۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان‌نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق– قدرت

بررسی و شبیه‌سازی روش‌های مختلف ردیابی دامنه فلیکر ولتاژ و تشخیص منابع اصلی مولد فلیکر در سیستم‌های توزیع الکتریکی

توسط:

بهنام صناعی

استاد راهنما:

دکتر مسعود علی اکبر گلکار

اسفند ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحیم

تأییدیّه هیات داوران

اعضای هیئت داوران، نسخه نهائی پایان نامه آقای: **بهنام صناعی** را با عنوان:

بررسی و شبیه‌سازی روش‌های مختلف ردیابی دامنه فلیکر ولتاژ و تشخیص منابع اصلی مولد فلیکر در سیستم‌های توزیع الکتریکی

از نظر فرم و محتوی بررسی نموده و پذیرش آن را برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد تأیید می‌کند.

اعضای هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱. استاد راهنما	**دکتر مسعود علی اکبر گلکار**	**استاد**	
۲. استاد ممتحن	**دکتر اصغر اکبری**	**استادیار**	
۳. استاد ممتحن	**دکتر سید حسین حسینیان**	**استاد**	
۴. نماینده تحصیلات تکمیلی			

اظهار نامه دانشجو

موضوع پایان نامه:

بررسی و شبیه‌سازی روش‌های مختلف ردیابی دامنه فلیکر ولتاژ و تشخیص منابع اصلی مولد فلیکر در سیستم‌های توزیع الکتریکی

استاد راهنما: جناب آقای دکتر مسعود علی اکبر گلکار

نام دانشجو: بهنام صناعی

شماره دانشجوئی: ۸۸۰۵۸۱۴

اینجانب **بهنام صناعی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی **برق** گرایش **سیستم‌های قدرت** دانشکده **مهندسی برق** دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تائید می‌باشد، و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده ام.

امضاء دانشجو:

تاریخ:

فرم حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می باشد. هرگونه کپی برداری بصورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می باشد.

ضمنا متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

تقدیم

این تلاش ناچیز را با شعری از احمد شاملو به همسر مهربانم تقدیم می‌کنم.

کوه با نخستین سنگ‌ها آغاز می‌شود و انسان با نخستین درد

در من زندانی ستمگری بود که به آوای زنجیرش خو نمی‌کرد

من با نخستین نگاه تو آغاز شدم.

تشکر و قدردانی

با سپاس فراوان از

استاد ارجمندم جناب آقای دکتر گلکار

که با راهنمایی‌های خود مرا در انجام این پروژه یاری کردند.

چکیده

در این تحقیق سعی شده است تا یک بررسی جامع از پدیده فلیکر در شبکه‌های قدرت ارائه شود. این تحقیق جامع در قالب چهار گام تشریح پدیده، بررسی روش‌های نوین پردازش سیگنال فلیکر، توصیف روش‌های تشخیص منبع مولد فلیکر در شبکه و جبرانسازی فلیکر ارائه شده است. تغییرات کوچک در مقدار موثر ولتاژ با فرکانسی بین ۰.۰۰۱ تا ۲۵ هرتز می‌تواند منجر به تغییرات آزاردهنده در روشنایی خروجی لامپ‌ها گردد. این پدیده در مبحث کیفیت توان، "فلیکر نور" یا به اختصار "فلیکر" نامگذاری شده است. البته، اصطلاح نادرست "فلیکر ولتاژ" نیز در مراجع مختلف استفاده می‌شود. منابع اصلی مولد این پدیده در شبکه‌های قدرت کوره‌های قوس، دستگاه‌های جوش، درایورهای موتورها و برخی از انواع توربین‌های بادی می‌باشد. اگرچه آگاهی از عامل اصلی به وجود آورنده این پدیده هم برای عرضه کننده و هم برای مصرف‌کننده برق حائز اهمیت می‌باشد، اما تاکنون تحقیقات گسترده‌ای با محوریت تشخیص منابع مولد فلیکر در شبکه صورت نگرفته است.

هدف نهایی این تحقیق، بررسی روش‌های مختلف ردیابی دامنه سیگنال فلیکر و ارائه الگوریتمی مبتنی بر این روش‌ها جهت تشخیص منابع مولد فلیکر در شبکه می‌باشد. در راستای دستیابی به این هدف، پس از تشریح و توصیف این پدیده، تعریف و تعیین شاخص‌های ارزیابی فلیکر در بخش‌های مختلف شبکه امری اجتناب‌ناپذیر است. در نتیجه، استاندارد IEEE 1453 در قالب یک فصل به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است. در مقالات اخیر، با توجه به معایب روش‌های پیشین در زمینه تحلیل پدیده فلیکر، گرایش به سمت روش‌های ردیابی دامنه می‌باشد. در این تحقیق، بررسی کاملی از ۴ روش ردیابی دامنه ADALINE، RLS، TEO و HT صورت پذیرفته است. با توجه به قابلیت این روش‌ها در استخراج سیگنال مدوله‌کننده از یک سیگنال دارای مدولاسیون دامنه، یک روش پیشنهادی جهت تشخیص منابع مولد فلیکر در شبکه ارائه شده است. همچنین، با ترکیب این الگوریتم‌ها، روشی ارائه گشته است که ردیابی دامنه، فاز و فرکانس سیگنال اندازه‌گیری شده را به طور همزمان انجام می‌دهد. با استفاده از این روش ترکیبی، یک سیستم کنترلی جهت پیاده‌سازی در DSTATCOM به منظور جبرانسازی فلیکر طراحی شده است. در انتها، با استفاده از شبیه‌سازی‌های مختلف، عملکرد این روش‌های پیشنهادی مورد ارزیابی و تأیید قرار گرفته است.

کلید واژه: سیستم‌های قدرت، کیفیت توان، پدیده فلیکر، فلیکرمتر، روش‌های ردیابی دامنه، تشخیص منابع مولد فلیکر در شبکه، DSTATCOM.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست جدول‌ها ..... ه

فهرست شکل‌ها ..... و

فصل ۱- مقدمه... ..... ۱

۱-۱- پیشگفتار ۱

۱-۲- تاریخچه. ۲

۱-۳- هدف از انجام تحقیق ۲

۱-۴- نوآوری‌های ارائه شده در تحقیق ۸

۱-۵- ساختار تحقیق ۹

فصل ۲- پدیده فلیکر ۱۱

۲-۱- مقدمه ۱۱

۲-۲- تشریح پدیده فلیکر ۱۱

۲-۲-۱- تعاریف ۱۱

۲-۲-۲- اهمیت توجه به فلیکر ۱۲

۲-۲-۳- عوامل ایجاد کننده فلیکر ولتاژ ۱۳

۲-۲-۴- تعیین حدود مجاز برای فلیکر ولتاژ ۱۳

۲-۲-۵- منحنی مشخصه حساسیت فلیکر ۱۵

۲-۳- استاندارد IEEE 1453 ..... ۱۶

۲-۳-۱- مقدمه ۱۶

۲-۳-۲- استاندارد IEC 61000-4-15 ..... ۱۶

۲-۳-۳- انطباق آماری ۲۷

۲-۳-۴- سطوح طراحی برای فلیکر ۲۷

۲-۳-۵- حدود سازگاری برای فلیکر ۲۸

۲-۴- جمع‌بندی ۲۸

فصل ۳- روش‌های ردیابی دامنه برای سیگنال فلیکر ۲۹

۳-۱- مقدمه ۲۹

۳-۲- مدل فلیکر ولتاژ برای الگوریتم‌های ADALINE و RLS ۳۰
۳-۳- الگوریتم شبکه عصبی خطی تطبیقی(ADALINE) ۳۱
۳-۴- الگوریتم حداقل مربعات بازگشتی (RLS) ۳۲
۳-۵- ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های ADALINE و RLS ۳۴
۳-۶- حساسیت پارامتری ۳۶
۳-۷- بررسی تأثیر تغییرات فرکانس بر دقت الگوریتم‌های ADALINE و RLS ۳۸
۳-۸- مدل فلیکر ولتاژ برای الگوریتم‌های TEO و HT ۴۰
۳-۹- الگوریتم TEO ۴۰
۳-۹-۱- الگوریتم‌های جداسازی ۴۱
۳-۱۰- تبدیل هیلبرت ۴۳
۳-۱۰-۱- تئوری تبدیل هیلبرت ۴۳
۳-۱۰-۲- پیاده‌سازی تبدیل هیلبرت ۴۴
۳-۱۰-۳- منابع تولید خطا در ردیابی به روش HT ۴۴
۳-۱۱- ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های TEO و HT ۴۴
۳-۱۱-۱- ردیابی سیگنال فلیکر ولتاژ با دامنه و فرکانس ثابت ۴۵
۳-۱۱-۲- تأثیر تغییرات دامنه و فرکانس فلیکر بر عملکرد TEO و HT ۴۷
۳-۱۱-۳- تأثیر حضور چندین فرکانس فلیکر بر عملکرد ردیابی TEO و HT ۴۹
۳-۱۲- جمع‌بندی ۵۰

فصل ۴- روش‌های تشخیص منبع مولد فلیکر در شبکه ۵۳

۴-۱- مدل‌های کوره قوس در حوزه زمان ۵۳
۴-۱-۱- مقدمه ۵۳
۴-۱-۲- مدلسازی کوره قوس ۵۳
۴-۱-۳- مدل‌های استاتیک در حوزه زمان ۵۴
۴-۱-۴- رفتار دینامیک مدل‌های حوزه زمان ۵۹
۴-۲- روش‌های تشخیص منبع مولد فلیکر در سیستم‌های توزیع ۶۰
۴-۲-۱- مقدمه ۶۰
۴-۲-۲- مدل روش اندازه‌گیری ۶۱
۴-۲-۳- روش پیشنهادی جهت تشخیص منبع مولد فلیکر ۷۱
۴-۲-۴- جمع‌بندی ۷۲

فصل ۵- بررسی DSTATCOM به عنوان یک جبرانساز فلیکر ۷۳

۵-۱- مقدمه ۷۳
۵-۲- مدلسازی STATCOM ۷۴
۵-۲-۱- انواع اینورترهای منبع ولتاژ ۷۶
۵-۳- بررسی روش‌های کنترل STATCOM ۸۳
۵-۳-۱- کنترل تناسبی – انتگرالی ۸۴
۵-۳-۲- روش‌های جابه‌جایی قطب ۸۵
۵-۳-۳- تنظیم‌کننده مربعی خطی(LQR) ۸۶
۵-۴- سیستم کنترلی DSTATCOM شبیه‌سازی شده ۸۷
۵-۴-۱- مقایسه عملکرد PLL پیشنهادی با PLL موجود در نرم‌افزار MATLAB ۸۹
۵-۵- جمع‌بندی ۹۵
فصل ۶- نتایج شبیه‌سازی‌ها ۹۷
۶-۱- مقدمه ۹۷
۶-۲- شبیه‌سازی فلیکرمتر IEC ۹۷
۶-۲-۱- مدل فلیکرمتر ۹۸
۶-۲-۲- جمع‌بندی ۱۰۴
۶-۳- شبیه‌سازی مدل‌های مختلف کوره قوس ۱۰۵
۶-۳-۱- بررسی رفتار کوره قوس در حالت استاتیک ۱۰۵
۶-۳-۲- بررسی رفتار کوره قوس در حالت دینامیک ۱۰۶
۶-۳-۳- جمع‌بندی ۱۰۹
۶-۴- تشخیص منابع مولد فلیکر در شبکه ۱۱۰
۶-۴-۱- تشخیص منبع مولد فلیکر در یک شبکه شعاعی ۱۱۰
۶-۴-۲- تشخیص منبع مولد فلیکر در یک شبکه حلقوی ۱۱۲
۶-۴-۳- جمع‌بندی ۱۱۷
۶-۵- جبرانسازی فلیکر توسط DSTATCOM ۱۱۷
۶-۵-۱- مشخصات DSTATCOM ۱۱۸
۶-۵-۲- سیستم کنترلی مورد استفاده در DSTATCOM ۱۱۹
۶-۵-۳- بررسی رفتار دینامیک DSTATCOM با سیستم کنترلی پیشنهادی ۱۲۲
۶-۵-۴- جمع‌بندی ۱۲۴
فصل ۷- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۲۵
۷-۱- نتیجه‌گیری ۱۲۵

۷-۲- پیشنهادات..... ۱۲۶

فهرست مراجع..... ۱۲۷

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۲-۱ مقادیر پارامترهای موجود در (۲-۱) ۱۹
جدول ۲-۲ خروجی نرمالیزه شده فلیکرمتر برای تغییرات سینوسی ولتاژ ۲۴
جدول ۲-۳ خروجی نرمالیزه شده فلیکرمتر برای تغییرات مربعی ولتاژ ۲۵
جدول ۲-۴ آزمون مشخصات فلیکرمتر ۲۶
جدول ۲-۵ سطوح طراحی برای $\boldsymbol{Pst}$ و $\boldsymbol{Plt}$ در سیستم‌های قدرت MV، HV و EHV ۲۸
جدول ۲-۶ سطوح سازگاری برای $\boldsymbol{Pst}$ و $\boldsymbol{Plt}$ در سیستم‌های قدرت LV و MV ۲۸
جدول ۳-۱ مقایسه بین خطای ردیابی و طول پنجره روش‌های HT و TEO ۴۷
جدول ۶-۱ مقادیر ضرائب تابع تبدیل فیلتر باترورث ۱۰۰
جدول ۶-۲ نتایج شبیه‌سازی برای شدت فلیکر کوتاه مدت ۱۰۳
جدول ۶-۳ نتایج شبیه‌سازی پاسخ نرمالیزه شده فلیکرمتر برای تغییرات ولتاژ مربعی و سینوسی ۱۰۳
جدول ۶-۴ بررسی ویژگی خطی بودن فلیکرمتر شبیه‌سازی شده ۱۰۴
جدول ۶-۵ پارامترهای سیستم و مدل‌های مختلف کوره قوس ۱۰۶
جدول ۶-۶ بررسی دقت $\boldsymbol{Pst}$ به دست آمده از شبیه‌سازی با استفاده از ویژگی خطی بودن رفتار فلیکرمتر ۱۰۸
جدول ۶-۷ مشخصات خطوط انتقال ۱۱۲
جدول ۶-۸ مشخصات ژنراتورها ۱۱۳
جدول ۶-۹ مشخصات ترانسفورماتورها ۱۱۳
جدول ۶-۱۰ علامت توان‌های فلیکر محاسبه شده در نقاط مانیتورینگ مختلف برای حالت ۱ ..... ۱۱۴
جدول ۶-۱۱ علامت توان‌های فلیکر محاسبه شده در نقاط مانیتورینگ مختلف برای حالت ۲ ..... ۱۱۴
جدول ۶-۱۲ علامت توان‌های فلیکر محاسبه شده در نقاط مانیتورینگ مختلف برای حالت ۳-۱ ..... ۱۱۵
جدول ۶-۱۳ مشخصات شبکه بالادست ۱۱۸
جدول ۶-۱۴ مشخصات فیدرها ۱۱۸
جدول ۶-۱۵ مشخصات ترانسفورماتور ۱۱۸
جدول ۶-۱۶ مشخصات بار غیرخطی ۱۱۸

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱ مشخصه حساسیت فلیکر ارائه شده توسط شرکت جنرال الکتریک معروف به منحنی GE ۱۵
شکل ۲-۲ دیاگرام بلوکی فلیکرمتر IEC ۱۷
شکل ۲-۳ الف) سطح فلیکر به صورت یک تابع متغیر با زمان ب) تابع احتمال تجمعی سیگنال فلیکر ۲۱
شکل ۲-۴ تغییرات مربعی ولتاژ ۲۷
شکل ۳-۱ دیاگرام بلوکی مدل ردیابی فلیکر ۳۲
شکل ۳-۲ ردیابی فلیکر با استفاده از الگوریتم ADALINE ۳۵
شکل ۳-۳ ردیابی فلیکر با استفاده از الگوریتم RLS ۳۵
شکل ۳-۴ تأثیر نرخ آموزش بر ردیابی دامنه ۳۷
شکل ۳-۵ تأثیر فاکتور فراموشی بر ردیابی دامنه ۳۷
شکل ۳-۶ تأثیر تغییر پله‌ای فرکانس بر عملکرد ردیابی دو الگوریتم ۳۹
شکل ۳-۷ عملکرد ردیابی دو الگوریتم با حضور PLL ۳۹
شکل ۳-۸ ردیابی فلیکر ولتاژ با استفاده از TEO ۴۵
شکل ۳-۹ ردیابی فلیکر ولتاژ با استفاده از HT و به ازای $\boldsymbol{N = 20}$ ۴۶
شکل ۳-۱۰ ردیابی فلیکر ولتاژ با استفاده از HT و به ازای $\boldsymbol{N = 60}$ ۴۷
شکل ۳-۱۱ تأثیر مدولاسیون دامنه بر خطای ردیابی الف) خطای ردیابی ولتاژ ب) خطای ردیابی فرکانس ۴۸
شکل ۳-۱۲ تأثیر مدولاسیون فرکانس بر خطای ردیابی الف) خطای ردیابی ولتاژ ب) خطای ردیابی فرکانس ۴۹
شکل ۳-۱۳ ردیابی دامنه فلیکر یک سیگنال فلیکر ولتاژ با ساختار پیچیده ۵۰
شکل ۴-۱ مشخصه ولتاژ – جریان واقعی و تقریبی خطی‌سازی شده یک بار کوره قوس ۵۴
شکل ۴-۲ مشخصه V- I مدل ۱ ۵۵
شکل ۴-۳ مشخصه V – I مدل ۲ ۵۶
شکل ۴-۴ مشخصه V – I مدل ۳ ۵۸
شکل ۴-۵ مشخصه R – I مدل ۳ ۵۸
شکل ۴-۶ مشخصه V – I مدل ۴ ۵۹
شکل ۴-۷ مدل مورد استفاده برای حالت اول ۶۱
شکل ۴-۸ دامنه‌های $\boldsymbol{UL1}$ و $\boldsymbol{I}$ قبل و بعد از بسته شدن کلید $\boldsymbol{BZ2}$ ۶۳
شکل ۴-۹ مدل استفاده شده برای حالت دوم ۶۴
شکل ۴-۱۰ دامنه‌های $\boldsymbol{UL1}$ و $\boldsymbol{I}$ بعد و قبل از بسته شدن کلید $\boldsymbol{BZ3}$ ۶۵
شکل ۴-۱۱ دیاگرام گذر سیگنال روش اندازه‌گیری ۱ ۶۸
شکل ۴-۱۲ دیاگرام گذر سیگنال روش اندازه‌گیری ۲ ۷۰
شکل ۴-۱۳ دیاگرام گذر سیگنال روش اندازه‌گیری ۳ ۷۱

شکل ۴-۱۴ دیاگرام بلوکی روش پیشنهادی برای تشخیص منبع مولد فلیکر ۷۱
شکل ۵-۱ اتصال یک STATCOM به یک باس ۷۴
شکل ۵-۲ مدار معادل STATCOM ۷۵
شکل ۵-۳ دیاگرام بلوکی سیستم کنترلی اینورتر نوع ۱ ۷۸
شکل ۵-۴ منحنی تغییرات نقاط کار حالت ماندگار بر حسب تغییرات زاویه $\boldsymbol{\alpha}$ ۷۹
شکل ۵-۵ دیاگرام بلوکی سیگنال کوچک توصیفگر رفتار دینامیک STATCOM با اینورتر نوع ۲ ۸۰
شکل ۵-۶ تابع تبدیل $\Delta \boldsymbol{Iq'(s)/\Delta\alpha(s)}$ ۸۲
شکل ۵-۷ تابع تبدیل $\boldsymbol{\Delta q'(s)/\Delta\alpha(s)}$ ۸۲
شکل ۵-۸ طرح کنترل PI ۸۵
شکل ۵-۹ دیاگرام بلوکی سیستم کنترلی DSTATCOM شبیه‌سازی شده ۸۸
شکل ۵-۱۰ دیاگرام بلوکی PLL پیشنهادی ۸۹
شکل ۵-۱۱ مقایسه رفتار PLL مجود در MATLAB به ازای شرائط اولیه مختلف ۹۰
شکل ۵-۱۲ پاسخ PLL ترکیبی به ازای شرائط اولیه صفر ۹۱
شکل ۵-۱۳ مقایسه رفتار دو PLL در حالت‌های گذرا ۹۱
شکل ۵-۱۴ مقایسه عملکرد ردیابی فرکانس دو PLL ۹۲
شکل ۵-۱۵ مقایسه عملکرد ردیابی فاز دو PLL ۹۳
شکل ۵-۱۶ مقایسه عملکرد دو PLL در برابر تغییرات پله‌ای سیگنال ورودی ۹۴
شکل ۵-۱۷ مقایسه عملکرد دو PLL در شرائط مدولاسیون دامنه سیگنال ورودی ۹۴
شکل ۶-۱ مدل تطبیق دهنده ولتاژ ورودی ۹۸
شکل ۶-۲ شکل موج سیگنال در خروجی بلوک ۲ ۹۹
شکل ۶-۳ دیاگرام Bode فیلترهای بلوک ۳ ۱۰۰
شکل ۶-۴ بررسی خروجی‌های بلوک‌های مختلف فلیکرمتر ۱۰۱
شکل ۶-۵ دیاگرام تک خطی سیستم قدرت مورد بررسی ۱۰۵
شکل ۶-۶ شکل موج‌های ولتاژ و جریان کوره قوس و ولتاژ PCC برای مدل‌های مختلف در حالت استاتیک ۱۰۶
شکل ۶-۷ بررسی رفتار دینامیک مدل ۱ کوره قوس ۱۰۷
شکل ۶-۸ بررسی رفتار دینامیک مدل ۲ کوره قوس ۱۰۷
شکل ۶-۹ بررسی رفتار دینامیک مدل ۳ کوره قوس ۱۰۸
شکل ۶-۱۰ بررسی رفتار دینامیک مدل ۴ کوره قوس ۱۰۸
شکل ۶-۱۱ بررسی تأثیر اعوجاج شکل موج ولتاژ بر خطای شبیه‌سازی ۱۰۹
شکل ۶-۱۲ شبکه شعاعی استفاده شده در شبیه‌سازی جهت ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در حالت اول ۱۱۰
شکل ۶-۱۳ شکل موج توان فلیکر محاسبه شده با استفاده از روش پیشنهادی برای حالت اول ۱۱۱
شکل ۶-۱۴ شبکه شعاعی استفاده شده در شبیه‌سازی جهت ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی در حالت دوم ۱۱۱
شکل ۶-۱۵ شکل موج توان فلیکر محاسبه شده با استفاده از روش پیشنهادی برای حالت دوم ۱۱۱
شکل ۶-۱۶ شبکه نمونه جهت بررسی روش‌های پیشنهادی جهت تشخیص منبع مولد فلیکر ۱۱۲
شکل ۶-۱۷ تشخیص کوره قوس ۱ به عنوان منبع مولد فلیکر در شبکه با استفاده از ردیاب دامنه ADALINE ۱۱۴

شکل ۶-۱۸ تشخیص کوره قوس ۲ به عنوان منبع مولد فلیکر در شبکه با استفاده از ردیاب دامنه TEO ۱۱۵
شکل ۶-۱۹ تشخیص کوره قوس ۱ و ۲ به عنوان منبع مولد فلیکر در شبکه با استفاده از ردیاب دامنه RLS ۱۱۶
شکل ۶-۲۰ نحوه تغییر جهت شارش توان فلیکر در نقطه مانیتورینگ ۱ ..... ۱۱۶
شکل ۶-۲۱ سیستم توزیع شبیه‌سازی شده جهت کاهش فلیکر ۱۱۷
شکل ۶-۲۲ تغییرات دامنه ولتاژ توالی مثبت باس‌های ۱ و ۳ ..... ۱۱۹
شکل ۶-۲۳ شکل موج تغییرات توان‌های اکتیو و راکتیو جذب شده توسط بار متغیر ۱۲۰
شکل ۶-۲۴ تغییرات ولتاژ باس‌های ۱ و ۳ با حضور DSTATCOM ۱۲۱
شکل ۶-۲۵ عملکرد DSTATCOM در جبرانسازی فلیکر ۱۲۱
شکل ۶-۲۶ تغییرات ولتاژ باس‌های ۱ و ۳ به واسطه تغییرات ولتاژ شبکه بالادست ۱۲۲
شکل ۶-۲۷ تغییرات ولتاژ باس‌های ۱ و ۳ به واسطه تغییرات ولتاژ شبکه بالادست با حضور DSTATCOM ۱۲۳
شکل ۶-۲۸ شکل تغییرات توان راکتیو DSTATCOM با تغییرات پله‌ای ولتاژ ۱۲۳

فصل ۱– مقدمه

۱–۱– پیش‌گفتار

شبکه‌های قدرت در سرتاسر جهان با مشکلات افزاینده‌ای در زمینه کیفیت توان روبه‌رو هستند. از دورانی که در آن اکثر بارهای استاتیک از شبکه جریان‌های سینوسی می‌کشیدند، زمان زیادی گذشته است و این بارها جای خود را در شبکه به بارهای دینامیک، غیر خطی و به طور کلی انواع بارهای غیر سینوسی داده‌اند. با افزایش اختلاف بین توان تولیدی و تقاضای مصرف، این مشکل حادتر نیز می‌شود. محدودیت‌های اقتصادی و محیطی به سادگی به شبکه‌های قدرت اجازه تولید توان به منظور عرضه مازاد را نمی‌دهند، در حالیکه در زمان‌های گذشته این مسأله یک قاعده پذیرفته شده بود[۱].

نتایج حاصل از مشکلات کیفیت توان به خوبی شناخته شده است. هارمونیک‌ها و عدم تعادل عوامل اصلی انتقال توان ناکارآمد هستند و می‌توانند با ایجاد نوسانات در گشتاور، صدمات قابل توجهی به موتورهای الکتریکی وارد کنند. افت ولتاژ می‌تواند سیستم‌های کنترلی را مختل کرده و منجر به ایجاد اختلال و حتی قطع کامل خطوط تولیدی شود. اعوجاج در شکل موج ولتاژ نیز مشکل دیگری است که اغلب با حضور اینترهارمونیک‌ها تقویت می‌شود.

یکی از اثرات اعوجاج ولتاژ پدیده فلیکر می‌باشد. خروجی روشنائی لامپ‌های ملتهب با مربع دامنه ولتاژ اعمال شده به آن‌ها رابطه مستقیم دارد. این مسأله، روشنائی خروجی این لامپ‌ها را به شدت وابسته به تغییرات شکل موج ولتاژ می‌کند. چشم انسان این نوسانات را تا فرکانس‌های نزدیک به ۴۰ Hz می‌تواند تشخیص دهد، در حالیکه حساسیت چشم انسان به بازه فرکانسی ۱۰ Hz – ۶ حداکثر می‌باشد. این بازه فرکانسی نوسانات دامنه ولتاژ، در صورتیکه با مدولاسیون فرکانسی ولتاژ تغذیه با دامنه کمتر از ٪ ۰.۵ همراه شود، می‌تواند برای سیستم بینایی انسان بسیار آزار دهنده باشد[۲].

به منظور فائق آمدن بر مشکلات کیفیت توان، گرایش شبکه‌های قدرت، بهره‌برداری از ادوات الکترونیک قدرت می‌باشد. با توجه به میزان کنترل‌پذیری این ادوات و قابلیت آن‌ها در ارائه توان در سطوح مختلف مورد نیاز، هیچ تکنولوژی دیگری نمی‌تواند جایگزین این تجهیزات در سیستم‌های قدرت گردد. همچنین، این تجهیزات کلیه ویژگی‌های عملکردی تجهیزات قدیمی موجود در سیستم‌های قدرت را دارا می‌باشند، با این

تفاوت که در مقایسه با آن‌ها دارای تلفات کمتری هستند. امروزه بسیاری از فیلترهای اکتیو موجود، بدون استفاده از تجهیزات الکترونیک قدرت امکان پیاده‌سازی ندارد.

۱-۲- تاریخچه

پدیده فلیکر از بدو شروع به کار سیستم‌های قدرت AC توجه مهندسین را به خود جلب کرده است. در سال ۱۸۸۶، ویلیام استنلی، برای اولین بار از سیستم‌های AC برای تغذیه بار روشنایی در شمال آمریکا استفاده کرد. چهار سال بعد، مهندسین برق شرکت westinghouse با مشکل فلیکر مواجه شدند. در سال ۱۸۹۱، برای پیشگیری از این پدیده آزار دهنده، آن‌ها فرکانس ۶۰ هرتز را به عنوان فرکانس استاندارد و جدید اختیار کردند. مشکل فلیکری که آن‌ها با آن برخورد کردند، بر خلاف تصور، بیش از آنکه مربوط به لامپ‌های رشته‌ای باشد، به لامپ‌های قوسی مربوط بود که با جریان متناوب کار می‌کردند. حتی لامپ‌های قوسی بدون محفظه، به دلیل نوسان‌های دمای قوس، بیشتر از لامپ‌های قوسی محفظه دار باعث نوسان نور می‌شدند[۳].

در همان سال در برلین، مهندسین شرکت AEG، با مشکلی مشابه مواجه شدند، اما نتیجه‌ای که کارشناسان آلمانی به آن رسیدند تا حدی با نتیجه‌ای که کارشناسان آمریکایی در آن توافق داشتند، متفاوت بود. آن‌ها استاندارد جدید خود را ۵۰ هرتز انتخاب کردند. علت این تفاوت در نوع لامپ‌های قوسی بود که مورد استفاده قرار می‌گرفت. در کشور آمریکا، از لامپ‌های قوسی بدون محفظه و در آلمان از لامپ‌های قوسی محفظه‌دار استفاده می‌شد. با توجه به تفاوت بین پاسخ این نوع لامپ‌ها به تغییرات ولتاژ، این دو استاندارد برای فرکانس سیستم‌های قدرت پدید آمد[۳].

۱-۳- هدف از انجام تحقیق

در این مطالعه سعی شده است تا به طور جامع به بررسی پدیده فلیکر پرداخته شود. به همین منظور، پس از تعریف و تشریح پدیده فلیکر به عنوان یکی از مهم‌ترین اختلالات کیفیت توان در شبکه‌های قدرت، اولین ضرورت، دستیابی به ابزاری بود تا به وسیله آن، امکان اندازه‌گیری سطح فلیکر در بخش‌های مختلف شبکه فراهم شود. فلیکرمتر IEC، به عنوان اصلی‌ترین مرجع جهت ارزیابی سطح فلیکر در شبکه، مطرح است[۴]. در نتیجه، بررسی کامل این تجهیز و تحلیل عملکرد کلیه بلوک‌های موجود در آن، بسیار حائز اهمیت می‌نماید. ضرورت دوم، پس از تعیین شاخص‌های ارزیابی، مشخص کردن حدود مجاز فلیکر در بخش‌های مختلف شبکه

می‌باشد. این حدود مجاز، در استانداردهای مختلف، به گونه‌ای تعیین می‌گردد که در صورت عدم تخطی از آن‌ها در بخش‌های مختلف، هیچ‌گونه شکایتی از جانب مصرف‌کننده‌ها مشاهده نشود. اصلی‌ترین علت توجه زیاد به پدیده فلیکر، نمود بصری است که این پدیده دارد و می‌تواند موجب آزردگی سیستم بینایی مصرف کننده شود. در نتیجه، معیار تعیین حدود مجاز، عدم مشاهده شکایات از جانب مصرف‌کننده‌ها می‌باشد[۵].

سیگنال فلیکر ولتاژ، یک سیگنال دارای مدولاسیون دامنه است. استخراج سیگنال مدوله‌کننده از سیگنال حامل، در ارزیابی پدیده فلیکر کاربردهای متعددی دارد[۶]. این کاربردها شامل اندازه‌گیری سطح فلیکر، تشخیص منابع مولد فلیکر در شبکه و سیستم‌های کنترلی جبرانسازهای مورد استفاده جهت کاهش فلیکر می‌شود. روش‌های گوناگونی در مقالات جهت ردیابی دامنه فلیکر ارائه شده است. در ادامه، توضیحات بیشتری در مورد هر یک از این روش‌ها ارائه شده است.

از تبدیل فوریه سریع(FFT[1]) جهت استخراج محتویات فلیکر شکل موج ولتاژ استفاده شده است[۷]. اندازه‌گیری فلیکر ولتاژ هم به صورت کاملاً دیجیتال و هم به صورت ترکیبی از روش‌های آنالوگ و دیجیتال امکان‌پذیر است. همچنین، فرآیند دمدولاسیون را می‌توان به ۲ دسته کلی تقسیم کرد. دسته اول، به طور مستقیم و با استفاده از پردازش شکل موج ولتاژ نمونه‌برداری شده به وسیله FFT، مؤلفه‌های مختلف نوسان ولتاژ را استخراج می‌کند. دسته دوم، این مؤلفه‌ها را به طور غیر مستقیم و با استفاده از نوسانات مقدار موثر ولتاژ محاسبه می‌کند. دقت FFT به واسطه پدیده‌های مختلفی به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد. پدیده‌هایی از قبیل شکستگی[2]، پراکندگی طیفی و اثر Picket-Fence، نمونه‌ای از این پدیده‌ها می‌باشند. پدیده شکستگی ناشی از حضور هارمونیک‌ها در شکل موج ولتاژ می‌باشد، مسأله‌ای که با حضور کوره‌های قوس الکتریکی بسیار شایع می‌باشد. در نتیجه، استفاده از یک فیلتر پایین‌گذر با فرکانس قطع f_c و انتخاب فرکانس نمونه‌برداری به گونه‌ای که از دو برابر f_c بزرگتر باشد، امری اجتناب‌ناپذیر است. اثر Picke-Fence ناشی از حضور مؤلفه‌هایی با فرکانس غیر صحیح از مؤلفه اصلی می‌باشد، که نه تنها قابل تشخیص نیست بلکه موجب پراکندگی، به ویژه در نزدیک‌ترین فرکانس‌ها می‌گردد. از آنجائیکه فلیکر ولتاژ یک سیگنال ساکن نبوده و طیف آن به طور کامل گسسته نمی‌باشد، این پدیده همواره در پردازش دیجیتال سیگنال فلیکر مطرح می-

[1] Fast Fourier Transform
[2] Aliasing

شود. تنها راه کاهش تأثیر این پدیده، بالا بردن دقت فرکانسی است. پدیده پراکندگی طیفی، ناشی از انتشار انرژی یک فرکانس در سایر فرکانس‌های مجاور می‌باشد. در صورتیکه طول پنجره انتخابی مضرب صحیحی از مؤلفه اصلی سیگنال نباشد، تأثیر این پدیده بسیار چشمگیر خواهد بود. اگرچه، در صورت انتخاب مناسب طول پنجره، عواملی از قبیل تغییرات فرکانس اصلی، اثر مؤلفه DC و نوع تابع پنجره با این پدیده در ارتباط می‌باشند[۸].

جهت پوشش نقاط ضعف روش FFT، در مرجع [۹]، فیلتر کالمن(KF[1]) به عنوان یک راهکار جایگزین معرفی شده است. مزیت اصلی این روش قابلیت مواجهه با هر دو نوع تغییرات قطعی و تصادفی مدل فلیکر می‌باشد. اما حجم محاسباتی بالای این روش، تبدیل به مانعی بزرگ جهت پیاده‌سازی در زمان واقعی برای این روش می‌شود. همچنین، عیب عمده دیگر این روش، قابلیت آن در تشخیص تنها یک مؤلفه فرکانسی غالب می‌باشد، در حالیکه سیگنال‌های فلیکر واقعی از ترکیب چندین مؤلفه فرکانسی ساخته می‌شود. فیلتر کالمن، یک تخمین‌زننده بازگشتی بهینه است که می‌تواند جهت پردازش کمیت‌های اندازه‌گیری شده نویزی مورد استفاده قرار گیرد. در این روش، ورودی مدل، یک سیگنال دارای مدولاسیون دامنه می‌باشد. هدف این مدل، تخمین دامنه این سیگنال ورودی(سیگنال فلیکر) است. در این مرجع، معادله حالت گذار و معادله اندازه‌گیری برای مدل فیلتر کالمن با دو متغیر حالت نوشته شده است. متغیرهای حالت در این معادلات، مؤلفه‌های هم‌فاز و متعامد بردار فازور ولتاژ می‌باشند. دامنه سیگنال شامل یک مؤلفه ثابت به واسطه شکل موج با فرکانس اصلی و یک دامنه تصادفی به واسطه فلیکر ولتاژ است. سپس، با استفاده از یک مدل فیلتر کالمن دیگر، دامنه مؤلفه اصلی سیگنال به صورت یک عدد ثابت تصادفی و فلیکر ولتاژ به صورت یک گام تصادفی مدل‌سازی می‌شود. این مدل‌سازی، موجب تفکیک انحراف ثابت موجود در تخمین دامنه شکل موج ورودی شده و سطح فلیکر لحظه‌ای را تولید می‌کند. معادله گذار حالت و معادله اندازه‌گیری برای این مدل با استفاده از مؤلفه‌های ثابت و متغیر دامنه ولتاژ(متغیرهای حالت) نوشته می‌شود. میزان تغییرات هر یک از این متغیرهای حالت با استفاده از بردار نویز فرآیند کنترل می‌گردد. گام بعدی در ارزیابی شدت فلیکر، تعیین مقدار و فرکانس سطح فلیکر لحظه‌ای می‌باشد. جهت پیاده‌سازی این گام، از یک فیلتر کالمن توسعه‌یافته استفاده شده است. علت استفاده از این نوع فیلتر، رفتار غیر خطی برخی از متغیرهای حالت در معادلات

[1] Kalman Filter