DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.3.111 **中图分类号**：TM712 **文献标志码**：A

基于模型预测控制的光伏混合储能系统控制策略

海 涛[1]，刘昱麟[1]，王 钧[2]，陆剑锋[3]
(1.广西大学电气工程学院，南宁 530004；2.华蓝设计(集团)有限公司，南宁 530004；
3.广西中烟工业有限责任公司，南宁 530004)

摘要：储能系统是光伏微电网的重要组成部分，传统的蓄电池储能系统存在功率密度低、使用寿命较短等问题，建立了1种以光伏发电为主的超级电容混合储能系统，针对该混合储能系统提出了1种控制策略，该策略通过模型预测控制MPC(model predictive control)与低通滤波器的协同工作，控制与储能元件相连的DC-DC变换器，通过虚拟同步电动机控制与交流侧相连的DC-AC变换器。MPC为1种实时控制方法，可以根据系统的当前状态决定未来一定时域内的约束条件，对预测时域的控制目标进行优化，相较于其他控制方法，具有良好的稳定性和鲁棒性。光照强度等参数变化时，可以使直流母线电压保持稳定，并提高直流母线电压的动态响应能力。最后在MATLAB/Simulink中对系统进行了仿真，验证了该方法的有效性。

关键词：微电网；混合储能；超级电容；模型预测控制

Control Strategy for Photovoltaic Hybrid Energy Storage System Based on Model Predictive Control

HAI Tao[1], LIU Yulin[1], WANG Jun[2], LU Jianfeng[3]
(1. College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Hualan Design Group Co., Ltd., Nanning 530004, China; 3. China Tobacco Guangxi Industrial Co., Ltd., Nanning 530004, China)

Abstract: The energy storage system is an important part of photovoltaic microgrid. However, the traditional battery energy storage system has many problems such as a low power density and a short service life. A supercapacitor hybrid energy storage system based on photovoltaic power generation is established, and its control strategy is proposed, under which the DC-DC converter connected to the energy storage element is controlled through the coordinated operation of model predictive control (MPC) and low-pass filter, and the DC-AC converter connected to the AC side is controlled through a virtual synchronous generator. MPC is a real-time control method, and it can determine the constraints in certain time domain in the future according to the system state at present and optimize the control objectives in the predicted time domain, which has good stability and robustness compared with other control methods. Under changes in the parameters including the intensity of solar radiation, the DC bus voltage can be kept stable, and the dynamic response capability of DC bus voltage can be improved. Finally, the system is simulated in MATLAB/Simulink, and the effectiveness of the proposed method is verified.

Keywords: Microgrid; hybrid energy storage; supercapacitor; model predictive control (MPC)

收稿日期：2023-07-03；**修回日期**：2023-09-05；**录用日期**：2023-10-29；**网络首发日期**：2024-04-08
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51867003)；广西重点研发计划资助项目(桂科 AB22035037)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 51867003; Guangxi Key R&D Program under the grant Gui Ke AB22035037

太阳能、风能等可再生能源受环境的影响较大，具有随机性、间歇性的特点，大规模接入可能会给电网带来安全隐患[1]，为了保证良好的发电质量，配置储能系统是1种有效的解决办法。现有的储能系统都存在自身的局限性，单一的储能系统很难同时满足寿命长、系统响应快、功率密度高等要

求[2]，所以本文采用了混合储能系统，常用的储能器件有超级电容、飞轮储能、超导储能等，超级电容与其他储能器件相比，具有较高的功率密度、充放电速度快、适应能力强、几乎不需要人工维护，将蓄电池能量密度大和超级电容功率密度大的优点相结合，可以有效提升储能系统的性能[3]。

针对混合储能系统，国内外学者都进行了大量的研究，文献[4]提出了 1 种基于自抗扰的控制策略，利用自抗扰控制代替传统比例积分 PI(proportional integral)控制，并针对扩张状态观测器引入了模糊自适应控制，有效缩短了母线电压恢复时间，但自抗扰控制调节时间短，在负载变化快的场合效果较差；文献[5]采用了模糊理论对混合储能系统的荷电状态 SOC(state-of-charge)进行了自适应控制，改善了微电网中间歇性电网的波动性，但模糊控制依赖专家经验，准确性会受到限制；文献[6]提出了 1 种基于数字预测控制的控制策略，有效降低了蓄电池的峰值电流和能量损耗，但数字预测控制依赖于精确的电路模型，鲁棒性较差。

针对以上控制方法出现的问题，本文提出并研究了 1 种基于模型预测控制 MPC(model predictive control)的光伏微电网混合储能控制方法。MPC 是 1 种实时控制方法，具有滚动预测、提前控制的优势，可以适应负载变化较快的场合，且具有良好的准确性和鲁棒性。光伏微电网分别由光伏发电系统、蓄电池储能系统、超级电容器储能系统组成，光伏发电系统为负载提供能量，由混合储能系统来动态调节多余或不足的能量，其中混合储能系统中的蓄电池吸收光伏输出功率中的低频分量，超级电容吸收光伏输出功率中的高频分量[7]。本文分析并给出了上述光伏微电网的控制方法，实现了光伏微电网的稳定运行及动态响应能力，最后通过对系统的建模与仿真验证了控制方法的有效性。

1 光伏微电网系统结构

含混合储能系统的光伏微电网结构如图 1 所示，光伏阵列、蓄电池、超级电容通过 DC-DC 变换器接入直流母线，各个储能元件的电压与直流母线电压相互独立，拓展了储能器件的工作电压范围[8]。交流负载和电网通过 LC 滤波器、三相逆变电路与直流母线相连。由于微电网引入了蓄电池和超级电容组成的混合储能系统，可以对光伏发电单元进行削峰填谷，使微电网更高效地利用光伏发电单元所产生的能量[9]。

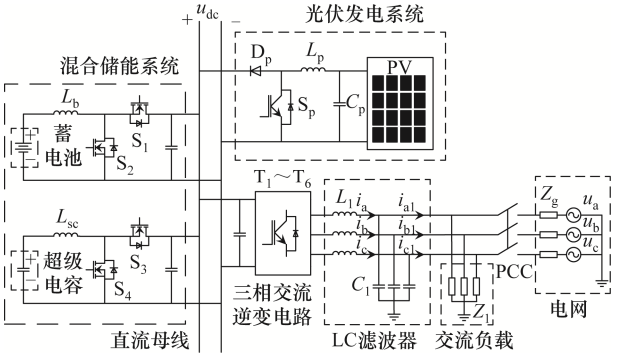


图 1 光伏微电网整体结构

Fig. 1 Overall structure of photovoltaic microgrid

在光伏阵列产生的能量输出到直流母线之前，需要利用 DC-DC Boost 变换器进行升压，Boost 升压电路由二极管 D_p、开关管 S_p、电容 C_p、电感 L_p 组成，可以通过控制开关管的占空比 D 来改变电压的大小，并且有助于减少谐波[10]。Boost 升压电路中 IGBT 开关的占空比，由最大功率点追踪系统产生的占空比 D 决定[11]。电路中电感和电容的临界值分别为

$$D=(U_o-U_i)/U_o \tag{1}$$

$$L_{min}=D(1-D)^2T_sU_o/(2I_o) \tag{2}$$

$$C_{min}=DT_sI_o/(0.01U_o) \tag{3}$$

式中：U_o 为 Boost 电路输出电压；U_i 为 Boost 电路输入电压；I_o 为 Boost 电路输出电流；T_s 为采样周期。

若将蓄电池和超级电容直接连接到直流母线上，储能器件可能无法有效控制充放电电流，导致瞬间电流变化过大，损坏储能元件[12]。所以要在储能元件和直流母线之间添加双向 DC-DC 变换器来控制储能系统的充放电。双向 DC-DC 变换器由开关管 S_1~S_4、电感 L_b、L_{sc} 组成，可以基于能量控制策略对开关管进行相应控制。如果光伏阵列发电量小于直流母线所需电量，混合储能系统将会放电；

如果发电量大于直流母线所需电量，混合储能系统将会吸收多余的电量进行充电[13]。

在并网系统中，逆变器承担着从直流到交流，从单相到三相的重要作用，影响着整个发电系统甚至电网的稳定运行[14]。DC-AC 变换器由三相交流逆变电路 T_1~T_6 和 LC 滤波器 L_1、C_1 组成，公共耦合点 PCC(point of common coupling)控制微电网与电网的连接。

2　光伏微电网系统控制策略

2.1　模型预测控制原理

MPC 又称滚动时域控制，是 1 种基于预测控制的闭环优化控制策略，近年来受到了广泛关注[15]。该算法主要分为 4 个环节，第一个环节为设定参考轨迹，第二个环节为建立预测模型，第三个环节为反馈矫正环节，最后一个环节为滚动优化环节[16]。

图 2 为 MPC 的基本控制原理，在 k 时刻采样，根据测量输出 $y(k)$，在线求解 1 个有限时域开环优化问题，并将求得的控制量 $u(k)$作用于被控对象，在下一个采样时刻 k+1，利用新的测量信息 $y(k+1)$重复上述过程[17]。当 MPC 应用到实际系统中，会存在各种各样的约束，在系统设计时如果简单忽略这些约束，可能导致实际系统的性能变差，甚至造成系统的不稳定[18]。正是由于在线求解的优化问题中很容易包括各种等式或不等式约束，不同于传统控制方法，MPC 是处理约束系统控制问题最有效的方法之一。

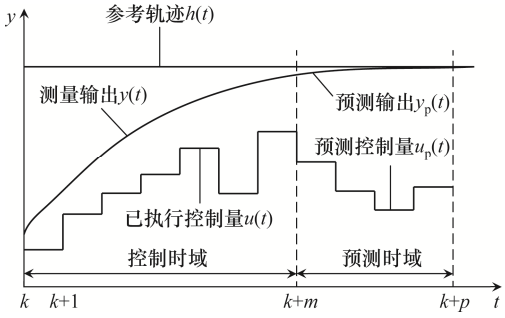


图 2　MPC 控制原理

Fig. 2 Schematic of MPC control

已知 k 时刻的输出状态量 $y(k)$及预测模型，状态空间模型设定为

$$y(k+1)=f(y(k),u(k)) \tag{4}$$

基于式(4)，可以计算出 k 时刻起，未来一段时间内的输出状态量 y_p 为

$$\{y_p(k+1|k),y_p(k+2|k),\cdots,y_p(k+p|k)\} \tag{5}$$

式中，$y_p(k+1|k)$为在 k 时刻观测到的 k+1 时刻的值。控制量的约束条件设定为

$$\begin{cases} u_{\min}\leqslant u(k+i)\leqslant u_{\max} \\ y_{\min}\leqslant y(k+i|k)\leqslant y_{\max} \end{cases} \tag{6}$$

式中，$u_{\min}$、$u_{\max}$ 和 $y_{\min}$、$y_{\max}$ 分别为控制量和测量输出的最小值、最大值。

控制目标是使$y(k)$逐渐接近事先设定的参考轨迹 $h(t)$，优化目标函数设定为

$$J_{\min}=\sum_{i=1}^{p}[h(i)-y_p(k+i|k)]^2 \tag{7}$$

求解式(7)可以得到控制序列 u=[$u(k)$, $u(k+1)$, $\cdots$, $u(k+m)$]，并基于所得到的序列对 $y(t)$进行最优化处理。

2.2　DC-DC 变换器控制策略

基于 MPC 的混合储能控制策略如图 3 所示。用直流母线参考电压 u_{ref} 减去直流母线实际电压 u_{dc}，将得到的误差电压 Δu 反馈到串级 PI 控制器中得到直流参考电流 i_{dcref}，再通过模型预测控制进行最优化处理，可以获得混合储能系统参考电流 i_{ref}。

i_{dcref}的计算公式为

$$\begin{cases} \Delta u=u_{\text{dcref}}-u_{\text{dc}} \\ i_{\text{dcref}}=k_p\Delta u+k_i\int\Delta u\mathrm{d}t \end{cases} \tag{8}$$

式中：k_p 为比例常数；k_i 为积分常数。MPC 控制器通过接收 i_{dcref} 和超级电容荷电状态 $S_{\text{OC,sc}}$，将 $S_{\text{OC,sc}}$ 控制在指定范围内，所以系统中运用的预测模型表示了混合储能系统参考电流与超级电容荷电状态之间的动态关系，超级电容的荷电状态可以表示为

$$S_{\text{OC,sc}}=-100i_n/Q_n\cdot\int i_{\text{scref}}^{*}\mathrm{d}t+S_{\text{OC,sc0}} \tag{9}$$

式中：i_n 为超级电容的额定电流；Q_n 为超级电容的额定容量；i_{scref}^{*} 为超级电容参考电流的标幺值；$S_{\text{OC,sc0}}$ 为超级电容的初始荷电状态。

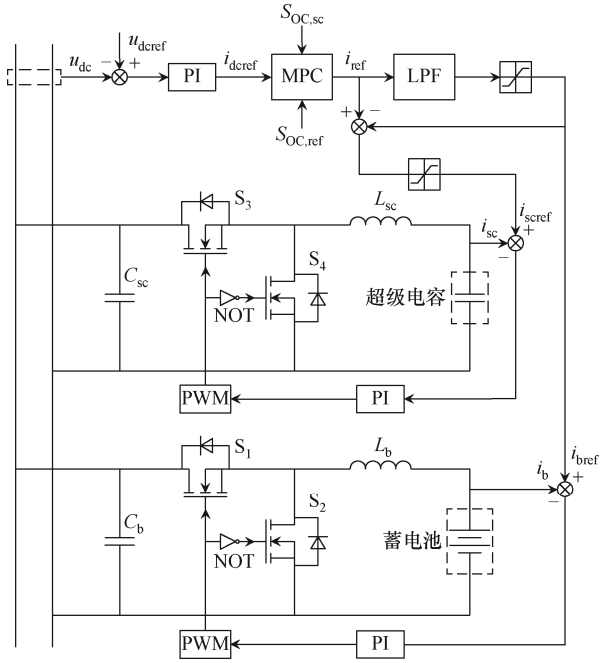


图 3 基于 MPC 的混合储能系统控制策略

Fig. 3 Control strategy for hybrid energy storage system based on MPC

i_{scref}^{*} 可以通过拉普拉斯变换表示为

$$i_{\text{scref}}^{*}=\frac{\tau_{\text{f}}s}{i_{\text{n}}(\tau_{\text{f}}s+1)}i_{\text{ref}}+\frac{\tau_{\text{f}}s}{\tau_{\text{f}}s+1}i_{\text{com}} \tag{10}$$

式中：τ_{f} 为滤波器的时间常数；i_{com} 为 MPC 施加的补偿电流。假设 $\tau_{\text{f}}=\omega_{\text{c}}^{-1}$，滤波器将通过截止频率为 ω_{c} 的低频分量，并由蓄电池处理，剩余的高频分量由超级电容处理。

式(10)也可以表示为

$$\begin{cases}\tau_{\text{f}}\mathrm{d}x_{\text{f}}/\mathrm{d}t=i_{\text{com}}-x_{\text{f}}+i_{\text{ref}}/i_{\text{n}}\\ i_{\text{scref}}^{*}=i_{\text{ref}}/i_{\text{n}}+i_{\text{com}}-x_{\text{f}}\end{cases} \tag{11}$$

式中，x_{f} 为滤波器的状态变量模型。基于式(9)和式(11)可以得出超级电容荷电状态的状态变量模型为

$$\begin{cases}\mathrm{d}S_{\text{OC,sc}}/\mathrm{d}t=100/Q_{\text{sc}}\cdot i_{\text{n}}(x_{\text{f}}-i_{\text{com}})-100/Q_{\text{sc}}\cdot i_{\text{ref}}\\ \mathrm{d}x_{\text{f}}/\mathrm{d}t=[i_{\text{ref}}-i_{\text{n}}(x_{\text{f}}-i_{\text{com}})]/(\tau_{\text{f}}i_{\text{n}})\end{cases} \tag{12}$$

式中，Q_{sc} 为超级电容的实际容量。MPC 补偿器是 1 个离散时间控制器，因此该方法利用了超级电容荷电状态的状态变量模型。基于式(12)，MPC 预测模型可以表示为

$$\begin{cases}\boldsymbol{x}_{\text{p}}(k+1)=(T_{\text{s}}\boldsymbol{A}+\boldsymbol{I})\boldsymbol{x}_{\text{p}}(k)+T_{\text{s}}\boldsymbol{B}_1u(k)+T_{\text{s}}\boldsymbol{B}_2d(k)\\ y_{\text{p}}(k)=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}_{\text{p}}(k)\end{cases} \tag{13}$$

式中：$y_{\text{p}}(k)$为预测输出量；$\boldsymbol{x}_{\text{p}}(k)=[S_{\text{OC,sc}}(k)\quad x_{\text{f}}(k)]^{\text{T}}$ 为预测模型的状态变量；$u(k)=i_{\text{com}}(k)$为控制变量；$d(k)=i_{\text{ref}}/i_{\text{n}}$ 为测量扰动；$\boldsymbol{I}$ 为 2×2 单位矩阵；矩阵 $\boldsymbol{A}$ 和向量 $\boldsymbol{B}_1$、$\boldsymbol{B}_2$、$\boldsymbol{C}$ 分别为

$$\begin{cases}\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}0 & 100i_{\text{n}}/Q_{\text{sc}}\\ 0 & -1/\tau_{\text{f}}\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{B}_1=\boldsymbol{B}_2=\begin{bmatrix}100i_{\text{n}}/Q_{\text{sc}}\\ -1/\tau_{\text{f}}\end{bmatrix}\\ \boldsymbol{C}=\begin{bmatrix}1 & 0\end{bmatrix}\end{cases} \tag{14}$$

图 4 为控制策略中 MPC 控制的流程，在优化过程中，MPC 控制器采用有效集方法来求解二次规划问题，并求解控制变量。在二次规划模型中，代价函数是二次的，约束条件是线性的[19]。

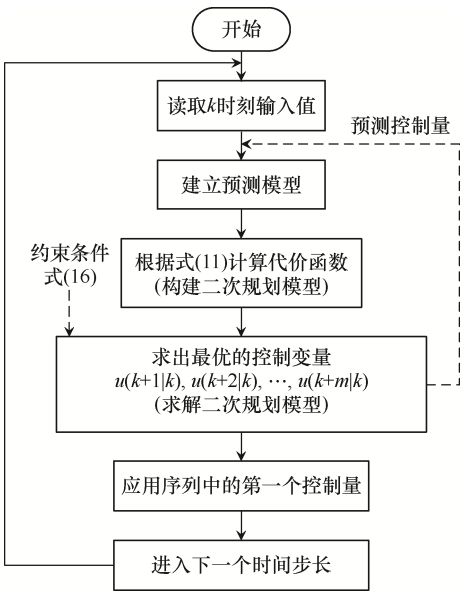


图 4 控制策略中所用 MPC 控制流程

Fig. 4 Flow chart of MPC control used in control strategy

MPC 的目标函数可以表示为

$$\sum_{i=1}^{m}\psi_{\text{m}}[u(k+i|k)-u(k+i-1|k)]^2+\sum_{i=1}^{p}\psi_{\text{e}}\cdot[S_{\text{OC,ref}}(k+i|k)-y_{\text{p}}(k+i|k)]^2+\rho\varepsilon(k)^2 \tag{15}$$

约束条件为

$$\begin{cases} S_{\mathrm{OC,min}} - \lambda\varepsilon(k) \leqslant y_{\mathrm{p}}(k+i|k) \leqslant S_{\mathrm{OC,max}} + \lambda\varepsilon(k) \\ i \in \{1,\cdots,p\} \end{cases} \tag{16}$$

式中：ψ_{m} 为控制变量的调整权重；ψ_{e} 为误差的调整权重；ρ 为违反约束条件的调整权重；$\varepsilon(k)$ 为松弛变量；$S_{\mathrm{OC,ref}}$、$S_{\mathrm{OC,min}}$、$S_{\mathrm{OC,max}}$ 分别为储能系统 SOC 的参考值、最小值、最大值；m 和 p 分别为控制时域和预测时域的范围；λ 为约束条件的待定系数。当 $i>m$ 时，$\lambda>0$，$u(k+i|k)-u(k+i-1|k)=0$。

MPC 控制器通过滤波器的状态变量模型来预估有多少电流将分配给超级电容，之后预测 $S_{\mathrm{OC,sc}}$ 在预测时域内的变化。在优化环节中，MPC 计算出一系列的补偿电流 i_{com}，通过式(16)所示的约束条件，使得 $S_{\mathrm{OC,sc}}$ 逐渐接近参考值，然后，MPC 控制器应用序列中的第一个值，并进入下一个时间步长。之后通过低通滤波器可以将混合储能系统参考电流 i_{ref} 的低频分量分离出来，将低频分量作为蓄电池的参考电流 i_{bref}，高频分量作为超级电容器的参考电流 i_{scref}，用得出的参考电流 i_{bref} 和 i_{scref} 分别减去蓄电池和超级电容器的实际电流，经过 PI 调节后产生占空比，输入到 PWM 发生器中产生脉冲，分别决定 DC-DC 变换器的工作方式。

i_{bref} 和 i_{scref} 可以分别表示为

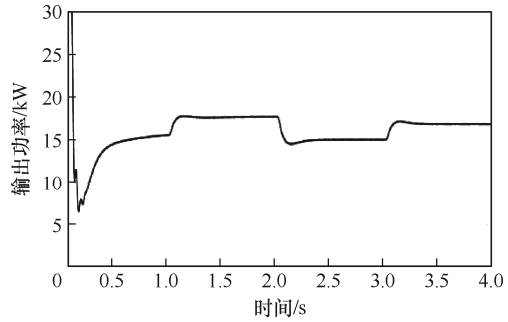
$$\begin{cases} i_{\mathrm{bref}} = \dfrac{1}{\tau_{\mathrm{f}}s+1} i_{\mathrm{ref}} + \dfrac{\tau_{\mathrm{f}}s}{\tau_{\mathrm{f}}s+1} i_{\mathrm{n}} i_{\mathrm{com}} \\ i_{\mathrm{scref}} = \dfrac{\tau_{\mathrm{f}}s}{\tau_{\mathrm{f}}s+1} (i_{\mathrm{ref}} - i_{\mathrm{n}} i_{\mathrm{com}}) \end{cases} \tag{17}$$

3　仿真结果与讨论

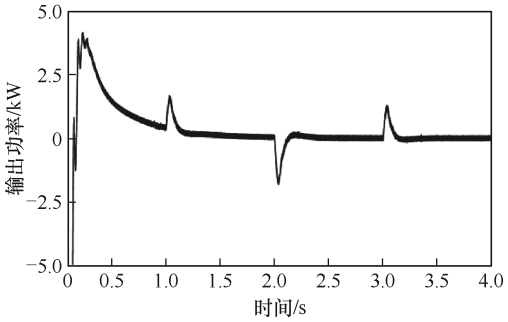
采用 MATLAB R2022a 进行仿真，搭建如图 1 所示的光伏混合储能微电网，参数设置为：蓄电池额定电压为 325 V，额定容量为 200 A·h，L_{b}=0.01 H；超级电容器额定电压为 400 V，额定电容为 110 F，L_{sc}=0.02 H；光伏阵列的开路电压为 330 V，短路电流为 48 A，最大功率点的电压和电流分别为 250 V 和 40 A，L_{p}=3 mH，C_{p}=3 μH，温度 T=25 ℃，MPC 中的参考超级电容荷电状态设置为 75%。在仿真中，考虑了光照强度和负载变化 2 种情况。

3.1　光照强度变化时的仿真结果

初始光照强度设定为 800 W/m²，在 1 s 时下降到 400 W/m²，2 s 时光照强度上升至 1 000 W/m²，3 s 时下降到 600 W/m²。图 5 为光照强度发生变化时蓄电池和超级电容输出功率，1 s 和 3 s 时光照强度下降，蓄电池开始放电，补偿不足的平均功率，超级电容补偿不足的瞬时功率，2 s 时光照强度上升，蓄电池开始充电，吸收多余的平均功率，超级电容吸收多余的瞬时功率。



(a) 蓄电池



(b) 超级电容

图 5　光照强度变化时蓄电池和超级电容输出功率

Fig. 5 Battery and supercapacitor output power under changes in the intensity of solar radiation

图 6 为光照强度发生变化时超级电容的荷电状态，将利用传统 PI 控制、模糊控制、MPC 控制的超级电容荷电状态进行对比，相较于其他 2 种控制方法，采用了 MPC 控制的超级电容荷电状态超调量更小，可以保持在预设的范围内波动，表明采用 MPC 控制更有利于超级电容的连续稳定运行。

图 7 为光照强度发生变化时的直流母线电压波形，将利用传统 PI 控制、模糊控制、MPC 控制的直流母线电压进行对比，光照强度变化时 3 种控

制方法的过冲电压和稳定时间见表 1，结果表明 MPC 控制比其他 2 种控制方法有更好的控制效果。

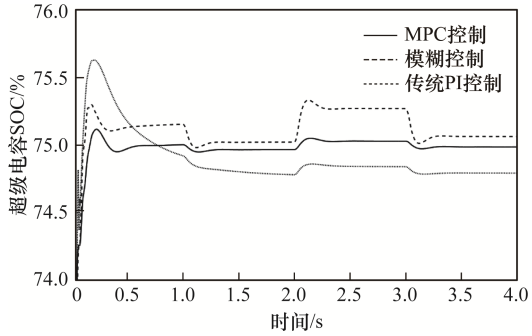


图 6 光照强度变化时的超级电容荷电状态

Fig. 6 SOC of supercapacitor under changes in the intensity of solar radiation

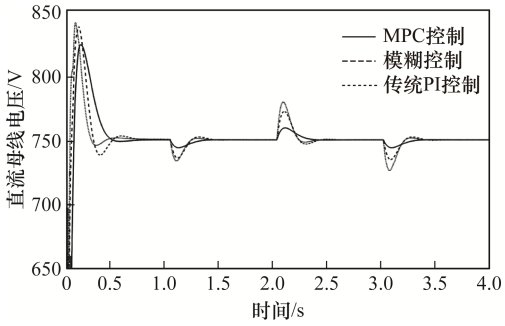


图 7 光照强度变化时的直流母线电压波形

Fig. 7 Waveforms of DC bus voltage under changes in the intensity of solar radiation

表 1 光照强度变化时 3 种控制方法的过冲峰值和稳定时间

Tab. 1 Overshoot peak and stabilization time under three control methods when the intensity of solar radiation changes

控制方法	变化时刻/s	过冲峰值/V	稳定时间/s
传统 PI 控制	1	16.3	0.442
	2	29.1	0.412
	3	24.4	0.494
模糊控制	1	14.0	0.408
	2	21.9	0.406
	3	15.3	0.540
MPC 控制	1	4.8	0.345
	2	7.2	0.355
	3	4.8	0.341

3.2 负载变化时的仿真结果

初始时设定为无负载，在 1 s 时负载功率上升到 10 kW，2 s 时负载功率下降到 5 kW，3 s 时上升到 8 kW。图 8 为负载发生变化时蓄电池和超级电容输出功率，1 s 和 3 s 时负载功率上升，蓄电池吸收多余的平均功率，超级电容吸收多余的瞬时功率。2 s 时负载功率下降，蓄电池补偿平均功率，超级电容补偿瞬时功率。

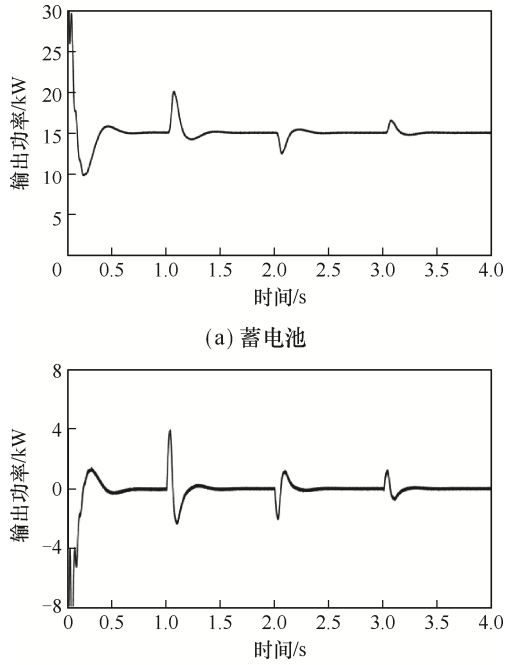


图 8 负载变化时蓄电池和超级电容输出功率

Fig. 8 Battery and supercapacitor output power when load changes

图 9 为负载发生变化时超级电容的荷电状态，将利用传统 PI 控制、模糊控制、MPC 控制的超级电容荷电状态进行对比，相较于其他 2 种控制方法，采用了 MPC 控制的超级电容荷电状态超调量更小，运行更加稳定，表明采用 MPC 控制更有利于超级电容的连续稳定运行。

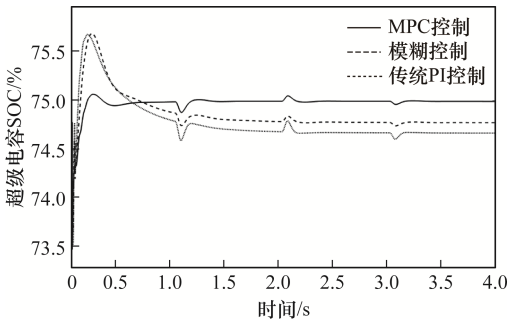


图 9 负载变化时的超级电容荷电状态

Fig. 9 SOC of supercapacitor when load changes

图 10 为负载发生变化时的直流母线电压波形，将利用传统 PI 控制、模糊控制、MPC 控制的直流母线电压进行对比，负载变化时 3 种控制方法的过冲电压和稳定时间见表 2，结果表明 MPC 控制比其他 2 种控制方法有更好的控制效果。

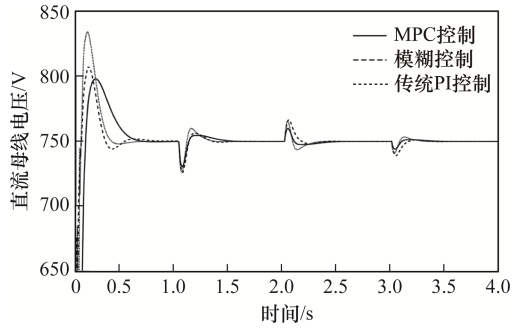


图 10　负载变化时的直流母线电压波形

Fig. 10 Waveforms of DC bus voltage when load changes

表 2　负载变化时 3 种控制方法的过冲峰值和稳定时间

Tab. 2 Overshoot peak and stabilization time under three control methods when load changes

控制方法	变化时刻/s	过冲峰值/V	稳定时间/s
传统 PI 控制	1	24.8	0.501
	2	16.7	0.521
	3	11.1	0.492
模糊控制	1	24.3	0.527
	2	15.5	0.510
	3	8.6	0.499
MPC 控制	1	20.4	0.482
	2	10.2	0.506
	3	6.1	0.481

4　结语

本文提出了 1 种基于混合储能的光伏微电网控制方法，展示了如何运用混合储能系统来维持直流母线电压的稳定，同时提高直流母线电压的动态响应能力。本文采用 MPC 控制，针对光照强度和负载变化 2 种情况进行研究，采用 MATLAB/Simulink 软件进行仿真验证，结果表明，当光照强度变化时，MPC 控制与 PI 控制相比，过冲峰值减少约 75.4%，调节时间缩短约 24%；与模糊控制相比，过冲峰值减少约 67.1%，调节时间缩短约 21.6%。当负载变化时，MPC 控制与 PI 控制相比，过冲峰值减少约 33.9%，调节时间缩短约 3.0%；与模糊控制相比，过冲峰值减少约 26.5%，调节时间缩短约 4.3%。并且超级电容荷电状态也更加稳定，确保了超级电容的连续可靠运行，达到了预期效果。本文提出的控制方法可以应用到更多种类的微电网中，具有广阔的前景。

参考文献：

[1] 苗晓阳, 李冰然, 傅洪全. 适用于 DFIG 连接到直流微网的双变换器设计与实现[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 170-181.
Miao Xiaoyang, Li Bingran, Fu Hongquan. Design and implementation of dual-converter for connecting DFIG to DC microgrid [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 170-181. (in Chinese)

[2] Ahmed M, Meegahapola L, Vahidnia A, et al. Stability and control aspects of microgrid architectures – A comprehensive review [J]. IEEE Access, 2020, 8: 144730-144766.

[3] 杨荣, 邹晓松, 袁旭峰, 等. 计及混合储能荷电状态的光伏直流微网功率分配策略[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(9): 118-126.
Yang Rong, Zou Xiaosong, Yuan Xufeng, et al. The power distribution strategy of the photovoltaic DC microgrid considering the state of charge of hybrid energy storage [J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(9): 118-126. (in Chinese)

[4] 马幼捷, 张超, 周雪松. 基于自抗扰的混合储能系统控制策略[J]. 电源技术, 2023, 47(1): 122-126.
Ma Youjie, Zhang Chao, Zhou Xuesong. Control strategy of hybrid energy storage system based on active disturbance rejection [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2023, 47(1): 122-126. (in Chinese)

[5] 熊雄, 王江波, 杨仁刚, 等. 微电网中混合储能模糊自适应控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 677-681.
Xiong Xiong, Wang Jiangbo, Yang Rengang, et al. A fuzzy adaptive control strategy for composite energy storage system to cope with output power fluctuation of intermittent energy source in microgrid [J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 677-681. (in Chinese)

[6] Wang Li, Wang Yujie, Liu Chang, et al. A power distribution strategy for hybrid energy storage system using adaptive model predictive control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(6): 5897-5906.

[7] Khan K A, Khalid M. Improving the transient response of hybrid energy storage system for voltage stability in DC microgrids using an autonomous control strategy [J]. IEEE Access, 2021, 9: 10460-10472.

[8] Xu Qianwen, Vafamand N, Chen Linglin, et al. Review on advanced control technologies for bidirectional DC/DC converters in DC microgrids [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(2): 1205-1221.

[9] 张美玲, 梁中豪, 杨艳芳, 等. 用于独立光伏发电系统的混合储能控制方法[J]. 电力电子技术, 2022, 56(10): 108-111, 132.
Zhang Meiling, Liang Zhonghao, Yang Yanfang, et al. Hybrid energy storage control method for independent photovoltaic power generation system [J]. Power Electronics, 2022, 56(10): 108-111, 132. (in Chinese)

[10] Biswas D K, Singh P P. DC microgrid power management by cascaded PI control of HESS [C]// 2022 4th International Conference on Energy, Power and Environment (ICEPE). Shillong, India, 2022: 1-5.

[11] Augustine S, Mishra M K, Lakshminarasamma N. A unified control scheme for a standalone solar-PV low voltage DC microgrid system with HESS [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2020, 8(2): 1351-1360.

[12] Kotra S, Mishra M K. Design and stability analysis of DC microgrid with hybrid energy storage system [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(3): 1603-1612.

[13] 郭伟. 混合储能阵列系统协调控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
Guo Wei. Research on coordinated control strategy of hybrid energy storage array system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020. (in Chinese)

[14] 赵伟, 李雄, 乔仁飞, 等. 基于混合储能的孤岛微网 VSG 控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12): 33-40.
Zhao Wei, Li Xiong, Qiao Renfei, et al. VSG control strategy of an isolated microgrid based on hybrid energy storage [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12): 33-40. (in Chinese)

[15] Zhao Yulong, Wang Weida, Xiang Changle, et al. Research and bench test of nonlinear model predictive control-based power allocation strategy for hybrid energy storage system [J]. IEEE Access, 2018, 6: 70770-70787.

[16] Liu Xinbo, Suo Yongbing, Zhang Zhou, et al. A new model predictive current control strategy for hybrid energy storage system considering the SOC of the supercapacitor [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2023, 11(1): 325-338.

[17] 杨悦强, 祝龙记. 微电网超级电容器混合储能系统控制策略[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2021, 39(2): 71-80.
Yang Yueqiang, Zhu Longji. Control strategy of microgrid super capacitor hybrid energy storage system [J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2021, 39(2): 71-80. (in Chinese)

[18] Karami Z, Shafiee Q, Sahoo S, et al. Hybrid model predictive control of DC-DC Boost converters with constant power load [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2021, 36(2): 1347-1356.

[19] Aguirre M, Kouro S, Rojas C A, et al. Switching frequency regulation for FCS-MPC based on a period control approach [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(7): 5764-5773.



海涛

作者简介：

海涛(1963—)，男，通信作者，本科，教授级高级工程师。研究方向：光伏发电储能，智能检测及电力系统节能。E-mail：976581187@qq.com。

刘昱麟(1998—)，男，硕士研究生。研究方向：光伏发电储能。E-mail：1468809495@qq.com。

王钧(1985—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：新能源应用，光伏建筑一体化，光储直柔。E-mail：15716762429@163.com。

陆剑锋(1978—)，男，硕士，工程师。研究方向：新能源应用。E-mail：87055555@qq.com。

(责任编辑：郭凯凯)