

助磁法接线方式对变压器直阻测试的影响

徐 鹏¹, 董正杰¹, 谭婷月¹, 曹雅榕², 陈弘扬¹

(1. 国网江苏省电力有限公司检修分公司, 江苏 南京 210006;

2. 国网江苏省电力有限公司南京供电公司, 江苏 南京 210012)

摘要:为了缩短直流电阻测试时间,在测试大型变压器低压绕组时常用到“助磁法”。文中分析了采用助磁法时不同接线方式对铁心剩磁的影响,选择了一种比较理想的接线方式。该接线方式优化了测试时施加的充电电流和电压激励方向,使铁心中的磁通方向与测试某相绕组后铁心中的剩磁方向尽可能一致,合理利用铁心中的剩磁对被试绕组的测试进行“助磁”,采用该接线方式测试低压绕组时铁心中总磁通变化绝对值最小。以某500 kV变电站主变为例,对其低压绕组直流电阻进行测试,将所有接线方式的测试结果进行对比,结果证明了所选接线方式可以一定程度上缩短测试时间,提高工作效率。

关键词:直流电阻测试;助磁法;接线方式;测试时间

中图分类号:TM452

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2018)04-0132-05

0 引言

通过测试变压器绕组的直流电阻,计算绕组间直流电阻的不平衡率,可以比较直观地反映绕组的焊接质量、有无匝间短路等情况^[1-3],是变压器交接、预试等工作中必不可少的试验项目^[4-5]。

随着变压器电压等级的不断提高,容量不断增大,其绕组电感不断增大,测试直流电阻时充电时间也越长,这就给直流电阻的测试带来了极大的困难^[6-7]。为了缩短测试时间,现场对大型变压器低压绕组直阻进行测试时多采用助磁法。由于大型变压器铁心多采用磁化特性很硬的冷轧硅钢片,测试完某一相绕组直流电阻之后剩磁现象严重,对其他绕组的测试会产生一定影响^[1,8]。

文章对比了利用助磁法对变压器低压绕组直流电阻进行测试时不同接线方式下铁心中的剩磁方向,分析了不同接线方式下铁心中磁通变化绝对值的大小,选择了一种比较理想的接线方式。与其他接线方式相比,该接线方式可以缩短测试时间,并在某500 kV变电站主变低压绕组直阻测试时进行验证。

1 常规法测试原理

变压器绕组是一个电感性元件,其电感较大而电阻相对较小^[3,9],当直流电源加在绕组后有一个过渡过程,可以将其等效为图1所示的基本电路。当直流电压 U 加在被测试绕组时,因电感中的电流不能突变,直流电源接通瞬间回路电压方程为:

$$U = L \frac{di}{dt} + iR \quad (1)$$

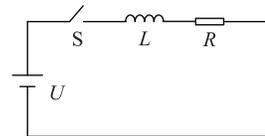


图1 变压器绕组直流电阻测试原理等效图

Fig.1 The equivalent diagram of winding DC resistance testing of transformer

绕组中的直流电流 i 为:

$$i = \frac{U}{R}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) = I(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (2)$$

式中: τ 为时间常数, $\tau=L/R$ 。

大型变压器的电感高达几百甚至几千亨,电阻只有几毫欧至几欧。因此,大型变压器绕组直流回路的稳定时间可能长达数十分钟甚至更长,充电时间与充电电流的关系见下表1。

表1 充电时间与充电电流的关系
Tab.1 The relationship between charging time and charging current

充电时间	充电电流	充电时间	充电电流
τ	0.632I	4τ	0.980I
2τ	0.865I	5τ	0.993I
3τ	0.950I	6τ	0.998I

对于该一阶动态电路,在实际试验中一般需要至少 5τ 的时间才能保证测试结果的有效性,因此缩短测量时间对测试工作有着重要意义^[1,10-11]。由时间常数 $\tau=L/R$ 可知,缩短时间可以通过增大电阻或者减小电感来实现。在回路中串入辅助电阻,虽然可以减小时间常数 τ ,但是电阻的引入需要提高电

源容量^[12],所以现场测试多采用减少电感的方法。

电感可由式(3)表示:

$$L = \frac{\Phi}{I} = k \frac{u_0 N s I}{l I} = k \frac{u_0 N s}{l} \quad (3)$$

式中: μ_0 为真空导磁率; N 为绕组匝数; s 为铁心截面; l 为铁心回路长度; k 为导磁系数。对于被试变压器, N, l, s 都是不变的。

随着磁场强度的增大,铁心磁通密度趋于饱和,导磁系数 k 下降,电感也就随之减小。由 $H = NI/L$ 可知,当匝数 N 保持不变时,要增大磁场强度 H ,就要增大 I ,也就是提高测试电流才能有效地减小电感,但是长时间的大电流测试会造成仪器发热严重,所以为了加速磁密饱和,常采用助磁法迫使铁心迅速趋于饱和,减小回路电感。

2 助磁法测试原理

助磁法测试变压器低压绕组直流电阻(Y/ Δ 接法)的常规接线方式如图2所示,将高、低压绕组串联,然后施加相应的充电电流和电压激励进行测试。测试时,同一铁心柱上高、低压绕组的电流方向必须一致才能起到助磁作用,即利用高压绕组产生同相位、同极性的磁通对低压绕组助磁,使铁心快速饱和,否则高、低压绕组产生的磁通相抵消,影响测量的速度和精度。

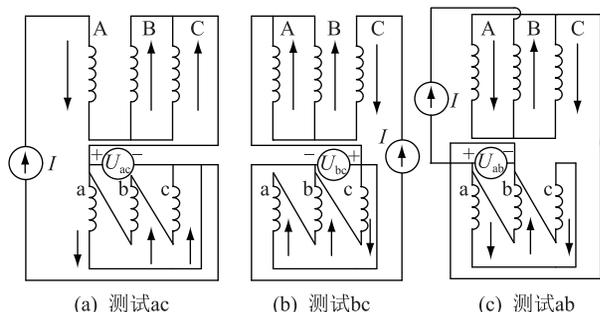


图2 助磁法测试低压绕组直流电阻的常规接线方式

Fig.2 The convention wiring of low-voltage winding DC resistance testing based on magnetic circuit method

由于高压绕组的匝数远多于低压绕组,借助于高压绕组的励磁安匝数,其磁势增加明显,用较小的电流就可使铁心饱和,使低压绕组电感快速减小,从而达到快速测试的目的^[13-15]。

以测试 ab 为例,设高压绕组 B 相中电流为 I ,则低压绕组 b 相中的电流为 $2/3I$,设高、低压绕组的匝数分别为 N_1, N_2 ,则相应磁势分别为 IN_1 和 $2/3IN_2$,由于高低压绕组串联,铁心助磁效果加深。引出 a, b 端子接测试电压 U_{ab} ,由于高压侧的助磁作用,短时间就可以读数。由公式 $R_{ab} = U_{ab}/I$ 可计算 R_{ab} ,同

样的方法依次得到 R_{bc}, R_{ac} 。

3 接线方式的选择

铁心的磁化过程呈现磁滞现象,在测量大型变压器直流电阻时,绕组中的充电电流切除后,铁心中将存在剩磁,剩磁会对其他绕组的测试过程产生影响。例如,采用助磁法对变压器低压侧绕组直流电阻进行测试时,10 min后读数基本稳定,然后改变电源极性,则数倍于原测试时间后读数还不能稳定,可见剩磁影响的严重性^[16-17]。因此选择合适的接线方式,在测试完一相绕组之后,可以利用铁心中的剩磁对其他绕组的测试进行助磁,而不是先将铁心中的剩磁去磁后再充磁,这样一来可以在一定程度上缩短测试时间。

目前大部分文献中助磁法测试变压器低压绕组直流电阻时所用的接线方式如图2所示,采用这种常规的接线方式时,铁心中的剩磁方向如图3所示。

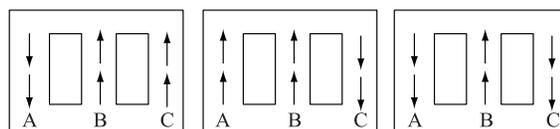


图3 常规接线方式下铁心中的剩磁方向

Fig.3 The remaining magnetic direction in the core of convention wiring mode

铁心中磁通变化绝对值 $|\Delta\Phi|$ 越大,所需测试时间也越长。按照图2的接线方式测试 R_{ac} 时,铁心中 A 相为主磁路, B, C 相为分支磁路,定义为正方向,则三相磁通分别为 $-\Phi, 1/2\Phi, 1/2\Phi$;测试 R_{bc} 时, C 相为主磁路, A, B 相为分支磁路,三相的磁通分别为 $1/2\Phi, 1/2\Phi, -\Phi$;测试 R_{ab} 时, B 相为主磁路, A, C 相为分支磁路,三相磁通分别为 $-1/2\Phi, \Phi, -1/2\Phi$,磁通变化绝对值见表2。采用常规接线方式测试完所有低压绕组直流电阻,总 $|\Delta\Phi|$ 为 5Φ 。

表2 常规接线方式下磁通变化绝对值

Tab.2 The absolute value of flux variation in convention wiring

相别	测试 R_{ac}	测试 R_{bc}	$ \Delta\Phi_1 $	测试 R_{ab}	$ \Delta\Phi_2 $	总 $ \Delta\Phi $
A	$-\Phi$	$1/2\Phi$	$3/2\Phi$	$-1/2\Phi$	Φ	
B	$1/2\Phi$	$1/2\Phi$	0	Φ	$1/2\Phi$	5Φ
C	$1/2\Phi$	Φ	$3/2\Phi$	$-1/2\Phi$	$1/2\Phi$	

当采用如图4所示的接线方式时,定义其为接线方式1,铁心中的剩磁方向如图5所示。

测试 R_{ac} 时,铁心中 A 相为主磁路, B, C 相为分支磁路,三相磁通分别为 $-\Phi, 1/2\Phi, 1/2\Phi$;测试 R_{bc} 时, C 相为主磁路, A, B 相为分支磁路,三相磁通分

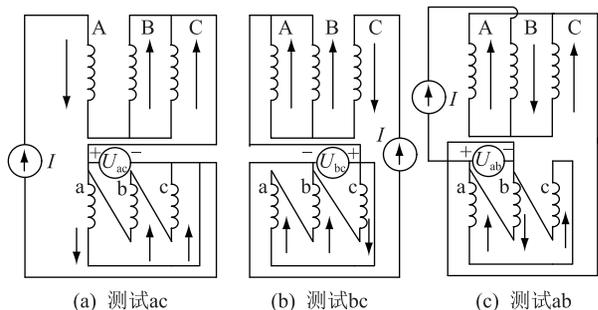


图4 接线方式1
Fig.4 Wiring mode 1

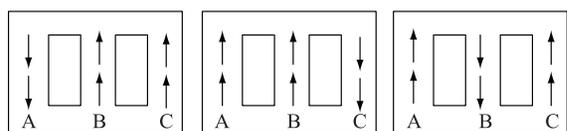


图5 接线方式1时铁心的剩磁方向
Fig.5 The remaining magnetic direction in the core of wiring mode 1

别为 $1/2\Phi, 1/2\Phi, -\Phi$; 测试 R_{ab} 时, B 相为主磁路, A、C 相为分支磁路, 三相磁通分别为 $1/2\Phi, -\Phi, 1/2\Phi$, 磁通变化绝对值见下表3。按照接线方式1测试完所有低压绕组直流电阻, 总 $|\Delta\Phi|$ 为 6Φ 。

表3 接线方式1时磁通变化绝对值

相别	测试 R_{ac}	测试 R_{bc}	$ \Delta\Phi_1 $	测试 R_{ab}	$ \Delta\Phi_2 $	总 $ \Delta\Phi $
A	$-\Phi$	$1/2\Phi$	$3/2\Phi$	$1/2\Phi$	0	
B	$1/2\Phi$	$1/2\Phi$	0	$-\Phi$	$3/2\Phi$	6Φ
C	$1/2\Phi$	$-\Phi$	$3/2\Phi$	$1/2\Phi$	$3/2\Phi$	

当采用如图6所示的接线方式时, 定义其为接线方式2, 铁心中的剩磁方向如图7所示。

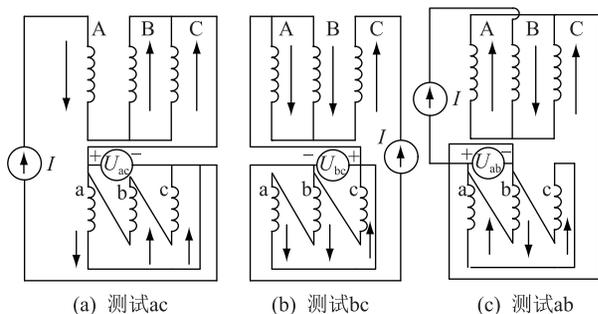


图6 接线方式2
Fig.6 Wiring mode 2

测试 R_{ac} 时, 铁心中 A 相为主磁路, B、C 相为分支磁路, 三相磁通分别为 $-\Phi, 1/2\Phi, 1/2\Phi$; 测试 R_{bc} 时, C 相为主磁路, A、B 相为分支磁路, 三相磁通分别为 $-1/2\Phi, -1/2\Phi, \Phi$; 测试 R_{ab} 时, B 相为主磁路, A、C 相为分支磁路, 三相磁通分别为 $1/2\Phi, -\Phi, 1/2\Phi$, 磁通变化绝对值见表4。按照接线方式2测试

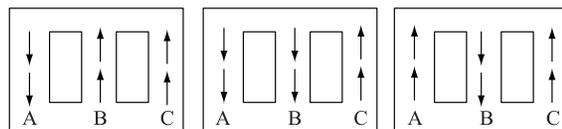


图7 接线方式2时铁心的剩磁方向
Fig.7 The remaining magnetic direction in the core of wiring mode 2

完所有低压绕组直流电阻, 总 $|\Delta\Phi|$ 为 4Φ 。

表4 接线方式2时磁通变化绝对值

相别	测试 R_{ac}	测试 R_{bc}	$ \Delta\Phi_1 $	测试 R_{ab}	$ \Delta\Phi_2 $	总 $ \Delta\Phi $
A	$-\Phi$	$-1/2\Phi$	$1/2\Phi$	$1/2\Phi$	Φ	
B	$1/2\Phi$	$-1/2\Phi$	Φ	$-\Phi$	$1/2\Phi$	4Φ
C	$1/2\Phi$	Φ	$1/2\Phi$	$1/2\Phi$	$1/2\Phi$	

当采用如图8所示的接线方式时, 定义其为接线方式3, 铁心中的剩磁方向如图9所示。

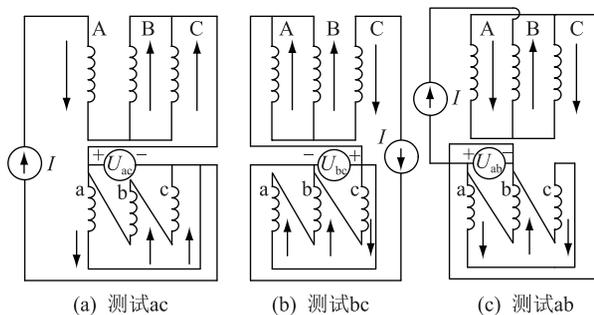


图8 接线方式3
Fig.8 Wiring mode 3

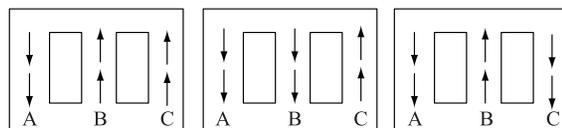


图9 接线方式3时铁心的剩磁方向
Fig.9 The remaining magnetic direction in the core of wiring mode 3

测试 R_{ac} 时, 铁心中 A 相为主磁路, B、C 相为分支磁路, 三相磁通分别为 $-\Phi, 1/2\Phi, 1/2\Phi$; 测试 R_{bc} 时, C 相为主磁路, A、B 相为分支磁路, 三相磁通分别为 $-1/2\Phi, -1/2\Phi, \Phi$; 测试 R_{ab} 时, B 相为主磁路, A、C 相为分支磁路, 三相磁通分别为 $-1/2\Phi, \Phi, -1/2\Phi$, 磁通变化绝对值见表5。按照接线方式3测试完所有低压绕组直流电阻, 总 $|\Delta\Phi|$ 为 5Φ 。

表5 接线方式3时磁通变化绝对值

相别	测试 R_{ac}	测试 R_{bc}	$ \Delta\Phi_1 $	测试 R_{ab}	$ \Delta\Phi_2 $	总 $ \Delta\Phi $
A	$-\Phi$	$-1/2\Phi$	$1/2\Phi$	$-1/2\Phi$	0	
B	$1/2\Phi$	$-1/2\Phi$	Φ	Φ	$3/2\Phi$	5Φ
C	$1/2\Phi$	Φ	$1/2\Phi$	$-1/2\Phi$	$3/2\Phi$	

由表2—5可发现, 采用接线方式2测试完低压

侧所有绕组直流电阻总磁通变化绝对值最小。

4 对比分析

现场通过对某 500 kV 变电站 2 号主变低压绕组直流电阻进行测试,该主变额定容量为 750/750/240 MV·A,联接组标号为 YNyn0d11,额定电压为 520/236(1±2×2.5%)/36 kV,测试仪器为 HDBZ-333 II 型三通道直流电阻测试仪。试验时,测试完某一相绕组之后不去磁,变更试验接线继续测试另一相,直到低压绕组全部测试完毕后进行去磁,去磁时采用 ZLQC-II 型变压器消磁仪,主变去磁完之后更换助磁法的另一种接线方式对低压绕组进行测试,最终 4 种接线方式的测试结果见表 6—9。

表 6 常规接线方式的测试结果

Tab.6 The testing result of convention wiring mode

相别	电阻值/mΩ	出厂值/mΩ	误差/%	充电时间/min
ab	9.651	9.719 7	-0.71	41
bc	9.676	9.741 1	-0.67	31
ca	9.602	9.597 8	0.04	33

表 7 接线方式 1 的测试结果

Tab.7 The testing result of wiring mode 1

相别	电阻值/mΩ	出厂值/mΩ	误差/%	充电时间/min
ab	9.648	9.719 7	-0.74	50
bc	9.680	9.741 1	-0.61	33
ca	9.612	9.597 8	0.12	33

表 8 接线方式 2 的测试结果

Tab.8 The testing result of wiring mode 2

相别	电阻值/mΩ	出厂值/mΩ	误差/%	充电时间/min
ab	9.649	9.719 7	-0.73	42
bc	9.678	9.741 1	-0.65	23
ca	9.606	9.597 8	0.09	30

表 9 接线方式 3 的测试结果

Tab.9 The testing result of wiring mode 3

相别	电阻值/mΩ	出厂值/mΩ	误差/%	充电时间/min
ab	9.651	9.719 7	-0.71	50
bc	9.678	9.741 1	-0.65	25
ca	9.610	9.597 8	0.13	32

由上表可见采用常规接线方式以及接线方式 1、2、3 测试完低压侧所有绕组所需的测试时间依次为 105 min, 116 min, 95 min, 107 min。采用接线方式 2 所需的测试时间最短,比常规接线方式节省时间约 10 min,在测试 bc 相时效果尤为明显。将测试结果与出厂值对比,三相直流电阻的误差都在 1% 以内。

5 结语

助磁法是测试大型变压器低压绕组直流电阻

常用的方法之一,测试时不同的接线方式将会在铁心中产生不同程度的剩磁,进而影响绕组的测试时间。

本文分析了不同接线方式对铁心中剩磁的影响,对比所有接线方式下铁心中磁通变化绝对值的大小,选择了一种比较理想的接线方式,即:依次测试 R_{ac} , R_{bc} , R_{ab} , 测试 R_{ac} 时,所加的直流电流从高压绕组 A 相流入,经 B、C 相流出;测试 R_{bc} 时,电流从 A、B 相流入,经 C 相流出;测试 R_{ab} 时,电流从 B 相流入,经 A、C 相流出,测试时低压绕组施加电压激励产生的电流方向需与高压绕组所加的充电电流方向一致。

与其他接线方式相比,该接线方式测试低压绕组时铁心中总磁通变化绝对值最小,可以在一定程度上缩短测试时间,是一种有效并值得在大型变压器试验中推广应用的方法。

参考文献:

- [1] 王朗珠,姚一平. “助磁法”在大型变压器低压侧直流电阻测试中的运用[J]. 高压电器,2003,39(2):59-60.
WANG Langzhu, YAO Yiping. Application of saturable magnetic circuit method to measuring the DC resistance of low voltage winding of large-size transformer [J]. High Voltage apparatus, 2003, 39(2):59-60.
- [2] 梁志瑞,甄旭锋,牛胜锁. 大型电力变压器低压侧绕组直流电阻测试新方法[J]. 电力自动化设备,2007,27(6):27-31.
LIANG Zhirui, ZHEN Xufeng, NIU Shengsuo. DC resistance measurement for low voltage side winding of large-scale transformer [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(6):27-31.
- [3] 张春龙,姚景涛,赵远新,等. 基于助磁法的变压器低压绕组直流电阻测试[J]. 内蒙古电力技术,2016,34(1):70-72,86.
ZHANG Chunlong, YAO Jingtao, ZHAO Xinyuan, et al. Test for low-voltage winding DC resistance of transformer based on magnetic circuit method [J]. Inner Mongolia Electric Power, 2016, 34(1):70-72,86.
- [4] 曲晓峰,李贻凯. 大型变压器低压绕组直流电阻测试时间过长问题的研究[J]. 电气技术,2015(11):12-15.
QU Xiaofeng, LI Yikai. Research of solving large transformer DC resistance of low voltage winding testing time consuming problem [J]. Electrical Engineering, 2015(11):12-15.
- [5] 袁燕岭,甘景福,陈震,等. 助磁法测量变压器直流电阻的应用研究[J]. 电气技术,2010(2):31-34.
YUAN Yanling, GAN Jingfu, CHEN Zhen, et al. Application study on the saturable magnetic circuit method to measuring the DC resistance of transformer's winding [J]. Electrical Engineering, 2010(2):31-34.
- [6] 魏春林. YD 联结变压器低压侧直流电阻测试技术[J]. 电工技术,2008(11):4-6.

- WEI Chunlin. The testing technology of YD junction transformer's low voltage winding resistance[J]. *Electrotechnical*, 2008(11):4-6.
- [7] 张永红. 大型变压器绕组直流电阻快速测量法[J]. *华中电力*, 2002, 15(2):60-61.
- ZHANG Yonghong. Application of fast measuring method to DC resistance of large-capacity transformer[J]. *Central China Electric Power*, 2002, 15(2):60-61.
- [8] 张军强, 赵 纲, 罗 蕾, 等. 大型变压器低压绕组直流电阻快速测量方法[J]. *电工技术*, 2016(4):65-67.
- ZHANG Junqiang, ZHAO Gang, LUO Lei, et al. The fast measuring method of large transformer DC resistance of low voltage winding [J]. *Electrotechnical*, 2016(4):65-67.
- [9] 王清友. 采用助磁法实测大型变压器直流电阻的经验[J]. *华北电力技术*, 1990(8):77-81.
- WANG Youqing. The experience of measuring large transformer DC resistance of low voltage winding[J]. *North China Electric Power*, 1990(8):77-81.
- [10] 严玉婷, 江健武, 王亚舟, 等. 变压器直流电阻测试原理及现场缺陷情况分析[J]. *高压电器*, 2010, 46(10):97-101.
- YAN Yuting, JIANG Jianwu, WANG Yazhou, et al. Theoretic of testing DC resistance and analysis of different kind of defects in field[J]. *High Voltage Apparatus*, 2010, 46(10):97-101.
- [11] 孙 锋, 陈志国, 黄宝新. 双通道助磁法电阻测量在温升试验中的应用[J]. *变压器*, 2014, 51(4):68-69.
- SUN Feng, CHEN Zhiguo, HUANG Baoxin. Application of dual channel magnetic resistivity measurement in temperature rise test [J]. *Transformer*, 2014, 51(4):68-69.
- [12] 甄旭锋. 电力变压器直流电阻快速测量的研究[D]. 河北: 华北电力大学, 2007.
- ZHEN Xufeng. The analysis of fast measuring of transformer's low voltage winding [D]. Hebei: North China Electric Power University, 2007.
- [13] 张志翀, 安 冰, 李 冬, 等. 缩短变压器直流电阻测量时间方法[J]. *电气制造*, 2014(5):76-78.
- ZHANG Zhichong, AN Bing, LI Dong, et al. The method of shorten testing time to transformer's low voltage winding [J]. *Electrical Manufacturing*, 2014(5):76-78.
- [14] 宋文翠, 陈 朋, 孙成田, 等. 变压器绕组直流电阻异常的分析与处理[J]. *变压器*, 2017, 54(5):66-69.
- SONG Wencui, CHEN Peng, SUN Chengtian, et al. Analysis and treatment of problem for transformer winding abnormal DC resistance [J]. *Transformer*, 2017, 54(5):66-69.
- [15] 程 盛, 韩 光. 结合变压器直流电阻超标事例浅析查找故障点的方法[J]. *变压器*, 2016, 53(3):71-73.
- CHENG Sheng, HAN Guang. Brief discussion on method to find out fault point based on overproof DC resistance cases of transformer [J]. *Transformer*, 2016, 53(3):71-73.
- [16] 于 淼, 朱孟周, 陈 光, 等. 1000 kV 特高压变压器快速试验系统设计[J]. *江苏电机工程*, 2016, 35(6):22-25.
- YU Miao, ZHU Mengzhou, CHEN Guang, et al. Design of 1000 kV UHV transformer rapid system [J]. *Jiangsu Electrical Engineering*, 2016, 35(6):22-25.
- [17] 孙宁强. 主变压器低压绕组电阻的快速测量[J]. *江苏电机工程*, 2001, 20(3):40-41.
- SUN Ningqiang. The fast measurement of transformer's low voltage winding [J]. *Jiangsu Electrical Engineering*, 2001, 20(3):40-41.

作者简介:



徐 鹏

徐 鹏(1990—),男,硕士,助理工程师,从事高电压绝缘、电气试验与检修工作(E-mail: xupeng_1990ncepu@163.com);

董正杰(1982—),男,本科,工程师,从事高电压绝缘、电气试验与检修工作(E-mail: 8670288@qq.com);

谭婷月(1990—),女,硕士,助理工程师,从事高电压绝缘、电气试验与检修工作。

The Wiring Mode's Influence on DC Resistance Testing of Transformer Based on Magnetic Circuit Method

XU Peng¹, DONG Zhengjie¹, TAN Tingyue¹, CAO Yarong², CHEN Hongyang¹

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Maintenance Branch Company, Nanjing 210006, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210012, China)

Abstract: In order to shorten the testing time of DC resistance, the magnetic circuit method is usually used in the test of low-voltage winding DC resistance of large transformer. The influence on remaining magnetic in the core of different wiring mode based on magnetic circuit method is analysed, and a more ideal wiring model is selected. The wiring model optimizes the direction of charging current and voltage excitation during the test, so as to make the magnetic flux direction in the core as consistent as possible with the remaining magnetic after testing one-phase winding, and make reasonable use of the remaining magnetic in the core to assist magnetic to the trial windings. A 500 kV transformer substation's main transformer is used as an example to compare the test results of all wiring modes, the results prove that the selected wiring method can shorten the testing time to a certain extent, and improve the working efficiency.

Key words: DC resistance testing; magnetic circuit method; wiring mode; testing time

(编辑 钱 悦)