

考虑末端电压的长距离海缆耐压 试验中新频率约束

孙 凯^{1,2}, 潘文霞¹, 朱正鼎¹, 赵 坤¹, 陈 洁³

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098; 2. 国网江苏省电力有限公司淮安市洪泽区供电公司, 江苏 淮安 223100;
3. 国电南京自动化股份有限公司, 江苏 南京 210032)

摘 要:长距离海底电缆在进行交流耐压试验时由于容升现象, 沿线电压升高, 其升高的数值与电缆长度和试验电源频率有关。极端条件下, 该数值会威胁到电缆的耐压水平从而阻碍了电缆耐压试验的进行。在此背景下, 以研究电缆末端电压为目的, 建立一种计及电缆护层的分布参数等值电路模型。基于该模型, 推导单芯电缆沿线电压计算公式, 并通过仿真验证其计算公式的正确性, 继而探究沿线电压与电缆长度以及试验电源频率的关系, 从而得知电缆长度越长, 其沿线电压受试验频率变化越明显。最后为限制末端电压幅值, 以 220 kV XLPE 电缆为例, 对于不同长度的电缆耐压试验的电源频率提出新的约束范围, 给现场耐压试验设计人员提供指导性意见。

关 键 词:耐压试验; 长电缆容升; 试验电源频率; 末端电压

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.05.013 中图分类号:TM831 文章编号:1673-9140(2020)05-0096-07

A new frequency constraint for the long distance cable withstand voltage test considering terminal voltage

SUN Kai^{1,2}, PAN Wenxia¹, ZHU Zhengding¹, ZHAO Kun¹, CHEN Jie³

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Huai'an Hongze District Power Supply Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Huai'an 223100, China;
3. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 210032, China)

Abstract: During the AC voltage withstand test, the voltage along the long distance submarine cable would be increased due to the capacitance effect. The elevated voltage value is related to the cable length and the test power supply frequency. Under extreme conditions, this value might threaten the withstand voltage level of cable and hinder voltage withstand test. In this paper, a distributed parameter equivalent circuit model considering cable sheath is established to study the cable terminal voltage. Based on this model, the calculation formula of the voltage along a single core cable is obtained. Then the obtained formula is verified by a simulation. Furthermore, the relationship among the voltage along the cable, the cable length and the power frequency is explored. Research results indicate that, the influence degree of test voltage frequency on the voltage along cable increases with the increasing cable length. Finally, a new frequency scope limitation of withstand test source is proposed for the 220 kV crosslinking polyethylene cable with different lengths to restrict the terminal voltage amplitude. It provides some guidance to field test designers.

Key words: voltage withstand test; capacitive voltage rise of long cable; test power frequency; terminal voltage

收稿日期:2018-07-19; 修回日期:2018-10-26

基金项目:国家自然科学基金(51377047); 高等学校学科创新引智计划(B14022)

通信作者:潘文霞(1961-),女,博导,教授,主要从事可再生能源发电与高电压绝缘技术研究, E-mail:pxwxh@hhu.edu.com

现阶段,海洋风力发电是国际上绿色能源开发的主要关注点之一,沿海及群岛地区的电力传输在很大程度上都是通过海底电力电缆来完成^[1-2]。对海缆进行交流耐压试验是目前现场交接时电缆质量检测最直接的方法,其耐压试验技术愈发重要。

一般情况下,在对于较短(长度小于 10 km)的电缆在进行交流耐压试验时不必要将容升现象考虑进来,而对于海缆这类长度较大(以 100 km 为例)的电缆来说,由于线路分布参数的条件,这个现象就不能被简单忽略了,若依然凭经验的思维模式进行试验可能会产生极其严重的后果。容升效应的积累使得电缆线路末端电压升高^[3],对于电缆耐压试验时的末端电压计算目前研究较少,在电缆等效模型上几乎都将电缆分布参数模型和架空线分布参数模型当做是一样的^[4-6],忽略了电缆护套层的影响,这与电缆实际运行状态不相符合。文献[7]以集中参数模型来表示电缆,并且给出了电缆终端电压计算公式,然而在研究长距离海缆时,根据集中参数进行计算误差较大;文献[8]通过软件仿真 10~100 km 电缆线路的首末端电压数值,通过曲线拟合建立起首末端电压关系,该公式只适用于工频条件下的末端电压计算,而电缆耐压试验时谐振频率在 30~300 Hz 可变,所拟合出来的公式已然不能适用;文献[9]研究了长、短电缆线路末端电压不同试验频率下的变化情况,但其电缆等效模型中的电阻、电感、电容参数认为是固定不变的,而现实状况是电阻、电感参数是随着试验电源频率的变化而变,除此之外并没有给出电缆沿线电压计算公式,所使用的电缆等值电路也并没有通过具体的验证,有待考量。

在前人研究的基础上,该文通过提出一个带有金属护套的电缆分布参数模型,推导了电缆沿线电压计算公式,使用 PSCAD/EMTDC 软件来仿真验证所推导出的电缆沿线电压计算公式的正确性。并进一步研究得出沿线电压会随着试验电源频率的升高而增大的结论,最后根据试验电缆长度不同提出耐压试验电源频率新的约束范围,在耐压试验中间接降低了电缆线芯末端电压幅值,提高了试验的安全性和可靠性。

1 电缆等效模型建立

1.1 耐压试验简介

海缆耐压试验原理如图 1 所示^[10],根据试验规程^[11-12],耐压试验采用 30~300 Hz 交流电压,127/220 kV 电缆交流耐压试验采用 $1.7U_0$, $U_0 = 127$ kV 为电缆相电压有效值。试验时间为 60 min。对即将投入运行的电缆进行交流耐压试验时,每一相电缆应该分开进行。在试验或测量时,试验电缆金属护层两端同时接地^[13],线芯末端悬空。由图 1 可知,在计算末端电压时,与电缆相连的试验设备可以等效为理想电压源,试验电压即为电源电压,试验频率为电源频率。

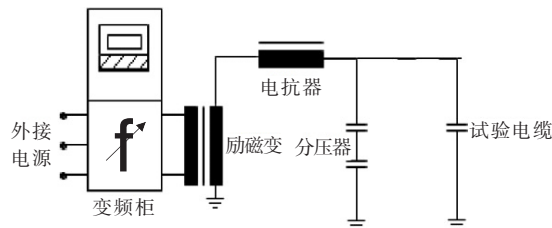


图 1 耐压试验原理

Figure 1 Principle diagram of voltage withstand test

1.2 单芯电缆结构

该文以交联聚乙烯电缆(XLPE)为研究对象,该电缆由线芯、绝缘层、金属护层、外护套等组成一个多导体的系统^[14-18],其中金属护层包含电缆的屏蔽层和铠装层,电缆截面结构如图 2 所示。

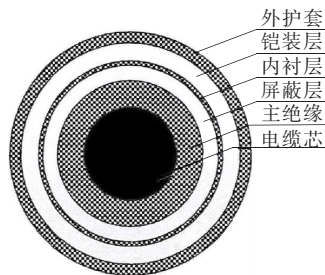


图 2 XLPE 单芯电缆结构

Figure 2 XLPE single core cable structure

电缆线芯作为一个导体负责传输要求的负载电流,其模型可以用一个单位长度的阻抗来表示,绝缘层用来隔开线芯与金属护层,其模型可以用一个单位长度的导纳来表示,同样将金属护层当做与线芯平行的导体,其外护套与绝缘层一样作为导纳处理。

1.3 单芯电缆等效模型

由 1.1 节分析,建立 XLPE 单芯电缆分布参数模型如图 3 所示。图中 R_1 、 L_1 、 R_2 、 L_2 、分别表示为电缆线芯和金属护层单位长度的电阻、电感; C_{12} 、 C_g 分别表示为线芯和金属护层的耦合电容、对地电容; $Z_{12} = R_{12} + j\omega M_{12}$ 表示线芯和金属护层之间的互阻抗; $\omega = 2\pi f$, f 为试验电源频率。

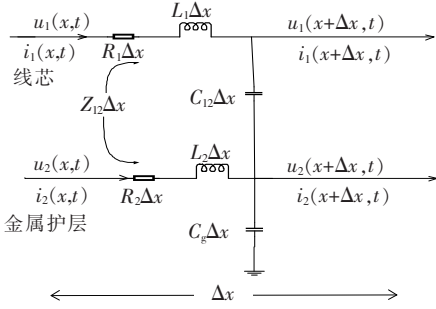


图 3 单相电缆分布参数模型

Figure 3 Distributed parameter model of single-phase cable

如图 3 所示的模型中,以 Δx 作为长度微元,每个微元用集中参数来表示,当微元 Δx 无限靠近 0 时,该模型就能准确地体现电缆传输的分布参数特性。

2 电缆沿线电压计算公式的推导

设电缆线芯和护层的首端电压电流分别为 $u_j(x,t)$ ($j=1,2$)、 $i_j(x,t)$ ($j=1,2$); 末端电压电流分别为 $u_j(x+\Delta x,t)$ ($j=1,2$)、 $i_j(x+\Delta x,t)$ ($j=1,2$)。

长度为 Δx 的线路中首末端电压电流满足:

$$\begin{cases} u_j(x+\Delta x,t) = u_j(x,t) + \frac{\partial u_j(x,t)}{\partial x} \Delta x \\ i_j(x+\Delta x,t) = i_j(x,t) + \frac{\partial i_j(x,t)}{\partial x} \Delta x \end{cases} \quad (1)$$

由 KCL 和 KVL 定律还可以得到如下关系:

$$\begin{cases} u_1(x,t) - u_1(x+\Delta x,t) = R_1 \Delta x i_1(x,t) + L_1 \Delta x \frac{\partial i_1(x,t)}{\partial t} + R_{12} \Delta x i_2(x,t) + M_{12} \Delta x \frac{\partial i_2(x,t)}{\partial t} \\ u_2(x,t) - u_2(x+\Delta x,t) = R_2 \Delta x i_2(x,t) + L_2 \Delta x \frac{\partial i_2(x,t)}{\partial t} + R_{12} \Delta x i_1(x,t) + M_{12} \Delta x \frac{\partial i_1(x,t)}{\partial t} \\ i_1(x,t) - i_1(x+\Delta x,t) = C_{12} \Delta x \frac{\partial (u_1(x+\Delta x,t) - u_2(x+\Delta x,t))}{\partial t} \\ i_2(x,t) - i_2(x+\Delta x,t) = C_g \Delta x \frac{\partial u_2(x+\Delta x,t)}{\partial t} + C_{12} \Delta x \frac{\partial (u_2(x+\Delta x,t) - u_1(x+\Delta x,t))}{\partial t} \end{cases} \quad (2)$$

根据导数定义,将式(2)两边同时除以 Δx ,得

$$\begin{cases} -\frac{\partial u_1(x,t)}{\partial x} = R_1 i_1(x,t) + L_1 \frac{\partial i_1(x,t)}{\partial t} + R_{12} i_2(x,t) + M_{12} \frac{\partial i_2(x,t)}{\partial t} \\ -\frac{\partial u_2(x,t)}{\partial x} = R_2 i_2(x,t) + L_2 \frac{\partial i_2(x,t)}{\partial t} + R_{12} i_1(x,t) + M_{12} \frac{\partial i_1(x,t)}{\partial t} \\ -\frac{\partial i_1(x,t)}{\partial x} = C_{12} \frac{\partial (u_1(x+\Delta x,t) - u_2(x+\Delta x,t))}{\partial t} \\ -\frac{\partial i_2(x,t)}{\partial x} = C_g \frac{\partial u_2(x+\Delta x,t)}{\partial t} + C_{12} \frac{\partial (u_2(x+\Delta x,t) - u_1(x+\Delta x,t))}{\partial t} \end{cases} \quad (3)$$

对式(3)中的电压电流变量做进一步化简,得

$$\begin{cases} -\frac{\partial u_{1x}}{\partial x} = R_1 i_{1x} + L_1 \frac{\partial i_{1x}}{\partial t} + R_{12} i_{2x} + M_{12} \frac{\partial i_{2x}}{\partial t} \\ -\frac{\partial u_{2x}}{\partial x} = R_2 i_{2x} + L_2 \frac{\partial i_{2x}}{\partial t} + R_{12} i_{1x} + M_{12} \frac{\partial i_{1x}}{\partial t} \\ -\frac{\partial i_{1x}}{\partial x} = C_{12} \frac{\partial (u_{1x} - u_{2x})}{\partial t} \\ -\frac{\partial i_{2x}}{\partial x} = C_g \frac{\partial u_{2x}}{\partial t} + C_{12} \frac{\partial (u_{2x} - u_{1x})}{\partial t} \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)用相量的形式表示出来,得

$$\begin{cases} -\frac{dU_{1x}}{dx} = (R_1 + j\omega L_1) I_{1x} + (R_{12} + j\omega M_{12}) I_{2x} \\ -\frac{dU_{2x}}{dx} = (R_2 + j\omega L_2) I_{2x} + (R_{12} + j\omega M_{12}) I_{1x} \\ -\frac{dI_{1x}}{dx} = j\omega C_{12} (U_{1x} - U_{2x}) \\ -\frac{dI_{2x}}{dx} = j\omega C_g U_{2x} + j\omega C_{12} (U_{2x} - U_{1x}) \end{cases} \quad (5)$$

设

$$\begin{cases} Z_1 = R_1 + j\omega L_1 \\ Z_2 = R_2 + j\omega L_2 \\ Y_{12} = j\omega C_{12} \\ Y_g = j\omega C_g \end{cases} \quad (6)$$

将式(6)代入式(5),并对式(5)两边进行拉普拉斯变换,得

$$-(s U_1(s) - U_1(0)) = Z_1 I_1(s) + Z_{12} I_2(s) \quad (7-1)$$

$$-(s U_2(s) - U_2(0)) = Z_2 I_2(s) + Z_{12} I_1(s) \quad (7-2)$$

$$\begin{cases} -(s I_1(s) - I_1(0)) = Y_{12}(U_1(s) - U_2(s)) \\ -(s I_2(s) - I_2(0)) = Y_g U_2(s) \end{cases} \quad (7-3)$$

$$-(s I_2(s) - I_2(0)) = Y_g U_2(s) \quad (7-4)$$

$$-(s I_2(s) - I_2(0)) = Y_g U_2(s) \quad (7-4)$$

式中 $U_1(0)$ 、 $U_2(0)$ 、 $I_1(0)$ 、 $I_2(0)$ 是电缆线芯和护套首端电压和电流相量。将式(7-3、4)代入式(7-1、2),得到 $U_1(s)$ 、 $U_2(s)$ 表达式:

$$U_1(s) = \frac{(Z_{12}Y_g + Z_{12}Y_{12} - Z_1Y_{12})U_2(s)}{(s^2 - Z_1Y_{12} + Z_{12}Y_{12})} + \frac{s U_1(0) - Z_1 I_1(0) - Z_{12} I_2(0)}{(s^2 - Z_1Y_{12} + Z_{12}Y_{12})} \quad (8)$$

$$U_2(s) = \frac{(Z_{12}Y_{12} - Z_2Y_{12})U_1(s)}{(s^2 - Z_2Y_g - Z_2Y_{12} + Z_{12}Y_{12})} + \frac{s U_2(0) - Z_2 I_2(0) - Z_{12} I_1(0)}{(s^2 - Z_2Y_g - Z_2Y_{12} + Z_{12}Y_{12})} \quad (9)$$

设

$$\begin{cases} a = Z_{12}Y_g + Z_{12}Y_{12} - Z_1Y_{12} \\ b = Z_{12}Y_{12} - Z_2Y_{12} \\ c = Z_1Y_{12} - Z_{12}Y_{12} \\ d = Z_2Y_g + Z_2Y_{12} - Z_{12}Y_{12} \\ e = Z_1 I_1(0) + Z_{12} I_2(0) \\ h = Z_2 I_2(0) + Z_{12} I_1(0) \end{cases} \quad (10)$$

将式(9)代入式(8)消去 $U_2(s)$,并将式(10)同时代入,得到电缆沿线电压 $U_1(s)$ 的表达式:

$$U_1(s) = \frac{(s^2 - d)(s U_1(0) - e) + as U_2(0) - ah}{(s^2 - c)(s^2 - d) - ab} \quad (11)$$

式中 a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 h 都已知, $U_1(0)$ 、 $U_2(0)$ 分别为电缆首端线芯和护套的电压相量。将式(11)进行拉普拉斯反变换^[19]得到最终的单相单芯电缆沿线电压计算公式:

$$U_1(x) = L^{-1}(U_1(s)) \quad (12)$$

式(12)即是该文推导的单芯电缆沿线电压计算公式。耐压试验时试验电源频率的改变只是改变了线

路参数和线路首端电气量的值,沿线电压的求解公式依然成立。

3 仿真实验

3.1 沿线电压计算公式验证

该文以江苏大丰 127/220 kV 的 XLPE 电缆作为算例,其电缆结构如图 4 所示,具体参数如表 1 所示。

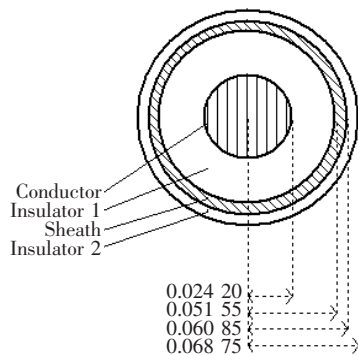


图 4 电缆仿真模型

Figure 4 Cable simulation model

表 1 电缆参数

Table 1 Cable parameters

参数	单位	数值
线芯导体半径	mm	24.2
绝缘层外半径	mm	51.55
金属护层外半径	mm	60.85
外护套外半径	mm	68.75
线芯电阻率	$\Omega \cdot m$	$1.72e-8$
金属护层电阻率	$\Omega \cdot m$	$2.2e-7$
线芯相对磁导率	—	1
金属护层相对磁导率	—	1
绝缘层相对介电常数	—	2.5
外护套相对介电常数	—	2.3
大地电阻率	$\Omega \cdot m$	100
长度	km	100

如图 4 和表 1 所示的电缆参数可以计算出电缆分布参数模型中的 R_1 、 L_1 、 R_2 、 L_2 等所有参数^[20-21]。

如图 5 所示的 PSCAD 仿真电路,首端加压 $1.7U_0$ 。由于试验电源频率在低频时电缆线路末端电压升高不明显^[22],该文取试验频率为 300 Hz 以验证末端电压计算公式即式(12)的准确性。电缆长度为 100 km,分别取不同距离沿线电压仿真值与公式计算值相比较,具体结果如表 2 所示。

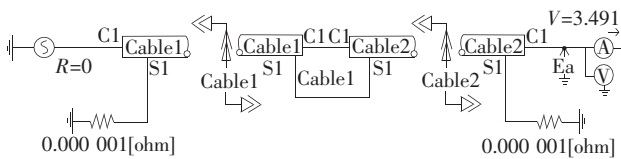


图5 电缆仿真电路

Figure 5 Cable simulation circuits

表2 沿线电压仿真值与计算值的比较

Table 2 Comparison of voltage simulation value and line voltage calculation value

距首端距离/km	pscad 计算/ U_0	公式计算/ U_0
10	1.997∠-4.85	1.996∠-4.79
30	2.557∠-11.0	2.558∠-10.9
50	3.000∠-14.8	2.990∠-14.9
60	3.170∠-15.9	3.170∠-15.8
80	3.410∠-16.9	3.400∠-17.0
100	3.490∠-17.2	3.490∠-17.1

如表2所示,所推导的式(12)所计算的沿线电压值与仿真值几乎一致,验证了单芯电缆分布参数模型的合理性和沿线电压公式的正确性。除此之外,频率一定时,电缆沿线电压随着距首端距离的增加其数值也跟着增大。根据国标 GB/Z 18890.1 规定,127/220 kV 交联聚乙烯电缆最高耐受电压不得超过 $2.5U_0$,而表2从30 km 开始已经超过,这严重阻碍了电缆耐压试验的顺利进行。因此对于电缆交流耐压试验中试验频率在30~300 Hz 的约束已不能适用于长距离电缆。接下来该文基于式(12)对频率在30~300 Hz 范围内的电缆沿线电压和末端电压进行了研究。

3.2 沿线电压与谐振频率关系分析

试验电缆长度为100 km,在30~300 Hz 内分别取不同的电源频率,研究沿线电压受频率影响的关系,如图6所示。

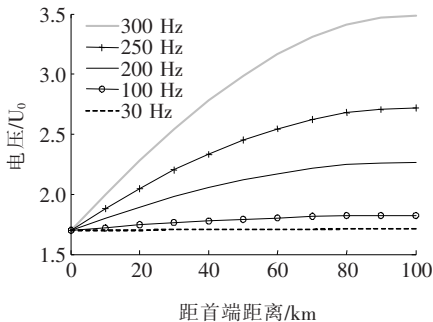


图6 不同频率下电缆沿线电压幅值变化

Figure 6 Voltage amplitude changes along the cable at different frequencies

当试验电源频率在30~300 Hz 变化时线路沿线电压曲线也会被抬高,250 Hz 和300 Hz 时的电缆末端电压分别达到 $2.71U_0$ 和 $3.49U_0$,已经不符合规定,因此对于长度100 km 及以上的电 缆进行耐压试验时建议将试验电源频率控制在250 Hz 以下,如可能,则尽量控制在100 Hz 以下。

3.3 末端电压与谐振频率关系分析

依然设首端所加电压为 $1.7U_0$,频率可变,分别比较10~120 km 不同长度的电缆在金属护层两端接地的条件下末端电压随频率变化的关系,如图7所示。

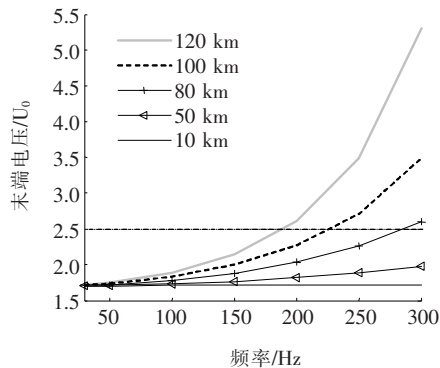


图7 不同长度电缆末端电压与频率关系

Figure 7 Relationship between terminal voltage and frequency of cables with different lengths

电缆长度不长的条件下,以10 km 为例,在进行耐压试验时,电缆末端电压几乎不受频率变化影响,300 Hz 时末端电压只升高了0.5%,而当电缆长度为100 km 时,电缆末端电压随着频率的升高而升高,250 Hz 时末端电压已经超过 $2.5U_0$,因此对于海缆这类长距离电缆耐压试验时,应该根据长度对试验电源频率进行一定的调整以规避末端电压过高带来的危险。

结合以上内容,对于不同长度220 kV 交联聚乙烯电缆耐压试验时试验电源频率(谐振频率)作了新的约束,如表3所示。

表3 不同长度下电缆试验频率约束范围

Table 3 Test frequency constraint scope of cable with different lengths

电缆长度/km	频率范围/Hz	电缆长度/km	频率范围/Hz
[0,60]	[30,300]	[90,100]	[30,225]
[60,80]	[30,270]	[100,110]	[30,205]
[80,90]	[30,255]	[110,120]	[30,190]

在试验电源频率约束条件下,耐压试验中电缆末端电压不会超过 $2.5U_0$,可以保障耐压试验的顺利进行。该文测试的最长电缆为120 km,若是更长的电缆其耐压试验频率约束条件需要重新计算。

4 结语

该文通过建立单芯电缆分布参数模型,推导了电缆芯芯沿线电压计算公式,并分别对不同频率下电缆沿线电压变化和不同长度电缆末端电压随频率变化情况作了分析,为限制耐压试验中电缆芯芯末端电压幅值,由图6、7分析结果对127/220 kV交联聚乙烯电缆试验电源频率按长度进行了进一步的约束以保证耐压试验的顺利进行,为现场试验设计者提供参考,具有一定的实际意义。

参考文献:

- [1] 张建民,张洪亮,谢书鸿,等. 交联聚乙烯绝缘海底电缆在中国海洋风电建设中的典型应用和发展前景[J]. 南方电网技术, 2017, 11(8):25-33.
ZHANG Jianmin, ZHANG Hongliang, XIE Shuhong, et al. Typical application and development prospect of XLPE insulated submarine cable for offshore wind farm in China [J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(8): 25-33.
- [2] 吴文庚,林雪倩. 海底电缆综合监测关键技术及应用[J]. 中国电力, 2018, 51(6): 129-135.
WU Wengeng, LIN Xueqian. Application and key technologies of submarine cable integrated monitoring [J]. Electric Power, 2018, 51(6): 129-135.
- [3] 詹铭,张磊,王洪新. 超高压输电线路电容效应的抑制特性[J]. 武汉大学学报:工学版, 2011, 44(4): 500-502+507.
ZHAN Ming, ZHANG Lei, WANG Hongxin. Suppression characteristics of ferranti effect for extra-high voltage transmission line [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2011, 44(4): 500-502+507.
- [4] 魏新劳,朱博,庞兵,等. 长距离三相电力电缆绝缘在线监测方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 2079-2086.
WEI Xinlao, ZHU Bo, PANG Bing, et al. On-line insulation monitoring method for long distance three-phase power cable [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 2079-2086.
- [5] 邢海瀛,袁汉川,邓春,等. 基于分布参数的电力电缆故障定位新型算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(14): 16-20.
XING Haiying, YUAN Hanchuan, DENG Chun, et al. A novel power cable fault location algorithm based on distributed parameters [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39 (14): 16-20.
- [6] 桂勋,刘志刚,韩旭东,等. 基于高压输电线电压沿线分布规律的故障双端测距算法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(19): 63-69.
GUI Xun, LIU Zhigang, HAN Xudong, et al. An accurate algorithm of two-terminal fault location based on the distribution of line voltage along HV transmission line [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(19): 63-69.
- [7] Da Silva F F F, Wiechowski W, Bak C L, et al. Full scale test on a 100 km, 150 kV AC cable [C]//2010 International Council on Large Electric Systems, Paris, France: CIGRE, 2010.
- [8] 王颢. 一种长大距离电缆线路电压工程算法[J]. 水电能源科学, 2010, 28(3): 146-148.
WANG Hao. Engineering empirical formula for voltage of long distance electric cable line [J]. Water Resources and Power, 2010, 28(3): 146-148.
- [9] 戚革庆,吴建军,戴思源,等. 高压电力电缆在交流耐压过程中的容升现象研究[J]. 高压电器, 2016, 52(8): 155-160.
QI Geqing, WU Jianjun, DAI Siyuan, et al. Capacitance rise phenomenon of power cable in AC voltage withstand test [J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(8): 155-160.
- [10] 陶劲松,席成员,贺景亮,等. 湖南110 kV长距离电缆耐压试验[J]. 高电压技术, 2002, 28(11): 48-49.
TAO Jinsong, XI Chengyuan, HE Jingliang, et al. AC voltage-withstand test in hunan furongnan-datuo 110 kV long distance electric cable [J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(11): 48-49.
- [11] GB/T 18890.1-2015. 额定电压220 kV ($U_m=252$ kV)交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件 第1部分:试验方法和要求[S].
- [12] GB/Z 18890.1-2002. 220 kV交联电缆试验方法和要

- 求[S].
- [13] 吴志祥, 周凯, 何珉. 高压电缆交叉互联系统的3种优化接地方案[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(3): 135-140.
- WU Zhixiang, ZHOU Kai, HE Min. Research on three optimized grounding schemes of HV cable cross connection system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(3): 135-140.
- [14] Xu Z H, Sidhu T S. Fault location method based on single-end measurements for underground cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(4): 2845-2854.
- [15] Yang X, Choi M S, Lee S J, et al. Fault location for underground power cable using distributed parameter approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(4): 1809-1816.
- [16] 唐进, 张姝, 林圣, 等. 计及金属护层结构的电缆单端故障测距方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1748-1756.
- TANG Jin, ZHANG Shu, LIN Sheng, et al. Single-terminal fault locating method of cables considering the metal sheath structure [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1748-1756.
- [17] 孙建明, 唐进. 考虑金属护层结构的电力电缆单端故障识别方法[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(4): 96-101.
- SUN Jianming, TANG Jin. Single-ended fault identification method of cables considered the sheath structure [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(4): 96-101.
- [18] 赵铁军, 王秀斌, 虞跃. 基于金属护层模型参数辨识的电缆单相故障单端测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 83-91.
- ZHAO Tiejun, WANG Xiubin, YU Yue. A single terminal fault location method for single phase fault of cable based on parameter identification of metal sheath model[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 83-91.
- [19] 李兴毅, 侯新杰. 拉普拉斯变换求完全耦合互感电路的暂态过程[J]. 河南师范大学学报: 自然科学版, 1998, 26(4): 26-28.
- LI Xingyi, HOU Xinjie. Transients in circuits with perfectly coupled mutual inductions solved by laplace transformation[J]. Journal of Henan Normal University: Natural Science, 1998(4): 26-28.
- [20] 徐政, 钱洁. 电缆电气参数不同计算方法及其比较[J]. 高电压技术, 2013, 39(3): 689-697.
- XU Zheng, QIAN Jie. Comparison of different methods for calculation electrical parameters of power cables[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(3): 689-697.
- [21] Aloui T, Amar F B, Abdallah H H. Fault prelocalization of underground single-phase cables: modeling and simulation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 44(1): 514-519.
- [22] 郑建康, 赵艾萱, 林涛, 等. 高频冲击电压对XLPE电缆介电响应特性的影响[J]. 智慧电力, 2018, 46(5): 46-52.
- ZHENG Jiankang, ZHAO Aixuan, LIN Tao, et al. Effect of high frequency impulse voltage upon dielectric response of XLPE cables[J]. Smart Power, 2018, 46(5): 46-52.