

# 基于相似日选择的调度计划安全校核潮流数据生成

周海锋, 徐伟, 鲍颜红, 郭剑, 严明辉, 汪马翔

(南瑞集团公司/国网电力科学研究院, 江苏 南京 211000)

**摘要:** 为了提高调度计划安全校核的准确度和精细度, 提出了一种基于相似日选择的调度计划安全校核潮流数据生成方法。根据候选基准方式与计划方式综合相似度最高原则从相似日历史数据中筛选出基准方式, 在此基础上生成内网潮流数据的拓扑信息和无功电压数据。通过在潮流计算迭代过程中自动投退容抗器, 将计划方式母线电压控制在基准方式实际电压值附近, 形成收敛的合理的内网潮流数据。根据联络线一致且联络线潮流最接近原则从外网潮流数据中筛选出待拼接的外网方式, 在此基础上将内网潮流数据和外网方式数据进行拼接, 通过调整外网潮流满足边界节点电压和联络线有功约束, 生成满足调度计划安全校核的全网潮流数据。通过实际电网应用, 验证了该方法的实用性和有效性。

**关键词:** 相似日; 调度计划; 安全校核; 数据整合; 潮流调整

## Power flow data generation of security check for scheduling plans based on similar day selection

ZHOU Haifeng, XU Wei, BAO Yanhong, GUO Jian, YAN Minghui, WANG Maxiang

(NARI Group Corporation/State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211000, China)

**Abstract:** Power flow data generation based on similar day selection is proposed to improve the accuracy and fineness of security check for scheduling plans. Integrated similarity degree is defined to select basic operation mode from historical operation modes of similar days. Topology information, reactive data and generator voltage data are extracted from basic operation mode. Bus voltage can be kept near the voltage value in the basic operation mode through auto-switching of reactors and capacitors during power flow calculation to form converged and reasonable internal network power flow data. Operation mode of external network with similar boundary nodes is selected with largest integrated similarity degree. The whole power flow data is generated through the joint of external and internal network power flow data. External network is adjusted to maintain the boundary node voltage and tie line power as the value of internal network. Real engineering applications in actual power grid have fully confirmed the practicality and validity of this method.

**Key words:** similar day; scheduling plans; security check; data integration; power flow regulation

中图分类号: TM71

文章编号: 1674-3415(2015)18-0087-07

## 0 引言

随着特高压建设和大区电网互联的推进, 交直流混联电网规模不断扩大, 电网运行方式越来越复杂, 而风电、光伏等新能源大规模接入进一步加剧了电网运行方式的不确定性<sup>[1-5]</sup>。调度计划是电网调度运行的重要环节, 合理的调度计划安排是保证电网安全稳定运行的前提和基础<sup>[6]</sup>。通过对调度计划

进行安全稳定校核, 在不满足安全稳定约束时给出调度计划调整建议, 对提高电网安全稳定运行水平, 提升大电网驾驭能力和资源优化配置能力具有至关重要的作用<sup>[7-11]</sup>。

调度计划安全校核的基础是生成满足安全稳定分析要求的计划校核潮流数据。对于调度中心调管范围内的子网(简称为内网), 调度计划数据包括负荷预测、发电计划、检修计划和区域功率交换计划。形成完整的内网计划校核潮流数据还需要电网模型和无功电压数据。进行暂态稳定校核和小干扰稳定校核时, 还需要外部电网的详细数据。计划校核潮流数据生成的难点在于不仅能够满足潮流收敛性,

**基金项目:** 国家电网公司科技项目“输电线路在线动态增容技术研究与运用”, “计及电网安全稳定性的输变电设备风险评估与运维管理决策技术研究与运用”

还需要满足在线应用对计算速度的要求<sup>[12-13]</sup>。

无功电压数据初值、无功电压调整策略和外网潮流数据是影响计划校核潮流数据收敛性的主要因素，而收敛性的改善有助于进一步提高计划校核潮流数据生成的计算速度。本文选取历史相似日潮流数据作为候选基准方式，通过灰色关联分析法计算候选基准方式与调度计划数据有功分布的相似程度，从基准方式提取无功电压数据作为计划校核潮流计算的初值，提高计划校核潮流数据的收敛性和计算精度；通过在潮流迭代过程中自动投退无功补偿装置的无功电压调整策略将母线电压维持在指定值，减少潮流计算的次数；选取与调度计划数据联络线相同且联络线潮流最接近的外网潮流数据，通过调整外网潮流数据的有功出力、负荷功率和无功补偿装置投退状态，使联络线有功功率和边界节点电压满足精度要求，生成满足调度计划安全校核要求的全网潮流数据；采用并行计算技术实现调度计划中各个计划方式的全网潮流数据生成，进一步提高在线应用时的计算速度。

## 1 安全校核潮流数据收敛性的影响因素

### 1.1 无功电压数据生成

为了确保计划校核潮流数据满足收敛性和运行约束的要求，需要生成合理的无功电压数据。无功电压数据的生成算法主要包括优化规划类方法和潮流调整类方法。优化规划类方法通过求解包含优化目标和约束条件的规划模型获得合理的无功分布，存在算法复杂性高、对初值的依赖性强和算法收敛性差等不足<sup>[14]</sup>。潮流调整类方法通过从基准方式提取调度计划未提供的初始无功电压数据，并根据无功就地平衡思想进行潮流调整获得合理的无功电压分布。由于未考虑基准方式和计划方式的相似程度，当二者差异过大时可能导致潮流迭代次数增加或者潮流不收敛<sup>[15-16]</sup>。因此，可以根据相似日原理从历史数据中挑选出与调度计划数据最接近的基准方式，从中提取调度计划未提供的无功电压数据作为调度计划潮流调整的初值。

### 1.2 无功电压调整策略

从基准方式提取的初始无功电压数据可能无法满足无功功率的就地平衡。为了保证整合后计划校核潮流数据母线电压满足要求，需要进行无功电压调整。现有无功电压调整算法通常采用将预先选定的系统枢纽节点设置为 PV 节点，然后将潮流计算后系统枢纽节点的未安排无功功率分摊到周边无功电源的方法实现无功就地平衡和电压合理分布。由于系统枢纽节点的选择完全依赖运行人员的经验，当

枢纽节点选择不合理，可能导致无功电压调整次数增加，甚至导致无功电压调整失败。另外，仅对系统枢纽节点进行无功电压调整无法保证整合后所有母线电压均满足要求。电网实际运行方式安排中，发电机一般按指定功率和电压运行，影响无功功率平衡的主要因素是容抗器的投退状态。因此，可以通过在潮流计算过程中自动投退容抗器，将母线电压控制在基准方式的电压值附近，形成收敛的合理的内网潮流数据。

### 1.3 外网潮流数据选择

对于外部电网潮流数据，现有计划校核潮流数据生成算法通常采用拼接外网离线典型方式数据的方法考虑外部电网对调度计划安全校核的影响。外网离线典型方式数据更新周期长，与计划数据偏差大，存在因潮流调整量过大导致拼接后潮流计算不收敛或者无法满足边界节点电压和联络线有功约束的问题。各级网省调可从上级调度获取调管范围外的状态估计结果作为断面数据。因此，可从上级调度获取的外网数据中挑选合适的断面数据，进行内外网潮流数据拼接形成全网调度计划潮流数据。

## 2 基准方式选择和潮流数据整合

### 2.1 基准方式选择

电网运行方式一般按日类型(比如工作日、休息日和特殊日)呈周期性变化规律(比如本周与上周当前日运行方式比较接近)<sup>[17-21]</sup>。因此，可从调度计划安排日开始按时间逆向选择与调度计划数据系统发电有功功率、系统负荷有功功率和联络线有功功率偏差小于指定门槛值的相似日历史数据作为候选基准方式。

相似日电网运行方式与计划日电网运行方式比较接近，发电和负荷的分布特性比较相似，可选择系统发电有功功率、系统负荷有功功率和联络线有功功率作为表征电网运行方式的特征量，采用灰色关联分析法计算候选基准方式与调度计划数据的综合相似度，从中确定与调度计划数据相似度最高的历史数据作为基准方式。在此基础上，从基准方式中提取调度计划数据整合所需的电网模型和无功电压数据，提高内网计划校核潮流数据整合的收敛性和计算精度。采用式(1)计算候选基准方式  $i$  与调度计划数据的综合相似度。

$$sim(x_i, x_0) = \delta_i(t) \times \prod_{k=1}^N \lambda_i(k) \quad (1)$$

其中： $x_0$  为调度计划数据； $x_i$  为候选基准方式  $i$ 、 $k$  为特征量； $N$  为特征量个数； $\delta_i(t)$  为候选基准方式

$i$  与调度计划数据的时间匹配系数;  $\lambda_i(k)$  为候选基准方式  $i$  与调度计划数据特征量  $k$  的关联系数。

时间匹配系数用于量化候选基准方式与调度计划数据在时间因素上的相似程度, 计算公式为

$$\delta_i(t) = \max \left[ \alpha, \beta_1^{(1-s_i) \text{int}(t/N_1)} \beta_2^{s_i \text{int}(t/N_2)} \right] \quad (2)$$

其中:  $\alpha$  为时间因素影响因子最小值, 一般取 0.1;  $\beta_1$  和  $\beta_2$  为衰减系数, 分别表示候选基准方式与调度计划数据的距离每增加一周和一年的相似缩减比例, 一般取 0.9~0.98;  $t$  为候选基准方式与调度计划数据的天数差;  $s_i$  为表示候选基准方式  $i$  与调度计划数据是否为同一特殊日的状态标量(当候选基准方式  $i$  与调度计划数据为同一特殊日时取 1, 否则取 0);  $N_1$  和  $N_2$  为常数,  $N_1$  取值为一周的天数 7, 考虑到某些节假日(如春节)之间的距离小于 365 天, 取  $N_2$  的值为 340。

关联系数用于量化候选基准方式与调度计划数据的特征量相似程度, 计算公式为

$$\lambda_i(k) = \frac{\min_i \min_k \Delta'_i(k) + \rho \max_i \max_k \Delta'_i(k)}{\Delta'_i(k) + \rho \max_i \max_k \Delta'_i(k)} \quad (3)$$

$$\Delta'_i(k) = \frac{\Delta_i(k) - \min_i \Delta_i(k)}{\max_i \Delta_i(k) - \min_i \Delta_i(k)} \quad (4)$$

$$\Delta_i(k) = |X_i(k) - X_0(k)| \quad (5)$$

其中:  $\Delta_i(k)$  为候选基准方式  $i$  与调度计划数据特征量  $k$  的差值;  $\Delta'_i(k)$  为  $\Delta_i(k)$  的归一化值;  $\rho$  为分辨系数, 一般取 0.5;  $\min_i \min_k \Delta'_i(k)$  表示在候选基准方式  $i$  中挑选出与调度计划数据差异最小的特征量;  $\max_i \max_k \Delta'_i(k)$  表示在候选基准方式  $i$  中挑选出与调度计划数据差异最大的特征量;  $\min_i \min_k \Delta'_i(k)$  表示在所有候选基准方式中挑选出与调度计划数据差异最小的特征值;  $\max_i \max_k \Delta'_i(k)$  表示在所有候选基准方式中挑选出与调度计划数据差异最大的特征值。

## 2.2 网络模型数据整合

在获得基准方式的基础上, 根据基准方式的电网模型数据和调度计划提供的检修计划数据, 生成计划校核潮流数据的拓扑信息, 具体过程如下。

- 1) 在基准方式网络模型的基础上, 将基准方式所有停运设备投运, 所有打开的开关、刀闸闭合;
- 2) 将调度计划检修设备停运;
- 3) 将停运设备直接关联的开关、刀闸设备断开;

4) 根据开关、刀闸设备开合状态及其连接关系进行厂站内拓扑分析形成拓扑节点;

5) 根据交流线段、变压器、直流线段和换流器设备投运状态及其连接关系进行厂站间拓扑分析形成拓扑岛号。

## 2.3 有功计划数据整合

在生成计划校核潮流数据拓扑信息的基础上, 根据基准方式整合调度计划提供的有功计划数据, 并通过有功潮流调整实现系统有功功率平衡。其中, 发电厂有功计划按基准方式发电机有功功率分配系数分摊, 系统负荷有功计划按基准方式负荷母线有功分配系数分摊, 联络断面有功计划按基准方式联络线有功分配系数分摊。当调度计划安排的全网有功功率不平衡量时, 可根据发电机可调裕度将全网有功功率不平衡量分摊到具有可调空间的大机组, 实现系统有功功率平衡, 具体过程如下。

1) 计算系统有功功率不平衡量  $\Delta P_S$ 。

$$\Delta P_S = \sum_{i=1}^{N_G} P_{G_i} - \sum_{j=1}^{N_L} P_{L_j} + \sum_{k=1}^{N_T} P_{T_k} - k_{\text{loss}} \times \sum_{i=1}^{N_G} P_{G_i} \quad (6)$$

其中:  $P_{G_i}$  为机组  $i$  的有功功率;  $P_{L_j}$  为负荷  $j$  的有功功率;  $P_{T_k}$  为联络线  $k$  的有功功率;  $k_{\text{loss}}$  为取自基准方式的系统网损率;  $N_G$  为发电机台数;  $N_L$  为负荷个数;  $N_T$  为联络线条数。

2) 根据系统有功功率不平衡量的正负, 从可调发电机集合中选择参与调整的发电机, 并按其可调裕度计算有功分配系数  $k_{G_i}$ 。

$$k_{G_i} = \frac{P_{G_i, \text{yd}}}{\sum_{i=1}^M P_{G_i, \text{yd}}} \quad (7)$$

$$P_{G_i, \text{yd}} = \begin{cases} P_{G_i} - P_{G_i, \text{min}}, \Delta P_S > 0 \\ P_{G_i, \text{max}} - P_{G_i}, \Delta P_S < 0 \end{cases} \quad (8)$$

其中:  $P_{G_i, \text{yd}}$  为机组  $i$  的可调裕度;  $P_{G_i, \text{max}}$  和  $P_{G_i, \text{min}}$  为机组  $i$  的有功上限和有功下限;  $M$  为可调机组的台数。

3) 计算每台机组承担的系统有功功率不平衡量  $\Delta P_{G_i}$ , 将系统有功功率不平衡量分配至多台可调机组。

$$\Delta P_{G_i} = k_{G_i} \times \Delta P_S \quad (9)$$

## 2.4 无功电压数据整合

在有功计划分配调整的基础上, 根据基准方式整合生成内网调度计划无功电压调整的初始值。其中, 发电机机端电压直接采用基准方式机端电压作为近似值, 发电机无功功率、负荷无功功率和联络

线无功功率按与基准方式等功率因素原则计算, 变压器绕组分接头直接取基准方式变压器分接头作为近似值, 交流线段和串补设备的并联无功补偿设备与对应的交流线段或串补设备一起投退, 直流换流站的电容器和滤波器根据直流输送功率分档自动投退。

### 3 基于容抗器自动投退的无功电压调整

调度计划数据整合补充的无功电压数据通常很难保证无功功率就地平衡, 可能导致整合后潮流不收敛, 即使潮流收敛也可能存在部分地区或母线的电压过低或过高。为保证调整后计划校核潮流数据的收敛性和合理性, 通过在潮流计算的迭代过程中自动投退容抗器<sup>[22]</sup>, 将母线电压控制在基准方式的电压值附近, 具体过程如下。

1) 将所有母线并联容抗器设置为可自动投退, 据此确定对应节点的无功补偿调整范围。

2) 根据基准方式并联容抗器被控母线实际电压值计算被控母线电压上下限。

$$\begin{cases} V'_{\max} = \min[(1 + \sigma) \times V_{\text{ref}}, V_{\max}] \\ V'_{\min} = \max[(1 - \sigma) \times V_{\text{ref}}, V_{\min}] \\ |V'_{\max} - V'_{\min}| \geq \sigma \end{cases} \quad (10)$$

其中:  $V_{\text{ref}}$  为基准方式被控母线电压值;  $V_{\max}$  和  $V_{\min}$  为被控母线电压考核上限和下限;  $\sigma$  为被控母线电压可调空间, 通常取 0.03。

3) 计算潮流, 通过在潮流计算的迭代过程中自动调整控制母线的无功补偿容量, 将被控母线电压限制在式(10)指定限值范围, 再将控制母线无功补偿容量转换成容抗器设备的投退情况。

### 4 全网潮流数据整合

为保证拼接后全网潮流数据满足边界节点电压和联络线有功约束, 并降低拼接过程中潮流迭代次数和外网潮流调整量, 根据联络线一致且联络线潮流最接近原则从上级调度下发的状态估计数据中选择待拼接的外网潮流数据。

在获得合理的外网潮流数据基础上进行内外网潮流数据拼接, 通过调整外网的有功出力、负荷功率和无功补偿装置投退情况, 满足边界节点电压和联络线有功约束, 生成满足调度计划安全校核的全网潮流数据, 具体过程如下。

1) 根据外网负荷节点有功对联络线有功潮流的灵敏度选择调整节点, 利用二次规划法迭代调整节点有功直至联络线有功潮流满足精度要求;

2) 根据外网负荷节点无功对联络线边界节点电

压的灵敏度选择调整节点, 利用二次规划法迭代调整节点无功直至联络线边界节点电压满足精度要求;

3) 在节点无功每次迭代结束时, 校核联络线有功潮流, 若不满足精度要求, 则终止电压调整并输出满足有功精度前提下电压调整的次优解。

### 5 流程设计

基于不同时段调度计划数据相互独立的特点, 可以通过优化计划校核潮流数据生成计算流程, 将不同时段的计划校核潮流数据生成计算任务按计算集群服务器 CPU 总核数分批次下发给计算集群的不同进程, 采用多时段并行计算技术进一步提高计划校核潮流数据生成的计算速度。图 1 为采用多时段并行计算技术的调度计划安全校核潮流数据生成计算流程。

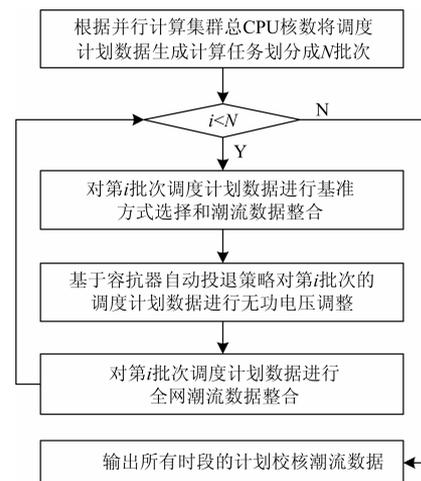


图 1 计划校核潮流数据生成流程图

Fig. 1 Flow chart of power flow data generation of security check for scheduling plans

### 6 应用实例

本文提出的基于相似日选择的调度计划安全校核潮流数据生成方法已在浙江电网日前计划安全校核系统得到应用。浙江电网规模为: 计算节点 860 个, 发电机组 205 台, 线路和变压器绕组支路 4 349 条, 联络线 13 条。

#### 6.1 单个时段计划校核潮流数据生成

实际应用中根据本文的方法自动生成的 96 点日前校核潮流数据达到了 100% 的收敛率。为了校验计算结果的收敛性和准确性, 抽取浙江电网 2014 年 6 月 18 日(周三)10:00(早高峰)、20:00(晚高峰)和 04:00(夜间低谷)3 个时刻的数据进行分析。首先从相似日历史数据中筛选出合理的基准方式。以 2014 年

6月18日(周三)10:00的计划数据为例,表1列出了部分相似日历史数据与计划数据的综合相似度计算结果。由表1可知,2014年6月11日(周三)09:00的历史数据与2014年6月18日(周三)10:00的计划数据综合相似度最高,应选其为基准方式。

表1 基准方式选择结果

Table 1 Results of reference mode selection

时刻	日期距离/天	发电有功/MW	负荷有功/MW	联络线有功/MW	综合相似度
06-18 10:00	/	36 502	41 891	6 120	/
06-11 09:00	7	36 799	42 139	6 110	0.927 8
06-11 10:00	7	38 255	43 868	6 433	0.395 3
06-11 20:00	7	30 568	36 743	6 786	0.136 5
06-04 10:00	14	37 827	43 243	6 183	0.619 4
06-04 20:00	14	27 220	33 779	7 103	0.066 8

在获得相似日基准方式的基础上,整合调度计划数据和基准方式提供的电网模型数据及无功电压数据,通过有功平衡调整和无功电压调整,形成收敛的合理的内网潮流数据。表2列出了上述3个时刻计划数据有功平衡调整和无功电压调整后电压偏差最大的母线。由表2可知,潮流调整后内网潮流数据均收敛,且各母线电压均在运行要求范围内。

表2 无功电压调整结果

Table 2 Results of reactive power and voltage adjustment

时刻	母线	调整前电压/kV	调整后电压/kV	偏差/%
04:00	富阳	510.77	508.52	0.44
10:00	双龙	513.49	515.41	0.37
20:00	含山	512.50	510.83	0.33

表3列出了部分外网潮流数据与内网潮流数据联络线一致性和联络线潮流计算结果。其中, $N_{in}$ 和 $N_{out}$ 分别表示内网潮流数据联络线集合和外网潮流数据联络线集合。由表3可知,2014年06月11日(周三)09:55的外网潮流数据与2014年6月18日(周三)10:00的内网潮流数据联络线完全一致且联络线潮流最接近,应选其为待拼接的外网方式。

表3 外网方式选择结果

Table 3 Results of outside mode selection

时刻	联络断面	联络线一致性	联络线有功/MW
06-11 09:55	浙江-华东	$N_{in} = N_{out}$	5 728.38
	浙江-福建	$N_{in} = N_{out}$	345.712
06-11 05:25	浙江-华东	$N_{in} = N_{out}$	5 670.12
	浙江-福建	$N_{in} = N_{out}$	414.561
06-04 15:27	浙江-华东	$N_{out} \subseteq N_{in}$	5 076.71
	浙江-福建	$N_{in} = N_{out}$	578.873
06-04 02:00	浙江-华东	$N_{in} \subseteq N_{out}$	6 491.94
	浙江-福建	$N_{in} = N_{out}$	340.164

在获得外网潮流数据的基础上,将内外网潮流数据拼在一起,通过调整外网潮流满足边界节点电压和联络线有功约束,生成满足调度计划安全校核的全网潮流数据。表4列出了拼接前后联络线有功功率偏差,表5列出了拼接前后电压偏差最大的联络线边界节点。由表4和表5可知,拼接后联络线有功功率和边界节点电压均满足调度计划安全校核要求。

表4 联络线有功调整结果

Table 4 Results of tie lines' active power adjustment

时刻	联络断面	调整前有功/MW	调整后有功/MW	有功偏差/%
04:00	浙江-华东	7 364.12	7 362.53	0.02
	浙江-福建	336.640	330.620	1.79
10:00	浙江-华东	5 779.73	5 783.48	0.06
	浙江-福建	340.490	332.480	2.35
20:00	浙江-华东	6 013.62	6 023.35	0.16
	浙江-福建	471.960	465.610	1.35

表5 边界节点电压调整结果

Table 5 Results of boundary nodes' voltage adjustment

时刻	边界节点	调整前电压/kV	调整后电压/kV	误差/%
04:00	汾湖	511.51	511.73	0.04
10:00	金华	515.19	517.01	0.35
20:00	金华	517.02	518.12	0.21

若不采用相似日基准方式,比如采用前一日同时刻历史数据作为基准方式,无功电压调整结果如表6所示。由表2和表6可知,基于相似日基准方式进行潮流调整可保证调整后计划方式母线电压与基准方式母线电压偏差较小。

表6 无功电压调整结果

Table 6 Results of reactive power and voltage adjustment

时刻	母线	调整前电压/kV	调整后电压/kV	偏差/%
04:00	金华	514.84	518.50	0.71
10:00	双龙	509.40	512.81	0.67
20:00	信安	508.73	504.14	0.90

表7列出了2014年6月18日(周三)10:00的内网潮流数据分别采用2014年06月11日(周三)09:55和2014年06月11日(周三)05:55的外网潮流数据进行拼接后外网有功调整结果。由表7可知,采用根据联络线一致且联络线潮流最接近原则选择的外网

表7 外网有功调整结果

Table 7 Results of outside grid's active power adjustment

外网数据	联络断面	有功调整量/MW	潮流计算次数/次
06-11 09:55	浙江-华东	237.58	7
	浙江-福建	173.75	
06-11 05:25	浙江-华东	389.34	8
	浙江-福建	189.58	

潮流数据进行拼接可减少潮流计算次数和外网潮流调整量。

## 6.2 多个时段计划校核潮流数据并行计算

并行计算集群共配置 6 台服务器, 每台服务器有 8 个 CPU 核, 可用 CPU 核数为 48 个。单个时段计划校核潮流数据生成平均耗时 8.5 s, 96 点日前计划数据分为 96 个计算任务, 需要分为 2 次下发计算, 总耗时为 17 s(8.5×2)。若不进行计划校核潮流数据并行计算, 96 点日前计划数据需要串行计算, 总耗时为 816 s(8.5×96)。可见, 通过将串行任务并行化, 可有效提高计算速度, 满足在线应用的要求。

## 7 结论

本文提出的调度计划安全校核潮流数据生成方法根据综合相似度最高原则从相似日的历史数据中筛选出基准方式, 提取调度计划数据整合所需的无功电压数据作为计划校核潮流计算的初始值, 并通过系统有功平衡调整和基于容抗器自动投切的无功电压调整形成收敛的合理的内网潮流数据, 提高了内网潮流数据整合的收敛性和计算精度。根据联络线一致且联络线潮流最接近原则从上级调度下发的外网潮流数据中筛选出待拼接的外网方式, 在此基础上将内网潮流数据和外网方式进行拼接, 通过调整外网潮流数据生成满足调度计划安全校核的全网潮流数据, 减少了拼接过程中潮流迭代次数和外网潮流调整量。通过多时段并行计算技术将串行计算任务并行化, 进一步提高了计划校核潮流数据生成的计算速度。实际系统应用验证了该方法的正确性和实用性。

## 参考文献

- [1] 陈权, 李令冬, 王群京, 等. 光伏发电并网系统的仿真建模及对配电网电压稳定性影响[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 241-247.  
CHEN Quan, LI Lingdong, WANG Qunjing, et al. Simulation model of photovoltaic generation grid-connected system and its impacts on voltage stability in distribution grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 241-247.
- [2] 朱星阳, 张建华, 刘文霞, 等. 风电并网引起电网电压波动的评价方法及应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 88-98.  
ZHU Xingyang, ZHANG Jianhua, LIU Wenxia, et al. Evaluation methodology and its application of voltage fluctuation in power network caused by interconnected wind power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 88-98.
- [3] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.  
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scal PV grid-connected system based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [4] 高玉洁, 张永凯, 李蓉蓉, 等. 计及风电的电力系统检修备用容量评估及应用. 高压电器, 2015, 51(6): 31-38.  
GAO Yujie, ZHANG Yongkai, LI Rongrong, et al. Maintenance reserve capacity evaluation and its application considering wind power and maintenance demand uncertainty[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 31-38.
- [5] 侯玉强, 李威. 大规模光伏接纳对电网安全稳定的影响及相关制约因素分析[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(4): 73-77.  
HOU Yuqiang, LI Wei. Influence of integration of large-scale photovoltaic on grid and key factors restricting its accepted capacity[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(4): 73-77.
- [6] 张智刚, 夏清. 智能电网调度发电计划体系架构及关键技术[J]. 电网技术, 2009, 33(20): 1-8.  
ZHANG Zhigang, XIA Qing. Architecture and key technologies for generation scheduling of smart grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(20): 1-8.
- [7] 胡晨旭, 周济, 罗治强, 等. 一体化调度计划辅助决策架构及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 131-136.  
HU Chenxu, ZHOU Ji, LUO Zhiqiang, et al. Architecture and key technologies for auxiliary decision making system of integrated dispatch scheduling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 131-136.
- [8] ZHANG Yang, ZHANG Rui, ZHANG Zhigang, et al. Design and realization of security checking of day-ahead generation schedules in power market[C] // Proceedings of IEEE International Conference on Power System Technology, October 13-17, 2002, Kunming, China: 2367-2370.
- [9] 崔晓丹, 周海锋, 刘韶峰, 等. 在线操作前安全校核系统的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 112-116.  
CUI Xiaodan, ZHOU Haifeng, LIU Shaofeng, et al. Design of online pre-operation security checking system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 112-116.
- [10] 徐田, 於益军, 钱玉妹. 能量管理系统中发电计划安全校核功能的设计[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(10):

- 88-91.  
XU Tian, YU Yijun, QIAN Yumei. Security correction design on generation plan in energy management system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(10): 88-91.
- [11] 吕颖, 鲁广明, 杨军峰, 等. 智能电网调度控制系统的安全校核服务及实用化关键技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 171-176.  
LÜ Ying, LU Guangming, YANG Junfeng, et al. Security check service and practical technique based on smart grid dispatching and control systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 171-176.
- [12] 王兴志, 严正, 沈沉, 等. 基于面向服务架构的调度计划安全校核网格计算[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 90-95.  
WANG Xingzhi, YAN Zheng, SHEN Chen, et al. Grid computing of operation scheduling with security constraint based on SOA[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 90-95.
- [13] 李峰, 李虎成, 於益军, 等. 基于并行计算和数据复用的快速静态安全校核技术[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(14): 75-80.  
LI Feng, LI Hucheng, YU Yijun, et al. Fast computing technologies for static security checking based on parallel computation and data reuse[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(14): 75-80.
- [14] 林毅, 孙宏斌, 吴文传, 等. 日前计划安全校核中计划潮流自动生成技术[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(20): 68-73.  
LIN Yi, SUN Hongbin, WU Wenchuan, et al. A schedule power flow auto generation technology in day-ahead security validation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(20): 68-73.
- [15] 王毅, 侯俊贤, 马世英, 等. 用于调度计划安全稳定校核的潮流数据自动整合调整方法[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 100-104.  
WANG Yi, HOU Junxian, MA Shiyong, et al. A method of automatic integration and regulation of power flow data for security and stability check of generation scheduling analysis[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 100-104.
- [16] 谢昶, 刘文颖, 文晶, 等. 基于多数据源的前报潮流自动生成方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 87-92.  
XIE Chang, LIU Wenying, WEN Jing, et al. Auto-generation method of day-ahead forecast power flow based on multiple data sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 87-92.
- [17] 黎灿兵, 李晓辉, 赵瑞, 等. 电力短期负荷预测相似日选取算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(9): 69-73.  
LI Canbing, LI Xiaohui, ZHAO Rui, et al. A novel algorithm of selecting similar days for short-term power load forecasting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(9): 69-73.
- [18] 陈昌松, 段善旭, 蔡涛, 等. 基于模糊识别的光伏发电短期预测系统[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 83-89.  
CHEN Changsong, DUAN Shanxu, CAI Tao, et al. Short-term photovoltaic generation forecasting system based on fuzzy recognition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 83-89.
- [19] 金海峰, 熊信良, 吴耀武. 基于相似性原理的短期负荷预测方法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(23): 45-48.  
JIN Haifeng, XIONG Xinyin, WU Yaowu. Short-term load forecasting based on analogous theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(23): 45-48.
- [20] 林辉, 刘晶, 郝志峰, 等. 基于相似日负荷修正的节假日短期负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 47-51.  
LIN Hui, LIU Jing, HAO Zhifeng, et al. Short-term load forecasting for holidays based on the similar days' load modification[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 47-51.
- [21] 孙谦, 姚建刚, 赵俊, 等. 基于最优交集相似日选取的短期母线负荷综合预测[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 126-134.  
SUN Qian, YAO Jiangang, ZHAO Jun, et al. Short-term bus load integrated forecasting based on selecting optimal intersection similar days[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 126-134.
- [22] 南京南瑞集团公司/国网电力科学研究院. 电力系统安全稳定量化分析与优化决策软件(FASTEST)(V3.0)潮流文件手册[S].

收稿日期: 2014-12-03; 修回日期: 2015-02-03

作者简介:

周海锋(1983-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制; E-mail: zhouhaifeng@sgepri.sgcc.com.cn

徐伟(1982-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制;

鲍颜红(1971-), 男, 博士研究生, 研究员级高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析与控制。

(编辑 姜新丽)