

混合储能系统功率配置的建模与滚动优化控制^①

宋秀兰^② 俞 立

(浙江工业大学信息工程学院 杭州 310023)

摘 要 为平抑分布式电网可再生能源输出功率的波动,给出了一种混合储能系统功率配置滚动优化控制方法:利用储能电量守恒原理建立充-放电过程混合储能系统荷电量变化的连续时间数学模型;结合储能单元功率配置要求建立混合储能系统的约束模型和性能优化函数;采用滚动优化控制理论显式处理混合储能系统的荷电量模型、约束模型和性能优化函数,设计功率配置过程的滚动优化控制策略。通过算例仿真分析验证了该方法对可再生能源输出功率的平抑效果和满足储能系统约束的能力。

关键词 分布式电网,混合储能系统,功率配置,滚动优化控制

0 引言

在分布式电网中的电能,来自风能、太阳能等可再生能源的比重越来越大。由于这些能源的电源输出功率受环境因素影响具有间歇性和随机性,其并网后会对电力系统的安全性和稳定性造成诸多不利影响^[1-5]。通常可给可再生能源配置一定比例的静态无功补偿器以快速补偿其无功功率,从而维持接入电网处电压稳定,而实现有功功率补偿,需要在可再生能源电源侧配置一定容量的储能系统^[4,5]。通过优化控制储能系统和可再生能源电源的运行(即储能系统的功率配置),平抑可再生能源电源注入电力系统的功率波动,可使可再生能源电源输出功率满足电力系统安全稳定运行的要求。同时,为使储能系统具备大容量和大功率性能,通常采用能量型储能介质(如蓄电池)和功率型储能介质(如超级电容)混合组成储能系统^[6-8]。由于能量型储能介

质的能量密度大、功率密度小,而功率型储能介质的能量密度小、功率密度大且高倍率充-放电不会损害其性能,因此,在优化控制储能系统和可再生能源电源的运行过程中,需要给出有效的优化控制策略以实现混合储能系统合理、有效的功率配置。

目前,国内外针对分布式电网混合储能系统功率配置及管理问题开展了研究,并取得了一定的成果。例如,文献[9]根据不同储能介质的互补特性,提出了超级电容与蓄电池混合储能系统,并从理论上证明了混合储能系统具有更高的功率输出能力并能减少蓄电池的充放电次数。文献[10,11]用自动状态机控制方法实现了风能、太阳能发电系统的混合储能控制,而文献[12]结合多滞环 PID 调节控制策略,研究了适用于微网的蓄电池和超级电容混合储能系统,结果表明混合系统在应对微网中频繁快速的功率和能量变化方面具有很好的技术经济性^[8-13]。进一步,文献[14]在储能介质离散时间数学模型^[15]的基础上,研究了由能量型和功率型储能

① 国家自然科学基金(61374111)资助项目。
② 女,1982年生,博士生,讲师;研究方向:电力系统先进控制研究;联系人,E-mail:songxl2008@zjut.edu.cn
(收稿日期:2014-07-26)

介质组成的混合储能系统,它利用模糊控制策略实现储能优化控制。这些成果通常侧重于储能过程机理分析,同时在储能功率配置控制器设计中没有显式地考虑不同储能单元的物理约束、荷电量等限制以及各储能单元的充-放电过程的不同特性。本文以滚动优化控制为主要策略,研究了用以平抑可再生能源电源输出功率波动的分布式电网混合储能系统功率配置优化控制方法。滚动优化控制即预测控制^[16],由于它能显式地处理系统约束和性能优化,而且能及时补偿由系统扰动和不精确建模引入的不确定影响,因而在石化、机电、电力电子等领域获得了广泛应用^[17-20]。该方法的要点是利用储能能量守恒建立充-放电过程混合储能系统荷电量波动的连续时间动态数学模型,再结合储能单元功率配置要求建立混合储能系统约束模型和性能优化函数,在此基础上引入控制理论中的状态变量概念,将上述模型转化为等价的状态空间方程,并以此方程作为预测模型设计混合储能系统功率配置过程的滚动优化控制策略。文中给出了功率配置滚动优化控制的设计算法。研究中通过一算例分析了上述方法对可再生能源电源输出功率的平抑效果和满足约束的能力,验证其有效性。

1 混合储能系统功率配置模型

1.1 储能系统荷电量模型

储能系统的荷电量即剩余电量在充-放电过程中不断变化,其变化量与当前时刻的充-放电功率和自放电率有关。考虑混合储能系统中 n 个并联储能单元,应用能量守恒定理可得第 i 个储能单元在充-放电过程中的荷电量变化动态数学模型

$$\frac{dQ_i(t)}{dt} = -\sigma_i Q_i(t) + \eta_i(t) P_i(t) \quad (1)$$

其中, $Q_i(t)$ 为第 i 个储能单元在 t 时刻的荷电量 (MW · h); $P_i(t)$ 为充-放电功率 (MW); σ_i 为自放电率 (%/min); $\eta_i(t)$ 为充-放电效率 (%)。当

$P_i(t) > 0$ 时,储能单元处于充电过程,此时充电效率记为 $\eta_i = \eta_{i,c}$; 否则,当 $P_i(t) < 0$ 时,储能单元处于放电过程,放电效率记为 $\eta_i = 1/\eta_{i,d}$ 。考虑到储能单元的并联连接以及储能单元之间不能形成回路,约定 n 个储能单元为同步充电或同步放电运行,即 $P_i(t)$ 对所有时间 t 满足

$$P_i(t) \cdot P_j(t) \geq 0, \forall i \neq j, 1 \leq i, j \leq n \quad (2)$$

储能系统的目标是平抑分布式电网可再生能源输出功率的波动。假设在 t 时刻电网需要配置的功率为 $P_T(t)$ (MW),并约定当 $P_T(t) > 0$ 时储能系统为充电过程;反之,当 $P_T(t) < 0$ 时储能系统为放电过程,则储能系统 n 类混合储能单元的充-放电功率 $P_i(t)$ 满足

$$\begin{aligned} \sum_{i=0}^n |P_i(t)| &\leq |P_T(t)|, P_i(t) \cdot P_T(t) \geq 0, \\ \forall i &= 1, \dots, n \end{aligned} \quad (3)$$

其中,功率 $P_T(t)$ 通常由电网的瞬时发电功率 $P_R(t)$ (MW) 和平滑目标功率 $P_O(t)$ (MW) 决定,即

$$P_T(t) = P_R(t) - P_O(t) \quad (4)$$

由于目前还没有制定储能系统平滑目标功率的统一标准,本文将采用文献[14]所述的时变低通滤波器计算平滑目标功率 $P_O(t)$ 。

1.2 功率配置约束模型

在混合储能单元的功率动态配置过程中,各个储能单元容许的荷电量、充-放电功率的范围不同,且不能超过容许范围,否则可能导致储能单元的过充或过放,减少储能单元的使用寿命,甚至损坏单元的储能介质。

储能单元在 t 时刻的最大容许充-放电功率由其自身的充-放电特性和 t 时刻的荷电量决定。为此,求解混合储能系统第 i 个储能单元的荷电量动态模型(式(1)),可得 t 时刻储能单元的荷电量为

$$Q_i(t) = e^{-\sigma_i t} Q_i(0) + \int_0^t e^{-\sigma_i(t-\tau)} \eta_i(\tau) P_i(\tau) d\tau \quad (5)$$

则在一次充电或放电过程中,第 i 个储能单元在 t 时

刻的最大容许充电和放电功率用下式表示:

$$\begin{aligned} P_{i,\max}(t) &= \min\{P_{i,c}, \bar{P}_i(t)\}, P_T(t) > 0 \\ P_{i,\min}(t) &= \max\{P_{i,d}, \bar{P}_i(t)\}, P_T(t) < 0 \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $P_{i,\max}(t) > 0$ 和 $P_{i,\min}(t) < 0$ 分别为第 i 个储能单元在 t 时刻的最大容许充电和放电功率 (MW); $P_{i,c} > 0$ 和 $P_{i,d} < 0$ 分别为第 i 个储能单元由充-放电特性决定的最大容许充电和放电功率 (MW); 而

$$\bar{P}_i(t) = \frac{Q_i(\infty) - (1 - \sigma_i)Q_i(t)}{\eta_i(t)} \quad (7)$$

为由储能单元荷电量决定的最大容许充电 ($\bar{P}_i(t) > 0$) 或放电 ($\bar{P}_i(t) < 0$) 功率 (MW); $Q_i(\infty)$ 为储能单元荷电量的上限 (充电) 或下限 (放电) 约束 (MW · h); $\min\{\cdot\}$ 和 $\max\{\cdot\}$ 函数分别为取最小和最大值函数。

如果储能单元充-放电时间充分, 第 i 个储能单元的荷电量 $Q_i(t)$ 将趋于荷电量的上限或下限量 $Q_i(\infty)$, 此时式(7)将简化为

$$\bar{P}_i(t) = \frac{\sigma_i(t)}{\eta_i(t)} Q_i(\infty) \quad (8)$$

即一次充-放电过程的功率配置必须要补偿由储能单元自放电造成的功率损失。本文以式(8)作为 t 时刻一次充-放过程中功率配置速度约束, 即

$$\left| \frac{dP_i(t)}{dt} \right| \geq \frac{\sigma_i(t)}{\eta_i(t)} Q_i(\infty) \quad (9)$$

其中 $i = 1, \dots, n$ 。

1.3 功率配置优化控制目标

在分布式电网中, 混合储能系统的作用是快速并尽可能地平抑 (吸收或释放) 电网中的配置 (过剩或需求) 功率 $P_T(t)$, 同时要求各储能单元最大化地保存能量以用于平抑下一个时刻的功率波动^[12-14]。进一步, 考虑各储能单元的充-放电优先级顺序, 即优先考虑功率型储能介质 (如超级电容) 承担 $P_T(t)$ 以减轻能量型储能介质 (如蓄电池) 的充-放电深度和次数, 从而提高能量型储能介质的使用寿命。因此, 分布式电网混合储能系统的功率配置优化控

制目标的一个典型数学模型可建立为

$$\begin{cases} L(t) = L_1(t) + L_2(t) + L_3(t) \\ L_1(t) = m(P_T(t) - \sum_{i=1}^n P_i(t))^2 \\ L_2(t) = \sum_{i=1}^n w_i(Q_i(t) - \bar{Q}_i)^2 \\ L_3(t) = \sum_{i=1}^n r_i P_i(t)^2 \end{cases} \quad (10)$$

其中, $L_1(t)$ 表示混合储能系统对功率配置的平抑目标; $L_2(t)$ 表示各储能单元最大化保存能量的目标; $L_3(t)$ 表示混合储能系统的充-放电优先级目标, 并限制每次配置的功率值, 以免功率变化过于剧烈。这些子目标的相对重要性通过可调整参数即权重系数 $m > 0$, $w_i > 0$ 和 $r_i > 0$ 表示, 即权重系数越大表明对应的子目标在总目标中的比重也越大。同时为使各子目标在数量上相当, 通常可对目标式(10)中的变量做归一化处理。此外, 系数 w_i 和 r_i 用于平衡各个储能单元的充-放电功率和荷电量, 而数值的大小表示功率配置的优先级顺序, 通常数值越大, 表明优先级越高。在目标 $L_2(t)$ 中, 参数 $\bar{Q}_i > 0$ 为第 i 个储能介质在充-放电过程中荷电量 (MW · h) 的期望值, 通常充电过程的期望值取为储能介质荷电量的上限, 放电过程的期望值取为储能介质荷电量的下限。

在混合储能系统功率配置的优化控制中, 要极小化目标函数 (式(10)) 需要明确考虑储能介质荷电量的动态模型 (式(1) ~ (4)) 和约束模型 (式(5) ~ (7) 与 (9))。从控制理论角度看, 这是一个带约束的优化控制问题。本文将各个储能介质的荷电量定义为状态变量, 充/放电功率定义为混合储能系统的控制输入变量, 采用滚动优化控制方法设计分布式电网混合储能系统功率配置的优化控制器。

2 混合储能功率配置滚动优化控制

将混合储能系统中储能介质的荷电量定义为状态变量, 充-放电功率定义为控制变量, 则由式(1)

可得混合储能系统功率配置过程的状态方程为

$$\dot{x}(t) = \tilde{A}x(t) + \tilde{B}u(t) \tag{11}$$

其中,状态变量 $x(t) = [Q_1(t) Q_2(t) \cdots Q_n(t)]'$,控制变量 $u(t) = [P_1(t) P_2(t) \cdots P_n(t)]'$,状态矩阵 $\tilde{A} = \text{diag}\{-\sigma_1, -\sigma_2, \cdots, -\sigma_n\}$ 和控制矩阵 $\tilde{B} = \text{diag}\{\eta_1, \eta_2, \cdots, \eta_n\}$ 。进一步,由式(2)和式(3)可得,模型(式(11))中的控制变量 $u(t)$ 满足约束条件(式(2)~(3)、(6)~(7)和(9))。对模型(式(11))及其约束条件采用零阶保持器将系统转化为离散时间模型

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) \tag{12}$$

其中,采样周期为 $T_s > 0$,矩阵 $A = I + T_s$ 和 $B = T_s \tilde{B}$ 。

在采样时刻 k 测量储能单元荷电量即状态量为 $x(k)$,则在时刻 k 预测未来 N 步系统状态量依次为

$$\begin{aligned} x(1|k) &= Ax(k) + B_1u(0|k) \\ x(2|k) &= A^2x(k) + AB_1u(0|k) + B_1u(1|k) \\ &\vdots \\ x(N|k) &= A^Nx(k) + \sum_{i=0}^{N-1} A^{N-i-1}B_1u(i|k) \end{aligned} \tag{13}$$

其中, $x(i|k)$ 和 $u(i|k)$ 分别为时刻 k 对未来时刻 $k+i$ 的预测状态变量和预测控制变量。将式(13)改写成紧凑的矩阵形式

$$x(k;N) = \phi(k) + \varphi u(k;N) \tag{14}$$

其中,

$$\begin{aligned} x(k;N) &= \begin{bmatrix} x(1|k) \\ x(2|k) \\ \vdots \\ x(N|k) \end{bmatrix}_{nN \times 1}, \\ u(k;N) &= \begin{bmatrix} u(0|k) \\ u(1|k) \\ \vdots \\ u(N-1|k) \end{bmatrix}_{nN \times 1}, \\ \phi(k) &= \begin{bmatrix} Ax(k) \\ A^2x(k) \\ \vdots \\ A^Nx(k) \end{bmatrix}_{nN \times 1}, \end{aligned}$$

$$\phi = \begin{bmatrix} B_1 & 0 & \cdots & 0 \\ AB_1 & B_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A^{N-1}B_1 & \cdots & AB_1 & B_1 \end{bmatrix}_{nN \times nN}$$

此时,向量 $\phi(k)$ 由当前时刻 k 的状态量 $x(k)$ 确定,而矩阵 ϕ 为常量矩阵。

为求得未来 N 步的功率配置量,结合储能单元各时刻的优化控制目标(式(10)),考虑 N 步时间内混合储能系统的优化目标函数 $J(k)$ 如下:

$$\begin{aligned} J(k) &= \sum_{j=0}^{N-1} \{L_1(j|k) + L_2(j|k) + L_3(j|k)\} \\ &= \sum_{j=0}^{N-1} \left\{ m \left(P_T(j|k) - \sum_{i=1}^n u_i(j|k) \right)^2 + \right. \\ &\quad \left. \|x(j|k) - \bar{x}\|_W^2 + \|u(j|k)\|_R^2 \right\} \\ &= \sum_{j=0}^{N-1} \left\{ \|P_T(j|k) - hu(j|k)\|_m^2 + \right. \\ &\quad \left. \|x(j|k) - \bar{x}\|_W^2 + \|u(j|k)\|_R^2 \right\} \end{aligned} \tag{15}$$

其中,期望状态量 $\bar{x} = [\bar{Q}_1 \cdots \bar{Q}_n]'$, $\|s\|_M^2 = s' Ms$ 表示矩阵 M 加权 2-范数, $W = \text{diag}\{w_1, \cdots, w_n\}$ 为状态加权矩阵, $R = \text{diag}\{r_1, \cdots, r_n\}$ 为控制加权矩阵及行向量 $h = [1 \cdots 1]_n$ 。

将式(14)代入式(15)并整理可得

$$\begin{aligned} J(k) &= [P_T(k;N) - Hu(k;N)]' M [P_T(k;N) \\ &\quad - Hu(k;N)] + [x(k;N) - \bar{X}]' \bar{W} [x(k;N) \\ &\quad - \bar{X}] + u(k;N)' \bar{R} u(k;N) \\ &= [P_T(k;N) - Hu(k;N)]' M [P_T(k;N) \\ &\quad - Hu(k;N)] + [\varphi(k) - \bar{X} \\ &\quad + \varphi u(k;N)]' \bar{W} [\varphi(k) - \bar{X} + \varphi u(k;N)] \\ &\quad + u(k;N)' \bar{R} u(k;N) \\ &= P_T(k;N)' M P_T(k;N) + [\varphi(k) \\ &\quad - \bar{X}]' \bar{W} [\varphi(k) - \bar{X}] + 2[\varphi(k) \\ &\quad - \bar{X}]' \bar{W} \varphi - P_T(k;N)' M H u(k;N) \\ &\quad + u(k;N)' (H' M H + \varphi' \bar{W} \varphi + \bar{R}) u(k;N) \end{aligned} \tag{16}$$

其中,

$$P_T(k;N) = \begin{bmatrix} P_T(0|k) \\ P_T(1|k) \\ \vdots \\ P_T(N-1|k) \end{bmatrix}_{nN \times 1}, \bar{X} = \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{x} \\ \vdots \\ \bar{x} \end{bmatrix}_{nN \times 1}$$

$$\bar{W} = \text{diag}\{\underbrace{W \cdots W}_N\}, \bar{R} = \text{diag}\{\underbrace{R \cdots R}_N\},$$

$$M = \text{diag}\{\underbrace{m \cdots m}_N\}, H = \text{diag}\{\underbrace{h \cdots h}_N\}$$

由于分布式电网中可再生能源输出功率的随机性和不确定性,未来 $[k, k+N-1]$ 时间内需配置的功率 $P_T(k;N)$ 难以直接得到,但通过风速、光照等短期预测可得到可再生能源输出功率的(超)短期估计^[21,22],进而得到需配置功率 $P_T(k;N)$ 。为描述简便,本文假设在一次预测过程中各时刻需配置的功率不变,即 $P_T(i|k) = P_T(k), i = 1, \dots, N-1$ 。

当不考虑储能系统充-放电功率约束(式(2)~(3)、(6)~(7)和(9))时,求解方程 $\partial J(k)/\partial u(k;N) = 0$,可得功率最优配置量的解析式为

$$u(k;N)^{opt} = -(H'MH + \varphi'\bar{W}\varphi + \bar{R})^{-1} \cdot$$

$$[\varphi'\bar{W}(\varphi(k) - \bar{X}) - H'MP_T(k;N)] \quad (17)$$

尽管式(17)极小化功率配置目标函数(式(15)),但通常难以满足充-放电约束条件(式(2)~(3)、(6)~(7)和(9)),从而难以应用。为此,考虑充-放电约束条件(2)~(3)、(6)~(7)和(9),定义如下约束优化控制问题:

$$\min_{u(k;N)} J(k) \quad (18a)$$

$$s. t. x(j+1|k) = Ax(j|k) + Bu(j|k) \quad (18b)$$

$$Q_{\min} \leq x(j+1|k) \leq Q_{\max} \quad (18c)$$

$$P_{\min}(k) \leq u(j|k) \leq P_{\max}(k) \quad (18d)$$

$$|\Delta u_i(j|k)| \geq T_s Q_i(\infty) \frac{\sigma_i(t)}{\eta_i(t)}, \forall i = 1, \dots, n \quad (18e)$$

$$x(0|k) = x(k), \forall j = 0, 1, \dots, N-1 \quad (18f)$$

其中,目标函数 $J(k)$ 由式(15)或式(16)给定;预测

模型(式(18b))描述混合储能系统的充-放电动态演化特性;式(18c)为储能单元荷电量的上下限约束;式(18d)为采样时刻 k 时的充-放电功率约束(式(6)和(7));式(18e)为充-放电功率变化速率约束(式(9));式(18f)为优化问题(式(18))的初始条件(即边界条件), $x(k)$ 为当前时刻 k 的状态测量值即储能单元的荷电量。

在每个采样时刻 k ,优化问题(式(18a)~(18f))是一个标准的二次规划问题。因此,采用内点法、牛顿法等二次型规划算法^[23]在线求解上述优化问题,得到当前时刻最优控制序列 $u(k;N)^* = \{u(0|k)^*, u(1|k)^*, \dots, u(N-1|k)^*\}$ 。尽管该最优序列包含了 $[k, k+N-1]$ 时间内的各时刻控制量,但根据滚动优化控制原理^[16],仅取第一个控制量 $u(0|k)^*$ 作为实际功率配置系统的控制量,即 k 时刻最优功率配置量定义为

$$u(k)^{opt} = u(0|k)^* \quad (19)$$

将 $u(k)^{opt}$ 输入混合储能系统(式(1)),并在下一个采样时刻 $k+1$ 测量各个储能单元的荷电量 $x(k+1)$ 和计算分布式电网需要配置的功率 $P_T(k+1)$,更新优化问题(式(18a)~(18f))的初始条件(式(18f)),再重复整个计算过程。如此循环计算,滚动实现混合储能系统充-放电功率配置的优化控制。由于预测模型(式(18b))只能是混合储能系统充放电动态响应的粗略描述,而实际的储能系统存在环境干扰和模型失配等未知因素,由式(18b)给出的预测值 $x(i|k)$ 有可能偏离实际值,这就需要在下一时刻 $k+1$ 利用实时信息 $x(k+1)$ 修改预测值,始终保持优化问题建立在实际信息的基础上,使控制保持实际上的最优,即滚动实现储能功率的优化控制。整个控制系统的结构如图1所示。

下面给出混合储能系统功率配置滚动优化控制实施步骤:

步骤1:设置混合储能系统各储能单元荷电量约束($Q_{\min}, Q_{\max}$)、充-放电特性决定的最大容许充-放电功率约束($P_{i,c}, P_{i,d}$)和采样周期 T_s 。

步骤 2:分别初始化充电过程和放电过程的功率配置滚动优化控制器设计参数 $(N, m, w_{i,c}, r_{i,c})$ 和 $(N, m, w_{i,d}, r_{i,d}), i = 1, \cdots, n_o$ 。

步骤 3:读取 k 时刻分布式电网瞬时发电功率 $P_R(k)$, 计算平滑目标功率 $P_o(k)$ 和储能配置功率 $P_T(k)$, 如果 $P_T(k) > 0$ 转入步骤 4, 否则转入步骤 5。

步骤 4:令目标(式(10))中 $w_i = w_{i,c}, r_i = r_{i,c}$; 预测模型(式(18b))中 $\eta_i(k) = \eta_{i,c}$; 转入步骤 6。

步骤 5:令目标(式(10))中 $w_i = w_{i,d}, r_i = r_{i,d}$; 预

测模型(式(18b))中 $\eta_i(k) = \eta_{i,d}$; 转入步骤 6。

步骤 6:分别利用式(5) ~ (7) 和式(9) 计算约束条件(式(18d)和(18e))。

步骤 7:利用二次型规划算法在线求解功率配置优化问题(式(18)), 得到 k 时刻最优控制序列 $u(k; N)^*$ 。

步骤 8:利用式(19) 计算混合储能系统各储能单元的最优功率分配量 $u(k)^{opt}$ 。

步骤 9:令 $k = k + 1$, 返回步骤 3。

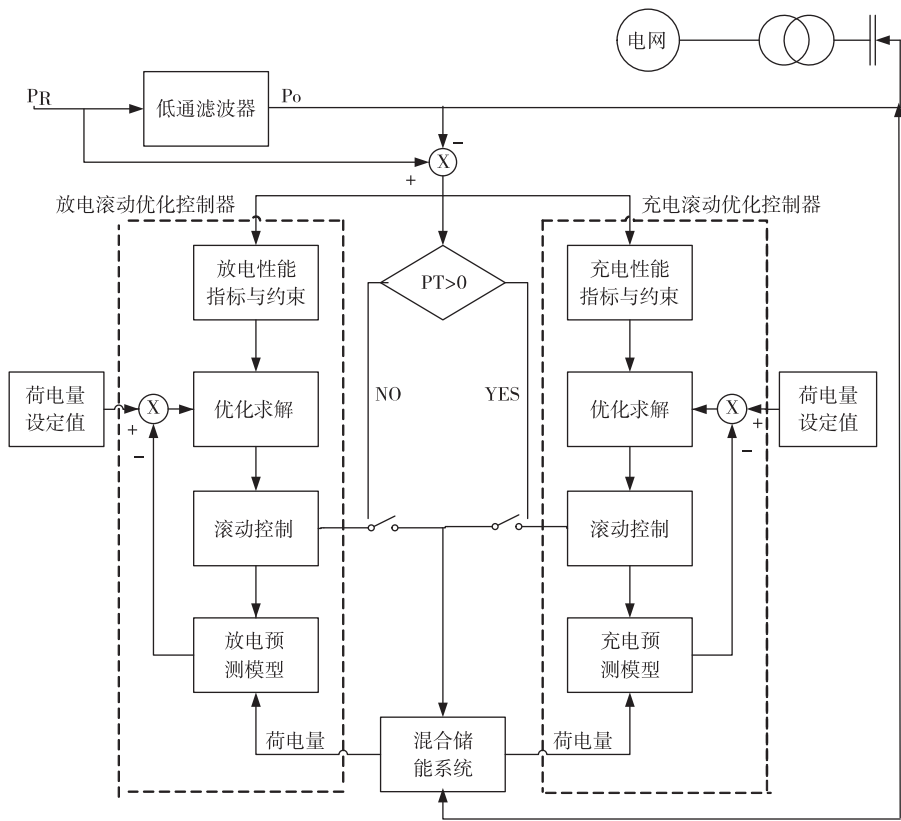


图 1 混合储能功率配置滚动优化控制系统结构图

3 算例仿真与结果分析

本文假设可再生能源电源的输出功率满足均值为 40MW、标准差为 15MW 的高斯过程, 考虑由超级电容组和锂离子蓄电池组并联组成的混合储能系统(超级电容和锂离子蓄电池的性能参数^[14]见表 1),

分析本文所述方法平抑可再生能源电源输出功率波动的有效性, 并进一步与经典二次型最优控制(LQR)方法相比较, 验证本文方法的优越性。

在算例仿真中, 采样周期 $T_s = 5\text{min}$, 控制器设计参数分别为 $N = 6, m = 500, w_{1,c} = w_{1,d} = 0.1, w_{2,c} = w_{2,d} = 0.1, r_{1,c} = r_{1,d} = 1.0$ 和 $r_{2,c} = r_{2,d} = 100$ 。进一步, 超级电容和锂离子蓄电池的荷电量分别用 x_1

表 1 超级电容和锂离子蓄电池性能参数

参数类型	超级电容	蓄电池
最大持续充电功率(MW)	7.5	15
最大持续放电功率(MW)	7.5	15
额定容量(MW·h)	3	15
容许充放电深度(%)	25~95	20~90
初始荷电状态(SOC)(%)	60	55
自放电率(%/min)	0.01	0
充/放电效率(%)	95	90

和 x_2 表示,充放电功率分别用 u_1 和 u_2 表示,则应用本文所述滚动优化控制方法,得混合储能系统实时控制输入曲线即充-放过程储能功率配置曲线如图 2 所示;状态响应曲线即储能单元荷电量变化曲线如图 3 所示,其中虚线表示超级电容的仿真结果,实线表示蓄电池的仿真结果。

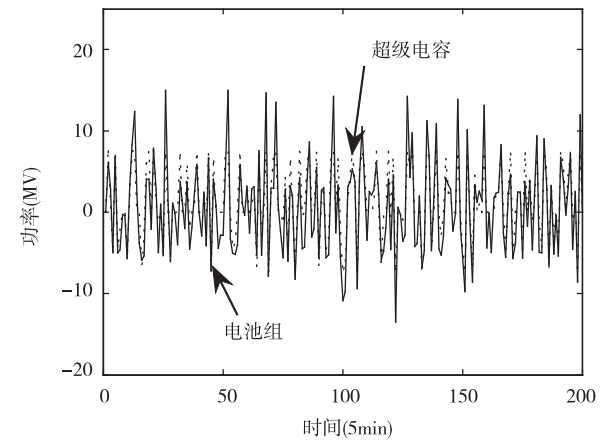


图 2 超级电容和蓄电池的充-放电功率

由图 2 和图 3 可知,蓄电池和超级电容均未出现荷电量和充-放电功率配置量越限,表明本文控制策略能够合理、有效地进行各储能单元的充-放电功率分配和避免各储能单元的荷电状态越限。同时图 2 显示的混合储能电站的充放电次数为 200 次,蓄电池充放电次数为 184 次。这是由于蓄电池配置功率权重系数(100)远大于超级电容权重系数(1),从而优化求解时当超级电容能独立承担需配置的功率,就不使用蓄电池承担功率配置任务,从而

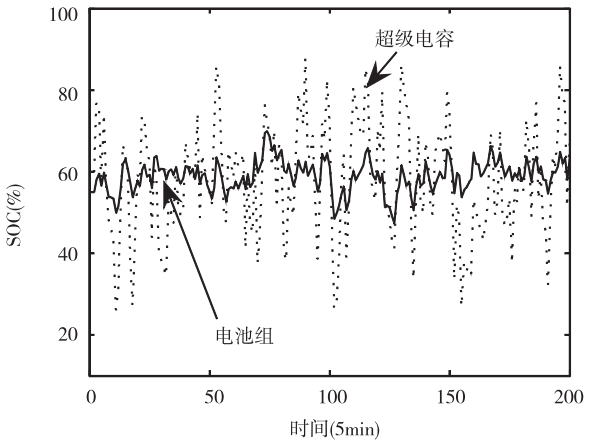


图 3 超级电容和蓄电池的荷电状态

提高蓄电池的使用寿命。这些结果保证了混合储能系统具有良好的波动平抑效果,如图 4 所示。其中虚线表示可再生能源电源的原始输出功率,实线表示平抑后的输出功率。由图 4 可知,经平抑后的可再生能源输出功率的波动程度明显下降。

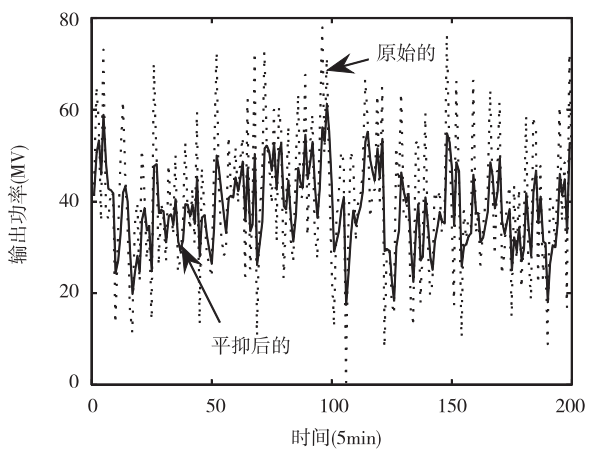


图 4 可再生能源原始输出功率与平抑后输出功率

进一步,使用与本文充放电控制器相同的参数设置,应用 LQR 方法得到混合储能系统充-放过程储能功率配置曲线如图 5 所示;储能单元荷电量变化曲线如图 6 所示;以及混合储能系统波动平抑效果如图 7 所示。其中,虚线表示超级电容的仿真结果,实线表示蓄电池的仿真结果。对比分析图 2~图 4 与图 5~图 7 曲线可知,LQR 方法得到的蓄电池充放电次数和每次数量都比本文方法要多,超级

电容的每次充放电数量同样比本文方法要多,从而导致蓄电池和超级电容的荷电量有频繁波动,得到的可再生能源输出功率平抑效果不理想。

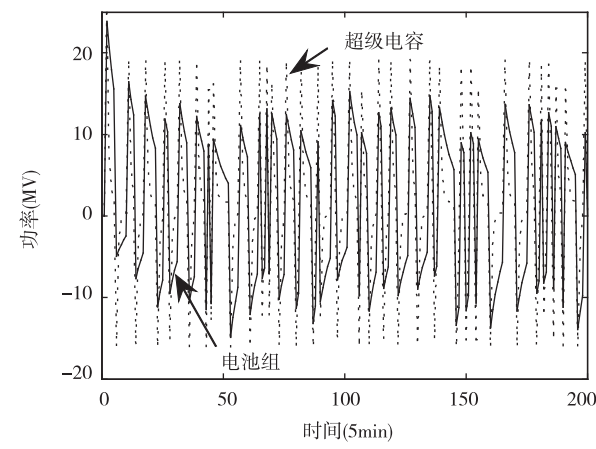


图 5 超级电容和蓄电池的充 - 放电功率

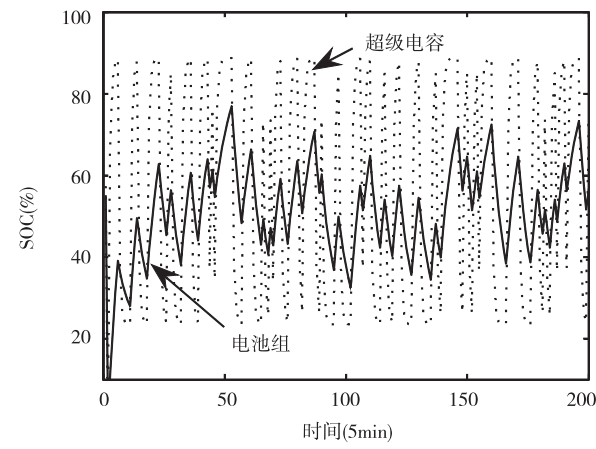


图 6 超级电容和蓄电池的荷电状态

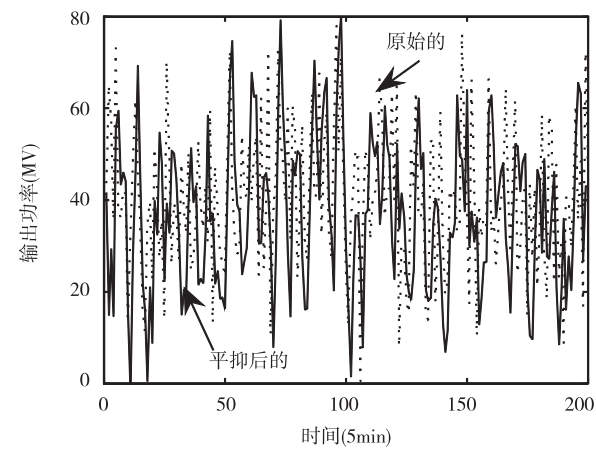


图 7 可再生能源原始输出功率与平抑后输出功率

最后,对比分析使用本文方法和 LQR 方法在平抑前、后输出功率的波动情况,统计相邻时刻功率的变化率,可得平抑前输出功率的最大变化率为 61.7 (MW/5min),使用本文方法平抑后的最大变化率为 24.5 (MW/5min),使用 LQR 方法抑后的最大变化率为 40.8 (MW/5min),其余区间结果如表 2 所示。结合图 4、图 7 和表 2 可知,经本文提出的混合储能系统功率滚动优化配置后,可再生能源输出功率的波动主要集中在 0 ~ 14 (MW/5min),占总数的 93.5%;平抑前在该范围的可再生能源输出功率只占总数的 44.5%,而 LQR 方法平抑后在该范围的可再生能源输出功率只占总数的 54.5%,从而表明利用本文方法优化控制混合储能功率配置过程能明显降低可再生能源输出功率的波动程度。

表 2 平抑前后输出功率变化率统计

输出功率变化率 (MW/5min)	百分比(%)		
	平抑前	LQR 法平抑	本文方法平抑
> 24	30	14.5	1
19 ~ 24	17.5	11	2.5
14 ~ 19	8	18.5	3
9 ~ 14	15.5	15	20.5
4 ~ 9	15.5	17.5	32.5
0 ~ 4	13.5	22	40.5

4 结 论

通过建立充 - 放电过程混合储能系统荷电量波动的连续时间数学模型、储能单元功率配置约束模型和性能优化函数,本文提出了一种用以平抑可再生能源输出功率波动的分布式电网混合储能系统功率配置滚动优化控制方法。算例结果分析表明:本文所提滚动优化控制方法根据混合储能系统的荷电量数学模型、功率配置约束模型和性能优化函数,在线优化配置各储能单元的充 - 放电功率,可以显著

抑制分布式电网中可再生能源的输出功率波动,同时混合储能系统各储能单元满足功率配置约束条件,实现了混合储能系统对可再生能源输出功率波动的良好平抑目标。

参考文献

- [1] 王成山,王守相. 分布式发电供能系统若干问题研究. 电力系统自动化,2008,32(20):1-4
- [2] Divya KC,Qstergaard J. Battery energy storage technology for power systems-An overview. *Electric Power Systems Research*,2009,79(4):511-520
- [3] 黄伟,孙昶辉,吴子平等. 含分布式发电系统的微网技术研究综述. 电网技术,2009,33(9):14-18
- [4] Fanjun M,Akella R,Crow M L,et al. Distributed grid intelligence for future microgrid with renewable sources and storage. In:Proceedings of the North American Power Symposium, Arlington, USA,2010. 1-6
- [5] Zamora R,Srivastava A K. Controls for microgrids with storage:Review,challenges and research needs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,2010,14(7):2009-2018
- [6] Dougal R A,Liu S,White RE. Power and life extension of battery-ultracapacitor hybrids. *IEEE Trans Components and Packaging Technologies*,2002,25(1):120-131
- [7] Haihua Z,Bhattacharya T,Duong T,et al. Composite energy storage system involving battery and ultracapacitor with dynamic energy management in microgrid applications. *IEEE Trans Power Electronics*,2011,26(3):923-930
- [8] Etxeberria A,Vechiu I,Camblong H,Vinassa J M. Hybrid energy storage systems for renewable energy sources integration in microgrids:A review. In:Proceedings of IPEC, Singapore,2010. 532-537
- [9] Dougal R A,Liu S,White R E. Power and life extension of battery-ultracapacitor hybrids. *IEEE Trans. Components and Packaging Technologies*,2002,25(1):120-131
- [10] 唐西胜,武鑫,齐智平. 超级电容器蓄电池混合储能独立光伏系统研究. 太阳能学报,2007,28(2):178-183
- [11] Abbey C,Strunz K,Chahwan J,et al. Impact and control of energy storage systems in wind power generation. In:Proceedings of Power Conversion Conference,Nagoya, Japan,2007. 1201-1206
- [12] 张国驹,唐西胜,齐智平. 超级电容器与蓄电池混合储能系统在微网中的应用. 电力系统自动化,2010,34(12):85-89
- [13] Wei L,Joos G,Belanger J. Real-time simulation of a wind turbine generator coupled with a battery supercapacitor energy storage system. *IEEE Trans Industrial Electronics*,2010,57(4):1137-1145
- [14] 丁明,林根德,陈自年等. 一种适用于混合储能系统的控制策略. 中国电机工程学报,2012,32(7):1-6
- [15] 丁明,徐宁舟,毕锐. 用于平抑可再生能源功率波动的储能电站建模及评价. 电力系统自动化,2011,35(2):66-72
- [16] Kwon W H,Han S. Receding Horizon Control:Model Predictive Control for State Models. London:Springer-Verlag,2005
- [17] Qin S J,Badgwell T A. A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice*,2003,11:733-764
- [18] Cortes P,Kazmierkowski M P,Kennel R M,et al. Predictive control in power electronics and drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*,2008,55(12):4312-4324
- [19] 郑雪生,李春文,戎袁杰. DC/AC 变换器的混杂系统建模及预测控制. 电工技术学报,2009,24(7):87-93
- [20] Kouro S,Cortes P,Vargas R,et al. Model predictive control-A simple and powerful method to control power converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*,2009,56(6):1826-1838
- [21] 王彩霞,鲁宗相,乔颖等. 基于非参数回归模型的短期风电功率预测. 电力系统自动化,2010,34(16):78-82
- [22] 陈颖,周海,王文鹏等. 风电场输出功率超短期预测结果分析与改进. 电力系统自动化,2011,35(15):30-36
- [23] Wang Y,Boyd S. Fast model predictive control using on-line optimization. *IEEE Trans Contr System Tech.*,2010,18(2):267-278

Modeling and receding horizon control of the power configuration of hybrid energy storage systems

Song Xiulan, Yu Li

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023)

Abstract

In order to smooth the fluctuations of renewable energy output power in a distributed generation system, the paper presents a method for receding horizon control of the power configuration of a hybrid energy storage system (HESS). The method has the following steps: Use the principle of conservation of energy storage to establish a continuous-time mathematic model to describe the charge changing of the HESS during charging and discharging; Formulate the constraint models and performance optimization functions of the HESS based on the power configuration requirements of energy storage units; Use the receding horizon control theory to explicitly tackle the charge models, constraint models and performance optimization functions of the HESS, and design the scheme for receding horizon control of the power configuration process. The proposed method's effectiveness of smoothing the fluctuations of the output power from renewable energy sources and the ability to satisfy the energy storage system's constraints were verified by the simulation analysis of a numerical example.

Key words: distributed generation system, hybrid energy storage system, power configuration, receding horizon control