

基于频响法的电力变压器剩磁检测技术研究

谭志红¹, 张榆², 单飞³, 穆舟², 程铭⁴

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

3. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072; 4. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044)

摘要: 特高压交直流互联大电网是未来电网的发展方向, 当换流站附近的大容量变压器带剩磁投入时, 会出现较大励磁涌流, 可能造成交直流电网故障。在长线路弱联系电网中, 投带剩磁变压器产生的励磁涌流及和应涌流, 会导致变压器差动保护误动和长时间的谐波电压, 是电网安全稳定性的重要隐患。因此有必要对电力变压器剩磁的产生机理进行分析, 探索剩磁检测方法, 消除剩磁对电网的影响。对变压器进行去磁后, 基于绕组的频率响应开展剩磁检测方法研究。研究表明, 通过对一定扫频范围的频率响应进行对比, 能准确地判断出变压器是否含有剩磁及剩磁含量的大小。

关键词: 频响法; 剩磁检测; 扫频; 频率响应特性

中图分类号: TM933 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2020)03-0073-05

DOI: 10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.03.015

Research on Residual Magnetism Detection Technology of Power Transformer Based on Frequency Response Method

Tan Zhihong¹, Zhang Yu², Shan Fei³, Mu Zhou², Cheng Ming⁴

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

3. Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China; 4. Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: UHV AC/DC interconnected power grid is the main form of power grid in the future, and large capacity transformers are widely used. When the main transformer of a new substation is put into operation or put into operation after maintenance, large inrush current will appear in the transformer with residual magnetism, which has an important impact on AC and DC power grid. In the long-line weak-link power grid, the inrush current and sympathetic inrush current generated by the transformer with residual magnetism will lead to the disoperation of the transformer differential protection and the harmonic voltage for a long time, which is an important hidden danger of the security and stability for power grid. Therefore, it is necessary to analyze the generating mechanism of residual magnetism in power transformer, explore the detection method of residual magnetism, and eliminate the influence of residual magnetism on power grid. The demagnetization test is carried out for the transformer, and based on the frequency response of winding, the residual magnetism detection method has been studied. The research results show that: by comparing the frequency response in a certain sweep frequency range, it can accurately determine whether the transformer contains residual magnetism, and can determine the magnitude of the residual magnetism content of the transformer.

Key words: frequency response method; residual magnetism detection; sweep frequency; frequency response characteristics

0 引言

随着中国电力系统特高压交直流互联大电网的

迅速发展, 大容量励磁电力设备的应用日益增多, 高幅值的励磁涌流对电气设备保护运行的可靠性和快速性提出了较高的要求^[1-2]。在电力变压器进行电压比、直流电阻测量及空载试验等操作后, 由于变压

器铁芯磁畴磁滞特性,使铁芯上存在大量的剩磁。当合闸变压器充电时,铁芯中的剩磁与合闸初始磁通叠加使电力变压器铁芯迅速饱和,导致电力变压器励磁电流产生大量的谐波,造成波形畸变严重^[3]。变压器铁芯剩磁极有可能造成变压器励磁涌流,励磁涌流的幅值可达变压器额定运行电流的几倍甚至几十倍,导致变压器差动保护误动作和长时间的谐波电压,使变电站设备的稳定运行面临严峻的考验^[4]。

幅值较高的励磁涌流,在铁芯、绕组和金属结构件中增加有功损耗,使铁芯、绕组和金属结构件温度升高,同时铁芯的高度饱和使漏磁增加,引起变压器局部过热,造成绝缘纸老化,从而降低绝缘纸的绝缘性能,给变压器带来潜在性缺陷,数次积累可造成变压器的永久性损害。励磁涌流中的谐波会导致电力变压器内的杂散损耗增加,引起发电机和电容滤波器组中继电器不正确跳闸。此外,大量谐波对电网电能质量造成严重的污染。剩磁会诱发低电压和过电压,在长距离弱联系电网中,剩磁会造成局部电压过低,还可能使系统谐波震荡,在系统远端造成电压过高,严重威胁电网设备的安全稳定运行。剩磁还会诱发变压器的差动保护、轻重瓦斯保护等误动作,造成变压器的投运失败^[5-6]。

综上所述,电力变压器剩磁在一定条件下严重影响电网安全稳定运行,为解决电力变压器剩磁的影响,需要掌握电力变压器剩磁的产生机理,研究剩磁检测方法,掌握电力变压器剩磁的实时状态,从而制定消除剩磁对电网影响相关措施。

1 变压器剩磁的检测方法

国内外学者针对铁磁原件的剩磁检测、剩磁测量及去磁方法开展了相应的研究。武汉大学陈文臣^[7]等利用励磁涌流含有很大的非周期分量、含有大量的偶次谐波且以二次谐波为主这一特点,对励磁电流进行 FFT 分解,得到其各次谐波含量的分布图,通过二次谐波的含量来判断是否含有剩磁。刘勇等^[8]在变压器的中性点及高压侧施加正负极性的直流电压,通过对加压时间及电流波形的比较,来判断变压器是否含有剩磁。河北电科院张建军等^[9]通过施加电压,获得变压器的上升及下降电流曲线,基于最小二乘法判断是否含有剩磁。

关于铁芯剩磁的测量,实际工程中,铁芯剩磁的测量技术在国内外目前还没有较为明确且成熟的方法,铁芯剩磁的测量方法主要有^[10-14]:

1) 经验估磁法:一般认为变压器在实验或运行结束后铁芯中剩磁范围为 20% ~ 80% 饱和磁通值。在 1984 年国际大电网会议(international council on large electric systems) 的调查中,500 台电力变压器中仅一台变压器的最大剩磁值超过这一范围。

2) 基于铁芯磁化模型的剩磁计算方法:结合变压器铁芯磁滞回线数学模型,考虑磁化过程中的磁滞效应,推导了铁芯剩磁的计算公式。

3) 电压积分法:基于电磁感应定律,通过记录变压器分闸时线圈中电压波形,对电压积分求取铁芯磁通。

4) 基于励磁涌流的剩磁测量方法:通过测量变压器铁芯中剩磁存在时励磁电流瞬时的变化(即励磁涌流),对比不同剩磁值时励磁涌流的差异,从而来判断剩磁的方向和大小。

5) 基于变压器漏磁的剩磁测量方法:利用磁通门传感器测量变压器漏磁,通过建立变压器漏磁和铁芯剩磁的传递函数,测量变压器铁芯剩磁。

变压器产生剩磁时,需采用一定的方法消除剩磁,以避免剩磁对设备带来不利影响。关于变压器铁芯的去磁方法,目前主要有交流去磁法和直流去磁法。

1) 交流去磁法:通常在变压器低压侧加压,高压侧空载,高低压中性点均接地,轮流在低压侧三相加压,低压侧的非加压相空载,电压升高至额定电压的 1.1 倍,按每 10 s 0.1 倍额定电压的速度逐渐将电压降低为 0。

2) 直流去磁法:对变压器绕组施加直流电流并不断变换极性。直流消磁法分为等幅变频法、等频降幅法两种。等幅变频法是指采用恒定幅值电压的恒压源,逐渐提高正负交替频率来实现变压器剩磁的消除;等频降幅法是指采用同一个正负电压交替频率,逐渐将电压幅值降低来实现变压器剩磁的消除。针对变压器三相剩磁的消除,直流消磁法因为可以把初始磁通调整到三相都达到较高的饱和点,三相剩磁的消磁只需要在变压器中间相施加直流交替电压,就可以完成变压器三相剩磁的同时消除^[15]。

下面对变压器开展去磁试验,基于绕组的频率响应研究其剩磁检测方法。

2 试验变压器去磁试验

利用直流去磁法,在变压器断口施加直流电流,对110 kV试验变压器进行去磁试验。

试验对象为110 kV油浸式试验变压器,原边额定电压为200 V,副边额定电压为110 kV。去磁试验前,对变压器施加工频电压,以此来产生剩磁,确保变压器含有剩磁。

去磁设备为TD-6910变压器消磁及验证装置,可采用手动去磁及自动去磁两种模式,消磁电流可设置为1 A、5 A、10 A的直流电流。去磁装置可接在变压器高压侧或低压侧,在消磁过程中,直流电流正负极性交替变化,电流幅值等时间间隔衰减直至电流为0,消磁完成。在消磁前后,可对变压器施加220 V工频电压,利用罗氏线圈测得其在消磁前后的空载电流,通过比较空载电流的大小,即可判断变压器是否完成消磁。

试验对象的高压绕组经测试电阻达250 kΩ,若将测试电流施加在其高压端,由于其阻抗过大使测试电流不能正常施加而无法完成去磁试验。低压绕组电阻测试值为0.1 Ω。因此,将去磁电流从低压端输入,选取电流为10 A,试验布置见图1。

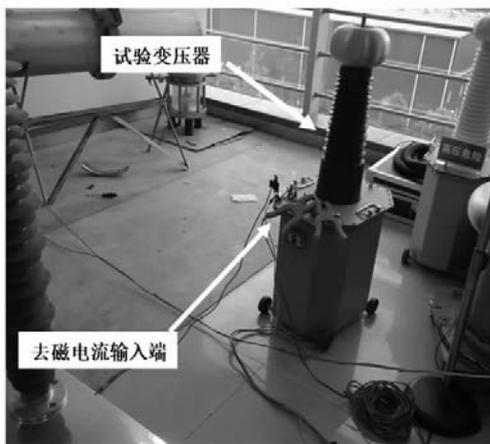


图1 试验布置

去磁试验后,从试验结果报表可以发现在去磁过程中,去磁电流从10 A开始逐渐减小,直至减小至0完成去磁,在去磁前后,空载电流明显减小。

3 剩磁对变压器频率响应特性的影响分析

首先利用直流发生器对5 kV双绕组干式变压器进行充磁,然后对充磁变压器进行扫频试验,并对

有剩磁及没有剩磁状态下的幅频特性进行比较。

3.1 试验方法

试验对象为DG-10双绕组干式变压器,原边额定电压为220 V,副边额定电压为5 kV,额定容量为10 kVA。

直流发生器为MS-115D,最大输出电压为30 V,最大输出电流为5 A。利用直流发生器输出不同幅值的直流电流至变压器,直流电流的幅值逐渐增加使变压器产生不同的剩磁量,每个幅值的电流施加时间为30 s。直流发生器的最大输出电流为5 A。为了在电流逐渐增大的过程中,使变压器产生足够的剩磁并达到饱和,考虑变压器原边及副边的变比,将直流电流从变压器的副边输入,当副边电流较小时,也能在原边产生一个很大的励磁电流。

在变压器无剩磁状态及不同幅值的直流电流输入后,均对变压器进行扫频试验。扫频设备为HR-2000数字频响分析仪。该设备产生一个幅值为3.5 V的扫频信号从变压器的高压侧输入,在变压器的低压侧对输出信号进行采集。输入及输出信号通过采集设备由数字频响仪利用数据传输线传至电脑端,即可得到变压器的幅频响应特性曲线,试验的扫频范围为10 Hz~10 MHz。扫频试验接线示意图见图2。

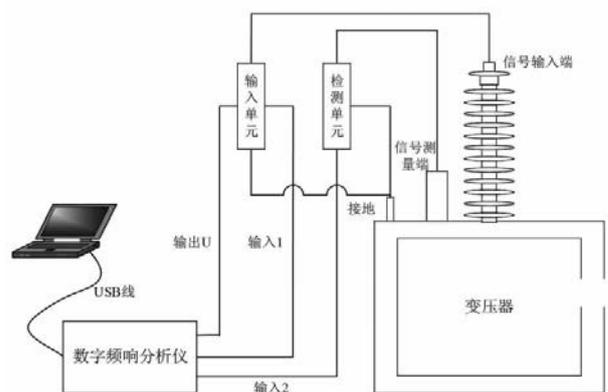


图2 扫频试验接线

3.2 试验结果分析

扫频试验结果见图3,图中除明确指出“无剩磁”的曲线为不含剩磁状态下变压器的幅频响应特性曲线外,其他均为变压器含有剩磁的曲线。利用直流发生器产生剩磁时,助磁电流不同,则在变压器上产生的剩磁含量不同,相应的扫频曲线也会存在一定的差异。通过对图3观察可知,随着扫频频率变化,变压的输出幅值发生了变化,在扫频范围内上下波动,最大幅值的绝对值约为52 dB,最小幅值的绝对值约为2 dB。进一步可以发现,当扫频频率为

10 Hz ~ 1000 kHz 时, 变压器是否含有剩磁以及剩磁含量是否不同, 均未对幅频响应特性产生影响, 几种工况下在这一频率范围内的幅频响应曲线重合。

而当频率大于 1000 kHz 时, 可以发现, 各工况下的幅频响应曲线开始出现了偏移, 并在一定的频率范围内呈现出一定的规律性。图 4 为 1000 ~ 2000 kHz 各工况下的幅频响应曲线。曲线 1 为变压器不含剩磁的幅频响应特性曲线, 曲线 2—曲线 5 为变压器不同剩磁含量的幅频响应特性。观察可知, 在这一频率范围内, 若变压器存在剩磁, 则输出的幅值会发生变化, 且随着剩磁含量的增加, 输出幅值的绝对值逐渐减小。当扫频范围为 4000 ~ 4200 kHz 时, 在这一频率范围内, 随着剩磁含量的增加, 输出幅值的极值逐渐增大, 见图 5。

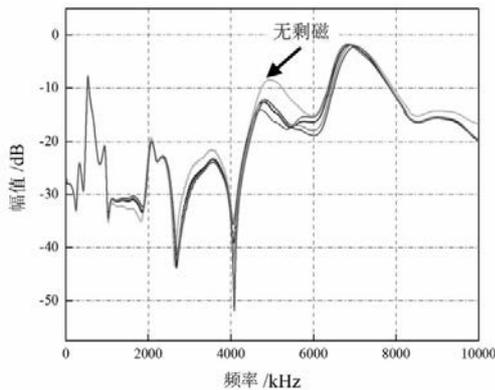


图 3 扫频试验结果

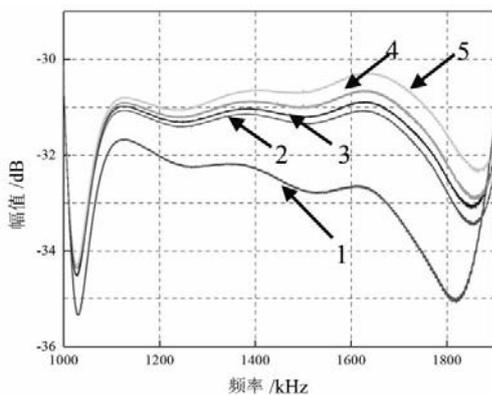


图 4 1000 ~ 2000 kHz 实验结果

当频率较高时, 变压器绕组的高低电压端可视为分布电容、电感、电阻构成的线性无源双端口网络, 这个双端口网络的传递函数与网络内部状态密切相关。当剩磁存在于变压器铁芯时, 高频电压在变压器分布电感参数上积分磁通起点不一样, 所以剩磁会影响变压器励磁电感的测量值。当变压器不含剩磁时, 回路电压方程为

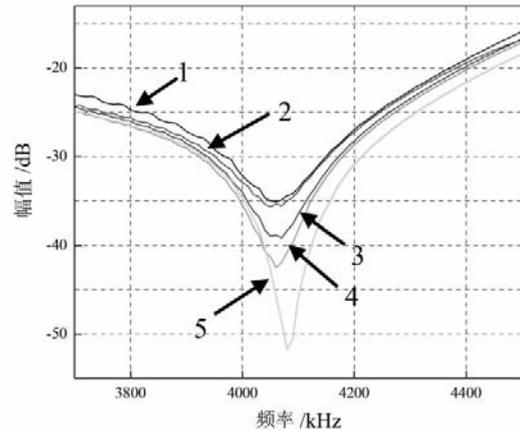


图 5 3700 ~ 4500 kHz 实验结果

$$\frac{d\varphi}{dt} + R_m \frac{\varphi}{L_{mc}} = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

式中, $\sqrt{2}U \sin(\omega t + \alpha)$ 为作用在励磁阻抗上的电压, 解得:

$$\varphi = -\sqrt{2} \frac{U}{\omega} \cos(\omega t + \alpha) \quad (2)$$

$$i_0 = -\sqrt{2} \frac{U}{\omega L_{mc}} \cos(\omega t + \alpha) \quad (3)$$

$$I_0 = \frac{U}{\omega L_{mc}} \quad (4)$$

$$I_m = \frac{U}{\omega L_0} \quad (5)$$

当变压器含剩磁时:

$$\varphi = \Phi_{RES} - \sqrt{2} \frac{U}{\omega} \cos(\omega t + \alpha) \quad (6)$$

$$i_0 = \frac{\Phi_{RES}}{L_{mc}} - \sqrt{2} \frac{U}{\omega L_{mc}} \cos(\omega t + \alpha) \quad (7)$$

$$I_0 = \frac{U}{\omega L_{mc}} \sqrt{1 + (\omega \Phi_{RES} / U)^2} \quad (8)$$

$$L_m = \frac{U}{\omega I_0} = \frac{L_{mc}}{\sqrt{1 + (\omega \Phi_{RES} / U)^2}} \quad (9)$$

综上所述, 由于剩磁的存在, 测量到的励磁电流有效值发生变化, 进而导致励磁电感测量值变化; 剩磁越大, 测量值的误差越大。

4 结 语

通过试验发现, 由于剩磁影响了变压器的电感分布而改变了其传递函数, 因此基于变压绕组的频率响应, 通过对一定扫频范围的频率响应进行对比, 能准确地判断出变压器是否含有剩磁及剩磁含量的大小。进一步的研究可以通过大量试验, 建立变压器剩磁含量与一定频率范围内幅频响应的准确关系。

参考文献

[1] 杜至刚. 中国特高压电网发展战略规划研究 [D]. 济南: 山东大学, 2008.

[2] 李光范, 王晓宁, 李鹏, 等. 1000 kV 特高压电力变压器绝缘水平及试验研究 [J]. 电网技术, 2008, 32(3): 1-6.

[3] 邢运民, 罗建, 周建平, 等. 变压器铁心剩磁估量 [J]. 电网技术, 2011, 35(2): 169-172.

[4] 仇明. 大型变压器铁心剩磁的危害及消除方法 [J]. 变压器, 2018(2): 74-75.

[5] 余克光. 电力变压器铁心剩磁检测及消除 [J]. 自动化应用, 2012(3): 73-74.

[6] 胡海将. 变压器剩磁对启机的影响 [C]//中国电机工程学会. 中国电机工程学会年会论文集, 2013.

[7] 陈文臣, 雷晓燕, 王磊. 电力变压器铁心剩磁检测方法研究 [J]. 陕西电力, 2009, 37(10): 45-48.

[8] 刘勇, 陈凌, 李英锋, 等. 一种大型电力变压器剩磁检测方法: CN201510213548.9 [D]. 2015-08-12.

[9] 张建军, 刘宏亮, 陈志勇, 等. 一种基于最小二乘法的

变压器铁心剩磁检测方法: CN201610382451.5 [P]. 2016-11-09.

[10] 戈文祺. 电力变压器铁心剩磁的仿真、测量与削弱 [D]. 天津: 河北工业大学, 2014.

[11] 周建平, 罗建, ZHOU Jian-ping, 等. 变压器铁心剩磁的一种估算方法 [J]. 热力发电, 2010, 39(3): 61-64.

[12] 戈文祺, 汪友华, 陈学广, 等. 电力变压器铁心剩磁的测量与削弱方法 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 10-16.

[13] 李钜, 乌云高娃, 刘涤尘, 等. Preisach 模型剩磁计算与抑制励磁涌流合闸角控制规律 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(19): 37-41.

[14] 李景丽, 贺鹏威, 邱再森. 电力变压器铁心剩磁测量方法研究综述 [J]. 高压电器, 2018(7): 98-105.

[15] 梁汉城, 陈向胜, 苏全. 降低大型变压器铁心剩磁的方法和测试 [J]. 电世界, 2013, 54(6): 38-39.

作者简介:

谭志红(1966), 工学博士, 主要从事输变电设备运检管理、SF₆ 气体局部放电下分解组分研究等工作。

(收稿日期: 2020-03-04)

(上接第 32 页)

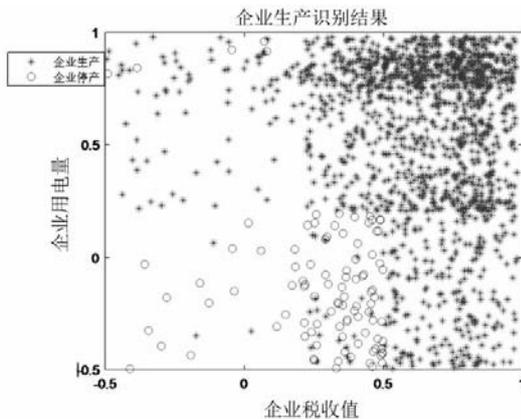


图 8 企业生产状态识别结果

有 342 个, 未进行异常和缺失值处理时, 正确识别 1142 个, 识别正确率为 76.13%, 异常和缺失值回归处理提高企业生产状态识别率 22.8%。

表 2 组合支持向量回归模型识别企业生产状态结果

输入数据	正确识别个数	正确识别率/%
回归处理后	1484	98.83
未回归处理	1142	76.13

4 结 语

提出了一种综合考虑企业用电和纳税信息的污

染企业生产状况识别方法。该识别方法考虑了实际应用过程中的数据部分病态的问题, 采用回归分析, 解决输入特征异常和部分缺失的问题, 提高了分析结果鲁棒性; 同时, 通过网格搜索选择多个支持向量机组合模型识别污染企业生产状况, 增加了模型的泛化能力, 提高了分类精度。

参考文献

[1] 牛哲文, 郭采珊, 唐文虎, 等. “互联网 + 智慧能源”的技术特征与发展路径 [J]. 电力大数据, 2019, 22(5): 6-10.

[2] 杜若, 谢川, 吴群艳. 电力环保大数据平台开发及智能运用 [J]. 电力大数据, 2017, 20(8): 64-67.

[3] 罗勇智. “电力大数据 + 环保监管”助力蓝天保卫战 [J]. 大众用电, 2019, 34(3): 15-16.

[4] Nekkaa M, Boughaci D. A Memetic Algorithm with Support Vector Machine for Feature Selection and Classification [J]. Memetic Computing, 2015, 7(1): 59-73.

[5] 周志华. 机器学习 [J]. 航空港, 2018(2): 94-94.

[6] Sebastian Raschka. Python Machine Learning [M]. Packt Publishing, 2014.

作者简介:

靳 旦(1995), 助理工程师, 主要从事大数据开发, 数据分析与挖掘工作;

唐 伟(1990), 工程师, 主要从事大数据计算模式, 存储和管理工作。

(收稿日期: 2020-03-25)