

光纤复合低压电缆宏弯损耗与高温热致损耗

许刚¹, 马良¹, 葛维春², 徐晨³, 罗桓桓², 陈晓阳³

(1. 华北电力大学 电气与工程学院, 北京 102206;

2. 国网辽宁省电力有限公司, 沈阳 110003; 3. 上海电缆研究所有限公司, 上海 200433)

摘要: 针对光纤复合低压电缆(OPLC)存在机械弯曲与短路故障的问题, 研究宏弯与暂态高温对 OPLC 传输损耗的影响。综合考虑 OPLC 温度场分布、光纤单元弯曲损耗特性及其在高温下的应力场分布特性, 建立多物理场耦合环境下的 OPLC 宏弯损耗与高温热致损耗数学模型, 并采用有限元分析方法对宏弯与热致损耗分别进行仿真。结果表明: 在稳定运行状态下, OPLC 的传输损耗随弯曲半径的减小而增大, 在达到临界半径之后急剧增加; 在短路故障状态下, 随着 OPLC 温度的升高, 光纤单元由于高温及应力差引起的微小形变使得传输损耗略有增加。

关键词: 光纤复合低压电缆; 宏弯; 高温; 传输损耗

中图分类号: TN915.62 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2019)04-0018-05

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.04.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Macro bending loss and high temperature thermal loss of optical fiber composite low-voltage cable

XU Gang¹, MA Liang¹, GE Weichun², XU Chen³, LUO Huanhuan², CHEN Xiaoyang³

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110003, China;

3. Shanghai Electric Cable Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200433, China)

Abstract: In view of the fact that mechanical bending and short circuit faults exist in optical fiber composite low-voltage cable (OPLC), the influence of macro bending and transient high temperature on the transmission loss of OPLC is studied. Considering the temperature field distribution of OPLC, the bending loss characteristics and the stress field distribution characteristics under high temperature of optical unit, a mathematical model of macro bending loss and temperature thermal loss under multi-physical field coupling condition is established. By using finite element analysis method, the transmission loss caused by macro bending and high temperature is simulated respectively. The results show that the transmission loss of OPLC increases with the decrease of the bending radius and increases sharply after reaching the critical radius, the transmission loss of OPLC caused by high temperature and stress increase slightly under short-circuit faults.

Key words: optical fiber composite low-voltage cable; macro bending; high temperature; transmission loss

0 引言

光纤复合低压电缆(OPLC)是由光纤和束管组成的光纤单元与电力电缆同轴敷设生产, 具备能量流、

收稿日期: 2018-11-01。

基金项目: 国家重点研发计划(项目编号: 2016YFB0901200)资助。

作者简介: 许刚(1963-), 男, 湖北武汉人, 博士, 教授, 中国计算机学会高级会员, IEEE 会员。主要研究方向为光通信技术、电气信息技术等。目前承担国家重点研发计划“电力光纤到户关键技术与示范”、国家 863 计划“智能配用电大数据应用关键技术”等课题。



信息流和业务流的同步传输能力, 是促进通道资源共享、避免重复建设^[1,2]和促进电力光纤到户的有效途径^[3,4]。在实际工况下, OPLC 在敷设时由于存在穿越电缆沟道、墙体孔洞等情况, 必然产生机械弯曲、设备故障、绝缘破损和雷击过电压等情况, 造成 OPLC 发生短路故障与温度骤升, 从而导致光纤单元的传输性能下降。文献[5]从结构、材料和运行环境的角度研究了 OPLC 的温度场分布机理, 但缺乏温升及实际工况对 OPLC 传输损耗影响的进一步研究。文献 [6] 采用了 Comsol 软件进行仿真, 得到 OPLC 稳定运行和短路故障下的温度与传输损耗间的关系, 但缺乏对 OPLC 高

温热致损耗机理的解释。文献[7]对单模光纤宏弯损耗的影响因素进行了研究,尝试使用耦合模理论解释回音壁效应(whispering-gallery mode, WGM)对光纤传输损耗的影响,但缺乏温度对传输损耗的相关研究与解释。文献[8]建立了温度波动对光纤应力场分布的数学模型,指出温度引起的光纤形变与应力差的关系,但是缺乏形变影响光纤传输损耗的分析。

因此,本文针对 OPLC 中光纤单元在稳定运行状态的宏弯损耗与短路故障状态的高温热致损耗影响机理不明的问题,综合考虑 OPLC 运行时的温度场分布特性、光纤单元弯曲损耗特性和光纤单元在暂态高温下的应力场分布特性,分析弯曲半径及高温引起的光纤单元热膨胀对传输损耗的影响。

1 OPCL 温度场与传输损耗机理分析

1.1 OPLC 温度场分布特性建模

当 OPLC 运行时,电流流过其内部铜导体产生焦耳热,热量主要以固体传热的形式向周围导体、光纤单元、填充物和外部环境传递。各层固体材料间的温度场求解,需分别约束各固体材料边界上的温度值、法向热流密度值、周围流体的温度和对流换热系数^[9]。OPLC 温度场分布的计算可视为其内部各层介质间的二维稳态导热问题^[10],其微分方程为:

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + q \quad (1)$$

其中, t 为时间; (x,y) 为 OPLC 内部的介质的坐标位置; T 为 OPLC 中点 (x,y) 处的温度值; ρ 、 C 和 k 分别为介质的密度、比热容和导热系数; q 为生热率。基于有限元方法求解 OPLC 的温度场分布,可根据导体的生热率以及三类边界条件计算得到 OPLC 中各点的温度值 T 。

1.2 光纤单元宏弯损耗特性分析

OPLC 在敷设时产生的机械弯曲会导致光纤单元内部光传播途径的改变,沿弯曲半径方向会造成光从光纤纤芯向包层及其外侧发生泄露,引起传输损耗的增加^[11]。设 OPLC 中光纤弯曲半径为 R ,基于纤芯-无限包层模型单位长度的单模光纤弯曲损耗 α_c 可以表示为:

$$\alpha_c = \frac{\sqrt{\pi} U^2 \exp(-2W^3 R / (3a^3 \beta^2))}{2e_v W^{2/3} V^2 \sqrt{aR} K_{v-1}(W) K_{v+1}(W)} \quad (2)$$

其中, $e_v=2$ 表示上式适用于单模光纤; a 为纤芯半径; β 为直光纤基模无扰动传播常数; $K_v(\cdot)$ 为 v 阶贝塞尔

函数; U 为归一化相位常数($U=a\sqrt{k^2 n_1^2 - \beta^2}$); W 为径向常数($W=a\sqrt{\beta^2 - k^2 n_2^2}$); V 为频率($V=ka\sqrt{n_1^2 - n_2^2}$); n_1 和 n_2 分别表示纤芯和包层的折射率; k 为真空波数($k=2\pi/\lambda$); λ 为波长。

由式(2)可知,对于材料折射率和纤芯半径确定的光纤,其单位长度的宏弯损耗主要受弯曲半径、波长的影响。

1.3 暂态高温下光纤单元应力场及传输损耗特性分析

在短路故障状态下,短路电流热效应会引起 O-PLC 出现暂态高温。温度的异常升高使光纤纤芯和包层产生热膨胀^[12],其单位长度轴向形变量 $\theta=\Delta l/l=\alpha\Delta T$, α 为光纤热膨胀系数, ΔT 为光纤温度波动, Δl 与 l 分别表示轴向形变差与光纤长度。热膨胀引起的光纤轴向应力 F 与横截面上的应力差 σ 可表示为^[13]:

$$F = \frac{ES}{2} \alpha \Delta T \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{E}{2} \alpha \Delta T \quad (4)$$

其中, E 为弹性模量, S 为纤芯和包层接触面的面积。

由分析可知,在高温条件下,光纤的轴向形变量及应力分布与温度的变化量呈线性相关关系。光纤在暂态高温下的形变引起光的模耦合,产生传输损耗。光纤的高温热致传输损耗表示为:

$$Loss = 10 \lg(P_{in}/P_{out}) \quad (5)$$

其中, P_{in} 为发送端光源输入功率, P_{out} 为接收端光功率。

2 OPLC 温度场仿真与分析

本文仿真所用 OPLC 模型如图 1 所示。该模型包含 1 芯光纤单元与 3 芯电缆。从外至内各层分别为:

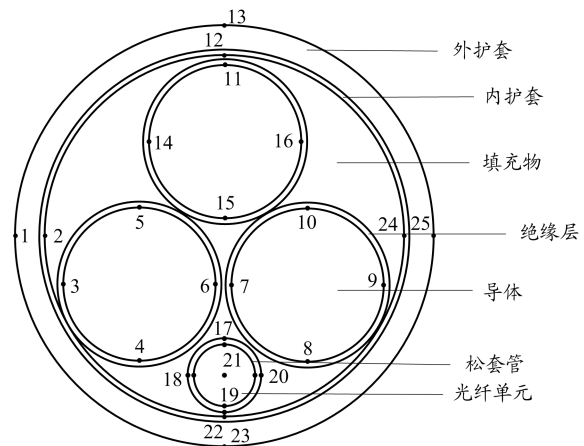


图 1 OPLC 模型及特征点

许刚,马良,葛维春,等:光纤复合低压电缆宏弯损耗与高温热致损耗

聚氯乙烯外护套、涤纶无纺布内护套、聚苯乙烯填充物、交联聚乙烯绝缘层包裹的铜导体和 PBT 材料松套管包裹的光纤单元。

根据 GB/T 12706.1-2008 标准^[14],当绝缘材料为交联聚乙烯(XLPE)时,电缆正常运行的导体最高额定温度为 90℃。设置环境温度为 20℃,调节流经 OPLC 内部导体的电流值,使得经 4500s 后 OPLC 内部导体温度达到稳定运行状态所允许的最高温度 90℃,得到稳定状态下 OPLC 的截面稳态温度场分布如图 2 所示。我们分别选取导体边缘特征点 5、外护套外侧特征点 1、内护套内侧特征点 2、光纤单元最靠近导体特征点 17、光纤单元次靠近导体特征点 18 和光纤单元中心特征点 21,记录各特征点在稳定运行状态下的温度变化曲线如图 3 所示。可以看出,在稳定运行状态下,OPLC 中各特征点具有相同的温度变化趋势,且服从由导体侧向外护套侧逐层降低的规律,导体的温度最高可达 90℃,内护套温度为 74.3℃,外护套外侧温度

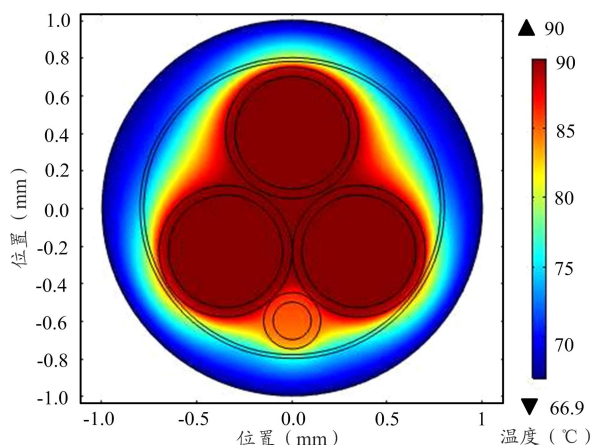


图 2 稳定工作状态下 OPLC 的截面稳态温度场

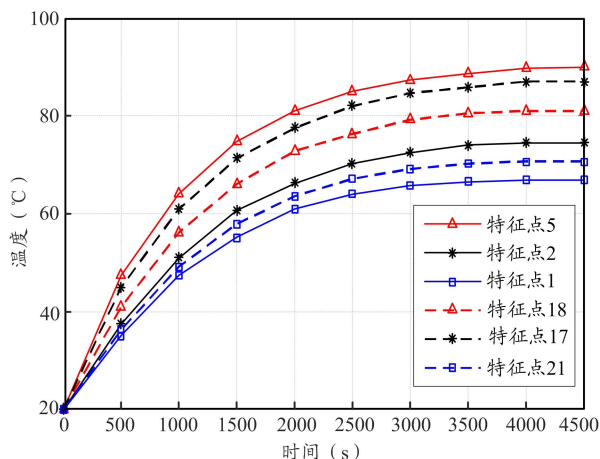


图 3 OPLC 稳定工作状态下各特征点温度变化

最低为 66.9℃,光纤单元最靠近导体侧的特征点 18 最高温度可达 86.7℃。此外,在短路故障状态下,电缆导体的最高允许温度为 250℃,最长短路持续时间为 5s,故调整电流值使 OPLC 内部铜导体的温度在 5s 内从 90℃上升至 246℃,得到短路故障状态下 OPLC 中特征点的温度变化曲线如图 4 所示。可以看出,在短路故障状态下导体温度变化明显,在 5s 内升高至 246℃。由于填充物及材料热阻的存在,暂态高温对 OPLC 内护套及外护套的影响可忽略不计,其温度在 5s 内保持不变。光纤单元最靠近导体侧的特征点 18 温度略有变化,升高至 93.5℃;光纤单元纤芯处的温度几乎没有变化,为 70.9℃,仅升高 1℃。

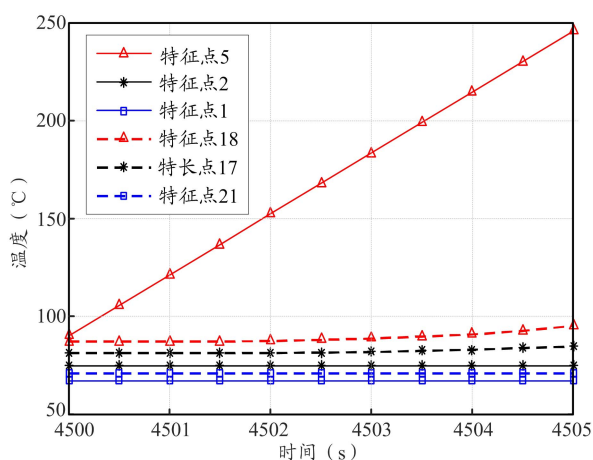


图 4 OPLC 短路故障状态下各特征点温度变化

因此,OPLC 故障状态下的暂态高温对光纤单元温度分布的影响较小,其温度变化不明显。

3 OPLC 宏弯损耗仿真与分析

由 1.2 节内容可知,光纤的宏弯损耗是由于光纤本体受外力发生弯曲,导致光能量从纤芯向外泄露,引起传输损耗。本文在 OPLC 稳定运行状态下和温度场分布已知的基础上,仿真分析光纤宏弯损耗,仿真时的弯曲半径与弯曲角度如图 5 所示。当 OPLC 在敷设时,由于存在跨越障碍、穿越孔洞等情况,OPLC 的最大弯曲角度应不超过 90°,故在 OPLC 稳定运行状态下(即导体温度达到 90℃时),设置 OPLC 的弯曲角度为 90°;通过光场、温度场耦合仿真研究 OPLC 中光纤宏弯弯曲半径、工作波长及与传输损耗间的关系如图 6 所示。仿真所用光纤型号为 G.657A,G.657A 光纤具有弯曲不敏感特性,适用于被安放在狭窄的管道或接头盒等具有狭小空间的终端设备中^[15]。

由图 6 可知,当 OPLC 处于稳定工作状态,传输损

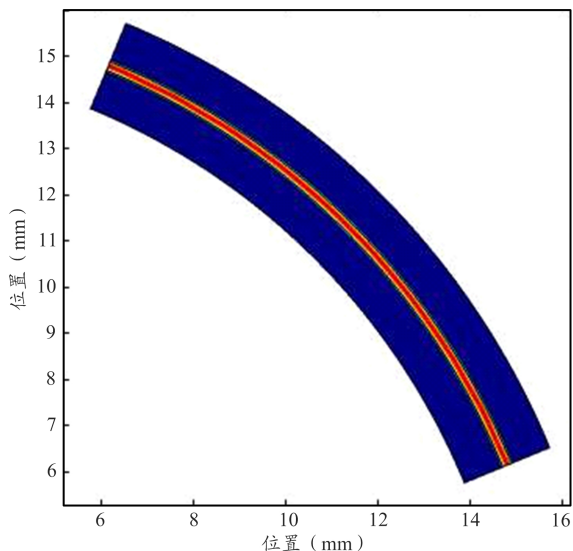


图5 稳定工作状态下 OPLC 宏弯仿真图

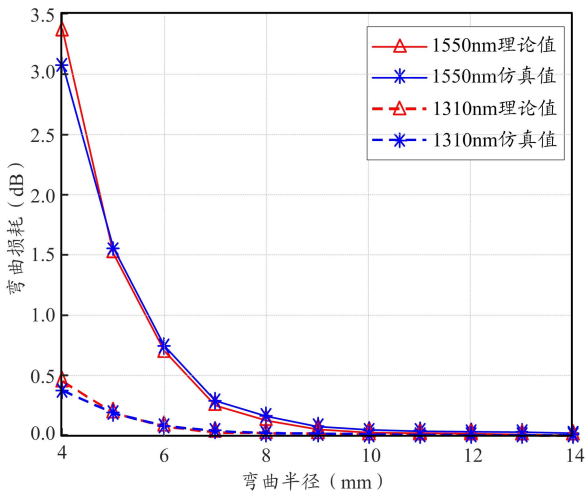


图6 OPLC 弯曲半径、工作波长与传输损耗间关系

耗的仿真值与理论值基本一致,且在同一工作波长下,其传输损耗与弯曲半径呈负相关;在同一弯曲半径下其传输损耗与工作波长呈正相关。对于工作波长为 1550nm 的入射光信号,OPLC 的宏弯传输损耗在弯曲半径大于 12mm 时,被限制在 0.1dB 以下;当弯曲半径在 7.5~12mm 时,传输损耗随着弯曲半径的减小而呈平稳增大态势;当弯曲半径小于 7.5mm 时,传输损耗随着弯曲半径的减小急剧增加,光信号衰减较大。对于工作波长为 1310nm 的入射光,其传输损耗特性与弯曲半径间的关系与波长为 1550nm 的入射光相似,当弯曲半径大于 6mm 时传输损耗较小,在工程上可忽略不计;当弯曲半径小于 6mm 时传输损耗增大较为明显,但其传输损耗值始终小于 1550nm 入射光对应的传输损耗。

综合考虑光纤宏弯半径、工作波长对传输损耗的影响,OPLC 在敷设时,其最小弯曲半径应大于 12mm,可避免因为弯曲半径过小而造成较大的宏弯损耗。由于在相同弯曲半径下工作波长较长的入射光产生的宏弯损耗较大,因此在实际的 OPLC 运行时应选择合理的工作波长。

4 OPLC 高温热致损耗仿真与分析

由 1.3 节的内容可知,在短路故障状态下,由于流经导体的短路电流可达到额定电流的数十倍,导致电流热效应使 OPLC 经历暂态高温过程。本文通过耦合固体传热、固体力学 2 个物理场,并在第 2 节短路故障状态温度变化的基础上,得到光纤暂态高温引起的形变量以及与之相对应的应力变化,仿真结果如图 7 所示。

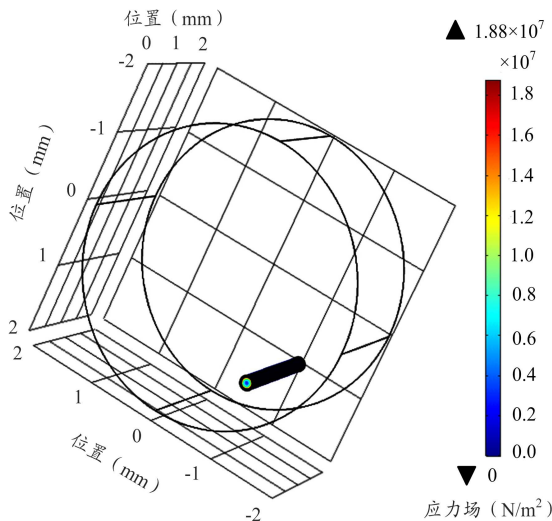


图7 暂态高温下光纤热膨胀及应力场分布

由图 7 可知,光纤在暂态高温下,其应力场中冯米塞斯力的最大值为 $1.88 \times 10^7 \text{ N/m}^2$,且光纤靠近导体侧所受的应力大于远离导体侧。由于暂态高温引起光纤应力发生变化,导致光纤产生形变量。根据暂态高温下光纤的应力场分布参数,通过 Comsol 软件仿真得到稳定运行状态与短路故障状态前后光纤的位移量分别为 21.368nm 与 22.102nm。我们以光纤的形变量为基础,设置输入光功率值为 10dBm,经仿真得到稳定运行状态和短路故障状态下的光功率变化如图 8 所示。

由图 8 可知,OPLC 在稳定运行与短路故障状态下,光纤的光功率值变化十分微小。这是由于在短路故障状态下,OPLC 内部光纤单元靠近导体侧的温度

许刚,马良,葛维春,等:光纤复合低压电缆宏弯损耗与高温热致损耗

变化最大值为 6.8℃,纤芯的温度变化仅为 1℃,光纤温度变化不明显,仅发生微小的形变量。暂态高温引起的光纤热致损耗较小,对光在光纤中的传输影响较为微弱,在工程允许范围之内。

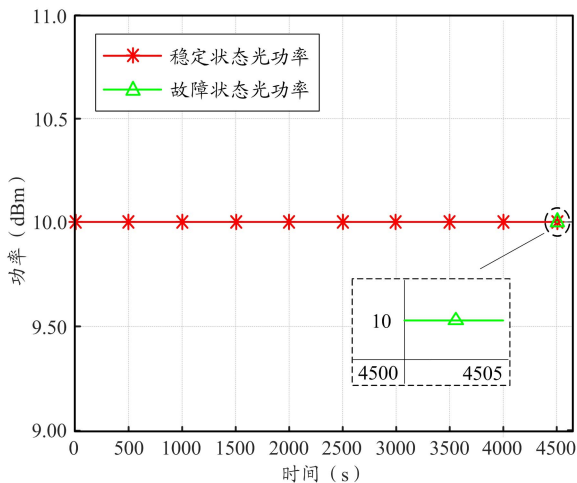


图 8 稳定运行状态和短路故障状态下光功率变化

由于光纤的异常温度升高引起光纤的热膨胀,而对光纤的传输损耗造成影响。为进一步验证高温与光纤传输损耗间的关系,在 Comsol 软件中设置光纤的温度缓慢从 70℃升高到 250℃,得到温度变化与热致损耗间的关系如图 9 所示。可以看出,光纤的热致传输损耗随温度的升高而呈线性增加趋势,从 70℃时的 0.0085dB/km 增加至 250℃时的 0.0368dB/km,持续高温对光纤传输损耗的影响已不能忽略。

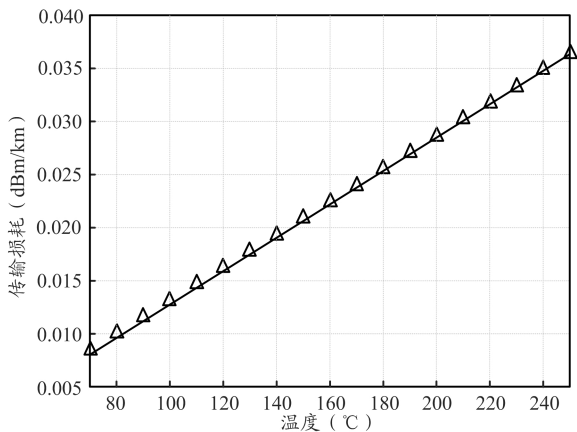


图 9 光纤温度变化与热致损耗间关系

在短路故障状态下,由于光纤单元升温不明显,且暂态高温引起的传输损耗较小;当温度持续维持在异常高值时,高温引起的热致损耗将不能忽略。因此,应尽量采取措施避免 OPLC 长期运行在高温条件下。

5 结束语

本文阐述了 OPLC 在稳定运行和短路故障状态下的宏弯损耗和高温热致损耗机理,并结合多物理场耦合及有限元分析方法研究了 OPLC 温度场分布、光纤单元宏弯损耗和高温引起的热致损耗间的关系,通过仿真得到以下结论:①在稳定运行状态下,OPLC 的温度由导体侧向外护套侧逐层降低;在短路故障状态下,OPLC 中光纤单元的温度略有升高。②在稳定运行条件下,OPLC 的宏弯传输损耗随着弯曲半径的减小而增大,相同弯曲半径下较小的工作波长有利于降低宏弯损耗。③在短路故障状态下,暂态高温引起光纤受热膨胀及应力变化,由于光纤在 OPLC 故障状态下温升较小,高温引起的热致损耗在工程上可以忽略,但是应避免 OPLC 长期运行在高温条件下。

参考文献:

- [1] 刘建明,王继业,范展鹏,等. 电力光纤到户在智能电网中的应用[J]. 电力系统通信,2011,32(9):1-5.
- [2] 张强,施惠庆,陈元林,等. 光纤复合低压电缆载流量计算及修正方法[J]. 光通信技术,2017,41(8):36-39.
- [3] 陈灿,张素香,陈芳,等. 电力光纤到户组网关键技术综述[J]. 电力信息与通信技术,2017,15(10):74-78.
- [4] 范宏,高亮,周利俊,等. 智能电网的电力光纤入户技术及其应用[J]. 电力自动化设备,2013,33(7):149-154.
- [5] 石培培,胡红利,王格,等. 光纤复合低压电缆温度分布影响因素分析[J]. 西北大学学报(自然科学版),2018,48(1):24-30.
- [6] 涂兴华,倪彬,李军博. 光纤复合低压电缆温度分布与光单元传输特性研究[J]. 量子电子学报,2017,34(1):88-93.
- [7] 彭星龙,张华,李玉龙,等. 单模光纤宏弯损耗性能的试验研究[J]. 光通信技术,2014,38(7):1-3.
- [8] 程嵩,郭志忠,张国庆,等. 全光纤电流互感器的温度特性[J]. 高压技术,2015,41(11):3843-3848.
- [9] 黄诗雅,吴勇,李磊. 土壤直埋敷设单芯电力电缆温度场与载流量计算[J]. 武汉大学学报(工学版),2014,47(4):502-505,526.
- [10] 国良,王晓墨,邹田华,等. 工程传热学[M]. 北京:中国电力出版社,2011.
- [11] 彭星龙,张华,李玉龙. 光纤宏弯损耗性能影响因素的仿真研究[J]. 激光与红外,2014,44(10):1132-1136.
- [12] 赵镇南. 传热学[M]. 北京:高等教育出版社,2002.
- [13] 程嵩,郭志忠,张国庆,等. 全光纤电流互感器的温度特性[J]. 高压技术,2015,41(11):3843-3848.
- [14] 全国电线电缆标准化技术委员会. 额定电压 1kV ($U_m=1.2kV$) 到 35kV ($U_m=40.5kV$) 挤包绝缘电力电缆及附件:GB/T 12706.1-2008[S]. 北京:中国国家标准化管理委员会,2017.
- [15] 谢昕. 单模光纤弯曲损耗的实验研究 [D]. 北京:北京交通大学,2016.