

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.02.026

选相精度对容性关合涌流幅值影响的数值仿真分析

曹先平¹, 刘 波², 陈轩恕², 兰贞波², 李伟林¹, 王 爽¹, 李 锐¹

(1. 云南电网公司昭通供电局, 云南 昭通 657000; 2. 国网电力科学研究院, 武汉 430074)

摘要: 文章研究了真空断路器相控精度与容性关合涌流幅值及频率的数值关系。并基于PSCAD仿真模型, 采用最小二乘拟合的方法, 从工程应用角度给出了数值表达式。讨论了真空断路器容性分断不考虑重击穿条件下时断口过电压及电容器过电压情况; 给出了真空断路器容性投切选相精度控制区间; 提出了真空断路器容性关合角度应控制在超前目标合闸角角度区间内的观点。

关键词: 真空断路器; 选相精度; 容性关合; 涌流

Numerical Simulation Analysis of the Impact of Phase-control Accuracy to Capacitive Closing Inrush Current Magnitude

CAO Xianping¹, LIU Bo², CHEN Xuanshu², LAN Zhenbo², LI Weilin¹, WANG Shuang¹, LI Rui¹

(1. Zhaotong Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Company, Yunnan Zhaotong 657000, China;

2. State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: This paper studies the numerical relationship between vacuum circuit breaker (VCB) phase-control accuracy and the amplitude as well as frequency of capacitive closing inrush current. And the least squares fitting method is applied to present the numerical expression which based on the models of PSCAD from the point of engineering application. In this paper, the situation of fracture overvoltage and capacitor overvoltage on the condition of VCB capacitive interruption without considering re-strike is proposed and the area of phase-control accuracy of vacuum circuit breaker capacitive switching is provided. The point that VCB phase-control degree should be limited in the area prior to the closing target point is suggested.

Key words: VCB; phase-control accuracy; capacitive closing; inrush current

0 引言

在电力系统无功补偿过程中, 需频繁投切容性负载。据统计, 真空开关应用于电容器组投切操作每年可达 300~700 次, 即平均每天有 1~2 次的容性投切操作^[1-6]。真空灭弧室具有上万次的机械动作寿命, 真空灭弧室在开关运行过程中触头无需维护, 且真空灭弧室受环境影响小, 对环境无任何污染。基于以上优势, 真空灭弧室特别适用于无功补偿领域^[6-9]。

但真空灭弧室用于电容器组投入时存在涌流严重的问题, 涌流的频率较高, 可达几百到几千赫兹, 幅值比电容器正常工作电流大几倍至几十倍^[10-15]。

根据 IEC 标准, 关合背靠背电容器组实验所需的涌流幅值为 20 kA, 频率为 4 250 Hz; 其衰减很快且持续时间很短, 一般小于 20 ms。

为解决容性关合涌流问题, 目前常用的方法有通过串联涌流限流器来降低高频合闸涌流幅值, 从而减少了涌流对真空开关触头的破坏。但该方法增加了系统能耗且降低了系统无功补偿效率。采用动态涌流控制技术, 系统复杂而且成本较高^[15-21]。而采用相控技术, 在电源电压过零时刻合闸, 所产生的涌流最小。利用现有的真空开关相控合闸技术能有效减小涌流, 同时降低容性分断重击穿概率^[7]。

近年来, 国内外学者们提出了各种选相控制策略应用于断路器投切领域。其中, 以西安交大及大连理工为代表的国内高校最早在容性负载选相投切领域做了大量研究工作, 提出了针对特定负载及

系统接线方式的选相控制策略。在容性关合方面, 大连理工给出了选相关合角度对涌流幅值影响的定性分析, 但没有研究选相精度对涌流幅值影响的数值关系。

笔者从工程应用角度, 结合 PSCAD 仿真模型, 对真空断路器相控精度与容性关合涌流幅值及频率的数值关系做了定量研究, 采用最小二乘拟合算法给出了相控精度与容性关合涌流幅值的近似线性化关系。结合仿真结果, 提出了真空断路器容性关合角度应控制在超前目标合闸角角度区间内的观点。

1 容性关合涌流分析

计算涌流的等值电路图见图 1, L_s 为无功补偿回路线路等值电感, C 为电容器等值容值, CB 为真空断路器, G 为等效电源。

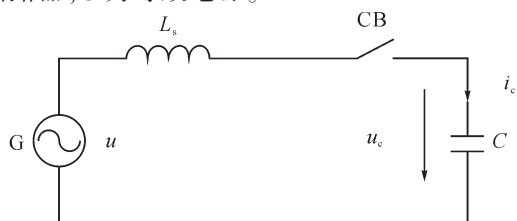


图 1 电容投切等值电路图

Fig. 1 Equivalent circuit of capacitor switching
设电源电压为

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi). \quad (1)$$

对图 1 可列出 CB 关合时的电路方程为

$$L_s C \frac{d^2 u_c}{dt^2} + u_c = U_m \sin(\omega t + \varphi). \quad (2)$$

解式(2)得

$$u_c = U_m \sin(\omega t + \varphi) - \frac{1}{\omega C} + a_1 \cos \omega_0 t + a_2 \sin \omega_0 t. \quad (3)$$

式(2)的初始条件为:

1) 关合前, 线路有残余电压 U_0 , 则 $t=0$ 时 $U_c = U_0$;

2) 因为线路有电感, 电流不能突变, 因此 $t=0$ 时 $i_c = 0$ 。

将初始条件代入式(3), 可得积分常数 a_1 与 a_2 , 其中 $\omega_0 = 1/(2\pi\sqrt{L_s C})$ 。解得 $a_1 = U_0 - U_m \sin \varphi$; $a_2 = \frac{-\omega U_m \cos \varphi}{\omega_0}$ 。

则式(3)可以化为

$$u_c = U_m \sin(\omega t + \varphi) - \frac{1}{\omega C} + (U_0 - U_m) \sin \varphi \cos \omega_0 t - \frac{\omega U_m \cos \varphi}{\omega_0} \sin \omega_0 t. \quad (4)$$

关合时的涌流为

$$i_c = U_m \cos(\omega t + \varphi) - \frac{\omega C}{1 - L_s C \omega^2} - \omega_0 C (U_0 - U_m) \times \sin \varphi \sin \omega_0 t - \omega C U_m \cos \varphi \cos \omega_0 t. \quad (5)$$

通常电容器组都接有放电电阻或放电线圈, 断路器关合时, 电容上的残余电压早已放完, 则 $U_0 = 0$, 并考虑涌流衰减很大(即 $\omega_0 \gg \omega$), 故可能出现最大的涌流峰值为

$$I_{cm} = \frac{U_m}{\sqrt{L_s} / C} = U_m \omega_0 C. \quad (6)$$

由式(4)、(5)可知, 容性关合电容电压及电流与选相关合角度关系复杂, 且高频涌流频率与电路参数有关而与关合角度无关。

2 仿真分析

2.1 容性关合数据

以下为容性关合再不考虑预击穿条件下的关合涌流与选相精度之间关系的仿真研究, 见图 2。仿真参数设置: 电容值 $10 \mu\text{F}$, 理想交流电压源有效值 126 kV , 线路电阻为 0.1Ω , 电感为 0.01 H 。

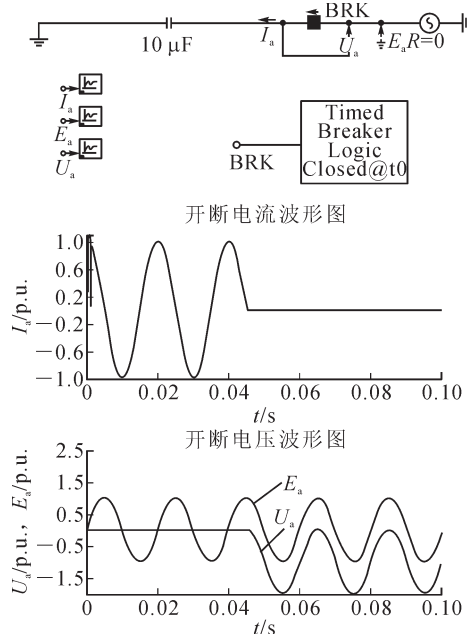


图 2 PSCAD 仿真界面(容性关合)

Fig. 2 PSCAD simulation interface (capacitive closing)

以电压过零点为参考点(第 30 ms, 此时工频半波基数次过零, 且定义此过零点为负向过零), 设为 0° , 以 1.8° 为步长(即 0.1 ms 的时间步长)。涌流频率以基频 50 Hz 为基准, 涌流幅值以电路稳定后额定电流幅值为基准。其中“-”表示超前参考零点。

理想关合角度附近角度关合时的涌流频率及涌流幅值数据见表 1。关合角度与涌流幅值间的关系图见图 3。

表1 关合窗口与涌流数据(工频半波奇次过零点为参考点)

参数	数值								
角度/(°)	0.0	-1.8	-3.6	-5.4	-7.2	-9.0	-10.8	-12.6	-14.4
涌流频率/p.u.	10	10	10	10	10	10	10	10	10
涌流幅值/p.u.	1.57	1.61	1.68	1.79	1.92	2.05	2.19	2.33	2.47
角度/(°)	-16.2	-18.0	-19.8	-21.6	-23.4	-25.2	-27.0	-28.8	-30.6
涌流频率/p.u.	10	10	10	10	10	10	10	10	10
涌流幅值/p.u.	2.60	2.73	2.89	3.02	3.16	3.29	3.41	3.55	3.68
角度/(°)	-32.4	-34.2	-36.0	-37.8	1.8	3.6	5.4	7.2	9.0
涌流频率/p.u.	10	10	10	10	10	10	10	10	10
涌流幅值/p.u.	3.79	3.93	4.16	4.37	1.60	1.68	1.82	2.00	2.19
角度/(°)	10.8	12.6	14.4	16.2	18.0	19.8	21.6	23.4	25.2
涌流频率/p.u.	10	10	10	10	10	10	10	10	10
涌流幅值/p.u.	2.38	2.60	2.81	3.04	3.25	3.47	3.68	3.90	4.11
角度/(°)	27.0	28.8	30.6	32.4	34.2	36.0	37.8	-90.0	90.0
涌流频率/p.u.	10	10	10	10	10	10	10	10	10
涌流幅值/p.u.	4.31	4.53	4.72	4.93	5.11	5.31	5.49	7.96	7.98

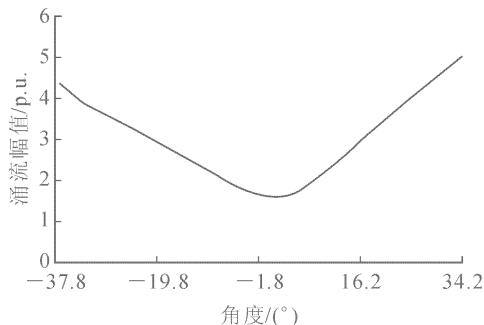
图3 关合窗口与涌流幅值间的关系曲线
(工频半波奇次过零点为参考点)

Fig. 3 Relation between closing window and inrush current amplitude(reference as the point of frequency half wave odd times crossing zero)

由图2可见,曲线形状接近二次函数图像,且对称轴左右两边图像近似直线,固考虑对数据进行二次拟合与线性拟合。将参考零点记为 θ_0 ,将可变误差角度记为 $\Delta\theta$ 。将角度即数据范围为 $[\theta_0-\Delta\theta, \theta_0+\Delta\theta]$ 与涌流幅值进行二次拟合得到 $y=0.002\ 290\ 3x^2+0.015\ 75x+1.999\ 5$ 。其中 x 表示角度, y 表示涌流幅值。将负误差角度即数据范围为 $[\theta_0-\Delta\theta, \theta_0]$ 与涌流幅值进行一次拟合得到 $y=-0.074\ 487x+1.419$ (即每0.1 ms幅值增加0.134 p.u., $0.074\ 487\times 1.8=0.134$)。

将正误差角度即数据范围为 $[\theta_0, \theta_0+\Delta\theta]$ 与涌流幅值进行一次拟合得到 $y=0.111\ 17x+1.285\ 2$ (即每0.1 ms幅值增加0.2 p.u., $0.111\ 17\times 1.8=0.20$)。

为研究以半波偶数次过零(定义此过零点为正向过零)为参考零点时涌流幅值的变化情况调整仿

真参数,以电压过零点为参考点(第40 ms,此时工频半波偶数次过零),设为 0° ,以 1.8° 为步长(即0.1 ms的时间步长)。涌流频率以基频50 Hz为基准,涌流幅值以电路稳定后额定电流幅值为基准。其中“-”表示超前参考零点。

理想关合角度附近角度关合时的涌流频率及涌流幅值数据见表2。关合角度与涌流幅值间的关系图见图4。

将负误差角度与涌流幅值进行一次拟合得到 $y=-0.074\ 697x+1.419$ (即每0.1 ms幅值增加0.134 p.u.)。

将正误差角度与涌流幅值进行一次拟合得到 $y=0.112\ 11x+1.285\ 2$ (即每0.1 ms幅值增加0.2 p.u.)。

由图2和图3及数据拟合结果可知,涌流幅值的变化情况与电压过零方向有关。由表1及表2数据可知,涌流频率与选相精度无关。

结论:容性关合涌流频率与关合窗口(选相精度)没有关系,涌流幅值与关合窗口有关,且涌流幅值与选相精度正向相关,近似呈线性关系。且负向偏差涌流幅值陡度小于正向偏差时的幅值陡度。即容性关合宜将合闸角控制在目标合闸角超前区间内。

2.2 容性关合过电压数据

为研究选相精度与关合电容过电压的变化情况调整仿真参数,以电压过零点为参考点(第30 ms及第40 ms),设为 0° ,以 9° 为步长(即0.5 ms的时间步长),以线路额定电压为过电压基值。理想关合角度附近角度关合时电容过电压数据见表3、4。关合角度与电容过电压间的关系图见图5、6。

表2 关合窗口与涌流数据(工频半波偶次过零点为参考点)

Table 2 Data of closing window and inrush current(reference as the point of frequency half wave even times crossing zero)

参数	数值								
角度/(°)	0.0	-1.8	-3.6	-5.4	-7.2	-9.0	-10.8	-12.6	-14.4
涌流频率/p.u.	10	10	10	10	10	10	10	10	10
涌流幅值/p.u.	1.57	1.61	1.69	1.79	1.91	2.05	2.18	2.32	2.46
角度/(°)	-16.2	-18.0	-19.8	-21.6	-23.4	-25.2	-27.0	-28.8	-30.6
涌流频率/p.u.	10	10	10	10	10	10	10	10	10
涌流幅值/p.u.	2.60	2.74	2.87	3.01	3.14	3.28	3.41	3.52	3.65
角度/(°)	-32.4	-34.2	-36.0	-37.8	1.8	3.6	5.4	7.2	9.0
涌流频率/p.u.	10	10	10	10	10	10	10	10	10
涌流幅值/p.u.	3.77	3.95	4.17	4.37	1.60	1.68	1.82	2.00	2.18
角度/(°)	10.8	12.6	14.4	16.2	18.0	19.8	21.6	23.4	25.2
涌流频率/p.u.	10	10	10	10	10	10	10	10	10
涌流幅值/p.u.	2.38	2.59	2.81	3.02	3.24	3.46	3.67	3.89	4.09
角度/(°)	27.0	28.8	30.6	32.4	34.2	36.0	37.8	-90.0	90.0
涌流频率/p.u.	10	10	10	10	10	10	10	10	10
涌流幅值/p.u.	4.31	4.51	4.72	4.91	5.11	5.29	5.49	7.96	7.98

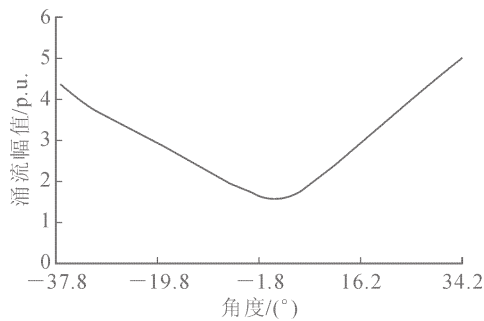


图4 关合窗口与涌流幅值间的关系曲线

(工频半波偶次过零点为参考点)

Fig. 4 Relation between closing window and inrush current amplitude(reference as the point of frequency half wave even times crossing zero)

表3 关合窗口与电容过电压数据

(工频半波奇次过零点为参考点)

Table 3 Data of closing window and capacitor over-voltage(reference as the point of frequency half wave odd times crossing zero)

参数	数值						
角度/(°)	0	-9	-18	-27	-36	-45	-54
过电压/p.u.	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.13
角度/(°)	-63	-72	-81	-90	9	18	27
过电压/p.u.	1.29	1.42	1.51	1.57	1.00	1.00	1.09
角度/(°)	36	45	54	63	72	81	90
过电压/p.u.	1.15	1.30	1.42	1.52	1.57	1.57	1.57

由以上数据可知选相关合窗口对电容过电压

表4 关合窗口与电容过电压数据

(工频半波偶次过零点为参考点)

Table 4 Closing window and capacitor over-voltage (reference as the point of frequency half wave even times crossing zero)

参数	数值						
角度/(°)	0	-9	-18	-27	-36	-45	-54
过电压/p.u.	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.13
角度/(°)	-63	-72	-81	-90	9	18	27
过电压/p.u.	1.29	1.42	1.51	1.57	1.00	1.03	1.09
角度/(°)	36	45	54	63	72	81	90
过电压/p.u.	1.15	1.30	1.43	1.52	1.57	1.57	1.57

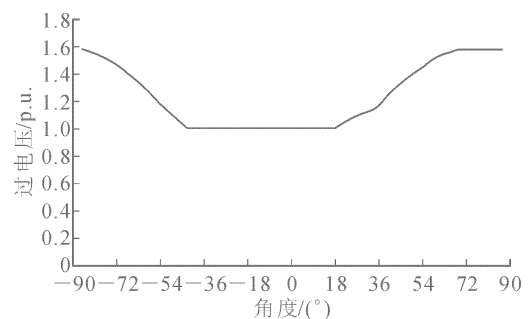


图5 关合窗口与电容过电压之间的关系(工频半波奇次过零点为参考点)

Fig. 5 Relations between closing window and capacitor over-voltage(reference as the point of frequency half wave odd times crossing zero)

有影响,当选相精度控制在(-45°~18°)间即-2.5~1 ms

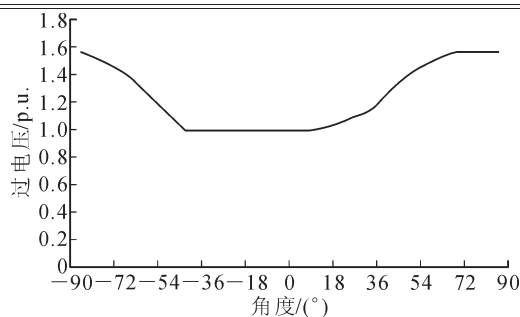


图6 关合窗口与电容过电压之间的关系
(工频半波偶次过零点为参考点)

Fig. 6 Relations between closing window and capacitor over-voltage(reference as the point of frequency half wave even times crossing zero)

间)时电容过电压可以限制在1 p.u.之内。

结论:容性关合宜将合闸角控制在目标合闸角超前区间内,这样能有效地限制过电压。

3 结语

不考虑断口预击穿条件下容性关合涌流频率与关合窗口(选相精度)没有关系,涌流幅值与关合窗口有关,且涌流幅值与选相精度正向相关,近似呈线性关系。当关合窗口为 $[\theta_0 - \Delta\theta, \theta_0]$ 时选相角每偏差0.1 ms涌流幅值增加0.134 p.u.,当关合窗口为 $[\theta_0, \theta_0 + \Delta\theta]$ 时选相角每偏差0.1 ms涌流幅值增加0.2 p.u.。即负向偏差涌流幅值陡度小于正向偏差时的幅值陡度。且当选相精度控制在 $(-45^\circ \sim 18^\circ)$ 间(即 $-2.5 \sim 1$ ms间)时电容过电压可以限制在1 p.u.之内。即容性关合宜将合闸角控制在目标合闸角超前区间 $[\theta_0 - \Delta\theta, \theta_0]$ 内。

参考文献:

- [1] 段雄英,邹积岩,方春恩,等. 相控真空开关同步关合电容器组控制策略及其实现[J]. 大连理工大学学报,2003,43(4):457-460.
DUAN Xiongying,ZOU Jiyan,FANG Chun'en,et al. Synchronized control tactics of phasing vacuum switches when closing capacitor banks[J]. Journal of Dalian University of Technology,2003,43(4):457-460.
- [2] 丁富华,段雄英,邹积岩. 基于同步真空断路器的智能无功补偿装置[J]. 中国电机工程学报,2005,25(6):30-35.
DING Fuhua,DUAN Xiongying,ZOU Jiyan. An intelligent reactive power compensator based on synchronous vacuum circuit breaker[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(6):30-35.
- [3] 方春恩,邹积岩,丛吉远,等. 基于DSP的无功补偿电容器组同步投切装置[J]. 高压电器,2003,39(6):21-23.
FANG Chun'en,ZOU Jiyan,CONG Jiyuan,et al. Synchronous switching device based on dsp for reactive power compensation capacitor banks[J]. High Voltage Apparatus,2003,39(6):21-23.
- [4] 邹积岩,丛吉远,董恩源. 真空开关的电子操动与同步开关技术[J]. 电工技术杂志,2001(4):30-33.
ZOU Jiyan,CONG Jiyuan,DONG Enyuan. Electronic actuator and synchronous switch technology for vacuum circuit breaker[J]. Electrotechnical Journal,2001(4):30-33.
- [5] 方春恩,王佳颖,邹积岩. 并联电容器组同步关合最佳目标相位的确定[J]. 电工技术学报,2006,21(1):24-27.
FANG Chun'en,WANG Jiaying,ZOU Jiyan. The investigation on optimal making phase for synchronous closing shunt capacitor banks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2006,21(1):24-27.
- [6] 淡淑恒,王季梅,阎静,等. 提高真空断路器容性开断性能方法的研究[J]. 中国电力,1999,32(12):71-74.
DAN Shuheng,WANG Jimei,YAN Jing,et al. Survey on the method of improving the capacitance breaking capability of vacuum circuit breakers[J]. Electric Power,1999,32(12):71-74.
- [7] RWETAL A. Synchronous closing control for shunt capacitors[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems,1985,104(9):2619.
- [8] DMETAL D. Magnification of transient voltage in multivoltage-level, shunt capacitor-compensated, circuits[J]. IEEE Trans. on PWD,1992,7(2):664.
- [9] DELFINO B,FORNARI F,GEMME C,et al. Power quality improvement in transmission and distribution networks via synchronous switching[J]. Transmission and Distribution Conference and Exposition,2001,19(28):367-372.
- [10] 邓焕仁. 采用同步分、合闸以降低操作过电压[J]. 华中电力,1992,5(5):92-95.
DENG Huanren. Synchronous operation of opening and closing to reduce over-voltage[J]. Central China Electric Power,1992,5(5):92-95.
- [11] 何妍,陈轩恕,刘飞,等. 智能真空开关投切不同负载控制策略研究[J]. 高压电器,2011,47(10):1-6.
HE Yan,CHEN Xuanshu,LIU Fei,et al. Research on intelligent vacuum breaker control strategy in switching different load[J]. High Voltage Apparatus,2011,47(10):1-6.
- [12] 黄道春,阮江军,吴高波,等. 模块化多断口真空断路器电位和电场分布研究[J]. 高电压技术,2011,37(1):124-130.
HUANG Daochun,RUAN Jiangjun,WU Gaobo,et al. Potential and electric field distributions of modular multi-break vacuum circuit breaker[J]. High Voltage Engineering,2011,37(1):124-130.
- [13] 廖敏夫,邹积岩,段雄英. 基于永磁操动机构的光控模块式多断口真空断路器技术[J]. 高压电器,2004,40(1):40-42.
LIAO Minfu,ZOU Jiyan,DUAN Xiongying. Vacuum circuit

- breaker with multi breaks based on permanent magnetic actuator with optic-controlled module[J]. High Voltage Apparatus, 2004, 40(1): 40-42.
- [14] 尹婷, 陈轩恕, 杜砚, 等. 采用紧耦合电抗器的大容量高压断路器设计[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1577-1582. YIN Ting, CHEN Xuanshu, DU Yan, et al. Design of large-capacity high-voltage breakers using tightly-coupled reactor[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1577-1582.
- [15] 黄道春, 阮江军, 吴高波, 等. 具有串并联结构的模块化多断口真空断路器静态电压分布特性[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 181-186. HUANG Daochun, RUAN Jiangjun, WU Gaobo, et al. Study on static and dynamic voltage distribution characteristics of modularized multi-break vacuum circuit breaker with series and parallel configuration[J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 181-186.
- [16] 杜砚, 陈轩恕, 刘飞, 等. 用于并联断路器的高耦合度分裂电抗器设计[J]. 高电压技术, 2009, 35(12): 2870-2875. DU Yan, CHEN Xuanshu, LIU Fei, et al. Design of coupled reactors used for parallel circuit breakers[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(12): 2870-2875.
- [17] 陈金祥, 董恩源, 邹积岩. 具有串联补偿作用的新型故障限流器(FCL)的研究[J]. 电工技术学报, 2001, 16(1): 48-51. CHEN Jinxiang, DONG Enyuan, ZOU Jiyang. Study of a new fault current limiter (FCL) with series compensation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(1): 48-51.
- [18] 董力, 李庆民, 刘卫东, 等. 两次电流转移型短路电流限制器的研究[J]. 电工技术学报, 2004, 19(3): 21-24. DONG Li, LI Qingmin, LIU Weidong, et al. Investigation of a double current-transferring type short circuit current limiter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(3): 21-24.
- [19] 孙一航, 武建文, 廉世军, 等. 结合经验模态分解能量总量的断路器振动信号特征向量提取[J]. 电工技术学报, 2014, 29(3): 228-236. SUN Yihang, WU Jianwen, LIAN Shijun, et al. Extraction of vibration signal feature vector of circuit breaker based on empirical mode decomposition amount of energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(3): 228-236.
- [20] 徐国顺, 江壮贤, 庄劲武, 等. 新型真空直流限流断路器设计及其介电恢复特性[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 171-177. XU Guoshun, JIANG Zhuangxian, ZHUANG Jinwu, et al. A new DC vacuum current limiting circuit breaker and its dielectric recovery characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 171-177.
- [21] 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.

曹先平(1974—), 男, 工程师, 主要从事电气工程设计、施工、配网管理、水电工程运行与建设等工作。

刘波(1987—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为高压智能电器及电力电子技术。

兰贞波(1988—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究领域为高压绝缘技术及电磁场数值计算(通讯作者)。

(上接第 159 页)

- 择[J]. 电力电子技术, 2007, 41(2): 93-95. TONG Xiangqian, JIAO Yanying, SHEN Wei. Selection of filter inductance in static synchronous compensator[J]. Power Electronics, 2007, 41(2): 93-95.
- [17] 易映萍, 浣喜明, 蔡子亮, 等. 单相高频 PWM 整流逆变能量回馈控制方法的研究[J]. 电气应用, 2005, 24(10): 92-94. YI Yingping, HUAN Ximing, CAI Ziliang, et al. Study on

the control method of single-phase high-frequency PWM rectifier/inverter energy feedback[J]. Electrotechnical Application, 2005, 24(10): 92-94.

- [18] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.

杜严行(1984—), 男, 工学硕士, 工程师, 研究方向为电力系统自动化装置及电能质量新技术。