

基于逆系统方法的三相 PWM 整流器控制

赵绍刚¹, 李秀娟², 漆随平²

(1. 徐州师范大学 物理系, 江苏 徐州 221116;

2. 河南工业大学 电气工程学院, 河南 郑州 450007)

摘要: 针对三相脉宽调制(PWM)整流器控制采用非线性反馈方法使控制器设计复杂化的问题, 提出一种基于逆系统方法的三相 PWM 整流器的反馈线性化控制方法。利用三相 PWM 整流器数学模型, 以直流输出电压、有功和无功电流作为状态反馈变量, 推导出三相 PWM 整流器的逆系统, 并构造出伪线性系统。通过该伪线性系统的综合, 设计出三相 PWM 整流器的闭环控制系统, 实现了无功电流分量和直流电压的解耦, 然后对该闭环控制系统进行了计算机仿真。结果表明, 所采用的控制策略能够实现三相 PWM 整流器直流电压和无功电流的解耦控制, 且性能良好。

关键词: 三相 PWM 整流器; 逆系统; 解耦; 非线性

中图分类号: TM 461

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)11-0046-03

0 引言

三相脉宽调制(PWM)整流器, 具有电流谐波分量小、功率因数可调、直流侧电压波动小、可实现交直流双向变换等优点, 成为近年来应用与研究的重点。一般使用的基于坐标变换的直接电流控制方法, 是依赖于小信号模型进行线性化后再求取传递函数, 应用古典控制理论方法设计闭环调节器^[1]。这种方法对模型的近似处理忽略了过多因素, 造成理论分析与实际控制结果有较大出入。文献[2]提出了一种基于线性二次型的最优控制方案, 保证系统对负载变化或系统参数在一定范围内变化时具有很强的鲁棒性, 并且输出电压可调, 但该方案中的系统工作在高功率因数下, 整流器的无功电流不能独立调节, 无法实现对系统功率因数的控制。一些基于状态反馈线性化的非线性方法被用于三相 PWM 整流器的控制^[3-5], 取得了较好的控制效果, 但这些方法在设计非线性控制器时非常复杂, 并且没有实现对无功电流的独立控制。逆系统方法作为非线性系统反馈线性化控制的新理论, 十几年来得到了显著发展^[6], 该方法具有物理概念清晰、适用面广、应用简便等特点, 并已成功应用于一些系统的控制^[7-8]。

本文采用逆系统方法的理论, 把三相 PWM 整流器的直流输出电压、无功和有功电流作为状态反馈变量, 推导出三相整流器的逆系统, 构造了伪线性系统, 在此基础上实现对整流器的输出电压和无功电流的解耦, 并进行了仿真研究, 实现了三相整流器直流电压和无功电流的解耦控制。

1 三相 PWM 整流器数学模型

图 1 是三相电压型 PWM 整流器的主电路, 图

中 U_{dc} 是直流侧电压, C 为直流侧滤波电容, R 为等效的负载电阻, L 为交流侧输入电感, R_s 为交流侧电阻, u_a, u_b, u_c 为三相电网电压。

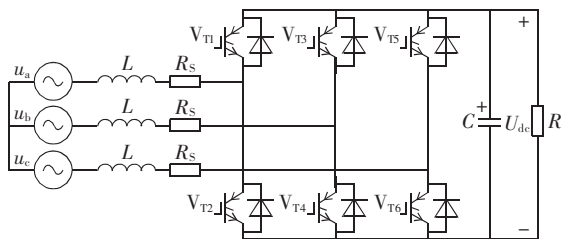


图 1 三相整流器主电路图

Fig.1 Main circuit of three-phase rectifier

假设交流侧电路为三相对称, 主电路开关元件为理想元件, 其通断可用开关函数描述。根据坐标变换理论可以得到在 dq 坐标系下的三相 PWM 整流器数学模型为^[9-10]

$$\begin{aligned} \frac{di_d}{dt} &= \omega i_q + \frac{1}{L} u_d - \frac{1}{L} U_{dc} m_d - \frac{R_s}{L} i_d \\ \frac{di_q}{dt} &= -\omega i_d + \frac{1}{L} u_q - \frac{1}{L} U_{dc} m_q - \frac{R_s}{L} i_q \\ \frac{dU_{dc}}{dt} &= \frac{1}{C} (m_d i_d + m_q i_q) - \frac{1}{RC} U_{dc} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 i_d, i_q 分别为有功、无功电流分量; m_d, m_q 为 dq 坐标系下的开关函数。

功率因数可调的三相 PWM 整流器系统输出量为直流电压 U_{dc} 和无功电流分量 i_q 。

选取系统状态变量为

$$x_1 = i_d, \quad x_2 = i_q, \quad x_3 = U_{dc} \quad (2)$$

系统输入为

$$u_1 = m_d, \quad u_2 = m_q \quad (3)$$

则系统输出为

$$y_1 = x_2, \quad y_2 = x_3 \quad (4)$$

可将式(1)写成如下形式:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \omega x_2 - \frac{1}{L} x_3 u_1 + \frac{1}{L} u_d - \frac{R_s}{L} x_1 \\ \dot{x}_2 &= -\omega x_1 - \frac{1}{L} x_3 u_2 + \frac{1}{L} u_q - \frac{R_s}{L} x_2 \\ \dot{x}_3 &= \frac{1}{C} x_1 u_1 + \frac{1}{C} x_2 u_2 - \frac{1}{RC} x_3, y_1 = x_2, y_2 = x_3 \end{aligned} \tag{5}$$

从此模型可以看出,三相PWM 整流器是一个多输入、多输出的非线性系统。其无功电流、有功电流和输出电压之间存在着耦合关系,为了使无功电流和直流侧电压得到良好的控制效果需要进行解耦。

2 三相 PWM 整流器的逆系统及其综合

利用逆系统方法的理论,求出三相 PWM 整流器的逆系统,利用状态反馈的方法,构建出解耦后的伪线性系统,然后利用线性控制理论的方法设计系统的控制策略。

2.1 三相 PWM 整流器的逆系统

根据系统求逆方法^[6],对式(5)所示的整流器系统的 2 个输出进行求导,可以得到:

$$y_1^{(1)} = \dot{x}_2 = -\omega x_1 - \frac{1}{L} x_3 u_2 + \frac{1}{L} u_q - \frac{R_s}{L} x_2 \tag{6}$$

$$y_2^{(1)} = \dot{x}_3 = \frac{1}{C} x_1 u_1 + \frac{1}{C} x_2 u_2 - \frac{1}{RC} x_3$$

从上式解出系统输入 u 为

$$\begin{aligned} u_1 &= C y_2^{(1)} \frac{1}{x_1} + L \frac{x_2}{x_1 x_3} y_1^{(1)} + L \frac{x_2}{x_3} \omega - \frac{x_2}{x_1 x_3} u_q + \frac{1}{R} \frac{x_3}{x_1} + \frac{R_s C}{x_1 x_3} x_2^2 \end{aligned} \tag{7}$$

$$u_2 = -L \frac{1}{x_3} y_1^{(1)} - L \omega x_1 \frac{1}{x_3} + \frac{1}{x_3} u_q - \frac{R_s}{x_3} x_2$$

令上式中

$$y_1^{(1)} = \varphi_1, y_2^{(1)} = \varphi_2 \tag{8}$$

可得三相 PWM 整流器的 $\alpha(1,1)$ 阶积分逆系统

$$\begin{aligned} u_1 &= C \varphi_2 \frac{1}{x_1} - L \frac{x_2}{x_1 x_3} \varphi_1 - \frac{1}{L} \frac{x_2}{x_3} \omega + \frac{x_2}{x_1 x_3} u_q - \frac{1}{R} \frac{x_3}{x_1} + \frac{R_s C}{x_1 x_3} x_2^2 \\ u_2 &= -L \frac{1}{x_3} \varphi_1 - L \omega x_1 \frac{1}{x_3} + \frac{1}{x_3} u_q - \frac{R_s}{x_3} x_2 \end{aligned} \tag{9}$$

2.2 控制系统的综合

将式(9)所示的 $\alpha(1,1)$ 阶积分逆系统连接在原系统之前,可得到三相整流器的伪线性系统,如图 2 虚线部分所示。这样,整流器的控制问题转化为对伪线性系统的控制,可以利用线性控制理论的各种方法,设计出满足要求的系统。可以设计相应的反馈控制律以实现整流器直流电压和无功电流的解耦。由式(9)可知,整流器的电流环节和电压环节均为 I 型系统,可设系统的解耦传递阵为

$$W_d(s) = \begin{bmatrix} \frac{1}{k_1 s + 1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{k_2 s + 1} \end{bmatrix} \tag{10}$$

由式(10)可求得系统的反馈控制律为

$$\varphi_1 = -\frac{1}{k_1} \gamma_1 + \frac{1}{k_1} r_1, \varphi_2 = -\frac{1}{k_2} \gamma_2 + \frac{1}{k_2} r_2 \tag{11}$$

即

$$\begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{k_1} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{k_2} \end{bmatrix} \mathbf{y} + \begin{bmatrix} \frac{1}{k_1} & 0 \\ 0 & \frac{1}{k_2} \end{bmatrix} \mathbf{r} \tag{12}$$

式中 $\mathbf{r} = [r_1 \ r_2]^T$, r_1, r_2 分别为无功电流分量 i_q 和直流电压 U_{dc} 的参考输入。

利用状态反馈,将式(12)和系统的伪线性系统连接在一起,可构成三相 PWM 整流器的闭环控制系统,实现了对无功电流分量 i_q 和直流电压 U_{dc} 的解耦,对此系统可进一步按线性理论的各种方法进行综合,以满足不同的动态要求。一般情况下,为了提高系统的动态性能,可以在如上所设计的系统之外再加上一个单位反馈的外环,并用 PI 调节器作为电流和电压控制器以消除系统的偏差,由此构成的控制系统框图如图 2 所示。其中, i_q^* 和 U_{dc}^* 分别为无功电流 i_q 和直流电压 U_{dc} 的期望值。

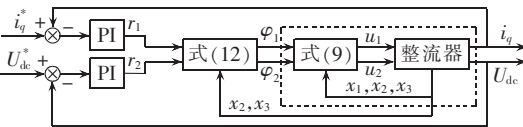


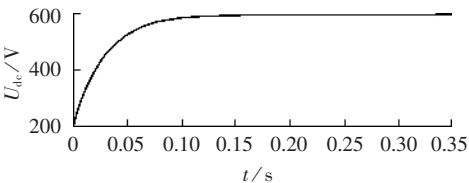
图 2 控制系统框图
Fig.2 Block diagram of control system

3 仿真

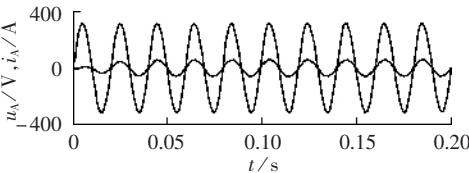
为了验证本文所述方法的有效性,用 Matlab/Simulink 对采用逆系统方法控制的三相 PWM 整流器进行了仿真。

电网参数为 $U_m=311 \text{ V}$, $f=50 \text{ Hz}$; 交流侧参数为 $L=6 \text{ mH}$, $R_s=0.5 \ \Omega$; 直流侧参数为 $C=2200 \ \mu\text{F}$, 负载电阻为 $20 \ \Omega$, 直流侧给定电压 $U_{dc}^*=600 \text{ V}$, 输出功率为 18 kW 。

图 3 所示为单位功率因数情况下,系统启动时的仿真曲线。由系统输出的电压和电流波形可知,



(a) 直流电压 U_{dc}



(b) A 相电流和电压

图 3 单位功率因数情况下直流电压和无功电流
Fig.3 DC voltage and reactive current under unit power factor

直流侧电压 U_{dc} 在系统启动后 0.15 s 达到稳定, 响应迅速, 电压无超调; A 相电流和电压相位相同, 无功电流 $i_q = 0$ A, 系统工作在单位功率因数情况下。

图 4 为改变整流器无功电流 i_q 给定值的仿真曲线。系统稳定后, 0.4 s 时无功电流 i_q 给定值从 0 A 变为 20 A, 0.7 s 时无功电流 i_q 给定值从 20 A 改变为 -20 A。由仿真曲线可见, 当无功电流期望值改变时, 无功电流响应曲线可以迅速地稳定在期望值上, 无超调、无振荡, 并且整流器的输出直流电压不受影响。

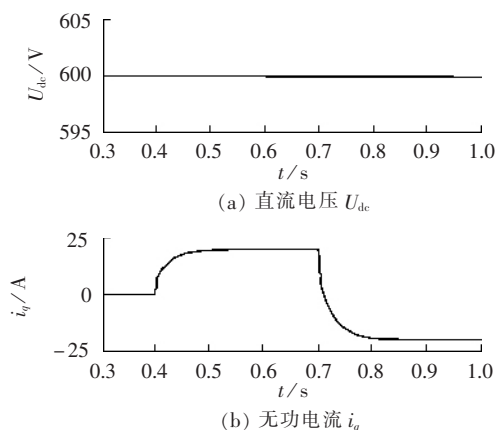


图 4 变无功电流情况下仿真曲线

Fig.4 Simulation curves with variable reactive current

图 5 为在单位功率因数情况下, 改变整流器的输出直流电压 U_{dc} 给定值情况下的仿真曲线。系统稳定后, 0.4 s 时输出电压 U_{dc} 给定值从 600 V 变为 500 V, 0.7 s 时输出电压 U_{dc} 给定值从 500 V 改变为 600 V。由仿真曲线可见, 当输出电压给定值改变时, 其响应曲线可以迅速地稳定在期望值上, 电压无超调, 整流器的相电流和相电压相位始终相同, 无功电流保持稳定, 不受输出电压改变的影响。

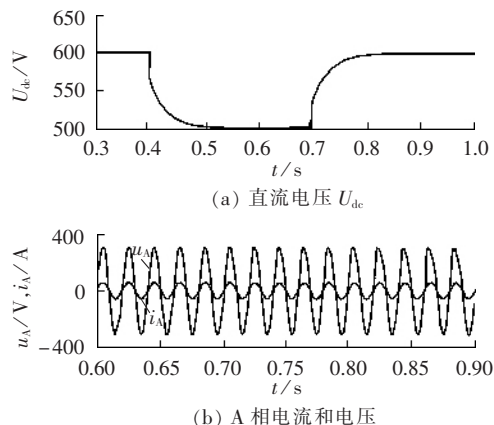


图 5 变输出电压情况下仿真曲线

Fig.5 Simulation curves with variable output voltage

4 结论

本文采用逆系统理论, 研究了三相 PWM 整流器的非线性控制方法, 推导出了三相整流器的逆系

统, 并在此基础上设计了整流器的输出电压和无功电流的解耦控制策略。改变直流电压和无功电流期望值情况下的仿真结果表明, 这种方法可以有效地实现三相 PWM 整流器的输出电压和无功电流的解耦控制, 系统的响应迅速并且无超调, 具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] CHOI Jong-woo, SUL Seung-ki. Fast current controller in three-phase AC/DC boost converter using $d-q$ axis crosscoupling[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1998, 13(1): 179-185.
- [2] 孙孝峰, 魏坤, 邹伟扬. 三相变流器最优控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 168-171.
SUN Xiao-feng, WEI Kun, WU Wei-yang. Optimal control of three phase converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 168-171.
- [3] ESPINOZA J R, JOOS G, MORAN L. Decoupled control of the active and reactive power in three-phase PWM rectifiers based on non-linear control strategies[C]//Power Electronics Specialists Conference, 1999 PESC 99, 30th Annual IEEE. [S.l.]: IEEE, 1999: 131-136.
- [4] RIOUAL P, POULIQUEN H, LOUIS J P. Non-linear control of PWM rectifier by feedback linearization and exact PWM control [C]//Power Electronics Specialists Conference, PESC, 94 Record. 25th Annual IEEE. Taipei: IEEE, 1994: 1095-1102.
- [5] LEE T S. Nonlinear state feedback control design for three-phase PWM boost rectifiers using extended linearisation [J]. IEE Proceedings Electric Power Applications, 2003, 150(5): 546-554.
- [6] 李春文, 冯元琨. 多变量非线性控制的逆系统方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
- [7] 葛友, 李春文, 孙政顺. 逆系统方法在电力系统综合控制中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 1-4.
GE You, LI Chun-wen, SUN Zheng-shun. Application of inverse system method for power system integrated control [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 1-4.
- [8] 严德昆. 大型空气重介流化床逆系统控制及仿真[J]. 自动化学报, 2002, 28(5): 854-858.
YAN De-kun. Inverted system control and simulation of large air dense medium fluidized bed [J]. Acta Automatica Sinica, 2002, 28(5): 854-858.
- [9] KOMURCUGIL H, KUKRER O. Lyapunov-based control for three phase PWM AC/DC voltage-source converters [J]. IEEE Trans on Power Electron, 1998, 13(5): 801-813.
- [10] LEE T S, TZENG K S. Input-output linearizing control with load estimator for three-phase AC/DC voltage-source converters [C]//Proc 23rd IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference. Cairns, Australia: IEEE, 2002: 791-795.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

赵绍刚(1978-), 男, 江苏徐州人, 硕士, 研究方向为电力电子与电力传动、嵌入式系统及应用;

李秀娟(1961-), 女, 吉林乾安人, 副教授, 主要从事计算机应用研究与管理工(Email: Lee_xiujuan@163.com);

漆随平(1970-), 男, 甘肃甘谷人, 副教授, 博士, 研究方向为智能控制、视觉检测。

Inverse control of three-phase PWM rectifier

ZHAO Shao-gang¹, LI Xiu-juan², QI Sui-ping²

(1. Xuzhou Normal University, Xuzhou 221116, China;

2. Henan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: Aiming at the complicated design of three-phase PWM (Pulse Width Modulation) rectifier by using nonlinear feedback method, a linear feedback approach based on inverse system method is presented. Based on the mathematical model of three-phase PWM rectifier, which takes the DC voltage, active and reactive currents as state feedback variables, an inverse system of three-phase PWM rectifier is deduced and a pseudo linear system is constructed. By synthesizing the pseudo linear system, a close-loop control system is designed to decouple the reactive current and DC voltage. The proposed close-loop control system is simulated, and results show that the decoupled control of DC voltage and reactive current is realized with better performance.

Key words: three-phase PWM rectifier; inverse system; decouple; nonlinear