

文章编号: 1001-1609(2006)05-0346-03

高压直流输电系统接地极电流对 电力变压器运行影响的研究

曹 林¹, 曾 嵘¹, 赵 杰², 何金良¹, 张 波¹(1. 清华大学电机系电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084;
2. 南方电网技术研究中心, 广东 广州 510620)

Study on the Influence of HVDC System Grounding Electrode Current on Power Transformer Operation

CAO Lin¹, ZENG Rong¹, ZHAO Jie², HE Jin-liang¹, ZHANG Bo¹(1. Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University, State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and
Generation Equipments, Beijing 100084, China;
2. Technology Research Center of China Southern Power Grid, Guangzhou 510620, China)

摘要: 当高压直流输电系统采用单极大地回路方式运行时, 可能会有部分入地电流流入中性点接地的电力变压器中, 这将给系统运行和变压器本身带来诸多不利后果。采用电路-磁路耦合方法, 推导建立了可以考虑负载变化的单相心式变压器模型, 对偏磁电流造成的变压器工作电流谐波增加等影响进行了详细分析, 并利用解析法对空载条件下的简化变压器模型进行了验证。还比较了由于负载不同使得变压器处于不同工作点时偏磁电流影响的变化。仿真结果表明, 变压器运行工作点降低对提高设备耐受直流偏磁干扰的能力有积极的作用。

关键词: 高压直流输电; 变压器; 直流偏磁;
电路-磁路耦合模型

中图分类号: TM41

文献标识码: A

Abstract: When HVDC system operates in monopolar mode and uses the earth as a return path, partial entering ground current may flow into the power transformers, which neutral point grounded, and this will bring a series unfavorable consequences to system operation and transformer. Using electromagnetic coupling method, this paper establishes model of the single-phase transformer with considering the variation of load, and analyzes the effects of such DC current on a single-phase core-form power transformer, such as increment of current harmonics and DC flux in the iron core. The simplified transformer model, under unloaded condition, is analyzed based on analytic method to verify its validity. Furthermore, the influence of different transformer operation status has also been discussed. The simulation results indicate that lower operation point can be more advantageous against the DC bias effects.

Key words: HVDC system; power transformer; DC bias;

coupled electromagnetic model

0 引言

随着“西电东送、南北互供、全国联网”战略的实施, 近几年来, 天生桥至广州北郊、三峡至常州、三峡至广东、贵州至广东直流输电工程陆续建成。在运行实践中, 当高压直流输电系统采用单极大地回路方式进行电能传送时, 将会有最高达数千安培的直流电流流入大地。部分直流电流流经中性点接地的电力变压器等设备, 在交流系统中形成回路, 从而由于直流偏磁效应, 使得电力变压器处于非正常的运行状态中, 最终导致了对设备本身以及所在电力系统的干扰。如在 2002 年 12 月三峡至常州 ±500 kV 直流输电系统开始调试和试运行以来, 常州武南两组 500 kV 主变压器噪声上升了约 20 dB。2003 年 4 月至 5 月, 在直流输电功率为 1 540 MW, 地中电流达 3 320 A 的大方式下, 测量得到 500 kV 武南主变压器的中性点直流电流最大值为 10.4 A, 噪声最高达 91.4 dB^[1]。此外, 南方电网贵广直流 2004 年 5 月的监测记录表明^[2], 当以 750 MW 单极大地回路方式运行时, 春城站主变压器中性点直流电流达 34.5 A, 噪声为 93.9 dB, 谐波电压总畸变率达 2.1%。

由于电力变压器对电力系统安全稳定运行起着至关重要的作用, 因此国内相关电力运行部门和科研院所针对电力变压器直流偏磁现象以及所造成的系统影响这一难题, 开展了大量的研究工作, 获得了许多有价值的研究成果^[1-7]。笔者采用电路-磁路耦合的分析方法, 推导建立了简单交流系统中带有负载的

收稿日期: 2005-12-27; 修回日期: 2006-02-24

作者简介: 曹 林(1979-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统电磁环境、过电压。

单相双绕组心式电力变压器的数学模型, 并利用解析法进行了验证。通过考察该模型在不同幅值的偏磁电流下的表现, 获得了关于变压器直流偏磁现象机理和所产生影响的定量描述, 分析了由于负载变化而导致变压器处于不同工作点时所产生的差异。研究结果可以为今后更进一步的研究工作提供参考。

1 计算原理

电路-磁路耦合的计算方法通过将反映变压器端口特性和内部电磁场分布的电路和磁路方程联合求解, 能更准确地反映变压器内在属性特征, 能更好地满足系统分析的需要^[8]。当变压器受到直流偏磁电流干扰时, 在设备内部既存在交流作用, 又存在直流作用, 变压器铁心极易进入高度饱和状态。对这一现象的研究必须综合考虑系统条件和变压器设备的本身特性, 因而利用电路-磁路耦合的计算方法能获得物理概念更为明晰的分析结果。

本文所研究的简单交流系统模型见图1。图中, U_{9s} , R_{9s} , L_{9s} 和 U_{dc} 分别表示交流系统等值交流电源、阻抗和直流电压源; 变压器原副边绕组电阻和负载分别用 R_p , R_s 和 R_L 来代表。而 i_p , i_s 和 e_p , e_s 则分别代表原副边绕组电流和感应电势。

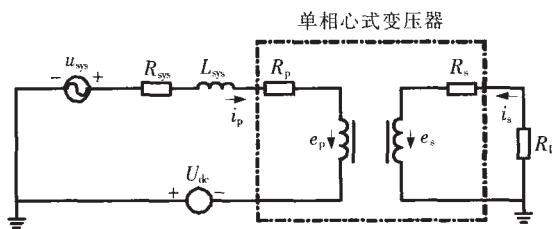


图1 简单交流系统模型示意图

根据图1所示系统电路结构, 可以列出相关电路方程见式(1):

$$\begin{cases} U_{9s} = i_p(R_{9s} + R_p) + L_{9s} \frac{di_p}{dt} + \frac{d\phi_p}{dt} - U_{dc} \\ -\frac{d\phi_s}{dt} = i_s(R_s + R_L) \end{cases} \quad (1)$$

其中: ϕ_p , ϕ_s 代表原副边绕组各自所交链的总磁链。图2所示是单相心式变压器的磁路模型, 其中 R_{mp} , R_{ms} 和 R_{ny} 分别代表变压器原副边铁心和上下铁轭磁阻; R_{mb} 表示两侧漏磁支路磁阻。而 F_p 和 F_s 则分别表示原副边绕组电流所产生的磁动势; ϕ_i ($i=1, 2, 3$) 为回路磁通。结合图2所示的磁路模型, 列写相关磁路方程如下:

$$[R(\cdot)][\phi] = [N_m][i] \quad (2)$$

其中: $[R(\cdot)]$ 为磁阻矩阵, 各漏磁支路磁阻值可以由变压器短路及空载试验数据获得^[9]; $[\phi]$ 为回路磁通矩阵; $[N_m]$, $[i]$ 分别为绕组匝数及电流矩阵。

利用梯形积分公式将式(1)转化为:

$$[A][i](t+\Delta t) = -[N_m]^T[\phi](t+\Delta t) + [S] \quad (3)$$

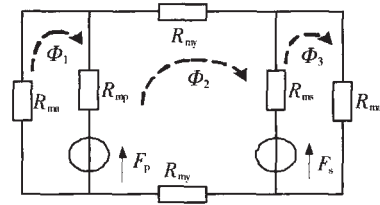


图2 单相心式变压器磁路模型

其中: $[A]$, $[S]$ 是与外加系统条件或前一时刻各状态量有关的系数矩阵。

将式(2)和式(3)联立, 就可以获得以矩阵形式表述的电路-磁路耦合方程:

$$\{[R(\cdot)] + [N_m][A]^{-1}[N_m]^T\}[i](t+\Delta t) = [N_m][A]^{-1}[S]$$

由于铁心材料的非线性, 需要利用牛顿-拉夫逊法进行迭代求解, 进而最终获得各状态量随时间的变化情况。

2 具体实例分析

实例分析中所采用的单相双绕组心式变压器模型各项参数包括^[9]: 额定容量 62.5 MV·A, 额定频率 50 Hz, 原副边额定电压分别为 $16/\sqrt{3}$ kV 和 $110/\sqrt{3}$ kV, 漏抗 0.113 p.u., 相应漏磁支路磁阻为 1.71×10^7 H⁻¹; 铁心和铁轭等效截面积均为 0.454 m², 铁轭长 1.33 m, 铁心高 3.59 m; 原副边绕组匝数分别为 65 匝和 450 匝。

为了便于进行解析分析, 笔者根据文[9]所给出的铁心励磁特性参数, 利用双曲函数表达式对其进行了拟合^[10], 得到该变压器铁心励磁特性曲线表达式为 $H = 0.201 \sin h(6.17 B)$ 。

2.1 空载条件下的数值仿真结果

由于回路电感效应, 当设定 U_{dc} 为某一数值后, 变压器绕组中流过的直流电流并不能马上达到稳态。为了缩短仿真时间, 调整原边回路总电阻值为 2 Ω , 副边回路总电阻值为 $1 \times 10^8 \Omega$ 。计算时间步长取为 39 μ s, 迭代计算的收敛精度为 1×10^{-8} 。

经计算得到, 变压器原边电流 i_p 和铁心主磁通受偏磁电流影响分别见图3和图4。当系统中不存在偏磁电流时, 原边电流 i_p 和铁心主磁通峰值分别为 90.5 A 和 0.64 Wb; 当流入变压器原边的偏磁电流为 10 A 时, 变压器原边电流 i_p 和铁心主磁通峰值分别为 133.8 A 和 0.67 Wb。

分别对这两种条件下的原边电流和铁心主磁通

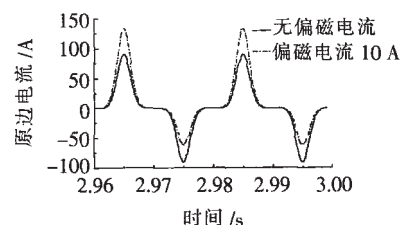


图3 偏磁电流对原边电流的影响

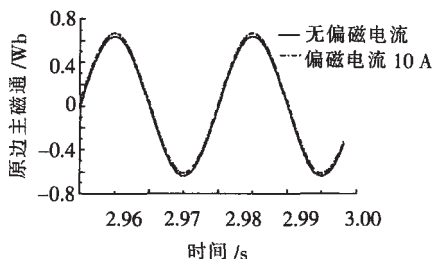


图 4 偏磁电流对原边铁心主磁通的影响

进行谐波分析,得到各次谐波幅值见表 1~3。

表 1 原边电流奇次谐波分析

偏磁电流/A	基波分量/A	三次谐波/A	五次谐波/A	七次谐波/A
0	46.8	28.9	11.3	2.94
10	50.5	31.1	12.2	3.16

表 2 原边电流偶次谐波分析

偏磁电流/A	直流分量/A	二次谐波/A	四次谐波/A	六次谐波/A
0	0.00	0.00	0.00	0.00
10	10.0	15.7	7.65	2.42

表 3 原边铁心主磁通谐波分析

偏磁电流/A	直流分量/Wb	基波分量/Wb	二次谐波/Wb	三次谐波/Wb
0	0.00	0.640	0.00	0.00
10	0.028 9	0.640	0.00	0.00

2.2 空载变压器模型的解析验证

为了对上述数值仿真结果进行解析验证,现假定原副边绕组匝数分别为 N_1 匝和 N_2 匝,原边接有交流电压源 $u_a = \sqrt{2} U_1 \cos t$,流入原边的偏磁电流为 I_{α} ,与原边电流 i_1 同向,铁心磁路长度为 l ,等效截面积为 S ,铁心励磁特性曲线仍采用双曲函数 $H = x \sin h(yB)$ 来表示。

根据安培环路定律,铁心中的磁场强度 H 满足:

$$N_1 i_1 + N_1 I_{\alpha} = Hl \quad (4)$$

将双曲函数表达式代入式(4),并进行傅里叶分解可得:

$$N_1 I_{\alpha} = l x \sin h\left(\frac{y}{S} \omega\right) a_0(m) \quad (5)$$

$$N_1 i_1 = l x \left\{ \sin h\left(\frac{y}{S} \omega\right) \left[\sum_{n=1}^{\infty} a_{2n}(m) \cos(2n t) \right] + \right.$$

$$\left. \cos h\left(\frac{y}{S} \omega\right) \left[\sum_{n=1}^{\infty} a_{2n-1}(m) \cos\left((2n-1) t - \frac{\pi}{2}\right) \right] \right\} \quad (6)$$

其中: $n=1, 2, \dots$; m 是与变压器工作状态有关的量;而 $a_0(m)$, $a_{2n}(m)$, $a_{2n-1}(m)$ 则分别为傅立叶分解生成的各项系数。

利用式(5)和式(6),就可以计算出铁心中由于偏磁电流 I_{α} 而出现的直流磁通分量 Φ_0 以及原边电流 i_1 的各次谐波分量。

经计算得到,空载条件下,变压器原边铁心主磁通峰值为 0.64 Wb。无偏磁电流存在时,直流磁通分量为 0;而当偏磁电流增大为 10 A 时,直流磁通分

量为 0.028 7 Wb。两种条件下原边电流各次谐波幅值见表 4 和表 5。

表 4 原边电流奇次谐波分析

偏磁电流/A	基波分量/A	三次谐波/A	五次谐波/A	七次谐波/A
0	46.9	29.0	11.3	2.96
10	50.6	31.2	12.2	3.19

表 5 原边电流偶次谐波分析

偏磁电流/A	直流分量/A	二次谐波/A	四次谐波/A	六次谐波/A
0	0.00	0.00	0.00	0.00
10	10.0	15.7	7.67	2.44

将电路-磁路耦合方法分析所得与解析法所得进行比较可以发现,二者结果相差很小,因而相互得到了验证。

综合这两种不同方法得到的直流偏磁电流对变压器工作电流的影响可以发现,偏磁电流能够造成变压器工作电流各次谐波幅值均出现不同程度的增加,特别是对于偶次谐波而言,变化更为明显。由此而产生的大量谐波势必会对所在系统的电压稳定和电能质量产生影响,也会给继电保护配置带来一定的问题。铁心主磁通的变化则表明,空载条件下偏磁电流对基波磁通幅值几乎没有影响,直流磁通分量则有所增加,但与 10 A 偏磁电流单独作用所产生的直流磁通 0.48 Wb 相比要小得多。

2.3 不同工作点的影响

在现场实际运行的电力变压器大都处于负载状态,它们在铁心励磁特性曲线上的工作点在某些条件下有可能会随着外部系统条件的变化而发生改变。为了分析不同工作点对于变压器承受偏磁电流干扰能力的影响,在图 1 所示系统模型中,通过调节副边负载电阻值,对偏磁电流的干扰作用进行了比较分析。

需要指出的是,在实际系统中,变压器原副边所处系统状态要复杂得多,同时也存在着各种能对电网电压进行相应调节的措施和手段。为了突出重点,本文仅考虑了最为简单的一种情况。

选择变压器副边负载电阻分别为 1 k 和 5 k,求解得到原边工作电流峰值变化情况见表 6。在这两种负载条件下,变压器铁心主磁通分别为 0.58 Wb 和 0.63 Wb,处于不同的工作点上。

表 6 变压器原边工作电流峰值变化

偏磁电流/A	原边工作电流峰值 /A	
	负载 1 k	负载 5 k
0	571.4	122.9
1	571.4	122.9
5	571.8	123.0
10	572.2	128.5

(下转第 354 页)

转换,通过显示电路实现输出指示,通过键盘电路进行测量功能的选定,通过报警电路实现温度上限报警,并通过串口通信电路与上位机进行通信。

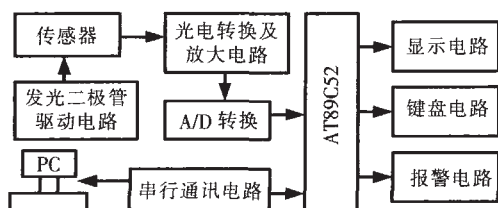


图3 光纤传感系统框图

4 实验结果分析及结语

实验结果的一组数据见表1,其中标准温度以分辨率为1的水银温度计为准。可以看出,系统测量误差在±1以内,符合设计的预期目标。升温、降温过程的测量温度不重合是由于测温仪本身所存在的迟滞性引起,它反映了传感器机械部分和结构材料方面不可避免的弱点^[7]。本系统产生迟滞的原因主要是由传感探头的导热能力引起,如果探头的导热性能良好,其响应温度变化的速度就会加快,则测温仪的迟滞程度就会减小。

实验结果表明该方案是可行的。该测量系统具有良好的电绝缘性和抗电磁干扰能力,测温元件可以做得很小,整个系统结构简单,成本低,安装方便,在易

(上接第348页)

通过对比不同负载条件下偏磁电流对变压器原边工作电流的影响,以及结合空载条件下求解得到的结果,可以认为,当变压器运行于较低的工作点上时,同样幅值的偏磁电流的影响会有所减弱。这应当是由于在这样的工作条件下,变压器铁心更不易进入过饱和状态的缘故。

3 结语

(1)采用电路-磁路耦合方法和解析方法,对空载条件下电力变压器直流偏磁现象进行分析所得的结果表明,受到直流偏磁电流干扰的电力变压器励磁电流峰值会大幅增加,原有各奇次谐波均有所增强,而偶次谐波更是大量出现。

(2)在稳态条件下,变压器直流偏磁电流注入侧产生畸变的工作电流的直流分量实际上就是自中性点流入的偏磁电流。同时,由于变压器铁心励磁特性曲线的非线性,直流偏磁状态下铁心主磁通的直流分量要小于偏磁电流单独作用时所产生的直流磁通量。

(3)当电力变压器运行于铁心励磁特性曲线上的不同工作点时,其承受直流偏磁电流干扰的能力会受到一定的影响。随着运行工作点的降低,同样幅值的直流偏磁电流所产生的干扰将会有所减弱。

表1 一组实验数据

标准温度	系统显示温度		标准温度	系统显示温度	
	升温	降温		升温	降温
10	10.0	9.2	60	59.0	59.8
15	14.2	14.3	65	65.4	65.3
20	19.9	19.4	70	70.3	69.6
25	24.1	24.7	75	75.7	75.3
30	29.5	30.8	80	80.0	80.0
35	35.5	35.8	85	84.7	85.2
40	39.8	41.0	90	90.8	91.0
45	45.6	46.0	95	94.2	95.4
50	51.0	50.7	100	99.5	99.8
55	54.5	54.7			

燃、易爆、强电磁干扰等环境具有很好的应用价值。

参考文献:

- [1] 苑舜. 高压开关设备状态监测与诊断技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [2] 吕文娥, 马乃祥, 周国华. 用光纤温度传感器在线测量高压电气设备内部绝缘温度[J]. 山西电力技术, 2000(5): 24-25.
- [3] 郭伟民. 高压电气设备现场试验技术 365 问 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1993.
- [4] 王耀才, 朱建铭. 关于光纤温度传感器的研究 [J]. 中国矿业大学学报, 1990, 19(2): 50-55.
- [5] YUAN Li-bo. Optical Path Automatic Compensation Low-coherence Interferometric Fiber-optic Temperature Sensor [J]. Optics & Laser Technology, 1998, 30(1): 33-38.
- [6] 刘瑞复, 史锦珊. 光纤传感器及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
- [7] 彭军. 传感器与检测技术 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003.

参考文献:

- [1] 蒯狄正. 电网设备直流偏磁影响检测分析与抑制 [D]. 南京: 南京理工大学, 2004.
- [2] 尚春. HVDC 地中电流对交流变压器影响的抑制措施[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 52-54.
- [3] 赵杰, 曾嵘, 黎小林. HVDC 输电系统中直流对交流系统的影响及防范措施研究 [J]. 高压电器, 2005, 41(5): 324-326, 329.
- [4] 姚纛英. 大型电力变压器直流偏磁现象的研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2000.
- [5] 曾连生. 直流输电接地极电流对电力变压器的影响[J]. 高电压技术, 2005, 31(4): 57-58, 81.
- [6] 王明新, 张强. 直流输电系统接地极电流对交流电网的影响分析[J]. 电网技术, 2005, 29(3): 9-14.
- [7] 朱艺颖, 蒋卫平, 曾昭华. 抑制变压器中性点直流电流的措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 1-7.
- [8] Yacamini R, Bronzeado H. Transformer Inrush Calculations Using a Coupled Electromagnetic Model [J]. Science, Measurement and Technology, 1994, 141(6): 491-498.
- [9] Enright W G. Transformer Models for Electromagnetic Transient Studies with Particular Reference to HVDC Transmission [D]. Christchurch, New Zealand: University of Canterbury, 1996.
- [10] Emanuel A E, Pileggi D J, Levitsky F J. Direct Current Generation in Single-phase Residential Systems-DC Effects and Permissible Levels [J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1984, PAS-103(8): 2051-2058.