

考虑脉冲负载影响的直流微电网变换器模型预测控制策略

赵新宽<sup>1</sup>, 陈燕东<sup>2</sup>, 姚 鹏<sup>3</sup>, 姜洪朝<sup>4</sup>

(1. 珠海城市职业技术学院珠海市智能电网技术协同创新中心, 广东 珠海 519000;  
2. 湖南大学国家电能变换与控制工程技术研究中心, 湖南 长沙 410082; 3. 珠海万力达电气  
自动化有限公司, 广东 珠海 519000; 4. 中国电子信息产业集团有限公司第六研究所, 北京 102209)

**摘要:** 围绕含脉冲负载的直流微电网稳定运行问题, 设计了抑制脉冲负载影响的直流微电网中变换器的预测控制策略。所设计的模型预测控制器是一种最优鲁棒协调控制器, 可直接应用于直流微电网中混合储能系统, 并减轻脉冲功率负载的负面影响。在分析直流微电网构成基础上, 推导了系统动态模型以开发模型预测控制器, 同时将系统硬约束引入控制策略中, 进而采用线性矩阵不等式方法求解模型预测控制条件。利用搭建的直流微电网测试平台进行了实验研究, 实验结果验证了新型模型预测控制策略的有效性。  
**关键词:** 直流微电网; 变换器; 模型预测控制; 脉冲负载

**DOI:** 10.12067/ATEEE2103048      **文章编号:** 1003-3076(2021)11-0020-09      **中图分类号:** TM727

1 引言

随着电力电子技术的发展, 直流微电网相关技术将成为未来新能源接入、全电飞机或船舶的核心关键架构。直流微电网能提供高效且可靠的配电, 并通过简单控制对能量进行灵活管理<sup>[1-3]</sup>。对于全电船舶而言, 负载类型较为多样, 包含常规负载、推进负载、脉冲负载(Pulsed Power Load, PPL)和专用高功率负载等<sup>[4,5]</sup>。其中 PPL 会间歇性从电网中消耗大量功率, 具有一种高功率脉冲行为特性, 可能导致电网电压波动和跳变, 甚至导致整个直流微电网失电<sup>[6,7]</sup>, 故对系统运行和控制提出了很高的要求。对此, 直流微电网中设置基于电池组或超级电容的储能系统(Energy Storage System, ESS)可对 PPL 进行关键条件下的补偿, 从而提高系统可靠性和效率<sup>[8-10]</sup>。

通常增加电池组储能的主要方法是增加电池数量, 故功率成本折中和电流均分问题使得其不是最理想补偿 PPL 的方案。而超级电容由于其内阻低、功率密度高和循环寿命长, 是一种对电池组较好的储能补充, 可形成混合 ESS 方案<sup>[11-13]</sup>。混合 ESS 方案下,

PPL 暂停时, 超级电容平滑充电, 而在 PPL 工作时, 其快速放电进行功率缓冲。文献[14]指出混合 ESS 可减少内部损耗, 并增加 ESS 的寿命, 故较单电池组具有更好的性能。混合 ESS 若直接接入直流侧, 则称为无源混合 ESS, 其优点是成本低和损耗小。但电池组和超级电容直接并联连接会限制两者之间的功率均分, 故可设置变换器接入到直流侧, 则该配置称为有源混合 ESS。文献[15]中指出有源混合 ESS 可通过变换器调节功率流, 故可使得 ESS 体积容量更小。由于有源混合 ESS 经由变换器接入直流侧, 故需分析系统稳定性和进行协调控制策略设计<sup>[16-18]</sup>。同时, 构建的控制方案必须能考虑 PPL、ESS 和系统之间的交互来减轻 PPL 的不利影响<sup>[19]</sup>。文献[20]提出了混合直流储能的瞬时功率控制方案, 并在直流母线上配备了电压滞环保护。文献[21]中提出基于极限电压的控制结构, 可根据变换器功率和电源可用功率的限制, 控制直流电压尽可能快地为 ESS 充电。文献[22, 23]设计了一种平均电流控制方案, 其试图将变换器输出电流尽量保持恒定以减轻对变换器和 ESS 的影响。文献[24, 25]中利用自适应补偿器和滑动平均测

收稿日期: 2021-03-26  
基金项目: 国家自然科学基金项目(52077070)、广东省普通高校特色创新项目(2020KTSCX303)、珠海市产学研合作项目(ZH22017001200019PWC)  
作者简介: 赵新宽(1982-), 男, 湖北籍, 博士研究生, 研究方向为电力电子技术与非线性控制;  
陈燕东(1979-), 男, 湖南籍, 教授, 博士, 研究方向为分布式发电、微电网控制和电能质量控制。

量技术设计了电流-电压协调控制方案,可实现对变流器电流和直流电压的同时控制。但上述方案均没有考虑 ESS 电压限制问题,也忽略了系统硬约束。

目前,随数字芯片发展,模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)在电力电子变换器中的应用前景趋于广阔<sup>[26,27]</sup>。MPC 可通过最优化成本函数计算直接获取变换器控制信号来实现最优控制。故本文将 MPC 引入到直流微电网变换器控制中,实现了一种简单、鲁棒性好且高效的直流微电网控制策略。不同于传统控制方法,所设计的控制系统不仅考虑了系统硬约束,还具备将直流微电网输出电压和电流保持在工作点附近较小区域中的能力,同时还保证了超级电容快速充电,以应对 PPL 的不利影响。最后,通过实验验证了所设计 MPC 方案的效果。

## 2 直流微电网配置及其动态建模

本文研究对象为全电船舶直流微电网<sup>[28]</sup>,如图 1 所示,包含发电机组、混合 ESS、PPL、推进负载和常规负载等。其中混合 ESS 用于补偿直流侧的电压波动。此外,还有能量管理控制系统参与进行分散式或集中式的系统能量调度和控制,实现在一些预定目标下优化系统运行。直流微电网中还配备有系统保护,由变换器控制和直流断路器组合实现,以应对系统故障。

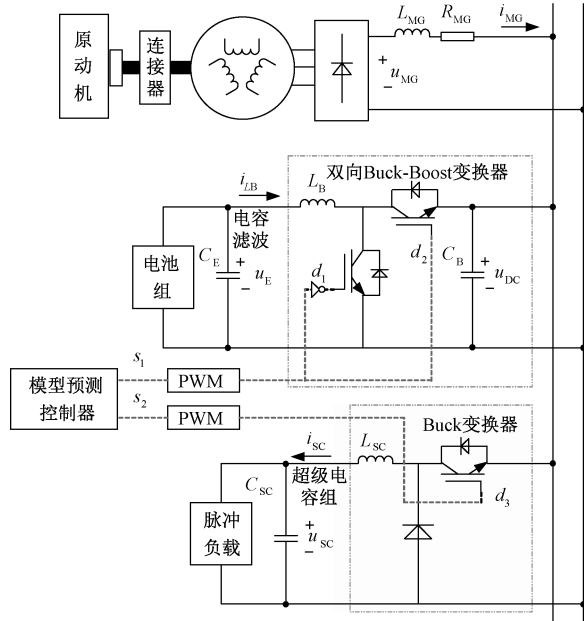


图 1 直流微电网配置

Fig.1 Configuration of DC microgrid

### 2.1 直流微电网配置

图 1 中直流微电网的电源由三相同步发电机组及不控整流器组成,整流器输出电压为  $u_{MG}$ 。混合 ESS 包含超级电容和电池组,分别经 Buck 变换器和双向 Buck-Boost 变换器接到直流侧<sup>[29]</sup>。在孤岛模式或高负载等工况下,电池组可为直流电压提供长期支持;而在正常情况下电池组将进行充电。此外,PPL 通过功率缓冲器连接到直流母线,功率缓冲器即由超级电容组成,超级电容通过直流侧充电后断开连接,当 PPL 激活时,其迅速放电以达到功率缓冲的目的。

### 2.2 ESS 动态模型

图 2(a) 为锂离子电池组的经典电路模型<sup>[30]</sup>。图 2(a)中,  $R_p$  和  $C_p$  分别是极化电阻和电容。电池组的充电状态可定义为:

$$SOC = SOC(0) - \frac{k_t}{C_{ESS}} \int i_b dt \quad (1)$$

式中,  $SOC$  为电池组荷电状态;  $C_{ESS}$  为电池组标称容量;  $i_b$  为负载电流;  $k_t$  为充电系数。对式(1)进行微分运算可得:

$$\frac{dSOC}{dt} = -\frac{k_t}{C_{ESS}} i_b = \frac{k_t}{R_b C_{ESS}} (u_p + u_{oc} - u_E) \quad (2)$$

式中,  $R_b$  为电池组内阻;  $u_E$  为输出电压;  $u_p$  为极化电容电压;  $u_{oc}$  是电池组内电压。将图 2(a) 中电路模型结合双向 Buck-Boost 变换器电路可得图 2(b) 中的电池组接入直流侧电路模型。结合图 1, 可推导出混合 ESS 的状态空间模型为:

$$\begin{cases} C_E \frac{du_E}{dt} = \frac{u_p + u_{oc} - u_E}{R_b} - i_{LB} \\ C_p \frac{du_p}{dt} = -\frac{u_p + u_{oc} - u_E}{R_b} - \frac{u_p}{R_p} \\ C_B \frac{du_{DC}}{dt} = i_{LB} s_1 - i_{SC} s_2 + i_{MG} \\ L_B \frac{di_{LB}}{dt} = u_E - u_{DC} s_1 - i_{LB} R_{LB} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $s_1$  和  $s_2$  分别为双向 Buck-Boost 变换器和 Buck 变换器的控制信号;  $L_B$  和  $C_E$  分别为双向 Buck-Boost 变换器电池侧电感和电容;  $C_B$  为双向 Buck-Boost 变换器直流母线侧电容;  $R_{LB}$  为  $L_B$  的寄生电阻;  $i_{LB}$  为流过  $L_B$  的电流;  $u_{DC}$  为直流母线电压;  $i_{SC}$  为 Buck 变换器内电感  $L_{SC}$  上电流;  $i_{MG}$  为直流源输出电流。

### 2.3 PPL 动态模型

图 3 所示为 ESS 及其功率缓冲器的电路模型。

考虑到 PPL 突然需要较高的功率,因此设置了超级电容由 Buck 变换器接入到直流侧进行缓冲。根据图 3,可推导出 PPL 的状态空间模型为:

$$\begin{cases} C_{SC} \frac{du_{SC}}{dt} = -\frac{PPL(t)}{u_{SC}} + i_{SC} \\ L_{SC} \frac{di_{SC}}{dt} = -u_{SC} + u_{DC}s_2 - i_{SC}R_{SC} \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $C_{SC}$  为超级电容的容值;  $u_{SC}$  为  $C_{SC}$  上的电压;  $L_{SC}$  为 Buck 电路内电感;  $R_{SC}$  为  $L_{SC}$  的寄生电阻;  $PPL(t)$  为脉冲负载功率。

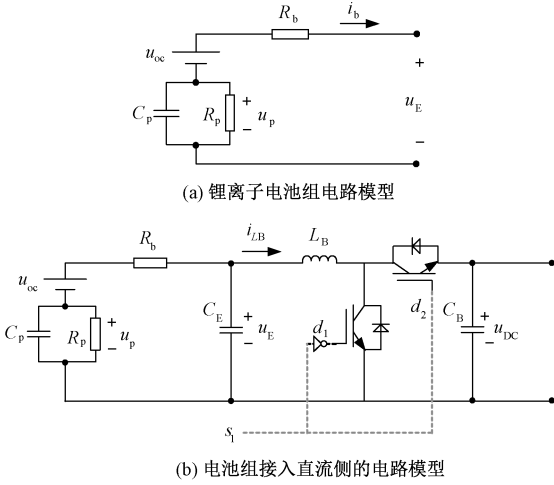


图 2 ESS 电路模型

Fig.2 Circuit model of ESS

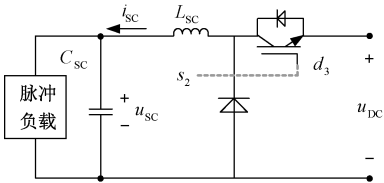


图 3 PPL 电路模型

Fig.3 Circuit model of PPL

## 2.4 直流源动态模型

如图 4 所示为直流源电路模型,据此可推导出直流源的状态空间模型为:

$$L_{MG} \frac{di_{MG}}{dt} = -i_{MG}R_{MG} + u_{MG} - u_{DC} \quad (5)$$

式中,  $R_{MG}$  和  $L_{MG}$  分别为对直流侧电压的压降进行模拟而设置的电源内阻和内电感;  $u_{MG}$  和  $i_{MG}$  分别为直流源输出电压和电流。

## 2.5 直流微电网的动态模型

根据前述对直流微电网中各组成部分的建模及其状态空间模型推导,可构建出整个直流微电网的状态空间模型。设  $z = [z_1 \ z_2 \ z_3 \ z_4 \ z_5 \ z_6 \ z_7 \ z_8]^T = [u_E \ u_p$

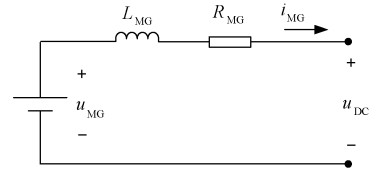


图 4 直流源电路模型

Fig.4 Circuit model of DC source

$u_{DC} \ i_{LB} \ u_{SC} \ i_{SC} \ i_{MG} \ SOC]^T$ , 而脉冲负载功率  $PPL(t)$  为未知扰动  $d(t)$ , 联立式(3)~式(5)可得直流微电网的状态空间模型为:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = \frac{z_2 + u_{oc} - z_1}{C_E R_b} - \frac{z_4}{C_E} \\ \dot{z}_2 = \frac{-(z_2 + u_{oc} - z_1)}{C_p R_b} - \frac{z_2}{C_p R_p} \\ \dot{z}_3 = \frac{z_7}{C_B} + \frac{z_4 s_1}{C_B} - \frac{z_6 s_2}{C_B} \\ \dot{z}_4 = \frac{z_1}{L_B} - \frac{z_3 s_1}{L_B} - \frac{z_4 R_{LB}}{L_B} \\ \dot{z}_5 = \frac{z_6}{C_{SC}} - \frac{d(t)}{z_5 C_{SC}} \\ \dot{z}_6 = \frac{-z_5}{L_{SC}} + \frac{z_3 s_2}{L_{SC}} - \frac{z_6 R_{SC}}{L_{SC}} \\ \dot{z}_7 = \frac{-R_{MG} z_7}{L_{MG}} + \frac{u_{MG}}{L_{MG}} - \frac{z_3}{L_{MG}} \\ \dot{z}_8 = \frac{-k_t(z_2 + u_{oc} - z_1)}{R_b C_{ESS}} \end{cases} \quad (6)$$

利用雅可比线性化方法,式(6)所描述的非线性系统可在工作点  $z^* = [z_1^* \ z_2^* \ z_3^* \ z_4^* \ z_5^* \ z_6^* \ z_7^* \ z_8^*]^T$  附近线性化,对应控制信号为  $s^* = [s_1^* \ s_2^*]^T$ , 从而有:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = \hat{A}\hat{x}(t) + \hat{B}u(t) + \hat{D}d(t) \\ \hat{y}(t) = \hat{C}\hat{x}(t) \end{cases} \quad (7)$$

其中

$$\hat{A} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_E R_b} & \frac{1}{C_E R_b} & 0 & \frac{-1}{C_E} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{C_p R_b} & \frac{-1}{C_p R_b} + \frac{-1}{C_p R_p} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{s_1^*}{C_B} & 0 & \frac{-s_2^*}{C_B} & \frac{1}{C_B} & 0 \\ \frac{1}{L_B} & 0 & \frac{-s_1^*}{L_B} & \frac{-R_{LB}}{L_B} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{C_{SC}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{s_2^*}{L_{SC}} & 0 & \frac{-1}{L_{SC}} & \frac{-R_{SC}}{L_B} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{L_{MG}} & 0 & 0 & 0 & \frac{-R_{MG}}{L_{MG}} & 0 \\ \frac{k_t}{R_b C_{ESS}} & \frac{-k_t}{R_b C_{ESS}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\hat{B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{x_4^*}{C_B} & \frac{-x_6^*}{C_B} \\ \frac{-x_3^*}{L_B} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{x_3^*}{L_{SC}} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \hat{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{C_{SC}} \cdot \frac{x_3^*}{L_B} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, C = [0 \quad I_5 \quad 0]$$

式中,  $u(t) = s(t) - s^*(t)$ ,  $x(t) = z(t) - z^*(t)$ ,  $y(t)$  和  $d(t)$  分别为系统输入、状态变量、系统输出和系统扰动;  $\hat{A}$ 、 $\hat{B}$ 、 $C$  和  $\hat{D}$  为常系数矩阵;  $I_5$  为 5 阶单位矩阵。设采样周期为  $T$ , 采用欧拉离散法, 可将式(7)转换为离散模型如下:

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + Dd(k) \\ y(k) = Cx(k) \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $A$ 、 $B$ 、 $C$  和  $D$  为离散模型中的常系数矩阵;  $k$  为步长。

### 3 系统约束分析

图 1 中所示直流微电网配置可在极端工况条件下, 使系统运行能力最大化。根据 1~35 kV 中压直流电网标准<sup>[28]</sup>, 在设计控制策略时需考虑系统约束, 以保证输出电能质量。图 1 中直流微电网各个设备均由电力电子变换器连接到直流侧, 因此需进行协调控制。此外, 通过使用主动配置可以限制故障电流。根据图 1 中系统配置, 可以提取出主要的系统约束如下: ①发电机组是通过不控整流器实现交流电能向直流侧的输送, 输出电流为  $i_{MG}$ , 其中不控整流器中必须使用半导体限流装置; ②需确保直流母线电压  $u_{DC}$  在允许范围内; ③由于直流变换器存在电流限制, 即  $i_{LB}$  和  $i_{SC}$  存在最大限制, 故过电流保护是必要的; ④超级电容电压  $u_{SC}$  需控制为较高且相对稳定, 以补偿 PPL 高脉冲功率的影响; ⑤变换器由 PWM 调制器生成的 0/1 脉冲信号进行控制。下面设计 MPC 方案时将考虑上述所有列出的系统约束。

### 4 直流微电网变换器 MPC 方案设计

MPC 广泛用于各类工业场景中, 可很好地解决带约束的控制问题。MPC 方法较传统控制技术具

有优势如下: ①可处理多输入多输出系统; ②可对输入输出信号严格限幅; ③MPC 方法可用于包括延迟、不确定性或扰动的非线性系统。

MPC 方案设计的关键在于求解约束下的最优优化问题, 这需要基于系统模型计算状态变量和控制信号在预测范围内的演变, 并在每个步长得到使预测结果最优的控制信号施加到系统中。由于 MPC 中最优问题的结构可以转换为凸结构, 因此可以使用线性矩阵不等式方法进行数值求解。

对于式(8)所描述的离散时间域系统, 由于没有确切的扰动值, 故在 MPC 设计过程中不考虑扰动。基于式(8), 可计算输出变量的  $N$  步长预测值为:

$$y(k+N) = CA^N x(k) + \sum_{j=1}^N CA^{N-j} Bu(k+j-1) \quad (9)$$

从式(9)可构建输出预测矩阵  $Y(k)$  为:

$$Y(k) = Fx(k) + GU(k) \quad (10)$$

其中

$$Y(k) = \begin{bmatrix} y(k+1) \\ y(k+2) \\ \vdots \\ y(k+N) \end{bmatrix}, U(k) = \begin{bmatrix} u(k) \\ u(k+1) \\ \vdots \\ u(k+N) \end{bmatrix}$$

$$F = \begin{bmatrix} CA \\ CA^2 \\ \vdots \\ CA^N \end{bmatrix}, G = \begin{bmatrix} CB & 0 & \cdots & 0 \\ CAB & CB & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ CA^{N-1}B & CA^{N-2}B & \cdots & CB \end{bmatrix}$$

为了评估不同控制输入作用下系统的性能, 需定义与性能指标相关的成本函数表达式。当成本函数最小化时, 则意味着系统在所期望的条件下运行。MPC 中成本函数设计为:

$$J = [Y(k) - w(k)]^T P [Y(k) - w(k)] + U^T(k) Q U(k) \quad (11)$$

式中,  $P$  和  $Q$  为已知的正定加权矩阵;  $w(k)$  为输出参考值。利用下面的不等式, 可使式(11)所描述的成本函数最小化:

$$[Y(k) - w(k)]^T P [Y(k) - w(k)] + U^T(k) Q U(k) < \gamma \quad (12)$$

式中, 性能指标  $\gamma$  是正定函数, 必须通过优化问题将其最小化<sup>[31]</sup>。由于式(12)中所包含的成本函数是非凸的, 故需要将式(12)转为凸结构。下面引出引理 1。下文中, 对于一个对称矩阵  $M$ , 采用“ $M > 0$ ”、“ $M < 0$ ”、“ $M \geq 0$ ”和“ $M \leq 0$ ”分别表示  $M$  为正



定、负定、正半定和负半定。此外,  $\text{diag}\{\}$  代表对角矩阵。

引理 1<sup>[32]</sup>: 考虑一个仿射函数  $\mathbf{F}'$ , 其划分为:

$$\mathbf{F}' = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{11} & \mathbf{F}_{12} \\ \mathbf{F}_{21} & \mathbf{F}_{22} \end{bmatrix} \quad (13)$$

当且仅当满足以下不等式之一时, 有  $\mathbf{F}' < 0$ 。

$$\begin{cases} \mathbf{F}_{11} < 0 \\ \mathbf{F}_{22} - \mathbf{F}_{21}\mathbf{F}_{11}^{-1}\mathbf{F}_{12} < 0 \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} \mathbf{F}_{22} < 0 \\ \mathbf{F}_{11} - \mathbf{F}_{12}\mathbf{F}_{22}^{-1}\mathbf{F}_{21} < 0 \end{cases} \quad (14)$$

定理 1: 如果存在决策矩阵变量  $\mathbf{K}(k)$  满足以下具有线性矩阵不等式约束的凸优化问题, 则将使成本函数式 (12) 最小化。

$\gamma$  最小化, 则有:

$$\begin{cases} \mathbf{U}(k) = \mathbf{K}(k)\mathbf{x}(k) \\ \begin{bmatrix} \mathbf{H}_{11}(k) & \mathbf{U}^T(k) \\ \mathbf{U}(k) & -(\mathbf{Q} + \mathbf{G}^T\mathbf{P}\mathbf{G}) \end{bmatrix} < 0 \\ \text{diag}\{\mathbf{F}\mathbf{x}(k) + \mathbf{G}\mathbf{U}(k) - \mathbf{Y}_{\max}\} < 0, \text{diag}\{\mathbf{U}(k) - \mathbf{U}_{\max}\} < 0 \\ \text{diag}\{\mathbf{F}\mathbf{x}(k) + \mathbf{G}\mathbf{U}(k) - \mathbf{Y}_{\min}\} > 0, \text{diag}\{\mathbf{U}(k) - \mathbf{U}_{\min}\} > 0 \\ \mathbf{H}_{11}(k) = [\mathbf{F}\mathbf{x}(k) - \mathbf{w}(k)]^T\mathbf{P}[\mathbf{F}\mathbf{x}(k) - \mathbf{w}(k)] + \\ \mathbf{U}^T(k)\mathbf{G}^T\mathbf{P}[\mathbf{F}\mathbf{x}(k) - \mathbf{w}(k)] + [\mathbf{F}\mathbf{x}(k) - \mathbf{w}(k)]^T\mathbf{P}\mathbf{G}\mathbf{U}(k) - \gamma \end{cases} \quad (15)$$

所获得的控制信号不仅试图将输出变量保持在恒定值, 并同时使性能指标  $\gamma$  最小。此外, 还保证了输出和控制信号的幅值在预设置区域内, 该预设置区域由  $\mathbf{U}_{\max}$ 、 $\mathbf{U}_{\min}$ 、 $\mathbf{Y}_{\max}$  和  $\mathbf{Y}_{\min}$  定义。

证明: 将式 (10) 代入式 (12), 可得:

$$\begin{aligned} & [\mathbf{F}\mathbf{x}(k) + \mathbf{G}\mathbf{U}(k) - \mathbf{w}(k)]^T\mathbf{P} \cdot \\ & [\mathbf{F}\mathbf{x}(k) + \mathbf{G}\mathbf{U}(k) - \mathbf{w}(k)] + \mathbf{U}^T(k)\mathbf{Q}\mathbf{U}(k) < \gamma \end{aligned} \quad (16)$$

式 (16) 可重写为如下形式:

$$\begin{aligned} & [\mathbf{F}\mathbf{x}(k) + \mathbf{G}\mathbf{U}(k) - \mathbf{w}(k)]^T\mathbf{P}[\mathbf{F}\mathbf{x}(k) - \mathbf{w}(k)] + \\ & [\mathbf{F}\mathbf{x}(k) - \mathbf{w}(k)]^T\mathbf{P}\mathbf{G}\mathbf{U}(k) - \gamma + \\ & \mathbf{U}^T(k)(\mathbf{Q} + \mathbf{G}^T\mathbf{P}\mathbf{G})\mathbf{U}(k) < 0 \end{aligned} \quad (17)$$

通过使用引理 1, 将双线性矩阵不等式 (16) 转换为线性矩阵不等式条件, 如下所示:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}_{11}(k) & \mathbf{U}^T(k) \\ \mathbf{U}(k) & -(\mathbf{Q} + \mathbf{G}^T\mathbf{P}\mathbf{G}) \end{bmatrix} < 0 \quad (18)$$

其中  $\mathbf{H}_{11}(k)$  为:

$$\begin{aligned} \mathbf{H}_{11}(k) = & [\mathbf{F}\mathbf{x}(k) - \mathbf{w}(k)]^T\mathbf{P}[\mathbf{F}\mathbf{x}(k) - \mathbf{w}(k)] + \\ & \mathbf{U}^T(k)\mathbf{G}^T\mathbf{P}[\mathbf{F}\mathbf{x}(k) - \mathbf{w}(k)] + \\ & [\mathbf{F}\mathbf{x}(k) - \mathbf{w}(k)]^T\mathbf{P}\mathbf{G}\mathbf{U}(k) - \gamma \end{aligned} \quad (19)$$

另外, 对输出信号和控制信号幅值的约束如下:

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{\min} < \mathbf{U}(k) < \mathbf{U}_{\max} \\ \mathbf{Y}_{\min} < \mathbf{Y}(k) < \mathbf{Y}_{\max} \end{cases} \quad (20)$$

式中,  $\mathbf{Y}(k) = \mathbf{F}\mathbf{x}(k) + \mathbf{G}\mathbf{U}(k)$ 。由于以上约束式是非凸的, 为了将非凸条件转换为凸条件, 以对角矩阵的形式重新表示式 (20), 从而式 (20) 转换为线性矩阵不等式。至此, 证明完成。

## 5 实验验证

为验证所设计的直流微电网变换器 MPC 方案的性能, 采用和文献 [24] 中所描述传统控制方案进行了对比测试, 其中实验平台如图 5 所示。图 5 中直流微电网实验平台设有单个 PPL, 功率为 2 kW, 工作频率为 0.2 Hz, 占空比为 20%, 即功率谱设置如图 6 所示。

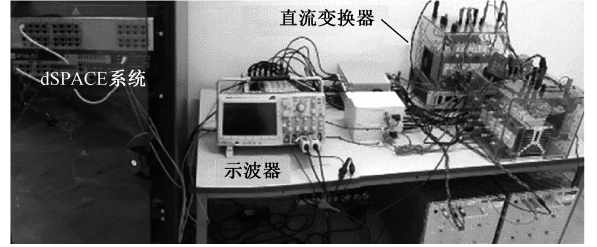


图 5 实验平台

Fig.5 Experimental platform

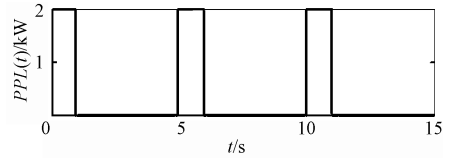


图 6 PPL 功率谱设置

Fig.6 Power spectrum setting of PPL

系统其他主要参数设置为: 直流源动态模型中内电阻  $R_{MG}$  和电感  $L_{MG}$  分别为 0.1  $\Omega$  和 3 mH; 超级电容  $C_{SC}$  为 0.1 F, 其对应的 Buck 变换器中电感  $L_{SC}$  为 3 mH; 电池组侧双向 Buck-Boost 变换器中电感  $L_B$  和电容  $C_B$  分别为 3 mH 和 680  $\mu\text{F}$ 。除了系统参数外, 工作点和输出参考值设置为:

$$\begin{aligned} & [z_1^* \ z_2^* \ z_3^* \ z_4^* \ z_5^* \ z_6^* \ z_7^* \ z_8^*]^T \\ & = [320 \ 0 \ 320 \ 0 \ 300 \ 0 \ 0 \ 0.9]^T \\ & [u_{DC}^* \ i_{LB}^* \ u_{SC}^* \ i_{SC}^* \ i_{MG}^* \ SOC^*]^T \\ & = [320 \ 0 \ 300 \ 0 \ 0 \ 0.9]^T \end{aligned}$$

同时输出信号设置的边界为:

$$\begin{aligned}
& [u_{DC} \quad i_{LB} \quad u_{SC} \quad i_{SC} \quad i_{MG} \quad SOC]^T \\
& \leq [324 \quad 2 \quad 410 \quad 2 \quad 1 \quad 1]^T \\
& [u_{DC} \quad i_{LB} \quad u_{SC} \quad i_{SC} \quad i_{MG} \quad SOC]^T \\
& \geq [314 \quad -1 \quad 300 \quad -0.5 \quad -1 \quad 0.5]^T
\end{aligned}$$

MPC 算法中预测步长设置为  $N=4$ , 采样周期设置为  $T=1$  ms。此外, 在考虑状态变量需满足无量纲条件, 以及不同输出变量的权重后, 设置成本函数式 (12) 中的加权矩阵  $P$  和  $Q$  如下:

$$\begin{aligned}
P &= I \otimes \begin{bmatrix} 320 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 320 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 100 \end{bmatrix}, \\
Q &= I \otimes \begin{bmatrix} 0.001 & 0 \\ 0 & 0.001 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

式中, “ $\otimes$ ” 为 Kronecker 积;  $I$  为单位矩阵。通过应用定理 1 中的最优算法, 可以计算每个采样周期的状态反馈控制增益矩阵。优化求解是基于 Matlab 平台中的 YALMIP 工具箱实现的。进一步, 基于 Matlab/Simulink 平台构建控制律, 并在 dSPACE (DS1202) 系统上生成可执行实时运行代码, 进而生成控制信号施加到 Semikron 变换器组件中。

如图 7 所示为采用所设计的 MPC 方案下的直流微电网运行结果, 同时还包含了传统控制方案时的测试结果, 以方便进行对比。其中直流微电网中的直流母线电压  $u_{DC}$  的波形如图 7(a) 所示, 从实验结果中可以看出, 传统控制方案下, 直流母线电压较参考值相差更大, 而 MPC 可有效补偿 PPL 带来的不利影响, 使实际母线电压较好地跟踪参考值。图 7(b) 为双向 Buck-Boost 变换器电流  $i_{LB}$  的波形, 图 7(c) 为超级电容  $C_{SC}$  上电压  $u_{SC}$  的波形, 超级电容分别在 PPL 工作和不工作期间放电和充电, 相对于传统控制方案, MPC 方案下超级电容可尽快充电, 故参考值跟踪性能更好, 这也可从图 7(d) 为超级电容  $C_{SC}$  充电电流  $i_{SC}$  的波形看出, 电流响应更快。图 7(e) 为直流源输出电流  $i_{MG}$  的波形, 可看出, 传统方案下, 直流源须注入大电流以补偿响应慢的问题, 这意味着整流器上的电流过高, 将提高整流器功率开关器件的电流应力要求。而所提出的 MPC 方案可保持整流器输出电流在预定范围内, 对系统设计更为有利。

从图 7 的实验结果可观察到, 传统控制方案和新型 MPC 方案都可以补偿 PPL 的影响。新方案的

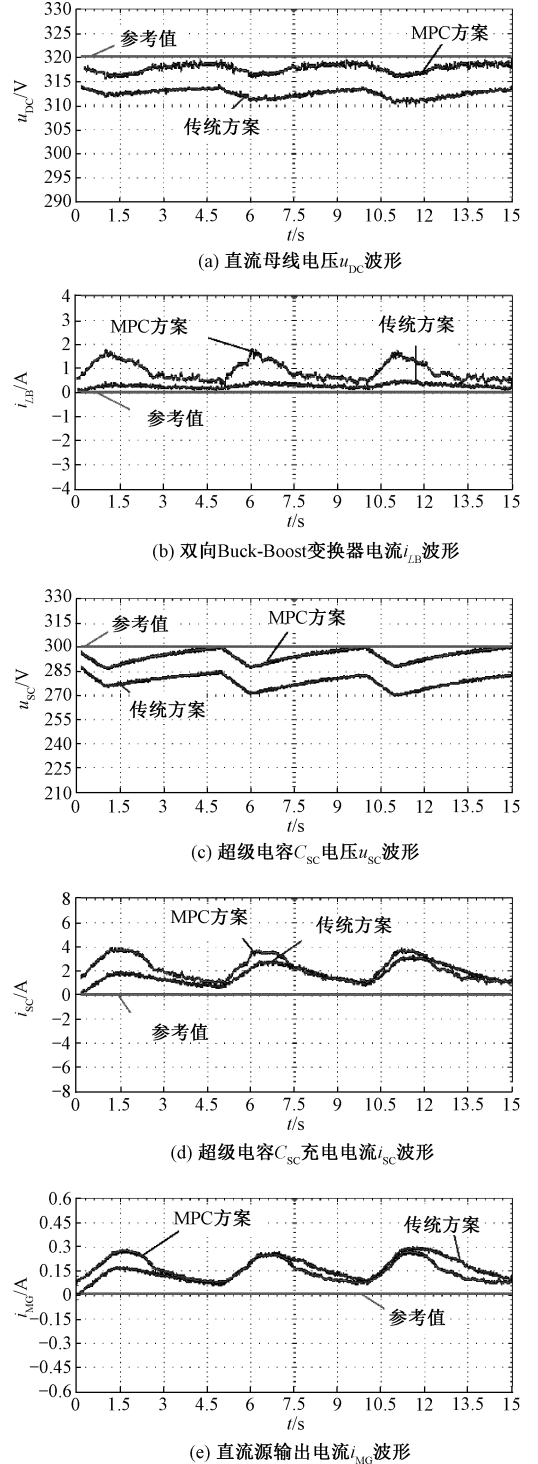


图 7 对比实验结果

Fig.7 Comparative experimental results

优势体现在系统瞬态响应明显更快, 可使超级电容尽快充电, 并在稳态下, 输出变量快速收敛到所定义的参考值。而传统方案下参考跟踪的偏差较大, 如表 1 所示为误差信号的两种范数在两种控制方案下的对比关系, 更清楚地反映出所提出的 MPC 方法相

对于传统控制方法的显著改进。此外,MPC 控制器可直接实现对直流微电网中 Buck 变换器和双向 Buck-Boost 变换器的最优鲁棒协调控制,而传统方案则是对两者分别进行控制的。

表 1 误差信号的两范数对比

Tab.1 Comparison of two norms of the error signal		
控制方案	$\ y(t) - w(t)\ _2$	$\ y(t) - w(t)\ _\infty$
传统控制方案	166.24	3 528.5
MPC 控制方案	44.1	688.63

6 结论

针对 PPL 对直流微电网的不利影响,本文提出了一种简单有效的 MPC 作用于直流微电网中变换器的控制方法,从而实现了更稳定的系统协调控制。回顾全文,可归纳主要结论为:

(1)由于带 PPL 的直流微电网系统存在一些系统约束,这使得标准线性控制技术无法使用,而 MPC 和线性矩阵不等式求解方法的结合,使得控制和输出信号在严格约束下完成,最大程度地减轻 PPL 对系统的影响。

(2)和传统控制策略的对比实验结果表明,MPC 直接作用于直流微电网中混合 ESS,可使直流母线压降优于传统方案,同时动态响应更快。

进一步的研究方向是将该 MPC 方案推广应用至其他配置更为复杂的直流微电网控制策略设计中。

参考文献 (References):

[ 1 ] 刘忠,杨陈,蒋玮,等 (Liu Zhong, Yang Chen, Jiang Wei, et al.). 基于一致性算法的直流微电网储能系统功率分配技术 (Consensus algorithm based power distribution technology for energy storage system in DC microgrid) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2020, 44 (7): 61-75.

[ 2 ] 郭伟,赵洪山 (Guo Wei, Zhao Hongshan). 基于事件触发机制的直流微电网多混合储能系统分层协调控制方法 (Coordinated control method of multiple hybrid energy storage system in DC microgrid based on event-triggered mechanism) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2020, 35 (5): 1140-1151.

[ 3 ] 康慨,邓少平,张超,等 (Kang Kai, Deng Shaoping, Zhang Chao, et al.). 含直流馈线分区优化的交直流混合微电网规划 (AC/DC hybrid microgrid planning with optimal placement of DC feeders) [J]. 智慧电力

(Smart Power), 2019, 47 (10): 22-30.

[ 4 ] 陈锋,曹洪涛,刘洋,等 (Chen Feng, Cao Hongtao, Liu Yang, et al.). 国外舰艇综合电力系统研究综述 (Summary of overseas warship's integrated power system) [J]. 舰船科学技术 (Ship Science and Technology), 2017, 39 (17): 1-5.

[ 5 ] Khooban M H, Dragovich T, Blaabjerg F, et al. Ship-board microgrids: A novel approach to load frequency control [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9 (2): 843-852.

[ 6 ] 戴宇峰,鲁军勇,张晓,等 (Dai Yufeng, Lu Junyong, Zhang Xiao, et al.). 脉冲功率电源连续发射水冷模拟负载 (Water-cooling simulated resistance for continuously launching pulsed power supply) [J]. 国防科技大学学报 (Journal of National University of Defense Technology), 2016, 38 (6): 6-11.

[ 7 ] 严鋈,王金全,黄克峰,等 (Yan Jun, Wang Jinquan, Huang Kefeng, et al.). 脉冲功率负载等效拓扑及潮流计算模型分析 (Analysis of equivalent topology and power-flow calculation model for pulsed power load) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2018, 33 (23): 5523-5531.

[ 8 ] 常晓勇,李永丽,陈晓龙 (Chang Xiaoyong, Li Yongli, Chen Xiaolong). 基于超级电容的直流微电网电压波动抑制研究 (A method based on SC ESS for compensating the voltage fluctuations on the DC bus in DC microgrids) [J]. 电力电子技术 (Power Electronics), 2017, 51 (4): 61-64.

[ 9 ] 米阳,陈鑫,季亮,等 (Mi Yang, Chen Xin, Ji Liang, et al.). 基于虚拟额定电流的直流微电网分布式储能单元精确电流分配研究 (Accurate current sharing of distributed energy storage units in DC microgrid based on virtual rated current) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2020, 44 (3): 823-835.

[ 10 ] Ortuzar M, Moreno J, Dixon J. Ultracapacitor-based auxiliary energy system for an electric vehicle: Implementation and evaluation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54 (4): 2147-2156.

[ 11 ] 刘文康,谷志锋,葛孟超,等 (Liu Wenkang, Gu Zhifeng, Ge Mengchao, et al.). 混合储能系统反演自适应变结构控制 (Back-stepping adaptive variable structure control for hybrid energy storage system) [J]. 电力电容器与无功补偿 (Power Capacitor & Reactive Power Compensation), 2020, 41 (1): 215-220.

[ 12 ] 李冰,李岚,柴伦,等 (Li Bing, Li Lan, Chai Lun, et al.). 一种基于限值管理的混合储能系统控制策略 (A control strategy of hybrid energy storage system based on threshold management) [J]. 电气传动, 2019, 49

- (11): 92-96.
- [13] 谢超,张建文,李星 (Xie Chao, Zhang Jianwen, Li Xing). 基于 EEMD 与模糊控制的混合储能控制策略 (Hybrid energy storage control strategy based on EEMD and fuzzy control) [J]. 电测与仪表 (Electrical Measurement & Instrumentation), 2019, 56 (20): 124-129.
- [14] Linzen D, Buller S, Karden E, et al. Analysis and evaluation of charge-balancing circuits on performance, reliability, and lifetime of supercapacitor systems [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41 (5): 1135-1141.
- [15] Prabodh Bajpai, Vaishalee Dash. Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: A review [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2012, 16 (5): 2926-2939.
- [16] Dragicevic T. Dynamic stabilization of DC microgrids with predictive control of point of load converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33 (12): 10872-10884.
- [17] 张弛,曾杰,张威,等 (Zhang Chi, Zeng Jie, Zhang Wei, et al.). 含混合储能的独立微电网多时间尺度协调控制策略 (Multi-time scale coordination control strategy of isolated microgrid with hybrid energy storage) [J]. 现代电力 (Modern Electric Power), 2020, 37 (1): 74-82.
- [18] 林泓涛,姜久春,贾志东,等 (Lin Hongtao, Jiang Jiuchun, Jia Zhidong, et al.). 权重系数自适应调整的混合储能系统多目标模型预测控制 (Multi-objective model predictive control for hybrid energy storage system with adaptive adjustment of weight coefficients) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2018, 38 (18): 5538-5547.
- [19] 刘正春,朱长青,王勇,等 (Liu Zhengchun, Zhu Changqing, Wang Yong, et al.). 脉冲负载下电力系统暂稳态功率特性 (Transient and steady-state power characteristics of power system with pulsed load) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2017, 41 (9): 3018-3024.
- [20] Farhadi M, Mohammed O. Adaptive energy management in redundant hybrid DC microgrid for pulse load mitigation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6 (1): 54-62.
- [21] Crider J M, Sudhoff S D. Reducing impact of pulsed power loads on microgrid power systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1 (3): 270-277.
- [22] Gao L, Dougal R A, Liu S. Power enhancement of an actively controlled battery/ultracapacitor hybrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20 (1): 236-243.
- [23] 孙建龙,窦晓波,张子仲,等 (Sun Jianlong, Dou Xiaobo, Zhang Zizhong, et al.). 直流对等式微电网混合储能系统协调控制策略 (DC peer-to-peer coordinated control strategy of hybrid energy storage system for microgrid) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2016, 31 (4): 194-202.
- [24] Farhadi M, Mohammed O A. Performance enhancement of actively controlled hybrid DC microgrid incorporating pulsed load [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51 (5): 3570-3578.
- [25] 胡长斌,王海鹏,罗珊娜,等 (Hu Changbin, Wang Haipeng, Luo Shanna, et al.). 基于鲁棒扰动观测器的直流微电网电压动态补偿控制 (Voltage dynamic compensation control of DC microgrid based on robust disturbance observer) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2020, 44 (5): 207-214.
- [26] Vazquez S, Rodriguez J, Rivera M, et al. Model predictive control for power converters and drives: Advances and trends [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64 (2): 935-947.
- [27] 柳志飞,杜贵平,杜发达 (Liu Zhifei, Du Guiping, Du Fada). 有限集模型预测控制在电力电子系统中的研究现状和发展趋势 (Research status and development trend of finite control set model predictive control in power electronics) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2017, 32 (22): 58-69.
- [28] IEEE B E. IEEE recommended practice for 1 kV to 35 kV medium-voltage DC power systems on ships [S]. 2018.
- [29] Mehdi M M, Navid V, Hassan K M, et al. Design of quadratic D-stable fuzzy controller for DC microgrids with multiple CPLs [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66 (6): 4805-4812.
- [30] Lee S, Kim J, Lee J, et al. State-of-charge and capacity estimation of lithium-ion battery using a new open-circuit voltage versus state-of-charge [J]. Journal of Power Sources, 2008, 185 (2): 1367-1373.
- [31] Camacho E F, Alba C B. Model predictive control [M]. 2nd ed. London: Springer-Verlag, 2007.
- [32] 俞立 (Yu Li). 鲁棒控制线性矩阵不等式处理方法 (Robust control for linear matrix inequality treatment) [M]. 北京: 清华大学出版社 (Beijing: Tsinghua University Press), 2002.



**Model predictive control strategy of DC microgrid converter considering influence of pulsed power loads**

ZHAO Xin-kuan<sup>1</sup>, CHEN Yan-dong<sup>2</sup>, YAO Peng<sup>3</sup>, JIANG Hong-zhao<sup>4</sup>

(1.Zhuhai City Polytechnic, Zhuhai Collaborative Innovation Center of Smart Grid technology, Zhuhai 519000, China;2.Hunan University, Natural Electric Power Conversion and Control Engineering Technology Research Center, Changsha 410082, China;3.Zhuhai Wanlida Electrical Automation Co.,Ltd., Zhuhai 519000, China;4.NCSE, Beijing 102209, China)

**Abstract:** Focusing on the problem of stable operation of DC microgrid with pulsed power loads, the predictive control strategy of the converter in DC microgrid to suppress the influence of pulsed power loads is designed. The designed model predictive controller is an optimal and robust coordinated controller, which can be directly applied to the hybrid energy storage system in the DC microgrid and reduces the negative impact of the pulsed power loads. Based on the analysis of the composition of the DC microgrid, the system dynamic model has been derived to develop a model predictive controller. And the system hard constraints are introduced into the control strategy, and then the linear matrix inequality approach is used to solve the model predictive control conditions. The experimental studies are carried out using the DC microgrid test platform, and the experimental results verifies the effectiveness of the new model predictive control strategy.

**Key words:** DC microgrid; converter; model predictive control; pulsed power load