

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2015.07.005

基于矩量法的空心电抗器工频磁场仿真分析

徐禄文¹, 罗 鹏², 邹岸新¹, 李永明², 付志红²

(1. 国网重庆市电力公司电力科学研究院, 重庆 401123;

2. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 为了研究变电站站内干式空心电抗器周围工频磁场的分布情况, 笔者基于矩量法, 首先推导了工频磁场矩量法的计算原理, 然后以 35 kV 干式空心电抗器为例对单相电抗器、三相电抗器组进行模型建立与工频磁场分布的计算与分析。将计算结果与实测结果进行对比, 两者结果吻合良好, 说明了文中方法及模型的准确性与有效性。最后分析空心电抗器组在不同运行方式时对其周围工频磁场分布的影响情况, 为研究变电站站内电抗器周围工频磁场的分布提供参考。

关键词: 空心电抗器; 变电站; 矩量法; 工频磁场; 仿真分析; 暴露限值

Analysis of Power Frequency Magnetic Field Simulation of Air Core Reactor Based on the Method of Moments

XU Luwen¹, LUO Peng¹, ZOU Anxin¹, LI Yongming², FU Zhihong¹

(1. Chongqing Electric Power Test & Research Institute, Chongqing 401123, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to study the distribution of power frequency magnetic field around the substation of dry-type air core reactor, this paper based on the method of moment, firstly the principle of power frequency magnetic field calculation method of moments is derived, then take the 35 kV dry air core reactor as an example, the model and the power frequency magnetic field distribution of the single-phase and three-phase reactor reactor group is established, calculated and analyzed. Comparing the calculated results and the measured results, the results are in good consistency, the accuracy of this method and the model is effective. Finally, the effects of the air core reactor group operating in different ways on the surrounding power frequency magnetic field distribution are analyzed, a reference for the study of power frequency magnetic field distribution around the substation reactor is provided.

Key words: air core reactor; substation; method of moments; power frequency magnetic field; simulation analysis; exposure limit

0 引言

随着经济的发展, 中国的电力发展非常迅速, 变电站电压等级越来越高, 而变电站中载流导体和各种电气设备在周围空间中产生的工频磁场引起了诸多问题: 干扰附近敏感电子设备的正常运行,

甚至影响到暴露于该场下的人体健康。国内外研究表明, 变电站内的工频磁场源主要来源于电抗器, 电抗器组附近是整个变电站中磁场强度最强的区域。因此变电站内空心电抗器组周围的工频磁场分布问题则成为变电站电磁环境研究的重点之一^[1-8]。

目前, 国内外关于研究空心电抗器周围工频磁场分布的方法主要有解析计算、数值计算和实际测量^[9-13]。文[9-11]中给出了干式空心电抗器周围工频

收稿日期: 2015-02-02; 修回日期: 2015-03-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(51277189); 国家“111”创新引智计划项目(B08036); 中央高校基本科研业务费资助(CDJXS12151108)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51277189), Program of Introducing Talents of Discipline to Universities(B08036), Fundamental Research Funds of the Central Universities(CDJXS12151108).

磁场计算的解析方法,这种计算方法需要电抗器的详细设计数据,如线圈的包封数、气道宽度、各包封的轴并数、辐并数、匝数、具体线径、匝绝缘厚度、绕线高度和电流密度等;文[12]中基于场-路耦合计算模型对三相干式空心电抗器组建立了仿真模型,对35 kV 品字形排列电抗器组进行仿真计算,计算结果与该电抗器组测量值相符;文[13]中通过试验表明干式铁心电抗器工频磁场对环境的影响小,优于空心电抗器。空心电抗器磁场强度随距离变远而减弱,一般在数十毫特斯拉及以下。文中基于矩量法(MOM)对空心干式电抗器建模,利用开域场的分析方法计算电抗器周围的工频磁场分布。

笔者从空心电抗器模型出发,计算35 kV 空心电抗器组周围工频磁场的分布,采用实测数据验证其有效性,并重点分析了不同运行状态下空心电抗器组周围工频磁场的分布^[14-25]。

1 电抗器计算原理及模型的建立

1.1 工频磁场矩量法的计算

文中计算是基于矩量法来实施的,空间工频磁场与载流导体的电流密切相关,为了推导载流导体周围的工频磁场表达式,可将导体划分为有限数目的载流导体段,先计算载流导体元段的空间工频磁场,运用叠加定理,再由此推导出总的工频磁场的表达式。

由于站内载流导体的形状各异,因此建立局部坐标系 u, v, w , 见图1, 假设一段导体段长为 L_{ab} , 导体段的两端位于局部坐标系 u 轴 a 点与 b 点, 流经导体的电流为 I_L , 电流方向与 u 轴正半轴方向一致。因此载流导体元段 du 在空间任意一点 $M(u, v, w)$ 产生的磁矢量位 dA 为

$$dA = \frac{\mu_0}{4\pi} \left(\frac{I_L}{R} du' \right) e_u \quad (1)$$

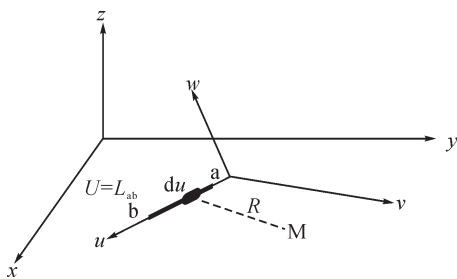


图1 一段载流导体段的示意图

Fig. 1 A current carrying conductor section diagram

式(1)中, R 是导体元段 $du(v, 0, 0)$ 与待求点 M 的距离, 即为

$$R = \sqrt{v^2 - 2uv + u^2 + v^2 + w^2} \quad (2)$$

整个载流导体段 L_{ab} 在 M 点上产生的磁矢量位

A , 则为

$$A = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_0^{L_{ab}} \frac{I_L}{\sqrt{v^2 - 2uv + c}} du' e_u \quad (3)$$

式(3)中, $c = u^2 + v^2 + w^2$ 。

为了推导载流导体周围工频磁场的表达式, 因此将长为 L 的载流导体划分为 n 段等间距导体段, 即每段长度为 $\Delta L' = L/n$ 。假设对于各个离散源点都在同一坐标轴 u 上, 则导体 L 上电流表示为 $I_L' = \sum_{i=1}^n \Pi(u') I_L$ 。在载流导体 L 上各段选定相应的匹配点 $N_j (j=1, 2, 3, \dots, n)$, 照点匹配法计算方法, 使积分方程离散化为矩阵方程。

$$\sum_{i=1}^n \frac{\mu_0}{4\pi} I_L \int_0^L \delta_j(r-r_j) \int_0^{L/n} \frac{\Pi(u')}{\sqrt{v^2 - 2uv + c}} du' = \int_0^L A \delta_j(r-r_j) du' \quad (4)$$

式(4)通过求逆运算, 转换为矩阵形式为

$$DA = G \quad (5)$$

式(5)中: D 为系数矩阵, G 为各导体的电流列矢量。

求解相应的代数方程组, 求得磁矢量位值为^[8]

$$A = \frac{u_0}{4\pi} \left(I_L H_{\frac{1}{2}0} - I_L H_{\frac{1}{2}2} \right) \quad (6)$$

式(6)中, $0, \frac{1}{2}, 1$ 分别表示各载流导体段的始端、中点和末端, H_{mm} 的定义为:

$$H_{mm} = \ln[r(m)] - \ln[r(n)]; \quad (7)$$

$$p(m) = [m^2 L - 2umL + (x-x_s)^2 + (y-y_s)^2 + (z-z_s)^2]^{\frac{1}{2}}; \quad (8)$$

$$r(m) = (u - mL) + p(m) \quad (9)$$

式(7)-(9)中: (x, y, z) 是待求点 M 的坐标; (x_s, y_s, z_s) 是载流导体段的起始坐标。经过坐标变换及推导, 磁矢量位值的偏导数方程为

$$\frac{\partial A}{\partial t} = -\frac{\mu_0}{4\pi} [(t-t_s)T_h - \frac{\partial u}{\partial t} E_h] \quad (10)$$

式(10)中: t 为坐标变量 x, y 或 z ; t_s 表示载流导体段起始点的坐标分量。而

$$T_h = I_L h(0) - I_L h\left(\frac{1}{2}\right); \quad (11)$$

$$E_h = I_L f(0) - I_L f\left(\frac{1}{2}\right); \quad (12)$$

$$h(m) = \frac{1}{r(m)p(m)}; \quad (13)$$

$$f(m) = uh(m) - 1/p(m) \quad (14)$$

通过上述载流导体的划分及磁矢量位的求取, 可推导出待求点各个方向的磁场强度分量表达式:

$$B_x = \frac{\mu_0}{4\pi} [(z-z_s) \sin \alpha] T_h; \quad (15)$$

$$B_y = -\frac{\mu_0}{4\pi}[(z-z_s)\cos\alpha]T_h; \quad (16)$$

$$B_z = -\frac{\mu_0}{4\pi}[(x-x_s)\sin\alpha - (y-y_s)\cos\alpha]T_h. \quad (17)$$

式(15)-(17)中, α 表示 u 轴与 x 轴之间的角度。通过上述表达式即可求得空间任意一点工频磁场。

1.2 干式空心电抗器模型的建立

空心干式电抗器的线圈采用绝缘的并联小截面铝导线绕制而成,在线圈的外部采用玻璃纤维包封;星形架除作电气连接作用外,还起压紧线圈的作用。干式空心电抗器的结构图见图2。



图2 干式空心电抗器结构图

Fig. 2 The structure of dry hollow reactor

文中针对 35 kV 空心干式电抗器建立模型,由于关心的是电抗器周围空间磁场的分布,因此忽略大地对磁场分布的影响,设大地磁导率与空气磁导率相同。同时,假设流过每相电抗器中包封中流过电流相位相同,且三相电抗器运行时处于平衡状态。基于上述假设,建立的 35 kV 干式空心电抗器模型及品字形排列并联电抗器组的模型见图3、4。

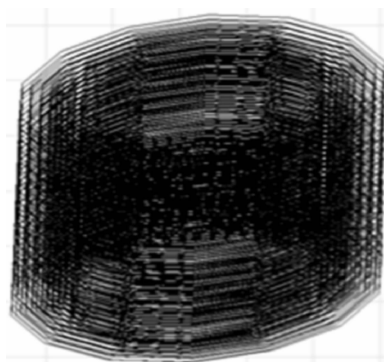


图3 35 kV 干式空心电抗器的模型图

Fig. 3 The model of the 35 kV dry hollow reactor

2 空心电抗器周围工频磁场的计算与分析

2.1 三相电抗器组工频磁场的计算与分析

建立的三相电抗器组模型见图4,每相电抗器与单相空心电抗器的参数设置相同。三相电抗器采用品字形排列,每两相电抗器的中心距为 5.2 m,各

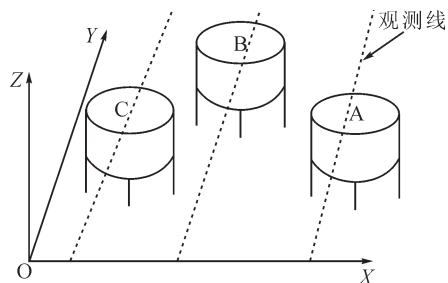


图4 品字形排列并联电抗器组的模型图

Fig. 4 Glyph arrangement model of shunt reactor group

相电抗器中心到三相电抗器中心的距离为 3 m。参数设置完毕后,对电抗器组各相电抗器下方的工频磁场进行仿真分析。为了较好地描述电抗器周围工频磁场的变化情况,在 A、B 和 C 相电抗器下方过各相电抗器中心取了 3 根观测线(沿 Y 轴正方向从 0~25 m,见图4),仿真计算的结果和现场实测的结果比较见图5。

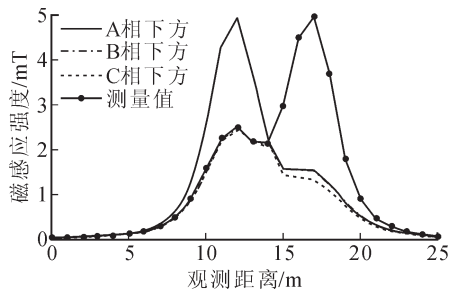


图5 品字形排列电抗器组 A、B、C 相下方离地 1.5 m 处的工频磁场仿真值与 B 相下方实测值

Fig. 5 The glyph arrangement reactor group A, B, C of power frequency magnetic field simulation values at the height of 1.5 m and the measurement of the phase B

结果表明:文中计算的工频磁场结果与实测数据中磁场分布情况基本一致,两者结果吻合较好,说明所建模型能够有效地分析空心干式电抗器周围工频磁场的分布情况。

当空心电抗器成品字形排列时,A相、C相电抗器下方的磁感应强度分布规律相同。由于三相电抗器磁场的叠加作用,ABC三相电抗器中心下方磁感应强度曲线分别在各相电抗器中心处及三相中心处出现局部极值。由于B相位于A、C相中间位置,因此B相下方磁感应强度的叠加效果最为明显。

为了进一步分析品字形排列电抗器组周围工频磁场的分布情况,仿真计算三相电抗器组周围离地 1.5 m 处工频磁场分布,仿真结果的等值色块图见图6。

从图6中可以看出三相电抗器组最大工频磁感应强度为 4.895 mT。电抗器组周围磁感应强度大多介于 2~4 mT,远大于职业暴露限值标准 500 μ T

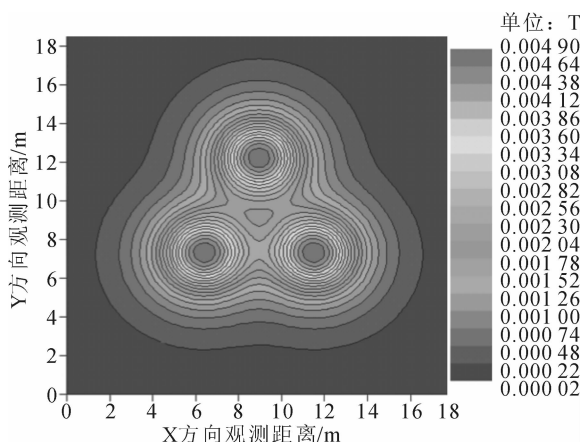


图 6 三相电抗器组附近离地 1.5 m 处工频磁场分布图

Fig. 6 The distribution of power frequency magnetic field around the three-phase reactor group in the substation at the height of 1.5 m

(安全防护 II 级)。品字形排列电抗器组周围的磁感应强度分布可等效为三个单相电抗器磁感应强度相互叠加的结果,电抗器组内侧由于 ABC 三相电抗器的磁场叠加而发生畸变,所以三相电抗器组磁感应强度最大值并非是中点,而是各相电抗器中心。

2.2 单相空心电抗器工频磁场的计算与分析

单相容量 15 000 kvar, 额定电压 19 919 V, 额定电流 753 A, 电抗 26.25 Ω 。电抗器有包封 11 个。包封高度 1 860 mm, 两包封之间气道宽度 25 mm, 包封离地高度 3 591 mm。根据建立空心电抗器组的单相模型, 仿真计算了其周围磁场分布。最终求出电抗器周围离地 1.5 m 处工频磁场分布的等值色块图, 见图 7。

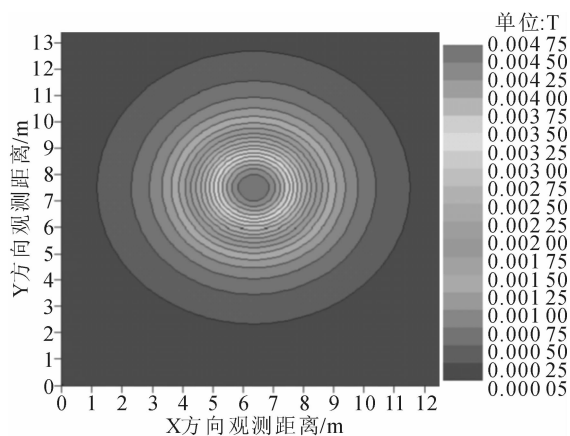


图 7 变电站内电抗器附近离地 1.5 m 处工频磁场分布图

Fig. 7 The distribution of power frequency magnetic field around the reactor in the substation at the height of 1.5 m

从图 5 中可以看出干式空心电抗器周围磁感应强度较大, 磁感应强度大多为 3 mT, 远大于职业暴露限值标准 500 μ T(安全防护 II 级)^[9]。单相电抗器

内部的磁感应强度比外部强, 且随电抗器中心距离的增大而逐渐衰减; 在以其中心为圆心, 半径为 7 m 左右的圆外区域, 磁感应强度低于 500 μ T(处于安全防护 I 级)。因此工作人员应尽量避免长时间暴露在空心电抗器附近。

3 空心电抗器运行方式对工频磁场的影响

由于变电站内空心电抗器附近的磁感应强度较大, 为了改善电抗器的漏磁的分布情况, 将在不改变电抗器本身尺寸、结构等额定参数的前提下, 分别改变电抗器的支柱高度、电抗器组的排列方式和, 分析运行方式对电抗器周围工频磁场的影响。

3.1 改变电抗器支柱的高度

干式空心电抗器支柱是支撑电抗器线圈的重要部件, 以 BKDCKL-15000/35 三相电抗器组的技术参数为计算参数, 每相电抗器有 6 根支柱, 间隔均匀的分布。考虑三相电抗器以品字形排列, 分别仿真计算在支柱高度的实际高度、升高 0.3 m、升高 0.6 m、升高 1.2 m、升高 1.8 m 等不同情况下, 中间相(B 相)下方离地 1.5 m 高度处工频磁场的分布。当电抗器支柱高度变化时, 其磁感应强度大小仿真曲线见图 8。

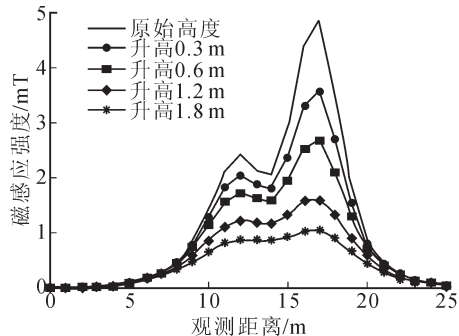


图 8 品字形排列电抗器组 B 相下方离地 1.5 m 处的工频磁场仿真值

Fig. 8 The simulation of power frequency magnetic field about the glyph arrangement reactor group B phase at the height of 1.5 m

结果表明: 随着支柱高度的增加, 电抗器线圈离地距离也相应的升高, 地面 1.5 m 高度的磁感应强度逐渐降低。当升高支柱时, B 相电抗器中心处磁感应强度迅速下降; 随着支柱高度的增加, 磁感应强度的减小幅度逐渐降低, 而且在距离三相电抗器中心约 12 m 范围外, 磁感应强度随支柱高度的升高基本保持不变。由此可见, 增加电抗器支柱高度, 可以有效降低电抗器周围一定范围内的磁感应强度, 特别是各相电抗器中心处, 并且磁感应强度的分布规律保持不变。

3.2 改变电抗器排列方式

对于三相电抗器组,生产厂家建议的安装方式为品字形或水平一字形排列。文中采用的品字形排列方式对三相电抗器组周围工频磁场进行仿真分析,仿真结果见图6。现将电抗器组排列方式改为一字形排列,为了避免单相之间相互影响,同时考虑到节省电抗器占地面积,采用之前品字形排列时设置的两相相间距5.2 m。当电抗器组排列方式变化时,其离地1.5 m处磁感应强度仿真色块图见图9。

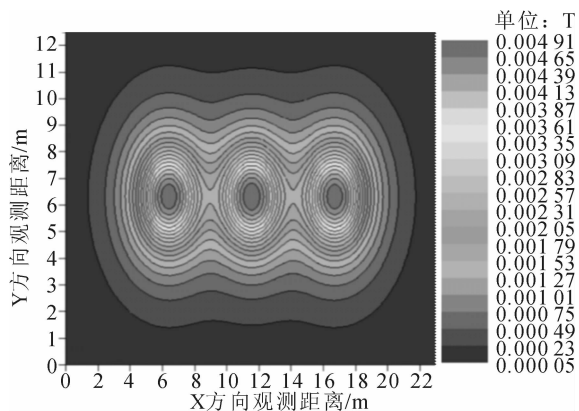


图9 一字形排列电抗器组离地1.5 m处磁场强度仿真图
Fig. 9 The simulation of power frequency magnetic field about the in-line reactor group at the height of 1.5 m

从图9中可以看出,当三相电抗器组成一字形排列时最大的工频磁感应强度与品字形排列时相差不大,且最大值也是位于各相电抗器中心处。由于磁场随着距离衰减非常迅速,因此一字形排列的电抗器可看作三个单相电抗器的叠加。

结果表明:两相电抗器之间的磁场由于磁场的叠加作用而发生了畸变。因此,改变电抗器组排列方式对改善电抗器附近空间的漏磁情况意义不大。

4 结论

1)文中基于矩量法,推导了计算工频磁场的计算原理并对35 kV干式空心电抗器建立模型。该方法可以对空心电抗器模型进行较大场域工频磁场计算,避免了有限元等方法对电抗器周围磁场计算范围的限值。

2)基于文中求得方法,计算分析了电抗器单相及三相模型周围工频磁场的分布。计算结果与实际测量数据基本吻合,说明建立模型的准确性和计算方法的有效性。为研究变电站内电抗器周围工频磁场的分布提供参考。

3)针对电抗器的支柱高度和电抗器排列方式对其周围工频磁场的影响,进行仿真分析。结果表明:改变电抗器支柱的高度能有效降低各相电抗

器下方及周围一定范围内工频磁场的分布情况;改变电抗器排列方式则对改变电抗器周围漏磁效果不佳。

参考文献:

- [1] 徐基泰. 40年来电抗器技术的发展[J]. 变压器, 2004, 41(3):45-50.
XU Jitai. Development of reactor technology in recent 40 years[J]. Transformer, 2004, 41(3):45-50.
- [2] 刘媛,董明,吴雪舟,等. 66 kV干式空心并联电抗器抗震特性仿真分析[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(2):1-6.
LIU Yuan, DONG Ming, WU Xuezhou, et al. Simulation analysis on anti-seismic characteristics of the 66 kV dry type hollow shunt reactor[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2014, 30(2):1-6.
- [3] 段力勇,王承民. 变压器式可控电抗器静态无功功率双向控制原理研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(1):9-15.
DUAN Liyong, WANG Chengmin. Research on the bidirectional control principle of reactive power based on a transformer type controllable shunting reaction[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(1):9-15.
- [4] 程汉湘,何绍洋,黄超宪. 磁控电抗器的电磁特性分析[J]. 变压器, 2013, 50(8):17-19.
CHENG Hanxiang, HE Shaoyang, HUANG Chaoxian. Electromagnetic characteristic analysis of magnetically controlled reactor[J]. Transformer, 2013, 50(8):17-19.
- [5] 张亚杰,刘洪文,周连发. 高阻抗变压器中内置式串联电抗器的仿真研究[J]. 变压器, 2014, 51(12):19-22.
ZHANG Yajie, LIU Hongwen, ZHOU Lianfa. Simulation study on built-in series reactor in high impedance transformer[J]. Transformer, 2014, 51(12):19-22.
- [6] 赵达,梁琮,陈绍彬. 完全谐波状态下电抗器的电流稳定性问题[J]. 电力电容器与无功补偿, 2013, 34(1):20-23.
ZHAO Da, LIANG Cong, CHEN Shaobin. On reactor current stability in complete harmonic condition[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2013, 34(1):20-23.
- [7] 王恒,范文洁,赵妍,等. SVC用TCT型可调电抗器仿真分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014(3):33-38.
WANG Heng, FAN Wenjie, ZHAO Yan, et al. Simulation analysis of TCT type adjustable reactor for SVC[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014(3):33-38.
- [8] 孙新年,于佰建. 快速响应磁控电抗器在光伏电站的应用[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014(2):33-39.
SUN Xinnian, YU Baijian. Application of the fast response magnetically controlled reactors in photovoltaic power plant[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014(2):33-39.
- [9] QIN Yu, SEBO S A. Simplified magnetic field modeling and

- calculation of large air-core reactor coils[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1996, 32(5):4281-4283.
- [10] QIN Yu, SEBO S A. Accurate evaluation of the magnetic field strength of large substation air-core reactor coils [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13 (4):1114-1119.
- [11] YU Q, SEBO S A. Calculation accuracy of the planar filament current loop stack model of large air-core reactor coils [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33 (5): 3313-3315.
- [12] 杜华珠, 文习山, 鲁海亮, 等. 35 kV 三相空心电抗器组的磁场分布[J]. 高电压技术, 2012(11):2858-2862.
DU Huazhu, WEN Xishan, LU Hailiang, et al. The magnetic field distribution of 35 kV three-phase air core reactor group[J]. High Voltage Engineering, 2012(11):2858-2862.
- [13] 毛启武, 曾庆赣. 空心与铁心电抗器工频磁场测量与分析[J]. 高电压技术, 2003, 29(4):49-50.
MAO Qiwu, ZENG Qinggan. Asurement and analysis of the power frequency magnetic field about hollow core reactor[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(4):49-50.
- [14] 倪光正. 工程电磁场数值计算[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.
- [15] DAWALIBI F. Electromagnetic fields generated by overhead and buried short conductors. Part 1:Single conductor[J]. Power Engineering Review, 1986, PER-6(10): 32-33.
- [16] DAWALIBI F, DONOSO F. Integrated analysis software for grounding, EMF, and EMI[J]. IEEE Computer Applications in Power, 1993, 6(2):19-24.
- [17] SES Technologies. CDEGS user manual[K]. Montreal:SES Technology, 2005.
- [18] 国家环境保护总局. HJ/T 24-1998 500 kV 超高压送变电工程电磁辐射环境影响评价技术规范[S]. 北京:中国环境科学, 1999.
State Environmental Protection Administration. HJ/T 24-1998 Technical regulations on environmental impact assessment of electromagnetic radiation produced by 500 kV ultra high voltage transmission and transfer power engineering[S]. Beijing:China Environmental Science, 1999.
- [19] 季 娟, 俞集辉, 袁一飞, 等. 空心电抗器磁场分布和防护体架设研究[J]. 高压电器, 2009, 45(6):61-64.
JI Juan, YU Jihui, YUAN Yifei, et al. The distribution of magnetic field and protection erection of hollow reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6):61-64.
- [20] 李 丽, 刘嘉文. 35 kV 并联电抗器工频电磁场分布特性研究[J]. 电力科技与环保, 2012, 1(1):5-6.
LI Li, LIU Jiawen. The characteristics of power frequency electromagnetic field distribution with 35 kV shunt reactor[J]. Electric Power Environmental Protection, 2012, 1(1):5-6.
- [21] 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(12):2960-2965.
LI Yongming, XU Luwen, YU Jihui, et al. The suppression of the power frequency magnetic field in 35 kV dry hollow reactor[J]. High Voltage Engineering, 2010(12):2960-2965.
- [22] 汪泉弟, 张 艳, 李永明, 等. 干式空心电抗器周围工频磁场分布[J]. 电工技术学报, 2009, 24(1):8-13.
WANG Quandi, ZHANG Yan, LI Yongming, et al. The power frequency magnetic field distribution around dry-type air-core reactor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(1):8-13.
- [23] 阎秀格, 杨桂平, 洛君婷, 等. 空心电力电抗器的磁场研究与环流计算[J]. 变压器, 2010, 6(6):1-4.
YAN Xiuke, YANG Guiping, LUO Junting, et al. The calculation of magnetic field and circulation of air core power reactor[J]. Transformer, 2010, 6(6):1-4.
- [24] 刘学军. 三相干式空心电抗器的磁场计算[J]. 科技信息, 2010(14):516.
LIU Xuejun. Calculation the magnetic field of three-phase dry-type hollow reactor[J]. Science & Technology Information, 2010(14):516.
- [25] QIN Yu, SEBO S A. Simplified magnetic field modeling and calculation of large air-core reactor coils [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1996, 32(5):4281-4283.
- 徐禄文(1968—), 男, 主任工程师, 主要研究领域为电网环保和电力系统电磁兼容。