

基于可变误差多面体算法的储能融合电锅炉 提升风电消纳控制技术

兰贞波^{1,2},冯万兴^{1,2},胡军峰³,余佳佳⁴,黎淑娟^{1,2},隗震^{1,2},刘波^{1,2},喻明江^{1,2}

(1. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司),江苏 南京 211000;

2. 国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司,湖北 武汉 430074;

3. 国网湖北省电力有限公司检修公司宜昌运维分部,湖北 宜昌 443002;

4. 国网嘉鱼县供电公司,湖北 嘉鱼 437200)

摘要:储能技术是提高风电-电锅炉-储能系统联合优化运行的关键,能量型和功率型储能系统的混合使用更能满足风电场和电锅炉技术性和经济性的要求。建立了混合储能系统和风电场的数学模型,其中锂电池采用通用受控电压源和定值内阻串联模型,超级电容器采用改进的一阶RC模型,风电模型通过功率解耦法实现对风机有功和无功的解耦控制。以风电场、电锅炉和混合储能系统的技术经济性指标为约束条件,将风电就地消纳能力、电锅炉档位调节次数和储能系统使用寿命列为目标函数,搭建了协同风电和电锅炉多目标优化运行的储能系统控制模型。采用可变误差多面体算法对该模型进行求解,通过某示范工程用算例验证了该方法在优化风电和电锅炉联合运行时的可行性和实用性。在该参数配置下,储能系统能日均提高风电就地消纳率5.36%,降低电锅炉动作次数8次。

关键词:储能;电锅炉;风电就地消纳;可变误差多面体算法;多目标运行

中图分类号:TM 614

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202004022

0 引言

随着风电装机容量的持续增长,在源荷供需矛盾凸显地区,弃风现象时有发生,风电就地消纳能力不足已成为制约风电发展的主要因素^[1-2]。我国吉林省正在推广应用电锅炉制热项目,增加电网的电转热负荷,以促进风电本地消纳。但目前风电-蓄热式电锅炉运行方式单一,受电锅炉功率调节速度、深度、频次及单向调节性能的限制,其风电消纳能力无法得到有效发挥。考虑风电与电锅炉在运行中因可控性差而引发的风电出力与负荷调节间的适配性问题,以及负荷参与电网调峰的调控技术问题,需引入储能系统及柔性控制技术探索解决途径。储能技术具有电能双向流动、能量时移及四象限有功和无功灵活调节等特点,可有效弥补风光发电的随机性和间歇性,提高风光发电接入电网的友好性。储能系统具有快速双向充放电的特性,是风电-电锅炉-储能系统联合优化运行的关键。

当前,应用储能技术协调风电与蓄热式电锅炉的应用研究与示范已受到业界的关注,但仍处于起步摸索阶段。针对储能如何协调风电与电锅炉,实

现源-荷-储的纵向优化调度与运行,达到提高多形态能源交互高效利用以促进高渗透风电就地消纳,同时改善源、荷、储并网节点电能质量等目标,尚存在关键技术问题待研究。在风储协调运行方面,文献[3-5]从平滑风电功率波动效果和系统经济性角度出发研究了储能系统容量的优化配置方法,并通过相应算法得到储能系统最佳的特性参数组合;文献[6-9]依据风电场以及储能系统的功能和工作特性,基于风电功率短期预测技术,提出储能系统运行控制策略,以平抑风电功率波动,改善并网风电场的电能质量和稳定性;文献[10]从储能系统辅助风电场爬坡率角度出发,利用 Gaussian 过程回归预测提出了基于概率预测的储能系统辅助风电场爬坡率控制方法。在风电与电锅炉协调配合方面,文献[11]引入鲁棒随机优化理论,用风电、蓄热式电锅炉组成供热系统,建立了考虑风电不确定性的风电供暖调度优化模型,说明了电锅炉在消纳风电能力上的可行性。在储能系统多目标优化和控制策略方面,文献[12]建立了含风储混合系统的多目标优化模型,采用模糊处理技术和改进组合粒子群优化算法进行求解,并分析了不同因素变化对优化结果的影响;文献[13-14]分析了风热冲突下的热电厂供热问题,并研究了风电-热电机组联合优化运行策略。但目前研究大多侧重于风储协调控制在风电预测、平抑风电波动和协调风电爬坡率的模型或控制策略,很少有学者从混合储能系统控制角度出发,研究风电-电锅炉-储能协调运行的控制策略或方法。

收稿日期:2019-10-08;**修回日期:**2020-02-25

基金项目:国家电网公司总部科技项目(多业态生态开发区可再生能源综合开发与利用技术研究)

Project supported by the Science and Technology Project of SGCC(Research on Comprehensive Development and Utilization Technology of Renewable Energy in Multi-format Ecological Zone)

本文基于上述研究,以东北地区某供热示范工程项目为例,将提升风电就地消纳能力、减少电锅炉档位动作次数和优化储能系统能效及提高寿命为突破点,开展协同风电与蓄热式电锅炉多目标优化运行的控制技术研究,解决风电-电锅炉运行的适配性问题,以指导我国东北某供热示范工程应用。

1 风电-电锅炉-混合储能系统运行机理

1.1 风电-电锅炉-混合储能系统模型

本文研究对象是中广核某风电场的风电-电锅炉-储能系统,该地建成了一定容量电负荷的蓄热式电锅炉消纳风电,并通过配置一定容量的储能系统来协调风电与电锅炉的运行,附录A图A1为该地区风电-锅炉-混合储能系统连接示意图。其由风电、混合储能系统、电锅炉、变压器和大电网组成,其中风电通过变流器和升压变与母线相连,而电锅炉用于消纳风电,储能系统配置有锂电池储能和超级电容器储能,通过储能逆变器接入交流母线,并通过电缆与电锅炉供热站的电气系统连接,实现联合运行。系统配置集中控制器对3类设备的运行状态进行监测,并分析得到不同运行时时刻下的储能系统出力,通过锂电池和超级电容器各自的储能变流器实现不同储能的充放电控制。

由于研究重点在于利用储能出力控制来满足风电消纳及锅炉负荷需求,与蓄热式电锅炉自身复杂运行原理相关性不大,故在处理蓄热式电锅炉模型时以可变功率负荷替代,下节重点介绍储能系统模型和风电模型。

1.2 混合储能系统模型

1.2.1 锂电池等效模型

由于本文在风电-电锅炉-储能联合系统对锂电池储能系统的研究侧重于控制其出力特性及自身的荷电状态SOC(State Of Charge),故忽略电池极化、运行温度与漏电流等因素的影响,采用经典电池模型^[15],将其等效为受控电压源和内阻 R 并联的电路模型。可通过采样电流实现对电池SOC和端电压的监测,同时可利用对该电流正负和大小值的调整来实现对储能系统功率的充放和大小的控制,其数学模型如附录A图A2所示。

该模型下电池放电、充电的端电压满足:

$$V_{\text{batt}} = \begin{cases} E_0 - Ri - K \frac{Q}{Q - i_t} (i_t + i^*) + M \exp(-Bi_t) & \text{放电} \\ E_0 - Ri - K \frac{Q}{i_t - 0.1Q} i^* - K \frac{Q}{Q - i_t} i_t + M \exp(-Bi_t) & \text{充电} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{SOC}_b = 100 \left(A - \frac{1}{Q} \int_0^t i(t) dt \right) \quad (2)$$

其中, V_{batt} 为电池组端电压(V); E_0 为电池组额定初始电压(V); K 为电池极化系数(V/(A·h)); Q 为电池组容量(A·h); i_t 为对采样电流的积分; M 为指数区振幅常量(V); B 为指数区时间常数的倒数(A·h), R 为电池内阻(Ω); i 为电池组回路电流(A); i^* 为电池组回路低通滤波电流(A); A 为锂电池初始SOC; SOC_b 为锂电池的剩余电量。

1.2.2 超级电容器储能模型

超级电容器等效模型有一阶RC模型、三支路模型、Conway模型和传输线模型等,本文采用改进的一阶RC模型,如附录A图A3所示。图中, $R_{\text{ES_sc}}$ 为等效串联电阻; $R_{\text{EP_sc}}$ 为等效并联电阻。该模型由单元串并联组成,超级电容器组的串联数主要由储能变流器直流侧工作电压允许范围决定,并联数主要由储能容量大小决定。对于超级电容器有:

$$\text{SOC}_c = \frac{C_{\text{sc}} U_{\text{sc}}^2 / 2}{C_{\text{sc}} U_{\text{rated}}^2 / 2} = \left(\frac{U_{\text{sc}}}{U_{\text{rated}}} \right)^2 \quad (3)$$

其中, C_{sc} 为超级电容器的容量; U_{sc} 为超级电容端电压; U_{rated} 为超级电容的额定电压; SOC_c 为超级电容器的剩余电量。

定义混合储能系统总SOC如下:

$$\text{SOC}_h = \frac{\text{SOC}_b E_b + \text{SOC}_c E_c}{E_b + E_c} \quad (4)$$

$$E = \sum_{n=1}^N E(n) \quad (5)$$

其中, E_b 和 E_c 分别为锂电池、超级电容器对应的储能容量; N 为储能子模块数; SOC_h 为混合储能系统的剩余电量。

1.3 风电双闭环功率解耦控制模型

由于风机模型中的电机定子端有功和无功的输出存在多阶耦合关系,为模拟风机的出力特性,精确控制其有功、无功输出功率,利用功率解耦法建立了风机模型^[16]。

电机定子经附录A图A4所示的矢量变换后输出有功、无功功率为:

$$\begin{cases} P_1 = u_{m1} i_{m1} + u_{t1} i_{t1} \\ Q_1 = u_{t1} i_{m1} - u_{m1} i_{t1} \end{cases} \quad (6)$$

而转子电压为:

$$\begin{cases} u_{m2} = (R_2 + pa_2) i_{m2} - a_2 \omega_s i_{t2} \\ u_{t2} = (R_2 + pa_2) i_{t2} + a_1 \omega_s \psi_1 + a_2 \omega_s i_{m2} \end{cases} \quad (7)$$

$$a_1 = -L_m / L_1, \quad a_2 = L_2 - L_m^2 / L_1$$

其中,下标1表示定子;下标2表示转子; R_2 为转子电阻; u_{m1} 、 u_{t1} 和 i_{m1} 、 i_{t1} 分别为定子电压和电流在 m 、 t 轴上的分量; ω_s 为发电机的转差角速度; p 为微分算子; L_1 、 L_2 和 L_m 分别为 mt 坐标系下的定、转子等效自感和互感。

2 协调控制模型

2.1 目标函数

多目标协调控制模型的目标函数主要涵盖三部分:电锅炉档位动作次数,风电就地消纳能力,储能系统寿命。具体目标函数如下:

$$\min f = \min (a\Delta T(t) + bP_{\text{dro}}(t) + cP_b(t)) \quad (8)$$

其中, $\Delta T(t)$ 、 $P_{\text{dro}}(t)$ 和 $P_b(t)$ 分别为时刻 t 的电锅炉档位动作次数、风电就地弃风量和锂电池出力值; a 、 b 和 c 为子函数的权重值。总目标函数最大值为1,且目标函数值越小表示优化结果越理想。

(1) 电锅炉动作次数。

考虑到电锅炉在操作过程中的便捷性和经济性,将电锅炉的工作档位动作次数作为目标函数之一,动作次数越少,便捷性和经济性越佳。

$$\Delta T(t) = T_t - T_{t-1} \quad (9)$$

$$T_t = T_{(P_{\text{boil}}(t) - P_{\text{gwind}}(t) - P_h(t))} \quad (10)$$

其中, T_t 为时刻 t 的电锅炉运行档位; T_{t-1} 为时刻 $t-1$ 的电锅炉运行档位; $P_{\text{boil}}(t)$ 为时刻 t 的锅炉功率; $P_{\text{gwind}}(t)$ 为时刻 t 的就地消纳风电功率; $P_h(t)$ 为时刻 t 的混合储能系统总出力; $T_{(P_{\text{boil}}(t) - P_{\text{gwind}}(t) - P_h(t))}$ 为时刻 t 的不同锅炉负载功率对应的锅炉工作档位表。

(2) 风电就地消纳能力。

为兼顾电网正常调度运行能力和清洁能源消纳水平,将风电就地消纳能力最大作为另一个目标函数。在实际运行中,风电就地消纳能力越大表示其就地弃风量越小,消纳效果越好。弃风量表示如下:

$$P_{\text{dro}}(t) = P_{\text{wind}}(t) - (P_{\text{boil}}(t) - P_h(t)) \quad (11)$$

$$P_{\text{gwind}}(t) = P_{\text{boil}}(t) - P_h(t) \quad (12)$$

其中, $P_{\text{wind}}(t)$ 为时刻 t 的风电原始功率。

(3) 储能系统寿命。

混合储能系统的充放电控制直接关系到其使用寿命,而该寿命直接关系到储能应用的经济性。考虑到超级电容器使用寿命较长,而锂电池储能的充放电循环对使用寿命影响大,故以锂电池充放电次数作为衡量混合储能系统的关键参数。

$$P_b(t) = \begin{cases} h(i(t)) & P_b \geq 0 \\ j(i(t)) & P_b < 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$h(i(t)) = E_0 i - Ri^2 - K \frac{Qi}{Q - \int idt} \left(\int idt + i^* \right) +$$

$$Mi \exp(-B \int idt)$$

$$j(i(t)) = - \left[E_0 i - \left(R + K \frac{Q}{i_t - 0.1Q} \right) i^* - K \frac{Qi}{Q - \int idt} \int idt + \right. \\ \left. Mi \exp(B \int idt) \right]$$

$$P_h(t) = P_b(t) + P_c(t) \quad (14)$$

其中, $P_c(t)$ 为时刻 t 的超级电容器的出力值; $P_b \geq 0$ 时表示放电, $P_b < 0$ 时表示充电。

2.2 约束条件

(1) 电锅炉负荷控制约束条件。

电锅炉有一定的调峰能力,在配备了智能负荷控制装置的条件可以参与到电网调度中,运行过程中需要满足电锅炉功率约束条件。

$$P_{\text{gmin}} \leq T_t \leq P_{\text{gmax}} \quad (15)$$

$$\Delta T = \begin{cases} 0 & T_t = T_{t-1} \\ 1 & T_t \neq T_{t-1} \end{cases} \quad (16)$$

其中, P_{gmin} 和 P_{gmax} 分别为蓄热式电锅炉功率的下限和上限值。式(16)说明任意时刻电锅炉的动作次数只能取0或1。

(2) 风电机组出力约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{dro}}(t) \leq P_{\text{wind}}(t) \\ 0 \leq P_{\text{gwind}}(t) \leq P_{\text{wind}}(t) \end{cases} \quad (17)$$

式(17)表明风电机组在 t 时刻的就地弃风量和消纳量应不大于原始风电场出力功率。

(3) 混合储能系统运行约束条件。

混合储能系统运行约束条件包括SOC约束、储能容量约束、单位采样时间段内储能容量变化约束、蓄电池充放电功率约束、蓄电池周期始末能量平衡约束以及充放电状态转换约束。

混合储能系统SOC约束为:

$$\text{SOC}_{\min} \leq \text{SOC} \leq \text{SOC}_{\max} \quad (18)$$

对于混合储能系统有 $\text{SOC}_{\min} = 15\%$, $\text{SOC}_{\max} = 80\%$;对于锂电池有 $\text{SOC}_{\min} = 20\%$, $\text{SOC}_{\max} = 80\%$;对于超级电容器有 $\text{SOC}_{\min} = 10\%$, $\text{SOC}_{\max} = 90\%$ 。

充放电功率约束为:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{dis}}(t) \leq P_{\text{dis}}^{\max} \\ 0 \leq P_{\text{ch}}(t) \leq P_{\text{ch}}^{\max} \end{cases} \quad (19)$$

其中, $P_{\text{dis}}(t)$ 、 $P_{\text{ch}}(t)$ 分别为时刻 t 储能系统的放电功率和充电功率; $P_{\text{dis}}^{\max}$ 、 $P_{\text{ch}}^{\max}$ 分别为放电和充电功率的最大值。

3 模型求解

3.1 可变误差多面体算法

可变误差多面体算法是比较成熟的数值优化方法,可利用能行点大幅缩短对本文多目标的非线性寻优问题的求解时间。其计算过程允许在一定的误差内不满足约束条件,以更快地接近问题的解,同时随着该接近过程的进行,误差越来越小,从而在计算中得到近似能行点的序列,进而收敛到问题的能行解。该算法的思想是将非线性规划问题转化为更简单的问题:在约束条件 $\Phi^{(k)} - R(\mathbf{x}) \geq 0$ 下求 $f(\mathbf{x})$ 的极小值点。其中 $\Phi^{(k)}$ 为第 k 步的能行性的允许误差,

$R(\mathbf{x})$ 为表明点 $\mathbf{x}$ 破坏约束的一个度量。在程序中取:

$$R(\mathbf{x}) = \left(\sum_{i=1}^{M_d} h_i^2(\mathbf{x}) + \sum_{i=M_d+1}^P u_i(g_i(\mathbf{x})) g_i^2(\mathbf{x}) \right)^{1/2} \quad (20)$$

$$u_i(y) = \begin{cases} 0 & y \geq 0 \\ 1 & y < 0 \end{cases} \quad (21)$$

其中, M_d 为等式约束的个数; P 为不等式约束的个数。

本文算法是在近似可行区域中采取可变多面体寻找方法。将误差 $\Phi^{(k)}$ 选成由可变多面体的顶点所确定的正下降函数 $\Phi^{(k)} = \Phi^{(k)}(x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_{r+1}^{(k)}, x_{r+2}^{(k)})$ 。函数 $\Phi^{(k)}$ 在整个寻找过程中作为约束破坏允许的误差, 同时作为寻找结束的判别量。本程序中选取的 $\Phi^{(k)}$ 由以下公式确定。

$$\Phi^{(k)} = \min \left\{ \Phi^{(k-1)}, \frac{M_d + 1}{r + 1} \sum_{i=1}^{r+1} |x_i^{(k)} - x_{r+2}^{(k)}| \right\} \quad (22)$$

$$\Phi^{(0)} = 2(M_d + 1)a_0 \quad (23)$$

其中, a_0 为初始多面体的边长; $x_i^{(k)}$ 为第 k 步寻找时多面体的第 i 个顶点, $i = 1, 2, \dots, r+1$; $r = P - M_d$, 为非线性规划问题中函数 $f(\mathbf{x})$ 的自由度; $x_{r+2}^{(k)}$ 为 $x_1^{(k)}, x_2^{(k)}, \dots, x_{r+1}^{(k)}$ 的重心。

3.2 储能系统控制策略

基于状态配合的混合储能系统协调控制策略中储能系统出力跟踪控制逻辑如图 1 所示。首先初始化参数, 设置锂电池和超级电容器初始 SOC 均为 50%, 读取风电输出功率、电锅炉的档位功率数据; 然后进入多目标优化控制层(图 1 中虚线框区域), 以风电就地消纳能量最大、电锅炉档位动作次数少和储能系统使用寿命长为目标函数, 并以风电、储能和电锅炉的运行条件为约束, 通过可变误差多面体算法求解各时间点目标函数最优值, 得到对应锂电池储能和超级电容器储能的出力曲线; 最后通过功率验证保证储能系统出力的正确和可靠性, 并进入下一采样数据流程。为防止过充过放, 锂电池和超级电容器的 SOC 应约束在正常工作区间内, 锂电池 SOC 为 20%~80%, 超级电容器 SOC 为 10%~90%。储能系统在实际运行中, 如果超级电容剩余容量充足, 则由超级电容独立承担风电与锅炉需求功率, 以减少锂电池充放电次数; 如果超级电容剩余容量不充足, 则需要锂电池配合出力来满足需求功率。同理, 在风电场输出功率过大, 需要储能系统吸收功率以提升风电消纳能力时, 超级电容器的充电优先级高于锂电池。

4 算例验证

为了分析混合储能系统在可变误差多面体算法的基础上对风电-电锅炉的协调作用, 以某实际示范

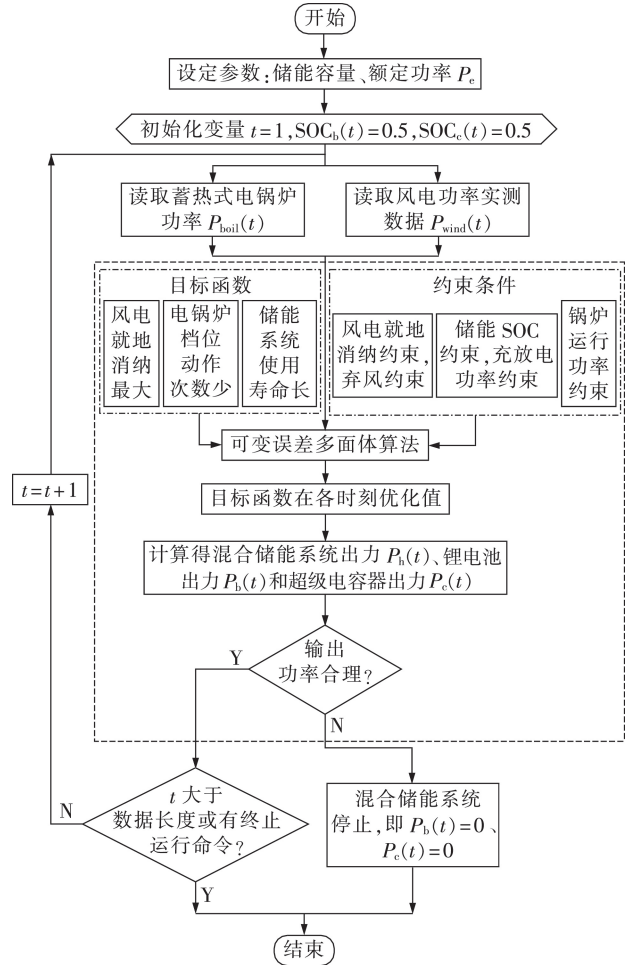


图 1 储能系统控制流程图

Fig.1 Flowchart of energy storage system control

应用的风电-电锅炉工程为例, 验证所提储能系统协调控制策略的有效性和可行性。

4.1 算例设置

以东北地区某 MW 级风电场为例, 该地区使用 30 MW 电锅炉配合消纳风电, 具体配置参数如表 1 所示。算例数据中风电数据由 2016 年 1 月某日该风电场采集量结合风电控制模型得到, 锅炉数据为实际供热负荷的调节曲线。数据采集时间间隔为 6 min, 该日风电场输出功率曲线与电锅炉档位调节曲线如图 2 所示。风电场输出功率在 0.4~20 MW 间波动, 电锅炉档位存在多次动作, 动作次数总计为 14 次。

表 1 风电-电锅炉-储能配置参数

Table 1 Parameters of wind power-boiler-energy storage

参数	数值
风电场总装机容量 / MW	30
电锅炉档位范围 / MW	0.5、10、15、20、25、30
超级电容器、锂电池储能容量 / (MW·h)	1
超级电容器、锂电池最大充放电功率 / MW	2
超级电容器、锂电池初始 SOC / %	50
锂电池储能 SOC 正常工作范围 / %	20~80
超级电容器 SOC 正常工作范围 / %	10~90

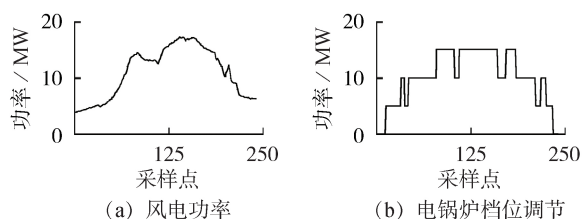


图2 示范工程中某日监控数据

Fig.2 Monitoring data of demonstration project

4.2 算例结果及分析

采用可变误差多面体算法对不同时间点的目标函数进行优化计算,设最大迭代次数为3000次,迭代误差为 10^{-5} ,初始多面体边长为2。计算得出目标函数优化曲线和3个子函数对应曲线如图3所示。图中子函数1—3分别对应电锅炉档位调节次数、风电就地消纳能力和储能系统使用寿命。

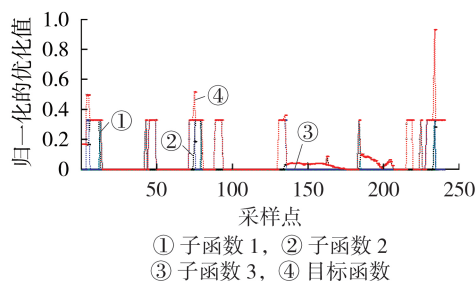


图3 目标函数优化波形

Fig.3 Optimal waveform of objective function

由图3可知,在计算240个采样数据的过程中,目标函数优化值在0~0.931之间波动,在采样点13—42上,目标函数优化值为0(表示该时间段3个子函数也处在最优解),即仅通过储能系统中超级电容器的充放电控制就可实现锅炉零动作和风电零弃风。同时存在目标函数是最优值但3个子函数并非同时取最优值的情况,如在目标函数最大值的第234个采样点上,就地弃风率达89.3%,且锅炉也在该时刻出现了降档,而锂电池在该时刻以允许最大功率充电,主要是由于在该时刻风电量与电锅炉档位功率差值达6.48 MW,而储能系统中超级电容器的SOC已达90%,须使锂电池以最大功率充电。

电锅炉在储能系统协调控制前后的档位变化见图4。图中锅炉档位1和2分别表示加储能控制前、

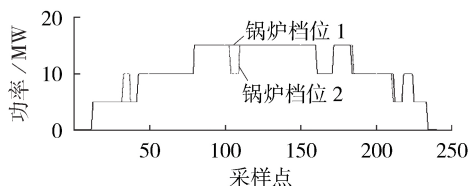


图4 电锅炉在储能系统协调控制前、后的档位变化

Fig.4 Gear variation of electric boiler before and after coordinated control for energy storage system

后电锅炉在该日内档位变化曲线。可以明显看出电锅炉档位在加储能系统协调控制前后的变化情况。在采样点33—37、104—109、161—171、211—217这4处,储能通过充放电有效平滑了风电与电锅炉功率差,有效避免锅炉档位变化。电锅炉档位由未加储能控制时的14次调档减少至6次调档,有效降低了电锅炉动作次数,提高了电锅炉操作的便捷性和经济性。

图5描述了风电原始出力变化曲线和风电场在加储能控制前后的弃风变化曲线。图中区域1表示未加储能系统时的风电就地消纳率,为86.6%;区域2表示在风电与电锅炉运行的基础上,加储能系统后增加的风电就地消纳量,占原始风电量的5.63%。可见在储能系统的协调控制下,该日风电就地消纳占比可提高至92.23%,有效地减少了弃风量。

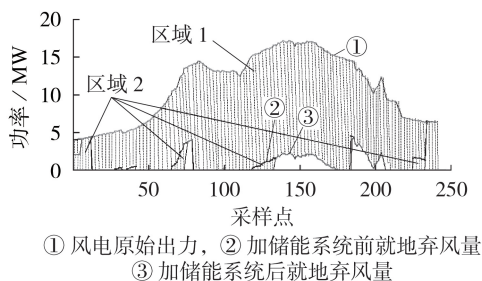
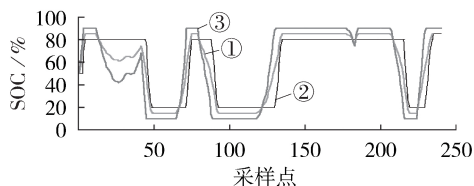


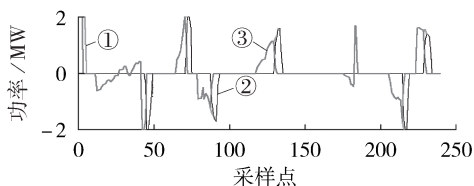
图5 风电就地消纳曲线

Fig.5 Local consumption curves of wind power

由图6所示的锂电池与超级电容器的SOC曲线和出力特性曲线可知:锂电池和超级电容器的出力曲线与混合储能系统总出力特性保持一致,但在充放电优先级上,超级电容高于锂电池。当超级电容器SOC(B_{soc})在其正常工作范围($10\% < B_{soc} < 90\%$)内时, $P_b = P_h$;当 $B_{soc} = 90\%$,且风电与锅炉仍需要储能系统充电存储能量时(或当 $B_{soc} = 10\%$,且风电与锅炉仍需要储能放电时),锂电池开始充/放电,并跟踪优



(a) 储能 SOC



(b) 储能充放电功率

① 混合储能系统, ② 锂电池, ③ 超级电容器

图6 混合储能系统仿真曲线

Fig.6 Simulative curves of hybrid energy storage system

化出力目标值。因此在保证了风电-电锅炉系统联合优化运行的基础上,充分发挥了超级电容器循环寿命长的优点,减少了锂电池充放电次数,有效延长了蓄电池使用寿命。

5 结论

从混合储能系统出力控制角度出发,研究了包含风电-电锅炉-储能系统的协调运行问题。为了切实考虑该系统运行时的经济成本和能源利用率,将电锅炉动作次数少、风电就地消纳能力强和储能系统的使用寿命长作为目标函数,并计及了风电、电锅炉和储能各自运行的约束条件,建立了含风电-电锅炉-储能系统的多目标优化模型,并用可变误差多面体算法对处理后的模型进行求解。以东北某地区实际示范工程为算例对模型进行分析,得出结论如下:

(1)提出的混合储能系统的协调控制策略能满足风电-电锅炉-储能系统协调运行,具备可行性和实用性;

(2)在风电-电锅炉运行基础上,通过储能系统的协调控制能有效降低弃风量和锅炉档位动作次数,在本文算例配置参数下,可以有效减少5.63%的弃风量,并降低电锅炉动作次数8次,即降低了57.2%的调节次数;

(3)相比于单一锂电池储能,通过超级电容器和锂电池混合配置,并通过本文所提控制策略能在满足风电-电锅炉运行的要求下,提升储能系统整体的使用寿命。

从储能系统充放电策略角度出发,目标是满足风电、电锅炉和储能系统自身的优化运行,并未考虑可能涉及的机电暂态和中长期动态过程对电网的影响,后期在推广应用该策略时需充分考虑该问题。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 汪海蛟,江全元. 应用于平抑风电功率波动的储能系统控制与配置综述[J]. 电力系统自动化,2014,38(19):126-134.
WANG Haijiao,JIANG Quanyuan. An overview of control and configuration of energy storage system used for wind power fluctuation mitigation[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(19):126-134.
- [2] 李建林,田立亭,来小康. 能源互联网背景下的电力储能技术展望[J]. 电力系统自动化,2015,39(23):15-25.
LI Jianlin,TIAN Liting,LAI Xiaokang. Outlook of electrical energy storage technologies under energy internet background[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(23):15-25.
- [3] 张坤,毛承雄,谢俊文,等. 风电场复合储能系统容量配置的优化设计[J]. 中国电机工程学报,2012,32(25):79-87.
ZHANG Kun,MAO Chengxiong,XIE Junwen,et al. Optimal of system capacity for wind farms[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(25):79-87.
- [4] 杨珺,张建成,桂勋. 并网风光发电中混合储能系统容量优化配置[J]. 电网技术,2013,37(5):1209-1216.
YANG Jun,ZHANG Jiancheng,GUI Xun. Capacity optimization of hybrid energy storage system in grid-connected wind and PV power generation system[J]. Power System Technology,2013,37(5):1209-1216.
- [5] 马速良,马会萌,蒋小平,等. 基于Bloch球面的量子遗传算法的混合储能系统容量配置[J]. 中国电机工程学报,2015,35(3):592-599.
MA Suliang,MA Huimeng,JIANG Xiaoping,et al. Capacity configuration of the hybrid energy storage system based on Bloch spherical quantum genetic algorithm[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(3):592-599.
- [6] 谢应昭,卢继平,翁宗林,等. 改善风电输出功率特性的复合储能系统优化配置[J]. 电网技术,2016,40(7):2052-2058.
XIE Yingzhao,LU Jiping,WENG Zonglin,et al. Optimization configuration of hybrid energy storage system for improving power output characteristics of wind farm[J]. Power System Technology,2016,40(7):2052-2058.
- [7] 于芃,周玮,孙辉,等. 用于风电功率平抑的混合储能系统及其控制系统设计[J]. 中国电机工程学报,2011,31(17):127-133.
YU Peng,ZHOU Wei,SUN Hui,et al. Hybrid energy storage system and control system design for wind power balancing[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(17):127-133.
- [8] 张步涵,曾杰,毛承雄,等. 电池储能系统在改善并网风电场电能质量和稳定性中的应用[J]. 电网技术,2006,30(15):8-13.
ZHANG Buhan,ZENG Jie,MAO Chengxiong,et al. Improvement of power quality and stability of wind farms connected to power grid by battery energy storage system[J]. Power System Technology,30(15),2006:8-13.
- [9] 于芃,赵瑜,周玮. 基于混合储能系统的平抑风电波动功率方法的研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(24):35-40.
YU Peng,ZHAO Yu,ZHOU Wei. Research on the method based on hybrid energy storage system for balancing fluctuant wind power[J]. Power System Protection and Control,2011,39(24):35-40.
- [10] 田立亭,李建林,程林. 基于概率预测的储能系统辅助风电场爬坡率控制[J]. 高电压技术,2015,41(10):3233-3239.
TIAN Liting,LI Jianlin,CHENG Lin. Wind farm ramp rate control using energy storage based on probability prediction[J]. High Voltage Engineering,2015,41(10):3233-3239.
- [11] 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.
- [12] 谢应昭,卢继平. 含风储混合系统的多目标机组组合优化模型及求解[J]. 电力自动化设备,2015,35(3):18-26.
XIE Yingzhao,LU Jiping. Multi-objective unit commitment optimization model including hybrid wind-storage system and its solution[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(3):18-26.
- [13] 于婧,孙宏斌,沈欣炜. 考虑储热装置的风电-热电机组联合优化运行策略[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.
- [14] 吕泉,胡炳廷,王海霞,等. 风热冲突下热电厂供热问题研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):236-244.
LÜ Quan,HU Binting,WANG Haixia,et al. Heat-supply of

thermal power plant in wind-heat conflict[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 236-244.

- [15] 户龙辉,李欣然,黄际元,等. 考虑多因素的磷酸铁锂电池综合建模研究[J]. 电源技术, 2016, 40(3): 514-518.

HU Longhui, LI Xinran, HUANG Jiyuan, et al. Various factors LiFePO₄ battery modeling study consideration [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(3): 514-518.

- [16] 刘其辉,贺益康,卞松江. 变速恒频风力发电机空载并网控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 6-11.

LIU Qihui, HE Yikang, BIAN Songjiang. Study on the no-load cutting-in control of the Variable-Speed Constant-Frequency (VSCF) wind-power generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 6-11.

作者简介:



兰贞波

究工作(E-mail: huxinjun2011@163.com)。

兰贞波(1988—),男,湖北洪湖人,高级工程师,硕士,主要从事高电压绝缘及新能源方面的研究工作(E-mail: lanzb@sina.com);

冯万兴(1977—),男,湖北宜昌人,教授级高级工程师,硕士,主要从事雷电定位方面的研究工作(E-mail: fengwanxing@sgepri.sgcc.com.cn);

胡军峰(1986—),男,湖北孝感人,工程师,主要从事超特高压输电运维方面的研

(编辑 李玮)

Usage of combined energy storage electric boiler to enhance wind power accommodation based on flexible tolerance polyhedron method

LAN Zhenbo^{1,2}, FENG Wanxing^{1,2}, HU Junfeng³, YU Jiajia⁴, LI Shujuan^{1,2},

WEI Zhen^{1,2}, LIU Bo^{1,2}, YU Mingjiang^{1,2}

(1. Nari Group Corporation(State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211000, China;

2. Wuhan Nari Limited Liability Company of State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China;

3. Yichang Operation & Maintenance Division of State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd., Yichang 443002, China;

4. State Grid Jiayu Electric Power Supply Company, Jiayu 437200, China)

Abstract: Energy storage technology facilitates the joint operation of wind power-electric boiler-energy storage system, and the hybrid energy and power storage systems can satisfy the technical and economic requirements of wind farms and electric boilers. The mathematical model of the hybrid energy storage system and the wind farm is established. In this model, the lithium batteries use universal controlled voltage sources and fixed internal resistance series model. An improved first-order RC model is adopted for supercapacitor. In addition, the wind power model considers the decoupling control of active and reactive power through power decoupling method. Based on this, an energy storage system control model for multi-objective operation of wind power and electric boiler is developed, in which the technical and economic constraints of wind farm, electric boiler and hybrid energy storage system are considered, and the local wind power accommodation, the adjustment times of electric boiler's tap position, and the service life of energy storage system are included in the objective functions. The flexible tolerance polyhedron approach is utilized to solve this model. The feasibility and practicability of this approach in optimizing the combined operation of wind power and electric boiler are verified by a demonstration project. Under pre-specified setting of parameters, the energy storage system increases the accommodation of wind power by 5.36 % and decreases the control times of electric boiler by 8 times per day.

Key words: energy storage; electric boilers; local accommodation of wind power; flexible tolerance polyhedron method; multi-objective operation

附录

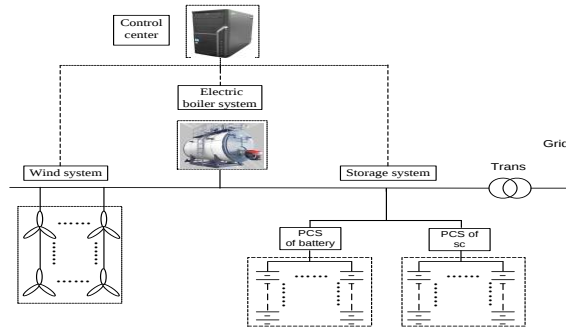


图 A1 风电-锅炉-混合储能系统运行示意图

Fig.A1 Diagram of wind power-boiler-energy storage system

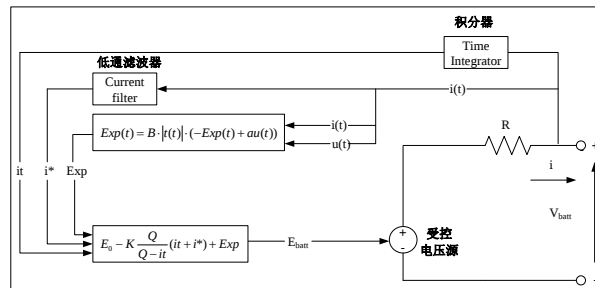


图 A2 锂电池数学模型

Fig.A2 Mathematical model of lithium battery

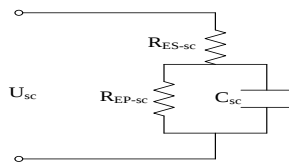


图 A3 超级电容器组等效电路模型

Fig.A3 Circuit model of super capacitor

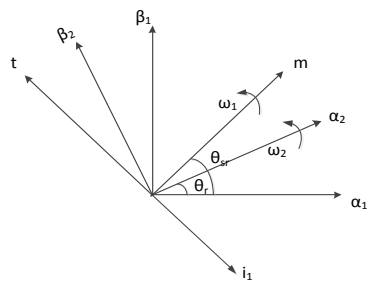


图 A4 定子磁场定向坐标变换

Fig.A4 Coordinate transformation of stator magnetic field