

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.04.024

一种PWM整流器的电流自跟踪控制策略研究*

周庆刚¹, 李优新¹, 郭宁宁²

(1. 广东工业大学 信息工程学院, 广东 广州 510006; 2. 江西省火电建设公司, 江西 南昌 330001)

摘要: 针对PWM整流器中传统滞环电流控制方法因固定环宽而引起的功率管的开关频率变换剧烈、频率低时跟踪性差、频率高时开关损耗大等问题,对PWM整流器的电路拓扑、滞环电流控制方法下的电压环、电流环以及三相锁相环的工作原理进行了研究,对滞环电流的控制过程进行了归纳,提出了一种新型的电流自跟踪PWM控制策略,并对这种控制策略的作用机理进行了详尽的阐释。然后利用Matlab对电流自跟踪控制算法进行了系统仿真,同时又以数字信号处理器-DSP28035为核心,搭建了软、硬件平台,进行了实验验证。研究表明,电流自跟踪控制策略的输入电压与输入电流同相位,实际电流能够快速跟踪参考电流,能够实现功率因数校正,该种控制策略具有可行性和有效性。

关键词: PWM整流器; 电流自跟踪; 控制策略

中图分类号: TM461 文献标志码: A

文章编号:1001-4551(2015)04-0557-04

Current automatic tracking control strategy of PWM rectifier

ZHOU Qing-gang¹, LI You-xin¹, GUO Ning-ning²

(1. Information Engineering College of Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China;

2. Jiangxi thermal power construction company, Nanchang 330001, China)

Abstract: Aiming at the problem which was the fixed width of the PWM control method of hysteresis current, which had cause several problems, such as the switch's frequency changing greatly, the real current could not fast track the given current when the frequency was low, the switch would consume a lot of power when the frequency was high, and so on. The rectifier's topology, the principle of current loop and voltage loop, which under the control method of hysteresis current and the principle of three phase locked loop had been studied. the control procedure also had been distilled. A new PWM control method of current automatic tracking was proposed, then the mechanism of this control strategy being detailed explanation. So not only the software-Matlab being used to simulate the control process, but also the digital signal processor-DSP28035 also being used to verify it. The results indicate that the input current and the input voltage has the same phase, the real current can fast track the current which was given, it can realize power factor correction. Furthermore, it proves the effectiveness and the feasibility of this control strategy.

Key words: rectifier of pulse width modulation; current automatic tracking; control strategy

0 引 言

现在人们对电力电子装置电压等级和功率等级的要求不断提高,三电平PWM变换器作为顺应这一潮流的一种解决方案正倍受关注^[1-3]。由于三电平PWM整流器能够有效减小电网的谐波污染,因而成为

近年来的研究热点^[4-8]。

基于滞环电流控制方法的三电平PWM整流器具有网侧功率因数高、谐波含量低等优点,因而得到了广泛的应用,如电动汽车充电站、风力发电以及变频器等领域。另一方面,尽管这种控制方法具有控制机理清晰、算法简单以及系统响应速度快的优点,但也会因电流环滞环环宽而引起功率管开关频率剧烈变

收稿日期: 2014-09-18

基金项目: 广东省重大科技专项计划资助项目(2011AA080402010)

作者简介: 周庆刚(1986-),男,河南南阳人,主要从事整流及逆变方面的研究。E-mail:1009828238@qq.com

化,具有低频率时跟踪性差、高频率时则开关损耗大的缺点^[9-12]。

针对滞环电流控制策略中因环宽而引起上述的问题,笔者提出了一种全新的电流自跟踪PWM控制策略。它不仅继承了滞环电流控制策略控制机理清晰以及系统响应速度快的特性,而且具有电流环与环宽无关,能够快速跟踪参考电流的优点。

本研究在分析其工作原理与结构的基础上,建立相应的数学模型,并且通过仿真和物理实验,验证其可行性与有效性。

1 滞环电流控制方法分析

1.1 电路拓扑

三电平PWM整流器电路拓扑如图1所示。其交流侧接三相四线制的供电系统,三相分别通过电感 L_1 、 L_2 、 L_3 接整流器的 a 、 b 、 c 3个桥臂,零线接直流侧两串联电容 C_1 和 C_2 中点,在图中用 N 表示。每相通过串联电感与后面的整流桥臂构成升压型电路。

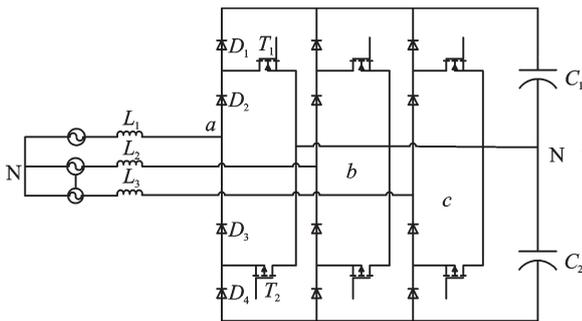


图1 三电平PWM整流器拓扑

1.2 滞环电流控制及其问题

三电平PWM整流器的滞环电流控制策略模型如图2所示。

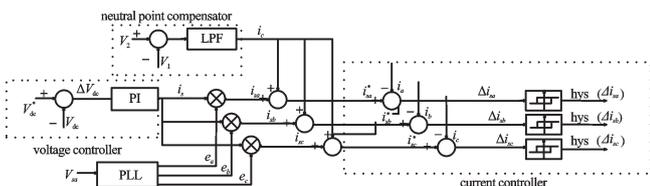


图2 滞环电流控制模型

V_1 、 V_2 — C_1 和 C_2 上的电压; V_{dc}^* 、 V_{dc} —给定参考电压和实际输出电压

从图2中可以看出,整流器控制采用的是电流内环和电压外环的双环结构。电压外环的作用是使输出电压跟踪给定电压值。电流内环的作用是使输入电流跟踪给定电流,并与电源电压同相位。滞环电流控制器的给定电流由于中点电位平衡的需要,加入了

中点电位补偿电流 $i_c(t)$,给定电流变为:

$$i_{sa}^*(t) = i_{sa}(t) + i_c(t) \quad (1)$$

$$i_{sb}^*(t) = i_{sb}(t) + i_c(t) \quad (2)$$

$$i_{sc}^*(t) = i_{sc}(t) + i_c(t) \quad (3)$$

给定电流与实际电流的差值经过滞环控制作用后产生PWM开关信号,控制整流器的开关器件进行动作。

滞环电流控制下电压电流波形示意图如图3所示。滞环的环宽为 $2h$ 。

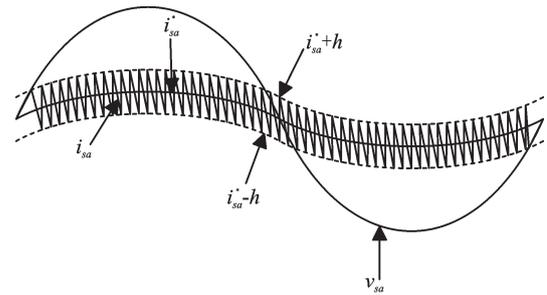


图3 滞环电流控制下的电压电流波形图

以A相为例,文献[12]从整流器的4种工作模式中,总结出开关器件PWM开关信号的表达式,如下式:

$$T_1 = hys(\Delta i_{sa}) \text{sign}(v_{sa}) \quad (4)$$

$$T_2 = (1 - hys(\Delta i_{sa})) (1 - \text{sign}(v_{sa})) \quad (5)$$

其中: $\Delta i_{sa} = i_{sa}^*(t) - i_{sa}(t)$ 。

$$hys(\Delta i_{sa}) = \begin{cases} 1, & \text{当} \Delta i_{sa} > h \text{时} \\ 0, & \text{当} \Delta i_{sa} < -h \text{时} \\ \text{保持}, & \text{当} \Delta i_{sa} \text{为其他时} \end{cases} \quad (6)$$

$$\text{sign}(v_{sa}) = \begin{cases} 1, & \text{当} v_{sa} > 0 \text{时} \\ 0, & \text{当} v_{sa} < 0 \text{时} \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{sign}(\Delta i_{sa}) = \begin{cases} 1, & \text{当} \Delta i_{sa} > 0 \text{时} \\ 0, & \text{当} v \Delta i_{sa} < 0 \text{时} \end{cases} \quad (8)$$

根据以上分析可以看出,滞环电流控制的实际电流与电流环的滞环环宽密切相关,而环宽选择的很大程度上决定了系统电流环的动态响应特性,并增加了系统设计的复杂性。

2 电流自跟踪控制策略研究

若把式(4,5)分别乘以式(8)可得式(9)和式(10),此时开关器件PWM开关信号的表达式,如下:

$$T_1 = hys(\Delta i_{sa}) \text{sign}(v_{sa}) \text{sign}(\Delta i_{sa}) \quad (9)$$

$$T_2 = (1 - hys(\Delta i_{sa})) (1 - \text{sign}(v_{sa})) (1 - \text{sign}(\Delta i_{sa})) \quad (10)$$

由式(9,10)可得到图4所示与滞环环宽无关的电流自跟踪控制下的电压电流波形示意图。其中滞环的宽度为 $2h$ 。

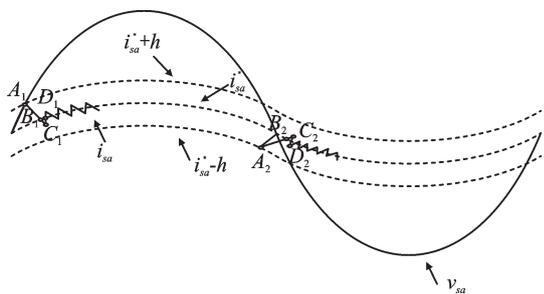


图4 电流自跟踪控制分析图

下面详细分析电流自跟踪控制一个周期电流环的工作原理。首先,在一个正弦波电压的正半周期,即 $v_{sa} > 0$ 时,由式(9)可得 $T_1 = hys(\Delta i_{sa}) \text{sign}(\Delta i_{sa})$ 。开始时,开关管 T_1 关断, $hys(\Delta i_{sa})$ 的值为1,电流 i_a 由大变小经过 A_1 点到 B_1 ,此时 $\Delta i_{sa} < 0$,所以 $\text{sign}(\Delta i_{sa}) = 0$,可得 T_1 仍关断。电流 i_a 继续减小由 B_1 到 C_1 ,此时 $\Delta i_{sa} > 0$,得 $\text{sign}(\Delta i_{sa}) = 1$, C_1 开通,电流 i_a 增大由 C_1 到达 D_1 。电流 i_a 经过 D_1 后,由于 $\Delta i_{sa} < 0$, $\text{sign}(\Delta i_{sa}) = 0$, T_1 关断,电流 i_a 开始减小。之后 i_a 的变化过程和前面的相似,从而实现了正弦电压正半周电流的自动跟踪,而与电流滞环的环宽无关。

其次,在一个正弦波电压的负半周期,即 $v_{sa} < 0$ 时,由式(10)可得 $T_2 = (1 - hys(\Delta i_{sa}))(1 - \text{sign}(\Delta i_{sa}))$ 。开始时,开关管 T_2 关断, $hys(\Delta i_{sa})$ 的值为0,电流 i_a 由小变大经过 A_2 点到 B_2 ,此时 $\Delta i_{sa} > 0$,可知 $\text{sign}(\Delta i_{sa}) = 1$, $1 - \text{sign}(\Delta i_{sa}) = 0$ 可得 T_2 仍关断。电流 i_a 继续增大由 B_2 到 C_2 ,此时 $\Delta i_{sa} < 0$,得 $\text{sign}(\Delta i_{sa}) = 0$,又有 $hys(\Delta i_{sa}) = 0$, T_1 开通,电流 i_a 减小由 C_2 到达 D_2 。电流 i_a 经过 D_2 后,由于 $\Delta i_{sa} > 0$, $\text{sign}(\Delta i_{sa}) = 1$, $1 - \text{sign}(\Delta i_{sa}) = 0$, T_2 关断,电流 i_a 开始增大。之后 i_a 的变化过程和前面的相似,从而实现了正弦电压负半周电流的自动跟踪,而与电流滞环的环宽无关。

另外为了使每一个正半周 $hys(\Delta i_{sa})$ 的值总为1,不必由0变化到1,可以在仿真是搭建相应的模块,予以实现,这样可以大大减小谐波电流。负半周的设置同样道理。

因此,可以将式(9,10)简化为式(11,12):

$$T_1 = \text{sign}(v_{sa}) \text{sign}(\Delta i_{sa}) \quad (11)$$

$$T_2 = (1 - \text{sign}(v_{sa}))(1 - \text{sign}(\Delta i_{sa})) \quad (12)$$

所以,电流 i_a 真正实现了正弦波整个周期的电流自动跟踪,而与环宽无关。

3 仿真与实验

3.1 仿真结果

为了验证所提出控制策略的可行性,本研究使用 Matlab 对文中介绍的新型三电平 PWM 整流器及提出

的电流自跟踪控制策略进行了仿真,仿真参数为:电源频率 $f_s = 50$ Hz,三相输入相电压 $u_m = 220$ V, $L = 2$ mH, $C_1 = C_2 = 2\ 200$ μ F, $U_{dc} = 1\ 200$ V。整流器 A 相的电压电流波形如图5所示。

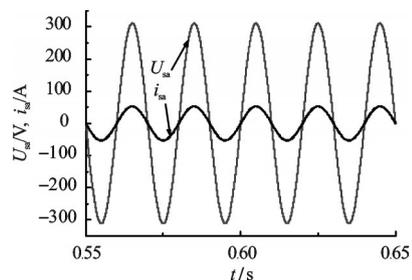


图5 电源 A 相输入电压与输入电流波形

图5表明,整流时,A相电网电压和电流同相位,网侧功率因数近似为1;三相电流波形为正弦波,说明整流器自身产生的谐波通过电感 L 的作用,得到很大的抑制。

3.2 物理实验

为了进一步验证所提出控制策略的有效性,本研究以数字信号处理器 TMS320F28035 为核心搭建了一台输入电源频率 $f_s = 50$ Hz,三相输入相电压 $u_m = 50$ V, $L = 2$ mH, $C_1 = C_2 = 2\ 000$ μ F, $U_{dc} = 200$ V 的样机,并进行了实验测试,实验结果如图6所示。

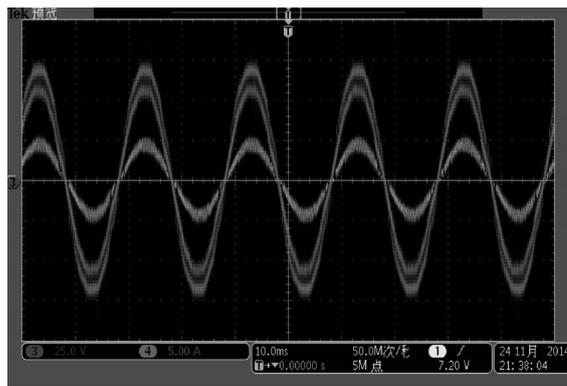


图6 电源 A 相输入电压与输入电流波形

物理实验进一步证明,整流器输入电压与输入电流均为正弦波且同相位,可以实现功率因数校正。

4 结束语

本研究首先介绍了一种新型的三相三电平 PWM 整流器拓扑,并在分析滞环电流控制策略的基础上,提出了一种新颖的电流自跟踪的 PWM 控制策略。然后,用 Matlab 进行了仿真和应用 DSP28035 搭建了样机,验证了该种控制策略的可行性,并为下一步研究电流自跟踪控制策略控制下三相三电平 PWM 整流器的谐波含量和功率因数奠定了基础。

参考文献(References):

- [1] LIN B R, LEE Y C, YANG T Y. Implementation of a three-phase high-power-factor rectifier with NPC topology [J]. **IEEE Transactions on aerospace and electronic systems**, 2004, 40(1): 180-189.
- [2] YACOUBI L, HADDAD K A, FNAIECH F, et al. A DSP-based implementation of a new nonlinear control for a three-phase neutral point clamped boost rectifier prototype [J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2003, 52(1): 197-205.
- [3] 伍文俊, 钟彦儒. 三相三电平PWM整流新技术[J]. 大功率变流技术, 2011(2): 26-34.
- [4] 符晓, 伍小杰, 于月森, 等. 基于g-h坐标系SVPWM算法三电平PWM整流器的研究[J]. 电气传动, 2009(39): 29-33.
- [5] WU J C, JOU H L. A new UPS scheme provides harmonic suppression, input power factor correction [J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 1995, 42(6): 629-635.
- [6] 尹忠刚, 孙向东, 钟彦儒, 等. 一种新型三相三电平PWM整流器的研究[J]. 电力电子技术, 2005, 39(5): 40-42.
- [7] 唐丽娜, 倪帅, 戴鹏, 等. NPC三电平整流器中点电位控制方法的研究[J]. 电气传动, 2012, 42(7): 41-45.
- [8] 薛畅, 王建曩, 纪延超. 采用三电平拓扑结构的广义有源电力滤波器[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(9): 61-64.
- [9] PAN C T, CHANG T Y. An improved hysteresis current controller for reducing switching frequency [J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 1994, 9(1): 97-104.
- [10] 屈莉莉, 张波. 三相电压型PWM整流器控制技术的发展[J]. 电力电子, 2007(4): 19-24.
- [11] 田凯. 一种新型三电平变频器拓扑及其控制策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学电气工程系, 2006.
- [12] LIN B R, LEE Y C, YANG T Y. Experimental verification of a three-phase multilevel rectifier with reduced number of power switches [J]. **IEEE Proceedings-Electric Power Application**, 2003, 150(5): 600-606.

[编辑: 张豪]

本文引用格式:

周庆刚, 李优新, 郭宁宁. 一种PWM整流器的电流自跟踪控制策略研究[J]. 机电工程, 2015, 32(4): 557-560.

ZHOU Qing-gang, LI You-xin, GUO Ning-ning. Current automatic tracking control strategy of PWM rectifier [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(4): 557-560.
《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第548页)

条件(取 $S=750 \text{ W/m}^2$, $T=35^\circ\text{C}$)发生突变后, 最大功率点处, $U_m=400 \text{ V}$, $P_m=29 \text{ kW}$, 波形变化如图14所示, 可见MPPT可使光伏板电压逐步升高, 并通过调制DC/DC输出电压基本保持不变。

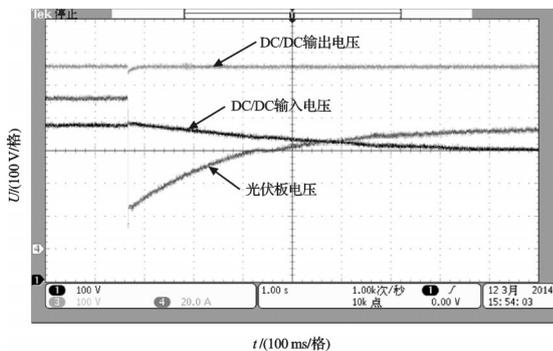


图14 MPPT有效性验证波形图

6 结束语

笔者研究了分布式光伏/储能一体化并网接口设备的控制技术, 开发了一套50 kW光储一体化系统, 并搭建了试验验证平台, 测试了光储一体化系统功能。

本研究经过反复的试验, 验证了该分布式光储一体化流器功能强大, 具备并网条件下恒功率充放电和快速

充放电切换以及离网条件下带不同负载和快速响应的能力; 同时, 具备并网平滑切换以及光伏最大功率点跟踪, 并具备三相独立供电能力, 具有很好的推广价值。

参考文献(References):

- [1] 艾欣, 韩晓男, 孙英云, 等. 光伏发电并网及其相关技术发展现状与展望[J]. 现代电力, 2013, 30(1): 1-7.
- [2] 许晓艳, 黄越辉, 刘纯, 等. 分布式光伏发电对配电网电压的影响及电压越限的解决方案[J]. 电网技术, 2010, 34(10): 140-145.
- [3] 张文亮, 丘明, 来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(7): 1-9.
- [4] 程华, 徐政. 分布式发电中的储能技术[J]. 高压电器, 2003, 39(3): 53-56.
- [5] 金一丁, 宋强, 陈晋辉, 等. 大容量电池储能电网接入系统[J]. 中国电力, 2010, 43(2): 16-20.
- [6] 李官军, 陶以彬, 胡金杭, 等. 储能系统在微网系统中的应用研究[J]. 电力电子技术, 2013, 47(11): 9-11.
- [7] 卢胜利, 鞠文耀, 贾中璐. 一种双向储能变流器并网控制策略研究[J]. 电力电子技术, 2013, 47(6): 41-43.
- [8] 桑丙玉, 杨波, 李官军, 等. 分布式发电与微电网应用的锂电池储能系统研究[J]. 电力电子技术, 2012, 46(10): 57-59.
- [9] 苏奎峰, 李强, 耿庆峰, 等. TMS320F28335 原理与开发[M]. 北京: 电子工业出版社, 2011.

[编辑: 张豪]