

一种计算空投变压器励磁涌流最大值的方法

刘晓华, 黄 静, 阮绵晖, 曾庆辉

(佛山供电局, 广东 佛山 528000)

摘要: 提出了一种计算投入空载变压器时引起的励磁涌流最大值的方法。基于对空投变压器励磁涌流机理的分析, 提出根据变压器的铭牌基本参数, 并通过磁通饱和点的定位, 确定变压器的磁化特性曲线大致形状, 利用磁化曲线饱和区段近似于线性的特性跟踪磁通变化, 估算励磁涌流的最大值, 并计算最大励磁涌流引起电压暂降的深度及持续时间。通过对一个配电变压器及电力变压器进行空载合闸操作仿真, 对比仿真结果和计算结果, 结果验证了所提方法的有效性和准确性。

关键词: 空载变压器; 励磁涌流; 电压暂降

中图分类号: TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2014)04-0120-05

Method to Estimate Maximum Inrush Current Caused by Energizing No-load Transformer

LIU Xiaohua, HUANG Jing, RUAN Mianhui, ZENG Qinghui

(Foshan Electric Power Bureau, Guangdong Foshan 528000, China)

Abstract: A method is proposed to estimate maximum inrush current caused by energizing no-load transformer. Based on the mechanism that energizing no-load transformer causes inrush current, according to the basic parameters of transformer's nameplate and the magnetic flux saturation point to establish nonlinear magnetization curve. The linear features of saturated magnetization curve segment is used to estimate the maximum inrush current. The maximum depth and the duration of voltage sag are calculated. According to the magnetic flux decay time to estimate the duration of voltage sag. The process of closing no-load distribution transformer and power transformer is simulated, and the simulated result is compared to the calculated result. It is shown that the proposed method is validity and accuracy.

Key words: no-load transformer; inrush current; voltage sag

0 引言

当空载变压器投入电网时, 由于变压器励磁的非线性特性, 可能产生很大的励磁涌流^[1]。其电流波形中含有大量的2、3次谐波, 如系统的自振频率与某次谐波的频率相近, 则将产生高幅值的谐振过电压^[2-5], 可能会损坏避雷器等设备, 并引起系统的继电保护跳闸; 当空投变压器产生的涌流流过上级或并列运行变压器, 也易引起差动保护误动^[6-7]; 合空变操作会产生一个很大的冲击电流, 将引起系统发生电压暂降, 该暂降易引起开关跳闸, 以至于变压器

不能顺利投入系统, 也可能影响供电质量并对负荷设备或供电安全造成不利的影响^[8-13]。

目前的国内外研究中, 大部分都只对励磁涌流产生的影响进行一个定性的分析, 而很少对其进行定量的计算^[12-17]。文[13]结合合闸空载变压器现场实施情况, 并分析了合空变操作引起电压暂降现象的机制, 提出了励磁涌流及系统短路容量是影响合空变电压暂降的主要因素。但该文献只对合空变操作引起电压暂降这一现象进行了定性的研究, 而没有对励磁涌流以及其造成的电压暂降进行定量的计算。

因此, 笔者提出了一种计算励磁涌流最大值的方法。基于对空投变压器引起励磁涌流机制的分析,

根据变压器铭牌基本参数和磁通饱和点的定位确定变压器的磁化曲线, 进而利用磁化曲线饱和区段近似于线性的特性来估算其可能造成的最大励磁涌流。该方法适用于一般的电力变压器, 原理简单, 结果误差在实际工程的可接受范围内。

1 接入空载变压器引起励磁涌流的机理

变压器空载投入电网时, 原边电路的电势方程为

$$w_1 \frac{d\Phi}{dt} + i_1 r_1 = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t + \alpha). \quad (1)$$

式(1)中: U_1 是电源电压有效值; Φ 是原绕组 w_1 的全部磁通; α 为合闸瞬间电源电压的相位角。由于绕组的电阻压降 $i_1 r_1$ 很小, 在分析暂态过程的初始阶段时可以忽略^[18]。于是式(1)可以改写为

$$w_1 \frac{d\Phi}{dt} \approx \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t + \alpha). \quad (2)$$

求解式(2), 得

$$\Phi = -\frac{\sqrt{2} U_1}{\omega w_1} \cos(\omega t + \alpha) + C. \quad (3)$$

式(3)中: C 为积分常数, 由初始条件确定。为简单起见, 设 $t=0$ 时铁心中无剩磁, 即 $\Phi|_{t=0}=0$, 代入式(3), 得

$$\Phi|_{t=0} = -\frac{\sqrt{2} U_1}{\omega w_1} \cos(\alpha) + C = 0; \quad (4)$$

$$C = \frac{\sqrt{2} U_1}{\omega w_1} \cos \alpha. \quad (5)$$

将式(5)代入式(3), 得

$$\Phi = \frac{\sqrt{2} U_1}{\omega w_1} [\cos \alpha - \cos(\omega t + \alpha)] = \Phi_m [\cos \alpha - \cos(\omega t + \alpha)]. \quad (6)$$

由式(6)可看出, 在变压器空载合闸的暂态过程中, 磁通可以分成两个分量: 非周期分量为 $\Phi_m \cos \alpha$, 周期分量为 $\Phi_m \cos(\omega t + \alpha)$ 。最有利情况为 $\alpha=90^\circ$ 时合闸, 没有暂态过程; 最严重情况是 $\alpha=0^\circ$ 时合闸, 此时非周期分量为 Φ_m , 周期分量为 $-\Phi_m \cos \omega t$, 磁通最大值可达到稳态时最大磁通 Φ_m 的两倍, 见图 1。如果考虑剩磁时, 铁心中主磁通最大值可达稳态值的 2.2~2.3 倍。

由于变压器正常运行时铁心已较为饱和, 所以在最不利的情况下($\alpha=0^\circ$)合闸时, 铁心的饱和情况非常严重。图 2 为变压器磁化曲线。从图 2 可见, 此时的激磁电流可达到变压器额定电流的 6~8 倍, 足以形成电压暂降。

2 变压器励磁涌流最大值的计算方法

2.1 建立经验磁化曲线

为了研究一般变压器的励磁涌流, 笔者采用了

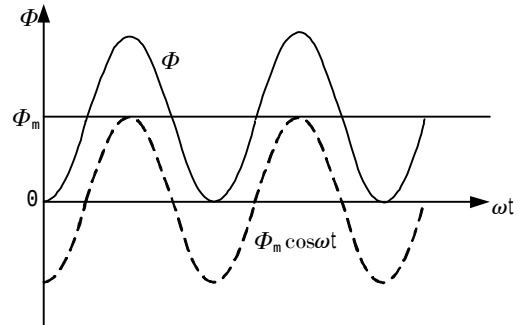


图 1 $\alpha=0$ 时合闸磁通变化($r_1=0$)

Fig. 1 The change of flux after the closing operation when $\alpha=0$ ($r_1=0$)

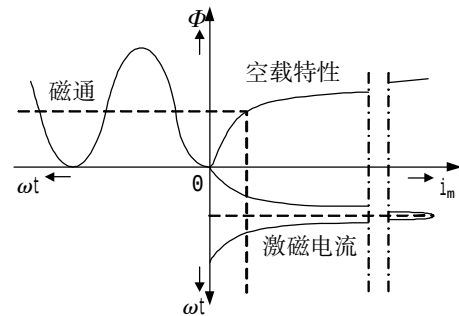


图 2 变压器磁化曲线

Fig. 2 Transformer magnetization curve

文[18]中所提的变压器铁心非线性通用单值曲线方程来建立适用于一般变压器的磁化曲线(以简单的单相单柱变压器空载下无磁耦合情况为例), 则有:

$$\Phi = K f(i) = K_1 i [1 + (i/f_{m0})^p]^{-1/p} + K_2 i. \quad (7)$$

式(7)中: K_1 决定最大饱和磁通 $\Phi_{\max}$ 的大小; K_2 决定非线性段 AB 的斜率; p 决定曲线的非线性程度; f_{m0} 是铁磁材料饱和开始的磁势。这些值均为经验性的参数, 这里 K_1 取 1.15, f_{m0} 取 1, p 取 3.5, K_2 取 0.001 4, 利用 MATLAB 软件画出的单值曲线见图 3。

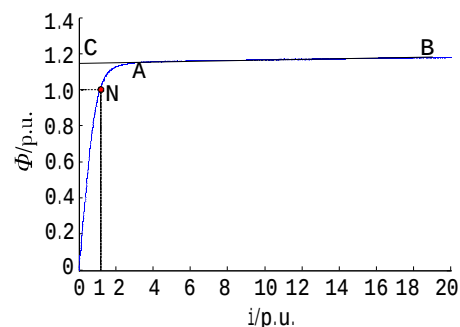


图 3 变压器铁心的非线性 Φ - i 曲线

Fig. 3 Nonlinear Φ - i curve for the core of transformer

如图 3 所示, N 点为额定工作点, 其对应磁通为额定磁通 $\Phi_N = \frac{U_N}{\omega N_1}$; C 点为饱和磁通点, 是饱和曲线 BC 与纵轴交于 C 点, 定义该点的磁通为饱和磁通 Φ_s , 电力变压器的饱和磁通一般为 $\Phi_s = 1.15 \sim 1.4 \Phi_N$, 根据饱和磁通大小来调节式(7)中参数 K_1 ; B 点为最

大磁通点,其对应的磁通为最大磁通点 $\Phi_{\max}$,由上节分析可得,变压器铁心中主磁通最大值可达稳态值的 2.2~2.3 倍,这里取 2.2 倍,即 $\Phi_{\max}=2.2\Phi_N$ 。

2.2 估算励磁涌流

建立了变压器的磁化曲线后,就可以估算其可能造成励磁涌流的最大值。

图 3 中的饱和区段 BC 近似于线性,其斜率近似于式(7)中的 K_2 ,线段 BC 的斜率方程为^[19-20]

$$K_2 = \frac{\Delta i}{\Delta \Phi} \quad (8)$$

因此可以通过线段 BC 上的饱和磁通点 C 和最大磁通点 B 来计算最大励磁电流 I_{inrush} ,如式(9):

$$I_{\text{inrush}} = \frac{\Phi_u - \Phi_s}{K_2} \quad (9)$$

对于三相变压器,空载合闸电流是不对称的,其中会有一相幅值最大,其最大幅值为单相变压器励磁电流的 2/3^[14]。

2.3 计算电压暂降特征值

变压器空载合闸模型见图 4。分析图 4 所示的变压器空载合闸模型,计算变压器励磁涌流引起的电压暂降。

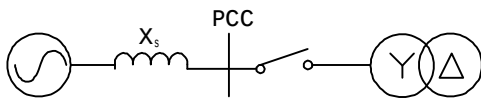


图 4 变压器空载合闸模型

Fig. 4 Model of the transformer no-load closing

由图 4 可得,公共连接点的电压 U_{pcc} 为

$$U_{\text{pcc}} = 1 - I_{\text{inrush}}^* X_s^* \quad (10)$$

式(10)中: I_{inrush}^* 为变压器励磁涌流标幺值; X_s 为系统到公共连接点间的电抗值; X_s^* 的标幺值为 $X_s^* = \frac{S_B}{S_s}$, 其中 X_s^* 是以 S_B 为基准功率的标幺值, S_s 是 U_{pcc} 点的短路容量的有名值。

在空载合闸的瞬变过程中,由于 R_1 (原绕组的电阻)的存在,随着暂态分量磁通的衰减,空载合闸电流也随之衰减。衰减的快慢由时间参数 $T=L_1/R_1$ 来决定。一般小容量变压器 R_1 较大,合闸电流衰减得快,只需经几个周波就可接近稳态值。大型变压器 R_1 小,衰减较慢,有的可延续 20 s 之久。因此可以通过磁通的衰减时间来估算电压暂降的持续时间,如式(11):

$$\Phi = -\Phi_m \cos \omega t + \Phi_m e^{-\frac{R_1}{L_1} t} \quad (11)$$

式(11)中, $\Phi_m e^{-\frac{R_1}{L_1} t}$ 为暂态分量,其从 Φ_m 向 0 衰减,由此可以求出衰减时间 t 。

3 仿真测试

3.1 算例 1

合闸空载配电变压器仿真系统见图 5。用图 5 所示的配电系统对文中提出的评估变压器励磁涌流引起系统电压暂降的方法进行测试。利用 PSCAD/EMTDC 来进行仿真,网络中的线路采用 PI 模型结构,负荷为恒定阻抗模型,电源为三相电压源模型。变压器 T_1 为待接入的变压器,其基本参数如下:额定容量 $S_N=1 \text{ MV} \cdot \text{A}$,变压器接法为 Y_0/Δ ,额定电压 $U_{1N}/U_{2N}=10 \text{ kV}/0.4 \text{ kV}$,空载电流 $I_0=2\%$ 。

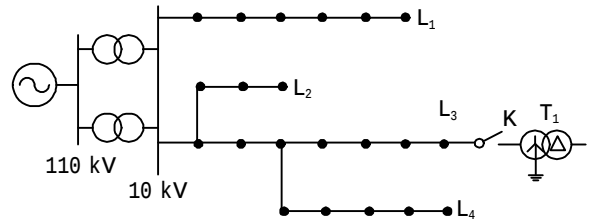


图 5 合闸空载配电变压器仿真系统

Fig. 5 Closing no-load transformer simulation system

系统正常运行时,开关 K 闭合前的电压为 10.48 kV,变压器的饱和磁通 Φ_s 取 $1.25\Phi_N$,剩磁取 20%。仿真总时间为 5 s,在 3 s 时,断路器 K 进行合闸操作,该断路器未设合闸电阻。

合闸空载变压器操作后,可以测得励磁涌流的仿真波形,图 6 为 A 相励磁涌流波形,由于合闸角为 0° ,A 相励磁涌流最大,因此这里只讨论 A 相的励磁涌流。比较仿真值与计算值,结果见表 1,仿真中的励磁涌流最大值在合闸后半周波时出现,约为 1.45 kA,合闸后约 0.8 s 后,励磁涌流减小到约 0.1 kA(额定电流)。用文中所提的方法计算励磁涌流的最大值约 1.357 kA,评估结果与仿真结果的误差为 6.4%,由于仿真中的变压器所考虑的励磁曲线与文中方法所建立的经验磁化曲线存在一定的误差,因此励磁涌流的仿真值和计算值会存在一定的误差,但误差在实际工程可接受范围内。

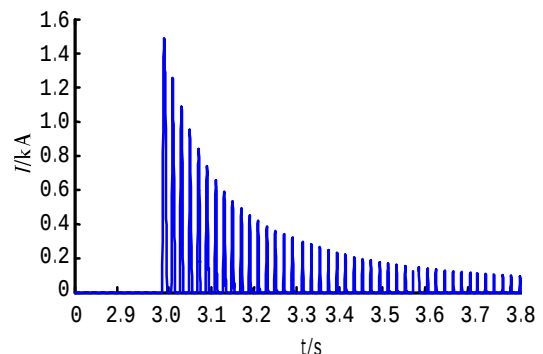


图 6 变压器励磁涌流仿真波形

Fig. 6 Inrush current simulated waveform of transformer

表 1 励磁涌流最大值比较

Tab. 1 Compare maximum inrush current kA		
仿真值	计算值	误差
1.450	1.357	0.093(6.4%)

接入点三相电压有效值见图 7, A 相电压暂降幅值最大, B 相次之, C 相最小。A 相的最低相电压值为 5.68 kV, 约为合闸前电压的 94%, 合闸后约 0.8 s, 该电压基本恢复至额定相电压。

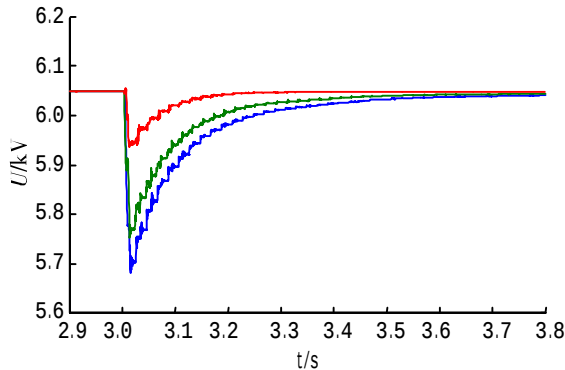


图 7 接入点三相电压有效值

Fig. 7 Three phases voltage effective value measured

用文中所提的方法计算结果为合闸后的电压暂降最大深度约为合闸前电压的 95.4%, 与仿真结果的误差为 1.5%; 计算的电压暂降持续时间为 0.94 s, 与仿真的持续时间相差 0.14 s。电压暂降特征值比较见表 2。

表 2 电压暂降特征值比较

Tab. 2 Comparison of two voltage sags			
特征值	仿真值	计算值	误差
暂降深度/p.u.	0.94	0.954	0.014
持续时间/s	0.80	0.940	0.140

3.2 算例 2

建立图 8 所示仿真系统, 利用文中提出的方法对电力变压器励磁涌流引起系统电压暂降进行评估测试。等效电源由一个短路容量为 3 000 MV·A 的感性三相电源代替。变压器 T₁ 为待接入的空载变压器, 其基本参数为: 额定容量 S_N=450 MV·A, 变压器接法为 Y_g/Y_g, 额定电压 U_{1N}/U_{2N}=500 kV/230 kV。

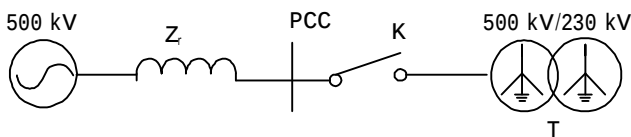


图 8 合闸空载电力变压器仿真系统

Fig. 8 Closing no-load transformer simulation system

合闸空载变压器后, 可得到 A 相励磁涌流仿真波形见图 9, 合闸角为 0°。

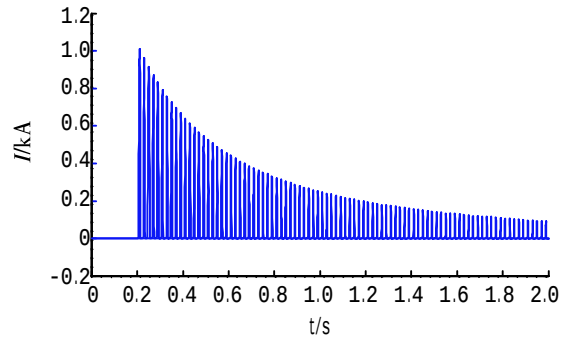


图 9 电力变压器励磁涌流仿真波形

Fig. 9 Inrush current simulated waveform of transformer

比较涌流最大相电流仿真值与计算值的差别见表 3, 由于仿真中电力变压器采用的磁化曲线与经验磁化曲线存在误差, 励磁涌流仿真值与计算值存在一定误差, 但在工程允许范围内。

表 3 电力变压器励磁涌流最大值比较

Tab. 3 Comparison of maximum inrush current kA		
仿真值	计算值	误差
1.012	0.905	0.107(10.6%)

由于 A 相励磁涌流最大, 所以, 接入点电压 A 相电压暂降幅值最大。三相电压暂降波形见图 10。

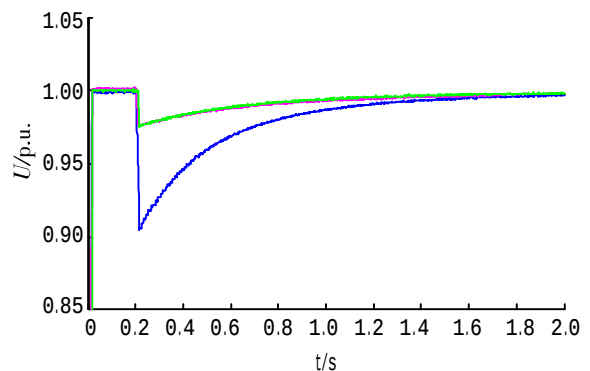


图 10 接入点三相电压标么值

Fig. 10 Three phases voltage effective value measured

由图 10 可知, 合闸空载变压器后, PCC 点 A 相电压下降到 0.905 p.u., 约 1.4 s 后电压恢复至额定电压。对比文中所提方法的计算结果见表 4。计算值与仿真值存在一定误差, 这主要也是由于仿真所用变压器磁化曲线与计算用经验磁化曲线存在一定差别导致的。

表 4 接入电力变压器后电压暂降特征值比较

Tab. 4 Comparison of two voltage sags			
特征值	仿真值	计算值	误差
暂降深度/p.u.	0.905	0.856	0.049
持续时间/s	1.40	0.94	0.46

综合以上仿真分析, 可以表明文中所提方法能有效地计算出励磁涌流的最大值, 并且评估出变压

器励磁涌流引起系统的电压暂降值,且误差较小,在实际工程可接受范围内。

4 结语

1)基于对空投变压器引起励磁涌流机制的分析,根据变压器铭牌基本参数和磁通饱和点的定位确定变压器的磁化曲线,进而估算其可能造成的最大励磁涌流,并计算其引起系统发生的电压暂降。该方法适用于一般电力变压器,原理简单,准确性较高。

2)下一步工作将考虑如何进一步优化经验磁化曲线和减少评估结果与实际的误差。

参考文献:

- [1] STEURER M, FROHLICH K. The impact of inrush currents on the mechanical stress of high voltage power transformer coils [J]. IEEE Transaction Power Delivery, 2002, 17(1): 155-160.
- [2] 高 辉, 刘 波. 一起操作过电压引起的变压器事故[J]. 高压电器, 2004, 40(4): 312-313.
GAO Hui, LIU Bo. An accident of transformer caused by switching overvoltage [J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(4): 312-313.
- [3] 蔡百凌, 陈葛松. 合空载变压器谐振过电压的探讨[J]. 华中电力, 2006, 19(3): 8-11.
CAI Bailing, CHEN Gesong. Study on resonance phenomena caused by energization of transformer [J]. Central China Electric Power, 2006, 19(3): 8-11.
- [4] 刘振亚. 特高压交流输电系统过电压与绝缘配合[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
LIU Zhenya. Overvoltage and insulation coordination of UHV AC transmission system [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [5] 林集明, 王晓刚, 班连庚, 等. 特高压空载变压器的谐振过电压[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 5-7.
LIN Jiming, WANG Xiaogang, BAN Liangeng, et al. Resonance overvoltage caused by energizing no-load transformer in 1 000 kV AC transmission system [J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 5-7.
- [6] 翁汉俐, 林湘宁. 变压器差动保护误动原因的复杂电磁暂态分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 65-66.
WENG Hanli, LIN Xiangning. Analysis of complex electromagnetic transient leading to the mal-operation of power transformer differential protection [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 65-66.
- [7] 刘志超. 三相变压器励磁涌流及保护方案[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(10): 58-60.
LIU Zhichao. Analyses of magnetic inrush current of three phase transformer and the differential protection scheme [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(10): 58-60.
- [8] 朱 毅. 电压暂降对敏感用电设备的影响及其抑制方法[J]. 电气技术, 2007(7): 76-81.
ZHU Yi. Influence and control of voltage dip to sensitive electrical equipment [J]. Electrical Engineering, 2007(7): 76-81.
- [9] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [10] 肖湘宁, 陶 顺. 中性点不同接地方式下的电压暂降类型及其在变压器间的传递(一)[J]. 电工技术学报, 2007, 22(9): 143-147.
XIAO Xiangning, TAO Shun. Voltage sags types under different grounding modes of neutral and their propagation: Part I [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(9): 143-147.
- [11] BOLLEN M H J. Understanding power quality problems, voltage sags and interruption [M]. New York: IEEE Press, 2000.
- [12] MOKHLIS H, LI Haiyu. Non-linear representation of voltage sag profiles for fault location in distribution networks [J]. Electrical Power and Energy Systems, 2010, 33(1): 124-130.
- [13] 郑 彬, 班连庚, 周佩朋, 等. 合闸 750 kV 空载变压器引起系统电压暂降现场实测与计算分析[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 203-208.
ZHENG Bin, BAN Liangeng, ZHOU Peipeng, et al. Analysis on field measured system voltage sag caused by energizing 750 kV no-load transformer and its simulation comparison [J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 203-208.
- [14] 李云阁, 施 围, 张祥全, 等. 750 kV 变压器现场局部放电试验有关问题分析[J]. 高压电器, 2007, 43(6): 434-437.
LI Yunge, SHI Wei, ZHANG Xiangquan, et al. Analysis of on-site partial-discharge test on 750 kV transformers [J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(6): 434-437.
- [15] 郝治国, 张保会, 褚云龙, 等. 变压器空载合闸励磁涌流抑制技术研究[J]. 高压电器, 2005, 41(2): 81-84.
HAO Zhiguo, ZHANG Baohui, CHU Yunlong, et al. Study on current restraining technology when energizing no-load transformer [J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(2): 81-84.
- [16] 李 山. 基于 EMTPE 的 750 kV 空载变压器励磁涌流仿真研究[J]. 高压电器, 2013, 49(1): 101-106.
LI Shan. Simulation of 750 kV unloaded transformer excitation surge based on software EMTPE [J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(1): 101-106.
- [17] 朱韬析, 王 超, 张雪松, 等. 浅析空载投入换流变压器对直流输电系统的影响[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(23): 108-112.
ZHU Taoksi, WANG Chao, ZHANG Xuesong, et al. Analysis of impacts on HVDC transmission systems when converter transformers are energized [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(23): 108-112.

(下转第 130 页)

- YANG Xugang. Interface of matrix composites[M]. Beijing: Chemical Industry Press (CIP), 2010.
- [12] 吴人杰. 高聚物的表面与界面[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- WU Renjie. Polymer interface and adhesion [M]. Beijing: Science Press, 1998.
- [13] 张璞, 许立宁, 路民旭. 金属表面预处理对环氧树脂粘结剂粘结强度的影响[J]. 科学技术与工程, 2007, 7(8): 1662-1665.
- ZHANG Pu, XU Lining, LU Minxu. Effects of metal pre-treatment on the bonding strength of epoxy resin adhesive [J]. Science Technology and Engineering, 2007, 7(8): 1662-1665.
- [14] 陈燕, 姚长江, 陈仲雄. 填料氧化铝粒度对环氧浇注体系粘度的影响[J]. 绝缘材料, 2004(1): 21-22.
- CHEN Yan, YAO Changjiang, CHEN Zhongxiong. The effect of crystallite size distribution of filler alumina in the viscosity of epoxy pouring system[J]. Insulating Materials, 2004(1): 21-22.
- [15] 付东升, 张康助, 孙福林. 环氧树脂灌封材料工艺性探讨[J]. 绝缘材料, 2003(6): 31-33.
- FU Dongsheng, ZHANG Kangzhu, SUN Fulin. Study on the processibility of epoxy resin casting material[J]. Insulating Materials, 2003(6): 31-33.
- [16] 张建宏. 环氧树脂浇注用 Al_2O_3 填料性能的对比分析[J]. 高压电器, 1992, 28(6): 12-16.
- ZHANG Jianhong. Analysis by Al_2O_3 filler properties of epoxy resin casting [J]. High Voltage Apparatus, 1992, 28(6): 12-16.
- [17] 王蓉蓉, 陈维, 褚磊, 等. 氧化铝粉体对环氧浇注体系性能影响[J]. 绝缘材料通讯, 1999(6): 17-19.
- WANG Rongrong, CHEN Wei, ZHU Lei, et al. Effect of alumina powder on the properties of epoxy casting system [J]. Insulating Materials, 1999(6): 17-19.
- [18] 王新衍, 巫松桢. 环氧浇注体内应力的研究[J]. 绝缘材料通讯, 1994(2): 23-25.
- WANG Xinyan, WU Songzheng. Study on epoxy casting internal stress[J]. Insulating Materials, 1994(2): 23-25.
- [19] 越智光一. 环氧树脂固化物的内部应力(译文)[J]. 绝缘材料通讯, 1990(6): 41-49.
- YUE Zhiguanyi. Internal stress in epoxy casting parts (translation)[J]. Insulating Materials, 1990(6): 41-49.
- [20] 陈维. 电熔刚玉氧化铝粉体特性及其对环氧浇注物性能影响研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2002.
- CHEN Wei. Research on the characteristics of the electro-melting corundum powder and its effect on the performance of the epoxy resin-casting piece [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2002.
- [21] 吴海军. 环氧树脂真空浇注工艺过程及注意事项[J]. 变压器, 2000, 37(5): 33-36.
- WU Haijun. Resin vacuum cast process and its points for attention[J]. Transformer, 2000, 37(5): 33-36.
- [22] 徐击水, 张子蓬, 王淑青, 等. 基于GNBR算法的BP网络对绝缘子运行状态预测研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(6): 6-9.
- XU Jishui, ZHANG Zipeng, WANG Shuqing, et al. Research on the prediction for the operating state of insulators using BP network based on gnbr algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(6): 6-9.
- [23] 闫士涛, 何宇, 石岩龙. 750 kV 直线塔整串绝缘子带电更换方法[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(2): 30-34.
- YAN Shitao, HE Yu, SHI Yanlong. Live replacement methods of the whole-bunch insulators on the 750 kV suspension tower[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(2): 30-34.
- 费龙菲(1967—), 女, 高级工程师, 从事真空浇注及APG注射环氧绝缘件技术及其管理。

(上接第124页)

- [18] 李晓萍, 文习山, 陈慈萱, 等. 变压器铁心磁耦合下非线性特性曲线的研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(12): 9-11.
- LI Xiaoping, WEN Xishan, CHEN Cixuan, et al. Study of nonlinear characteristic curve for the core of transformer with magnetic coupling [J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(12): 9-11.
- [19] 肖华, 吴广宁, 蒋伟, 等. 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.
- XIAO Hua, WU Guangning, JIANG Wei, et al. Simulation of DC bias of single-phase transformer based on FEM[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(9): 39-42.
- [20] 李振强, 谷定燮, 戴敏. 特高压空载变压器谐振过电压和励磁涌流分析及抑制方法[J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 387-391.
- LI Zhenqiang, GU Dingxie, DAI Min. Analysis and suppression method of no-load ultra high voltage transformer resonance overvoltage and inrush current[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2): 387-391.
- 刘晓华(1968—), 女, 高级工程师, 主要从事电力测量、电能质量技术和管理。工作。
- 黄静(1988—), 女, 助理工程师, 主要从事电力测量、电能质量技术工作。
- 阮绵晖(1967—), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统变电运行技术管理工作。
- 曾庆辉(1985—), 男, 工程师, 主要从事电力测量、电能质量技术工作。