

线路零序阻抗测量在直流偏磁影响下的研究

线路零序阻抗等参数在实测过程中由于需要线路两端接地，因此在地磁感应电流环境下，会有具有直流特性的电流流过导线，另外在直流输电单极运行情况下，也会有直流电流流过线路，对线路参数测试结果带来影响。通过建立哈密地区某线路零序阻抗实测PSpice仿真模型，得出在不同直流电流影响下，测量得到的电流幅值及初相角变化规律，通过在单极运行情况下对某线路零序阻抗进行实测，验证了线路参数在直流偏磁影响下的测试结果出现明显偏差。

董新胜¹ 张小军¹ 黄耀德² 郭克竹³ 何成¹/1.国网新疆电力公司电力科学研究院 2.国网新疆电力公司经济技术研究院 3.国网塔城供电公司

0 引言

在地磁暴的作用下，会使地表产生持续时间几分钟至几小时不等的地面电势由输电线路、中性点接地变压器和大地构成的回路中会产生地磁感应电流，频率在0.001~0.1 Hz之间，可看成具有直流特性的电流^[1]。直流输电单极运行或正负极不对称运行时，有直流通过大地、变压器中性点及输电线路组成的回路，使得变压器、电流互感器等设备励磁电流出现直流分量。这两种电流都具有直流特性，因此作用于电气设备原理相同。近年来，直流偏磁的研究多集中于对变压器的影响，陆续有学者对电流互感器的传变特性进行了研究。文献[2]研究了直流偏磁对电流互感器（CT）的作用机理，应用了仿真方法进行了分析，利用CT校验仪验证仿真方法的正确性，提出了用于揭示CT在偏磁作用下的误差变化规律。文献[3]通过对电流互感器的仿真与试验分析，表明直流偏磁会对电流互感器传变特性产生影响，偏磁条件下电流互感器的磁化曲线第三象限

部分会减小，二次波形也会发生畸变。文献[4]通过铁磁性能试验得到了在直流偏磁下电感与铁心磁导率之间的变化规律，通过试验数据分析直流偏磁对计量用CT误差的影响，结果表明直流偏磁没有改变铁心饱和特性，随着直流偏置量的增加，比差整体往负方向偏移，角差整体往正方向偏移，CT二次侧的谐波分量增加。

线路参数测试是高压试验的一项内容，高压试验涉及到的计量参数主要有电压、电流和功率等，由于高压试验仪表不同于关口计量表计，其测量准确度往往较低，高压试验中直流偏磁对输电线路参数测量的影响目前尚未有报道关于此方面的研究。根据输电线路在测量线路零序阻抗的原理，线路测量端的对侧线路必须要短接接地，当附近直流输电线路单极运行时，被测量线路会有直流电流流过导线，对线路参数测量带来一定影响。尤其是测量线路参数的仪器一般输出电压、电流不高，直流偏磁电流的影响更是不能小觑。

1 直流偏磁下零序阻抗测量物理模型

线路参数测量中，主要的参数包括：正序阻抗、零序阻抗、正序电容和零序电容等。其中零序阻抗需要在线路一端短接接地情况下测量。在接地情况下，交直流混联电网中将出现直流偏磁电流流过线路导线，与试验仪器输出的交流电流相叠加，对线路测量带来影响。



董新胜/高级工程师

关键词/Keywords

地磁电流·
直流偏磁·
线路参数·
零序阻抗·
阻抗角·

图1为测量零序阻抗原理接线图。根据测试原理测得的电流、电压和功率,由式(1)~式(4)计算相应的单位长度的零序参数。

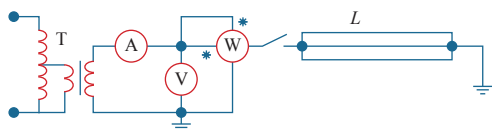


图1 线路零序阻抗测试接线原理图

$$Z_0 = \frac{3U}{I} \frac{1}{L} \quad (1)$$

$$R_0 = \frac{3P_0}{I^2} \frac{1}{L} \quad (2)$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \quad (3)$$

式中, Z_0 为零序阻抗; R_0 为零序电阻; X_0 为零序电抗; P 为所测功率; U 、 I 为试验电压、电流; L 为线路长度。

当直流输电切换到单极大地运行方式时,如果附近变电站进行线路参数测试,根据零序阻抗测试接线方式,地中直流电流将流过输电线路。直流偏磁电流下,零序阻抗测试物理模型如图2所示。

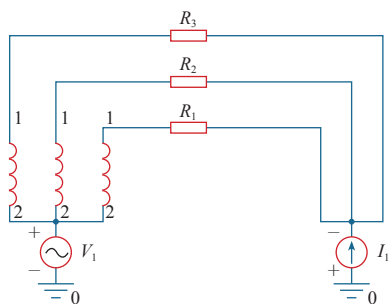


图2 直流偏磁电流下零序阻抗测量物理模型

图2中, V_1 为试验仪器输出电压; I_1 为直流偏磁电流; $R_1 \sim R_3$ 及相应连接电感为三相导线零序下的参数。在直流偏磁下,线路零序阻抗参数测试由于对端三相导线短接接地,直流偏磁电流侵入交流测试回路,造成测试回路中电流互感器、试验变压器等设备发生直流偏磁现象。由于直流偏磁电流下对测试回路试验电压影响不大,其主要影响到测试回路中电流互感器的测量部分,对线路参数零序阻抗测试值带来影响。

对于线路参数测量所用的仪器而言,由于采用的电流互感器准确度低于计量用电流互感器,且仪器采用的电流互感器一般电流比均不大,测量时加到线路导线上的交流电流一般为1~10 A,而在直流偏磁下的直流分量一般为0~10 A,甚至超过10 A,在测量导线电流时,直流分量往往在交流分量的100%以上,对线路参数测量中电流的测量带来更大的误差。

2 直流偏磁电流对仪器输出电流影响的仿真分析

根据相关学者对计量电流互感器在直流偏磁下的研究,直流偏磁下,CT一次绕组存在直流分量,直流偏磁磁通和交流磁通相叠加,与直流偏磁方向一致的半周铁心饱和程度增加,另外半周饱和程度减弱,使得励磁电流呈现正、负不对称形状。根据直流偏磁下的电流互感器的仿真与实测研究,表明直流偏磁的存在会使CT的比差与角差向着不同方向增大,当它们同方向同时存在时,比差和角差的大小会超过规定的限值。

2.1 基于PSpice的CT等效模型

电磁式CT等效电路如图3所示。图3中, Z_1 、 Z'_2 、 Z_m 和 Z'_L 分别为CT的一次阻抗、二次折算到一次阻抗、励磁阻抗和二次折算到一次的负荷阻抗; I_1 、 I_0 和 I'_2 分别为一次电流、励磁电流和二次折算到一次的电流; E_1 、 E'_2 分别为一次的感应电动势和二次折算到一次的感应电动势。

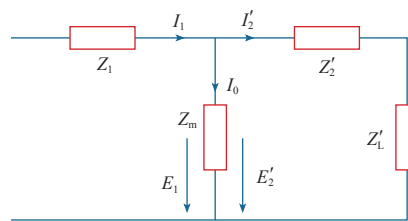


图3 CT等效电路

Pspice电路仿真软件包含多种变压器,通过其模型编辑器组件,利用模型编辑器对非线性磁心的B-H回线进行修改,当符合要求时提取Jiles-Atherton参数。应用实测线路参数的电流互感器,

基于图2零序阻抗测试原理,应用Jiles-Atherton理论建立实测零序阻抗线路参数模型,针对直流偏磁电流对线路参数测试的影响进行分析。

对于计量用电流互感器传变特性主要用比差 f 和角差 δ 来衡量。电流互感器由于励磁电流 I_0 的存在,使得二次电流乘以匝数比后与一次电流不等,产生了误差 ε 。

$$\varepsilon = f + j\delta = \frac{I_0 N_1}{I_1 N_1} \sin(\alpha + \theta) \times 100 + \frac{I_0 N_1}{I_1 N_1} \cos(\alpha + \theta) \times 3440 \quad (4)$$

$$I_0 N_1 = \frac{I_2 Z_2 L_c}{2\pi f \mu A_c N_2} \quad (5)$$

式中, I_0 为励磁电流; I_1 为一次电流; I_2 为二次电流(有效值); Z_2 为二次回路总阻抗; L_c 为铁心平均磁路长; A_c 为铁心有效截面积; μ 为铁心材料导磁率; N_1 为额定一次匝数; N_2 为额定二次匝数; f 为电源频率。

2.2 零序阻抗测试仿真分析

以哈密地区受到直流偏磁影响的变电站输电线路的实测参数为例,建立线路零序阻抗测试电路仿真模型。

线路参数测量施加交流220 V的电压,在模型中改变线路参数测量回路中直流电流的幅值,对

哈密地区电网不同运行方式下可能出现的偏磁电流-6.4 A、-1 A和6.4 A进行仿真分析。

在-6.4 A、-1 A、0 A和6.4 A直流电流下,流过线路导线上的交直流叠加波形(从上到下)如图4所示。从图4中可以看出,在直流偏磁电流下,流过线路的电流对称性发生破坏。在直流电流为负的情况下,正向电流增加,当直流电流足够大时,波形完全越过负半轴。相反,当导线上流过正向直流电流时,导线上叠加电流波形向负半轴偏移。从图4还可以看出,直流电流幅值越大,线路导线上叠加电流波形偏移越大。

根据实际测试线路参数使用的电流互感器,考虑该类互感器磁化曲线的非线性,根据Jiles-Atherton建立非线性变压器模型。得到在不同直流偏磁电流下二次侧电流波形如图5所示。

从图5中可以看出,由于电流互感器一次侧直流偏磁的存在,造成二次侧电流幅值相较一次侧减小。在0 A直流情况下,电流互感器二次电流峰值为340 mA,在6.3 A和1 A直流偏磁下,二次电流分别为210 mA、335 mA,分别比0 A直流情况下,偏差了38%、1.5%。因此,与无直流偏磁相比,在直流偏磁影响的测量来看,其二次侧电流幅值减小,且直流偏磁电流越大,二次侧电流幅值越

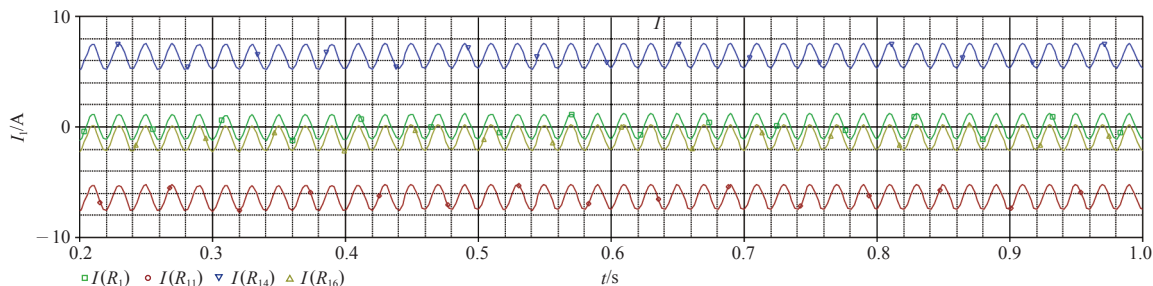


图4 不同直流偏磁电流下线路参数测试回路电流波形

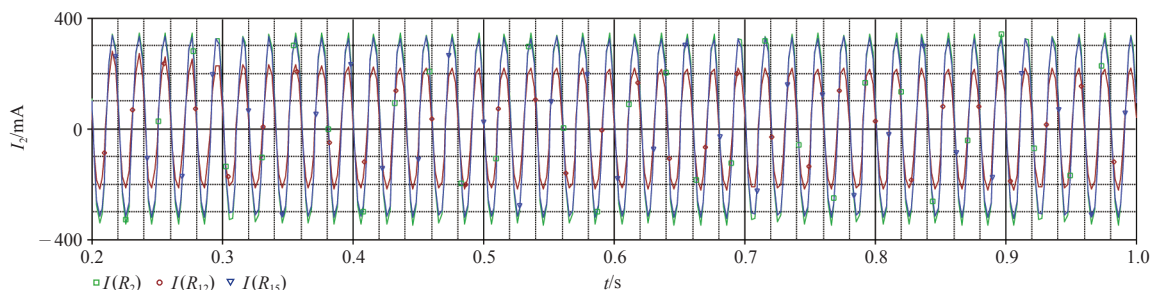


图5 不同直流偏磁电流下电流互感器二次侧电流波形

小, 根据式 (1), 由于测量的电流值减小, 则在直流偏磁影响下零序阻抗测试结果比实际偏大。

对0 A、1 A和6.3 A不同直流偏磁电流下的零序阻抗测试回路在50 Hz频率下进行交流扫描分析, 电源初相角设置为0°, 得到在直流偏磁影响下, 二次侧初相角发生了变化值, 如图6所示。根据图6, 在0 A、1 A和6.3 A直流电流下, 初相角分别为168°、165°、156°, 表明直流电流越大, 初相角偏差越大。

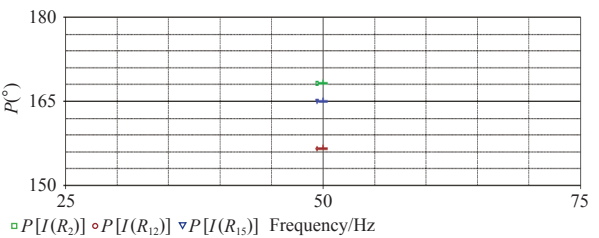


图6 不同直流偏磁电流下电流互感器二次侧电流初相角

3 线路零序阻抗参数实测分析

±800 kV天—中特高压直流工程2013年投运, 它是新疆第一条特高压直流输电工程, 图7为哈密地区电网接线图。随着天—中直流工程的低端投运, 直流输电入地电流在新疆交流电网分布的研究越发紧迫, 根据运行人员巡检发现, 在天—中直流低端大功率单极大地方式运行时, 石城子变电站、东疆变电站等多个变电站出现主变压器振动加剧, 噪声明显增大的现象, 这些都是典型的变压器直流偏磁的特征。

在天山换流站直流调试期间, 对哈密地区选取在直流偏磁影响的某线路参数进行了实测分析。在天山换流站低端调试中, 天—中直流采用单极大地方式运行, 直流极注入电流 $I_0 = -5\,000\text{ A}$, 天山换流站附近110 kV及以上电压等级变电站运行方式如下。220 kV东疆变电站2#主变压器中性点、烟墩西变电站220 kV侧接地开关分闸, 110 kV侧中性点中性点接地开关合闸, 骆驼圈子110 kV变电站、兴业变电站及雅矿变电站中性点接地开关分闸, 白山泉110 kV变电站、黄山东110 kV变电站中性点接地开关分闸, 其他变电站均采用中性点接地方式。

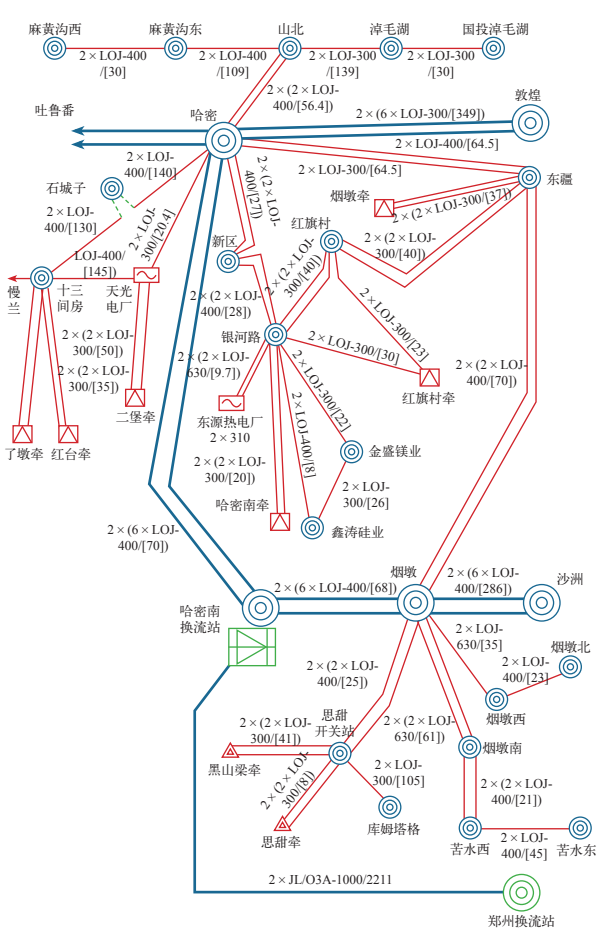


图7 哈密地区110 kV及以上电网接线图

应用电流表对变压器中性点直流电流进行检测。电流表直流电流检测范围: DC/0~2 000 A, 分辨为10 mA (40 A量程)/100 mA (400 A量程)/1 A (2 000 A量程)。根据哈密电网运行方式, 测得750 kV烟墩变电站变压器中性点偏磁电流为9.5 A。

天山换流站附近110 kV及以上电压等级变电站根据不同运行方式测量出最大直流偏磁电流如表1所示。

表1 中性点直流电流实测值

变电站名称	与接地极距离/km	方式一	方式二	方式三
		实测	实测	实测
750 kV哈密	54	4.5	4.6	4.9
750 kV烟墩	45	8.0	9.7	10.6
220 kV石城子	58	2.1	/	/
220 kV银河路	64	0.3	/	0.3

从表1中可以看出, 在不同运行方式下, 直流偏磁电流最大达到10 A以上。

在直流偏磁影响下的750 kV天烟二线进行了零序阻抗实测，线路全长为68.7 km，导线型号为6×JL（GD）/G1A-400/50，测试时仪器侧在天山换流站，对侧接地端在烟墩变电站，试验仪器采用抗干扰性仪器，最大输出电压为400 V，最大输出电流为12 A，测量结果与理论计算值对比如表2所示。

表2 天烟二线零序阻抗实测与理论值对比

理论值			实测值		
零序电阻 总值/Ω	零序电抗 总值/Ω	阻抗角 (°)	零序电阻 总值/Ω	零序电抗 总值/Ω	阻抗角 (°)
18.82	55.03	71.23	26.87	63.35	67.03

从表2可以看出，实测与理论值偏差较大，零序电阻、零序电抗均比理论计算值偏大。因此，为了准确测量在直流偏磁下影响的线路参数，需要在测试仪器、测试方法等方面进行处理。在测试线路参数过程中，由于直流线路单极大地运行较少实行，且运行时间一般较短，故可以避开该段运行方式时间，再进行测试。如果不能避开该种运行方式，采用与变压器直流偏磁相似的隔离直流措施，如加装阻容式隔离方式，再在测量数据中去除隔离方式造成的数据偏差。

4 结束语

在直流偏磁下，由于线路零序阻抗实测中需要一端接地，会有直流偏磁电流流过线路导线，对线路参数测试结果的准确性带来影响。

通过PSpice建立零序阻抗测试仿真模型，在零序阻抗测试中，直流偏磁电流对测试仪器电流互感器的传变特性带来误差，直流偏磁电流越大，则电流互感器测量的电流幅值越小，且测量的电流互感器二次侧初相角发生改变，进而影响线路参数测量结果的准确性。

通过天山换流站调试期间，对一条750 kV输电线路零序阻抗进行了测试分析，验证了在直流偏磁电流作用下。零序阻抗比理论值增大，因此需要在测试仪器、测试方法方面进行改进以消除直流偏磁带来的测试结果偏差。

参考文献

- [1] 易成星，杨伟. 地磁感应电流对变压器影响的仿真研究[J]. 电工电气, 2015 (1): 16-21.
- [2] 卢树峰，杨世海，蔡霖霖，等. 直流偏磁对电流互感器的作用机理研究[J]. 电测与仪表, 2014, 51 (14): 6-10.
- [3] 王振浩，王学斌，李国庆，等. 计及直流偏磁的保护用电流互感器仿真与实验分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43 (13): 15-23.
- [4] 谭炳源，卢继平，江波，等. 直流偏磁对计量用电流互感器的性能影响分析[J]. 电网技术, 2014, 38 (5): 1408-1414.
- [5] 田晓倩，李宝树，申路. 直流偏磁下电流互感器误差特性分析[J]. 高压电器, 2013, 49 (11): 104-110.
- [6] 董霞，刘志珍. 直流偏磁下单相变压器的传输线模型[J]. 电机与控制学报, 2012, 16 (10): 7-13.
- [7] 王振浩，佟昕，齐伟夫. 直流偏磁下变压器励磁电流仿真分析[J]. 电测与仪表, 2013, 50 (10): 23-28.
- [8] 张雪松，黄莉. 基于PSCAD/EMTDC的变压器直流偏磁仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 40 (19): 78-85.
- [9] 郑涛，陈佩璐，刘连光，等. 计及直流偏磁的电流互感器传变特性对差动保护的影响[J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (20): 89-94.
- [10] 王建，马勤勇，常喜强，等. ±800 kV天—中直流对哈密电网变压器直流偏磁的影响[J]. 四川电力技术, 2014, 37 (4): 46-54.
- [11] 王欢，毛安澜，汪泉，等. 直流偏磁下计量用CT误差特性的研究[J]. 自动化仪表, 2014, 35 (6): 49-53.
- [12] 刘明章. PSpice电路设计与分析[M]. 北京：国防工业出版社, 2010.
- [13] 李世琼，宗伟. 基于PSpice的电路计算机辅助分析[M]. 北京：中国电力出版社, 2007.
- [14] 高一飞. 直流偏磁对变压器的影响研究[D]. 济南：山东大学, 2010.

(收稿日期：2017-09-03) EA