

高温超导脉冲变压器线圈结构参数影响分析^{*}

焦灿¹, 李海涛^{1†}, 安韵竹¹, 陈毅¹, 姜志鹏², 高晓晶³

1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 淄博 255000;

2. 国网湖北省电力有限公司鄂州供电公司, 鄂州 436000;

3. 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院, 武汉 430000

收稿日期: 2019-03-19; 接收日期: 2019-08-15

【摘要】 用于脉冲功率电源的高温超导脉冲变压器, 集超导储能与脉冲放电为一体, 在脉冲功率技术中有着良好的发展前景. 设置合理的线圈结构参数可以提升高温超导脉冲功率变压器的耦合系数和储能容量, 满足脉冲功率电源小型化、轻量化的优化目标. 本文利用有限元仿真软件 Ansys EM, 建立了同轴饼式线圈叠加结构的单模块变压器模型和环形结构的多模块变压器模型, 根据磁场分布和后期计算, 分析了结构参数对脉冲变压器耦合系数和原边超导线圈的储能的影响. 仿真分析结果表明, 在 77 K 时, 采用相同用线量的情况下, 单模块高温超导脉冲变压器耦合系数和原边电感线圈的储能随线圈高度减小逐渐增大; 多模块高温超导脉冲变压器减小线圈高度、增大内半径能够获得较高的性能, 为超导脉冲变压器的脉冲电源实验验证提供了一定的参考依据.

关键词: 电感储能, 超导脉冲变压器, 结构参数

PACS: 07. 55. Db, 74. 25. Sv, 84. 71. Mn, 84. 71. Ba

DOI: 10. 13380/j. ltpl. 2019. 03. 004

Analysis of Coil Structural Parameters of High Temperature Superconducting Pulsed Power Transformer

JIAO Can¹, LI Haitao^{1†}, AN Yunzhu¹, CHEN Yi¹, JIANG Zhipeng², GAO Xiaojing³

1. School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049;

2. State Grid Hubei Power Supply Limited Company Ezhou Power Supply Company, Wuhan 436000;

3. State Grid Hubei Power Supply Limited Company, Economic & Technology Research Institute, Wuhan 430000

Received date: 2019-03-19; accepted date: 2019-08-15

【Abstract】 High temperature superconducting pulsed power transformer (HTSPPT) for pulsed power supply can store superconducting energy and amplify pulsed. It has a good development prospect in pulsed power technology. Proper coil structure parameters can increase the coupling coefficient and energy storage capacity of HTSPPT. This can meet the optimization goal of miniaturization and lightweight of pulsed power supply. In this paper, the finite element simulation software Ansys EM is used to establish the simulation model of single module transformer with coaxial pancake coil structure and multi-module transformer with ring structure. According to the magnetic field distribution and calculation, the influence of structural parameters on the performance of pulsed transformer is analyzed. At 77 K, in the case of the same amount of wire, the high-temperature superconducting pulsed transformer of the single-module coaxial cake structure, the coupling coefficient and the energy storage of the

^{*} 国家自然科学基金(批准号:51807113)资助的课题.

[†] lihaitao840812@163.com

primary-side inductor coil gradually increase with the decrease of the coil height; The high-temperature superconducting pulsed transformer with multi-module ring structure can reduce the coil height and increase the inner radius to obtain higher performance, which provides a reference for the experimental verification of pulsed power supply of multi-module pulsed transformer.

Keywords: Inductive energy storage, Superconducting pulsed power transformer, Structural parameter

PACS: 07. 55. Db, 74. 25. Sv, 84. 71. Mn, 84. 71. Ba

DOI: 10.13380/j.ltpl.2019.03.004

Reference method: JIAO Can, LI Haitao, AN Yunzhu, CHEN Yi, JIANG Zhipeng, GAO Xiaojing, Low. Temp. Phys. Lett. **41**,0171 (2019)

1 引言

脉冲功率技术在国防科技、民用工业等领域都有着越来越广泛的应用^[1-2]. 当前脉冲功率技术研究的核心问题是能量的高密度存储技术和高功率的快速释放技术^[3]. 脉冲功率系统采用的储能方式主要有电容储能、电感储能和机械储能等. 电感储能相对于其他方式具有较高的功率密度、易于冷却等优点, 电感储能型脉冲电源成为近期研究的热点, 在脉冲功率技术的发展中有广阔的应用前景^[4-5]. 随着超导技术的不断发展, 利用超导线圈将电磁能直接储存起来的高温超导磁储能技术得到了广泛关注^[6]. 超导电感储能具有储能时间长, 损耗小, 体积小, 重量轻, 对输入级功率要求低等优势, 这对脉冲功率电源在轻量化、小型化和实用化等未来发展要求的实现方面都具有重要的研究意义^[3,7]. 目前已有多种类型的电感储能脉冲电源, 其中高温超导脉冲变压器能够实现高密度储能和脉冲压缩, 具有良好的发展潜力. 高温超导脉冲变压器原边绕组为超导电感线圈, 用于能量存储, 放电时原边电流衰减, 副边绕组感应脉冲电流放电. 考虑制作工艺复杂和超导带材成本, 副边线圈采用常导电感, 感应高幅值的瞬间脉冲电流^[8].

已有的相关文献大多针对超导脉冲功率变压器的电路拓扑设计优化, 而超导脉冲变压器模型的线圈几何参数和排列方式也会影响其电磁性能, 因此本文利用有限元仿真研究了高温超导脉冲变压器模型的几何参数和电磁性能之间的关系. 超导带材的价格高昂, 为了降低脉冲功率电源的成本, 进一步提升超导线圈的储能密度成为了关键问题. 文献^[9]分析了原边电感线圈的几何参数对高温超导脉冲变压器储能性能的影响, 其副边电感线圈并未考虑. 然而, 作为变压器, 副边电感线圈的几何参数也会影响脉冲变压器性能.

本文利用有限元电磁场仿真软件 Ansys EM 仿真, 保持线圈体积不变, 即超导带材和铜导线所用的材料总量不变, 同时考虑原副边电感线圈的结构参数变化, 结合超导带材临界电流密度的计算方法, 分析了线圈内外半径、高度对高温超导脉冲变压器储能、耦合系数等性能的影响.

2 线圈模型建立

2.1 线圈结构介绍

参考文献^[9]中的同轴饼式线圈结构, 本文高温超导脉冲变压器采用五个空心饼式线圈叠加而成, 原边为两个同轴双饼超导线圈相互串联, 副边为 3 个单饼铜线圈相互串联. 单模块的高温超导脉冲变压器线圈的结构模型如图 1 所示, 结构参数包括: 内径 r 、外径 R 、原边线圈高度 h_1 、副边线圈高度 h_2 . 变压器内部各个饼式线圈之间的间隙设计为 1 mm.

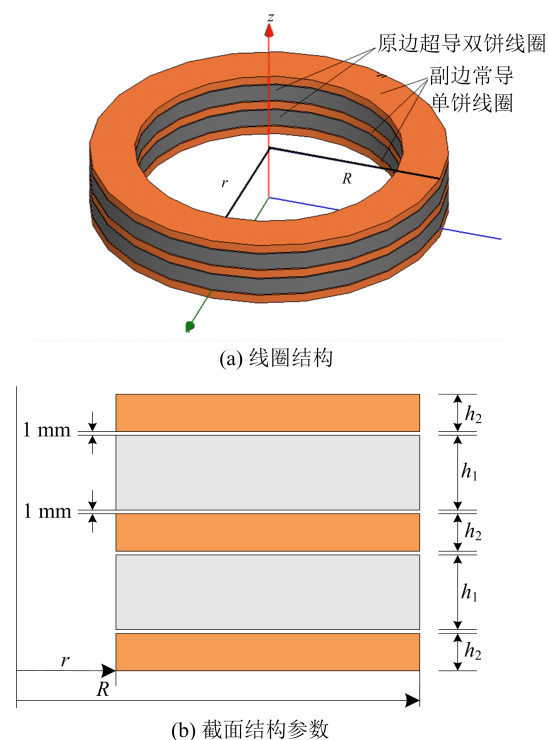


图 1 超导脉冲变压器模型结构参数

实际脉冲功率应用中, 单模块高温超导脉冲变压器往往很难实现高储能和高脉冲电流, 多模块的高温超导脉冲变压器可以解决这个问题. 在电力储能领域, 多模块超导储能系统的磁体主要有平行螺线管形和环形两种基本的排列结构. 为了减小漏磁, 本文的多模块高温超导脉冲变压器线圈选择采用环形结构. 图 2 所示为建立的八模块环形结构的线圈模型, 其中设置两个邻近模块的间距 12 毫米, 用于放置绝缘材料和支撑结构, 所有模块的原边电感线圈采用串联连接, 副边线圈则采用并联连接的方式.

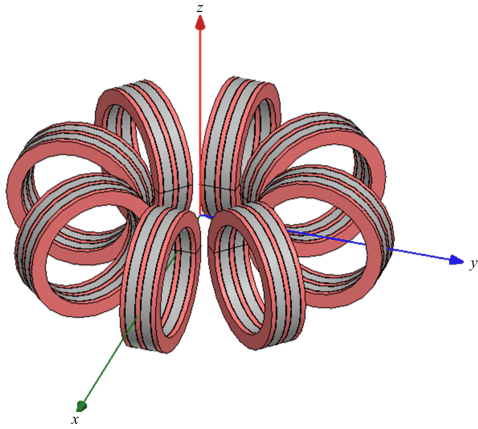


图2 环形结构的8模块超导脉冲变压器模型

2.2 Bi2223/Ag 带材特性

当前,市场化的高温超导带材主要有一代高温超导带材(铋系带材)和二代高温超导带材(钇系带材).综合考虑带材的性能和成本,本文超导线圈采用日本住友公司生产的 Type H 类型的 Bi2223/Ag 带材绕制,带材特性如表 1 所示.

表1 Bi-2223/Ag 带材规格说明

规格说明	
带材宽度	4.3±0.2 mm
带材厚度	0.23±0.01 mm
最大应力	130 MPa
临界弯曲半径	40 mm

Bi2223/Ag 带材有明显的各向异性,具体表现为磁场分布与带材表面夹角有关,不同夹角磁场分布不同.不同角度下磁场对住友公司超导带材的影响如图 3 所示^[10].在计算高温超导脉冲变压器线圈的临界电流及其储能时,只需考虑线圈带材与磁场夹角为 0°和 90°的情况,即线圈的轴向磁场和径向磁场分布.

3 理论计算

高温超导脉冲变压器的原副边电感线圈可以看成是几个空心螺线管线圈叠加,基于场分布的轴对称场特征,选取圆柱坐标系,电流密度沿磁体轴向均匀分布,由毕奥-萨伐尔定律可得螺线管线圈在空间任一点的磁场分布^[11]:

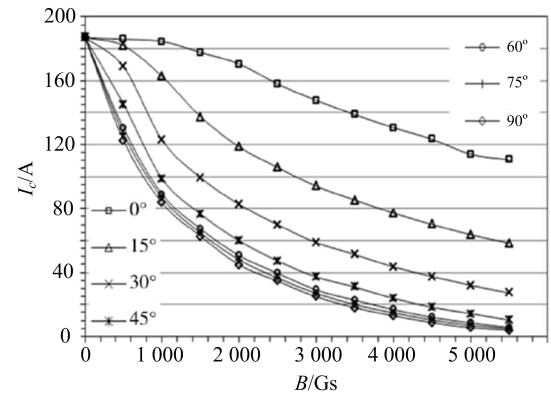


图3 不同角度下磁场对 Sumitomo 公司高温超导带材的影响

$$\begin{cases} B_{\perp c} = \frac{\mu_0 J}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_{R_i}^{R_o} d\rho' \int_{z_1}^{z_2} \frac{(z' - z)\rho' \cos\theta}{r^3} dz' \\ B_{\parallel c} = \frac{\mu_0 J}{4\pi} \int_{-\pi}^{\pi} d\theta \int_{R_i}^{R_o} d\rho' \int_{z_1}^{z_2} \frac{\rho'(\rho' - \rho \cos\theta)}{r^3} dz' \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ 、 z 为空间磁场中任一点的径向、轴向坐标, θ 为空间任一点与电流区域一点轴向坐标之差, ρ' 、 z' 为线圈内任一点的径向、轴向坐标, r 为空间内任一点到原点的距离,

$$r = \sqrt{\rho'^2 + \rho^2 - 2\rho'\rho\cos\theta + z'^2}.$$

3.1 临界电流密度计算方法

超导磁体的临界电流受超导带材所处磁场的大小和方向影响.在载流情况下,超导线圈的每个点磁场与电流成线性关系,为过原点的直线.对于单一带材的超导线圈,可通过电磁仿真计算出最大磁场点,进一步确定该点的励磁线斜率.带材的临界电流特性曲线和励磁线的交点处的电流为磁体上各点的最大允许电流,这些点中,电流最小值点处的电流为整个磁体的临界电流^[12].对于结构参数确定的高温超导脉冲变压器原边电感线圈,通过对线圈的有限元仿真,找到径向和轴向磁场分量的最大点,确定其励磁线斜率,将带材的临界电流特性曲线分别与励磁线联立求解,取其最小值即可得到原边超导线圈的临界电流密度.

仿真中设置原边超导线圈的初始截面电流为 16000 A,副边线圈用来感应瞬间脉冲电流,不施加初始电流.各磁场分量最大点的励磁线斜率,为原边线圈施加的临界电流密度与仿真中该磁场分量最大值的比值:

$$K_1 = \frac{16000}{S * B_{\perp m}} \quad (2)$$

$$K_2 = \frac{16000}{S * B_{||m}} \quad (3)$$

日本住友公司生产的 Type H 类型的 Bi2223/Ag 带材在 77 K 时的临界电流密度特性曲线的采样数据如表 2 和表 3 所示^[13]. 基于表 2 和表 3 中的采样数据,超导带材的临界电流与磁场的关系特性曲线可拟合成双曲线函数^[14].

表 2 Bi-2223/Ag 带材在垂直磁场下的样本点数据

垂直磁场强度	临界电流密度
B/T	J/(A/cm ²)
0.1	8291.2
0.2	4246.7
0.3	2123.4

表 3 Bi-2223/Ag 带材在平行磁场下的样本点数据

垂直磁场强度	临界电流密度
B/T	J/(A/cm ²)
0.1	19211.3
0.2	18604.7
0.3	17593.5

将拟合的双曲线函数与励磁线方程联立,得出临界电流与磁场的关系函数如下:

$$\begin{cases} J_{\perp c} = K_1 * B_{\perp c} \\ J_{\perp c} = \frac{2870.08}{B_{\perp c} + 0.12104} - 4693.3 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} J_{||c} = K_2 * B_{||c} \\ J_{||c} = \frac{1212.4}{B_{||c} - 0.5999} + 21637 \end{cases} \quad (5)$$

分别得出径向、轴向磁场分量作用下的电流密度,二者比较取较小值为原边超导线圈的临界电流密度.

$$J_c = \min(J_{\perp c}, J_{||c}) \quad (6)$$

3.2 储能计算方法

在得到超导线圈的临界电流密度 J 的基础上,计算出临界电流为:

$$I = J * S \quad (7)$$

其中 S 为原边超导双饼线圈的截面积,每个原边双饼线圈的储能容量为:

$$E = \frac{I^2 * L}{2} \quad (8)$$

在高温超导脉冲变压器储能容量的计算过程中,通过磁场最大值点计算得出超导线圈的临界电流,再从有限元仿真软件中直接得出线圈的电感值,求出储能容量.

4 仿真结果分析

4.1 单模块线圈结构参数分析

建模过程中需要改变线圈的内外半径,若带材弯曲半径设置太小,带材金属氧化物陶瓷芯会产生裂纹,载流能力下降,影响线圈的临界电流密度.文献[14]对日本住友公司生产的 Bi2223/Ag 带材进行测量,最小弯曲半径为 40 mm,当线圈内半径小于 40 mm 时,临界电流衰减明显.住友最新展示的 Type HT-NX 系列带材在银包套中加入了加强材料,最小弯曲直径为 40 mm,即半径仅为 20 mm.本文采用 Type H 类型带材的临界半径为 40 mm,因此我们设置内半径最小值为 40 mm.

为了控制超导带材和铜导线的材料总量相同,使原副边线圈的体积保持不变,原边每个超导线圈的体积为 358 cm³,副边每个常导线圈的体积为 179 cm³,改变结构参数依次利用 Ansys EM 的二维建模仿真得出磁场分布,计算临界电流. Bi-2223/Ag 带材的各向异性决定了其临界电流对垂直于带材表面的磁场非常敏感^[15-18]. 高温超导脉冲变压器线圈径向磁场分布云图如图 4 所示,径向磁场分量的最大值出现在超导线圈的上下两个端面,由上下两个端面向中间逐渐减弱,中心处磁场最弱.左侧图例中磁场的正负值仅表示磁场不同的方向.

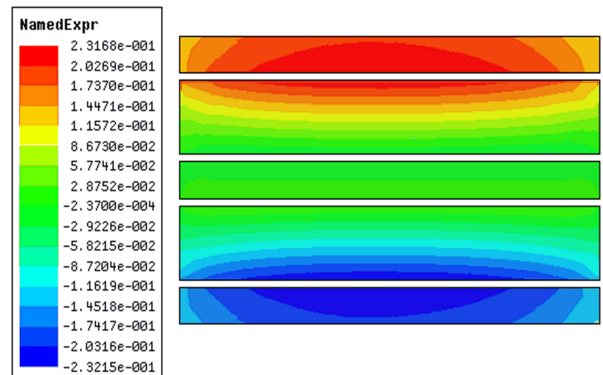


图 4 单模块变压器最大径向磁场分量分布云图

通过仿真与计算,单模块变压器中每个原边超导线圈的储能容量随线圈结构变化曲线如图 5 所示.在线圈用线量相同的情况下,增大线圈的高度,储能明显降低.当线圈高度较大时,增大内半径线圈储能随之增大,内半径增大至 100 mm 后,储能趋近稳定水平.图 6 为单模块变压器耦合系数随线圈结构参数变化曲线,线圈高度对耦合系数影响较大,增加线圈高度会使耦合系数降低,半径对耦合系数影响较小,变化线圈的内半径,耦合系数保持相对平稳的趋势.

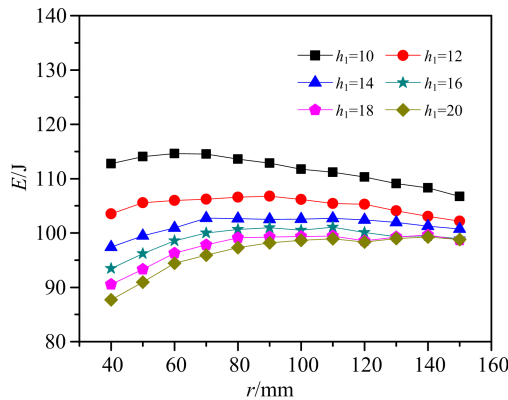


图 5 单模块每个超导线圈储能容量随内半径和高度变化曲线

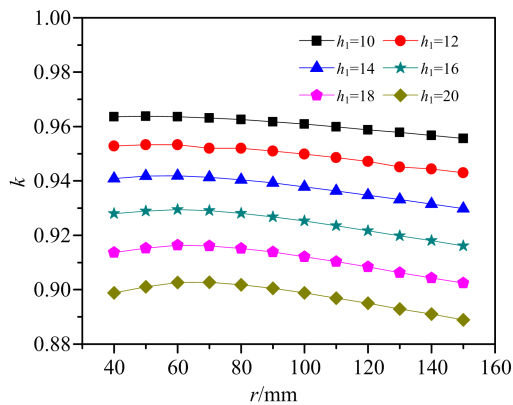


图 6 单模块线圈耦合系数随内半径和高度变化曲线

由于 Bi-2223/Ag 带材的各向异性,径向磁场分量对临界电流的影响比轴向磁场分量大多得多.由超导线圈的临界电流计算过程中发现,临界电流取决于线圈径向磁场最大点,即超导线圈的上下两个端面.储能取决于临界电流,因此除磁场最大值点以外其他位置的超导带材的载流能力未能得到充分的发挥.当线圈总体积不变,高度增大时,超导线圈的上下端面的所占线圈比例减小,其他位置所占线圈比

例增大,更大比例带材的载流能力未能充分发挥,导致储能容量降低.同时,原副边线圈间的耦合系数也会随着线圈高度的提升而降低.为了使超导变压器获得更好的性能,应尽量减小线圈高度,将线圈中更大比例超导带材的载流能力得到充分发挥.

4.2 多模块线圈结构参数分析

针对多模块高温超导脉冲变压器,利用 Ansys EM 的三维建模仿真,基本设置与单模块相同.在八模块仿真中,保持每个模块的原副边电感线圈的用线量与单模块相同,分析线圈内半径对变压器性能影响时,设置原边线圈高度为 10 mm;分析线圈高度对变压器性能影响时,设置线圈内半径为 80 mm.改变结构参数仿真,利用 Maxwell 的后处理器对八模块线圈中位于 y 轴处的模块进行 3D 场图处理,得到了多模块高温超导脉冲变压器线圈径向磁场分布云图,如图 7 所示.多模块变压器径向磁场分布与单模块变压器径向磁场分布图相似,径向磁场分量最大值出现在超导线圈的两侧两个端面,由两个端面向中间逐渐减弱,中心处磁场最弱.

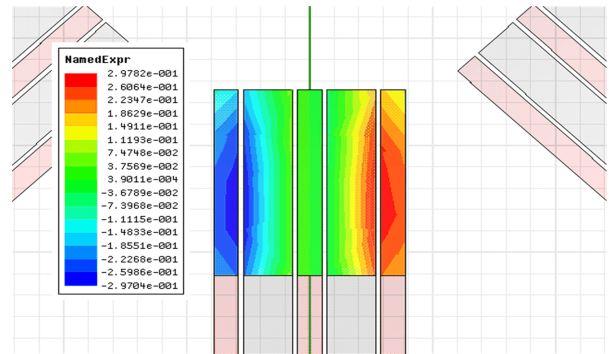


图 7 八模块变压器最大径向磁场分量分布云图

原边线圈高度为 10 mm 时,八模块变压器每个模块的平均储能容量与单模块储能容量随半径变化的对比曲线如图 8(a)所示,由于各模块线圈之间的互感,八模块高温超导脉冲变压器各个超导线圈的平均储能远远大于单模块时超导线圈的储能,而且随内半径增大而明显增大,同时半径越大,多模块超导线圈的储能优势越明显.由此可知,为了获得更高的储能应选择多模块变压器.线圈的内半径为 80 mm 时,八模块变压器每个模块的平均储能容量与单模块储能容量随线圈高度变化曲线如图 8(b)所示,线圈高度对八模块变压器每个模块的平均储能容量影响更大,较低的线圈高度能实现高储能.线圈

高度增加一倍时,各模块的超导线圈平均储能容量降低了 30%。

单模块和多模块超导变压器耦合系数对比曲线如图 9 所示。多模块的超导变压器相对于单模块能获得更高的耦合系数。耦合系数越高,脉冲功率电源的能量转换效率越大。用线量相同的八模块高温超

导脉冲变压器,半径对耦合系数影响较小,而高度对耦合系数影响较大,高度越小耦合系数越大,耦合系数对脉冲功率电源系统的能量传输效率有较大影响,因此应尽量选择线圈高度较小的多模块超导脉冲变压器。

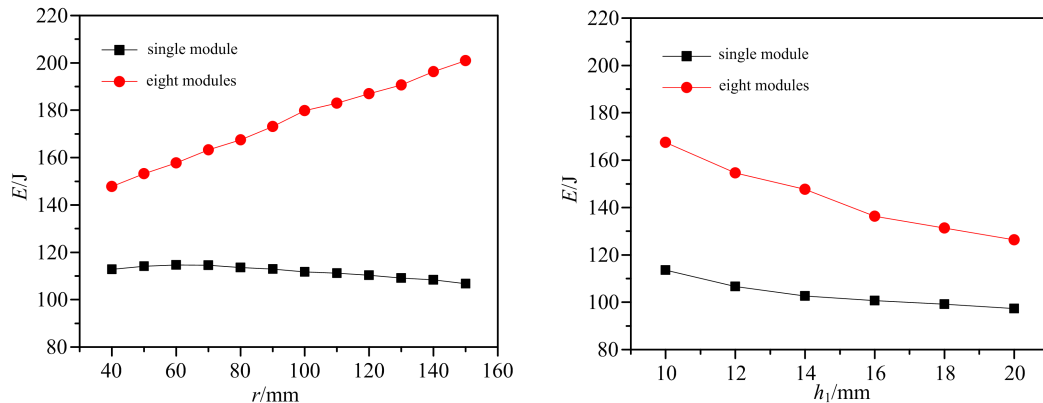


图 8 (a) 每个模块储能容量随线圈内半径变化曲线; (b) 每个模块储能容量随线圈高度变化曲线

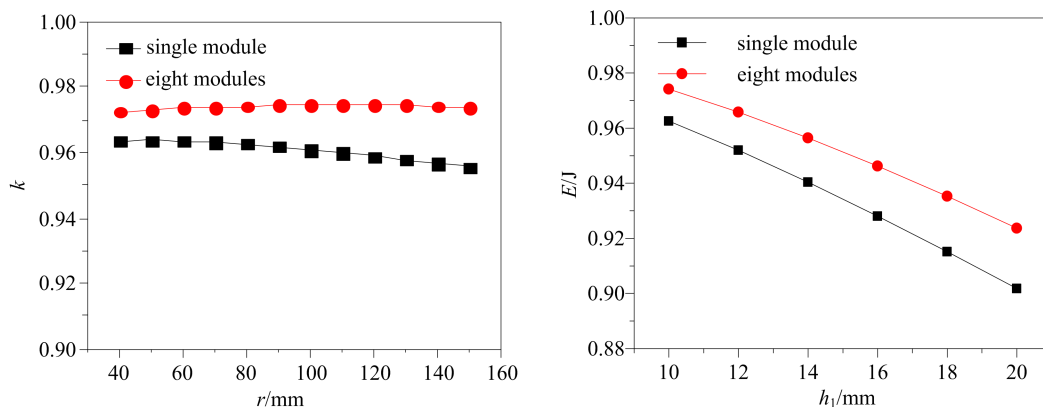


图 9 (a) 耦合系数随线圈内半径变化曲线; (b) 耦合系数随线圈高度变化曲线

5 结 论

本文建立了同轴饼式线圈结构的单模块高温超导脉冲变压器模型和环形结构的多模块高温超导脉冲变压器模型,仿真分析了线圈的结构参数对变压

器的耦合系数、超导线圈的储能容量等性能的影响。仿真结果表明:采用线圈高度小、内半径大的多模块高温超导脉冲变压器用于电感储能脉冲功率电源,能获得高储能容量和高耦合系数。

参 考 文 献

- [1] 郑建毅,何闻, 机电工程 **25** (2008),1.
- [2] 周翔宇, 科技创新与应用 **27** (2015),69.
- [3] 李海涛 2012 博士学位论文(成都:西南交通大学).
- [4] J. O. Rossi, E. Schamiloglu, M. Ueda, *IEEE Transactions on Plasma Science*, **39** (2011), 3033.
- [5] X. Zhang, Z. Li, H. Li, C. Zhang, S. Liu, *IEEE Transactions on Plasma Science*, **45** (2017), 2536.
- [6] S. Nagaya, N. Hirano, M. Naruse, T. Watanabe and T.

- Tamada, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **23** (2013), 5602804.
- [7] 郑欣欣,张存山,李海涛,李震梅,王钦冰,张涛,低温与超导 **10** (2017),36.
- [8] M. Song, K. Cao, Y. Tang, D. Wang, S. Zhang, N. Zhou, J. Li, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **22** (2012), 5500904.
- [9] C. Zhang, X. Zheng, H. Li, Z. Li, *Cryogenics*, **91** (2018), 21.
- [10] 赵翔,胡南南,王达达,曹昆南,宋萌,邓嘉翕,任丽,苏路顺,低温与超导, **41** (2013),46.
- [11] 雷银照,励庆孚. 西安交通大学学报, **S1**(1989),109.
- [12] 李海涛,魏佩瑜,刘万强,王荣印,王钦冰,张昆,低温物理学报, **1** (2016),52.
- [13] Sumitomo Electric Superconductor. Available: http://global-sei.com/super/index_en.html, (2019) Online.
- [14] 南和礼 2007 超导磁体设计基础(北京:国防工业出版社)第 46 页.
- [15] 李利,谢述锋,王德义,材料开发与应用, **27** (2012),47.
- [16] J. Lee, J. Kang, D. Kim, *Cryogenics*, **42** (2002),387.
- [17] 王超,黄晖,宋守森,张博,杨明,王秋良,低温物理学报, **26** (2004),237.
- [18] J. Zhang, S. Dai, Z. Wang, Zhang, D. , Xiao, L, *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, **21** (2011),1344.