

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211132

计及机组组合与线路重构协同的电热联合系统消纳弃风研究

姜楠^{1,2}, 戴赛³, 许丹³, 宋柏越⁴, 胡林献¹

(1. 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001;
2. 国网江苏省电力有限公司南通供电分公司, 江苏 南通 226006; 3. 中国电力科学研究院有限公司,
北京 100192; 4. 国网黑龙江电力科学研究院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要: 现有文献仅以线路传输功率限制或“热电耦合”约束为单一弃风原因研究电热联合系统的消纳弃风策略, 因而仅适用于消纳单种原因产生的弃风。针对这一问题, 同时考虑两种弃风原因, 研究进一步提高风电消纳的调度策略, 提出了一种计及电网线路重构的直流潮流改进算法。在此基础上构建了考虑优化机组组合与线路重构的电热联合系统源网协同调度模型。通过实例仿真, 验证了该模型能够根据弃风量大小和弃风原因的不同, 通过机组出力优化、机组组合和输电线路重构3种策略的合理选取或组合, 同时消纳由两种原因引起的弃风。并且该模型能够在不新增投资的情况下, 实现风电消纳最大化。

关键词: 电热联合系统; 源网协同; 线路重构; 直流潮流法; 风电消纳

Wind power consumption in a CHP system considering the collaboration of unit combination and line reconstruction

JIANG Nan^{1,2}, DAI Sai³, XU Dan³, SONG Baiyue⁴, HU Linxian¹

(1. School of Electrical Engineering & Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;
2. Nantong Electric Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Company Limited,
Nantong 226006, China; 3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;
4. State Grid Heilongjiang Electric Power Research Institute, Harbin 150030, China)

Abstract: Existing studies only analyze the consumption measures in a CHP system from a single aspect, namely the CHP units' "thermo-electric coupling" and power network safety constraints. Therefore, these strategies are only applicable to the curtailed wind power caused by a single reason. This present a problem, and this paper studies the dispatch strategy of consuming curtailed wind power taking into account two reasons at the same time. It proposes an improved DC power flow algorithm considering line reconstruction. Based on the algorithm, a source-grid collaboration dispatch model including unit combination and line reconstruction in a CHP system is established. A case study shows that through a reasonable choice or combination of three strategies i.e. unit output optimization, unit combination and line reconstruction, the model can reduce curtailed wind power caused by those two reasons depending on the amount and the reason for the wind power curtailment. It can also achieve maximum wind power consumption without new investment.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877049).

Key words: combined heat and power system; source-grid collaboration; line reconstruction; DC power flow algorithm; wind power consumption

0 引言

风能作为一种清洁的可再生能源, 具有十分广阔的发展前景^[1-4]。但随着风电装机容量与并网规模的不断扩大, 弃风问题也变得愈发严峻^[5]。根据

国家能源局的统计数据, 2021年的全国平均弃风率约为3.1%, 其中新疆、甘肃地区的弃风率仍高达7.3%、4.1%^[6-7]。

现有研究表明, 随着清洁能源需求的增加, 电网结构无法适应不断扩大的风电规模, 输电线路传输容量限制成为产生弃风的重要原因^[8], 因此提高电网输送能力可以缓解弃风, 主要包括扩展电网^[9]

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877049)

与电网线路重构^[10-11]。“三北”地区的热电机组比重高,且供暖期弃风现象高发,热电机组的“热电耦合”约束是产生弃风的另一个原因^[12],因此“热电解耦”是促进弃风消纳的另一种措施^[13-14],如配置电锅炉与储热装置等^[15-17]。

也有学者从源网协同的角度展开弃风消纳研究。文献[18]提出优化机组组合和网络结构的源网协同规划模型,以提高系统的风电接纳能力及经济性。文献[19]提出发电协同调度,将机组组合与输电线路切换引入优化模型,提高风电消纳水平的同时降低系统运行成本^[20]。然而,上述研究仍局限于单一弃风原因,未考虑热电机组“热电耦合”约束引起的弃风问题,因而提出的措施难以消纳“三北”地区的全部弃风。

综上所述,学者们已从输电线路传输容量限制或热电机组“热电耦合”约束单方面分析了弃风机理,并从提高电网输送能力或“热电解耦”单方面探讨了相应的弃风消纳措施,取得了一定的消纳效果,但架设新输电线路或加装电锅炉、储热罐等装置均需增加投入。但文献[21]分析指出电热联合系统一个调度周期内的弃风可能由热电机组“热电耦合”约束、线路传输功率限制交替或同时引起。本文在其分析的基础上,研究同时消纳由两方面原因所产生弃风的调度策略,提出改进的直流潮流算法,构建计及机组组合与线路重构的电热联合系统源网协同调度模型。通过算例仿真,验证了本文提出的源网协同调度模型能够在不新增投资的情况下,依照弃风原因的不同,通过优化机组出力、机组组合和输电线路重构等策略的合理选取或组合,实现风电的最大化消纳。

1 计及电网线路重构的直流潮流改进算法

输电网的优化调度问题通常考虑系统的有功功率平衡,为提高计算速度,常采用直流潮流法计算线路的传输功率^[19]。

$$\begin{cases} \mathbf{P} = \mathbf{B}\boldsymbol{\theta} \\ \mathbf{P}^L = \mathbf{Y}\boldsymbol{\Phi} \end{cases} \quad (1)$$

式中: \mathbf{P} 为节点注入功率向量; $\boldsymbol{\theta}$ 为节点电压相角向量; \mathbf{B} 为节点电纳矩阵; \mathbf{P}^L 为各支路有功功率潮流构成的向量; $\boldsymbol{\Phi}$ 为各支路两端相角差向量; \mathbf{Y} 为各支路导纳组成的对角矩阵。为便于构建线性约束条件, \mathbf{P}^L 可改写为

$$\mathbf{P}^L = \mathbf{Y}\mathbf{A}^T\mathbf{B}^{-1}\mathbf{P} \quad (2)$$

式中, \mathbf{A} 为电网的节点-支路关联矩阵。因此在构建节点注入功率与支路有功功率潮流的等式约束条

件时需求得节点电纳矩阵的逆矩阵。

若网络拓扑结构发生变动,节点电纳矩阵将发生改变,从而影响线路传输功率。目前绝大多数文献都引入线路运行状态,将线路的传输功率约束扩展为式(3)所示的二阶等式约束,将节点电压相角与各支路有功功率同时作为优化变量进行求解,优化变量及约束条件多,调度模型维数高,计算时间长^[22]。目前常规方法所采用的大 \mathbf{M} 法可松弛该二阶约束,构成线性约束条件,但收敛速度变慢^[10,18]。

$$u_i^L \left(\frac{P_i^L}{y_i} - \theta_j + \theta_k \right) = 0 \quad (3)$$

式中: u_i^L 为第 i 条线路的运行状态, 1 表示线路投入运行, 0 表示线路退出运行; y_i 为线路 i 的支路导纳, 其首端节点为 j 、末端节点为 k ; P_i^L 为线路 i 的传输功率。

本文提出计及电网线路重构的直流潮流改进算法。设电网共有 m 个节点, b 条支路, 如附图 A1 所示, 每一条支路可形成一个只有对应节点位置存在非零元素的 $m \times m$ 阶节点电纳矩阵(即一个单元), 将所有支路形成的单元叠加起来即可形成电网的节点电纳矩阵 \mathbf{B} , 通过控制 u_i^L 的取值, 即可构成计及电网线路重构的节点电纳矩阵形成方法, 如式(4)所示。

$$\mathbf{B} = \sum_{i(j,k) \in \Psi} u_i^L \mathbf{M}_i y_i \mathbf{M}_i^T \quad (4)$$

式中: $i(j,k)$ 表示第 i 条线路, 其首、末端节点分别为 j 、 k ; \mathbf{M}_i 为 \mathbf{A} 的第 i 个列向量, 为线路 i 的节点-支路关联向量; Ψ 为电网所有可投入线路的集合。

将式(4)代入式(1)并展开, 可得

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_n \\ \vdots \\ P_m \end{bmatrix} - \sum_{i(j,k) \in \Psi} u_i^L y_i \begin{bmatrix} A_{ji} \\ \vdots \\ A_{ki} \\ \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{ji} \\ \vdots \\ A_{ki} \\ \vdots \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \theta_j \\ \vdots \\ \theta_k \\ \vdots \end{bmatrix} = 0 \quad (5)$$

节点 n 注入功率为

$$P_n - \sum_{i(j,k) \in \Psi} u_i^L y_i A_{ni} A_{ji} \theta_j - \sum_{i(j,k) \in \Psi} u_i^L y_i A_{ni} A_{ki} \theta_k = 0 \quad (6)$$

线路传输功率亦可展开为

$$\begin{bmatrix} P_1^L \\ \vdots \\ P_i^L \\ \vdots \\ P_b^L \end{bmatrix} = \text{diag}(u_1^L y_1, \dots, u_i^L y_i, \dots, u_b^L y_b) \begin{bmatrix} A_{11} & \dots & A_{n1} & \dots & A_{m1} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ A_{i1} & \dots & A_{ni} & \dots & A_{mi} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ A_{b1} & \dots & A_{nb} & \dots & A_{mb} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \vdots \\ \theta_n \\ \vdots \\ \theta_m \end{bmatrix} \quad (7)$$

线路 i 传输功率为

$$P_i^L = \sum_{l=1}^m u_l^L y_l A_l \theta_l \quad (8)$$

如式(6)和式(8)所示, 计及电网线路重构的直流潮流改进算法通过调整节点电纳矩阵的形成方式, 不改变电网潮流计算的精度, 仅引入优化变量 θ , 避免节点电纳矩阵的求逆运算, 减少线路传输功率优化变量, 以及系统有功功率平衡约束条件数目, 从而简化求解过程, 对于调度模型的适用性更强。

2 电热联合系统源网协同优化调度模型

本文将机组组合与线路重构纳入电热联合系统调度模型, 在避免新增投资的基础上, 通过源网协同优化消纳因热电机组“热电耦合”和线路传输功率限制引起的弃风。

2.1 目标函数

目标函数为系统运行成本最低, 包括机组煤耗与启机成本。

$$\min F = \sum_{t=1}^T \left\{ \begin{aligned} & \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{N_r} \left[u_{t,r,i}^{\text{CHP}} F_{t,r,i}^{\text{CHP}} + u_{t,r,i}^{\text{CHP}} (1 - u_{t-1,r,i}^{\text{CHP}}) C_{r,i}^{\text{CHP}} \right] + \\ & \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^{N_h} \left[u_{t,h,i}^{\text{CON}} F_{t,h,i}^{\text{CON}} + u_{t,h,i}^{\text{CON}} (1 - u_{t-1,h,i}^{\text{CON}}) C_{h,i}^{\text{CON}} \right] \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

式中: 各变量下标字符 t 表示第 t 个调度时段; T 为时段总数; F 为系统运行成本, 万元; R 、 H 分别为热电厂数、火电厂数; N_r 、 N_h 分别为第 r 座热电厂热电机组数量和第 h 座火电厂火电机组数量; $F_{t,r,i}^{\text{CHP}}$ 、 $C_{r,i}^{\text{CHP}}$ 分别为第 r 座热电厂第 i 台热电机组的煤耗成本及启机费用, 万元; $F_{t,h,i}^{\text{CON}}$ 、 $C_{h,i}^{\text{CON}}$ 分别为第 h 座火电厂第 i 台火电机组的煤耗成本及启机费用, 万元; $u_{t,r,i}^{\text{CHP}}$ 、 $u_{t,h,i}^{\text{CON}}$ 为状态变量, 分别表示第 r 座热电厂第 i 台热电机组、第 h 座火电厂第 i 台火电机组的启停状态, 其中 1 表示机组处于运行状态, 0 表示机组处于停机状态, 为便于表示, 后文统一记作 u_i^G 。各机组煤耗量公式可见文献[16]。

2.2 约束条件

1) 机组约束

各机组出力约束为

$$u_{t,h,i}^{\text{CON}} P_{h,i}^{\min} \leq P_{t,h,i}^{\text{CON}} \leq u_{t,h,i}^{\text{CON}} P_{h,i}^{\max} \quad (10)$$

$$u_{t,r,i}^{\text{CHP}} D_{r,i}^{\min} \leq D_{t,r,i} \leq u_{t,r,i}^{\text{CHP}} D_{r,i}^{\max} \quad (11)$$

$$u_{t,r,i}^{\text{CHP}} (P_{r,i}^{\min} + b_L D_{t,r,i}) \leq P_{t,r,i}^{\text{CHP}} \leq u_{t,r,i}^{\text{CHP}} (P_{r,i}^{\max} - b_H D_{t,r,i}) \quad (12)$$

$$0 \leq P_t^W \leq P_t^{W,\max} \quad (13)$$

式中: $P_{h,i}^{\max}$ 、 $P_{h,i}^{\min}$ 分别为第 h 座火电厂第 i 台火电机组电功率上、下限, MW; $D_{r,i}^{\max}$ 、 $D_{r,i}^{\min}$ 分别为第 r 座热电厂第 i 台热电机组供热抽汽速率上、下

限, t/h; $P_{r,i}^{\max}$ 、 $P_{r,i}^{\min}$ 分别为第 r 座热电厂第 i 台热电机组电功率上、下限, MW; b_L 、 b_H 分别为背压工况与最大凝气工况下热电机组的电耗比, (MW·h)/t; P_t^W 为风电功率, MW; $P_t^{W,\max}$ 为风电预测功率, MW。

火电机组与热电机组的爬坡、滑坡约束分别为

$$P_t \leq P_{t-1} + u_{t-1}^G r^{\text{up}} \quad (14)$$

$$P_t \leq P_{t+1} + u_{t+1}^G r^{\text{down}} \quad (15)$$

式中, r^{up} 、 r^{down} 分别表示机组的爬坡、滑坡功率, MW/h。

2) 功率平衡约束

电功率采用全网平衡, 而热功率按热电厂供热区域分别平衡。

$$\sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^{N_r} P_{t,r,i}^{\text{CHP}} + \sum_{h=1}^H \sum_{i=1}^{N_h} P_{t,h,i}^{\text{CON}} + P_t^W = \sum_{n=1}^m P_{t,n}^{\text{LD}} \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^{N_r} Q_{t,r,i}^{\text{CHP}} = \sum_{l=1}^{L_r} (Q_{t+\tau_{r,j},r,l}^{\text{LD}} - Q_{t+\tau_{r,j},r,l}^e) + \sum_{p=1}^{M_p} \Delta Q_{t,r,p} \quad (17)$$

式中: $P_{t,n}^{\text{LD}}$ 为第 n 个负荷节点的电负荷功率, MW; m 为电网节点个数; $Q_{t,r,i}^{\text{CHP}}$ 为第 r 座热电厂第 i 台热电机组的热功率, GJ/h, 其中 $Q_{t,r,i}^{\text{CHP}} = D_{t,r,i} \Delta H / 10^3$, ΔH 为蒸汽焓降, kJ/kg; $Q_{t+\tau_{r,j},r,l}^{\text{LD}}$ 、 $Q_{t+\tau_{r,j},r,l}^e$ 分别为 $t + \tau_{r,l}$ 时刻第 r 座热电厂所带第 l 个换热站的热负荷功率和热负荷损失功率, GJ/h; $\Delta Q_{t,r,p}$ 为第 r 座热电厂所带热网中第 p 条管道的热量损耗, GJ/h; H_r 为第 r 座热电厂所连接的热网的管道数; L_r 为第 r 座热电厂所带换热站数量; $\tau_{r,l}$ 为第 r 座热电厂的热量到达第 l 个换热站的传输延迟时间, h。热网管道热量损耗与延时的计算公式, 热网安全约束, 以及热源、热负荷约束可见文献[23-24]。

3) 电网安全约束

当机组的启动方案发生变化时, 电网的节点注入功率需要发生改变。

$$P_{t,n} = \sum_{j \in n_g} u_{t,n,j}^G P_{t,n,j}^G - P_{t,n}^{\text{LD}} \quad (18)$$

式中: $P_{t,n}$ 为节点 n 的注入功率, MW; $u_{t,n,j}^G$ 为节点 n 所接第 j 台发电机组的启停状态; $P_{t,n,j}^G$ 为节点 n 所接第 j 台发电机的电功率; n_g 为节点 n 所接的发电机集合。

由于考虑了电网线路重构, 因此采用式(6)与式(8)计算线路传输功率, 其上、下限约束为

$$P_{t,i}^{\text{L},\min} \leq P_{t,i}^L \leq P_{t,i}^{\text{L},\max} \quad (19)$$

式中: $P_{t,i}^L$ 为第 i 条线路的传输功率, MW; $P_{t,i}^{\text{L},\max}$ 、

$P_i^{L,\min}$ 分别为第 i 条线路传输功率上、下限, MW。

节点电压相角范围约束为

$$\theta_i^{\min} \leq \theta_{t,i} \leq \theta_i^{\max} \quad (20)$$

$$\theta_i^{\text{ref}} = 0 \quad (21)$$

式中: θ_i^{\max} 、 θ_i^{\min} 分别为节点电压相角的上、下限, 通常取 $[-\pi, \pi]$; θ_i^{ref} 为参考节点电压相角。

4) 运行状态约束

设 \mathbf{u}_t^G 、 \mathbf{u}_t^L 分别为机组、线路运行状态组成的列向量, 为保证相邻时段机组及线路的投退数量满足调控需求, 应满足式(22)和式(23)。

$$\|\mathbf{u}_t^G - \mathbf{u}_{t-1}^G\|_1 \leq \tau^G \quad (22)$$

$$\|\mathbf{u}_t^L - \mathbf{u}_{t-1}^L\|_1 \leq \tau^L \quad (23)$$

式中, τ^G 、 τ^L 分别为相邻时段机组、线路的最大变化量。

在电网线路重构过程中, 需要保证网络的连通性, 即任意两节点之间至少存在一条间接通路, 其判别准则为^[25]

$$\mathbf{S}_t = \sum_{n=1}^{m-1} (\mathbf{R}_t)^n \quad S_{t,jk} > 0 \quad (24)$$

式中: \mathbf{S}_t 为可达矩阵, 当矩阵中任意元素 $S_{t,jk}$ 大于 0 时, 即可保证网络连通; \mathbf{R}_t 为节点邻接矩阵, 其各元素如式(25)所示。

$$R_{t,jk} = \begin{cases} u_{t,i}^L & i(j,k) \in \Psi \\ 0 & i(j,k) \notin \Psi \end{cases} \quad (25)$$

为满足调控要求, 必须保证每个电厂至少有一台机组投入运行, 且重要线路(如联络线、发电机出线)始终投入, 如式(26)和式(27)所示。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_r} u_{t,r,i}^{\text{CHP}} \geq 1 \\ \sum_{i=1}^{N_h} u_{t,h,i}^{\text{CON}} \geq 1 \end{cases} \quad (26)$$

$$u_{t,i}^L = 1 \quad i \in \Psi^* \quad (27)$$

式中, Ψ^* 为系统中重要线路集合。

为构建统一的机组与线路运行状态约束, 将 u_t^G 与 u_t^L 统一记作 u_t , 即元件运行状态。当系统无弃风时, 为避免运行方式变化, u_t 保持不变; 当系统出现弃风时, 允许元件运行状态变化。设弃风开始、结束时段为 $[t_s, t_e]$, 元件运行状态变化之后需保持的最小连续投入、最小连续退出时间分别为 t^{up} 、 t^{down} , G 、 L 分别为弃风开始时段起元件至少连续投入、连续退出的时段数, 如式(28)和式(29)所示。

以图 1 状态 1 为例, u_t 从初始状态起已投入运行两个时段, 当系统出现弃风时, 为保证最小连续投入时间, u_t 在 $[t_s, t_s + 3]$ 需保持为 1, 即 $G = 4$ 、 $L = 0$ 。

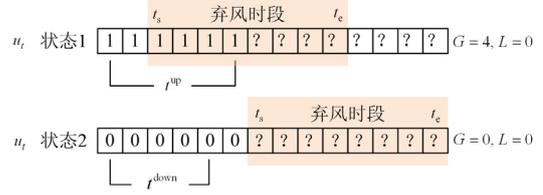


图 1 弃风开始时段起元件至少连续投退时段数示意图
Fig. 1 Schematic diagram of least continuous putting and quitting periods of elements starting from wind power curtailment period

$$G = \begin{cases} u_0(t_s - t^{\text{up}} + 1) & t_s \leq t^{\text{up}} \\ 0 & t_s > t^{\text{up}} \end{cases} \quad (28)$$

$$L = \begin{cases} (1 - u_0)(t_s - t^{\text{down}} + 1) & t_s \leq t^{\text{down}} \\ 0 & t_s > t^{\text{down}} \end{cases} \quad (29)$$

当 $u_{t_s-1} = 1$ 时, 状态变量约束如式(30)、式(31)。

$$\sum_{t=t_s}^{G+t_s-1} (1 - u_t) = 0 \quad (30)$$

$$\sum_{k=t}^{t+\beta-1} (1 - u_k) \geq \beta(u_{t-1} - u_t), \quad t \in [G + t_s, t_e] \quad (31)$$

式中, $\beta = \min\{t^{\text{down}}, t_e - t + 1\}$ 。

当 $u_{t_s-1} = 0$ 时, 状态变量约束如式(32)、式(33)。

$$\sum_{t=t_s}^{L+t_s-1} u_t = 0 \quad (32)$$

$$\sum_{k=t}^{t+\alpha-1} u_k \geq \alpha(u_t - u_{t-1}), \quad t \in [L + t_s, t_e] \quad (33)$$

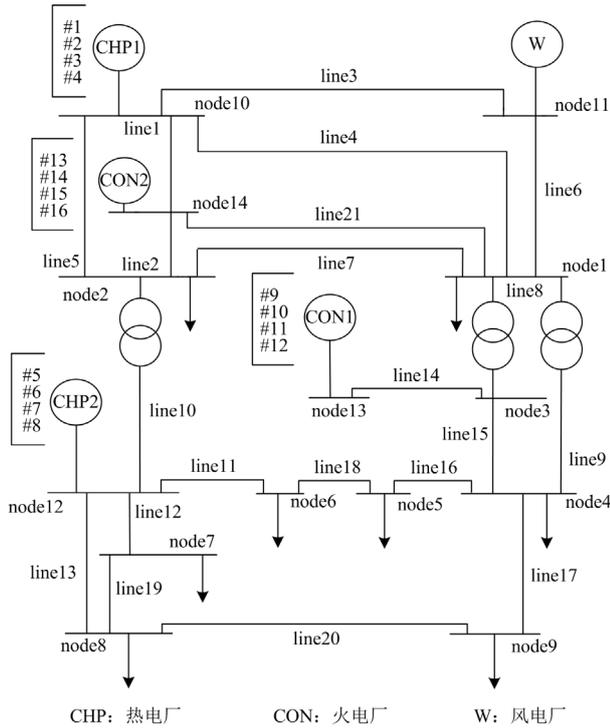
式中, $\alpha = \min\{t^{\text{up}}, t_e - t + 1\}$ 。

3 算例仿真

3.1 原始数据

电网采用扩展的 IEEE 5 机 14 节点系统^[26], 电网拓扑、各机组编号与系统初始状态如图 2 所示, 各节点电负荷及风电预测功率如图 3 所示。热电、火电机组以及线路的最小连续投入、退出时间分别设置为 8 h、6 h、6 h, 初始状态下均已满足连续投退时间。 Ψ^* 设置为 $\{8,9,10,14\}$, τ^G 、 τ^L 分别取 3 台、5 条, 相邻两次迭代的收敛精度取 10^{-9} 。热网拓扑结构及参数详见文献[15], 输电线路参数详见文献[21], 机组相关参数详见文献[27]。本文所建调度模型为混合整数规划模型, 采用 Gurobi 优化工具进行求解, 仿真硬件环境为: Intel Core i7 CPU 5

GHz, 内存为 8 G, 4 种调度方案如表 1 所示。



机组初始状态: #1~3、5~7、9~11、13~15 投运
线路初始状态: 1~20 投运

图 2 扩展的 IEEE 14 节点电网拓扑结构

Fig. 2 Expanded IEEE 14 power network topology

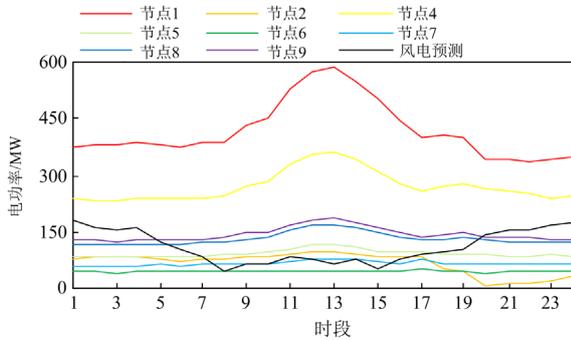


图 3 各节点电负荷及风电预测功率

Fig. 3 Electric load of each node and forecasted wind power

表 1 4 种调度方案的弃风消纳策略组合情况

Table 1 Wind power consumption strategy combination situation of four dispatching plans

	机组出力优化	机组组合*	线路重构*
原始方案	✓		
机组组合	✓	✓	
线路重构	✓		✓
源网协同	✓	✓	✓

注：“*”表示当出现弃风时考虑该策略。

原始方案调度结果如图 4 所示。根据文献[19]的方法可知(分析案例详见附录 B)，20—22 时段弃风由热电厂“热电耦合”约束引起，后图中采用粉色色块表示；1—4 时段弃风由线路传输功率上限引起，采用浅蓝色色块表示；23—24 时段弃风由两者原因同时引起，采用两种色块重叠表示。

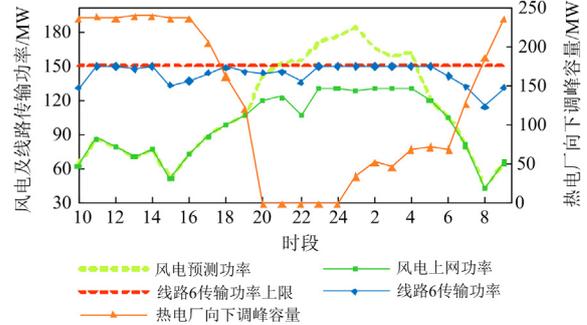


图 4 原始方案优化调度结果

Fig. 4 Dispatching results of original optimization plan

3.2 机组组合方案仿真及弃风分析

源侧方案的优化调度结果见图 5。20 时段起，系统因“热电耦合”约束产生弃风，此时#3 机组退出，热电厂 1 的机组强迫出力下降 26.89%，从而缓解了风电消纳紧张状况，而热电厂 2 为满足所带热负荷需求，仍保持初始状态；23 时段起，由于节点 2 电负荷较小，然而风电预测功率进一步增大，因此#10 机组退出，在进一步降低系统强迫出力的同时，减少节点 14 注入功率，并改变电网潮流分布，如图 5 所示，线路 3 传输功率下降，扩大了风电厂经线路 6 向电网传输的空间；1 时段起，由于弃风仅由线路传输功率上限引起，因此#10 机组仍保持退出状态，然而 4 时段起电负荷开始增大，#3 机组已满足最小退出时间，从而恢复运行状态。

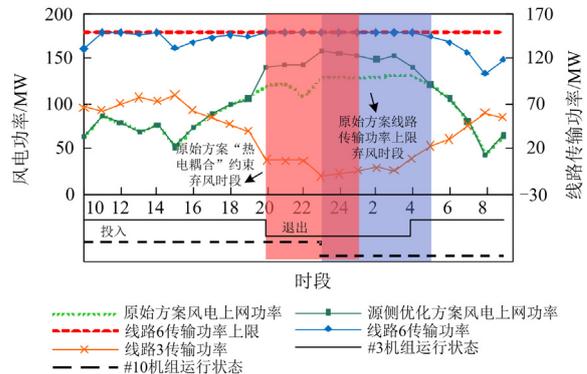


图 5 机组组合方案优化调度结果

Fig. 5 Dispatching results of unit combination plan

经过机组组合之后，在 20—24 时段，弃风原因转化为线路传输功率上限，各时段弃风量均小于原

始方案,其中由“热电耦合”约束引起的弃风量降为0,弃风总量降低62.87%。由此可见,机组组合可通过降低系统强迫出力、改变电网潮流分布,降低因“热电耦合”约束以及线路传输功率上限引起的弃风。

3.3 线路重构方案仿真及弃风分析

线路重构方案的优化调度结果见图6。20—22时段输电线路不发生重构,因为该时段弃风由热电机组“热电耦合”约束引起,改变电网拓扑结构无法解决热电机组电出力过高的状况;23时段起,线路传输功率上限也成为弃风原因,输电线路发生重构,线路21投入,使得火电厂2经线路21向节点1输送电功率,同时线路18退出,避免变压器8向节点1倒送功率,增加了火电厂1向节点5的输送功率,线路3传输功率下降,然而弃风原因仍包含“热电耦合”约束,因此23—24时段弃风量未发生变化;1时段起,输电线路再一次发生重构,线路1退出,从而避免火电厂2经线路3从风电厂母线转送功率,如图6所示,线路3传输功率再次下降,此时弃风仅由热电机组“热电耦合”约束引起,并且1—4时段弃风量降低。

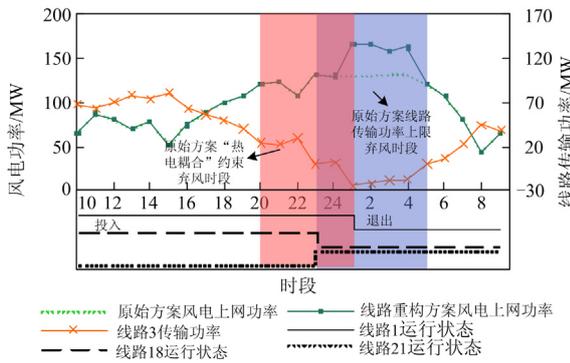


图6 线路重构方案优化调度结果

Fig. 6 Dispatching results of line reconstruction plan

经过线路重构之后,23—1时段弃风原因转化为“热电耦合”约束,2—4时段弃风能够完全消纳。由此可见,电网线路重构仅能消纳由线路传输功率上限引起的弃风,而不能消纳由“热电耦合”约束引起的弃风。

3.4 源网协同方案仿真及弃风分析

源网协同方案的优化调度结果见图7。原始方案下20—22时段弃风由热电机组“热电耦合”约束引起,因此首先进行机组组合,20时段#3机组退出,热电厂1的机组强迫出力降低26.89%,输电线路不发生重构;随着风电预测功率上升,单独通过机组

组合无法完全消纳线路传输功率限制引起的弃风,因此23时段线路21投入、24时段线路1退出,线路3传输功率不断下降,由于原始方案下在23—24时段的弃风由两种原因同时引起,从机组组合和线路重构两方面加以优化,与其他方案相比弃风量可降至最低;1时段起,风电预测功率仍较大,线路1、线路21维持24时段重构后的运行状态,而#3机组在4时段已满足最小退出时间,因此恢复运行状态。

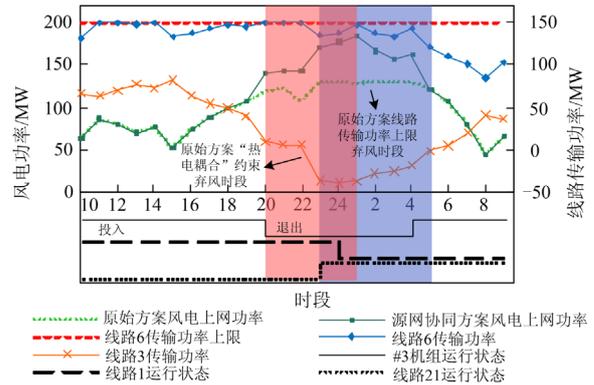


图7 源网协同方案优化调度结果

Fig. 7 Source-grid collaboration plan dispatching results

经过源网协同之后,21—22时段弃风原因转化为线路传输功率上限,其余时段弃风能够完全消纳。由此可见,源网协同方案能够按照弃风原因调用不同的弃风消纳策略以及进行策略的合理组合,实现风电的最大化消纳。

4种方案的弃风率、弃风时段和弃风原因如表2所示,可见源网协同方案的弃风时段数和弃风率最低。为验证一定规模风电样本下本文所提方法的有效性,在本文算例系统中利用蒙特卡洛模拟方法来生成风电功率的随机出力场景,随机模拟次数取30,随机场景下4种调度方案所得的系统平均弃风率分别为12.92%、6.97%、8.89%、3.12%,由此可知,源网协同方法在不同的风电波动情况下也能够将弃风量降至最低。

表2 各方案弃风率、弃风时段及弃风原因

Table 2 Rate, the periods and the reason of wind power curtailment of each plan

方案名称	弃风率/%	“热电耦合”约束弃风时段	线路传输功率上限弃风时段	“热电耦合”约束和线路传输功率上限弃风时段
原始方案	12.46	20—22	1—4	23—24
机组组合	4.63	—	21—4	—
线路重构	7.64	20—1	—	—
源网协同	0.82	—	21—22	—

优化模型中采用常规直流潮流算法和本文所提直流潮流改进算法的优化计算时间如表 3 所示。对比可知, 本文算法在求解过程中, 因减少优化变量及约束条件个数, 优化求解时间更短。

表 3 直流潮流算法改进前后调度模型优化求解时间

Table 3 Dispatch model optimal calculation time before and after improvement of DC power flow algorithm				
ms				
算法	原始方案	机组组合	线路重构	源网协同
常规算法	505.45	3784.04	3263.44	10 101.47
改进算法	284.70	1837.90	1869.11	7384.62

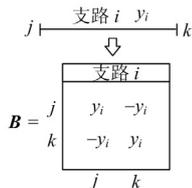
4 结论

1) 机组组合可同时减少热发电机组“热电耦合”约束和线路传输限制引起的弃风, 而电网线路重构则仅能降低线路传输限制引起的弃风。

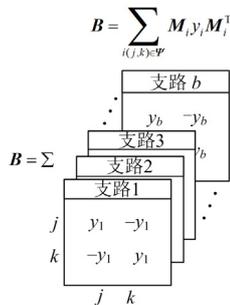
2) 本文模型综合考虑了机组出力优化、机组组合和输电线路重构 3 种消纳弃风策略, 能够在不新增投资的情况下, 根据弃风量大小和弃风原因的不同, 合理选取或组合 3 种策略, 同时消纳由两种原因引起的弃风, 实现风电消纳最大化。本文算例系统中采用源网协同调度策略后, 弃风率降低了 9.80%。

3) 本文提出的计及电网线路重构的直流潮流改进算法可降低优化变量及约束条件个数, 简化求解过程, 对于调度模型的适用性更强, 可推广用于电网规划、运行方式安排和最优潮流等多种研究场合。

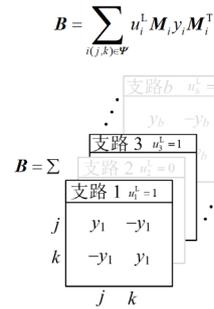
附录 A



(a) 单条支路形成的单元



(b) 多条支路单元叠加形成的节点电纳矩阵



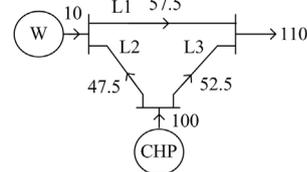
(c) 考虑支路运行状态形成的节点电纳矩阵

附图 A1 计及电网线路重构的直流潮流改进算法节点电纳矩阵生成示意图

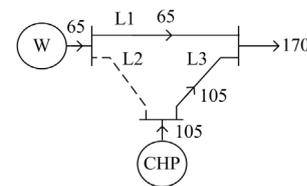
Attached Fig. A1 Nodal susceptance matrix forming schematic diagram of improved DC power flow algorithm considering line reconstruction

附录 B

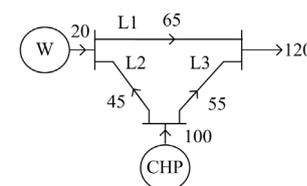
文献[21]对弃风原因展开分析, 本文以三节点系统为例进行简单说明。该系统风电预测功率取 70 MW, 线路 L1、L2、L3 电抗分别取 0.1 p.u.、0.1 p.u.、0.2 p.u., 各线路传输功率上限分别取 65 MW、65 MW、120 MW, 热发电机组最小电出力下限取 100 MW, 负荷如附图 B1 所示。通过计算可得 3 种场景的风电上网功率及各支路传输功率, 已在附图 B1 中标出。



(a) 场景1: 弃风由热发电机组热电耦合约束引起



(b) 场景2: 弃风由线路传输功率上限引起



(c) 场景3: 弃风由两种原因同时引起

附图 B1 三节点算例系统图

Attached Fig. B1 Three nodes example system diagram

场景 1: 热电机组运行在最小电出力下限, 机组无调峰裕度, 并且线路 L1 传输功率未达上限, 弃风量为 60 MW, 弃风原因为热电机组“热电耦合”约束;

场景 2: 当线路 L2 因检修、故障或其他原因退出运行, 由于线路 L1 传输功率的限制, 风电最大上网功率为 65 MW, 同时为满足系统较高的负荷要求, 热电机组实际电出力需高于电出力下限, 此时弃风量为 5, 弃风原因为线路传输功率上限;

场景 3: 热电机组无调峰裕度, 同时线路 L1 传输功率达到上限, 弃风量为 50 MW, 此时弃风由两种原因同时引起。

参考文献

- [1] XU J, XIAO Z, LIN Z, et al. System bias correction of short-term hub-height wind forecasts using the Kalman filter[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2021, 6(4): 473-481.
- [2] ZHANG Z, WANG C, LÜ H, et al. Day-ahead optimal dispatch for integrated energy system considering power-to-gas and dynamic pipeline networks[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2021, 57(4): 3317-3328.
- [3] 王卓群, 刘蕾, 马平. 考虑顺序性弃风惩罚的电力系统经济调度[J]. *广东电力*, 2020, 33(6): 59-65.
WANG Zhuoqun, LIU Lei, MA Ping. Optimal economic dispatching of power system considering sequential wind abandonment punishment[J]. *Guangdong Electric Power*, 2020, 33(6): 59-65.
- [4] 李瑜, 孙东磊, 王明强, 等. 火电机组灵活性改造与输电网规划多阶段联合决策方法[J]. *全球能源互联网*, 2021, 4(4): 344-352.
LI Yu, SUN Donglei, WANG Mingqiang, et al. Multi-stage joint planning decision-making for transmission network and thermal power unit flexibility reformation[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2021, 4(4): 344-352.
- [5] 白斌, 韩明亮, 林江, 等. 含风电和光伏的可再生能源场景削减方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(15): 141-149.
BAI Bin, HAN Mingliang, LIN Jiang, et al. Scenario reduction method of renewable energy including wind power and photovoltaic[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(15): 141-149.
- [6] 国家能源局. 国家能源局 2022 年一季度网上新闻发布会文字实录[EB/OL]. [2022-02-26]. http://www.nea.gov.cn/2022-01/26/c_1310445390.htm.
National Energy Administration. Transcript of the online press conference of national energy administration in the first quarter of 2022[EB/OL]. [2022-02-26]. http://www.nea.gov.cn/2022-01/26/c_1310445390.htm.
- [7] ERDIWANSYAH, MAHIDIN, HUSIN H, et al. A critical review of the integration of renewable energy sources with various technologies[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2021, 6(1): 37-54.
- [8] 周强, 汪宁渤, 何世恩, 等. 高弃风弃光背景下中国新能源发展总结及前景探究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(10): 146-154.
ZHOU Qiang, WANG Ningbo, HE Shien, et al. Summary and prospect of China's new energy development under the background of high abandoned new energy power[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(10): 146-154.
- [9] 林芝羽, 李华强, 苏韵掣, 等. 计及灵活性承载度的电网评估与扩展规划方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(5): 46-57.
LIN Zhiyu, LI Huaqiang, SU Yunche. Evaluation and expansion planning method of a power system considering flexible carrying capacity[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(5): 46-57.
- [10] 赵博石, 胡泽春, 宋永华. 考虑 N-1 安全约束的含可再生能源输电网络结构鲁棒优化[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(4): 16-26.
ZHAO Boshi, HU Zechun, SONG Yonghua. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(4): 16-26.
- [11] XI Z, LIU Y, GAO H, et al. A bi-level corrective line switching model for urban power grid congestion mitigation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(4): 2959-2970.
- [12] 王凯丰, 谢丽蓉, 乔颖, 等. 计及弃风的多锅炉耦合协调供暖优化及经济性分析[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(12): 104-109.
WANG Kaifeng, XIE Lirong, QIAO Ying, et al. Optimization and economic analysis of multi-boiler coupled coordination heating considering abandon wind power[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2021, 42(12): 104-109.
- [13] 帅挽澜, 朱自伟, 李雪萌, 等. 考虑风电消纳的综合能源系统“源-网-荷-储”协同优化运行[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(19): 18-26.
SHUAI Wanlan, ZHU Ziwei, LI Xuemeng, et al. “Source-network-load-storage” coordinated optimization operation for an integrated energy system considering wind power consumption[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(19): 18-26.
- [14] CAO L, WANG Z, PAN T, et al. Analysis on wind

- power accommodation ability and coal consumption of heat-power decoupling technologies for CHP units[J]. Energy, 2021, 231.
- [15] 邵世圻, 戴赛, 胡林献, 等. 计及热网特性的电热联合系统调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(10): 24-30.
SHAO Shiqi, DAI Sai, HU Linxian, et al. Research on heat-electricity combined scheduling method considering the characteristics of the heating network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(10): 24-30.
- [16] 邓佳乐, 胡林献, 李娃娃. 采用二级热网电锅炉调峰的消纳弃风机理及经济性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 41-47.
DENG Jiale, HU Linxian, LI Jijia. Analysis on mechanism of curtailed wind power accommodation and its economic operation based on electric boiler for peak-load regulation at secondary heat supply network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 41-47.
- [17] 宋杰, 张卫国, 李树鹏, 等. 蓄热式电采暖负荷参与风电消纳运行策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 80-87.
SONG Jie, ZHANG Weiguo, LI Shupeng, et al. Research on operational strategy for regenerative electric heating load participating in wind power consumption[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 80-87.
- [18] 王伟臣, 张天宇, 宣文博, 等. 考虑机组组合和网络结构优化的电网规划方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(2): 108-115.
WANG Weichen, ZHANG Tianyu, XUAN Wenbo, et al. Power system planning method considering unit commitment and optimal transmission switching[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(2): 108-115.
- [19] 陆明璇, 周明, 黄瀚燕, 等. 含快速线路筛选的电力系统发输电协同优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(20): 6949-6959.
LU Mingxuan, ZHOU Ming, HUANG Hanyan, et al. Synergetic operational optimization of generation and transmission in power systems with rapid line screening[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(20): 6949-6959.
- [20] 李军徽, 付英男, 李翠萍, 等. 提升风电消纳的储热电混合储能系统经济优化配置[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4547-4557.
LI Junhui, FU Yingnan, LI Cuiping, et al. Economic optimal configuration of hybrid energy storage system for improving wind power consumption[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4547-4557.
- [21] JIANG N, SONG B, CHAI Q, et al. Study on the influence of power grid operation mode on wind power consumption in CHP system[C] // Proceedings of the 3rd International Conference on Information Technologies and Electrical Engineering, December 3-5, 2020, Changde, China: 183-189.
- [22] 张杰, 刘晓明, 孙东磊, 等. 基于混合遗传算法的电力系统源网协同调度[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(7): 20-25, 32.
ZHANG Jie, LIU Xiaoming, SUN Donglei, et al. Synergistic dispatch of power source and electric network in power system based on hybrid genetic algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(7): 20-25, 32.
- [23] 谢华宝, 许丹, 胡林献, 等. 电锅炉配置方式对弃风消纳效果的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 126-133.
XIE Huabao, XU Dan, HU Linxian, et al. Study on effect of electric boiler configuration method on wind power curtailment[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 126-133.
- [24] 汤木易, 罗毅, 胡博, 等. 电热联合调度模型综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(23): 161-175.
TANG Muyi, LUO Yi, HU Bo, et al. A review of the dispatch model of a combined heat and power system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(23): 161-175.
- [25] 朱广萍. 图的连通性的矩阵判别法及计算机实现[J]. 江苏技术师范学院学报(自然科学版), 2009, 15(3): 1-4, 9.
ZHU Guangping. Matrix discriminance and computer algorithm of graph connectivity[J]. Journal of Jiangsu Teachers University of Technology (Natural Science Edition), 2009, 15(3): 1-4, 9.
- [26] MOHAMMED A, TAREK B, ISMAIL M. Power system voltage instability risk mitigation via emergency demand response-based whale optimization algorithm[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 269-282.
- [27] LUO Z, YANG J, XIE H, et al. An optimized dispatch model of combined heat and power system unit commitment considering heating network characteristics[C] // 2019 International Conference on New Energy and Future Energy System, July 21-24, 2019, Macau, China: 12-22.
-
- 收稿日期: 2021-08-19; 修回日期: 2022-01-27
作者简介:
姜楠(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电热联合系统优化调度; E-mail: 291443056@qq.com
胡林献(1966—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统经济调度、区域综合能源系统。E-mail: Linxian_hu@163.com

(编辑 魏小丽)