

结合直流潮流模型的电网断面热稳定极限快速评估方法

赵娟¹, 申旭辉², 吴丽华², 付红军¹, 谢岩²

(1. 国网河南省电力公司, 河南 郑州 450052; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 电网结构的增强使得系统的热稳定问题日益突出。采用直流潮流的方法对典型等值系统的断面热稳定极限进行了推导, 分析了断面设备 $N-1$ 开断对在运设备有功潮流变化的影响。基于有功潮流的阻抗分配原理, 提出了对断面热稳定极限的评估方法和流程, 可实现断面热稳定极限和限制故障的快速评估。最后, 以河南电网 2014 年夏季大负荷方式为例, 对豫北断面的热稳定极限进行了评估, 仿真结果证明了所提方法的可行性。

关键词: 热稳定极限; 快速评估; 直流潮流

Fast evaluation method on thermal stability limit of power grid cross-section with DC power flow model

ZHAO Juan¹, SHEN Xuhui², WU Lihua², FU Hongjun¹, XIE Yan²

(1. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Enhanced grid structure makes the system thermal stability problems increasingly prominent. The thermal stability of grid section is deduced by use of DC power flow method in typical equivalent system, furthermore, the effect of section $N-1$ breaking on active power flow in operating equipment is analyzed. Based on the principle of active power flow distribution to meet the impedance proportional relationship, thermal stability limit section assessment methods and processes are presented, which can achieve fast assessment on thermal stability limits and restriction faults. Finally, the summer maximum loads mode of Henan power grid in 2014 is taken as example, and the thermal stability limit in northern sections is evaluated. The simulation results prove the feasibility of the proposed method.

Key words: thermal stability limit; fast evaluation; DC power flow

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)03-097-05

0 引言

随着我国电网的不断发展, 主网架结构日益增强。为提升运行的可靠性和灵活性, 以特高压交直流线路构成主网架的特点更加突出^[1-3]。在电网结构发展变化的过程中, 电网稳定问题的主要矛盾和焦点由发展初期的暂稳问题, 逐步过渡到受限于电力设备自身容量的热稳定问题^[4-8]。因此, 研究电网的热稳定问题及其解决方案, 尤其是断面的热稳定极限问题已经成为电网生产实际中不可回避的重要课题。

关于断面热稳定极限的评估方法, 国内外开展了不少研究, 包括: 线性/二次规划法、连续潮流法、遗传算法、蒙特卡罗模拟法等^[9-16]。这类方法与调度人员实际采用的方式调整方法差别往往较大, 不利于在实际电网中的推广应用。而在实际方式计算工作中, 为了确定电网断面的热稳定极限值和约束故障, 并计及约束故障发生后系统内发电机、电动机等动态设备在暂态过程中对断面潮流分布的影

响, 往往仍然采用离线多次调整潮流, 并结合暂态稳定计算仿真的方法。随着电网的快速发展, 尤其是特高压网架的构建提速, 原有 500 kV 电网断面的外部边界发生着快速、深刻地变化, 再加上为提升断面输电能力对原有线路的扩容和改造, 更使得断面热稳定极限的评估变得更加频繁, 旧有的多次调整潮流逐次逼近法逐渐落后于实际工作的需要。

本文基于经由 n 条交流线路互联的等值系统, 结合直流潮流模型, 依据断面潮流的阻抗分配原理, 提出了一种对电网断面热稳定极限的快速评估方法, 通过对断面的 1 次 $N-1$ 扫描, 即可实现电网断面热稳定极限的评估及约束故障的准确选取。

为校核本文所提评估方法的准确性, 以河南电网豫北地区 500 kV 受电断面为例进行验证, 对断面的热稳定极限进行了快速评估, 并与 BPA 仿真软件的结果进行了对比分析。结果证实, 本文提出的快速评估方法与 BPA 时域仿真方法两者结果基本一致。对快速评估方法的结果误差进行了分析, 提出

了进一步减小误差的方法。

1 断面热稳定极限的快速评估方法

典型的经由 n 条交流线路互联的两等值系统如图1所示,考虑到省级电网断面送、受端母线电气距离较近,可以近似处理为图1所示的电气联接关系。其中, l_i 为第 i 条线路, $i \in [1, n]$ 。 x_i 为第 i 条线路的电抗, V_s 、 V_r 分别为断面送、受端母线的电压, δ_{sr} 为送、受端母线电压的相角差。这里忽略了线路的电阻和对地电纳,采用直流潮流的方法对断面潮流进行计算,以期在保持计算结果精度的基础上实现快速评估。

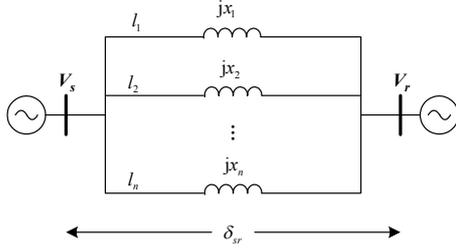


图1 经由断面互联的两等值系统

Fig. 1 Two equivalent system with cross-section

线路热稳定极限功率 P_i 的求取一般将设备的热稳定电流折算为有功潮流,并计及环境温度的影响,具体如式(1)所示。

$$\begin{aligned} P_i &= \sqrt{3}UI_{\max} \cos \varphi \\ I_{\max} &= KI_s \end{aligned} \quad (1)$$

式中: I_{\max} 为线路的热稳定极限电流; I_s 为环境温度为 25°C 时线路的安全电流; K 为温度校正系数;功率因数 $\cos \varphi$ 一般取 0.95 ; P_i 为线路的热稳定极限有功功率。

图1所示的两等值系统间断面有功潮流可按式(2)进行计算。

$$\begin{aligned} P_i &= \frac{V_s V_r \sin \delta_{sr}}{x_i} \\ P_\Sigma &= V_s V_r \sin \delta_{sr} \sum_{i=1}^n \frac{1}{x_i} \\ i &= 1, \dots, n \end{aligned} \quad (2)$$

由式(2)可以看出,断面的有功潮流按照各条线路的电抗成比例分配,即 $P_{i1}/P_{i2} = x_{i2}/x_{i1}$ 。

若线路 l_j 开断,由于断面两侧系统有功的供需没有发生变化,断面总的有功潮流将保持不变,线路 l_j 开断前有功潮流 P_j 将分配至断面其他线路。其中,线路 l_k 在 l_j 开断后的有功潮流 \bar{P}_{kj} 如式(3)所示。

$$\bar{P}_{kj} = \frac{V_s V_r}{x_k} \sin \bar{\delta}_{srj} \quad (3)$$

因此,可以得到线路 l_k 有功潮流的增量 ΔP_{kj} 如式(4)所示。

$$\Delta P_{kj} = \bar{P}_{kj} - P_k = \frac{V_s V_r}{x_k} (\sin \bar{\delta}_{srj} - \sin \delta_{sr}) \quad (4)$$

P_j 即为在各条线路有功潮流增量之和,如式(5)所示。

$$P_j = \sum_{k=1}^n \Delta P_{kj} = V_s V_r (\sin \bar{\delta}_{srj} - \sin \delta_{sr}) \sum_{k=1}^n \frac{1}{x_k} \quad (5)$$

其中, $k \neq j$ 。

根据式(4)~式(5),可以得到线路 l_j 开断后在线路 l_k 上的有功潮流转移比 η_{kj} ,如式(6)所示。

$$\eta_{kj} = \frac{\Delta P_{kj}}{P_j} = \frac{\sum_{k=1}^n \frac{1}{x_k}}{x_k} \quad (6)$$

可以看出, P_j 将按照电抗比例关系分配至剩余的各条线路。

至此,可以给出线路 l_j 开断在线路 l_k 上产生的有功潮流变化率 λ_{kj} 定义,其具体含义如式(7)所示。

$$\lambda_{kj} = \frac{\Delta P_{kj}}{P_k} = \frac{\eta_{kj} P_j}{P_k} = \eta_{kj} \frac{x_k}{x_j} \quad (7)$$

λ_{kj} 反映了线路 l_j 的开断在线路 l_k 上造成的有功潮流变化,由式(7)可以看出, λ_{kj} 是与断面线路参数相关的确定值。根据式(7),若 $k=j$,则有 $\Delta P_{kk} = P_k$,因此 $\lambda_{kk} = 1.0$ 。

基于 λ_{kj} 的含义,对图1所示断面进行开断模拟可以采用静态潮流 $N-1$,也可以采用暂态 $N-1$ 故障仿真,其原因即在于不论采用何种仿真方式,断面各线路的稳态潮流分布均满足阻抗比例关系。因此基于初始潮流,在对图1所示系统的断面进行一轮开断模拟之后,可以得到一系列 λ_{kj} 的值,并给出 λ 矩阵的相关定义为

$$\lambda = \begin{bmatrix} 1 & \lambda_{12} & \cdots & \lambda_{1k} & \cdots & \lambda_{1n} \\ \lambda_{21} & 1 & \cdots & \lambda_{2k} & \cdots & \lambda_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \lambda_{k1} & \lambda_{k2} & \cdots & 1 & \cdots & \lambda_{kn} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \lambda_{n1} & \lambda_{n2} & \cdots & \lambda_{nk} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

根据式(7),若图1所示系统断面已运行在热稳定极限状态下,则必将会有某条线路 l_j 的开断,导

致至少一条线路 l_k 达到其热稳极限的情况出现。因此, 可以计算得到线路 l_k 在线路 l_j 未开断前的有功潮流如式(9)所示。

$$\lambda_{kj} = \frac{P_{kt} - P_{kj}}{P_{kj}} \quad (9)$$

$$P_{kj} = \frac{P_{kt}}{1 + \lambda_{kj}} \quad k \neq j$$

式(9)中, P_{kt} 为线路 l_k 的热稳极限。根据式(8)、式(9), 可以得到运行于热稳极限状态下的断面有功潮流矩阵 \mathbf{P}_T 如式(10)所示。

$$\mathbf{P}_T = \begin{bmatrix} P_1 & P_{12} & \cdots & P_{1k} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_2 & \cdots & P_{2k} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ P_{k1} & P_{k2} & \cdots & P_j & \cdots & P_{kn} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & \cdots & P_{nk} & \cdots & P_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中, 矩阵的对角线元素 P_j 根据式(5)求出, 具体如式(11)所示。

$$P_j = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n \Delta P_{kj} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n (P_{kt} - P_{kj}) \quad (11)$$

至此, 矩阵 \mathbf{P}_T 中的所有元素均已求出。对应于矩阵 \mathbf{P}_T 的第 j 列, 即为线路 j 开断前断面各线路的有功潮流。矩阵 \mathbf{P}_T 反映并给出了断面各元件开断前的潮流分布情况。对矩阵 \mathbf{P}_T 各列分别求和, 可以得到断面在线路 j 开断前的运行功率, 这些和中的最小值, 即为断面热稳定极限的评估结果 $P_{\Sigma j}$, 如式(12)所示。

$$P_{\Sigma j} = \min \left(P_j + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^n P_{kj} \right) \quad j=1, \dots, n \quad (12)$$

对应于式(12)取最小值时的 j , 即为断面热稳定极限的支路开断约束故障。因此, 采用本方法即可以快速地对面热稳极限进行评估, 同时也定位了断面的约束故障。基于得到的评估结果, 对系统的运行方式进行调整, 可实现向热稳极限方式的快速逼近。上述求取断面热稳极限的过程如图2所示。

在图2所示的评估流程中, 判断电网断面是否处于热稳定极限方式的条件是: 断面线路 $N-1$ 故障后, 在各线路故障后的稳态潮流是否达到其热稳定极限功率值 P_i 。与现有离线多次调整潮流的方法不同, 采用本方法每一轮评估均可以得到断面热稳定极限评估结果, 并以此结果为断面潮流调整的目标

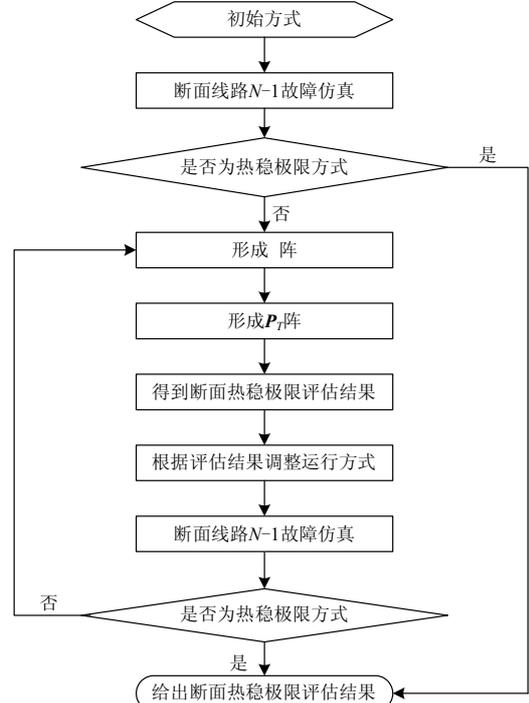


图2 断面热稳定极限的评估流程

Fig. 2 Evaluation procedure of thermal stability limit in cross-section

来调整断面两侧的开机量, 改变了采用现有逐次、无目标的调整开机量方法, 从而实现对电网断面热稳定极限及约束故障的快速评估。

2 仿真实验

以河南电网2014年夏季大负荷方式为例, 采用本文提出的方法对豫北断面的热稳定极限进行评估。2014年河南夏季大负荷方式下, 河南电网总体负荷水平为5 170万kW, 特高压长南线南送5 000 MW, 鄂豫断面南送5 000 MW, 哈郑直流馈入2 000 MW, 灵宝直流馈入1 110 MW。豫北断面的接线构成如图3所示, 其由豫HH双回线和豫TC单回线组成。

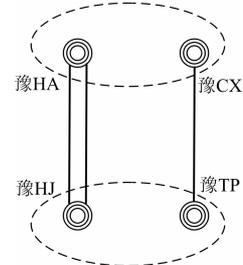


图3 豫北断面一次接线图

Fig. 3 Primary connection diagram on north cross-section of Henan power grid

豫北断面各条线路的初始潮流及其热稳定极

限功率如表1所示。其中,线路的热稳定极限功率按照公式(1)计算,公式中系数的 K 取值为1。

表 1 豫北断面各线路的初始潮流与热稳限额

Table 1 The initial power flow and the thermal stability limit in north cross-section of Henan power grid

	豫HH I回线	豫HH II回线	豫TC线
初始潮流	595.8	595.8	644.9
热稳电流/A	2 500	2 500	2 012
热稳定极限功率	2 056	2 056	1 655

对断面线路进行一轮暂态 $N-1$ 故障仿真,按照本文提出的方法可以形成 λ 阵和 P_T 阵。具体的开断仿真结果如表2所示。

表 2 豫北断面的热稳定极限评估

Table 2 Evaluation on thermal stability in north cross-section of Henan power grid

	豫 HH I 回 $N-1$	豫 HH II 回 $N-1$	豫 TC $N-1$
故障后潮流	豫 HH I 回	—	990
	豫 HH II 回	990	—
	豫 TC	850	850
转移来的潮流	豫 HH I 回	—	394.2
	豫 HH II 回	394.2	—
	豫 TC	205.1	205.1
λ	豫 HH I 回	1	0.662
	豫 HH II 回	0.662	1
	豫 TC	0.318	0.318
热稳极限时线路有功	豫 HH I 回	1 218	1 237.3
	豫 HH II 回	1 237.3	1 218
	豫 TC	1 255.7	1 255.7

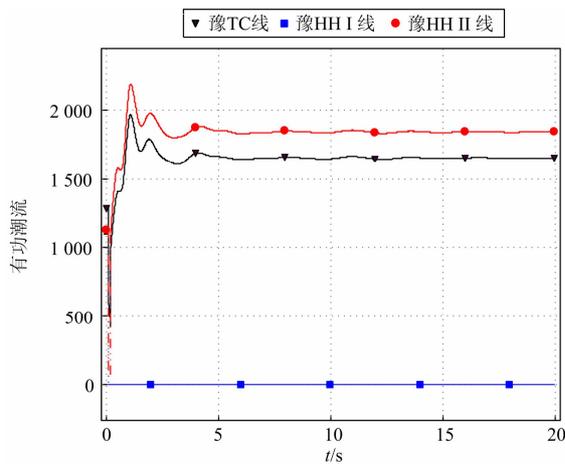


图 4 豫北断面热稳极限方式

Fig. 4 Thermal stability limit on north cross-section of Henan power grid

本评估方法误差的来源包括这两个方面: 1) 对断面两侧系统电压的近似处理, 认为方式调整过程

根据表2中断面热稳定极限时各线路的有功潮流结果和式(12)的判定方法, 可以给出豫北断面的热稳定极限为3711 MW, 限制故障为豫HH线 $N-1$ 故障。

根据评估结果, 并以其为断面潮流调整的目标来调整断面两侧的开机量, 对运行方式进行调整, 实现向热稳定极限方式逼近, 经过4次调整后, 即可将豫北断面调整至热稳定极限方式, 使用PSD-BPA对豫HH线 $N-1$ 故障进行仿真, 结果如图4所示, 豫TC线的稳态有功潮流为1650 MW, 达到了线路自身的热稳定极限功率。豫北断面热稳极限的最后输出结果为3534 MW。可以看出, 首次评估的结果误差为5%, 但根据评估结果经过几次调整后, 即可迅速缩小误差, 并逼近最终真实结果。

中, 两侧系统的电压为1.0 pu; 2) 实际系统中往往是某条线路先达到热稳定极限, 而非断面所有线路同时达到热稳定极限, 这是豫北断面热稳定极限首次评估误差较大的主要原因, 但是经过方式调整使运行方式逼近热稳定极限方式时, 误差将迅速降低。

3 结论

本文通过对典型互联系统断面功率变化的推导, 提出了断面热稳定极限的快速评估方法, 并以河南电网2014年夏季大负荷方式为研究对象, 对豫北断面的热稳定极限进行了仿真验证。得到以下结论:

(1) 所提出的快速评估方法可实现断面热稳定极限与限制故障的同时评估。根据评估的结果, 通过方式调整, 可快速确定断面的热稳定极限, 便于调度人员分析掌握。

(2) 所提出的快速评估方法误差可通过运行方式的手动调整予以控制, 在运行方式逼近热稳极限

方式时,误差即可忽略;

(3) 所提出的快速评估方法和流程可为软件实现提供重要参考,成为智能化仿真软件的应用模块之一。

参考文献

- [1] 刘振亚,张启平. 国家电网发展模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 1-10.
LIU Zhenya, ZHANG Qiping. Study on the development mode of National Power Grid of China[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 1-10.
- [2] 张文亮,周孝信,郭剑波,等. $\pm 1\ 000$ kV特高压直流在我国电网应用的可行性研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(8): 1-5.
ZHANG Wenliang, ZHOU Xiaoxin, GUO Jianbo, et al. Feasibility of $\pm 1\ 000$ kV ultra HVDC in the power grid of China[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(8): 1-5.
- [3] 周浩,余宇红. 我国发展特高压输电中一些重要问题的讨论[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 1-9.
ZHOU Hao, YU Yuhong. Discussion on several important problems of developing UHV AC transmission in China[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 1-9.
- [4] 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.
- [5] 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 the CSU-EPSCA, 2007, 19(4): 111-115.
- [6] 李勇,姚文峰,杨柳,等. 南方电网主网架热稳定和短路电流超标问题分析[J]. 南方电网技术, 2013, 7(2): 21-25.
LI Yong, YAO Wenfeng, YANG Liu, et al. Analysis on the problems of thermal stability and standard-exceed short circuit current in the CSG main grid[J]. Southern Power System Technology, 2013, 7(2): 21-25.
- [7] 雷霆,胡晓飞,胡世骏,等. 基于稳态数据的调度主站热稳定控制技术[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 103-106.
LEI Ting, HU Xiaofei, HU Shijun, et al. Thermal stability control technology in dispatching center based on grid steady-state data[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 103-106.
- [8] 栾军,张智刚,寇惠珍,等. 提高500 kV 电网输电能力的技术研究[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 15-17.
LUAN Juan, ZHANG Zhigang, KOU Huizhen, et al. Research on improving transmission ability of 500 kV network[J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 15-17.
- [9] HAMOUND G Assessment of available transfer capability of transmission system[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(1): 27-32.
- [10] QU Y, SINGH C. Assessment of available transfer capability and margins[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(2): 463-468.
- [11] EJEBE G C, TONG J, WAIGHT J G, et al. Available transfer capability calculations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(4): 1521-1527.
- [12] SHAABAN M, NI Yixin, WU F. Total transfer capability calculations for competitive power networks using genetic algorithms[C] // IEEE, IEE Proceedings of International Conference on DRPT, London: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2000: 114-118.
- [13] MELLO J, MELO A C G, GRANVILLE S. Simultaneous transfer capability assessment by combining interior point methods and monte carlo simulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 2(2): 736-742.
- [14] 陈静,李华强,刘慧. 基于连续潮流法的交直流系统可利用传输能力的计算[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 1-5.
CHEN Jing, LI Huaqiang, LIU Hui. Calculation of available transfer capability for AC/DC power systems based on continuation power flow[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 1-5.
- [15] 马晓明,范春菊,胡天强,等. 基于热稳定约束的架空导线增容计算研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 86-91.
MA Xiaoming, FAN Chunju, HU Tianqiang, et al. Calculation of current carrying capacity of overhead transmission line based on thermal stability constraint[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 86-91.
- [16] 唐国栋,李华强,肖玲,等. 交直流系统可利用传输能力的评估[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 12-17.
TANG Guodong, LI Huaqiang, XIAO Ling, et al. Evaluation of available transfer capability for AC/DC power systems[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 12-17.

收稿日期: 2014-04-25; 修回日期: 2014-06-16

作者简介:

赵娟(1975-),女,高工,研究方向为电网稳控系统配置与整定; E-mail: flora_zz@sina.com

申旭辉(1979-),男,博士,研究方向为交直流系统的仿真与分析。E-mail: shenxuhui@epri.sgcc.com.cn