

引用格式:张万家,赵耀,陈永江.基于改进FCS-MPC的储能系统控制策略[J].电力科学与技术学报,2025,40(1):221-229.

Citation: ZHANG Wanjia, ZHAO Yao, CHEN Yongjiang. Control strategy of energy storage system based on improved FCS-MPC[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1): 221-229.

基于改进 FCS-MPC 的储能系统控制策略

张万家, 赵 耀, 陈永江

(上海电力大学电气工程学院, 上海 200090)

摘要:当微电网负荷功率发生波动时,储能系统能够通过控制逆变器维持系统电压频率稳定。储能逆变器通常采用PI双闭环控制策略,但是由于PI控制存在滞后性,导致系统动态响应速度慢。为此,提出一种考虑Lyapunov稳定约束的有限集模型预测控制(finite control set-model predictive control, FCS-MPC)策略。首先,通过Lyapunov稳定约束实现对主控制目标电容电压的稳定控制,再根据电容电压总谐波失真约束项的轻重设置权重系数;然后,通过使目标函数最小实现协同控制,解决传统FCS-MPC目标函数耦合导致系统不稳定以及权重系数难以整定的问题,将改进后的FCS-MPC方法和下垂控制相结合控制储能逆变器;最后,在MATLAB和RT-LAB平台上进行仿真验证。仿真结果表明:与传统控制策略相比,改进后的FCS-MPC方法可以提高系统动态响应速度,实现多目标协同控制并且对权重系数有很好的鲁棒性。

关键词:储能系统;有限控制集;多约束;动态响应速度;逆变器

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2025.01.023

中图分类号: TM73

文章编号: 1673-9140(2025)01-0221-09

Control strategy of energy storage system based on improved FCS-MPC

ZHANG Wanjia, ZHAO Yao, CHEN Yongjiang

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

Abstract: When the load power of a microgrid fluctuates, the energy storage system can maintain the stability of the system voltage and frequency by controlling the inverter. Energy storage inverters commonly adopt a double closed-loop control strategy with PI algorithm, but due to the lag of PI control, the dynamic response speed of the system is slow. To address this issue, a finite control set-model predictive control (FCS-MPC) strategy considering Lyapunov stability constraints is proposed. Firstly, the main control objective which is the stable control of the capacitor voltage, is achieved through Lyapunov stability constraints, and weight coefficients are set based on the severity of the total harmonic distortion constraint term of the capacitor voltage. Then, collaborative control is achieved by minimizing the objective function, solving the problems of system instability caused by the coupling of traditional FCS-MPC objective functions and difficulty in tuning weight coefficients. The improved FCS-MPC scheme is combined with droop control to control the energy storage inverter. Finally, simulation verification is performed on the MATLAB and RT-LAB platforms. Simulation results show that compared with traditional control strategies, this approach can improve the dynamic response speed of the system, achieve multi-objective collaborative control, and exhibit good robustness to weight coefficients.

Key words: energy storage system; finite control set; multiple constraints; dynamic response speed; inverter

孤岛微电网不依赖大电网,利用储能装置的充放电特性及逆变器的控制策略维持系统的电压频

率稳定,是一种典型的微电网架构。但是光伏、风电等可再生能源出力存在不稳定、平衡功率难度大

收稿日期:2023-05-09;修回日期:2023-08-30

基金项目:国家自然科学基金(51977128);上海市自然科学基金(21ZR1425400);上海市青年科技启明星计划(21QC1400200)

通信作者:赵 耀(1987—),男,博士,副教授,主要从事微电网控制、电力设备故障诊断与监测等研究;E-mail: nihaozhaoyao@163.com

及影响电能质量等问题^[1-3],此外负荷的波动也给电网的稳定运行带来了挑战。通过储能装置组成微电网并采取有效的控制策略可以平抑风电光伏以及负荷的波动^[4-5]。

在多能源多逆变器的微电网中,为了实现分布式发电(distributed generation, DG)机组负荷功率分配以及系统电压频率稳定,通常采用下垂控制策略^[6-7]。近年来,人们对储能系统的下垂控制方法已经取得了部分研究成果。文献[8-9]通过在常规下垂回路中引入功率导数积分项和内部电压电流反馈回路,可以快速瞬态响应逆变器之间的功率分配;文献[10]采用分段下垂控制策略,实现了交直流混合微电网在子微网间无互联通信条件下交流频率和直流母线电压的稳态无差运行;文献[11]针对分布式等效阻抗存在差异的问题,提出一种基于同步补偿的改进下垂控制策略。以上文献通过采用线性级联控制方法来维持微电网的功率稳定,这些控制技术都是以PI环节为基础,但是PI环节是基于实测值的滞后调节方法,会降低系统的动态响应速度。

近年来,有限集模型预测控制(finite control set-model predictive control, FCS-MPC)策略被广泛应用于微电网的控制策略中^[12]。相比于PI调节的滞后性,FCS-MPC采用主动预测方法,能显著提高系统的动态响应速度。文献[13]将模型预测控制(model predictive control, MPC)与下垂控制方法结合,实现了并联逆变交流微电网的控制;文献[14]考虑微电网的不确定性因素及复杂约束,提出MPC的自适应改进方法,能更好地适应微电网设备投切灵活、发电功率受外界影响大等特性;文献[15]采用模型预测控制中的动态矩阵预估控制,对微电网逆变器输出控制器进行改进,解决了微电网内负荷随机性大和网内分布式电源对负荷变化敏感度高的问题;文献[16]采用分布式模型预测控制方法对直流电网中风能和太阳能系统进行协调控制,提高了系统的动态响应速度。

FCS-MPC可以设计多个目标函数及约束,并且能够同时实现这些目标。目标函数的每一项都需要配置一个权重系数来调节各个控制目标的重要性,若权重系数配置不合理则会导致控制性能恶化,严重情况下会导致系统失稳。文献[17]给出了目标函数每个控制目标的权重系数的选择依据;文献[18]研究了一种由三相两电平电压源逆变器供电的感应电机的预测转矩和磁链控制,所提策略用

基于排序方法的多目标优化代替了单一成本函数,该方法不需要调整加权因子;文献[19]提出一种可以检查模型参数不确定性对三相两电平逆变器电流控制的FCS-MPC预测误差影响的控制方法,分析表明,预测误差不仅取决于参数失配,还取决于负载电流和逆变器输出电压的瞬时值。这意味着在预测算法的每个采样周期内,当评估多个电压矢量时,会产生若干预测误差条件。文献[20]提出了一种基于改进人工神经网络解决电力电子变换器有限集模型预测控制方法,该方法可以解决目标函数中权重因子的自动选择问题。在每次仿真中,通过提取关键性能指标如转换器的平均开关频率、总谐波失真(total harmonic distortion, THD)等训练人工神经网络,以此作为逆变器的代理模型,可以为任何加权因子组合提供快速和准确的性能指标估计。文献[21]探讨了多目标遗传算法的应用,以获得一组适用于异步电机变速驱动器模型预测转矩控制(model predictive torque control, MPTC)的加权因子;设计了非支配排序遗传算法,在转矩和磁链性能与系统平均开关频率之间进行权衡。但是,这种基于人工智能的方法需要大量的离线模拟或实验获取相关数据,过程十分烦琐。

本文针对孤岛储能逆变器FCS-MPC系统,提出一种改进的FCS-MPC优化控制策略。首先建立储能逆变器FCS-MPC的下垂控制策略,实现对负荷功率的合理分配,保证系统的电压质量;其次通过Lyapunov函数约束实现多目标控制,保证电压稳定的同时降低电容电压的THD,同时还可以有效消除权重系数设置不合理及多约束耦合效应造成的控制状态选择错误带来的不稳定现象;最后通过仿真实验验证控制策略的有效性。本文所提方法可以提高系统的动态响应速度,解决目标函数耦合带来的失稳问题,从而提高权重系数的鲁棒性。

1 微电网系统结构

由于光伏等新能源出力具有间歇性和随机性,输出功率容易受到天气影响,同时,考虑负荷的波动性,需要配备相应的储能单元来满足微电网运行的电能质量要求和负荷的功率需求。本文研究的独立风光储系统结构如图1所示,光伏电池、储能装置以及风电系统输出的直流电经过逆变器变换为交流电,再通过滤波器接入交流母线;负荷包括本地和公共负荷,连接到交流母线上。

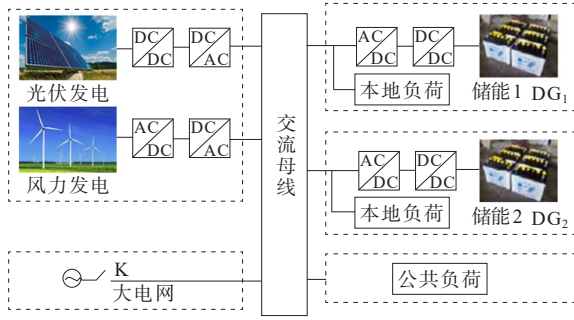


图 1 微电网系统结构

Figure 1 System architecture of microgrid

忽略系统各部分的能量损耗,由能量守恒可得上述系统功率之间的关系式:

$$P_{load} = P_{bat} + P_{PV} + P_{WT} \quad (1)$$

其中, P_{bat} 为蓄电池功率; P_{PV} 为光伏系统功率; P_{WT} 为风电功率; P_{load} 为负荷功率。

微电网中风电和光伏输出功率受外界影响较大,通常只能按照最大功率或恒定的功率输出,因此,本文中风电和光伏系统采用恒功率控制。对于储能系统,采用下垂控制与改进 FCS-MPC 控制相结合来实现功率的合理分配。本文着重介绍储能系统的控制策略。

2 储能逆变器模型预测控制策略

MPC 采用逆变器的离散模型,由于逆变器的开关状态数量很少,因此, MPC 优化问题可以简化为仅预测可能的开关状态,以预测系统的状态行为,使用滤波器来预测所有可能的控制输入的结果,在有限的时间步长内达到最小的目标函数。将模型预测方法应用于储能系统变换器控制中,利用其预测能力可以达到使系统快速响应并稳定运行的目标。三相两电平逆变器是微电网中最基本逆变器拓扑结构,如图 2 所示,可以看出,在逆变器的输出端连接了一个 LC 滤波器,用来降低开关谐波。

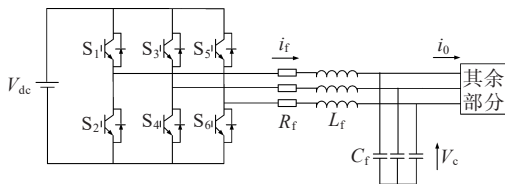


图 2 逆变器结构

Figure 2 Structure of inverter

逆变器的每个分支包含 2 个开关,可以使用数字 1/0 分别表示其开关状态。若上开关断开、下开关接通,则为 0;若上开关接通、下开关断开,则为 1。

开关的动作影响逆变器的输出电压 (V_0, V_1, \dots, V_7), 对应有 8 种可能的开关状态 (000, 100, 110, 010, 011, 001, 101, 111)。逆变器的电压向量 V_i 可以表示为

$$V_i = \begin{cases} \frac{2}{3} V_{dc} e^{j(i-1)\pi/3}, & i = 1, 2, \dots, 6 \\ 0, & i = 0, 7 \end{cases} \quad (2)$$

由于 V_0, V_7 的输出电压结果相同,因此,可以采用 7 个电压向量来控制逆变器的状态。这些向量中的每一个都可以用来预测目标函数,使目标函数最小的向量用于下一个采样间隔内控制逆变器。

三相 LC 滤波器连接到逆变器的输出端来抑制开关产生的谐波。滤波器的每个支路由电感 L_f 、串联电阻 R_f 和电容 C_f 组成。流过 L_f 的电感电流 i_f 和流过 C_f 的电容电压 v_c 是这个二阶系统的状态变量。假设 3 个分支的参数值都相等, LC 滤波器电容的动态行为可表示为

$$\begin{cases} L_f \frac{di_f}{dt} = v_i - v_c - R_f i_f \\ C_f \frac{dv_c}{dt} = i_f - i_o \end{cases} \quad (3)$$

在方程 (3) 中, i_o 为扰动变量,可由电流传感器测量或由观测器估计, i_f, v_c 视为状态变量, V_i 视为控制信号。根据式 (3), 离散时间内的数学模型可以表示为

$$x(k+1) = A_d x(k) + B_d u(k) \quad (4)$$

其中,

$$\begin{cases} x(k+1) = \begin{bmatrix} i_f(k+1) \\ v_c(k+1) \end{bmatrix} \\ u(k) = \begin{bmatrix} V_i(k) \\ i_o(k) \end{bmatrix} \\ A_d = e^{A T_s} \\ B_d = \int_0^{T_s} e^{A \tau} B d\tau \\ A = \begin{bmatrix} -R_f/L_f & -1/L_f \\ 1/C_f & 0 \end{bmatrix} \\ B = \begin{bmatrix} -R_f/L_f & -1/L_f \\ 1/C_f & 0 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5)$$

在 MPC 中,目标函数用于选择适当的控制信号。由于孤岛微电网需要对输出电压进行控制,因此,目标函数定义为电容电压跟踪误差的二次函数,以选择合适的控制信号。目标函数可设置为

$$g = [V_{ca}^* - V_{ca}(k+1)]^2 + [V_{cb}^* - V_{cb}(k+1)]^2 \quad (6)$$

其中, $V_{c\alpha}$ 、 $V_{c\beta}$ 分别为电容电压的实、虚分量。在此目标函数的基础上, 下一个采样周期中应用 g 值最小的电压向量。由于 α 、 β 分别被独立控制, 故 V_c 可以跟踪参考值。

对于基于并联逆变器的交流系统, 通常采用下垂控制来实现多个逆变器之间的负荷功率均分, 并且不需要交互通信线路。下垂关系可以表示为

$$\begin{cases} f_j = f^* - m_j(P_j - P^*) \\ U_j = U^* - n_j(Q_j - Q^*) \end{cases} \quad (7)$$

式中, j 为各个逆变器的系数; f_j 、 U_j 分别为实际的频率、电压; f^* 、 U^* 分别为额定的频率、电压; P_j 、 Q_j 分别为平均有功、无功功率; P^* 、 Q^* 分别为额定有功、无功功率; m_j 、 n_j 均为下垂系数。

采用下垂控制会使控制目标电容电压产生稳态误差, 通常采用下垂控制的变体控制来避免该问题。然而这种技术通常需要额外的通信环节, 在复杂的微电网中难以实现, 此外, 采用 FCS-MPC 调节逆变器有更好的性能。因此, 本文采用传统的下垂控制。

3 多目标协同优化控制策略

3.1 Lyapunov 函数稳定性准则

Lyapunov 稳定性准则指出: 当满足以下 4 个条件时, 任何线性或者非线性系统都可以保证全局稳定, 即

$$\begin{cases} V(0) = 0 \\ x \neq 0, V(x) > 0 \\ x \neq 0, V < 0 \\ x \rightarrow \infty, V(x) \rightarrow \infty \end{cases} \quad (8)$$

在孤岛微电网储能逆变器的控制系统中, 当状态变量为 0 时系统达到平衡点, 采用 Lyapunov 函数可以确定逆变器在平衡点附近的全局稳定性。根据 Lyapunov 直接法构造变量误差的 Lyapunov 函数, 函数以电容电压为自变量, 根据函数导数的负定性来判断系统是否稳定。

定义输出变量 $Y = x_{\text{ref}} - x = [v_{\alpha}^* - v_{\alpha}, v_{\beta}^* - v_{\beta}]^T = [Y_1, Y_2]^T$ 。令 Lyapunov 函数 $V(Y)$ 定义为

$$V(Y) = \frac{1}{2} (Y_1^2 + Y_2^2) \quad (9)$$

将式(3)代入式(9)并求偏导, 可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}(Y) = & (v_{c\alpha}^* - v_{c\alpha}) \left(v_{c\alpha}^* - \frac{dv_{c\alpha}}{dt} \right) + \\ & (v_{c\beta}^* - v_{c\beta}) \left(v_{c\beta}^* - \frac{dv_{c\beta}}{dt} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

根据 Lyapunov 稳定性判据, 当满足 $\dot{V}(Y) < 0$ 时, 则系统在此状态下满足稳定性要求。

3.2 多约束模型预测控制

传统的 FCS-MPC 的目标函数为式(6)所示, 该目标函数可以很好地追踪电容电压。这对于一阶系统可能会产生令人满意的性能, 但状态变量之间的耦合使其在某种程度上不适用于二阶系统。L 型滤波器中的电感电流可以直接由控制输入调节, 允许其导数在特定采样瞬间发生瞬时变化; 相反, 二级 LC 型滤波器中的电容电压只能通过电感电流间接调节。由于各自的电流不能瞬时改变, 相应的电容电压也不能瞬时改变其导数。因此, 若只涉及 C_f 中的电容电压误差, 不考虑其电压的导数误差, 则在实现最小的电容电压偏差时往往会使电压轨迹明显偏离参考轨迹^[22-23]。这会在采用周期内产生电压偏差, 会对未来的起始点不利, 最终导致测量电容电压信号中较高的 THD。电容电压谐波失真会导致控制系统追踪电容电压的能力变弱, 也会使储能系统不能快速准确地分配功率来满足负荷的需求。因此, 需要对电容电压的导数即电流进行控制。

为了提高稳定性能, 使 MPC 不仅追踪电容电压参考值, 同时对电容电压的导数进行跟踪控制, 提出新的目标函数为

$$g_d = [C_f \omega_{\text{ref}} v_{i\beta}^* - i_{i\alpha}(k+1) + i_{o\alpha}(k+1)]^2 + [C_f \omega_{\text{ref}} v_{i\alpha}^* + i_{i\beta}(k+1) - i_{o\beta}(k+1)]^2 \quad (11)$$

将 g_d 添加到传统的目标函数中, 其控制效果可以通过权重系数 λ_d 来控制。改进后的目标函数如下:

$$g = [V_{c\alpha}^* - V_{c\alpha}(k+1)]^2 + [V_{c\beta}^* - V_{c\beta}(k+1)]^2 + \lambda_d \left\{ [C_f \omega_{\text{ref}} v_{i\beta}^* - i_{i\alpha}(k+1) + i_{o\alpha}(k+1)]^2 + [C_f \omega_{\text{ref}} v_{i\alpha}^* + i_{i\beta}(k+1) - i_{o\beta}(k+1)]^2 \right\} \quad (12)$$

3.3 基于 Lyapunov 函数的多约束模型预测控制

本文所提多目标协同优化 FCS-MPC 策略主要思想是, 将 Lyapunov 稳定性准则与有限模型预测控制相结合, 通过 Lyapunov 稳定性约束对主控制目标电容输出电压实现稳定控制, 再根据次控制目标控制电容电压的导数, 并且可以自由调节权重系数来降低电容电压的 THD, 在稳定范畴内利用目标函数确定综合最优开关状态, 实现多目标协同优化控制。整体的控制框图如图 3 所示, 控制算法流程如图 4 所示, 具体步骤如下。

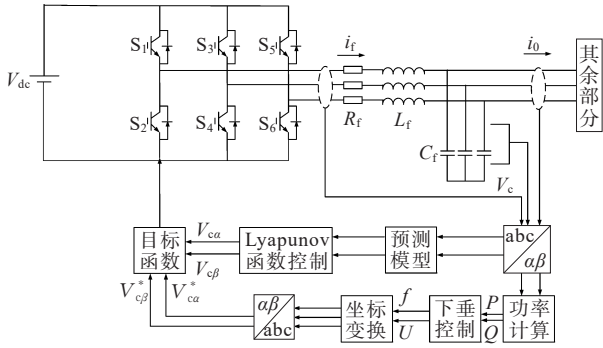


图 3 改进 MPC 控制框图

Figure 3 Block diagram of improved MPC

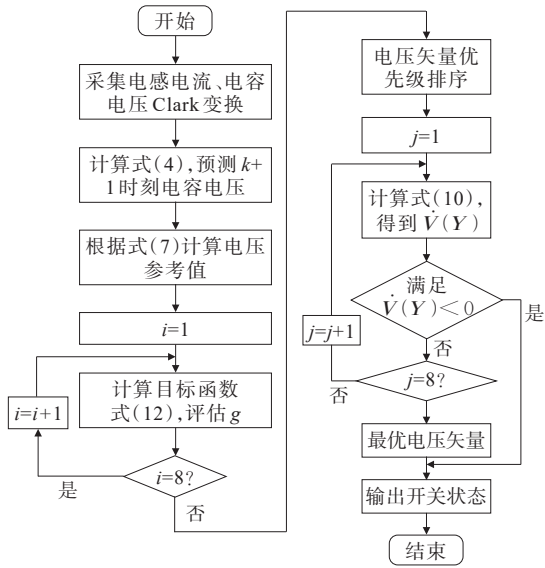


图 4 控制算法流程

Figure 4 Flowchart of control algorithm

1) 在 k 时刻采用上一个控制周期计算得到的最优开关序列 $S(k)$ 。通过采用基于下垂控制的 MPC 策略,对采集到的电压、电流进行预测,通过目标函数进行寻优,根据计算的目标函数值对逆变器的 8 个电压矢量进行优先级排序。

2) 将根据优先级排序的 8 个电压矢量代入 Lyapunov 稳定性判据中,计算是否满足 $\dot{V}(Y) < 0$,若满足,则证明最优电压矢量能够同时满足目标函数最优和系统稳定性要求,可在 $k+1$ 时刻直接输出此电压矢量对应的开关状态。

3) 若最优电压矢量不能满足 Lyapunov 稳定性判据,则根据优先级排序代入下一个电压矢量,验证是否满足稳定性判据,若满足则输出该电压矢量,否则将继续代入下一个电压矢量,直至在 8 个电压矢量中选择满足稳定约束的电压矢量。

4) 若上述流程中所有电压矢量都不满足 $\dot{V}(Y) < 0$,则直接输出最优电压矢量对应开关状态。

5) 返回步骤 1),进行下一步采样预测。

4 仿真实验

为了验证本文所提策略的性能,在 MATLAB/SIMULINK 仿真平台搭建风光储微电网仿真模型。模型参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Parameters for simulation

| U_{dc}/V | U_{rms}/V | f/Hz | T_s/s | C_f/F | $R_f/m\Omega$ | L_f/mH |
|------------|-------------|--------|--------------------|--------------------|---------------|----------|
| 600 | 380 | 50 | 2×10^{-5} | 1×10^{-3} | 1.9 | 1 |

设置光伏输出有功功率为 10 kW,无功功率为 0;风电有功功率为 10 kW,无功功率为 5 kVar。2 s 时 DG_1 的本地负载由 8 kW、3 kVar 增加到 18 kW、4 kVar; DG_2 的本地负载 4 s 时由 17 kW、9 kVar 下降到 7 kW、2 kVar;然后 6 s 时接通公共负载 30 kW、14 kVar,并在 8 s 时切断。

为了分析引入次目标电容电压导数对主控制目标输出的电容电压的影响,对不同权重系数下的输出电容电压进行仿真。设置权重系数分别为 $\lambda_0=0.0$ 、 $\lambda_1=0.5$ 、 $\lambda_2=1.0$,仿真结果如图 5 所示。

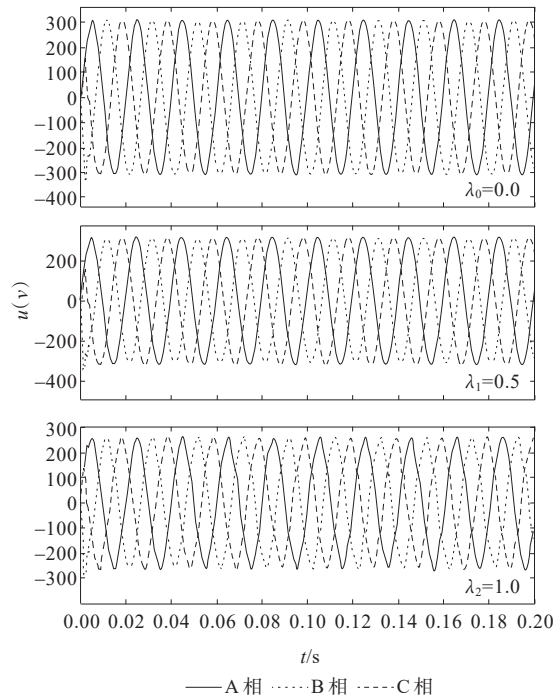


图 5 不同权重系数下传统多目标 FCS-MPC 电容电压
Figure 5 Capacitor voltages of traditional multi-objective FCS-MPC with different weight coefficients

图 5 中 $\lambda_0=0.0$ 时次控制目标权重为 0,控制目标仅为输出电容电压,因此等同于传统 FCS-MPC 方法,此时电压质量较好; $\lambda_1=0.5$ 时控制目标为输

出电容电流和电容电压导数,可以看出,电压波形较好,但纹波变大、谐波增加;对于 $\lambda_2=1.0$,由于权重系数的增加,次控制目标权重进一步变大,干扰下一时刻开关状态的选择,可以看出,三相电容输出电压幅值大幅度降低,无法对主控制目标实现有效稳定控制。因此,权重系数的大小影响着控制系统的性能。

为验证所提方法的控制性能,权重系数为 λ_2 时所提协同优化控制策略仿真结果如图6所示,可以看出,在增加Lyapunov稳定性约束后,多约束FCS-MPC可以在优先保证主目标输出电压有稳定控制效果的前提下,电容电压的质量有明显改善。与图5中 $\lambda_2=1.0$ 时的传统多目标FCS-MPC相比,主控制目标电容电压可以实现稳定的控制,改善控制性能。由此说明,在传统多目标FCS-MPC无法稳定控制的情况下,所提协同优化控制策略可以实现有效控制。

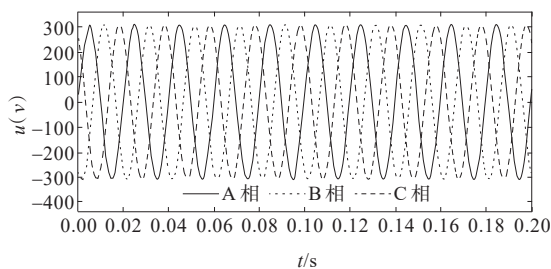


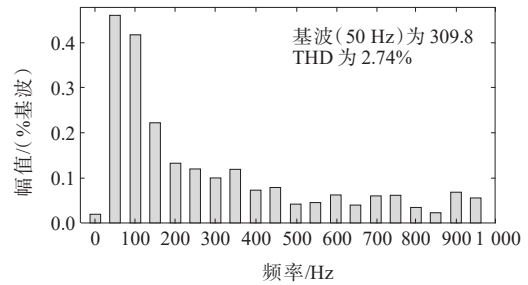
图6 协同优化控制策略输出电压

Figure 6 Output voltage with co-optimal control strategy

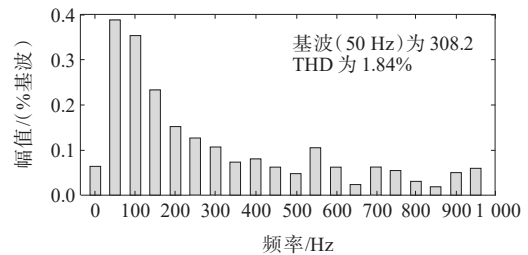
为了说明协同优化控制策略次控制目标电容电压导数即电容电压THD的控制效果,对输出电压进行快速傅里叶变换(fast Fourier transformation, FFT)分析。不同控制方式下电容电压THD数值情况如图7所示,可知传统单约束下的电容电压THD为2.74%,而采用考虑稳定约束的FCS-MPC的电容电压THD为1.84%。因此,考虑稳定约束的FCS-MPC可以在维持电容电压幅值的前提下降低THD。

综上,所提方法保证了主控制目标可以实现电容电压稳定控制,消除了多目标协同优化时可能出现的控制失效现象,保证了主控制目标输出电压有良好的质量,同时能够降低次控制目标电容电压THD。

为进一步验证所提方法对权重系数配置的鲁棒性,对次控制目标的权重系数分别为 $0.1\lambda_1$ 、 $0.5\lambda_1$ 、 λ_1 、 $5\lambda_1$ 时的输出电压THD进行仿真。输出电压FFT分析的谐波分布如图8所示,THD分别为2.66%、2.21%、1.84%(图7(a))、1.52%。



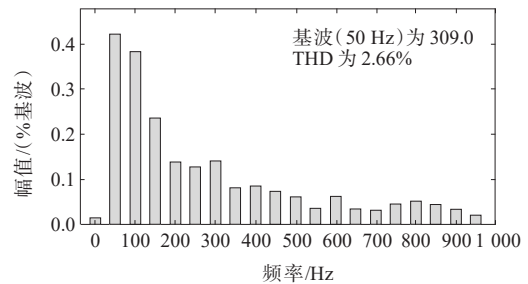
(a) 单约束FCS-MPC



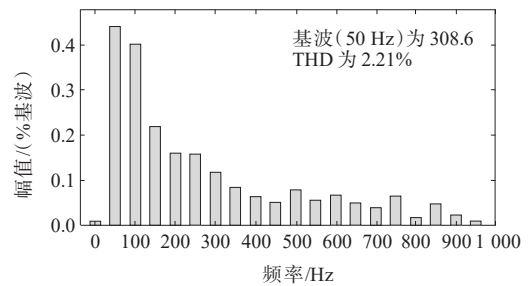
(b) 所提方法

图7 不同方法下电容电压THD

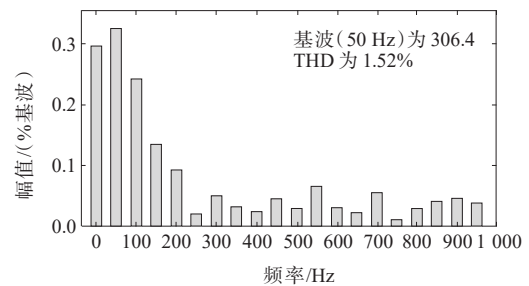
Figure 7 THD of capacitor voltage under different methods



(a) 权重系数为 $0.1\lambda_1$



(b) 权重系数为 $0.5\lambda_1$



(c) 权重系数为 $5\lambda_1$

图8 不同权重系数下THD

Figure 8 THD under different weight coefficients

本文所提和传统方法负荷功率分配对比如图 9、10 所示。可以看出,在 3 种方法中,由于采用下垂控制,并联逆变器可以自动调节输出来满足不断变化的功率需求。但是,由于 FCS-MPC 具有更好的电压控制能力,采用该方法得到的有功功率比传统方法具有更平滑、更快的暂态性能,提高了系统的动态响应速度。

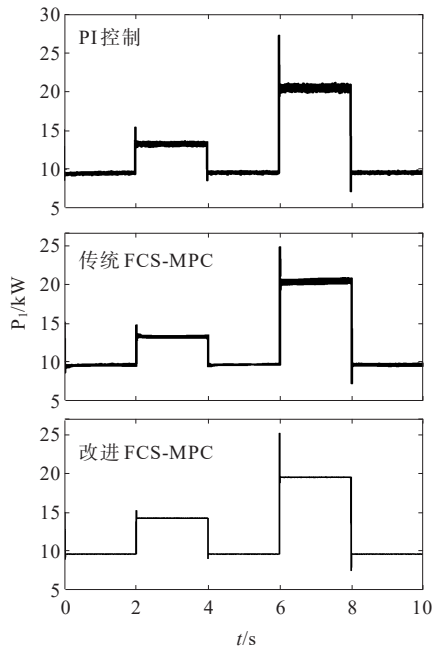


图 9 DG₁输出有功功率

Figure 9 Output active power of DG₁

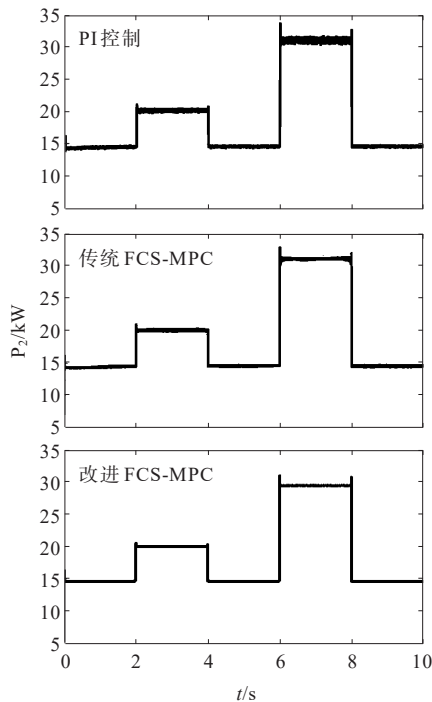


图 10 DG₂输出有功功率

Figure 10 Output active power of DG₂

为了更好地观察曲线,绘制 P_1 在 2 s 时的放大波形,如图 11 所示,可以看出,基于 PI 控制的传统储能逆变器控制方法经过 15 ms 输出稳定的功率,且最大输出功率偏差为 2.5 kW;基于传统 MPC 控制的储能逆变器控制方法经过 6 ms 输出稳定的功率,且最大输出功率偏差为 1.8 kW;而采用改进的 MPC 控制方法经过 5 ms 即可输出稳定的功率,输出功率最大偏差为 1.5 kW,因此,可以提高系统的动态响应速度、降低超调量。由于输出无功功率呈现类似的响应,因此不再绘制。

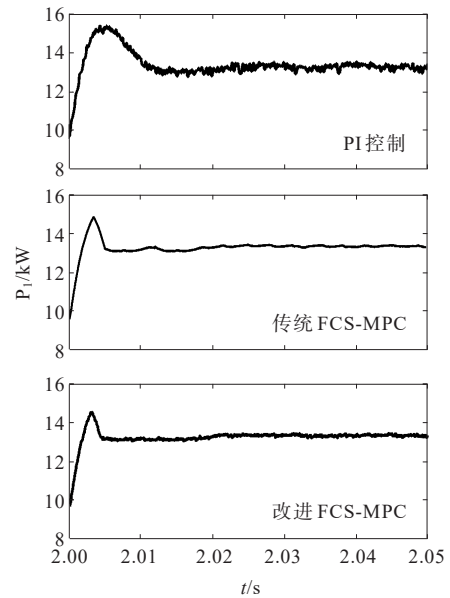


图 11 2 s 时 DG₁输出的有功功率

Figure 11 Output active power of DG₁ at 2 s

不同内环控制器下交流母线电压有效值变化情况如图 12 所示,可以看出,由于采用下垂控制会产生稳态误差,故母线的电压不能恢复到初始的状态。通过连接和切断负荷,体现了该方法的动态性能。当负载发生变化时,相较于传统的 PI 控制器,采用 MPC 控制器有更好的动态特性。

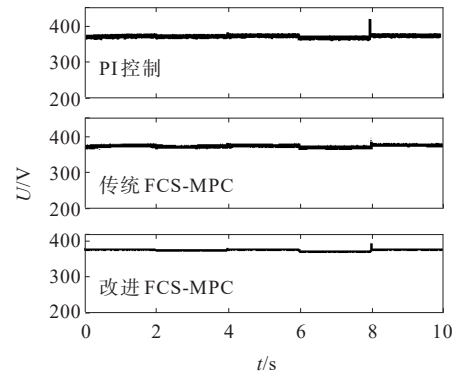


图 12 不同内环控制器下交流母线电压有效值

Figure 12 RMS of AC-bus voltage under different inner loop controllers

5 实验验证

为了进一步验证所提控制策略的实用性,基于 RT-LAB 仿真平台搭建交流微电网模型(图 1),实验接线如图 13 所示。仿真模型建立在上位机(PC)上。在实时数字模拟器(OP5707 RT-LAB)上对子系统进行划分,增加实时仿真模块并加载代码,代码可以通过 RT-LAB 转换为可执行文件,然后进行实时仿真。



图 13 RT-LAB 实时仿真平台

Figure 13 RT-LAB real-time simulation platform

RT-LAB 仿真条件和模型参数与文 4 中相同,储能逆变器采用改进的 FCS-MPC 控制策略,当负荷在 6、8 s 变化时,观察 DG 输出有功功率和母线电压的变化情况。RT-LAB 仿真实时波形如图 14 所示,可以看出,当微电网负荷功率发生突变时,在不到 0.02 s 的时间内, DG₁、DG₂ 输出的有功功率均能快速响应负荷功率变化,母线电压也能迅速达到稳定的运行状态。实验结果与文 4 中仿真验证相同。

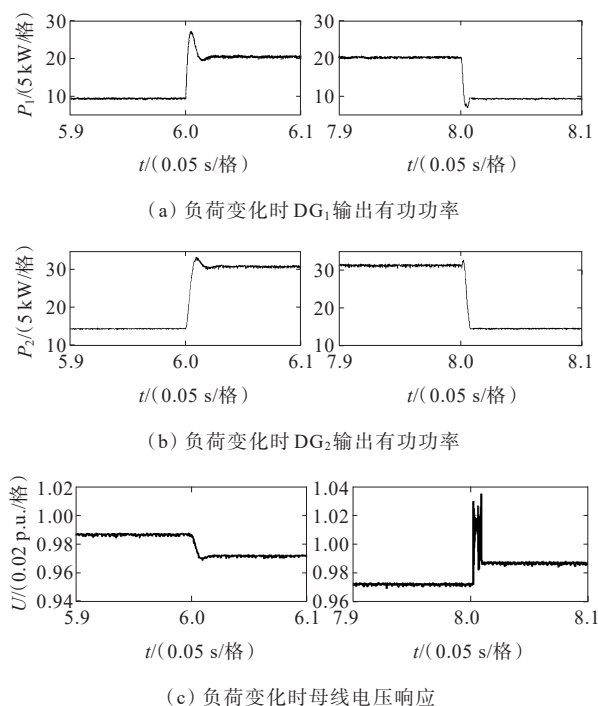


图 14 RT-LAB 实时仿真波形

Figure 14 RT-LAB real-time simulation waveform

6 结语

本文针对传统 PI 双闭环控制方法中存在动态响应速度不佳以及传统多约束 FCS-MPC 权重系数难以整定的问题,提出了一种适用于孤岛储能逆变器的改进 FCS-MPC 方法。该方法首先通过 Lyapunov 函数稳定性准则保证电容电压的稳定,再根据次控制目标控制电容电压的导数,并且可以自由调节权重系数来降低电容电压的 THD,然后通过目标函数最小化实现多约束协同控制。仿真结果表明:系统在保证电容电压稳定的前提下,消除了约束间耦合作用带来的不稳定现象,对权重系数有很好的鲁棒性,解决了多目标下传统 FCS-MPC 权重系数配置复杂的问题。采用改进的 FCS-MPC 代替 PI 控制可以提高系统的动态响应速度,能够实现负荷功率合理分配。

参考文献:

- [1] 曹杰,王维庆,王海云.光储直流微电网系统协调控制策略研究[J].电测与仪表,2024,61(4):29-34.
CAO Jie, WANG Weiqing, WANG Haiyun. Research on coordinated control strategy of photovoltaic and energy storage DC microgrid system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(4): 29-34.
- [2] 王涛,钟浩,李世春,等.基于主从博弈的多微电网储能容量优化配置[J].智慧电力,2023,51(1):9-15,68.
WANG Tao, ZHONG Hao, LI Shichun, et al. Optimal allocation of energy storage capacity in multi-microgrid based on master-slave game[J]. Smart Power, 2023, 51(1): 9-15, 68.
- [3] 林泽源,王宗尧,张凡,等.考虑氢能应用的光伏直流微电网中储能容量配置寻优方法研究[J].高压电器, 2024, 60(7): 78-87.
LIN Zeyuan, WANG Zongyao, ZHANG Fan, et al. Research on optimization method for energy storage capacity configuration in photovoltaic DC micro grid considering hydrogen energy application[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(7): 78-87.
- [4] 武海涛,张宁宁,曹志轩,等.弱电网下光伏并网系统锁相环参数自适应控制[J].电网与清洁能源, 2024, 40(1): 52-61.
WU Haitao, ZHANG Ningning, CAO Zhixuan, et al. Adaptive control of phase-locked loop parameters of the photovoltaic grid-connected system under weak grid[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(1): 52-61.
- [5] 裴润生,赖绮瑄,梁活航.计量设备故障下交流微电网缺失电量智能追补[J].供用电, 2023, 40(5): 92-99.
PEI Runsheng, LAI Qixuan, LIANG Huohang. Smart

- catch-up for missing power in AC microgrid under metering equipment failure[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(5): 92-99.
- [6] 李冰,李岚,王浩,等.一种改善直流微电网负荷电流分配的下垂控制[J]. *电力科学与技术学报*, 2022, 37(1): 48-54.
LI Bing, LI Lan, WANG Hao, et al. An improved droop control of load current sharing in DC microgrid[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2022, 37(1): 48-54.
- [7] 樊晓伟,王瑞妙,杨海峰,等.计及源荷不确定的综合能源微电网集群优化运行[J]. *电力建设*, 2024, 45(8): 128-139.
FAN Xiaowei, WANG Ruimiao, YANG Haifeng, et al. Optimization operation of integrated energy microgrid cluster considering source-load uncertainty[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(8): 128-139.
- [8] GUERRERO J M, DE VICUNA L G, MATAS J, et al. A wireless controller to enhance dynamic performance of parallel inverters in distributed generation systems[J]. *Transactions on Power Electronics*, 2004, 19(5): 1205-1213.
- [9] 宋昕一,徐永海,袁敞,等.孤岛直流微电网的多储能SOC稳定均衡控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(20): 49-59.
SONG Xinyi, XU Yonghai, YUAN Chang, et al. Multi-storage SOC stabilization and equalization control strategy for islanded DC microgrids[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(20): 49-59.
- [10] 米阳,宋根新,蔡杭谊,等.基于分段下垂的交直流混合微电网自主协调控制[J]. *电网技术*, 2018, 42(12): 3941-3950.
MI Yang, SONG Genxin, CAI Hangyi, et al. Autonomous coordinated control of hybrid AC/DC microgrids based on segmented droop[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(12): 3941-3950.
- [11] 黄堃,付明,梁加本.基于融合专家知识DDPG的孤岛微电网频率调节策略[J]. *中国电力*, 2024, 57(2): 194-201.
HUANG Kun, FU Ming, LIANG Jiaben. Frequency regulation strategy of isolated island microgrid based on fusion expert knowledge DDPG[J]. *Electric Power*, 2024, 57(2): 194-201.
- [12] 李飞,刘战,赵强,等.基于模型预测的简化定频PWM三电平整流器控制策略[J]. *电力科学与技术学报*, 2021, 36(2): 116-123.
LI Fei, LIU Zhan, ZHAO Qiang, et al. Research on control strategy of simplified fixed frequency PWM three-level rectifier based on model prediction[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2021, 36(2): 116-123.
- [13] DRAGICEVIC T. Model predictive control of power converters for robust and fast operation of ac microgrids[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(7): 6304-6317.
- [14] 杨捷,孙哲,苏辛一,等.考虑振荡型功率的直流微电网储能系统无互联通信网络的多目标功率分配方法[J]. *发电技术*, 2024, 45(2): 341-352.
YANG Jie, SUN Zhe, SU Xinyi, et al. A wireless multi-objective power sharing method for energy storage system in DC micro-grid considering oscillatory-type power[J]. *Power Generation Technology*, 2024, 45(2): 341-352.
- [15] 董润楠,刘石,梁庚,等.基于模型预测控制的微电网逆变器控制方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(21): 11-20.
DONG Runnan, LIU Shi, LIANG Geng, et al. Research on control method of special inverter in micro-grid based on model predictive control[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(21): 11-20.
- [16] ZHAO B, ZHANG X S, CHEN J, et al. Operation optimization of standalone microgrids considering lifetime characteristics of battery energy storage system[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2013, 4(4): 934-943.
- [17] DAVARI S A, KHABURI D A, KENNEL R. An improved FCS-MPC algorithm for an induction motor with an imposed optimized weighting factor[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2012, 27(3): 1540-1551.
- [18] ROJAS C A, RODRIGUEZ J, VILLARROEL F, et al. Predictive torque and flux control without weighting factors[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(21): 681-690.
- [19] YOUNG H A, PEREZ M A, RODRIGUEZ J. Analysis of finite control set model predictive current control with model parameter mismatch in a three phase inverter[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(5): 3100-3107.
- [20] DRAGIĆEVIĆ T, NOVAK M. Weighting factor design in model predictive control of power electronic converters: an artificial neural network approach[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2019, 66(11): 8870-8880.
- [21] GUAZZELLI P R U, PEREIRA W C D E, OLIVEIRA C M R D, et al. Weighting factors optimization of predictive torque control of induction motor by multi objective genetic algorithm[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(7): 6628-6638.
- [22] ARAMASU V, RIVERA M, NARIMANI M, et al. Model predictive approach for a simple and effective load voltage control of four-leg inverter with an output Lc filter[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2014, 61(10): 5259-5270.
- [23] 马立红,梁亚峰,程西,等.计及构网型储能稳定拓展的微电网群优化运行[J]. *电力工程技术*, 2024, 43(6): 214-222.
MA Lihong, LIANG Yafeng, CHENG Xi, et al. Optimal operation of microgrids considering stabilized expansion of grid-forming energy storage[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2024, 43(6): 214-222.