

DOI: 10.7667/PSPC160195

电网输电断面动态热稳定限值在线计算方法

朱斌¹, 邱丽君², 王勇², 吴海伟¹, 潘小辉³, 刘俊²

(1. 江苏省电力公司, 江苏 南京 210024; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100085;
3. 江苏省电力公司南京供电公司, 江苏 南京 210019)

摘要: 提出了一种利用实时气象环境和电网运行方式进行稳定断面功率限值在线计算方法, 将静态的稳定断面限值转变为根据实时数据变化的动态限值, 为电网精益化调控提供支撑。基于动态增容技术将外部系统的微气象数据接入调控系统进行线路动态载流量计算。基于电网模型和实时运行方式, 采用支路开断分布因子计算输电断面的潮流动态转移比。基于节点对支路的功率转移分布因子实时分析稳控装置动作对开断后输电断面潮流的影响, 对断面限值进行动态修正。提出的方法在南京地区调控系统进行了在线应用, 基于实际运行数据对结果进行验证, 证明了算法对于高峰时段提升断面输送能力的有效性。

关键词: 动态增容; 调控系统; 电网断面; 动态功率限值; 在线计算

Online calculation method for dynamic thermal stability limit of transmission section

ZHU Bin¹, QIU Lijun², WANG Yong², WU Haiwei¹, PAN Xiaohui³, LIU Jun²

(1. Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China; 3. Nanjing Power Supply Bureau of Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210019, China)

Abstract: An online calculation method for stability section power limit based on real-time microclimate environment and operation mode is proposed. Static stability section limit is transferred to dynamic limit which changes with real-time data, offering technical support to lean regulation of power grid. Based on dynamic capacity-increasing technology, microclimate data in external system is accessed to regulating system and dynamic current carrying capacity of transmission line is calculated. Based on power grid model and real-time operation mode, branch open distribution factor is adopted to calculate dynamic power flow transfer ratio of transmission sections. Based on power transfer distribution factor of node-branch, the influence of stability control device action to transmission section power is analyzed real-timely. And section power limit is modified dynamically. The method has been used in Nanjing district regulating system online. Actual running data is used to verify the results, proving the efficiency of algorithm to improve the transmission capacity of sections in peak period.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Research on Key Techniques of Transmitting Capacity Promotion of Urban Core Transmission Line."

Key words: dynamic capacity-increase; regulating system; power grid section; dynamic power limit; on-line calculation

0 引言

电网调控除保证正常运行时的设备和电网安全, 还需保障电网发生预想事故情况时的短时电网安全, 即电网静态安全^[1]。目前调控系统中的电网静态安全除了通过 $N-1$ 静态安全分析, 更重要的是通过电网正常运行时的稳定断面监视来实现^[2]。

稳定断面是根据调度运行经验, 将有密切电气联系的一组设备(包括线路和变压器)组成的设备集合, 设备的功率总加即为断面的功率。断面功率限值是指当断面发生 $N-1$ 故障时, 保证断面其他设备短时安全条件下的断面正常可输送功率。

电网断面的确定^[3-7]以及断面功率限值的计算^[8-11]是方式部门一项重要的工作, 目前主要是依据调度经验, 采用 BPA 等分析软件进行离线分析, 依据极端气象条件以及极端电网运行方式来确定线路电流限值和电网断面功率限值。文献[10]将断面离线的

基金项目: 国家电网公司科技项目“城市核心区输电线路输送能力提升关键技术研究”

手工算法程序化, 并开发了实用计算软件应用于实际电网。文献[11]结合直流潮流模型, 提出了一种电网断面热稳定极限的快速评估方法, 实现电网断面热稳定极限的评估及约束故障的准确选取。上述研究仍是基于现有算法得出输电断面的静态限值, 计算结果理论上仍趋于保守, 无法充分利用线路的输电潜能。

本文根据实时采集的微气象环境和电网实时运行方式, 将离线静态断面限值算法动态化, 以在线计算数据取代传统离线保守数据, 得到断面的动态功率限值计算结果, 为夏季高峰电网提供调控依据。基于本文算法开发的断面功率限值计算软件已应用于南京地区电网调控系统中, 为电网迎峰度夏的精益化调控提供了技术支撑。

1 输电断面功率限值算法

调控系统的电网断面通常包括了输电断面(对应输电线路)和下网断面(对应变压器设备), 本文主要基于输电线路动态增容技术, 通过将线路的微气象采集数据接入调控系统, 对输电断面的热稳定限值计算开展研究。

设调控系统某个输电断面 S 包括了 n 条输电线路, 则输电断面热稳定功率限值按以下步骤进行计算:

- 1) 基于导线热稳定平衡方程分别计算断面线路的电流限值, 并将电流限值转化成功率;
- 2) 对断面线路逐个进行开断分析, 计算断面的 $N-1$ 最大潮流转移比, 得出断面的功率限值;
- 3) 考虑断面 $N-1$ 后稳控装置动作对断面的影响, 对功率限值进行修正。

1.1 线路静态电流限值和功率限值计算

输电线路的电流限值由运检部门确定, 计算方法是按照安全规程规定的外部环境边界条件, 依据导线热稳定平衡方程^[12]进行计算。

$$I^2 R(T_c) + Q_s = Q_c + Q_r \quad (1)$$

式中: I 为指定导线允许温度条件下的载流量(A); $R(T_c)$ 为导线在温度 T_c 时的交流电阻; Q_s 为导线日照吸热; Q_c 为导线的对流散热; Q_r 为导线辐射散热。根据线路电流限值计算结果, 归算出线路运行的最大功率限值 P_{\max} , 功率与电流的关系如式(2)所示。

$$P_{\max} = \sqrt{3} U_N I_{\max} \cos \varphi \quad (2)$$

式中: U_N 为线路的额定电压(kV); I_{\max} 为线路电流限值; $\cos \varphi$ 为功率因数, 正常电网运行时线路的功率因数通常较高, 进行功率折算时, 考虑调控安全性, 通常取较保守值(一般取 0.9)。

1.2 输电断面静态功率限值计算

高压电网中有功功率一般具有较好的线性关系, 当一个设备发生故障时, 其潮流将按相对固定的比例关系转移到与其有电气关联关系的其他设备上。通过这种潮流线性转移关系可以分析出当断面发生 $N-1$ 故障后, 断面其他设备不越限时所能承受的最大功率, 也即输电断面的静态功率限值。通过对电网正常运行情况下断面限值的控制, 保证电网的静态安全。

断面潮流转移比的定义为: 断面发生 $N-1$ 开断并造成潮流转移后, 剩余线路的功率总加与开断前断面所有线路功率总加的比值。设断面中线路 k 发生开断, 断面潮流转移比 w_s 按式(3)计算。

$$w_{S,k} = \frac{\sum_{i \in S, i \neq k} P_i^k}{\sum_{i \in S} P_i^0} \quad (3)$$

式中: P_i^k 为断面中线路 k 发生开断后, 剩余线路 i 的有功功率; P_i^0 为开断前线路 i 的有功功率。根据开断线路的潮流转移比计算线路开断后断面剩余线路的有功功率总加, 得到线路 k 开断时的断面功率限值为

$$P_{S,k} = \sum_{i \in S, i \neq k} (P_{i,\max} / w_{S,k}) \quad (4)$$

式中, $P_{i,\max}$ 对应了线路 i 的功率限值。对断面中所有线路逐个进行开断分析, 得到每个设备开断对应的断面功率限值, 取断面静态功率限值为

$$P_S = \min\{P_{S,k}\}, k \in S \quad (5)$$

当断面发生 $N-1$ 引起稳控装置动作, 引起切机切负荷操作时, 断面的潮流可能会相应降低, 在计算断面功率限值时需累加这部分功率值。最终断面静态功率限值为

$$P_{S,\max} = P_S + P_{\text{ads}} \quad (6)$$

式中, P_{ads} 为稳控装置动作对断面功率的影响。

2 输电断面动态功率限值计算

通过对调控系统断面静态功率限值离线算法的分析可以看出, 为了确保电网运行安全, 相关分量在计算过程中均采用了相对保守的值, 使得断面的输送能力受到了一定限制, 尤其是在夏季高峰时段, 不得不采取负荷转移甚至拉闸限电等极端措施。实际上, 如果按照实时气象条件以及实时运行方式, 输电断面的限值有一定提升空间。本文从线路载流量、断面潮流转移比、稳控装置功率影响等几方面对断面限值计算过程动态化, 基于实时微气象环境和电网运行方式对断面限值进行在线计算。

2.1 输电线路动态载流量计算

目前调控系统中的线路电流限值都是基于边界气象条件的计算结果,而这种严酷气象条件很难同时出现,线路载流量本身存在一定的提升空间。基于输电线路动态增容技术,将线路实测的微气象条件接入调控系统,进行导线载流量的实时计算,取代线路静态电流限值,为断面动态功率限值计算提供数据基础。

对于安装了微气象监测装置的线路,采集数据通常已接入省级电科院输变电在线监测系统中。首先将微气象数据从输变电在线监测系统中周期导出成标准 E 文件,以 FTP 的方式上送到调控系统 III 区,经由反向隔离装置传送到 II 区进行解析入库,并建立装置数据与线路的关联关系。数据接入的总体流程如图 1 所示。

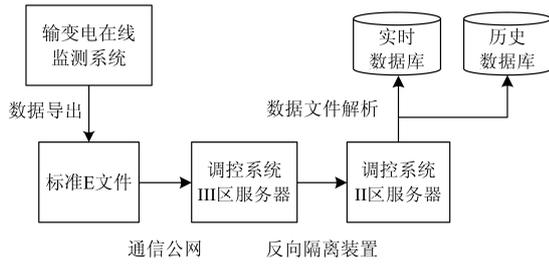


图 1 数据接入流程

Fig. 1 Flow chart of data access

对接入实时库的装置数据以线路为单位进行整合与辨识,包括对缺失数据的补齐、对扰动和异常数据的判断和处理等,具体处理内容包括:

1) 当装置某个温度采样点的量测数据缺失时,利用其变化缓慢的数据特性,以前 n 个历史采样数据的移动平均值来对当前采样点进行补充。

2) 以线路为单位,对所有装置的实时采样数据进行统一辨识。计算所有装置同类数据的平均值,对于偏离平均值一定阈值的数据进行剔除或将其固定在边界值。每个辨识周期处理一个异常数据,直到所有异常数据处理完毕。

经过数据辨识处理后,根据每种数据类型对于导线载流量的贡献,分别选择使载流量最保守的数值参与动态载流量计算。具体数据类型和取值方式如表 1 所示。

基于辨识后的实时数据,采用式(1)计算导线允许温度为 70°C 和 80°C 时的载流量,分别对应了线路正常电流限值和故障电流限值。将线路故障电流限值代入式(2),得到线路的动态功率限值 P_{\max} 。

2.2 断面动态潮流转移比计算

目前输电断面的潮流转移比是方式部门根据电

表 1 数据类型和辨识方式

Table 1 Data type and identification method		
数据类型	取值方式	采集周期
环境温度	取线路所有装置中的最大值	
日照强度		
10 min 平均风速	风速风向成对考虑,选取所有装置中使对流量最小的数据对;若对流量计算结果小于边界值,则取边界值对应的数据对(风速 0.5 m/s, 风向 90°)	1 min
10 min 平均风向		

网典型运行方式进行离线开断分析后得出的一个相对保守值,实际上潮流转移比是随电网运行方式实时变化的。以电网实时运行方式作为基态断面,利用支路开断分布因子来分析预想开断后断面其他线路潮流的分布情况,计算输电断面的动态潮流转移比。

从状态估计获取电网模型、SCADA 获取实时运行方式进行拓扑分析,生成拓扑后的方式模型,基于方式模型和支路参数进行电网断面开断分布因子计算。首先形成 B 矩阵及其逆矩阵 X ,其中 B 矩阵为直流潮流法中以 $1/x$ 为支路参数建立的 $n \times n$ 阶电纳矩阵。设断面中线路 k 发生开断,对断面其他线路 l 的开断分布因子 D_{k-l} 为^[13-14]

$$D_{k-l} = \frac{X_{k-l} / x_k}{1 - X_{l-l} / x_l} \quad (7)$$

式中: X 为支路节点对之间的自阻抗或互阻抗; x 为支路电抗。支路开断后线路 l 的潮流为

$$P_l^{(1)} = P_l^{(0)} + D_{k-l} P_k^{(0)} \quad (8)$$

式中, $P^{(0)}$ 为各支路在开断前的基态功率值。此时的断面潮流动态转移比为

$$w_{S,k} = \frac{\sum_{i \in S, i \neq k} P_i^{(1)}}{\sum_{i \in S} P_i^{(0)}} \quad (9)$$

按照式(4)依次计算剩余线路的功率限值并进行总加,得到支路 k 开断条件下的断面动态功率限值。对断面的所有支路依次进行开断分析,并按式(5)选择最终的断面功率限值。

2.3 稳控装置动作功率动态计算

离线断面功率限值计算时,采用电网典型断面来分析稳控装置动作对输电断面功率的影响,分析结果作为固定值叠加到输电断面功率限值上。实际上稳控装置的功率影响是随着电网运行方式实时变化的。基于电网实时方式和发电机输出功率转移分布因子对这部分功率进行实时分析,提升功率限值的计算精度。

从 SCADA 获取电网实时运行方式,在计算支

路开断分布因子后, 直接利用建立的 X 矩阵以及开断后的潮流分析结果进行稳控装置动作影响分析。假设输电断面中支路 k 开断, 造成发电机节点 i 功率变化 ΔP_{Gi} 。首先计算节点 i 对支路 l 的功率转移分布因子为

$$G_{l-i} = \frac{X_{mi} - X_{ni}}{x_l} \quad (10)$$

式中: m, n 为支路 l 两端节点; X 对应了 X 矩阵中的元素。此时输电断面的总功率变化为

$$\Delta P_S^i = \sum_{l \in S, l \neq k} G_{l-i} \Delta P_{Gi} \quad (11)$$

式中, ΔP_{Gi} 为自动装置动作引起的发电机出力变化情况, 通常为直接切机或者减出力。对稳控装置引起的切负荷动作也同样适用。

对断面中的线路逐条进行稳控装置影响分析。为保证断面的安全, 选择计算结果最小的 ΔP_S 作为最终结果, 代入式(6)中进行计算, 得到最终的断面动态功率限值。

3 计算流程

作为调度控制的辅助手段, 断面动态功率限值在线计算部署在 D5000 调控系统安全 II 区, 从输变电在线监测系统接收微气象数据, 从 I 区获取电网模型和运行方式, 以 10 s 为周期进行断面限值分析计算, 计算结果通过服务总线传送到 I 区实时库中, 并在监控列表中进行展示。在线计算总体框架如图 2 所示。

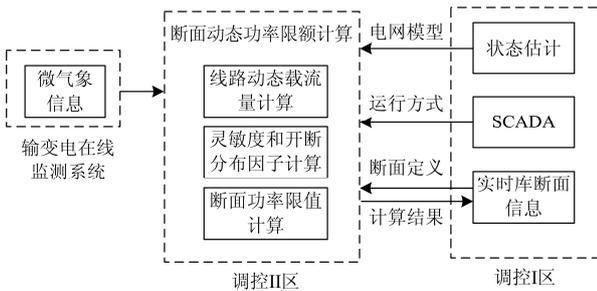


图 2 总体框架

Fig. 2 General framework

线路动态载流量计算所需的数据从外部系统接入到 III 区后再传送到 II 区, 采集周期为 1 min; 电网模型从 I 区状态估计中获取, 获取方式为按需更新, 当判断状态估计模型与当前计算用电网模型有差异时给出提示, 手动触发电网模型更新; 基于 D5000 服务总线机制从 I 区 SCADA 中获取电网实时运行方式, 包括遥信和遥测数据, 获取周期为 10 s。断面动态功率限值计算周期为 10 s, 计算结

果通过服务总线送入 I 区实时库中进行列表显示。总体计算流程如图 3 所示。

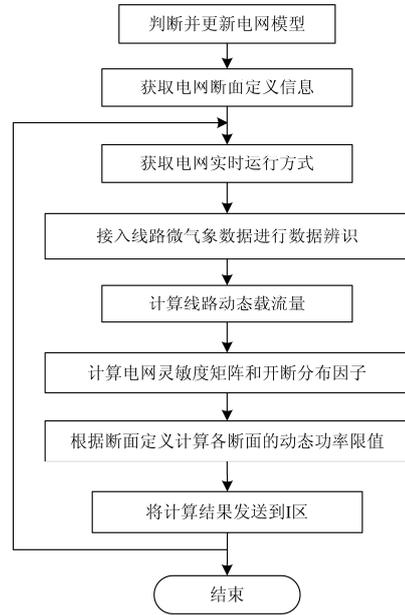


图 3 计算流程

Fig. 3 Calculation flow

4 算例分析

本文提出的输电断面动态功率限值在线计算方法已应用于南京地区 D5000 调控系统中, 对下晓/晓中双线组成的电网断面进行在线分析计算, 有力支撑了夏季高峰时段的电网调控运行。

下晓/晓中双线于 2015 年 6 月完成线路智能化改造, 双线共装设了 6 套微气象装置, 装置采集数据经输变电在线监测系统接入到 D5000 系统中。

4.1 断面静态功率限值

下晓 2577/晓中 2578 双线组成的输电断面接线图如图 4 所示。当断面发生 $N-1$ 开断时, 稳控装置将自动切除华京电厂一台机组, 降低断面潮流。华京电厂正常运行为两台 300 MW 机组。

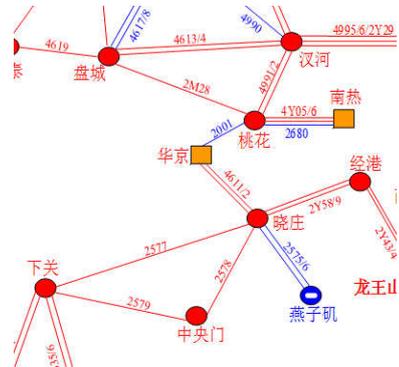


图 4 系统接线图

Fig. 4 System wiring diagram

根据离线分析结果,双线的静态正常电流限值为 1154 A,静态故障电流限值为 1345 A。断面最大潮流转移比取为 0.96,电压取额定电压 230 kV,功率因数按 0.9 进行考虑,稳控装置动作切除一台机组后,断面功率按降低 150 MW 考虑。按式(4)一式(6)给出的断面静态功率限值计算算法进行计算,方式部门给出的断面静态限值为 650 MW。

4.2 考虑微气象的动态功率限值

首先基于线路实测微气象数据进行断面动态功率限值计算。以夏季高峰时段某时刻的运行数据为例进行分析,双线采集的微气象数据经过辨识后如表 2 所示。

表 2 微气象采集数据

Table 2 Collecting data of microclimate

线路	环境温度/ (°C)	风速/(m/s)	风向/ (°)	日照强度 (W/m ²)
下晓 2577	37.9	1.3	2	982
晓中 2578	37.2	1.8	8	973

根据导线热稳定平衡方程进行线路动态载流量,双线电流限值计算结果如表 3 所示。

表 3 线路电流限值计算结果

Table 3 Calculation result of line current limit

线路	正常电流限值	故障电流限值
下晓 2577	1214.7	1418.2
晓中 2578	1232.6	1445.6

取其他算法参数不变,采用线路动态载流量进行断面功率限值计算。采用保守算法,取断面所有线路中故障电流限值最小值 1418.2 A,采用式(2)计算结果为 529.6 MW,叠加上稳控装置动作对断面潮流的影响 150 MW,断面功率限值约为 679.6 MW,增长 29.6 MW。计算结果表明,在夏季高峰时刻,相对于静态限值,采用实测的微气象条件进行计算,断面仍有一定的增长空间。

4.3 考虑实时运行方式的动态功率限值

在实测微气象条件的基础上,根据当时的电网实时运行方式进行灵敏度和开断分布因子计算,与断面相关的计算结果如表 4 所示。

表 4 开断分布因子计算结果

Table 4 Result of open distribution factor

	开断前	对下晓 2577	对晓中 2578
	有功/MW	分布因子	分布因子
下晓 2577 开断	316.7	-	0.7723
晓中 2578 开断	282.5	0.845	-

按照式(8)和式(9)计算得到 2577 和 2578 开断时断面的潮流转移比分别为 0.88 和 0.93。

接着计算稳控装置动作对断面功率的影响。取华京电厂出力较大的机组功率值为 262.4 MW。基于支路开断分析后的潮流结果和拓扑结构进行发电机功率转移分布因子计算,结果如表 5 所示。

表 5 功率转移分布因子计算结果

Table 5 Result of power transfer distribution factor

	发电机节点对断面其他线路的转移分布因子	
	下晓 2577	晓中 2578
下晓 2577 开断	-	0.4216
晓中 2578 开断	0.4618	-

根据转移分布因子,当 2577 和 2578 分别开断时,稳控装置动作切机对断面功率的减少值分别为 110.6 MW 和 121.2 MW,实际上均未达到离线计算中所使用的 150 MW。

将上述动态化的参数代入式(4)和式(6)中,分别计算得到 2577 和 2578 开断时的断面动态功率限值如表 6 所示。

表 6 断面动态功率限值计算结果

Table 6 Result of section dynamic power limit

	断面动态功率限值/MW
下晓 2577 开断	699.6
晓中 2578 开断	667.9

取计算结果最小值 667.9 MW 作为断面动态功率限值计算结果。结果表明,即使在夏季最严酷气象条件和运行方式下,断面功率仍有一定的提升空间。与静态限值相比,动态计算方法能够更好反映实时环境和运行方式对功率限值的影响,实现电网精益化调控。

当日输电断面动态功率限值计算结果曲线如图 5 所示。

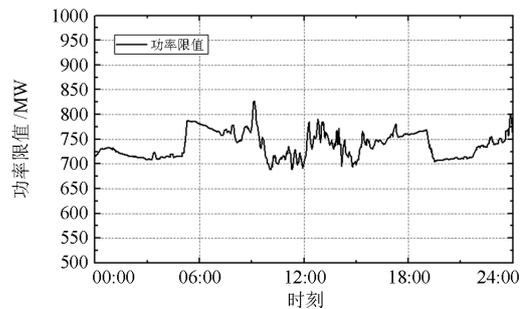


图 5 断面动态功率限值曲线

Fig. 5 Section dynamic power limit curve

结果表明,当载流量采用实时微气象数据进行计算时,受风速和风向的波动影响,计算结果会有较大波动,对于调控而言,实际上可以不考虑这些波动,采用当日极小值作为限值参考,结合实时计算结果进行调控操作。

5 结论

本文基于导线微气象环境实测数据和电网实时运行方式,提出了调控系统输电断面动态功率限值在线计算方法,并研发相应的计算软件模块在D5000调控系统进行在线应用。输电断面动态功率限值的计算突破传统离线计算方法的局限性,真实地反映外部环境和电网运行方式对断面的影响,实现电网的精益化控制,尤其在夏季高峰时段能为电网调控人员提供参考,避免不必要的拉限电操作。

在实际应用过程中,受制于现有的调度管理规程,目前还无法让调控人员突破现有的静态功率限值,完全按照动态限值结果进行电网的调控,但动态限值的计算结果能够为调控人员的调控指令提供参考。同时断面运行数据的积累,也能够为断面的限值修正提供更为准确的数据支撑。随着对电网调控精益化要求的不断提高,断面动态限值计算将具有更广阔的应用前景。

参考文献

- [1] DL 755-2001 电力系统安全稳定导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [2] 卢建刚, 陈慧坤, 叶周. 关于电网稳定断面实时监控软件的设计及应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 30(9): 58-60.
LU Jianguang, CHEN Huikun, YE Zhou. Design and application of electric power network stability real-time monitoring software[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 30(9): 58-60.
- [3] 李传栋, 张逸, 杨桂钟, 等. 基于故障影响域的多重预想故障集筛选方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 92-98.
LI Chuandong, ZHANG Yi, YANG Guizhong, et al. An anticipated multi-contingencies selection method based on fault influence domain[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 92-98.
- [4] 苗世洪, 马帅, 尚亚男, 等. 基于割点和路径搜索的输电断面快速识别方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(2): 39-45.
MIAO Shihong, MA Shuai, SHANG Yanan, et al. A fast recognition method of transmission section based on cut-vertex and path search[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(2): 39-45.
- [5] 侯俊贤, 韩民晓, 董毅峰, 等. 基于子网络收缩的输电断面快速识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 92-97.
HOU Junxian, HAN Minxiao, DONG Yifeng, et al. Transmission section searching method based on power system sub-network combination[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 92-97.
- [6] 王增平, 李刚, 任建文. 基于前 K 最短路径的输电断面搜索新方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 193-200.
WANG Zengping, LI Gang, REN Jianwen. A new research algorithm for transmission section based on K shortest paths[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 193-200.
- [7] 王涛, 李渝, 顾雪平, 等. 考虑地理分区边界优化的电网关键输电断面辨识[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 220-228.
WANG Tao, LI Yu, GU Xueping, et al. Identification of the key transmission sections considering optimization of geographical partition boundary for power grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 220-228.
- [8] 张谦, 奚巍民, 黄俊辉, 等. 考虑系统运行方式的江苏电网过江断面概率潮流实证分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 47-52.
ZHANG Qian, XI Weimin, HUANG Junhui, et al. Probabilistic load flow evaluation considering system operation mode for transmission lines across the Yangzi river of Jiangsu power grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 47-52.
- [9] 房大中, 吴明波, 李传栋, 等. 热稳定约束下断面输电极限分析方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(4): 111-115.
FANG Dazhong, WU Mingbo, LI Chuandong, et al. Analysis method of transfer capability of transmission interfaces under thermal stability constraints[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2007, 19(4): 111-115.
- [10] 陈伟, 郭瑞鹏, 叶琳, 等. 电网断面热稳定限额计算模型及方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 20-24.
CHEN Yi, GUO Ruipeng, YE Lin, et al. Calculation model and method for thermal stability control limit to transmission interfaces in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(17): 20-24.
- [11] 赵娟, 申旭辉, 吴丽华, 等. 结合直流潮流模型的电网断面热稳定极限快速评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 97-101.
ZHAO Juan, SHEN Xuhui, WU Lihua, et al. Fast evaluation method on thermal stability limit of power grid cross-section with DC power flow model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 97-101.
- [12] 戈东方, 钟大文. 电力工程电气设计手册(电气一次部分)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989.
- [13] 张伯明, 陈寿孙, 严正. 高等电力网络分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [14] 於益军, 刘俊, 冯树海, 等. 基于开断灵敏度的静态安全分析辅助决策[J]. 中国电力, 2013, 46(3): 53-58.
YU Yijun, LIU Jun, FENG Shuhai, et al. Assistant decision-making for static security analysis based on outage sensitivity[J]. Electric Power, 2013, 46(3): 53-58.

收稿日期: 2016-02-17

作者简介:

朱 斌(1965-), 男, 高级工程师, 从事电网调控运行管理方面的工作;

邱丽君(1982-), 女, 硕士, 工程师, 从事电力系统通信方面的研究工作;

王 勇(1979-), 男, 高级工程师, 从事电力系统分析与仿真方面的研究。E-mail: wangyong5@epri.sgcc.com.cn

(编辑 周金梅)