

# 高频大电流电抗器近场损耗分析

吴伟华, 卢增艺, 杨海军, 章进法

台达电子企业管理(上海)有限公司, 上海浦东新区 201209

中图分类号: TM55 文献标识码: B 文章编号: 1606-7517(2016)11-4-136

**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, 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。论文详细分析了高频大电流电抗器的磁场分布特征, 讨论近场磁场对周围金属支撑件带来的高频附加损耗影响, 结合实际工程应用案例, 进行理论分析与建模仿真, 得出改善方案。

**关键词:** 高频大电流, 电抗器, 近场磁场, 附加损耗

## Near-Field Loss Analysis of High Frequency and High Current Inductor

WU Weihua, LU Zengyi, YANG Haijun, ZHANG Alpha J

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

**Abstract:** In order to withstand high Ampere-Turns currents without saturation, open loop magnetic circuit structure is used in high frequency and high current inductor design. It will bring electromagnetic coupling into near-by components and produce additional near-field losses and local high temperature problem. This paper analyzes the distribution characteristic of high frequency and high current inductor in depth, discusses the eddy current loss of near-filed coupling impact on metal support. 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, Additional loss

### 1 引言

由于磁场的分散性, 磁性元件将对周围元件造成电磁耦合, 类似技术特征在不同的应用场合会呈现不同应用特征。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结构件(比如拉杆、底座、油箱等)带来附加的近场损耗(简称近场损耗)。但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更加的突出。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 EMI 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] 以分槽式磁集成 LLC 变压器的近场磁场对导磁外壳的损耗做了研究。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。本文详细分析了电抗器的磁场分布特征, 以高频大电流电抗器为研究对象, 讨论近场磁场对周围金属支撑件带来的高频附加损耗影响, 包括材料特性和距离, 结合一 400A/12uH 电抗器的工程应用案例, 进行理论分析与建模仿真, 得出改善方案。

### 2 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>, 如图 1 所示。外部激励产生扩散磁通  $\Phi(t)$ , 此磁通将在金属上产生近场效应, 金属截面将感应涡流电流  $J(x)$ , 垂直于电流方向截面电场强度为  $H(x)$ , 此电强度趋于表面有最大值  $H_m$ ,  $H_m$  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。T 为金属厚度,  $h$  为等效宽度,  $L$  为等效长度, 频率为 200kHz。由 Maxwell 电磁方程可推导出损耗计算公式, 如式 (1)。

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

此处, 透入深度  $\delta$  如式 (2),  $\sigma$  为电导率,  $\mu$  为磁导率,  $f$  为工作频率。

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

当  $T \ll \delta$  时, 式 (1) 可简化为式 (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。

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

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

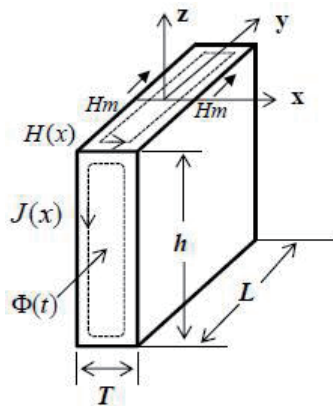


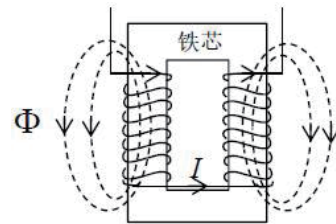
图 1 近场效应原理等效分析模型

### 3 大电流电抗器近场损耗分析

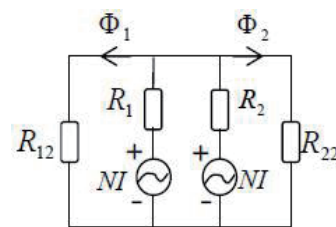
#### 3.1 大电流电抗器的介绍

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, 将很大程度的增加电抗器的体积, 所以在应用中通常采用如图 2(a) 的结构, 绕组分别绕在 UU 型铁芯的两侧并串联, 左右绕组反向耦合, 励磁磁通经过磁芯和空间磁路返回, 等效磁路可如图 2(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, 严重时可能导致元件起火烧毁。



(a) 电抗器模型



(b) 磁路模型

图 2 电抗器模型与等效磁路

#### 3.2 电导率对附加损耗的影响仿真分析

针对节 3.1 所述的大电流电抗器近场效应建立二维仿真模型, 如图 3, 进一步采用了涡流磁场仿真, 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 200kHz, 电流峰值为 68A, 底座电导率从  $10^3 \text{S/m}$  到  $5 \cdot 10^8 \text{S/m}$  依次取样 14 个点进行仿真, 通过仿真得损耗随着材料电导率变化曲线结果如图 4。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

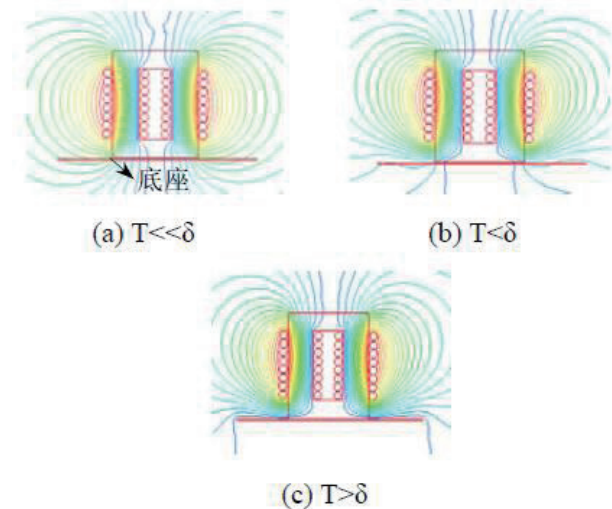


图 3 二维模型扩散磁场分布

透入深度  $\delta = T$  时, 电导率为  $1.048 \times 10^6 \text{ S/m}$ , 结果以最大损耗点和厚度  $T = \delta$  点为分界可分成三个区间作分析。

1) 当厚度  $T \ll \delta$ , 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, 损耗将如图 4 的①区间随电导率的增加而增大, 与式 (3) 结果相同。

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

3) 当厚度  $T > \delta$ , 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, 损耗将如图 4 的③区间随电导率的增加而减小, 与式 (4) 结果相同。

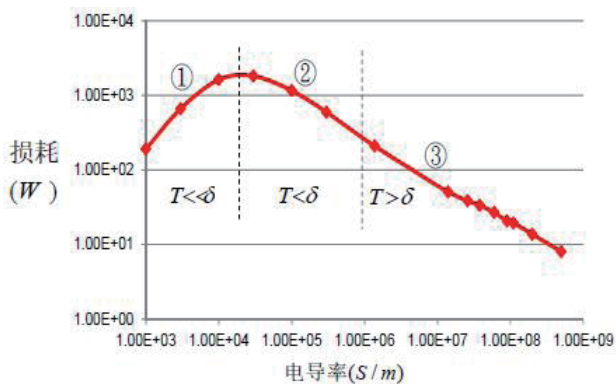


图 4 损耗随着材料电导率变化曲线

### 3.3 电导率对附加损耗的影响仿真分析

在 3.2 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  $1.37 \times 10^6 \text{ S/m}$ , 磁导率从 1 到 1200 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。由仿真结果可知随着磁导率的增大, 损耗将变大。随磁导率的变大, 损耗增速下降, 此情况与式 (4) 结果相同。

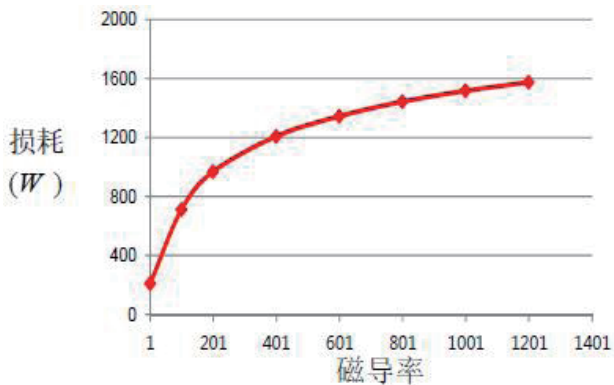


图 5 损耗随着材料磁导率变化曲线

## 4 实际案例分析与验证

分析的对象为 400A/12uH 的电抗器, 由两个电感串联构成。工作频率为 200kHz, 底座材料为不锈钢 SUS304, 磁导率  $\mu = 1$ , 电导率  $\sigma = 1.37 \times 10^6 \text{ S/m}$ , 厚度  $T = 1 \text{ mm}$ 。

### 4.1 电导率对近场损耗的影响分析

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, 可改用较不锈钢 SUS304 更大电导率的材料。在图 6 的 3D 仿真模型中, 增大底座材料电导率, 结果如图 7, 损耗将随电导率的增加而减小, 且随着电导率  $\sigma$  的增加, 相同电导率  $\sigma$  增量下, 损耗的减小幅度将变小。铝的电导率为  $38 \times 10^6 \text{ S/m}$ , 铜的电导率为  $58 \times 10^6 \text{ S/m}$ 。由仿真结果可知若将底座材料改用铝, 损耗将从 347.2W 下降至 21.8W。

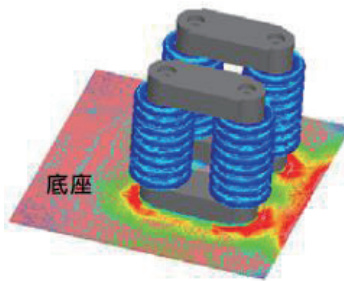


图 6 电抗器损耗仿真模型

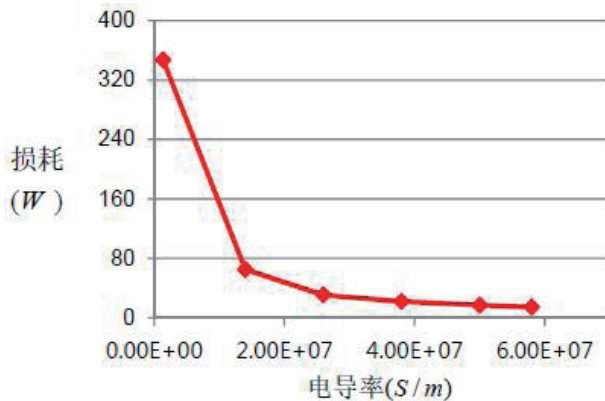


图 7 增大电导率底座损耗变化曲线

### 4.2 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。所以增大电抗器与底座间的距离损耗将减小。图 8 为 3D 仿真模型, 仿真结果如图 9。由仿真结果可知, 底座损耗将随  $d$  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。底座为铝,电抗器与底座间的距离  $d$  为零时,损耗为 21.8W。兼顾空间尺寸,可取距离为 5mm,损耗下降为 16.7W。

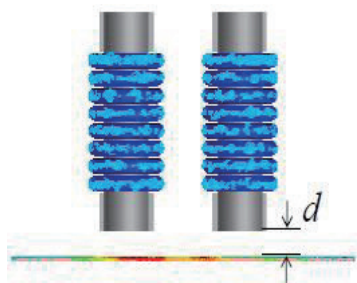


图 8 仿真模型

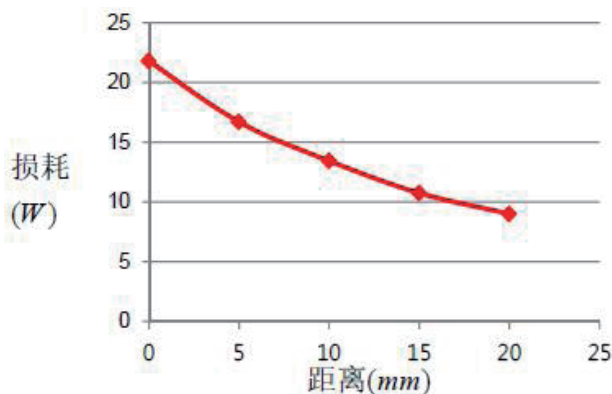


图 9 电抗器与底座间距离损耗变化曲线

## 5 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。本文研究近场磁场对邻近金属底座带来的功率损耗,分析影响损耗的主要参数,得到主要结论如下。

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不导磁材料。

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,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. 科学出版社 [M], 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.
- [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
- [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 届全国电源技术年会, 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
- [7] 和军平, 郑宝堂, 王毅. 开关电源近场效应分析与模型的研究 [J]. 电工电能新技术, 2009, 28(1): 16-20
- [8] Yang Haijun, LU Zengyi. Analysis on Near-field Effect Caused by Stray Magnetic Field of Integrated LLC Transformer [C]. In: Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC), Shanghai, 2014: 1349-1352
- [9] Jan A Ferreira. Improved Analytical Modeling of Conductive Losses In magnetic Components [J], IEEE Transactions on Power Electronics, 1994, 1(9): 127-131.
- [10] Hamdi Altayib Abdelbagi. Skin and Proximity Effects in Two Parallel plates [D], Wright State University, 2007.

## 作者简介

吴伟华 (1987), 男, 学士, 台达电子企业管理 (上海) 有限公司磁性元件设计部资深工程师, 从事磁性产品开发。研究领域为开关电源高频磁元件设计技术

卢增艺 (1979), 男, 博士, 台达电子企业管理 (上海) 有限公司副理, 负责磁性元件设计部。研究领域包括高频功率磁元件设计技术、电力电子磁集成技术、开关电源电磁兼容技术等。lu.zengyi@deltaww.com.cn