نشریه بین المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران، شماره ۳، جلد ۱۸، پاییز۱۳۸۶ صفحه ۳۰-۲۳
ویژه‌نامه مهندسی برق و مکانیک

انتخاب مقادیر نامی خازن و راکتور برای فیلترهای پسیو تک تنظیمه در سمت DC سیستم HVDC

علی توفیقی، علی مصلی نژاد و عباس شولائی

چکیده: این مقاله به بررسی روش تعیین مقادیر نامی المان‌های فیلترهای پسیو تک تنظیمه با توجه به ساختار سیستم و شرایط کاری آن پرداخته است. سپس با شبیه‌سازی یک سیستم HVDC نمونه چگونگی تعیین مقدار نامی این المانها با در نظرگرفتن شرایط حالت دائمی، دینامیکی و گذرا ارائه شده است.

واژه‌های کلیدی: فیلترهای پسیو، مقادیر نامی المانها، سیستم HVDC.

۱. مقدمه

امروزه استفاده از بارهای غیرخطی در شبکه‌های سیستم قدرت (HVDC و SVC) و نیز در مراکز صنعتی بزرگ همچون کوره‌های القائی افزایش فوق العاده‌ای داشته است و چون این بارهای غیرخطی هارمونیک‌هایی را شامل می‌شوند، لذا نیاز به فیلترهای پسیو و اکتیو برای کنترل میزان این هارمونیک‌ها تا محدودهٔ مجاز استاندارد [۱] IEEE Std 519-1992 واضح و آشکار است. در یک سیستم HVDC ، P پالسه هارمونیک‌های ولتاژ PK در سمت DC و $PK \pm 1$ در سمت AC اصلی‌ترین هارمونیک‌ها می‌باشند که برای کاهش آنها از فیلترهای پسیو تنظیم شونده (تک تنظیمه و چند تنظیمه) و تضعیف‌کننده استفاده می‌شود [۲،۳،۴]. تعیین مقدار نامی المان‌های فیلتر (خازن و راکتور) با توجه به ساختار سیستم و شرایط کاری آن صورت می‌پذیرد. که در مراجع، خیلی اندک به این امر بها داده شده است.

روشی که عموماً برای تعیین مقادیر نامی المانها المانهای فیلتر (خازن و راکتور) با توجه به ساختار سیستم و شرایط کاری آن صورت می‌پذیرد. که در مراجع، خیلی اندک به این امر بها داده شده است.

روشی که عموماً برای تعیین مقادیر نامی المانها ارائه می‌شود در نظر گرفتن اثر مجموع مؤلفه اصلی و مؤلفه هارمونیکی می‌باشد. این روش برای سیستم‌های کوچک و ساده پاسخگو می‌باشد، ولی برای سیستم‌های پیچیده قابل اطمینان نبوده و برای آنها شرایط مختلف همانند برقدار نمودن فیلترها، انرژی‌دار نمودن ترانسفورماتورها، وقوع خطاهای مختلف در سیستم مورد نظر بررسی شده و اثرات آنها بر المانهای فیلتر مطالعه گردیده و براساس آن مقادیر نامی المانها انتخاب می‌گردد. مرجع [۵] به بررسی و انتخاب مقادیر نامی خازن و راکتور برای فیلترهای تک تنظیمه براساس استانداردها و برای بخشی از یک سیستم AC پرداخته است.

در مرجع [۶] به بررسی اثر کلیدزنی فیلترها و بانکهای خازنی در سیستمهای HVDC و در مرجع [۷] مسئله رزونانس در نتیجه انرژی‌دار نمودن ترانسفورماتورهای این سیستمها و نهایتاً در مرجع [۸] تحلیل و بررسی اضافه ولتاژهای ناشی از خطای قطب به زمین درآنها ارائه شده است.

در این مقاله برقدار نمودن فیلترهای DC و انرژی دار نمودن ترانسفورماتورهای سمت یکسوساز و اینورتر وقوع خطای سه فاز در سمت AC و خطای قطب به زمین در سمت DC برای سیستم HVDC مورد مطالعه و بررسی شده و براساس آنها مقادیر نامی خازن و راکتور فیلترهای سمت DC تعیین شده است.

۲. سیستم HVDC مورد مطالعه

برای بررسی حالت‌های ذکر شده بر روی سیستم HVDC و تعیین مقادیر نامی المان‌های فیلترهای DC از سیستم Pacific HVDC که در کشور امریکا بطور ۱۳۶۱ کیلومتر کشیده شده و دارای مشخصات زیر است بهره گرفته شده است.

مقاله در تاریخ ۸۲/۱۱/۲۶ دریافت شده و در تاریخ ۸۳/۱۱/۲۴ به تصویب نهایی رسیده است.

علی توفیقی، دانشجوی دکترای دانشکده مهندسی برق،دانشگاه علم و صنعت ایران، tofighi@iust.ac.ir

علی مصلی‌نژاد، دانشجوی دکترای دانشکده مهندسی برق،دانشگاه علم و صنعت ایران mosallanejad@iust.ac.ir

عباس شولائی، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران shoulaie@iust.ac.ir

Archive of SID
www.SID.ir

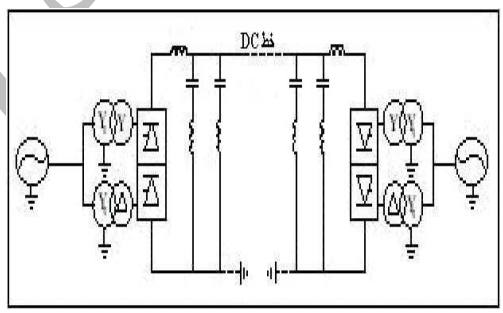
جدول ۱.مقادیر نامی سیستم HVDC مورد مطالعه

	سمت یکسوساز	سمت اینورتر	سمت DC
ولتاژ	۳۴۵ (kV)	۲۳۰ (kV)	۵۰۰ (kV)
جریان	-	-	۲۰۰۰A
توان	۱۰۰۰MW	۱۰۰۰MW	۱۰۰۰MW
فرکانس	۵۰Hz	۵۰Hz	-

این سیستم به کمک نرم افزار EMTDC-PSCAD V.3.0 شبیه‌سازی شده است که در شکل ۱ نمای کلی از این سیستم مشاهده می‌شود. نتایج شبیه سازی آن در جدول زیر آورده شده است:

جدول ۲.درصد هارمونیک ولتاژ DC

هارمونیک	در صد سمت یکسوساز	درصد سمت اینورتر
DC	۱۰۰	۱۰۰
۱۲	۱۳/۹	۱۴/۳
۲۴	۵/۷	۶/۱
THD %	۱۵/۳	۱۶/۰



شکل ۱. نمای کلی از سیستم HVDC

فیلترهای هارمونیکی ۱۲ و ۲۴ هر دو سمت یکسوساز و اینورتر در لحظات متفاوتی وارد سیستم شدند و شکل موج آنها در شکل‌های ۲ و۳ ارائه شده است، واضح است که راکتورهای فیلترها دارای برقگیر بوده و لیکن آنها پاسخگوی تمامی شرایط نبوده و حتماً باید میزان اتلاف توان توسط این برقگیر برآورد گردد که سبب ایجاد مشکل در قابلیت اطمینان سیستم نگردد.

به هنگام برآورد مقدار نامی این المان‌ها لازم است که به فرکانس نسبی وقوع این اتفاقات دقت شود، بطوریکه شاید بعضی از مسائل به کرات وقوع بپیوندد (برقدار نمودن فیلترها) ولی پاره‌ای دیگر (خطای سه فاز انرژی دار نمودن ترانسفورماتورها) به ندرت در سیستم اتفاق بیفتد.

هر چند انرژی‌دار نمودن ترانسفورماتور بندرت در سیستم اتفاق می‌افتد، لیکن در هر دو سمت یکسوسازی و اینورتری شبیه‌سازی شده و نتایج آن ارائه شده است و در ادامه وقوع خطای سه فاز در دو سمت AC بررسی و شبیه‌سازی گردیده و شکل موج ولتاژ و جریان المانها بررسی گردیده است.

نهایتاً یک خطای قطب به زمین در سمت DC به سیستم اعمال شده که نتایج آن بررسی و در جداول بیان شده است.

۳. انتخاب مقادیر نامی راکتور با فاصله هوائی

وسایل حفاظتی مرسوم اضافه ولتاژها همانند برقگیرها قرار داده شده در سیستم، برای حفاظت ناکافی می‌باشد. مگر اینکه المان‌های تشکیل دهنده فیلتر با مقادیر نامی ویژه‌ای برای تحمل استرسهای زیاد بکار گرفته شوند.

درخصوص استرسهای وارده به سیستم نه تنها دامنهٔ آن، بلکه مدت زمان وقوع و فرکانس تکرار آن نیز مهم می‌باشد. بویژه مدت زمان وقوع این اتفاقات بسیار مهم می‌باشد.

طراحی و انتخاب راکتورهای با هسته هوائی بطور کلی در استاندارد IEEE Std C57.16-1996 آورده شده است. مشخصات کلی که در طراحی راکتورها باید مورد نظر قرار گیرند، عبارت است از:

- ولتاژ و فرکانس سیستم؛
- اندوکتانس (اتو ترانس و تعداد تپهای مورد نیاز)؛
- مقدار جریان نامی حالت دائمی در فرکانس نامی و فرکانسهای هارمونیکی؛
- سطح اتصال کوتاه راکتور؛
- سطح ولتاژ عایقی راکتور؛
- ضریب کیفیت راکتور؛
- حجم مورد نیاز و تجهیزات نصب آن؛
- فاکتورهای زیست محیطی.

این اطلاعات برای طراحی راکتور مورد استفاده در فیلترهای تک تنظیمه کافی می‌باشد.

۳-۱. اضافه ولتاژهای گذرا

مشخصه اساسی برای سلف با هسته هوائی دارا بودن BIL نامی برای موج ضربه می‌باشد که اساساً براساس ولتاژ سیستم انتخاب می‌گردد.

در راکتورهای مدرن میزان استرس ولتاژ هادی به هادی، در برابر اضافه ولتاژهای گذرا به کمک لایه‌های عایقی اضافی بر روی هادی به حداقل مقدار ممکن خود می‌رسد.

راکتورهای خشک ذاتاً دارای مشخصه کاهش دهنده آثار ولتاژهای گذرا می‌باشند.

راکتورهای بکار گرفته شده در فیلترها بایستی برای نرخ تغییرات سریع ولتاژ اضافه تغییرات سریع ولتاژ همانند اضافه ولتاژهای کلیدزنی با مدت زمان بلند در نظر گرفته شوند.

نرخ سریع افزایش ولتاژ می‌تواند خاصیت غیرخطی بودن توزیع ولتاژ در سیم‌پیچها را افزایش دهد و اگر به این مسئله در طراحی اهمیت داده نشود، می‌تواند سبب استرس در سطح عایقی هادی به هادی

Archive of SID
www.SID.ir

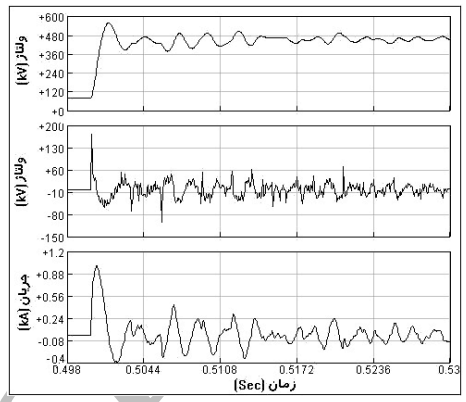
شود. اضافه ولتاژهای کلیدزنی با مدت زمان زیاد می‌تواند منجر به وقوع قوس شود.

این نرخ سریع افزایش ولتاژ می‌تواند با استفاده از لایه‌های جانبی عایق بر روی هادیها اصلاح شود.

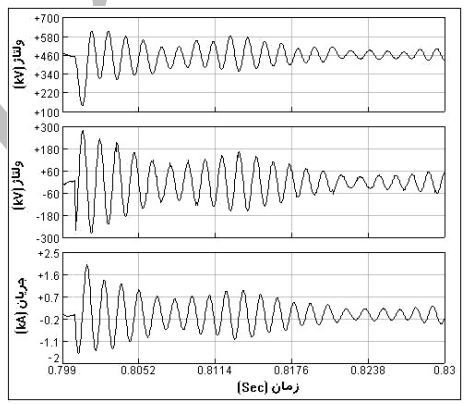
نکته دیگری که در طراحی راکتور در حالت گذرا می‌تواند مد نظر باشد، پیک ولتاژ ضربه، فرکانس کلیدزنی و اثرات متقابل بین چند فیلتر می‌باشد.

همچنین مدت زمان اضافه ولتاژهای گذرا و تعداد دفعات وقوع پارامترهای مهمی هستند که می‌توانند تأثیرگذار در طراحی راکتور فیلتر باشند.

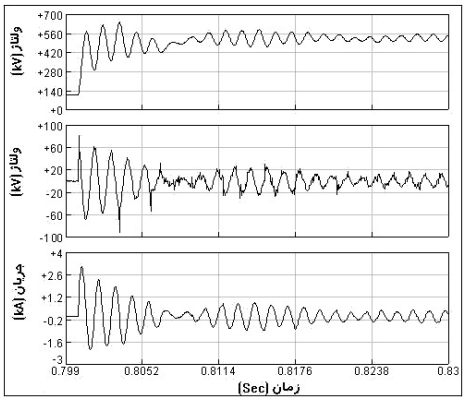
تعداد دفعات وقوع اضافه ولتاژهای گذرا بر طول عمر راکتور و نتیجتاً طول عمر سیستم عایقی هادی مؤثر می‌باشد.



(الف)



(ب)



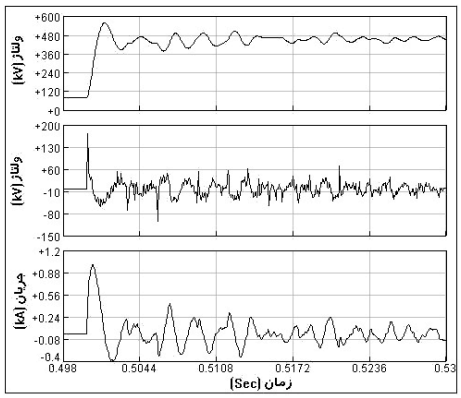
(ج)

شکل ۲. شکل موج ولتاژ: بترتیب خازن-سلف وجریان شاخه سمت یکسوساز

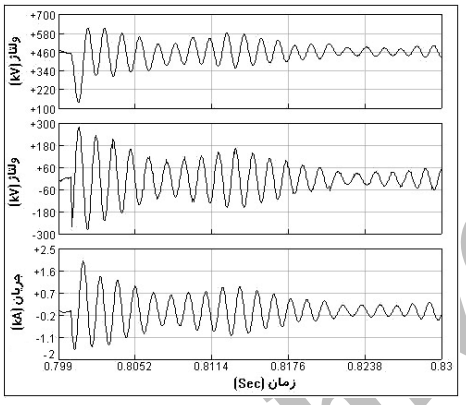
(الف) - برقدار نمودن فیلتر هارمونیک ۱۲

(ب) - اثر برقدار نمودن فیلتر هارمونیک ۲۴ بر فیلتر ۱۲

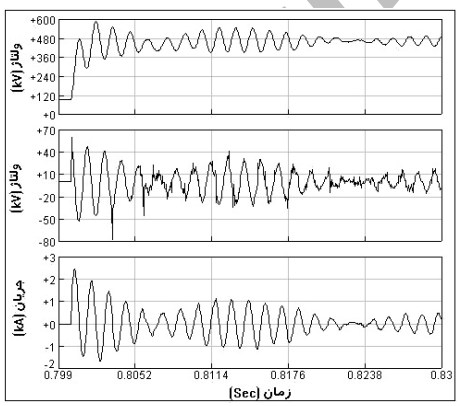
(ج) - برقدار نمودن فیلتر هارمونیک ۲۴



(الف)



(ب)



(ج)

شکل۳. شکل موج ولتاژ: بترتیب خازن-سلف وجریان شاخه سمت اینورتر

(الف) - برقدار نمودن فیلتر هارمونیک ۱۲

(ب) - اثر برقدار نمودن فیلتر هارمونیک ۲۴ بر فیلتر ۱۲

(ج) - برقدار نمودن فیلتر هارمونیک ۲۴

www.SID.ir

۲-۳. اضافه ولتاژها و اضافه جریان‌های دینامیکی

بنا به تعریف، اضافه ولتاژها و جریان‌های دینامیکی اشاره به اتفاقات با مدت زمان وقوع بیش از حالت‌های گذرا اما هنوز نسبتاً کم می‌باشد. مدت زمان آن در حدود دهها میلی‌ثانیه تا یک ثانیه می‌باشد. جریان اضافه بارهای کوتاه مدت که می‌تواند در حدود چند دقیقه باشد، دارای اثرات حرارتی می‌باشد. ولی اضافه جریان‌های دینامیکی به اندازه کافی بلند مدت نیست که سبب اثرات حرارتی شود و بجای آن، استرس مکانیکی یک پارامتر کلیدی است که به همراه جریان اتصال کوتاه می‌باشد. طراحی راکتور از نظر مکانیکی باید در حدی باشد که توانائی تحمل بار مکانیکی ناشی از اتصال کوتاه را داشته باشد، جریان‌های دینامیکی دارای دامنه‌ای پائین‌تر از جریان‌های اتصال کوتاه می‌باشند و در طول عمر آن وسیله چندین بار اتفاق می‌افتد که نتیجه آن می‌تواند فرسودگی مکانیکی آن باشد. اضافه ولتاژهای دینامیکی توانایی ایجاد استرس ولتاژ خارجی بر روی راکتور و استرس ولتاژ داخلی بر سیستم عایقی هادی را دارد. فرکانس وقوع یک پارامتر مهم برای طراحی در اضافه ولتاژها و جریانهای دینامیکی می‌باشد. فرکانس تکرار بالا می‌تواند مقدمه‌ای برای اثرات طول عمر (کاهش آن) باشد. برای اضافه ولتاژها و جریان‌های دینامیکی که امکان وقوع آن در طی کلیدزنی‌ها متفاوت می‌باشد، معیار طراحی استاندارد راکتورهای با هسته هوائی برای فیلترها می‌تواند ارتقاء داده شود. پارامترهای خیلی اساسی که برای مقادیر نامی تأثیر گذار است، استرس ولتاژ فرکانس نامی (افت ولتاژ)، مقدار نامی جریان اتصال کوتاه و تحمل موج ضربه می‌باشد. مقادیر واقعی استفاده شده برای ارتقاء طراحی بر پایه اضافه ولتاژها و جریانهای دینامیکی که تحت حالتهای کلیدزنی متفاوت ایجاد می‌شوند، نمی‌توانند بطور کامل با معیارهای ارائه شده برای تعیین مقادیر نامی پوشش داده شوند، بطوریکه نتایج حاصله از حالت‌های دینامیکی و گذرا برای طراحی پایه استفاده نشده بلکه برای مسئلهٔ تست راکتور از آن بهره گرفته می‌شود.

۴. انتخاب مقادیر نامی خازن

بی شک خازن اصلی ترین بخش یک فیلتر پسیو می باشد و نتیجتاً حساسیت فراوانی برای انتخاب آن وجود دارد. در مراجع معیارهایی برای انتخاب ارائه شده است. اصلی‌ترین و معتبرترین مرجع استاندارد IEEE Std 18-1992 [۱۰] است که استاندارد خازنهای قدرت موازی می‌باشد. براساس این استاندارد یک کیلووار خازنی برابر است با مقدار مؤثر ولتاژ برحسب کیلوولت ضربدر جریان مؤثر آن برحسب آمپر و سینوس زاویه بین آنها. پارامترهایی که برای مشخص نمودن خازن وجود دارند عبارتند از:

- مقدار مؤثر ولتاژ (ترمینال به ترمینال)؛
- کلاس عایقی (ترمینال به بدنه یا زمین)؛
- توان راکتیو؛
- تعداد فازها؛
- فرکانس.

محدودهٔ تغییرات مجازی که برای این خازنها در نظر گرفته شده، این است که تحت ولتاژ و فرکانس نامی توان راکتیو نامی آن نباید متجاوز از ٪ ۱۱۵ مقدار نامی باشد. ولی این خازنها بایستی توانایی کارکرد پیوسته تا ٪ ۱۳۵ مقدار نامی را داشته باشند. این افزایش توان نامی می‌تواند ناشی از ترکیبی از این دلایل باشد:

الف) افزایش توان نامی ناشی از اضافه ولتاژ بیش از مقدار قید شده بر روی پلاک آن در فرکانس نامی که آن را نیز می‌توان اینگونه بیان نمود:

۱- اضافه ولتاژ تا ٪ ۱۱۰ مقدار مؤثر، یا پیک ولتاژ متجاوز از $1.2\sqrt{2}$ ولتاژ مؤثر نامی نباشد (که آن شامل هارمونیکها نیز می‌شود ولی اضافه ولتاژ گذرا در نظر گرفته نمی‌شود).

۲- اضافه جریان تا ٪ ۱۸۰ جریان نامی که شامل مؤلفه اصلی و مؤلفه‌های هارمونیکی می‌شود.

ب) افزایش توان راکتیو ناشی از هارمونیکهای ولتاژ اضافه شده در فرکانس اصلی؛

ج) افزایش توان راکتیو به مقداری بیش از مقدار ذکر شده بر روی پلاک خازن که سازنده برای تغییرات مجاز دانسته است.

خازنها باید توانایی تحمل ولتاژهای کلیدزنی گذرا تا پیک $2\sqrt{2}$ برابر ولتاژ موثر نامی را برای طول عمر نامی داشته باشد. خازنهای قدرت برای کار در فرکانس ۵۰ یا ۶۰ هرتز طراحی می‌شود و اگر خازن در فرکانسی غیر از آن بکار گرفته شود توان راکتیو و جریان نامی آن تغییر می‌یابد و آن مستقیماً با فرکانس کاری تغییر می‌نماید. استرسهای اضافی و اضافه حرارتها و تغییرات شیمیایی، عموماً فیزیکی، نیز باعث کاهش طول عمر خازن می‌شوند.

۴-۱. اضافه ولتاژها

خازن شنت باعث افزایش ولتاژ در نقطه ای که نصب شده، می‌شود و این همانند آن است که باعث اضافه ولتاژ در دیگر تجهیزات می‌شود. شناخت این مسئله و مقدار ولتاژ نامی و اضافه ولتاژ مجاز باعث کاهش مشکلات خواهد شد. خازنهایی که از این استاندارد پیروی می‌کنند توانایی تحمل پیوسته تا ٪ ۱۱۰ ولتاژ مؤثر را دارند و با در نظر گرفتن آن که شامل هارمونیکها نیز می‌باشد تا $1.2\sqrt{2}$ برابر ولتاژ مؤثر نامی را تحمل می‌کنند و حداکثر کیلووار مجاز نیز تا ٪ ۱۳۵ مقدار نامی می‌باشد. واضح است که هرگونه اضافه ولتاژ و افزایش دمای محیط باعث کاهش طول عمر خازن می‌شود. خازن‌ها بایستی برای اضافه ولتاژها و جریان‌های ناشی از کلیدزنی حفاظت شده باشند. دامنه مجاز پیک ولتاژ و جریان بستگی به فرکانس وقوع دارد. در مواقعی که بطور تناوبی کلیدزنی صورت می‌پذیرد پیک جریان و ولتاژ باید نسبتاً کم نگه داشته شود. جدول ۳ راهنمای خوبی برای پیش بینی اضافه ولتاژها می‌باشد. هر یک از این مقادیر با توجه به نظر سازنده زیادتر می‌شود. هر خازنی باید توانایی تحمل در طول عمر عادی بیش از ۳۰۰ بار اضافه ولتاژ در فرکانس قدرت

Archive of SID
www.SID.ir

بین دو ترمینال را داشته باشد. البته این اضافه ولتاژها غیر از اضـافه ولتاژهای گذرا و هارمونیکی می‌باشد. دامنه و بازه آن براساس جدول ۴ می‌باشد.

جدول ۳ : حداکثر اضافه ولتاژ دینامیکی مجاز در فرکانس نامی [۱۰]

بازده تکرار اضافه ولتاژ	حداکثر ولتاژ مجاز (ضریبی که به مقدار مؤثر نامی اعمال می شود)
۶ سیکل	۲/۲
۱۵ سیکل	۲/۰
۱ ثانیه	۱/۷
۱۵ ثانیه	۱/۴
۱ دقیقه	۱/۳
۳۰ دقیقه	۱/۲۵

جدول ۴ .حداکثر اضافه ولتاژ گذرا مجاز در فرکانس نامی [۱۰]

تعداد احتمال تکرار در سال	حداکثر ولتاژ گذرا (ضریبی که به مقدار مؤثر نامی اعمال می‌شود)
۴	۵/۰
۴۰	۴/۰
۴۰۰	۳/۴
۴۰۰۰	۲/۹

میزان اضافه جریانی که خازن توانایی تحمل آنرا خواهد داشت در جدول ۵ آمده است:

جدول ۵ . حداکثر اضافه ولتاژ گذرا مجاز در فرکانس نامی [۱۰]

تعداد احتمال تکرار در سال	حداکثر پیک جریان گذرای مجاز (ضریبی که به مقدار مؤثر جریان نامی اعمال می شود)
۴	۱۶۰۰
۴۰	۱۱۵۰
۴۰۰	۸۰۰
۴۰۰۰	۴۰۰

۵. نتایج شبیه سازی

سیستم معرفی شـده در بخـش ۲ در محـیط EMTDC-PSCAD شبیه‌سازی شده و نتایج آن در جداول (۶،۷) ارائه می‌گردد.

برای محاسبه مقادیر ولتاژ و جریـان در حالتهـای مختلـف از روابـط جدول ۸ بهره گرفته شده است.

جدول۶ . ولتاژ المانهای فیلترهای DC در هر دو سمت

وضعیت سیستم	ولتاژ سمت یکسوساز (kV)				ولتاژ سمت اینورتر (kV)			
	خازن فیلتر ۱۲	سلف فیلتر۱۲	خازن فیلتر ۲۴	سلف فیلتر۲۴	خازن فیلتر ۱۲	سلف فیلتر۱۲	خازن فیلتر ۲۴	سلف فیلتر۲۴
برقدار نمودن فیلتر	۶۸۰	۲۹۶	۶۴۵	۸۱/۷	۶۵۷	۲۷۳	۵۸۹	۶۰
انرژی‌دار نمودن ترانسفورماتور سمت یکسوساز	۶۷۱	۸۳/۴	۶۵۲	۲۵/۵	۵۶۷	۶۷	۵۳۰	۱۶/۳
انرژی‌دار نمودن ترانسفورماتور سمت اینورتر	۵۸۹	۱۰۶	۵۲۶	۲۲/۵	۵۵۷	۸۹	۵۰۷	۱۳/۴
اتصال کوتاه سه فاز سمت یکسوساز	۵۴۱	۹۸	۵۲۱	۲۲	۴۷۰	۶۴/۵	۴۶۰	۱۱/۸
اتصال کوتاه سه فاز سمت اینورتر	۵۴۴	۷۸	۵۱۳	۲۴/۸	۴۷۰	۵۵	۴۶۲	۱۳/۲
خطای قطب به زمین	۵۴۰	۹۲	۵۱۶	۲۶/۷	۴۷۱	۴۸	۴۶۲	۲۲

جدول ۷. جریان عبوری از شاخه‌های فیلتری DC در دو سمت

وضعیت سیستم	جریان یکسوساز(kA)		جریان اینورتر (kA)	
	فیلتر ۱۲	فیلتر ۲۴	فیلتر ۱۲	فیلتر ۲۴
برقدار نمودن فیلتر	۲/۰۰۳	۳/۸۰	۱/۹۸۶	۲/۴۶۳
انرژی‌دار نمودن ترانسفورماتور سمت یکسوساز	۰/۷۲۸	۰/۹۱۳	۰/۲۹	۰/۳۴۹
انرژی‌دار نمودن ترانسفورماتور سمت اینورتر	۰/۸۳۴	۰/۶۲۹	۰/۴۹۶	۰/۶۶۸
اتصال کوتاه سه فازسمت یکسوساز	۰/۶۰۷	۰/۹۴۱	۰/۴۰۹	۰/۳۶۳
اتصال کوتاه سه فاز سمت اینورتر	۰/۶۷۶	۰/۸۱۵	۰/۶۲۲	۰/۵۰۷
خطای قطب به زمین	۰/۶۹	۰/۶۶	۰/۲۹۸	۰/۲۹۷

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۸ . روابط بکار گرفته شده برای محاسبه

وضعیت سیستم	روابط		
حالت دائمی	$I_{sc}=\frac{V_{L-L}}{\sqrt{3}X_L}$	$I_{rss}=\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty}I_h^2}$	$V_{drss}=\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty}V_h^2}$
انرژی دار نمودن ترانسفورماتور	$I_{SC}=\left(\frac{I_{PK}}{\sqrt{2}}\right)*2$		$V_{drss}=\frac{\left(\frac{V_{PK}}{\sqrt{2}}\right)}{2}$
برقدار نمودن فیلتر	$I_{SC}=\left(\frac{I_{PK}}{\sqrt{2}}\right)*3$		$V_{drss}=\frac{\left(\frac{V_{PK}}{\sqrt{2}}\right)}{1.5}$

در جدول (۹) مقادیر ولتاژ راکتور و جریان شاخه در وضعیت‌های حالت دائمی، دینامیکی و گذرا ارائه شده است.

جدول ۹ . ولتاژ و جریان المانها و شاخه های فیلتری DC

پارامترها	ولتاژ یکسوساز (kV)		ولتاژ اینورتر (kV)	
	فیلتر۱۲	فیلتر ۲۴	فیلتر۱۲	فیلتر ۲۴
حالت دائمی (s.s) (rms)	۱۹/۳	۲/۲	۸/۲	۱/۲
اضافه ولتاژ دینامیکی (pk) (انرژی‌دار نمودن ترانسفورماتور یکسوساز)	۸۳/۴	۲۵/۵۴	۶۷	۱۶/۳
اضافه ولتاژ دینامیکی (pk) (انرژی‌دار نمودن ترانسفورماتور اینورتر)	۱۰۶	۲۲/۵	۸۹	۱۳/۴
اضافه ولتاژ گذرا (pk) (برقدار نمودن فیلتر)	۲۹۶	۸۱/۷	۲۷۳	۶۰
جریان فیلتر (kA)				
حالت دائمی (s.s) (rms)	۰/۱۴۴	۰/۰۳۱	۰/۰۵۳	۰/۰۲۸
اضافه جریان دینامیکی (pk) (انرژی‌دار نمودن ترانسفورماتور یکسوساز)	۰/۷۲۸	۰/۹۱۳	۰/۲۹	۰/۳۴۹
اضافه جریان دینامیکی (pk) (انرژی‌دار نمودن ترانسفورماتور اینورتر)	۰/۸۳۴	۰/۶۲۹	۰/۴۹۶	۰/۶۶۸
اضافه جریان گذرا (pk)	۲/۰۰۳	۳/۰۸	۱/۹۸۶	۲/۴۶۳

جدول ۱۰ .مقادیر نامی راکتورهای سمت DC بر پایه طراحی استاندارد و ارتقاء یافته

یکسوساز	نوع مشخصه	نوع طراحی	$I_{rss}(A)$	$V_{drss}(kV)$
فیلتر ۱۲	TDS	UPG	۱۴۴	۳۷/۴۷
	CS	STD	۱۴۴	۱۹/۳
فیلتر ۲۴	TDS	UPG	۳۱	۹/۰۳
	CS	STD	۳۱	۲/۲
اینورتر				
فیلتر ۱۲	TDS	UPG	۵۳	۳۱/۴۷
	CS	STD	۵۳	۸/۲
فیلتر ۲۴	TDS	UPG	۲۸	۵/۷۵
	CS	STD	۲۸	۱/۲

Archive of SID

www.SID.ir

براساس آن دو نوع طراحی در نظر گرفته شده است: مشخصه دینامیکی یا گذرا و مشخصه دائمی، طراحی راکتور در دو حالت استاندارد و ارتقاء یافته انجام می‌گیرد.

از اطلاعات مشخصه دینامیکی یا گذرا بهنگام طراحی استاندارد راکتور استفاده نشده و در زمان تست از آن بهره گرفته می‌شود جدول ۱۰.انتخاب مقادیر نامی خازن بر پایه اضافه ولتاژهای دینامیکی و گذرا یک پارامتر اساسی است. اضافه جریان‌های گذرا عموما چندان مهم نیست چرا که خازنها برای کار در جریانهای بالا طراحی می‌شوند، ولتاژ اعمالی به خازنها در شرایط متفاوت در جدول ۱۱ آورده شده است. برای محاسبه مقدار نامی خازنها از روابط جدول ۱۲ استفاده شده است. ضرایب بکار گرفته شده در آن بر پایه استاندارد IEEE برای شرایط گذرا با در نظر گرفتن مدت وقوع آن می‌باشد و نهایتا ولتاژ دو سر خازنها در جدول ۱۳ آورده شده است.

جدول ۱۱. مقادیر ولتاژ خازنهای فیلترهای سمت DC

وضعیت سیستم	سمت یکسوساز (kV)		سمت اینورتر (kV)	
	فیلتر ۱۲	فیلتر۲۴	فیلتر ۱۲	فیلتر۲۴
ولتاژ حالت دائمی $\left(\sum V_h(rms)\right)$ (s.s)	۵۱۸	۵۲۰	۴۵۸	۴۶۲
اضافه ولتاژ دینامیکی $V_D - pk$ (انرژی‌دار شدن ترانسفورماتور یکسوساز)	۶۷۱	۶۵۲	۴۹۹	۴۸۶
اضافه ولتاژ دینامیکی $V_D - pk$ (انرژی‌دار شدن ترانسفورماتور اینورتر)	۵۸۹	۵۲۶	۵۰۰	۵۰۴
اضافه ولتاژ گذرا $V_{TE} - pk$	۶۸۰	۶۴۵	۶۰۷	۵۸۹

جدول ۱۲. روابط بکار گرفته شده برای محاسبه ولتاژ خازنها در شرایط مختلف

وضعیت سیستم	مقدار نامی ولتاژ بانک خازنی V_R (rms)
حالت دائمی	جمع ولتاژهای هارمونیکی $\sum V_h$ $V_R \geq \sum V_h$
اضافه ولتاژ دینامیکی (انرژی‌دار نمودن ترانسفورماتور) (V_D)	$V_R \geq (V_D/\sqrt{2})/1.4$
اضافه ولتاژ گذرا (انرژی‌دار نمودن ترانسفورماتور) (V_{Tf})	$V_R \geq (V_D/\sqrt{2})/2.5$

جدول ۱۳ . ولتاژ خازنهای فیلتر های DC

پارامتر	سمت یکسوساز (kV)		سمت اینورتر (kV)	
	فیلتر۱۲	فیلتر ۲۴	فیلتر ۱۲	فیلتر ۲۴

۶. نتیجه‌گیری

برای کاهش هارمونیک‌ها در سیستم‌ها از فیلترهای پسیو استفاده می‌شود. محاسبه مقادیر نامی المانهای فیلتر(خازن و راکتور) بر پایه مقدار مولفه اصلی و مولفه هارمونیکی می‌باشد.

برای افزایش قابلیت اطمینان سیستم تعیین مقادیر نامی بکمک شرایط حالت دائمی، دینامیکی و گذرا صورت می‌پذیرد که در این روش علاوه بر دامنه ومدت زمان وقوع، فرکانس تکرار وقوع آن از پارامترهای کلیدی است. در محاسبات انجام شده در این روش ضرایبی که در معادلات استفاده می‌شود از سیستمی به سیستم دیگر متفاوت بوده و بایستی با توجه به شرایط سیستم به معادلات اعمال نمود.

مراجع

[1] IEEE, Std 519-1992, "IEEE Recommended Practices And Requirements For Harmonic Control In Electrical Power System".

[2] Boashu P., Hong R., Tao SH. ,Chunye F., Dairong W., Huang H., Riedel P., Sadek K., *"Basic desgin aspects of Gui-Guang HVDC power transmission system"*. IEEE,Power System Technology, Int. Con. on , Vol: 1 , 13-17 Oct. 2002.

[3] Jun Y., Zehong L., Yan SH., "Studies on design of DC filters to three gorges to changzhou $\pm$ 500 kV HVDC link". IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol: 1, 23-27 Jan. 2000.

Archive of SID

www.SID.ir

[4] Bergdahl B., Dass R., *"AC-DC harmonic filters for three gorges changzhou ±500 kV HVDC project"*, ABB power systems, from www.abb.com.

[5] Bonner, J.A., Hurst, W.M. , Rocomora, R.G., Dudley, R.F., Sharp M.R., Twiss, J.A., *"Selecting rating for capacitors and reactors in applications involving multiple single-tuned filters"* , IEEE Trans on Power delivery, Vol. 10, No. 1, Jan 1995.

[6] Y.H., Fu, *"Simulation study on the switching transients during de-energisation of filter and capacitor banks"*, IEE AC and DC power transmission conference, 29 April-3 May 1996.

[7] Gesong, Ch.,Yonghua, Y., Yong, T., *"Studies on resonance phenomena caused by energization of transformer"* , IEEE power system technology, power con2002, Vol. 3, Oct 2002, 13-17.

[۸] اسماعیلی جعفرآبادی، سعید، شولائی، عباس.، *"تحلیل، مدلسازی و بررسی اضافه ولتاژهای ناشی از خطای تک قطبی به زمین در سیستم‌های دو قطبی HVDC"* یازدهمین کنفرانس برق ایران، تهران – ایران ۱۳۸۲.

[9] IEEE Std C57-16-1996, *IEEE standard requirments, terminology and test code for dry type Air-core series comected reactors.*

[10] IEEE Std, 18-1992, IEEE standard for shunt power capacitors, New York, IEEE 1993.

پیوست

علائم بکار برده شده:

V_{drss}: جذر مجموع مربعات ولتاژ هارمونیکی اعمالی به سلف فیلتر

I_{rss}: جذر مجموع مر بعات جریان هارمونیکی عبوری ازسلف

V_h: مقدار موثر افت ولتاژ هارمونیکی در هارمونیکh ام

V_{pk}: پیک اضافه ولتاژ

TDS: مشخصه دینامیکی یا گذرا

CS: مشخصه عادی

UPG: *طراحی ارتقاء یافته*

STD: *طراحی استاندارد*

Archive of SID

www.SID.ir