电力电容器的精准相控投切与过电压抑制

宫艳朝[1],杨海运[1],苗俊杰[2],郜志[1]
(1.国网河北省电力有限公司邯郸供电分公司,河北 邯郸 056035;
2.国网河北省电力有限公司,河北 石家庄 050011)

摘要:并联电容器组在配电网的应用过程中,可以有效提高电能输送的效率和质量,但由于电力电容器投切方式的某些不合理因素,也会因其产生过电压,从而影响到电网的稳定性。研究分析电力电容器投切暂态状态,对于合闸暂态,通过建立电力电容器组合闸并联时的单相等效电路,简化电力电容器投切暂态过程;对于分闸暂态,计算断路器触头在电力电容器投切状态下产生的恢复电压。由储能电容器、开关电源、功率驱动输出接口以及电流/电压传感器接口等硬件组成同步开关控制器,实现电力电容器的过电压保护。为验证该方法的应用性能,开展实验分析,在合闸和分闸两种状态下采用同步控制器对电力电容器展开投切测试,三相电压波动具有对称规律性,且幅值变化较为平稳,有效抑制了电力电容器的过电压峰值。实验测试结果表明,所提方法的投切稳定性高、过电压抑制效果好。

关键词:电力电容器;相控投切;暂态分析;同步控制器;过电压抑制
中图分类号:TM571 **文献标识码**:A **DOI**:10.19457/j.1001-2095.dqcd24396

Precise Phase-controlled Switching and Overvoltage Suppression of Power Capacitors

GONG Yanchao[1],YANG Haiyun[1],MIAO Junjie[2],GAO Zhi[1]
(1.*State Grid Hebei Electric Power Co.,Ltd. Handan Power Supply Branch*,*Handan* 056035,*Hebei*,*China*;
2.*State Grid Hebei Electric Power Co.,Ltd.*,*Shijiazhuang* 050011,*Hebei*,*China*)

Abstract: Parallel capacitor banks can effectively improve the efficiency and quality of power transmission in the application process of power distribution network. However,due to some unreasonable factors in the switching mode of power capacitors,it will also generate overvoltage,thus affecting the power grid. stability. The transient state of power capacitor switching was researched and analyzed. For the closing transient,by establishing a single-phase equivalent circuit when the power capacitor combination switches were connected in parallel,the power capacitor switching transient process was simplified. For the opening transient,the recovery voltage generated was calulated by the circuit breaker contact during the power capacitor switching state. The synchronous switch controller was composed of hardware such as energy storage capacitor,switching power supply,power drive output interface and current/voltage sensor interface to realize overvoltage protection of power capacitors. In order to verify the application performance of this method,experimental analysis was carried out. When the synchronous controller was used to perform switching tests on power capacitors in two states of closing and opening,the three-phase voltage fluctuations were symmetrical and regular,and the amplitude changes were relatively stable,the overvoltage peak of the power capacitor was effectively suppressed. The experimental test results show that the proposed method has high switching stability and good overvoltage suppression effect.

Key words: power capacitor;phase-controlled switching;transient analysis;synchronous controller;overvoltage suppress

在电力工业不断发展的背景下,多元化逐渐成为电力电子装置的发展方向,随着电力电容器的广泛应用,电力用户对电网供电质量提出了更高的要求。电力电容器具有容量大和成本低等优点,在电能质量领域中得到了广泛应用[1]。但是,由于电力电容器的投切过程容易出现过电压,在电力系统运行过程中属于较大的安全隐患,因此研究电力电容器相控投切与过电压抑制

基金项目:国网河北省电力有限公司科技项目(KJ2020-010)
作者简介:宫艳朝(1984—),男,硕士研究生,工程师,主要研究方向为变电运维检修技术,Email:hangong603@163.com

方法成为目前亟需解决的问题。

宋向征等人[2]构建了电容器在变电站中的合闸数学模型，将最小涌流作为目标，建立电力电容器相控投切策略，以此避免过电流的产生，该方法没有分析分闸状态下电力电容器产生的过电压，导致投切后电力电容器的电压和电流不稳定，存在投切稳定性差的问题。于群英等人[3]建立了电力电容器三相仿真模型，根据仿真模型获取电容器在运行过程中产生的不同过电压，根据分析结果设计过电压防护措施，该方法没有对电力电容器展开投切暂态分析，无法获取投切状态与过电压之间的关系，存在过电压抑制能力差的问题。Choi等人[4]提出了一种电力双电容器切换（dual-capacitor switching，DCS）电压失超保护系统。该系统使用电容器和开关，从高温超导（high temperature superconductor，HTS）磁体中快速提取能量。当发生淬火时，淬火保护系统依次激活4个金属氧化物半导体场效应晶体管开关，存储在磁铁中的能量由电容器提取到外部电阻器。为了验证所提出的双电容器切换失超保护系统的可行性，使用一个自感为3.3 mH的小型线圈对DCS系统进行了测试。实验结果表明，该磁体的能量提取速度快于使用传统转储电阻器的失超保护系统。但是，由于系统对电容、电感和4个电阻非常敏感，其参数控制难度较大。Luis等人[5]提出了一种级联H桥变换器的开关抑制方法。对以前的电力电容器的精准相控投切方法进行了进一步修改，以在其目标函数中考虑开关损耗。每次换相都会根据相电流和模块电压的比例进行惩罚，从而避免产生最大损耗，但允许低损耗换相。通过实验结果表明了该方法没有明显缺点，可以将电力电容器开关量减少14%。但是该方法忽略了对电力电容器过电压的抑制。Palanisamy等人[6]针对基于飞电容器（flying capacitor，FC）的四电平中点钳位（neutral point clamped，NPC）逆变器的电容电压平衡问题，提出了一种空间矢量脉宽调制（space vector pulse width modulation，SVPWM）控制方法。为确保电力电容器逆变器正常工作，所有开关设备以相同的方式分担电压应力。此外，还需要控制每个电容器上的电压，并保持在3倍的外加直流电压。该SVPWM方法利用冗余开关状态，用最近开关状态向量选择方法控制和平衡电容器两端的电压。

为了解决上述方法中存在的问题，提出电力电容器的精准相控投切与过电压抑制方法。该方法首先对合闸状态下和分闸状态下的电力电容器展开了投切暂态分析，获取投切状态与过电流之间的关系，根据分析结果设计同步控制器，在同步控制器中结合同步关合技术完成电力电容器的精准相控投切，抑制电力电容器中产生较高的过电压。

1　电力电容器投切暂态分析

分析电力电容器投切暂态，即合闸状态和分闸状态，为过电压的抑制提供相关依据。

1.1　合闸暂态分析

电力电容器组合闸并联时的单相等效电路图如图1所示。图中，K为理想开关；U_s为电源电压；C为电力电容器组在并联状态下对应的电容；R_s，L_s分别为电源内阻和电源内感；L为串联电抗器产生的电感[7]。

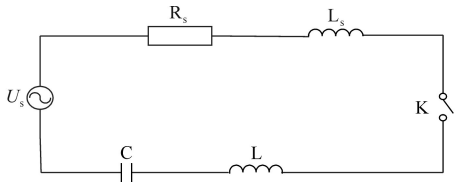


图1　单相等效电路图

Fig.1　Single-phase equivalent circuit diagram

用$u_s(t)$表示母线在电容器合闸状态下的电压，其计算公式如下：

$$u_s(t) = U_{sm}\sin(\omega t + \theta_s) \tag{1}$$

式中：U_{sm}为母线电压对应的峰值；ω为工频角频率；θ_s为电压在合闸瞬间的初相角。

不考虑电源在回路中的内阻，简化电力电容器投切暂态分析过程。用U_{cm}，I_{cm}表示合闸相角θ_c为90°时的电压幅值和合闸涌流，其计算公式如下：

$$\begin{cases} U_{cm} = |2U_{sm} - U_0| \\ I_{cm} = I_{sm}(1 + f_0/f) \end{cases} \tag{2}$$

式中：U_0为电容在开关K处于合闸状态下的电压；I_{sm}为电源电流对应的幅值；f_0为涌流振荡频率；f为工频频率，f=50 Hz。

分析式（2）可知，电力电容器在合闸状态下产生的电压U_{cm}与两倍的稳态相电压幅值相比，相对较低；随着涌流振荡频率的增大，电力电容器的合闸涌流I_{cm}不断增加，两者之间属于正比关系。

当合闸相角θ_c为0°时，U_{cm}，I_{cm}可通过下式计

算得到：

$$\begin{cases} U_{cm} = U_{sm}(1 + f_0) \\ I_{cm} = |2I_{sm} - I_0| \end{cases} \tag{3}$$

式中：I_0为电容在开关K处于合闸状态下的电流。

分析式(3)发现，当电力电容器的合闸角度为零时，此时电力电容器内产生较小的电流幅值和合闸电压。

综上所述，合闸涌流在电力电容器中对应的幅值一般都比合闸状态下电力电容器产生的过电压高，由此可知，在电力电容器中通过相控断路器合闸[8]，可以在母线电压过零点状态下抑制暂态过电压的产生。

1.2　分闸暂态分析

如果在分闸暂态状态下电力电容器没有出现电弧重燃的现象，电缆对地电容在电力电容器结构中与三线电路形成振荡回路[9]。振荡回路中存在的振荡电压会影响电力电容器的断路器端口。电力电容器的电容储能通常设定在一定范围内，没有电弧重燃现象下产生的自由振荡电压通常低于正常电压。

触头分离的条件是真空断路器在电力电容器中分闸，用U_{cm}=U_m表示电容C在电力电容器中对应的最大电压值。设$u_r(t)$为断路器触头在电力电容器投切状态下产生的恢复电压，不考虑电荷泄露时$u_r(t)$可通过下式计算得到：

$$u_r(t) = u_s(t) - U_m \tag{4}$$

2　同步开关控制器

根据电力电容器投切暂态分析结果设计同步开关控制器，实现电力电容器的精准相控投切，以此抑制过电压的产生。

同步开关控制器由储能电容器、开关电源、功率驱动输出接口以及电流/电压传感器接口等硬件构成，具体结构如图2所示。

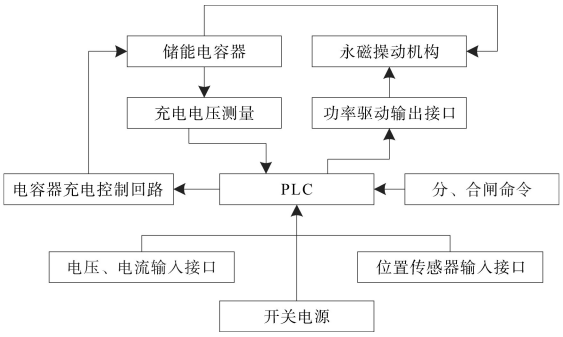


图2　同步控制器结构

Fig.2　Synchronous controller structure

1)PIC16F877由多通道A/D转换器、Flash程序存储器、EEPROM数据存储器构成，具有高性能的优点，将其作为同步控制器的微处理器，可以提高同步控制器在运行过程中的可靠性。

2)微处理器单元的主要功能是处理电流互感器和电压互感器产生的信号[10]。

3)在位置传感器中装置接近式感应辅助开关，该类开关具有无触点的特点，当开关操作面与感应元件之间的距离较近时，位置传感器会在第一时间产生电平信号，开关中存在的元件容易受到外界污秽的污染，同时容易受到电磁场的干扰[11]，为了避免上述问题，将其密封在金属管内，提高同步控制器的机械寿命和整体可靠性。

4)储能电容器在同步控制器中的主要功能是提供电能，确保合、分闸线圈的正常工作。

电力电容器的精准相控投切与过电压抑制方法结合同步关合技术在同步控制器中实现电力电容器的精准相控投切[12]，以此避免过电压的产生，同步关合流程如图3所示。

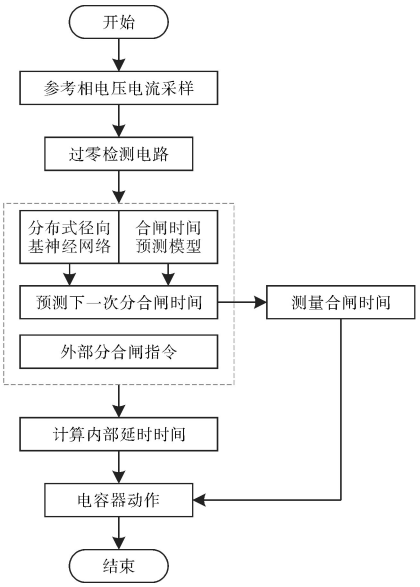


图3　同步关合流程图

Fig.3　Flowchart of synchronous closing

1)将合闸指令和分闸指令传送到控制系统中，过零检测电路此时开始工作，对参考电流和参考电压的相位展开检测；

2)利用同步控制器中的传感器采集电力电容器工作环境的温度数据以及系统电压数据，结合历史时间数据库中存在的数据与传感器获取的数据预测电力电容器下一次动作产生的延时时间；

3）将步骤2）计算到的延时时间传送到同步控制器PLC中，同步控制器产生投切指令[13]，并将指令传输到电力电容器系统中，完成同步关合控制；

4）在同步控制器的存储器中存入本次电力电容器的动作时间及相关数据，为电力电容器下一次动作产生的时延时间预测提供相关依据[14]。

为了使电力电容器实现同步关合，同步控制器的延时时间t_{di}需要满足下式：

$$t_{di} = n/2f_g - t_d + t_{opi} \tag{5}$$

式中：n为常数，其主要作用是使$t_{di}\geq 0$；t_d为电力电容器自身的延时时间，可根据操作电压和附近环境温度预测得到[15]；f_g为电网对应的频率；t_{opi}为三相电容器相对于参考相位点A_0的滞后时间。

三相电容器需要延长的时间分别为t_{dA}，t_{dB}，t_{dC}，其计算公式如下：

$$\begin{cases} t_{dA} = n/(2f_g) - t_d + 15T/36 \\ t_{dB} = n/(2f_g) - t_d + T/4 \\ t_{dC} = n/(2f_g) - t_d + T/12 \end{cases} \tag{6}$$

式中：T为电网的工作周期。

合闸指令传输到同步控制器后电力电容器完成动作所需时间[16]的计算公式如下：

$$t_i = \Delta t + t_{di} + t_{opi} \tag{7}$$

式中：Δt为同步控制器的反应时间。

计算同步控制器使电力电容器在电流过零点切除所需的延时时间t_{ai}：

$$t_{ai} = n/(2f_g) - t_d - t_{arc} + t_{opi} \tag{8}$$

式中：t_{arc}为电力电容器触头对应的息弧时间。

A，B，C三相电容器实现过零点切除所需的延时时间t'_{dA}，t'_{dB}，t'_{dC}可通过下述公式计算：

$$\begin{cases} t'_{dA} = n/(2f_g) - t_d - t_{arc} + T/2 \\ t'_{dB} = n/(2f_g) - t_d - t_{arc} + T/3 \\ t'_{dC} = n/(2f_g) - t_d - t_{arc} + T/6 \end{cases} \tag{9}$$

根据上述计算结果，获得分闸指令传输到同步控制器与电力电容器完成对应动作所需的时间t_i：

$$t_i = \Delta t + t_{ai} + t_{opi} + t_d \tag{10}$$

通过上述过程完成电力电容器的同步关合控制，在此基础上抑制过电压的产生。

3　实验与分析

为了验证电力电容器的精准相控投切与过电压抑制方法的整体有效性，需要对其展开测试，本次实验的测试环境如图4所示。示波器型号为YB43020B，该示波器具有校准信号采用晶振和高稳定度特性。

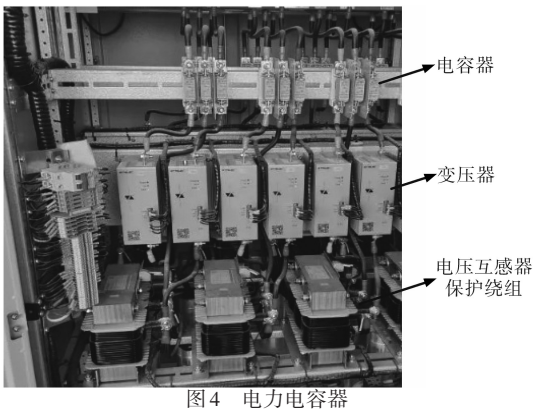


图4　电力电容器

Fig.4　Power capacitors

具体实验流程为采用研究提出的同步控制器对电力电容器展开投切测试，将时间间隔设置为5 min，记录电压和电流波形，如图5和图6所示。

由图5和图6可知，采用同步控制器对电力电容器展开投切测试时，三相电压较为平稳，且电流可在短时间内趋于稳定，通过电流录波和电压录波可知，采用同步控制器可提高电力电容器运行的稳定性[17]。

在上述测试环境中，现对比研究方法应用前、后两种情况下过电压的抑制效果，测试结果如表1所示。

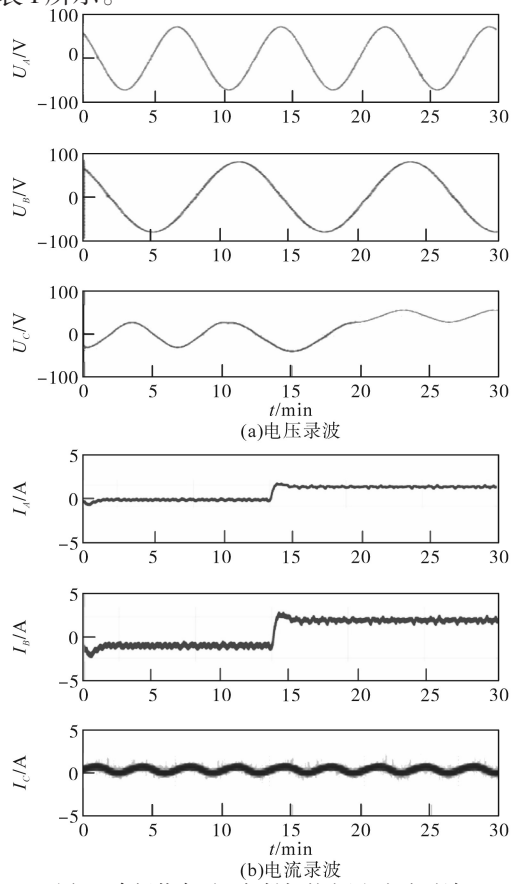
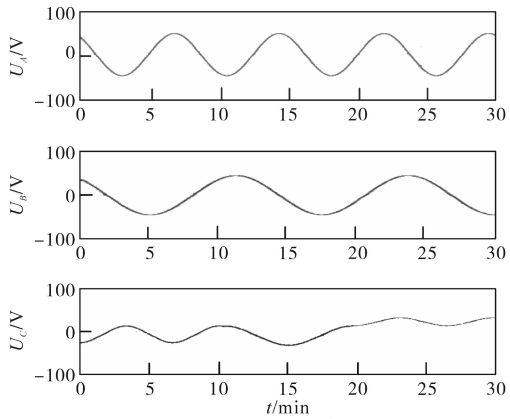
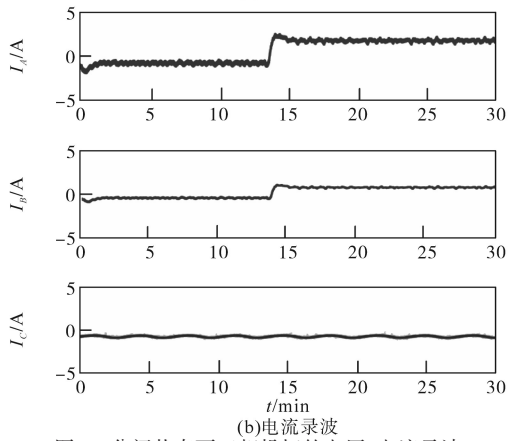


图5　合闸状态下三相投切的电压、电流录波

Fig.5　Voltage and current recording of three-phase switching under closed state



(a)电压录波



(b)电流录波

图6　分闸状态下三相投切的电压、电流录波

Fig.6　Voltage and current recording of three-phase switching under open state

表1　三相过电压测试结果

Tab.1　Three-phase overvoltage test results

时间/min	A相过电压峰值/V		B相过电压峰值/V		C相过电压峰值/V	
	应用后	应用前	应用后	应用前	应用后	应用前
5	127.6	178.5	111.5	168.7	134.5	183.3
10	125.7	179.4	113.4	166.5	136.3	189.1
15	128.4	179.9	112.7	169.2	135.8	187.6
20	124.3	176.8	116.9	168.3	135.5	185.4
25	122.1	178.2	117.2	167.7	134.9	186.3
30	125.4	179.3	118.1	165.9	134.7	182.7
35	127.6	178.4	115.5	165.4	133.6	184.9
40	126.9	176.9	114.7	166.8	135.3	185.5
45	128.1	177.5	116.2	163.5	132.9	187.2
50	123.7	174.6	117.3	167.2	135.7	188.6

由表1的数据可知，在电力电容器运行过程中，研究方法应用后的过电压峰值明显降低。这是因为电力电容器的精准相控投切与过电压抑制方法对电力电容器的投切暂态展开分析，根据分析结果设计同步控制器，控制电力电容器的闭合状态，以此抑制过电压的产生。通过上述测试表明，电力电容器的精准相控投切与电压抑制方法具有较强的过电压抑制能力[18]。

4　结论

电网中电力电容器组属于无功补偿设备，目前大部分电力电容器都是三相同时投切，在运行过程中这种投切方式会产生较大的过电压，降低了电力电容器的使用寿命，同时威胁着电力电容器的运行安全，因此，研究电力电容器相控投切与过电压抑制方法具有重要意义。目前电力电容器相控投切与过电压抑制方法存在投切稳定性差和过电压抑制能力差的问题，提出电力电容器的精准相控与投切过电压抑制方法，该方法首先对电力电容器展开了投切暂态分析，以此为依据设计同步控制器，实现过电压的抑制，可有效解决目前方法中存在的问题，为电力电容器的稳定、安全运行提供了保障。

参考文献

[1] 杨洪明，陈博文，王懂，等.局部阴影遮挡下太阳能电池-超级电容器件阵列建模及其缺失电流协同补偿方法[J].电力自动化设备，2021，41(6)：15-23.
YANG Hongming，CHEN Bowen，WANG Dong，et al. Modeling of solar cell-supercapacitor device array under local shadow and its cooperative compensation method of missing current[J]. Electric Power Automation Equipment，2021，41(6)：15-23.

[2] 宋向征，郭春林，杨洪旺，等. 220 kV变电站投切并联电容器组精准合闸策略[J].电力电容器与无功补偿，2021，42(1)：6-11.
SONG Xiangzheng，GUO Chunlin，YANG Hongwang，et al. Precise closing strategy on switching shunt capacitor bank in 220 kV substation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation，2021，42(1)：6-11.

[3] 于群英，赵春明，杨代勇，等. SF_6断路器投切66 kV干式并联电抗器过电压及抑制防护技术研究[J]. 高压电器，2020，56(5)：223-228.
YU Qunying，ZHAO Chunming，YANG Daiyong，et al. Study on the overvoltage and suppression protection technology of SF_6 circuit breaker switching 66 kV dry-type shunt reactor[J]. High Voltage Apparatus，2020，56(5)：223-228.

[4] CHOI Y，LEE W S，SONG S，et al. Optimal design and performance evaluation of dual-capacitor switching (DCS) quench protection system for superconducting magnet[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity，2020，30(4)：1-5.

[5] GALVÁN L，GÓMEZ PJ，GALVÁN E，et al. Optimization-based capacitor balancing method with customizable switching reduction for CHB converters[J]. Energies，2022，15(6):1.

[6] PALANISAMY R，SHANMUGASUNDARAM V，VIDYASAGAR S，et al. A SVPWM control strategy for capacitor voltage balancing of flying capacitor based 4-level NPC inverter[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology，2020，15(6)：

2639-2649.

[7] 张清河,王巨丰,徐宇恒,等.爆轰气流截断电弧及重燃抑制的仿真与试验研究[J].水电能源科学,2021,39(7):179-183.
ZHANG Qinghe, WANG Jufeng, XU Yuheng, et al. Simulation and experimental research on detonation airflow interrupting arc and reignition suppression[J]. Water Resources and Power, 2021,39(7):179-183.

[8] 杨会,宋航,肖夏.基于场路仿真的PCIe电磁干扰分析及优化设计[J].强激光与粒子束,2020,32(4):101-107.
YANG Hui, SONG Hang, XIAO Xia. PCIe electromagnetic interference analysis and optimization design based on co-simulation of field and circuit [J]. High Power Laser and Particle Beams,2020,32(4):101-107.

[9] 王硕,邹积岩,张立岩,等.混合型相控开关在地面自动过分相中的应用[J].电网技术,2020,44(3):1160-1167.
WANG Shuo, ZOU Jiyan, ZHANG Liyan, et al. Asymmetrical phase-controlled hybrid switching system applied to ground-switching auto-passing neutral section system[J]. Power System Technology,2020,44(3):1160-1167.

[10] 于铄航,荣相,杨帆,等.一种矿用相控开关短路电流过零点预测算法[J].工矿自动化,2020,46(6):103-107.
YU Shuohang, RONG Xiang, YANG Fan, et al. A zero-crossing point prediction algorithm of short-circuit current for mine-used phase-controlled switching[J]. Journal of Mine Automation, 2020,46(6):103-107.

[11] 海涛,时雨,陈永鉴,等.抑制电力电容投切消极影响的控制策略[J].桂林理工大学学报,2021,41(2):415-420.
HAI Tao, SHI Yu, CHEN Yongjian, et al. A control strategy to suppress negative influence of power capacitor switching[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2021, 41(2): 415-420.

[12] 郑茂然,王茂林,张静伟,等.基于零模涌流波形相似度的零差保护CT极性校验方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(21):101-108.
ZHENG Maoran, WANG Maolin, ZHANG Jingwei, et al. CT polarity checking method of zero-sequence differential protection based on the similarity of inrush[J]. Power System Protection and Control,2020,48(21):101-108.

[13] 张培夫,金能,章建玲,等.一种面向线路零序过流保护的防励磁涌流所致误动闭锁策略[J].中国电机工程学报,2020,40(23):7609-7622.
ZHANG Peifu, JIN Neng, ZHANG Jianling, et al. A line zero-sequence over current protection blocking strategy against mal-operation caused by inrush[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23):7609-7622.

[14] 何强,聂京凯,刘文宇,等.电力电容器辐射噪声预测的快速边界型等效源方法[J].振动与冲击,2020,39(24):32-38.
HE Qiang, NIE Jingkai, LIU Wenyu, et al. An efficient boundary-type equivalent source method for the prediction of noise radiated by power capacitors[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020,39(24):32-38.

[15] 张祖安,黄莹,朱学文,等.声压法与声强法测定电力电容器单元噪声试验研究[J].电力电容器与无功补偿,2020,41(1):112-117.
ZHANG Zuan, HUANG Ying, ZHU Xuewen, et al. Study on noise test of power capacitor by sound pressure and sound intensity method[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2020,41(1):112-117.

[16] 张晨萌,谢施君,谭思文,等.基于极化去极化电流法的电力电容器绝缘状态检测方法研究[J].高压电器,2020,56(6):296-301.
ZHANG Chenmeng, XIE Shijun, TAN Siwen, et al. Research on power capacitor insulation state detection based on polarization depolarization current method[J]. High Voltage Apparatus, 2020,56(6):296-301.

[17] 汪涛,虞晓阳,文继锋,等.模块化多电平柔性直流输电换流器子模块过电压保护[J].电力系统自动化,2020,44(21):107-115.
WANG Tao, YU Xiaoyang, WEN Jifeng, et al. Sub-module overvoltage protection of modular multilevel converter for flexible DC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020,44(21):107-115.

[18] 林军昌,石彬,哲东旭,等.大容量电力电容器过电压周期试验装置的研究[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(3):63-68.
LIN Junchang, SHI Bin, ZHE Dongxu, et al. Study on overvoltage cycle test device for large capacity power capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation,2021,42(3):63-68.

收稿日期:2022-05-25
修改稿日期:2022-06-10