

# 基于 SVPWM 的直驱式风电系统网侧变换器控制策略

朱晓琴, 秦生升

(盐城工学院 电气工程学院, 江苏 盐城 224051)

**摘要:**对基于 SVPWM 调制的直驱式风电系统网侧变换器的控制策略进行了研究, 变换器采用了三相电压源型 PWM 结构, 对其进行了分析并基于电网电压矢量定向控制, 提出采用旋转轴电流线性化解耦控制策略的网侧变换器的数学模型, 在双环控制中, 采用了一种新型的 PR 控制策略。仿真结果表明, 该系统运行稳定, 动态响应快, 输出直流电压稳定, 且脉动很小, 各项性能优良。

**关键词:**网侧变换器; 线性化解耦; PR 控制; 空间电压矢量

**中图分类号:** TM921.5    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1671-5322(2012)01-0037-04

当采用永磁同步发电机的直驱式风力发电系统时可省去主流风力发电机组 DFIG 中的增速齿轮箱, 由此大大减少了系统的维护费用, 并提高了系统的可靠性<sup>[1]</sup>。基于双 SVPWM 变换器的永磁同步发电系统能够实现变速恒频发电运行和并网有功功率及无功功率的独立控制, 结构较为简单, 发电效率高, 运行稳定性好, SVPWM 具有直流电压利用率高、相同品质的波形需要的开关频率低、更容易实现数字化控制等优点。

本文研究了应用于永磁直驱式风电系统变速恒频风力发电机组中的网侧变换器, 建立了网侧 PWM 变换器的数学模型, 基于 SVPWM 调制的电网电压定向矢量的控制策略, 采用基于旋转  $d$ 、 $q$  轴电流线性化解耦控制策略, 在双环控制中, 常见的电流控制方法 PI 控制虽易于实现、可靠性高, 但其对正弦参考量却难以消除稳态误差。为了解决该问题, 采用 PR 控制实现了正弦电流控制的零稳态误差<sup>[2]</sup>, 通过 Matlab 对其进行了仿真研究。结果表明, 该系统具有动态响应快、输出直流电压稳定、输入电流 THD 低等优点。

波含量少, 功率因数符合要求; 二是保证直流母线电压的稳定, 直流母线电压的稳定是整个双 PWM 变换器正常工作的前提, 是通过输入电流的有效控制来实现的<sup>[3,4]</sup>。在图 1 中,  $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$  网侧变换器交流侧三相电网相电压,  $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  网侧变换器交流侧三相输入电流,  $R$  和  $L$  分别是进线电抗器的等效电阻和电感,  $C$  为直流环节的储能电容,  $u_{dc}$  和  $i_{dc}$  分别是直流环节电容电压和电容电流,  $i_{load}$  是流入机侧变换器直流母线的电流。设系统在理想稳态工作条件下, 网侧变换器输出直流电压平均值不变, 开关器件按照空间电压矢量脉宽调制, 网侧变换器交流侧的输出电压和传统逆变器是相

## 1 网侧变换器工作原理和数学模型建立

### 1.1 网侧变换器的基本工作原理

网侧变换器的任务主要有两个, 一是保证其良好的输入特性, 即输入电流的波形接近正弦波, 谐

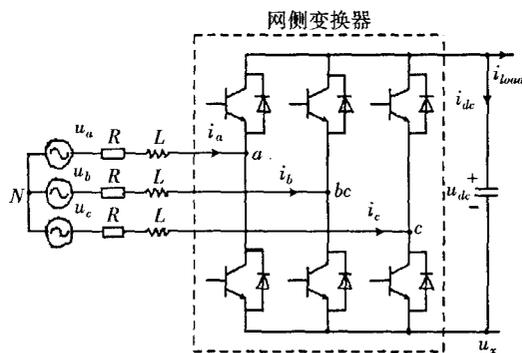


图 1 网侧变换器的拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of Converter in power grid

收稿日期: 2011-10-25

作者简介: 朱晓琴(1971-), 女, 江苏盐城人, 副教授, 硕士, 主要研究方向为电力电子。

同的。由于输入电感的滤波作用,忽略网侧变换器交流侧输出交流电压的谐波,就可将其看作可控三相正弦电压源,产生对应的三相正弦输入电流。

在图 2 中,以 a 相为例,只要调节  $u_{as}$  的基波相位和幅值,就能控制变换器交流侧输入电流的大小以及它和电网电压的相角,从而使变换器运行于以下 3 种工作状态:功率因数接近 1 的同相整流运行,能量由电网流入网侧变换器,电网和变换器之间没有无功功率的流动;功率因数接近 1 的逆变运行,能量由网侧变换器流向电网,电网和变换器之间没有无功功率的流动;功率因数不为 1 的运行状态,有一定的相位关系,当保持  $90^\circ$  时,变换器作为静止无功补偿器运行。

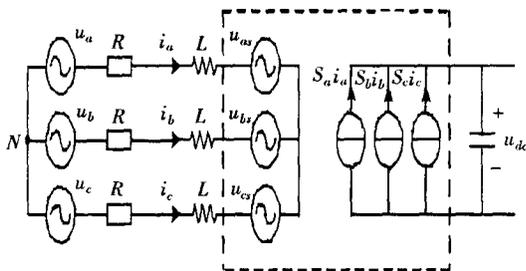


图 2 网侧变换器的等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of Converter in power grid

### 1.2 网侧变换器的数学模型建立

在图 1 所示的拓扑结构中,应用基尔霍夫定理列出网侧变换器在三相静止坐标系下的模型:

$$\begin{aligned}
 u_a - i_a R - L \frac{di_a}{dt} - S_a u_{dc} &= \\
 u_b - i_b R - L \frac{di_b}{dt} - S_b u_{dc} &= \\
 u_c - i_c R - L \frac{di_c}{dt} - S_c u_{dc} &= \\
 C \frac{du_{dc}}{dt} &= S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中,  $S_a, S_b, S_c$  分别为三相桥臂的开关函数,当  $s_i = 1$  时,表示第  $i$  相上管导通;当  $s_i = 0$  时,表示第  $i$  相下管导通。在三相无中线系统中,三相电流之和为零,即  $i_a + i_b + i_c = 0$ ,且三相电网电压平衡,  $u_a + u_b + u_c = 0$ ,并对其进行  $3s/2r$  坐标变换,得到整流器在两相旋转  $d, q$  坐标系中的数学模型如下

$$\begin{aligned}
 L \frac{di_d}{dt} &= -i_d R + \omega_1 L i_q - S_d u_{dc} + u_d \quad (2) \\
 L \frac{di_q}{dt} &= -R i_q - \omega_1 L i_d - S_q u_{dc} + u_q
 \end{aligned}$$

$$C \frac{du_{dc}}{dt} = \frac{3}{2} S_d i_d + \frac{3}{2} S_q i_q - i_{load}$$

式中,  $i_d, i_q$  分别为网侧变换器交流侧,即电网侧电流的  $d, q$  分量;  $u_d, u_q$  分别为电压的  $d, q$  分量,  $s_d u_{dc}, s_q u_{dc}$  分别为变换器交流侧电压的  $d, q$  分量。

## 2 基于 SVPWM 调制的网侧变换器控制

PWM 变换器的开关函数模型表达式存在两个变量的乘积  $i_d s_d$  和  $i_q s_q$ , 因此,其模型具有典型的非线性特征,需要对变换器的  $d, q$  模型进行线性化处理。采用电网电压定向矢量控制策略,将同步旋转  $d-q$  坐标系的  $d$  轴定向在电网电压矢量方向上,得到电网电压的  $d, q$  分量为  $u_d = u_s, u_q = 0$ , 其中,  $u_s$  为电网相电压矢量幅值。为了解除  $d, q$  轴电流耦合和消除电网电压扰动,将变换器交流侧电压设为:  $u_{ds} = s_d u_{dc}, u_{qs} = s_q u_{dc}$ , 将式(2)改写为

$$\begin{aligned}
 u_{ds} &= -u'_{ds} + \Delta u_{ds} + u_s \\
 u_{qs} &= -u'_{qs} - \Delta u_{qs} \quad (3)
 \end{aligned}$$

其中:  $u'_{ds} = L \frac{di_d}{dt} + R i_d = (Lp + R) i_d, u'_{qs} = L \frac{di_q}{dt} + R i_q = (Lp + R) i_q, \Delta u_{ds} = \omega_1 L i_q, \Delta u_{qs} = \omega_1 L i_d$ 。变换器中,通过控制  $u_{ds}, u_{qs}$  来控制输出电流  $i_d, i_q$ 。由式(2)可以看出,  $d, q$  轴电流  $i_d, i_q$  之间还存在耦合,因此,一般的线性控制方法很难达到理想的控制性能。为提高电流控制的性能,使  $u_{ds}, u_{qs}$  能直接控制相应的电流  $i_d, i_q$ , 提出采用  $d, q$  轴电流线性解耦控制策略,其基本思想是构造新的输入变量  $u_{ds}^*, u_{qs}^*$ , 使其与输出  $i_d, i_q$  之间转化为线性解耦关系。由于交流侧每相只有一个电感储能元件,将三相 PWM 变换器输入和输出的电流、电压反馈,采用上式计算  $u_{ds}, u_{qs}$ , 经空间矢量脉宽调制求得三相 PWM 信号,然后去控制 6 个开关管,则电流  $i_d, i_q$  与新的输入  $u_{ds}^*, u_{qs}^*$  之间呈线性关系且实现了  $d, q$  轴电流线性解耦。根据式(1)~(3)可知网侧变换器的控制策略,具体控制框图如图 3 所示。整个控制系统为双闭环结构,外环为电压环,内环为电流环。直流侧给定电压  $u_{dc}^*$  和反馈电压相  $u_{dc}$  比较后的误差经 PI 调节器调节输出  $i_d^*$ , 而  $i_q^*$  则由功率因数的性质决定,比如在双 PWM 变换器实行单位功率因数控制时,  $i_q^* = 0$ 。  $i_d^*, i_q^*$  分别与对应的反馈值  $i_d, i_q$  相比较后的误差经过 PR 调节后输出  $u'_{ds}, u'_{qs}$ , 再与各自的解耦补偿项  $\Delta u_{ds}, \Delta u_{qs}$  和电网扰动前馈补偿项  $u_d, u_q$  相

运算后得到变换器交流侧参考电压  $u_{ds}^*$ 、 $u_{qs}^*$ ，参考电压经坐标变换后得到  $\alpha - \beta$  坐标系中的分量  $u_{\alpha s}^*$ 、 $u_{\beta s}^*$ ，由此进行 SVPWM 调制，产生驱动信号实现对网侧变换器的控制<sup>[5,6]</sup>。

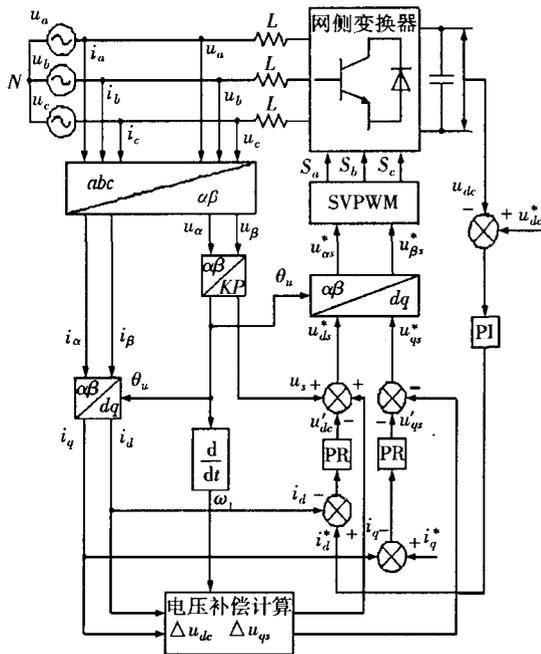


图 3 网侧变换器控制框图

Fig. 3 Block diagram of Converter in power grid

### 3 仿真结果与分析

利用 MATLAB 的 Simuink 工具箱,按照前述的控制策略,建立了系统仿真模型(图 4)。

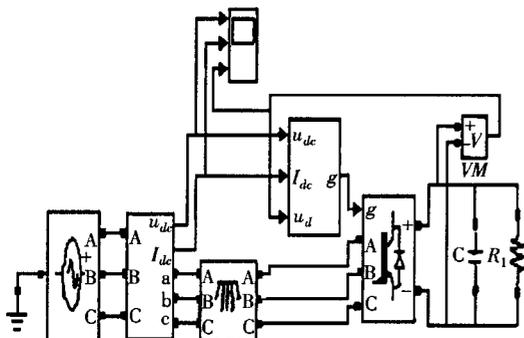


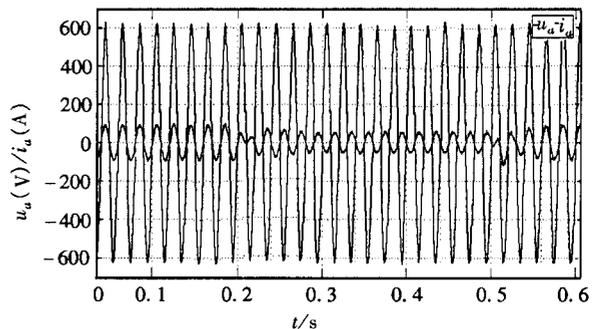
图 4 变换器系统仿真控制框图

Fig. 4 Block diagram of Converter system simulation

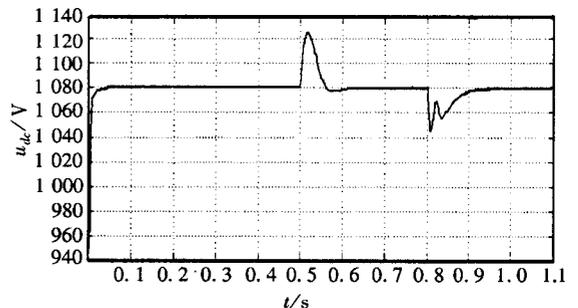
对所建模型进行仿真,其波形如图 5。仿真参数为变换器交流侧线电压有效值为 690 V,频率为 50 Hz,网侧电感 0.15 mH,直流母线电压设定为  $u_{dc} = 1\ 100\text{ V}$ 。图 5a、b 反映了网侧变换器直

流侧发生功率扰动时,交流电流与直流电压的响应情况。图 5a 可见,变换器始终在单位功率因数下运行,在整流运行时,电压和电流同相位,逆变运行时电压和电流反相位。网侧变换器由逆变状态(电能从直流侧向交流侧传递)变为整流状态(电能从交流侧向直流侧传递)。从图 5b 可见,网侧变换器启动后直流侧母线电压达到给定值不到 0.05 s,并且超调量较小,无论是整流还是逆变运行,直流侧电压都能很好地保持在直流侧母线电压给定值,在运行状态改变后能很快地重新回到给定值。

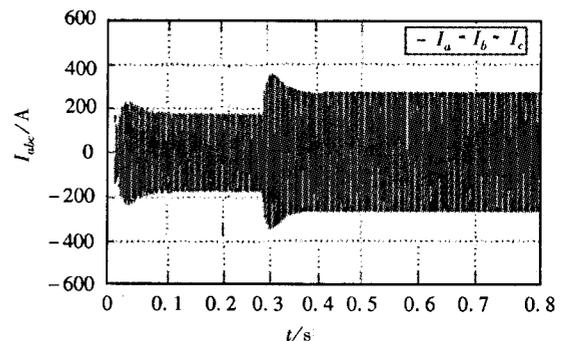
由图 5c 可见,稳态运行时变换器具有平滑的输出电流波形,实现了零稳态误差,且三相电流保持平衡,动态过程中输出电流能够快速跟踪指令



a 交流侧 a 相相电压和相电流



b 直流母线电压波形



c 输出侧三相电流波形

图 5 功率扰动状态下仿真运行

Fig. 5 Simulation - running with power - perturbation

的变化,而且稳定时间较短,整个系统不仅具有良好的快速性,而且也具有较好的鲁棒性和稳定性。

#### 4 结论

本文针对网侧 PWM 变换器在  $d-q$  旋转坐标系中电流的  $d, q$  分量存在耦合的特性,提出了采用一种基于  $d, q$  轴电流线性化解耦控制方案,

使系统获得了良好的线性控制特性。仿真结果表明,采用该控制策略变换器系统具有很好的电流响应特性和优良的解耦性能,同时该模型也验证了一个重要的结论,即为无论在整流还是逆变运行中,变换器直流侧电压一直保持在给定值不变,这也是变换器,以至整个风力发电系统能稳定运行的前提。

#### 参考文献:

- [1] Monica Chinchilla, Santiago Arnaltes, Juan Carlos Burgos. Control of permanent - mag - net generators applied to vari - able - speed wind - energy systems connected to the Grid[J]. IEEE Trans. On Energy Conversion, 2006, 21(1): 130 - 135.
- [2] 张豫,陈静薇,梁振鸿. 基于 DSP 的永磁同步电机全数字化矢量控制[J]. 微电机, 2002, 35(3): 23 - 26.
- [3] 卞松江. 变速恒频风力发电关键技术研究[D]. 杭州:浙江大学, 2003.
- [4] 刘其辉. 变速恒频风力发电系统运行与控制研究[D]. 杭州:浙江大学, 2005.
- [5] 赵仁德. 变速恒频双馈风力发电机交流励磁电源研究[D]. 杭州:浙江大学, 2005.
- [6] Wentai Qu, Xuewen Liu, Yong Chen, et al. New control technology of doubly - fed induction machine based on current - source Dual - PWM converter[J]. IEEE IPEMC 2009: 1 972 - 1 978.

## Study on the Control Strategy for Direct - drive Grid Side Converter in Wind Power System Based on SVPWM

ZHU Xiao-qin, QIN Sheng-sheng

(School of Electrical Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng Jiangsu 224051, China)

**Abstract:** It is researched of control strategy suitable for direct - drive grid side converter in wind power system based on SVPWM. The topology with PWM six bridge arms powered by three - phase voltage is adopted. A mathematical model of the grid side SVPWM converter is established. Based on grid voltage oriented vector, the control strategy with dq axis current linearization decoupling and a novel P + resonant control strategies are adopted. The simulation results show that the system has excellent performance with the advantages of stable operation, fast transient response, stable output DC voltage and tiny ripple.

**Keywords:** grid side converter; linearization decoupling; PR control; space voltage vector

(责任编辑:沈建新)