

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.02.016

特高压变压器直流偏磁计算及无功功率特性分析

王泽忠¹, 谭瑞娟¹, 刘连光², 邓涛¹

(1. 华北电力大学高电压与电磁兼容北京市重点实验室, 北京 102206;

2. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要: 针对变压器的直流偏磁问题, 分析了特高压变压器直流偏磁时无功损耗的响应机理, 给出无功损耗计算方法, 进行无功损耗特性分析。采用增加串联电阻的方法, 提高计算电流中直流分量的计算精度。结合电压补偿, 消除增加串联电阻后导致的电压下降问题。根据特高压变压器的实际参数, 建立变压器的场路耦合模型, 进行特高压变压器不同直流偏磁电流下的仿真计算。研究表明, 变压器直流偏磁时, 励磁电流波形严重畸变。随着直流偏磁电流的增加, 特高压变压器的空载无功功率逐渐增加, 直流偏磁电流超过一定范围后, 无功功率随着直流偏磁电流的增加近似呈线性增加。相同直流偏磁电流时, 负载下的无功功率明显大于空载下的无功功率。相比于无直流偏磁时的无功功率, 相同直流偏磁电流时, 空载与负载下的无功增额大体相同。

关键词: 特高压变压器; 直流偏磁; 串联电阻; 电压补偿; 无功功率

DC Bias Calculation and Characteristics Analysis of Reactive Power for the UHV Transformer

WANG Zezhong¹, TAN Ruijuan¹, LIU Lianguang², DENG Tao¹

(1. Key Laboratory of High Voltage & EMC, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: For the DC bias problem of transformer, the response mechanism of reactive power loss of UHV transformer under DC bias is analyzed and the method of reactive power loss is indicated. On the basis of this, when given no power loss calculation method, the characteristics of reactive power loss is analyzed. The efficiency about the calculated current can be enhanced by increasing the series resistance. The problem of voltage drop can be solved effectively resulting in the series resistance by the method of voltage compensation. The magnetic field model is established according to the product level of UHV transformer parameters. The time domain simulations of different direct current can be carried out based on the field-circuit coupled model, established according to the product level of UHV transformer parameters. The study shows that the exciting current is distorted wave severely. The reactive power loss in no-load increase linearly with DC current grows. Compared to the no-load, the reactive power loss with load increases more with the same DC bias current. In addition, with the same DC bias current, the increase of reactive power loss is nearly the same in no-load and load.

Key words: UHV transformer; DC bias; series resistance; voltage compensation; reactive power

收稿日期: 2016-08-17; 修回日期: 2016-10-11

基金项目: 国家重点研发计划专项(2016YFC0800103); 国家自然科学基金(51577060)。

Project Supported by National Key Research Program of China(2016YFC0800103), National Natural Science Foundation of China(51577060).

0 引言

地磁暴^[1-2]和高压直流输电单极大地回路运行方式^[3-4]均可能在交流电网中产生直流分量。直流分量经变压器中性点流入变压器,引起直流偏磁现象,导致变压器铁心半周饱和,励磁电流谐波增加、无功损耗增大、变压器局部过热、振动噪声增加等一系列问题^[5-7];同时引起继电器、测量设备等保护装置的误动作,引起电压较大波动,严重时导致大范围的停电事故^[8-9],对电网及其主要设备的安全稳定运行构成了严重的威胁。在2004年11月9-10日地磁暴期间,广东岭澳核电站的500 kV变压器中性点测到过75.5 A的GIC (geomagnetically induced current)^[10]。不计500 kV电网GIC作用及影响,中国建成的特高压电网的GIC计算值可达382.9 A^[11]。加拿大魁北克大停电事故的起因是直流偏磁引发的谐波及无功波动,使输电线路和电网的静止无功补偿(SVC)装置跳闸,致使系统内无功补偿严重不足,导致全网电压崩溃^[12]。

国内外学者针对变压器直流偏磁下的无功功率计算主要开展了简化推导工程算法和电磁特性仿真计算。文[13]通过将变压器铁心材料的磁化曲线近似为两段线性,推导了变压器直流偏磁时的地磁感应电流与无功功率的定性关系,指出直流偏磁时的无功损耗依赖于GIC的大小、施加电压和电感的大小。在此基础上,文[14]基于两段线性磁化曲线,给出直流偏磁时的GIC-Q具体计算公式。上述研究方法均认为变压器电感近似为常数,而在直流偏磁条件下,变压器励磁饱和加剧,电流畸变,漏磁增大^[15-16],因此,对应的电感参数可能出现较大波动,动态电感大小直接影响到GIC-Q曲线的计算斜率,从而影响无功功率的计算结果。因而,该方法适用于变压器直流偏磁时无功功率的大小估算。文[17]通过PSCAD/EMTDC软件对不同结构的变压器进行仿真计算,得出变压器的励磁电流与无功功率近似成线性关系。文[18]基于U-I曲线通过给定不同的偏置磁通模拟计算特高压变压器不同直流偏置电流下的无功损耗,该方法忽略了变压器漏磁对计算结果的影响。从特高压变压器电与磁的角度综合分析,建立特高压变压器的电磁暂态模型分析直流偏磁时的无功扰动在国内外未进行深入研究。中国新建设的1 000 kV特高压电网采用单相四柱式和单相五柱式两种结构的变压器,调压补偿变压器单独配置。与特高压主体变相比,调压补偿变的容量小、结构简单,文中主要研究单相四柱式特高压

主体变,以下均称为特高压变压器。

笔者结合变压器的直流偏磁问题,分析直流偏磁时无功扰动的响应机理。根据特高压变压器的实际参数,建立变压器的场路耦合模型。基于特高压变压器磁导率大、绕组电阻小的特点,结合电压补偿,分析串联电阻对直流偏磁计算结果的影响。最后,进行不同直流偏磁电流下的仿真计算,总结无功扰动变化规律,为电网的稳定运行提供参考依据。

1 无功功率机理分析与计算方法

1.1 机理分析

变压器直流偏磁时,由中性点流入直流电流,产生直流磁通,导致变压器磁通曲线的整体上移或下移,从而引起变压器磁通的半波饱和现象。变压器的半波饱和现象导致励磁电流幅值增加,正负半波不对称以及波形畸变等一系列的问题。

畸变的电流包含直流分量、基波以及各次谐波分量,基波及各次谐波均为正弦量,为变压器直流偏磁时的无功功率源。直流偏磁电流越大,电流波形畸变越严重,无功功率增加。

电网规模大,变压器数量多,直流偏磁时多台变压器群发的无功波动可能导致系统电压不稳定。

1.2 计算方法

变压器直流偏磁时,励磁电流波形畸变,偏磁下的无功功率计算属于非正弦情况下无功功率的计算范畴。目前针对非正弦条件下的无功功率有很多种定义,主要为Budeanu的频域分析法和Fryze的时域分析法两个派系^[19-20]。Budeanu无功功率的计算方法为

$$Q_B = \sum_{n=1}^k U_n I_n \sin \varphi_n = \sum_{n=1}^k Q_n \quad (1)$$

式(1)中: U_n 、 I_n 分别为n次谐波电压、电流的有效值; φ_n 为n次谐波电压、电流之间的相位角; Q_n 为n次谐波无功功率。Fryze无功功率的计算思想是把电流按照电压波形分解为有功电流 i_p 和无功电流 i_q ,其中, i_p 的波形和电压波形完全一致。

$$Q_F = UI_q = \sqrt{U^2 P^2 - U^2 P_p^2} = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2)$$

式(2)中: I_p 和 I_q 分别为有功电流 i_p 和无功电流 i_q 的有效值; U 为电压有效值; S 、 P 和 Q_F 分别为视在功率、有功功率和无功功率。

Budeanu的无功功率计算方法中,各次谐波的无功功率计算与经典无功功率计算方法相对应,但 Q_B 不具有明确的物理意义。Fryze的时域分析法没有明确的物理意义。由于变压器直流偏磁时无功功

率的增加,直接影响系统电压的稳定性,因而从系统电压稳定性的角度来衡量直流偏磁的危害^[21],空载直流偏磁时单相变压器的无功功率计算方法为

$$Q=U_1 I_1 \sin\varphi。 \quad (3)$$

式(3)中: U_1 为所加交流电压的有效值; I_1 为直流偏磁下空载电流中基波分量的有效值。三相特高压变压器空载直流偏磁时的无功功率为

$$Q=3U_1 I_1 \sin\varphi。 \quad (4)$$

由式(3)、(4)可以看出,空载直流偏磁下的空载电流是计算变压器空载无功功率的重要参数。同样,负载直流偏磁时一次侧流过的电流是负载无功功率计算的重要参数。

2 特高压变压器电流计算方法

直流偏磁作用下变压器的无功功率与直流电流偏置电流、所施加的电压以及电感等因素有关^[13]。考虑变压器电磁特性,采用瞬态场路耦合法进行特高压变压器直流偏磁时的电磁仿真计算。瞬态场路耦合法以磁场模型计算动态电感,以电路模型计算瞬态电流,具有较高的准确性与稳定性^[22-23]。

2.1 特高压变压器场路耦合模型

特高压变压器采用单相四柱式两主柱并联结构,为自耦变压器,电路接线方式复杂。两主柱上的中压绕组通过外部接线直接并联,高压绕组采用中部出线再并联的连接方式。

为减少计算工作量,便于计算,不考虑变压器的低压绕组,建立变压器的八分之一模型,除去空气包的特高压变压器模型图见图1,绕组由外到内分别为高压绕组和中压绕组。特高压变压器磁场模型的边界条件为:空气包裹外侧,设置磁力线平行边界条件;根据变压器结构对称性,“前后对称面”设置磁力线平行边界条件,“左右对称面”上和“上下对称面”上设置磁场垂直自然边界条件。

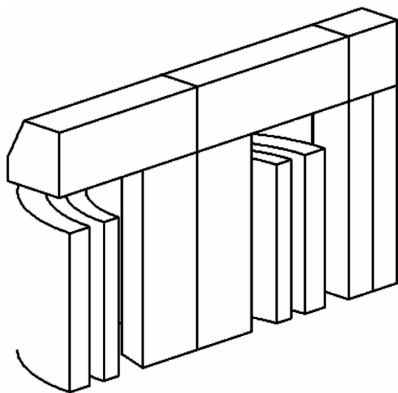


图1 特高压变压器模型

Fig. 1 The model of UHV transformer

根据特高压自耦变压器的接线方式,等效电路模型图见图2。

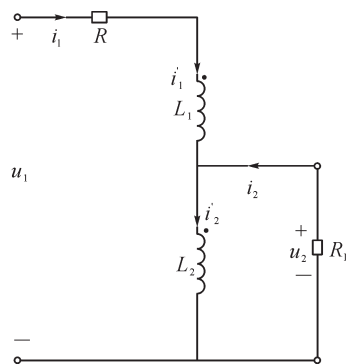


图2 等效电路模型

Fig. 2 The equivalent circuit model

变压器铁心材料为非线性材料,使得磁链和电流为非线性关系。变压器绕组电压方程为

$$u = \frac{d\psi(i)}{dt} = \frac{d\psi(i)}{di} \frac{di}{dt} = L_D(i) \frac{di}{dt}。 \quad (5)$$

式(5)中, L_D 为动态电感,在计算过程中需根据特高压变压器的磁场模型进行求解获得。

有限元法采用矢量磁位 A 进行磁场计算,根据 Maxwell 得到非线性磁场方程

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A = J。 \quad (6)$$

式(6)中: μ 为媒质的磁导率;右端项 J 为电流密度,电流在循环迭代过程中由电路模型计算获得。

由于特高压变压器的电感非常大,电阻很小,进行直流偏磁仿真计算时,通过在原边增加串联电阻的方式,加快变压器饱和速度。由等效电路模型推导得到存在直流电压源时的电路微分方程为

$$\begin{pmatrix} L_1+M & L_2+M \\ M & L_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{di_1}{dt} \\ \frac{di_2}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u_1+u_{dc} \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} R+r_1 & r_2 \\ -R_L & r_2+R_L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_1' \\ i_2' \end{pmatrix}。 \quad (7)$$

式(7)中: R 为原边串联电阻; R_L 为负载电阻; r_1 和 r_2 分别为高中压电阻; u_1 为原边交流电压; u_{dc} 为施加的直流电压; L_1 、 L_2 和 M 分别为高压绕组自感、中压绕组自感和高中压绕组之间的互感。

电路微分方程的求解采用四阶龙格库塔法,由 t_n 时刻的绕组电流 i_n 计算 t_{n+1} 时刻的绕组电流 i_{n+1} 。

$$i_{n+1} = i_n + \frac{h}{6} (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4)。 \quad (8)$$

式(8)中: h 为时间步长; k_1-k_4 为计算电流 1 个步长内 3 个不同时刻对应的 4 个电流对时间的导数值。

2.2 基于串联电阻的空载电流计算

特高压变压器空载运行相当于负载电阻无穷大。特高压变压器与普通变压器相比,铁心不饱和时磁导率更大,绕组电阻更小。电阻小使得很小的直流电压便可产生较大的直流电流。这种大电感串联小电阻的电路,容易导致相对于1 000 kV交流电压的小直流电压在循环迭代计算过程中的数据淹没,造成计算结果出错。

由一阶电路微分方程可知,电阻值越大,计算电流达到稳定的时间越短,铁心饱和速度加快。同时,电阻值越大,产生相同直流电流所需施加的直流电压则越大,增大了直流电压相对于交流电压的比例。因此,为深入分析原边串联电阻值对计算结果准确性的影响,进行不同原边串联电阻值时特高压变压器的空载直流偏磁计算。

增加串联电阻改变了变压器原有的电路结构,通过电压补偿,消除串联电阻对计算结果的影响。选取串联电阻 R 为5 000 Ω ,直流偏磁电流为10 A,进行电压补偿前后的仿真计算,计算结果见图3。

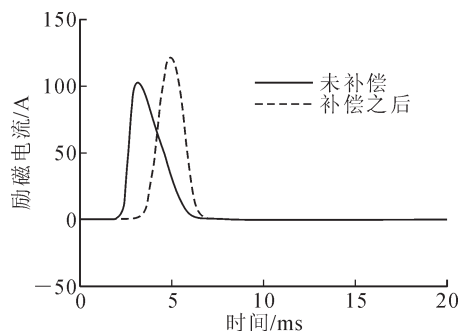


图3 电压补偿前后电流

Fig. 3 Currents with and without voltage compensation

由图3可以看出,未进行电压补偿时,励磁电流波形发生偏移,进行电压补偿后,励磁电流幅值增加,波形在正半周中心处左右对称,说明电压补偿可有效消除增大串联电阻值带来的电流计算偏差。

为分析原边串联电阻值对偏磁计算结果的影响,进行直流偏磁电流为2 A,原边串联电阻值 R 分别为0、500、1 000、5 000 Ω 的仿真计算。不同情况下,计算电流中的直流分量见表1。

表1 不同电阻时电流中的直流分量

Table 1 The DC component in different resistance

R/Ω	i_{dc}/A
0	0.000 1
500	1.869 0
1 000	1.997 0
5 000	1.999 0

针对不同的计算条件,计算电流达到稳定之

后,取稳定后一个完整周期的电流绘图,不同串联电阻值时的电流波形见图4。

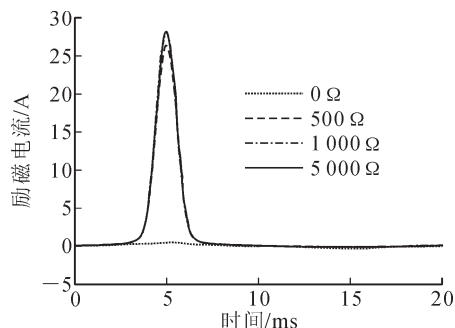


图4 不同电阻时电流

Fig. 4 Currents of different resistance

由表1可以看出,随着串联电阻值的增大,计算电流中的直流分量逐渐增加至接近于直流电流理论值2 A。当串联电阻为0 Ω ,即不增加串联电阻时,计算电流中的直流分量仅为0.000 1 A,计算结果无效。

在进行变压器空载直流偏磁仿真计算时,特高压变压器本身具有的磁导率大和电阻小的特点,使得电阻为实际电阻时计算结果无效,无法进行偏磁计算与分析。通过增大串联电阻值的方式,使得计算电流中的直流分量接近于直流电流理论值,提高直流偏磁仿真计算的准确性与稳定性。

基于空载直流偏磁时串联电阻对计算结果的影响,负载直流偏磁计算时同样采取增加串联电阻并进行电压补偿的计算方式。

3 特高压变压器偏磁下的无功功率计算

3.1 空载直流偏磁无功功率计算

结合特高压变压器的场路耦合模型,进行空载无直流偏磁电流和直流偏磁电流为0.1、0.2、0.5、2、10、20、50、80、100 A时的无功功率计算。

取励磁电流稳定后的一个完整周期绘图,不同情况下的励磁电流波形见图5。

根据得到的不同直流情况下的空载电流,计算三相特高压变压器空载直流偏磁下的无功功率,计算结果见表2。不同直流偏磁电流下的无功功率见图6。

由表2可以看出,随着直流偏磁电流逐渐增加至0.5 A时,无功功率增加较快;在此基础上继续增大直流偏磁电流,无功功率增加变缓,结合图6可以看出,两者最终近似呈线性关系。单相变压器中的直流偏磁电流为100 A时,三相中的无功功率为243.34 Mvar,相比于无直流偏磁时的无功功率显著增加。

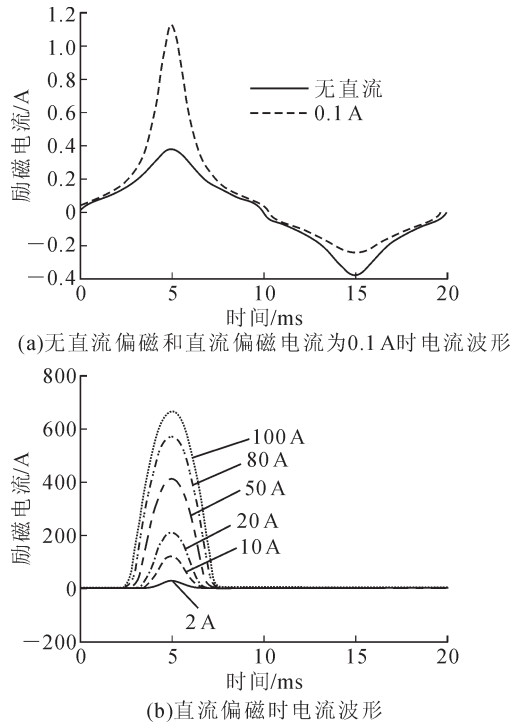


图5 计算电流波形

Fig. 5 The curve of calculated currents

表2 空载无功功率计算结果

Table 2 The calculated result of reactive power with no-load

I_{dc}/A	Q/Mvar
0.0	0.36
0.1	0.49
0.2	0.71
0.5	1.42
2.0	5.23
10.0	25.36
20.0	50.36
50.0	124.39
80.0	196.63
100.0	243.34

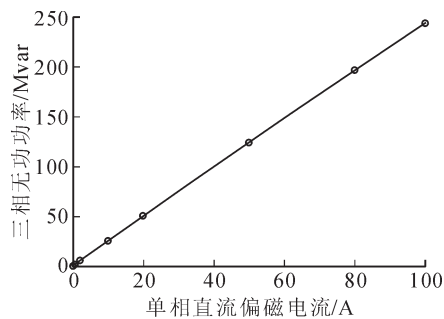


图6 不同直流偏磁电流下的无功功率

Fig. 6 The reactive power of different direct current

3.2 负载直流偏磁无功功率计算

结合特高压变压器空载直流偏磁的无功功率

计算,进行特高压变压器额定情况下的直流偏磁仿真计算。中压绕组给定额定负载 $R_L=91.875 \Omega$,分别进行无直流偏磁和直流偏磁电流为 20、50、100 A 时的仿真计算。计算得到的原副边电流见图 7,实线为原边电流,虚线为副边电流。

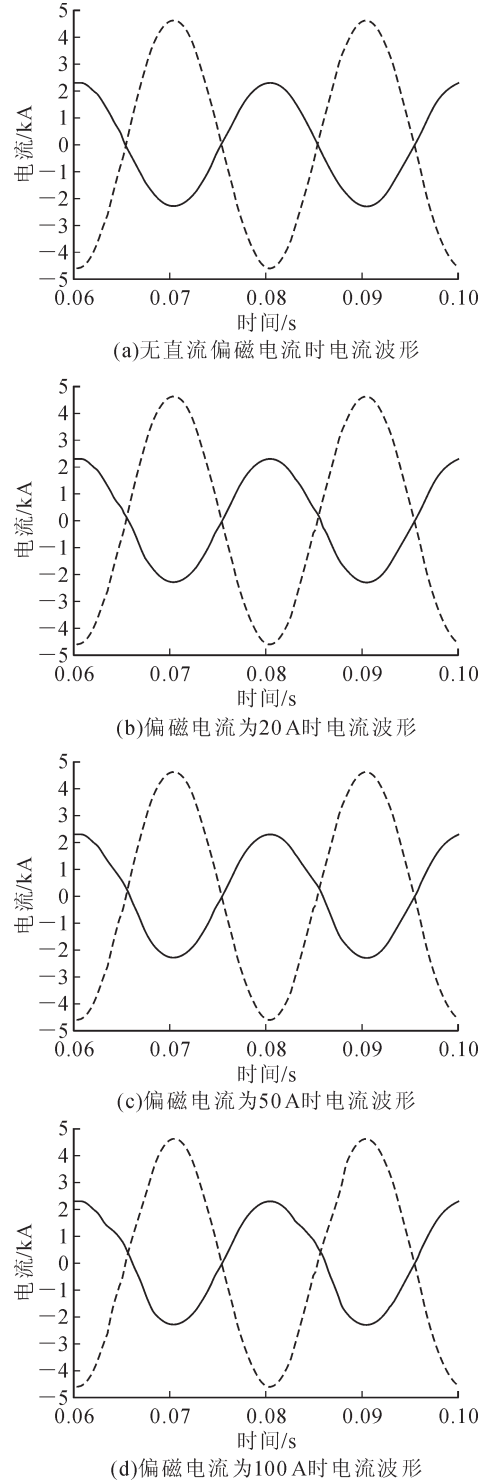


图7 负载情况下原副边电流

Fig. 7 Currents of the primary and secondary with load

由图 7 可以看出,特高压变压器额定负载时随着直流偏磁电流逐渐增加至 100 A,电流波形有不

同程度畸变。

根据得到的不同情况下的原边电流,计算三相特高压变压器负载直流偏磁下的无功功率,计算结果见表3。

表3 负载无功功率计算结果

Table 3 The calculated result of reactive power with load

I_{dc}/A	$Q/Mvar$
0	425.10
20	490.23
50	549.17
100	651.89

由表2、3可以看出,对比空载情况下的无功功率,相同直流偏磁电流时,负载情况下的无功功率显著增加。相比于空载无直流偏磁电流时的无功功率,空载直流偏磁电流20、50、100 A时的无功增额分别为50.0、124.03、242.98 Mvar;相比于负载无直流偏磁电流时的无功功率,负载直流偏磁电流20、50、100 A时的无功增额分别为65.13、124.07、226.79 Mvar。因而,相比于无直流偏磁时的无功功率,相同直流偏磁电流时,空载与负载下的无功增额大体相同。

特高压变压器不论空载或负载运行情况,直流偏磁较大时,无功功率均有较大增长。若电网中多台变压器同时遭受直流偏磁时,易导致系统中较大的无功波动,系统电压大大降低,严重威胁电网的安全运行。

4 结论

1)特高压变压器空载直流偏磁数值计算,随着直流偏磁电流的增加,波形严重畸变。

2)变压器空载直流偏磁时,一定范围内无功功率随着直流偏磁电流的增大增加较快,继续增大直流偏磁电流,无功功率近似呈线性增加。

3)相同直流偏磁电流时,额定负载下的无功功率比空载下的无功功率显著增加。同时,相比于无直流偏磁时的无功功率,相同直流偏磁电流时,空载与负载下的无功增额大体相同。

为降低直流偏磁时由无功功率引起的大范围停电事故的可能性,因而针对直流偏磁有必要采取合理的抑制措施。

参考文献:

[1] AHFOCK A, HEWIT A J. DC magnetization of transformer[J]. IEEE Proceedings of Electric Power Applications, 2006,

153(4): 601-607.

[2] 郑涛,卢婷,杨国生,等. GIC引发直流偏磁对距离保护Ⅲ段动作性能影响的分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 1-5.

ZHENG Tao, LU Ting, YANG Guosheng, et al. Analysis of the effects on distance protection zone Ⅲ relays caused by DC bias induced from geomagnetic induced current[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 1-5.

[3] PAN Zhuohong, WANG Xiaomao, TAN Bo, et al. Potential compensation method for restraining the DC bias of transformers during HVDC monopolar operation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 103-111.

[4] 陈志伟,白保东,陈德志,等. 电力变压器直流偏磁现象形成机理及一种抑制措施的研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 208-214.

CHEN Zhiwei, BAI Baodong, CHEN Dezhi, et al. Research on the formation mechanism and suppression method of transformer DC bias[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 208-214.

[5] ZHENG Kuan, BOTELE D, PIRJOLA R J, et al. Effects of system characteristics on geomagnetically induced currents[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 890-898.

[6] BOLDUC L, LANGLOIS P, BOTELE D H, et al. A study of geoelectromagnetic disturbances in Quebec II. Detailed analysis of a large event[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 272-278.

[7] TAKASU N, OSHI T, MIYAWAKI F, et al. An experimental-analysis of dc excitation of transformers by geomagnetically induced currents[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(2): 1173-1182.

[8] DICKMANDER D L, LEE S Y. AC/DC harmonic interactions in the presence of GIC for the Quebec-New England phase II HVDC transmission[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(1): 68-78.

[9] PRABHAKARA F S, PONDER J Z, TOWLE J N. Computing GIC in large power systems[J]. IEEE Computer Applications in Power, 1992, 5(1): 46-50.

[10] 刘连光,刘春明,张冰. 磁暴对我国特高压电网的影响研究[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 1-5.

LIU Lianguang, LIU Chunming, ZHANG Bing. Effects of geomagnetic storm to UHV power grids in China[J]. Power System Technology, 2009, 33(11): 1-5.

[11] 刘连光,王开让,郭世晓,等. 双电压等级电网 GIC 的相互作用特征[J]. 中国科学:技术科学, 2015, 45(12): 1311-1320.

LIU Lianguang, WANG Kairang, GUO Shixiao, et al. Characteristics of GIC interaction in a dual-voltage-level power network[J]. Scientia Sinica Technologica, 2015, 45(12): 1311-1320.

- [12] KAPPERMAN J G, ALBERTSON V D. Bracing for the geomagnetic storms[J]. IEEE Spectrum, 1990, 27(3): 27-33.
- [13] REZAEI-ZARE A. Behavior of single-phase transformers under geomagnetically induced current conditions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 916-925.
- [14] REZAEI-ZARE A. Reactive power loss versus GIC characteristic of single-phase transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1639-1640.
- [15] ZHANG Haijun, YANG Bin, XU Weijie, et al. Dynamic deformation analysis of power transformer windings in short-circuit fault by FEM[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2014, 24(3): 502-504.
- [16] 王增平, 马 静. 基于等效瞬时漏感与回路方程的变压器保护原理[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 39-44.
WANG Zengping, MA Jing. A novel principle of transformer protection based on equivalent instantaneous leakage inductance and loop equation[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(19): 39-44.
- [17] 张洪兰, 彭晨光, 刘连光. GIC 作用下的变压器励磁电流及无功功率特性[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(2): 13-17.
ZHANG Honglan, PENG Chenguang, LIU Lianguang. Characteristics of transformer magnetic-current and reactive power consumption under GIC[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2010, 26(2): 13-17.
- [18] 刘连光, 秦晓培, 葛小宁. 基于 $U-I$ 曲线的单相自耦变 GIC 无功损耗算法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(12): 55-59.
LIU Lianguang, QIN Xiaopei, GE Xiaoning. GIC reactive power loss calculation based on $U-I$ curve for single-phase autotransformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12): 55-59.
- [19] 闫华光, 宗建华, 杨 林. 非正弦情况下无功功率定义的分析[J]. 电测与仪表, 2003, 40(2): 5-7.
YAN Huagang, ZONG Jianhua, YANG Lin. Analysis of reactive power definition in nonsinusoidal conditions[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2003, 40(2): 5-7.
- [20] 张旭俊. 非正弦波形下各种无功功率定义的本质[J]. 电测与仪表, 2004, 41(1): 1-3.
ZHANG Xujun. Essence of reactive power definitions in nonsinusoidal conditions[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2004, 41(1): 1-3.
- [21] 林湘宁, 杨国稳, 翁汉珩, 等. 直流偏磁下变压器无功损耗增多对系统电压的影响分析[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 272-278.
LIN Xiangning, YANG Guowen, WENG Hanli, et al. Analysis of system voltage impact by transformer reactive power consumption increased under DC bias[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 272-278.
- [22] 王泽忠, 潘 超, 刘连光, 等. 基于棱边有限元法的变压器瞬态场路耦合模型[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 146-152.
WANG Zezhong, PAN Chao, LIU Lianguang, et al. Transient magnetic circuit coupled model of transformer based on edge finite element method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 146-152.
- [23] 潘 超, 王泽忠, 李海龙, 等. 基于瞬态场路耦合模型的变压器直流偏磁计算[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 174-181.
PAN Chao, WANG Zezhong, LI Hailong, et al. DC-bias calculation for single phase transformers based on transient field-circuit coupled model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 174-181.

王泽忠(1960—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电磁场分析计算、电力系统电磁兼容和电磁测量等科学研究和教学工作。

谭瑞娟(1988—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为电磁场数值计算、电力系统电磁兼容。

(上接第 100 页)

- tion of SVM based on RBF kernel[J]. Computer Engineering and Applications, 2003, 39(24): 72-73.
- [18] 董春曦, 饶 鲜, 杨绍全. 支持向量机参数选择方法研究[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(8): 1117-1120.
DONG Chunxi, RAO Xian, YANG Shaoquan. Research on parameter selection method of support vector machine[J]. Systems Engineering and Electronics Technology, 2004, 26(8): 1117-1120.
- [19] HAO L, LEWIN P L, TIAN Y, et al. Partial discharge identification using a support vector machine [C]//2005

Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena.[S.l.]: IEEE, 2005: 414-417.

陆国俊(1972—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力安全生产监督与技术管理。

王施又(1990—), 男, 硕士研究生, 从事电气设备在线监测与故障诊断研究。

王有元(1971—), 男, 博士, 教授, 从事电气设备在线监测与故障诊断研究。