

DOI: 10.13296/j.1001-1609.hva.2018.03.016

基于合闸电阻的变压器励磁涌流相控技术研究

刘 涛¹, 颜廷武¹, 卜新良¹, 段雄鹰², 廖敏夫²

(1. 国网辽宁电力有限公司阜新供电公司, 辽宁 阜新 123000; 2. 大连理工大学电气工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 分析了励磁涌流产生机理,借助数学手段推导出励磁涌流与磁链、合闸相角和合闸电阻的关系,得到了最佳合闸相位的计算公式,阐述了合闸电阻抑制励磁涌流的原理。提出合闸电阻与相控技术相结合的方法,使励磁涌流抑制效果达到最佳。采用ATP暂态仿真软件,搭建了三相变压器系统仿真模型,对合闸电阻接入阻值、接入时间、相控合闸进行了仿真与分析,得出了抑制励磁涌流的最佳方案。最后,通过三相变压器空载合闸实验来验证最佳合闸相位的合理性,对减小空载变压器合闸励磁涌流有指导意义。

关键词: 励磁涌流; 相控合闸; 合闸电阻

Research on Phase-controlled Technology of Inrush Current Based on Closing Resistance

LIU Tao¹, YAN Tingwu¹, BU Xinliang¹, DUAN Xiongying², LIAO Minfu²

(1. State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Fuxin Power Supply Company, Liaoning Fuxin 123000, China;

2. Dalian University of Technology School of Electrical Engineering, Liaoning Dalian 116024, China)

Abstract: The mechanism of the inrush current generation is analyzed, the relationship between inrush current and magnetic chain, closing angle, closing resistance is derived by means of mathematical method, and the formula of the optimal closing phase is obtained. The principle of closing resistance to suppress inrush current is expounded. The combination of closing resistance and phase-control technology is proposed, which makes the effect of inrush current suppression to the best. Then, the simulation model of three-phase transformer system was established by using ATP transient simulation software. The simulation and analysis of value and working time of closing resistance, and phase-controlled switching are carried out, and the best scheme to suppress the inrush current is obtained. At last, through the three-phase transformer no-load closing test to verify the best closing phase of the rationality. It is instructive to reduce the closing inrush current of no-load transformer.

Key words: inrush current; phase-controlled switching; closing resistance

0 引言

空载变压器在投入系统运行时,由于铁心磁通的饱和,会产生高达空载电流 20 倍以上的励磁涌流。这将严重危害电力系统的安全稳定运行,可能会导致保护装置误动作,造成变压器损坏,影响电能质量^[1-3]。因此,抑制励磁涌流成为亟待解决的热点问题。

传统的消除变压器励磁涌流的方法是采取特殊的绕组解法或内接电阻等,这些方法在一定程度上

可以削弱涌流,但抑制效果有限。在中小容量的系统应用中,通常采用串联合闸电阻的方法削弱涌流幅值,应用效果较为理想。目前,国内外学者提出的取消合闸电阻的可行性研究,大多是从合闸电阻对操作过电压的影响方面考虑^[4-6],而针对励磁涌流的抑制,合闸电阻有着其重要的作用。相控技术应用在变压器空载投切中,理论上可以从根本上抑制涌流的发生^[7-13]。

文中提出基于合闸电阻的相控技术,将串联合闸电阻技术和相控技术相结合,使空载变压器合闸励磁涌流抑制效果达到最佳。

收稿日期:2017-09-10; 修回日期:2017-11-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51777025,51477024,51337001)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51777025,51477024,51337001).

1 变压器励磁涌流产生机理

变压器铁心一般选用硅钢材料,硅钢具有高磁导率。系统正常运行时,变压器在磁化曲线拐点附近工作,可最大程度上发挥硅钢材料的优点。变压器中的磁通由励磁电流产生,工频电压稳定情况下,励磁电流不发生畸变。当变压器退出运行后,由于剩磁的存在,与稳态磁通叠加后,使变压器进入饱和状态,在变压器再次投入运行时,投切相位不合理会形成很大的励磁涌流,见图1。

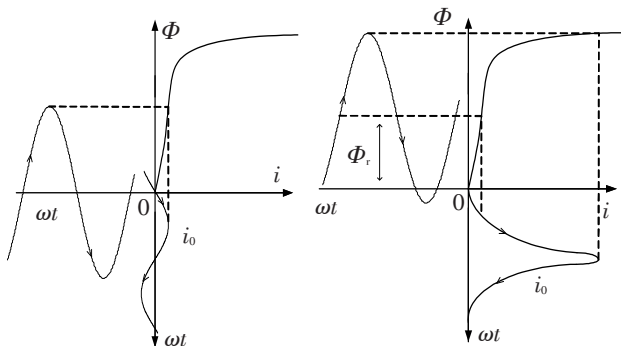


图1 正常励磁电流与励磁涌流

Fig. 1 Normal excitation current and inrush current

当磁通量发生突变时,变压器进入非线性工作区,励磁电流随之发生突变,形成较大的尖峰。在理论方面,可从麦克斯韦方程组角度进行分析^[14]。

$$\oint_S D \cdot ds = \int_S \rho \cdot dv \quad (1)$$

$$\oint_S B \cdot ds = 0 \quad (2)$$

$$\oint_L E \cdot dl = - \int_S \frac{\partial B}{\partial t} \cdot ds \quad (3)$$

$$\oint_L H \cdot dl = \int_S J \cdot ds + \int_S \frac{\partial D}{\partial t} \cdot ds \quad (4)$$

由式(3)、(4)可知,电压 U 与磁感应强度 B 成正比相关,磁场强度 H 与励磁电流 I 成正比相关,通过磁化特性曲线可推出伏安特性曲线, $B-H$ 出现非线性关系时, $U-I$ 出现饱和时不再是线型关系。影响励磁涌流大小的因素可分为两类:一类是变压器自身原因,如变压器的自身结构、等值阻抗等;另一类是外部因素,如变压器绕组接线方式、投切相位等^[15]。

2 最佳合闸相位

对于三相变压器的投切,采用延时合闸技术,以 A 相位首合相,选择合适的投切相位,使感应磁通能够抵消剩磁,磁路中的磁通没有发生畸变,保持稳定运行^[16-19]。首合相 A 投入系统后,利用 A 相电流的磁场对剩余的 B、C 相进行磁化。一般情况下, B、C 两相的剩磁不同,剩磁较大的相励磁电感小,且

会较快进入非线性工作区。此时剩磁较大相产生的感应电压也比较大,抵消原有剩磁, B、C 相很快进入平衡状态。经过大约两个周期后剩余两相的剩磁就会基本被抵消完全,磁通的变化由图2可知。首合相(A 相)合闸后,经过两个周期时间, B、C 相的磁通变化率相同,且均与首合相(A 相)感应磁通数值相等,相位相反。 B、C 相磁通在一个周期内会出现两次相等,且位于 A 相磁通变化极值点,在该点电压为零。此刻将 B、C 相投入电网,系统不会出现励磁涌流。

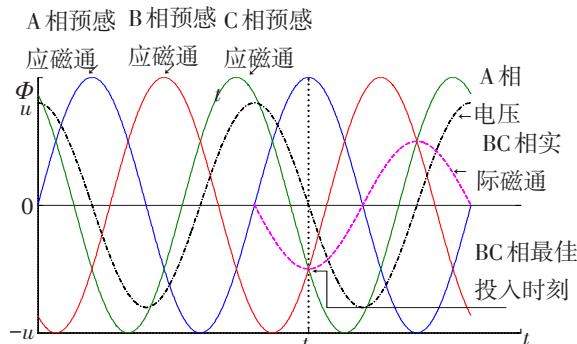


图2 首动相动作后的感应磁通关系

Fig. 2 Relation of sensing flux after the first-action-phase's switching

假设剩磁值为 ψ_r , A 相电压某一负向峰值对应时刻为 T , 频率为 50 Hz。则根据图2的磁通关系可以得到首动相 A 相的最佳合闸时间为

$$t = T - \frac{10 \cdot \arcsin(\psi_r / \psi_m)}{\pi} \quad (5)$$

根据式(5)求得的最佳合闸时间是在合闸时刻 T 前后各半个周期内的时间,与合闸时刻的差值是由剩磁量决定的。

3 合闸电阻与励磁涌流

串联断路器合闸电阻可以对合闸励磁涌流起到抑制作用^[20]。从理论上分析,假设变压器无漏抗,断路器合闸电阻为 R ,合闸相角为 α ,变压器的合闸简化电路见图3,合闸时电源电压为

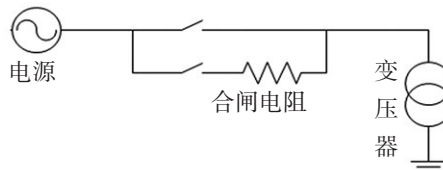


图3 单相变压器合闸电路简化图

Fig. 3 Closing circuit diagram of single phase transformer

$$u = U_m \cdot \sin(\omega t + \alpha) \quad (6)$$

空载变压器合闸时可以列出微分方程

$$\frac{d\psi}{dt} + \frac{R}{L} \psi = U_m \sin(\omega t + \alpha) + \frac{R\psi_s}{L} \quad (7)$$

式(7)可看作以 ψ 为未知函数的常系数线性微分

方程,其解为

$$\psi = \psi_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + \psi_s + Ae^{-\frac{R}{L}t} \quad (8)$$

式(8)中, ψ_m 为磁通稳态分量最大值

$$\psi_m = LI_m = \frac{LU_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \quad (9)$$

$$\varphi = \arctan \frac{\omega L}{R} \quad (10)$$

假设合闸前存在剩磁,初始条件为 $\psi|_{t=0} = \psi_r$, 带入式(8),得到

$$\psi = \psi_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) - [\psi_r - \psi_m \sin(\alpha - \varphi) - \psi_s]e^{-\frac{R}{L}t} \quad (11)$$

励磁涌流为

$$I = \frac{1}{L}(\psi - \psi_s) = \frac{1}{L} \left\{ \psi_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) - [\psi_r - \psi_m \sin(\alpha - \varphi) - \psi_s]e^{-\frac{R}{L}t} \right\} \quad (12)$$

若不考虑合闸电阻,则式(12)变为

$$I = \frac{1}{L} \left\{ \psi_m \sin(\omega t + \alpha - \frac{\pi}{2}) - \psi_m \sin[(\alpha - \frac{\pi}{2}) - (\psi_r - \psi_s)] \right\} \quad (13)$$

对比式(12)、(13)可以得到:断路器施加合闸电阻后,减小了励磁涌流的稳态分量,加快了励磁涌流暂态分量的衰减速度,可起到抑制励磁涌流的作用。

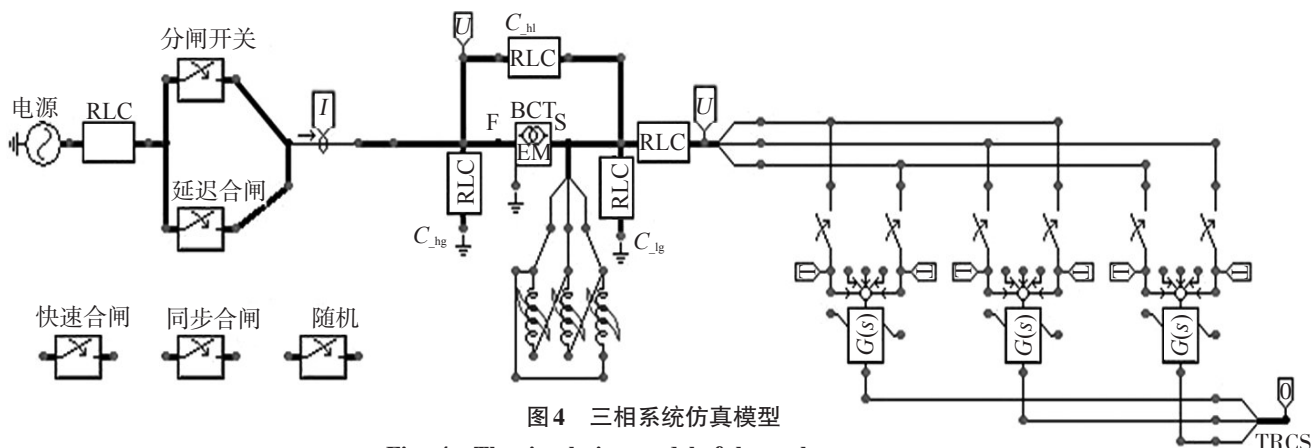


图4 三相系统仿真模型

Fig. 4 The simulation model of three phase system

若不装设合闸电阻,随机合闸的情况下,可出现4.3倍于额定电流的励磁涌流,见图5,若在断路器增设合闸电阻,涌流的抑制效果见图6。

合闸电阻阻值对励磁涌流的影响如图6所示,取合闸电阻接入时间为10 ms,电阻阻值由200 Ω 至600 Ω 变化,由仿真结果可以看出,接入合闸电阻对涌流的抑制效果十分显著,并且随着合闸电阻阻值的增加,励磁涌流值逐渐降低。

合闸电阻接入时间对励磁涌流的影响见图7。由图7可知,合闸电阻的阻值为600 Ω ,合闸电阻接入时间由8 ms至11 ms递增,可以看出,励磁涌流随

4 仿真计算与分析

4.1 三相变压器系统模型

利用ATP电磁暂态仿真软件的J-A模型拟合变压器的磁化曲线。电源为三相交流工频,假设A相的初始相位为 -90° ,三相电压为正序排列。仿真中用到的变压器为双绕组结构,Y/D11连接。额定容量4 MVA,额定电压变比为15 kV/6.9 kV。短路及空载试验参数:空载电流0.5%,空载损耗1 kW,短路电压7.5%,短路损耗10 kW。高压侧和低压侧等效对地电容均为0.01 μF ,对地电阻50 Ω ,绕组相间电容0.01 μF 。假设不存在燃弧、击穿等问题,只考虑合闸相位的影响,仿真模型见图4。

4.2 仿真结果与分析

对于断路器加装合闸电阻的措施,合闸电阻投入时间一般为8~11 ms,电阻退出后仍有可能出现高幅值涌流,断路器合闸电阻根据实际需求一般取为400~1 500 Ω ,在断路器增设合闸电阻,使得合闸前电阻投入,合闸一段时间后电阻旁路退出的方法,是目前工程应用最为广泛的励磁涌流抑制措施之一。

随着合闸电阻接入时间增加而减小,合闸电阻接入时间为11 ms时,励磁涌流可抑制在50 A以下,效果十分显著。为了在采用合闸电阻的情况下将涌流效果达到更佳,可以继续增加合闸电阻的阻值与接入时间,在仿真中可以做到,尤其是延长合闸电阻接入时间对涌流的削弱作用更明显,但是在实际工程应用中要考虑合闸电阻的耗能等问题,所以合闸电阻阻值与接入时间要根据实际工况进行选择。

基于图4的仿真模型,在仿真中采用延迟合闸的策略,首合相(A相)在电压峰值处合闸,剩余两相延迟3个周期后同时合闸,在不装设合闸电阻的情

况下,合闸的励磁涌流波形见图8。

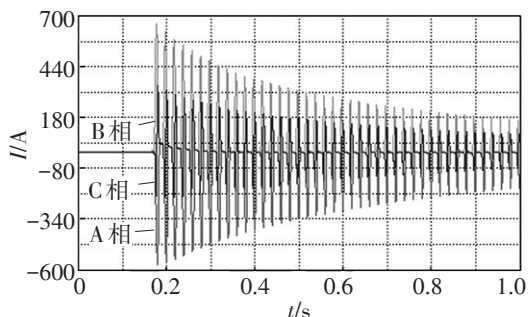


图5 不装设合闸电阻时随机合闸的涌流波形

Fig. 5 Inrush current when random closing without closing resistance

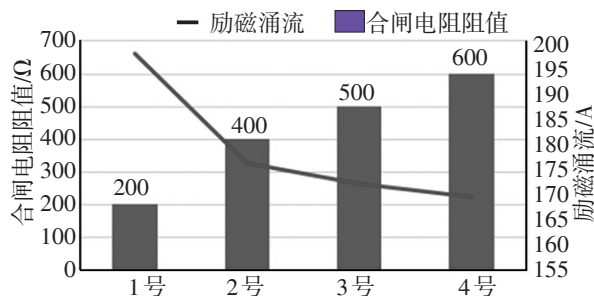


图6 合闸电阻阻值与励磁涌流的关系

Fig. 6 The relationship between the resistance value of the closing resistance and the inrush current

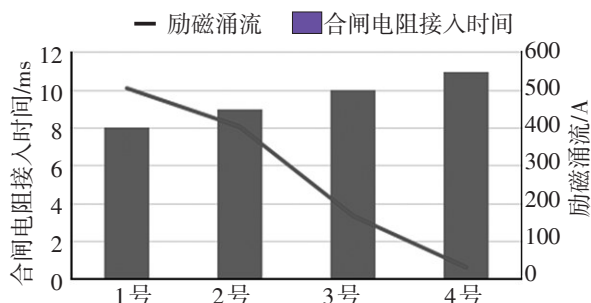


图7 合闸电阻接入时间与励磁涌流的关系

Fig. 7 The relationship between working time of the closing resistance and inrush current

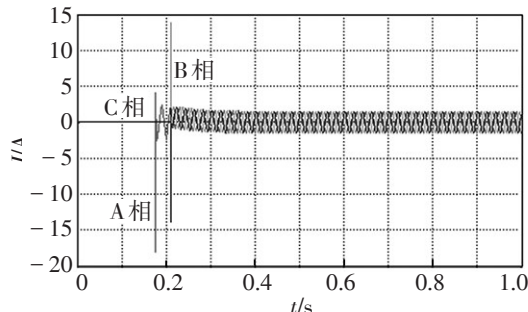


图8 不装设合闸电阻时相控合闸的涌流波形

Fig. 8 Inrush current when phase-controlled switching without closing resistance

由励磁涌流波形可以看出,采用相控方式,涌流的削弱效果十分显著,可将励磁涌流限制在20 A以内。在断路器两端装设阻值为600 Ω的合闸电阻,

接入时间设为11 ms,采用延迟合闸策略进行相控合闸,得到的涌流波形见图9,采用合闸电阻与相控方式相结合的方式,可将励磁涌流抑制在4 A以内,该方法同其他方法相比,体现在励磁涌流的抑制效果上,具有明显的优越性。

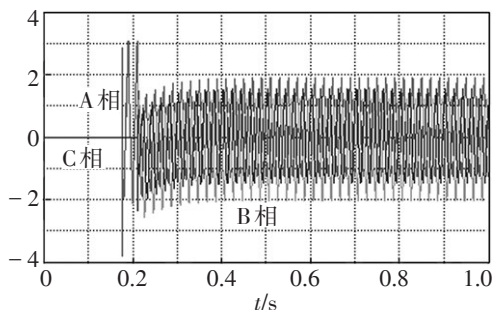


图9 装设合闸电阻时相控合闸的涌流波形

Fig. 9 Inrush current when phase-controlled switching with closing resistance

5 三相变压器空载实验

实验平台由隔离变压器、调压器、电流钳、示波器、负载变压器、三相真空断路器、控制器、驱动电路板等构成,电源采用市电三相电,实验平台见图10。

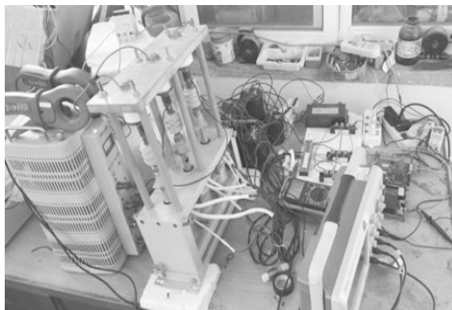


图10 三相实验现场

Fig. 10 Experiment site of three-phase

对三相断路器的操作机构采用电容充放电的方式,由控制器控制,完成断路器的分合闸操作,充电部分采用电容充电模块。采用100 mV/A的电流钳采集了正常励磁电流的波形见图11。测量结果显示,在变压器励磁正常时,三相励磁电流较小,三相电流比较均衡无偏置现象。根据实验结果,正常励磁电流、相控合闸电流见图12、13。图12、13波形近似,但随机合闸图中的标度较大,每格代表值是正常合闸和选相合闸的2倍。

随机合闸的励磁涌流比相控合闸励磁涌流幅值要大很多。且存在直流偏置现象,三相励磁涌流剧增,前两个周期的幅值已经超过额定负载电流6.3 A,在使用相控合闸技术后,励磁电流被有效削减,虽然波形相对正常励磁电流有畸变,但幅值很小控制在0.5 A以内,已接近正常励磁电流0.2 A,验证了相控

合闸的有效性。

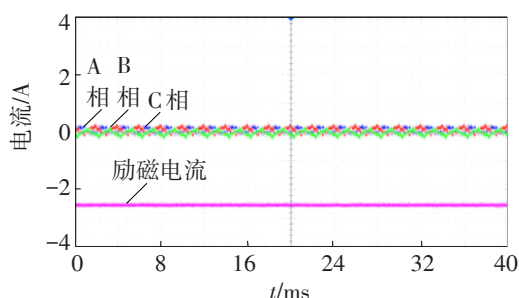


图 11 正常励磁电流

Fig. 11 Normal excitation current

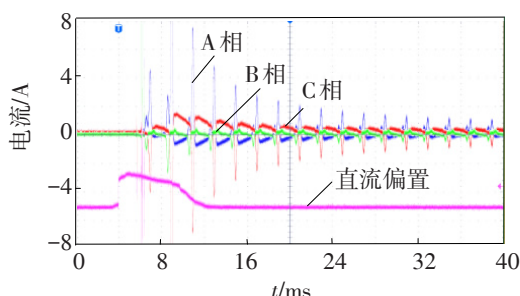


图 12 随机合闸涌流

Fig. 12 Inrush current of random switching

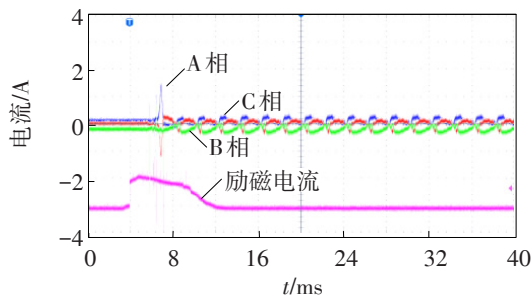


图 13 相控合闸电流

Fig. 13 Inrush current of phase-controlled switching

6 结论

文中对变压器空载合闸励磁产生机理进行了研究,得到了空载变压器最佳合闸相位的计算方法,阐述了串联合闸电阻抑制励磁涌流的原理,并进行了软件仿真和实验验证,得出以下结论:

1)串联合闸电阻对励磁涌流有明显抑制作用,并且抑制效果随着合闸电阻值的增加、接入时间的延长而增强。

2)串联合闸电阻技术与相控技术相结合,涌流削弱效果显著,可将励磁涌流抑制在 0.1 p.u. 内,并通过试验证明了空载变压器选相合闸的有效性。

参考文献:

- [1] 丁富华. 真空开关的选相控制及其应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
DING Fuhua. Research on controlled vacuum switch-

es and their applications[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.

- [2] 吴清华, 张彼德. 空载变压器的励磁涌流研究[J]. 电力学报, 2010, 25(1): 37-39.
WU Qinghua, ZHANG Bide. Study on excitation inrush current of no-load transformer[J]. Journal of Electric Power, 2010, 25(1): 37-39.
- [3] 李伟, 黄金, 方春恩, 等. 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, et al. Research on elimination of no-load power transformers inrush currents based on controlled switching[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(5): 9-13.
- [4] 马欢, 魏磊, 郭洁, 等. 750 kV 系统线路侧断路器取消合闸电阻可行性研究[J]. 高压电器, 2016, 52(1): 136-141.
MA Huan, WEI Lei, GUO Jie, et al. Study on the feasibility of cancelling the circuit-breaker pre-insert resistor at 750 kV overhead transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(01): 136-141.
- [5] 徐鹏, 林宝玉, 刘玮, 等. 基于 ATP-EMTP 对 500 kV 输电线路取消合闸电阻的仿真研究[J]. 电瓷避雷器, 2011(6): 70-75.
XU Peng, LIN Baoyu, LIU Wei, et al. Simulation research on eliminating parallel resistor in circuit breaker for 500 kV transmission lines based on ATP-EMTP[J]. Insulators and Surge Arresters, 2011(6): 70-75.
- [6] 王剑, 朱芸. 500 kV 输电线路断路器合闸电阻配置原则[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 100-103.
WANG Jian, ZHU Yun. Principle of switching resistance configuration for 500 kV transmission line circuit breaker[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 100-103.
- [7] 单国平, 曹荣. 电力系统相控开关技术及其智能控制方法[J]. 信息通信, 2013(9): 75-76.
SHAN Guoping, CAO Rong. Power system phased switch technology and its intelligent control method [J]. Information and Communication, 2013(9): 75-76.
- [8] 林明星, 廖敏夫. 选相分合闸削弱变压器励磁涌流的应用研究[J]. 四川电力技术, 2008, 31(s1): 5-9.
LIN Mingxing, LIAO Minfu. Study on application of magnetizing inrush current in weakening transformer [J]. Journal of Sichuan Electric Power Technology, 2008, 31(s1): 5-9.
- [9] 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.
- [10] 须雷, 李海涛, 王万亭, 等. 智能变电站中断路器选相控制技术应用研究[J]. 高压电器, 2014, 50(11): 63-68.
XU Lei, LI Haitao, WANG Wanting, et al. Application research on the technology of CB phase-controlled in smart substation[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(11): 63-68.
- [11] 段雄英, 廖敏夫, 丁富华, 等. 相控开关在电网中的应用及关键技术分析[J]. 高压电器, 2007, 43(2): 113-117.
DUAN Xiongying, LIAO Minfu, DING Fuhua, et al. Application and key technology analysis of controlled switching[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(2): 113-117.
- [12] PARIKH U, BHALLA B R. Challenges in field implementation of controlled energization for various equipment loads with circuit breakers considering diversified dielectric and mechanical characteristics[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017(87): 99-108.
- [13] CHANDRASENA W, JACOBSON D, WANG P. Controlled switching of a 1 200 MVA transformer in manitoba[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(5): 2390-2400.
- [14] 刘觉平. 麦克斯韦方程组的建立及其作用[J]. 物理, 2015, 44(12): 810-818.
LIU Jueping. Discovery of the Maxwell equations and their significance[J]. Physics, 2015, 44(12): 810-818.
- [15] 陈建华. 电缆连接变压器选相投切技术研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
CHEN Jianhua. Research on controlled switching of no-load transformers with cable[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [16] 沃建栋, 郑涛, 万磊, 等. 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.
- [17] 齐国政. 变压器励磁涌流抑制技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2017.
QI Guozheng. Research on suppression technique of transformer inrush current[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [18] CANO-GONZÁLEZ R, BACHILLER-SOLER A, ROSENDO-MACÍAS J A, et al. Controlled switching strategies for transformer inrush current reduction: A comparative study[J]. Electric Power Systems Research, 2017(145): 12-18.
- [19] MIRKALAEI S A M, HASHIESH F. Controlled switching to mitigate power transformers inrush current phenomenon[C]//Power Engineering Conference. [S.l.]: IEEE, 2015: 1-4.
- [20] 吴佐民, 全恒立, 杜永红, 等. 串联合闸电阻的变压器励磁涌流抑制策略研究[J]. 电气应用, 2011, 30(15): 56-60.
WU Zuomin, QUAN Hengli, DU Yonghong, et al. Study on the suppression strategy of transformer inrush current in series connection resistance[J]. Electro-technical Application, 2011, 30(15): 56-60.

刘涛(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事变电设备运维、检修和管理等。

颜廷武(1970—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事变电设备管理研究。

卜新良(1981—), 男, 硕士, 主要从事变电站运维、检修和管理等。

段雄英(1974—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事智能开关电器理论与高电压新技术等。

廖敏夫(1975—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事智能化高压电器及高电压新技术的研究。

(上接第108页)

- CHE Wenjun, LI Fan, HE Jimou, et al. Key techniques and actuality of high voltage DC metal oxide arresters[J]. Insulators and Surge Arresters, 2005(3): 29-31.
- [16] 马为民, 聂定珍, 曹燕明. 向家坝上海±800 kV特高压直流工程中的关键技术方案[J]. 电网技术, 2007, 31(11): 1-5.
MA Weimin, NIE Dingzhen, CAO Yanming. Key technical schemes for ±800 kV UHVDC project from Xiangjiaba to Shanghai[J]. Power System Technology, 2007, 31(11): 1-5.
- [17] 韩永霞, 李立涅, 陈辉祥, 等. 直流保护策略对特高压换

流站过电压与绝缘配合影响的仿真分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 316-321.

HAN Yongxia, LI Licheng, CHEN Huixiang, et al. Simulation analysis of influence of DC protection on the overvoltage and insulation coordination of UHVDC converter stations[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(2): 316-321.

卢文浩(1986—), 男, 工程师, 工学硕士, 主要从事高电压试验、过电压与绝缘配合研究工作。