

## 高压电力电缆增加段长关键技术研究展望及应用

谭笑<sup>1</sup>, 陈杰<sup>1</sup>, 李陈莹<sup>1</sup>, 曹京荣<sup>1</sup>, 胡丽斌<sup>1</sup>, 朱孟周<sup>1</sup>, 张云霄<sup>2</sup>

(1. 国网GIS设备运维检修技术实验室(国网江苏省电力有限公司电力科学研究院),  
江苏南京211103; 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京100084)

**摘要:**随着城市化发展进程加快,大容量、长距离、大截面电力电缆线路在各大城市输电网络中的应用规模逐年增加。而目前传统电缆设计段长有限,单位长度内电缆接头数量相对较多,导致工程投资增加的同时,电力电缆线路运行故障概率也随之上升。文中从大长段电力电缆设计、交接试验、运维等环节出发,针对大长段电缆感应电压计算、电压限制器要求、局放信号衰减等影响因素,对高压电力电缆增加段长关键技术进行可行性分析,同时以国内首次敷设220 kV 1450 m的电缆应用工程为例,为今后大长段电缆工程实际应用提供理论依据和相关数据。

**关键词:**电力电缆;增加段长;感应电压;局放信号衰减

**中图分类号:** TM73

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2018)03-0091-06

### 0 引言

随着城市建设速度加快,城市建设与电力建设的矛盾日益加剧。为了解决该矛盾,输电线路逐步由架空转向地下电缆敷设,电力电缆的使用量逐年增加,大容量、长距离、大截面的电缆工程日益增多。由于传统电缆设计分段长度有限,单位长度内电缆接头数量相对较多,一方面增加了工程投资、延长了施工时间,另一方面也导致电力电缆运行的故障概率增大。

适当增加电力电缆段长可以相应的减少电缆接头,缩短工程工期,既能降低投资又能提高电缆线路运行可靠性。但电力电缆增加段长后,对电力电缆设计、生产、试验、运维等环节都提出了新的要求和挑战,因此有必要对高压电力电缆增加段长关键技术进行可行性分析,提供理论和相关数据,为今后大长段电缆工程实际应用提出解决方案。

### 1 国内外大长段电缆工程应用现状

目前,国外已有多例大长段的电缆实际应用工程投入运行<sup>[1]</sup>。日本中部电力公司已建成的275 kV 1×2500 mm<sup>2</sup> 23 km长线路工程中,电力电缆段长最长达1700 m,相应的金属护套感应电压计算值可达200~300 V。日本广岛、福冈的220 kV 1×2500 mm<sup>2</sup> XLPE 不锈钢套电缆,制造长度也由500 m提高至1050~1300 m,不仅缩短了工期,还使工程造价降低约5%。

在欧洲,电缆段长也有延长的趋势。如比瑞利公司承担的400 kV 1×2500 mm<sup>2</sup> 电缆线路工程中,制造长度由750 m提高至1400 m;1×1000 mm<sup>2</sup> 电缆长度从1000 m提高至3500 m。英国电力部一回路长度为21 km的275 kV 1×1600 mm<sup>2</sup> 充油电缆线路运行30 a后,其装有护层电压限制器的接线盒大多需要更换,交叉互联单元在原设计的28个的基础上缩减为7个,不仅降低了维护总费用,还提高了运行的安全可靠。该线路改变原设计后的电缆交叉互联单元段长增至2955~3099 km,各区段电缆金属护套的感应电动势,在负荷电流抑制或暂态工况下,都会比原设计的条件有较大幅度提升。如在额定负荷电流情况下的金属层最大感应电动势达214 V,雷电进行波暂态作用于金属层分隔绝缘的跨接电动势最大达100 kV。

美国电气与电子工程师协会出版了电缆金属连接方式及护套感应电压、环流的计算标准,详细讨论了电缆金属护套不同连接、排列方式对护套感应电压、护套环流的影响,并对护层保护器的不同接法进行了详细的探讨。美国关于单芯电缆感应电动势计算导则的IEEE Std标准中,虽明确规定应从安全性限制,但未规定限制值;欧洲各国标准中也不作规定,英国在275~400 kV电缆线路终端的敞露金属部位实施防护条件下,以150 V为限;法国则倾向于在防护条件下可达400 V。

国内GB 50217—2007中要求<sup>[2]</sup>:单芯电缆线路的金属护套或屏蔽层,在线路上至少有一点直接接地,且在金属护套或屏蔽层上任一点非接地处的正常感应电压应符合下列规定:(1)未采取能防止人员任意接触金属护套或屏蔽层的安全措施时,在满

收稿日期:2018-01-23;修回日期:2018-02-27

基金项目:国家电网有限公司科技项目(J2018028);国家自然科学基金资助项目(51377089)

负载情况下,不得大于 50 V;(2) 采取能防止人员任意接触金属护套或屏蔽层的安全措施时,在正常满负荷情况下,不得大于 300 V。

## 2 增加段长对设计阶段的影响

### 2.1 感应电压计算

当电缆在交变电压下运行时,线芯中流过交变的负荷电流,变化的电流会在空间中产生交变的磁场。交变的磁场所产生的磁链不但会和线芯发生交链,同时也与屏蔽层和金属护套相交链<sup>[3]</sup>。因此,在电缆正常运行时,屏蔽层和金属护套上会产生和电缆接地方式、线路参数等因素相关的感应电压。电缆护套感应电压值与线芯截面、缆间距离和电缆大小有关。感应电压数值与电缆排列中心距离和金属护套平均半径之比的对数成正比,并且与导体负荷电流、频率以及电缆的长度成正比<sup>[4-6]</sup>。因此,相同条件下增加段长后势必会增加该段电缆金属护层的感应电压。

考虑回路内电力电缆的排列方式,结合图 1 所示的计算模型,通过求取金属外护套内的磁通进而求得感应电动势大小。

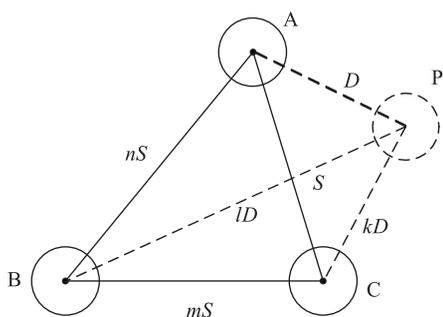


图 1 金属外护套感应电压计算模型  
Fig.1 Calculation model of induction voltage for metal outer sheath

图中 P 表示金属外护套,可以看做一根平行于缆芯 A、B、C 的导体;A、B、C、P 之间的距离如图所示,其中 D 为 A 相导体线芯离金属外护套距离;B 相导体线芯离金属外护套距离为 A 相导体线芯离金属外护套距离的 l 倍,记为 lD;C 相导体线芯离金属外护套距离为 A 相导体线芯离金属外护套距离的 k 倍,记为 kD;S 为 A、C 相导体线芯间的距离;A、B 相导体线芯间的距离为 A、C 相导体线芯间的距离的 n 倍,记为 nS;B、C 相导体线芯间的距离为 A、C 相导体线芯间的距离的 m 倍,记为 mS;R 为 P 的半径,单位为 m,考虑到土壤磁导率与真空磁导率近似相等,即  $\mu/2\pi \approx 2 \times 10^{-7}$ ,则单位长度 A、B、C 三相缆芯在 P 上产生的磁通为:

$$\dot{\phi}_{PA} = 2 \times 10^{-7} i_A \ln \frac{D}{R} \quad (1)$$

$$\dot{\phi}_{PB} = 2 \times 10^{-7} i_B \ln \frac{lD}{R} \quad (2)$$

$$\dot{\phi}_{PC} = 2 \times 10^{-7} i_C \ln \frac{kD}{R} \quad (3)$$

由此可得,三相缆芯电流在金属外护套上产生的磁通为:

$$\dot{\phi}_P = \dot{\phi}_{PA} + \dot{\phi}_{PB} + \dot{\phi}_{PC} \quad (4)$$

当 A 与 P 中心重合,即求解 A 相金属外护套受到影响。此时,  $D=R, lD=nS, kD=S$ , 单位为 m, 有:

$$\dot{\phi}_P = 2 \times 10^{-7} \left( i_B \ln \frac{nS}{R} + i_C \ln \frac{S}{R} \right)$$

考虑三相缆芯电流对称,即:

$$\begin{cases} \dot{I}_A = I \\ \dot{I}_B = \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) I \\ \dot{I}_C = \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) I \end{cases} \quad (5)$$

代入式(4),得:

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_P &= 2 \times 10^{-7} I \left[ \left( -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \ln \frac{nS}{R} + \left( -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \ln \frac{S}{R} \right] = \\ &= 2 \times 10^{-7} I \left[ -\frac{1}{2} \ln \frac{nS^2}{R^2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \ln n \right] \end{aligned} \quad (6)$$

故:

$$\begin{aligned} \dot{e}_{sA} &= -j\omega \dot{\phi}_P = \\ &= 2\omega I \times 10^{-7} \left[ -\frac{\sqrt{3}}{2} \ln n + j\frac{1}{2} \ln \frac{nS^2}{R^2} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

当 B 与 P 中心重合,  $kD=mS, D=nS, lD=R$ , 即求解 B 相金属外护套:

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_P &= 2 \times 10^{-7} \left( i_A \ln \frac{nS}{R} + i_C \ln \frac{mS}{R} \right) \\ &= 2 \times 10^{-7} I \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{n^2 S}{mR} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{mS}{R} \right] \end{aligned} \quad (8)$$

故:

$$\dot{e}_{sB} = -j\omega l \dot{\phi}_P = 2\omega I \times 10^{-7} \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{mS}{R} - j\frac{1}{2} \ln \frac{n^2 S}{mR} \right] \quad (9)$$

当 C 与 P 中心重合时,  $lD=mS, D=S, kD=R$ , 即求解 C 相金属外护套:

$$\dot{\phi}_P = 2 \times 10^{-7} \left( i_A \ln \frac{S}{R} + i_B \ln \frac{mS}{R} \right) =$$

$$2 \times 10^{-7} I \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{S}{mR} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{mS}{R} \right] \quad (10)$$

故:

$$\begin{aligned} \dot{e}_{sc} &= -j\omega\dot{\phi}_p = \\ 2\omega I \times 10^{-7} &\left[ -\frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{mS}{R} - j \frac{1}{2} \ln \frac{S}{mR} \right] \quad (11) \end{aligned}$$

## 2.2 电压限制器的要求

当高压电力电缆段长增加后,发生单相接地短路、遭受雷电冲击或接地设施失效时,电缆金属护层感应电压水平也会随之大幅升高<sup>[7-8]</sup>。这就需要对电缆金属护层绝缘水平、绝缘接头绝缘水平和金属护层电压限制器保护水平提出新的要求。对此应设法重新组合保护器或者研制新型高性能保护器<sup>[9-11]</sup>。单芯电缆护套电压限制器参数的选择,应符合下列规定<sup>[7]</sup>。

(1) 在最大可能冲击电流作用下,护套电压限制器残压不得大于电缆护套冲击耐压的  $1/\sqrt{2}$  倍。

(2) 在系统短路时产生的最大工频感应过电压作用下,在可能长的切除故障时间内,护套电压限制器应能耐受。

(3) 最大可能冲击电流累积作用 20 次后,护套电压限制器不得损坏。

(4) 应考虑雷击影响下电压限制器的选择及安装要求。

## 3 增加段长对交接试验的影响

电力电缆局部放电脉冲信号的宽度约为 1~10 ns,放电源处高频脉冲信号在电缆介质传播中向两侧传输时,信号幅值会发生衰减现象,信号波形逐渐失真。由于表征局部放电脉冲信号本质的特征量瞬间即逝,或高速采样检测装置采集到失真信号,会造成较大的测量误差甚至得到错误的结论。

而这一现象在电力电缆增加段长后情况会越发严重。大长段中间的局放信号会出现严重的衰减失真现象,甚至局放信号无法进行检测,出现局放死区。因此需对局放信号在同轴结构单芯高压电缆中的传播特性进行研究分析。

高压交联电缆属于传输线的一种,在理想情况下可被视为均匀传输线。由于电缆的局部放电信号含有高频分量,其波长与其长度相比非常短,因此在构建线路模型时要用分布参数线路模型来表示,如图 2 所示。不仅要考虑线路的电阻和电感,还要考虑导线之间的电导和电容。在分布参数电路理论中,均匀传输线的原始参数以每单位长度上的线路参数表示,用分布电容  $C_0$  来反映沿传输线周围

空间的电场的储能特性,单位为 f;用沿线的分布电感  $L_0$  来反映沿传输线周围空间分布的磁场的储能特性,单位为 h;用沿线的分布电阻  $R_0$  来反映由于电流流过金属导体而引发的热损耗现象,单位为  $\Omega$ ;用线间的分布电导  $G_0$  来反映由于分隔传输线和地平面的介质阻抗有限而引起的衰减,单位为  $\Omega^{-1}$ 。在距传输线始端  $x$  处取微分长度  $dx$ ,整个均匀传输线可视为由无限多个这种微分端等效参数模型级联而成,如图 2 所示。

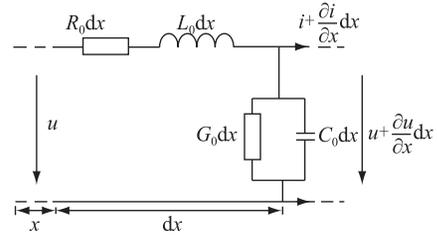


图 2 单位长度传输线的分布参数等效模型

Fig.2 Equivalent model of distribution parameter of unit length transmission line

这 4 个参数是表征传输线特征的最基本参数,被称为一次参数。电缆的传输特性实质上就是由 4 个基本参数决定。通过对 4 个基本参数可推导特性阻抗  $Z_c$ ,单位为  $\Omega$ ,表示无限长均匀传输线上任一点的行波电压和电流之比。

$$Z_c = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} \quad (12)$$

由上式可知,特性阻抗与传输线的一次参数和传输信号的频率有关,传输不同频率信号时传输线的特性阻抗不同。又可知,传输线的特性阻抗是一个复数,其绝对值的大小等于行波电压和电流的绝对值之比;幅角的大小等于电压和电流的相位差,将  $Z_c$  写成向量形式为:

$$Z_c = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} = |Z_c| e^{j\varphi_c} \quad (13)$$

$Z_c$  由幅值和相角两部分组成。特性阻抗反映传输线上某一点的特性,而对于均匀传输线而言,信号在传输线上传播的规律与特点,需用传输线的传输系数  $\gamma$  来表征,其定义为:

$$\gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} = \alpha + j\beta \quad (14)$$

在传播系数  $\gamma$  中,包含两部分的信息:传输损耗常数  $\alpha$  和传输相移常数  $\beta$ 。传输线上行波电压与电流的传输规律,可由下式表示,即长度为  $l$  的传输线的传输方程:

$$U_0 = U_i e^{-\gamma l} = U_i e^{-(\alpha + j\beta)l} \quad (15)$$

$$I_0 = I_i e^{-\gamma l} = I_i e^{-(\alpha + j\beta)l} \quad (16)$$

局部放电脉冲信号因其含有丰富的频率成分,

可看作是由无数不同频率的正弦(或余弦)信号叠加组成。对于频率为 $f$ 的信号,长度为 $l$ 的电缆传输方程中具有物理意义的实部可改写为:

$$U_0 = U_i e^{-\alpha l} \cos \frac{l}{v} = U_i e^{-\alpha l} \cos \omega t \quad (17)$$

式中: $v$ 为信号传播的速度, $v = 2\pi f/\beta$ 。

设电缆中信号从源点传播到任一点P的距离为 $r$ ,则电缆中任一点P的局放脉冲中频率信号的传播特性关系式为:

$$U_0 = U_i e^{-\alpha r} \cos \omega \left( t - \frac{r}{v} \right) \quad (18)$$

$\alpha$ 取决于电缆的一次参数,且总为正数,所以传播距离越长,信号的幅值 $U_0$ 越小,说明信号沿电缆传播时总有衰减,且按指数规律衰减。在同一传播距离下,传播衰减随信号频率增大而增大,又由于不同频率信号传播速度不同,各频率信号传播至同一点处存在时间差,导致包含丰富频率分量信号的局部放电脉冲在传播一定的距离后,波形发生明显畸变,表现为幅值下降,并不再具有陡峭的上升沿和下降沿。

经理论计算和仿真分析,得出局放信号脉冲传播800 m后,其幅值只是注入信号的幅值的39%;电缆长度越长,则测得脉冲的幅值越小,而脉冲宽度随电缆长度变长而变宽。这就对增加段长后交接试验中局放测量工作带来了新的挑战。需根据增加段长后的局放信号传播衰减、畸变情况,改进局放信号补偿算法。与此同时,提出一种基于新型传感器的适用于大长段电缆局放信号测量方法是解决该问题的根本。

#### 4 增加段长对运维的影响

(1) 落实安全防范手段。根据增加段长后电缆正常运行时可能出现的最大护层感应电压、金属护套两端悬浮后出现的悬浮电位数值,提出大长段电缆在运检工作流程、标示标牌布置、操作注意事项等方面的规范要求,防止护层感应电压危害人员和设备安全。

(2) 建立在线监测系统2.0。由于增加段长后电缆金属护层感应电压偏高,易产生打火现象,火灾的隐患系数较高。建议针对该情况设置接地环流、接触式温度、点阵式温度、水位、气体等在线监测系统,形成一套基于物联网技术的大长段电缆在线监测方法<sup>[12-13]</sup>。

(3) 完善大长段电缆在线检测技术方案。根据电缆段长增加对护层感应电压和接地电流检测、局

放检测、终端红外测温、接地电阻检测的影响分析,对各项带电检测的现场实施流程、检测判断标准进行改进<sup>[14-19]</sup>。

#### 5 国内高压电缆增加段长应用案例

调研结果显示,南京秋藤—高旺线路工程为全国范围内首次敷设220 kV 1450 m的电缆工程。该工程于2017年3月17日正式开工,6月11日结束,历时87个工作日。其电缆参数如表1所示。

表1 电缆参数表

名称	技术参数	备注
电缆截面/mm <sup>2</sup>	1×2500	
电缆电气长度/m	4350	1450×3 盘
电压等级/kV	220	
电缆外径/mm	156	
电缆单位重量/(kg·m <sup>-1</sup> )	36.6	
总重量/(t·盘 <sup>-1</sup> )	70	电缆及电缆盘

根据该工程临时搭接系统接线方案,临时搭接线路作为500 kV秋藤变变压器启动充电电源输送容量约50 MV·A,另作为“台积电”负荷备用电源线路,其输送容量约10~15 MV·A左右。线路输送电流较小,最大仅为131 A。

该工程5~10 a后的系统短路水平为24.3 kA,事故情况下单相接地短路时,电缆金属护套产生的短路感应电压应考虑地电位升高的影响。该工程为试点工程,考虑到工程远景更有利于改装为交叉互联接地方式,该工程中在全线1/3处进行金属护套开断,做分段接地确保电缆金属护套热稳定要求。利用本中上述计算公式对正常运行时最大负荷和系统单相短路情况下电缆金属护层感应电压进行计算,结果如表2所示。

表2 电缆金属护层感应电压计算结果

系统状态	电缆品字形敷设	电缆水平敷设中相	电缆水平敷设边相
正常运行时最大负荷	6.64	12.09	15.65
系统单相接地短路	1231	2242	2902

由表2可知,在南京秋藤—高旺线路正常运行最大负荷时,不同的敷设方式下其外护套感应单压均小于50 V,满足GB 50217—2007中相关要求,该计算数据证明了高压电缆增加段长技术在设计上的可行性,同时也为工程的顺利实施和投运提供了理论基础。该工程与常规工程的比较情况如表3所

示,其中以往工程为3段电缆400 m/盘、2组接头、2组终端,而南京秋藤—高旺线路为3段电缆1450 m/盘、无接头、2组终端。

表3 南京秋藤—高旺线路与常规工程比较情况  
Tab.3 Comparison of Qiuteng—Gaowang project and conventional project

名称	以往工程	本次工程
电缆盘长/m	350~500	1450
单位重量/(kg·m <sup>-1</sup> )	32.5	37.5
总重量(电缆本体+电缆盘)/t	17~23	70
吊车吨位/t	25~50	350
输送机数量/台	15~20	50
输送机摆放间隔/(m·台 <sup>-1</sup> )	50	30~40
控制箱数量/台	15~20	50
人员配备/人	20~30人	90
特殊敷设设备	无	自动放缆机、自动导滚
电缆摆放场地要求	无	需硬化
设备运输/d	普通货车	大吨位平板货车
正常施工周期	21d	12d
电缆/(元·m <sup>-1</sup> )	2300	2300
接头/(元·只 <sup>-1</sup> )	111 000	—
终端/(元·只 <sup>-1</sup> )	105 000	105 000
总价/万元	1 129.41	1 063.5

由表3可以看出,南京秋藤—高旺220 kV线路与常规工程相比较,其特点体现在以下方面:

(1) 与常规工程相比,南京秋藤—高旺220 kV线路工程中电缆盘长和总重量的增加对运输条件、施工设备和人员配备提出了更高的要求。

(2) 该工程中由于电缆接头数量的减少,缩短了约40%的施工工期,节省了约66万元物资投资。

(3) 该工程中由于电缆接头数量的减少,有利于大幅提高该条线路运行的可靠性。

该工程投运后会进一步对已投运的秋藤—高旺大长段电缆进行数据采集,定期采集护层感应电压、局放信号、接地环流等关键运行数据,以校验正常运行情况下增加段长后静电感应和金属护套感应电压计算结果,持续积累相关运行经验。

## 6 结语

电力电缆增加段长可有效提高电缆运行可靠性、缩短工程工期、降低物资投资,但对电力电缆设计、生产、试验、运维等环节都提出了新的要求和挑战。通过以上分析和应用可以得出:其他条件不变的情况下,电力电缆增加段长后金属护层感应电压会随之上升。但需满足GB 50217—2007要求。感应电压的上升对金属护层绝缘水平、绝缘接头绝缘

水平和金属护层电压限制器保护水平提出新的要求。电力电缆增加段长后,如何解决因局放信号衰减、畸变造成的电缆中间段“局放死区”的问题,成为了一个难题,对线路运维安全和检测方法提出了更高的要求。

## 参考文献:

- [1] 查传忠. 运行中单芯高压电缆金属护套感应电压规定值提升的意义及讨论[J]. 电线电缆, 2010(2): 45-46.  
ZHA Chuanzhong. Significance and discussion of the increase in the specified induction voltage in the metal sheath of single core HV metal sheathed cable in operation[J]. Electric Wire & Cable, 2010(2): 45-46.
- [2] 朱爱钧. 超高压长距离大截面电缆的护层感应电压[J]. 供用电, 2006, 23(6): 7-9.  
ZHU Aijun. Induction voltage of high voltage, long distance, large section power cable[J]. Distribution & Utilization, 2006, 23(6): 7-9.
- [3] 中华人民共和国建设部. GB 50217—2007 电力工程电缆设计规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.  
Ministry of Construction of People's Republic of China. GB50217—2007 Code for design of cables of electric engineering[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [4] 张山, 李茂民. 电线电缆[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989: 277-280.  
ZHANG Shan, LI Maomin. Power cable[M]. Beijing: China Machine Press, 1989: 277-280.
- [5] 蔡高凤. 110 kV 单芯电缆金属护套感应电压计算及分段[J]. 科技创新导报, 2014(36): 73-74.  
CAI Gaofeng. Calculation and segmentation of induction voltage for 110 kV single-core cable metal sheath[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2014(36): 73-74.
- [6] 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.
- [7] 欧景茹. 高压单芯电缆金属护套感应电压计算及其保护方式[J]. 吉林电力, 2001(3): 14-16.  
OU Jingru. Calculation on induction voltage of metal jacket on high-voltage and single-core cable and its protection[J]. Jilin Electric Power. 2001(3): 14-16.
- [8] 李新振. 高压单芯电缆金属护套接地方式探讨[J]. 电力安全技术, 2015(10): 62-65.  
LI Xinzhen. Discussion on grounding mode of high-pressure single-core cable metal sheath[J]. Electric Safety Technology, 2015(10): 62-65.
- [9] 李熙谋. 新近日本66 kV长距离电缆线路工程设计的问题及其对策概要[J]. 广东电缆技术, 2007(2): 39-40.  
LI Ximou. Problems and countermeasures of 66 kV long

- distance cable engineering in Japan [J]. Guangdong Power cable. 2007(2):39-40.
- [10] 刘毅刚,许继葵. 高压电缆外护套故障及其对策[J]. 高电压技术. 2001,27(B07):38-39.  
LIU Yigang, XU Jikui. Fault of sheath of HV power cable and countermeasure [J]. High Voltage Engineering, 2001, 27 (B07):38-39.
- [11] 罗俊华. 单芯电力电缆金属护层过电压保护器参数设计[J]. 高电压技术,2008(2):355-358.  
LUO Junhua. Technical parameters design of over voltage protect for single-core Power Cable Shield Sheath [J]. High Voltage Engineering, 2008(2):355-358.
- [12] 李云财,石万成. 高压、超高压 XLPE 电缆外护套的性能[J]. 高电压技术,2001(S1):7-8.  
LI Yuncai, SHI Wancheng. Discussion on sheath performance of HV EHV XLPE cable[J]. High Voltage Engineering. 2001 (S1):7-8.
- [13] 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.
- [14] 王 波,罗进圣. 220 kV 高压单芯电力电缆金属护套环流分析[J]. 高压电器. 2009,45(5):141-145.  
WANG Bo, LUO Jinsheng. Analysis of circulating current in sheaths of 220 kV XLPE single-core cables[J]. High Voltage Apparatus. 2009,45(5):141-145.
- [15] 袁燕岭,周 灏,董 杰,等. 高压电力电缆护层电流在线监测及故障诊断技术[J]. 高电压技术,2015,41(4):1194-1203.  
YUAN Yanling, ZHOU Hao, DONG Jie, et al. Sheath current in HV cable systems and its on-line monitoring for cable fault diagnosis[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4): 1194-1203.
- [16] 赵成斌,李 雯,顾欣刚,等. 基于仿真与振荡波试验的电缆接头缺陷研究[J]. 电网与清洁能源,2017(12):99-103.  
ZHAO Chengbin, LI Wen, GU Xingang, et al. Study on cable joint defects based on simulation and oscillatory wave test[J]. Power System and Clean Energy, 2017(12):99-103.
- [17] 沈飞飞. 中压电力电缆状态检测技术及应用[J]. 江苏电机工程,2013,32(6):55-58.  
SHENG Feifei, et al. Medium voltage power cable state detection technology and application [J]. Jiangsu Electrical Engineering. 2013,32(6):55-58.
- [18] 何 聪,袁 川,曾 伟,等. XLPE 高压电力电缆局部放电检测方法[J]. 电网与清洁能源,2016,32(05):27-33.  
HE Cong, YUAN Chuan, ZENG Wei, et al. Detection method for partial discharge of XLPE high-voltage power cable [J]. Power System and Clean Energy, 2016,32(05):27-33.
- [19] 叶冠豪,郭湘奇,王一磊,等. XLPE 电缆交叉互联系统接地直流电流在线监测[J]. 江苏电力工程,2016,35(3):39-45.  
YE Guanhao, GUO Xiangqi, WANG Yilei, et al. On-line monitoring of ground DC current for crross-linking XLPE cable system [J]. Jiangsu Electrical Engineering. 2016, 35 (3): 39-45.

作者简介:



谭 笑

谭 笑(1989—),男,博士,工程师,从事高电压试验技术、高压电力电缆的研究工作 (E-mail: 525450084@qq.com);

陈 杰(1984—),男,博士,高级工程师,从事电力电缆的研究工作;

李陈莹(1990—),女,硕士,工程师,从事电力电缆的研究工作。

## Research Prospect and Application of Technology to Increase the Length of High Voltage Power Line

TAN Xiao<sup>1</sup>, CHEN Jie<sup>1</sup>, LI Chenying<sup>1</sup>, CAO Jingying<sup>1</sup>, HU Libin<sup>1</sup>, ZHU Mengzhou<sup>1</sup>, ZHANG Yunxiao<sup>2</sup>

(1. State Grid GIS Equipment Maintenance and Repair Technology Laboratory

(State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute), Nanjing 211103, China;

2. Tsinghua University, Department of Electrical Engineering, Beijing 100084, China)

**Abstract:** With the acceleration of the urbanization development process, the application scale of large capacity, long distance and large cross section power cable lines in the transmission network of major cities is on the rise. Due to the limited length of the traditional cable design, the number of cable connectors per unit length is relatively large, which leads to the increase of the investment of the project, and the probability of the operation of the power cable line also increases. This essay will start its research from the large-length power cable design, transfer test, operation and maintenance and other aspects of the study, for large long-term cable induced voltage, partial signal attenuation and other factors, high-voltage power cable to increase the key technology feasibility analysis. The demonstration project of 220 kV Qiteng—Gaowang line provides the theoretical basis and relevant data for the practical application of cable engineering in the future.

**Key words:** power cable; increasing segment length; induced voltage; partial discharge signal attenuation

(编辑 方 晶)