

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200030

考虑多时段耦合特性的联络线功率可行域确定方法

李林威¹, 林伟¹, 杨知方¹, 余娟¹, 夏少连², 汪洋³

(1. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044; 2. 国家电网公司华中分部, 湖北 武汉 430077;
3. 北京清能互联科技有限公司, 北京 100084)

摘要: 为了解决现有方法未计及多时段耦合特性、无法准确刻画联络线功率可行域的不足, 提出一种考虑多时段耦合特性的联络线功率可行域确定新方法。所提方法可考虑火电机组多时段爬坡耦合约束, 基于时段聚类思想, 将多时段联络线功率可行域解耦降维表征, 缓解了现有方法在高维联络线功率可行域刻画中的计算量爆炸问题, 从而有效刻画联络线功率可行域。同时, 为推动电力资源的广域优化配置, 研究分析了以火电机组深度调峰为代表的弹性资源对多时段联络线功率可行域的影响。以 IEEE 30—IEEE RTS96 节点联合算例的仿真分析验证了所提方法的有效性和准确性。

关键词: 联络线功率可行域; 日前调度多时段耦合特性; 时段聚类; 弹性资源

Characterizing a tie-line transfer capacity region considering time coupling in day-ahead multi-period dispatch

LI Linwei¹, LIN Wei¹, YANG Zhifang¹, YU Juan¹, XIA Shaolian², WANG Yang³

(1. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Central China Branch of State Grid Company, Wuhan 430077, China; 3. Beijing TsIntergy Technology Co., Ltd., Beijing 100084, China)

Abstract: There is a problem that the existing methods do not consider time coupling in the day-ahead multi-period dispatch. This leads to the accuracy loss in the tie-line power transfer capability region. A new method to determine the tie-line transfer capacity region considering time coupling in day-ahead multi-period dispatch is proposed. The proposed method considers multi-period ramping constraints. Based on time period aggregations, the multi-period tie-line power transfer region can be represented by decoupling and dimensionality reduction, which alleviates a heavy computational burden brought by existing methods applied in determining a high-dimensional tie-line power transfer region. Compared with existing studies, the proposed method can provide a more accurate tie-line power transfer region. At the same time, in order to promote the cross-region optimal utilization further, it takes the depth peaking of thermal power units as the representative to investigate the influence of the flexible resources on the multi-period tie-line transfer capacity region. The validity and effectiveness of the proposed method are verified by the joint case IEEE 30—IEEE RTS96-bus test system.

This work is supported by Youth Science Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 51807014), Management Consulting Project of State Grid Corporation of China (No. SGTYYHT/17-WT-231), and Postdoctoral Science Fund for Natural Science Foundation of Chongqing (No. cstc2019jcyj-bshX0081).

Key words: tie-line transfer capacity region; time coupling in the day-ahead multi-period dispatch; period aggregation; flexible resources

0 引言

随着电力负荷增长和大规模新能源接入, 电网

的安全、经济运行面临严峻挑战^[1]。近年来, 为实现电力资源在更广阔区域内的优化配置, 区域电网频繁通过联络线实现功率传输, 保证电网的安全与经济运行^[2]。如 2018 年, 我国重庆电网跨区消纳四川水电达 19 780 MW^[3]; 2018 年, 美国通过北美跨国互联电网消纳加拿大水电 32 480 MW^[4]; 2016 年西班牙通过欧洲跨国互联电网, 消纳葡萄牙高比

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(51807014); 国家电网公司管理咨询项目(SGTYYHT/17-WT-231); 重庆市自然科学基金博士后科学基金项目(cstc2019jcyj-bshX0081)

例风电 5 148 MW^[5]。

同时, 随着我国锦苏、复奉、宾金等多条特高压直流线路的投运^[6], 我国各区域电网间电力交换能力不断加强^[7]。因此, 在现有多时段经济调度中精准刻画联络线功率可行域, 对保证我国电力资源的高效跨区利用具有更加重要的意义^[8]。目前关于联络线功率可行域的研究通常分为如下四类:

1) 文献[9-12]通过计算可用传输容量表征区域电网的传输功率。文献[9-11]采用网流法计算可用容量, 计算简单且速度较快, 但该方法仅考虑单一时刻发电机容量约束和支路传输极限约束, 难以表征潮流平衡约束, 无法保证可用容量计算的准确性。文献[12]采用优化模型, 获得单一时刻满足系统网络约束的边界截面及边界节点最大功率。但是, 上述方法仅以特定的最大注入功率平面近似刻画单一时刻联络线功率可行域, 仍无法保证其在考虑多时段耦合的联络线功率可行域刻画中的精准性。

2) 文献[13-14]基于等值网络约束刻画单一时刻联络线功率可行域。文献[13]采用 Kron 消去法进行区域电网等值, 在保证单一时刻等值前后边界节点总传输容量相等的基础上获得等值支路传输极限的上限估计值。文献[14]在文献[13]的基础上建立了二次优化模型, 求取等值支路单一时刻传输极限的估计值上下限和最优估计值。但是, 上述方法均无法考虑区域电网内部的注入功率, 难以适用于实际互联电网。

3) 文献[15-17]基于多参数规划理论, 以联络线耦合变量为规划参数, 研究满足单一时刻潮流约束、发电机容量约束和支路传输极限约束的联络线功率可行范围。但常规多参数规划理论的计算负担随规划参数、优化变量、约束条件数目的增加急剧增加, 难以适用于考虑日前调度多时段耦合特性的联络线功率可行域刻画。

4) 文献[18]通过顶点搜索的方式构建联络线功率可行域。然而, 在顶点搜索过程中, 需根据所搜索到的顶点迭代更新联络线功率可行域。在考虑日前调度多时段耦合特性的情况下, 通过海量高维顶点更新刻画联络线功率可行域具有极大的计算负担。因此, 文献[18]也难以用于考虑日前多时段联络线调度耦合特性的联络线功率可行域刻画。

然而, 目前联络线功率可行域确定方法难以计及日前调度多时段耦合特性, 无法有效刻画联络线功率可行域。为此, 本文提出一种考虑日前调度多时段耦合特性的联络线功率可行域刻画方法。本文主要贡献如下:

1) 提出一种考虑日前调度多时段耦合特性的

联络线功率可行域刻画方法。所提方法克服了现有方法在多时段高维联络线功率可行域刻画中的计算量爆炸问题。同时, 所提方法可考虑机组多时段爬坡耦合约束、潮流平衡约束、发电机容量约束和支路传输极限约束等, 为电网调度提供准确的边界条件。

2) 目前, 我国的能源结构中, 由于风、光等新能源的快速发展, 水电、抽水蓄能等快速调节电源所占比例逐步减少, 导致电网的调节手段和调峰能力不足, 电网调峰的矛盾日益突出。若能在现有电力设备满足电网运行约束的基础上, 挖掘电网的运行弹性空间, 扩大电网间联络线功率可行域, 则能有效降低电网运行成本并促进可再生能源消纳。为此, 本文以火电机组深度调峰为弹性资源代表, 研究不同深度调峰下多时段联络线功率可行域, 为电力资源跨区域优化配置提供辅助决策依据。

1 多时段联络线功率可行域的表征

1.1 多时段区域电网经济调度优化模型

多时段联络线功率可行域可为区域间多时段经济调度提供边界运行条件, 促进电力资源的广域优化配置。对于每个区域电网而言, 其通过联络线功率 \mathbf{P}_B 与其余区域电网相连。因此, 本文建立考虑联络线功率 \mathbf{P}_B 的多时段区域电网经济调度模型如下所示。

$$\min_{\mathbf{P}_{G,t}, \mathbf{P}_{DL,t}, \mathbf{P}_{B,t}} z = \sum_{t=1}^T \mathbf{C}_{G,t}^T \mathbf{P}_{G,t} \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \quad \mathbf{e}_G \mathbf{P}_{G,t} + \mathbf{e}_{DL} \mathbf{P}_{DL,t} = \mathbf{e}_D \mathbf{P}_{DI,t} \quad (2)$$

$$\mathbf{P}_{L,t} = \mathbf{S} \times (\mathbf{A}_{G,t} \mathbf{P}_{G,t} + \mathbf{A}_{DL,t} \mathbf{P}_{DL,t} - \mathbf{A}_{D,t} \mathbf{P}_{DI,t}) \quad (3)$$

$$\mathbf{M}_{B,t} \mathbf{P}_{B,t} + \mathbf{M}_{DL,t} \mathbf{P}_{DL,t} = \mathbf{P}_{DB,t} \quad (4)$$

$$\underline{\mathbf{P}}_{B,t} \leq \mathbf{P}_{B,t} \leq \bar{\mathbf{P}}_{B,t} \quad (5)$$

$$\underline{\mathbf{P}}_G \leq \mathbf{P}_{G,t} \leq \bar{\mathbf{P}}_G \quad (6)$$

$$\underline{\mathbf{P}}_{DL} \leq \mathbf{P}_{DL,t} \leq \bar{\mathbf{P}}_{DL} \quad (7)$$

$$\mathbf{RD} \leq \mathbf{P}_{G,t} - \mathbf{P}_{G,t-1} \leq \mathbf{RU} \quad (8)$$

式(1)一式(8)中, $t = \{1, 2, \dots, T\}$, 式(1)为多时段经济调度的运行费用, 其中 $\mathbf{C}_{G,t}$ 和 $\mathbf{P}_{G,t}$ 分别为 t 时刻的机组报价和机组出力。式(2)为区域电网的功率平衡约束, 其中 $\mathbf{P}_{DL,t}$ 和 $\mathbf{P}_{DI,t}$ 分别为 t 时刻的区域电网与节点相连线路传输功率和节点负荷。式(3)为支路传输功率约束, 其中 \mathbf{S} 为转移分布因子矩阵, $\mathbf{A}_{G,t}$ 、 $\mathbf{A}_{DL,t}$ 、 $\mathbf{A}_{D,t}$ 分别为 $\mathbf{P}_{G,t}$ 、 $\mathbf{P}_{DL,t}$ 、 $\mathbf{P}_{DI,t}$ 的区域电网节点关联矩阵; 式(4)为边界节点的节点功率平衡约束, $\mathbf{P}_{B,t}$ 和 $\mathbf{P}_{DB,t}$ 分别为 t 时刻的联络线功率和边界

节点负荷, $\mathbf{M}_{B,t}$ 、 $\mathbf{M}_{DL,t}$ 、 $\mathbf{M}_{DB,t}$ 分别为 $\mathbf{P}_{B,t}$ 、 $\mathbf{P}_{DL,t}$ 、 $\mathbf{P}_{DB,t}$ 的边界节点关联矩阵; 式(5)一式(7)为优化变量的上下限约束, 其中 $\bar{*}$ 和 $\underline{*}$ 分别为优化变量 $*$ 的上限和下限约束。式(8)为火电机组爬坡约束, \mathbf{RU} 和 \mathbf{RD} 分别为上爬坡和下爬坡约束。

将式(1)一式(8)简记为式(9)一式(11)所示的优化问题 P1。

$$\min_{\mathbf{x}_t} z = \sum_{t=1}^T \mathbf{C}_t^T \mathbf{x}_t \quad (9)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{F}_t \mathbf{x}_t \leq \mathbf{H}_t \mathbf{w}_t + \mathbf{K}_t, \quad t = \{1, 2, \dots, T\} \quad (10)$$

$$\mathbf{R} \leq \mathbf{x}_t - \mathbf{x}_{t-1} \leq \bar{\mathbf{R}} \quad t = \{1, 2, \dots, T\} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{x}_t = [\mathbf{P}_{G,t}^T \quad \mathbf{P}_{DL,t}^T]^T$, $\mathbf{w}_t = \mathbf{P}_{B,t}$, $t = 1, 2, \dots, L, T$; 式(9)中的 \mathbf{C}_t 可由式(1)求得; 约束式(10)表征 t 时刻的非爬坡约束式(2)一式(7), \mathbf{F}_t 、 \mathbf{H}_t 和 \mathbf{K}_t 可由式(2)一式(7)求得; 约束式(11)表征时刻间的爬坡耦合约束式(8), $\bar{\mathbf{R}}$ 和 \mathbf{R} 可由式(8)求得。

1.2 多时段联络线功率可行域的本质

多时段联络线功率可行域的时段耦合特性本质在于: 时段 t 的联络线功率 $\mathbf{P}_{B,t}$ ($t = 1, L, T$) 与时段 t 的机组出力 $\mathbf{P}_{G,t}$ 共同影响系统约束式(2)一式(4)。而相邻时段的机组出力 $\mathbf{P}_{G,t}$ 和 $\mathbf{P}_{G,t-1}$ ($t = 2, L, T$) 以时段爬坡耦合约束式(8)相互关联。因此, 相邻时段的联络线功率 $\mathbf{P}_{B,t}$ 和 $\mathbf{P}_{B,t-1}$ ($t = 2, L, T$) 互相耦合, 具有时段耦合特性, 导致联络线功率为表征在 $\mathbf{w}_t = \mathbf{P}_{B,t}$ ($t = 1, 2, L, T$) 形成的高维空间。

因此, 多时段联络线功率可行域的数学本质可以理解为: 当 $\mathbf{w}_t = \mathbf{P}_{B,t}$ ($t = 1, 2, L, T$) 在可行域内任意变化时, 均应使得优化问题 P1 可解。因此, 若将 $\mathbf{w}_t = \mathbf{P}_{B,t}$ ($t = 1, 2, L, T$) 视作规划参数, 则优化问题 P1 即成为典型的多参数线性规划(Multi-parametric linear programming, MPLP)问题。

但传统多参数线性规划理论为求取可行域, 需枚举优化问题 P1 的所有起作用约束和不起作用约束组合。而起作用约束和不起作用约束组合数随优化变量、约束个数、规划参数个数的增加呈指数式爆炸增长^[19]。因此, 传统多参数规划理论仅适用于单时段的联络线功率可行域刻画^[15-17], 难以直接应用于考虑日前调度多时段耦合特性的联络线功率可行域, 而通过顶点搜索方式构建多时段联络线功率可行域需要海量高维顶点迭代更新^[18], 具有极大的计算负担, 难以适用于实际互联电网。

为此, 本文在第2节提出一种基于时段降维思想的联络线功率可行域刻画方法, 将多时段联络线

功率可行域进行解耦降维表征, 从而实现考虑日前调度多时段耦合特性的联络线功率可行域确定。

2 方法总体思路

所提确定方法总体思路如图1所示。

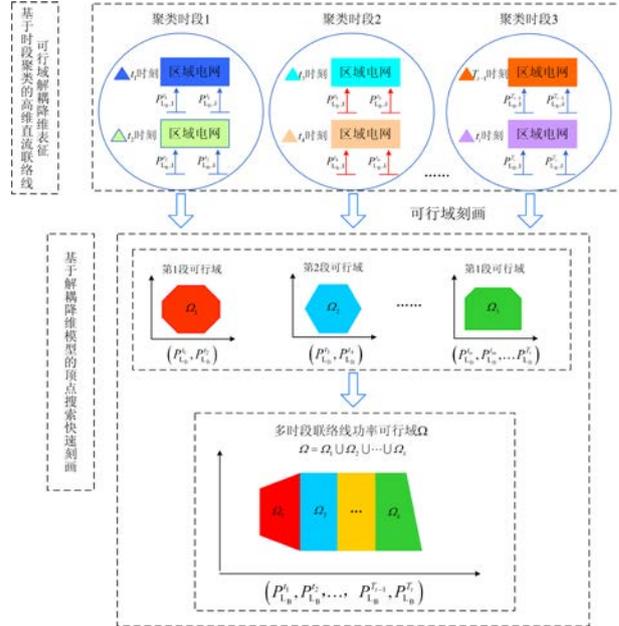


图1 所提多时段联络线功率可行域确定总体思路

Fig. 1 Overview of the proposed method for determining a multi-period tie-line transfer capability region

由图1可知, 本文所提方法可分为两部分:

1) 基于时段聚类的高维联络线可行域解耦降维表征。如图1所示, 所提方法基于时段聚类思想, 将具有 N_t 个连续时段的高维优化问题 P1, 拆解为 j 个低维连续时段优化问题 P_k ($k = 1, 2, L, j$)。从而, 利用 j 个低维优化问题所描述的联络线功率可行域, 近似刻画原高维联络线功率可行域, 从而大大降低计算负担, 现有联络线功率可行域刻画方法^[15-16]均可有效刻画低维联络线功率可行域, 本文以顶点搜索算法^[16]为例, 刻画低维联络线功率可行域。

2) 基于降维解耦模型的顶点搜索快速刻画。针对上述每个低维优化问题 P_k , 所提方法基于“顶点搜索”的方法刻画相应低维空间可行域 $\Omega_k @ \{ \mathbf{w}_k^{\text{Re}} | \mathbf{A}_k \mathbf{w}_k^{\text{Re}} \leq \mathbf{b}_k \}$ (其中, \mathbf{w}_k^{Re} 为第 k 个低维优化问题所包含联络线功率可行域 $\mathbf{w}_t = \mathbf{P}_{B,t}$, $t \in T_k$ 构成的列向量, T_k 为第 k 个聚类时段所包含的时段)。由于经过前述降维解耦处理, 每个低维优化问题 P_k 可以通过顶点搜索方法快速刻画每个低维联络线功率可行域。最终, 为考虑各个时段约束对联络线功率可

行域的综合影响, 本文利用多个低维联络线功率可行域的并集求取考虑日前调度多时段耦合特性的联络线功率可行域, 即 $\Omega = \bigcup_k \Omega_k$ 。

本文所提方法首先通过时段聚类思想, 将日前多时段的高维时空耦合优化问题, 拆解为若干个低维连续时段优化问题, 从而有效缓解计算量爆炸的问题。由于本文所提方法在各个聚类时段内依然保持多时段间的爬坡关系, 因此本文所提方法仍可以有效考虑日前调度多时段的耦合特性, 从而实现考虑日前调度多时段耦合特性的联络线功率可行域确定。

3 考虑日前多时段耦合特性的联络线功率可行域确定方法

3.1 基于时段聚类的高维联络线可行域解耦降维表征

本文基于 K -means 聚类算法对高维联络线功率可行域进行解耦表征。考虑到火电机组爬坡的连续时间特性, 本文在将多个调度时段聚类的时候, 还保证每组中所含时段均为连续时段。为此, 本文基于 K -means 聚类算法利用最大最小距离法设定初始聚类中心, 充分保证聚类时段及其所含时段的连续性。具体步骤如下:

1) 设定聚类时段数为 n , 采用最大最小距离法^[20], 计算 T 个时刻系统节点总负荷 $P_N^Z = \{P_1^Z, P_2^Z, \dots, P_N^Z\}$ 的初始聚类中心 $K_j = \{K_1, K_2, K_3, \dots, K_n\}$ 。

2) 按照初始聚类中心 K_j 将数据划分为 n 个连续的子块, 依次计算各子块内每个数据点到初始聚类中心的间距, 并把对应数据点归并到最近似的子块内。

3) 对每个子块内的数据重新计算聚类中心, 和步骤 1) 获得的初始聚类中心 K_j 进行对比, 如果聚类中心发生变化, 则令 $K_j^{\text{new}} = K_j$ 作为新的初始聚类中心, 跳转到步骤 2), 否则跳转到下一步。

4) 输出结果, n 个连续子块数据即为基于 K -means 的时段聚类结果。

5) 根据步骤 4) 中 K -means 聚类结果构建解耦降维表征模型。其中第 k 个聚类时段模型可写为

$$\min_{x_k} z = \sum_{t \in T_k} C_k^T x_k \quad (12)$$

$$\text{s.t. } F_k x_t \leq H_k w_t + K_k, t \in T_k \quad (13)$$

$$\underline{R} \leq x_t - x_{t-1} \leq \bar{R}, t \in T_k \quad (14)$$

式(12)一式(14)可简写为

$$\min_{x_k} z = \sum_{t \in T_k} C_k^T x_k \quad (15)$$

$$\text{s.t. } A_k x_k \leq B_k w_k^{\text{Re}} + D_k \quad (16)$$

式中: $x_t = [P_{G,t}^T \quad P_{DL,t}^T]^T$, $t \in T_k$ 。 C_k^T 、 A_k 、 B_k 和 D_k 为由式(12)一式(14)所确定的常数矩阵。

3.2 基于降维解耦模型的顶点搜索快速刻画

针对每个低维聚类时段, 本文基于顶点搜索算法求解联络线功率可行域^[18]。以第 k 个低维聚类时段的联络线功率可行域为例, 具体算法流程如下:

1) 算法初始化。首先基于式(17)一式(18)、式(19)一式(20)分别求解 w_k^{Re} 在各个维度上的最大值和最小值, 构建初始化联络线功率可行域。

最小值求解问题:

$$\min_{x_k} z = \sum C_k^T x_k \quad (17)$$

$$\text{s.t. 约束(16)} \quad (18)$$

最大值求解问题:

$$\max_{x_k} z = \sum C_k^T x_k \quad (19)$$

$$\text{s.t. 约束(16)} \quad (20)$$

将式(17)一式(18)、式(19)一式(20)获得的最优解作为顶点 V , 构造可行域 R 。

2) 找寻新顶点。通过将凸多面体 R 的各个边界平面外移, 找寻新顶点。假设平移第 g 个边界平面 $f_g @ \{A_{kg} w_k^{\text{Re}} \leq b_{kg}\}$, 通过求解下述线性规划问题获得对应的新顶点。

$$\max_{b_{kg}, w} \frac{b_{kg} - A_{kg} V_i}{\|A_{kg}\|} \quad (21)$$

$$\text{s.t. 约束(16)} \quad (22)$$

$$A_{kg} w_{kg} = b_{kg} \quad (23)$$

式中, V_i 为可行域 R 中的任意一点。

式(21)一式(23)中的最优解即为对应顶点, 当平移完所有边以后, 记所有的顶点为 V_{new} 。同时, 记录下每个边界平面平移的距离, 也就是式(21)的目标函数。

3) 算法终止条件检查。若步骤 2) 中边界平面平移的最大距离小于给定阈值, 那么终止算法, 记第 k 个聚类时段联络线功率可行域为 $\Omega_k @ \{w_k^{\text{Re}} | A_k w_k^{\text{Re}} \leq b_k\}$; 转步骤 4); 否则根据新顶点, 构造可行域, 然后返回步骤 2)。

4) 求取所有聚类时段联络线功率可行域的并集 $\Omega = \bigcup_{i=1}^j \Omega_i$, 记为 $\Omega @ \{w | Aw < b\}$, 即为考虑日前调度多时段耦合特性的联络线功率可行域。

4 火电机组深度调峰对可行域影响分析

近年来, 随着中国新能源的快速大规模并网与电力负荷激增, 省间跨区功率传输通道愈发重要。

然而,随着新能源大规模并网,电网调峰愈发迫切^[21]。因此,火电机组深度调峰等灵活性资源已被广泛用于电力系统调度,以提高新能源消纳。本章以火电机组深度调峰为灵活性资源代表,研究火电机组深度调峰对联络线功率可行域的影响,为电力资源的广域优化配置提供辅助决策依据。

4.1 火电机组深度调峰过程

火电深度调峰是指火电机组在常规出力范围下限之外可以继续降低出力的能力^[22]。火电机组的调峰过程通常可分为常规调峰和深度调峰,而深度调峰根据机组降出力调峰程度可分为不投油深度调峰和投油深度调峰^[23],如图2所示: P_{\min} 为机组常规最小技术出力; P_a 为机组不投油深度调峰稳燃负荷值, P_b 为机组投油深度调峰稳燃极限负荷值,当系统要求机组调峰出力低于 P_a 时,需要投油助燃。

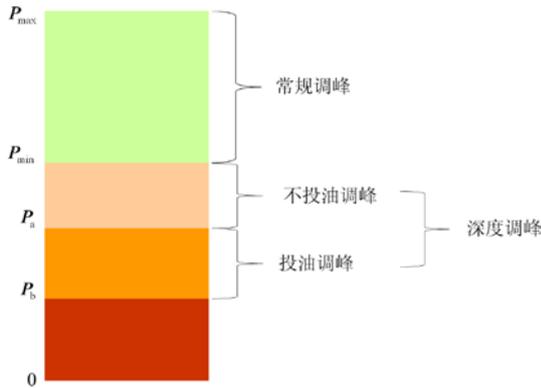


图2 火电机组深度调峰示意图

Fig. 2 Schematic diagram of deep peak regulation of thermal power unit

4.2 火电机组深度调峰影响分析

在多时段区域电网优化问题中,如果火电机组采取深度调峰,则将影响火电机组容量约束(6)中的火电机组出力下限约束值 P_G ,进而影响不等式约束式(10)。

与不考虑深度调峰的多时段区域电网经济调度优化模型式(9)一式(11)相比,考虑深度调峰的多时段区域电网经济优化模型与其的区别仅在于:不等式约束式(10)的右侧项参数 K_i 放宽为 K_i^D 。因此,以深度调峰为代表的弹性资源参与市场调节时,电网将充分挖掘自身运行弹性空间,扩大电网的运行区域,从而影响约束式(16),导致凸多面体各个边界平面向外平移距离变大,进而使得各个聚类时段的联络线功率可行域 $\Omega_k (k=1,2,L,m)$ 发生变化,最终拓宽多时段联络线功率可行域 Ω 。算例5.4节以仿真实例给出了以深度调峰为代表的弹性资源对联

络线功率可行域影响的定量分析。

5 算例分析

5.1 算例系统

由于直联联络线的控制方式灵活,已在世界范围内得到广泛采用。本节仍然以直联联络线为例,以图3所示IEEE30-IEEE RTS96节点联合算例进行仿真^[15],验证本文所提方法的有效性。

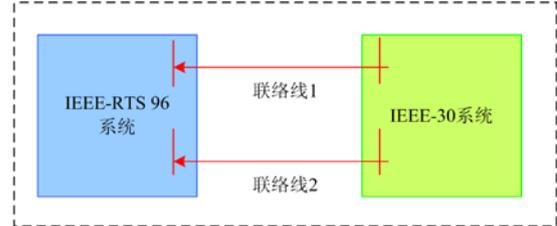


图3 测试算例

Fig. 3 Test system

本文采用以下3种方法刻画日前多时段直联联络线功率可行域:

M1 本文所提直联联络线功率可行域确定方法。

M2 基于顶点搜索快速刻画方法,忽略时段间耦合特性(11)的直联联络线功率可行域确定方法。

M3 基于顶点搜索快速刻画方法,考虑时段间耦合特性(11)的直联联络线功率可行域确定方法。

为比较M1—M3方法获得的直联联络线功率可行域,本文在5.2节中对比了不同方法获得的直联联络线功率可行域二维可视图。并以M1-M3方法确定的直联联络线功率为区域电网功率交换边界条件,计算考虑联络线功率边界条件的区域电网最小发电费用优化结果。将M1-M2方法所得优化结果与基于全网约束的区域电网最小发电费用(精确值)进行误差分析,进而验证了所提方法的有效性^[15]。本文5.3节分析了不同聚类时段数对本文所提M1方法的影响。本文还将在5.4节定量分析以火电机组深度调峰为代表的弹性资源对多时段直联联络线功率可行域的影响,为电力资源的广域优化配置提供辅助决策依据。

5.2 多时段直联联络线功率可行域

分别以IEEE-RTS 96和IEEE 30节点系统为例,本文采用不同方法求取其多时段直联联络线功率可行域,图4和图5所示分别为基于M1和M2方法刻画的IEEE-RTS 96和IEEE 30节点系统的联络线功率可行域。

从图4和图5可以看出,与所提方法M1(聚类时段为8)相比,M2方法由于忽略了时段间耦合爬

坡关系, 使得联络线功率可以更加自由的方式进行组合, 因此 M2 方法所获得的可行域具有更大的面积。

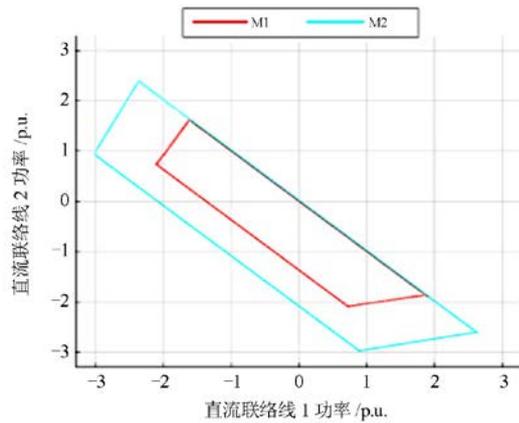


图 4 基于 M1—M2 方法的 IEEE-RTS 96 节点系统 1 时刻直流联络线功率可行域

Fig. 4 DC tie-line transfer capacity region of IEEE-RTS 96 test system obtained by M1—M2 methods in time period 1

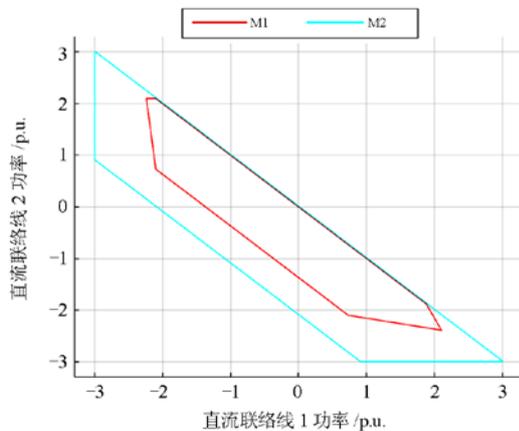


图 5 基于 M1—M2 方法的 IEEE-30 节点系统 1 时刻直流联络线功率可行域

Fig. 5 DC tie-line transfer capacity region of IEEE-30 test system obtained by M1—M2 methods in time period 1

M3 方法理论上可以获得最为精确的多时段直流联络线功率可行域, 然而由于其庞大的计算负担, 在 IEEE-RTS96 节点系统中的计算时间长达 138 742.6 s, 在 IEEE-30 节点系统中的计算时间长达 141 236.2 s, 无法在电力系统经济调度中获得实际的应用。而 M2 方法由于忽略时段间耦合关系, 在 IEEE-RTS96 节点系统中所需计算时间为 2.43 s, 在 IEEE-30 节点系统中所需计算时间为 2.68 s。而本文所提方法 M1(聚类时段为 8), 在 IEEE-RTS96

节点系统中的计算时间为 698.6 s, 在 IEEE-30 节点系统中的计算时间为 778.3 s, 均远远快于 M3 方法。

为验证 M1—M2 方法所获得的多时段直流联络线功率可行域的有效性, 分别以 M1-M2 方法确定多时段直流联络线功率可行域作为边界条件, 求解区域电网 IEEE-RTS96 节点系统的最小发购电费用优化结果。将所得优化结果与考虑全网原始约束的区域电网最小发购电费用结果(精确值)进行对比。表 1 所示为不同方法获得的最小发购电费用。

表 1 基于 M1—M2 方法获得的 IEEE-RTS 96 节点系统最小发购电费用误差分析

Table 1 Error analysis of IEEE-RTS 96 test system minimum generation and purchase cost using M1—M2 methods

时刻	精确值 费用/\$	M1		M2	
		费用/\$	相对误差/%	费用/\$	相对误差/%
1	530.24	504.30	4.89	421.18	20.57
2	518.91	498.67	3.91	421.08	18.85
3	507.95	493.88	2.77	419.85	17.34
4	507.69	493.71	2.75	419.85	17.30
5	507.69	493.71	2.75	419.85	17.52
6	509.39	493.59	3.10	420.17	23.29
7	549.92	514.41	6.46	421.85	27.59
8	583.70	531.77	8.90	422.63	30.51
9	609.03	544.78	10.55	423.19	30.81
10	611.92	547.25	10.56	423.34	30.81
11	611.92	547.25	10.57	423.34	30.68
12	609.03	544.76	10.55	422.16	30.76
13	609.03	544.76	10.55	421.65	30.68
14	609.03	544.76	10.55	422.13	30.76
15	520.06	493.13	5.18	421.87	18.88
16	520.52	493.13	5.26	421.89	18.94
17	522.79	494.05	5.49	422.03	19.27
18	523.33	493.21	5.75	422.07	19.35
19	523.33	493.21	5.75	422.07	19.35
20	521.46	493.21	5.41	421.96	19.08
21	519.10	492.59	5.10	421.82	18.74
22	515.38	491.81	4.57	421.62	18.19
23	510.73	489.02	4.25	421.35	17.51
24	506.04	487.45	3.67	421.07	16.79
总费用	13 058.2	12 218.4	6.43	10 109.1	22.58

由表 1 看出, 基于本文所提 M1 方法, 总费用相对误差仅为 6.43%。而 M2 方法由于所刻画多时段联络线功率可行域有较大误差, 其总费用误差高达 22.58%, 远大于本文所提方法。

综上所述, 现有 M2 方法由于忽略日前多时段耦合特性, 在多时段联络线功率可行域的刻画存在较大误差。而基于顶点快速搜索的考虑日前多时段

耦合特性的可行域刻画方法 M3, 由于其庞大的计算量, 导致其难以在实际电力系统调度中获得应用。相较于现有多时段联络线功率可行域确定方法, 本文所提方法可对考虑日前调度多时段耦合特性的直流联络线功率可行域进行高效快速刻画。

5.3 聚类时段数对多时段直流联络线功率可行域的影响

本节将分析所提 M1 方法中聚类时段数对所刻画联络线功率可行域的影响。图 6 给出了不同聚类时段数下 M1 方法的计算时间与误差。由图 6 看出, 随着聚类时段数的增加(由 7 增加至 12), 其求解时间逐渐减小但总费用误差也逐渐增加。在聚类时段数为 7 时, 其相对误差仅为 3.94%, 而求解时间达到 5 727.28 s; 当聚类时段数为 12 时, 其求解时间仅需 1.96 s, 而求解误差为 19.06%。可见, 当聚类时段数较小时, 由于仅忽略掉小部分时段间的爬坡耦合关系, 因此所获得的联络线功率可行域具有更高的精度。但各个聚类时段所对应的优化问题式 (15) 一式(16) 规模较大, 因此也将具有较大的计算负担。而当聚类时段数较大时, 由于忽略掉较多时段间的爬坡耦合关系, 因此各个聚类时段所对应的优化问题式(15)一式(16) 规模较小, 可快速刻画相应的可行域, 然而难以保证可行域刻画精度。

应当指出, 本文所提方法 M1 即使在聚类时段数为 12 的情况下(即本文所提方法存在最大总费用相对误差), 其总费用相对误差也低于 M2 方法相对误差 22.58%, 进一步验证了本文所提方法优越性。

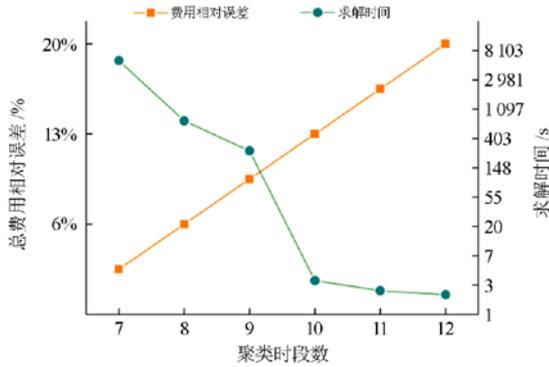


图 6 不同聚类时段数总费用相对误差及求解时间
Fig. 6 Relative cost errors and solution time of different clustering periods

5.4 深度调峰对多时段直流联络线功率可行域的影响

本节将分析火电机组深度调峰对多时段直流联络线功率可行域的重要影响。分别针对表 2 所示的 4 种深度调峰场景刻画相对应的 IEEE-RTS 96 节点系统和 IEEE-30 节点系统的多时段联络线功率可行域, 结果如图 7—图 8 所示。

域, 结果如图 7—图 8 所示。

表 2 四种深度调峰场景下火电机组出力下限
Table 2 Minimum generation levels under four depth peak-shaving scenarios

场景	火电机组下限/MW
Case 1	0
Case 2	5
Case 3	10
Case 4	15

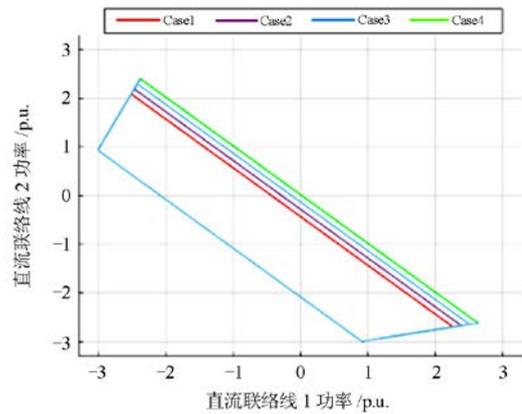


图 7 四种深度调峰场景下 IEEE-RTS 96 节点系统 1 时刻联络线功率可行域

Fig. 7 DC tie-line transfer capacity region of IEEE-RTS 96 test system in time period 1 under four depth peak-shaving scenarios

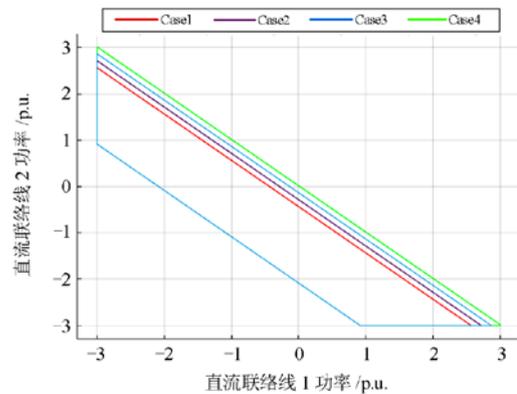


图 8 四种深度调峰场景下 IEEE-30 节点系统 1 时刻联络线功率可行域

Fig. 8 DC tie-line transfer capacity region of IEEE-30 test system in time period 1 under four depth peak-shaving scenarios

由图 7—图 8 可以看出, 随着火电机组深度调峰的增加(即出力下限的降低), 直流联络线功率可行域范围逐渐增加, 即直流联络线传输能力增大。

本文以直流联络线功率可行域面积为衡量指标, 直观反映深度调峰对直流联络线功率可行域的影响, 结果如表 3 所示。

表 3 四种深度调峰场景下 IEEE-RTS 96 节点系统和 IEEE-30 节点系统 1 时刻联络线功率可行域

Table 3 DC tie-line transfer capacity related to time period 1 in the IEEE-RTS 96 test system and IEEE-30 test system under four depth peak-shaving scenarios

场景	IEEE-RTS 96 节点系统	IEEE-30 节点系统
	联络线可行域面积	联络线可行域面积
Case 1	5.63	6.93
Case 2	6.74	8.04
Case 3	7.88	9.18
Case 4	9.06	10.36

由表 3 可以看出, 当火电机组出力下限由 Case1 场景变化至 Case4 场景时, IEEE-RTS 96 节点系统所示 1 时刻直流联络线功率可行域面积由 5.63 提升至 9.06, IEEE-30 节点系统所示 1 时刻直流联络线功率可行域面积由 6.93 提升至 10.36。可见, 随着火电机组容量范围的增大, 机组出力的灵活性增加, 电网运行空间提升, 进而导致直流联络线可行域的增大。

6 结论

随着电力负荷增长和大规模新能源的接入, 为保证跨区功率传输安全性和经济性, 应准确刻画多时段联络线功率可行域。本文提出一种考虑日前调度多时段耦合特性的联络线功率可行域确定方法。主要结论如下:

1) 本文以互联电网联络线为对象, 充分考虑机组多时段爬坡耦合约束、潮流平衡约束、发电机容量约束和支路传输极限约束等安全约束对多时段联络线功率可行域的影响, 较好刻画多时段联络线功率可行域, 缓解了现有方法在多时段高维联络线功率可行域刻画中的计算量爆炸问题。

2) 本文分析深度调峰对多时段联络线功率可行域的影响: 当深度调峰比例在允许调节容量范围内逐渐提升时, 可提升电网运行空间, 使得各个聚类时段联络线功率可行域增大, 最终可拓宽多时段联络线功率可行域。

参考文献

[1] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904.
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al.

Technology features of the new generation power system in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904.

[2] 张振宇, 王文倬, 王智伟, 等. 跨区直流外送模式对新能源消纳的影响分析及应用[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(11): 174-179.
ZHANG Zhenyu, WANG Wenzhuo, WANG Zhiwei, et al. Impact analysis and application of cross-region HVDC delivery mode in renewable energy accommodation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(11): 174-179.

[3] 四川: 2018 年全省装机容量达 7674 万千瓦[EB/OL]. [2019-01-22].
<http://news.bjx.com.cn/20190122/958414.shtml>.

[4] LI G, LI G, ZHOU M. Model and application of renewable energy accommodation capacity calculation considering utilization level of inter-provincial tie-line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 1-12. DOI: 10.1186/s41601-019-0115-7.

[5] SCHOLOTT M, KIES A, BROWN T, et al. The impact of climate change on a cost-optimal highly renewable European electricity network[J]. Applied Energy, 2018, 230: 1645-1659.

[6] 孙立飞, 申建建, 张俊, 等. 跨省互联水电站群长期多目标联合优化调度[J]. 电网技术, 2017, 41(12): 1-10.
SUN Lifei, SHEN Jianjian, ZHANG Jun, et al. Research on long-term multi-objective optimal operation for trans-provincial hydropower plants[J]. Power System Technology, 2017, 41(12): 1-10.

[7] 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, 46(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, 46(18): 100-107.

[8] 谢宇翔, 张雪敏, 罗金山, 等. 新能源大规模接入下的未来电力系统演化模型[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 421-430.
XIE Yuxiang, ZHANG Xuemin, LUO Jinshan, et al. Evolution model for future power system under massive penetration of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 421-430.

[9] KUMAR S, BILLINTON R. Adequacy equivalents in composite power system evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(3): 1167-1173.

[10] BILLINTON R, ZHANG W. Enhanced adequacy equivalent for composite power system reliability evaluation[J]. IET

- Generation Transmission & Distribution, 1996, 143(5): 420-426.
- [11] LIU J, CHU C. Iterative distributed algorithms for real-time available transfer capability assessment of multiarea power systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2569-2578.
- [12] YU J, LIU J, LI W, et al. Limit preserving equivalent method of interconnected power systems based on transmission capability consistency[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(14): 3547-3554.
- [13] JANG W, MOHAPATRA S, OVERBVE T J, et al. Line limit preserving power system equivalent[C] // IEEE Power and Energy Conference at Illinois (PECI), February 22-23, 2013, Champaign, IL, USA.
- [14] MOHAPATRA S, JANG W, OVERBVE T J, et al. Equivalent line limit calculation for power system equivalent networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(5): 2338-2346.
- [15] 张林, 杨高峰, 汪洋, 等. 基于多参数规划理论的互联电网联络线功率可行域确定方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(19): 5763-5771, 5904.
- ZHANG Lin, YANG Gaofeng, WANG Yang, et al. Determination of the DC tie-line transfer capacity region of the interconnected power grid: a multi-parametric programming approach[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(19): 5763-5771, 5904.
- [16] LIN W, YANG Z, YU J, et al. Determination of transfer capacity region of tie lines in electricity markets: theory and analysis[J]. Applied Energy, 2019, 239: 1441-1458.
- [17] LIN W, YANG Z, YU J, et al. Tie-line power transmission region in a hybrid grid: fast characterization and expansion strategy[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 2222-2231.
- [18] TAN Z, ZHONG H, WANG J, et al. Enforcing intra-regional constraints in tie-line scheduling: a projection-based framework[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4751-4761.
- [19] NAEL K, KMITTER J R, JAHAN R, et al. Multi-parametric magnetic resonance imaging for prediction of parenchymal hemorrhage in acute ischemic stroke after reperfusion therapy[J]. Stroke, 2017, 48(3): 664-670.
- [20] 刘庆珍, 张晓燕, 蔡金锭. 基于降维技术与K-means聚类的油纸绝缘状态综合灰评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 62-70.
- LIU Qingzhen, ZHANG Xiaoyan, CAI Jinding. Comprehensive grey evaluation for oil-paper insulation based on dimension reduction techniques and K-means cluster[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 62-70.
- [21] 盛四清, 邱昊, 张文朝, 等. 考虑稳态和动态有功平衡约束的新能源消纳综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 51-56.
- SHENG Siqing, QIU Hao, ZHANG Wenzhao, et al. Comprehensive assessment method of new energy consumption considering steady and dynamic active power equilibrium constraints[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 51-56.
- [22] 邓婷婷, 娄素华, 田旭, 等. 计及需求响应与火电深度调峰的含风电系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(15): 37-59.
- DENG Tingting, LOU Suhua, TIAN Xu, et al. Optimal dispatch of power system integrated with wind power considering demand response and deep peak regulation of thermal power units[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 37-59.
- [23] 应益强, 王正风, 吴旭, 等. 计及新能源随机特性的电网深度调峰多目标策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(6): 34-42.
- YING Yiqiang, WANG Zhengfeng, WU Xu, et al. Multi-objective strategy for deep peak shaving of power grid considering uncertainty of new energy[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(6): 34-42.
- [24] 测试系统数据[EB/OL]. [2020-09-24]. https://figshare.com/articles/Case_data_for_IEEERTS96-30-bus_test_systems/8525013.

收稿日期: 2020-01-07; 修回日期: 2020-03-27

作者简介:

李林威(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统区域间功率交换能力确定;

林伟(1994—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为区域电力市场和电力系统概率分析;

杨知方(1992—), 男, 研究员, 主要研究方向为电力系统运行优化与分析;

余娟(1980—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 主要研究方向为电力和能源系统经济优化运行、风险评估。E-mail: 148454745@qq.com

(编辑 张爱琴)