

# 基于 LQRI 控制的三电平 PWM 整流器的实现

何凤有<sup>1</sup>, 李 渊<sup>1,2</sup>, 刘 毅<sup>1</sup>

(1. 中国矿业大学 信电学院, 江苏 徐州 221008;

2. 江苏大学 电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要:** 研究了三电平电压型 PWM 整流器的新颖控制算法, 针对传统 LQR 控制存在稳态误差, 提出了含有积分控制的线性二次型最优控制算法(LQRI)。建立了基于电网电压定向三电平 PWM 整流器两相同步旋转坐标系下的数学模型, 推导了内环控制的状态方程, 实现了电流环控制参数的最优设计, 并给出了采用 LQRI 控制器三电平 PWM 整流器的整体控制策略。搭建了基于 DSP 实现的样机试验平台, 试验验证了控制方案的正确性和有效性, 消除了纯 LQR 控制存在稳态误差的问题, 改善了系统的动、静态性能。

**关键词:** 三电平; LQRI 控制; PWM 整流; DSP

**中图分类号:** TM 461.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6047(2011)04-0074-04

## 0 引言

三相电压型 PWM 整流器输入电流正弦性好, 可获得单位功率因数, 并且能量可实现双向流动, 消除了传统意义上的整流电路中存在的谐波含量大、功率因数低和能量不能回馈等问题。正是基于这些优势, 三相电压型 PWM 整流器可替代传统整流电路实现装置的“绿色”运行, 有着广泛的应用前景和重要的研究价值<sup>[1]</sup>。

一方面, 随着整流器容量的不断增大、电压等级的升高, 以 NPC 结构为代表的三电平变流装置逐渐受到国内外科研人员的青睐<sup>[2]</sup>; 另一方面, 一些新型的控制策略的引入, 有效地提高了 PWM 整流器的系统性能。其中包括: 电压定向控制、虚拟磁链定向控制、基于电压的直接功率控制和基于虚拟磁链的直接功率控制<sup>[3-6]</sup>、反馈线性化控制<sup>[7-8]</sup>、滑模变结构控制等<sup>[9-12]</sup>。

目前, 常规的三相电压型 PWM 整流器控制策略采用基于矢量控制的双环结构, 即内环为电流环, 外环为电压环。控制器多采用结构简单的 PI 控制器。线性二次调节(LQR)控制器具有控制目标明确、实现简单、动态性能好等优点, 被应用于 APF<sup>[13]</sup>、风力发电变桨距控制<sup>[14]</sup>、异步电机控制等领域<sup>[15]</sup>。然而单纯使用 LQR 实现整流器内环控制, 实质上仅实现了比例控制参数(P)的最优选择, 无法消除电流环的稳态误差。因此本文将含积分控制的线性二次型最优控制算法(LQRI)引入三电平 PWM 整流器控制中, 实现了内环控制器的最优设计。

本文首先介绍了三相电压型三电平 PWM 可控整流的数学模型和基于电压定向的矢量控制策略; 进而推导 LQRI 控制算法的实现; 简述三电平 SVPWM

算法的实现; 最后通过基于 DSP 实现的样机试验, 验证了提出算法的正确性和有效性。

## 1 三电平 PWM 可控整流模型

NPC 结构的三电平 PWM 整流器结构如图 1 所示。其中,  $i_a, i_b, i_c$  分别为三相电网电流;  $R_s$  为线路阻抗;  $L$  为进线滤波电抗;  $C_1, C_2$  分别为上、下母线滤波电容。

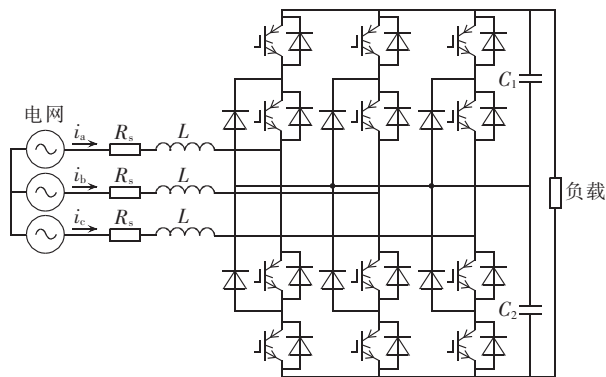


图 1 NPC 结构三电平整流器  
Fig.1 Three-level NPC rectifier

经过电网电压定向, 可写出系统在  $dq$  坐标系下的数学模型, 如式(1)所示。

$$\begin{cases} C \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} (i_d s_d + i_q s_q) - i_L \\ L \frac{di_d}{dt} = e_d - u_d - R_s i_d + L\omega i_q \\ L \frac{di_q}{dt} = e_q - u_q - R_s i_q - L\omega i_d \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $C$  为直流侧电容; 下标  $d, q$  代表  $dq$  坐标系下分量;  $u_{dc}$  为直流母线电压;  $i_d, i_q$  为电网电流;  $u_d, u_q$  为输入电压;  $i_L$  为负载电流;  $e_d, e_q$  为电网电压;  $\omega$  为电网频率。

## 2 LQRI 控制算法的实现

结合式(1),可以写出内环控制的状态空间方程:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{E}\mathbf{V} \quad (2)$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -R_s/L & \omega \\ -\omega & -R_s/L \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -1/L & 0 \\ 0 & -1/L \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} 1/L & 0 \\ 0 & 1/L \end{bmatrix}$$

其中,  $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{u}$ 、 $\mathbf{V}$  分别为系统状态向量、系统输入向量、系统扰动向量,  $\mathbf{x} = [i_d \ i_q]^T$ ,  $\mathbf{u} = [u_d \ u_q]^T$ ,  $\mathbf{V} = [e_d \ e_q]^T$ ;  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$ 、 $\mathbf{E}$  为系统矩阵、输入矩阵和扰动量矩阵。因此可以定义目标函数:

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q}\mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R}\mathbf{u}) dt \quad (3)$$

其中,  $\mathbf{Q}$  为输出变量的加权矩阵,  $\mathbf{R}$  为输入变量的加权值。系统最优控制规律为:  $\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x}$ ,  $\mathbf{K}$  为最优反馈矩阵。

$$\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} \quad (4)$$

矩阵  $\mathbf{P}$  可以由 Riccati 方程求得:

$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A} - \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0 \quad (5)$$

$\mathbf{Q}$  为正定对角矩阵,  $\mathbf{R}$  一般可取为常数。为了便于求解该方程,可使用 Matlab 中的 lqr 函数予以实现。

然而从上面的分析可以得知,如果使用纯 LQR 控制,获得的仅是控制量  $\mathbf{u}$  和状态变量  $\mathbf{x}$  之间的比例关系。所设计出的控制器虽然具有较好的动态性能,但稳态误差无法予以消除。文献[13]提出了一种增加状态变量的方式,实现了控制器积分效果的引入。因此,系统状态空间方程可改写为

$$\dot{\mathbf{x}}_{\alpha} = \mathbf{A}_{\alpha}\mathbf{x}_{\alpha} + \mathbf{B}_{\alpha}\mathbf{u}_{\alpha} + \mathbf{E}_{\alpha}\mathbf{V}_{\alpha} \quad (6)$$

$$\mathbf{x}_{\alpha} = \begin{bmatrix} i_{d-} & i_{q-} & \int i_{d-} & \int i_{q-} \end{bmatrix}^T, \quad \mathbf{u}_{\alpha} = [u_{d-} \ u_{q-}]^T, \quad \mathbf{V}_{\alpha} = [e_{d-} \ e_{q-}]^T$$

其中,  $\int i_{d-}$ 、 $\int i_{q-}$  分别为增加了积分项的新状态变量;下标“~”表示新系统下各变量值。因此,各矩阵可重写为

$$\mathbf{A}_{\alpha} = \begin{bmatrix} -R_s/L & \omega & 0 & 0 \\ -\omega & -R_s/L & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}_{\alpha} = \begin{bmatrix} -1/L & 0 \\ 0 & -1/L \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E}_{\alpha} = \begin{bmatrix} 1/L & 0 \\ 0 & 1/L \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

因此,令  $Q_{id}$ 、 $Q_{iq}$ 、 $Q_{\int id}$ 、 $Q_{\int iq}$  为各状态变量的加权值,则加权矩阵  $\mathbf{Q}$  可重写为

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} Q_{id} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_{iq} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Q_{\int id} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & Q_{\int iq} \end{bmatrix} \quad (7)$$

目标函数亦可重新写为

$$J = Q_{id} i_{d-}^2 + Q_{iq} i_{q-}^2 + Q_{\int id} \left( \int i_{d-} \right)^2 + Q_{\int iq} \left( \int i_{q-} \right)^2 + R(u_{d-}^2 + u_{q-}^2) \quad (8)$$

同理,  $\mathbf{R}$  一般可取为常数。为了便于求解该方程,使用 Matlab 中的 lqr 函数予以实现,则使用新型控制策略的算法如图 2 所示。

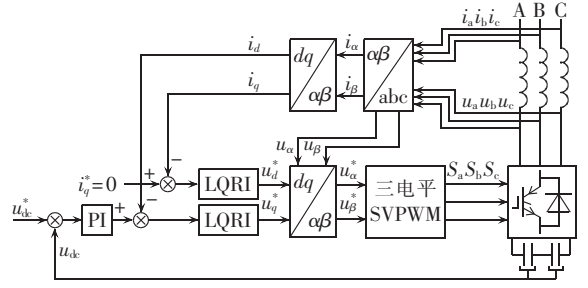


图 2 电网电压定向的三电平整流控制

Fig.2 Grid-voltage-oriented control of three-level rectifier

## 3 三电平 SVPWM 算法的实现

与两电平相比较,三电平空间矢量算法更为复杂,本文采用文献[2]中使用的简化的三电平空间矢量算法,其基本原理如图 3 所示。

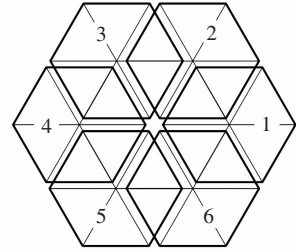


图 3 简化的三电平 SVPWM 算法

Fig.3 Simplified three-level SVPWM algorithm

三电平空间矢量图可以看成 6 个 ( $S=1, 2, 3, \dots, 6$  表示)小六边形互相重叠组成,而每个小六边形则代表传统的两电平空间矢量图。对于某一参考电压矢量,先将其定位于某个  $S$  域内,然后即可按照两电平的方法分配相应矢量作用时间,从而简化了编程难度,提高算法效率。

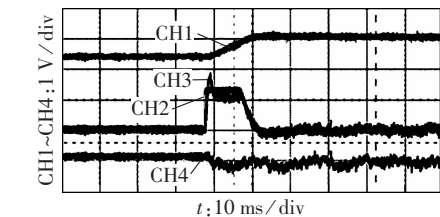
## 4 实验验证

为了验证提出算法的正确性和有效性,进行了实验验证。所用参数如下:电网电压 690 V,频率 50 Hz,额定电流 310 A,进线电抗 0.6 mH,开关频率 2.5 kHz,母线电容  $6000 \times 2 \mu\text{F}$ ,母线电压 1100 V。

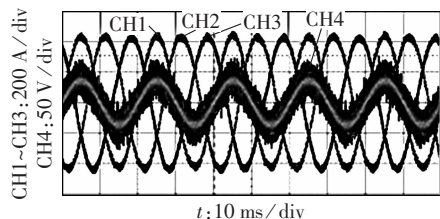
加权矩阵取值如下:  $Q_{id}=1, Q_{iq}=1, Q_{\int id}=1000, Q_{\int iq}=1000, R=1$ 。

为了验证算法有效性,将其用于课题组研制的变频器样机。采用 DSP2812 作为主控制器;功率器件使用 IGBT(FF650R17IE4);电流测试使用罗氏线圈(量程 1000 A);谐波和功率因数测量采用 FLUKE 电能质量测试仪(型号:FLUKE435);示波器采用 Agilent 数字示波器(MSO6014A)。图 4 是相关实验波形。

图 4(a)中波形均通过 DA 采样测得,其中 CH1 为直流母线电压波形,CH2 为有功电流分量给定,



(a) 直流母线电压试验波形



(b) 电网电压、电流试验波形

图 4 系统试验波形

Fig.4 Experimental curves of system

CH3 为有功电流分量,CH4 为无功电流分量;图 4(b) CH1、CH2、CH3 为 A、B、C 三相电流波形,CH4 为 A 相电压波形(经同步变压器测量获得)。

表 1 示出了额定工况下电能质量测试情况,分别为有功功率  $P$ 、视在功率  $S$ 、无功功率  $Q$ 、功率因数  $\lambda$ 、电流有效值  $I$ 、电压有效值  $U$  以及三相电流谐波性能指标  $\text{THD}_i$ (计算前 50 次总谐波畸变率)。其总谐波畸变率均为 3% 以下。

表 1 电能质量测试  
Tab.1 Test of power quality

相别	$P/\text{kW}$	$S/(\text{kV}\cdot\text{A})$	$Q/\text{kvar}$	$\lambda$	$I/\text{A}$	$U/\text{V}$	$\text{THD}_i/\%$
A	111.6	111.6	0.3	0.99	299	381.0	2.8
B	117.4	117.5	5.5	0.99	316	378.7	2.3
C	115.9	115.9	3.5	0.99	310	380.6	3.0
总值	344.8	345.0	9.4	0.99			

## 5 结论

提出了用于三电平 PWM 可控整流系统中的 LQRI 控制算法。详尽推导了控制器设计过程,阐述了三电平 PWM 实现的具体策略。样机试验表明,采用该控制算法使得电流环控制器参数设计简便,动态、稳态性能指标良好。总电流畸变率控制在 3% 以下,功率因数高。

## 参考文献:

- [1] 伍小杰,罗悦华,乔树通. 三相电压型 PWM 整流器控制技术综述[J]. 电工技术学报,2005,20(12):7-12.  
WU Xiaojie,LUO Yuehua,QIAO Shutong. A control technical summary of three-phase voltage-source PWM rectifiers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2005,20(12):7-12.
- [2] 叶宗彬,李浩,景巍,等. 双三电平双馈电机控制系统[J]. 电工技术学报,2009,24(6):24-29.  
YE Zongbin,LI Hao,JING Wei,et al. Control system of dual three-level double-fed induction motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(6):24-29.
- [3] 张颖超,赵争鸣,袁立强,等. 三电平 PWM 整流器直接功率控制[J]. 电工技术学报,2008,23(5):62-68.

- ZHANG Yingchao,ZHAO Zhengming,YUAN Liqiang,et al. Direct power control for three-level PWM rectifier[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2008,23(5):62-68.
- [4] CHEN Wei,ZOU Yunping,XU Lijuan. Direct power control for neutral-point-clamped three-level PWM rectifier[C]//IEEE International Conference on Industrial Technology. Chengdu,China: IEEE,2008:1-6.
- [5] SERPA L A,KOLAR J W. Virtual-flux direct power control for mains connected three-level NPC inverter systems[C]//Power Conversion Conference. Nagoya,Japan:[s.n.],2007:130-136.
- [6] MALINOWSKI M,JASINSKI M,KAZMIERKOWSKI M P. Simple direct power control of three-phase PWM rectifier using space-vector modulation(DPC-SVM)[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2004,51(2):447-454.
- [7] 张志,谢运祥,乐江源,等. 三相电压型 PWM 整流器的反馈线性化和滑模控制[J]. 华南理工大学学报:自然科学版,2009,37(11):71-75.  
ZHANG Zhi,XIE Yunxiang,LE Jiangyuan,et al. Feedback linearization and sliding-mode control of three-phase voltage source PWM rectifier[J]. Journal of South China University of Technology:Natural Science Edition,2009,37(11):71-75.
- [8] 邓卫华,张波,丘东元,等. 三相电压型 PWM 整流器状态反馈精确线性化解耦控制研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(7):97-103.  
DENG Weihua,ZHANG Bo,LIU Dongyuan,et al. The research of decoupled state variable feedback linearization control method of three-phase voltage source PWM rectifier[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(7):97-103.
- [9] 陈瑶,金新民,童亦斌. 基于滑模控制的三相 PWM 整流器系统仿真[J]. 系统仿真学报,2007,19(8):1849-1852.  
CHEN Yao,JIN Xinmin,TONG Yibin. Simulation of three-phase voltage source PWM rectifier based on sliding-mode control[J]. Journal of System Simulation,2007,19(8):1849-1852.
- [10] 郎永强,徐殿国,马洪飞. 三相电压型 PWM 整流器的一种改进前馈控制策略[J]. 电机与控制学报,2006,10(2):166-170.  
LANG Yongqiang,XU Dianguo,MA Hongfei. Improved feed forward control of three phase voltage source PWM rectifier[J]. Electric Machines and Control,2006,10(2):166-170.
- [11] 赵葵银. PWM 整流器的模糊滑模变结构控制[J]. 电工技术学报,2006,21(7):49-53.  
ZHAO Kuiyin. PWM rectifier with fuzzy sliding mode variable structure control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2006,21(7):49-53.
- [12] LEE T. Input-output linearization and zero-dynamics control of three-phase AC/DC voltage-source converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2003,18(1):11-22.
- [13] KEDJAR B,AL-HADDAD K. DSP-based Implementation of an LQR with integral action for a three-phase three-wire shunt active power filter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2009,56(8):2821-2828.
- [14] LI Jianlin,XU Hongyan,ZHANG Lei,et al. Disturbance accommodating LQR method based pitch control strategy for wind turbines[C]//Second International Symposium on Intelligent Information Technology Application. Shanghai,China:[s.n.],2008:766-770.
- [15] OSAMA S,EBRAHIM,PRAVEEN. LQR-based stator field oriented control for the induction motor drives[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition. Austin,USA:[s.n.],2008:1126-1131.

## 作者简介:

何凤有(1963-),男,河北张家口人,教授,博士研究生导师,研究方向为大功率传动控制、传动系统智能诊断等;  
李 渊(1979-),男,宁夏石嘴山人,讲师,博士研究生,研

究方向为大功率交流电机传动控制、交流电机智能控制(E-mail: smartwave@163.com);

刘 毅(1987-),男,江苏徐州人,硕士研究生,研究方向为大功率传动控制、交流电机智能控制。

## Implementation of three-level PWM rectifier based on LQRI control

HE Fengyou<sup>1</sup>, LI Yuan<sup>1,2</sup>, LIU Yi<sup>1</sup>

(1. Institute of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** A control scheme for three-level voltage-source PWM rectifier is researched and a control strategy based on an optimal algorithm of LQRI (Linear Quadratic Regulator with an Integrator) is proposed to eliminate the steady-state error of traditional LQR control. The mathematic model of three-level voltage-source PWM rectifier in two-phase synchronous rotation coordinates based on grid voltage orientation. The state equation of inner loop control is deduced to realize the optimal parameter design of current loop control. The overall control strategy is given for the three-level PWM rectifier based on LQRI. The prototype based upon DSP is established and the experimental results show its validity with improved dynamic and static performance of system.

**Key words:** three-level; LQRI control; PWM rectifier; DSP