

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190028

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

许丹, 蔡帜, 周京阳

(中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 提升大规模安全约束经济调度优化模型的求解性能是开展大电网跨省区电力电量全局优化平衡的前提与基础。首先分析问题的物理特性, 通过并行计算求解不考虑机组爬坡约束的分时段约束松弛模型。基于对松弛解的分析获得可用于指导安全约束经济调度模型改进的有用信息, 以约束剔除和约束增加的方式提出了基于启发式线性规划的大规模安全约束经济调度快速求解方法。将所提算法运用于新英格兰10机扩展系统和实际中国电网, 验证了所提算法的正确性和有效性。

关键词: 安全约束经济调度; 爬坡约束; 约束松弛; 启发式算法

A fast solution method for large-scale security constrained economic dispatch based on heuristic linear programming

XU Dan, CAI Zhi, ZHOU Jingyang

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Improving the solving performance of large-scale security constrained economic dispatching optimization model is the premise and foundation of carrying out the global optimization and balance of large-scale power grid. The physical characteristics of the safety constrained economic dispatch problem are first analyzed, and the time-varying constrained relaxation model without considering the unit climbing constraints is solved by parallel computation. Based on the analysis of relaxation solutions, useful information for guiding the improvement of security constrained economic dispatch model is obtained. A fast solution method of large-scale security constrained economic dispatch based on heuristic linear programming is proposed by eliminating constraints and increasing constraints. The proposed algorithm is applied to the new England 10 machine expansion system and the actual power grid in China, and the accuracy and effectiveness of the algorithm is verified.

This work is supported by Science and Technology Project of the Headquarter of State Grid Corporation of China (No. 5442DZ180019) and Innovation Fund of China Electric Power Research Institute (No. 5242001700G3).

Key words: security constrained economic dispatch; ramp constraints; constraint relaxation; heuristic linear programming

0 引言

安全约束经济调度(Security Constrained Economic Dispatch, SCED)是保障电网安全经济运行的有效技术手段之一, 其经历了静态经济调度(单一时段)、安全约束静态经济调度及安全约束动态经济调度(多时段)等发展过程。随着国家电网公司智能电网调度控制系统的推广应用, 基于安全约束经济调度的日前、日内发电计划应用已在省级电网得到普遍

使用^[1-4], 且该技术已逐步被推广到配电网及微电网的优化运行^[5-11]。近年来, 一方面由于特高压交直流的快速发展使得跨省跨区电网联系日益紧密, 互联电网一体化特征凸显; 另一方面由于大规模集中式风-光-水等清洁能源的大范围消纳需求, 在全网范围内开展电力电量平衡优化是实现资源跨省区优化配置的理想模式^[12-13]。

为支撑全网电力电量平衡优化, 高效求解大规模安全约束经济调度问题是需要首先解决的技术问题。当计算规模扩大后, 一方面模型的求解效率将直接下降, 另一方面将消耗更多的硬件资源, 即便是使用商用求解器, 也需要在模型描述方法及求解

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(5442DZ180019); 中国电科院创新基金项目资助(5242001700G3)

策略方面进行不断改进以满足实际运行的需求。针对大规模的SCED问题, 现有研究人员普遍采取两种研究思路, 其一是对现有算法进行改进, 以提升其计算性能^[14-19], 如文献[17]对动态规划算法进行改进, 采用策略迭代对动态规划过程中的值函数进行近似, 替代了从可行状态中精确计算值函数的过程, 避免了“维数灾”的发生。在值函数的近似过程中, 利用了实际系统的运行约束有效压缩状态空间, 减少可选择的启停动作, 进一步降低了计算量。而文献[19]则从模型压缩角度, 通过对机组和时间的合并以优化变量降维的方式提升大规模经济调度的求解性能。但其破坏了寻优空间, 一定程度上牺牲了最优性。另外一种思路则是对模型进行分解, 将整体问题分为主子问题进行协调优化^[20-24], 此类方法利用了大电网由各省各区域电网互联而成的自然属性, 以互联电网的联络线功率为主子问题的协调变量, 取得了较好的使用效果。然而对于环网互联的省级(区域)电网, 这种分解协调模式很难准确求解联络线附近的潮流分布, 这对于通过经济调度实现重点断面的潮流控制是极为不利的。文献[25]中则提出了以时段进行解耦的处理方式, 然而其在解耦中仅以机组的爬坡能力为依据而并未考虑机组的经济性问题, 因此其解耦方式虽能满足爬坡约束, 却会较大程度地牺牲系统整体经济性。

综合现有相关文献, 改进现有算法, 压缩求解规模, 解耦优化模型是提升问题求解性能的有效手段, 然而如何更好地实现问题压缩和分解, 则需要深入分析模型潜在地物理意义。本文提出了一种基于启发式预处理的求解算法, 该算法以模型分析为基础, 通过挖掘模型特征, 借助时段解耦、并行计算及有效约束识别等技术提升大规模安全约束经济调度问题的求解性能。将本文所提算法应用于新英格兰10机扩展系统和我国大区实际电网, 验证了算法的有效性。

1 安全约束经济调度模型分析

1.1 模型描述

安全约束经济调度的优化目标是在规划周期内使机组的运行费用最小, 该运行费用可以定义为煤耗、报价或是其他相关成本。目标函数描述为

$$f = (\min) \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^N S_{i,t} \cdot F(p_{i,t}) \quad (1)$$

式中: T 为规划周期内的总时段; N 为机组总数; $S_{i,t}$ 为机组 i 在时段 t 的状态, 1 表示开机, 0 表示停机, 由于是经济调度问题, 因此机组的开停状态在

此是已知的; $p_{i,t}$ 为机组 i 在时段 t 的出力计划值, 为决策变量; $F(p_{i,t})$ 为机组 i 在时段 t 的运行费用, 此曲线通常可采用二次函数描述为

$$F(p_{i,t}) = ap_{i,t}^2 + bp_{i,t} + c \quad (2)$$

式中, a 、 b 、 c 为二次函数的特性值, 具体取值与机组的特性相关。

安全约束经济调度的主要约束包括如下几个方面。

1) 系统负荷平衡约束。

$$P_{D,t} = \sum_i^N P_{i,t} + T_{\text{line},t} \quad (3)$$

式中: $P_{D,t}$ 表示系统在时刻 t 的负荷预测值; $T_{\text{line},t}$ 表示平衡区的对外联络线在时刻 t 的出力计划。

2) 机组自身性能约束, 其中包括机组出力限值约束、机组爬坡约束。

$$\begin{cases} P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max} \\ P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq P_{i,\text{up}} \\ P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq P_{i,\text{down}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{i,\text{up}}$ 为机组 i 的上爬坡限值; $P_{i,\text{down}}$ 为机组 i 的下爬坡限值;

3) 支路潮流约束, 主要为支路限值约束。

$$\begin{cases} \theta = \mathbf{X}\mathbf{p} \\ l_{k,t} = (\theta_{ki,t} - \theta_{kj,t}) / x_{ki,kj} \\ l_{k,\min} \leq l_{k,t} \leq l_{k,\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中: \mathbf{p} 为各个节点注入的有功功率矩阵; \mathbf{X} 为网络的节点阻抗矩阵; $l_{k,t}$ 为支路 k 在时段 t 的有功潮流; $\theta_{ki,t}$ 为节点 ki 在时刻 t 的相角; $l_{k,\min}$ 、 $l_{k,\max}$ 为支路 k 的潮流限额; $x_{ki,kj}$ 为节点 ki 、 kj 之间支路的电抗值。

4) 断面潮流控制约束, 表示将电网关键断面潮流控制在某个出力区间。

$$\begin{cases} S_{D,\min} \leq S_{D,t} \leq S_{D,\max} \\ S_{D,t} = \sum_{k \in D} l_k \end{cases} \quad (6)$$

式中: $S_{D,t}$ 为断面 D 在时刻 t 的有功潮流; $S_{D,\max}$ 、 $S_{D,\min}$ 为断面 D 的潮流控制上下限; $k \in D$ 表示断面 D 的支路构成。

1.2 优化目标分析

模型中的优化目标是引导解分布的内在决定因素, 对优化目标的剖析可以获得帮助模型求解的有用信息。

对于由式(1)和式(2)给出的优化目标, 为降低模型的求解难度, 普遍的做法都将其处理为分段线性函数, 如式(7)所示。

$$F(p_{i,t}) = \begin{cases} b_0 \cdot p_{i,t} + c_0 & p_0 \leq p_{i,t} < p_1 \\ b_1 \cdot p_{i,t} + c_1 & p_1 \leq p_{i,t} < p_2 \\ \vdots & \\ b_{d-1} \cdot p_{i,t} + c_{d-1} & p_{d-1} \leq p_{i,t} < p_d \end{cases} \quad (7)$$

式中: P_0 到 P_d 为机组出力分段区间; b_{d-1} , c_{d-1} 为各分段区间一次函数系数。

对于线性化后的优化目标, 分析可得到以下信息:

(A1) 针对目标函数, 下列不等式成立, 等号成立的条件是时段耦合约束在模型中不生效。

$$\begin{cases} f_1 \leq f_2 \\ f_1 \text{ 为分时段独立优化后目标值求和} \\ f_2 \text{ 为全周期统一优化的目标值} \end{cases} \quad (8)$$

(A2) 由负荷分配的等耗量微增率原则, 负荷变动时, 微增率小的机组将优先增出力, 微增率大的机组将优先降出力。

(A3) 目标线性化将扩展最优解空间, 而费用函数的分段数将决定最优解的数量, 如式(9)所示。

$$\begin{cases} p^m = \{\{p_1^1, p_2^1, \dots, p_n^1\}, \dots, \{p_1^m, p_2^m, \dots, p_n^m\}\} \\ p^v = \{\{p_1^1, p_2^1, \dots, p_n^1\}, \dots, \{p_1^v, p_2^v, \dots, p_n^v\}\} \\ d_m \leq d_v \rightarrow m \geq v \end{cases} \quad (9)$$

式中: p^m 代表费用函数分段数为 d_m 时的最优解空间, 假设有最优解为 m 组; p^v 代表费用函数分段数为 d_v 时的最优解空间, 假设有最优解为 v 组。可以推断出, 分段数越小, 解空间越大。例如, 当前有 h 台机组处在相同的出力区间 $[P_1, P_2]$, 在满足各类约束的前提下, 这 h 台机组在区间内的取值是自由的。因此二次函数的线性化分段数不但决定了原始模型的求解精度, 还决定了最优解的可能分布。

1.3 约束条件分析

1) 爬坡约束分析

在所有的约束中, 只有机组的爬坡约束具有时段耦合性, 因此文献[25]提出了考虑机组爬坡速度的解耦算法。但如果将优化目标对机组出力的引导因素考虑进去, 文献[25]完全依托于负荷变化量和机组爬坡性能的解耦方式则需要进一步改进。

假设系统负荷从时刻 t_0 的 P_{D,t_0} 变化为时刻 t_1 的 $P_{D,t_1} = P_{D,t_0} + \Delta P_D$, 变化量 ΔP_D 将在所有机组之间进行分配, 每台机组的分配量由机组的当前耗量微增率所决定。通过分析, 可以得到以下信息:

(B1) 结合 1.2 节中的(A3), 机组费用曲线分段数是决定机组爬坡约束是否生效的决定性因素之一。增加分段数, 将减少同一微增率所对应的出力

区间 $\Delta P_d = P_d - P_{d-1}$, 可更好地通过优化目标的引导, 使得微增率接近的机组能够共同承担负荷波动, 从而有效减少机组爬坡约束生效率。理论上, 如果所有的机组费用曲线都一样, 且全部机组的爬坡能力总和满足负荷变动需求, 则只要出力分段区间 ΔP_d 小于爬坡限额, 机组爬坡约束可全部自动满足。

2) 支路和断面潮流约束分析

对于支路热稳限额约束, 可以得到以下信息:

(C1) 此类约束大部分时候均为不生效约束。由于电网在规划设计时已经考虑过安全裕度, 因此, 因此众多文献对此约束都是采用先松弛后检验的模式。

对于断面潮流控制约束, 可以得到以下信息:

(C2) 由于断面潮流控制大多要求分布在较小的区间内, 因此有必要将其加入模型共同求解。

(C3) 虽然枢纽断面的功率与大多数机组出力均相关, 但大部分机组对其有功灵敏度也较小。因此如果断面功率已被控制在要求范围内, 而由于其他原因需要对部分机组出力进行少量调整时, 此约束大概率将仍处于满足状态。

2 启发式线性规划算法描述

2.1 总体思路

由于机组的爬坡约束是造成时段耦合的唯一原因, 因此本文的启发式算法总体思路是: 首先通过松弛机组的爬坡约束解耦时段, 将 T 个时段通过并行计算快速得到优化松弛解。随后对优化松弛解进行分析, 从中找出能够指导后续全模型求解的有用信息, 以约束剔除、约束增加的方式调整优化模型, 从而提升大规模安全约束经济调度的求解性能。

2.2 算法步骤

步骤 1: 将优化模型按照时段拆分成 T 个小规模独立优化模型。按照(B1)所给信息在分段数满足相关要求前提下, 对费用函数进行分段线性化。

步骤 2: 对 T 个独立的优化模型利用 CPLEX 商用软件进行并行求解, 获得不考虑机组爬坡约束的松弛解。

步骤 3: 对松弛解进行验证分析。这是整个算法中的关键步骤, 包含以下内容。

1) 确定机组不满足爬坡约束的时段, 按式(10)计算系统总体调节需求。

$$\begin{cases} P_{UP,t} = \sum_{i \in \text{上爬坡不满足}} (p_{i,t} - p_{i,t-1}) - p_{i,up} \\ P_{DOWN,t} = \sum_{i \in \text{下爬坡不满足}} (p_{i,t-1} - p_{i,t}) - p_{i,down} \end{cases} \quad (10)$$

式中, $P_{UP,t}$ 、 $P_{DOWN,t}$ 表示如果要将不满足爬坡约束的机组调整到满足爬坡约束, 其他机组需要承担的调节总量。

2) 机组出力调整。调整思路为: 对于不满足爬坡约束的机组, 均将其调整成正好满足爬坡约束。

$$\begin{cases} p_{i,t} = p_{i,t-1} + p_{i,up} & \text{if } p_{i,t} - p_{i,t-1} > p_{i,up} \\ p_{i,t} = p_{i,t-1} - p_{i,down} & \text{if } p_{i,t-1} - p_{i,t} > p_{i,down} \end{cases} \quad (11)$$

对于 $P_{UP,t}$, $P_{DOWN,t}$ 则按照机组的耗量微增率进行负荷分担。首先根据时刻 t 的机组松弛解, 求出机组对应的耗量微增率, 并对其进行排序。

$$\begin{cases} \lambda_{i,t} = 2 \cdot a \cdot p_{i,t} + b \\ O_t = [\lambda_{i_1,t}, \lambda_{i_2,t}, \dots, \lambda_{i_n,t}] \quad \lambda_{i_1,t} \leq \lambda_{i_2,t} \leq \dots \leq \lambda_{i_n,t} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\lambda_{i,t}$ 为机组 i 在时刻 t 的耗量微增率; O_t 表示对所有机组在时刻 t 的耗量微增率排序。

对于 $P_{UP,t}$ 的分担, 以微增率从小到大的方式进行分摊(分摊时需考虑爬坡约束), 直到 $P_{UP,t}$ 完全分摊结束。计算方法是, 首先计算每台机组的调整量, 如式(13)所示。

$$\varepsilon_{i_1,t} = \min\left(\frac{\lambda_{i_2,t} - \lambda_{i_1,t}}{2 \cdot a_{i_1}}, p_{i_1,up}\right) \quad (13)$$

式中, $\varepsilon_{i_1,t}$ 为式(12)中排好序的机组 i_1 的上调量。随后按机组的排序, 对上调量进行累加, 直到正好大于 $P_{UP,t}$ 。

$$\begin{cases} \varepsilon_{t,sum} = \sum \varepsilon_{i,t} \\ \min \varepsilon_{t,sum} - P_{UP,t} \quad \text{且} \quad \varepsilon_{t,sum} \geq P_{UP,t} \end{cases} \quad (14)$$

式中, $\varepsilon_{t,sum}$ 为机组总体上调累积量。对于 $P_{DOWN,t}$ 的分担, 以微增率从大到小进行分摊即可。调整后的出力则取代原有的约束松弛最优解。

3) 按照调整后的机组出力计算支路潮流与断面潮流。模型虽然未考虑机组的爬坡约束, 但却完整地考虑了支路和断面潮流约束。因此断面和支路的潮流约束满足性变化均是由于机组出力调整所造成的。

步骤 4: 依据前述步骤获得的相关信息, 调整优化模型。

1) 约束剔除。主要是针对线路及断面潮流约束。凡是在步骤 3 的 3) 中满足了相关约束, 全部剔除。

2) 约束增加。通过前述分析可知, 爬坡约束并非所有的时段都不满足, 当爬坡约束不满足时也并非所有的机组都需要参与出力调整, 因此约束松弛解中部分机组即便后续加上爬坡约束也并不会影响其出力。这些机组的解可作为已知值加入模型。

$$p_{i,t} = p_{i,r,t} \quad (15)$$

式中, $p_{i,r,t}$ 为机组 i 在时刻 t 的松弛解。至于哪些松弛解可作为已知值可参照以下原则: 如果时段 $\{t_0, t_1, \dots, t_{e-1}, t_e\}$ 均满足爬坡约束, 则 $\{t_0, t_1, \dots, t_{e-1}\}$ 时段的松弛解均可作为已知解。如果 t_{e+1} 时段不满足爬坡约束, 当需要进行 $P_{UP,t}$ 调整时, 所有处于最大出力的机组均可作为已知值, 当需要进行 $P_{DOWN,t}$ 调整时, 所有处于最小出力的机组均可作为已知值。

在整个求解步骤中, 对于分时段的并行求解只需开展一次, 用以挖掘潜在的可用信息, 以约束剔除、约束增加的方式指导全模型构建。在全模型求解中, 由于机组出力的调整, 需再次检查支路和断面潮流是否越限, 需要将不满足约束的支路和断面加入全模型, 进行再次求解。

3 算例及其分析

本文构建了两个大规模算例对所提算法进行验证。算例 1 为基于新英格兰 10 机标准算例扩展而成的 1 000 机系统, 扩展方式是: 每个机组扩展成相同属性的 100 个机组。将负荷按比例扩展 100 倍, 并利用插值法将 24 点负荷预测转换为 96 点负荷预测。由于考虑的是经济调度问题, 假设所有机组全天都处于开机状态(算例 1 未考虑网络约束)。算例 2 为我国某区域电网的实际算例, 该算例中包含近 700 台主力机组, 含 200 kV 及以上支路近 7 000 条, 需考虑的断面约束近 70 个(算例 2 考虑网络约束)。求解硬件环境为: 便携式计算机, i5-5200 2.2 GHz 的 CUP, 8 G 内存, Win 7 操作系统。

3.1 扩展后的标准算例

根据前述的算法思路, 首先将扩展后的标准算例分拆成 96 个时段进行并行求解, 费用曲线分段数为 15 段, 平均优化时间约为 4.5 s。96 个时段爬坡约束的满足情况如图 1 所示。其中 1 表示不满足爬坡约束的时段, 0 表示满足爬坡约束的时段。此算例中共 38 个时段中所有的机组都满足爬坡约束, 而 58 个时段存在着机组不满足爬坡约束的情况。

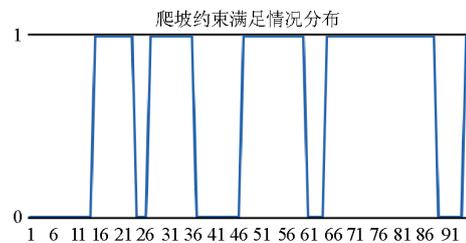


图 1 爬坡约束满足情况分布

Fig. 1 Distribution of climbing constraints satisfaction

在得到不考虑爬坡约束的松弛解以后,对结果进行分析,然后在全模型中进行约束删除与添加,再进行求解。采用本文所提的改进算法与 CPLEX 提供的线性规划法(后文称未改进算法)进行对比,结果如表 1 所示。其中改进后的算法用时比未改进的算法节省 31.6%,最优解相差 0.2%。这说明即便是标准算例各类条件数据都比较苛刻的情况下,改进算法仍然具有较佳的时间优势。

表 1 标准算例算法对比

	最优解/\$	计算时间/s
改进算法	63 685 129	374
未改进算法	63 656 764	547

为测试费用曲线分段数对改进算法的影响,将分段数为 15 段、10 段和 5 段分别进行了测试,计算结果如表 2 所示。

表 2 分段数对算法的影响结果

分段数	满足爬坡约束时段	计算时间/s	最优解/\$
15 段	38	374	63 685 129
10 段	15	466	63 747 608
5 段	5	541	63 692 843

通过不同分段数的计算结果对比分析可知,费用曲线的分段数将直接影响在分时段松弛解中爬坡约束的满足时段数,从而影响计算效率,然其对最优解的影响却并不明显。

3.2 区域电网实际算例

区域实际电网仿真算例,对于费用曲线仍然采用 15 段分段数,本算例主要用于分析改进算法在节省计算资源及提升计算效率方面的优势。

仿真算例 1:采用未改进算法进行 96 时段同时求解,不考虑进行断面潮流控制,计算时间为 104 s,最优解为 2 257 607,最大内存消耗为 1.7 GB;仿真算例 2:采用未改进算法进行求解,考虑断面潮流控制,在模型构建过程中,当添加了 18 条支路潮流模型后,系统剩余可用的 4.4 GB 内存全部消耗殆尽,求解被迫中断;仿真算例 3:采用本文所提的启发式线性规划算法,且考虑断面潮流控制,单次求解时间约为 2 s。不满足爬坡约束的时段如图 2 所示,由图 2 可知,此时不满足爬坡约束的时段仅为 5 个。以爬坡松弛解作为后续整体模型的指导信息,再次进行优化,计算时间为 6 s,最优解为 2 257 909,且此时考虑了断面潮流控制。仿真表明,本文所提算法可以在几乎不影响最优性的前提下极大地减少硬件开销并提升求解效率。

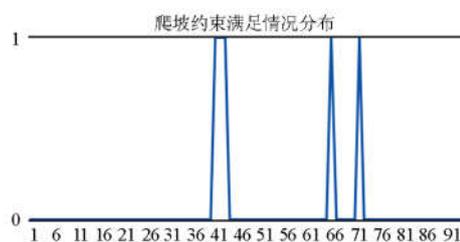


图 2 爬坡约束满足情况分布

Fig. 2 Distribution of climbing constraints satisfaction

在该实际算例中,由于爬坡约束不满足所需调整的最大功率为 224 MW,依据本文的功率调整方式,其将由 12 台机组进行分担,而由于机组分担所造成的断面功率偏差小于 100 MW,仍然在断面功率控制区间范围内,因此在全模型构建时,所有满足爬坡约束的时段,断面控制约束都可以不纳入整体模型,这也极大地提升了模型求解效率,节省了内存开销。

4 结论

本文提出了一种基于启发式线性规划的大规模安全约束经济调度方法,该方法通过时段解耦获得有用信息,指导安全约束经济调度模型修改,从而提升模型的求解性能,通过模拟仿真得到如下结论:

1) 实际电力系统中由于系统负荷具有明显的峰谷及爬升下降期,不同时期的负荷变化率不同,机组的爬坡约束在很多时段是自动满足的,基于时段解耦的算法改进是可行的。

2) 通过对模型物理背景的分析,获得先验知识从而对模型约束进行删除和添加可以在内存需求、计算速度等方面显著改善模型求解性能。

参考文献

- [1] 辛耀中,郭建成,杨胜春,等. 智能电网调度控制系统应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 辛耀中, 石俊杰, 周京阳, 等. 智能电网调度控制系统现状与技术展望[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(1): 2-8. XIN Yaozhong, SHI Junjie, ZHOU Jingyang, et al. Technology development trends of smart grid dispatching and control systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(1): 2-8.
- [5] 王甜婧, 许阔, 朱永强. 主动配电网的源_网_荷多层博弈经济调度策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(4): 10-19. WANG Tianjing, XU Kuo, ZHU Yongqiang. Economic dispatch strategy of active distribution network based on source-network-load multi-layer game[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(4): 10-19.
- [6] 戴志辉, 陈冰研, 谢军, 等. 含多微网的主动配电网分层调度策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(18): 121-127. DAI Zhihui, CHEN Bingyan, XIE Jun, et al. Hierarchical scheduling strategy for active distribution network with multi-microgrids[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(18): 121-127.
- [7] 周玮, 孙恺, 孙辉, 等. 基于机会约束规划的主动配电网最大供电能力双层优化[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(17): 70-77. ZHOU Wei, SUN Kai, SUN Hui, et al. Bi-level optimization model for load supplying capability in active distribution network based on chance-constrained programming[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(18): 121-127.
- [8] 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(3): 21-34. DOI: 10.1186/s41601-017-0074-9.
- [9] GANGAMMANAVAR H, SEN S, ZAVALA V M. Stochastic optimization of sub-hourly economic dispatch with wind energy[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(2): 949-960.
- [10] CHEN Gang, ZHAO Zhongyuan. Delay effects on consensus-based distributed economic dispatch algorithm in microgrid[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(1): 602-612.
- [11] MAHMOODI M, SHAMSI P, FAHIMI B. Economic dispatch of a hybrid microgrid with distributed energy storage[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 6(6): 2607-2614.
- [12] 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.
- [13] 许洪强, 姚建国, 南贵林, 等. 未来电网调度控制系统应用功能的新特征[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.
- [14] RABIEE A, MOHAMMADI-IVATLOO B, MORADI-DALVAND M. Fast dynamic economic power dispatch problems solution via optimality condition decomposition[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(2): 982-983.
- [15] 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.
- [16] 覃华, 韦化. 大规模机组组合问题的量子近似动态规划[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(19): 4918-4929. QIN Hua, WEI Hua. A quantum-inspired approximate dynamic programming algorithm for large-scale unit commitment problems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(19): 4918-4929.
- [17] 韦化, 龙丹丽, 黎静华. 求解大规模机组组合问题的策略迭代近似动态规划[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(25): 4420-4429. WEI Hua, LONG Danli, LI Jinghua. Policy iteration-approximate dynamic programming for large scale unit commitment problems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(25): 4420-4429.
- [18] YANG Linfeng, JIAN Jinbao, DONG Zhaoyang, et al. Multi-cuts outer approximation method for unit commitment[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(2): 1587-1588.
- [19] 丁强, 李镡, 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(8): 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(8): 130-136.

- [20] CHEN Guo, LI Chaojie, DONG Zhaoyang. Parallel and distributed computation for dynamical economic dispatch[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 1026-1027.
- [21] 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.
WANG Bin, XIA Ye, XIA Qing, et al. Security-constrained economic dispatch with AC/DC interconnection system based on Benders decomposition method[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1588-1595.
- [22] 李颖浩, 郭瑞鹏. 基于广义 Benders 分解的启发式机组组合优化[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 179-183.
LI Yinghao, GUO Ruipeng. A generalized Benders decomposition based heuristic algorithm for unit commitment[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 179-183.
- [23] BLANCO I, MORALES J M. An efficient robust solution to the two-stage stochastic unit commitment problem[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4477-4488.
- [24] 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.
- [25] 韩学山, 柳焯. 考虑机组爬坡速度和网络安全约束的经济调度解耦算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(13): 32-37.
HAN Xueshan, LIU Zhuo. Decoupled economic dispatch including unit ramp rate and network security constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(13): 32-37.

收稿日期: 2019-01-08; 修回日期: 2019-04-30

作者简介:

许丹(1985—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为大电网优化运行调度; E-mail: xudan@epri.sgcc.com.cn

蔡帜(1985—), 男, 高级工程师, 研究方向为大电网在线安全分析, 电网节能优化调度; E-mail: caizhi@epri.sgcc.com.cn

周京阳(1962—), 女, 博士生导师, 教授级高级工程师, 主要研究方向为电力系统能量管理, 大电网优化运行调度。E-mail: zhoujy@epri.sgcc.com.cn

(编辑 周金梅)