

# 配电网架空绝缘导线暂态载流能力计算与评估

张禹<sup>1</sup> 江少成<sup>1</sup> 何良<sup>2</sup> 吕世超<sup>1</sup> 奚晓航<sup>1</sup> 奚海波<sup>3</sup>

(1. 上海海能信息科技有限公司, 上海 201315;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

3. 中国能源建设集团江苏省电力设计院有限公司, 江苏 南京 211102)

**摘要:** 城市配电网用电负荷快速增长和供电走廊稀缺会造成用电高峰时期部分配电网供电线路出现重载或过载现象, 威胁电网运行安全。输电线路暂态载流能力实时计算与评估对于缓解当前城市配电网供电紧张的局面具有重要意义。基于架空绝缘导线等值热路模型、导线热平衡方程和导线暂态温升微分方程组, 并考虑日照等外界热源条件和风、雨水等外界有利散热因素, 提出了架空绝缘导线暂态载流能力评估方法。根据该计算模型重点分析了导线温升过程, 计算了导线暂态载流量和安全运行时间。最后, 基于架空绝缘导线的在线监测系统数据, 评估了实际运行线路暂态载流能力。研究表明: 现行运行规程规定的线路载流量限值过于保守, 配电网架空导线具有很大的供电潜力。

**关键词:** 架空绝缘导线; 导体温度; 安全运行时间; 暂态载流量; 增容运行

中图分类号: TM862 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)03-0043-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.03.009

## Calculation and Evaluation for Transient Current Carrying Capacity of Overhead Insulated Conductor in Distribution Network

Zhang Yu<sup>1</sup>, Jiang Shaocheng<sup>1</sup>, He Liang<sup>2</sup>, Lv Shichao<sup>1</sup>, Xi Xiaohang<sup>1</sup>, Xi Haibo<sup>3</sup>

(1. Hinner Technology Company, Shanghai 201315, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

3. Jiangsu Power Design Institute Company of China Energy Engineering Group, Nanjing 211102, Jiangsu, China)

**Abstract:** The load of urban distribution network is increasing rapidly, and the power supply corridor is becoming increasingly rare especially in the central area of city, which causes overload or heavy load of some important overhead transmission lines. So the real-time calculation and evaluation of transient current carrying capacity of transmission lines are significant to relieve the tension in power supply. Based on the equivalent thermal model of overhead insulated conductor, the thermal balance equation and transient temperature rise equation set, the evaluation method of transient current carrying capacity is presented considering the effect of sun, wind and rain. The conductor temperature rise is analyzed according to the proposed model, and the transient current carrying capacity and safe running time of the line are given by the calculation methods. Furthermore, the current carrying capacity of a real overhead insulated transmission line is evaluated based on the online monitoring data. The research results show that the current carrying capacity of transmission line is too conservative in the current standards, and the overhead lines of distribution network has a significant power supply potential.

**Key words:** overhead insulated conductor; conductor temperature; safe running time; transient current carrying capacity; rating operation

## 0 引言

近年来, 由于中心城市区域负荷增长迅猛, 部分

已建配电网线路供电能力已不能满足当地负荷需求, 导致用电高峰时期电网运维部门被迫“拉闸限电”或转移负荷。同时, 城区供电走廊紧张, 新建线路难以满足负荷增长的需求。通过技术改造更换高

载流量导线,会面临建设周期长、资金投入大和停电经济损失等诸多问题。为了解决上述问题,近年来架空配电线路动态增容运行技术已成为研究热点<sup>[1-5]</sup>。增容运行技术有两种实现方式:一是突破现行规程限制,提高导线运行允许温度,但这存在安全隐患;二是加装线路在线监测系统,采集导线现场运行工况数据,包括电流、环境温度、光照、风速等参数,用于计算导线暂态载流量,为调度运维人员提供增容的建议与措施,而其技术难点在于导线暂态温升的实时计算。

配电网供电线路包括架空裸导线(钢芯铝绞线和铝绞线等)、架空绝缘导线和电力电缆。随着配电网的进一步发展,为了提升供电安全性,电网公司一直致力于对架空供电线路进行绝缘化改造。截至2016年年底,国家电网公司下属的城市配电线路架空导线绝缘化率为89.5%,县域已达34.3%,并且呈逐年上升趋势。目前,关于配电线路增容运行技术的研究重点关注架空裸导线<sup>[2,6-10]</sup>和电力电缆<sup>[11]</sup>,其中:裸导线暂态载流量理论计算方法相对成熟,能够计及环境因素对裸导线暂态载流量的影响;电力电缆载流量已由标准解析式计算,但不能计及环境因素(如风)对电缆允许载流量的影响;对架空绝缘导线的研究则鲜有报道。

下面基于架空绝缘导线等值热路模型、导线热平衡方程和导线暂态温升微分方程组,并考虑外部热源和外界散热等因素,提出配电网架空绝缘导线暂态载流能力计算方法。以挂网运行的动态增容系统实时数据为基础,对某10 kV绝缘导线暂态载流能力开展全面评估。在不突破现行技术规程的前提下,为调度运维人员提供导线运行温度、暂态载流量、安全运行时间等基础数据,以达到为架空绝缘导线增容运行的目的。

## 1 架空绝缘导线暂态载流能力计算方法

### 1.1 架空绝缘导线等效热路模型

架空绝缘导线与单芯电力电缆结构相似,因此现行运行规程中其载流值是依据IEC 60287关于单芯电力电缆载流量解析式的计算结果<sup>[11-12]</sup>,计算时环境参数风速为0 m/s、光照为1000 W/m<sup>2</sup>,这显然与实际运行情况不符合。绝缘导线结构主要包括:

导体、绝缘介质、导体和绝缘屏蔽层、外护层等。基于单芯电力电缆等效热路模型<sup>[11]</sup>并忽略屏蔽层和外护层厚度及其损耗值,所建立的架空绝缘导线等效热路模型如图1所示。基于此模型可建立导线热平衡方程和暂态温升微分方程组。

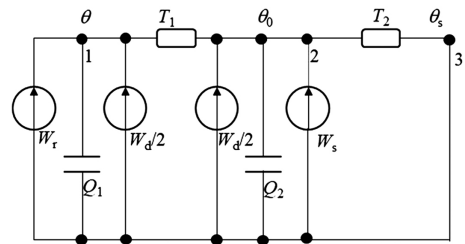


图1 架空绝缘导线等效简化热路模型

图1中: $W_r$ 为单位长度导体流过电流而产生的热损耗, W/m;  $W_d$ 为单位长度导线介质损耗, W/m;  $W_s$ 为单位长度导线吸收日照产生的热功率, W/m;  $Q_1$ 为单位长度导体热容和部分绝缘层热容, J/(K·m);  $Q_2$ 为单位长度导线剩余绝缘介质热容, J/(K·m);  $T_1$ 为导线导体至绝缘介质的散热热阻, (K·m)/W;  $T_2$ 为导线的绝缘介质至空气的散热热阻, (K·m)/W;  $\theta$ 为导体温度, K;  $\theta_0$ 为导线表面温度, K;  $\theta_s$ 为导线周围环境温度, K。架空绝缘导线的发热取决于导线本身损耗与散热条件,导线损耗与运行电流、运行温度已有明确的对应关系,为工程广泛应用;导线散热主要取决于环境参数和导线各部分物理参数。一般认为在运行温度范围内,这些物理参数保持不变<sup>[13]</sup>。

### 1.2 架空绝缘导线热平衡方程

外部环境条件保持不变,当架空绝缘导线通过电流*I*时,导线温度将不断上升,直至导线发热、吸热与散热达到动态平衡。此时,由图1可得:

$$W_r \cdot (T_1 + T_2) + W_d \cdot (0.5T_1 + T_2) + W_s \cdot T_2 = \theta - \theta_s \quad (1)$$

无风情况下,式(1)中各项计算方法可参照文献[11]。当导线处于有风或者下雨环境下时,导线表面散热能力增强,外部等效散热热阻 $T_2$ 减小,由此可定量分析外部散热条件变化对线路允许载流量的影响。当导线处于热平衡状态时,外部等效热阻可由式(2)计算。

$$T_2 = \frac{\theta_0 - \theta_s}{W_r + W_d + W_s} \quad (2)$$

已知导线表面温度和环境温度,根据式(1)、式

(2) 可求解当前导线的导体温度。当导线达到热平衡且导体温度达到最大允许长期工作温度(PE/PVC绝缘为70℃,XLPE绝缘为90℃)时,导线流过的电流*I*就是该环境条件下导线的稳态载流量。

### 1.3 架空绝缘导线暂态温升微分方程组

当架空绝缘导线运行于环境参数恒定的条件下,其导体温升过程满足:

$$W_r + \frac{W_d}{2} - Q_1 \frac{d\theta}{dt} = \frac{\theta - \theta_0}{T_1} \quad (3)$$

$$\frac{\theta - \theta_0}{T_1} + W_s + \frac{W_d}{2} - Q_2 \frac{d\theta_0}{dt} = \frac{\theta_0 - \theta_s}{T_2} \quad (4)$$

由式(3)、式(4)可见,架空绝缘导线暂态温升过程是关于导体温度 $\theta$ 及导线表面温度 $\theta_0$ 的一阶线性非齐次微分方程组。

若已知当前环境参数,如光照、环境温度、导线表面温度和导线电流,则可根据式(3)、式(4)计算导体暂态温升过程。假设电流发生阶跃变化,则模型中仅导体热损耗 $W_r$ 会改变,其余参数不变,根据导线暂态温升过程可得到导体达到允许工作温度所需时间(即安全工作时间),此时对应的阶跃电流为导线暂态载流量,据此可绘制导线安全工作时间与暂态载流量工作曲线。

## 2 计算模型求解

### 2.1 暂态温升方程组 Runge - Kutta 法求解

如果直接求解方程组(3)、(4)的解析解,计算复杂,不易实现<sup>[14]</sup>。采用数值法求解微分方程组,具有求解速度快和误差可控等优点,被广泛应用于各工程领域。Runge - Kutta法是一种代表性的数值算法,下面采取经典的4阶算法,其计算速度满足工程需求。对于一阶微分方程组,其初值问题数学形

式为

$$\begin{cases} \frac{dy}{dx} = f(y, z, x) \\ \frac{dz}{dx} = g(y, z, x) \\ y(x_0) = y_0 \\ z(x_0) = z_0 \end{cases} \quad (5)$$

则4阶Runge - Kutta法迭代公式为

$$\begin{cases} y_{n+1} = y_n + \frac{h}{6}(K_1 + 2K_2 + 2K_3 + K_4) \\ z_{n+1} = z_n + \frac{h}{6}(L_1 + 2L_2 + 2L_3 + L_4) \end{cases} \quad (6)$$

式中:

$$\begin{cases} K_1 = f(x_n, y_n, z_n) \\ L_1 = g(x_n, y_n, z_n) \\ K_m = f\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}K_{m-1}, z_n + \frac{h}{2}L_{m-1}\right) \\ L_m = g\left(x_n + \frac{h}{2}, y_n + \frac{h}{2}K_{m-1}, z_n + \frac{h}{2}L_{m-1}\right) \\ m = 2, 3, 4 \\ n = 0, 1, 2, \dots \end{cases} \quad (7)$$

当时间步长*h*取值足够小时,根据初始 $x_0$ 时刻 $y_0$ 和 $z_0$ 的值,由式(6)、式(7)可预测未来 $x_n$ 时刻 $y_n$ 和 $z_n$ 的值。

### 2.2 仿真数据分析

选择架空绝缘导线型号为JKLYJ-10/120,其电气参数见表1。绝缘导线时间常数较小<sup>[13]</sup>,当电流发生变化后,导线温度通常能在数分钟内达到稳定,故可认为运行线路在负荷和环境均稳定时,其运行温度也处于稳定状态。计算中初始参数选取某市区供电公司某10 kV线路的实测值,具体参数见表2。

表1 10 kV 架空绝缘导线电气参数

型号	载流量 (40℃) /A	导体直径 /mm	绝缘标称 厚度/mm	绝缘线成品 外径/mm	20℃时导体电 阻/(Ω·km)	介质 损耗因数	绝缘介质相 对介电系数
JKLYJ-10/120	350	13.0	3.4	21.0	0.253	0.004	2.5

表2 计算初始参数

负荷 /A	辐射 系数	吸热 系数	光照强度 /(W·m <sup>-2</sup> )	环境温度 /℃	表面温度 /℃	$W_r$ / (W·m <sup>-1</sup> )	$W_d$ / (W·m <sup>-1</sup> )	$W_s$ / (W·m <sup>-1</sup> )	$T_1$ / (K·m· W <sup>-1</sup> )	$Q_1$ / (J·K <sup>-1</sup> · m <sup>1</sup> )	$Q_2$ / (J·K <sup>-1</sup> · m <sup>1</sup> )
189	0.4	0.4	499.45	33.1	38.5	11.53	0.012 2	4.22	0.232 9	554.45	298.22

由式(1)、式(2)可得,绝缘导线外皮外部等效热阻  $T_2$  为  $0.3853 \text{ (K} \cdot \text{m) / W}$ ,导线导体温度为  $40.8 \text{ }^\circ\text{C}$  与导线表面温差为  $2.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,导线稳态载流量为  $528 \text{ A}$ 。假设线路负荷电流从  $189 \text{ A}$  突变至  $400 \text{ A}$ ,根据1.3节导线暂态温升方程组并采用2.1节方法求解得到的导线温度变化过程如图2所示。线路导体稳态温度为  $65 \text{ }^\circ\text{C}$  与导线表面温差约为  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  温升时间常数约  $5.5 \text{ min}$  故可认为线路电流为  $400 \text{ A}$  时可长期安全运行(即安全运行时间无穷大)。当电流值越大,导线导体与表面稳态温差越大。当前导线暂态载流量与安全运行时间关系曲线如图3所示。当暂态载流量越大,导线温度上升速度越快,更易在短时间内超过允许工作温度。

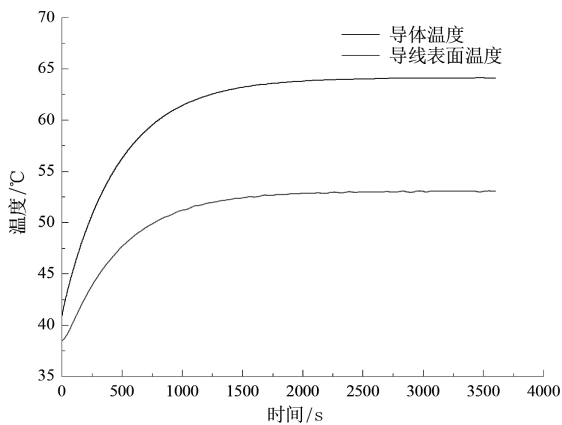


图2 绝缘导线温升变化曲线  
(电流从  $189 \text{ A}$  跃变至  $400 \text{ A}$ )

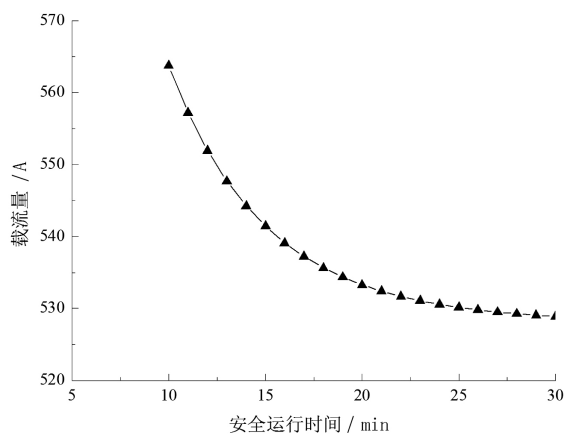


图3 导线暂态载流量与安全运行时间关系曲线

### 3 架空绝缘导线暂态载流能力计算与应用

某市区供电公司某  $10 \text{ kV}$  架空绝缘导线(型号 JKLYJ-10/120)因在用电高峰期时会出现线路满

载的情况,为了全面掌握线路运行状态,于2017年6月在线路上加装了线路在线监测装置。下面基于装置现场实测数据,对该线路暂态载流能力进行计算与评估。

#### 3.1 模型有效性验证

2017年6月29日,对该  $10 \text{ kV}$  线采取翻负荷方式提高线路负载率,以验证暂态载流能力计算模型。当日12时43分,线路负荷从  $106 \text{ A}$  开始上升,3 min后电流达到稳定负荷  $210 \text{ A}$ 。 $10 \text{ kV}$  绝缘导线温升时间常数通常小于  $10 \text{ min}$ ,记录实验开始后  $15 \text{ min}$  内的数据。实验初始阶段环境参数变化不明显,导线处于稳定状态,据此并按照式(2)计算得到导线外部热阻作为模型计算初始参数,预测导线表面温升情况,其结果如图4所示。易见模型预测结果与实测结果的变化趋势相符,因此该模型用于计算导线暂态温升过程是有效的。

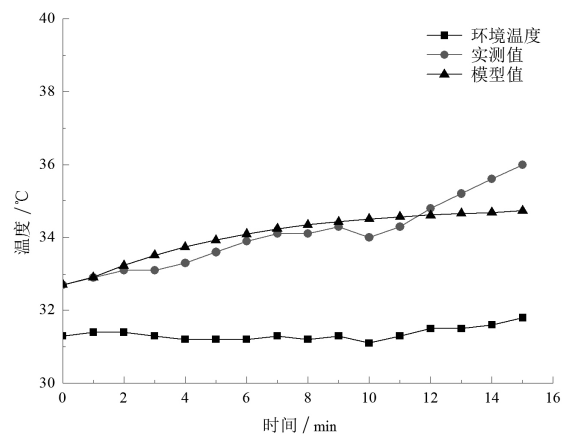


图4 导线表面温升曲线

#### 3.2 暂态载流能力评估

在工程应用中,考虑到线路负荷变化缓慢且导线时间常数较短,因此认为计算时刻导线温度处于稳态,以便于计算导线稳(暂)态载流量。选取线路在线监测装置6月27日00:00—24:00数据进行分析,数据间隔为每5 min 1组。负荷电流、环境温度、导线表面温度、光照强度随时间的变化曲线如图5所示。

根据每时刻导线运行工况计算导体温度并改变电流计算导线暂态温升,得到暂态载流量与安全运行时间关系曲线,特别是可得  $30 \text{ min}$  暂态载流量值,即当导线电流发生阶跃变化至  $30 \text{ min}$  暂态载流量时,导线导体温度将在  $30 \text{ min}$  后达到允许温度  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ 。图6为当日导线额定载流量、稳态载流量和  $30 \text{ min}$  暂态载流量变化曲线。图中,额定载流量(环境温度  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ )为  $325 \text{ A}^{[12]}$ ,稳态载流量为  $355 \sim 422$

A 30 min 载流量为 358 ~ 499 A。由于导线温升时间常数较小,当环境条件严酷时,稳态载流量会接近 30 min 暂态载流量。稳态载流量较额定载流量能够提升 10% ~ 30%,表明绝缘导线供电能力潜力巨大。

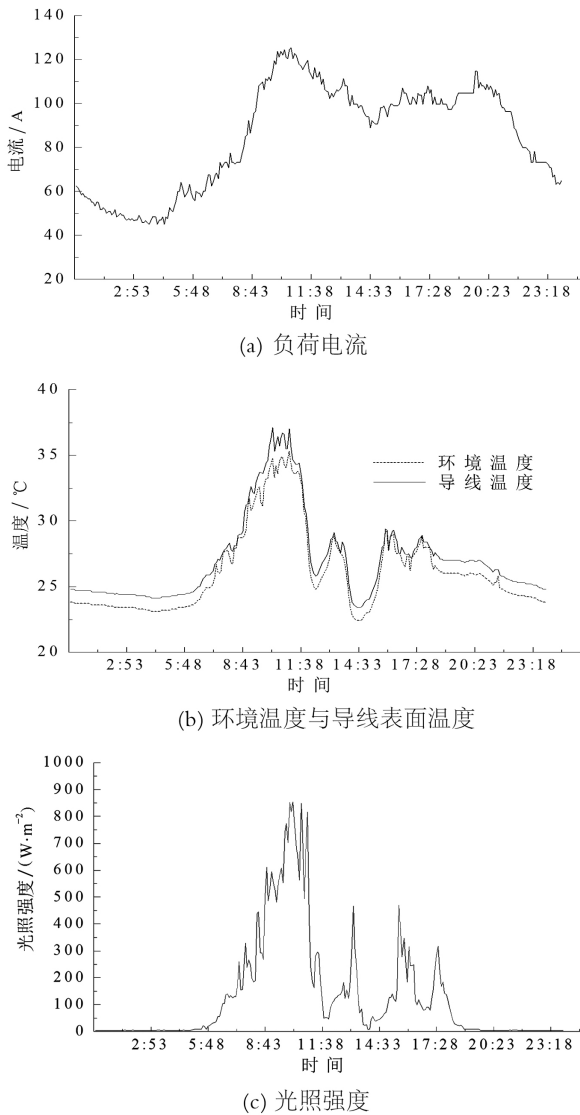


图5 导线监测数据

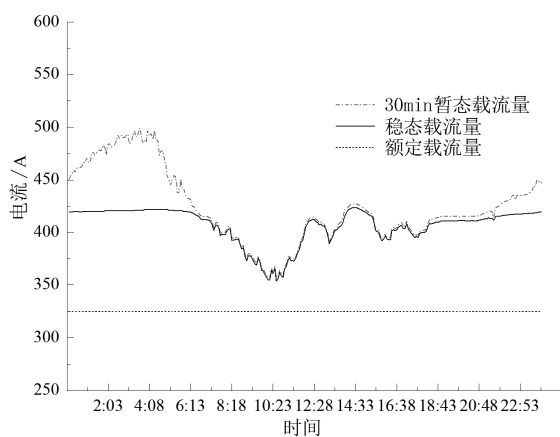


图6 载流量数据曲线

## 4 结 语

基于架空绝缘导线等值热路模型,建立了导线热平衡方程和导线暂态温升微分方程组,并给出了方程组的数值解法,通过导线暂态温升计算,得到导线暂态载流量与安全运行时间关系曲线,进而评估导线暂态载流能力。通过线路温升实验,充分验证了架空绝缘导线暂态载流能力计算模型的有效性。并以运行线路的实测数据为基础,计算并评估了某 10 kV 绝缘导线暂态载流能力,结合在线监测系统数据使运维调度人员更能直观掌握线路运行状态。得到了如下结论:

- 1) 结合热路解析法与数值法建立计算模型是模拟线路暂态温升过程的有效方法。
- 2) 暂态载流能力与线路安全运行时间呈负指数关系,并呈快速饱和趋势。运行工况越严酷时,饱和趋势越快。
- 3) 通常情况下,线路所处散热环境要好于规程设计依据的环境条件,实测结果表明线路稳态载流量大于线路额定载流量,短时暂态载流能力又大于稳态载流能力,这就为提高线路长期供电能力和应对线路短时过负荷运行提供了基础数据支撑。

### 参考文献

- [1] 毛先胤,盛戈峰,刘亚东,等. 架空输电线路暂态载流能力的计算和评估[J]. 高压电器, 2011, 47(1): 70 - 74.
- [2] 黄新波,孙钦东,张冠军,等. 输电线路实时增容技术的理论计算与应用研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(6): 1138 - 1144.
- [3] 卢波,汪静,赵文彬. 华东电网架空裸导线载流量管理及推荐计算方法[J]. 电线电缆, 2017, 2(2): 6 - 11.
- [4] 刘同同. 基于热路模型的电力电缆导体温度计算及试验研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2016.
- [5] 雷成华. 高压单芯电缆动态增容的理论分析与实验研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.
- [6] 金红卫,朱权,杨彪,等. 多条件下配网线路载流量的分析研究[J]. 机电工程技术, 2016, 45(9): 151 - 154.
- [7] IEEE Standard for Calculation the Current - temperature of Bare Overhead Conductor: IEEE Standard 738 - 2006 [S] 2006.

(下转第 67 页)

[D]. 济南: 山东大学, 2014.

[4] 张恒旭, 靳宗帅, 刘玉田. 轻型广域测量系统及其在中国的应用[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(22): 85-90.

[5] 谢潇磊, 刘亚东, 孙鹏, 等. 新型配电网线路 PMU 装置的研制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 15-20.

[6] M. Zima, M. Larsson, P. Korba, et. al. Design Aspects for Wide-area Monitoring and Control Systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 980-996.

[7] 许勇, 王慧铮, 李倩, 等. 智能变电站同步相量测量装置研制[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 1-5.

[8] 毕天姝, 刘灏, 杨奇逊. PMU 算法动态性能及其测试系统[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 62-67.

[9] 张晓莉, 周泽昕, 张道农, 等. 同步相量测量装置的测试与评估[J]. 电力科学与技术学报, 2011, 26(2): 31-36.

[10] 张道龙, 刘灏, 毕天姝, 等. 中外 PMU 静态标准及评估方法对比分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 140-145.

[11] 包伟, 裘愉涛, 潘武略, 等. 一种基于 IEC 61850 的

(上接第 47 页)

[8] Glenn A D, Thomas E D. Short-time Thermal Ratings for Bare Overhead Conductors [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(3): 194-199.

[9] Chen Shelly L, Black William Z. High-temperature Sag Model for Overhead Conductors [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 183-188.

[10] 徐青松, 韩芳, 王孟龙. 架空导线载流量的等效风速系数算法[J]. 高电压技术, 2008, 34(10): 2200-2204.

[11] 马国栋. 电线电缆载流量(2版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2013: 41-111.

[12] 配网运行规程: Q/GDW 519-2010 [S] 2010.

(上接第 51 页)

统接入地铁牵引供电系统的研究较少, 上述所建立的模型和光伏并网方法可以起到借鉴作用。

### 参考文献

[1] 何颖, 赵争鸣. 新疆光伏发电现状及发展对策[J]. 能源工程, 2004(4): 35-37.

[2] 胡仁祥, 王晓斌, 常喜强. 并网光伏发电系统对吐鲁番地区配电网影响的研究[J]. 四川电力技术, 2012, 35(3): 27-29.

[3] MB Caracciolo, R Faranda, S Leva. Photovoltaic Applications in Railway Stations [C]. International Conference on Electricity Distribution 2007.

[4] Mayer O, Lynass M, Gómez M, et al. Design Aspects for

PMU 测试仪的研制[J]. 电测与仪表, 2015, 52(17): 125-129.

[12] Communication Networks and Systems for Power Utility Automation: Part 7-4 Basic Communication Structure—Compatible Logical Node Classes and Data Object Classes: IEC 61850-7-4 [S] 2010.

[13] IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems: IEEE Standard C37.118.1: 2011 [S], 2011.

[14] 智能变电站自动化设备检测规范 第6部分: 同步相量测量装置: Q/GDW 11202.6-2014 [S] 2015.

[15] 电力系统实时动态监测系统 第2部分: 数据传输协议: GB/T 26865.2-2011 [S] 2011.

作者简介:

何 笠(1985), 工程师、硕士, 主要研究方向为智能电网技术、继电保护及自动化、电力系统稳定与控制等;

滕予非(1984), 博士, 主要研究方向为智能电网技术、电力系统稳定与控制、高压直流输电等。

(收稿日期: 2018-01-06)

[13] 张尧, 周鑫, 牛海清, 等. 单芯电缆热时间常数的理论计算与试验研究[J]. 高电压技术, 2009, 35(11): 2081-2086.

[14] 苏瑞波, 王鹏, 康守亚, 等. 空气敷设下 10 kV 三芯电缆应急时间计算[J]. 南方电网技术, 2015, 9(11): 78-83.

[15] 阮班义, 王金生, 汪光煌, 等. 基于热路模型的架空导线暂态载流量研究[J]. 绝缘材料, 2015, 48(8): 73-77.

作者简介:

张 禹(1988), 硕士、工程师, 主要从事电力设备在线监测、负荷管理和绝缘方面的研究工作。

(收稿日期: 2018-01-16)

High Voltage MW PV Systems for Railway Power Supply [C]. European PV Solar Energy Conference 2014.

[5] 倪卫标, 沈小军, 赵时旻, 等. 光伏发电系统接入城市轨道交通供电系统模式研究[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(11): 78-81.

[6] Li Qiang. Analysis on the Application of Photovoltaic Power Generation Project in a Metro Section [J]. Electric Railway, 2016(4): 32-35.

[7] 张国梁, 李虹, 刘立群, 等. 基于改进扰动观察法的光伏 MPPT 研究[J]. 电源技术, 2017(1): 111-114.

作者简介:

郭晓宇(1970), 本科, 高级工程师, 主要从事铁道供电相关研究工作。

(收稿日期: 2018-01-29)