

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

庄小亮¹, 余兆荣², 牛海清¹, 孙广慧³, 游勇¹

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广东电网公司 生产技术部, 广东 广州 510600;

3. 广东电网公司佛山供电局, 广东 佛山 528000)

摘要: 为计算 10 kV 交联聚乙烯(XLPE)电缆周期负荷载流量, 开发了三芯电缆周期负荷载流量计算软件, 开展了直埋敷设不同日负载系数的三芯电缆周期负荷载流量试验。将试验所得的周期负荷载流量与软件计算结果进行对比, 验证了软件计算的正确性。利用软件计算结合载流量试验, 对日负载系数与周期负荷载流量的关系进行理论研究, 结果表明日负载系数越小, 周期负荷载流量越大。针对佛山地区典型负荷的 10 kV 电缆线路, 计算其 12 个月的周期负荷载流量系数。建议按周期负荷载流量控制电缆负荷电流的最大值, 可在保证电缆寿命的前提下, 提高电缆线路的输电能力。

关键词: 电力电缆; 日负载系数; 周期负荷载流量; 周期负荷载流量系数

中图分类号: TM 247

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.04.028

0 引言

地下电缆具有不占地面空间、受外界影响小、安全可靠和维护费用低等优点。因此, 交联聚乙烯(XLPE)电缆在城市电网中得到广泛应用。随着城市用电负荷的不断攀升, 需要新增电缆线路或提高原有线路的输送能力以满足供电需求。然而电缆造价高、投资大, 且城市地下管道密集, 在地价持续走高的情况下, 新增电缆线路异常困难^[1-3]。因此, 在现有基础上充分利用电缆的输送能力变得十分重要。

目前, 一般使用持续负荷载流量作为电力电缆负荷调度的依据, 而实际运行中电缆的负荷电流并非固定不变, 而是呈现周期性的变化, 且在某一个相对长的时间段(比如一个月)内日负荷曲线的形状变化不大。由于电缆的热时间常数较大, 电缆导体温度(即绝缘温度)的响应滞后于负荷的变化^[4]。在这种情况下, 采用持续负荷载流量作为电缆线路的电流峰值, 则全天内电缆的最高导体温度将小于 XLPE 电缆允许的长期工作温度(90℃), 造成输电线路载流能力的浪费^[5-6]。若根据周期负荷载流量来控制负荷, 既不影响电缆寿命, 又可以在不增加线路投资的情况下, 大幅提高电缆的输送能力^[7-8]。

IEC60853 给出了周期负荷载流量系数及周期性负荷载流量的计算方法^[9-10], 其条件是在日周期内导体温度达到但不超过电缆绝缘允许的最高工作温度。为研究 10 kV 配电电缆周期负荷载流量, 本文开发了三芯电缆周期负荷载流量计算软件; 开展了水泥槽盒直埋敷设 10 kV 配电电缆周期负荷载流量试验; 利用软件计算结合试验分析, 研究了日负载系数

与电缆周期负荷载流量及其系数的关系; 针对典型负荷, 计算典型电缆线路 12 个月的周期负荷载流量系数。

1 周期负荷三芯电缆载流量试验

1.1 试验电缆及现场

笔者所在项目组在佛山市建立了载流量试验场, 开展了水泥槽盒直埋敷设 10 kV XLPE 三芯电缆周期负荷载流量试验, 图 1 为敷设示意图, 图中各尺寸单位均为 mm。试验电缆是长度为 20 m 的 YJV22-8.7/15-3×240 XPLE 钢带铠装三芯电缆。

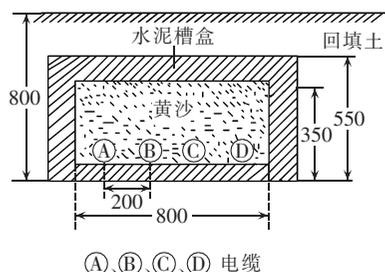


图 1 水泥槽盒直埋敷设示意图

Fig.1 Schematic diagram of cable directly buried in cement trunk

1.2 日负荷曲线的选取

1.2.1 典型负荷日负载系数分析

本项目针对佛山地区居民、工业、商业和混合用电 4 种典型负荷性质, 选取了 10 条线路, 针对 2009 年 1 月到 2011 年 9 月这 33 个月的负荷, 计算每条线路每个月的日负载系数。考虑到每月中每天的日负荷曲线基本相同, 以最大负荷日的负荷曲线作为该月的典型负荷曲线。其中日负载系数(或称日负荷因数) L_f 定义^[11]如下:

$$L_f = \frac{1}{24 I_{\max}} \int_0^{24} I(t) dt \quad (1)$$

其中, I_{\max} 为该日最大负荷电流; $I(t)$ 为日负荷曲线的电流值。

考虑到负荷调度一般每 15 min 改变一次电流值, 为了使得试验能够更加贴近实际调度运行状况, 每条日负荷曲线数据以 15 min 为步长来采集, 每条线路每天就会有 96 个数据。将式(1)离散化后可以改写为:

$$L_f = \sum_{t=1}^{96} I(t) / (96 I_{\max}) \quad (2)$$

在计算出每条线路 33 个月的日负荷曲线的日负载系数后, 对计算所得到的结果进行统计分析, 研究其分布规律, 找出其比例最大的日负载系数。

1.2.2 典型日负荷曲线的确定

根据典型负荷性质的日负载系数的分布规律, 选取佛山地区日负载系数为 0.5、0.7、0.8 和 0.9 的典型日负荷曲线, 来控制加载在试验电缆上的周期负荷电流。所选取的典型日负荷曲线如图 2 所示。由图 2 可见, 日负载系数为 0.9 和 0.8 的日负荷曲线幅值较大, 相对平稳, 峰谷差小; 日负载系数为 0.7 和 0.5 的日负荷曲线峰谷差大, 表现出较强的时间规律。

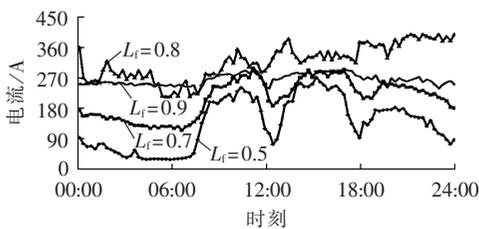


图 2 所选定的典型日负荷曲线

Fig.2 Selected typical daily load curves

1.3 直埋敷设三芯电缆周期负载流量试验

水泥槽盒直埋敷设条件下, 本文开展了日负载系数分别为 0.5、0.7、0.8、0.9 的单回路周期负载流量试验和单回路持续负荷(即日负载系数为 1.0)载流量试验。

根据选取的负荷曲线, 按照预先计算的初值给电缆施加周期负荷电流, 试验过程中记录电缆导体、外皮温度以及环境温度。根据导体温度的监测情况, 保持负荷曲线形状, 适当调整所加电流的峰值, 直至电缆导体温度峰值达到 89~91℃ 的准稳态(条件是前后 2 个周期电流增幅不超过 5%, 且导体温度波动不超过 2℃), 停止试验^[12-16]。试验最后一个周期电流的峰值即为本次试验的周期负载流量。由于篇幅所限, 本文只给出日负载系数为 0.7 的单回路周期负载流量试验过程如图 3 所示, 其他试验过程与之类似。不同日负载系数周期负载流量试验结果见表 1。

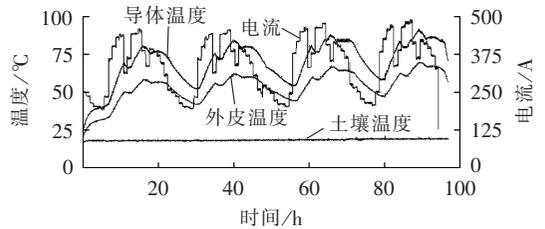


图 3 日负载系数为 0.7 时的单回路周期负载流量试验结果

Fig.3 Results of cyclic ampacity experiment for single-loop cable when daily load factor is 0.7

表 1 不同日负载系数的单回路周期负载流量试验结果
Tab.1 Results of single-loop cable cyclic ampacity experiments for different daily load factors

L_f	外加电流 最大值周期 负载流量/A	导体最高 温度/°C	外皮最高 温度/°C	环境 温度/°C	土壤 热阻系数/ (K·m·W ⁻¹)
0.5	528.3	92.0	73.7	18.3	1.71
0.7	487.9	90.7	73.5	18.3	1.68
0.8	545.1	89.7	72.4	19.9	1.15
0.9	531.1	89.5	72.4	18.7	1.30
1.0	380.0	91.1	81.7	23.1	2.41

2 试验结果与软件计算结果的对比分析

2.1 周期负载流量的计算

根据 IEC60853, 电缆周期负载流量(以 1 d 为周期的电流峰值)等于周期负载流量系数 M 乘以持续负载流量 $I^{[10]}$ 。持续负载流量 I 和周期负载流量系数 M 的计算如式(3)和(4)所示。

$$I = \sqrt{\frac{\theta_c - \theta_0 - W_d [0.5 T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{RT_1 + nR(1 + \lambda_1)T_2 + nR(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)}} \quad (3)$$

$$M = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=0}^5 Y_i \left[\frac{\theta_R(i+1)}{\theta_R(\infty)} - \frac{\theta_R(i)}{\theta_R(\infty)} \right] + \mu \left[1 - \frac{\theta_R(6)}{\theta_R(\infty)} \right]}} \quad (4)$$

其中, θ_c 、 θ_0 分别为导体温度、环境温度; T_1 、 T_2 、 T_3 及 T_4 分别为绝缘层热阻、内衬层热阻、外护层热阻及周围媒质热阻; n 为电缆芯数; R 为导体的交流电阻; W_d 为绝缘介质损耗; λ_1 、 λ_2 分别为金属屏蔽层(金属护套)、铠装层相对导体总损耗的比率; Y_i 为最高温度时刻之前 i 小时对应时刻的纵坐标^[10]; $\theta_R(i)/\theta_R(\infty)$ 为各时间段温升与额定电流时稳态温升的比率; μ 为周期负荷-损耗因数。

本文根据 IEC60853 中的计算方法, 开发了周期负荷三芯电缆载流量计算软件。

2.2 试验环境下周期负载流量试验结果与计算结果的对比

根据周期负载流量控制加载负荷曲线上的最大值, 可以使电缆导体温度在 1 d 的周期内达到但不超过电缆绝缘允许的最高工作温度。

本文根据上述不同日负载系数三芯电缆周期负载流量试验的条件, 利用软件进行计算, 对比分析了软件计算结果与试验结果, 如表 2 所示。

表 2 三芯电缆周期荷载流量试验与计算结果的对比

Tab.2 Comparison of three-core cable cyclic ampacity between experimental and calculated results

L_f	试验值/A	计算值/A	误差/%
0.5	528	535	1.3
0.7	488	487	-0.2
0.8	545	563	3.3
0.9	531	512	-3.6
1.0	380	371	-2.4

由表 2 可知,不同日负载系数三芯电缆周期荷载流量的计算值与试验结果最大误差为 -3.6%。

2.3 标准环境下周期荷载流量试验结果与计算结果的对比

由于每次试验周期较长,每次试验环境温度和媒质等值热阻都有所不同。为使试验数据具有可比性,将试验结果按照文献[17]中给出的直埋敷设电缆载流量计算标准归算至同一标准环境下,即环境温度为 30℃、土壤热阻系数为 1.2 K·m/W。标准环境下的试验结果由试验值乘以相应的温度校正系数和土壤热阻校正系数得到。

标准环境下水泥槽盒直埋敷设周期荷载流量试验结果与软件计算结果对比如图 4 所示,可以看出周期荷载流量的试验结果与计算结果相差不大。

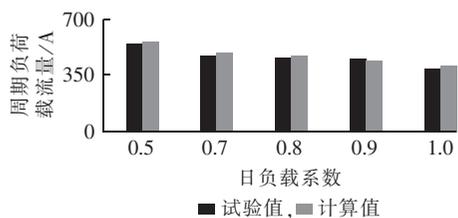


图 4 不同日负载系数周期荷载流量试验与计算结果的对比

Fig.4 Comparison of cyclic ampacity between experimental and calculated results for different daily load factors

热电偶敷设工艺造成接触电阻的不同、热电偶敷设在电缆圆周的位置不同会引起测量的误差,同时温度测量系统本身会引入测量误差。考虑到理论计算和试验过程中产生的误差,软件计算的结果是正确的。

3 日负载系数与周期荷载流量及其系数的关系

由图 4 可知随着日负载系数的增加,周期荷载流量减小,但大于持续荷载流量,即按照周期荷载流量控制负荷,可以提高电缆输送能力。

3.1 不同日负载系数对周期荷载流量的影响程度

利用验证后的软件计算标准环境下(环境温度为 30℃、土壤热阻系数为 1.2 K·m/W)不同日负载系数对应的周期荷载流量以及周期荷载流量系数 M ,结果如表 3 所示。

表 3 不同日负载系数对应的周期荷载流量系数
Tab.3 Cyclic load coefficients corresponding to different daily load factors

L_f	周期荷载流量/A	M
0.5	621	1.34
0.7	554	1.20
0.8	528	1.14
0.9	495	1.07
1.0	462	1.00

由表 3 看出,当日负载系数为 0.5 时,周期荷载流量系数为 1.34,即按照周期荷载流量控制负荷的加载,负荷峰值相比持续负荷将提高 34%;而日负载系数为 0.7 时,其周期荷载流量将比持续荷载流量高 20%;日负载系数为 0.8 时,其周期荷载流量将比持续荷载流量高 14%;日负载系数为 0.9 时,周期荷载流量系数只有 1.07,其周期荷载流量只比持续荷载流量高 7%。可见,日负载系数越小,电缆输送能力提高的空间越大。

3.2 负荷曲线形状对周期荷载流量系数 M 的影响

选择日负载系数为 0.5 的 3 类不同形状负荷曲线如图 5 所示。图中 3 条曲线形状相同,而负荷电流幅值不同。计算结果表明日负载系数为 0.5 的 3 条负荷曲线对应的周期荷载流量系数 M 均为 1.34,即保持同一日负载系数不变,同比例改变负荷电流幅值,周期荷载流量系数 M 不发生变化。这说明周期荷载流量与日负载系数的大小有关,而与负荷电流幅值无关。

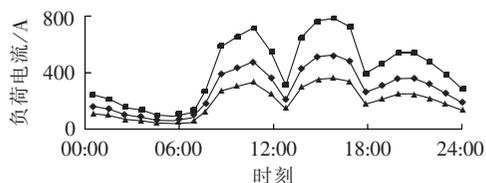


图 5 日负载系数为 0.5 时的不同负荷曲线

Fig.5 Load curves corresponding to $L_f=0.5$

4 不同负荷类型 10 kV 电缆线路的周期荷载流量系数

为研究不同性质的负荷(居民、工业、商业、混合用电等)的典型周期荷载流量系数,本文选择佛山地区 4 条有代表性的典型 10 kV 配电电缆线路,按照 2010 年的日负荷曲线,计算其直埋敷设单回路周期荷载流量系数,结果如表 4 所示。

由表 4 中可以看出,在 1 a 的时间内,居民和商业负荷的日负载系数多在 0.5~0.6 范围内,对应的周期荷载流量系数较大,在 1.25~1.35 之间;而工业负荷的日负载系数在 0.9 左右,其周期荷载流量系数较小,在 1.07 左右;混合负荷介于两者之间,其日负载系数在 0.7~0.8 范围内,周期荷载流量系数在

表4 负荷性质不同的10 kV 电缆线路2010年
日负载系数及周期负载流量系数Tab.4 M and L_f of 10 kV cable lines with
different load types in 2010

时间	居民负荷		工业负荷		商业负荷		混合负荷	
	L_f	M	L_f	M	L_f	M	L_f	M
1月	—	—	0.92	1.06	0.62	1.25	0.73	1.21
2月	—	—	0.88	1.09	0.53	1.34	0.74	1.20
3月	0.59	1.30	0.92	1.06	0.46	1.43	0.64	1.30
4月	0.59	1.30	0.92	1.06	0.48	1.41	0.73	1.21
5月	0.55	1.36	0.90	1.07	0.57	1.29	0.84	1.12
6月	0.60	1.31	0.87	1.10	0.51	1.36	0.81	1.14
7月	0.57	1.35	0.90	1.07	0.61	1.26	0.81	1.14
8月	0.63	1.29	0.89	1.08	0.63	1.25	0.80	1.15
9月	0.58	1.31	0.88	1.09	0.55	1.31	0.82	1.13
10月	0.59	1.30	0.89	1.08	0.54	1.32	0.80	1.15
11月	0.54	1.37	0.89	1.08	0.50	1.37	—	—
12月	0.56	1.34	0.92	1.06	0.49	1.38	0.74	1.20

1.15~1.20 之间。这是因为工业负荷在1 d内基本不变,峰谷差小,日负载系数大;而居民负荷和商业负荷与人的日常生活活动有较大相关性,负荷在1 d内波动大,日负载系数小。

日负荷曲线越平稳,周期负载流量系数越小,其周期性过负荷能力越弱;反之,峰谷差越大,日负载系数越小,则周期负载流量系数越大,其周期性过负荷能力越强。这也说明居民和商业负荷有较大的周期性过负荷能力。建议电力部门在负荷调度时,充分利用周期负载流量系数,在保证电缆寿命的前提下,提高电缆输送能力。

5 结论

本文开展了直埋敷设不同日负载系数的三芯电缆周期负载流量试验,验证了周期负载流量计算软件的正确性。利用软件计算结合周期负载流量试验,对三芯电缆周期负载流量与其日负载系数的关系进行研究,得到以下结论。

a. 电缆周期负载流量比持续负载流量大,即按周期负载流量控制负荷的最大值,可在保证电缆寿命的前提下提高电缆的输送能力。

b. 日负载系数越小,按照周期负载流量控制负荷,电缆输送能力提高的空间越大。

c. 日负载系数相同而电流幅值不同的负荷曲线,其周期负载流量系数相同。

d. 负荷性质决定了日负载系数的大小,进而决定了周期负载流量系数;日负荷曲线越平稳,周期负载流量系数越小,其周期性过负荷能力越弱。

建议电力部门在调度负荷(尤其是居民负荷和商业负荷)时,充分利用周期负载流量系数,在保证电缆寿命的前提下,提高电缆输送能力。

参考文献:

[1] 杨文英. 电力电缆温度在线监测系统的研究[D]. 吉林:东北电

力大学,2008.

YANG Wenyong. Studying on the on-line temperature monitoring system for power cable[D]. Jilin:Northeast Dianli University,2008.

[2] 叶鸿声,龚大卫,黄伟中,等. 提高导线允许温度的可行性和工程实践[J]. 电力建设,2004,25(9):1-7.

YE Hongsheng,GONG Dawei,HUANG Weizhong,et al. Feasibility study on increasing conductor allowable temperature and engineering practice[J]. Electric Power Construction,2004,25(9):1-7.

[3] 王有元,陈仁刚,陈伟根,等. 缆沟敷设方式下电缆载流量计算及其影响因素分析[J]. 电力自动化设备,2010,30(11):24-29.

WANG Youyuan,CHEN Rengang,CHEN Weigen,et al. Calculation of trench laying cable ampacity and its influencing factors [J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(11):24-29.

[4] 刘刚,雷成华. 提高单芯电缆短时负载流量的试验分析[J]. 高电压技术,2011,37(5):1290-1292.

LIU Gang,LEI Chenghua. Experimental analysis on increasing temporary ampacity of single-core cable[J]. High Voltage Engineering,2011,37(5):1290-1292.

[5] de LOEN F,GEORGE J. Effects of back filling on cable ampacity analyzed with the finite element method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2008,23(2):537-543.

[6] 曹惠玲,王增强,李雯婧,等. 坐标组合法对直埋电缆与土壤界面温度场的数值计算[J]. 电工技术学报,2003,18(3):59-63.

CAO Huiling,WANG Zengqiang,LI Wenjing,et al. Numerical computation of temperature distribution of underground cables and soil with combinatorial coordinates[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2003,18(3):59-63.

[7] 殷潇波. 110 kV 以上高压电缆敷设周期性载流量研究[D]. 上海:上海交通大学,2009.

YIN Xiaobo. The study of calculation of the cyclic current rating for 110 kV or above high voltage cables[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University,2009.

[8] 桑纪明,黄逸明,孙正华. 土壤敷设电缆周期负载流量[J]. 电线电缆,1984(4):41-45.

SANG Jiming,HUANG Yiming,SUN Zhenghua. The cyclic current rating of buried cable[J]. Electric Wire & Cable,1984(4):41-45.

[9] IEC. IEC Std60853 Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables[S]. [S.I.]:IEC,1994.

[10] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003:138-146.

[11] ANDERS G J. Rating of electric power cables in unfavorable environment[M]. [S.I.]:Wiley-IEEE Press,2000:211-245.

[12] 赵健康,姜芸,杨黎明,等. 中低压交联电缆密集敷设载流量试验研究[J]. 高电压技术,2005,31(10):55-58.

ZHAO Jiankang,JIANG Yun,YANG Liming,et al. Experimental research for the current rating of medium and low voltage XLPE cables in cluster laying[J]. High Voltage Engineering,2005,31(10):55-58.

[13] 牛海清,周鑫. 外皮温度监测的单芯电缆暂态温度计算与实验[J]. 高电压技术,2009,35(9):2138-2143.

NIU Haiqing,ZHOU Xin. Calculation and experiment of transient temperatures of single-core cables on jacket temperature monitoring[J]. High Voltage Engineering,2009,35(9):2138-2143.

[14] 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.

[15] 郑雁翎. 10 kV XLPE 电力电缆稳态温度场和额定载流量的计算[J]. 宝鸡文理学院学报:自然科学版, 2009, 29(2):59-62.

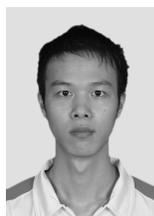
ZHENG Yanling. The calculation of the steady-state temperature field and rated ampacity of 10 kV XLPE power cables [J]. Journal of Baoji University of Arts and Sciences: Natural Science Edition, 2009, 29(2):59-62.

[16] 汤毅, 王晓兵, 陈燕萍, 等. 10 kV 三芯交联电缆载流量的试验研究[J]. 高电压技术, 2009, 35(11):2807-2811.

TANG Yi, WANG Xiaobing, CHEN Yanping, et al. Experimental research on the current rating of 10 kV three-core XLPE cables[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(11):2807-2811.

[17] 中国电力工程顾问集团西南电力设计院. GB50217—2007 电力工程电缆设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2007.

作者简介:



庄小亮

庄小亮(1988-), 男, 四川苍溪人, 硕士研究生, 主要从事电气设备外绝缘方面的研究工作(E-mail: xl.zhuang@163.com);

余兆荣(1973-), 男, 广东广州人, 高级工程师, 主要从事配电运行管理工作;

牛海清(1969-), 女, 陕西富平人, 副教授, 博士, 主要从事高压输电线路及高压电气设备方面的研究工作(E-mail: niuhq@scut.edu.cn)。

Experimental research of relationship between daily load factor and cyclic ampacity of 10 kV XLPE cable

ZHUANG Xiaoliang¹, YU Zhaorong², NIU Haiqing³, SUN Guanghui³, YOU Yong¹

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Department of Production Technology, Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510600, China;

3. Foshan Power Bureau of Guangdong Power Grid Corporation, Foshan 528000, China)

Abstract: A software package for calculating the cyclic ampacity of 10 kV XLPE three-core cable is developed and the cyclic ampacity experiments of directly buried three-core cable are carried out for different load factors. The comparison of cyclic ampacity between experimental and calculated results verifies the validity of the developed software. The relationship between daily load factor and cyclic ampacity is theoretically researched and results show that, the smaller the daily load factor is, the bigger the cyclic ampacity will be. The cyclic load coefficients of 10 kV cable lines in Foshan with typical load are calculated for 12 months. It is suggested that, the cable load should be controlled by the cyclic ampacity to enhance its transmission capacity while its lifetime is guaranteed.

Key words: electric cables; daily load factor; cyclic ampacity; cyclic load coefficient

撤稿声明

本社于 2014 年 3 月 10 日收到读者潘晓春来邮, 反映《电力自动化设备》期刊 2013 年第 9 期第 119~122, 129 页刊登的论文《矩函数在风速 Weibull 分布参数估计中的应用》(作者: 郝晓弘、王海鹏等), 其内容涉嫌抄袭发表在《现代电力》期刊 2007 年第 5 期第 12~18 页上的《基于矩函数的风速概率分布参数估计方法》一文(作者: 潘晓春)。

本社高度重视, 迅速召开紧急会议并致函《矩函数在风速 Weibull 分布参数估计中的应用》的第一作者郝晓弘, 要求对此进行解释, 其回函“同意关于事件是学术不端行为的认定”, 并对潘晓春和《电力自动化设备》杂志社致歉。

在此, 本社对《矩函数在风速 Weibull 分布参数估计中的应用》一文正式撤稿, 请所有读者和机构等勿再以任何形式引用或传播该文。同时, 本社已删除该文在《电力自动化设备》网站上的相关信息, 并协调“中国知网”、“万方数据”已将该文撤除。

本社在此重申, 我们绝不接受并强烈谴责任何形式的学术不端行为。对于编审工作的失察, 我们在此向潘晓春及广大读者诚挚致歉, 并将以此为鉴, 进一步加强论文审核工作。

《电力自动化设备》杂志社

2014 年 3 月