

DOI: 10.7667/PSPC171881

适应智能变电站就地化线路保护的双模 高密度预制光缆研究

方贞泽¹, 万淑娟², 邱新娟¹, 梁蓉³, 李文娟², 张超⁴

(1. 上海思方电气技术有限公司, 上海 200122; 2. 武汉供电设计院, 湖北 武汉 430032; 3. 国网湖北省电力有限公司武汉供电公司, 湖北 武汉 430013; 4. 沈阳农业大学, 辽宁 沈阳 110866)

摘要: 针对智能变电站即插即用就地化线路保护装置通信与其他设备交互时单模和多模即双模光信号在同一光接口传输的要求, 设计了一种性能可靠、连接快速的双模(单模+多模)高密度预制光缆。该预制光缆能长期在恶劣气候、环境下使用, 光纤连接器具有低连接损耗和高回波损耗的特点。该预制光缆解决了现有预制光缆光传输单一、性能不可靠等问题, 提高了光连接的高效性和可靠性。通过对双模预制光缆的测试和验证, 表明该预制光缆性能优异, 达到了预期的目标。

关键词: 智能变电站; 就地化线路保护; 双模(单模+多模); 高密度预制光缆

Analysis of the dual-mode high-density prefabricated optical cable for outdoor installation line protection in smart substation

FANG Zhenze¹, WAN Shujuan², QIU Xinjuan¹, LIANG Rong³, LI Wenjuan², ZHANG Chao⁴

(1. Shanghai SFUN Electric Technology Co., Ltd, Shanghai 200122, China; 2. Wuhan Electric Power Design Institute, Wuhan 430032, China; 3. Wuhan Power Supply Company, State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430013, China; 4. Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: When outdoor installation line protection devices communicate with other devices in the plug-and-play smart substation, transmitting single-mode and multi-mode optical signals should be at the same optical interface, and then a high-density prefabricated dual-mode (single-mode and multi-mode) optical cable with reliable performance and fast connection is designed. The prefabricated optical cable can be used in harsh weather for a long period. The optical fiber connector has the characteristics of low insertion loss and high return loss. This prefabricated optical cable overcomes the problems of single optical transmission and unreliable performance of existing prefabricated fiber optic cable, and improves the efficiency and reliability of optical connection. The test and verification of the dual-mode prefabricated optical cable show that it has excellent performance and achieves the expected goal.

The work is supported by Science and Technology Project of State Grid Hubei Electric Power Company (No. HB1702-0348).

Key words: smart substation; outdoor installation line protection; dual-mode (single-mode and multi-mode); high-density prefabricated optical cable

0 引言

采用多功能测控装置、站域保护控制装置、多合一装置等新型集成设备的智能变电站二次回路, 由SCD文件描述的“虚回路”和由物理光纤连接构

成的“实回路”共同组成^[1-2]。目前在二次虚回路配置和物理回路连接方面是由独立的多模光纤和单模光纤分别传输实现, 兼顾智能变电站信息数字化和共享化的优点^[3]。在开关厂或与一次设备集成安装并采用标准化接口的就地化“即插即用”保护装置^[4-5], 具备SV、GOOSE、MMS三网合一共口输出功能, 并通过该光接口接入就地化保护专网。线

基金项目: 国网湖北省电力公司科技项目资助(HB1702-0348)

路保护独立完成保护功能,单模 2 个通道和多模 8 个通道,光纤采用单端预制的标准光连接器通过保护专网与其他保护设备交互信号;变压器保护采用分布式、侧配置保护子机,与其他保护的联锁信号通过保护专网以 GOOSE 方式交互,包括多模对时 2 个通道、MMS 及过程接口 4 个通道、保护环网 8 个通道、调试口 2 个通道;母线保护采用积木式可扩展设计,与其他保护的联锁信号通过保护专网以 GOOSE 方式交互,包括多模对时 2 个通道、保护专网 4 个通道、保护环网 8 个通道、调试口 2 个通道。

由于就地化线路保护装置通过保护专网与其他设备交互信号,采用同一光口内单模 2 个通道和多模 8 个通道即双模(单模+多模)光纤同步传输的预制光缆,现有技术采用单一传输模式,如单模预制光缆或多模预制光缆^[6]均已难以满足同一通信接口同步传输和共享双模信号要求,同时就地化保护装置还需适应极寒、极热、大风、盐雾、湿热、冰霜、高海拔等极端恶劣气候条件。因此,本文提出基于智能变电站“即插即用”,就地化保护通信接口连接,具有高可靠性和小型化、标准化特点,具备较高防水防尘等级的一种双模(单模+多模)高密度光纤连接器预制光缆方案,实现二次设备互换性对智能变电站检修维护有着重要的意义^[7-9]。

1 双模高密度光纤连接器连接损耗

高密度光纤连接器插芯^[10-11]通常单排预制 12 芯或 16 芯,双排预制 24 芯或 32 芯,最多可达 96 芯。

单模光纤插入损耗基于横向电场的分布进行计算,多模光纤插入损耗则是基于功率分布的假设如均匀分布、稳态分布或高斯分布计算,无论单模光纤还是多模光纤,插入损耗均与高密度光纤连接器插芯的光纤插孔直径失配、横向错位、端面角度倾斜变量有关,但与光的传输方向无关^[12-13]。由于高密度光纤连接器插芯制作时已经控制了光纤插孔直径失配、横向错位的尺寸和位置精度,故下面重点分析高密度光纤连接器插芯端面角度倾斜时的损耗 C 。

1.1 单模高密度光纤连接器插入损耗

由波动方程求解横向电场时,先引入归一化频率 V 这一基本参量,即

$$V = \frac{2\pi n(0)a\sqrt{2\Delta}}{\lambda} \quad (1)$$

式中: λ 为传输光波波长; a 为纤芯半径; $n(0)$ 为光纤中心的折射率; $\Delta = \frac{n(0) - n_c}{n(0)}$, n_c 为包层折射率;

对于已知的光纤, a 、 $n(0)$ 、 Δ 均为已知,故对于某

一波长 λ 而言,归一化频率 V 是确定的值。

设 r_1 、 r_2 、 z_1 、 z_2 分别为输入单模光纤和输出单模光纤的圆柱坐标, α 为输入单模光纤和输出单模光纤之间的倾斜角度,如图 1 所示,根据日本电气通信所土屋治彦等的推导结果,角度倾斜而引起的损耗为

$$C_\alpha = K_\alpha \left(\frac{\alpha}{\sqrt{2\Delta}} \right)^2 \quad (2)$$

$$K_\alpha = \frac{V^2}{6} \left[1 + 2 \left(\frac{1}{W^2} - \frac{1}{U^2} \right) + \frac{2}{U} \cdot \frac{J_0(U)}{J_1(U)} \right] \quad (3)$$

K_α 为端面角度倾斜损耗系数, K_α 与归一化频率 V 的关系可由 $V^2 = U^2 + W^2$ 导出,如图 2。

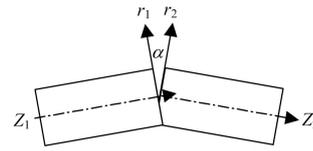


图 1 端面倾角

Fig. 1 End surface slope angle

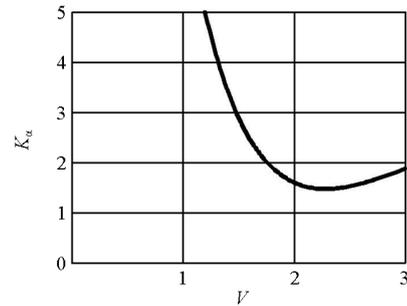


图 2 K_α 与 V 的关系

Fig. 2 Relationship between K_α and V

插入损耗的分贝数为

$$L_{\alpha(sm)} = -10 \lg(1 - C_\alpha) \quad (4)$$

由此可见,角度倾斜时的损耗不仅与 α 有关,而且还与 V 值有关。对单模光纤, $a=5 \mu\text{m}$, $\Delta=0.2\%$, $n(0)=1.52$, $\lambda=1.3 \mu\text{m}$, 则 $V=2.3$, 由图 2 查得 $K_\alpha=1.7$; 当倾斜角度 $\alpha=0.5^\circ$ 时,即 $\alpha=0.5/57.3$ 弧度时,可计算得出损耗为

$$C_\alpha = K_\alpha \left(\frac{\alpha}{\sqrt{2\Delta}} \right)^2 = 1.7 \times \left(\frac{0.5/57.3}{\sqrt{2 \times 0.2\%}} \right)^2 = 0.032$$

插入损耗 $L_{\alpha(sm)} = -10 \lg(1 - 0.032) = 0.14 \text{ dB}$ 。

1.2 多模高密度光纤连接器插入损耗

多模光纤连接损耗采用光功率稳态分布条件下的损耗公式。

$$L_{\alpha(mm)} = -10 \lg(1 - 0.36\alpha^2 / \Delta) \quad (5)$$

表 1 是高密度光纤连接器插芯角度倾斜时单模光纤和多模光纤插入损耗的比较。

表 1 光纤连接器插芯角度倾斜时插入损耗比较

Table 1 Insertion loss comparison of different slope angles of optical fiber connector MT ferrule

倾角 $\alpha/(\circ)$	单模 $V=2.3$		多模	
	α^2/Δ	$L_{\alpha}(\text{sm})/\text{dB}$	α^2/Δ	$L_{\alpha}(\text{mm})/\text{dB}$
	($\Delta=0.002$)		($\Delta=0.01$)	
0	0	0	0	0
0.1	0.001 5	0.006	0.000 3	0.000 5
0.2	0.006 1	0.023	0.001 2	0.002
0.3	0.013 7	0.051	0.002 7	0.004
0.4	0.024	0.091	0.004 8	0.008
0.5	0.038	0.143	0.007 6	0.012
0.8	0.097	0.376	0.019	0.03

当 α 增加时, 无论是单模光纤或是多模光纤, 连接损耗都将随着 α^2/Δ 逐渐增加, 而且角度对单模光纤连接损耗的影响比多模光纤连接损耗的影响要大得多。基于上述现象, 应使双模(单模+多模)高密度光纤连接器角度倾斜 $<0.5^\circ$ 。

2 双模高密度光纤连接器回波损耗及倾角

通常在光纤连接处保持连接端面紧密物理接触(Physical Contact, PC)或施加折射率匹配剂(Index Matching)两种方法减少菲涅尔反射^[14], 提高回波损耗, 一般可使回波损耗达到 35~30 dB。单模光纤斜面连接时, 如回光的入射角大于光纤临界角余角, 可使回反光进入包层最终泄露出去, 因此选择适当的高密度光纤连接器端面倾角, 其回波损耗可达 60 dB 以上^[15]。

设 R 为连接界面处的功率反射率, 则回波损耗(Return Loss, RL)可表示为

$$RL = -10 \lg R \quad (\text{dB}) \quad (6)$$

因多模光纤对回波损耗不作特殊要求, 以下重点分析单模光纤端面倾角与回波损耗的关系。

2.1 单模光纤平面连接

单模光纤的模场近似于高斯分布, 由高斯光束模式耦合理论可得单模光纤连接的耦合效率。

设光纤基模光斑直径为 2ω , 纤芯折射率为 n_1 , 包层折射率 n_2 , 连接间隙折射率 n_0 , 两根光纤连接存在倾角 θ 时的耦合效率为

$$T_{\theta} = \exp \left[- \left(\frac{\pi n_2 \omega \theta}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (7)$$

当单模光纤平面连接时, 作为正入射处理, 其菲涅尔反射系数为

$$R_0 = \left(\frac{n_1 - n_0}{n_1 + n_0} \right)^2 \quad (8)$$

式中: n_1 为纤芯折射率; n_0 为连接界面失配层折射率。

当 $\lambda=1.31 \mu\text{m}$ 时, 常规单模光纤 $n_1=1.46$ 。

当 $n_0=1$ (空气隙), 由式(6)和式(8)得 $RL=-14.56 \text{ dB}$ 。

当 $n_0=1.54$ (PC 连接失配层), 同理可得 $RL=-31.48 \text{ dB}$ 。

2.2 单模光纤斜面连接

单模光纤斜面连接时, 其连接界面处的菲涅尔反射光以 2θ 角返回, 斜面连接的功率反射系数为

$$R = R_0 \exp \left[- \left(\frac{\pi n_2 \omega 2\theta}{\lambda} \right)^2 \right] \quad (9)$$

式中, R_0 为平面连接时菲涅尔反射系数。

由式(6)和式(9)可得不同端面倾角与回波损耗的理论曲线, 如图 3($\omega=5 \mu\text{m}$, $n_2=1.46$)。

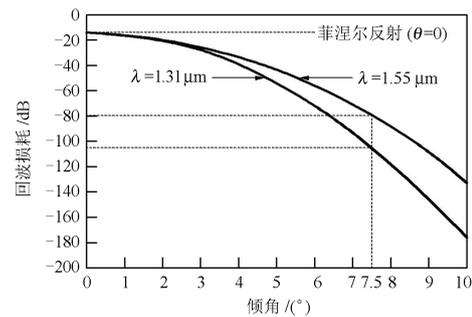


图 3 高密度插芯端面倾角与回波损耗理论曲线图

Fig. 3 Theoretical curve of end surface slope angle and return loss of high-density MT ferrule

由图 3 可以看出:

$\theta=7.0^\circ$ 时, $RL=-95 \text{ dB}(\lambda=1.31 \mu\text{m})$;

$\theta=7.2^\circ$ 时, $RL=-98 \text{ dB}(\lambda=1.31 \mu\text{m})$;

$\theta=7.5^\circ$ 时, $RL=-105 \text{ dB}(\lambda=1.31 \mu\text{m})$ 。

2.3 双模(单模+多模)光纤斜面倾角优化

普通 G652 单模光纤的数值孔径设计为 0.125, 根据数值孔径定义: $NA = \sin x$, 可得出 $X=7.2^\circ$, 当斜面角度大于 7.2° 时, 光纤斜面反射回去的光基本进入包层, 从而折射出光纤以外。

基于双模(单模+多模)高密度光纤连接器连接损耗分析, 其连接端面角度倾斜应控制在 $<0.5^\circ$; 基于双模(单模+多模)高密度光纤连接器回波损耗分析, 其连接端面的斜面倾角 $7.0^\circ \sim 7.5^\circ$ 即可满足常规传输要求。综合双模(单模+多模)高密度光纤连接器在多模光纤和单模光纤连接实现较低损耗的同时兼顾单模光纤较大回波损耗的插芯端面的斜面倾角为 $7.0^\circ \sim 7.5^\circ$, 如图 4。

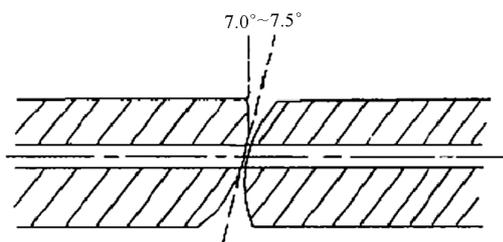


图 4 双模(单模+多模)高密度光纤插芯端面的斜面倾角示意图

Fig. 4 Diagram of end surface slope angle of dual-mode (single-mode and multi-mode) high-density optical fiber MT ferrule

3 双模高密度预制光缆实现型式

(1) 设计双模(单模+多模)光缆结构, 将所需若干芯数的单模光纤和多模光纤组合放入中心束管, 中心束管外包裹防鼠啃玻璃纤维纱和防拉拽芳纶纱, 外侧护套防护。

(2) 双模(单模+多模)高密度光纤连接器插芯端面按 $7.0^{\circ}\sim 7.5^{\circ}$ 倾角研磨。

(3) 将端面倾角 $7.0^{\circ}\sim 7.5^{\circ}$ 的双模(单模+多模)高密度光纤连接器插芯(公插芯或母插芯)安装防护套后卡入带 T 槽的多键位连接器^[16-18]插头壳体内, 由 U 型定位块将高密度光纤连接器的防护套与金属插头壳体固定, 根据高密度光纤连接器工作原理, 其公插芯或母插芯均可分别在防护套内轴向自由弹性伸缩, 径向自由摆动。金属插头壳体的尾端与金属手柄和金属尾夹相连, 金属尾夹内包含的密封圈将光缆夹紧并密封, 这样设计的防护结构使得高密度光纤连接器整体包裹在金属壳体内部, 在插芯端的金属插头壳体拧上金属密封盖后, 即形成防尘防水高防护等级的双模(单模+多模)高密度预制光缆公插头组件或母插头组件, 如图 5。

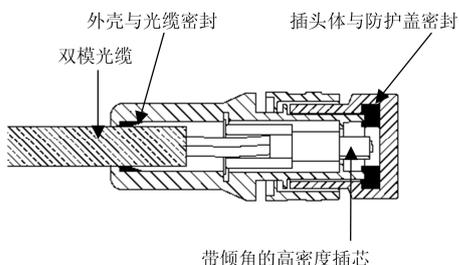


图 5 双模(单模+多模)高密度预制光缆插头组件结构示意图
Fig. 5 Structure diagram of dual-mode (single-mode and multi-mode) high-density prefabricated optical cable plug assembly

(4) 公插头组件和母插头组件分别对准适配器(图 6)导向位置并插入 T 型导向槽后锁紧, 适配器 T 槽的外侧安装有密封圈, 当插头组件与适配器锁紧

时此密封圈受到插头金属壳体的挤压, 形成防水防尘的高防护效应, 即构建一种较高防护等级“即插即用”双模(单模+多模)高密度预制光缆, 如图 7 所示。

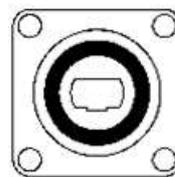


图 6 适配器
Fig. 6 Adapter

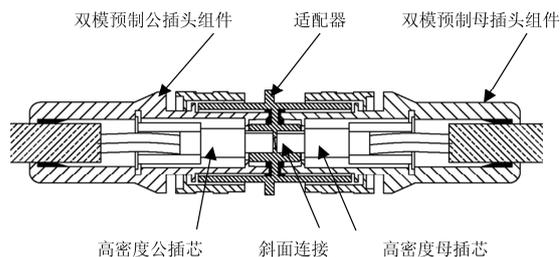


图 7 双模(单模+多模)高密度预制光缆及其高防护外壳结构示意图

Fig. 7 Structure diagram of dual-mode (single-mode and multi-mode) high-density prefabricated optical cable and its high-protection shell

双模(单模+多模)高密度预制光缆测试链路^[19-21]如图 8 所示, 测试现场照片如图 9 所示。

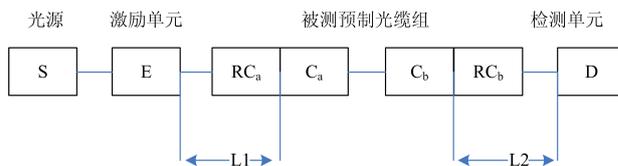


图 8 双模(单模+多模)高密度预制光缆连接和测试链路示意图

Fig. 8 Link diagram of dual-mode (single-mode and multi-mode) high-density prefabricated optical cable connection and test



图 9 双模(单模+多模)高密度预制光缆测试现场照片
Fig. 9 Field photograph of dual-mode (single-mode and multi-mode) high-density prefabricated optical cable

表 2 是 FC/PC 光纤连接器-两对双模(单模+多模)斜面连接高密度预制光缆-FC/PC 光纤连接器串联链路的连接损耗和回波损耗实验测试结果。

表 2 光纤连接器链路连接损耗和回波损耗实验测试数据

Table 2 Experimental data of insertion loss and return loss of optical fiber connector link

光纤 序号	连接损耗/dB				回波损耗/dB	
	850	1 300	1 310	1 550	1 310	1 550
MM1	0.65	0.66	0.66	0.68	-	—
MM2	0.58	0.59	0.60	0.63	-	—
MM3	0.59	0.59	0.59	0.63	-	—
MM4	0.75	0.76	0.78	0.80	-	—
MM5	0.79	0.80	0.80	0.83	-	—
MM6	0.62	0.64	0.64	0.65	-	—
MM7	0.55	0.55	0.55	0.57	-	—
MM8	0.82	0.83	0.83	0.85	-	—
MM9	0.74	0.76	0.76	0.78	-	—
MM10	0.62	0.63	0.63	0.65	-	—
MM11	0.52	0.53	0.54	0.56	-	—
MM12	0.48	0.49	0.49	0.53	-	—
SM1	0.91	0.94	0.95	0.98	-60.66	-59.14
SM2	0.84	0.85	0.85	0.87	-58.67	-57.88
SM3	0.71	0.72	0.72	0.74	-55.11	-54.73
SM4	0.66	0.66	0.67	0.69	-54.37	-53.81

从表 2 实验测试结果看, 具有斜面插芯的双模(单模+多模)高密度预制光缆实际连接损耗值比理论计算值稍大一些, 实际回波损耗值比理论计算值要小些, 主要原因是理论计算没有考虑高密度插芯端面抛光划痕等原因引起的光散射, 倾角一致性偏差也会使回波损耗下降。通过改进高密度插芯倾角研磨辅材的精细度, 提高研磨机中心四角定位和倾角精度, 采用低损耗插芯, 可使双模(单模+多模)高密度预制光缆的单模和多模连接损耗进一步降低, 单模回波损耗进一步提高。

4 结论

针对智能变电站“即插即用”, 就地化线路保护装置通过保护专网与其他保护设备交互信号, 采用单个通信接口, 同时需要单模光纤和多模光纤同步传输的特点, 本文提出双模(单模+多模)高密度预制光缆, 解决了预制光缆单一标准接口同时具备单模光纤和多模光纤, 以及快速连接和光信号同步传输的技术问题。

兼顾多模光纤和单模光纤连接较低插入损耗值, 以及单模光纤连接较高回波损耗值的传输要求,

导出并优化, 实验验证双模(单模+多模)高密度预制光缆的光纤连接插芯端面采用斜面 $7.0^{\circ}\sim 7.5^{\circ}$ 是较为理想的端面倾角, 能较好地满足变电站通信传输要求。

高密度光纤连接插芯具有的小型化、标准化优势, 设计实现具有较高防水防尘等级的双模(单模+多模)高密度预制光缆能更好地顺应就地化保护装置小型化高防护和下一代变电站技术发展方向, 更加适应各种严酷环境条件对预制光缆的严苛使用要求。

参考文献

- [1] 高磊, 杨毅, 苏麟, 等. 智能变电站二次系统物理回路建模方法及设计实现[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 130-139.
GAO Lei, YANG Yi, SU Lin, et al. A modeling approach and design implementation of secondary system physical circuit for smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 130-139.
- [2] 杨辉, 温东旭, 高磊, 等. 智能变电站二次虚回路连线自动生产实践[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 116-121.
YANG Hui, WEN Dongxu, GAO Lei, et al. Automatic generation of secondary circuit virtual connection in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 116-121.
- [3] 郑玉平, 吴通华, 戴魏, 等. 变电站二次设备就地化系统网络架构探讨[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 20-26.
ZHENG Yuping, WU Tonghua, DAI Wei, et al. Discussion on network architecture of outdoor installation protection system in substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 20-26.
- [4] 王德林, 裘愉涛, 凌光. 变电站即插即用就地化保护的应用方案和经济比较[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(16): 12-19.
WANG Delin, QIU Yutao, LING Guang. Application scheme and economical comparison of plug & play and outdoor installation protection in substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 12-19.
- [5] 刘颖. 智能变电站全寿命周期“即插即用”技术体系的研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 23-28.
LIU Ying. Research and application on the technology system of plug & play in the smart substation's life cycle[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 23-28.
- [6] 智能变电站预制光缆技术规范: Q/GDW 11155—

- 2014[S]. 北京: 国家电网公司, 2014.
Technical specification for prefabricated optic cable in smart substation: Q/GDW 11155—2014[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2014.
- [7] 李晓朋, 裘愉涛, 钱建国, 等. 智能变电站二次设备互换性探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 76-81.
LI Xiaopeng, QIU Yutao, QIAN Jianguo, et al. Discussion on interchangeability of secondary devices in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 76-81.
- [8] 裘愉涛, 胡雪平, 凌光, 等. 国网公司智能变电站继电保护标准体系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 7-13.
QIU Yutao, HU Xueping, LING Guang, et al. Research on State Grid's technical specification system of relay protection in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 7-13.
- [9] 彭朝钊, 程凌飞, 刘邦海, 等. 智能变电站预制舱式二次组合设备舱体环境控制优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 143-147.
PENG Zhaozhao, CHENG Lingfei, LIU Banghai, et al. Optimization control research on secondary combination device cabin environment of prefabricated cabin in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 143-147.
- [10] Telecommunications Industry Association. Generic telecommunications cabling for customer premises: ANSI/TIA-568-C.0—2009[S].
- [11] 光纤活动连接器第 5 部分: MPO 型: YD/T 1272.5—2009[S]. 北京: 工业和信息化部, 2009.
Optical fiber connector part 5: type MPO: YD/T 1272.5—2009[S]. Beijing: Ministry of Industry and Information of the People's Republic of China, 2009.
- [12] 宋金声. 单模光纤的连接损耗计算[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 1989(6): 24-31.
SONG Jinsheng. Calculation of connection loss for single mode fiber[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 1989(6): 24-31.
- [13] 谭海艳, 赵鑫. 光纤损耗的理论分析与测量[J]. 甘肃科技, 2009, 25(21): 66-88.
TAN Haiyan, ZHAO Xin. Theoretical analysis and measurement of optical fiber loss[J]. Gansu Science and Technology, 2009, 25(21): 66-88.
- [14] 赵兰兰, 朱益清. 菲涅尔反射对光纤连接器插入损耗的影响[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2010(2): 44-46.
ZHAO Lanlan, ZHU Yiqing. Insertion loss of fiber optic connector induced by Fresnel reflection[J]. Optical Fiber & Electric Cable and Their Applications, 2010(2): 44-46.
- [15] 江山, 刘水华, 方罗珍, 等. 单模光纤斜面连接的回波损耗[J]. 光通信研究, 1994, 71(3): 31-37.
JIANG Shan, LIU Shuihua, FANG Luozhen, et al. Return loss in single-mode fiber joints with beveled endface[J]. Study on Optical Communications, 1994, 71(3): 31-37.
- [16] 耐环境快速分离高密度小圆形电连接器总规范: GJB 599A-93[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1993.
General specification for circular, miniature, high density, quick disconnect and environmental resistant electrical connectors: GJB 599A-93[S]. Beijing: National Defense Science and Technology Industry Committee, 1993.
- [17] 张战峰. 国外军用连接器技术及发展趋势[J]. 机电元件, 2004, 24(3): 47-52.
ZHANG Zhanfeng. Foreign military connector technology and development trend[J]. Electromechanical Components, 2004, 24(3): 47-52.
- [18] 李华强. 军用光纤连接器技术近期发展动向[J]. 光通信技术, 2015, 39(3): 21-23.
LI Huaqiang. Recent trend of military optical fiber connector technology[J]. Optical Communication Technology, 2015, 39(3): 21-23.
- [19] 耐环境中性圆形光纤光缆连接器总规范: GJB 1919-94[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1994.
General specification for circular, environmental resistant, hermaphroditic fiber optic connectors[S]. Beijing: National Defense Science and Technology Industry Committee, 1994.
- [20] 戴真. 对标准中关于光纤活动连接器插入损耗测量的指标和测试方法的认识和讨论[J]. 电信工程技术与标准化, 2005(4): 39-41.
DAI Zhen. Understanding and discussing the requirement and test method of optical fiber connector's insert loss in standard[J]. Telecom Engineering Technics and Standardization, 2005(4): 39-41.
- [21] 张雪梅. 浅析光纤连接器插入损耗测试[J]. 电子质量, 2007, 测试技术卷(11): 23-28.
ZHANG Xuemei. Simple analysis on insertion loss measurement of optical fiber connector[J]. Electronics Quality, 2007, Test Technology(11): 23-28.

收稿日期: 2017-12-26; 修回日期: 2018-08-26

作者简介:

方贞泽(1965—), 男, 高级工程师, 长期从事电力系统光电连接技术相关工作;

万淑娟(1981—), 女, 高级工程师, 长期从事电力系统自动化工作;

邱新娟(1977—), 女, 通信作者, 高级工程师, 长期从事电力系统光通信技术工作。E-mail: xinjuanq@sfuntec.com

(编辑 姜新丽)