

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200753

# 互联电网安全约束经济调度场景构建方法

黄国栋<sup>1,2</sup>, 许丹<sup>1,2</sup>, 崔晖<sup>1,2</sup>, 杨晓楠<sup>1,2</sup>, 徐立中<sup>3</sup>

(1. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 2. 电力调度自动化技术研究与系统评价北京市重点实验室, 北京 100192; 3. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310007)

**摘要:** 安全约束经济调度在省级电网调度控制中应用较为成熟。为实现大范围内资源优化配置, 有必要研究互联电网安全约束经济调度技术。针对在实际生产运行中遇到的困难, 提炼了优化目标设计、系统平衡、联络线调整、基础数据整合五个关键问题, 并对每个问题给出多种解决策略。建立了基于策略组合的互联电网安全约束经济调度场景构建方法, 分析了不同场景的适应性及对应模型特点。最后通过实际电网算例验证了策略组合的合理性和准确性。以实际需求为导向, 构建不同的应用场景和经济调度模型, 能提升互联电网安全约束经济调度技术的实用性和适应性。

**关键词:** 安全约束经济调度; 互联电网; 电网平衡; 联络线计划调整; 场景构建; 策略组合

## Scenario construction method of security-constrained economic dispatch for an interconnected power grid

HUANG Guodong<sup>1,2</sup>, XU Dan<sup>1,2</sup>, CUI Hui<sup>1,2</sup>, YANG Xiaonan<sup>1,2</sup>, XU Lizhong<sup>3</sup>

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 2. Beijing Key Laboratory of Research and System Evaluation of Power Dispatching Automation Technology, Beijing 100192, China; 3. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China)

**Abstract:** Security constrained economic dispatch is relatively mature in dispatch and control for the provincial power grid. In order to achieve large-scale optimal allocation of resources, it is necessary to study security-constrained economic dispatch technology for the interconnected power grid. In view of the difficulties encountered in actual production and operation, five key problems of optimization target design, system balance, tie-line adjustment, and basic data integration are refined, and various solution strategies are given for each problem. The scenario construction method of security-constrained economic dispatch for an interconnected power grid based on strategy combination is established, and the adaptability to different scenarios and the characteristics of corresponding models are analyzed. Finally, the rationality and accuracy of the strategy combination are verified through practical grid calculation examples. Guided by actual needs, constructing different application scenarios and economic dispatch models can improve the practicality and adaptability of security-constrained economic dispatch technology for the interconnected power grid.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 52110418002A).

**Key words:** security constrained economic dispatch; interconnected power grid; power grid balance; tie-line schedule adjustment; scenario construction; strategy combination

## 0 引言

随着特高压交直流建设的推进, 交直流互联电网规模不断扩大, 电网交直流耦合、送受端耦合、

高低压耦合更加紧密。同时, 在我国西部、北部地区, 风、光、水电装机容量大, 但负荷中心与能源中心分布不均衡, 通过互联大电网进行清洁能源远距离输送是实现清洁能源消纳的有效手段<sup>[1-3]</sup>。因此, 互联电网的运行状态一体性、电力平衡全局性日趋明显, 有必要开展互联大电网的调度控制技术

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助 (52110418002A)

研究, 实现大范围资源优化配置, 保证电网安全经济运行。

目前开展的互联电网优化调度相关研究多是从分解协调方面着手。文献[4]中提出了基于价格响应函数的超大电网分解协调优化方法。它将超大电网的安全约束经济调度模型分解为上级联络线优化主问题和省级机组计划子问题, 算例表明该方法能有效提高大电网经济调度求解效率, 但由于该方法未考虑我国电网实际运行情况, 实际操作性不强。文献[5-6]提出了电力市场下大型分散式机组组合模型, 它主要针对国际间和区域间不同市场规则之间的联合优化, 重点在于分散模型的求解方法。文献[7]从全网统筹的角度开展联络线计划编制, 力求解决全局资源优化配置问题, 将联络线计划与电网运行状态相结合, 但不涉及互联电网平衡模式和网络处理; 文献[8]构建了联络线优化调度模式, 实现对联络线输送功率消纳的最大化以指导联络线计划制定, 更侧重受端电网情况, 对互联大电网考虑较少。文献[9-11]着力研究了大规模机组组合问题的求解策略, 但均不考虑各类实用化约束和电网调控模式。文献[12-16]侧重于从模型和算法等方面对不可控可再生能源的消纳进行研究。文献[17-19]基于配电网提出分布式、去中心化的多区域联合调度方法, 有一定借鉴意义, 但还需要考虑互联大电网的实际调度模式和电网模型的差异。整体而言, 目前大规模互联电网的优化调度实用化问题仍未得到妥善解决。

统筹电力电量平衡、制定调度计划是我国电力调控中心的专业业务之一, 当前我国的上级调度主要负责编制直调机组和跨区跨省联络线计划, 考虑省间电力交易和大电源的跨区跨省消纳。省级调度则根据机组发电能力、负荷预测、联络线计划编制调管机组的发电曲线, 目前普遍采用安全约束经济调度(Security Constrained Economic Dispatch, SCED)技术进行计划编制<sup>[20-24]</sup>。该技术已在我国省级电网大范围推广应用, 能很好地解决省级电网优化调度问题, 但如果要在互联电网采用安全约束经济调度技术, 还需要解决数据和模型问题。

数据方面, 随着智能电网调度控制系统在国家电网公司范围内的推广应用, 各省的调度计划基础数据收集工作已基本解决。模型方面, 如果使用互联电网的全模型, 必然因为数据、约束太多而求解困难, 并且在实际中不同的应用场景对模型处理不尽相同, 主要区别是在以下几个关键问题上: (1) 优化目标设计; (2) 互联电网系统平衡策略设计; (3) 省间及区域间联络线计划调整原则; (4) 不同调度

关系电源的处理方式; (5) 大规模电网适用于计划需求的网络简化方式。

因此, 文中对互联电网优化调度模型中的关键问题逐一分析, 以需求组合的方式构建互联电网安全约束经济调度的使用场景, 基于“三华”实际电网模型分析了不同场景的数据需求、针对问题及模型构建难易度, 提出适用于不同应用场景的模型处理方式, 以多场景构建的方式提升互联电网安全约束经济调度技术在相关调度模式下的可用性及实用性。

## 1 策略设计

### 1.1 优化目标设计

通常SCED的优化目标为全网购电价格最优、煤耗最优等, 而考虑到我国的实际调度策略, 我国省内的SCED优化目标多为考虑火电“三公”的节能调度模式, 但互联电网SCED由于使用人员通常是站在全局范围内决策问题, 因此除了省内“三公”优化目标外, 根据实际调研, 互联电网SCED应该添加可再生清洁能源消纳及重点输电断面的潮流裕度最大化两个优化目标。

三公节能调度目标函数为

$$f_1 = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_G} (B_{0,i} + \sum_{k=1}^K \int b_{i,k}(p_{i,t})) \quad (1)$$

式中:  $N_G$  为发电机机组数;  $N_T$  为研究周期的时段数;  $B_{0,i}$  为第  $i$  台机组的发电费用常数;  $b_{i,k}(p_{i,t})$  为第  $i$  台机组第  $k$  段的发电微增率曲线, 装机容量相同的机组发电微增率相似,  $k$  为多段费用微增率曲线的段号;  $p_{i,t}$  为机组出力。

可再生能源最大化消纳的目标函数为

$$f_2 = \alpha \sum_{t=1}^T (P'_{w,t} - P_{w,t}) \quad (2)$$

式中:  $\alpha$  为惩罚系数;  $P_{w,t}$  为  $t$  时段可再生能源实际被调用的功率;  $P'_{w,t}$  为  $t$  时段可再生能源预测功率。

重点断面的潮流裕度最大化为

$$f_3 = \beta \sum (L_t - L_{t,\text{limit}}) \quad (3)$$

式中:  $\beta$  为惩罚系数;  $L_t$  为  $t$  时段断面的潮流;  $L_{t,\text{limit}}$  为  $t$  时段断面限值。

上述惩罚系数  $\alpha$ 、 $\beta$  一般取较大值, 并根据实际最优模型进行调试修正。

因此, 可供选择的优化目标至少有三种, 分别为: ① 考虑火电“三公”的节能调度; ② 全网可再生清洁能源消纳最大化; ③ 重点输电断面的潮流裕度最大化。

## 1.2 系统平衡策略

在传统的以省为单位的 SCED 模型中,平衡策略为省域内机组总出力等于省域内负荷总需求,如式(4)所示。

$$P_{\text{load},c,t} = \sum_{i \in c} P_{i,t} - T_{c,t} \quad (4)$$

式中:  $P_{\text{load},c,t}$  为省域  $c$  在时刻  $t$  的负荷总需求;  $P_{i,t}$  为省域  $c$  内机组  $i$  在时刻  $t$  的计划出力;  $T_{c,t}$  为省域  $c$  在时刻  $t$  的外送(受入则为负值)功率。通常  $T_{c,t}$  为上级调度的下发数据,按确定值参与平衡。

上述  $T_{c,t}$  在模型中为确定值,这是能将全网分解处理的关键因素。当在全网内开展全局优化计算时,事实上也是对各省外送(受入)功率  $T_{c,t}$  的优化。一种较为简易的处理方法是仍然采用式(1)的平衡策略将省域  $c$  扩展到需要优化的全局网络范围,以各省域负荷预测总加作为平衡量,该网络与外网的功率传输依然可采用已知值,当优化结束后通过潮流计算可以获取  $T_{c,t}$ 。这种处理方式简单明了,但  $T_{c,t}$  值可能与实际联络线计划背离甚远,究其原因按照传统 SCED 优化目标,当不添加电力交易相关约束时,联络线功率将完全由各省电源结构决定。这与我国联络线计划的形成机制不符,将对现实使用造成困难。

一种可解决上述问题的方案是直接添加联络线断面约束,以约束形式使联络线计划在可接受范围内,如式(5)所示。

$$T_{c,t,\min} \leq T_{c,t} \leq T_{c,t,\max} \quad (5)$$

式中,  $T_{c,t,\min}$ 、 $T_{c,t,\max}$  分别为省域  $c$  在时刻  $t$  可外送(受入)的最小、最大功率。

另一种方案是各省均保留平衡约束,将联络线作为待求等值电源以保留全局寻优性。等值方式为两端在相同省域的物理线路合并为一对等值电源。此时还满足以下约束:① 两端耦合约束,即在忽略网络损耗的前提下线路两端输送功率之和为 0;② 功率分散注入特性,为进行潮流计算,等值机优化功率按照历史统计规律在物理线路接入点进行分配。按照该思路,互联电网 SCED 场景需要添加正负耦合等值机组信息,以及等值机功率分布系数。

可采取的系统平衡策略至少包含三种方式:

- ① 全网统一平衡模式。
- ② 考虑联络线约束的全网平衡模式。
- ③ 联络线作为等值机组的全网平衡模式。

### 1.3 联络线计划调整

上面所涉及的平衡策略,当采用联络线作为等值机参与系统平衡模式时,将联络线功率划归为待求变量,重点在于给定联络线功率的调整区间。但

事实上,联络线计划的制定主要是根据跨区跨省平衡大电源计划及分配策略和省域之间的电力交易来决定<sup>[3]</sup>。这就表明给联络线划定的调整区间必须满足一定的约束条件。

按照目前实际情况,联络线功率组成可分为省区间电力交易和跨省跨区平衡电源两部分,如式(6)所示。

$$T_{l,t} = T_{l,s,t} + T_{l,u,t} \quad (6)$$

式中:  $T_{l,t}$  为联络线功率;  $T_{l,s,t}$  为电力交易决定量;  $T_{l,u,t}$  为跨省跨区电源决定量。如交易可调整,可根据交易的刚性给出  $T_{l,s,t}$  的可调区间。如果全网计划中跨区跨省大电源做固定出力处理(事实上,由于跨区跨省大电源大多为大规模火电、水电群,通常会事先制定计划值),那么  $T_{l,u,t}$  则没有改变空间。如果该部分电源也参与优化,则调整区间应与该值变化量相关联,如式(7)所示。

$$\Delta T_{l,u,t} = \sum_{i=1}^{N_u} \alpha_{i,l,t} \cdot (P_i - p_{i,\text{ini}}) \quad (7)$$

式中:  $\Delta T_{l,u,t}$  为跨省跨区电源决定量变化区间;  $N_u$  为跨省跨区电源总数;  $P_i$  为跨省跨区电源  $i$  的计划;  $p_{i,\text{ini}}$  为跨省跨区电源  $i$  的初始计划值;  $\alpha_{i,l,t}$  为机组  $i$  在时刻  $t$  分配到联络线  $l$  的功率分配系数,一般根据历史经验或者电网运行方式规程确定。

实际中联络线还分为区域联络线和省间联络线,区域联络线和省间联络线也存在关联关系,通常区域联络线传输的功率为区域内多省联合消纳。当考虑该因素时,区域联络线功率调整必然引发区域内省间联络线功率调整。实际中,区域联络线功率将按比例分摊到区域内省间联络线,因此调节关系如式(8)所示。

$$T_{i,t} - T_{i,t,\text{ini}} = \Delta T_{a,t} \cdot \gamma_{a,i,t} \quad (8)$$

式中:  $\Delta T_{a,t}$  为区域联络线  $a$  的调整量;  $T_{i,t}$  为省内联络线  $i$  在时刻  $t$  的计划值;  $T_{i,t,\text{ini}}$  为省内联络线  $i$  在时刻  $t$  的初始值;  $\gamma_{a,i,t}$  为区域联络线  $a$  在时刻  $t$  分配到省内联络线  $i$  的功率分摊系数,一般根据历史经验或者电网运行方式规程确定。

联络线计划的调整方式由三种因素所决定,文中选择三种调整方式:① 电力交易可调、跨省跨区大电源不可调。② 两者均可调。③ 两者均可调且考虑区域、省间联络线的关联性。

## 2 基础数据整合

目前全网调度计划基础数据来源于各省数据上报,现已应用于“三华”全网量化安全校核,且校

核的计划潮流准确率得到了实际认可<sup>[25]</sup>。这在一定程度上保证了基础数据收集的可行性, 但由于 SCED 与安全校核存在本质差异, 因此不能直接照搬安全校核的处理方式, 还必须考虑与调度计划相适应的解决办法。

## 2.1 机组数据处理

通过各省上报的信息, 获得机组的基础数据, 同时还要对机组数据进行特殊处理, 因为机组在调度计划中存在以下几个特殊属性: 从调度关系而言, 机组存在就地平衡机组和跨省跨区平衡机组, 不同的调度属性将决定其参与系统平衡的方式; 从网络模型构建而言, 机组有建模机组和未建模机组, 这将影响网络潮流和模型精确性。因此在全网 SCED 场景构建中, 需要针对机组的上述调度属性给予区别考虑。

### 1) 跨省跨区平衡机组

对于跨省跨区平衡机组, 采用与各相关联络线绑定处理的方式, 如式(9)所示。

$$T_{l,i,t} = \alpha_{i,l,t} \cdot P_i \quad (9)$$

式中:  $T_{l,i,t}$  表示联络线  $l$  在时刻  $t$  由机组  $i$  决定的功率值;  $P_i$  为机组  $i$  的计划出力;  $\alpha_{i,l,t}$  为机组  $i$  在时刻  $t$  分配到联络线  $l$  的功率分配系数, 由联络线和机组的物理特性决定。当机组功率体现在联络线计划时, 它则不可以再以机组形式参与系统平衡, 否则将造成电源出力重复计算问题。但其必须参与系统潮流计算, 否则将在潮流计算中造成功率不平衡问题。

### 2) 未建模机组

对于未建模机组, 在目前省级调度计划中也多由电厂上报作为固定出力处理。在全网 SCED 中, 它同样以固定出力模式存在, 由于其不影响全网资源的优化配置和潮流分析, 因此对未建模机组将采取省域内打包处理模式, 如式(10)所示。

$$P_{s,c} = \sum_{i \in c} P_{i,s} \quad (10)$$

式中:  $p_{i,s}$  为未建模小机组, 该值已事先获取;  $P_{s,c}$  为省域  $c$  内的未建模小机组出力总加。此时, 场景中用总出力替代未建模小机组。

分析可知, 不同调度关系机组的处理方式将取决于平衡策略的选择。① 直接全网平衡模式, 不考虑跨省跨区平衡特性, 机组直接参与全网统一平衡。② 与联络线绑定模式, 考虑区域、省间联络线约束, 考虑机组不同调度属性, 且按照实际情况进行调整。

## 2.2 直流输电系统处理

在区域电网互联中, 区域之间通过直流输电系统进行互联是普遍采取的方式。由于大功率电力电

子全控开关器件技术的进一步发展和新型控制策略的研究, 直流输电不仅可以实现能量的传输, 同时具有一定的可调度特性, 这与交流联络线不同, 因此有必要对直流输电系统进行单独处理。

直流输电系统在交流侧的换流阀处进行等值, 如果将直流功率设置为全网 SCED 的优化变量, 则仍然采取送受端等值机处理模式。但相对于交流联络线, 直流计划将受到直流运行特性、运行方式、运行规程等一系列影响, 文中将这些影响转换为机组出力限额、爬坡、禁止运行区、连续运行等约束。

$$P_{i,t,dc} \notin \begin{cases} [P_{i,dw}^1, P_{i,up}^1] \\ \vdots \\ [P_{i,dw}^n, P_{i,up}^n] \end{cases} \quad (11)$$

$$T_{on}(P_{i,t,dc}) \geq T_{dc} \quad (12)$$

式中:  $P_{i,t,dc}$  为直流  $i$  在时段  $t$  的出力;  $P_{i,dw}^n$ 、 $P_{i,up}^n$  为直流  $i$  的第  $n$  段禁止运行区下限和上限;  $T_{on}(P_{i,t,dc})$  为直流从  $t$  时段保持出力  $P_{i,t,dc}$  的时长;  $T_{dc}$  为直流维持出力最小时间。

因此直流存在以下两种处理方式: ① 固定出力模式, 直流不参与优化决策, 按照固定出力的等值机处理, 但此时降低了区域之间的寻优空间。② 优化调整模式, 直流作为变量参与优化, 需考虑各类特性, 建立相关约束。

## 2.3 电网模型处理

对于互联大电网, 网络模型处理一般有以下几种策略。

1) 不考虑网络约束, 即不做计划潮流分析, 将 SCED 问题转换为单纯无网络约束的经济调度问题, 该方式求解简单, 但是失去了互联电网 SCED 寻优的部分价值。

2) 按照全网统一模式考虑, 对整个互联电网进行统一潮流分析, 该方式直观, 但是求解量大, 尤其是“三华+两北”的超大规模互联电网, 在 SCED 中对网络模型全部考虑将带来极大的计算量<sup>[4]</sup>。

3) 按照全网分省模式, 在计划潮流中以联络线为边界, 用等值模式将大电网分解为省域电网, 再进行优化求解, 该方式能减少网络分析计算时间, 联络线处理灵活, 但是可能在个别情况下失去最优解。

4) 按照全网分省简化模式, 由于全网 SCED 的使用者多为国分调度人员, 根据使用人员的关注焦点, 只选取关键支路进行计划潮流分析。这些关键支路主要分布在大电源近区网络以及特高压交直流落点近区网络, 因此需要关注的线路事实上是比较

固定的，一般包括重载情况较多或者运行方式变化较大时的重要支路、断面。该方式能大大减少网络分析计算时间，提高效率，适合电网运行方式变化不大的情况。

在选定需要关注的特定线路后，再根据直流灵敏度分析，计算关注的支路潮流，如式(13)所示。

$$P_{z,t} = \sum_{i=1}^{N_G} \beta_{i,z} \cdot P_i + P_{ld,z,t} \quad (13)$$

式中： $P_{z,t}$ 为支路  $z$  在时刻  $t$  的潮流； $\beta_{i,z}$ 为机组  $i$  对支路  $z$  的灵敏度； $P_{ld,z,t}$ 为所有负荷对该支路的潮流贡献。由于  $\beta_{i,z}$ 和  $P_{ld,z,t}$ 只与网络拓扑有关，因此可在 SCED 优化前计算获得。

在对网络模型的处理方面，文中认为至少存在以下几种处理方式：① 不考虑网络约束；② 全网统一模式；③ 全网分省模式；④ 全网分省简化模式。

### 3 互联电网 SCED 场景构建及算例分析

#### 3.1 场景构建

通过上述分析可以看出，除了目标函数选择不同外，互联电网经济调度受联络线、直流输电系统、电网模型等多种因素不同处理方式的影响，总结如表 1 所示。

表 1 不同处理策略汇总

Table 1 Summary of different processing strategies

关键问题	处理方式
平衡策略	(1) 全网统一平衡模式。
	(2) 考虑联络线约束的全网平衡模式。
	(3) 联络线作为等值机组的全网平衡模式。
联络线调整	(1) 电力交易可调、跨省跨区大电源不可调。
	(2) 两者均可调。
	(3) 两者均可调且考虑区域、省间联络线关联性。
机组数据	(1) 直接全网平衡模式。
	(2) 与联络线绑定模式。
直流系统	(1) 固定出力模式。
	(2) 优化调整模式。
电网模型	(1) 不考虑网络约束；
	(2) 全网统一模式；
	(3) 全网分省模式；
	(4) 全网分省简化模式。

互联电网 SCED 面对诸多需要处理的策略及基础数据处理问题，不同的策略和处理方式将构成不同的计划场景，结合实际情况和组合关联性，文中针对不同的分析目的组建了几个较为典型的场景，组合方式如表 2 所示。

表 2 场景列表

Table 2 List of scenarios

场景	平衡策略	联络线调整	机组数据	直流系统	电网模型
1	(1)	(1)	(1)	(1)	(2)
2	(2)	(1)	(1)	(1)	(2)
3	(3)	(2)	(2)	(1)	(2)
4	(3)	(2)	(2)	(2)	(2)
5	(3)	(3)	(2)	(2)	(3)

通过分析可知：

1) 场景 1 是以跨区联络线为边界，将传统的省域 SCED 问题直接扩展到全网范围，适合分析在全网范围内按照机组特性得到的理论优化结果，但联络线结果可能和实际有偏差；

2) 场景 2 是在满足交易调整的背景下开展互联电网 SCED 优化，且考虑联络线约束，但由于直流系统不可调，因此属于调整交易前提下区域内的资源优化配置；

3) 场景 3 是在场景 2 的基础上，在既放开交易又放开大电源优化的前提下的区域内资源优化配置，计算量较大；

4) 场景 4 是在场景 3 的基础上，由于直流输电可调，因此是全网范围内的资源优化配置，但是计算量最大；

5) 场景 5 由于在平衡策略、联络线调整和电网模型上以省为主体，是最贴合目前调度实际情况的全网范围内的资源优化配置。

上述罗列的是文中认为值得研究的各类场景，它并非所有场景集合，研究人员可以根据研究需求进行不同的场景组合。由于不同场景对计划模型所考虑的约束条件具有较大差异，因此根据需求构建场景具有一定的实际意义。

#### 3.2 算例分析

以某个区域电网为例，该区域电网包括 5 个省级电网、220 kV 及以上线路 3 000 多条、建模机组 800 多个。接入负荷预测、交换计划、电网模型等信息，选取上面场景 5 的处理方式，以常用的“三公”节能调度为目标函数，通过商业软件 cplex 进行求解。考虑一天 96 个时段，基础数据整合耗时 109 s，优化计算耗时 155 s，满足实用化的要求。

##### 1) 机组计划

文中对互联电网采用了全网分省模型进行计划编制，某省的负荷预测和典型机组计划如图 1 所示。

从图 1 中结果可以看出，机组计划能跟踪负荷变化，由于是“三公”调度目标，相同装机容量的机组负载率一致，机组一、机组二为 300 MW 机组，

负载率为 72%，机组三、机组四为 200 MW 机组，负载率为 79%，机组满足爬坡、限额等约束，计划编制结果符合实用化要求。

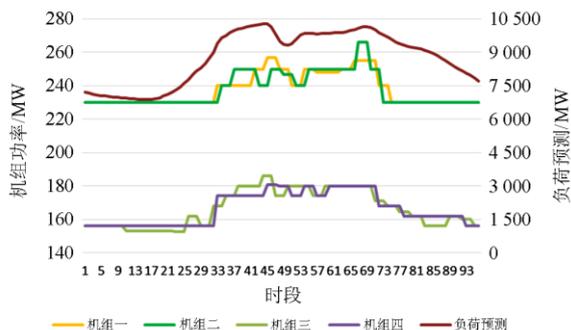


图 1 机组计划和负荷预测结果

Fig. 1 Results of unit plan and load forecast

### 2) 支路潮流

安全约束经济调度对计划潮流要求较高，因此先分析潮流计算的准确性。对比计划潮流和次日实际支路有功功率，潮流合格率计算公式为

$$\varepsilon = |L_{i,t}^{real} - L_{i,t}^{plan}| / L_{i,t}^{real} \quad (14)$$

$$\lambda = \sum_{i=1}^N m_i / (96 \cdot N) \quad (15)$$

式中： $\varepsilon$  表示潮流相对误差； $L_{i,t}^{real}$ 、 $L_{i,t}^{plan}$  分别表示  $t$  时段支路  $i$  的实际潮流、计划潮流； $\lambda$  表示潮流计算的合格率； $m_i$  表示支路或断面 96 个计算时段点中的合格点数，如果一个时段  $\varepsilon < 10\%$ ，则认为该时段是合格点，否则是不合格点； $N$  为总的设备数，包括支路和断面。

利用文中提到的方法，进行安全约束经济调度计算，并按小时对潮流相对误差进行统计，潮流计算的合格率是 91.1%，部分典型线路潮流统计结果如表 3 所示。线路潮流的平均相对误差均在 10% 以下，考虑到机组实际出力和计划出力的偏差，计划潮流精度基本能满足工程实际的要求。

表 3 线路潮流统计

Table 3 Line power flow statistics

线路名称	电压等级/kV	最大相对误差/%	最小相对误差/%	平均相对误差/%
线路 A	220	10.5	5.1	8.9
线路 B	220	9.5	3.9	6.7
线路 C	500	8.8	3.1	5.6
线路 D	500	9.1	4.5	6.3

### 3) 联络线计划

以区域电网中的某省为例，该省通过 17 条物理

联络线路和周边省份相连，通过中长期交易和大电源计划，确定了该省的交换计划。

为了确定具体的物理联络线路的功率，考虑两种计算方式。一种是上述平衡策略模式二，添加联络线约束，按照全网潮流进行计算；另一种是本场景采用的平衡策略模式三，将联络线作为等值机组，但它本身并不是决策变量，功率受发电、负荷、网络的影响，因此考虑将总的交换计划参考历史实际曲线按比例分配到联络线路。两种模式下计划潮流和实际潮流对比如图 2 所示。

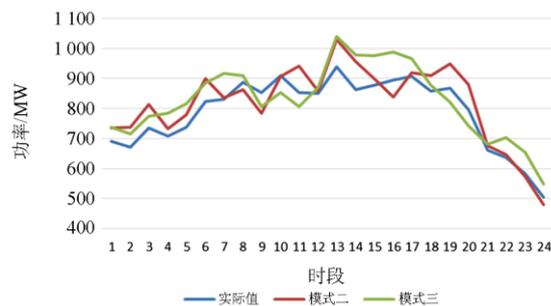


图 2 潮流对比

Fig. 2 Power flow comparison

从图 2 中可以看出，计划潮流受各种因素影响，都有一定的误差，平衡策略模式三的误差略大，最大误差达到 13%，经过统计，平衡策略模式二合格率是 94.79%，平衡策略模式三合格率是 91.67%，平衡策略模式二由于是在全网进行潮流计算，合格率更高。但正因如此，模式二的计算时间更长，考虑 17 条联络线路 96 个时段，平均增加 25 s 计算时间，如果互联电网内联络线路较多，计算时间增加更多。因此实际中可根据电网情况进行选择，如果联络线不多可采用平衡策略模式二，如果联络线较多且电网运行方式变化较小可采用平衡策略模式三。

## 4 结论

互联电网安全约束经济调度是一种解决大范围内资源优化配置的有效技术手段。但由于大规模 SCED 问题给数据收集、模型构建与求解带来极大的难度，再加上我国调度机构的多级组织模式、调度区域的平衡策略差异等客观因素使得实用化更为困难。针对上述问题，文中提出了不同场景针对不同问题的解决办法。基于我国调度计划业务的生产特点，从优化目标、计划策略、基础数据处理等方面构建了基于策略组合的互联电网安全约束经济调度场景构建方法，分析了不同场景的问题适应性及后续模型构建难易度，并结合实际电网数据进行了

分析计算。实际算例表明, 选定合适场景可以进行机组计划编制, 计算结果合理, 计划潮流合格率满足实际应用要求。可见, 以实际需求为导向, 构建合理的组合策略, 是提升互联电网安全约束经济调度技术可用性及其实用性的一种可用方法。

### 参考文献

- [1] 许洪强, 姚建国, 於益军, 等. 支撑一体化大电网的调度控制系统架构及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(6): 1-8.  
XU Hongqiang, YAO Jianguo, YU Yijun, et al. Architecture and key technologies of dispatch and control system supporting integrated bulk power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(6): 1-8.
- [2] 许洪强, 姚建国, 南贵林, 等. 未来电网调控系统应用功能新特征[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(1): 1-7.  
XU Hongqiang, YAO Jianguo, NAN Guilin, et al. New features of application function for future dispatching and control systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 1-7.
- [3] 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.
- [4] 赖晓文, 钟海旺, 杨军峰, 等. 基于价格响应函数的超大电网分解协调优化方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(21): 60-65.  
LAI Xiaowen, ZHONG Haiwang, YANG Junfeng, et al. Decomposed optimization method over large-scale power system based on price response function[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(21): 60-65.
- [5] FEIZOLLAHI M J, COSTLEY M, AHMED S, et al. Large-scale decentralized unit commitment[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 73: 97-106.
- [6] 何宇斌, 郭嘉, 沈俭荣, 等. 基于风险节点电价的互联系统分散协同调度方法[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2462-2468.  
HE Yubin, GUO Jia, SHEN Jianrong, et al. Decentralized synergetic dispatch of interconnected power systems with risk based locational marginal price[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2462-2468.
- [7] 许丹, 李晓磊, 丁强, 等. 基于全网统筹的联络线分层优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(2): 122-126.  
XU Dan, LI Xiaolei, DING Qiang, et al. Optimization of tie line hierarchical schedule based on network-wide coordination[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(2): 122-126.
- [8] 陈跃辉, 向萌, 张斌, 等. 跨省联络线的优化调度模式及预警策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 48(18): 100-107.  
CHEN Yuehui, XIANG Meng, ZHANG Bin, et al. Optimal dispatch modes of cross-provincial tie-line and early-warning strategy[J]. Power System Protection and Control, 2018, 48(18): 100-107.
- [9] POURAKBARI-KASMAEI M, RIDER M J, MANTOVANI J R S. An unambiguous distance-based miqp model to solve economic dispatch problems with disjoint operating zones[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 825-826.
- [10] 丁强, 李锴, 朱泽磊, 等. 基于变量降维的大电网经济调度优化方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(18): 130-136.  
DING Qiang, LI Kai, ZHU Zelei, et al. Economic dispatch optimization method for large-scale power grid based on variable dimension reduction[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(18): 130-136.
- [11] 许丹, 蔡帜, 周京阳. 基于启发式线性规划的大规模安全约束调度快速求解方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 131-137.  
XU Dan, CAI Zhi, ZHOU Jingyang. A fast solution method for large-scale security constrained economic dispatch based on heuristic linear programming[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 131-137.
- [12] 刘德顺, 董海鹰, 汪宁渤, 等. 基于多时空尺度协调的多源互补发电场群优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(12): 73-83.  
LIU Deshun, DONG Haiying, WANG Ningbo, et al. Optimization scheduling for multi-source complementary power plants group based on multiple temporal and spatial scales coordination[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(12): 73-83.
- [13] WANG J, SHAHIDEPOUR M, LI Z. Security-constrained unit commitment with volatile wind power generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1319-1327.
- [14] LI Jinghua, WANG Sai, YE Liu, et al. A coordinated dispatch method with pumped-storage and battery-storage for compensating the variation of wind power[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(1): 21-34. DOI: 10.1186/s41601-017-0074-9.

- [15] 郭晓蕊, 王珂, 杨胜春, 等. 计及风电时空互补特性的互联电网有功调度与控制方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 139-144.  
GUO Xiaorui, WANG Ke, YANG Shengchun, et al. Active power scheduling and control scheme for interconnected power grids considering time-space complementary characteristics of wind energy[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 139-144.
- [16] TEWARI S, GEYER C J, MOHAN N, et al. A statistical model for wind power forecast error and its application to the estimation of penalties in liberalized markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2031-2039.
- [17] ZHENG W, WU W, ZHANG B, et al. A fully distributed reactive power optimization and control method for active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 1021-1033.
- [18] ZHENG W, WU W, ZHANG B, et al. Fully distributed multi-area economic dispatch method for active distribution networks[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(12): 1341-1351.
- [19] LOIA V, VACCARO A. Decentralized economic dispatch in smart grids by self-organizing dynamic agents[J]. IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics Systems, 2014, 44(4): 397-408.
- [20] 王明松. 风-光-蓄-火联合发电系统的两阶段优化调度策略[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(5): 79-86.  
WANG Mingsong. Two-stage optimal dispatching strategy of the wind-solar-pumped storage-thermal combined system[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(5): 79-86.
- [21] 黄鹏翔, 周云海, 徐飞, 等. 基于灵活性裕度的含风电电力系统源荷储协调滚动调度[J]. 中国电力, 2020, 53(11): 82-92.  
HUANG Pengxiang, ZHOU Yunhai, XU Fei, et al. Source-load-storage coordinated rolling dispatch for wind power integrated power system based on flexibility margin[J]. Electric Power, 2020, 53(11): 82-92.
- [22] 陈池瑶, 陈晓明. 基于清洁能源消纳的风电规模入网机组启停间歇控制研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(9): 100-104.  
CHEN Chiyao, CHEN Xiaoming. A study on start-stop intermittent control of large-scale wind power units based on clean energy absorption[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(9): 100-104.
- [23] 杨柳, 张超, 蒋勃, 等. 考虑用户满意度的虚拟电厂热电联合低碳经济调度模型[J]. 热力发电, 2019, 48(9): 40-45.  
YANG Liu, ZHANG Chao, JIANG Bo, et al. A combined low-carbon economic dispatching model for virtual power plant considering customer satisfaction index[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(9): 40-45.
- [24] 高雷, 苏辛一, 刘世宇. 可再生能源消纳责任权重下的新能源合理弃电率研究[J]. 中国电力, 2020, 53(12): 140-146.  
GAO Lei, SU Xinyi, LIU Shiyu. Study on reasonable curtailment rate of renewables under certain renewable energy consumption quota obligation[J]. Electric Power, 2020, 53(12): 140-146.
- [25] MEN D Y, JI X, CAI Z, et al. Expert library-based data verification for national-regional-provincial power grid integration security correction[J]. Advanced Materials Research, 2013, 805-806: 1087-1092.

收稿日期: 2020-06-29; 修回日期: 2021-01-30

作者简介:

黄国栋(1988—), 男, 高级工程师, 从事电网优化调度、电力市场研究; E-mail: hgd2088@126.com

许丹(1985—), 男, 高级工程师, 从事电网经济调度研究;

崔晖(1982—), 男, 高级工程师, 从事电力市场技术研究。

(编辑 魏小丽)