

三相 SVPWM 整流器在风能最大功率点追踪中应用

余 岳, 欧阳红林, 高 平, 李龙文

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 变速风力发电机高效利用风能所需的风能最大功率点追踪(MPPT)算法的关键在于能否根据风速变化快速调节风轮转速,使其迅速达到相应的最佳转速。采用直接转矩控制思想以达到此目标,首先介绍了风力发电机空气动力学特性及永磁同步电机直接转矩控制原理,然后通过空间矢量脉冲宽度调制(SVPWM)直接电流控制的整流器实时控制其输出电流跟踪指令电流的方法实现变速风力发电机中的 MPPT 控制。仿真研究证明该方法具有控制简单、跟踪响应快的特点,能够达到风能 MPPT 算法要求。

关键词: 变速风力发电机; 风能最大功率点追踪; 永磁同步电机; SVPWM 整流器

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)05-0019-04

0 引言^[1]

风能的获取不仅与风力发电机的机械特性有关,还与其采用的控制方法有关^[2]。好的控制方法可使风轮的转速迅速跟踪风速变化,使风力发电机始终保持在最佳叶尖速比上运行,从而最大限度的获得风能^[3]。

最大风能的获取方法与风力发电机组采用的发电机有关^[4-6]。在中小功率电机中,永磁同步电机相比感应电机不需励磁电流,拥有高性能、高可靠性和高可控性^[7]。而采用空间矢量脉冲宽度调制(SVPWM)直接电流控制的整流器相比普通 SPWM 间接电流控制的整流器有诸如电流跟踪速度快、电压利用率高、电动机的转矩脉动小等优点^[8-9]。

收稿日期:2005-10-07

本文以采用永磁同步电机作为风力发电机组中的发电机为研究对象,论述了三相 SVPWM 直接电流控制的整流器在风能最大功率点追踪中的应用。

1 风力发电机空气动力学特性

风力发电机是将风能转化为机械能后再转化为电能的机械。而风机获得的机械能 P_m 和机械转矩 T_m 可分别用以下关系式表示^[10]:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A C_p v^3 \tag{1}$$

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_w} = \frac{1}{2} \rho A C_p \frac{r}{\gamma} v^2 \tag{2}$$

式中 ρ 为空气密度; A 为风轮扫风面积; C_p 为风能利用率系数; v 为上游风速; r 为风轮半径; ω_w 为风机转速; $\gamma = \omega_w r / v$ 为叶尖速比。

假设 ρ, A, v 不变,则 P_m 为 C_p 的函数,而 C_p 又是

γ 的函数。不同的风机,其函数关系不同,一种典型风机的 C_p 与 γ 的函数关系^[10]如图 1 所示。

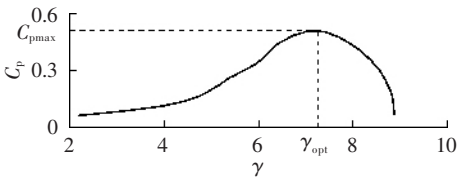


图 1 风能利用率系数 C_p 随叶尖速比 γ 的变化曲线
Fig.1 Turbine power coefficient C_p vs. tip speed ratio γ

由图 1 可见:对于变化的 v ,需要有变化的 ω_w 相对应,才能保证 γ 总是为最佳叶尖速比 γ_{opt} ,才能使得 C_p 为 C_{pmax} , P_m 为 P_{mmax} ,而此时的 T_m 为最佳转矩 T_{mopt} 。

2 直接转矩控制原理及风能最大功率点追踪算法

永磁同步电机的电磁转矩 T_e 可用式(3)^[6]表示:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p_n}{2} [(L_d - L_q) i_d i_q - \lambda_m i_q] \tag{3}$$

式中 p_n 为极对数; L_d, L_q 为 d, q 轴等效电感; i_d, i_q 为 d, q 轴等效电流; λ_m 为转子励磁磁场链过定子绕组的磁链。

当 $i_d=0$ 时,由式(3)可得:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p_n}{2} (-\lambda_m i_q) \tag{4}$$

由式(4)可见:当 $i_d=0$ 时, T_e 将随 i_q 的变化而成线性比例变化。

如上所述,可得风力发电机组在采用永磁同步电机时,风能的最大功率点追踪算法(MPPT),即根据风速 v 的大小,确定最佳的风机转速 ω_{wopt} ,而此时风机所承受的机械转矩就是最佳转矩 T_{mopt} 。只需令永磁同步发电机的定子电流分量 $i_d=0$,改变 i_q 的大小,直接控制 T_e 跟踪风机的最佳转矩 T_{mopt} ,就能实现风能的最大功率点追踪。本文采用 SVPWM 直接电流控制的整流器实现永磁同步发电机的定子电流的跟踪控制。

3 SVPWM 直接电流控制整流器

3.1 三相电压型 PWM 整流器

三相电压型整流器(VSR)的拓扑结构见图 2。

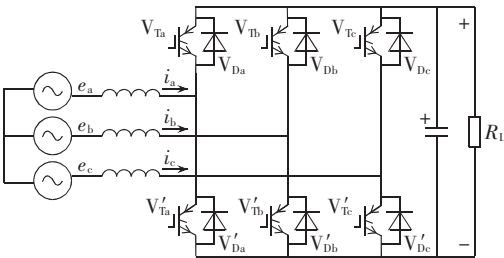


图 2 三相电压型整流器拓扑结构
Fig.2 Three-phase VSR structure

在图 2 中,由于每相桥臂共有上桥臂导通和下桥臂导通 2 种开关模式,因此,三相 PWM 电压源整流器共有 8 种开关模式,可以利用单极性二值逻辑开关函数 $S_j(j=a,b,c)$ 描述,即 $S_j=1$ 时, a,b,c 导通; $S_j=0$ 时, a',b',c' 导通。

故三相 PWM 电压源整流器的 8 种开关模式如表 1 所示。

表 1 8 种开关模式对应的向量
Tab.1 Corresponding vectors for eight switch modes

开关函数	开关模式							
	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_0	U_7
S_a	0	0	0	1	1	1	0	1
S_b	0	1	1	1	0	0	0	1
S_c	1	1	0	0	0	1	0	1

3.2 SVPWM 直接电流控制原理

SVPWM 直接电流控制的方法如图 3 所示,这种控制方法是将指令电流 i_a^*, i_b^*, i_c^* 与反馈电流 i_a, i_b, i_c 通过定环宽的滞环比较单元,输出相应的比较状态值 B_a, B_b, B_c ,并通过对指令电压矢量 U^* 的区域判别,最终由空间电压矢量选择逻辑,输出 1 个合适的 $U_k(k=0,1,\dots,7)$,从而使三相 VSR 电流跟踪指令电流。

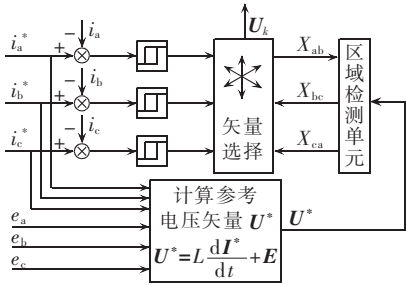


图 3 电流滞环比较的 SVPWM 原理
Fig.3 SVPWM with current hysteresis comparison

3.2.1 电流偏差矢量 ΔI 和电压矢量 U^* 区域划分

由于三相 VSR 空间电压矢量 U_k (零矢量除外) 将矢量空间自然划成 6 个三角形区域,故可将 U^* 所在区域划分为 6 个三角形区域,并记为 I~VI 区。另外,考虑到 ΔI 区域的划分应该有利于 $\Delta i_a, \Delta i_b, \Delta i_c$ 的正负极性判别,从而得到 ΔI 和 U^* 区域划分如图 4 所示。

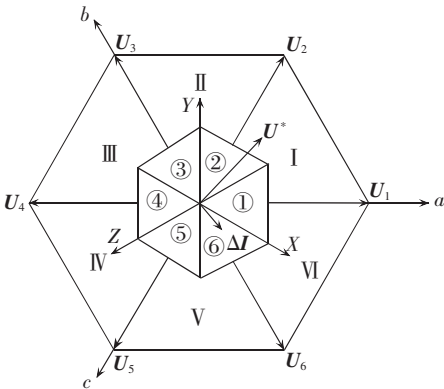


图 4 电流偏差矢量 ΔI 和电压矢量 U^* 区域的划分
Fig.4 Areas of differential current vector ΔI and voltage vector U^*

3.2.2 电流偏差矢量 $\Delta \boldsymbol{I}$ 所在区域判别

电流偏差矢量 $\Delta \boldsymbol{I}$ 在 3 个坐标轴 a, b, c 上的分量 $\Delta i_a, \Delta i_b, \Delta i_c$ 的正负极性判别, 容易确定矢量 $\Delta \boldsymbol{I}$ 所在的区域。 $\Delta \boldsymbol{I}$ 所在的区域检测判据如表 2 所示。

表 2 电流偏差矢量 $\Delta \boldsymbol{I}$ 所在区域的判据
Tab.2 Criterion of area for differential current vector $\Delta \boldsymbol{I}$

Δi_a	Δi_b	Δi_c	$\Delta \boldsymbol{I}$ 区域	Δi_a	Δi_b	Δi_c	$\Delta \boldsymbol{I}$ 区域
+	-	-	①	-	+	+	④
+	+	-	②	-	-	+	⑤
-	+	-	③	+	-	+	⑥

3.2.3 电压矢量 $\boldsymbol{U}^*$ 所在区域判别

根据指令电流矢量可得对应的指令电压矢量 $\boldsymbol{U}^*$ 。设 $\boldsymbol{U}^*$ 在 3 个坐标轴上的分量分别为 u_a^*, u_b^*, u_c^* , 且记

$$\begin{aligned} X_{ab} &= \text{sign}(u_a^* - u_b^*) \\ X_{bc} &= \text{sign}(u_b^* - u_c^*) \\ X_{ca} &= \text{sign}(u_c^* - u_a^*) \end{aligned} \tag{5}$$

式中 $x \geq 0$ 时, $\text{sign}(x) = 1$; $x < 0$ 时, $\text{sign}(x) = 0$ 。
结合式(5)可得到 $\boldsymbol{U}^*$ 所在区域检测判据, 如表 3 所示。

表 3 电压矢量所在区域的判据
Tab.3 Criterion of area for voltage vector

X_{ab}	X_{bc}	X_{ca}	$\boldsymbol{U}^*$ 区域	X_{ab}	X_{bc}	X_{ca}	$\boldsymbol{U}^*$ 区域
1	1	0	I	0	0	1	IV
0	1	0	II	1	0	1	V
0	1	1	III	1	0	0	VI

3.2.4 空间电压矢量 $\boldsymbol{U}_k$ 选择逻辑

空间电压矢量 $\boldsymbol{U}_k$ 选择规则: 当 $|\Delta \boldsymbol{I}| > I_w$ (I_w 为允许的最大电流偏差) 时, 选择三相 VSR 空间电压矢量 $\boldsymbol{U}_k$ ($k = 0, 1, \dots, 7$), 其对应的 $L(d\Delta \boldsymbol{I}/dt)$ 具有与误差电流矢量 $\Delta \boldsymbol{I}$ 方向相反的最小分量, 以确保电流矢量 $\boldsymbol{I}$ 在跟踪指令电流矢量 $\boldsymbol{I}^*$ 的同时, 限制电流变化率, 以抑制电流谐波; 当 $|\Delta \boldsymbol{I}| < I_w$ 时, 原有开关矢量 $\boldsymbol{U}_k$ 不切换, 从而在限制平均开关频率的同时, 增加了 SVPWM 控制的稳定性。

由以上规则, 可得到根据 $\Delta \boldsymbol{I}, \boldsymbol{U}^*$ 所在区域确定的 $\boldsymbol{U}_k$ 选择逻辑, 如表 4 所示。

表 4 空间电压矢量 $\boldsymbol{U}_k$ 选择逻辑
Tab.4 Selection logic of space voltage vector $\boldsymbol{U}_k$

$\boldsymbol{U}^*$ 区域	$\Delta \boldsymbol{I}$ 区域					
	①	②	③	④	⑤	⑥
I	$\boldsymbol{U}_1$	$\boldsymbol{U}_2$	$\boldsymbol{U}_2$	$\boldsymbol{U}_{0,7}$	$\boldsymbol{U}_{0,7}$	$\boldsymbol{U}_1$
II	$\boldsymbol{U}_2$	$\boldsymbol{U}_2$	$\boldsymbol{U}_3$	$\boldsymbol{U}_3$	$\boldsymbol{U}_{0,7}$	$\boldsymbol{U}_{0,7}$
III	$\boldsymbol{U}_2$	$\boldsymbol{U}_3$	$\boldsymbol{U}_3$	$\boldsymbol{U}_4$	$\boldsymbol{U}_4$	$\boldsymbol{U}_{0,7}$
IV	$\boldsymbol{U}_{0,7}$	$\boldsymbol{U}_{0,7}$	$\boldsymbol{U}_4$	$\boldsymbol{U}_4$	$\boldsymbol{U}_5$	$\boldsymbol{U}_5$
V	$\boldsymbol{U}_6$	$\boldsymbol{U}_{0,7}$	$\boldsymbol{U}_{0,7}$	$\boldsymbol{U}_5$	$\boldsymbol{U}_5$	$\boldsymbol{U}_6$
VI	$\boldsymbol{U}_1$	$\boldsymbol{U}_1$	$\boldsymbol{U}_{0,7}$	$\boldsymbol{U}_{0,7}$	$\boldsymbol{U}_6$	$\boldsymbol{U}_6$

4 最大功率点追踪控制系统结构

综上所述, 可得到三相 SVPWM 整流器风能最大功率点追踪控制系统结构, 如图 5 所示(图中 1, 2 处接变调制比 SVPWM 逆变器)。

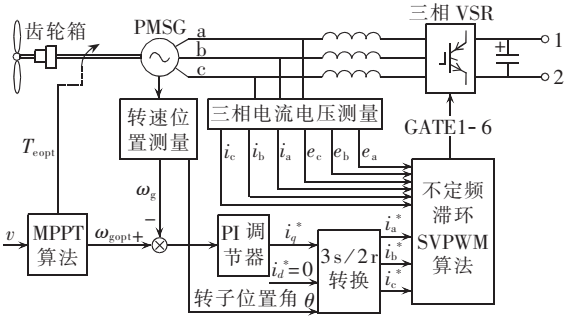


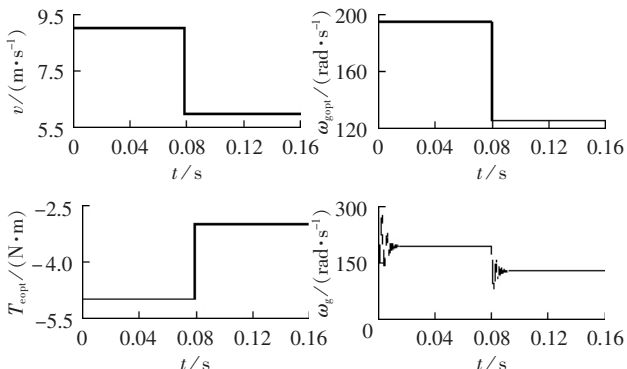
图 5 控制系统结构

Fig.5 Structure of control system

根据检测的风速 v , 通过 MPPT 算法, 得到最佳的风机转速 ω_{wopt} , 此时风机转矩就是最佳转矩 T_{wopt} 。由于系统采用风机与发电机通过提速齿轮箱提速(提速比 K)的连接模式, 所以控制系统的控制目标是在 ω_g 等于 ω_{wopt} 的 K 倍时, T_e 等于 T_{mopt} 的 $1/K$ 。具体实现方法是令指令电流的 d 轴分量 $i_d^* = 0$, 将检测到的发电机转速 ω_g 与 $K\omega_{wopt}$ 比较后作为 PI 调节器的输入, PI 调节器的输出即为指令电流的 q 轴分量 i_q^* 。因为 T_e 和 i_q 成正比, 所以此时的 i_q^* 能够代表 T_{eopt} 的大小。将 d, q 轴分量的指令电流 i_d^*, i_q^* 转换为三轴的指令电流 i_a^*, i_b^*, i_c^* 后, 再采用电流滞环比较的 SVPWM 调制算法, 就能实现发电机定子电流迅速跟踪指令电流, 从而保证 T_e 为 T_{wopt} 的 $1/K$, 实现风机以最佳转速运行。

5 仿真结果

根据前面提出的风能最大功率点追踪控制系统, 利用 Matlab/Simulink 进行仿真。采用阶跃信号模拟 v , 对应的 ω_{gopt}, T_{eopt} 曲线和实际 ω_g, T_e 曲线, a 相定子电流的波形如图 6 所示。由仿真结果可知, 永磁同步发电机可以迅速跟踪指令转速的变化, 响应时间在 0.1 s 数量级上。



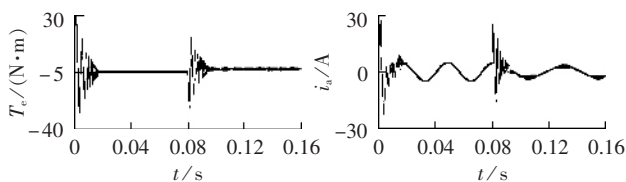


图 6 仿真结果波形图

Fig.6 Simulation results

6 结语

通过电流滞环比较的 SVPWM 整流器的直接电流控制和永磁同步发电机的直接转矩控制方法,风力发电机组中的永磁同步发电机的定子电流能够迅速的跟踪指令电流,其转速也能够迅速的跟踪最佳转速,因此,在没有考虑风轮的固有机特性,如惯性等因素的情况下,本文所提出的控制方法完全能达到风能的最大功率点追踪控制的要求。

参考文献:

- [1] 施鹏飞. 21 世纪风力发电前景[J]. 中国电力,2000,33(9): 78-81.
SHI Peng-fei. Prospect of wind power generation in 21st century[J]. **Electric Power**,2000,33(9):78-81.
- [2] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [3] TAN K, ISLAM S. Optimum control strategies in energy conversion of PMSG wind turbine system without mechanical sensors[J]. **IEEE Transactions on Energy Conversion**,2004,19(2):392-399.
- [4] RABELO B, HOFMANN W. Control of an optimized power flow in wind power plants with doubly-fed induction generators[C]// **PESC'2003**. [S.l.]: IEEE, 2003: 1563-1568.
- [5] 彭国平,李帅,鱼振民,等. 小型风电系统最大功率跟踪的研究[J]. 西安交通大学学报,2004,38(4):357-360.
PENG Guo-ping, LI Shuai, YU Zhen-min, et al. Research

on maximum power tracking of small size wind energy conversion system[J]. **Transaction of Xi'an Jiaotong University**,2004,38(4):357-360.

- [6] ESMAILI R, XU L, NICHOLS D K. A new control method of permanent magnet generator for maximum power tracking in wind turbine application[C]// **Power Engineering Society General Meeting**. San Francisco, CA: IEEE, 2005: 1162-1167.
- [7] YOSHIKAZU H, NAOKI Y, MUNEAKI I, et al. An improvement of performance for small-scaled wind power generating system with permanent magnet type synchronous generator[C]// **26th Annual Conference of the IEEE, IECON 2000**. Nagoya, Japan: IEEE, 2000: 1037-1043.
- [8] HABETLER T G. A space vector-based rectifier regulator for AC/DC/AC converters[J]. **IEEE Trans Power Electron**, 1993, 8(1): 30-36.
- [9] 张兴, 张崇巍. PWM 可逆变流器空间电压矢量控制技术的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 102-105.
ZHANG Xing, ZHANG Chong-wei. Research on space voltage vector control technique on PWM inverter[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2001, 21(10): 102-105.
- [10] FRERIS L L. Wind energy conversion system[M]. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1990.

(责任编辑: 康鲁豫)



作者简介:

余岳(1980-),男,湖南长沙人,硕士研究生,主要研究方向为电力传动及其控制(E-mail: sheyue@yeah.com);

欧阳红林(1966-),男,湖南衡阳人,副教授,主要研究方向为电力电子变流技术;

高平(1980-),男,浙江温州人,硕士研究生,主要研究方向为电力电子变流技术;

李龙文(1980-),男,湖南邵阳人,硕士研究生,主要研究方向为控制理论与控制工程。

Three-phase SVPWM rectifier and its application in maximum wind power point tracking

SHE Yue, OUYANG Hong-lin, GAO Ping, LI Long-wen
(Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The key of MPPT(Maximum Power Point Tracking) is to adjust the rotate speed of wind turbine quickly according to the variable wind speed for high efficiency. The direct torque control theory is adopted to reach it. The aero-dynamical characteristic of the wind turbine and the direct torque control of PMSG are introduced. The SVPWM(Space Vector Pulse Width Modulation) direct current regulated rectifier is applied to real-timely control the output current following the instruction current in MPPT. The simulation results demonstrate that the proposed method, with simple control and fast response, meets the requirements of wind generation MPPT.

Key words: variable speed wind turbine; MPPT; PMSG; SVPWM rectifier