

# 逆变器模型预测采样时间与误差关系仿真分析\*

吴靖南<sup>1</sup>, 吴奕锴<sup>1</sup>, 康文<sup>2</sup>

(1. 厦门大学 航空航天学院, 厦门 361000; 2. 湖南省电力公司检修公司, 长沙 410004)

**摘要:** 模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)是电压型逆变器(Voltage Source Inverter, VSI)电流跟随控制装置定频调制的典型方法,得到了广泛的应用。论文使用统计的方法研究MPC的采样时间与跟踪误差(方差)的函数关系。该函数关系是研究和解决逆变器切换优化问题的基础。仿真结果可得出采样时间与跟踪误差呈线性关系的结论。

**关键词:** 误差-采样率关系; 模型预测控制; 电流跟踪; 电压型逆变器

中图分类号: TM464

文献标识码: B

文章编号: 1001-1390(2017)02-0105-04

## Simulation analysis of the relationship between the sampling time and tracking error of the model predictive control in inverter

Wu Jingnan<sup>1</sup>, Wu Yikai<sup>1</sup>, Kang Wen<sup>2</sup>

(1. School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen 361000, China.

2. State Grid Hunan Electric Power Corporation Maintenance Company, Changsha 410004, China)

**Abstract:** Model Predictive Control (MPC) is a typical method of voltage source inverter (VSI), which is widely used to control the constant frequency modulation. In this paper, we use statistical methods to study the function relationship between the sampling time of MPC and the tracking error (variance). The function relationship is the basis of research and solves the optimization problem of inverter switching. The simulation results show that the sampling time and tracking error are linear relationship.

**Keywords:** error-sampling relationship, model predictive control, current following, voltage source inverter

### 0 引言

MPC在电力电子研究中得到了广泛应用。在哈尔滨工业大学“仿人机器人感知控制高性能单元和系统—高速高精一体化关节”的课题中,对永磁同步电机数字控制系统的电流预测控制进行了研究,提出了一种增强鲁棒性的预测控制算法<sup>[1]</sup>。在哈尔滨工业大学的“单相全桥软开关功率因数校正变换器的预测控制研究”中,使用预测电流控制分析预测了boost型变换器的谷值电流,及模型误差对电流控制的影响,从而给出了一种相应的校正方法<sup>[2]</sup>。在哈尔滨工业大学“改进型预测电流控制算法”中,利用根轨迹法提出了一种改进型预测电流控制算法,并用仿真证明了其正确性与可行性<sup>[3]</sup>。在华北电力大

学“基于模型电流预测控制的光伏电站低电压穿越控制方法”的研究中,提出了一种基于模型电流预测控制的光伏并网逆变器低电压穿越控制方法,并用仿真验证了其有效性<sup>[4]</sup>。在华北电力大学“电网不对称故障下光伏逆变器预测控制方法”的研究中,提出了电网不对称故障下基于模型预测电流控制的光伏并网逆变器控制策略,用仿真实验验证了逆变器的动稳态特性<sup>[5]</sup>。

逆变器中开关管的切换次数对逆变效果的影响亦是时下热门的话题。在湖南大学“N级逆变器空间矢量调制的开关频率优化算法”研究中,为了减少开关损耗提出了一种对逆变器开关频率进行优化的算法<sup>[6]</sup>。湖南大学“用特征网络优化多电平逆变器开关频率的方法”的研究中,为了得到最小的开关次数,提出了基于特征网络的特性实现多电平逆变器开关的空间矢量调制方法<sup>[7]</sup>。以及在“用特征网络

\* 基金项目: 国网湖南省电力公司科技项目(5216A31350D6)

优化开关频率的 SVPWM 控制方法”的研究中,给出了具体根据参考电压调制系数变化的切换次数计算方法<sup>[8]</sup>。在中国矿业大学“H 桥型多电平逆变器 PWM 调制策略及控制系统研究”中,介绍了一种易于向多电平逆变器扩展的线电压坐标系通用 SVPWM 算法<sup>[9]</sup>。

在本研究中,着重从控制器采样时间的角度,来探讨采样时间与定频调制的单相电压型逆变器电流跟随控制的误差之间的关系,期望通过基于一定数量的采样点的统计数据的相关数值分析得到采样时间  $T_s$  与电流跟随误差方差  $std$  (Standard Deviation) 之间的函数关系。为后续的基于 VSI 的 MPC 跟随优化问题提供借鉴。

本文将首先介绍基于 VSI 的 MPC 控制理论及方法,并介绍仿真实验的思路构想;之后介绍具体 MATLAB/Simulink/Stateflow 仿真建模过程;而后对相关数值改变对实验结果的影响制作统计图表;最后通过函数拟合得出电流跟随误差方差与采样时间  $T_s$  之间的函数关系。

### 1 原理与设计

逆变器是把直流电能转变成交流电能的变流器,它由逆变桥、控制逻辑和滤波电路组成。按照逆变器的电源类型的不同,可将逆变器分为电压型逆变器 VSI 和电流型逆变器 CSI。电压型逆变器 VSI 为直流电压近于恒定,输出电流为交变波形;而电流型逆变器 CSI 为直流电流近于恒定,输出电压为交变波形。在回路的构成上,电压型逆变器 VSI 需有反并二极管,且直流电源并联大电容,或是低阻抗电源;而电流型逆变器 CSI 在直流电源端需串联大电感以确保电源波形足够平滑。

模型预测控制 MPC 是一类特殊的控制,是一种基于模型的闭环优化控制策略。在 José Rodríguez, Jorge Pontt, César A. Silva 等人的论文 Predictive Current Control of a Voltage Source Inverter<sup>[10]</sup> 中提出了模型预测控制理论,理论使用一个由逆变器的离散时间模型系统来预测不同的电压向量未来的电流值,从而选择误差最小的一组,控制相关的开关管输出从而达到跟踪参考电流的效果。如图 1 所示的单相电流预测跟踪模型,扣除上下桥臂同时导通的非正常情况,在模型中共有四种可能的开关状态,对应的输出逆变电压如表 1 所示。在该理论的工作过程中,代价函数评估了相应的下一采样时间周期内的误差,考虑了延迟现象及脉宽调制的情况后从而给出

相应的控制指令。相应的结果也表明,比起传统的解决方法,模型预测控制在解决电流波形跟随中易于实现。

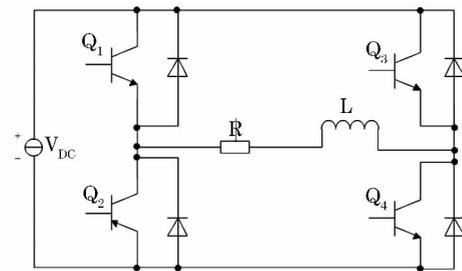


图 1 逆变全桥模型

Fig. 1 Model of inverter full bridge

表 1 逆变全桥开关管不同状态对应电压输出表

Tab. 1 Voltage output table of different states of inverter full bridge switch tube

	$U_{AB}$
$Q_1、Q_4$ 开	$+V_{DC}$
$Q_1、Q_3$ 开	0
$Q_2、Q_3$ 开	$-V_{DC}$
$Q_2、Q_4$ 开	0

基于 VSI 的 MPC 控制,是对输出波形进行采样与参考电流波形进行比较控制,通过计算得出实时的最佳调控策略,进而控制相关的开关管输出,以实现闭环反馈的作用的一种电流跟随控制的典型方法。在本课题中,计划通过改变控制器对输出电流采样的采样时间,来观测对应电流跟随误差的变化情况。通过对统计数据分析及计算得出解析的函数关系。

### 2 模型仿真及分析

#### 2.1 预测模型的构建

通过 MATLAB 自带的 Simulink 仿真模块构建模型。从功能上看,预测模型分为三部分,分别是:由四个开关管构成的逆变全桥、基于有限状态机(Stateflow)的控制模块、相应的电流输出及参考电流的输入。在本研究中,开关管构成的逆变全桥以四个全控型器件绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)为核心构成,相比于金属-氧化物半导体场效应晶体管(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor, MOSFET)而言,IGBT 具有更好的耐压性能,且能适应 10 kHz 级别的开关频率,故本实验选取 IGBT 作为理想的模型进行仿真。实际生产中,在功率要求不高的前提下,可用 MOSFET 以契合高

频率的开断要求,具有更广泛的应用背景。在逆变全桥的构建中,全控型开关管的控制端连接虚拟控制器的输出端,开关管的被控端连接逆变器的直流电源。

基于有限状态机的控制模块,通过获取参考电流的波形并与现时电流进行比对,通过空间电压矢量控制得出最佳的开关管状态,并确定相应输出以使实际逆变达到控制器预期控制效果,使电流尽可能跟踪上参考波形。相应的电流输出即为逆变全桥的输出电流,并通过系统采样的方法将实时数据返回有限状态机以实现闭环反馈控制。同样的,有限控制机也以相同的采样频率对参考电流进行采样作为比对的参照。用VISIO绘制的单相电流跟随控制模型如图2所示。

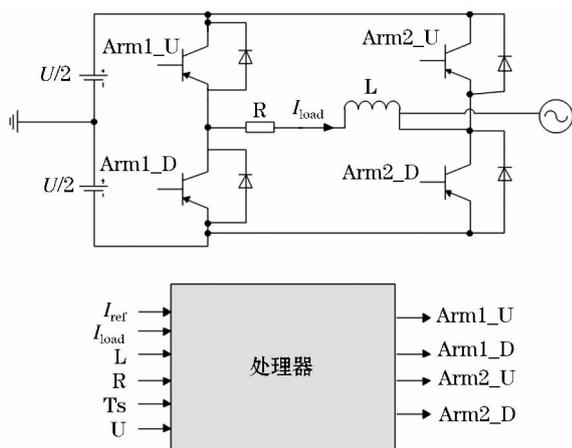


图2 单相电流跟随控制模型

Fig. 2 Single phase current following control model

### 2.2 改变采样时间对跟踪误差的影响

对系统的采样时间进行改变。需要同时对系统的各项设置,如参考电流的采样时间及输出电流反馈的采样时间同时进行更改。通过修改系统的采样时间,改变参考电流采样间隔,并将所得到的数据发送到处理器,处理器根据模型预测控制方法MPC来得到相应的跟踪电流,同时改变输出电流反馈的采样时间,使两者的采样时间相同,通过对比输出电流和计算得到的跟踪电流的误差,即可得到不同的电流跟踪效果。在本例中,通过对 $10\ \mu\text{s} \sim 100\ \mu\text{s}$ 采样时间节点之间每增加 $10\ \mu\text{s}$ 做一次采样,并对相关采样时间的跟踪效果用MATLAB自带的求方差函数进行量化,在 $0.1\ \text{s}$ 的仿真时间内对每个采样时间对应的总谐波失真误差方差进行统计,可得到相关的统计数据。进一步的,对统计数据进行拟合分析可以得到二者的近似线性关系,如图3所示,拟合曲线即

图中实线,拟合的直线斜率为 $2\ 244.198\ 07$ ,截距为 $-6.903\ 51\text{E}-4$ ,自变量单位为秒,应变量为安培。拟合相关系数 $R^2 = 0.999\ 65$ ,具有较大的相关性。拟合直线的残差平方和为 $1.076\ 72\text{E}-5$ ,即拟合的直线可以较好地反映两个相关变量的函数关系。从量化的角度可以得出总谐波失真的误差方差 $std$ 与采样时间 $T_s$ 之间的关系为

$$std(A) = 2244.19807 \times T_s(s) - 6.90351\text{E} - 4 \quad (1)$$

在公式(1)中, $T_s$ 为微秒( $\mu\text{s}$ )级, $\text{E}-5$ 乘以 $2\ 244.198\ 07$ 后较截距 $-6.903\ 51\text{E}-4$ 高两个数量级,因此截距 $-6.903\ 51\text{E}-4$ 可忽略,方程近似为:

$$std(A) = 2\ 244.198\ 07 \times T_s(s) \quad (2)$$

公式(2)是纯线性。考虑到周期与频率互为倒数,跟踪误差的方差和采样频率 $f$ 的关系可抽象为:

$$std \times f = C \quad (C \text{ 为常数}) \quad (3)$$

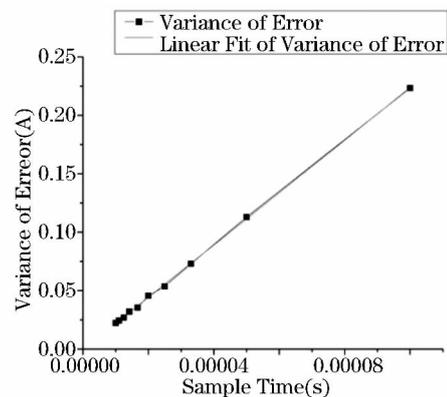


图3 在 $10\ \mu\text{s} \sim 100\ \mu\text{s}$ 变化范围内采样时间与总谐波失真误差关系及拟合直线

Fig. 3 Relationship between sampling time and total harmonic distortion error and the fitting line in the range of  $10\ \mu\text{s} \sim 100\ \mu\text{s}$

### 3 结束语

本课题的仿真实验主要对基于模型预测控制的电压型逆变电流跟随控制进行了仿真分析,改变系统的采样时间及电压的量化间隔并分析其与总谐波失真的关系。仿真实验表明,当系统的采样时间增大时,相应的总谐波失真也会增大,通过统计数据对 $10\ \mu\text{s} \sim 100\ \mu\text{s}$ 采样时间的误差方差进行分析与线性拟合,得出采样时间在 $10\ \mu\text{s} \sim 100\ \mu\text{s}$ 之间的与误差方差之间的量化关系为 $std \times f = C$ ( $C$ 为常数)。

#### 参考文献

- [1] 王宏佳. 微小型高性能永磁交流伺服系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012  
Wang Hongjia. Research on minitype high performance PM AC servo

system[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

[2] 苗震宇. 单相全桥软开关功率因数校正变换器的预测控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012  
Miao Zhenyu. Research on predictive control of single phase full bridge soft switched PFC converter[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012.

[3] 李春鹏, 贾洪奇, 孙绍华, 等. 改进型预测电流控制算法[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(3): 61-68.  
Li Chunpeng, Ben Hongqi, Sun Shaohua, et al. Research of improved predictive current control algorithm[J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(3): 61-68.

[4] 贾利虎, 朱永强, 孙小燕, 等. 基于模型电流预测控制的光伏电站低电压穿越控制方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 68-74  
Jia Lihu, Zhu Yongqiang, Sun Xiaoyan, Wang et al. Low voltage ride through control method for photovoltaic power station based on model current predictive control [J]. Automation of Electric Power System, 2015, 39(7): 68-74

[5] 孙小燕, 朱永强, 贾利虎, 等. 电网不对称故障下光伏逆变器预测控制方法[J]. 电力系统自动化. 2015, 39(13): 81-86.  
Sun Xiaoyan, Zhu Yongqiang, Jia Lihu, et al. Predictive control method for photovoltaic inverter under unbalanced grid faults[J]. Automation of Electric Power System, 2015, 39(13): 81-86.

[6] 王翠, 孟志强. N级逆变器空间矢量调制的开关频率优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(36): 46-52.

[7] 王翠, 孟志强, 李泽军. 用特征网络优化多电平逆变器开关频率的方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2010, 37(12): 49-54.

[8] 王翠, 孟志强. 用特征网络优化开关频率的SVPWM控制方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 49-55.

[9] 李高峰. H桥型多电平逆变器PWM调制策略及控制系统研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.

[10] José Rodríguez, Jorge Pontt, César A. Silva, et al. Predictive Current Control of a Voltage Source Inverter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(1): 495-503.

作者简介:



吴靖南(1993—),男,本科生,研究方向为电力电子。Email: 332751450@qq.com

吴奕锴(1994—)男,本科生,研究方向为电力电子。

Email: 781434768@qq.com

康文(1982—)男,本科,工程师,主要从事高压直流输电运检技术管理工作。Email: K5249@163.com

收稿日期: 2015-08-14; 修回日期: 2015-12-18

(刘爽 编发)

### (上接第104页)

[11] E. Foruzan, S. D. Scott and J. Lin, A comparative study of different machine learning methods for electricity prices forecasting of an electricity market [C]// North American Power Symposium (NAPS), Charlotte, NC, IEEE 2015: 1-6.

[12] Z. h. He, J. l. Yu and Lu Fang, Notice of retraction destructed multilateral matchmaking transaction method for power consumers and power generation corporations [C]// Power Engineering and Automation Conference (PEAM), Wuhan, IEEE 2011: 128-134.

[13] 李沛盈. 电力市场撮合交易模型的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2008.

[14] 姚珺玉, 刘俊勇, 刘友波, 等. 计及时滞指标综合灵敏度的用户电价响应模式划分方法[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 30-36.

[15] V. Borokhov, On the properties of nodal price response matrix in electricity markets [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3286-3294.

作者简介:



胥威汀(1985—)男,博士,高级工程师,从事电网规划、能源战略和电力市场研究。  
Email: maillott@163.com

李婷(1979—)女,硕士,高级工程师,主要从事电网规划、智能配电网方面的研究工作。

刘友波(1983—)男,博士,讲师,主要研究方向为电力大数据、电力市场、电力系统经济运行等。

阎晓卿(1986—)男,博士,高级工程师,从事能源战略和能源电力规划研究。

刘莹(1985—)女,硕士,工程师,主要从事电网规划和电网设计。

朱觅(1987—)女,硕士,工程师,主要从事电网规划和电力市场研究。

收稿日期: 2016-10-25; 修回日期: 2016-12-07

(田春雨 编发)