در پروژه‌های EPC شرکت نمایند. پاسخ دهندگان به‌طور میانگین اهمیت استفاده از استفاده از پیمانکاران معتبر داخلی (برون سپاری) را در اجرای پروژه ها در فاز اجرا (Construction) سناریوی بهتری دانسته‌اند.

میانگین نمرات بخش مربوط به سوالات خرید با استفاده از برنامه SPSS

۱	تدوین دستورالعمل های مورد نیاز با توجه به استاندارد های مورد استفاده در شرکت های معتبر داخلی (Bench Marking) برای تامین تجهیزات	proc.1	4.25
۲	تهیه بانک اطلاعاتی تامین کنندگان داخلی	proc.2	4.575
۳	تهیه بانک اطلاعاتی تامین کنندگان خارجی	proc.3	4.575

	proc.1	proc.2	proc.3
N	40	40	40
Mean	4.25	4.575	4.575
Std. Deviation	0.493548	0.549475	0.598609

میانگین نمرات بخش مربوط به سوالات ساخت و نصب با استفاده از برنامه SPSS

۱	استفاده از پیمانکاران معتبر داخلی (برون سپاری) در اجرای پروژه ها در فاز اجرا (Construction)	cons.1	4.325
۲	تامین ماشین آلات مورد نیاز جهت اجرای پروژه ها در فاز اجرا (Construction) - امانی	cons.2	3.825

	cons.1	cons.2
N	40	40
Mean	4.325	3.825
Std. Deviation	1.022503	0.902631

تحلیل سوالات بخش Development & Excellence

Dept.:

آشنایی و رعایت دقیق قوانین و مقررات کشور در ارتباط با اجرای پروژه‌های EPC و الزامات قانونی در این خصوص می‌تواند از بروز مشکلات در زمان اجرای این گونه پروژه‌ها جلوگیری نماید. همچنین رعایت پروتکل‌های اداره کار و قوانین و مقرراتی و حفظ محیط زیست و به‌طور کلی HSE به‌خصوص در پروژه‌های نفت و گاز و پتروشیمی بسیار اهمیت داشته و لازم است شرکت‌های مهندسی مشاور قبل از ورود به چنین پروژه‌هایی، آشنایی کاملی با این موارد داشته باشند.

تحلیل سوالات بخش H.R.M

توجه مدیریت به مسائل کارمندان به عنوان سرمایه‌های انسانی و همچنین رعایت شایسته سалاری و شایسته‌گزینی در پروژه‌های EPC می‌تواند نقش بسیار تعیین‌کننده‌ای داشته باشد. همچنین حفظ رعایت ارزش و احترام و سهمیم بودن کارکنان در موفقیت و خوشنامی شرکت می‌تواند باعث توسعه و ارتباط نزدیک و دوستانه بین مدیران ارشد و کارکنان را در پروژه‌ها گردد. همین‌طور که از جدول ذیل مشاهده می‌کنید تامین ثبات، امنیت و رضایت شغلی به طور میانگین از اهمیت بالایی برخوردار است.

میانگین نمرات بخش مربوط به سوالات طرح و توسعه با استفاده از برنامه SPSS

4.275	de.ex.2	رعایت دقیق قوانین و مقررات کشور در ارتباط با پروژه	۱
4.2	de.ex.3	رعایت پروتکل‌های اداره کار برای حفظ سلامت کارگران در محیط پروژه	۲
4.225	de.ex.4	رعایت مجموعه قوانین زیست محیطی کشور در اجرای پروژه‌ها	۳

	de.ex.1	de.ex.2	de.ex.3
N	40	40	40
Mean	4.275	4.2	4.225
Std. Deviation	0.505736	0.563869	1.073874

میانگین نمرات بخش مربوط به سوالات منابع انسانی با استفاده از برنامه SPSS

4.25	hrm.1	توجه مدیریت به مسائل خانواده کارمندان	۱
4.375	hrm.2	رعایت شایسته سалاری و شایسته‌گزینی توسط مدیریت های ارشد شرکت	۲
4.175	hrm.3	حفظ و رعایت ارزش و احترام به نقش کارکنان و ایجاد محیطی دوستانه شفاف و قابل اعتماد	۳
4.25	hrm.4	سهمیم بودن کارکنان در موفقیت و خوشنامی شرکت	۴
4.25	hrm.5	تامین ثبات، امنیت و رضایت شغلی	۵

	hrm.1	hrm.2	hrm.3	hrm.4	hrm.5
N	40	40	40	40	40
Mean	4.25	4.375	4.175	4.25	4.25
Std. Deviation	0.926809	0.49029	1.034966	0.630425	0.630425

تحلیل سوالات بخش Project Management Office:

یکی از مهمترین کارهایی که شرکت‌های مهندسين مشاور برای اجرای پروژه‌های EPC باید انجام دهند آشنایی با استانداردهای مورد استفاده در اجرای اینگونه پروژه‌ها می‌باشد. براساس استاندارد^۱ PMBOK دفتري با عنوان PMO تأسيس شده و اهم وظايف اين دفتر شامل موارد ذيل می باشد:

- ۱- تدوین دستورالعمل‌های مورد نیاز مدیریت پروژه
- ۲- ارزیابی و تهیه شرح وظایف مدیران پروژه
- ۳- تهیه WBS و برنامه‌های مدیریت پروژه (Project Management Plan)
- ۴- تهیه برنامه‌های اجرای پروژه (Execution Plan)
- ۵- مونیتورینگ پروژه‌ها و تهیه گزارشات و دلایل تأخیر پروژه‌ها به مدیریت ارشد سازمان

همانطوری که از جدول ذیل ملاحظه می‌نمائید میانگین اهمیت موضوع فوق از نظر پاسخ دهندگان بالا می‌باشد

تحلیل سوالات بخش Commercial Dept:

اصولاً در شرکت‌های مهندسين مشاور تهیه اسناد مناقصه و شرکت در مناقصات با توجه به ماهیت فعالیت و خدمات ارائه شده بسیار مختصر و ریسک پائین‌تری نسبت به پروژه‌های EPC دارد. لذا لزوم واحدی مستقل متشکل از نفرات متخصص و مجرب در برآورد مناقصات پروژه EPC ضروری می‌باشد. در همین راستا تهیه دستورالعمل‌های مورد نیاز و آشنایی کامل تیم تهیه پیشنهادات می‌تواند در برنده شدن و برآورد درست پروژه‌های EPC کمک شایانی نماید درضمن شرکت در نمایشگاه‌های تخصصی می‌تواند در آشنایی شرکت‌های مهندسين مشاور با طرح‌هایی که به صورت EPC برگزار می‌شود کمک زیادی نماید. استفاده از برنامه‌های نرم افزاری در برآورد مناقصات نیز یکی دیگر از راهکارهایی است که در پایین آوردن ریسک اینگونه پروژه‌ها تأثیر دارد. همانگونه که از جدول ذیل مشاهده می‌نماید کلیه پاسخ دهندگان نیز با امتیاز میانگین بالایی به این گونه تغییرات پاسخ داده‌اند.

میانگین نمرات بخش مربوط به سوالات PMO با استفاده از برنامه SPSS

۱	ایجاد ساختار بخش (Project management office) جهت تدوین استانداردهای مدیریت پروژه‌های EPC	pmo.1	4.125
۲	تدوین دستورالعمل‌های مورد نیاز بر اساس استاندارد PMBOK برای مدیریت پروژه	pmo.2	4.2
۳	تدوین و طراحی ساختار مدیریت پروژه	pmo.3	4.325
۴	تهیه برنامه‌های اجرایی مدیریت پروژه (Project Management Plan)	pmo.4	4.025
۵	تهیه برنامه کنترل کیفیت - محیط زیست (QA /QC Plan ,HSE Plan)	pmo.5	4.225
۶	تهیه برنامه‌های اجرایی پروژه (Execution Plan)	pmo.6	4.325

	pmo.1	pmo.2	pmo.3	pmo.4	pmo.5	pmo.6
N	40	40	40	40	40	40
Mean	4.125	4.2	4.325	4.025	4.225	4.325
Std. Deviation	0.563301	0.405096	0.474342	0.422902	0.697523	0.693837



میانگین نمرات بخش مربوط به سوالات دپارتمان بازرگانی با استفاده از برنامه SPSS

۱	شرکت در نمایشگاه های بین المللی تخصصی جهت آشنایی با حوزه فعالیت EPC	comm.1	3.925
۲	طراحی بسته تبلیغاتی که نشان دهنده ورود شرکت به حوزه EPC می باشد	comm.2	3.95
۳	جمع آوری اطلاعات مناقصات از سایت ها - جراید - فراخوان ها پروژه های EPC	comm.3	4.3
۴	تدوین دستور العمل مورد نیاز جهت شرکت در مناقصات EPC	comm.4	4.175
۵	تدوین دستور العمل مورد نیاز جهت برآورد مالی مناقصات EPC (Cost Estimate) به منظور پایین آوردن حداقل ریسک	comm.5	4.3
۶	ایجاد تیم مستقل جهت تهیه پیشنهاد فنی - مالی مناقصات EPC	comm.6	4.3

	comm.1	comm.2	comm.3	comm.4	comm.5	comm.6
N	40	40	40	40	40	40
Mean	3.925	3.95	4.3	4.175	4.3	4.3
Std. Deviation	0.764182	0.845804	0.464095	0.812956	0.939176	

مقایسه میانگین سوالات بخش های مختلف پرسش نامه به ترتیب بیشترین اهمیت :

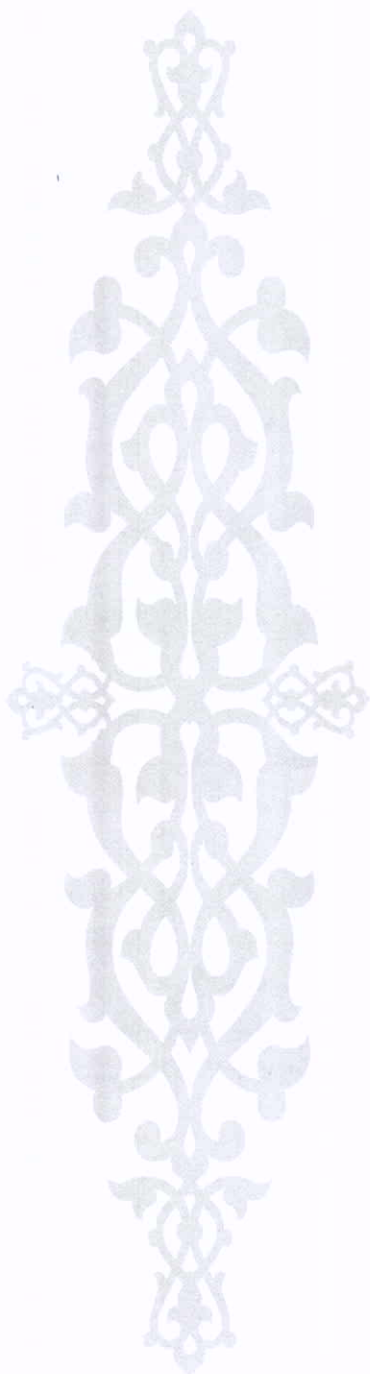
Mean Proc	4.43
Mean HRM	4.26
Mean Pmo	4.2
Mean Strategy	4.18
Mean Comm	4.16
Mean De. Ex	4.09
Mean Cons	4.08
Mean Fin	4.01
Mean Eng	3.93

بیوگرافی:

آقای سعید رحمانی جو دارای کارشناسی برق- الکترونیک از دانشگاه تبریز و کارشناسی ارشد MBA از سازمان مدیریت صنعتی بوده و جمعاً دارای سال تجربه کاری می باشد که سال آن را در قدس نیرو است. ایشان در حال حاضر مدیر پروژه پلیمر کرمانشاه و در عین حال کارشناس ارشد واحد بازرگانی می باشند.

زمینه علاقمندی آقای مهندس رحمانی جو برنامه ریزی استراتژیک و مدیریت تغییر، استفاده از استاندارد PMBOK برای توسعه مدل مدیریت پروژه، تهیه مدل کسب و کار Business Plan، عرضه یابی پروژه ها بر اساس مدل System Dynamic، مدل سازی ریسک طرحها، مطالعه تطبیقی نظریه های فلسفی با گفتمان های مهندسی می باشد

Email: srahmanjoo@gmail.com



GHODS NIROO شرکت **ENGINEERING COMPANY** مهندسی **قدس نیرو**

شرکت مهندسی قدس نیرو

با پیش از ۳۵ سال سابقه درخشان

خدمات مشاوره، مهندسی و طراحی جزئیات، تهیه مشخصات فنی، نظارت عالی، نظارت بر اجرا و راه اندازی پروژه‌ها و مدیریت اجرایی را در زمینه‌های زیر ارائه می نماید:

- نیروگاههای حرارتی (بخاری، گازی و سیکل ترکیبی)
- انرژیهای تجدیدپذیر (بادی، خورشیدی.....) و بهینه سازی انرژی
- پستهای فشار قوی
- خطوط انتقال نیرو، شبکه های توزیع نیروی برق و مطالعات سیستم
- سدها و نیروگاههای برق آبی، شبکه‌های آبیاری و زهکشی
- مطالعات زیست محیطی
- خطوط انتقال نفت و گاز
- همکاری با کارفرمایان به صورت مدیریت پیمان "MC"
- اجرا و یا همکاری در پروژه‌های بزرگ به صورت "EPC"

GHODS NIROO ENGINEERING COMPANY (GNEC)

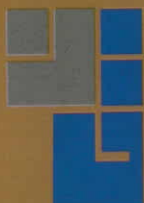
GNEC provides engineering & consultancy services, detail design, rendering technical specifications, project management and site & technical supervisory services in the following fields:

- Power plants (Steam, Gas Turbine & Combined Cycle)
- Renewable Energies (Wind, Solar,.....) Energy Reclamation
- Substations & SwitchYards
- Transmission Lines, Distribution Networks & System Studies
- Dams & Hydropower Plants, Water Transmission Lines, Irrigation & Drainage Networks.
- Environmental Studies
- Oil & Gas Transmission Lines
- Cooperation with Clients in Management of Contract "MC"
- Execution or Participation in major "EPC" Contracts



No, 82 Ostad Motahari Ave
 Tehran 1566775353/IRAN
 Tel: (+9821) 88403613-82404000
 Fax: (+9821) 88411704
 www.ghods-niroo.com

آدرس: تهران . خیابان استاد مطهری.
 بعد از چهارراه سهروردی . شماره ۸۲
 کدپستی: ۱۵۶۶۷۷۵۳۵۳
 تلفن: ۸۲۴۰۴۰۰۰ - ۸۸۴۰۳۶۱۳
 فاکس: ۸۸۴۱۱۷۰۴



تهران ، خیابان استاد مطهری ، چهارراه سهروردی ، شماره ۸۲
 کدپستی : ۱۵۶۶۷۷۵۳۵۳
 تلفن : ۸۸۴۳۰۴۵۴ - ۸۸۴۰۳۶۱۳
 فکس : ۸۸۴۱۱۷۰۴

No.82 , Ostad Motahari Ave.
 Tehran 1566775353 - IRAN
 Tel: 88403613 - 88430454
 Fax: 88411704

info@ghods-niroo.com
 www.ghods-niroo.com

