

# 基于虚拟磁链定向的 PWM 整流器控制方法研究

侯兆然

(许昌学院, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 基于电网电压矢量定向 (VOC), 考虑 PWM 整流器结构与交流电机电路结构的相似性, 采用类似交流电机磁链观测的方法, 构造电网的虚拟磁链作为矢量控制的定向, 建立通用的虚拟电网磁链定向 (VFOC) 的双闭环矢量控制系统。与传统的 VOC 方案相比较, VFOC 方案可以省去交流电网电压传感器, 既可以节省空间又可以降低成本。为了解决在观测虚拟电网磁链的过程中, 初始值偏差对控制效果的影响, 提出一种抗积分饱和的初始值观测处理方法, 可以有效地解决初始值给虚拟电网磁链观测器带来的误差。试验验证了采用 VFOC 可以实现单位功率因数 PWM 整流控制, 且控制器具有较好的静态稳定性和动态快速性。

**关键词:** 无传感器; 虚拟电网磁链; 矢量控制; PWM 整流器; VOC

## Research on control method of PWM rectifier based on virtual flux orientation

HOU Zhao-ran

(Xuchang University, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** Based on the grid voltage vector orientation (VOC), considering the similarity of PWM rectifier circuit structure and the structure of AC motors, this paper uses AC motors similar flux observation method, constructs virtual grid flux vector control as directed, and establishes a common virtual grid magnetic chain orientation (VFOC) of double-loop vector control system. Compared with the traditional VOC program, VFOC program can save AC grid voltage sensor, which can both save space and reduce costs. In order to solve the effect of the deviation of initial value on the control effect in the virtual grid flux observation process, it proposes an anti-windup initial value observation approach, which can effectively solve the error of the virtual grid flux observer due to initial value. Experimental verification using VFOC can achieve unity power factor PWM rectifier control, and the controller has better static stability and dynamic speediness.

**Key words:** sensor-less; virtual line-flux-linkage; vector control; PWM rectifier; VOC

中图分类号: TM461 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)21-0105-05

## 0 引言

PWM 整流技术相对于二极管静态整流具有先天的优势, 可以实现单位功率因数运行, 可以将电能回馈到电网中, 对快速变化的负载具有快速响应能力等优点<sup>[1-2]</sup>。目前在工业应用中 PWM 整流技术已经得到了较多的应用, 但是 PWM 整流器在成本上的劣势也是比较明显的<sup>[3]</sup>。

当前, 多数应用的是三相电压型 PWM 整流器, 采用的控制方案多为电网电压定向的矢量控制方法。这种控制方案, 需要检测三相输入电流、直流

母线电压以及电网测相电压。电流检测通常采用霍尔元件, 电流量的检测通常不能省略, 因为电流传感器提供控制器所需要的电流反馈输入信号, 而且过流、过载保护都需要电流反馈来实现<sup>[4]</sup>。直流母线电压的检测通常采用光电隔离放大器设计的检测电路, 母线电压是控制母线电压稳定必须的电压反馈输入, 而且过压、欠压保护通过电压反馈来完成, 同样不能省略<sup>[5-6]</sup>。电网电压检测电路的作用主要是通过检测电网电压的计算得到同步旋转坐标系变换的角度信息。

在无电网电压传感器的控制方案中, 只需通过其他的物理量观测出所需要的角度信息, 就可以按照电网电压定向的矢量控制方法进行控制了。从文献研究中我们可以得出, 主要可以通过三个方面来

**基金项目:** 河南省教育厅自然科学基金 (13A520754); 许昌学院校内科研基金 (2014013)

达到角度观测的目的,一是直接观测相电压的角度;二是观测电网电压然后通过锁相环一类的技术计算角度;三是通过观测虚拟电网磁链来得到角度信息<sup>[7-8]</sup>。通过比较,观测虚拟电网磁链的方法不仅能够准确地观测所需的量,而且因为自身有积分环节的存在对测量过程中的干扰有一定的抑制作用<sup>[9]</sup>。在观测虚拟电网磁链的过程中,存在初始值的问题,如果不对观测的初始值进行处理,观测值会出现偏差,导致控制效果变差甚至控制失败。本文提出一种观测初始值的处理方法,可以有效地解决初始值给观测器带来的误差。试验结果验证了本文所提出的方案能够在无电网电压传感器的情况下采用虚拟电网磁链的方法实现 PWM 整流控制,且控制器具有较好的静态稳定性和动态快速性。

### 1 虚拟磁链原理

三相 PWM 整流器的主拓扑结构如图 1 所示,拓扑结构中  $V_{dc}$  为母线电压,  $R$  为等效电阻,  $L$  为储能滤波电感,  $u_a, u_b, u_c$  为三相电网电压。交流电机控制拓扑结构如图 2 所示,虚线圈内为交流电机的等效结构。对比两份图,不难发现, PWM 整流器的网侧部分与三相交流电机有着莫大的相似之处。 PWM 整流器中的网侧电压相当于三相交流电机的反电动势,网侧电感相当于电机绕组的漏感,等效电阻相当于电机绕组的电阻<sup>[10]</sup>。因此可以类比于交流电机磁链观测的方法来观测虚拟电网磁链。

忽略三相电网电压的不平衡量,忽略线路阻抗,

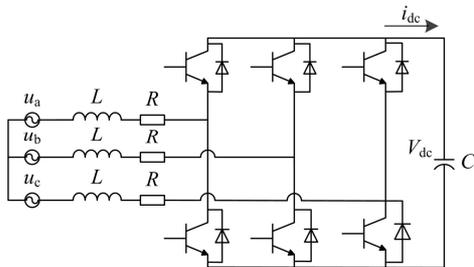


图 1 PWM 整流器拓扑结构  
Fig. 1 PWM rectifier topology

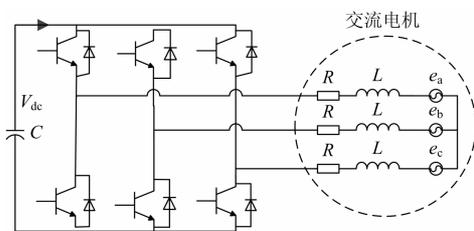


图 2 交流电机控制拓扑结构  
Fig. 2 AC motor control topologies

PWM 整流器在两相静止  $\alpha\beta$  坐标系下的电压方程为

$$\begin{cases} u_\alpha = L \frac{di_\alpha}{dt} + v_\alpha \\ u_\beta = L \frac{di_\beta}{dt} + v_\beta \end{cases}$$

其中: 
$$\begin{cases} v_\alpha = \frac{2}{3} V_{dc} \left( S_a - \frac{1}{2} (S_b - S_c) \right) \\ v_\beta = \frac{\sqrt{3}}{3} V_{dc} (S_b - S_c) \end{cases}$$
 为交流侧输出电压的  $\alpha, \beta$  分量;  $S_a, S_b, S_c$  是开关管的开关函数;

$u_\alpha, u_\beta, i_\alpha, i_\beta$  分别是三相电网电压与三相电流的  $\alpha, \beta$  分量。

理论上可以用上式进行电网电压观测并进行相应的无电网电压传感器的控制方法。但是,这种观测方法包含了电流的微分量,在实际控制系统中容易放大噪声干扰,对系统控制不利,需要对可能引入的干扰进行处理。令

$$\begin{cases} \psi_\alpha = \int u_\alpha dt \\ \psi_\beta = \int u_\beta dt \end{cases}$$

将上述的电压方程两边同时积分可得

$$\begin{cases} \psi_\alpha = \int V_\alpha dt + Li_\alpha \\ \psi_\beta = \int V_\beta dt + Li_\beta \end{cases}$$

式中,  $\psi_\alpha, \psi_\beta$  分别为虚拟电网磁链的  $\alpha, \beta$  分量。设电网电压矢量表达式为  $U = u_\alpha + ju_\beta$ , 虚拟电网磁链矢量表达式为  $\psi = \psi_\alpha + j\psi_\beta$ , 则电网电压超前于虚拟电网磁链,超前角度为  $\pi/2$ 。

### 2 虚拟电网磁链的 PWM 整流器控制方法

结合上文中的分析, PWM 整流器控制数学模型在同步旋转坐标系下包含虚拟电网磁链的矢量关系图如图 3 所示,图中的角度  $\theta$  为需要观测的物理量。

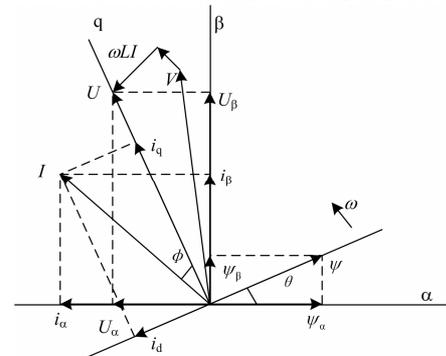


图 3 虚拟电网磁链矢量图  
Fig. 3 Virtual grid flux vector

根据图中各量关系,可以得到

$$\begin{cases} \sin \theta = \psi_{\beta} / \sqrt{\psi_{\alpha}^2 + \psi_{\beta}^2} \\ \cos \theta = \psi_{\alpha} / \sqrt{\psi_{\alpha}^2 + \psi_{\beta}^2} \end{cases}$$

进而可以计算得到相位角度为

$$\theta = \arctan(\psi_{\beta} / \psi_{\alpha})$$

在完成对相位角的估计后,我们就可以按照传统的 PWM 整流器控制方法进行控制。参照传统的 PWM 整流器控制方案,容易得到基于虚拟电网磁链的控制方案,控制框图如图 4 所示。

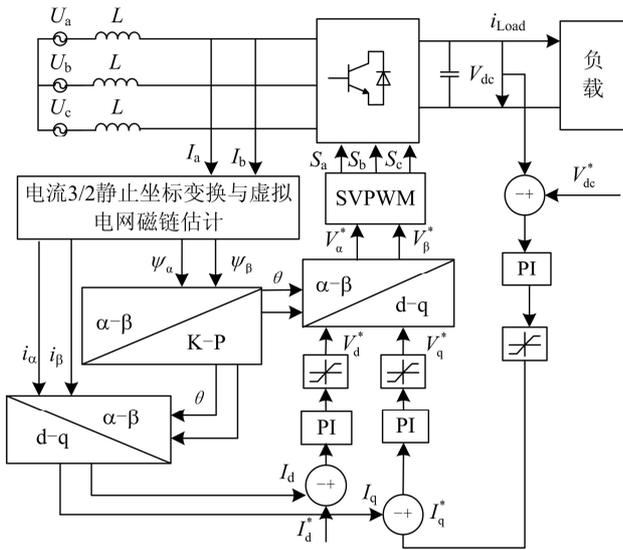


图 4 基于虚拟电网磁链的 PWM 整流器控制框图

Fig. 4 Rectifier PWM control block diagram based on virtual grid flux

不难发现,在虚拟电网磁链的观测中存在积分环节,如果在初值未知的情况下直接采用积分的方式来计算,很可能因为初值带来直流偏置使积分快速饱和,使观测结果出现偏差。角度观测结果的偏差,将直接影响 PWM 整流器整体的控制效果,甚至使控制系统失效导致整流器故障报警。

为了解决传统积分方法存在的弊端,可以借用 PID 控制器的思想,将 PID 控制器的抗积分饱和思想移植到虚拟电网磁链观测的积分运算中。首先需要合理设置虚拟电网磁链的输出限值,这部分的限值可以根据实际的电网侧电压情况计算得到,再者积分调节器的输出值要作为反馈量输入到积分调节器,作为抗积分饱和计算的参考反馈输入。积分器

的具体设计可以参照图 5 中的方法。

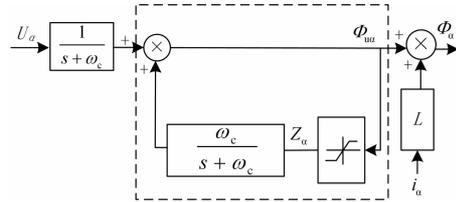


图 5 虚拟电网磁链积分器

Fig. 5 Virtual grid flux integrator

### 3 实验分析

基于虚拟电网磁链的 PWM 整流器控制方案是基于电网电压定向的 PWM 整流器控制方案设计的,为了验证上述方案的可行性以及性能,可以采用当前现有的 PWM 整流器硬件平台进行试验验证。现有的硬件平台采用图 1 的拓扑结构,具有独立的电网相位检测电路和网测电压检测电路。试验选用 30 kW 的 PWM 整流器,网侧电抗器电感为 1 mH,电网电压为 400 V AC,直流母线电容容量为 2 800 μF,直流母线电压设定值为 600 V,负载设计为电机对拖平台。驱动端电源采用虚拟电网磁链控制方法,负载端的电源采用传统控制方案。该 PWM 整流器采用 TI 的 TMS320F2812 为主要控制核心。

PWM 整流器稳态运行时网测电流正弦度和功率因数是衡量其性能的一个重要指标。图 6 给出了在平稳负载的情况下,PWM 整流器 A 相电流与 A 相电压的测量波形图。从图中可以看出,在采用虚拟电网磁链的控制方式下,PWM 整流器可以稳定地运行,相电流与相电压的相位基本不存在差别,近似实现了单位功率因数运行,符合了 PWM 整流器的基本要求。

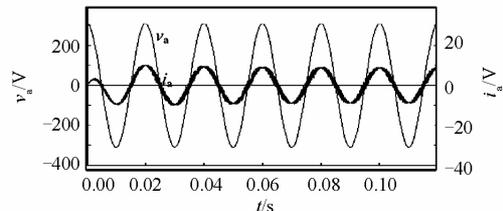


图 6 PWM 整流器稳态运行时 A 相电压与 A 相电流波形图  
Fig. 6 PWM rectifier steady-state operation A phase voltage and current waveforms diagram

PWM 整流器动态响应是衡量其性能的另一重要指标。通常的方法是快速改变负载,测试 PWM 整流器的动态跟踪情况。通过对比两种控制方案在相同的测试条件下的响应情况可以从这方面评判 VFOC 方案的性能。图 7、图 8 分别给出了在同一

时间对电机突加负载的情况下，作为整流模式的基于虚拟电网磁链控制方式的 PWM 整流器和作为反馈模式下的基于传统控制方法模式下的 PWM 整流器相电流及母线电压的跟踪情况（调整负载变化方向，使电源工作在不同的模式下得到类似的响应结果）。两份图采用软件采集，横坐标为采样次数，不对应具体时间单位，故不做单位标注；纵坐标分别为电流的幅值和电压的幅值，均采用标么值表示，也不做单位标注。从图中可以看到，在突加负载时，处于整流模式下的基于虚拟电网磁链的整流器经过短暂的调整时间后恢复稳定，与传统的控制方法保持基本一致的响应速度。

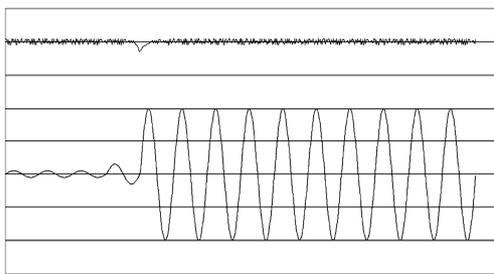


图 7 基于虚拟电网磁链负载突变响应

Fig. 7 Mutation load response based on virtual grid flux

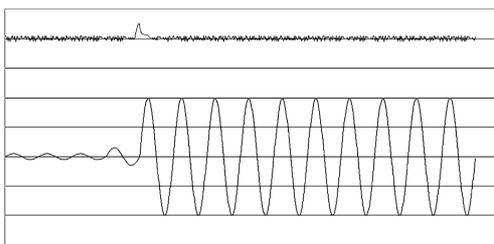


图 8 基于传统方法负载突变响应

Fig. 8 Mutation load response based on traditional methods

#### 4 结论

三相电压型 PWM 整流器的网侧部分与三相交流电机有着莫大的相似之处。通过将三相电压型 PWM 整流器中各部分与三相交流电机做对比处理，可以将 PWM 整流器网侧部分等效成受驱动器控制的电机侧。因此可以类比于交流电机磁链观测的方法来观测虚拟电网磁链。相比电网电压定向矢量控制方法可以省略电网电压传感器，降低了三相 PWM 整流器的成本。本文分析了虚拟电网磁链的观测方法，针对观测方法中存在的积分环节可能带来的直流偏置，设计了类似于抗饱和积分 PID 调节器方法的抗积分饱和积分器，可以有效地解决积分

初值带来的问题。本文应用现有 PWM 整流器在不增加硬件的情况下，采用基于虚拟电网磁链的方案进行实验测试，结果表明采用这种方案的 PWM 整流器稳态运行良好，并且动态调整较好，与采用电网电压定向控制方法的 PWM 整流器性能相近。但是这种方案仍然有不足之处，需要后续更多的研究，但是是比较好的一种技术方案。

#### 参考文献

[1] 程启明, 程尹曼, 薛阳, 等. 三相电压型 PWM 整流器控制方法的发展综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 145-155.  
CHENG Qi-ming, CHENG Yi-man, XUE Yang, et al. A summary of current control methods for three-phase voltage-source PWM rectifiers[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 145-155.

[2] 赵方平, 杨勇, 阮毅, 等. 三相并网逆变器直接功率控制和直接功率预测控制的对比[J]. 电工技术学报, 2012, 27(7): 212-220.  
ZHAO Fang-ping, YANG Yong, RUAN Yi, et al. Comparative study for direct power control and direct power predictive control in three-phase grid-connected inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(7): 212-220.

[3] 袁洁, 王耀南. 单相三电平整流器双滞环 SVPWM 电流控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 31-36.  
YUAN Jie, WANG Yao-nan. Double hysteresis SVPWM current control method for single-phase three-level rectifiers[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 31-36.

[4] 宋战峰, 夏长亮, 谷鑫. 静止坐标系下基于最优时间序列的电压型 PWM 整流器电流预测控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 234-240.  
SONG Zhan-feng, XIA Chang-liang, GU Xin. Stationary frame current regulation of PWM rectifiers based on predictive control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 234-240.

[5] 彭咏龙, 黄潇潇, 李亚斌. 三相 BUCK 型 SVPWM 整流器 LC 振荡阻尼混合控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 90-95.  
PENG Yong-long, HUANG Xiao-xiao, LI Ya-bin. Damping of LC oscillation using a hybrid combination

- approach for three-phase BUCK type SVPWM rectifier[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 90-95.
- [6] 杨勇, 赵方平, 阮毅, 等. 三相并网逆变器模型电流预测控制技术[J]. 电工技术学报, 2011, 26(6): 153-159.  
YANG Yong, ZHAO Fang-ping, RUAN Yi, et al. Model current predictive control for three-phase grid-connected inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(6): 153-159.
- [7] 郑征, 景小萍. 虚拟磁链定向的 PWM 整流器矢量控制研究[J]. 电气传动, 2011, 41(1): 38-41.  
ZHENG Zheng, JING Xiao-ping. Research for virtual flux oriented vector control of PWM rectifier[J]. Electric Drive, 2011, 41(1): 38-41.
- [8] 姚志垒, 肖岚, 陈良亮. 三相 SVPWM 并网逆变器的改进解耦控制方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(20): 99-103.  
YAO Zhi-lei, XIAO Lan, CHEN Liang-liang. An improved decoupling control method for three-phase grid-connected inverters with SVPWM[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(20): 99-103.
- [9] 赵仁德, 贺益康. PWM 整流器虚拟电网磁链定向矢量控制仿真研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(5): 94-98.  
ZHAO Ren-de, HE Yi-kang. Simulation study on the virtual line flux oriented vector control of the PWM rectifier[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 17(5): 94-98.
- [10] MALINOWSKIM, SZCZYGIEL W, KAZMIERKOWSKI M, et al. sensorless operation of active damping methods for three-phase PWM converters[J]. ISIE, 2005, 2: 775-780.

---

收稿日期: 2014-02-11; 修回日期: 2014-09-22

作者简介:

侯兆然(1983-), 男, 助教, 工学硕士, 研究方向为数字视频处理、自动控制信号处理等。E-mail: 42298918@qq.com