

直驱式风力发电并网逆变器的仿真分析

王晓明 肖雯娟*

(兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 兰州 730050)

摘要 对直驱式风力发电并网逆变器工作原理研究的基础上,建立了逆变器在三相旋转坐标系下的数学模型并进行分析。提出了一种基于前馈解耦的双闭环控制策略,同时结合矢量脉宽调制方法(SVPWM)对交流侧输出电流实施有效控制,使其波形正弦且与电网电压同频同相,从而大大减少了对电网的谐波污染,提高了风力发电的并网效率和可靠性。同时,对该方法在 Matlab/Simulink 中进行了建模与仿真,仿真结果验证了控制方法设计的正确性和可行性。

关键词 风力发电 并网逆变器 前馈解耦 空间矢量脉宽调制 谐波污染

中图分类号 TM614; 文献标志码 A

随着世界能源危机的日益严重以及公众对于改善生态环境要求的日益高涨,使得风能作为一种清洁可再生能源,受到了世界各国的高度重视。目前,直驱式风力发电系统以其在并网发电中体现的优势而受到研究者的青睐^[1]。本文即针对直驱式永磁同步风力发电系统并网环节,研究其网侧逆变器的控制策略。本课题采用瞬时电流控制技术以电网电压同步信号为逆变器输出电流的跟踪信号,能够使逆变电流快速跟踪电网电压信号,实现了单位功率因数并网及有功、无功功率的解耦控制。同时得到稳定的直流侧电压。最后运用 Matlab/Simulink 对系统进行了建模与仿真分析。

1 并网逆变器原理

三相电压型逆变器拓扑结构如图1所示。

针对三相 VSR 一般数学模型的建立,通常作以下假设^[2]:

(1) 电网电动势为 (e_a, e_b, e_c) 为三相平稳的纯

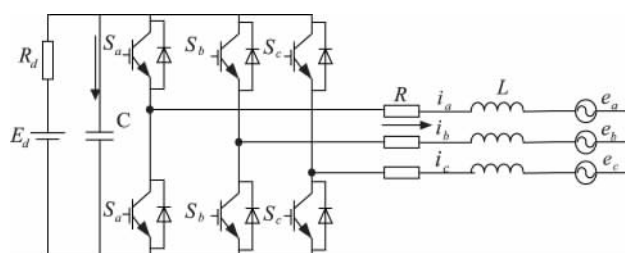


图1 三相电压型逆变器拓扑结构

正弦波电动势。

(2) 网侧滤波电感 L 是线性,且不考虑饱和。

(3) 功率开关管损耗以电阻 R 表示,即实际的功率开关管可由理想开关与损耗电阻 R 串联等效表示。

由三相 VSR 的拓扑结构可得其在 dq 坐标系下的数学模型:

$$\begin{cases} e_d = L \frac{di_d}{dt} + Ri_d + \omega Li_q + u_d \\ e_q = L \frac{di_q}{dt} + Ri_q - \omega Li_d + u_q \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, e_d, e_q 为电网电动势矢量的 d, q 轴分量; u_d, u_q 为三相 VSR 交流侧电压矢量的 d, q 轴分量; i_d, i_q 为三相 VSR 交流侧电流矢量的 d, q 轴分量; L 为交流侧滤波电感; C 为直流侧电容; R 为等效电阻。

2011年6月27日收到

甘肃省科技支撑计划资助

第一作者简介: 王晓明(1954—),男,甘肃民勤人,教授,研究方向:自动控制、计算机应用技术。

* 通信作者简介: 肖雯娟(1987—),女,甘肃武都人,研究生,研究方向: 风力发电并网关键技术。E-mail: xiaowenjuan2@163.com。

2 系统的控制方法

2.1 前馈解耦控制

经过坐标变换后,三相对称静止坐标系中的基波正弦变量转化成了同步旋转坐标系中的直流量,但由(1)式可以看出,这依然是一个强耦合的系统, d 、 q 轴电流变化相互影响,因此为了实现对电流的控制,研究中采用了电网电压合成矢量定向的控制策略,将同步旋转 dq 坐标系下的 d 轴定向于电网电压合成矢量 E 上,且 q 轴超前 d 轴 90° 。同时采用前馈解耦和前馈补偿控制策略,当电流调节器选用 PI 调节器时, u_d 、 u_q 的控制方程如式(2)所示。

$$\begin{cases} v_d^* = -\left(k_p + \frac{k_i}{s}\right)(i_d^* - i_d) - \omega L i_q + e_d \\ v_q^* = -\left(k_p + \frac{k_i}{s}\right)(i_q^* - i_q) + \omega L i_d + e_q \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中 k_p 、 k_i 为控制环的比例参数和积分参数; u_d 、 u_q 为逆变器指令交流电压在两相旋转坐标系中的量; i_d^* 、 i_q^* 为交流侧逆变指令电流。以上为电流内环控制策略,再加入电压外环的 PI 调节,则整体形成一个双闭环控制系统。电流内环的作用主要是按电压外环输出的电流指令进行电流控制,如实现单位功率因数正弦波电流控制,而电压外环的作用主要为控制直流侧电压。控制框图如图 2 所示。

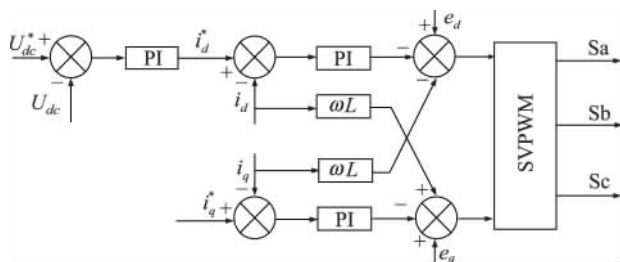


图 2 控制框图

2.2 空间矢量脉宽调制算法

SVPWM 的控制方案分为三个部分,即三相电压的区间分配、矢量合成的最佳序列选择和控制算法^[3]。电压的区间分配直接影响到具体的控制算法,矢量合成序列的选择则关系到开关损耗和谐波分量^[4]。

2.2.1 判断指令电压 v_{ref} 所在扇区

将 v_d^* 、 v_q^* 经坐标变换后得到 v_α 、 v_β ,由二者合成的电压矢量所在扇区可由以下简便算法计算得知。

$$\text{令} \begin{cases} u_1 = u_\beta \\ u_2 = \sqrt{3}u_\alpha - u_\beta \\ u_3 = -\sqrt{3}u_\alpha - u_\beta \end{cases} \quad (3)$$

$$A = \begin{cases} 1 & \mu_1 > 0 \\ 0 & \mu_1 \leq 0 \end{cases}, B = \begin{cases} 1 & \mu_2 > 0 \\ 0 & \mu_2 \leq 0 \end{cases}, C = \begin{cases} 1 & \mu_3 > 0 \\ 0 & \mu_3 \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

即参考电压矢量所在扇区完全由 u_β 、 $\sqrt{3}u_\alpha - u_\beta$ 、 $-\sqrt{3}u_\alpha - u_\beta$ 三式与 0 的关系来确定,可以看出 A、B、C 之间共有八种组合,事实上 A、B、C 不会同时为 1 或同时为 0,所以实际的组合为六种, A、B、C 组合取不同的值对应着不同的扇区,并且为一一对应。为区别六种状态,令 $N = 4C + 2B + A$,则可以通过表 1 计算参考电压矢量所在扇区。其仿真模型如图 3 所示。

表 1 参考电压扇区判断

N	3	1	5	4	6	2
扇区	I	II	III	IV	V	VI

2.2.2 计算相邻两开关电压矢量的作用时间

v_{ref} 由所在扇区的相邻两个空间矢量作用而成,定义每个扇区中先发生的矢量叫主矢量,用 T_x 表示,后发生的矢量叫辅矢量,用 T_y 表示,令 X、Y、Z 分别表示 $T_x + T_y \leq T$ 、 T_y 的作用时间, T 为载波周期。经分析可知 X、Y、Z 的值可由式(5)计算得到。对于不同的扇区,基本矢量的作用时间可按表 2 取值。仿真模型如图 4 所示。

$$\begin{cases} X = \frac{\sqrt{3}u_\beta T}{U_{dc}} \\ Y = T \frac{(\sqrt{3}u_\beta + 3u_\alpha)}{2} U_{dc} \\ Z = T \frac{(\sqrt{3}u_\beta - 3u_\alpha)}{2} U_{dc} \end{cases} \quad (5)$$

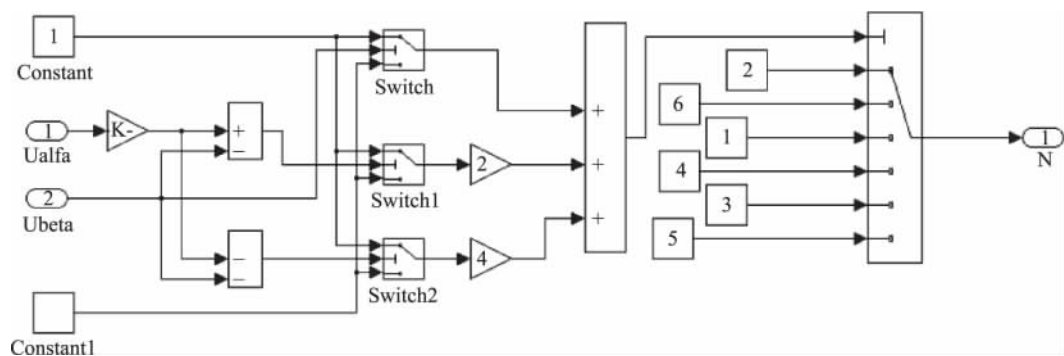


图3 扇区判断仿真模型

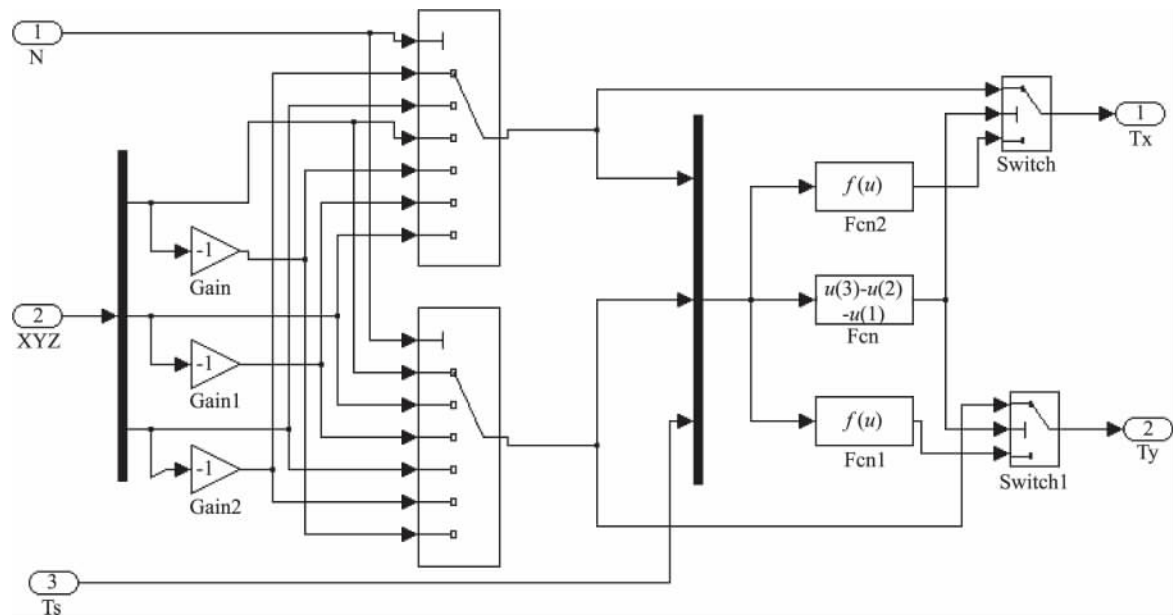


图4 基本矢量作用时间仿真模型

表2 基本矢量作用时间						
扇区	I	II	III	IV	V	VI
T_x	$-Z$	Z	X	$-Z$	$-Z$	$-Z$
T_y	X	Y	$-Y$	Z	$-Z$	$-X$

2.2.3 根据开关电压矢量作用时间合成三相 PWM 信号

根据 T_x 、 T_y 和开关切换规则,并考虑到扇区的不同,可由式(6)计算出开关作用时间 T_{on1} 、 T_{on2} 、 T_{on3} :

令
$$\begin{cases} T_a = (T - T_x - T_y) \\ T_b = T_a + T_x \\ T_c = T_b + T_y \end{cases} \quad (6)$$

则开关作用时间如表3所示。仿真模型如图5

所示。

表3 开关电压矢量作用时间						
扇区号	I	II	III	IV	V	VI
T_{on1}	T_a	T_b	T_c	T_c	T_b	T_a
T_{on2}	T_b	T_a	T_a	T_b	T_c	T_c
T_{on3}	T_c	T_c	T_b	T_a	T_a	T_b

3 仿真分析

为验证控制系统设计的正确性,在 Matlab7.6/Simulink 中搭建仿真模型。具体参数为:直流侧母

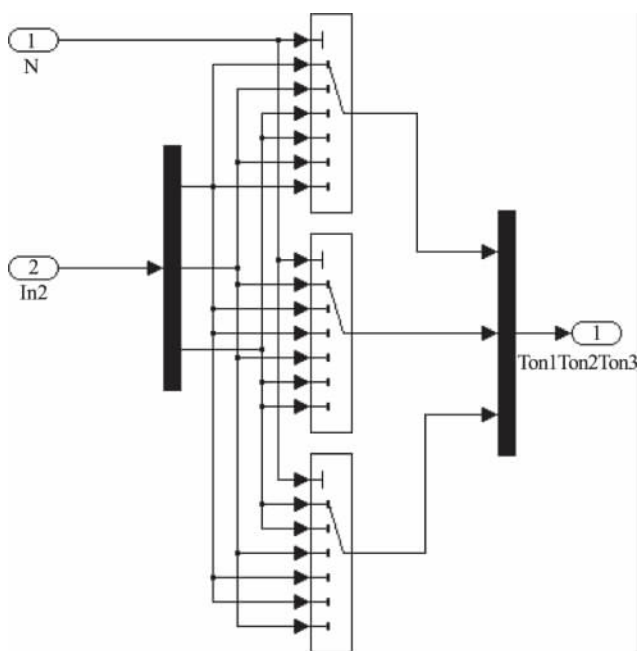


图5 开关电压矢量作用时间仿真模型

线电压指令值为1 200 V,并网逆变器额定功率为1.2 MW,电网电压峰值为690 V,开关频率为2 kHz,直流侧电容为6.8 mF,滤波电感为3.3 mH。逆变桥用系统提供的通用桥(IGBT + DIODE),电网用三相对称电压源模拟,并使用PLL锁相环模块来计算电网电压角频率。为了便于观察,本设计将电压、电流进行了标幺化,电压基值为690 V,功率为1.2 MW。

图6所示为系统在逆变状态下的A相电压、电流波形。为便于观察,将电流波形反相。从图中可以看出,电流为正弦波,且与电网电压同频反相,实现了良好的跟踪性能,并网功率因数为1。

并网逆变系统的另一个重要功能是使并入电网的电流谐波满足并网标准。对并网电流进行FFT分析,结果如图7所示。

从图7中可以看出THD值为2.67%,满足小于5%的要求。由此可见,经系统控制输出的并网电流谐波符合并网要求。

图8所示为直流侧电压值。由图可见,直流侧电压值被稳定在1 200 V左右,有轻微的脉动,可见电压外环起到了良好的控制作用。

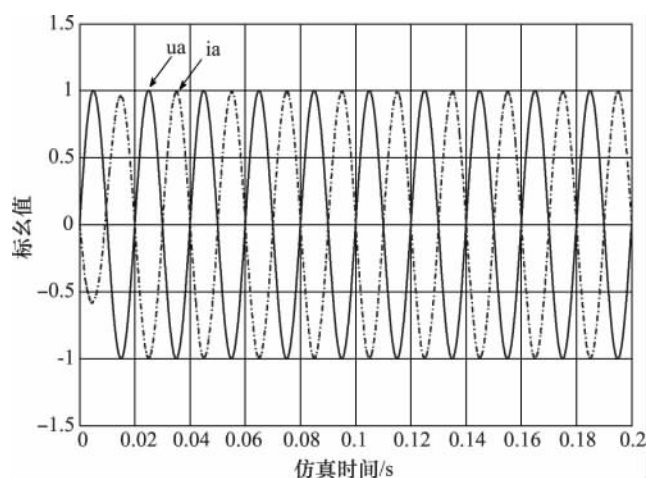


图6 A相电压电流波形

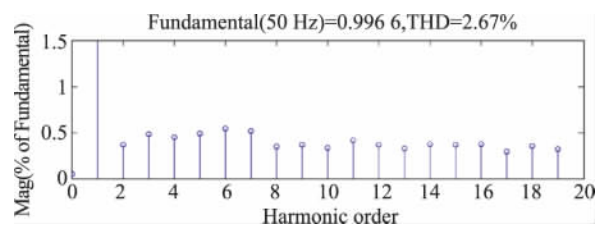


图7 A相并网电流FFT分析(标幺值)

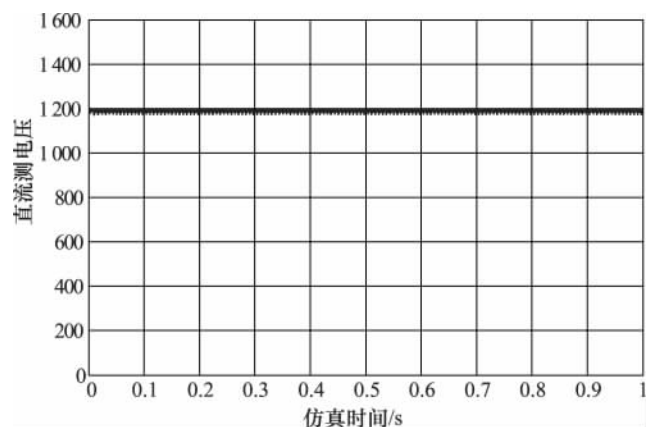


图8 直流侧电容电压

4 结束语

本文对风力发电并网逆变器的工作原理进行了分析,建立其数学模型,并对双闭环控制系统进行设计,结合SVPWM算法实现了整个系统的仿真。

(下转第6854页)

The Equipment of Distributed Power in Synchronized Grid-connected

YANG Yang¹, SUN Kan², WANG Jian-hua¹

(College of Electronic Information , Jiangsu University of Science and Technology¹ , Zhenjiang 212000 , P. R. China;

Nanjing Grid Power Automation Co. , Ltd² , Nanjing 211106 , P. R. China)

[Abstract] As demand of the distributed power grid-connected increased constantly , the frequent of distributed power grid connected becomes an important issue. A equipment of distributed power in synchronized grid-connected based on reserve protection is designed , and the equipment have three remote functions like DTU , integrated within the protection equipment to reduce the cost. Using LPC2468 to build the hardware circuit , real-time acquire both sides of the grid parameters to monitor distributed power , using the derivative algorithm fastly to calculated the real-time phase angle difference , embedded real-time multitasking operating can protect functions of system , to make distributed power grid-connected rapidly and accurate.

[Key words] distributed power embedded systems synchronized grid-connected derivative method
angular phase difference

(上接第 6849 页)

仿真结果验证了本文所建立的并网逆变器控制系统的正确性 , 同时也验证了系统控制方法的可行性 , 为直驱型风力发电系统的研究奠定了基础。

参 考 文 献

1 李建林 , 许洪华 . 风力发电中的电力电子变流技术 . 北京 : 机械工业出版社 2008

2 张崇巍 , 张 兴 . PWM 整流器及其控制 . 北京 : 机械工业出版社 2003

3 Yang Yong , Ruan Yi , Shen Huanqing , *et al.* Grid-connected inverter for wind power generation system. Journal of Shanghai university (English) 2009; 13(1) : 51—56

4 张厚升 , 赵艳雷 . 基于矢量解耦控制的风电并网逆变器研究 . 电气传动 2010; 40(9) : 28—32

Simulation Analysis of Grid-connected Inverter of Direct-driven Wind Power System

WANG Xiao-ming , XIAO Wen-juan*

(Dept of Electronics and Information Engineering , Lanzhou University of Tecnology , Lanzhou 730050 , P. R. China)

[Abstract] Working principle of direct-driven wind power grid inverter was studied , on the basis of analyzing the mathematical model of the grid-connected inverter was deduced. A feedforward decoupling double closed loop control strategy was proposed , and the space vector pulse width modulation (SVPWM) method was analyzed. So that , the output current is effective controlled , whose waveform is sinusoidal , the frequency and phase are the same as the grid voltage. Thus this method greatly reduces the powers of hamonic pollution , improves the performance and reliability of the inverter , and lastly raises the efficiency and reliability of wind power system. Meawhile , this method is modeled and simulated in Matlab/Simulink software , the simulation result verifie its feasibility and correctness.

[Key words] wind power generation grid-connected inverter feedforward decoupling svpwm
hamonic pollution