

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.12.035

配电系统三芯电缆应急时间计算方法

付明星^{1,2}, 马宏忠¹, 李盛翀¹, 王光明³, 郭湘奇³

(1. 河海大学能源与电气学院, 南京 211100; 2. 国网江苏省电力有限公司盐城供电分公司, 江苏 盐城 224002;
3. 国网江苏省电力有限公司南京供电分公司, 南京 210008)

摘要:当配电系统三芯电缆因其他线路故障或电力抢修而需施加较大的应急负荷时,其线芯温度达到最高限值前,允许过载的时间是电缆运行监测部门亟待解决的问题。文中以10 kV三芯电缆为研究对象,首先建立电缆暂态热路模型,并将应急负荷作用下电缆暂态温升分为稳态分量和五个热时间常数不同的暂态分量。其次借助数据拟合的方法确定不同暂态分量的参数,得到应急负荷作用下电缆应急时间的计算表达式。最后设计了加载不同应急负荷时三芯电缆的暂态温升实验。实验结果表明,本方法能够准确地计算电缆的应急时间,为三芯电缆的应急能力评估和电力应急调度提供依据。

关键词:三芯电缆; 应急时间; 数据拟合; 暂态热路模型; 热时间常数

Calculation Method for Emergency Time of Three-core Cable in Distribution System

FU Mingxing^{1,2}, MA Hongzhong¹, LI Shengchong¹, WANG Guangming³, GUO Xiangqi³

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 2. Yancheng Power Supply Company of State Grid Jiangsu Electric Power Company, Jiangsu Yancheng 224002, China; 3. Nanjing Power Supply Company of State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210008, China)

Abstract: When three-core cable in distribution system needs to load larger emergency loads for other line fault or power repair, the time the cable can resist the overload is an urgent issue for cable running and monitoring department. The 10 kV three-core cable is taken as the research object in this paper. Firstly, a cable transient thermal circuit model is established, and the transient temperature rise of the cable is divided into two parts, the steady state component and five transient components including different thermal time constant. Secondly, by means of the method of data fitting, the parameters of different transient components are determined, then the calculation formula of cable emergency time is obtained under the action of emergency loads. Finally, the transient temperature rising experiments are designed under different emergency loads. The experimental results show that, using the proposed method the emergency time of cable can be calculated accurately, which provides the basis for the emergency capability evaluation of the three-core cable and power emergency dispatching.

Key words: three-core cable; emergency time; data fitting; transient thermal circuit model; heating time constant

0 引言

提高三芯电缆设备的实时监测与状态评估能力,降低其运行风险是城市配电系统的重要目标之一。电缆导体温度作为表征电缆是否安全运行的

关键参数^[1-2],是目前研究的热点。然而,当线路发生故障或检修时,配网电缆常会出现过负荷运行状态,此时电缆导体温度达到最高限值所需的应急时间是电缆状态监测的另一重要参数^[3]。受技术限制,现在仍难以通过获取电缆导体温度直接得到应

收稿日期:2018-04-07; 修回日期:2018-06-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51577050);国网江苏省电力公司2017年重点科技项目(J2017070)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51577050), the State Grid Jiangsu Electric Power Company Key Science and Technology Project in 2017(J2017070).

急时间大小。因此,研究紧急情况下能否对运行电缆施加应急负荷及应急时间的计算方法,是一个急需解决的问题。

目前国内外对电缆应急时间的研究相对较少,大多数文献专注于解决电缆导体温度和载流量计算问题^[4-7]。国际公认的 IEC 60287 标准给出了电缆热路模型及导体温度计算方法,但该标准依赖于工程经验,计算误差较大^[8];文[9]结合解析法与有限元法,建立直埋高压电缆的温度场计算模型,并提出载流量计算的优化方法;文[10]建立了高压单芯电缆的暂态热路简化模型,依据表皮温度推算导体温度,并分析了模型计算误差;文[11]则建立导体温度推算的离散模型,但模型参数的计算依赖于大量的现场数据。而文[12]在逐层分析三芯电缆暂态热路模型的基础上,推导出应急时间计算公式,但计算过程复杂且误差较大。

文中以 10 kV 三芯电缆为研究对象,首先建立三芯电缆暂态热路模型,并研究阶跃负荷作用下电缆暂态温升过程。其次,通过指数拟合方法确定应急负荷作用下电缆应急时间的五阶表达式。最后设计了三芯电缆暂态温升实验,实测应急时间,与理论计算值对比,并简要分析本方法的计算误差。

1 三芯电缆暂态热路模型的优化

1.1 三芯电缆暂态热路基本模型

当三芯电缆处于稳态运行状态,其线芯的温升量可以近似认为不随时间变化;但若电缆处于暂态运行状态,其线芯的温升量则是关于时间的变化函数^[13-14]。因此,为了研究电缆在应急负荷条件下应急时间的计算方法,则需要建立合适的三芯电缆暂态热路模型。

考虑三芯电缆的内部结构与温度场仿真结果,文[15]建立了其稳态热路模型,在此模型的电缆各层节点上,对应增加热容,便可以得到单位长度 10 kV 三芯电缆暂态热路基本模型,见图 1。

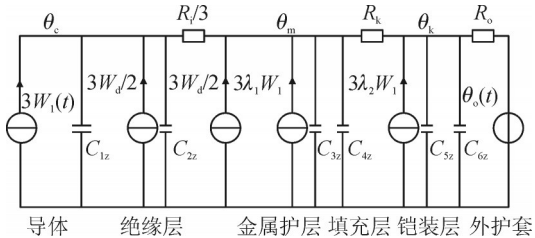


图 1 三芯电缆暂态热路基本模型

Fig. 1 Basic model of transient thermal circuit of three-core cable

图 1 中: W_1 、 W_d 分别表示单个线芯电缆导体单位损耗和绝缘单位损耗; λ_1 、 λ_2 分别为单个线芯金属护层损耗因数及铠装层损耗因数; R_i 、 R_k 、 R_o 依次为单个线芯绝缘层单位热阻、填充层单位热阻以及外护套单位热阻; C_{1s} 、 C_{2s} 、 C_{3s} 、 C_{4s} 、 C_{5s} 、 C_{6s} 则依次为导体、绝缘层、金属护层、填充层、铠装层、外护套单位热容; θ_c 、 θ_m 、 θ_k 、 θ_o 分别为电缆导体、金属护层、铠装层以及外护套表面温度; t 为时间。

1.2 三芯电缆暂态热路模型的改进

在图 1 的基础上,依据热路原理的串并联关系,将暂态热路基本模型的各个节点上热源和热容分别合并,简化得到图 2。

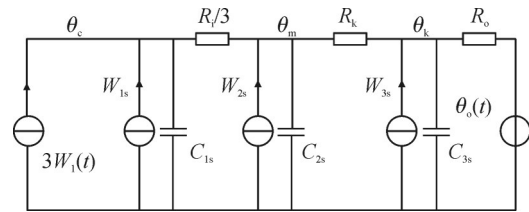


图 2 电缆暂态热路简化模型

Fig. 2 Transient thermal circuit simplified model of cable

图 2 中热源 W_{1s} 、 W_{2s} 、 W_{3s} 和热容 C_{1s} 、 C_{2s} 、 C_{3s} 的大小分别为: $W_{1s}=3W_d/2$; $W_{2s}=3W_d/2+3\lambda_1W_1$; $W_{3s}=3\lambda_2W_1$; $C_{1s}=C_{1s}+C_{2s}$; $C_{2s}=C_{3s}+C_{4s}$; $C_{3s}=C_{5s}+C_{6s}$ 。

为了便于研究三芯电缆的应急温升响应,可将暂态热路模型等效为只含单一热流源模型。等效过程则需保证三芯电缆导体温度不变及各层热容存储总热量保持不变^[16-17],借助三种损耗因数对电缆热参数进行归算,得到的三芯电缆暂态热路优化模型见图 3。

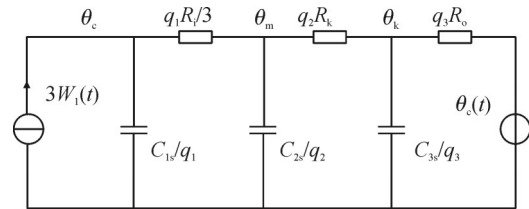


图 3 电缆暂态热路优化模型

Fig. 3 Transient thermal circuit optimized model of cable

图 3 中 3 种损耗因数 q_1 、 q_2 、 q_3 的具体计算公式^[18]如下

$$\begin{cases} q_1 = (3W_1 + W_{1s})/3W_1 \\ q_2 = (3W_1 + W_{1s} + W_{2s})/3W_1 \\ q_3 = (3W_1 + W_{1s} + W_{2s} + W_{3s})/3W_1 \end{cases} \quad (1)$$

将图 3 进一步整理可得三芯电缆暂态热路等效模型,见图 4。

图 4 与图 3 对比可知: $W_1=3W_1$; $R_1=q_1R/3$; $R_2=q_2R_k$; $R_3=q_3R_o$; $C_1=C_{1s}/q_1$; $C_2=C_{2s}/q_2$; $C_3=C_{3s}/q_3$ 。

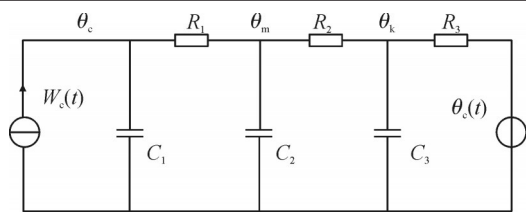


图4 三芯电缆暂态热路等效模型

Fig. 4 Equivalent model of transient thermal circuit of three-core cable

2 三芯电缆的暂态温升特性

2.1 电缆暂态温升特性的数学模型

配电系统三芯电缆的应急时间是指因电力故障或检修,三芯电缆需要加载更大的应急负荷,在应急负荷电流的持续作用下,电缆导体温度达到稳定限额 90 ℃所需的时间。研究三芯电缆的暂态温升特性是解决电缆应急时间计算问题的基础。

针对三芯电缆应急时间的计算,需要考虑电缆本体与周围敷设环境之间的相互作用与影响。因此将电缆敷设环境等效为二阶热路模型,并在图4电缆暂态热路等效模型的基础上,将模型扩展至周围环境,进行拉普拉斯变换,进一步得到s域下电缆热路运算模型,见图5。

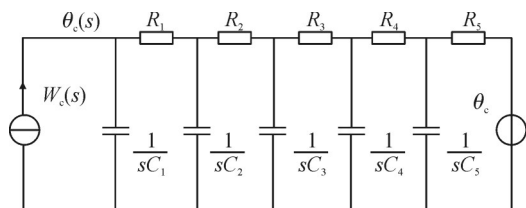


图5 三芯电缆热路运算模型

Fig. 5 Thermal circuit operation model of three-core cable

图5中: R_4 、 C_4 、 R_5 、 C_5 共同构成电缆周围敷设环境的二阶热路模型; θ_c 表示电缆运行环境温度作用下的电缆导体温度。

类比电路原理节点电压法的计算思路,通过节点温度方程求解电缆运算热路模型中导体温度的运算形式,整理后得到s域下电缆导体温度的计算公式为

$$\theta_c(s) = \frac{h_4 s^4 + h_3 s^3 + h_2 s^2 + h_1 s + h_0}{(s + \tau_1)(s + \tau_2)(s + \tau_3)(s + \tau_4)(s + \tau_5)} W_c(s) + \theta_c \quad (2)$$

当三芯电缆在某一负荷电流下稳定运行,突然施加较大的应急负荷电流时,相当于阶跃电流作用于电缆上,因此式(2)中 $W_c(s)$ 为阶跃输入,则三芯电缆导体温度变化为阶跃响应,对式(2)施行反拉普拉斯变换,得到三芯电缆导体温度随时间变化的计算形式为

$$\theta_c(t) = \theta_c(\infty) + \sum_{i=1}^5 r_i e^{\frac{-t}{\tau_i}} \quad (3)$$

分析式(3)可以发现,三芯电缆导体温升量包括两大部分:一是电缆导体温度在新的负荷电流下稳态分量 $\theta_c(\infty)$;二是5个热时间常数大小不同、按指数形式衰减的暂态温升分量。

2.2 模型参数的求解

目前,配电系统电缆导体温度的计算方法已相对成熟,文[19-22]分别提出了计算精度较高的导体温度推算方法,因而可以直接从系统中获取一组阶跃电流作用下三芯电缆导体温度变化数据。约定电缆运行电流 I_s 下,对应的导体稳态温度用 $\theta_c(I_s)$ 来表示。故设三芯电缆初始稳态运行电流为 I_s ,则 $\theta_c(I_s)$ 代表对应的导体稳态温度;施加的阶跃电流为 I_{ex} ,同理 $\theta_c(I_{ex})$ 则表示新运行状态下导体稳态温度。参考式(3),因而阶跃电流作用下电缆导体温度随时间变化的表达式为

$$\theta_c(t) = \theta_c(I_{ex}) + \sum_{i=1}^5 \alpha_{ei} e^{\frac{-t}{\tau_{ei}}} \quad (4)$$

式(4)中: α_{ei} 为暂态温升分量幅值; τ_{ei} 为暂态温升分量热时间常数。

观察式(4),结合指数衰减函数性质和阶跃电流作用下电缆导体温度变化过程可知:对于按指数形式衰减的、不同热时间常数的暂态温升分量,具有较大热时间常数的暂态分量,在温度变化过程中衰减较慢;反之,对于具有较小热时间常数的暂态分量,则衰减较快。因此,在不同的时间段,各暂态温升分量对电缆导体温度变化的贡献度因热时间常数大小不同而不同。

对三芯电缆施加阶跃电流后,在导体温度变化的初始阶段,各个暂态分量对导体温度的变化均有贡献,但是当电缆即将达到稳态,导体温度变化过程快要结束时,具有小热时间常数的暂态分量早已衰减至零,对导体温度变化不再起作用,只剩下大热时间常数的暂态分量起贡献。故从阶跃温度曲线上看,电缆导体温度变化曲线的末端是与具有最大热时间常数的暂态分量曲线末端重合,根据此特征对温度曲线末端数据进行数据拟合,得到具有最大热时间常数的指数函数表达式。当最大热时间常数的暂态分量确定后,用原温度曲线数据减去最大热时间常数的暂态分量数据,得到新温度数据曲线的末端是与具有次最大热时间常数的暂态分量曲线末端重合,重复上述拟合过程,便可以确定次最大热时间常数的暂态分量。依此推理,可以逐步

确定5个不同暂态分量的热时间常数和幅值大小。

3 三芯电缆应急时间计算方法

假设某时刻下因紧急情况需对三芯电缆施加较大的应急负荷 I_{em} , 从配电系统的电缆状态监测软件中可知该时刻下电缆导体初始温度, 记为 $\theta_c(0) = \theta_{c0}$; 并记 $\theta_c(I_{em})$ 为应急负荷电流 I_{em} 持续作用下导体稳态温度。根据上述分析, 该阶跃电流作用下导体温度变化的表达式可写为

$$\theta_c(t) = \theta_c(I_{em}) + \sum_{i=1}^5 b_{mi} e^{-\frac{t}{\tau_{mi}}} \quad (5)$$

当运行电缆处于稳态时, 不考虑各种损耗与非线性因素的影响, 其导体温度与运行电流的平方近似成正比关系。在已知两种稳态电流 I_s 、 I_{ex} 以及与之对应的导体稳态温度 $\theta_c(I_s)$ 、 $\theta_c(I_{ex})$ 的前提下, 推导出三芯电缆导体稳态温度与运行电流的关系式如下

$$\theta_c(I) = \frac{\theta_c(I_{ex}) - \theta_c(I_s)}{I_{ex}^2 - I_s^2} (I^2 - I_s^2) + \theta_c(I_s) \quad (6)$$

式(6)中: 令 $I = I_{em}$ 时, 便可以求得 $\theta_c(I_{em})$; 若令 $\theta_c(I) = 90^\circ\text{C}$ 时, 求得的负荷电流 I 即为额定载流量 I_N 。

分析式(2)、(3)及推导过程可知: 不论阶跃输入 $W_c(s)$ 如何变化, 各暂态分量的热时间常数 τ_i 大小不变; 此外, 各暂态分量幅值之间相互比值关系不变, 各暂态分量幅值与所有暂态分量幅值之和的比值不变。可分别令式(4)、(5)中 $t=0$, 可以得到不同阶跃负荷条件下, 导体温度变化过程中各暂态分量幅值之和依次为:

$$\sum_{i=1}^5 \alpha_{ei} = \theta_c(I_s) - \theta_c(I_{ex}) \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^5 b_{mi} = \theta_{c0} - \theta_c(I_{em}) \quad (8)$$

根据上述特征, 可以得到以下关系式

$$\tau_{mi} = \tau_{ei} \quad (9)$$

$$b_{mi} / \sum_{i=1}^5 b_{mi} = \alpha_{ei} / \sum_{i=1}^5 \alpha_{ei} \quad (10)$$

将式(7)、(8)代入式(10)中, 整理得到在应急负荷 I_{em} 作用下, 导体温度阶跃响应的暂态分量幅值一般表达式为

$$b_{mi} = \frac{\theta_{c0} - \theta_c(I_{em})}{\theta_c(I_s) - \theta_c(I_{ex})} \alpha_{ei} \quad (11)$$

结合式(5)、(9)、(11), 进一步整理得到一般条件下的三芯电缆导体温度暂态响应表达式

$$\theta_c(t) = \theta_c(I_{em}) + \frac{\theta_{c0} - \theta_c(I_{em})}{\theta_c(I_s) - \theta_c(I_{ex})} \sum_{i=1}^5 \alpha_{ei} e^{-\frac{t}{\tau_{ei}}} \quad (12)$$

因此, 结合目前已有的三芯电缆导体温度推算方法, 将式(12)编入配电系统电缆运行状态监测软

件程序中。当施加较大的应急负荷 I_{em} 时, 可令 $\theta_c(t) = 90^\circ\text{C}$, 通过监测程序对应求得时间 t_{em} 即为应急时间, 综合应急时间与电缆其他状态监测参数, 可动态评估三芯电缆在紧急情况下的应急能力。

4 实验分析与验证

4.1 实验装置与实验方法

为了验证上文所提出的三芯电缆应急时间计算方法的准确性与可靠性, 以 10 kV 三芯电缆, 型号 YJV 22-8.7/15-3×70 为对象, 设计了电缆在不同应急负荷下的温升实验, 实测导体温度变化过程, 并将实验值与理论计算值对比。实验过程中, 施加于三芯电缆的负荷电流模拟日负荷变化特性, 具体实验负荷曲线及电缆各层温度监测曲线见图6。

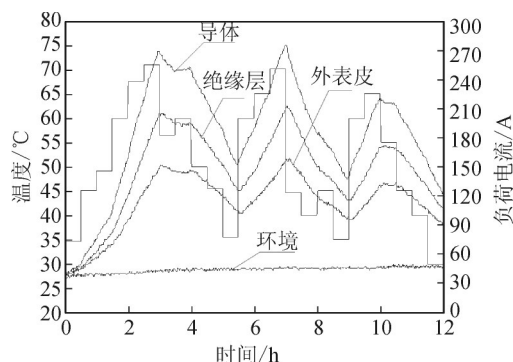


图6 负荷电流及温度监测曲线

Fig. 6 Current and temperature monitoring curve

电缆应急负荷实验系统见图7, 主要包括: 实验电源、调压器、升流变压器、实验电缆、热电偶、温度采集仪等。其中, 升流变压器的高压侧与调压器相连, 低压侧与电缆连接, 通过升流变压器可以产生低电压大电流; 此外控制调压器的输出电压, 便能实现电缆运行电流的实时连续控制, 试验装置实物见图8。

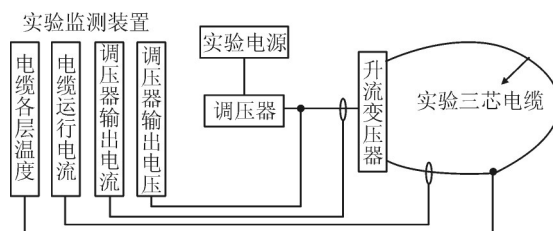


图7 三芯电缆应急负荷实验系统

Fig. 7 Test system of emergency load on three-core cable

4.2 三芯电缆应急时间求解的算例分析

结合式(5)-(12)的推导过程可得算例中三芯电缆的暂态温升特性表达式为

$$\theta_c(t) = \theta_c(I_{em}) + [\theta_{c0} - \theta_c(I_{em})] (0.6e^{-\frac{t}{6090}} + 0.23e^{-\frac{t}{4198}} + 0.08e^{-\frac{t}{2416}} + 0.06e^{-\frac{t}{1472}} + 0.03e^{-\frac{t}{695}}) \quad (13)$$



图8 三芯电缆温升试验实物图

Fig. 8 The physical map of temperature rise test on three-core cable

式(13)中, θ_{c0} 表示导体初始运行温度, 依据式(6)得到 $\theta_c(I_{em})$ 的计算式为

$$\theta_c(I_{em}) = 10.24 \times 10^{-4} I_{em}^2 + 27.88 \quad (14)$$

分析式(13)、(14)可知: 三芯电缆导体的暂态温度与导体初始运行温度 θ_{c0} 及应急负荷电流 I_{em} 密切相关。由式(6)可计算得到实验三芯电缆的最大载流量 I_N 为 230 A。因此当 $I_{em} < 230$ A 时, 三芯电缆导体温度不会超过 90 °C; 若 $I_{em} > 230$ A 时, 令式(13)导体温度值为 90 °C, 便可以计算出电缆应急时间 t_{em} 。不同初始温度下加载应急负荷 250 A 的暂态温升曲线见图9。加载应急负荷 290 A 的暂态温升曲线见图10。

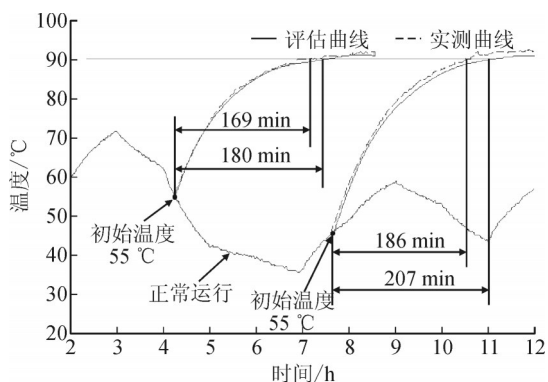


图9 应急负荷 250 A 下的暂态温升曲线

Fig. 9 Transient temperature rise curve under emergency load 250 A

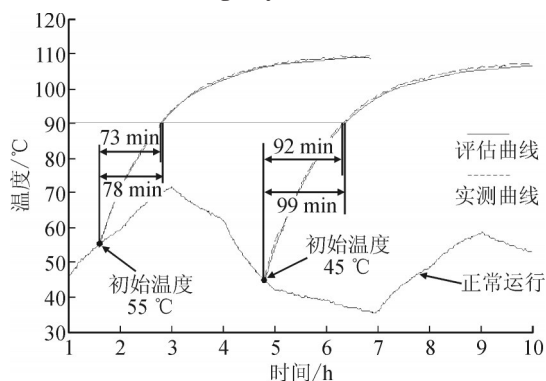


图10 应急负荷 290 A 下的暂态温升曲线

Fig. 10 Transient temperature rise curve under emergency load 290 A

由图9可知, 当加载应急负荷 250 A, 初始运行温度为 45 °C 时, 应急时间计算值为 207 min, 实测值为 186 min, 相差 21 min; 若初始温度为 55 °C, 计算值为 180 min, 实测值为 169 min, 相差 11 min。由图10可知, 当加载应急负荷 290 A, 初始温度为 45 °C, 应急时间计算值为 99 min, 实测值为 92 min, 相差 7 min; 若初始温度为 55 °C, 计算值为 78 min, 实测值为 73 min, 相差 5 min。因此, 同一初始温度下, 应急负荷越大, 应急时间越短; 同一应急负荷下, 初始温度越高, 应急时间越短, 且随着应急时间的变短, 评估误差存在变小的趋势。

考虑温度测量技术和实验室实验条件限制, 应急时间的理论计算值与实验值之间的误差在合理范围内, 验证了应急时间计算公式的准确性。但在实际工程应用中, 三芯电缆的应急时间评估与设定需要留有一定的安全裕度。

5 结论

文中通过建立空气敷设下 10 kV 三芯电缆的暂态热路等效模型, 推导出其暂态特性五阶表达式, 并给出了三芯电缆应急时间计算方法, 最后设计了加载不同应急负荷的暂态温升实验, 对比分析应急时间的实测值与计算值, 得到以下结论:

- 1) 应急时间的实测值与计算值之间的误差在合理范围内, 验证了应急时间计算方法的准确性, 实际工程应用中需要留有一定的安全裕度。
- 2) 随着应急时间的变短, 其评估误差存在变小的趋势, 符合“越急越准”的特点。
- 3) 评估三芯电缆的应急时间大小, 有利于提升配电系统对电缆设备的状态评估和安全预警能力, 为电力应急调度提供理论指导。

参考文献:

- [1] 王守相, 葛磊蛟, 王 凯. 智能配电系统的内涵及其关键技术[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 1-6.
WANG Shouxiang, GE Leijiao, WANG Kai. Main contents and key technologies of smart distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 1-6.
- [2] 王成山, 王 丹, 周 越. 智能配电系统架构分析及技术挑战[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 2-9.
WANG Chengshan, WANG Dan, ZHOU Yue. Framework analysis and technical challenges to smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 2-9.
- [3] 肖 峻, 谷文卓, 王成山. 面向智能配电系统的安全域模

- 型[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 14-19.
- XIAO Jun, GU Wenzhuo, WANG Chengshan. A security region model for smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 14-19.
- [4] NASKAR A K, BHATTACHARYA N K, SAHA S, et al. Thermal analysis of underground power cables using two dimensional finite element method[C]//IEEE International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems. Kolkata: IEEE, 2013: 94-99.
- [5] 刘畅, 徐政, 宣耀伟, 等. 基于等效导热系数的直流电缆稳态载流量简化有限元算法[J]. 高压电器, 2016, 52(5): 7-13.
- LIU Chang, XU Zheng, XUAN Yaowei, et al. Simplified finite element method for calculating DC cable's current capacity using equivalent thermal conductivity[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(5): 7-13.
- [6] 梁永春. 高压电力电缆温度场和载流量评估研究动态[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1142-1150.
- LIANG Yongchun. Technological development in evaluating the temperature and ampacity of power cables[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1142-1150.
- [7] DE LEON F, GEORGE J. Effects of backfilling on cable ampacity analyzed with the finite element method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 537-543.
- [8] Calculation of the current rating of electric cables, Part 1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses, section 1: General: IEC 60287-1-1:2012[S]. 2012.
- [9] 李超群, 沈培峰, 马宏忠, 等. 多回路土壤直埋高压电缆温度场建模与载流量计算[J]. 高压电器, 2015, 51(10): 63-69.
- LI Chaoqun, SHEN Peifeng, MA Hongzhong, et al. Modeling of soil buried multi-circuit cables' temperature field and ampacity calculation[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(10): 63-69.
- [10] 刘刚, 雷成华, 刘毅刚. 根据电缆表面温度推算导体温度的热路简化模型暂态误差分析[J]. 电网技术, 2011, 35(4): 212-217.
- LIU Gang, LEI Chenghua, LIU Yigang. Analysis on transient error of simplified thermal circuit model for calculating conductor temperature by cable surface temperature[J]. Power System Technology, 2011, 35(4): 212-217.
- [11] 方睿, 鲁华祥, 李志坚, 等. 基于矩阵广义逆的电缆线芯温度动态计算方法[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 97-102.
- FANG Rui, LU Huaxiang, LI Zhijian, et al. Dynamic calculation of cable core temperature based on generalized inverse of matrix[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 97-102.
- [12] 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): 78-84.
- SU Ruibo, WANG Peng, KANG Shouya, et al. Emergency time calculation for 10 kV three-core cable under air[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(11): 78-84.
- [13] 苏文, 宋建成, 许春雨, 等. 10 kV MYPTJ 型矿用电缆线芯动态温度监测方法[J]. 高压电器, 2015, 51(2): 57-62.
- SU Wen, SONG Jiancheng, XU Chunyu, et al. Method for monitoring dynamic temperature of 10 kV MYPTJ mining cable core[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(2): 57-62.
- [14] 庄小亮, 余兆荣, 牛海清, 等. 日负载系数与 10 kV XLPE 电缆周期负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.
- [15] 周凡. 电力电缆暂态热路模型的优化分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- ZHOU Fan. Optimization analysis of transient thermal circuit model of power cables[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.
- [16] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- MA Guodong. Ampacity of cables[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2013.
- [17] 刘畅. 电力电缆载流量与温度场计算软件设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- LIU Chang. Calculation software design on ampacity and temperature field of power cables[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [18] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [19] 梁永春, 赵静, 闫彩红. 沟槽电缆温度场和载流量的数值计算[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 3048-3053.
- LIANG Yongchun, ZHAO Jing, YAN Caihong. Numerical calculation of temperature field and ampacity of power cable in channel[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 3048-3053.
- [20] 刘刚, 雷鸣, 阮班义, 等. 考虑轴向传热的单芯电缆线芯温度实时计算模型研究[J]. 高电压技术, 2012, 38(8): 1877-1883.
- LIU Gang, LEI Ming, RUAN Banyi, et al. Model research of real-time calculation for single-core cable temperature considering axial heat transfer[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8): 1877-1883.
- [21] 彭超, 张宇娇, 秦威南. 基于有限体积法的超高压电缆接头绝缘性能研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(12): 3695-3701.

- cn/n/2014/0922/c337695-22392921. html.
- [15] 章 岑. 特高压GIS雷电冲击试验成功[N/OL]. 2015-08-20[2016-06-14]. http://www.js.sgcc.com.cn/html/main/col37/2015-08/24/20150824152018870801962_1.html.
ZHANG Cen. Lightning impulse voltage withstand test for UHV GIS gains success[N/OL]. 2015-08-20[2016-06-14]. http://www.js.sgcc.com.cn/html/main/col37/2015-08/24/20150824152018870801962_1.html.
- [16] 陆国俊, 李智宁, 熊 俊, 等. GIS现场冲击耐压试验装置: CN204330960U[P]. 2015-05-13.
LU Guojun, LI Zhining, XIONG Jun, et al. Testing equipment for field impulse voltage withstand test of GES: CN204330960U[P]. 2015-05-13.
- [17] 张崇兴, 任 明, 董 明, 等. 基于IGBT触发控制的感应式操作冲击电压产生技术[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2606-2613.
ZHANG Chongxing, REN Ming, DONG Ming, et al. Switching impulse generator based on IGBT triggering control and transformer induction[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2606-2613.
- [18] ZHAO Xuefeng, XIU Yao, GUO Zhifeng, et al. Characteristics and development mechanisms of partial discharge in SF₆ gas under impulse voltages[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(2): 668-674.
- [19] 张 亮, 车 斌, 韩旭涛, 等. 负极性振荡雷电冲击电压下SF₆尖板模型局部放电特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(4): 108-116.
ZHANG Liang, CHE Bin, HAN Xutao, et al. Partial discharge on SF₆ needle-plane defect under negative oscillating lightning impulse voltage[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(4): 108-116.
- [20] LIANG Jianfeng, ZHANG Liang, LI Junhao, et al. Study on oscillating switching impulse voltage generation for power transformer onsite test[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(5): 2223-2230.
- [21] 李兴旺, 卢启付, 吕 鸿, 等. 雷电冲击耐压过程中GIS局部放电特高频检测有效性研究[J]. 高压电器, 2013, 49(10): 72-76.
LI Xingwang, LU Qifu, LYU Hong, et al. GIS partial discharge detection via ultra-high frequency signal in lightning impulse process[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(10): 72-76.
- [22] High voltage test techniques Part 3: Definitions and requirements for on-site tests: IEC 60060-3 Ed.1.0—2006[S]. 2005.
- [23] 高电压试验技术 第3部分 现场试验的定义和要求: GB/T 16927.3—2010[S]. 2010.
High voltage test techniques—Part 3: Definitions and requirements for on-site testing: GB/T 16927.3—2010[S]. 2010.
- [24] 李继胜, 赵学风, 孙振权, 等. 电力设备现场耐压试验用振荡冲击波产生的仿真研究[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 54-56.
LI Jisheng, ZHAO Xuefeng, SUN Zhenquan, et al. The simulation study of oscillating impulse voltage for power equipment on-site testing[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 54-56.
- [26] 郭治锋, 赵学风, 顾朝敏, 等. 振荡冲击波发生电路的设计及其参数选取[J]. 变压器, 2010, 47(z1): 5-8.
GUO Zhifeng, ZHAO Xuefeng, GU Chaomin, et al. Design and parameters selection of oscillating impulse voltage generator circuit[J]. Transformer, 2010, 47(z1): 5-8.
- [26] MATSUMOTO S. Analysis and evaluation of waveform parameters for oscillating impulse voltage[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2007, 2(6): 651-656.
- [27] NISHIMURA N, MATSUMOTO S. 基于4次线性微分方程的雷电冲击试验波形分析[J]. 电网技术, 2009, 33(15): 93-99.
NISHIMURA N, MATSUMOTO S. Analysis of lightning impulse waveforms given by a fourth-order linear differential equation[J]. Power System Technology, 2009, 33(15): 93-99.

李 晓(1988—), 女, 工学硕士, 助理工程师, 主要从事高压试验技术方面的研究。

李军浩(1980—), 男, 工学博士, 副教授, 主要从事电气设备试验技术、故障检测与诊断及高电压绝缘等方面的教学工作。

(上接第237页)

- PENG Chao, ZHANG Yujiao, JIANG Weinan. Study on insulation performance of EHV power cable joint based on finite volume method[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(12): 3695-3701.
- [22] 郑雁翎. 电缆线路的电缆群载流量优化数值计算模型研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(11): 3760-3765.
ZHENG Yanling. Research on optimal numerical calculation model of cable groups ampacity in cable group[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(11): 3760-3765.

付明星(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力设备状态监测与故障诊断。

马宏忠(1962—), 男, 博士, 教授, 从事电力设备状态监测、故障诊断等方面的研究工作。

李盛群(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电气设备状态监测与故障诊断。