

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.10.034

基于SPWM的变压器励磁涌流抑制技术研究

黄景光¹, 赵娇娇¹, 林湘宁², 罗亭然¹, 申涛¹, 翁汉琍¹

(1. 三峡大学梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002; 2. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 为了避免变压器投运到电力系统的过程中, 断路器合闸时产生的励磁涌流对电网设备及电力系统电能质量造成不良影响, 文中提出了一种基于SPWM的变压器励磁涌流抑制技术。该技术通过控制新型大功率电力电子电路整流、逆变、变频模式实现变压器励磁电压的调节与控制, 使变压器铁心快速的建立稳态磁场。变压器在投运到系统时变压器绕组电压幅值、相位与母线电压完全一致, 实现了同期合闸, 不会因暂态过程所引起较大暂态磁通而激发励磁涌流。利用所提方法建立了励磁涌流抑制系统仿真模型, 仿真结果表明, 所提出的励磁涌流抑制方案及电压调制算法能够有效抑制合闸励磁涌流的产生, 验证了所提方法的可行性。

关键词: 电力变压器; 励磁涌流抑制; 电压调制; 同期合闸

Research on Inrush Current Suppression Technology of Transformer Based on SPWM

HUANG Jingguang¹, ZHAO Jiaojiao¹, LIN Xiangning², LUO Tingran¹, SHEN Tao¹, WENG Hanli¹

(1. Hubei Key Laboratory of Cascaded Hydropower Stations Operation & Control, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: For transformer putting into operation in power system, the magnetizing inrush current has adverse effect both on the electric devices and the power quality. A new principle of transformer non-inrush system is proposed which is based on SPWM technology. To realize the adjustment and control of the excitation voltage by controlling the models of high power electronics rectifier circuit, inverter, frequency conversion. First, applying a controllable excitation voltage in the low-voltage winding of the transformer, so the transformer core can smoothly and quickly establish a steady magnetic field. When the transformer is put into operation in the system, the voltage of transformer has the same amplitude and phase with the bus voltage, so that the synchronous closing is realized. Using the proposed method, the simulation model of suppression of inrush current is established, and the simulation result shows that the system can effectively inhibit the switching inrush current generation, and the feasibility of this method is verified.

Key words: electric transformer; inrush current suppression; voltage modulation; synchronous closing

0 引言

在电力系统中, 大型变压器在空投时, 由于变压器铁心磁通饱和及铁心材料的非线性特性, 很容易产生较大的励磁涌流, 可能会导致变压器差动保护等继电保护装置误动作或变压器无法成功投运

等情况^[1-3]。而励磁涌流中含有大量的高次谐波和非周期分量等也可能引发谐波污染、电压骤降、铁磁谐振, 这都将对变压器及电力系统其他设备及电力系统供电质量造成严重的影响^[4-5]。

目前, 国内外抑制励磁涌流的方法主要有控制变压器的合闸角、变压器铁心消磁法、投切大电阻

收稿日期: 2019-02-21; 修回日期: 2019-04-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51477090, 51607106)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51477090, 51607106).

合闸法、改变变压器结构等方法^[6-10]。文[11-13]通过控制合闸角使得合闸瞬间,铁心中磁通的稳态强制分量初始值等于剩磁磁通大小,从而避免产生励磁涌流,但合闸角的控制对硬件的精度要求很高。文[14-15]通过预充磁装置来改变变压器铁心中的磁通,使铁心剩磁磁通逐步减少到0,合闸时变压器不会产生较大的励磁涌流,但该方法需要增加大量额外一次设备,且大电阻在暂态过程吸收大量能量时极易损坏。文[16]通过将电阻或电抗器之类的电流限制元件串联到变压器绕组中,用来抑制励磁涌流的产生,但该方法在实际运用中,抑制能力有限,不能完全消除励磁涌流。文[17]通过将传统的变压器与电力电子转换器相结合,实现变压器接入电网之前预充磁,从而消除励磁电流,但该方法比较复杂、实现难度较大,在电力系统运行中难以实现。

文中提出一种基于SPWM的变压器励磁涌流抑制技术,在变压器投运到系统中之前,通过在变压器低压侧绕组施加励磁电压,建立稳定磁场,消除变压器主断路器合闸时产生的励磁涌流,使电力系统和变压器本身都免遭励磁涌流的危害,提高了系统的安全稳定性和变压器投运成功率。通过建立变压器励磁涌流抑制器仿真模型,验证了文中消除主变压器合闸励磁涌流原理方法的有效性和可行性。

1 影响变压器励磁涌流产生的关键因素

变压器铁心严重饱和是导致励磁涌流产生的主要原因,以单相变压器为例,若单相变压器在 t_0 时刻空载合闸,则磁通在 t 时刻表达式^[18]为

$$\varphi(t) = -\Phi_m \cos(\omega t + \alpha) + [\Phi_m \cos(\alpha) + \Phi_r] e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} \quad (1)$$

式(1)中, τ 表示铁心磁通的衰减时间常数。

由式(1)可知,变压器励磁涌流幅值的大小及波形与合闸时刻 t_0 、剩磁 Φ_r 、电压 U_m 、系统内阻抗有关。不计剩磁影响,当合闸角为0时,由式(1)有

$$\varphi(t) = -\Phi_m \cos(\omega t) + \Phi_m e^{-\frac{t-t_0}{\tau}} \quad (2)$$

当合闸角为 $\omega t = k\pi$ 时,此时 φ 为最大值, $\varphi = 2\Phi_m$,远大于饱和磁通 Φ_{sat} ,此时磁通严重饱和,励磁涌流迅速增大,能够达到正常运行时额定电流的6~8倍,是空载电流的几百倍^[19]。

计剩磁的影响,当合闸初相角为 $\alpha = 90^\circ$ 时,在剩磁正向达到最大,磁通在合闸时最大可达 $2\Phi_m$;剩磁反向达到最大,磁通在合闸时最大可达 $-2\Phi_m$ 。

由上述分析,变压器空投时,在系统阻抗、变压

器结构等一定的情况下,合闸初相角及剩磁磁通是影响变压器励磁涌流的关键因素。若剩磁较大,且合闸角在系统电压过零点时,同时磁通变化方向与剩磁方向一致时,铁心会严重饱和,产生较大励磁涌流^[20-21]。

2 变压合闸励磁涌流抑制原理及算法

2.1 变压器合闸励磁涌流抑制原理

文中提出的基于SPWM的变压器励磁涌流抑制技术的原理框图见图1。

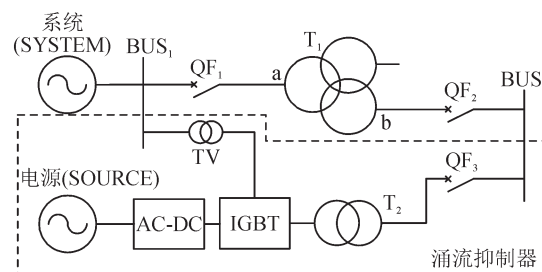


图1 变压器励磁涌流抑制器的原理框图

Fig. 1 Diagram of non-inrush passing neutral section system

当主变压器 T_1 准备通过断路器 QF_1 合闸投运到母线 BUS_1 ,与系统(SYSTEM)并列运行时,先通过涌流抑制器给变压器预励磁。

在变压器 T_1 空载投运前,涌流抑制器控制模块通过调节SPWM调制信号,向整流滤波器和SPWM逆变器的大功率电力电子器件栅极发送控制命令,控制大功率器件的导通与截止,从而控制SPWM逆变器输出从0开始逐渐增大的输出电压,经过励磁变压器 T_2 升压成为主变压器 T_1 的励磁电压。涌流抑制器控制模块通过控制SPWM调制信号,使SPWM逆变器输出电压的相位、频率与母线 BUS_1 侧相同,幅值为从0开始,根据变压器参数计算结果,按预定函数曲线逐渐增加,使SPWM逆变器输出电压达到稳定值,励磁变压器 T_2 输出电压达到变压器 T_1 的额定励磁电压,变压器绕组中产生的励磁电流也从0开始快速增加达到额定值,变压器a侧绕组电压也逐渐达到稳定电压。通过测量母线 BUS_1 、 BUS_2 经过电压互感器TV输入涌流抑制器控制模块的电压,计算变压器a侧绕组电压与母线 BUS_1 电压的相位与幅值差,微调SPWM逆变器调制信号,使变压器a侧绕组电压与母线 BUS_1 电压大小、相位完全一致,完全满足同期合闸条件。此时,控制器向系统侧断路器发出合闸命令,合上断路器 QF_1 变压器完成合闸操作。

断路器 QF_1 合闸时,铁心中已建立稳态磁场,绕

组电压等于系统侧母线 BUS_i 电压,变压器 T_1 合闸不经过暂态过程直接进入稳态运行状态,变压器绕组中不产生励磁涌流。投运成功后断开断路器 QF_3 ,使变压器励磁涌流抑制器退出系统。

2.2 励磁电压的调制

文中运用的励磁电压调制算法,按抛物线函数曲线或指数函数曲线,使 SPWM 逆变器的输出电压从 0 逐渐增加,最终使变压器 T_1 投运到系统时,变压器 a 侧绕组电压也逐渐达到稳定电压。

为了确保调制电压的精确性,将结合抛物线函数和指数函数两者共同调节电压幅值,可使电压幅值按先陡后缓的变化来调节,给变压器施加励磁电压幅值按抛物线函数曲线随时间变化的示意图见图 2。设投运变压器励磁涌流抑制器时,时间为 0 s,整定调幅时间为 t_1 。

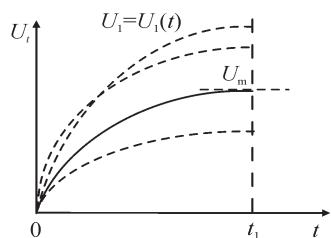


图2 抛物线函数幅值变化示意图

Fig. 2 Amplitude variation of the parabolic function

系统侧母线电压为

$$u_A = U_m \sin(\omega_0 t + \vartheta) \quad (3)$$

给变压器 b 侧施加的励磁电压为

$$u_{\text{new}} = U_1 \sin(\omega_0 t + \vartheta) \quad (4)$$

式(4)中, U_1 是关于时间 t 的函数表达式,在这里是一个抛物线函数,即

$$U_1 = at^2 + bt \quad (5)$$

约束条件为

$$\begin{cases} t_1 = -\frac{b}{2a} \\ U_m = at_1^2 + bt_1 \end{cases} \quad (6)$$

得出抛物线函数表达式为

$$U_1 = -\frac{U_m}{t_1^2} t^2 + \frac{2U_m}{t_1} t \quad (7)$$

当测量出系统母线 BUS_i 电压后,根据 u_{new} 进行电压调制,给变压器施加上述励磁电压,确保主变压器励磁电压相位输出与母线 BUS_i 电压相位一致,电压幅值从 0 上升到系统侧母线电压。合闸瞬间变压器 a 侧绕组电压、幅值、相位与母线 BUS_i 一致,不会产生励磁涌流。为了消除剩磁的影响,同时确保调制电压幅值精确度,采用抛物线函数与指数函数构成的复合函数,使励磁电压幅值先缓慢增加再加

快,最后在缓慢增加的方式,见式(8)。

$$\begin{cases} U_1 = a_1 t_1^3 & 0 < t \leq \frac{1}{2} t_1 \\ U_1 = a_2 t_1^{\frac{1}{2}} & \frac{1}{2} t_1 < t \leq t_1 \end{cases} \quad (8)$$

约束函数为

$$\begin{cases} a_1 \left(\frac{1}{2} t_1\right)^3 = a_2 \left(\frac{1}{2} t_1\right)^{\frac{1}{2}} \\ U_m = a_2 t_1^{\frac{1}{2}} \end{cases} \quad (9)$$

得出复合函数表达式为

$$\begin{cases} U_1 = \frac{4\sqrt{2}u_m}{t_1^3} t^3 & 0 < t \leq \frac{1}{2} t_1 \\ U_1 = \frac{u_m}{\sqrt{t_1}} t^{\frac{1}{2}} & \frac{1}{2} t_1 < t \leq t_1 \end{cases} \quad (10)$$

给变压器施加励磁电压幅值按复合函数曲线随时间变化的示意图见图 3。整定调幅时间为 t_1 。

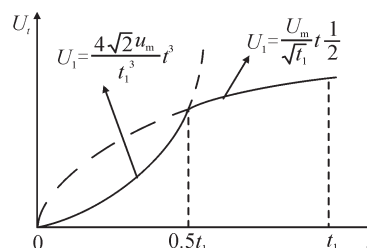


图3 复合函数幅值变化示意图

Fig. 3 Amplitude variation of the composite function

按照图 3 曲线调制电压幅值,根据式(4)、(10)给变压器 b 侧施加的励磁电压 u_{new} ,使变压器 T_1 的幅值缓慢上升,消除了由于变压器 a 绕组侧电压突变而产生的励磁涌流。

3 变压器励磁涌流抑制器仿真

为了验证文中所研究的变压器励磁涌流抑制器原理的正确性及该励磁涌流抑制器不受合闸角及剩磁的影响。以 MATLAB/Simulink 为平台建立三相变压器励磁涌流抑制器系统仿真模型。采用的仿真参数见表 1,对变压器 a 侧绕组电压电流、三相差动电流、变压器铁心励磁电流进行仿真验证。

3.1 变压器励磁涌流抑制器仿真

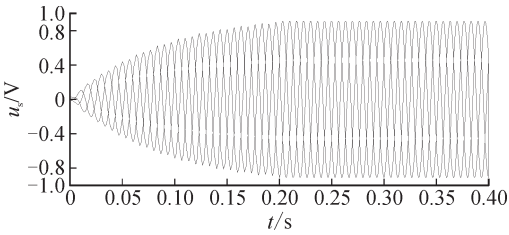
在涌流抑制器启动之后在 0.2 s 时闭合断路器 QF_1 , 0.3 s 时断开励磁回路断路器 QF_3 。变压器 a 侧绕组电压、电流波形见图 4。

由图 4 可以看出,在 0.00~0.18 s 时,主变压器 a 侧绕组电压从零开始逐渐平滑上升,在 0.20 s 时主断路器投运到系统时,变压器 a 侧绕组电压已经与母线 BUS_i 电压同步,幅值相位均相等,属于同期合闸。0.20~0.30 s 电流稳步升高。当 0.30 s 断开断路

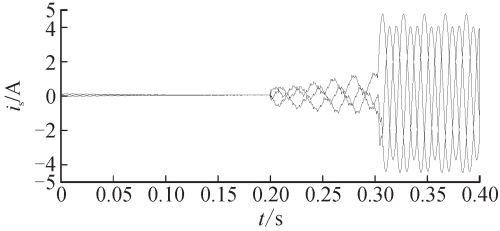
表1 仿真系统参数

Table 1 Parameters of simulation system

名称	参数	数值
主变压器T ₁	接线方式	Y0/Y0/D11
	额定容量/MVA	200
	电压变比	110 kV/35 kV/10 kV
励磁变压器T ₂	接线方式	Y0/D11
	额定容量/MVA	20
	电压变比	110 kV/22 kV
涌流抑制系统回路	电阻(R ₁ 、R ₂)/Ω	50
	电感(L)/H	10
	电容(C)/μF	1.013 2



(a)电压波形

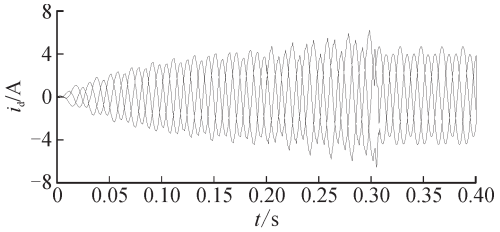


(b)电流波形

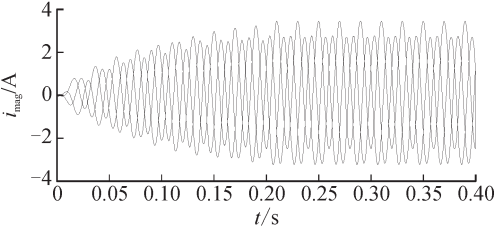
图4 变压器T₁的a侧电压、电流波形

Fig. 4 Magnetizing voltage and current waveform of T₁ 器 QF₃,其最大幅值约为 4 A,整个过程没有没有励磁涌流的产生。

变压器差动电流及励磁电流波形见图5。



(a)三相差动电流波形



(b)三相励磁电流波形

图5 变压器T₁差动电流及励磁电流波形

Fig. 5 Differential current and excitation current waveform of T₁

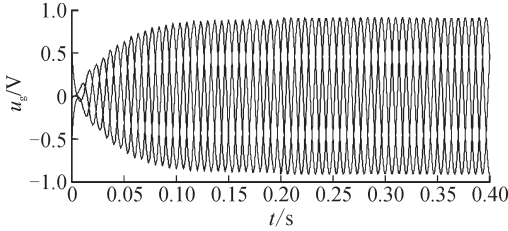
铁心磁链对应的变压器 a 侧励磁电流,由图 5(a)、(b)可以看出,从励磁绕组加上励磁电压开始,到主侧断路器合闸,再到励磁电压断开,始终仅有微小的差动电流,其最大峰值仅仅略大于 5 A,有效值小于额定电流的 0.5%,差动电流与额定励磁电流大小基本一致。

综上所述分析可见,在变压器空载合闸投运整个过程中,没有产生励磁涌流,变压器保护中各相电流和差动电流波形平稳,且幅值都很小,不会引起保护的启动和误动作。

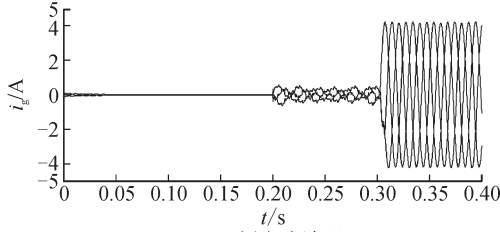
3.2 合闸角及剩磁的影响仿真

在 A 相合闸电压初始角为 0°时,对应的稳态磁通为反向最大值,此时若铁心存在正向最大值的剩磁磁通,是最大非周期分量磁通的产生条件,此时的合闸操作最容易出现严重励磁涌流。为了验证该励磁涌流抑制器,不受合闸角及剩磁的影响,在 A 相合闸角为 0 且剩磁正相最大时条件下对其进行仿真。

在 A 相合闸角为 0 且剩磁正相最大时,变压器 a 侧电压电流、差动电流及励磁电流波形,见图 6。



(a)a侧电压波形



(b)a侧电流波形

图6 有剩磁且合闸角为 0°时变压器 a 侧电压、电流波形

Fig. 6 Magnetizing voltage and current waveform of transformer when having residual magnetism and 0° colsing power

由图 6 可以看出,在 0.2 s 时主变压器投运到系统前,变压器 a 侧绕组电压幅值按照抛物线函数稳步上升,在 0.2 s 主断路器合闸时,电源侧绕组电压已经与母线 BUS₁ 电压同步。断开断路器 QF₃ 时,其励磁电流最大幅值约为 4 A,没有励磁电流的产生。

在 A 相合闸电压初始角为 0°时,对应的稳态磁通为反向最大值,变压器差动电流及励磁电流波形见图 7。

由图 7(a)、(b)可以看出,从励磁绕组加上励磁电压开始,到断路器合闸 QF₁,再到励磁电压断开,始

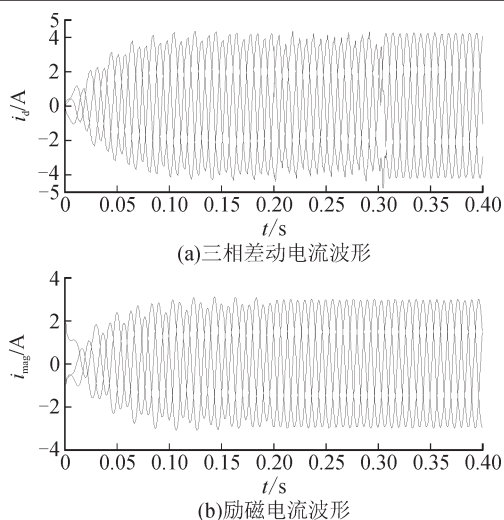


图7 变压器 T_1 有剩磁且合闸角为 0° 时变压器差动电流及励磁电流波形

Fig. 7 Differential current and excitation current waveform of transformer T_1 when having residual magnetism and 0° closing power

终仅有微小的差动电流,其最大峰值不超过5 A,有效值小于额定电流的0.5%,差动电流与额定励磁电流大小基本一致。可见,在变压器空载合闸投运整个过程中,没有产生励磁涌流。

从以上仿真结果可以看到,考虑合闸角及剩磁对变压器励磁涌流的影响,采用基于SPWM电压控制的变压器励磁涌流抑制技术时,变压器在空投时,变压器绕组均未产生暂态过程,没有产生励磁涌流。

综上所述,该基于SPWM的变压器励磁涌流抑制技术能够有效的抑制变压器投运时励磁涌流的产生,同时,该系统不受变压器合闸初始角及剩磁的影响,确保了变压器在任何条件下,均不会产生励磁涌流。

4 结论

针对变压器投运到系统中产生合闸励磁涌流对电网系统产生的不良影响,提出基于大功率电力电子器件和SPWM电压控制的抑制变压器合闸励磁涌流方法,经过分析和仿真,得到如下结论:

1)提出的变压器励磁涌流抑制系统能够有效的抑制励磁涌流的产生,避免了励磁涌流直流分量和高次谐波对电网系统电能质量的不良影响。

2)提出的变压器励磁涌流抑制技术,消除了励磁涌流发生的剩磁、合闸角、铁心饱和等条件,在变压器投运到系统电网中时,完成了电压同期合闸,确保变压器铁心磁场不出现暂态过程,从而消除了励磁涌流。SPWM电压调制算法均不受变压器剩磁及合闸初相角的影响,可靠性较高。

3)该涌流抑制器系统响应速度可根据需要调

整,能够完全跟随母线电压,适应母线电压的波动,同时可以反馈励磁电压输出,进行电压的闭环控制,使得该系统更具灵活性和实用性。

由于该技术需要增加额外大功率电力电子设备及直流电源,在变压器实际投运过程中会增加投运的复杂度,同时为确保变压器实现同期投运,对系统控制精确性也有较高的要求,这也给实际投运带来了困难。

参考文献:

- [1] 蒋云峰,李晓松,汤洁,等. 双流制机车变压器合闸到交流电网的冲击电流分析[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(1): 133-139.
JIANG Yunfeng, LI Xiaosong, TANG Jie, et al. Analysis on inrush current caused by locomotive transformer switched to AC grid from DC grid[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(1): 133-139.
- [2] 付丰年,沈恒毅,吕杰. 关于核电主变励磁涌流的分析及抑制措施研究[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 86-89.
FU Fengnian, SHEN Hengyi, LYU Jie. Analysis on inrush current and inhibition methods of main transformer in nuclear power plant[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 86-89.
- [3] 顾春阳,王爱元,李健,等. 一种有效抑制变压器空载合闸励磁涌流的方法[J]. 变压器, 2015, 52(11): 33-36.
GU Chunyang, WANG Aiyuan, LI Jian, et al. Method to suppress magnetizing inrush current of transformer during no-loaded closing[J]. Transformer, 2015, 52(11): 33-36.
- [4] 王立大,段周朝. 变压器励磁涌流引起保护误动分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(10): 138-140.
WANG Lida, DUAN Zhouchao. Mal-operation analysis on magnetic inrush current of power transformer[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(10): 138-140.
- [5] 焦在滨,马涛,屈亚军,等. 基于励磁电感参数识别的快速变压器保护[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1658-1666.
JIAO Zaibin, MA Tao, QU Yajun et al. A novel excitation inductance-based power transformer protection scheme[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1658-1666.
- [6] 丛伟,王伟旭,肖静,等. 控制合闸电压幅值的变压器励磁涌流抑制方案[J]. 电力系统自动化, 2017, 45(8): 159-165.
CONG Wei, WANG Weixu, XIAO Jing, et al. Transformer inrush current suppression scheme to control amplitude of switching voltage[J]. Automation of Electric Power System, 2017, 45(8): 159-165.
- [7] 戈文祺,汪友华,陈学广,等. 电力变压器铁心剩磁的测量与削弱方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 10-16.
GE Wenqi, WANG Youhua, CHEN Xueguang, et al. Method to measure and weaken the residual flux of the power transformer core[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2015, 30(16): 10-16.
- [8] 何小庆,刘淑萍,李攀宏,等. 一种消除单相变压器励磁

- 涌流的预充磁策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17):120-124.
- HE Xiaoqing, LIU Shuping, LI Panhong, et al. Eliminating the single-phase transformer inrush current based on pre-magnetizing[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17):120-124.
- [9] KOVAN B, DE LEON F, CZARKOWSKI D, et al. Mitigation of inrush currents in network transformers by reducing the residual flux with an ultra-low-frequency power source[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(3):1563-1570.
- [10] TSENG H T, CHEN J F. Voltage compensation-type inrush current limiter for reducing power transformer inrush current[J]. IET Electric Power Applications, 2012, 6(2):101-110.
- [11] 沃建栋, 郑涛, 万磊. 基于合闸控制策略的变压器励磁涌流抑制措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22):32-36.
- WO Jiandong, ZHENG Tao, WAN Lei. et al. Study on inrush current suppression method based on the breaker control strategy[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22):32-36.
- [12] 范兴明, 葛琳, 张鑫, 等. 基于选相合闸技术的变压器励磁涌流的仿真分析[J]. 高压电器, 2014, 50(2):54-59.
- FAN Xingming, GE Lin, ZHANG Xin, et al. Analysis and simulation of power transformer inrush current based on the phase selection switch technology[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(2):54-59.
- [13] 李伟, 黄金, 方春恩. 基于相控开关技术的空载变压器励磁涌流抑制研究[J]. 高压电器, 2010, 46(5):9-13.
- LI Wei, HUANG Jin, FANG Chun'en. Research on elimination of no-load power transformers inrush currents based on controlled switching[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5):9-13.
- [14] 李占元, 张伟红, 杜秀红. 预充磁绕组在抑制变压器空载合闸励磁涌流中的应用实例[J]. 变压器, 2013, 50(3):34-40.
- LI Zhanyuan, ZHANG Weihong, DU Xiuhong. Applied example of pre-magnetizing winding in suppression of no-load switching magnetizing inrush current of transformer[J]. Transformer, 2013, 50(3):34-40.
- [15] 何越, 林湘宁, 黄景光. 一种直接消除变压器合闸励磁涌流的方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(11):141-149.
- HE Yue, LIN Xiangning, HUANG Jingguang. A method to eliminate the magnetizing inrush current of energized transformers[J]. Transactions of China Electro Technical Society, 2011, 26(11):141-149.
- [16] BURKARD J, BIELA J. Transformer inrush current mitigation concept for hybrid transformers[C]//19th European Conference on Power Electronics and Applications. Warsaw, Poland:[s.n.], 2017:11-14.
- [17] HARCHANDANI R, KALE R. Selection of effective mitigation method for inrush current in power transformers[J]. International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science, 2014, 2(5):359-366.
- [18] 邢运民, 罗建, 周建平, 等. 变压器铁心剩磁估量[J]. 电网技术, 2011, 35(2):169-172.
- XING Yunmin, LUO Jian, ZHOU Jianping, et al. Estimation of remanence in transformer core[J]. Power System Technology, 2011, 35(2):169-172.
- [19] 曾耀吾, 李晓松, 陈萌, 等. 机车牵引变压器空载合闸励磁涌流特性分析[J]. 电力科学与技术学报, 2013, 28(4):19-23.
- ZENG Yaowu, LI Xiaosong, CHEN Meng, et al. Magnetizing inrush current characteristics of locomotive traction transformer no-load switching[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2013, 28(4):19-23.
- [20] 杨国斌, 钱江, 陈军潮, 等. 探讨干式电抗器匝间短路故障与漏磁场的关系[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(2):60-63.
- YANG Guobin, QIAN Jiang, CHEN Junchao, et al. Discussion on the relation between inter-turn short circuit fault and leakage magnetic field of dry type reactor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(2):60-63.
- [21] 丛伟, 王伟旭, 肖静, 等. 控制合闸电压幅值的变压器励磁涌流抑制方案[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8):159-165.
- CONG Wei, WANG Weixu, XIAO Jing, et al. Transformer inrush current restraining scheme based on switching voltage amplitude controlling method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8):159-165.
- 黄景光(1968—), 男, 副教授, 博士研究生, 主要从事电力系统继电保护方向的研究。
- (上接第209页)
- (1):322-327.
- LIU Lianguang, YAN Xudong, MA Chenglian, et al. Research of converter transformer marshalling and receiving-end grid structure's effect on converter transformer DC bias[J]. Power System Technology, 2016, 40(1):322-327.
- [22] 陈柏富, 杨言孝. 并联电容器装置在变压器空载时投入引发串联谐振[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(6):7-11.
- CHEN Baifu, YANG Yanxiao. The Series resonance problem of shunt capacitor bank when transformer in no-load condition[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(6):7-11.
- [23] 刘连光, 朱溪, 王泽忠, 等. 基于K值法的单相四柱式特高压主体变的GIC-Q损耗计算[J]. 高电压技术, 2017, 43(7):2340-2349.
- LIU Lianguang, ZHU Xi, WANG Zezhong, et al. Calculation for reactive power loss of single-phase for limbs UHV main transformer due to geomagnetically induced currents with parameter K[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(7):2340-2349.
- 杨培宏(1980—), 男, 副教授, 主要从事电网安全运行与灾变控制等研究工作。
- 冯士伟(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析与控制。