

计及新能源消纳的多级调度计划协调决策方法

张国芳¹, 杨小磊², 孙永超³

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司成都供电公司, 四川 成都 610041; 3. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 构建以新能源为主体的新型电力系统是碳中和、碳达峰的重要举措。针对新能源具有的独特特性与成本模式, 在当前中国大电网多级调度计划协调编制模式中, 为避免国分调在编制跨区跨省联络线计划时基于电力交易而较少考虑省网约束, 可能导致的省网计划无法收敛而需要反复流转修改, 文中设计了一种“自下而上”的多级调度计划编制方案。考虑新能源消纳情况, 将联络线计划作为可调的决策变量, 同时考虑运行约束, 建立省网外送或受入的极限能力分析模型, 求解获得联络线计划的边界条件。最终得到国分调据此边界条件编制满足省网约束的联络线计划。并以实际电网算例对所提方法的有效性进行了验证。

关键词: 新能源消纳; 联络线计划; 调度计划; 经济调度

中图分类号: TM 732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2021)06-32-06

DOI: 12.16527/j.issn.1003-6954.20210607

Coordination Decision Method of Multi-level Dispatching Plan Considering Renewable Energy Accommodation

Zhang Guofang¹, Yang Xiaolei², Sun Yongchao³

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Building a new power system with renewable energy as the main body is an important measure for carbon neutralization and carbon peaking. Aiming at the unique characteristics and cost model of renewable energy, in the current multi-level dispatching plan coordination mode of large power grid in China, a bottom-up multi-level dispatching plan preparation scheme is designed in order to avoid the lack of consideration of provincial grid constraints based on power transactions in the preparation of cross-regional and cross-provincial tie-line plans, which may lead to the convergence of provincial grid plans and require repeated circulation and modification. Considering the renewable energy accommodation, the tie-line plan is taken as an adjustable decision variable, and considering the operation constraints, the limit capacity analysis model of provincial network transmission or acceptance is established to solve the boundary conditions of the tie-line plan. Finally, according to the boundary conditions, the tie-line plan meeting the provincial network constraints is compiled. The effectiveness of the proposed method is verified by an actual power grid example.

Key words: renewable energy accommodation; tie-line plan; dispatching plan; economic dispatch

0 引言

近年来, 风电与光伏等新能源因成本低、无污染且开发潜力大的特点, 得到快速发展, 但风光的不确定性严重制约着消纳能力。为了尽可能提升风光消

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(1300-202026033A-0-0-00)

纳水平, 国家出台促进新能源跨省跨区消纳的相关政策。国网总部倡导打破省间电力市场壁垒, 鼓励风电企业直接参与跨区外送电交易, 为新能源拓展区外消纳空间。

在特高压网架和直流输电的保证下, 大区及省间联络线输电能力显著提升, 可有助于提高跨区域新能源消纳水平, 但对联络线计划编制的合理性提

出了更高的要求。目前中国多级调度计划编制模式是“自上而下”,国分调的联络线计划编制主要基于电力交易^[2],与电网运行处于松耦合状态,可能因为不满足省网约束而需要反复迭代修改,也有可能发生断面利用率较低、弃风弃光等情况,使得人员工作强度不断增加,并存在错漏隐患。

目前针对大电网的调度计划方法研究,多集中于建模和算法上^[3-6],而针对模式和流程复杂度的关注较少。国外大多数电网的调度控制区相互独立,少有上下级关系,因此缺乏跨区协调的参考实例^[7-9]。国内针对中国调度模式的计划编制方法研究有一些相关报道。文献[10-11]提出了基于由国分调进行全网统筹的安全约束经济调度方法,从而解决多级调度计划协调的问题。但存在以下问题:一方面,省调需增加计算运力,减少国分调计算量,否则对国分调压力较大;另一方面,各省由于电网结构、电源类型不同在调度模式及优化目标等多方面存在差异,很难构建省间统一模型,模型无法满足各省个性化需求。文献[12-14]在兼顾现有国(分)、省两级调度模式的基础上,提出了以直流联络线功率为协调变量,区内优化、跨区协调的互联电网发输电计划方法,符合中国电网分层分区的调度模式,并有助于提高新能源的消纳能力。但这些方案通过国分调协调主问题和省内优化调度子问题的联合求解来实现,两级调度之间必然需要多次迭代调整才能形成最终方案,忽视了实际电网中多级调度间计划编制流转的人工和时间成本。总体来说,目前尚缺乏考虑新能源消纳的高效调度计划协调方法的研究。

为解决上述问题,下面结合新能源发电特点以及跨区新能源消纳亟需解决的实际需求^[15-16],将新能源的调度加入跨区调度计划编制中,通过多级计划编制流程现状分析,提出了一种多级调度计划协调优化方案,建立了考虑联络线运行特性约束的省网外送和受入的极限能力分析模型。通过极限能力边界条件编制满足省网约束的联络线计划,可以避免流程上的反复迭代,有效提升调度计划多级协调效率和计划编制能力,并能适应当前实际电网的信息化和自动化水平。通过实际电网算例,证明了所提建模方法的正确性与有效性。

1 多级调度计划编制现状分析

在中国,国调和分中心编制区间和省间联络线计划,而省级调度编制省内机组计划,具体流程是“自上而下”:首先,国调编制区域联络线计划及直流送出计划,并将计划下发给各分中心;然后,分中心制定省间联络线计划;最后,省调将下发的联络线计划作为边界,依托安全约束机组组合/经济调度技术编制省内发电计划。

在国、分、省调度计划中,需要协调的原因在于省调计划依赖于国分调的跨区跨省联络线计划。目前联络线计划主要基于各类电力交易开展,一般采用将多个交易进行成分叠加的方法。这种联络线计划模式的主要优点是计划条理清晰、易于计算、方便统计等。但是该模式的缺点同样也显而易见,即较少考虑省内电网约束。当联络线计划不满足省内电力平衡或电网潮流约束时,这种来回的迭代就不可避免地形成了。

过去由于电网互联程度不高,多级调度计划编制和迭代修改都较为简单且耗时短,并未引起过多关注。然而新形势下的能源、电网格局,对现有各省平衡、各级调度松耦合的现有调度计划业务模式提出了新的挑战,主要体现在:

1) 计划编制时间。随着电网结构日益复杂以及集中式新能源通过联络线输送需求的迅速增加,国、分、省各级调度计划编制需要考虑的约束越来越多,涉及清洁能源消纳需求、交易电量计划、直流线路运行方式、各分区功率平衡、供热、环保等,计划编制所需要的时间也在不断增加。按照目前国内调度中心的编制效率,国分和省内迭代一次至少需要1 h,如果迭代3次,则发电计划协调编制时间将达到3 h以上。

2) 信息交互传输。由于各地电源结构、电网结构和调度运行规则各异,各级调度间和同级调度间的约束差异较大。各级调度间难以实现大量的约束信息自动化共享和交流,基本上只能依靠电话交流、人工检查和设置。约束冲突协调复杂,影响计划编制协调效率。

3) 计划流转修改难度。联络线计划涉及多个省网,送端电网计划与受端电网计划经由国、分计划形成高度耦合,送受端的电网约束易形成“跷跷板”

现象,即联络线计划在满足一端电网约束后却不能满足另一端电网约束。不同省网约束冲突的统筹协调难度不断增加,尤其在电网输送能力紧张或电力平衡困难时,计划编制修改难度更大。

2 多级调度计划协调优化方案

由上述分析可知,造成多级调度计划反复迭代修改的原因是国分调在编制联络线计划时缺少合理的计划边界以满足下级电网约束。为解决此问题,应采用“自下而上”的计划编制模式,即省调通过分析电力电量平衡情况为国、分调提供自身外送或受入的能力,国、分调可以通过集中分析实现整体优化,形成“分散优化,集中协调”^[1]的调度模式。

另外,考虑到国调和分中心的主营业务均为联络线计划编制,所不同的是前者编制区域联络线计划,后者编制省间联络线计划,但归根结底均为联络线计划。因此,可将国、分、省三级调度计划分为国分、省两级协调优化业务模式。

所提出的方案具体流程如下:

1) 各省调将联络线计划作为可调的决策变量、新能源弃电作为惩罚因子进行安全约束经济调度程序(security constrained economic dispatch, SCED)计算,求解的关键不在于给出机组的计划,而在于给出联络线计划编制的边界条件。

2) 将各个省级的边界条件上传至国分调,国(分)调根据省调上传的边界条件,调用联络线计划优化分析模块,编制联络线计划。

3) 优化后的联络线计划下发至各省调,省调基于联络线计划进行省内计划编制。

多级调度计划协调优化流程如图 1 所示。

所提模式的优点如下:

1) 仅增加了省调分析和上报联络线边界条件的环节,而避免了多级间迭代。如果省调 SCED 的计算时间为 0,按照第 1 章的编制时间分析,整体协调编制计划的时间可在 1.5 h 完成,保证了多级计划编制的效率。

2) 国(分)调与省调之间交互的信息仅为联络线功率和边界信息,协调过程中的数据格式简单统一、交换量小,有效减少人工检查和操作的工作量。

3) 国(分)调在生成、更新联络线功率计划时,同时掌握了各个省调的关键边界信息,有效确保了

计算结果全局收敛性,避免了传统方法反馈单一信息的振荡问题。

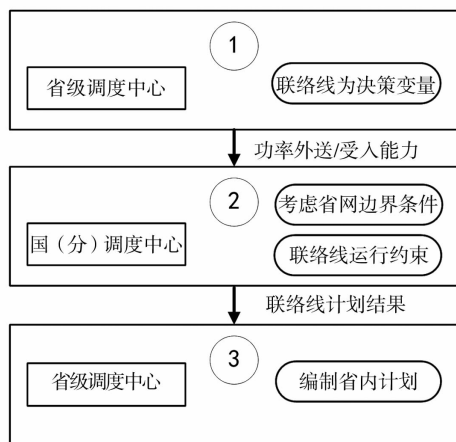


图 1 多级调度计划协调优化流程

3 省网外送/受入极限能力分析模型

在所提方案流程的步骤 1 中,省调计划边界的提取是将联络线计划作为因变量,新能源弃电作为惩罚因子,建立省网外送/受入极限能力分析模型以求解联络线的边界范围。

3.1 优化目标

使用 SCED 安全经济调度模型。在传统求解过程中将省间联络线计划作为边界,叠加系统负荷预测,形成省内机组出力总需求。而在省网外送/受入极限能力分析模型中,联络线计划作为因变量,等值为发电机进行优化,另外新能源弃电作为惩罚因子,即可求得使自身处于最优运行状态的联络线计划。

模型优化目标为计划周期内全部机组的运行成本最小、新能源弃电成本最小。设置惩罚因子后相加,进行联合优化。

$$\min \left[\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N f(p_{i,t}) + \sum_{l=1}^T \sum_{l=1}^{N_l} f(p_{l,t}) \right]$$

$$\min \left[\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N C(p_{i,t}) + \sum_{t=1}^T \sum_{l=1}^{N_l} C(p_{l,t}) + \lambda \sum_{t=1}^T \sum_{w=1}^W C(p_{w,t}) \right] \quad (1)$$

式中: T 为总时段数; N 为机组总数; $C(p_{i,t})$ 为机组 i 在时段 t 的发电成本; $p_{i,t}$ 为机组 i 在时刻 t 的出力; N_l 为联络线总数; $C(p_{l,t})$ 为联络线 l 在时段 t 的等值发电成本; $p_{l,t}$ 为联络线 l 在时刻 t 的出力; $C(p_{w,t})$

为新能源弃电成本; λ 为新能源弃电情况下的惩罚系数。

联络线等值机的成本曲线 $C(p_{l,t})$ 用极大、极小成本。极大、极小成本虽不存在,但代表了省内外送和受入的极限能力。

3.2 约束构建

1) 联络线功率约束

联络线等值机单个机组的上下限来源于线路的热稳定限额;对于等值机组合而成的联络线断面,需要满足断面限额约束。

$$P_{c,t,d} \leq \sum_{l=0}^{N_l} P_{l,t} \leq P_{c,t,u} \quad (2)$$

式中, $P_{c,t,u}$ 、 $P_{c,t,d}$ 分别为在电网运行方式中,联络线断面在时刻 t 的上、下限。

在实际调度运行中,跨区、跨省大范围的联络线计划无需过多考虑两侧电网调频需求和功率波动,尤其是直流联络线需要考虑控制运行的可靠性和设备寿命,因此部分联络线计划可能需要考虑出力保持约束。

$$\begin{cases} P_{l,t} = P_{l,t+1} \\ P_{l,t} = P_{l,t+2} & \text{if } P_{l,t} \neq P_{l,t-1} \\ \vdots \\ P_{l,t} = P_{l,t+t_n} \end{cases} \quad (3)$$

式中, t_n 为出力保持的持续时段数,可根据需求设定。

2) 系统平衡约束

$$P_{\text{load},t} = \sum_{i=1}^N P_{i,t} + \sum_{l=1}^{N_l} P_{l,t} \quad (4)$$

式中, $P_{\text{load},t}$ 为时刻 t 的系统负荷预测值。

3) 机组出力约束

机组出力约束包括机组出力约束、限值约束、爬坡约束。

$$\begin{cases} \bar{P}_i \leq p_{i,t} \leq \bar{P}_i \\ p_{i,t} - p_{i,t-1} \leq R_{u_i} \\ p_{i,t-1} - p_{i,t} \leq R_{d_i} \end{cases} \quad (5)$$

式中: \bar{P}_i 、 P_i 分别为机组 i 的出力上、下限; R_{u_i} 、 R_{d_i} 分别为机组 i 的爬坡上、下限。

4) 机组电量和出力约束

$$\begin{cases} P_{i,t,\text{down}} \leq P_{i,t} \leq P_{i,t,\text{up}} \\ Q_{i,\text{down}} \leq \sum_{t=1}^T \frac{24}{T} \cdot P_{i,t} \leq Q_{i,\text{up}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{i,t,\text{down}}$ 、 $P_{i,t,\text{up}}$ 分别为机组 i 建议电力下限和上限;

$Q_{i,\text{down}}$ 、 $Q_{i,\text{up}}$ 分别为机组 i 全天建议电量下限和上限。

5) 网络潮流约束

$$F_{l,\text{min}} \leq \sum_{i=1}^{N_g} G_{l,i} P_{i,t} - \sum_{j=1}^{N_d} G_{l,j} P_{j,t} \leq F_{l,\text{max}} \quad (7)$$

式中: $G_{l,i}$ 为机组 i 对支路 l 的分布因子; $G_{l,j}$ 为负荷 j 对支路 l 的分布因子; $F_{l,\text{max}}$ 、 $F_{l,\text{min}}$ 分别为支路 l 潮流上、下限。

4 各级调度计划优化模型

4.1 国(分)调度计划优化模型

在以上流程的步骤2中,国(分)调编制的跨区跨省联络线计划由多项交易成分组成,根据交易申请得知该时刻的交易电力,为避免不必要的交易调整,设置优化目标函数为交易调整量最小。

$$\min \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T |p_{m,t,2} - p_{m,t,1}| + \sum_{e=1}^E \sum_{t=1}^T \sigma_e |p_{e,t,2} - p_{e,t,1}| \quad (8)$$

式中: $p_{m,t,2}$ 为联络线断面 m 在时刻 t 的优化值; $p_{m,t,1}$ 为联络线断面 m 在时刻 t 的建议电力值; $p_{e,t,2}$ 为交易成分 e 在时刻 t 的优化值; $p_{e,t,1}$ 为交易成分 e 在时刻 t 的建议电力值; M 为联络线数量; E 为交易成分数量; σ_e 为交易成分 e 的调整代价系数,用于控制不同交易调整顺序。

在联络线功率约束方面,除式(2)以外,增加考虑各省上报的外送/受入极限能力约束。

$$P_{m,t,d} \leq p_{m,t,2} \leq p_{m,t,u} \quad (9)$$

式中, $p_{m,t,u}$ 、 $p_{m,t,d}$ 分别为省级联络线断面 m 在时刻 t 的功率上、下限,由省调上传获得。

在电力交易中,通常各类交易都有明确的交易电力和电量要求,因此必须考虑交易成分的电力和电量约束。

$$P_{e,t,d} \leq p_{e,t,2} \leq p_{e,t,u} \quad (10)$$

$$\beta_{e,d} \leq \sum_{t=1}^T \frac{24}{T} \cdot p_{e,t,2} \leq \beta_{e,u} \quad (11)$$

式中: $p_{e,t,u}$ 、 $p_{e,t,d}$ 分别为交易成分 e 的电力可调节上、下限; $\beta_{e,u}$ 、 $\beta_{e,d}$ 分别为交易成分 e 的电量约束上、下限。

4.2 省级调度计划优化模型

在以上流程的步骤3中,联络线计划确定以后,省级进行调度计划编制,同样加入新能源弃电惩罚,优化目标为

$$\min \sum_{i=1}^T \sum_{l=1}^N C(p_{i,l}) + \mu \sum_{l=1}^T \sum_{w=1}^W C(p_{w,l}) \quad (12)$$

约束条件不需要考虑联络线功率约束,直接使用国(分)调下发值,其他约束与第 3.2 节的式(4)一式(7)相同。

5 算例分析

采用处于同一分调的两相邻省级电网典型日数据为实际算例进行计算,验证所提出的有新能源接入的多级调度计划优化模型。送端省份新能源发电比例大,风电大发时需要外送;受端省份工业负荷比例较小而负荷受气候影响较大。这里只考虑两省间的联络线断面,联络线断面由 4 条交流联络线组成,限额为 4000 MW。

5.1 受端省网联络线边界分析

以联络线为决策变量,图 2 给出了基于实际运行数据,在不同联络线成本下计算得到的购电省份 4 条最优联络线计划曲线。

从图 2 可知,在不考虑新开机和新停机的情况下,即便以 50 元/MW 价格度量联络线购电成本,由于低谷调峰需求,仍无法按照联络线限额进行购电,换言之,联络线计划在低谷时段最多只能购入近 2200 MW 功率;而高峰时期,即使较大代价也需要从外购电,换言之,联络线计划在高峰时段,至少需要购入近 1000 MW 功率。这些最优联络线计划真实地体现了该省在不考虑机组组合情况下的调峰需求。

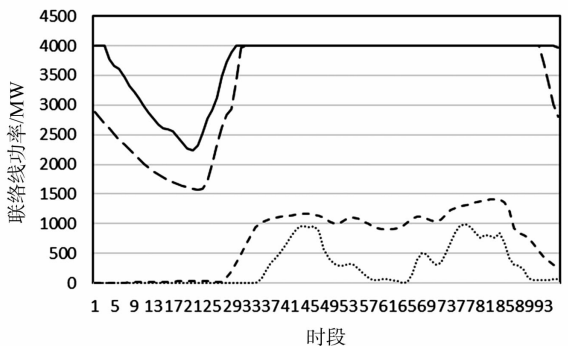


图 2 不同购电成本下的最优联络线计划曲线

5.2 送端省网联络线边界分析

图 3 给出了基于实际运行数据,在不同联络线成本下测算得到的售电省份 4 条最优联络线需求。

从图 3 可知,该省为提高风电消纳能力,在负荷

低谷时段需加大省间外送量,凌晨 3:00 达到外送峰值 1250 MW,夜间自 19:45 起同样有外送需求。日间峰段、平段由于本省负荷增长,省间消纳需求降低,严重时更有可能限电。这也符合实际调度情况。

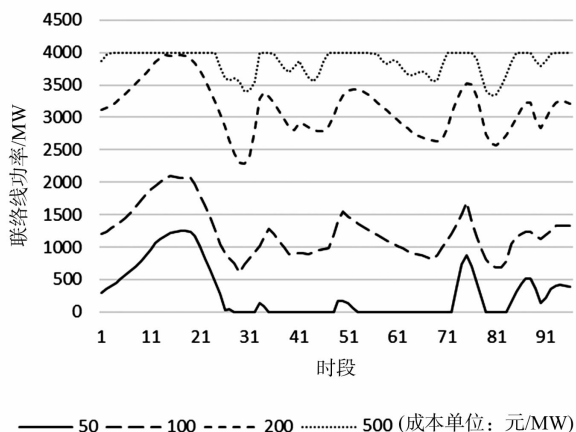


图 3 售电省份最优联络线计划曲线

5.3 国(分)调联络线计划编制

为了研究省网约束对国(分)调联络线计划编制的影响,进行了 2 个模式对比。

模式 1:采用“自上而下”的联络线计划编制方法,不考虑下级省网约束,国调按照省间交易信息拆分联络线成分,并且重新汇总形成联络线总计划。

模式 2:采用“自下而上”的联络线计划编制方法,在模式 1 的初始交易计划的基础上,增加下级省网安全运行约束,以 50 元/MW 和 500 元/MW 作为成本极大、极小时的联络线计划边界。通过第 4.1 节所述方法优化联络线计划。

模式 1 和模式 2 的联络线功率结果如图 4 所示。

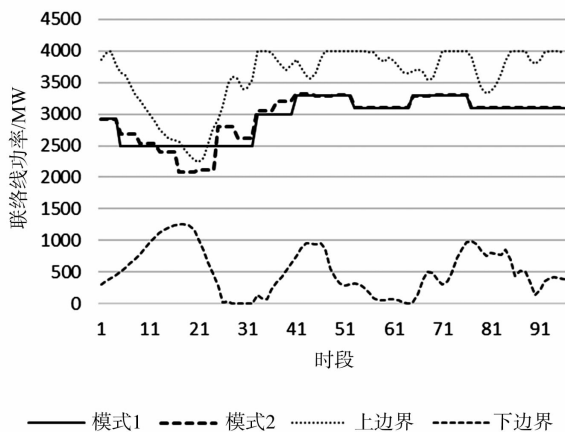


图 4 不同计划编制模式下的联络线功率曲线

5.4 模式对比

从图 4 可以看出,模式 1 不考虑省网约束,在时段 18~23 的联络线计划,超出了购电省份在低谷时段的受人能力,势必需要再来调整计划,这在新

能源大发时经常发生;模式2考虑了购电和售电的省网约束,自动地对时段18~23的交易成分电量进行了调整,在时段23~45间增加新能源消纳量369 MW/h,避免了流程上的反复流转,同时保证了新能源消纳水平。模式2相对于模式1,增加的计算量和数据共享量不大,不依赖于电网运行状态,避免了反复迭代,在国(分)调虽然需要增加联络线边界优化环节,但该环节能够充分考虑各个省网约束,有效提高了计划编制质量。

6 结论

上面分析了中国互联电网和新能源的快速发展对现有多级调度计划编制模式的影响,提出了基于联络线边界分析的“自下而上”多级调度计划编制方法。一方面,省调将关键边界信息上传,国(分)调能够在充分掌握全网可能会影响到联络线计划结果信息的基础上对联络线功率进行优化;另一方面,由于进行了省网大规模信息的化简,省调仅将联络线关联的边界信息上传,数据交换量极少,计算效率高,同时又保证了编制计划的质量,避免了流程上的反复流转。通过实际电网计划编制算例的验证,证明了其可行性和合理性,有利于多级调度计划协调编制工作的有效开展,可以作为建设以新能源为主体的新型电力系统过程中跨省跨区计划联合编制实用化的一种实现方案。

参考文献

- [1] Cai Zhi, Dai Sai, Zhao Kun, et al. Future Power Grid Dispatch and Control Mode with Large - scale Clean Energy Integration in China[C]// IEEE PES Asia - Pacific Power and Energy Conference, Xi'an, China, 2016: 1874 - 1879.
- [2] 许丹,夏少连,程燕军,等.华中电网络络线计划优化建模与求解[J].电力系统自动化,2012,36(18):139 - 142.
- [3] 胡飞虎,李威,冯轩,等.基于不同目标的电网分区域调度研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(19):22 - 28.
- [4] 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,2016,2(16):91 - 96.
- [5] 郭艳艳,熊国江.大规模电力系统经济调度的改进竞争群优化算法[J].电力系统保护与控制,2017,45(15): 97 - 103.
- [6] 王斌,夏叶,夏清,等.基于Benders分解法的交直流互联电网安全约束经济调度[J].中国电机工程学报,2016,36(6):1588 - 1595.
- [7] Jagat Kishore Pattanaik, Mousumi Basu, Deba Prasad Dash. Review on application and comparison of metaheuristic techniques to multi-area economic dispatch problem[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2:17.
- [8] Dieter Helm. The European framework for energy and climate policies[J]. Energy Policy, 2014, 64: 29 - 35.
- [9] Mark Norton, Hans Vander broucke, Emil Larsen, et al. European Network of Transmission System Operator for Electricity(ENTSO-E). Statistical yearbook 2011[R]. Berlin, Germany: Oswald and Martin Werbeagentur, 2012.
- [10] 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.
- [11] 钟海旺,夏清,丁茂生,等.以直流联络线运行方式优化提升新能源消纳能力的新模式[J].电力系统自动化,2015,39(3):36 - 42.
- [12] 王秀丽,李骏,黄宾,等.促进风电消纳的区省两级电力系统调度模型[J].电网技术,2015,39(7): 1833 - 1838.
- [13] 王斌,夏叶,夏清,等.直流跨区互联电网发输电计划模型与方法[J].电力系统自动化,2016,40(3): 8 - 13.
- [14] 周明,翟俊义,任建文,等.含风电并网的直流互联电网分散协调调度方法[J].电网技术,2017,41(5): 1428 - 1434.
- [15] 褚云龙,李秋芳,马晓伟,等.考虑复杂级联断面的多能源协调优化技术及应用[J].电网技术,2020, 44(10): 68 - 72.
- [16] 赵磊,杨永利,张新伟,等.基于配额制的自备电厂参与新能源消纳日前交易模式[J].四川电力技术, 2021,44(3): 12 - 17.

作者简介:

张国芳(1985),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为调度自动化及电力市场;

杨小磊(1985),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力系统自动化及变电运行维护;

孙永超(1990),男,硕士,工程师,主要研究方向为电力系统自动化及继电保护。

(收稿日期:2021-08-23)