

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.08.022

风力发电系统中PWM整流器脉宽调制方法的研究*

彭 程, 潘再平*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 近年来, 离网型风力发电(isolated WECS)引起了人们的广泛关注, 为了获得可靠平稳的负载电压, 风力发电机侧整流器的控制至关重要。针对PWM整流器的动态响应问题, 首先分析了当前主流的三相电压型PWM整流器(VSR)的拓扑结构、数学模型及控制策略, 然后通过公式推导出基于电网电压定向的矢量控制策略, 最终在基于Matlab Simulink平台搭建了三相VSR仿真模型, 分别用正弦脉宽调制(SPWM)与空间矢量脉宽调制(SVPWM)方法进行了仿真研究。研究结果表明, 基于电网电压定向的矢量控制能够有效控制PWM整流器, 获得稳定的直流母线电压, 同时空间矢量脉宽调制方法能够有效改善VSR动态性能, 为离网型风力发电系统的研究提供了有力参考。

关键词: 离网型风力发电; 三相电压型PWM整流器; 矢量控制; 脉宽调制

中图分类号: TM614; TM461 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2013)08-0993-04

PWM modulation methods of PWM rectifiers in WECS

PENG Cheng, PAN Zai-ping

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In recent years, isolated wind energy conversion system(WECS) has aroused widespread concern, to obtain reliable and steady output voltage, the control characteristics of motor-side rectifier was evidently the key point. Aiming at dynamic response of PWM rectifier, firstly, the topology, mathematic model and control strategy of the most popular three phase voltage PWM rectifier were separately analyzed; Then, the vector control strategy based on grid voltage orientation was proposed through formula derivation, finally three phase VSR emulation model was established with Matlab Simulink using different PWM modulation methods(SPWM and SVPWM). The results indicate that the control strategy proposed above was effectively demonstrated in achieving steady DC-bus voltage; meanwhile, SVPWM strategy was well proved in improving the dynamic response of VSR. The simulation results provide reference to the control of isolated WECS.

Key words: isolated wind energy conversion system(WECS); voltage source rectifier(VSR); vector control; pulse width modulation(PWM)

0 引 言

伴随着全球能源消耗的持续增长以及传统化石能源的可开采量逐年下降, 近年来, 风力发电成为世界各国的研究热点。风力可运行在并网模式下或离网模式下, 离网风力发电以经济、实用的特点成为我

国新能源发电中的一个重要发展方向, 它可为偏远地区提供电能^[1]。

由于风力发电受风能的影响较大, 为了满足负载对电压和频率的要求, 必须对风能加以控制, 保证系统稳定工作^[2]。在并网运行时, 直流侧电压的稳定是由并网逆变器控制的, 机侧整流器负责有功的调节,

收稿日期: 2013-01-11

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)资助项目(2011AA050204)

作者简介: 彭 程(1988-), 男, 江苏扬州人, 主要从事电机控制及驱动方面的研究。E-mail: idealpc@zju.edu.cn

通信联系人: 潘再平, 男, 教授, 硕士生导师。E-mail: panzaiping@zju.edu.cn

以实现最大风能追踪为目的;在离网运行时,直流侧电压的稳定则由机侧整流器控制。

现有的风力发电系统中大多仍采用二极管不控整流和boost变换器结构,其结构尽管简单,控制方便,但是不控整流使得系统输入电流严重畸变,产生大量谐波,使发电机转矩产生振荡^[3]。

近年来,随着电力电子技术的发展,不控整流器逐渐地被PWM整流器取代。永磁同步直驱风力发电系统,机侧整流器采用三相电压型PWM整流器,实现系统输入单位功率因数,同时获得稳定的直流母线电压^[4-6]。

笔者研究三相PWM整流器的工作原理与控制方法,通过Simulink建模分析,对于SPWM与SVPWM两种脉宽调制方式进行对比分析。

1 三相PWM整流器工作原理

1.1 三相PWM整流器拓扑结构

三相PWM整流器按照直流储能形式分为电压型和电流型两种。三相电压型PWM整流器是目前应该最多的变流器,典型三相电压型PWM整流器的拓扑结构^[7]如图1所示。

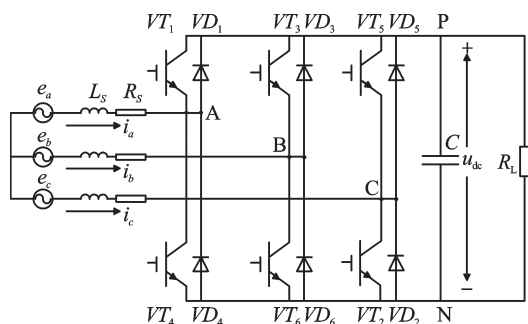


图1 三相电压型PWM整流器拓扑结构

输入侧由永磁同步风力发电机等效的三相电压源、三相输入电感构成,功率电路由6个全控功率开关器件构成,直流侧由直流储能电容和负载组成。

1.2 三相PWM整流器数学模型

为方便分析,作如下假设:

- (1) 三相电网为对称的三相交流电,电压波形为正弦;
- (2) 三相输入电感及电阻值大小相等,且三相对称,在工作范围内不饱和;
- (3) 功率开关器件为理想器件;
- (4) 器件的开关频率远大于电网频率,且不考虑死区时间和过渡过程。

图1中各变量定义如下:网侧三相交流电压为 E_a 、 E_b 、 E_c ,网侧三相电流为 i_a 、 i_b 、 i_c ,网侧输入三相电感为 L_s ,电感电阻为 R_s ,直流侧母线电容为 C ,直

流母线电压为 U_{dc} ,直流侧负载电阻为 R_L ,网侧三相电压的中点为 O ,直流侧电压参考点为 N ,两参考点之间的电压差为 U_{No} ,同时定义功率开关管的开关函数 s_k 为:

$$s_k = \begin{cases} 1 & \text{上桥臂导通, 下桥臂关断} \\ 0 & \text{上桥臂关断, 下桥臂导通} \end{cases} \quad (1)$$

根据基尔霍夫电压和电流定律可得ABC坐标系下的三相电压型PWM整流器的数学模型:

$$\begin{cases} L_s \frac{di_a}{dt} = E_a - i_a R_s - s_a U_{dc} + \frac{s_a + s_b + s_c}{3} U_{dc} \\ L_s \frac{di_b}{dt} = E_b - i_b R_s - s_b U_{dc} + \frac{s_a + s_b + s_c}{3} U_{dc} \\ L_s \frac{di_c}{dt} = E_c - i_c R_s - s_c U_{dc} + \frac{s_a + s_b + s_c}{3} U_{dc} \\ C \frac{dU_{dc}}{dt} = s_a i_a + s_b i_b + s_c i_c - \frac{U_{dc}}{R_L} \end{cases} \quad (2)$$

将ABC坐标系下的方程变换至两相旋转的 dq 坐标系下,可得^[8]:

$$\begin{bmatrix} L_s \frac{di_d}{dt} \\ L_s \frac{di_q}{dt} \\ C \frac{dU_{dc}}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & \omega L_s & -s_d \\ -\omega L_s & -R_s & -s_q \\ \frac{3}{2} s_d & \frac{3}{2} s_q & -\frac{1}{R_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ U_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_d \\ E_q \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: E_d 、 E_q — d 、 q 轴电压; i_d 、 i_q — d 、 q 轴电流; s_d 、 s_q — d 、 q 轴开关函数。

可以看出,模型的 d 、 q 轴电流相互耦合,不利于实现电流的独立控制,在下面将会提到模型解耦的方法。

1.3 VSR电流控制策略

目前,VSR电流控制技术主要分为两大类,即间接电流控制和直接电流控制^[9]。

间接电流控制主要以相幅控制为代表。间接电流控制的优点在于控制简单,一般无需电流反馈控制。而其主要问题在于,VSR电流动态响应不够快,甚至交流侧电流含有直流分量,且对系统参数波动较敏感^[10]。

而直接电流控制,由于对电流有直接的反馈控制,可以获得高品质的电流响应,其中主要包括以固定开关频率PWM控制以及滞环PWM控制等。固定开关频率PWM电流控制的算法便捷,物理意义清晰,网侧变压器及滤波器设计较容易,本研究重点关注固定开关频率且采用电网电动势前馈的PWM控制^[11]。

由PWM整流器在同步旋转的 dq 坐标系下的数学模型式可得:

$$\begin{cases} E_d = i_d R_s - \omega L_s i_q + L_s \frac{di_d}{dt} + V_d \\ E_q = i_q R_s + \omega L_s i_d + L_s \frac{di_q}{dt} + V_q \end{cases} \quad (4)$$

式中: V_d, V_q —交流侧电压的 d, q 轴分量, $V_d = s_d U_{dc}$, $V_q = s_q U_{dc}$ 。

整理得:

$$\begin{cases} V_d = E_d + \omega L_s i_q - \left(L_s \frac{di_d}{dt} + i_d R_s \right) \\ V_q = E_q - \omega L_s i_d - \left(L_s \frac{di_q}{dt} + i_q R_s \right) \end{cases} \quad (5)$$

由上述公式可以得到PWM整流器在同步旋转 dq 坐标系下的解耦控制的原理图,如图2所示。

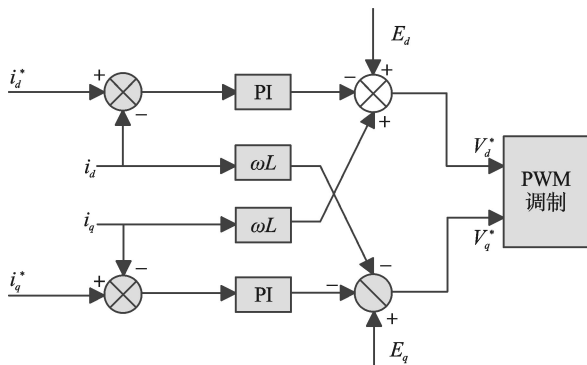


图2 同步旋转 dq 坐标系下的直接电流控制框图

由图2可以看出,三相VSR在 dq 坐标系下的解耦控制实质是向 d, q 轴电流PI调节后的结果注入耦合分量,同时引入电网电压 d, q 轴分量的前馈补偿控制。采用如图2所示的控制方法,可得:

$$\begin{cases} V_d^* = -\left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (i_d^* - i_d) + E_d + \omega L_s i_q \\ V_q^* = -\left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) (i_q^* - i_q) + E_q - \omega L_s i_d \end{cases} \quad (6)$$

式中: i_d^*, i_q^*, K_p, K_i — d, q 轴电流给定分量和PI调节器的比例、积分系数。

d 轴定向于电网电压的三相电压型PWM整流器的矢量控制框图如图3所示。

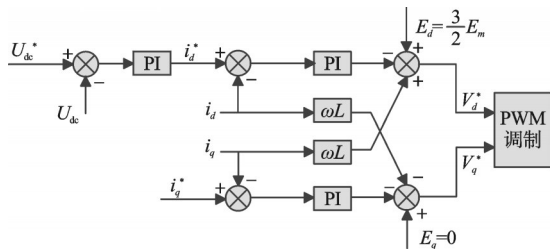


图3 d 轴定向于电网电压的三相电压型PWM整流器的矢量控制框图

由图3可以看出,电压外环采用PI调节器控制,主要实现直流母线电压在稳定时无静态误差,其输出为电流给定信号;电流内环直接控制网侧电流,主要实现电压外环输出的指令电流的快速跟踪,具有很好的动态性能。

基于上述优点,基于电网电压矢量定向的矢量控

制方法在实际中得到了广泛的应用。

2 仿真设计

根据图3的控制策略,本研究在Simulink中分别搭建了仿真模型。

三相PWM整流的主电路如图4所示,主电路参数为:网侧输入线电压幅值110 V、频率50 Hz,进线侧电阻1 Ω ,进线电感0.01 H,直流侧滤波电容2 200 μF ,电阻负载55 Ω ,直流侧电压450 V。

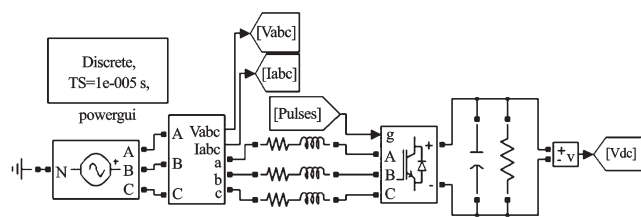


图4 三相PWM整流器主电路模型

PWM调制模块如图5所示,其中有两个调制模块,分别采用SVPWM调制与SPWM调制,Selector用来实现两者的切换,开关频率都设为10 kHz。

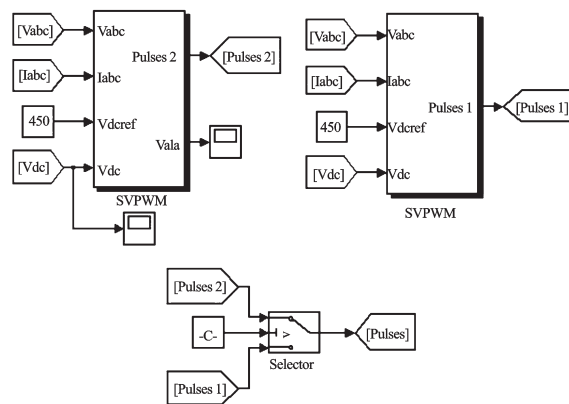


图5 PWM调制模块

仿真结果分别如图6~9所示。SPWM调制下与SVPWM调制下的直流侧电压波形如图6、图7所示;SPWM调制下与SVPWM调制下的交流侧a相电压电流波形如图8、图9所示。

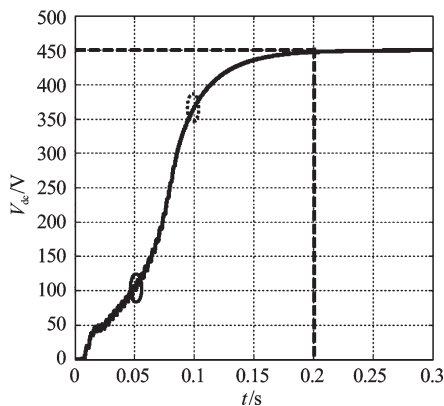


图6 SPWM调制—直流侧电压波形

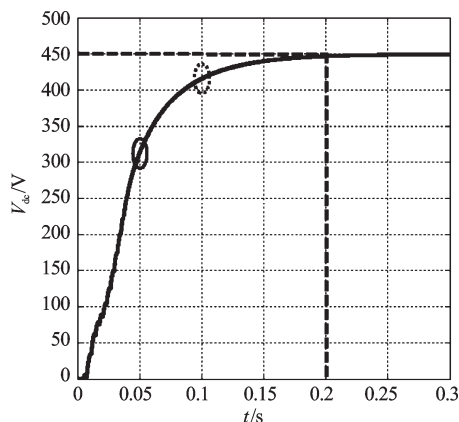


图7 SVPWM调制-直流侧电压波形

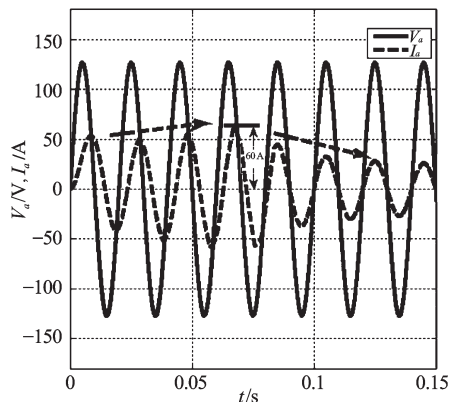


图8 SPWM调制-交流侧a相电压电流波形

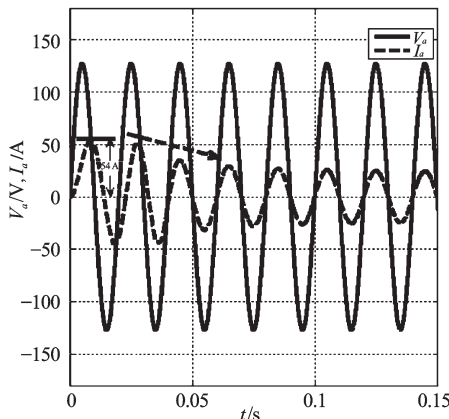


图9 SVPWM调制-交流侧a相电压电流波形

从仿真结果可以明显发现,两种调制方式都能正确稳定运行,直流侧电压稳定在450 V,网侧电流与电压同相位,即运行在单位功率因数下,仿真结果证实了仿真模型的正确性以及基于电网电压定向的矢量控制策略的正确性及可行性。

此外,从图6~9中可以明显看出两种PWM调制方式在启动性能方面的差异,首先观察图6与图7,SPWM调制下,在0.05 s、0.1 s时直流侧电压分别为约100 V、370 V,分别如图6中实线圈和虚线圈所示位置;而SVPWM调制下,在0.05 s、0.1 s时直流侧电压分别为约300 V、420 V,分别如图7中实线圈所示位置,这充分说明SVPWM调制下直流电压动态响

应速度快,能够快速地跟踪直流电压指令。

其次,观察图8与图9,SPWM调制下,冲击电流振荡剧烈,冲击电流幅值先逐渐增大然后才逐渐减小,最大冲击电流达到60 A,约0.1 s才达到稳定运行状态;而SVPWM调制下,冲击电流小幅振荡,振荡幅度也不断减小,冲击电流最大值仅为54 A,约0.05 s时就能达到稳定,这说明SVPWM调制能够有效抑制电流超调,加速电流响应时间。

3 结束语

通过仿真,本研究对PWM脉宽调制方法进行了深入探讨,仿真结果证实了不同脉宽调制方法对于三相VSR的性能的影响,在同样的开关频率下,SVPWM调制下的系统波形品质更高,这就意味着在获得相同的波形品质时,SVPWM可以在较低的频率下运行,大大减小了开关损耗。仿真结果表明,SVPWM能有效改善VSR的动态响应,对于离网小型的风力发电系统的研究具有参考作用。

参考文献(References):

- [1] 储灵施,分布式电源接口逆变器的控制方法研究[D]. 广州:广东工业大学机电工程学院,2010.
- [2] 陈娜娜,宁 玮,李富生,等. 风电并网中储能技术应用的探讨[J]. 机电工程技术,2011,40(12):49-51.
- [3] 时建欣,焦振宏,董金宝,等. 三相PWM整流器在风力发电系统中的应用研究[J]. 微特电机,2010,38(6):31-33.
- [4] 黄 琦,直驱式永磁风力发电系统若干问题研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2012.
- [5] QI H, PAN Zai-ping. Sensorless control of permanent magnet synchronous generator in direct-drive wind power system [C]//2011 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Beijing: [s.n.], 2011:1-5.
- [6] KHABURI D, NAZEMPOUR A. Design and simulation of a PWM rectifier connected to a PM generator of micro turbine unit[J]. *Scientia Iranica*, 2012, 19(3): 820-828.
- [7] 游 帅. 可逆电源模块与多轴伺服系统研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2012.
- [8] 刘念洲,刘成浩. 基于MATLAB的三相电压型PWM整流系统仿真[J]. 船电技术,2009,29(2):43-46.
- [9] 张崇巍,张 兴. PWM整流器及其控制[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [10] WU R, DEWAN S B, SLEMON G R. Analysis of an AC-to-DC voltage source converter using PWM with phase and amplitude control [J]. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 1991, 27(2): 355-364.
- [11] MALINOWSKI M, KAZMIERKOWSKI T. Review and comparative study of control techniques for three-phase PWM rectifiers [J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2003, 63(3-5): 349-361.

[编辑:李 辉]