

储能在风火联合电力系统中的容量优化研究

欧阳思荣, 唐 玥, 宁新玉, 莫宏敏*

吉首大学数学与统计学院, 湖南 吉首

收稿日期: 2023年5月29日; 录用日期: 2023年6月16日; 发布日期: 2023年8月7日

摘 要

随着科技的发展和进步, 以风力为基础的可再生能源开始崭露头角, 逐渐替代传统发电并在社会上得到广泛应用。大规模风电并网给电力系统安全稳定运行带来了新的挑战, 储能系统在提高风电接入能力方面具有广阔的应用前景, 然而储能的高容量成本制约了风火联合电力系统的发展。本文在考虑风电出力波动性和火电机组运行约束的基础上, 研究了储能在风火联合电力系统中的优化配置策略。在失负荷损失尽可能小的前提下, 通过合理配置储能容量, 平抑风电场输出功率的波动性, 使得风火联合电力系统和储能系统的发电总成本达到最优, 从而提高整个系统的运行经济效率。

关键词

风电并网, 风火联合, 容量优化配置, 失负荷损失, 经济最优化

Research on Capacity Optimization of Energy Storage in Wind and Fire Combined Power Systems

Sirong Ouyang, Yue Tang, Xinyu Ning, Hongmin Mo*

College of Mathematics and Statistics, Jishou University, Jishou Hunan

Received: May 29th, 2023; accepted: Jun. 16th, 2023; published: Aug. 7th, 2023

Abstract

With the development and progress of science and technology, wind based renewable energy began to emerge, gradually replacing the traditional power generation and widely used in society. Large-scale wind power grid-connection has brought new challenges to the safe and stable opera-

*通讯作者。

tion of the power system. The energy storage system has a broad application prospect in improving the access capacity of wind power. However, the high capacity cost of energy storage restricts the development of wind-fire combined power system. Based on the consideration of wind power output volatility and thermal power unit operation constraints, this paper studies the optimal allocation strategy of energy storage in wind-fire combined power system. Under the premise that the loss of load is as small as possible, the output power volatility of wind farm is suppressed by rational allocation of energy storage capacity, so that the total power generation cost of wind-fire combined power system and energy storage system can be optimized, so as to improve the economic efficiency of the whole system.

Keywords

Wind Power Grid-Connection, Wind-Fire Combination, Capacity Optimization Configuration, Loss of Load Loss, Economic Optimization

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着人们生活质量的提高, 社会用电量逐年增加, 据国家能源局 1 月 25 日发布的 2021 年全国电力工业统计数据显示, 截至 2021 年 12 月底, 全国发电装机容量约 23.8 亿千瓦, 同比增长 7.9%。其中, 风电装机容量约 3.3 亿千瓦, 同比增长 16.6%, 在大力发展新能源发电的国家政策下, 电网调频、调峰需求增大, 风力发电作为目前技术最成熟的可再生和清洁能源发电技术之一, 其具有投资周期短等特点。然而风能是一种天然能源, 具有间歇性和波动性, 将风力发电并网后会给整个电力系统的功率、电压和稳定性带来诸多不利的影 响, 难以满足电力系统稳定的供电需求, 这严重影响了风力发电的质量。将储能技术引入风力发电系统, 调节储能系统使其快速有效地改善风电场的输出、平滑输出功率, 可以将并网的风电出力波动限制在允许范围内, 能够很好地解决风电大规模并网的问题。

据调查表明, 截至 2019 年底, 全球已投运储能项目累计装机规模为 183.1 GW, 同比增长 1.2%; 国内已投运储能项目累计装机规模为 32.3 GW, 占全球 18%。在此基础上, 到 2024 年储能市场规模将扩大 3 倍。2019 年, 我国电化学储能技术取得了重要进展, 累计装机规模为 1592.7 MW 占全国储能规模总额 4.9%, 同比增长了 1.5% [1]。

本文旨在研究火力和风力联合发电, 保证发电系统稳定运行的基础上, 研究如何选取储能系统的储能容量, 才能保证整个电力系统发电的稳定性, 保证用户的用电需求, 并实现发电成本的最优化, 从而提高风火联合发电的经济效率。

2. 问题提出

待研究系统包含火电、风电、储能和负荷, 火电机组 3 台、装机容量 1050 MW; 某日风电、负荷归一化功率(1.0 p.u.风电对应其装机容量, 1.0 p.u.负荷对应最大负荷功率), 风电渗透率(最大风电功率与最大负荷功率之比)递增可能造成系统弃风、失负荷, 影响系统功率平衡。

定义: 系统单位供电成本 = 系统发电总成本/系统总负荷电量, 发电总成本 = 火电成本 + 风电成本 + 损失成本 + 储能成本, 其中:

1) 火电成本包括运行成本、碳捕集成本，其中火电运行成本由运行维护成本和发电煤耗成本构成，发电煤耗与其出力关系： $F = aP^2 + bP + c$ ， F 为机组煤耗量(kg/h)， P 为机组出力/MW；运行维护成本按照 0.5 倍煤耗成本考虑，碳捕集成本取决于碳排放量及碳捕集单价，采用 2020 年陕西榆林能源集团横山煤电有限公司火电机组数据。火电机组相关参数见表 1，参照陕西地区动力煤价设置煤价为 700 元/t。

Table 1. Related parameters of thermal power units
表 1. 火电机组相关参数

技术参数	机组 1	机组 2	机组 3
机组最大技术出力(MW)	600	300	150
机组最小技术出力(MW)	180	90	45
碳排放量(kg/kW*h)	0.72	0.75	0.79
煤排放系数 c /(kg*h ⁻¹)	786.80	451.21	1049.5
煤排放系数 b /(kg*(MW*h ⁻¹))	30.42	65.12	139.6
煤排放系数 a /(kg*(MW ² *h ⁻¹))	0.226	0.588	0.785

2) 风电成本仅考虑运维成本，相关参数见表 2。

Table 2. Wind power operating cost parameters
表 2. 风电运行成本参数

单位电量运维成本元/kWh
0.045

3) 储能成本由投资成本、运维成本构成，相关参数见表 3。

注：在计算每天成本时，需将投资成本平摊至每天，即平均每天投资成本 = 总投资成本/运行年限/365 天。

Table 3. Energy storage cost parameters (full life cycle of energy storage: 10 years)
表 3. 储能成本参数(储能全寿命周期：10 年)

投资成本		运维成本
单位功率成本(元/kW)	单位功率成本(元/kWh)	单位电量运维成本(元/kWh)
3000	3000	0.05

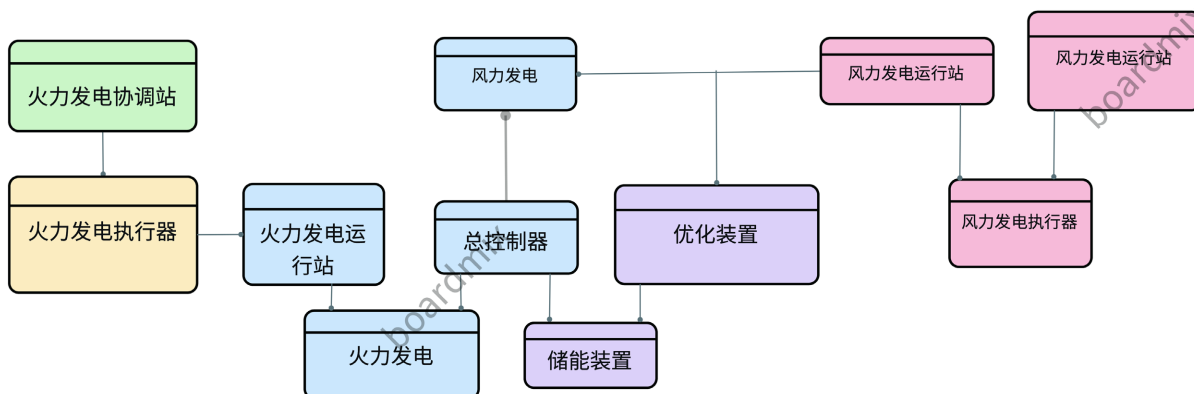


Figure 1. Structure diagram of wind and thermal power combined generation
图 1. 风力和火力联合发电结构图

4) 弃风损失按 0.3 元/kWh 计算, 失负荷损失按 8 元/kWh 计算。

假设系统日负荷功率最大值 900 MW, 单位碳捕集成本为 100 元/t, 分析计算以下问题:

考虑储能系统的接入, 风电装机 900 MW 替代火电机组 2、3 运行时, 失负荷电量为多少? 为不失负荷, 需要配置的最小储能容量将是多少(储能充放电效率 90%)? 如果考虑储能成本(取 60 元/t)、单位碳捕集成本(取 60 元/t), 此时系统的单位供电成本为多少?

风火联合发电系统结构主要包括风力发电和火力发电, 主要发电结构如图 1 所示。

3. 问题分析

根据题目假设, 主要依据风力发电为主, 依靠火力发电以及储能系统提高风力发电的稳定性, 该火力发电的功率主要取决于为目标功率和风力发电的功率的差值大小:

$$\Delta P = P_{mu} - P_{zong} - k\Delta P_{yu} \quad (1)$$

式中: ΔP 为前后火力发电的功率差值; P_{mu} 为风火联合发电系统的功率目标值; P_{zong} 为前一刻发电厂风力火力发电总功率; 为下一时刻风力发电功率的预测值。若 ΔP 为正代表需要提升火力发电, 为负则代表需要降低火力发电。

将储能技术应用于风力发电系统, 可以平抑风电的间歇性, 提高可再生能源的利用率。

电池储能系统因其比能量大、充放电效率高、不受地理条件限制等优势而被广泛应用[3], 实际工程上可根据运行要求和电池性能来选择合适的储能电池类型。本文采用可以在分钟级内实现充放电转换, 能够满足本文控制策略要求的电池储能系统。

在平抑可再生能源输出功率波动的过程中, 储能系统的充、放电功率受限于电池容量及其最大允许充放电功率。因此, 要建立储能系统的数学模型, 用于记录电池储能系统在各个时刻的充放电功率和电池 Soc (荷电状态), 以满足储能系统控制策略对电池特性的要求[4]。为了保证系统的功率稳定, 系统储能的功率计算方式为:

$$P_{jb}(t) = P_f(t) + P_b(t), \quad (2)$$

$$P_b(t) = fd(t)P_{fd}(t) - chd(t)P_{chd}(t), \quad (3)$$

$$\begin{cases} fd(t) + chd(t) = 1, \\ fd(t), chd(t) \in \{0, 1\}. \end{cases} \quad (4)$$

若实际风力发电大于所需则满足:

$$\begin{aligned} Soc(t) &= (1 - \varepsilon)Soc(t-1) + P_{chd}\eta_{chd}\Delta t/E_b, \\ S_{min} &\leq Soc(t) \leq S_{max}. \end{aligned} \quad (5)$$

若实际风力发电小于所需则满足:

$$\begin{aligned} Soc(t) &= (1 - \varepsilon)Soc(t-1) - P_{fd}\eta_{fd}\Delta t/E_b, \\ S_{min} &\leq Soc(t) \leq S_{max}. \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $P_{jb}(t)$ 为 t 时段风储联合系统的输出功率; $P_f(t)$ 为 t 时刻风力发电机组输出功率; $P_b(t)$ 为 t 时刻储能系统的充/放电功率; $chd(t)$ 为 t 时刻储能电池的充电状态; $fd(t)$ 为 t 时刻储能电池的放电状态; $P_{chd}(t)$ 为 t 时刻储能电池的充电功率; $P_{fd}(t)$ 为 t 时刻储能电池的放电功率; E_b 为储能电池容量; $Soc(t)$ 为 t 时刻电荷状态; ε 为电池自放电率; η_{chd} 为储能电池的充电效率; η_{fd} 为储能电池的放电效率; S_{max} 为电池荷电状态的允许上限值; S_{min} 为电池荷电状态的允许下限值。

根据题意, 储能系统控制策略应满足如下情形: 当风电出力小于计划出力值时, 功率缺额由储能电池放电来提供; 当风电出力大于计划出力值时, 多余的输出功率将储存在储能电池里, 以保证联合系统出力实时跟随计划出力。

功率缺额表示为:

$$\Delta P(t) = P_f(t) - P_{ref}(t). \quad (7)$$

当功率缺额为正值时, 储能电池应放电

$$P_{fd}(t) = \min \left\{ -\Delta P(t), P_{f\max}, \frac{[(1-\varepsilon)S(t) - S_{\min}]E_b\eta_{fd}}{\Delta t} \right\}, \quad (8)$$

当功率缺额为负时, 储能电池应充电

$$P_{chd}(t) = \min \left\{ \Delta P(t), P_{c\max}, \frac{[S_{\max} - (1-\varepsilon)S(t)]E_b}{\Delta t\eta_{chd}} \right\}. \quad (9)$$

式中: ΔP 为时段 t 前后火力发电的功率差值; $P_{ref}(t)$ 为风储联合系统在时段 t 的计划发电功率; $P_{f\max}$ 为储能电池允许最大放电功率; $P_{c\max}$ 为储能电池允许最大充电功率。

4. 模型建立与算例求解

4.1. 模型建立

火力发电成本:

火力发电成本主要考虑运行成本和碳捕集成本, 其中火电运行成本由运行维护成本和发电煤耗成本构成, 发电煤耗与其出力关系: $F_{it} = a_i P_{it}^2 + b_i P_{it} + c_i$, 运行维护成本按照 0.5 倍煤耗成本考虑, 碳捕集成本取决于碳排放量及碳捕集单价。可表示为:

$$W_h = 1.5 \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N q F_{it} + \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N m w_i P_{it}. \quad (10)$$

式中: W_h 为火力发电成本; F_{it} 为火电机组 i 在第 t 时段的煤耗量; P_{it} 为火电机组 i 在第 t 时段的发电功率; a_i, b_i, c_i 为火电机组 i 的煤耗系数; q 为电煤价格; m 为单位碳捕集成本。

风力发电成本:

风力发电属于清洁能源, 因此没有耗能成本, 但是该发电方式需要较高昂的日常维护成本以及运行成本, 本文仅考虑风力发电的运维成本, 因此风力发电总成本为:

$$W_f = \sum_{t=1}^T C_f P_{ft}. \quad (11)$$

式中: W_f 为风力发电成本; C_f 为成本系数; $P_{ft}(t)$ 为 t 时刻风力发电机组输出功率。

损失成本:

损失成本主要包括本文考虑风储联合系统按照跟随计划出力的调控模式运行, 在实际运行过程中, 受风电出力的波动以及储能容量的限制, 可能造成风储联合系统无法满足跟踪计划出力的要求。损失成本包括失负荷损失成本和弃风损失成本[3], 可表示为:

$$W_q = d\gamma_1 \left\{ \sum_{t=1}^T H[P_{ref}(t) - P_{fb}(t)]\Delta t \right\} + d\gamma_2 \left\{ \sum_{t=1}^T H[P_{fb}(t) - P_{ref}(t)]\Delta t \right\}, \quad (12)$$

$$H(x) = \begin{cases} x & x > 0, \\ 0 & x \leq 0. \end{cases} \quad (13)$$

式中： W_q 为损失成本； γ_1 为缺电惩罚系数； γ_2 为弃风惩罚系数； d 为系统一年运行的总天数； Δt 为采样时段。

储能成本：

储能成本由投资成本、运维成本构成。其中投资成本与储能电池的容量成正比，运维成本则按初始投资成本的百分比进行估算，储能成本可表示为：

$$W_c = \frac{\lambda(1+\lambda)^n}{(1+\lambda)^n - 1} E_b C_r (1+\delta). \quad (14)$$

式中： W_c 为储能成本； λ 为年利率； δ 为储能电站的运维成本占投资成本的比例； C_r 为单位储能容量成本。

发电总收益：

风火联合储能发电系统的发电总收益主要由发电所获收益和国家补贴构成，本文主要考虑发电所获收益，发电所获收益主要取决于年售电量和单位电量所收电费，年售电量收益如下：

$$W_s = d \sum_{t=1}^T C_e P_{fb}(t) \Delta t. \quad (15)$$

式中： W_s 为年售电量收益； C_e 为国家补贴的上网电价。

以风火储联合系统的总利润最大为目标函数，如下：

$$\text{Max} W_z = W_s - W_h - W_f - W_q. \quad (16)$$

对于风火储联合系统发应该满足的条件：

$$\begin{cases} 0 \leq P_h + P_f \leq P_{mu}, \\ P_{f \min} \leq P_f \leq P_{f \max}, \\ P_{h \min} \leq P_h \leq P_{h \max}, \\ E_{b \min} \leq E_b \leq E_{b \max}. \end{cases} \quad (17)$$

式中： W_z 为发电总利润； P_{mu} 为供电需求功率； $P_{f \min}$ 为风力发电机组的最小发电功率； $P_{f \max}$ 风力发电机组的最大发电功率； $P_{h \min}$ 为火力发电机组的最小发电功率； $P_{h \max}$ 火力发电机组的最大发电功率； $E_{b \min}$ 为储能系统容量的最小值； $E_{b \max}$ 储能系统容量的最大值。

4.2. 模型求解

本文以西北地区风电场每日 15 分钟为一次采样时段，采集各时段的负荷功率与风电功率数据作为计算支撑，储能系统所选用的钠硫蓄电池单位能量成本为 3000 元/kWh，单位电量运维成本为 0.05 元/kWh，储能全寿命周期为 10 年，其容量与最大充、放电功率满足一定的比例关系，电池充、放电效率均取 90%。

当将风电装机 900 MW 直接替代火电机组 2、3 时，用 MATLAB 软件绘制出发电机组的日发电计划曲线，观察系统功率平衡发生的变化情况。在此场景下，以最小发电成本为目标函数，将负荷分配给火电机组 1 和风电机组，用 MATLAB 软件绘制出发电机组日发电计划图。

然后再将储能容量作为一个决策变量，这时系统的发电成本考虑储能成本，以最小发电成本为目标函数，从而求出取最小发电成本时所对应的储能系统需要配置的容量，用 MATLAB 软件绘制出机组日

发电计划图。

将风电装机 900 MW 直接替代火电机组 2、3 时，机组日发电计划曲线如图 2 所示，系统功率平衡发生的变化情况如图 3 所示：

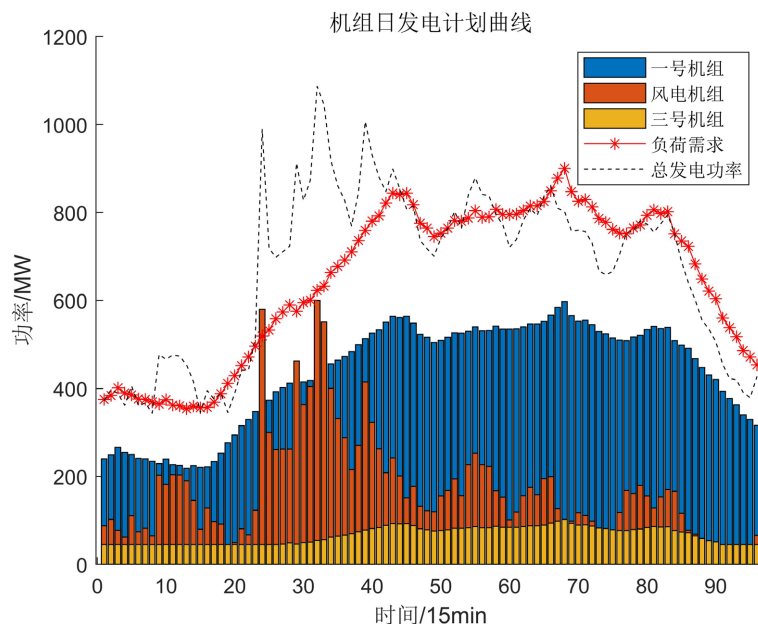


Figure 2. Daily power generation plan curve of the unit

图 2. 机组日发电计划曲线

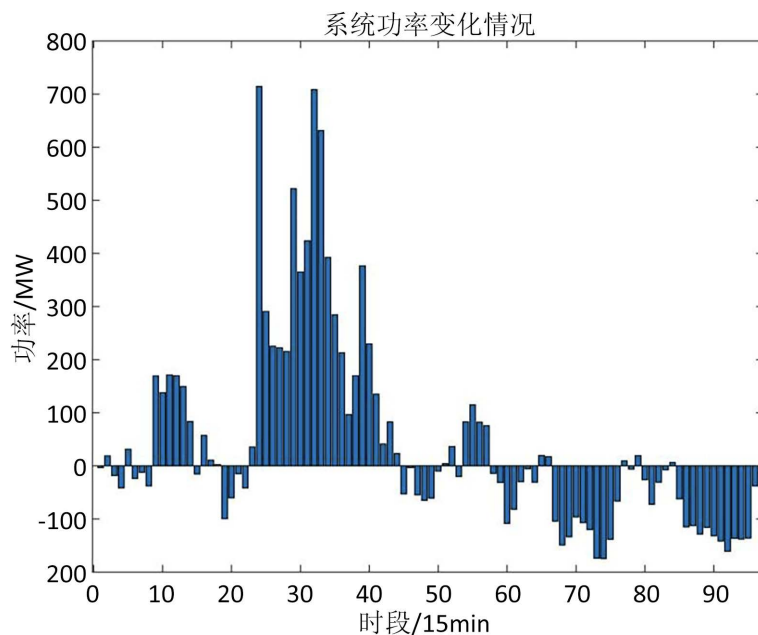


Figure 3. System power changes

图 3. 系统功率变化情况

可以得出：有 44 个时段存在弃风的情况，弃风电量达到 1966.941 MWh，有 52 个时段存在失负荷的情况，失负荷电量达到 941.086 MWh。

此时的系统发电成本 = 火电成本 + 风电成本 + 弃风损失 + 失负荷损失，再以最小成本为目标函数，此时的机组日发电计划曲线如图 4 所示，系统功率平衡变化曲线如图 5 所示：

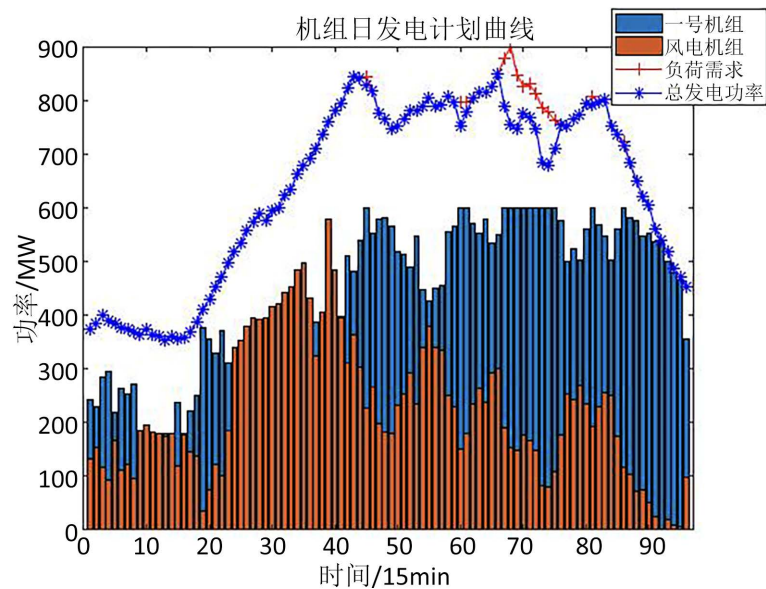


Figure 4. Daily power generation plan curve of the unit
图 4. 机组日发电计划曲线

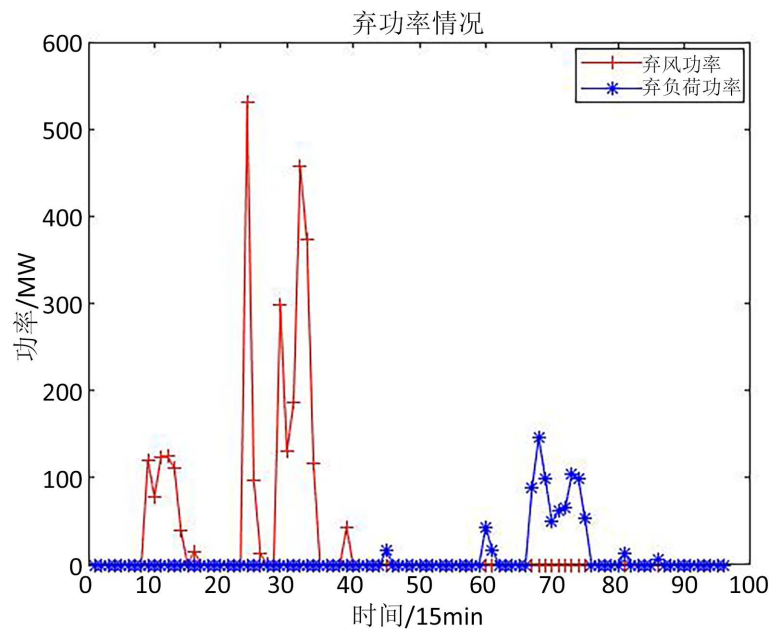


Figure 5. Abandoned power situation
图 5. 弃功率情况

可以得出：有 19 个时段存在弃风的情况，弃风电量达到 714.274 MWh，有 14 个时段存在失负荷的情况，失负荷电量达到 215.541 MWh。单位碳捕捉成本(取 60 元/t)，此时系统单位供电成本如表 4 所示。

进行大规模风电并网后，火电机组按照相关参数的技术出力范围和调峰要求参与系统运行调度时，系统常无法平衡大规模风电并网的大幅出力变化，从而造成大量弃风，限制了风电的消纳。为了充分有

效利用风能这一可再生能源进行发电，需要配置储能系统。考虑采用储能设备对负荷曲线进行削峰填谷，

Table 4. Various costs of system power generation

表 4. 系统发电各项成本

碳捕集单 成本(元/t)	火电机组运行成本 (万元)	碳捕集成本 (万元)	单位供电成本 (元/kWh)	风电运维成本 (万元)	弃风损失		失负荷损失	
					弃风电量 (MWh)	弃风损失 (万元)	失负荷电量 (万元)	失负荷损失 (万元)
60	146.230	42.892	0.265	27.344	714.274	21.428	215.541	172.433

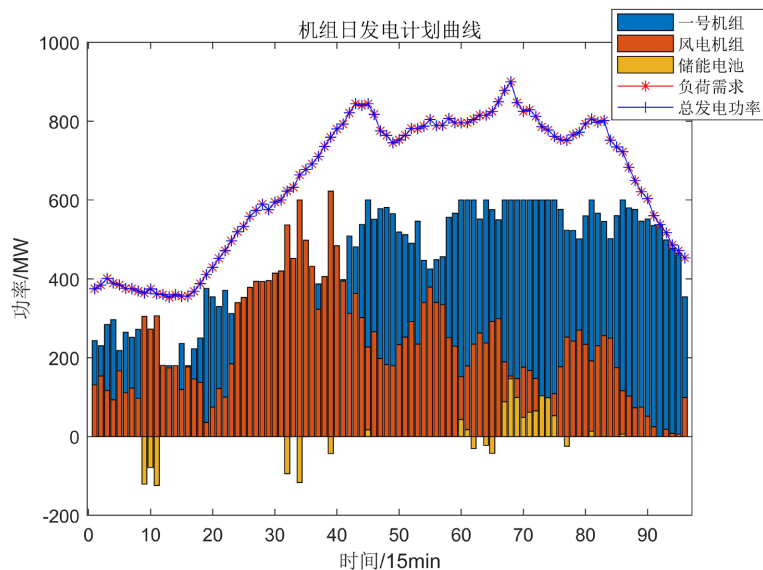


Figure 6. Daily power generation plan curve of the unit after connecting to the energy storage system

图 6. 接入储能系统后机组日发电计划曲线

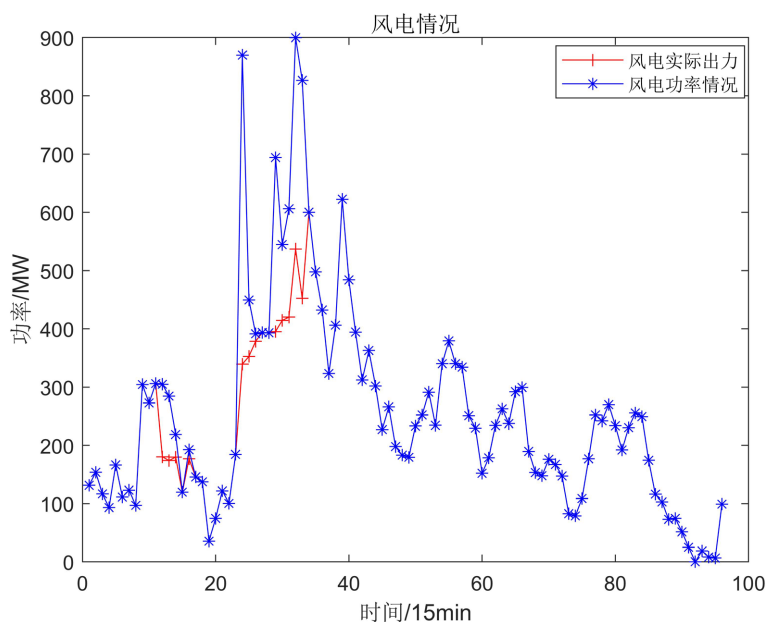


Figure 7. Wind power generation situation

图 7. 风力发电情况

从而将负荷高峰期电网的部分转移到低谷期，即可解决出现的调峰瓶颈以及由此造成的弃风问题[2]。

在接入储能系统后，此时的系统发电成本 = 火电成本 + 风电成本 + 储能成本 + 弃风损失 + 失负荷损失，机组日发电计划曲线如图 6 所示，风电功率情况如图 7 所示。以系统发电总成本最小为优化目标，约束条件考虑系统功率平衡约束。在容量配置方面综合考虑储能所带来的节煤收益、弃风损失和失负荷损失，以系统发电总成本最小为目标函数对储能系统的容量优化配置进行建模，从而得出系统应配置的最小储能容量。使用 MATLAB 软件可以求得：在满足不失负荷条件下，需要配置的最小储能容量为 944.420 MW。

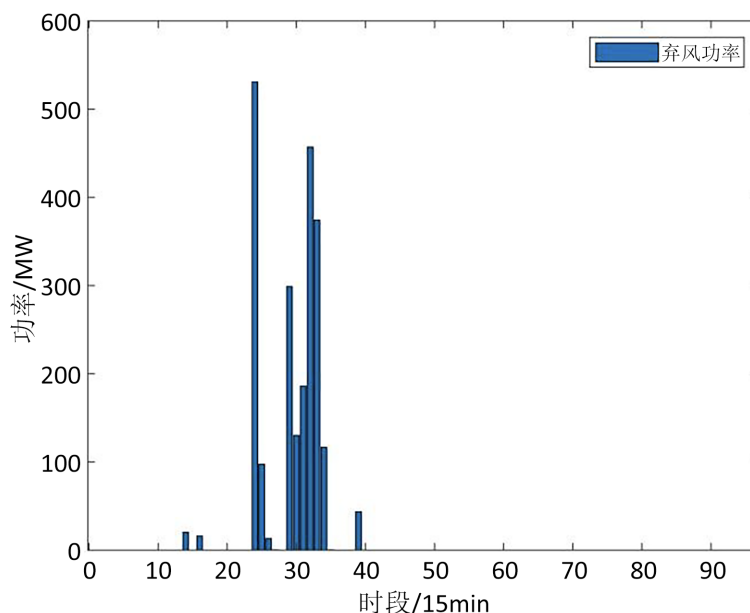


Figure 8. Abandoned wind power
图 8. 弃风功率

通过建模以及代码运行分析，可以得出：有 12 个时段存在弃风的情况(见图 8)，弃风电量达到 570.938 MWh，不存在失负荷的情况。考虑储能成本、单位碳捕捉成本(取 60 元/t)，此时系统单位供电成本如表 5 所示：

Table 5. System related cost statistics for replacing units 2, 3 with 900 MW installed wind power
表 5. 风电装机 900 MW 替代机组 2、3 且配置储能时系统相关成本统计

碳捕集单位成本(元/t)	火电机组运行成本 (万元)	碳捕集成本 (万元)	风电运维成本 (万元)	弃风损失		储能成本 (万元)	单位供电成本 (元/kWh)
				弃风电量 (MWh)	弃风损失 (万元)		
60	147.132	43.021	27.344	570.938	17.128	89.657	0.209

结果分析：储能系统是解决高比例风电消纳问题、提高系统发电的稳定性及可靠性的有效手段。然而负荷曲线与风电出力曲线都会影响储能系统的配置结果。通过配置合适的储能容量，可以减少风电发电的弃风损失和失负荷损失，提高风电发电系统整体的运行经济效率。

5. 结果评价

5.1. 模型的优点

本模型对现实风火联合储能系统考虑的情况比较全面，模型能够较好反映风火储联合系统的各成分

组成, 得出的各部分求解方法较可信。

本模型基于环境污染及化石能源紧缺问题日益严重的时代背景, 提出考虑环境成本及用户端供电需求为约束的风火联合发电调度模型, 对合理调度风电并网功率, 提高风力供电稳定性提出的建议与国家政策同向而行, 具有现实意义。

5.2. 模型缺点

本模型考虑的现实问题较多, 可能求解存在一定困难。

本模型仅根据假设提出, 因条件不足, 未对模型进行算例分析及仿真, 可能在现实中存在一定偏差。

本模型是基于现行经济调度下所提出, 但并未考虑火场和风场的初始投资, 模型仍需进一步完善。

6. 结语

本文提出了风火联合储能优化配置发电系统, 以风火储能系统总收益为目标函数, 对风火联合储能系统的储能容量配置的影响因素进行了分析, 在尽量不失负荷损失的情况, 配置合理的储能容量, 使得整个系统的总利润达到最大。算例结果表明, 当损失成本的减少可以弥补储能投资成本的增加时, 风电场才能更好地投资储能系统, 通过合理优化储能系统的容量, 能够在平抑风电功率波动的基础上, 使用储能系统实时协调发电厂内的风电与火电的出力情况, 整体提升发电厂的运行性能, 满足用户端的调度需求, 提高风电场运行经济性。本文提出的风电与火电之间功率分配策略以及储能系统控制策略对于提高风电输送具有一定的参考意义。

基金项目

湖南省大学生创新创业训练计划项目(3501)。

参考文献

- [1] 周喜超. 电力储能技术发展现状及走向分析[J]. 热力发电, 2020, 49(8): 7-12.
<https://doi.org/10.19666/j.rlfed.202002027>
- [2] 高明杰, 惠东, 高宗和, 等. 国家风光储输示范工程介绍及其典型运行模式分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 59-64.
- [3] 欧阳曾恺. 风储联合系统运行特性与控制策略研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 东华大学, 2015.
- [4] 王小蕾, 顾佳, 周佳威. 风储联合系统的储能容量优化配置[J]. 浙江电力, 2018, 37(9): 14-17.
<https://doi.org/10.19585/j.zjdl.201809003>