

مدل سازی عددی تلفات جریان متناوب نوارهای ابررسانای دما بالای نسل دوم تحت میدان های مغناطیسی متغیر به روش اجزاء محدود دوبعدی

محمد یزدانی اسرمی^۱، سید اصغر غلامیان^{۲*}، مهدی میرایمانی^۳، جعفر ادبی فیروزجایی^۴

۱- دانشجوی دکتری مهندسی برق، ۲- دانشیار، ۳- استادیار، ۴- استادیار، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

(دریافت: ۹۶/۰۸/۱۵، پذیرش: ۹۷/۰۲/۱۹)

چکیده: امروزه ابررسانایی یکی از فناوری های پیشرو در زمینه های کاربردی بخصوص در زمینه مهندسی برق می باشد. امکان بهره گیری از این فناوری در ساخت تجهیزات قدرت الکتریکی با راندمان بیشتر، تلفات کمتر، قابلیت اطمینان بالاتر و نیز ابعاد و اندازه های کوچکتر نسبت به تجهیزات غیر ابررسانای سنتی موجود، زمینه را برای مطالعه و سرمایه گذاری بیشتر در امر تحقیق و توسعه این فناوری فراهم آورده است. از مهم ترین ویژگی های نوارهای ابررسانای دما بالای نسل دوم، چگالی جریان بسیار زیاد و نیز تلفات جریان متناوب بسیار کم نسبت به هادی های مسی می باشد. ابررساناهای دما بالای بر پایه ایتريم تا ۱۰۰ برابر چگالی جریان بالاتر و البته قیمتی تا ۲۰ برابر بیشتر از هادی مسی دارند. میزان تلفات جریان متناوب نوارهای ابررسانا، یکی از محدودیت های مهم طراحی برای کاربردهای تجهیزات قدرت الکتریکی است. بدین منظور تاکنون روش های متعددی برای اندازه گیری، تخمین و محاسبه این میزان تلفات ارائه شده که یکی از روش های موثر، روش های عددی می باشند که کم هزینه، سریع و با توجه به مقایسه آنها با روش های مبتنی بر اندازه گیری، به اندازه کافی دقیق هستند. در این مقاله، مدل سازی عددی برای محاسبه تلفات جریان متناوب نوارهای ابررسانای دما بالای نسل دوم بر پایه ایتريم به روش اجزاء محدود و با استفاده از فرمول سازی H در سه حالت تحت میدان مغناطیسی خارجی، در حالت جریان حامل و نیز اعمال هم زمان هر دو حالت انجام شده است. در هر حالت، نتایج برای زمانی که جریان بحرانی مستقل از و یا وابسته به چگالی شار مغناطیسی بوده محاسبه و تحلیل شده است.

کلیدواژه ها: ابررساناهای دما بالا، تلفات جریان حامل، تلفات جریان متناوب، روش اجزاء محدود، میدان مغناطیسی خارجی

۱- مقدمه

مهم ترین مزایای نوارهای ابررسانا در مقایسه با مس یا آلومینیوم عبارتند از: تلفات در حد صفر در جریان مستقیم و نیز بسیار اندک در جریان متناوب، میدان مغناطیسی قوی در حد بیش از چند تسلا، چگالی جریان بسیار بالا تا حدود گیگا آمپر. در این میان برخی از محدودیت ها نیز در مسیر استفاده از نوارهای ابررسانای دما بالا خودنمایی می کند. مهم ترین محدودیت های کاربردی مواد ابررسانا عبارتند از: میزان تلفات جریان متناوب (AC Loss)، جریان بحرانی (Ic)، میدان مغناطیسی بحرانی (Bc)، دمای بحرانی (Tc)، استقامت مکانیکی و استقامت حرارتی در برابر خروج از فاز ابررسانایی. در این میان، تلفات نوار ابررسانا در جریان متناوب مهم ترین محدودیت کاربردی برای طراحی تجهیزات قدرت الکتریکی ابررساناست [۴-۲]. پیش از ساخت، برای بهبود راندمان تجهیزات الکتریکی ابررسانا و به منظور طراحی بهینه سیستم خنک ساز، تخمینی مناسب از میزان حرارت تولیدی در کرایوستات مورد نیاز است. بدین منظور مدل سازی دقیق تلفات جریان متناوب نوار ابررسانا اهمیتی حیاتی می یابد.

با پیشرفت هایی که در زمینه ساخت نوارهای ابررسانای دما بالای نسل دوم پدید آمد، امکان ساخت نوارهایی با طول زیاد در حدود کیلومتر و نیز جریان بحرانی بسیار بالا در حدود گیگا آمپر بر مترمربع فراهم آمده است. همچنین به تدریج در طی سالیان گذشته قیمت نوارهای ابررسانای نسل دوم از ۴۰ برابر به حدود ۲۰ برابر بیشتر از مس کاهش یافته است. این پیشرفت ها موجب شده که استفاده از این فناوری در ساخت تجهیزات قدرت الکتریکی توجیه فنی و اقتصادی یابد. در دهه اخیر این فناوری در ساخت ماشین های الکتریکی همچون ترانسفورماتور ابررسانا، در خطوط انتقال توان همچون کابل های ابررسانای فشار قوی و نیز تولید میدان های مغناطیسی قوی همچون کاربرد در عکسبرداری تشدید مغناطیسی، بکار گرفته شده است [۲-۱].

امر برای مدل‌سازی‌های دقیق نوارهای ابررسانای دمابالا در میدان مغناطیسی خارجی مثلا در شتاب‌دهنده‌ها یا برخی ماشین‌های الکتریکی، الزامی می‌باشد. در این مقاله، مدل‌سازی عددی به روش اجزاء محدود دوبعدی برای محاسبه تلفات جریان متناوب نوارهای ابررسانای نسل دوم بر پایه ایتیریم با استفاده از روش فرمول‌سازی H انجام گرفته است. بدین منظور ابتدا فرمولبندی روش H ارائه و معرفی شده و سپس از مدل‌سازی یادشده در سه حالت برای محاسبه تلفات جریان متناوب استفاده شده است، یکبار تلفات تحت میدان مغناطیسی خارجی، بار دوم تلفات در حالت جریان حامل و بار سوم اعمال همزمان هر دو حالت قبلی. شایان ذکر است در هر حالت نتایج برای زمانی که جریان بحرانی مستقل از و یا وابسته به چگالی شار مغناطیسی بوده محاسبه شده است. که به ترتیب مدل‌های قانون توان و مدل کیم- اندرسن می‌باشند.

۲- تلفات جریان متناوب نوار ابررسانا

به‌طور کلی عملکرد الکترومغناطیسی یک نوار ابررسانای دمابالای نسل دوم در کاربردهای جریان متناوب مخصوصا کاربرد در تجهیزات قدرت الکتریکی همچون ترانسفورماتورهای قدرت و یا محدودکننده‌های جریان خطا، بوسیله دو عامل مهم تعیین می‌شود [۱۷]: (۱) بیشینه جریانی که بدون بروز مقاومت الکتریکی توسط نوار ابررسانا قابل حمل است که بوسیله جریان بحرانی نوار دیکته می‌شود. (۲) نرخی که انرژی الکترومغناطیسی در نوار ابررسانا تبدیل به حرارت می‌شود. این نرخ به میزان تغییرات تلفات جریان متناوب نسبت به اندازه جریان حامل و اندازه میدان مغناطیسی خارجی اعمالی بستگی دارد.

تلفات جریان متناوب در نوارهای ابررسانای دما بالا، تلفاتی ناشی از تغییرات شار مغناطیسی بوده که شامل مولفه‌های پیرو است [۱۸-۱۹]: (۱) تلفات هیستریزس ناشی از نفوذ شار مغناطیسی در ماده ابررسانا، (۲) تلفات جریان گردابی در غلاف فلزی نوار ابررسانا ناشی از جریان‌های القایی بوسیله میدان مغناطیسی متغیر، (۳) تلفات کوپلینگ ناشی از شار متقابل یک رشته ابررسانا با رشته دیگر درون یک نوار که بوسیله بخش فلزی از هم جدا شده‌اند، (۴) تلفات فرومغناطیسی در لایه بستر که گاهی از جنس مواد مغناطیسی بوده و این تلفات در واقع همان تلفات هیستریزس آن ماده فرومغناطیسی است.

برای اندازه‌گیری این تلفات در نوارهای ابررسانای نسل دوم به روش الکتریکی، معمولا از حاصل ضرب ولتاژ موثر دو سر نوار ابررسانا در جریان موثر عبوری از نوار، تقسیم بر فرکانس منبع و طول نوار استفاده می‌شود [۲۱-۲۰].

تاکنون روش‌های مدل‌سازی متعددی برای محاسبه تلفات جریان متناوب نوارهای ابررسانا در منابع معتبر پیشنهاد شده است. سه روش مدل‌سازی کلی برای نوارهای ابررسانا عبارتند از [۱۰-۱۵]: (۱) مدل‌سازی A-V برپایه پتانسیل بردار مغناطیسی (A)، (۲) مدل‌سازی T-Ω برپایه پتانسیل بردار جریان (T)، (۳) مدل‌سازی H که میدان‌های مغناطیسی را به‌طور مستقیم تحلیل می‌کند. اصول هر سه روش یکسان بوده و برپایه حل معادلات مکسول می‌باشد ولی معادلات دیفرانسیل جزئی که در این روش -ها برای حل نوشته می‌شوند با یکدیگر متفاوت هستند.

در [۱۱]، مدل‌سازی اجزاء محدود برای محاسبه تلفات جریان حامل متناوب نوار ابررسانا استفاده شده درحالی‌که در مدل یادشده چگالی جریان بحرانی مستقل از میدان مغناطیسی در نظر گرفته شده است. نویسندگان نتایج حاصله را با مدل تحلیلی حالت بحرانی مقایسه نموده‌اند. در [۱۲]، روش اجزاء محدود برپایه فرمول‌سازی H برای محاسبه تلفات هیستریزس جریان حامل نوار ابررسانا به کار گرفته شده و در ادامه بررسی‌هایی بر روی اثر تعداد مش بر دقت و سرعت محاسبات انجام گرفته است. در پایان مقایسه‌ای بین نتایج حاصله با روش تحلیلی نورس انجام شد. در [۱۳]، تلفات جریان متناوب هیستریزس یک تیوپ ابررسانای دمابالا برای کاربرد در ساخت کابل‌های فشار قوی شش هسته و با استفاده از روابط مختلف E-J با سطح غیرخطی متفاوت مورد محاسبه و مطالعه قرار گرفت. نویسندگان تأثیرات این غیرخطی بودن را بر همگرایی تحلیل اجزاء محدود بررسی نمودند. در [۱۴-۱۵]، با بررسی اثر پارامترهای مختلف بر تلفات جریان حامل یک نوار مستطیلی ابررسانا بخصوص ثابت n در رابطه E-J، روابطی تحلیلی برای مقیاس‌پذیری این تلفات ارائه شده است. به‌طوری‌که چنانچه تلفات با استفاده از مدل‌سازی مناسب برای یک نمونه خاص مثلا در جریان بحرانی و فرکانس معین محاسبه شود، پس از آن امکان تخمین تلفات با استفاده از مقیاس‌بندی و برون‌یابی برای سایر فرکانس‌ها، جریان‌های حامل و ضرایب غیرخطی متفاوت فراهم می‌شود. این روش برای نوارهای نازک ابررسانای نسل اول و دوم انجام گرفته و نتایج مقایسه شده است. در [۱۶]، مدل‌سازی برای تخمین چگالی جریان بحرانی محلی وابسته به زاویه $J_c(\theta, \text{Bloc})$ براساس نتایج حاصل از آزمایش تغییرات جریان بحرانی بر اثر یک میدان مغناطیسی خارجی $I_c(\theta, \text{Ba})$ توسعه داده شده است. برای این منظور ابتدا از یک درون‌یابی ساده برای برازش داده‌ها استفاده شده و سپس حاصل برازش با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده و توسط یک نرم‌افزار رایانه‌ای خطای تخمین در هر تکرار برنامه کاهش داده شد تا به مقدار دقیق حاصل از اندازه‌گیری برسد. این

مغناطیسی، J_{c0} چگالی جریان بحرانی در میدان خودی وابسته به جنس ماده و B_0 ثابت قانون کیم- اندرسن برای بیان وابستگی چگالی جریان بحرانی به چگالی شار مغناطیسی و وابسته به جنس ماده است. در ضمن، صورت ساده شده قانون توان وقتی چگالی جریان بحرانی به میدان مغناطیسی وابسته نیست در رابطه (۵) و مدل کیم- اندرسن وقتی چگالی جریان بحرانی وابسته به چگالی شار مغناطیسی هست در رابطه‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است.

با ادغام روابط (۱) تا (۷)، صورت کلی معادله دیفرانسیل جزئی برای متغیر H به وسیله رابطه (۸) به روش اجزاء محدود محاسبه خواهد شد.

$$\frac{\partial(\mu_0 \mu_r \mathbf{H})}{\partial t} + \nabla \times (\rho \nabla \times \mathbf{H}) = 0 \quad (8)$$

اندازه جریان عبوری از نوار ابررسانا از انتگرال چگالی جریان بر روی ناحیه مزبور حاصل می‌شود.

$$I = \int_{\theta} J \, d\theta \quad (9)$$

در رابطه (۹)، θ ناحیه انتگرال گیری است.

همچنین در صورت اعمال میدان مغناطیسی خارجی متناوب، چگالی جریان ایجاد شده درون نوار از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$J(x, t) = \frac{\mu d}{\rho} \left[H_a(t)x + \frac{1}{2\pi} \int j(u, t) \ln \left| \frac{x-u}{x+u} \right| du \right] \quad (10)$$

که در آن، $H_a(t)$ میدان مغناطیسی خارجی است.

تلفات جریان متناوب در ناحیه θ از محاسبه انتگرال چگالی توان در ناحیه مزبور در مدت زمان یک دوره حاصل می‌شود:

$$Q = 2 \int_{T/2}^T \int_{\theta} E \cdot J \, d\theta \, dt \quad (11)$$

تلفات جریان متناوبی که از این رابطه حاصل می‌شود بر پایه ژول بر متر بر سیکل می‌باشد.

۴- مطالعات عددی و نتایج مدل سازی

در این بخش، سه دسته مطالعه عددی در قالب محاسبه تلفات جریان متناوب برای یک نوار ابررسانای نسل دوم نمونه‌ای در سه حالت تحت میدان مغناطیسی خارجی، تحت جریان حامل و نیز اعمال همزمان هر دو حالت به روش اجزاء محدود دوبعدی در نرم‌افزار COMSOL Multiphysics انجام گرفته است. تمامی مدل‌سازی‌ها و مطالعات عددی در یک رایانه همراه، با این

۳- مدل سازی تلفات جریان متناوب نوار ابررسانای

دمابالا به روش اجزاء محدود با فرمول سازی H

در این مقاله به منظور مدل سازی رفتار نوار ابررسانای دمابالا تحت جریان، ولتاژ و میدان‌های مغناطیسی متناوب از روش اجزاء محدود دوبعدی با فرمول سازی H استفاده شده که امکان مدل سازی تلفات هیستریزیس، جریان گردابی و فرومغناطیسی بستر نوار را به صورت همزمان فراهم می‌آورد. روش‌های برپایه فرمول سازی H به دلیل حل مستقیم معادلات مغناطیسی در صورت انتخاب مش بندی مناسب، سریعتر بوده و شرایط مرزی مربوط به جریان حامل ورودی یا خروجی و نیز میدان مغناطیسی خارجی در این مدل سازی راحت تر قابل اعمال است. همچنین این روش نسبت به سایر روش‌های پیشین دارای مزیت‌های دیگری از جمله توانایی همگرایی بسیار مناسب و عدم نیاز به اضافه کردن یک مقاومت کوچک فرضی در مدل سازی E نسبت به J است که در روش‌های دیگر در گذشته برای جلوگیری از به وجود آمدن نقاط تکین مورد نیاز بود [۲۲-۲۵].

معادلات اساسی در مدل سازی تلفات جریان متناوب با فرمول سازی H به روش اجزاء محدود عبارتند از معادلات مکسول شامل قانون فارادی و قانون آمپر به اضافه قانون توان. به همراه این معادلات باید از قانون اهم و رابطه بین چگالی شار و شدت میدان مغناطیسی هم بهره برد. روابط مورد استفاده در این مدل سازی در پی آمده است [۲۴-۲۶]:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \quad (2)$$

$$\mathbf{E} = \rho \mathbf{J} \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} \quad (4)$$

$$\mathbf{E} = J \left(\frac{E_0}{J_{c0}} \right) \left(\frac{J}{J_{c0}} \right)^{n-1} \quad (5)$$

$$\mathbf{E} = J \left(\frac{E_0}{J_c} \right) \left(\frac{J}{J_c} \right)^{n-1} \quad (6)$$

$$J_c(B) = \left(\frac{J_{c0}}{1 + \frac{|B_y|}{B_0}} \right) \quad (7)$$

در روابط فوق، E میدان الکتریکی، B و H چگالی شار و شدت میدان مغناطیسی، J چگالی جریان، ρ مقاومت، μ_0 نفوذپذیری مغناطیسی خلاء، μ_r نفوذپذیری مغناطیسی نسبی، E_0 معیار میدان مغناطیسی در دمای ۷۷ کلوین، J_c چگالی جریان بحرانی، n ثابت قانون توان، B_y مولفه عمودی چگالی شار

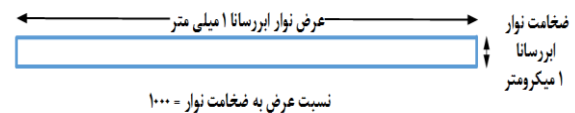
مشخصات انجام شد:

Intel Core i7-5500U 2.4 GHz CPU 8GB RAM

مشخصات نوار ابرسانای دمابالای نمونه‌ای مورد استفاده در مطالعات عددی و نیز پارامترهای دیگر مدل‌سازی در جداول (۱) و (۲) آمده است.

همچنین برای تصور بهتر نوار ابرسانای تحت مطالعه، نمایی از این نوار به همراه نسبت ابعاد (Aspect Ratio) آن در شکل (۱) نمایش داده شده است.

برای مدل‌سازی، نوار ابرسانای دمابالای نسل دوم تحت مطالعه و نیز ناحیه حل مساله (region) به ترتیب بصورت مستطیل و دایره در نرم‌افزار مربوطه ترسیم شدند. لازم به یادآوری است که شعاع ناحیه حل ۱۰ برابر بزرگترین بعد نوار ابرسانا یعنی عرض آن در نظر گرفته شد. همچنین، شرایط مرزی در مدل‌سازی و مطالعات عددی تحت میدان مغناطیسی خارجی و نیز تحت جریان حامل در نرم‌افزار COMSOL Multiphysics اعمال شده‌اند به ترتیب عبارتند از شرایط مرزی دیریکله و نیومن.



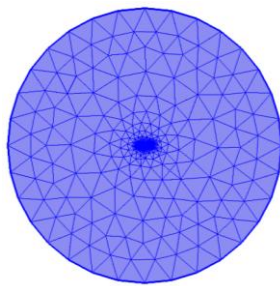
شکل (۱): نمایی از ابعاد فیزیکی نوار ابرسانای تحت مطالعه

جدول (۱): مشخصات نوار ابرسانای دمابالای نسل دوم برپایه ایتیریم تحت مطالعه

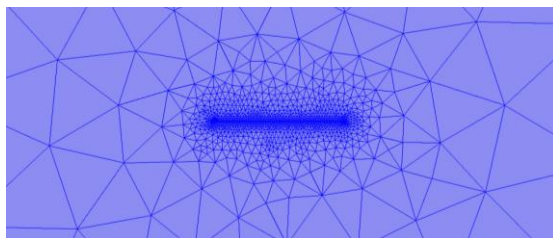
پارامتر	نماد	مقدار	واحد
طول ابرسانا	h	۳	میلی‌متر
عرض ابرسانا	d	۱	میکرومتر
ثابت قانون توان	n	۲۵	---
ولتاژ بحرانی	E_c	۱	میکروولت بر سانتی‌متر
چگالی جریان بحرانی	J_c	۱۰	گیگاآمپر بر مترمربع
ثابت مدل کیم-اندرسن	B_0	۷۵ ۱۲۵	میلی‌تسلا

جدول (۲): پارامترهای مورد استفاده در مطالعه عددی

پارامتر	نماد	مقدار	واحد
مقاومت هوا	ρ_{air}	۱	مگا اهم بر متر
فرکانس	f	۱۰ - ۵۰ ۲۰۰ - ۱۰۰	هرتز
تعداد مش (المان‌های ناحیه و مرز)	N_{mesh}	۱۸۴ و ۲۵۸۳	---
جریان بحرانی	I_c	۳۰	آمپر



(الف)



(ب)

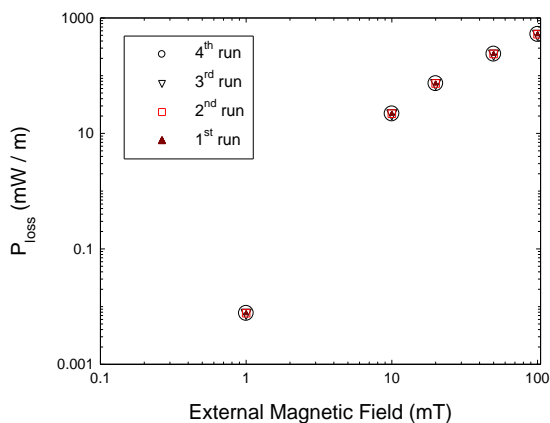
شکل (۲): نمایی از مش‌بندی مدل ارائه شده: (الف) مش‌بندی در همه نواحی حل مساله. (ب) مش‌بندی نقشه‌برداری شده در نوار ابرسانا

برای مش‌بندی هندسه عناصر موجود در این مطالعه عددی، از دو نوع مش استفاده شده، یک مش نقشه‌برداری شده برای مش‌بندی نوار ابرسانا (Mapped Mesh) و دیگری مش‌بندی مثلثی برای سایر نواحی. مش‌بندی نقشه‌برداری شده مطابق منابع منتشر شده پیشین، بهترین گزینه برای مش‌بندی ابرسانا به منظور تسریع در همگرایی است. نمایی از مش‌بندی نوار ابرسانای مدل‌شده در نرم‌افزار COMSOL Multiphysics در شکل (۲) نشان داده شده و همچنین، فلوجارت مراحل مدل‌سازی و مطالعات عددی انجام‌شده به روش اجزاء محدود در شکل (۳) نمایش داده شده است.

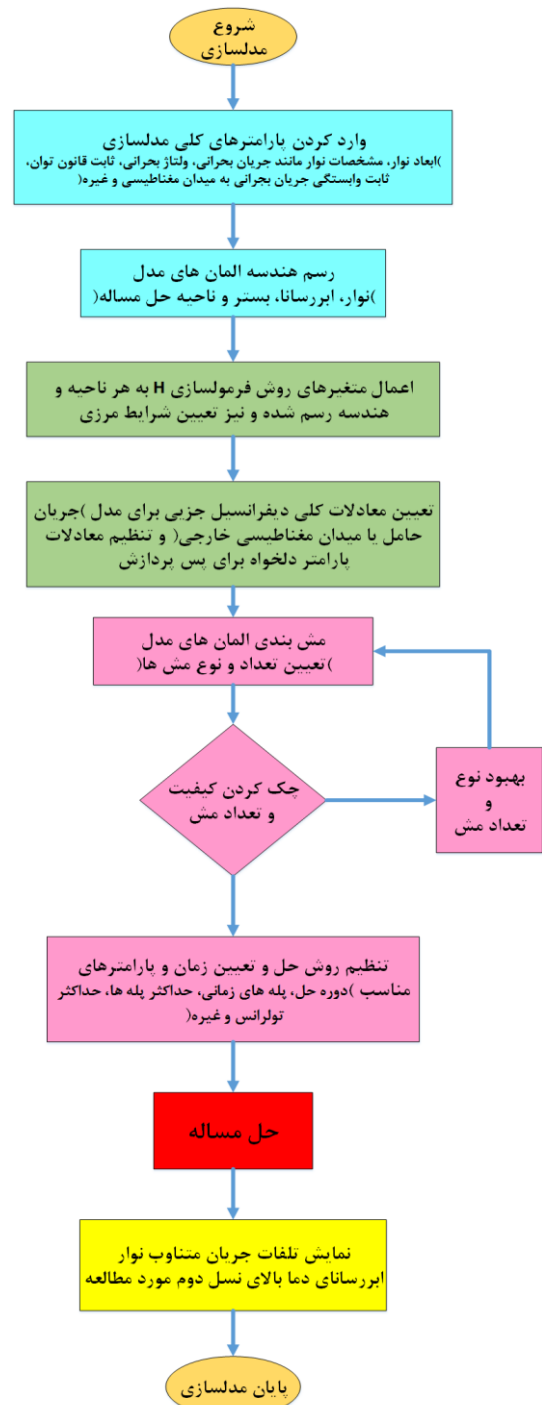
برای هر سناریو، تلفات جریان متناوب تحت ۵ میدان مغناطیسی مختلف خارجی (۱ mT، ۱۰ mT، ۲۰ mT، ۵۰ mT و ۱۰۰ mT) و ۴ فرکانس مختلف (۱۰ Hz، ۵۰ Hz، ۱۰۰ Hz و ۲۰۰ Hz) محاسبه شد. در هر حالت میدان مغناطیسی خارجی سینوسی بوده و با فرکانس و دامنه معین تعریف شده است.

برای بررسی صحت مدل پیشنهادی، نتیجه تلفات در میدان‌های مغناطیسی خارجی ۱ mT، ۱۰ mT و ۲۰ mT در فرکانس ۵۰ Hz با نتیجه تلفات حاصل از مرجع [۹] مقایسه و اعتبارسنجی شده است. این مقایسه نشان می‌دهد نتایج مدل‌سازی این مقاله کاملاً مشابه نتایج مرجع [۹] بوده و دقیقاً تکرار شده‌اند. در این مرجع نیز نتایج با روش‌های تک‌بعدی و نیز تحلیلی مقایسه شده بود. همچنین، پیش از شروع مطالعات عددی و در مرحله اعتبارسنجی مدل، تعدادی مطالعه عددی به‌منظور بررسی تکرارپذیری نتایج مدل‌سازی انجام شد. نتایج این تست تکرارپذیری برای ۴ بار در شکل (۴) نشان داده شده که تکرارپذیری مدل را تایید می‌کند. سپس مطالعات عددی برای سه سناریو مدنظر انجام گرفت.

در شکل (۵)، تغییرات تلفات جریان متناوب نوار ابررسانای دما بالای نسل دوم برپایه ایتیریم مورد مطالعه تحت میدان مغناطیسی خارجی با اندازه و فرکانس‌های مختلف برای چگالی جریان بحرانی مستقل از میدان مغناطیسی، نشان داده شده است. با افزایش صدبرابری اندازه میدان خارجی، تلفات جریان متناوب نوار ابررسانای تحت مطالعه برای فرکانس‌های ۱۰ Hz، ۵۰ Hz، ۱۰۰ Hz و ۲۰۰ Hz به ترتیب ۵۰۰۰۰، ۷۰۰۰۰، ۸۰۰۰۰ و ۱۰۰۰۰۰ برابر افزایش یافته است. تخمین دقیق این میزان از تغییرات برای کاربردهایی که تحت میدان خارجی هستند، اهمیت می‌یابد. در برخی ماشین‌های الکتریکی همچون ترانسفورماتور میدان خارجی در حد ۱۰۰ mT بوده و در ژنراتورهای دوار توربین بادی، حتی از این مقدار بیشتر است.



شکل (۴): بررسی تکرارپذیری نتایج مدل‌سازی تحت میدان مغناطیسی خارجی برای ۴ بار تکرار

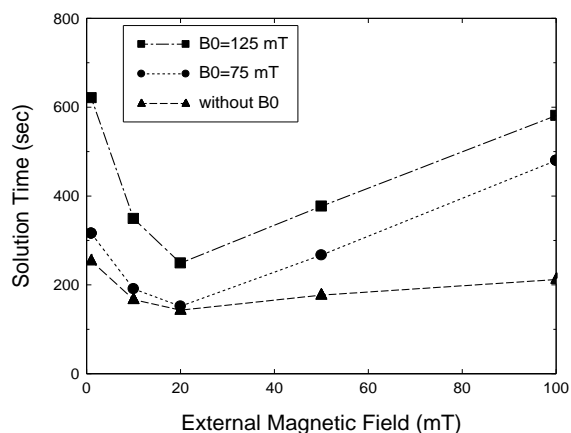


شکل (۳): فلوچارت مراحل مدل‌سازی پیشنهادی به روش اجزاء محدود

۴-۱- نتایج تلفات مغناطیسی شدگی

سه سناریو برای مطالعه عددی اثر میدان مغناطیسی خارجی بر تلفات جریان متناوب یا همان تلفات مغناطیسی شدگی، مورد بررسی قرار گرفت: (۱) چگالی جریان بحرانی مستقل از میدان مغناطیسی یا مدل قانون توان (رابطه (۵))، (۲) چگالی جریان بحرانی وابسته به میدان مغناطیسی با B_0 ، ۷۵ mT (رابطه (۷))، (۳) چگالی جریان بحرانی وابسته به میدان مغناطیسی با B_0 ، ۱۲۵ mT (رابطه (۷)).

متناب نوار ابرسانی تحت مطالعه در حضور میدان مغناطیسی خارجی با اندازه‌های مختلف و فرکانس ۲۰۰ Hz برای هر سه سناریو، نشان داده شده است. برای هر سه سناریو، منحنی تغییرات زمان حل، کمینه‌ای در فرکانس ۲۰ Hz دارد. برای اندازه میدان‌های خیلی کوچک این زمان طولانی‌تر است. سریعترین زمان حل در بین سناریوهای مختلف، متعلق به حالتی است که چگالی جریان بحرانی وابستگی به میدان مغناطیسی ندارد.

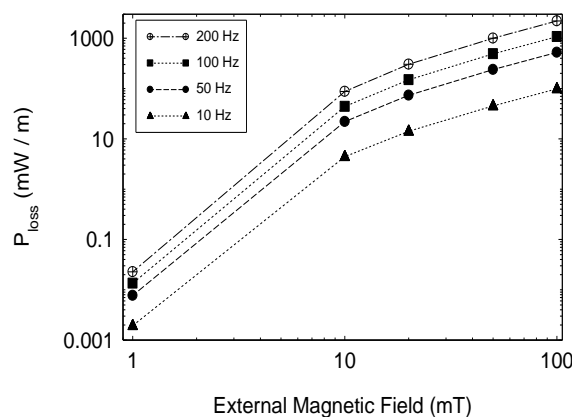


شکل (۷): تغییرات زمان محاسبات در مدل‌سازی تلفات جریان متناب نوار ابرسانی تحت مطالعه در میدان مغناطیسی خارجی با اندازه‌های مختلف و فرکانس ۲۰۰ Hz در سه سناریو

در شکل‌های (۸) و (۹)، به ترتیب نمایی از اندازه چگالی شار مغناطیسی در طول نوار و اندازه چگالی جریان در مرکز نوار ابرسانی مورد مطالعه تحت میدان‌های خارجی ۱ mT و ۱۰۰ mT با فرکانس ۲۰۰ Hz و ضریب وابستگی ۱۲۵ mT در یک زمان مشابه در ۰/۰۳۵ ثانیه نشان داده شده است. لازم به یادآوری است زمانی که فقط میدان خارجی بدون جریان حامل به نوار اعمال می‌شود، این میدان خارجی یک چگالی جریانی در نوار بوجود می‌آورد که از رابطه (۱۰) قابل محاسبه بوده و این چگالی جریان است که تولید تلفات جریان متناب در نوار می‌نماید.

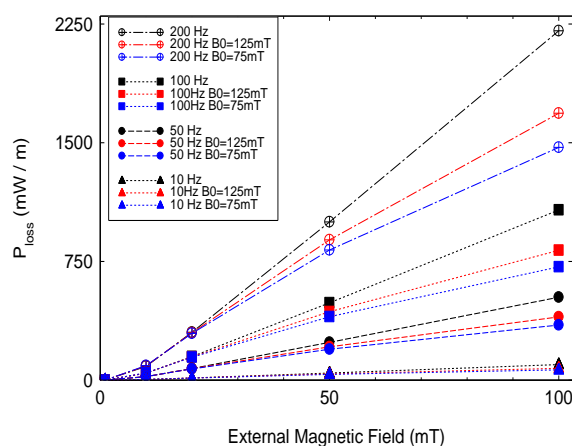
۴-۲- نتایج تلفات جریان حامل

برای محاسبه عددی تلفات جریان متناب تحت جریان حامل، سه سناریو مشابه بخش قبل در نظر گرفته شد. برای هر سناریو، تلفات جریان متناب تحت ۵ جریان حامل مختلف ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۹۵ درصد جریان بحرانی و ۴ فرکانس متفاوت ۱۰ Hz، ۵۰ Hz، ۱۰۰ Hz و ۲۰۰ Hz مورد محاسبه قرار گرفت. در هر حالت جریان حامل سینوسی بوده و با فرکانس و دامنه مشخص تعریف شده است.



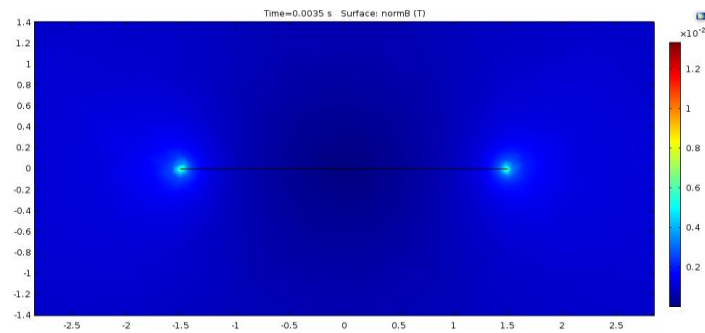
شکل (۵): تغییرات تلفات جریان متناب نوار ابرسانی تحت مطالعه نسبت به تغییرات میدان خارجی تحت اندازه‌ها و فرکانس‌های مختلف برای سناریو اول

در شکل (۶)، تغییرات تلفات جریان متناب نوار ابرسانی دما بالای نسل دوم برپایه ایتیریم مورد مطالعه تحت میدان مغناطیسی خارجی با اندازه و فرکانس‌های مختلف تحت سه سناریوی پیش‌گفته نشان داده شده است. آنچه که از نتایج مدل‌سازی شکل (۶) دریافت می‌شود عبارتند از: (۱) بالاترین تلفات زمانی به وقوع می‌پیوندد که چگالی جریان بحرانی به میدان مغناطیسی وابسته نیست. (۲) با در نظر گرفتن وابستگی چگالی جریان بحرانی به میدان مغناطیسی در مدل کیم-اندرسن، با افزایش ضریب B_0 تلفات افزایش می‌یابد. زیرا در این حالت چگالی جریان بیشتر شده و به دلیل نبود جریان دیگری در نوار، این جریان درون ماده تلفات می‌سازد. (۳) با افزایش فرکانس، اختلاف بین نتایج سناریوهای مختلف بشکل معنی‌دار و قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

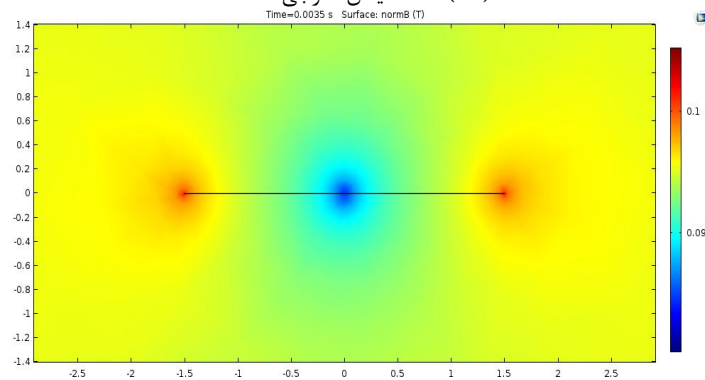


شکل (۶): تغییرات تلفات جریان متناب نوار ابرسانی تحت مطالعه نسبت به تغییرات میدان مغناطیسی خارجی تحت اندازه‌ها و فرکانس‌های مختلف سه سناریو

در شکل (۷)، تغییرات زمان محاسبه در نرم‌افزار اجزاء محدود COMSOL Multiphysics برای مدل‌سازی تلفات جریان

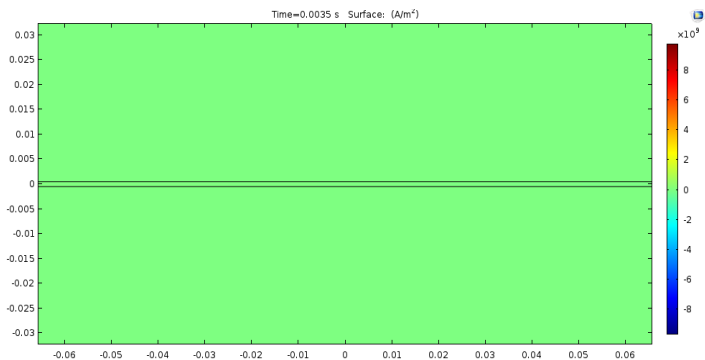


(الف) تحت میدان خارجی ۱ mT

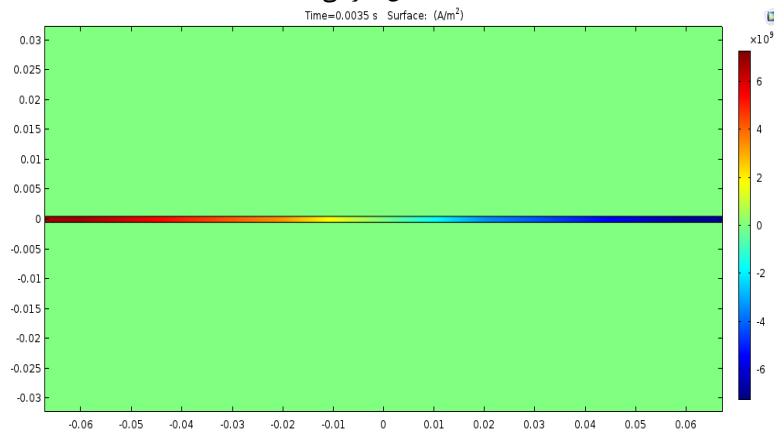


(ب) تحت میدان خارجی ۱۰۰ mT

شکل (۸): چگالی شار مغناطیسی نفوذ کرده در نوار ابررسانای مورد مطالعه در فرکانس ۲۰۰ Hz و تحت میدان مغناطیسی خارجی با اندازه‌های مختلف در سناریوی سوم در ۰/۰۰۳۵ ثانیه



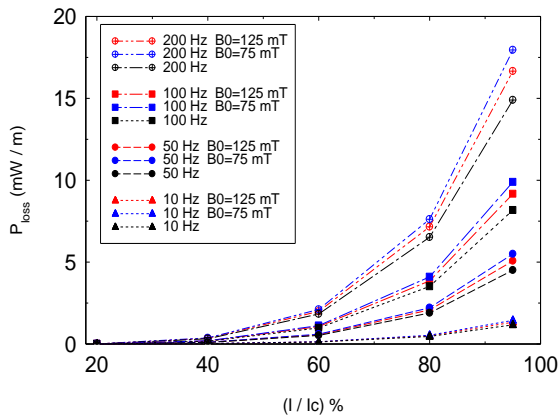
(الف) تحت میدان خارجی ۱ mT



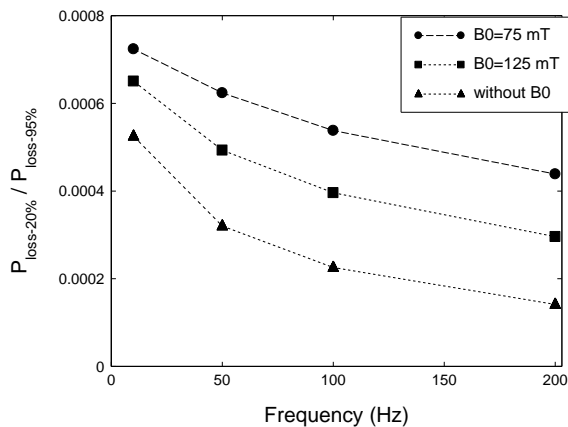
(ب) تحت میدان خارجی ۱۰۰ mT

شکل (۹): چگالی جریان در مرکز نوار ابررسانای مورد مطالعه در فرکانس ۲۰۰ Hz و تحت میدان مغناطیسی خارجی با اندازه‌های مختلف در سناریوی سوم در ۰/۰۰۳۵ ثانیه

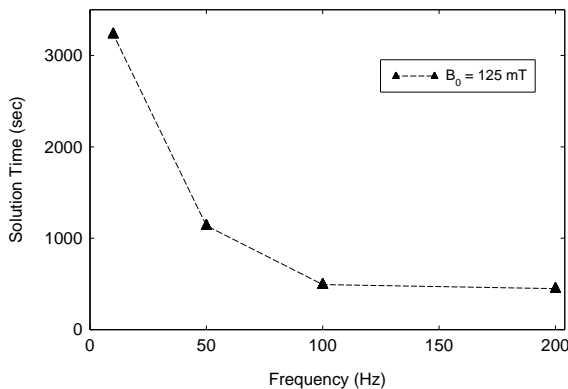
بزرگ خواهد بود. در شکل (۱۳)، تغییرات زمان محاسبات در مدل‌سازی تلفات جریان متناوب نوار ابرسانی تحت مطالعه در حالت جریان حامل با ۲۰ درصد جریان بحرانی و فرکانس‌های مختلف در سناریو سوم نشان داده شده است.



شکل (۱۱): تغییرات تلفات جریان متناوب نوار ابرسانی تحت مطالعه نسبت به تغییرات جریان حامل تحت اندازه‌ها و فرکانس‌های مختلف در سه سناریو

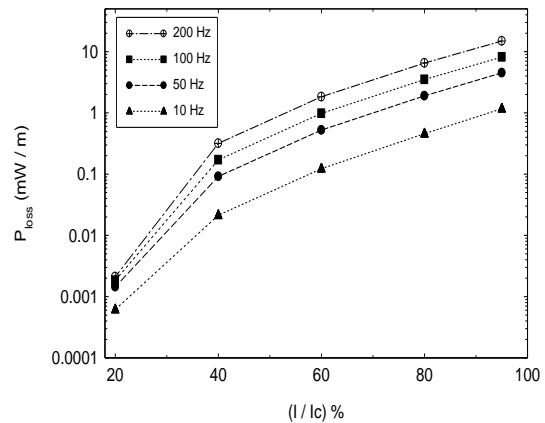


شکل (۱۲): نسبت تغییرات تلفات جریان متناوب در جریان حامل با دامنه ۲۰ به ۹۵ درصد جریان بحرانی در فرکانس‌های مختلف برای سه سناریو



شکل (۱۳): تغییرات زمان محاسبات در مدل‌سازی تلفات جریان متناوب نوار ابرسانی تحت مطالعه در حالت جریان حامل با ۲۰ درصد جریان بحرانی و فرکانس‌های مختلف در سناریو سوم

در شکل (۱۰)، تغییرات تلفات جریان متناوب نوار ابرسانی دما بالای نسل دوم برپایه ایتیریم تحت مطالعه نسبت به جریان حامل عبوری با اندازه و فرکانس‌های مختلف برای چگالی جریان مستقل از میدان مغناطیسی، نشان داده شده است. به خوبی مشخص است که با افزایش جریان حامل، تلفات نوار افزایش چشم‌گیری می‌یابد.



شکل (۱۰): تغییرات تلفات جریان متناوب نوار ابرسانی تحت مطالعه نسبت به تغییرات جریان حامل تحت اندازه‌ها و فرکانس‌های مختلف برای حالت چگالی جریان بحرانی مستقل از میدان مغناطیسی

در شکل (۱۱)، تغییرات تلفات جریان متناوب نوار ابرسانی دما بالای نسل دوم برپایه ایتیریم تحت مطالعه نسبت به تغییرات جریان حامل با اندازه و فرکانس‌های مختلف تحت سه سناریوی پیش‌گفته نشان داده شده است. آنچه که از نتایج مطالعه عددی شکل (۱۱) برای تلفات جریان حامل دریافت می‌شود عبارتند از: (۱) در هر سناریو بیشترین تلفات زمانی بوقوع می‌پیوندد که نسبت جریان حامل به جریان بحرانی بیشینه باشد. (۲) کمترین تلفات زمانی دیده می‌شود که چگالی جریان به میدان مغناطیسی وابسته نیست. (۳) با در نظر گرفتن وابستگی چگالی جریان به میدان مغناطیسی، با افزایش ضریب B_0 ، تلفات کاهش می‌یابد. زیرا در این حالت چگالی جریان بحرانی بیشتر شده و این یعنی نسبت جریان حامل به جریان بحرانی کاهش یافته و در نتیجه طبق بند (۱) تلفات کاهش می‌یابد. (۴) با افزایش فرکانس، اختلاف بین نتایج سناریوهای مختلف در یک فرکانس معین به شکل قابل توجهی افزایش می‌یابد. (۵) تلفات در نزدیکی جریان بحرانی شیب زیادی یافته و به صورت تصاعدی افزایش می‌یابد.

در شکل (۱۲)، نسبت تغییرات تلفات جریان متناوب در جریان حامل با دامنه ۲۰ به ۹۵ درصد جریان بحرانی در فرکانس‌های مختلف برای سه سناریو رسم شده است. به خوبی مشخص است که با افزایش فرکانس، تغییرات این نسبت هموگرافیک بوده و رشد تلفات در جریان‌های حامل بالاتر بسیار

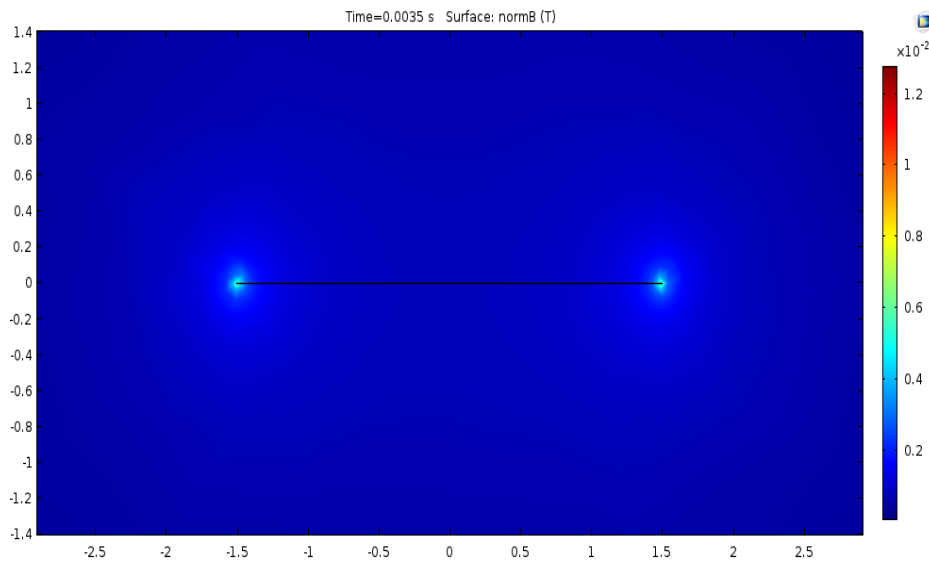
مطالعه عددی انجام گرفته است. در این بررسی برآنیم تا نشان دهیم در این مورد با توجه به ساختار غیرهمسان نوار ابرسانا و موجودیت غیرخطی روابط مربوط به تلفات جریان متناوب این عناصر، نمی‌توان از قاعده جمع آثار بهره برد.

در محاسبه تلفات جریان بحرانی در اعمال هم‌زمان میدان مغناطیسی خارجی و نیز جریان حامل، پدیده‌های مغناطیسی و غیرمغناطیسی مختلفی بر میزان تلفات موثرند از جمله فرکانس‌های جریان و میدان اعمالی، دامنه جریان حامل، اندازه میدان مغناطیسی خارجی، ضریب وابستگی چگالی جریان بحرانی به میدان مغناطیسی و غیره.

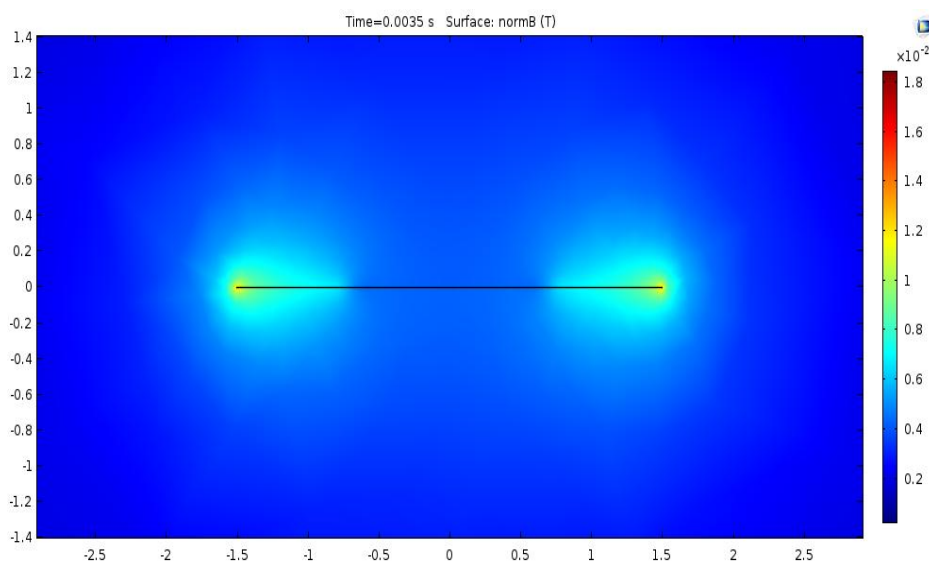
در شکل‌های (۱۵-۱۴)، به ترتیب نمایی از اندازه چگالی شار مغناطیسی در طول نوار و اندازه چگالی جریان در مرکز نوار ابرسانای تحت مطالعه برای جریان‌های حامل ۲۰ و ۹۵ درصد جریان بحرانی، با فرکانس ۲۰۰ Hz و ضریب وابستگی ۱۲۵ mT در ۰/۰۰۳۵ ثانیه نشان داده شده است.

۳-۴- محاسبه تلفات جریان متناوب با اعمال هم‌زمان میدان مغناطیسی خارجی و تحت جریان حامل

برای بررسی اثر هم‌زمان جریان حامل و میدان مغناطیسی خارجی بر تلفات جریان متناوب نوار ابرسانا نیز یک نمونه

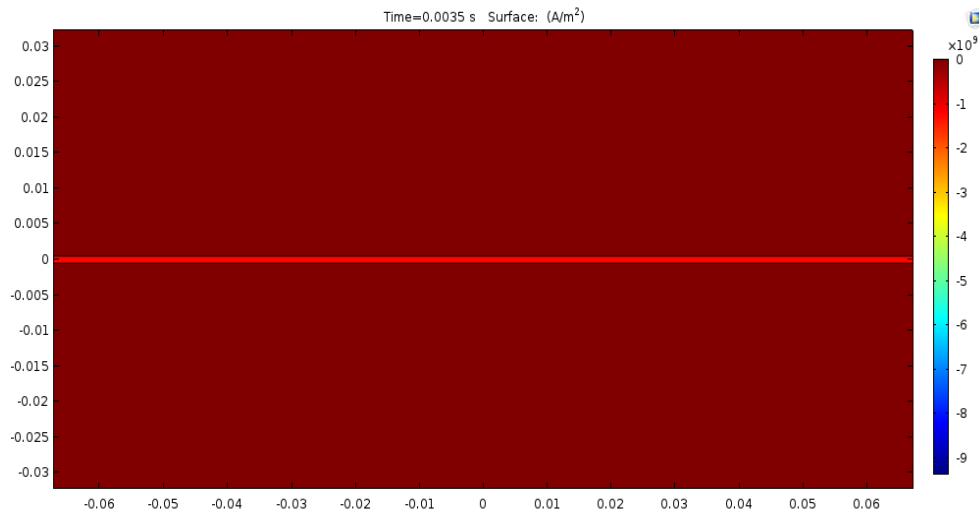


(الف) تحت جریان حامل ۲۰ درصد جریان بحرانی

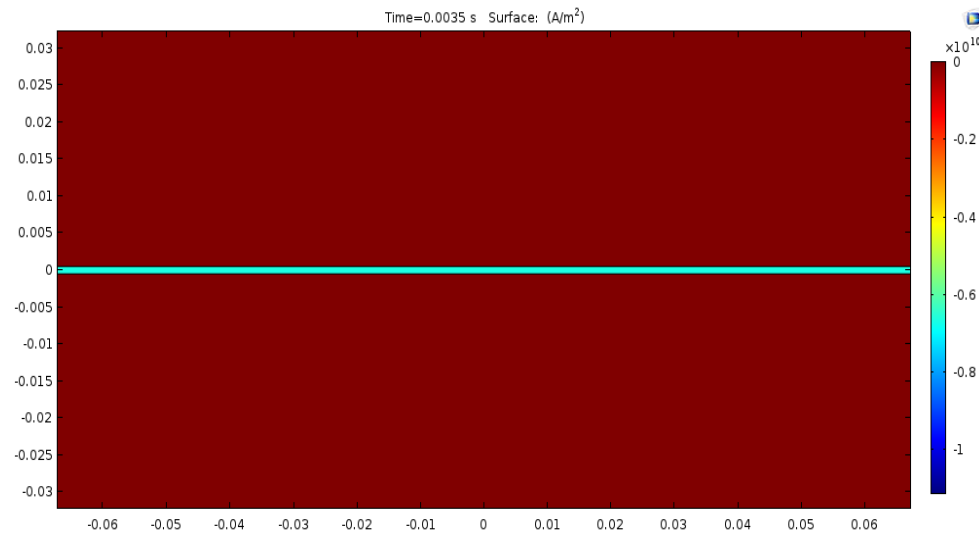


(ب) تحت جریان حامل ۹۵ درصد جریان بحرانی

شکل (۱۴): چگالی شار مغناطیسی در طول نوار ابرسانای تحت مطالعه در فرکانس ۲۰۰ Hz و جریان‌های حامل با اندازه‌های مختلف در سناریوی سوم در ۰/۰۰۳۵ ثانیه

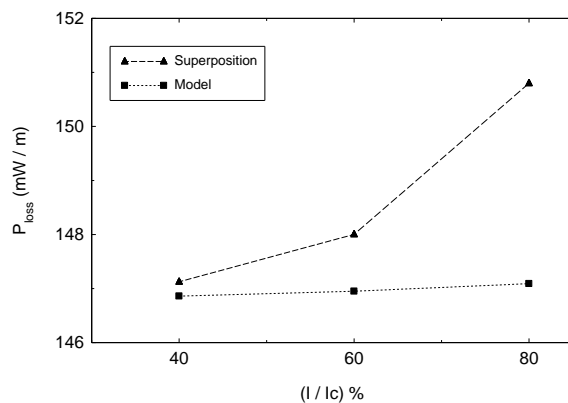


(الف) تحت جریان حامل ۲۰ درصد جریان بحرانی



(ب) تحت جریان حامل ۹۵ درصد جریان بحرانی

شکل (۱۵): چگالی جریان در مرکز نوار ابررسانای تحت مطالعه در فرکانس ۲۰۰ Hz و جریان‌های حامل با اندازه‌های مختلف در سناریوی سوم در ۰/۰۰۳۵ ثانیه



شکل (۱۶): مقایسه تلفات جریان متناوب حاصل از مدل و نیز قاعده جمع آثار با اعمال همزمان میدان مغناطیسی خارجی ۲۰ mT با فرکانس ۱۰۰ Hz و نیز جریان‌های حامل ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد جریان بحرانی با فرکانس ۱۰۰ Hz در سناریوی سوم

مطالعه عددی این بخش، مربوط به اعمال همزمان میدان مغناطیسی خارجی ۲۰ mT با فرکانس ۱۰۰ Hz و نیز جریان‌های حامل ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد جریان بحرانی با فرکانس ۱۰۰ Hz می‌باشد. با توجه به این مطالعات عددی و نیز استفاده از قاعده جمع آثار، تلفات جریان متناوب نوار ابررسانای تحت مطالعه بصورت شکل (۱۶) نشان داده شد. چنانچه از قاعده جمع آثار برای محاسبه تلفات جریان متناوب در اعمال همزمان میدان مغناطیسی خارجی و جریان حامل استفاده شود، نتیجه محاسبات خطای قابل توجهی را بروز می‌دهد. این خطا برای مطالعه عددی شکل (۱۶)، در شکل (۱۷) نمایش داده شده است. لازم به تذکر است که هر چه فرکانس بالاتر رود و جریان حامل بزرگتر شده و هر اندازه دامنه میدان خارجی بزرگتر شود، این میزان خطا به صورت تصاعدی بالا می‌رود.

و نیز مدل کیم- اندرسن بررسی و مقایسه شده‌اند. برای هر حالت مدل‌سازی، مطالعات عددی متعدد در فرکانس‌ها، دامنه‌های مختلف جریان و میدان مغناطیسی خارجی انجام شده و در هر حالت، چگالی شار مغناطیسی و چگالی جریان نوار ابررسانا نیز بررسی شد.

مشروح نتایج در متن مقاله در هر بخش و در قالب نتیجه‌گیری از مطالعات عددی آورده شده است. در اینجا برخی از نتایج کلی دیگر برشمرده می‌شود:

(۱) تلفات جریان متناوب نوار ابررسانای نسل دوم برپایه ایتیریم به شدت وابسته به میزان میدان مغناطیسی خارجی بوده و کمتر به جریان حامل وابسته است.

(۲) همچنین میزان تلفات جریان متناوب حساس به وابستگی چگالی جریان بحرانی به میدان مغناطیسی می‌باشد به طوری که در مطالعه عددی تحت میدان مغناطیسی خارجی در صورت وابستگی، تلفات تا ۳۰ درصد تغییر کرده و در مطالعه تحت جریان حامل در صورت وابستگی تلفات تا ۱۵ درصد تفاوت دارد.

(۳) نتایج مدل‌سازی از نظر سرعت تحلیل نسبت به روش‌های یک‌بعدی و یا مدل‌های تحلیلی بسیار سریع‌تر است.

به شدت وابسته به میزان میدان مغناطیسی خارجی بوده و کمتر به جریان حامل وابسته است.

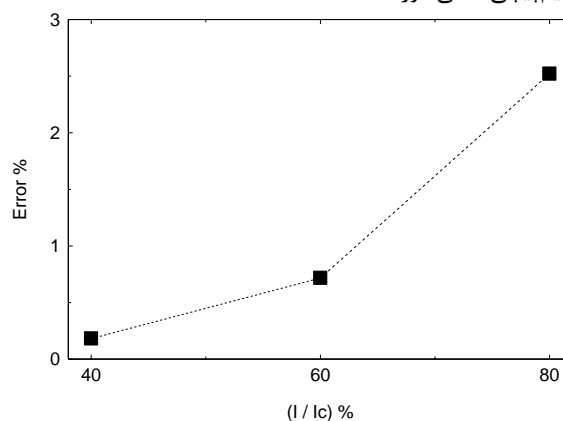
(۲) همچنین میزان تلفات جریان متناوب حساس به وابستگی چگالی جریان بحرانی به میدان مغناطیسی می‌باشد به طوری که در مطالعه عددی تحت میدان مغناطیسی خارجی در صورت وابستگی، تلفات تا ۳۰ درصد تغییر کرده و در مطالعه تحت جریان حامل در صورت وابستگی تلفات تا ۱۵ درصد تفاوت دارد.

(۳) نتایج مدل‌سازی از نظر سرعت تحلیل نسبت به روش‌های یک‌بعدی و یا مدل‌های تحلیلی بسیار سریع‌تر است.

۶- مراجع

- [1] X. Yang, X. Li, Y. He, X. Wang, and B. Xu, "Investigation on stresses of superconductors under pulsed magnetic fields based on multiphysics model," *Physica C: Superconductivity and its applications*, vol. 535, pp. 1-8, 2017.
- [2] B. G. Marchionini, Y. Yamada, L. Martini, and H. Ohsaki, "High Temperature Superconductivity: A Roadmap for Electric Power Sector Applications, 2015-2030," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 27, no. 4, pp. 1-6, 2017.
- [3] S. Fukui, S. Tsukamoto, K. Nohara, J. Ogawa, T. Sato, and T. Nakamura, "Study on AC Loss Reduction in HTS Coil for Armature Winding of AC Rotating Machines," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 4, pp. 1-5, 2016.
- [4] X. Obradors and T. Puig, "Coated conductors for power applications: materials challenges," *Superconductor Science and Technology*, vol. 27, pp. 1-17, 2014.

در ضمن باید توجه داشت که خود جریان بحرانی در حضور میدان خارجی شدت افت می‌کند لذا از یک میدان و جریان معینی دیگر ماده ابررسانا نبوده و مقاومتی ده‌ها برابر مس خواهد داشت. لازم به یادآوری مجدد است که تخمین دقیق میزان تلفات جریان متناوب در کاربردهای خاص نظیر شتاب‌دهنده‌های ذرات، ماشین‌های الکتریکی و کابل‌های فشار قوی از اهمیت فوق‌العاده حیاتی برخوردار است. در صورت خطا در محاسبات برای این کاربردها، ماشین از حالت ابررسانایی خارج و گاهی حتی سیم‌پیچی‌ها می‌سوزند.



شکل (۱۷): درصد خطای نسبی محاسبه تلفات جریان متناوب با استفاده از قاعده جمع آثار ناشی از اعمال همزمان میدان مغناطیسی خارجی ۲۰ mT با فرکانس ۱۰۰ Hz و نیز جریان‌های حامل ۴۰، ۶۰ و ۸۰ درصد جریان بحرانی با فرکانس ۱۰۰ Hz در سناریوی سوم

۵- نتیجه‌گیری

تلفات جریان متناوب نوارهای ابررسانا، یکی از محدودیت‌های مهم طراحی برای کاربردهای تجهیزات قدرت الکتریکی از دید کاهش تلفات تجهیز و نیز برای طراحی و ساخت کرایوستات‌های صنعتی از دید بهبود راندمان کلی سامانه است. یکی از روش‌های کم هزینه، سریع و دقیق برای ارزیابی تلفات جریان متناوب نوارهای ابررسانا، روش‌های عددی می‌باشند.

در این مقاله، مدل‌سازی عددی به روش اجزاء محدود برای محاسبه تلفات جریان متناوب (تلفات مغناطیسی‌شدگی و تلفات جریان حامل) نوارهای ابررسانای نسل دوم بر پایه ایتیریم و با استفاده از فرمول‌سازی H در سه حالت انجام شده است: (۱) تحت میدان مغناطیسی خارجی (تلفات مغناطیسی‌شدگی)، (۲) تحت جریان حامل (تلفات جریان حامل)، (۳) اعمال هم‌زمان هر دو حالت اول و دوم. در مدل‌سازی‌ها، وابستگی چگالی جریان بحرانی به چگالی شار مغناطیسی در مطالعات عددی در نرم‌افزار اجزاء محدود COMSOL Multiphysics در قالب سه سناریو در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر هر دو مدل قانون توان ساده شده

- [16] V. M. R. Zermeno, K. Habelok, M. Stepien, and F. Grilli, "A parameter-free method to extract the superconductor's $J_c(B, \theta)$ field-dependence from in-field current-voltage characteristics of high temperature superconductor tapes," *Superconductor Science and Technology*, vol. 30, no. 3, pp. 1-7, 2017.
- [17] F. Gomory, M. Vojenciak, E. Pardo, M. Solovyov, and J. Souc, "AC losses in coated conductors," *Superconductor Science and Technology*, vol. 23, no. 3, pp. 1-9, 2010.
- [18] F. Grilli, E. Pardo, A. Stenvall, D. N. Nguyen, W. Yuan, and F. Gomory, "Computation of Losses in HTS Under the Action of Varying Magnetic Fields and Currents," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 24, no. 1, pp. 1-33, 2014.
- [19] X. Pei, A. C. Smith, M. Barnes, "AC Losses Measurement and Analysis for a 2G YBCO Coil in Metallic Containment Vessels," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 27, no. 4, pp. 1-5, 2017.
- [20] J. H. Kim, C. H. Kim, G. Iyyani, J. Kvitkovic, and S. Pamidi, "Transport AC Loss Measurements in Superconducting Coils," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 21, no. 3, pp. 3962-3972, 2011.
- [21] C. M. Rey, R. C. Duckworth, S. W. Schwenterly, and E. Pleva, "Electrical AC Loss Measurements on a 2G YBCO Coil," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 21, no. 3, pp. 2424-2427, 2011.
- [22] L. Queval, V. M. R. Zermeno, and F. Grilli, "Numerical models for ac loss calculation in large-scale applications of HTS coated conductors," *Superconductor Science and Technology*, vol. 29, no. 2, pp. 1-10, 2016.
- [23] R. Brambilla, F. Grilli, L. Martini, and F. Sirois, "Integral equations for the current density in thin conductors and their solution by the finite-element method," *Superconductor Science and Technology*, vol. 21, no. 10, pp. 1-8, 2008.
- [24] D. N. Nguyen, S. P. Ashworth, and J. O. Willis, "Experimental and finite-element method studies of the effects of ferromagnetic substrate on the total ac loss in a rolling-assisted biaxially textured substrate YBa₂Cu₃O₇ tape exposed to a parallel ac magnetic field," *Journal of Applied Physics*, vol. 106, no. 9, pp. 1-7, 2009.
- [25] Y. Wang, H. Song, W. Yuan, Z. Jin, and Z. Hong, "Ramping turn-to-turn loss and magnetization loss of a No-Insulation (RE)Ba₂Cu₃O_x high temperature superconductor pancake coil," *Journal of Applied Physics*, vol. 121, no. 11, pp. 1-16, 2017.
- [26] B. Shen, J. Li, J. Geng, L. Fu, X. Zhang, H. Zhang, C. Li, F. Grilli, and T. A. Coombs, "Investigation of AC losses in horizontally parallel HTS tapes," *Superconductor Science and Technology*, vol. 30, no. 7, pp. 1-9, 2017.
- [5] S. Stavrev, F. Grilli, B. Dutoit, N. Nibbio, E. Vinot, I. Klutsch, G. Meunier, P. Tixador, Y. Yang, and E. Martinez, "Comparison of numerical methods for modeling of superconductors," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 38, no. 1, pp. 849-852, 2002.
- [6] A. M. Campbell, "A direct method for obtaining the critical state in two and three dimensions," *Superconductor Science and Technology*, vol. 22, pp. 1-8, 2009.
- [7] S. Stavrev, F. Grilli, B. Dutoit, and S. P. Ashworth, "Comparison of the AC losses of BSCCO and YBCO conductors by means of numerical analysis," *Superconductor Science and Technology*, vol. 18, no. 10, pp. 1300-1312, 2005.
- [8] Y. Ichiki and H. Ohsaki, "Numerical analysis of ac loss characteristics of YBCO coated conductors arranged in parallel," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 15, no. 2, pp. 2851-2854, 2005.
- [9] V. M. Rodriguez-Zermeno, N. Mijatovic, C. Traholt, T. Zirnigibl, E. Seiler, A. B. Abrahamsen, N. F. Pedersen, and M. P. Sorensen, "Towards Faster FEM Simulation of Thin Film Superconductors: A Multiscale Approach," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 21, no. 3, pp. 3273-3276, 2011.
- [10] A. Stenvall, V. Lahtinen, and M. Lyly, "An H-formulation-based three-dimensional hysteresis loss modelling tool in a simulation including time varying applied field and transport current: the fundamental problem and its solution," *Superconductor Science and Technology*, vol. 27, no. 10, pp. 1-7, 2014.
- [11] Z. Hong and T. A. Coombs, "Numerical Modelling of AC Loss in Coated Conductors by Finite Element Software Using H Formulation," *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism*, vol. 23, no. 8, pp. 1551-1562, 2010.
- [12] M. D. Ainslie, T. J. Flack, Z. Hong, and T. A. Coombs, "Comparison of first- and second-order 2D finite element models for calculating AC loss in high temperature superconductor coated conductors," *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, vol. 30, no. 2, pp. 762-774, 2011.
- [13] G. Escamez, A. Badel, P. Tixador, B. Ramdane, G. Meunier, A. Allais, and C. E. Bruzek, "Numerical Modelling of AC Hysteresis Losses in HTS Tubes," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 25, no. 3, pp. 1-5, 2015.
- [14] S. Li, D. X. Chen, Y. Fan, and J. Fang, "Transport ac loss in a rectangular thin strip with power-law E(J) relation," *Physica C: Superconductivity and its applications*, vol. 508, pp. 12-16, 2015.
- [15] D. X. Chen, S. Li, and J. Fang, "Scaling law and general expression for transport ac loss of a rectangular thin strip with power-law E(J) relation," *Physica C: Superconductivity and its applications*, vol. 519, pp. 89-94, 2015.

**Numerical Modelling for AC Loss of the Second Generation
HTS Tapes Under Alternating External Magnetic Fields
Using the Finite Element Method**

M. Yazdani-Asrami, S. A. Gholamian*, M. Mirimani, J. Adabi Firuzjaie

Babol Noshirvani University of Technology

(Received: 06/11/2017, Accepted: 09/05/2017)

Abstract

Superconductivity is one of the most advanced technologies to use in technical applications especially in electrical engineering applications. This technology is of great interest in R&D stage to fabricate electrical power apparatus because of promising features such as higher efficiency, lower loss, better reliability, smaller size and compact assembly compared with conventional electrical components. The most important properties of high temperature superconducting (HTS) tapes are large current density, high power density and very low AC loss. Yttrium-based second generation HTS tapes have got 100 times higher current density and 20 times higher price compared with conventional copper wires. The most important limitation on application of superconducting technology in power applications is AC loss of the HTS tapes. Many methods have been developed during last decay in order to measure, estimate and calculate the AC loss of the HTS wires. One of the low-cost, fast, and precise approaches is numerical modelling methods. In this paper, a numerical model for yttrium-based second generation HTS tapes has been developed in order to calculate AC loss in transport current mode and under external magnetic fields using the H-formulation finite element method. The dependency of the current density of tape to magnetic field has been considered in the model.

Keywords: AC Loss, External Magnetic Field, Finite Element Method, High Temperature Superconductors, Transport Current Loss

* Corresponding author E-mail: gholamian@nit.ac.ir