

大型水电站主变压器励磁涌流仿真研究与分析

朱小清, 周宇斐, 宗煜

(雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610051)

摘要:空载变压器在充电过程中会产生励磁涌流, 文章根据生产需求及设备运维需要, 通过理论分析及仿真研究的方法, 对变压器采取高低压侧全压充电进行了仿真分析。针对分析结果提出了有关建议, 从而提高设备运维效率, 对其他电站变压器运行与维护提供重要参考价值。

关键词:变压器; 全压充电; 励磁涌流

中图分类号: TM406; TM626

文献标志码: A

文章编号: 1001-2184(2024)增 1-0105-07

Simulation and Analysis of Magnetizing Inrush Current of Main Transformer in Large Hydropower Projects

ZHU Xiaoqing, ZHOU Yufei, ZONG Yu

(Yalong River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu Sichuan 610051)

Abstract: The no-load transformer will produce magnetizing inrush current during the charging process. According to the production demand and equipment operation and maintenance needs, through theoretical analysis and simulation research methods, the full-voltage charging of the high and low voltage sides of the transformer was simulated and analyzed in this paper. According to the analysis of results, some suggestions are put forward to improve the efficiency of equipment operation and maintenance, which have important reference value for the operation and maintenance of transformers of other projects.

Key words: Transformer; Full voltage charging; Magnetizing inrush current

0 引言

空载变压器全压充电时, 无论是采取高压侧充电方式还是低压侧充电方式, 由于其内部主要表现为磁滞变化的过渡过程, 绕组中都会产生很大的瞬态电流(又称为励磁涌流)^[1]。巨大的励磁涌流将在变压器绕组中产生很大的电磁力(机械力), 对变压器线圈的绝缘强度和机械稳定性将造成巨大影响^[2]。本文以某大型水电站主变压器作为研究主体, 对其高低压侧全压充电时励磁涌流的产生机理进行阐述, 分析判断主变压器差动保护是否动作, 并对结果进行详细分析和总结。

1 大型水电站主变压器励磁涌流的产生机理与危害

1.1 大型水电站主变压器励磁涌流的产生机理

正常运行时主变铁芯中的磁通滞后激励电源相位 90°。假设变压器铁芯剩磁为零, 若合闸瞬间电压幅值为峰值, 则绕组磁通为零, 此时与变压

器初始投入运行时铁芯无磁通一样, 磁通不会发生跃变。当合闸瞬间电压幅值为零, 则磁通达到最大, 为使合闸瞬时磁通仍为零, 铁芯内必须形成一个反向的直流分量磁通用来抵消该瞬时的稳态磁通, 且方向相反大小相等。这样, 合闸瞬时总的磁通仍为零, 但在半个周期后总的磁通为稳态磁通的 2 倍, 使铁芯达到饱和磁化^[3], 如图 1 所示。

以一台单相变压器的全压充电为例, 图 2 是变压器铁芯的分段磁滞线, 将变压器铁芯的磁滞线近似看作两条段线 AE 和 OA, Φ_s 为 A 点对应的饱和磁通。当磁通值小于 A 点对应的饱和磁通时, 铁芯磁化未达到饱和状态, 该瞬时变压器铁芯的相对磁导率很高, 绕组中存在很大的反电动势, 因此, 励磁电流很小; 当磁通值大于 A 点对应的饱和磁通 Φ_s 时, 变压器铁芯饱和磁化, 此时其相对磁导率变小, 绕组的反电动势减小, 铁芯的磁化特性工作在直线 AE 或 BF 上, 磁场线密度的微小增量, 都会引起励磁涌流的较大变化。由此

可见,全压充电时出现的过电流现象和铁芯磁场强度的建立是密不可分的^[4]。

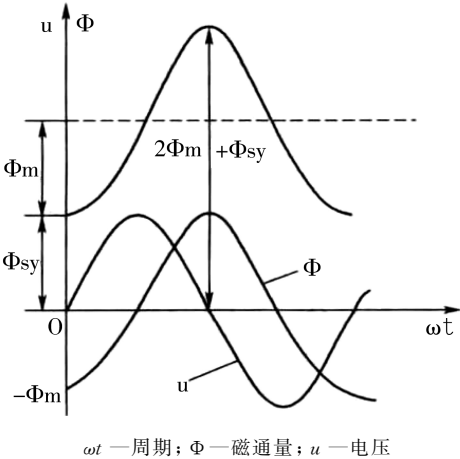


图 1 空载变压器磁通与电压的关系

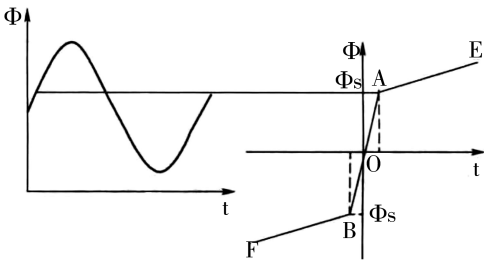


图 2 变压器铁芯的分段磁滞线

空载变压器全压充电过程中,为简化分析过程,假设电源是纯正弦电压且其内阻抗为零,忽略变压器的漏感,列出变压器初级侧回路电压方程为

$$L \frac{di}{dt} + iR = U \tag{1}$$

式中: L 为绕组的电感, H ; i 为瞬时的涌流, A ; R 为初级绕组的总电阻, Ω ; $U = U_m \sin(\omega t + \alpha)$, α 为合闸瞬间激磁电压的初相角。

解微分方程式(1),可得

$$i = \frac{U_m}{\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}} \left[\cos \alpha \times e^{-\frac{R}{L}t} - \cos(\omega t + \alpha) \right] \tag{2}$$

式中: $-\frac{U_m}{\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}} \cos(\omega t + \alpha)$ 为电流的稳态值; $\frac{U_m}{\sqrt{(\omega L)^2 + R^2}} \cos \alpha \times e^{-\frac{R}{L}t}$ 为电流的暂态值。

暂态电流是为维持 $t=0$ 时刻电流不能发生突变而产生衰减的具有非周期分量,衰减的时

间常数为 $\frac{L}{R}$ 。但如果在初相角为 90° 时变压器合闸,则该暂态分量为零,变压器将直接进入稳态过程。

在变压器的空载合闸过程中,电感值 L 并非固定不变,而是随着铁芯的磁化程度而变化。铁芯的饱和程度越低,电感值 L 就会越大,反之,电感值 L 就会越小。因此,在变压器合闸后最初的几个周期内,由于铁芯的磁化饱和程度较高,电感值 L 就会越小,从而导致励磁涌流的值较大。同时,因绕组中的电磁阻尼作用,变压器的励磁涌流 i 是不断衰减的。随着电流的减小,铁芯的饱和程度也会降低,电感值 L 逐渐变大,最终导致电流的衰减速度会逐渐缓慢。

通过对式(2)的分析得出,要减小空载变压器全压充电时的励磁涌流,可通过选择合适的合闸初相角或增大空载合闸过程的电感值以及电阻值来实现。

当空载单相变压器突然投入无穷大电源时,假设初级绕组匝数 $N_1=1$,则

$$\frac{d\Phi}{dt} = U_m \sin(\omega t + \alpha) \tag{3}$$

得出

$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t + \alpha) + C \tag{4}$$

根据初始条件得

$$C = \Phi_m \cos \alpha + \Phi_{sy} \tag{5}$$

因此,变压器空载合闸时铁芯的磁通量为

$$\Phi = -\Phi_m \cos(\omega t + \alpha) + \Phi_m \cos \alpha + \Phi_{sy} \tag{6}$$

式中: $\Phi_m = \frac{U_m}{\omega}$ 为稳定磁通的幅值; Φ_{sy} 为铁芯的剩余磁通; Φ_{sy} 通常不为零,它的瞬时值与变压器切除时刻的电流流向有关。

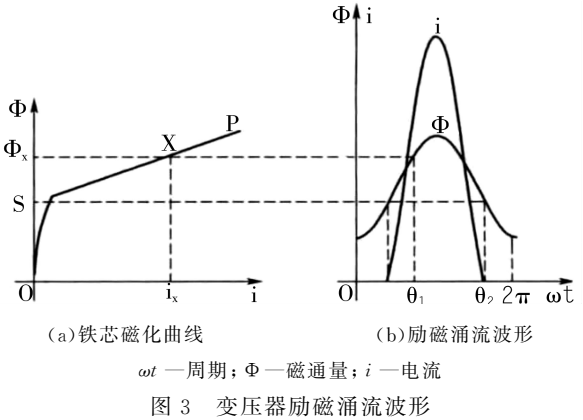
合闸瞬间 $t=0$,式(6)为

$$\Phi = -\Phi_m \cos \alpha + \Phi_m \cos \alpha + \Phi_{sy} = \Phi_{sy} \tag{7}$$

分析式(7)可知,变压器铁芯磁通在合闸瞬间没有突变,与合闸前的剩余磁通相等。式(6)中, $-\Phi_m \cos(\omega t + \alpha)$ 为稳态磁通; $\Phi_m \cos \alpha$ 为维持合闸瞬间铁芯磁通不能突变而产生的暂态磁通。

当合闸初相角为 0° 时,经过 $1/2$ 周期之后,铁芯中的磁场线密度达到 $2\Phi_m + \Phi_{sy}$,如图 1 所示,此时变压器的铁芯磁滞最为严重,要维持绕组如此大的磁通量就必须相应增加励磁电流。然而

铁芯饱和后励磁电流和绕组总的磁通量是非线性关系,此时由于铁芯的饱和作用,励磁涌流达到极大值,如图 3 所示。



由图 3 分析可知,涌流波形中含有大量的谐波分量和非周期性分量,涌流的大小以及衰减时间,与初级绕组的激励电压的大小和相位、变压器容量及电压等级、铁芯的磁滞回线、回路阻抗等都有关系^[5]。

1.2 大型水电站变压器励磁涌流的危害

由上可知,变压器的励磁电流大小与铁芯饱和程度、合闸时电压的相角和铁芯的剩磁等因素有关。如此巨大的励磁涌流将在变压器绕组中产生很大的电磁力(机械力),对变压器线圈的绝缘强度和机械稳定性将造成巨大影响,甚至造成主变差动保护动作,进而引起更严重的事故发生^[6]。

大型水电站在电力系统遭受冲击导致机组跳闸失去厂用电的极端情况下,需采取黑启动方式逐渐恢复厂用电。若仅考虑缩短黑启动时间,采用发电机到达空载态后直接合上出口断路器(GCB)的方式给空载主变压器(升压变压器)全压充电,巨大的励磁涌流不仅会对主变造成影响,且会影响发电机(与主变电气连接)定子绕组绝缘性以及机械稳定性。高于主变额定电流数倍及含有大量二次谐波特性的励磁涌流还可能引起带二次谐波闭锁的主变比率差动保护动作,造成机组跳闸,导致黑启动失败。

不仅如此,受励磁、调速系统内部固有程序影响以及电气五防闭锁逻辑约束,励磁和调速系统均接入并网信号(GCB 位置信号),GCB 与主变高压侧刀闸接入了电气闭锁条件。在未解除励磁、

调速并网信号和电气闭锁条件下,发电机无法正常升压至空载态,主变高压侧刀闸无法合闸,也就无法顺利实现黑启动流程。

2 大型水电站主变压器全压充电仿真试验

2.1 仿真实验概述

三相变压器与单相变压器稍有不同,并且其电磁瞬变过程更为复杂。这是因为三相激励电压超前磁通 90° ,而三相绕组空载合闸初相角亦互差 120° ,故三相变压器绕组中铁芯的瞬态磁通不可能全部为零。即无论铁芯剩磁情况如何,空载合闸初相角 α 是多少度,在绕组中一定存在一定的磁通。因此三相变压器励磁涌流与铁芯磁化,磁通回路,合闸相角、绕组连接方式等均有关系。

本次仿真模拟参考某大型水电站由三台单相变压器组成的星三角连接方式的主变压器,由于其与单台三相变压器连接时内部绕组截然不同,这也使得仿真有多种选择性。本文为了简化主变压器的模型,较好的观察和分析励磁涌流的特性及特征,最终选择理想的单台三相变压器替代三台单相变压器进行仿真和分析,其结果仍具有参考意义。

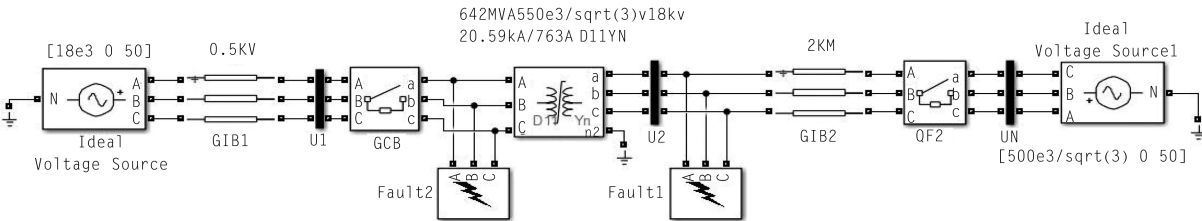
2.2 主变压器高压侧、低压侧全压充电仿真

选定理想电压源作为发电机和电网模型后,仿真模型如下图 4,从左至右分别为发电机、GIB、GCB、主变、电缆、GIS、电网。重要参数已经标注在对应模型上,仿真主要参数如表 1 所列。

低压侧全压充电方式下,不同合闸相位角(0° 、 45° 、 90°)和不同剩磁下(0Φ 、 0.8Φ)的励磁涌流仿真如下图 5 所示,其中横纵坐标分别表示时间和电流值,A、B 和 C 线条分别表示 A、B、C 三相电流,最大励磁涌流数值以游标标注在图形中。

高压侧全压充电方式下,不同合闸相位角(0° 、 45° 、 90°)和不同剩磁下(0Φ 、 0.8Φ)的励磁涌流仿真如下图 6 所示。

对比以上仿真图,将空载变压器合闸角度、铁芯剩磁都不同时所对应的两种充电方式下励磁涌流峰值提取后,与低压侧、高压侧额定电流做比值,并通过 simulink 中 FFT 分析工具计算励磁涌流仿真图中最大的一相电流二次谐波含量,数据列入表 2 和表 3。



Voltage Source—电压源;GIB—封闭母线;GCB—发电机断路器;Fault—故障点

图 4 仿真模型图

表 1 仿真主要参数

参数名	参数数值
发电机线电压 /V	18 000
合闸角 /°	0°、45°、90°
发电机频率 /Hz	50
封闭母线单位电阻 /(Ω·km ⁻¹)	12.73
封闭母线单位电感 /(H·km ⁻¹)	0.933 7
封闭母线单位电容 /(F·km ⁻¹)	0.127 4
封闭母线长度 /km	0.5
GCB 电阻 /Ω	0.00 1
GCB 缓冲电阻 /Ω	500
GCB 缓冲电容 /F	0.132
主变容量 /MVA	3×214= 642
主变一二次额定电流 /kA	0.674、20.592
主变一次、二次侧电阻标幺值	0.002
主变一次、二次侧电抗标幺值	0.045
主变励磁电阻 /Ω	500
主变励磁电感 /H	500
主变饱和特性(饱和曲线)	[0 0;0.002 4 1.2; 0.999 97 1.52]
电缆单位电阻 /(Ω·km ⁻¹)	12.73
电缆单位电感 /(H·km ⁻¹)	0.933 7
电缆单位电容 /(F·km ⁻¹)	0.127 4
GIB 母线长度 /km	2
GIS 电阻 /Ω	0.001
GIS 缓冲电阻 /Ω	500
GIS 缓冲电容 /F	0.132

3 分析研讨

3.1 结论分析

综合以上励磁涌流产生机理的阐述,结合仿真图形与数据,通过分析和对比,可知空载单相变压器全压合闸时励磁涌流有以下特征^[7-9]:

(1)空载变压器不论从低压侧(低电压、大电流特性)还是高压侧(高电压、小电流特性)全压充

电,都伴随有励磁涌流现象;

(2)励磁涌流的峰值大小除了与发电机、主变、电网特征参数(容量、电压等级、等效参数)有关,还主要与主变磁滞特性、合闸相角密切相关。当剩磁最大且合闸角 $\alpha = 0^\circ$ 或 $\alpha = 180^\circ$ 时励磁涌流最大;

(3)励磁涌流波形图远离时间轴,且励磁涌流有间断,间断角越小涌流越大;

(4)励磁涌流中含有大量的非周期分量和高次谐波分量,其中以二次谐波为主。间断角越小,非周期分量越大;励磁涌流越大,二次谐波含量越少;

(5)励磁涌流在前几个周期内,涌流较大且衰减很快,随后衰减速度逐渐变缓。

在本次仿真结论中,无论是低压侧充电还是高压侧充电下,励磁涌流与额定电流倍数均小于 5 倍(最大倍数出现在高压侧充电时,为 4.85 倍),二次谐波含量均大于 15 %(最小出现在低压侧充电时,为 15.31 %),未达到某大型水电站主变差动保护定值。因此可以得出该水电站主变压器全压充电时不会引起主变差动保护动作的结论。

通过以上分析,结合现场实际工作,对主变或厂内变压器正常运行、操作及维护提出以下建议:

(1)运行人员应掌握主变高压侧全压充电的倒闸操作,严禁违反安规规定,对主变进行低压侧全压充电。及时梳理目前可能引起低压侧全压充电的闭锁逻辑,防止出现逻辑漏洞,从根源上消除死区。

(2)主变充电过程中,检修班组重视励磁涌流对主变压器的影响,制定必要措施,记录每次主变压器充电时录波波形、励磁涌流峰值等特征值。

(3)掌握励磁涌流对变压器危害后果。充分考虑厂内变压器全压充电后,专业班组专业人员现场检查的必要性,如外观检查、局部放电检测、

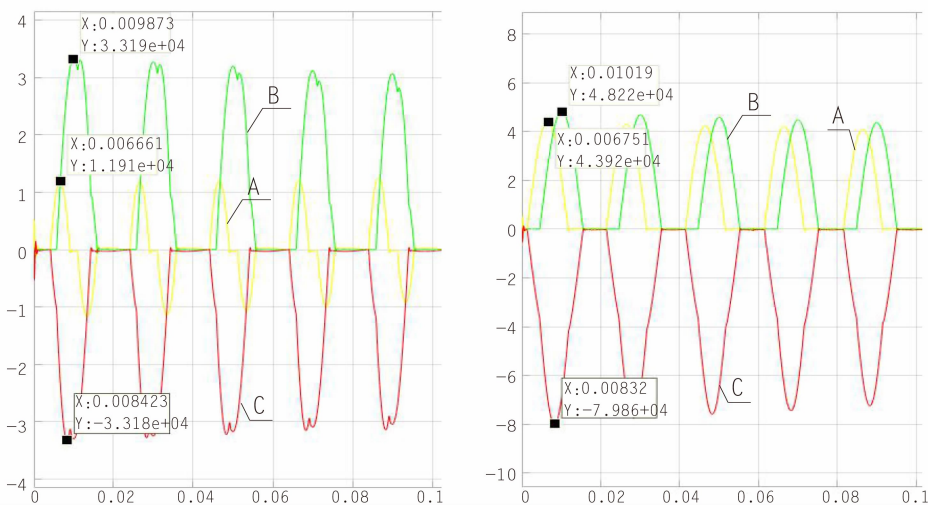
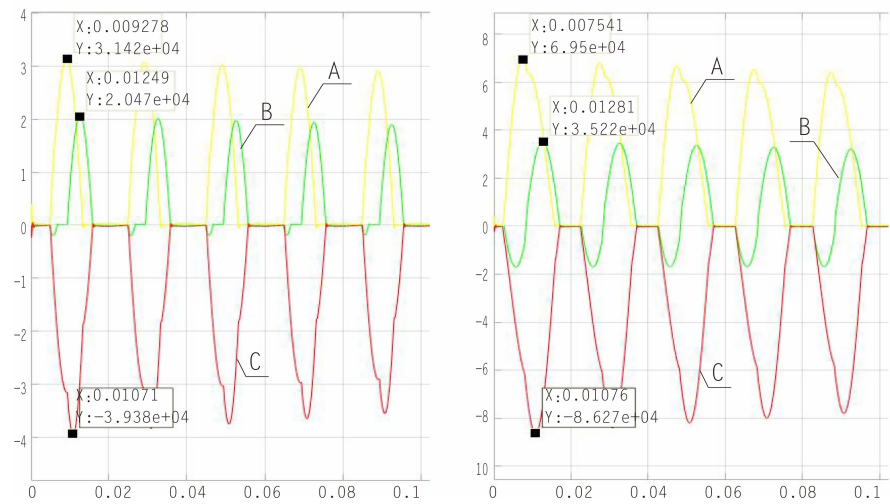
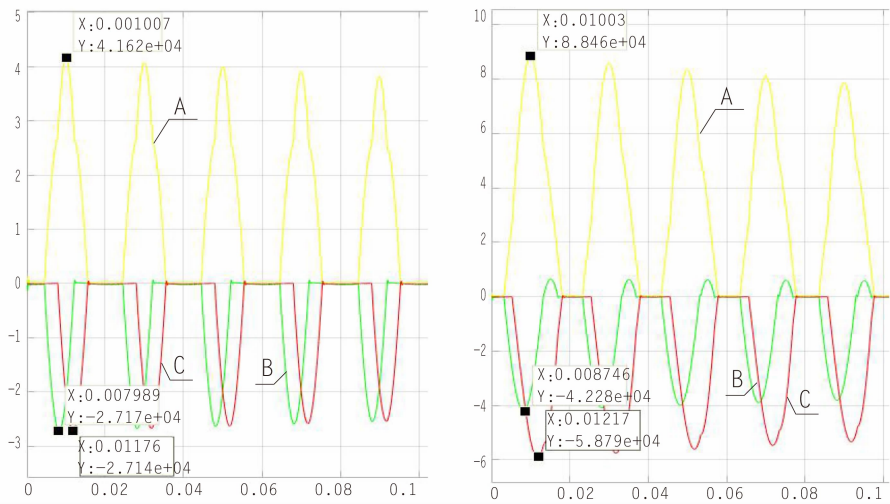
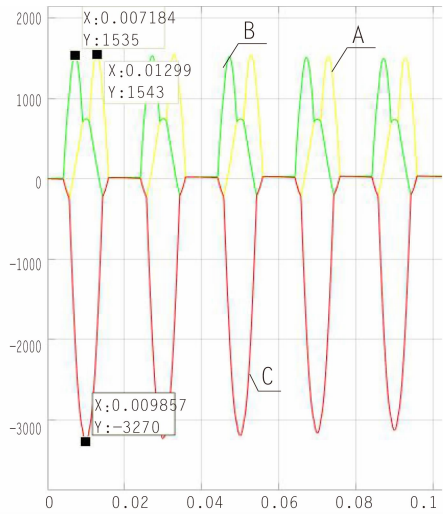
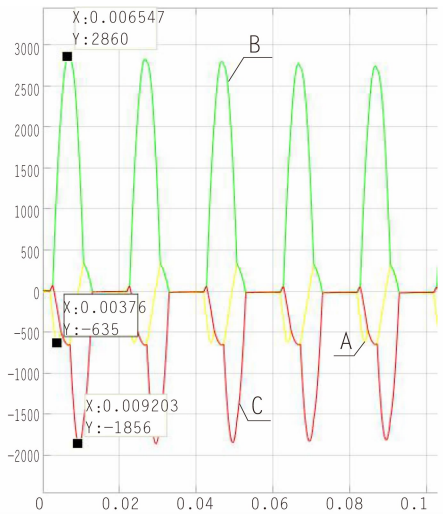


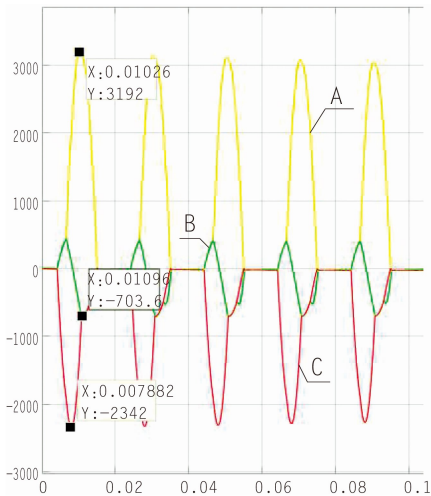
图 5 低压侧全压充电励磁涌流仿真图



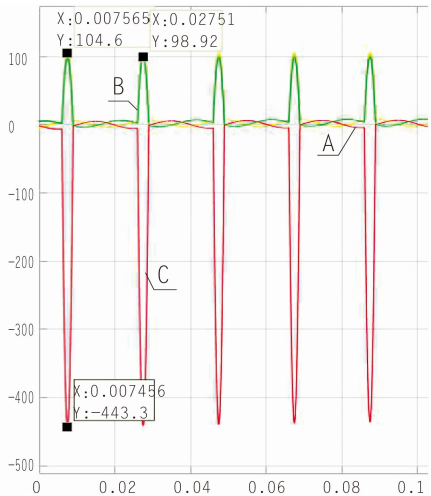
(a) 相位角 0° 剩磁 0Φ



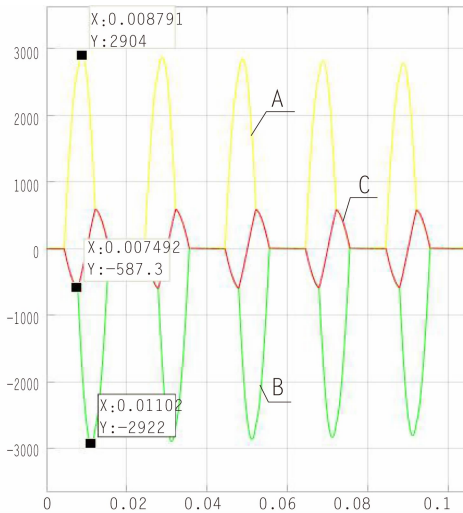
(b) 相位角 0° 剩磁 0.8Φ



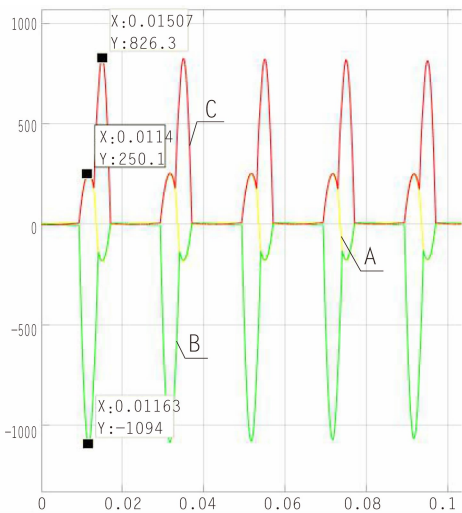
(c) 相位角 45° 剩磁 0Φ



(d) 相位角 45° 剩磁 0.8Φ



(e) 相位角 90° 剩磁 0Φ



(f) 相位角 90° 剩磁 0.8Φ

图 6 高压侧全压充电励磁涌流仿真图

表 2 低压侧充电过程中合闸角度不同和铁芯剩余磁通不同所对应的励磁涌流峰值表

合闸角度 /°	0 °		45 °		90 °	
铁芯剩余磁通 Φ	0	0.8	0	0.8	0	0.8
励磁涌流峰值 /kA	41.62	88.46	39.38	86.27	33.19	79.86
与低压侧额定电流 (20.592 kA)的倍数	2.02	4.3	1.91	4.2	1.61	3.87
二次谐波含量 /%	34.52	15.62	35.58	15.31	42.90	19.38

表 3 高压侧充电过程中合闸角度不同和铁芯剩余磁通不同所对应的励磁涌流峰值表

合闸角度 /°	0 °		45 °		90 °	
铁芯剩余磁通 Φ	0	0.8	0	0.8	0	0.8
励磁涌流峰值 /A	3270	2860	3192	443	2922	1094
与高压侧额定电流 (674 A)的倍数	4.85	4.24	4.73	0.65	4.3	1.62
二次谐波含量 /%	46.74	51.88	48.14	89.36	49.12	72.14

噪音记录等。

2014,35(10):26—30. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-7229. 2014. 10. 006.

(4)鉴于目前现有手段无法对励磁涌流作用于主变上的机械应力进行精确计算,建议在机变检修过程中增加主变机械部件排查和加固的工作内容,提高主变机械牢固性,保障主变长期安全稳定运行。

4 结 语

本文对空载变压器两种充电方式,即从高压侧与低压侧充电进行了分析。阐述了空载变压器全压充电时励磁涌流的产生机理,并通过仿真试验得出相应数据结论,得出空载变压器全压合闸时励磁涌流特征量。结合某大型水电站生产实际,得出该水电站主变压器全压充电时不会引起主变差动保护动作的结论。提出了日常运行维护的建议,对于后续变压器励磁涌流研究提供了一定参考价值。

参考文献:

[1] 张兰兰. 变压器励磁涌流鉴别新方法 with 保护新原理研究 [M]. 电力工程学院,2014.

[2] 葛宝明,王祥珩,苏鹏声,等. 电力变压器的励磁涌流判据及其发展方向[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22):6. DOI: 10. 3321/j. issn:1000-1026. 2003. 22. 001.

[3] YU Shifeng,NIE Dingzhen,XIANG Bing. 特高压直流换流变压器励磁涌流及其抑制[J]. Electric Power Construction,

2014,35(10):26—30. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-7229. 2014. 10. 006.

[4] 张雪松,何奔腾,张建松. 变压器和应涌流的产生机理及其影响因素研究[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6):5. DOI: 10. 3321/j. issn:1000-1026. 2005. 06. 003.

[5] 孙洋,黄家栋. 一种变压器励磁涌流识别新方法[J]. 南方电网技术,2010, 4(6):4. DOI: 10. 3969/j. issn. 1674-0629. 2010. 06. 020.

[6] 赖燕妮. 浅谈励磁涌流与变压器保护的关系[J]. 水电站机电技术, 1998. DOI:CNKI:SUN:SDJD. 0. 1998-04-015.

[7] 汪太平. 500 kV 变电站主变励磁涌流的特点和防范措施 [J]. 北京电力高等专科学校学报:自然科学版, 2010, 27(10):76-77.

[8] 王志英,唐伟侃成,王志伟. 变压器差动保护中励磁涌流产生的机理分析与建模[J]. 兵工自动化, 2013, 000(007): 74-76.

[9] 黄锦,赵文忠. 变压器空合闸的励磁涌流及对电网影响的分析[J]. 自动化与仪器仪表, 2013(2):3. DOI:CNKI:SUN: ZDYY. 0. 2013-02-074.

作者简介:

朱小清(1994-),男,江西萍乡人,中级工程师,硕士学位,从事水电站运行维护工作;

周宇斐(1997-),男,甘肃平凉人,助理工程师,学士学位,从事水电站运行维护工作;

宗 煜(1996-),男,湖北宜昌人,中级工程师,硕士学位,从事水电站运行维护工作.

(编辑:史心雨)