

# 高频大电流电抗器近场损耗分析

卢增艺, 吴伟华, 杨海军, 章进法

(台达电子企业管理(上海)有限公司, 上海 201209)

**摘要:** 高频大电流电抗器要求磁路能够承受较大安匝电流而不饱和, 在结构设计上往往需采用开放的空间磁路, 但这会对周围元件造成电磁耦合, 带来额外的近场损耗和引发局部高温问题。因此, 详细分析了高频大电流电抗器的磁场分布特征, 讨论了近场磁场对周围金属支撑件带来的高频附加损耗影响, 并结合实际工程应用案例, 进行理论分析与建模仿真, 最终得出改善方案。

**关键词:** 高频大电流; 电抗器; 近场磁场; 近场损耗

## Near-field Loss Analysis of High Frequency and High Current Choke

LU Zengyi, WU Weihua, YANG Haijun, ZHANG Jinfa

(Delta Electronics (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201209, China)

**Abstract:** In order to withstand high ampere-turns currents without saturation, the open loop magnetic structure is used in high frequency and high current choke design. However, it will bring electromagnetic coupling into near-by components and produce additional near-field losses and local high temperature problem. Therefore, the distribution characteristic of high frequency and high current choke is analyzed in detail and the eddy current loss of near-filed coupling impact on metal base plate is discussed. Finally, according to a real engineering application, the improvement schemes are proposed by theoretical analysis and simulation.

**Keywords:** high frequency and high current; inductor; near-field magnetic field; near-field loss

由于磁场的分散性, 磁性元件将对周围元件造成电磁耦合, 类似现象在不同的应用场合会呈现出不同应用特征。文献[1-3]研究在工频电力变压器场合杂散磁场对绕组附近机构件, 如拉杆、底座、油箱等带来的附加近磁场损耗(简称近场损耗), 由于变压器的磁芯和绕组损耗仍然是主要损耗, 因此, 工频场合杂散磁场引起的结构件损耗不明显, 但随着应用频率的提高, 近场磁场的作用就会凸显出来; 文献[4-7]研究和讨论了开关电源应用中 EMI 滤波器近场电磁耦合的作用机理和控制方法, 此类近场效应的功率等级虽小, 但对电磁干扰噪声抑制的作用却不容忽视; 对于开关电源中磁元件近场耦合带来的功率损耗影响, 文献[8]研究了分槽式磁集成

LLC 变压器的近场磁场对电源外壳的损耗, 给出考虑近场耦合的集成变压器模型和近场改善分析。对于大电流电抗器由于应用的特殊性, 比如要求磁路能够承受较大安匝电流而不饱和, 因此, 在结构设计上往往需采用开放的空间磁路, 而强磁场的扩散势必对周围元件带来电磁耦合效应。

本文详细分析了开放磁路电抗器的磁场分布特征, 讨论了近场磁场对周围金属支撑件带来的高频附加损耗的影响, 并分析了影响损耗的主要参数, 其中主要包括材料特性和距离。最后结合一台 400 A/12  $\mu$ H 电抗器的工程应用案例, 对附加损耗的影响参数电导率和电抗器与底座间的距离进行理论分析和建模仿真验证, 并给出改善方案。

## 1 近场效应带来附加损耗的影响分析

近场效应产生附加损耗的原理可借鉴导体临近损耗的作用机理<sup>[9-10]</sup>,近场效应原理等效分析模型如图 1 所示。图中, $T$  为金属厚度, $h$  为等效宽度, $L$  为等效长度。

当外部激励产生扩散磁通  $\Phi$  时,此磁通将在金属上产生近场效应,金属截面将感应出涡流电流  $J$ ,而垂直于电流方向的截面电场强度为  $H$ ,此电强度趋于表面时有最大值  $H_m$ ,其大小由扩散磁场决定。若外部激励为定值,则最大电场强度  $H_m$  为定值。

由 Maxwell 电磁方程可推导得到损耗计算公式为

$$P_{\text{loss}}(\sigma) = \frac{H_m^2 Lh}{\sigma \delta} \frac{\sinh(T/\delta) - \sin(T/\delta)}{\cosh(T/\delta) - \cos(T/\delta)} \quad (1)$$

式中: $\sigma$  为电导率; $\mu$  为磁导率; $f$  为工作频率; $\delta$  为透入深度,表示为

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \sigma \mu f}} \quad (2)$$

当  $T \ll \delta$  时,式(1)可简化为

$$P_{\text{loss}}(\sigma) = \frac{H_m^2 Lh T^3}{6 \sigma \delta^4} = \frac{\pi^2 \mu^2 H_m^2 Lh T^3 f^2 \sigma}{6} \quad (3)$$

由式(3)可知,此情况下,电导率  $\sigma$  越大,涡流损耗越大;磁导率  $\mu$  越大,涡流损耗越大。

当  $T \gg \delta$  时,式(1)可简化为

$$P_{\text{loss}}(\sigma) = \frac{H_m^2 Lh}{\sigma \delta} = H_m^2 Lh \sqrt{\frac{\pi \mu f}{\sigma}} \quad (4)$$

此情况下,电导率  $\sigma$  越大,涡流损耗越小;磁导率  $\mu$  越大,涡流损耗越大。

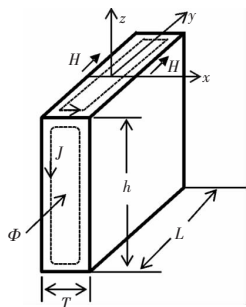


图 1 近场效应原理等效分析模型

Fig.1 Equivalent model for near-field effect analysis

## 2 大电流电抗器近场损耗分析

### 2.1 大电流电抗器的介绍

由于整机功率达几十千瓦,需要的电抗器最大工作电流将达几百安培,且在高频工作条件下,若采用传统的铁氧体开气隙做法,通常所需气隙较大,工作时将会由于扩散磁通在绕组上产生较大涡流损耗,而烧毁线包的内部绕组。但若采用绕组避气隙做法,将很大程度地增加电抗器的体积,所以在应用中通常采用开放磁路电抗器的结构,如图 2 所示。图(a)中,绕组分别绕在 UU 型铁芯的两边柱,左右绕组串联,反向耦合,励磁磁通经过磁芯和空间磁路返回,其等效磁路如图(b)所示。由于电抗器磁路通过外部空间,高频工作磁通的分布具有强烈的分散性,会对周边的器件、机壳和金属固定件产生磁场近场效应,从而引起周边元件产生附加损耗,严重时有可能导致元件起火烧毁。

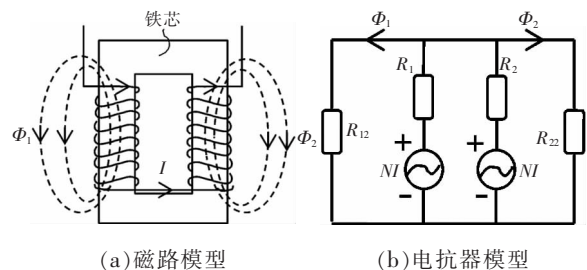


图 2 开放磁路电抗器模型与等效磁路

Fig.2 Model and equivalent magnetic circuit of choke with open loop magnetic structure

### 2.2 电导率对附加损耗的影响仿真分析

针对第 2.1 节所述的大电流电抗器近场效应建立二维仿真模型,如图 3 所示,大电流电抗器放置在底座上。采用涡流磁场仿真方法,分析材料电阻率对附加损耗的影响。仿真电流工作频率设定 200 kHz,电流峰值为 68 A;底座电导率从  $10^3$  S/m 到  $5 \times 10^8$  S/m 依次取样 14 个点进行仿真。

通过仿真得到的损耗随着材料电导率变化曲线结果如图 4 所示。由仿真结果可知,损耗随电导率的增大呈现先增大后减小的趋势。计算可得,当透入深度  $\delta = T$  时,电导率为  $1.048 \times 10^6$  S/m。以最大

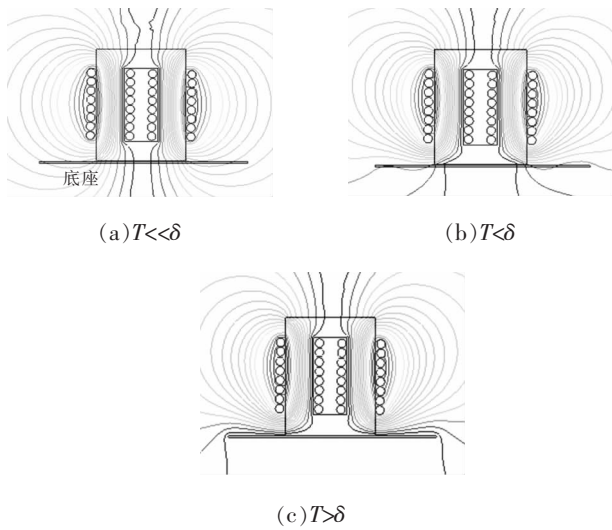


图 3 扩散磁场分布

Fig.3 Distribution of stray magnetic flux

损耗点和厚度  $T=\delta$  点为分界分成 3 个区间作分析结果。

(1)当厚度  $T \ll \delta$  时,仿真磁场分布如图 3(a),此时大部分扩散磁通将透过金属底座,损耗将随电导率的增加而增大,如图 4 的区间①,与式(3)结果相同。

(2)当厚度  $T < \delta$ ,即透入深度大于底板厚度,且只有少量磁通透过金属底座时,仿真磁场分布如图 3(b),损耗将随电导率的增加而减小,如图 4 的区间②。

(3)当厚度  $T > \delta$  时,仿真磁场分布如图 3(c),此时基本无扩散磁通透过金属底座,损耗将随电导率的增加而减小,如图 4 的区间③,与式(4)结果相同。

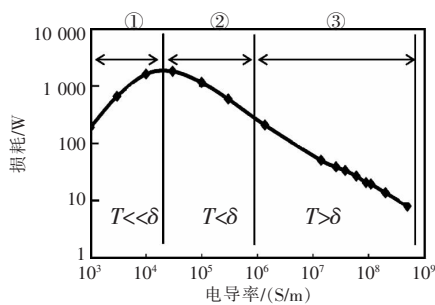


图 4 损耗随着材料电导率变化曲线

Fig.4 Loss curve under different material conductivity

### 2.3 磁导率对附加损耗的影响仿真分析

在第 2.2 节模型的基础上,进一步仿真分析材料磁导率对附加损耗的影响。底座电导率固定为

$1.37 \times 10^6$  S/m,磁导率从 1~1 200 依次取样 8 个点进行仿真,所有仿真点都满足  $T > \delta$ ,仿真结果曲线如图 5 所示。由仿真结果可知,随着磁导率的增大,损耗将变大,但损耗上升的速度变缓,此情况与式(4)结果相同。

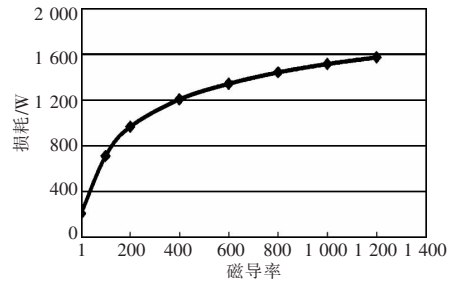


图 5 损耗随着材料磁导率变化曲线

Fig.5 Loss curve under different material permeability

## 3 实际案例分析与验证

本实验采用由 2 个电感串联构成的 400 A/12  $\mu$ H 的电抗器。工作频率为 200 kHz,底座材料为不锈钢 SUS304,磁导率  $\mu=1$ ,电导率  $\sigma=1.37 \times 10^6$  S/m,厚度  $T=1$ mm。

### 3.1 电导率对近场损耗的影响分析

底座随电导率的损耗仿真分析示意如图 6 所示。在图 6(a)的三维损耗仿真模型中,增大底座材料电导率,其仿真结果如图 6(b)所示。由图 6(b)可见,损耗随电导率的增加而减小;且在相同电导率  $\sigma$  增量下,随着电导率  $\sigma$  的增加,损耗的减小幅度将变小。

根据上述近场效应的计算与二维仿真分析结果可知,为减小近场效应附加损耗,可改用比不锈钢 SUS304 电导率更大的材料。

已知铝的电导率为  $38 \times 10^6$  S/m,铜的电导率为  $58 \times 10^6$  S/m。若将底座材料由不锈钢 SVS304 改为铝,则由仿真结果可知,损耗将从 347.2 W 下降至 21.8 W。

### 3.2 距离对近场损耗的影响分析

当电抗器的结构和电流固定,周边扩散磁场的电场强度将随电抗器与底座间距离的增加而减小。由式(1)可知,涡流损耗与磁场强度的平方成正比,

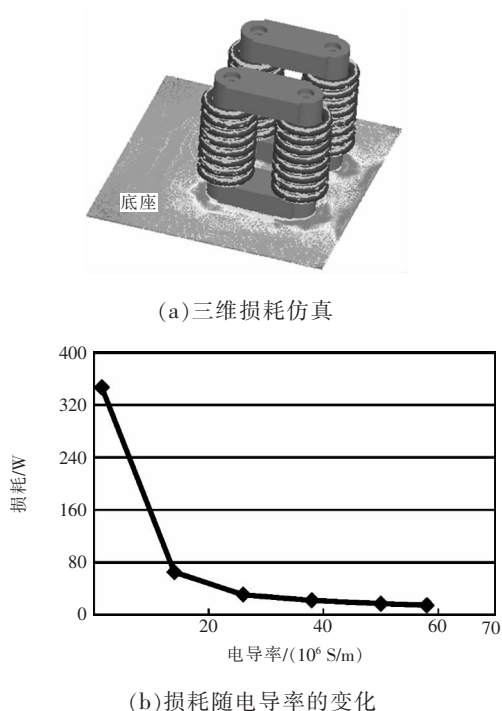


图 6 底座随电导率变化的损耗仿真分析

Fig.6 Loss simulation analysis for base plate changing with conductivity

所以增大电抗器与底座间的距离,损耗将减小。

底座随距离变化的损耗仿真分析如图 7 所示。

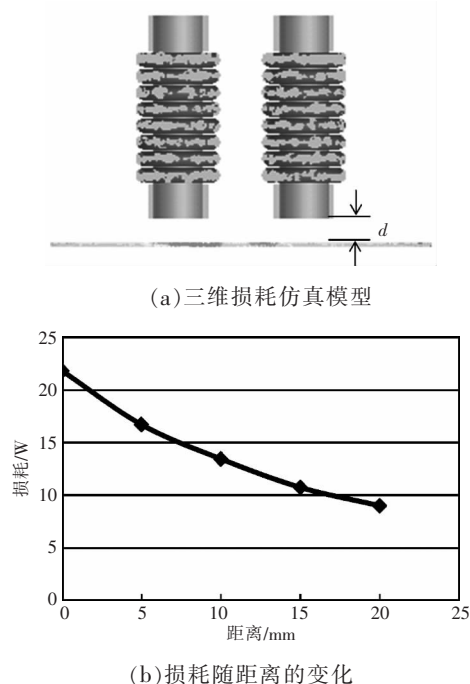


图 7 底座随距离变化的损耗仿真分析

Fig.7 Loss simulation analysis for base plate changing with distance

图 7(a)为三维仿真模型,其仿真结果如图 7(b)所示。由仿真结果可知,底座损耗将随距离  $d$  的增大而减小,这与式(1)的结论相同;且随距离的增大,损耗减小速度下降。

当底座材料为铝,电抗器与底座间的距离  $d$  为 0 时,损耗为 21.8 W。兼顾空间尺寸,可取距离  $d$  为 5 mm,损耗下降为 16.7 W。

## 4 结论

开放磁路高频大电流电抗器的扩散磁通与周边金属部件会产生强烈的近场耦合效应。本文研究了近场磁场对邻近金属底座带来的功率损耗,并分析了影响损耗的主要参数,得到的主要结论如下。

(1)近场效应产生附加损耗的大小与材料的电导率有直接关系。附加损耗会随电导率的增加而呈现出先增大后减小的趋势,因此,选择合适电导率的材料可有效减小近场效应产生的附加损耗。

(2)近场效应产生附加损耗大小与材料磁导率直接相关。当材料厚度大于透入深度时,附加损耗大小随磁导率的增大而增大。所以,为得到较小的附加损耗,应该选择导磁率低材料。

(3)涡流损耗与磁场强度的平方成正比。当电抗器结构和电流固定,在空间允许的条件下,增加底座到电抗器的距离,磁场强度将变小,近场附加损耗也随之减小。

### 参考文献:

[1] 程志光,高桥则雄,博扎德·弗甘尼,等. 电气工程电磁热场模拟与应用[M]. 北京:科学出版社,2009.

[2] 井永腾,李岩,李洪奎,等. 基于 ANSYS 软件的电力变压器磁场和结构件损耗计算[J]. 变压器,2009,46(7):5-7. Jing Yongteng, Li Yan, Li Hongkui, et al. Calculation of magnetic field and structural parts loss in power transformer based on ANSYS software[J]. Transformer, 2009, 46(7): 5-7(in Chinese).

[3] 郭健,林鹤云,徐子宏,等. 电力变压器附加损耗计算及影响因素分析[J]. 高压电器,2008,44(6):551-554. Guo Jian, Lin Heyun, Xu Zihong, et al. Calculation and anal-

- ysis of additional Loss in power transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(6): 551-554 (in Chinese).
- [4] 杨海军, 陈为, 卢增艺. 功率变换器磁性器件磁场近场效应分析[C]. 中国电源学会第 18 届学术年会, 厦门, 2009: 422-424.
- [5] Wang Shuo, Lee F C. Effects of parasitic parameters on EMI filter performance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(3): 869-877.
- [6] 和军平, 陈为, 姜建国. 功率因数校正电路杂散磁场对传导干扰发射作用的分析研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 151-158.
- He Junping, Chen Wei, Jiang Jianguo. Analysis on the EMI effect of stray magnetic field from main circuit of a PFC switched mode power supply [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(14): 151-158(in Chinese).
- [7] 和军平, 郑宝堂, 王毅. 开关电源近场辐射效应分析与模型的研究[J]. 电工电能新技术, 2009, 28(1): 16-20.
- He Junping, Zheng Baotang, Wang Yi. Near field effect analysis and common mode conducted EMI model of a switch mode power supply[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2009, 28(1): 16-20(in Chinese).
- [8] Yang Haijun, Lu Zengyi. Analysis on near-field effect caused by stray magnetic field of integrated LLC transformer [C]. Power Electronics and Application Conference and Exposition(PEAC), Shanghai, 2014: 1349-1352
- [9] Ferreira J A. Improved analytical modeling of conductive losses in magnetic components[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1994, 9(1): 127-131.
- [10] Abdelbagi H A. Skin and proximity effects in two parallel plates[D]. Dayton, Ohio: Wright State University, 2007.



卢增艺

## 作者简介:

卢增艺(1979-),男,通信作者,博士,研究方向:电力电子磁技术,E-mail: zengyi.lu@deltaww.com。

吴伟华(1987-),男,本科,研究方向:电力电子变换技术,高频功率磁元件设计,E-mail: weihua.wu@deltaww.com。

杨海军(1982-),男,硕士,研究方向:电力电子变换技术,高频功率磁元件设计,E-mail: haijun.yang@deltaww.com。

章进法(1964-),男,博士,副教授,研究方向:高效高功率密度开关电源,新型LED照明电源,太阳能逆变器,汽车绿色能源变换器等,E-mail: alphaj.zhang@deltaww.com。