

单相变压器的直流偏磁励磁电流问题及其对保护的影响分析

朱林¹, 韦晨², 余洋³

(1. 德阳电业局, 四川 德阳 618000; 2. 二滩水电开发有限责任公司, 四川 攀枝花 617000;
3. 华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003)

摘要: 直流偏磁将使变压器励磁电流发生半个周波的畸变, 产生大量的偶数次和奇数次谐波。为研究直流偏磁对变压器及其保护设备的影响, 利用 PSCAD/EMTDC 软件建立系统模型, 仿真了某实际电网单相 750 kV 变压器在直流偏磁时的励磁电流变化情况, 研究了直流入侵导致的变压器励磁电流畸变、谐波分布、励磁电流峰值与直流偏磁的关系。同时还分析了在谐波影响下变压器保护的性能, 定量计算了励磁电流畸变所造成的变压器损耗。

关键词: 单相变压器; HVDC 输电; 直流偏磁; 励磁电流; 保护

Analysis of DC bias exciting current of the single-phase transformer and its effect on protection

ZHU Lin¹, WEI Chen², YU Yang³

(1. Deyang Electric Power Bureau, Deyang 618000, China;
2. Ertan Hydropower Development Company, LTD, Panzhihua 617000, China;
3. Department of Electric Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: DC bias will lead to half-cycle distortion of exciting currents. Then large quantity of even and odd harmonics will be produced. In order to research the effect of DC bias on single transformer and its protection, this paper uses PSCAD/EMTDC to create a simulation model. It simulates exciting current of a practical 750 kV single-phase transformer in variant cases under DC bias. It studies the relationship between the DC bias and distortion of exciting current, harmonic distribution, as well as the peak value of the exciting current. Meanwhile, the performance of transformer protection in this harmonic environment is analyzed. The loss made by exciting current's distortion and the elevated temperature of the core tie-plate are quantitatively calculated.

Key words: single-phase transformer; HVDC system; DC bias; exciting current; protection

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)24-0158-05

0 引言

近年来,在国家“西电东送、南北互供”战略方针指导下,我国基本实现了全国联网。由于输送容量大,输送距离远,在能量输送方式上采用了高压直流输电(HVDC)^[1]。

直流输电系统的运行方式包括两极直接构成回路、单极或双极以大地或金属为回路等运行方式^[2]。我国很多接地极的额定入地电流能达到 3 kA,如果 HVDC 输电采用单极大地方式运行,3 kA 入地直流将造成地表电位分布不均匀,从而在交流电网不同接地点间产生电位差,使部分直流电流从一端变

器中性点流入,再从另一端变压器中性点流出^[3]。现场测试表明^[4]只需很少的直流电流流过变压器中性点就会严重危害变压器甚至影响交流电力系统的正常运行。因此,变压器的直流偏磁问题越来越受到国内学者的重视^[5-6]。由于 500 kV 及以上大型变压器(750 kV 和 1 000 kV)一般均采用单相结构,而研究表明三相组式(单相)变压器受直流偏磁影响最为严重^[7]。为研究实际的电力系统遭受直流电流入侵所产生的变压器直流偏磁及其规律,本文在 PSCAD/EMTDC 中建立了系统模型,仿真了变压器的励磁电流及其畸变所产生的各次谐波与直流偏磁间的关系,分析了在谐波影响下变压器保护的性能,并定量计算了谐波可能造成的变压器损耗。

基金项目:华北电力大学(保定)青年教师科研基金项目(200911001)

1 系统仿真模型

图1所示为某 ± 500 kV高压直流输电示意图,正常情况下地中无直流,但当直流系统检修或发生单极闭锁故障时,某一极将退出运行,如图中虚线框退出运行后,系统将通过大地构成回路。此时,入地直流将改变地表电位的分布,使交流电网不同接地点的电位不同,在两接地点间产生电位差,该电位差将使一部分直流通过接地变压器的中性点和架空线路构成回路,引起变压器直流偏磁,对交流电网产生不利影响^[8-9]。

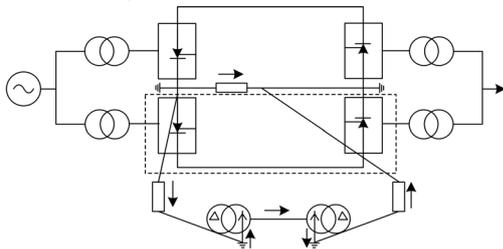


图1 直流单极运行电流流向

Fig.1 DC flow when HVDC monopole operation

直流偏磁对变压器励磁电流的影响可用图2来说明。在设计变压器时,为了充分利用铁磁材料,在额定运行时主磁通 φ 应运行于图2(b)线性区端部的A点。这样,当变压器中存在直流性质的电流时,直流磁通和交流励磁磁通相叠加,形成带有偏磁的总磁通。与直流偏磁方向一致的半个周波,总磁通的磁通密度将大大增加,另外半个周波的磁通密度反而减小,与之对应的励磁电流的波形也会发生相应的变化,呈现正负半波不对称(如图2(c)所示),并产生大量谐波。

为研究直流偏磁对变压器的影响,在PSCAD/EMTDC中建立了系统模型。交流系统为简化的双端长距离供电系统,如图3所示,其中, U_{dc} 为两变压器中性点之间的直流电位差。等值系统A和B每相容量均为233 MVA,电压为750 kV,系统等值内阻不为零,电源A等值电压相角超前电源B的相角为 1° ^[10];输电线路用分布参数表示,长度取100 km。

在一般的电力系统仿真中,对变压器往往只考虑各相之间电的联系,很少注意其磁的关联性,本文选用PSCAD/EMTDC提供的UMEC变压器模型,它能准确模拟变压器的非线性励磁特性,并依据变压器的不同结构,充分考虑变压器饱和状态下饱和磁通在相内、相间的耦合。

变压器采用某电网实际750 kV单相变压器,其主要参数如下:额定容量700/700 MVA,额定电压:

高压 $765/\sqrt{3}$ kV, 低压 $(345/\sqrt{3} \pm 2 \times 2.5\%)$ kV, 空载损耗127 kW, 短路损耗1 226 kW, 空载电流0.1%。 $I-\Phi$ 曲线如图4所示。为更好地模拟实际系统,将变压器T1、T2和T3组成第一组三相变压器;变压器T4、T5和T6组成第二组三相变压器^[11],两组均接为Y/y结构,6台变压器铁心具有相同的非线性特性。

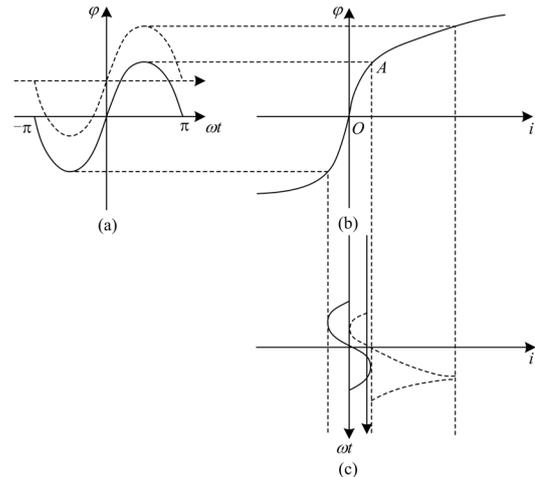


图2 直流偏磁对励磁电流的影响

Fig.2 Exciting current influenced by DC bias

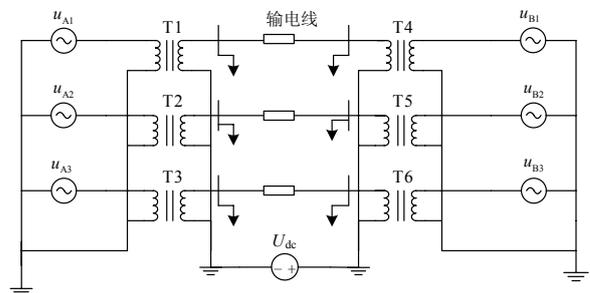


图3 仿真实电网简化接线图

Fig.3 Simplified connecting diagram of simulation system

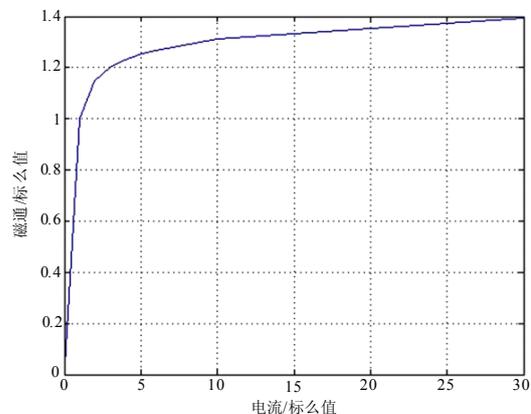


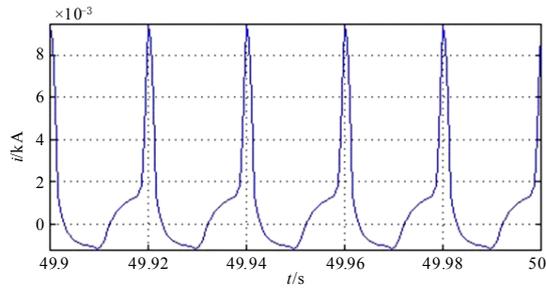
图4 变压器的 $I-\Phi$ 曲线

Fig.4 $I-\Phi$ curve of transformers

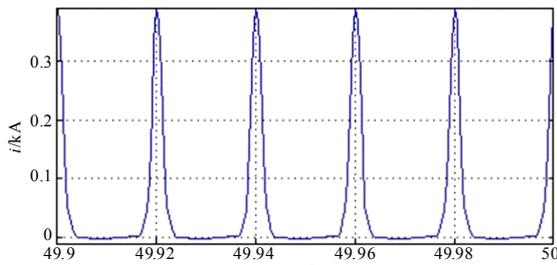
2 单相变压器直流偏磁仿真

2.1 直流偏磁下励磁电流和磁链饱和分析

图 5 和图 6 为典型的变压器励磁电流和磁链在不同直流偏磁下的波形。表 1 为单相变压器励磁电流及磁链与直流偏磁间的关系。



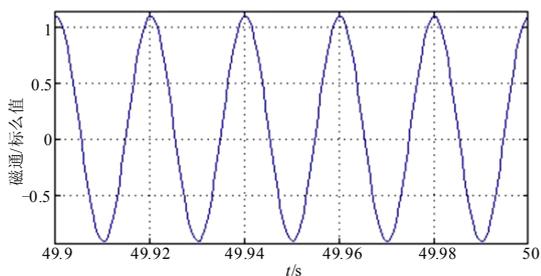
(a) $I_{dc}=5\text{ A}$



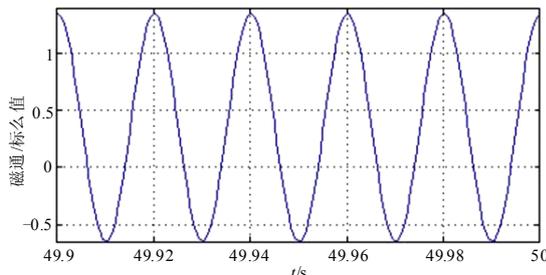
(b) $I_{dc}=50\text{ A}$

图 5 单相变压器直流偏磁下励磁电流波形

Fig.5 Waveform of exciting current for single-phase transformer under DC bias



(a) $I_{dc}=5\text{ A}$



(b) $I_{dc}=50\text{ A}$

图 6 单相变压器直流偏磁下磁链波形

Fig.6 Waveform of flux linkage for single-phase transformer under DC bias

表 1 单相变压器励磁电流及磁通与直流偏磁的关系

Tab.1 Exciting current and flux of single-phase transformer under DC bias

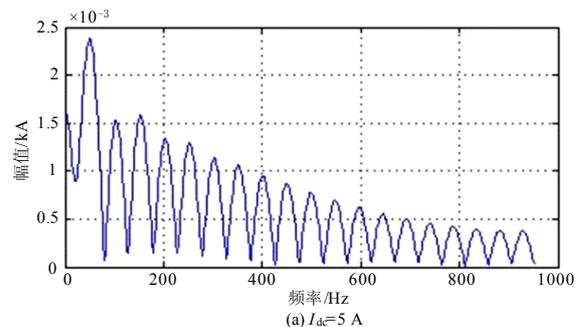
直流电流/A	励磁电流/A		磁通/标么值	
	平均值	有效值	平均值	峰值
0.0	0.041	1.094	0.025	0.997
5	1.145	3.151	0.120	1.097
10	13.406	28.334	0.234	1.228
20	19.900	42.79	0.275	1.252
30	38.310	85.67	0.336	1.302
40	47.529	105.58	0.361	1.325
60	70.394	155.71	0.393	1.362
80	96.361	207.69	0.446	1.406
90	106.660	228.78	0.454	1.417
100	108.640	231.74	0.467	1.432

由于 750 kV 主变为单相结构,此类变压器具有独立的磁回路,磁阻低,较小的直流就可以引起磁饱和(图 5 可看出),并且直流偏磁越大,励磁电流正半周越来越大,负半周逐渐减小至零(从图 6 可以看出)。从表 1 也可以看出,当 $I_{dc}=100\text{ A}$ 时,系统中存在的直流磁链达到 1 704 Wb,几乎接近额定磁链(1 966 Wb),可以说直流偏磁很容易引起单相变压器饱和,因此单相变压器绕组只能容许流入较少的直流电流,在直流单极运行时,我们应采取适当的抑制措施减小流入变压器中性点的直流电流。

2.2 直流偏磁下励磁电流谐波分析

图 7、8 和 9 分别为直流偏磁下励磁电流的谐波分布、励磁电流峰值随直流的变化曲线和励磁电流各次谐波随直流的变化曲线。

对图 5 中的励磁电流进行 FFT,得到图 7 中的励磁电流在各个频率下的谐波分布,其中零次谐波为直流分量。从图 7 可以看出,随着直流的增加,低次谐波增加非常迅速,而高次谐波增加则较为缓慢。以 2 次和 3 次谐波为例,直流从 5 A 增大为 50 A,即增大 10 倍,2 次谐波则从 1.5 A 增大为 80 A,增大了 50 倍,3 次谐波从 1.6 A 增大为 70 A,增大了 40 倍。直流偏磁使单相变压器励磁电流出现了半



(a) $I_{dc}=5\text{ A}$

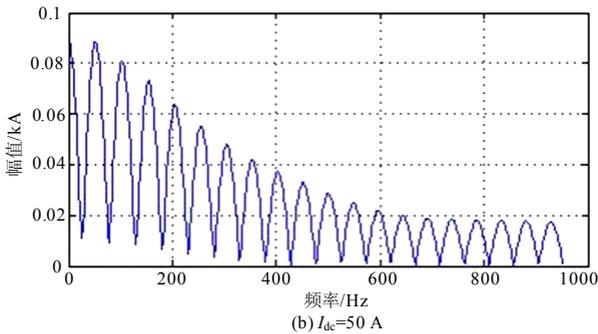


图7 直流偏磁下励磁电流的谐波分布

Fig.7 Harmonic distribution of exciting current under DC bias

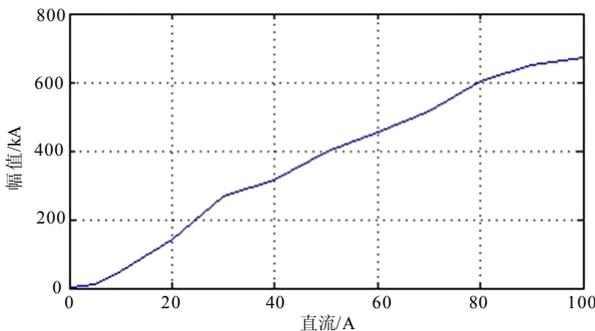


图8 直流偏磁下励磁电流峰值随直流的变化曲线

Fig.8 Peaking value of exciting current changed along with DC bias

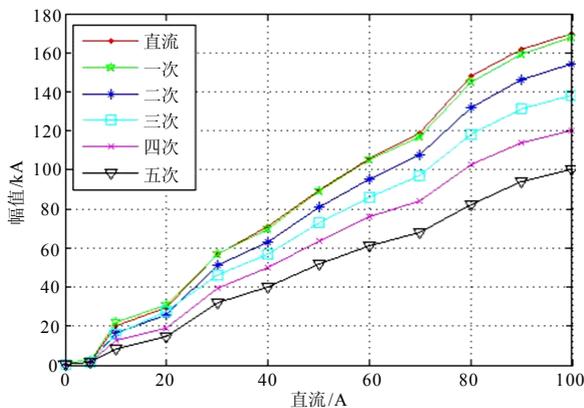


图9 直流偏磁下励磁电流各次谐波随直流的变化曲线

Fig.9 Harmonic magnitude of exciting current changed along with DC bias

个周波的饱和,而饱和又使偶次和奇次谐波的含量都大为增加。

现在一般均采用差动保护作为变压器的主保护,为提高保护的動作率,增加了谐波抑制环节,比如我国常用的是带二次谐波制动的比率式差动保护。这种保护通过检测励磁电流中二次谐波含量的大小来确定是内部故障还是外部故障。现场二次谐

波含量的整定值可设为25%或者更高,也就是说,如果二次谐波含量大于25%,差动保护将不能动作。而从上面的分析得知,当直流偏磁流过单相变压器时,励磁电流中二次谐波的含量将大为增加,甚至很有可能大于25%(流入100A直流时二次谐波含量为30.1%),如果此时发生变压器内部故障,由于直流偏磁使励磁电流中二次谐波含量大于了整定值,将闭锁保护,导致保护拒动。特别是在发生小匝间故障时,保护更可能拒动。现场中可以通过提高二次谐波含量的整定值来解决该问题,但需要注意的是,该整定值仅适用于直流单极运行时,如果正常运行时仍有这么高的整定值,将可能降低保护的灵敏度,使保护误动。

数字式保护大多通过检测电流峰值来实现保护算法,因此我们对直流偏磁下励磁电流峰值的变化作了仿真,结果如图8所示。在直流电流从零增大到100A时,励磁电流峰值从1.2A增加到670A,增大了550倍,在这么高的励磁电流下,如果不采取适当的抑制措施,有可能导致差动速断保护误动。

图9为直流偏磁下励磁电流中各次谐波幅值随直流的变化曲线。从图中可以看出,各次谐波幅值随直流以较大斜率的直线快速上升,谐波次数越低,增长速度越快。

2.3 直流偏磁下的变压器损耗

如果流过变压器绕组的直流电流较大,不但可能引起变压器铁心磁饱和,还将导致变压器损耗增大。变压器损耗可根据以式(1)、(2)进行计算^[12]:

$$P = V \cdot I_1 \quad (1)$$

$$Q = V \cdot \left(\sum_{j=1}^N I_j^2 \right)^{1/2} \quad (2)$$

式中: P 、 Q 为有功、无功损耗; V 为正弦电压有效值; I_j 为第 j 次谐波电流的有效值; N 为计算所取的最高次谐波(本文取20次)。

根据式(1)、(2),计算出在50A直流偏磁下,该750kV单相变压器由于励磁电流畸变所引起的有功和无功损耗分别为:296.198kW和93.120kvar,有功损耗达到了空载损耗的2.33倍,无功损耗则为空载时的13.3%。如此大的功率损耗完全有可能使气体继电器告警或动作,使保护误动。因此,在直流单极大地方式运行时,我们应更加注意监测气体继电器,防止其误告警或误动作。

3 结论

(1)当直流以单极大地方式运行时,只要有较少的直流流过单相变压器中性点,就可能引起饱和,

因此,单相变压器对直流偏磁很敏感,我们应采取适当的抑制措施来减小流入变压器中性点的直流电流。

(2) 随着流入单相变压器中性点直流的增加,励磁电流中各次谐波幅值都将增大,特别是低次谐波的增长更为迅速。随着二次谐波的增大,当变压器发生内部故障时,可能会由于二次谐波含量较大而闭锁保护,导致保护拒动,尤其是变压器内部发生小匝间故障。

(3) 直流偏磁使励磁电流畸变的同时,还将导致变压器损耗增加。由于油浸式变压器大都以气体继电器作为内部故障时的主保护,因此直流偏磁导致的变压器损耗可能使气体继电器误动或误告警,实际工作中应更注意监测气体继电器的运行状况。

参考文献

- [1] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
ZHAO Wan-jun. HVDC engineering technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [2] 叶廷路. 葛南直流输电系统的运行与控制[J]. 电网技术, 1994, 18 (1): 20-25.
YE Ting-lu. The operation and control of Ge-Nan HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 1994, 18 (1): 20-25.
- [3] 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.
SHANG Chun. Measure to decrease the neutral current of the AC transformer in HVDC ground return system[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30 (11): 52-54.
- [4] 蒯狄正, 万达, 邹云. 直流偏磁对变压器的影响[J]. 中国电力, 2004, 37 (8): 41-43.
KUAI Di-zheng, WAN Da, ZHOU Yun. Impacts of long-time DC biasing magnetism on transformers[J]. Electric Power, 2004, 37 (8): 41-43.
- [5] 钟连宏, 陆培均, 仇志成, 等. 直流接地极电流对中性点直接接地变压器影响[J]. 高电压技术, 2003, 29 (8): 12-13, 28.
ZHONG Lian-hong, LU Pei-jun, CHOU Zhi-cheng, et al. The influence of current of DC earthing electrode on directly grounded transformer[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29 (8): 12-13, 28.
- [6] 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 (9): 8-10.
ZENG Lian-sheng. Impact of HVDC ground electrode current on the adjacent power transformers[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31 (9): 8-10.
- [7] Nobuo Takasu, Tetsuo Oshi, Fumihiko Miyawaki, et al. An experimental analysis of excitation of transformers by geomagnetically induced currents[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1994, 9 (2): 1173-1182.
- [8] 姚缨英. 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.
YAO Ying-ying. Research on the DC bias phenomena of large power transformers[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2000.
- [9] 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, 2005.
KUAI Di-zheng. Inspection, analysis and restraining of DC transmission on power grid equipment[D]. Nanjing: University of Science and Technology, 2005.
- [10] 张燕秉, 刘连光, 姚谦. 基于 PSCAD/EMTDC 的电网 GIC 影响仿真分析[J]. 华北电力技术, 2004(6): 10-13.
ZHANG Yan-bing, LIU Lian-guang, YAO Qian. Simulation analysis on GIC effect on power grids based on PSCAD/EMTDC[J]. North China Electric Power, 2004 (6): 10-13.
- [11] 李晓萍, 文习山, 蓝磊, 等. 单相变压器直流偏磁试验与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27 (9): 33-40.
LI Xiao-ping, WEN Xi-shan, LAN Lei, et al. Test and simulation for single-phase transformer under DC bias [J]. Proceeding of the CSEE, 2007, 27 (9): 33-40.
- [12] The Power Systems Relaying Committee of the IEEE PES. Transient response of current transformer[R]. IEEE Publication 76 CH 1130-4 PWR, 1976.

收稿日期: 2009-12-23; 修回日期: 2010-03-06

作者简介:

朱林 (1981-), 男, 本科, 助理工程师, 从事电力系统继电保护现场安装调试维护工作;

韦晨 (1985-), 男, 本科, 助理工程师, 从事电力系统继电保护工作;

余洋 (1982-), 男, 硕士, 助教, 从事电力系统自动化、风力发电等方面研究。E-mail: ncepu_yy@163.com