

基于大规模储能融合蓄热式电锅炉的风电消纳多目标优化控制

李国庆¹, 庄冠群¹, 田春光², 王鹤¹

(1. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 国网吉林省电力有限公司 电力科学研究院, 吉林 长春 130021)

摘要:我国“三北”地区存在源荷供需矛盾凸出、电网灵活性差的问题。风电场弃风现象严重问题的一个重要原因是热电机组在冬季以“以热定电”的方式运行, 导致其调峰能力下降。利用蓄热式电锅炉供热, 将电能转化为热能, 能够提高风电就地消纳的能力。但采用电极加热的蓄热式电锅炉, 其功率调节受电极机械部件限制, 频繁调节将严重影响蓄热式电锅炉的使用寿命。将具有快速、灵活功率调节能力的电化学储能引入蓄热式电锅炉消纳风电的系统中, 以风电消纳最大和蓄热式电锅炉电极调节次数最小为目标, 提出了一种基于储能融合蓄热式电锅炉的风电消纳多目标优化控制方法。仿真结果表明: 所提方法能够兼顾蓄热式电锅炉系统的弃风消纳与锅炉电极的调节次数, 有效地解决了蓄热式电锅炉功率调节能力与风功率变化不匹配的问题。

关键词:风电消纳; 大规模储能; 蓄热式电锅炉; 优化控制; 多目标优化; 调节次数; 模型

中图分类号: TM 614; TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.10.008

0 引言

风电作为技术最成熟、发展前景最好的新能源发电技术, 已在我国迅速发展^[1-3]。但目前风电弃风问题突出, 一个重要原因是电网以热电机组为主的“三北”地区, 在冬季供暖期间, 机组以“以热定电”的方式运行, 机组强迫出力高, 调峰能力大幅降低。如何消纳风电已经成为现阶段国内外学者的主要研究内容之一。为了解决我国的风电消纳问题, 国家出台了一系列政策措施, 鼓励推广弃风电力供热, 促进电负荷向热负荷的转化, 利用电采暖方式实现电能替代^[4]。此外, 利用储能技术辅助消纳弃风电力也得到广泛的关注^[5-7], 但匹配风力发电的大容量储能由于系统规模、使用灵活性、技术成熟度以及经济成本等方面的制约, 其推广应用受到很大的限制。文献[8]针对“三北”地区的弃风问题提出利用电热锅炉解耦热电机组“以热定电”方式运行, 通过弃风供热来降低煤耗, 提升系统经济性的同时提高机组的调峰能力, 并通过系统经济性分析证明了所提方案具有较好的应用前景。文献[9]分析了风电-热能的运行模式, 考虑储热装置的运行机理, 建立涵盖储热装置的日前调度模型, 对比风电场及热电机组单独运行方式, 验证了蓄热装置在风电消纳领域的有效性。文献[10]提出以风电、蓄热式电锅炉联合

构成供热系统, 结合热负荷需求, 建立风电、蓄热式电锅炉联合调度优化模型, 以北方某实际项目进行仿真, 验证其合理性。

综上所述, 现有的研究对利用蓄热式电锅炉提高风电场风电就地消纳的经济性及调度控制技术进行了较为深入的研究, 并证明了其在风电消纳方面广阔的应用前景^[11-14]。但是, 现有文献并没有考虑蓄热式电锅炉跟踪弃风功率变化的调节能力问题。目前大容量蓄热式电锅炉的电极可以实现功率连续调节, 但是其调节速度和调节次数受电极机械部件的制约。快速、频繁的功率调节将严重损害蓄热式电锅炉的使用寿命。针对上述矛盾, 本文对大规模储能融合蓄热式电锅炉系统消纳弃风的优化控制问题进行了深入研究。以弃风消纳最大和电锅炉调节次数最小为目标建立了储能融合蓄热式电锅炉系统优化运行的控制模型, 提出了储能融合蓄热式电锅炉系统消纳弃风的多目标优化控制策略。本文的研究成果已在我国吉林省白城地区某地建立供热示范工程, 目前已投入运营。

1 储能融合蓄热式电锅炉系统消纳弃风机理

蓄热式电锅炉以其良好的电转热效率及可移时供热的特性, 在火电机组调峰、供热电能替代等方面的应用越来越广泛^[15]。大容量蓄热式电锅炉大多由电极式锅炉搭配水箱蓄热装置构成, 其产生的热量一部分直接供热, 另一部分可作为可移时负荷存入蓄热装置。目前, 蓄热式电锅炉的应用方式主要为负荷低谷时段运行储热、负荷高峰时段停机放热, 这样在削峰填谷的同时降低了购电成本。当蓄热式

收稿日期: 2018-02-07; 修回日期: 2018-08-02

基金项目: 国家电网公司科技发展计划项目 (KY-SG-2016-204-JLDKY); 吉林省优秀青年人才基金项目 (20170520100JH)
Project supported by the Science and Technology Development Plan of State Grid Corporation of China (KY-SG-2016-204-JLDKY) and Jilin Province Outstanding Young Talents Fund Project (20170520100JH)

电锅炉应用于风电消纳、利用风电供热时,为了提高风电消纳能力,需控制电锅炉功率跟踪风电出力。电锅炉通过改变电极在介质中的位置调节输出功率,但频繁调节势必影响电极部件的机械寿命,这一矛盾制约了蓄热式电锅炉在风电供热方面的发展。

电化学储能系统具有电能双向流动、能量时移及四象限有功/无功灵活调节等特点,在利用蓄热式电锅炉进行风电供热时,引入储能装置平抑风电波动,弥补电极调节能力的不足,可有效地改善上述矛盾,提高风电消纳能力。储能融合蓄热式电锅炉系统的体系架构见图 1,系统大多由风电场投资建设,由于风电场大多建设在远离市区供热负荷的位置,新建线路为锅炉直接供电的成本过高,因此本文采用以电网为中介的非直供电模式,即风电场的发电送入电网,蓄热式电锅炉再从电网购电以制热。当风电出力不足无法满足基本热负荷时,系统能够及时从电网购电,增加系统供热的安全可靠性。

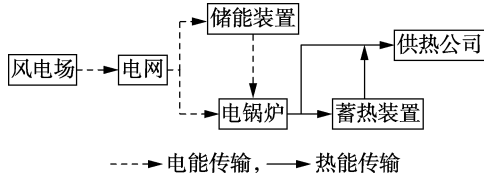


图 1 储能融合蓄热式电锅炉系统的体系架构

Fig.1 Architecture of regenerative electric boiler system integrated with energy storage

2 储能融合蓄热式电锅炉系统优化控制方法

本文模型以储能融合蓄热式电锅炉系统的弃风消纳最大和蓄热式电锅炉电极的调节次数最小为目标函数,综合考虑供热合约、功率平衡、设备状态等约束条件,并采用改进粒子群优化 PSO (Particle Swarm Optimization) 算法进行求解,得出储能融合蓄热式电锅炉系统的最优控制策略。

2.1 多目标优化数学模型

在非直供模式下,以弃风消纳最大为目标的函数为:

$$\max f_1 = \sum_{t=1}^T W_s^t \quad (1)$$

以蓄热式电锅炉电极调节次数最少为目标的函数为:

$$\min f_2 = \sum_{t=1}^T |L_t - L_{t-1}| \quad (2)$$

其中, W_s^t 为 t 时段蓄热式电锅炉和电化学储能消纳的弃风电量; L_t 为蓄热式电锅炉在 t 时段的功率档位; T 为一天内供热时段数,共 96 个供热时段。蓄热式电锅炉的电极可连续调节,本文为了有效地减少其调节次数,对电极的功率进行了限定,将蓄热式电锅炉的功率限定为在有限的几个固定档位间切换。

约束条件包括供热负荷约束、功率平衡约束及设备状态约束等。

a. 供热负荷约束。

储能融合蓄热式电锅炉系统的根本是为供热区客户供热,故系统在单位时段内的供热量不应小于供热公司规定的最低供热量,即:

$$Q_x^t \geq Q_{x,\min} \quad (3)$$

其中, Q_x^t 为 t 时段系统的供热量; $Q_{x,\min}$ 为供热公司规定的最低供热量要求。

b. 功率平衡约束。

功率平衡约束包括电功率平衡及热功率平衡,分别如式(4)、式(5)所示。

$$P_w^t + P_b^t = P_{E,\text{in}}^t + P_h^t \quad (4)$$

$$\begin{cases} Q_h^t = Q_{zg}^t + Q_{G,\text{in}}^t \\ Q_x^t = Q_{zg}^t + Q_{G,\text{out}}^t \end{cases} \quad (5)$$

其中, P_w^t 为 t 时段弃风功率; P_b^t 为弃风功率不能满足供热需求时系统从电网购电的电功率; $P_{E,\text{in}}^t$ 为 t 时段储能系统的充电功率; P_h^t 为 t 时段电锅炉的运行功率; Q_h^t 为 t 时段电锅炉系统产生的热量; Q_{zg}^t 为 t 时段直接供给供热公司的热量; $Q_{G,\text{in}}^t$ 、 $Q_{G,\text{out}}^t$ 分别为 t 时段系统向蓄热装置储存、释放的热量。

c. 设备状态约束。

蓄热罐的储热量应处于其限值之内,即:

$$Q_{\min} \leq Q_c^t \leq Q_{\max} \quad (6)$$

其中, Q_c^t 为 t 时段蓄热罐的储热量; $Q_{\max}$ 为蓄热罐的最大储热量; $Q_{\min}$ 为蓄热罐的最小储热量。

同时,储能系统的荷电状态也应在合适的范围之内,即:

$$\text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC} \leq \text{SOC}_{\max} \quad (7)$$

其中, SOC 为储能系统的荷电状态; $\text{SOC}_{\max}$ 、 $\text{SOC}_{\min}$ 分别为荷电状态的上、下限,一般 $\text{SOC}_{\max}$ 取为 0.8、 $\text{SOC}_{\min}$ 取为 0.2。

d. 电锅炉功率约束。

$$0 \leq P_b^t \leq P_{h,\max} \quad (8)$$

其中, $P_{h,\max}$ 为 t 时段蓄热式电锅炉的功率上限。本文中电锅炉的功率约束等效为:

$$L_{\text{low}} \leq L_t \leq L_{\text{high}} \quad (9)$$

其中, L_{high} 、 L_{low} 分别为档位位置的上、下限。

2.2 基于隶属度函数的多目标优化模型

由于本文考虑的 2 个目标函数的量纲不同,对两目标分别建立隶属度函数,将其等效为对优化结果的满意度,即在约束条件范围内使得综合满意度达到最大。消纳弃风越大,相应的隶属度越大;锅炉档位的调节次数越少,相应的隶属度越大。据此,本文利用升半直线形以及降半直线形分别表示两目标

的隶属度函数,相对应的函数如下:

$$\mu(K) = \begin{cases} 0 & f(K) < K_{\max} - \delta_1 \\ \frac{f(K) - (K_{\max} - \delta_1)}{\delta_1} & K_{\max} - \delta_1 \leq f(K) \leq K_{\max} \\ 1 & f(K) > K_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

$$\mu(P) = \begin{cases} 1 & f(P) < P_{\min} \\ \frac{P_{\min} + \delta_2 - f(P)}{\delta_2} & P_{\min} \leq f(P) \leq P_{\min} + \delta_2 \\ 0 & f(P) > P_{\min} + \delta_2 \end{cases} \quad (11)$$

其中, $\mu(K)$ 为消纳弃风的隶属度函数; $\mu(P)$ 为档位调节次数隶属度函数; $f(K)$ 、 $f(P)$ 分别对应式(1)、式(2)两目标在各时段的函数值; $K_{\max}$ 为以弃风消纳最大为目标时的值; $P_{\min}$ 为以锅炉档位调节次数最小为目标时的值; δ_1 为消纳弃风可接受的伸缩值; δ_2 为锅炉档位调节次数可接受的伸缩值。两目标的隶属度函数如图2所示。

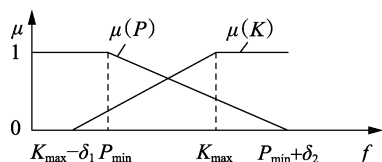


图2 两目标的隶属度函数

Fig.2 Membership functions of two objectives

兼顾消纳弃风电量和锅炉档位调节次数,利用加权求和法将复杂的多目标优化求解等效为单目标优化问题。这样原问题转化为求解满足所有约束条件下的满意度 μ 最大化的单目标非线性优化问题,如式(12)所示,约束条件包括式(3)~(9)。

$$\mu_{\max} = k_1 \mu(K) + k_2 \mu(P) \quad (12)$$

其中, k_1 、 k_2 为各部分的权重系数,且满足 $k_1 + k_2 = 1$ 。

2.3 改进粒子群优化算法

本文采用改进粒子群优化算法求解式(3)~(12)所示的优化问题。粒子群优化算法是于1995年由 Kennedy 和 Eberhart 从鸟类捕食行为中得到启发进而开发的一种智能进化算法。与其他优化算法相比,粒子群优化算法具有无需采用二进制编码、逻辑简单以及对优化函数较灵敏等优势。其求解过程为:首先在可行域内随机产生若干粒子在域内寻找食物,各粒子通过追踪个体最优值 p_{best} 以及种群最优值 g_{best} 来更新个体位置,最终得到可行域内的最优解。标准粒子群优化算法内粒子更新速度和位置的公式分别为:

$$v_i^{k+1} = w v_i^k + c_1 r_1 (p_{\text{best}} - z_i^k) + c_2 r_2 (g_{\text{best}} - z_i^k) \quad (13)$$

$$z_i^{k+1} = z_i^k + v_i^{k+1} \quad (14)$$

其中, k 为迭代次数; w 为惯性权重因子; r_1 、 r_2 为 0~1 之间的随机数; c_1 、 c_2 为学习因子(加速因子); v_i^k 为第 i 个粒子在第 k 次迭代时的速度; z_i^k 为第 i 个粒子在第 k 次迭代时的位置; p_{best} 为粒子找到的个体最优解; g_{best} 为粒子找到的群体最优解。

标准粒子群优化算法的收敛速度快、效率高,但存在精度低、较依赖初始值的设定的缺点,迭代至后期收敛速度降低,很容易造成局部收敛的现象进而导致准确性降低。为了改善这些缺陷,本文做了如下的改进。

a. 采用动态惯性权重 w 。

$$w(k) = w_{\text{start}} - (w_{\text{start}} - w_{\text{end}}) \left(\frac{k}{T_{\max}} \right)^2 \quad (15)$$

其中, w_{start} 、 w_{end} 分别为 w 的初始值和结束值,本文仿真中两值分别设置为 0.9 和 0.4; k 和 $T_{\max}$ 分别为当前迭代次数和最大迭代次数。动态惯性权重 w 的取值较大,因此前期变化缓慢,能够提高算法的全局搜索能力,随着迭代过程的进行, w 的变化速度加快,算法的局部优化能力大幅度提升。

b. 改进学习因子 c_1 、 c_2 。

学习因子的取值等效为粒子间信息交流能力的强弱,其值不宜设置得太大或太小。一般情况下, c_1 、 c_2 的取值范围为 0~4,通常取 $c_1 = c_2 = 2$ 。考虑学习因子对算法迭代求解的影响,本文采用一种线性调整方法改进 c_1 、 c_2 的取值,即:

$$\begin{cases} c_1 = 2.5 - \frac{1.5k}{T_{\max}} \\ c_2 = 1 + \frac{1.5k}{T_{\max}} \end{cases} \quad (16)$$

2.4 多目标优化模型的求解步骤

多目标优化模型的求解流程如图3所示,具体步骤如下:

a. 利用改进粒子群优化算法分别求解以风电消纳最大、档位调节次数最少为目标时的解,得到 $K_{\max}$ 及 $P_{\min}$;

b. 在步骤 a 的基础上,将两目标进行一定程度的伸缩,确定 δ_1 、 δ_2 ,从而确定隶属度函数;

c. 将多目标优化等效为求解以满意度最大为目标的目标单目标优化问题,综合考虑各约束条件,采用改进粒子群优化算法求解目标函数,最后得到系统的最优控制方式。

3 仿真分析

3.1 风电场数据分析

我国吉林西部某风电场在 2015—2016 年供热期的风电出力及弃风功率分别如图4、图5所示。

从图中可以看出,我国吉林地区在冬季供热期

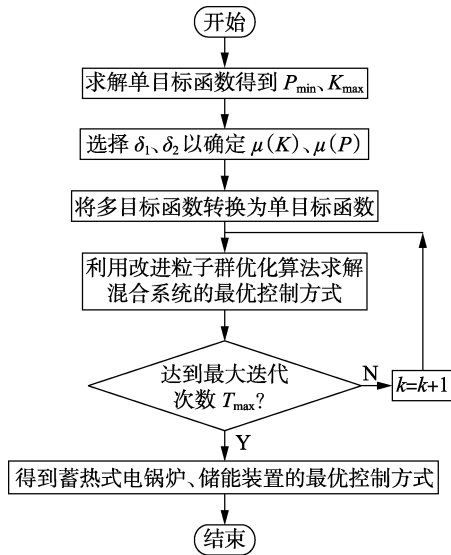


图 3 多目标优化模型的求解流程

Fig.3 Flowchart of solving multi-objective optimization model

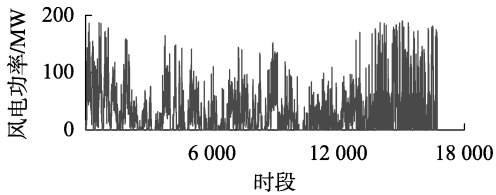


图 4 整个供热期 15 min 级风电出力

Fig.4 Wind power output per 15 minutes in whole heating period

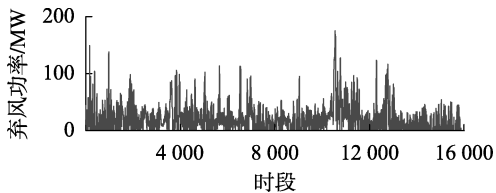


图 5 整个供热期 15 min 级弃风功率

Fig.5 Abandoned wind power output per 15 minutes in whole heating period

存在严重的弃风问题,探究高效的消纳弃风方法刻不容缓。统计供热期内弃风数据得到弃风出力概率如表 1 所示。

表 1 供热期内弃风出力概率

Table 1 Probability of abandoned wind power output in heating period

弃风出力/MW	概率/%	弃风出力/MW	概率/%
[0,10]	42	(40,50]	6
(10,20]	19	(50,60)	3
(20,30]	15	60	6
(30,40]	9		

由表 1 不难发现,弃风功率在 10 MW 以下的概率最大,高弃风功率出现的概率较小,风电极端出力的概率很低,更多波动位于 30 MW 以下,共占整个出力概率的 76%。根据弃风概率以及供热示范工程的实际情况衡量,本文仿真中风电场建设储热量为

300 GJ、功率为 30 MW 的蓄热式电锅炉。依照示范工程的实际经验,储能容量与电锅炉的容量比设置为 1:10,符合现场实际应用,故本文仿真采用功率为 3 MW、储电量为 3 MW·h 的大规模储能电池组成混合系统,将锅炉的功率按照 5 MW 一个档位分成[0, 5, 10, 15, 20, 25, 30]7 个档位进行优化求解。

3.2 算例分析

为了验证本文所提方法的合理性,本文探究了储能融合蓄热式电锅炉系统的 4 种运行方式进行仿真分析:

- 运行方式 A,传统蓄热式电锅炉两段式运行;
- 运行方式 B,蓄热式电锅炉跟踪弃风出力运行;
- 运行方式 C,蓄热式电锅炉优化控制运行;
- 运行方式 D,储能融合蓄热式电锅炉优化控制运行。

吉林地区供热期约 174 d,按照风电出力的特性以及供热需求一般将其分为三部分:前期(30 d)、末期(30 d)、中期(其余时间)。本文算例数据来源的风电场在整个供热期的日平均弃风电量为 482.69 MW·h,算例日数据取自时间较长、风电出力较均衡的供热中期内与平均水平较接近的一天的弃风数据进行分析(以 15 min 为时间间隔,一天共有 96 个时段)。运行方式 A 下的弃风功率和锅炉功率曲线如图 6 所示。

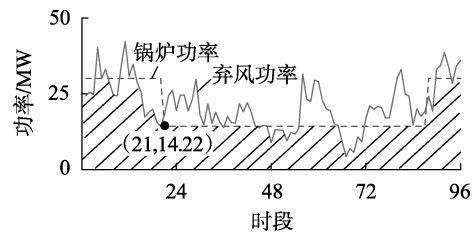


图 6 运行方式 A 下的弃风功率和锅炉功率曲线

Fig.6 Abandoned wind power output and boiler power curves in operation mode A

图 6 中弃风功率曲线与横轴所围面积为全天弃风电量,共计 520.285 MW·h。目前利用蓄热式电锅炉消纳风电的具体运行方式为:每天 22:00 至次日 05:00 电锅炉满功率运行,产生的热量一部分直接供热,另一部分存进蓄热罐,并在全天其他时段放空。锅炉功率曲线如图 6 所示,其中阴影部分的面积为消纳弃风的电量,共为 411.845 MW·h,效率较低。

为了提高锅炉的利用效率,利用蓄热式电锅炉跟踪弃风功率运行具有 2 种运行方式:一种是无优化控制跟踪弃风,即运行方式 B;另一种是利用本文所提方法单独控制电锅炉跟踪弃风运行,即运行方式 C。2 种运行方式下的锅炉功率曲线如图 7 所示。

图 7 中运行方式 B 消纳风电 448.75 MW·h,共调节锅炉电极档位 55 次,目前工程上应用的电极锅

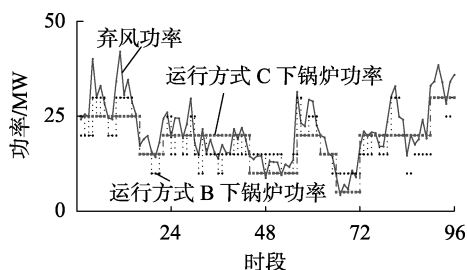


图7 运行方式 B 和 C 下的弃风功率和锅炉功率曲线

Fig.7 Abandoned wind power output and boiler power curves in operation mode B and C

炉虽能够实现功率的连续调节但为了保证机械部件的使用寿命,调节周期一般不少于 30 min,也即全天调节次数不多于 48 次,可见此种运行方式的应用价值不大。运行方式 C 共计消纳弃风 434.95 MW·h,调节锅炉电极档位 8 次,相较于运行方式 A,该运行方式消纳风电的能力有所提升;相较于运行方式 B,该运行方式的锅炉电极档位调节次数也有所下降。但是,由于风力发电的波动性及随机性,弃风现象仍然明显,同时电锅炉运行时为了保证供热负荷可靠也需从电网购买较多电量。

采用改进粒子群优化算法对运行方式 D 进行求解得到储能融合储热系统的运行曲线,如图 8—11 所示。

图 8、图 9 分别为电锅炉的功率及蓄热罐的热量。电锅炉按照设定的 7 个档位跟踪风电运行,全天共调节电极 25 次。本文设定热负荷需求为分段供热,即在 22:00 至次日 05:00 的居民睡眠时段内,

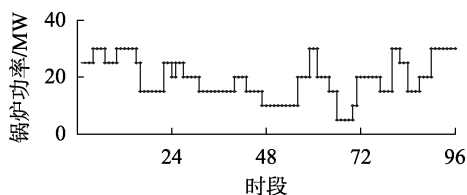


图8 运行方式 D 下的锅炉功率曲线

Fig.8 Boiler power curve in operation mode D

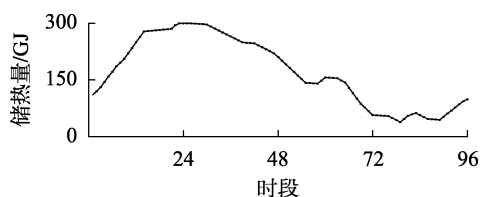


图9 蓄热罐实时储热量

Fig.9 Real-time heat storage capacity of heat accumulator

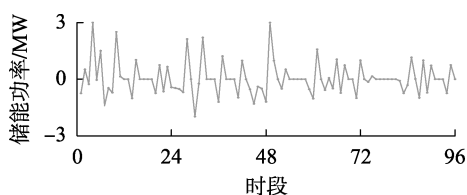


图10 储能电池运行功率

Fig.10 Power of energy storage battery

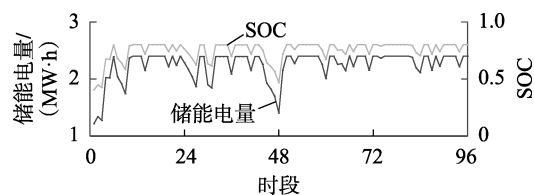


图11 储能电池实时电量及荷电状态

Fig.11 Real-time electric quantity and SOC of energy storage battery

单位时段供热不能低于 50 GJ,折算为电功率为 13.9 MW·h,其余时段供热不低于 75 GJ,折算为电功率为 20.85 MW·h。当锅炉功率不足以满足最低热负荷(时段 48—55、66—79)时,蓄热罐释放热量,此时蓄热罐内的储热量下降;当锅炉功率能够满足热负荷(时段 1—14、80—83)时,蓄热罐储热,罐内的储热量升高。

图 10、图 11 分别为储能电池运行功率及储能电池储电量和荷电状态。当锅炉运行功率高于弃风功率(时段 24—27、44—48)时,储能电池的功率小于 0,在满足储能电池荷电状态的前提下电池放电以补充电量的不足,储电量下降;当弃风功率大于锅炉运行功率(时段 10、11、85、86)时,储能功率大于 0,在满足荷电状态的前提下电池充电,储电量上升。

图 12 为运行方式 D 消纳风电的情况。由于储能系统的接入,电锅炉跟踪弃风运行的能力进一步提升,混合系统共消纳弃风电量 465.71 MW·h,比运行方式 A 多消纳弃风电量 53.865 MW·h,比运行方式 B 多消纳弃风电量 16.96 MW·h,比运行方式 C 多消纳弃风电量 30.76 MW·h,风电消纳能力得到提升。

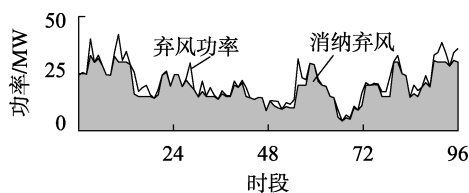


图12 运行方式 D 消纳风电情况

Fig.12 Abandoned wind power output of operation mode D

由于风电出力的不确定性较大,供热期内不同日期,系统消纳弃风的水平将随着弃风出力的波动而上下浮动。表 2 给出了 3 个不同日期的系统运行情况,虽然消纳弃风电量以及锅炉电极的调节次数会随着弃风出力的波动而变动,但结果是一致的,本文所提方法能够在消纳弃风的同时降低锅炉电极的调节次数。本文选择的是供热中期的典型数据,能够在一定程度上代表整个供热期弃风的平均水平,为了进一步衡量一个供热周期内系统消纳弃风的水平,以 1 月 14 日的仿真结果作为基准,评估系统的运行效果。吉林地区冬季供热期内由于供热前期及末期风电出力相较于供热中期略小,供热温度也相

对较低,故系统消纳弃风电量以及供热收益将有所降低,本文按照供热前、末期消纳弃风电量与供热收益相较于中期均降低 30% 估算,运行方式 A 下整个供热期消纳弃风 $6.4 \times 10^4 \text{ MW} \cdot \text{h}$,运行方式 C 下整个供热期消纳弃风 $6.8 \times 10^4 \text{ MW} \cdot \text{h}$,运行方式 D 下整个供热期消纳弃风 $7.3 \times 10^4 \text{ MW} \cdot \text{h}$,比运行方式 A 提升了 14.06%,比运行方式 C 提升了 7.35%,说明运行方式 D 较大程度地提升了弃风应用于供热的比例。运行方式 D 下锅炉电极调节次数为 25,比运行方式 B 减少了 54.5%,与运行方式 A、C 相比,调节次数虽有所增加但仍在允许的范围内。从结果可以看出,考虑总体满意度,采用本文所提消纳风电的影响方式,能够在消纳弃风和锅炉电极调节次数这 2 个指标之间取得平衡,最大限度消纳弃风的同时,延长了锅炉的使用寿命。

表 2 不同日期的仿真结果

Table 2 Simulative results of different dates

日期	弃风电量/ ($\text{MW} \cdot \text{h}$)	运行 方式	消纳弃风/ ($\text{MW} \cdot \text{h}$)	调节 次数
12 月 7 日	477.240	A	367.650	2
		C	381.720	9
		D	395.410	22
1 月 14 日	520.285	A	411.845	2
		C	434.950	8
		D	465.710	25
3 月 5 日	546.890	A	428.070	2
		C	442.950	8
		D	478.740	26

3.3 经济性分析

同样地,以 1 月 14 日的情况作为基准进行经济性分析。本文中蓄热式电锅炉的建设成本按照 90 万元/MW 进行核算^[16],30 MW 锅炉的建设成本为 2 700 万元。为了保证供热负荷,本文设定每小时供热最低需求为:夜间 7 h 为 50 GJ/h,其余 17 h 为 75 GJ/h。供热价格总共分为 4 种,居民用热价格为 4 元/GJ,行政事业用热价格为 28.3 元/GJ,工业用热价格为 29.8 元/GJ,经营服务用热价格为 31.6 元/GJ。综上,为了方便计算,本文选择供热价格为 15 元/GJ。弃风电力供热运营模式参照我国河北省某风电供暖试点运营模式,即:将最低风电保障小时数以外的增发电量部分用于供暖,上网电价不高于 0.05 元/($\text{kW} \cdot \text{h}$),包括输配电价、政府性基金及附加在内的过网费不高于 0.1 元/($\text{kW} \cdot \text{h}$),风电供暖用电电价总体不超过 0.15 元/($\text{kW} \cdot \text{h}$),即利用弃风电力供热不考虑供电成本。

在运行方式 A 下,算例当天风电场增发电量 418.32 $\text{MW} \cdot \text{h}$ 。蓄热式电锅炉除去消纳的 418.32 $\text{MW} \cdot \text{h}$ 弃风电量外,为了保证供热需求,需要从电网至少购电 33.43 $\text{MW} \cdot \text{h}$,常规购电价格按照 0.42 元/($\text{kW} \cdot \text{h}$) 核算,算例当天购电成本为 1.4 万元,供

热收益为 2.44 万元,蓄热式电锅炉供热系统当天盈利 1.04 万元。考虑供热前、中、后期的收益差异,整个供热期,运行方式 A 的收益为 162.24 万元,在不考虑维护成本的情况下,17 a 可收回初期投资。运行方式 C 除去消纳的 434.95 $\text{MW} \cdot \text{h}$ 弃风电量外,需购电 16.8 $\text{MW} \cdot \text{h}$,算例当天购电成本为 0.71 万元,则全天盈利 1.73 万元,整个供热期的收益为 269.88 万元,10.1 a 可收回投资成本。

运行方式 D 利用储能融合蓄热式电锅炉系统,储能系统的建设成本按照 3 000 元/($\text{kW} \cdot \text{h}$) 核算,3 $\text{MW} \cdot \text{h}$ 储能系统的建设成本为 900 万元,算例当天无需从电网购电即可满足供热需求,全天供热收益为 2.513 万元,整个供热期的收益为 392 万元,考虑风电出力不足无法满足供热负荷的情况存在,供热收益将有所下降,本文按照 10% 比例下浮衡量弃风电力不够的情况,则运行方式 D 在全供热期的收益为 352.8 万元,10.2 a 可收回初期投资,与运行方式 A 比较回收年限有所减少,与运行方式 C 比较,在同样回收年限的前提下,可多消纳大量弃风,在消纳弃风的同时提高了系统的经济效益。1 月 14 日各运行方式的运行情况如表 3 所示。

表 3 各运行方式的运行结果

Table 3 Operation results of each operation mode

运行 方式	消纳弃风电量/ ($\text{MW} \cdot \text{h}$)	弃风供热 占比/%	调节 次数	投资回收 年限/a
A	411.845	91.17	2	17
B	448.750	99.34	55	—
C	434.950	96.29	8	10.1
D	465.710	100	25	10.2

4 结论

本文针对目前利用蓄热式电锅炉消纳风电灵活性差的问题,提出了融入储能系统的解决办法。以储能融合蓄热式电锅炉弃风消纳最大以及电锅炉调节次数最小为目标建立了目标函数,综合考虑了各种约束条件,利用隶属度函数解决了不同目标函数量纲不同的问题,并利用改进粒子群优化算法进行优化求解。仿真结果表明:本文所提优化控制方法能够有效地提高蓄热式电锅炉消纳弃风的利用效率,延长设备的使用寿命,系统经济性也有明显提高,为利用蓄热式电锅炉参与弃风消纳提供了更灵活、经济的运行方法和理论依据。但利用供热中期的典型数据估算投资回报,具有一定的合理性,但也不可避免地存在误差,在下一步的研究过程中,将全面搜集示范工程的全供热周期数据,进行深入的分析。

当前,基于蓄热式电锅炉等的弃风电力供热项目大多应用于示范工程中,并未全面推广。供热成本过高制约了其快速发展。本文所提方法虽然能在

消纳弃风的同时兼顾设备的寿命,提升了经济性,但也只是在现有模式下尽力挖掘其潜力。若要实现跨越式发展,需要进一步促进电力市场机制,探究灵活的电力市场机制参与以降低购电成本,以及引入风电竞价机制鼓励独立个体投资,通过市场化竞争,降低弃风价格,实现电锅炉独自个体的盈利,推动弃风供热产业的发展。

参考文献:

- [1] 张运洲,白建华,辛颂旭. 我国风电开发及消纳相关重大问题研究[J]. 能源技术经济,2010,22(1):1-6.
ZHANG Yunzhou, BAI Jianhua, XIN Songxu. Study on the key issues concerning development and consumption of wind power in China[J]. Energy Technology and Economics, 2010, 22(1): 1-6.
- [2] 孙惠娟,彭春华,易洪京. 大规模风电接入电网多目标随机优化调度[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):123-128.
SUN Huijuan, PENG Chunhua, YI Hongjing. Multi-objective stochastic optimal dispatch of power system with wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 123-128.
- [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 Shien. Cross-border accommodation method and transmission scheme of Jiuquan wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 82-89.
- [4] 国家能源局. 国家能源局综合司关于开展风电清洁供暖工作的通知(国能综新能(2015)306)[EB/OL]. (2015-06-05)[2018-02-07]. <http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201506/t201506151938.htm>.
- [5] 郭壮志,洪俊杰,孟安波. 基于多维度动态协调的大规模并网风电储能容量多指标优化配置策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(2):161-168.
GUO Zhuangzhi, HONG Junjie, MENG Anbo. Multi-index optimization of energy storage capacity configuration based on multi-dimensional dynamic coordination for large-scale grid-connected wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(2): 161-168.
- [6] 严干贵,刘嘉,崔杨,等. 利用储能提高风电调度入网规模的经济性评价[J]. 中国电机工程学报,2013,33(22):45-52.
YAN Gangui, LIU Jia, CUI Yang, et al. Economic evaluation on improving wind power scheduling scale by using energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 45-52.
- [7] 陈谦,陈霄逸,金宇清,等. 基于混合储能的大型风电场优化控制[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):70-76.
CHEN Qian, CHEN Xiaoyi, JIN Yuqing, et al. Optimal control of large-scale wind farm based on hybrid energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 70-76.
- [8] 吕泉,姜浩,陈天佑,等. 基于电锅炉的热电厂消纳风电方案及其国民经济评价[J]. 电力系统自动化,2014,38(1):6-12.
LÜ Quan, JIANG Hao, CHEN Tianyou, et al. Wind power accommodation by combined heat and power plant with electric boiler and its national economic evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 6-12.
- [9] 于婧,孙宏斌,沈欣炜. 考虑储热装置的风电-热电机组合优化运行策略[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):139-145.
YU Jing, SUN Hongbin, SHEN Xinwei. Optimal operating strategy of integrated power system with wind farm, CHP unit and heat storage device[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 139-145.
- [10] 陈守军,辛禾,王涛,等. 风电、蓄热式电锅炉联合供暖调度鲁棒优化模型[J]. 电力建设,2016,37(1):103-109.
CHEN Shoujun, XIN He, WANG Tao, et al. Heating operation scheduling robust optimization model for heat storage electric boiler combined with wind power[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(1): 103-109.
- [11] 邓拓宇,田亮,刘吉臻. 利用热网储能提高供热机组调频调峰能力的控制方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3626-3633.
DENG Tuoyu, TIAN Liang, LIU Jizhen. A control method of heat supply units for improving frequency control and peak load regulation ability with thermal storage in heat supply net[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3626-3633.
- [12] VITTORIO V, FRANCESCO C. Primary energy savings through thermal storage in district heating networks[J]. Energy, 2011, 36(7): 4278-4286.
- [13] DRIES H, LEEN P, LIEVE H, et al. The impact of thermal storage on the operational behavior of residential CHP facilities and the overall CO₂ emissions[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, 11(6): 1227-1243.
- [14] WANG L, SINGH C. Stochastic combined heat and power dispatch based on multi-objective particle swarm optimization[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2008, 30(3): 226-234.
- [15] 孙勇,严干贵,郑太一,等. 电力市场背景下蓄热式电采暖消纳弃风的经济性分析[J]. 储能科学与技术,2016,5(4):532-538.
SUN Yong, YAN Gangui, ZHENG Taiyi, et al. Economic analysis of electrical heating with heat storage using grid integrated wind power[J]. Energy Storage Science and Technology, 2016, 5(4): 532-538.
- [16] 李伟,姜璐. 利用弃风蓄热供暖经济性评价[J]. 农村电气化,2014(9):51-53.
LI Wei, JIANG Lu. Economic evaluation of regenerative heating with abandoned wind[J]. Rural Electrification, 2014(9): 51-53.

作者简介:



李国庆

李国庆(1963—),男,吉林吉林人,教授,博士,主要研究方向为电力系统安全性与稳定性分析、控制与决策、配电系统自动化(E-mail: LGQ@mail.nedu.edu.cn);

庄冠群(1993—),男,吉林长春人,硕士研究生,主要研究方向为新能源消纳可控负荷控制(E-mail: zhuangguanqun701@163.com);

田春光(1970—),男,吉林长春人,教授级高级工程师,硕士,主要研究方向为新能源并网发电及储能技术(E-mail: jlcctiancg@163.com);

王鹤(1983—),男,吉林吉林人,副教授,博士,研究方向为分布式发电、微电网的运行与控制(E-mail: wang_he12@yahoo.com.cn)。

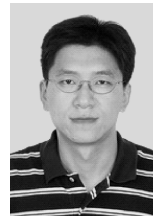
(下转第59页 continued on page 59)

power control method for distributed photovoltaic generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 6-11.

- [17] 沈欣炜,郑竞宏,朱守真,等. 光伏并网逆变器控制参数的 dq 轴解耦辨识策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(4): 38-43.
SHEN Xinwei, ZHENG Jinghong, ZHU Shouzheng, et al. A dq axis decoupling parameter identification strategy for grid-connected inverter controller of photovoltaic generation system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(4): 38-43.
- [18] 徐少华,李建林. 光储微网系统并网/孤岛运行控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 25-33.
XU Shaohua, LI Jianlin. Grid-connected/island operation control

strategy for photovoltaic/battery micro-grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 25-33.

作者简介:



解绍锋

解绍锋(1976—),男,河北定州人,教授,博士研究生导师,研究方向为牵引供电系统分析和电能质量(E-mail: sfxie@swjtu.cn);

方曼琪(1995—),女,江西上饶人,硕士研究生,研究方向为电能质量分析。

Influence of PV generation system accessing to traction power supply system on power quality

XIE Shaofeng, FANG Manqi, XIA Guohua, DAI Chaohua

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: A traction load power supply scheme is proposed, in which the PV (PhotoVoltaic) generation system is used as one of the power sources to supply power together with power system. The PV generation system is accessed into the traction power supply system at 27.5 kV side. The characteristics of traction loads and PV output are analyzed, and the influence of the PV generation system access on power quality is derived. The influences of PV generation system on power quality in different working conditions are simulated, which are verified by the practical load data. Simulative results show that the studied PV access scheme has no influence on three-phase voltage unbalance factor of the power system, and the influences on three-phase harmonic distortion rate and power factor is related to the capacity of the accessed PV system.

Key words: traction power supply system; electric power systems; photovoltaic generation system; power quality

(上接第 52 页 continued from page 52)

Multi-objective optimization control of wind power consumption based on regenerative electric boiler system integrated with large-scale energy storage

LI Guoqing¹, ZHUANG Guanqun¹, TIAN Chunguang², WANG He¹

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Jilin Electric Power Co., Ltd., Changchun 130021, China)

Abstract: There are problems that the contradiction between source supply and load demand is prominent and the flexibility of power grid is poor in “three-north area” of China. And the wind power curtailment of wind farms is serious, one of the important causes is that the thermoelectric units operate in the mode of “determining power generation by heat” in winter, resulting in the reduction of their peak load regulation capacity. Applying regenerative electric boilers for heating and transferring the electric energy into heat energy can improve the local accommodation ability of wind power. However, the power regulation of electrode heating-based regenerative electric boiler is limited by its mechanical components and the frequent adjustment of electrode will seriously affect the service life of regenerative electric boilers. A multi-objective optimization control method of wind power consumption based on regenerative electric boiler system integrated with large-scale energy storage is proposed with the maximum wind power consumption and the minimum regulating times of electrode as its objectives, by introducing the electrochemical energy storage with fast and flexible power adjustment ability into the regenerative electric boiler system to consume wind power. Simulative results show that the proposed method can take both the wind power consumption of regenerative electric boiler system and the regulating times of electrode into account, solving the mismatching problem between the power regulation capacity of regenerative electric boiler and the variation of wind power effectively.

Key words: wind power consumption; large-scale energy storage; regenerative electric boiler; optimization control; multi-objective optimization; regulating times; models