

DOI: 10.7667/PSPC160491

# 基于 BOTDR 测温技术的架空线路动态增容方法

杨安琪, 龚庆武

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 架空导线的载流量一般是在输电线路周围环境为恒定的假设下计算得到的, 是比较保守的定额。为了充分利用现有架空输电线路的输电能力, 提出一种基于 BOTDR 测温技术的在线动态增容新方法。利用 OPGW 上的 BOTDR 测温技术对架空线路周围环境温度进行分布式测量, 通过牛顿迭代推导出导线温度, 将导线实时温度瓶颈点代入新的热平衡公式, 从而计算出实时载流量。计算证明, 该方法能够有效地提高线路载流量, 对线路载流量设计优化有理论指导作用。

**关键词:** 架空导线; OPGW; 动态载流量; 摩根公式; BOTDR

## Dynamic capacity-increase of overhead line based on BOTDR temperature monitoring technology

YANG Anqi, GONG Qingwu

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The transmission capacity of overhead line is generally calculated under the assumption that the surrounding environment of the transmission line is constant, and it is quite conservative. In order to make full use of the transmission capacity of the existing overhead transmission lines, a new method of on-line dynamic capacity-increase is developed based on BOTDR temperature monitoring technology. By using the Brillouin optical time domain reflectometer (BOTDR) temperature monitoring technology on OPGW, distributed measurement can be done for the ambient temperature of the long distance overhead line in real time. The wire temperature is deduced by Newton's iteration method. The real time load flow is calculated by substituting the choke point of temperature of real-time wire into the new simplified heat balance equation. The result shows that this new method can effectively improve the carrying capacity of the line and is of great theoretical value to design optimization of the line load flow.

This work is supported by National Science and Technology Support Program of China (No. 2013BAA02B01).

**Key words:** overhead transmission line; OPGW; dynamic current-carrying capacity; Morgan equation; BOTDR

## 0 引言

由于架空输电导线存在着电阻, 当流过一定负载电流时, 电阻就会“损耗”一部分电能而变成热量, 导线必然会发热。并且输电导线的温度会随着负载电流的增大而逐渐上升, 当超过导线的最大允许工作温度时, 必然因产生过流发热而烧毁, 可能导致断路器跳闸。因此我们需要在既不影响电网运行安全, 又不改变原有架空线路结构的条件下, 对输电线路的隐藏输电潜力进行深度挖掘, 科学地提高线路的输电容量, 以解决部分地区输电高峰的供需不平衡问题。

目前国内外一般采用以下两种方法来提高架空输电线路的载流量: 静态增容和动态增容<sup>[1-7]</sup>。静态增容技术需要对现有导线材料、规格及其配套设备进行改进, 对传统电力行业技术规定进行更新, 使架空输电线的最大允许工作温度从传统的 70℃ 提高到 80℃, 从而提高约 20% 的线路输电容量, 但是这种方法需要考虑 3 个方面的制约: 1) 是否符合现行设计标准; 2) 是否会影响导线及其配套设备的寿命和机械强度; 3) 受导线升温影响, 导线弧垂也会随之增加, 可能存在导线对地安全距离不足的隐患, 使得输电线路安全系数太小。而动态增容技术则改进了计算方法和测量方法, 通过在线路上增加监测设备对导线的状态及其周围环境因素进行精确在线检测, 不改变原有的线路布局且不影响电网运行安

全, 充分精确地监测架空线路环境参数来计算线路的最大容量, 理论上可提高线路载流量约 10%~30%。

现在国内外学者普遍使用的是动态热定值系统 (DTR 系统), 该系统根据 SCADA 提供的实时环境条件(风速、日照和温度等数据), 计算导体的最大允许载流值。但是其设备成本较高, 维护较困难, 可靠性难以保证等缺点制约了该系统在电网的应用推广, 它的价值不能被正常发挥出来。因此若采用保守的静态计算方法, 各地区统一标准、全年温度单一, 不能最大限度地体现架空线路的真实输电能力, 白白地浪费了巨大的电网资源。文献[8]提出一种将动态增容与阻塞分析结合的方法, 对于特定的易阻塞线路进行选择性的增容, 提高了计算效率, 并结合天气预报等实时气象数据对确定该线路可增加的安全容量和时间段。但是在线路阻塞时间段内, 微气象条件可能剧烈变化, 从而导致安全稳定问题。文献[9]提出一种静态综合增容方法, 以导线的最高允许温度为可变量, 根据电网运行的实际情况灵活设定其数值; 同时通过实时测量导体周围的环境数据计算动态载流量。运用抛物线法进行弧垂计算以保证线路运行安全。但是根据实际运行环境计算出的数据波动较大, 对载流量的设计有一定风险。

## 1 热平衡公式的化简

导线最高允许温度、导线受到的应力和导线对地安全静距是决定架空导线载流能力的 3 个最主要的因素。由于输电线路流过电流而引起的线路温度、弧垂以及张力的变化有相互影响的关系, 因此在工程中导体的热载荷能力往往取决于线路这 3 个物理量中最先受到约束的一个。在实际运行中, 常用导体的最高允许工作温度来进行统一计算。

目前国内外主要根据实时测得的气象数据, 运用 IEEE 738-2006 标准或 Morgan 公式来计算输电线路动态载流量<sup>[10-12]</sup>。

稳态热平衡方程为

$$q_c + q_r = q_s + I^2 R(T_c) \quad (1)$$

$$I = \sqrt{\frac{q_c + q_r - q_s}{R(T_c)}} \quad (2)$$

非稳态热平衡方程为

$$q_c + q_r + mC_p \frac{dT_c}{dt} = q_s + I^2 R(T_c) \quad (3)$$

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{1}{mC_p} [R(T_c) I^2 + q_s - q_c - q_r] \quad (4)$$

式中:  $I$  为导线电流, A;  $T_c$  为导线温度, °C;  $R(T_c)$  为温度  $T_c$  时导线每千米的交流电阻,  $\Omega/\text{km}$ ;  $q_c$  为

导线对流散热, W/m;  $q_r$  为导线辐射散热, W/m;  $q_s$  为导线日照吸热, W/m;  $mC_p$  为导线的总热容量,  $J/(m^\circ\text{C})$ 。

由于上式中,  $q_c$ ,  $q_r$ ,  $q_s$  的计算公式涉及参数较多, 计算过程相当复杂, 据文献[13]的思想, 在短时间内, 式(4)可以简化表示为

$$\frac{dT}{dt} = \theta_1(t)T + \theta_2(t)I^2 + \theta_3(t) \quad (5)$$

令环境隐性容量系数向量  $S(t) = [\theta_1(t), \theta_2(t), \theta_3(t)]^T$ ,  $\theta_1(t)$  为架空导线的散热系数;  $\theta_2(t)$  为架空导线的发热系数;  $\theta_3(t)$  为环境(比如风速、湿度等因子)对架空导线的综合影响系数。理论上, 若能测得输电线路温度瓶颈点的实时运行导线温度轨迹  $T_1, T_2, \dots, T_k$ , 则当  $k \geq 4$  时, 就能解除方程的一组系数向量  $S(t)$ , 就能够实现在线修正热平衡方程, 达到动态增容的目的。

本文用到的测温系统, 是基于 OPGW 的 BOTDR 光纤测温技术, 下文将详细说明。

## 2 导线周围温度的检测

随着智能电网建设的全面展开, 对下一代电网提出了新的要求, 即通过技术革新将所有通信业务和电力传输网络融为一体, 简化网络的结构, 这将会成为目前电力通信网络发展的新趋势。在我国, 电压等级大于 110 kV 的架空线路的电力通信大多都采用 OPGW 光缆(光纤复合架空地线)。OPGW 是一种加入了光纤单元的架空地线。其结构如图 1。线芯中心的光纤一般采用松套管与相邻地线相结合, 以防应变过大。光纤温度传感器的本质是: 由于光纤中入射光的相位、振幅、波长、偏振态等特征量对外界环境(如应力、温度等)非常敏感, 却不易受到电磁干扰, 所以光纤温度传感器可以实现长距离、大范围、高精度的温度测量, 且安装使用方便、运行稳定可靠。

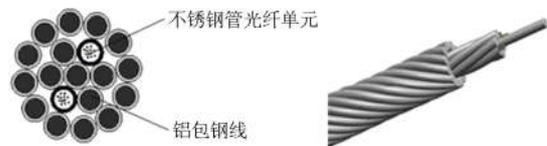


图 1 层绞式 OPGW 光缆截面图

Fig. 1 Optical fiber structure in OPGW

光纤温度传感原理的主要依据是光纤产生的背向布里渊散射温度效应(Brillouin Optical Time-Domain Reflectometer, BOTDR)<sup>[14]</sup>。布里渊散射光时域传感

技术是近年来国际上提出的一种尖端新技术,它以光纤为传导介质和传感介质。由于光纤介质分子内部存在一定规律的振动,介质的折射率因此也随时间和空间进行相应的变化,会产生周期性的声波场,温度的升降和应力的改变都会使光纤的折射率发生改变。在测温系统中,当 BOTDR 设备产生一定宽度的脉冲光经 OPGW 光缆光纤的一端定向射入光纤通道时,这个光脉冲就会在光纤里面不断地向前传播,当受到突变的声波场的作用时就会产生布里渊散射,其中有一小部分光,其传播方向与入射方向相反,称为背向布里渊散射光信号。背向布里渊散射光会携带光纤的温度和应变特征返回光纤发射端的 BOTDR 设备。在发射端对背向布里渊散射信号进行解调和分析,计算发射信号与背向散射信号之间的时间差并乘以光纤中的光速,就可以得到应力或温度突变点的位置信息。

布里渊光时域传感器采用光时域分析方法检测入射脉冲光,在特定的光频差的设置下可分别获得入射脉冲光与激励光的功率大小,继而计算出 OPGW 内光纤的布里渊散射光的增益。再根据增益大小的分布可获得光纤的布里渊散射光的频移量,由频移和应力(或温度)之间的线性关系计算出整条光纤的应变(或温度)分布情况。利用 OPGW 测得的温度来对输电线的热平衡方程进行修正,可以达到动态增容的目的。

一般情况下,布里渊频移可用式(6)表示<sup>[15]</sup>。

$$v_B = \frac{2nv_A}{\lambda_p} \quad (6)$$

若取  $v_A = 5.96 \text{ km/s}$ ,  $n = 1.45$ , 则对于石英光纤,在  $\lambda_p = 1.55 \mu\text{s}$  附近,  $v_B \approx 11 \text{ GHz}$ 。

当光缆因受到外部环境的应变或温度影响而发生变化时,光纤传播介质的声波速度和折射率也会随之变化,造成布里渊频移  $v_B$  随应变  $\varepsilon$  和温度  $T$  变化<sup>[16]</sup>。

$$v_B(\varepsilon, T) = v_B(0) + \frac{\partial v_B(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \cdot \varepsilon + \frac{\partial v_B(T)}{\partial T} \cdot T \quad (7)$$

式中:  $v_B(\varepsilon, T)$  为光纤发生应变和温变时的布里渊散射光频移量;  $v_B(0)$  为光纤无应变和温变时的布里渊散射光频移量;  $\frac{\partial v_B(T)}{\partial T}$  和  $\frac{\partial v_B(\varepsilon)}{\partial \varepsilon}$  分别为温度系数和应变系数<sup>[17-18]</sup>,  $\frac{\partial v_B(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} = 4.16 / \mu\varepsilon$ ,  $\frac{\partial v_B(T)}{\partial T} = 9.4 \times 10^{-5} \times 1/\text{K}$ 。

当光纤没有发生应变时,布里渊散射光的频移与光纤温度成线性关系。

$$v_B(T) = v_B(T_0) + \frac{\partial v_B(T)}{\partial T} (T - T_0) \quad (8)$$

OPGW 光纤上的任意点与脉冲光入射端之间的距离  $L$  可根据式(9)计算获得。

$$L = \frac{c\Delta T}{2n} \quad (9)$$

式中:  $c$  是真空中光速;  $n$  是光纤的折射率;  $\Delta T$  是 OTDR 设备发出的激励光与接收到的背向布里渊散射光的时间差。

因此,通过布里渊散射频移温度应力解调仪可以分离出输电线路 OPGW 中各个探测点的温度和应力两个参变量。通过 BOTDR 对散射光频率漂移的分析,就可以得到整个测温光缆的温度分布,即测得架空线路的环境温度。不需要传感探头,只需要用到 OPGW 内部的传感光纤,就能够实现对输电线周围温度的分布式测量。根据输电线路 OPGW 和导线的稳态热传导方程建立 OPGW 分布式温度与导线分布式温度的关系,计算载流值时,采用每段导线的温度瓶颈点代入。

### 3 导线温度的计算

由于在架空输电线上,处于同一空间位置的 OPGW 和输电线的热平衡方程可以简写如下。

OPGW

$$q_{co} + q_{ro} - q_{so} = 0 \quad (10)$$

架空输电线

$$I^2 R(T_c) - q_{cc} - q_{rc} + q_{sc} = 0 \quad (11)$$

式中:  $I$  为输电线载流量;  $R(T_c)$  为温度  $T_c$  时导线每千米的交流电阻;  $q_{so}$  和  $q_{sc}$  分别为 OPGW 和导线的日照吸热,均为未知量;  $q_{ro}$  和  $q_{rc}$  分别是 OPGW 和导线的辐射散热,  $q_{co}$  和  $q_{cc}$  分别是 OPGW 和导线的对流散热。表达式为

$$q_{ro} = 16.03 D_o \times 10^{-8} [(T_o + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \quad (12)$$

$$q_{rc} = 16.03 D_c \times 10^{-8} [(T_c + 273)^4 - (T_a + 273)^4] \quad (13)$$

$$q_{co} = h(t) D_o^{0.75} (T_o - T_a) \quad (14)$$

$$q_{cc} = h(t) D_c^{0.75} (T_c - T_a) \quad (15)$$

在上式中,认为 OPGW 光缆和架空输电线有相同表层材料特性(即对流散热系数  $h(t) = 0.0205 \rho_f^{0.5}$  相同),其中  $\rho_f$  为空气密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $T_o$  为 OPGW 传感光纤测得的温度;  $T_c$  为导线温度;  $T_a$  为环境温度;  $D_o$  与  $D_c$  分别为 OPGW 和导线的直径。由于 OPGW 和输电线处于同一自然空间位置,两者受到的日照辐射相同,所以日照吸热有下面的关系:

$$\frac{q_{so}}{q_{sc}} = \frac{D_o}{D_c} \quad (16)$$

将式(16)代入式(12)中, 并与式(13)相减可以得到以下关系:

$$I^2 R(T_c) = D_c [(T_c + 273)^4 - (T_a + 273)^4] + 0.0205 \rho_f^{0.5} D_c (T_c - T_a) \quad (17)$$

式(17)中, 计算导线载流量时, 交直流电阻  $R(T_c)$  的运算比较麻烦, 但是由于摩尔根公式是建立在大量实践基础上的, 我们可以运用导线电流  $I$  与交直流电阻的比值  $\beta$  之间存在一定非线性关系的这个实践结论来对运算过程进行化简<sup>[9]</sup>, 公式为

$$\beta = \zeta I^\tau \quad (18)$$

当导线标准截面确定后,  $\zeta$  和  $\tau$  都是常量, 即

$$R(T_c) = \beta R_d \quad (19)$$

$$R_d = R_{20} [1 + \alpha(T_c - 20)] \quad (20)$$

式中:  $R_d$  为工作温度下导体的直流电阻;  $R_{20}$  是 20 °C 的直流电阻。

$$R_{20} = \frac{4\rho_{20}\lambda_{am}}{\pi d^2 N} \quad (21)$$

式中:  $d$  为铝单线直径, mm;  $\rho_{20}$  为铝单线的电阻率, 取  $2.8264 \times 10^{-8}$  (20 °C),  $\Omega \cdot m$ ;  $N$  为铝线总根数;  $\lambda_{am}$  为铝线平均绞入率按各层铝线平均节距比计算;  $\alpha$  为温度系数, 铝取 0.004 03,  $1/^\circ C$ ;  $T_c$  为导体工作时的温度, °C。

式(17)中只有导线温度  $T_c$  是未知变量, 通过牛顿迭代法进行求解, 令

$$f(T_c) = D_c [(T_c + 273)^4 - (T_a + 273)^4] + h(t) D_c (T_c - T_a) - I^2 R(T_c) \quad (22)$$

$$f'(T_c) = 4D_c (T_c + 273)^3 + h(t) D_c - I^2 R'(T_c) \quad (23)$$

则

$$T_{c(n+1)} = T_{c(n)} - \frac{f(T_{c(n)})}{f'(T_{c(n)})} \quad (24)$$

式中,  $n=1, 2, 3, \dots, n$  为迭代次数。由式(24)可以计算得到架空输电线的导线温度。

#### 4 基于 BOTDR 的架空线路载流值在线修正

本文以 220 kV 的架空输电线为例, 说明线路动态载流量计算方法的正确性。导线型号为 LGJ-400/50。OPGW 光纤敷设完成稳定 24 h 后达到应力平衡时, 通过 BOTDR 设备对整条输电线路环境温度的连续测量, 可以获得输电线路周围环境温度, 根据式(24)由测得的环境温度计算出导线温度, 导线温度随时间变化的序列:  $T_1, T_2, \dots, T_k$ , 将温度信息代入热

平衡公式(25)中, 由于只有 3 个未知参数个数, 因此连续采样 4 次就能确定方程的系数, 由于每个时刻估计不相关, 因此估计结果相互独立, 可以解出一组环境隐性容量系数向量。  $\mathbf{S}_k = [\theta_{1,k}, \theta_{2,k}, \theta_{3,k}]^T$ 。

$$\begin{bmatrix} T_{k-2} - T_{k-3} \\ T_{k-1} - T_{k-2} \\ T_k - T_{k-1} \end{bmatrix} \Delta t = \begin{bmatrix} T_{k-2} I_{k-2}^2 & 1 \\ T_{k-1} I_{k-1}^2 & 1 \\ T_k I_k^2 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{S}_k \quad (25)$$

式中,  $\Delta t$  为采样周期。

当已知当前一组系数向量  $\mathbf{S}_k$  和初始温度  $T_k$ , 在之后的一段时间内, 最大载流量可以按照式(26)来计算得到。

$$I_{\max} = \sqrt{\frac{\frac{dT}{dt} - \theta_1 \cdot T_{\max} - \theta_3}{\theta_2}} \quad (26)$$

式中: 根据我国电力设计规程规定输电线的导线允许最大温度限额见表 1;  $T_{\max}$  取 70 °C。

表 1 有关国家载流量计算的边界条件

Table 1 Boundary conditions of current-carrying capacity calculation in some countries

条件	中国	日本	美国
环境温度/°C	35		
风速/(m·s <sup>-1</sup> )	0.5	0.5	0.61
日照系数/(W·m <sup>-2</sup> )	1000	1000	
吸热系数	0.9	0.9	0.5
辐射系数	0.9	0.9	0.5
导线温度/°C	70	90	90

$$\frac{dT}{dt} \text{ 取连续的 4 个采样周期的温度变化均值为 } \frac{(T_{k-2} - T_{k-3}) + (T_{k-1} - T_{k-2}) + (T_k - T_{k-1})}{3\Delta t} = \frac{T_k - T_{k-3}}{3\Delta t} \quad (27)$$

计算结果如图 2。

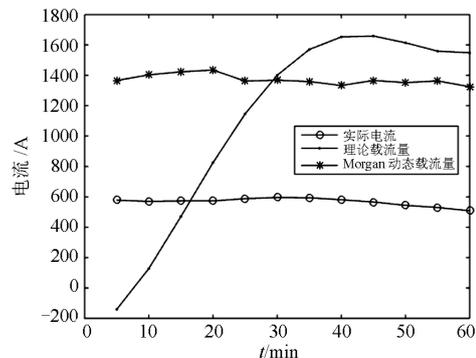


图 2 载流量计算值与 Morgan 计算载流量比较

Fig. 2 Comparison of test data and Morgan theoretical calculation results for current-carrying wire

以表 2 中的数据为例,取导线温度  $T = 37.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 代入式(25)计算,则线路允许的最大载流量为 1658.66 A。若采用 Morgan 算法计算载流值为 1366 A,与 SCADA 系统传来的数据相比,存在较大差距的原因是当温度突然变化时,导线短期无法达到热平衡,系统便已经开始采样,用暂态数据计算会使计算结果有较大误差,采样稳定后,扩容百分比能够稳定在 10% 到 25%,比较符合实际情况;若采用静态保守估计,环境温度仍采用最高气温月

的最高平均气温  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  考虑,线路上的风速和日照强度完全符合规程要求(风速采用  $0.5\text{ m/s}$ ,日照强度采用  $1000\text{ W/m}^2$ ),线路允许的最大电流只有 855 A。通过实际大量运行经验可知,这种限定值是基于最严峻的环境而计算得出的保守值。而实际绝大多数情况下,输电量适当超出规定值一些不会影响线路运行安全。上面计算表明,该方法极大地利用了线路隐性存在的综合环境容量系数来提高架空输电线路的输送容量,相比之前的算法有一定优势。

表 2 试验数据和计算结果

Table 2 Real values and calculated values of the test

采样点/ 5 min	环境 温度/ $^{\circ}\text{C}$	OPGW 温度/ $^{\circ}\text{C}$	导线 温度/ $^{\circ}\text{C}$	导线 电流/A	Morgan 载流量/A	计算后 载流量/A	扩容 误差(%)
1	27.3	27.2	33.6	578	1366		
2	27.7	27.6	35.8	570	1403		
3	27.6	27.6	35.7	573	1423		
4	27.6	27.7	36.1	573	1435		
5	27.7	27.8	35.5	588	1362		
6	28.0	27.9	36.2	596	1368	1400.05	2.34
7	28.3	28.4	37.8	594	1359	1570.06	15.53
8	28.5	28.6	38.4	581	1333	1652.53	23.97
9	28.6	28.5	37.5	566	1366	1658.66	21.42
10	28.7	28.6	37.3	544	1352	1614.13	19.39
11	28.8	28.8	37.6	530	1363	1559.10	14.39
12	28.8	28.9	37.7	508	1325	1548.23	16.85

### 5 结论

上文的架空线路载流量在线计算方法利用基于 OPGW 的光纤 BOTDR 技术对输电线环境温度进行连续测量,通过本文的方法评估架空线路的最大载流量,理论上远优于基于传统的最恶劣环境下的载流能力。而且该方法不需要额外的温度传感设备,降低了一般 DTR 设备的成本,维护较简单,可靠性高,能够被广泛地应用到电网中去,发挥出输电线的真实容量,可作为计算架空导线载流值的一种新思路。

### 参考文献

[1] 张辉, 韩学山, 王艳玲. 架空输电线路运行载流量分析[J]. 电网技术, 2008, 32(14): 31-35.  
ZHANG Hui, HAN Xueshan, WANG Yanling. Analysis on current carrying capacity of overhead lines being operated[J]. Power System Technology, 2008, 32(14): 31-35.

[2] 任丽佳, 盛戈噪, 李力学, 等. 动态确定输电线路输送容量[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(17): 45-49.  
REN Lijia, SHENG Gehao, LI Lixue, et al. Research of

dynamic line rating system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(17): 45-49.

[3] 张文亮, 艾闯, 李丹. 输电线路大截面导线降温补偿研究[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(6): 13-16.  
ZHANG Wenliang, AI Chuang, LI Dan. Temperature reduction compensation of large cross-section conductor for power transmission[J]. Power System and Clean Energy, 2011, 27(6): 13-16.

[4] 金珩, 王之浩. 输电线路动态监测扩容技术[J]. 华东电力, 2005, 33(7): 30-32.  
JIN Heng, WANG Zhihao. Dynamic monitoring capacity-increase technology of transmission lines[J]. East China Electric Power, 2005, 33(7): 30-32.

[5] 刘赞, 俞集辉, 程鹏. 基于电磁-热耦合场的架空输电线路载流量分析与计算[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 28-34.  
LIU Yun, YU Jihui, CHENG Peng. Analysis and calculation on the ampacity of overhead transmission lines based on electromagnetic-thermal coupling fields[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 28-34.

[6] 王丽, 罗健斌. 城市电网高压电缆光纤传感在线监测技术比对试验研究[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 63-68.

- WANG Li, LUO Jianbin. Experimental research on comparison of fiber sensing technology for urban power grid transmission cables on-line monitoring[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 63-68.
- [7] 秦嘉南, 房岭锋, 盛戈峰, 等. 基于风机功率和导线载流特性动态匹配的风电场出线增容[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 9-14.
- QIN Jianan, FANG Lingfeng, SHENG Gehao, et al. Wind farm outgoing transmission line dynamic rating based on dynamic matching of wind turbine power characteristic and conductor permissive carrying current[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 9-14.
- [8] 徐伟, 鲍颜红, 周海锋, 等. 基于阻塞分析的输电线路动态增容[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 15-22.
- XU Wei, BAO Yanhong, ZHOU Haifeng, et al. Transmission line dynamic capacity-increase based on congestion analysis[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 15-22.
- [9] 吉兴全, 杜彦钺, 李可军, 等. 一种超高压输电线路动态增容方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 102-106.
- JI Xingquan, DU Yanbin, LI Kejun, et al. Method of dynamic rating of ultra high voltage transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 102-106.
- [10] 马晓明, 范春菊, 胡天强, 等. 基于热稳定约束的架空导线增容计算研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 86-91.
- MA Xiaoming, FAN Chunju, HU Tianqiang, et al. Calculation of current carrying capacity of overhead transmission line based on thermal stability constraint[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 86-91.
- [11] 韩晓燕, 黄新波, 赵小惠, 等. 输电线路摩尔根载流量简化公式的初步研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(5): 92-96.
- HAN Xiaoyan, HUANG Xinbo, ZHAO Xiaohui, et al. Preliminary study on Morgan transmission capacity simplified formula of transmission lines[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2009, 21(5): 92-96.
- [12] IEEE Std 738 -1993 IEEE standard for calculating the current-temperature relationship of bare overhead conductors[S]. 1993.
- [13] FOSS S D, LIN S H, FERNANDES R A. Dynamic thermal line ratings; part I: dynamic ampacity rating algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus Systems, 1983, PAS-102(6): 1858-1864.
- [14] 李永倩, 翟丽娜, 赵丽娟, 等. 基于 BOTDR 技术的 OPGW 在线监测研究[J]. 光通信研究, 2013(5): 30-33.
- LI Yongqian, ZHAI Lina, ZHAO Lijuan, et al. Study on BOTDR technology-based OPGW on-line monitoring[J]. Study on Optical Communications, 2013(5): 30-33.
- [15] AGRAWAL G P. 非线性光纤光学原理及应用[M]. 贾东方, 余震虹, 等译. 北京: 电子工业出版社, 2002: 223-243.
- [16] 张勇, 魏广庆, 施斌, 等. 基于 BOTDR 的传感光纤温度效应研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2010, 24(10): 929-934.
- ZHANG Yong, WEI Guangqing, SHI Bin, et al. Study on temperature effect of BOTDR-based optical fibers[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2010, 24(10): 929-934.
- [17] KURASHIMA T, HORIGUCHI T, OHNO H, et al. Strain and temperature characteristics of Brillouin spectra in optical fibers for distributed sensing techniques[C] // Optical Communication, 1998. 24th European Conference on. IEEE, 1998, 1: 149-150.
- [18] NARUSE H, TATEDA M, OHNO H, et al. Linear strain distribution dependence of the Brillouin gain spectrum[C] // Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest, 2002. Ofs 2002, 15th. IEEE, 2002: 309-312.

收稿日期: 2016-04-08; 修回日期: 2016-05-17

作者简介:

杨安琪(1992-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: yanganqi@whu.edu.cn

龚庆武(1967-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: qwgong@whu.edu.cn

(编辑 周金梅)