

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190249

## 基于电量裕度的中长期电量安全校核方法

黄国栋<sup>1</sup>, 杨军峰<sup>2</sup>, 丁强<sup>1</sup>, 张宏图<sup>3</sup>

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 国家电网有限公司调控中心, 北京 100031;  
3. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041)

**摘要:** 中长期交易电量日益增多, 电网可调节裕度减少, 因此有必要进行中长期电量安全校核。首先构建电量裕度求解模型, 并考虑安全约束必发电量 and 未来态电网模型, 计算机组、断面等关键主体的电量极限。然后通过关联系数矩阵实现中长期电量校核及调整。最后以实际省级电网作为算例, 验证所提出模型方法的有效性。通过电力计算、电量校核的方式, 为中长期双边交易和电网安全调度运行提供一种技术分析手段。

**关键词:** 电量裕度; 中长期; 电量校核; 未来态电网模型; 电量调整

### Medium and long-term electric quantity security check method based on power quantity margin

HUANG Guodong<sup>1</sup>, YANG Junfeng<sup>2</sup>, DING Qiang<sup>1</sup>, ZHANG Hongtu<sup>3</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. Power Dispatch and Control Center of the State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 3. State Grid Sichuan Electric Power Corporation, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** Medium and long-term trading power is increasing, and the adjustable margin of grid is reduced. Therefore, medium and long-term electric quantity security check is necessary. Considering power quantity constraints and the future state grid model, the power quantity margin solution model is constructed. The power quantity limits of principal equipments such as unit group and line section are calculated, and the medium and long-term electric quantity security check and adjustment are realized through the correlation coefficient matrix. The provincial power grid is used as an example to verify the effectiveness of the proposed model and method. The method of power calculation and electric quantity check provides a technical analysis method for medium and long-term bilateral trading and grid security dispatch operation.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 5442DZ180005) "Research and Application of Key Technologies for Medium and Long-Term Electric Quantity Security Check".

**Key words:** margin of power quantity; medium and long-term; electric quantity security check; future state model of power grid; electric quantity adjustment

## 0 引言

近年来, 随着市场化改革的稳步推进和发用电计划有序放开, 市场交易电量规模不断扩大, 中长期交易电量越来越多, 刚性执行的要求越来越高, 引起电网调节空间减少, 安全裕度降低<sup>[1-2]</sup>。中长期电量交易由于时间跨度长、电网边界不确定性强, 一直缺乏针对中长期交易有效、全面、规范的校核调整手段<sup>[3]</sup>。因此, 为了保证电网安全和电量交易

顺利执行, 需要提供有效可行的中长期电量校核和调整方法。

在国外, 中长期金融合同较多, 在短期的日前、日内现货市场通过 SCUC (Security Constrained Unit Commitment)、SCED (Security Constrained Economic Dispatch) 统筹考虑、统一出清<sup>[4-6]</sup>。而国内交易和调度机构相对独立, 在中长期和短期电网调度方面研究较多<sup>[7-11]</sup>, 对中长期电量安全校核研究较少, 总体来看, 目前的解决办法有两种: 一是电量校核方式, 将电力相关约束转化成电量约束, 分月、分年度校核中长期电量。文献[3]以交易电量和计划电量为基础, 考虑调峰、节能、阻塞等设定 3 个安全校

基金项目: 国家电网公司科技项目资助(5442DZ180005) “中长期电量安全校核关键技术研究及应用”

核指标,并通过年度、月度实现对中长期电量的校核,给出校核不通过的原因。文献[12]以年度、月度合同交易电量为校核对象,建立安全分区,以中标电量、输电联络断面流经电量为决策变量,确定安全校核优化模型,不考虑电力潮流,通过二次优化调整中标电量。文献[13]以发电计划为基础构建月度电量校核模型,考虑系统电量、机组电量和通道传输电量等约束,评估输电通道的传输电量能力,实现月度电能计划(交易)的校核和调整。电量校核从电量层面对发输电进行整体分析,不涉及电量电力分解和潮流计算,简单快捷,但是在当前电网结构愈发复杂、交直流耦合愈发紧密的情况下,单从电量角度对于网络阻塞、断面输电限额的分析计算愈发困难。另外,每一笔电量校核通过,都会对机组启停和出力有一定要求,如果交易量比较大,虽然电量校核能通过,但是到安排机组出力时可能会出现无可解的情况。

第二种是电力校核方式,将电量分解成电力,然后进行电力电量平衡和网络安全校核。文献[14]采用每日一个优化时刻,对月度发电计划在负荷高峰时段进行安全校核。文献[15]考虑月度720个时段机组组合,选取峰荷、腰荷、谷荷3个典型负荷断面,以最优潮流的模型进行电网安全校核和优化校正。文献[16]将月度电量分解和安全校核细化到各日峰、平、谷时段,以提升安全校核精度。现有电力校核文献中多是已经确定电量,然后制定机组组合并进行安全校核。但是在未来中长期电量校核过程中,需要将电量分解成电力再校核,这种电力校核虽然更为精确,但是随着时间尺度细化,计算量必然剧增,同时电力电量分解原则也难以确定。

综上分析,电量校核太过粗略,不够精细,电力校核受维数灾难和计算速度的影响难以实用,而且中长期尺度细化到电力的逐点校核意义并不大。本文提出一种基于电量裕度的校核方法,以机组、断面等关键主体的电量极限为目标,以电力计算、电量校核的方式实现安全校核。另外,当前的文献中都没有考虑未来的电网拓扑变化,本文将基于未来电网模型进行电量校核。

## 1 电量裕度模型

本文所提的校核方法,以计算主体(机组、机组群、线路、断面)的月度发电量最大为目标,考虑机组运行、电网平衡、网络安全等约束,建立电网裕度求解模型,确定电量可行域,作为电量校核的依据。在主体的电量裕度求解过程中,都考虑了其他主体和电网运行的约束。计划电量只有通过了所有

与之关联的机组、机组群、线路和断面的电量裕度校核后,才认为该交易可行。

中长期电量校核要考虑电量-电力转换,本文在计算求解过程中,用电力进行计算,每日按负荷峰、平、谷时段选取3个点<sup>[17]</sup>,然后累加转换成电量。

### 1.1 目标函数

以机组、机组群、线路、断面的月度发电量最大为目标。

$$\max f(p_{i,t}) = \sum_{t=1}^T p_{i,t} \times \alpha_i \quad (1)$$

式中:  $p_{i,t}$  表示计算主体在  $t$  时段的有功功率值;  $T$  表示一个月度周期,根据计算要求可以取1h、多小时或者一天为一个时段;  $\alpha_i$  表示设备  $i$  的电量-电力转换系数,根据时段选择而定。

### 1.2 安全约束必发电量

电网实际调度中,由于安全运行需要,很多机组存在安全约束必发电量,在计算各个主体的电量裕度过程中,必须把这些约束电量作为边界条件。安全约束必发电量一般有下面几类。

(1) 电压支撑、短路容量等产生的约束电量。局部电压支撑、直流送端保证短路容量等所需的必开机组形成的电量。

(2) 网络安全约束电量。受限于断面输电能力,发电机组必须开启且保持出力所形成的电量。

(3) 保障跨区直流闭锁后的事故备用容量所形成的必发电量。考虑跨区直流闭锁,直流落地端电网应保持合理规模开机,并留有必要的事故备用容量,超出本地平衡所需开机的部分视为必发电量。

(4) 阶段性保护配合要求的最小开机方式。为保障灵敏度及阶段性保护配合,电厂最小开机方式下,最低技术出力形成的电量为必发电量。

(5) 顶峰机组必发电量。季节性大负荷期间,必须开机方可满足电力平衡的机组所形成的电量。

### 1.3 约束条件

该模型以SCUC模型为基础,除了常规约束<sup>[18]</sup>,增加了机组群约束、电量约束,机组群电力电量约束和机组约束形式相似,所以合并列出,具体如下。

(1) 系统平衡约束

$$\sum_{i=1}^I p_{i,t} = \bar{P}_t \quad (2)$$

式中:  $\bar{P}_t$  表示  $t$  时段的系统负荷预测;  $I$  表示机组数量。

(2) 机组(机组群)限值约束

$$p_{i,\min} \leq p_{i,t} \leq p_{i,\max} \quad (3)$$

式中,  $p_{i,\min}$ 、 $p_{i,\max}$  分别表示机组(机组群)  $i$  的有功出力下限和上限。

(3) 机组开停机时间约束

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

式中:  $t_{i,on}$ 、 $t_{i,off}$  为机组  $i$  的持续开机、停机时间;  
 $t_{i,up}$ 、 $t_{i,down}$  为机组  $i$  的最小开机、停机时间。

(4) 机组(机组群)电量约束

$$q_{i,min} \leq q_i \leq q_{i,max} \quad (5)$$

式中:  $q_i$  表示机组(机组群) $i$  一段时间内电量;  $q_{i,min}$  表示该时间段内电量下限, 包括安全约束引起的必发电量;  $q_{i,max}$  表示该时间段内电量上限, 对于火电机组则考虑“三公”、燃煤等情况而定, 水电机组则考虑来水、库容等情况而定。

(5) 网络安全约束

$$L_{k,min} \leq \sum_{i=1}^M l_{i,t} S_{i,k,t} \leq L_{k,max} \quad (6)$$

$$D_{j,min} \leq d_{j,t} \leq D_{j,max} \quad (7)$$

式中:  $L_{k,min}$ 、 $L_{k,max}$  分别表示线路  $k$  的潮流功率下限、上限值;  $M$  为系统节点数;  $l_{i,t}$  为节点  $i$  在  $t$  时段的净注入功率;  $S_{i,k,t}$  为节点  $i$  在  $t$  时段注入功率对支路  $k$  潮流的灵敏度;  $d_{j,t}$  为断面(支路组成的断面) $j$  在  $t$  时段的潮流功率;  $D_{j,min}$ 、 $D_{j,max}$  分别表示

线路  $j$  的潮流功率下限、上限值。

1.4 未来态电网模型

由于中长期电量安全校核涉及未来的电网情况, 尤其是重要输变电设备的变动会对潮流产生较大影响, 因此未来电网模型是基础, 而且目前对未来态电网模型的研究还较少<sup>[19]</sup>。

本文采用 CIM/E 格式<sup>[20-22]</sup>文件来描述电网模型。电网模型的拓扑连接以厂站为基本单元, 往下首先是包含多个电压等级, 每个电压等级上包括多个设备, 设备之间通过端子连接, 端子再通过结点完成连接, 如图 1 所示。

同电压等级的厂站设备的投产、退役、检修等情况, 形成适应中长期电量校核的未来态电网模型。在建模和维护中, 重点考虑了以下问题。

(1) 只考虑 220 kV 及以上电压等级的设备, 对于模型中的 220 kV 降压变压器进行了等值处理。同时, 建模的范围主要对电网潮流有影响的所有设备, 如厂站、机组、线路、变压器、负荷、母线等, 而对于保护装置等二次设备则无需考虑。

(2) 对于新投设备, 要增加设备名称、所属厂站、电压等级等基本信息, 同时建立结点与现有模型的逻辑关系。

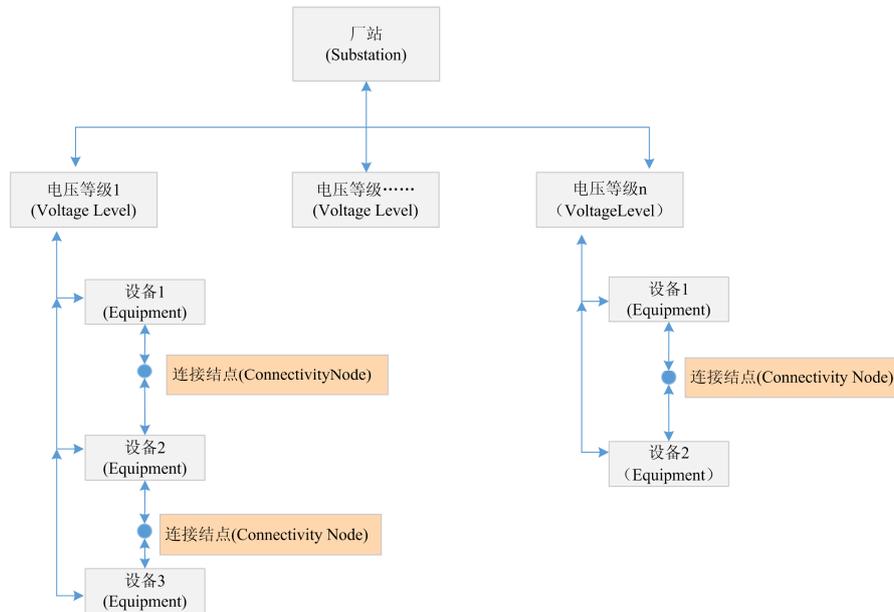


图 1 电网模型描述

Fig. 1 Description of power grid model

(3) 对于检修设备, 要根据设备的停运和复役时间, 结合模型生成时的时序要求, 对设备进行停运和投运的状态标识。

(4) 对于退役设备, 在对应设备表中删除该设

备, 同时需要将相关并且“悬空”的连接结点、电压等级、变压器、变压器绕组、线路端点表、变压器端点表、母线以及逻辑关系表中的记录删除。

(5) 对于未来态电网模型, 建模尺度可以是月

度、旬、周和日，尺度越细，建模和维护成本越高、计算时间越长。

基于上述裕度模型和未来态电网模型，建立中长期电量裕度求解模型，然后采用成熟的 cplex 优化计算软件包进行求解。

### 2 电量校核及定位调整

通过上述计算，可以得到各主体的月度发电裕度，然后根据交易计划计算各主体的计划电量，两项比较，可以判断越限情况。

计算各主体计划电量，可通过下列方法。

$$F = K \cdot U \tag{8}$$

式中： $F$  表示计算主体计划电量； $U$  表示机组的中长期交易电量； $K$  表示关联系数矩阵。

对于机组和机组群来说，关联系数矩阵  $K$  如下所示，其中  $k_{ij}$  表示机组  $i$  和机组(群) $j$  的包含关系，是 0 或者 1。

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & k_{ij} & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nm} \end{bmatrix} \tag{9}$$

对于线路和断面来说，关联系数矩阵如下所示，其中  $k_{ij}$  表示机组  $i$  和线路(或断面) $j$  的灵敏度关系，是线路或断面对机组的功率转移分布因子，需要根据网络模型求解。

$$K = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1m} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2m} \\ \vdots & \vdots & k_{ij} & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \dots & k_{nm} \end{bmatrix} \tag{10}$$

出现越限后，可以根据式(8)定位到越限主体、越限月份、越限原因和相应分布因子较高的电厂或机组，再依照一定的原则(如调整量最小、新能源调整最少、调整成本最小等)对中长期交易电量进行调整。

### 3 算例分析

将本文方法应用在四川省电网的中长期电量安全校核中。主要步骤包括建立未来态电网模型、计算电量裕度、电量校核和电量调整。约束条件包括电网平衡约束、安全约束、机组(群)电力电量约束、最小开停机时间约束等。

#### 1) 建立未来态电网模型

四川以水电为主，电网复杂，除了通过多条联络线和直流与重庆、西藏、陕西相连外，四川内部

还有大量上级调度管辖的电厂，这些电厂和本地水电一起通过三大直流向华东地区输电。

本文以 2017 年最后一天的电网模型为基础，建立 2018 年月尺度的电网模型，并考虑重点设备的检修计划、新投计划和退役计划，细化月度模型，形成多个未来态电网模型。如表 1 所示。

表 1 电网模型构建

Table 1 Construction of power grid model

电网模型开始时间	模型变化原因
20180116	设备检修
20180128	设备检修
20180210	设备检修
20180307	设备检修
20180316	设备检修、新增设备
20180406	设备检修
20180425	设备检修、新增设备
20180510	设备检修
20180610	新增设备
20180810	设备检修、新增设备
20180910	设备检修、新增设备
20181010	设备检修、新增设备
20181111	设备检修、新增设备
20181120	设备检修
20181210	设备检修、新增设备

#### 2) 计算电量裕度

按照上述电量裕度计算方法，计算四川电网的主要机组(计划单元)、机组群、线路和断面的月度电量裕度。全省共计算了 336 个计划单元(机组和电厂)、20 个断面、21 个机组群。

某断面的各月电量裕度如图 2 所示。

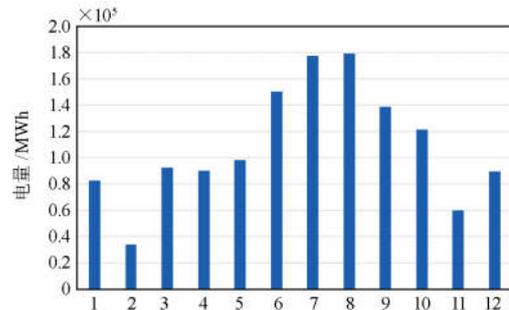


图 2 断面电量裕度

Fig. 2 Power quantity margin of line section

从图中可以看到，在丰水期(5 月—10 月)，受供电平衡、网络约束等条件影响，电量裕度较大；由于该断面在 2 月份存在停电检修，所以 2 月份的电量空间较其他月份明显减少。

某计划单元各月的电量裕度如图 3 所示。

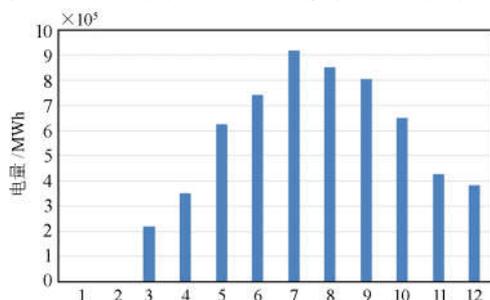


图 3 计划单元电量裕度

Fig. 3 Power quantity margin of plan unit

该计划单元是新增水电站, 从 3 月开始投入运行, 所以 1 月、2 月没有电量裕度; 在丰水期, 水电大发, 电量裕度较大。

某机组群各月的电量裕度如图 4 所示。

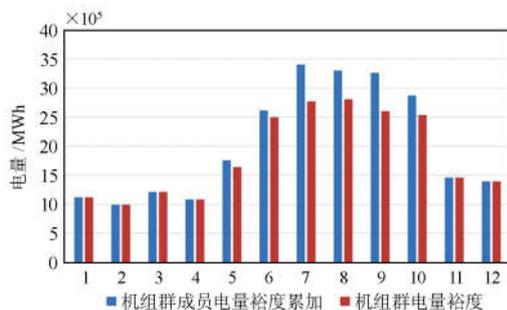


图 4 机组群电量裕度

Fig. 4 Power quantity margin of unit group

该机组群有若干机组组成, 从图 4 对比可以看出, 机组群由于受到自身机组群电力、电量等约束, 其电量裕度并不一定等于其成员电量裕度的累加, 在 5 月—10 月份, 机组群的电量裕度均小于其成员电量裕度的累加, 这也与实际情况相符。

### 3) 电量裕度计算验证

#### (1) 水电站全年极限电量和实际对比

为了验证电量裕度计算的准确性, 将某个水电站 2018 年的计算结果和实际发电量进行对比, 具体如图 5 所示。

从图中可以看到, 该电厂的电量裕度和实际发电量存在一定偏差, 而且偏差随着月份的增加, 整体呈现递增的趋势。这主要是因为预测数据和电网模型是在 2017 年底获取, 随着时间增加, 基础数据准确性降低, 导致偏差增大。在 1 月—7 月份, 各月偏差低于 10%, 全年最大偏差 15% 以下, 符合目前中长期电量年度校核需求, 偏差部分将在月度、日前日内的时间尺度内进行纠正。

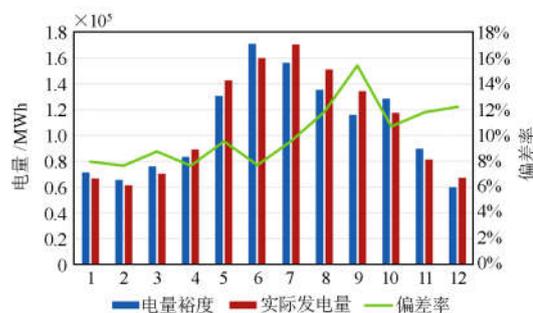


图 5 水电厂电量对比

Fig. 5 Comparison of hydropower quantity

#### (2) 关联断面耦合分析

为了验证电量裕度计算能否处理关联断面, 现考虑两个有物理连接关系的断面 A 和断面 B, 设定两种情形: 情形一, 断面 B 的限额为正常限额, 4 000 MW; 情形二, 断面 B 的限额为 3 000 MW, 对比两种情形下断面 A 的电量裕度, 结果如图 6 所示。

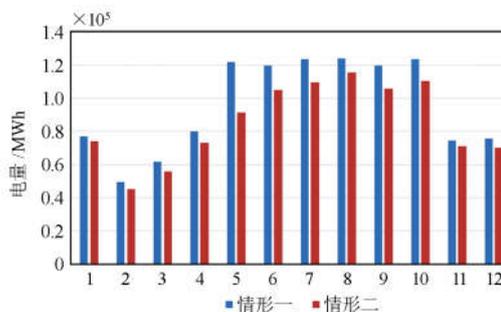


图 6 断面电量裕度对比

Fig. 6 Comparison of power quantity margin for section

可以看出, 在其他约束条件完全一样的情况下, 改变断面 B 的限额, 会影响断面 A, 断面 A 的电量裕度在情形二下整体降低 10.8%, 尤其在丰水期, 断面 A 的电量裕度下降明显, 可见在丰水期断面 A、B 的潮流大, 断面 B 限额下降对断面 A 影响较大。这也说明电量裕度计算中考虑了多种约束和耦合关系。

#### 4) 电量校核及调整

完成电量裕度计算后, 指定一部分计划单元的中长期电量计划, 然后按照上述方法进行电量校核。校核后发现, 断面一、二在 7 月份电量计划大于电量裕度, 出现了越限, 具体如表 2 所示。

根据关联系数, 找到引起断面越限的计划单元, 然后以调整量最小为目标函数进行电量调整, 最后消除越限, 具体调整量如表 3 所示。

表 2 断面电量对比

Table 2 Comparison of section power quantity

断面	电量计划/MWh	电量裕度/MWh	越限电量/MWh
断面一	169 999	166 725	3 274
断面二	189 197	182 279	6 918

表 3 电量调整

Table 3 Adjustment of power quantity

计划单元	消除断面一	消除断面二	消除两个断
	越限的调整	越限的调整	面越限的调
	量/MWh	量/MWh	整量/MWh
计划单元一	8 622	0	29 838
计划单元二	0	48 831	74 142
计划单元三	0	2 971	2 971
计划单元四	0	28 702	28 702
计划单元五	0	5 726	5 726
总调整量	8 622	86 230	141 379

从表 3 可以看到，同时消除两个断面越限的总调整量要大于分别消除每个断面越限调整量的累加，说明这两个断面还存在类似“跷跷板”的耦合关系，因此同时消除两个断面越限的调整代价更大。

### 4 结语

针对越来越多的中长期电量交易，本文提出一种基于机组、断面等关键主体电量裕度的校核方法，考虑未来态电网模型，以电力计算、电量校核的方式实现安全校核。通过实际算例，验证了算法的准确可行，全过程实现了电量裕度计算、校核和调整，同时通过电量裕度也对电网运行边界有了更量化直观的掌握。未来在以下方面还需进一步开展研究：

(1) 在中长期尺度，受电网模型、预测数据等不确定性的影响，计算结果必然存在一定的偏差，因此有必要将年度、月度和日前日内尺度的电量校核相互配合，逐渐滚动，达到精细化校核。

(2) 在中长期的电量-电力转换方面，时段选择很关键，按照一天 96 点选择电力进行计算，工作量极大也没有必要，按照一天一个点，则太粗略，按照典型电力曲线则要考虑不同类型机组、不同季节，因此还需要结合实际情况进一步深化研究，提升计算精度。

### 参考文献

[1] 谭振飞, 阮广春, 钟海旺, 等. 适应交易机构相对独立的双边交易安全预校核方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(10): 112-119.  
TAN Zhenfei, RUAN Guangchun, ZHONG Haiwang, et al. Security pre-check method of bilateral trading adapted to

independence of power exchange[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(10): 112-119.

[2] FU Y, SHAHIDEHPOUR M, LI Z Y. Long-term security-constrained unit commitment: hybrid Dantzig-wolfe decomposition and subgradient approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 2093-2106.

[3] 胡晓飞. 大规模大用户直购电模式下电网安全校核体系及方法研究[J]. 东北电力技术, 2017, 38(6): 25-29.  
HU Xiaofei. Research on power network security correction index system and method for massive large user direct purchaser of electricity[J]. Northeast Electric Power Technology, 2017, 38(6): 25-29.

[4] GALIANA F D, ILIC M. A mathematical framework for the Analysis and management of power transactions under open access[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13(2): 681-687.

[5] GALIANA F D, KOCKAR I, FRANCO P C. Combined pool/bilateral dispatch: part I performance of trading strategies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17 (1): 92-99.

[6] MARCOVECCHIO M G, NOVAIS A Q, GROSSMANN I E. Deterministic optimization of the thermal unit commitment problem: a branch and cut search[J]. Computers & Chemical Engineering, 2014, 67: 53-68.

[7] HUANG Guodong, XU Dan, LUO Zhiqiang, et al. Research on the construction of security constrained economic dispatch scenarios for large-scale power grid[C] // The 3rd International Conference on Sustainable and Renewable Energy Engineering, May 9-11, 2018, Zamora, Spain: 66-71.

[8] 谢冰, 黄柳强, 吴茵, 等. 基于“三公”调度的年度滚动发电计划与机组组合优化模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 110-116.  
XIE Bing, HUANG Liuqiang, WU Yin, et al. Annual rolling generation scheduling and unit commitment optimization model based on open and impartial dispatching[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 110-116.

[9] 黄国栋, 许丹, 丁强, 等. 考虑热电和大规模风电的电网调度研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 162-170.  
HUANG Guodong, XU Dan, DING Qiang, et al. Review of grid dispatching considering thermal power and large-scale wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 162-170.

[10] 池喜洋, 竺炜, 刘长富, 等. 含大型风电场的电网安

- 全经济优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(1): 127-133.
- CHI Xi-yang, ZHU Wei, LIU Changfu, et al. Security and economic optimization dispatch for power grid integrating large-scale wind farm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1): 127-133.
- [11] 陈雨果, 李嘉龙, 刘文涛, 等. 电力市场环境下发电计划关键技术综述[J]. 广东电力, 2018, 31(6): 14-19.
- CHEN Yuguo, LI Jialong, LIU Wentao, et al. Overview on key technologies for generation scheduling under electric market environment[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(6): 14-19.
- [12] 张粒子, 陈之栩, 舒隽, 等. 东北区域市场中长期交易安全校核改进方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(8): 95-99.
- ZHANG Lizi, CHEN Zhixu, SHU Jun, et al. An improved security correction method for medium and long-term transaction of northeast electricity market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(8): 95-99.
- [13] 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.
- [14] 李利利, 管益斌, 耿建, 等. 月度安全约束机组组合建模及求解[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(12): 27-31.
- LI Lili, GUAN Yibin, GENG Jian, et al. Modeling and solving for monthly security constrained unit commitment problem[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(12): 27-31.
- [15] 高宗和, 耿建, 张显, 等. 大规模系统月度机组组合和安全校核算法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(23): 28-30.
- GAO Zonghe, GENG Jian, ZHANG Xian, et al. Monthly unit commitment and security assessment algorithm for large-scale power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(23): 28-30.
- [16] 梁志飞, 夏清, 许洪强, 等. 基于多目标优化模型的省级电网月度发电计划[J]. 电网技术, 2009, 33(13): 90-95.
- LIANG Zhifei, XIA Qing, XU Hongqiang, et al. Monthly generation scheduling method based on multi-objective optimization model for provincial power grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(13): 90-95.
- [17] 郭琳, 文旭, 赵志强, 等. 计及节能风险评估的月度随机规划调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 22-29.
- GUO Lin, WEN Xu, ZHAO Zhiqiang, et al. A stochastic programming monthly generation dispatching model considering energy-saving risk assessment[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 22-29.
- [18] STREIFERT D, PHILBRICK R, OTT A. A mixed integer programming solution for market clearing and reliability analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 21(4): 1127-1135.
- [19] 杨启京, 张勇, 翟明玉, 等. 大电网未来态一体化模型构建和融合技术研究[J]. 中国电力, 2018, 51(6): 121-128.
- YANG Qijing, ZHANG Yong, ZHAI Mingyu, et al. Research on integration model construction and integration technology for future state of power grid[J]. Electric Power, 2018, 51(6): 121-128.
- [20] Energy management system application program interface (EMS-API): part 555 CIM based efficient model exchange format (CIM/E): IEC 61970[S]. 2012.
- [21] XIN Yaozhong, MI Weimin, LI Wei. CIM-based grid model and graphics exchange format[J]. China Standardization, 2011, 47(4): 72-74.
- [22] 陈玲, 吴栋其, 杨涛, 等. 基于 CIM 的配电网模型到 RTDS 仿真模型的转换研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 136-142.
- CHEN Ling, WU Dongqi, YANG Tao, et al. Model conversion from the CIM-based distribution network to RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 136-142.

收稿日期: 2019-03-08; 修回日期: 2019-05-23

作者简介:

黄国栋 (1988—), 男, 通信作者, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统优化调度、电力市场; E-mail: hgd2088@126.com

杨军峰 (1970—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统经济调度、市场交易;

丁强 (1981—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电网优化调度、新能源消纳、电力市场等。

(编辑 姜新丽)