

# 一种基于节点聚合的区域联络线潮流调整方法

黄磊<sup>1</sup>, 鲍颜红<sup>2</sup>, 刘映尚<sup>1</sup>, 徐泰山<sup>2</sup>, 周剑<sup>1</sup>, 徐伟<sup>2</sup>

(1. 中国南方电网电力调度控制中心, 广东 广州 510623;

2. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106)

**摘要:**在线安全稳定分析数据由本地状态估计数据和上级下发的其他调度机构数据拼接构成,由于两者时间不同步造成区域联络线功率出现偏差。文中提出了一种内外网数据拼接的区域联络线潮流调整方法,在将联络线聚合成联络通道以及将对联络通道灵敏度较大的若干节点聚合的基础上,通过求解聚合节点调整量和联络通道潮流偏差量的线性方程组获得调整量,避免采用优化方法时计算速度慢和部分节点调整量过大的问题;当方程组病态时,通过求解极小范数最小二乘解避免线性方程组无解的问题。该方法可以满足在线安全稳定分析计算速度和准确性要求,且某实际电网的算例验证了该方法的有效性。

**关键词:**在线安全稳定分析;数据拼接;联络线潮流;线性方程组;最小二乘解

中图分类号:TM76

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)01-0071-05

## 0 引言

随着电网运行工况日益多变,安全稳定问题也日益复杂。过去十年以来在线安全评估技术得到了迅速发展,调度运行控制逐渐转变为离线以研究运行特性和机理为主、安排运行方式为辅,在线以调度优化控制运行方式为主的模式<sup>[1-7]</sup>。

在线安全稳定分析计算的基础是形成全网的潮流计算数据,目前的调度运行模式下各个调度运行机构均有本地的数据采集与监视控制(supervisory control and data acquisition, SCADA)系统量测数据和状态估计数据,但其他调度机构模型和数据需要由上级调度机构转发<sup>[8]</sup>。上级调度机构数据刷新周期一般在5 min左右,而本地状态估计1 min内即可更新,因此上级下发数据刷新时间一般滞后于本地数据。若直接将本地状态估计模型数据与其他调度机构模型数据进行简单拼接后生成潮流计算数据<sup>[9]</sup>,则会因为2类数据存在时间差,同时各调度机构状态估计结果不完全一致,而导致内外网网络线交换功率和平衡机功率均可能出现较大误差。

针对区域联络线潮流调整问题,在潮流计算中考虑区域联络线功率控制可能造成迭代次数增加过多从而影响潮流收敛性<sup>[10]</sup>;通过多次迭代调整反复计算潮流的方法计算速度难以满足要求<sup>[11-12]</sup>;而基于源流路径剖分<sup>[13]</sup>和神经网络<sup>[14]</sup>的方法过于复

杂,实用性较差。实际工程中更多通过优化方法求解该问题<sup>[15-17]</sup>,但求解优化模型耗时较多,且对联络线功率灵敏度较大的节点可能调整量过大。

文中提出了一种内外网数据拼接的区域联络线潮流调整方法。将联络线聚合成联络通道,将对联络通道灵敏度较大的若干节点聚合成一个节点,以此为基础,求解聚合节点调整量和联络通道潮流偏差量的线性方程组获得调整量,避免采用优化方法时计算速度慢和部分节点调整量过大的问题。该方法可以满足在线安全稳定分析计算速度和准确性要求,且某实际电网的算例验证了其有效性。

## 1 联络通道与聚合节点

### 1.1 二次规划模型

当上下级调度机构状态估计数据由于时间不同步存在差异时,由于在线安全稳定分析计算的主要是本地预想故障,因此以本地状态估计数据为准,通过调整本地外其他节点注入功率满足联络线功率要求。获取本地状态估计模型数据和上级下发的状态估计模型数据后,拼接成全网模型数据;基于所述全网模型数据生成潮流文件进行潮流计算,获得所有联络线功率。文献[2,15]通过求解如下二次规划模型获得节点注入调整量:

$$\min \left[ \left( \frac{\Delta P_1}{P_{1N}} \right)^2 + \left( \frac{\Delta P_2}{P_{2N}} \right)^2 + \dots + \left( \frac{\Delta P_n}{P_{nN}} \right)^2 \right] \quad (1)$$

式中: $\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_n$ 为本地区域外其他节点注入有功功率的变化量; $n$ 为区域外可调整节点总数; $P_{1N}, P_{2N}, \dots, P_{nN}$ 为对应方式下的节点有功功率。

约束条件包括以下3类:

收稿日期:2019-07-09;修回日期:2019-08-21

基金项目:中国南方电网有限公司科技项目“电网限制短路电流运行方式在线智能决策控制系统研究”

(1) 保证满足联络线有功潮流的要求,即:

$$\Delta P_1 G_{l-1} + \Delta P_2 G_{l-2} + \cdots + \Delta P_n G_{l-n} = \Delta P_l$$

$$l = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

式中:  $G_{l-1}, G_{l-2}, \dots, G_{l-n}$  为联络线有功潮流对于节点有功注入功率的灵敏度系数;  $\Delta P_l$  为相对于本地状态估计数据联络线有功潮流变化量;  $m$  为联络线条数。

(2) 各节点有功注入功率的上下限约束:

$$\Delta P_{i\min} \leq \Delta P_i \leq \Delta P_{i\max} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

(3) 平衡节点有功注入功率的上下限约束:

$$k_1 \Delta P_{\text{slack-min}} \leq -(\Delta P_1 + \Delta P_2 + \cdots + \Delta P_n) \leq k_2 \Delta P_{\text{slack-max}} \quad (4)$$

式中:  $\Delta P_{\text{slack-min}}, \Delta P_{\text{slack-max}}$  分别为相对于对应方式的平衡节点有功注入功率变化量的上下限;  $k_1, k_2$  为考虑网损后的修正系数。

上述方法的主要问题是二次规划模型相对复杂,求解时间较长,当没有可行解时无法给出次优解。此外,模型的目标函数是节点有功功率注入相对变化总量较小,因此灵敏度大的节点调整量也较大,可能对上级下发的状态估计数据改变较大。

## 1.2 联络线和节点聚合

对于本地区域电网与外部电网的联络线而言,可以将其合并为若干联络通道。联络通道通常由同一送电或受电方向的多条联络线组成,这些联络线彼此之间联系紧密。一般在联络通道内各条联络线拓扑连接不变的情况下,各条联络线的功率分配比例不变,因此只要将联络通道的功率调整至目标值,其中的各条联络线功率就可以满足要求。而考虑到上级下发和本地状态估计之间的时间间隔不会太长,因此联络线拓扑连接不变的条件基本可以得到满足。

对于某一联络通道,存在对其有功功率灵敏度较大的多个节点,一般情况下内外网联络通道网架结构简单清晰,因此这些节点对同一个联络通道的灵敏度相差不大,可以将其聚合成一个节点以简化问题,聚合节点的灵敏度取这些节点对联络通道灵敏度的平均值。理想情况为若节点的调整量相同,则聚合节点的灵敏度为关联节点的平均灵敏度,即若式(5)成立,则有式(6):

$$\Delta P_1 = \Delta P_2 = \cdots = \Delta P_n = \Delta P/n \quad (5)$$

$$\Delta P_1 G_{T-1} + \Delta P_2 G_{T-2} + \cdots + \Delta P_n G_{T-n} = \Delta P(G_{T-1} + G_{T-2} + \cdots + G_{T-n})/n \quad (6)$$

式中:  $G_{T-1}, G_{T-2}, \dots, G_{T-n}$  为节点有功注入功率对联络通道  $T$  有功潮流的灵敏度系数;  $n$  为聚合节点中关联节点总数。

## 2 线性方程组的建立和求解

### 2.1 建立线性方程组

由上文可知,通过将联络线聚合成若干联络通道,将对联络通道灵敏度较大的若干节点聚合成一个节点,可以较大程度减少计算复杂度和计算量。基于此文中构建了线性方程组,并通过求解该方程组获得各节点注入功率调整量。

遍历本地网络与各外部子网间联络线获得所有联络通道,计算所有节点对联络通道组成联络线的灵敏度  $S_{k,i}$ ,其中,  $k$  为联络线,  $i$  为节点。计算各节点对联络通道  $j$  的灵敏度:

$$S_{j,i} = \sum_{k=1}^{N_j} S_{k,i} \quad (7)$$

式中:  $N_j$  为联络通道  $j$  的组成联络线路数。将各节点按对联络通道  $j$  的灵敏度进行排序,得到可调整节点中灵敏度的最大值  $S_{j,\max}$ ,则灵敏度阈值为  $\eta S_{j,\max}$ ,  $\eta$  为设置的节点相对灵敏度阈值,  $\eta < 1$ 。对于某一联络通道,筛选出对该联络通道灵敏度大于联络通道灵敏度阈值值的节点,形成该联络通道的关联节点集合,即为该联络通道的聚合节点。

计算某一联络通道聚合节点对应的各关联节点对联络通道的平均灵敏度,将其作为该聚合节点对联络通道的灵敏度;该聚合节点对联络通道的灵敏度既包括与其对应的联络通道灵敏度,也包括对其他联络通道的灵敏度。

建立以聚合节点对联络通道的灵敏度为系数的聚合节点调整量和联络通道功率偏差量的线性方程组,求解该线性方程组,获取各聚合节点的调整量。所述线性方程组为:

$$\begin{cases} a_{11} \Delta P_1 + \cdots + a_{1j} \Delta P_j + \cdots + a_{1n} \Delta P_n = \Delta P_{l,1} \\ a_{h1} \Delta P_1 + \cdots + a_{hj} \Delta P_j + \cdots + a_{hn} \Delta P_n = \Delta P_{l,h} \\ a_{n1} \Delta P_1 + \cdots + a_{nj} \Delta P_j + \cdots + a_{nn} \Delta P_n = \Delta P_{l,n} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $a_{hj}$  是联络通道  $j$  的聚合节点对联络通道  $h$  的灵敏度,  $h = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, n, n$  为联络通道总数;  $\Delta P_j$  为联络通道  $j$  聚合节点的调整量;  $\Delta P_{l,h}$  为联络通道  $h$  的功率偏差量,为潮流计算结果中联络通道功率与本地状态估计模型数据中联络通道功率的功率差值。

### 2.2 线性方程组求解

因为式(8)中灵敏度为近似值,因此存在方程组病态的可能性。当判断出该线性方程组为病态方程组时,求解极小范数最小二乘解<sup>[18]</sup>,获取各聚合节点的调整量。

对线性方程组进行全主元消去,若某一次消去过程中选定的主元小于指定阈值,则判断该方程组病态并求解极小范数最小二乘解。其中,求解不相容线性方程组  $Ax=b$  的极小范数最小二乘解方法如下:

(1) 计算  $B=A^T A, c=A^T b$ , 得到方程组  $Bx=c$ ;

(2) 对方程组  $Bx=c$  进行全主元消去, 消去其中对角元小于指定阈值的方程, 得到方程  $B'x=c'$ ;

(3) 通过全主元消去和回代运算求解方程组  $B'B'^T z=c'$ , 得到  $z$ ;

(4) 计算  $x=B'^T z$ 。

### 3 节点调整量分配

将聚合节点对应的关关节点集合按照发电、负荷和直流功率节点类型分类。聚合节点调整量功率分配时按照预先设置的发电、负荷和直流功率节点优先级顺序调整, 在某一类优先级顺序靠前的节点分配功率至其限值时, 再进行后续优先级较低节点功率分配。其中新能源和水电送端电网可考虑发电节点优先调整, 负荷中心受端电网则负荷节点优先调整, 直流功率一般波动不大, 调整顺序靠后。

在每一类节点功率分配中, 所有节点按照其可调节空间大小进行等比分配, 当节点功率增加时, 可调空间为节点功率允许调整上限与节点当前功率之差, 当节点功率减少时, 可调空间为节点当前功率与节点功率允许调整下限之差。由于一个节点可能属于多个聚合节点, 则该节点的分配功率为多个聚合节点分配功率之和, 若计算获得的节点功率调整量大于 0, 则在原节点功率基础上附加调整量。

当判断出某一节点调整量越限, 则将差额功率返回聚合节点重新分配, 以获得满足联络线功率偏差要求的各节点功率调整量。其中, 返回给多个聚合节点的功率比例之前聚合节点分配给该节点的功率之比。聚合节点功率调整量分配流程如图 1 所示。

### 4 算例仿真验证

采用江苏电网 2017 年 3 月 9 日 16:52:24 断面时刻状态估计数据进行算例验证, 为测试算法性能, 上级下发数据选取距离该时刻较远的 15:56:00 国调下发状态估计数据。江苏电网与外部电网共有 16 条联络线, 通道识别后有 8 个通道, 具体识别结果如图 2 所示。

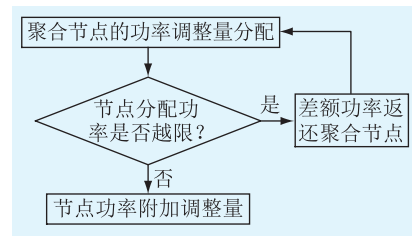


图 1 聚合节点功率调整量分配流程

Fig.1 Flow chart of power adjustment allocation for aggregate node

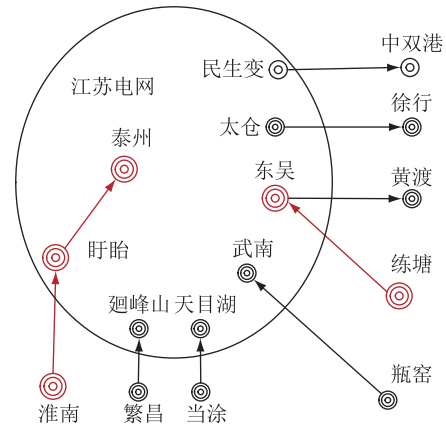


图 2 通道识别结果

Fig.2 Channel recognition results

对于每个联络通道, 以外网节点对该通道灵敏度最大值为基准, 筛选灵敏度大于阈值(灵敏度阈值比例为 0.9)的节点, 作为当前通道的关关节点, 计算关关节点对联络通道的平均灵敏度作为聚合节点的灵敏度。

以苏廻峰—皖繁昌联络通道为例, 该通道的关关节点及聚合节点对部分联络通道灵敏度如表 1 所示。从表 1 可见, 关关节点对各联络通道灵敏度相近, 可以聚合成一个节点。

表 1 关关节点及聚合节点灵敏度

Table 1 Sensitivity of association node and aggregate node

节点名称	苏天目— 皖当涂	苏武南— 浙瓶窑	苏太仓— 沪徐行	苏廻峰— 皖繁昌
皖盛桥	0.024 40	0.043 85	-0.010 37	0.355 48
皖月桥	0.024 40	0.043 85	-0.010 37	0.355 48
皖繁南	0.025 00	0.044 44	-0.010 06	0.353 40
皖喻村	0.025 10	0.044 50	-0.010 03	0.353 18
皖库山	0.025 37	0.044 74	-0.009 91	0.352 35
皖玉楼	0.030 42	0.049 76	-0.007 29	0.334 62
皖丹阳	0.033 64	0.052 97	-0.005 62	0.323 29
聚合节点	0.026 90	0.046 30	-0.009 09	0.346 83

通过求解式(8)获得聚合节点调整量, 按负荷节点优先调整的顺序将调整量分配至各个关关节

点,其中调整量在各负荷节点允许调整范围内,之后重新进行潮流计算,结果如表2所示。

表2 联络通道潮流调整结果

Table 2 Tie channel power flow adjustment results

通道	MW				
	目标潮流	合并后潮流	调整后功率	合并后与目标差异	调整后与目标差值
苏太仓— 沪徐行	-1 009.5	-1 003.62	-1 008.38	5.88	1.12
苏东吴— 沪黄渡	-560.60	-548.00	-564.52	12.60	-3.92
苏东吴— 沪练塘	548.00	530.02	544.99	-17.98	-3.01
苏武南— 浙瓶窑	34.50	-22.99	33.09	-57.49	-1.41
苏天目— 皖当涂	1 019.00	1 100.90	1 019.70	81.90	0.70
苏邳峰— 皖繁昌	429.00	391.18	428.80	-37.82	-0.20
苏盱眙— 华淮南	1 030.00	1 041.86	1 034.80	11.86	4.80
民生— 中双	-122.09	-122.08	-122.1	0.01	-0.01

由表2可见,调整后联络通道潮流与本地状态估计潮流接近,误差在允许范围内,其中各个节点厂站最大调整量为18.46 MW。如通过求解节点注入调整量最小的二次规划函数方法,在相同误差范围内各节点厂站中最大调整量为27.12 MW,可见文中方法节点调整量分布相对均衡。

并且通道潮流调整计算(不包括潮流计算)耗时501 ms,如果采用二次规划函数方法则计算耗时2 743 ms,相比而言文中方法计算效率较高。

## 5 结语

针对在线安全稳定分析中本地状态估计数据和上级下发的其他调度机构数据时间不同步的问题,文中提出了一种基于节点聚合的区域联络线潮流调整方法,计算速度和精度可以满足在线安全稳定分析要求。实际上,该问题的最终解决还需要完善目前的状态估计算法,通过多个调度机构分解协调的分布式并行计算技术,实现全网统一的状态估计模型和数据。

### 参考文献:

[1] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架:(一)从孤立防线到综合防御[J]. 电力系统自动化,2006,30(1): 8-16.  
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: part I from isolated defense lines to coordinated defending[J]. Automation of Electric Power System, 2006, 30(1): 8-16.

[2] 徐泰山,许剑冰,鲍颜红,等. 互联网预防控制和紧急控制在线预决策系统[J]. 电力系统自动化,2006,30(7): 1-4.  
XU Taishan, XU Jianbing, BAO Yanhong, et al. On-line pre-decision based preventive and emergency control system for interconnected power grids[J]. Automation of Electric Power System, 2006, 30(7): 1-4.

[3] 李碧君,许剑冰,徐泰山,等. 大电网安全稳定综合协调防御的工程应用[J]. 电力系统自动化,2008,32(6): 25-30.  
LI Bijun, XU Jianbing, XU Taishan, et al. Engineering application of integrated and coordinated defense technology of large power system security and stability[J]. Automation of Electric Power System, 2008, 32(6): 25-30.

[4] 汤涌,王英涛,田芳,等. 大电网安全分析、预警及控制系统的研发[J]. 电网技术,2012,36(7): 1-11.  
TANG Yong, WANG Yingtao, TIAN Fang, et al. Research and development of stability analysis, early-warning and control system for huge power grids[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 1-11.

[5] 孙宏斌,胡江溢,刘映尚,等. 调度控制中心功能的发展——电网实时安全预警系统[J]. 电力系统自动化,2004,28(15): 1-6.  
SUN Hongbin, HU Jiangyi, LIU Yingshang, et al. Development of the power dispatching control center-real time power security early warning system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 1-6.

[6] 严剑峰,于之虹,田芳,等. 电力系统在线动态安全评估和预警系统[J]. 中国电机工程学报,2008,28(34): 87-93.  
YAN Jianfeng, YU Zhihong, TIAN Fang, et al. Dynamic security assessment and early warning system of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 87-93.

[7] 蔡斌,吴素农,王诗明,等. 电网在线安全稳定分析和预警系统[J]. 电网技术,2007,31(2): 36-41.  
CAI Bin, WU Sunong, WANG Shiming, et al. Power grid on-line security and stability analysis and forewarning system[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 36-41.

[8] 张佳楠,袁启海,余建明,等. 基于联络线扩展区域分解协调的分布式并行状态估计[J]. 电力系统自动化,2019,43(4): 166-173.  
ZHANG Jianan, YUAN Qihai, YU Jianming, et al. Distributed parallel state estimation based on decomposition and coordination of tie-line extended area[J]. Automation of Electric Power System, 2019, 43(4): 166-173.

[9] 汤伟,吴昊. 基于网络拓扑结构的全网潮流计算模型自动生成[J]. 现代电力,2013,30(2): 13-16.  
TANG Wei, WU Hao. The automatic generation of power flow calculation model for whole power grid based on network topology[J]. Modern Electric Power, 2013, 30(2): 13-16.

[10] 胡学浩,李汉香. 潮流计算中区域联络线功率控制的模拟计算方法初探[J]. 电网技术,1989(4): 52-54, 72.  
HU Xuehao, LI Hanxiang. A simulation method of tie line power flow control among areas of an interconnected network in load flow calculation[J]. Power System Technology, 1989(4):

- 52-54, 72.
- [11] 黄国栋, 崔晖, 许丹, 等. 安全约束经济调度中有功潮流调整方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 91-96.  
HUANG Guodong, CUI Hui, XU Dan, et al. A method of active power flow adjustment in security constrained economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 91-96.
- [12] 张跃驰, 刘本希, 罗彬, 等. 基于 PSD-BPA 的电网运行方式数据自动整合与调整方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 102-108.  
ZHANG Yuechi, LIU Benxi, LUO Bin, et al. PSD-BPA based automatic integration and adjustment method of power grid operation plan data[J]. Automation of Electric Power System, 2017, 41(1): 102-108.
- [13] 朱涛, 易善军, 于继来. 基于电力网络源流路径电气剖分的联络线功率调控方法[J]. 电网技术, 2008(11): 24-29, 39.  
ZHU Tao, YI Shanjun, YU Jilai. Tie-line power regulation method based on electrical dissecting for power source and power flow path in power network[J]. Power System Technology, 2008(11): 24-29, 39.
- [14] 韩军锋, 吴杰康. 基于灵敏度分析与神经网络算法的互联电力系统联络线功率调整方法[J]. 陕西电力, 2010, 38(7): 47-51.  
HAN Junfeng, WU Jiekang. Method to adjust power of interconnected power system the-line based on sensitivity analysis and neural network algorithm[J]. Shaanxi Electric Power, 2010, 38(7): 47-51.
- [15] 鲍颜红, 方勇杰, 薛禹胜, 等. 在线预决策紧急控制系统中的若干问题[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(24): 1-12, 16.  
BAO Yanhong, FANG Yongjie, XUE Yusheng, et al. Practical considerations on the on-line pre-decision emergency control system[J]. Automation of Electric Power System, 2001, 25(24): 1-12, 16.
- [16] 陆文甜, 林舜江, 刘明波. 远距离交流直流并联输电通道联络线的有功优化分配[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2017, 45(7): 16-24.  
LU Wentian, LIN Shunjiang, LIU Mingbo. Optimal distribution of active power for tie-lines in long-distance ac/dc parallel transmission channel[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2017, 45(7): 16-24.
- [17] 周海锋, 徐伟, 鲍颜红, 等. 基于相似日选择的调度计划安全校核潮流数据生成[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 87-93.  
ZHOU Haifeng, XU Wei, BAO Yanhong, et al. Power flow data generation of security check for scheduling plans based on similar day selection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 87-93.
- [18] 邬弘毅, 潘卫, 王春生. 有关解线性方程组的一些思考[J]. 大学数学, 2010, 26(6): 174-177.  
WU Hongyi, PAN Wei, WANG Chunsheng. Some thoughts for solving system of linear equations[J]. College Mathematics, 2010, 26(6): 174-177.

#### 作者简介:



黄磊

黄磊(1987),男,博士,高级工程师,从事电力系统稳定分析与控制工作(E-mail: huanglei@csg.cn);

鲍颜红(1971),男,博士,研究员级高级工程师,从事电力系统安全稳定分析与控制工作;

刘映尚(1964),男,博士,教授级高级工程师,从事电力系统运行控制与风险管理工作。

## A method for power flow adjustment of tie line based on data splicing of internal and external networks

HUANG Lei<sup>1</sup>, BAO Yanhong<sup>2</sup>, LIU Yingshang<sup>1</sup>, XU Taishan<sup>2</sup>, ZHOU Jian<sup>1</sup>, XU Wei<sup>2</sup>

(1. Electric Power Dispatching and Control Center, China Southern Power Grid, Guangzhou 510623, China;

2. NARI Group(State Grid Electric Power Research Institute) Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

**Abstract:** The online security and stability analysis data is composed of local state estimation data and data of other dispatching agencies issued by the superior. The power deviation of the regional tie line is caused by the synchronization of the time between the two. In this paper, a method of regional tie-line power flow adjustment is proposed for data splicing of internal and external networks. On the basis of aggregation of interconnection lines into contact channels and several nodes with greater sensitivity to the aggregate nodes, the adjustment quantity is obtained by solving the linear equations of aggregate node adjustment quantity and connection channel power flow deviation quantity. When the system is ill-conditioned, the problem of no solution of linear system is avoided by solving minimum norm least squares solution. This method can meet the requirements of speed and accuracy of online safety and stability analysis. The validity of the method is verified by the case of actual power system.

**Keywords:** online security and stability analysis; data splicing; tie-line power flow; linear equations; least squares solution

(编辑 方晶)