

基于储能技术的高比例风电电力系统优化策略与运行特性研究

王绎舜

中国矿业大学电气工程学院 江苏徐州 221116

摘要: 高比例风能与太阳能等可再生能源接入电力系统, 因其波动性和随机性, 显著增加了系统运行中实时功率平衡的难度。储能系统作为一种灵活的能量存储与调节装置, 能够根据需求实现充放电, 被视为保障系统功率实时平衡的有效手段。然而, 由于储能系统的高成本, 大规模部署会显著提升系统的运行费用。针对这一问题, 本文以风火储联合系统为研究对象, 在综合考虑电力系统经济性和可靠性指标的基础上, 深入探讨了供给侧低碳化转型背景下联合系统的运行机制及优化配置策略。本文构建了包括火电运行成本最小化调度模型、弃风与失负荷双层优化模型、储能容量配置模型以及系统单位发电成本模型在内的多层次优化框架, 并结合数学规划与遗传算法进行求解与验证。通过分析系统功率波动的多项统计指标及不同情景下的成本构成, 本文提出了兼顾经济性与可靠性的功率平衡方案, 为可再生能源与储能系统的协同优化提供了重要参考。

关键词: 风电与火电协调运行; 储能优化; 电力系统; 弃风量优化; 遗传算法

引言

随着全球范围内低碳经济和碳中和目标的推动, 可再生能源, 特别是风能和太阳能的高比例接入, 正在迅速改变电力系统的运行格局。然而, 由于这些能源的波动性和随机性, 电力系统在实时功率平衡方面面临着前所未有的挑战。这种不平衡不仅会影响系统的稳定性, 还可能导致弃风、失负荷等问题, 从而降低电力系统的经济性和可靠性^[1]。

本文以风火储联合系统为研究对象, 结合电力系统的运行经济性和可靠性目标, 提出了一套系统化的优化框架。通过构建火电运行成本最小化调度模型、弃风与失负荷双层优化模型、储能容量配置模型等, 分析了不同情景下系统的功率波动特性及其对成本的影响。此外, 本文结合数学规划与遗传算法等多种优化方法, 探讨了供给侧低碳化转型背景下, 风电、火电与储能协同运行的最优配置方案。研究结果可为实现可再生能源高比例接入电力系统的经济性和可靠性优化提供理论支撑和实践参考。

1. 系统基本模型

1.1 火电机组数学模型

1.1.1 火电机组运行成本模型

火电机组的运行成本通常由以下几个部分构成:

$$D_1 = D_{11} + D_{12} + D_{13} \quad (1)$$

式中: D_1 为火电机组总供电成本, D_{11} 为火电机组能耗成本, D_{12} 为火电机组运行维护成本, D_{13} 为碳捕集成本。

火电机组的能耗成本与机组的出力和能效系数密切相关, 通常通过以下公式计算:

$$D_{11} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_G} a_i (P_{Gi}^t)^2 + b_i P_{Gi}^t + c_i^t \quad (2)$$

其中, a_i , b_i , c_i 分别为第 i 台火电机组的发电系数, P_{Gi}^t 为第 i 台火电机组在 t 时刻的出力, T 为调度周期数量, 值为 6。NG 为火电机组的数量, 值为 3。

运行维护成本通过以下公式计算:

$$D_{12} = \alpha_1 D_{11} \quad (3)$$

式中: α_1 为火电机组运行维护系数, 根据要求, 取值为 0.5。

碳捕集成本为火电机组运行中不可忽视的一部分^[2]。碳捕集成本通过以下公式进行计算:

$$D_{13} = \sum_{t=1}^T \frac{P_G^t \beta}{\gamma} \quad (4)$$

式中: P_G^t 为火电机组在 t 时刻的出力总和; β 为火电机组碳排放系数; γ 为碳捕集单价。

1.1.2 火电机组约束条件

火电机组的运行需满足一定的功率约束, 确保机组的

安全和稳定运行。功率约束的公式如下：

$$p_{Gi}^{t \min} \leq P_G^t \leq p_{Gi}^{t \max} \quad (5)$$

其中， $P_{Gi, \min}$ 为火电机组在时段 t 的最小出力功率约束； $P_{Gi, \max}$ 为火电机组在时段 t 的最大出力功率约束。

1.2 风电机组数学模型

1.2.1 风电机组供电成本模型

风电机组的供电成本模型如下所示：

$$D_2 = \sum_{t=1}^T \alpha_2 p_{WT}^t \quad (6)$$

式中： D_2 为风电机组供电成本； α_2 为风电机组运行维护系数；为时刻风电机组的出力总和。

1.2.2 风电出力约束

电机组在实际运行情况中会受到风电机组出力约束、功率爬坡约束、功率旋转备用约束等相关的约束条件，但在本文中不考虑风电的相关约束，因此在此本文未对风电的相关约束条件进行建模。

1.3 储能数学模型

1.3.1 储能运行建模

为减少能源转换而造成能量损失，只有当风火供电小于负荷时，储能开始放电，题目中未考虑储能的充电问题，因此本文定义储能装置的放电启停条件为：

$$S_{EC}^{out} = \begin{cases} 1, & p_{Gi}^t + p_{WT}^t < p_{load}^t \\ 0, & p_{Gi}^t + p_{WT}^t \geq p_{load}^t \end{cases} \quad (7)$$

式中： S_{EC}^{out} 为电池储能装置放电启停状态（1 代表放电，0 代表不放电）； p_{Gi}^t 为 t 时段火电机组的总出力； p_{WT}^t 为 t 时段风电机组的总出力； p_{load}^t 为 t 时段负荷总需求。

1.3.2 储能供电成本模型

$$D_3 = D_{31} + D_{32} \quad (8)$$

式中： D_3 为储能供电成本； D_{31} 为储能建设投资成本； D_{32} 为储能维护成本。

$$D_{31} = \frac{P_E \varphi}{YS} \quad (9)$$

式中： P_E 为储能建设容量； φ 为单位储能建设投资； Y 为储能全寿命周期运行年限； S 为储能每年运行天数。

$$D_{32} = \sum_{t=1}^T \alpha_3 p_e^t \quad (10)$$

式中： α_3 为储能维护系数， p_e^t 为储能在 t 时刻的充放电功率。

1.4 弃风损失模型

1.4.1 弃风量计算

结合相关研究，本文定义的弃风量计算公式如下：

$$P_{out} = p_{WT} + p_{Gi} + p_E - p_{load} \quad (11)$$

式中： P_{out} 为弃风量， P_{WT} 为风电机组出力， P_{Gi} 为火电机组出力， P_E 为储能出力， P_{load} 为负荷需求。

1.4.2 弃风损失模型

弃风损失由弃风量与单位弃风惩罚构成，其公式具体如下所示：

$$D_4 = \alpha_4 p_{out} \quad (12)$$

式中： D_4 为弃风损失成本， α_4 为弃风损失单位系数。

1.5 失负荷损失模型

1.5.1 失负荷定义

定义：由于发电容量短缺或其他原因导致系统无法满足负荷供应。

1.5.2 失负荷损失模型

$$p_{in} = p_{load} - p_{WT} - p_{Gi} - p_E \quad (13)$$

式中： p_{in} 为失负荷量， p_{WT} 为风电机组出力， p_{Gi} 为火电机组出力， p_E 为储能出力， p_{load} 为负荷需求。

$$D_5 = \alpha_5 p_{in} \quad (14)$$

式中： D_5 为失负荷损失成本， α_5 为失负荷损失成本系数。在实际计算中，若 p_{in} 为正数，此时系统则发生失负荷；若 p_{out} 为正数，系统则发生弃风现象；若 p_{in} 为 0，系统功率则处在实时平衡状态，即不弃风也不失负荷。

2. 无风电接入时火电最小成本运行分析

本文设以火电运行成本最低为目标，其目标函数与约束条件如下所示：

$$\min D_1 \quad (15)$$

目标函数由式 (1)–(5) 组成；约束条件主要包括火电机组的处理约束；具体模型内容请参考第一章。

求解结果如下表 1 所示，其中火电机组供电成本单位为万元，碳捕集成本单位为元 / 吨：

表 1 火电机组供电成本结果表

碳捕单价	数学规划	遗传 1	遗传 2	遗传 3	遗传 4	遗传 5
0	298	304	298	299	315	305
60	375	382	376	377	392	382
80	401	408	402	403	418	408
100	427	434	427	428	444	434

采取数学规划方法得到的火电机组出力曲线，如图 2 所示：

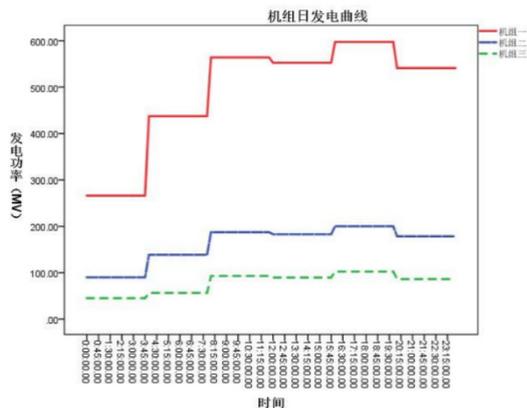


图 2 火电机组日发电计划曲线

系统总供电成本为：

$$D = D_1 \tag{16}$$

有题目可得，系统单位供电成本的计算公式为：

$$D'' = \frac{D}{P_{load}} \tag{17}$$

式中： D'' 为系统单位供电成本，单位为万元； P_{load} 为在此场景下的系统总用电量。

系统单位供电成本，其中单位供电成本为（万元 / MW），请参考表 2，如下所示：

表 2 系统单位供电成本

碳捕成本 (元/t)	火电运行成本	碳捕成本	总发电成本	单位供电成本
0	298	0	298	0.3
60	298	77	375	0.4
80	298	103	401	0.4
100	298	129	427	0.4

参考文献：

- [1] 董旭柱, 华祝虎, 尚磊, 等. 新型配电系统形态特征与技术展望 [J]. 高电压技术, 2021,47(09):3021-3035.
- [2] 杜刚, 赵冬, 梅刘鑫. 计及风电不确定性优化调度研究综述 [J]. 中国电机工程学报 :1-21. (网络首发)
- [3] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望 [J]. 中国电机工程学报, 2022,42(08):2806-2819.
- [4] 温正, 孙华克. MATLAB 智能优化算法, 北京: 清华大学出版社, 2017 年 9 月, 160-165.

作者简介：

王绎舜, (2004—) 男, 汉族, 山东日照人, 本科, 研究方向: 电力系统自动化)