

变压器内绕组短路试验模型的计算与分析

李健¹, 李岩¹, 孙昕¹, 井永腾^{1,2}, 曲光磊³

(1. 沈阳工业大学输变电技术研究所, 沈阳 110870; 2. 特变电工沈阳变压器集团有限公司, 沈阳 110870;

3. 安世亚太科技(北京)有限公司, 北京 100000)

摘要: 笔者应用有限元软件 ANSYS 对变压器短路试验模型进行了仿真分析。当撑条取不同弹性模量值时, 计算了绕组线饼的变形; 通过改变撑条圆周方向尺寸, 计算得出了对应 4 种撑条尺寸的线饼的径向位移; 采用短路电流下的载荷对模型进行计算分析, 得出的线饼的变形最大值 2.62 mm 与实测值 2.906 mm 基本吻合。文中的分析方法可用于大容量变压器的绕组短路强度和径向稳定性分析。

关键词: 大容量变压器; 短路试验模型; 径向稳定性; 短路强度

中图分类号: TM402 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2012)03-0031-05

Calculation and Analysis of Short-circuit Test Model of Internal Winding in Transformer

LI Jian¹, LI Yan¹, SUN Xin¹, JING Yong-teng^{1,2}, QU Guang-lei³

(1. Research Institution of Transmission and Transformation Electricity, Shenyang University of Technology,

Shenyang 110870, China; 2. TBEA Shenyang Transformer Group Co., Ltd., Shenyang 110870, China;

3. PERA Global Science and Technology(Beijing) Co., Ltd., Beijing 100000, China)

Abstract: This paper processes simulate analysis of short-circuit test model of transformer, using finite element analysis software ANSYS. The winding and disk deformation is calculated in different elastic modulus value of strip; By changing the size of strip circumferential direction, radial displacement of disk is calculated corresponding to the four strip size; The model is calculated and analyzed in the load of short-circuit test, the maximum deformation 2.62 mm of disk obtained is consistent with actual measured value 2.906 mm. This analysis method in paper can be used for large power transformer winding short-circuit strength and radial stability analysis.

Key words: power transformer; short-circuit test model; radial stability; short-circuit strength

0 引言

绕组短路强度和稳定性问题是大容量电力变压器设计的一个关键问题。随着电力系统的发展, 变压器的容量和电压等级也在提高, 750 kV、1 000 kV 电压等级的大容量变压器已投入运行。然而, 受试验条件的限制, 目前这些超、特高压变压器的产品级短路试验还不能进行, 对于绕组短路强度和稳定性的考核主要依靠模型试验和计算进行^[1-4]。

为了保证模型的等效性, 首先应对实际变压器

绕组短路力的分布进行计算和分析, 其目的是确定最大受力的区域, 并以此区域的若干局部线段作为短路试验模型, 通过在结构和磁路等方面的设计使得模型受力与实际变压器绕组受力相当^[5]。通过对模型的短路试验可以间接考核实际变压器绕组的短路强度和稳定性, 此外, 对模型的短路力进行计算并与试验结果进行对比, 分析支撑材料特性对短路强度的影响, 可以得出有效的变压器绕组短路强度分析方法并用于产品级计算校核。为此, 笔者针对一台大容量变压器内绕组径向失稳模型进行了绕组承受短路电力的静态分析, 以及绕组位移的变化过

收稿日期: 2011-10-22; 修回日期: 2011-11-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51177103)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51177103).

程分析。

1 用于径向失稳研究的试验模型

大容量变压器在短路过程中,短路电流与漏磁场相互作用使绕组产生巨大的短路力。通常外绕组受到向外的拉力,内绕组受到向内的压力。对于内绕组而言,如果抗短路强度能力不够,可能发生内绕组压弯或者动力失稳,导致线匝绝缘破裂,因绝缘损坏而发生故障。径向失稳可以描述为在径向短路力作用下,内绕组在圆周方向一个撑条间距内或者多个撑条间距内向内凹进,或者向外凸出均视为失稳发生^[5]。如果考虑电磁力的瞬态效应,短路电磁力可以用式(1)表示。

$$F = K_{F_{id}} i_{d \max}^2 = K_{F_{id}} i_{d \max}^2 \left[\frac{1}{2} + e^{-2t/T_s} - 2e^{-t/T_s} \cos \omega t + \frac{1}{2} \cos 2\omega t \right] \quad (1)$$

式(1)中, K_F 为决定电动力系数。

内绕组的径向力为向内的压缩力,这个径向载荷有直流分量、基频分量和倍频分量 3 部分组成^[6-7]。式(1)反映了绕组受力载荷随时间的变化关系。载荷力可以通过解析方法和有限元数值方法得出。

试验模型的原型为容量 250 MV·A、电压等级 500 kV 的自耦电力变压器中压绕组,按照其中部大约 1/6 高度段数的线规和结构尺寸设计^[3]。内绕组内径 801 mm,外径 999 mm,轴向 16 个线饼,垫块和撑条数量均为 36,模型见图 1。

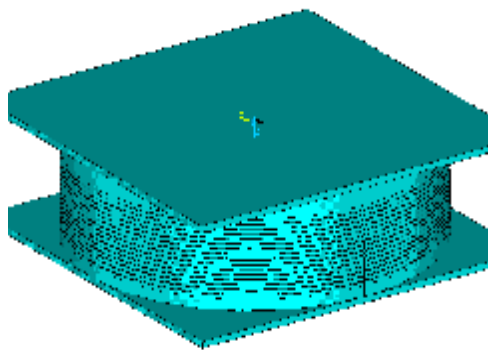


图 1 试验模型建模

Fig. 1 Test model modeling

应用 ANSYS 软件对上述试验模型进行仿真分析,剖分单元选择 SOLID95 单元,进行材料和结构双重非线性设置^[8],软铜导线没有明显的屈服强度,采用为 100 MPa 为屈服强度^[9],绕组导线的应力应变关系见图 2。

对模型进行自由手动剖分。根据文[3]提供的试验模型数据,中间 12 个线饼每饼单位圆周长度载荷

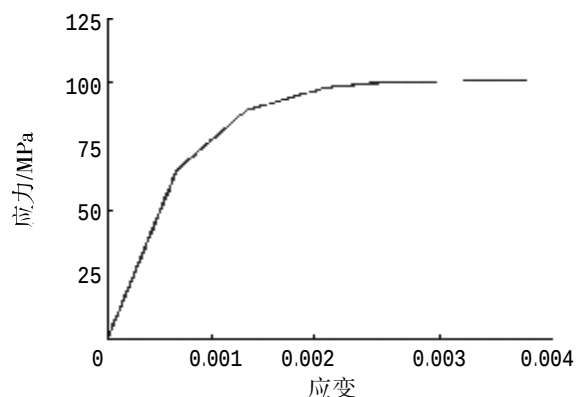


图 2 线圈的应力应变关系

Fig. 2 Stress-strain relationship of winding

为 -122.5 N/mm,在整个圆周上线饼受力 692 721 N,端部 4 个线饼每饼单位圆周长度受力为 -103.53 N/mm,整个圆周上受力为 585 448 N。圆周长取为内绕组平均半径周长,加载方向为径向,撑条的弹性模量和应力应变关系都是随预压力变化的,这是分析的不确定因素^[10-12]。对于变压器绕组损耗产生的热以及温升对软铜导线的影响可以忽略。

2 试验模型的计算与分析

2.1 弹性模量对绕组变形的影响

确定分析模型,进行材料和结构双重非线性分析,前处理过程如上所述。撑条材料近似成线性,对应力应变关系未加设置,改变撑条的弹性模量 E 来仿真绕组位移的变化情况。设置 6 组不同的弹性模量值进行仿真计算,求解方式为大应变静态非线性求解,模型单元数为 12 953,设置适当的载荷步以及载荷子步。通过 6 组不同弹性模量下的结果对比,得到了弹性模量 E 和线饼径向位移的关系,见表 1。

表 1 弹性模量 E 的变化对绕组的影响

Tab. 1 The elastic modulus change influence on winding

弹性模量/MPa	位移/mm	偏转角度/(°)	等效应力/MPa
3.5	2.679	2.380×10^{-3}	59.3
7	1.400	1.140×10^{-3}	58.4
15	0.953	0.630×10^{-3}	57.5
50	0.624	0.304×10^{-3}	55.2
100	0.522	0.210×10^{-3}	53.0
150	0.471	0.168×10^{-3}	51.5

从表 1 中可以看出弹性模量为 3.5 MPa 时,各项数据均达到六组数据中的最大值:位移 2.679 mm,周向偏转 $0.002\ 38^\circ$,等效应力为 59.3 MPa。弹性模量最大为 150 MPa,各项数据达到最小值。弹性模量为 3.5 MPa 时,模型的变形见图 3,从上到下线饼依次编号。模型内绕组在第一个峰值时受到向内压缩

的短路电磁力,使线饼向内压缩,但是压缩过程中由于模型本身具有一定的强度,在撑条的作用下,会有一部分线匝沿径向移动,即绕组一侧 2.679 mm 的位移表示绕组导线向绕组中心轴方向(径向)移动了 2.679 mm。由于绕组中部的轴向漏磁场偏大,所以在中部线饼产生的径向力大于上下两端,导致中部线饼的变形明显大于两个端部的变形,这是符合实际工况的。试验模型在受径向载荷时,使绕组线匝变形,在圆周方向也有体现,使线匝向径向的法线两侧移动,形成偏转角,但这个偏转的角度不大,这是因为径向载荷起主要作用。

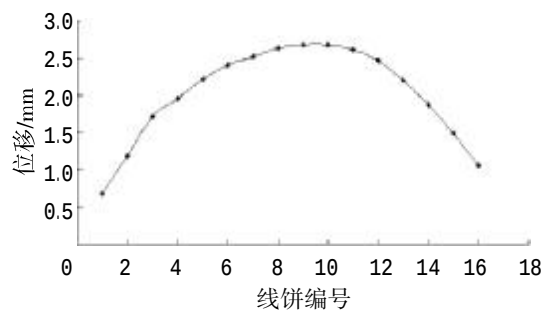


图 3 弹性模量为 3.5 MPa 时各线饼的径向变形
Fig. 3 Elastic modulus at 3.5 MPa radial distortion of each disk

计算得出的线饼等效应力见图 4。此时的等效应力为 59.3 MPa。从表 1 中可以看出,在弹性模量变化过程中,绕组的变形在逐渐变化,但是绕组的等效应力变化不大。

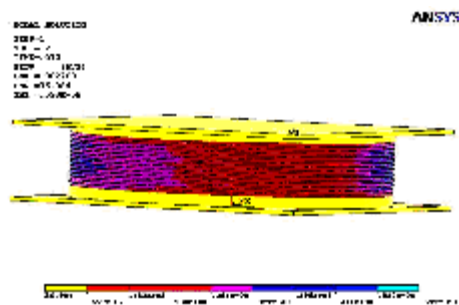


图 4 线饼的等效应力
Fig. 4 Equivalent stress of disk

进一步对这 6 组数据和曲线加以分析,将上述数据转化为图表形式可以清晰地反应出各个量的变化关系。从图 5 可知,线匝的位移随弹性模量的增加呈减小趋势,在弹性模量较小时,位移的变化相对明显,在弹性模量大于 20 MPa 时,径向变形的幅度变化不大。

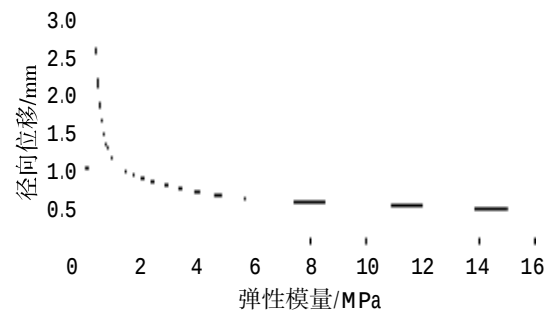


图 5 绕组径向变形随弹性模量的变化关系
Fig. 5 Winding radial deformation in relations with change of elastic modulus

改变弹性模量,模型的等效应力变化不明显,在较大的弹性模量变化范围内,模型的等效应力均在 50~60 MPa 之间变化,并且具有近似线性变化特点,见图 6。

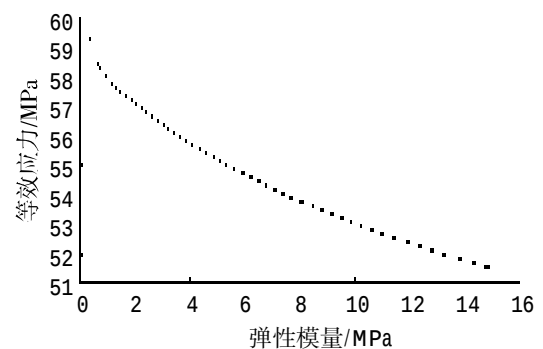


图 6 线圈等效应力随弹性模量的变化关系
Fig. 6 Winding equivalent stress in relations with change of elastic modulus

2.2 撑条的周向尺寸对线饼变形的影响

通过上述分析以及参考试验测量数据(见表 2),改变撑条的圆周方向尺寸进行仿真计算。

表 2 AIO 通道测量波形幅值的变化

Tab. 2 Measurements waveform amplitude change in AIO channel

电流/A	1 波谷/ mm	1 波峰/ mm	1 谷-1 峰/ mm	2 波谷/ mm	1 峰-2 谷/mm	2 波峰/ mm	2 谷-2 峰/mm	3 波谷/ mm	2 峰-3 谷/mm	基线 位移/mm
96.3%, 9 437	-2.906	-0.676	-2.230	-3.927	+3.251	-2.181	-1.746	-3.809	+1.628	-1.327

根据试验模型撑条的尺寸约为 17.6 mm,采用不同的周向尺寸(圆周角度为 1.4°、1.28°、1.12°、0.95° 4 种情况)仿真线饼变形对比,这 4 个角度对应的圆弧长度(宽度)分别为 22、20、17.6、15 mm。撑条

的弹性模量取 10 MPa 进行分析。加载载荷为非对称短路电流的电磁力,分析结果见表 3。

模型在不同撑条尺寸下的变形结果有明显的差异,线饼的位移随撑条的尺寸减小而增大。在结构分

表 3 模型的仿真结果

Tab. 3 The simulation results of the model

撑条宽度/mm	位移/mm	偏转角度/(°)	等效应力/MPa
22.0	1.17	0.86×10^{-3}	58.4
20.0	1.97	1.31×10^{-3}	65.6
17.6	2.82	2.67×10^{-3}	62.4
15.0	3.21	3.78×10^{-3}	61.6

析中,线饼相当于曲面梁,撑条相当于铰支座,支座的承载面积与梁的变形有关,所以体现在撑条的尺寸变化引起梁的变形幅度也在改变。周向偏转是由于径向变形引起的,所以它的变化是径向位移的作用结果。分析表 3 中的数据,可知在撑条的周向尺寸为 17.6 mm 条件下,试验模型线饼的径向位移为 2.82 mm,与试验测量值基本相符,位移计算结果见图 7。

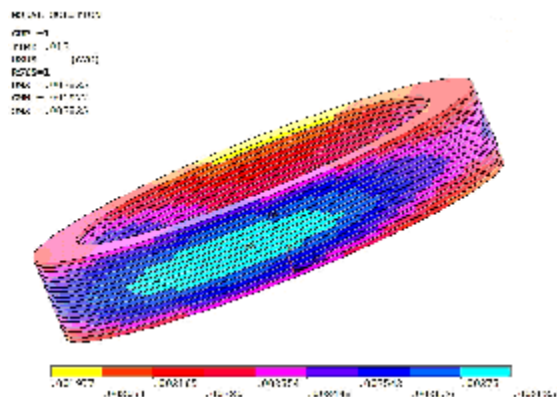


图 7 撑条宽度为 17.6 mm 时的线饼变形

Fig. 7 Disk displacement at the width of 17.6 mm strip

2.3 测量载荷作用下的绕组变形分析

从以上分析中可以看出模型的线饼变形随撑条尺寸的减少而增加。综合以上 4 组数据和测量数据进行对比分析,短路力载荷在第 1 个周期内变化时线饼最大变形为 2.906 mm,这个变形位移是在 96.3% 短路电流下测量所得的位移。所以按照仿真模型中撑条宽度尺寸为 17.6 mm 的模型进行计算,加载 96.3% 短路电流下的载荷,计算结果如下:撑条的径向尺寸为 9 mm、周向宽度为 17.6 mm 时,模型的总体变形最大值为 2.62 mm,见图 8,与实测值基本吻合,误差为 9.84%。表 4 给出了试验最大载荷作用下的线饼位移等结果。由于没有考虑绕组温升导致的热应力对线饼变形的影响^[13-14],所以绕组变形的计算值略小于试验测量值。仿真结果能够较准确地描述线饼的变形情况。笔者给出的分析方法可用于大型变压器短路强度计算和绕组稳定性校核。

3 结论

1) 针对变压器短路试验模型进行仿真分析,

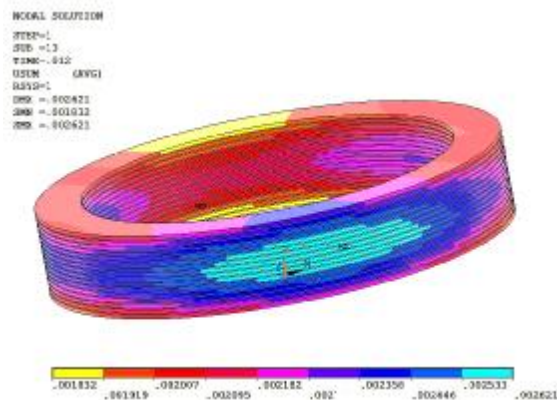


图 8 最大试验载荷(96.3%电流)作用下线饼变形

Fig. 8 Disk displacement at the maximum test load (96.3% current)

表 4 最大试验载荷作用下的计算数据

Tab. 4 The calculated data at the maximum test load

撑条 尺寸/mm	线饼 位移/mm	偏转角/(°)	线饼 应力/MPa	撑条 应力/MPa
17.6	2.62	2.48×10^{-3}	55.5	0.74

当撑条取不同弹性模量(即绕组的刚度参数)值时,计算了绕组线饼的变形,得出线饼径向变形随撑条的弹性模量增加而减小,且当弹性模量小于 20 MPa 时,这种影响作用相对明显,而大于 20 MPa 时,弹性模量的变化引起线饼位移变化不大。

2) 从结构上看,计算模型是一个多跨模型,撑条看做模拟铰支座,线饼相当于曲面梁。撑条的周向宽度增加即增加支座的承载面积,减小了曲面梁的弯曲程度。通过改变撑条圆周方向尺寸 (22、20、17.6、15 mm),计算得出线饼径向位移在撑条周向尺寸为 15 mm 时,变形达到最大值 3.21 mm。撑条为 22 mm 时变形为 1.17,所以适当增加撑条的宽度可以增加短路强度。

3) 在撑条的径向宽度为 9 mm,周向宽度为 17.6 mm 时,采用 96.3% 短路电流下的载荷对模型进行仿真分析,可得模型中线饼的变形最大值为 2.62 mm,与实测值基本吻合,误差为 9.84%。文中的分析方法可用于大容量变压器的绕组短路强度和稳定性分析。

参考文献:

- [1] 李英,董振华,詹凤顺,等.特大容量变压器短路径向稳定性的模型模拟实验[J]. 变压器,2003,40(11):1-7.
LI Ying, DONG Zhen-hua, ZHAN Feng-shun, et al. Radial stability of high capacity transformer with model during simulated short-circuit test[J]. Transformer, 2003, 40 (11): 1-7.

- [2] 谢毓城. 电力变压器手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
XIE Yu-cheng. Power transformer manual[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2003.
- [3] 孟庆民, 陈玉红, 洛君婷, 等. 大容量变压器内绕组辐向失稳特性的模拟研究[J]. 变压器, 2010, 47(4): 36-44.
MENG Qing-min, CHEN Yu-hong, LUO Jun-ting et al. Simulation research on radial stability of internal winding in large transformer[J]. Transformer, 2010, 47(4): 36-44.
- [4] 辛朝辉, 钟俊涛, 付铁军, 等. 大容量变压器内绕组短路强度研究[J]. 变压器, 2009, 46(8): 41-45.
XIN Zhao-hui, ZHONG Jun-tao, FU Tie-jun et al. Research on short circuit strength of inner winding of large transformer[J]. Transformer, 2009, 46(8): 41-45.
- [5] HOLM R D, HOECKER D A, ALLEN D W, et al. The short-circuit radial response of core-form transformer coils [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, PAS-104 (2): 468-476.
- [6] 余小辉. 变压器空载合闸及短路过程中绕组稳定性计算[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2008.
YU Xiao-hui. Calculation on windings stability in condition of switching no-load and short-circuit for transformer [D]. Shenyang: Shenyang University, 2008.
- [7] 刘爽. 大型电力变压器绕组短路强度计算与分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2007.
LIU Shuang. Calculation and analysis on the winding short-circuit strength in large power transformers [D]. Shenyang: Shenyang University, 2008.
- [8] 梁振光, 王春成, 唐任远, 等. 采用大位移几何非线性理论的变压器低压绕组辐向稳定性研究 [J]. 变压器, 2002, 39(10): 1-4.
LIANG Zhen-guang, WANG Chun-cheng, TANG Ren-yuan, et al. Research on radial stability of transformer low-voltage winding using large deformation geometric nonlinear theory. [J]. Transformer, 2002, 39(10): 1-4.
- [9] 杨俊海, 张元录. 变压器短路力学特性数值计算及其性能收绕组结构参数的影响 [J]. 变压器, 1997, 34(10): 28-32.
YANG Jun-hai, ZHANG Yuan-lu. Numerical calculation of mechanical characteristics for transformer in short-circuit and the influence of winding structural parameters on its performances[J]. Transformer, 1997, 34(10): 28-32.
- [10] 陈玉红, 杨杰, 孟庆民, 等. 变压器绕组短路振动辐向模拟信号的采集和分析[J]. 变压器, 2011, 48(4): 33-40.
CHEN Yu-hong, YANG Jie, MENG Qing-min, et al. Collection and analysis of radial simulated signal of short circuit vibration of transformer winding [J]. Transformer, 2011, 48(4): 33-40.
- [11] 李文海. 有关变压器承受短路力问题的商讨[J]. 变压器, 2005, 42(8): 8-11.
LI Wen-hai. Discussion on problems to withstand short-circuit force in transformer[J]. Transformer, 2005, 42(8): 8-11.
- [12] 王世山, 汲胜昌, 李彦明. 电缆绕组变压器线圈短路机械强度的计算[J]. 应用力学学报, 2006, 23(2): 275-279.
WANG Shi-shan, JI Sheng-chang, LI Yan-ming. Calculation to short-circuit mechanical strength for powerformer windings[J]. Journal of Applied Mechanics, 2006, 23(2): 275-279.
- [13] WANG H, BUTLER K L. Finite element analysis of internal winding faults in distribution transformers [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2001, 16(13): 422-428.
- [14] 曹志军, 胡家炘, 巨建民, 等. 大容量变压器线圈短路状态下非线性稳定性与动力稳定性 [J]. 变压器, 2003, 24(2): 31-35.
CAO Zhi-jun, HU Jia-xin, JU Jian-min, et al. Study of nonlinear and dynamic stabilities of large power transformer coils under short-circuit condition[J]. Transformer, 2003, 24(2): 31-35.
- 李健(1984—), 男, 硕士研究生, 从事电力变压器电磁场、短路力与结构强度的研究工作。
- 李岩(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事变压器、永磁电机以及工程电磁场问题的研究工作。
- 孙昕(1981—), 女, 在读博士研究生, 长期从事变压器电磁场及短路力问题的研究工作。
- 井永腾(1981—), 男, 在读博士研究生; 特变电工沈阳变压器集团有限公司, 主要从事变压器设计、损耗及热问题研究工作。
- 曲光磊(1982—), 男, 工程师, 主要从事应用软件开发和结构分析工作。
- 董衍旭(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为现代传感与测量技术。
- 韩旭彬(1977—), 男, 高级工程师, 从事电力系统分析和电力设备检测工作。
- 尚秋峰(1968—), 女, 教授, 从事现代传感与测量技术、实时信号处理的研究。
- 李竞攀(1986—), 女, 硕士研究生, 研究方向为现代传感与测量技术。

(上接第 30 页)

- [19] DONALDSON E F, GIBSON J R, JONES G R, et al. Hybrid optical current transformer with optical and power-line tenderization [J]. IEE Proceedings on Generator, Transmission and Distribution, 2000, 147(5): 304-309.
- [20] 尹永强, 古书燕, 叶磊. 一种用于电子式电压互感器的隔离电路的研究[J]. 高压电器, 2008, 44(1): 53-55.
YIN Yong-qiang, GU Shu-yan, YE Lei. An isolation circuit for electronic voltage transformer [J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(1): 53-55.