

DOI: 10.7667/PSPC160797

PV-FC-BS 混合系统全状态模型预测能量管理优化策略

薛花, 张芮嘉, 胡英俊

(上海电力学院电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 光伏-燃料电池-蓄电池(Photovoltaic-Fuel Cell-Battery System, PV-FC-BS)混合系统因能有效解决光伏输出功率间歇性、波动性问题而得到广泛关注, 克服各构成单元利用局限性同时实现各单元间的能量高效管理成为PV-FC-BS应用推广的关键。针对传统能量管理策略分别在BS开、关模式下建立不同预测模型, 工作模式转换使系统在预测模型切换过程中稳定性难以保证的问题, 提出新型BS充放电约束条件, 构建全状态多输入多输出动态功率交换预测模型。通过将能量管理问题转化为控制优化问题, 减小算法复杂度且避免模式切换影响, 设计动态预测模型滚动寻优方法, 实现PV-FC-BS混合系统能量最优分配。同时考虑BS使用寿命和充放电效率, 提出BS参数自适应估计算法, 提高能量调度准确性。在Matlab环境下对PV-FC-BS混合系统全状态模型预测能量管理优化策略进行仿真验证, 结果表明: 所提出的策略优化计算量小, 能量分配准确, 不同应用情形适应性强。

关键词: PV-FC-BS混合系统; 全状态模型预测控制; 能量管理优化; 参数自适应

Full-state model predictive energy management optimization for PV-fuel cell-battery hybrid system

XUE Hua, ZHANG Ruijia, HU Yingjun

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: It is widely acknowledged that PV-fuel Cell-battery System (PV-FC-BS) hybrid energy storage system can effectively solve the intermittent and volatility of PV output power. And it is significant for the application and promotion of PV-FC-BS to overcome the limitations of each component utilization and realize efficient power dispatching. Traditional energy management strategy often creates separated prediction models in different switch modes. It is difficult to guarantee the stability in mode switching process. New BS charging-discharging constraints are proposed and full-state multiple-input-multiple-output dynamic power exchange model is built. Therefore such energy management problem is transformed into an optimization problem, reducing the complexity of algorithm and avoiding the impact of mode switching. PV-FC-BS hybrid system energy optimal allocation is realized by designing dynamic prediction model and quick rolling optimization methods. Taking charging or discharging efficiency coefficient of batteries into account, an adaptive estimation algorithm of battery constant charging-discharging parameter is proposed to achieve an accurate scheduling of energy. In the Matlab environment, PV-FC-BS hybrid system simulation results show that the proposed strategy has small optional calculation as well as accurate energy assignment and it is adaptable to different application conditions.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51407114), Natural Science Foundation of Shanghai (No. 15ZR1418200 and No. 15ZR1418000), Shanghai Engineering Research Center of Green Energy Grid-connected Technology (No. 13DZ2251900).

Key words: PV-FC-BS hybrid system; full-state model prediction control; model predictive energy management optimization; BS parameters adaptation

0 引言

随着化石资源的日益匮乏和环境污染的日趋严

重, 光伏发电产业在过去十年得到蓬勃发展^[1-5]。但光伏渗透率水平增加, 使得光伏出力波动性引起的电网运行不可靠、不可控问题显得更为严重^[6-9]。储能系统凭借其快速灵活的调节能力, 成为改善光伏发电输出特性、提高系统供电质量及电网安全稳定性的有效手段^[10-13]。同时, 储能蓄电池频繁充放电带来的蓄电池使用寿命问题、燃料电池等备用电源

基金项目: 国家自然科学基金项目(51407114); 上海市自然科学基金项目(15ZR1418200, 15ZR1418000); 上海绿色能源并网工程技术研究中心(13DZ2251900)

投切时刻问题,也增加了 PV-FC-BS 混合系统实现能源分配和优化调度的难度^[14]。

通常采用基于反馈控制的能量管理策略解决 PV-FC-BS 混合系统能源分配和优化调度问题,但反馈控制采用被动响应,具有时滞性,不利于系统优化调度的快速响应特性^[15-16]。为解决这一问题,模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)采用预先补偿方式,能快速消除能源分配误差,对于 PV 输出功率频繁波动特性具有更优的控制效果^[17-20]。2004 年, Kothare M. V 等^[21]提出定时输出反馈 MPC 方法,设计多重预测控制器,提高计算效率,但需反复迭代求解。2005 年, Prashant Mhaskar 等^[22]为非线性系统每个工作模式,结合状态切换约束以及稳定边界约束,但切换预测模型计算复杂,求取 MPC 优化设计最优可行解困难。2015 年,杨冬锋等^[23]将日前调度和实时调度不同时间尺度的信息联系起来,有效应对预测信息波动对系统调度的影响。同年, Felix Garcia-Torres 等^[24]对微电网不同的工作模式切换进行建模,结合混合整数二次规划给出最优经济运行策略,但优化目标形式多样且不统一。目前, MPC 能量调度策略设计主要考虑在系统 BS 开、关模式分离的条件下,建立不同预测模型,但工作模式切换使系统稳定性难以保证,因此提出新型的开关模式统一 MPC 能量调度策略是实现 PV-FC-BS 混合系统能量优化调度关键所在。

为实现 PV-FC-BS 混合系统的快速、高效能量优化调度,并解决传统能量管理策略在 BS 开、关模式下分别建立不同预测模型,工作模式转换使系统在预测模型切换过程中稳定性难以保证的问题,提出新型的 BS 充放电约束条件,构建全状态多输入多输出(Multiple-Input-Multiple-Output, MIMO)动态功率交换预测模型,通过将能量管理问题转化为控制优化问题,减小算法复杂度且避免模式切换影响,设计动态预测模型快速滚动寻优方法,实现 PV-FC-BS 混合系统能量最优分配。同时考虑 BS 使用寿命和充放电效率,提出 BS 充放电效率参数自适应估计算法,提高能量调度准确性。基于 Matlab 的仿真结果表明:BS 参数自适应全状态 MPC 策略结构简单,分配准确,响应迅速。

1 PV-FC-BS 混合系统动态功率流动模型

1.1 PV 动态功率模型

给定面积 PV 组件每小时输出功率为

$$P_{PV} = \eta_{PV} A_c I_{PV}$$

式中, η_{PV} 表示 PV 发电效率,与太阳辐射强度 $I_{PV}(\text{kWh}/\text{m}^2)$ 、环境温度 T_A 以及 PV 组件面积 A_c 有

关。在光照充足时, PV 单元发电优先供给负荷,再将多余能量存储起来转换成化学能,给 BS 充电,即满足约束

$$0 \leq P_2(k) + P_3(k) \leq P_{PV}(k) \quad (1)$$

$$0 \leq P_2(k) \leq P_2^{\max} \quad (2)$$

$$0 \leq P_3(k) \leq P_3^{\max} \quad (3)$$

式中: P_2 表示 PV 组件输送给负荷的功率部分; P_2^{\max} 表示 PV 单元可以供给负荷的最大功率; P_3 表示 BS 充电功率; P_3^{\max} 表示每小时 BS 允许的最大充电功率。

1.2 BS 动态功率模型

根据所提供 PV 出力数据和负荷曲线,判定 BS 充电和放电状态切换情况:当负载需求超出 PV 功率时(如日出或日落), BS 为放电状态;当 PV 功率超出负载需求时(如晴朗白天), BS 为充电状态。同时 BS 不允许同时充放电,即

$$P_3(k)P_4(k) = 0 \quad (4)$$

式中, P_4 表示 BS 放电功率。

假设 SOC 变化与 BS 充放电电流成正比, SOC 连续模型简化为离散动态模型。

$$Soc(k+1) = Soc(k) + \eta_c P_3(k) - \eta_d P_4(k) \quad (5)$$

式中: $Soc(k+1)$ 表示在采样时刻 k 时充电状态; P_3 和 P_4 分别表示充电功率和放电功率; η_c 和 η_d 是 MPC 设计中在线估计的参数,分别表示充电效率和放电效率。由式(2)可得一定时间内蓄电池 SOC 为

$$Soc(\tau) = Soc(0) + \eta_c \sum_{k=0}^{\tau} P_3(k) - \eta_d \sum_{k=0}^{\tau} P_4(k)$$

且满足约束

$$B_c^{\min} \leq Soc(k) \leq B_c^{\max} \quad (6)$$

$$0 \leq P_4(k) \leq P_4^{\max} \quad (7)$$

式中: B_c^{\min} 和 B_c^{\max} 分别表示 SOC 的上限和下限; P_4^{\max} 表示每小时最大放电功率。BS 容量配置时需考虑负荷用电需求,混合系统供电可靠性以及建设成本。为延长 BS 寿命兼顾降低混合系统成本,可根据每日的负荷需求、BS 放电深度、连续的光照不足天数等来优化蓄电池容量配置;在保证负载不间断供电的同时,配合 BS 适度充放电, FC 考虑最大程度节约燃料成本进行容量配置。PV-FC-BS 混合系统仅依靠内部各电源对负荷供电,在 PV 出力相同的前提, BS 容量增加,在光照充足时可储存更多能量,用于 PV 不足时系统负荷消耗,减少 FC 整体能量消耗,所以 FC 配置容量也可相应减小。

1.3 FC 动态功率模型

当电能需求过大时, FC 可以作为 PV-FC-BS 混合系统的能量补充。FC 虽可以根据负荷需求,在任何时候投入运行,但燃料昂贵,应尽可能少利用 FC。

FC 发出功率 P_1 应满足约束如式(8)。

$$0 \leq P_1(k) \leq P_1^{\max} \quad (8)$$

式中, P_1^{\max} 表示单位小时内 FC 可提供最大功率。另外, PV-FC-BS 互配合应该满足日常功率需求, 即

$$P_1(k) + P_2(k) + P_4(k) = P_L(k) \quad (9)$$

式中, $P_L(k)$ 表示负荷功率。

由式(5)和式(9)可以看出, PV-FC-BS 混合系统是典型 MIMO 系统, 系统中各构成单元动态功率模型不仅受自身特性和外界条件影响, 而且功率输出关系相互耦合, 增加系统实现高效、准确能量分配的难度。

2 全状态模型预测能量管理优化策略

2.1 全状态 MPC 设计

1) 全状态模型建立

为解决 PV-FC-BS 混合系统各组件能量相互耦合以及传统策略分开关模式建模求解复杂的问题, 建立统一 MIMO 动态功率流动线性状态空间模型, 设计全状态 MPC 方法, 简化模型, 提高运算速度, 将能量管理问题转化为最优化问题。

当 PV 输出功率超出负荷需求时, BS 处于充电状态, 当 PV 输出功率不足以满足负荷需求时, BS 处于放电状态, 所以可根据负荷需求曲线和 PV 输出功率确定 BS 充放电切换时刻 T_k 。给定时刻 k , 找到最近切换时刻 $T_k > k$, 对应 k 时刻的控制范围 N_c 和预测范围 N_p 为

$$N_c = N_p(k) = T_k - k \quad (10)$$

控制范围和预测范围可以随不同切换时刻进行变化。根据系统各组件功率模型定义控制变量为

$$\mathbf{u}(k) = [P_2(k), P_3(k), P_4(k)]^T$$

输出变量

$$y_m(k) = c_1(P_L(k) - P_1(k)) = c_1(P_2(k) + P_4(k))$$

$$y_a(k) = c_3(P_2(k) + P_3(k))$$

$$y_b(k) = c_2(P_3(k) + P_4(k))$$

式中, c_1, c_2, c_3 是正权重系数。BS 充放电动态过程为

$$Soc(k) = Soc(k-1) + \mathbf{b}_m \mathbf{u}(k-1) \quad (11)$$

式中, $\mathbf{b}_m = [0, \eta_c, -\eta_d]$ 。或等价于

$$Soc(k) = Soc(k-1) + \mathbf{b}_b \mathbf{u}_b(k-1) \quad (12)$$

式中, $\mathbf{b}_b = [\eta_c, -\eta_d]$ 且 $\mathbf{u}_b = [P_3(k), P_4(k)]^T$ 。

同时定义系统增广状态变量为

$$\mathbf{x}(k) = [Soc(k), y_m(k-1), y_a(k-1), y_b(k-1)]^T$$

系统增广输出变量

$$\mathbf{y}(k) = [y_m(k-1), y_a(k-1), y_b(k-1)]^T$$

得到线性空间模型

$$\begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) \\ \mathbf{y}(k) = \mathbf{C}\mathbf{x}(k) \end{cases} \quad (13)$$

式中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & \mathbf{0}_{1 \times 3} \\ \mathbf{0}_{3 \times 1} & \mathbf{0}_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & \eta_c & -\eta_d \\ c_1 & 0 & c_1 \\ c_3 & c_3 & 0 \\ 0 & c_2 & c_2 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = [\mathbf{0}_{3 \times 1} \quad \mathbf{I}_{3 \times 3}]$$

线性空间系统式(13)给出全状态 MPC 能量管理策略设计的数学准备。

2) 寻优策略设计

根据输出变量 $y_m(k), y_a(k), y_b(k)$ 可知, 最小化 FC 使用 $\min \sum c_1^2 P_1(k)^2$ 与 $\min \sum (c_1 P_L(k) - y_m(k))^2$ 等价, 尽量避免 BS 过度使用等价于 $\min \sum y_b(k)^2$, 最大化利用 PV 能量供给负荷 $\max \sum c_3^2 P_2(k)^2$ 等价于 $\min \sum (c_3 P_{PV}(k) - y_a(k))^2$ 。所以 MPC 优化目标为

$$\min J_1(k) = \min \sum_k^{k+N_p} (c_1 P_L(k) - y_m(k))^2$$

$$\min J_2(k) = \min \sum_k^{k+N_p} y_b(k)^2$$

$$\min J_3(k) = \min \sum_k^{k+N_p} (c_3 P_{PV}(k) - y_a(k))^2$$

进而得出全局目标函数为

$$\begin{aligned} \min J(k) &= \min (J_1(k) + J_2(k) + J_3(k)) = \\ &= \min (\mathbf{Y}(k) - \mathbf{R}(k))^T (\mathbf{Y}(k) - \mathbf{R}(k)) \end{aligned} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{Y}(k) = [\mathbf{y}^T(k), \mathbf{y}^T(k+1), \dots, \mathbf{y}^T(k+N_p-1)]^T$ 表示输出变量, $\mathbf{y}(k+i|k)$ 表示从采样时间 k 时开始, 第 i 步时 \mathbf{y} 的预测值; $\mathbf{R}(k) = [c_1 P_L(k), c_3 P_{PV}(k), 0, c_1 P_L(k+1), c_3 P_{PV}(k+1), 0, \dots, c_1 P_L(k+N_p-1), c_3 P_{PV}(k+N_p-1), 0]^T$ 表示参考向量。

根据经典 MPC 设计, 可得 MPC 增益为

$$\mathbf{F}(k) = [(\mathbf{C}\mathbf{A})^T, (\mathbf{C}\mathbf{A}^2)^T, \dots, (\mathbf{C}\mathbf{A}^{N_p(k)})^T]^T$$

$$\Phi(k) = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & \cdots & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \Phi_{N_p,1} & \Phi_{N_p,2} & \cdots & \Phi_{N_p,N_c} \end{bmatrix}$$

式中, $\Phi_j = \mathbf{CA}^{j-1}\mathbf{B}$ 。输出向量可由输入向量来表示。

$$\mathbf{Y}(k) = \mathbf{F}\mathbf{x}(k) + \Phi\mathbf{U}(k)$$

因此, 目标函数可变形为

$$\begin{aligned} J(k) &= (\mathbf{Y}(k) - \mathbf{R}(k))^T (\mathbf{Y}(k) - \mathbf{R}(k)) = \\ &= (\mathbf{F}\mathbf{x}(k) - \mathbf{R}(k))^T (\mathbf{F}\mathbf{x}(k) - \mathbf{R}(k)) + \\ &= 2(\mathbf{F}\mathbf{x}(k) - \mathbf{R}(k))^T \Phi\mathbf{U}(k) + \Phi^T\Phi\mathbf{U}(k) \end{aligned}$$

式中, $(\mathbf{F}\mathbf{x}(k) - \mathbf{R}(k))^T (\mathbf{F}\mathbf{x}(k) - \mathbf{R}(k))$ 与 $\mathbf{U}(k)$ 相互独立。因此全局目标 $J(k)$ 可以变形为

$$\begin{aligned} \min J(k) &= \min (\mathbf{Y}(k) - \mathbf{R}(k))^T (\mathbf{Y}(k) - \mathbf{R}(k)) \Leftrightarrow \\ &= \min [2(\mathbf{F}\mathbf{x}(k) - \mathbf{R}(k))^T \Phi\mathbf{U}(k) + \mathbf{U}(k)^T \Phi^T\Phi\mathbf{U}(k)] \Leftrightarrow \\ &= \min (\mathbf{U}(k)^T \mathbf{E}\mathbf{U}(k) + 2\mathbf{H}\mathbf{U}(k)) \end{aligned}$$

式中: $\mathbf{E}(k) = \Phi(k)^T\Phi(k)$; $\mathbf{H}(k) = (\mathbf{F}\mathbf{x}(k) - \mathbf{R}(k))^T\Phi$ 。

所以, PV-FC-BS 混合系统能量管理需要考虑多个目标转化为统一形式的全局优化目标函数。

传统分开关模式是将约束(4)划分成两个切换模式: 充电状态($P_4=0$)和放电状态($P_3=0$), 针对两种不同状态分别进行能量管理优化。所建立的全状态模式是将等式约束(4)转化为不等式约束, 作为新增约束条件扩充不等式约束的系数矩阵, 从而将充放电两种状态的约束条件化为统一线性形式。

1) 充电状态($P_4=0$)

约束改写为

$$\begin{cases} P_4(k) \leq 0 \\ P_4(k) \geq 0 \end{cases}$$

约束(1)–(3)、约束(7)–(9)统一改写为

$$\mathbf{M}_{11}\mathbf{u}(k) \leq \gamma_{11} \quad (15)$$

式中:

$$\mathbf{M}_{11} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$\gamma_{11} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ P_L(k) \\ P_{PV}(k) \\ P_2^{\max} \\ P_3^{\max} \\ P_4^{\max} \\ P_1^{\max} - P_L(k) \end{bmatrix}$$

定义系统预测控制向量为

$$\mathbf{U}(k) = [\mathbf{u}^T(k), \mathbf{u}^T(k+1|k), \dots, \mathbf{u}^T(k+N_c-1|k)]^T$$

式中, $\mathbf{u}(k+i|k)$ 表示根据采样时间 k 时得到 \mathbf{u} 的预测值。因为在预测控制向量中每个 $\mathbf{u}(k+i|k)$ 应该满足式(13), 且应该满足

$$\overline{\mathbf{M}}_{11}\mathbf{U}(k) \leq \overline{\gamma}_{11} \quad (16)$$

式中:

$$\overline{\mathbf{M}}_{11} = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{M}_{11} & & \\ & \cdots & \\ & & \mathbf{M}_{11} \end{bmatrix}}_{N_c}$$

$$\overline{\gamma}_{11} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} \\ \vdots \\ \gamma_{11} \end{bmatrix}$$

将约束(6)变形为含有预测控制向量 $\mathbf{U}(k)$ 的形式。由 BS 动态等式(5), 蓄电池状态 x_m 预测值为

$$\text{Soc}(k+i|k) = \text{Soc}(k) + \mathbf{b}_m \sum_{j=k}^{j \leq k+i-1} \mathbf{u}(j) \quad (17)$$

式中, $\text{Soc}(k+i|k)$ 表示在采样时间 k 时 SOC 的预测值。由式(15)得到

$$\mathbf{X}_m(k) = \text{Soc}(k)[1, 1, \dots, 1]^T + \mathbf{B}_m\mathbf{U}(k)$$

式中:

$$\mathbf{X}_m(k) = [\text{Soc}(k), \text{Soc}(k+1|k), \dots, \text{Soc}(k+N_c-1|k)]^T$$

$$\mathbf{B}_m(\mathbf{b}_m) = \underbrace{\begin{bmatrix} \mathbf{b}_m & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{b}_m & \mathbf{b}_m & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \mathbf{0} \\ \mathbf{b}_m & \mathbf{b}_m & \cdots & \mathbf{b}_m \end{bmatrix}}_{N_c}$$

所预测 BS 充电状态 $\mathbf{X}_m(k)$ 中的每个 $\text{Soc}(k+i|k)$ 应该满足约束(6), 因此根据不等式

$$B_{\min} \underbrace{[1, 1, \dots, 1]^T}_{N_c} \leq X_m(k) \leq B_{\max} \underbrace{[1, 1, \dots, 1]^T}_{N_c}$$

可将约束(6)转换成统一形式

$$\bar{M}_2 U(k) \leq \bar{y}_2 \quad (18)$$

式中:

$$\bar{M}_2 = \begin{bmatrix} -B_m \\ B_m \end{bmatrix}$$

$$\bar{y}_2 = \begin{bmatrix} (Soc(k) - B_c^{\min}) [1, 1, \dots, 1]^T \\ (B_c^{\max} - Soc(k)) [1, 1, \dots, 1]^T \end{bmatrix}$$

在式(14)中 $Soc(k)$ 可以实时更新, 约束表达式考虑到预测控制向量 $U(k)$ 。结合约束(16)和(18)推导出 MPC 设计在充电状态的约束为

$$\bar{M}_c U(k) \leq \bar{y}_c \quad (19)$$

式中: $\bar{M}_c = [\bar{M}_{11}^T, \bar{M}_2^T]^T$; $\bar{y}_c = [\bar{y}_{11}^T, \bar{y}_2^T]^T$ 。

2) 放电状态($P_3=0$)

与式(15)一式(19)类似, 在放电状态的约束也可以化为统一线性表达式:

$$\bar{M}_d U(k) \leq \bar{y}_d$$

通过引入新型约束建立全状态模型预测模型来统一优化目标和约束条件, 进而提高计算速度。

2.2 自适应 BS 参数估计算法设计

设计自适应 BS 参数估计法则实时估计充放电系数 η_c 和 η_d , 更符合 BS 充放电实际情形, 提高能量调度准确性。

BS 充放电估计动态过程为

$$\hat{Soc}(k) = Soc(k-1) + \hat{b}_b(k-1) u_b(k-1) \quad (20)$$

式中: $\hat{Soc}(k)$ 表示 SOC 估计状态; $\hat{b}_b = [\hat{\eta}_c, -\hat{\eta}_d]$ 表示估计参数。

在线识别 BS 参数时, SOC 误差泛函数设计为

$$J_p = \frac{1}{2} \tilde{Soc}(k)^2 = \frac{1}{2} (Soc(k) - Soc(k-1) - \hat{b}_b(k-1) u_b(k-1))^2$$

式中, $\tilde{Soc} = Soc(k) - \hat{Soc}(k)$ 。 J_p 关于 \hat{b}_b 的梯度为

$$\nabla J_p = -(\Delta Soc(k) - \hat{b}_b(k-1) u_b(k-1)) u_b^T(k-1)$$

式中, $\Delta Soc(k) = Soc(k) - Soc(k-1)$ 。因此, BS 参数估计值 \hat{b}_b 的更新算法为

$$\hat{b}_b(k) = \hat{b}_b(k-1) - \lambda \nabla J_p$$

则 \hat{b}_m 的更新算法为

$$\hat{b}_m(k) = [0, \hat{\eta}_c, -\hat{\eta}_d(k)] = [0, \hat{b}_b(k)] \quad (21)$$

将全状态模型中实际的 η_c 和 η_d 分别用估计值

$\hat{\eta}_c$ 和 $\hat{\eta}_d$ 代替, 实现 BS 参数自适应估计, 同时 $u_b(k)$ 应该在时间域($h, h+H_0$)内持续更新, 估计参数可以收敛到实际值, 并满足附加约束

$$u_b(k)^T u_b(k) < \frac{2-\alpha}{\lambda}$$

即

$$P_3(k) + P_4(k) < \sqrt{\frac{2-\alpha}{\lambda}} \quad (22)$$

式中, $0 < \alpha < 2$ 。将式(22)增加到式(13)最后一行, 得

$$M'_{11} u(k) \leq \gamma'_{11} \quad (23)$$

式中:

$$M'_{11} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\gamma'_{11} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ P_L(k) \\ P_{PV}(k) \\ P_2^{\max} \\ P_3^{\max} \\ P_4^{\max} \\ P_1^{\max} - P_L(k) \\ \sqrt{\frac{2-\alpha}{\lambda}} \end{bmatrix}$$

得到带有参数估计的全状态 MPC 模型为

$$\bar{M}'_c U(k) \leq \bar{y}'_c$$

$$\bar{M}'_d U(k) \leq \bar{y}'_d$$

通过 BS 参数更新, 调度分配可以实时跟踪蓄电池 SOC, 调高能量管理准确性。

3 仿真和结果分析

为验证 PV-FC-BS 混合系统全状态 MPC 方法的正确性和有效性, 在 Matlab 环境下对系统进行仿真

建模。以上海某印刷厂屋顶 PV 和负荷实测数据为基础进行仿真研究。

针对 PV 出力，系统装机容量为 367.8 kW，采样设备为 FLUKE 435 电能质量分析仪，采样时间间隔为 1 min，采样时间段为每天早上 6:30 到下午 17:30 的 PV 出力作为仿真原始数据。选取阴天、多云转晴、晴天 3 组具有代表性的 PV 出力数据。由于噪声导致原始信息模糊失真，采用基于最小二乘法的鲁棒迭代数据降噪的算法^[25-26]，对 PV 输出功率时间序列进行降噪预处理，如图 1 所示。选取降噪处理后的相应时间段(每小时)PV 出力的平均值作为仿真数据，如图 2 所示。

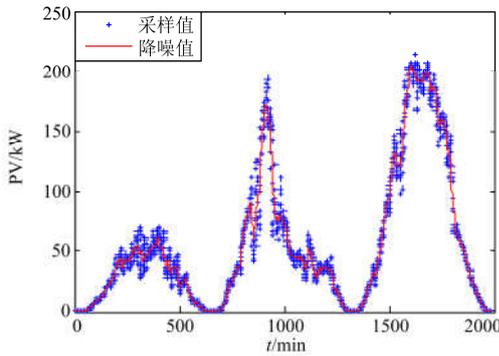


图 1 PV 出力降噪预处理

Fig. 1 Noise pretreatment of PV output

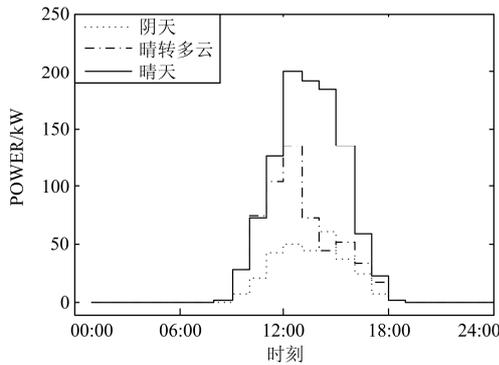


图 2 不同天气时 PV 模块出力情况

Fig. 2 Output of PV modules on different weather conditions

针对负荷数据，选取工作日和双休日具有代表性的小时负荷曲线，作为仿真数据，如图 3 所示。工作日时印刷厂机组负荷全勤工作，负荷需求大，变化幅度小，正午时刻为用电高峰，午夜时刻为用电低谷；而双休日时印刷厂部分机组停机，平均负荷需求小，但存在集中时段内负荷需求变化幅度大且频繁的情形。

根据 PV 和负荷曲线交点确定 BS 开关切换时刻，但每天 PV 和负荷情况不会完全相同，为测试

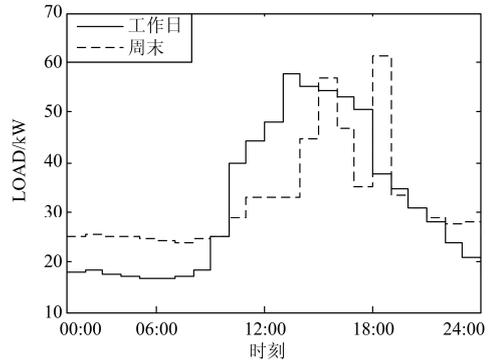


图 3 工作日以及双休日的负荷曲线

Fig. 3 Load curve of weekdays and weekends

闭环系统干扰抑制性能，假设实际负荷需求比期望值大 20%，PV 组件比期望少提供 20%。

系统参数和控制参数值分别见表 1 和表 2。 $P_i(k)(i=1,2,3,4)$ 初始值均设置为 0。充电状态初始值设置为 $x_m(1)=0.7B_c^{max}$ 。全状态 MPC 方法未知常参数在线估计初始值为 $\hat{\eta}_c(0)=1.0$ ， $\hat{\eta}_d(0)=1.0$ 。每一个 MPC 循环采用 Interior Point 数值解法寻求最优解。每种情形仿真时间为 1 天(24 h)。

表 1 系统参数值

Table 1 Parameters of the system

符号	取值	符号	取值
P_1^{max}	75 kW	B_c^{max}	520 kWh
P_2^{max}	75 kW	B_c^{min}	240 kWh
P_3^{max}	75 kW	η_c	0.85
P_4^{max}	75 kW	η_d	1.15

表 2 控制参数值

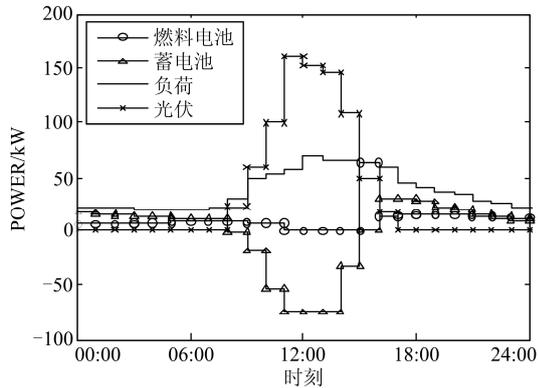
Table 2 Control parameters

符号	取值	符号	取值
c_1	1.0	c_3	0.8
c_2	0.2	α	0.01

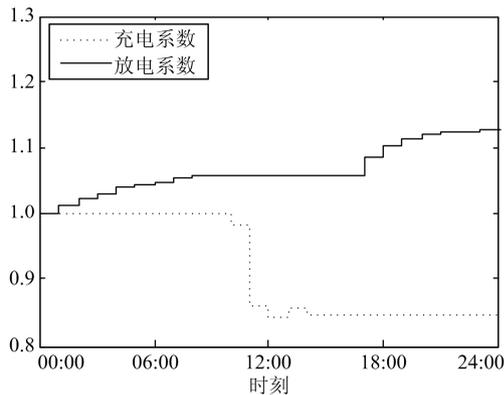
情形一：工作日采用全状态 MPC 方法能量调度图 4 分别为工作日时晴、晴转阴、阴 3 种不同天气条件下，PV-FC-BS 混合系统采用全状态 MPC 方法的能量调度结果以及参数估计结果。

由图 4 可以看出：晴天时 11:00—14:00，晴转阴时 11:00—12:00，光照充足，PV 发电直接满足负荷需求，且过剩的 PV 能量将转化为化学能储存到 BS 中，BS 处于充电状态，FC 不投入使用，充分利用光伏发电，减少燃料成本；晴天时 08:00—11:00 以及 15:00—16:00，晴转阴时 10:00—11:00、12:00—13:00 以及 14:00—15:00，阴天时 11:00—12:00，光伏不足，PV 与 FC 配合给负荷供电，充分利用光伏发电，并避免 BS 过度使用；夜间时，FC 和 BS 配合保证负荷不间断供电。全状态 MPC 方法能够实

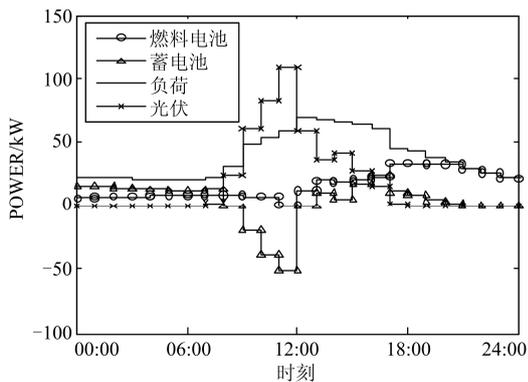
现 PV-FC-BS 混合系统的稳定运行与可靠控制。



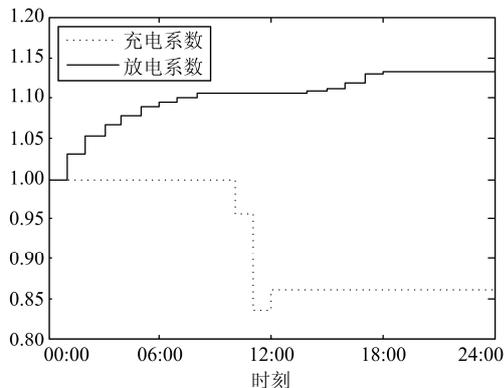
(a) 晴天条件能量调度($\lambda=0.00032$)



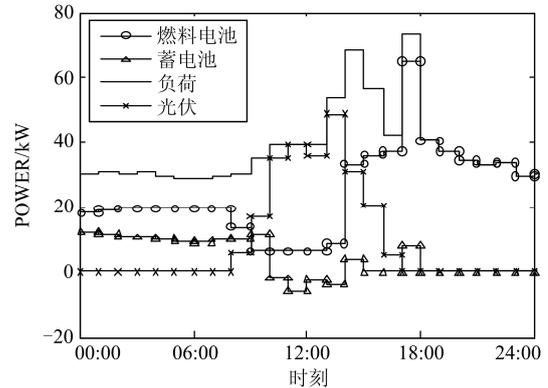
(b) 晴天条件参数估计($\lambda=0.00032$)



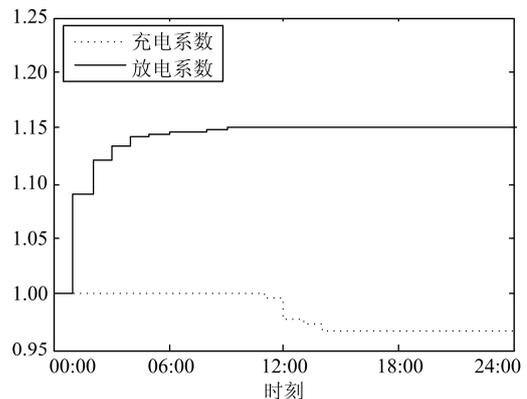
(c) 晴转阴条件能量调度($\lambda=0.00078$)



(d) 晴转阴条件参数估计($\lambda=0.00078$)



(e) 阴天条件能量调度($\lambda=0.004$)



(f) 阴天条件参数估计结果($\lambda=0.004$)

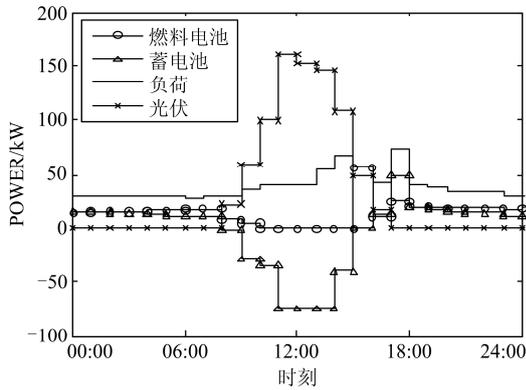
图 4 工作日采用全状态 MPC 方法能量调度结果

Fig. 4 Energy scheduling result on workday using full-state MPC method

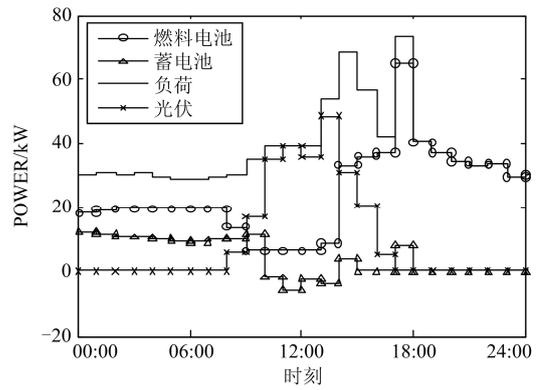
在不同天气条件下, 全状态 MPC 方法可实现 FC 投入时间长度和功率值的自适应调节, 晴天时 FC 输出功率小, 主要起平滑波动作用; 阴天时 FC 输出功率大, 主要起不间断负荷供电作用, 提高混合系统供电可靠性。同时, BS 充电或放电状态下, 充放电参数实现了实时更新, 能收敛到系统预设参数值, 如阴天时 BS 处于放电状态, 放电系数实时更新而充电系数保持不变。系统能量调度时, BS 充放电状态自由切换, FC 给予能量辅助, PV-FC-BS 3 者相互配合, 在充分利用 PV 且避免 BS 过度使用的前提下, 尽可能减少 FC 能量投入。全状态 MPC 方法实现了系统能量最优调度, 优化计算量小, 响应快速。

情形二: 双休日采用全状态 MPC 方法能量调度

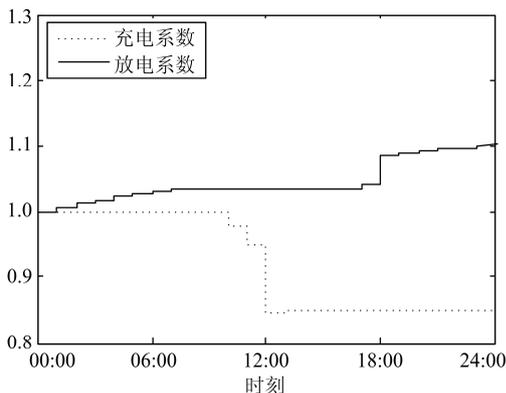
图 5 分别为工作日时晴、晴转阴、阴 3 种不同天气条件下, PV-FC-BS 混合系统采用全状态 MPC 方法的能量调度结果以及参数估计结果。



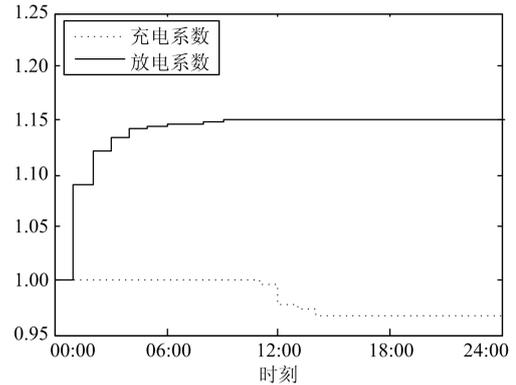
(a) 晴天条件能量调度($\lambda=0.000\ 18$)



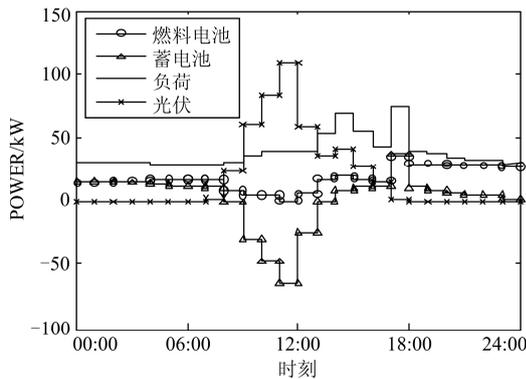
(e) 阴天条件能量调度($\lambda=0.0004$)



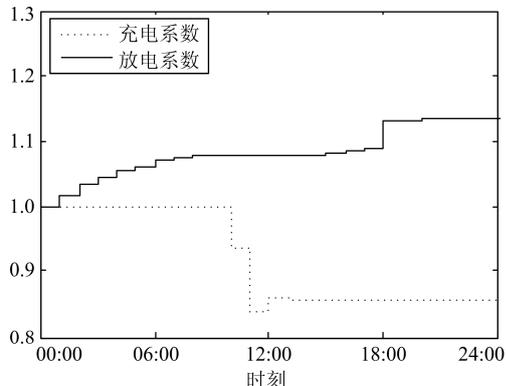
(b) 晴天条件参数估计($\lambda=0.000\ 18$)



(f) 阴天条件参数估计结果($\lambda=0.0004$)



(c) 晴转阴条件能量调度($\lambda=0.000\ 48$)



(d) 晴转阴条件参数估计($\lambda=0.000\ 48$)

图 5 双休日采用全状态 MPC 方法能量调度结果

Fig. 5 Energy scheduling result on weekend using full-state MPC method

由图 5 可以看出：在相同天气状况下，负荷需求在 14:00—19:00 时段存在频繁且剧烈突变，所提出的策略仍然可以给出最优调度。白天光照充足时，BS 电能充足，负荷波动期间，BS 可以迅速响应跟踪，保证功率平衡，减小燃料成本。白天光照不足时，FC 投入使用，BS 给以辅助，相互配合，跟踪负荷动态波动。全状态 MPC 方法在负荷变化频繁快速且变化幅度大的情形下，依然能够保持优良的控制性能，稳定性好，适应性强。

4 结论

针对 PV-FC-BS 混合系统实现高效、准确能量调度的难点问题，提出全状态 MPC 策略，建立统一 MIMO 线性动态功率流动模型，有效解决传统方法预测模型切换带来的稳定性问题，实现计算简化，提高系统能量调度快速性。针对 BS 充放电参数，设计自适应参数更新算法进行在线估计，实现 BS 参数实时自校正，提升系统能量调度准确性和稳定性。基于 Matlab 仿真结果表明：提出的控制策略再

不同天气情况和不同负荷条件下都能有效控制 PV-FC-BS 混合系统能量最优分配, 各构成单元配合合理, 响应迅速, 能满足不同应用条件的能量优化需求。该方法的提出为含有工作模式切换过程的非线性系统高性能控制与能量优化管理提供了可行的参考手段。

参考文献

- [1] BOSE B K. Global warming: energy, environmental pollution, and the impact of power electronics[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2010, 4(1): 6-17.
- [2] 张蕴昕, 孙运全. 混合储能在风光互补微网中的控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 93-98.
ZHANG Yunxin, SUN Yunquan. Control strategy of a hybrid energy storage in wind-solar hybrid generation micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 93-98.
- [3] 李晓东, 刘广一, 贾宏杰, 等. 基于电压调节的分布式可再生能源发电功率波动平抑策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 76-82.
LI Xiaodong, LIU Guangyi, JIA Hongjie, et al. Mitigation of output power fluctuations for distributed renewable energy generation based on voltage regulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 76-82.
- [4] 赵书强, 王明雨, 胡永强, 等. 基于不确定理论的光伏出力预测研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 213-220.
ZHAO Shuqiang, WANG Mingyu, HU Yongqiang, et al. Research on the prediction of PV output based on uncertainty theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 213-220.
- [5] 刘琳. 光伏电站有功功率优化分配[J]. 热力发电, 2015, 44(11): 105-108.
LIU Lin. Active power control in photovoltaic power plants[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(11): 105-108.
- [6] BELFKIRA R, ZHANG Lu, BARAKAT G. Optimal sizing study of hybrid wind/ PV/ diesel power generation unit[J]. Solar Energy, 2011, 85(1): 100-110.
- [7] 张纯江, 董杰, 刘君, 等. 蓄电池与超级电容混合储能系统的控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 334-340.
ZHANG Chunjiang, DONG Jie, LIU Jun, et al. A control strategy for battery-ultracapacitor hybrid energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 334-340.
- [8] 沈枢, 张沛超, 李中豪, 等. 平抑长短期风电功率波动的风储协调运行方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 12-18.
SHEN Shu, ZHANG Peichao, LI Zhonghao, et al. A coordination operation method of wind and energy storage hybrid system for smoothing short-term and long-term wind power fluctuations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 12-18.
- [9] 袁晓玲, 施俊华, 徐杰彦. 计及天气类型指数的光伏发电短期出力预测[J]. 中国电机工程学报, 2013, 34(33): 57-64.
YUAN Xiaoling, SHI Junhua, XU Jieyan. Short-term power forecasting for photovoltaic generation considering weather[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 34(33): 57-64.
- [10] MESSO T, JOKIPII J, PUUKKO J, et al. Determining the value of DC-link capacitance to ensure stable operation of a three-phase photovoltaic inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 665-673.
- [11] 张川, 杨雷, 牛童阳, 等. 平抑风电出力波动储能技术比较及分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 149-154.
ZHANG Chuan, YANG Lei, NIU Tongyang, et al. Comparison and analysis of energy storage technology to balance fluctuation of wind power output[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 149-154.
- [12] 齐保良, 孙玉龙. 小型风力发电混合储能及能量管理系统[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(3): 87-92.
QI Baoliang, SUN Yulong. Hybrid energy storage and energy management system in small wind power generation system[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(3): 87-92.
- [13] 赵飞, 许剑, 徐玉杰, 等. 基于复合储能系统平抑风电场波动功率研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(7): 99-105.
ZHAO Fei, XU Jian, XU Yujie, et al. Research on smoothing wind power fluctuations based on hybrid energy storage system[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(7): 99-105.
- [14] 马速良, 蒋小平, 马会萌, 等. 平抑风电波动的混合储

- 能系统的容量配置[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 111-114.
- MA Suliang, JIANG Xiaoping, MA Huimeng, et al. Capacity configuration of the hybrid energy storage system for wind power smoothing[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 111-114.
- [15] 杨珺, 张建成, 周阳, 等. 针对独立风光发电中混合储能容量优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 38-44.
- YANG Jun, ZHANG Jiancheng, ZHOU Yang, et al. Research on capacity optimization of hybrid energy storage system in stand-alone wind/PV power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 38-44.
- [16] TAZVINGA H, XIA Xiaohua, ZHANG Jiangfeng. Minimum cost solution of photovoltaic-diesel-battery hybrid power systems for remote consumers[J]. Solar Energy, 2013, 96(2): 292-299.
- [17] TAN K T, SO P L, CHU Y C, et al. Coordinated control and energy management of distributed generation inverters in a microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 704-713.
- [18] WANG T, KAMATH H, WILLARD S. Control and optimization of grid-tied photovoltaic storage systems using model predictive control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 1010-1017.
- [19] PÉREZ E, BELTRAN H, APARICIO N, et al. Predictive power control for PV plants with energy storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(2): 482-490.
- [20] 钱虹, 杨祖魁, 金蔚霄, 等. 循环流化床锅炉主蒸汽压力模型预测控制[J]. 热力发电, 2015, 44(7): 55-61.
- QIAN Hong, YANG Zukui, JIN Weixiao, et al. Model predictive control based main steam pressure control system for CFB boilers[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(7): 55-61.
- [21] WAN Zhaoyang, KOTHARE M V. Efficient scheduled stabilizing output feedback model predictive control for constrained nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(7): 1172-1177.
- [22] MHASKAR P, EL-FARRA N H, CHRISTOFIDES P D. Predictive control of switched nonlinear systems with scheduled mode transitions[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005, 50(11): 1670-1680.
- [23] 杨冬锋, 周苏荃, 魏剑啸, 等. 基于 MPC 的超短期优化调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 21-26.
- YANG Dongfeng, ZHOU Suquan, WEI Jianxiao, et al. Ultra-short term optimal dispatch method based on MPC[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 21-26.
- [24] GARCIA T F, BORDONS C. Optimal economical schedule of hydrogen-based microgrids with hybrid storage using model predictive control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(8): 5195-5207.
- [25] LEU J S, TUNG N H. Non-parametric RSS prediction based energy saving scheme for moving smart phones[J]. IEEE Transactions on Computers, 2014, 63(7): 1793-1808.
- [26] CLEVELAND W S. Robust locally weighted regression and smoothing scatter plots[J]. Theory and Methods Section, 1979, 74(368): 829-236.
-
- 收稿日期: 2016-06-02; 修回日期: 2016-09-13
- 作者简介:
- 薛花(1979—), 女, 博士, 副教授, 主要从事分布式电源并网控制技术、非线性理论与控制方法方面的研究工作; E-mail: distributedpower@163.com
- 张芮嘉(1991—), 女, 硕士研究生, 研究方向为分布式电源能量调度管理与优化策略方法; E-mail: 185256827@qq.com
- 胡英俊(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为分布式电源并网变流器非线性理论与控制方法。E-mail: yingjunhu_hess@163.com
- (编辑 周金梅)