

# 500 kV 电力变压器直流偏磁耐受性能的仿真研究

杨晓辉<sup>1</sup>, 王丰华<sup>2</sup>, 段若晨<sup>2</sup>, 郑含博<sup>1</sup>

(1. 河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450008; 2. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

**摘要:** 为了深入研究 500 kV 电力变压器的直流偏磁耐受性能, 根据 J-A 磁滞回线理论, 基于电路磁路模型建立了 500 kV 自耦变压器的直流偏磁仿真模型, 通过改变 J-A 模型中的关键参数, 仿真研究了矫顽力、剩磁和磁滞损耗等硅钢片磁化特性对 500 kV 变压器直流偏磁耐受性能的影响。仿真结果表明, 变压器直流偏磁时, 励磁电流出现畸变, 有偶次谐波出现, 励磁电流随直流分量的增大呈现不同的增幅。当磁滞回线的矫顽力增大时, 励磁电流及其总谐波畸变率随外加直流分量的增幅变小。当剩磁和磁滞损耗增大时, 励磁电流及其总谐波畸变率随外加直流分量的增幅加剧。研究结果可为大型变压器直流偏磁耐受能力评估及直流偏磁抑制措施提供理论依据和新思路, 具有一定的实用价值。

**关键词:** 电力变压器; 直流偏磁; J-A 磁滞回线理论; 励磁电流; 谐波畸变率

## Simulation study of DC bias enduring ability of 500 kV power transformer

YANG Xiao-hui<sup>1</sup>, WANG Feng-hua<sup>2</sup>, DUAN Ruo-chen<sup>2</sup>, ZHENG Han-bo<sup>1</sup>

(1. Henan Electric Power Company Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450008, China;  
2. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** In order to further study the DC bias enduring ability of 500 kV power transformer, DC bias simulation model of 500 kV auto-transformer is built based on the electric circuit and magnetic circuit combined model according to the J-A hysteresis loop theory. The effects of magnetizing property of silicon steel sheet including coercive force, remanence, hysteresis loss to the enduring ability of 500 kV power transformer are simulated through the variations of key parameters in J-A model. It is seen that the magnetic currents are distorted with the occurrence of even harmonics when the DC component enters into the power transformer. The magnetizing currents are increased with different amplitudes with the increasing of DC component. When the coercive force of hysteresis loop is increased, the variations of magnetic currents and its total harmonics distortion are increased gradually. When remanence and hysteresis loss are increased, the variations of magnetic currents and its total harmonics distortion are increased greatly. The obtained results could provide theoretical references and new thoughts for the improvement of DC bias enduring ability of power transformer and suppression measure of DC bias with certain practical value.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51207090).

**Key words:** power transformer; DC bias; J-A hysteresis loop theory; magnetic current; total harmonics distortion

中图分类号: TM401

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2014)14-0060-07

## 0 引言

高压直流输电系统采用单极大地回线运行方式或双极不平衡运行方式时, 会有直流分量经大地进入到中性点接地的变压器中, 发生直流偏磁现象, 使得变压器铁芯饱和程度加剧, 绕组漏磁增加, 出现损耗增加、局部过热、振动加剧和噪声增大等现象, 严重时甚至可对变压器本体造成永久性损坏<sup>[1]</sup>。此外, 地磁暴产生的频率在 0.001~0.01 Hz 之间的地磁感应电流 (Geomagnetically Induced Current, GIC)

也可近似看作直流, 也是诱发交流系统中接地变压器发生直流偏磁的原因<sup>[2]</sup>。

目前, 国内外研究者对变压器直流偏磁现象的主要成果有: 变压器叠片铁芯直流偏磁时磁化特性测试分析<sup>[3-4]</sup>; 基于电路-磁路模型或有限元分析法的变压器直流偏磁特性研究<sup>[5-8]</sup>, 如励磁电流、绕组电流、磁感应强度、无功损耗等随注入变压器的直流分量的变化规律等; 变压器直流偏磁对系统运行的影响<sup>[9-10]</sup>; 变压器直流偏磁的抑制方法<sup>[11-13]</sup>等。但直流偏磁对变压器的影响是一个涉及设备电磁、热、力和噪声等特性和系统谐波等一系列问题的综合性课题, 变压器直流偏磁时所引起的变压器铁芯饱和及绕组

基金项目: 国家自然科学基金 (51207090)

漏磁增大等现象在传统的变压器设计过程中都没有考虑, 也缺乏完善的评估指标对运行中的变压器的直流偏磁耐受能力进行评估, 仍需进一步研究。

随着特高压直流输电工程的发展和建设, 因变压器直流偏磁而引发的不利影响在特高压输电工程投运阶段及运行中时有发生, 迫切需要研究直流偏磁对大型主变的影响及偏磁程度的鉴别, 进而制定相应的改进或抑制措施, 确保电网的安全可靠运行。文中基于 J-A 磁滞回线理论, 通过建立 500 kV 自耦变压器的电路磁路模型, 借助于数值计算方法仿真研究 500 kV 变压器的直流偏磁特性, 比较和分析矫顽力、剩磁、磁滞损耗等硅钢片磁化特性对变 500 kV 励磁电流及其总谐波畸变率 (Total Harmonic Distortion, THD) 的影响, 为探寻大型变压器直流偏磁耐受能力的提高提供新途径。

## 1 电路-磁路模型

### 1.1 电路方程

500 kV 变压器大都为  $Y_n/Y_n/\Delta$  联接的三相组式变压器, 直流偏磁时的电气结构简图如图 1 所示。图中,  $E_1$  为激励源;  $R$  为激励源内阻;  $U_{dc}$  为直流偏置激励;  $i_1$  为原边绕组电流;  $i_2$  和  $i_3$  为副边绕组电流;  $Z_2$  和  $Z_3$  为负载。

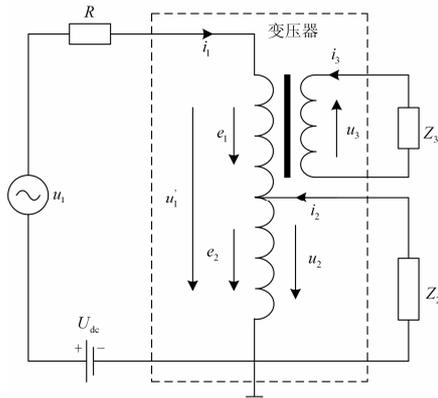


图 1 单相自耦变压器直流偏磁时的电路模型

Fig. 1 Electric circuit model of a DC biased auto-transformer

若不计电源内阻和变压器铁芯涡流损耗, 可得电路方程为

$$\begin{cases} u_1 + U_{dc} = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + N_1 \frac{d\phi}{dt} + R_2 (i_1 + i_2) + \\ \quad L_2 \frac{d(i_1 + i_2)}{dt} + N_2 \frac{d\phi}{dt} \\ R_2 (i_1 + i_2) + L_2 \frac{d(i_1 + i_2)}{dt} + N_2 \frac{d\phi}{dt} = -i_2 Z_2 \\ R_3 i_3 + L_3 \frac{di_3}{dt} + N_3 \frac{d\phi}{dt} = -i_3 Z_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$  分别为串联绕组、公共绕组和第三绕组电阻;  $L_1$ 、 $L_2$  和  $L_3$  分别为串联绕组、公共绕组和第三绕组漏感;  $N_1$ 、 $N_2$  和  $N_3$  分别为串联绕组、公共绕组和第三绕组匝数;  $\phi$  为磁通。

### 1.2 磁路方程

为了反映变压器铁芯的非线性特性, 需要建立对应的磁路方程。500 kV 变压器的铁芯结构为三相五柱, 磁路示意图如图 2 所示。图中,  $H_1 \sim H_7$  分别为三相芯柱、旁柱和端轭的磁场强度。根据磁通连续性和安培环路定理, 可得磁路方程为

$$\begin{cases} g(H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, H_6, H_7, i_1, i_2, i_3) = 0 \\ h(B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6, B_7) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $i_i (i=1,2,3)$  为绕组电流;  $g$  为变压器铁芯各柱磁场强度和绕组电流的函数;  $B_i (i=1, \dots, 7)$  为变压器三相芯柱、旁柱和端轭的磁感应强度;  $h$  为变压器铁芯各柱磁感应强度的函数。

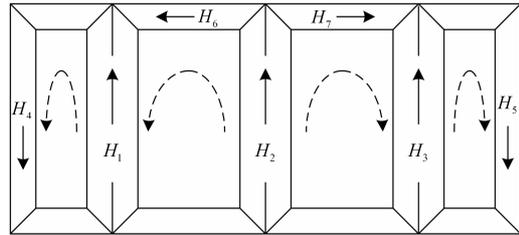


图 2 三相五柱变压器磁路示意图

Fig. 2 Magnetic circuit of three-phase five limbs transformer

### 1.3 逆 J-A 磁滞回线模型

变压器铁芯硅钢片的磁滞特性对变压器直流偏磁时的运行性能有着重要影响, 现有的描述磁滞特性的模型主要有 Presiach 模型、Jile-Atherton (J-A) 模型等, 其中建立在物理机制考虑磁畴壁运动的 J-A 模型具有物理意义清晰、参数数量少、计算量小等优点, 较好地模拟了铁磁材料的非线性和磁滞特性。为计算方便, 本文在此使用以磁感应强度为自变量逆 J-A 模型对变压器的磁滞回线特性进行描述, 即为<sup>[14]</sup>

$$\frac{dM}{dB} = \frac{\frac{dM}{dH}}{(1 + \frac{dM}{dH})\mu_0} \quad (3)$$

式中:  $M$  为磁化强度;  $\mu_0$  为磁导率;  $H$  为磁化强度;  $B$  为磁感应强度。

无磁滞磁化强度  $M_{an}$  可表示为

$$M_{an} = M_s \coth\left(\frac{H_e}{a} - \frac{a}{H_e}\right) \quad (4)$$

式中:  $M_s$  为饱和磁化强度;  $H_e$  为有效磁场强度;  $a$

为常数。

则当  $(M_{an} - M)\delta > 0$  时有

$$\frac{dM}{dH} = \frac{c \frac{dM_{an}}{dH_e} + \frac{M_{an} - M_{irr}}{\delta k} - \frac{\alpha(M_{an} - M_{irr})}{(1-c)}}{\mu_0(1-c) - \frac{1 - \alpha c \frac{dM_{an}}{dH_e}}{(1-c)}} \quad (5)$$

式中:  $\alpha$ 、 $c$ 、 $k$  为常数;  $\delta$  为方向系数, 为

$$\delta = \begin{cases} 1 & dH/dt > 0 \\ 0 & dH/dt < 0 \end{cases} \quad (6)$$

当  $(M_{an} - M)\delta < 0$  时有

$$\frac{dM}{dH} = \frac{c \frac{dM_{an}}{dH_e}}{1 - \alpha c \frac{dM_{an}}{dH_e}} \quad (7)$$

J-A 模型中有 5 个重要参数  $M_s$ 、 $a$ 、 $\alpha$ 、 $c$  和  $k$ , 其中,  $M_s$  决定了磁化强度  $M$  的最大值,  $a$  为表征非磁滞磁化曲线形状的参数,  $\alpha$  反映了磁畴间的耦合, 与磁滞回线的倾斜度有关,  $c$  和  $k$  关系到磁滞回线的面积, 且二者作用相反。显然, 磁滞回线的饱和特性主要由  $M_s$  和  $a$  决定, 损耗特性取决于  $c$  和  $k$  的取值。相应地, 通过改变相关参数的取值, 可较为方便地分析变压器硅钢片磁化特性对其直流偏磁耐受性能的影响。

## 2 结果分析

### 2.1 无直流时的仿真结果

计算用 500 kV 变压器的铭牌参数如表 1 所示。铁芯主柱直径为 1 242 mm, 铁轭直径为 621 mm, 铁芯窗高为 2 770 mm。

表 1 计算用变压器铭牌参数

Table 1 Name plate parameters of power transformer

额定容量/kVA	额定电压/kV	额定电流/A
250/250/80	500/230/36	866/1882.7/2222.2
短路阻抗/%	空载损耗/kW	空载电流百分数/%
12/29/24	70	0.2%

图 3 为计算得到的变压器的绕组电流、励磁电流及其频谱分布和磁滞回线。由图可见, 绕组电流为正弦波, 励磁电流为典型的尖顶波, 频谱分布主要为奇次谐波。另外, 绕组电流和励磁电流的数值与铭牌参数吻合良好, 说明了计算结果的正确性。对于图中所示的磁滞回线, JA 模型中的参数取值分别为  $M_s = 1.85 \times 10^6$ ,  $a = 145$ ,  $\alpha = 0.06 \times 10^{-4}$ ,  $c = 0.75$ ,  $k = 180$ 。

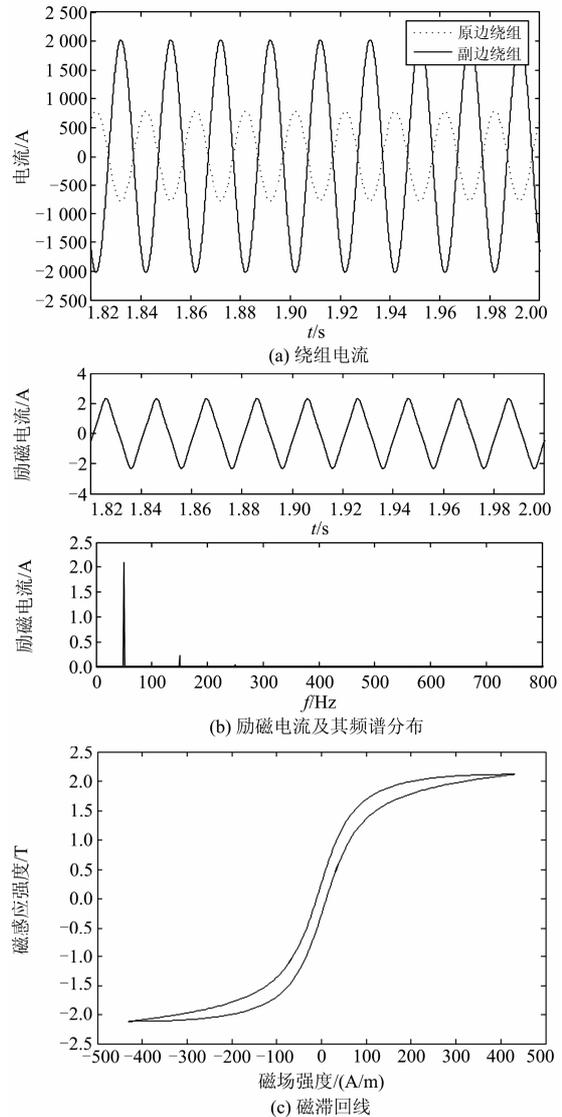


图 3 变压器的绕组电流、励磁电流和磁滞回线

Fig. 3 Winding current, magnetic current and magnetic hysteresis loop of power transformer

### 2.2 直流偏磁时的仿真结果

图 4 为  $I_{dc} = 3$  A 时变压器的绕组电流、励磁电流及其频谱分布和磁滞回线。由图可见, 有 3 A 的直流分量注入变压器时, 绕组电流与无直流分量时的情形类似。励磁电流发生畸变, 正向幅值呈现增大趋势, 负向幅值出现递减现象, 频谱分布中有偶次谐波出现。

在分析变压器的直流偏磁耐受能力时, 已有的研究大都以励磁电流随直流分量的变化作为评估标准<sup>[5,15]</sup>。考虑到直流偏磁时变压器励磁电流的畸变特性, 本文在此使用式 (8) 计算不同直流偏磁时变压器的励磁电流有效值, 为

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (8)$$

式中:  $I$  为励磁电流有效值;  $T$  为周期;  $i$  为励磁电流。

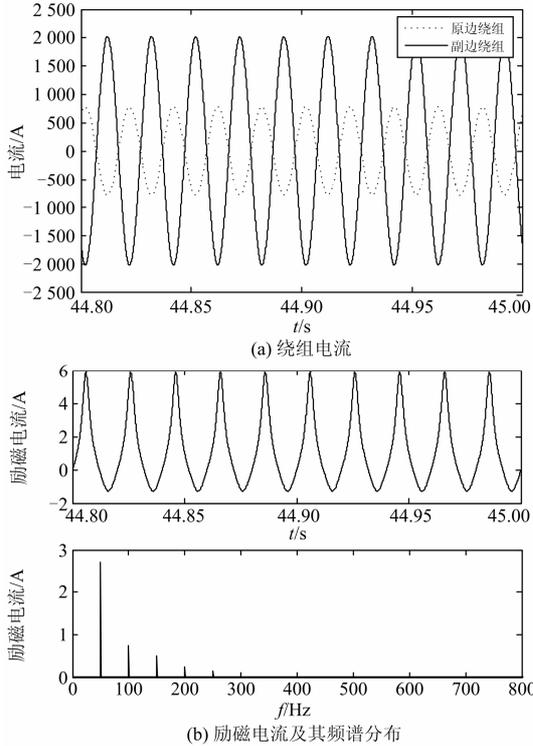


图 4 直流偏磁时变压器的绕组电流和励磁电流  
Fig. 4 Winding current and magnetic current of power transformer under DC bias

分别计算不同直流偏置下变压器励磁电流及其频谱分布, 可得励磁电流及总谐波畸变率随直流分量的变化如图 5 所示。图中,  $I_{dc}$  为外加直流分量;  $I_m / I_{ma}$  为直流偏磁时励磁电流有效值与无直流时励

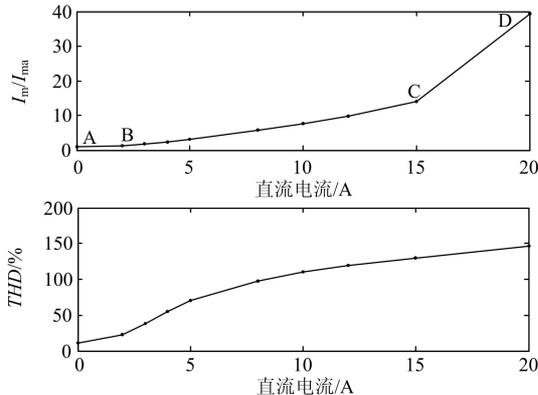


图 5 励磁电流及总谐波畸变率与直流分量关系曲线  
Fig. 5 Variation of magnetic current and its THD with the DC component

磁电流有效值的比值。由图可见, 随着外加直流分量的增加, 励磁电流及其 THD 均呈现增大趋势。

为详细分析励磁电流有效值随直流分量的变化, 将图 5 中的曲线分为 AB、BC、CD 三段, 并分别记其斜率为  $k_{AB}$ 、 $k_{BC}$  和  $k_{CD}$ 。在 AB 段, 励磁电流及其 THD 随直流分量的增大呈现线性增加。在 B 点, 外加直流为 2 A 时, 励磁电流增大为  $I_{ma}$  的 1.2 倍, 且有  $k_{AB} = 0.16$ 。说明变压器铁芯此时工作在非饱和区域, 铁芯内磁导率还处于线性区域。在 BC 段, 励磁电流及其 THD 随外加直流的增速明显增大, 有  $k_{BC} = 1.51$ 。在 C 点, 外加直流为 15 A 时, 励磁电流增大为  $I_{ma}$  的 13.96 倍。说明此时变压器铁芯的工作区域已从线性区域经拐点进入饱和段, 励磁电流变化较为明显。相应地, 励磁电流的增加将会使电力变压器的损耗升高、振动加剧和噪声增大, 需及时监测注入变压器的中性点的直流分量的变化, 并采取相应的治理措施。在 CD 段, 励磁电流随外加直流的增速进一步增大, 有  $k_{CD} = 7.46$ , 但 THD 的增速较之 BC 段变缓, 表明此时磁滞回线开始进入到深度饱和段。此外, 图 5 所示的励磁电流随直流分量的变化趋势与文献[16]吻合良好, 进一步说明了本文计算结果的正确性。

### 2.3 矫顽力改变时的直流偏磁仿真结果

图 6 为矫顽力改变后的变压器铁芯磁滞回线。由图可见, 矫顽力增大后, 磁滞回线上升和下降段的斜率随之降低, 对应的拐点随之变小, 磁滞回线面积有所增大。

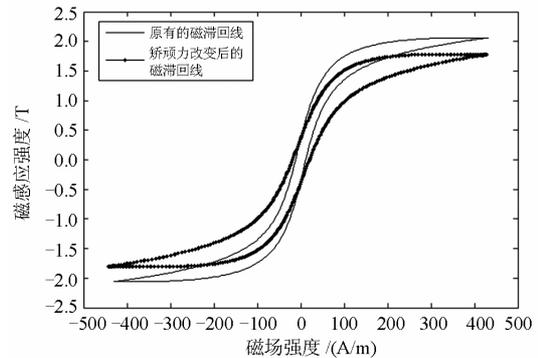


图 6 矫顽力改变前后的磁滞回线  
Fig. 6 Magnetic hysteresis loop with varied coercive force

图 7 为根据矫顽力增大后的磁滞回线模型计算得到的变压器励磁电流及其 THD 随直流分量的变化曲线。由图可见, 随着外加直流分量的增加, 励磁电流及其 THD 均呈现增大趋势, 但对于同样的直流分量, 励磁电流及其 THD 的增幅远小于图 5 的情形。在 AB 段, 励磁电流随直流分量的增大无明显变化。在 B 点, 外加直流为 2 A 时, 励磁电流增大

为  $I_{ma}$  的 1.04 倍, 有  $k_{AB} = 0.02$ 。表明变压器铁芯工作在非饱和区域, 铁芯内磁导率处于线性区域。在 BC 段, 当外加直流不大于 5 A 时, 励磁电流随直流分量的增幅变大, 有  $k_{BB1} = 0.09$ 。当外加直流大于 5 A 时, 有  $k_{B1C} = 0.44$ 。表明此时变压器铁芯磁导率仍处于线性区域。在 C 点, 外加直流为 15 A 时, 励磁电流增大为  $I_{ma}$  的 13.96 倍。说明此时变压器铁芯的工作区域已从线性区域经拐点进入饱和段。在 CD 段, 励磁电流随外加电流的增速变大, 有  $k_{CD} = 1.03$ 。因此, 当励磁回线的矫顽力增大时, 变压器铁芯耐受直流偏磁的能力明显增大, 但同时应关注无直流分量时励磁电流的谐波问题。

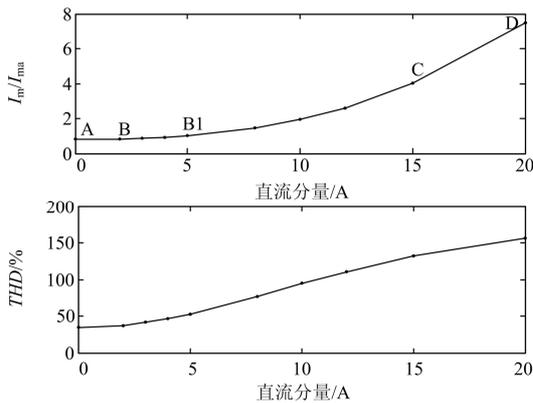


图 7 励磁电流及总谐波畸变率与直流分量关系曲线

Fig. 7 Variation of magnetic current and its THD with the DC component

### 2.4 剩磁改变时的直流偏磁仿真结果

图 8 为剩磁改变后的变压器铁芯磁滞回线。由图可见, 剩磁变大后, 磁滞回线上升和下降段的斜率随之增大, 对应的拐点有所增大。

图 9 为根据剩磁增大后的磁滞回线模型计算得到的变压器励磁电流及其 THD 随直流分量的变化曲线。由图可见, 随着外加直流分量的增加, 励磁电流及其 THD 均呈现增大趋势, 但在 BC 段的增速明显大于图 5 的情形。具体来说, 在 AB 段, 励磁电流随直流分量的增大呈现线性增加。在 B 点, 外加直流为 2 A 时, 励磁电流增大为  $I_{ma}$  的 1.29 倍, 且有  $k_{AB} = 0.22$ 。在 BC 段, 励磁电流及其 THD 随外加直流的增速明显增大, 且有  $k_{BC} = 2.83$ 。在 C 点, 外加直流为 15 A 时, 励磁电流增大为  $I_{ma}$  的 24.83 倍。在 CD 段, 励磁电流随外加直流的增速进一步增大, 有  $k_{CD} = 4.12$ , 但励磁电流的 THD 无明显变化, 表明此时磁滞回线已经进入到深度饱和段。因此, 当磁滞回线的剩磁增大时, 直流偏磁时变压器铁芯的磁滞回线较图 5 的情形更容易超过拐点进

入饱和段, 意味着其直流偏磁耐受能力的降低。

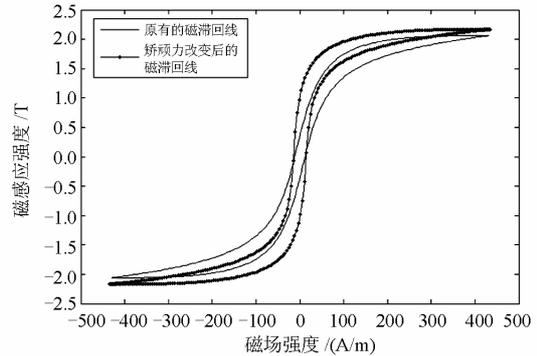


图 8 剩磁改变前后的磁滞回线

Fig. 8 Magnetic hysteresis loop with varied remanence

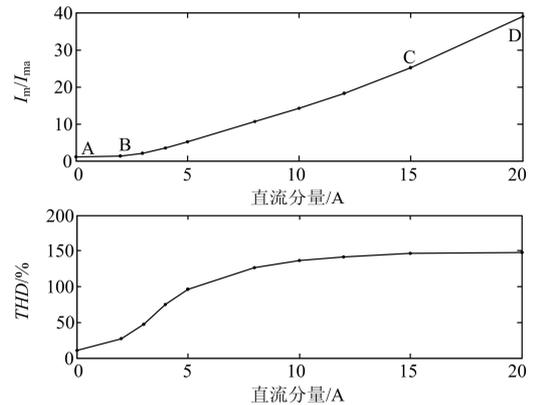


图 9 励磁电流及总谐波畸变率与直流分量关系曲线

Fig. 9 Variation of magnetic current and its THD with the DC component

### 2.5 磁滞损耗改变时的直流偏磁仿真结果

图 10 为磁滞损耗改变后的磁滞回线, 铁芯磁滞回线面积的增大意味着磁滞损耗的增加。

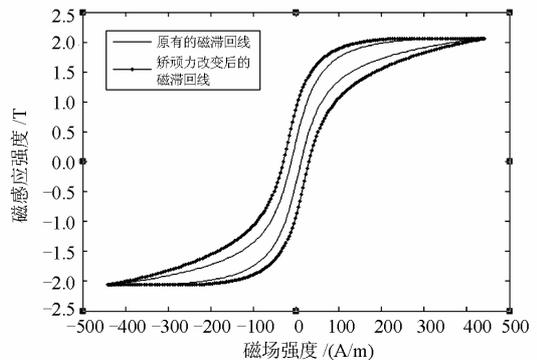


图 10 磁滞损耗改变后的磁滞回线

Fig. 10 Magnetic hysteresis loop with varied hysteresis loss

图 11 为根据磁滞损耗增大后的磁滞回线模型计算得到的变压器励磁电流及其 THD 随直流分量

的变化曲线。由图可见, 随着外加直流分量的增加, 励磁电流及其 THD 均呈现增大趋势, 但其数值与增速明显小于图 5 的情形。具体来说, 在 AB 段, 励磁电流随直流分量的增大呈现线性增加。在 B 点, 外加直流为 2 A 时, 励磁电流增大为  $I_{ma}$  的 1.16 倍, 且有  $k_{AB} = 0.11$ 。在 BC 段, 励磁电流及其 THD 随外加直流的增速明显增大, 且有  $k_{BC} = 0.86$ 。在 C 点, 外加直流为 15 A 时, 励磁电流增大为  $I_{ma}$  的 8.75 倍。在 CD 段, 励磁电流随外加直流的增速进一步增大, 有  $k_{CD} = 4.25$ 。因此, 当磁滞回线的面积即磁滞损耗增大时, 变压器耐受直流偏磁能力有所增大。

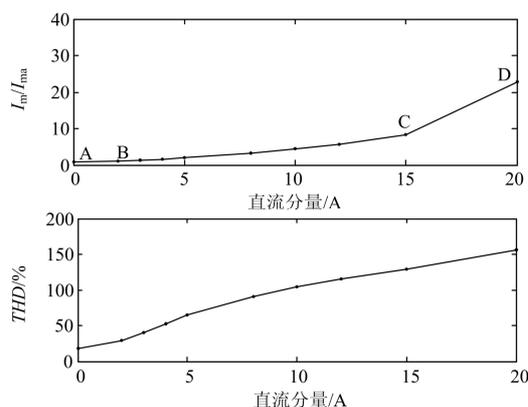


图 11 励磁电流及总谐波畸变率与直流分量关系曲线

Fig. 11 Variation of magnetic current and its THD with the DC component

综合分析前述四种情形, 可得磁滞回线变化时变压器的励磁电流变化如表 2 所示。由表 2 可见, 和图 3 所示的磁滞回线相比较, 剩磁增大时, 励磁电流随直流分量的增速变大, 较小的直流电流就可使得变压器铁芯工作在磁滞回线的饱和段, 影响其正常运行, 即降低了变压器的直流偏磁耐受能力。矫顽力和铁芯磁滞损耗增大时, 励磁电流随直流分量的增速随之变缓, 使得变压器可以承受较大的直流电流, 进而增大了其直流偏磁耐受能力。

表 2 磁滞回线变化时变压器的励磁电流

Table 2 Magnetic current of power transformer with the varied magnetic hysteresis loop

相关参数	原有磁滞回线	矫顽力增大	剩磁增大	磁滞损耗增大
$I_B / I_{ma}$	1.2	1.04	1.29	1.16
$k_{AB}$	0.16	0.09	0.22	0.11
$I_C / I_{ma}$	13.96	5.03	24.83	8.75
$k_{BC}$	1.51	0.44	2.83	0.86
$I_D / I_{ma}$	39.3	9.39	38.73	23.9
$k_{CD}$	7.46	1.03	4.12	4.25

### 3 结论

本文根据 J-A 磁滞回线理论, 基于电路磁路模型仿真研究了 500 kV 变压器在不同硅钢片磁化特性时的直流偏磁耐受能力, 结果表明:

(1) 变压器直流偏磁时, 励磁电流随直流分量的增加近似成线性关系, 但随着铁芯磁导率工作区域的变化呈现不同的增长速率;

(2) 变压器铁芯磁滞回线的矫顽力增大时, 磁滞回线上升和下降段的斜率随之降低, 励磁电流随直流分量的增幅明显变缓, 即变压器直流偏磁的耐受能力明显增大, 但应关注励磁电流畸变程度加剧带来的其他问题;

(3) 变压器铁芯磁滞回线的剩磁增大时, 较小的直流电流就可使得变压器的工作点超过磁滞回线的拐点进入到饱和段, 励磁电流随直流分量的增幅加剧, 意味着变压器直流偏磁耐受能力的降低;

(4) 变压器铁芯的磁滞损耗增大时, 励磁电流随直流分量的增幅变缓, 变压器直流偏磁的耐受能力有所提高。

因此, 改善变压器铁芯材料的磁化特性, 也是提高变压器直流偏磁耐受能力的一个方法, 但变压器铁芯材料的磁化特性与其运行特性密切相关, 应在实际应用中综合考虑。

### 参考文献

[1] 王学峰, 余小菲, 周俊宇. 直流输电系统对交流变压器影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(24): 101-104.  
WANG Xue-feng, YU Xiao-fei, ZHOU Jun-yu. Studying on the effect to transformer by DC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(24): 101-104.

[2] PRICE P R. Geomagnetically induced current effect on transformers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 7(4): 1002-1008.

[3] 赵志刚, 刘富贵, 程志光, 等. 直流偏磁条件下叠片铁芯的磁性能模拟[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 14-19.  
ZHAO Zhi-gang, LIU Fu-gui, CHENG Zhi-guang, et al. Magnetic property modeling of laminated core under DC-biased condition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 26(9): 14-19.

[4] 赵志刚, 刘富贵, 张俊杰, 等. 直流偏磁条件下变压器励磁电流的实验与分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 71-76.

- ZHAO Zhi-gang, LIU Fu-gui, ZHANG Jun-jie, et al. Measurement and analysis of magnetizing current in DC-biased transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 71-76.
- [5] 李泓志, 崔翔, 卢铁兵, 等. 变压直流偏磁的电路-磁路模型[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(25): 119-125.
- LI Hong-zhi, CUI Xiang, LU Tie-bing, et al. Electric circuit and magnetic circuit combined model of DC biased power transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(25): 119-125.
- [6] 董霞, 刘志珍, 宁大海, 等. 基于传输线模型的三相变压器直流偏磁仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(23): 12-16.
- DONG Xia, LIU Zhi-zhen, NING Da-hai, et al. Simulation study for the three-phase transformer under DC bias based on the transmission-line model[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(23): 12-16.
- [7] 余洋, 韦晨, 朱林. 直流输电接地极电流对不同结构变压器影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 71-76.
- YU Yang, WEI Chen, ZHU Lin. Impact of HVDC ground electrode current on transformers with different structures[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 71-76.
- [8] 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.
- GUO Man-sheng, MEI Gui-hua, ZHANG Xi-le, et al. Calculation of losses in single phase three limb transformer under DC-biasing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 67-71.
- [9] 朱林, 韦晨, 余洋. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 158-162.
- ZHU Lin, WEI Chen, YU Yang. Analysis of DC bias exciting current of the single-phase transformer and its effect on protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 158-162.
- [10] 文俊, 刘连光, 项颂, 等. 地磁感应电流对电网安全稳定运行的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 24-30.
- WEN Jun, LIU Lian-guang, XIANG Song, et al. Influences of geomagnetic induced currents on security and stability of power systems[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 24-30.
- [11] 王升. HVDC地电流对变压器的影响及其抑制措施[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
- WANG Sheng. Influence of HVDC ground electrode current on grounding transformer and its restraining measure[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.
- [12] 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. Study on measures of restraining DC current through transformer neutrals[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 1-7.
- [13] 王艳艳. 大规模电网 GIC 治理方法和技术的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2009.
- WANG Yanyan. Study of management methods and techniques of geomagnetically induced current of large-scale power grid[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2009.
- [14] LEITE J V, SADOWSKI N, KUO-PENG P, et al. The inverse Jiles-Atherton model parameters identification[J]. IEEE Trans on Magnetics, 2003, 39(3): 1397-1400.
- [15] 李英, 王健, 孙树波, 等. 500 kV 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.
- LI Ying, WANG Jian, SUN Shu-bo, et al. Research on DC bias of 500 kV single phase transformer with load and no-load[J]. Transformer, 2013, 50(4): 55-60.
- [16] 张均. 直流偏磁下变压器运行特性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.
- ZHANG Di. Analysis of operating characteristics of transformer under DC bias[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2013.

收稿日期: 2013-10-17; 修回日期: 2013-12-09

作者简介:

杨晓辉(1982-), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事输电变电设备的试验检测和研究工作;

王丰华(1973-), 女, 通讯作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力变压器在线监测、电力变压器直流偏磁、电能质量分析等。E-mail: fhwang7723@sytu.edu.cn