

DOI: 10.13234/j.issn.2095-2805.2024.1.41

中图分类号: TM461

文献标志码: A

基于双矢量的三电平 PFC 中点电位平衡 无权重模型预测控制

高曼曼¹(中国电源学会会员), 龙珊珊¹, 王 飞², 党超亮^{2,3}(中国电源学会会员)
(1. 石家庄理工职业学院智能制造与技术学院, 石家庄 050200; 2. 西安理工大学电气工程学院,
西安 710054; 3. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 以三相 Vienna 整流器为研究对象, 针对有限集模型预测控制 FCS-MPC (finite control set model predictive control) 实现中点电位平衡控制时权重因子选取困难, 采样周期内作用单一矢量引起网侧电流纹波较大的问题, 提出一种基于双矢量的无权重模型预测控制 UF-MPC (unweighted factor model predictive control) 策略。首先, 构建基于功率预测的单目标价值函数。然后, 通过扇区划分同时采用无权重因子的方式来提高单次寻优效率, 根据直流侧中点电位的波动优选冗余小矢量, 实现无权重因子的中点电位平衡控制。在获取最优矢量的基础上, 结合零矢量实现了双矢量固定开关频率控制。最后, 基于 RT-LAB 半实物平台从稳态、暂态、中点电位波动方面进行验证, 有效证明了所提控制策略的正确性和有效性。

关键词: Vienna 整流器; 模型预测控制; 无权重因子; 中点电位; 固定开关频率

Neutral-point Potential Balance Unweighted Factor Model Predictive Control of Three-level PFC Based on Double Vectors

GAO Manman¹, Member, CPSS, LONG Shanshan¹, WANG Fei², DANG Chaoliang^{2,3}, Member, CPSS
(1. School of Intelligent Manufacturing and Technology, Shijiazhuang Institute of Technology, Shijiazhuang 050200, China;
2. School of Electrical Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710054, China; 3. State Key Laboratory of
Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an 710049, China)

Abstract: A three-phase Vienna rectifier is taken as the research object in this paper. In view of the difficulty in selecting the weight factor when the finite control set model predictive control realizes the neutral-point potential balance control, as well as the problem of large current ripple on grid-side caused by the action of one single vector during the sampling period, an unweighted factor model predictive control strategy based on double vectors is proposed. First, a single-objective cost function based on power prediction is constructed, and the efficiency of single optimization is improved by sector division and unweighted factor. According to the fluctuation of neutral-point potential on DC side, the redundant small vector is selected to realize the unweighted factor neutral-point potential balance control. Then, based on the obtained optimal vector, the double-vector fixed switching frequency control is realized by combining with the ze-

收稿日期: 2022-07-26; 修回日期: 2022-09-26, 2022-10-14;
录用日期: 2022-10-20; 网络首发日期: 2023-01-12
基金项目: 河北省教育厅科技项目 (QN2021408); 陕西省科技
计划项目青年项目 (2022JQ-512)

This work is supported by Science and Technology Project of Education Department of Hebei Province under the grant QN 2021408; Youth Project of Shaanxi Science and Technology Plan Project under the grant 2022JQ-512

ro vector. Finally, the proposed control strategy is verified on a hardware-in-the-loop platform based on RT-LAB from the aspects of steady state, transient state and neutral-point potential fluctuation, and results effectively prove its correctness and effectiveness.

Keywords: Vienna rectifier; model predictive control; unweighted factor; neutral-point potential; fixed switching frequency

随着电动汽车行业的快速发展,用户对电动汽车充电桩的可靠性和电能质量提出了更高的要求。三相三电平整流器作为电动汽车充电设施的核心组成部分,其性能决定着网侧电能质量和蓄电池的使用寿命。三相 Vienna 整流器^[1]具有成本低、网侧电能质量好的优点,已广泛应用于汽车充电领域。诸多学者将模型预测控制算法 FCS-MPC(finite control set model predictive control)应用于变频器的控制策略上^[2-4],凭借其具多目标跟踪、动态响应快的优点,已取得良好的控制效果。

目前,针对应用在三电平变换器的模型预测控制已取得了一些研究进展。对于三电平变换器具有的中点电位不平衡问题解决方案一般有 2 种方法:第 1 种方法是根据 FCS-MPC 易于实现多目标跟踪的优势,通过在价值函数中引入中点约束项的方式来实现中点电位波动抑制,由于此方法主要存在的问题是权重因子与控制变量之间没有明确的数学关系,其设计需要反复整定和试凑^[5-6],这将带来极大的不便;第 2 种方法是利用冗余小矢量来控制直流侧中点电位的波动^[7-9]。文献[7-8]通过调整冗余小矢量的动作时间,使得中点电位趋于平衡;文献[9]提出了一种基于冗余短矢量预判的模型预测电流控制方法,上述方法实现了中点电位平衡并有效避免权重因子难以选取问题,凭借单目标函数就可实现系统控制,但其遍历的矢量集个数较多。此外, FCS-MPC 策略通过价值函数来评估出最优矢量,在采样周期内作用于此矢量会带来网侧电流纹波较大的问题,这是由于作用单一矢量使得在控制周期结束时预测值和参考值间存在误差较大所致。文献[10-11]提出三矢量合成的方法,利用空间矢量脉宽调制 SVPWM(space vector pulse width modulation)算法将 3 个电压矢量组合来逼近控制周期结束时的参考值,以达到降低并网电流纹波的目的,同时实现固定开关频率控制;文献[12]通过引入虚拟矢量来增加预测控制中的候选矢量集,能有效减少参考电压和预测电压之间的误差,从而改善了网侧电流质量;文献[13]根据作用时间与目标函数值呈反比特性,通过选取扇区内目标函数最小的 3 个矢量

合成最优电压矢量,来降低电网电流 THD。

针对以上问题,本文提出一种基于双矢量的无权重模型预测控制 UF-MPC(unweighted factor model predictive control),研究了基于 Vienna 整流器的无权重因子预测控制策略实现直流侧中点波动抑制问题,同时结合零矢量实现双矢量固定开关频率控制。首先,通过电网电压极性进行扇区划分,同时预判直流母线上、下电容的电压大小,优选出矢量个数为 3 的矢量集,结合直接功率控制得到有功和无功功率的预测值,并设计单目标价值函数遍历找到最优矢量。然后,计算最优矢量和零矢量的占空比,来实现双矢量固定开关频率控制。最后,搭建基于 RT-LAB 半实物平台,验证所提策略的可行性和有效性。

1 三相 Vienna 整流器系统离散模型

图 1 所示为三相三电平 Vienna 整流器的电路拓扑示意。其中, $u_{gx}(x=a, b, c)$ 为三相交流侧电网电压; i_{gx} 为三相流经电感 L 上的电流; $D_{xp} \sim D_{xn}$ 为二极管整流桥; S_{x1} 和 S_{x2} 是由两个反向串联开关管构成的双向开关; C_1, C_2 为 2 个分裂电容; u_{dk} 为直流输出电压; u_p 和 u_n 分别是连接至中点 o 的上、下电容电压。

根据基尔霍夫电压定律得到三相 Vienna 整流器的数学模型,并进行 Clark 变换,表达式为

$$\begin{cases} L \frac{di_{g\alpha}}{dt} = -Ri_{g\alpha} - u_{o\alpha} + u_{g\alpha} \\ L \frac{di_{g\beta}}{dt} = -Ri_{g\beta} - u_{o\beta} + u_{g\beta} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $u_{g\alpha}$ 和 $u_{g\beta}$ 为通过 Clark 变换的 α 轴和 β 轴电源电压; $i_{g\alpha}$ 和 $i_{g\beta}$ 为通过 Clark 变换的 α 轴和 β 轴网侧电流; $u_{o\alpha}$ 和 $u_{o\beta}$ 为通过 Clark 变换的桥臂点对直流侧中点 o 的 α 轴和 β 轴电压。根据瞬时功率理论,计算得到系统交流侧在两相 $\alpha\beta$ 静止坐标系下的瞬时有功功率 p 和瞬时无功功率 q ,即

$$\begin{cases} p = u_{g\alpha} i_{g\alpha} + u_{g\beta} i_{g\beta} \\ q = u_{g\beta} i_{g\alpha} - u_{g\alpha} i_{g\beta} \end{cases} \quad (2)$$

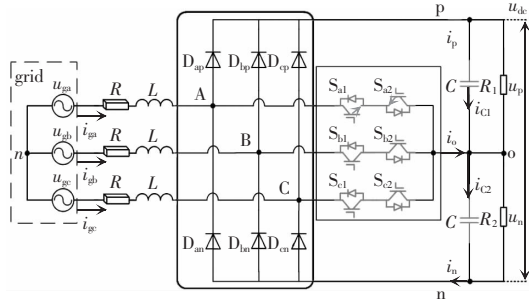


图 1 三相三电平 Vienna 整流器的电路拓扑

Fig. 1 Circuit topology of three-phase three-level Vienna rectifier

对式(2)两侧求导,得到网侧的有功功率和无功功率的变化率分别为

$$\begin{cases} \frac{dp}{dt} = u_{gx} \frac{di_{gx}}{dt} + i_{gx} \frac{du_{gx}}{dt} + u_{gy} \frac{di_{gy}}{dt} + i_{gy} \frac{du_{gy}}{dt} \\ \frac{dq}{dt} = u_{gy} \frac{di_{gx}}{dt} + i_{gx} \frac{du_{gy}}{dt} - u_{gy} \frac{di_{gy}}{dt} - i_{gy} \frac{du_{gx}}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

在电网电压理想的条件下 Vienna 整流器网侧电压关系表示为

$$\begin{cases} u_{gx} = U_g \sin(\omega t) \\ u_{gy} = U_g \cos(\omega t) \end{cases} \quad (4)$$

式中: U_g 为相电压幅值; ω 为电网电压角频率。对式(4)两侧进行微分计算,同时结合式(4)可得到 Vienna 整流器网侧电压在 t 时刻的变化率,即

$$\begin{cases} \frac{du_{gx}}{dt} = -\omega u_{gy} \\ \frac{du_{gy}}{dt} = \omega u_{gx} \end{cases} \quad (5)$$

将式(1)和式(5)代入式(3)中,通过计算整理,可得 t 时刻有功功率 p 和无功功率 q 的变化率为

$$\begin{cases} \frac{dp}{dt} = \frac{1}{L} (u_{gx}^2 + u_{gy}^2 - u_{gx}u_{\alpha\omega} - u_{gy}u_{\beta\omega}) - \omega q \\ \frac{dq}{dt} = \frac{1}{L} (u_{gx}u_{\beta\omega} - u_{gy}u_{\alpha\omega}) + \omega p \end{cases} \quad (6)$$

假设控制系统的采样周期为 T_s (取值为 2×10^{-5} s),且远远小于电网电压的周期。系统网侧有功功率和无功功率的预测值可通过一阶前向欧拉法来获取,即

$$\begin{cases} \frac{dp}{dt} = \frac{p^p(k+1) - p(k)}{T_s} \\ \frac{dq}{dt} = \frac{q^p(k+1) - q(k)}{T_s} \end{cases} \quad (7)$$

式中: p^p 和 q^p 为 k 时刻的有功功率和无功功率; $p^p(k+1)$ 和 $q^p(k+1)$ 分别为有功功率和无功功率的预测值。由于网侧电阻 R 很小,因此将式(1)中的电阻项忽略掉,同时结合式(6)和式(7),可得整流器网侧输入有功和无功功率的预测值分别为

$$\begin{cases} p^p(k+1) = p(k) - \omega T_s q(k) + \frac{T_s}{L} (u_{gx}^2 + u_{gy}^2 - \\ u_{gx}u_{\alpha\omega} - u_{gy}u_{\beta\omega}) \\ q^p(k+1) = q(k) + \omega T_s p(k) + \frac{T_s}{L} (u_{gx}u_{\beta\omega} - u_{gy}u_{\alpha\omega}) \end{cases} \quad (8)$$

依据功率变化最小化标准来设计目标函数 $g(i)$,

表示为

$$g(i) = [p^* - p^p(k+1)]^2 + [q^* - q^p(k+1)]^2 \quad (9)$$

式中, p^* 和 q^* 分别为有功功率和无功功率的参考值。为使整机工作在单位因数状态下, q^* 取值为 0。对候选矢量集中的每个矢量放入目标函数中进行评判,以获得最小值对应的电压矢量,即最优矢量。

传统 FCS-MPC 实现中点电位平衡时需要在目标函数中加入附加项,即

$$g(i) = [p^* - p^p(k+1)]^2 + [q^* - q^p(k+1)]^2 + \lambda [u_p(k+1) - u_n(k+1)]^2 \quad (10)$$

式中, $u_p(k+1)$ 和 $u_n(k+1)$ 分别为直流侧上、下电容的电压预测值。

传统 FCS-MPC 中不同权重因子选取对网侧电流 THD 的影响如图 2 所示。通过图 2 可以看到,系统的最优控制依赖于权重因子 λ 的合理取值,而 λ 的不同取值对中点电位和网侧电流 THD 产生较大

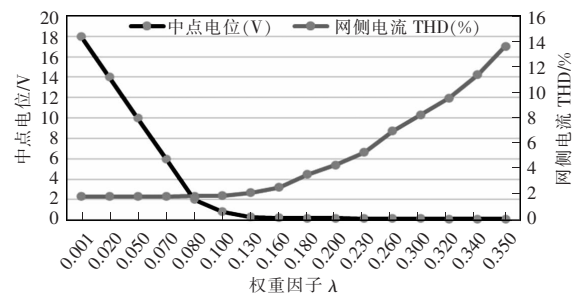


图 2 传统 FCS-MPC 中不同权重因子选取对网侧电流 THD 的影响

Fig. 2 Influence of different weight factors on grid-side current THD in traditional FCS-MPC

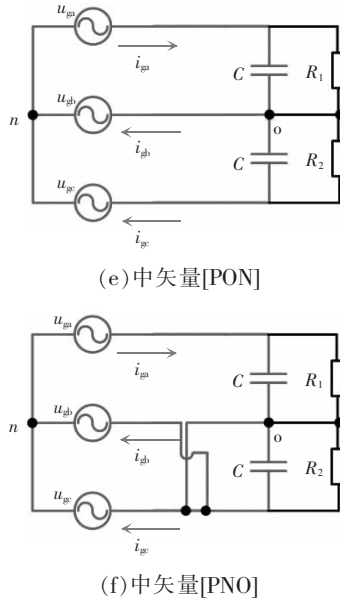


图 4 扇区 I 内电压矢量的作用过程

Fig. 4 Action process of voltage vector in Sector I

位的影响呈相反状态,因此根据中点电位的正负偏差调整期望冗余小矢量的作用即可实现中点电位平衡控制。扇区 I 有限控制集的选取原则如表 1 所示,其他扇区的矢量集选取原则类似。

表 1 矢量集的选取原则

Tab. 1 Selection principle for vector set

扇区 编号	直流母线 电压分布	矢量集	类型
I-1	$u_p > u_n$	[ONN],[OON],[PON]	N 型
	$u_p < u_n$	[POO],[PON],[PNN]	P 型
I-2	$u_p > u_n$	[ONN],[PON],[PNN]	N 型
	$u_p < u_n$	[POO],[PON],[PNN]	P 型
I-3	$u_p > u_n$	[ONN],[ONN],[PNO]	N 型
	$u_p < u_n$	[POO],[PNO],[PNN]	P 型
I-4	$u_p > u_n$	[ONN],[PNN],[PNO]	N 型
	$u_p < u_n$	[POO],[PNN],[PNO]	P 型

2.2 UF-MPC 固定开关频率策略

传统 FCS-MPC 策略在一个控制周期中只作用单一电压矢量,这将造成网侧电流纹波较大。由于矢量选择的随机性,该策略也具有开关频率不固定的缺点。因此,本文引入矢量占空比的思想来实现开关频率固定的目标,在获取最优矢量的基础上结合零矢量实现了双矢量定频控制。首先,按照给定功率和反馈功率误差最小原则获得最优矢量,然后在一个

控制周期中作用最优矢量和零矢量,其中最优矢量的作用时间根据功率误差最小的原理计算得到。

本文模型预测内环结合直接功率控制,利用价值函数滚动寻优获得最优矢量后,需要计算最优矢量和零矢量的作用时间。假设功率斜率在极其小的采样周期 T_s 内保持不变,则控制周期结束时的有功功率 p^{k+1} 和无功功率 q^{k+1} 可表示为

$$\begin{cases} p^{k+1} = p^k + f_{pv}t_v + f_{pz}(T_s - t_v) \\ q^{k+1} = q^k + f_{qv}t_v + f_{qz}(T_s - t_v) \end{cases} \quad (11)$$

式中: p^k 和 q^k 分别为第 k 时刻的有功功率和无功功率的预测值; f_{pv} 和 f_{pz} 分别为最优矢量和零矢量作用时有功功率的斜率; f_{qv} 和 f_{qz} 分别为最优矢量和零矢量作用时无功功率的斜率; t_v 和 t_z 分别为最优矢量和零矢量的作用时间。

结合第 k 个采样周期瞬时功率变化率可以得到斜率 f_{pv} 、 f_{pz} 、 f_{qv} 和 f_{qz} 的表达式,即

$$\begin{cases} f_{pv} = \frac{dp}{dt} \Big|_{V_{opt} = f_{pv} + \frac{1}{L}u_m} \\ f_{qv} = \frac{dq}{dt} \Big|_{V_{opt} = f_{qv} + \frac{1}{L}u_n} \\ f_{pz} = \frac{dp}{dt} \Big|_{V_o = -\omega q - \frac{R}{L}p + \frac{1}{L}|e|^2} \\ f_{qz} = \frac{dq}{dt} \Big|_{V_o = \omega p - \frac{R}{L}q} \end{cases} \quad (12)$$

根据式(11)和功率误差的概念,功率的预测值和参考值 p^{ref} 、 q^{ref} 之间的误差 p_{error} 、 q_{error} 表示为

$$\begin{cases} p_{\text{error}} = p^{\text{ref}} - [p^k + f_{pv}t_v + f_{pz}(T_s - t_v)] \\ q_{\text{error}} = q^{\text{ref}} - [q^k + f_{qv}t_v + f_{qz}(T_s - t_v)] \end{cases} \quad (13)$$

以最小功率误差平方和的形式定义目标函数 G ,并使目标函数最小化,即有

$$\begin{cases} G = p_{\text{error}}^2 + q_{\text{error}}^2 \\ \frac{\partial G}{\partial t_v} = 0 \end{cases} \quad (14)$$

整理式(13)和式(14),可以求出最优矢量和零矢量的作用时间 t_v 和 t_z 分别为

$$\begin{cases} t_v = \frac{(p^{\text{ref}} - p^k)(f_{pv} - f_{pz}) + (q^{\text{ref}} - q^k)(f_{qv} - f_{qz})}{(f_{pv} - f_{pz})^2 + (f_{qv} - f_{qz})^2} + \\ \frac{T_s(f_{pz}^2 - f_{qz}^2 - f_{pv}f_{pz} - f_{qv}f_{qz})}{(f_{pv} - f_{pz})^2 + (f_{qv} - f_{qz})^2} \\ t_z = T_s - t_v \end{cases} \quad (15)$$

由此可以得到在一个控制周期 T_s 内最优矢量和零矢量作用在时间刻度上的双矢量序列。通过驱动电路将双矢量对应的脉冲序列作用于开关管,从而达到固定开关频率的目标。同时,相较于仅单一矢量的作用,本文所提策略由于双矢量的作用,网侧电流纹波得到了降低。

3 实验验证分析

为验证所提 UF-MPC 控制策略的正确性和有效性,本文搭建了基于 RT-LAB 半实物平台。实验系统电路参数如表 2 所示。

表 2 系统的电路参数

Tab. 2 Circuit parameters of system

参数	数值	参数	数值
电网电压 u_{gn}/V	380	额定功率 P/kW	8
网侧滤波电感 L/mH	3	采样时间 T_s/s	0.000 02
直流侧电容 C_1 和 $C_2/\mu F$	1 080	直流侧电压 u_{dk}/V	800

本文针对三相 Vienna 整流器,采用基于双矢量的无权重型预测控制策略,其控制框图如图 5 所示。

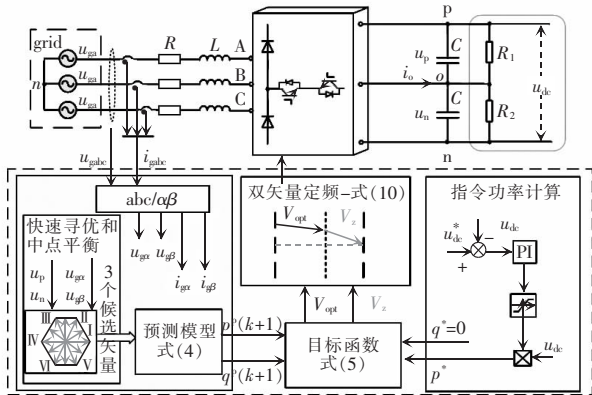


图 5 基于双矢量的无权重型预测控制策略框图

Fig. 5 Block diagram of UF-MPC strategy based on double vectors

该策略采用双环控制,外环为直流侧 PI 电压环,内环为结合直接功率的模型预测控制。其控制步骤如下:首先,根据电网电压极性可以分为 6 大扇区(分别为 I~VI),每个大扇区又分成 4 个小扇区;同时通过比较直流侧电压 u_p 和 u_n 的大小,优选

出中点电位趋于平衡的冗余小矢量。然后,通过外环 PI 控制得到内环有功功率的给定值 p^* ,将无功功率参考值 q^* 设为 0,从而确定出当前时刻个数为 3 的候选矢量集。最后,在此矢量集中,通过目标函数最小化获取最优矢量,并结合零矢量来达到固定开关频率的目标。本文所提策略的流程如图 6 所示。

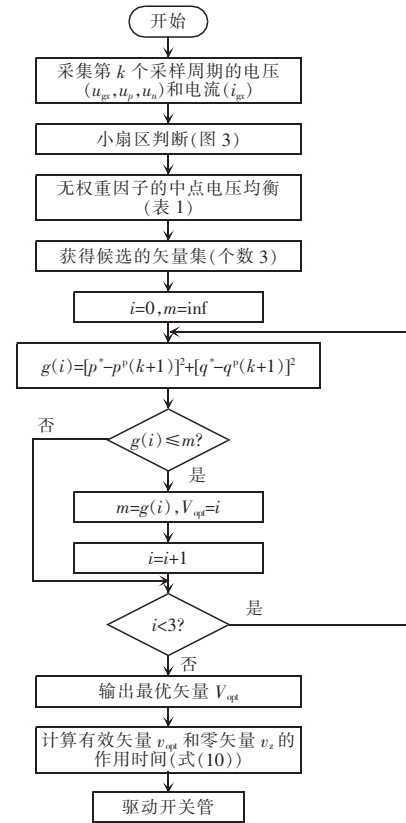


图 6 基于双矢量的无权重型预测控制流程

Fig. 6 Flow chart of UF-MPC based on double vectors

图 7 为系统由满载切换到半载时不同控制策略的暂态响应结果。在满载工况下,利用示波器测得传统 FCS-MPC 和所提 UF-MPC 策略下的网侧输出电流 THD 分别为 3.39% 和 2.28%,可看出本文所提控制策略降低了电网电流纹波,主要因为双矢量的作用使得控制周期结束时预测值和参考值的误差进一步降低,电流纹波更小。

图 8 给出了满载工况时 2 种控制策略在直流侧上、下电容电压 (u_p, u_n) 和直流侧中点电位波动 u_o ($u_o = u_p - u_n$) 的波形。由图 8(a) 可见,采用传统 FCS-MPC 控制时,直流侧中点波动量 u_o 为 15.4 V,而所提 UF-MPC 控制策略的中点波动量仅为 3.6 V,说

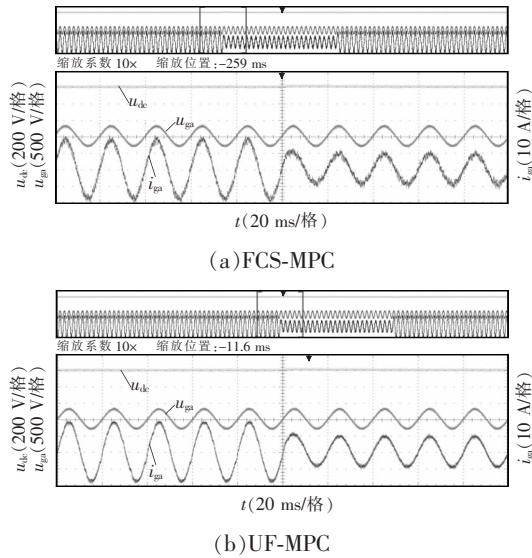


图 7 不同控制策略的网侧电流暂态波形

Fig. 7 Transient waveforms of grid-side current under different control strategies

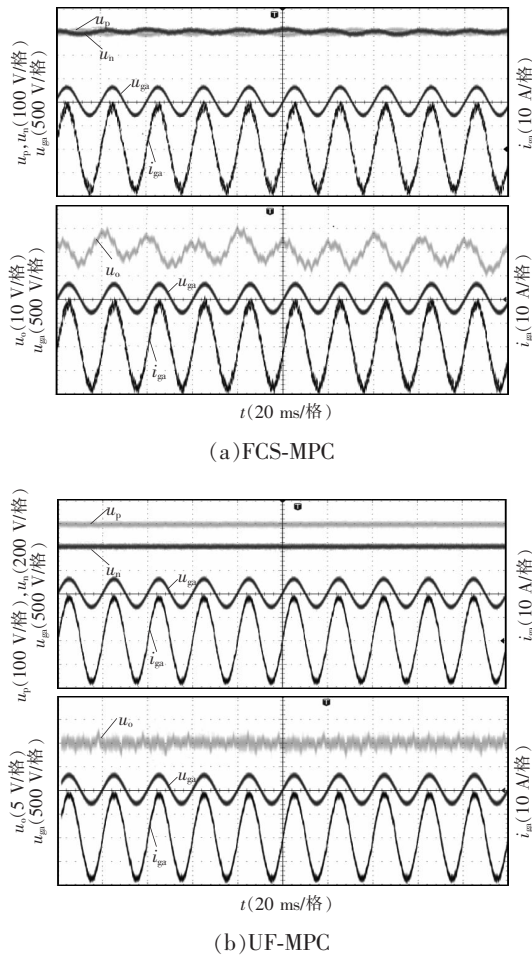


图 8 不同控制策略的直流侧中点电位波动波形

Fig. 8 Waveforms of DC-side neutral-point potential fluctuation under different control strategies

明采用无权重因子的控制策略平衡中点电位能力较强,同时避免了权重因子的选取困难问题,一定程度简化了控制策略的复杂度。

4 结语

本文对模型预测控制应用在三电平变换器上的不足之处进行改进,以 Vienna 整流器为研究对象,提出一种基于双矢量的无权重模型预测控制策略,避免权重因子难以选取问题,并优选出冗余小矢量来实现无权重因子的中点电位平衡控制。通过 RT-LAB 半实物测试平台对所提方案进行效果验证,实验结果表明,所提 UF-MPC 控制和传统 FCS-MPC 策略相比,具有直流侧中点电位波动更小的优势;同时通过引入双矢量定频控制有效改善了电流的谐波。本文提出的控制策略不仅适用于 Vienna 整流器,对其他三电平变换器也同样适用。

参考文献:

- [1] 杨闯闯,俞波. 基于两级结构的电动汽车直流充电桩建模[J/OL]. 电源学报. (2022-06-01) [2022-09-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20220531.1532.002.html>
- Yang Chuanchang, Yu Bo. Modeling of DC charging piles for electric vehicles based on two-level structure [J/OL]. Journal of Power Supply. (2022-06-01) [2022-09-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20220531.1532.002.html> (in Chinese).
- [2] 马雯,郭强,李山. LCL 电压型整流器模型预测优化控制[J]. 电源学报, 2023, 21(4): 38-46.
- Ma Wen, Guo Qiang, Li Shan. Model predictive optimization control of LCL voltage-type rectifier [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(4): 38-46 (in Chinese).
- [3] Dang Chaoliang, Wang Fei, Liu Ding, et al. Model predictive direct power control scheme for Vienna rectifier with constant switching frequency [J]. IET Power Electronics, 2021, 15(3): 216-225.
- [4] 金楠,肖晗,谢欢,等. NPC 三电平虚拟同步机桥臂故障容错模型预测控制[J/OL]. 电源学报. (2022-02-23)[2022-09-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.tn.20220222>.

1811.017.html

Jin Nan, Xiao Han, Xie Huan, et al. Fault tolerant model predictive control for bridge arm of NPC three-level virtual synchronous generator [J/OL]. Journal of Power Supply. (2022-02-23) [2022-09-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.tm.20220222.1811.017.html> (in Chinese).

- [5] 吴晓新, 宋文祥, 乐胜康, 等. 异步电机模型预测三电平直接电流控制[J]. 电工技术学报, 2017, 32(18): 113-123.

Wu Xiaoxin, Song Wenxiang, Le Shengkang, et al. Model predictive direct current control of induction machines fed by a three level inverter [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(18): 113-123.

- [6] 李辉, 黄彦全, 韦婷, 等. 功率前馈的单相三电平模型预测有限集控制[J]. 电气自动化, 2019, 41(6): 70-73.

Li Hui, Huang Yanquan, Wei Ting, et al. Finite set control with power feed-forward for single-phase three-level model prediction [J]. Electrical Automation, 2019, 41(6): 70-73.

- [7] Yang Yong, Wen Huiqing, Fan Mingdi, et al. Multiple-voltage-vector model predictive control with reduced complexity for multilevel inverters [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(1): 105-117.

- [8] Bekhoucha N, Kermadi M, Mesbahi N, et al. Performance investigation of deadbeat predictive controllers for three-level neutral point clamped inverter [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2022, 10(1): 1165-1177.

- [9] Zhang Hongliang, Zhang Chenghui, Xing Xiangyang, et al. Three-layer double-vector model predictive control strategy for current harmonic reduction and neutral-point voltage balance in vienna rectifier [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(1): 251-262.

- [10] 杨兴武, 杨帅, 王涛, 等. 基于功率跟踪目标函数定频模型预测控制的三相整流器[J]. 电网技术, 2021, 45(3): 1125-1131.

Yang Xingwu, Yang Shuai, Wang Tao, et al. Three phase PWM rectifier under constant-frequency model predictive

control based on power tracking objective function [J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 1125-1131 (in Chinese).

- [11] 张子成, 陈阿莲, 邢相洋. 改进的并网逆变器模型预测控制方法[J]. 电源学报, 2018, 16(2): 137-143.

Zhang Zicheng, Chen Alian, Xing Xiangyang. Improved model predictive control method based on grid-connected inverter [J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(2): 137-143 (in Chinese).

- [12] 朱文杰, 陈昌松, 段善旭. 一种基于离散空间矢量调制的 Vienna 整流器模型预测控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 6008-6016.

Zhu Wenjie, Chen Changsong, Duan Shanxu. A model predictive control method with discrete space vector modulation of vienna rectifier [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 6008-6016.

- [13] 党超亮, 王飞, 刘丁, 等. 基于优选矢量合成的 Vienna 整流器滑模预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(23): 8699-8707.

Dang Chaoliang, Wang Fei, Liu Ding, et al. Sliding mode predictive control of Vienna rectifier based on optimal vector synthesis [J]. 2022, 42(23): 8699-8707 (in Chinese).



高曼曼

作者简介:

高曼曼(1986-),女,中国电源学会会员,硕士,讲师。研究方向:电气传动与自动化。E-mail:554806320@qq.com。

龙珊珊(1983-),女,通信作者,硕士,讲师,一级建造师(机电)。研究方向:机电一体化技术。E-mail:83412371@qq.com。

王飞(1998-),男,硕士研究生。研究方向:电能质量测控与并网变换器优化设计。E-mail:wangf897@163.com。

党超亮(1988-),男,中国电源学会会员,博士,博士后在站,讲师。研究方向:多电平并网变换器优化设计,特种电源系统及控制,电能质量测控与新能源技术开发设计等。E-mail:dangclkk@163.com。