

基于双 PWM 协调控制的永磁风力发电系统研究

郭林杰¹, 赵建勇²

(1. 青岛科技大学 机电工程学院, 山东 青岛 266042;

2. 安徽理工大学 电气与信息工程学院, 安徽 淮南 232001)

摘要: 说明了直驱式永磁风力发电系统的基本组成和原理, 分析了永磁风力发电系统最大功率跟踪的控制策略; 设计了发电系统网侧变流器基于电网电压矢量定向、机侧变流器基于发电机转子磁链定向的背靠背双 PWM 协调控制结构。最后通过仿真验证了该系统的最大功率跟踪特性, 并就仿真中 PI 参数设置的关键问题进行了说明, 可有效防止转速比较控制中的转矩冲击问题。

关键词: 永磁同步电机; 风力发电; 矢量控制; PWM 整流

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2013)08-0068-04

Study of permanent magnet wind power generation system based on coordination control of double PWM

Guo Linjie¹, Zhao Jianyong²

(1. College of Electromechanical Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: States the basic configuration and principle of permanent magnet direct drive wind power system, analyse the most power tracing control strategy of permanent magnetic wind power systems. Designs the double PWM back-to-back coordinated control structure that grid side converter based on grid voltage vector orientation and machine side converter based on Rotor flux orientation. Verifies the system's maximum power tracking characteristics through simulation, and states the key issues in the setting of PI parameter, avoids the torque impact problem effectively in speed more control.

Key words: permanent magnet synchronous motor; wind power; vector control; PWM rectifier

当今世界, 石化能源大量消耗, 传统能源资源面临枯竭, 能源短缺问题日益严重。改变能源结构, 开发新能源已经刻不容缓。而风能便是各种新能源中应用最广泛的一种^[1]。

现代风力发电行业中, 应用最广泛的两种变速恒频发电系统分别为双馈发电系统和永磁直驱风力发电系统。两者中, 双馈风力发电系统由于变频策略实现在转子侧, 只需发电机容量的 1/3 左右, 因此容量相对做得更大, 但是该系统需要价格昂贵的增速齿轮箱, 同时双馈发电机含有容易损坏的滑环和电刷, 使整个发电系统结构复杂, 稳定性较差, 发电效率受此影响难以提升。与其相比, 永磁直驱风力发电系统则省去了齿轮箱装置, 结构相对简单, 控制较为容易。虽然变频器容量相对较大, 但是随着电力电子技术的发展, 变频器容量也不再是一个明显的瓶颈。而且永磁风力发电系统还具有较强

的低电压穿越能力, 这是双馈发电系统无法相比的^[2-3]。从风力发电总体效益上考虑, 直驱式永磁风力发电系统很有潜力, 将成为未来几十年的主流方案, 所以本文选择永磁风电系统作为研究对象。

1 拓扑结构基本原理

图 1 为基于双 PWM 拓扑结构的直驱永磁风力发电

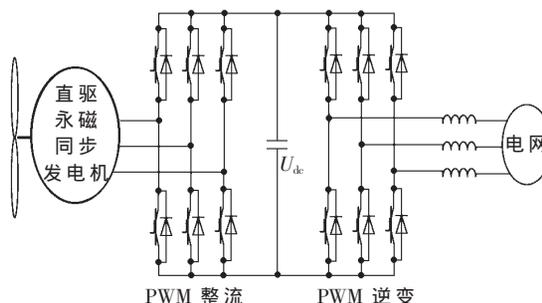


图 1 双 PWM 变流器典型拓扑结构图

技术与方法 Technique and Method

系统。风力机与永磁同步发电机同轴相连,发电机定子连接机侧变流器,机侧变流器和网侧变流器均为 IGBT 反并联续流二极管的三相桥电路,中间通过直流环节相连,网侧变流器连接电网。

该系统变流环节可以看作双 P 结构的交交变频器,但在控制上却不相同。电路中 PWM 变流器可以分为两部分。电机侧变流器主要用于控制发电机转速,使其跟随风速的变化而变化来追踪最佳风能(第 3 节中介绍),并且将发电机输出的频率和幅值变化的三相交流电整流成稳定的直流电;而网侧变流器的作用则是稳定直流侧母线电压,并且将发电机输出到直流侧的电转换为频率和幅值与电网相同的交流电馈入电网,此外,在电网电压因为雷击或者短路等故障导致电压跌落时,网侧变流器可以向电网输送一定的无功功率支持网侧电压的稳定。

2 控制策略与控制结构

2.1 最大风能追踪策略

风力发电系统在运行时主要有两种状态:额定风速以下运行和额定风速运行。额定风速以下时保持桨距角 $\beta=0$,通过各种控制方式使发电机以最大功率运行;在达到额定风速或者超过额定风速时通过控制桨距角(变桨距)或者叶尖速比(定桨距)来降低风能利用系数 C_p ,限制风能的利用率,使风力机维持在额定功率运行。由于风电场中风速经常会低于额定风速,而最大风能跟踪问题就是在此基础上提出的^[4]。

风力机吸收功率为:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho v^3 s C_p \quad (1)$$

其中,空气密度 ρ 和风轮扫掠面积 s 为定值,当风速 v 变化时,影响风力机吸收功率 P_m 大小的只有风能利用系数 C_p 。

风能利用系数 C_p 与桨叶节距角 β 、叶尖速比 λ 有关。在最大风能追踪过程中, β 一般设置为 0 以保证风轮对风能的最大吸收。此时 C_p 便是一个只与 λ 有关的函数。

而叶尖速比 λ 满足:

$$\lambda = \frac{R \times \omega}{v} \quad (2)$$

由式(2)可以看出,要使叶尖速比 λ 保持为 λ_{opt} (最佳叶尖速比),只要使风力机转速 ω 与风速 v 比值不变即可。而直驱发电系统中风力机与发电机同轴相连,转速相同。所以只要风速变化时控制发电机转速相应变化便能实现风力机对风能的最大追踪。这也是本文选用的最佳叶尖速比控制法。

此外还有爬山搜索法、功率信号反馈法等方法都可以实现最大风能追踪。在此不再一一叙述。

2.2 控制结构

结合永磁同步发电机以及三相 PWM 变流器数学模

型,对网侧变流器采用基于电网电压矢量定向的控制策略,机侧变流器采用基于电机转子磁链定向 $i_d=0$ 矢量控制策略,设计出如图 2 所示双 PWM 协调控制结构图。

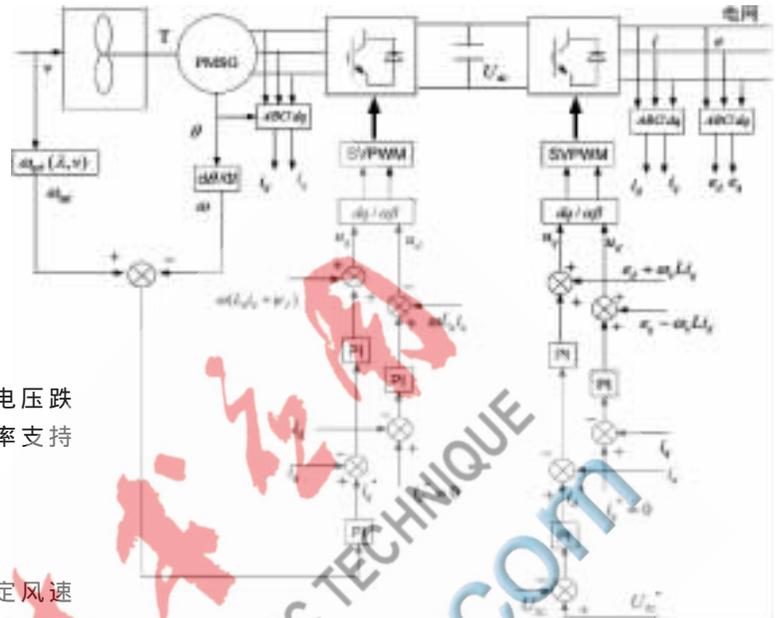


图 2 基于双 PWM 协调控制的系统框图

当风力机达到切入风速后开始转动,风速测量装置测量到实际风速,根据 $\lambda = \frac{\omega R}{v}$ 得出此风速对应的最佳转速参考值 ω_{ref} ,此值与实际测量得到的发电机转速 ω 相比较,通过转速 PI 调节器得到发电机定子电流的转矩分量(有功电流)期望值 i_d^* ,然后与实际有功电流 i_q 比较(有功电流和无功电流通过坐标变换得到,其中角度 θ 由转子位置角根据极对数计算得到),差值经过电流调节器,再经过电压前馈补偿得到发电机交轴参考电压 u_q 。在发电系统正常运行状态下,电流环的无功电流(励磁分量) i_d^* 给定设为 0,此值与实际无功电流相比较,差值经过无功电流调节器再加上前馈电压补偿得到发电机直轴参考电压 u_d 。 u_q 、 u_d 经过 SVPWM 调制得到电机侧变流器主电路三相桥的六路驱动脉冲,以此来实现在机侧变流器的控制^[5]。

网侧变流器的控制过程与机侧变流器相似,给定直流电压 U_{dc}^* 与从直流侧检测得到的实际电压 U_{dc} 比较,差值经过电压调节器得到有功电流的期望值 i_d^* , i_d^* 与实际检测到的有功电流 i_q 比较(有功电流和无功电流通过坐标变换得到, θ 由锁相环 PLL 得到),差值经过有功电流调节器输出,然后加上前馈电压补偿得到参考电压 u_d 。无功电流 i_q^* 在发电系统正常运行时设定为 0, i_q^* 与实际无功电流 i_q 比较,差值经过 PI 调节器再加上前馈电压补偿得到参考电压 u_q 。 u_d 、 u_q 经过 SVPWM 调制得到网侧变流器主电路三相桥的驱动脉冲,以此来控制网侧变流器工作。

根据以上分析,通过网侧变流器和机侧变流器协调控制,便可使发电机和风力机跟随风速的变化而变化,

技术与方法 Technique and Method

吸收各种风速下的最大风能, 同时将风能转化为机械能, 进一步通过各种电流环节转化为可以馈入电网的电能, 实现永磁风力发电的基本目标。

3 系统仿真研究

根据图 2, 在 MATLAB/Simulink 中搭建仿真模型, 仿真参数设置如下:

风力机参数: 额定功率 120 kW; 风力机叶轮半径 12 m; 切入风速 3 m/s; 切出风速 25 m/s; 额定风速 10 m/s; 最佳叶尖速比 8.3; 最佳风能利用系数 4.79。

永磁同步发电机参数: 额定功率 120 kW; 定子电阻 0.12Ω , d 轴电感 0.033 H ; q 轴电感 0.033 H ; 永磁体磁链 1.79 Wb ; 转动惯量 $150 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$; 转动粘滞系数 $0.005 \text{ N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}$; 极对数 32。

网侧变流器仿真参数: 网侧相电压 220 V; 网侧滤波电感 0.012 H ; 滤波电感等效电阻 0.06Ω ; 开关频率 5 kHz; 直流侧滤波电容 0.002 F 。

仿真波形如图 3~图 9 所示。

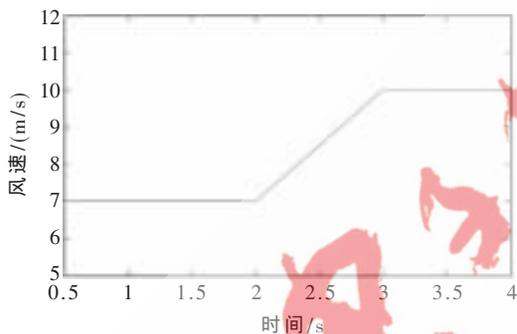


图 3 渐变风速



图 4 期望转速与实际转速

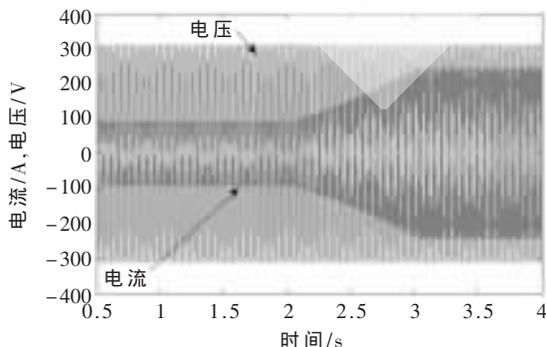


图 5 网侧 A 相电流电压波形

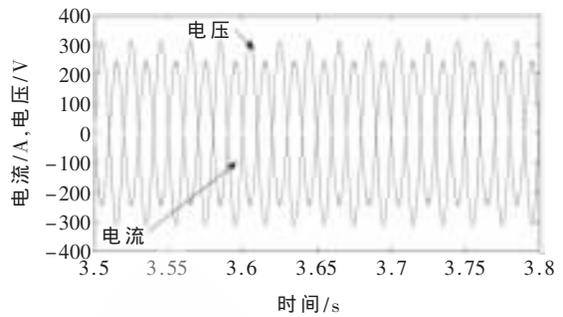


图 6 网侧 A 相电流电压波形(部分)

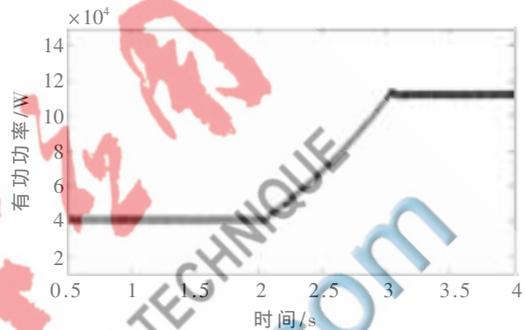


图 7 网侧有功功率

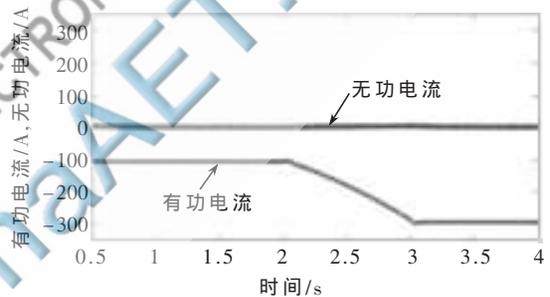


图 8 网侧有功、无功电流

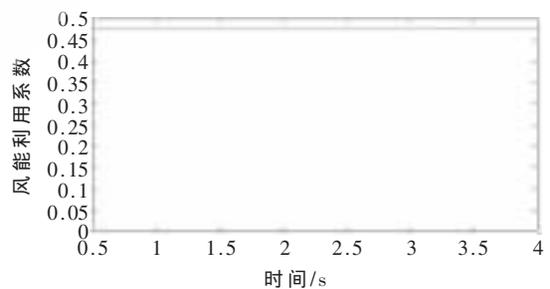


图 9 风能利用系数

根据以上仿真曲线可以看出, 当风速由 7 m/s 渐变为 10 m/s 时, 发电机 (风力机) 转速能够很好地跟随风速的变化而变化, 发电机定子侧电流和网侧电流也随着风速的增大而增大, 并且网侧电流与电压能够保证运行在单位功率因数逆变 (相位角相差 180°) 状态。通过网侧有功功率以及有功电流 i_d 、无功电流 i_q 可以看出, 整个发电过程中, 只要系统正常运行, 网侧无功电流 i_q 便一直保持为 0, 而有功电流可以随着风速的变化而变化, 当风速变化时馈入电网的有功功率由 40 kW 变为 120 kW, 风

技术与方法 Technique and Method

能利用系数在整个过程中基本保持不变,接近 0.48,说明风电系统在整个过程中一直保持最大风能的追踪。

4 其他问题的说明

(1)在风力发电的控制系统中应用了多个 PI 调节器,在对其比例系数 K_p 、积分系数 K_i 进行设定时必须符合发电系统的基本物理要求,另外各个 PI 调节器一定要加限幅值。例如发电机控制系统中的变流器,如果外环为速度环时,由于直驱风力发电系统具有很大的转动惯量,反应比较迟缓,因此要使其速度跟随风速快速变化必须是 PI 调节器有合适的灵敏度,一般比例系数 K_p 应该设置得较大一些,而积分时间常数 τ_i 应该较小。

(2)PI 调节器的限幅值也非常关键,因为仿真最终是模拟实际,因此只有确定明确的限幅值才能确定系统的容量问题,才能对其他各种问题进行分析。

(3)永磁风力发电系统的中间变流环节可以看作一台背靠背 PWM 交直交变频器^[6],因此当风速变化较为明显时,若采用速度外环控制则可能出现发电机运行到电动状态的问题,也就是风能和电网发出电能同时使风力机和发电机提速。在这种情况下风电系统的电流和功率极性都会瞬时发生改变,这对系统就有一定的冲击性,是一种不良影响。因此必须对 PI 调节器设定合适的限幅值,防止其在转速变化(特别是风速变化明显,如阶跃信号)时工作在电动状态,在设定限幅值时应同时设置积分环节单独的限幅值,防止其积分影响。

本文通过仿真分析验证了采用双 PWM 协调控制的永磁直驱风力发电系统在最大功率追踪方面的较好性能,说明了该系统具有良好的可行性;论文最后对仿真系统中 PI 参数的设置进行了说明,使该系统可以有效避免转速控制中转矩和功率冲击问题。

参考文献

- [1] 李传统. 新能源与可再生能源技术[M]. 南京: 东南大学出版社, 2005.
- [2] 马洪飞, 徐殿国, 苗立杰. 几种变速恒频风力发电系统控制方案的对比分析[J]. 电工技术杂志, 2000(10): 1-4.
- [3] 李文杰. 基于交流励磁双馈电机变速恒频风力发电系统的研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2011.
- [4] 余峰. 永磁直驱式风力发电系统中最大功率控制的仿真研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2009.
- [5] 董桐宇. 直驱式风力发电机的建模与并网仿真分析[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.
- [6] TAFTICHT T, AGBOSSOU K, CHERITI A. DC bus control of variable speed wind turbine using a buck-boost converter [C]. Power Engineering Society General Meeting, 2006: 18-22.

(收稿日期: 2012-12-28)

作者简介:

郭林杰, 男, 1986 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 控制工程。

赵建勇, 男, 1987 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 控制理论与控制工程。