

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190430

基于二阶锥规划的含大规模风电接入的直流电网储能配置

桑丙玉¹, 姚良忠¹, 李明杨², 艾小猛², 周博², 文劲宇²

(1. 中国电力科学研究院, 江苏 南京 210003; 2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室
(华中科技大学电气与电子工程学院), 湖北 武汉 430074)

摘要: 随着风电规模的快速增长, 其消纳问题日益突出, 直流电网结合储能技术能为风电大规模消纳提供一定技术支持。以典型日下储能日化投资、火电机组运行成本与弃风惩罚成本之和最小为目标, 提出了一种直流电网储能容量规划模型。模型综合考虑了火电机组、电池储能、抽蓄机组的协调运行, 为非凸非线性模型, 无法通过求解器直接求解。采用分段线性化、大 M 法及锥松弛等手段将模型转化为等效的二阶锥规划模型, 可调用 CPLEX 求解器获得模型的全局最优解。最后, 以风电汇集的多端直流系统为例进行仿真验证, 结果表明配置的储能可提高系统风电消纳能力, 降低系统运行成本, 验证了所提模型的有效性。

关键词: 直流电网; 风电接入; 储能; 二阶锥规划; 机组组合

Research on energy storage system planning of DC grid with large-scale wind power integration

SANG Bingyu¹, YAO Liangzhong¹, LI Mingyang², AI Xiaomeng², ZHOU Bo², WEN Jinyu²

(1. China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China)

Abstract: With the rapid growth of wind power scale, the problem of wind power consumption is becoming increasingly prominent, and the combination of DC grid and energy storage technology can provide certain technical support for large-scale wind power consumption. In order to minimize the sum of typical daily energy storage investment, thermal power unit operation cost and wind abandonment penalty cost, this paper proposes a DC power grid energy storage capacity planning model. The model considers the coordinated operation of thermal power units, battery energy storage units and pumped storage units. It is a non-convex nonlinear model, which can not be solved directly by the solver. In this paper, by means of piecewise linearization, large M method and cone relaxation, the model is transformed into an equivalent second-order cone programming model. Finally, the simulation results of the multi terminal DC system with wind power integration show that the energy storage can improve the wind power consumption capacity of the system and reduce the operating cost of the system, verifying the effectiveness of the proposed model.

This work is supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. NYN17201600314).

Key words: DC power grid; wind power integration; energy storage; second-order cone planning; unit commitment

0 引言

进入 21 世纪以来, 全球化石能源紧缺与环境污染问题日益严重, 各国政府开始大力发展新能源。其中风力发电技术发展迅速, 并在电力系统中得到大规模开发利用^[1-2]。然而, 实现风电大规模消纳仍有以下两方面困难: 一方面, 风力发电中心往往远

离负荷需求中心, 大规模风电难以就地消纳^[3-4]; 另一方面, 风电的间歇性与波动性会影响电力系统安全稳定运行, 反调峰特性会进一步增加电力系统调峰压力^[5-7]。

柔性直流输电与储能系统相结合, 是目前实现大规模风电消纳的一种可行方式。柔性直流输电具有大容量、远距离、控制灵活、易于扩展的优点, 构建直流电网后, 可实现多风力发电中心与多负荷中心的远距离互联^[8-10]。储能装置可以进行灵活的

功率吞吐, 通过配置储能, 可以增强电力系统调节能力, 促进风电消纳^[11-12]。但是, 当前储能装置成本较高, 为了在支撑大规模风电消纳的同时提高经济性, 需要对直流电网中储能容量进行合理配置。

储能容量规划问题已有学者进行了广泛研究, 文献[13]针对含新能源的微网孤岛运行场景, 为满足微网运行的经济性和实用性, 建立了基于日前能量调度管理和实时误差控制的储能系统容量配置模型; 文献[14]搭建了储能系统规划及运行的双层优化模型, 考虑了规划与运行的相互影响, 适用于不同类型储能在多种场景下的配置; 文献[15]提出了基于网损灵敏度方差的配电网分布式储能选址定容模型, 可以降低配网网损、降低配网节点电压波动; 文献[16]在风电场不同可调度置信度水平下进行储能系统容量配置, 基于曲线拟合函数建模, 采用遗传算法求解; 文献[17]围绕发电系统能量缺失率等运行指标进行储能容量优化问题建模, 运用粒子群算法进行求解计算。上述文献采用粒子群算法、遗传算法等启发式算法进行储能规划及系统运行等问题的求解, 而限于算法固有缺陷, 往往只能得到模型的局部最优解, 且求解效率低、计算时间长、所得结果不稳定。文献[18]中基于离散傅里叶频谱分析进行了直流配电网中的储能容量规划, 但未考虑网架结构以及直流网络中含节点电压的非线性约束的影响。

本文搭建了综合考虑火电机组、抽蓄机组以及电池储能电站协调运行的含大规模风电接入的直流电网储能容量规划模型, 对于模型中的非凸非线性部分, 采用分段线性化、大 M 法以及锥松弛等手段对原模型进行凸化处理, 将原模型转化为混合整数二阶锥规划模型, 可采用商业求解器 CPLEX 进行高效求解, 并保证求解结果的全局最优。最后以新能源汇集的多端直流系统为例进行仿真分析, 结果表明本文所提方法在求解结果和求解效率上均优于目前常用的启发式算法。

1 直流电网储能容量规划模型

本文所研究问题的对应系统组成如图 1 所示, 火电机组及风力发电场作为该系统的有功电源供给负载, 抽水蓄能机组为系统中已经存在的储能装置, 不再考虑其投资成本, 各机组出力及电池储能电站的出力及容量为待规划对象, 由于实际工程中每个电池储能电站由若干个电池储能单元组成, 本模型中储能系统容量以储能电站的电池储能单元数量表示。由于风电具有较强的波动性而火电机组调节能力有限, 为了尽可能减少弃风, 抽水蓄能机组及电

池储能电站在风电大发的负荷低谷吸收功率, 在风电较弱的负荷高峰提供功率, 以达到维持直流网络功率平衡及节点电压稳定、提高供电质量的目的。

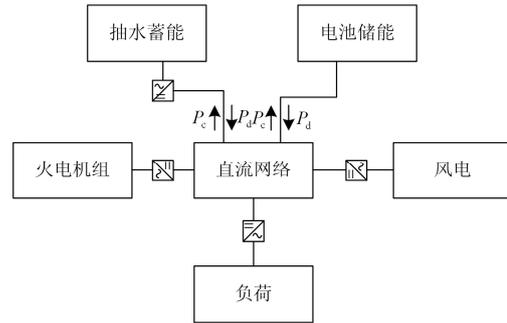


图 1 系统组成

Fig. 1 System composition

1.1 目标函数

以所选取典型日下系统单日成本最低为优化目标, 单日成本由火电机组运行成本、电池储能日化投资成本及弃风惩罚成本组成。

$$\min f = C_{\text{gen}} + C_{\text{inv}} + C_{\text{punish.wind}} \quad (1)$$

式中: C_{gen} 为火电机组运行成本; C_{inv} 为储能日化投资成本; $C_{\text{punish.wind}}$ 为系统弃风惩罚成本。

火电机组运行成本为

$$C_{\text{gen}} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_g} F_{i,C}(P_{i,t}) \quad (2)$$

式中: T 表示一天时长, 为 24 h; N_g 表示火电机组总台数; $F_{i,C}(P_{i,t})$ 为火电机组 i 在第 t 时段的煤耗费用, 实际中火电机组煤耗费用模型为发电功率的二次函数, 如式(4)。

$$F_{i,C}(P_{i,t}) = a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i \quad (3)$$

式中: a_i 、 b_i 、 c_i 为机组固有参数。

储能日化投资成本与储能系统的最大功率及最大容量线性相关, 本文中待规划储能系统为电池储能系统, 各节点储能电站由待规划数量的储能单元组成, 所以储能系统的最大功率与最大容量与规划结果中电池储能单元的规划数量有关, 即

$$C_{\text{inv}} = \sum_{j=1}^k Q_{\text{BS},j} C_{\text{BS}} \quad (4)$$

式中, $Q_{\text{BS},j}$ 为在节点 j 的电池储能单元规划数量; k 为系统节点总数; C_{BS} 为电池储能单元的日化投资成本, 是由储能单元容量、容量成本及预期使用总天数决定的固有参数, 即式(5)。

$$C_{\text{BS}} = \frac{\eta_P P_{\text{BS}} + \eta_E E_{\text{BS}}}{T_{\text{total}}} \quad (5)$$

式中: η_p 、 η_E 为电池储能单元的功率容量成本和能量容量成本; P_{BS} 、 E_{BS} 为电池储能单元的额定功率容量和额定能量容量; T_{total} 为电池储能单元以天数表示的预期使用寿命。

系统弃风惩罚等于全时段弃风总量乘以弃风惩罚系数。

$$C_{punish.wind} = k_{w,penal} \times \sum_{t=1}^T \Delta P_{w,t} \quad (6)$$

式中: $k_{w,penal}$ 为弃风惩罚系数; $\Delta P_{w,t}$ 为 t 时刻弃风量。

1.2 约束条件

1.2.1 电池储能系统约束

(1) 电池储能布点约束

$$0 \leq Q_{BS,m} \leq Q_{BS,m}^{\max} \quad (7)$$

式中, $Q_{BS,m}^{\max}$ 为节点 m 处允许规划的最大储能单元数。

$$E_{BS,m}^{\max} = E_{BS} Q_{BS,m} \quad (8)$$

式中, $E_{BS,m}^{\max}$ 为节点 m 处的电池储能电站额定能量容量。

$$P_{BS,m}^{\max} = P_{BS} Q_{BS,m} \quad (9)$$

式中, $P_{BS,m}^{\max}$ 为节点 m 处的电池储能电站额定功率容量。

(2) 电池储能运行约束

$$0 \leq P_{BS,m,t}^d \leq P_{BS,m}^{\max} \alpha_{BS,m,t}^d \quad (10)$$

$$0 \leq P_{BS,m,t}^c \leq P_{BS,m}^{\max} \alpha_{BS,m,t}^c \quad (11)$$

$$0 \leq \alpha_{BS,m,t}^d + \alpha_{BS,m,t}^c \leq 1 \quad (12)$$

式中: $P_{BS,m,t}^d$ 和 $P_{BS,m,t}^c$ 分别为 t 时刻节点 m 处电池储能电站的放电、充电功率; $\alpha_{BS,m,t}^d$ 和 $\alpha_{BS,m,t}^c$ 为 t 时刻节点 m 处电池储能电站的放电、充电状态, 且为 0-1 变量。

(3) 电池储能能量状态约束

$$\left\{ \begin{aligned} \sum_{\tau=1}^t \left(\eta_c P_{BS,m,\tau}^c - \frac{1}{\eta_d} P_{BS,m,\tau}^d \right) &\leq E_m^{\max} - E_{m0} \\ \sum_{\tau=1}^t \left(\frac{1}{\eta_d} P_{BS,m}^d(\tau) - \eta_c P_{BS,m,\tau}^c \right) &\leq E_{m0} \end{aligned} \right. \quad (13)$$

$$\sum_{\tau=1}^T \left(\eta_{BS,c} P_{BS,m,\tau}^c - \frac{1}{\eta_{BS,d}} P_{BS,m,\tau}^d \right) = 0 \quad (14)$$

式中: $\eta_{BS,c}$ 、 $\eta_{BS,d}$ 分别为储能电站的充、放电效率, E_{m0} 为规划周期内初始时刻的 m 节点的电池储能电站能量状态, 式(13)表示在规划周期内的任一时刻储能电站的能量状态不得为负也不超过其能量容量限制, 式(14)表示经过一个规划周期, 电池储能电站能量状态保持平衡。

1.2.2 抽水蓄能系统约束

(1) 抽蓄电站出力约束

$$P_{PS}^{d,\min} \alpha_{PS,t}^d \leq P_{PS,t}^d \leq P_{PS}^{d,\max} \alpha_{PS,t}^d \quad (15)$$

$$P_{PS}^{c,\min} \alpha_{PS,t}^c \leq P_{PS,t}^c \leq P_{PS}^{c,\max} \alpha_{PS,t}^c \quad (16)$$

$$0 \leq \alpha_{PS,t}^d + \alpha_{PS,t}^c \leq 1 \quad (17)$$

式中: $P_{PS,t}^c$ 、 $P_{PS,t}^d$ 分别为 t 时刻抽蓄电站的充、放电功率; $P_{PS}^{d,\max}$ 、 $P_{PS}^{d,\min}$ 分别为抽蓄电站的最大、最小发电功率; $P_{PS}^{c,\max}$ 、 $P_{PS}^{c,\min}$ 分别为抽蓄电站的最大、最小充电功率; $\alpha_{PS,t}^d$ 和 $\alpha_{PS,t}^c$ 为 t 时刻抽蓄电站的放电、充电状态, 且为 0-1 变量。

(2) 抽蓄电站能量平衡约束

$$\sum_{t=1}^T \left(\eta_{PS,c} P_{PS,t}^c - \frac{1}{\eta_{PS,d}} P_{PS,t}^d \right) = 0 \quad (18)$$

式中, $\eta_{PS,c}$ 、 $\eta_{PS,d}$ 分别为抽蓄电站的充、放电效率。

1.2.3 直流网络运行约束

(1) 直流网络功率平衡约束

$$\sum_{\forall i \in \lambda(j)} P_{br,ij,t} + P_{win,j,t} + P_{g,j,t} + P_{PS,j,t}^d + P_{BS,j,t}^d = P_{L,j,t} + P_{PS,j,t}^c + P_{PS,j,t}^c \quad (19)$$

$$P_{br,ij,t} = V_{j,t} (V_{i,t} - V_{j,t}) / R_{ij} \quad (20)$$

式中: $\lambda(j)$ 表示所有与节点 j 通过线路相连的节点集合; $P_{br,ij,t}$ 为 t 时刻通过线路由节点 i 传给节点 j 的功率; $P_{win,j,t}$ 为节点 j 处风电出力; $P_{g,j,t}$ 为节点 j 处火电机组出力; $P_{L,j,t}$ 为节点 j 处负荷功率, $V_{j,t}$ 与 $V_{i,t}$ 分别为节点 j 和节点 i 的电压。

(2) 节点电压约束

$$V_{i,\min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,\max} \quad (21)$$

式中, $V_{i,\max}$ 、 $V_{i,\min}$ 分别为节点 i 处电压上下限。

(3) 线路容量约束

$$|P_{br,ij,t}| \leq P_{ij,\max} \quad (22)$$

式中, $P_{ij,\max}$ 为节点 i 、 j 间线路的额定传输容量。

(4) 旋转备用约束

$$\bar{P}_{g,t} + P_{wind,t} + P_{BS,t} + P_{PS,t} \geq P_{L,t} + R_t^{\text{up}} \quad (23)$$

$$\underline{P}_{g,t} + P_{wind,t} + P_{BS,t} + P_{PS,t} \leq P_{L,t} - R_t^{\text{dn}} \quad (24)$$

式中: $\bar{P}_{g,t}$ 、 $\underline{P}_{g,t}$ 为考虑爬坡后全网火电机组在 t 时刻的最大、最小出力; R_t^{up} 、 R_t^{dn} 为 t 时刻正、负旋转备用需求对应的备用容量^[19]。

(5) 机组出力约束

$$\begin{cases} P_{g,i,t} \geq \underline{P}_{g,i,t} \geq u_{g,i,t} P_{g,i}^{\min} \\ P_{g,i,t} \leq \bar{P}_{g,i,t} \leq u_{g,i,t} P_{g,i}^{\max} \end{cases} \quad (25)$$

式中: $P_{g,i,t}$ 为 t 时刻第 i 台机组的出力; $\bar{P}_{g,i,t}$ 、 $\underline{P}_{g,i,t}$ 分别为考虑爬坡后该机组 t 时刻的出力上下限; $u_{g,i,t}$ 为 t 时刻该机组的启停状态, 1 表示开机, 0 表示关机; $P_{g,i}^{\max}$ 、 $P_{g,i}^{\min}$ 分别为该机组出力上下限。

(6) 爬坡及启停机功率约束

$$\begin{cases} \bar{P}_{g,i,t} \leq P_{g,i,t-1} + P_{g,i}^{\text{up}} \\ \underline{P}_{g,i,t} \geq P_{g,i,t-1} - P_{g,i}^{\text{dn}} \end{cases} \quad (u_{g,i,t-1} = u_{g,i,t} = 1) \quad (26)$$

$$\begin{cases} \bar{P}_{g,i,t} \leq P_{g,i}^{\text{Startup}} \\ \bar{P}_{g,i,t} \leq P_{g,i}^{\text{Shutdown}} \end{cases} \quad (u_{g,i,t-1} = 0, u_{g,i,t} = 1) \quad (27)$$

式中: $P_{g,i,t-1}$ 为 $t-1$ 时刻第 i 台机组实际出力; $P_{g,i}^{\text{up}}$ 为节点 i 机组上爬坡率; $P_{g,i}^{\text{dn}}$ 为节点 i 机组下爬坡率; $P_{g,i}^{\text{Startup}}$ 、 $P_{g,i}^{\text{Shutdown}}$ 为该机组的启动及停机时最大功率。

(7) 启停机时间约束

$$\begin{cases} T_{i,t,\text{on}} \geq M_{i,\text{on}} \\ T_{i,t,\text{off}} \geq M_{i,\text{off}} \end{cases} \quad (28)$$

式中: $T_{i,t,\text{on}}$ 和 $T_{i,t,\text{off}}$ 为第 i 台机组在第 t 时刻的连续运行时间和连续停运时间; $M_{i,\text{on}}$ 和 $M_{i,\text{off}}$ 为第 i 台机组最小连续运行时间和最小连续停运时间。

1.3 模型的凸化处理

式(1)一式(28)为直流电网储能容量规划模型, 是一个非凸非线性的混合整数规划模型, 无法调用求解器直接求解, 为使模型等效转化为满足 CPLEX 求解条件的混合整数二次规划模型, 需要对原问题进行如下凸化处理。

1.3.1 火电机组煤耗曲线的线性化处理

式(3)中火电机组煤耗费用为发电功率的二次函数, 不便于求解, 为此采用文献[20]中的分段线性化方法, 将火电机组的煤耗成本曲线分割成多段, 用线性函数对每一段加以表示, 如图 2 所示。图中将式(3)中二次函数 $F(P)$ 划分为 N 段, 分段间隔 $\delta = (P_{\max} - P_{\min})/N$, 各段斜率 K_i 由对应分段端点在 $F(P)$ 曲线上的连线斜率确定, 即

$$K_i = [F(P_{\min} + i\delta) - F(P_{\min} + (i-1)\delta)]/\delta \quad (29)$$

则可将煤耗成本 $F(P)$ 等效线性化为

$$f(P) = F(P_{\min}) + \sum_{i=1}^N K_i \Delta P_i \quad (30)$$

$$P = P_{\min} + \sum_{i=1}^N \Delta P_i \quad (31)$$

式中, ΔP_i 为火电机组在各分段对应出力, 且满足 $\Delta P_i \leq \delta$ 。

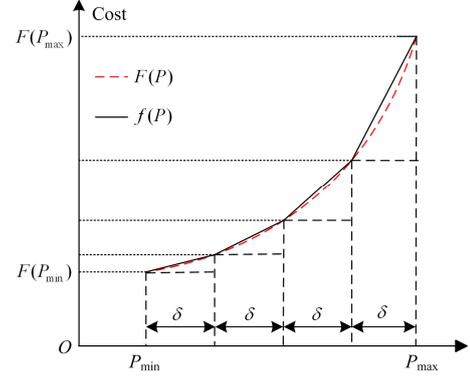


图 2 分段线性化近似成本曲线

Fig. 2 Piecewise linear generation cost

1.3.2 电池储能电站运行约束的大 M 法线性化

式(10)为电池储能电站放电功率约束, 在该约束中由于电池储能电站储能单元数量和运行状态变量相乘, 使模型中出现非线性项而不便于求解。这个非线性项可以进行适当转换并通过大 M 法线性化^[21]。

首先将电池储能电站储能单元规划数量整数变量用二进制表示为

$$Q_{\text{BS},m} = 2^0 x_{m,1} + 2^1 x_{m,2} + \dots + 2^{v_m-1} x_{m,v_m} \quad (32)$$

且

$$0 \leq 2^0 x_{m,1} + 2^1 x_{m,2} + \dots + 2^{v_m-1} x_{m,v_m} \leq Q_{\text{BS},m}^{\text{Max}} \quad (33)$$

$$x_{m,1}, x_{m,2}, \dots, x_{m,v_m} \in \{0, 1\}$$

则式(10)可以表示为

$$\begin{cases} P_{\text{BS},m,t}^{\text{d}} \leq P_{\text{BS}} \left(2^0 \sigma_{m,1,t}^{\text{d}} + \dots + 2^{v_m-1} \sigma_{m,v_m,t}^{\text{d}} \right) \\ \sigma_{m,k,t}^{\text{d}} = \alpha_{\text{BS},m,t}^{\text{d}} x_{m,k} \\ \alpha_{\text{BS},m,t}^{\text{d}} - M(1 - x_{m,k}) \leq \sigma_{m,k,t}^{\text{d}} \leq \alpha_{\text{BS},m,t}^{\text{d}} + M(1 - x_{m,k}) \\ -Mx_{m,k} \leq \sigma_{m,k,t}^{\text{d}} \leq Mx_{m,k} \end{cases} \quad (34)$$

同样的, 式(11)可以表示为

$$\begin{cases} P_{\text{BS},m,t}^{\text{c}} \leq P_{\text{BS},m}^{\text{Max}} \left(2^0 \sigma_{m,1,t}^{\text{c}} + \dots + 2^{v_m-1} \sigma_{m,v_m,t}^{\text{c}} \right) \\ \sigma_{m,k,t}^{\text{c}} = \alpha_{\text{BS},m,t}^{\text{c}} x_{m,k} \\ \alpha_{\text{BS},m,t}^{\text{c}} - M(1 - x_{m,k}) \leq \sigma_{m,k,t}^{\text{c}} \leq \alpha_{\text{BS},m,t}^{\text{c}} + M(1 - x_{m,k}) \\ -Mx_{m,k} \leq \sigma_{m,k,t}^{\text{c}} \leq Mx_{m,k} \end{cases} \quad (35)$$

式中, M 为足够大的正数。

1.3.3 直流网络功率平衡约束的锥松弛

式(19)、式(20)为基于直流网络节点电压表示的节点功率平衡约束, 其中式(20)引入了节点电压的二次项, 是非凸非线性约束, 给模型带来较大求解难度。经观察发现, 该二次等式约束可通过适当的凸化处理转变为二阶锥形式, 进而可采用二阶锥规

划实现模型的求解，凸化过程如下。

(1) 换元变换

令 $Y_{ij,t}$ 表示 t 时刻相邻节点 i 与 j 的节点电压乘积， $X_{j,t}$ 表示 t 时刻节点 j 电压的平方，即

$$V_{i,t}V_{j,t}=Y_{ij,t}, \quad V_{j,t}^2=X_{j,t} \quad (36)$$

则有

$$X_{i,t}X_{j,t}=Y_{ij,t}^2 \quad (37)$$

将式(36)代入到式(20)中得

$$(Y_{ij,t}-X_{j,t})/R_{ij}=P_{br,ij,t} \quad (38)$$

同时与式(21)节点电压约束对应的有：

$$\begin{cases} V_{i,\min}V_{j,\min} \leq Y_{ij,t} \leq V_{i,\max}V_{j,\max} \\ V_{j,\min}^2 \leq X_{j,t} \leq V_{j,\max}^2 \end{cases} \quad (39)$$

(2) 锥松弛

注意到式(37)是一个非凸的二次等式约束，对该约束采用锥松弛方式进行处理，等效变换为如式(40)所示的旋转二阶锥约束形式^[22-23]：

$$X_{i,t}X_{j,t} \geq Y_{ij,t}^2 \quad (40)$$

经上述处理，原模型变换为由式(1)一式(9)、式(12)一式(19)、式(22)一式(35)、式(38)一式(40)表示的混合整数二阶锥规划模型，是 MIQCP 形式的凸规划问题，可通过 CPLEX 求解器求解。

2 算例验证

2.1 算例介绍

为验证本文所提方法的有效性，基于张北柔直工程远期拓扑，在含新能源接入的多端直流系统中所提方法及模型进行仿真验证，直流系统拓扑结构如图 3 所示，其中 1 号节点作为系统的平衡节点，

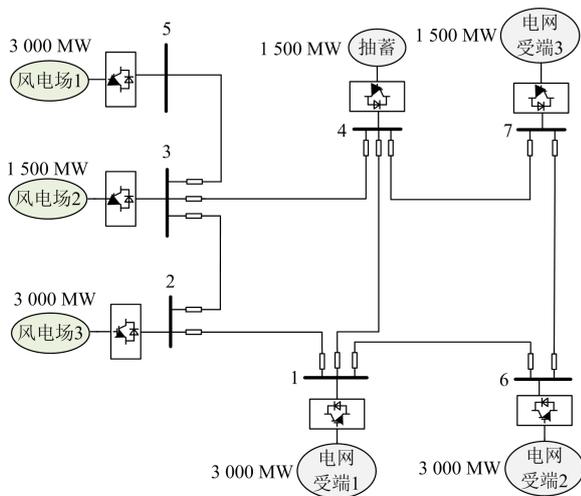


图 3 直流系统拓扑结构

Fig. 3 Topology of DC system

其直流换流站采用定电压控制，其他节点均为 PQ 节点，换流站采用定功率控制。

在该直流电网的 2 号、3 号以及 5 号节点处分别接入容量为 3 000 MW、1 500 MW、3 000 MW 的风电场，在 1 号、6 号以及 7 号节点接入负荷以及火电机组，负荷容量分别为 3 000 MW、3 000 MW、1 500 MW，在 4 号节点存在一个系统固有的抽水蓄能电站，容量为 1 500 MW。

结合模型以及典型日下的风电与负荷曲线，对该直流网络系统进行储能容量配置规划，以分析储能装置在该直流网络中的作用及验证所提方法的正确性，选定节点 2、3、5 进行储能容量配置，单个电池储能单元额定功率容量 50 MW，额定能量容量 150 MW·h，每个节点最大储能单元配置数为 10。系统额定电压 500 kV，节点电压允许范围为 0.95~1.05 p.u.。

系统中火电机组运行及煤耗参数如表 1、表 2 所示。

表 1 火电机组运行参数

Table 1 Operation coefficients of coal-fired power units

机组	节点	$P_{\max}/$ MW	$P_{\min}/$ MW	$M_{\text{on}}/$ h	$M_{\text{off}}/$ h	$P_{G,i}^{\text{pp}}/$ (MW·h)	$P_{G,i}^{\text{dn}}/$ (MW·h)
1	1	900	270	15	8	450	450
2	1	900	270	15	8	450	450
3	1	900	270	15	8	450	450
4	6	700	210	10	5	350	350
5	6	700	210	10	5	350	350
6	6	700	210	10	5	350	350
7	7	500	150	8	4	250	250
8	7	500	150	8	4	250	250
9	7	500	150	8	4	250	250

表 2 火电机组煤耗参数

Table 2 Coefficients of coal-fired power units

机组	节点	a_i	b_i	c_i
1	1	0.13	135	0
2	1	0.13	135	0
3	1	0.13	135	0
4	6	0.221	153	0
5	6	0.221	153	0
6	6	0.221	153	0
7	7	0.383	170	0
8	7	0.383	170	0
9	7	0.383	170	0

系统中抽水蓄机组参数如表 3 所示。

系统支路参数如表 4 所示。

算例所用典型日负荷及风电曲线如图 4、图 5 所示。

表 3 抽蓄机组参数

Table 3 Coefficients of pumping unit

节点	$P_{PS}^{d,max}$ / MW	$P_{PS}^{d,min}$ / MW	$P_{PS}^{c,max}$ / MW	$P_{PS}^{c,min}$ / MW	$\eta_{PS,c}$	$\eta_{PS,d}$
4	1 500	750	1 500	750	0.85	0.9

表 4 支路参数

Table 4 Coefficients of branch

线路号	起始节点	终止节点	支路电阻/ Ω	支路传输容量/MW
1	1	2	2.051 8	3 000
2	1	4	1.563 7	3 000
3	1	6	2.141 4	3 000
4	2	3	0.498 0	3 000
5	3	4	2.041 8	3 000
6	3	5	1.095 6	3 000
7	4	7	1.374 5	3 000
8	6	7	3.436 2	3 000

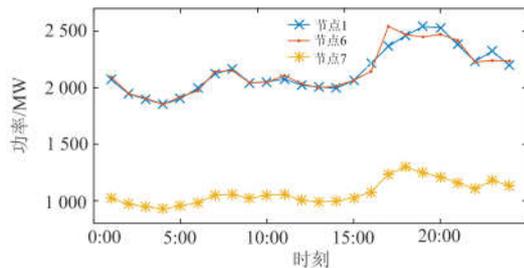


图 4 典型日负荷曲线

Fig. 4 Typical daily curves of loads

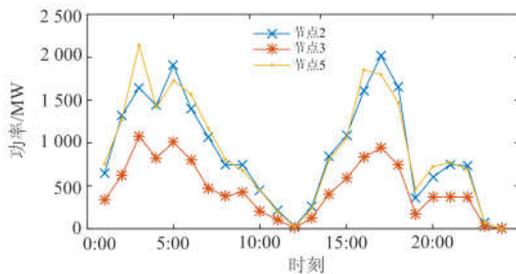


图 5 典型日风电曲线

Fig. 5 Typical daily curves of wind power

2.2 结果分析

2.2.1 不同算法、场景下优化结果对比

为验证本文中直流网络储能规划模型的正确性与有效性, 分别采用本文所提二阶锥规划方式与文献[24]中所用双重粒子群算法进行求解, 并对所得结果进行对比, 如表 5 所示。由于改进双重 PSO 算法为启发式算法, 求解过程易陷入局部最优点, 为更好地说明本文中所提出的采用二阶锥规划方式求解该问题的优越性, 表中改进双重 PSO 算法结果为运行 20 次所得结果中的最优值, 取得最优值时对应的 PSO 收敛曲线如图 6 所示。

表 5 不同算法规划结果比较

Table 5 Comparison of different algorithm planning results

方法	弃风成本/元	储能成本/元	火电成本/元	总成本/元
改进双重 PSO	3.147×10^6	9.71×10^5	2.3121×10^7	2.6020×10^7
二阶锥规划	6.987×10^4	7.46×10^5	1.7692×10^7	1.8508×10^7

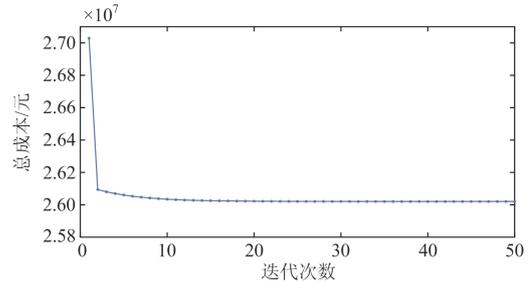


图 6 PSO 目标函数收敛曲线

Fig. 6 Convergence curve of PSO object function

由表 5 可知, 采用二阶锥规划方式所得结果在弃风惩罚、储能投资成本、火电成本上均低于采用改进双重 PSO 算法所得对应成本, 二阶锥规划所得结果相较于改进双重 PSO 所得结果在总成本上降低了 28.9%, 证明采用二阶锥规划方式求解本文中模型较于目前普遍采用的启发式算法结果更优。

另对两种方法进行 20 次独立运行求解所用时间进行记录并对比如表 6 所示, 由于采用双重 PSO 算法求解过程中涉及大量的粒子可行性判别以及潮流计算, 耗时较长, 所以在求解速度上采用二阶锥规划方法有明显优势, 相较于双重 PSO 算法求解速度提高了 98%, 而且求解二阶锥规划模型可直接由内点法得到全局最优解, 不需要考虑启发式算法中常见的陷入局部最优点的问题, 求解结果准确稳定。

表 6 求解时间对比

Table 6 Solution time comparison

算法	双重 PSO	二阶锥规划
求解时间/s	1 072.4	15.64

为了更好地说明本算例中进行储能配置的作用, 采用本文中提出的二阶锥规划模型对有、无电池储能配置两种场景进行了仿真分析, 结果如表 7 所示。

表 7 不同场景下的优化结果

Table 7 Optimization results of different scenarios

电池储能	弃风成本/元	储能成本/元	火电成本/元	总成本/元
无	5.047×10^5	0	1.8477×10^7	1.8982×10^7
有	6.987×10^4	7.46×10^5	1.7692×10^7	1.8508×10^7

由表 7 可知：不配置储能时，由于风电出力具有较强的波动性，为了维持系统中的功率平衡及电压稳定，需要进行较多弃风，带来了较大的弃风成本，同时火电机组出力增加，进而拉高火电成本；配置储能后，通过储能装置的调峰作用，提高了系统对风电的消纳能力，减少了系统弃风，相较于不配置储能的场景降低了 86% 的弃风成本，由于对风电的充分利用，火电机组出力减少，火电成本也随之下降，在计入储能日化投资成本后，配置储能场景下的系统单日总成本仍低于不配置储能场景下的系统单日总成本 2.5%。因此通过合理配置储能装置，该直流系统对风电的消纳能力得到了提高，系统单日总成本降低。

2.2.2 锥松弛校验

由于本文所提模型在求解过程中引入了锥松弛，为了验证松弛所得二阶锥规划模型求解结果的精确性，基于式(37)对求解结果中各线路上的电压关系进行验证，计算公式：

$$\Delta = \left(X_i(t)X_j(t) - Y_{ij}(t)^2 \right) / Y_{ij}(t)^2 \times 100\% \quad (41)$$

由式(41)计算得各时段线路电压关系的锥松弛百分误差如图 7 所示。

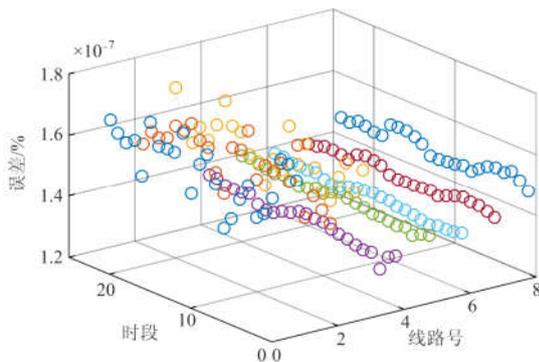


图 7 各时段松弛误差

Fig. 7 Relaxation error of each period

由图 7 可知，各时段各线路的锥松弛百分误差值均在 10^{-6} 以下，可以认为锥松弛误差为 0，即式(40)可以取到等号。

2.2.3 储能参数灵敏度分析

算例中电池储能单元的单位功率容量成本及单位能量容量成本分别为 $\eta_p = 3800$ 元/kW 及 $\eta_E = 550$ 元/kW·h，弃风惩罚系数基准值为 $k_{penal}^w = 500$ 元/MW·h，以此作为基准值，采用本文所提模型分别在不同倍率储能成本与不同倍率弃风惩罚系数下的优化结果如图 8 与图 9 所示。

由图 8 可知，随着储能成本的降低，系统中储能配置容量逐步增加，系统对风电消纳能力增强，

弃风惩罚与火电成本不断降低，说明随着储能技术发展日趋完善，储能成本不断降低，配置储能设备将带来更高的收益。

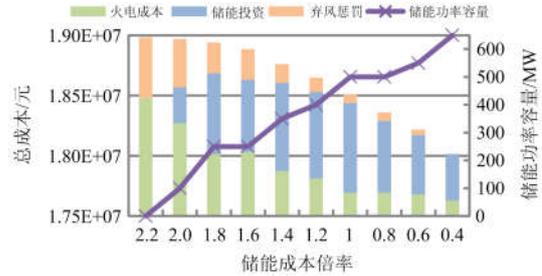


图 8 不同储能成本下的优化结果

Fig. 8 Optimized results of different energy storage costs

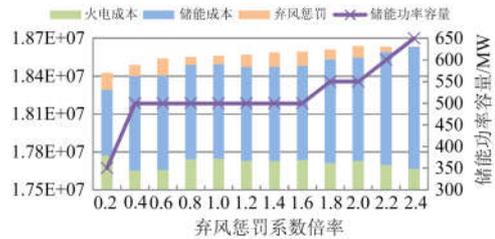


图 9 不同弃风惩罚系数下的优化结果

Fig. 9 Optimized results of different discarding coefficients

由图 9 可知，随着弃风惩罚系数的增大，系统中储能配置容量逐步增加，系统对风电消纳能力增强，直至储能容量增加到不需要再进行弃风，说明较高的弃风惩罚系数下，对配置储能装置的需求更强烈。

3 结论

1) 本文提出了用于求解直流电网储能容量规划的优化模型，模型中综合考虑了常规火电机组、电池储能、抽蓄机组协调运行，对工程实际具有较强的参考意义。

2) 通过分段线性化、大 M 法及锥松弛等手段将原模型由非凸非线性模型等效转化为二阶锥规划模型，采用内点法直接求得全局最优解，本文算例中二阶锥规划所得结果相较于改进双重 PSO 所得结果在总成本上降低了 28.9%，求解速度相较于双重 PSO 算法提高了 98%。

3) 通过合理配置电池储能，本文算例中多端直流系统的风电消纳能力提高，相较于不配置储能的场景降低了 86% 的弃风成本，单日总成本降低 2.5%。

参考文献

[1] 吴雅仪, 陈红坤, 徐坤领, 等. 考虑双时间尺度调度周

- 期的储能最优容量配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(5): 106-113.
- WU Yayi, CHEN Hongkun, XU Kunling, et al. Optimal capacity allocation of energy storage system considering two time scale scheduling cycles[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(5): 106-113.
- [2] 江全元, 龚裕仲. 储能技术辅助风电并网控制的应用综述[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3360-3368.
- JIANG Quanyuan, GONG Yuzhong. Review of wind power integration control with energy storage technology[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3360-3368.
- [3] 汪宁渤, 王建东, 何世恩. 酒泉风电跨区消纳模式及其外送方案[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 82-89.
- WANG Ningbo, WANG Jiandong, HE Shi'en. Cross-border accommodation method and transmission scheme of Jiuquan wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 82-89.
- [4] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-9.
- ZHANG Liying, YE Tinglu, XIN Yaozhong, et al. problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-9.
- [5] 贾成真, 王灵梅, 孟恩隆, 等. 基于风电场集中储能的风储柔性控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 30-37.
- JIA Chengzhen, WANG Lingmei, MENG Enlong, et al. Research on flexible control strategy based on the centralized storage joint with wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 30-37.
- [6] SHE Xu, HUANG A Q, WANG Fei, et al. Wind energy system with integrated functions of active power transfer, reactive power compensation and voltage conversion[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(10): 4512-4524.
- [7] 候佑华, 房大中, 齐军, 等. 大规模风电入网的有功功率波动特性分析及发电计划仿真[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 60-66.
- HOU Youhua, FANG Dazhong, QI Jun, et al. Analysis on active power fluctuation characteristics of large-scale Grid-connected wind farm and generation scheduling simulation under different capacity power injected from wind farms into power grid[J]. Power System Technology, 2010, 34(5): 60-66.
- [8] MAU C N, RUDION K, ORTHS A, et al. Grid connection of offshore wind farm based DFIG with low frequency AC transmission system[C] // 2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 22-26, 2012, San Diego, CA, USA: 1-7.
- [9] 杨方, 张义斌, 葛旭波, 等. 德国海上风电 VSC-HVDC 技术分析[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(10): 63-68.
- YANG Fang, ZHANG Yibin, GE Xubo, et al. Technical analysis of VSC-HVDC in Germany' offshore wind power[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(10): 63-68.
- [10] 姬煜轲, 赵成勇, 李承昱, 等. 含新能源接入的柔性直流电网启动策略及仿真[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(4): 98-104.
- JI Yuke, ZHAO Chengyong, LI Chengyu, et al. Start-up strategy and simulation of flexible DC grid with renewable energy source[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 98-104.
- [11] 韩杏宇, 黎嘉明, 文劲宇, 等. 含多风电场的电力系统储能鲁棒优化配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2120-2127.
- HAN Xingning, LI Jiaming, WEN Jinyu, et al. Optimization for robust energy storage allocation in power system with multiple wind farms integrated[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2120-2127.
- [12] 甘伟, 艾小猛, 方家琨, 等. 风-火-水-储-气联合优化调度策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(增刊 1): 11-20.
- GAN Wei, AI Xiaomeng, FANG Jiakun, et al. Coordinated optimal operation of the wind, coal, hydro, gas units with energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(S1): 11-20.
- [13] 方磊, 牛玉刚, 王思明, 等. 基于日前调度与实时控制的微网储能系统容量配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 102-110.
- FANG Lei, NIU Yugang, WANG Siming, et al. Optimal capacity determination method based on day-ahead scheduling and real-time control[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 102-110.
- [14] 郑乐, 胡伟, 陆秋瑜, 等. 储能系统用于提高风电接入的规划和运行综合优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2533-2543.
- ZHENG Le, HU Wei, LU Qiuyu, et al. Research on planning and operation model for energy storage system to optimize wind power integration[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2533-2543.
- [15] 杜鹏, 米增强, 贾雨龙, 等. 基于网损灵敏度方差的配电网分布式储能位置与容量优化配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 103-109.
- DU Peng, MI Zengqiang, JIA Yulong, et al. Optimal placement and capacity of distributed energy storage in

- distribution system based on the sensitivity variance of network loss[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 103-109.
- [16] 施琳, 罗毅, 涂光瑜, 等. 考虑风电场可调度性的储能容量配置方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 120-127, 134. SHI Lin, LUO Yi, TU Guangyu, et al. Energy storage sizing method considering dispatchability of wind farm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(5): 120-127, 134.
- [17] 程世军, 张粒子. 风力发电系统中储能容量的优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(3): 71-75. CHENG Shijun, ZHANG Lizi. Energy storage capacity optimization for wind power generation system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2015, 27(3): 71-75.
- [18] 李文, 陈海东, 崔战涛, 等. 基于离散傅里叶频谱分析的直流配电网储能规划配置方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 92-98. LI Wen, CHEN Haidong, CUI Zhantao, et al. A configuration method of energy storage device in DC distribution network based on discrete Fourier spectrum analysis[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 92-98.
- [19] WOOD A J, WOLLENBERG B F. Power generation, operation and control[M]. New York: Wiley, 2003.
- [20] 宋艺航, 谭忠富, 李欢欢, 等. 促进风电消纳的发电侧、储能及需求侧联合优化模型[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 610-615. SONG Yihang, TAN Zhongfu, LI Huanhuan, et al. An optimization model combining generation side and energy storage system with demand side to promote accommodation of wind power[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 610-615.
- [21] 刘健辰, 刘山林. 基于二阶锥松弛和 Big-M 法的配电网分布式电源优化配置[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2604-2611. LIU Jianchen, LIU Shanlin. Optimal distributed generation allocation in distribution network based on second order conic relaxation and big-M method[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2604-2611.
- [22] FARIVAR M, LOW S H. Branch flow model: relaxations and convexification—part I[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2554-2564.
- [23] 张艺镨, 艾小猛, 方家琨, 等. 基于极限场景的两阶段含分布式电源的配网无功优化[J]. 电工技术学报, 2018, 33(2): 380-389. ZHANG Yipu, AI Xiaomeng, FANG Jiakun, et al. Two-stage reactive power optimization for distribution network with distributed generation based on extreme scenarios[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(2): 380-389.
- [24] 李整, 谭文, 秦金磊. 一种用于机组组合问题的改进双重粒子群算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 189-195, 26. LI Zheng, TAN Wen, QIN Jinlei. An improved dual particle swarm optimization algorithm for unit commitment problem[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 189-195, 26.

收稿日期: 2019-04-17; 修回日期: 2019-10-23

作者简介:

桑丙玉(1983—), 女, 高级工程师, 研究方向为储能规划配置和运行控制技术; E-mail: sangbingyu@epri.sgcc.com.cn

姚良忠(1961—), 男, 教授级高级工程师, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析及大型风电场并网技术; E-mail: yaoliangzhong@epri.sgcc.com.cn

李明杨(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为含新能源电力系统储能规划. E-mail: frank_li@hust.edu.cn

(编辑 姜新丽)