

直流偏磁条件下换流变压器空载特性分析

刘文里¹, 马健², 李阳阳³, 白永刚⁴, 李航¹

(1. 哈尔滨理工大学 电气与电子工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080; 2. 德州供电公司, 山东 德州 253000;
3. 国网北京经济技术研究院徐州勘测设计中心, 江苏 徐州 221005; 4. 东营供电公司, 山东 东营 257091)

摘要: 为了深入研究直流偏磁对换流变压器运行性能的影响, 基于瞬态“场-路耦合”方法, 使用实际产品参数建立了二维求解模型. 结合铁心材料磁导率的非线性, 利用该模型分析了不同直流流入侵情况下, 换流变压器空载时励磁电流的波形曲线及铁心磁感应强度变化. 另外, 依据半波平均算法定量分析了在不同等级直流偏磁电流作用下空载损耗情况. 结果显示, 直流偏置水平的升高使励磁电流波形畸变; 低次谐波逐渐增加; 铁心磁密峰值呈非线性增长并趋于饱和. 同时, 空载损耗也随之增加. 该方法为考虑换流变压器偏磁时的设计和维护提供了有效手段.

关键词: 换流变压器; 直流偏磁; 非线性 “场-路耦合”; 空载特性; ANSYS

中图分类号: TM411 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2014)05-0120-07

Analysis on Non-load Characteristics of Converter Transformer under DC Bias

LIU Wen-li¹, MA Jian², LI Yang-yang³, BAI Yong-gang⁴, LI Hang¹

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China;
2. Dezhou Power Supply Company, Dezhou 253000, China; 3. State Power Economic Research Institute Xuzhou Survey and Design Center, Xuzhou 221005, China; 4. Dongying Power Supply Company, Dongying 257091, China)

Abstract: Based on the transient “field-circuit coupled” method, two-dimensional solution mode is established according to the parameters of the actual product, so that people can further research the effect on the operating performance of converter transformer caused by DC bias better. Considering the nonlinearity of core material’s permeability, the model is used to analyze the exciting current waveform curves and the iron core magnetic flux intensity changes of no-load in different DC bias conditions. In addition, the condition of no-load loss is analyzed quantitatively in accordance with half-wave average algorithm. The results show that the increase of DC bias ratio leads to distortion of the exciting current waveform. The low harmonics become more and more abundant. The peak value of iron core magnetic flux intensity grows nonlinearly and tends to be saturated. Synchronously the no-load loss is also increased. This method provides an effective means for the design and maintenance of converter transformer’s DC bias.

Key words: converter transformer; DC bias; nonlinear; “field-circuit coupled”; non-load characteristics; ANSYS

收稿日期: 2013-09-06

作者简介: 刘文里(1956—), 男, 教授, 硕士研究生导师, E-mail: 13936640759@139.com;

马健(1987—), 男, 硕士研究生.

通讯作者: 李航(1989—), 男, 硕士研究生.

0 引言

当直流输电系统工作在单级大地回线方式或双极不平衡方式时^[1-2], 大地中的直流电流会通过接地极流入中性点接地的换流变压器绕组. 换相过程中晶闸管触发相位不同或直流侧电流的谐波也会使阀侧绕组中出现直流电流^[3-4]. 直流磁通造成换流变压器铁心半周饱和, 励磁电流严重畸变, 出现噪音增大、器身振动加剧和局部过热等现象, 严重影响其正常工作^[5]. 换流变压器直流偏磁问题日益突出, 已成为工程实际中亟待解决的课题.

针对普通变压器直流偏磁现象已开展了广泛研究, 采用电路-磁路模型^[6-10]求解直流偏磁条件下变压器的励磁电流及磁密. 通过直流偏磁试验研究^[11-13]分析变压器的性能变化.

本文运用 ANSYS 有限元软件, 基于对瞬态“场-路耦合”关系的处理和铁磁材料的非线性曲线, 对实际运行的 530 kV/405.2 MVA 单相双绕组换流变压器在不同直流偏磁情况下的励磁电流及谐波特征、铁心磁通密度进行了系统分析. 同时, 基于半波平均算法探究了不同偏置量对空载损耗的影响.

1 磁场-电路耦合方程

采用磁场-电路耦合对换流变压器进行瞬态涡流场计算, 就是把激励源与绕组参数加入有限元模型中, 形成求解区域见图 1. 图中, $N_{N1} \sim N_{Nm}$ 为相互串联的网侧绕组各线饼, 加电压 $u(t)$; $N_{V1} \sim N_{Vm}$ 为相互串联的阀侧绕组各线饼, 入侵直流电流为 I_{dc} .

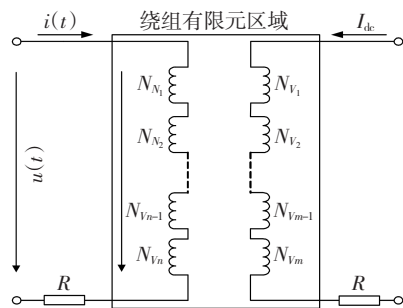


图1 换流变压器“场-路耦合”模型

换流变压器二维涡流场的边值问题满足:

$$\nabla \times \nu \nabla \times A = J_{AC} + J_{DC} + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} \quad (1)$$

式中: ν 为磁阻率, m/H; A 为磁矢位, Wb/m; J_{AC} 为

交流励磁电流密度, A/m²; J_{DC} 为直流励磁电流密度, A/m²; σ 为材料的电导率, S/m; $\partial A / \partial t$ 为涡流电流密度, A/m².

边界条件满足:

$$H_{1t} = H_{2t} + J_s \quad (2)$$

$$B_{1n} = B_{2n} \quad (3)$$

式中: H_{1t} 、 H_{2t} 为分界面上磁场强度的切向分量; J_s 为表面电流密度; B_{1n} 、 B_{2n} 为分界面上磁感应强度的法向分量.

不考虑导线涡流的去磁作用, 绕组回路的电路方程^[16-17]为

$$u(t) = -e(t) + L \frac{\partial i(t)}{\partial t} + Ri(t) \quad (4)$$

式中: $u(t)$ 为网侧外接电压源; $e(t)$ 为绕组感应电动势; L 为回路电感; $i(t)$ 为回路电流; R 为回路电阻.

采用有限元法对场方程和电路方程进行离散处理, 得到“场-路耦合”模型的一阶非线性微分矩阵方程为

$$\begin{bmatrix} T & 0 \\ 2\lambda_{ej}C^T & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{\partial A}{\partial t} \\ \frac{\partial i}{\partial t} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} S & -C \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ u \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: T 为与导体单元面积和电导率有关的常数矩阵; λ_{ej} 为二维场沿轴向的等效长度; C 为回路电流与单元节点之间相互作用的关联矩阵; S 为 $\nabla \times A$ 的函数; F 为与场源有关的列向量.

2 系统仿真模型

2.1 产品仿真参数

目前 530 kV/405.2 MVA 单相双绕组换流变压器广泛应用于西北电网多个换流站, 其主要技术参数如表 1 所示.

表1 换流变压器技术参数

额定容量/kVA	额定电压/kV	短路阻抗/%
405 200	$(530 \pm 23_{-5}^{+23} \times 1.25\% / \sqrt{3}) / (171.9 / \sqrt{3})$	20.4
空载损耗/kW	空载电流/%	负载损耗/kW
177.55	0.3	1 142

铁心结构为单相两柱带旁轭式, 各心柱上网、阀侧绕组均为并联连接, 如图 2 所示. 采用高质量、低损耗的晶粒取向冷轧硅钢片 27QG110, 基本磁化曲线如图 3 所示, 磁密工作点位于 $B = 1.7$ T 处.

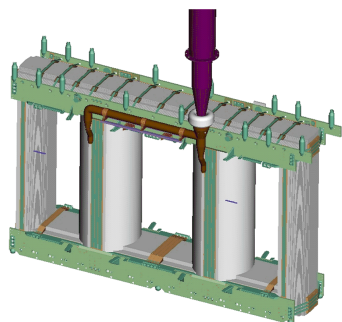
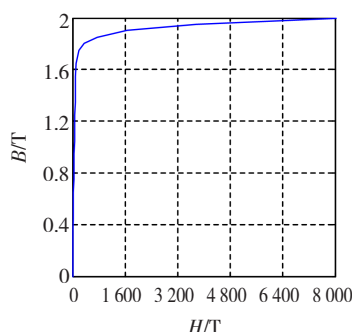


图2 铁心结构

图3 硅钢片 $B-H$ 曲线

2.2 直流偏置量的选取

文[8]提出变压器绕组允许通过的直流电流与额定电流有关,单相取额定电流的0.3%,三相五柱取0.5%,三相三柱取0.7%。直流入侵状态下,换流变压器容许的电流偏置量在一定程度上取决于结构尺寸、硅钢片材料、绕组形式等因素。

本文以换流变压器额定负载电流为基准,对施加的直流偏置电流进行归一化处理。仿真研究过程中,直流偏置电流 I_{dc} 依照基准电流的不同比例逐次施加,分别为 $0, 0.15\% I_N, 0.3\% I_N, 0.6\% I_N, 1.2\% I_N, 2.4\% I_N, 4.8\% I_N, 9.6\% I_N, I_N$ 为基准电流。

2.3 二维有限元分析

根据对换流变压器结构特点的分析和数值计算的实践经验,采用2D瞬态求解,可以基本真实反映内部磁场的分布情况。应用有限元软件ANSYS,结合铁心内磁通分布特性,沿换流变压器长度剖面方向建立仿真模型。此外,还需作如下基本简化:

- 1) 选取铁心柱的一半、铁轭及其内部窗口作为求解区域,同时忽略不同心柱绕组间的漏磁影响;
- 2) 近似认为铁心区域为各向同性材料,忽略磁滞现象;
- 3) 忽略铁心接缝面积与接缝方式对直流偏磁的影响;
- 4) 不考虑引线电流的影响及绕组导线的涡流

去磁作用;

- 5) 忽略铁心夹件、拉板等对磁场的影响。

采用分饼建模的方法,充分考虑了绕组各线饼的匝数及填充系数等因素。需要耦合各线饼区域的电流CURR、电动势降EMF自由度,每组设置独立编号。在油箱外壁施加磁力线平行边界条件,即 $AZ=0$ 。选择瞬态分析类型,通过时间迭代循环计算直至求解收敛。保持网侧绕组的端部电压为其额定值,阀侧施加直流电流,计算励磁电流波形、铁心磁场分布及空载损耗。

3 仿真结果与分析

3.1 励磁电流特性

在空载无偏磁与直流入侵的情况下,利用构建的模型对换流变压器的励磁电流波形进行仿真,如图4所示。

图4(a)给出了无直流偏磁时励磁电流的变化规律。空载状态下,换流变压器工作在铁心的非饱和区,励磁电流波形偏离了正弦形,呈现正负半周对称的尖峰状,且峰值很小。空载电流仿真幅值与理论值的偏差仅有0.3178%,满足误差允许范围。可见,基于有限元法搭建仿真模型的求解结果与实际工况基本一致。

遭受直流偏磁时,励磁电流的分析是研究电磁特性的关键问题。图4(b)、(c)、(d)是施加三种不同比例的直流偏置量时,励磁电流在5个周期内的波形变化。

可以看出,励磁电流波形的对称性被破坏,主磁通工作在铁心磁化曲线的饱和区。由于换流变压器存在独立的零序磁路(旁轭),磁阻相对较低,因此其对直流电流的免疫能力较差。随着入侵直流的增加,励磁电流正半周峰值迅速增加,出现严重的半周饱和现象;而负半周峰值绝对值减小,波形陡度降低,逐渐趋近于0A。此时铁心磁饱和程度加深,但波形周期和过零点位置不变。

励磁电流在不同直流磁通影响下幅值的变化见表2。随着直流入侵量从 $0.15\% I_N$ 增加到 $9.6\% I_N$,正向峰值达到53.5083A,相比正常状态下增长了21.2倍,同时负半周峰值仅为-1.2605A。当 I_{dc} 超过 $0.6\% I_N$ 后,励磁电流变化趋于缓慢,主要由于铁磁材料此时已经深度饱和,变化不再明显。仿真证明励磁电流幅值与直流偏置量密切相关,为后续研究工作建立了理论基础。

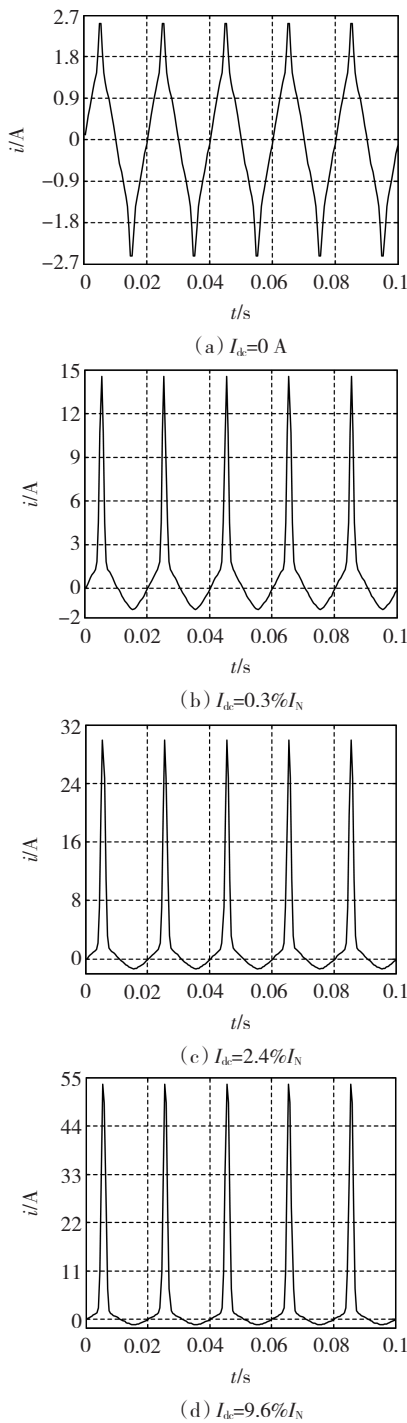


图 4 换流变压器励磁电流波形

表 2 励磁电流峰值与入侵直流的关系

直流电流/(% I_N)	正半周峰值/A	负半周峰值/A
0	2.525 0	-2.525 0
0.15	8.633 3	-1.556 2
0.3	14.520 4	-1.435 3
0.6	17.785 0	-1.401 5
1.2	22.059 8	-1.369 8
2.4	29.939 3	-1.329 3
4.8	40.649 3	-1.292 2
9.6	53.508 3	-1.260 5

3.2 激磁电流的谐波分析

通过对励磁电流按照式(6)进行傅里叶分析,得到不同直流偏置量作用下空载电流的谐波含量,如图5所示(I_0 称作励磁电流的恒定分量)。

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (6)$$

由计算结果可知,无直流偏磁影响时,谐波中只含有1、3、5等奇次分量,无偶次谐波;随着直流量的增加,激磁电流中同时含有直流分量、奇次与偶次谐波。低次谐波含量增长明显,而高次谐波增加速度则较为平缓。直流偏置量从0.3% I_N 增大到2.4% I_N ,1~3次谐波分别增加了5.47、7.68和5.83倍。换流变压器遭受深度直流偏磁时,高次谐波含量也很丰富。

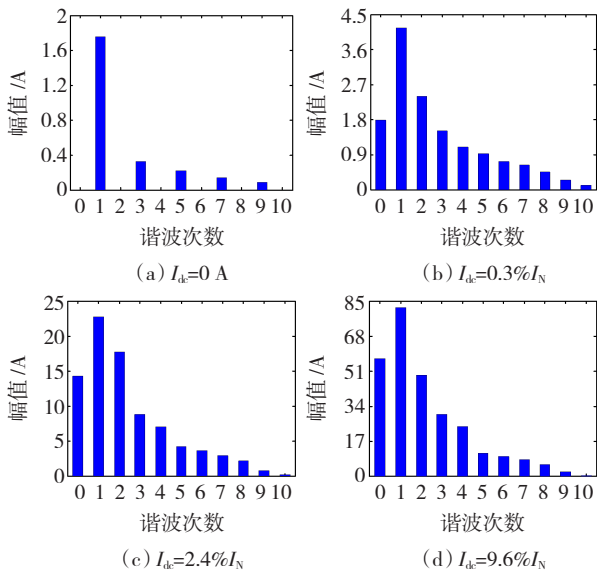


图 5 直流偏磁下空载电流的谐波分布

随着直流电流的增加,低次谐波分量的变化趋势如图6所示。直流偏置量较小时,各次谐波比值(与基波的比值)接近线性增加,2次谐波增加尤为明显,谐波次数越高增加速度越慢。直流电流达到

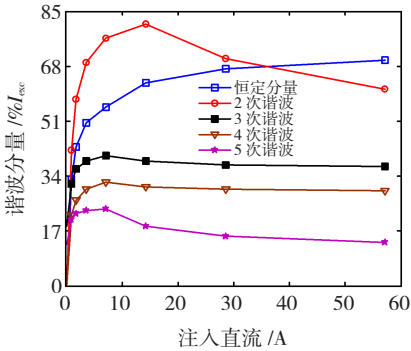


图 6 低次谐波随直流分量的变化趋势

14.28 A (2.4% I_N), 3 ~ 5 次谐波比值基本趋于稳定; 而 2 次谐波比值达到最大值 (81.08%)。但当偏置电流超过一定值后, 恒定分量所占比值继续增加, 其他谐波比值减小, 这是由于当直流量很大时铁心高度饱和, 其等效磁导率接近真空磁导率。

换流变压器遭受直流偏磁影响时, 其产生的谐波电流会成为电力系统中的主要谐波源。过大的谐波会导致系统电压降低、继电保护误动作等情况的发生, 严重威胁电网的安全稳定运行。

3.3 磁场分布计算结果

在直流偏磁影响下, 铁心磁场强度的变化是换流变压器振动加剧、温升和噪声增大的根本原因。

图 7 是所计算的换流变压器中右窗口计算区域。选取 A-A、B-B、C-C、D-D 为考查磁场分布的具体位置。当铁心在正半周期内达到饱和峰值时, 通过计算各路径节点磁通量密度, 来对比不同位置的磁感应强度对偏磁直流电流变化的敏感程度。

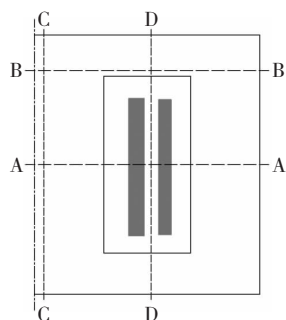
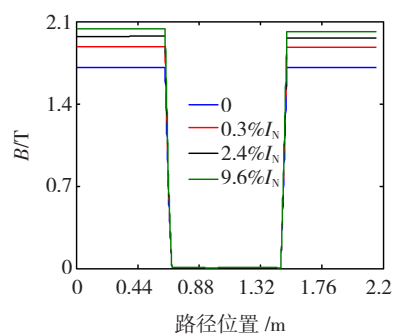


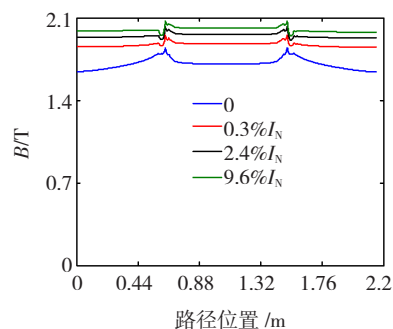
图 7 换流变压器右窗口二维场域示意图

本文所用换流变压器的硅钢片工作磁密约为 1.7 ~ 1.72 T 左右。图 8 是四种不同比例的偏置量下, 各观测线处磁感应强度的仿真结果。可以看出, 随着直流的增加, 磁通密度的正峰值逼近 2.1 T, 铁心半波深度饱和。

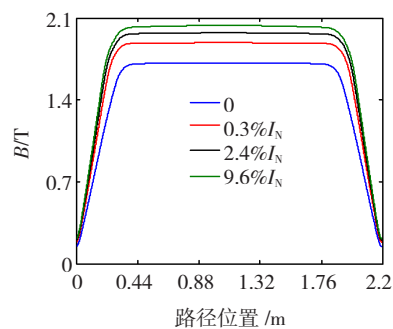
当 I_{dc} 从 0 增加到 9.6% I_N 时, 每条路径磁感应强度值总体均增加, 变化规律基本一致。并且各位置增加速率随着直流量增加而减缓, 这是由于随着铁心磁饱和程度加深, 其磁化曲线非线性一定程度上遏制了磁感应强度的增长区间。分析水平路径下 B_{max} 变化可以发现, B-B 位置的最大磁感应强度明显大于其他路径。垂直路径在直流电流达到 9.6% I_N 时, 铁心柱的磁感应强度较绕组及铁轭都大, 铁轭的内部区域增加速率较大。综合前述分析, 磁感应强度最大值出现在与铁心柱衔接的铁轭处, 且铁心左右磁饱和程度基本平衡。



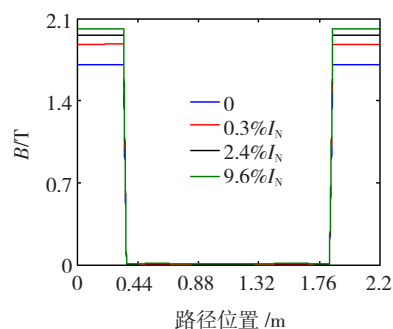
(a) 位置 A-A 处



(b) 位置 B-B 处



(c) 位置 C-C 处



(d) 位置 D-D 处

图 8 不同路径处磁感应强度最大值

表 3 给出了不同偏磁工况下各考察点处磁感应强度最大值。由于直流分量的存在, 把换流变压器主磁通整体抬高, 不同位置增长速度各异且总体逐渐减缓。评估各位置节点磁密的具体数值, 发现 B-B 处拥有最大值为 2.075 T, 位于 0.636 m 处的斜接缝区域, 约为无直流时的 1.123 倍。

表3 不同直流偏磁情况下最大磁感应强度

直流量/(% I_N)	最大磁感应强度/T			
	A-A	B-B	C-C	D-D
0	1.711	1.847	1.711	1.71
0.15	1.835	1.912	1.835	1.832
0.3	1.89	1.954	1.89	1.884
0.6	1.923	1.982	1.923	1.915
1.2	1.949	2.005	1.949	1.939
2.4	1.974	2.025	1.974	1.962
4.8	2.005	2.05	2.005	1.988
9.6	2.036	2.075	2.036	2.015

当直流电流增至(0.6~1.2)% I_N 时,A-A位置磁感应强度峰值为1.923~1.949 T,约是无偏磁时 B_{max} 的1.124~1.139倍.直流值在2.4% I_N 后,各处的磁感应强度幅值趋于稳定,此时铁磁材料饱和程度加剧,漏磁通增加.从而造成换流变压器振动加剧、噪声增大及温度上升,对其安全稳定运行产生影响.

4 空载损耗计算

不同中性点偏移电流作用下,系统稳定后铁心柱磁感应强度的波形如图9所示.

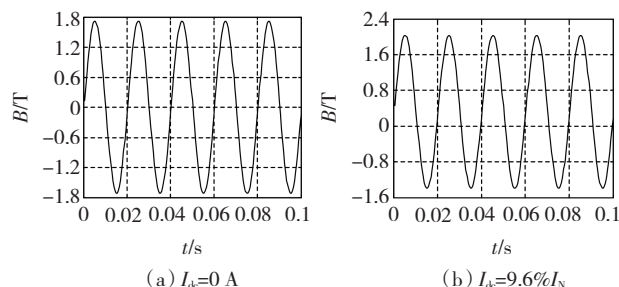


图9 铁心柱磁感应强度的变化曲线

由图可知,直流偏磁条件下,主磁通波形在正弦变化的基础上沿 y 轴存在偏移,形成直流磁通.由于磁路结构对直流的敏感性比较高,当偏置量增加到9.6% I_N 时,磁感应强度变化值 ΔB 为0.32 T.为此,需分别在正、负半波内计算空载损耗.

定量分析铁心磁感应强度变化,图10是加载9.6% I_N 直流量时磁通密度正峰值分布.从图中可以看出,磁通密度在1.863~2.096 T之间,最大值出现在心柱与旁轭处,在各个拐角接缝处其磁密相对较小,且空载时漏磁感应强度都很小.应采取适当的措施减小流入中性点的直流电流.

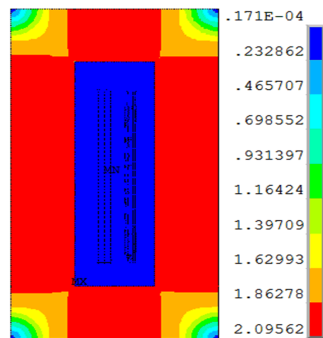


图10 铁心磁感应强度分布云图

由于换流变压器的特殊工况条件,直流偏磁现象会长时间影响其运行,导致空载损耗变化是不可忽略的^[9].励磁磁势建立的主磁通全部通过铁心,并在硅钢片中产生磁滞损耗和涡流损耗,构成换流变压器空载损耗的基本分量.

遵循沈变公司《电力变压器设计手册》中铁心计算部分,当外施正弦波电压且忽略铁心中涡流的去磁作用时,冷轧硅钢片性能数据计算公式为

$$p_0 = 2.1548B_m^6 - 13.6051B_m^5 + 35.1257B_m^4 - 47.2836B_m^3 + 35.1903B_m^2 - 13.3025B_m + 2.0613 \quad (7)$$

式中: p_0 为单位质量铁心的基本损耗;W/kg; B_m 为磁感应强度峰值,T.

空载损耗主要是铁心损耗,与直流偏磁方向一致的半个周波铁心过度饱和,对应急剧上升的损耗为 P_{0+} ,平均至整个周波为 $\frac{P_{0+}}{2}$.同理,另外半个周波磁通密度降低,随之下降的铁心损耗平均至整个周波为 $\frac{P_{0-}}{2}$.结合铁损和磁通密度之间的拟合关系式(7),以及铁心磁密随时间的变化规律,提出半波平均算法,则直流入侵下的空载损耗可表示^[24]为

$$P_0 = \frac{P_{0+} + P_{0-}}{2} = \frac{1}{2} K_{F0} G_F (p_{0+} + p_{0-}) \quad (8)$$

式中: K_{F0} 为空载损耗附加系数,取值为1.15; G_F 为铁心硅钢片质量,kg; p_{0+} 、 p_{0-} 分别为对应的单位质量铁心基本损耗,W/kg.

由于铁心柱与铁轭的磁密数值基本一致,可以合并求解空载损耗,同时将斜接缝区域单独计算.应用半波平均算法求解直流偏磁时的空载损耗列于表4.可以看出,随着直流分量的增大,空载损耗随之增加,增至9.6% I_N 时,其数值为无偏磁时的1.52倍.过量的直流电流会使铁心形成局部热区,影响换流变压器的正常运行.因此,应采取适当的措施来限制

直流偏磁量.

表4 不同偏磁情况下的空载损耗

直流量/($\%I_N$)	空载损耗/kW		
	$P_{0+}/2$	$P_{0-}/2$	P_0
0	87.33	87.33	174.66
0.15	115.61	71.18	186.79
0.3	134.1	65.38	199.48
0.6	147.46	62.28	209.74
1.2	159.83	59.87	219.7
2.4	173.49	57.51	231
4.8	191.92	54.79	246.71
9.6	213.49	52.11	265.6

5 结 论

1) 直流偏磁状态下,励磁电流波形严重畸变,正半周峰值增加,负半周峰值绝对值减小.随着铁磁材料半波深度饱和,励磁电流变化趋势明减缓.

2) 随着直流偏置水平的升高,各次谐波幅值均不同程度增加,其中1~3次谐波增速比较快.各次谐波与基波的比值线性度变差,逐渐呈缓增趋势.

3) 通过分析铁心在有直流偏置量情况下的内部特性差异可知,不同路径磁感应强度最大值均随直流呈非线性增加,且分布规律基本不变.考察区域的磁密峰值出现在与心柱衔接的铁轭处.当注入直流达到一定值后,铁心已经高度磁饱和.

4) 直流激励使铁心内部出现相应的直流偏置磁场,主磁通仍保持正弦,但整个曲线向上平移.根据磁密的变化规律定量分析,直流偏磁还将导致空载损耗增加.

参 考 文 献:

- [1] 舒印彪,张文亮.特高压输电若干关键技术研究[J].中国电机工程学报,2007,27(31):1-6.
- [2] 曾嵘,赵杰,尚春,等. HVDC 地中直流对交流系统影响的防范措施[J].高电压技术,2009,35(4):919-925.
- [3] 莫丽琼. ± 800 特高压直流输电系统谐波不稳定研究[J].电力自动化设备,2012,32(5):118-122.
- [4] 王智勇.直流偏磁下新型换流变压器运行特性仿真研究[D].长沙:湖南大学,2010:8-18.
- [5] 黄道春,魏远航,钟连宏,等.我国发展特高压直流输电中一些问题的探讨[J].电网技术,2007,31(8):6-12.
- [6] 李晓萍,文习山.三相五柱变压器直流偏磁计算研究[J].中国电机工程学报,2010,30(1):127-131.
- [7] 潘超,王泽忠,杨敬瑞,等.变压器直流偏磁瞬态场路耦合计算的稳定性分析[J].电工技术学报,2012,27(12):226-239.
- [8] 刘渝根,冷迪,田资,等.基于 ANSYS Maxwell 的 750kV 自耦变压器直流偏磁仿真[J].高电压技术,2013,39(1):218-225.
- [9] BIRO O, AUERHOFER S, BUCHGRABER G, et al. Prediction of Magnetising Current Waveform in a Single-phase Power Transformer Under DC Bias[J]. IET Science, Measurement and Technology, 2007,1(1):2-5.
- [10] BIRO O, BUCHGRABER G, LEBER G, et al. Prediction of Magnetizing Current Waveforms in a Three-phase Power Transformer under DC Bias[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(6):1554-1557.
- [11] 赵小军,李琳,程志光,等.应用谐波有限元法的变压器直流偏磁现象分析[J].中国电机工程学报,2010,30(21):103-108.
- [12] 李英,王健,孙树波,等.500kV 单相变压器空载和负载下的直流偏磁试验研究[J].变压器,2013,50(4):55-60.
- [13] PRICE P R. Geomagnetically Induced Current Effects on Transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002,17(4):1002-1008.
- [14] SITI R M, HASSAN S, ANUAR M N K. Study the Harmonic Characteristics of DC Bias on the Single Phase Power Transformer[J]. 2012 IEEE International Power Engineering and Optimization Conference, Malaysia, 2012:501-504.
- [15] BUTICCHI G, LORENZANI E. Detection Method of the DC Bias in Distribution Power Transformers[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013,60(8):3539-3549.
- [16] 肖冬.直流输电和磁暴引起变压器直流偏磁的相关研究[J].武汉:华中科技大学,2007:42-46.
- [17] 肖华,吴广宁,蒋伟.基于有限元法的单相变压器直流偏磁仿真研究[J].高压电器,2010,46(9):39-42.
- [18] 中华人民共和国发展和改革委员会. DL/T 5224-2005 高压直流输电大地返回运行系统设计技术规定[S].北京:中国电力出版社,2005:89-93.
- [19] 郭满生,梅桂华,张喜乐,等.直流偏磁条件下单相三柱电力变压器的损耗计算[J].电工技术学报,2010,25(7):67-71.
- [20] 路长柏.电力变压器理论与计算[M].沈阳:辽宁科学技术出版社,2007:41-48.

(编辑:付长缨)