

林锦荣¹ 武云发¹ 廖如超² 陈郑淦哲¹

基于 K-Means 算法的架空输电线路载流量计算

摘要

针对边界条件取值过于保守导致架空输电线路载流量过小而无法充分发挥输电线路的载流能力的问题,本文提出了一种基于 K-Means 算法的架空输电线路载流量计算方法.首先对历史气象数据进行统计分析,然后根据每月气象数据的相似性,使用 K-Means 算法划分时段,并选取各时段最为合适的边界条件,最后基于选定的边界条件使用摩根公式进行仿真计算.通过这种方法,可以在保证线路运行安全的条件下挖掘输电线路的隐性输送能力.

关键词

载流量;K-Means 算法;边界条件;架空输电线路

中图分类号 TM75

文献标志码 A

收稿日期 2020-09-10

资助项目 广东电网有限责任公司科技项目 (GDKJXM20184755)

作者简介

林锦荣,男,硕士生,研究方向为输电线路智能巡检技术.303358268@qq.com

武云发(通信作者),男,博士生,研究方向为输电线路智能技术.wu_yunfa@qq.com

¹ 广东工业大学 自动化学院,广州,510006

² 广东电网责任有限公司 机巡管理中心,广州,510000

0 引言

载流量作为架空输电线路载流能力的重要标准,其取值的大小决定了架空输电线路动态增容的合理性,对电力调度和建设极为重要.边界条件是载流量计算过程中的重要参数,其取值是否合理决定了载流量计算结果的准确性^[1-2].

目前我国在架空输电线路载流量计算时,普遍使用的是《110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范》摩根公式^[3].同时,边界条件作为载流量计算的重要影响参数,目前我国载流量计算推荐的边界环境风速为 0.5 m/s,环境温度为 35 ℃.由于在载流量计算过程中使用的边界条件过于保守,导致无法充分发挥输电线路的载流量能力^[4-5].基于以上问题,文献[6]提出了一种载流量计算过程中边界条件的统计方法,通过传统的数学统计方法对气象数据进行统计并选定新的边界条件;文献[7]提出了一种气候条件对载流量影响的分析方法,得出对载流量有影响的因素由大到小依次为环境风速、环境温度以及日照强度.

随着人工智能时代的到来,统计机器学习方法被广泛应用于各个领域,成为人们不可或缺的数据分析手段^[8].其中,聚类算法在数据挖掘领域起着至关重要的作用,而在聚类算法中较为经典的算法有 K-Means^[9]、special clustering^[10]等.其中 K-Means 由于其高效、易于实施的特点,到目前为止仍被广泛地应用于各个领域.

本文在传统的载流量计算方法的基础上,对载流量计算的边界条件进行重新选定.以广州地区近 10 年的气象数据为分析对象,对其进行筛选、预处理,根据各月气象数据的相似性,使用 K-Means 算法划分时段,并选取最为合适的边界条件进行载流量计算,通过实例分析验证本文提出的新方法的有效性^[11].本文的主要贡献如下:1)基于 K-Means 算法建立了时段划分与边界条件选定的数学模型;2)引入了极限边界条件载流量进行分析对比,通过安全裕度的计算解决了新选定边界条件下载流量计算结果的合理性问题.

1 气象数据分析

由于我国的地域辽阔,同一时间内由于经纬度的不同,气象条件差异较大.因此,非常有必要对特定地区的气象条件进行统计分析,得出该地区最为合适的边界条件.本文对广州地区 2011—2019 年的气象数据进行统计分析,主要统计的气象数据包括环境温度以及环境风速.

1.1 环境温度分析

环境温度的统计流程如下:

1) 选取每日的最高气温作为统计对象,逐年统计出每个月的平均日最高气温(简称月平均气温)和每个月的最高气温(简称月最高气温):

$$\bar{t}_i = \frac{\sum_{j=1}^n t_{ij}}{n}, \quad (1)$$

$$t_{imax} = \max_{j \leq n} \{t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{ij}\}, \quad (2)$$

其中, \bar{t}_i 为每个月的平均日最高气温, t_{imax} 为某个月的最高气温, i 为月份, n 为每个月的天数, t_{ij} 为 i 月 j 日的最高气温.

2) 综合考虑多年来每个月的平均日最高气温和最高气温,计算出多年平均月平均气温、多年最高月平均气温、多年平均月最高气温、多年月最高气温:

$$\bar{t}_y = \frac{\sum_{k=1}^m \bar{t}_{ki}}{m}, \quad (3)$$

$$t_{ymax} = \max \{\bar{t}_{1i}, \bar{t}_{2i}, \dots, \bar{t}_{mi}\}, \quad (4)$$

$$\bar{t}_{max} = \frac{\sum_{k=1}^m t_{kimax}}{m}, \quad (5)$$

$$t_{ymax} = \max \{t_{1imax}, t_{2imax}, \dots, t_{mimax}\}, \quad (6)$$

其中, \bar{t}_y 为多年平均月平均气温, m 为综合考虑的年数, \bar{t}_{ki} 为第 k 年 i 月的平均日最高气温, t_{ymax} 为多年最高月平均气温, \bar{t}_{ymax} 为多年平均月最高气温, t_{kimax} 为 k 年 i 月的最高气温, t_{ymax} 为多年月最高气温. 数据统计结果如图 1 所示.

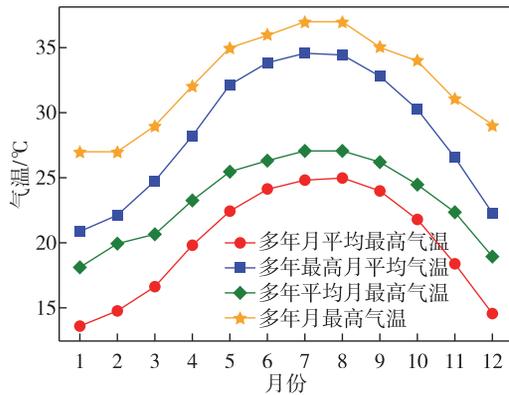


图 1 广州地区近十年气温变化统计

Fig. 1 Monthly changes of temperature in Guangzhou in recent 10 years

1.2 环境风速分析

环境风速的统计流程如下:

1) 选取每日的平均风速作为计算值,计算每个月平均风速:

$$\bar{V}_i = \frac{\sum_{j=1}^n V_{ij}}{n}, \quad (7)$$

其中 V_{ij} 为第 i 月第 j 日的平均风速, n 为每个月的天数, \bar{V}_i 为 i 月的平均风速.

2) 综合考虑多年来每个月的平均风速,计算出多年平均月平均风速、多年最高月平均风速、多年最低月平均风速:

$$\bar{V}_y = \frac{\sum_{k=1}^m \bar{V}_{ki}}{m}, \quad (8)$$

$$V_{ymax} = \max \{\bar{V}_{1i}, \bar{V}_{2i}, \dots, \bar{V}_{mi}\}, \quad (9)$$

$$V_{ymin} = \min \{\bar{V}_{1i}, \bar{V}_{2i}, \dots, \bar{V}_{mi}\}, \quad (10)$$

其中 m 为综合考虑的年数, \bar{V}_{ij} 为多年平均月平均风速, V_{ymax} 为多年最高月平均风速, V_{ymin} 为多年最低月平均风速, \bar{V}_{mi} 为第 m 年 i 月的平均风速. 数据统计结果如图 2 所示.

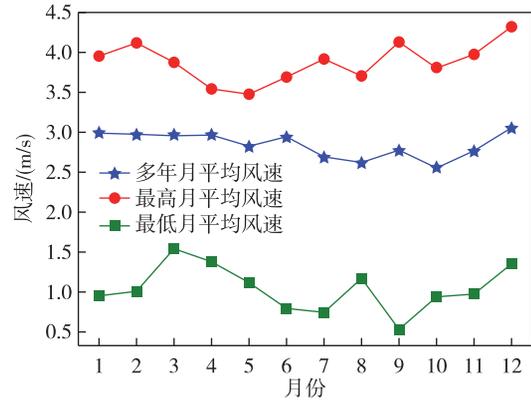


图 2 广州地区近十年风速变化统计

Fig. 2 Monthly changes of wind speed in Guangzhou in recent 10 years

2 基于 K-Means 算法的气象聚类

K-Means 算法是基于样本集合来划分的一种聚类算法. 将 12 个月的气象数据看作一个数据集, 共包含 12 个样本. 通过 K-Means 算法确定簇 k 的个数, 再将 12 个样本划分到 k 个簇中, 使每个样本到所属簇的中心的距离最小^[12].

2.1 基于轮廓系数的k值确定

通过轮廓系数计算,确定最佳的划分簇k的值.单个样本的轮廓系数公式如下:

$$s = \frac{b - a}{\max(a, b)} \quad (11)$$

进一步可解析为

$$s = \begin{cases} 1 - \frac{a}{b}, & a < b, \\ 0, & a = b, \\ \frac{b}{a} - 1, & a > b, \end{cases} \quad (12)$$

其中:*a*为样本与其自身所在的簇中的其他样本的相似度,等于样本与同一簇中所有其他点之间的平均距离;*b*为样本与其他簇中的样本相似度,等于样本与下一个最近的簇中所有点之间的距离.根据聚类算法遵循簇内样本差异尽可能小、簇外样本差异尽可能大的原则,由式(12)可知每个样本的轮廓系数的范围是(-1,1),且越接近1越好.因此,当选择不同的*k*值时,如果整个数据集的平均轮廓系数越接近1,则聚类效果越好,*k*的值越合适.

把一年12个月的数据看作一个数据集,进行轮廓系数计算,仿真结果(*k*=3)如图3所示.

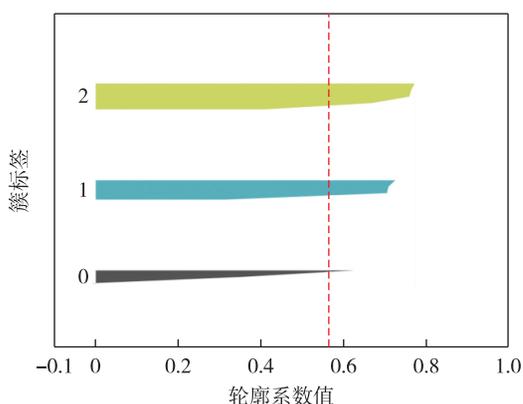


图3 轮廓系数计算仿真结果(*k*=3)

Fig.3 Simulation of contour coefficient calculation(*k*=3)

由仿真结果可知,当*k*的数值选择为3时,轮廓

系数最接近1,效果最好.因此,广州地区一年12个月的气象条件划分为3个时段最为合适,分别命名为高温月份、低温月份和其他月份.

2.2 基于K-Means算法的气象聚类

对于一个簇来说,所有样本点到质心的距离之和越小,就可以认为这个簇中的样本越相似,簇内差异越小.使用K-Means算法将12个月份样本聚类到高温月份、低温月份和其他月份3个簇中.具体步骤如下:

步骤1.随机选择3个样本点作为簇的中心.*t*=0,簇中心集合为

$$m^{(0)} = (m_1^{(0)}, m_2^{(0)}, m_3^{(0)}). \quad (13)$$

步骤2.计算每个样本点到簇中心的距离,将每个样本点派到与其最近的簇中.距离计算量度使用欧几里得距离:

$$d_{ij} = \left(\sum_{k=1}^m |x_{ki} - x_{kj}|^2 \right)^{\frac{1}{2}}. \quad (14)$$

步骤3.计算各个簇的均值得到新的簇中心集合:

$$m_l = \frac{1}{n_{l c(i)=l}} \sum x_i, \quad l = 1, 2, 3, \quad (15)$$

$$m^{(t+1)} = (m_1^{(t+1)}, m_2^{(t+1)}, m_3^{(t+1)}). \quad (16)$$

步骤4.重复步骤2、步骤3使目标函数达到收敛为止,输出每个样本所属的簇.目标函数如下式所示:

$$\arg \min \sum_{i=1}^k \sum_{c(i) \in l} \|x - m_l\|^2. \quad (17)$$

当目标函数收敛后,共包含3个簇,簇标签分别为高温月份、低温月份和其他月份.通过对每个样本点进行欧几里得距离计算,可得出每个样本到对应簇中心的距离,以及每个样本所属的簇标签.其中,高温月份包含5月、6月、7月、8月、9月共5个月份,低温月份包含12月、1月、2月、3月共4个月份,其他月份共包含4月、10月、11月共3个月份.其中每个簇的中心对应数值如表1所示.

因此,从表1数据可得,在高温月份时间段内最

表1 簇中心样本数据汇总
Table 1 Summary of cluster center data

月份	平均月平均气温/℃	最高月平均气温/℃	平均月最高气温/℃	最高气温/℃	平均月平均风速/(m/s)	最高月平均风速/(m/s)	最低月平均风速/(m/s)
高温	24.09	33.57	26.43	36.00	2.76	3.78	0.86
低温	14.84	22.49	19.41	28.00	2.99	4.06	1.21
其他	20.01	28.37	23.36	32.33	2.75	3.77	1.09

高温为 36 ℃,最低平均风速为 0.86 m/s;在低温月份时间段内最高温度为 28 ℃,最低平均风速为 1.21 m/s;在其他月份时间段内最高温度为 32.33 ℃,最低平均风速为 1.09 m/s.由于以上边界条件的取值是根据簇样本中心的极限范围进行选取的,因此把上述边界条件定义为对应时段下可获取的极限边界条件.

3 基于选定边界条件下的载流量计算

3.1 边界条件选定

在实际工程中,需要考虑一定的安全裕度以防止载流量设置过高而产生故障.在考虑一定安全裕度的情况下,高温月份时间段内,环境温度的边界值设置为 40 ℃,环境风速的边界值设置为 0.8 m/s;在低温月份时间段内,环境温度的边界值设置为 30 ℃,环境风速的边界值设置为 1.2 m/s;在其他月份时间段内,环境温度的边界值设置为 35 ℃,环境风速的边界值设置为 1.0 m/s.因此,在一定安全裕度情况下的环境温度和风速作为最终选定的边界条件.边界条件的对比如表 2 所示.

3.2 载流量计算

经过对广州地区气象数据的统计分析,并最终选定高温月份、低温月份以及其他月份对应环境温度以及环境风速的边界值.边界条件选定后,根据摩根公式进行载流量的计算^[13-14].

载流量计算选用我国标准 DL/T 5092 中的摩根公式^[15]:

$$I_{\max} = \sqrt{(W_R + W_F - W_S)/R'_l}, \quad (18)$$

式中: I_{\max} 为输电线路载流量(A); W_R 为单位长度导线的辐射散热功率; W_F 为单位长度导线的对流散热功率; W_S 为单位长度导线的日照吸热功率; R'_l 为导线的交流电阻.

辐射散热功率 W_R 的计算式:

$$W_R = \pi D E_1 S_1 [(t + t_a + 273)^4 - (t_a + 273)^4], \quad (19)$$

式中: D 为导线外径; E_1 为导线表面的辐射散热系数,光亮的新线为 0.23 ~ 0.43,旧线或涂黑色防腐剂的线

为 0.90 ~ 0.95; S_1 为斯特凡-包尔兹曼常数,为 5.67×10^{-8} ; t 为导线表面的平均温升, t_a 为环境温度.

对流散热功率 W_F 的计算式:

$$W_F = 0.57 \pi \lambda_f t R e^{0.485}, \quad (20)$$

式中: λ_f 为导线表面空气层的传热系数, $\lambda_f = 2.42 \times 10^{-2} + 7(t_a + t/2) \times 10^{-5}$; Re 为雷诺数, $Re = VD/v$, 其中 $v = 1.32 \times 10^5 + 9.6(t_a + t/2) \times 10^{-8}$, V 为环境风速, v 为导线表面空气层的运动黏度.

日照吸热功率 W_S :

$$W_S = \alpha_s J_s D, \quad (21)$$

式中: α_s 为导线表面的吸热系数,光亮的新线为 0.35 ~ 0.46,旧线或涂黑色防腐剂的线为 0.9 ~ 0.95; J_s 为日光对导线的日照强度,当天晴、日光直射导线时,可采用 1 000 W/m².

交流电阻 R'_l :

$$R_l = R_{20} [1 + \alpha_{20}(t - 20)], \quad (22)$$

$$R'_l = \lambda_{am} R_l, \quad (23)$$

其中: α_{20} 为 20 ℃ 时电阻温度系数; t 为导线最大允许工作温度; R_{20} 为 20 ℃ 时导线的直流电阻; λ_{am} 为交直流电阻比.

4 仿真分析

根据广州地区最终选定的边界条件进行载流量计算,其中高温月份(5月、6月、7月、8月、9月)环境温度 40 ℃、风速 0.8 m/s;低温月份(12月、1月、2月、3月)环境温度 30 ℃、风速 1.2 m/s;其他月份(4月、10月、11月)环境温度取 35 ℃、风速 1.0 m/s.在选定的边界条件下计算所得载流量与原始载流量和极限边界条件下的载流量进行对比分析^[16-18],结果如表 3 所示.

表 3 计算结果表明:相对于原始载流量,选定边界条件下的载流量在低温月份以及其他月份时间段内有明显的提升空间.同时,相对于极限边界条件载流量,能保留一定的安全裕度.以 LGJ-630/45 导线为例进行分析,不同时段下 3 种载流量的仿真对比如图 4 所示.

表 2 边界条件对比分析

Table 2 Comparison of boundary conditions

边界条件	原始边界条件	极限边界条件			选定边界条件		
		高温月份	低温月份	其他月份	高温月份	低温月份	其他月份
环境温度/℃	35	36	28	32.33	40	30	35
环境风速/(m/s)	0.5	0.86	1.21	1.09	0.8	1.2	1.0

表3 载流量仿真计算对比

Table 3 Current carrying capacity simulation for conducting lines under 3 different temperatures

A

导线规格	原始边界条件	极限边界条件			选定边界条件		
		高温月份	低温月份	其他月份	高温月份	低温月份	其他月份
LGJ-300/40	525.56	592.85	741.29	674.50	531.17	717.66	628.71
LGJ-400/50	626.44	706.84	886.29	805.51	631.71	857.63	750.07
LGJ-630/45	818.08	923.29	1162.75	1054.98	822.16	1124.39	980.88
JL/LB1A-630/45	829.31	936.10	1178.84	1069.53	833.37	1139.93	994.37
JL/LB20A-630/55	841.87	950.39	1197.20	1086.02	845.73	1157.61	1009.57

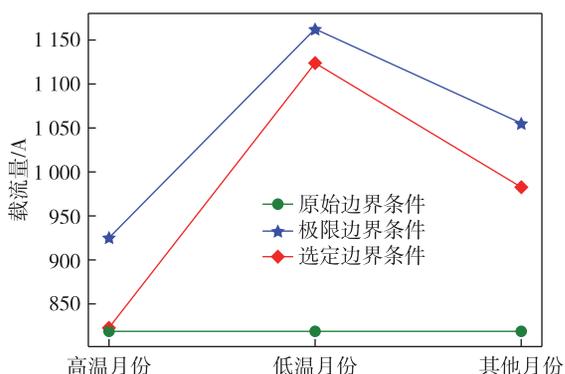


图4 导线 LGJ-630/45 载流量分析对比

Fig. 4 Current capacity comparison for conducting line LGJ-630/45 under 3 different temperatures

由图4并结合表3数据分析可得,相对于原始载流量,选定边界条件下,载流量在高温月份可提升0.50%,在低温月份可提升37.44%,在其他月份可提升19.90%。同时,与极限边界载流量对比分析可得,在高温月份可保留10.95%的安全裕度,在低温月份可保留3.30%的安全裕度,在其他月份可保留7.02%的安全裕度^[19-20]。

5 结束语

本文在传统载流量计算方法的基础上,引入了K-Means算法,针对特定的地区将一年划分成不同时段,并根据每个时段的簇中心,选定新的边界条件。仿真分析验证了在新选定的边界条件下,在低温月份和其他月份两个时间段内可明显提升架空输电线路的载流量,同时可保留一定的安全裕度。

今后的工作将结合其他聚类算法,进一步考虑多种载流量计算影响因素下的最优组合问题。

参考文献

References

[1] 刘洋.基于改进安全限距计算模型的架空线路载流能力分析研究[D].北京:华北电力大学,2015

LIU Yang.Study on current capacity of transmission line based on improved calculation model of restriction on span [D]. Beijing: North China Electric Power University,2015

[2] 林玉章.高压架空输电线路载流量和温度计算[J].南方电网技术,2012,6(4):23-27

LIN Yuzhang.The calculation of current carrying capacity and temperature of high voltage overhead lines[J].Southern Power System Technology,2012,6(4):23-27

[3] 中国电力企业联合会.110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范 GB 50545—2010 [S].北京:中国计划出版社,2010

China Electric Council.Code for design of 110 kV-750 kV overhead transmission line GB 50545-2010 [S].Beijing:China Planning Press,2010

[4] 叶鸿声.高压输电线路导线载流量计算的探讨[J].电力建设,2000,21(12):23-26

YE Hongsheng.Inquire into calculation of conductor current carrying ampacity on HV transmission line[J].Electric Power Construction,2000,21(12):23-26

[5] 杜开源,吴廷祥,冯杰,等.深圳地区导线载流量计算边界条件统计分析[J].青海电力,2016,35(1):43-47

DU Kaiyuan, WU Tingxiang, FENG Jie, et al.Statistical analysis on the bound condition for the calculation of current carrying capacity of the overhead conductor in the Shenzhen area[J].Qinghai Electric Power,2016,35(1):43-47

[6] 杨帆,刘浩军,王少华,等.考虑实时气候对于输电线路载流量的影响[J].广东电力,2017,30(7):70-75

YANG Fan, LIU Haojun, WANG Shaohua, et al.Influence of real-time climatic conditions on ampacity of power transmission line [J].Guangdong Electric Power, 2017, 30(7):70-75

[7] Davis M. A new thermal rating approach: the real time thermal rating system for strategic overhead conductor transmission lines part IV daily comparisons of real-time and conventional thermal rating and establishment of typical annual weather models [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1980, 99(6):2184-2192

[8] MacQueen J. Some methods for classification and analysis of multivariate observations [C] // Proceedings of the fifth Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probability, 1967:281-297

[9] von Luxburg U. A tutorial on spectral clustering [J]. Statistics and Computing, 2007, 17(4):395-416

[10] 陈晓平,陈易旺,施建华.基于机器学习的降雨量雷达

- 回波数据建模与预测[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),2020,12(4):483-494
CHEN Xiaoping, CHEN Yiwang, SHI Jianhua. Rainfall modeling and prediction by radar echo data based on machine learning[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition), 2020, 12(4):483-494
- [11] Huang Z X. Extensions to the k-means algorithm for clustering large data sets with categorical values [J]. Data Mining and Knowledge Discovery, 1998, 2(3):283-304
- [12] Douglass D A, Edris A A. Real-time monitoring and dynamic thermal rating of power transmission circuits [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3):1407-1418
- [13] 艾戈韬.大跨越架空线路载流量计算方法与监测装置研究[D].南昌:南昌大学,2019
AI Getao. Research on calculation method and monitoring device of carrying capacity of large-span overhead power transmission lines [D]. Nanchang: Nanchang University, 2019
- [14] 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
- [15] 夏云峰,郑秋,黄国飞,等.架空导线允许短时过负荷时间和载流量计算模型研究[J].电线电缆,2014(5):35-38.
XIA Yunfeng, ZHENG Qiu, HUANG Guofei, et al. Research on the factors to effect the calculation of the carrying current of the power transmission line [J]. Electric Wire & Cable, 2014(5):35-38
- [16] 马奇,李生平,李青松,等.输电线路载流量计算影响因素研究[J].青海电力,2017,36(1):30-33
Ma Qi, Li Shengping, Li Qingsong, et al. Study on influencing factors of transmission line ampacity calculation [J]. Qinghai Electric Power, 2017, 36(1):30-33
- [17] 王艳玲,严志杰,梁立凯,等.气象数据驱动的架空线路载流动态定值分析[J].电网技术,2018,42(1):315-321.
WANG Yanling, YAN Zhijie, LIANG Likai, et al. Dynamic rating analysis of overhead line load ability driven by meteorological data [J]. Power Grid Technology, 2018, 42(1):315-321
- [18] 周海松,陈哲,张健,等.应用气象数值预报技术提高架空线路动态载流量能力[J].电网技术,2016,40(7):2175-2180
ZHOU Haisong, CHEN Zhe, ZHANG Jian, et al. Application of meteorological numerical forecast technology for improving transmission line capability [J]. Power Grid Technology, 2016, 40(7):2175-2180
- [19] 杜彦巍,林莉,牟道槐,等.综合气象指数对电力负荷的影响分析[J].重庆大学学报,2006,29(12):56-60
DU Yanwei, LIN Li, MOU Daohuai, et al. Analysis of the effect of composite meteorology index on power load [J]. Journal of Chongqing University, 2006, 29(12):56-60
- [20] 丁尧.时变气象环境下架空线路动态载流裕度评估与运行风险预警方法[D].重庆:重庆大学,2018
DING Yao. Method of dynamic ampacity margin estimation and operation risk warning for overhead lines in time-varying weather conditions [D]. Chongqing: Chongqing University, 2018

Calculation of current carrying capacity for overhead transmission lines based on K-Means algorithm

LIN Jinrong¹ WU Yunfa¹ LIAO Ruchao² CHENZHENG Ganzhe¹

¹ School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006

² Machine Patrol Management Center Guangdong Power Grid Company Limited, Guangzhou 510000

Abstract The current carrying capacity of the overhead transmission lines is lowered due to the conservative value of the boundary conditions. We propose an approach to calculate the carrying capacity based on K-Means algorithm, with purpose to fully exploit the carrying capacity of the overhead transmission lines. Meteorological data of Guangzhou in recent 10 years were summarized to analyze the variation of monthly ambient temperature and wind speed, based on which the K-Means algorithm was employed to rate the 12 months into several time periods, then appropriate boundary conditions were given for each time period. The Morgan formula was used to simulate the current carrying capacity under the new boundary conditions. Simulation results showed that the current carrying capacity can be effectively increased on the premise of ensuring safe operation of overhead transmission lines.

Key words current carrying capacity; K-Means; boundary conditions; overhead transmission lines