

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.02.012

油浸式空心磁屏蔽电抗器电感计算的研究

刘克彬, 杨宇环, 商涛, 谭桂新, 边海峰

(北京电力设备总厂, 北京 102401)

摘要: 基于解析法与 Ansoft 电磁场仿真分析相结合的方式计算油浸式空心磁屏蔽电抗器的电感, 设计制造样机, 并通过对样机的试验验证了电感理论计算的准确性。

关键词: 空心磁屏蔽电抗器; 电感计算; Ansoft; 样机制造; 试验验证

Research of the Inductance Calculation for Air-core Magnetic Shielding Reactor

LIU Kebin, YANG Yuhuan, SHANG Tao, TAN Guixin, BIAN Haifeng

(Beijing Power Equipment Group, Beijing 102401, China)

Abstract: Based on the analytical method and the Ansoft electromagnetic field simulation, the inductance for air-core magnetic shielding reactor is calculated. The proto-type reactor is designed and manufactured. And the accuracy of theoretical calculation is verified through the experimental validation.

Key words: air-core magnetic shielding reactor; inductance calculation; Ansoft; proto-type manufacturing; experimental validation

0 引言

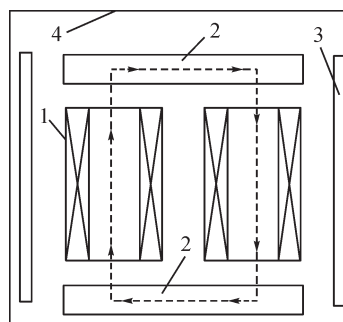
油浸式空心磁屏蔽电抗器是一种新型环保型的电抗器, 这类电抗器兼具铁心电抗器与空心电抗器的优点于一身, 该种结构电抗器既没有空心电抗器难以克服的电磁污染, 又保证了电抗值的线性度, 同时采用油纸绝缘, 产品类型适用于电网的智能化要求, 并能适应各种恶劣环境, 具有良好的环保特性。随着智能电网技术的发展, 和环境保护意识的增强, 给此类油浸式空心磁屏蔽电抗器的发展提供了广阔的空间^[1-6]。

油浸式空心磁屏蔽电抗器电感的计算方法与空心电抗器和铁心电抗器的电感计算方法不同, 笔者设计了油浸式空心磁屏蔽电抗的产品结构, 采用解析法与 Ansoft 有限元软件仿真计算对油浸式空心磁屏蔽电抗器的电感值进行了分别计算, 同时制作了样机, 通过试验验证了计算方法的准确性。

1 解析法计算空心磁屏蔽电抗器电感

单相油浸磁屏蔽空心电抗器结构示意图见图

1, 电抗器包括两个线圈绕组、上、下铁轭磁屏蔽、油箱磁屏蔽与油箱。电抗器的两个(单相电抗器)线圈两端放置铁轭把磁路联接起来, 构成了电抗器的基本磁路部分, 主磁通沿着图中 1 虚线部分流通, 同时存在向油箱磁屏蔽中泄漏的漏磁通部分^[7-14]。



1—线圈; 2—硅钢片铁轭; 3—硅钢片磁屏蔽; 4—油箱。

图 1 单相油浸磁屏蔽空心电抗器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of single phase air-core magnetic shielding reactor

主电抗计算式为

$$X_z = \frac{k_x \cdot f \cdot \pi^2 \cdot N^2 \cdot S_x}{H_c} \times 10^{-7} \quad (1)$$

式(1)中: k_x 为电抗计算系数; N 为线圈匝数; S_x 为主磁通截面积; H_c 为窗高。

漏电抗计算式为

$$X_0 = \frac{k_x \cdot f \cdot p_a \pi^2 \cdot N^2 \cdot S_0}{H_x} \times 10^{-7} \quad (2)$$

式(2)中: p_a 为洛式系数; S_0 为漏磁通截面积; H_x 为电抗高度。

电抗器的电抗值为主电抗与漏电抗之和,再根据公式 $X=\omega \cdot L$ 即可求解出电感值。

2 Ansoft 计算空心磁屏蔽电抗器电感

应用 Ansoft 有限元分析软件计算油浸式空心磁屏蔽电抗器电感值,未知量(也称自由度)主要是节点矢量磁位,电感值可以由这些自由度导出。

考虑到实际的电抗器在空间结构上不具有整体的轴对称性,以往使用的二维或轴对称模型只能视作电抗器某些局部场域的近似。因此,笔者主要用三维模型计算电抗器电感量,在建立电抗器计算模型时,做了以下几点假设。

- 1)电抗器关于绕组中心连线前后对称;
- 2)所有场量均随时间正弦变化,不考虑高次谐波;
- 3)忽略位移电流的影响,铁心材料赋予单值磁化曲线。

笔者取实际样机建立电抗器的数学模型,激励按 50 Hz 工频计算,使用能量法进行电感矩阵值计算,从而计算出电感值^[15-23]。

3 样机计算与试验

设计样机参数:额定电压为 400 V,额定电感值为 10 mH,流入电抗器的基波电流为 17.55 A。单柱线圈匝数为 140 匝,窗高为 231 mm,线圈内径 266 mm,线圈外径为 281 mm,两柱线圈采用串联结构,磁屏蔽厚度为 20 mm。

以上述样机为例,通过解析法与 Ansoft 电磁场仿真计算样机电感值,并通过样机试验验证计算方法的准确性。

3.1 解析法计算结果

根据式(1)、(2),单柱线圈的主电抗为 1.562 8 Ω ,漏电抗为 0.071 3 Ω ,两柱线圈串联后,总电抗为 3.268 2 Ω ,电感值为 10.4 mH。

3.2 Ansoft 电磁场仿真计算

单相计算模型见图 2,单相电抗器磁力线分布见图 3,单相电抗器磁密分布见图 4。

从图 3 中可以看出,磁力线主要在两个线圈与上、下铁轭磁屏蔽中流通;从图 4 中可以看出,磁密主要集中在上、下铁轭磁屏蔽的中部。

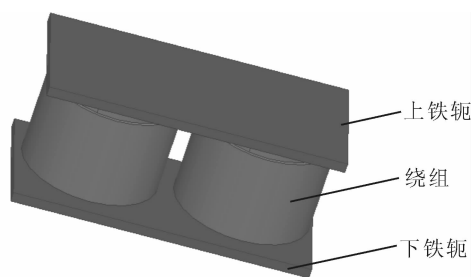


图 2 单相计算模型

Fig. 2 Calculation model of single phase reactor

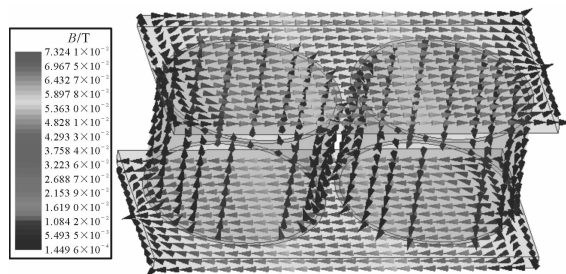


图 3 单相电抗器磁力线分布

Fig. 3 Distribution of magnetic of the single phase reactor

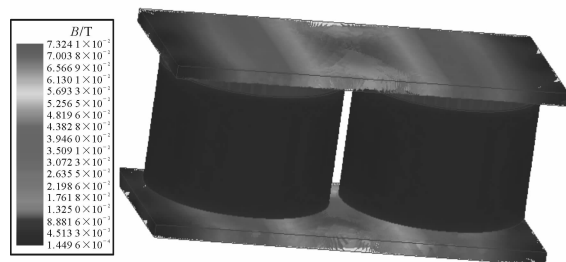


图 4 单相电抗器磁密分布

Fig. 4 Distribution of magnetic density of the single phase reactor

Ansoft 仿真计算结果见表 1(总电感值为两个线圈的自感与相互间的互感之和,即 10.54 mH)。

表 1 样机仿真计算电感值

Table 1 Simulation results of inductance value mH

线圈	自感	互感
1	3.82	1.45
2	3.82	1.45

3.3 样机试验

单相油浸式空心磁屏蔽电抗器样机器身部分见图 5,试验时线圈采用串联结构。

通过施加电压,计算出单相油浸式空心磁屏蔽电抗器电感值,电感值见表 2(电抗和电感的平均值分别为 3.191 7 Ω 和 10.17mH)。

3.4 样机计算值与试验值偏差

样机电感计算值与试验值对比见表 3。

从表 3 中可以看出,解析法计算与仿真计算的电感值与试验值偏差较小,说明两种计算方法均能



图 5 单相电抗器样机

Fig. 5 Prototype of single phase air-core magnetic shielding reactor

表 2 样机试验电感值

Table 2 Tested value of the prototype

参数	数值		
电压/V	63.97	91.88	125.52
电流/A	20.00	28.78	39.42
电抗/ Ω	3.198 5	3.192 4	3.184 2
电感/mH	10.19	10.17	10.14

表 3 电感值对比

Table 3 Contrast of inductance value

计算方法	计算值/mH	试验值/mH	偏差/%
解析法	10.40	10.17	2.3
仿真法	10.54		3.6

满足产品的设计要求。

3.5 磁屏蔽厚度对电感值的影响

在保证样机线圈结构不变的情况下,通过调整上、下铁轭的高度查看线圈电感值的变化,计算结果见表 4。

表 4 不同磁屏蔽厚度下电感值比较

Table 4 Contrast of inductance value in different thickness magnetic shielding

参数	数值				
磁屏蔽厚度/mm	10	20	30	40	50
线圈电感值/mH	10.535	10.540	10.542	10.543	10.545

计算结果表明,磁屏蔽厚度对于线圈电感值影响很小。

3.6 三相样机计算值与试验值对比

为了验证三相产品三相之间的互感影响,设计了三相油浸式空心磁屏蔽电抗器样机,并通过 Ansoft 电磁场仿真计算其电感值。三相计算模型见图 6,三相电抗器磁密分布见图 7,三相油浸式空心磁屏蔽电抗器样机见图 8。

三相样机试验电感值与计算值比较见表 5。

通过表 5 的数据对比可以看出,Ansoft 电磁场

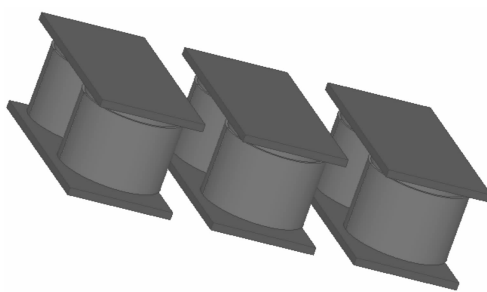


图 6 三相计算模型

Fig. 6 Calculation model of three phases reactor

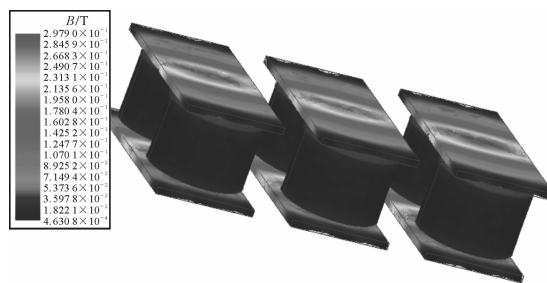


图 7 三相电抗器磁密分布

Fig. 7 Distribution of magnetic density of the three phases reactor



图 8 三相油浸式空心磁屏蔽电抗器样机

Fig. 8 Prototype of three phases air-core magnetic shielding reactor

表 5 三相样机试验电感值与计算值比较

Table 5 Contrast of inductance value of three phases reactor

试验值	A相	B相	C相
电压/V	67.70	67.80	69.20
电流/A	21.09	20.99	21.63
电抗/ Ω	3.21	3.23	3.20
电感/mH	10.21	10.30	10.20
仿真值/mH	10.37	10.47	10.37
偏差/%	3.00	3.30	3.10

仿真计算的电感值与样机的试验值偏差较小,仿真计算能够满足产品的设计要求。同时与表 2 中的单相样机试验值相比较,三相之间存在互感,三相样机的电感有一定的增加。

4 结语

针对油浸式空心磁屏蔽电抗器,进行了解析法计算与 Ansoft 电磁场仿真分析计算,同时设计制造了产品样机,并对样机进行了电感值的测量试验,通过对比,验证了两种计算方法的准确性,表明上述两种计算方法基本可以满足产品的设计要求,为油浸式空心磁屏蔽电抗器的研制提供了理论基础与设计经验。

参考文献:

- [1] 罗文骥. 环保型全磁屏蔽空心电抗器的研制[J]. 陕西科技大学学报(自然科学版), 2007, 25(4): 44-47.
LUO Wenji. Research and manufacture on environment-friendly and full magnetic shielded hollow reactor[J]. Journal of Shaanxi University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2007, 25(4): 44-47.
- [2] 李韶. 使用干式磁屏蔽电抗器的优势分析[J]. 广西轻工业, 2010, 26(11): 43.
LI Shao. The analysis of the advantage of using dry magnetic shield reactor[J]. Guangxi Journal of Light Industry, 2010, 26(11): 43.
- [3] 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. The magnetic field calculation for three phase dry air type reactor[J]. Science & Technology Information, 2010(14): 516.
- [4] 陈超强, 文云山, 张孝军, 等. 空芯电抗器磁场对周围设施影响的测试研究[J]. 高电压技术, 2001, 27(3): 19-21.
CHEN Chaoqiang, WEN Xishan, ZHANG Xiaojun, et al. Study and measurement on the influence of magnetic field of dry-type air core reactor on adjacent metal loop and communication apparatus[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(3): 19-21.
- [5] 刘东升, 胡国龙, 郑泉. 壳式空心并联电抗器的三维磁场与电抗计算[J]. 变压器, 2008, 45(4): 20-21.
LIU Dongsheng, HU Guolong, ZHENG Quan. The 3 d magnetic field and reactance calculation for shell type air shunt reactor[J]. Transformer, 2008, 45(4): 20-21.
- [6] 罗兵. 磁屏蔽空心电抗器[J]. 电力电容器, 2007, 28(5): 41-43.
LUO Bing. Magnetism-screened air-core reactor[J]. Power Capacitor, 2007, 28(5): 41-43.
- [7] 赵亮, 张建军, 梁东. 干式带气隙铁心电抗器电感计算方法[J]. 高压电器, 2012, 48(6): 61-64.
ZHAO Liang, ZHANG Jianjun, LIANG Dong. Inductance calculation method for dry-type gapped-iron core reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(6): 61-64.
- [8] 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.
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.
- [9] 李民族, 李颖, 敖伟智. 带耦电抗器电磁结构设计[J]. 高压电器, 2011, 47(4): 57-63.
LI Minzu, LI Ying, AO Weizhi. Design of the electromagnetism structure of reactor with coupling coil[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(4): 57-63.
- [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]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12): 2960-2965.
- [11] 冯利君. 电抗器工频干扰磁场屏蔽研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2007.
FWNG Lijun. The studies of power frequency magnetic shielding of reactor[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2007.
- [12] 童灵华, 郑建梓. 35 kV 干式电抗器磁场对二次电缆屏蔽层感应电流的影响[J]. 浙江电力, 2008, 27(5): 54-56.
TONG Linghua, ZHENG Jianzi. Influence of 35 kV dry-type air-core reactor on induced current of secondary cable shielding layer[J]. Zhejiang Electric Power, 2008, 27(5): 54-56.
- [13] 吴罗兰. 干式磁屏蔽电抗器优势分析[J]. 科技致富向导, 2012(16): 375.
WU Luolan. The analysis of the advantage for dry type magnetic shield reactor[J]. Wizard Magazine Rich Technology, 2012(16): 375.
- [14] 郎为民, 姜斌. 电磁屏蔽原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [15] 刘全峰, 李勤, 姚恩祥. 电容器组串联用干式半铁心电抗器磁场分布特性的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2010, 31(2): 21-24.
LIU Quanfeng, LI Qin, YAO Enxiang. Study on the magnetic field distribution of dry-type half-iron core reactor for series connection of capacitor bank[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2010, 31(2): 21-24.
- [16] 杜淑文, 宋春燕, 祝春捷, 等. 10 kV 空心电抗器周围工频磁场的简化计算及影响范围[J]. 高压电器, 2006, 42(3): 179-182.
DU Shuwen, SONG Chunyan, ZHU Chunjie, et al. Simplified calculation and coverage of power frequency magnetic field around 10 kV air-core reactors[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(3): 179-182.

- tric fields around a 1 000 kV UHV substation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2356-2362.
- [18] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- YAN Zhang, ZHU Deheng. High voltage and insulation technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [19] 俞翔霄, 陆惠英. 环氧树脂电绝缘材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- YU Xiangxiao, LU Huiying. Electrical insulation materials of epoxy resin[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007.
- [20] 温红旗, 王荣亮, 房克荣. 变压器套管末屏接地型式存在的问题及解决方法[J]. 变压器, 2014, 51(2): 72-73.
- WEN Hongqi, WANG Rongliang, FANG Kerong. Problems and solution for grounding types of transformer bushing end shield[J]. Transformer, 2014, 51(2): 72-73.
- [21] 周海滨, 彭翔, 陈禾. 变压器套管在线监测装置运行风险分析[J]. 变压器, 2014, 51(3): 58-60.
- ZHOU Haibin, PENG Xiang, CHEN He. Risk analysis of Transformer bushing on-line monitoring device[J]. Transformer, 2014, 51(3): 58-60.
- [22] 田学静, 王鑫, 王建功, 等. 高速动车组牵引变压器T型插头放电烧损分析及对策[J]. 机车电传动, 2013(6): 105-106.
- TIAN Xuejing, WANG Xin, WANG Jiangong, et al. Analysis of type-T termination burning of traction transformer of high-speed train[J]. Electric Drive For Locomotives, 2013(6): 105-106.
- [23] 刘芹. 复合绝缘子内部缺陷污秽条件下电场仿真研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- LIU Qin. Electric field simulation study of composite insulators with internal defects and under pollution conditions respectively[D]. Guangzhou: South China University of technology, 2012.
- [24] ROKUNOHE T, KATO T, HIROSE M, et al. Development of insulation technology in compact SF₆ gas-filled bushings: development of compact 800 kV SF₆ gas-filled bushings[J]. Electrical Engineering in Japan, 2010, 171(1): 19-27.
- 邓志祥(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力设备绝缘结构的优化设计,

(上接第77页)

- [17] 季娟, 俞集辉, 袁一飞, 等. 空心电抗器磁场分布和保护体架设研究[J]. 高压电器, 2009, 45(6): 61-64.
- JI Juan, YU Jihui, YUAN Yifei, et al. Research of the magnetic field distribution and protection body setting for air-core reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 61-64.
- [18] 季娟, 俞集辉, 杨光, 等. 电抗器磁场干扰及屏蔽研究[C]//电工理论与新技术学术年会论文集. 重庆: 中国电机工程学会, 中国电工技术学会, 2008: 44-46.
- JI Juan, YU Jihui, YANG Guang, et al. The research of the magnetic interference and shielding for reactor[C]//Annual Meeting of Electrical Engineering Theory and New Technology Academic. Chongqing: CSEE, CES, 2004: 44-46.
- [19] 刘国强, 赵凌云, 蒋继娅. Ansoft 工程电磁场有限元分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- [20] 程汉湘, 何绍洋, 黄超宪, 等. 磁控电抗器的电磁特性分析[J]. 变压器, 2013, 50(8): 16-18.
- CHENG Hanxiang, HE Shaoyang, HUANG Chaoxian, et al. Electromagnetic characteristic analysis of magnetically controlled reactor[J]. Transformer, 2013, 50(8): 16-18.
- [21] 李霞, 刘燕, 肖勋. 关于干式空心电抗器试验的几个问题[J]. 变压器, 2013, 50(2): 57-59.
- LI Xia, LIU Yan, XIAO Xun. Several questions of dry-type air-core reactors test[J]. Transformer, 2013, 50(2): 57-59.
- [22] 刘东升, 胡国龙, 郑泉, 等. 空心接地电抗器的磁场和电抗计算[J]. 变压器, 2008, 45(5): 5-7.
- LIU Dongsheng, HU Guolong, ZHENG Quan, et al. Calculation of magnetic field and reactance of earth reactor with air core[J]. Transformer, 2008, 45(5): 5-7.
- [23] 王丽君, 刘卓. 干式空心串联电抗器耐受短路电流能力计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 35(4): 44-48.
- WANG Lijun, LIU Zhuo. Calculation of withstand short circuit current ability of dry core series reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(4): 44-48.
- 刘克彬(1983—), 男, 工程师, 主要从事电抗器及无功补偿装置产品的研发与设计。