

基于重复控制和预测控制的逆变器控制特性分析

丁银江, 邓 嘉, 马 皓*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为了改善整流性负载下逆变器的输出电压畸变, 首先提出了重复控制和电流预测控制相结合的控制策略, 并分别对重复控制和电流预测控制进行了稳定性分析, 然后给出了重复控制器和预测控制器的控制参数设计方法, 最后在实验平台上对控制特性进行了验证。实验结果表明, 重复控制能有效抑制整流性负载下的电压波形畸变, 电流预测控制能提高系统的动态性能。

关键词: 重复控制; 预测控制; 逆变器; 整流性负载

中图分类号: TM464

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2011)07-0896-05

Analysis of inverter controller based on repetitive control and predictive control

DING Yin-jiang, DENG Jia, MA Hao

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to improve the output voltage distortion of the inverter under rectifier loads, a control method which combines the repetitive control theory and the predictive control theory was proposed. Then the analysis of stability for repetitive control and the predictive control was presented, and the design method of the control parameters for repetitive control and predictive control was also given. The feature of repetitive control and predictive control was analyzed based on the experiment. The experimental results show that repetitive control can reduce the voltage distortion under rectifier loads effectively, and the dynamic performance of the system can be enhanced by means of current predictive control.

Key words: repetitive control; predictive control; inverter; rectifier load

0 引 言

目前对于传统逆变电源的研究已经比较成熟, 但多是在线性负载下, 对非线性负载下逆变电源特性的研究较少。这与目前各种非线性负载(特别是电力电子设备)的广泛应用是不相称的。因此针对非线性负载条件下逆变电源输出特性的研究是非常有意义的。传统逆变电源一般采用电压和电流双环 PI 控制。PI 控制是最经典的控制方法, 其实现简单、性能良好、可靠性高。但是 PI 控制在逆变系统中却无法实现零静差特性^[1]。在非线性的负载下, PI 控制逆变器的输出电压会出现较大畸变。这是由于整流性负载下, 谐波电流在逆变器输出

阻抗上产生较大压降。通过采用合理的控制策略, 减小输出阻抗, 可以有效地克服非线性负载的影响^[2]。

重复控制在抑制周期性干扰信号上有优势, 在非线性的负载下具有良好的稳态性能, 但是重复控制的动态性能较差^[3-4]。本研究针对整流性负载下逆变器输出电压的畸变问题, 提出了将重复控制和电流预测控制相结合的控制策略, 并分析了这种控制策略下的逆变器的输出特性。

1 控制策略分析

1.1 控制策略的提出

重复控制是一种基于内模原理的逆变器控制方

案。所谓内模原理,是指外部信号的动力学模型包含在稳定的闭环控制器内以构成高精度反馈控制系统的一种设计原理。这样的系统能够无静差地跟随输入信号。重复控制对于消除非线性负载等周期性干扰引起的波形畸变有非常明显的效果,可以在稳态条件下实现对给定信号完美的跟踪。但是由于延迟因子的存在,在干扰出现的一个基波周期内,重复控制系统对于干扰不产生任何调节作用,重复控制的动态性能较差^[5-7]。

电流预测控制的原理是通过计算电感电流在一定时间内能够跟踪参考值而所需的电感两端电压,从而得到所需的占空比。相对于PI控制,它的最大优点是动态性能好^[8-9]。

采用单一的控制策略,无法同时满足输出的动、静特性。针对单一控制方法的局限性,本研究对重复控制器加入了一个电流预测内环,用来改善系统的动态性能。为了进一步改善系统的动态性能,本研究将重复控制和一个比例环节并联使用。在负载跳变时,可以利用比例环节的快速性来改善重复控制的动态特性。

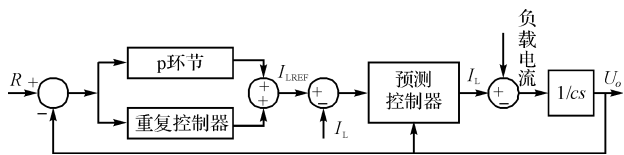


图1 基于重复控制和预测控制的双环控制框图

本研究采用的总体控制策略如图1所示,其中外环为电压比例环节和重复控制器并联,内环为电流预测控制。

1.2 重复控制稳定性分析

重复控制应用在工程中时,需要对内模进行改造^[10]。改进型内模如图2所示,即采用 Qz^{-N} 代替 z^{-N} 。 Q 可以为小于1的常数,或者具有低通性质的函数。

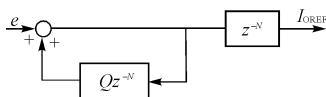


图2 改进型的重复控制内模框图

在重复控制系统中,仅仅依靠受控系统 $P(z)$ 很难满足稳定性等约束条件,需要引入补偿器 $S(z)$ 来改善系统的性能,如图3所示。补偿器 $S(z)$ 的主要作用是对 $P(z)$ 的幅频和相频特性进行补偿,它决定了整个重复控制系统的稳定性、误差收敛速度和稳态误差等性能。

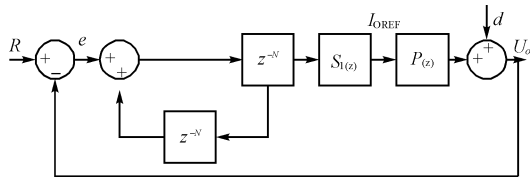


图3 加入补偿器后的重复控制系统框图

完整的重复控制器的传递函数为:

$$\frac{i_{OREF}(z)}{e(z)} = \frac{z^{-N}S(z)}{1 - Q(z)z^{-N}} \tag{1}$$

重复控制系统的特征方程为:

$$1 - z^{-N}(Q - SP) = 0 \tag{2}$$

离散系统稳定的充要条件:系统闭环脉冲传递函数的所有极点均位于z平面上的单位圆内。将方程变形为:

$$z^N = Q - SP \tag{3}$$

设 z_i 为特征方程的根,当所有极点均需在单位圆内,即 $|z_i| < 1$,必有 $|z_i|^N < 1$,即 $|Q - SP| < 1$ 。所以系统的稳定条件转化为:当 $|Q - SP| < 1$ 时,系统必然稳定。为方便讨论,定义:

$$H(z) = Q(z) - S(z)P(z) \tag{4}$$

则重复控制系统的稳定条件转化为 $|H(z)| < 1$ 。

稳定性条件的几何描述如图4所示,更加直观地描述了稳定性条件^[11],本研究将 Q, SP 以频率响应的形式画在复平面上,再以 Q 所在的位置为圆心画一个单位圆。当 $S(z)P(z)$ 位于单位圆内的时候,系统稳定,此时 $|Q - SP| < 1$ 成立。当 $Q = 1$ 时,如图4(a)所示,单位圆的圆心位于(1,0),可以通过设计补偿器 $S = P^{-1}$ 的形式使 SP 位于单位圆内,并且 SP 的终点位于(1,0),此时 $H(z) = 0$,系统具有最好的稳定性。但是很难建立系统高频时的有效模型,当某一高频信号的相角在 $(-90, 90)$ 之外时,此时 SP 就在单位圆外,系统失去稳定性。所以 Q 需要取略小于1的正数来保证系统的稳定性,如图4(b)所示,相当于单位圆左移了一段距离,此时高频信号的相角即使超出了 $(-90, 90)$,只要设计出能提供足够高频衰减特性的 S ,使 SP 的增益足够小,此时 SP 仍可位于单位圆内,系统依然稳定。可以看出,相对于传统内模,改进型内模提高了系统稳定性。

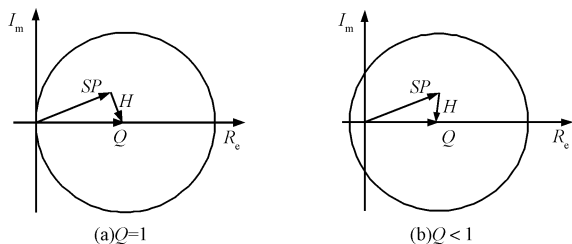


图4 稳定性条件的几何描述

1.3 预测控制的稳定性分析

模型和电路参数不准确是影响预测控制器性能的两个主要因素。本研究主要讨论由于电路参数不准确引起的系统稳定问题。有多个参数可能造成电路参数的不准确,如反馈回路增益、直流母线电压和滤波电感值 L 等。本研究只讨论滤波电感 L 引起的系统稳定性问题,其他原因引起的稳定性问题分析方法与其相同^[12]。

电流预测控制系统的状态空间方程如下:

$$\begin{bmatrix} I(k) \\ \bar{V}_{oc}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \frac{T}{L} \\ -\frac{L_m}{T} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I(k-1) \\ \bar{V}_{oc}(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{L} & 0 \\ -2 & 4 & 0 & \frac{L_m}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E(k-2) \\ E(k-1) \\ E(k) \\ I_{OREF} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: \bar{V}_{oc} —一个开关周期内没有经过 LC 滤波的平均输出电压; E —逆变器平均输出电压; I —电感电流; L_m — L 在 MCU 程序中电感模型的电感值。

系统的特征方程为:

$$z^2 - 1 + \frac{L_m}{L} = 0 \quad (6)$$

从式(6)可得系统的闭环极点为:

$$p_{1,2} = \pm \sqrt{\Delta L} \quad (7)$$

其中, $\Delta L = 1 - L_m/L$, 表示滤波电感值的相对误差, ΔL 影响系统闭环极点的位置^[13], 所以滤波电感参数不准确将会影响系统的暂态响应和稳定性。在 z 域中系统的闭环极点为 $p_{1,2} = \pm \sqrt{\Delta L}$, 则当 ΔL 为正时, 一个极点在正实轴上, 另一个极点在负实轴上; 当 ΔL 为负时, 一个极点在正虚轴上, 另一个极点在负虚轴上。系统闭环极点和 ΔL 之间的关系如图 5 所示。

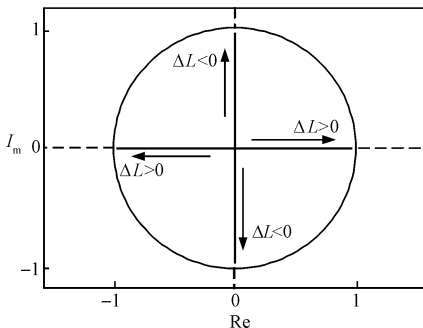


图 5 闭环极点位置与 ΔL 关系图

从图 5 看出, 当 $L_m \geq 2L$ 时系统的极点位于单位圆外面, 系统将会不稳定。预测控制器的稳定条件为:

$$-1 \leq \Delta L \leq 1 \quad (8)$$

系统稳定时, 模型中的电感值与真实电感值的关系为:

$$0 \leq L_m \leq 2L \quad (9)$$

2 控制器参数设计

2.1 主电路参数

本研究设计了一套基于重复控制和电流预测控制的逆变器电路。逆变器主电路采用全桥拓扑, 输出正弦电压为 50 Hz/220 V, 输入直流母线电压为 390 V。开关频率选为 20 kHz, 输出 LC 滤波器的 L 选为 4.2 mH, C 选为 5 μ F。测得电感的寄生电阻为 2.75 Ω 。

2.2 重复控制器参数设计

2.2.1 $P(z)$ 的设计

由于逆变器在空载时阻尼最小, 谐振峰值最高, 本研究考虑最坏的情况, $P(s)$ 选取为逆变器空载传递函数:

$$P(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{LCs^2 + (\frac{L}{R} + rC)s + 1 + \frac{r}{R}}$$

当 $R \rightarrow \infty$ 时, 有:

$$P(s) = \frac{1}{LCs^2 + rCs + 1} \quad (10)$$

将 $L = 4.2$ mH, $C = 5.0$ μ F, $r_L = 2.75$ Ω 参数代入上式并离散化后得:

$$P(z) = \frac{0.2197z + 0.2151}{z^2 - 1.505z + 0.9353} \quad (11)$$

2.2.2 重复内模的设计

该系统给定正弦信号的频率为 50 Hz, 开关频率为 20 kHz, 采样频率为 5 kHz, 则 $N = 100$ 。工程上 Q 通常取为 0.95, 实验中为使控制算法便于实验, Q 也取为常数。

2.2.3 补偿器 $S(z)$ 的设计

要实现较好的控制特性, SP 应具有零增益和零相移。为了在 $P(z)$ 谐振频率处得到较大的增益衰减, $S(z)$ 的截止频率需要设得非常低, 这样会在 $S(z)$ 的转折频率和 $P(z)$ 的谐振频率之间引入较大的相位滞后。为了改善相位滞后, 本研究希望引入一种新的滤波器, 它应对中频段增益有很强的衰减, 对其他频段增益尤其低频段影响较小。梳状滤波器满足上述特点。本研究中采样频率为 5 kHz, 谐振频率为 1 079 Hz, 则 $n \approx$

2.25,取 $n=2$,此时梳状滤波器的表达式为:

$$S_n(z) = \frac{z^2 + 2 + z^{-2}}{4} \quad (12)$$

二阶滤波器 $S_f(s)$ 取为:

$$S_f(s) = \frac{1}{3 \times 10^{-8} s^2 + 3.5 \times 10^{-4} s + 1} \quad (13)$$

离散化后得:

$$S_f(z) = \frac{0.3193z + 0.1462}{z^2 - 0.6315z + 0.09697} \quad (14)$$

最后,补偿器 $S(z)$ 设计为:

$$S(z) = z^3 S_n(z) S_f(z) \quad (15)$$

2.2.4 预测控制器的设计

在 kT 时刻求得 kT 到 $(k+1)T$ 时刻的 $\bar{V}_{oc}(k)$ 为:

$$\bar{V}_{oc}(k) = -\bar{V}_{oc}(k-1) + 4E(k-1) - 2E(k-2) + L \frac{I_{OREF} - I(k-1)}{T} \quad (16)$$

由上式可以看出,本研究估计输出电压 $E(k)$ 和电感电流 $I(k)$ 后,预测控制器的算法中没有其他需要设计的参数。但是在 MCU 中运算时,输出电压和电感电流要采样到 MCU 中,各个变量幅值发生了变化,所以式(16)要作归一化处理:

$$m(k) = -m(k-1) + \frac{1}{f_v} [4E(k-1) - 2E(k-2)] + \frac{L}{Tf_i} [I_{OREF} - I(k-1)] \quad (17)$$

式中: f_v —输出电压调理电路的衰减比, f_i —电感电流调理电路的衰减比。

3 实验结果及分析比较

整流性负载下,PI 双环、重复控制逆变器输出电压/电流波形分别如图 6(a)、(b)所示。直流母线电压为 390 V,整流桥输出电容为 900 μ F,电阻为 1 k Ω 。

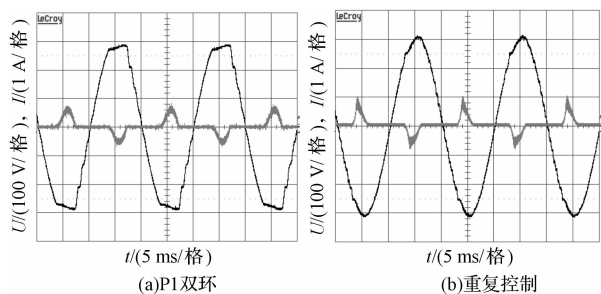


图6 PI 双环、重复控制逆变器输出电压、电流波形

由图6可以看出,由于PI控制的局限性,无法完全消除波形畸变。采用重复控制后可大大减小输出波形的畸变,和理论分析一致。

负载切换时的输出电压波形(500 Ω)如图7所示。从图7可以看出在负载突变时输出电压有明显的跳变。

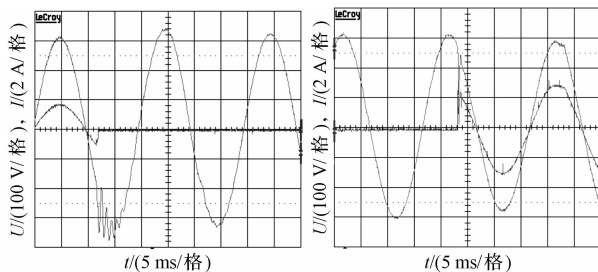


图7 重复控制逆变器负载切换输出电压、电流波形

本研究加入了电流预测控制内环的负载切换时的输出电压波形(500 Ω)如图8所示。从图8可以看出,在负载突变时输出电压的突变减小了。

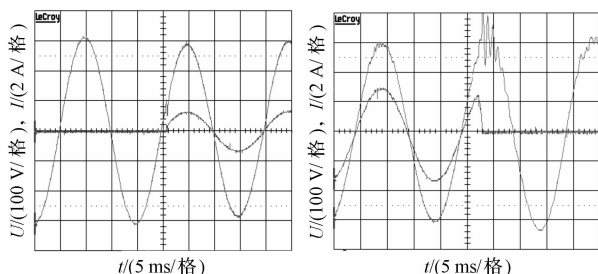


图8 预测控制内环下的重复控制逆变器负载切换输出电压、电流波形

实验结果分析:采用PI双环控制的逆变器在带整流性负载时,输出电压有较大的畸变,采用重复控制后,输出电压畸变明显变小了。同时,采用重复控制的逆变器系统动态性能较差,在加入预测控制的电流内环后,系统的动态特性有所提高。

4 结束语

本研究提出了重复控制和预测控制相结合的控制策略,给出了重复控制器和预测控制器的参数设计方法,最后通过实验对理论进行了验证。

研究表明,采用这种控制策略的逆变器在带非线性负载时具有较好的输出电压波形和动态性能。该研究为逆变器的设计提供了一些帮助,具有一定的工程指导意义。

参考文献(References):

[1] 陈宏. 基于重复控制理论的逆变电源控制技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学电气工程学院,2003.
 [2] 陈敏. 非线性负载条件下的逆变器特性研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2006.

- [3] 胡兴柳. 基于重复 - 模糊控制的逆变电源控制系统研究 [J]. 电力电子技术, 2009, 43(3): 57-59.
- [4] 王雪丹, 任继伟, 张晓曦. 复合控制算法在逆变器中的应用 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2009, 14(4): 99-102.
- [5] LI Ming-zhu, HE Zhong-yi, YAN Xing. Analysis and Design of Repetitive Controlled Inverter System with High Dynamic Performance [C]//IPEMC'06. Beijing: [s. n.], 2006: 1-5.
- [6] HARA S, YAMAMOTO Y. Stability of repetitive control systems [C]//Proceedings of IEEE 24th Conference on Decision and Control. Fort Lauderdale: [s. n.], 1985: 326-327.
- [7] ZHANG Kai, KANG Yong, XIONG Jian, et al. Direct repetitive control of SPWM inverter for UPS purpose [J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2003, 18(3): 784-792.
- [8] BUSO S, FASOLO S. Uninterruptible power supply multi-loop control employing digital predictive voltage and current regulators [J]. **IEEE Transactions on Industrial Applications**, 2001, 37(6): 1846-1854.
- [9] BUSO S, MATTAVELLI P. Digital Control in Power Electronics [M]. Morgan & Claypool Publishers, 2006.
- [10] 游志青. 基于重复控制技术的数字式逆变电源的研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学电气工程学院, 2003.
- [11] 张 凯, 康 勇, 熊 建, 等. 基于状态反馈控制和重复控制的逆变电源研究 [J]. 电力电子技术. 2000, 34(5): 9-11.
- [12] BUSO S, FASOLO S. Uninterruptible power supply multi-loop control employing digital predictive voltage and current regulators [J]. **IEEE Transactions on Industrial Applications**, 2001, 37(6): 1846-1854.
- [13] BODE G H, LOH P C, NEWMAN M J, et al. An Improved Robust Predictive Current Regulation Algorithm [C]//PEDS 2003. Singapore: [s. n.], 2003: 1058-1063.

[编辑: 李 辉]

(上接第 890 页)

参考文献 (References):

- [1] CHAN C C. The state of the art of electric and hybrid vehicles [J]. **IEEE**, 2002, 90(2): 1-29.
- [2] RIAZENMAN M J. Engineering the EV future [J]. **IEEE Spectrum**, 1998, 35(11): 18-20.
- [3] HORI Y. Future Vehicle Driven by Electricity and Control Research on Four Wheel Motored "UOT Electric March II" [C]//Proceedings of the IEEE Advanced Motion Control. Slovenia: [s. n.], 2002: 1-14.
- [4] 许锦旋, 苏成悦, 潘永雄. 充电器大功率变压器的设计 [J]. 通信电源技术, 2007, 24(2): 77-79.
- [5] FURLAN S. A Comparative Valuation of External Costs due to Transportation Electric VS Conventional Vehicles [C]//Proceedings of the EVS 17. Canada: [s. n.], 2000: 18-21.
- [6] 徐曼珍. 新型蓄电池原理与应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005.
- [7] 文 锋, 姜久春, 张维戈. 电动汽车用锂离子电池组充电方法 [J]. 汽车工程, 2008, 30(9): 792-795.
- [8] 张 巍, 王 艳, 殷天明. 基于 DSP 的电动汽车电池管理系统的设计 [J]. 微计算机信息, 2009, 25(2): 238-239.
- [9] CHEN J J, YANG F C, LAI C C. A high-efficiency multi-mode li-Ion battery charger with variable current source and controlling previous-stage supply voltage [J]. **Industrial Electronics**, 2009, 56(7): 2469-2478.

[编辑: 李 辉]