

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی برق و رباتیک

کارشناسی ارشد برق قدرت - سیستم‌های قدرت

تحلیل گذرای کابل ابررسانای دما بالا تحت جریان خطا

نگارنده: علیرضا صادقی

استاد راهنما

دکتر سید میثم سیدبرزگر

استاد مشاور

دکتر محمد یزدانی اسرمی

شهریور ۱۴۰۰

در این صفحه صورت جلسه دفاع را قرار دهید. لازم است پس از صحافی این صفحه مجدداً توسط دانشکده مهر گردد و استاد راهنما با امضای خود اصلاحات پایان نامه را تایید کند.

تقدیم اثر

به پدر و مادر عزیزم که همواره بدون هیچ چشم داشتی حامی من بودند

به روح بزرگ نیکولای تسلا ی هتید که جهان بدون تلاش های او تاریکی مطلق فرومی رفت

به مایک کامرلینگ اونس که شاید بدون مطالعات او دنیای ابررسانایی هرگز خلق نمی شد

شکر و قدردانی

از استاد ارجمند جناب آقای دکتر سید بزرگ که در تمامی ایام سخت و گاه آتکل نپذیر، همواره انگیزه را به شریان های من

تزریق کرده و از میراث دادن انگیزه من در اثر نوسانات فزاینده کوچک و بزرگ زندگی، جلوگیری کردند.

از استاد مشاورم جناب آقای دکتر نریمان اسرمی که همانند ذات فو تو ن روشن گر میراث دیک من به سمت

موفقیت بودند.

از پدر و مادر که در تمامی روزهای سخت و طاقت فرسا کنار من ایستادند تا بتوانم با تمام انگیزه این مراحل زندگی را طی کنم.

تهدنام

اینجانب علیرضا صادقی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق قدرت دانشکده برق دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تحلیل حالت گذرای کابل های ابرسانا تحت راهنمایی جناب آقای دکتر سیدبرزگر متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود . استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

ابرساناها که در سال ۱۹۱۱ کشف شدند، در دماهایی پایین دارای دو ویژگی منحصر به فرد مقاومت الکتریکی بسیار اندک و دیامغناطیس کامل هستند. این دو ویژگی ابرساناها باعث شدند تا امکان پذیری استفاده از این مواد در بسیاری از تجهیزات سیستم‌های قدرت از جمله کابل‌ها، مورد بررسی قرار بگیرند که این امر منجر به پدیدار شدن مفهوم کابل‌های ابرسانای دما بالا شد.

جهت تسریع روند صنعتی شدن کابل‌های ابرسانا و استفاده آن‌ها در سیستم‌های قدرت و صنایع هوایی، نیاز است تا رفتار این کابل‌ها تحت حالت گذرای شبکه مورد مطالعه قرار بگیرد. در حین وقوع خطا و افزایش جریان شبکه، دمای کابل ابرسانا به سرعت افزایش پیدا می‌کند. این افزایش دما رفتار و مشخصه الکتریکی-حرارتی کابل را تحت شعاع قرار داده و ممکن است منجر به سوختن نوارهای ابرسانا شود. بنابراین نیاز است تا قبل از پیاده‌سازی کابل در شبکه واقعی، مشخصه الکترومغناطیسی، حرارتی و مکانیکی آن تحت حالت گذرای شبکه مورد بررسی قرار گیرد. در نتیجه، جهت بررسی رفتار گذرای یک کابل ابرسانا تحت ملاحظات مختلف و تغییرات پارامترهای شبکه، در این پایان‌نامه یک کابل ابرسانای ۲۲،۹ کیلوولت عایق سرد، هم‌محور الکتریکی و حرارتی مورد استفاده قرار گرفته است. رفتار الکترومغناطیسی، حرارتی و مکانیکی این کابل توسط یک مدل مدار معادل مورد مطالعه قرار گرفته است که از ویژگی‌های بارز این مدل، در نظر گرفتن تاثیر الکترومغناطیسی و مکانیکی پیچش نوارهای ابرسانا و همچنین تاثیر تقسیم‌بندی یک نوار ابرسانا است. این مدل به منظور بررسی رفتار گذرای کابل ابرسانا تحت عوامل تاثیرگذار شبکه مانند مقاومت خطا، نوع خطا، طول مدت خطا و مواردی از این قبیل پدیدار شده است. تاثیر موارد مذکور تا قبل از انجام این تحقیق، اصولاً یا در نظر گرفته نشده بودند یا بسیار اندک به آن‌ها پرداخته شده بود. همچنین این پایان‌نامه ارائه دهنده اولین مدل مدار معادل است که توانایی محاسبات الکتریکی، حرارتی، مغناطیسی و مکانیکی یک کابل ابرسانا را دارد.

نتایج حاصل در این پایان‌نامه نشان‌دهنده اهمیت بررسی عوامل تاثیرگذار شبکه در بررسی رفتار گذرای کابل‌های ابرسانا هستند. با افزایش مقاومت خطا، جریان خطا رو به کاهش می‌رود که این امر ممکن است سلامت نوارهای ابرسانا را به دلیل ورود کابل به حالت انتشار شار، مورد مخاطره قرار دهد. نوع خطا و فازهای درگیر در آن عامل مهم دیگری است که تأثیری شگرف بر رفتار الکترومکانیکی کابل دارد. در واقع خطاهای نامتقارن قادر هستند تا نیروی لورنتز هنگفتی را به نوارهای فازهای درگیر خطا اعمال کنند که این امر نشان‌دهنده اهمیت بررسی نوع خطا است. نوع خطا و مقاومت آن در یک بخش جداگانه مورد مطالعه قرار گرفته است تا تأثیر همزمان این عوامل بررسی شود. در نهایت، مواردی مانند طول خطا و حالت بازیابی نیز مورد بررسی و تفحص قرار گرفته‌اند.

کلمات کلیدی: کابل‌های ابرسانا، تحلیل حالت گذرا، خطا، میدان مغناطیسی، دما، توزیع جریان

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- ۱- Alireza Sadeghi, Seyyed Meysam Seyyedbarzegar, and Mohammad Yazdani-Asrami. "Transient analysis of a ۲۲,۹ kV/۲ kA HTS cable under short circuit using equivalent circuit model considering different fault parameters." Physica C: Superconductivity and its Applications (۲۰۲۱): ۱۳۵۳۹۳۵.
- ۲- Alireza Sadeghi, Seyyed Meysam Seyyedbarzegar, "An accurate model of the high-temperature superconducting cable by using stochastic methods", Transformers Magazine, pp. ۲۴-۳۰, ۲۰۲۱.
- ۳- Alireza Sadeghi, Seyyed Meysam Seyyedbarzegar, and Mohammad Yazdani-Asrami. "The electrothermal behavior of a high temperature superconducting cable Integrated with Offshore Wind Farm" ۷th Iran Wind Energy Conference (IWEC۲۰۲۱), Shahrood, Semnan, Iran, May ۱۷-۱۸, ۲۰۲۱.

فهرست مطالب

ث	فهرست جداول
ج	فهرست اشکال
۱	فصل ۱ تعریف مسئله
۲	۱-۱ مقدمه
۳	۲-۱ ضرورت انجام تحقیق
۴	۳-۱ اهداف پایان نامه
۴	۴-۱ ساختار پایان نامه
۷	فصل ۲ مطالعه پژوهش‌های انجام شده بر روی کابل‌های ابرسانا
۸	۱-۲ بررسی مفهوم مقاومت الکتریکی
۹	۲-۲ تاریخچه ابرسانایی
۱۰	۳-۲ انواع مواد ابرسانا
۱۲	۴-۲ مواد ابرسانای دما بالا
۱۲	۱-۴-۲ ابرساناهای دما بالای نسل اول
۱۳	۲-۴-۲ ابرساناهای دما بالای نسل دوم
۱۴	۵-۲ کابل‌های ابرسانا
۱۵	۶-۲ دسته‌بندی کابل‌های ابرسانا
۱۵	۱-۶-۲ ساختار الکتریکی-مغناطیسی کابل‌های ابرسانا
۱۷	۲-۶-۲ ساختار مکانیکی کابل‌های ابرسانا
۲۰	۳-۶-۲ ساختار عایقی کابل‌های ابرسانا

۲-۷ روش‌های مدل‌سازی کابل‌های ابرسانا ۲۲

۲-۷-۱ مدل‌های مداری ۲۲

۲-۸ جمع‌بندی ۲۳

فصل ۳ مدل‌سازی مبتنی بر مدل مداری کابل ابرسانای سه محور ۲۵

۳-۱ گام‌های طراحی یک کابل ابرسانا ۲۶

۳-۱-۱ لایه نگهدارنده ۲۶

۳-۱-۲ لایه ابرسانا ۲۸

۳-۱-۳ لایه عایقی ۳۴

۳-۱-۴ لایه نیمه‌هادی ۳۵

۳-۱-۵ سیستم خنک‌کننده ۳۵

۳-۱-۶ لایه محافظ ۳۶

۳-۱-۷ غلاف بیرونی ۳۷

۳-۲ بررسی رفتار کابل ابرسانا تحت حالت مانای شبکه ۳۷

۳-۳ بررسی رفتار کابل ابرسانا تحت حالت گذرا شبکه ۴۰

۳-۴ رفتار کابل ابرسانا پس از رفع خطا (حالت بازیابی) ۴۲

۳-۵ اثر میدان و دما بر تغییرات خواص مواد کابل ۴۲

۳-۶ الگوریتم مدل‌سازی کابل ابرسانا ۴۴

۳-۷ جمع‌بندی ۴۶

فصل ۴ بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها ۴۷

۴-۱ طراحی کابل مورد مطالعه ۴۸

۴-۲ مدل مداری یک کابل ابرسانا ۵۱

۴-۳ رفتار کابل ابرسانا تحت شرایط مانای شبکه ۵۴

۵۸	تحلیل تغییرات جریان بحرانی
۶۱	تحلیل تغییرات میزان شاخص
۶۲	رفتار الکتریکی لایه‌های نوار ابرسانا
۶۴	رفتار کابل ابرسانا تحت شرایط گذرا
۶۴	تأثیر مقاومت خطا بر رفتار گذرای یک کابل ابرسانا
۷۳	تأثیر انواع خطاهای اعمالی بر رفتار گذرای کابل ابرسانا
۷۷	تأثیر مدت زمان خطا بر رفتار گذرای کابل ابرسانا
۸۰	بررسی حالت بازیابی در کابل ابرسانا
۸۱	۶-۴ مقایسه نتایج

فصل ۵ نتیجه‌گیری و اقدامات پیشرو

۸۴	۱-۵ جمع‌بندی
۸۴	۲-۵ نتیجه‌گیری
۸۵	۳-۵ پیشنهادات

مراجع

۸۶

فهرست جداول

جدول ۱-۲ لیست مواد ابرسانای کشف شده تاکنون.....	۱۱
جدول ۲-۲ بررسی مدل‌های ارائه شده در مقالات معتبر در زمینه مدل‌سازی کابل‌های ابرسانا.....	۲۴
جدول ۱-۳ پارامترهای مربوط به معادلات (۳-۱۲) الی (۳-۱۴) [۶۱].....	۳۰
جدول ۲-۳ انواع مواد مورد استفاده در لایه عایقی کابل‌های ابرسانا.....	۳۴
جدول ۱-۴ جدول مشخصات الکتریکی-حرارتی اولیه کابل مورد بررسی در پایان‌نامه.....	۴۸
جدول ۲-۴ جنس لایه‌های مختلف کابل مورد مطالعه.....	۴۹
جدول ۳-۴ ضخامت و شعاع لایه‌های مختلف مورد استفاده در کابل مورد مطالعه.....	۴۹
جدول ۴-۴ مشخصات نوار مورد استفاده در کابل ۲۲,۹ کیلوولت [۷۰].....	۴۹
جدول ۵-۴ مشخصات نوارهای مورد استفاده در کابل ابرسانا.....	۵۰
جدول ۶-۴ مشخصات مکانیکی کابل ابرسانای تحت مطالعه.....	۵۰
جدول ۷-۴ مقادیر کاپاسیتانس‌های کابل طراحی شده.....	۵۲
جدول ۸-۴ مقادیر اندوکتانس‌های خودی و مشترک بر حسب میلی هانری.....	۵۲
جدول ۹-۴ مشخصات شبکه تست مورد استفاده.....	۵۴
جدول ۱۰-۴ تاثیر تغییرات تعداد سگشن بر جریان بحرانی تخمینی و سرعت محاسبات.....	۶۰
جدول ۱۱-۴ تاثیر تغییرات نوع و مقاومت خطا بر حداکثر جریان خطای هر فاز.....	۷۳
جدول ۱۲-۴ تاثیر تغییرات نوع و مقاومت خطا بر حداکثر دمای لایه ابرسانای هر فاز.....	۷۴
جدول ۱۳-۴ تاثیر تغییرات نوع و مقاومت خطا بر حداکثر مقاومت لایه ابرسانای هر فاز.....	۷۵
جدول ۱۴-۴ تاثیر تغییرات نوع و مقاومت خطا بر حداکثر نیروی لورنتز القایی به لایه ابرسانای هر فاز.....	۷۷
جدول ۱۵-۴ تغییرات زمان بازیابی فازهای سه‌گانه بر حسب افزایش طول زمان خطا.....	۸۱
جدول ۱۶-۴ مقایسه نتایج مرجع [۵۱] و نتایج پایان‌نامه.....	۸۲

فهرست اشکال

- شکل ۱-۲ رفتار مقاومتی فلزات خالص و ناخالص در مقابل تغییرات دما [۶]..... ۸
- شکل ۲-۲ مثلث ابررسانایی [۱۷]..... ۱۰
- شکل ۳-۲ ساختار غشایی ابررساناهای دما بالای نسل اول [۲۵]..... ۱۳
- شکل ۴-۲ ساختار نواری یک ابررسانای نسل دوم..... ۱۳
- شکل ۵-۲ نمایی از ساختار یک کابل سه محور..... ۱۶
- شکل ۶-۲ ساختار هم محور کابل ۲۲,۹ کیلوولت مورد استفاده در شبکه کره جنوبی..... ۱۷
- شکل ۷-۲ نمایی از یک کابل روبل [۳۲]..... ۱۷
- شکل ۸-۲ نحوه قرارگیری نوارهای ابررسانا به روش رادرفورد [۳۳]..... ۱۸
- شکل ۹-۲ نمایی از یک کابل CORC [۳۴]..... ۱۸
- شکل ۱۰-۲ نمایی از مدل اجزاء محدود یک کابل CORC [۳۵]..... ۱۸
- شکل ۱۱-۲ نمایی از یک کابل دسته نوار پیچیده شده شبیه سازی شده در ANSYS [۳۶]..... ۱۹
- شکل ۱۲-۲ نمایی از کابل TSTC واقعی [۳۶]..... ۱۹
- شکل ۱۳-۲ نمایی از کابل RSCCCT [۳۷]..... ۲۰
- شکل ۱۴-۲ نمایی از یک کابل ابررسانا با عایق سرد [۳۸]..... ۲۱
- شکل ۱۵-۲ نمایی از یک کابل ابررسانا با عایق گرم [۳۸]..... ۲۱
- شکل ۱-۳ مدار معادل برای رفتار مقاومتی یک ابررسانا [۵۶]..... ۲۹
- شکل ۲-۳ مفهوم زاویه و گام پیچش..... ۳۱
- شکل ۳-۳ فرآیند مدل سازی یک کابل ابررسانا..... ۴۵
- شکل ۴-۳ بلوک دیاگرام چگونگی پیادسازی معادلات مذکور در پایان نامه در مدل مداری وابسته سلف، خازن و مقاومت..... ۴۶
- شکل ۱-۴ کابل طراحی شده ۲۲,۹ کیلوولتی..... ۴۸

- شکل ۴-۲ نوار ساخته شده شرکت South Wire ۴۹
- شکل ۴-۳ مدل مدار معادل کابل مورد مطالعه ۵۲
- شکل ۴-۴ مدل مداری لایه ابرسانی کابل در هر فاز، برای یک لایه با m نوار ابرسانا ۵۳
- شکل ۴-۵ شبکه تست استفاده شده در این مطالعه ۵۳
- شکل ۴-۶ سیمولینک نوار، کابل و شبکه ۵۴
- شکل ۴-۷ جریان مانای عبوری از لایه های مختلف هر فاز کابل ابرسانا، الف) جریان شبکه ورودی به کابل ب) جریان عبوری از لایه ابرسانی کابل پ) جریان عبوری از لایه نگه دارنده کابل ۵۶
- شکل ۴-۸ میدان مغناطیسی برآیند کابل ابرسانا در حالت مانا ۵۶
- شکل ۴-۹ تلفات جریان متناوب هر فاز ۵۷
- شکل ۴-۱۰ دمای کابل ابرسانا در حالت مانای شبکه ۵۷
- شکل ۴-۱۱ تغییرات جریان بحرانی بر حسب دما، میدان و پیچش ۵۸
- شکل ۴-۱۲ تغییرات جریان بحرانی کل کابل ابرسانا بر حسب دما، میدان و پیچش ۵۹
- شکل ۴-۱۳ تاثیر تغییرات تعداد سکشن بر مدلسازی صحیح رفتار الکتریکی نوار ابرسانا در فاز A ۶۰
- شکل ۴-۱۴ تابع توزیع احتمالی جریان بحرانی نرمالیزه شده برای تعداد سکشن صد هزار ۶۱
- شکل ۴-۱۵ تابع توزیع تجمعی جریان بحرانی نوارهای ابرسانا ۶۱
- شکل ۴-۱۶ تغییرات میزان شاخص بر اساس دما، میدان و پیچش ۶۲
- شکل ۴-۱۷ تابع توزیع تجمعی تغییرات میزان شاخص ۶۲
- شکل ۴-۱۸ جریان عبوری از لایه ابرسانا نوارها در هر فاز ۶۳
- شکل ۴-۱۹ جریان عبوری از لایه مسی نوارهای ابرسانا ۶۳
- شکل ۴-۲۰ جریان عبوری از لایه نقره نوارهای ابرسانا ۶۴

- شکل ۴-۲۱ جریان عبوری از هر فاز کابل ابررسانا تحت حالت خطای شبکه و مقاومت‌های خطای مختلف ۶۵
- شکل ۴-۲۲ حداکثر دمای پدیدار شده در لایه ابررسانای کابل در اثر وقوع خطاهایی با مقاومت‌های مختلف ۶۶
- شکل ۴-۲۳ جریان خطای عبوری از لایه ابررسانای کابل تحت مقاومت خطاهای مختلف ۶۷
- شکل ۴-۲۴ جریان عبوری از لایه نگه‌دارنده کابل ابررسانا تحت مقاومت خطاهای مختلف ۶۷
- شکل ۴-۲۵ حداکثر دمای ایجاد شده در لایه نگه‌دارنده کابل ابررسانا تحت مقاومت‌های خطای مختلف ۶۸
- شکل ۴-۲۶ افزایش مقاومت لایه ابررسانا در اثر مقاومت‌های خطای مختلف ۶۹
- شکل ۴-۲۷ توزیع جریان بحرانی فازهای سه‌گانه کابل و تغییرات آن با مقاومت خطا ۷۰
- شکل ۴-۲۸ توزیع میدان مغناطیسی در کابل تحت خطا و در اثر مقاومت‌های مختلف خطا ۷۱
- شکل ۴-۲۹ توزیع نیروی لورنتز القاء شده در نوارهای ابررسانا تحت مقاومت‌های خطای مختلف ۷۱
- شکل ۴-۳۰ نمایی کلی از تغییرات حرارت مخصوص YBCO با افزایش حرارت ۷۲
- شکل ۴-۳۱ حرارت مخصوص نوارهای ابررسانا در هر فاز تحت خطا و تحت مقاومت خطا ۷۲
- شکل ۴-۳۲ تغییرات دما در لایه نگه‌دارنده کابل ابررسانا بر حسب انواع خطا، الف) فاز A ب) نگه‌دارنده اول فاز B ج) نگه‌دارنده دوم فاز B د) فاز C ۷۶
- شکل ۴-۳۳ رفتار لایه شیلد (محافظ) تحت خطاهای مختلف ۷۷
- شکل ۴-۳۴ میزان محدودشوندگی خطا و تغییرات آن بر اساس زمان حضور خطا در سیستم ... ۷۸
- شکل ۴-۳۵ میزان پیک نهایی جریان خطا به جریان نامی کابل ۷۸
- شکل ۴-۳۶ حداکثر حرارت ایجاد شده در سیستم کابل ابررسانا با افزایش طول زمان حضور خطا ۷۹
- شکل ۴-۳۷ تغییرات مقاومت لایه ابررسانا در اثر افزایش مدت زمان خطا ۷۹
- شکل ۴-۳۸ روند کاهش دما پس از رفع خطا در کابل ابررسانا تحت مطالعه ۸۰

شکل ۳۹-۴ تغییرات زمان بازیابی در فازهای سه گانه بر حسب تغییرات نوع خطا و مقاومت خطا
الف) فاز A، ب) فاز B، پ) فاز C..... ۸۱

شکل ۴۰-۴ مقایسه جریان‌های خطا بین مقاله مرجع و نتایج مدل پیشنهادی الف) نتایج مقاله مرجع
[۵۱] ب) نتایج مدل ارائه شده..... ۸۲

فصل ۱ تعریف مسئله

۱-۱ مقدمه

امروزه توان الکتریکی به عنوان یکی از جدایی‌ناپذیرترین عناصر زندگی بشر شناخته می‌شود که در سطوح مختلفی، زندگی بشر را تحت تأثیر خود قرار داده است. انرژی الکتریکی امروزه نقش مهمی در روشنایی دنیای اطراف، ارتباطات انسان‌ها با یکدیگر و حتی در سیستم‌های حمل و نقل دارد. در واقع زندگی بشر بدون این انرژی ارزشمند میسر نیست. به همین دلیل جهان با افزایش سریع و روز افزون، در نیاز به مصرف برق مواجه است. این جهش در مصرف، در سال‌های اخیر منجر به پدیدار شدن مشکلاتی در سیستم‌های قدرت شده است.

شبکه قدرت امروزی دارای مشکلات متعددی است که عملکرد صحیح آن را در سطوح مختلف مختل می‌کند. یکی از این مشکلات، تلفات بالای خطوط انتقال و توزیع انرژی الکتریکی است که ناشی از ذات مقاومتی هادی‌های مورد استفاده در این خطوط است. راه‌حل‌های متنوعی برای کاهش این تلفات ارائه شده‌اند که از میان آن‌ها می‌توان به خطوط فوق فشار قوی [۱]^۱، خطوط جریان مستقیم [۲]^۲ و خطوط کابلی اشاره کرد. با این وجود، این روش‌ها همچنان قادر به حداقل رساندن تلفات نیستند. در این حین و با کشف مواد ابررسانا توسط کامرلینگ اونس^۳ در سال ۱۹۱۱ [۳]، این امید به وجود آمد که ابررساناها راه‌حلی نهایی برای این مشکل باشند. با این حال استفاده از ابررساناها در سیستم‌های انتقال و توزیع به دلیل دمای بسیار پایین و نیاز به شرایطی ویژه، میسر نبود تا این که در سال ۱۹۸۶ ابررساناهای دمابالا توسط بدنورز^۴ و مولر^۵ کشف شدند [۴]. ابررساناهای دمابالا، برخلاف ابررساناهای دمایی، هزینه‌های تولید، نگهداری و خنک‌کنندگی پایین‌تر و قابل دسترس‌تری را دارا بودند. از این رو و با عنایت به اهمیت این موضوع، دانشمندان و مهندسين بسیار زیادی تمرکز خود را به این زمینه معطوف کرده‌اند. ابررساناهای دمابالا امروزه در صنایع اصلی جهان نقشی مهم و اساسی را به خود اختصاص داده‌اند. یکی از مهم‌ترین کاربردهای ابررسانای دمابالا، کابل ابررسانا است که مزایای زیر را می‌توان برای آن‌ها توصیف کرد:

- تلفات اهمی اندک
- مزایای اقتصادی
- حجم کم و فشردگی ساختاری بالا
- محدودسازی جریان خطا
- مزایای زیست‌محیطی

کابل‌های ابررسانا در ساختاری‌های گوناگونی ارائه می‌شوند که قادر هستند در سطح ولتاژ یکسانی

^۱ Ultra-High Voltage (UHV) Lines

^۲ High Voltage Direct Current (HVDC) Lines

^۳ Kamerlingh Onnes

^۴ K. A. Bednorz

^۵ J. G. Müller

با خطوط انتقال و توزیع مرسوم، توانی بین ۵ تا ۱۰ برابر آن‌ها را انتقال دهند. این کابل‌ها دارای ساختاری متفاوت با کابل‌های معمول بوده که این امر باعث می‌شود که تحلیل حالت گذرا در این کابل‌ها بسیار متفاوت از کابل‌های معمولی باشد. این تفاوت ناشی از حضور لایه‌های جدید در ساختار کابل‌های ابررسانا، دمای عملیاتی بسیار پایین کابل‌های ابررسانا و رفتار متفاوت مواد مورد استفاده در این کابل‌ها در دماهای پایین است.

شایان توجه است که این کابل‌ها در آینده‌ای نزدیک به عنوان یکی از مهم‌ترین و اساسی‌ترین عناصر انتقال توان در هواپیماها و کشتی‌های برقی مورد استفاده قرار خواهند گرفت. این امر ناشی از تلفات، حجم و وزن اندک آن‌ها است.

۲-۱ ضرورت انجام تحقیق

مطالعه رفتار کابل‌های ابررسانا را می‌توان از چند بعد مورد بررسی قرار داد. در باب اول، می‌توان مدل‌سازی را از دید ملاحظات انجام شده بررسی کرد. مدل‌های الکترومغناطیسی، الکتریکی و حرارتی، مکانیکی و حرارتی و الکترومکانیکی از انواع ملاحظات هستند که می‌توان برای یک کابل ابررسانا در نظر گرفت. هر یک از این نوع مطالعات اطلاعاتی را در اختیار قرار داده و از برخی دیگر چشم‌پوشی می‌کند که بنابر نیاز می‌توان هر یک از این موارد مذکور را انتخاب کرد.

دیدگاهی دیگر بیان‌کننده رویه مدل‌سازی است که می‌توان آن را به سه دسته مطالعات مبتنی بر مدل‌های مداری، مطالعات مبتنی بر اجزاء محدود و مطالعات مبتنی بر تفاضل محدود دسته‌بندی کرد. مدل‌های المان محدود اصولاً دارای دقت بالایی هستند ولی تنها برای مطالعه ذات کابل‌های ابررسانا مانند تلفات، میدان و توزیع دما مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مدل‌ها گرچه قابلیت پیاده‌سازی در مطالعات سیستمی را دارا هستند اما سرعت بسیار اندک آن‌ها باعث شده تا گرایش مطالعات سیستمی به مدل‌های مداری باشد. مدل‌های مداری دقت قابل قبولی را ارائه داده و سرعت مناسبی نیز در باب مطالعات سیستمی دارا هستند.

در این پایان‌نامه یک مدل مداری برای کابل ابررسانا ارائه شده است که قادر است شرایط مانا، گذرا و پساگذرا را تشخیص داده و رفتار الکتریکی، مغناطیسی، حرارتی و مکانیکی کابل را در هر یک از این حالات نشان دهد. مدل مداری از آن جهت انتخاب شده است تا شبیه‌سازی انجام شده، قادر باشد در شبکه‌های مختلفی مورد بررسی قرار گرفته و رفتار کابل تحت تمامی این حالات در بالاترین سرعت و دقت ممکن حاصل گردد. از مهم‌ترین مزایای این مدل، در نظر گرفتن پیچش، زمان بازیابی، انتقال حرارت در حالات مختلف است.

کابل‌های ابررسانا دما بالا دارای رفتاری مشابه مقاومت غیرخطی هستند. تحت شرایطی که جریان عبوری از این کابل‌ها از مقدار جریان بحرانی تعیین شده کمتر باشد، مقاومتی اندک را دارا هستند ولی در شرایطی که جریان عبوری از آنها از جریان بحرانی بیشتر شده و یا آن برابر باشد، کابل‌ها از حالت ابررسانایی خارج شده و مقاومت و دما در آن‌ها به شدت و به سرعت افزایش می‌یابند. یکی از شرایطی

که در طی آن جریان عبوری از کابل‌های ابرسانا از جریان بحرانی آن‌ها تجاوز می‌کند، وقوع خطا در شبکه الکتریکی است. در اثر خطا، جریان زیادی از شبکه عبور می‌کند که ممکن است موجب از بین رفتن کامل کابل ابرسانا گردد. از این رو، تحلیل حالت گذرای یک کابل را می‌توان از مهم‌ترین گام‌ها به سمت صنعتی‌تر شدن آن‌ها دانست.

بنابر آنچه که گفته شد، تحلیل خطا در کابل‌های ابرسانا امری بسیار مهم و ضروری است که پرداختن به آن یکی از اصلی‌ترین اهداف این پایان‌نامه می‌باشد. برای مدل‌سازی خطا در کابل‌های ابرسانا، اولین و مهم‌ترین گام، تخمین پیک اول جریان خطای عبوری می‌باشد. این موضوع از آن جهت حائز اهمیت است که اصولاً بیشترین میزان جریان خطای گذرای عبوری از سیستم در اولین پیک، به سیستم اعمال می‌شود و در پیک‌های بعدی جریان خطا معمولاً با میرایی مواجه شده و اثر آن بر کابل در قیاس با پیک اول کاهش پیدا می‌کند. گام مهم بعدی، مدل‌سازی مداری کابل‌های ابرسانای متصل به شبکه است. در نهایت، مدل‌سازی صحیح و مناسب خطا، تحلیل خطاهای مختلف در سیستم و بررسی اثرات آن‌ها تحت شرایط مختلف شبکه آخرین مرحله‌ی تحلیل خطای کابل‌های ابرسانای دمابالا است. بطور کلی این پایان‌نامه قصد دارد با توجه به اهداف ذکر شده، ارزیابی مناسبی از رفتار گذرای یک کابل ابرسانای دمابالا تحت شرایط خطا در سیستم را مورد پژوهش قرار دهد.

۱-۳ اهداف پایان‌نامه

بنابر آنچه که ذکر شد، هدف کلی و اساسی این پایان‌نامه بررسی حالت گذاری یک کابل ابرسانای دمابالا است. اما جهت حصول این هدف، اهداف کوچکتري نیز تبیین شده اند که می‌توان از مهم‌ترین آن‌ها به موارد زیر اشاره کرد که با انجام تک تک آن‌ها، هدف اصلی در دسترس است.

- ایجاد یک مدل مداری جهت دریافت توزیع جریان‌ها
- محاسبه میزان افزایش دما در حالت مانا
- بررسی نهایی رفتار الکترومغناطیسی-حرارتی کابل ابرسانا در حالت مانای شبکه
- اعمال خطا به شبکه تست جهت بررسی رفتار گذرای کابل ابرسانا
- بررسی رفتار گذرای کابل ابرسانا تحت تغییرات پارامترهای خطا
- بررسی صحت عملکرد کابل ابرسانا پس از رفع خطا

۱-۴ ساختار پایان‌نامه

جهت نیل به اهداف مذکور در بخش قبل مطالعات انجام شده در پنج فصل مطرح شده‌اند که خلاصه‌ای از این فصول عبارت است از:

در فصل دوم پایان‌نامه، در ابتدا مفهوم ابرسانایی، قوانین حاکم بر آن و چگونگی ساخت نوارها و غشاءهای ابرسانا بیان شده است. در نهایت مطالعات انجام شده بر روی چگونگی مدل‌سازی رفتار کابل‌های ابرسانا در انتهای این فصل به صورت کامل مورد بحث قرار گرفته‌اند.

فصل سوم به تشریح مدل‌سازی انجام شده و فرمول‌بندی اختصاص یافته است. در این فصل در ابتدا کابل مورد انتخاب طراحی شده و ضخامت و ویژگی لایه‌های مختلف آن مورد بحث قرار گرفته‌اند. پس از آن ملاحظات الکترومغناطیسی، حرارتی و مکانیکی یک کابل تحت سه حالت مختلف شبکه، مانا، گذرا و پس از خطا، بیان شده‌اند. در نهایت خواص مواد مورد استفاده در کابل و تغییرات آن‌ها با مواردی چون فشار و دما به تفصیل بیان شده است.

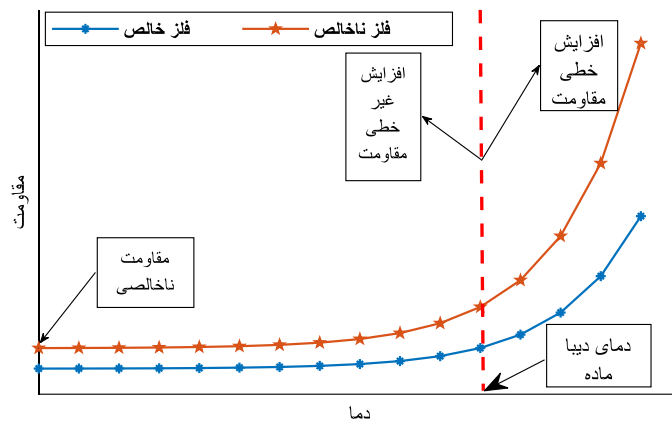
نتایج حاصل از فرمول‌بندی ارائه شده در فصل قبل، در فصل چهارم به تفصیل بیان شده است. در این فصل نتایجی مانند توزیع دما، میدان، نیروی لورنتز، توزیع جریان و مدت زمان بازیابی برای حالت‌های مختلف شبکه نشان داده شده‌اند. در انتهای این فصل یک فرمول‌بندی برای بررسی میزان محدودکنندگی کابل ابرسانا تحت جریان‌های مختلف خطا بیان شده است. از ویژگی‌های این فصل بیان نتایج بر طبق حالت‌های مختلف عملکرد سیستم است که در هر بخش دقت نتایج نیز بررسی شده است. همچنین مقایسه نتایج با سایر مقالات و مطالعات انجام شده از دیگر اهداف این فصل است که گواهی بر دقت بالای مدل ارائه شده و همچنین نتایج است.

فصل پنجم به بیان جمع‌بندی و نتیجه‌گیری از پایان‌نامه پرداخته است. همچنین اقدامات قابل انجام که می‌توانند مکمل این پایان‌نامه باشند، بیان شده است.

فصل ۲ مطالعه پژوهش های انجام شده بر روی کابل های ابررسانا

۲-۱ بررسی مفهوم مقاومت الکتریکی

یک فلز ایده‌آل دارای ساختاری بلوری شکل است که در آن اتم‌ها در یک شبکه تکراری و منظم قرار دارند. یک الکترون به دلیل خواص موجی خود، می‌تواند از میان یک شبکه موجی ایده‌آل بدون این‌که اندازه حرکت الکترون، جهت اصلی خودش را از دست بدهد، حرکت کند. این به معنای مقاومت صفر در فلزات است. اما در فلزهای عادی این ساختار بلوری چندان ایده‌آل نبوده و دو عامل باعث ایجاد مقاومت در آن‌ها می‌گردد [۵]. اثر اول، اثر دمای بالای صفر مطلق بر تعادل اتم‌ها و در نتیجه نوسان آن‌ها است که منجر می‌شود که الکترون‌ها تحت خاصیت موجی با مقاومتی جهت جابه‌جایی روبرو شوند. اثر دوم، تأثیر اتم‌های خارجی و ناخالصی‌ها است که حالت ایده‌آل بلوری را از بین می‌برند. این دو عامل باعث ایجاد مقاومت الکتریکی در فلزات می‌شوند. حال می‌توان متوجه شد که در اثر کاهش حرارت، الکترون‌های هدایت کم‌تر پراکنده می‌شوند. در اثر کاهش دما حتی تا صفر مطلق، مقاومت فلزات هرگز صفر نمی‌شوند و این به دلیل حضور ناخالصی‌ها در فلز است [۶]. شکل ۲-۱ نشان دهنده رفتار مقاومتی فلزات خالص و ناخالص بر اثر تغییرات دما است.



شکل ۲-۱ رفتار مقاومتی فلزات خالص و ناخالص در مقابل تغییرات دما [۶]

مفهوم مطرح‌شده، بیان‌گر مقاومت الکتریکی از دیدگاه اتمی بود. با این وجود این پارامتر از دیدگاه الکتریکی به این صورت تعریف می‌شود: مقاومت الکتریکی عبارت است از کمیتی که نشان‌دهنده میزان توانایی یک فلز در جلوگیری از عبور جریان الکتریکی است. مقاومت الکتریکی تابعی از جنس فلز و حرارت آن در نظر گرفته می‌شود [۷]. جهت حل مشکلات ناشی از تلفات در سیستم‌های قدرت اولیه، محققین اقدامات زیادی را انجام دادند که شاید از میان آن‌ها بتوان به افزایش سطح ولتاژ سیستم انتقال توان و کاهش جریان اشاره کرد تا بر اساس قانون اهم و رابطه تلفات، تلفات ناشی از انتقال توان الکتریکی کاهش پیدا کند. با این وجود، همچنان مسئله تلفات در سیستم‌های انتقال توان و عدم توانایی این سیستم‌ها در انتقال توان با جریان بالا پابرجا بود تا این‌که با کشف مواد ابررسانا، دانشمندان به از میان برداشتن این موانع امیدوار شدند.

۲-۲ تاریخچه ابررسانایی

ابررسانایی در سال ۱۹۱۱ توسط هایک کامرلینگ اونس^۶ کشف شد. اونس در آزمایشگاه خود، در ابتدا بر روی رفتار میکروسکوپیک گازهایی مانند هلیوم، اکسیژن و نیتروژن تحقیق کرد تا بتواند نظریه پیشبینی ون در وال^۷ را در مورد گازها اثبات کند.

وی برای انجام این کار، دمای گازها را تا حد بسیار اندکی پایین آورد و مشاهدات خود را ثبت کرد [۸]. پس از آزمایش بر روی گازها، اونس تصمیم گرفت تا آزمایشات خود را بر روی فلزات متمرکز کند، او دمای جیوه را تا ۴ کلوین کاهش داد و مقاومت آن‌ها را تحت دماهای مختلف اندازه‌گیری کرد. وی مشاهده کرد که ماده پس از یک دمای خاص، مقاومتش به صورت ناگهانی کاهش پیدا می‌کند و دارای مقاومتی نزدیک به صفر می‌شود. با این وجود او از بیان معادلاتی که بیان‌گر چرایی این پدیده باشند، عاجز بود [۳]. این کشف سرآغاز مسیر طولانی ابررساناها در دنیای امروز بود. با کشف مهم اونس، در سال‌های بعد دانشمندان زیادی سعی در تشریح و تفصیل خواص و معادلات حاکم بر ابررساناها کردند که مایسنر و اوشنفلد^۸ پیشگام این عرصه بودند [۹]. پس از اقدامات مایسنر و اوشنفلد، نظریات زیادی جهت تشریح خواص ابررساناها پدیدار شد که از میان آن‌ها می‌توان به نظریه لندن، تئوری گینزبرگ و لاندائو و نهایتاً نظریه BCS اشاره کرد [۱۰-۱۶].

هر ماده ابررسانا، برای باقی‌ماندن در حالت ابررسانایی، به اندرکنشی از میدان مغناطیسی، چگالی جریان و دما نیازمند است [۱۷]. هریک از این کمیت‌ها تعیین‌کننده یک مرز بین حالت ابررسانایی و حالت عادی است که مرزهای بحرانی نامیده می‌شوند و به شرح زیر هستند:

- دمای بحرانی^۹: دمای گذرا از حالت معمولی ماده به حالت ابررسانایی است. در دماهای پایین‌تر از این دما، ماده تغییر فاز داده به حالت ابررسانایی می‌رود. این مرز به صورت T_C نشان داده می‌شود.
 - چگالی جریان بحرانی^{۱۰}: دیگر مرز بین ابررسانایی و حالت معمولی، چگالی جریان بحرانی است. بر این اساس اگر چگالی جریان عبوری از ابررسانا از حد بحرانی تعدی کند، حالت ابررسانایی از بین می‌رود که این مرز با J_C نشان داده می‌شود.
 - میدان مغناطیسی بحرانی^{۱۱}: شرط سوم و نهایی برای برقرار ماندن حالت ابررسانایی یک ماده، میدان مغناطیسی اعمال شده به آن است که با B_C نشان داده می‌شود.
- شکل ۲-۲ نشان‌دهنده اندرکنش مرزهای مذکور و تشکیل مثلث ابررسانایی است [۱۷].

^۶ Heike Kamerlingh Onnes

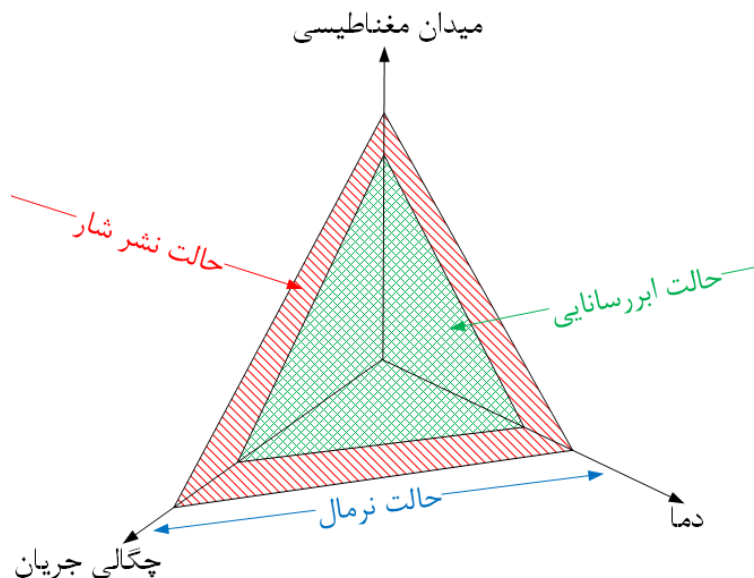
^۷ Van der Waal's Prediction Theory

^۸ Meissner and Ochsenfeld

^۹ Critical Temperature

^{۱۰} Critical Current Density

^{۱۱} Critical Magnetic Field



شکل ۲-۲ مثلث ابرسانایی [۱۷]

۳-۲ انواع مواد ابرسانا

ابرساناها را می‌توان در دسته بندی‌های مختلفی قرار داد که این دسته‌بندی را می‌توان بر اساس دمای بحرانی، مغناطیس‌شوندگی و طول هم‌دوسی^{۱۲} آن‌ها انجام داد. در این پایان‌نامه و با توجه به اهداف مدنظر برای تحقیقات، دسته‌بندی بر اساس دمای بحرانی انجام می‌پذیرد. ابرساناها در این مطالعه به دو دسته ابرساناهای دم‌پایین و ابرساناهای دم‌بالا تقسیم می‌شوند.

• ابرساناهای دم‌پایین^{۱۳}

این دسته از ابرساناها که ابرساناهای پیپارد یا ابرساناهای نرم^{۱۴} نیز نام دارند، دارای یک میدان مغناطیسی بحرانی بوده و اگر دمای عملیاتی آن‌ها از دمای بحرانی آن‌ها کم‌تر باشد، آن‌ها در مد مایسنر هستند. این به آن معنا است که سطح نفوذ خطوط میدان مغناطیسی در آن‌ها بسیار کم و نزدیک به صفر است. این در حالی است که اگر میدان مغناطیسی آن‌ها از میدان بحرانی تعدی کند، آن‌ها به سرعت وارد مد نرمال شده و خطوط شار به درون ماده ابرسانا نفوذ می‌کنند، در نتیجه این امر، این مواد خواص ابرسانایی خود را از دست می‌دهند. این مواد عموماً دمای بحرانی بسیار اندکی را دارا هستند که توجیه‌پذیری اقتصادی آن‌ها در بسیاری از کاربردها غیرممکن است [۱۸]. نخستین ابرسانای دم‌پایین کشف شده جیوه بود که دارای دمای بحرانی ۴٫۲ کلوین بود و پس از آن سرب در دمای بحرانی ۷٫۲ کلوین کشف شد. ابرساناهای دم‌پایین دسته اول از ابرساناها بودند که خواصی مانند مقاومت بسیار اندک و دیامغناطیسی کامل را از خود نشان دادند. این مواد هزینه تولید بسیار اندکی را دارا

^{۱۲} Coherence Length

^{۱۳} Low Temperature Superconductors (LTS)

^{۱۴} Soft Superconductors

هستند اما در مقایسه با ابررساناهای دمابالا، هزینه‌های خنک‌کنندگی زیاد و همچنین تلفات AC قابل توجهی را به خود اختصاص داده‌اند. هزینه زیاد خنک‌کردن آن‌ها ناشی از دمای بحرانی نزدیک به صفر مطلق آن‌ها است و تلفات AC بالای آن‌ها بر اساس نظریه BCS توجیه پذیر است [۱۹]. از مهم‌ترین مواد ابررسانای دمایی می‌توان به NbTi و Nb₃Sn اشاره کرد.

• ابررساناهای دمابالا^{۱۵}

ابررساناهای دمابالا که ابررساناهای سخت نیز نامیده می‌شوند، در برخی خواص فیزیکی و کوانتومی رفتاری مشابه با ابررساناهای دمایی را از خود نشان می‌دهند. با این وجود تفاوت‌هایی نیز در رفتار آن‌ها با ابررساناهای دمایی مشاهده می‌شوند که از مهم‌ترین این تفاوت‌ها می‌توان به رفتار مغناطیسی آن‌ها اشاره کرد. ابررساناهای دمابالا دارای دو میدان بحرانی هستند که به ترتیب H_{C1} و H_{C2} نام دارند. در دمایی کمتر از دمای بحرانی این مواد، اگر میدان مغناطیسی از میدان بحرانی اولیه کمتر باشد، ماده در حالت ابررسانایی قرار دارد، با افزایش میدان از میدان بحرانی اولیه تا حد میدان بحرانی ثانویه، ابررسانا وارد حالتی به نام حالت مختلط می‌شود که در طی آن، خطوط میدان مغناطیسی شروع به نفوذ در ابررسانا کرده ولی مقاومت الکتریکی همچنان اندک است. با روند افزایش میدان فراتر از میدان بحرانی ثانویه، مقاومت ماده نیز به حداکثر میزان خود می‌رسد و ماده وارد فاز نرمال می‌گردد. اصولاً تمام فلزات نادر بر روی کره زمین و ترکیب آن‌ها با اکسید مس منجر به پدیدار شدن ابررساناهایی با دمای بالا و بیشتر از دمای جوش نیتروژن مایع (۷۷ کلوین) می‌شوند [۲۰]. از میان پرکاربردترین این مواد می‌توان به YBCO و BSCCO اشاره کرد.

مهم‌ترین مواد ابررسانا فارغ از نوع آن‌ها در جدول ۱-۲ قابل مشاهده هستند.

جدول ۱-۲ لیست مواد ابررسانای کشف‌شده تاکنون

نام ماده	دمای بحرانی	تاریخ اکتشاف
Hg	۴٫۱	۱۹۱۱
Pb	۷٫۲	۱۹۱۳
Nb	۹٫۲	۱۹۳۰
NbN _{۰٫۸۶}	۱۵٫۲	۱۹۵۰
Nb ₃ Sn	۱۸٫۱	۱۹۵۴
Nb ₃ (Al _{۰٫۷۵} Ge _{۰٫۲۵})	۲۱-۲۰	۱۹۶۶
Nb ₃ Ga	۲۰٫۳	۱۹۷۱
BaxLa ^{۱-x} Cu ^{۱-x} O _y	۲۳٫۲	۱۹۷۳
(La ^{۱-x} Ba ^x) _{۱-x} Cu _{۱-x} O _{۱-x} at ۱ GPa	۳۵-۳۰	۱۹۸۶
Yba ^{۱-x} Cu ^{۱-x} O _{۱-x}	۵۲	۱۹۸۷
Bi ^{۱-x} Sr ^x Ca ^{۱-x} Cu ^{۱-x} O _{۱-x}	۹۵	۱۹۸۷
Tl ^{۱-x} Ba ^x Ca ^{۱-x} Cu ^{۱-x} O _{۱-x}	۱۱۰	۱۹۸۸
Tl ^{۱-x} Ba ^x Ca ^{۱-x} Cu ^{۱-x} O _{۱-x} at ۷ GPa	۱۲۵	۱۹۸۸
HgBa ^{۱-x} Ca ^x Cu ^{۱-x} O _{۱-x} + δ	۱۳۱	۱۹۹۳
HgBa ^{۱-x} Ca ^x Cu ^{۱-x} O _{۱-x} + δ at ۲۰ GPa	۱۳۳	۱۹۹۳
Hg ^{۱-x} Pb ^x Ba ^{۱-x} Ca ^x Cu ^{۱-x} O _{۱-x}	۱۵۵	۱۹۹۳
HgBa ^{۱-x} Ca ^x Cu ^{۱-x} O _{۱-x} + δ at ۳۰ GPa	۱۳۳	۱۹۹۴
MgB ₂	۳۹	۲۰۰۱

ابررساناهای دمای محیط-گرم بعدی

نزدیک ۲۵ سانتی‌گراد

نامشخص

^{۱۵} High Temperature Superconductors (HTS)

۲-۴ مواد ابررسانای دما بالا

در سال ۱۹۷۵ در گزارشی مطرح گردید که ابررسانایی در دمای ۱۳ کلوین برای ماده $\text{BaPb}_{(1-x)}\text{Bi}_x\text{O}_3$ مشاهده شده است [۲۱]. این گزارش سرآغازی در تحقیق بر روی ابررساناهای دما بالای اکسیدی بود. ۱۱ سال پس از این گزارش و در سال ۱۹۸۶، بدنورز^{۱۶} و مولر^{۱۷} ماده ابررسانایی را با دمای بحرانی ۳۵ کلوین ارائه دادند که این ماده دارای ساختار LaBaCuO_x بود. این ماده به عنوان اولین ابررسانای دما بالا قلمداد شد و توانست توجه بسیاری را به خود معطوف سازد [۴]. یک سال پس از آن و با تحقیقات گسترده‌تر در این زمینه، ابررسانایی با ساختار $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ کشف شده که دمای گذار آن (دمای بحرانی) حدود ۹۰ کلوین بود [۲۲]. این ساختار به عنوان یکی از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین نوع از ابررساناهای دما بالا شناخته شد که با توجه به میدان مغناطیسی بحرانی بالا، دمای بحرانی مناسب و تلفات ac اندک، توجیه‌پذیری اقتصادی و فنی بسیار مناسبی را جهت به‌کارگیری در سیستم‌های جریان و میدان بالا فراهم کرد. با این وجود تحقیقات برای کشف مواد جدیدتر نیز ادامه داشت و موادی مبتنی بر بیسموت^{۱۸} و جیوه نیز پدیدار شدند که دارای دمای بحرانی بالاتری نسبت به مواد مبتنی بر ایتیریوم^{۱۹} بودند، با این حال از دیدگاه مغناطیسی و تلفات ac هم‌چنان مواد مبتنی بر ایتیریوم برتری خاصی از خود نشان دادند [۲۳].

پس از کشف ابررساناهای دما بالا و به دلیل تفاوت در رفتار الکترومغناطیسی آن‌ها، این مواد به دو دسته تقسیم شدند. ابررساناهای دما بالای نسل اول^{۲۰} و ابررساناهای دما بالا نسل دوم^{۲۱}.

۲-۴-۱ ابررساناهای دما بالای نسل اول

ابررساناهای دما بالای نسل اول به موادی اطلاق می‌شود که بر پایه بیسموت بوده و دارای ساختار شیمیایی $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{O}_{10}$ و دمای بحرانی ۱۱۵ کلوین هستند که میدان مغناطیسی بحرانی ثانویه آن‌ها در دمای ۴٫۲ کلوین حدود ۱۰۰ تسلا است. ساختار این مواد جهت استفاده در کاربردهای مقیاس عظیم به صورت غشایی بوده که عموماً توسط روش پودر درون لوله^{۲۲} به دست می‌آید. اطلاعات بیشتر در مورد این روش در [۲۴] قابل مشاهده است. ساختار غشایی یک نوار ابررسانای نسل اول در شکل ۲-۳ قابل مشاهده است.

^{۱۶} J.G. Bednorz

^{۱۷} K.A. Müller

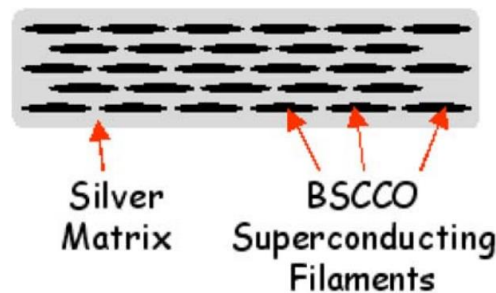
^{۱۸} Bismuth

^{۱۹} Yttrium

^{۲۰} 1G HTS

^{۲۱} 2G HTS

^{۲۲} Powder In Tube (PIT)



شکل ۲-۳ ساختار غشایی ابررساناهای دما بالای نسل اول [۲۵]

۲-۴-۲ ابررساناهای دما بالای نسل دوم

ابررساناهای نسل دوم عموماً موادی هستند که مبتنی بر فلزات کم‌یاب سطح زمین هستند که از میان آن‌ها می‌توان به ایتیریوم و گادولینیوم^{۲۳} اشاره کرد. این دسته از ابررساناها دارای دمای بحرانی کمتری از ابررساناهای نسل اول هستند ولی با این وجود مشخصه مغناطیسی بهتری را از خود نشان می‌دهند. روش‌های مختلفی برای ساخت آن‌ها وجود دارد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۱۸]:

- ته‌نشینی پرتو یونی تقویت شده^{۲۴}
- لایه بافت‌دار شده توسط نور دو محوری^{۲۵}
- ته‌نشینی بستر مایل^{۲۶}

با اعمال هر یک از این روش‌ها به مواد ابررسانای نسل دوم، نوارهای ابررسانایی پدیدار می‌شوند که ساختار آن‌ها در شکل ۲-۴ نشان داده شده است.



شکل ۲-۴ ساختار نوازی یک ابررسانای نسل دوم

هر یک از این لایه‌ها دارای وظایف مهمی در نوارهای ابررسانای نسل دوم هستند که عبارت‌اند از:

^{۲۳} Gadolinium

^{۲۴} Ion beam assisted deposition (IBAD)

^{۲۵} Rolling-assisted biaxially textured substrate (RABiTS)

^{۲۶} Inclined substrate deposition (ISD)

- لایه تثبیت‌کننده^{۲۷}: این لایه معمولاً از جنس هادی‌های معمولی مانند مس و آلومینیوم ساخته می‌شود و وظیفه اصلی آن عبور جریان خطا از نوار ابررسانا در حالت خطا است ولو این که در حالت عادی جریانی به دلیل مقاومت بالا در مقایسه با لایه ابررسانا از آن عبور نمی‌کند [۲۶].
- لایه غلاف نقره‌ای: همانطور که از اسم این لایه مشخص است جنس آن از نقره می‌باشد و مهم ترین وظیفه آن محصور کردن میدان مغناطیسی و دمایی ایجاد شده در نوار ابررسانا است تا از آسیب زدن به غشاء ابررسانا جلوگیری کند [۲۷].
- لایه ابررسانا: اصلی‌ترین وظیفه این لایه عبور جریان در حداقل تلفات و مقاومت است. این لایه به منظور اصلی‌ترین لایه در کابل‌های ابررسانا برای هدایت جریان و در نتیجه انتقال توان به کار می‌روند [۲۸].

با پدیدار شدن نوارها و غشاء^{۲۸}های ابررسانا، کاربرد این مواد با افزایش چشم‌گیری روبرو شد که در این میان مهندسين و محققين سیستم‌های قدرت سعی کردند تا با استفاده از این مواد، عملکرد تجهیزات شبکه قدرت را بهبود بخشیده و بر مشکلات موجود در آن فائق آیند. مهم‌ترین تجهیزات سیستم‌های قدرت که از مواد ابررسانا استفاده می‌کنند عبارت‌اند از، کابل‌های ابررسانا، ماشین‌های ابررسانا، ترانسفورمرهای ابررسانا، ذخیره سازهای انرژی الکترومغناطیسی ابررسانا و محدودسازهای جریان خطای ابررسانا.

۲-۵ کابل‌های ابررسانا

کابل‌های ابررسانا قابلیت انتقال و توزیع توان در سطح ولتاژی بسیار کم‌تر از سیستم‌های انتقال عادی را دارا هستند. در این کابل‌ها، نوارهای ابررسانا به عنوان اصلی‌ترین عنصر انتقال توان عملکرد داشته و قادر هستند در سطح جریانی بسیار بالاتر از سیستم‌های کابلی معمولی و یا حتی خطوط هوایی، توان مورد نیاز را انتقال داده یا توزیع نمایند. این کابل‌ها در ولتاژی برابر با سیستم‌های عادی توانی حدود ۵ تا ۱۰ برابر آن‌ها را انتقال داده که این امر در کشورها و شهرهایی که محدودیت فضای هوایی و زمینی وجود دارد بسیار سودمند است. این کابل‌ها در آینده‌ای نزدیک در سیستم‌های قدرت هوشمند، در اتصال تولیدات تجدیدپذیر به شبکه اصلی، در سیستم‌های هوایی، فضایی، کشتیرانی و حتی نظامی کاربرد وسیعی پیدا خواهند کرد [۲۹].

^{۲۷} Stabilizer Layer

^{۲۸} Filament

۲-۶ دسته‌بندی کابل‌های ابررسانا

به منظور شبیه‌سازی کابل ابررسانا، در این بخش به تشریح اجزاء مختلف یک کابل ابررسانا و چگونگی رفتار الکتریکی، مغناطیسی و حتی ترمودینامیکی آن‌ها پرداخته شده است. به این منظور در این بخش از پایان‌نامه اجزاء مختلف کابل به تفصیل مورد بحث قرار گرفته و روش‌های مختلف جهت پیش‌بینی رفتار آن‌ها بیان گردیده است. سپس ساختار کابل‌ها از چند جهت مورد بررسی قرار گرفته و در مورد کلاس‌بندی‌های مختلف کابل‌ها سخن گفته شده است.

انتخاب طراحی مناسب برای کابل ابررسانای یکی از مهم‌ترین گام‌های شبیه‌سازی است. این طراحی باید به گونه‌ای انتخاب شود که با مقادیر و استانداردهای واقعی مغایرت نداشته باشد. به طور کلی طراحی کابل ابررسانا را می‌توان از دیدگاه‌های مختلفی مورد بررسی قرار داد که از میان آن‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۲۹].

- طراحی الکتریکی کابل ابررسانا: این طراحی شامل انتخاب نوع، جنس و شعاع لایه‌های هادی، نگه‌دارنده، عایقی، نیمه هادی و محافظ^{۲۹} است. در این حالت مواردی همچون جریان بحرانی، میدان الکتریکی که موجب ایجاد شکست در عایق کابل شده است، کلاس ولتاژی کابل، طول کابل و ... در نظر گرفته می‌شوند.
- طراحی مغناطیسی کابل ابررسانا: در این حالت با توجه به روابط ریاضی موجود و همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها، میدان مغناطیسی بحرانی، تعداد نوارها در هر فاز، فاصله بین آن‌ها، گام پیچش آن‌ها و مواردی از این قبیل انتخاب می‌شوند.
- طراحی حرارتی: در این حالت ملاحظات ترمودینامیکی کابل مانند دمای بحرانی، رسانایی حرارتی کابل، نوع سیستم خنک کننده، ایستگاه‌های تغذیه و شارژ ماده خنک‌کننده انتخاب می‌شوند.

۲-۶-۱ ساختار الکتریکی-مغناطیسی کابل‌های ابررسانا

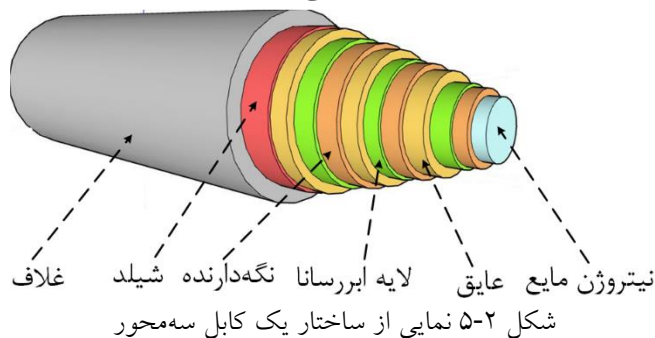
کابل‌های ابررسانا دارای ساختارهایی متنوع هستند و هریک مزایا و معایب خاص خود را دارا هستند. هدف از نگارش این بخش نگاهی اجمالی به انواع کابل‌های ابررسانا و بررسی مزایا و معایب هر یک است. یکی از روش‌هایی که کابل‌های ابررسانا را می‌توان بر اساس آن تقسیم‌بندی کرد، دسته‌بندی بر اساس ساختار هادی‌های آن‌ها است. بنابراین کابل‌های ابررسانا دارای ساختارهای مرسوم زیر هستند.

^{۲۹} Shield

۲-۶-۱-۱ کابل‌های ابررسانای دما بالای سه‌محور^{۳۰}

در ساختار سه‌محور هر فاز توسط یک لایه عایقی که معمولاً PPLP است، از فاز دیگر جدا شده و این لایه‌های عایقی معمولاً در یک ماده خنک‌کننده نیز غوطه‌ور هستند. از مزایای ساختار سه‌محور می‌توان به این موضوع اشاره کرد که به دلیل قرارگیری هادی‌ها به روی یک‌دیگر، شعاع نهایی کابل نسبت به ساختار هم‌محور بسیار کمتر شده و این موضوع از دیدگاه اقتصادی بسیار با صرفه است. همچنین میدان مغناطیسی ایجاد شده در این کابل نسبت به ساختار هم‌محور، کمتر است و به همین دلیل عموماً از مس برای لایه شیلد آن استفاده می‌کنند که توجیه اقتصادی دیگری برای این نوع کابل است. از دیگر مزایای این نوع کابل، کاهش سطح لازم برای خنک کردن است که منجر می‌گردد از لحاظ فنی دارای بازده الکتریکی بالاتری باشد. از معایب این ساختار می‌توان به توزیع جریان نامتعادل در هر فاز اشاره کرد که ناشی از تفاوت در شعاع هر فاز است. این نامتعادلی در توزیع جریان منجر به تلفات اضافه، میدان ناشی بالا و همچنین کاهش کیفیت توان می‌گردد. با تنظیم مناسب زاویه پیچش و گام پیچش می‌توان بر این مشکلات غلبه کرد [۳۰].

شکل ۲-۵ یک ساختار کابل سه‌محور را نمایش می‌دهد.

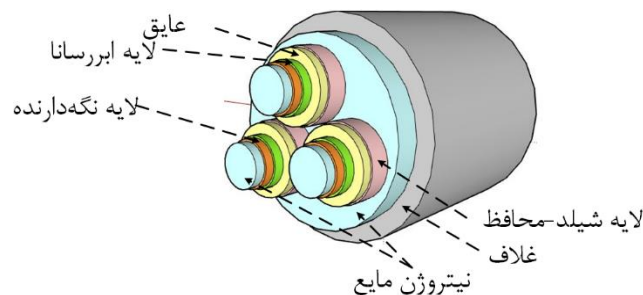


۲-۶-۱-۲ کابل‌های ابررسانای دما بالای هم‌محور^{۳۱}

در این نوع ساختار بر خلاف ساختار سه‌محور، سه فاز دارای شعاع‌های یکسانی هستند و نوارهای ابررسانا، بر روی سه نگه‌دارنده جداگانه پیچیده شده‌اند. از مزایای این کابل می‌توان به توزیع جریان یکنواخت ناشی از یکسان بودن شعاع هسته‌ها اشاره کرد که مواردی همچون کاهش کیفیت توان، میدان ناشی زیاد، دشواری تنظیم زاویه‌های پیچش و گام پیچش در این نوع کابل جایی ندارند. با این وجود به دلیل جدا بودن سه فاز از یک دیگر، میدان مغناطیسی آن نسبت به حالت سه‌محور بیشتر بوده و نیاز است تا از ابررسانا برای لایه شیلد استفاده شود که این امر منجر به افزایش هزینه‌های ناشی از ساخت این نوع کابل می‌گردد. همچنین شعاع بیرونی و نهایی این کابل‌ها اصولاً بسیار بزرگ‌تر از شعاع کابل‌های سه‌محور است [۳۱]. شکل ۲-۶ نمایی از کابل ۲۲,۹ کیلوولت مورد تست در شبکه اینچئون کره جنوبی را نشان می‌دهد که دارای ساختار هم‌محور است.

^{۳۰} Triaxial HTS Cable

^{۳۱} Coaxial HTS Cable



شکل ۶-۲ ساختار هم‌محور کابل ۲۲,۹ کیلوولت مورد استفاده در شبکه کره جنوبی

۲-۶-۲ ساختار مکانیکی کابل‌های ابررسانا

یکی دیگر از روش‌های دسته‌بندی کابل‌های ابررسانا، بر اساس نحوه قرارگیری و آرایش نوارهای ابررسانا است. از طریق این روش‌ها می‌توان توسط نوارهای ابررسانا، کابل‌هایی با استقامت مکانیکی متفاوت ساخت.

۲-۶-۲-۱ کابل هادی پوشانیده شده به روش روبل^{۳۲}

تاریخچه این ساختار به قبل از کشف ابررسانایی باز می‌گردد. این ساختار نخستین بار توسط مهندس آلمانی لوودویگ روبل^{۳۳} مطرح شد و توانست به عنوان راه‌حلی برای کاهش تلفات AC، در ماشین‌های الکتریکی بیان گردد. در زمینه ابررسانایی کاربردی با افزایش میدان مغناطیسی و یا افزایش جریان، نیاز به ساختاری بود که علاوه بر لایه لایه بودن، دارای جابه‌جایی فاز نیز باشد تا سیستم ابررسانا در حداقل تلفات ac عملکرد داشته باشد. این ساختار همان ساختار پیشنهادی روبل بود که در نتیجه آن شرکت‌های تولیدکننده ادوات ابررسانایی، از این ساختار برای تولیدات خود استفاده کردند. کابل‌های ابررسانا نیز از این قاعده مستثنی نبوده و آن‌ها نیز از این ساختار برای تولید کابل‌های ابررسانایی با جریان بسیار بالا استفاده کردند [۳۲]. شکل ۷-۲ ساختار یک کابل Roebel را نشان می‌دهد.



شکل ۷-۲ نمایی از یک کابل روبل [۳۲]

^{۳۲} Roebel Assembled Coated Conductor (RACC) cables

^{۳۳} Ludwig Roebel

۲-۲-۶-۲ کابل هادی پوشانیده شده به روش رادرفورد^{۳۴}

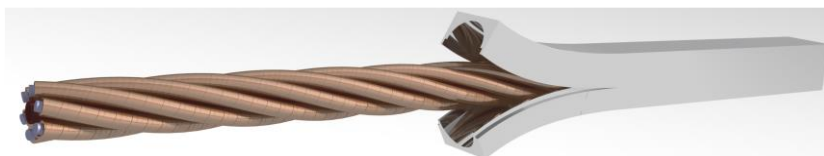
این روش از محدود روش‌های مناسب برای تولید کابل‌های ابررسانا توسط نوارهای ابررسانای دما بالا است. در سال ۲۰۰۶ یک کابل ۱۲ میلی‌متری از ۱۶ نوار ابررسانای پانچ‌شده، ساخته شد. به طور کلی این روش نه تنها با پانچ کردن نوارهای ابررسانا بر روی یک دیگر، بلکه با ترانهاده کردن نوارها در طول کابل باعث کاهش تاثیر میدان مغناطیسی و دما بر توزیع جریان بحرانی می‌شود که این امر ظرفیت جریانی کابل را افزایش می‌دهد. این کابل‌ها در موسسه KIT آلمان مورد استفاده و ساخت قرار می‌گیرند [۳۳]. شکل ۸-۲ نمایی از این نوع قرارگیری نوار را نمایش می‌دهد.



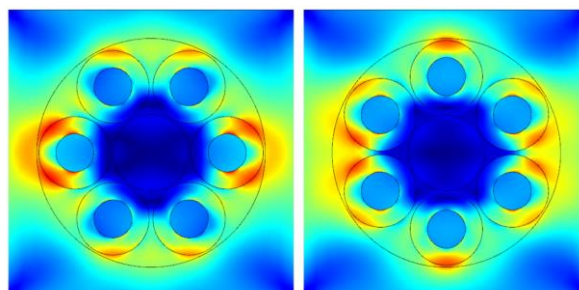
شکل ۸-۲ نحوه قرارگیری نوارهای ابررسانا به روش رادرفورد [۳۳]

۲-۲-۶-۳ کابل با هادی‌هایی بر روی هسته گرد^{۳۵}

در این کابل‌ها تعدادی نوار ابررسانا بر روی نگه‌دارنده‌هایی دوار و جداگانه با زاویه‌ای بین ۳۰ تا ۶۰ درجه پیچیده شده‌اند و هر لایه جهت پیچشی معکوس با لایه قبلی دارد. از مزایای این امر استفاده از نگه‌دارنده‌هایی با شعاع بسیار کمتر است که در نتیجه آن‌ها حرارت ناشی از لایه نگه‌دارنده به شدت افت پیدا می‌کند [۳۴]. این نوع کابل پیشتر در آمریکا و در دانشگاه کلورادو مورد بهره‌برداری و تست قرار گرفته است [۳۵]. شکل ۹-۲ نمایی از این نوع کابل را نمایش می‌دهد. شکل ۱۰-۲ نیز نمایی از یک شبیه‌سازی اجزاء محدود این نوع کابل را نشان می‌دهد.



شکل ۹-۲ نمایی از یک کابل CORC [۳۴]



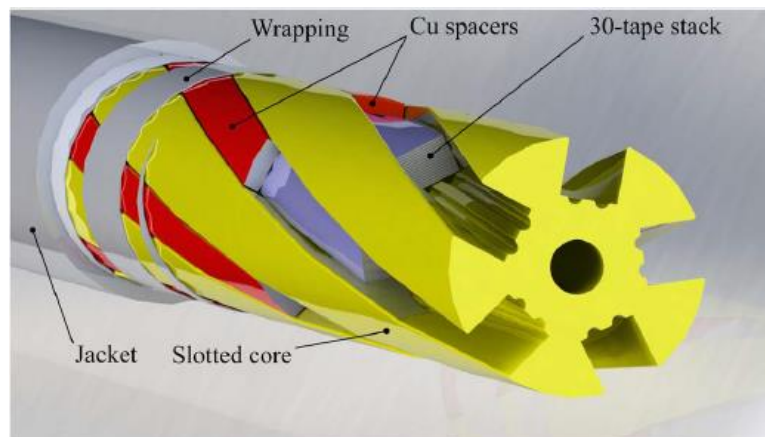
شکل ۱۰-۲ نمایی از مدل اجزاء محدود یک کابل CORC [۳۵]

^{۳۴} Coated Conductor Rutherford Cables (CCRC)

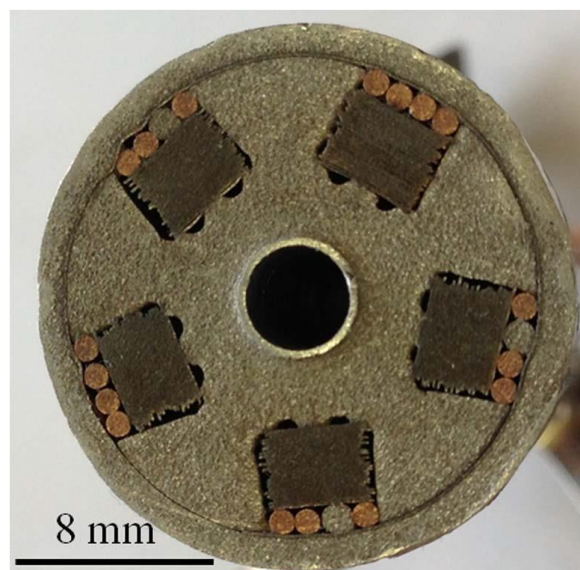
^{۳۵} Conductor on Round Core (CORC) cables

۲-۶-۲-۴ کابل‌های دسته نوارهای پیچیده شده^{۳۶}

این کابل‌ها دارای هسته‌ای شکاف‌دار هستند که اصولاً از جنس مواد غیرهادی است. این شکاف‌ها در طول کابل با زاویه‌ای چرخش می‌کنند و ثابت نیستند. در درون این شکاف‌ها نوارهای ابررسانا به صورت چندلایه روی هم قرار دارند و انتقال جریان را در حین شرایط عادی انجام می‌دهند. در انتهای بالایی این شکاف‌ها، جداکننده‌های مسی قرار دارند که هم وظیفه فاصله‌گذاری را دارا هستند و هم به عنوان مسیری انحرافی برای انتقال جریان عبور می‌کنند. این کابل‌ها عموماً در آزمایش‌های هسته‌ای و یا آزمایش‌های مربوط به ذوب مواد استفاده شده و کمتر در سیستم قدرت کاربرد دارند. این کابل‌ها توسط سازمان تکنولوژی‌های نوین ایتالیا مورد بهره‌برداری و ساخت قرار گرفته‌اند [۳۶]. شکل ۱۱-۲ نمایی از این کابل را که در محیط ANSYS شبیه‌سازی شده است نشان می‌دهد و شکل ۱۲-۲ یک نمونه واقعی از این کابل را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۱-۲ نمایی از یک کابل دسته‌نوار پیچیده شده شبیه‌سازی شده در ANSYS [۳۶]

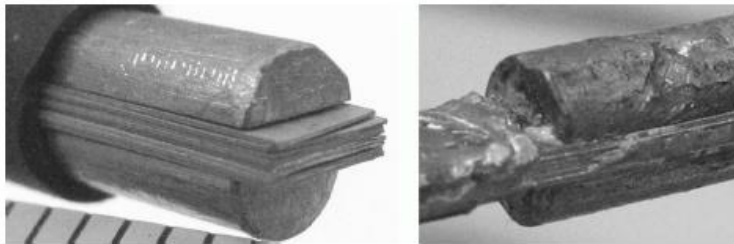


شکل ۱۲-۲ نمایی از کابل TSTC واقعی [۳۶]

^{۳۶} Twisted Stacked-Tape Cables (TSTC)

۲-۶-۵ رشته‌های دوار تشکیل شده از نوارهای هادی‌های گرد^{۳۷}

در این نوع کابل‌ها، نوارهای ابررسانا در میان دو نیم دایره توپر از جنس مس قرار می‌گیرند و تشکیل یک هادی می‌دهند. این نیم‌کره‌های مسی برای محافظت مکانیکی و الکتریکی نوارها هستند. در اثر کشش و پیچش تمام بار را نیم‌کره‌های مسی تحمل کرده و آسیبی به نوار ابررسانا نمی‌رسد. همچنین در صورت وقوع خطا، جریان از این لایه‌ها عبور کرده و لایه ابررسانا آسیبی نمی‌بیند. این کابل‌ها معمولاً برای ساخت ماشین‌های ابررسانا و آهن‌رباهای بزرگ ابررسانا کاربرد دارند و کم‌تر برای انتقال توان به کار می‌روند [۳۷]. شکل ۲-۱۳ نمایی از این نوع کابل را نشان می‌دهد. این کابل بیشتر در موسسه EPFL سوئیس به کار برده می‌شود.



شکل ۲-۱۳ نمایی از کابل RSCCCT [۳۷]

۲-۶-۳ ساختار عایقی کابل‌های ابررسانا

در این بخش ساختارهای عایقی کابل‌های ابررسانای دمابالا مورد بررسی و تفحص قرار گرفته است. این مطالعه از آن جهت مهم است که در حین انتخاب نوع کابل و طراحی آن، جهت انتخاب لایه عایقی و نوع آن باید به مواردی خاص توجه کرد که در این بخش سعی بر ارائه آن شده است.

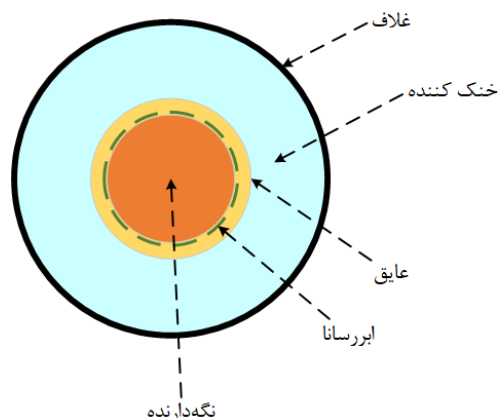
۲-۶-۳-۱ کابل‌های ابررسانا با عایق سرد^{۳۸}

در کابل‌های ابررسانا با عایق سرد، همانند آنچه در شکل ۲-۱۴ نشان داده شده است، لایه عایقی در درون سرماپا^{۳۹} قرار گرفته است. در این حالت عایق حرارتی کرایوستات (سرماپا) نیز مانند یک عایق الکتریکی اضافی عملکرد دارد. با این وجود محیطی که ماده خنک‌کننده موظف به تنظیم و کم کردن دمای آن است بسیار بزرگ بوده و همچنین ممکن است در حین خطا، در عایق حباب ایجاد گردد که باعث تخلیه‌های جزئی در عایق کابل می‌شود. با این وجود، در این نوع عایق جریان نشتی به لایه سرماپا بسیار کم بوده و در نتیجه آن تلفات بسیار اندک است. از مزایای دیگر این سیستم کاهش اندوکتانس و کاپاسیتانس سیستم است. همچنین عایق مورد استفاده در این نوع کابل، از جنس عایق‌های معمولی یا همان PPLP است [۳۸].

^{۳۷} Round Strands Composed of Coated Conductor Tapes (RSCCCT)

^{۳۸} HTS Cable with Cold Dielectric

^{۳۹} Cryostat

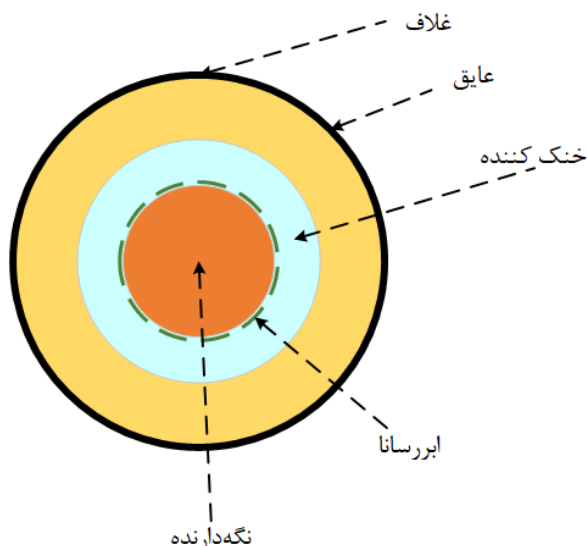


شکل ۲-۱۴ نمایی از یک کابل ابرسانا با عایق سرد [۳۸]

۲-۳-۶-۲ کابل‌های ابرسانا با عایق گرم^{۴۰}

در این حالت لایه هادی و نگهدارنده کابل در درون ماده خنک‌کننده قرار دارند و پس از آن کرایوستات و عایق حرارتی قرار گرفته‌اند. به دور این لایه‌ها، عایق و سپس لایه شیلد قرار گرفته است. در این حالت باری که سیستم خنک‌کننده باید تامین کند به مراتب کمتر از حالت عایق سرد است و این به دلیل محیط هندسی کمتر لایه خنک‌کننده است. در این نوع کابل پس از وقوع خطا، احتمال پدیدار شدن حباب در عایق وجود ندارد. از مزایای دیگر این سیستم، کاهش دما پس از وقوع خطا به صورت بسیار سریع است. در این نوع کابل باید از عایق‌هایی خاص استفاده کرد که اصولاً باعث افزایش قیمت تمام شده کابل می‌شوند. همچنین اصولاً اندوکتانس و کاپاسیتانس آن‌ها به دلیل دور بودن لایه عایقی و حرارتی بسیار بیشتر از حالت عایق سرد است که ممکن است به اختلال عملکرد کابل منجر شود [۳۹].

شکل ۲-۱۵ نمایی از این نوع ساختار عایقی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۵ نمایی از یک کابل ابرسانا با عایق گرم [۳۸]

^{۴۰} HTS Cable with Warm Dielectric

۷-۲ روش‌های مدل‌سازی کابل‌های ابررسانا

از آن جایی که تحلیل رفتار یک کابل و نوار ابررسانا تحت حالات مختلف امری مهم و ضروری است، روش‌های مختلفی برای مدل‌سازی رفتارهای الکتریکی، حرارتی و مکانیکی برای موارد ذکر شده وجود دارد. از میان این روش‌ها می‌توان به روش‌های زیر اشاره کرد.

- روش‌های مبتنی بر اجزاء محدود^{۴۱}: در این روش‌ها اصولاً با استفاده از معادلات ماکسول، قانون القای فارادی و قوانینی مانند آن‌ها به مدل‌سازی و تشبیه رفتار یک کابل ابررسانا پرداخته می‌شود. این روش‌ها قابلیت این را دارا هستند که خوردگی، تغییر شکل و سایر ملاحظات مغناطیسی-مکانیکی را بدون هیچ پیچیدگی در مدل‌سازی، تعبیه کرده و همچنین به راحتی می‌توانند در کنار تحلیل‌های الکتریکی به تحلیل‌های مکانیکی و حرارتی نیز بپردازند.
- روش‌های مبتنی بر مدل‌های مداری^{۴۲}: در این روش‌ها، مدل‌سازی دقیق هر المان و لایه از کابل یا نوار ابررسانا به صورت یک المان مداری مانند مقاومت، خازن، سلف و یا ترکیبی از آن‌ها امری بسیار مهم است تا بتوان به مدلی ساده، صحیحی دست پیدا کرد. اصولاً تحلیل و بررسی دما، خوردگی و مواردی غیرالکتریکی در تحلیل‌های مدار معادل امری غیرممکن و یا بسیار دشوار است که با پیچیدگی‌های زیادی روبرو است.

۱-۷-۲ مدل‌های مداری

مدل‌های مداری قادر هستند تا با فراهم کردن یک شبکه تست گسترده و پیچیده، درک بهتری از رفتار کابل‌های ابررسانا را ارائه دهند. عموماً بررسی و تحلیل مواردی همچون تاثیر عوامل شبکه بر کابل‌های ابررسانا، بررسی شاخص‌های شبکه تحت حضور کابل‌های ابررسانا، بررسی حالت گذرا و مشخصه خطای کابل‌های ابررسانا توسط مدل‌های مداری انجام‌پذیر است. به طور کلی می‌توان مدل‌های مداری را به صورت زیر دسته‌بندی کرد.

۱-۱-۷-۲ مدل‌های مداری جهت حصول پارامترهای کابل

در این مدل‌ها امپدانس، کاپاسیتانس و مقاومت الکتریکی کابل برای هر لایه قابل محاسبه هستند. همچنین با اعمال صحیح معادلات حاکم بر این مدل‌ها، توزیع جریان در لایه‌های مختلف کابل مانند لایه‌های هادی، نگه‌دارنده، شیلد و حتی عایقی نیز در دسترس است. همچنین این مدل‌ها قدر هستند تا توزیع جریان را در لایه‌های مختلف نوار ابررسانا ارائه دهند [۴۰].

^{۴۱} Finite Element based Methods

^{۴۲} Equivalent Circuit Model

۲-۷-۱-۲ مدل‌های مداری جهت تحلیل حالت گذرای کابل‌های ابررسانا

در این دسته از مدل‌های مداری کابل‌های ابررسانا می‌توان حالت گذرای این کابل‌ها را به خوبی و با دقتی مناسب مورد مطالعه و بررسی قرار داد. از این جهت این مدل‌های مداری در تحلیل خطا و حالت گذرای کابل‌های ابررسانا حائز اهمیت زیادی بوده و به عنوان یکی از مهم‌ترین کاربردهای مدل‌های مداری شناخته می‌شوند. مدل‌های حالت گذرا را می‌توان در دسته‌های زیر قرار داد.

پس از مدل‌سازی دقیق مداری یک کابل ابررسانا و اتصال آن به شبکه مورد نظر، می‌توان مشخصه خطای شبکه در حضور کابل ابررسانا را مورد بررسی قرار داد. در نتیجه این دست از مدل‌سازی‌ها، جریان خطا، اضافه ولتاژ ناشی از خطا و تحلیل سطح استقامت عایقی کابل می‌شوند [۴۱]. همچنین می‌توان نوع خطا، محل وقوع آن و سایر پارامترهای مربوط به خطا در یک شبکه را در حضور کابل‌های ابررسانا مورد بررسی قرار داد. این نوع مدل‌سازی تنها توسط روش‌های مداری قابل انجام بوده و عموماً در روش‌های مبتنی بر اجزاء محدود به سختی قابل پیاده‌سازی هستند. روش‌های موجود برای مکان‌یابی خطا در حضور کابل‌های ابررسانا عموماً روش‌های مرسوم موجود بوده که با توجه به مشخصه خطای کابل‌های ابررسانا بهبود یافته‌اند [۴۲]. از سویی دیگر با در دست داشتن مدل مداری کابل و اتصال آن به مدل مداری شبکه قدرت تحت مطالعه و تحت خطا، می‌توان مواردی مانند تاثیر کابل‌های ابررسانا بر سیستم حفاظتی [۴۳، ۴۴]، قیود اقتصادی سیستم [۴۵]، نتایج حاصل از پخش بار [۴۶]، کیفیت توان سیستم [۴۷] و هماهنگی عایقی سیستم [۴۸] را به دست آورد. نهایتاً با اعمال این نوع مدل‌سازی‌ها می‌توان مواردی هم‌چون نرخ افزایش دما در اثر خطا [۴۹]، نیروی لورنتز اعمالی به کابل در حین خطا [۵۰]، فرآیند بازیابی کابل [۴۹] و رفتار مقاومتی کابل در حین خطا و پس از آن [۵۱] را مشاهده کرد. مدل‌های ارائه شده برای کابل‌های ابررسانا، هر یک دارای نواقصی هستند که این پایان‌نامه سعی در برطرف کردن تمامی این نواقص و نقاط ضعف دارد. مهم‌ترین مدل‌های ارائه شده برای کابل‌های ابررسانا در جدول ۲-۲ ارائه شده‌اند.

۲-۸ جمع‌بندی

در این بخش سعی بر آن شد تا خواننده پس از ادراک مفاهیم اولیه ابررسانایی، با انواع و ساختار کابل‌های ابررسانا آشنا بشود. پس از آن، به بیان مفاهیم و دیدگاه‌های مختلف در مدل‌سازی پرداخته شد. در این قسمت بیان گردید که جهت حصول مشخصه یک کابل ابررسانا، مدل‌های مداری و اجزاء محدود در دسترس هستند. پس از آن مزایا و معایب مدل مداری بررسی گردید و نواقص موجود در سایر مدل‌های ارائه شده برای کابل‌های ابررسانا بیان شد.

جدول ۲-۲ بررسی مدل‌های ارائه شده در مقالات معتبر در زمینه مدل‌سازی کابل‌های ابرسانا

شماره مرجع	مشخصات کابل	نتایج حاصل	نقاط ضعف
[۳۰]	- ۲۲,۹ کیلوولت - ۱,۵ کیلو آمپر - ۲ کیلومتر	- تلفات AC کل: ۱۰ وات بر متر - حداکثر جریان خطا: ۷,۸ کیلوآمپر - حداکثر دمای لایه ابرسانا: ۷۴ کلوین - حداکثر مقاومت کابل: ۰,۱۸ اهم بر متر	- عدم بررسی تغییرات جریان خطا و نوع خطا بر رفتار گذرای کابل ابرسانا - عدم بررسی نیروی لورنتز در حالت خطا برای کابل ابرسانا - خلاء نتایج برای دمای لایه نگه‌دارنده - عدم بررسی تغییرات جریان بحرانی و میزان شاخص
[۴۹]	- ۶۶ کیلوولت - ۵ کیلوآمپر	- جریان خطا: ۳۱,۵ کیلوآمپر - نیروی لورنتز: ۱۵ کیلوپاسکال	- عدم بررسی تغییرات جریان خطا و نوع خطا بر رفتار گذرای کابل ابرسانا - عدم مدل‌سازی رفتار الکتریکی، حرارتی و مغناطیسی و تنها بررسی مکانیکی کابل ابرسانا - عدم بررسی تغییرات جریان بحرانی و میزان شاخص
[۴۸]	- ۱۰ کیلوولت - ۲۰۰ آمپر	- حداکثر جریان خطا: ۴۰ کیلوآمپر - حداکثر دمای لایه ابرسانا: ۲۱۰ کلوین - زمان بازیابی الکتریکی: ۱۲۰ ثانیه - زمان بازیابی حرارتی: ۸ ساعت - حداکثر مقاومت لایه ابرسانا: ۰,۹ اهم بر متر	- عدم بررسی تغییرات جریان خطا و نوع خطا بر رفتار گذرای کابل ابرسانا - عدم بررسی نیروی لورنتز در حالت خطا برای کابل ابرسانا - خلاء نتایج برای دمای لایه نگه‌دارنده - عدم بررسی مغناطیسی کابل ابرسانا در حین خطا

فصل ۳ مدل سازی مبتنی بر مدل مداری کابل ابررسانای سه محور

در این بخش به بررسی رفتار الکترومغناطیسی و حرارتی کابل ابرسانای تحت مطالعه و نحوه مدل کردن آن پرداخته می‌شود. در ابتدای این فصل چگونگی طراحی یک کابل ابرسانا مورد بررسی قرار گرفته و پس از آن طراحی کابل مورد استفاده در این پایان‌نامه بیان شده است. در نهایت مدل‌سازی مداری کابل ابرسانا به همراه فرمول‌بندی ارائه می‌گردد.

۳-۱ گام‌های طراحی یک کابل ابرسانا

طراحی کابل ابرسانای دمابالا یکی از مهم‌ترین قسمت‌های شروع مطالعه در این زمینه است. در ابتدا باید یک کلاس ولتاژی مناسب از کابل ابرسانا را انتخاب کرده و سپس به بررسی رفتار لایه‌های مختلف آن پرداخته شود. به منظور انجام این هدف مراحل زیر در نظر گرفته شده‌اند.

۳-۱-۱ لایه نگه‌دارنده^{۴۳}

لایه نگه‌دارنده اصولاً به عنوان مسیری انحرافی برای عبور جریان خطا استفاده می‌شود. این لایه عموماً از جنس مس یا آلیاژهای آن بوده و در حین خطا مقاومت آن از مقاومت لایه ابرسانا (که در اثر عبور خطا افزایش پیدا کرده است) کمتر است. در نتیجه، این امر و به دلیل تمایل عبور جریان از شاخه با مقاومت کمتر، جریان از این لایه، یعنی لایه نگه‌دارنده، عبور می‌کند. این لایه در حین عملکرد در حالت پایدار شبکه، تأثیری بر عبور جریان نداشته و تمام جریان از لایه ابرسانا عبور می‌نماید. این لایه در حین وقوع خطا به دلیل رسانایی حرارتی بالا، یکی از دلایل افزایش دما در کابل است. به‌علاوه از لایه نگه‌دارنده به عنوان محلی برای پیچش نوارهای ابرسانا استفاده می‌شود. شایان ذکر است که این لایه با نوارهای ابرسانا به صورت موازی الکتریکی قرار می‌گیرد [۵۱].

معادلات (۱-۳) و (۲-۳) رفتار مقاومتی-حرارتی لایه نگه‌دارنده مسی را نشان می‌دهد [۵۱].

$$\rho_{cu,j} = (-2.46499 + 0.06351T_j)10^{-9} \quad (1-3)$$

$$r_{DC,j} = \frac{\rho_{cu}}{A_{FE,i}} l \quad (2-3)$$

در این معادلات ρ_{cu} مقاومت مخصوص مس (یا هر فلز دیگری که در نگه‌دارنده استفاده شده است)، T_i دمای لایه نگه‌دارنده λ_m ، A_{FE} سطح مقطع مؤثر لایه نگه‌دارنده، l طول کابل و r_{DC} مقاومت DC لایه نگه‌دارنده است. سطح مقطع مؤثر از معادله (۳-۳) محاسبه می‌شود.

$$A_{FE,j} = \pi (r_j^2 - (r_j^2 - th_j^2)) \quad (3-3)$$

در این رابطه، r_j شعاع لایه نگه‌دارنده و th_j ضخامت آن در هر فاز است. اصولاً ضخامت هنگامی مطرح می‌شود که لایه نگه‌دارنده از یک لوله تو خالی مسی تشکیل شده باشد. اما لایه نگه‌دارنده را می‌توان به

^{۴۳} Former

صورت باندلی از چند سیم مسی نیز در نظر گرفت که در این صورت ضخامت، برابر شعاع این لایه بوده و رابطه (۳-۳) به صورت یک رابطه معمول محیط دایره محاسبه می‌شود. در صورتی که از لوله تو خالی مسی برای این لایه استفاده شود، ضخامت آن با توجه به تعداد نوارهای ابررسانا و ضخامت نوارها، اندازه گیری می‌شود که اصولاً عددی بین یک تا دو میلی متر است [۳۹].

حداقل سطح مقطع لایه نگه‌دارنده از رابطه (۴-۳) به دست می‌آید. منظور از حداقل سطح مقطع، سطحی است که نگه‌دارنده باید داشته باشد تا از وقوع حباب در ماده خنک‌کننده در حین بازگشت از این لایه (به عنوان مسیر بازگشت ماده خنک‌کننده) در هنگام وقوع خطا، جلوگیری شود [۵۲].

$$A_f = \int_{T_n}^{T_{boiling}} c dT \geq \int_0^{\Delta T_f} \frac{I^2}{\sigma A_f} dt \quad (۴-۳)$$

در این رابطه c حرارت مخصوص^{۴۴}، σ هدایت الکتریکی، I جریان خطای عبوری از سیستم و T_n دمای عملیاتی است. با به دست آوردن حداقل سطح مقطع می‌توان حداقل شعاع لازم برای این لایه را نیز محاسبه کرد [۵۲]. با وجود این که شعاع این لایه بسیار به جریان خطای سیستم وابسته است، اما در مراجع [۵۳] و [۵۴] ثابت شده است که یک نگه‌دارنده به مساحت ۴۰۰ میلی‌متر مربع قادر است تا جریان خطای ۶۳٫۵ کیلوآمپر را برای حدود ۰/۶ ثانیه تحمل کند، این در حالی است که در حین وقوع این میزان از جریان خطا، دمای لایه نگه‌دارنده ۲۰ کلوین افزایش پیدا می‌کند.

اکنون با داشتن رابطه‌ای برای محاسبه شعاع لایه نگه‌دارنده، می‌توان مقاومت ac و سایر موارد را محاسبه کرد. معادله (۵-۳) عمق پوستی^{۴۵} را برای مس نشان می‌دهد [۵۱].

$$\delta_i = \sqrt{\frac{\rho_{cu,i}}{\pi f (\mu_r \mu)}} \quad (۵-۳)$$

و با داشتن عمق پوستی، مقاومت ac را می‌توان از رابطه (۶-۳) محاسبه کرد که در آن D قطر لایه نگه‌دارنده است [۵۱].

$$r_{AC,i} = r_{DC,i} \frac{\pi r_i^2}{\pi (D - \delta_i) \delta_i} \quad (۶-۳)$$

با انجام محاسبات اولیه برای لایه نگه‌دارنده، چگونگی انتقال حرارت و اتلاف انرژی در آن مورد بررسی قرار می‌گیرد. معادله (۷-۳) بیان‌کننده رابطه اتلاف انرژی بر حسب ژول در این لایه است [۵۱].

$$\Delta J_i = I_i^2 r_{AC,i} \Delta t \quad (۷-۳)$$

بدیهی است که در حین شرایط عادی و نرمال شبکه، جریانی ناچیز از نگه‌دارنده عبور می‌کند و در نتیجه اتلاف انرژی بسیار اندکی رخ می‌دهد. این در حالی است که در حین وقوع خطا، به دلیل افزایش مقاومت لایه ابررسانا، بیشتر جریان خطا از لایه نگه‌دارنده عبور کرده و این امر موجب افزایش اتلاف انرژی در حین وقوع خطا خواهد شد. علاوه بر اتلاف انرژی، ظرفیت حرارتی حجمی مس به عنوان یک

^{۴۴} Specific Heat

^{۴۵} Skin Depth

عامل مهم در تغییرات دما مطرح است. ظرفیت حرارتی حجمی مس از رابطه (۳-۸) محاسبه می‌شود [۵۱].

$$C_{p,i} = -159.9T_i^2 + 5138.0T_i - 1297000 \quad (۳-۸)$$

در نهایت تغییرات دما در اثر افزایش جریان عبوری از این لایه، از رابطه (۳-۹) محاسبه می‌گردد [۵۱].

$$\Delta T = \frac{\Delta J}{A_{FE,i} \times l \times C_{p,i}} \quad (۳-۹)$$

به طور کلی با داشتن این نه رابطه و آنچه که در این بخش مطرح شده است، می‌توان لایه نگه‌دارنده مناسبی را برای هر نوع کابل ابررسانا، فارغ از شرایط مکانیکی، حرارتی و الکتریکی آن طراحی کرد.

۳-۱-۲ لایه ابررسانا

ابررساناها در کابل‌هایی که از آن‌ها استفاده می‌نمایند، نقش اصلی را در انتقال جریان دارد که تحت شرایط نرمال شبکه حدود ۹۹/۹۹ درصد جریان نامی شبکه از این لایه عبور می‌کند [۵۱]. این لایه از چندین نوار ابررسانای موازی تشکیل شده است که به صورت حلزونی شکل بر روی لایه نگه‌دارنده، پیچیده شده‌اند. ضخامت این لایه برابر است با ضخامت نوار ابررسانای مورد استفاده در کابل. با توجه به نوع نوار مورد استفاده، این پارامتر حدوداً بین ۰/۱ تا ۰/۵ میلی‌متر متغیر است. در اینجا تنها به بیان برخی کمیت‌های مهم از این لایه و رفتار مقاومتی آن تحت افزایش جریان ناشی از خطا پرداخته خواهد شد. شایان ذکر است که یکی از مهم‌ترین عواملی که دامنه جریان خطای رخ داده در سیستم را معین می‌کند، لایه ابررسانا است. این لایه منشاء اصلی تلفات دامنه جریانی در لایه‌های مختلف کابل‌ها هستند که با تنظیم مناسب آن‌ها می‌توان این اثر سوء را کاهش داده و کابل را به شرایط اقتصادی و فنی بهینه نزدیک‌تر کرد. از دیگر عواملی که لایه ابررسانا بر آن تأثیرگذار است، امپدانس و ادمیتانس خط است [۵۵]. چگالی جریان یکی از مهم‌ترین عواملی است که باید در حین طراحی لایه‌های ابررسانای کابل‌های ابررسانا محاسبه شود. این عامل بیان‌کننده میزان جریانی است که با عبور آن نه تنها کابل می‌تواند وظایف برق رسانی خود را انجام دهد، بلکه در حداقل تلفات جریان متناوب عملکرد دارد. روابط (۳-۱۰) و (۳-۱۱) به ترتیب چگالی جریان اولیه یک نوار ابررسانا و میدان مغناطیسی ناشی از آن را نمایش می‌دهد [۵۵].

$$J = \frac{I_{dc}}{\beta\pi \left((R_f + \delta_{SC,core})^2 - R_f^2 \right) \cos\alpha} \quad (۳-۱۰)$$

$$B_{max} = \mu \cdot \frac{I_{dc}}{2\pi(R_f + \delta_{SC,core})} \quad (۳-۱۱)$$

در این روابط β پارامتر فاصله است، I_{dc} جریان dc عبوری از نوار، R_f شعاع لایه نگه‌دارنده، α میانگین

زاویه پیچش و $\delta_{SC,Core}$ ضخامت نوار ابررسانا است.

۳-۱-۲-۱ رفتار مقاومتی یک نوار ابررسانا

رفتار مقاومتی ابررسانا را می‌توان با استفاده از مدل مداری شکل ۱-۳ و بر اساس تغییرات چگالی جریان بحرانی همگام با افزایش دما، مدل کرد. به منظور تشریح رفتار مقاومتی یک نوار ابررسانا بر اثر تغییرات چگالی جریان، شرایطی به شرح زیر در نظر گرفته شده است [۵۶].

❖ هنگامی که $0 < J < J_c$ است، مقاومت الکتریکی بسیار اندک و نزدیک به صفر است. ρ در شکل ۱-۳ نشان دهنده مقاومت حاصل از این شرایط است که دارای مقداری برابر 10^{-14} است.

❖ هنگامی که $J_c < J < 3J_c$ باشد، مقاومت ماده ابررسانا از رابطه (۱۲-۳) حاصل می‌شود که در شکل ۱-۳ با نماد ρ_{PL1} نشان داده می‌شود.

$$\rho_{PL1} = \begin{cases} \frac{E_c}{|J|} \left(\frac{|J|}{J_c} - 1 \right)^{n_1} & \text{if } |J| < J_c \\ 0 & \text{if } |J| > J_c \end{cases} \quad (12-3)$$

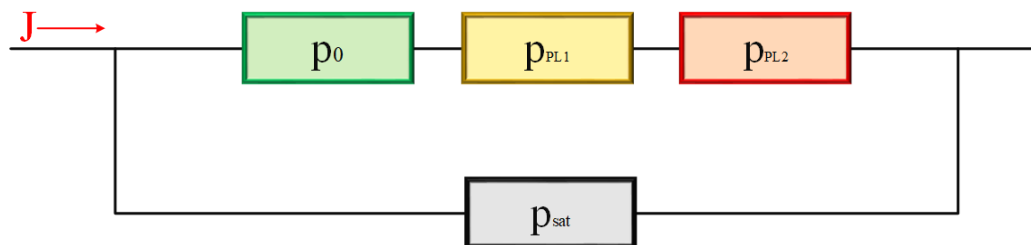
در این معادله، E_c میدان الکتریکی بحرانی، J_c چگالی جریان بحرانی، J چگالی جریان عبوری و n_1 میزان شاخص اولیه است.

❖ هنگامی که چگالی جریان به مقدار $3J_c$ می‌رسد، ماده خاصیت ابررسانایی خود را به صورت کامل از دست داده و به حالت عادی گذار می‌کند. این حالت توسط معادله (۱۳-۳) و نماد ρ_{PL2} در شکل ۱-۳ نشان داده شده است.

$$\rho_{PL2} = \begin{cases} \frac{E_c}{|J|} \left(\frac{|J|}{J_c} - \gamma \right)^{n_2} & \text{if } |J| < \gamma J_c \\ 0 & \text{if } |J| > \gamma J_c \end{cases} \quad (13-3)$$

❖ اگر $J > 3J_c$ بشود، شاخه موازی با مقاومت ρ_{sat} به مدار معادل اضافه می‌گردد. بنابراین مقاومت معادل به صورت رابطه (۱۴-۳) است.

$$\rho = \frac{(\rho_{PL1} + \rho_{PL2} + \rho_c) \rho_{sat}}{\rho_{PL1} + \rho_{PL2} + \rho_c + \rho_{sat}} \quad (14-3)$$



شکل ۱-۳ مدار معادل برای رفتار مقاومتی یک ابررسانا [۵۶]

مقادیر مربوط به این معادلات در جدول ۱-۳ نشان داده شده است.

جدول ۱-۳ پارامترهای مربوط به معادلات (۳-۱۲) الی (۳-۱۴) [۶۱]

پارامتر	اندازه	واحد
ρ_0	10^{-14}	$\Omega \text{ cm}$
n_1	۲.۸	-
n_2	۳.۰	-
E_0	۰.۱	V/cm
γ	۲	-
ρ_{sat}	۹۰	$\mu\Omega \text{ cm}$

۳-۲-۱-۲ وابستگی چگالی جریان بحرانی به دما

یکی از پارامترهایی که چگالی جریان بحرانی به آن وابسته است، دما می‌باشد. از این رو لازم است تا چگالی جریان بحرانی برحسب دما بیان گردد. وابستگی چگالی جریان بحرانی به دما به صورت معادله (۱۵-۳) مدل می‌شود.

$$J_c(T) = \begin{cases} J_c(T_{ref}) \frac{(T_c - T)^\alpha}{(T_c - T_{ref})^\alpha} & \text{if } T_{ref} < T < T_c \\ 0 & \text{if } T > T_c \end{cases} \quad (15-3)$$

در این رابطه، α برابر ۱.۵، T_{ref} ۷۷ درجه کلوین، $J_c(T_{ref})$ برابر است با $10^6 \frac{A}{cm^2}$ و دمای بحرانی نیز برابر با ۹۲ کلوین است. همچنین پارامتر α بر اساس مرجع [۵۷] به دما وابسته است که می‌توان با مدل کردن این پارامتر، دقت شبیه‌سازی را افزایش داد. در نهایت با استفاده از رابطه (۱۶-۳) می‌توان اثر تغییرات دما بر مقادیر حاصل از مقاومت ابررسانا در معادلات (۱۲-۳) الی (۱۴-۳) را نشان داد.

$$\rho(T) = \rho(T_{ref}) \left(1 + \beta(T - T_{ref}) \right) \quad (16-3)$$

در این معادله $\rho(T_{ref})$ مقاومت در حالت دمای عادی است و β برای ابررسانا حدود 0.007 در نظر گرفته شده است.

۳-۲-۱-۳ بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر چگونگی تغییر چگالی جریان بحرانی

با داشتن مقادیر میدان‌های موازی و عمود در هر لحظه، می‌توان چگونگی تغییر چگالی جریان بحرانی را در اثر تغییرات میدان به دست آورد. رابطه (۱۷-۳) نشان‌دهنده تغییرات چگالی جریان بحرانی بر اساس مدل کیم [۵۸] و میدان‌های موازی $B_{||}$ و عمود $B_{\perp}$ است. رابطه (۱۸-۳) نشان‌دهنده تغییرات میزان شاخص بر اساس میدان مغناطیسی است. در رابطه (۱۷-۳)، k یک ضریب هندسی است که برابر ۱.۵۶ است.

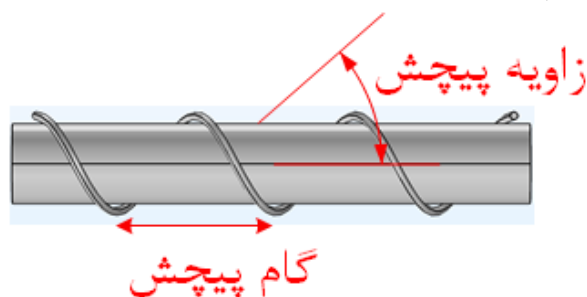
$$J_c(B) = \frac{J_{c.}}{\left(1 + \sqrt{\frac{k^2 |B_{\parallel}|^2 + |B_{\perp}|^2}{B_{c.}}}\right)^{\alpha}} \quad (۱۷-۳)$$

$$n(B) = \frac{n_{.}}{30.8 - 7.5e^{\frac{B_{\parallel}}{B_{c.}}} - 23.3e^{\frac{B_{\perp}}{B_{c.}}}} \quad (۱۸-۳)$$

در این رابطه $B_{c.}$ پارامتر نرمال کننده و برابر ۴۲,۶ تسلا و $n_{.}$ برابر است با مقادیر اولیه میزان شاخص برای هر نوع نوار ابررسانا.

۳-۱-۲-۴ مفهوم پیچش در نوارهای ابررسانا

به منظور تعدیل جریان عبوری از لایه‌های کابل‌های ابررسانای سه‌محور، کاهش تلفات جریان متناوب و همچنین تعدیل میدان مغناطیسی در این نوع کابل و البته سایر کابل‌ها، نوارهای ابررسانا به دور لایه نگه‌دارنده پیچیده می‌شوند. این پیچیده شدن باعث به وجود آمدن مفاهیمی مانند زاویه پیچش^{۴۶} و گام پیچش^{۴۷} می‌شود. این مفاهیم در شکل ۲-۳ نمایش داده شده‌اند.



شکل ۲-۳ مفهوم زاویه و گام پیچش

زاویه پیچش تأثیری مستقیم و قابل توجه بر روی میدان مغناطیسی و تلفات ac ایجاد شده در کابل دارد. از این رو تنظیم بهینه آن نه تنها این قابلیت را دارد که تلفات را حداقل نماید، بلکه بر اساس آنچه در بخش قبل بیان گردید، امکان کمینه کردن افت چگالی جریان بحرانی نیز میسر خواهد شد. اصولاً این کار توسط محاسبات المان محدود^{۴۸} و فرمولاسیون‌های مربوطه انجام می‌شود [۶۴]. با این وجود، برای محاسبه گام پیچش می‌توان از معادلات (۱۹-۳) الی (۲۵-۳) استفاده کرد [۵۹].

^{۴۶} Pitch Angle

^{۴۷} Pitch Length

^{۴۸} Finite Element Calculation

$$\ell P_{a,1} = \varepsilon f_1(r_a, r_b, r_c) \quad (19-3)$$

$$\ell P_{a,2} = -\varepsilon f_1(r_a, r_b, r_c) \quad (20-3)$$

$$\ell P_b = \varepsilon f_2(r_a, r_b, r_c) \quad (21-3)$$

$$\ell P_c = \varepsilon f_3(r_a, r_b, r_c) \quad (22-3)$$

$$f_1 = 2\pi r_a \frac{1}{2(\frac{r_b}{r_a})(\ln \frac{r_c}{r_b})} \times \left[\ln \frac{r_b}{r_a} + \sqrt{(\ln \frac{r_b}{r_a})^2 + 4(\frac{r_b}{r_a} \ln \frac{r_c}{r_b})^2} \right]^{1/2} \quad (23-3)$$

$$f_2 = 2\pi r_b \frac{1}{2(\frac{r_b}{r_a})(\ln \frac{r_c}{r_b})} \times \left[\ln \frac{r_b}{r_a} + \sqrt{(\ln \frac{r_b}{r_a})^2 + 4(\frac{r_b}{r_a} \ln \frac{r_c}{r_b})^2} \right]^{1/2} \quad (24-3)$$

$$f_3 = 2\pi r_c \left[\ln \frac{r_c}{r_a r_b} + \sqrt{(\ln \frac{r_b}{r_a})^2 + 4(\frac{r_b}{r_a} \ln \frac{r_c}{r_b})^2} \right]^{-1/2} \quad (25-3)$$

در این معادلات زیرنویس‌های a، b و c مشخص‌کننده هر فاز، $\ell P_{a,b,c}$ گام پیچش در هر فاز، $r_{a,b,c}$ شعاع نگه‌دارنده در هر فاز، ε جهت پیچش و f تابعی از شعاع تمام نگه‌دارنده‌ها است [۵۹].

۳-۱-۲-۵ انتخاب تعداد نوار ابررسانا در هر فاز و جریان بحرانی آن‌ها

با ایجاد شناخت از نوار ابررسانا و بررسی چگونگی رفتار مغناطیسی، حرارتی و مکانیکی آن‌ها تحت پیچش و کشش، چگونگی انتخاب تعداد نوار در هر فاز کابل ابررسانا و محاسبه جریان بحرانی مطرح است. در این راستا معادلات (۲۶-۳) الی (۲۹-۳) ارائه شده‌اند که بیان‌کننده چگونگی این انتخاب هستند.

$$n_k = \frac{P_{former(k)}}{w_t + \frac{g}{\gamma}} \quad (26-3)$$

$$I_{ct(k)} = \left(\frac{I_{op}}{n_k} \right) \times m \quad (27-3)$$

$$I_{cl(k)} = \sum_{i=1}^{n_k} I_{ct(i)} \quad k = 1, 2, 3, \dots, M \quad (28-3)$$

$$I_c = \max(I_{cl(1)}, I_{cl(2)}, I_{cl(3)}, \dots, I_{cl(M)}) \quad (29-3)$$

در این معادلات n_k تعداد نوار در هر لایه، $P_{former(k)}$ محیط لایه نگه‌دارنده در هر لایه کابل، M تعداد لایه‌ها، w_t عرض نوار ابررسانا، g فاصله بین نوارهای ابررسانا، $I_{ct(k)}$ جریان بحرانی هر نوار ابررسانا در هر

لایه، Iop جریان نامی کابل، m ضریب طراحی (حدوداً برابر ۲,۳۴ [۶۰])، Iai(k) جریان بحرانی هر لایه کابل و Ic جریان بحرانی کل کابل هستند.

۳-۱-۲-۶ محاسبه امپدانس و کاپاسیتانس کابل ابررسانا

به صورت کلی معادله (۳-۳۰)، در یک کابل ابررسانای سه فاز حاکم است. این به آن معنی است که هر نوع تحلیلی که مبتنی بر مدل مداری یا نتایج واقعی باشد، از این معادله پیروی می کند.

$$\begin{pmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_s \end{pmatrix} = j\omega \begin{pmatrix} C_{ab} & -C_{ab} & \cdot & \cdot \\ -C_{ba} & C_{ba} + C_{bc} & -C_{bc} & \cdot \\ \cdot & -C_{cb} & C_{cb} + C_{cs} & -C_{cs} \\ \cdot & \cdot & -C_{cs} & C_{cs} \end{pmatrix} + \frac{1}{j\omega} \begin{pmatrix} L_{selfa} & M_{ab} & M_{ac} & M_{as} \\ M_{ba} & L_{selfb} & M_{bc} & M_{bs} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{selfc} & M_{cs} \\ M_{as} & M_{bs} & M_{cs} & L_{selfs} \end{pmatrix}^{-1} + \begin{pmatrix} R_a & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & R_b & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & R_c & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & R_s \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_s \end{pmatrix} \quad (3-30)$$

این معادله بر اساس کاپاسیتانس، اندوکتانس و مقاومت لایه های مختلف یک کابل (هادی ها و شیلد) نوشته شده است. جهت حصول این مقادیر مجموعه روابط (۳-۳۱) الی (۳-۳۳) ارائه شده است [۳۰].

$$L_{selfi} = \mu \cdot \frac{\pi r_i^2}{\ell_{pi}^2} + \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{D}{r_i} \quad (3-31)$$

$$M_{ij} = a_i a_j \frac{\mu \cdot \pi r_i^2}{\ell_{pi} \ell_{pj}} + \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{D}{r_j} \quad (3-32)$$

$$C_{ij} = \frac{2\pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0}{\ln \frac{r_i}{r_j}} \quad (3-33)$$

در این معادلات r شعاع های هر لایه کابل، ℓ_{pi} گام پیچش نوار ابررسانا در هر لایه و D فاصله میانگین هندسی است که از مرجع [۶۱] قابل محاسبه هستند.

۳-۱-۳ لایه عایقی

لایه عایقی فارغ از نوع ساختار آن (سرد یا گرم بودن) مانند کابل‌های متداول در سیستم قدرت، وظیفه افزایش سطح ولتاژ شکست عایقی و جلوگیری از عدم اتصال در فازهای سه گانه با یکدیگر و لایه شیلد را دارا است [۶۲]. عموماً برای ساخت این لایه از ماده PPLP^{۴۹} استفاده می‌شود. با این وجود کاغذ کابل، فیلم PI و فیلم LDPE از دیگر موادی هستند که می‌توانند استفاده شوند. جدول ۲-۳ پارامترهای الکتریکی و مکانیکی مواد مورد استفاده را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۳ انواع مواد مورد استفاده در لایه عایقی کابل‌های ابررسانا

نام	کاغذ کابل	PPLP	فیلم PI	فیلم LDPE
مقاومت (اهم.متر)	3×10^{13}	2.91×10^{14}	5.77×10^{14}	2.97×10^{14}
ثابت دی‌الکتریک	۲,۳	۲,۳۹	۲,۲۱	۲,۳۶
ضریب تلفات عایقی	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001	< 0.0001
مقاومت عایق در مقابل ولتاژ AC (kv/mm)	۶۶-۷۷	۱۰۳,۷۸	۱۹۹,۱۳	۱۳۳,۹۸
مقاومت عایق در مقابل ولتاژ ضربه (kv/mm)	۱۱۳-۱۳۸	۲۱۷,۶	۳۲۹,۵	۲۷۱,۵
ولتاژ اولیه تخلیه جزئی	۵,۶۵-۵,۶۹	۵,۹۸	۵,۷۹	۵,۹۷
قابلیت کشیدگی	۱۵	۷,۵	۳۰	۷۰,۵
مقاومت کششی (N/mm)	۳۶	۳۰,۱	۱۲۰,۹	۱۷,۷

به منظور به دست آوردن ضخامت عایقی یک کابل ابررسانا، سه آزمایش اصلی بر روی کابل پیاده سازی می‌شود. این سه آزمایش عبارت‌اند از آزمایش اضافه ولتاژهای ناشی از خطاهای فرکانس قدرت یا همان ولتاژ AC، آزمایش ناشی از اعمال موج ضربه صاعقه و در نهایت اضافه ولتاژ ناشی از تخلیه جزئی در کابل. پس از انجام این آزمایشات و محاسبه میدان الکتریکی ناشی از آن‌ها در عایق کابل، بر اساس روابط (۳-۳۴) الی (۳-۳۶) ضخامت عایقی را محاسبه کرده و در نهایت در بین آن‌ها بزرگ‌ترین عدد را به عنوان ضخامت لایه عایقی در نظر می‌گیرند [۶۳].

$$t_{AC} = r_1 \times \left[\left(\frac{V_{AC}}{E_{\min(AC)} \cdot M_{AC} \cdot r_1} \right) - 1 \right] \quad (3-34)$$

$$t_{imp} = r_1 \times \left[\left(\frac{V_{imp} L_1 \cdot L_2 \cdot L_3}{E_{\min(imp)} \cdot M_{imp} \cdot r_1} \right) - 1 \right] \quad (3-35)$$

$$t_{PD} = r_1 \times \left[\left(\frac{U_{max} K_1 \cdot K_2 \cdot K_3}{E_{\min(PD)} \cdot M_{iPD} \cdot r_1} \right) - 1 \right] \quad (3-36)$$

در این معادلات $t_{AC,imp,PD}$ ضخامت عایقی در سه حالت مذکور، r_1 شعاع هادی تحت عایق، $V_{(AC,imp)}$

^{۴۹} Polypropylene laminated paper

ولتاژ تحمل برای حالت فرکانس قدرت و ضربه صاعقه، U_{max} حداکثر ولتاژ AC سیستم، L_1 تا L_3 به ترتیب $1/1$ ، 1 و $1/1$ ، K_1 تا K_3 به ترتیب $1/34$ ، 1 و $1/1$ ، $E_{min(AC,imp,PD)}$ میدان شکست تحت سه حالت مزبور و $M_{(AC,imp,PD)}$ ضریب تبدیل است.

۳-۱-۴ لایه نیمه‌هادی

این لایه به منظور یکنواخت نگه‌داشتن توزیع پتانسیل بر روی هادی و جلوگیری از تخلیه جزئی بر روی هادی پیچیده می‌شود. جنس این لایه‌ها اصولاً از جنس مواد نیمه‌رسانایی مانند کاغذ کربن است. ضخامت آن بر اساس کلاس ولتاژی کابل و شعاع هادی حاصل می‌شود که اصولاً عددی بین $0/2$ تا $0/5$ میلی‌متر است [۶۴].

۳-۱-۵ سیستم خنک‌کننده

هر کابل ابررسانا در هر سطح ولتاژی در معرض افزایش دما ناشی از بارهای حرارتی ایجاد شده در سیستم و تحت شرایط مانای خود است. در اثر این افزایش دما، عملکرد کابل از دیدگاه فنی و اقتصادی دچار مخاطره می‌شود که این مهم به دلیل افزایش مقاومت لایه ابررسانا در اثر افزایش دما است. بنابراین به یک سیستم خنک‌کننده در کابل‌های ابررسانا نیاز است تا بتواند قبل از رسیدن این دما به دمای بحرانی کابل، آن را خنک کرده و در حالت بهینه اقتصادی و فنی نگه دارد. این سیستم به اصطلاح خنک‌ساز^{۵۰} نام دارد [۶۵].

هر سیستم کرایوکولر از اجزای زیر تشکیل شده است:

- کرایوستات^{۵۱} اولیه
- کرایوستات ثانویه
- ماده خنک‌کننده
- پمپ یا توربین دمنده

۳-۱-۵-۱ سیستم کرایوستات اولیه

اصلی‌ترین وظیفه این لایه تامین فشار لازم برای چرخش و گردش ماده خنک‌کننده در سیستم کابل است. همچنین این لایه، افت فشار ماده خنک‌کننده در اثر تبخیر و یا ایجاد حباب در آن را جبران کرده و باعث گردش صحیح ماده خنک‌کننده در کابل می‌شود [۲۹].

^{۵۰} Cryocooler

^{۵۱} Cryostat

۳-۱-۵-۲ سیستم کرایوستات ثانویه

وظیفه این لایه ایجاد یک عایق حرارتی است که لایه ابررسانا را در مقابل حرارت‌های خارجی محافظت می‌کند. این لایه معمولاً در کابل‌های عایق سرد، بعد از عایق الکتریکی قرار گرفته و حفظ تعادل در دما را انجام می‌دهند. جنس آن‌ها معمولاً از پلی‌استر است [۶۶]. از دیگر وظایف این لایه می‌توان به تأمین فشار خلاء در کابل اشاره کرد. برای به دست آوردن شعاع این لایه از معادلات تعادل جرم، تکانه و انرژی استفاده می‌شود. از آن جایی که طول لوله کرایوستات ثانویه از ابعاد آن بسیار بیشتر است، معادلات یک‌بعدی برای حل مسئله کافی هستند. این معادلات توسط روابط (۳۷-۳) و (۳۸-۳) نمایش داده می‌شوند [۶۷].

$$\frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{f}{D_h} \frac{\rho v^2}{2} \quad (37-3)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{f}{D_h} \frac{v^2}{2 c_p} + \frac{q}{m c_p} \quad (38-3)$$

در این معادلات P و T فشار و دمای سیال، v و m سرعت و نرخ حرکت جرم سیال، ρ و c_p چگالی جرم و حرارت مخصوص هستند و f ضریب اصطکاک است. دو پارامتر D_h و q در این روابط به عنوان مجهولات معادله مطرح هستند. D_h قطر معادل هیدرولیکی است که با به دست آوردن آن و از طریق روابط (۳۹-۳) و (۴۰-۳) قطر کرایوستات ثانویه حاصل می‌شود.

$$D_h = D_o - D_i \quad (39-3)$$

$$D_i = 2R_f + \delta_{SC,Core} + \delta_{ins} + \delta_{shield} \quad (40-3)$$

در این معادلات، D_h قطر کرایوستات، D_o قطر بیرونی، D_i قطر درونی کرایوستات، R_f شعاع نگه‌دارنده، $\delta_{SC,Core}$ ضخامت هسته ابررسانا، δ_{ins} ضخامت عایق و δ_{shield} ضخامت شیلد است.

۳-۱-۶ لایه محافظ^{۵۲}

وظیفه این لایه در هنگام عملکرد مانای کابل، کاهش میدان‌های الکترومغناطیسی ناشی است و در حین و پس از وقوع خطا، به عنوان مسیری برای بازگشت جریان خطا، عمل می‌کند [۶۸]. این لایه می‌تواند از جنس مس، ابررسانا و یا هر دو باشد (دو لایه محافظ). ضخامت این لایه معمولاً برابر با ضخامت لایه ابررسانا در نظر گرفته می‌شود [۳۸]. با این وجود و بر اساس مرجع [۱۸] می‌توان شعاع این لایه را به صورت رابطه زیر محاسبه کرد:

$$r_{sh} = \pi(r_{so}^2 - r_{si}^2) \quad (41-3)$$

در این معادله r_{si} و r_{so} به ترتیب شعاع بیرونی و درونی شیلد هستند.

^{۵۲} Shield

۳-۱-۷ غلاف بیرونی

غلاف بیرونی به عنوان آخرین لایه کابل ابررسانا شناخته می‌شود و وظیفه محافظت از عناصر و اجزاء کابل را در مقابل بارهای مکانیکی و تنش‌های فیزیکی بر عهده دارد. جنس آن معمولاً از پروپیلن بوده و ضخامت آن حدوداً برابر ۱۵ الی ۳۰ میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود [۶۹].

۳-۲ بررسی رفتار کابل ابررسانا تحت حالت مانای شبکه

عملکرد کابل ابررسانا در شبکه مدل‌سازی شده بر اساس تشخیص شرایط بهره‌برداری صورت می‌گیرد. از این رو تشخیص برخط آنچه در شبکه اتفاق افتاده است بر اساس نمونه‌برداری از تغییرات جریان شبکه، پیاده سازی گردید. اولین حالتی که در این پایان نامه مورد بررسی قرار گرفته، رفتار کابل ابررسانا تحت شرایط نرمال شبکه است. در این حالت هیچ خطایی در سیستم رخ نداده و جریان عبوری از کابل، از جریان بحرانی کمتر است. تحت چنین شرایطی و به دلیل خاصیت ذاتی نوارهای ابررسانا تلفاتی موسوم به تلفات جریان متناوب در کابل پدیدار می‌شود. این تلفات در قیاس با تلفات خطوط کابلی نرمال بسیار کمتر است. با این وجود به منظور تعیین بار حرارتی سیستم خنک‌کننده در شرایط نامی لازم به محاسبه آن است. بنابراین محاسبه دقیق و گام به گام تلفات و افزایش حرارت منتجه از آن، یکی از مهم‌ترین پارامترهای حالت مانای سیستم است که در ادامه به بررسی آن پرداخته شده است. تحت شرایط مانا، با عبور جریان از کابل، یک میدان مغناطیسی در هر فاز القاء می‌شود که با اعمال روابط (۳-۴۲) الی (۳-۴۵) می‌توان دو مولفه عمود و موازی آن را برای یک کابل محاسبه کرد [۷۲].

$$B_{iz} = \mu \cdot \left(\sum_{k=i-1}^n a_k \frac{I_k}{l_{pk}} + a_i \left(\frac{r_{io} - r_{ip}}{r_{io} - r_{ii}} \right) \frac{I_i}{l_{pi}} \right) \quad (۳-۴۲)$$

$$B_{i\theta} = \mu \cdot \left(\frac{1}{2\pi r_{ip}} \sum_{k=i}^{i-1} I_k + \left(\frac{r_{ip} - r_{ii}}{r_{io} - r_{ii}} \right) \frac{I_i}{2\pi r_{io}} \right) \quad (۳-۴۳)$$

$$B_{i\perp} = B_{iz} \cos \alpha_i + B_{i\theta} \sin \alpha_i \quad (۳-۴۴)$$

$$B_{i\parallel} = B_{iz} \sin \alpha_i + B_{i\theta} \cos \alpha_i \quad (۳-۴۵)$$

در این معادلات، B_{iz} میدان مغناطیسی محوری، μ ضریب تراوایی خلاء، a_k جهت پیچش، I_k جریان لایه، l_{pk} گام پیچش لایه، r_{io} شعاع بیرونی لایه، r_{ii} شعاع درونی لایه، r_{ip} محل محاسبه میدان، $B_{i\perp}$ جزء عمود میدان، $B_{i\parallel}$ جزء موازی میدان و α_i زاویه پیچش در هر لایه هستند.

با آگاهی از میدان‌های مغناطیسی، تلفات کابل ابررسانا در یک مدل مداری با استفاده از روابط (۳-۴۶) الی (۳-۵۰) قابل محاسبه است. مطابق با روابط ارائه شده دیده می‌شود که تلفات از دو بخش تلفات ناشی از مغناطیس‌شوندگی و تلفات ناشی از عبور جریان از نوارهای ابررسانا به وجود آمده است.

قابل ذکر است که تلفات دی‌الکتریک، گرانیوی ماده خنک‌کننده در کرایوستات و تلفات حرارت نشتی در روابط (۳-۵۱) تا (۳-۵۳) آمده است. در نهایت تلفات کلی یک کابل ابررسانا در رابطه (۳-۵۴) نشان داده شده است. [۷۳-۷۶].

$$Q_{mag} = \begin{cases} \frac{2fB_i^2 \beta_i}{\mu} S_i & \beta_i < 1 \\ \frac{2fB_i^2}{\mu} \left(\frac{1}{\beta_i} - \frac{2}{3\beta_i^2} \right) S_i & \beta_i > 1 \end{cases} \quad (۳-۴۶)$$

$$B_i = \sqrt{B_{iz}^2 + B_{i\theta}^2} \quad (۳-۴۷)$$

$$\beta_i = \frac{B_i}{\mu J_c b} \quad (۳-۴۸)$$

$$Q_{trans} = \frac{\mu f I_{Ci}^2}{2\pi} \{ (2 - F_i) F_i + 2(1 - F_i) \ln(1 - F_i) \} \quad (۳-۴۹)$$

$$F_i = \frac{I_{Pi}}{I_{Ci}} \quad (۳-۵۰)$$

$$Q_d = 2\pi f C_d V^2 \tan \delta \quad (۳-۵۱)$$

$$Q_v = \frac{G \Delta P}{\rho_{LN} \gamma} \quad (۳-۵۲)$$

$$Q_{leakage} = \frac{2\pi \lambda_{LN} \Delta T}{\ln \left(\frac{D_{out}}{D_{in}} \right)} \quad (۳-۵۳)$$

$$Q_T = Q_{mag} + Q_{trans} + Q_d + Q_v + Q_{leakage} \quad (۳-۵۴)$$

در این معادلات، Q_{mag} تلفات مغناطیس‌شوندگی، S_i سطح مقطع هر لایه از کابل، f فرکانس، J_c چگالی جریان بحرانی، b نصف عرض نوارها، Q_{trans} تلفات ناشی از جریان عبوری، I_{Ci} جریان بحرانی، I_{Pi} جریان حداکثری در هر لایه، C_d ظرفیت خازنی دی‌الکتریک، $\tan \delta$ میزان تلفات عایقی دی‌الکتریک، G نرخ شارش سیال معادل ۱،۱ کیلوگرم بر ثانیه، ΔP تغییرات فشار، D_{in} و D_{out} قطر بیرونی و درونی کرایوستات هستند.

با اطلاع از میزان تلفات جریان متناوب در هر لحظه، می‌توان افزایش دمای ناشی از این تلفات را محاسبه کرد. این افزایش دما با توجه به عملکرد حالت مانای کابل تغییرات چندان قابل توجهی نداشته و به راحتی توسط سیستم خنک‌کننده کاهش می‌یابد. محاسبه افزایش دما در مدل مداری ارائه شده با استفاده از رابطه‌های (۳-۵۵) و (۳-۵۶) امکان‌پذیر است. [۷۷].

$$\Delta T_{t_i} = \frac{Q_{mag} + Q_{trans}}{m \cdot C_p(T)} \quad (۳-۵۵)$$

$$T_{t_{i+1}} = T_{t_i} + \Delta T_{t_i} \quad (56-3)$$

در این معادلات، ΔT_{t_i} اختلاف دمای ایجاد شده در هر گام زمانی، m نرخ شارش سیال، $C_p(T)$ حرارت مخصوص وابسته به دما برای نوارهای ابررسانا و T_{t_i} میزان دما در هر لحظه است. با توجه به اثرپذیری چگالی جریان بحرانی از دما، میدان و پیچش، لازم است تا تغییرات هر یک از این پارامترها با توجه به روابط ارائه شده برای آنها مورد بررسی قرار گیرد. رابطه (57-3) نشان‌دهنده تغییرات چگالی جریان بحرانی با دما است که به قانون توانی میدان الکتریکی-چگالی جریان^{۵۳} مشهور است.

$$J_c(T) = \begin{cases} J_c(T_{op}) \left(\frac{T_c - T}{T_c - T_{op}} \right)^{\alpha_s} & T < T_c \\ 0 & T > T_c \end{cases} \quad (57-3)$$

در این معادله، $J_c(T_{op})$ چگالی جریان بحرانی در دمای عملیاتی، T_{op} دمای عملیاتی، T_c دمای بحرانی و T دمای لحظه‌ای است و همچنین α_s ۱٫۵ در نظر گرفته می‌شود [۷۸]. ارتباط چگالی جریان بحرانی با میدان مغناطیسی با توجه به رابطه (58-3) مورد بررسی قرار گرفته است. که به مدل Kim بهبودیافته مشهور است [۷۹، ۸۰].

$$J_c(B_{\perp}, B_{\parallel}) = \frac{J_c(0,0)}{\left[1 + \sqrt{(kB_{\parallel})^2 + B_{\perp}^2} / B_c \right]^{bs}} \quad (58-3)$$

در این معادله، $J_c(0,0)$ چگالی جریان بحرانی در نبود میدان مغناطیسی است، k و bs پارامترهای هندسی هستند که به ترتیب ۰٫۰۶۰۵ و ۰٫۷۵۸ در نظر گرفته شده‌اند و در نهایت B_c نیز ۱۰۳ میلی‌تسلا در نظر گرفته شده است.

معادلات (57-3) و (58-3) نشان‌دهنده تأثیر غیرمستقیم پیچش بر رفتار نوارهای ابررسانا هستند. نوارهای ابررسانا در اثر پیچش دچار کاهشی در جریان بحرانی خود نیز می‌شوند که اثر مستقیم پیچش بر نوارهای ابررسانا نام دارد. جهت مدل کردن این رفتار در این مطالعه از روش مونت کارلو استفاده شده است. در این روش با استفاده از توزیع آماری ویبول و چند رابطه آماری و تجربی می‌توان توزیع جریان بحرانی را در اثر پیچش بدست آورد. جهت انجام این کار فرآیند زیر در نظر گرفته شده است [۸۱]:

❖ تقسیم هر نوار در هر لایه به بخش^{۵۴}هایی یک سانتی متری. (برای مثال یک نوار ۱۰۰ متری دارای ۱۰،۰۰۰ سکشن می‌شود)

❖ تولید یک عدد تصادفی بر اساس توزیع ویبول برای هر سکشن در هر نوار $R_w(i)$

❖ حل معادله (59-3) برای هر سکشن و حصول جریان بحرانی در هر سکشن $(I_{nc}(i))$

^{۵۳} E-J Power Law

^{۵۴} Section

❖ ضرب مقدار حاصل شده از گام قبلی در J_c جهت حصول به توزیع چگالی جریان بحرانی

$$R_w(i) = \exp \left(- \left[\frac{(I_{nc}(i) - I_{c,min})}{I.} \right]^m \right) \quad (۵۹-۳)$$

در این معادله $I.$ پارامتر معیار^{۵۵}، m پارامتر شکل^{۵۶} و $I_{c,min}$ حد پایین جریان بحرانی است [۸۱].

۳-۳ بررسی رفتار کابل ابرسانا تحت حالت گذرا شبکه

با شروع شرایط گذرا شبکه، جریان عبوری از جریان بحرانی تعدی کرده و دما به سرعت شروع به افزایش می‌کند. تحت چنین شرایطی مقاومت لایه ابرسانا به سرعت افزایش پیدا کرده و از مقاومت لایه نگه-دارنده بیشتر می‌گردد. بر این اساس اکثر جریان خطا از لایه با مقاومت کم‌تر (لایه نگه‌دارنده) عبور کرده و باعث ایجاد بار حرارتی در سیستم می‌شود. رفتار مقاومتی لایه ابرسانا با توجه به چگالی جریان عبوری از آن در معادلات (۳-۶۰) الی (۳-۶۲) آمده است [۷۸].

$$\rho_{t1} = \rho. \quad \text{if } J < J_c \quad (۳-۶۰)$$

$$\rho_{t2} = \rho_{t1} + \left(\frac{E.}{J} \right) \left(\frac{J}{J_c} - 1 \right)^n \quad \text{if } J_c < J < 3J_c \quad (۳-۶۱)$$

$$\rho_{t3} = \frac{\rho_{t2} + \rho_{sat}}{\rho_{t2} \cdot \rho_{sat}} \quad \text{if } J > 3J_c \quad (۳-۶۲)$$

در این معادلات، ρ مقاومت لایه ابرسانا در حالت ابرسانایی، $E.$ برابر 0.1 ولت بر سانتی‌متر، n میزان شاخص که حدوداً $2/8$ در نظر گرفته شده است و ρ_{sat} مقاومت اشباع است که 90 میکرواوم در متر در نظر گرفته شده است.

به منظور ارزیابی عملکرد کابل ابرسانا تحت شرایط خطا، علاوه بر بررسی رفتار مقاومتی با توجه به تغییرات جریان عبوری از آن، رفتار حرارتی نیز تحت این شرایط باید در نظر گرفته شود. معادلات (۳-۶۳) و (۳-۶۴) نشان‌دهنده رفتار حرارتی یک ابرسانا در حین خطا هستند [۸۲].

$$\rho C_p(T) \frac{dT}{dt} = G(T, I) \quad (۳-۶۳)$$

$$G(T, I) = \begin{cases} \frac{\rho_{ybco}(T) I_{ybco} (I_{ybco} - I_c(T))}{S_{ybco}} & T < T_c \\ \rho_{cu}(T) \left(\frac{I_{cu}}{S_{cu}} \right) & T \geq T_c \end{cases} \quad (۳-۶۴)$$

در این روابط، ρ چگالی نوارهای ابرسانا، ρ_{ybco} مقاومت لایه ابرسانا، I_{ybco} جریان عبوری از لایه ابرسانا، S_{ybco} سطح مقطع لایه ابرسانا، ρ_{cu} مقاومت مخصوص لایه نگه‌دارنده و I_{cu} و S_{cu} نیز جریان

^{۵۵} Scale Parameter

^{۵۶} Shape Parameter

و سطح مقطع لایه نگه‌دارنده هستند.

لایه نگه‌دارنده کابل ابررسانا عموماً از جنس مس انتخاب می‌شود و در نتیجه این امر در حین عملکرد مانای سیستم، جریانی بسیار اندک (حدود ۰/۰۱ درصد جریان کل) را از خود عبور می‌دهد. این در حالی است که در صورت وقوع خطا در شبکه، بیشترین مقدار جریان خطا از آن عبور می‌کند که به دلیل افزایش ناگهانی مقاومت لایه ابررسانا است. بر این اساس دمای لایه نگه‌دارنده و در نتیجه مقاومت آن نیز با شیبی اندک افزایش پیدا خواهد کرد. به منظور بررسی رفتار وابسته به دمای مقاومت مس در این بخش، معادلات زیر ارائه شده است [۵۱].

$$\rho_{Cu,i} = (-2.46499 + 0.06351T_{Cu,i})10^{-9} \quad (65-3)$$

$$r_{DC,i} = \frac{\rho_{Cu}}{A_{FE}} l \quad (66-3)$$

$$\delta_i = \sqrt{\frac{\rho_{Cu,i}}{(\pi f)(\mu \cdot \mu_r)}} \quad (67-3)$$

$$r_{AC,i} = r_{DC,i} \frac{\pi r_i^2}{\pi(D - \delta_i)\delta_i} \quad (68-3)$$

در این معادلات، ρ_{Cu} مقاومت مخصوص مس، $T_{Cu,i}$ دمای لایه نگه‌دارنده، $r_{DC,i}$ مقاومت DC مس، δ_i اثر پوستی برای مس، f فرکانس، $r_{AC,i}$ مقاومت AC مس و r_i شعاع نگه‌دارنده است. با دستیابی به چگونگی تغییرات مقاومت مس بر حسب دما، لازم است تا دما به عنوان عامل موثر مورد توجه قرار گرفته و چگونگی روند افزایش دما در لایه نگه‌دارنده مورد بررسی قرار گیرد. این فرآیند در معادلات (۶۹-۳) الی (۷۲-۳) نشان داده می‌شود [۵۱].

$$\Delta J_i = I_{Cu,i}^2 r_{AC,i} \Delta t \quad (69-3)$$

$$C_{p,i} = -159.9T_{Cu,i}^2 + 5138.0T_{Cu,i} - 1297000 \quad (70-3)$$

$$\Delta T_{Cu,i} = \frac{\Delta J_i}{V_F C_{p,i}} \quad (71-3)$$

$$T_{Cu,i+1} = \Delta T_{Cu,i} + T_{Cu,i} \quad (72-3)$$

در این روابط، ΔJ_i اتلاف انرژی در هر لحظه، $I_{Cu,i}$ جریان عبوری از مس، Δt زمان نمونه‌برداری، $C_{p,i}$ حرارت مخصوص مس، $\Delta T_{Cu,i}$ اختلاف دمایی ایجاد شده در هر ثانیه و V_F حجم لایه مسی است. با عبور جریان (چه خطا و چه نرمال) از نوار ابررسانا در اثر القای میدان مغناطیسی و گرادیان دمایی، نیرویی منصوب به نیروی لورنتز به نوارهای ابررسانا اعمال می‌شود که این نیرو را می‌توان با استفاده از فرمولاسیون (۷۳-۳) محاسبه کرد [۸۳، ۸۴].

$$LF = I_{ybco} S_{ybco} B_i \sin(\theta) + I_{cu} S_{cu} B_i \sin(\theta) \quad (73-3)$$

در نتیجه با در دست داشتن رفتار الکتریکی-مغناطیسی-حرارتی یک کابل ابررسانا در حین خطا و همچنین اعمال روابطه (3-57) الی (3-59) برای محاسبه افت جریان بحرانی، امکان ارزیابی رفتار کابل در قبل و در حین وقوع خطا میسر شده است. با این وجود بررسی رفتار کابل ابررسانا پس از رفع خطا به منظور ارزیابی طریقه بهره‌برداری از آن به عنوان یک هدف تعیین کننده مطرح است که در ادامه به بررسی آن پرداخته شده است.

3-4 رفتار کابل ابررسانا پس از رفع خطا (حالت بازیابی)

پس از رفع خطا، اگر جریان اندازه‌گیری شده کمتر از جریان بحرانی باشد، مادامی که دما همچنان فراتر از دمای عملیاتی بالاتر است، کابل در حالت بازیابی قرار دارد. عموماً یک ثانیه پس از رفع خطا، کابل وارد فاز بازیابی می‌شود. در این زمان دما از طریق همرفت^{۵۷} به سیال خنک‌کننده منتقل شده و این امر باعث کاهش تدریجی دما در کابل ابررسانا تا دمای عملیاتی می‌شود. جهت مدل کردن این رفتار، به معادله (3-63) پارامتر مربوط به انتقال دمای همرفت اضافه خواهد شد که در این صورت رابطه نهایی به فرم روابط (3-74) و (3-75) ارائه شده است [85].

$$\rho C_p(T) \frac{dT}{dt} = G(T, I) - Q(T, t) \quad (74-3)$$

$$\rho_{ybco}(t_i) = \rho_{ybco}(t_{i-1}) (1 + c(T(t_i) - T(t_{i-1}))) \quad (75-3)$$

در این معادلات، $Q(T, t)$ عبارت انتقال حرارت بوده که رابطه (3-76) نشان داده شده است [86].

$$Q(T, t) = \frac{\lambda_{LN2}(T_{ybco}(t) - T_{op}) \times P_h}{\frac{D_e}{4}} \quad (76-3)$$

در این روابط P_h محیط هیدرولیک و D_e قطر موثر کرایوستات است.

3-5 اثر میدان و دما بر تغییرات خواص مواد کابل

به منظور افزایش دقت مدل ارائه شده در این پایان نامه، لازم است تا تاثیر دما و میدان مغناطیسی بر پارامترهای الکتریکی و حرارتی مواد بکار رفته در ساخت کابل ابررسانا مورد بررسی قرار گیرد. از این رو در این بخش به بررسی خواص مواد استفاده شده در کابل ابررسانا و تغییرات آن‌ها با دما و میدان مغناطیسی پرداخته شده است.

۳-۵-۱-۱ خواص نوارهای YBCO

دو خاصیت مهم نوارهای ابررسانا که تاثیر به سزایی در افزایش دقت مدل ارائه شده دارند، عبارتند از هدایت حرارتی و حرارت مخصوص نوارهای ابررسانا. این دو پارامتر تابعی از دمای لایه ابررسانا در فازهای مختلف هستند. روابط (۷۷-۳) و (۷۸-۳) بیان گر رابطه بین این دو پارامتر با دما هستند [۸۸], [۸۷].

$$C_{pt}(T) = 7.238e^{-9} \times T^3 - 9.37e^{-6} \times T^2 \quad (77-3)$$

$$+ 0.003589 \times T - 0.043668$$

$$\lambda(T) = -2.687e^{-16} \times T^9 + 2.687e^{-13} \times T^8 - 7.308e^{-11} \times T^7 \quad (78-3)$$

$$+ 1.0011e^{-8} \times T^6 - 9.218e^{-8} \times T^5 - 0.0001539 \times T^4$$

$$+ 0.0203 \times T^3 - 1.132 \times T^2 + 26.92 \times T - 98.78$$

رابطه (۷۷-۳) بیان کننده رابطه بین حرارت مخصوص نوارهای ابررسانا و دما است، این در حالی است که رابطه (۷۸-۳) این وابستگی را برای هدایت حرارتی این نوارها بیان می کند. در این روابط T معرف دمای نوار ابررسانا است.

میزان شاخص^{۵۸}، دمای بحرانی و میدان مغناطیسی بحرانی سه پارامتر مهم دیگر نوارهای ابررسانا هستند که تابعی از میدان و دمای کابل ابررسانا قلمداد می شوند. روابط (۷۹-۳) الی (۸۱-۲) به منظور بیان ارتباط این پارامترها به دما و میدان بیان شده اند [۸۹], [۱۸].

$$n(B) = n \cdot \frac{B_{\parallel}}{|B_{\parallel}| + B_{\parallel}} \cdot \frac{B_{\perp}}{|B_{\perp}| + B_{\perp}} \quad (79-3)$$

$$T_C(B) = \begin{cases} -45.62B + 87.1 & B < 1T \\ 42.8e^{-0.015B} & B \geq 1T \end{cases} \quad (80-3)$$

$$B_C(T) = 150 \left(1 - \frac{T}{T_C} \right)^{1.5} e^{-\sqrt{\frac{T}{T_C}}} \quad (81-3)$$

در این معادلات n ، میزان شاخص اولیه، اعداد ثابت $B_{\parallel}$ و $B_{\perp}$ که به ترتیب ۲ و ۱ تسلا هستند [۸۹].

۳-۵-۱-۲ خواص مس لایه نگه دارنده

مس استفاده شده در لایه نگه دارنده یکی دیگر از مواد مهم استفاده شده در کابل های ابررسانا است که لازم است تغییرات خواص الکتریکی و حرارتی آن را بر حسب تغییرات دما مورد ارزیابی قرار داد. رابطه (۸۲-۳) نشان دهنده تغییرات مقاومت مخصوص مس استفاده شده در این کابل و رابطه (۸۳-۳) نیز نشان دهنده تغییرات حرارت مخصوص مس بر حسب تغییرات دما است [۵۱].

$$\rho_{CU} = (-2.464699 + 0.0635T) 10^{-9} \quad (82-3)$$

$$C_{pCU} = -159.9T^2 + 5238.0T - 12970.0 \quad (83-3)$$

^{۵۸} Index Value

۳-۱-۵-۳ خواص نیتروژن مایع

نیتروژن مایع به عنوان ماده خنک کننده یکی دیگر از بخش‌هایی است که خواص آن بر اثر دما تغییر می‌کند. دما فشار این سیال را تحت تاثیر قرار می‌دهد. روابط (۸۴-۳) و (۸۵-۳) فرآیند تغییر فشار را در ماده خنک کننده بیان می‌کنند [۶۶].

$$\dot{m} = L \frac{q_n}{C_{PL}(T)\Delta T} \quad (۸۴-۳)$$

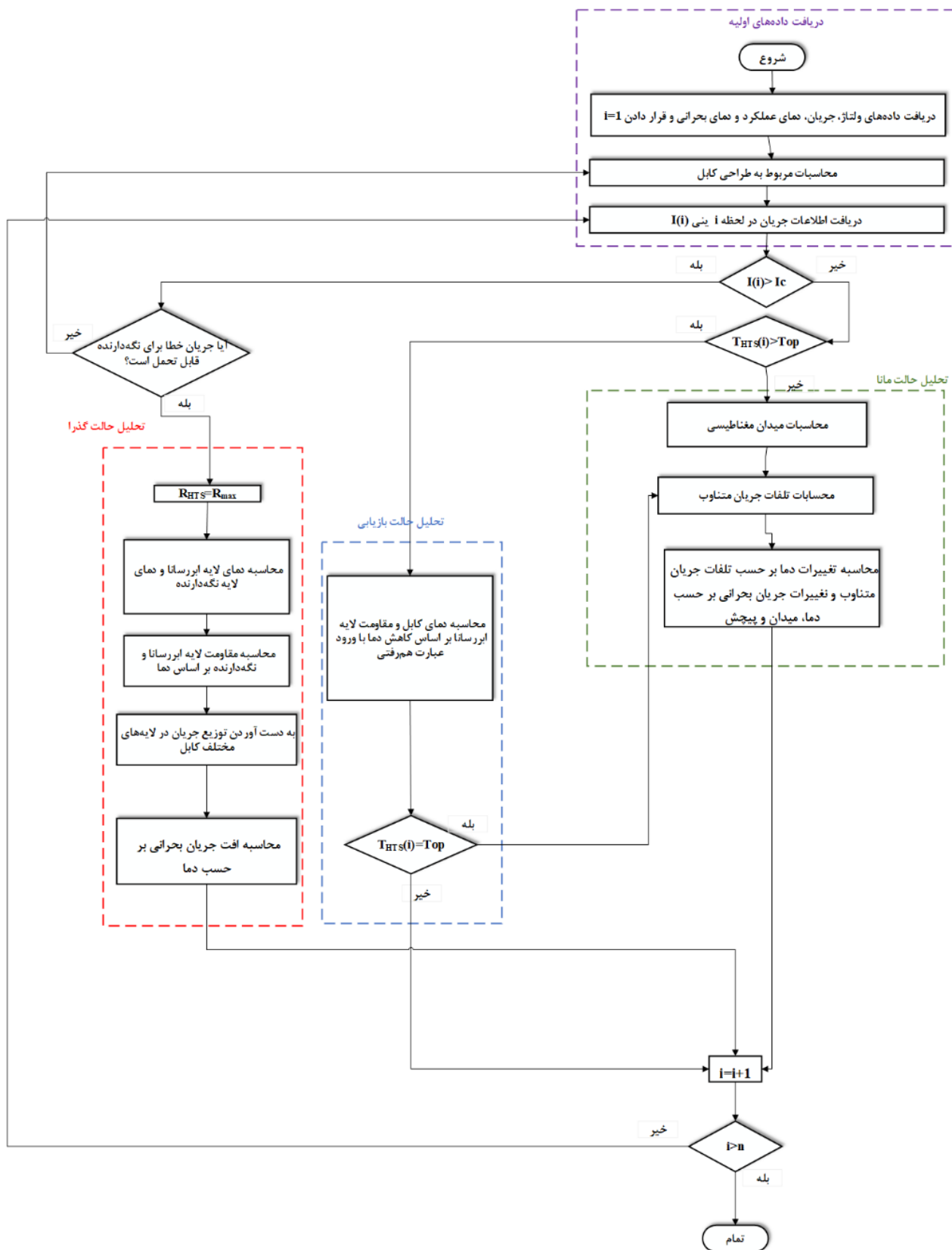
$$\Delta P = \frac{1}{\gamma} \lambda_L \frac{\dot{m}^2}{D_{LN}^5} \frac{L}{A^2 D_h} \quad (۸۵-۳)$$

در این معادلات، $C_{PL}(T)$ حرارت مخصوص نیتروژن مایع، L طول کابل، $\dot{m}$ نرخ چگالش جرم (لیتر بر دقیقه)، q_n بار حرارتی کابل در هر لحظه، λ_L هدایت حرارتی نیتروژن مایع، D_{LN} چگالی نیتروژن، A سطح مقطع لوله کرایوستات و D_h قطر هیدرولیکی است.

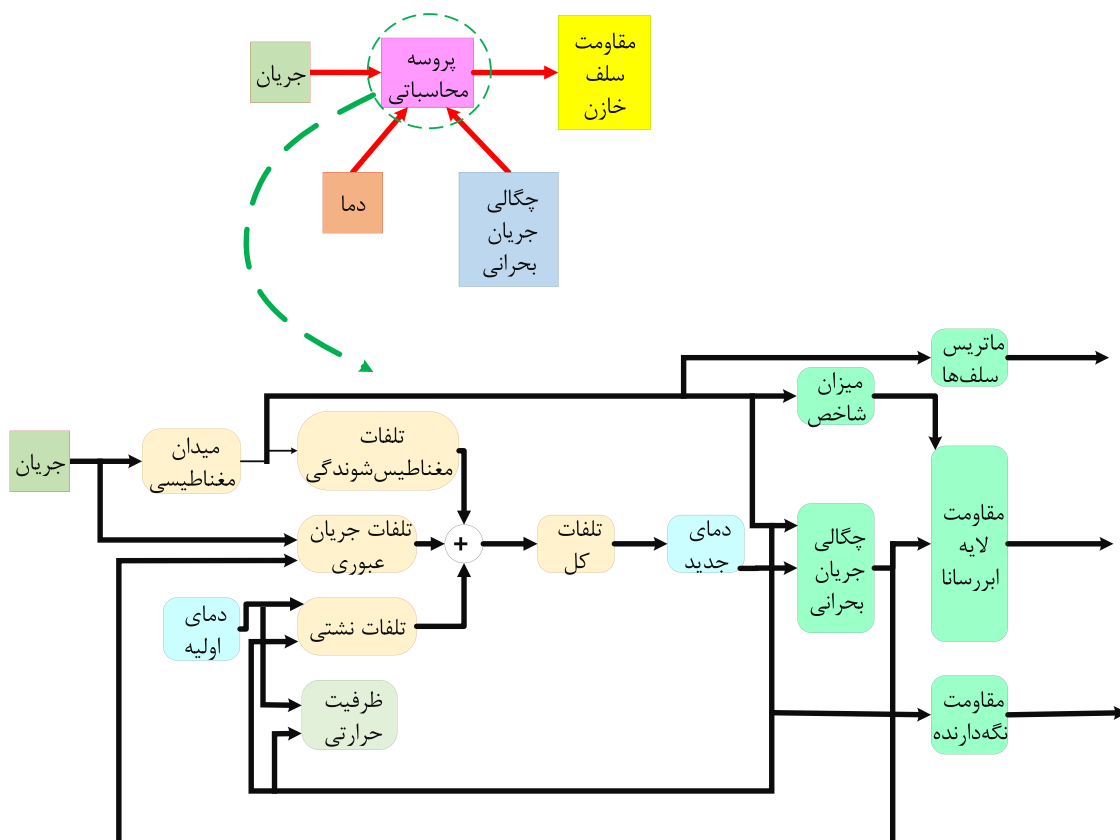
۳-۶ الگوریتم مدل سازی کابل ابررسانا

با در دست داشتن تمامی روابط مورد نیاز، روندنمای لازم جهت حصول به یک مدل مدار معادل کامل کابل ابررسانا، در شکل ۳-۱۱ نمایش داده شده است. در این روندنما، پس از دریافت اطلاعات اولیه کابل ابررسانا، مانند سطح ولتاژ و مشخصات لایه‌ها، جریان عبوری از کابل در هر گام زمانی اندازه‌گیری می‌شود. پس از آن جریان با جریان بحرانی مقایسه می‌شود. اگر جریان عبوری از جریان بحرانی بیشتر باشد، کابل حتماً در حالت خطا است. بنابراین باید محاسبات مربوط به حالت گذرا انجام شود. از سویی دیگر، اگر جریان عبوری از جریان بحرانی کم‌تر باشد، کابل ممکن است هم در حالت مانا بوده و هم در حالت بازیابی. برای تشخیص این دو مهم از یک دیگر، دما در آن لحظه اندازه‌گیری می‌شود، اگر دما از حدود دمای عملیاتی بیشتر باشد، کابل در حالت بازیابی بوده و در حال کاهش دما است. از سویی دیگر، اگر دمای اندازه‌گیری شده در محدوده دمای عملیاتی باشد، کابل در حالت مانا است.

شکل ۳-۴ نشان‌دهنده چگونگی ارتباط بین مدل‌مداری و مواردی مانند دما، میدان مغناطیسی، چگالی جریان و میزان شاخص است. بر این اساس، در هر تکرار با استفاده از روابط ارائه شده در این فصل، مقادیر مقاومت، خازن و سلف‌ها محاسبه شده و تغییرات توزیع جریان، دما و میدان برای تکرار بعد در نظر گرفته می‌شوند. در نتیجه این امر، می‌توان با استفاده از لینک محیط MATLAB و SIMULINK به صورت زمان واقعی، رفتار کابل ابررسانا را در هر نمونه و با توجه به میزان جریان عبوری از آن محاسبه کرد. چگونگی روند تغییرات در شکل ۳-۳ بیان شده است. در واقع با در دست داشتن این دو مورد به راحتی می‌توان فرآیند مدل‌سازی را برای یک کابل ابررسانا و یا هر عنصر ابررسانای دیگری پیاده کرد.



شکل ۳-۳ فرآیند مدل‌سازی یک کابل ابررسانا



شکل ۳-۴ بلوک دیاگرام چگونگی پیادسازی معادلات مذکور در پایان نامه در مدل مداری وابسته سلف، خازن و مقاومت

۳-۷ جمع بندی

در این بخش به بررسی روابطی پرداخته شد که مدل سازی مداری یک کابل ابررسانا را ممکن می سازد. یک مدل باید قادر باشد تا شرایط نرمال سیستم را تشخیص داده و مقادیری مانند تلفات، میدان، دما و توزیع جریان را برای کابل حاصل کند. از سویی دیگر مدل ارائه شده باید این توانمندی را داشته باشد تا شرایط گذرا را نیز پس از وقوع خطا در سیستم به صورت آنی تشخیص داده و رفتاری مناسب را که بیان گر پاسخ الکترومغناطیسی و حرارتی کابل به وقوع خطا است، به وجود آورد. این رفتار را می توان در نیروی لورنتز، دما، مقاومت و توزیع جریان لایه های مختلف خلاصه کرد. از دیگر موارد بسیار مهمی که در این بخش به آن پرداخته شده است، مدلسازی کابل برای شرایط پس از رفع خطا بوده که به حالت بازیابی کابل معروف است. در بخش بعدی به بررسی رفتار کابل ابررسانا و نتایج حاصل از شبیه سازی ها پرداخته خواهد شد.

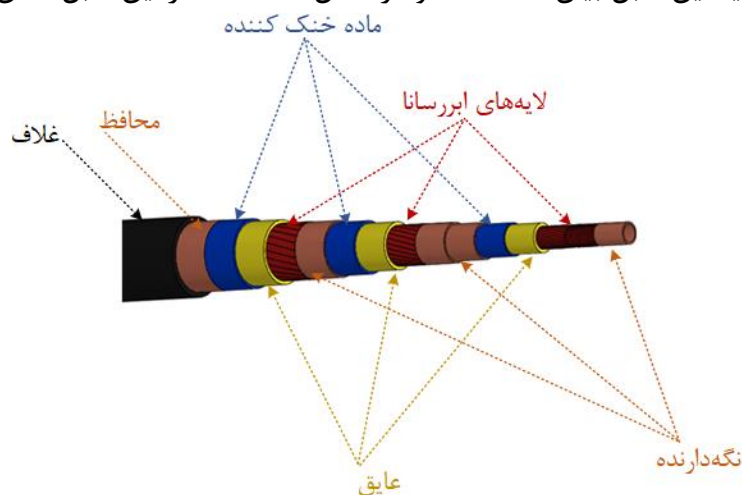
فصل ۴ . بررسی نتایج حاصل از شبیه سازی؛

پس از بررسی چگونگی مدل سازی رفتار یک کابل ابررسانا تحت شرایط مختلف شبکه، در این بخش به بیان نتایج حاصل از آن پرداخته شده است. در ابتدای امر به بررسی رفتار نتایج حاصل از طراحی کابل و مدل مداری ارائه شده برای کابل طراحی شده پرداخته می شود.

۱-۴ طراحی کابل مورد مطالعه

پس از بررسی و مطالعه بخش های مختلف یک کابل ابررسانا، چگونگی طراحی یک کابل ابررسانا در ادامه این فصل مورد بررسی قرار گرفته است.

در این پایان نامه کابل ابررسانای ۲۲٫۹ کیلوولتی به طول یک کیلومتر و جریان متغیر بین ۱٫۲۵ تا ۳ کیلوآمپر مورد بررسی قرار گرفته است. این کابل دارای ساختار هم محور و عایق سرد است. در جدول ۱-۴ مشخصات اولیه این کابل بیان شده است و در شکل ۱-۴ ساختار این کابل نشان داده شده است.



شکل ۱-۴ کابل طراحی شده ۲۲٫۹ کیلوولتی

جدول ۱-۴ جدول مشخصات الکتریکی-حرارتی اولیه کابل مورد بررسی در پایان نامه

ویژگی	میزان
ولتاژ عملکرد	۲۲٫۹ کیلوولت
جریان عملیاتی	۱٫۷۸ کیلوآمپر
طول کابل	۱ کیلومتر
نوع ابررسانا	YBCO- South wire
سطح عملکرد	توزیع
ساختار کابل	Co-axial
نوع عایق	Cold Dielectric
ظرفیت خنک کنندگی	۷٫۵ کیلووات
جریان بحرانی	۴٫۲۱ کیلوآمپر
دمای بحرانی	۸۸ درجه کلوین
دمای عملیاتی	۷۰ درجه کلوین
فشار عملیاتی	۰٫۵ Mpa
تعداد نوار در هر فاز	۲۱-۲۴-۲۲-۲۳
جریان بحرانی نوارهای هر فاز	۱۸۹-۱۷۴-۱۲۵ آمپر

جدول ۲-۴ مشخص کننده جنس لایه های این کابل در کلاس ولتاژی ۲۲,۹ کیلوولت است. جدول ۴-۳ نیز ضخامت و شعاع لایه های مذکور در جدول ۴-۴ را نشان می دهد. نوار استفاده شده در این کابل از جنس YBCO و ساخته شرکت South Wire است. مشخصات این نوار در جدول ۴-۴ آمده است [۷۰]. این نوار در شکل ۲-۴ نشان داده شده است.

جدول ۲-۴ جنس لایه های مختلف کابل مورد مطالعه

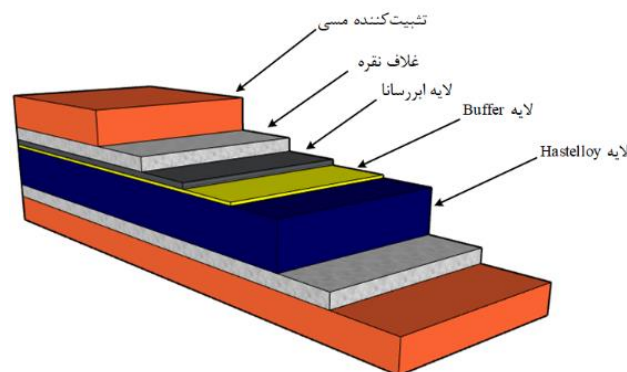
ویژگی	آیتم
YBCO	نوار ابررسانا
Copper Tapes	لایه Shield
Stranded Copper Tapes	لایه نگه دارنده
Insulation Paper	نیمه هادی ها
PPLP	لایه عایقی
Polyester	عایق حرارتی
Stainless steel double-wall corrugated pipe	سرماپا
Polyethylene	غلاف بیرونی

جدول ۳-۴ ضخامت و شعاع لایه های مختلف مورد استفاده در کابل مورد مطالعه

لایه	ضخامت (میلی متر)	شعاع (میلی متر) به ترتیب فاز
نگه دارنده (a b b r c)	۱	۱۶-۲۵,۱-۲۶,۲-۳۴,۶
ابررسانا (a a r b c)	۰,۱	۱-۱۶,۲-۲۶,۲-۳۴,۷
نیمه هادی (a a r b c)	۰,۱	۲-۱۶,۳-۲۶,۳-۳۴,۸
عایقی (a b c)	۴,۵	۸-۲۰,۸-۳۰,۸-۳۹,۳
سرماپا اولیه (a b c)	۱	۸-۲۱,۸-۳۱,۸-۴۰,۳
سرماپا ثانویه (a b c)	۱,۵	۳-۲۳,۳-۳۳,۳-۴۱,۸
لایه محافظ	۱	۸-۴۲,۸
غلاف بیرونی	۳	۸-۴۵,۸

جدول ۴-۴ مشخصات نوار مورد استفاده در کابل ۲۲,۹ کیلوولت [۷۰]

نوع نوار ابررسانا و ضخامت لایه های نوار ابررسانا	YBCO
نوع تثبیت کننده و ضخامت	مس - ۴۰ میکرومتر (۲۰ میکرومتر بالا و ۲۰ میکرومتر پایین)
ضخامت لایه نقره	۳,۸ میکرومتر
ضخامت لایه Buffer	۰,۲ میکرومتر
ضخامت لایه Hastelloy	۵۰ میکرومتر
ضخامت و عرض کلی نوار	۴,۴ میلی متر عرض در ۰,۱ میلی متر ضخامت



شکل ۲-۴ نوار ساخته شده شرکت South Wire

سایر مشخصات مربوط به نوار ابرسانای YBCO در جدول ۴-۵ بیان شده است. سایر مشخصات کابل نیز در جدول ۴-۶ نشان داده شده است. این مشخصات به صورت مستقیم در مشابه سازی ها تاثیری ندارد و تنها به عنوان نکات تکمیلی ذکر شده است.

جدول ۴-۵ مشخصات نوارهای مورد استفاده در کابل ابرسانا

ردیف	فاز	گام پیچش (میلی متر)
۱	A	$-214,710.4 + 326,657.1$
۲	B	$+221,734.1$
۳	C	$+164,142.1$
*	فاز	زاویه پیچش (درجه)
۱	A	$16.2-18.1$
۲	B	30.1
۳	C	45.1
*	مشخصات	میزان

جدول ۴-۶ مشخصات مکانیکی کابل ابرسانای تحت مطالعه

مشخصه	ویژگی
بار حرارتی سیستم	۵ کیلووات
سیستم خنک کننده	سیستم خنک کننده هیبریدی با کرایوکولر استرلینگ به عنوان سیستم اصلی و کرایوکولر Gifford McMahon به عنوان پشتیبان
فاصله بین پیوندگاه های چرخش ماده خنک کننده	۵۰۰ متر
نوع ماده خنک کننده	LN_2
فاصله پیوندگاه های الکتریکی	۱ کیلومتر
نرخ دبی جرمی	0.51 kg/s
چگالی مس مورد استفاده در نگه دارنده	1900 kg/m^3
چگالی اتمی مس مورد استفاده در نگه دارنده	0.0635 kg/mol
اتلاف حرارتی پیوندگاه الکتریکی	100 W ، N برابر است با تعداد پیوندگاه
اتلاف حرارتی پایانه الکتریکی	100 W ، N برابر است با تعداد پایانه الکتریکی
عمق و عرض داکت زیرزمینی کابل	۳۰ متر در ۱۷۵ میلی متر
اندوکتانس کابل	0.21 mH/km/core
کاپاسیتانس کابل	0.32 nF/km/core

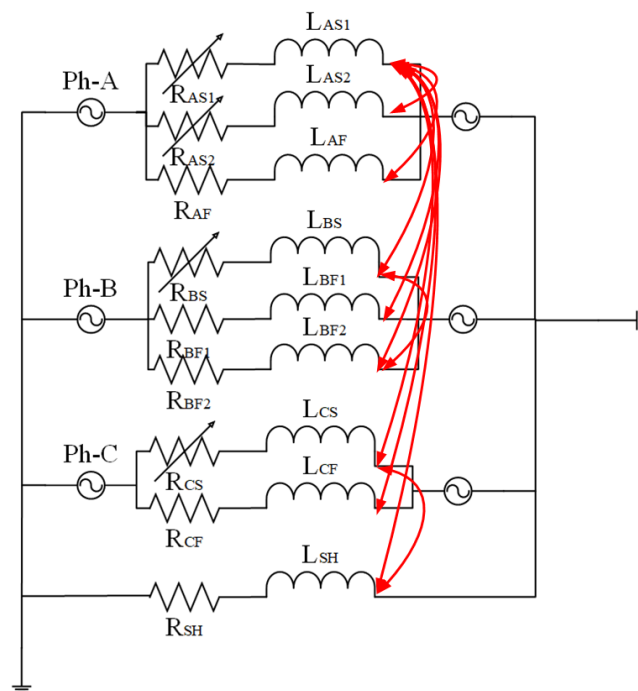
لازم به ذکر است با استفاده از معادلات و روابط مطرح شده در بخش ۳-۱-۱، بارحرارتی سیستم حدود ۴٫۸ کیلووات محاسبه شد که با در نظر گرفتن ۲۰۰ وات برای تلفات گردش نیتروژن مایع و تلفات عایقی، میزان ۵ کیلووات برای کابل در نظر گرفته شد. بنابراین نیاز به کرایوکولری است که توان خنک کنندگی حدود ۶ تا ۷ کیلووات را در دمای ۷۰ درجه کلوین تامین کند. از این رو از یک سیستم هیبریدی استفاده شد که در آن سیستم اصلی متشکل از دو کرایوکولر استرلینگ با توان خنک کنندگی

۷ کیلووات است و سیستم پشتیبان دو عدد کرایوکولر Gifford McMahon است که توان خنک‌کنندگی ۷ کیلوواتی را نیز در سیستم پشتیبان به ما می‌دهد.

۲-۴ مدل مداری یک کابل ابررسانا

جهت بررسی رفتار یک کابل ابررسانا تحت حالت گذرا نیاز به شبیه‌سازی دقیق از رفتار کابل تحت جریان‌ها و ولتاژهای گوناگون است. همگام با این موضوع، ساختار شبکه نیز بر رفتار گذرای یک کابل بسیار موثر بوده و مدل‌سازی دقیق شبکه نیز می‌تواند در رفتار کابل بسیار تاثیرگذار باشد. همانطور که در بخش قبل مطرح شده، مدل‌های مبتنی بر المان محدود در فراهم کردن یک شبکه گسترده برای تست مدل کابل بسیار محدود بوده و یا پیاده‌سازی چنین حالتی بسیار دشوار و زمان‌بر است. بنابراین در این مطالعه از مدل مدار معادل استفاده شده است که قابلیت مدل‌سازی رفتار کابل ابررسانا را تحت هر شرایطی دارا است. مدل مدار معادل جهت بررسی رفتار کابل در شبکه‌های گسترده بسیار مناسب است و این قابلیت را دارد تا درک درستی از تغییرات الکتریکی، مغناطیسی و حرارتی کابل فراهم نماید. مدل مداری کابل ابررسانای معرفی شده در بخش قبل را می‌توان به صورت شکل ۴-۳ نمایش داد. در این شکل زیرنویس ABC مربوط به فازهای سه‌گانه، S مربوط به لایه ابررسانا، F مربوط به لایه نگه‌دارنده و SH مربوط به لایه شیلد است. اندوکتانس‌های خودی و مشترک و کاپاسیتانس مورد استفاده در این کابل بر اساس رابطه (۳-۳۱) و (۳-۳۲) قابل محاسبه هستند [۷۱]. در جدول ۴-۷ کاپاسیتانس‌ها و در جدول ۴-۸ مقادیر اندوکتانس‌های خودی و مشترک نشان داده شده‌اند.

به منظور مدل کردن نوارهای ابررسانا لازم است تا آن‌ها را به صورت یک مدل مداری در نظر گرفت. جهت انجام این کار و با توجه به ساختار نوار ابررسانای استفاده شده، یک مدل مداری به صورت شکل ۴-۴ برای هر نوار ابررسانا در نظر گرفته شده است. با مدل‌سازی کابل مذکور بر اساس مدل مداری نوارها و بخش‌های مختلف آن، این امکان وجود دارد تا عملکرد مدل مطروحه در یک شبکه مورد ارزیابی قرار گیرد. شکل ۴-۵ مدل شبکه ساده مورد استفاده در این پایان‌نامه را نشان می‌دهد. مشخصات اولیه این شبکه در جدول ۴-۹ مطرح شده‌اند که مطابق با شرایط محل نصب آن در کشور کره جنوبی است. به همین جهت، این شبکه به مانند بسیاری از مقالات برای بررسی و تست مدل ارائه شده مورد بررسی قرار گرفته شده است. شکل ۴-۶ نشان‌دهنده مدل پیاده‌سازی شده در سمولینک است که به ترتیب برای شبکه، یک بخش از نوار ابررسانا و کل کابل ابررسانا است.



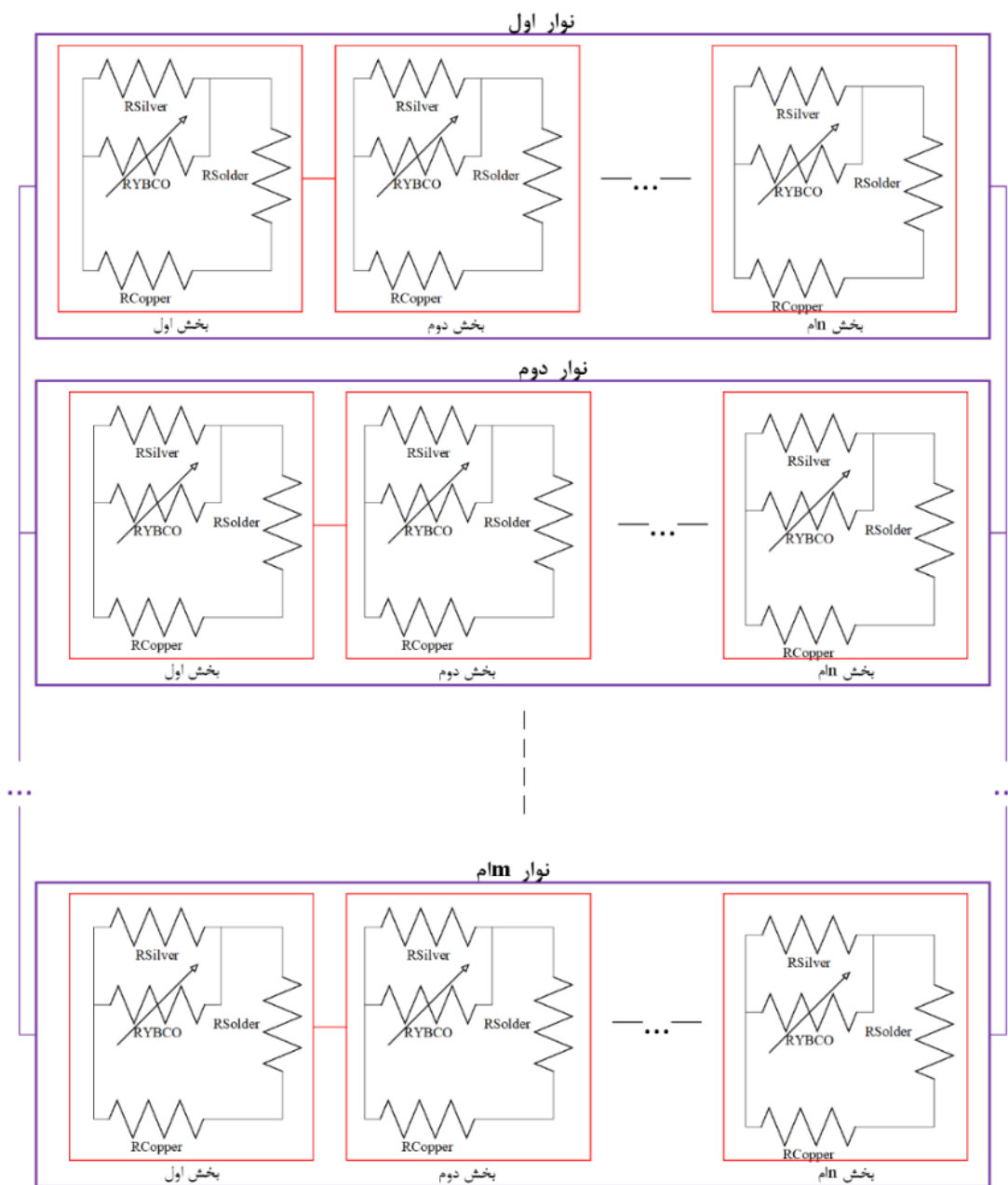
شکل ۳-۴ مدل مدار معادل کابل مورد مطالعه

جدول ۷-۴ مقادیر کاپاسیتانس های کابل طراحی شده

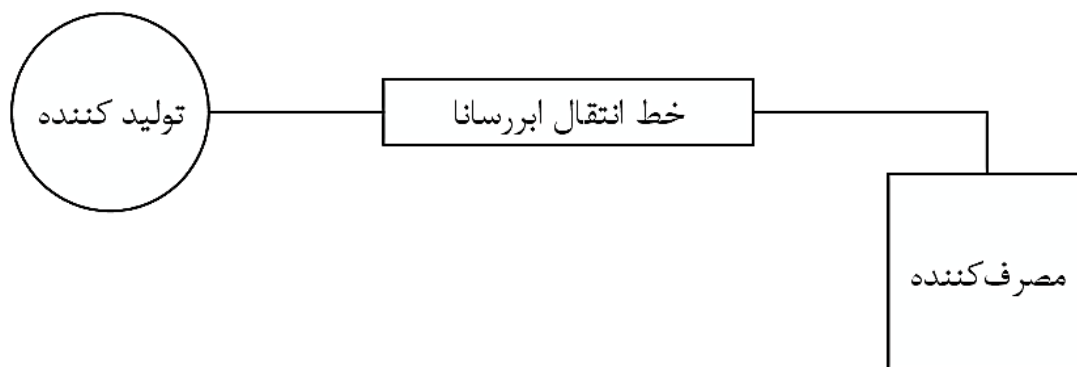
اندازه (نانوفاراد)	کاپاسیتانس
۶۰٫۹	Cab
۵۰٫۷	Cbc
۷۴٫۴	Ccsh

جدول ۸-۴ مقادیر اندوکتانس های خودی و مشترک بر حسب میلی هانری

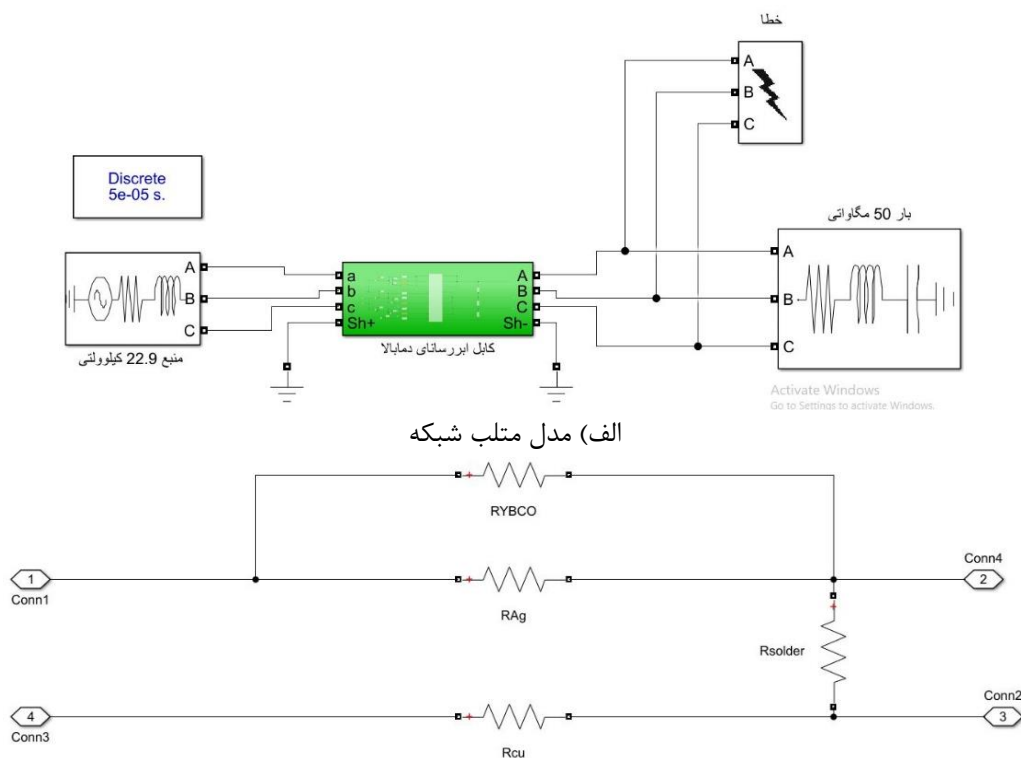
لایه	ابرسانای اول A	ابرسانای دوم A	نگهدارنده A	ابرسانای B	نگهدارنده اول B	نگهدارنده دوم B	ابرسانای C	نگهدارنده C	شیلد
ابرسانای اول A	۰٫۰۲۴	۰٫۰۲۳۸	۰٫۰۲۳۷	۰٫۰۲۳۵	۰٫۰۲۳۴	۰٫۰۲۳۳	۰٫۰۲۲۹	۰٫۰۲۲۹	۰٫۰۲۲۵
ابرسانای دوم A	۰٫۰۲۴	۰٫۰۲۳۸	۰٫۰۲۳۷	۰٫۰۲۳۵	۰٫۰۲۳۴	۰٫۰۲۳۳	۰٫۰۲۲۹	۰٫۰۲۲۹	۰٫۰۲۲۵
نگهدارنده A	۰٫۰۲۳۷	۰٫۰۲۳۷	۰٫۰۲۳۸	۰٫۰۲۳۵	۰٫۰۲۳۴	۰٫۰۲۳۳	۰٫۰۲۲۹	۰٫۰۲۲۹	۰٫۰۲۲۵
ابرسانای B	۰٫۰۲۳۵	۰٫۰۲۳۵	۰٫۰۲۳۵	۰٫۰۲۳۵	۰٫۰۲۳۴	۰٫۰۲۳۳	۰٫۰۲۲۹	۰٫۰۲۲۹	۰٫۰۲۲۵
نگهدارنده اول B	۰٫۰۲۳۴	۰٫۰۲۳۴	۰٫۰۲۳۴	۰٫۰۲۳۴	۰٫۰۲۳۵	۰٫۰۲۳۳	۰٫۰۲۲۹	۰٫۰۲۲۹	۰٫۰۲۲۵
نگهدارنده دوم B	۰٫۰۲۳۳	۰٫۰۲۳۳	۰٫۰۲۳۳	۰٫۰۲۳۳	۰٫۰۲۳۳	۰٫۰۲۳۳	۰٫۰۲۲۹	۰٫۰۲۲۹	۰٫۰۲۲۵
ابرسانای C	۰٫۰۲۲۹	۰٫۰۲۲۹	۰٫۰۲۲۹	۰٫۰۲۲۹	۰٫۰۲۲۹	۰٫۰۲۲۹	۰٫۰۲۳	۰٫۰۲۲۹	۰٫۰۲۲۵
نگهدارنده C	۰٫۰۲۲۹	۰٫۰۲۲۹	۰٫۰۲۲۹	۰٫۰۲۲۹	۰٫۰۲۲۹	۰٫۰۲۲۹	۰٫۰۲۲۹	۰٫۰۲۲۹	۰٫۰۲۲۵
شیلد	۰٫۰۲۲۵	۰٫۰۲۲۵	۰٫۰۲۲۵	۰٫۰۲۲۵	۰٫۰۲۲۵	۰٫۰۲۲۵	۰٫۰۲۲۵	۰٫۰۲۲۵	۰٫۰۲۲۶



شکل ۴-۴ مدل مداری لایه ابرسانی کابل در هر فاز، برای یک لایه با m نوار ابرسانا



شکل ۵-۴ شبکه تست استفاده شده در این مطالعه



الف) مدل متلب شبکه
 ب) مدل متلب یک بخش نوار ابرسانا
 شکل ۴-۶ سیمولینک نوار، کابل و شبکه
 جدول ۴-۹ مشخصات شبکه تست مورد استفاده

مشخصات تولیدکننده		مقدار	واحد
ولتاژ تولیدی	۲۲,۹	کیلوولت	
توان تولیدی	۵۰	مگاوات آمپر	
امپدانس داخلی	۰,۰۸۵	اهم	
فرکانس	۶۰	هرتز	
مشخصات خط انتقال		مقدار	واحد
طول	۱۰۰۰	متر	
جریان نامی	۱۵۰۰	آمپر	
مشخصات مصرف کننده		مقدار	واحد
سطح ولتاژ	۲۲,۹	کیلوولت	
توان ظاهری	۵۰	مگاوات آمپر	

۳-۴ رفتار کابل ابرسانا تحت شرایط مانای شبکه

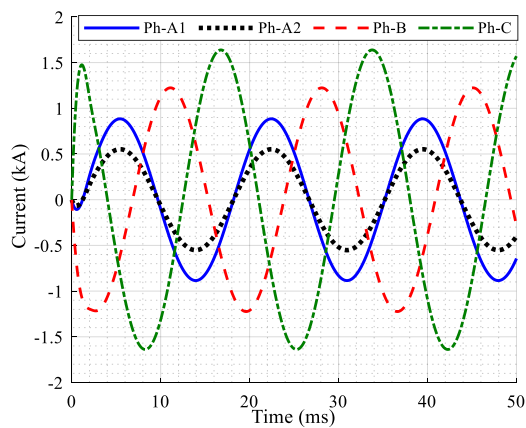
شکل ۴-۷ نشان دهنده جریان عبوری از کابل ابرسانا در حالت مانا یا نرمال شبکه است. قسمت (الف) جریان کل، قسمت (ب) جریان عبوری از لایه ابرسانا و (پ) جریان عبوری از نگه دارنده های هر فاز را

نشان می‌دهد. همانطور که از شکل ۴-۷ مشخص است، غالب جریان نرمال شبکه، از لایه ابررسانا عبور می‌کند که ناشی از مقاومت نزدیک صفر این لایه در حالت نرمال شبکه است. باید بیان کرد که تفاوت ایجاد شده در حداکثر جریان عبوری از لایه‌های ابررسانای فازهای مختلف در حالت نرمال، ناشی از تفاوت در سطح مقطع لایه نگه‌دارنده فازهای سه‌گانه است. این امر باعث می‌شود تا تعداد نوارهای ابررسانا در هر فاز متفاوت بوده و در نتیجه حداکثر جریان عبوری از لایه‌های ابررسانای هر فاز با فازهای دیگر اختلاف داشته باشد. علت تفاوت در جریان عبوری از لایه نگه‌دارنده در حالت مانا نیز مشابه لایه ابررسانا است، با این تفاوت که افزایش سطح مقطع مفید^{۵۹} لایه نگه‌دارنده از فاز درونی (فاز A) تا فاز بیرونی (فاز C) منجر به کاهش مقاومت مخصوص و مقاومت لایه نگه‌دارنده شده و در نتیجه جریان بیشتری از نگه‌دارنده بیرونی عبور می‌کند.

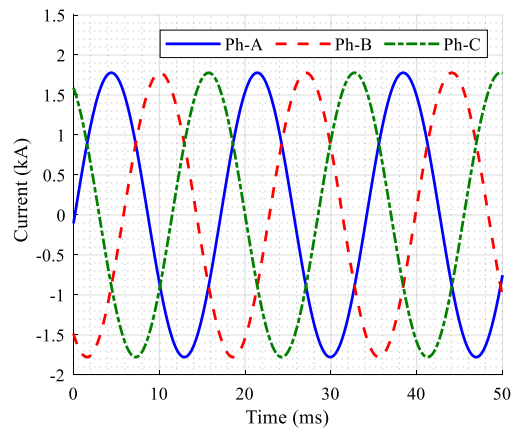
با عبور این جریان از لایه ابررسانا در هر فاز، یک میدان مغناطیسی در کابل القاء می‌شود که برآیند آن به صورت شکل ۴-۸ نشان داده می‌شود. دلیل تفاوت میزان میدان‌های مغناطیسی ایجاد شده در فازهای مختلف کابل، تفاوت در زاویه پیچش آن‌ها است. فاز A دارای کم‌ترین زاویه پیچش است و باید دارای بیشترین میدان مغناطیسی باشد، اما به دلیل آن که دارای دو لایه نوار ابررسانا است که در جهت مخالف هم پیچیده شده‌اند، میدان ناشی از این دو لایه ابررسانا در فاز A یک‌دیگر را خنثی کرده و میدان به میزان حداقلی خود در کابل می‌رسد. پس از آن میدان در فاز B با زاویه پیچش حدوداً $30/1$ درجه بسیار بیشتر از فاز C با زاویه پیچش حدود $45/8$ است. در واقع با افزایش زاویه پیچش جزء غالب میدان مغناطیسی (در اینجا همان جزء موازی) کاهش پیدا می‌کند.

با القاء میدان مغناطیسی در نوارهای ابررسانا و هم‌چنین عبور جریان از این نوارها، بنابر آنچه که در فصل سوم گفته شد به ترتیب تلفات جریان عبوری و هیستریزیس در کابل پدیدار می‌شوند که مجموع این تلفات با نام تلفات جریان متناوب در شکل ۴-۹ نشان داده شده است. همانطور که مشخص است فاز B دارای بیشترین تلفات در بین فازهای سه‌گانه است. این به دلیل آن است که میدان مغناطیسی موازی و عمود این فاز از سایر فازها بیشتر است. فاز C نیز به دلیل زاویه پیچش بالای خود دارای تلفاتی اندک است. در نهایت، لایه ابررسانای دوم فاز A نیز به دلیل جهت پیچش پادساعت‌گرد خود میدان مغناطیسی و تلفات اندکی را دارا است. لازم به ذکر است که افزایش زاویه پیچش در فازهای اولیه تا ثالثیه بیش‌تر از حدود مکانیکی موجود، ممکن نبوده و این امر منجر به شکست الکترومکانیکی نوارهای ابررسانا در این فازها می‌شود. در واقع پس از انجام صحیح و خطاهای فراوان، این زوایا به عنوان بهترین حالت ممکن برای این ساختار کابل، انتخاب شدند. هم‌چنین در صورت تغییرات جهت پیچش نوارهای ابررسانا برای تعدیل و یا کاهش تلفات، توزیع یکنواخت جریان‌ها بین فازها از بین رفته که این امر منجر به افزایش چشم‌گیر تلفات می‌شود.

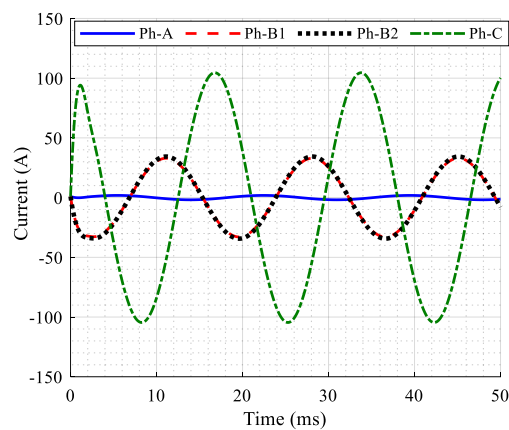
^{۵۹} Efficient Cross-Section



(ب)

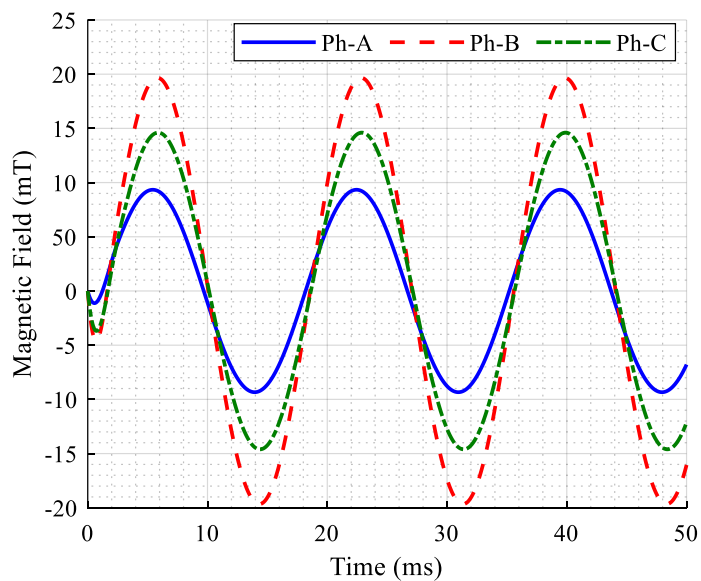


(الف)

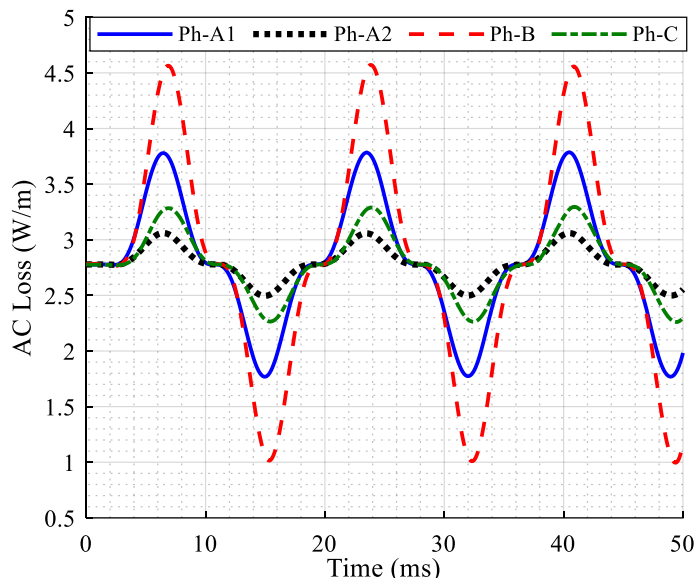


(ب)

شکل ۴-۷ جریان مانای عبوری از لایه‌های مختلف هر فاز کابل ابرسانا، الف) جریان شبکه ورودی به کابل ب) جریان عبوری از لایه ابرسانای کابل پ) جریان عبوری از لایه نگهدارنده کابل



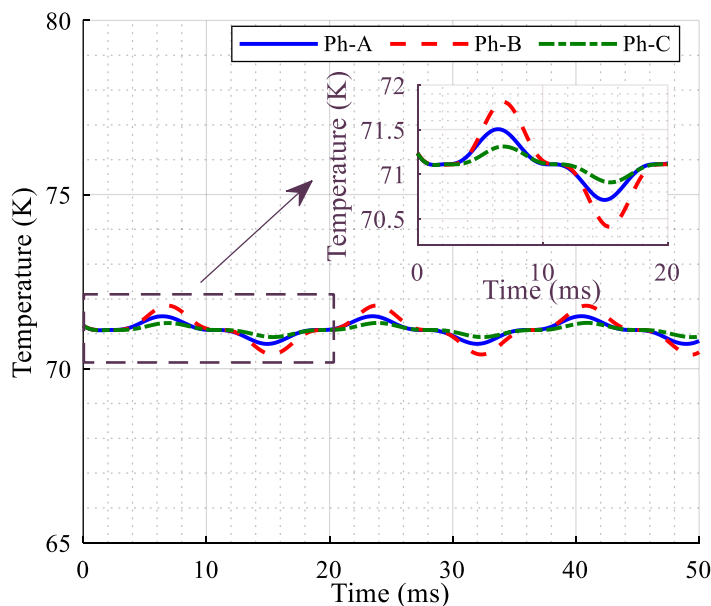
شکل ۴-۸ میدان مغناطیسی برآیند کابل ابرسانا در حالت مانا



شکل ۴-۹ تلفات جریان متناوب هر فاز

در اثر پدیدار شدن تلفات جریان متناوب در کابل، دمای نوارهای ابرسانا شروع به افزایش می‌کند. این افزایش دما در شکل ۴-۱۰ نشان داده شده است. اختلاف دما در فازهای گوناگون با توجه به میزان تلفات این فازها توجیه‌پذیر است. همانطور که در شکل ۴-۱۰ قابل مشاهده است، دما در حالت مانای کابل تغییرات چندانی نداشته و بین $1/44$ درصد تا $2/5$ درصد دمای عملیاتی تغییر می‌کند. این تغییرات عملاً موجب خارج شدن کابل از حالت ابرسانایی نمی‌شود.

با وجود این که دما، میدان و جریان در محدوده‌ای موسوم به مثلث ابرسانایی عملکرد دارند، جریان بحرانی و میزان شاخص تحت تغییرات اندک موارد مذکور نیز دچار تغییراتی می‌شوند که در پیشرو به تاثیرات این عوامل بر جریان بحرانی و میزان شاخص پرداخته خواهد شد.

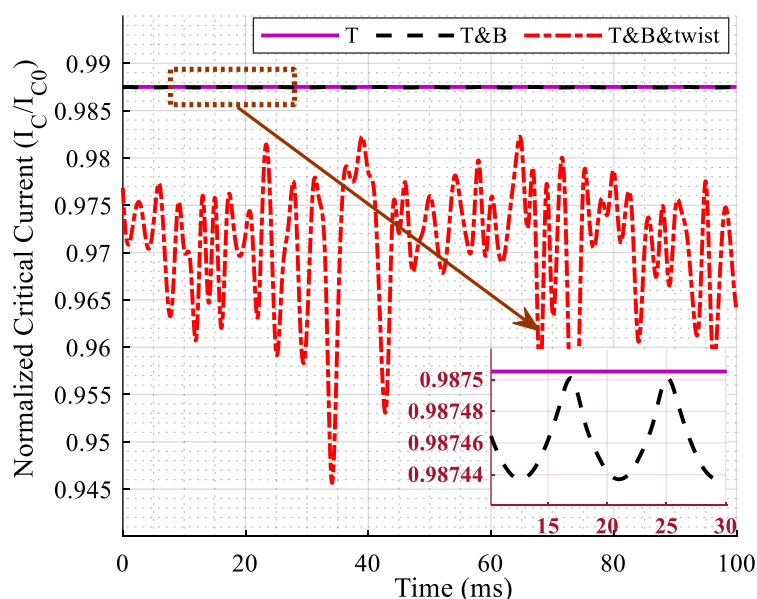


شکل ۴-۱۰ دمای کابل ابرسانا در حالت مانای شبکه

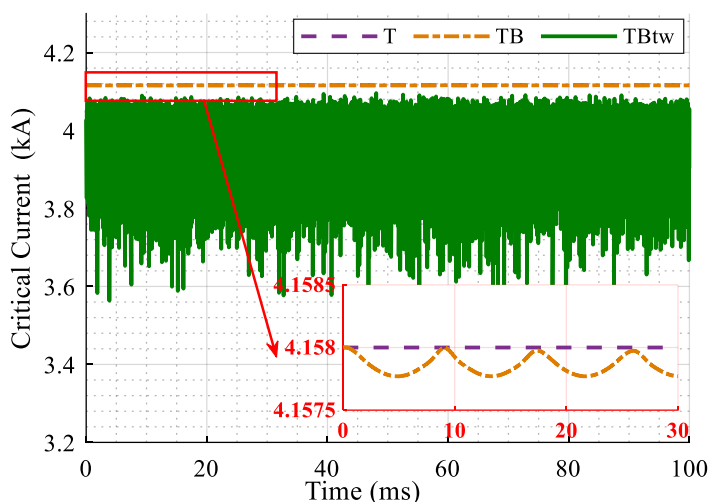
۴-۳-۱ تحلیل تغییرات جریان بحرانی

جریان بحرانی نوارهای ابررسانا در هر لایه تحت تاثیر سه عامل مهم دچار تغییرات می شود که این عوامل عبارتند از دما، میدان و پیچش. پیچش نوارهای ابررسانا و چگونگی تاثیر آن بر میزان تغییرات جریان بحرانی را می توان به دو صورت تحلیل کرد. در حالت اول که تاثیر غیرمستقیم نام دارد، پیچش باعث ایجاد تغییراتی در تلفات و دمای منته می شود. تاثیر ثانویه که تاثیر الکترومکانیکی نام دارد، نتیجه شکست های مکانیکی در نوار ابررسانا است که منجر به کاهش جریان بحرانی نوارها می شود. همانطور که در بخش قبل مطرح شد، جهت بررسی این رفتار الکترومکانیکی از روشی موسوم به روش تصادفی مونت کارلو و تقسیم هر سانتی متر از نوار به یک بخش، استفاده شده است.

شکل ۴-۱۱ نشان دهنده تغییرات جریان بحرانی نرمال شده نوارها بر حسب دما، میدان و پیچش است. این نتایج برای تعداد سکن صد هزار حاصل شده است. با این وجود با تعداد سکن کم تر نیز این نتایج قابل حصول هستند. بنابر شکل ۴-۱۱ جریان بحرانی نرمالیزه شده برای حالتی که هر سه عامل دخیل شده اند، بین ۰,۹۴۸ جریان بحرانی محاسبه شده تا ۰,۹۸۲ این مقدار تغییر پیدا می کند. این در حالی است که اگر تنها میدان و حرارت را در نظر بگیریم این میزان بین ۰,۹۸۷۴۴ تا ۰,۹۸۷۵ تغییر پیدا می کند و در حالتی که تنها دما مدل شود، این میزان تقریباً ثابت است. این امر نشان دهنده افزایش ۰,۵۶ درصدی تا ۳,۹۹ دقت شبیه سازی در حالت مانا است. شایان ذکر است که با افزایش تعداد بخش بندی این میزان را می توان اندکی نیز بهبود بخشید و با کاهش تعداد بخش ها این میزان کاهش پیدا می کند. از این رو لازم است تا به بررسی تغییرات دقت بر حسب تغییرات تعداد سکن پرداخت. جهت اعتبار سنجی روش ارائه شده، جریان بحرانی کل کابل نیز مورد بررسی قرار گرفته است که شکل ۴-۱۲ تغییرات جریان بحرانی کل کابل ابررسانا را بر اساس تغییرات بر حسب دما، میدان و پیچش نشان می دهد.



شکل ۴-۱۱ تغییرات جریان بحرانی بر حسب دما، میدان و پیچش

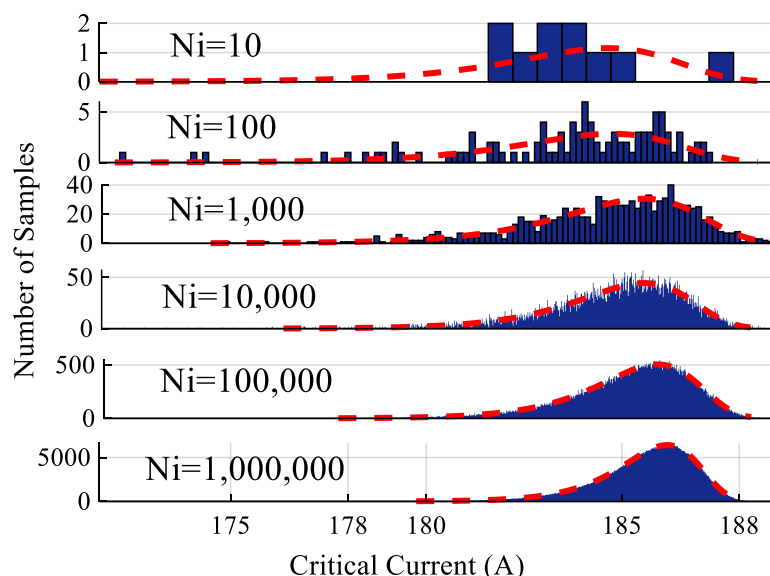


شکل ۴-۱۲ تغییرات جریان بحرانی کل کابل ابرسانا بر حسب دما، میدان و پیچش

۴-۳-۱-۱ تأثیر تعداد سکشن بر تغییرات جریان بحرانی

با افزایش تعداد سکشن میزان دقت به صورت قابل توجهی افزایش پیدا می‌کند با این وجود زمان شبیه‌سازی نیز با افزایش تعداد سکشن افزایش پیدا می‌کند. در این بخش به بررسی تأثیر تعداد سکشن‌ها پرداخته شده است. شکل ۴-۱۳ نشان‌دهنده تغییرات تابع توزیع احتمالی برای سکشن‌های مختلف است. همانطور که مشخص است، با افزایش تعداد سکشن از ده سکشن تا یک میلیون سکشن، دقت شبیه‌سازی بسیار بالا می‌رود. با این وجود باید چگونگی تغییرات سرعت شبیه‌سازی را در اثر تغییرات تعداد سکشن بررسی و تحلیل کرد. هم‌چنین باید بررسی شود که در اثر این تغییرات میزان جریان بحرانی پیش‌بینی شده تا چه میزان کاهش پیدا می‌کند. جدول ۴-۱۰ چگونگی روند این تغییرات را بررسی می‌کند. همانطور که مشخص است با افزایش تعداد سکشن از ۱۰ به ۱۰۰، زمان شبیه‌سازی ۹،۹ برابر افزایش پیدا می‌کند. این میزان برای تغییرات از ده هزار سکشن به صد هزار سکشن ۱۱،۶ است. این در حالی است که نسبت میزان جریان بحرانی تخمینی در این حالت ۰،۹۸۳ است. این بدان معنا است که با افزایش تعداد سکشن از ده هزار به صد هزار میزان جریان بحرانی نوارهای ابرسانا در فاز ۰،۹۸۳ A برابر حالت ده هزار سکشن است. درواقع با افزایش تعداد سکشن از صد هزار به مقادیر بالای یک میلیون میزان جریان بحرانی تغییرات قابل توجهی نداشته و قابل چشم‌پوشی است. در واقع ده هزار سکشن برای یک کابل یک کیلومتری میزان مناسبی است با این وجود در این پایان‌نامه تعداد بخش‌ها صد هزار انتخاب شده است تا دقت شبیه‌سازی به حداکثر میزان ممکن برسد. شایان ذکر است که زمان‌های ارائه شده برای شبیه‌سازی در جدول ۴-۱۰ با بهبود سخت‌افزاری باز هم کاهش پیدا خواهند کرد. ویژگی‌های سیستم مورد استفاده عبارتند از:

- حافظه RAM: ۱۶ گیگابایت DDR۳
- پردازشگر: هشت هسته AMD Ryzen ۷ ۱۷۰۰

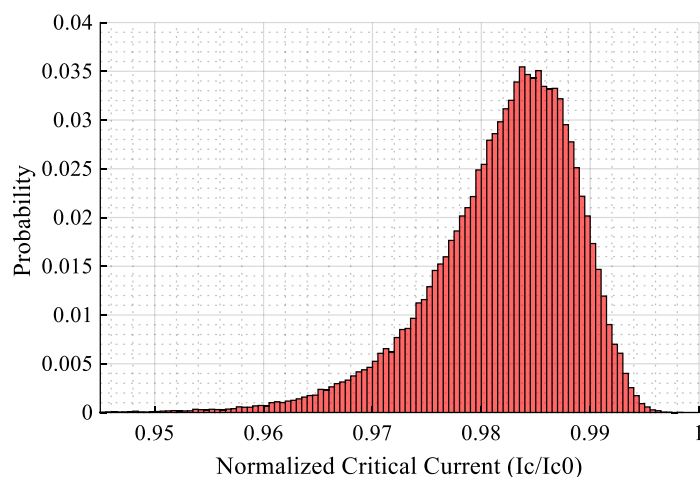


شکل ۴-۱۳ تاثیر تغییرات تعداد سکشن بر مدل سازی صحیح رفتار الکتریکی نوار ابررسانا در فاز A

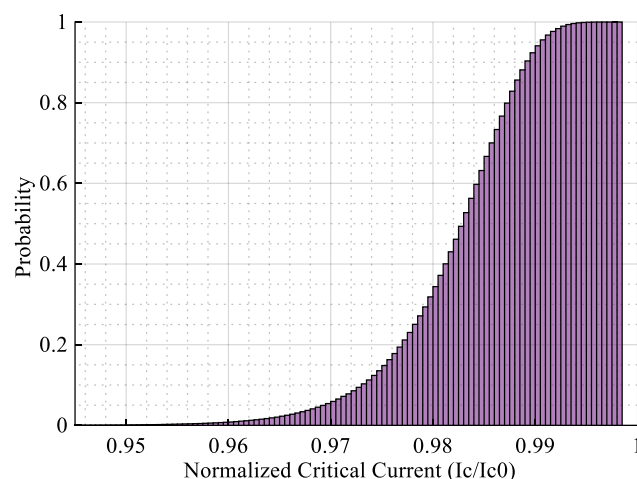
جدول ۴-۱۰ تاثیر تغییرات تعداد سکشن بر جریان بحرانی تخمینی و سرعت محاسبات

تعداد سکشن	زمان شبیه سازی (ثانیه)	حداقل میزان جریان بحرانی نرمال شده حاصله
۱۰	۲۱۰	۰٫۹۶۵
۱۰۰	۲۰۷۸	۰٫۹۶
۱۰۰۰	۳۰۱۵۴	۰٫۹۴۹
۱۰۰۰۰	۲۸۰۰۰ (۷ ساعت)	۰٫۹۳۶
۱۰۰۰۰۰	۳۲۵۰۰۰ (۴ روز)	۰٫۹۲
۱۰۰۰۰۰۰	۲۰۹۷۵۰۲۰۰ (۲۴ روز)	۰٫۹۱۵

حال باید بررسی کرد که با انتخاب تعداد سکشن صدهزار، نوارهای ابررسانا دارای چه رفتار الکترومکانیکی هستند. شکل ۴-۱۴ نشان دهنده تابع توزیع احتمالی برای تغییرات جریان بحرانی نرمالیزه شده است. همانطور که در این شکل دیده می شود، محدوده ۰/۹۶۵ تا ۰/۹۹۵، بازه ای است که دارای بیشترین احتمال رخداد است که به مقادیر مورد انتظار برای نوارهای ابررسانا بسیار نزدیک است. در واقع جریان بحرانی نرمال شده هرگز به میزان ۱ نمی رسد و همواره دچار کاهش می گردد. شکل ۴-۱۵ رفتار تغییرات جریان بحرانی را تحت تاثیر پیچش از دید تابع توزیع تجمعی نشان می دهد. در واقع شکل ۴-۱۵ مقیاسی بهتر برای نشان دادن چگونگی رفتار یک نوار ابررسانا تحت پیچش است. همانطور که در این شکل مشهود است، بازه ۰/۹۸ تا ۱ دارای بیشترین احتمال است، این به آن معنا است که بیشترین توزیع جریان بحرانی در این بازه قرار داشته و در بازه های قبل از آن، جریان بحرانی احتمال کمتری برای وقوع دارد.



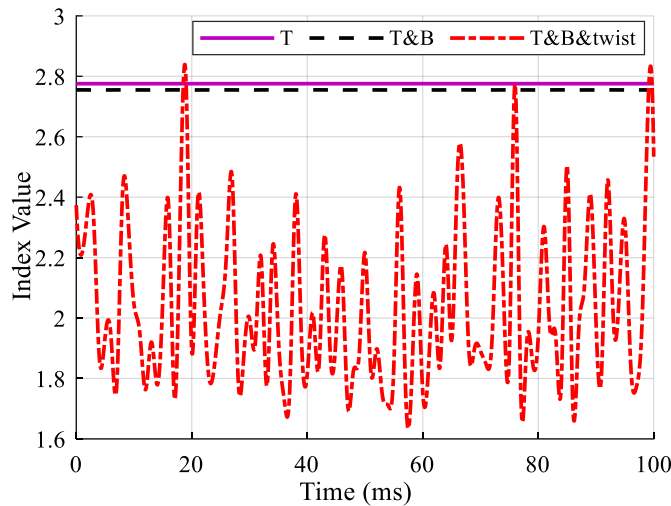
شکل ۴-۱۴ تابع توزیع احتمالی جریان بحرانی نرمالیزه شده برای تعداد سکشن صد هزار



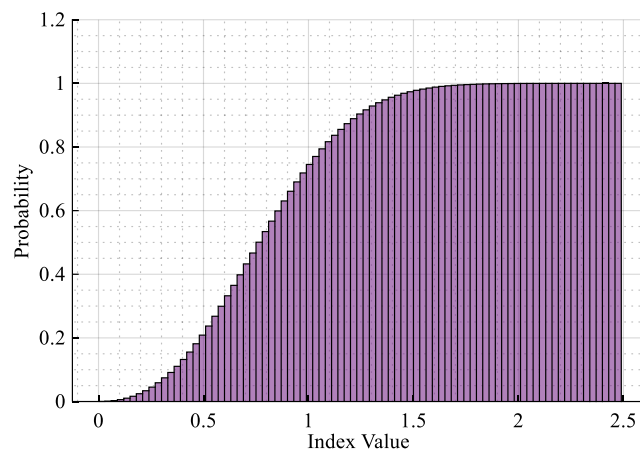
شکل ۴-۱۵ تابع توزیع تجمعی جریان بحرانی نوارهای ابررسانا

۴-۳-۲ تحلیل تغییرات میزان شاخص

میزان شاخص در قانون توانی E-J به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل افزایش مقاومت نوارهای ابررسانا مطرح می‌شود. این مقدار برای نوارهای YBCO حدوداً ۲٫۸ است ولی با این وجود تابعی از دما، میدان و پیچش است. شکل ۴-۱۶ نشان دهنده روند تغییرات مقدار با سه عامل مطرح شده است. بنابر شکل ۴-۱۶، میزان تغییرات این عامل بر حسب دما و یا میدان چندان قابل لمس نیست. با این وجود این تغییرات برای حالتی که پیچش نیز مستقیماً دخیل شود، به صورت چشم‌گیری ملموس هستند. این به آن دلیل است که میزان شاخص پارامتری ناشی از ذات ابررسانا و ذرات سازنده آن است و تغییرات میدان و دما چندان بر آن تاثیر گذار نیستند. این در حالی است که در اثر پیچش و نیروهای مکانیکی منته‌جه، رفتار ذرات تشکیل‌دهنده نوارهای ابررسانا دستخوش تغییراتی می‌شوند که منجر به دگرگونی‌های شدید در این پارامتر می‌شود. شکل ۴-۱۷ تابع توزیع تجمعی را برای میزان شاخص نشان می‌دهد. همانطور که مشهود است، بیشترین میزان شاخص بین ۱٫۲۵ تا ۲ است.



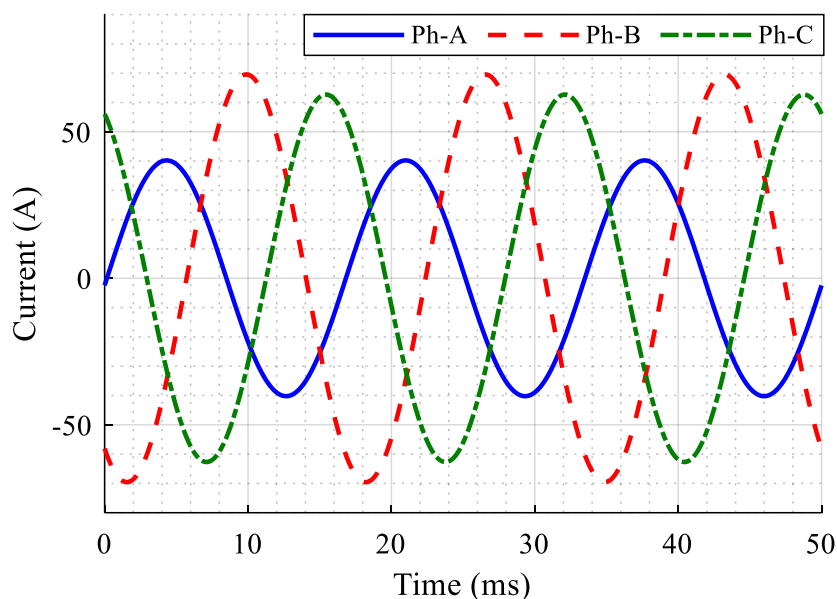
شکل ۴-۱۶ تغییرات میزان شاخص بر اساس دما، میدان و پیچش



شکل ۴-۱۷ تابع توزیع تجمعی تغییرات میزان شاخص

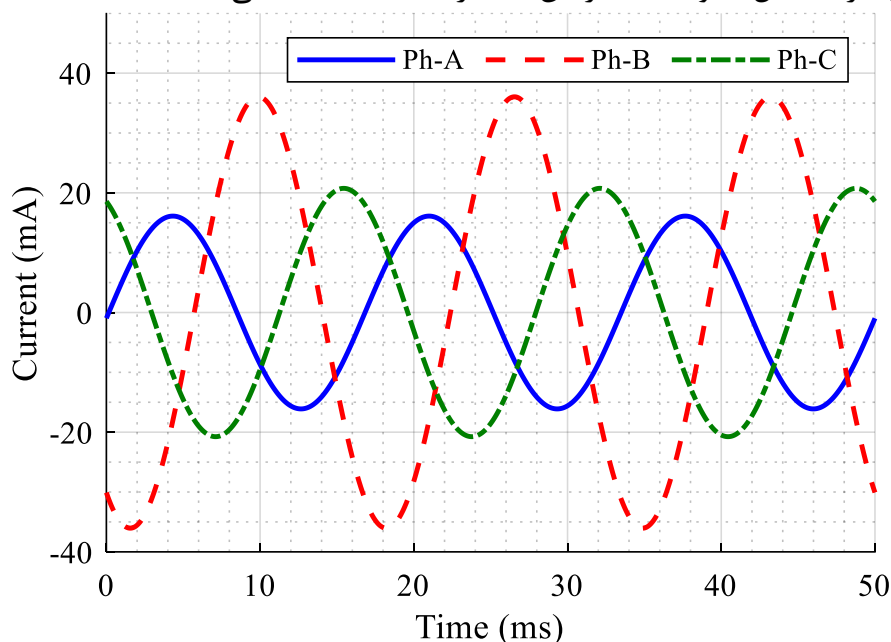
۳-۳-۴ رفتار الکتریکی لایه‌های نوار ابرسانا

در این بخش به بررسی رفتار یک نوار ابرسانا و لایه‌های مختلف آن تحت شرایط مانا شبکه پرداخته می‌شود. همانطور که در بخش قبل بیان گردید، یک نوار ابرسانا دارای لایه‌های مختلفی است که برخی از این لایه‌ها تنها به منظور حفاظت‌های مکانیکی در نوار وجود دارند و به دلیل مقاومت بسیار بالای خود علناً جریانی را از خود عبور نمی‌دهند. در این بخش تنها به بررسی سه لایه مهم در نوارهای ابرسانا پرداخته می‌شود، لایه هادی اصلی (ابرسانا)، لایه تثبیت‌کننده مسی و لایه محافظ مغناطیسی نقره‌ای. شکل ۴-۱۸ جریان عبوری از لایه ابرسانای یک نوار را نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، ۹۹/۹۹ درصد جریان نامی عبوری از نوار، از این لایه عبور می‌کند. دلیل اختلاف بین حداکثر جریان عبوری از نوارهای هر فاز، اختلاف تعداد نوارهای آن فازها است که در اثر تفاوت در شعاع لایه‌های نگه‌دارنده کابل حاصل گردیده است.

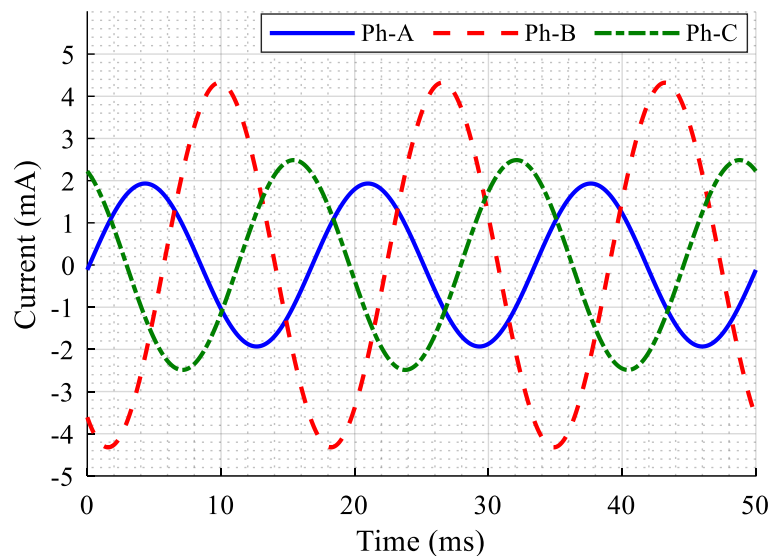


شکل ۴-۱۸ جریان عبوری از لایه ابرسانا نوارها در هر فاز

شکل ۴-۱۹ نشان‌دهنده توزیع جریان در ثابت‌کننده مسی نوارهای ابرسانا در هر فاز کابل است. همانطور که مشخص است جریان عبوری از این لایه حدوداً ۲۰ تا ۴۰ میلی‌آمپر است که یک صدم درصد جریان مانا است. البته تحت شرایط افزایش جریان و خطا این میزان نیز دچار افزایش می‌شود تا محافظتی الکتریکی برای لایه ابرسانا را پدید آورد. در شکل ۴-۲۰ جریان عبوری از لایه نقره‌ای نوار ابرسانا نشان داده شده است. همانطور که مشخص است جریان این لایه حتی از لایه مسی نیز کمتر بوده که این امر به دلیل مقاومت بیشتر این لایه در مقایسه با لایه مسی است.



شکل ۴-۱۹ جریان عبوری از لایه مسی نوارهای ابرسانا



شکل ۴-۲۰ جریان عبوری از لایه نقره نوارهای ابرسانا

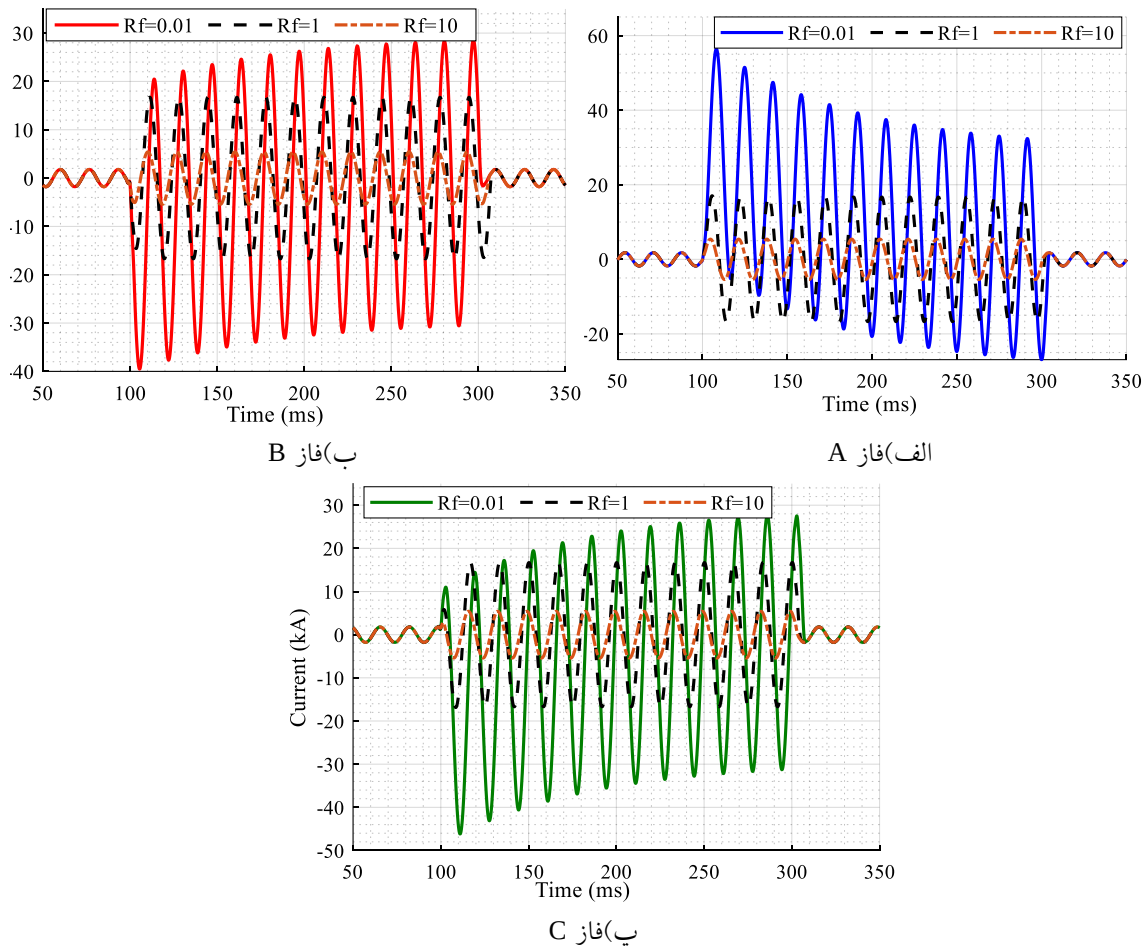
۴-۴ رفتار کابل ابرسانا تحت شرایط گذرا

در این بخش سعی بر آن است تا رفتار کابل ابرسانا تحت حالت‌های مختلف خطای شبکه بررسی شود. این حالت‌ها شامل تغییراتی در مقاومت خطا، طول زمان خطا و همچنین نوع خطا است. مقاومت خطا تحت تاثیر عوامل محیطی و سیستمی بسیار زیادی است که از میان آن‌ها می‌توان به طول جرقه ایجاد شده در حین خطا، محل وقوع خطا و ساختار شبکه اشاره کرد. در این تحقیق مقاومت خطا مقادیری بین ۰/۰۱ اهم تا ۱۰ اهم را اختیار می‌کند. عامل بعدی طول زمان خطا است که تحت تاثیر عملکرد کلیدهای حفاظتی یک سیستم قدرت قرار دارد. در این پایان‌نامه ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ ثانیه طول زمان خطاهای مدنظر ما هستند که بر اساس میانگین زمان عملکرد کلیدهای مختلف انتخاب شده‌اند. انواع خطا نیز عامل دیگری است که بر رفتار گذرای کابل ابرسانا موثر است که به تفصیل در بخش‌های بعدی بیان خواهند شد.

۴-۴-۱ تاثیر مقاومت خطا بر رفتار گذرای یک کابل ابرسانا

در این بخش از مطالعه به بررسی رفتار کابل ابرسانا تحت تغییرات مقاومت محل وقوع خطا پرداخته می‌شود. در این حالت بارگذاری با ضریب توان ۰/۹۶ درصد انجام شده و خطایی سه فاز به زمین در لحظه ۰/۱ به سیستم اعمال شده و در لحظه ۰/۳ برطرف می‌گردد. در نتیجه جریانی مانند آن‌چه که در شکل ۴-۲۱ نشان داده شده است به فازهای سه‌گانه کابل اعمال می‌شود. همانطور که مشخص است با افزایش مقاومت خطا، جریان خطا کاهش پیدا می‌کند. این کاهش جریان تا حدودی مناسب و قابل قبول است اما با افزایش مقاومت خطا از ممکن است جریان خطا از میزان جریان بحرانی لایه ابرسانا و

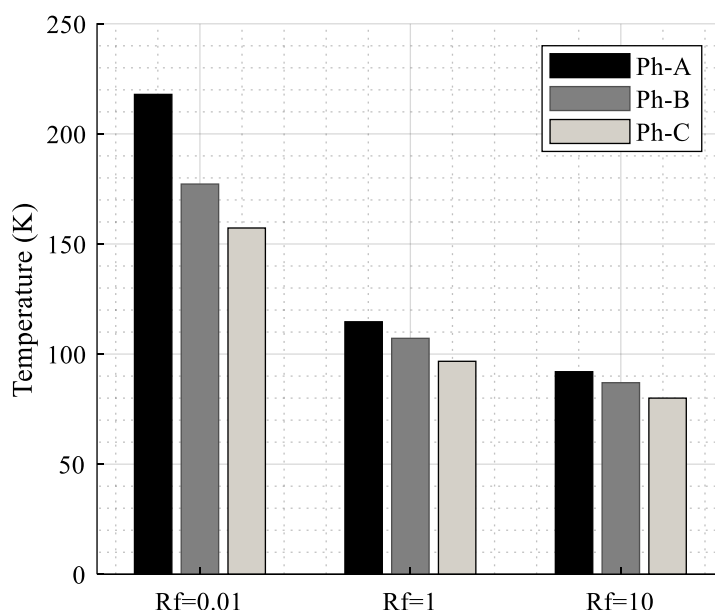
نوارهای موجود در آن کم‌تر شده که این امر ممکن است کابل را به حالت انتشار شار^{۶۰} برده و کابل بسوزد. بر این اساس باید بررسی کرد که جریان خطا در لایه‌های مختلف کابل ابرسانا چگونه توزیع می‌شود.



شکل ۴-۲۱ جریان عبوری از هر فاز کابل ابرسانا تحت حالت خطای شبکه و مقاومت‌های خطای مختلف

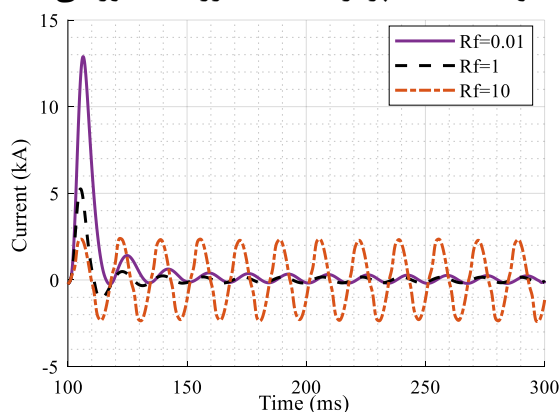
با عبور جریان‌های خطای مطرح شده در شکل ۴-۲۱، دما در لایه ابرسانا به صورتی ناگهانی شروع به افزایش کرده و با تعدی آن از میزان دمای بحرانی، نوارها وارد ناحیه غیرابرسانایی یا نرمال خود می‌شوند. در این حالت مقاومت لایه ابرسانای افزایش پیدا کرده و به میزان چند اهم می‌رسد. حداکثر دمای ایجاد شده در هر فاز کابل ابرسانا تحت مقاومت‌های خطای مختلف در شکل ۴-۲۲ نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشخص است، دما در خطا با مقاومت ۱۰ اهم از حد آستانه‌ای یا همان دمای بحرانی تعدی نکرده که این امر موجب ایجاد حالتی خاص در کابل می‌شود که در ادامه به صورت کامل بحث خواهد شد.

^{۶۰} Flux Flow State

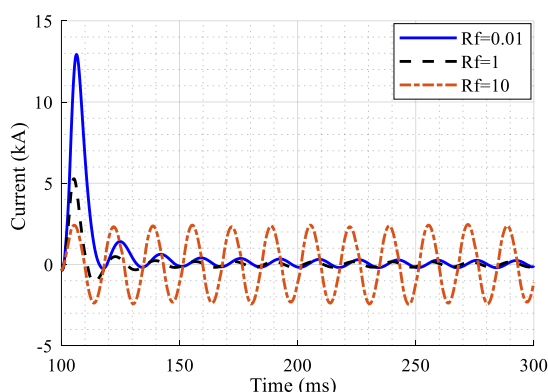


شکل ۲۲-۴ حداکثر دمای پدیدار شده در لایه ابررسانای کابل در اثر وقوع خطاهایی با مقاومت‌های مختلف

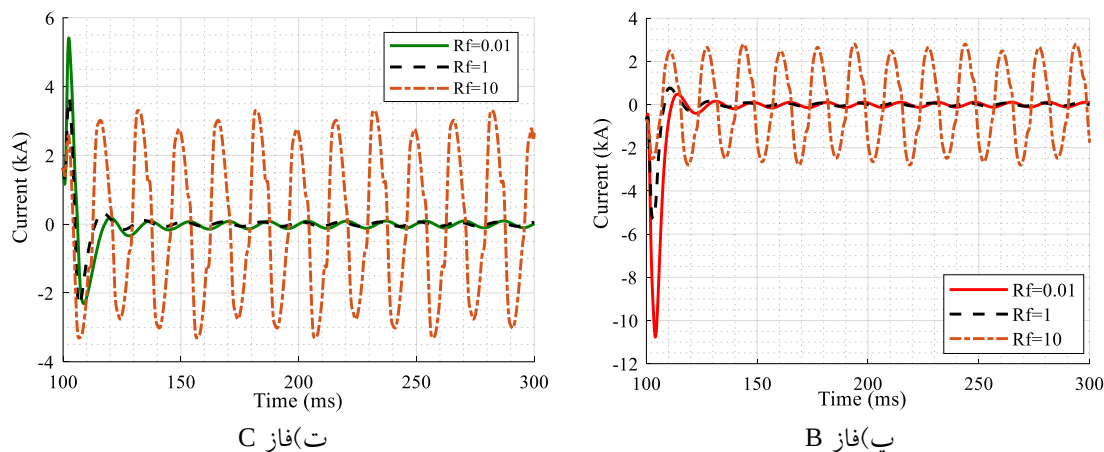
شکل ۲۳-۴ نشان‌دهنده جریان خطای عبوری از لایه ابررسانای فازهای سه‌گانه کابل است. همانطور که مشخص است در مقاومت‌های خطای ۰/۰۱ و ۱ اهم، ۱۰ میلی ثانیه پس از وقوع خطا نوارهای ابررسانا کاملاً وارد ناحیه نرمال شده و خواص ابررسانایی خود را از دست می‌دهند. در نتیجه این امر مقاومت آن‌ها افزایش پیدا کرده و جریان خطا از لایه با مقاومت کم‌تر که همان لایه نگه‌دارنده است عبور می‌کند. توزیع جریان در لایه‌های نگه‌دارنده در شکل ۲۴-۴ قابل مشاهده است. این امر در مقاومت خطای ۱۰ اهم معنا پیدا نکرده و لایه ابررسانا کاملاً وارد ناحیه غیرابررسانایی نمی‌شود. در اثر این پدیده، مقاومتی حدوداً برابر با مقاومت لایه نگه‌دارنده از خود نشان می‌دهد که منجر به تقسیم جریان بین دو لایه ابررسانا و مس می‌گردد. همانطور که از شکل ۲۱-۴ مشخص است جریان خطا در حین مقاومت خطای ۱۰ اهم حدوداً ۵۲۰۰ آمپر است که با توجه به شکل ۲۳-۴ حدود ۲۲۰۰ آمپر از لایه‌های ابررسانا عبور می‌کند.



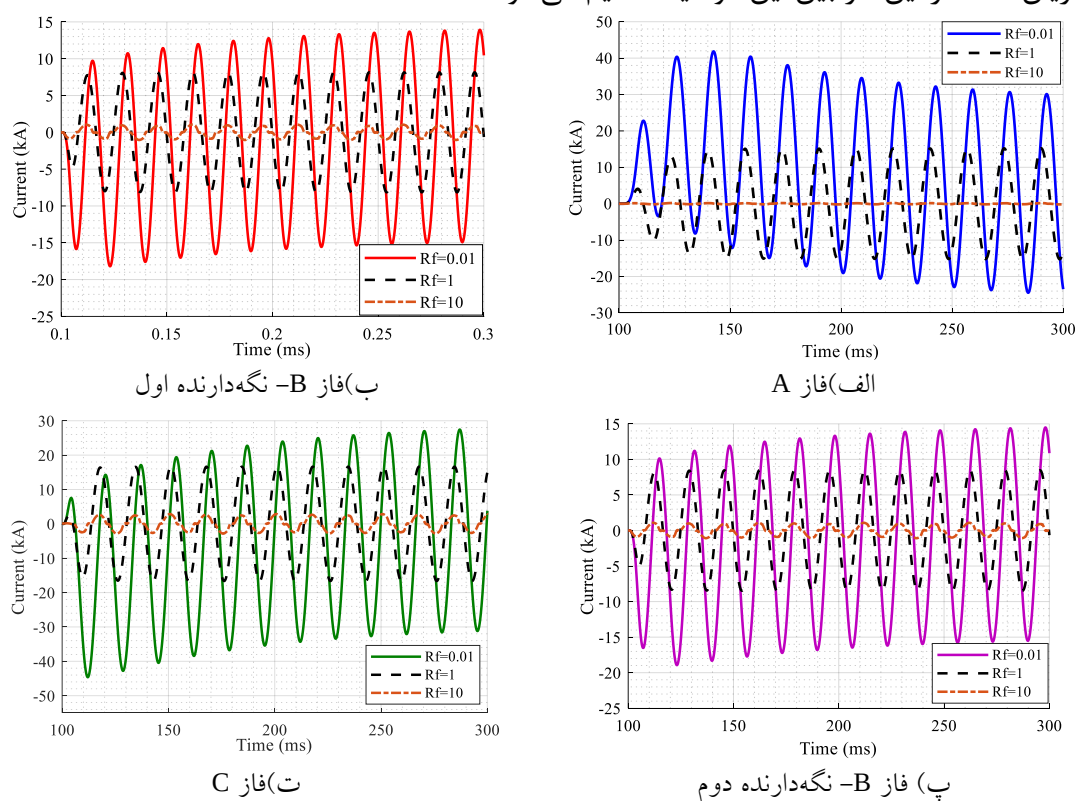
ب) فاز A-نوارهای دوم



الف) فاز A-نوارهای اول

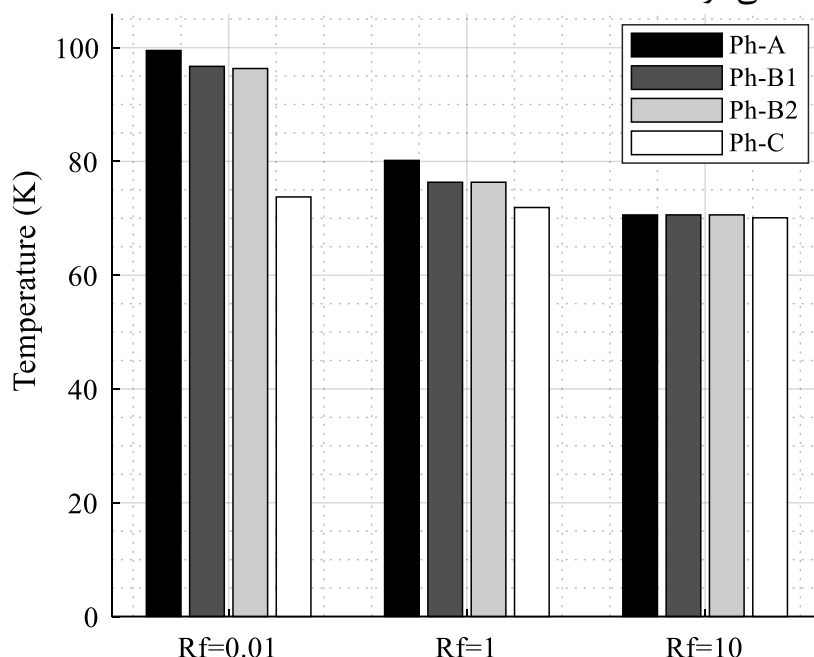


شکل ۲۴-۴: توزیع جریان در لایه نگه‌دارنده کابل ابرسانا را در حین وقوع خطا نشان می‌دهد. همانطور که در بخش‌های پیشین ذکر شده، این کابل دارای دو نگه‌دارنده در فاز دوم است. در نتیجه این امر جریان خطا در این فاز بین این دو لایه تقسیم می‌شود.



در اثر عبور جریان‌های نشان‌داده شده در شکل ۲۴-۴ از لایه نگه‌دارنده مسی، دما در این لایه نیز شروع به افزایش می‌کند. حداکثر دمای ایجاد شده در این حالت در شکل ۲۵-۴ نشان داده شده است. دلیل تفاوت بین حداکثر دمای ایجاد شده بین لایه نگه‌دارنده و ابرسانا در ظرفیت حرارتی بالای مس و

هم‌چنین حجم موثر بیشتر مس (حدود ۱۰ برابر) نسبت به ابرسانا است. این امر منجر به افزایش دمای کم‌تر در نگه‌دارنده می‌شود.

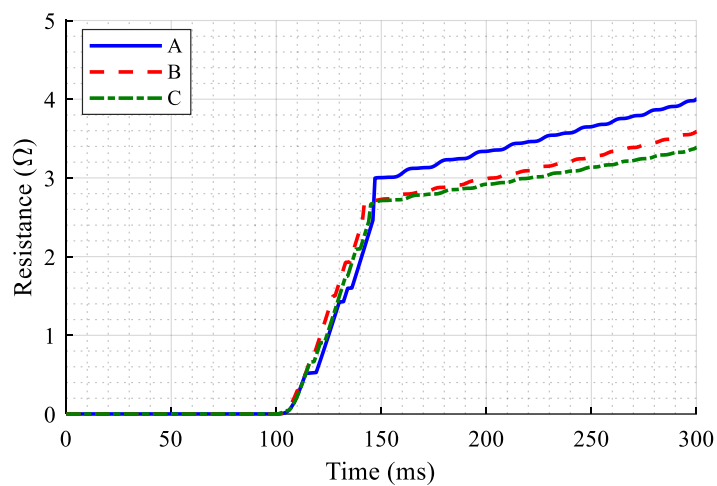


شکل ۴-۲۵ حداکثر دمای ایجاد شده در لایه نگه‌دارنده کابل ابرسانا تحت مقاومت‌های خطای مختلف

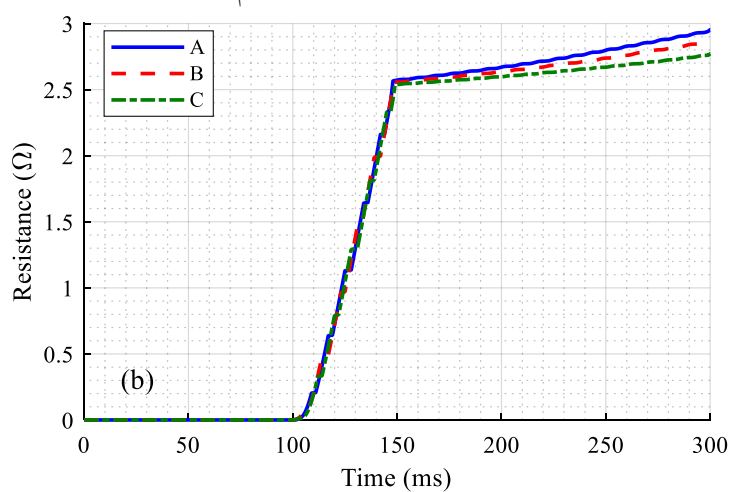
حال که توزیع دمایی در کابل ابرسانا حاصل شد و با در نظر گرفتن دمای ایجاد شده در لایه نگه‌دارنده به عنوان یک منبع حرارتی، مقاومت لایه ابرسانا تحت حالات مختلف در شکل ۴-۲۶ قابل مشاهده است. همانطور که مشخص است کابل در حالت خطای ۰/۰۱ اهمی و ۱ اهمی کاملاً وارد حالت نرمال می‌شود و این در حالی است که در صورت وقوع خطا با مقاومت ۱۰ اهم، حداکثر مقاومت حدود ۰/۰۲ اهم شده که این امر منجر به تقسیم جریان برابر بین لایه ابرسانا و نگه‌دارنده می‌شود.

افزایش دما موجب ایجاد تغییراتی در مشخصات کابل می‌شود. بنابراین و با توجه به شکل ۴-۲۷، جریان بحرانی در فازهای سه گانه به سرعت شروع به کاهش می‌کند. این کاهش تا زمانی ادامه دارد که دمای لایه ابرسانا از دمای بحرانی کم‌تر باشد. با تعدی این دما از دمای بحرانی، جریان بحرانی به صورت ناگهانی صفر می‌شود. این مورد برای خطاهای ۰/۰۱ اهمی و ۱ اهمی به خوبی قابل مشاهده است. با این وجود این کاهش در مقاومت خطای ۱۰ اهم قابل مشاهده نیست. این به دلیل آن است که در اثر وقوع خطا در مقاومت ۱۰ اهم و بر حسب توزیع‌های جریانی مطرح‌شده، کابل در این شرایط کاملاً وارد حالت گذرا نمی‌شود.

در اثر وقوع خطا با مقاومت‌های ۰/۰۱ اهم و ۱ اهم جریان بسیار اندکی از لایه ابرسانا کابل عبور کرده که این امر موجب کاهش چشمگیر میدان مغناطیسی در کابل می‌شود. همانطور که در قسمت‌های اول و دوم شکل ۴-۲۸ مشخص است. با وقوع خطا، میدان مغناطیسی پس از گذار نوارها به حالت نرمال، به حدود کم‌تر از ۵ میلی‌تسلا می‌رسد

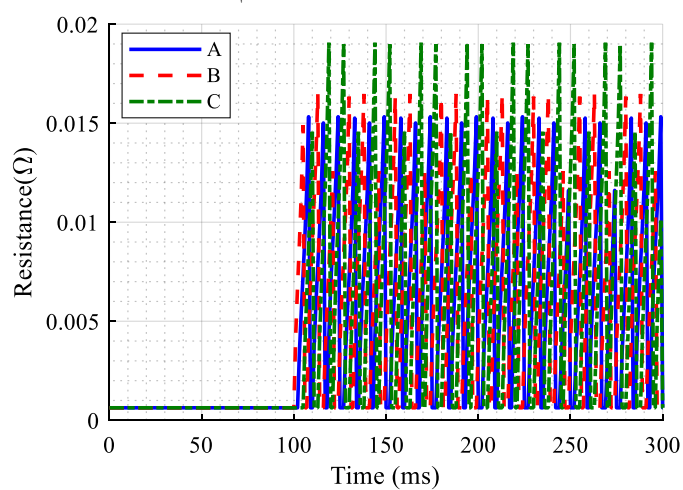


الف) مقاومت خطا ۰/۰۱ اهم



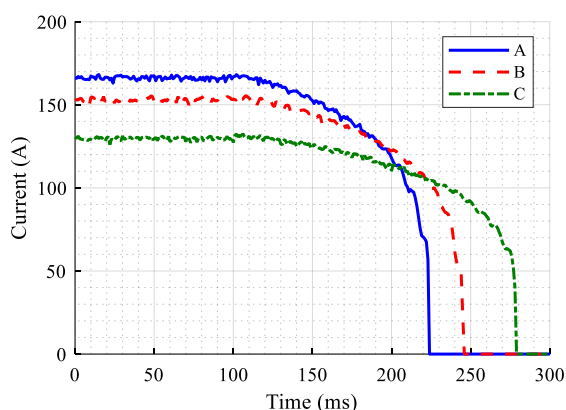
(b)

ب) مقاومت خطا ۱ اهم

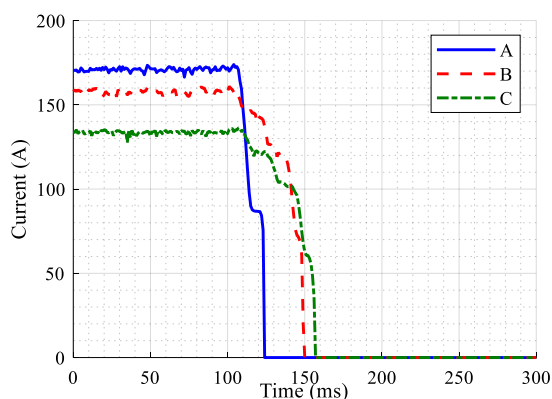


پ) مقاومت خطا ۱۰ اهم

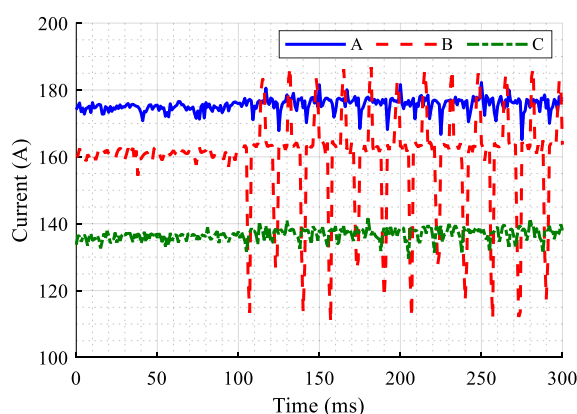
شکل ۴-۲۶ افزایش مقاومت لایه ابرسانا در اثر مقاومت های خطای مختلف



ب) مقاومت خطا ۱ اهم



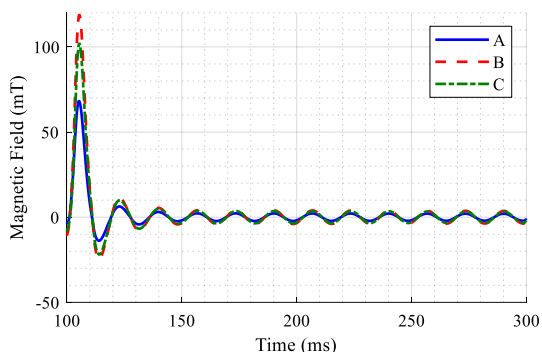
الف) مقاومت خطا ۰/۰۱ اهم



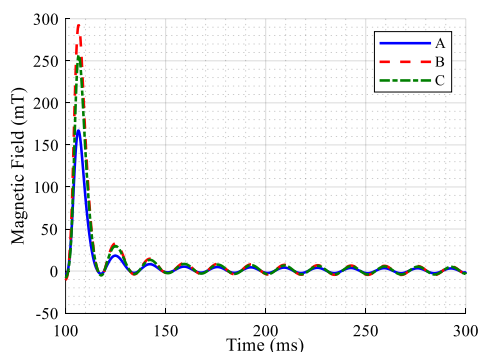
پ) مقاومت خطا ۱۰ اهم

شکل ۴-۲۷ توزیع جریان بحرانی فازهای سه گانه کابل و تغییرات آن با مقاومت خطا

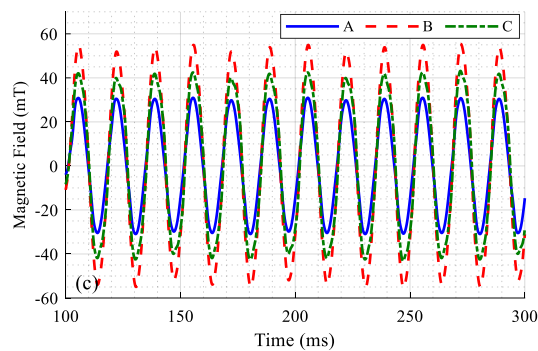
با وقوع خطا، میدان مغناطیسی پس از گذار نوارها به حالت نرمال، به حدود کم‌تر از ۵ میلی‌تسلا می‌رسد. این در حالی است که تا زمان گذار کابل به حالت غیرابرسیانایی میدانی بین ۰/۳ تسلا تا ۰/۵ تسلا به کابل اعمال می‌شود. میدان در حالت خطای ۱۰ اهمی کاملاً متفاوت توزیع می‌شود که این امر به دلیل آن است که جریانی حدود ۲/۲ کیلوآمپر هم‌چنان از لایه ابررسانا عبور می‌کند. در اثر این امر، میدانی حتی بیشتر از میدان کابل در شرایط مانا به کابل اعمال می‌شود.



ب) مقاومت خطا ۱ اهم



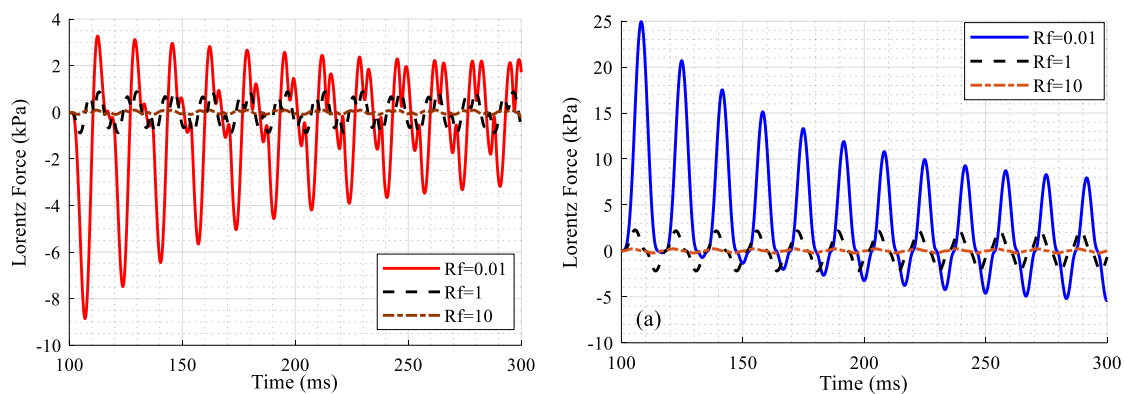
الف) مقاومت خطا ۰/۰۱ اهم



پ) مقاومت خطا ۱۰ اهم

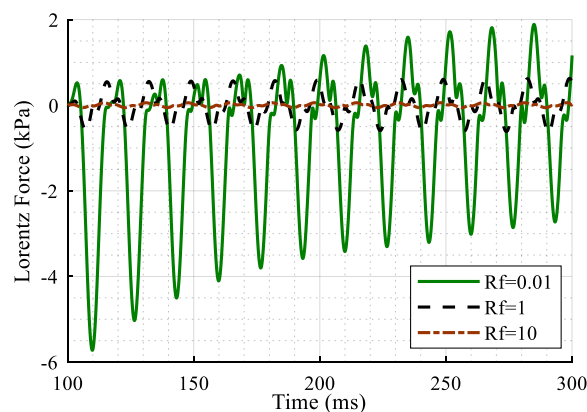
شکل ۴-۲۸ توزیع میدان مغناطیسی در کابل تحت خطا و در اثر مقاومت‌های مختلف خطا

نیروی لورنتز یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که در حین مطالعات گذرای نوارها و کابل‌های ابررسانا مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این نیرو در شکل ۴-۲۹ قابل مشاهده است. همانطور که مشخص است با افزایش مقاومت، این نیرو کاهش پیدا می‌کند که کاهش نیرو با توجه به رابطه نیروی لورنتز توجیه‌پذیر است.



ب) فاز B

الف) فاز A



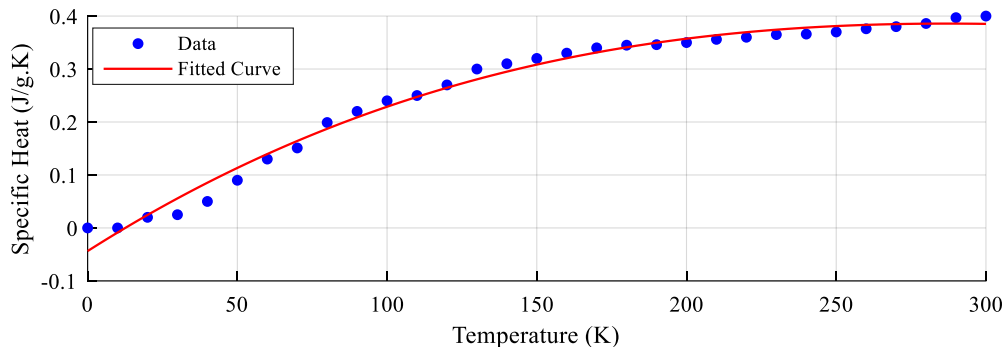
پ) فاز C

شکل ۴-۲۹ توزیع نیروی لورنتز القاء شده در نوارهای ابررسانا تحت مقاومت‌های خطای مختلف

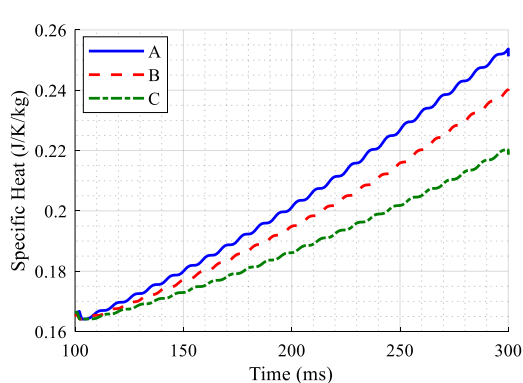
آخرین پارامتری که در این قسمت مورد بررسی قرار می‌گیرد، حرارت مخصوص نوارهای ابررسانا است. حرارت مخصوص یک نوار ابررسانای از جنس YBCO از رابطه (۴-۱) پیروی می‌کند که به صورت کلی

در شکل ۴-۳۰ نشان داده شده است. در این رابطه T دمای نوارهای ابررسانا است. با اعمال این رابطه به شبیه‌سازی‌ها و تغییرات دما در کابل در اثر خطا نتایج نشان داده شده در شکل ۴-۳۱ حاصل می‌شود

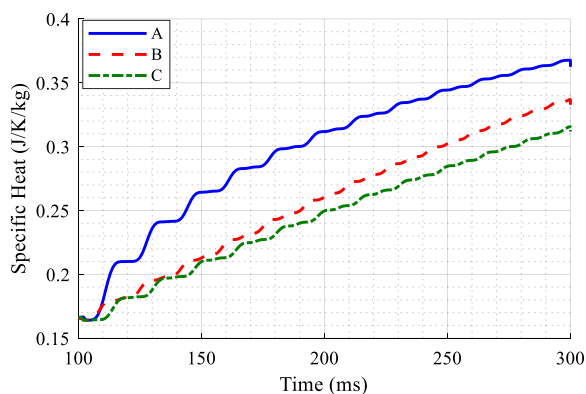
$$C_p(T) = 7.238e^{-9} \times T^3 - 9.37e^{-6} \times T^2 + 0.003589 \times T - 0.043668 \quad (1-4)$$



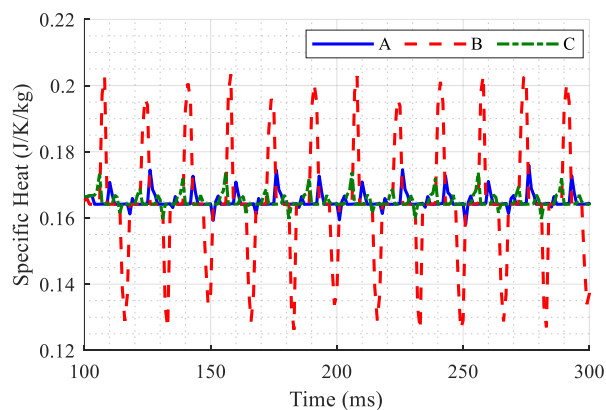
شکل ۴-۳۰ نمایی کلی از تغییرات حرارت مخصوص YBCO با افزایش حرارت



ب) مقاومت خطا ۱ اهم



الف) مقاومت خطا ۰/۱ اهم



پ) مقاومت خطا ۱۰ اهم

شکل ۴-۳۱ حرارت مخصوص نوارهای ابررسانا در هر فاز تحت خطا و تحت مقاومت خطا

پس از بررسی اشکال نشان داده شده، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش مقاومت خطا منجر به در خطر افتادن عملکرد صحیح کابل می‌گردد.

۴-۲-۴ تاثیر انواع خطاهای اعمالی بر رفتار گذرای کابل ابررسانا

پس از بررسی تاثیر مقاومت خطا بر رفتار گذرای کابل ابررسانای انتخاب شده، در این بخش به بررسی تاثیر انواع خطا بر رفتار الکترومغناطیسی-حرارتی کابل ابررسانا پرداخته می شود. در ابتدا جدول ۴-۱۱ حداکثر جریان خطای ایجاد شده در فازهای گوناگون را تحت مقاومت های مختلف نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود حداکثر جریان خطا در فازهای مختلف و برای خطاهای مختلف متفاوت است. برای مثال در فاز اول، بیشترین جریان خطا برای خطای سه فاز به زمین است، این در حالی است که این مقدار برای فازهای دوم و سوم برای خطای دو فاز است. لازم به ذکر است که در خطای دو فاز و دوفاز به زمین، فازهای درگیر به ترتیب AB و BC است، در حالی که در خطای تک فاز به زمین تنها فاز سوم دخیل است.

جدول ۴-۱۱ تاثیر تغییرات نوع و مقاومت خطا بر حداکثر جریان خطای هر فاز

جریان خطا (کیلوآمپر)			نوع خطا	مقاومت خطا (اهم)
فاز C	فاز B	فاز A		
۲۷,۵۳۵	۲۸,۵۱۱	۵۶,۶۳۹	۳LG	۰,۰۱
۲۷,۵۳	۲۸,۵۳۹	۵۶,۶۳۸	۳L	
۲۸,۲۷۴	۲۹,۹۵۴	نرمال	LLG	
نرمال	۲۲,۵	۴۴,۹۹۷	LL	
۲۸,۴۲۱	نرمال	نرمال	SLG	
۱۶,۶۸۳	۱۶,۷۰۵	۱۶,۹۲۱	۳LG	۱
۱۶,۶۸۳	۱۶,۷	۱۶,۹۲۱	۳L	
۱۶,۶۱۵	۱۶,۶	نرمال	LLG	
نرمال	۱۴,۰۱۹	۱۴,۹۱۷	LL	
۱۶,۵۰۳	نرمال	نرمال	SLG	
۵,۴۰۸	۵,۴۰۷	۵,۴۱۲	۳LG	۱۰
۵,۴۰۸	۵,۴۰۷	۵,۴۱۱	۳L	
۵,۴۰۹	۵,۳۹۵	نرمال	LLG	
نرمال	۴,۶۵۸	۴,۸۷۵	LL	
۵,۳۹۸	نرمال	نرمال	SLG	

جریان خطای نشان داده شده در جدول ۴-۱۲ باعث افزایش حرارت در کابل ابررسانا شده که این افزایش حرارت تحت تاثیر جریان خطاهای مختلف و مقاومت‌های خطای گوناگون تغییر می‌کند. جدول ۴-۱۲ نشان‌دهنده چگونگی این افزایش دما تحت خطاهای گوناگون است.

جدول ۴-۱۲ تاثیر تغییرات نوع و مقاومت خطا بر حداکثر دمای لایه ابررسانای هر فاز

مقاومت خطا (اهم)	نوع خطا	دما (کلوین)		
		فاز A	فاز B	فاز C
۰,۰۱	۳LG	۲۱۷,۳۹۳	۱۷۷,۲۰۴	۱۵۷,۲۶۱
	۳L	۲۱۷,۸۳۵	۱۷۷,۲۱	۱۵۷,۲۶۴
	LLG	نرمال	۱۷۶,۰۱۴	۱۵۰,۱۸۲
	LL	۱۸۳,۹۵۴	۱۵۹,۶۹۱	نرمال
	SLG	نرمال	نرمال	۱۵۲,۰۸۴
۱	۳LG	۱۱۴,۶۶۸	۱۰۷,۱۵۲	۹۶,۷۲۱
	۳L	۱۱۴,۴۶۱	۱۰۶,۹۴۸	۹۶,۵۱۲
	LLG	نرمال	۱۰۶,۴۸۵	۹۶,۲۳۷
	LL	۱۰۵,۹۲	۹۸,۴۰۳	نرمال
	SLG	نرمال	نرمال	۹۶,۰۹
۱۰	۳LG	۸۵,۰۳۵	۸۷,۴۳	۸۴,۰۷۴
	۳L	۸۴,۶۲۱	۸۸,۸۵	۸۴,۲۲۳
	LLG	نرمال	۸۶,۲۹۱	۸۱,۳۱۴
	LL	۷۴,۶۲۴	۸۳,۰۹۹	نرمال
	SLG	نرمال	نرمال	۸۳,۲۹۶

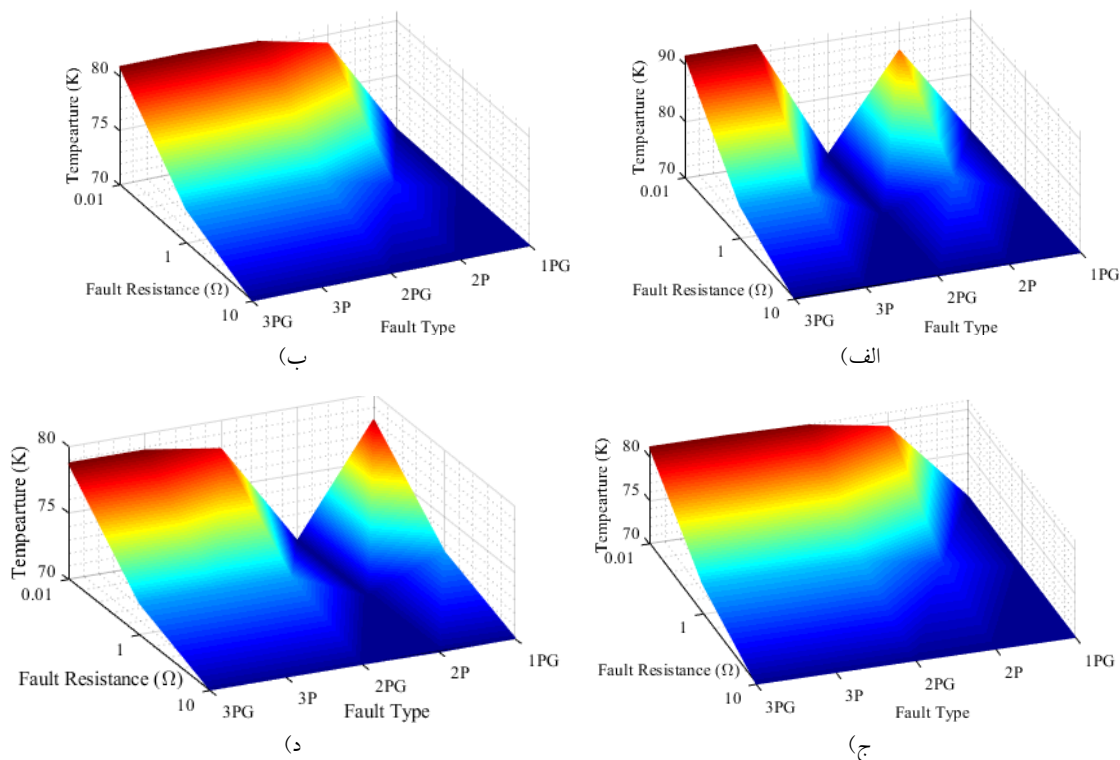
تحت افزایش دمای نشان داده شده در جدول ۴-۱۲، مقاومت لایه ابررسانا نیز افزایش پیدا می‌کند. این افزایش مقاومت به ترتیب برای فازهای سه‌گانه در جدول ۴-۱۳ قابل مشاهده است. لازم به ذکر است که دلیل عدم افزایش مقاومت در خطای دوفاز به زمین در فاز اول، به دلیل درگیر نبودن این فاز در این نوع خطا است. این مورد برای خطای تک فاز در این فاز، خطای دو فاز برای فاز سوم و خطای تک فاز برای فاز دوم نیز صادق است.

پس از افزایش مقاومت و تمایل جریان خطا به عبور از لایه نگه‌دارنده، دما در این لایه نیز افزایش پیدا می‌کند که این افزایش دما برای خطاهای گوناگون و نگه‌دارنده‌های مختلف در شکل ۴-۳۲ قابل مشاهده

است. لازم به ذکر است که شکل اول مربوط به لایه نگه‌دارنده فاز اول بوده که به دلیل سطح مقطع کم‌تر مقاومت الکتریکی بیشتر و ظرفیت حرارتی کم‌تری دارد که این دو عامل باعث افزایش دمای بیشتر در این نگه‌دارنده می‌شود. مادامی که فاز دوم دارای دو نگه‌دارنده است تا جریان خطا بین این دو لایه تقسیم شود و حرارت کم‌تر افزایش یابد. در نهایت نیز فاز سوم به دلیل مقاومت الکتریکی کم‌تر و ظرفیت حرارتی بسیار بیشتر، افزایش دمای چندانی را در نگه‌دارنده خود احساس نمی‌کند. دمای نگه‌دارنده در فاز اول حداکثر ۱/۲۸ برابر حالت عادی خود می‌شود، در فاز دوم این عدد به ۱/۱۴ برابر می‌رسد و در فاز سوم این میزان حدوداً ۱/۱۱ است.

جدول ۴-۱۳ تاثیر تغییرات نوع و مقاومت خطا بر حداکثر مقاومت لایه ابرسانای هر فاز

مقاومت (اهم)			نوع خطا	مقاومت خطا (اهم)
فاز C	فاز B	فاز A		
۳,۳۸۵	۳,۵۸۸	۴,۰۰۲	۳LG	۰,۰۱
۳,۳۸۵	۳,۵۸۸	۴,۰۰۱	۳L	
۳,۳۱۳	۳,۵۷۶	نرمال	LLG	
نرمال	۳,۴۲۱	۳,۶۵۶	LL	
۳,۳۳	نرمال	نرمال	SLG	
۲,۷۷۱	۲,۸۷۶	۲,۹۳۲	۳LG	۱
۲,۷۶۸	۲,۸۷۴	۲,۹۵۱	۳L	
۲,۷۶۶	۲,۸۷	نرمال	LLG	
نرمال	۲,۸۸	۲,۸۶۴	LL	
۲,۷۶۴	نرمال	نرمال	SLG	
۰,۰۱۹	۰,۰۱۶	۰,۰۱۵	۳LG	۱۰
۰,۰۱۹	۰,۰۱۶	۰,۰۱۵	۳L	
۰,۰۱۹	۰,۰۱۶	نرمال	LLG	
نرمال	۰,۰۱۴۷	۰,۰۱۶	LL	
۰,۰۱۹	نرمال	نرمال	SLG	

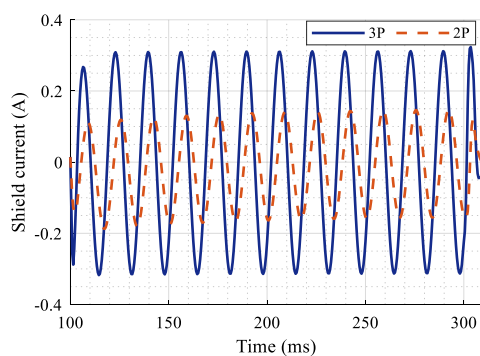


شکل ۴-۳۲ تغییرات دما در لایه نگه‌دارنده کابل ابرسانا بر حسب انواع خطا، الف) فاز A ب) نگه‌دارنده اول فاز B ج) نگه‌دارنده دوم فاز B د) فاز C

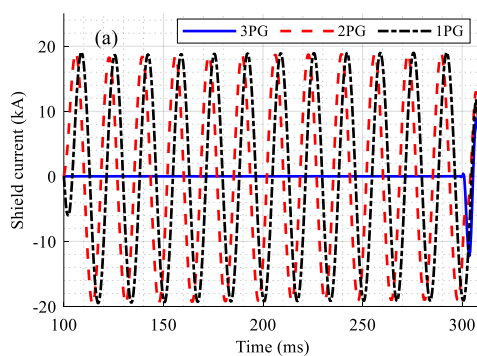
یکی دیگر از عوامل مهم، نیروی لورنتز القائی به نوارهای ابرسانا در حین وقوع خطا در سیستم است. این نیرو می‌تواند باعث فروپاشی مکانیکی-حرارتی نوارهای ابرسانا شده و صحت عملکرد کابل را پس از رفع خطا مورد مخاطره قرار دهد. جدول ۴-۱۴ نشان‌دهنده تغییرات این نیرو بر حسب انواع خطا است. فازهای ثانویه و ثالثیه نیروی بسیار زیاد و حدود ۰٫۵ گیگا پاسکال را در حین خطای دو فاز تجربه می‌کنند. که این به دلیل آن است که جریان فازهای دوم و سوم تنها از لایه مسی کابل عبور کرده و جریان فاز اول هم‌چنان از نوار ابرسانا عبور می‌کند. این عبور جریان باعث ایجاد میدانی مغناطیسی قابل توجهی در فازهای سه گانه می‌شود (بر اساس معادلاتی که در فصل قبل مطرح شد) که هم‌گام با عبور جریان خطا از لایه مسی فازهای B و C نیروی لورنتز هنگفتی به نوارها وارد می‌گردد. این موضوع برای خطای تک فاز و فاز C نیز تا حدی مشهود است. مورد آخری که در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد، تاثیر نوع خطا در جریان بازگشتی عبوری از لایه شیلد است. همانطور که در شکل ۴-۳۳ قابل مشاهده است، با نقش داشتن زمین در خطا، جریانی تقریباً ۱۱ برابر جریان نامی از لایه شیلد عبور می‌کند. البته در خطای متقارن این جریان تنها در لحظه رفع خطا و به دلیل عملکرد غیرایده‌آل کلید وجود دارد. این در حالی است که در خطاهای نامتقارن این جریان در تمامی طول حضور خطا از لایه شیلد عبور می‌کند. لازم به ذکر است که به دلیل هم‌مرکز بودن ساختار کابل، دیگر نیازی به شیلد ثانویه‌ای از جنس ابرسانا نیست و لایه اصلی ابرسانا به خودی خود عملیات کاهش میدان خارجی را انجام می‌دهند.

جدول ۴-۱۴ تاثیر تغییرات نوع و مقاومت خطا بر حداکثر نیروی لورنتز القایی به لایه ابرسانی هر فاز

مقاومت خطا (اهم)	نوع خطا	نیروی لورنتز (کیلوپاسکال)		
		فاز A	فاز B	فاز C
۰,۰۱	۳LG	۲۴,۸۸۸	۴,۶۰۸	۳,۱۴۱
	۳L	۲۴,۸۸۹	۳,۱۲۴	۱,۸۸۶
	LLG	۰,۸۰۲	۴۳۸,۶۹۰	۶۲۳,۲۱۳
	LL	۱۵,۵۳۵	۷,۰۳۳۳	۰,۹۱۳
	SLG	۰,۸۰۲	۴,۷۰۸	۴۲۹,۴۶۸
۱	۳LG	۴,۹۲۷	۱۴,۶۴۵	۰,۹۷۸
	۳L	۵,۱	۵,۵۰۲	۱۴,۹۳
	LLG	۰,۸۰۲	۲۴۹,۱۶۴	۲۱۳,۶۰۱
	LL	۵,۷۶۴	۱,۳۰۳	۰,۹۱۳
	SLG	۰,۸۰۲	۱,۳۰۴	۲۶۳,۴۰۵
۱۰	۳LG	۰,۸۰۲	۶,۳۳۱	۰,۹۱۳
	۳L	۰,۸۰۲	۷,۱۱۵	۱۳۴,۸۴۲
	LLG	۰,۸۲	۶۸,۹۰۳	۹۳,۷۰۳
	LL	۰,۸۰۲	۱۴,۶۶۵	۰,۹۱۳
	SLG	۰,۸۰۲	۱,۳۰۴	۱۰۳,۹۴۹



ب) خطاهای غیرمتصل به زمین



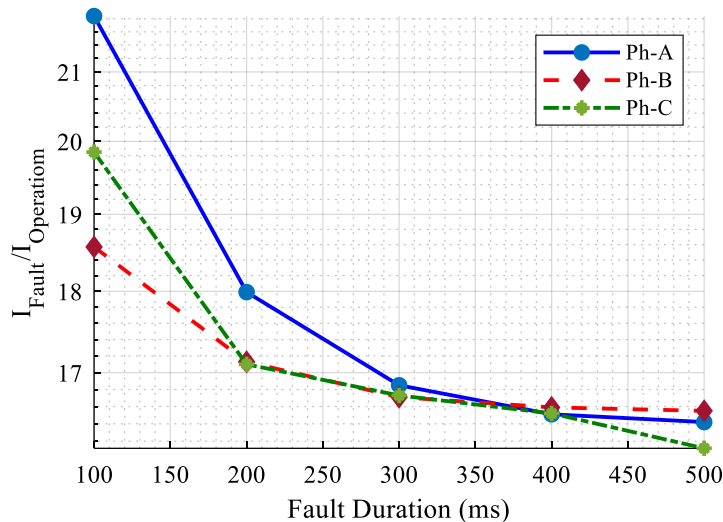
الف) خطاهای متصل به زمین

شکل ۴-۳۳ رفتار لایه شیلد (محافظ) تحت خطاهای مختلف

۴-۳-۴ تاثیر مدت زمان خطا بر رفتار گذرای کابل ابرسانا

مدت زمان خطا یکی از عواملی است که تاثیری قابل توجهی بر رفتار گذرای کابل‌های ابرسانا دارد. این عامل به خودی خود می‌تواند موجب تغییرات عمده‌ای در میدان، گرادیان دمایی ایجاد شده، مقاومت و

خاصیت محدودکنندگی جریان داشته باشد. در شکل ۴-۳۴ قابل مشاهده است که با افزایش زمان حضور خطا در سیستم نسبت پیک نهایی جریان خطا به پیک جریان نامی کاهش پیدا می‌کند. این کاهش را می‌توان به نحوی به عنوان محدودشوندگی جریان خطا تفسیر کرد.



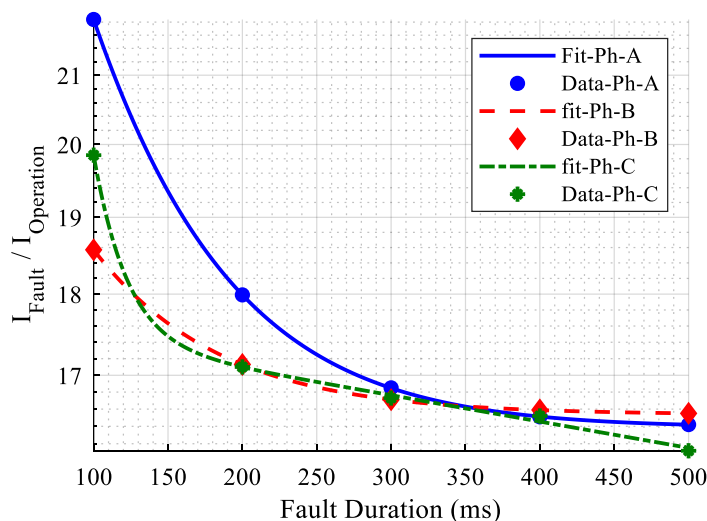
شکل ۴-۳۴ میزان محدودشوندگی خطا و تغییرات آن بر اساس زمان حضور خطا در سیستم

با در دست داشتن نتایج حاصل از شکل ۴-۳۴، می‌توان به رابطه‌ای دست پیدا کرد که چگونگی روند کاهش جریان خطا را نشان می‌دهد. این رابطه در (۴-۲) الی (۴-۴) قابل مشاهده بوده و نتایج حاصل از اعمال برازش منحنی در شکل ۴-۳۵ آمده است.

$$S_A(t) = 18.42 \exp(-12.09t) + 16.33 \exp(-0.005549t) \quad (2-4)$$

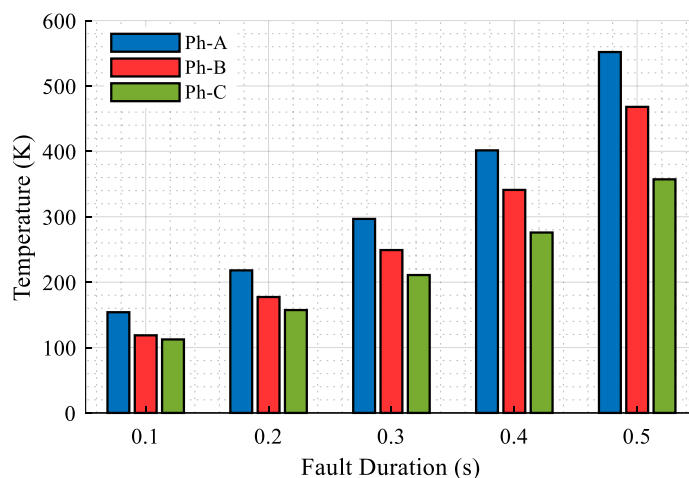
$$S_B(t) = 6.999 \exp(-12.42t) + 16.55 \exp(-0.001931t) \quad (3-4)$$

$$S_C(t) = 259.4 \exp(-46.6t) + 17.72 \exp(-0.1853t) \quad (4-4)$$



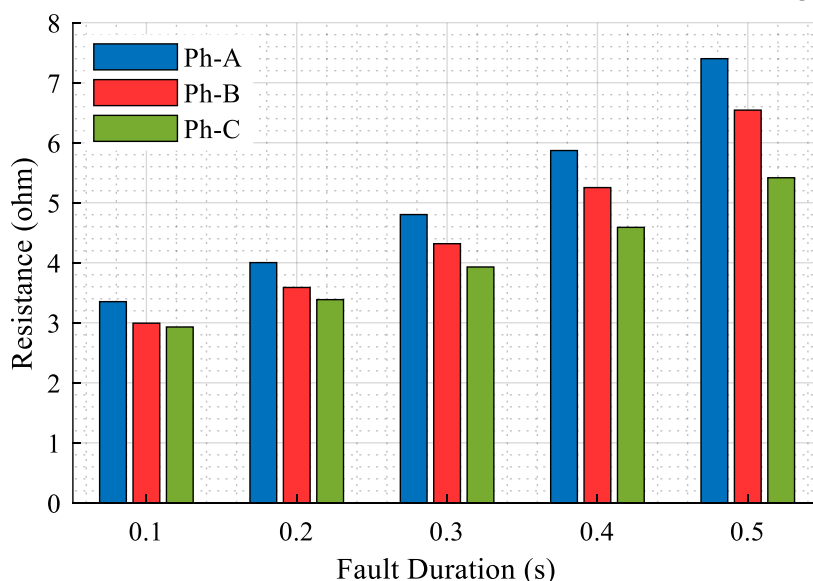
شکل ۴-۳۵ میزان پیک نهایی جریان خطا به جریان نامی کابل

با این وجود افزایش مدت زمان خطا باعث افزایش چشمگیر و قابل توجه حداکثر دمای ایجاد شده در کابل می‌شود که می‌تواند منجر به فروپاشی الکتریکی-حرارتی کابل ابررسانا و نوارهای استفاده شده در آن بشود. شکل ۴-۳۶ نشان دهنده تغییرات حداکثر دمای ایجاد شده در هر فاز هم‌گام با افزایش زمان ماندگاری خطا در سیستم است. قابل توجه است که دمای نهایی برای فروپاشی حرارتی-الکتریکی نوارهای ابررسانا از جنس YBCO حدود ۳۵۰ کلوین است. که این میزان در فاز اول پس از ۰/۳ ثانیه ماندگاری خطا مورد تعدی قرار می‌گیرد، این در حالی است که برای فاز دوم و سوم به ترتیب پس از ۰/۴ و ۰/۵ ثانیه از خطا مورد تعدی قرار می‌گیرد. البته شایان ذکر است که این مقادیر برای مقاومت خطای ۰/۰۱ حاصل شده و با افزایش مقاومت خطا، این مقادیر نیز دچار کاهش می‌شوند.



شکل ۴-۳۶ حداکثر حرارت ایجاد شده در سیستم کابل ابررسانا با افزایش طول زمان حضور خطا

با توجه به تغییرات دما، مقاومت لایه ابررسانا نیز دستخوش تغییراتی می‌شود که این تغییرات در شکل ۴-۳۷ قابل مشاهده هستند.

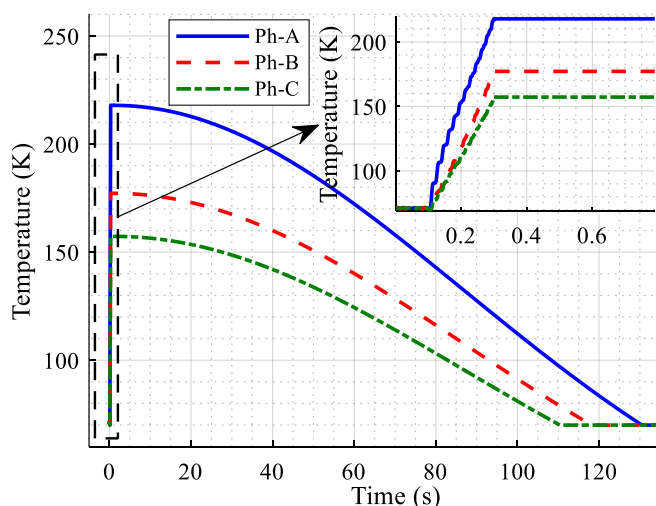


شکل ۴-۳۷ تغییرات مقاومت لایه ابررسانا در اثر افزایش مدت زمان خطا

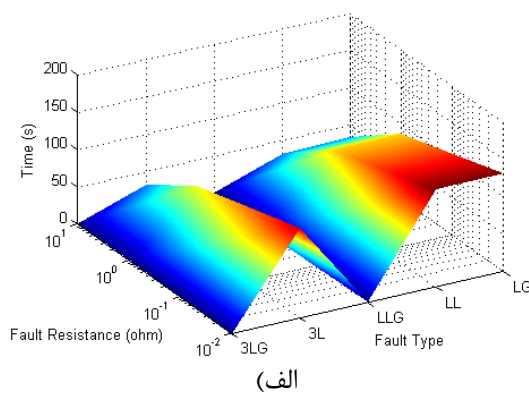
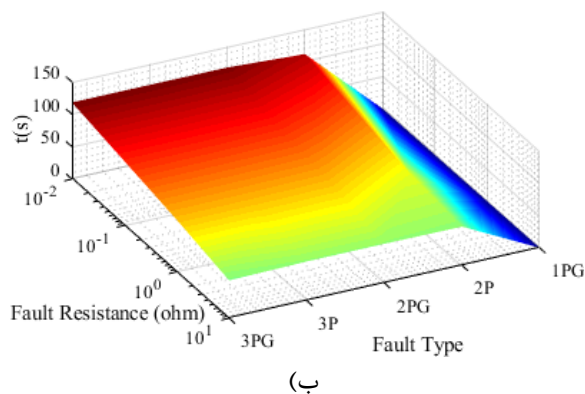
۴-۵ بررسی حالت بازیابی در کابل ابرسانا

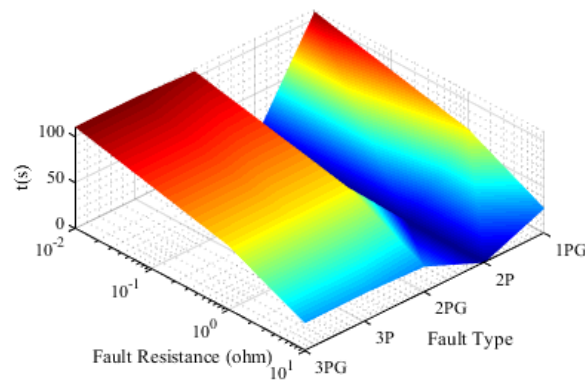
حالت بازیابی در کابل‌های ابرسانا یکی از مهم‌ترین نواحی عملکرد کابل است که پس از رفع خطا پدیدار می‌شود. در این حالت عبارت همرفتی به سیستم انتقال حرارت کابل اضافه شده و باعث کاهش دمای کابل پس از گذشت چندین ثانیه می‌گردد. این بخش به بررسی نتایج حاصل در باب حالت بازیابی متمرکز شده است. شکل ۴-۳۸ چگونگی روند کاهش دما را در فازهای سه گانه برای یک خطای سه فاز به زمین با مقاومت خطای ۰/۰۱ را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۴-۳۸ مشهود است، حدود دو دقیقه طول می‌کشد تا کابل ابرسانا به حالت نرمال خود باز گردد. البته زمان ریکووری یا بازیابی تابعی است از دمای پدیدار شده در کابل ابرسانا. از این رو در این بخش به بررسی تاثیر شرایط مختلف بر روی زمان بازیابی کابل ابرسانا پرداخته می‌شود.

شکل ۴-۳۹ به ترتیب دمای حالت بازیابی را برای فازهای سه گانه بر حسب تغییرات مقاومت خطا و نوع خطا نشان می‌دهد. جدول ۴-۱۵ تغییرات زمان بازیابی را با افزایش طول زمان خطا برای فازهای سه گانه نشان می‌دهد.



شکل ۴-۳۸ روند کاهش دما پس از رفع خطا در کابل ابرسانا تحت مطالعه





(پ)

شکل ۴-۳۹ تغییرات زمان بازیابی در فازهای سه گانه بر حسب تغییرات نوع خطا و مقاومت خطا

(الف) فاز A، (ب) فاز B، (پ) فاز C

جدول ۴-۱۵ تغییرات زمان بازیابی فازهای سه گانه بر حسب افزایش طول زمان خطا

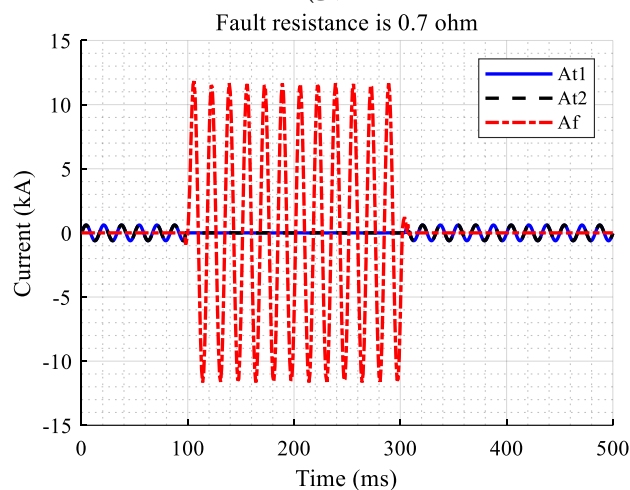
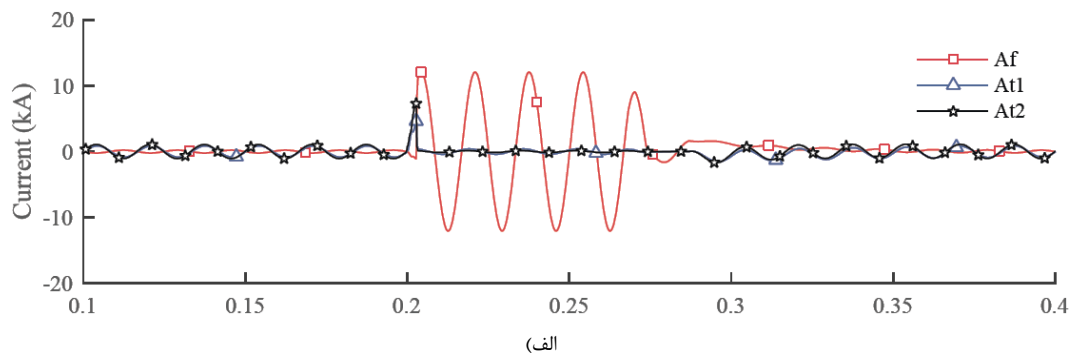
۱۰۰ میلی ثانیه	۲۰۰ میلی ثانیه	۳۰۰ میلی ثانیه	۴۰۰ میلی ثانیه	۵۰۰ میلی ثانیه	
۱۰۹	۱۳۰٫۶	۱۴۷٫۱	۲۲۸٫۵	۳۲۰٫۵	فاز A
۸۹٫۴	۱۱۸٫۲	۱۳۷٫۹	۲۱۷٫۶	۳۰۷٫۵	فاز B
۸۴٫۷۱	۱۱۰٫۴	۱۲۸٫۷	۲۰۲٫۶	۲۸۹٫۱	فاز C

۴-۶ مقایسه نتایج

در این بخش به قیاس نتایج حاصل از مدل ارائه شده با نتایج مقالاتی پرداخته می شود که هدف اصلی آن ها بررسی رفتار گذرای کابل های ابررسانا بود. در ابتدای امر به این موضوع پرداخته می شود که مقالات و کارهای پیشین دارای چه نقاط ضعفی بودند که این پایان نامه سعی در برطرف کردن آن ها داشت. لازم به ذکر مجدد است که مدل ارائه شده در این پایان نامه یک مدل مداری جامع است که تمامی جنبه های الکتریکی، حرارتی، مغناطیسی و مکانیکی یک کابل ابررسانا را پوشش می دهد. چنین مدلی برای کابل های ابررسانا در مطالعات پیشین در دسترس نبوده و تنها بسته به نیاز محقق بخشی از این مدل را شامل می شد.

در نتیجه خلاءهای موجود در مدل های کابل های ابررسانا سعی شد تا تا خلاءهای موجود را برطرف شده و مدلی جامع و کامل برای یک کابل ابررسانا ارائه گردد و اثر پارامترهای خطا را که پیشتر در باب آن ها به تفصیل بحث شد، در این کابل مورد بررسی قرار گیرد. از این رو کابل ۲۲٫۹ کیلوولت ارائه شده در مرجع [۵۱] به عنوان کابل مورد مطالعه انتخاب شد.

شکل ۴-۴۰ (الف) نتایج حاصل از مرجع مذکور و توزیع جریان را در دو حالت نرمال و گذرا نشان می دهد و شکل ۴-۴۰ (ب) نتایج توزیع جریان را در این مقاله به نمایش در آورده است که هر دوی این موارد توزیع جریان ها را در فاز A نشان می دهند.



(ب)

شکل ۴-۴۰ مقایسه جریان‌های خطا بین مقاله مرجع و نتایج مدل پیشنهادی الف) نتایج مقاله مرجع [۵۱] ب) نتایج مدل ارائه شده

مشاهده می‌شود که نتایج مقاله مرجع برای مقاومت خطایی حدود ۰,۷ اهم حاصل شده است. این در حالی است که مقاومت خطا اصولاً از این مقدار کم‌تر بوده و جریان خطا دارای مقادیری بسیار بیشتر از ۱۲ کیلوآمپر است. بنابر آن چه که در این فصل بیان شد، این پایان‌نامه خلاءهای مقاله مرجع در رابطه با عدم بررسی تغییرات مقاومت محل خطا را رفع کرده است.

خطای مقاله مرجع حدود ۰/۲ ثانیه در سیستم پایدار بوده است، این در حالی است که خطا در سیستم بررسی شده ما دارای مدت زمانی متغیر است. با فرض این موضوع نتایج حاصل می‌شود که در جدول ۴-۱۶ به آن اشاره شده است. لازم به ذکر است نتایج مذکور حاصل از این پایان‌نامه در جدول ذیل ناشی از حالت مقاومت خطای ۰,۷ اهم است.

جدول ۴-۱۶ مقایسه نتایج مرجع [۵۱] و نتایج پایان‌نامه

پارامتر	نتایج حاصل مقاله مرجع	نتایج حاصل پایان‌نامه
حداکثر جریان خطا (C, B, A) - کیلوآمپر	(۱۱, ۷, ۵, ۱۰)	(۱۱, ۶, ۸, ۱۲, ۳)
حداکثر دمای نگه‌دارنده (C, B, A, B ₂ , B ₁) - کلوین	(۷۱, ۷۰, ۲۵, ۷۰, ۲۵, ۷۰, ۱)	(۷۲, ۱, ۷۸, ۴, ۷۸, ۶, ۸۳, ۳)
حداکثر مقاومت لایه ابررسانا (C, B, A, A ₂ , A ₁) - کلوین	در نظر گرفته نشده است	(۹۸, ۹۹, ۱۰۹, ۲۴, ۱۲۰, ۹۲)
زمان بازیابی (ثانیه)	در نظر گرفته نشده است	(۵۹, ۱۱, ۷۶, ۳۹, ۸۸, ۲۶)

فصل ۵ نتیجه گیری و اقدامات پیش رو

۵-۱ جمع‌بندی

تحلیل کابل‌های ابررسانا به عنوان یکی از مهم‌ترین و اصلی‌ترین گام‌های صنعتی شدن استفاده از این کابل‌ها شناخته می‌شود. با انجام چنین تحلیل‌هایی، رفتار مانا، گذرا و پس از خطای کابل‌های ابررسانا دسترس‌پذیر شده و می‌توان به شناخت مناسبی از واکنش کابل‌ها تحت شرایط مختلف دستیابی پیدا کرد. مدل مدار معادل کابل‌های ابررسانا بر خلاف مدل‌های مبتنی بر اجزاء محدود، تفاضل محدود و یا حتی حجم محدود، این قابلیت را دارا هستند که شرایط کابل را تحت حالات مختلفی از شبکه بررسی و توصیف نماید. این به آن معناست که مدل‌های مداری قادر هستند تا مشخصه عملکرد کابل‌های ابررسانا را بر اساس شرایط سیستمی که در آن قرار دارند، بسنجند. با توجه به این ویژگی مدل مداری، از این مدل در شبیه‌سازی این مطالعه استفاده شده است تا بتوان به اهداف پایان‌نامه دست یافت. جهت ارائه یک مدل مداری، باید بیان کرد که این مدل باید قادر باشد تا به صورت خودکار شرایط مانا، گذرا و پساخطا را تشخیص داده و رفتار الکترومغناطیسی، حرارتی و مکانیکی صحیحی از کابل را تحت هر شرایط در نهایت دقت ارائه دهد.

۵-۲ نتیجه‌گیری

مدل‌سازی کابل ابررسانا در این تحقیق توسط کدنویسی در محیط MATLAB و استفاده از شبیه‌ساز سیستم قدرت در محیط SIMULINK و ارتباطی زمان واقعی بین این دو انجام شده است. باید توجه داشت که این مدل با اندازه‌گیری جریان و دما در هر لحظه و مقایسه آن‌ها با حدود بحرانی عمل می‌کند. چگونگی انجام این شبیه‌سازی در الگوریتم فصل سوم ارائه شده است. پس از اعمال این مدل و حصول نتایج، می‌توان نتایج را به دو دسته مانا، گذرا و پساخطا تقسیم کرد:

۱. نتایج حاصل از بررسی شرایط مانا:

- توزیع همگن و یکنواخت جریان نامی در هر فاز با زوایای ارائه شده
- میدان مغناطیسی فاز A دارای کم‌ترین مقدار و فاز B دارای بیشترین مقدار است.
- تغییرات تلفات AC بین ۳ تا ۴/۵ وات بر فاز. متر
- حداکثر دمای کابل ۷۱/۴ کلوین در حین حالت مانا
- افت ۵٪ جریان بحرانی تحت تاثیر شکست‌های مکانیکی برای نوارهای بحرانی
- کاهش ۵ الی ۷ درصدی جریان بحرانی کل کابل
- تعداد ۱۰۰/۰۰۰ سکشن مناسب جهت تحلیل دقیق مدل نوار ابررسانای تحت تنش مکانیکی

۲. نتایج حاصل از بررسی شرایط گذرا و پساخطا:

- کاهش دما، مقاومت لایه‌های ابررسانا و زمان بازبانی همگام با افزایش مقاومت خطا

- القاء نیروی لورنتز در محدوده مگاپاسکال در حین وقوع خطاهای نامتقارن بر روی نوارهای ابررسانا
- کاهش جریان خطا با دوام خطا در سیستم (نسبت جریان خطا به جریان نامی)
- سوختن کابل پس از خطایی به طول ۳۵۰ میلی ثانیه
- زمانی حدود ۱۰۰ الی ۱۲۰ ثانیه برای بازیابی کابل‌های ابررسانا در بدترین سناریو موجود

با توجه به نتایج حاصل، می‌توان استنتاج کرد که پارامترهای شبکه تاثیر به سزایی در رفتار الکترومغناطیسی-حرارتی-مکانیکی کابل‌های ابررسانا در شرایط خطا دارند و در نظر گرفتن بدترین سناریو ممکن و چگونگی انتخاب آن، نقشی قابل توجه را در طراحی مناسب کابل ایفا می‌کنند.

۳-۵ پیشنهادات

در جهت ادامه مطالعات این تحقیق می‌توان تاثیر پارامترهایی همچون مقاومت زمین را این بار با دیدگاهی جدید مورد مطالعه قرار داد. در واقع می‌توان مقاومت زمین را بر اساس مدل وابسته به فرکانس مدل کرده و تاثیر خطاهای غیرفرکانس قدرت (مانند انواع صاعقه و سوئیچینگ) را بر رفتار گذرای کابل ابررسانا مورد مطالعه قرار داد.

- [١] H. Liu, Q. Li, H. Li, Z. Xue, M. Han, and L. Liu, "Characteristics and effects of electromagnetic interference from UHVDC and geomagnetic storms on buried pipelines," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. ١٢٥, no., pp. ١٠٦٩٩٤, ٢٠٢١.
- [٢] M. O. Faruque, Y. Zhang, and V. Dinavahi, "Detailed modeling of CIGRÉ HVDC benchmark system using PSCAD/EMTDC and PSB/SIMULINK," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. ٢١, no. ١, pp. ٣٧٨-٣٨٧, ٢٠٠٦.
- [٣] M. N. Wilson, "١٠٠ Years of superconductivity and ٥٠ years of superconducting magnets," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. ٢٢, no. ٣, ٢٠١٢.
- [٤] J. G. Müller, K. A. ; Bednorz, "(١٩٨٦) Bednorz - Mueller, *Z Phys B (CM)* ٦٤, ١٨٩.pdf," *Zeitschrift für Physik B Condensed Matter*. ١٩٨٦.
- [٥] T. Matsumura, T. Obokata, and T. Fukuda, "Two-dimensional microscopic uniformity of resistivity in semi-insulating GaAs," *J. Appl. Phys.*, vol. ٥٧, no. ٤, pp. ١١٨٢-١١٨٥, ١٩٨٥.
- [٦] H. Ishida, "Microscopic theory of surface resistivity," *Phys. Rev. B*, vol. ٥٢, no. ١٥, pp. ١٠٨١٩-١٠٨٢٢, ١٩٩٥.
- [٧] Koefoed, Otto, and Geosounding Principles. "Resistivity soundings measurements." *Geosounding principles* ١ (١٩٧٩).
- [٨] H. Kamerlingh Onnes, "Further experiments with liquid helium. G. On the electrical resistance of pure metals, etc. VI. On the sudden change in the rate at which the resistance of mercury disappears." *Comm. Phys. Lab. Univ. Leiden*, vol. ١٢٤c, no. September, pp. ٨١٨-٨٢١, ١٩١١.
- [٩] Osborne, M. F. M. "The perfect diamagnetism of free electrons with application to superconductivity." *Physical Review* vol. ٨١. No. ١, pp. ١٤٧, ١٩٥١.
- [١٠] R. Prozorov, R. Giannetta, and A. Carrington, "Meissner-London state in superconductors of rectangular cross section in a perpendicular magnetic field," *Phys. Rev. B - Condens. Matter Mater. Phys.*, vol. ٦٢, no. ١, pp. ١١٥-١١٨, ٢٠٠٠.
- [١١] Kogan, V. G. "London approach to anisotropic type-II superconductors." *Physical Review B* vol. ٢٤.no.٣, pp.١٥٧٢, ١٩٨١.
- [١٢] Cyrot, M. "Ginzburg-Landau theory for superconductors." *Reports on Progress in Physics* vol. ٣٦. No. ٢, pp. ١٠٣, ١٩٧٣.
- [١٣] H. Schmidt, "The onset of superconductivity in the time dependent Ginzburg-

Landau theory,” Zeitschrift für Phys., vol. 216, no. 4, pp. 336–345, 1968.

[14] Mele, Paolo, et al., eds. Superconductivity: from materials science to practical applications. Springer Nature, 2019.

[15] Melhem, Ziad, ed. High temperature superconductors (HTS) for energy applications. Elsevier, 2011.

[16] Bardeen, John, Leon N. Cooper, and John Robert Schrieffer. “Theory of superconductivity.” Physical review vol. 108, no. 2, pp. 1175–1191. 1957.

[17] L. Tan, P. Chen, X. Zhao, J. Zhu, and J. Fang, “Analysis of the current limiting performance of a novel DC-SFCL in the VSC-HVDC system,” J. Supercond. Nov. Magn., vol. 32, no. 7, pp. 2235–2245, 2019.

[18] Wang, Yinshun. Fundamental elements of applied superconductivity in electrical engineering. John Wiley & Sons, 2013.

[19] P. Sunwong, J. S. Higgins, Y. Tsui, M. J. Raine, and D. P. Hampshire, “The critical current density of grain boundary channels in polycrystalline HTS and LTS superconductors in magnetic fields,” Supercond. Sci. Technol., vol. 26, no. 9, 2013.

[20] H. Hosono, “Two classes of superconductors discovered in our material research: Iron-based high temperature superconductor and electride superconductor,” Phys. C Supercond. its Appl., vol. 469, no. 9–12, pp. 314–325, 2009.

[21] A. W. Sleight, J. L. Gillson, and P. E. Bierstedt, “High-temp SC in the BaPbBiO_x system,” Solid State Commun., vol. 88, no. 1975, pp. 841–842, 1993.

[22] R. A. Camps, J. E. Evetts, B. A. Glowacki, S. B. Newcomb, R. E. Somekh, and W. M. Stobbs, “Microstructure and critical current of superconducting Yba₂Cu₃O_{7-x},” Nature, vol. 329, no. 6136, pp. 229–232, 1987.

[23] Tanaka, Shoji. “High-temperature superconductivity: history and outlook.” JSAP international 4,4 (2001): 17-22.

[24] Schiferl, Rich, et al. "High temperature superconducting synchronous motors: Economic issues for industrial applications." 2006 Record of Conference Papers-IEEE Industry Applications Society 53rd Annual Petroleum and Chemical Industry Conference. IEEE, 2006.

[25] J. M. S. Skakle, “Crystal chemical substitutions and doping of Yba₂Cu₃O_x and related superconductors,” Mater. Sci. Eng. R Reports, vol. 23, no. 1, pp. 1–40, 1998.

[26] B. Shen et al., “Investigation and comparison of AC losses on stabilizer-free and copper stabilizer HTS tapes,” Phys. C Supercond. its Appl., vol. 541, pp. 40–44, 2017.

- [27] A. G. Page et al., "The effect of stabilizer on the trapped field of stacks of superconducting tape magnetized by a pulsed field," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 28, no. 8, 2015.
- [28] J. Rhyner, "Magnetic properties and AC-losses of superconductors with power law current-voltage characteristics," *Phys. C Supercond. its Appl.*, vol. 212, no. 3-4, pp. 292-300, 1993.
- [29] S. J. Lee and H. S. Yang, "Recent progress and design of three-phase coaxial HTS power cable in Korea," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 29, no. 5, 2019.
- [30] S. K. Ha et al., "Development of an impedance matching program for balancing the current distribution in a tri-axial HTS power cable," *J. Supercond. Nov. Magn.*, vol. 26, no. 4, pp. 759-762, 2013.
- [31] K. S. Ryu, Y. S. Jo, and M. Park, "Overview of the development of the advanced power system by the applied superconductivity technologies programme in Korea," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 19, no. 3, 2006.
- [32] W. Goldacker, F. Grilli, E. Pardo, A. Kario, S. I. Schlachter, and M. Vojenčiak, "Roebel cables from REBCO coated conductors: A one-century-old concept for the superconductivity of the future," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 27, no. 9, 2014.
- [33] S. I. Schlachter, W. Goldacker, F. Grilli, R. Heller, and A. Kudymow, "Coated conductorutherford cables (CCRC) for high-current applications: Concept and properties," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, no. 3 PART 3, pp. 3021-3024, 2011.
- [34] C. Barth, D. C. Van Der Laan, N. Bagrets, C. M. Bayer, K. P. Weiss, and C. Lange, "Temperature- and field-dependent characterization of a conductor on round core cable," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 28, no. 6, p. 65007, 2015.
- [35] T. Mulder et al., "Design and Manufacturing of a 40 kA at 10 T REBCO-CORC Cable-in-Conduit Conductor for Large-Scale Magnets," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, no. 4, 2016.
- [36] G. Celentano et al., "Design of an industrially feasible twisted-stack HTS cable-in-conduit conductor for fusion application," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 24, no. 3, pp. 3-7, 2014.
- [37] Uglietti, Davide, Rainer Wesche, and Pierluigi Bruzzone. "Fabrication trials of round strands composed of coated conductor tapes." *IEEE transactions on applied superconductivity* 23,3 (2013): 4802104-4802104.
- [38] A. Morandi, "HTS dc transmission and distribution: Concepts, applications and

benefits,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 28, no. 12, p. 123001, 2015.

[39] P. M. Grant, W. V. Hassenzuhl, B. Gregory, and S. W. Eckroad, “Design criteria for warm temperature dielectric superconducting dc cables: Impact of co-pole magnetic fields,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 97, no. 1, 2008.

[40] T. Hamajima et al., “Balanced three-phase distribution experiment of a triaxial HTS cable,” *Electron. Commun. Japan*, vol. 94, no. 2, pp. 51–58, 2011.

[41] J. Li et al., “Fault Analysis for 110 kV HTS Power Cables,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 24, no. 5, 2014.

[42] G. S. Lee et al., “Monitoring method for an unbalanced three-phase HTS cable system via time-frequency domain reflectometry,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 28, no. 4, 2018.

[43] E. Y. Ko, S. R. Lee, S. Seo, and J. Cho, “Impact of Smart HTS Transmission Cable to Protection Systems of the Power Grid in South Korea,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 29, no. 2, pp. 1–5, 2019.

[44] H. C. Jo, S. Kong, and S. K. Joo, “Impedance Selection of a Fault Current Limiting Superconducting Cable under Fault Conditions in a Power System from a System Protection Perspective,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, no. 4, 2016.

[45] D. Lee, H. C. Jo, and S. K. Joo, “Economic Evaluation Method for Fault Current Limiting Superconducting Cables Considering Network Congestion in a Power System,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, no. 4, pp. 8–11, 2016.

[46] J. Jipping, A. Mansoldo, and C. Wakefield, “The impact of HTS cables on power flow distribution and short-circuit currents within a meshed network,” *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, vol. 2, no. C, pp. 736–741, 2001.

[47] H. J. Kim, J. W. Shim, K. Sim, and K. Hur, “Assessment of improved power quality due to fault current limiting HTS Cable,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 3, pp. 3–6, 2013.

[48] H. Lee, D. H. Yoon, S. R. Lee, B. M. Yang, and G. Jang, “The insulation coordination and surge arrester design for HTS cable system in Icheon substation,” *Phys. C Supercond. its Appl.*, vol. 484, pp. 223–228, 2013.

[49] W. T. B. De Sousa, D. Kottonau, and M. Noe, “Transient Simulation and Recovery Time of a Three-Phase Concentric HTS Cable,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 29, no. 5, pp. 1–5, 2019.

[50] X. Wang, A. Ishiyama, M. Ohya, O. Maruyama, and T. Ohkuma, “Numerical analyses of the electromagnetic force acting on high-temperature superconducting power cables due to fault current,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 25, no. 5, 2012.

- [51] Nguyen, Thai-Thanh, et al. "A simplified model of coaxial, multilayer high-temperature superconducting power cables with Cu formers for transient studies." *Energies* 12,8 (2019): 1514.
- [52] K. Sato et al., "HTS large scale application using BSCCO conductor," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 7, no. 2 PART 1, pp. 345–350, 1997.
- [53] H. Yumura et al., "Update of YOKOHAMA HTS cable project," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 3, 2013.
- [54] M. Yagi et al., "Experimental results of 275-kV 3-kA REBCO HTS power cable," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 25, no. 3, pp. 3–6, 2015.
- [55] D. I. Doukas, "Superconducting Transmission Systems: Review, Classification, and Technology Readiness Assessment," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 29, no. 4, pp. 1–5, 2019.
- [56] L. Ren, Y. Tang, J. Shi, and F. Jiao, "Design of a termination for the HTS power cable," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 22, no. 3, pp. 3–6, 2012.
- [57] L. Tan, P. Chen, X. Zhao, J. Zhu, and J. Fang, "Analysis of the Current Limiting Performance of a Novel DC-SFCL in the VSC-HVDC System," *J. Supercond. Nov. Magn.*, vol. 32, no. 7, pp. 2235–2245, 2019.
- [58] E. J. Cukauskas and L. H. Allen, "Critical current characteristics of composite thin films of Au and YBaCuO," *Phys. C Supercond. its Appl.*, vol. 313, no. 1–2, pp. 11–20, 1999.
- [59] P. W. Anderson and Y. B. Kim, "Hard superconductivity: Theory of the motion of abrikosov flux lines," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 36, no. 1, pp. 39–43, 1964.
- [60] S. K. Kim et al., "Design and AC loss analysis of a 22,9 kV/50 MVA class triaxial HTS power cable," *J. Supercond. Nov. Magn.*, vol. 26, no. 4, pp. 755–758, 2013.
- [61] S. S. Fetisov et al., "Numerical Simulation and Cold Test of a Compact 2G HTS Power Cable," vol. 28, no. 4, 2018.
- [62] T. Asada et al., "Influence of dry ambient conditions on performance of underground medium-voltage DC cables," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 14, no. 3, pp. 1–7, 2014.
- [63] J. Cho et al., "Design and experimental results of a 3 phase 30 m HTS power cable," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 16, no. 2, pp. 1602–1605, 2006.
- [64] S. K. Kim et al., "Transposition-based connection scheme and joint box concept for a tri-axial HTS power cable," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 25, no. 3, 2015.

- [65] T. Takahashi, H. Suzuki, M. Ichikawa, and T. Okamoto, "PD inception characteristics of polypropylene laminated paper / liquid nitrogen composite insulation system under local heating," *Annu. Rep. - Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP*, vol. 2005, pp. 365-368, 2005.
- [66] R. Radebaugh, "Refrigeration for Superconductors," *Proc. IEEE*, vol. 92, no. 10, pp. 1719-1734, 2004.
- [67] A. Sasaki, Y. Ivanov, and S. Yamaguchi, "LN₂ circulation in cryopipes of superconducting power transmission line," *Cryogenics (Guildf.)*, vol. 51, no. 9, pp. 471-476, 2011.
- [68] L. Trevisani, M. Fabbri, and F. Negrini, "Long distance renewable-energy-sources power transmission using hydrogen-cooled MgB₂ superconducting line," *Cryogenics (Guildf.)*, vol. 47, no. 2, pp. 113-120, 2007.
- [69] Zhang, Zhenyu. Electrical characterizing of superconducting power cable consisted of Second-Generation High-temperature superconducting tapes. Diss. University of Bath, 2016.
- [70] A. N. Ozcivan et al., "AC loss of a multi-layer per phase tri-axial HTS cable with balanced current distribution," *J. Supercond. Nov. Magn.*, vol. 24, no. 1-2, pp. 975-980, 2011.
- [71] N. C. Allen, L. Chiesa, and M. Takayasu, "Structural modeling of HTS tapes and cables," *Cryogenics (Guildf.)*, vol. 48, pp. 405-418, 2016.
- [72] S. K. Ha et al., "Transient characteristic analysis of a tri-axial HTS power cable using PSCAD/EMTDC," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 23, no. 3, pp. 3-6, 2013.
- [73] J. K. Lee and G. Cha, "Magnetic field and magnetization loss calculation in an HTS transmission cable considering the axial field component of SC tape," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 12, no. 1, pp. 1624-1627, 2002.
- [74] J. K. Lee and G. Cha, "Magnetization loss calculation in superconducting power transmission cable," *Cryogenics (Guildf.)*, vol. 41, no. 3, pp. 157-161, 2001.
- [75] M. Yazdani-Asrami, S. A. Gholamian, S. M. Mirimani, and J. Adabi, "Experimental investigation for power loss measurement of superconducting coils under harmonic supply current," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 132, pp. 324-329, 2019.
- [76] M. Yazdani-Asrami, S. A. Gholamian, S. M. Mirimani, and J. Adabi, "Calculation of AC Magnetizing Loss of ReBCO Superconducting Tapes Subjected to Applied Distorted Magnetic Fields," *J. Supercond. Nov. Magn.*, vol. 31, no. 12, pp. 3875-3888, 2018.

- [۷۷] Hu, N., Toda, M., Ozcivan, A. N., Yagai, T., Tsuda, M., & Hamajima, T. (۲۰۱۰). Fault current analysis in a tri-axial HTS cable. *IEEE Transactions on applied superconductivity*, ۲۰(۳), ۱۲۸۸-۱۲۹۱.
- [۷۸] C. Lee, D. Kim, S. Kim, D. Y. Won, and H. S. Yang, "Thermo-Hydraulic Analysis on Long Three-Phase Coaxial HTS Power Cable of Several Kilometers," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. ۲۹, no. ۵, pp. ۱-۵, ۲۰۱۹.
- [۷۹] J. Duron, F. Grilli, L. Antognazza, M. Decroux, B. Dutoit, and Fischer, "Finite-element modelling of YBCO fault current limiter with temperature dependent parameters," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. ۲۰, no. ۴, pp. ۳۳۸-۳۴۴, ۲۰۰۷.
- [۸۰] Y. Yan, P. Song, W. Li, J. Sheng, and T. Qu, "Numerical Investigation of the Coupling Effect in CORC Cable with Striated Strands," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. ۳۰, no. ۴, p. ۱, ۲۰۲۰.
- [۸۱] M. Yazdani-Asrami, S. A. Gholamian, S. M. Mirimani, and J. Adabi, "Investigation on Effect of Magnetic Field Dependency Coefficient of Critical Current Density on the AC Magnetizing Loss in HTS Tapes Exposed to External Field," *J. Supercond. Nov. Magn.*, vol. ۳۱, no. ۱۲, pp. ۳۸۹۹-۳۹۱۰, ۲۰۱۸.
- [۸۲] S. Ochiai, M. Fujimoto, H. Okuda, S. S. Oh, and D. W. Ha, "Simulation on the relation of distribution of overall critical transport current to that of local one in bent-damaged Bi۲۲۲۳ superconducting composite tape," *J. Appl. Phys.*, vol. ۱۰۵, no. ۶, ۲۰۰۹.
- [۸۳] N. Hu, M. Toda, A. N. Ozcivan, T. Yagai, M. Tsuda, and T. Hamajima, "Fault current analysis in a tri-axial HTS cable," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. ۲۰, no. ۳, pp. ۱۲۸۸-۱۲۹۱, ۲۰۱۰.
- [۸۴] Yazdani-Asrami, Mohammad, et al. "Fault current limiting HTS transformer with extended fault withstand time." *Superconductor Science and Technology* ۳۲,۳ (۲۰۱۹): ۰۳۵۰۰۶.
- [۸۵] X. Wang, A. Ishiyama, M. Ohya, O. Maruyama, and T. Ohkuma, "Numerical analyses of the electromagnetic force acting on high-temperature superconducting power cables due to fault current," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. ۲۵, no. ۵, ۲۰۱۲.
- [۸۶] E. Shabagin, C. Heidt, S. Strauß, and S. Grohmann, "Modelling of ۳D temperature profiles and pressure drop in concentric three-phase HTS power cables," *Cryogenics (Guildf.)*, vol. ۸۱, pp. ۲۴-۳۲, ۲۰۱۷.
- [۸۷] Sato, Yusuke, et al. "Temperature and Pressure Simulation of a High-Temperature Superconducting Cable Cooled by Subcooled LN_۲ With Fault Current." *IEEE Transactions on Applied Superconductivity* ۲۵,۳ (۲۰۱۴): ۱-۵.
- [۸۸] T. Naito, H. Fujishiro, Y. Yamamura, and K. Saito, "Specific heat and thermal di

ff usivity of YBCO coated conductors,” vol. 36, pp. 1609–1613, 2012.

[89] Fujishiro, Hiroyuki, et al. "Anisotropic thermal diffusivity and conductivity of YBCO (123) and YBCO (211) mixed crystals. I." Japanese journal of applied physics 33,9R (1994): 4965.

[90] Y. Ichiki and H. Ohsaki, “Numerical analysis of AC losses in YBCO coated conductor in external magnetic field,” Phys. C Supercond. its Appl., vol. 412–414, no. SPEC. ISS., pp. 1015–1020, 2004.

Abstract

Superconductors which were discovered in 1911, in low temperatures has two magnificent properties. These properties are very low resistivity and perfect diamagnetism. The aforementioned properties cause the feasibility of using superconductors in many power apparatuses, being assessed. This has resulted in the appearance of a concept as “*High Temperature Superconducting cables*” or HTS cables. HTS cables can transmit the same amount of the electrical energy of the conventional lines, at 20% of their nominal voltages. In fact, the same voltage, HTS cables are capable of transmitting a 5-to-10-time larger power in comparison to normal lines. These cables have different various electromagnetic, thermal, dielectric, and mechanical structures. According to the considerations of costumer, every one of these structures could be utilized. In this dissertation, a 22.9 kV cold dielectric and coaxial HTS cable is studied.

The electromagnetic, thermal, and mechanical behavior of this cable is analyzed through an equivalent circuit model (ECM). The most significant properties of this model are the consideration of electromagnetic and mechanical impacts of twisted tapes and the sectionizing the superconducting tape. This model has been provided to analyze the transient behavior of the HTS cable under different contingencies of the test system, such as fault resistance, fault type, and fault duration. In fact, the aforementioned parameters have not been discussed or are discussed very shortly. Also, this dissertation is the presenter of the first ECM of HTS cables, with electrothermal, magnetic, and mechanical capabilities.

The results of this dissertation are the proof of the significant impact of system parameters on the transient behavior of HTS cables. Fault resistance as one of the most important of factors in analyzing the transient behavior of HTS cables, have an outstanding impact on the fault current level and its first peak. By the increment of this factor, fault current level decreases. This can result in the flux flow state of the tapes and jeopardizes their safety. Fault type and engaged phases in fault are other important factors which have magnificent impact on the applied Lorentz force. The simultaneous impact of these two parameters have been discussed sufficiently in another subsection. At last, fault duration and recovery times are also discussed.

Keywords: superconducting cables, transient state analysis, fault, magnetic field, temperature, current distribution



Shahrood University of
Technology

Faculty of Electrical Engineering

M.Sc. Thesis in Technical Power Systems Engineering

Transient Analysis of High Temperature Superconducting Cables Subjected to Fault Currents

By: Alireza Sadeghi

Supervisor:

Dr. Seyyed Meysam Seyyedbarzegar

Advisor:

Dr. Mohammad Yazdani-Asrami

September , ۲۰۲۱