

# 不同材料对变电站内三相空心电抗器 磁场干扰的屏蔽效果研究

汪先进<sup>1,2</sup>, 周凯<sup>1</sup>, 赵世林<sup>3</sup>, 陈玉豪<sup>1</sup>, 陈诗佳<sup>1</sup>, 黄永禄<sup>1</sup>

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 国网重庆市电力公司万州供电分公司, 重庆 404100;  
3. 国网四川省电力公司技能培训中心, 四川 成都 610072)

**摘要:**为研究变电站现场三相空心电抗器对附近线路的磁场干扰及不同材料的屏蔽特性,在建立三维电磁场仿真模型基础上,研究高电导率材料与高磁导率材料对空间磁场的变化情况,并阐明其变化原因。同时利用有限元仿真结果中的矢量磁位对电抗器附近线路的感应电压进行计算,对不同屏蔽材料下的电压抑制效果进行讨论。结果表明:采用高磁导率材料屏蔽时需要将三相屏蔽体连通才能取得良好的屏蔽效果,同时高磁导率材料边缘大量磁力线的穿出可能造成附近区域线路的干扰增强。因此,采用高磁导率三相连通屏蔽还需要考虑变电站现场线路的分布情况。

**关键词:**磁场干扰;空心电抗器;屏蔽方法;有限元法

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.04.019 中图分类号:TM472 文章编号:1673-9140(2021)04-0150-07

## Research for magnetic shielding effect of 3-phase air core reactor in substation by using different materials

WANG Xianjin<sup>1,2</sup>, ZHOU Kai<sup>1</sup>, ZHAO Shilin<sup>3</sup>, CHEN Yuhao<sup>1</sup>, CHEN Shijia<sup>1</sup>, HUANG Yonglu<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Wanzhou Power Supply Branch, State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 404100, China; 3. Skills training center, State Grid Sichuan Electric Power Co., Ltd., Chengdu 610072, China)

**Abstract:** In order to research the magnetic field interference on cables nearby 3-phase air core reactor and the shielding effect of different materials, this paper analyses the influence of high conductivity materials and high permeability materials on spatial magnetic field on the basis of 3D electromagnetic field simulation model. Then the influence mechanisms are expounded. Furthermore, the induced voltages in different shielding measures are calculated and discussed basing on magnetic vector potential obtained from the finite element simulation results. The results show that, for the shielding of high permeability materials, good shielding effect can be achieved only by connecting 3 phases shield together. Moreover, a large number of magnetic leakages on the edge of shield may aggravate the magnetic field interference in surrounding areas. Therefore, the distribution of onsite cables in substation needs to be considered when applying high permeability 3-phase connection shielding.

**Key words:** magnetic field interference wave; air core reactor; shielding method; finite element method

收稿日期:2018-10-22;修回日期:2019-03-27

基金项目:中国博士后科学基金(2015T80976)

通信作者:汪先进(1995-),男,硕士研究生,主要从事电气设备试验和故障诊断方面研究;E-mail: wxj2013141441150@163.com

近年来,随着坚强电网工程和西电东送战略在国内的广泛实施,柔性交流输电已逐渐成为改善电能质量的关键技术<sup>[1]</sup>。而空心电力电抗器作为柔性交流输电中调节、稳定负荷水平的主要设备,目前已大量运用在西电东送线路各重要节点上<sup>[2]</sup>。大容量空心电抗器通常需要承受较大的电流,在大电流作用下电抗器附近磁场辐射范围较广,对变电站附近二次设备造成的磁场干扰较为严重<sup>[3]</sup>。

针对空心电抗器对变电站内设备的磁场干扰问题,国内外研究者提出过多种抑制措施,如采用抬高电抗器<sup>[4]</sup>、调整电缆沟走向<sup>[5]</sup>、改造主地网结构<sup>[6]</sup>等方式来减小周围设施与空间磁场的耦合效率,这些方法在工程中有较明显的效果,但对于在运的变电站,站内各部分设备布局已成形,以上方式施工规模大,实施难度较大,且现场电抗器高度、地网结构通常受设计标准限制,改动范围不大。

除此之外,磁场屏蔽作为一种通用性较强的磁场抑制方法也被广泛研究。例如:文献[7-9]研究了不同材料对变电站内空心电抗器的磁场屏蔽效果,得出了工频磁场的最优抑制方式;文献[10-12]提出高磁导率材料适合与磁力线平行放置,高电导率材料适合与磁力线垂直放置,2种材料混合铺设能够取得较好的屏蔽效果。然而,过去关于磁场屏蔽效果的论证方法,主要利用磁场值的大小评判屏蔽是否有效,在仿真模型中,也通常只用了电场到磁场的耦合模型。事实上,变电站现场的电磁干扰主要体现在于二次线路中的感应电压,这需要在模型中进一步考虑磁场到电场计算。由于二次线路感应电压与磁场方向和自身空间位置相关,磁场的衰减并不能直接代表线路中感应电压的衰减,传统方法缺乏对二次线路上感应电压的比较,其屏蔽效果有待进一步研究。

该文利用有限元仿真软件 COMSOL 对变电站实际的三相电抗器建立电磁仿真模型,研究不同材料和不同铺设方式下整个仿真空间内磁场的变化情况,进而在模型中设置 2 种典型二次线路,研究不同屏蔽方式对附近线路感应电压的抑制效果。

## 1 空心电抗器的磁场干扰

### 1.1 空心电抗器结构

目前,干式空心电抗器普遍采用多个同轴绕组

包封并联的结构形式。其中每个包封由多层线圈并联绕制而成,每层线圈由数根小截面金属导线(通常为铝导线)组成<sup>[13]</sup>。各包封的导线首、末端分别焊接在上、下铝制星形架上,从而构成大容量的电抗器绕组。对于一个空心电抗器,其绕组区域仅占电抗器的小部分区域,如图 1 所示,电抗器内部大部分均为空心区域。空心电抗器正常运行工作电流能达到 2 000~3 000 A,其空心区域能够辐射出较大的磁场,能够对周围设施特别是二次线路产生强烈电磁污染。如能有效降低空心电抗器对环境的磁场干扰,这对于变电站及电力系统的安全、稳定运行具有重要意义。

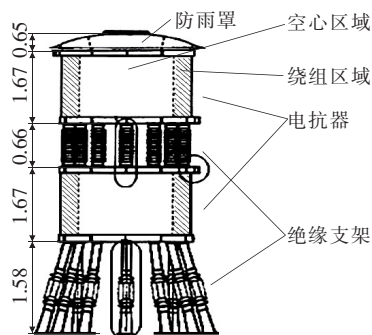


图 1 空心电抗器设计示意(单位:m)

Figure 1 Design drawing of air core reactor(Unit:m)

### 1.2 仿真模型搭建

变电站现场某三相空心电抗器的额定电流为 2 000 A,额定电压为 36.5 kV,额定电感值为 28.26 mH,根据现场参数在 COMSOL 软件中建立三维电磁场模型,如图 2 所示,并计算三相电抗器空间磁场分布。

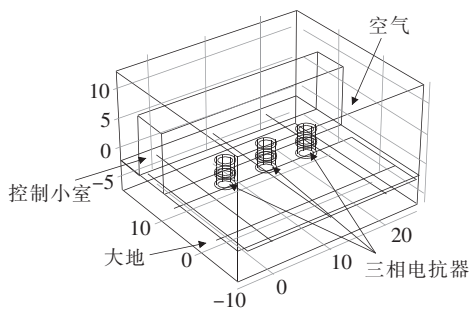


图 2 三相电抗器模型

Figure 2 3-phase air core reactor model

空间中任意一点的磁场值均受三相电抗器的共同作用,在圆柱坐标系中,单相电抗器对空间某点的矢量磁位仅有轴向分量,根据 Maxwell 方程组,求解区域的磁场基本方程<sup>[2]</sup>为

$$\frac{\partial^2 \mathbf{A}_i}{\partial r_i^2} + \frac{\partial \mathbf{A}_i}{r_i \partial r_i} - \frac{\mathbf{A}_i}{r_i^2} + \frac{\partial \mathbf{A}_i}{\partial z_i^2} = -\mu \mathbf{J}_i \quad (1)$$

式中  $\mathbf{A}_i$  为矢量磁位  $\mathbf{A}$  在第  $i$  相 ( $i$  分别代表 A、B、C 相) 电抗器单独作用下的分量;  $\mu$  为模型中不同材料的磁导率;  $\mathbf{J}_i$  为第  $i$  相电抗器的电流密度;  $r_i$ 、 $z_i$  分别代表以第  $i$  相电抗器为中心的柱坐标系中的半径和高度坐标轴。

$i$  相电流密度  $\mathbf{J}_i = n \mathbf{I}_i / S$ , 其中  $n$  为电抗器绕组匝数,  $S$  为单根漆包线面积, 工作电流  $\mathbf{I}_i$  按照实际电抗器额定工作电流  $2000 \sin(100\pi t + \varphi)$  取值,  $t$  为工作时间, 三相电流相角  $\varphi$  互为  $120^\circ$ 。

计算求得矢量磁位  $\mathbf{A}$  后, 空间某点的磁感应强度  $\mathbf{B}$  即为矢量磁位  $\mathbf{A}$  的旋度<sup>[14]</sup>:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (2)$$

在模型中, 根据面电流密度等效原则, 采用等尺寸的圆环柱体代替真实电抗器中的线圈结构, 并对每相电抗器设置工作电流  $\mathbf{I}_i$ 。

### 1.3 空间磁场分布

在 COMSOL Multiphysics 软件中, 通过四面体网格剖分将模型分为 69 140 最小计算单元, 设置频域求解器实现三维空间的求解。三相空心电抗器的空间磁场分布如图 3 所示, 可知整个仿真区域的最大磁通密度已接近 200 mT。磁场从电抗器中心向空间扩散, 使得附近  $20 \times 20 \text{ m}^2$  的空间内仍保持有数百  $\mu\text{T}$  到 1 mT 的磁通密度。三相电抗器底部 1 m 处的磁场分布情况如图 4 所示, 磁场在三相电抗器中心区域最强, 而其他距电抗器较远的区域磁场较弱。

不少研究发现, 大容量空心电抗器的磁泄露能直接影响周围线路的稳定运行<sup>[15]</sup>, 并形成较大的干扰电压或感应电流。线路在空间磁场中产生感应电压<sup>[14]</sup>, 即

$$\begin{aligned} \epsilon &= -\iint_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot \vec{n} dS = \\ &= -\iint_S \frac{\partial (\nabla \times \mathbf{A})}{\partial t} \cdot \vec{n} dS = \oint_l \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \cdot \vec{l} dl \quad (3) \end{aligned}$$

式中  $S$  为线路所围成的面积;  $\vec{n}$  为所围成面积的法向方向矢量;  $\mathbf{B}$  为磁感应强度;  $\mathbf{A}$  为矢量磁位;  $l$  为线路长度;  $\vec{l}$  为线路沿线方向矢量。说明线路中的感应电压  $\epsilon$  与空间磁矢量和线路分布密切相关。而闭合线路的感应电流为

$$I = \frac{\epsilon}{R} = -\iint_S \frac{\partial \mathbf{B}}{R \partial t} \cdot \vec{n} dS \quad (4)$$

$I$  与穿过闭合线路中的磁感应强度  $\mathbf{B}$  和回路电阻  $R$  密切相关, 但也是通过求取回路中的感应电压  $\epsilon$  得到。因此, 感应电压可以有效代表线路所受电磁干扰的情况。

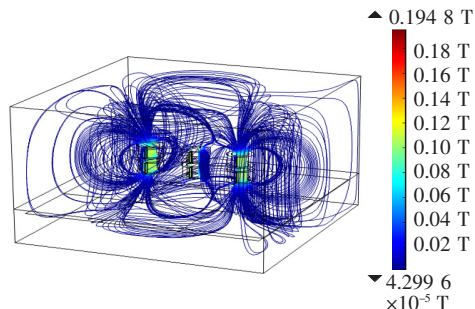


图 3 三相电抗器的磁场分布

Figure 3 Magnetic field distribution of 3-phase reactor

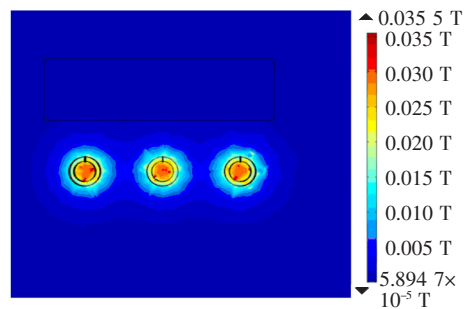


图 4 电抗器正下方 1 m 处磁场分布

Figure 4 Magnetic field distribution at 1 m under reactor

该文在模型中地面下 0.8 m 处加入 2 条线路, 模拟变电站现场电抗器附近的二次线路, 如图 5 所示, 线路 1 为  $10 \times 10 \text{ m}^2$  方格状, 位于电抗器正下方, 线路 2 为图 5 中黑色实线, 线路走向与现场电缆沟走向一致, 线路总长度为 46 m, 模拟现场变电站电抗器周围敷设的二次线路。

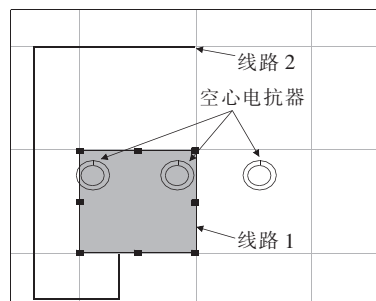


图 5 电抗器附近的二次线路

Figure 5 Secondary cable near reactor

计算得到线路 1、2 的感应电压分别为 24.81、11.88 V。线路 1 位于电抗器正下方,空间磁场较强,因此能感应出更大的干扰电压。

## 2 空心电抗器的磁场屏蔽与分析

### 2.1 屏蔽对磁场的影响

铝板、硅钢片分别作为高电导率、高磁导率材料广泛用于各种磁场屏蔽研究中<sup>[16]</sup>。采用铁磁材料作屏蔽体,利用铁磁材料的高导磁特性,将磁力线束缚在铁磁材料内部,改变磁力线方向以达到屏蔽效果,高导磁材料屏蔽示意如图 6(a)所示。在时变磁场下,利用高电导率的屏蔽材料在屏蔽体内形成涡流,从而引发与入射场相反的磁场,抵消部分原磁场,从而达到屏蔽的效果。高导电材料屏蔽示意如图 6(b)所示。

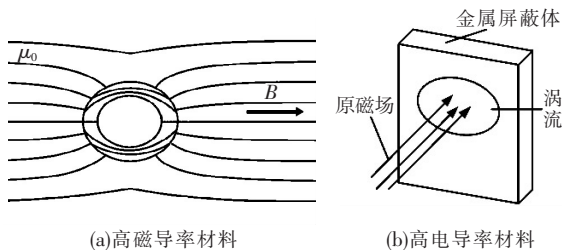


图 6 不同材料的屏蔽原理示意

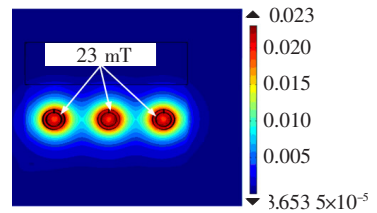
Figure 6 Schematic diagram of different materials

分别在模型中设置铝板、硅钢片,2 种材料的参数如表 1 所示。硅钢片为高磁导率材料,若采用一体化结构进行屏蔽,屏蔽体内部将会产生较大感应电流,从而引起屏蔽体本身发热严重。采用叠片状结构可以在保证磁通路的同时避免电气通路,从而实现磁屏蔽的效果。因此,在材料设置中,硅钢片电导率为叠片间绝缘材料的电导率。在模型中,地表设置  $10 \times 18 \text{ m}^2$  厚度为 1 cm 的屏蔽体。电抗器正下方 1 m 处的磁场在不同屏蔽材料作用下发生变化,如图 7 所示。

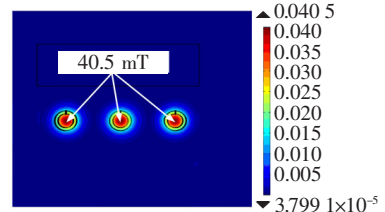
表 1 屏蔽材料的参数设置

Table 1 Parameters setting of shielding material

材料	电导率 $\zeta$ / (S/m)	相对介电常数 $\epsilon_r$	相对磁导率 $\mu_r$
铝板	$3.774 \times 10^7$	1	1
硅钢片	$9.843 \times 10^{-4}$	1	7 000



(a) 铝板屏蔽



(b) 硅钢片屏蔽

图 7 屏蔽后电抗器正下方 1 m 处磁场分布

Figure 7 Magnetic field distribution at 1m under reactor by shielding

与图 4 对比可以看出,由于铝板感应出反向磁场,屏蔽后电抗器底部的磁场分布更加均匀,其中最强的区域磁通密度由 35 mT 减小为 23 mT,而电抗器周围区域的磁场也有所增大,因此,铝板屏蔽后,在屏蔽体上方强磁场区域会扩大。而硅钢片屏蔽后,由于高磁导率使得磁场更加集中在电抗器内部,对周围环境的影响更小,磁力线紧缩在电抗器底部,其磁感应强度达到了 40.5 mT,与屏蔽前情况相比变化不大,因此,硅钢片屏蔽后,在屏蔽体上方强磁场区域会缩小。

### 2.2 屏蔽对感应电压的影响

进一步设置不同屏蔽体的铺设面积来研究磁场对附近线路感应电压的影响,铺设方式如图 8 所示,屏蔽面积分为 4 种。

方式 1 传统方式提出的是在三相电抗器的每相底部分别铺设一个  $2 \times 2 \text{ m}^2$  厚度为 1 cm 的方形屏蔽体,三相屏蔽体彼此不连接。

方式 2 该文提出在方式 1 的基础上将三相电抗器之间空隙连接在一起,形成一个  $2 \times 13 \text{ m}^2$  的整体。

方式 3 在方式 2 的基础上扩大屏蔽体的面积,形成一个完全覆盖三相电抗器的  $10 \times 18 \text{ m}^2$  长方形屏蔽体。

方式 4 进一步扩大屏蔽体的面积,形成  $15 \times 23 \text{ m}^2$  的长方形屏蔽体。

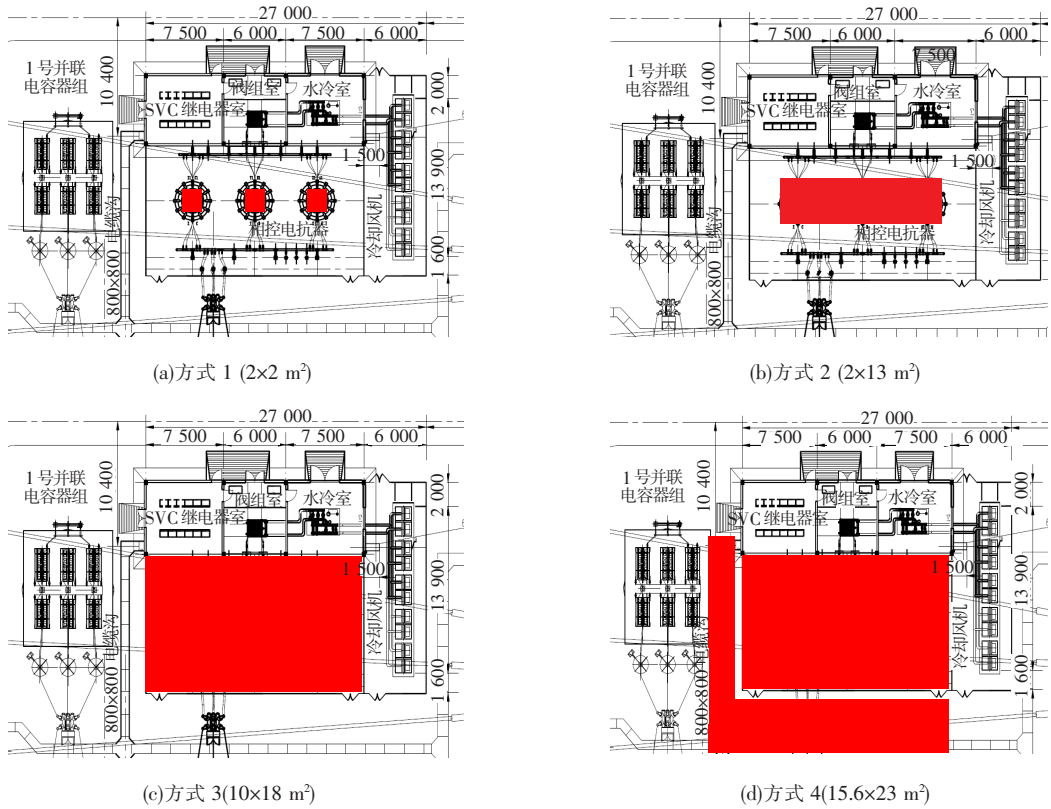


图 8 屏蔽体的不同铺设方式(单位:mm)

Figure 8 Different ways of shielding(Unit:mm)

4 种方式下 2 种屏蔽材料在线路上的感应电压变化情况如图 9 所示。从 2 种屏蔽材料对线路 1 的屏蔽效果可以看出:随着屏蔽面积的增加,感应电压能够较为明显的减小,但当屏蔽面积达到一定程度(方式 3),屏蔽效果不再有明显提高。其中硅钢片屏蔽有一定的特点,当三相屏蔽体独立地铺设在电抗器底部(方式 1)时,没有起到良好的屏蔽效果,感应电压仅下降 2.98 V,而当三相屏蔽体连接为一个整体(方式 2)后,感应电压骤降为 1.9 V,取得相同面积下铝板更好的屏蔽方式。这是由于硅钢片屏蔽原理是空间的磁场分布,单纯在每一相电抗器底部铺设硅钢片,磁力线仍能大量从屏蔽体边缘流出,进入到地下对线路形成较大感应电压。而当三相屏蔽体连接为一个整体(方式 2~4)时,三相磁场均汇聚在同一屏蔽体内部,三相磁场在屏蔽体内部能够相互抵消,使得空间磁场大量集中在屏蔽体内部,如图 10 所示,而在屏蔽体以外的空间磁场大大减弱,从而取得更为明显的屏蔽效果。

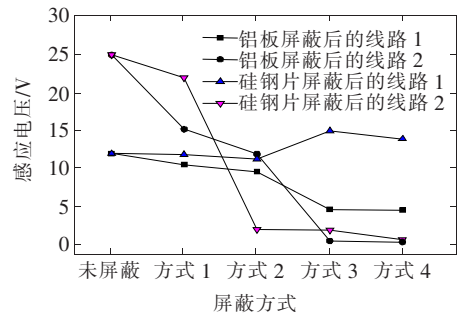


图 9 不同屏蔽方式下的感应电压

Figure 9 Induced voltage for different shielding methods

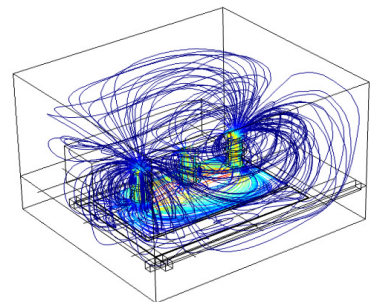


图 10 硅钢片屏蔽的磁力线变化情况

Figure 10 Magnetic line variation of silicon-steel sheet shielding

高磁导率材料能够将大量磁力线约束在材料内部,但在材料边缘仍会有大量磁力线穿出(以下称为边缘效应),如图 11 所示。对于线路 2,从方式 3、4 的仿真结果可以发现,硅钢片屏蔽措施反而使得感应电压更大,这是由于方式 3、4 屏蔽体的边缘已接近线路 2,由于硅钢片材料的边缘效应使得线路走向附近的磁场反而增大,进而增加了线路上的感应电压。由此说明:硅钢片屏蔽效果虽然优于铝板,但也受空间布局的影响,位于硅钢片屏蔽体边缘的线路可能受到更严重的磁场干扰。

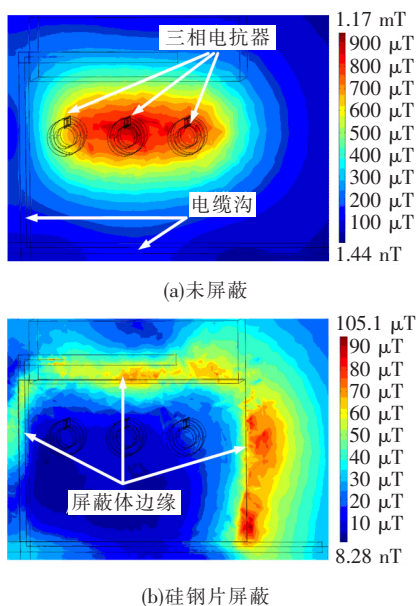


图 11 硅钢片对底部磁场分布影响

Figure 11 Influence of silicon steel sheet on magnetic field distribution at the bottom of reactor

### 3 结语

该文根据现场模型建立了三维电磁仿真模型,通过分析磁场分布情况与附近线路感应电压情况,研究了不同屏蔽材料的屏蔽特性,得出以下结论:

1)以铝板为代表的高电导率屏蔽材料能够有效屏蔽电抗器附近线路上的感应电压,并随面积增加屏蔽效果逐渐增强,但当屏蔽面积达到一定程度,屏蔽效果不再有明显提高;

2)利用硅钢片为代表的高磁导率材料在对三相电抗器屏蔽时,三相分别独立铺设不能取得较好的屏蔽效果,需要将三相屏蔽体的磁路连通;

3)使用高磁导率材料屏蔽虽然能够使得屏蔽空间内部磁场减弱,但高磁导率材料的边缘效应反而会使部分二次线路感应电压有所增大,造成该区域线路的磁场干扰更为严重。

### 参考文献:

- [1] 郭天伟, 罗日成, 潘茜雯, 等. 750 kV 同塔双回交流输电线路电磁环境分析[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(1): 46-53.
- [2] 赵世林, 周凯, 温才权, 等. 大型 SVC 中三相电抗器的电磁干扰测试与屏蔽措施评估[J]. 电网技术, 2018, 11(3): 3818-3826.
- [3] 于龙洋, 刘晔, 于施淼, 等. 超特高压油浸式电抗器电磁场仿真分析[J]. 中国电力, 2018, 51(11): 110-116.
- [4] 余志飞. SVC 中空芯电抗器磁屏蔽措施研究和结构优化[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [5] Terciyani A, Ermis M, Gultekin B, et al. EMC considerations in the design of a unified relocatable SVC for open-cast lignite mining in turkey[C]//IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Istanbul, Turkey, 2003.
- [6] 李宁, 温才权, 宋永佳, 等. 克服变电站空心电抗器磁场干扰的接地系统设计[J]. 南方电网技术, 2017, 11(5): 36-40.
- [7] 张宁, 李琳. 35 kV 空心电抗器工频磁场最优抑制方式

GUO Tianwei, LUO Richeng, PAN Xiwen, et al. Analysis on electromagnetic environment of 750 kV double-circuits transmission lines[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1): 46-53.

ZHAO Shilin, ZHOU Kai, WEN Caiquan, et al. Simulation of electromagnetic compatibility of air-core reactor in large scale SVC and measure of reducing induced current in substation grounding grid[J]. Power System Technology, 2018, 11(3): 3818-3826.

YU Longyang, LIU Ye, YU Shimiao, et al. Simulation analysis and research on electromagnetic field of ultra-special high pressure oil-immersed reactor[J]. Electric Power, 2018, 51(11): 110-116.

LI Ning, WEN Caiquan, SONG Yongjia, et al. Grounding system design to reduce magnetic interference of air-core reactor in substation[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(5): 36-40.

LI Ning, WEN Caiquan, SONG Yongjia, et al. Grounding system design to reduce magnetic interference of air-core reactor in substation[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(5): 36-40.

LI Ning, WEN Caiquan, SONG Yongjia, et al. Grounding system design to reduce magnetic interference of air-core reactor in substation[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(5): 36-40.

LI Ning, WEN Caiquan, SONG Yongjia, et al. Grounding system design to reduce magnetic interference of air-core reactor in substation[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(5): 36-40.

LI Ning, WEN Caiquan, SONG Yongjia, et al. Grounding system design to reduce magnetic interference of air-core reactor in substation[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(5): 36-40.

LI Ning, WEN Caiquan, SONG Yongjia, et al. Grounding system design to reduce magnetic interference of air-core reactor in substation[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(5): 36-40.

- 的研究分析[J]. 高压电器, 2015, 51(8): 125-130+135.
- ZHANG Ning, LI Lin. Research analysis of the optimal inhibition of power frequency magnetic field of 35 kV air-core reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8): 125-130+135.
- [8] 杨嘉萌, 王亚莉, 张雯芳, 等. 干式空心直流平波电抗器磁场分布与屏蔽研究[J]. 高压电器, 2019, 55(4): 133-140.
- YANG Jiameng, WANG Yali, ZHANG Wenfang, et al. Research on distribution and shielding of magnetic field of dry-type air-core smoothing reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4): 133-140.
- [9] 杜志叶, 阮江军, 干喆渊, 等. 变电站内工频电磁场三维数值仿真研究[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 229-235.
- DU Zhiye, RUAN Jiangjun, GAN Zheyuan, et al. Three-dimensional numerical simulation of power frequency electromagnetic field inside and outside substation[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 229-235.
- [10] 李永明, 徐禄文, 俞集辉, 等. 35 kV 干式空心电抗器下工频磁场抑制[J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 2960-2965.
- LI Yongming, XU Luwen, YU Jihui, et al. Intensity control of power frequency magnetic field under 35 kV dry-type air-core reactor[J]. Power System Technology, 2010, 36(12): 2960-2965.
- [11] 陈隽, 戴奇奇, 袁召, 等. 特高压油浸式空心电抗器温度场计算及其影响因素分析[J]. 高压电器, 2020, 56(1): 87-95.
- CHEN Juan, DAI Qiqi, YUAN Zhao, et al. Calculation in temperature field of UHV oil-immersed air-core reactor and analysis of influencing factors[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(1): 87-95.
- [12] 邹亮, 宫攀, 张黎, 等. 干式空心电抗器空间磁场缩比试验与模型简化[J]. 高电压技术, 2014, 40(6): 1675-1682.
- ZHOU Liang, GONG Pan, ZHANG Li, et al. Small-scale experiment and model simplification of space magnetic fields around air-core reactors[J]. Power System Technology, 2014, 40(6): 1675-1682.
- [13] Lee S Y, Lim Y S, Choi I H, et al. Effective combination of soft magnetic materials for magnetic shielding[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2012, 48(11): 4550-4553.
- [14] 冯慈璋. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 120.
- [15] 苏利捷, 黄保栋, 次仁罗布. 混联式 PHEV 中 DC/DC 变换器辐射电磁干扰分析与抑制[J]. 电测与仪表, 2019, 56(7): 35-42.
- SU Lijie, HUANG Baodong, CI Renluobu. Analysis and suppression on radiated EMI of DC/DC converter in parallel-series PHEV[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(7): 35-42.
- [16] 欧阳樟, 刘全峰, 梁艺超, 等. 干式空心电抗器工频磁场屏蔽方法的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(6): 66-73+79.
- OUYANG Zhang, LIU Quanfeng, LIANG Yichao, et al. Study on power frequency magnetic field shielding method of dry air-core reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(6): 66-73+79.