

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.03.005

基于扫频阻抗法的变压器匝间短路故障检测

孙 翔¹, 何文林¹, 邱 炜¹, 刘 勇², 汲胜昌², 杨 帆²

(1. 国网浙江省电力公司电力科学研究院, 杭州 310014;

2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 文中以一种新型变压器绕组检测方法——扫频阻抗法为理论依据, 建立了试验室测试系统, 并利用该系统对单相双绕组变压器进行了测试。其结果表明: 扫频阻抗法能够有效反映变压器绕组分布式参数, 且其测试结果在频率大于 11.5 kHz 时与频响曲线呈现轴对称关系; 短路故障会造成 50 Hz 处阻抗值与相关系数皆发生变化, 且故障越严重, 阻抗值与相关系数的变化越明显。

关键词: 频率响应分析法; 短路阻抗法; 扫频阻抗法; 短路故障

Detection of Short Circuit Fault Between Transformer Windings Based on Sweep Frequency Impedance Method

SUN Xiang¹, HE Wenlin¹, QIU Wei¹, LIU Yong², JI Shengchang², YANG Fan²

(1. Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China;

2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A laboratory measurement system is set up to test a single phase transformer with two windings by means of the novel sweep frequency impedance (SFI) method. The test results show that: 1) SFI curve can effectively reflect the distributed parameters of the transformer winding, and it displays axisymmetric relationship with the frequency response curve obtained in the same test condition for the frequency range from 11.5 kHz to 1 MHz; and 2) Short circuit fault results in changes in both SFI and correlation coefficient at frequency of 50 Hz in the SFI curve, and the more serious the short circuit fault, the more obvious these changes.

Key words: frequency response analysis(FRA); short circuit impedance(SCI); sweep frequency impedance (SFI); short circuit fault

0 引言

随着国内经济的快速发展, 对电力设备的需求出现了急速上升的趋势, 保证电网的安全运行成为电力工作者的重要任务之一, 而变压器作为电力系统中昂贵且重要的设备, 其稳定运行与否则更加受到重视^[1-3]。由于内部结构的特殊性, 变压器极易遭受短路冲击, 从而造成绕组机械性故障, 并最终引起变压器事故^[4-6]。据文[7-9]中统计, 2002 年到 2005 年间, 全国 110 kV 及以上变压器发生事故 131 台, 事

故总容量 10 293.2 MVA, 其中事故台次若按照故障位置来划分, 由绕组引起的事故比例最高, 占到事故总量的 60%; 因此正确快速的检测出变压器绕组变形故障, 能够有效延长变压器使用寿命, 从而极大减少电力系统的开支。

传统的变压器检查方法为吊罩检修, 该方法费时费力且效果一般, 对于低压绕组上的变形故障, 则需将高压绕组拆除后才能进行检测^[10-11]。为了有效解决以上问题, 人们开发了多种变压器绕组故障无损检测方法。其中, 频率响应分析法和短路阻抗法由于测试设备简单、易携等优点得到了普遍研究和应用^[12-14]。但两种方法皆各有制约^[15-17]; 频率响应分析

收稿日期: 2015-10-14; 修回日期: 2015-11-19

基金项目: 国网浙江省电力公司科技项目(5211011306X9)。

Project Supported by Science and Technology Project of Zhejiang Electric Power Research Institute(5211011306X9)。

法的测试结果易受外部因素影响,且测试结果并不直观,需采用历史数据进行横向和纵向对比,要求测试人员经验丰富;短路阻抗法虽具有定量判据,但测试灵敏度较低,不能对绕组故障进行定位。文[18-23]中提出了一种新型的变压器绕组变形检测方法——扫频阻抗法,具有测试灵敏度高、抗干扰能力强和判据简单等优点,能够有效减少对变压器绕组变形的误判。目前这种方法开展的相关研究还比较有限,缺乏与频率响应法的对比分析,其可行性尚值得深入探讨。

文中利用扫频阻抗法的测试原理,建立实验室测试系统,通过对单相双绕组变压器的测试,分析在相同测试环境下频率响应分析法与扫频阻抗法测试结果的异同,通过对模拟匝间短路故障的测试,验证了利用扫频阻抗法检测绕组匝间短路故障严重程度的可行性。

1 扫频阻抗法测试原理

试验室中搭建的扫频阻抗测试系统,包括以下几部分:信号发生器、功率放大器、采样电阻、数据采集卡、测试线与夹具,见图1。

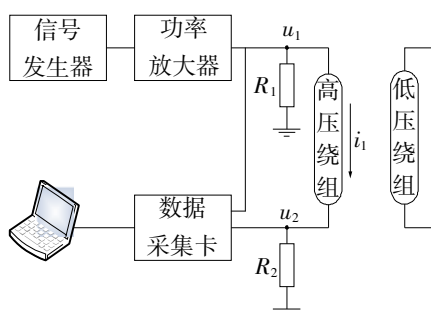


图1 扫频阻抗法测试原理

Fig. 1 Testing principle of SFI method

图1中功率放大器的作用为:增大施加到变压器绕组上的激励电压,同时增大流过绕组的电流,从而提高测试的信噪比,并保证测试得到的扫频阻抗曲线的准确性。

由图1可知,测试时,变压器低压侧绕组短路,高压侧绕组与测试系统相连,利用信号发生器产生10 Hz~1 MHz的稳定正弦波电压信号,该信号经过功率放大器后,其幅值增大为原来的10倍,通过数据采集卡得到此时的电压信号 u_1 ,然后将该放大信号加载于变压器高压侧绕组,并记录其响应信号 u_2 ,利用采集到的电压信号 u_1 和 u_2 ,可得变压器的扫频阻抗

$$Z_k(j\omega) = \frac{u_1(j\omega) - u_2(j\omega)}{i_1(j\omega)} = R + jX(\omega). \quad (1)$$

经变换可得阻抗模值

$$|Z_k| = \sqrt{R^2 + X^2}. \quad (2)$$

式(1)、(2)中: ω 为正弦波信号的角频率,rad/s; R 为线圈电阻, Ω ; X 为线圈电抗, Ω 。为了更好地对变压器故障进行判断,对阻抗模值进行分贝化转换

$$Z_i = 20 \lg(|Z_k|). \quad (3)$$

由于 Z_k 的单位为 Ω ,故可定义 Z_i 的单位为dB Ω 。

利用式(3)得到扫频阻抗曲线后,根据相关系数的定义^[20]对正常与故障曲线进行判定,计算方法为

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 \sum_{i=1}^n y_i^2}}. \quad (4)$$

式(4)中, $X\{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$ 和 $Y\{y_1, y_2, y_3, \dots, y_n\}$ 分别为2次测试得到的扫频阻抗序列。

从上述测量原理可以看出,扫频阻抗法是一种全新的测试方法,能较好地结合了短路阻抗法和频率响应分析法的优点,提高了测试信噪比,有效降低对变压器绕组变形故障的误判。利用该方法在变压器故障前/后得到的扫频阻抗曲线可较为快捷地判断变压器故障的类型和位置,同时通过比较两次测试数据50 Hz处的阻抗值变化,能够进一步确认故障,因此这种方法也很好地将频率响应法及短路阻抗法结合了起来。

2 试验对象

文中试验对象为单相双绕组变压器,其具体参数见表1。该变压器高/低压绕组首末端皆由套管引出,变压器箱体顶端安装有低压绕组首末端套管a、x与高压绕组首端套管A,而箱体侧面则为高压绕组末端分接头套管 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 ,单相双绕组变压器见图2。

表1 单相变压器参数

Table 1 Parameters of single phase transformer

类型	标称值	类型	标称值
出厂日期	2014年1月	相位数量	1
额定电压/V	(10 000+3×2.5%)/220	分接头数量	4
额定电流/A	3.00/136.36	工作频率/Hz	50
额定容量/kVA	30	冷却方式	ONAN



图2 单相双绕组变压器

Fig. 2 Single phase transformer model

图 2 中: X_1 为最大分接; X_4 为额定分接, 且两相邻分接头之间线圈相差 64 匝, 见图 3。变压器绕组机械性故障主要表现为绕组电感、对地电容和纵向电容的改变, 因此通过在该变压器的不同分接头间串并联导线、电感和电容便能有效模拟绕组短路、位移等故障形式。

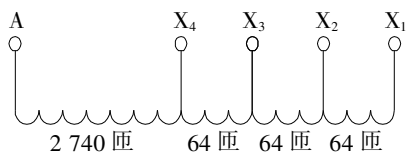


图 3 绕组内部分接头位置

Fig. 3 Taps position of winding

3 测试结果及其分析

3.1 变压器扫频阻抗法与频响法的比较

为了证明扫频阻抗法的优点, 文中对同一正常变压器进行频率响应分析法与扫频阻抗法测试, 且 2 次测试的激励端与响应端皆分别为套管 A 与额定档套管 X_4 , 测试结果见图 4。

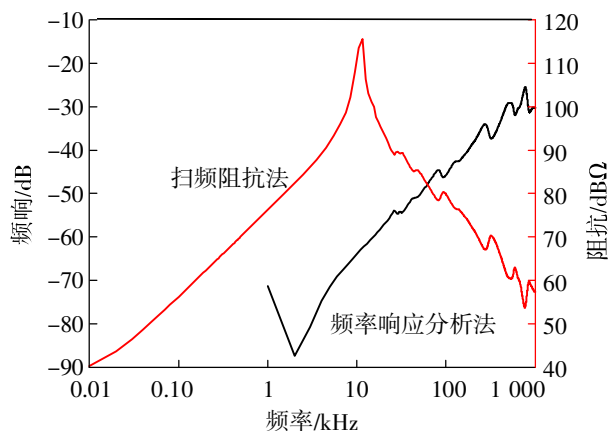


图 4 扫频阻抗法与频响法的比较

Fig. 4 Comparison between SFI and FRA methods

由图 4 可知, 当频率大于 11.5 kHz 时, 扫频阻抗曲线与频响曲线呈现上下对称性, 具体表现为前者的幅值与频率成负相关, 而后者的幅值则与频率成正相关, 但两者谐振频点位置基本相同, 因此可知扫频阻抗法具有与频响法相似的测试灵敏度, 其曲线变化能够准确反映变压器绕组状况。

提取扫频阻抗曲线 50 Hz 处的值进行变换后, 可得到变压器阻抗电压百分比, 见表 2。

表 2 单相变压器阻抗电压百分比测试值

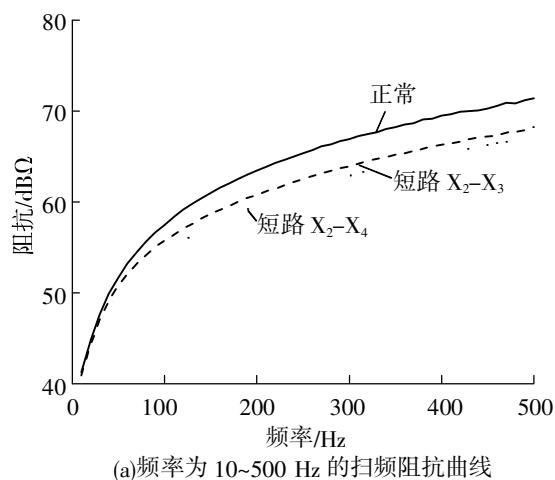
Table 2 Comparison between the values from measurement and nameplate

参数	$Z/\text{dB}\Omega$	Z_k/Ω	$U_k/\%$
铭牌值	—	—	10.39
测试值	50.51	335.35	10.06

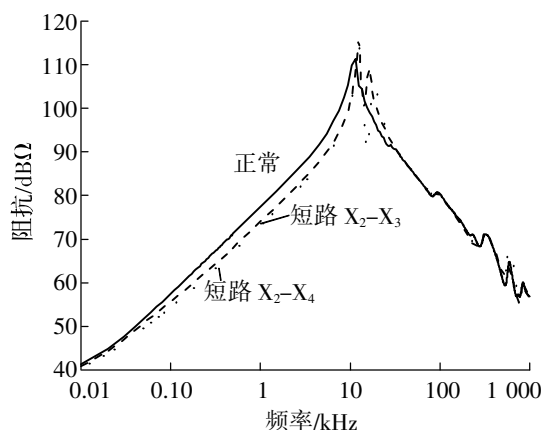
表 2 中: Z_k 为短路阻抗值; U_k 为阻抗电压百分比。通过比较可知, 测试得到的阻抗电压百分比基本等于铭牌值, 故扫频阻抗曲线 50 Hz 处的值可近似等效为变压器短路阻抗值, 由此利用 2 次测试得到的阻抗值间的偏差便可进一步判断变压器绕组的状况^[12]。正是由于扫频阻抗法能够得到被测变压器的短路阻抗值, 可用于绕组状态的判断, 因此扫频阻抗法比频率响应法要多一个判据, 可认为是频率响应法和短路阻抗法的一个结合, 且是通过一次测试、一台设备直接可以测量得到。

3.2 变压器匝间短路故障

为了研究变压器绕组发生短路故障时的扫频阻抗曲线变化情况, 文中短接导线于 X_2 和 X_3 及 X_2 和 X_4 间用于模拟不同严重程度的绕组匝间短路故障, 且激励端为绕组首端套管 A, 响应接收端为绕组接入最多处, 即套管 X_1 , 将得到的短路故障阻抗曲线与正常情况进行比较, 见图 5。



(a) 频率为 10~500 Hz 的扫频阻抗曲线



(b) 频率为 10 Hz~1 MHz 的扫频阻抗曲线

图 5 短路故障与正常情况阻抗曲线的比较

Fig. 5 Comparison between short circuit fault and normal

通过图 5 可看出, 在频率为 10 Hz~10 kHz 时, 短路故障曲线与正常曲线相比会出现较为明显的幅值降低与谐振点偏移, 且故障越严重, 趋势越明显。

将故障时 50 Hz 处的阻抗值与正常情况进行比较,见表 3。

表 3 故障与正常单相变压器的阻抗电压百分比测试值

Table 3 Comparison between the values from short circuit fault and normal

变压器状态	$Z/\text{dB}\Omega$	Z/Ω	$U_k/\%$	$\Delta U_k/\%$
正常	51.72	385.48	10.76	0.00
绕组短路 X_2-X_3	50.75	344.75	9.62	-10.59
绕组短路 X_2-X_4	49.62	302.69	8.45	-21.47

表 3 中, ΔU_k 为阻抗电压百分比偏差。由表 3 可知, 短路故障会引起扫频阻抗曲线 50 Hz 处的值发生较大改变, 且其阻抗偏差超过 $\pm 2\%$ 的正常范围^[12], 故能够判定绕组故障; 同时, 短路故障越严重, 其阻抗电压百分比偏差越大。

当频率继续升高到 10~40 kHz 时, 2 条短路故障曲线皆会有一个较大的波谷出现; 而频率为 40~500 kHz, 正常曲线与故障曲线则吻合较好, 随着频率增大到 500 kHz~1 MHz 时, 故障曲线与正常曲线之间再次出现偏差, 表现为频率小于 800 kHz 时, 绕组抽头 X_2-X_4 短路的故障曲线幅值最大; 而频率大于 800 kHz 时, 故障与正常曲线则基本重合。为更好地研究故障曲线相对于正常曲线的不同, 通过式(4)得 3 条曲线的相关系数^[20], 见表 4。

表 4 故障与正常阻抗曲线相关系数

Table 4 Correlation coefficients between fault and normal

频率范围	短路 X_2-X_3 与正常	短路 X_2-X_4 与正常
10~100 Hz	1.000 0	0.999 9
100 Hz~1 kHz	1.000 0	1.000 0
1~10 kHz	1.000 0	1.000 0
10~100 kHz	0.999 7	0.999 5
100 kHz~1 MHz	0.999 9	0.999 6

根据表 4 可知, 在频率为 10 Hz~100 kHz 时, 绕组抽头 X_2-X_3 间短路故障与正常阻抗曲线的相关系数皆为 1.000 0, 证明两者相似程度较高, 当频率升高到 10~100 kHz 和 100 kHz~1 MHz 时, 相关系数分别降为 0.999 7 与 0.999 9, 说明 2 条曲线在较高频率时会出现一定的波形差异; 而绕组抽头 X_2-X_4 短路故障曲线与正常曲线的相关系数则在 3 个频段处(频率为 10~100 Hz、10~100 kHz 及 100 kHz~1 MHz 时)小于 1, 这也证明了故障越严重相关系数的相似程度越小, 说明扫频阻抗曲线的相关系数及 50 Hz 处的阻抗值皆可用于描述绕组短路故障的严重程度。

综上所述, 扫频阻抗法可有效地检测变压器绕组变形, 其不仅具有与频响法相似的测试灵敏度, 且能够准确判断绕组匝间短路故障的严重程度。

4 结论

文中介绍了扫频阻抗法的基本原理, 并采用该法对单相双绕组变压器进行了测试, 得到结论为:

1) 扫频阻抗法具有与频响法相似的测试灵敏度, 能较好地反映变压器绕组分布式参数的变化, 当测试频率大于某特定值时, 其阻抗曲线与频响曲线会呈现上下对称关系。

2) 扫频阻抗曲线 50 Hz 处的阻抗值等效于变压器短路阻抗值, 因此可采用电力标准中阻抗偏差的概念来判断变压器绕组是否出现变形, 且阻抗曲线的变化也能利用相关系数来表述。

3) 变压器短路故障利用 50 Hz 处阻抗值偏差与相关系数皆可进行判断, 且匝间短路故障越严重, 其阻抗电压百分比偏差越大, 相关系数变化越明显。

参考文献:

- [1] 杨双锁, 张冠军, 董明, 等. 基于频域介电谱试验的 750 kV 变压器绝缘状况评估[J]. 高压电器, 2010, 46(4): 16-20.
YANG Shuangshuo, ZHANG Guanrun, DONG Ming, et al. Insulation condition evaluation of 750 kV power transformers based on frequency domain spectroscopy[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(4): 16-20.
- [2] 陈立, 郭丽娟, 邓雨荣. 基于状态和风险评估的老旧变压器安全经济性管理分析[J]. 高压电器, 2012, 48(2): 81-85.
CHEN Li, GUO Lijuan, DENG Yurong. Safety and economics analysis of the aged transformer based on the condition evaluation and risk assessment [J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(2): 81-85.
- [3] 沈煜, 阮玲, 罗维, 等. 基于漏感抗在线识别的变压器绕组变形监测技术的研究[J]. 高压电器, 2012, 48(12): 44-48.
SHEN Yu, RUAN Ling, LUO Wei, et al. On line monitoring of transformer winding deformation based on identification of leakage inductance [J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(12): 44-48.
- [4] 邹国平, 何文林, 董雪松, 等. 一起变压器近区短路冲击的诊断与分析[J]. 高压电器, 2013, 49(12): 95-98.
ZOU Guoping, HE Wenlin, DONG Xuesong, et al. Diagnosis and analysis of nearby short-circuit impact on transformer [J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12): 95-98.
- [5] 富强. 突发短路故障造成变压器损坏的原因分析及预防措施[J]. 高压电器, 2008, 44(6): 569-573.

- FU Qiang. Analysis and prevention of sudden short circuit fault in power transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(6): 569-573.
- [6] 杨静, 盛慧慧, 魏晓伟. 500 kV 变压器内部短路损坏事故分析[J]. 高压电器, 2010, 46(6): 74-78.
YANG Jing, SHENG Huihui, WEI Xiaowei. Analysis of a 500 kV transformer inner short circuit damage[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(6): 74-78.
- [7] 王梦云. 110 kV 及以上变压器事故与缺陷统计分析[J]. 供用电, 2007, 24(1): 1-5.
WANG Mengyun. Statistic analysis of transformer's faults and defects at voltage 110 kV and above[J]. Distribution & Utilization, 2007, 24(1): 1-5.
- [8] 王梦云. 2004 年度 110 kV 及以上变压器事故统计分析[J]. 电力设备, 2005, 6(11): 35-41.
WANG Mengyun. Statistics and analysis of 110 kV and the above transformer fault in 2004[J]. Electrical Equipment, 2005, 6(11): 35-41.
- [9] 王梦云. 2002—2003 年国家电网公司系统变压器类设备事故统计与分析(一)[J]. 电力设备, 2004, 5(10): 20-26.
WANG Mengyun. Faults statistics and analysis for equipments of transformer's type in SG system in 2002—2003[J]. Electrical Equipment, 2004, 5(10): 20-26.
- [10] 唐纲. 频响法分析变压器绕组变形[D]. 成都: 西华大学, 2007.
TANG Gang. Frequency response analysis for winding deformation of power transformer[D]. Chengdu: Xihua University, 2007.
- [11] 丁刚. 大型变压器在现场吊罩检查的探讨[J]. 电力建设, 1987, 8(9): 43-50.
DING Gang. Study of onsite examination to dedanking winding from large transformer[J]. Electric Power Construction, 1987, 8(9): 43-50.
- [12] 龙凯华, 杨海超, 马继先, 等. 电力变压器绕组变形诊断有效性研究[J]. 变压器, 2013, 50(9): 54-57.
LONG Kaihua, YANG Haichao, MA Jixian, et al. Research on diagnosis validity of power transformer winding deformation[J]. Transformer, 2013, 50(9): 54-57.
- [13] 陈巧勇, 任红, 罗平, 等. 电力变压器绕组变形的综合诊断法[J]. 高压电器, 2011, 47(7): 50-53.
CHEN Qiaoyong, REN Hong, LUO Ping, et al. Comprehensive diagnosis method of winding deformation of power transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(7): 50-53.
- [14] 沈煜. 1 000 kV 特高压变压器现场绕组变形测量与分析[J]. 高压电器, 2010, 46(6): 6-9.
SHEN Yu. On site deformation measurement and analysis of a 1 000 kV ultra high voltage power transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(6): 6-9.
- [15] 刘勇, 梁笑尘, 汲胜昌, 等. 变压器套管容性故障对频响曲线的影响[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(2): 62-68.
LIU Yong, LIANG Xiaochen, JI Shengchang, et al. Influence of transformer bushing capacitive fault on frequency response curves[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(2): 62-68.
- [16] 刘勇, 崔彦捷, 秦睿, 等. 变压器套管故障对频响曲线影响的仿真研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2406-2415.
LIU Yong, CUI Yanjie, QIN Rui, et al. Simulation study of influence of transformer bushing fault on frequency response curves[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2406-2415.
- [17] 曹小龙, 胡春梅, 曹小虎, 等. 变压器频率响应法测试结果的影响因素分析及改善[J]. 高压电器, 2012, 48(7): 81-87.
CAO Xiaolong, HU Chunmei, CAO Xiaohu, et al. Influencing factors on deformation diagnosis of transformer windings[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(7): 81-87.
- [18] 刘勇, 汲胜昌, 梁笑尘, 等. 检测变压器绕组变形的扫频阻抗法原理及应用[J]. 绝缘材料, 2014, 47(3): 85-88.
LIU Yong, JI Shengchang, LIANG Xiaochen, et al. Principle and application of sweep frequency impedance method for detecting transformer winding deformation[J]. Insulating Materials, 2014, 47(3): 85-88.
- [19] 贺家李, 贺继红, 汪国新, 等. 特高压变压器的阻抗快速后备保护[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 1-8.
HE Jiali, HE Jihong, WANG Guoxin, et al. Impedance backup protection for UHV large capacity transformers[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 1-8.
- [20] 栗磊, 宋小会, 刘星, 等. 串变调压电炉变压器差动保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 118-121.
LI Lei, SONG Xiaohui, LIU Xing, et al. Research on differential protection of the furnace transformer which adopts series transformer used for voltage-regulation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 118-121.
- [21] 陈奎, 程天华, 陈景波, 等. 过电流保护在变压器合闸过程中的自适应策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 136-141.
CHEN Kui, CHENG Tianhua, CHEN Jingbo, et al. Adaptive strategy for overcurrent protection in process of transformer closing[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 136-141.
- [22] LIANG Xiaochen, JI Shengchang, WANG Wei, et al. The Application of SFRA in the diagnosis of transformer winding deformation[C]//International Symposium on High Engineering. Korea: KIEE, 2013: 203-206.
- [23] RYDER S A. Diagnosing transformer faults using frequency response analysis[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2003, 19(2): 16-22.
- 孙翔(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事变压器类设备的运行、管理及状态检修。