

直流偏磁条件下变压器的谐波畸变特征

李贞¹, 李庆民¹, 李长云¹, 姚金霞², 刘民²

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 山东电力研究院, 山东 济南 250002)

摘要: 结合我国在建的±660 kV 直流输电线路(银川至青岛), 基于建立的非线性磁模型, 对距青岛换流站 30 km 的 220 kV 匡正站一号主变进行了谐波定量分析。结果表明, 直流偏磁条件下变压器输出电压的偶次与奇次谐波含量均显著增加, 使得变压器成为系统的严重谐波源。通过分析直流偏磁对变压器影响的相关因素, 给出了该变压器输出电压偶次谐波含量与中性点注入直流的对应关系, 为发展基于中性点反向注入电流的直流偏磁抑制方法提供了新思路。

关键词: 变压器; 直流偏磁; PSCAD/EMTDC; 总谐波畸变率; 谐波含有率

Harmonic distortion feature of AC transformers caused by DC bias

LI Zhen¹, LI Qing-min¹, LI Chang-yun¹, YAO Jin-xia², LIU Min²

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. EPRI of Shandong, Jinan 250002, China)

Abstract: Combined with the undergoing ± 660 kV HVDC transmission line from Yinchuan to Qingdao, quantitative harmonic analysis of the No.1 main transformer of Kuangzheng substation which is 30 km away from the Qingdao converter station is carried out based on an established nonlinear magnetic model by PSCAD/EMTDC. The results indicate that, both the odd and even harmonic components are increasing significantly under DC bias than that without DC bias, which thereby makes the power transformers become the severe harmonic sources. Related factors of DC bias impact on the power transformers are discussed, and the relationship between the injected neural DC currents and the even harmonic ratio is established, which presents further potential for developing inverse-current-injection based DC bias suppression scheme.

Key words: transformer; DC bias; PSCAD/EMTDC; total harmonic distortion; harmonic ratio

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)24-0052-04

0 引言

高压直流输电系统调试或发生单极故障时, 将采用导线-大地回线的运行方式, 此时较大的直流经接地极注入大地, 在极址附近土壤中形成一个恒定的直流电场, 场域内的变电站间会产生电位差, 形成的直流偏磁电流将由一个变电站的变压器中性点流入, 经交流输电线路后再从另一变电站的变压器中性点流出, 如图 1 所示。

此外, 地磁暴产生的地磁感应电流(GIC), 其频率在 0.001~0.01 Hz 之间, 也可近似看作直流^[1]。当直流经过变压器两侧绕组时, 在变压器铁芯内产生一恒定直流磁通, 造成直流偏磁现象, 致使铁芯饱和程度大大增加。直流偏磁对变压器的影响主要

表现在: 一方面, 由于变压器励磁特性的非线性, 励磁电流高度畸变, 变压器无功损耗增加; 另一方面, 铁芯饱和使漏磁增加, 相关部件损耗增加, 温升增大。此外, 大量实测数据还表明, 接地极附近的交流电力变压器会出现不同程度的噪声增大、振动加剧等异常现象^[2-4]。

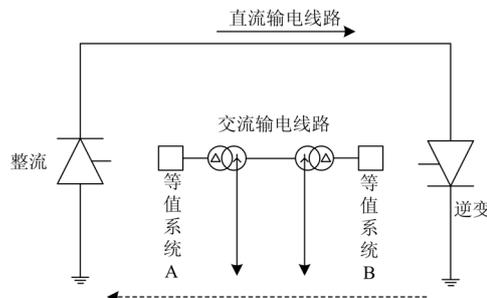


图 1 直流偏磁对交流电力变压器的影响

Fig.1 Impact of HVDC bias on the AC transformers

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-08-0335); 国家电网公司科技项目

依托我国在建的±660 kV 宁东-山东直流输电线路,本文以某台实际运行的变压器为研究对象,分析不同直流注入情况下其输出电压的畸变情况,以获得各种谐波分量的物理特征,为探寻基于中性点注入直流的偏磁抑制方法提供了新思路。

1 变压器直流偏磁的仿真分析

我国首条±660 kV 宁东-山东直流输电系统正在建设当中,现针对距青岛换流站 30 km 的 220 kV 匡正站一号主变 T_1 进行分析。在额定负载下,当中性点注入直流分别为高压侧额定电流的 3%、5%、10%、15%、20% (对应直流大小分别为 14.2、23.4、47.3、70.9、94.6 A) 时,观察 T_1 低压侧输出电压的谐波特征。

1.1 仿真实例

T_1 型号为 SFS9-180000/220, 额定电压为 220/110/35 kV, Y/Y/△ 接线,三相五柱式铁芯结构,空载损耗为 110 kW,短路损耗分别为 530.53 kW、135.65 kW、195.28 kW。图 2 为仿真实例图,有关参数设置如下:

1) 等值系统 1、2 内阻不为零,零序阻抗参数采用经验值,系统 1 的电压相角超前 1° , T_1 高压侧接系统 1, 低压侧接输电线路 L, 中压侧接系统 3;

2) 输电线路 L 东西走向,长度为 50 km,三相对称;

3) 变压器模型采用 PSCAD/EMTDC^[6-7] 提供的 UMEC 模型,并以文献[8-9]所述的分段线性化的等效支路电导,来模拟铁芯的磁化曲线,其取值如表 1 所示。

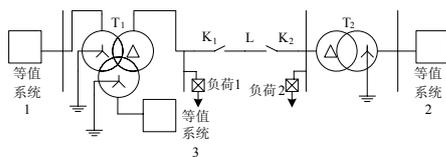


图 2 仿真实例简化图

Fig.2 Diagram of simulation model

表 1 UMEC 模型 $U-I$ 数据对

Tab.1 $U-I$ data for UMEC model

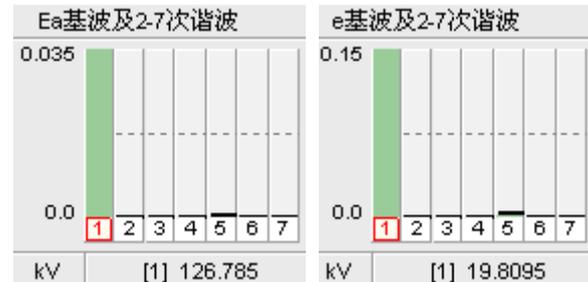
参数	参数值									
I/A	0	0.837	2.30	4.63	9.46	30.8	96.1	284	587	
U/kV	0	4.12	7.78	105	127	149	160	173	190	

4) E_a 为 T_1 高压侧 A 相电压, e 为低压侧 A 相电压,通过快速傅里叶变换器 (FFT) 获得 E_a 和 e 的基波及各次谐波分量的方均根值 (至 7 次谐波);

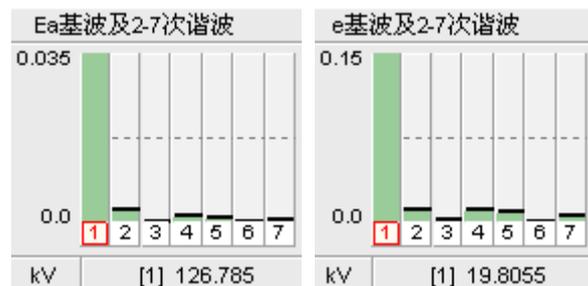
5) 线路参数及负载均为线性,以免因线路和负载对 E_a 、 e 的谐波分析产生影响。

1.2 结果及分析

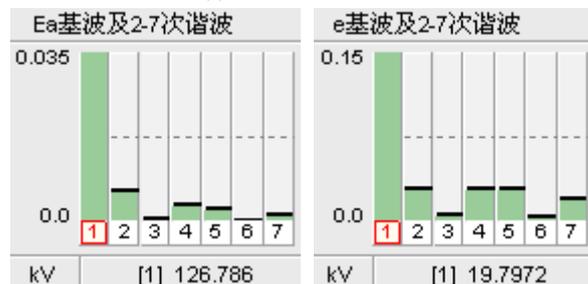
额定负载情况下,当 T_1 中性点注入直流不同时, E_a 、 e 的谐波分量如图 3 所示。图中横坐标为谐波次数,标注[1]后的数字表示基波均方根值。



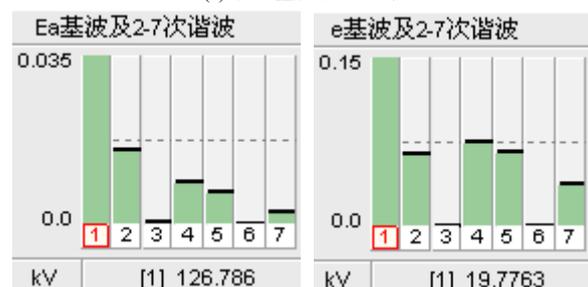
(a) 注入直流 0 A 时



(b) 注入直流 14.2 A 时



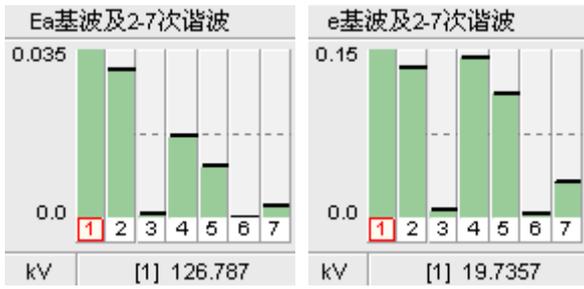
(c) 注入直流 23.4 A 时



(d) 注入直流 47.3 A 时



(e) 注入直流 70.9 A 时



(f) 注入直流 94.6 A 时

图 3 E_a 和 e 的谐波分量组成

Fig.3 Harmonic components of both E_a and e

由图 3 可以看出, T_1 中性点无直流注入时, E_a 、 e 都仅含有少量奇次谐波, 当有直流注入时, 均出现偶次谐波。随 T_1 中性点注入直流的增加, E_a 、 e 的谐波含量均将显著增大。以 e 的二次谐波为例, 无直流注入时为 0, 当注入直流 14.2 A 时则达 10.14 V, 而注入直流 23.4 A 时则增加到 27.15 V。总体而言, 2、4 和 5 次谐波增加显著, 7 次谐波增加较缓。因该变压器低压绕组为三角形联结, 所以相电压中三的倍数次谐波含量较少。

1.3 低压侧输出电压的谐波分析

根据电压总谐波畸变率 ($THDu$) 和第 h 次谐波电压含量 (HRU_h) 的计算公式^[10]:

$$THDu = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^M U_h^2}}{U_1} \times 100\%, \quad HRU_h = \frac{U_h}{U_1}$$

可计算得出不同直流注入时 e 的总谐波畸变率 ($THDe$) 和 e 的 2、4 次谐波电压含量 ($HRe2$ 、 $HRe4$), 如表 2 所示。这里, U_1 、 U_h 分别为基波及 h 次谐波的方均根值。

表 2 定量给出了 T_1 在不同偏磁水平下 35 kV 线路侧的谐波含量。当偏磁电流为 T_1 高压侧额定电流的 3%、5%、10%、15%、20% 时, e 的总谐波畸变率 $THDe$ 分别是无偏磁时的 6.99 倍、15.7 倍、53.4 倍、80.1 倍、100 倍。显然, 处于偏磁状态的变压器已经成为系统的主要谐波源。对表 2 中 $HRe2$ 、 $HRe4$ 的数据进一步分析表明, 当直流注入不为零时, e 的偶次谐波含量较大, 从数值上看, $HRe2$ 、 $HRe4$ 的大小近似为 $THDe$ 的 1/2, 与文献[1]的实测数据相符 (文献[1]中表 1、2 的实测数据表明, 北郊变电站和嘉禾变电站在偏磁情况下, 其 220 kV 母线电压的 $HR4$ 约为 THD 的 1/2)。

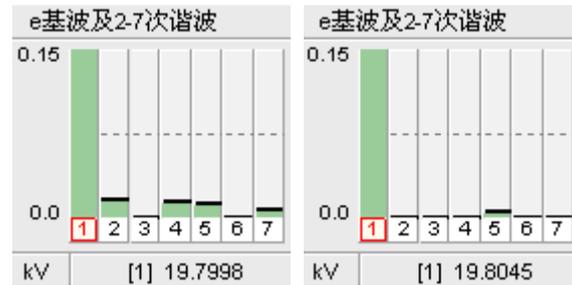
表 2 e 的电压总谐波畸变率及 2、4 次谐波含量

Tab.2 $THDe$, $HRe2$ and $HRe4$			
DC/A	$THDe$ / %	$HRe2$ / %	$HRe4$ / %
0	0.011 6	0	0
14.2	0.081 1	0.049 8	0.043 9
23.4	0.266	0.137	0.146
47.3	0.619	0.322	0.338
70.9	0.929	0.506	0.566
94.6	1.162	0.686	0.706

1.4 直流偏磁对变压器影响的相关因素分析

当中性点注入直流为 14.2 A 时, 计算表明, 空载、额定负载以及 150% 额定负载情况下, e 的总谐波畸变率分别为 0.0912%、0.0811%、0.0790%, 限于篇幅, 未给出附图说明。这与文献[11]的试验结果相一致, 直流偏磁对空载变压器的影响较负载时更严重。

保持其他条件不变, 仅将 T_1 改为三相组式变压器或三相三柱式铁芯结构, 当额定负载下注入直流 14.2 A 时的谐波含量如图 4 所示。



(a) 三相组式变压器

(b) 三相三柱式变压器

图 4 不同铁芯结构下 e 的谐波含量

Fig.4 Harmonic analysis of e under different core structures

对比图 3 (b), 可以看出, 三相组式变压器受偏磁影响最为严重, 三相三柱铁芯结构的变压器受偏磁影响最小, 这与文献[12]的分析相一致。

2 直流偏磁抑制措施的探讨

目前抑制直流偏磁的措施主要有: 交流线路上装设串联电容器; 变压器中性点串联小电阻接地; 变压器中性点串联电容器接地; 中性点反向电流注入抑制方法^[13], 等。以上措施在应用中都存在着不同程度的问题。其中的反向电流注入抑制方法, 是在变压器中性点注入反向的直流电流, 以消除偏磁电流对变压器影响, 该方法不改动变压器的原有接线, 利于运行安全, 但是中性点注入直流电流的监测是个技术难点。电网电压谐波一般为奇次谐波, 而直流偏磁状态下的变压器是电网电压偶次谐波的

主要来源,且与中性点注入直流的大小有对应关系,考虑到交流电压的在线监测技术已较为成熟,则可通过检测变压器输出电压的偶次谐波来确定反向注入电流的大小,实现起来较为容易。这为发展基于反向注入电流的直流偏磁抑制方法,提供了有价值的思路,但需要进一步深入研究。

4 结论

1)采用 PSCAD/EMTDC 提供的 UMEC 变压器仿真模型,能准确模拟其非线性励磁特性,并可根据变压器的不同结构,充分考虑变压器饱和和磁通在相内、相间的耦合作用。

2)直流偏磁状态下,变压器输出电压存在奇次和偶次谐波,且后者含量较高。输出电压的总谐波畸变率随中性点注入直流电流的增加而增大,且与变压器结构及负载状况有关。中性点注入直流对高次谐波影响不明显。

3)针对我国在建的±660 kV 宁东-山东直流输电线路,定量给出了匡正站一号主变在不同偏磁水平下母线上的谐波含量,为交直流系统的电能质量分析提供了参考依据。通过监测变压器的偶次谐波可间接获得中性点注入电流的大小,可为发展直流偏磁抑制措施提供新思路。

参考文献

- [1] 郭满生,程志光.大型电力变压器直流偏磁研究综述[J].电气制造,2006(3):52-54.
GUO Man-sheng, CHENG Zhi-guang. Summary of study on large power transformers under DC bias[J]. Electric Manufacture, 2006(3):52-54.
- [2] 梅桂华,徐柏榆,王晓毛,等.直流输电对交流系统变压器的影响[J].广东电力,2006,19(1):1-7.
MEI Gui-hua, XU Bai-yu, WANG Xiao-mao, et al. Effect of DC transmission on AC system transformers[J]. Guangdong Power, 2006, 19(1):1-7.
- [3] 薛向党,郭晖,郑云祥,等.地磁感应电流对电力变压器危害的研究[J].电力系统及其自动化学报,1999,11(2):13-19.
XUE Xiang-dang, GUO Hui, ZHENG Yun-xiang, et al. Study on damage of geomagnetically induced currents to power transformers[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 1999, 11(2):13-19.
- [4] 蒋跃强,李红雷,周行星,等.变压器直流偏磁的振动特性研究[J].华东电力,2009,37(1):132-134.
JIANG Yue-qiang, LI Hong-lei, ZHOU Xing-xing, et al. Study on vibration characteristics of transformers under DC bias[J]. East China Electric Power, 2009, 37(1):132-134.
- [5] 汤蕴璆.电机学[M].北京:机械工业出版社,1999.
TANG Yun-qiu. Electromechanics[M]. Beijing: China Machine Press, 1999.
- [6] Jayasinghe R P, McLaren P G, Gouldsborough T. Effect of GIC on overcurrent protection for filter banks[C].// IEEE Proceedings on Communications, Computers and Power in the Modern Environment. 1993: 36-42.
- [7] 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 of GIC effect on power grid based on PSCAD / EMTDC[J]. North China Electric Power, 2004(6):10-13.
- [8] Enright W, Nayak O B, Irwin G D, et al. An electromagnetic transients model of multi-limb transformers using normalized core concept[C]. // IPST '97 Proceedings. Seattle: 1997: 93-98.
- [9] Enright W, Watson N, Nayak O B. Three-phase five-limb unified magnetic equivalent circuit transformer models for PSCAD V3[C]. // IPST '99 Proceedings. Budapest: 1999: 462-467.
- [10] 肖湘宁.电能质量分析与控制[M].北京:中国电力出版社,2004.
XIAO Xiang-ning. Power quality analysis and control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [11] 程志光,高桥则雄,博扎德,等.电气工程电磁热场模拟与应用[M].北京:科学出版社,2009.
CHENG Zhi-guang, Norio Takahashi, Behzad, et al. Simulation and application of electrical-engineering electromagnetic thermal field[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [12] 刘曲,郑健超,潘文,等.变压器铁芯承受直流能力的仿真和分析[J].变压器,2006,43(8):5-10.
LIU Qu, ZHENG Jian-chao, PAN Wen, et al. Simulation and analysis of DC endured ability for transformer core[J]. Transformer, 2006, 43(8):5-10.
- [13] 朱艺颖,蒋卫平,曾昭华,等.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.
ZHU Yi-ying, JIANG Wei-ping, ZENG Zhao-hua, et al. Studying on measures of restraining dc current through transformer neutrals [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13):1-7.
- [14] Yao Ying-ying, Chang Seop Koh, Ni Guang-zheng, et al. 3-D nonlinear transient eddy current calculation of online power transformer under DC bias[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(5):1840-1843.

收稿日期:2009-12-16; 修回日期:2010-01-29

作者简介:

李贞(1984-),女,硕士研究生,主要从事直流偏磁分析、偏磁时变压器建模方面的研究工作;

李庆民(1968-),男,教授,博士生导师,主要从事高电压与绝缘技术、应用电磁学等方面的科学研究工作;
E-mail: lqmeee@sdu.edu.cn

李长云(1974-),男,博士研究生,主要从事直流偏磁、铁磁非线性及其治理技术方面的研究工作。