

9-14-2020

Research on three optimized grounding schemes of HV cable cross connection system

Zhixiang WU

School of Electrical Engineering and Information , Sichuan University , Chengdu 610065 , China

Kai ZHOU

School of Electrical Engineering and Information , Sichuan University , Chengdu 610065 , China

Min HE

School of Electrical Engineering and Information , Sichuan University , Chengdu 610065 , China

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

WU, Zhixiang; ZHOU, Kai; and HE, Min (2020) "Research on three optimized grounding schemes of HV cable cross connection system," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 35: Iss. 3, Article 18.

DOI: 10.19781/j.issn.16739140.2020.03.018

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol35/iss3/18>

This Article is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology.

高压电缆交叉互联系统的 3 种优化接地方案

吴志祥, 周 凯, 何 珉

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要:为了限制电缆金属护层感应电压,降低交叉互联接地方式下电缆护层环流,该文对护层接地方式进行改进,以适用于电缆线路的改造。基于交叉互联接地方式在实际应用中的缺陷,提出 3 种护层接地方式的优化方案:护层一端经补偿电感接地、交叉互联单端接地、逐段单端接地。利用 PSCAD 仿真软件搭建仿真模型,并对 3 种接地方式下不同运行条件的护层电压和环流进行仿真。理论分析及仿真结果表明:3 种电缆护层接地方式可以有效抑制金属护层末端感应过高电压,且能降低线路改造后产生的护层环流,可作为今后工程实践的推广方向。

关 键 词:护层感应电压;交叉互联接地;优化方案;护层环流;PSCAD

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.03.018 中图分类号:TM247 文章编号:1673-9140(2020)03-0135-06

Research on three optimized grounding schemes of HV cable cross connection system

WU Zhixiang, ZHOU Kai, HE Min

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to reduce the induced voltage at the metal sheath of cables, as well as the circulation current of sheath in the cross interconnected grounding mode, the grounding mode of sheath is modified for the reconstruction of cable lines. Based on the defects of cross interconnection grounding in the practical application, three kinds of the optimization scheme for grounding protection are proposed. There are the grounding of one side of the protective layer through the compensating inductance, single terminal grounding through the cross connection, and grounding at each section. The simulation models are built by utilizing PSCAD simulation software to study the voltage and circulation current at sheaths under different schemes. Theoretical analysis and simulation results show that those three kinds of cable sheath grounding can effectively suppress the metal sheath end induction high voltage. The sheath circulation current produced after the line reconstruction can be reduced. The optimization schemes for cable sheath grounding can be utilized as the engineering practice in the future direction of promotion.

Key words: protective layer induced voltage; cross connect ground; optimization scheme; protective layer circulation; PSCAD

随着城市化进程的加快,城市电网中地下电缆逐步取代架空线,且所占比重越来越大^[1-4]。但在实际工程中,较短的高压单芯电缆一般会采取护层单端接地,未接地端的金属护层可能感应较大电

压^[5-6]。对于较长的高压单芯电缆,其金属护层一般会采用交叉互联接地,这种接地方式能够降低金属护层感应电压、有效保护外护套绝缘^[7-10]。但由于城市负荷的不断增加以及故障后的抢修,高压电缆

线路的改造工程越来越多,从而破坏原有的交叉互联接地方式,造成护层环流问题;当线路遭受雷击或发生单相短路时,护层感应电压可能会击穿电缆的外护套,造成电缆护层多点接地故障^[11-12],增加护层环流;长期运行时过大的护层环流会产生大量热损耗、降低电缆的载流量,同时加速电缆绝缘的老化,缩短使用寿命。因此,对护层感应电压和护层环流的抑制方法的研究意义重大。

国内外学者对单端接地线路电缆护层过电压及环流进行了大量研究,并在实际工程中取得了积极的效果。文献[13]分别对单端接地及双端接地线路电缆护层环流的影响因数进行研究,并提出减小环流的有效途径,且简要说明了交叉互联系统的缺陷但并未进行具体研究;文献[14]建立超高压海底电缆的理论模型,推导出一种计及线芯电流轴向空间分布特性的电缆护套环流计算的新方法,并进行仿真验证,但未对如何减小环流做进一步分析;文献[15]对金属护层补偿电感的装置进行详细的理论研究,但缺乏有效的仿真及实验验证。目前对交叉互联系统电缆护层过电压及环流的研究还不够^[16-19],交叉互联电缆线路经改造后造成的护层过电压及环流问题还未引起众多学者的关注,缺乏有效的解决方法。

针对上述问题,该文首先介绍电缆护层过电压的产生原因及交叉互联接地方式;然后为适用于电缆线路的改造,针对传统的交叉互联接地方式进行改进,提出了3种护层接地方式;再利用PSCAD电磁暂态仿真软件,对电缆在工频电压、雷击过电压及单相接地短路3种不同情况进行建模仿真,验证3种方式的可靠性。

1 交叉互联接地系统及其缺陷

1.1 传统交叉互联接地方式

在许多实际的电缆出线变电站中,由于电缆长度较短(一般只有几百米),电缆护层都采用单端接地方式,即电缆护层一端直接接地,另一端经护层保护器接地,这种接地方式可以有效地限制护层感应电压,消去护层环流。但是电缆护层单端接地仅适用于短电缆线路,当电缆长度超过1 000 m时,护层宜采用三相交叉互联的接地方式。这种方式是将电

缆线路平均分成3的倍数个单元,每相邻两小段电缆间安装绝缘接头,在绝缘接头处的电缆护层三相交叉换位连接,并用同轴接地电缆连接至护层保护器接地,电缆线路两端护层经直接接地箱接地,交叉互联的接线方式如图1所示。

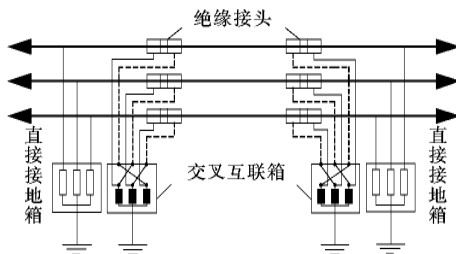


图1 交叉互联接地示意

Figure 1 The diagram of cross connection grounding

交叉互联线路各小段电缆长度相等,三相护层感应电压的相位差为 120° ,护层交叉换位的次序为“A→B→C→A”,沿电缆线路,不同相的三小段电缆护层串联在一起,可以起到降低护层感应电压的作用。

1.2 非理想交叉互联系统

在实际工程中,由于受到各种因素的制约,交叉互联接地方式很难达到理想的效果,并且随着城市电网的不断发展,许多电缆线路需要进行相应的改造,这往往会破坏理想的交叉互联接地方式,使得某段电缆长度减小,造成电缆护层两直接接地端的电位差不为零,从而在电缆护层上产生环流。环流的出现不仅会损耗大量的电能,降低电缆的输送能力,还会严重影响到电缆的绝缘性能。这就需要对交叉互联线路进行改进,以达到降低护层电压及环流的效果。

2 交叉互联接地系统优化方案及仿真分析

该文基于交叉互联接地方式在实际应用中的缺陷,提出3种护层接地方式的优化方案:护层一端经补偿电感接地、交叉互联单端接地、逐段单端接地。利用PSCAD仿真软件搭建仿真模型,分别进行仿真验证。电缆模型选取Frequency Dependent (Phase) Model模型,该模型能够全面反映不同频率分量在电缆中传播时的衰减和畸变。电缆参数依据YLLW03-64/110-1 * 400型号的电进行设置,线芯标称截面积为 400 mm^2 ,电压等级为110 kV,

负载设为三相对称星形电阻,取值 $300\ \Omega$,电缆采用交叉互联的接地方式,第 1、2 段电缆长度为 $500\ \text{m}$,第 3 段电缆长度为 $200\ \text{m}$,金属护层接地电阻设为 $1\ \Omega$ 。

2.1 补偿电感

补偿电感实质上是一个周围缠绕线圈的铁芯。将补偿电感安装在较短段电缆末端,具体的安装方式是将线圈的一端接入电缆护层,另一端接地,在安装过程中需要注意补偿电感的方向,保证护层与线圈产生的感应电压符号相反,补偿电感安装如图 2 所示。

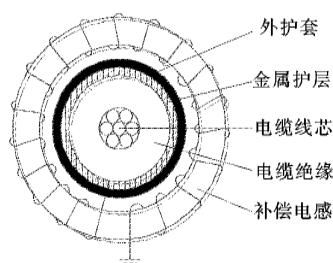


图 2 补偿电感的安装示意

Figure 2 Installation diagram of compensation inductance

为了验证补偿电感法的可靠性,该文基于 PSCAD 仿真软件对补偿前后电缆护层工频感应电压进行仿真计算。经过仿真计算可得补偿前三相电缆护层感应电压: $U_A=22.725\ \text{V}$, $U_B=25.804\ \text{V}$, $U_C=25.564\ \text{V}$ 。补偿电感大小可计算,即

$$U_L = \omega L I \quad (1)$$

式中 U_L 为电感两端的电压; L 为补偿电感值; I 为电缆护层中电流的大小; ω 是电源角频率,取值为 $2\pi f$ 。

根据式(1)可得每相电缆需补偿的电感数值分别为: $L_A=5.3\ \text{mH}$, $L_B=10.7\ \text{mH}$, $L_C=13.1\ \text{mH}$ 。补偿前后各相护层感应电压如图 3 所示,从

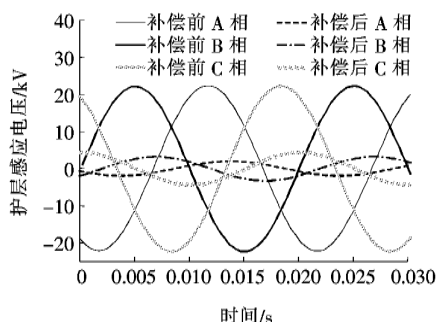


图 3 补偿前后各相护层感应电压

Figure 3 Induced voltages of each sheath before and after compensation

仿真结果可以看出,安装补偿电感线圈后各相电缆护层感应电压明显减小,此时各相护层感应电压幅值为 $U_A=2.002\ \text{V}$, $U_B=2.966\ \text{V}$, $U_C=4.786\ \text{V}$ 。

2.2 交叉互联单端接地

传统的交叉互联接地方式不利于电缆线路的改造,电缆金属护层上往往会产生环流和较大感应电压。对传统的交叉互联接地方式进行优化,得到电缆交叉互联单端接地方式即可解决上述问题。交叉互联单端接地是指将电缆一端直接接地,另一端经护层保护器接地,中间部分接地方式保持不变。由于电缆护层只有一端直接接地,未直接接地的护层末端上会产生感应电压,当护层感应电压较高时护层保护器动作,可以起到护层过电压保护的作用。在正常运行下,由于护层保护器呈现高电阻状态,护层只有一端与大地相连,不构成回路,不会产生护层环流。

与交叉互联接地方式相比,交叉互联单端接地系统需要敷设一根回流线。因为当电缆发生单相接地短路时,金属护层由于只有一端接地,无法为短路电流提供回路,短路电流将以大地作为回路,电缆护层会产生很大感应电压。装设回流线后,短路电流直接经回流线返回,回流线中电流产生的磁通会抵消一部分电缆芯线电流产生的磁通,从而降低护层感应电压,同时装设回流线还可以起到降低地电位升高的作用^[20-21]。而对于交叉互联接地方式,金属护层两端直接接地,护层本身即可起到回流线的作用,故不须敷设回流线。电缆交叉互联单端接地的接线方式如图 4 所示。

在 PSCAD 中搭建仿真模型,对交叉互联接地及交叉互联单端接地 2 种不同的电缆护层接地方式进行对比研究。对电缆在工频电压、雷击过电压及单相接地短路 3 种不同的运行方式下进行仿真计算,雷击点位于电缆末端,雷电流取 $100\ \text{kA}$,雷击及短路均设为 A 相电缆,仿真结果如图 5~7 所示。

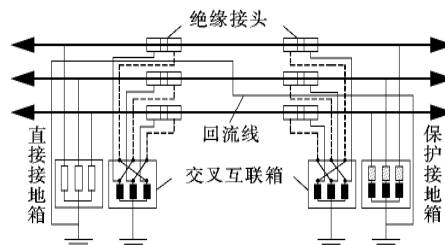


图 4 交叉互联单端接地

Figure 4 Single terminal grounding through cross connection

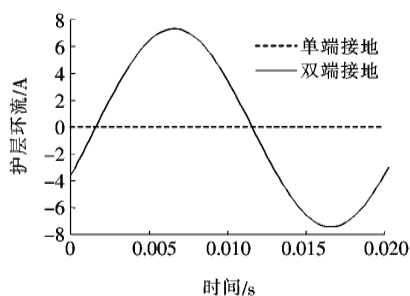


图 5 工频运行下 A 相电缆金属护层环流对比

Figure 5 Comparison of metal sheath circulation current of A phase cable under power frequency operation

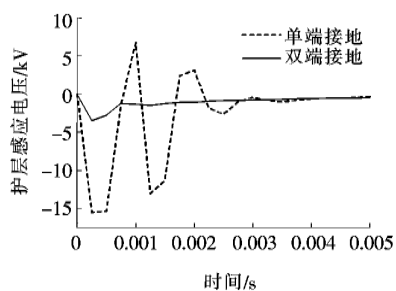


图 6 雷击时护层感应电压

Figure 6 Induced voltage of shield layer during lightning strike

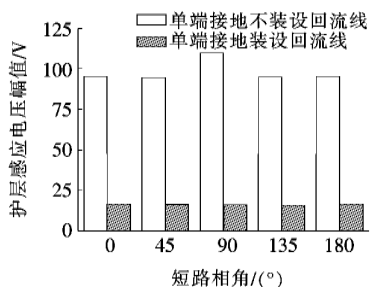


图 7 交叉互联单端接地线路 A 相短路护层过电压

Figure 7 Overvoltage of shield layer during A phase short circuit of cross connected single terminal grounding line

根据图 5 所示的仿真结果可以看出交叉互联单端接地方式能够截断工频电压下护层环流,避免了能量损失。从图 6 可以看出当电缆遭受雷击时交叉互联单端接地电缆护层感应电压较高,但是由于末端接入了护层保护器,护层电压幅值可以限制在安全范围内。据图 7 可知交叉互联单端接地线路装设回流线后可以增强电缆的抗短路能力,发生单相短路时护层感应电压幅值最大降低了 86%,最大值由 109.541 kV 减小到 16.204 V,有利于电缆安全稳定运行。

2.3 逐段单端接地

为了能从根本上解决护层环流问题并适用于电缆线路的改造,除了采用交叉互联单端接地的方式外,还可以将传统的交叉互联接地改进成电缆逐段单端接地。电缆逐段单端接地实质上是电缆单端接地的串联形式,具体的方式是先将长电缆线路分成若干段,相邻两端电缆之间用绝缘接头连接,然后将每小段电缆金属护层的一端直接接地,另一端经护层保护器接地。与交叉互联单端接地一样,为了降低电缆发生单相接地短路故障时短路电流带来的危害,沿电缆线路同样需要敷设回流线。电缆逐段单端接地的接线如图 8 所示。

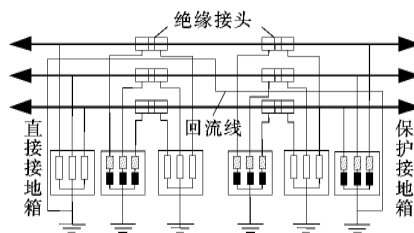


图 8 逐段单端接地

Figure 8 The diagram of piecewise single terminal grounding

与交叉互联接地方式相比,逐段单端接地方式具有以下几处优点:①各小段电缆长度无需相等,在保证每小段电缆金属护层上的感应电压不超过 50 V 的前提下,电缆长度取值范围灵活,而且电缆护层不会产生环流;②适用于电缆线路的改造,电缆经过改造后,逐段单端接地方式不会被破坏;③电缆接地方便,各小段电缆接地点相互独立,互不影响。对于电缆出线变电站,可将与变电站相连端电缆护层经保护器接地,减小变电站地网电压对电缆护层的影响。对于电缆—架空线的混合线路,将混合线路连接处的电缆金属护层直接接地,可以降低沿线传播的过电压幅值。虽然逐段单端接地方式具有上述优点,但其明显的不足之处是极大地提高了线路成本。

同样,为了进一步说明逐段单端接地的有效性,在 PSCAD 中搭建仿真模型,将交叉互联接地及逐段单端接地 2 种不同的电缆护层接地方式进行对比。模型及各参数同上,电缆在工频电压、雷击过电压及单相接地短路 3 种不同的运行方式下的仿真结果如表 1、2 所示。

表 1 2 种接地方式对比

Table 1 Comparison of two grounding modes

交叉互联接地		逐段单端接地	
工频护层 环流/A	雷击护层 电压/kV	工频护层 环流/A	雷击护层 电压/kV
$I_A=7.399$		$I_A=0$	
$I_B=7.658$	3.471	$I_B=0$	13.575
$I_C=8.828$		$I_C=0$	

表 2 逐段单端接地电缆 A 相短路护层过电压

Table 2 Protective layer overvoltage in single phase single ended grounding cable with A phase short circuit

短路相角/ (°)	不装设回流线时 护层电压/V	装设回流线时 护层电压/V
0	94.575	11.699
45	93.863	11.642
90	-113.594	11.485
135	-94.017	11.312
180	-94.575	-11.699

从表 1、2 的仿真数据可以看出,与交叉互联单端接地方式一样,电缆逐段单端接地方式也可降低护层环流,承受自然雷击。装设回流线后,逐段单端接地线路发生单相短路时,护层过电压最大值由 113.594 V 减小到 11.485 V,最大降低幅度达 90%,极大提高了线路的抗短路能力。

3 结语

1)当交叉互联三小段电缆不等长时,在较短一段电缆护层末端安装补偿电感可以大幅度降低护层过电压幅值,使之处于允许范围内,保证电缆的安全运行;

2)电缆交叉互联单端接地优于传统的电缆交叉互联接地方式。在工频电压下可以截断护层环流,避免能量损失;当电缆遭受雷击时,虽然护层过电压幅值相对较高,但由于保护器的存在,也能保证电缆的安全运行;由于护层只有一端接地,当电缆发生单相短路时无法为短路电流提供回流通路,因此需要装设回流线,回流线的存在可以减低电缆单相短路时护层感应电压。

3)电缆护层逐段单端接地也能有效截断工频护层环流,降低雷击及短路时护层感应电压。从仿真结果可以看出,其抗短路能力优于电缆交叉互联单

端接地方式。虽然其效果更佳,但由于线路装设成本高,在实际工程中应依据不同的要求选取合适的方案。

参考文献:

- [1] 李超群,张嘉旻,谢伟,等. 500 kV 城市电缆线路过电压研究[J]. 华东电力,2012,40(5): 869-872.
LI Chaoqun,ZHANG Jiamin,XIE Wei,et al. Overvoltage of 500kV city cable line[J]. East China Electric Power,2012,40(5): 869-872.
- [2] 牛海清,王晓兵,刘毅刚,等. 高压单芯电缆金属护套雷电过电压仿真和参数分析[J]. 高电压技术,2009,35(4): 784-789.
NIU Haiqing,WANG Xiaobing,LIU Yigang,et al. Simulation and parameter analysis of sheath lightning overvoltage of single-core cable[J]. High Voltage Engineering,2009,35(4): 784-789.
- [3] 杨小兵,苏洪波,王志刚,等. XLPE 电缆护层保护器引起护层环流异常分析[J]. 四川电力技术,2013,36(5): 87-90.
YANG Xiaobing,SU Hongbo,WANG Zhigang,et al. Analysis on abnormal sheath circulation caused by sheath protector in XLPE cable[J]. Sichuan Electric Power Technology,2013,36(5): 87-90.
- [4] 杜伯学,李忠磊,张锴,等. 220 kV 交联聚乙烯电力电缆接地电流的计算与应用[J]. 高电压技术,2013,39(5): 1034-1039.
DU Boxue,LI Zhonglei,ZHANG Kai,et al. Calculation and application of 220 kV crosslinked polyethylene power cable grounding current[J]. High Voltage Engineering,2013,39(5): 1034-1039.
- [5] 高俊国,于平澜,李紫云,等. 基于有限元法的电缆金属护套感应电压仿真分析[J]. 高电压技术,2014,40(3): 714-720.
GAO Junguo,YU Pinglan,LI Ziyun,et al. Simulation analysis of induced voltage on metal sheath of power cable based on finite element method[J]. High Voltage Engineering,2014,40(3): 714-720.
- [6] 李雷,李飞,周力行,等. 35kV 变电站电缆护套过电压保护研究[J]. 电瓷避雷器,2008,45(5): 23-25.
LI Lei,LI Fei,ZHOU Lixing,et al. Research on over-voltage protection of cable sheath in 35kV substations[J]. Insulators and Surge Arresters,2008,45(5): 23-25.
- [7] 赵智大. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版社,1999.

- [8] 曹晓斌,易志兴,陈奎,等. 高速铁路馈线电缆雷电过电压及防护措施[J]. 高电压技术,2016,42(2): 619-626.
CAO Xiaobin, YI Zhixing, CHEN Kui, et al. Lightning overvoltage and protection measures of high-speed railway feeder cable[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(2): 619-626.
- [9] 樊友兵,赵健康,钱康,等. 单芯电力电缆同相多根并联运行方式分析与优化[J]. 高电压技术,2010,36(10): 2607-2612.
FAN Youbing, ZHAO Jiankang, QIAN Kang, et al. Analysis and optimisation for operation of the single-core power cables in parallel[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2607-2612.
- [10] 兰贞波,赵常威,阮江军. 海底电缆-架空线路雷击过电压分析与计算[J]. 电力自动化设备,2014,34(10): 133-137.
LAN Zhenbo, ZHAO Changwei, RUAN Jiangjun. Analysis and calculation of submarine cable-overhead line lightning overvoltage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(10): 133-137.
- [11] 江日洪. 交联聚乙烯电力电缆线路[M]. 北京: 中国电力出版社,2009.
- [12] 梁型淦,王昱力,张磊. 220 kV 电缆护套单相接地故障过电压特性[J]. 武汉大学学报:工学版,2013,46(6): 747-751+758.
LIANG Xinggan, WANG Yuli, ZHANG Lei. Sheath overvoltage characteristics for single-phase ground fault in 220kV power cable[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2013, 46(6): 747-751+758.
- [13] 刘楚加. 高压单芯电缆减小金属护套环流的途径[J]. 自动化应用,2013(7): 87-89.
LIU Chujia. Methods of decreasing metal sheath circulation of high voltage single-core cable[J]. Automation Application, 2013(7): 87-89.
- [14] 杜兆斌,杨泽明,谌军,等. 超高压海底电缆护套环流的理论计算新方法[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2013,41(12): 63-69.
DU Zhaobin, YANG Zeming, CHEN Jun, et al. A new method to theoretically calculate circulating current of sheath of extra-high voltage submarine cables[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2013, 41(12): 63-69.
- [15] 马宏忠,李超群,许高俊,等. 电缆金属护层环流补偿装置设计[J]. 电力自动化设备,2015,35(4): 151-155.
MA Hongzhong, LI Chaoqun, XU Gaojun, et al. Design of compensation device for metal shield circulating current of power cable[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 151-155.
- [16] 夏向阳,贺运九,唐洁,等. 电缆接头局部放电在线监测方法[J]. 电力科学与技术学报,2016,31(4): 143-148+167.
XIA Xiangyang, HE Yunjiu, TANG Jie, et al. Research on on-line monitoring of partial discharge for distribution underground cable joint[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(4): 143-148+167.
- [17] 杨超,李明德,黄海,等. 基于向量运算法的交叉互联XLPE电缆在线监测系统设计[J]. 电力科学与技术学报,2016,31(3): 88-94.
YANG Chao, LI Mingde, HUANG Hai, et al. Design of on-line monitoring system for crossing-linked XLPE cable based on vector calculation method[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(3): 88-94.
- [18] 杨龙涛,唐忠. 交叉互联的单芯XLPE电缆绝缘在线监测系统[J]. 电力科学与技术学报,2014,29(4): 72-78.
YANG Longtao, TANG Zhong. Insulation online monitoring system for cross-linked single-core XLPE cable[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2014, 29(4): 72-78.
- [19] 成健,黎玉强,刘文东,等. 一种单芯电缆护层电压补偿与环流限制技术分析[J]. 通信电源技术,2016,33(1): 96-99.
CHEN Jian, LI Yuqiang, LIU Wendong, et al. Analysis on compensation of induced voltage and restrictions of circular current in the metal sheath high-voltage power cable[J]. Telecom Power Technology, 2016, 33(1): 96-99.
- [20] 朱文卫,梁爱武. 基于ATP-EMTP的高压电缆回流线设置仿真研究[J]. 中国电力,2014,47(3): 107-110.
ZHU Wenwei, LIANG Aiwu. ATP-EMTP based simulation study on auxiliary ground wire in high-voltage cables[J]. Electric Power, 2014, 47(3): 107-110.
- [21] 王炼兵,郭伟华,陈腾彪,等. 高压电力电缆事故回流线接地端子发热缺陷分析[J]. 广东电力,2013,26(12): 120-123.
WANG Lianbing, GUO Weihua, CHEN Tengbiao, et al. Analysis on calorification defect of grounding terminal of accident return cable of high voltage power cable[J]. Guangdong Electric Power, 2013, 26(12): 120-123.