

三相电压型 PWM 整流器的级联式 非线性 PI 控制

郭文杰, 林 飞, 郑琼林

(北京交通大学电气工程学院, 北京市 海淀区 100044)

The Cascaded Nonlinear PI Control for Three-Phase Voltage Source PWM Rectifier

GUO Wen-jie, LIN Fei, Zheng Qiong-lin

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Haidian District, Beijing 100044, China)

ABSTRACT: This paper proposes a cascaded nonlinear PI controller for three-phase voltage source PWM rectifier, which is based on its model in synchronous reference frame. The DC bus voltage and the power factor of the PWM rectifier are regulated by three nonlinear PI controllers with high performance. The cascaded nonlinear controller, consisting of the nonlinear function of the error and the traditional PI regulator, improves the dynamic response as well as the robustness of the system. This controller is also easy to be realized. Compared with the traditional PI controllers, the simulation results show that this method can improve the dynamic performance of the system obviously. The experimental results demonstrate the effectiveness of the proposed control algorithm.

KEY WORDS: Power electronics; Three-phase voltage source PWM rectifier; Nonlinear control; Nonlinear PI controller

摘要: 该文以同步旋转坐标系模型为基础, 设计了三相电压型 PWM 整流器的级联式非线性 PI 控制器。采用双环结构, 用三个非线性 PI 环节实现了对整流器直流电压与功率因数的高性能控制。以误差的非线性函数与传统 PI 环节构成的级联式控制器, 既提高了系统响应的快速性, 又增强了抗扰能力, 同时计算简单易于实现。与传统 PI 控制器的仿真对比表明该方法能够明显改善系统的动态性能, 而实验结果也验证了非线性 PI 控制器的优良性能。

关键词: 电力电子; 三相电压型 PWM 整流器; 非线性控制; 非线性 PI 控制器

1 引言

随着人类对电能质量要求的提高, “绿色”电力

电子已经成为当今电力电子发展的重要方向, 三相电压型 PWM 整流器正是其中的代表产物之一。它除了能提供稳定的直流电压外, 更突出的优点是可以实现低谐波正弦电流控制和网侧单位功率因数以及电能的双向传输^[1], 正日益受到广泛关注。

早期 PWM 整流器的控制方案以静止坐标系模型为基础, 主要采用滞环控制^[2]、预测电流控制^[3]、相位幅值控制^[4]、等方法。文献[5]通过坐标变换得到同步旋转坐标系模型, 采用 PI 调节器实现对电压与电流的控制。但对常规 PI 调节器来说, 稳态与动态性能、快速性与超调量、跟踪与抗扰等方面的矛盾, 难以很好解决, 往往造成实际应用中 PI 参数的整定困难^[6-7]。这些问题是系统特性变化与控制量之间采用简单的线性映射引起的, 因此近年来提出了多种形式的非线性 PID^[6-9]以改进控制性能, 并在不同领域得到成功应用^[10-13]。由人工智能而来的模糊 PI 控制^[14]、神经元控制^[15]等方法也都可以看作是某种形式的非线性 PI 控制器, 并已初步用于 PWM 整流器的电流控制中。

但是这些方法相对较为复杂, 对计算能力要求较高, 增加了实际应用中控制器设计的难度。本文采用文献[7-8]提出的级联式方案设计了 PWM 整流器中电压、电流环的非线性 PI 控制器。利用原有的 PI 参数, 只需增加一个非线性函数就可取得较好效果。

2 三相电压型 PWM 整流器数学模型

对图 1 所示的三相电压型整流器而言, 假设三

相电网电压对称且平衡，开关器件的开关频率足够高，经三相静止坐标系到两 k 相旋转坐标系变换后，可得到系统在 d - q 同步旋转坐标系下的数学模型^[5]如下：

$$\mathbf{Z}\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{u} \quad (1)$$

其中：

$$\begin{aligned} \mathbf{Z} &= \text{diag}\{L_s \quad L_s \quad C_d\} \\ \mathbf{X} &= [i_{sd} \quad i_{sq} \quad U_{dc}]^T \\ \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} -R_s & \omega L_s & -d_d \\ -\omega L_s & -R_s & -d_q \\ 3d_d/2 & 3d_q/2 & 0 \end{bmatrix} \\ \mathbf{u} &= [u_{sd} \quad u_{sq} \quad -I_{dc}]^T \end{aligned}$$

式中 L_s 为网侧等效电感值； R_s 为网侧等效电阻值； C_d 为直流侧电容值； i_{sd} 与 i_{sq} 分别为交流输入电流的等效 d 轴与 q 轴分量； U_{dc} 为直流电压； ω 为电网电压角频率； u_{sd} 与 u_{sq} 分别为电网电压的 d 轴与 q 轴分量； I_{dc} 为直流侧负载电流； d_d 与 d_q 分别为开关函数在一个控制周期里占空比的等效 d 轴与 q 轴分量，作为系统的可控输入。

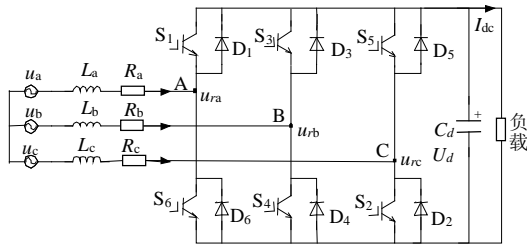


图 1 三相电压型 PWM 整流器

Fig. 1 Three-phase voltage source PWM rectifier

通过控制各开关器件的占空比可以保证 PWM 整流器的直流电压为给定值，同时控制其功率因数近似为 1。实际应用中，通常以整流器桥臂中点电压 u_{rd} 与 u_{rq} 为控制输入来设计控制器，然后采用空间矢量调制 (SVPWM) 的方法得到实际的开关函数，它们与直流电压的关系^[4]如下：

$$\begin{cases} u_{rd} = d_d U_{dc} \\ u_{rq} = d_q U_{dc} \end{cases} \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)中，此时式(1)中的电流方程转化为如下的线性形式：

$$\begin{cases} L_s \dot{i}_{sd} = -R_s i_{sd} + \omega L_s \cdot i_{sq} + u_{sd} - u_{rd} \\ L_s \dot{i}_{sq} = -\omega L_s \cdot i_{sd} - R_s i_{sq} + u_{sq} - u_{rq} \end{cases} \quad (3)$$

而式(1)中的直流电压方程仍为非线性方程。

3 PWM 整流器非线性 PI 控制器设计

3.1 级联式非线性 PI 控制简述

为了解决传统 PI 控制器存在的问题，出现了多种形式的非线性 PI 控制器。其中利用误差 e 的非线性函数与简单 PI 控制器级联，便构成了一种最简单的非线性 PI 控制结构^[7-8]，如图 2 所示。

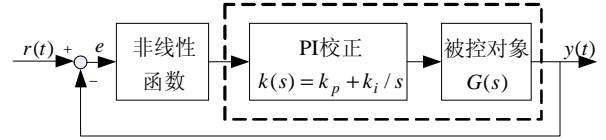


图 2 级联式非线性 PI 控制器框图

Fig. 2 Block diagram of cascaded nonlinear PI controller

本文采用如下的一种非线性函数^[5]与 PI 调节器级联，其中 k 为常数

$$f(e) = k|e|^a \text{sgn}(e) \quad (4)$$

假设被控对象经过 PI 调节器校正后可以看作广义一阶系统，则整个系统可表示成如下误差系统，

$$\dot{e} = w - k|e|^a \text{sgn}(e) \quad (5)$$

其中 w 为系统中存在的各种扰动。首先考虑 w 为零的情况，此时上式的通解如下：

$$e(t) = \begin{cases} \text{sgn}(e_0)/(1/|e_0|^{a-1} + (a-1)kt)^{1/(a-1)}, & a > 1 \\ e_0 \exp(-kt), & a = 1 \\ \text{sgn}(e_0)[|e_0|^{1-a} - (1-a)kt]^{1/(a-1)}, & a < 1 \end{cases} \quad (6)$$

其中， e_0 为 e 的初值。可见当图 2 中采用线性函数，即 $\alpha=1$ 时误差按指数衰减。而当采用 $0 < \alpha < 1$ 的非线性函数时，由式(6)可知，误差可在有限时间内衰减至零，快速性较传统 PI 控制器有了提高。例如 a 取 0.5 时，系统达到稳态无差的时间要比传统的比例控制进入误差 2% 的调整时间快一倍。

而当系统存在有界扰动，扰动界限为 w_0 时，即 $|w| < w_0$ ，采用式(4)所示的 $0 < \alpha < 1$ 的非线性函数也能更有效的抑制扰动。由式(5)可知，一定条件下系统的静差最终要小于 $(w_0/k)^{1/a}$ ，若选择 k 保证 $w_0/k < 1$ ，则随着 a 的减小，就以数量级的方式减小静差，大大提高了反馈抑制扰动的效率。

对于二阶及以上系统，采用上述的级联式非线性 PI 控制器也有类似效果^[6-8]。另外，为了预防可能产生的高频颤振现象，实际中常用如下函数代替式(4)

$$f(e, a, d) = \begin{cases} k|e|^a \text{sgn}(e) & |e| > d \\ ke/d^{1-a} & |e| \leq d \end{cases} \quad (7)$$

其中， $0 < \alpha < 1$ ， d 为误差限。

3.2 PWM 整流器的非线性 PI 控制

若保持同步旋转坐标系的 d 轴与电网电压的 a 轴一致, 即实现所谓电压定向, 则 u_{sq} 为零, 而 u_{sd} 为电网电压的幅值 E_m 。由式(1)、(3)可知, 此时若能控制 q 轴电流 $i_{sq}=0$, 便可实现电压电流同相位, 即网侧功率因数为 1。而直流电压的调节则主要与 d 轴电流 i_{sd} 有关。

由式(3)可知, 整流器 d 、 q 轴电流存在交叉耦合, 为了提高控制性能还需引入如下的解耦项:

$$\begin{cases} u_{id} = E_m + wL_s i_{sq} \\ u_{iq} = -wL_s i_{sd} \end{cases} \quad (8)$$

本文提出的 PWM 整流器的整体控制框图如图 3 所示,

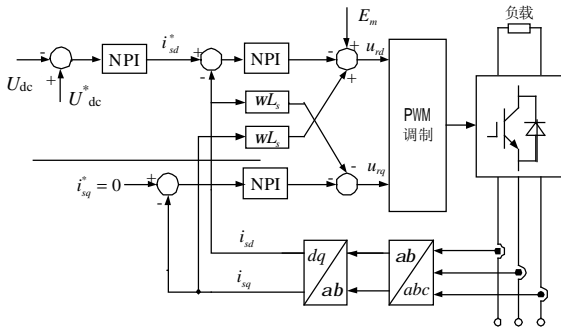


图 3 整流器的非线性 PI 控制框图

Fig.3 Nonlinear PI control block diagram for PWM rectifier

直流电压偏差经非线性 PI 控制器后得到 d 轴电流指令 i_{sd}^* , 而 q 轴电流指令为零。采样得到的三相交流电流经旋转坐标变换后可得 d 、 q 轴实际电流, 与各自电流指令相减所得偏差送入两个非线性电流 PI 控制器, 所得控制量与式(8)中的解耦项相加便得整流器桥臂中点电压指令, 再通过 SVPWM 算法便可输出控制整流器的脉冲。

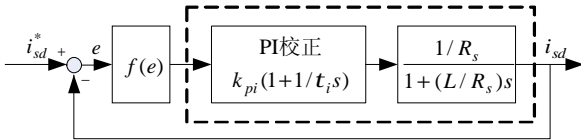


图 4 i_d 电流环框图

Fig. 4 Block diagram of the i_d current loop

在加入式(8)所示的解耦项后, d 轴电流控制环结构如图 4 所示。

如前所述, 利用 PI 环节把对象校正成一阶系统, 因此选择 $t_i = L/R_s$ 。若控制周期为 T_s , 则比例系数按如下经验公式选择会有较好的效果,

$$k_{pi} = \frac{R_s t_i}{2T_s} \quad (9)$$

由于 q 轴电流环节具有对称的结构, 因此二者可

用相同的控制参数。

由于式(1)中的电压方程本身即为非线性方程, 而且采用非线性 PI 后, d 轴电流的闭环传递函数也难以表示, 因此电压环的 PI 参数整定较为困难。本文根据文献[4]对整流器设计普通 PI 控制器时的简化分析, 得到电压环的初始比例与积分参数为

$$k_{pu} = \frac{4C_d}{15T_s} \quad (10)$$

$$k_{iu} = \frac{4C_d}{225T_s^2} \quad (11)$$

然后再以图 2 的形式级联非线性函数, 并通过仿真实验对参数进行微调。

4 仿真与实验研究

4.1 仿真比较

仿真采用 Matlab/Simulink, 主电路由其中的 simpower 元件构成, 结构如图 1 所示。仿真参数为三相相电压 220V, 交流侧电感 2.1mH, 直流侧电容 2300uF, 开关频率 5kHz。仿真中非线性 f 函数的参数 a 取为 0.5, d 取为 10^{-4} 。为了进行对比, 还给出了采用普通 PI 调节器的控制结果, 两种情况下使用的 PI 参数相同。

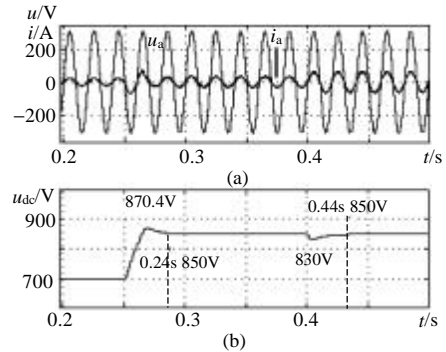


图 5 采用 PI 调节器时电压突增、电阻突减时波形
Fig. 5 Waveforms of the AC voltage, AC current and DC voltage with PI controller

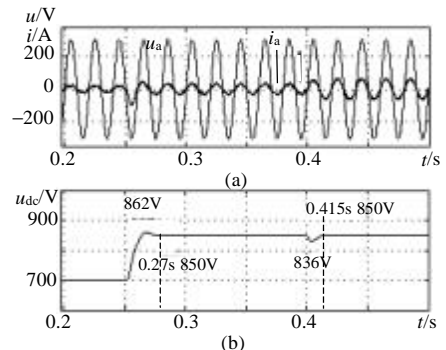


图 6 采用非线性 PI 调节器时电压突增、电阻突减时波形
Fig. 6 Waveforms of the AC voltage, AC current and DC voltage with nonlinear PI controller

图 5 为采用普通 PI 调节器时, 在 0.25s 时将给定直流电压从 700V 突增到 850V, 在 0.4s 时将负载电阻从 50Ω 突减至 25Ω 时直流电压和交流电压、电流的响应波形, 电压突增时直流电压超调为 2.4%, 到稳态时间 0.04s, 负载突减时电压跌落 20V, 恢复时间为 0.04s。图 6 为采用非线性 PI 调节器时, 相同条件下直流电压和交流电压电流的响应波形, 电压突增时直流电压超调为 1.4%, 到稳态时间 0.02s, 负载突减时电压跌落 17V, 恢复时间为 0.015s。由图可见, 采用非线性 PI 控制器后, 直流电压的超调量减小, 调整时间缩短, 抗扰能力也有所增强。

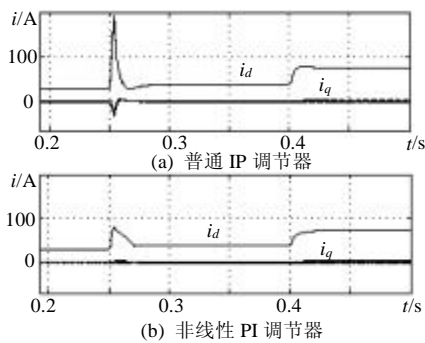


图 7 电压突增、电阻突减时 d/q 轴电流波形

Fig. 7 Waveforms of the d/q current

图 7 为上述情况下的 d 轴和 q 轴电流响应曲线。可以看出使用非线性 PI 调节器以后的电流响应明显优于普通 PI 调节器的结果, 不但改善了动态过程中的电流冲击, 而且在调节电压时几乎不影响 q 轴电流, 系统的解耦性能也有提高。

4.2 实验研究

根据上述方法研制了一台容量为 50kVA 的三相 PWM 整流器, 并进行了实验研究, 控制系统核心是 TI 的 TMS320F243 型 DSP, 其时钟频率 20MHz。实验参数基本仿真所述, 开关频率 4kHz。

图 8 为直流给定电压从 750V 突增至 850V 时直流电压和交流电流波形, 可以看出电压能够迅速达到给定值, 而且几乎没有超调, 同时动态过程中电流过渡非常平稳。

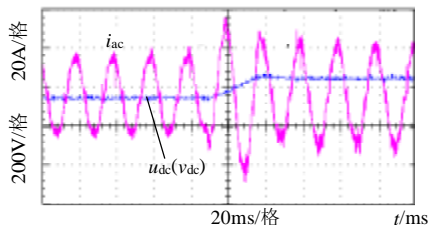


图 8 电压突增时波形

Fig. 8 Waveforms of the DC voltage and AC current when voltage reference increasing

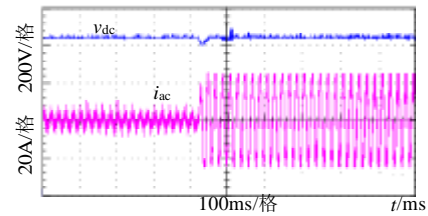


图 9 负载突增时波形

Fig. 9 Waveforms of the DC voltage and AC current when load increasing

直流电压 850V 时, 当整流器从空载工况突然加入 60Ω 电阻时, 直流电压和交流电流的波形如图 9 所示。从图中可以看到直流电压的跌落很小, 并且能够快速恢复。表明本文方法具有良好的抗负载扰动能力。

5 结论

采用非线性 PI 控制器代替三相电压型 PWM 整流器同步控制中的普通 PI 控制器, 使得系统在保持单位功率因数的同时, 动态性能有了明显提高。而级联式非线性 PI 控制方案, 简化了参数整定问题, 同时计算简单便于实际应用。仿真以及实验结果表明采用级联式非线性 PI 控制器的三相电压型 PWM 整流器的动态响应和鲁棒性均有所改善。

致谢

感谢台达电力电子科教发展基金 (CREG2005001) 和北京交通大学科技基金 (2004CR013) 的资助。

参考文献

- [1] Eugenio W, Atsuo K. A high frequency AC/DC converter with unity power factor and minimum harmonic distortion[J]. IEEE Trans. Power Electronics, 1991, 6(3): 364-370.
- [2] Green A W, Bous J T. Hysteresis current-forced three-phase voltage sourced reversible rectifier [J]. IEE. Part B, 1989, 136(3): 113-120.
- [3] Wu R, Shashi BD, Gordon R S. Analysis of a PWM ac to dc voltage source converter under the predicted current control with a fixed switching frequency[J]. IEEE Trans. Industry Applications, 1991, 27(4): 756-764.
- [4] 王英, 张纯江, 陈辉明. 三相 PWM 整流器新型相位幅值控制数学模型及其控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 85-89. Wang Ying, Zhang Chunjiang, Chen Huiming. A new phase and amplitude control strategy and mathematics model of three-phase voltage rectifier[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 85-89.
- [5] Vladimir B, Vikram K. A new mathematical model and control of a three-phase AC-DC voltage source converter[J]. IEEE Trans. Power Electronics, 1997, 12(1): 116-123.
- [6] 韩京清. 非线性 PID 控制器[J]. 自动化学报, 1994, 20(4): 487-490. Han Jingqing. Nonlinear PID controller[J]. Acta Automatica Sinica, 1994, 20(4): 487-490.
- [7] 苏玉鑫, 段宝岩. 一种新型非线性 PID 控制器[J]. 控制与决策, 2003, 18(1): 126-128.

- Su Yuxin, Duan Baoyan. A new class of nonlinear PID controller [J]. Control and decision, 2003, 18(1): 126-128.
- [8] 苏玉鑫, 郑春红, 段宝岩, 等. 一类非线性 PID 控制系统稳定性分析 [J]. 控制与决策, 2002, 17(Supp1): 754-757.
- Su Yuxin, Zheng Chunhong, Duan Baoyan, et al. Stability analysis of a class of nonlinear PID control systems[J]. Control and decision, 2002, 17(Supp1): 754-757.
- [9] Armstrong B, Neevel D, Kusik T. New results in NPID control: tracking, integral control, friction compensation and experimental results[J]. IEEE Trans. Control System Technology, 2001, 9(2): 399-406.
- [10] 邱宇, 陈学允. 用于静止无功补偿器的非线性 PID 控制器[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(11): 41-44.
- Qiu Yu, Chen Xueyun. The new nonlinear PID controller for SVC[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 41-44.
- [11] 程远楚, 漆为民, 叶鲁卿, 等. 发电机励磁的非线性解析模糊控制 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 121-125.
- Cheng Yuanchu, Qi Weimin, Ye luqing, et al. A nonlinear analytical fuzzy logic excitation controller of generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 121-125.
- [12] 马幼捷, 周雪松. 静止无功补偿器非线性控制对系统功角稳定的影响[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 84-88.
- Ma Youjie, Zhou Xuesong. Study on nonlinear SVC control for improving power system stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 84-88.
- [13] 张桂斌, 徐政, 王广柱. 基于 VSC 的直流输电系统的稳态建模及其非线性控制[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 17-22.
- Zhang Guibin, Xu Zheng, Wang Guangzhu. Steady-state model and its nonlinear control of VSC-HVDC ststem[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 17-22.
- [14] Marek J, Marco L, Frede B, et al. Fuzzy logic current controller for PWM rectifiers[C]. Proc. IECON 02, Spain, 2002, 2: 1300-1305.
- [15] Mariusz C, Marian P K. Comparison of current control techniques for PWM rectifiers[C]. Proc. of 2002 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, ISIE, Italy, 2002, 4. 1259-1263.

收稿日期: 2005-09-23。

作者简介:

郭文杰(1980-), 男, 博士研究生, 从事变流控制与牵引传动技术的研究工作;

林飞(1975-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为电机控制、电力电子及其在电力系统的应用;

郑琼林(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究领域为交流传动、有源滤波和电力电子。

(编辑 王彦骏)