

智能型 JB 柜中配电变压器集成滤波电抗器的应用研究

谷秀甜¹, 范瑞祥², 许加柱¹, 徐 宁², 邓才波², 徐在德²

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 国网江西省电力公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096)

摘要:一体化智能型 JB 柜电力电子装置能够对无功、不平衡、谐波等多种电能质量问题进行有效治理。针对一体化智能型 JB 柜物理空间有限且滤波装置中的空心电抗器体积较大的问题, 提出一种将滤波空心电抗器集成于配电变压器的方案, 并将其应用于 JB 柜中, 可减小装备的占地面积, 同时也提高了一体化智能型 JB 柜的集成度。对配电变压器集成滤波电抗器的绕组结构布置、电磁解耦电路、集成滤波电抗器的电感值计算方法进行详细介绍, 并对该新型配电变压器进行三维有限元建模及仿真。结果表明, 集成滤波空心电抗器与变压器绕组之间具有良好的低耦合度和高解耦度, 计算所得滤波电抗器的电感值偏差在国家标准允许的范围内, 验证了集成滤波电抗器配电变压器模型的正确性。

关键词:一体化智能型 JB 柜; 配电变压器集成滤波电抗器; 电磁解耦电路; 电感值计算方法; 有限元建模

中图分类号: TM 477

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2019.07.031

0 引言

传统的配电变压器出口 JB 柜一般采用分组投切电容器结构, 存在投切涌流大、电容器及投切开关的寿命有限等问题; 其只能对无功进行补偿, 而且只能分组投切, 补偿效果无法做到无级、无差; 对解决三相不平衡问题无能为力; 容易与电网阻抗发生并联谐振, 造成电容器甚至配电变压器损坏^[1-4]。而采用一体化智能型 JB 柜电力电子装置, 能够无级、无差地对无功、不平衡、谐波等多种电能质量问题进行有效治理。其基本原理是通过检测不平衡和非线性负载中的无功、不平衡及谐波电流, 然后通过脉宽调制(PWM)和电力功率开关技术, 逆变产生大小相等、相位相反的量进行叠加, 使被补偿对象中的无功电流、负序/零序电流及谐波电流流入一体化智能型 JB 柜中, 从而提升电网侧的电能质量^[5-9]。一体化智能 JB 柜中装设输出滤波器的目的是为了滤除逆变器产生的高频开关谐波, 该输出滤波器采用有源电力滤波器(APF), APF 采用空心电抗器, 它具有以下特点: ①空心电抗器的电感值不随电流的变化而变化, 不存在磁饱和现象, 电感的线性度好; ②当电抗器发生短路时, 环氧树脂浸渍的玻璃纤维包绕的包封能够承受较大的短路电动力, 提高了整个线圈的抗短路电流能力; ③空心电抗器的包封之间有通风槽, 具有良好的散热性能; ④电抗器的线圈导线可采用某些特定的金属材料, 如铝、铜导线等, 这些特定的材料可以有效减小涡流损耗; ⑤电抗器的结构简单、维护方便、可靠性高、噪音低, 能长期在户外运行; ⑥同时, 空心电抗器的体积较大, 运行时会在周围空间产生强散发磁场, 对其他电气设备产生磁场干扰^[10-13]。

针对滤波空心电抗器所存在的占地面积大、磁场辐射范围广的缺陷, 以及将其应用于一体化智能型 JB 柜物理空间有限的场合中会存在技术难点的问题, 本文提出一种将滤波空心电抗器集成于配电变压器并将其应用于 JB 柜中的方案, 通过特殊的绕组排布方式将空心电抗器集成于配电变压器中, 实现了减小装备占地面积、降低装备整体噪音的目的, 并对配电变压器集成滤波电抗器电感值的计算方法做了介绍, 搭建了该变压器的三维有限元建模并进行了相关的仿真分析。

1 一体化智能型 JB 柜系统

一体化智能型 JB 柜分为配电部分和补偿部分。配电部分主要由多路负荷开关构成, 直接为用户供电; 补偿部分本质上为 1 台三相四线制 APF, 由三相四线制电压型逆变器输出经过快速熔断器、三相四线输出滤波电抗器及三相主断路器, 通过交流接触器控制的缓冲并网电阻连接到电网, 风扇、控制系统、保护及检测部分电源采用直流电源, 由主断路器进线端供电。

一体化智能型 JB 柜系统的结构如图 1 所示, 其现场应用图见附录中图 A1。图 1 中主要包括三相交流电源、10 kV/400 V 配电变压器、非线性负载、APF 和相关的驱动、控制电路等。由于受 JB 柜物理空间的限制, 本文针对 APF 中空心电抗器体积大的缺点, 提出一种集成滤波电抗器于配电变压器的方案, 该方案的详细介绍见第 2 节。

2 配电变压器集成滤波电抗器方案

本文设计了 1 台容量为 200 kV·A、变比为 10 kV/400 V 的配电变压器集成滤波电抗器的方案, 该配电变压器的相关参数如下: 额定容量为 200 kV·A,

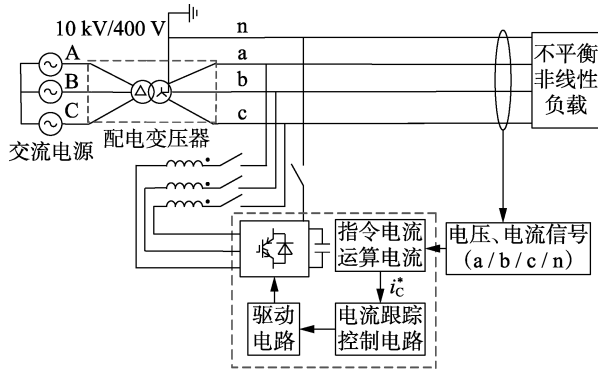


图 1 一体化智能型 JB 柜系统的结构图

Fig.1 Structure diagram of integrated intelligent JB cabinet system

高压绕组的额定电压、额定电流、匝数分别为 10 kV、11.55 A、1 367，低压绕组的额定电压、额定电流、匝数分别为 0.4 kV、303.86 A、30，集成滤波绕组的额定电流、匝数分别为 150 A、70，电抗器的电感设计值为 1 mH，铁芯材料为 30Q130，铁芯磁密为 1.43 T，铁芯直径为 180 mm，绕组型式采用同心式。

图 2 为配电变压器集成滤波电抗器的三相绕组接线示意图及单相绕组结构布置图，图 2(a)中的高压绕组采用三角形接法，主要构成 3 次谐波的通路，滤除 3 次谐波，低压绕组采用星形接法。为了克服 JB 柜物理空间有限的缺点，并提高整个系统的集成度，本文提出一种配电变压器集成滤波电抗器的方案，其绕组布置如图 2(b)所示。

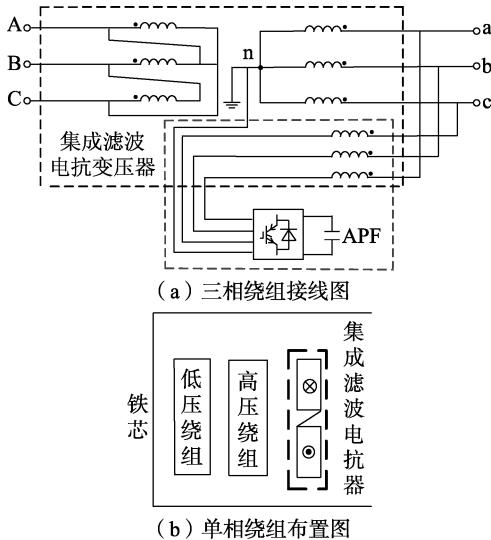


图 2 集成滤波电抗器配电变压器的三相绕组接线图及单相绕组布置图

Fig.2 Three-phase winding connection diagram and single-phase winding layout of distribution transformer integrated with filtering reactor

3 电磁去耦等效电路

配电变压器集成滤波电抗器的单相电磁去耦等效电路图如图 3 所示。

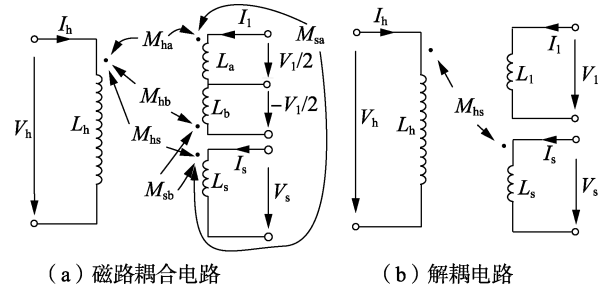


图 3 配电变压器集成滤波电抗器的单相电路等效图

Fig.3 Equivalent single-phase circuit of distribution transformer integrated with filtering reactor

忽略所有绕组的电阻，根据图 3(a)可得：

$$\begin{cases} V_h = j\omega(L_h I_h + M_{hs} I_s + M_{ha} I_1 - M_{hb} I_1) \\ V_s = j\omega(M_{hs} I_h + L_s I_s + M_{sa} I_1 - M_{sb} I_1) \\ 0.5V_1 = j\omega(M_{ha} I_h + M_{sa} I_s + L_a I_1 - M_{ab} I_1) \\ -0.5V_1 = j\omega(M_{hb} I_h + M_{sb} I_s + M_{ab} I_1 - L_b I_1) \end{cases} \quad (1)$$

由于集成滤波电抗器绕组 1 是由 2 个子绕组 a 和 b 组成，故将式(1)变换后得到方程式(2)。

$$\begin{cases} V_h = j\omega[L_h I_h + M_{hs} I_s + (M_{ha} - M_{hb}) I_1] \\ V_s = j\omega[M_{hs} I_h + L_s I_s + (M_{sa} - M_{sb}) I_1] \\ V_1 = j\omega[(M_{ha} - M_{hb}) I_h + (M_{sa} - M_{sb}) I_s + (L_a + L_b - 2M_{ab}) I_1] \end{cases} \quad (2)$$

假设忽略所有的互漏感，且变压器铁芯未饱和。令 $N_i (i = a, b)$ 为构成集成滤波电抗器子绕组的匝数，且 $N_a = N_b$ ，则可以得到式(3)、(4)^[14-16]。

$$\begin{cases} M_{ha} = M_{hb} = N_h N_a / R_c \\ M_{sa} = M_{sb} = N_s N_a / R_c \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} L_a = L_{la} + N_a^2 / R_c \\ M_{ab} = N_a^2 / R_c \\ L_b = L_{lb} + N_a^2 / R_c \end{cases} \quad (4)$$

将式(3)、(4)代入式(2)可以得到式(5)：

$$\begin{cases} V_h = j\omega L_h I_h + j\omega M_{hs} I_s \\ V_s = j\omega M_{hs} I_h + j\omega L_s I_s \\ V_1 = j\omega(L_{la} + L_{lb}) I_1 = j\omega L_1 I_1 \end{cases} \quad (5)$$

其中， ω 为角频率； V_h 为变压器高压绕组两端的电压； V_s 为变压器低压绕组两端的电压； $0.5V_1$ 、 $-0.5V_1$ 分别为构成集成滤波电抗器的 2 个子绕组 a、b 两端的电压， V_1 为集成滤波电抗器 1 两端的电压； L_h 为高压绕组的自感； L_s 为低压绕组的自感； L_a 和 L_b 分别为构成集成滤波电抗器的 2 个子绕组 a、b 的自感； L_{la} 、 L_{lb} 分别为绕组 a 和 b 的漏电感； L_1 为集成滤波电抗器 1 的自感； $M_{ij} (i \neq j \in \{h, s, a, b\})$ 为绕组 i 与绕组 j 之间的互感，且有 $M_{ij} = M_{ji}$ ； $I_n (n \in \{h, s, 1\})$ 为对应绕组的电流； R_c 为变压器的磁阻； N_h 、 N_s 分别为变压器高压绕组、低压绕组的匝数。

根据式(5),配电变压器集成滤波电抗器的简单等效电路如图3(b)所示。式(5)及图3(b)表明,采用图2(b)所示的绕组布置结构,配电变压器与集成滤波电抗器之间可以实现电磁解耦,即使它们共用同一个铁芯。

此外,一个集成滤波电抗器的电感值是由构成它的2个子绕组的漏磁通决定。利用相关技术对变压器的漏电感进行计算,可以得到集成滤波电感值的计算公式,具体见第4节。

4 变压器集成滤波电抗器电感值计算方法

4.1 变压器集成滤波电抗器的工程设计方法

图4为集成滤波电抗器的物理尺寸图。图中绕组W由2个子绕组W₁和W₂反向串联构成,两子绕组W₁和W₂的绕组匝数相同均为N,r为铁芯外径与绕组内径之间的距离,r_{av}为绕组W的平均半径,H_x为绕组W的横向宽度,a₁为子绕组W₁和W₂的高度,a₀为W₁和W₂之间的间距。

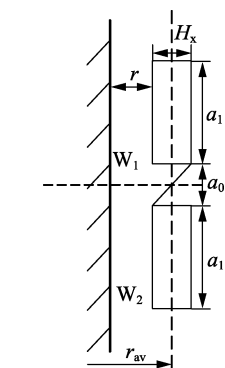


图4 集成滤波电抗器的物理尺寸

Fig.4 Physical dimensions of integrated filtering reactor

根据图4所描述的尺寸,滤波电抗器的电感值可由式(6)计算得到。

$$L = \frac{2\pi\mu_0 N^2 \rho}{H_x} S_D \quad (6)$$

$$\begin{cases} \rho = 1 - \frac{1}{\pi u} (1 - e^{-\pi u}) [1 - 0.5e^{-2\pi v} (1 - e^{-\pi u})] \\ u = \frac{H_x}{a_0 + 2a_1} \\ v = \frac{r}{a_0 + 2a_1} \\ S_D = r_{av} (a_0 + 2a_1 / 3) \end{cases} \quad (7)$$

其中, μ_0 为真空磁导率,其值为 $4\pi \times 10^{-7}$ H/m; ρ 为洛氏系数; S_D 为漏磁等效面积。

根据配电变压器的结构、尺寸,表1给出集成滤波空心电抗器的相关参数,由式(6)、(7)计算得到集成滤波空心电抗器的电感值 $L=1.0808$ mH。

表1 集成滤波电抗器的参数

Table 1 Parameters of integrated filtering reactor

参数	数值	参数	数值	参数	数值
N/匝	35	a ₀ /mm	26.6	r/mm	100.5
a ₁ /mm	124	H _x /mm	36.5	r _{av} /mm	208.75

4.2 变压器集成滤波电抗器的降阶电感矩阵法

根据集成滤波电抗器配电变压器样机的结构尺寸和绕组排布结构,在Ansoft/Maxwell中建立其三维修有限元模型,如图5所示。

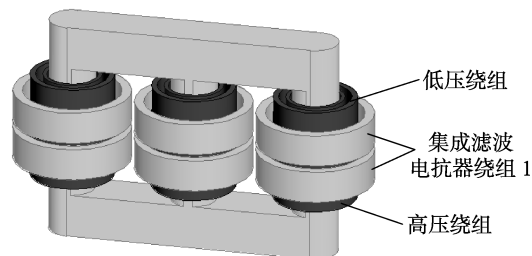


图5 集成滤波电抗器配电变压器的三维修有限元模型

Fig.5 Three dimensional finite element model of distribution transformer integrated with filtering reactor

利用Ansoft/Maxwell静磁场计算器可以计算得到上述所建变压器所有绕组的电感矩阵和电感耦合系数矩阵,为了简单起见,本文只给出了变压器A相一次绕组、二次绕组和一个集成滤波电抗器绕组(滤波电抗器的2个线圈反向串联看作一个统一整体)的电感矩阵和电感耦合系数矩阵,见式(8)、(9)。

$$M = \begin{bmatrix} L_h & M_{hs} & M_{hl} \\ M_{sh} & L_s & M_{sl} \\ M_{lh} & M_{ls} & L_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.33 \times 10^6 & -29\ 186 & -0.004\ 784\ 5 \\ -29\ 186 & 640.55 & 0 \\ -0.004\ 784\ 5 & 0 & 1.014\ 8 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_h & k_{hs} & k_{hl} \\ k_{sh} & k_s & k_{sl} \\ k_{lh} & k_{ls} & k_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -0.999\ 94 & -4.118\ 4 \times 10^{-6} \\ -0.999\ 94 & 1 & 0 \\ -4.118\ 4 \times 10^{-6} & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

根据式(8)可以得到A相集成滤波电抗器的电感值 $L_{IA}=1.0148$ mH,同理,可得到变压器B相、C相集成滤波电感器的电感值分别为 $L_{IB}=1.0388$ mH、 $L_{IC}=1.0147$ mH,三相配电变压器集成滤波电抗器的电感平均值为 $L_{rav}=1.0227$ mH。

集成滤波电抗器电感的设计值、计算值及仿真值如表2所示。可见,不同方法计算所得集成滤波电抗器的电感值都非常接近设计值,且最大偏差在8.1%以内,符合国家标准GB 1094.1—2013的要求,其中变压器电感值允许的偏差为 $\pm 10\%$ 以内。相应地,由式(9)所示电感耦合系数矩阵K可看出,集成滤波电抗器与变压器绕组之间的电磁耦合度小于 10^{-6} ,即这些很小的磁耦合值表示本文所提方法对集成滤波电抗器与变压器绕组之间具有良好的解耦

性能,说明了集成滤波电抗器参数计算方法的合理性和正确性。

表2 集成滤波电抗器电感的设计值、计算值及仿真值

Table 2 Designed, calculative and simulative inductance value of integrated filtering reactor mH

电抗器	设计值	计算值	仿真值
集成滤波电抗器 1	1	1.080 8	1.022 7

5 新型一体化智能型JB柜系统

图6为变压器集成滤波电抗器于一体化智能型JB柜的系统图。图6中主要包括三相交流电压源、10 kV/400 V集成滤波电抗器配电变压器、非线性负载、APF以及相关的驱动、控制电路等。

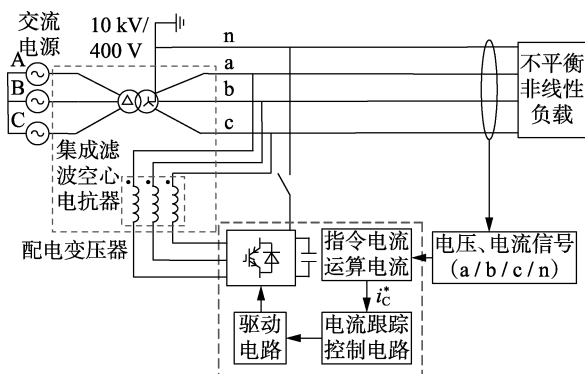


图6 新型一体化智能型JB柜系统结构图

Fig.6 Structure diagram of novel integrated intelligent JB cabinet system

对比图1和图6可发现,图1中LC滤波器中的空心电抗器放置于变压器外,为了避免各空心电抗器之间漏磁通的相互影响,必须在各个空心电抗器之间留出一定的空间距离,这样使得空心电抗器的占地面积进一步扩大,对应用于物理空间受限制的一体化智能型JB柜系统造成了严重的困扰;而图6所示新型一体化智能型JB柜系统将LC滤波器中的空心电抗器集成于变压器中,解决了空心电抗器占地面积大的问题。

6 结论

针对一体化智能型JB柜物理空间受限制的问题,本文提出一种配电变压器集成滤波电抗器的方案,所提方案既满足了谐波治理的要求,又能提高JB柜的集成度。本文给出了配电变压器集成滤波电抗器的绕组接线示意图及绕组布置示意图,清晰地展示了这种特殊结构变压器的实施方案;对各绕组的电磁解耦电路做了详细的公式推导;并采用工程设计方法和降阶电感矩阵法2种方法,对集成滤波电抗器的电感值进行了计算;最后通过Ansoft/Maxwell有限元软件的仿真计算,评估了集成滤波电抗器的去耦效果。结果表明,本文所提配电变压器

集成滤波电抗器具有较好的电磁解耦性能,且不同计算方法所得滤波电抗器的电感值都非常接近,偏差符合国家标准的要求。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 王名洲. 企业配电系统谐波污染及治理[J]. 油气田地面工程, 2018, 37(8): 70-72.
WANG Mingzhou. Enterprise distribution system harmonic pollution and its treatment[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2018, 37(8): 70-72.
- [2] 朱桂萍, 王树民. 电能质量控制技术综述[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(19): 28-31, 40.
ZHU Guiping, WANG Shumin. A survey on power quality control technology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(19): 28-31, 40.
- [3] 颜伟, 陈思柔, 沈海江, 等. 配变低压无功补偿装置的运行状态评估指标体系[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(4): 25-31.
YAN Wei, CHEN Sirou, SHEN Haijiang, et al. Index system of operational status evaluation for reactive-power compensation device at low-voltage side of distribution transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(4): 25-31.
- [4] 赵亚清, 刘青, 谢欢, 等. 考虑源网协调的风电场动态无功补偿装置控制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(8): 118-123.
ZHAO Yaqing, LIU Qing, XIE Huan, et al. Dynamic reactive power compensator control considering source-grid coordination for wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(8): 118-123.
- [5] 黄建强. 浅析医院建筑中谐波电流的治理[J]. 中国医院建筑与装备, 2018, 19(10): 92-95.
HUANG Jianqiang. Brief analysis of harmonic current in hospital building[J]. Chinese Hospital Architecture & Equipment, 2018, 19(10): 92-95.
- [6] 范瑞祥, 罗安, 李欣然. 并联混合型有源电力滤波器的系统参数设计及应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 106-111.
FAN Ruixiang, LUO An, LI Xinran. Parameter design and application research of shunt hybrid active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 106-111.
- [7] 成武发. 有源滤波装置适应性及可靠性分析研究[J]. 通信电源技术, 2016, 33(1): 104, 107.
CHENG Wufa. Study on adaptability and reliability of active power filter device[J]. Telecom Power Technologies, 2016, 33(1): 104, 107.
- [8] 陈国柱, 吕征宇, 钱照明. 有源电力滤波器的一般原理及应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 17-21.
CHEN Guozhu, LÜ Zhengyu, QIAN Zhaoming. The general principle of active filter and its application[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 17-21.
- [9] 范瑞祥, 马亮, 罗安, 等. 谐波与无功综合补偿装置的控制策略[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(8): 14-18.
FAN Ruixiang, MA Liang, LUO An, et al. Control strategy of synthetic harmonics and reactive power compensation equipment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(8): 14-18.
- [10] 郑莉萍, 孙强, 刘小河, 等. 干式空心电抗器设计和计算方法[J]. 电工技术学报, 2003, 18(4): 81-84, 93.
ZHENG Liping, SUN Qiang, LIU Xiaohu, et al. Design and calculation

- tion methods of dry-type air reactors [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(4): 81-84, 93.
- [11] YU Q, 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.
- [12] 李季, 罗隆福, 许加柱, 等. 磁集成地铁变压器漏抗三维有限元计算 [J]. 中国铁道科学, 2007, 28(2): 90-93.
- LI Ji, LUO Longfu, XU Jiazhu, et al. 3D finite element computation of metro traction transformer leakage with integrated magnetics [J]. China Railway Science, 2007, 28(2): 90-93.
- [13] 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.
- ZOU Liang, GONG Pan, ZHANG Li, et al. Small-scale experiment and model simplification of space magnetic fields around air-core reactors [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6): 1675-1682.
- [14] CORASANITI V F, BARBIERI M B, ARNERA P L, et al. Hybrid active filter for reactive and harmonics compensation in a distribution network [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 670-677.
- [15] 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.

- [16] KUWATA M, NOGAWA S, TAKAHASHI N, et al. Development of molded-core-type gapped iron-core reactor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(10): 4066-4068.

作者简介:



谷秀甜

谷秀甜 (1990—), 女, 湖南张家界人, 硕士研究生, 研究方向为现代电气装备的设计与多物理场分析计算 (E-mail: 839856548@qq.com);

范瑞祥 (1977—), 男, 湖南湘潭人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事有源电力滤波器、无功补偿技术方面的研究 (E-mail: ricefan117@126.com);

许加柱 (1980—), 男, 安徽来安人, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为现代电气装备的设计、优化及仿真 (E-mail: xujiazhu@126.com)。

Application of distribution transformer integrated with filtering reactor in intelligent JB cabinet

GU Xiutian¹, FAN Ruixiang², XU Jiazhu¹, XU Ning², DENG Caibo², XU Zaide²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. State Grid Jiangxi Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China)

Abstract: The power electronic device in the integrated intelligent JB cabinet can effectively deal with the power quality problems such as reactive power, unbalance, harmonic and so on. Aiming at the problem of limited physical space of integrated intelligent JB cabinet and the large volume of the air-core reactor in the filtering device, a scheme of integrating air-core reactor into distribution transformer is put forward and applied in JB cabinets, which can reduce the equipment area and improve the integration of integrated intelligent JB cabinet. The winding structure arrangement, the electromagnetic decoupling circuit and the inductance calculation method of integrated filtering reactor are introduced in detail. The three-dimensional finite element modeling and simulation of the new distribution transformer are presented. The results show that, there is a good low-coupling and high-decoupling between the integrated filtering air-core reactor and the transformer winding, and the calculated inductance deviation of the filter reactor is within the allowable range of the national standard, which verifies the correctness of the model of distribution transformer integrated with filtering reactor.

Key words: integrated intelligent JB cabinet; distribution transformer integrated with filtering reactor; electromagnetic decoupling circuit; calculation method of inductance; finite element modeling

附 录



图 A1 现场应用图

Fig.A1 Field application