

干式空心电抗器匝间绝缘试验方法有效性分析

骆晓龙¹, 张 良¹, 王永红², 聂洪岩², 彭 翔¹, 陈 伟¹, 魏新劳²

(1. 南网超高压公司检修试验中心, 广东 广州 510600;

2. 哈尔滨理工大学 电气与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要: 对于 35 kV 及以下电压等级的干式空心电抗器, 按照 IEC 和国家标准规定, 匝间绝缘可以采用雷电冲击或匝间过电压两者之一进行试验. 按照 IEEE 和行业标准规定, 既要进行匝间过电压试验又要进行雷电冲击试验. 为弄清楚如何试验更合理, 以一台串联电抗器和一台并联电抗器为例, 数值解析了存在匝间短路故障时的电感变化量, 通过电路仿真研究了两种试验方法判断匝间短路故障的有效性, 绕制了一台电抗器样品进行了试验验证. 结果表明: 干式空心电抗器匝间短路故障时电感变化小, 靠雷电冲击波形判断匝间故障会造成误判, 而匝间过电压试验更容易发现匝间绝缘故障. 认为进行两种试验是必要的, 建议采纳 IEEE 及行业标准对试验方法的规定.

关键词: 干式空心电抗器; 匝间绝缘; 雷电冲击; 匝间过电压; 试验方法

中图分类号: TM47

文献标志码: A

文章编号: 1007-2683(2014)01-0074-05

Analysis of the Effectiveness of Turn-to-turn Insulation Test Methods for Dry-type Air-core Reactors

LUO Xiao-long¹, ZHANG Liang¹, WANG Yong-hong², NIE Hong-yan²,
PENG Xiang¹, CHEN Wei¹, WEI Xin-lao²

(1. Maintenance and Test Center of EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510600, China;

2. Electrical and Electronic Engineering College, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: According to IEC and national standards, the turn-to-turn insulation of dry-type air-core reactors with nominal system voltage 35kV and below could be tested by either the lightning impulse or the turn-to-turn over-voltage. But both the lightning impulse test and the turn-to-turn over-voltage test will be carried out according to the regulations of the IEEE and industrial standards. In order to make it clear that how to test is more reasonable, taking a series of reactor and a shunt reactor for example, numerical analyses on the inductance variation of the reactor with a turn-to-turn failure are carried out in this paper. The effectiveness of the turn-to-turn failure predication for these two test methods is researched by the circuit simulation, and the experimental verification is accomplished on a wound reactor sample. Research results indicate that, when the dry-type air-core reactor has a turn-to-turn fault there is a smaller inductance variation. The misjudgment may occur if the turn-to-turn failure is detected by lightning impulse waves. Moreover, the turn-to-turn over-voltage test is simpler to detect the failure. It is considered that doing two kinds of test is necessary, and it is suggested to accept the test method which is provided by IEEE and industrial standards.

Key words: dry-type air-core reactor; turn-to-turn insulation; lightning impulse; turn-to-turn over-voltage; test method

收稿日期: 2013-09-12

基金项目: 南方电网公司科技项目(K-GY2012-047); 黑龙江省科技攻关项目(GZ11A209).

作者简介: 骆晓龙(1978—), 男, 硕士, 工程师;

张 良(1981—), 男, 硕士, 工程师.

通讯作者: 聂洪岩(1984—), 男, 博士研究生, 讲师, E-mail: 15846606714@163.com.

0 引言

从上世纪九十年代开始,干式空心电抗器在电网中普遍使用.随着运行年限增加,近几年烧毁事故频发,多数故障是匝间绝缘缺陷造成匝间短路引发的^[1-3].因此,采取有效的试验方法对干式空心电抗器进行匝间绝缘检测,及时发现匝间绝缘缺陷,对确保电网安全运行非常必要.

传统的变压器类产品匝间绝缘试验方法是感应电压试验,雷电冲击试验为过电压试验.干式空心电抗器只有一个绕组且磁路开放,感应电压无法施加.开始一般通过雷电冲击代替感应电压试验,随着试验技术发展,近年来逐步采用匝间过电压(高频脉冲振荡电压)试验替代感应电压试验,它对干式空心电抗器持续施加 1 分钟数千次相同幅值的脉冲振荡波.

对于 35 kV 及以下电压等级的干式空心电抗器,国际标准 IEC60076-6 和国家标准 GB1094.6 仍然允许采用雷电冲击试验代替感应电压试验,同时允许采用匝间过电压试验代替雷电冲击试验,也就是两种试验选择其一即可^[6-7].美国标准 IEEE Std C57.16 及 IEEE Std C57.21、国家电网公司“10~66 kV 干式电抗器技术标准”、行业标准 JB/T10775 及 JB/T5346 采用匝间过电压试验代替感应电压试验,除此还需要进行雷电冲击过电压试验^[8-12],也就是两种试验都要进行.其中,国家电网公司“10~66 kV 干式电抗器技术标准”与 JB/T5346 标准对串联电抗器试验要求有所降低,可以仅进行雷电冲击试验.

既然按照国家标准要求雷电冲击和匝间过电压试验选择其一进行,就有必要弄清楚进行哪种试验更合理,是否有必要如同 IEEE 及行业标准要求进行两种电压试验.一些文献论证了匝间过电压试验方法的有效性^[13-19],但没有文献把两种试验方法试验效果进行对比,本文开展了相关工作.

1 匝间故障时干式空心电抗器电感变化

1.1 匝间故障时电感计算方法

干式空心电抗器为多层(层数为 n)并绕结构,其中某一层(第 i 层)出现匝间短路故障时,该层由短路匝与剩余匝构成,把短路匝看成第 $n+1$ 个支路,剩余匝为 i 个支路,含短路故障的干式空心电抗

器等值电路如图 1.

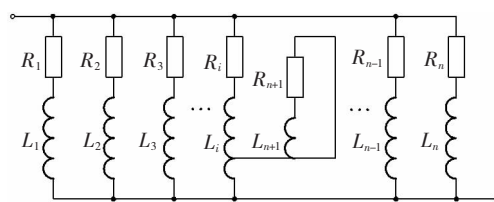


图 1 匝间故障的干式空心电抗器等值电路

各支路都由等值电阻 R 和自感 L 构成,所有支路间都存在互感 M ,它们可以通过结构参数精确计算^[20].当外施交流电压为 $\dot{U}$ 时,各支路电压组成的方程组为:

$$(R_i + j\omega L_i) \dot{I}_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n+1} j\omega M_{i,k} \dot{I}_k = \dot{U}$$

$$(R_{n+1} + j\omega L_{n+1}) \dot{I}_{n+1} + \sum_{k=1}^n j\omega M_{n+1,k} \dot{I}_k = 0$$

在雷电冲击和匝间过电压对应频率下,一般存在 $R_i \ll \omega L_i$ 关系,忽略等效电阻,上述方程组简化为:

$$j\omega L_i \dot{I}_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{n+1} j\omega M_{i,k} \dot{I}_k = \dot{U}$$

$$j\omega L_{n+1} \dot{I}_{n+1} + \sum_{k=1}^n j\omega M_{n+1,k} \dot{I}_k = 0$$

以上简化前后 $n+1$ 阶方程组中都有 $n+1$ 个电流变量,解方程组可以得到各电流值.则总电流为:

$$\dot{I} = \sum_{k=1}^n \dot{I}_k$$

根据欧姆定律可以求得匝间短路的干式空心电抗器的总体等值电阻和电感值.

1.2 匝间故障时电感值变化实例

实例 1 为一串联电抗器,层数 n 为 5,电感值为 5.4 mH,直流电阻为 0.034 3 Ω ,绕组平均匝数为 110,绕组平均直径为 0.44 m.按照上述方法计算,在高频下不同位置出现匝间故障时电感值变化情况如表 1.

表 1 匝间故障串联电抗器电感变化

故障匝所在层	故障匝轴向位置	故障后电感/mH	电感变化量/%
最内层	中部	4.72	13.9
	端部	5.09	7.13
最外层	中部	4.31	21.3
	端部	4.91	10.3

实例 2 为一并联电抗器,层数 n 为 20,电感值为 650 mH,直流电阻为 1.52 Ω ,绕组平均匝数为

655, 绕组平均直径为 2.175 m. 不同位置出现匝间故障时电感值变化情况如表 2.

表 2 匝间故障并联电抗器电感变化

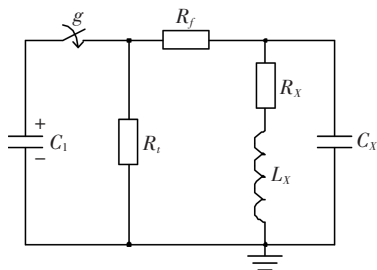
故障匝所在层	故障匝轴向位置	故障后电感/mH	电感变化量/%
最内层	中部	551.3	15.2
	端部	614.3	5.48
最外层	中部	525.1	19.2
	端部	606.9	6.61

计算结果表明: 对同一电抗器, 同一轴向位置外层短路比内层短路电感变化量大, 同一层轴向中部短路比端部短路电感变化大; 电感变化量大约在 5% ~ 20% 范围.

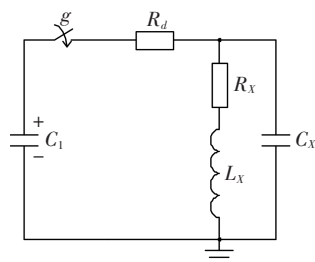
2 试验方法有效性仿真分析

2.1 放电等值电路

从单次工作过程看, 雷电冲击和匝间过电压都是先把主电容充电, 然后通过球隙开关把电压施加到电抗器试品. 雷电冲击试验由波头电阻和波尾电阻调节试验波形, 匝间过电压试验则直接施加到被试电抗器形成高频振荡. 匝间过电压试验和雷电冲击试验放电回路及他们的等值电路如图 2. 图中: C_1 为主电容; g 为球隙开关; R_f 为波头电阻; R_t 为波尾电阻; R_X 为电抗器等值电阻; L_X 为电抗器电感值; C_X 为电抗器杂散电容及电容分压器等电容值的和; R_d 为匝间过电压放电回路等值电阻.



(a) 雷电冲击试验放电回路

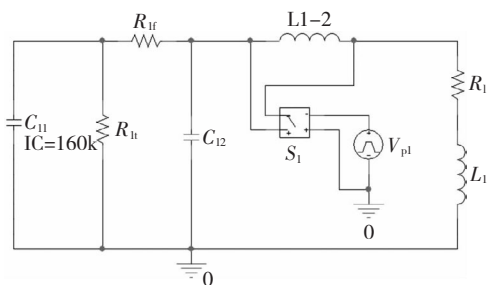


(b) 匝间过电压放电回路

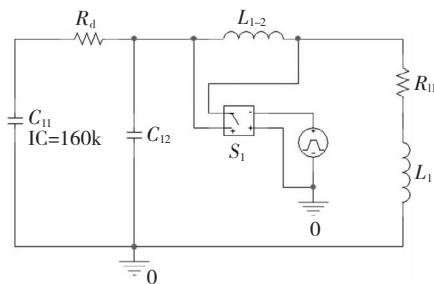
图 2 两种试验方法放电回路

2.2 仿真电路

对于雷电冲击仿真, 按图 2(a) 所示等值电路得到仿真电路如图 3(a) 所示; 对于匝间过电压仿真, 按图 2(b) 所示等值电路得到仿真电路如图 3(b) 所示. 按前一部分的计算, 电抗器存在匝间短路时电感减小. 在两幅图中 S_1 为一个由脉冲电压控制的常开开关, 仿真过程中在电压达到峰值时控制开关 S_1 闭合, 模拟电抗器在电压峰值时出现匝间短路. 无脉冲信号时, L_1 与 L_{1-2} 串联模拟完好的电抗器; 脉冲信号触发后 L_{1-2} 被短路, L_1 模拟存在短路匝的电抗器. 电路中的其它参数为可调整量, 每次仿真过程中, 按相应的波形对各参量适当调整, 至符合要求的波形为止.



(a) 雷电冲击仿真电路



(b) 匝间过电压仿真电路

图 3 两种试验方法的仿真电路

2.3 仿真结果

以 5.4 mH 串联电抗器电感最小变化量为 7.13% 及 650 mH 并联电抗器电感最小变化量为 5.48% 为例, 利用 orcad 软件对两种试验电路判断故障的有效性进行仿真. 雷电冲击电压下仿真结果如图 4, 匝间过电压下仿真结果如图 5.

图 4 结果中, 在雷电冲击电压下, 串联电抗器故障前后电压与电流波形都产生了微小变化; 并联电抗器故障前后电压波形基本观察不到变化, 故障前后电流波形幅值变化比较明显. 仿真结果表明, 在雷电冲击电压下故障前后电压与电流波形变化都不十分明显.

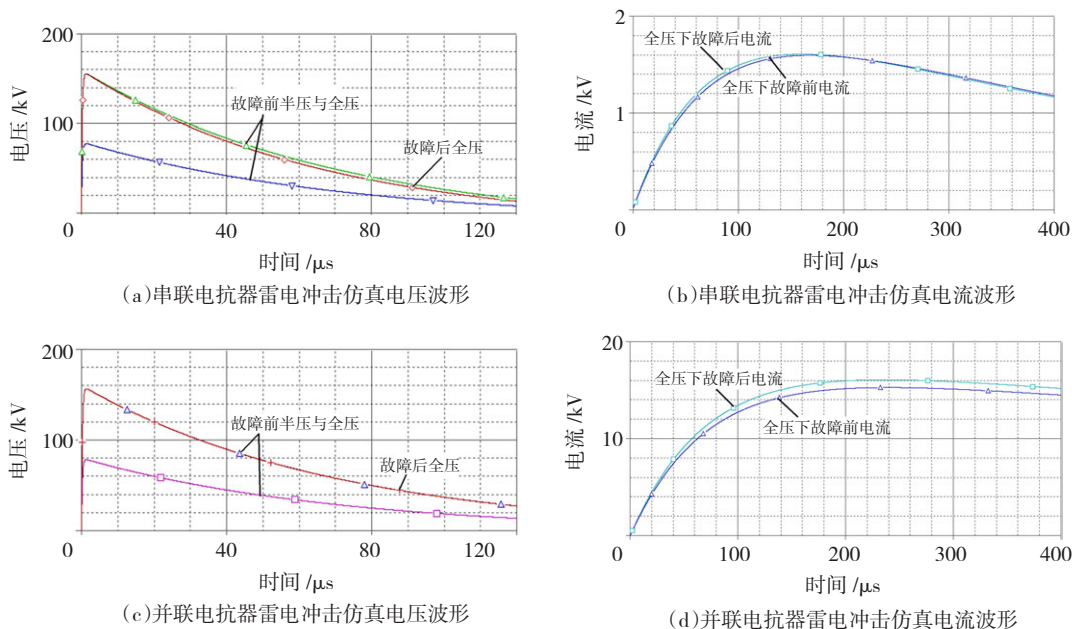


图 4 雷电冲击电压下仿真结果

图 5 结果中,在匝间过电压下,串联电抗器与并联电抗器故障前后波形的两个周期都没有明显变化,随着周期增多,过零点都出现了明显的不重合,波形变化明显.波形变化明显是变化量累积的体现.

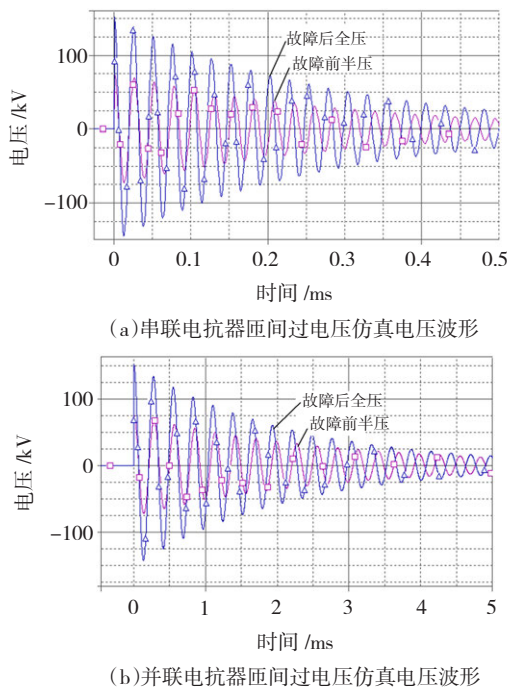


图 5 匝间过电压下仿真结果

3 试验方法有效性试验研究

3.1 试验条件

为验证以上分析结果,绕制了一台单层空心电

抗器作为样品,测量其电感量为 55mH. 通过人为破坏在电抗器样品上制作匝间短路故障.

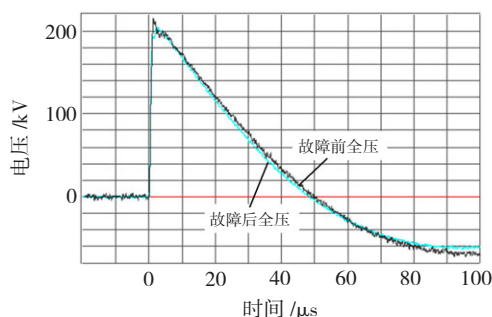
冲击电压发生器为北京华天公司生产的 2 000 kV/100 kJ 型设备,使用级数为 5(共 10 级),通过计算机记录冲击电压与电流波形. 匝间过电压试验设备为自行研制的 200 kV-3 nF 设备^[2],利用数字示波器记录脉冲振荡电压波形.

3.2 试验结果

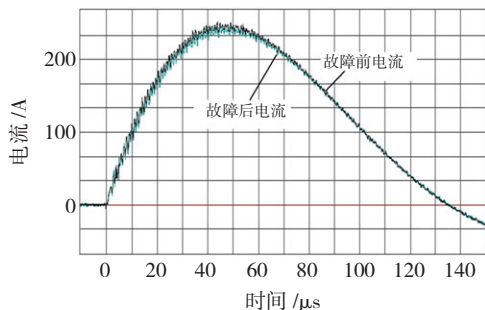
雷电冲击试验过程中,尽量调整波头和波尾电阻进行调波,多次调整后得到的实际半峰时间与标准雷电波比较数值要小,但满足国家标准 GB1094.3 对冲击试验的基本要求,记录的冲击电压与电流试验波形如图 6.

从图 6 可以观测到故障前后电压与电流波形产生了微小变化. 这种示伤电流波形与变压器绕组试验时的波形有较大区别,如果考虑多次试验施加电压的幅值及冲击设备同步过程存在差异等因素,这种微小变化很难区分. 按照 GB1094.3 所规定的试验判别准则: 如果在降低的试验电压下所记录的电压和电流瞬变波形图与在全试验电压下所记录的相应的瞬变波形图无明显差异,则绝缘耐压试验合格,按图 6 波形完全可以判断没有匝间绝缘故障,就会造成误判.

匝间过电压试验记录的匝间过电压试验波形如图 7,可以观测到故障前后波形存在较明显的变化. 考察其振荡频率变化了 5%,电感值变化了 10%,与数值计算结果所描述的电感变化范围基本一致.



(a)雷电冲击试验电压波形



(b)雷电冲击试验电流波形

图6 雷电冲击电压下试验结果

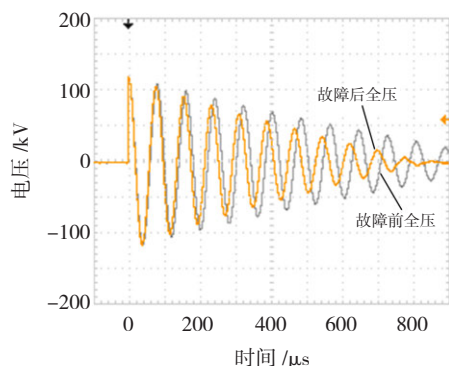


图7 匝间过电压下试验结果

4 结论

通过对干式空心电抗器匝间故障时电感变化分析及其对两种试验方法电路仿真与试验研究对比,得到如下结论:

1) 干式空心电抗器发生匝间短路故障时,电感变化量小,短路匝在不同位置时电感变化量也存在差异.

2) 雷电冲击是电抗器耐受过电压水平考核的主要方法,但利用它判断匝间短路故障时效果并不理想,可能造成误判.

3) 振荡周期足够多条件下,匝间过电压试验能有效地发现匝间短路故障.

4) 建议采纳 IEEE 及行业标准对干式空心电抗器匝间绝缘试验方法的规定:需要进行雷电冲击和

匝间过电压两种试验.

参考文献:

- [1] 王永勇,温祥龙,刘华,等.关于干式空心并联电抗器烧损问题的研究[J].黑龙江电力,2003,25(6):423-428.
- [2] 徐林峰.一起干式空心串联电抗器的故障分析[J].电力电容器与无功补偿,2008,29(2):50-54.
- [3] 夏长根.一起35kV干式并联空心电抗器故障分析[J].电力电容器与无功补偿,2009,30(5):43-45.
- [4] 付炜平,赵京武,霍春燕.一起35kV干式电抗器故障原因分析[J].电力电容器与无功补偿,2011,32(1):59-62.
- [5] 孙强,吴经锋.运行中干式电抗器绝缘状况的诊断方法与判断标准[J].电力设备,2004,5(9):31-33.
- [6] IEC60076-6-2007, Power Transformers - Part6: Reactors [S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2007.
- [7] 中华人民共和国国家标准管理委员会, GB1094.6-2011, 电力变压器-第6部分:电抗器 [S]. 中国北京: 中国标准出版社, 2011.
- [8] IEEE Std C57.16-1996, IEEE Standard Requirements, Terminology, and Test Code for Dry-type Air-core Series-connected Reactors [S]. New York USA: Printed in the United States of America, 1997.
- [9] IEEE Std C57.21-2008, IEEE Standard Requirements, Terminology, and Test Code for Shunt Reactors Rated Over 500kVA [S]. New York USA: Printed in the United States of America, 2008.
- [10] 国家电网公司, 企业标准-2005, 10~66kV干式电抗器技术标准 [S]. 中国北京: 中国电力出版社, 2005.
- [11] 中华人民共和国国家发展和改革委员会, JB/T10775-2007, 6~35kV级干式并联电抗器技术参数和要求 [S]. 中国北京: 机械工业出版社, 2008.
- [12] 中华人民共和国机械工业部, JB/T5346-1998, 串联电抗器 [S]. 中国北京: 机械科学研究院, 1998.
- [13] 陈庆国, 邱毓昌, 魏新芳. 用脉冲电压谐振法检测空心电抗器匝间绝缘缺陷[J]. 电工技术学报, 1999, 14(6): 55-58.
- [14] 杨一民. 电抗器匝间过电压试验方法-脉冲电压法的分析[J]. 电力电容器, 2004(2): 28-31.
- [15] 魏新芳, 王永红, 陈炯, 等. 用脉冲电压法进行干式空心电抗器匝间绝缘试验[J]. 黑龙江电力, 2001, 23(2): 82-84.
- [16] 吴健儿, 王永红, 杨一民, 等. 干式空心电抗器匝间绝缘试验方法研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 1999, 4(6): 99-103.
- [17] 江少成, 戴瑞海, 夏晓波, 等. 干式空心电抗器匝间绝缘检测原理及试验分析[J]. 高压电器, 2011, 47(6): 67-71.
- [18] 王瑞科, 郭香福. 干式空心电抗器匝间绝缘故障对总体特性的影响及检测方法[J]. 变压器, 2000, 37(9): 32-35.
- [19] 李水旺, 赵海翔, 郭丽萍, 等. 高频振荡电压下干式空心电抗器的电流特性[J]. 变压器, 2001, 38(7): 4-6.
- [20] 魏新芳. 大型干式空心电抗器设计计算相关理论研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002.
- [21] 徐林峰, 林一峰, 王永红, 等. 干式空心电抗器匝间过电压试验技术研究[J]. 高压电器, 2012, 48(7): 71-75.

(编辑: 关毅)