

DOI: 10.7667/PSPC162100

基于负荷和环境温度曲线的输电断面短时过载能力分析

范京艺^{1,2}, 毛安家¹, 刘岩³, 吴卓航³, 王春生³

(1. 华北电力大学, 北京 102206; 2. 国网晋中供电公司, 山西 晋中 030600;
3. 国网辽宁省电力公司经济技术研究院, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 断面中的线路过载跳闸引起的潮流转移是导致系统连锁跳闸的重要原因。然而, 过于严格的断面潮流限制可能抑制了线路的输送能力, 造成了输电资源的浪费。为解决由尖峰负荷变化引起不必要的负荷控制的问题, 可在短时间内允许断面一定程度的过载而不影响系统安全。利用预测的负荷曲线和环境温度变化曲线, 考虑动态热平衡过程, 建立了断面潮流—温度模型, 并提出了该模型的BS23求解算法。通过该模型实现断面导线温度的动态计算并确定断面的短时过载能力。通过对某16节点系统进行仿真计算, 结果表明所提方法能够保留尖峰负荷而保证导线温度维持在允许范围之内, 较为有效地提高了断面的输电能力。

关键词: 热平衡; 短时过载; 输电断面; 输电能力

Analysis of the short-time overload capability of the transmission section based on the load and ambient temperature curve

FAN Jingyi^{1,2}, MAO Anjia¹, LIU Yan³, WU Zhuohang³, WANG Chunsheng³

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Grid Jinzhong Power Supply Company, Jinzhong 030600, China; 3. Economic and Technology Research Institute, State Grid Liaoning Electric Power Supply Co., Ltd, Shenyang 110016, China)

Abstract: Power flow transfer caused by overloaded tie-lines tripping-off is one of the main reasons leading to cascading failure. However, too strict flow restriction of the tie-lines may inhibit the transmission capacity of the line, resulting in a waste of transmission resources. In order to solve the problem of unnecessary load control caused by the change of the sharp-peak load, it is possible to allow the tie-lines to be overloaded in a short time without affecting the safety of the system. Based on the predicted load curve and the ambient temperature change curve, the load flow-temperature model of the tie-lines is established on account of the dynamic thermal equilibrium process. To solve the model, the BS23 algorithm is proposed. The model can be used to calculate the conductor temperature dynamically and determine the short-time overload capability of the tie-lines to improve the transmission capacity. By way of the simulation of a 16-node system, it shows that the proposed method can retain the peak load and keep the line temperature within the allowable range. As a result, the transmission capability of the section is improved effectively.

Key words: thermal equilibrium; short-time overload; transmission section; transmission capability

0 引言

由于经济发展和能源资源分布的不均衡性, 使得我国跨区跨省送电呈现逐年增长的趋势, 由此对电网断面的输送能力提出了较高要求。毫无疑问, 加强输电通道建设是保证输电能力的基本措施, 然而, 一方面, 随着征地成本及环境限制, 开辟新的输电走廊、甚至建设新的线路变得愈发困难; 另一方面, 由于经济发展和电力工程建设的非同期性,

区域电网缺电和电力富余往往交替出现, 盲目扩建线路并非上乘决策。因此, 充分挖掘现有电网断面的输电能力, 有助于提高电网抵御高峰负荷冲击及扰动的能力, 可以缓建或少建线路, 有显著的社会和经济效益。

随着电网结构日益加强, 区域电网间联系日益紧密, 电网断面的热稳定极限在系统安全性方面起着越来越重要的作用。然而, 传统热稳定极限通过载流导体的最大允许电流静态确定, 不能准确反映

断面的安全状况^[1-2]。实际情况中, 负荷变化引起的断面过载情况往往只持续较短的时间, 此时断面线路的温度仍能保持在最大允许温度之内, 因而无需切除负荷而保证系统安全。因此, 在短时间内允许断面过载而提高断面输电能力, 不仅可以避免不必要的负荷损失, 而且可以避免因线路切除和潮流再分布而引起线路相继过载跳闸的连锁反应。

国外, DAVIS 最早在 1977 年提出动态热定值 (DTR), 利用 SCADA 系统实时评估输电线路的载流能力^[3-4]。1986 年 IEEE 制定了评估输电线路载流能力的标准方法^[5], 并作了多次修订。国内也做了大量研究。文献[6]在 Morgan 公式的基础上提高线路工作允许温度, 增大输电能力, 然而这个方法受到输电导线的机械强度和寿命的限制, 因此, 文献[7]提出了一种基于弧垂实时测量的输电线路动态增容技术, 其核心思想是利用行波的传输测量线路的长度近似得到线路各点的弧垂, 进而评估线路的输送能力。文献[8]基于 SCADA 系统的量测数据, 对输电线路电阻估计, 间接得到导线温度, 追踪输电线路的动态热定值。文献[9]运用电热协调理论, 以电阻为纽带交替求解热平衡方程式和潮流方程, 得到温度变化曲线, 分析输电线路的输电能力。类似的方法亦被应用在输电线路的动态增容方面, 其核心方法是设法跟踪输电线路在一定输电功率下的温度, 作为提高线路输送容量的依据^[10-12]。然而, 由于忽略了负荷与环境温度的时间变化特性, 使得上述方法的应用效果受到一定影响, 因此, 有必要对上述方法进一步完善。

本文利用日负荷曲线和环境温度变化曲线, 考虑动态热平衡过程, 建立了断面潮流—温度模型, 提出了该模型的 BS23 求解算法, 运用该模型对断面导线温度进行动态计算, 从而确定断面的短时过载能力。以某 16 节点系统为算例进行仿真计算, 验证所提出模型及解算方法的正确性及有效性。

1 断面的输电能力和热平衡方程式

1.1 输电断面及关键断面的确定

电网断面亦称潮流断面, 是指电力系统在某一运行方式下, 有功潮流方向相同且电气距离相近的一组输电线路所构成的集合。当断面中的线路因故障而跳闸时, 其潮流一般通过断面中其他线路进行转移, 在此过程中可能引起其他线路连锁故障跳闸, 因此, 输电断面在电网安全稳定方面起着至关重要的作用^[13]。

当电网结构相对简单时, 关键断面一般可通过运行经验确定, 如区域间联络断面, 省间联络断面,

或者省内地区之间联络断面等。随着电网联系的进一步加强, 电网结构日趋复杂, 网间关键联络断面不再清晰明了, 需要根据系统运行状态进行确定。例如, 文献[13]提出了一种以线路介数和支路潮流作为权重、通过构建相似度矩阵得到电网分区的基于聚类算法的关键输电断面搜索算法。文献[14]提出一种基于电流转移比例系数的复杂网络输电断面识别方法, 该方法通过构建电网拓扑模型及图论矩阵, 利用关联矩阵不定向搜索限定搜索范围, 提高算法效率。本文对于电网输电断面的确定, 将直接借鉴文献[13]的研究成果。

1.2 断面的电热平衡理论

输电断面的输电能力主要取决于输电断面中输电线路的热稳定容量。按允许载流量设限的持续输送容量称为线路的热稳定容量, 用式(1)表示。

$$S_{\max} = \sqrt{3}UI_{\max} \quad (1)$$

式中: S_{\max} 为线路的热稳定容量; U 在近似计算中受端可取额定电压, 送端取平均额定电压; I_{\max} 为长期允许载流量。

长期允许载流量 I_{\max} 的确定依赖于输电线路的热平衡过程。由传热学的理论, 可知输电线路的稳态热平衡方程式为^[12, 15]

$$I^2 R(T_c) + q_s = q_c + q_r \quad (2)$$

$$I = \sqrt{\frac{q_c + q_r - q_s}{R(T_c)}} \quad (3)$$

暂态热平衡方程式为

$$I^2 R(T_c) + q_s = q_c + q_r + mC_p \frac{dT_c}{dt} \quad (4)$$

变形后可得

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{1}{mC_p} [I^2 R(T_c) + q_s - q_c - q_r] \quad (5)$$

式(2)—式(5)中: T_c 表示的是导线的运行温度; I 是输电线路流过的电流值; $R(T_c)$ 是对应导线温度为 T_c 的交流电阻; mC_p 为输电导线总的热容值; q_s 是单位时间内太阳辐射引起的发热量; q_c 是单位时间内对流散热量; q_r 是单位时间内热辐射散热量。其中 q_s 与导体温度无关, q_c 和 q_r 与导线温度呈正相关。

在实际工程应用中, 式(5)中的电流 I 不容易直接获得, 往往通过监测线路潮流 P_l 来反映线路电流的大小, 为计算方便, 可以用式(6)表示热平衡过程。

$$\frac{dT_c}{dt} = \frac{1}{mC_p} [P_l(T_c) + q_s - q_c - q_r] \quad (6)$$

在传统计算中, 最大允许载流量 I_{\max} 是由式(3)按照规程计算得到的。然而, 式(3)忽略了导体载流

与温度不同步的过渡过程, 尽管这一过渡过程时间不长, 但往往就是这一不长的时间过程的忽略, 有可能造成原本不该发生的连锁故障, 产生不该有的经济损失。因此, 本文计及温度变化过程, 在式(6)的基础上, 考虑负荷曲线及环境温度的变化, 分析输电断面线路短时过载情况下, 温度对断面输电能力的影响。

2 断面短时过载能力分析

在某时刻断面中几支输电线路过载, 造成该断面越限^[16]。分析其中一条关键线路短时过载时的运行情况, 如图 1 所示。

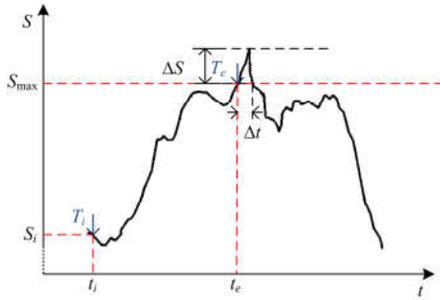


图 1 输电线路短时过载能力示意图

Fig. 1 Schematic diagram of short-time overload capability of the transmission line

初始的负荷容量水平 S_i 由所选断面常规预测的电能需求确定。在正常运行情况下, 初始温度 T_i 低于导体的安全温度 T_{co} , 因为导体温度从初始值 T_i (对应于初始热容量 S_i) 变化到安全导体温度 T_{co} (导体温度临界点) 之间存在一个滞后时间。

在 t_e 时刻, 输电线路过载, 断面越限, 按照传统方法, 相应输电线路将跳闸。但是负荷在 t_e 时刻的导体温度 T_e 往往低于 T_{co} , 因为当负荷增长时, 导线温度 T_c 将按照式(6)所示规律上升, 由于温度的上升有赖于热量的累积, 即使负荷上升到热稳定容量, 甚至超过热稳定容量时, 导线的温度也并不一定达到 T_{co} , 也就是说, 此时的系统仍然是安全的, 仍可保持过载线路的运行^[15]。

当线路长时间过载, 根据式(6)所确定的热平衡方程有可能使得导线温度达到或超过 T_{co} , 此时必须采取措施以保证系统安全。因此, 本文通过追踪负荷变化过程中的导线温度, 在导线温度低于安全温度时, 允许断面短时过载运行, 由于负荷真实允许的载流量水平可能会超过最大允许载流量, 进而在一定程度上增加了断面输送能力。当温度变化规律已知时, 可以确定过载时间 Δt 和过载量 ΔS , 便于调度人员做好运行决策。

3 断面潮流—温度模型及解算方法

电力系统的断面受系统潮流的约束。假设系统断面中某一线路首末两端节点分别为 i 和 j , 则该线路的潮流可用式(7)和式(8)表示(忽略线路对地导纳)。

$$P_{ij} = U_i^2 g_{ij}(T_c) - U_i U_j \left[g_{ij}(T_c) \cos \theta_{ij} - b_{ij}(T_c) \sin \theta_{ij} \right] \quad (7)$$

$$Q_{ij} = U_i^2 b_{ij}(T_c) - U_i U_j \left[g_{ij}(T_c) \sin \theta_{ij} + b_{ij}(T_c) \cos \theta_{ij} \right] \quad (8)$$

式中: U_i 和 U_j 分别为 i 和 j 节点电压的大小; $g_{ij}(T_c)$ 、 $b_{ij}(T_c)$ 表示线路温度为 T_c 时电导和电纳; θ_{ij} 为节点电压 i 和 j 相位角之差。由式(7)和式(8)可知, 线路电导和电纳都与温度有关, 因而潮流也受到温度的制约。本文结合式(6)一式(8), 考虑输电线路负荷变化及环境温度变化, 得到式(9)。

$$\begin{cases} \frac{dT_c}{dt} = C_R P^{2+\tau} (1 + \alpha_{20}(T_c - 20)) + C_s - C_c (T_c - T_a) - \\ C_r \left[\left(\frac{T_c + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_a + 273}{100} \right)^4 \right] \\ P_{ij} = P_{ij}(t) \\ T_a = T_a(t) \end{cases} \quad (9)$$

其中, 令

$$C_R = \frac{\zeta R_{20}}{mC_p (\sqrt{3}U)^{2+\tau}} \quad (10)$$

$$C_s = \frac{1}{mC_p} \alpha_s Q_s \sin(\eta) A \quad (11)$$

$$C_c = \frac{1}{mC_p} \left[1.01 + 0.0372 (R_c)^{0.52} \right] k_f K_{\text{angle}} \quad (12)$$

$$C_r = \frac{1}{mC_p} 0.0178 D \varepsilon \quad (13)$$

式(10)一式(13)中: mC_p 为导线总的热容值; ζ 与 τ 为与导线截面积对应的常量; R_{20} 为导线 20 °C 时的电阻; α_s 为导线对太阳辐射的吸收率; Q_s 为直射和漫反射总的热通量; η 为太阳辐射入射的有效角度; A 为单位长度导线的投影面积; R_c 为雷诺数; k_f 为气体热导率; K_{angle} 为用于修正的风向角因子; D 为导线外径; ε 代表导线辐射率。

断面短时过载能力的分析主要是建立在对面潮流模型的求解上。本文采用常微分方程数值解法—BS23 算法^[17], 对式(6)一式(9)联立求解, 得

到输电线路温度的变化轨迹。研究的初始状态为正常运行时的某一时刻, 断面中的输电线路的初始温度已知。该方法的关键步骤为

$$\begin{aligned} t_{n+1} &= t_n + h \\ T_{n+1} &= T_n + h \frac{2K_1 + 3K_2 + 4K_3}{9} \\ K_1 &= f(t_n, T_n) \\ K_2 &= f\left(t_n + \frac{h}{2}, T_n + \frac{h}{2}K_1\right) \\ K_3 &= f\left(t_n + \frac{3}{4}h, T_n + \frac{3}{4}hK_2\right) \end{aligned} \quad (14)$$

式中, h 为龙格—库塔单步法迭代的步长。对输电断面的每一条线路运用上述方法, 可求得断面线路温度的变化情况。根据线路温度的变化情况, 判断断面过载时, 系统是否能继续运行一段时间, 从而短时间内提高断面的输送容量。解算过程的流程图见图 2。

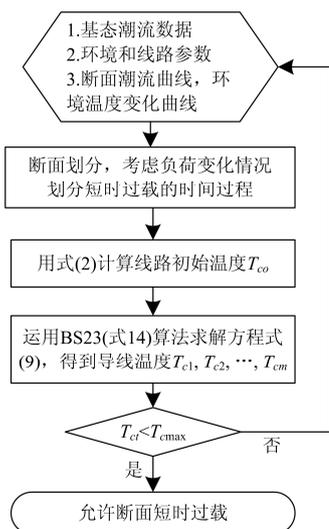


图 2 解算过程流程图

Fig. 2 Flow chart of the solution process

4 算例及分析

以 16 节点系统为研究算例, 对上节描述的算法及算例进行验证及分析。此系统总共 16 个节点, 包括发电机 5 台, 变压器 3 台, 支路 22 条, 其中节点 1 为平衡节点。按自然功率和功率输送方向^[18], 将该系统划分为 2 个区域。基准电压为 100 kV, 基准功率为 100 MVA。系统接线图及区域划分如图 3 所示。

对该系统分析可知, 区域 1 为送电区域, 区域 2 为受电区域, 本文通过计算区域 1 与区域 2 之间的断面线路温度, 分析断面短时过载对断面输电能

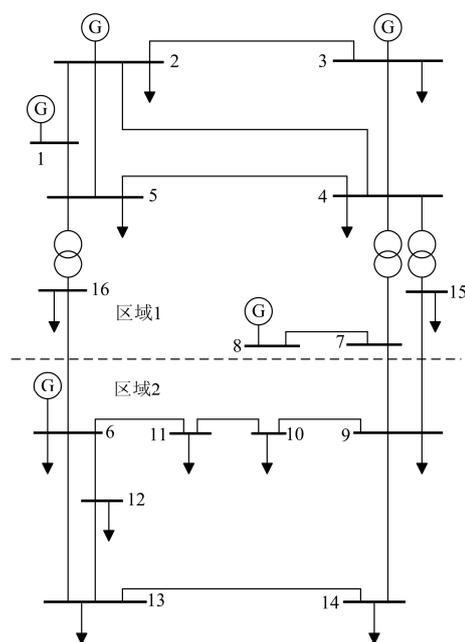


图 3 系统接线图

Fig. 3 Wiring diagram of the system

力的影响。区域 1 与区域 2 之间的断面包括三条线路, Bus16-6, Bus7-9 和 Bus15-9。由系统基态潮流运行结果可知, 基础运行方式下, 支路 Bus16-6, Bus7-9 和 Bus15-9 的有功潮流分别是 41 MW, 32.1 MW 和 15.3 MW。为计算方便, 设三条支路有功功率潮流限制分别为 80 MW, 80 MW 和 80 MW。

输电线路的初始参数和环境温度变化情况见表 1 和表 2。输电断面潮流曲线如图 4 所示。

断面潮流结果及导线温度计算结果如表 3 及图 5 所示, 为明确导线温度的滞后效应, 图 5 的温度曲线上叠加了负荷变化曲线。

表 1 输电线路参数及环境参数

Table 1 Line and environmental parameters

$mC_p/\text{(J/m}\cdot\text{°C)}$	D/mm	$\alpha_{20}/\text{(1/°C)}$	ε	$V_w/\text{(m/s)}$	α_s	$Q_s/\text{(W/m}^2\text{)}$
605	23.94	0.004 03	0.95	0.5	0.9	1000

表 2 环境温度随时间的变化情况

Table 2 Ambient temperature curve with time change

t	9:00	9:30	10:00	10:30	11:00	11:15
$T_a/\text{(°C)}$	20.4	21.8	23.6	25.4	26.7	27.1
t	11:30	11:44	11:50	11:55	12:00	12:30
$T_a/\text{(°C)}$	27.5	27.8	28.1	28.3	30.1	30.8
t	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30
$T_a/\text{(°C)}$	31.2	31.6	32.5	31.1	30.2	29.5
t	16:00	16:30	17:00	17:30	18:00	—
$T_a/\text{(°C)}$	28.6	27.4	25.5	24.3	22.5	—

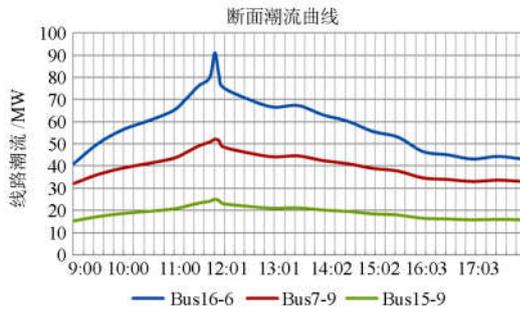


图 4 断面在 9 点到 18 点的潮流变化情况

Fig. 4 Section line flow between 9:00 and 18:00

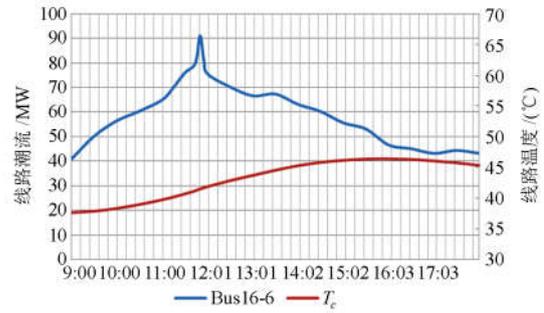


图 5 导线温度随环境温度及负荷变化的曲线

Fig. 5 Line temperature curve changing with the ambient temperature and the load

表 3 断面潮流的数据及导线温度的计算结果

Table 3 Data of the cross section flow and the calculation result of the line temperature

时刻	时间	Bus16-6/MW	Bus7-9/MW	Bus15-9/MW	$T_c/(\text{°C})$
1	9:00	41	32.1	15.3	37.64
2	9:30	50.3	36.3	17.3	37.88
3	10:00	56.5	39.2	18.7	38.34
4	10:30	60.4	41.2	19.6	38.97
5	11:00	65	43.5	20.7	39.74
6	11:15	70.1	46	21.9	40.18
7	11:30	76	49	23.3	40.69
8	11:44	80	50.9	24.2	41.21
9	11:50	91	52.1	25.1	41.5
10	11:55	81	51.5	24.5	41.68
11	12:00	75.5	48.7	23.1	41.87
12	12:30	70.2	46	21.9	42.85
13	13:00	66.6	44.2	21	43.7
14	13:30	67.3	44.6	21.2	44.54
15	14:00	63.1	42.5	20.2	45.28
16	14:30	60.2	41.1	19.6	45.82
17	15:00	55.6	39	18.5	46.15
18	15:30	53.1	37.8	18	46.36
19	16:00	46.6	34.7	16.5	46.39
20	16:30	45.1	34	16.2	46.3
21	17:00	43.2	33.1	15.8	46.05
22	17:30	44.4	33.7	16	45.75
23	18:00	43.2	33.1	15.8	45.33

如表 3 及图 5 所示, 断面输电线路 Bus16-6 在 11:44 到 11:55 的时间区间内潮流越限, 但是如图 4, 计算结果显示, 线路 Bus16-6 的运行温度并未达到最大允许温度 70 °C, 线路仍处于正常运行状态; 此外, 从图中可以看出导线温度的上升明显滞后于线路潮流的升高。因而可以充分利用这种滞后效应, 当断面中的线路温度低于 70 °C 时, 可以允许断面短时过载运行一定时间, 增加了断面的输送容量, 提高了断面的输送能力。

5 结论

通过考虑断面潮流及环境温度变化, 本文基于动态热平衡方程式提出断面潮流温度模型, 利用该模型应用于断面短时过载。算例结果表明, 本文所提的方法能够保留尖峰负荷而保证导线温度维持在允许范围之内, 较为有效地提高了断面输电能力, 为缓解尖峰时刻跳电的问题提供了参考。考虑断面短时过载提高输电能力的优点在于其经济性, 但是由于本文探讨的方法还存在风险水平未知等诸多问题, 有待于今后深入的研究。

参考文献

- [1] 朱斌, 邱丽君, 王勇, 等. 电网输电断面动态热稳定限值在线计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 94-99.
ZHU Bin, QIU Lijun, WANG Yong, et al. Online calculation method for dynamic thermal stability limit of transmission section[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 94-99.
- [2] 110-500 kV 架空送电线路设计技术规程: DL/T 5092—1999[S]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
Technical code for design of 110-500 kV overhead transmission line: DL/T 5092—1999[S]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [3] DAVIS M W. A new thermal rating approach: the real time thermal rating system for strategic overhead conductor transmission lines, part I[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(3): 803-809.
- [4] DAVIS M W. A new thermal rating approach: the real time thermal rating system for strategic overhead conductor transmission lines, part II[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(3): 810-825.
- [5] IEEE Standard Board. IEEE standard for calculation of bare overhead conductor temperatures: IEEE 738—1986

- [S]. 1985.
- [6] 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.
- [7] 曾祥君, 阳韬, 钟卓颖, 等. 基于弧垂实时测量的输电线路动态增容决策系统设计[J]. 电力科学与技术学报, 2015, 30(2): 9-15.
ZENG Xiangjun, YANG Tao, ZHONG Zhuoying, et al. Design of dynamic power capacity increasing decision system based on the real-time measurement of transmission line sag[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2015, 30(2): 9-15.
- [8] 陈芳, 韩学山, 康凯, 等. 基于 SCADA 信息追踪输电线路动态热定值[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 81-85.
CHEN Fang, HAN Xueshan, KANG Kai, et al. Tracking of dynamic thermal rating of transmission line based on SCADA[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 81-85.
- [9] 丁希亮, 韩学山, 张辉, 等. 电热协调潮流及输电线路温度的变化过程分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19): 138-144.
DING Xiliang, HAN Xueshan, ZHANG Hui, et al. Analysis on electro-thermal coordination power flow and transmission line temperature variation process[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(19): 138-144.
- [10] 徐伟, 鲍颜红, 周海锋, 等. 基于阻塞分析的输电线路动态增容[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 15-22.
XU Wei, BAO Yanhong, ZHOU Haifeng, et al. Transmission line dynamic capacity-increase based on congestion analysis[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 15-22.
- [11] 吉兴全, 杜彦宾, 李可军, 等. 一种超高压输电线路动态增容方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 102-106.
JI Xingquan, DU Yanbin, LI Kejun, et al. A method of dynamic rating of ultra high voltage transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 102-106.
- [12] 刘刚, 阮班义, 张鸣. 架空导线动态增容的热路法暂态模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 58-62.
LIU Gang, RUAN Banyi, ZHANG Ming. A transient model for overhead transmission line dynamic rating based on thermal circuit method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 58-62.
- [13] 何培颖, 房鑫炎. 基于聚类算法的关键输电断面快速搜索[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 97-101.
HE Peiyong, FANG Xinyan. Fast search of the key transmission sections based on clustering algorithms[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 97-101.
- [14] 王紫琪, 和敬涵, 张大海, 等. 基于电流转移比例系数的复杂网络输电断面识别方法[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 915-921.
WANG Ziqi, HE Jinghan, ZHANG Dahai, et al. Identification method of key transmission section in complex power grid based on current transferring ratio[J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 915-921.
- [15] DAVIDSON G A, DONOHO T E. Short-time thermal ratings for bare overhead conductors[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(3): 194-199.
- [16] 马明, 刘强, 沈凤杰, 等. 输电设备过载与断面功率越限在线控制决策[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(6): 26-32.
MA Ming, LIU Qiang, SHEN Fengjie, et al. On-line auxiliary decision-making for overload control of power transmission equipment and sections[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(6): 26-32.
- [17] MOLER C B. MATLAB 数值计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [18] 张富超, 钟成元, 张富春, 等. 基于源流路径剖分的输电断面快速搜索[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 8-13.
ZHANG Fuchao, ZHONG Chengyuan, ZHANG Fuchun, et al. Fast search of transmission section based on path split between sources and flows[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 8-13.

收稿日期: 2016-12-25; 修回日期: 2017-08-11

作者简介:

范京艺(1992—), 女, 硕士, 研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: fjiy9209@163.com

毛安家(1976—), 男, 副教授, 研究方向为电力系统分析与控制, 电力市场及安全; E-mail: angel_maoyang@sohu.com

刘岩(1978—), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划与设计. E-mail: 1240343781@qq.com

(编辑 周金梅)