

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181070

# 考虑安全约束及电量执行的年度发电与检修联合优化模型

许丹<sup>1</sup>, 罗治强<sup>2</sup>, 李旻<sup>3</sup>, 蔡帜<sup>1</sup>

(1. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 2. 国家电力调度控制中心, 北京 100031;  
3. 四川电力调度控制中心, 四川 成都 610041)

**摘要:** 针对年度发电计划与年度检修计划在系统发电能力、电网潮流约束等方面具有强耦合性的特点, 构建了考虑安全约束及月度电量执行的年度发电与检修联合优化模型。年度发电计划模型以天为计算时段, 提出以历史负荷率统计与正备用约束选择相结合的电量估算方法, 降低了计划规模, 提升了优化效率。为充分考虑检修对电网运行的影响, 通过引入支路开断潮流分布因子, 在优化模型中可同时考虑发电计划与检修计划对潮流的综合影响, 提升发电计划和检修计划的联合优化能力。将所提模型运用于中国某省的实际电网, 验证了其有效性。

**关键词:** 年度发电计划; 年度检修计划; 电量计划; 潮流转移; 安全约束

## A combined optimization model for annual generation and maintenance scheduling considering safety constraints and power execution

XU Dan<sup>1</sup>, LUO Zhiqiang<sup>2</sup>, LI Min<sup>3</sup>, CAI Zhi<sup>1</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. National Electric Power Dispatching and Control Center, Beijing 100031, China; 3. Sichuan Electric Power Dispatching and Control Center, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** A joint optimization model of annual generation and maintenance considering security constraints and monthly electricity execution is proposed in this paper to solve the strong coupling between annual generation plan and annual maintenance plan in terms of system generation capacity and power flow constraints. The annual generation planning model takes days as the calculation period, and puts forward a method of electricity estimation combining historical load rate statistics with positive reserve constraints, which reduces the planning scale and improves the optimization efficiency. In order to consider the influence of maintenance plan on power grid operation, the power distribution factor of branch breaking is introduced. In the optimization model, the comprehensive influence of generation plan and maintenance plan on power flow can be considered simultaneously to enhance the joint optimization capability of generation plan and maintenance plan. The proposed model is applied to an actual power grid in a certain province in China, and the effectiveness of the proposed model is verified.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5542dz170034) "Research and Application of Mid-long Term Maintenance Scheduling and Large-scale Power Delivery Coordinated Optimization Technique Considering Section Constraints".

**Key words:** annual power generation plan; annual maintenance plan; electric quantity plan; power flow transfer; security constraint

## 0 引言

年度发电计划与年度检修计划的制定是电力系

统调度运行的核心业务之一。其中年度发电计划的主要任务是根据风光水火等资源的年内分布特性, 以中长期负荷预测、年度计划电量和交易电量为基础, 编制全年及分月发电计划, 并在此基础上安排更为细致的月度、周、日前、日内等各周期发电计划<sup>[1]</sup>。年度检修计划的主要任务是在保障电力系统运行安全性、可靠性和经济性的前提下, 合理安排

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(5542dz170034)“考虑断面约束的中长期检修安排和大规模电力外送协调优化技术研究与应用”

发输变电设备的检修组合方式及停运时段,提升电力系统运行精细化水平<sup>[2]</sup>。发电计划和停电计划互为耦合,密切相关。长期以来,中长期计划首先将设备停电检修计划集中安排在春季和秋季两个负荷低谷期,之后在检修计划已知的条件下开展年度发电计划编制。这种模式具有很强的可操作性和实用性。但近年来随着风电光伏等新能源的快速发展以及中长期电力交易的刚性执行,对发电计划与检修计划的协调配合提出了更高的要求。

对于年度、月度中长期发电计划,现有研究主要集中于两个方面,其一是解决中长期计划由于时间跨度长、计算时段多所导致的机组组合规模过大的问题<sup>[3-4]</sup>,其二是如何通过合理的机组开停机组合保障计划、交易电量的有效执行<sup>[5-6]</sup>。然而,受限于中长期计划的计算能力及外部环境的不确定性,如何提升中长期计划应用的实用化水平,仍然需要开展深入研究。

对于检修计划,机组检修<sup>[7-8]</sup>和输变电设备的检修<sup>[9-12]</sup>通常区别对待,其主要原因在于机组检修直接影响系统发电能力却不影响电网拓扑结构。而输变电设备检修将改变电网输电能力,继而间接影响发用电平衡,因此需要满足更多拓扑类约束。文献<sup>[9-10]</sup>均同时考虑了检修成本和期望缺供电量最小,建立了输电网检修计划多目标优化模型,为考虑多重目标的检修优化提供了一种可供参考的技术手段。然而,现有的检修计划至少还存在两个方面的不足,其一是在优化目标方面大多考虑检修自身的最优(比如检修成本),而对电网运行的考虑还较为单一(比如期望缺供电量);其二是在约束方面对检修所造成的潮流转移虽均有涉及,但由于检修将改变电网拓扑结构,因此大多采用事后校验的模式,很难将设备检修对潮流的影响直接体现在优化模型中。

中长期发电计划与检修计划本是一个互为关联彼此耦合的两个应用,大多数研究还是将其割裂开展的,虽然已有相关学者开展了两者之间的联合优化<sup>[13-18]</sup>,如文献<sup>[13]</sup>建立了发电计划和检修计划协调优化的多场景调度模型,模型在长时段内考虑了众多约束,但模型的优化目标仅为全网发电能耗最小,既未涉及检修计划的相关目标,也未涉及检修可能导致的网络潮流越限进而造成发电计划受影响的情况。而文献<sup>[16-18]</sup>则仅考虑了风光资源与外送通道检修之间的发电/检修配合,这是一种具有直观耦合关系的特殊情况。

针对上述问题及实际生产需求,本文构建了以天为计算时段,考虑中长期电量执行与检修计划执行相协调的发电、检修联合优化模型,并根据支路

开断后的潮流转移分布因子,将检修计划与发电计划在网络侧的耦合关系体现于优化模型中,以期获得更为合理的联合优化结果。将本文所提的模型应用于我国某实际电网,验证了模型的有效性。

## 1 模型构建的整体思路

实际生产中无论是中长期发电计划还是中长期检修计划,系统负荷预测、母线负荷预测、水电新能源预测等都存在较大偏差,因此难以构建准确到小时的计划场景。由于年度发电计划的主要目标在于对年度和月度电量计划的编制,并不需要给出精确到小时的机组开停时段和每个时段准确的出力值。而检修计划也只需要精确到具体的开停工日期即可,因此本文在对计算时段的选取上,采用每天一个优化点的处理模式。这种处理的好处在于:1)可以使发电计划和停电计划处于同一时间维度上,而不用构建两个不同的时间体系;2)有效减少了系统计算规模;3)无论是系统负荷预测或母线负荷预测值,均只需预测每日最大值,既降低了对外部数据的依赖性又可以实现对潮流约束的考虑。当然这种处理的不足在于:无法准确计算发电量。为了弥补这个缺陷,将在下一节模型构建中详细叙述通过历史负荷率统计与正备用约束选择相配合的方法开展电量估算,从而实现通过峰值负荷估算电量。

在优化目标方面,由于模型仅涉及了每日最大负荷点,因此年度发电计划采用系统整体运行费用最低显然不合适,为了保障在电量执行时尽可能地少对机组进行开停,因此采用了机组整体开机费用最少为优化目标。这种处理既能满足实际生产的需要,也能规避由于计划时段少而无法计算运行费用的不足。对于检修计划,目前的工作方式是仅对所提交的检修单进行时段的组合优化,而不去优化元件是否需要检修。同时对单个元件的检修费用也很难评估,因此采用检修费用最低作为优化目标并不合适。在此本文将不考虑检修模型的优化目标,而仅考虑检修业务的各类相关约束。另外传统发电计划的爬坡约束将不予考虑,而由于检修所造成的潮流转移将得到重点关注。

## 2 发电计划与检修计划联合优化模型

### 2.1 年度发电计划模型

年度发电计划的优化目标为

$$\min f_1 = \sum_{t=1}^{TM-1} \sum_{i=1}^N S_{i,t+1} \cdot (1 - S_{i,t}) \cdot U_i \quad (1)$$

式中:  $TM$  表示全年总天数;  $S_{i,t}$  为机组  $i$  在第  $t$  天的开停状态, 1 表示开机, 0 表示停机, 为决策变

量;  $U_i$  为机组的开机费用;  $N$  为机组总数。

年度发电计划考虑的约束条件包括负荷平衡约束, 系统正备用、负备用约束, 机组最小开停约束、机组分月电量约束、机组全年电量约束等。

负荷平衡约束为

$$P_{D,t} = \sum_{i=1}^N P_{i,t} \cdot S_{i,t} \quad (2)$$

式中:  $P_{i,t}$  为机组  $i$  在第  $t$  天的出力值, 为决策变量, 其中新能源及没有调节能力的水电为给定的固定值;  $P_{D,t}$  为系统在第  $t$  天的最大负荷需求。

系统正、负备用约束为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N (P_{i,\max} - P_{i,t}) \cdot S_{i,t} \geq P_{D,u,t} \\ \sum_{i=1}^N (P_{i,t} - P_{i,\min}) \cdot S_{i,t} \geq P_{D,d,t} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $P_{i,\max}$  为机组  $i$  的最大出力值;  $P_{i,\min}$  为机组  $i$  的最小出力值;  $P_{D,u,t}$  为系统的正备用需求;  $P_{D,d,t}$  为系统的负备用需求。由于  $P_{D,u,t}$  和  $P_{D,d,t}$  的给定将直接影响机组的负荷率, 而为了保障式(2)的计算准确性, 建议此处与负荷率联合给出。

机组最小开停时间约束为

$$\begin{cases} t_{i,\text{on}} \geq t_{i,\text{up}} \\ t_{i,\text{off}} \geq t_{i,\text{down}} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $t_{i,\text{on}}$  为机组  $i$  的持续运行天数;  $t_{i,\text{up}}$  为机组  $i$  的最小运行天数;  $t_{i,\text{off}}$  为机组  $i$  的持续停运天数;  $t_{i,\text{down}}$  为机组  $i$  的最小停运天数。

部分机组(电厂)由于大用户直购电等原因对分月电量执行有相关约束, 如下所示。

$$\begin{cases} Q_{i,m} = \sum_{t=1}^{T_m} 24 \cdot P_{i,\max} \cdot S_{i,t} \cdot \beta_{i,t} & t \in m \\ Q_{i,m} \geq q_{i,m} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $m$  为月份;  $i$  为机组数;  $Q_{i,m}$  为机组  $i$  在月份  $m$  的发电量;  $P_{i,\max}$  为机组  $i$  的最大出力值, 为已知量;  $\beta_{i,t}$  为机组  $i$  在第  $t$  天的负荷率统计值, 这个值可以按照周或是按月对历史值进行统计获得, 为已知量;  $T_m$  表示  $m$  月的总天数;  $q_{i,m}$  为机组  $i$  在月份  $m$  的需执行电量。

对于给定年度计划电量的机组需要满足年度总体电量约束, 如下所示。

$$\begin{cases} Q_i = \sum_{t=1}^T 24 \cdot P_{i,\max} \cdot S_{i,t} \cdot \beta_{i,t} \\ Q_{i,\min} \leq Q_i \leq Q_{i,\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $m$  为月份;  $i$  为机组数;  $Q_i$  为机组  $i$  全年发电

量;  $[Q_{i,\min}, Q_{i,\max}]$  为机组  $i$  要求的年度电量区间。

网络潮流约束, 其中包括潮流平衡约束、支路限值约束。

$$\begin{cases} \theta = Xp \\ f_{i,j,t} = (\theta_{i,t} - \theta_{j,t}) / x_{i,j} \\ f_{i,j,t,\min} \leq f_{i,j,t} \leq f_{i,j,t,\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $p$  为各个节点注入有功功率矢量矩阵;  $X$  为网络的节点阻抗矩阵;  $\theta$  为各节点相角矢量矩阵;  $x_{ij}$  为节点  $ij$  之间支路的电抗值;  $f_{i,j,t}$  为节点  $ij$  之间支路在第  $t$  天的有功潮流;  $f_{i,j,t,\max}$ ,  $f_{i,j,t,\min}$  为节点  $ij$  之间支路上下限。由于检修计划将改变网络拓扑结构, 因此潮流的计算需要进行修正, 这将在后续章节给出说明。

## 2.2 年度检修计划约束

检修计划的约束条件包括检修时长、同停、互斥等约束。

检修时长约束为

$$H_{c,b} - H_{c,e} = J_c \quad (8)$$

式中:  $H_{c,b}$  表示设备  $c$  在第  $b$  天开始处于检修状态;  $H_{c,e}$  表示设备  $c$  在第  $e+1$  天结束检修状态;  $J_c$  为设备  $c$  的工期, 为已知值。

同停约束, 一次停电可以进行检修的设备应该同时检修, 避免重复停电。同停约束为

$$\begin{cases} H_{c,b} = H_{c',b} \\ H_{c,e} = H_{c',e} \end{cases} \quad (9)$$

式中, 设备  $c$  和  $c'$  设备为同停设备。

互斥约束, 为保障电网传输能力及出现电气孤岛等情况, 某些设备应避免同时检修。互斥约束为

$$J_c \cap J_{c'} = \emptyset \quad (10)$$

式中, 设备  $c$  和设备  $c'$  为互斥设备。

不可变更的检修约束。某些设备的检修时间不允许调整, 不参与优化编排。不可变更约束如下所示。

$$\begin{cases} H_{c,b,t} = H_{c,b,t} \\ H_{c,e,t} = H_{c,e,t} \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $H_{c,b,t}$ ,  $H_{c,e,t}$  为设备  $c$  固定的开始结束时间。

## 2.3 年度发电计划与检修计划关联描述

对于机组可以进行直接耦合, 即机组处于检修状态即不可处于开机状态。机组发电、检修耦合约束为

$$S_{i,t} + H_{i,t} \leq 1 \quad (12)$$

对于输变电设备的检修与发电计划则需要通过电网输电需求与输电断面限额进行耦合。在单独的

发电计划编制过程中, 检修计划往往是已知的, 对于每个时段的电网拓扑则为确定的, 从而节点注入有功对支路潮流的灵敏度是已知的, 因此可直接根据式(7)考虑电网潮流约束。但是当检修设备为决策变量时, 电网拓扑则为变量, 就不能根据确定的灵敏度计算网络潮流, 对于该问题现有研究涉及较少。

对于上述问题, 本文的处理方式为: 首先可获取一个未考虑任何检修的基础拓扑, 在基础拓扑上根据发电计划与母线负荷预测则可按照式(7)计算基础潮流断面。文献[19]表明, 对于支路开断, 在电网不出现解裂的情况下, 可通过支路开断分布因子对原有潮流进行修正, 从而获得新的潮流分布。对于单支路开断, 修正方式为

$$\begin{cases} D_{k-l} = \frac{x_{k-l}/x_k}{1-x_{l-l}/x_l} \\ \Delta p_k^l = D_{k-l} \cdot p_l \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $D_{k-l}$  为开断分布因子, 表示支路  $l$  开断后对支路  $k$  的潮流转移系数;  $x_{k-l}$  为两个支路端口节点之间的互阻抗;  $x_{l-l}$  为开断端口的自阻抗, 两个量均可根据初始基础拓扑的节点阻抗矩阵计算获得<sup>[19]</sup>;  $x_k$ ,  $x_l$  为支路  $k$  和  $l$  的电抗;  $p_l$  为开断支路  $l$  在开断前的潮流;  $\Delta p_k^l$  为由于支路  $l$  开断所造成的支路  $k$  的潮流变化量。

由式(13)可知, 当某个时段设备检修只造成一条支路开断时, 开断支路可作为决策变量对式(7)的潮流进行修正即可获得考虑设备检修的潮流分布, 从而在优化模型的潮流约束中同时考虑机组出力 and 检修编排。然而同一时段不可能只存在一条支路开断, 如果存在多条支路开断时, 问题将变得较为复杂, 比如第 2 条开断支路的分布因子必须反映第一条支路已经开断的事实, 不能根据基础拓扑的节点阻抗矩阵进行潮流修正的直接叠加。为了避免修改节点阻抗矩阵, 文献[20]给出了多支路开断潮流转移计算方法。对于双支路开断而言, 潮流的修正方式为

$$\begin{cases} D'_{k-a} = D_{k-a} \cdot D_{ab} + D_{k-b} \cdot D_{a-b} \cdot D_{ab} \\ D'_{k-b} = D_{k-b} \cdot D_{ab} + D_{k-a} \cdot D_{b-a} \cdot D_{ab} \\ D_{ab} = \frac{1}{1-D_{a-b} \cdot D_{b-a}} \\ \Delta p_k^{ab} = D'_{k-a} \cdot p_a + D'_{k-b} \cdot p_b \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $D_{k-a}$ ,  $D_{k-b}$ ,  $D_{a-b}$ ,  $D_{b-a}$ , 均为单支路开断时的分布因子, 可根据初始基础拓扑的节点阻抗矩阵计算获得;  $D'_{k-a}$ ,  $D'_{k-b}$  为  $a$ ,  $b$  两条支路开断后的分布因

子;  $\Delta p_k^{ab}$  为由于  $a$ ,  $b$  两条支路开断后支路  $k$  的潮流变化量。

由上式可知, 如果  $D_{a-b}$ ,  $D_{b-a}$  较小时, 可将两条支路定义为开断潮流转移弱关联支路。因为此时  $D_{ab}$  将趋近于 1, 从而  $D'_{k-a} \approx D_{k-a}$ ,  $D'_{k-b} \approx D_{k-b}$ 。它表明支路  $a$  和支路  $b$  的开断可根据初始拓扑的分布因子进行直接线性叠加, 大大降低了潮流的修正计算量。另一方面, 开断潮流转移弱关联支路同时检修对于电网运行是有利的。实时上这些弱关联支路是大量存在的。

在检修计划这个特定问题中, 互斥约束可以避免大量开断支路潮流转移强关联的问题。对于同停设备, 由于同停的设备自身是捆绑的, 因此可以按照文献[19]所述事先求好修正系数, 随后按一个设备与其他设备进行联合调整优化。对于在同一时段确实需要安排多个开断支路潮流转移强关联检修设备的情况, 则将与这些开断支路关联的局部网络潮流在优化模型中暂不考虑, 而通过传统检修优化模型的事后验证调整的方式予以解决。

在此需要说明的是, 输电断面限额与开停机状态、负荷水平、设备检修等因素密切耦合, 如何获得准确的输电断面限额本身是一个非常复杂的问题, 本文不涉及对断面限额的确定问题, 默认限额以保守方式进行人工设定, 为已知值。

### 3 模型求解

本文所提模型是一个典型的混合整数规划问题, 对于该问题的可使用 CPLEX 等成熟商业软件进行求解。由于本文所提的年度发电计划和检修计划的联合优化模型尚不能在一次优化中解决所有检修对潮流的转移分析, 但可以通过迭代求解予以实现, 整个求解过程如图 1 所示。

### 4 算例及其分析

以我国某省的实际电网对本文所提模型进行了验证。该省含主力机组近 200 台, 200 kV 及以上支路 800 余条(含变压器支路)。某年度负荷曲线如图 2 所示。从图中可以看出该省和我国大多数省份一样在全年有明显的夏冬负荷高峰与春秋负荷低谷期。

#### 4.1 年度发电计划分析

年度发电计划主要是目标之一在于将年度电量合理分解到各个月。本文算例运行的硬件条件为 CUP i5-5200 2.2 GHz, 内存 8 G 的便携式计算机。可在 15 min 内完成发电计划编制, 而如果采用全年 8 760 点的计算模式则需要数小时。

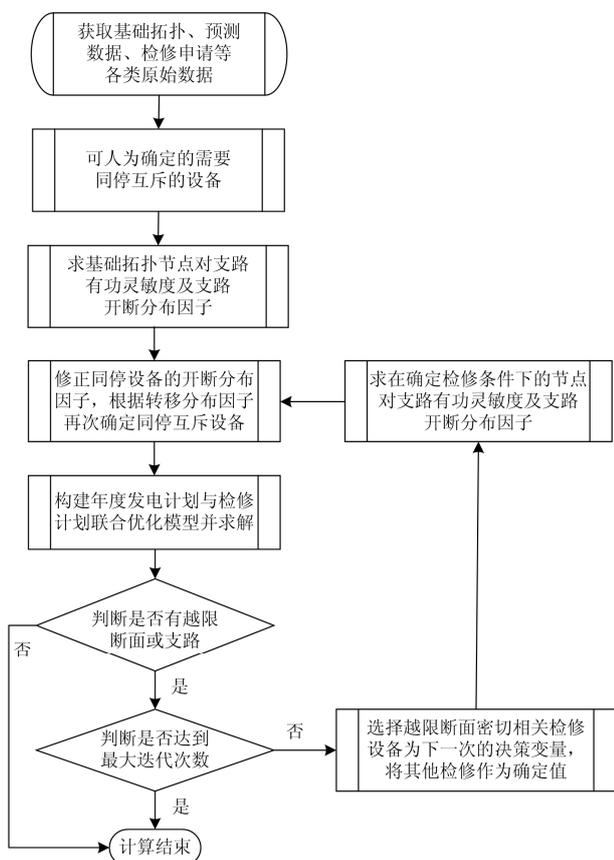


图1 优化模型求解流程图

Fig. 1 Optimization model solving process diagram

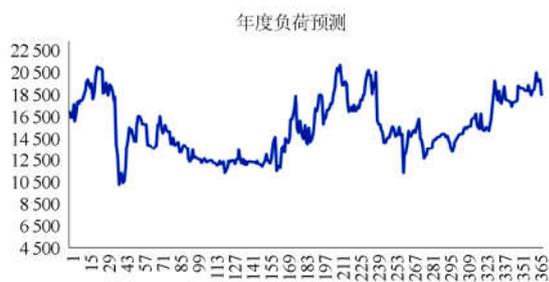


图2 年度负荷预测值

Fig. 2 Annual load forecast

在此专门对比了采用1个小时一个点和1天一个点对于所有机组某月计划电量计算精度的影响。对比方式是：首先按照本文所提方式以负荷率的模式对计划电量执行需求进行开停机优化，随后将此开停机优化作为已知值，在全月范围内按照经济调度的模式再次进行优化。结果表明，当采用惩罚系数使部分机组计划电量偏差小于2%时，最大的机组电量偏差也未超过10%。如果在月度周期内优化可对机组启停进行少量调整，则可以进一步降低计

划电量偏差。这说明，采用本文所提的计划模型在保障月度电量执行方面是可行的。例如某机组的月度电量需求如表1所示，优化得到的开停机结果如图3所示。

表1 机组月度电量计划

	1月—3月	4月—6月	7月—9月	10月—12月
电量需求	232 500	185 000	232 500	211 000
电量需求	211 500	181 400	242 600	195 900
电量需求	202 700	195 000	216 100	212 400

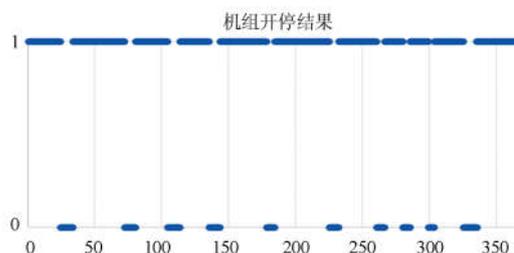


图3 机组开停机结果

Fig. 3 Operation result of unit

#### 4.2 年度检修计划分析

算例测试时段中共需检修元件120个(含线路、开关、断路器等)，检修时间为几天到20几天不等，在考虑了检修的同停、互斥、检修分布均衡性及机组电量执行等约束后，得到检修的年度单日检修分布图如图4所示。从图中可见在夏冬负荷高峰时间检修数量少，从而尽可能减少其对电网运行的影响。



图4 检修计划结果

Fig. 4 Maintenance scheduling result

#### 4.3 发电计划和检修计划耦合性分析

首先，分析在发电能力方面的耦合性。该省在每年5月—8月将处于丰水期，水电将大量出力，火电空间受到挤压，将减少开机时间，而此时联合优化模型正好可以较好地实现火电的开停机与火电检修的配合。

另一方面是潮流层面的耦合分析。图5给出了仅考虑发电计划而不考虑设备检修时电网安全约束

断面 a 和与该断面具有密切潮流关系的支路 b 的潮流分布，在负荷高峰时期断面潮流已经接近 1 200 MW，同时段支路 b 的潮流已超过 -800 MW。而支路 b 开断后对断面 a 的潮流转移系数为 -0.68。如果支路 b 在负荷高峰时期检修，断面 a 的潮流将达到 1 700 MW，已经非常接近极限 1 800 MW。此时为了保证断面安全裕度，对于会造成支路 b 的停运的检修将自动避开此负荷高峰时段，从而实现发现计划与检修计划的一体化编制。



图 5 潮流结果

Fig. 5 Power flow result

### 5 结论

本文提出了一种考虑安全约束及电量执行的年度发电计划与检修计划联合优化模型。模型以全年开机费用最小及尽可能降低检修对电网运行影响为优化目标，并借助开断支路潮流分布因子初步给出了发电计划与停电计划耦合约束构建方法，最后以我国某省实际电网数据对模型进行了验证，得到如下结论：

- 1) 在年度发电计划中采用每天一个优化点的模式，通过计算参数的合理设置，可以在保障月度电量计划的基础上，有效降低计算规模。
- 2) 在检修计划模型中考虑系统负荷情况及检修设备之间开断对潮流转移的影响，可以提升检修设备在全年范围内的分布均衡性，降低检修对电网运行的影响。
- 3) 借助于支路开断潮流转移分布因子可以将大量检修计划对潮流的影响构建到优化模型中，通过优化模型实现发电计划与检修计划的联合优化。

### 参考文献

[1] 郭源善, 匡洪辉, 郭少青. 协调中长期市场交易计划与日内发电计划的周机组组合策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 78-82.  
GUO Yuanshan, KUANG Honghui, GUO Shaoqing. Research on weekly unit commitment strategy harmonizing long term market trade planning and daily generation

scheduling[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 78-82.

[2] 张煦, 张向伍. 计及运行工况影响的电力设备检修策略分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 74-80.  
ZHANG Xu, ZHANG Xiangwu. Comparative analysis on power equipment maintenance strategies considering the effect of operating conditions[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 74-80.

[3] 张传成, 许丹, 戴赛, 等. 基于特征时段提取的月度发电计划与安全校核模型[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3342-3347.  
ZHANG Chuancheng, XU Dan, DAI Sai, et al. Monthly generation scheduling and security correction model based on characteristic time periods[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3342-3347.

[4] BASIT A, HANSEN A D, ALTIN M, et al. Compensating active power imbalances in power system with large-scale wind power penetration[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2016, 4(2): 229-237.

[5] 季峰, 蔡兴国. 含风电电力系统的月度机组组合模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(3): 26-31.  
JI Feng, CAI Xingguo. Monthly unit commitment model of power system with integrated wind power [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(3): 26-31.

[6] 章美丹, 谢俊, 黄民翔, 等. 基于差别电量的中长期发电调度分步模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(16): 42-46.  
ZHANG Meidan, XIE Jun, HUANG Minxiang, et al. A two-stage medium and long term power dispatch model based on electricity quantities with differences[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(16): 73-79.

[7] ABIRI-JAHROMI A, FOTUHI-FIRUZABAD M, PARVANIA M. Optimized midterm preventive maintenance outage scheduling of thermal generating units[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1354-1365.

[8] DA SILVA E L, SCHILLING M T. Generation maintenance scheduling considering transmission constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 838-843.

[9] JAVANMARD H, KORAEIZADEH A W. Optimizing the preventive maintenance scheduling by genetic algorithm based on cost and reliability in National Iranian Drilling Company[J]. Journal of Industrial Engineering

- International, 2016, 12: 509-516.
- [10] 刘文颖, 谢昶, 文晶, 等. 基于小生境多目标粒子群算法的输电网检修计划优化[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 141-148.
- LIU Wenyong, XIE Chang, WEN Jing, et al. Optimization of transmission network maintenance scheduling based on niche multi-objective particle swarm algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 141-148.
- [11] 刘文颖, 谢昶, 文晶, 等. 交互式输电网检修计划多目标决策方法[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 471-476.
- LIU Wenyong, XIE Chang, WEN Jing, et al. Multi-objective decision making method for maintenance scheduling of transmission network[J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 471-476.
- [12] 唐燕, 刘艳. 考虑电网总风险和检修收益的设备状态检修计划优化[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 33-39.
- TANG Yan, LIU Yan. Optimization for maintenance schedule based on equipment condition considering the overall risk of grid operation and the maintenance revenue[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 33-39.
- [13] 葛晓琳, 舒隽, 张粒子. 考虑检修计划的中长期水火电联合优化调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 36-43.
- GE Xiaolin, SHU Jun, ZHANG Lizi. Mid-long term optimal dispatching method of hydro-thermal power system considering scheduled maintenance[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 36-43.
- [14] 周明, 夏澍, 李琰, 等. 含风电的电力系统月度机组组合和检修计划联合优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1586-2216.
- ZHOU Ming, XIA Shu, LI Yan, et al. A joint optimization approach on monthly unit commitment and maintenance scheduling for wind power integrated power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1586-2216.
- [15] FU Yong, SHAHIDEHPOUR M, LI Zuyi. Security-constrained optimal coordination of generation and transmission maintenance outage scheduling[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 1302-1313.
- [16] 蔡帜, 罗治强, 杨军峰, 等. 考虑大规模可再生能源接入的输电设备检修计划[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 96-101.
- CAI Zhi, LUO Zhiqiang, YANG Junfeng, et al. Transmission maintenance scheduling with large-scale renewable energy integration[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 96-101.
- [17] ABIRI-JAHROMI A, FOTUHI-FIRUZABAD M, PARVANIA M. Optimized midterm preventive maintenance outage scheduling of thermal generating units[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1354-1365.
- [18] JI Guoqiang, WU Wenchuan, ZHANG Boming. Robust generation maintenance scheduling considering wind power and forced outages[J]. IET Renewable Power Generation, 2016, 10(5): 634-641.
- [19] 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: 208-217.
- [20] 任建文, 何培成, 李刚. 基于虚拟支路模型与 FTIL 的多支路开断潮流转移搜索新算法[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 194-200.
- REN Jianwen, HE Peicheng, LI Gang. A new searching algorithm of power flow transferring for multi-branch removal event based on virtual-branch model and FTIL[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 194-200.

收稿日期: 2018-08-20; 修回日期: 2018-10-31

作者简介:

许丹(1985—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统节能经济调度; E-mail: xudan@epri.sgcc.com.cn

罗治强(1977—), 男, 高级工程师, 研究方向为大电网优化调度; E-mail: luo-zhiqiang@sgcc.com.cn

李旻(1970—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为电网调度管理和电力市场化运营。E-mail: limin@sc.sgcc.com.cn

(编辑 姜新丽)