

200 kV 磁控谐振变压器试验系统研究

陆春玉¹, 王言¹, 潘志城¹, 陈柏超², 田翠华², 陈博², 吴煜文²

(1. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司检修试验中心, 广东 广州 510700;

2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对目前交流工频耐压试验装备存在补偿电抗器容量不可调的不足, 研制出 200 kV, 100 kV·A 磁控谐振试验变压器。该试验系统集成升压、被试品电容平滑无级补偿于一体, 结构紧凑、精准补偿。本文给出了该系统的结构组成与基本原理, 建立了仿真模型, 研究了 200 kV 磁控谐振试验系统运行特性, 并验证了该试验系统的升压和自动调谐能力。当被试品电容范围小于 16 000 pF 时有较好的调谐效果。通过 200 kV 样机试验, 验证了该试验系统的可行性。

关键词: 高压试验电源; 磁控谐振变压器; 并联谐振

DOI: 10.12067/ATEEE1910022

文章编号: 1003-3076(2020)07-0016-08

中图分类号: TM83

1 引言

工频交流耐压试验是电力设备一项基本试验, 以检验一次高压设备是否存在绝缘缺陷。目前, 现场超高压大型电力设备的工频交流耐压试验方法主要包含试验变压器升压、串联谐振方法和并联谐振方法。并联谐振方式以机械调气隙式可变电抗器为主, 以减少对试验现场电源容量的要求。但机械调气隙式试验电源运行时铁心易受电磁力干扰, 并联谐振稳定性差。因此, 研制适用范围宽广、无局放干扰的大容量交流工频耐压并联谐振试验装置具有十分重要的实际意义。

串联谐振方式通过调节电源频率或串联可调电抗器的电抗值, 使串联电抗与被试品电容发生串联谐振, 从而减小电源输入容量。

用于容性电流平滑补偿的磁控电抗器业已受到越来越多的关注, 其主要有两种类型: 垂直磁通控制的正交磁通式和平行磁通控制的磁控式^[1]。总的来说磁控式电抗器存在谐波含量高、损耗大等缺点。文献[2]介绍了高温超导可控电抗器, 可以减小电抗器的体积, 降低控制绕组的损耗, 提高利用效率^[3,4]; 文献[5-9]深入研究了磁阀式电抗器的谐波特性、磁阀结构以及损耗控制等。

针对上述问题, 本文在国内外的研究基础上, 提出了一种基于磁控式试验变压器的高压并联谐振试验系统, 将磁控电抗器原理与变压器相结合, 形成创新的磁控谐振试验变压器, 本变压器仅适用于并联谐振系统。南方电网超高压公司与武汉大学联合研制成功世界首台 200 kV, 100 kV·A 磁控谐振变压器装备。该磁控谐振试验装置集可控电抗和升压为一体, 结构紧凑, 励磁电抗大范围平滑调节(50 倍以上)。可有效解决目前交流耐压装置体积大、运输组装困难、故障率高、适用范围局限的难题, 可替代现有的机械调感式、变频式交流谐振装置^[10-13]。

2 200 kV 磁控谐振变压器试验系统

本节将对 200 kV 磁控谐振变压器试验系统的结构组成以及基本原理进行阐述。

2.1 试验系统组成

200 kV, 100 kV·A 磁控谐振变压器试验系统结构原理如图1所示。该试验系统有三个组成部分, 分别为交流调压器及控制系统、磁控谐振试验变压器、电容分压器。

由图1可见, 磁控谐振变压器是在传统变压器基础上, 将铁心设计成可饱和段, 即所谓的磁阀。通过直流控制绕组的偏磁控制, 使得变压器铁心磁阀工

收稿日期: 2019-10-17

作者简介: 陆春玉(1987-), 男, 江苏籍, 高级工程师, 硕士, 从事高电压测试技术工作;

陈柏超(1960-), 男, 湖南籍, 教授, 博士, 研究方向为高电压与绝缘技术(通讯作者)。

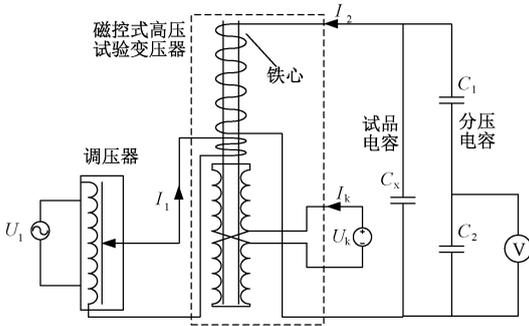


图1 200 kV, 100 kV·A 磁控谐振变压器试验系统结构原理图

Fig.1 Schematic diagram of test system structure of 200 kV, 100 kV·A magnetically controlled resonant transformer

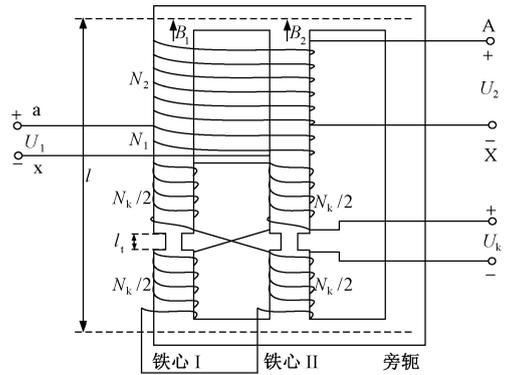


图3 高压磁控谐振试验变压器结构图

Fig.3 Structural chart of a novel high-voltage magnetically controlled resonant transformer

作在不同的磁饱和状态,从而具备补偿容性无功的能力。磁控谐振变压器等效电路如图2所示。

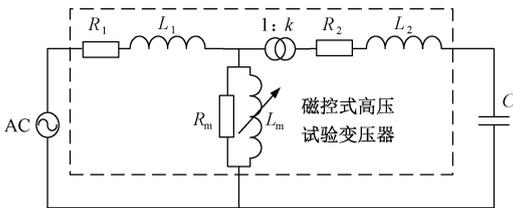


图2 磁控谐振变压器等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of magnetically controlled resonant transformer

由图2所示,通过调节直流励磁控制系统来改变磁控谐振变压器铁心的磁饱和度,从而调整变压器的励磁电抗大小,使其与被试品电容始终处于并联谐振状态,从而交流电源仅提供有功电流。

2.2 试验系统基本原理

本文提出的磁控式变压器的基本结构图如图3所示。该装置采用单相裂芯式变压器结构,直流励磁控制绕组、低压绕组以及高压绕组都绕制在左侧的铁心 I 和铁心 II 上,另一柱称为旁轭的铁心是为磁通提供闭合磁通回路。铁心 I 和铁心 II 上都存在一个磁阀小截面段。各绕组绕制所不同的是,高压绕组以及低压绕组都绕制在铁心 I 和铁心 II 的外侧,高压侧绕组匝数为 N_2 , 低压侧绕组匝数为 N_1 , 而直流励磁控制绕组则有四个相同匝数为 $N_k/2$ 的直流控制绕组分别绕制在各个铁心上通过交叉相连的方式组成,中间接有一直流励磁电源 U_k , U_1 为一次侧的输入电压, U_2 为二次侧的输出电压。

该装置是根据软磁材料 $B-H$ 磁化曲线的非线性

性饱和特性,铁心的磁导率 μ 会随铁心的磁饱和度增大而减小。根据电路原理,铁心式电抗器的励磁电感 L_m 满足:

$$L_m = \frac{\mu N^2 A}{l} \quad (1)$$

式中, μ 为铁心磁导率; N 为电感线圈匝数; A 为铁心横截面积; l 为磁路长度。

调节直流励磁电流数值,就可以调整铁心的磁饱和度大小,从而就可以改变铁心的磁导率 μ , 进而起到平滑的调节紧凑型高压试验系统等效励磁电感大小的作用。直流励磁电流越小,铁心的磁饱和度越小,铁心的磁导率 μ 越大,等效励磁电感就越大。

采用上述磁控式可励磁结构具有以下优点:

(1) 该结构中两铁心均有一个小段截面称为磁阀,在磁控变压器正常运行过程中,磁阀段处于饱和状态,其余部分始终处于不饱和的线性工作区,有效地减少了谐波的产生。

(2) 该装置的输出励磁电抗值不受机械振动等外界因素的影响,其稳定性较传统的机械调气隙式的可控电抗器更高,且装置简单、调节方便、易于运输。

3 磁控谐振变压器的谐波特性

由于磁控谐振变压器铁心工作在磁饱和状态,不可避免地会产生谐波。将变压器铁心设计成截面面积不同的数段,如图4所示。通过改变磁阀截面的面积和长度可以起到改变铁心磁化特性的目的^[14,15]。

将 200 kV, 100 kV·A 磁控谐振变压器小截面设计成4段,并通过优化设计,使得谐波减小。图5为

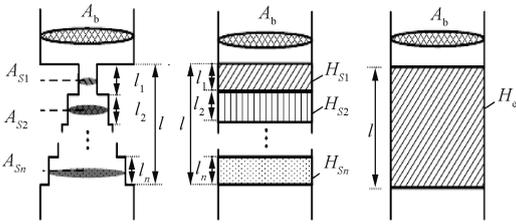


图 4 工作铁心不同截面段

Fig.4 Different cross section of transformer core

磁控谐振变压器谐波含量计算值,其中横坐标为最小截面积磁饱和度,纵坐标为谐波幅值标么值,基准值为额定基波电流。可见,200 kV, 100 kV·A 磁控谐振变压器谐波含量很小。

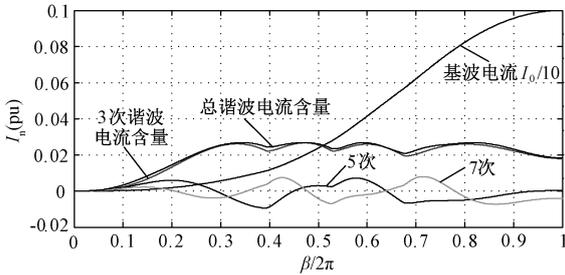


图 5 磁控谐振变压器谐波含量

Fig.5 Harmonic containments of magnetically controlled resonant transformer

4 200 kV, 100 kV·A 磁控谐振变压器试验系统仿真

本节搭建了200 kV 磁控谐振变压器试验系统模型,该试验系统的额定输出电压为 200 kV。分别进行了空载仿真与带负载仿真研究,从而验证了原理的正确性。

4.1 仿真模型

建立了基于 MATLAB 的 200 kV, 100 kV·A 磁控谐振变压器系统仿真模型,并进行了空载与带负载仿真。仿真模型如图 6 所示。

200 kV, 100 kV·A 磁控谐振变压器的主要参数如表1所示。

表 1 磁控谐振变压器主要参数

Tab.1 Main parameters of magnetically controlled resonant transformer

| 参数 | 值 |
|--------|-----------------------|
| 额定容量 | 100 kV·A |
| 额定电压 | 380 V;200 000 V |
| 额定电流 | 263 A;0.5 A |
| 铁心磁化曲线 | [0,0;0.001,1;1.001,2] |

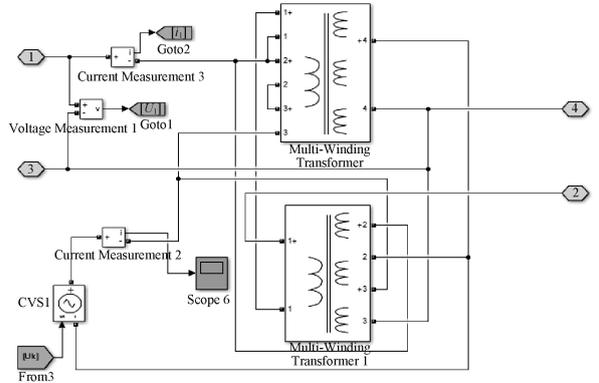


图 6 磁控谐振变压器仿真模型

Fig.6 Simulation model of magnetically controlled resonant transformer

4.2 空载仿真分析

首先进行了 200 kV 磁控谐振变压器试验系统的空载仿真,即高压输出侧不接负载,高压侧处于断路状态。然后通过调节直流励磁控制电路来研究磁控变压器励磁电抗的变化情况。

在仿真过程中,保持交流电源侧的电压为 380 V 不变,直流励磁控制回路的电压在 0~1 s 时保持为 0 V。在 1~6 s 时保持控制电压由 0~100 V 线性均匀增加。此时,空载仿真时低压侧输入电流的变化曲线如图 7 所示。

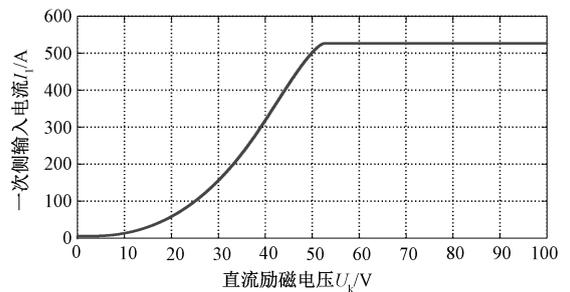


图 7 空载低压侧输入电流有效值变化曲线

Fig.7 Change curve of RMS of input current at no-load low-voltage side

由图 7 可知,当直流励磁电压在 0~20 V 范围内,低压侧输入电流增加较为缓慢,当直流励磁电压在 20~52 V 内,低压侧输入电流增加较为快速,且在 0~52 V 内输出电流的增加速度在逐步增大。这表明直流励磁电压在 0~52 V 的范围内,铁心在一个工频周期内不全处于磁饱和状态即铁心磁饱和度小于 2π ,但磁饱和度随着直流控制电压的增加而增加。由此可知,可以通过增加直流励磁电压的方式来提高磁控变压器励磁电抗调节的响应速度,即直

励磁控制电压越大,相同响应时间内励磁电抗的调节范围越大。而当直流励磁电压达到 52 V 以后,低压侧输入电流不再继续增加而保持 530 A 不变,表明此时磁控变压器的铁心在一个工频周期内均处于磁饱和状态即磁饱和度为 2π ,此时磁控变压器的励磁电抗为可调节范围内的最小值且保持不变,故随着直流控制电压的继续增大,低压侧输入电流不再增加保持不变。

图 8 为空载直流励磁控制电流变化曲线。当直流励磁电压在 0~52 V,磁控变压器铁心磁饱和度小于 2π 时,直流励磁回路的伏安特性为非线性,直流励磁电流增加较为缓慢,而随着铁心磁饱和度达到 2π 时,两铁心磁通均饱和,此时直流励磁回路的伏安特性为线性关系。

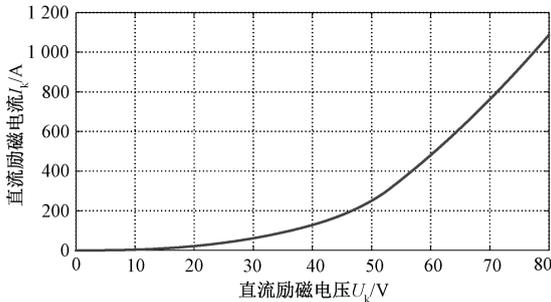


图 8 空载直流励磁控制电流变化曲线

Fig.8 No-load DC excitation control current change curve

图 9 为空载仿真时,高压试验系统二次侧输出电压和一次侧输入电压变比的变化示意图,仿真时试验系统一次侧的交流电源保持 380 V 电压不变。由图 9 可知,在 2.5~3.6 s 的范围内,电压变比持续下降,在 3.6 s 后,铁心达到极限饱和状态时,电压变比继续维持不变,此时电压变比为额定电压变比的 92%。因此要想保证电压变比不下降,需适当减少励磁电抗的调节范围。

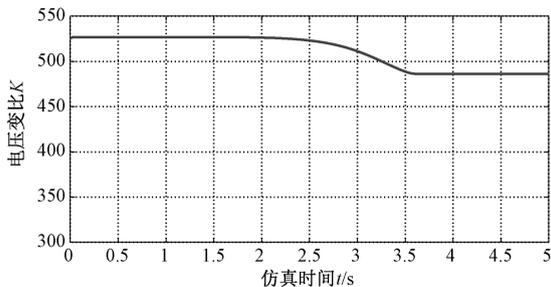


图 9 磁控变压器输出电压与输入电压变比示意图

Fig.9 Diagram of variable ratio of output voltage to input voltage of magnetically controlled transformer

4.3 带负载仿真分析

做负载仿真试验时,分别选取电容的电容量为 2 000 pF、4 000 pF、6 000 pF 的试品,将其与高压试验系统的二次侧相接。已知当高压试验系统完全并联谐振时,一次侧电源输出的无功功率为 0。因此可把一次侧的无功功率作为控制变量,通过 PI 调节器调节控制从而使得一次侧电源输出的无功功率向 0 逼近,进而控制磁控变压器的励磁电抗与试品电容达到并联谐振条件。该仿真试验可以验证 200 kV 磁控谐振变压器试验系统的升压和自动调谐能力。

为了检验直流励磁控制系统的调谐能力。保持试验系统一次侧交流电源电压为 380 V 不变,通过 PI 控制器来调节直流励磁电压,快速地使系统工作在并联谐振状态,并在整个试验过程都维持并联谐振状态。图 10 为仿真试验过程中一次侧输入电流有效值示意图。由图 10 可知,三种不同负载下一次侧输入电流有效值在 0.4 s 时基本都处于稳定状态,且此时一次侧输入电流相差不大,均小于 40 A,表明在不同负载下直流励磁控制系统调谐效果均为良好。

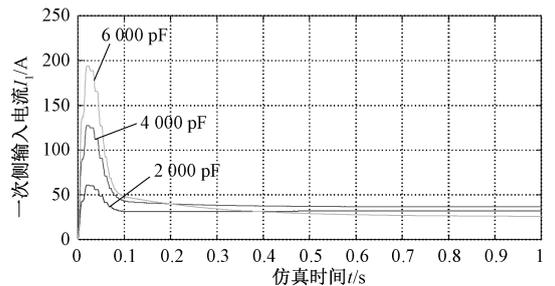
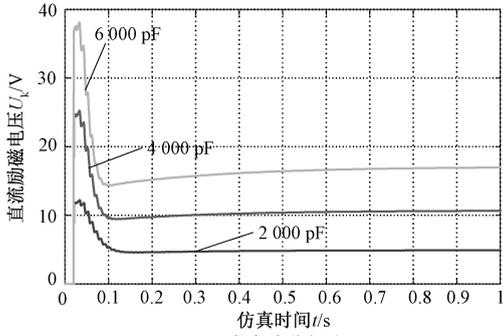


图 10 一次侧输入电流有效值示意图

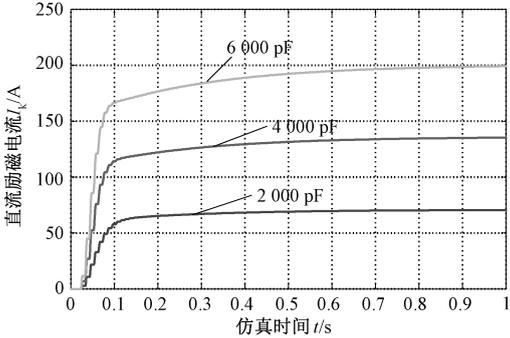
Fig.10 Schematic diagram of RMS of primary input current

在该仿真过程中,不同负载下控制回路的直流励磁电压与直流励磁电流变化曲线如图 11 所示。由图 11 可知,当试验系统处于稳定工作状态时即磁控变压器励磁电抗与试品电容处于并联谐振状态时,负载容抗越小,稳态时所需的励磁电压及其励磁电流越大。

然后检验直流励磁控制系统的自动跟踪调谐能力。在 0~2 s,保持试验系统一次侧交流电源电压为 50 V 不变,在 2~8 s,一次侧交流电源电压从 50~380 V 逐渐增加,8 s 后电源电压保持 380 V 不变。在此仿真过程中得到不同负载下一次侧输入电流有效值如图 12 所示。



(a) 直流励磁电压



(b) 直流励磁电流

图 11 直流励磁电压以及电流有效值示意图

Fig.11 Diagram of DC excitation voltage and RMS current

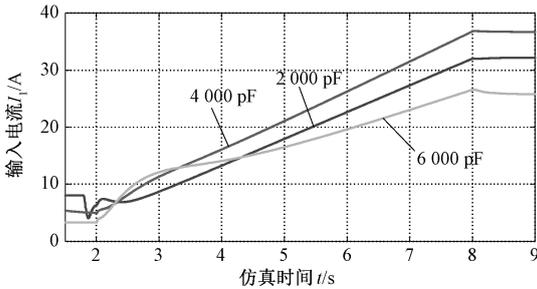
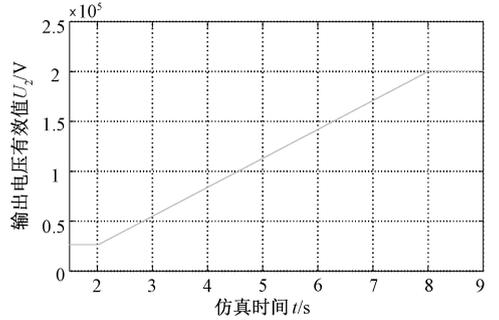


图 12 一次侧输入电流有效值示意图

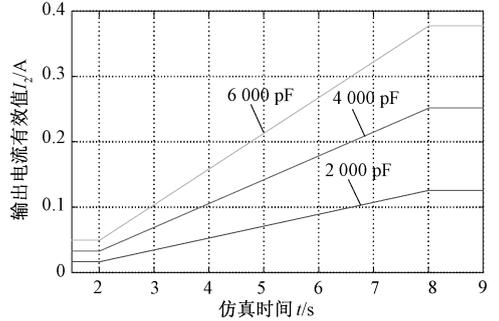
Fig.12 Schematic diagram of RMS of primary input current

由图 12 可知,在 2~8 s 调压过程中,不同负载的一次侧输入电流随输入电压的增加均平稳上升,当电压升高到 380 V 后,输入电流也均小于 40 A 且保持不变。表明在整个升压过程中,直流励磁控制系统都有较强的自动调谐能力。

在此升压过程中,试验装置不同负载下二次侧输出电压以及输出电流有效值的变化曲线如图 13 所示。由图 13 可知不同负载情况下二次侧输出电压随一次侧输入电压呈线性关系,表明整个升压过程中试验系统均稳定于并联谐振状态。由于不同负载下升压速率相同,故负载容抗越大,二次侧输出电流越小。



(a) 二次侧输出电压



(b) 二次侧输出电流

图 13 二次侧输出电压以及电流有效值示意图

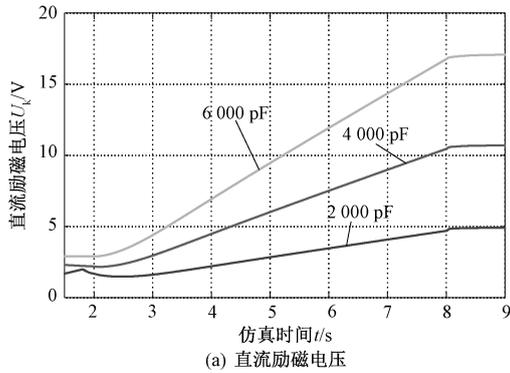
Fig.13 Schematic diagram of secondary side output

voltage and RMS current

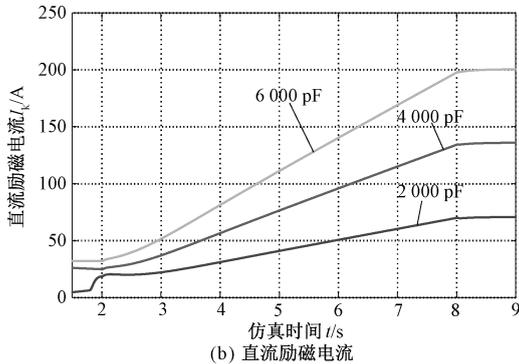
试验装置直流励磁电压以及电流有效值的变化曲线如图 14 所示。由图 14 可知,在 2~8 s 调压过程中,不同负载下的直流励磁电压与直流励磁电流均随输入电压的增加而平稳上升,当电压升高到 380 V 并稳定不变后,直流励磁电压与直流励磁电流也均稳定不变,且负载容抗越大,稳定时所需要的直流励磁电压与直流励磁电流越小。同时,当试验系统处于谐振状态时,直流励磁电压与直流励磁电流呈线性关系。

当试验系统高压侧并联的试品电容的容量不同时,测得各稳态状态下一次侧输入电流的有效值,绘制如图 15 所示。

由图 15 可知,当试品电容小于 16 000 pF 时,试品电容的容量在磁控变压器励磁电抗的补偿范围内,故稳态时,试验系统均可处于并联谐振状态下,此时一次侧的输入电流有效值小于 40 A。但当试品电容大于 16 000 pF 时,一次侧的输入电流开始快速变大,这是因为励磁电抗的调节范围不能满足与试品电容发生并联谐振的条件,励磁电抗对试品电容只能处于欠补偿状态。因此,可知该磁控变压器励磁电抗可调谐试品电容的容量范围应小于 16 000 pF,在此范围内具有较好的调谐效果。



(a) 直流励磁电压



(b) 直流励磁电流

图 14 直流励磁电压以及电流有效值示意图

Fig.14 Diagram of DC excitation voltage and RMS current

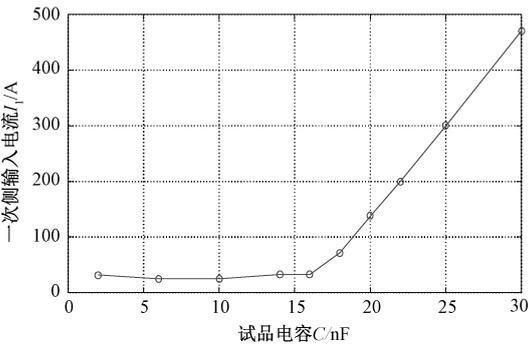


图 15 稳态下输入电流随试品电容变化示意图

Fig.15 Chart of input current change with capacitance of test specimen in steady state

5 200 kV,100 kV·A 磁控谐振变压器及试验

根据理论计算和仿真分析,设计制造了一台 200 kV,100 kV·A 磁控谐振变压器样机,如图 16 所示。

200 kV,100 kV·A 磁控谐振变压器样机铁心和绕组结构如图 17 所示。

图 18 为 200 kV,100 kV·A 磁控谐振变压器试验系统接线,图 19 为试验现场。图 20 中两个波形分别为变压器输出电压波形和变压器输入电流波形。



图 16 200 kV,100 kV·A 磁控谐振变压器样机
Fig.16 Prototype of 200 kV,100 kV·A magnetically controlled resonant transformer

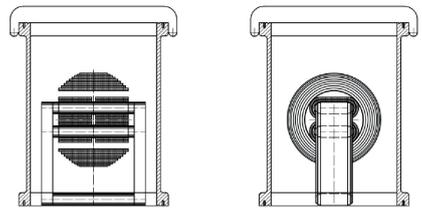


图 17 200 kV,100 kV·A 磁控谐振变压器铁心与绕组结构
Fig.17 Iron core and windings of 200 kV,100 kV·A magnetically controlled resonant transformer

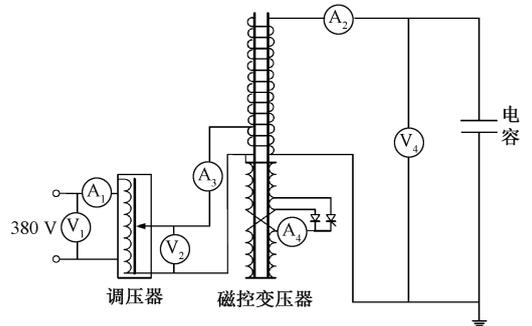


图 18 200 kV,100 kV·A 磁控谐振变压器试验接线图
Fig.18 Test wiring diagram of 200 kV,100 kV·A magnetically controlled resonant transformer

试验结果表明,当被试品电容量为 7 500 pF,将被试品电压通过调压器逐渐升压到 200 kV 时,通过调整谐振变压器的直流励磁电流,可以使得谐振变压器电源侧的电流始终小于 10 A。所测得的 200 kV,100 kV·A 磁控谐振变压器的 Q 值为 25 倍,即若无磁控谐振变压器的补偿,电源侧的电流将达到 250 A 以上。



图19 200 kV, 100 kV·A 磁控谐振变压器试验现场

Fig.19 Testing field of 200 kV, 100 kV·A magnetically controlled resonant transformer

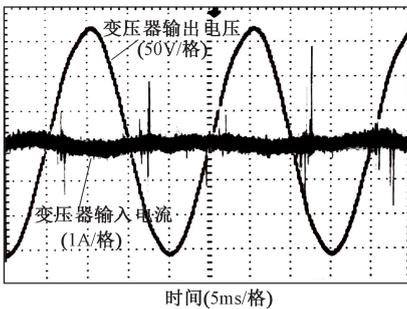


图20 试验波形

Fig.20 Test waveforms

6 结论

介绍了所研制的世界上首台 200 kV, 100 kV·A 磁控谐振变压器样机及其高压工频试验系统原理, 并进行了数值仿真分析。最后给出了样机试验结果。与传统的试验变压器相比, 磁控谐振试验变压器借助铁心直流偏磁, 具有平滑调节变压器的激磁电抗和对被试品电容进行全补偿(并联谐振)的能力。磁控谐振变压器结构紧凑, 补偿范围宽广, 可大幅度降低电源输入容量, 为高压试验智能化奠定基础, 可替代现有的机械调感式、变频式的交流谐振装置。

参考文献 (References):

[1] 张宇 (Zhang Yu). 基于磁通控制的大容量可调电抗器研究 (Research on large capacity adjustable reactor based on flux control) [D]. 武汉: 华中科技大学 (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology), 2005.

[2] 王作帅, 任丽, 严思念, 等 (Wang Zuoshuai, Ren Li, Yan Sinian, et al.). 高温超导可控电抗器研究进展

(Research progress of high temperature superconducting controllable reactor) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (10): 41-48, 57.

- [3] 李永刚, 李悦宁, 程志光, 等 (Li Yonggang, Li Yuening, Cheng Zhiguang, et al.). 电力变压器中不同磁屏蔽的建模、仿真和基准化实验验证 (Modeling, simulation and benchmarking validation of magnetic shields in large power transformers) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (2): 61-66.
- [4] 杨意妹, 祝丽花, 王斌, 等 (Yang Yimei, Zhu Lihua, Wang Bin, et al.). 考虑磁致伸缩效应的可控饱和电抗器电磁振动分析 (Analysis on electromagnetic vibration of controllable saturable reactor considering magnetostrictive effects) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (8): 40-45.
- [5] 陈柏超 (Chen Baichao). 新型可控饱和电抗器理论及应用 (Theory and Application of New Controllable Saturated Reactor) [M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社 (Wuhan: Wuhan University of Water Resources and Electricity Press), 1999.
- [6] Chen Xuxuan, Chen Baichao, Tian Cuihua, et al. Modeling and harmonic optimization of a two-stage saturable magnetically controlled reactor for an arc suppression coil [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59 (7): 2824-2831.
- [7] 李和明, 刘海鹏, 尹忠东 (Li Heming, Liu Haipeng, Yin Zhongdong). 基于磁控电抗器的控制系统设计 (Design of control system based on magnetically controlled reactor) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2014, 40 (1): 275-281.
- [8] Wang Z Q, Yin Z D, Zhou L X, et al. Study on controllable reactor magnetic structure and loss based on ANSYS [A]. 2009 4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications [C]. Xi'an, China, 2009. 201-205.
- [9] Wang Z, Yin Z, Xie Z. Study on magnetic circuit structure of magnetic valve controllable reactor based on ANSYS [A]. 2009 International Conference on Energy and Environment Technology [C]. Guilin, Guangxi, China, 2009. 317-320.
- [10] 陈崇源, 金玮 (Chen Chongyuan, Jin Wei). 谐振与调谐变压器 (Resonance and resonant transformer) [J]. 变压器 (Transformer), 2001, 38 (3): 15-17.
- [11] 孙林涛 (Sun Lintao). 串联谐振技术在电容式电压互感器校验中的应用研究 (The research for series-resonance in calibration of capacitor voltage transformer)

- [D]. 杭州: 浙江大学 (Hangzhou: Zhejiang University), 2012.
- [12] 孙建军 (Sun Jianjun). 调频式串联谐振交流高压试验装置的研制 (Development of frequency modulation series resonance AC high voltage test device) [D]. 大连: 大连理工大学 (Dalian: Dalian University of Technology), 2002.
- [13] Hauschild W. Frequency-tuned resonant test systems for HV on-site testing of XLPE cables and SF 6 insulated apparatus [A]. International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. IEEE [C]. 1997. 2: 1151-1158.
- [14] 孔令齐 (Kong Lingqi). 基于 ANSYS 的正交磁化可控电抗器电磁场数值计算研究 (Numerical calculation of electromagnetic field of controllable reactor with orthogonal magnetization based on ANSYS) [D]. 北京: 北方工业大学 (Beijing: North China University of Technology), 2013.
- [15] 陈柏超, 田翠华, 梁柏华, 等 (Chen Baichao, Tian Cuihua, Liang Baihua, et al.). 单相可控电抗器的一种谐波抑制原理及实现 (Principle and implementation of a harmonic depression approach for single-phase controlled saturable reactor) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2002, 22 (3): 64-68.

Study of 200 kV magnetically controlled resonant transformer test system

LU Chun-yu¹, WANG Yan¹, PAN Zhi-cheng¹, CHEN Bai-chao², TIAN Cui-hua²,
CHEN Bo², WU Yu-wen²

(1. Overhaul Test Center of China Southern Power Grid Co., Ltd. UHV Transmission Company, Guangzhou 510700, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In view of the unadjustable capacity of compensation reactor in the current AC power frequency withstand voltage test equipment, a 200 kV, 100 kV·A magnetically controlled resonance test transformer is developed. The test system integrates step-up, smooth and stepless compensation of the tested object capacitance, with compact structure and precise compensation. This paper presents the structure and basic principle of the system, establishes a simulation model, studies the operation characteristics of the 200 kV magnetic resonance test system, and verifies the boosting and automatic tuning ability of the test system. When the capacitance range of the test object is less than 16 000 pF, it has a better tuning effect. Through 200 kV prototype test, the feasibility of the test system is verified.

Key words: high voltage test power supply; magnetically controlled resonant transformer; parallel resonance