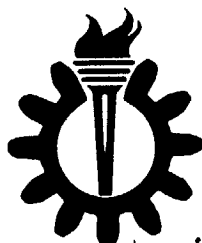


اللهم صل على محمد
وعلى آل محمد

۱۰ / ۱۲ / ۱۳۷۹



دانشگاه علم و صنعت ایران

دانشکده مهندسی برق

بررسی هارمونیک‌های طرف AC و DC در شبکه HVDC

و حذف آنها با استفاده از فیلتر غیرفعال

تهیه کننده

مهران برغشی

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی برق - قدرت

استاد راهنما

دکتر عباس شولائی

013230

مهر ۱۳۷۹

۳۹۱۸۰

تقدیم به پدر فداکارم که چگونه زیستن را به من آموخت.
تقدیم به مادر دلسوزم که چگونه دوست داشتن را به من آموخت.
تقدیم به برادران مهربانم ، مهرداد و مهرزاد که چگونه از خود گذشتن را به من آموختند.
تقدیم به اساتید خوبم که چگونه آموختن را به من آموختند.
تقدیم به شهر مقاوم ، آبادان که چگونه استقامت کردن را به من آموخت.
تقدیم به مردم خونگرم آبادان که چگونه مردم داری را به من آموختند.
تقدیم به دوستان عزیزم که چگونه رفاقت کردن را به من آموختند.

چکیده

سیستمهای برق صنعتی، از جمله شبکه‌های HVDC در سالهای اخیر، رشد قابل توجهی در استفاده از مبدلها داشته‌اند. بیشتر این مبدلها، تریستورها و دیودها را به شکل پل شش پالسه و یا دوازده پالسه مورد استفاده قرار می‌دهند. هر چند شکل موجهای این مبدلها پرریودیک هستند، ولی دارای اعوجاج قابل تفکیک به مجموع یک موج سینوسی پایه و یکسری از مکملهای هارمونیک که فرکانس آنها مضارب صحیحی از فرکانس سینوسی پایه هستند، می‌باشد که میتواند آثار زیانباری برای شبکه قدرت و همچنین شبکه‌های مخابراتی مجاور داشته باشند.

در این پایان نامه در ابتدا به شرح اجمالی هارمونیکهای تولیدی توسط مبدلها، چه در طرف جریان مستقیم و چه در سمت جریان متناوب، اعم از هارمونیکهای مشخص و نامشخص در شرایط تعادل و عدم تعادل پرداخته می‌شود و سپس بطور مبسوط روش حذف هارمونیکهای موجود در سمت AC و DC با استفاده از فیلترهای پسیو، شرح داده می‌شود.

همچنین در پایان نیز نتایج شبیه سازی کامپیوتری و نتیجه گیری از بحثهای انجام شده ارائه خواهد شد.

تمام مراحل انجام این پایان نامه در آزمایشگاه تحقیقاتی انجام شده است ،
بنابراین جا دارد که از جناب آقای دکتر شولائی مسئول محترم آزمایشگاه که
در طول مدت تحصیل راهنمایی این پروژه را به عهده داشتند تشکر کنم و
همچنین از تمامی پرسنل محترم آزمایشگاه و دوستان عزیز ی که بنحوی در
انجام این پروژه مرا یاری کردند ، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

بر خود لازم می دانم که از خانواده های محترم پوربلورچیان و فرازی که در طول مدت
دوره تحصیل ، مشوق اینجانب بودند تشکر و قدردانی کنم. امید که روزی جوابگوی
زحمات این عزیزان باشم.
همچنین از خانم شیرمحمدی مسئول محترم کتابخانه دانشکده برق و خانم توکلی
منشی محترم تحصیلات تکمیلی دانشکده برق که در طول تهیه این پایان نامه زحمت
زیادی را به این عزیزان دادم کمال تشکر و قدردانی را دارم.

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول : مقدمه

۱	۱-۱- مقدمه
۲	۲-۱- سابقه و وضعیت کنونی سیستمهای HVDC
۴	۳-۱- انتقال انرژی به صورت جریان مستقیم
۴	۱-۳-۱- مزایای انتقال با استفاده از کابلها ، نسبت به خطوط هوایی
۴	۲-۳-۱- مزایای انتقال با استفاده از خطوط هوایی ، نسبت به کابلها
۴	۱-۴-۱- مزایای انتقال به صورت جریان مستقیم (DC) نسبت به جریان متناوب (AC) ...
۵	۲-۴-۱- معایب استفاده از شبکههای HVDC نسبت به HVAC
۶	۵-۱- طبقه بندی خطوط HVDC
۶	۱-۵-۱- خطوط تک قطبی
۷	۲-۵-۱- خطوط دو قطبی
۸	۳-۵-۱- خطوط هم قطبی
۸	۶-۱- اجزای سیستم انتقال HVDC
۹	۱-۶-۱- مبدلها
۹	۲-۶-۱- راکتورهای هموار ساز
۱۰	۳-۶-۱- فیلترهای هارمونیکی
۱۰	۴-۶-۱- منابع توان راکتیو
۱۰	۵-۶-۱- الکترودها
۱۱	۶-۶-۱- خطوط جریان مستقیم

۱۱ ۱-۶-۷- کلیدهای جریان متناوب

فصل دوم : بررسی هارمونیکهای سمت AC و DC

۱۲ ۱-۱-۱- مقدمه

۱۳ ۲-۲- آثار نامطلوب هارمونیکها

۱۳ ۳-۲- تقسیم بندی هارمونیکها

۱۴ ۲-۳-۱- عوامل مؤثر در بوجود آمدن هارمونیکهای نامشخص

۱۴ ۲-۳-۲- هارمونیکهای مشخص

۱۴ ۲-۳-۲- الف- هارمونیکهای مشخص سمت DC

۱۸ ۲-۳-۲- ب- هارمونیکهای مشخص سمت AC

۲۱ ۲-۳-۲- ج- تأثیر پارامترهای مختلف روی هارمونیکهای جریان

۲۶ ۲-۳-۳- هارمونیکهای ناشناخته

۲۶ ۲-۳-۳- الف- میان هارمونیکها (Interharmonics)

۲۷ ۲-۳-۳- الف-۱- محاسبه ولتاژ قسمت DC برای یک مبدل

۲۹ ۲-۳-۳- الف-۲- امیدانس کموتاسیون یک مبدل از دید طرف DC

۳۰ ۲-۳-۳- الف-۳- محاسبه جریان DC با امیدانس متغیر با زمان مبدل

۳۴ ۲-۳-۳- الف-۴- محاسبه میان هارمونیکهای جریان AC

۳۶ ۲-۳-۳- ب- هارمونیکهای ناشی از عدم تعادل منبع

۳۶ ۲-۳-۳- ب-۱- محاسبه جریانهای هارمونیکی مبدل پل سه فاز در حالت عدم تعادل ولتاژ منبع

۳۸ ۲-۳-۳- ب-۲- محاسبه ولتاژهای هارمونیکی سمت DC ، در حالت عدم تعادل منبع

۳۹ ۲-۳-۳- ب-۳- محاسبه جریانهای هارمونیکی سمت AC در حالت عدم تعادل منبع

۴۰ ۲-۳-۳- ب-۴- تأثیر المانهای مختلف شبکه بر هارمونیکهای ناشی از عدم تعادل منبع

فصل سوم : بررسی فیلترهای غیر فعال (پسیو) از لحاظ نوع و پاسخ فرکانسی

۴۵	..... ۱-۳-۱ مقدمه
۴۶	..... ۲-۳-۲ فاکتورهای طراحی
۴۷	..... ۳-۳-۳ تقسیم بندی کلی فیلترهای غیرفعال از لحاظ فرکانس تنظیم
۴۷	..... ۱-۳-۳-۱ فیلترهای تنظیم شونده
۴۹	..... ۱-۳-۳-۱-۱ انواع فیلترهای تنظیم شونده
۴۹	..... ۱-۳-۳-۱-۱-الف- فیلترهای تک تنظیمه
۵۲	..... ۱-۳-۳-۱-۱-الف-۱- امیدانس خیلی زیاد
۵۲	..... ۱-۳-۳-۱-۱-الف-۲- سیستم AC بدون تلفات (شبکه کاملاً راکتیو باشد)
۵۳	..... ۱-۳-۳-۱-۱-الف-۳- شبکه AC با زاویه امیدانس معین
۵۵	..... ۲-۳-۱-۱-ب- فیلترهای تنظیم شونده دابل
۵۶	..... ۲-۳-۱-۲ فیلترهای بالاگذر
۵۹	..... ۳-۴-۴ مزایای فیلترهای بالاگذر نسبت به فیلتر تنظیم شونده
۶۰	..... ۳-۵-۵ نقطه اتصال فیلترهای سمت AC

فصل چهارم : طراحی فیلترهای غیرفعال سمت AC و DC

۶۲	..... ۱-۴-۱ مقدمه
۶۳	..... ۲-۴-۲ فیلترهای پسیو سمت AC
۶۴	..... ۴-۲-۱-۱ فیلتر تنظیم شونده
	..... بهای مینیمم فیلتر تنظیم شونده
۷۰	..... ۴-۲-۲-۲ فیلتر بالاگذر
۷۰	..... ۴-۲-۲-۱-الف- طراحی فیلتر بالاگذر

۷۴	..... ۳-۴- فیلترهای سمت DC
۷۵	..... ۱-۳-۴- معیارهای طراحی
۷۹	..... ۲-۳-۴- محاسبه امپدانس متقابل بین خط تلفن و خط انتقال
۷۹	..... ۳-۳-۴- محاسبه جریانهای هارمونیکی خط HVDC
۸۲	..... ۴-۳-۴- طراحی و محاسبه فیلتر سمت DC
۸۳	..... ۴-۴- توان راکتیو تولید شده توسط فیلترها
۸۴	..... ۱-۴-۴- توان راکتیو تولید شده توسط فیلترهای تنظیم شونده
۸۵	..... ۲-۴-۴- توان راکتیو تولید شده توسط فیلتر بالا گذر

فصل پنجم : شبیه سازی

۸۶	..... ۱-۵- مقدمه
۸۷	..... ۲-۵- شمای کلی شبکه HVDC
۸۷	..... ۱-۲-۵- قسمت یکسوسازی
۸۹	..... ۱-۲-۵- الف- مدار تولید پالسهای زاویه آتش
۸۹	..... ۱-۲-۵- ب- مدار کنترل جریان ثابت
۹۰	..... ۱-۲-۵- ج- فیلترهای سمت AC
۹۰	..... ۱-۲-۵- د- فیلترهای سمت DC
۹۱	..... ۲-۲-۵- قسمت اینورتری
۹۳	..... ۲-۲-۵- الف- مدار تولید پالسهای زاویه آتش ترستورها
۹۴	..... ۲-۲-۵- ب- مدار کنترل زاویه خاموشی ثابت
۹۴	..... ۲-۲-۵- ج- فیلترهای سمت AC
۹۵	..... ۲-۲-۵- د- فیلتر سمت DC

۹۵	..... ۳-۵- شبکه‌های شبیه سازی شده
۹۵	..... ۳-۵-الف- اطلاعات شبکه ۵۰۰ کیلوولت با جریان ۱۶۰ آمپر
۹۷	..... ۳-۵-الف-۱- نتایج حاصل از شبیه سازی مربوط به شبکه ۵۰۰ کیلوولت و ۱۶۰ آمپر
۱۰۲	..... ۳-۵-ب- اطلاعات شبکه ۵۰۰ کیلوولت با جریان ۱۶۰ آمپر
۱۰۴	..... ۳-۵-ب-۱- نتایج حاصل از شبیه سازی مربوط به شبکه ۵۰۰ کیلوولت و ۷۵ آمپر
۱۰۸	..... ۴-۵- شبیه سازی‌های انجام شده در مراجع [۱۶ و ۱۴].

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۱۱۰	..... ۱-۶- نتیجه گیری
۱۱۳	..... ۲-۶- پیشنهادات
۱۱۵	..... ضمیمه
۱۳۱	..... مراجع

فهرست شکلها

صفحه

عنوان

فصل اول

- شکل (۱-۱) : روند روبه رشد سیستمهای HVDC تا سال ۱۹۸۴ ۳
- شکل (۲-۱) : ساختار یک خط تک قطبی ۷
- شکل (۳-۱) : خط ارتباطی دو قطبی HVDC ۷
- شکل (۴-۱) : خط ارتباط هم قطبی HVDC ۸
- شکل (۵-۱) : نمونه‌ای از سیستم دو قطبی HVDC با نمایش مؤلفه‌های اصلی آن ۹

فصل دوم

- شکل (۱-۲) : نمایش یک مبدل پل سه فاز شش پالسه ۱۵
- شکل (۲-۲) : شکل موج ولتاژ DC مبدل شش پالسه (الف) از ترمینالهای مثبت ، (ب) از ترمینالهای منفی ، (ج) بین دو ترمینال ۱۵
- شکل (۳-۲) : تأثیر افزایش زاویه آتش α ، بر هارمونیکهای ولتاژ سمت DC (الف) حالت یکسوسازی ، (ب) حالت اینورتری ۱۶
- شکل (۴-۲) : " تأثیر افزایش زاویه همپوشانی μ ، بر هارمونیکهای ولتاژ سمت DC ۱۷
- شکل (۵-۲) : ۱۹
- شکل (۶-۲) : تأثیر افزایش زاویه آتش α بر هارمونیکهای جریان سمت AC (الف) حالت یکسوسازی ، (ب) حالت اینورتری ۲۲
- شکل (۷-۲) : تأثیر افزایش زاویه کموتاسیون μ ، بر هارمونیکهای جریان سمت AC ۲۲

- شکل (۸-۲): تأثیر افزایش زاویه آتش α ، بر THD جریان سمت AC (الف) حالت یکسوسازی ،
 ۲۳ (ب) حالت اینورتری
- شکل (۹-۲): تأثیر افزایش L_{ac} ، روی THD جریان سمت AC
 ۲۴
- شکل (۱۰-۲): تأثیر افزایش
 ۲۴
- شکل (۱۱-۲): تأثیر افزایش L_{dc} ، روی هارمونیکهای جریان مرتبه بالای سمت AC
 ۲۵
- شکل (۱۲-۲): تأثیر افزایش L_{dc} ، روی THD جریان سمت AC
 ۲۵
- شکل (۱۳-۲): توابع مدولاسیون (الف) تابع سوئیچینگ ایده آل با $\mu = 0$ (ب) تابع سوئیچینگ برای
 مدولاسیون ولتاژ (ج) تابع سوئیچینگ برای مدولاسیون جریان (د) مدولاسیون امپدانس مربوط به
 مبدل
 ۲۸
- شکل (۱۴-۲): مدارهای معادل برای طرحهای HVDC ، پشت به پشت برای مبدل شش پالس
 (الف) اتصال سیستم (ب) مدار معادل برای محاسبات جریان DC (ج) مدار معادل تغییر یافته
 ۳۱
- شکل (۱۵-۲): مدار پل یکسوکننده سه فاز تریستوری
 ۳۷
- شکل (۱۶-۲): مدار معادل جریان طرف DC (الف) مؤلفه DC (ب) مؤلفه AC
 ۳۷
- شکل (۱۷-۲): شکل موج ولتاژ منبع و سوئیچینگ
 ۳۹
- شکل (۱۸-۲): طیف جریان هارمونیکي سمت AC (در حالت تعادل فازها)
 ۴۱
- شکل (۱۹-۲): طیف جریان هارمونیکي سمت AC (در حالت عدم تعادل فازها)
 ۴۱
- شکل (۲۰-۲): تأثیر افزایش L_{dc} بر روی هارمونیکهای نامشخص جریان سمت AC
 ۴۲
- شکل (۲۱-۲): تأثیر افزایش L_{dc} بر روی THD جریان سمت AC (در حالت تعادل فازها و عدم
 تعادل فازها)
 ۴۳

فصل سوم

- شکل (۱-۳): نمونه‌ای از ترکیب فیلترها برای مبدل جریان شش پالس
 ۴۸

- ۴۸ شکل (۲-۳): مدار ساده شده منبع هارمونیک، فیلتر و امپدانس شبکه
- ۴۹ شکل (۳-۳): شکل مداری و پاسخ فرکانسی، فیلتر تنظیم شونده
- ۵۳ شکل (۴-۳): مکان امپدانس فیلتر
- ۵۴ شکل (۵-۳): روش پیدا کردن مقدار بهینه Q (Q_0) براساس، حداقل ادمیتانس کل Y_h
- شکل (۶-۳): شکل مداری فیلترهای تنظیم شونده (الف) دو شاخه فیلتر تک تنظیمه (ب) یک شاخه فیلتر دو تنظیمه
- ۵۵
- ۵۷ شکل (۷-۳): شکل مداری و پاسخ فرکانسی یک فیلتر بالاگذر
- ۵۸ شکل (۸-۳): انواع فیلترهای بالا گذر (الف) فیلتر نوع اول (ب) فیلتر نوع دوم (ج) فیلتر نوع سوم
- ۵۸ شکل (۹-۳): منحنی امپدانس فیلتر بالاگذر نوع دوم برحسب فرکانس
- ۵۹ شکل (۱۰-۳): منحنی امپدانس فیلتر بالاگذر نوع سوم برحسب فرکانس
- شکل (۱۱-۳): مکانهای مختلف اتصال فیلتر سمت AC (الف) در اولیه ترانسفورماتور (ب) در ثانویه ترانسفورماتور (ج) در ثانیه ترانسفورماتور
- ۶۰

فصل چهارم

- ۶۴ شکل (۱-۴): منحنی قیمت فیلتر برحسب اندازه فیلتر
- ۷۷ شکل (۲-۴): سیستم دو قطبی HVDC
- ۸۰ شکل (۳-۴): مدار معادل HVDC، برای طراحی فیلتر سمت DC
- شکل (۴-۴): مدار معادل تونن خط A، همراه با فیلتر Z_f و اندوکتانسهای L_c و L_{dc} (الف) مدار اصلی (ب) مدار معادل تونن
- ۸۰
- ۸۱ شکل (۵-۴): قسمت بسیار کوچک از خط انتقال مورد استفاده

فصل پنجم

- ۸۷ شکل (۵-۱) : شمای کلی یک شبکه HVDC
- ۸۸ شکل (۵-۲) : شمای کلی شبکه در سمت یکسوسازی
- ۸۹ شکل (۵-۳) : بلوک دیاگرام مدار تولید پالسهای زاویه آتش
- ۹۰ شکل (۵-۴) : فیلترهای سمت AC (برای قسمت یکسوسازی)
- ۹۱ شکل (۵-۵) : فیلتر سمت DC
- ۹۲ شکل (۵-۶) : شمای کلی شبکه در سمت اینورتری
- ۹۳ شکل (۵-۷) : مدار تولید پالسهای زاویه آتش سمت اینورتری
- ۹۴ شکل (۵-۸) : مدار کنترل زاویه خاموشی ثابت
- ۹۴ شکل (۵-۹) : فیلترهای سمت AC (برای قسمت اینورتری)
- ۹۷ شکل (۵-۱۰) : جریان سمت AC یکسوساز برای حالت قبل از نصب فیلتر (توپر) و پس از نصب فیلتر (نقطه چین)
- ۹۷ شکل (۵-۱۱) : طیف هارمونیکی جریان AC سمت یکسوساز (قبل از نصب فیلتر)
- شکل (۵-۱۲) : جریان سمت AC اینورتر ، برای حالت قبل از نصب فیلتر (توپر) و پس از نصب فیلتر (نقطه چین)
- ۹۸ شکل (۵-۱۳) : طیف هارمونیکی جریان AC سمت اینورتر (قبل از نصب فیلتر)
- شکل (۵-۱۴) : ولتاژ DC سمت یکسوساز ، برای حالت قبل از نصب فیلتر (نازک) و پس از نصب فیلتر (ضخیم)
- ۹۹ شکل (۵-۱۵) : طیف هارمونیکی ولتاژ DC سمت یکسوساز (قبل از نصب فیلتر)
- شکل (۵-۱۶) : ولتاژ DC سمت اینورتر ، برای حالت قبل از نصب فیلتر (نازک) و پس از نصب فیلتر (ضخیم)
- ۱۰۰ شکل (۵-۱۷) : طیف هارمونیکی ولتاژ DC سمت یکسوساز (قبل از نصب فیلتر)

- شکل (۵-۱۸): جریان سمت DC ، برای حالت قبل از نصب فیلتر (نازک) و پس از نصب فیلتر (ضحیم) ۱۰۱
- شکل (۵-۱۹): جریان سمت AC یکسوساز برای حالت قبل از نصب فیلتر (توپر) و پس از نصب فیلتر (نقطه چین) ۱۰۴
- شکل (۵-۲۰): طیف هارمونیکی جریان سمت AC یکسوساز (قبل از نصب فیلتر) ۱۰۴
- شکل (۵-۲۱): جریان سمت AC اینورتر ، برای حالت قبل از نصب فیلتر (توپر) و پس از نصب فیلتر (نقطه چین) ۱۰۵
- شکل (۵-۲۲): طیف هارمونیکی جریان سمت AC اینورتر (قبل از نصب فیلتر) ۱۰۵
- شکل (۵-۲۳): ولتاژ DC سمت یکسوساز ، برای حالت قبل از نصب فیلتر (نازک) و پس از نصب فیلتر (ضحیم) ۱۰۶
- شکل (۵-۲۴): طیف هارمونیکی ولتاژ DC سمت یکسوساز (قبل از نصب فیلتر) ۱۰۶
- شکل (۵-۲۵): ولتاژ DC سمت اینورتر ، برای حالت قبل از نصب فیلتر (نازک) و پس از نصب فیلتر (ضحیم) ۱۰۷
- شکل (۵-۲۶): طیف هارمونیکی ولتاژ DC سمت یکسوساز (قبل از نصب فیلتر) ۱۰۷
- شکل (۵-۲۷): جریان سمت DC ، برای حالت قبل از نصب فیلتر (نازک) و پس از نصب فیلتر (ضحیم) ۱۰۸
- ضمیمه**
- شکل (ض-۱): مدل شبکه Benchmark Cigre ۱۱۵
- شکل (ض-۲): بلوک دیاگرام کلی شبکه نمونه ۱۱۷
- شکل (ض-۳): بلوک دیاگرام کلی طرف اینورتری ۱۱۸
- شکل (ض-۴): شکل فیلترهای بکاررفته شده در طرف یکسوساز و اینورتری ۱۱۹