

电缆电弧故障仿真及试验研究

电缆电弧故障的仿真和试验对研究有效、可靠的电弧故障检测方法有重要作用。首先对现有的电弧故障模型和特点进行了介绍,根据电缆物理结构特征,提出了适用于电缆电弧故障的仿真分析模型,并介绍了在PSCAD/EMTDC中的实现方法。同时,搭建电缆电弧故障物理试验平台,对电缆电弧故障进行了试验研究,总结了电缆电弧故障的特征,为研究电缆电弧故障检测方法奠定了重要理论和试验基础。

何婧宇¹ 张文海² 肖先勇¹/1.四川大学电气信息学院 2.国网四川省电力公司检修公司



何婧宇/硕士研究生

0 引言

地下电缆在城市中压配电系统中得到了大量应用,但由于电缆结构上的原因(存在绝缘层),电缆发生故障时(除外力破坏故障外),通常首先表现为电弧故障,此时可能导致停电,甚至引发爆炸、火灾等恶性事故^[1-4],因此需深入研究电缆电弧故障模型以提出准确的检测和定位方法。

针对电弧模型已有大量研究^[5-15],根据应用情况可分为三类:断路器电弧模型^[5-8]、电弧能量计算模型^[9-10]以及电弧故障模型^[11-15],如图1所示。本文主要针对电弧故障模型进行分析。电弧故障为一典型的动态过程,最为经典的电弧动态模型为Mayr和Cassie的电弧模型,其以能量平衡为基础进行推导,其后也相继提出了大量模型,包括在其基础上进行

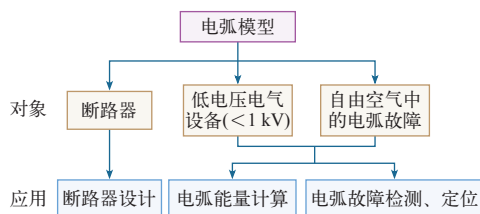


图1 根据用途的电弧模型分类

改进的各种模型,以及最为简化的矩形模型。

由于电缆结构的特殊性,针对电缆电弧特征也有一定研究,文献[16]对不同类型的电缆电弧故障电压特征进行了总结,文献[17]统计了电缆电弧故障的电压波形特征,然而并未对电缆电弧模型进行讨论。

本文在现有电弧故障模型研究的基础上,考虑电缆物理结构特征以及电缆电弧故障电压特征,总结了适用于电缆电弧故障仿真的模型,并明确了适用参数范围,最后搭建物理试验模型进一步分析了电缆电弧故障特征。

1 电弧故障模型

1.1 经典电弧故障模型

电弧是一种高温、高导电的游离气体^[5],其特征由电极材料、绝缘介质的性质和状态、电流幅值范围以及电弧长度等综合决定。

电弧故障模型可以直接理解为电弧电压与电流之间的动态关系描述。最为经典的电弧模型为Mayr和Cassie模型,针对模型的分析讨论已有大量文献^[5,7-8],在此不赘述。为简化分析,还经常用到简化电弧模型^[18],如式(1)所示

$$v_{\text{arc}}(t) = V_{\text{arc}} \cdot \text{sign}[i_f(t)] \quad (1)$$

式中, $v_{\text{arc}}(t)$ 为电弧电压; $i_f(t)$ 为电弧电流; V_{arc} 为电弧电压的幅值,为常数; $\text{sign}()$ 为符号函数,当 $i_f(t) > 0$ 时为1, $i_f(t) < 0$ 时为-1。可看出该种电弧模型即认为电弧电压为理想矩形波。

关键词/Keywords

电缆电弧 ·
PSCAD/EMTDC仿真 ·
电弧试验 ·
Kilicay电弧模型 ·

在近年的研究中, 基于电弧能量平衡理论并结合控制理论思想提出的Kilicay电弧模型^[15]应用最为广泛, 模型准确性在文献[14]中得到了证明, 并在多种电弧故障分析中得到了应用^[19-20], 模型将电弧物理意义与数学意义相结合, 电弧电导表达式为^[15]

$$\frac{dg(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} [G - g(t)] \quad (2)$$

式中, τ 为电弧时间常数; G 为静态电弧电导; g 为瞬时电弧电导, 并可表示为

$$R_{arc}(t) = \frac{1}{g(t)} \quad (3)$$

式中, R_{arc} 为电弧电阻。电弧静态电导 G 为电弧电流函数, 即

$$G(t) = \frac{|i_f(t)|}{u_{st}(t)} \quad (4)$$

式中, i_f 为电弧瞬时电流。如式(5)所示, u_{st} 为静态电弧电压

$$u_{st}(t) = u_0 + r_0 |i_f(t)| \quad (5)$$

式中, u_0 和 r_0 分别为电弧特征电压和特征电阻。由此可得出电弧动态模型完整表达式为

$$\frac{dg(t)}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{|i_f(t)|}{u_0 + r_0 |i_f(t)|} - g(t) \right) \quad (6)$$

式中, τ 、 u_0 和 r_0 为表征电弧的特征参数, 通常为常数, 通过这三个参数即可确定电弧特性。

1.2 电缆电弧故障模型

结合电缆的结构特点, 以及电缆故障的物理过程——通常由水树、电树发展形成击穿故障, 仅用电弧不足以准确描述其故障, 因此提出由恒定电阻串联电弧电阻的模型进行表示, 当串联电阻为0时, 即为纯电弧故障。电缆电弧故障模型如图2所示。

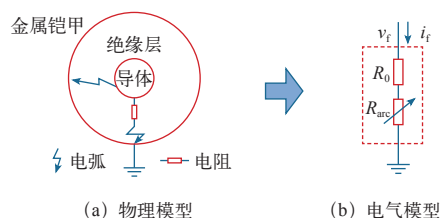


图2 电缆电弧故障模型

在数学上, 可将电缆故障模型表示为恒定电阻 R_0 与电弧电阻 R_{arc} 的串联, 如图2所示, 其中电弧电阻 R_{arc} 为动态电阻, 电缆故障模型可表示为

$$v_f(t) = i_f(t)R_0 + i_f(t)R_{arc} \quad (7)$$

式中, $v_f(t)$ 和 $i_f(t)$ 分别为故障电压和电流。

2 基于PSCAD/EMTDC的电弧仿真模型

PSCAD/EMTDC作为电力系统通用的电磁暂态仿真程序, 在电力系统中得到了大量应用, 为实现上节中介绍的电缆电弧故障模型, 其关键在于电弧电阻求解, 电弧电阻为故障电流的积分函数, 基于PSCAD强大的控制实现功能, 电缆电弧故障的仿真模型如图3所示, 仿真波形如图4所示。

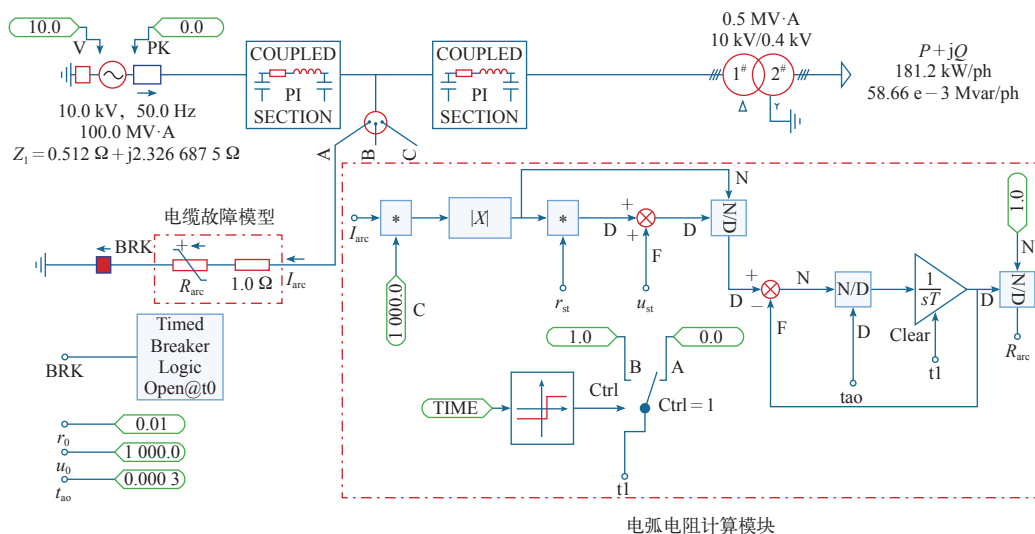


图3 PSCAD/EMTDC电缆电弧故障仿真模型

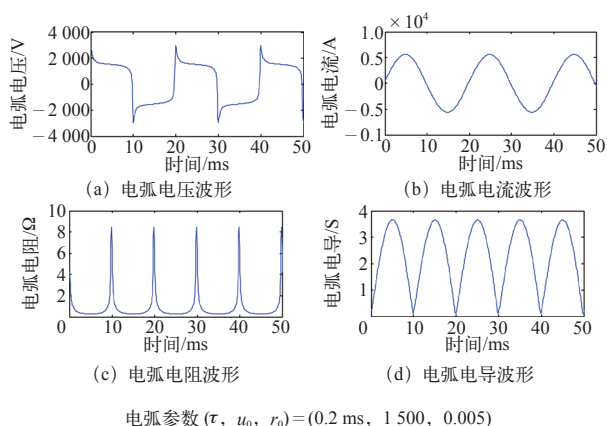


图4 电缆电弧故障仿真波形

在实际仿真中,最为关键的在于 (τ, u_0, r_0) 参数的设置,其直接影响了电缆电弧故障的特征,根据地下电缆电弧故障的试验数据以及电弧的经验数据综合分析^[16-17, 21],确定了 (τ, u_0, r_0) 参数的取值范围: τ 为0.2~0.4 ms, u_0 为300~4 000 V, r_0 为0.005~0.015 Ω 。

3 电缆电弧故障试验

3.1 试验平台

为进一步分析电缆电弧故障特征,本文在试验室搭建了物理试验模型进行数据实测分析。试验电路如图5所示,主要组成元件及参数:①电源为AC 220 V、50 Hz;②调压器为TSG2J-6;③试验变压器为YDQ-10/100;④电缆为YJV22-0.6/1 kV;⑤录波仪为横河DL 750;⑥高压探头为泰克P6015A;⑦电流互感器为元星TA25CL-1A/1mA,额定负载100 Ω ;⑧限流电阻为金属玻璃铀电阻器。需要说明的是,由于采用试验变压器,其不能承受较大电流,因此仅能做小电流电弧故障。测量对象包括:出线处电压、故障点电压以及回路电流。

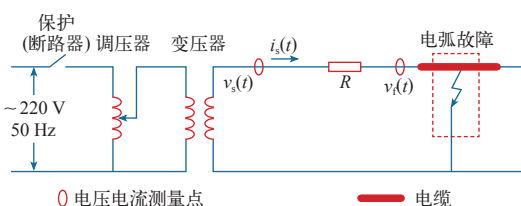


图5 电缆电弧故障试验原理接线图

由于选择电缆为三芯电缆,试验选择其中

一相,为保证形成电弧故障,因此用小刀在电缆绝缘层制造切痕,然后恢复电缆结构(在绝缘层外恢复金属铠甲),物理接线如图6所示。试验操作过程:①完成接线;②调节调压器升高输出电压,直到电缆击穿形成电弧故障;③维持该状态,直到形成金属性短路故障并维持一段时间;④最后调节调压器至零,并结束试验。

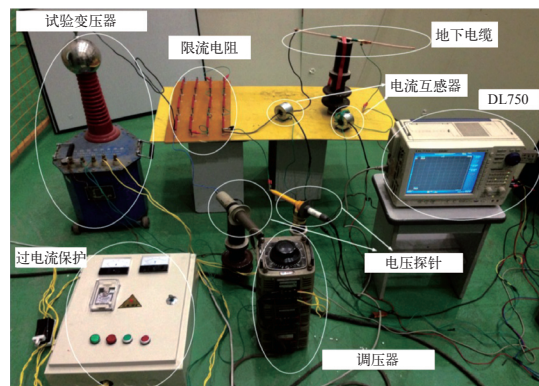


图6 电缆电弧故障试验物理接线图

3.2 试验结果分析

3.2.1 故障趋势分析

针对该试验共进行了三次,试验数据如下表所示,从下表中可以看出三次试验的电弧电流、持续时间以及电弧电压均不相同,并且发现:电弧电流越大,电弧持续时间越长,电弧电压越小,主要原因在于电弧的高热对电缆绝缘层的灼烧。需要注意的是,虽然Case2和Case3的限流电阻相同,但是两组试验施加电压并不同(由调压器决定)。电缆灼烧情况对比如图7所示,对比图7b、图7c和图7d可看出,电弧电流越大,电缆切痕处灼烧面越大,灼烧越严重。

表 三组电缆电弧试验故障参数

编号	参数设置		故障特征		
	限流电阻 /k Ω	采样频率 /kHz	持续时间 /s	电弧电流 /mA	电弧电压近似值 /V
Case1	70	10	11.3	0.57	-1 000~1 000
Case2	40	10	3.9	9.9	-700~700
Case3	40	10	1.82	16.27	-600~600

3.2.2 故障波形对比

三次故障试验过程均可分为三个阶段:正常

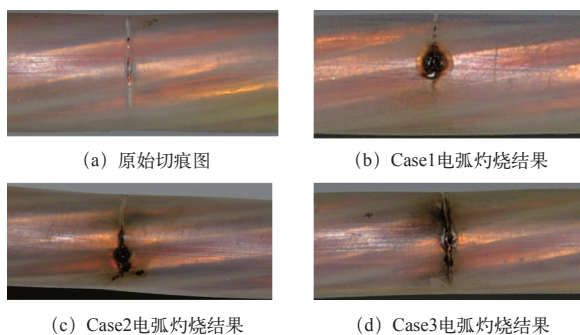


图7 电缆电弧灼烧对比图

状态、电弧故障和永久性故障，其中在永久性故障期间还可能发生间歇性电弧故障。以Case2为例，其测量电压电流全图如图8所示。当调节调压器到电缆击穿时，电路从正常状态突变为电弧状态，母线测量电压存在阶跃性的下降，而馈线电流存在阶跃性升高，如图8中 t_A 时刻；在进入电弧故障状态后，电弧电压整体呈逐渐减小的趋势，然后逐渐达到稳定状态，当电缆中电弧故障稳定持续一段时间后，由于电弧的灼烧，致使电缆绝缘层逐渐碳化并最终形成永久性故障，如图中 t_B 时刻。

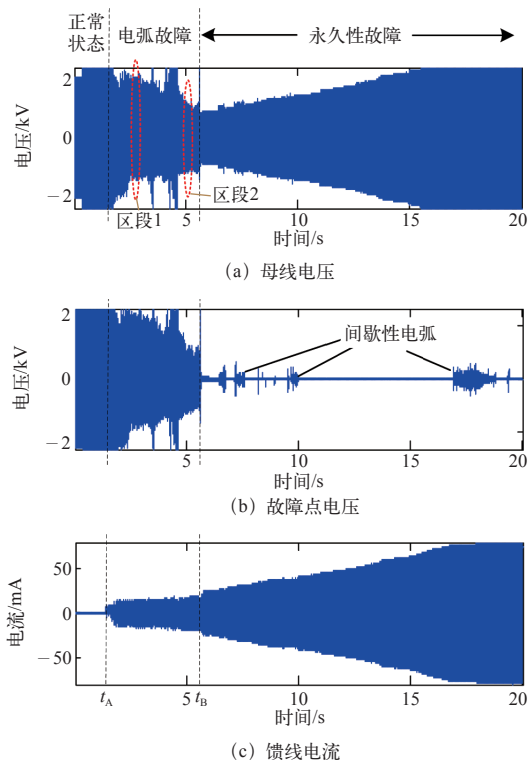


图8 Case2试验电压、电流波形全图

为进一步对比故障不同阶段电压、电流波形特征，选择图8中两区段信号进行方法对比，如图

9和图10所示，从图9和图10中可以看出：①从故障点电压图9b和图10b可看出，电弧电压为畸变的矩形波，与传统结论基本相符，并且可以发现电弧电压存在一定程度的波动，并逐渐趋近于稳定；②对比故障点电压和母线电压可发现，故障点电压畸变程度明显大于母线测量点电压，同样母线电压的畸变程度与电流畸变程度相关，电流畸变越大则母线电压畸变越大；③故障电流在过零点附近存在明显畸变。

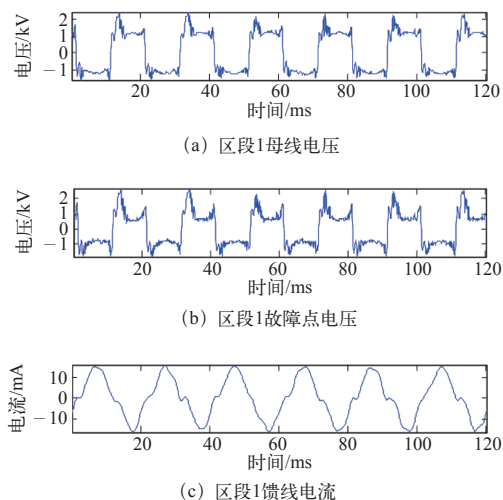


图9 区段1故障测量电压、电流信号波形对比

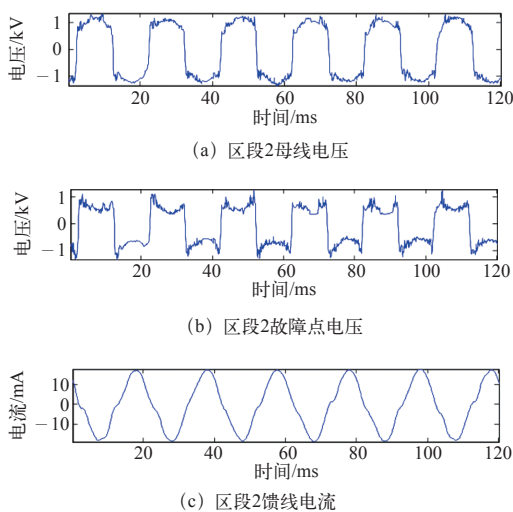


图10 区段2故障测量电压、电流信号波形对比

3.2.3 波形畸变程度对比

为定量比较电弧故障状态下故障点电压和母线测量电压畸变程度的差异，分别作出电弧故障期间故障点电压 $v_f(t)$ 和母线电压 $v_{st}(t)$ 的谐波总畸变

率 (THD) 对比图 (计算窗口为2周波), 如图11所示。从图11中可以看出: ①由于线路上电压降落的影响, 母线电压谐波总畸变率始终小于故障点 (电弧) 电压谐波总畸变率, 尤其从图11a可以看出, 发生电弧故障时, 母线电压谐波总畸变率可能很小, 因此利用母线电压的谐波总畸变率不能可靠检测电弧故障; ②几乎所有电弧电压总畸变率均大于30%, 最大可达100%, 这与故障电流大小有关; ③母线电压和电弧电压THD的变化趋势一致。

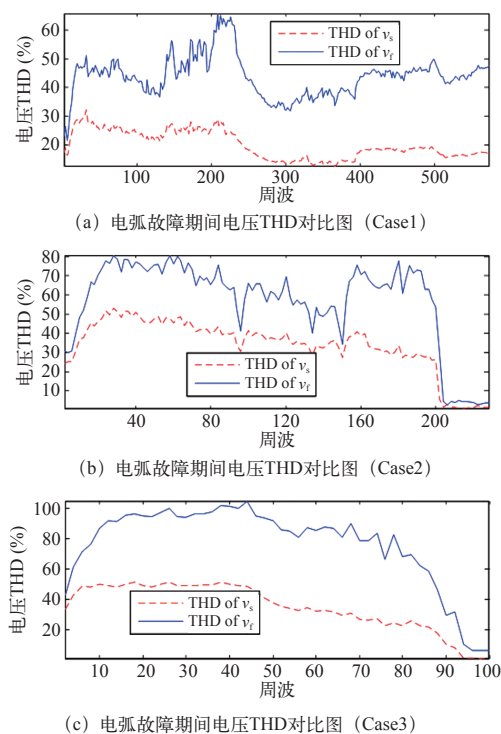


图11 母线电压与电弧电压THD对比图

4 结束语

电缆电弧故障的建模仿真、试验分析以及特征提取对于准确检测电弧故障, 避免因电弧故障导致的故障扩大有重要意义, 针对本文研究主要得出以下结论。

1) 对比分析现有电弧仿真模型, 提出Kilicay电弧模型更适用于电缆电弧故障仿真分析, 结合电缆电弧故障电压等特征, 明确了参数取值范围。

2) 结合电缆物理结构特征, 提出利用恒定阻抗串联电弧电阻的电缆故障仿真模型, 并详细介

绍了基于PSCAD/EMTDC的仿真实现方案。

3) 通过物理建模实测分析了电缆电弧波形特征, 其波形与仿真模型基本一致, 同时发现站端测量电压与实际电弧电压有明显差异, 故障点电压谐波总畸变率大于30%, 最高可达100%, 而母线电压谐波总畸变率与故障距离有关, 因此进行电弧故障检测时必须考虑线路参数的影响。

参考文献

- [1] Abdolali Khaled, Vern L, Cartlidge Dennis M, et al. B C Hydro 15 kV Cable explosion [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17 (2) : 302-307.
- [2] 诸然. 电弧危险分析研究 [J]. 电气应用, 2013, 32 (15) : 43-47
- [3] Koch B, Carpentier Y. Manhole explosions due to arcing faults on underground secondary distribution cable in ducts [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7 (3) : 1425-1433.
- [4] Kulkarni S, Santoso S, Short T A. Incipient fault location algorithm for underground cables [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5 (3) : 1165-1174.
- [5] Browne T E. The electric arc as a circuit element [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1955, 102 (1) : 27-37.
- [6] 魏钢, 张照辉, 杨庆, 等. 12 kV真空断路器开断并联电抗器电弧重燃三相建模 [J]. 电气应用, 2015, 34 (16) : 75-80.
- [7] Bizjak G, Zunko P, Povh D. Circuit breaker model for digital simulation based on Mayr's and Cassie's differential arc equations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10 (3) : 1310-1315.
- [8] Darwish H A, Elkalashy N I. Universal arc representation using EMTP [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (2) : 772-779.
- [9] 张冠英, 曹旺林, 李长伟, 等. 低压故障电弧检测与周期辨识 [J]. 电气应用, 2016, 35 (23) : 81-85.

- [10] Tammy Gammon, John Matthews. IEEE 1584-2002 arc modeling debate [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2008, 14 (4) : 61-69.
- [11] Khakpour A, Franke S, Uhrlandt D, et al. Electrical arc model based on physical parameters and power calculation [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43 (8) : 2721-2729
- [12] 陈奎, 刘长江. 小电流接地系统单相电弧接地故障特征的研究 [J]. 电气应用, 2006, 25 (8) : 1-4.
- [13] 王倩, 叶赞, 谭王景, 等. 精确击穿电弧模型仿真及分析 [J]. 电网与清洁能源, 2015, 31 (10) : 4-15.
- [14] Idarraga Ospina G, Cubillos D, Ibanez L. Analysis of arcing fault models [C]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Latin America, 2008: 1-5.
- [15] Kizilcay M, Pniok T. Digital simulation of fault arcs in power systems [J]. European Transactions on Electrical Power, 1991, 1 (1) : 55-60.
- [16] Koch B, Christophe P. Arc voltage for arcing faults on 25 (28) kV cables and splices [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1993, 8 (3) : 779-788.
- [17] Kulkarni S, Allen A J, Chopra S, et al. Waveform characteristics of underground cable failures [C]. 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010: 1-8.
- [18] Kulkarni S, Santoso S, Short T A. Incipient fault location algorithm for underground cables [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5 (3) : 1165-1174.
- [19] Elkalashy N I, Lehtonen M, Darwish H A, et al. Modeling and experimental verification of high impedance arcing fault in medium voltage networks [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14 (2) : 375-383.
- [20] Michalik M, Rebizant W, Lukowicz M, et al. High-impedance fault detection in distribution networks with use of wavelet-based algorithm [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21 (4) : 1793-1802.
- [21] Kizilcay M, K-H Koch. Numerical fault arc simulation based on power arc tests [J]. European Transactions on Electrical Power, 1994 (4) : 177-185.

(收稿日期: 2017-02-08) **EA**

(上接第76页)

- [6] 李超, 唐志军, 林国栋, 等. MMC静态直流充电时电容均压特性研究和保护定值整定 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40 (21) : 34-39.
- [7] 刁冠勋, 李传毅, 毛颖科. 柔性直流输电工程启停流程探讨 [J]. 电气应用, 2013 (增刊) : 612-616.
- [8] 王存平. 柔性直流输电系统技术优势及仿真研究 [J]. 电气应用, 2015 (增刊) : 224-227.
- [9] 毛新红. 适应于孤岛供电柔性直流输电系统控制器研究设计 [J]. 电气应用, 2015, 34 (14) : 136-139.
- [10] 翁汉琨, 林湘宁. 换流变压器差动保护异常动作行为分析及对策 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (31) : 87-94.
- [11] 许加柱, 白俊锋, 罗隆福, 等. FCC-HVDC换流变压器三相差动保护仿真研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39 (20) : 115-119.
- [12] 胡敏, 瞿纲举. 换流变差动保护现场校验 [J]. 湖南电力, 2011, 31 (1) : 52-54.
- [13] 刘光誉, 潘俊锐. 浅析换流变压器比率差动保护 [J]. 科技创新与应用, 2014 (26) : 19-20.
- [14] 张佳敏, 蒋琛, 李鹏, 等. 换流变压器保护改造分析及试验技术研究 [J]. 江苏电机工程, 2013, 32 (2) : 24-27.
- [15] 雷兵. “三取二”逻辑在南方电网直流输电工程中的应用 [J]. 继电器, 2008, 36 (7) : 88-91.

(收稿日期: 2017-02-24) **EA**