

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.250650

基于 Voronoi-Softmax 概率分配的 T 型逆变器 EMPC 全局最优策略

张虹¹, 孙道兴¹, 王超², 马万基¹, 杨佳霖³

(1. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012; 2. 中国航发哈尔滨东安发动机有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150066; 3. 通榆中广核风力发电有限公司, 吉林 白城 137200)

摘要: T 型三电平逆变器在传统有限集模型预测并网控制过程中, 因相邻控制周期优化过程缺少关联, 进而产生多周期局部最优问题。提出一种基于 Voronoi-Softmax 概率分配的 T 型逆变器 EMPC 控制(Voronoi-Softmax explicit model predictive control, VS-EMPC)策略。首先, 采用死区线性化补偿策略修正并网模型。基于 Voronoi 图的思想, 把开关序列的在线计算转化为对离线计算的显式模型预测控制状态空间进行 Voronoi 单元划分。在线查表得到 3 个候选矢量并结合在线 Softmax 概率探索机制和自适应动态系数计算, 通过优化的概率引导进行多周期关联下最优候选矢量的选择。最后通过搭建半实物仿真实验平台, 验证了所提策略良好的动态性能和在降低存储负担及实现全局最优控制方面的有效性。

关键词: Voronoi-Softmax; 三电平逆变器; 概率分配; 显式模型预测控制; 全局最优

Global optimal EMPC strategy for T-type inverters based on Voronoi-Softmax probability distribution

ZHANG Hong¹, SUN Daoxing¹, WANG Chao², MA Wanji¹, YANG Jialin³

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology, Ministry of Education (Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China; 2. China Aviation Development Harbin Dong'an Engine Co., Ltd., Harbin 150066, China; 3. Tongyu CGN Wind Power Co., Ltd., Baicheng 137200, China)

Abstract: In traditional finite set model predictive grid-connected control of T-type three-level inverters, the lack of correlation between optimization processes in adjacent control cycles often leads to multi-cycle local optimality issues. To address this problem, this paper proposes a T-type inverter EMPC control strategy based on Voronoi-Softmax probability distribution, referred to as Voronoi-Softmax explicit model predictive control (VS-EMPC). First, a dead-zone linearization compensation strategy is adopted to correct the grid-connected model. Based on the concept of Voronoi diagrams, the online calculation of switching sequences is transformed into a Voronoi cell partitioning of the state space in the offline explicit model predictive control framework. During online operation, three candidate voltage vectors are obtained through a lookup table, and combined with an online Softmax probability exploration mechanism and adaptive dynamic coefficient calculation, the optimal candidate vector is selected through the guidance of the optimized probability distribution under multi-cycle correlation. Finally, a hardware-in-the-loop experimental platform is built to verify the proposed strategy, demonstrating favorable dynamic and steady-state performance, as well as its effectiveness in reducing storage requirements and achieving global optimal control.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52277170).

Key words: Voronoi-Softmax; three-level inverter; probability distribution; explicit model predictive control; global optimal

0 引言

在当前的“双碳”背景下, 国家大力推进新型

电力系统的建设^[1-4], 新能源和电力电子器件在电力系统中的占比不断增加, T 型并网逆变器作为能源转换的核心电力电子设备, 因导通损耗小, 受热均匀以及等效开关频率高等优点, 广泛应用于太阳能、风能等新能源并网领域, 逐渐成为电力系统中的关

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52277170)

键设备^[5-7]。然而 T 型三电平逆变器模型只能固定输出 27 个离散电压矢量, 模型本身的非凸性使得求解非凸优化问题可能存在多个局部最优解, 导致开关损耗增加并降低器件寿命, 影响并网性能^[8]。

在逆变器运行过程中, 非线性因素的累积效应可能会导致输出偏移进而影响并网的控制效果^[9], 加剧模型求解的非凸性。文献[10]采用基于脉冲的补偿方法, 通过修改 PWM 信号通断来补偿死区。文献[11]采用非线性观测器, 推导电流矢量角与转子位置角之间的关系对逆变器死区效应进行补偿, 但是以上方法均需要判断电流极性, 由于零电流钳位效应等原因, 对电流极性准确判断非常困难, 因此容易引起误补偿。文献[12]离线采集开关管导通和关断延时时间, 利用功率因数角进行极性判断, 有效抑制了各种扰动对电流方向判断的影响。文献[13]根据负载电流极性调整参考电压矢量进行死区电压补偿。上述文献只考虑对死区电压进行精确补偿, 但均未考虑死区电压非线性化会导致状态空间划分复杂, 使优化问题非凸性增强, 进一步陷入局部最优。

采用合适的控制策略是实现全局最优的另一个关键因素。传统的 PI 控制策略内外环参数整定较为复杂, 解耦会影响到系统动态性能。有限集模型预测控制(finite control set-model predictive control, FCS-MPC)凭借着快速响应、非线性约束易于合并和控制带宽较高等优势, 已广泛应用于逆变器并网中。文献[14]采用 FCS-MPC 枚举所有电压矢量, 基于当前状态求解最优矢量。文献[15-17]采用双矢量调制进行电流跟踪, 但频繁切换导致功率器件开关损耗集中, 并产生高频电磁干扰。文献[18]提出一种改进的矢量合成模型预测控制, 根据预测电流值与参考电流之间的误差矢量选取输出电压, 降低了一定的开关次数。但以上文献仅将每个控制周期视为独立优化问题, 缺乏多周期关联性, 忽略了电力电子系统动态演变的连续性特征, 导致相邻周期控制量跳变频繁, 产生电位振荡。文献[19-20]采用冗余电压矢量来消除代价函数中的权重项, 从而平衡电流跟踪以及中点电位振荡。文献[21-22]运用一种无权重因子的模型预测控制方法, 根据上下电容电压之差在参考电压中注入一个偏置电压, 可以在较小的震荡中平衡中点电位, 有效跟踪参考电流。然而上述文献采用的 FCS-MPC 方法, 滚动优化耗时严重, 在线计算负担重。

显式模型预测控制通过离线求解最优控制律并存储为分段仿射函数^[23-25], 将在线计算简化为查表操作, 有效解决了 FCS-MPC 的在线计算耗时问题^[26],

为全局优化提供了可能。但巨大的离线存储需求、状态空间分区数量随问题规模指数增长, 成为其应用于复杂系统的主要瓶颈。

因此, 本文提出一种基于 Voronoi-Softmax 的 T 型三电平显式模型预测控制策略(Voronoi-Softmax explicit model predictive control, VS-EMPC), 建立逆变器的死区分段仿射(piece wise affine, PWA)并网补偿模型, 基于 Voronoi 图离线求解代价函数的最优控制量, 通过 Softmax 概率化候选矢量选择, 最后通过半实物实验平台验证。实验结果表明, 所提策略能够实现多周期关联优化下的全局最优控制, 减轻存储负担。

1 考虑死区补偿的 T 型三电平逆变器模型建立

本节将建立含有死区的 T 型三电平逆变器并网模型, 并线性化为相应的 PWA 模型, 下面将对该过程进行详细阐述。

1.1 T 型逆变器死区效应

T 型三电平变换器具有开关器件损耗低、运行效率高的特性, 其拓扑结构如图 1 所示。

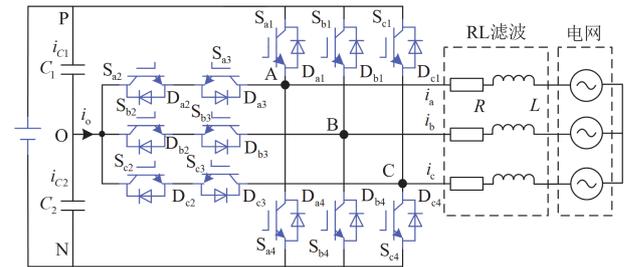


图 1 T 型三电平变换器拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of T-type three-level inverter

根据电压矢量幅值的大小, T 型三电平逆变器每相均有 P、N、O 这 3 种开关状态, 三相输出共有 27 种电平组合, 对应 27 种开关矢量, 可分为 3 个零矢量、12 个小矢量、6 个中矢量和 6 个大矢量, 按照矢量分布将其分为 6 个大扇区, 每个大扇区分为 4 个小扇区。开关的状态切换有 4 种情况: P→O, O→P, N→O, O→N。如图 2 所示。

死区效应源于开关器件的导通和关断延迟, 导致逆变器输出电压在换向时出现畸变。为了便于分析, 定义从逆变器流出的方向为正方向。如图 1 所示, 当 A 相输出电压为正即电压状态为 P 时, 电流流向从电容 C_1 经过开关管 S_{a1} 流出, 理想情况下 S_{a1} 和 S_{a3} 交替导通, S_{a2} 导通, S_{a4} 断开, 但实际应用中 S_{a1} 和 S_{a3} 可能同时导通导致电容 C_1 短路; 当电压状态为 O 时, 电流从直流母线中点经 S_{a2} 和 D_{a3} 流向负

载, 输出电压为 0; 同理可分析 A 相参考电压为负即电压状态为 N 时的情况。

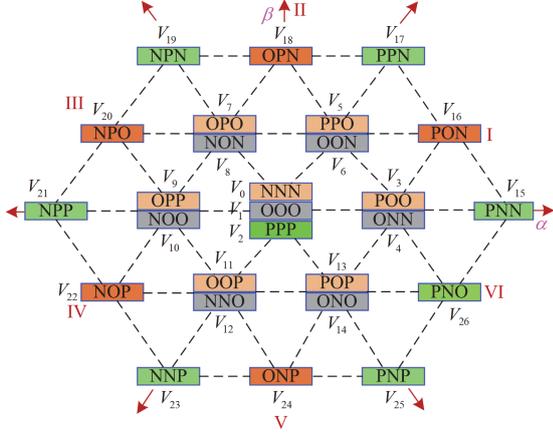


图 2 T 型逆变器空间电压矢量图

Fig. 2 Space voltage vector diagram of T-type inverter

为避免三电平逆变器上下桥臂直通, 须在同一桥臂的互补驱动信号间加入一段延时时间 T_d 即死区时间, 以避免直流母线短路。

在死区时间内, 逆变器的上下桥臂两个开关器件处于关断状态, 同时存在一个导通的开关二极管。负载两端电压被续流二极管钳位为 0 或逆变器直流侧输入电压 U_{dc} 。每周平均补偿时间 T_c 为

$$T_c = T_{off} - T_{on} - T_d \quad (1)$$

式中: T_{on} 、 T_{off} 分别为开通、关断延时。A、B、C 三相的平均死区补偿电压 ΔV_a 、 ΔV_b 、 ΔV_c 为

$$\begin{cases} \Delta V_a = \frac{T_c}{T_s} U_{dc} \text{sign}(i_a) \\ \Delta V_b = \frac{T_c}{T_s} U_{dc} \text{sign}(i_b) \\ \Delta V_c = \frac{T_c}{T_s} U_{dc} \text{sign}(i_c) \end{cases} \quad (2)$$

式中: T_s 为开关时间; i_a 、 i_b 、 i_c 分别为 ABC 三相并网电流; sign 为符号函数, 表示输出电压的正负。

将三相死区补偿电压变换到两相静止坐标系, 如式(3)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta V_\alpha \\ \Delta V_\beta \end{bmatrix} = \mathbf{D} \begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: \mathbf{D} 为 abc 坐标系到 $\alpha\beta$ 坐标系的变换矩阵。

1.2 PWA 逆变器死区模型建立

针对图 1 所示的三电平并网逆变器, 考虑其在两相静止坐标系下含死区效应的非线性系统控制离散化方程为

$$\begin{cases} i_\alpha(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) i_\alpha(k) + \frac{T_s}{L} [u_\alpha(k) - e_\alpha(k) + \Delta V_\alpha(k) \text{sign}(i_\alpha)] \\ i_\beta(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) i_\beta(k) + \frac{T_s}{L} [u_\beta(k) - e_\beta(k) + \Delta V_\beta(k) \text{sign}(i_\beta)] \end{cases} \quad (4)$$

式中: $i_\alpha(k)$ 、 $i_\beta(k)$ 为 k 时刻电流采样值; $i_\alpha(k+1)$ 、 $i_\beta(k+1)$ 为 $k+1$ 时刻的电流预测值; 电流方向通过符号函数 $\text{sign}(i_\alpha)$ 、 $\text{sign}(i_\beta)$ 表征; R 和 L 分别为寄生电阻和滤波电感; $u_\alpha(k)$ 、 $u_\beta(k)$ 分别为 k 时刻逆变器输出电压的 α 轴、 β 轴分量; $e_\alpha(k)$ 、 $e_\beta(k)$ 分别为 k 时刻电网的 α 轴、 β 轴电压矢量。

假设逆变器输出电流可以跟踪 $k+1$ 时刻的给定电流, 将电流跟踪的优化目标转化为对控制输入(电压矢量)的优化目标, 计算 k 时刻网侧参考电压 $\mathbf{u}_\alpha^{\text{ref}}(k)$ 、 $\mathbf{u}_\beta^{\text{ref}}(k)$, 如式(5)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{u}_\alpha^{\text{ref}}(k) = \frac{L}{T_s} i_\alpha^{\text{ref}}(k+1) + \left(R - \frac{L}{T_s}\right) i_\alpha(k) + e_\alpha(k) + \Delta V_\alpha(k) \text{sign}(i_\alpha) \\ \mathbf{u}_\beta^{\text{ref}}(k) = \frac{L}{T_s} i_\beta^{\text{ref}}(k+1) + \left(R - \frac{L}{T_s}\right) i_\beta(k) + e_\beta(k) + \Delta V_\beta(k) \text{sign}(i_\beta) \end{cases} \quad (5)$$

式中: $i_\alpha^{\text{ref}}(k)$ 、 $i_\beta^{\text{ref}}(k)$ 分别为 k 时刻给定的参考电流。三电平并网逆变器直流侧中点电位波动也会对逆变器的输出波形产生影响, 除了考虑交流侧电流精准跟踪外, 还需要对直流侧中点电位平衡进行控制。直流侧电容电压离散微分方程如式(6)所示。

$$\begin{cases} u_{c1}(k+1) = u_{c1}(k) + \frac{1}{C_1} i_{c1}(k) T_s \\ u_{c2}(k+1) = u_{c2}(k) + \frac{1}{C_2} i_{c2}(k) T_s \end{cases} \quad (6)$$

式中: C_1 、 C_2 分别为上、下母线的电容值; $u_{c1}(k)$ 、 $u_{c2}(k)$ 分别为 k 时刻的上、下电容电压值; $i_{c1}(k)$ 和 $i_{c2}(k)$ 分别为流经电容 C_1 、 C_2 的电流。本文假设上、下两电容的参数一致, 即 $C_1 = C_2$ 。

根据式(4)和式(6), 选定状态量 $\mathbf{x}(k) = [i_\alpha(k), i_\beta(k), u_{c1}(k), u_{c2}(k)]^T$, 控制量 $\mathbf{u}(k) = [u_\alpha(k), u_\beta(k)]^T$, 则 T 型三电平非线性系统数学模型为

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)) \quad (7)$$

采用分段线性化的方法进行模型处理, 将电流方向划分为 4 个区域 $R_1 - R_4$, 每个区域对应相应

线性子模型, 如表 1 所示。

表 1 不同区域电流方向向量表

区域	i_α	i_β	对应向量 \mathbf{S}_i
R_1	>0	>0	$[1 \ 1]^T$
R_2	>0	<0	$[1 \ -1]^T$
R_3	<0	>0	$[-1 \ 1]^T$
R_4	<0	<0	$[-1 \ -1]^T$

对 T 型三电平含死区补偿模型进行分段线性化, 整合为分段仿射系统形式, 如式(8)所示。

$$\mathbf{x}(k+1) = \begin{cases} \mathbf{A}_1 \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_1 \mathbf{u}(k) + \mathbf{f}_1 & \text{if } \mathbf{x}(k) \in R_1 \\ \mathbf{A}_2 \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_2 \mathbf{u}(k) + \mathbf{f}_2 & \text{if } \mathbf{x}(k) \in R_2 \\ \mathbf{A}_3 \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_3 \mathbf{u}(k) + \mathbf{f}_3 & \text{if } \mathbf{x}(k) \in R_3 \\ \mathbf{A}_4 \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_4 \mathbf{u}(k) + \mathbf{f}_4 & \text{if } \mathbf{x}(k) \in R_4 \end{cases} \quad (8)$$

式中: \mathbf{A}_i 为第 i 个区域的状态转移矩阵, $i=1,2,3,4$; \mathbf{B}_i 为第 i 个区域的控制输入转移矩阵; $\mathbf{f}_i = -\mathbf{B}_i \cdot \frac{U_{dc} T_c}{T_s} \cdot \mathbf{S}_i$ 为死区效应在离散模型中的电压降。之后,

可以得到含死区补偿的系统的最优控制律 $J(k)$ 为

$$J(k) = \left\| \mathbf{u}_\alpha^{\text{ref}}(k) - \mathbf{u}_\alpha(k) \right\|^2 + \left\| \mathbf{u}_\beta^{\text{ref}}(k) - \mathbf{u}_\beta(k) \right\|^2 + \lambda \left\| \mathbf{u}_{c1}(k+1) - \mathbf{u}_{c2}(k+1) \right\|^2 \quad (9)$$

式中: λ 为权重系数, 根据系统实际工况选取。控制器需要在一个采样周期内在线计算 27 次, 选取代价函数最小的电压矢量输出开关信号。

2 基于 Voronoi-Softmax 的 EMPC 优化算法

传统 MPC 算法存在着在线计算负担重和求解易陷入局部最优的问题, 本文在 EMPC 算法离线与在线阶段分别结合 Voronoi 图与 Softmax 概率分配来解决上述问题。

2.1 基于 Voronoi 图的 EMPC 离线矢量筛选

2.1.1 EMPC 分区离线计算

结合上文所述, 在实现 EMPC 算法过程中, 将式(9)代价函数转化为一个等价的动态规划形式, 如式(10)所示。

$$J_k^*(\mathbf{x}(k)) = \min_{\mathbf{u}(k)} \left\{ \left\| \mathbf{u}(k) - \mathbf{u}^{\text{ref}}(k) \right\|_\infty + \left\| \mathbf{x}(k) - \mathbf{x}_{\text{ref}}(k) \right\|_\infty \right\} + J_k^*(\mathbf{x}(k+1)) \quad (10)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \mathbf{x}(k+1) = \mathbf{f}_{\text{pwa}}(\mathbf{x}(k), \mathbf{u}(k)) \\ \mathbf{x}(k+1) \in T_{k+1} \end{cases}$$

式中: $J_k^*(\mathbf{x}(k))$ 为从第 k 个控制周期的状态 $\mathbf{x}(k)$, 遵循最优控制策略到预测时域结束时的总最优代价总和; $\mathbf{x}_{\text{ref}}(k)$ 为 k 时刻的系统参考状态; $\mathbf{u}^{\text{ref}}(k)$ 为 k 时刻的控制参考值; 式(10)可行解所有初始状态的

集合为

$$T_k = \{\mathbf{x} \in \mathbf{R}^4 \mid \exists \mathbf{u}, \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \in T_{k+1}\} \quad (11)$$

式中: T_k 为可行解所有初始状态的集合; \mathbf{R}^4 为 4 维实数集; \mathbf{u} 为控制变量。采用逆序解法对式(10)求解, 得到每一次迭代时的转化形式, 如式(12)所示。

$$\begin{cases} J^*(\mathbf{x}) = \min_{\mathbf{u}} \{J(\mathbf{z}, \mathbf{x}) = \mathbf{f}^T \mathbf{z}\} \\ \text{s.t. } \mathbf{C}^z \mathbf{u} \leq \mathbf{C}^x \mathbf{x} + \mathbf{C}^c \end{cases} \quad (12)$$

式中: \mathbf{u} 为控制变量矩阵; \mathbf{C}^z 、 \mathbf{C}^x 、 \mathbf{C}^c 为系数矩阵; \mathbf{f} 为目标函数的权重向量; $J^*(\mathbf{x})$ 为在状态 \mathbf{x} 下的最优成本函数。图 2 中 6 个大扇区所对应的候选电压矢量计算问题转化为了式(12)的多参数线性规划问题。通过状态区域的划分和求解, 得到分段仿射形式不同临界分区的显式函数表达式, 如式(13)所示。

$$\mathbf{u}(k) = \begin{cases} K_1 \mathbf{x} + \mathbf{r}_1 \\ \vdots \\ K_M \mathbf{x} + \mathbf{r}_M \end{cases} \quad (13)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{x}(k) \in R_i^k, i=1,2,\dots,N^k$$

式中: R_i^k 为 $\mathbf{x}(k)$ 在时间步长 $k=N-1,\dots,0$ 的多面体分区; $\mathbf{r}_i (i=1,2,\dots,M)$ 为与状态域相关联的索引, 用于选择在 k 时刻查找状态域; K_M 为第 M 个状态分区对应的线性反馈系数矩阵。

2.1.2 基于 Voronoi 图优化分区矢量筛选

为突破传统 EMPC 的存储瓶颈, 本文引入 Voronoi 图思想对控制空间进行重新划分, 从而对状态分区进行合并划分。Voronoi 图是一种基于距离的空间划分方法, 每个 Voronoi 区域的边界是相邻生成点连线的垂直平分线, 区域内的所有点距离对应的生成点最近, 且区域之间无重叠。首先以 27 个电压向量为种子点, 将控制空间根据欧式距离重新划分为不同的 Voronoi 单元, 每个单元内的点距离对应电压矢量 $V_m (m=1,2,\dots,27)$ 最近。

$$C_m = \{\mathbf{u} \mid \mathbf{u} - V_m \leq \|\mathbf{u} - V_n\|, \forall n \neq m\} \quad (14)$$

式中: C_m 为划分的 Voronoi 单元。在每个状态空间区域 R_i^k 内通过网格点采样生成一组均匀分布的采样点 $\{\mathbf{x}_s\}_{s=1}^N$, 对每个采样点 \mathbf{x}_s , 计算对应的理想控制输入 \mathbf{u}^* 以及其在控制空间中的映射 W_i , 如式(15)所示。

$$\begin{cases} \mathbf{u}^* = K_i \mathbf{x}_s + \mathbf{r}_i & i=(1,\dots,M) \\ W_i = \{\mathbf{u}^*(k) \mid k \in R_i\} \end{cases} \quad (15)$$

候选矢量选择等价于找到与 W_i 交集最多的 3 个 Voronoi 单元, 即满足 $W_i \cap C_m \neq \emptyset$ 的 V_m , 若 W_i 与多个 Voronoi 单元相交, 选择相交面积最大的 3 个单

元对应的矢量作为候选矢量。

$$\{V_1, V_2, V_3\} = \arg \min_{V_m \in \text{Top3}(u^*)} (16)$$

式中: $\text{Top3}(u^*)$ 表示离 u^* 欧式距离最近的 3 个电压矢量。将选择相同候选矢量的状态点 x_s 合并为同一临界分区, 整个状态空间 R_i^k 被重新划分为若干区域, 从而生成新的仿射控制律, 如式(17)所示。

$$u^*(k) = \begin{cases} K_1^* x + r_1^* \\ \vdots \\ K_n^* x + r_n^* \end{cases} \quad (17)$$

s.t. $x(k) \in R_i^k, i=1, \dots, N^k$

式中: K_n^* 为重新分区后第 n 个状态分区对应的线性反馈系数矩阵; r_n^* 为重新分区后与状态域相关联的索引。每个区域的最优控制律对应 3 个 Voronoi 单元的候选电压矢量, 存入 Voronoi 区域-候选矢量映射表中。

2.2 最优电压矢量在线 Softmax 概率分配

在线部分分为两个环节, 首先根据系统的实时状态确定其所属的分区。显式的控制器形式允许将离线计算得到的增益 K_n 、 r_n 存储在 Voronoi 区域-候选矢量映射表中, 使得在线求解的优化问题简化为对表中不同分区时刻值的选择, 即可简单的确定最优的理想控制输入 $u^*(k)$ 所对应的 3 个 Voronoi 单元的候选矢量, 将其代入多目标代价函数式(9)中, 计算得到 $J_m (m=1,2,3)$, 然后用 Softmax 回归函数通过概率分配将距离转换为概率分布, 如式(18)所示。

$$P_m(k) = \frac{\exp(-\beta(k) \cdot J_m(k))}{\sum_{n=1}^3 \exp(-\beta(k) \cdot J_n(k))} \quad (18)$$

式中: $P_m(k)$ 为每个候选矢量被选中的概率; $\beta(k)$ 为动态调节函数用来控制概率分布的集中程度, 根据误差动态特性的自适应调节机制进行调节, 定义动态调节函数为

$$\beta(k) = \beta_0 + \lambda_1 \cdot \epsilon(k) + \lambda_2 \cdot |\epsilon(k) - \epsilon(k-1)| \quad (19)$$

式中: β_0 为基础调度值; λ_1 、 λ_2 分别为误差幅值与变化率的调节因子; $\epsilon(k)$ 为当前控制周期的参考电流与实际电流之间的瞬时误差。该方式使得控制器在较大误差或快速扰动出现时自动提高 β 值, 从而强化最优矢量的选择集中性; 而在平稳运行状态下 β 值趋缓, 保留一定探索性, 提升控制器跨周期调节柔性。之后生成随机数 $\xi \sim U(0,1)$, 按概率累加区间选择 3 个候选矢量之一。

$$V^*(k) = \begin{cases} V_1 & \text{if } \xi \leq P_1(k) \\ V_2 & \text{if } P_1(k) < \xi \leq P_1(k) + P_2(k) \\ V_3 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $V^*(k)$ 为 EMPC 求解优化后的全局最优解, 此机制打破单周期绝对最优选择的局限。通过动态分配概率, 以可控方式探索多周期关联更优的候选矢量路径, 从而增强算法在多周期滚动优化中逼近全局最优解的能力。

本文提出的 VS-EMPC 控制策略如图 3 所示, 该预测控制方案可按以下步骤进行。

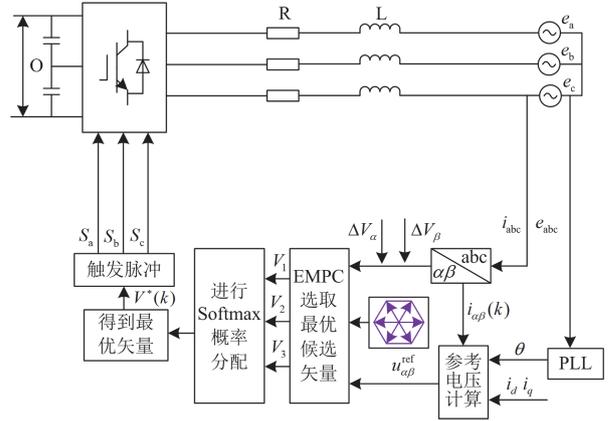


图 3 VS-EMPC 控制策略框图

Fig. 3 Block diagram of VS-EMPC control strategy

第 1 步: 测量采样第 k 个采样瞬间三相输出电流 i_{abc} 、三相输出电压 U_{abc} 以及直流侧的电容电压 $u_{c1}(k), u_{c2}(k)$ 。

第 2 步: 将输出电流 $i_{abc}(k)$ 通过坐标变换到 $i_\alpha(k), i_\beta(k)$, 加入死区补偿电压 $\Delta V_\alpha(k), \Delta V_\beta(k)$ 来进行模型修正, 根据式(5)计算参考空间电压矢量 $u_\alpha^{\text{ref}}(k), u_\beta^{\text{ref}}(k)$ 。

第 3 步: 构建代价函数, 通过 EMPC 控制器, 利用 Voronoi 图的思想离线计算出 3 个最优候选电压矢量。

第 4 步: 在线阶段查找当前工况对应的 Voronoi 区域-候选矢量映射表, 由式(18)计算候选矢量的概率值, 根据式(20)对 3 个最优的候选矢量进行 Softmax 概率分配, 选出最优矢量。

第 5 步: 最后按照实时概率将选择出的最优电压矢量作用于 T 型三电平逆变器, 完成一个控制周期。

2.3 李雅普诺夫稳定性分析

EMPC 通过在线求解多参数二次规划问题, 得到存储最优分区的控制器, 每个状态都与控制器域 l 和系统动态相关。本文利用半定规划构造 Lyapunov 函数, 并对稳定性进行仿真分析。

假定电网电压恒定, 将式(8)转化为自治的分段仿射系统, 如式(21)所示。

$$x(k+1) = A_l x(k) + B_l u(k) + f_l = \tilde{A}_l x(k) + f_l \quad (21)$$

式中: $\mathbf{x}(k) \in G_i$, G_i 为状态分区的几何区域; \tilde{A}_i 为分区的闭环系统矩阵; \mathbf{f}_i 为该闭环系统的偏移项。

对于该系统, 考虑控制不变子集 $Z_0 \subseteq Z$, 则

$$Z_0 = \{\mathbf{x}(0) \in Z | \mathbf{x}(k) \in Z, \forall k \geq 0\} \quad (22)$$

式中: Z 为状态约束集合; $\mathbf{x}(0)$ 为初始状态量。构造分段二次函数(piecewise quadratic function, PWQ) 函数, 如式(23)所示。

$$\begin{cases} L(\mathbf{X}) = \mathbf{X}^T \mathbf{Q}_i \mathbf{X} \\ L(\mathbf{x}(k)) \geq T_r \|\mathbf{x}(k)\|_2^2 \\ L(\mathbf{x}(k+1)) - L(\mathbf{x}(k)) \leq -\rho \|\mathbf{x}(k)\|_2^2 \\ \forall \mathbf{x}(k) \in Z_0 \end{cases} \quad (23)$$

式中: $L(\mathbf{X})$ 为分段二次 Lyapunov 函数; \mathbf{Q}_i 为正定加权矩阵; T_r 、 ρ 分别为保证 Lyapunov 函数的正定性和能量递减速率的正定系数, 且 $T_r > 0$, $\rho > 0$ 。

PWQ 形式的李雅普诺夫函数图如图 4 所示, 其中 X_1 、 X_2 为状态量, 可以看出系统的平衡点 $X = 0$ 在 Z_0 上是指数稳定的, 因此该闭环控制系统是全局稳定的。

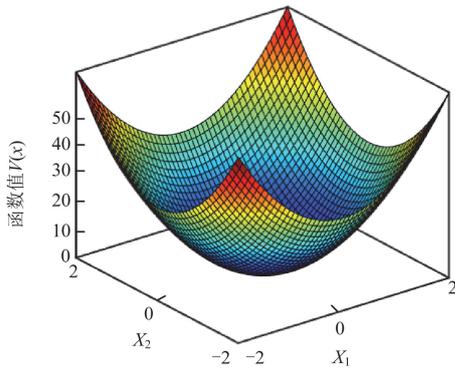


图 4 PWQ 型李雅普诺夫函数图

Fig. 4 Lyapunov function diagram of PWQ type

3 实验验证

为了验证本文所提 VS-EMPC 控制策略的可行性及有效性, 进行半实物硬件在环仿真(hardware in the loop, HIL)实验, 控制器采用的 DSP 芯片型号为 TMS320F28335, 目标机型号为远宽 MT8020, 实验设备图如图 5 所示。系统参数如表 2 所示。

3.1 Voronoi-Softmax 映射下的 EMPC 分区设计

基于 KKT 条件离线求解有约束有限时间尺度最优化控制问题(constrained finite time optimal control, CFTOC), 随着系统状态维度的增高, 其求解的难度和计算量也大大提高。本文采用基于 MATLAB

的多参数工具箱 MPT3 进行定义与求解。在保证仿真效果的情况下, 本文选取预测时域和控制时域均为 2。图 6 为代价函数的控制律分区图(状态空间分区在特定平面上的投影可视化)。

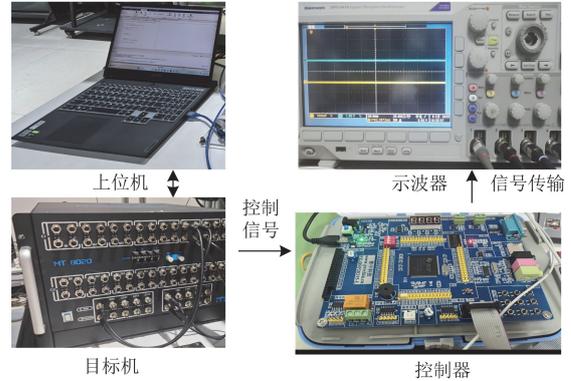


图 5 实验设备图

Fig. 5 Experimental equipment

表 2 系统参数

Table 2 System parameters

参数	数值
直流侧电容 $C_1, C_2/\mu\text{F}$	2900, 2900
直流侧电压 U_{dc}/V	220
开关频率 f/kHz	10
滤波电感 L/mH	5
寄生电阻 R/Ω	1
采样周期 $T_s/\mu\text{s}$	100

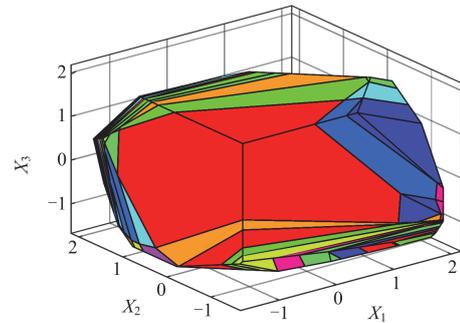


图 6 临界控制律分区

Fig. 6 Critical control law partitioning

图中不同颜色的分区对应不同分区的仿射控制律, 是该分区内代价函数在约束条件下的解。采用 Voronoi 图思想重新划分 Voronoi 单元合并分区, 得到优化后 EMPC 的临界分区图如图 7 所示。

传统 EMPC 策略在预测时域 $N = 2$ 下形成的状态分区数量为 481 个, 而经过 Voronoi 区域合并与 Top3 候选矢量映射后, 最终保留的有效分区数量压缩至 127 个, 压缩率达到 73.6%, Top3 候选矢量

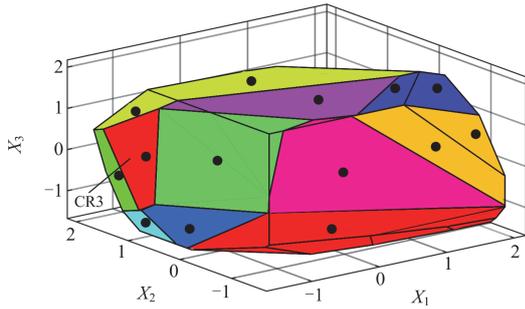


图 7 优化后的 EMPC 临界分区图

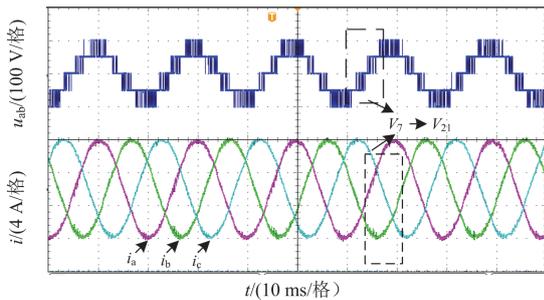
Fig. 7 Critical partition diagram of the optimized EMPC

中大/中矢量对的组合(如 $V_7-V_{15}-V_{21}$)最常出现, 占比约 62.8%, 零矢量组合(如 $V_0-V_{13}-V_{26}$)占比 14.2%, 说明系统在稳态与轻载条件下倾向选择中高幅值控制矢量, 而非频繁使用切换频率较高的小矢量。另外, Voronoi 映射不仅有效压缩了分区规模, 还保持了候选集结构的多样性与覆盖性, 降低了存储资源消耗, 同时为 Softmax 概率分配提供了稳定的结构支撑。

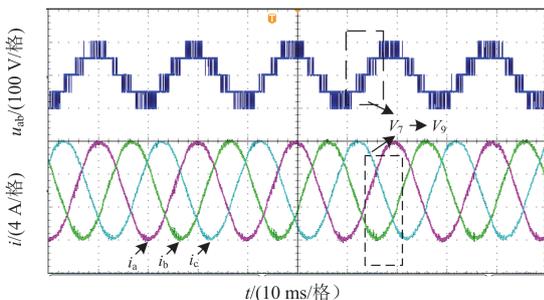
3.2 稳态工况下候选矢量选择机制与控制性能对比

分别对传统的 FCS-MPC、EMPC 和 VS-EMPC 策略进行输出性能的比较, 如图 8 所示, 给定的参考电流值为 6 A。

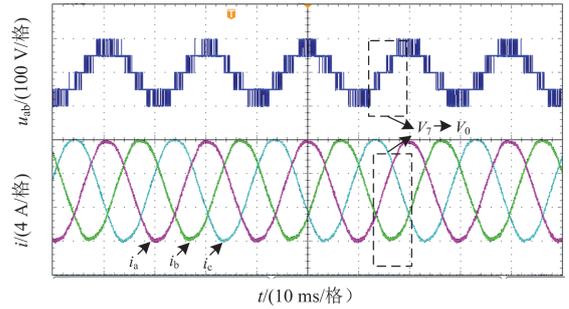
实验结果表明, 3 种算法都可以准确跟踪并网电流波形, 但波形的畸变程度依次下降; 在 $t = 0.165$ s(电流过零点)时, 通过 HIL 测量得到此刻状



(a) FCS-MPC策略



(b) EMPC策略



(c) VS-EMPC策略

图 8 3 种控制策略的稳态电流及线电压分析

Fig. 8 Steady state current and FFT analysis of three control strategies

态点位于图 7 的临界分区 CR3, 对应的候选矢量为 V_0 (NNN)、 V_7 (PPN)和 V_{18} (OPN), 如表 3 所示。

表 3 候选矢量的选择

Table 3 Selection of candidate vectors

候选矢量	代价函数	分配概率/%	随机数
V_0	0.33	38	0.41
V_7	0.17	35	0.41
V_{18}	0.27	27	0.41

FCS-MPC 策略仅基于瞬时代价函数最小选择 V_7 , 但在下一周期会跳变到不相邻的 V_{21} , 控制上缺乏连续性, 产生了线电压跳变现象, 电流发生畸变, 陷入单周期局部最优, 如图 8(a)所示。EMPC 策略虽然求解性能更优, 但在多周期矢量输出上依然会出现波形畸变, 如图 8(b)所示。这是因为死区导致的非线性电压降在电流极性切换点附近影响最为显著。而 VS-EMPC 策略结合了基于 PWA 模型的死区补偿, 并在代价函数优化中考虑了状态相关的死区电压降, 通过概率选择在当前周期牺牲部分性能选择 V_0 , 此时虽然 V_0 代价函数最高, 但通过控制器计算, 横向比较多个周期下 3 个矢量不同选择带来的对下一周期不同开关序列选择的影响, 选择连续 3 个周期形成 $V_0 \rightarrow V_7 \rightarrow V_0$ 平滑序列, 如图 8(c)所示, 减少了相邻周期期间的矢量跳变幅度, 有效抑制了电流毛刺和电压振荡, 验证了通过 Softmax 概率机制避免局部最优、实现多周期平滑控制的效果。

综上, 传统有限集模型预测控制算法在电压矢量的识别精度以及多个周期全局控制的最优选择上效果较差, 相比较之下, 本文所提 VS-EMPC 策略通过对死区的补偿以及算法的优化, 电流质量更高, 稳态控制效果更优。

比较采用 3 种控制策略下傅里叶谐波分析结果以及直流侧中点电位波动情况, 由图 9 得到 FCS-MPC、EMPC、VS-EMPC 策略的总谐波失真(total

harmonic distortion, THD)分别为 3.74%、2.51%、2.21%, 而平均电位差分别为 0.4 V、0.34 V、0.1 V。死区引起的非线性失真通常表现为低次谐波。上述结果表明, 3 种策略均能维持直流侧电容电压平衡, 本文所提 VS-EMPC 策略通过精确的死区建模与补偿有效降低了由死区引起的特定次谐波含量, 并且通过概率分配筛选符合全局最优的矢量, 因此谐波含量更少, 电位差更小, 中点电位控制能力更强。

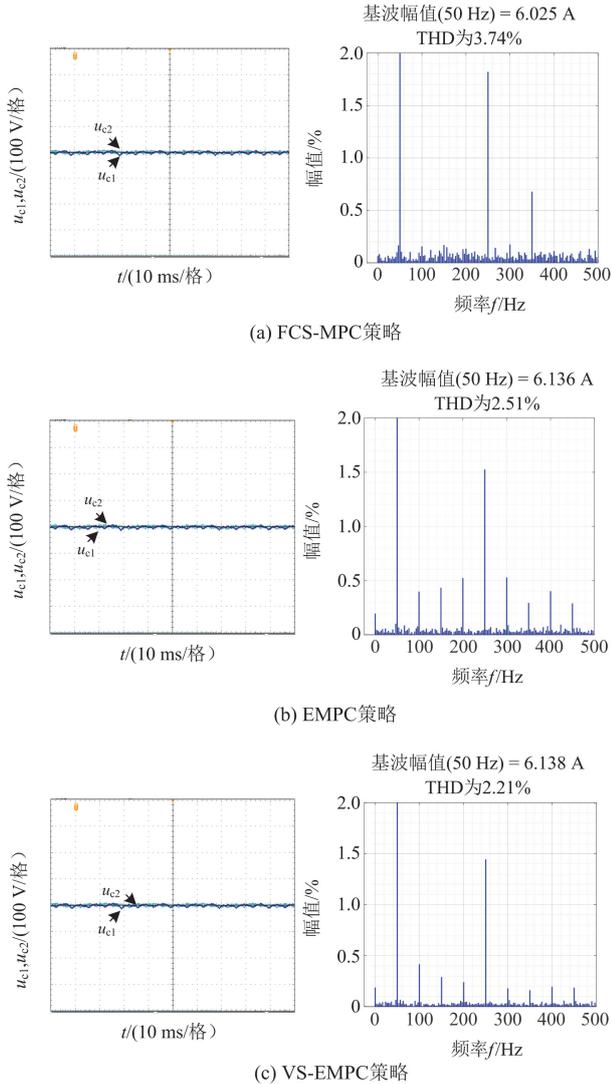


图9 3种控制策略的THD及中点电位结果

Fig. 9 THD and neutral point potential results of three control strategies

3.3 动态扰动响应下多周期控制路径的连续性分析
为了验证本文所提策略的暂态稳定性, 进行电流突变实验, 在 $t=0.5$ s 时分别将三相指令电流有效值从 6 A 衰减到 3 A、从 4 A 跃升到 6 A, 如图 10 所示。

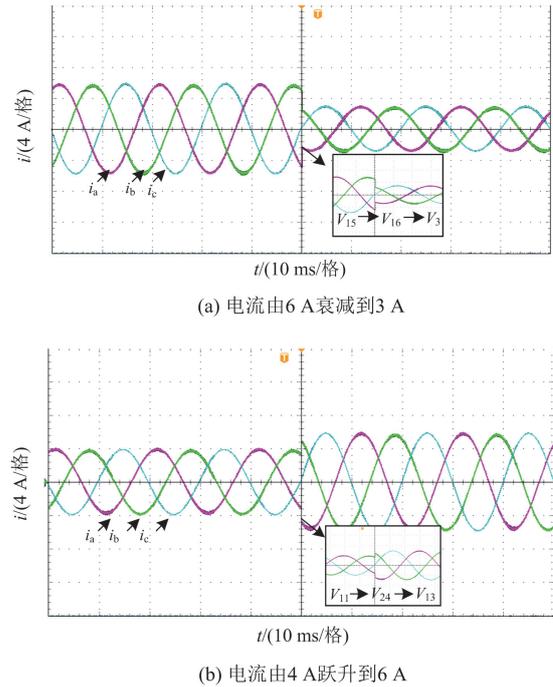


图10 电流突变实验

Fig. 10 Current mutation experiment

以图10(a)为例: 由 HIL 得到在电流突变时刻实时状态点落入 Voronoi 子区域对应的分区 R_{13} , 得到对应候选矢量为 V_3 、 V_{15} 、 V_{25} , 随机数 ξ 为 0.72, β 值为 2.4, 计算 Softmax 分配的概率为 33%、28%、39%, 控制器选择 V_{15} 作为当前周期控制矢量, 配合下两个周期的顺序进行调整, 实现 $V_{15} \rightarrow V_{16} \rightarrow V_3$ 的控制路径, β 值动态调整为 3.3, 最终平滑实现新指令电流的稳定过渡。若采用传统的 FCS-MPC 策略, 其矢量切换路径为 $V_{25} \rightarrow V_6 \rightarrow V_{12}$, 多个周期下开关切换剧烈, 产生较大的动态电压毛刺, 未考虑死区时间, 响应时间更长, 控制稳定性和系统平滑性不足。

本文提出的 VS-EMPC 策略在两种工况下均实现了在 0.5 ms 内对参考电流的跟踪, 并达到稳态效果, 且不存在动态超调。该策略不仅体现了多周期关联性, 也考虑了死区效应带来的影响, 从而支持控制器做出有利于平滑过渡和全局优化的决策, 通过概率探索, 选择关联性更好的矢量, 避免局部最优的情况发生, 验证了跨周期关联优化的有效性, 并且具备很强的动态响应能力。

3.4 鲁棒性分析

鉴于 Softmax 机制在候选矢量选择中引入了随机数 $\xi \sim U(0,1)$, 理论上在相同控制参考条件下, 多次运行将导致最终预测矢量序列存在差异。为评估 Softmax 随机性对整体控制性能的影响, 本文在同

一初始状态下设定参考电流从 5 A 突变到 10 A，并重复运行控制器 30 次，统计关键性能指标的均值与方差，结果如表 4 所示。

表 4 Softmax 随机性对控制性能的影响

Table 4 Impact of Softmax randomness on control performance

指标名称	平均值	标准差	最大值	最小值
THD/%	2.78	0.072	3.07	2.46
中点电压偏差/V	0.65	0.048	0.91	0.36
响应时间/ms	0.52	0.012	0.55	0.50
超调量/V	6.82	0.41	7.39	6.14

尽管每次仿真中所选控制矢量路径存在微小差异，但 THD、中点电压偏差 Δu_c 、动态响应时间 t 与电压超调量均维持在低方差水平，表明 VS-EMPC 策略具备良好的鲁棒性。该特性使控制器在保持响应灵活性的同时，确保核心性能指标稳定不变。

3.5 动态系数对控制性能的影响分析

为进一步分析动态系数对控制性能的影响，针对系统工况，本文通过试验对比不同 β 下的输出电流 THD 和中点电位差，如图 11 所示。从图中结果可见：当 β 值较小时，系统表现出较强的随机性，控制效果较差，当增加一定的电压扰动，使 β 从 0 逐步增大时，Softmax 分布更趋集中，控制器趋向于贪心策略，从而减少了随机性，在 $\beta=1$ 时达到最佳控制效果。当 β 超过 3 后，控制性能增益趋于饱和，且过大的 β 值会使探索性降低，可能陷入局部最优。因此建议将 β 设定在 1~3 为宜，以平衡控制性能与优化搜索空间。

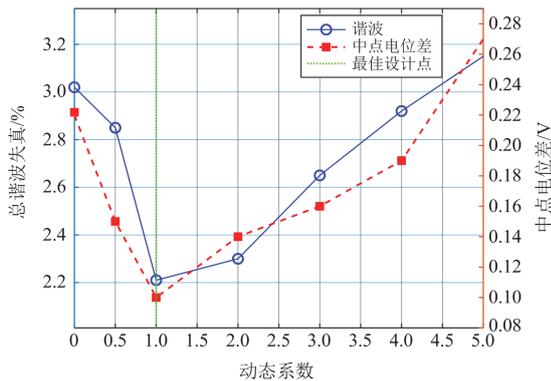


图 11 动态系数对控制性能的影响

Fig. 11 Effect of dynamic coefficient on control performance

调整动态系数 β ，Softmax 电压矢量概率分配的热力图如图 12 所示。在给定不同动态系数情况下，EMPC 控制器会根据式(18)、式(20)计算出相应最优的 3 个矢量，分配以不同的概率，并根据系统实际工况来选择合适的最优矢量，从而实现多个周

期全局最优的效果。

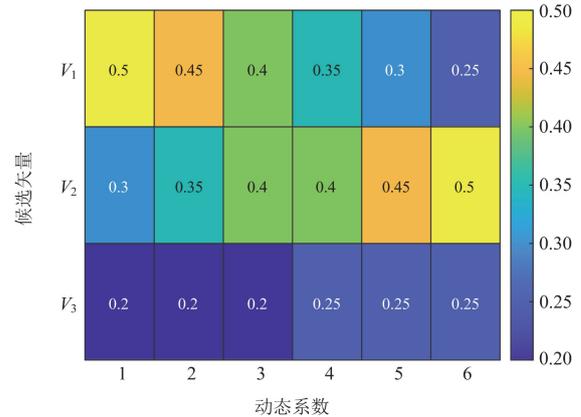


图 12 候选矢量的概率分布图

Fig. 12 Probability distribution of candidate vectors

通过硬件在环仿真平台测得 3 种策略所需存储空间和平均计算时间如表 5 所示。

表 5 3 种控制算法对比

Table 5 Comparison of three control algorithms

算法	存储空间/ 字节	平均计算时间/ μs	
		离线	在线
FCS-MPC	32 230	0	63.2
EMPC	67 785	27.2	7.8
VS-EMPC	47 873	24.3	5.4

由表 5 可得，传统的 FCS-MPC 策略虽然没有离线计算过程，但总体耗时较长。而本文所采用的 VS-EMPC 算法虽分为离线在线两个步骤，但不需要进行延时补偿，执行时间为传统算法的 47% 左右，大大提高了计算效率，通过 Voronoi 离线分区压缩存储空间，较 EMPC 减少 29.4% 内存占用，降低了全局优化与实时性的矛盾，验证了其在多周期关联优化中的全局性优势。

4 结论与展望

本文提出一种基于 Voronoi-Softmax 的 T 型逆变器 EMPC 全局最优控制策略，通过理论推导和实验验证，得到以下结论。

1) 本文策略对死区进行补偿，有效地修正了建模过程中非线性问题，使预测模型更接近实际系统，模型非凸性降低，提升了全局最优解的可能性。实验结果表明，本文预测显著改善了电流过零点波形质量，降低了 THD(达 2.21%)，并确保了动态过程中预测和矢量选择的准确性，是提升系统动稳态性能的关键因素。

2) 针对 EMPC 离线计算内存占用较高的问题，利用 Voronoi 图的思想对 EMPC 离线得到的分区进

行重新划分, 基于欧式距离得到了最优的 3 个候选矢量, 减少了 29.4% 的内存占用, 降低了计算成本。

3) 提出基于 Voronoi-Softmax 的 T 型逆变器 EMPC 全局最优控制策略, 依据得到的不同自适应动态系数值, 通过 Softmax 概率分配筛选符合多周期关联的优化矢量, 在保证实时性的同时, 实现非凸解空间中的多周期关联全局最优, 且比有限控制集算法具有更快的动态响应速度和谐波抑制能力。

本文在三电平 T 型拓扑结构下验证了所提 VS-EMPC 策略的有效性。目前 Softmax 中的概率分配由误差驱动机制决定, 未来可结合轻量级神经网络结构, 进行状态空间与最优矢量概率之间的非线性映射建模, 使 Softmax 分配权重具备“学习式调度”能力, 进一步提升控制器在复杂扰动下的全局最优路径选择能力与鲁棒性。

参考文献

- [1] 沈赋, 李施伟, 王健, 等. 融合储能的光伏发电系统并网逆变器建模与稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(19): 131-143.
- SHEN Fu, LI Shiwei, WANG Jian, et al. Modeling and stability analysis of a photovoltaic grid-connected inverter integrated with an energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(19): 131-143.
- [2] 李雪萍, 王自力, 陈燕东, 等. 基于虚拟惯量模糊自适应的新能源逆变器频率主动支撑策略[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(20): 25-37.
- LI Xueping, WANG Zili, CHEN Yandong, et al. Active frequency support strategy for new energy inverters based on virtual inertia fuzzy adaptive control[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(20): 25-37.
- [3] 李宗源, 陈谦, 钱倍奇, 等. 基于格拉姆角场与并行 CNN 的并网逆变器开关管健康诊断[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(8): 153-159.
- LI Zongyuan, CHEN Qian, QIAN Beiqi, et al. Health diagnosis of switch tube in grid-connected inverter based on Gramian angular field and parallel CNN[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(8): 153-159.
- [4] 肖白, 赵雪纯, 高宁远, 等. 挖掘多功能并网逆变器潜力的电能质量综合治理策略[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(6): 133-140.
- XIAO Bai, ZHAO Xuechun, GAO Ningyuan, et al. Comprehensive governance strategy for power quality based on multi-functional grid-connected inverter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(6): 133-140.
- [5] 屈克庆, 高畅, 许跃成, 等. 高渗透率下计及并网逆变器动态性能的新型锁相环设计方法及鲁棒性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(14): 69-79.
- QU Keqing, GAO Chang, XU Yuecheng, et al. Design method and robustness analysis of a novel phase-locked loop considering the dynamic performance of grid-connected inverters under high penetration[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(14): 69-79.
- [6] 马俊鹏, 李磊, 迟程缤, 等. 宽短路比工况下构网型逆变器功率自同步控制的稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(7): 165-173.
- MA Junpeng, LI Lei, CHI Chengbin, et al. Stability analysis of power self-synchronization control of grid-forming converters in wide range of short-circuit ratio conditions[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(7): 165-173.
- [7] 王立强, 陶军, 阿敏夫, 等. 抑制新能源并网系统谐振的逆变器阻抗适配支路参数设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(11): 74-83.
- WANG Liqiang, TAO Jun, A Minfu, et al. Parameter design method for the impedance adaptation branch of an inverter to suppress resonance in new energy grid-connected systems[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(11): 74-83.
- [8] 柳志飞, 杜贵平, 杜发达. 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[J]. 电工技术学报, 2017, 32(22): 58-69.
- LIU Zhifei, DU Guiping, DU Fada. Research status and development trend of finite set model predictive control in power electronic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(22): 58-69.
- [9] 宁继超, 贲洪奇, 王雪松, 等. 带有死区时间补偿及电容电压平衡功能的二极管钳位型三电平逆变器数字调制方法[J]. 电工技术学报, 2024, 39(20): 6444-6461.
- NING Jichao, BEN Hongqi, WANG Xuesong, et al. A digital modulation method for dead-time compensation and capacitor voltage balance in diode clamped three-level inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(20): 6444-6461.
- [10] 刘和平, 路莹超, 王华斌, 等. 电压型逆变器分段死区补偿调制策略[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(3): 25-32.
- LIU Heping, LU Yingchao, WANG Huabin, et al. Dead-time compensation modulation strategy of subsection integrated in voltage source inverter[J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(3): 25-32.
- [11] ZHANG Nianzhong, SONG Qiang, WANG Mingsheng. A dead-time compensation method for motor drive inverters based on nonlinear observer[J]. Computers and Electrical Engineering, 2024, 120.
- [12] 杨立永, 陈智刚, 陈为奇, 等. 逆变器输出电压模型及新型死区补偿方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 182-187.

- YANG Liyong, CHEN Zhigang, CHEN Weiqi, et al. Output voltage model of VSI-inverter and a novel dead-time compensation method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 182-187.
- [13] LI X, AKIN B, RAJASHEKARA K. Vector-based dead-time compensation for three-level T-type converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 52(2): 1597-1607.
- [14] 王勋嵩, 李锐华, 许嘉杰, 等. 基于冗余矢量的 T 型三电平双向变换器中点电位平衡模型预测控制[J]. 高电压技术, 2024, 50(3): 1264-1271.
WANG Xunsong, LI Ruihua, XU Jiajie, et al. Model predictive control for midpoint potential balance of T-type three-level bidirectional converter based on redundant vector[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 1264-1271.
- [15] ZHANG Y, XIE W, LI Z, et al. Low-complexity model predictive power control: double-vector-based approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(11): 5871-5880.
- [16] CHEN W, ZENG S, ZHANG G, et al. A modified double vectors model predictive torque control of permanent magnet synchronous motor[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(11): 11419-11428.
- [17] ZHANG X, HOU B. Double vectors model predictive torque control without weighting factor based on voltage tracking error[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 33(3): 2368-2380.
- [18] 兰志勇, 王波, 徐琛, 等. 永磁同步电机新型三矢量模型预测电流控制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(增刊 1): 243-249.
LAN Zhiyong, WANG Bo, XU Chen, et al. Novel three vector model predictive current control for permanent magnet synchronous motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 243-249.
- [19] YANG Y, WEN H, FAN M, et al. Fast finite-switching state model predictive control method without weighting factors for T-type three-level three-phase inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(3): 1298-1310.
- [20] DONOSO F, MORA A, CARDENAS R, et al. Finite-set model-predictive control strategies for a 3L-NPC inverter operating with fixed switching frequency[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(5): 3954-3965.
- [21] JUN E S, NGUYEN M H, KWAK S S. Model predictive control method with NP voltage balance by offset voltage injection for three-phase three-level NPC inverter[J]. IEEE Access, 2020, 8: 172175-172195.
- [22] 张国荣, 方舒, 彭勃, 等. 一种降低三电平逆变器中性点电压交流纹波的新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 1-8.
ZHANG Guorong, FANG Shu, PENG Bo, et al. A new method for neutral-point AC ripple voltage reduction in a three-level inverter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(19): 1-8.
- [23] JOFORE M, LLOR A M, SILVA C A. Sensorless low switching frequency explicit model predictive control of induction machines fed by neutral point clamped inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(12): 9122-9128.
- [24] ALI Q, MONTENEGRO S. Explicit model following distributed control scheme for formation flying of mini UAVs[J]. IEEE Access, 2016, 4: 397-406.
- [25] BEMPORAD A, MORARIM, DUA V, et al. The explicit solution of model predictive control via multiparametric quadratic programming[C] // Proceedings of the 2000 American Control Conference, ACC, June 28-30, 2000, Chicago, IL, USA: 872-876.
- [26] 丁靖. 显式模型预测控制及其在电力电子及电力系统中的应用[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2011.
DING Jing. Explicit model predictive control and its application in power electronics and power systems[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2011.

收稿日期: 2025-06-16; 修回日期: 2025-08-14

作者简介:

张虹(1973—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为新能源并网发电技术、电力系统稳定与控制; E-mail: jdlzh2000@126.com

孙道兴(2001—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源并网。E-mail: 815640805@qq.com

(编辑 周金梅)