

智能配电系统电缆导体温度推算与应急能力评估

高昇宇¹,李超群²,王春宁¹,许洪华¹,马宏忠²

(1. 国网南京供电公司,江苏 南京 210019;2. 河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 211100)

摘要: 在电缆暂态热路模型的基础上,运用连续系统离散化处理方法,建立一种电缆导体温度实时推算方法;依据输入的负荷电流和电缆外表面温度数据,实时推算电缆导体温度。给出了一种载流量动态应急评估方法;将阶跃电流作用下的电缆暂态温升分为稳态部分和 4 个热时间常数不等的暂态分量。利用数据拟合的方法确定各温升暂态分量的参数,得到阶跃温升表达式。依据该表达式即可进行电缆线路应急能力评估,即评估不同情况下导体温度达到稳定限额所需的应急时间。通过实验验证了所提方法的准确性和可行性,并进行了简单的定量和误差分析。

关键词: 智能配电系统; 电缆; 导体温度; 实时推算; 暂态温升; 数据拟合

中图分类号: TM 246

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.03.008

0 引言

城市智能配电系统广泛使用电力电缆。传统配电系统的电缆电流是以前其标称额定载流量作为其载流能力的依据,然而,受运行环境、负荷持续时间、电缆实际状况等多种因素影响,这一方法已经不能满足当前智能配电网系统的要求^[1-4]。为了既充分发挥电缆线路的载流能力,又保证电缆运行的安全可靠,同时提高配电网调度的灵活性,智能配电系统在电缆传输方面应以线芯导体实际温度作为评判电缆运行是否达到额定载流量的依据^[5-6]。但由于技术限制,很难直接精确测量电缆线芯导体温度。

IEC60287 标准给出了稳态情况下导体温度及载流量计算的详细方法^[7-10],实际高压电缆负荷电流具有周期性,IEC60853 标准专门规范了周期性负荷下的载流量计算。这 2 类标准在一定程度上依赖于工程经验,计算较复杂,且不具备智能配电系统的相关要求。随着电力负荷的日益增长,电缆敷设呈多样化、集群化趋势,导致传统计算结果与电缆导体实际温度、实际载流量相差较大^[11]。因此,国内外相关学者在电缆实际载流能力、导体温度推算方面展开了深入的分析探讨。

文献[12]建立了依据电缆表面温度推算导体温度的暂态热路模型,并进行了全面的误差理论分析。文献[13]则采用 Laplace 运算进行导体温度的实时推算,虽然提高了精度,但也带来计算复杂等问题。文献[14]运用 BP 神经网络进行推算,但需要大量可靠的数据初始化网络结构和权值,工程上较难实现。很多文献对于导体温度推算模型的后续研究较为匮乏,没有进一步给出实际载流能力的评估方

法^[15-16],且试验电流形式相对单一,缺乏对周期性负荷、应急负荷等情况下导体温升特性的分析。

本文以 110 kV 无铠装高压电缆为研究对象,首先对电缆暂态热路模型进行优化。在此基础上建立一种能够为智能配电系统实时提供电缆导体温度的实时推算方法,并且进一步提出了一种应急负荷电流作用下电缆载流能力应急评估方法,为智能配电系统的灵活调度提供指导。最后,进行了较为全面的实验验证。

1 高压电缆暂态热路模型

1.1 高压电缆暂态热路模型的简化

单位长度的 110 kV 高压电缆(无铠装层)的暂态热路简化模型如图 1 所示。图中: Q_c 、 Q_i 、 Q_s 分别为导体单位损耗、绝缘单位损耗及金属护层的单位损耗; R_i 、 R_e 分别为绝缘层和外护套的单位热阻; C_{cu} 、 C_i 、 C_s 、 C_e 分别为电缆导体、绝缘层、金属护层、外护套的单位热容; θ_1 、 θ_2 、 θ_e 分别为导体温度、金属护层温度及电缆外表面温度。电缆敷设环境、外部热源等因素对导体温度的影响均可通过图 1 中电缆外表面温度 θ_e 的变化来反映。

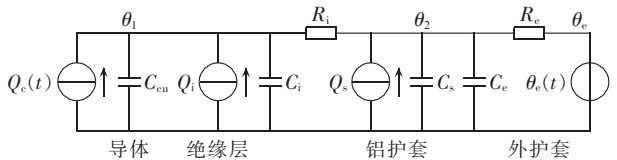


图 1 电缆暂态热路简化模型

Fig.1 Simplified transient thermal circuit model of power cable

1.2 高压电缆暂态热路模型的优化

绝缘损耗 Q_i 可忽略不计,在图 1 的基础上,依据“电缆导体温度不变,则各层热容存储总热量不变”

的原则,对电缆热参数进行归算处理,对各层热容重新分配得到的优化热路模型如图 2^[17]所示。

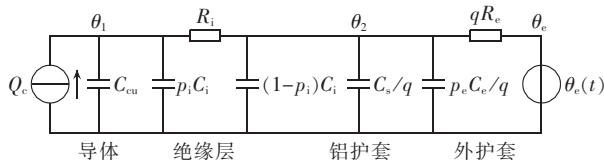


图 2 优化后的暂态热路模型

Fig.2 Optimized transient thermal circuit model

图 2 中, q 为损耗比率; p_i 、 p_e 分别为绝缘层和外护套的热容分配系数。依据文献[17]得到具体计算公式为:

$$q = (Q_c + Q_s)/Q_c \quad (1)$$

$$p_i = \frac{1}{2 \ln(D_i/d_c)} - \frac{1}{(D_i/d_c)^2 - 1} \quad (2)$$

$$p_e = \frac{1}{2 \ln(D_e/D_s)} - \frac{1}{(D_e/D_s)^2 - 1} \quad (3)$$

其中, d_c 为导体外径; D_i 为绝缘外径; D_s 为金属护套外径; D_e 为电缆外径。

对图 2 进行热容等效合并后得到暂态热路,如图 3 所示。

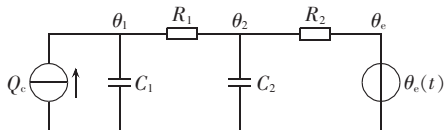


图 3 等效简化暂态热路

Fig.3 Simplified equivalent transient thermal circuit

将图 3 与图 2 对比有: $R_1 = R_i$; $R_2 = qR_e$; $C_1 = C_c + p_i C_i$; $C_2 = (1-p_i) C_i + C_s/q + p_e C_e/q$ 。其中 C_i 的具体表达式为:

$$C_i = \sigma \frac{\pi}{4} (D_i^2 - d_c^2) \quad (4)$$

其中, σ 为绝缘体积热容(J/m³)。

2 离散系统下的导体温度推算

2.1 暂态热路模型的状态方程

根据图 3 所示的暂态热路模型,结合电路相关知识^[18]得到形如式(5)的连续状态方程:

$$\dot{\theta} = A\theta + Bu \quad (5)$$

将 A 、 B 的具体表达式代入得到:

$$\begin{bmatrix} \frac{d\theta_1}{dt} \\ \frac{d\theta_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_1 C_1} & \frac{1}{R_1 C_1} \\ \frac{1}{R_1 C_2} & -\frac{1}{R_1 C_2} - \frac{1}{R_2 C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_2 C_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_c \\ \theta_e \end{bmatrix} \quad (6)$$

2.2 高压电缆导体温度实时推算方法

式(5)的状态量为电缆各层(导体层、绝缘中间层、金属护套层)温度,实际运行的重要高压电缆线路一般配有电缆外表面温度实时监测系统,而负荷电流则可以直接通过调度中心获取,即为式(5)中的输入量。将式(5)进行离散化处理,系统矩阵 $G(T)$ 和输入矩阵 $H(T)$ 的表达式如下:

$$G(T) = e^{AT} \Big|_{t=T} = L^{-1}[(sI - A)^{-1}] \Big|_{t=T} \quad (7)$$

$$H(T) = \left[\int_0^T e^{A(t-T)} dt \right] B \quad (8)$$

其中, T 为离散系统采样周期; L^{-1} 为拉普拉斯逆运算。

将式(6)离散化得到导体温度离散推算公式,如式(9)所示。

$$\begin{bmatrix} \theta_1[(k+1)T] \\ \theta_2[(k+1)T] \end{bmatrix} = G(T) \begin{bmatrix} \theta_1(kT) \\ \theta_2(kT) \end{bmatrix} + H(T) \begin{bmatrix} Q_c(kT) \\ \theta_e(kT) \end{bmatrix} \quad (9)$$

通过上文构建的离散推算公式即可实现电缆导体温度的实时推算,以实时推算的数据为依据,结合相关理论知识,便可实现智能配电系统中电缆线路的实时、在线和连续的状态监测与安全评估。

3 应急能力评估

3.1 应急能力评估的内涵

本文定义:电缆应急能力评估,即根据当前电缆本体各层温度的分布情况,预测在设定的应急负荷电流 I_p 持续作用下的电缆导体温度变化规律,若在该电流作用下的导体温度的稳态值为 90°C ,则 $I_p = I_N$ (I_N 为额定载流量);若导体温度稳态值大于 90°C ,则 $I_p > I_N$,并且给出导体温度达到稳定限额 90°C 所需要的应急时间 t_p 。该评估能为智能配电系统中电缆线路增容、应急和高效运行提供依据和参考。

3.2 电缆暂态温升特性的数学描述

研究电缆导体温升的暂态特性是过负荷应急能力评估的基础,文献[19]在逐层分析的基础上,将电缆热路模型简化为一阶暂态热路模型,计算复杂且误差较大,本文推导出一种依据已知阶跃响应的导体温升数据,利用数据拟合方法,得出一种电缆导体阶跃温升的四阶计算表达式。

3.2.1 阶跃温升四阶计算公式的理论依据

在图 3 的基础上将暂态热路向外围敷设环境扩展,并进行 Laplace 变换,得到图 4 所示的运算热路。图中, R_3 、 C_3 、 R_4 、 C_4 构成电缆外围敷设环境的二阶热

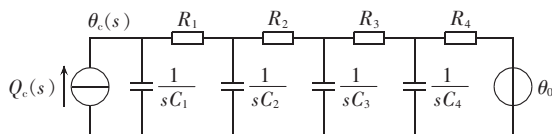


图 4 暂态运算热路

Fig.4 Transient thermal circuit for calculation

路; θ_0 为环境温度作用下的电缆导体温度。

类比运算电路的计算方法,得到运算热路中导体温度的计算公式为:

$$\theta_c(s) = \frac{b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{(s + \tau_1)(s + \tau_2)(s + \tau_3)(s + \tau_4)} Q_c(s) + \theta_0 \quad (10)$$

阶跃电流的作用下,式(10)中的 $Q_c(s)$ 为阶跃输入,电缆导体温升为阶跃响应,阶跃电流作用下的导体温度与时间的关系式如下:

$$\theta_c(t) = \theta_c(\infty) + \sum_{i=1}^4 \alpha_i e^{-t/\tau_i} \quad (11)$$

其中,电缆导体暂态温升包含稳态分量 $\theta_c(\infty)$ 和4个指数形式衰减的温升分量 $\sum_{i=1}^4 \alpha_i e^{-t/\tau_i}$ 。

3.2.2 各温升分量参数的求解

依据式(9)获取一组电缆导体阶跃温度数据:设初始稳态运行电流为 I_0 ,用 $\theta_c(I_0)$ 表示导体稳态初始温度,设阶跃电流为 I_m ,则暂态过程结束时的导体稳态温度可表示为 $\theta_c(\infty) = \theta_c(I_m)$ 。参考式(11),设该阶跃暂态过程的温升表达式为:

$$\theta_c(t) = \theta_c(I_m) + \sum_{i=1}^4 \alpha_{i0} e^{-t/\tau_{i0}} \quad (12)$$

其中, α_{i0} 为各暂态温升分量幅值; τ_{i0} 为各温升分量的时间常数。

分析可知:施加阶跃电流的初始阶段,所有温升分量均对导体升温起作用,但随着时间推移,时间常数小的温升分量的影响衰减至零,只剩下具有大时间常数的温升分量起作用。阶跃温度曲线的末端与具有最大时间常数的指数函数重合,依据这一特征,对温度曲线末端数据进行指数拟合即可得到具有最大时间常数的温升分量,随后,用原温度曲线数据减去已经确定的最大时间常数温升分量,所得新数据的末端与具有次最大时间常数温升分量的末端重合,重复上述指数拟合过程,便可确定次最大时间常数对应的温升分量。依此类推,式(12)中的 α_{i0} 、 τ_{i0} ($i=1, 2, 3, 4$)可利用指数曲线拟合逐一确定。

稳态情况下,负荷电流引起的导体损耗是影响电缆导体温度的主要因素,不考虑非线性因素的影响,根据导体温度与电流平方近似成正比的关系,可依据推算得到的2种稳态电流 I_0 、 I_m 下对应的导体稳态温度 $\theta_c(I_0)$ 、 $\theta_c(I_m)$,得到导体稳态温度关于负荷电流 I 的函数:

$$\theta_c(I) = \frac{\theta_c(I_m) - \theta_c(I_0)}{I_m^2 - I_0^2} (I^2 - I_0^2) + \theta_c(I_0) \quad (13)$$

令 $\theta_c(I) = 90^\circ\text{C}$ 即可求得额定载流量 I_N 。

3.3 应急能力评估的计算方法

令式(11)中的 $t=0$,得到各分量幅值之和的计算公式为:

$$\sum_{i=1}^4 \alpha_i = \theta_c(0) - \theta_c(\infty) \quad (14)$$

其中, $\theta_c(0)$ 为暂态过程中导体的初始温度。

在电缆导体初始温度 $\theta_c(0) = \theta_{c0}$ 时刻,对电缆施加设定的负荷电流 I_p , $\theta_c(I_p)$ 为负荷电流 I_p 作用下的导体稳态温度,这一过程的导体温度响应表达式为:

$$\theta_c(t) = \theta_c(I_p) + \sum_{i=1}^4 r_i e^{-t/\tau_{i0}} \quad (15)$$

由式(10)、(11)可知,无论阶跃输入 $Q_c(s)$ 如何改变,各温升分量的热时间常数 τ_i 不变,即 $\tau_i = \tau_{i0}$;且各暂态分量幅值之间的相互比值关系不变。各暂态分量幅值与暂态分量幅值之和的比值不变。依据这一特征可得一般情况下暂态温升分量幅值 r_i 满足以下关系式:

$$\sum_{i=1}^4 r_i = \theta_{c0} - \theta_c(I_p) \quad (16)$$

$$r_i / \sum_{i=1}^4 r_i = \alpha_{i0} / [\theta_c(I_0) - \theta_c(I_m)] \quad (17)$$

结合式(16)、(17)得到一般情况下暂态温升分量幅值 r_i 的计算公式为:

$$r_i = \alpha_{i0} \frac{\theta_{c0} - \theta_c(I_p)}{\theta_c(I_0) - \theta_c(I_m)} \quad (18)$$

将式(18)代入式(15)得到一般情况下的电缆暂态温度响应表达式:

$$\theta_c(t) = \theta_c(I_p) + \frac{\theta_{c0} - \theta_c(I_p)}{\theta_c(I_0) - \theta_c(I_m)} \sum_{i=1}^4 \alpha_{i0} e^{-t/\tau_{i0}} \quad (19)$$

当 $I_p > I_N$ 时,令式(19)中的 $\theta_c(t) = 90^\circ\text{C}$,可得到 I_p 作用下导体温度达到稳定限额所需要的时间 t_p 。

文中的阶跃电流 I_p 对应具体工程中可表述为过负荷应急电流(或应急负荷电流),则对应的时间 t_p 为应急时间。若将式(19)嵌入智能配电系统的软件平台之中,便可依据输入的负荷电流和推算得到的导体温度动态评估其对应的应急时间 t_p ,实现电缆过负荷应急能力的动态评估。

4 计算实例

笔者通过电缆导体温升实验对上文理论方法进行验证。实验装置主要有:调压器、变压器、电缆线路、热电偶、温度采集仪等,其中变压器主要用于产生低压大电流。

一回路电流发生部分接线方式为:调压器控制变压器高压侧输入,变压器低压侧与电缆线路相连接以产生低电压大电流。则通过控制调压器输出电压即可实现电缆线路导体电流的实时连续控制。

实验过程中,模拟日负荷的变化曲线给电缆导体施加负荷电流,具体的负荷电流及实验监测的电缆各层温度曲线如图5所示。

4.1 导体温度离散推算及误差

对于导体温度离散推算,实验中,设定采样周期 $T=240\text{s}$,求出对应的系统矩阵 $\mathbf{G}(T)$ 和输入矩阵 $\mathbf{H}(T)$,结合式(9)得到的推算导体温度及误差见图6。

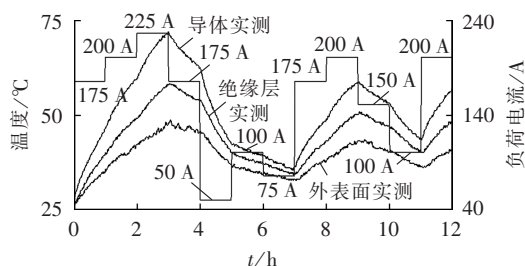


图 5 施加负荷电流及温度监测曲线
Fig.5 Load current curve and monitored temperature curves

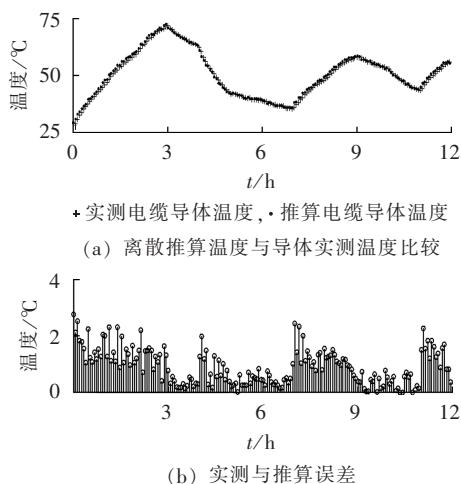


图 6 电缆导体温度推算结果及误差
Fig.6 Calculative and measured conductor temperatures and corresponding errors

由图 6 可知:文中所提的推算公式基本能够实时追踪电缆导体温度变化,且误差在允许的范围内。观察误差数据可知,误差随着电缆导体温度升高而增大,且负荷电流突变处误差较大,但与其他相关文献相比,推算精度有了进一步的提高(很多文献的这一误差最大值达到 6°C 左右)。

4.2 载流量动态应急评估的算例分析

根据式(10)~(17)的推导过程得到算例中电缆导体暂态温升关系式如下:

$$\theta_c(t) = \theta_c(I_p) + [\theta_{c0} - \theta_c(I_p)](0.7e^{-t/5552} + 0.2e^{-t/3821} + 0.06e^{-t/1057} + 0.04e^{-t/502}) \quad (20)$$

$$\theta_c(I_p) = 10.68 I_p^2 \times 10^{-4} + 28.5 \quad (21)$$

由式(20)可知,电缆暂态阶跃温升变化受暂态初始温度 θ_{c0} 和施加的应急电流 I_p 的影响。根据式(19)得到电缆的持续额定电流 $I_N = 240 \text{ A}$,当施加的应急电流 $I_p < 240 \text{ A}$ 时,电缆导体温度不会越过 90°C 限额,可通过式(19)准确评估导体温升变化曲线;当 $I_p > 240 \text{ A}$ 时,评估导体温升变化曲线的同时,令式(19)中的 $\theta_c(t) = 90^{\circ}\text{C}$ 即可求解出导体温度达到稳定限额所需要的应急时间 t_p 。图 7 为施加 250 A 应急电流情况下的导体温升曲线。图 8 为施加 300 A 应急电流情况下的导体温升曲线。

由图 7 可知: 250 A 应急电流下,导体初始温度为 40°C 时的评估时间为 188 min ,实测时间为 175 min ,相差 13 min ;导体初始温度为 50°C 情况下的评估时间为 169 min ,实测时间为 153 min ,相差 16 min 。同理,由图 8 可知 300 A 应急电流下,导体初始温度为 40°C 时的评估时间为 68 min ,实测时间为 71 min ,相差 3 min ;导体初始温度为 50°C 时的评估时间为 57 min ,实测时间为 55 min ,相差 2 min 。因此,同一应急电流下,电缆导体初始温度越高,达到稳定限额所需的应急时间越短,同一电缆导体初始温度下,施加的阶跃电流越大所需的应急时间越短;评估误差也随着应急电流的增大而增大。

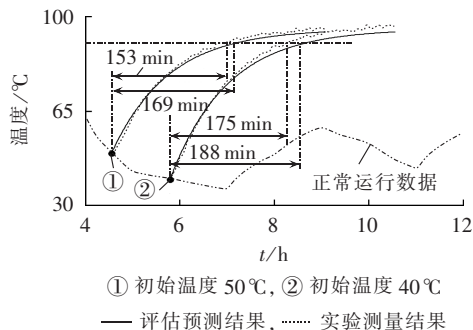


图 7 250 A 阶跃电流下的暂态温升曲线
Fig.7 Curve of transient temperature rise under 250 A step current

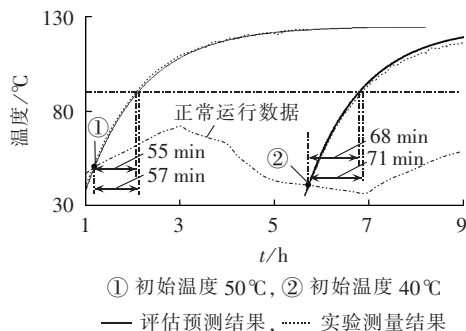


图 8 300 A 阶跃电流下的暂态温升曲线
Fig.8 Curve of transient temperature rise under 300 A step current

实际工程应用中,应急时间的设定建议留有一定的安全裕度,即用评估时间乘以一定的百分数(目前还没有工程应用的实例),并且电缆的热时间常数较大,随着时间的推移,温度变化趋于缓慢,因此导体温度达到稳定限额附近的时间误差一定程度上会被放大,加之实验条件有很多不可控因素,因此评估误差基本可以接受。

5 结论

传统的以电缆标称额定电流为电缆载流能力的方法不能满足智能配电系统的要求,应以电缆导体实际运行温度来判断电缆的实际负载状态和剩余截流

能力。本文提出的电缆导体温度离散推算方法能够满足导体温度实时推算要求,具有较高的推算精度。过负荷应急能力评估方法能较为准确地评估预测导体温度达到稳定限额所需的应急时间。

导体温度实时推算有利于电缆线路的实时在线监测与状态评估;过负荷应急能力评估一定程度上也能够提高智能配电系统的风险评估水平和安全预警能力。两者均有利于线路资源的合理配置和高效利用,对提高智能配电网的经济性也大有益处。

参考文献:

- [1] 李勋,龚庆武,胡元潮,等. 智能配电网体系探讨[J]. 电力自动化设备,2011,31(8):108-111.
LI Xun,GONG Qingwu,HU Yuanchao,et al. Discuss of smart distribution grid system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011,31(8):108-111.
- [2] 马宏忠,李超群,许高俊,等. 电缆金属护层环流补偿装置设计[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):151-155.
MA Hongzhong,LI Chaoqun,XU Gaojun,et al. Design of compensation device for metal shield circulating current of power cable[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):151-155.
- [3] 王守相,张卫涛,葛磊蛟,等. 智能配电网统一模型云与应用服务技术系统[J]. 电力自动化设备,2015,35(2):49-54.
WANG Shouxiang,ZHANG Weitao,GE Leijiao,et al. Unified model cloud and application service system for smart distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(2):49-54.
- [4] 李滨,杜孟远,韦维,等. 基于准实时数据的智能配电网理论线损计算[J]. 电力自动化设备,2014,34(11):122-128.
LI Bin,DU Mengyuan,WEI Wei,et al. Calculation of theoretical line loss based on quasi real-time data of smart distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(11):122-128.
- [5] IEC. Calculation of the current rating of electric cables,part 1: current rating equations(100% load factor) and calculation of losses,section 1:general;IEC602872121-2012[S]. [S.I.]:IEC, 2012.
- [6] 郑雁翎,王宁,李洪杰,等. 电力电缆载流量计算的研究与发展[J]. 电线电缆,2010(2):4-9.
ZHENG Yanling,WANG Ning,LI Hongjie,et al. Study and progress of the ampacity of power cables[J]. Electric & Wire Cable,2010(2):4-9.
- [7] 庄小亮,余兆荣,牛海清,等. 日负载系数与10 kV XLPE 电缆周期负荷载流量关系的试验研究[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):168-172.
ZHUANG Xiaoliang,YU Zhaorong,NIU Haiqing,et al. Experimental research of relationship between daily load factor and cyclic ampacity of 10 kV XLPE cable[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(4):168-172.
- [8] 赵继光,牛海清,陈诚,等. 直埋集群敷设配电缆的载流量多回路修正系数校核[J]. 南方电网技术,2014,8(1):89-93.
ZHAO Jiguang,NIU Haiqing,CHEN Cheng,et al. Check of rating correction factor for direct-buried multi-circuit distribution cables in cluster laying[J]. Southern Power System Technology, 2014,8(1):89-93.
- [9] 梁永春. 高压电力电缆载流量数值计算[M]. 北京:国防工业出版社,2012:18-24.
- [10] 郑雁翎,仪涛,张冠军,等. 分散式排管敷设电缆群温度场的流固耦合计算[J]. 高电压技术,2010,36(6):1566-1571.
ZHENG Yanling,YI Tao,ZHANG Guanjun,et al. Fluid-solid coupling on temperature field of decentralized pipe cable system[J]. High Voltage Engineering,2010,36(6):1566-1571.
- [11] 邱关源. 电路[M]. 北京:高等教育出版社,2006:116-123.
- [12] 雷成华,刘刚,李钦豪. BP 神经网络模型用于单芯电缆导体温度的动态计算[J]. 高电压技术,2011,37(1):184-189.
LEI Chenghua,LIU Gang,LI Qin hao. Dynamic calculation of conductor temperature of single-core cable using BP neural network[J]. High Voltage Engineering,2011,37(1):184-189.
- [13] 雷鸣,刘刚,赖育庭,等. 采用 Laplace 方法的单芯电缆线芯温度动态计算[J]. 高电压技术,2010,36(5):1150-1154.
LEI Ming,LIU Gang,LAI Yuting,et al. Dynamic calculation of core temperature of single core cables using Laplace method[J]. High Voltage Engineering,2010,36(5):1150-1154.
- [14] 范高峰,王伟胜,刘纯,等. 基于人工神经网络的风电功率预测[J]. 中国电机工程学报,2008,28(34):118-123.
FAN Gaofeng,WANG Weisheng,LIU Chun,et al. Wind power prediction based on artificial neural network[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(34):118-123.
- [15] FRANCISCO G J. Effects of backfilling on cable ampacity analyzed with the finite element method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2008,23(2):537-543.
- [16] 雷鸣. 依据电缆表皮温度准确计算单芯高压电缆线芯温度的理论及实验研究[D]. 广州:华南理工大学,2011.
LEI Ming. Theoretical and experimental study on accurate calculation of single-core high-voltage cable core temperature based on skin temperature[D]. Guangzhou:South China University of Technology,2011.
- [17] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 北京:中国电力出版社,2013:35-50.
- [18] 郑大钟. 线性系统理论[M]. 北京:清华大学出版社,2002:88-98.
- [19] 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):2801-2806.
ZHANG Yao,ZHOU Xin,NIU Haiqing,et al. Theoretical calculation and experimental research on thermal time constant of single-core cables[J]. High Voltage Engineering,2009,35(11):2801-2806.

作者简介:



高昇宇

高昇宇(1966—),男,江苏无锡人,高级工程师,硕士,主要从事电力运行与管理工
作(E-mail:13805158058@163.com);

李超群(1991—),男,江苏阜宁人,硕士研究生,研究方向为电缆线路温度场分析、电缆
动态增容(E-mail:lichaoqundqzy@163.com);

王春宁(1966—),男,江苏南京人,教授
级高级工程师,主要从事电力设备、电缆运
行与管理工作(E-mail:wangchunning@sina.com)。

(下转第54页 continued on page 54)

- LIU Zifa, WEI Tao, LI Mengyu, et al. Comprehensive evaluation based on improved analysis hierarchy process for AC/DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 60-66.
- [8] 陈红江, 李夕兵, 刘爱华, 等. 用 Fisher 判别法确定矿井突水水源[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(4): 1114-1120.
- CHEN Hongjiang, LI Xibing, LIU Aihua, et al. Identifying of mine water inrush sources by Fisher discriminant analysis method[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2009, 40(4): 1114-1120.
- [9] JIANG Benben, ZHU Xiaoxiang, HUANG Dexian, et al. A combined Canonical Variate Analysis and Fisher Discriminant Analysis (CVA-FDA) approach for fault diagnosis[J]. Computer and Chemical Engineering, 2015, 77: 1-9.
- [10] WANG Haixian, LU Xuesong, HU Zilan, et al. Fisher discriminant analysis with L1-Norm[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2014, 44(6): 828-842.
- [11] 中华国家标准化管理委员会. 电能质量—供电电压偏差: GB/T 12325—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [12] 中华国家标准化管理委员会. 电能质量—电力系统频率偏差: GB/T 15945—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [13] 中华国家标准化管理委员会. 电能质量—三相电压不平衡: GB/T 15543—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [14] 中华国家标准化管理委员会. 电能质量—公用电网谐波: GB/T 14549—1993[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [15] 中华国家标准化管理委员会. 电能质量—电压波动和闪变: GB/T 12326—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [16] WANG Jidong, WANG Lipeng, PANG Xipin. Steady state power quality evaluation of grid-connected photovoltaic system based on improved principal component analysis method[J]. Recent Patents on Electrical and Electronic Engineering, 2013, 6(3): 217-223.
- [17] 周林, 栗秋华, 刘华勇, 等. 用模糊神经网络模型评估电能质量[J]. 高电压技术, 2007, 33(9): 66-69.
- ZHOU Lin, LI Qiuhua, LIU Huayong, et al. Evaluation of power quality by fuzzy artificial neural network[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(9): 66-69.

作者简介:



王继东

王继东(1977—),男,山东邹城人,副教授,博士,从事电能质量、分布式发电和微电网、智能用电等方面的研究(E-mail: jidongwang@tju.edu.cn);

庞文杰(1991—),男,山西晋中人,硕士研究生,主要研究方向为电能质量(E-mail: pangwenjie@tju.edu.cn)。

Application of Fisher discriminant analysis in steady-state power quality evaluation of grid-connected photovoltaic system

WANG Jidong, PANG Wenjie

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Aiming at the complexity of steady-state power quality evaluation and the limitation of single comprehensive power quality index, Fisher discriminant analysis is proposed to evaluate the steady-state power quality of grid-connected photovoltaic system for checking its grid-connection feasibility. A discriminant model is established based on the samples constructed according to China's national standard of power quality, which is checked by the back-substitution estimation method and applied to a practical system. Experimental result shows that, the proposed method has small misjudgment rate and excellent discriminating performance.

Key words: power quality; Fisher discriminant analysis; photovoltaic system; multi-index; comprehensive evaluation; steady-state

(上接第 49 页 continued from page 49)

Cable conductor temperature calculation and emergency capability assessment for smart distribution network

GAO Shengyu¹, LI Chaoqun², WANG Chunling¹, XU Honghua¹, MA Hongzhong²

(1. State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, China;

2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: Based on the transient thermal circuit model of power cable and by the dispersed processing of continuous system, a real-time method is proposed to calculate the power cable conductor temperature according to its load current and outside surface temperature. A dynamic ampacity assessment method is also given, which divide the transient temperature rise caused by the step current into the steady state component and four transient components with different time constants. Data fitting is applied to obtain the parameters of transient components and a step temperature rise expression is thus achieved, based on which, the emergency capability of power cable line can be assessed, i.e. the time required to reach the stable limit of temperature rise under different conditions. The feasibility and accuracy of the proposed methods are verified by experiments, and simple quantitative analysis and error analysis are also carried out.

Key words: smart distribution system; electric cables; conductor temperature; real-time calculation; transient temperature rise; data fitting