

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.07.021

变压器分列转并列运行冲击电流抑制措施研究

饶 强¹, 王 兢¹, 张艳妍¹, 常乾坤¹, 徐梦佳²,
王渝红², 魏 亮², 汤 华²

(1. 国网北京市电力公司, 北京 100031; 2. 四川大学电气信息学院, 成都 610065)

摘要: 变压器分列转并列现象很常见,其产生的冲击电流可能会破坏变压器、开关等设备,对于配电网的安全稳定运行十分不利,因此提出了一种基于复合开关的冲击电流抑制措施。首先利用戴维宁等值定理建立数学模型,分析了变压器暂态过程冲击电流形成的原因及计算方法,并推导论证了冲击电流、等值阻抗角及电压源相位三者之间的函数关系;然后设计了基于过零检测电路的复合开关分相投切控制模块,并在 MATLAB 中仿真实验,验证了该方法在对称及不对称系统中均可实现变压器稳态并列;最后,利用傅里叶算法(FFT)分析复合开关分相投切策略在谐波上的影响。结果表明,该投入方式对系统的谐波影响较小。

关键词: 并列运行; 冲击电流; 复合开关; 阻抗角; 分相控制; 谐波

Study on the Mode of Surge Current Suppression in Transformer Turned into Parallel Operation

RAO Qiang¹, WANG Jing¹, ZHANG Yanyan¹, CHANG Qiankun¹, XU Mengjia²,
WANG Yuhong², WEI Liang², TANG Hua²

(1. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China;

2. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: It's very common for transformers of independent operation to turn into parallel operation, and its surge current may destroy transformers, switches and the other equipment. So this paper presents a new method for surge current suppression based on the composite switch. Firstly, utilizing Thevenin equivalence theorem, the mathematical model is established. Meanwhile by analyzing the cause and the calculation method of the surge current in the transient process of the transformers, the impulse current function model with the equivalent impedance angle and the voltage source phase in switching time is derived. Then, the control module of the composite switch is designed based on zero crossing detection circuit. Finally, by MATLAB simulation, it is verified that the transformers can turn into parallel operation steadily under symmetric and asymmetric conditions with the proposed method; And the effect on the harmonic of the composite switch is analyzed by FFT method, whose results show that the input mode has little influence on the harmonic of the system.

Key words: parallel operation; surge current; composite switch; impedance angle; individual phase control; harmonic

0 引言

变压器并列运行具有提高系统供电可靠性、灵活性、扩大系统容量等特点^[1-4],因此在某些情况下需要对分列运行变压器进行带电转并列运行,即合

环操作。但是并列瞬间可能会产生很大的冲击电流,使开关和变压器遭受巨大的电动力冲击,甚至造成破坏性影响^[5-6]。因此对于变压器分列转并列运行暂态过程的研究具有十分重要的意义。

目前,变压器合环暂态过程的研究主要集中在

收稿日期:2017-01-15; 修回日期:2017-02-17

基金项目:国网北京电力公司科技项目支持(52020114026Y)。

Project Support by State Grid Beijing Electric Power Company(52020114026Y).

冲击电流的分析计算上以评估该点合环可行性,但对冲击电流抑制的研究较少。文[7]采用恒电流负荷模型对网络进行简化,推导出了合环网络暂态过程的时域方程,分析了影响冲击电流大小的因素;文[8]利用戴维南等值定理得到的等值配电网来计算出稳态电流,然后根据稳态电流与冲击电流之间的关系,计算得到冲击电流,并且分析了负荷分布情况对冲击电流及稳态电流的影响;文[9]提出了一种暂态冲击电流的频域模型,并通过拉普拉斯反变换最终得到了时域下冲击电流瞬时表达式;文[10]利用最佳频率法来求冲击电流的衰减系数 T_a , 验证了某些“环内”非合环支路的冲击电流比合环支路冲击电流要大的结论。然而上述文献均没有对变压器分列转并列运行的暂态冲击电流提出具体的抑制措施。

复合开关^[11-12]具有普通交流接触器耐电、耐热性能且通态损耗小,此外还具有电子式无触点开关快速响应的特点,为系统精确合闸提供了途径。目前,复合开关基本用于投切无功补偿电容器,利用电压过零投入,电流过零切除的控制策略,解决了合闸涌流,分闸过电压的问题^[13-15],但由于变压器回路呈感性,与电容器组有着本质的区别,因此该复合开关控制策略并不适用于变压器转并列运行冲击电流的抑制。

文中提出了一种用于抑制变压器分列转并列运行时冲击电流的复合开关控制策略。该方法基于结点阻抗矩阵及合环暂态过程分析求取最合适投切时刻,然后通过搭建复合开关的过零检测电路,自动检测该时刻,分相投入复合开关,实现稳态并列。最后通过 MATLAB 仿真验证了本方法的正确性。

1 并列暂态分析

1.1 暂态分析模型

变压器并列示意图见图 1。

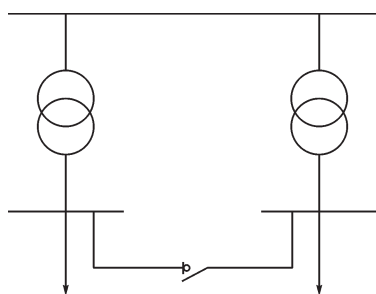


图 1 变压器并列示意图

Fig. 1 Parallel transformers schematic diagram

图 1 中,两台双绕组变压器并列,若已知设备

参数,则忽略负载,利用戴维宁定理可将其等效为由等值阻抗和等效电源构成的电路,见图 2。

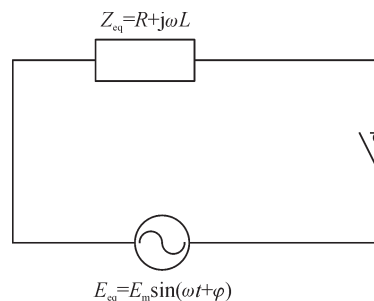


图 2 配电网等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of distribution network

图(2)中: E_{eq} 为变压器并列前开关处的电压; Z_{eq} 为环路中变压器、线路等设备的总阻抗。为简化计算,假设系统三相对称,忽略 35 kV 及以下架空线路的电纳。

1.2 理论分析

由于线路呈感性,整个暂态过程是衰减的,取 A 相作为分析对象,建立微分方程,计算暂态过程全电流。对 B、C 相的分析,只要在 A 相的基础上分别向后移相 120° 和 240° 。

根据图 2 的等值模型,列出电路的微分方程

$$Ri + L \frac{di}{dt} = E_m \sin(\omega t + \varphi). \quad (1)$$

式(1)中: R 、 L 分别为等值网络的总电阻及总电感; E_m 为等效电源的电压幅值; φ 为并列时刻的初相角。

其解由 2 部分组成:周期分量及自由分量。全电流表达式^[16-17]为:

$$i = i_{ap} + i_p; \quad (2)$$

$$i_{ap} = C e^{-\frac{t}{T_a}}; \quad (3)$$

$$i_p = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin(\omega t + \varphi - \alpha). \quad (4)$$

式(2)-(4)中: i_{ap} 为自由分量; i_p 为周期分量; C 为由初始条件决定的积分常数; $T_a = L/R$, 为电流自由分量衰减的时间常数; $\alpha = \arctan \omega L/R$, 为回路的阻抗角。

若并列时刻为 t_1 , 且并列前电感中无电流流过,则由于电感具有保持电流的能力,所以并列前后,电流不变,可求得自由分量系数 C 为

$$C = -\frac{E_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin(\omega t_1 + \varphi - \alpha) e^{\frac{t_1}{T_a}}. \quad (5)$$

1.3 等值阻抗的求取

利用基于单位电流法的结点阻抗矩阵求配电网等值阻抗^[10]。若网络结构参数已知,将网络进行简

化:忽略 10 kV 及以下线路的电纳,利用集中参数表示各支路的导纳。假设 a 和 b 为合环点且简化后的网络有 n 个结点,列写节点导纳矩阵 $\mathbf{Y}$,根据节点导纳矩阵与节点阻抗矩阵之间互逆的关系,求出节点阻抗矩阵 $\mathbf{Z}$ 。

在合环节点 a 和 b 上分别注入单位电流 $I_a=1\angle 0^\circ$ 和 $I_b=-1\angle 0^\circ$,其余节点开路,则

$$\mathbf{Z}_{eq}=\mathbf{U}_a-\mathbf{U}_b \quad (6)$$

式(6)中: $\mathbf{Z}_{eq}$ 为从合环点 a, b 看进去的等值阻抗; $\mathbf{U}_a, \mathbf{U}_b$ 分别为节点 a, b 的结点电压。

将 I_a, I_b 带入到阻抗形式的结点方程中

$$\begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & L & Z_{1a} & L & Z_{1b} & L & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & L & Z_{2a} & L & Z_{2b} & L & Z_{2n} \\ M & M & L & M & L & M & L & M \\ Z_{a1} & Z_{a2} & L & Z_{aa} & L & Z_{ab} & L & Z_{an} \\ M & M & L & M & L & M & L & M \\ Z_{b1} & Z_{b2} & L & Z_{ba} & L & Z_{bb} & L & Z_{bn} \\ M & M & L & M & L & M & L & M \\ Z_{n1} & Z_{n2} & L & Z_{na} & L & Z_{nb} & L & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ M \\ 1 \\ M \\ -1 \\ M \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ M \\ U_a \\ M \\ U_b \\ M \\ U_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

得

$$\begin{cases} Z_{aa}-Z_{ab}=U_a \\ Z_{ba}-Z_{bb}=U_b \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)代入到式(6)中,可以求得等值阻抗 $\mathbf{Z}_{eq}$ 为

$$\mathbf{Z}_{eq}=\mathbf{Z}_{aa}-\mathbf{Z}_{ab}-\mathbf{Z}_{ba}+\mathbf{Z}_{bb} \quad (9)$$

2 抑制措施研究

2.1 复合开关的结构及工作原理

复合开关由晶闸管阀、旁路开关及控制模块构成,见图 3。

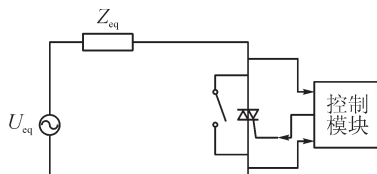


图 3 复合开关单相结构简图

Fig. 3 Single-phase structure diagram of composite switch

晶闸管阀是复合开关的核心部件,采用双向晶闸管,使其在交流正负半波都能够导通,当收到控制模块发出的触发信号时,能快速合闸;旁路机械

开关在暂态过程结束后(大约 2 个周波)投入运行,弥补晶闸管阀通态损耗大的缺陷;控制模块对合环点两侧的电压进行实时监测,并基于某种控制策略对晶闸管、旁路开关发出投切命令^[18]。

复合开关大致的工作流程见图 4。

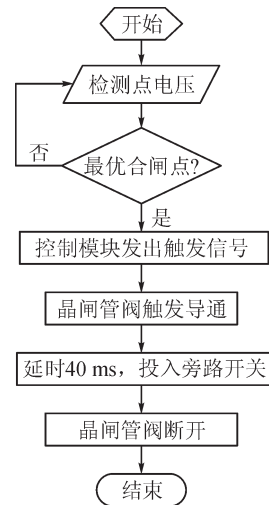


图 4 复合开关工作原理流程图

Fig. 4 Composite switch operation diagram

2.2 冲击电流抑制策略

对变压器并列暂态过程分析可知,暂态电流由自由分量叠加到稳态周期分量上而得。为了减小或消除暂态冲击电流,需使自由分量初值达到最小,由式(5)可知,其初值大小与网络参数及开关投切时刻 t_1 相关,若 $\sin(\omega t_1 + \varphi - \alpha)$ 为零,则 C 等于 0,并列后系统直接进入稳态运行方式,则投切时刻满足

$$\omega t_1 + \varphi - \alpha = k\pi \quad (10)$$

式(10)中, k 取大于 0 的整数。

换言之,冲击电流大小是由电压源投切相位与回路阻抗角 α 之间的关系决定的函数。

$$i_{im} = \begin{cases} 0 & \theta(t_1) = \alpha \\ C(t_1)e^{-\frac{t}{T_s}} + i_{up}(t) & \theta(t_1) \neq \alpha \end{cases} \quad (11)$$

式(1)中, $\theta(t_1)$ 为投入时刻电压源相位。

使 k 为 0,取相电压波形上升沿过零点为监控点,延迟 α 相位角,即为理想的合闸点。以 A 相为例,通过控制模块中的过零检测环节,实时监控 A 相合环点电压,当相电压过零时,过零检测环节发出信号,延迟 α 相位角触发导通双向晶闸管阀,三相晶闸管控制模块见图 5。

系统稳定后,大约三相晶闸管阀导通后 40 ms,自动投入旁路开关;旁路开关稳态投入后闭锁脉冲触发装置,三相双向晶闸管阀退出运行,复合开关投入过程结束。具体控制模块设计见图 6。

由于以相参数作为基本控制单元,A、B、C 三相

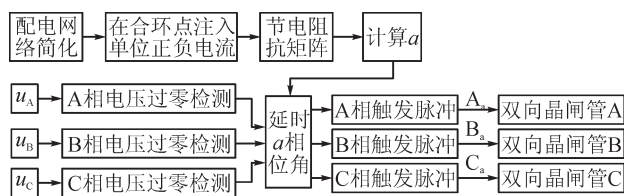


图5 三相晶闸管控制简图

Fig. 5 Three-phase thyristor control schematic

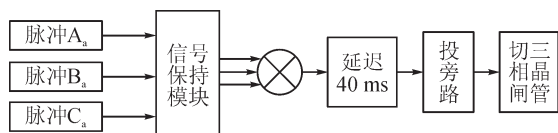


图6 旁路开关控制简图

Fig. 6 Bypass switch control schematic

控制策略相同且各相之间的控制相互独立,因此三相不对称或者发生故障的情况下,该控制策略一样适用。

3 仿真建模与分析

3.1 模型搭建

在 MATLAB/Simulink 平台中,选择某 10 kV 配电网变压器分列运行节点,搭建相应复合开关及控制模块,模型见图 7,其中 a 、 b 点电压有效值分别为 10、9.95 kV,其中 A 相电压初相角分别为 0.6° 、 0° ;复合开关两侧电阻及电感相等,分别为 0.5Ω 、 0.02 H ;额定频率为 50 Hz。

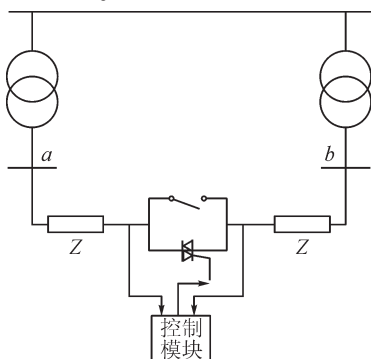


图7 三相模型简图

Fig. 7 Three phase model

3.2 对称环境下合环仿真分析

1)常规合环。实际工程中一般采用机械开关进行合环,而由于机械开关不能做到精确合环,因此文中采取任意点合环来模拟实际情况,波形图见图8。

由图8可见,采用普通机械开关进行合环,其冲击电流高达 13.365 A,额定电流为 7.5 A,冲击电流幅值是额定电流的 1.78 倍。

2)采取控制策略后的合环。对模型等效计算得

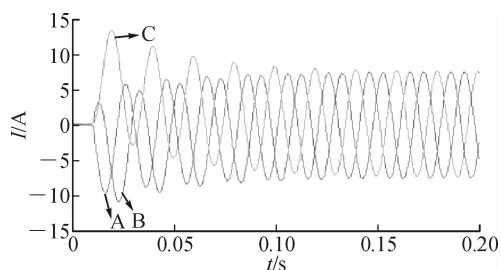


图8 采用普通机械开关投切波形图

Fig. 8 Waveform of ordinary mechanical switch

α 为 85.45° ,输入到复合开关控制模块中进行仿真,仿真波形见图9。

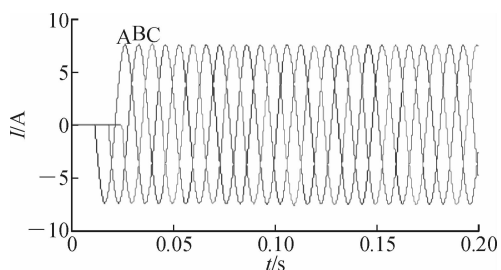
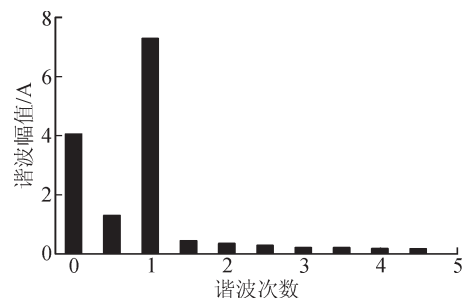


图9 暂态电流波形图

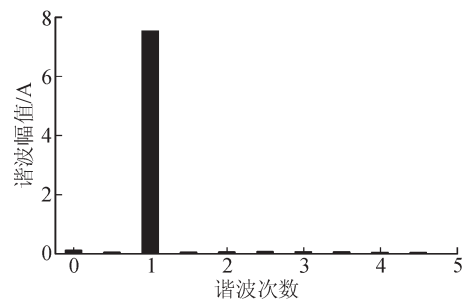
Fig. 9 Waveform of composite switch

采用基于 α 的复合开关投切策略较好的抑制了冲击电流现象,系统并列后直接进入稳定运行状态,冲击电流仅为 7.577 A,比额定电流幅值高 1.03%。

3)谐波分析。由于冲击电流抑制策略中复合开关是分相投切的,这势必会造成短时断线现象,因此基于 FFT 对比分析三相投入机械开关与分相投入复合开关 2 种方式下 5 次以下谐波情况,见图10。



(a)采用机械开关方式



(b)采用复合开关方式

图10 谐波含量图

Fig. 10 Harmonic content diagram

由图10可见,机械开关投入方式产生的谐波明显高于复合开关方式,其中直流分量高达4 A,其THD为7.18%;同时复合开关方式的THD为0.21%。

谐波产生的本质原因是存在非线性负载^[9],从文1.2节暂态过程理论分析中可知,冲击电流是一个随指数衰减的直流量与原正弦电流的叠加,复合开关投入方式不改变电流相位,并且将直流分量幅值降低至零,此外复合开关装置不含非线性电阻,因此由分相投入方式造成的短时断线现象不会对系统造成较大的影响。

3.3 不对称环境下合环仿真分析

系统不对称情况分为:电源幅值不对称、电源相位不对称、线路参数不对称等,其造成的影响均表现在并列点的电压差上。在原有的模型上,只改变电压源的初相角以产生不对称的网络,参数具体情况见表1。

表1 电压源初相角

Table 1 The initial phase of voltage source

相序	左边电源/(°)	右边电源/(°)	电压差/V
A	0.6	0	118.00∠64.72°
B	242.6	241	283.00∠321.62°
C	118.6	119	85.70∠173.52°

由于电路结构不改变,即 α 不变,向控制模块输入 α 为85.45°,得到的电流波形见图11。

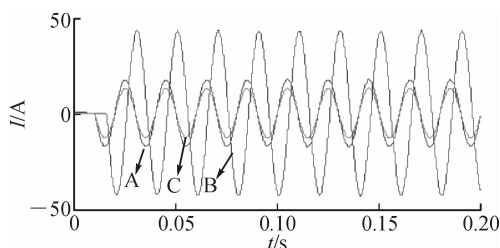


图11 电源不对称情况下合环电流波形图

Fig. 11 Transient current waveform in asymmetric power supply

由图11可知,即使在电源不对称环境下,基于 α 的复合开关投切策略对合环冲击电流同样具有抑制作用。

4 结语

文中基于戴维宁等值定理提出了变压器并列简化模型,并且在此模型的基础上推导了变压器并列暂态过程,发现了暂态冲击电流与并列点电压相位之间的关系。由于复合开关相较于机械开关具有快速精确导通及通态损耗小的特点,因此设计了基于过零检测电路和移相电路的控制模块,控制复合开关在并列点电压相位为 α 时进行合闸导通。最后

通过MATLAB仿真验证了该方法在系统对称及不对称情况下变压器并列时能有效的减小冲击电流,且其谐波影响较小。该冲击电流抑制方法成本较低,实现效果较好,在工程实践上具有一定的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 何昌雄,陈巍,唐军. 110 kV 变压器并列运行的环流分析[J]. 广西电力,2015,38(2):37-40.
HE Changxiong, CHEN Wei, TANG Jun. Circulation current analysis of 110 kV parallel operation transformers[J]. Guangxi Electric Power, 2015, 38(2):37-40.
- [2] 曹宏凯. 变压器并列运行条件的理论分析[J]. 甘肃冶金, 2009, 32(3):98-100.
CAO Hongkai. The theoretical analysis of the qualification of transformers in juxtaposed circulation[J]. Gansu Metallurgy, 2009, 32(3):98-100.
- [3] 郭镭,陈世国,徐伟,等. 变压器并列运行的循环电流控制策略[J]. 电力系统自动化,2010,34(4):75-79.
GUO Lei, CHEN Shiguo, LI Wui, et al. Circulating current control for paralleling transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(4):75-79.
- [4] 栾鹏飞,孙冬梅,张书梅. 变压器并列运行程序计算器的设计[J]. 通信电源技术,2015,32(3):53-56.
LUAN Pengfei, SUN Dongmei, ZHANG Shumei. Design of calculator program for transformer paralleling operation[J]. Telecom Power Technology, 2015, 32(3):53-56.
- [5] 张嶔,徐楠,方舟. 暂态电流对配网并列运行可靠性的影响[J]. 中国电机(技术版),2013(10):15-19.
ZHANG Di, XU Nan, FANG Zhou. The reliability impact of transient current to parallel operation of distribution network[J]. China Electric Power (Technology Edition), 2013 (10):15-19.
- [6] 颜湘莲,文远芳,邹积岩. 变压器绕组的暂态响应研究[J]. 高压电器,2001,37(5):33-36.
YAN Xianglian, WEN Yuanfang, ZOU Jiyan. Study on transient response characteristics of transformer windings[J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(5):33-36.
- [7] 刘磊,禹化然,金鑫. 合环潮流的暂态过程分析[J]. 机电工程,2008,25(10):74-76.
LIU Lei, YU Huaran, JIN Xin. Analysis of loop power flows transient process[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2008, 25(10):74-76.
- [8] 葛少云,李晓明. 基于戴维南等值的配电网合环冲击电流计算[J]. 电力系统及其自动化学报,2007,19(6):124-127.
GE Shaoyun, LI Xiaoming. Study on surge current due to closing loop in distribution network based on thevenin's equivalent[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2007, 19(6):124-127.

- [9] 李晓柯,李祥发. 配电网合环冲击电流的暂态过程分析与仿真[J]. 电机工程,2010,27(5):67-70.
LI Xiaoke, LI Xiangfa. Transient analysis and simulation of surge current due to closing loop in distribution network[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2010, 27(5):67-70.
- [10] 甘国晓,王主丁,李瑞,等. 配电网合环冲击电流计算方法及其简化计算公式[J]. 电力系统自动化,2014,38(20):115-120.
GAN Guoxiao, WANG Zhuding, LI Rui, et al. Methods and simplified formulas for calculating surge currents from loop closing in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(20):115-120.
- [11] 邱晓燕,刘天琪. 电力系统分析的计算机算法[M]. 北京:中国电力出版社,2009.
QIU Xiaoyan, LIU Tianqi. The computerized algorithm of electric power system analysis[M]. Beijing:China Electric Power Press, 2009.
- [12] 王毅. 复合开关在无功补偿中的应用[D]. 山东:山东大学,2011.
WANG Yi. Application of compound switch in reactive power compensation[D]. Shandong:Shandong University, 2011.
- [13] WU J C, JOU J C, WU K D, et al. Hybrid switch to suppress the inrush current of AC power capacitor[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1):506-511.
- [14] 魏孟刚,李鹏,何砚德,等. 复合开关投切无功补偿电容器的研究[J]. 电力电子技术,2013,47(8):96-98.
WEI Menggang, LI Peng, HE Yande, et al. Study of compound switch for reactive compensation capacitor switching[J]. Power Electronics, 2013, 47(8):96-98.
- [15] 张绍通,杨伟杰,周志军,等. 复合开关在低压无功补偿装置中的应用分析[J]. 电力电容器与无功补偿,2014,35(3):10-13.
ZHANG Shaotong, YANG Weijie, ZHOU Zhijun, et al. Application analysis of composite switch on low voltage reactive power[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(3):10-13.
- [16] 孔庆耀. 10 kV 配电网合环操作研究[D]. 广东:华南理工大学,2013.
KONG Qingyao. Research on loop closing operation for 10 kV distribution network[D]. Guangdong:South China University of Technology, 2013.
- [17] 曹亮. 中压配电网合环调度运行分析的研究[D]. 北京:华北电力大学,2007.
CAO Liang. The research on closing loop scheduling and operation analysis for MV distribution network[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2007.
- [18] 陈思宇,李雅洁,赵立. 基于复合开关的无功补偿系统的谐波分析[J]. 华北电力大学学报,2013,40(2):55-58.
CHEN Siyu, LI Yajie, ZHAO Li. Based on the compound switch for reactive power compensation harmony analysis and management system[J]. Journal of North China Electric Power University, 2013, 40(2):55-58.
- [19] 胡友强. 电力系统谐波测试分析机理与治理技术研究[D]. 重庆:重庆大学,2004.
HU Youqiang. Research on testing analytic mechanism and controlling technology of harmonic wave in power system[D]. Chongqing:Chongqing University, 2004.
- 饶强(1983—),男,工程师,从事于配电网运行维护、新技术新产品开发等方面的工作。
- 王兢(1985—),男,工程师,主要从事于配电网运维检修管理等方面的工作。
- 张艳妍(1977—),女,工程师,主要从事于配电自动化、分布式电源工作、电能质量及定制电力等方面的工作。
- 常乾坤(1985—),男,工程师,博士研究生,主要从事大功率电力电子变流器控制技术、感应电机无速度传感器控制技术等方面的研究工作。
- 徐梦佳(1991—),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定与控制、高压直流输电。
- 王渝红(1971—),女,教授,硕士生导师,主要研究方向为新能源接入系统、电力系统稳定与控制、高压直流输电。
- 魏亮(1990—),男,硕士研究生,研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制。
- 汤华(1992—),男,硕士研究生,研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制。