

基于多参数的混合线路故障类型识别方法

曹京荣¹, 陈杰¹, 谭笑¹, 李陈莹¹, 胡丽斌¹, 方春华², 孙维², 陶玉宁²

(1. 国网江苏省电力有限公司 电力科学研究院, 江苏 南京 210000;

2. 三峡大学 电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 随着城镇化建设的推进以及跨海输电工程发展, 采用架空-电缆混合线路越来越多, 快速准确识别混合线路中发生的故障类型和故障点是保证电网稳定运行的基础。根据混合线路实际情况建立单相金属性接地、单相高阻接地、两相金属性短路、直击雷故障(包括绕击情况和反击情况)、感应雷故障这5种故障源, 通过改变故障距离等参数得到对应电流数据; 基于各种故障情况下对电流数据的整体分析, 定义震荡指数、谐波畸变率、波形相似度均值、能量指数这4种特征量, 针对每种特征量定义阈值, 对数据分层定量分析, 达到故障类型识别的目的。

关键词: 混合线路; 故障类型; 特征量; 故障识别

中图分类号: TM726 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed22264

Hybrid Line Fault Type Identification Method Based on Multi Parameters

CAO Jingying¹, CHEN Jie¹, TAN Xiao¹, LI Chenying¹, HU Libin¹, FANG Chunhua², SUN Wei², TAO Yuning²

(1. *Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000,*

Jiangsu, China; 2. *College of Electrical Engineering and New Energy, China*

Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China)

Abstract: With the development of urbanization construction and cross sea power transmission projects, more and more overhead-cable hybrid lines are constructed. It is the foundation to ensure the stable operation of power grid to quickly and accurately determine the fault types and fault points in the hybrid lines. According to the actual operation of the hybrid line, five fault sources that are single-phase metal grounding, single-phase high resistance grounding, two-phase metal short circuit, direct lightning fault (including the situation of shielding and counterattack), and induced lightning fault were established. The current data of each situation could be obtained by changing the fault distance and other parameters. Based on the overall analysis of current data under various fault conditions, four characteristic parameters were defined, that are oscillation index, harmonic distortion rate, mean value of waveform similarity and energy index. The threshold value of each characteristic quantity was defined, and the data was analyzed quantitatively in layers to achieve the purpose of fault type identification.

Key words: hybrid lines; fault types; characteristic parameters; fault identification

在电网快速发展的过程中, 输电线路起到至关重要的作用^[1-2]。一般在城市内部和跨海输送电能时采用电缆^[3], 在城市外部输电时则采用架空线输电的方式, 这样在保证整体线路经济性的同时, 也更灵活地适应各类实际情况, 架空线-电缆混合输电的方式得到普遍的应用^[4-5]。

混合线路由于其工作环境复杂, 有较多故障发生, 某些情况下会对树木进行放电, 导致接地短路, 森林火灾也可能使架空线路燃烧, 最终

导致断线, 雷电、线路结冰、强风等外部气候情况都会影响架空线路的稳定运行^[6-7]。电缆在运行过程中存在绝缘受潮或者受到外力破坏等导致的接地或断线的情况^[8-9]。

从目前的研究情况来看, 金属性接地故障和非金属性接地故障的识别可以通过分析故障后一段时间内线路上数据采集装置记录下的电流波形来实现。文献[10]通过对线路上实测特定故障发生后的波形数据进行分析, 对比电气量特性

基金项目: 2019年度国网江苏省电力有限公司科技项目(J2019044)

作者简介: 曹京荣(1987—), 男, 硕士, 工程师, Email: cjoyeq@126.com

以及各个故障下电气量变化趋势,初步把故障发生后的电气量变化特性与相对应的故障类别联系起来。文献[11]针对金属性接地故障和阻性接地故障波形形貌进行了一定分析,但没有形成一个较为系统的理论,无法对线路中多种参数组合下的故障进行准确识别。雷击情况具有较大的随机性,现在针对雷击故障的识别多集中于仿真计算^[12-15],较为常见的方法是通过行波从雷电流注入系统后系统故障电流行波的波动性来辨识雷电故障^[16-17]。架空线-电缆混合线路运行环境复杂,现有方法对线路故障的识别不够精确,故障识别类型较为不全。

本文通过PSCAD建立混合模型,模拟各种接地故障以及雷击故障。通过在故障点设置不同故障相位和距测量点不同距离的各种故障,在测量点测得电流数据,将各种故障下的电流波形对比分析;将故障产生机理和仿真得出的各种故障波形分析结合,得出多参数的架空-电缆混合线路故障类型识别方法。

1 混合线路系统建模

线路结构示意图如图1所示。在架空线A段和电缆段交界点E点左侧某点设置为故障点X,在架空线B段和电缆交界点F点右0.5 km的D点设置为监测点。在故障点设置雷击(反击、绕击、感应雷)和接地短路故障(单相金属接地、单相高阻接地、两相金属性短路),通过在故障点设置不同故障相位和距测量点不同距离的各种故障,在测量点测得电流数据,将各种故障下的电流波形对比分析。



图1 线路结构图

Fig.1 Circuit structure diagram

架空线路段仿真模型采用PSCAD中的仿真采用频率相关(phase)模型,防雷计算一般取2.6/50 μs 电流波形,仿真模型采用双指数雷电波形。接地故障的模拟中,采用PSCAD库中自带的接地故障模块即可较好地实现。

系统仿真设置电压等级为220 kV,相角差为20°,电缆长度为0.5 km,架空线B段上测量点距电缆架空线交界点F点为0.5 km,调整架空线A段上的故障点位置,即可模拟不同故障距离下电

流波形变化。系统仿真频率为1 MHz,为了避免重合闸等装置对数据特性分析造成的影响,仿真模型中不包含继电保护装置。

2 故障电流波形特征

本文仿真了线路上常见的故障:单相金属性接地、单相高阻接地、两相金属性短路以及雷电流电压的故障(直击雷和感应雷),其中直击雷又包括了反击和绕击两种情况。下面以单相金属性接地、绕击、感应雷为例,分析其波形特征。

2.1 单相金属性接地

设置A相发生单相金属性接地故障,故障距离为2 km,系统故障时相位为45°,故障点和测量点波形如图2所示。系统电流由之前稳态的1.82 kA快速阶跃到了11.2 kA,通过图2a可以观察到故障发生后,系统有比较明显但幅度较小的过渡过程。将图2a和图2b对比,故障行波经过线路传播后,电流的波动性已经降低,测量点数据震荡过程相较于故障点有所减弱,可见故障行波在混合线路中的折反射和损耗对波形有较大影响。

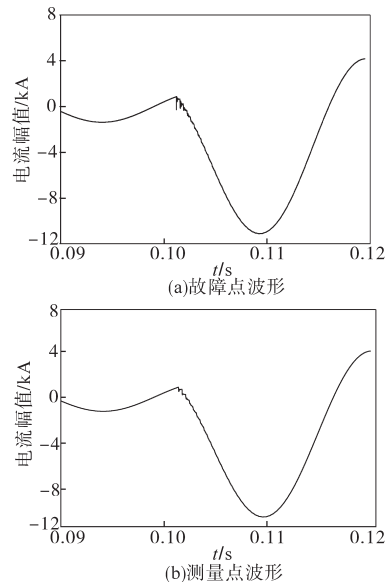


图2 单相金属性接地情况下故障点和测量点波形

Fig.2 Waveforms of fault points and measurement points under single-phase metallic grounding

2.2 绕击

在绕击故障中,设置A相为故障相,雷电流幅值40 kA,故障距离为2 km,波形为2.6/50 μs ,系统相位为0°,其波形如图3所示。由图可知,系统产生严重震荡,在0.05 s后才逐渐恢复稳定状态,在混合线路的传播过程中,故障行波发生幅值上的衰减和多次的折反射。

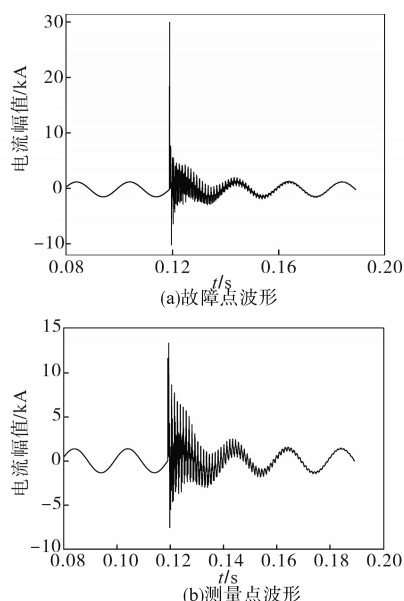


图3 绕击情况下故障点和测量点波形

Fig.3 Waveforms of fault points and measurement points under winding strike

2.3 感应雷故障

设置故障距离为8 km,雷电源幅值为40 kA,波形为0.26/100 μ s,A相故障时相位为0°,波形如图4所示。

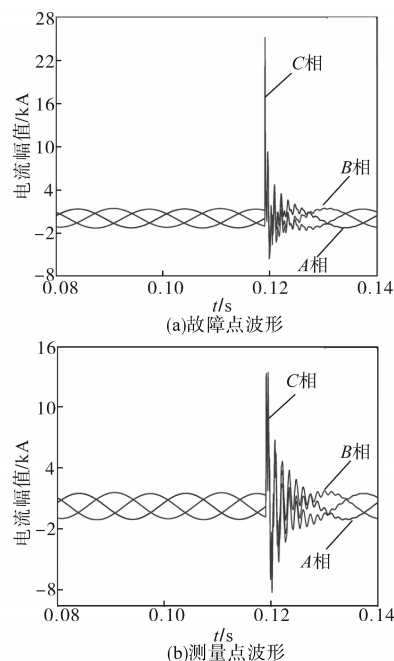


图4 感应雷故障情况下故障点和测量点波形

Fig.4 Waveforms of fault points and measurement points in case of induced lightning fault

三相导线可以看作距离落雷点相同的距离,由图4可知系统受到了感应电压冲击,产生严重震荡,大约在0.03 s后,系统恢复正常,且三相波形的相似度较高,变化趋势较为一致。改变系统A相故障时相位为90°,其他参数保持不变,与相

位为0°波形相似,只是幅值上有些许不同。

3 架空-电缆混合线路故障类型识别

3.1 雷击故障和接地故障的识别

当线路发生雷击故障时,在较短时间段内,系统会发生较为剧烈的震荡,而发生短路接地故障时,无论是单相金属性接地、单相高阻接地还是两相金属性短路,经过一个较小波动便快速过渡到新的稳态下^[18]。混合线路结构不同于单一线路,行波传递过程中会出现折反射,因此选取数据分析时不能分析某一时间点的数据,需要对故障发生后一段时间内的数据进行统一处理。

根据雷电故障和接地故障形成性质的不同,先对电流信号进行Clark变换解耦^[19],求取故障相电流的线模分量 $I(k)$,然后对线模分量定义震荡指数,用特征量 M_A 来表示,即

$$M_A = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n [I(k) - \bar{I}]^2 \quad (1)$$

式中: $I(k)$ 为故障相电流数据线模分量; M_A 为故障发生后的0.002 s内故障相电流数据线模分量的方差值。

通过震荡指数即可反映故障数据中的数据变量和该组数据均值的偏离程度。接地故障中,系统故障相位选取0°和90°,对2 km和8 km的故障距离进行仿真,然后计算数据的震荡指数。各种故障参数下的震荡指数如表1所示。

表1 接地故障在不同故障参数下的震荡指数

Tab.1 Oscillation index of ground fault under different fault parameters

故障类型	故障编号	相位/(°)	故障距离/km	M_A
单相金属性接地	1	0	2	0.114
	2	0	8	0.084
	3	90	2	0.094
	4	90	8	0.071
单相高阻接地	1	0	2	0.264
	2	0	8	0.247
	3	90	2	0.421
	4	90	8	0.398
两相金属性短路	1	0	2	0.341
	2	0	8	0.325
	3	90	2	0.232
	4	90	8	0.211

同理可得雷击故障的震荡指数,统计上述特征量 M_A 数值如图5所示。

由图5可知,特征量 M_A 以0.6为阈值,可较好区分雷击故障和接地故障,数据分布有较好的边界性。

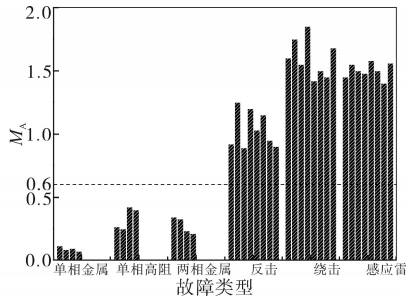


图5 振荡指数分布图

Fig.5 Oscillation index distribution

3.2 接地故障类型的识别

将A相金属性接地、A相高阻接地(接地电阻为200 Ω)、A,B两相金属性接地三种故障时刻的A相电流波形图放大发现,三种故障下相同时间段内的波形形貌有较大区别,可以根据此特点,来定义每种故障类型故障后0.005 s的波形畸变率(total harmonics distortion, THD),即谐波含量的均方根与其基波分量的均方根之比。将波形畸变率定义为特征量 M_B ,根据 M_B 值来区别接地故障中确切的故障类型。

设置故障相位为 0° ,在不同的故障距离下计算三种接地故障0.005 s后电流的畸变率,数据如表2所示。由表2可知两相金属性短路电流畸变率最大,单相高阻接地电流畸变率最小,且随着故障距离的增加,三种故障畸变率都是递减的趋势。

表2 0° 故障相位各故障畸变率Tab.2 Distortion rate of each fault in 0° fault phase

故障编号	故障距离/km	特征值 $M_B/\%$		
		单相金属	单相高阻	两相短路
1	2	3.94	2.27	12.87
2	8	3.73	2.02	12.26
3	24	3.30	1.69	11.58

混合线路故障相位为 45° 时,计算其故障畸变率,故障编号为4~6;混合线路故障相位为 90° 时,编号记为7~9。具体故障畸变率数值如图6所示。

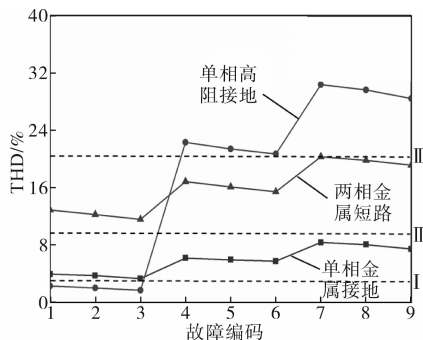


图6 各种接地故障情况下THD折线图

Fig.6 Line chart of THD under various ground fault conditions

在图6中,特征量 M_B 设置3%,10%,20.5%三个阈值,则将折线图可以分为4个区域。除了故障相位 45° 、故障距离24 km的单相高阻接地点和故障相位 90° 、故障距离为2 km的两相金属短地点,边界有些模糊以外,其他情况可以明确区分出三种接地故障类型。

3.3 感应雷和直击雷的识别

图7为感应雷下三相感应电流波形。从图7中测量点所测得波形来看,三相电流在感应雷故障后,三相波形有较高的相似度,这是由于含有较强能量的雷击源雷击线路附近地面造成周围电磁场突变。落雷点距离A,B,C三相线路的距离点近似相等,三条线路上的感应电压、电流也较为相似。

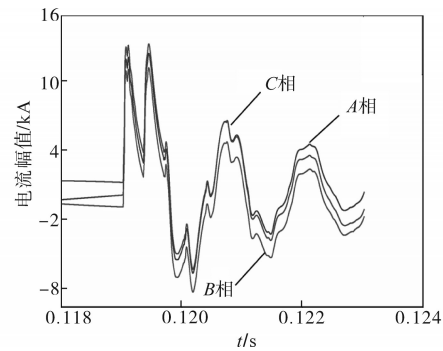


图7 感应雷下三相感应电流

Fig.7 Three-phase induction current under induced lightning

当反击杆塔顶端避雷线时,避雷线距离A,B,C三相的距离也不相同,所以在A,B,C三相上感应出的电流也不尽相同。

根据此特点,可以求出A,B,C三相的电流波形中的任意两相的相似程度的均值,如下式:

$$S_{AB} = \frac{\sum_{k=1}^n I_A(k) I_B(k)}{\sqrt{\sum_{k=1}^n I_A^2(k) \sum_{k=1}^n I_B^2(k)}} \quad (2)$$

式中: $I_A(k)$, $I_B(k)$ 分别为A,B相故障电流线模分量。用一个特征量 M_C 来区分感应雷和直击雷, M_C 根据下式计算:

$$M_C = (S_{AB} + S_{BC} + S_{AC})/3 \quad (3)$$

通过式(2)求出两相电流波形的相似程度,选取测量点测量故障后0.002 s内的数据,计算A,B,C三相的电流波形任意两相之间的相似度,然后根据式(3)取三个相似度的均值 M_C 作为特征量。

在绕击情况下,各种故障参数组合下三相波形的相似度如表3所示。

表3 绕击情况下波形相似度均值

Tab.3 Mean value of waveform similarity in case of detour

故障编号	1	2
相位/(°)	0	90
故障距离/km	2	2
幅值	40	40
波形	2.6/50	2.6/50
S_{AB}	0.327	0.412
S_{BC}	0.354	0.429
S_{AC}	0.379	0.471
M_c	0.353	0.437

由表3可知,发生绕击时,三相波形的相似度较小,基本在0.4左右;同理,通过计算反击情况下三相波形的相似度,发现在反击 M_c 还是维持在一个较低的水平,但整体略高于绕击;感应雷三相波形的 M_c 值则远大于绕击和反击。

具体故障参数组合下三相波形相似度分布如图8所示。

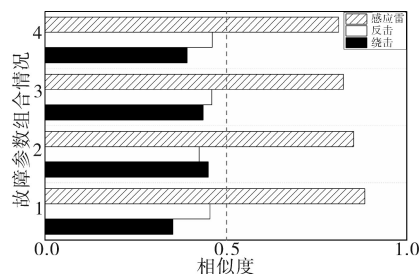


图8 各种雷击故障下相似度分布

Fig.8 Similarity distribution under various lightning strikes

由图8可知,在感应雷下, A, B, C 三相近似于同时出现感应电压,相似度特征值 M_c 维持在一个较高的水平,反击和绕击下的相相似度均值较低,特征量 M_c 取0.5时,感应雷和直击雷整体数据分布有较好的边界性。

3.4 直击雷中反击和绕击故障的识别

由之前的 M_c 值作为特征量来进行雷击故障识别时,并不能对绕击和反击这两种情况来进行识别,根据文献[20]能量算子(teager energy operator, TEO)能够有效地反映数据的幅值和频率的变化,对于时域信号能量算子的定义为

$$\Psi[f(n)] = f^2(n) - f(n+1)f(n-1) \quad (4)$$

图9为最后进行能量算子运算后得到的瞬时能量图。绕击下,雷电流直接注入输电线路,系统的电流值直接发生大幅改变;反击时,雷电流经杆塔或避雷线流入大地,空间电场变化速度相对缓慢,没有绕击的能量变化迅速,所以反击瞬

时能量图的第1个极大值并不是能量的最大值。因此定义特征量 M_d ,当能量指数图的第1个极大值为该时间段内能量的最大值,取 $M_d=1$,该次故障为绕击故障;当瞬时能量图的第1个极大值不是该时间段内能量的最大值时,取 $M_d=0$,该次故障为反击故障。

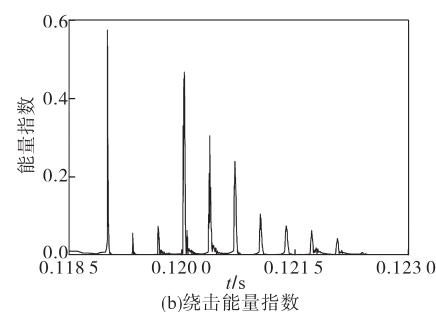
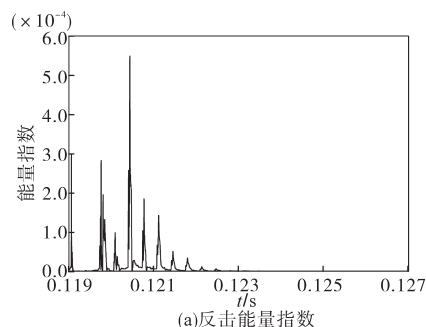


图9 反击绕击能量指数对比图

Fig.9 Comparison chart of counterattack twist energy index

4 多参数识别方法

图10为故障识别流程图。

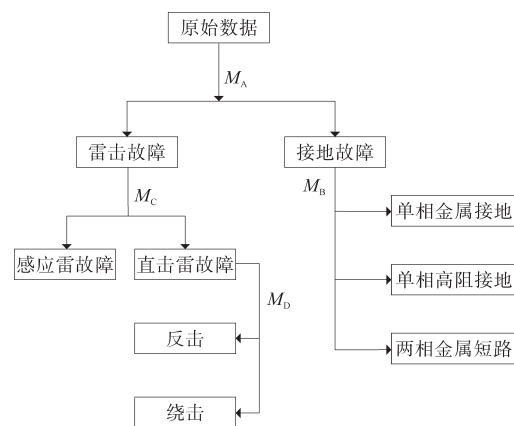


图10 故障识别流程图

Fig.10 Fault identification flowchart

将故障产生机理和仿真故障波形分析结合,以上文设定的 M_A, M_B, M_C, M_D 四个特征量为“多参数”;当满足各自特征量阈值时则判断对应故障发生。

图10分层分级依次对四个特征量阈值进行比对,实现对混合线路故障类型的识别,具体步

骤如下:

1)对原始数据处理后,求取震荡指数 M_A 值。 $M_A > 0.6$,为雷击故障; $M_A < 0.6$,则为接地故障。

2)当确定故障为接地故障时,通过定义谐波畸变率 M_B 来识别三种接地故障。 $M_B < 3\%$,为单相高阻接地故障; $3\% < M_B < 10\%$,为单相金属接地故障; $10\% < M_B < 20.5\%$,为两相金属性短路; $M_B > 20.5\%$,为单相高阻接地。

3)当确定为雷击故障后,根据三相电流波形相似度均值 M_C 将直击雷和感应雷进行区分。当 $M_C > 0.5$ 时,为感应雷故障,当 $M_C < 0.5$ 时,为直击雷故障。

4)针对直击雷故障中绕击、反击的识别,对数据进行能量算子运算。当能量指数分布图中第1个极值为最大值时, $M_D=1$,为绕击故障;当能量指数分布图中第1个极值不是最大值时, $M_D=0$,为反击故障。

通过以上四个步骤对混合线路故障进行识别。

5 结论

1)系统故障时相位越大,故障初段整体的电流波形畸变越严重,相同情况下高阻接地比金属接地有着更为明显的震荡;通过对比相同故障参数的波形数据,发现两相金属性短路时,系统波动要比单相金属性接地时要明显。

2)在雷击故障中,感应雷情况下三相感应电流波形相似度较高,绕击和感应雷对线路的影响较大,且各种故障参数组合下都比接地故障波形波动剧烈,系统恢复稳定时间也要比接地故障要长。

3)通过对震荡指数(特征量 M_A)、谐波畸变率(特征量 M_B)、电流波形相似度均值(特征量 M_C)以及特征量 M_D 进行分层定量分析,可达到对混合线路上发生的故障进行识别的目的。

参考文献

- [1] 肖湘奇,邹德华,曾祥君,等.输电线路带电作业绝缘电动牵引装置的设计[J].电气传动,2016,46(2):68-71.
Xiao Xiangqi, Zou Dehua, Zeng Xiangjun, et al. Design of insulated electric traction device for live working on transmission line[J]. Electrical Drive, 2016, 46(2): 68-71.
- [2] 于玉泽,覃剑,李功新,等.电缆-架空线混合线路故障测距方法综述[J].电网技术,2006,30(17):64-69.
Yu Yuze, Qin Jian, Li Gongxin, et al. A survey on fault location methods for hybrid transmission lines consisting of power cables and overhead lines[J]. Power Grid Technology, 2006, 30(17): 64-69.
- [3] Kezunovic M. Smart fault location for smart grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1): 11-22.
- [4] 黄涛,文珊,王庭华,等.不同材质电缆支架对电缆运行适用性研究[J].电力工程技术,2017,36(2):104-109.
Huang Tao, Wen Shan, Wang Tinghua, et al. Research on applicability of different material cable brackets for cable operation[J]. Power Engineering Technology, 2017, 36(2): 104-109.
- [5] 叶冠豪,吕立翔,洪露.接地不良缺陷对高压XLPE电缆终端的影响[J].电力工程技术,2018,37(4):137-142.
Ye Guanhao, Lü Lixiang, Hong Lu. Effect of grounding defect on high-voltage XLPE cable terminal[J]. Power Engineering Technology, 2018, 37(4): 137-142.
- [6] 岑建明.输电线路故障测距的研究[D].杭州:浙江大学,2007.
Cen Jianming. Research on fault location of transmission lines[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [7] 李春叶,黄华,孟祥有,等.MMC-HVDC系统结构对多端直流电网故障的影响分析[J].电气传动,2019,49(12):102-108.
Li Chunye, Huang Hua, Meng Xiangyou, et al. Impact analysis of MMC-HVDC system topology on multi-terminal DC network faults[J]. Electrical Drive, 2019, 49(12): 102-108.
- [8] 覃思明,李焱.架空线-电缆-架空线混合线路故障定位方法研究[J].广西电力,2019,42(4):24-28.
Qin Siming, Li Yi. Study on the fault location method of overhead-cable-overhead hybrid line[J]. Guangxi Electric Power, 2019, 42(4): 24-28.
- [9] 李欢,翟双,陈杰,等.热历史过程对XLPE电缆热历史温度的影响研究[J].电力工程技术,2019,38(5):157-163.
Li Huan, Zhai Shuang, Chen Jie, et al. Influence of thermal history on thermal history temperature of XLPE cable[J]. Power Engineering Technology, 2019, 38(5): 157-163.
- [10] 董光哲,钱萌,王国龙,等.高压架空线路典型故障录波分析[J].电世界,2014,55(10):1-6.
Dong Guangzhe, Qian Meng, Wang Guolong, et al. Typical fault recording analysis of high voltage overhead lines[J]. Dianshijie, 2014, 55(10): 1-6.
- [11] 黄福勇,周挺,王成.输电线路雷击故障查找探讨[J].湖南电力,2009,29(6):23-26.
Huang Fuyong, Zhou Ting, Wang Cheng. Discussion on transmission line lightning fault detection[J]. Hunan Electric Power, 2009, 29(6): 23-26.
- [12] 张逸群,李海星.输电线路典型故障案例分析及预防[M].北京:中国电力出版社,2012.
Zhang Yiqun, Li Haixing. Typical fault case analysis and prevention of transmission line[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2012.
- [13] 卢明.输电线路运行典型故障分析[M].北京:中国电力出版社,2014.
Lu Ming. Typical fault analysis of transmission line operation[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2014.

(下转第80页)

- drive power supply[J]. *Automobile Technology*, 2019(9):87-90.
- [4] 夏一帆,王征宇,陈建明,等. 基于 ACPL-32JT 的电动汽车电机控制器 IGBT 驱动电路设计[J]. *大功率变流技术*, 2015(3):54-57.
- Xia Yifan, Wang Zhengyu, Chen Jianming, *et al.* IGBT drive circuit design of electric vehicle motor controller based on ACPL-32JT[J]. *High Power Converter Technology*, 2015(3):54-57.
- [5] 韩猛,陈昭,张玮麟. 新型电动汽车双向隔离型 DC-DC 变换器控制策略[J]. *电机与控制应用*, 2020, 47(7):29-34.
- Han Meng, Chen Zhao, Zhang Weilin. Control strategy for a new type of electric vehicle bi-directional isolated DC-DC converter[J]. *Electric Machines & Control Application*, 2020, 47(7):29-34.
- [6] 朱斌. 电动汽车用永磁同步电机模型预测控制及快速开发平台研究[D]. 镇江:江苏大学, 2019.
- Zhu Bin. Model predictive control and rapid development platform of permanent magnet synchronous motors for electric vehicles[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.
- [7] Adapa A K, Venkatramanan D, John V. Auxiliary subsystems of a general-purpose IGBT stack for high-performance laboratory power converters[J]. *Sādhanā*, 2017, 42(8):1-8.
- [8] Jin-Hong Kim, Joon Sung Park, Bon-Gwan Gu, *et al.* Turn-on loss reduction for high voltage power stack using active gate driving method[J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2017, 12(2):632-642.
- [9] 王倩,施荣,刘丽,等. 适用于大功率绝缘栅双极型晶体管的两段式有源门极关断技术的研究[J]. *电气传动*, 2018, 48(10):75-78.
- Wang Qian, Shi Rong, Liu Li, *et al.* Research on two-stage active gate closing technology which is suitable for high power insulated gate bipolar transistor[J]. *Electric Drive*, 2018, 48(10):75-78.
- [10] Luo Haoze, Francesco Iannuzzo, Paula Diaz Reigosa, *et al.* Modern IGBT gate driving methods for enhancing reliability of high-power converters—an overview[J]. *Microelectronics & Reliability*, 2016, 58:141-150.

收稿日期:2020-08-10

修改稿日期:2020-09-01

(上接第 61 页)

- [14] 姜山. 基于支持向量机的高压线路故障原因辨识[D]. 北京:华北电力大学, 2016.
- Jiang Shan. Fault cause identification of high voltage transmission lines based on support vector machine[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [15] 李离南. 高压交流输电线路故障特征挖掘与故障原因辨识[D]. 济南:山东大学, 2017.
- Li Linan. Fault feature mining and fault cause identification of high voltage AC transmission lines[D]. Jinan: Shandong University, 2017.
- [16] 彭向阳,李鑫,张国清. 输电线路故障辨识电磁暂态仿真研究[J]. *高压电器*, 2013(8):8-15.
- Peng Xiangyang, Li Xin, Zhang Guoqing. Electromagnetic transient simulation on fault identification lines[J]. *High Voltage Apparatus*, 2013(8):8-15.
- [17] 彭向阳,李鑫,姚森敬,等. 基于行波电流暂态特性的输电线路故障原因辨识[J]. *南方电网技术*, 2012, 6(5):43-47.
- Peng Xiangyang, Li Xin, Yao Senjing, *et al.* The identification of the fault cause of overhead transmission lines based on the transient characteristics of travelling wave current[J]. *China Southern Power Grid technology*, 2012, 6(5):43-47.
- [18] 陈学伟. 500 kV 输电线路精确故障定位技术研究[D]. 济南:山东大学, 2013.
- Chen Xuewei. Research on accurate fault location technology of 500 kV transmission line[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [19] Behvandi A, Seifossadat S G, Saffarian A. A new method for discrimination of internal fault from other transient states in power transformer using Clarke's transform and modified hyperbolic S-transform[J]. *Electric Power Systems Research*, 2020, 178:106023.
- [20] Derrien T, Johnson R, Bussotti G, *et al.* Wavelet speech enhancement based on the Teager energy operator[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2001, 8(1):10-12.

收稿日期:2020-08-03

修改稿日期:2020-09-23