

引用格式: 王举重, 白海东, 刘浩, 等. 三相 PWM 整流器低开关频率分层模型预测控制 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(5): 119-129. WANG Juzhong, BAI Haidong, LIU Hao, et al. Low switching frequency multi-layered model predictive control strategy for three-phase PWM rectifier [J]. Southern energy construction, 2025, 12(5): 119-129. DOI: 10.16516/j.ceec.2025-010.

三相 PWM 整流器低开关频率分层模型预测控制

王举重¹, 白海东¹, 刘浩¹, 曹晓冬², 夏晨阳³, 曹钰晨^{3,✉}, 公铮³

(1. 鄂尔多斯市昊华精煤有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000;

2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210019;

3. 中国矿业大学 电气工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: [目的]随着直流微电网在配电网中使用的不断拓展, 大功率三相 PWM (Pulse Width Modulation) 整流器的重要性日益凸显。与两电平 PWM 整流器方案相比, 采用三相三电平 PWM 整流器可在获取优异的网侧电能质量的同时大幅提升装置的耐压及有效容量, 但其控制目标及复杂度大幅增加。现有的整流器模型预测控制算法在三电平 PWM 整流器的多目标控制中存在计算量大、权重系数整定困难、开关频率较高的问题。这使得整流器对控制器算力要求高、性能下降, 制约了其广泛使用。[方法]针对上述问题, 文章以三相三电平大功率 PWM 整流器为研究对象, 对传统模型预测控制进行改进, 提出 1 种基于电流波形相似系数的低开关频率 PWM 整流器分层模型预测控制策略, 以实现三相三电平 PWM 整流器的多目标优化控制并搭建了仿真和实验平台进行仿真和实验验证。[结果]仿真及实验结果显示, 该控制策略有效减少了计算量, 并可在较低开关频率情况下获得较低的电流畸变率, 实现多目标约束下的有效控制。[结论]可将此控制策略应用于大功率 PWM 整流器的控制中, 减小系统开关损耗, 提高其可靠性。

关键词: PWM 整流器; 模型预测控制; 多目标控制; 分层模型预测控制; 低开关频率

DOI: 10.16516/j.ceec.2025-010

文章编号: 2095-8676(2025)05-0119-11

CSTR: 32391.14.j.ceec.2025-010

中图分类号: TM7; TM461



论文二维码

Low Switching Frequency Multi-Layered Model Predictive Control Strategy for Three-Phase PWM Rectifier

WANG Juzhong¹, BAI Haidong¹, LIU Hao¹, CAO Xiaodong², XIA Chenyang³, CAO Yuchen^{3,✉}, GONG Zheng³

(1. Ordos Haohua Clean Coal Co., Ltd., Ordos 017000, Inner Mongolia, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210019, Jiangsu, China;

3. School of Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] With the continuous expansion of the use of DC microgrids in distribution networks, high-power three-phase pulse width modulation (PWM) rectifiers are becoming increasingly important. Compared with the two-level PWM rectifiers, three-phase three-level PWM rectifiers can significantly improve the withstand voltage and effective capacity of the devices while obtaining excellent grid side power quality, but their control objectives and complexity are greatly increased. The existing rectifier model predictive control algorithms have problems such as large amounts of calculation, difficulty in setting weight coefficients, and high switching frequency in multi-objective control of three-level PWM rectifiers. As a result, the rectifiers require high computing power from the controllers and have reduced performance, restricting their widespread use. [Method] To solve the above problems, this article took three-phase three-level high-power PWM rectifiers as the research object, improved the traditional model predictive control, and proposed a low switching frequency PWM rectifier multi-Layered model predictive control strategy based on current waveform similarity coefficient to achieve

收稿日期: 2025-01-12 修回日期: 2025-03-07 网络首发日期: 2025-05-23

基金项目: 国家自然科学基金“海上风电变频传输系统轻型化 M3C 及其高可靠性优化预测控制”(52277205)

multi-objective optimization control of the three-phase three-level PWM rectifiers. A simulation and experimental platform was built for simulation and experimental verification. [Result] Simulation and experimental results show that this control strategy effectively reduces the amounts of calculation, achieves a lower current distortion rate at a lower switching frequency, and achieves effective control under multi-objective constraints. [Conclusion] This control strategy can be applied to the control of high-power PWM rectifiers to reduce system switching losses and improve system reliability.

Key words: PWM rectifier; model predictive control; multi-objective control; multi-layered model predictive control; low switching frequency

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

电力电子设备主要依靠功率开关运行,多数情况下并非线性放大功率,而是处于开关状态。在大功率中压电气传动场合中,随着变流器容量提升,开关器件电压等级升高、容量增大,开关损耗也随着增大。为保证高压大功率器件(3.3 kV、4.5 kV、6.5 kV 的 IGBT 和 IGCT)瞬时开关损耗满足要求,其开关频率通常被限定在 1 kHz^[1] 以内。若未能对这些设备进行有效控制,可能会引起电力系统中的“谐波污染”,在极端情况下还可能触发安全事故,极易造成严重的损失^[2]。虽然这些设备通过整流器获得所需的直流电压水平,但早期的相控整流和不控整流技术由于存在功率因数低和高网侧电流畸变率的问题,未能满足严格的控制标准^[3-4]。随着开关频率降低,采用传统三角载波调制或电压空间矢量调制产生 PWM (Pulse Width Modulation) 信号,输出波形中谐波含量大,无法正常工作^[5]。

面对中压大功率变流装置在低开关频率下的高性能控制难题,国内外的研究者都进行了深入的研究。文献[6-7]所描述的双环 PI 控制方法,可以达到对电压和电流进行基础的稳定控制。尽管如此,它的动态反应速度相对较慢,对干扰的抵抗力也不强,因此不能适应当前高精度应用的需求。文献[8]描述了采纳双闭环控制策略,并利用空间电压矢量调制技术实现直接控制功率,这一策略提升了反应的迅速性,但在整体稳定性和实用性方面仍存在不足。文献[9]介绍了 1 种结合正负序双电流环矢量控制与简化版 PR 控制的策略,这是一个确定的观点。虽然 PWM 整流器的抗扰能力得到了一定程度的增强,但它仅在轻微扰动的情況下适用,这在相关文献中有所提及^[10-12]。针对低开关频率下

PWM 调制响应滞后问题,设计复矢量电流调节器,改善了传统 PI 调节器低开关频率造成的耦合问题,但其仍属于载波调制,过低的开关频率将引起过高谐波。文献[13-15]基于同步优化 PWM 结合自控电机以及基波观测器,提出定子磁链轨迹跟踪控制,实现低开关频率下变流器控制,但存在基波提取困难、自控电机模型复杂等问题。文献[16-17]介绍了 1 种基于模型在线优化预测控制策略,并成功将其应用于电力电子及电机调速领域。其在处理多个控制目标时,采用权值法^[18],即每个控制目标分配权重系数,之后对所有目标函数加权求和,将多个目标函数优化问题转换成单目标函数优化^[19-20]。但随着控制目标增多,出现权重系数设计困难,不利于系统稳定运行等缺点。文献[21]设计了 1 种负载自适应控制器,提高了整流器对负载参数的自适应性。此外,自适应控制的控制效果对模型参数辨识精度具有较大的依赖性。因其动态响应迅速、概念清晰且适用于多变量系统,模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)已成为功率变换器领域的主流技术^[22]。文献[23]将改进的双矢量有限控制集模型预测控制(Finite Control Set Model Predictive Control, FCS-MPC)应用于三相整流器控制中,保持动态性能的同时提高了整流器的稳态性能,开关频率也有所降低。为有效提高 FCS-MPC 在低采样频率下的控制精度,文献[24]提出了 1 种新的控制集扩充方法,以较小的代价取得三相整流器系统控制性能的提升。FCS-MPC 的计算量较大,同时开关频率不固定问题也使得滤波器参数设计十分困难。

随着功率等级的提高,整流器的开关损耗不断增加,为确保电能转换效率,有必要降低其功率器件的开关频率^[25]。文献[26]通过直接在有限的控制动作集合中选择最优控制动作来实现控制目标,适

用于三相 PWM 整流器的实时控制, 且无需改变控制单元, 简化了计算量。文献 [27] 提出了 1 种改进的模型预测控制方法, 旨在优化有限控制集, 以减少系统在寻找最优解时所需的计算量。该策略基于多矢量合成技术, 通过在当前控制周期及其相邻周期内最小化开关操作次数, 来优化开关序列。针对低开关频率 PWM 整流器多目标优化问题, 本文提出 1 种分层模型预测控制策略。在分析传统模型预测控制策略设计原则基础上, 讨论分层模型预测控制 (Multi-Layered Model Predictive Control, ML-MPC) 设计方法。针对 ML-MPC 策略存在的大负荷在线计算问题, 设计完成其基于现场可编程门阵列 (Field Programmable Gate Array, FPGA) [28] 的 ML-MPC 片上系统, 并传统数字信号处理器 (Digital Signal Processor, DSP) 设计方案进行对比分析。Matlab 仿真及样机实验结果表明, 基于 ML-MPC 策略设计的低开关频率 PWM 整流器在处理多目标优化问题时结构清晰, 避免了复杂权重系数设计, 是 1 种安全稳定且性能优异的三相 PWM 整流器模型预测控制指导设计方案。

1 三相 PWM 整流器模型预测控制

对三相 PWM 整流器来说, 其核心的控制策略涵盖了基于电压定向控制 (Voltage Oriented Control, VOC) 的传统直接电流控制方法, 以及近些年涌现的直接功率控制技术 (Direct Power Control, DPC)。本研究设计的三相 PWM 整流器的控制策略是直接电流控制, 并采用在线优化的最优脉冲方案, 目的是保持电流正弦度的同时, 降低开关的频率。图 1 展示了三相 PWM 整流器的模型预测控制框架, 其中采纳了电压的外环控制和功率的内环控制策略。基于三相 PWM 整流器的离散数学模型, 并结合三电平的拓扑结构, 我们可以识别出 27 种不同的开关状态, 在预测 PWM 整流器未来输出的各个开关状态时, 会选择那些能使整流器达到最佳控制效果的开关状态进行输出。

三相 PWM 整流器 MPC 策略设计步骤为:

- (1) 构建三相 PWM 整流器的离散数学模型, 由离散数学模型预测不同开关状态对应 PWM 整流器未来状态;
- (2) 依据控制目标来设定目标函数 f ;
- (3) 将不同开关状态对应 PWM 整流器预测结果

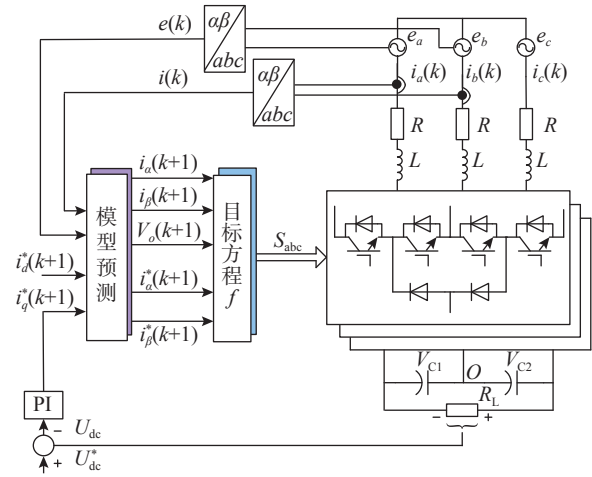


图 1 三电平 PWM 整流器 FCS-MPC 控制框图

Fig. 1 Block diagram of three-level PWM rectifier FCS-MPC

输入目标函数, 在线进行滚动优化搜索, 最终确定目标函数的最佳开关状态, 将作为最优开关状态输出。

1.1 三相 PWM 整流器离散数学模型建立

如图 2 展示的是三相 PWM 整流器的主电路结构图, 它采用了三电平中点钳位式的拓扑设计, 其在 α - β 坐标系中的数学模型可以这样描述 [29-32]:

$$\begin{cases} L \frac{di_\alpha}{dt} = e_{s,\alpha} - V_{s,\alpha} - Ri_\alpha \\ L \frac{di_\beta}{dt} = e_{s,\beta} - V_{s,\beta} - Ri_\beta \end{cases} \quad (1)$$

式中:

L ——网侧滤波电感 (H);

R ——网侧杂散电阻 (Ω);

$e_{s,\alpha}$ ——电网电动势 α - β 坐标分量 (V);

$e_{s,\beta}$ ——电网电动势 α - β 坐标分量 (V);

$V_{s,\alpha}$ ——PWM 整流器交流侧端 α - β 坐标分量 (V);

$V_{s,\beta}$ ——PWM 整流器交流侧端 α - β 坐标分量 (V);

i_α ——PWM 整流器网侧电流 α - β 坐标分量 (A);

i_β ——PWM 整流器网侧电流 α - β 坐标分量 (A)。

当高采样频率下进行 PWM 整流器控制时, 采样周期 T_s 足够小, 式 (1) 中微分可近似表示为:

$$\begin{cases} \frac{di_\alpha}{dt} \approx \frac{i_\alpha(k+1) - i_\alpha(k)}{T_s} \\ \frac{di_\beta}{dt} \approx \frac{i_\beta(k+1) - i_\beta(k)}{T_s} \end{cases} \quad (2)$$

将式 (2) 代入式 (1) 可得到网侧电流的下一拍, 即第 $k+1$ 拍预测值:

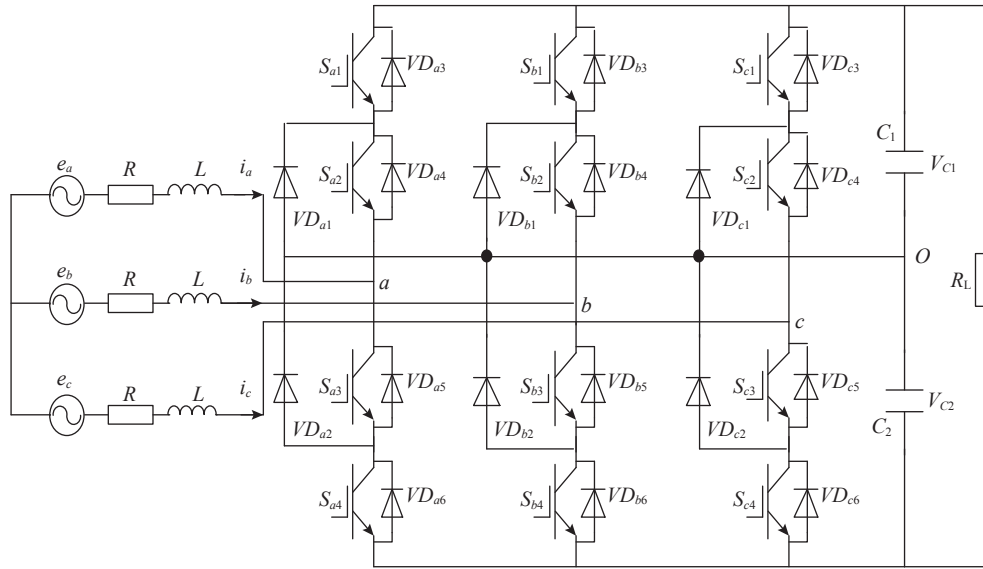


图 2 三电平整流器电路拓扑结构

Fig. 2 Three-level rectifier circuit topology

$$\begin{cases} i_{\alpha}(k+1) = \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_s}\right) i_{\alpha}(k) + \frac{T_s}{L} [e_{s,\alpha}(k) - V_{dc}(k) s_{\alpha}(k+1)] \\ i_{\beta}(k+1) = \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_s}\right) i_{\beta}(k) + \frac{T_s}{L} [e_{s,\beta}(k) - V_{dc}(k) s_{\beta}(k+1)] \end{cases} \quad (3)$$

式中:

s_{α} ——三电平整流器开关状态在 α - β 坐标系下分量;

s_{β} ——三电平整流器开关状态在 α - β 坐标系下分量;

$V_{dc}(k)$ ——第 k 拍直流母线电压值 (V), $V_{dc}(k) = V_{c1}(k) + V_{c2}(k)$ 。

1.2 中点电位预测

三电平 PWM 整流器控制很重要的 1 环是中点电位平衡, 如果中点电位漂移, 整流器可能发生功率器件损坏的严重问题。

设中点电位 $V_o = V_{c1} - V_{c2}$, 在三电平 PWM 整流器中, 点电位在两相静止的 α - β 坐标系中的数学描述是:

$$\frac{dV_o}{dt} = \frac{1}{2C} (i_{\alpha} |s_{\alpha}| + i_{\beta} |s_{\beta}|) \quad (4)$$

式中:

C ——直流侧电容 (F), 且 $C = C_1 = C_2$ 。

对式 (4) 进行离散化, 则可预估三电平 PWM 整流器在第 $k+1$ 拍中的点电位:

$$\begin{aligned} V_o(k+1) = & V_o(k) + \frac{1}{2C} [i_{\alpha}(k+1) \cdot |s_{\alpha}(k+1)| + \\ & i_{\beta}(k+1) \cdot |s_{\beta}(k+1)|] \end{aligned} \quad (5)$$

1.3 低开关频率控制

将降低变流器的开关频率作为 PWM 整流器的附加控制目标, 是通过在目标函数中加入一个降低开关频率的目标项来实现 f_{switch} 的, 其中与前一拍开关状态相比, 产生更少开关动作的开关状态将会被选择。 f_{switch} 表示三电平拓扑 12 个开关器件平均开关频率, 如式 (6) 所示。

$$f_{switch} = \sum_{i=1}^4 \frac{f_{sai} + f_{sbi} + f_{sci}}{12} \quad (6)$$

其中 f_{ski} 表示 k 相第 i 个开关器件动作情况, $k \in [a, b, c]$ 、 $i \in [1, 2, 3, 4]$ 。

对于中压大功率 PWM 整流器, 降低开关频率有助于降低其开关损耗, 有助于功率半导体器件的安全运行。单纯减少开关频率将增大电流谐波, 而以往模型预测控制下, 为在降低开关频率的同时抑制各次电流谐波, 大都采用多步预测法, 但多步预测的运算量急剧上升。

开关频率和电流误差由此可知, 如果进行电流误差目标的改进, 将一段时间内的电流误差指标予以表征, 即可获得跟多步模型预测控制相类似的效果。即可采用更为简化的波形相似系数指标代替传统模型预测控制中的电流误差指标, 相关推导如下。

首先定义电流波形相似系数:

$$\sigma_i = \int_0^T i^*(t) \cdot i(t) dt \quad (7)$$

式中:

T —— 电流周期 (s);

$i^*(t)$ —— 参考电流 (A);

$i(t)$ —— 预测电流 (A)。

对上式进行离散化, 可得:

$$\sum_{k=0}^{N-1} i^*(k+1) \cdot i(k+1) \cdot T_s \quad (8)$$

式中, N 为数据点数, 其值计算为 $N=T/T_s$, $i^*(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻参考电流, $i(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻预测电流。由式 (8) 可知, 通过引入深度为 N 的 FIFO, 保存历史电流数据, 进而计算电流波形相似度, 以此作为衡量电流波形畸变率的指标, 可有效降低计算量。当电压外环参数调整良好时, $\alpha\beta$ 轴的电流为正弦对称电流, 如果保证预测电流波形与之相似度较高, 即可保证电流畸变率较低。

考虑到电网频率较为固定, 满足并网要求的电流也呈现了高度正弦且对称的特征, 可以利用此特点, 仅仅计算半波周期, 对上述等效计算进一步优化以削减计算量, 满足实际应用要求。此时, 式 (8) 可变为:

$$\sum_{k=0}^{N/2-1} i^*(k+1) \cdot i(k+1) \cdot T_s \quad (9)$$

通过上式即可获得表征工频电网电流的谐波畸变率信息, 但仅需一半的 FIFO 深度以及乘法和加法计算量, 可大幅降低对硬件资源的要求。

定义表征在 $k+1$ 时刻的 $\alpha\beta$ 轴电流波形相似度的波形系数 $\sigma_{i,\alpha}(k+1)$ 和 $\sigma_{i,\beta}(k+1)$, 波形相似度计算变量 $i_{we,\alpha}(k+1)$ 和 $i_{we,\beta}(k+1)$, 其表达式为:

$$\begin{cases} \sigma_{i,\alpha}(k+1) = \sum_{k=0}^{N/2-1} i_{we,\alpha}(k+1) \\ \sigma_{i,\beta}(k+1) = \sum_{k=0}^{N/2-1} i_{we,\beta}(k+1) \end{cases} \quad (10)$$

其中:

$$\begin{cases} i_{we,\alpha}(k+1) = i_{\alpha}^*(k+1) \cdot i_{\alpha}(k+1) \cdot T_s \\ i_{we,\beta}(k+1) = i_{\beta}^*(k+1) \cdot i_{\beta}(k+1) \cdot T_s \end{cases} \quad (11)$$

1.4 目标函数的建立

PWM 整流器根据不同的控制目标, 建立相应的目标函数 f , 目标函数 f 直接决定 PWM 整流器控制性能。

三电平低开关频率 PWM 整流器模型预测控制目标包括: 控制其网侧电流 i_{α} 、 i_{β} 为低畸变正弦电

流; 同时由于采用中点钳位式拓扑结构, 需要控制其中点电位平衡; 为满足开关器件开关频率要求引入降低开关频率目标。传统的 MPC 策略是通过权值法将多目标优化问题转换成单目标优化问题, 建立的目标函数 f 如式 (12) 所示。通过设置加权系数 K_i 、 K_o 、 K_s 确定电流跟踪、中点电位平衡以及降低开关频率在目标函数 f 中的权重比例。随着控制目标增多, 加权系数的配置凸显复杂, 同时单一的加权系数在系统动态过程中很难实现全局最优。

$$\min f(i) = K_i / (|\sigma_{i,\alpha}(k+1)| + |\sigma_{i,\beta}(k+1)|) + K_o \cdot |V_o(k+1)| + K_s \cdot f_{\text{switch}}, i \in [1, 2 \dots 27] \quad (12)$$

1.5 启动过程控制

为达成低开关频率控制, 需要借助电流的历史信息进行波形相似系数计算。为此, 本文引入了 FIFO 进行数据存储以节省内存开销, FIFO 结构及计算过程示意图如图 3 所示。

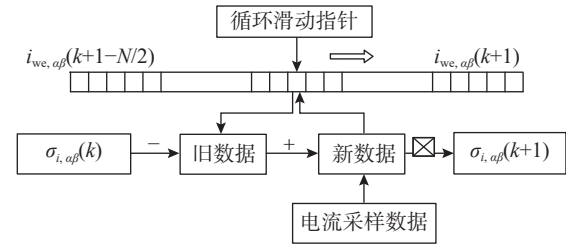


图3 波形相似度计算 FIFO 示意图

Fig. 3 FIFO diagram of waveform similarity calculation

每次计算获取新的 $\sigma_{i,\alpha}(k+1)$ 时, 只需要将 $\sigma_{i,\alpha}(k)$ 减去最旧的数据 $i_{we,\alpha}(k+1-N/2)$, 再加上新数据 $i_{we,\alpha}(k+1)$ 即可, 计算量大为减小。

但该过程存在问题: 当 PWM 整流器刚开始运行时, FIFO 中内容为空, 此时如果采用本文提出的方法进行控制, 则控制将失效。为避免出现该问题, 本文引入了启动过程过渡控制策略。

在进行模型测控制时, 首先判断 FIFO 是否已满, 当 FIFO 中内容未满足时, 采用单步预测成本函数 f_1 :

$$\begin{aligned} f_1 = & K_i |i_{\alpha}^*(k+1) - i_{\alpha}(k+1)| + \\ & K_i |i_{\beta}^*(k+1) - i_{\beta}(k+1)| + \\ & K_s \cdot f_{\text{switch}} \end{aligned} \quad (13)$$

在此过程中, 波形系数实时更新计算。当 FIFO 数据填满之后, 成本函数切换成式 (12) 进行控制, 以此避免控制失效的问题。

2 三相 PWM 整流器 ML-MPC 策略

2.1 ML-MPC 策略基本思想

随着数字处理技术的发展, 人们在被控系统满足基本性能要求后, 希望更多控制目标在系统控制过程中予以考虑^[33]。本文所提 ML-MPC 策略, 各目标函数按重要程度排序, 分成不同的优先层, 再按层次优先次序进行求解。其中低层目标需在高层目标最优解的集合域附近寻优, 以此类推直至求解出最优解。ML-MPC 策略在垂直方向上呈现为多层次的信息重构模式和预测, 而在水平方向上则表现为多种不同模式的预测与优化。

设控制系统包含 l 个目标函数, 其中 $f_1(X)$ 最重要, $f_2(X)$ 其次, $f_l(X)$ 次之。

首先对第 1 个目标函数 $f_1(X)$ 求解, 得其最优解为:

$$\begin{cases} \min f_1(X) = f_1^* \\ X \in D \end{cases} \quad (14)$$

其中 f_1^* 为第 1 个目标函数最优解集合域; D 为系统可行域。

在 $f_1(X)$ 最优解集合域 f_1^* 内求解 $f_2(X)$ 的最优解, 此时目标函数 $f_1(X)$ 转化为辅助约束条件, 即:

$$\begin{cases} \min f_2(X) = f_2^* \\ X \in D_1 \subset \{X | f_1(X) \leq f_1^* + \varepsilon_1\} \end{cases} \quad (15)$$

式中:

f_2^* —— 第 1 个目标函数最优解集合域;

D_1 —— $f_2(X)$ 可行域;

ε_1 —— 宽容值, 其作用为避免计算过程的中断。

以此类推, 经过层层筛选, 最后求解第 l 个目标函数 $f_l(X)$ 即可求得满足各层目标函数, 且性能最优的解 X^* , 其对应最优值为 f_l^* 。

2.2 三电平 PWM 整流器 ML-MPC 控制策略

以三电平低开关频率 PWM 整流器系统设计为例, 由于采用三电平拓扑结构, 为避免 +1、-1 电位直接跳变引起的过高 dV/dt , 目标函数中需加入避免过高 dV/dt 项; 为实现降低开关频率控制目标, 目标函数中需加入降低开关频率项; 此外, 高采样频率下 MPC 策略引起的过窄脉冲, 对大功率开关器件产生危害, 需加以避免; 最后根据系统不同的工况要求, 结合 PWM 整流器系统预测结果, 设置合适阈值, 避免系统保护部分误动作。

此时, 三电平 PWM 整流器控制目标包括: 电流波形正弦度、中点电位平衡、降低开关频率、消除相电压中过高的 dV/dt 、窄脉冲消除以及避免系统保护部分误动作等。

根据各控制目标对整个 PWM 整流器系统重要程度, 将目标函数划分为 3 层。第 1 层为系统保护层, 其目标函数包括避免过高 dV/dt 、消除窄脉冲以及避免系统保护误动作; 第 2 层为系统性能指标层, 其目标函数包括电流相似度以及中点电位平衡; 第 3 层为系统附加功能层, 其中低开关频率 PWM 整流器附加功能为降低开关器件开关频率。三电平 PWM 整流器 ML-MPC 目标函数控制流程框图如图 4 所示。其中 N_1 、 N_2 、 N_3 、 N_4 分别为上一层目标函数筛选后剩余开关状态个数, 若其中任一个等于 1, 系统跳出滚动寻优, 直接将该开关状态作为最优开关状态输出。

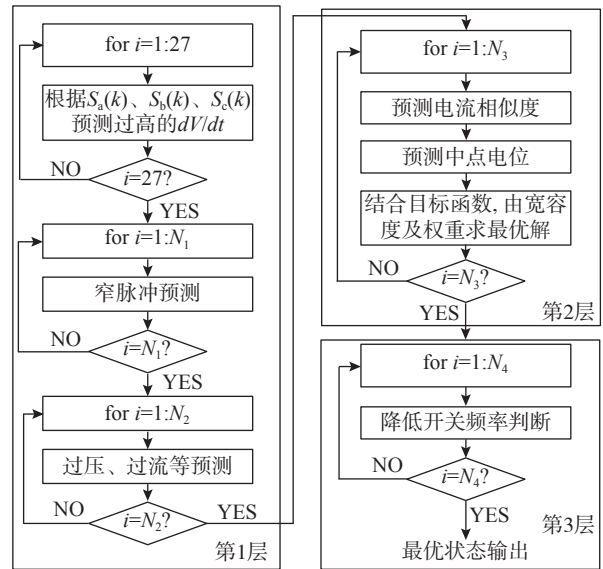


图 4 三电平 PWM 整流器 ML-MPC 目标函数流程框图

Fig. 4 Flow diagram of the three-levels PWM rectifier ML-MPC control

ML-MPC 控制策略的提出, 对 PWM 整流器多个控制目标分层管理规划, 无需进行复杂的权重系数设置, 为多目标复杂系统设计提供了一套新颖的设计思路。

2.3 ML-MPC 控制策略 FPGA 系统设计

传统高性能数字处理方案以 DSP 作为主控器件, FPGA 作为逻辑协处理器。DSP 拥有完善的指令系统、低成本、低功耗以及顺序架构执行等优势,

长期占据高性能数字处理市场^[34-35]。然而随着模型预测控制、模糊控制、遗传算法等一系列在线优化控制方案的研究及应用, 带来大负荷在线计算问题。FPGA 以其完善的 IP (Intellectual Property) 核心、并行架构处理等优势, 逐渐由传统逻辑协处理器向系统主控制器转变。

为解决 ML-MPC 控制策略带来的大负荷在线计算问题, 基于 FPGA 设计 ML-MPC 策略片上系统, 系统框图如图 5 所示。其中, 主控制器采用 Xilinx 公司 Sparten2E 型 FPGA, 时钟频率为 37.5 MHz。主要包含 AD 采样、系统保护、模型预测控制以及 DA 输出 4 个功能模块, 各模块通过全

局状态机顺序调度。其中, 模型预测控制模块包含电压外环控制模块、模型预测模块、分层目标方程模块以及脉冲死区模块, 各模块通过 MPC 状态机顺序调度。其中, 分层目标方程模块包含多次滚动优化, 采用并行执行方式, 减少计算耗时。图 6 为控制器执行各模块对应时间, 由图可知基于 FPGA 实现分层模型预测控制算法时, 串并行方式结合执行, 对比采用 DSP(TMS320F2812) 单一顺序执行该方式, 计算速度大幅提升。同时采用 FPGA 进行 PWM 整流器控制时, 其 AD 采样点与脉冲作用时刻间隔仅为几微秒, 避免了大负荷在线计算存在的控制延时问题。

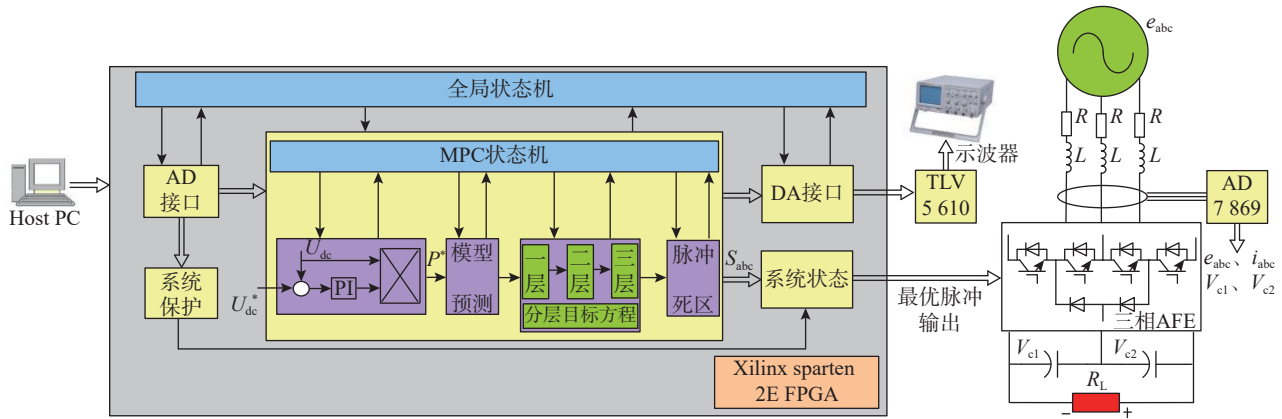


图 5 三电平 PWM 整流器 ML-MPC 系统框图

Fig. 5 Flow diagram of the three levels PWM rectifier ML-MPC control

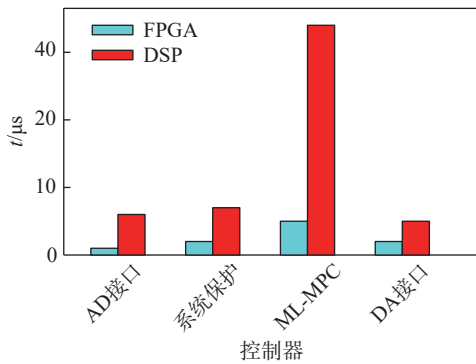


图 6 ML-MPC 系统耗时对比

Fig. 6 Comparison of computation time of ML-MPC system

3 仿真及实验验证

为验证分层模型预测控制策略的可行性及其性能表现, 对 1 台三电平 PWM 整流器实验样机进行了仿真和实验研究。仿真及实验样机主电路主要参数及控制参数如表 1 所示。

表 1 仿真和实验参数表

Tab. 1 Simulation and experimental parameters

参数	数值
电网线电压 e_{ab}/V	60
直流侧电容 $C/\mu F$	2500
滤波电感 L_s/mH	1.5
负载电阻 R_L/Ω	4
采样频率/kHz	10
死区时间/ μs	5

3.1 仿真分析

仿真分析采用 Matlab/Simulink 工具箱。验证 ML-MPC 算法功率跟踪以及中点电位平衡控制的有效性。然后, 对比目标函数 f 中加入降低开关频率项前后, PWM 整流器运行效果。

图 7 为目标函数 f 中加入第 3 层降低开关频率目标前后 PWM 整流器稳态效果对比图。可以明显看出, 图 7(b) 中加入降低开关频率目标函数后, 整

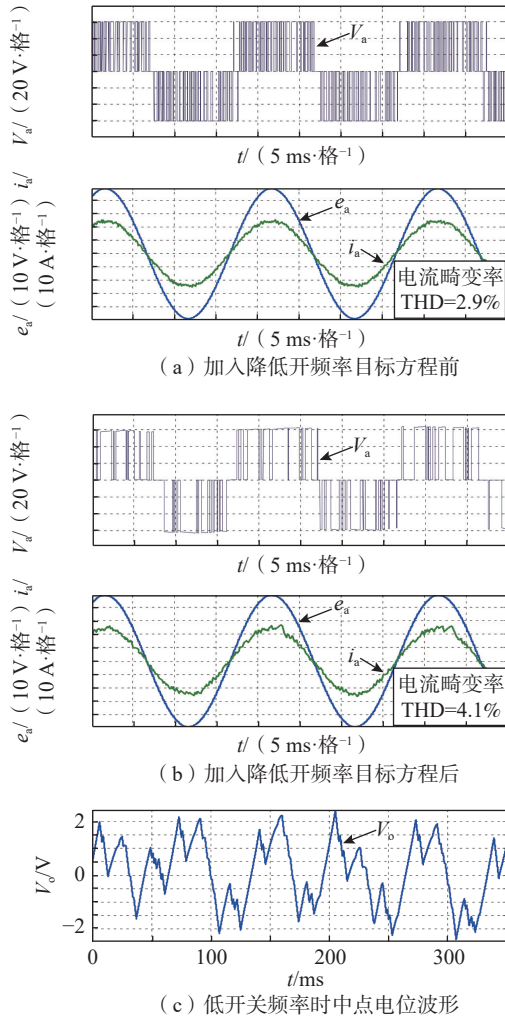


图 7 PWM 整流器稳态效果对比图

Fig. 7 Comparison of PWM rectifier steady-state effect

流器平均开关频率大幅下降, 与此同时带来网侧电流畸变率小幅上升。通过适当的调节宽容值 ε 大小, 可以获得合适的缓冲区域长度, 从而在降低开关频率和网侧电流质量之间获得平衡。由图 7(c) 可知, 平均开关频率 500 Hz 时中点电位波动低于 5%, 满足设计要求。

3.2 实验验证

为了验证基于 ML-MPC 策略设计的 PWM 整流器在多控制目标系统规划中的可行性、优越性, 基于 Xilinx 公司 Spartan2E 型 FPGA 搭建三电平 PWM 整流器实验样机, 如图 8 所示。其中 A/D 转换由 ADS7869 芯片 (12 位精度) 实现, D/A 转换由 TLV5610 (12 位精度) 实现。

图 9 (a) 为传统 MPC 策略 PWM 整流器稳态波形, 由于加入降低开关频率控制目标, 其平均开

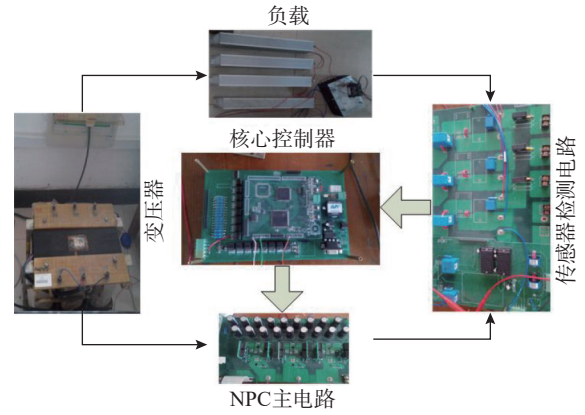


图 8 实验样机照片

Fig. 8 Experimental prototype photo

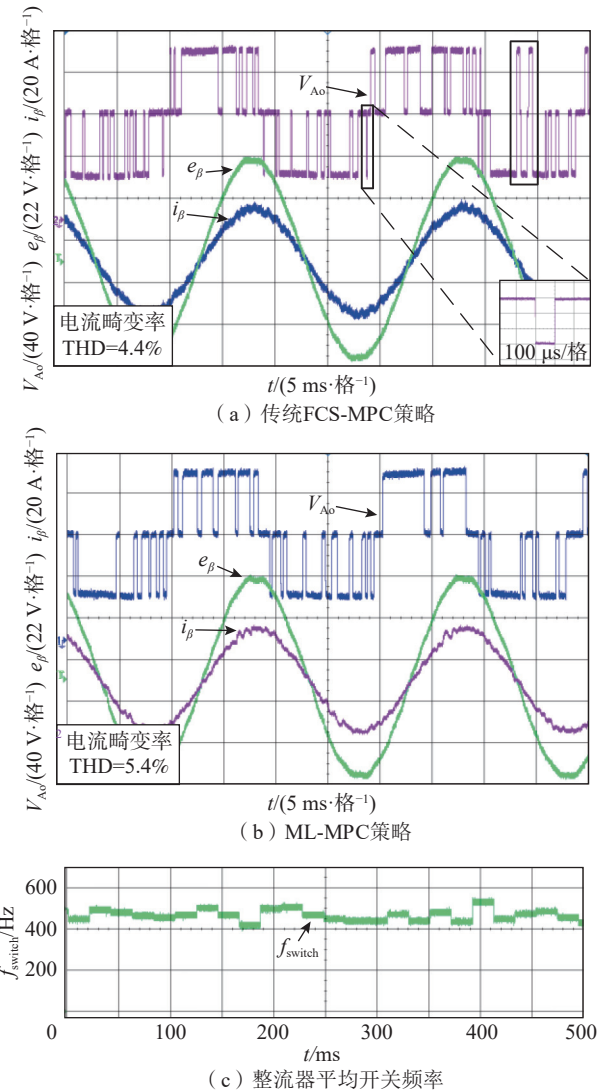


图 9 PWM 整流器动态实验波形

Fig. 9 Dynamic experimental waveforms of PWM rectifiers

关频率仅为 500 Hz。由图可知,整流器相电压 V_{Ao} 中存在窄脉冲以及过高的 dI/dt 。图 9 (b) 为采用 ML-MPC 策略设计的 PWM 整流器控制系统实验波形。分层目标函数加入后,窄脉冲以及过高的 dI/dt 已从相电压 V_{Ao} 中消除,保证了系统安全稳定运行。然而随着第 2 层目标函数宽容值 ε 增大,系统降低开关频率效果增强,但其网侧电流畸变率也随之增大。为保证网侧电流畸变率满足电能质量要求,通常宽容值 ε 选择不超过 5。实验选择 $\varepsilon=5$,此时网侧电流畸变率由 4.4% 小幅上升为 5.4%,与仿真效果接近。实验比仿真的电流畸变率高是由于实际实验中存在开关动作的死区及延迟所致。图 9 (c) 为整流器每 20 ms 计算所得平均开关频率,平均开关频率保持在 500 Hz 波动,满足低开关频率 PWM 整流器设计要求。

4 结论

本文详尽地描述了在复杂的工业流程中如何进行多目标的分层优化,以三电平低开关频率 PWM 整流器设计为切入点,验证了所提 ML-MPC 策略的可行性及优越性。得出以下结论:

1) 降低电力电子器件开关频率本身具有极大的实用意义,随着开关频率的降低电力电子器件开关损耗、电磁干扰等问题迎刃而解。基于 MPC 策略进行三相 PWM 整流器控制,在这个目标函数里,我们加入了减少开关频率的部分,方便地实现降低开关频率控制目标,引入基于电流波形相似度的电流误差控制,与多步预测相比,大大减小了计算量。

2) 针对多控制目标在线寻优问题,ML-MPC 策略通过建立的分层目标函数,对多个控制目标进行分层规划,结构清晰且易数字化实现。

3) 针对 ML-MPC 策略引起的大负荷在线计算问题,结合 ML-MPC 算法特点,设计了基于 FPGA 的 ML-MPC 片上系统。对比常规 DSP 控制器,该片上系统采用串、并行配合执行方式,效率更高。

参考文献:

- [1] 马小亮. 概述低开关频率 PWM 变频的问题及解决办法 [J]. 电气传动, 2009, 39(5): 3-9. DOI: 10.19457/j.1001-2095.2009.05.001.
- MA X L. Problems and solutions of low frequency PWM inverters-an overview [J]. Electric drive, 2009, 39(5): 3-9. DOI: 10.19457/j.1001-2095.2009.05.001.
- [2] 李铜林. 提高高压变频器安全性及运行可靠性的策略 [J]. 南方能源建设, 2024, 11(5): 1-6. DOI: 10.16516/j.ceec.2023-184.
- LI T L. Strategies for improving the safety and operational reliability of high-voltage frequency converters [J]. Southern energy construction, 2024, 11(5): 1-6. DOI: 10.16516/j.ceec.2023-184.
- [3] 陈小强, 刘笑含, 王英, 等. 一种直流侧使用低损耗无源脉波倍增电路的并联型 24 脉波整流器 [J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 33-46. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220730.
- CHEN X Q, LIU X H, WANG Y, et al. A parallel 24-pulse rectifier using low loss passive pulse doubling circuit on the DC side [J]. Power system protection and control, 2023, 51(5): 33-46. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220730.
- [4] 郑强. 计及开关频率固定的三相电压源型 PWM 整流器模型预测控制策略研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2024.
- ZHENG Q. Voltage-source PWM rectifiers considering fixed switching frequency study on model predictive control strategy for three-phase [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2024.
- [5] 王新菊, 王小敏. 双重化 PWM 整流器自抗扰模型预测直接功率控制 [J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(7): 45-56. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230900.
- WANG X J, WANG X M. Active disturbance rejection control-based model predictive direct power control for dual PWM rectifiers [J]. Power system protection and control, 2024, 52(7): 45-56. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230900.
- [6] GAO Z Q. Active disturbance rejection control: a paradigm shift in feedback control system design [C]// Anon. American Control Conference, Minneapolis, USA, June 14-16, 2006. New York: IEEE, 2006: 7. DOI: 10.1109/ACC.2006.1656579.
- [7] ZHANG X Z, LIU C, ZHANG Y Z, et al. Control strategy of three-phase PWM rectifier based on improved double closed loop sliding mode control [C]// Anon. 2023 IEEE 2nd International Conference on Electrical Engineering, Big Data and Algorithms (EEBDA), Changchun, China, February 24-26, 2023. New York: IEEE, 2023: 135-138. DOI: 10.1109/EEBDA56825.2023.10090601.
- [8] 苏倩. 三相电压型 PWM 整流器及其控制策略研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- SU Q. Research on three phase voltage source PWM rectifier and its control strategies [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [9] 黄金飞. 三相电压型抗扰 PWM 整流器研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
- HUANG J F. Study of anti-disturbance three phase voltage PWM rectifier [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [10] 戴鹏, 符晓, 袁庆庆, 等. 基于复矢量调节器的低开关频率 PWM 整流器研究 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(21): 25-31.

- DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.2011.21.006](#).
- DAI P, FU X, YUAN Q Q, et al. A novel complex state current controller for PWM rectifier at very low switching frequency [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(21): 25-31. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.2011.21.006](#).
- [11] 伍小杰, 袁庆庆, 符晓, 等. 基于复矢量调节器的低开关频率同步电机控制 [J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(3): 124-129. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.2012.03.019](#).
- WU X J, YUAN Q Q, FU X, et al. A novel complex state current controller for synchronous motor at very low switching frequency [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2012, 32(3): 124-129. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.2012.03.019](#).
- [12] 丁然, 邵尹池, 李咏凯, 等. 功率同步型构网型变流器功率环建模及其差异性对暂态稳定的影响 [J]. *电力工程技术*, 2025, 44(2): 111-122. DOI: [10.12158/j.2096-3203.2025.02.011](#).
- DING R, SHAO Y C, LI Y K, et al. Power loop modeling of grid-forming converter and the influence of difference on transient stability [J]. *Electric power engineering technology*, 2025, 44(2): 111-122. DOI: [10.12158/j.2096-3203.2025.02.011](#).
- [13] OIKONOMOU N, HOLTZ J. Closed-Loop control of medium-voltage drives operated with synchronous optimal pulsewidth modulation [J]. *IEEE transactions on industry applications*, 2008, 44(1): 115-123. DOI: [10.1109/TIA.2007.912735](#).
- [14] HOLTZ J, OIKONOMOU N. Synchronous optimal pulsewidth modulation and stator flux trajectory control for medium-voltage drives [J]. *IEEE transactions on industry applications*, 2007, 43(2): 600-608. DOI: [10.1109/TIA.2006.889893](#).
- [15] 石荣亮, 刘维莎, 王国斌, 等. 基于二自由度 PID 的三相 PWM 整流器调压改进策略 [J]. *电力工程技术*, 2023, 42(3): 149-156. DOI: [CNKI:SUN:JSDJ.0.2023-03-018](#).
- SHI R L, LIU W S, WANG G B, et al. An optimization strategy for voltage regulation of three-phase PWM rectifier based on two-degree-of-freedom PID [J]. *Electric power engineering technology*, 2023, 42(3): 149-156. DOI: [CNKI:SUN:JSDJ.0.2023-03-018](#).
- [16] CORTES P, KAZMIERKOWSKI M P, KENNEL R M, et al. Predictive control in power electronics and drives [J]. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2008, 55(12): 4312-4324. DOI: [10.1109/TIE.2008.2007480](#).
- [17] RODRIGUEZ J, PONTT J, CORTES P, et al. Predictive control of a three-phase neutral point clamped inverter [C]// Anon. 2005 IEEE 36th Power Electronics Specialists Conference, Dresden, Germany, June 16, 2005, New York: IEEE, 2005: 1364-1369. DOI: [10.1109/PESC.2005.1581807](#).
- [18] BORDONS C, CAMACHO E F. A generalized predictive controller for a wide class of industrial processes [J]. *IEEE transactions on control systems technology*, 1998, 6(3): 372-387. DOI: [10.1109/87.668038](#).
- [19] PEREZ M A, RODRIGUEZ J, FUENTES E J, et al. Predictive control of AC-AC modular multilevel converters [J]. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2012, 59(7): 2832-2839. DOI: [10.1109/TIE.2011.2159349](#).
- [20] GEYER T, PAPAFOOTI G, MORARI M. Model predictive direct torque control——part I: concept, algorithm, and analysis [J]. *IEEE transactions on industrial electronics*, 2009, 56(6): 1894-1905. DOI: [10.1109/TIE.2008.2007030](#).
- [21] 郭鑫, 任海鹏. 三相 PWM 变换器的负载自适应控制 [J]. *电子学报*, 2015, 43(10): 2088-2094. DOI: [10.3969/j.issn.0372-2112.2015.10.031](#).
- GUO X, REN H P. Load adaptive control for three phase PWM converter [J]. *Acta electronica sinica*, 2015, 43(10): 2088-2094. DOI: [10.3969/j.issn.0372-2112.2015.10.031](#).
- [22] 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. DOI: [10.1109/TIE.2016.2625238](#).
- [23] ZHANG Y C, PENG Y B, YANG H T. Performance improvement of two-vectors-based model predictive control of PWM rectifier [J]. *IEEE transactions on power electronics*, 2016, 31(8): 6016-6030. DOI: [10.1109/TPEL.2015.2498306](#).
- [24] 胡林强, 雷万钧, 代宇琦, 等. 三相电压源整流器有限控制集扩充方法研究 [J]. *中国电机工程学报*, 2023, 43(5): 1961-1972. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.212672](#).
- HU L Q, LEI W J, DAI Y Q, et al. Research on finite control set expansion method of three-phase voltage source rectifier [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2023, 43(5): 1961-1972. DOI: [10.13334/j.0258-8013.pcsee.212672](#).
- [25] 魏昂, 王丹, 武文杰, 等. 降低不平衡电网下 PWM 整流器开关频率的顺序模型预测直接功率控制方法 [J]. *电网技术*, 2021, 45(7): 2700-2708. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2020.1316](#).
- WEI A, WANG D, WU W J, et al. Sequential model predictive control to reduce the switching of PWM rectifier under unbalanced grid-side conditions [J]. *Power system technology*, 2021, 45(7): 2700-2708. DOI: [10.13335/j.1000-3673.pst.2020.1316](#).
- [26] 夏文婧, 刘碧, 王嵩, 等. 基于输入端电压动态分量优化的 PWM 整流器模型预测控制 [J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(1): 200-207. DOI: [10.7500/AEPS20190315005](#).
- XIA W J, LIU B, WANG S, et al. Model predictive control of PWM rectifiers based on dynamic component optimization of input-port voltage [J]. *Automation of electric power systems*, 2020, 44(1): 200-207. DOI: [10.7500/AEPS20190315005](#).
- [27] 肖蕙蕙, 魏苏东, 郭强, 等. 优化开关序列的 PWM 整流器模型预测控制策略 [J]. *电工技术学报*, 2022, 37(14): 3665-3675, 3700. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.201325](#).
- XIAO H H, WEI S D, GUO Q, et al. Model predictive control strategy for PWM rectifier with optimized switching sequence [J]. *Transactions of China electrotechnical society*, 2022, 37(14):

- 3665-3675, 3700. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.201325](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.201325).
- [28] CHEE H L, KUMAR T N, ALMURIB H A, et al. Analysis of a novel non-volatile look-up table (NV LUT) controller design with resistive random-access memories (RRAM) for field-programmable gate arrays (FPGA) [C]// Anon. 2019 IEEE Regional Symposium on Micro and Nanoelectronics (RSM), Pahang, Malaysia, August 21-23, 2019, New York: IEEE, 2019: 87-90. DOI: [10.1109/RSM46715.2019.8943560](https://doi.org/10.1109/RSM46715.2019.8943560).
- [29] 杨勇, 赵方平, 阮毅, 等. 三相并网逆变器模型电流预测控制技术 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 153-159. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2011.06.024](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2011.06.024).
- YANG Y, ZHAO F P, RUAN Y, et al. Model current predictive control for three-phase grid-connected inverters [J]. *Transactions of China electrotechnical society*, 2011, 26(6): 153-159. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2011.06.024](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2011.06.024).
- [30] 赵方平, 杨勇, 阮毅, 等. 三相并网逆变器直接功率控制和直接功率预测控制的对比 [J]. 电工技术学报, 2012, 27(7): 212-220. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2012.07.028](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2012.07.028).
- ZHAO F P, YANG Y, RUAN Y, et al. Comparative study for direct power control and direct power predictive control in three-phase grid-connected inverters [J]. *Transactions of China electrotechnical society*, 2012, 27(7): 212-220. DOI: [10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2012.07.028](https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.2012.07.028).
- [31] 张兴. PWM 整流器及其控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- ZHANG X. PWM rectifier and control [M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [32] 朱志键, 唐卫民. 三相电压型 PWM 整流器的新型双闭环控制方法 [J]. 电力工程技术, 2018, 37(1): 86-90. DOI: [10.12158/j.2096-3203.2023.03.017](https://doi.org/10.12158/j.2096-3203.2023.03.017).
- ZHU Z J, TANG W M. A novel double closed loop control strategy of three-phase voltage-sourced PWM rectifier [J]. *Electric power engineering technology*, 2018, 37(1): 86-90. DOI: [10.12158/j.2096-3203.2023.03.017](https://doi.org/10.12158/j.2096-3203.2023.03.017).
- [33] 徐滤非. 基于 DSP 的三相电压型 PWM 整流器研究 [J]. 机电工程技术, 2004(10): 53-55. DOI: [10.3969/j.issn.1009-9492.2004.10.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-9492.2004.10.022).
- XU L F. Study on three phase voltage source PWM rectifier based on DSP [J]. *Mechanical & electrical engineering technology*, 2004(10): 53-55. DOI: [10.3969/j.issn.1009-9492.2004.10.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-9492.2004.10.022).
- [34] 陶海军, 张晨杰, 赵蒙恩, 等. 级联 H 桥整流器谐波分析及混合控制 [J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(22): 24-33. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.230671](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.230671).
- TAO H J, ZHANG C J, ZHAO M E, et al. Harmonic analysis and hybrid control of a cascaded H-bridge rectifier [J]. *Power system protection and control*, 2023, 51(22): 24-33. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.230671](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.230671).
- [35] 包西平. 基于 DSP 的提升机双 PWM 变频调速系统的设计与研究 [J]. 机电工程技术, 2014, 43(11): 97-104. DOI: [CNKI:SUN:JXKF.0.2014-11-029](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.230671).
- BAO X P. Design and research of dual-PWM variable frequency speed regulation system based on DSP [J]. *Mechanical & electrical engineering technology*, 2014, 43(11): 97-104. DOI: [CNKI:SUN:JXKF.0.2014-11-029](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.230671).

作者简介:



王举重

王举重 (第一作者)

1987-, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事机电工程方面的工作 (e-mail) 767850829@qq.com。

白海东

1992-, 男, 工程师, 学士, 主要从事机电工程方面的工作 (e-mail) 545746250@qq.com。

刘浩

1999-, 男, 工程师, 学士, 主要从事机电工程方面的工作 (e-mail) 852302605@qq.com。

曹晓冬

1990-, 男, 高级工程师, 博士, 主要从事机电工程方面的工作 (e-mail) stategrid_cxd@126.com。

夏晨阳

1982-, 男, 教授, 博士, 主要从事电力电子技术、电动汽车、无线充电/供电技术、先进控制技术方面的工作 (e-mail) chyxia@cumt.edu.cn。



曹钰晨

曹钰晨 (通信作者)

2001-, 女, 硕士, 主要从事构网储能技术、优化控制与稳定性分析方面的工作 (e-mail) 17656222398@163.com。

公铮

1990-, 男, 副教授, 博士, 主要从事电力电子技术、电机驱动控制方面的工作 (e-mail) zgo@cumt.edu.cn。

(责任编辑 孙舒)