

一起 110 kV 高压交流电缆外护套 烧损故障原因分析

刘云龙¹, 邵 愚¹, 周大明¹, 黄会贤², 袁子超¹, 王 聪¹, 谢 弦¹, 张丽萍¹

(1. 国网重庆市电力公司江北供电分公司, 重庆 401147; 2. 国网重庆市电力公司, 重庆 400100)

摘 要: 高压单芯交流电缆在城市输电网中得到越来越广泛的应用, 但当其接地系统发生异常时会产生不同程度的悬浮电位。在分析一起电缆外护套烧损故障的基础上, 对电缆线路的悬浮电位情况进行了讨论研究。铝护套接地异常后产生的悬浮电位, 与电缆石墨(半导体)层的接地状态有关。当直接接地断开且石墨层未有效接地时, 电缆石墨层悬浮电压可能会达到相电压的 90% 以上。高悬浮电压必然会导致石墨层对地绝缘薄弱处高频充放电, 并不断烧蚀外护套, 引发火灾等严重后果。

关键词: 外护套烧损; 石墨层; 悬浮电位; 高压电缆

中图分类号: TM755 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2020)05-0018-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.05.005

Cause Analysis on Burning Failure of the Outer Sheath of 110 kV High-voltage AC Cable

Liu Yunlong¹, Shao Yu¹, Zhou Daming¹, Huang Huixian², Yuan Zichao¹, Wang Cong¹, Xie Xian¹, Zhang Liping¹

(1. State Grid Chongqing Jiangbei Electric Power Supply Branch Company, Chongqing 401147, China;

2. State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 400100, China)

Abstract: High-voltage single-core cable is widely used in urban transmission network, but it will produce a different degree of floating potential when its grounding system is abnormal. Based on the cause analysis of the burning failure of the outer sheath of 110 kV high-voltage AC cable, the possible floating potential of actual cable line is discussed and studied. The floating potential after the aluminum sheath grounding disappears is proportional to the line voltage level and is related to the grounding state of the graphite (semi-conductive) layer of the cable. When the direct grounding is disconnected and the graphite layer is not effectively grounded, the floating voltage of graphite layer of the cable may reach more than 90% of the phase voltage, and the high floating voltage will inevitably lead to the high-frequency charge and discharge of the graphite layer on the weak ground insulation, and the constantly ablation of the outer sheath, causing fire and other serious consequences.

Key words: burning failure of the outer sheath; graphitic layer; floating potential; high-voltage cable

0 引 言

随着城市化的不断推进, 城区地面资源越来越紧缺, 地下高压电缆在城市输电网中应用规模也快速增大^[1], 各学者对电缆开展了广泛的研究^[1-10]。高压电缆多回同通道敷设的情况较为普遍, 电缆通道一旦起火, 容易导致同断面多回电缆全停, 进而对城市核心区域安全供电带来极大安全隐患。近年来, 针对电缆通道火灾严峻形势, 各供电公司从上至下, 均高度重视电缆通道防火, 开展隐患整治^[11-13]。

电缆及通道防火, 除被动地增加灭火、阻燃、隔离措施外, 更为关键的是杜绝火源起点。然而, 对于部分电缆及通道火源起点、电缆烧损的原因分析, 仍存在不少争议或不清楚的情况, 对于切实提升电缆及通道防火能力, 造成不利的影响^[4,13]。

为加强电缆及通道火源起点和烧损原因判别, 下面对一起 110 kV 高压交流电缆本体外护套烧损案例进行了深入分析, 得出电缆接地系统异常引发外护套烧损的可能性和依据。电缆接地系统异常后, 按照电缆石墨层的接地与否, 深入讨论电缆外部

石墨层上产生悬浮电位的不同情况。对悬浮电位高频放电引起外护套烧损,进而可能导致火灾事故进行了分析,用以帮助对类似缺陷或事故分析,便于加强高压电缆防火管理。

1 电缆故障概况

1.1 故障现象

运行人员巡视发现,某110 kV变电站电缆夹层内出现电缆烧损情况,现场超细干粉灭火弹已经动作并成功灭火,随即紧急对受损电缆申请停电检查。现场核实,故障断面涉及4回110 kV电缆,其中2回为110 kV变电站进线、2回为GIS至主变压器联络电缆。

电缆烧损故障发生在最上层电缆与其保护接地箱接地电缆交叉的部位,该回电缆属于110 kV变电站进线,现场检查起火点为B相电缆,且从起火点一直到GIS电缆终端防火封堵处,约2.0 m区段的外护套均出现烧损,铝护套裸露。起火点处,保护箱接地电缆发生烧损且只剩铜芯,B相电缆外护套熔融滴落物造成附近其他多根电缆外护套不同程度的烧损,现场照片如图1、图2所示。



图1 电缆烧损故障现场



图2 电缆烧损故障火源起点

进一步巡视电缆全线,发现在该110 kV故障电

缆线路终端塔侧,塔上直接接地箱B相接地电缆连接端子断裂,如图3所示。该110 kV线路B相电缆直接接地断开,只通过站内的保护器接地,铝护套处于电位悬浮状态。



图3 终端塔上接地端子脱落

1.2 电缆参数

烧损故障电缆全长0.13 km,起于电缆终端塔,止于变电站GIS终端。电缆型号为ZR-YJLW03-64/110 kV-1000 mm²,线路投运时间为2015年12月。由于进站电缆较短,电缆接地采用塔上直接接地、站内保护接地的单端接地方式,如图4所示。电缆隧道及夹层运行环境良好。通道断面如图5所示,电缆的详细结构参数如表1所示。

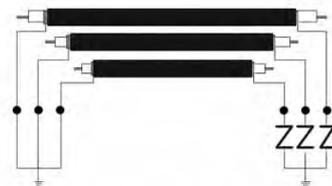


图4 110 kV 某电缆线路接地系统接线原理

表1 故障电缆结构参数

参数	电压等级 /kV	标称截面 /mm ²	导体外径 /mm	绝缘厚度 /mm
数值	64/110	1000	40.4	16
参数	外护套厚度 /mm	近似外径 /mm	电缆电容 /(μF·km ⁻¹)	外护套电容 /(μF·km ⁻¹)
数值	4.5	101.3	0.230	1.449

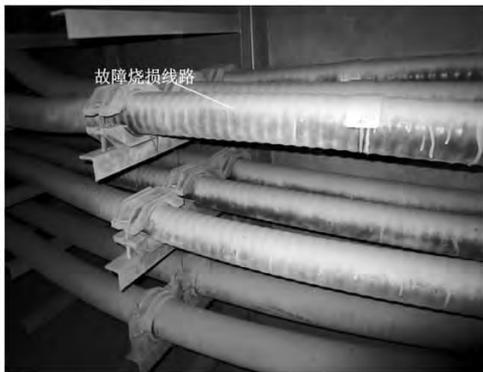
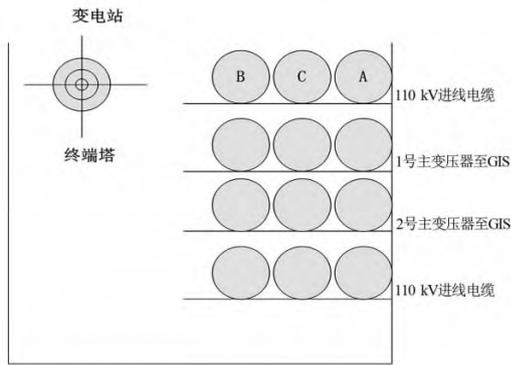


图5 110 kV 某电缆线路所在通道断面

1.3 故障处理与恢复

在现场对电缆烧伤处,通过铝护套开窗进行了受损程度鉴定。该110 kV 烧损电缆在外护套部位烧伤严重,电缆阻水层外层表面有轻微碳化痕迹,内层阻水带仍可呈现纤维丝状,如图6所示,电缆本体外屏蔽层无受损痕迹,可判断内部主绝缘并无损伤。

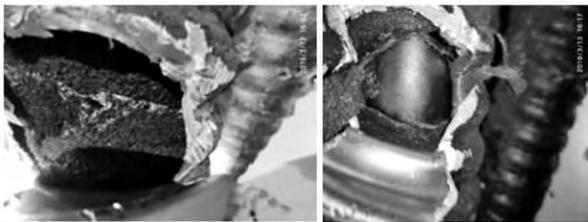


图6 电缆铝护套开窗检查

根据上述情况,拟定了处理方案:仅对变电站电缆夹层内的110 kV 受损电缆外护套、联络电缆外护套进行修复更换;电缆不做更换。对本次受损的110 kV 电缆线路同轴接地电缆全部进行更换,终端塔上接地线接线端子需全部更换。修复完成后,对该段电缆全线重新涂刷防火涂料,恢复防火措施,如图7所示。该事件未对外停电。

2 故障原因分析

经检查,110 kV 电缆受损区段无中直接头,通道内的输电电缆交叉互联箱和接地箱等附属设施完

好,排除电缆本体和电缆中直接头故障。同时变电站夹层内无破坏和外部火种进入的可能。

经现场巡查,故障段电缆中某110 kV 电缆线路B相电缆及保护接地同轴电缆损坏最严重,同时终端塔上受损电缆线路B相接地电缆脱落,初步确定为该110 kV 电缆线路因接地线脱落,电缆存在悬浮电压,悬浮电压高频充放电情况下导致电缆外护套烧损,下面进行详细理论分析。



图7 烧损电缆故障恢复

2.1 电缆电容模型

不考虑电流引起的感应电压(短电缆线路感应电压较小),单芯交流电缆的电路模型如图8所示。其中, C_0 、 C_1 、 C_2 分别是导体与铝护套之间电容、铝护套与石墨(半导体)层之间电容、石墨(半导体)层与接地体之间单位长度的等效电容; U_{C0} 、 U_{C1} 、 U_{C2} 分别是 C_0 、 C_1 、 C_2 各电容两端的电压; U_0 为电缆相电压。

圆柱形电容计算式为^[14]

$$C = 2\pi + \epsilon_0 \epsilon_r l / \ln \frac{R}{r} \quad (1)$$

式中: r 、 R 分别为内外电极的半径; l 为电缆长度(同一段电缆,三相电缆可认为 l 相同); ϵ_r 为两电极间绝缘介质的相对介电常数。表1中给出故障电缆单位长度的相关参数与对应等效电容值。

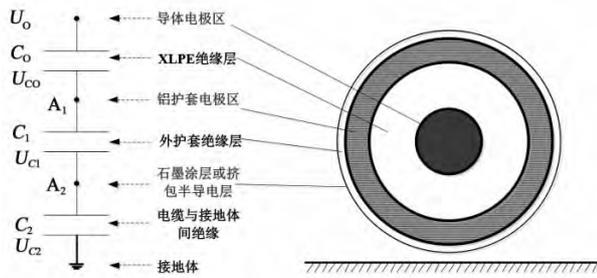


图8 电缆的多级电容结构

2.2 铝护套未接地工况分析

1) 电缆石墨(半导体)层可靠接地

图8中A₁点产生悬浮电位, A₂点的电位为0, C₂、U_{C2}均为0, 电缆为两级电容的串联结构, 此时有^[15]

$$I = U_{C0}j\omega C_0 = U_{C1}j\omega C_1 \quad (2)$$

$$U_0 = U_{C0} + U_{C1} \quad (3)$$

根据式(2)、式(3)可得, 各电容电压为:

$$U_{C0} = \frac{C_1}{C_0 + C_1} U_0 \quad (4)$$

$$U_{C1} = \frac{C_0}{C_0 + C_1} U_0 \quad (5)$$

由式(2)至式(5)可知, 当铝护套未接地且石墨(半导体)层接地时, U₀由C₀、C₁串联承载, 耐压的绝缘介质分别为XLPE和外护套, 且按照电容值的反比进行分压, 即电容值越小, 分压越大。

2) 电缆石墨层未接地

图8中A₁、A₂点均产生悬浮电位, 在多层电容串联条件下, 有:

$$I = U_{C0}j\omega C_0 = U_{C1}j\omega C_1 = U_{C2}j\omega C_2 \quad (6)$$

$$U_0 = U_{C0} + U_{C1} + U_{C2} \quad (7)$$

根据式(6)、式(7)可得, 各电容电压为:

$$U_{C0} = \frac{C_1 C_2}{C_1 C_2 + C_1 C_0 + C_2 C_0} U_0 \quad (8)$$

$$U_{C1} = \frac{C_0 C_2}{C_1 C_2 + C_1 C_0 + C_2 C_0} U_0 \quad (9)$$

$$U_{C2} = \frac{C_0 C_1}{C_1 C_2 + C_1 C_0 + C_2 C_0} U_0 \quad (10)$$

由式(6)至式(10)可知, 当铝护套、石墨(半导体)层均未接地时, U₀由C₀、C₁、C₂串联承载, 耐压的绝缘介质分别为XLPE、外护套、杂散介质, 且按照电容值的反比进行分压, 电容值越小, 分压反而越大。

2.3 悬浮电位危害分析

按照电缆的多级电容模型, 单端接地系统的电路模型如图9所示, 其中Z_A、Z_B、Z_C代表保护接地箱

中各相的保护器。该故障线路B相接地线脱落, 等同于图9中接线B₁O接线断开, 此时A、C两相接地状态良好, 而B相电缆线路, 铝护套未接地, B相电缆线路的电路模型如图10所示。

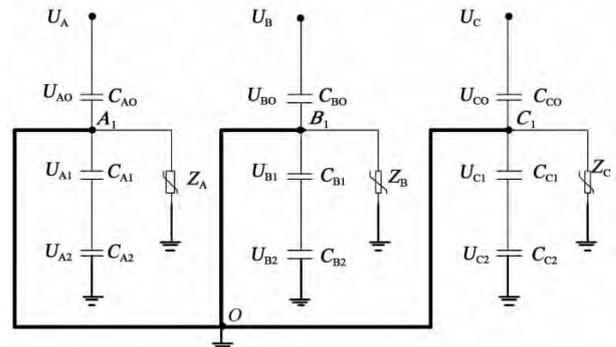


图9 单端接地电路模型

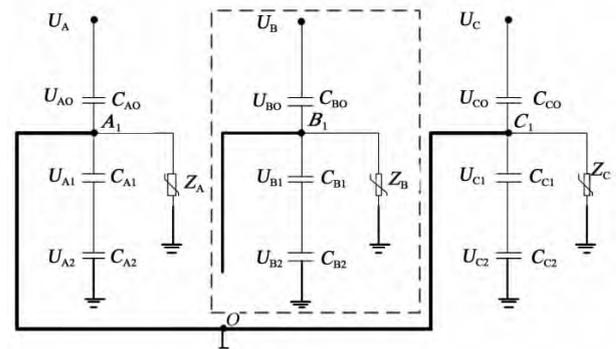


图10 故障电缆线路接地电路模型

1) 石墨层有效接地

根据式(2)至式(5)的分析, 对于故障电缆B相直接接地断开后, 当石墨层有效接地时, 电缆线路为两级电容串联, 铝护套A₁点产生悬浮电位。由表1可知, 外护套电容C₁大小约为1.449 μF/km, XLPE电容C₀约为0.23 μF/km。由式(4)、式(5)可得, B相XLPE、外护套两端的电压U_{C0}、U_{C1}分别为:

$$U_{C0} = \frac{C_1}{C_0 + C_1} U_B \approx \frac{1.449}{0.23 + 1.449} U_B = 0.863 U_B \quad (11)$$

$$U_{C1} = \frac{C_0}{C_0 + C_1} U_B \approx \frac{0.23}{0.23 + 1.449} U_B = 0.137 U_B \quad (12)$$

对于110 kV电缆线路, 此时相电压U_B为64 kV, 则对应的铝护套上的悬浮电压为8.768 kV。根据规程要求, 电缆外护套的交接试验耐受电压是10 kV, 电缆外护套的耐压水平在长期运行中会逐渐降低, 但应能耐受5 kV、1 min直流耐压^[16]。因此, 当石墨层可靠接地、B相电缆线路接地断开, 铝护套会产生悬浮电位。该电压是否会击穿外护套, 是否引起故障起

火,取决于电缆外护套的耐压水平下降程度。当电缆投运较久且运行条件不良,外护套耐压水平下降较多时,会造成外护套击穿,引起起火。

2) 石墨层未有效接地

部分文献^[4]认为,石墨层放置在金属支架上,在正常状态下石墨层不会出现接地不良。而实际工况如图11所示,绝大部分的电缆放置在支架上通过抱箍固定时,接触部位都垫了绝缘胶垫,此时石墨层实际上处于未接地状态。特别是在短电缆线路中,石墨层未有效接地的状态更为普遍。

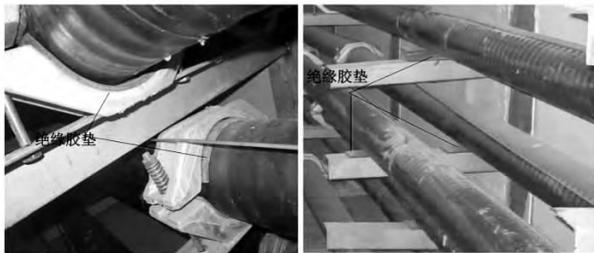


图11 一般电缆与支架间的绝缘胶垫

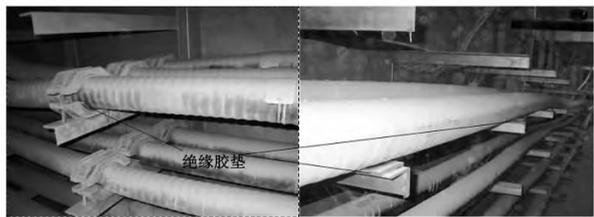


图12 故障电缆与支架间的绝缘胶垫

经检查,故障电缆也与金属支架、抱箍之间全部设置了绝缘胶垫,即电缆的石墨层并未接地,如图12所示。根据式(6)至式(10)的分析,此时电缆属于三级电容串联,相电压 U_B 由XLPE、外护套、绝缘胶垫或其他杂散介质来承载,且按照电容值的反比进行分压。单位长度的杂散电容一般取 $20 \text{ pF/m}^{[4]}$,由表1、式(8)至式(10)可知,B相XLPE两端、外护套两端、石墨层与地之间的电压 U_{C0} 、 U_{C1} 、 U_{C2} 分别为:

$$U_{C0} = \frac{C_1 C_2}{C_1 C_2 + C_1 C_0 + C_2 C_0} U_B$$

$$\approx \frac{1449 \times 20}{1449 \times 20 + 1449 \times 230 + 20 \times 230} U_B = 0.079 U_B \quad (13)$$

$$U_{C1} = \frac{C_0 C_2}{C_1 C_2 + C_1 C_0 + C_2 C_0} U_B$$

$$\approx \frac{230 \times 20}{1449 \times 20 + 1449 \times 230 + 230 \times 20} U_B = 0.013 U_B \quad (14)$$

$$U_{C2} = \frac{C_0 C_1}{C_1 C_2 + C_1 C_0 + C_2 C_0} U_B$$

$$\approx \frac{1449 \times 230}{1449 \times 20 + 1449 \times 230 + 230 \times 20} U_B = 0.908 U_B \quad (15)$$

可知,此时90%以上的相电压 U_B 由石墨层与接地体之间的介质来承载,具有绝缘耐受能力的XLPE只承载相电压电压的10%左右。对应相电压64 kV,石墨层悬浮电位高达58.1 kV,此时必然会在石墨层与接地体之间绝缘最薄弱处发生击穿放电。

3) 电缆烧损原因

从图1、图2故障现场照片可知,故障电缆三相铝护套的保护接地电缆全部搭在B相电缆石墨层上。当B相电缆石墨层出现高悬浮电位时,A、C两相的保护接地电缆可近似为0电位(直接接地正常)。此时高悬浮电位必然会在B相电缆石墨层与绝缘薄弱处放电。通过放电通道,B相电缆石墨层实现假接地,由于石墨层与接地体之间的电容量很小, C_2 储存的电荷快速释放后又会重复充电,进而在故障点处形成高频的持续充放电。持续放电产生的热量会不断烧蚀外护套,进而造成外护套起火,导致最终的电缆烧损故障。

该次电缆烧损故障,是由于户外终端塔接地线断开产生的悬浮电压高频放电导致,直接原因是塔上直接接地箱B相接地电缆铜铝过渡连接端子存在质量问题,在铜铝过渡处断裂。而高悬浮电位产生的本质原因除直接接地线断开外,更与电缆石墨层未有效接地有关。为防止出现上述安全问题,电缆石墨层必须可靠接地,即110 kV以上高压单芯交流电缆,应采用可靠接地的金属支架,且电缆与支架、抱箍之间不应增加绝缘胶垫。

3 结 语

一起110 kV电缆外护套烧损故障案例分析的基础上,对单芯高压电缆由于接地系统异常引起的悬浮电位进行了讨论,并得出以下结论:

1) 当铝护套的可靠接地消失后,电缆铝护套上会出现悬浮电位。悬浮电位的大小与线路电压等级成正比,与电缆石墨层的接地状态有关。当石墨层可靠接地时,电缆可等效为两级电容结构;石墨(半导电)层未接地时,电缆可等效为三级电容结构。

(下转第61页)

建模,并将其用于故障定位,而在常用的基于阻抗的故障定位算法中,是不能直接利用这些参数的。所提方法可以灵活地包含系统的所有可用信息,这使得该方法具有高度的准确性。

参考文献

[1] 叶昌荣,冯树海,徐鹏,等. 基于故障录波数据同步技术的输电线路参数辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 156-161.

[2] Ram, B., Vishwakarma, D. N. Power System Protection and Switchgear [M]. New Delhi: Tata McGraw - Hill Publication Company Limited, 2005.

[3] 胡毅,刘凯,吴田,等. 输电线路运行安全影响因素分析及防治措施[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3491-3499.

[4] 蒋乐,刘俊勇,魏震波,等. 基于马尔可夫链模型的输电线路运行状态及其风险评估[J]. 电力系统自动

化, 2015, 39(13): 51-57.

[5] 马志远,石立宝,姚良忠,等. 电网连锁故障的事故链搜索模型及策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3292-3302.

[6] Das, S., Santoso, S., Gaikwad, A., et al. Impedance - based Fault Location in Transmission Networks: Theory and Application [J]. IEEE Access, 2014, 2: 537-557.

[7] 郑涛,潘玉美,郭昆亚,等. 基于节点阻抗矩阵的配电网故障测距算法[J]. 电网技术, 2013, 37(11): 3233-3240.

[8] Mora - Flórez, J., Meléndez, J., Carrillo - Caicedo, G. Comparison of Impedance - based Fault Location Methods for Power Distribution Systems [J]. Electric Power System Research, 2008, 78(4): 657-666.

作者简介:

张铃珠(1988),女,硕士,工程师,主要从事输配电网规划评审及运行分析研究。(收稿日期:2020-07-12)

(上接第22页)

2) 单端接地电缆线路,出现直接接地线脱落时,会造成铝护套未有效接地。石墨层未有效接地时,石墨层上会产生很高的悬浮电压,进而导致石墨层对绝缘薄弱处高频充放电,并不断烧蚀外护套,引发火灾等严重后果。

3) 当电缆线路通过绝缘胶垫放置在金属支架时,石墨层未有效接地。为防止出现上述安全问题,电缆石墨层必须可靠接地,即110 kV以上高压单芯交流电缆,应采用可靠接地的金属支架,且电缆与支架、抱箍之间不应增加绝缘胶垫。

参考文献

[1] 王荣亮,王浩鸣,宗红宝,等. 高压电缆金属护套接地环流平衡抑制方法分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(11): 108-114.

[2] 张才军,全风云,陈佳,等. 主变空载合闸引起的电缆护层过电压分析[J]. 高压电器, 2019, 55(2): 164-170.

[3] 吴明祥,包建强,王建明,等. 一起220 kV电缆预制式中间接头击穿故障及其原因分析[J]. 高压电器, 2010, 46(5): 95-97.

[4] 王谦,郝建,张电,等. 一交叉互联高压电缆绝缘故障的理论及仿真分析[J]. 高压电器, 2014, 50(9): 47-52.

[5] 陈根,唐焱,王新桥. 基于ATP的高压电缆金属护套多点接地故障仿真[J]. 高压电器, 2014, 50(4): 49-53.

[6] 段肖力,汤美云,林峰,等. 220 kV电缆中间接头主绝缘

击穿事故分析[J]. 高压电器, 2009, 45(6): 142-144.

[7] 程序,陶诗洋,王文山. 一起110 kV XLPE电缆终端局放带电检测及解体分析实例[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(S1): 226-230.

[8] 曹俊平,蒋愉宽,王少华,等. XLPE电力电缆接头缺陷检测关键技术分析与展望[J]. 高压电器, 2018, 54(7): 87-97.

[9] 方春华,李景,汤世祥,等. 基于接地电流的交叉互联箱故障诊断技术研究[J]. 高压电器, 2018, 54(6): 16-23.

[10] 王永志,曹炜,梁海生,等. 电缆护套环流估算公式的拟合及排列方式的优化[J]. 高压电器, 2017, 53(1): 77-82.

[11] 陈贵. 基于电力电缆安全性的防火工艺应用与探讨[J]. 电工技术, 2018(6): 39-40.

[12] 姬康源,贾紫蕊. 电力电缆的防火技术措施探究[J]. 通信电源技术, 2018(1): 139-140.

[13] 吴俊鹏. 高压单芯电缆外护套烧蚀故障分析[J]. 集成电路应用, 2019, 36(2): 125-126.

[14] 严璋,朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

[15] 邱关源,罗先觉. 电路(第5版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

[16] 电力工程电缆设计规范: GB 50217—2007[S], 2008.

作者简介:

刘云龙(1989),男,硕士,工程师,从事高压电缆、高电压与绝缘技术研究。

(收稿日期:2020-07-10)