

DOI: 10.7667/PSPC180031

计及可行解恢复的高载能负荷-新能源有功-无功协调调度

罗煜¹, 邓莉荣², 张鑫¹, 王康², 陈威洪¹, 李敬光¹

(1. 广东电网有限责任公司东莞供电局, 广东 东莞 523000; 2. 清华-伯克利深圳学院, 广东 深圳 518057)

摘要: 高载能负荷具有较强的用电调节能力, 可通过与新能源协调促进新能源消纳。考虑节点电压约束和内部电网潮流方程的高载能负荷自调度问题是一个混合整数非线性非凸问题, 现有的求解器难以求解。而采用线性潮流等简化方法求得的自调度结果不够精确, 无法保证实际运行时的节点电压约束。针对以上问题, 首先采用二阶锥松弛方法对原问题进行凸化以降低问题求解难度, 进而采用基于交流潮流的可行解恢复过程以保证二阶锥松弛后的自调度结果精确合理。通过对比线性潮流自调度结果、基于二阶锥松弛的自调度结果、采用可行解恢复的自调度结果和原始自调度模型的结果, 证明采用可行解恢复过程的自调度结果避免了基于线性潮流或基于二阶锥松弛的自调度解不精确问题。同时, 相比利用现有商业求解器直接求解原问题, 采用该方法可以在较短的时间内快速求得一组优化结果, 有效地降低了原问题求解的难度。

关键词: 高载能负荷; 新能源消纳; 有功-无功协调调度; 可行解恢复

Feasible solution recovery of the coordination problem of energy intensive enterprise and renewable

LUO Yu¹, DENG Lirong², ZHANG Xin¹, WANG Kang², CHEN Weihong¹, LI Jingguang¹

(1. Guangdong Power Grid Company, Dongguan Power Supply Bureau, Dongguan 523000, China;

2. Tsinghua-Berkeley Shenzhen Institute, Shenzhen 518057, China)

Abstract: The Energy Intensive Enterprises (EIEs) have considerable flexibility in energy consumption, which can be utilized to improve renewable integration. However, EIEs' self-scheduling problem with the nodal voltage constraints and power flow equations is a mixed integer non-linear programming problem, which is hard to solve for existing solvers. Moreover, simplification of this problem such as linearization method will result in inaccuracy of the results so that the nodal voltage constraints will be violated. In order to solve the aforementioned problems, at first this paper applies second-order cone relaxation method to make the original problem convex, which reduces the difficulty to solve the problem. Then, a feasible solution recovery procedure, which is based on AC power flow, is introduced so as to recover an accurate and feasible solution from the relaxed second-order conic problem. Compared with the results from original problem, linearized problem, relaxed second order conic problem and the results from the proposed method, it is observed that the proposed method can eliminate the inaccuracy induced by second-order cone relaxation or linearization approximation. Meanwhile, the proposed method can obtain a feasible and optimized result in a short time compared to the solving time of the original problem by Knitro. Thus the difficulty of solving the self-scheduling problem is reduced.

This work is supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd (No. GDKJXM20162081).

Key words: energy intensive enterprise; renewable integration; active-reactive power coordination; feasibility recovery

0 引言

甘肃等地的大规模集中式新能源发电并网导致

了严峻的消纳问题^[1-7]。为提高区域电网的新能源消纳能力, 目前甘肃省已开始进行新能源电站与高载能负荷间的直接交易^[9-12], 通过激励当地用电量巨大的高载能负荷参与调度来吸纳弃风弃光。

考虑到高载能企业中各设备对接入点的电压要求, 以及冶炼炉运行中的有功、无功冲击负荷带来

基金项目: 南方电网有限责任公司科技项目资助 (GDKJXM 20162081)

的电压问题^[13-16], 对高载能负荷有功功率的调度控制需要考虑设备的有功功率-无功功率耦合^[13]和内部电网节点电压约束。因此, 在高载能负荷参与消纳新能源时, 高载能企业对自身用电负荷的调度问题是一个有功-无功协调的调度问题。对于负荷侧, 考虑到电容器等无功设备和本地电网的交流潮流约束后, 该有功-无功协调调度问题是一个混合整数非线性非凸优化问题, 常用的求解器难以进行求解该问题。针对潮流方程的非凸问题, 文献[17-20]研究了基于二阶锥松弛方法将最优潮流中的非凸约束进行凸松弛的方法, 以便快速求得最有潮流的全局最优解。然而, 二阶锥松弛会导致原优化问题的可行域变大, 仅在满足非常强的假设条件(如电压或节点有功无上限等)^[17-20]下, 二阶锥松弛后得到的优化结果才能保证精确性: 即优化结果带回松弛前的原潮流方程时, 潮流方程成立。由于高载能企业内部电网的线路潮流重载、负荷模型复杂等问题, 二阶锥松弛方法的精确松弛的前提条件往往无法满足。这使得二阶锥松弛后的高载能企业内部电网自调度问题得到的优化结果带回到松弛前的潮流方程中时, 原潮流方程不成立, 得到的结果不是原自调度问题的可行解。文献[13]在文献[12]提出的基于电力平衡的高载能负荷-新能源协调调度的基础上, 采用了线性化的 Distflow 模型来简化潮流方程, 但是该模型忽略了内部网络线路上的网络损耗。由于高载能负荷用电量很大, 故其内部网络常常处于重载状态, 网络损耗很大。忽略网络损耗的线性化 Distflow 模型将引入较大的误差, 导致采用简化模型下可以满足电压约束的自调度结果, 在实际的调度控制过程中可能出现电压越限的问题。

为求解含整数和交流潮流模型的配电网最优潮流问题, 文献[21]提出了在二阶锥松弛结果基础上, 通过启发式算法迭代地寻找配电网最优潮流问题可行解的方法。该方法可以在二阶锥松弛得到的非精确结果基础上, 寻找附近的原问题可行解, 从而为高载能负荷与新能源协调的有功无功协调调度问题带来了新的思路。

本文针对高载能负荷与新能源协调下的有功无功协调调度问题, 通过利用文献[21]中提出的基于二阶锥松弛的可行解恢复方法, 对高载能企业的有功-无功协调调度进行研究。通过对比多种不同方法下有功-无功协调调度结果, 本文验证了采用可行解恢复后高载能负荷自调度结果的合理性。该方法可在最大化新能源消纳的同时, 保证负荷内部电网的电压安全的同时, 从而促进高载能负荷与新能源的协调调度。

1 高载能企业内部电网及设备特性

由于本文主要研究高载能负荷-新能源协调下的有功-无功协调调度问题, 故本文采用文献[12]中的某铁合金企业内部电网结构和负荷有功-无功模型。本文简要介绍文献[13]的高载能负荷企业内部电网结构、负荷有功-无功模型以及采用 Distflow 表示的内部电网模型。

1.1 高载能内部电网结构

图 1 为某铁合金企业的内部电网示意图^[13], 其内部电网类似于配电网, 通常为辐射状网络。

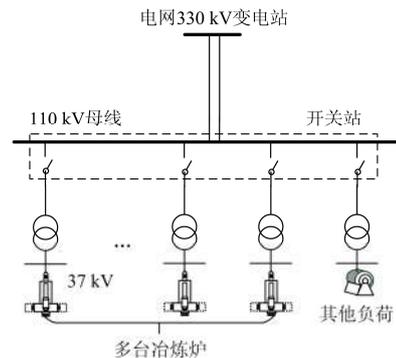


图 1 高载能企业内部电网拓扑示意图

Fig. 1 Topology of power grid of the energy intensive enterprise

铁合金冶炼炉投入生产时有很大的有功/无功冲击负荷。若高载能负荷企业为协调弃风弃光功率, 调节所有冶炼炉的冶炼周期, 则可能导致多台冶炼炉同时出现冲击负荷, 引起负荷侧电压越限。此外, 高载能企业内的其他用电设备与高载能负荷相比用电功率很小^[13], 故将其简化为一个恒功率负荷。

1.2 负荷有功-无功模型^[12-13]

本文采用的高载能负荷有功模型为文献[12]中的铁合金有功模型(文献中式(1)—式(8))。本文采用的高载能负荷无功模型为文献[13]中的铁合金无功模型(文献中式(1)—式(5))。具体的高载能负荷有功-无功模型本文不再赘述。为便于后文的叙述, 记高载能负荷的约束集合的可行域为 Ω_{EF} , 记模型中的有功功率、无功功率、状态变量等各个变量为变量向量 ξ , 可知 $\xi \in \Omega_{EF}$ 。

1.3 高载能负荷内部电网模型

通过 Distflow 模型可以方便刻画树状网络的交流潮流模型。Distflow 方程中将常规潮流方程中复数表示的电压变量变换为只与电压幅值有关的变量, 并可以在树枝状网络中形成从首段节点到末端节点的递推形式。本文通过 Distflow 模型刻画交流潮流模型如下。

$$\begin{cases} \sum_{k \in u(i)} P_{t,ik} - P_{t,ji} + r_{ij} \ell_{t,ji}^l - p_{t,i}^{\text{bus}} = 0 \\ \sum_{k \in u(i)} Q_{t,ik} - Q_{t,ji} + x_{ij} \ell_{t,ji}^l - q_{t,i}^{\text{bus}} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$v_{t,j} - v_{t,i} + 2(r_{ij} P_{t,ij} + x_{ij} Q_{t,ij}) = (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \ell_{t,ij}^l \quad (2)$$

$$U_{i,\min}^2 \leq v_{t,i} \leq U_{i,\max}^2 \quad (3)$$

$$p_{t,i} = -p_{t,i}^{\text{load}} \quad (4)$$

$$q_{t,i} = q_{t,i}^g - q_{t,i}^{\text{load}}$$

$$\ell_{t,ij}^l = I_{t,ij}^2 = \frac{P_{t,ij}^2 + Q_{t,ij}^2}{U_{t,i}^2} \quad (5)$$

$$v_{t,i} = U_{t,i}^2, \quad i, j \in B_{\text{us}}, \quad l \in L_{\text{ine}} \quad (6)$$

式中: $u(i)$ 为所有节点 i 所连接的其他节点的编号集合; $P_{t,ij}$ 为从节点 i 出发在时刻 t 向节点 i 流出的有功功率, 以流出为正; $p_{t,i}^{\text{bus}}$ 为节点 i 在时刻 t 的总有功功率注入; $q_{t,i}^{\text{bus}}$ 为节点 i 在时刻 t 的总无功功率注入; $q_{t,i}^g$ 、 $q_{t,i}^{\text{load}}$ 、 $p_{t,i}^{\text{load}}$ 分别为时刻 t 时向节点 i 注入的电容器容性无功功率、负荷无功功率和负荷有功功率; r_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的电阻值; x_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的电抗值; $U_{i,\min}$ 为节点 i 的电压允许下限; $U_{i,\max}$ 为节点 i 的电压允许上限; $I_{t,ij}$ 表示 t 时刻节点 i 和节点 j 之间的线路 l 上的电流; L_{ine} 为线路下标集合; B_{us} 为节点下标集合。为便于下文叙述, 记式(1)一式(6)中的变量 $p_{t,i}^{\text{bus}}$ 、 $q_{t,i}^{\text{bus}}$ 、 $p_{t,i}^{\text{load}}$ 、 $q_{t,i}^{\text{load}}$ 、 $v_{t,i}$ 、 $\ell_{t,ij}^l$ 、 $U_{t,ij}$ 、 $I_{t,ij}$ 为变量向量 ψ , 记式(1)一式(4)和式(6)刻画的可行域为 Ω_{Dis} , 可知 $\psi, \xi \in \Omega_{\text{Dis}}$ 。

1.4 高载能-新能源协调调度模型

由于高载能负荷具备一定的调节能力, 电网可以通过高载能负荷的调节能力来促进新能源的消纳。当出现新能源的弃风弃光的时候, 电网公司可以通过价格激励的形式, 鼓励高载能企业提高负荷用电, 促进新能源的消纳。当新能源不存在弃风弃光的时候, 电网公司恢复正常的负荷用电电价。这样通过合理的弃风弃光功率和电价的引导, 电网可以利用高载能负荷的调节能力, 提高电网对新能源的消纳水平。

文献[12-13]介绍了高载能负荷与新能源协调时的基于多合约的功率平衡模型(文献中式(6)一式(9))和自调度的目标函数(文献中式(10))。具体的协调调度模型本文不再赘述。为便于后文的叙述, 记协调调度模型的约束集合为 Ω_{CO} , 可知 $\xi \in \Omega_{\text{CO}}$; 记自调度的目标函数为 $c(\xi)$ 。此时, 高载能负荷的自调度模型可以表示为

$$\begin{cases} \min c(\xi) \\ \text{Constraint (5)} \\ \psi, \xi \in \Omega_{\text{Dis}}, \quad \xi \in \Omega_{\text{EF}}, \quad \xi \in \Omega_{\text{CO}} \end{cases} \quad (7)$$

优化问题式(7)是一个混合整数非凸问题, 很难在合理的时间内求解, 其解也无法保证最优性。针对该问题, 本文进一步通过二阶锥松弛方法化简原问题, 并通过可行解恢复方法快速求解出临近原问题最优解的可行解。

2 二阶锥松弛和可行解恢复

由 Distflow 模型表示的潮流方程为一个非线性非凸模型, 这主要是由于约束式(5)引起的。为了方便求解, 本文采用二阶锥方法对约束式(5)进行松弛, 从而将原非凸潮流模型凸化, 以便于求解。同时, 为了保证二阶锥松弛后的问题求得的解可以满足松弛前的潮流方程, 使求得的解也为原问题的解, 本文进一步采用了可行解恢复方法, 通过在松弛后的问题的目标函数中加入惩罚函数的方式, 缩小松弛后的不等式约束的两端项的间隙, 最后使得松弛后问题得到的解可以使被松弛的不等式的等号成立, 从而满足松弛前原潮流方程的约束, 得到合理可行的高载能企业内部电网自调度结果。

2.1 二阶锥松弛后的自调度模型

进行二阶锥松弛时, 首先对约束式(5)表示的等式进行松弛:

$$\ell_{t,ji}^l \geq \frac{P_{t,ji}^2 + Q_{t,ji}^2}{U_{t,j}^2} \quad (8)$$

式(8)中的模型可以进一步写为二阶锥形式, 如式(9)。

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{t,ji} \\ 2Q_{t,ji} \\ \ell_{t,ji}^l - v_{t,j} \end{array} \right\|_2 \leq \ell_{t,ji}^l + v_{t,j} \quad (9)$$

定义凸函数为

$$f_l(\psi) = (U_{t,i} + I_{t,ij})^2 \quad (10)$$

$$g_l(\psi) = (U_{t,i} - I_{t,ij})^2 + (2P_{t,ji})^2 + (2Q_{t,ji})^2 \quad (11)$$

$$i, j \in B_{\text{us}}, \quad l \in L_{\text{ine}}$$

不难发现, 式(9)等价于式(12)。

$$f_l(\psi) - g_l(\psi) \geq 0, \quad l \in L_{\text{ine}} \quad (12)$$

进而, 对潮流方程进行二阶锥松弛后的高载能负荷自调度模型可写为如下形式:

$$\min c(\xi) \quad (13)$$

$$f_l(\psi) - g_l(\psi) \geq 0, \quad l \in L_{\text{ine}} \quad (14)$$

$$\psi, \xi \in \Omega_{\text{Dis}}, \quad \xi \in \Omega_{\text{EF}}, \quad \xi \in \Omega_{\text{CO}} \quad (15)$$

该优化问题为一个混合整数凸规划，可以用 Cplex 等现有求解器求解。

2.2 解的精确性分析

尽管式(13)—式(15)刻画的潮流方程松弛后的高载能负荷自调度模型可以大大降低计算难度，提高优化模型的计算效率，但是，由于等式约束式(5)被松弛为不等式约束式(9)，原优化问题的可行域增大，优化问题的最优解可能落到原问题的可行域之外，导致松弛后的最优解不是原问题的可行解。文献[17-20]对二阶锥松弛的精确松弛条件进行了推导，对于二阶锥松弛后的优化问题，仅当满足很强的前提条件(如负荷功率无上限或电压功率无上限)时，二阶锥松弛后优化问题的最优解才是原问题的最优解(可行解)。否则，二阶锥松弛后得到的最优解不是原问题的可行解。对于本文研究的高载能企业内部电网，由于负荷模型复杂、线路重载以及需要满足电压约束，故二阶锥松弛后的优化问题的最优解难以保证是原问题的可行解。在第5节的算例中也能看出，二阶锥松弛后的高载能负荷自调度模型的最优解不能保证不等式(14)的等号成立，即约束(5)的等号不成立，因此该最优解并非原问题的可行解。这种情况下，若高载能负荷调度人员采用松弛后的优化问题得出的负荷调度策略，很可能出现电压越限的情况，无法保证负荷侧的电压安全。

2.3 可行解恢复

由于二阶锥松弛后的优化问题最优解不能保证为原问题的可行解，但是由于松弛后的优化问题为凸问题，其最优解为全局最优解，又因为松弛后的优化问题可行域增大，其最优解下的目标函数值必然大于等于原问题的目标函数值。因此，若能够在松弛后优化问题的最优解附近快速寻找到一个可行解，则既可以保证自调度结果下的负荷侧电压安全问题，也可以保证调度结果临近甚至等于原问题的最优解，以提升高载能负荷参与和新能源的协调调度后的经济效益并最小化新能源弃风弃光。

2.4 二阶锥松弛和可行解恢复算法流程

为求出高载能负荷-新能源协调下的高载能负荷自调度结果，首先，求解二阶锥松弛后的混合整数凸优化问题；接着，根据求出的结果，判断二阶锥松弛结果是否精确。如果松弛结果精确，则得到高载能负荷自调度问题的全局最优解；如果不精确，则代入可行解恢复过程，求出松弛后自调度问题最优解附近的原问题可行解。

2.4.1 松弛后优化问题算法流程

松弛后问题的计算流程如下。

1) 求解优化问题式(13)—式(15)，得到最优解 ψ^*, ξ^* ；

2) 计算松弛间隙：

$$Gap = \sum_{l \in L_{inc}} [f_l(\psi) - g_l(\psi)] \quad (16)$$

3) 判断松弛间隙大小：设定允许的松弛间隙 $\varepsilon \geq 0$ 。若 $Gap \leq \varepsilon$ ， ψ^*, ξ^* 可使所有原问题约束满足，则 ψ^*, ξ^* 为原问题的最优解。如果 $Gap \geq \varepsilon$ ，则进行可行解恢复流程。

2.4.2 可行解恢复算法流程

可行解恢复算法流程如下。

1) 记本次循环为 k ， $k=1$ ，设定权值 τ_p^k ，设定恢复步长 $\alpha > 1$ 。

2) 设间隙变量 δ_{Gap} ，有

$$\delta_{Gap} = \sum_{l \in L_{inc}} [f_l(\psi) - g_l(\psi)]$$

3) 对于 δ_{Gap} ，其值越接近 0，则松弛后问题的最优解越接近原问题的可行域，为保证问题的凸性，对 $g_l(\psi)$ 在 ψ^k 附近进行一阶泰勒展开(当 $k=1$ 时， $\psi^k = \psi^*$)，记

$$\bar{\delta}_{Gap}^k \geq \sum_{l \in L_{inc}} [f_l(\psi) - g_l(\psi^k) - \nabla g_l(\psi^k)(\psi - \psi^k)]$$

4) 求解可行解恢复问题

$$\min c(\xi) + \tau_p^k \bar{\delta}_{Gap}^k \quad (17)$$

$$\bar{\delta}_{Gap}^k \geq \sum_{l \in L_{inc}} [f_l(\psi) - g_l(\psi^k) - \nabla g_l(\psi^k)(\psi - \psi^k)]$$

$$\psi, \xi \in \Omega_{Dis}, \xi \in \Omega_{EF}, \xi \in \Omega_{CO}$$

得到最优解 ψ^{k+1}, ξ^{k+1} 和 $\bar{\delta}_{Gap}^k$ 。

5) 判断松弛间隙大小 $\bar{\delta}_{Gap}^k$ ，若 $\bar{\delta}_{Gap}^k \leq \varepsilon$ ，则可行解恢复成功，输出自调度问题的解 ψ^{k+1}, ξ^{k+1} ，反之，则 $k = k + 1$ ，提高权值 $\tau_p^{k+1} = \alpha \tau_p^k$ ，回到步骤 3) 开始迭代。

3 算例分析

为便于对比，本文采用文献[13]中的算例数据进行仿真对比。文献[13]中采用了甘肃某铁合金企业的实际电网结构和负荷，参考甘肃省大工业用户分时电价^[22]和甘肃省高载能负荷-新能源撮合交易电价^[9-11]进行仿真计算。铁合金企业的网架结构如图1所示，共9个节点(节点1为根节点，是电网变电站出口母线；节点9为企业关口母线，其余节点中，有6个负荷设备母线节点，1个其他负荷节点)，含6台冶炼炉。各节点电压采用标幺值表示，其上

下限为[0.94, 1.06]。可用弃风功率场景如图2所示^[13]。

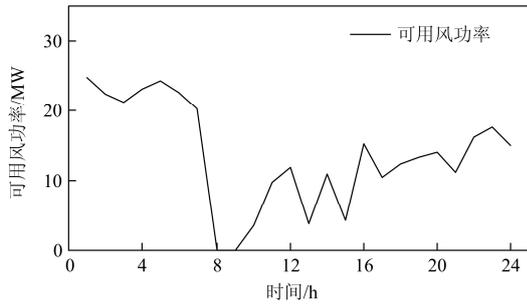


图2 参与协调的风电场可用弃风功率

Fig. 2 Curve of available abandoned wind power

本文计算并分析了四种不同情形下的高载能负荷自调度结果:

算例1 采用文献[13]中的忽略网损简化潮流模型计算得到的高载能负荷自调度结果;

算例2 仅采用二阶锥松弛后得到的高载能负荷自调度结果;

算例3 采用二阶锥松弛和可行解恢复后得到的高载能负荷自调度结果;

算例4 采用未化简的优化模型(7)计算高载能负荷自调度结果。

算例1—算例3均由 cplex 12.5 求解, 由于算例4为混合整数非凸问题, 故本文采用 knitro 10.3 求解。计算平台配置为 Core-i5@3.2 GHz 处理器和 16 GB 内存。

3.1 算例1: 采用忽略网损简化潮流模型的计算结果

基于文献[13]中简化潮流模型计算出的铁合金生产计划和简化潮流模型下的各节点电压如图3所示^[13]。从图3可以看出, 在简化的潮流模型下, 铁合金企业内部电网各节点的电压值均在上下限之内。

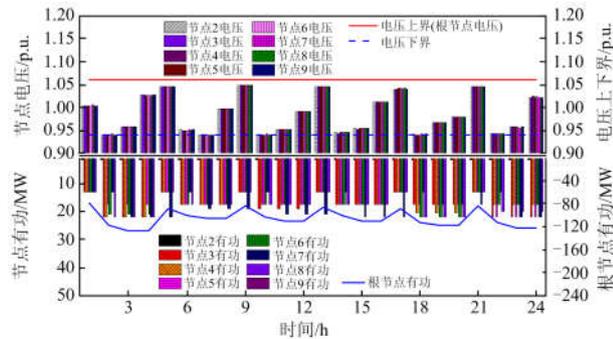


图3 基于简化潮流模型的负荷计划及节点电压

Fig. 3 Load schedule and corresponding voltage value of each node under simplified power flow equation

然而, 文献[13]中基于简化潮流模型的计算结果忽略了网络损耗。从图3可以看出, 由于铁合金企业的设备功率很大, 其内部电网各节点在冶炼炉

投入生产时有功功率和无功功率很大, 各线路处于重载状态, 其线路上的损耗也较大。在实际生产时, 若采用基于简化潮流模型计算得到的铁合金生产计划, 将可能导致铁合金企业内部电网的某些节点电压值低于简化潮流模型计算的电压值, 从而引起电压安全问题。

基于图3中的铁合金生产计划, 图4给出了基于精确交流潮流模型计算得出的各节点电压值。对比图3中的节点电压和图4中的节点电压, 可以发现, 图4中的节点电压在冶炼炉投运的时候, 最低电压的标么值甚至接近0.90, 远低于0.94的节点电压标么值下限要求。若按照简化潮流模型计算出的铁合金负荷计划指导实际的生产, 则可能引起铁合金设备侧的电压远低于设备最低电压要求, 导致严重的生产安全事故, 甚至造成人身和财产损失。

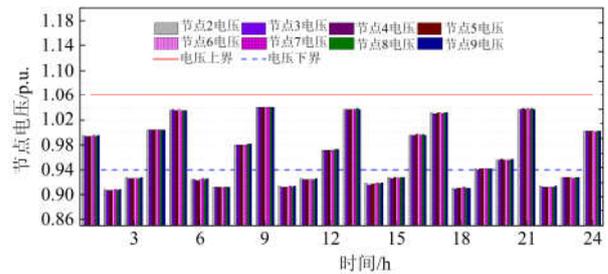


图4 将简化潮流模型得到的负荷计划带回精确潮流模型后的节点电压

Fig. 4 Load schedule and corresponding voltage value of each node under exact power flow equation

3.2 仅采用二阶锥松弛模型的计算结果

采用二阶锥松弛模型计算得到的铁合金生产计划和各节点电压如图5所示。二阶锥松弛模型中约束(14)的松弛间隙如表1所示, 松弛间隙的计算公式如式(16)所示。

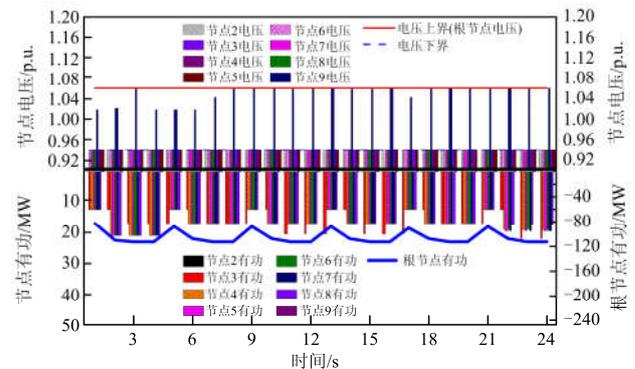


图5 基于二阶锥松弛模型的负荷计划及节点电压

Fig. 5 Load schedule and corresponding voltage value of each node under second order conic relaxation model

表 1 等式约束(5)的松弛间隙

Table 1 Relaxation gap of equation constraint (5)

松弛间隙	期望的间隙
2.08	0

从表 1 可以看出, 将潮流方程中的等式约束(5)的等号松弛后, 其间隙为 2.08, 说明二阶锥松弛后模型计算得到的结果并非原问题的可行解。因此, 虽然图 5 所示的各节点电压并未越限, 但是该电压值由于模型中的潮流方程并不满足, 所以没有实际意义。若将此时得到的铁合金生产计划和电容器投切策略代入到精确的潮流方程, 可能出现各节点电压越限的情况。

图 6 给出了将二阶锥松弛模型计算得到的铁合金生产计划代回到精确潮流方程后的各节点电压的数值。从图中可以看出, 企业内部电网的负荷节点在 2 点、6 点、10 点等多个时刻, 出现了电压低于下限的情况。因此, 虽然二阶锥松弛后的模型相比采用精确潮流模型的计算难度大大降低, 但是由于高载能企业内部电网线路重载和负荷模型约束复杂的原因, 二阶锥松弛模型不能保证潮流方程的成立, 也就无法保证得到的高载能负荷自调度结果满足内部电网的节点电压约束。

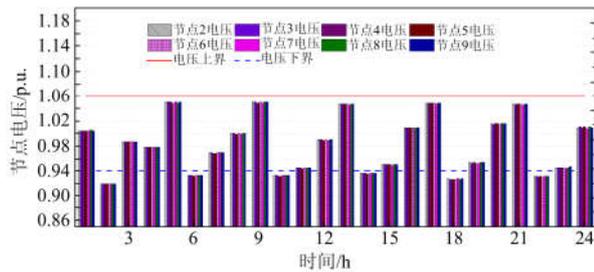


图 6 将二阶锥松弛模型得到的负荷计划带回精确潮流模型后的节点电压

Fig. 6 Load schedule and corresponding voltage value of each node under exact power flow equation model

3.3 采用二阶锥松弛模型和可行解恢复后的计算结果

采用二阶锥松弛模型并进行可行解恢复得到的铁合金生产计划和各节点电压如图 7 所示。可行解恢复过程的迭代次数和间隙数值如图 8 所示。从图 8 可以看出, 在经过几次迭代后, 松弛间隙迅速降低至允许的间隙值范围之内, 此时得到的铁合金生产计划可以满足潮流方程中等式约束(5), 因此图 7 中的节点电压等于精确潮流方程约束下的节点电压。从图 7 可以看出, 通过可行解恢复过程, 此时得到的铁合金生产计划可以在满足最大化高载能企业经济性和新能源弃风消纳的同时, 又可以保证企

业的内部电网的电压安全, 防止由于电压越限带来的生产上的安全隐患。

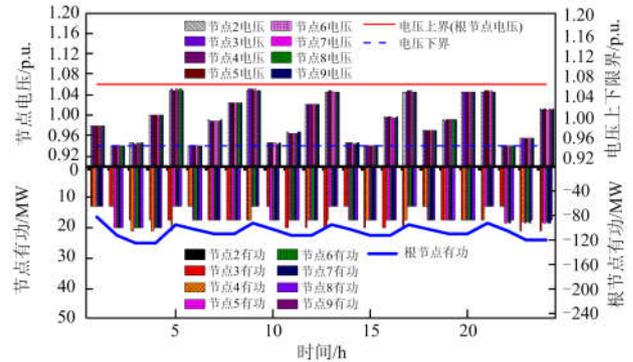


图 7 基于二阶锥松弛模型和可行解恢复得到的负荷计划及节点电压

Fig. 7 Load schedule and corresponding voltage value of each node under second order conic relaxation model and feasibility recovery

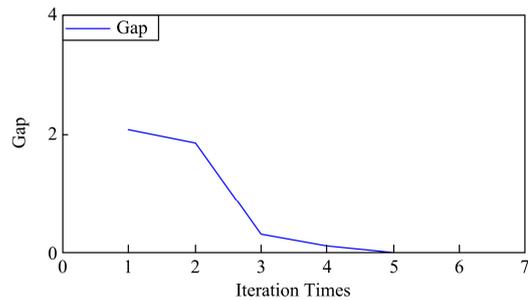


图 8 可行解恢复过程迭代次数及松弛间隙变化情况

Fig. 8 Relaxation gap under each iteration in feasibility recovery

3.4 各个算例的计算时间与优化结果对比

本文进一步对比了各个算例的计算时间和优化结果, 如表 2 所示。

表 2 各算例计算时间与目标值

Table 2 Calculation times and objective values of the four cases

	是否得到可行解	优化结果	总计算时间/s
算例 1	否	\$ 946 251.07	48.54
算例 2	否	\$ 1 027 022.43	102.31
算例 3	是	\$ 1 094 863.11	661.75
算例 4	否	—	—

表 2 中, 算例 4 由于数学模型复杂, 无法在合理的时间内计算出可行解。算例 1 和算例 2 的方法虽然计算时间短, 优化结果好, 但是算例 1 忽略了网络损耗, 算例 2 松弛不精确。算例 1 和算例 2 得到的最优解在代回精确的交流潮流方程验证时, 均违背了电压上下限约束, 不是可行解。算例 3 的方法通过可行解恢复过程, 既可以在合理的时间内计

算出优化后的负荷自调度的生产计划, 又可以保证潮流方程的精确性和内部电网的电压安全。因此, 在高载能负荷参与和新能源协调的过程中, 结合二阶锥松弛方法和可行解恢复过程, 既可以保证企业参与消纳弃风弃光的经济性, 又可以保证企业内部电网的电压安全。

4 结论

通过高载能负荷与新能源协调调度, 以消纳廉价弃风弃光电力来鼓励负荷提升用电水平, 不仅能够降低新能源的弃风弃光情况, 减少新能源企业的损失, 还可以提升负荷企业的经济效益, 降低电网的调峰压力, 是一个针对当前新能源弃风弃光严重背景下的负荷-新能源-电网三方共赢的新途径。对于高载能负荷企业, 如何在尽可能消纳弃风弃光、促进生产效益的同时, 保证其内部电网的电压安全是高载能负荷与新能源协调调度的核心问题。针对之前文献中采用简化潮流模型进行高载能负荷自调度带来的电压安全问题和采用精确潮流模型带来的高计算难度问题, 本文研究了采用二阶锥松弛方法和可行解恢复方法的高载能负荷自调度问题。通过结合二阶锥松弛方法和可行解恢复方法, 不仅可以保证松弛模型的计算效率, 还可以保证对负荷企业生产计划的优化调度和企业内部电网的电压安全, 促进高载能企业参与到与新能源的协调调度中, 使负荷-新能源-电网可以在高载能负荷-新能源调度模式中实现共赢。

参考文献

- [1] 宋卓然, 赵琳, 张子信, 等. 热电联产与风电机组联合运行滚动优化调度模型[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 110-116.
SONG Zhuoran, ZHAO Lin, ZHANG Zixin, et al. Rolling optimal model for multiple heating source and wind turbine unit[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 110-116.
- [2] 唐学军, 韩佳, 苗世洪, 等. 基于需求侧响应的多类型负荷协调控制模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 116-123.
TANG Xuejun, HAN Ji, MIAO Shihong, et al. On demand response participating in the frequency control of the grid under high wind penetration[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 116-123.
- [3] LI Han, ESEYE A T, ZHANG Jianhua, et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 122-135. DOI: 10.1186/s41601-017-0040-6.
- [4] 刘文颖, 文晶, 谢昶, 等. 考虑风电消纳的电力系统源荷协调多目标优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1079-1088.
LIU Wenyong, WEN Jing, XIE Chang, et al. Multi-objective optimal method considering wind power accommodation based on source load coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1079-1088.
- [5] 赵嘉兴, 高伟, 上官明霞, 等. 风电参与电力系统调频综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 157-169.
ZHAO Jiaying, GAO Wei, SHANGGUAN Mingxia, et al. Review on frequency regulation technology of power grid by wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 157-169.
- [6] 陈润泽, 孙宏斌, 晋宏杨. 高载能企业参与电力系统调度的模式与效益分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 168-175.
CHEN Runze, SUN Hongbin, JIN Hongyang. Pattern and benefit analysis of energy-intensive enterprises participating in power system dispatch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 168-175.
- [7] 崔强, 王秀丽, 王维洲. 考虑风电消纳能力的高载能用户错峰峰谷电价研究[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 946-952.
CUI Qiang, WANG Xiuli, WANG Weizhou. Stagger peak electricity price for heavy energy-consuming enterprises considering improvement of wind power accommodation[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 946-952.
- [8] 王敏, 许建, 潘永春. 计及风电预测可靠性的含风电电力系统优化调度模型[J]. 广东电力, 2017, 30(4): 43-49.
WANG Min, XU Jian, PAN Yongchun. Optimized Dispatching model for power system with wind power considering wind power forecasting reliability[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(4): 43-49.
- [9] 国网甘肃省电力公司. 2015 年度新能源企业与电力用户直接交易公告[EB/OL]. [2016]. http://www.gsgcc.com.cn/html/main/col7/2015-07/06/20150706080636252440122_1.html.
- [10] 国网甘肃省电力公司. 2015 年甘肃省新能源发电企业替代中国铝业兰州分公司自备电厂发电交易成交结果公告[EB/OL]. [2016]. http://www.gsgcc.com.cn/html/main/col7/2015-05/29/20150529161533662587265_1.html.
- [11] 国网甘肃省电力公司. 2015 年度新能源发电企业与电力用户直接交易结果[EB/OL]. [2016]. http://www.gsgcc.com.cn/html/main/col7/2015-07/23/20150723111516591626645_1.html.

- [12] 晋宏杨, 孙宏斌, 郭庆来, 等. 基于能源互联网用户核心理念的高载能-风电协调调度策略[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 139-145.
JIN Hongyang, SUN Hongbin, GUO Qinglai, et al. Dispatch strategy based on energy internet customer-centered concept for energy intensive enterprise and renewable generation to improve renewable integration[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 139-145.
- [13] 晋宏杨, 王维洲, 梁琛, 等. 考虑高载能负荷无功特性的高载能-新能源协调调度[J]. 电网技术, 2017, 41(8): 2618-2624.
JIN Hongyang, WANG Weizhou, LIANG Chen, et al. Dispatch strategy for energy intensive enterprise and renewable generation considering reactive power characteristics of devices[J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2618-2624.
- [14] 贺仁睦, 王吉利, 史可琴, 等. 实测冲击负荷分析与建模[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 59-65.
HE Renmu, WANG Jili, SHI Keqin, et al. Analysis and modeling of shock load via measurement[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 59-65.
- [15] 黄荣升. 铁合金企业大容量电网的运行分析[J]. 铁合金, 2006, 37(4): 26-31.
HUANG Rongsheng. Operation analysis of large capacity electric net of ferroalloy plant[J]. Ferro-Alloys, 2006, 37(4): 26-31.
- [16] 张楠, 顾立群, 彭道刚, 等. 基于负荷转移的钢铁企业自备电厂发用电联合优化模型[J]. 广东电力, 2017, 30(5): 40-47.
ZHANG Nan, GU Liquan, PENG Daogang, et al. Combined optimized model for power generation and consumption in autonomous power plant of steel companies based on load shifting[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(5): 40-47.
- [17] FARIVAR M, LOW S H. Branch flow model: relaxations and convexification[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2554-2572.
- [18] LAVAEI J, TSE D, ZHANG B. Geometry of power flows and optimization in distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 572-583.
- [19] LI N, CHEN L, LOW S H. Exact convex relaxation of OPF for radial networks using branch flow model[C] // Proc 2012 IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications, November 5-8, 2012, Tainan, China: 7-12.
- [20] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于混合整数二阶锥规划的三相有源配电网无功优化[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 58-64.
LIU Yibing, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Reactive power optimization for three-phase distribution networks with distributed generators based on mixed integer second-order cone programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 58-64.
- [21] WEI W, WANG J, LI N, et al. Optimal power flow of radial network and its variations: a sequential convex optimization approach[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 8(6): 2974-2987.
- [22] 甘肃省发展和改革委员会. 甘肃省发展和改革委员会关于降低燃煤发电企业上网电价和一般工商业用电价格的通知[EB/OL]. [2016]. http://www.95598.cn/static/html/person/sas/es/PM06003001_2016038813675860.shtml

收稿日期: 2018-01-08; 修回日期: 2018-05-22

作者简介:

罗煜(1982—), 男, 工程师, 主要从事电网调度、规划等管理和研究工作; E-mail: 1243061718@qq.com

邓莉荣(1993—), 女, 博士研究生, 研究方向为能源市场;

张鑫(1986—), 男, 工程师, 主要从事电网调度运行及管理工作。

(编辑 周金梅)