

具有建模误差补偿的三相逆变器模型预测控制算法

沈 坤, 章 兢

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 对于三相逆变器模型预测控制系统, 传统的有限控制集模型预测控制(FCS-MPC)算法未考虑建模误差对系统控制的影响, 导致所选择的最优控制量在实施控制时已失去最优性。对此设计了一种具有建模误差补偿的三相逆变器有限控制集模型预测控制(FCS-MPCMEC)算法, 该算法以前一时刻三相逆变器的建模误差补偿当前时刻三相逆变器预测模型的输出, 从而实现对三相逆变器预测模型建模误差的在线补偿。通过对比实验分析了基于 FCS-MPC 算法及 FCS-MPCMEC 算法的三相逆变器在空载、带阻感性负载、带非线性负载及负载投入等工况下的控制性能。实验结果表明: 在上述所有工况下, FCS-MPCMEC 算法对三相逆变器的控制效果均优于传统 FCS-MPC 算法。

关键词: 模型预测控制; 逆变器; 补偿; 建模; 误差分析

中图分类号: TM 464

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.07.015

0 引言

预测控制起源于 20 世纪 70 年代末的工业过程控制领域, 因其具有鲁棒性及自适应性等特点^[1], 现已被广泛应用于变流器控制领域^[2-16]。三相逆变器模型预测控制算法是一种将模型预测理论应用于三相逆变器控制的优化控制算法, 它具有模型预测控制算法的一般特征, 如基于预测模型、求解性能优化函数等^[1]。当前最主要的 2 种三相逆变器模型预测控制算法是显式模型预测控制 EMPC(Explicit Model Predictive Control)算法^[4]及有限控制集模型预测控制 FCS-MPC(Finite Control Set Model Predictive Control)算法^[5]。其中 FCS-MPC 算法具有易于理解、建模直观、控制直接、方便处理系统约束且无 PWM 调制器及参数调节^[5]等优点, 并且已成为三相逆变器模型预测控制研究的主要方向^[5-16]。文献[5]阐述了 FCS-MPC 算法原理, 并分析了三相逆变器 FCS-MPC 算法的特点及其与传统 PI 控制算法的区别; 文献[6-7]则将三相逆变器 FCS-MPC 算法应用于三相电机的直接转矩控制; 文献[8]首次采用 FCS-MPC 算法实现了三相逆变器的预测电流控制; 文献[9]将三相逆变器 FCS-MPC 算法应用于三相 UPS 逆变器的输出电压控制; 文献[10]讨论了三相逆变器 FCS-MPC 算法计算延时的补偿问题; 文献[11]采用对瞬态与稳态分开控制的方法降低了在 FCS-MPC 算法控制下的三相逆变器开关频率; 文献[12]采用多步预测的方法降低了 FCS-MPC 算法的保守性。对于 FCS-MPC 算法性能优化函数中权重系数的设计问

题, 文献[13]采用实验方法对权重系数进行设计, 而文献[14]给出了无需权重系数的性能优化函数设计方法。此外, 文献[15]采用 FCS-MPC 算法实现了三相中点箝位逆变器的优化控制; 文献[16]采用 FCS-MPC 算法控制三相并联逆变器的输出电压, 改善了三相逆变器并联系统的控制性能。上述文献均假设所构建的三相逆变器预测模型与实际系统一致, 不考虑三相逆变器的建模误差。由此构建的预测模型缺乏三相逆变器的实际输出反馈。即传统的三相逆变器 FCS-MPC 算法无经典预测控制理论中的反馈校正机制^[1], 从而影响系统控制性能。

本文首先介绍了三相逆变器 FCS-MPC 算法的基本原理, 给出了三相逆变器 FCS-MPC 算法的设计过程, 分析了建模误差对三相逆变器 FCS-MPC 算法控制性能的影响; 基于经典预测控制理论中的反馈校正机制, 采用三相逆变器的实际输出值与其预测模型计算出的预测值的偏差对三相逆变器建模误差进行补偿; 通过对比实验验证了所设计建模误差补偿算法的有效性。

1 三相逆变器 FCS-MPC 算法

1.1 基本原理

本文研究的三相逆变器为两电平三相电压型逆变器, 其系统结构框图如图 1 所示。设定在任意时刻 t_k , 作用在三相逆变器上的开关函数组合表示为向

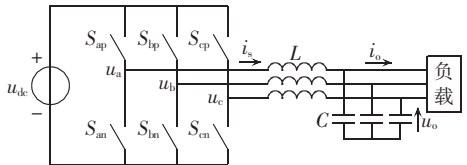


图 1 两电平三相逆变器结构示意图

Fig.1 Structure of two-level three-phase inverter

量 $\mathbf{S}=[S_a, S_b, S_c]^T$, 其中开关函数 $S_j=S_{jp}=\bar{S}_{jn}$, 且 $S_j \in \{0,1\}$, $j=a,b,c$ 。开关函数组合 $\mathbf{S}$ 只有 8 种可能值, 设为 $\mathbf{S}_i (i=0,1,\dots,7)$ 。

针对图 1 所示的两电平三相电压型逆变器, 文献[5]介绍了 FCS-MPC 算法。该算法基于三相逆变器开关函数组合(控制集)的个数有限(8 个), 从而可以通过由三相逆变器开关函数组合与其被控量之间关系构成的预测模型, 采用遍历法的形式计算出在所有 8 个开关函数组合分别作用下的三相逆变器被控量预测值, 并选择使所设计的系统性能优化函数值最小的开关函数组合作用于三相逆变器[5,12]。

三相逆变器 FCS-MPC 系统的设计过程为: 先根据三相逆变器被控量 $\mathbf{x}$ 与开关函数组合 $\mathbf{S}$ 的关系构建三相逆变器系统的预测模型 $f_p\{\mathbf{x}, \mathbf{S}\}$; 在 t_k 时刻, 由被控量测量值 $\mathbf{x}(t_k)$ 与该时刻实施的开关函数组合 $\mathbf{S}(t_k)$ (已在前一控制周期计算出), 计算出 t_{k+1} 时刻被控量的预测值, 即 $\mathbf{x}_p(t_{k+1})=f_p\{\mathbf{x}(t_k), \mathbf{S}(t_k)\}$; 再由计算出的被控量 t_{k+1} 时刻预测值 $\mathbf{x}_p(t_{k+1})$ 与全部开关函数组合 $\mathbf{S}_i$ 分别计算出 t_{k+2} 时刻被控量的预测值, 即 $\mathbf{x}_{pi}(t_{k+2})=f_p\{\mathbf{x}_p(t_{k+1}), \mathbf{S}_i\}$, $i=0,1,\dots,7$; 根据设定的控制目标, 如三相逆变器被控量对其参考值的跟踪、开关功耗及系统约束等, 构建系统的性能优化函数 $f_g\{\mathbf{x}^*, \mathbf{x}_{pi}, \mathbf{S}_i\}$, 其中 $\mathbf{x}^*$ 为被控量参考值, 并且认为其变化相对于系统采样时间而言是平缓的; 在 $\mathbf{S}_i (i=0,1,\dots,7)$ 中选择使性能优化函数 f_g 最小即最优的开关函数组合在 t_{k+1} 时刻作用于三相逆变器系统[5,12]。两电平三相逆变器有限控制集模型预测控制系统结构框图[5]如图 2 所示。

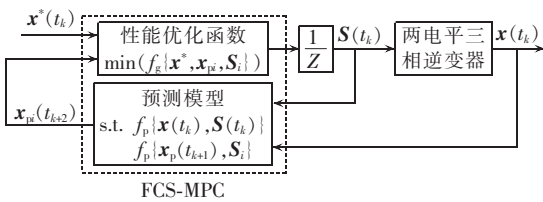


图 2 三相逆变器 FCS-MPC 算法系统结构框图

Fig.2 Structure of FCS-MPC scheme for three-phase inverter

根据上述算法描述, 且设定三相逆变器的控制目标是被控量对其参考值的跟踪, 可得出如图 3 所示的三相逆变器 FCS-MPC 算法原理图。图中点划线表示三相逆变器被控量参考值曲线, 短虚线表示各时刻在所给最优开关函数组合作用下的被控量输出值, 实线表示各时刻在三相逆变器全部 8 个开关函数组合分别作用下的被控量预测值。由 FCS-MPC 算法可知, 图 3 中在 t_k 时刻先由三相逆变器预测模型计算出被控量在 t_{k+1} 时刻的预测值 $\mathbf{x}_p(t_{k+1})$, 再利用预测模型分别计算出在三相逆变器全部 8 个开关函数组合分别作用下的系统被控量在 t_{k+2} 时刻的预

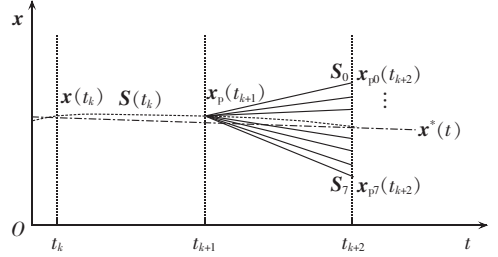


图 3 三相逆变器 FCS-MPC 算法原理
Fig.3 Principle of FCS-MPC scheme for three-phase inverter

测值 $\mathbf{x}_{pi}(t_{k+2}) (i=0,1,\dots,7)$, 最后选择与被控量参考值曲线最接近的预测值所对应的开关函数组合在 t_{k+1} 时刻作用于系统。由图 3 可知, 系统 t_{k+1} 时刻实施的开关函数组合为 $\mathbf{S}_3$ 。

1.2 两电平三相电压型逆变器 FCS-MPC 算法设计

文献[9]针对图 1 所示两电平三相电压型逆变器的输出电压跟踪问题, 给出了两电平三相电压型逆变器 FCS-MPC 算法的设计方法, 具体过程如下。

先构建两电平三相电压型逆变器的离散时间模型[9]:

$$\mathbf{x}(k+1)=\mathbf{A}_q\mathbf{x}(k)+\mathbf{B}_q\mathbf{u}_s(k)+\mathbf{B}_{dq}\mathbf{i}_o(k) \quad (1)$$

$$\mathbf{y}(k)=[0 \ 1]\mathbf{x}(k) \quad (2)$$

其中, $\mathbf{x}(k)=\begin{bmatrix} \mathbf{i}_s(k) \\ \mathbf{u}_o(k) \end{bmatrix}$; $\mathbf{A}_q=e^{\mathbf{A}T_s}$, $\mathbf{B}_q=\int_0^{T_s} e^{\mathbf{A}\tau}\mathbf{B}d\tau$, $\mathbf{B}_{dq}=\int_0^{T_s} e^{\mathbf{A}\tau}\mathbf{B}_{d1}d\tau$, $\mathbf{A}=\begin{bmatrix} -r_1/L & -1/L \\ 1/C & 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{B}=\begin{bmatrix} 1/L \\ 0 \end{bmatrix}$, $\mathbf{B}_{d1}=\begin{bmatrix} 0 \\ -1/C \end{bmatrix}$; T_s 为控制器采样周期; L, C 为图 1 所示三

相滤波电路的电感及电容; r_1 为滤波电感及线路等效阻抗; $\mathbf{u}_s(k)=2[S_a(k)+\alpha S_b(k)+\alpha^2 S_c(k)]u_{dc}/3$, $\alpha=e^{j2\pi/3}$; $\mathbf{i}_s(k)$ 、 $\mathbf{u}_o(k)$ 、 $\mathbf{i}_o(k)$ 均为图 1 中对应三相电量的矢量化形式。

由 1.1 节可知:

$$\mathbf{u}_{si}(k)=\frac{2}{3}u_{dc}[1 \ \alpha \ \alpha^2]\mathbf{S}_i \quad i=0,1,\dots,7 \quad (3)$$

则由式(1)~(3)可得控制器预测模型为:

$$\mathbf{u}_{opi}(k+1)=[0 \ 1]\times$$

$$[\mathbf{A}_q\mathbf{x}(k)+\mathbf{B}_q\mathbf{u}_{si}(k)+\mathbf{B}_{dq}\mathbf{i}_o(k)] \quad i=0,1,\dots,7 \quad (4)$$

设三相逆变器输出电压的参考值为 $\mathbf{u}_o^*$, 确定三相逆变器预测控制的性能优化函数为:

$$f_g=(\mathbf{u}_{o\alpha}^*-\mathbf{u}_{opi\alpha})^2+(\mathbf{u}_{o\beta}^*-\mathbf{u}_{opi\beta})^2 \quad i=0,1,\dots,7 \quad (5)$$

其中, $\mathbf{u}_{o\alpha}^*$ 、 $\mathbf{u}_{o\beta}^*$ 分别为矢量 $\mathbf{u}_o^*$ 的实部和虚部数值; $\mathbf{u}_{opi\alpha}$ 、 $\mathbf{u}_{opi\beta}$ 分别为矢量 $\mathbf{u}_{opi}$ 的实部和虚部数值。

1.3 系统建模误差对控制性能的影响分析

注意到在上述三相逆变器 FCS-MPC 算法构建过程中, 总是假定三相逆变器被控量的实际测量值与由所构建的三相逆变器预测模型计算出的预测值

是相等的,即认为所构建的三相逆变器预测模型与实际系统完全一致,忽略系统建模误差。而事实上建模误差在任一时间及任一建模精度下均存在,且对系统控制性能的影响不可忽略。图 4 给出了考虑建模误差时,传统三相逆变器 FCS-MPC 算法的开关函数组合选优过程。同样设定三相逆变器的控制目标是被控量对其参考值的跟踪问题。图中长虚线表示被控量的参考值曲线,短虚线表示各时刻在由前一时刻选择的最优开关函数组合作用下的系统被控量预测值,点划线表示各时刻系统被控量测量值,实线表示各时刻在三相逆变器全部 8 个开关函数组合分别作用下的被控量预测值。

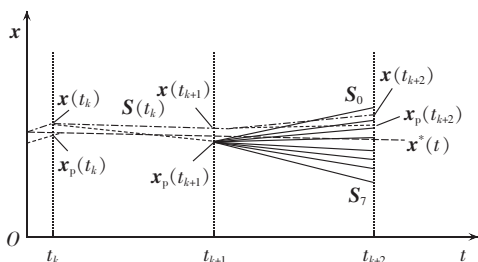


图 4 建模误差影响下的三相逆变器 FCS-MPC 算法

Fig.4 Influence of modeling error on FCS-MPC scheme for three-phase inverter

由图 4 可知,假设在 t_k 时刻被控量的测量值 $\mathbf{x}(t_k)$ 与 t_{k-1} 时刻由三相逆变器预测模型计算出的预测值 $\mathbf{x}_p(t_k)$ 存在偏差,这将导致在 t_k 时刻由 t_{k-1} 时刻基于被控量预测值 $\mathbf{x}_p(t_k)$ 确定的最优开关函数组合 $\mathbf{S}(t_k)$,并未从点 $\mathbf{x}_p(t_k)$ 作用于系统,而是从点 $\mathbf{x}(t_k)$ 作用于系统。此时对于三相逆变器控制系统而言,由 t_{k-1} 时刻确定的 t_k 时刻最优开关函数组合 $\mathbf{S}(t_k)$ 可能已不再是最优。而在 t_k 时刻,基于传统三相逆变器 FCS-MPC 算法,先由 $f_p\{\mathbf{x}(t_k), \mathbf{S}(t_k)\}$ 计算出被控量 t_{k+1} 时刻预测值 $\mathbf{x}_p(t_{k+1})$,再根据该预测值计算出 t_{k+2} 时刻被控量在全部 8 个开关函数组合分别作用下的预测值,选择最接近参考值的预测值对应的开关函数组合即为 t_{k+1} 时刻的最优开关函数组合。按上述方法,图 4 中 t_{k+1} 时刻将实施的最优开关函数组合为 $\mathbf{S}_3$ 。同样由于存在建模误差,且假设在一个控制周期内系统是线性的(事实上该假设完全成立,因为依据 FCS-MPC 算法原理,系统在一个控制周期内没有开关动作,此时变流器系统是线性的),则在 t_{k+1} 时刻由 $\mathbf{S}_3$ 作用下的被控量响应曲线的起点将从点 $\mathbf{x}_p(t_{k+1})$ 平移至 $\mathbf{x}(t_{k+1})$,依此可得出在 t_{k+1} 时刻由预测模型计算出的在 $\mathbf{S}_3$ 作用下的被控量 t_{k+2} 时刻预测值 $\mathbf{x}_p(t_{k+2})$ 。由图可知,此时 $\mathbf{x}_p(t_{k+2})$ 已远离参考值曲线,即在 t_{k+1} 时刻对三相逆变器实施 $\mathbf{S}_3$ 时,该控制量已失去了最优性。

综上所述,由于存在建模误差,使得遵循传统 FCS-MPC 算法选择的最优开关函数组合,在其实施

于三相逆变器时已丧失了最优性,导致系统被控量实际响应曲线与由 FCS-MPC 算法确定的最优响应曲线出现偏差,最终影响系统的控制性能。

2 具有建模误差补偿的三相逆变器 FCS-MPC 算法

由理论分析可知传统三相逆变器 FCS-MPC 算法由于未考虑建模误差,使得系统控制性能受到影响。而在经典预测控制理论中,为避免建模误差对系统控制性能的影响,采用反馈校正的机制实现对预测模型建模误差的闭环校正,因此基于反馈校正的思想^[1],本文提出了一种用前一时刻三相逆变器预测模型的建模误差补偿当前时刻预测模型输出值的具有建模误差补偿的 FCS-MPC,即 FCS-MPCMEC 算法,算法具体描述如下。

步骤 1 在 t_k 时刻采样 $\mathbf{x}(t_k)$,并已知 $\mathbf{S}(t_k)$ (t_{k-1} 时刻计算结果),由预测模型 $f_p\{\mathbf{x}(t_k), \mathbf{S}(t_k)\}$,计算出被控量 t_{k+1} 时刻预测值 $\mathbf{x}_p(t_{k+1})$ 。

步骤 2 已知 $\mathbf{x}(t_k)$ 、 $\mathbf{x}_p^c(t_k)$ (t_{k-1} 时刻补偿后的预测模型计算结果)、 $\mathbf{x}_p(t_{k+1})$ 及补偿系数 λ ,其中补偿系数 λ 的计算公式为:

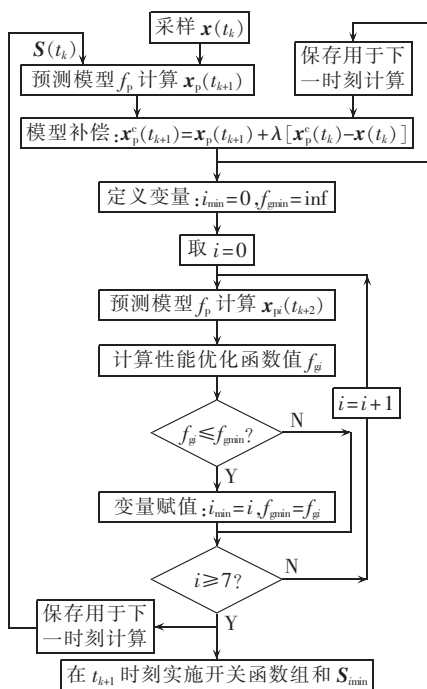
$$\lambda = \begin{cases} -0.5 & \mathbf{x}_p^c(t_k) \neq \mathbf{x}(t_k) \\ 0 & \mathbf{x}_p^c(t_k) = \mathbf{x}(t_k) \end{cases} \quad (6)$$

根据公式 $\mathbf{x}_p^c(t_{k+1}) = \mathbf{x}_p(t_{k+1}) + \lambda[\mathbf{x}_p^c(t_k) - \mathbf{x}(t_k)]$ 对 $\mathbf{x}_p(t_{k+1})$ 进行补偿,计算出 $\mathbf{x}_p^c(t_{k+1})$ 。

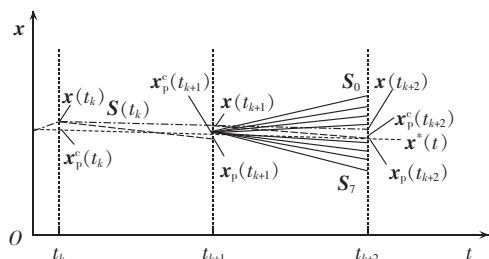
步骤 3 已知 $\mathbf{x}_p^c(t_{k+1})$ 及 $\mathbf{S}_i(t_{k+1})$ ($i=0,1,\dots,7$),由预测模型 $f_p\{\mathbf{x}_p^c(t_{k+1}), \mathbf{S}_i(t_{k+1})\}$,计算出 $\mathbf{x}_{pi}(t_{k+2})$ ($i=0,1,\dots,7$)。

步骤 4 求解性能优化函数 $f_g\{\mathbf{x}^*, \mathbf{x}_{pi}(t_{k+2}), \mathbf{S}_i(t_{k+1})\}$ ($i=0,1,\dots,7$),选择可使得 f_g 最小的 $i_{\min}$, $i_{\min} \in \{0,1,\dots,7\}$,将其对应的开关函数组合 $\mathbf{S}_{i_{\min}}$ 在 t_{k+1} 时刻实施于系统。

根据上述三相逆变器 FCS-MPCMEC 算法描述,给出了如图 5 所示的 FCS-MPCMEC 算法原理图,其中图 5(a)为算法流程图,图 5(b)为三相逆变器 FCS-MPCMEC 算法开关函数组合优选过程。在图 5(b)中,考察被控量 $\mathbf{x}(t)$ 对其参考值 $\mathbf{x}^*(t)$ 的跟踪问题。在 t_k 时刻,三相逆变器被控量测量值 $\mathbf{x}(t_k)$ 与 t_{k-1} 时刻计算出的经补偿后的预测值 $\mathbf{x}_p^c(t_k)$ 仍存在小偏差,而该时刻的最优开关函数组合 $\mathbf{S}(t_k)$ 从点 $\mathbf{x}(t_k)$ 作用于系统。依据 FCS-MPCMEC 算法,由预测模型计算出 t_{k+1} 时刻的预测值 $\mathbf{x}_p(t_{k+1})$,再由补偿算法计算出 t_{k+1} 时刻被控量预测值的补偿值 $\mathbf{x}_p^c(t_{k+1})$,并在 $\mathbf{x}_p^c(t_{k+1})$ 基础上计算在全部 8 个开关函数组合分别作用下的 t_{k+2} 时刻被控量的预测值,选择最接近参考值的预测值对应的开关函数组合在 t_{k+1} 时刻作用于系统。在



(a) 三相逆变器 FCS-MPCMEC 算法流程图



(b) 三相逆变器 FCS-MPCMEC 算法原理

图 5 三相逆变器 FCS-MPCMEC 算法

Fig.5 FCS-MPCMEC scheme for three-phase inverter

图 5(b)中 S_4 被确定为最优开关函数组合,并在 t_{k+1} 时刻作用于系统。

3 实验

为验证上述三相逆变器 FCS-MPCMEC 算法的可行性及有效性,本文按图 1 所示主电路结构构建了两电平三相电压型逆变器实验系统,系统参数为: $u_{dc}=520\text{ V}$, $L=2.4\text{ mH}$, $C=40\text{ }\mu\text{F}$ 。在由 DSP6711D 及 DSP2812 组成的双 DSP 平台上实现了如图 5 所示的三相逆变器 FCS-MPCMEC 算法,控制器的参数为: $T_s=33\text{ }\mu\text{s}$,且将三相逆变器模型式(1)的系统矩阵 A 中的参数 r_1 赋值为 0。即所构建的三相逆变器预测模型忽略了滤波电感及线路等效阻抗,同时也未考虑三相滤波电路电感、电容参数的变化,这是对三相逆变器的非精确建模。设定逆变器输出电压参考值为:频率 50 Hz、峰值 200 V 三相对称电压。为验证三相逆变器 FCS-MPCMEC 算法对三相逆变器在多种负载工况下的控制性能,本文进行了三相逆变器在空载、带阻感性负载(有功功率 $P=15\text{ kW}$,无功功率 $Q=$

2 kvar)、带非线性负载(三相二极管不控制整流桥外接 $47\text{ }\Omega$ 与 $470\text{ }\mu\text{F}$ 并联的阻容性负载)及负载投入($P=15\text{ kW}$, $Q=2\text{ kvar}$)等多种工况下的实验。同时为了对比分析,本文给出了不带补偿的三相逆变器 FCS-MPC 算法在上述负载工况下对三相逆变器控制的实验结果。

三相逆变器 FCS-MPCMEC 算法的实验波形如图 6 所示,作为对比的无补偿三相逆变器 FCS-MPC 算法的实验波形如图 7 所示。为便于分析及观察,本文仅给出三相逆变器 A 相输出电压以及输出电流波形。

对比图 6 及图 7 可知:在三相逆变器空载运行时,基于 FCS-MPCMEC 算法的三相逆变器输出电压 THD 值比基于 FCS-MPC 算法的三相逆变器输出电压 THD 值减小了接近一半;在三相逆变器带阻感性负载时,FCS-MPCMEC 算法对三相逆变器输出电压的控制效果也优于 FCS-MPC 算法,前者对应输出电压的 THD 值是后者对应输出电压 THD 值的一半。对于带非线性负载工况,算法对逆变器输出电压波

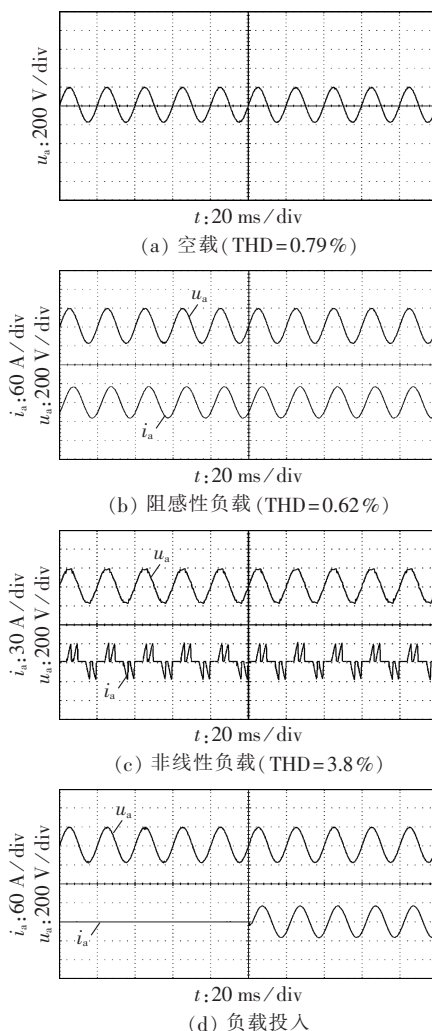


图 6 三相逆变器 FCS-MPCMEC 算法实验波形
Fig.6 Experimental waveforms of FCS-MPCMEC scheme for three-phase inverter

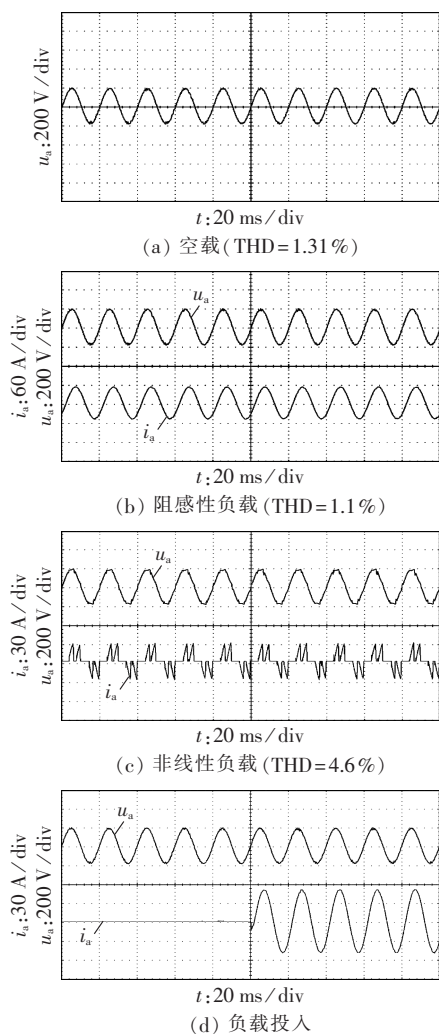


图 7 三相逆变器 FCS-MPC 算法实验波形

Fig.7 Experimental waveforms of FCS-MPC scheme for three-phase inverter

形质量的改善效果不显著,图 6(c)中在 FCS-MPCMEC 算法控制下三相逆变器输出电压 THD 值为 3.8%,而对应图 7(c)中由 FCS-MPC 算法控制下三相逆变器输出电压 THD 值为 4.6%,但图 6(c)中电流波形的毛刺明显比图 7(c)少。对于负载投入工况,FCS-MPCMEC 算法及 FCS-MPC 算法具有相似的动态响应速度,但基于稳态 FCS-MPCMEC 算法的逆变器输出电压波形质量比 FCS-MPC 算法好。

由此可知,FCS-MPCMEC 算法改善了三相逆变器输出电压的波形质量,减少了输出电压的谐波含量,同时继承了 FCS-MPC 算法动态响应快的优点。这表明本文设计的 FCS-MPCMEC 算法对三相逆变器的控制是有效的和可行的,同时表明对于 DSP 平台,本文给出的 FCS-MPCMEC 是完全可以实现的。

4 结论

预测模型、滚动优化及反馈校正预测控制的 3 个基本要素,上述三要素的紧密配合成就了预测控

制的自适应性及鲁棒性等诸多优势。本文首先分析了传统三相逆变器 FCS-MPC 算法的原理,指出该算法缺乏对系统建模误差的考虑,并设计了一种采用三相逆变器实际输出量反馈校正预测模型输出值的 FCS-MPCMEC 算法,给出了该算法的原理及程序流程图,最后通过对比实验验证了该算法的有效性及可行性。

参考文献:

- [1] 席裕庚. 预测控制[M]. 北京:国防工业出版社,1993:1-9.
- [2] 郭自勇,周有庆,郭利敏,等. 一种简单的预测电流控制新方法[J]. 电力自动化设备,2007,27(7):29-32.
GUO Ziyong,ZHOU Youqing,GUO Limin,et al. Simple method of predictive current control[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(7):29-32.
- [3] 杨俊华,冯小峰,吴捷,等. 基于广义预测的矩阵变换器电流闭环控制[J]. 电力自动化设备,2010,30(9):28-32.
YANG Junhua,FENG Xiaofeng,WU Jie,et al. GPC-based close-loop current control for matrix converter[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(9):28-32.
- [4] MARIETHOZ S,MORARI M. Explicit model-predictive control of a PWM inverter with an LCL filter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2009,56(2):389-399.
- [5] KOURO S,CORTES P,VARGAS R,et al. Model predictive control-a simple and powerful method to control power converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2009,56(6):1826-1838.
- [6] GEYER T,PAPAFOTIOU 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.
- [7] PAPAFOTIOU G,KLEY J,PA K G,et al. Model predictive direct torque control-part II:implementation and experimental evaluation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2009,56(6):1906-1915.
- [8] RODRIGUEZ J,PONTT J,SILVA C,et al. Predictive control of three-phase inverter[J]. Electronics Letters,2004,40(9):561-562.
- [9] CORTES P,ORTIZ G,YUZ J I,et al. Model predictive control of an inverter with output LC filter for UPS applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2009,56(6):1875-1883.
- [10] CORTES P,RODRIGUEZ J,SILVA C,et al. Delay compensation in model predictive current control of a three-phase inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2012,59(2):1323-1325.
- [11] PREINDL M,SCHALTZ E,THOGERSEN P. Switching frequency reduction using model predictive direct current control for high power voltage source inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2011,58(7):2826-2835.
- [12] 沈坤,章兢,王坚. 一种多步预测的变流器有限控制集模型预测控制算法[J]. 中国电机工程学报,2012,32(33):37-44.
SHEN Kun,ZHANG Jing,WANG Jian. A model predictive control scheme of multi-step prediction finite control set for converters[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(33):37-44.
- [13] CORTES P,KOURO S,ROCCA B L,et al. Guidelines for weighting factors design in model predictive control of power converters and drives[C]//2009 IEEE International Conference on Indus-

trial Technology. Gippsland, Australia; [s.n.], 2009: 1-7.

[14] ROJAS C A, RODRIGUEZ J, VILLARROEL F, et al. Predictive torque and flux control without weighting factors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(2): 681-690.

[15] VARGAS R, CORTES P, AMMANN U, et al. Model predictive control of a three-phase neutral-point-clamped inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(5): 2697-2705.

[16] 沈坤, 章兢, 王坚, 等. 三相逆变器并联系统的无互连线预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(6): 46-53.

SHEN Kun, ZHANG Jing, WANG Jian, et al. Wireless predictive control of parallel three-phase inverter systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(6): 46-53.

作者简介:
沈 坤(1984-), 男, 湖南浏阳人, 博士研究生, 研究方向为变流器系统预测控制算法 (**E-mail**: shenkun84@163.com);
章 兢(1957-), 男, 湖南湘潭人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 研究方向为复杂系统工业控制。

Model predictive control scheme with modeling error compensation for three-phase inverter

SHEN Kun, ZHANG Jing

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Because the traditional FCS-MPC(Finite Control Set Model Predictive Control) scheme for three-phase inverter neglects the influence of modeling errors on system control, the selected optimal control action may not be optimal. An FCS-MPCMEC(Finite Control Set Model Predictive Control with Modeling Error Compensation) scheme is proposed, which realizes the online compensation of predictive model by modifying its output for current moment according to its modeling error of last moment. The control performance of three-phase inverter is compared between FCS-MPC and FCS-MPCMEC schemes for different operating conditions: without load, with resistive-inductive load, with nonlinear load, and load switching-on. The experimental results demonstrate that, the control performance of FCS-MPCMEC scheme is better than that of traditional FCS-MPC scheme under all operating conditions.

Key words: model predictive control; electric inverters; compensation; models; error analysis

(上接第 85 页 continued from page 85)

Power battery charging system based on current SVPWM

LIU Heping, ZENG Qicai, GUO Qiang, REN Fa

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The main circuit of three-phase current-source PWM rectifier is designed for the charging of power battery according to its three-stage charging pattern. Indirect current control strategy based on current SVPWM(Space Vector Pulse Width Modulation) and PI controller are adopted to achieve the unity power factor at grid side and the stable current output at DC side. The algorithm of SVPWM in three-phase stationary frame is applied to avoid the coordinate transform of traditional current space vector modulation, based on which, the TMS320F2808-based control system of current source PWM charger is designed. The design of PI controller, three-phase voltage conditioning circuit and two/three logic transform is introduced in detail. Without the detection of grid current, the charging set has excellent steady-state and dynamic performance, providing the charging current with low ripple in wider range. Results of computer simulations and experiments demonstrate the feasibility of the introduced design.

Key words: electric rectifiers; power battery; electric current control; SVPWM; unity power factor