

大功率高频高压变压器的试验及故障分析

王延安, 肖登明, 李佑淮, 顾 金, 陈桂文
(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘 要: 为分析一台大功率高频高压变压器的故障原因, 搭建了试验平台并对该故障变压器和同等规格的无故障变压器进行了空载试验和波形录制; 采用电流波形比较法对比分析了试验波形以总结其波形特点; 根据变压器的绝缘结构提出了考虑寄生参数的等效电路并给出简化工作电路。研究表明空载电流大是由分布电容引起, 而非气隙异常导致。通过电流波形比较, 得出高压线包(层、匝)间绝缘击穿的故障结论, 与拆卸观察结果相符合。

关键词: 大功率; 高频; 高压; 绝缘; 变压器; 试验; 故障分析

中图分类号: TM432, TM854 文献标志码: A 文章编号: 1003-6520(2009)05-1049-05

Test and Fault Analysis for High Power High Frequency High Voltage Transformer

WANG Yan-an, XIAO Deng-ming, LI You-huai, GU Jin, CHEN Gui-wen
(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to analyze the fault reason of a high power high frequency high voltage transformer, a test platform was established, zero-load test and wave-recording of a fault transformer and a normal transformer were carried out, and the wave characteristic was analyzed. Taking combination of the insulation structure of the transformer, an equivalent circuit of the transformer considering distribution parameters was put forward, and a simplified equivalent circuit was put forward. First, the fault reason which may lead to growth of inputting zero-load current of the transformer is stray capacitances other than air gap abnormality. Second, through the method of current wave comparing, the conclusion that the transformer fault is caused by the insulation breakdown of high voltage winding can be drawn. The diagnosis result is authenticated through the observation after dismantlement of the transformer.

Key words: high power; high frequency; high voltage; insulation; transformer; test; fault analysis

0 引言

工频电力变压器的故障诊断已有许多研究成果和实用方法^[1-3]。随着大功率高压直流电源的广泛应用^[4-8]及其高频化。对大功率高压高频变压器的保护和故障诊断方面的研究有待进一步发展。由于高频高压所带来的寄生参数影响,使其等效电路复杂化,并产生许多新问题(如多个谐振点)。致使有些面向常规电力变压器的故障诊断方法在高频高压变压器的故障分析中难以奏效,甚至会导致错误结论。本文对变压器隔离型 DC-DC 电源中的一台故障变压器进行了试验和录波,并对同规格的无故障变压器进行了试验。采用电流波形比较法得出故障类型。分析结果与变压器拆卸观察结果基本相同。

1 试验平台

试验平台框图如图 1 所示。由主电路和控制系统组成。控制系统以 TI 公司的数字控制芯片 TMS320F2812 为核心。

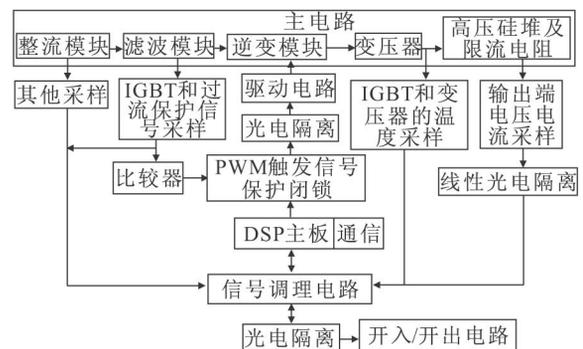


图 1 试验平台框图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental platform

主电路如图 2 所示。由左到右分别是整流模块、滤波模块 LC、逆变模块、变压器、高压整流硅堆、限流电阻 R_5 、电压采样电阻 R_6 、 R_7 、电流采样电阻 R_8 和分压器。其中 T_1 - T_4 是 IGBT 器件,采用 SEMIKRON 公司的 SKM 300GB125D (1200V, 300A)。 D_1 、 C_1 、 D_5 和 R_3 是开关器件 T_1 的缓冲电路。 T_3 - T_4 的缓冲电路如图 2 所示。

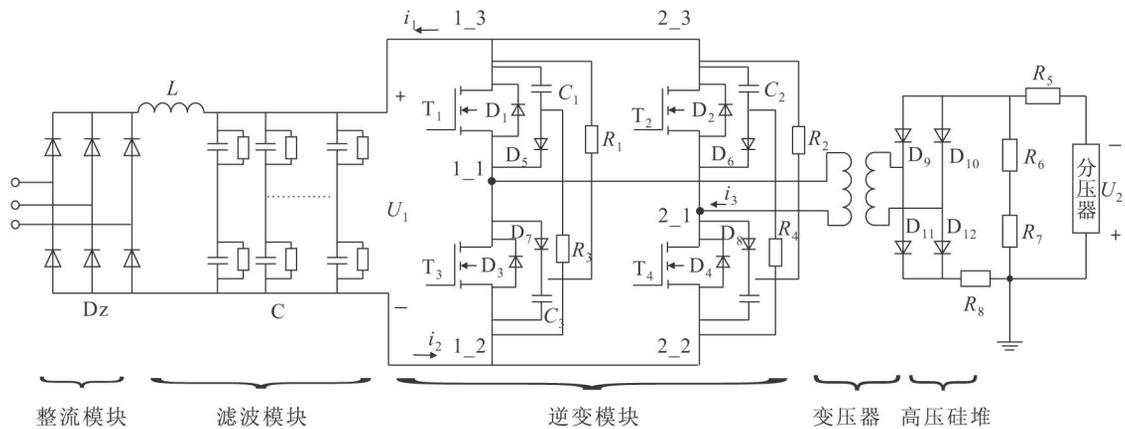


图2 主电路图

Fig. 2 Main principle circuit

2 故障现象

2.1 试验条件

三相输入线电压 100 V; 触发信号频率 18 kHz, 占空比 = 0.3557, 采用方波逆变^[9], 即触发信号 T₁、T₄ 同相位, T₂、T₃ 同相位, 两组互差 180°; 各信号脉宽相同。高压输出端空载 (只接电阻分压器)。故障变压器的主要设计参数为输入电压 510 V, 变压器原副边匝比 7/780, 输出功率 60 kW, 工作频率 20 kHz, 磁芯材料采用铁基非晶磁芯 (饱和磁密为 1.56 T)。

2.2 试验结果

由分压器测得输出端电压为 20.63 ~ 21.99 kV。变压器输入电流约 70 A。另外, 开关器件的缓冲电阻较热, 安装开关器件的散热器微热。采集的故障波形有: 开关器件 T₄ 触发信号波形 u_{T4} 。

变压器原边输入电压波形 u_{12} (即图 2 的点 1_1 至点 2_1 的压差)。变压器原边输入电流波形 i_3 。如图 3 所示, 以上信号的方向如图 2 所示。

以上波形用 Tek 公司的 TDS3012 示波器录制成 excel 文件, 再由 MATLAB 把波形复原, 下同。

2.3 结果分析

变压器输出经整流后的空载电压的公式为

$$U_{out} = \frac{\sqrt{2}U_{in}m_1}{n_2} \quad (1)$$

式中, U_{in} 、 U_{out} 和 m_1 、 n_2 分别表示三相输入电压的线电压、高压整流输出电压和变压器原、副边绕组匝数。在三相输入线电压 100 V 的情况下, 根据式 (1) U_{out} 应为 15.758 kV。而分压器测得输出端电压为 20.63 ~ 21.99 kV。结合图 3 可知:

- 1) 直流输出端电压比计算值偏高。
- 2) 变压器空载输入电流很大。

3) 电流波形相位超前电压约 90°。

4) 电流波形严重畸变并有异常尖峰。

5) 滤波模块一个周期平均输出功率 0。

3 故障分析

3.1 变压器结构及等效电路

变压器的结构如图 4 所示。绝缘材料具体为: 骨架采用环氧板, 绕组的层间绝缘和匝间绝缘采用聚脂薄膜, 绝缘纸板为厚纸板。磁芯由 8 块 U 型磁芯并联磁路构成。整个变压器芯浸在变压器油中。

本变压器的等效电路^[10-13]可表述如图 5 所示。其中 R_1 、 C_1 、 L_{1s} 分别表示原边绕组的电阻、分布电容、漏感。 R_{2-1} 、 C_{2-1} 、 L_{2s-1} 分别表示副边绕组第 1 个高压线包的电阻、分布电容、漏感 (均折算到原边)。 C_{12-1} 表示原绕组和副边绕组第 1 个高压线包之间的电容。其它线包同理。 L_m 和 R_c 分别表示激磁电感和代表磁芯损耗的电阻。

根据该变压器是升压变压器及变压器绝缘结构特点, 把图 5 等效电路做适当简化: 原副边绕组之间电容合并到副边电路。副边高压线包等效为一个线包。原副边漏感合并。

考虑到高压整流桥臂的二极管反向势垒结电容、分压器寄生电容、高压绕组对地电容及杂散电容等, 输出端电路可以由一个电容和一个电阻等效。合并简化后的变压器等效电路和输出端等效电路得变压器的简化工作电路如图 6 所示。其中 L_s 和 R_2 分别表示变压器原副边等效漏感和副边等效电阻。 C_3 表示原副边之间分布电容、副边绕组本身分布电容、副边对地分布电容等的总体等效电容。 C 表示输出等效电容。 R 表示高压整流桥臂的反向内阻和分压器电阻。

3.2 故障分析

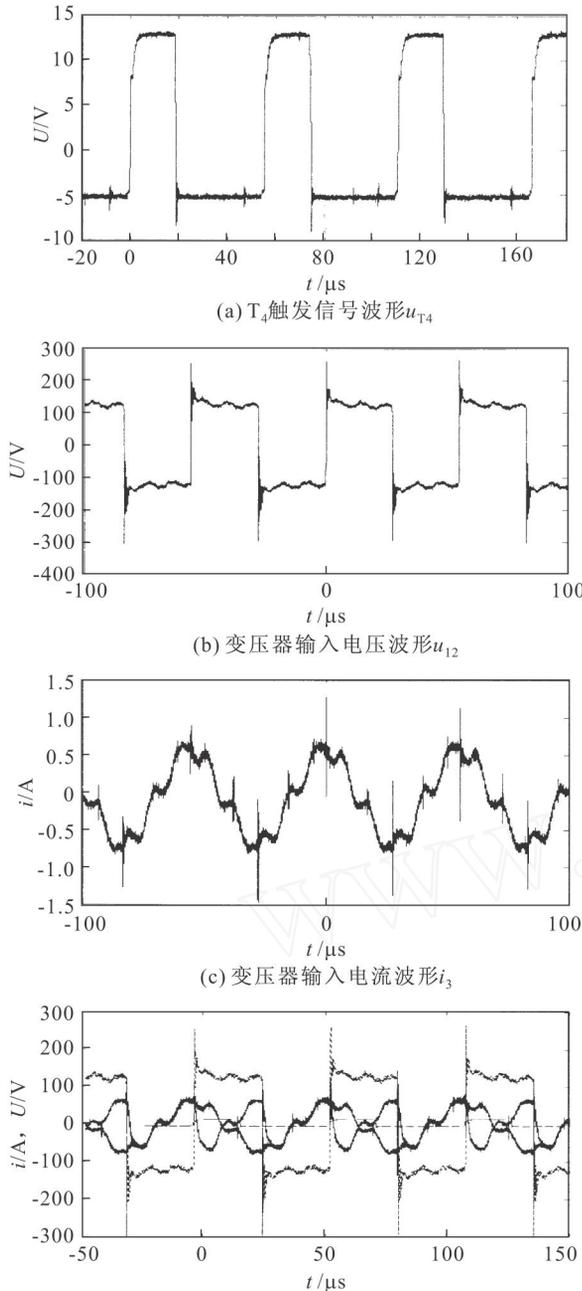


图3 故障录波波形

Fig. 3 Waveform of fault recorder

由以上分析可得导致故障的原因可能有2种：变压器在吊装过程中导致气隙变大，绕组绝缘击穿和变压器分布电容影响。

3.2.1 气隙问题分析

气隙长度的公式^[14]为

$$l = \frac{2fn^2\mu_0 A I_1}{\sqrt{2}U_{in}} \quad (2)$$

式中, l 、 A 分别表示气隙的长度、磁芯的截面积(为 41.6 cm^2)； μ_0 、 I_1 、 f 分别表示空气磁导率、原边电流有效值、激磁电源频率。

忽略磁芯磁阻,根据公式(2)得气隙长度约为

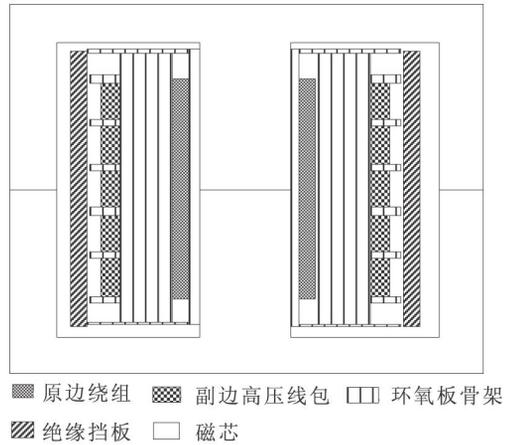


图4 变压器的绝缘结构

Fig. 4 Insulation structure of transformer

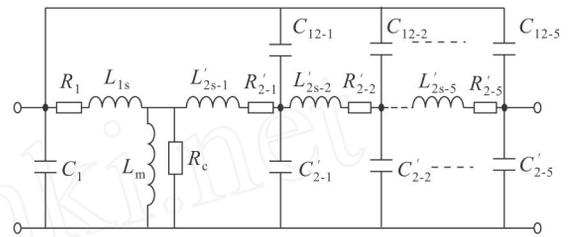


图5 变压器的等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit of transformer

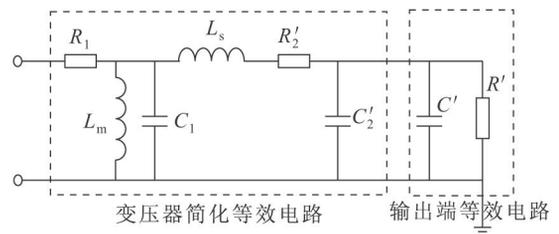


图6 简化工作电路

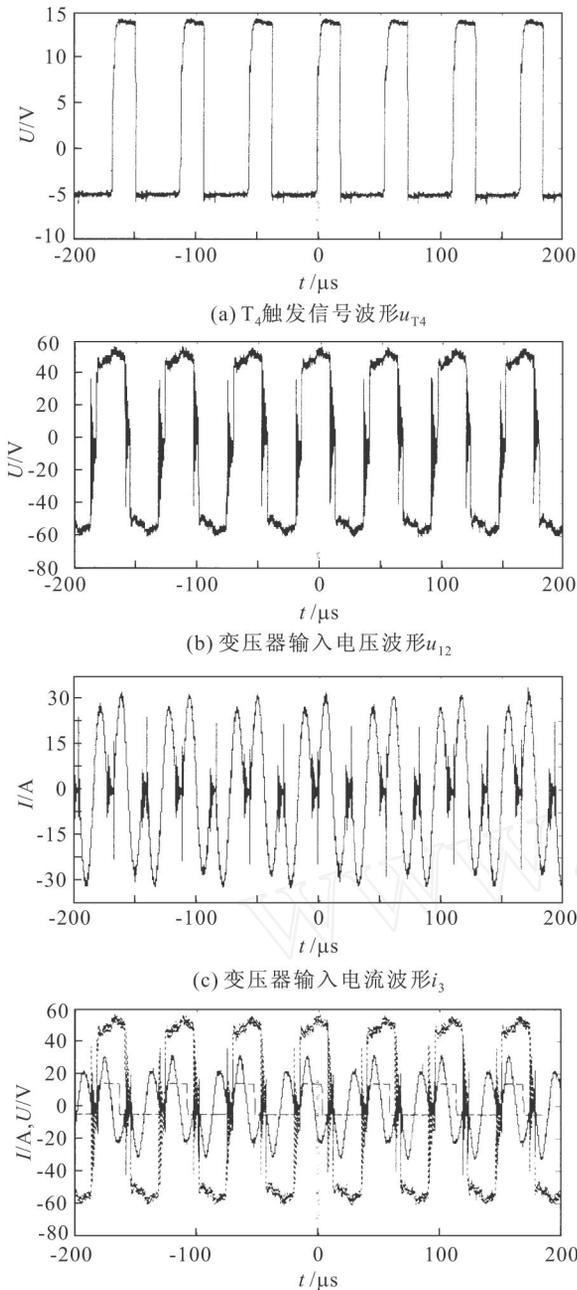
Fig. 6 Simplify running circuit

14.34 mm。依据变压器结构,吊装导致14 mm气隙的可能性很小;且与电流波形畸变并带有异常尖峰的情况不符。因此认为不是气隙变大导致的空载输入电流变大。

3.2.2 绕组绝缘击穿和变压器分布电容影响

为便于比较分析,在相同条件下对同等规格无故障变压器做空载试验并录制波形:开关器件T4触发信号波形 u_{T4} 。变压器原边输入电压波形 u_{12} 。变压器原边输入电流波形 i_3 。具体波形如图7所示。

由图3(c)和图7(c)的电流波形比较可见。故障变压器的电流波形畸变严重,并带有异常电流尖峰。由此判定变压器绕组有绝缘击穿导致的短路故障^[15]。根据变压器的绝缘结构,原边绕组匝间短路



(d) 触发信号(虚线) u_{T4} 、电压信号(点线) u_{12} 、电流信号(实线) i_3 波形

图 7 无故障变压器波形

Fig. 7 Waveform of normal transformer

和原副边绕组被击穿短路的可能性基本排除。认为导致故障的原因为高压线包绝缘被击穿而导致副边绕组某些匝间或层间短路。部分异常电流尖峰由沿面放电引起。

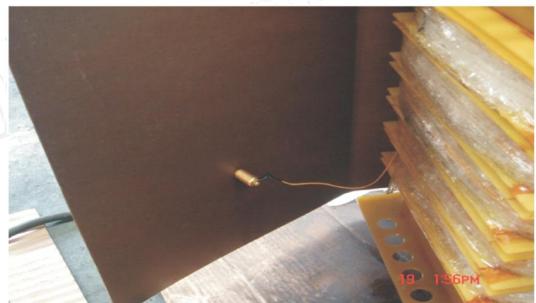
由图 7(c) 可见无故障变压器空载输入电流依然很大, 这是由变压器绕组的分布电容导致。因为同样结构和分布电容的变压器, 容抗随频率比例减小, 因此导致空载电流大和逆变器空载发热问题突出^[16]。在故障变压器中加上短路故障影响, 使空载电流更大, 如图 3(c)。解决分布电容对系统的不利影响有多种措施。总的来说有 3 类^[16-18]: 利用此



(a) 高压线包绝缘击穿点1



(b) 高压线包绝缘击穿点2



(c) 高压输出端断线故障点(黑色)

图 8 故障照片

Fig. 8 Photograph of fault

分布电容; 对分布电容进行补偿; 适当改进变压器的结构以减小分布电容。

另外, 表面上看高压线包绝缘击穿短路与“直流输出端电压比计算值偏高”的情况相矛盾。实际是一方面变压器带有许多分布参数容易产生谐振, 另一方面输出端的等效容性负载导致“容升”效应^[19,20]。因此可能产生在副边发生某些匝间短路时, 直流输出端电压依然比理论值偏高的现象。

4 拆卸观察验证

经变压器拆卸观察发现, 变压器确实存在副边高压线包绝缘击穿现象。具体现象照片见图 8。共有 3 处故障点。两处为高压线包层间绝缘击穿。一处为输出引出与高压整流桥发生断线故障, 此故障点在高压下发生沿面放电。

通过分析, 导致故障的原因是在击穿点的聚脂薄膜之间有细小气泡存在。气泡引起局部放电, 造

成绝缘击穿。建议在采用聚脂薄膜绝缘材料时要进行较高等级的真空浸油,或在一般真空浸油工艺下,采用电缆纸绝缘。另外要注意高压输出连接端的韧性和强度。

5 结语

测试并录制了一台大功率高压高频故障变压器和一台同等规格的无故障变压器空载时的相关波形。针对测试结果,分析了可能造成故障的原因。结合变压器的绝缘结构,给出变压器的详细等效电路,并适当简化。根据变压器的结构和对两台变压器的电流波形比较分析,排除了气隙异常故障,得出本变压器故障是由副边绝缘击穿引起短路。经变压器拆卸观察证实了诊断结果。并且分析了引起击穿故障的原因,给出改善建议。同时得出变压器高压绕组部分被击穿短路的情况下空载输出电压依然可能偏高的结论。

参 考 文 献

- [1] 李 剑,杨 洋,程奎奎,等. 变压器局部放电监测逐层最优小波去噪算法[J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 56-60.
LI Jian, YANG Yang, CHENG Chang-kui, et al. Optimum wavelet denoising algorithm for partial discharge online monitoring of transformers[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(8): 56-60.
- [2] 周建平,倪钱杭,袁华明. 一起变压器绕组变形的诊断及处理[J]. 高电压技术, 2005, 31(10): 89-90.
ZHOU Jian-ping, NI Qian-hang, YUAN Hua-ming. Treatment and diagnosis of winding deformation in a power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(10): 89-90.
- [3] 陈伟根,潘 翀,王有元,等. 利用小波神经网络的电力变压器故障诊断方法[J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 52-55.
CHEN Wei-gen, PAN Chong, WANG You-yuan, et al. Fault diagnostic method using wavelet neural network for power transformers[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(8): 52-55.
- [4] 林 赫,高 翔,骆仲决,等. 直流电晕自由基簇射脱除烟气中的NO_x[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 150-155.
LIN He, GAO Xiang, LUO Zhong-yue, et al. Removing NO_x from flue gas by means of radical showering induced by DC corona[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8): 150-155.
- [5] 赵艳雷,童建忠,齐智平. 25 kV高精度直流负高压源设计[J]. 高电压技术, 2006, 32(4): 88-90.
ZHAO Yan-lei, TONG Jian-zhong, QI Zhi-ping. Design of high precise DC negative high voltage power supply with 25 kV output voltage[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(4): 88-90.
- [6] Norbert Grass, Werner Hartmann, Michael Klchner. Application of different types of high-voltage supplies on industrial electrostatic precipitators[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2004, 40(6): 1513-1520.
- [7] J Marcos Alonso, Jorge Garca, Antonio J Calleja, et al. Analysis, design, and experimentation of a high-voltage power supply for ozone generation based on current-fed parallel-resonant push pull inverter[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2005, 41(5): 1364-1372.
- [8] 江秀臣,周录波,曾 奕,等. 直流高压发生器设计中的四个关键问题[J]. 高电压技术, 2007, 33(6): 85-88.
JIANG Xi-chen, ZHOU Lu-bo, ZENG Yi, et al. Four key problems in the design of a DC high voltage generator[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(6): 85-88.
- [9] 林渭勋. 现代电力电子技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
- [10] 王瑞华. 脉冲变压器设计[M]. 2版. 北京:科学出版社, 1996.
- [11] 杨玉岗. 现代电力电子的磁技术[M]. 北京:科学出版社, 2003.
- [12] 刑 岩,蔡宣三. 高功率开关变换技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
- [13] HAI Yan-lu, JIAN Guo-zhu, S Y Ron Hui. Experimental determination of stray capacitances in high frequency transformers[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2003, 18(5): 1105-1112.
- [14] 汤蕴璆,史 乃. 电机学[M]. 西安:西安交通大学出版社, 1993.
- [15] 张嘉祥. 变压器线圈波过程[M]. 北京:水利电力出版社, 1982.
- [16] 彭燕昌,严 萍,舒 立,等. 介质阻挡放电用大功率高频高压电源的研究[J]. 高电压技术, 2002, 28(增刊): 35-36.
PENG Yan-chang, YAN Ping, SHU Li, et al. Research on a HP/HF/HV power supply used in dielectric barrier discharge[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(S): 35-36.
- [17] 吴建强,吴 辉,郭兴宽. 吸收法抑制高频高压变压器分布电容的研究[J]. 电力电子技术, 2002, 36(6): 43-44.
WU Jian-qiang, WU Hui, GUO Xing-kuan. Research on restraining the harm of high-frequency high-voltage transformer using balance transformers[J]. Power Electronics, 2002, 36(6): 43-44.
- [18] 曾 光,金 舜,史 明. 高频高压变压器分布电容的分析与处理[J]. 电力电子技术, 2002, 36(6): 54-57.
ZENG Guang, JIN Shun, SHI Ming. Analysis and disposal of distributed capacitance in high-frequency and high-voltage transformer[J]. Power Electronics, 2002, 36(6): 54-57.
- [19] 张仁豫,陈昌渔,王昌长. 高电压试验技术[M]. 2版. 北京:清华大学出版社, 2003.
- [20] 梁曦东,陈昌渔,周远翔. 高电压工程[M]. 北京:清华大学出版社, 2003.



王延安

1976—,男,博士生

目前从事高频高压大功率直流电源的研究

电话:(021)29869094

E-mail:wangyananj@sina.com

WANG Yan-an
Ph. D. candidate



肖登明

1953—,男,教授,博导

主要从事气体放电、电力设备在线检测等研究

XIAO Deng-ming
Professor

收稿日期 2008-05-28 修回日期 2008-10-15 编辑 蒋英圣