دانشکده فنی و مهندسی

پایان نامه کارشناسی ارشد

رشته مهندسی برق گرایش قدرت

عنوان پایان نامه :

بررسی مسائل حفاظتی در خطوط جبران شده با TCSC و ارائه روشی جدید برای تعیین محل اتصال کوتاه در این خطوط

استاد راهنما : دکتر مهدی اخباری

نگارش : سید محمد نوبختی

تابستان ۱۳۹۰

	اظهار نامه دانشجو	شماره: تاریخ:

اینجانب **سید محمد نوبختی** دانشجوی کارشناسی ارشد رشته **مهندسی برق** گرایش **قدرت** دانشکده **فنی- مهندسی** دانشگاه شاهد، گواهی می دهم که پایان نامه تدوین شده حاضر با عنوان؛ "**بررسی مسائل حفاظتی در خطوط جبران شده با TCSC و ارائه روشی جدید برای تعیین محل اتصال کوتاه در این خطوط**" به راهنمایی استاد محترم جناب آقای دکتر **مهدی اخباری**، توسط شخص اینجانب انجام و صحت و اصالت مطالب تدوین شده در آن، مورد تأیید است و چنان چه هر زمان، دانشگاه کسب اطلاع کند که گزارش پایان نامه حاضر ص۳حت و اصالت لازم را نداشته، دانشگاه حق دارد، مدرک تحصیلی اینجانب را مسترد و ابطال نماید هم چنین اعلام می دارد در صورت بهره گیری از منابع مختلف شامل؛ گزارش های تحقیقاتی، رساله، پایان نامه، کتاب، مقالات تخصصی و غیره، به منبع مورد استفاده و پدید آورنده آن به طور دقیق ارجاع داده شده و نیز مطالب مندرج در پایان نامه حاضر تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب و یا سایر افراد به هیچ کجا ارایه نشده است. در تدوین متن پایان نامه حاضر، چارچوب (فرمت) مصوب تدوین گزارش های پژوهشی تحصیلات تکمیلی دانشگاه شاهد به طور کامل مراعات شده و نهایتاً این که، کلیه حقوق مادی ناشی از گزارش پایان نامه حاضر، متعلق به دانشگاه شاهد می باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو(دست نویس):.....

امضاء دانشجو:

تاریخ:

تقدیم به

پیشگاه مقدس امام عصر (عج)

و

پدر و مادر عزیزم

با تشکر و قدردانی از

حمایت ها و راهنمایی های بی دریغ استاد ارجمند **جناب آقای دکتر مهدی اخباری** که همواره راهگشای من در طی این دوره تحصیلی بودند.

و جناب آقای دکتر خدرزاده و جناب آقای دکتر سیدطبایی که زحمت مطالعه و داوری این پژوهش را پذیرفتند.

چکیده پایان نامه

استفاده از جبران سازهای سری چه از نوع خازن ثابت و چه TCSC سیستم های حفاظتی خط انتقال را با چالش هایی روبرو نموده اند. امپدانس منفی این جبران سازها سبب ایجاد وارونگی ولتاژ و یا جریان شده و رله های حفاظتی را دچار اشتباه در تشخیص می نمایند. علاوه بر این الگوریتم های تعیین محل اتصال کوتاه موجود نیز همانند سیستم های حفاظتی در حضور جبرانسازهای سری کارایی مناسبی نداشته و نیاز به اصلاح آنها و یا ارائه الگوریتم های جدید وجود دارد.

در این پایان نامه روشی جدید برای تعیین بخش خطازده در خطوط انتقال جبران شده با TCSC ارائه می گردد. در این روش با تعمیم مفاهیم مربوط به حالت دائمی سینوسی، در حالت گذرا *"امپدانس مجازی"* تعریف شده و با استفاده از آن یک *"شاخص تعیین بخش خطا زده به نام FSI"* در اولین سیکل پس از آغاز اتصال کوتاه محاسبه می شود. در این حالت با معلوم بودن جهت انتقال توان قبل از وقوع اتصال کوتاه و مقایسه شاخص تعیین بخش خطازده FSI با مقدار آستانه از قبل مشخص شده FSI_{th}، بخش خطا زده تعیین می گردد. با مشخص شدن بخش خطا زده می توان تشخیص داد حلقه اتصالی از دید کدام یک از رله های دو سر خط، شامل TCSC می باشد و به این ترتیب از عملکرد نادرست سیستم حفاظت جلوگیری نمود.

روش فوق الذکر در تعیین بخش خطا زده، در حقیقت بخشی از الگوریتم تعیین محل اتصال کوتاه در خطوط با جبران سری می باشد. بنابراین به کمک روش ارائه شده در تعیین بخش خطازده الگوریتمی سریع و دقیق برای تعیین محل اتصال کوتاه در خطوط جبران شده سری با TCSC نصب شده در وسط خط ارائه می شود. به این منظور روشی جدید برای مدلسازی TCSC در حوزه زمان ارائه شده و برای خط از مدل خط انتقال مبتنی بر امواج سیار استفاده می گردد. این الگوریتم از ولتاژ و جریان دو طرف خط انتقال که به صورت سنکرون نمونه برداری شده اند استفاده می کند و از دو زیربرنامه تشکیل شده که یکی برای اتصال کوتاه قبل از TCSC و دیگری برای اتصال کوتاه های بعد از آن به کار می رود. انتخاب زیربرنامه مناسب با تعیین بخش خطازده با استفاده از معیار FSI انجام می گیرد. با استفاده از شبیه سازی های متعدد بر روی یک سیستم انتقال ۴۰۰kV با طول ۳۰۰km و TCSC در وسط خط نشان داده شده است که الگوریتم پیشنهادی قادر است محل اتصالی را با دقت بالایی (خطای کمتر از ۰/۴ درصد در بدترین شرایط) در اولین سیکل پس از آغاز اتصال کوتاه تعیین نماید.

کلمات کلیدی: *جبرانساز سری، ادوات FACTS ، تعیین محل اتصال کوتاه، تعیین بخش خطازده، خط انتقال، TCSC*

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱- جبرانسازی در خطوط انتقال ۱
۱-۲- تاثیر جبرانسازی سری بر سیستم های حفاظت خطوط انتقال ۳
۱-۳- مروری بر راهکارهای حفاظت خطوط جبران شده سری ۵
۱-۴- ضرورت و اهداف تحقیق ۸

فصل دوم: جبران سری خطوط انتقال ۱۰

۲-۱- مقدمه ۱۰
۲-۲- معادلات مربوط به خطوط انتقال ۱۱
۲-۳- خطوط انتقال جبران نشده ۱۲
۲-۳-۱- خطوط انتقال شعاعی ۱۲
۲-۳-۲- خطوط انتقال متقارن ۱۳
۲-۴- خطوط انتقال جبران شده ۱۵
۲-۵- انواع جبرانسازها ۱۶
۲-۶- جبرانسازی سری خطوط انتقال ۱۶
۲-۷- اتصالی در خطوط جبران شده سری با خازن بای پس نشده ۱۹
۲-۸- حفاظت بانک خازنی سری ۲۸
۲-۹- سیستم بای پس خازن سری ۲۹
۲-۹-۱- فاصله هوایی بای پس ۲۹
۲-۹-۲- واریستور اکسید فلز ۳۱
۲-۹-۳- فاصله هوایی و مقاومت غیرخطی ۳۲
۲-۱۰- کمیت های رله با وجود عملکرد سیستم بای پس خازن ۳۳
۲-۱۱- تاثیر جبرانسازی سری بر سیستم حفاظت ۳۶
۲-۱۱-۱- تاثیر پدیده های گذرا ۳۶
۲-۱۱-۲- تاثیر نامتعادلی امپدانس فاز ۳۷

۲-۱۱-۳- تاثیر رزونانس زیر سنکرون ۳۷
۲-۱۱-۴- وارونگی ولتاژ و جریان ۳۸
۲-۱۱-۵- مشکلات ایجاد شده در اندازه گیری دسترسی ۳۹
۲-۱۱-۵-۱- طرحهای underreaching ۴۰
۲-۱۱-۵-۲- طرحهای overreaching ۴۲
۲-۱۲- نتیجه گیری ۴۴

فصل سوم: اصول عملکرد و مدلسازی خط انتقال جبران شده توسط TCSC ۴۵

۳-۱- مقدمه ۴۵
۳-۲- اصول عملکرد TCSC ۴۶
۳-۳- مودهای عملیاتی TCSC در حالت ماندگار ۴۸
۳-۳-۱- مود بلوکه شده ۴۸
۳-۳-۲- مود بای پس ۴۸
۳-۳-۳- مود تقویت خازنی ۴۹
۳-۳-۴- مود تقویت سلفی ۵۱
۳-۴- مودهای عملکرد TCSC در هنگام خطا ۵۱
۳-۵- مدلسازی TCSC ۵۴
۳-۶- مدلسازی خطوط انتقال انرژی ۵۷
۳-۷- نتیجه گیری ۶۲

فصل چهارم: تعیین بخش و محل اتصال کوتاه در خطوط انتقال جبران شده با TCSC ۶۳

۴-۱- مقدمه ۶۳
۴-۲- تعیین بخش خطازده در خطوط جبران شده با TCSC ۶۵
۴-۳- تعیین محل اتصالی در خطوط جبران شده با TCSC ۷۳
۴-۳-۱- اتصال کوتاه قبل از TCSC ۷۳
۴-۳-۲- اتصال کوتاه بعد از TCSC ۷۶
۴-۴- سیستم مورد مطالعه ۷۶
۴-۵- ارزیابی روش های پیشنهادی ۷۹

۴-۶- نتیجه گیری ۹۶

فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات ۹۷

۵-۱- نتیجه گیری ۹۷

۵-۲- پیشنهادات برای ادامه تحقیق ۹۸

مراجع. ۱۰۰

چکیده پایان نامه به لاتین ۱۰۵

فهرست نمودارها

۲-۱- منحنی تغییرات Vr برحسب P برای ضریب توان های مختلف ۱۳
۲-۲- منحنی تغییرات ولتاژ Vr برحسب P برای مقادیر مختلف طول خط ۱۴
۲-۳- سیستم های حفاظت خازن سری ۱۹
۲-۴- مدار معادل ۲۰
۲-۵- منحنی تغییرات دامنه جریان رله برحسب تغییر محل اتصالی ۲۰
۲-۶- منحنی تغییرات دامنه ولتاژ رله برحسب محل اتصالی ۲۱
۲-۷- مکان هندسی فازور ولتاژ و جریان برای خط جبران نشده به ازای مقادیر مختلف h ۲۲
۲-۸- مکان هندسی فازور ولتاژ و جریان برای خط جبران شده به ازای مقادیر مختلف h ۲۳
۲-۹- مکان هندسی امپدانس ظاهری از دید رله ۲۳
۲-۱۰- مدار معادل ۲۴
۲-۱۱- منحنی تغییرات دامنه ولتاژ رله برحسب تغییرات محل اتصالی ۲۴
۲-۱۲- مکان هندسی امپدانس ظاهری از دید رله ۲۵
۲-۱۳- مدار معادل ۲۵
۲-۱۴- منحنی تغییرات دامنه جریان رله برحسب تغییرات محل اتصالی ۲۶
۲-۱۵- منحنی تغییرات دامنه ولتاژ رله برحسب تغییرات محل اتصالی ۲۶
۲-۱۶- مکان هندسی فازور ولتاژ و جریان برای درجه جبرانسازی ۶۰٪ ۲۷
۲-۱۷- مکان هندسی امپدانس دیده شده از دید رله برای مقادیر مختلف جبرانسازی ۲۷
۲-۱۸- بانک خازنی ۲۸
۲-۱۹- انواع سیستم های حفاظت خازن سری ۳۰
۲-۲۰- منحنی تغییرات ولتاژ دو نوع واریستور برحسب جریان آن ۳۲
۲-۲۱- جریان خازن و جریان واریستور در حین اتصالی ۳۲
۲-۲۲- مدار معادل سیستم با درنظر گرفتن واریستور موازی ۳۳
۲-۲۳- منحنی تغییرات دامنه جریان برحسب تغییرات محل اتصالی ۳۳
۲-۲۴- نمودار هدایت واریستور برحسب تغییرات محل اتصالی برای درجات جبرانسازی مختلف ۳۴
۲-۲۵- منحنی تغییرات دامنه ولتاژ برحسب تغییر محل اتصالی ۳۴

۲-۲۶- منحنی تغییرات فازور ولتاژ و جریان برای درجه جبرانسازی ۶۰٪ ۳۵
۲-۲۷- مکان هندسی امپدانس برحسب تغییرات محل اتصالی برای درجات جبرانسازی مختلف ۳۵
۲-۲۸- الف) وارونگی ولتاژ وجریان ب) محل قرارگرفتن امپدانس ۳۹
۲-۲۹- خط انتقال در نظر گرفته شده جهت بررسی طرح های underreaching ۴۰
۲-۳۰- آرایش های مختلف خازن سری در خط انتقال جهت مطالعه طرح های overreaching ۴۳
۳-۱- مدار TCSC ۴۶
۳-۲- ولتاژ و جریان TCSC جریان خازن و جریان سلف برای فاز a در مود بای پس ۴۹
۳-۳- ولتاژ و جریان TCSC جریان خازن و جریان سلف برای فاز a در مود تقویت خازنی ۵۰
۳-۴- ولتاژ و جریان TCSC جریان خازن و جریان سلف برای فاز a در مود تقویت سلفی ۵۲
۳-۵- منحنی تغییرات K_B برحسب β برای λ=۲/۰۵ . . . . . ۵۲
۳-۶- مدل خط انتقال انرژی با پارامترهای توزیع شده ۵۸
۳-۷- مدار معادل یک قسمت کوچک از خط انتقال به طول dx ۵۹
۳-۸- مدار معادل گسترده خط لنتقال انرژی ۶۰
۴-۱- خط انتقال با TCSC نصب شده در وسط خط ۶۵
۴-۲- خط انتقال با TCSC نصب شده در دو طرف خط ۶۶
۴-۳- خط انتقال و TCSC مورد مطالعه ۶۶
۴-۴- SIS برای یک اتصال کوتاه تکفاز به زمین ۶۷
۴-۵- SIS برای اتصال کوتاه تکفاز به زمین در سیستم مورد مطالعه ۶۷
۴-۶- دیاگرام R— X مربوط به TCSC برای اتصال کوتاه سه فاز به زمین در فاصله ۵۰ km از باس A ۶۸
۴-۷- دیاگرام R— X مربوط به TCSC برای اتصال کوتاه سه فاز به زمین در فاصله ۲۰۰ km از باس A ۶۹
۴-۸- دیاگرام R— X مربوط به TCSC برای اتصال کوتاه دوفاز (ab) در فاصله ۸۰ km از باس A ۷۰
۴-۹- دیاگرام R— X مربوط به TCSC برای اتصال کوتاه دوفاز (ab) در فاصله ۲۱۰ km از باس A ۷۱
۴-۱۰- بلوک دیاگرام روش پیشنهادی تعیین بخش خطازده ۷۲
۴-۱۱- فلوچارت الگوریتم تعیین محل اتصال کوتاه ۷۷
۴-۱۲- مدار TCSC به همراه سیستم کنترل ۷۹
۴-۱۳- ولتاژ اندازه گیری شده فاز a در باس A برای اتصال کوتاه سه فاز به زمین در ۱۰۰ km باس A با مقاومت اتصال کوتاه ۱۰۰Ω و زاویه آتش ۱۵۵ درجه ۸۰

۴-۱۴- جریان اندازه گیری شده فاز a در باس A برای اتصال کوتاه سه فاز به زمین در ۱۰۰ km باس A با مقاومت اتصال کوتاه ۱۰۰Ω و زاویه آتش ۱۵۵ درجه ۸۰
۴-۱۵- ولتاژ اندازه گیری شده فاز a در باسB برای اتصال کوتاه سه فاز به زمین در ۱۰۰ km باس A با مقاومت اتصال کوتاه ۱۰۰Ω و زاویه آتش ۱۵۵ درجه ۸۱
۴-۱۶- جریان اندازه گیری شده فاز a در باسB برای اتصال کوتاه سه فاز به زمین در ۱۰۰ km باس A با مقاومت اتصال کوتاه ۱۰۰Ω و زاویه آتش ۱۵۵ درجه ۸۱
۴-۱۷- ولتاژ محاسبه شده TCSC برای اتصال کوتاه سه فاز به زمین در ۱۰۰ km باس A با مقاومت اتصال کوتاه ۱۰۰Ω و زاویه آتش ۱۵۵ درجه ۸۲
۴-۱۸- خطای ولتاژ محاسبه TCSC برای اتصال کوتاه سه فاز به زمین در ۱۰۰ km باس A با مقاومت اتصال کوتاه ۱۰۰Ω و زاویه آتش ۱۵۵ درجه ۸۲
۴-۱۹- جریان محاسبه شده TCSC برای اتصال کوتاه سه فاز به زمین در ۱۰۰ km باس A با مقاومت اتصال کوتاه ۱۰۰Ω و زاویه آتش ۱۵۵ درجه ۸۳
۴-۲۰- خطای جریان محاسبه TCSC برای اتصال کوتاه سه فاز به زمین در ۱۰۰ km باس A با مقاومت اتصال کوتاه ۱۰۰Ω و زاویه آتش ۱۵۵ درجه. ۸۳
۴-۲۱- FSI برای اتصال کوتاه سه فاز به زمین با مقاومت اتصال کوتاه ۱۰Ω، زاویه آتش تریستور ۱۶۰ درجه، زاویه توان ۱۵ درجه، جهت انتقال توان از چپ به راست ۸۴
۴-۲۲- FSI برای اتصال کوتاه دو فاز(ab) به زمین با مقاومت اتصال کوتاه ۵۰Ω، زاویه آتش تریستور ۱۵۵ درجه، زاویه توان ۱۰ درجه، جهت انتقال توان از چپ به راست ۸۵
۴-۲۳- FSI برای اتصال کوتاه دو فاز با زاویه آتش تریستور ۱۶۵ درجه، زاویه توان ۲۰ درجه، جهت انتقال توان از چپ به راست ۸۶
۴-۲۴- FSI فاز a برای اتصال کوتاه تکفاز به زمین با مقاومت اتصال کوتاه ۱۰۰Ω، زاویه آتش تریستور ۱۷۰ درجه، زاویه توان ۵ درجه، جهت انتقال توان از چپ به راست ۸۷
۴-۲۵- FSI برای اتصال کوتاه دو فاز با زاویه آتش تریستور ۱۶۰ درجه، زاویه توان ۱۵ درجه، جهت انتقال توان از راست به چپ ۸۸
۴-۲۶- مقادیر تابع هدف تعیین محل اتصال کوتاه برای اتصال کوتاه سه فاز به زمین در فاصله ۵۰ km از باس A با مقاومت اتصال کوتاه ۱۰Ω، زاویه آتش تریستور ۱۶۰ درجه، زاویه ولتاژ سیستم A برابر صفر، زاویه ولتاژ سیستم B برابر ۱۵- درجه ۸۹

۴-۲۷- مقادیر تابع هدف تعیین محل اتصال کوتاه برای اتصال کوتاه دو فاز(ab) به زمین در فاصله ۲۵۰ km از باس A با مقاومت اتصال کوتاه ۵۰Ω .زاویه آتش تریستور ۱۵۵ درجه .زاویه ولتاژ سیستم A برابر صفر. زاویه ولتاژ سیستم B برابر۱۰- درجه ۹۰
۴-۲۸- مقادیر تابع هدف تعیین محل اتصال کوتاه برای اتصال کوتاه تکفاز(a) به زمین در فاصله ۸۰ km از باس A با مقاومت اتصال کوتاه ۱۰۰Ω .زاویه آتش تریستور ۱۷۰درجه .زاویه ولتاژ سیستم A برابر صفر. زاویه ولتاژ سیستم B برابر۵- درجه ۹۰
۴-۲۹- مقادیر تابع هدف تعیین محل اتصال کوتاه برای اتصال کوتاه دو فاز(ab) در فاصله ۲۵۰ km از باس A با زاویه آتش تریستور ۱۶۰ درجه .زاویه ولتاژ سیستم A برابر صفر. زاویه ولتاژ سیستم B برابر۱۵ درجه . . . ۹۱
۴-۳۰- منحنی تغییرات درصد خطای محل اتصال کوتاه تخمینی برحسب تغییرات زاویه آتش تریستورها برای اتصال کوتاه دوفاز به زمین در فاصله ۲۰۰ km باس A با مقاومت اتصال کوتاه ۵۰Ω ۹۱
۴-۳۱- منحنی تغییرات درصد خطای محل اتصال کوتاه تخمینی برحسب تغییرات محل اتصالی برای اتصال کوتاه تکفاز به زمین با زاویه آتش تریستور ۱۶۰ درجه و مقاومت اتصال کوتاه ۵۰Ω ۹۲
۴-۳۲- منحنی تغییرات درصد خطای محل اتصال کوتاه تخمینی برحسب تغییرات مقاومت اتصالی برای اتصال کوتاه دوفاز به زمین در ۱۰۰ km باس A با زاویه آتش تریستور ۱۵۵ درجه . . . . . ۹۲.

فهرست جداول

۲-۱- دسته بندی جبرانسازها ۱۷

۲-۲- دسترسی واقعی جهت تنظیم overreaching ۴۳

۴-۱- مقایسه الگوریتم های تعیین محل اتصال کوتاه ۶۴

۴-۲- مشخصات خط انتقال و TCSC. ۷۸

۴-۳- FSI و محل اتصال کوتاه تخمین زده شده برای انواع اتصال کوتاه با زاویه آغاز اتصال کوتاه ۰ درجه و مقاومت اتصال کوتاه ۱۰Ω ۹۳

۴-۴- FSI و محل اتصال کوتاه تخمین زده شده برای انواع اتصال کوتاه با زاویه آغاز اتصال کوتاه ۹۰ درجه و مقاومت اتصال کوتاه ۱۰Ω. ۹۴

۴-۵- FSI و محل اتصال کوتاه تخمین زده شده برای انواع اتصال کوتاه با زاویه آغاز اتصال کوتاه ۰ درجه و مقاومت اتصال کوتاه ۱۰۰Ω ۹۵

فصل اول: مقدمه

۱-۱- جبرانسازی در خطوط انتقال

انتقال انرژی الکتریکی همواره درگیر چالش هایی در مورد انتقال هرچه بیشتر توان از طریق یک خط انتقال به منظور رسیدن به بهره اقتصادی بیشتر بوده است. امروزه با توجه به کمبود فضا برای احداث خطوط انتقال جدید، اهمیت این موضوع بیشتر از گذشته به چشم می آید. بنابراین برنامه ریزی و طراحی راهکارهایی در جهت انتقال توان بیشتر از طریق یک خط انتقال از اولویت های مهندسان بخش انتقال در یک سیستم قدرت بزرگ می باشد. این موضوع باعث شده روش های مختلف جبرانسازی در خطوط انتقال هرچه بیشتر مورد تحقیق و مطالعه قرار گیرد.

یکی از محدودیت های بهره برداری از یک خط انتقال با طول مشخص، این است که با افزایش توان انتقالی از خط پایداری کاهش می یابد. به طوری که پس از رسیدن به یک حد مشخص از توان انتقالی، سیستم به طور ناگهانی ناپایدار می گردد. به این سطح از توان انتقالی که پس از آن سیستم ناپایدار می شود حد پایداری ماندگار گویند. حد پایداری ماندگار سیستم با تغییر تحریک ماشین های سنکرون، تعداد و نوع اتصال خطوط انتقال، تعداد و نوع ماشین های سنکرون، الگوی پخش بار اکتیو و راکتیو و همچنین نوع اتصال و مشخصات تجهیزات جبرانسازی قابل تغییر است. البته در عمل سیستم انتقال، نزدیک به حد پایداری ماندگار خود کار نمی کند. زیرا همواره بایستی یک فاصله مناسب از حد پایداری ماندگار داشته باشد تا در اثر اغتشاش های ناشی از اتصال کوتاه و کلید زنی در هنگام ورود یا خروج بارهای بزرگ در سیستم، ناپایداری رخ ندهد[۱].

علاوه بر این، حفظ سطح ولتاژ نیز از ضروریات سیستم قدرت می باشد زیرا بخشی از بارهای الکتریکی حساسیت ویژه ای به سطح ولتاژ دارند. افت ولتاژ که معمولا در اثر اعمال بار سنگین به سیستم یا کمبود تولید ایجاد می شود باعث ایجاد اختلال در عملکرد برخی بارها خصوصا موتورهای القایی می شود. افزایش ولتاژ از مقدار نامی خود نیز شرایط خطرناکی را ایجاد می کند زیرا در این حالت خطر تخلیه الکتریکی و یا شکست عایقی وجود دارد. همچنین افزایش ولتاژ موجب اشباع ترانسفورماتورها گردیده و این موضوع می تواند جریان های هارمونیکی بالا تولید کند. در این حالت در صورت وجود ظرفیت خازنی خطر فرورزونانس و رزونانس هارمونیکی نیز وجود دارد. همچنین افزایش ولتاژ به صورت کنترل نشده عمر مفید عایق ها را کاهش خواهد داد. قطع بارها، عملیات سوئیچینگ، اتصالی ها و صاعقه از عوامل ایجاد اضافه ولتاژ در سیستم قدرت می باشند. به علاوه، در خطوط انتقال طولانی اثر فرورانتی[1] (اضافه ولتاژ انتهای خط در حالت کم باری) مقدار توان انتقالی و طول مسیر انتقال را محدود خواهد کرد[۱].

بنابراین مهندسان بخش انتقال همواره به دنبال طراحی روش های جبرانسازی، به منظور افزایش سطح پایداری ماندگار و ایجاد پروفیل ولتاژ مسطح در شرایط مختلف کاری سیستم قدرت بوده اند. جبرانسازی عبارتست از تغییر مشخصات الکتریکی یک خط انتقال به منظور افزایش توان انتقالی توسط خط با حفظ پایداری و دامنه ولتاژ مناسب. بنابراین جبرانسازی بایستی نتایج زیر را به همراه داشته باشد:

۱- ایجاد یک پروفیل ولتاژ مسطح در همه سطوح انتقال توان
۲- بهبود پایداری به وسیله افزایش ماکزیمم توان قابل انتقال
۳- فراهم کردن یک وسیله مقرون به صرفه برای تامین نیاز توان راکتیو سیستم انتقال

جبرانسازها را می توان به دو دسته پسیو و اکتیو تقسیم کرد. جبرانسازهای پسیو شامل خازن های سری و خازن ها و راکتورهای شنت می شود و برای تغییر ظرفیت خازنی و اندوکتانس سلفی خط استفاده می شود. جبرانسازهای اکتیو نیز که معمولا به صورت شنت متصل می شوند، با جذب مقدار مناسب توان راکتیو، ولتاژ را در ترمینال خود ثابت نگه می دارند. این جبرانسازها قابلیت سازگاری با تغییرات پیوسته را دارند و همچنین دارای پاسخ سریعی هستند. از نظر نوع اتصال به شبکه نیز، جبرانسازها به دو دسته جبرانسازهای سری و جبرانسازهای موازی تقسیم می شوند که در انتهای خط و یا در نقاطی در طول خط انتقال متصل می شوند[۱].

خازن های سری، ابزار مفیدی برای بهبود بازده سیستم و افزایش قابلیت انتقال توان هستند. خازن های سری برای جبران راکتانس سلفی خطوط انتقال طولانی به کار می روند. این خازن ها معمولا در انتهای خط و یا در وسط خط نصب

[1] Ferranti Effect

می گردند و موجب افزایش قابلیت انتقال توان، بهبود پایداری ماندگار و گذرای سیستم، کاهش افت ولتاژ در محل بار در هنگام اغتشاشات شدید و کاهش تلفات انتقال می گردند. خازن های سری می توانند از نوع ثابت یا متغیر باشند. استفاده از خازن های سری متغیر علاوه بر مزایایی که به آن اشاره شد، می توانند بسته به سیستم کنترل آن ها در میرا نمودن نوسانات سیستم قدرت نقش اساسی داشته باشند[۶]-[۲].

ادوات FACTS[1] ترکیبی از عناصر پسیو (خازن و سلف و ...) و عناصر الکترونیک قدرت (تریستور، IGBT و ...) هستند که به منظور تنظیم و کنترل پارامترهای الکتریکی سیستم انتقال (ولتاژ، امپدانس، زاویه فاز و ...) استفاده می گردند. این تجهیزات در اواسط دهه هشتاد میلادی توسط EPRI[2] پیشنهاد گردیدند و به سرعت نیز توسعه و گسترش یافتند به طوری که امروزه بخش قابل توجهی از مطالعات در سیستم انتقال معطوف به بررسی پاسخ سیستم در شرایط مختلف در حضور ادوات FACTS گردیده است.TCSC[3]یکی از این ادوات است که به عنوان خازن سری قابل کنترل در خط انتقال مورد استفاده قرار می گیرد. TCSC می تواند امپدانس خط انتقال را بر اساس سیستم کنترل خود به طور پیوسته تغییر دهد و به این دلیل کارایی بیشتری نسبت به خازن های سری ثابت دارد[۷]. با توجه به موضوع این پایان نامه ساختار این عنصر به همراه مودهای مختلف عملکرد و سیستم حفاظت آن به طور مفصل در فصل سوم بررسی می گردد.

حضور جبرانسازهای سری در خط انتقال احتمال رزونانس های زیرسنکرون را افزایش می دهد. همچنین جبرانسازی سری مشکلاتی را در سیستم حفاظت ایجاد می کند. اما با توجه به مزایای متعدد آن، تلاش های زیادی در جهت رفع مشکلات ناشی از این نوع جبرانسازی صورت گرفته است و راه حل هایی نیز ارائه گردیده است. این راه حل ها، استفاده از خازن های سری ثابت و متغیر را در خطوط انتقال، هم از نظر تعداد و هم از نظر درصد جبرانسازی روز به روز افزایش داده است[۱۳]-[۸].

۱-۲- تاثیر جبرانسازی سری بر سیستم های حفاظت خطوط انتقال

در سال های اخیر وابستگی و حساسیت مصرف کننده ها به پیوستگی تامین انرژی الکتریکی به شدت افزایش یافته است و این به معنی نیاز به بهبود امنیت و قابلیت اعتماد سیستم های انتقال می باشد. مهم ترین تهدید در تامین پیوسته انرژی الکتریکی وقوع اتصال کوتاه ها در سیستم انتقال است. اتصال کوتاه در خطوط انتقال هنگامی اتفاق

[1] Flexible AC Transmission Systems
[2] Electric Power Research Institute
[3] Thyristor controlled series capacitor

می افتد که هادی ها با یکدیگر و یا با زمین تماس پیدا کنند. اتصال کوتاه ها ها شامل اتصال کوتاه سه فاز، سه فاز به زمین، تکفاز به زمین، دو فاز و دو فاز به زمین می باشد. بدیهی است که با طراحی های بهتر خطوط انتقال می توان احتمال وقوع اتصالی را کاهش داد اما هیچ گاه نمی توان سیستم را به طور کامل از اتصالی ها مصون دانست. عبور جریان های زیاد در هنگام اتصالی موجب ایجاد خسارات جدی به تجهیزات می گردد. بنابراین یک سیستم حفاظتی جهت تشخیص اتصالی و جلوگیری از صدمه خوردن تجهیزات و همچنین تعیین محل اتصالی به منظور رفع عیب از نیازهای اساسی سیستم قدرت به شما می رود. تشخیص دقیق محل اتصالی در خط انتقال به بهره بردار امکان می دهد تا هرچه سریعتر نسبت به ترمیم خط خطا زده اقدام کند.

حضور جبرانسازها در خطوط انتقال سبب تغییراتی در مدار معادل دیده شده از ابتدا و انتهای خط می گردد. این موضوع سیستم های حفاظت رایج در خطوط انتقال را دچار چالش هایی می کند به طوری که ممکن است موجب عملکرد نادرست رله ها در هنگام اتصالی گردد. بنابراین طراحی سیستم های حفاظتی در حضور جبرانسازها از جمله دغدغه های مهم مهندسان قدرت در سال های اخیر بوده است[۱۸]-[۱۴].

به منظور حفاظت خازن سری در مقابل ولتاژ بالای ناشی از عبور جریان اتصالی، خازن را در هنگام اتصالی با نصب جرقه گیر[۱] و یا واریستور اکسید فلز MOV[۲] در دو سر خازن، بای پس می کنند. توجه به این نکته ضروری است که گاهی این روش های حفاظتی بصورت ترکیبی استفاده می شود. نوع حفاظت خازن تاثیر زیادی روی سیستم حفاظتی خط انتقال دارد زیرا با بای پس شدن خازن امپدانس ظاهری دیده شده توسط رله به مقدار زیادی تغییر می کند و با ورود دوباره خازن به سیستم پس از اتصالی امپدانس ظاهری دوباره دستخوش تغییر می شود[۳].

اضافه شدن خازن های سری در خطوط انتقال طراحی سیستم حفاظت را پیچیده می سازد. میزان این پیچیدگی بستگی به اندازه خازن سری و محل نصب آن در طول خط و نوع سیستم بای پس خازن دارد. علاوه بر این در هنگام اتصال کوتاه به دلیل ایجاد رزونانس های شبکه، ولتاژ و جریان در محل رله به قسمت های متفاوتی در صفحه مختلط در مقایسه با خطوط جبران نشده حرکت می کند. این ویژگی نامعمول فاز جریان و ولتاژ را *وارونگی کمیت های فازوری* می نامند. هر چه درجه جبرانسازی بالاتر باشد رله گذاری دشوارتر خواهد بود. علاوه بر آن مکان نصب جبرانسازهای سری در خط انتقال، روی سیستم حفاظتی تاثیر بسزایی دارد. رله های دیستانس فاصله بین رله و اتصالی را بوسیله امپدانس موثر دیده شده از رله اندازه می گیرند. وقتی بخش بزرگی از راکتانس سلفی خط به وسیله راکتانس خازنی خنثی شود، اندازه امپدانس ظاهری تحت تاثیر قرار می گیرد. در این حالت ناحیه اول رله دیستانس که معمولا تا ۸۰ درصد خط را پوشش

[1] Spark gap

[2] Metal Oxide Varistor

می دهد ممکن است تا ۱۰۰درصد و یا حتی بخشی از خط مجاور را نیز پوشش دهد.به همین ترتیب ناحیه های دوم و سوم نیز تحت تاثیر قرار می گیرند. در بسیاری از موارد TCSC ها و یا خازن های ثابت سری در دو انتهای خط انتقال قرار می گیرد زیرا این نوع جبرانسازی در پست های دو طرف خط ارزان تر از جبرانسازی در وسط خط است و نیاز به ساخت پست جدید ندارد. هنگامی که جبرانسازها در دو سر خط نصب می شوند، اگر اتصالی در نزدیکی ابتدای خط رخ دهد ممکن است رله راکتانس منفی اندازه گیری نماید و المان دیستانس این اتصالی را اشتباها اتصالی پشت رله تفسیر نماید. نصب جبرانساز سری در وسط خط نیز مشکلات مشابهی را ایجاد نموده و علاوه بر آن الگوریتم های تعیین محل خطا را نیز دچار چالش می نماید[۳],[۱۸].

وقتی یک اتصالی در خط انتقال رخ می دهد یک تغییر ناگهانی در سیستم قدرت رخ می دهد که این تغییر همراه با پاسخ های گذرا است. به علت ایجاد تشدید بین جبرانساز سری و اندوکتانس سری شبکه حالت های گذرای فرکانس پایین رخ می دهد که همیشه شامل فرکانس های زیر سنکرون می باشند. فیلتر کردن گذراهای زیرسنکرون به دلیل فرکانس پایین آن ها دشوار است. از این رو ممکن است رله های خط انتقال را دچار خطا نماید.

از دیگر چالش های سیستم حفاظت در حضور جبرانسازهای سری نا متعادلی امپدانس فاز است. نامتعادلی امپدانس فاز وقتی اتفاق می افتد که سیستم بای پس خازن سری به صورت نامتقارن عملیات بای پس و ورود دوباره خازن سری را انجام دهند. در هنگام اتصال کوتاه وقتی که ولتاژ دو سر خازن سری در هر فاز به مقدار تعیین شده رسید فاصله های هوایی جرقه گیر شروع به هدایت می کنند. این شروع به هدایت کردن ممکن است در هر فاز در زمان های متفاوتی آغاز شود. در نتیجه برای مدت کوتاهی نامتعادلی فاز بزرگی خواهیم داشت[۳].

در سال های اخیر تلاش هایی برای اصلاح سیستم های حفاظت موجود به منظور عملکرد صحیح در خطوط جبران شده سری انجام گرفته است که در ادامه به بررسی آن ها می پردازیم.

۱-۳-مروری بر راهکارهای حفاظت خطوط جبرن شده سری

از زمان کاربرد خازن های سری در خطوط انتقال حفاظت این خطوط همواره یکی از نگرانی های مهندسان حفاظت بوده است. در برخی کاربردهای خازن های سری در گذشته با محدود کردن درجه جبرانسازی از همان رله های حفاظتی خطوط جبران نشده برای این خطوط نیز استفاده می شد. این کار تا حدودی مشکل را رفع می کرد اما گسترش استفاده از جبرانسازهای سری چه به صورت خازن ثابت و چه به صورت TCSC با درجات جبرانسازی بالا، نیاز به اصلاح روش

های موجود و یا طراحی روش های جدید حفاظت به منظور کارایی در این نوع خطوط را بیش از پیش نمایان ساخت. از این رو تلاش هایی در این زمینه آغاز گردید که به بررسی آن ها می پردازیم.

برای جلوگیری از عملکرد نادرست المان های mho و المان های جهتداری که از کمیت های فاز مثل ولتاژ و جریان فاز برای تصمیم گیری استفاده می کنند از روش پلاریزاسیون حافظه استفاده می کنند. در این روش ترکیبی از اطلاعات ولتاژ قبل و هنگام اتصالی برای تشخیص جهت استفاده می شود و از این طریق مشکل وارونگی ولتاژ و همچنین ولتاژ صفر اتصالی سه فاز نزدیک به رله، برای این نوع رله ها تا حد زیادی حل می شود. همچنین با تغییر تنظیم مرزهای اتصالی جلو و پشت رله در المان های جهتداری که از امپدانس های توالی به عنوان ورودی استفاده می کنند، عملکرد صحیحی در هنگام وارونگی ولتاژ خواهیم داشت. برای جلوگیری از عملکرد نادرست ناحیه یک رله ی دیستانس نیز از مقایسه نسبت بین ولتاژ اندازه گیری شده به ولتاژ محاسبه شده با فرض حضور جبرانساز سری در حلقه خطا با یک مقدار مرزی استفاده می کنند. علاوه بر این، به منظور تصحیح عملکرد رله های دیفرانسیل نیز، تغییر ناحیه عملکرد آن پیشنهاد شده است[۲۰]-[۱۹]. همچنین در [۲۵]-[۲۱] راهکارهایی برای تنظیم رله های دیستانس در حضور خازن ثابت سری ارائه گردیده است. در [۲۸]-[۲۶] نیز مطالعاتی به منظور کاهش اثر TCSC بر سیستم های حفاظتی انجام پذیرفته است.

روش های پیشنهادی فوق روش هایی است که طراحان، به منظور تصحیح عملکرد رله ها پیشنهاد داده اند اما سیستم های حفاظتی مورد استفاده در خطوط EHV[1] دارای برخی ویژگی های مشترک هستند. از جمله همگی این سیستم ها دارای رله گذاری پایلوت هستند یعنی سیستم ها از یک مسیر ارتباطی برای فرستادن سیگنال ها از یک طرف خط به طرف دیگر آن استفاده می کنند که فرصتی را برای تصمیم گیری های حفاظتی هوشمندتر فراهم می کند زیرا به این طریق اطلاعات هردو طرف خط برای پردازش در دسترس اند. رله ها در هر انتهای خط انتقال ولتاژ و جریان آن را در نقطه نصب خود اندازه می گیرند. این سیگنال و یا پاسخ حاصل از آن به تجهیزات رله محلی فرستاده می شود تا شاید سیگنال تریپ تولید شده و به بریکر در آن محل ارسال گردد. تجهیزات دیگری به رله توانایی ارسال سیگنال به تجهیزات طرف دیگر خط را می دهد. این ویژگی، اطلاعات جدید و مهمی راجع به نیاز به تریپ کردن خط را در اختیار می گذارد. در این حالت دو رله می توانند بر اساس شرایط مشاهده شده در دو طرف خط عمل کنند[۳].

تغییرات ناشی از حضور جبرانسازهای سری در خطوط انتقال سبب عملکرد نادرست سیستم های مختلف حفاظت پایلوت با منطق های معمول می گردد. در [۲۹] روش هایی برای اصلاح سیستم های حفاظت پایلوت DCB[2]،

[1] Extra High Voltage
[2] Directional Comparison Blocking