

直驱永磁同步风力发电机侧系统建模及仿真

林立¹,何洋¹,周建华²,陈红专³,刘燕凌¹,陈鸿蔚⁴

(1.邵阳学院 多电源地区电网运行与控制湖南省重点实验室,湖南 邵阳 422000;

2.邵阳学院 信息工程学院,湖南 邵阳 422000;

3.邵阳市电机厂有限公司,湖南 邵阳 422000;

4.湘潭电机集团有限公司,湖南 湘潭 411100)

摘要:为深入研究直驱永磁同步风力发电机组的高性能控制,研究了直驱永磁同步发电机侧系统构成、原理及建模方法,分析了风力机与永磁同步发电机、电压空间矢量(SVPWM)整流原理及其建模,基于双闭环PI控制搭建了机侧系统仿真模型。通过仿真与分析,证明了双闭环PI控制策略在4种不同风速下实现最大功率追踪的可行性。该系统模型的建立为机组高性能控制的研究打下基础,对于深入理解直驱永磁同步风力发电系统运行原理及推广应用具有重要意义。

关键词:风力发电;直驱永磁同步发电机;最大功率点追踪;机侧控制;系统建模;仿真

中图分类号:TM614 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd19060

Modelling and Simulation for Generator Side of Direct-driven Permanent Magnet

Synchronous Generator Wind Energy Systems

LIN Li¹, HE Yang¹, ZHOU Jianhua², CHEN Hongzhuan³, LIU Yanling¹, CHEN Hongwei⁴

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Grids Operation and Control on Multi-power Sources Area, Shaoyang University, Shaoyang 422000, Hunan, China; 2. School of Information Engineering, Shaoyang University, Shaoyang 422000, Hunan, China; 3. Shaoyang Electric Machinery Factory Co., Ltd, Shaoyang 422000, Hunan, China; 4. Xiangtan Electrical Machinery Group Co., Ltd, Xiangtan 411100, Hunan, China)

Abstract: To intensive study high performance control for direct-driven permanent magnet synchronous generator wind Energy systems, the structure, control principle and modelling of generator side systems were researched. The control principle and modelling of wind turbine, permanent magnet synchronous generator and space vector pulse width modulation rectifier were analyzed, and the simulation model of generator side control systems was established using double closed-loop PI control strategy. Through simulation and analysis, It is proved that the method for maximum power point tracking using double closed-loop PI control strategy under four different wind speeds is feasibility. The systems modelling is the basis for studying high performance control for wind energy systems. Moreover, it has significance meaning for knowing and applying control principle of wind energy systems.

Key words: wind power generation; direct-driven permanent magnet synchronous generator; maximum power point tracking(MPPT); generator side control; systems modelling; simulation

环境污染,能源危机日益严重,风电因其高效、清洁而得到各国关注^[1]。永磁同步发电机(permanent magnet synchronous generator, PMSG)相比双馈异步发电机,因高效、高可靠性成为海上风电主流机型^[2]。

变速永磁风电始于上世纪90年代,欧美国家

规模已趋向大型化^[3],国内目前规模尚小,“弃风限电”严重^[4],且随装机容量需求快速增长,变速恒频与全功率变流将成为风电产业关键技术^[5],并迅速向多种地形扩展^[6]。故研究多种风速下的最大功率追踪(maximum power point tracking, MPPT)尤为重要。

基金项目:湖南省教育厅计划重点项目(16A191);湖南省科技计划项目(2016TP1023)

作者简介:林立(1972-),男,教授,博士,硕士生导师, Email:linlidexin@163.com

直驱永磁风电系统的精确建模是实现其控制和仿真的基础。文献[6]分析了直驱永磁风电系统各种拓扑结构的控制原理与特点。本文在此基础上,重点分析了直驱永磁风力发电最佳叶尖速比MPPT矢量控制系统的结构、控制原理与建模方法。最后,通过搭建发电机侧控制系统仿真模型,分析了双闭环PI控制下发电性能特点,为机组控制研究与先进算法优化控制奠定坚实基础。

1 发电机侧系统结构及原理

直驱永磁同步风电系统机侧控制原理如图1所示^[7]。

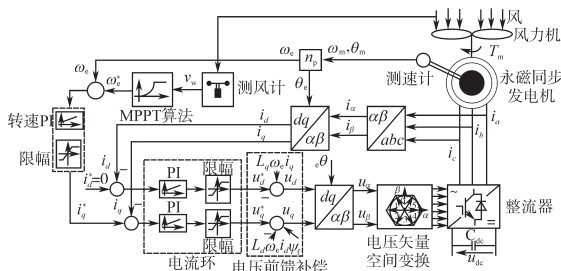


图1 直驱永磁风力发电系统机侧控制原理图

Fig.1 Principle diagram for generator side of direct-driven PMSG wind energy systems

由图1可知,风推动风力机转动,产生机械转矩 T_m , 推动永磁同步发电机发出交流电,经整流滤波后得到直流电压 u_{dc} 。实测风速经MPPT算法运算后,得到永磁同步发电机转子电角速度给定值 ω_c^* , 与其实际值 ω_c 相比较后,经转速PI调节器运算后,得到定子电流 q 轴分量给定值 i_q^* , 永磁同步发电机三相交流电 i_a, i_b, i_c 经 $abc/\alpha\beta$ 与 $\alpha\beta/dq$ 变换后,得到定子电流 d 轴分量 i_d 与 q 轴分量 i_q ; d 轴电流采用 $i_d^*=0$ 控制, i_d^* 与 i_d 相比较, i_q^* 与 i_q 相比较后,分别经 d, q 轴电流PI调节器运算后得到 d, q 轴电压的调节参考值 u_d^*, u_q^* , 并采用电压前馈补偿抵消 d, q 轴电压的动态耦合项 $\omega_c L_q i_q$ 与 $\omega_c \Psi_f - \omega_c L_d i_d$, 与 d, q 轴电压的调节参考值叠加后得到系统的控制电压 u_d, u_q , 经 $dq/\alpha\beta$ 变换后得到系统的驱动电压 u_a, u_β , 经空间矢量脉宽调制(space vector pulse width modulation, SVPWM)后产生 6 路 SVPWM 脉冲信号, 以实现对接流器的控制。

2 风力发电系统机侧建模

2.1 风力机

根据 Betz 理论, 风力机输出轴上的机械转矩

 T_m 为

$$T_m = \frac{\rho \pi C_p(\lambda, \beta) R_r^3 v_w^2}{2\lambda} \quad (1)$$

式中: v_w 为风速; ρ 为空气密度; C_p 为能量系数, λ 为叶尖速比; β 为桨距角; R_r 为叶轮半径。

由叶尖速比的定义可得:

$$\omega_e^* = \frac{\lambda v_w}{n_p R_r} \quad (2)$$

式中: n_p 为发电机极对数。

叶尖速比、桨距角与能量系数间的关系可表达为

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22[1.16(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}) - 0.4\beta - 5]e^{-12.5(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1})} \quad (3)$$

由式(3)可知,定叶尖速比下,桨距角变大,能量系数减少,且零桨距角下,能量系数最大,并随叶尖速比 λ 变化,且总有一个最优叶尖速比 λ_{opt} 使能量系数最大。

由式(3)可得 $\lambda_{\text{opt}} \approx 6.277$, $C_{\text{pmax}} \approx 43.82\%$ 。

2.2 永磁同步发电机

经坐标变换,并将转子磁链定位在 d 轴,可得 d, q 轴下永磁同步发电机数学模型如下:

1)定子电压方程为

$$\begin{cases} u_d = -R_s i_d - L_d \dot{i}_d + \omega_c L_q i_q \\ u_q = -R_s i_q - L_q \dot{i}_q - \omega_c L_d i_d + \omega_c \Psi_f \end{cases} \quad (4)$$

式中: R_s 为定子相电阻; L_d, L_q 分别为 d, q 轴电感分量; $i_d, i_q, \dot{i}_d, \dot{i}_q$ 分别为 d, q 轴电流分量及其导数; Ψ_f 为转子永磁体磁链。

2) 转矩与运动方程为

$$T_c = \frac{3}{2} n_p [\Psi_f + (L_d - L_q) i_d] i_q \quad (5)$$

$$T_m - T_c - B \frac{\omega_c}{n_p} = \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_c}{dt} \quad (6)$$

式中: T_e 为电磁转矩; J 为转动惯量; B 为粘性摩擦系数。

2.3 整流模块建模机理

整流模块依据 SVPWM 波控制 IGBT 的通断,其结构如图 2 所示,通过开关信号与载波信号相比较输出 IGBT 的通断信号,为防止短路,上、下桥臂同一时刻互补动作。由此可定义开关函数 S_a, S_b, S_c ,如下式:

$$S_{i(i=a,b,c)} = \begin{cases} 1 & \text{上桥臂导通} \\ 0 & \text{下桥臂导通} \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可将交流电转换成直流电:

$$\int (S_a i_a + S_b i_c + S_c i_c) / C = u_{dc} \quad (8)$$

式中: u_{dc} , C 分别为直流侧电压与电容。

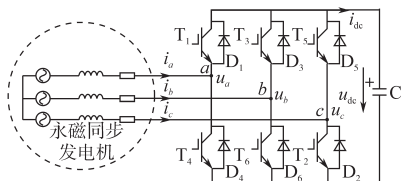


图2 PMSG-SVPWM 整流结构

Fig.2 PMSG-SVPWM rectifier structure

2.4 PI调节及电压前馈补偿建模机理

2.4.1 速度环PI调节

基于第1节的分析,取转速偏差为速度环输入, q 轴电流给定值为输出,从控制简单精准方面考虑,取PI控制如下:

$$\dot{i}_q^* = k_{p1}(\omega_c^* - \omega_c) + k_{i1} \int (\omega_c^* - \omega_c) dt \quad (9)$$

式中: k_{pl} , k_{il} 分别为比例与积分增益。

2.4.2 电流环PI调节

为避免永磁体的退磁和变流器的无功交换, 取零 d 轴电流 PI 控制策略如下:

$$\begin{cases} u_d^* = k_{p2} R_s (i_d^* - i_d) + k_{i2} L_d \int (i_d^* - i_d) dt \\ u_q^* = k_{p3} R_s (i_q^* - i_q) + k_{i3} L_q \int (i_q^* - i_q) dt \end{cases} \quad (10)$$

式中: k_{p2}, k_{i2} 分别为 d 轴电流内环比例与积分增益; k_{p3}, k_{i3} 分别为 q 轴电流内环比例与积分增益。

2.4.3 电压前馈补偿

由式(4)可知,永磁同步发电机 d, q 轴电压存在 d, q 轴间动态耦合,需通过电压前馈补偿,实现精确线性化,可表达为

$$\begin{cases} u_d = \omega_c L_q i_q - u_d^* \\ u_q = -\omega_c L_d i_d + \omega_c \Psi_f - u_q^* \end{cases} \quad (11)$$

3 风力发电机侧系统仿真

综上所述,可搭建直驱永磁风电机组机侧双闭环PI控制系统模型如图3所示,主电路包括风速模型、风力机与MPPT算法模块(式(1)~式(3))、PMSG(式(4)~式(6))、整流器(式(7)~式(8))。控制电路包括转速电流双闭环PI与电压前馈补偿(式(10)~式(11))、坐标变换与电压空间矢量变换模块。

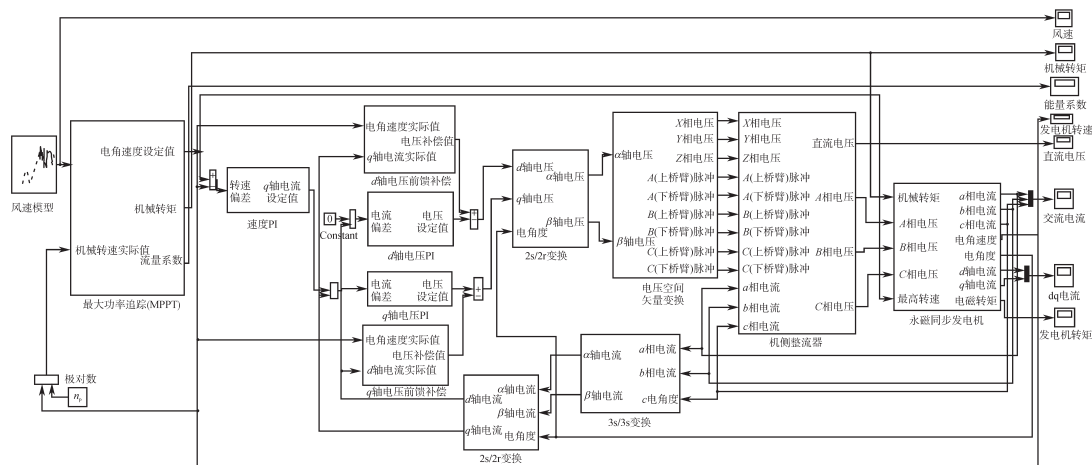


图3 直驱永磁风电机组机侧双闭环PI控制系统模型

Fig.3 Double-loop PI control model of direct-driven permanent magnet synchronous generator side systems

4 仿真结果及分析

4.1 系统仿真参数设置

依据直驱永磁风电电机侧双闭环PI控制原理,可在Matlab/Simulink上搭建机侧控制系统模型,系统参数为: $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$, $R_r=1.86 \text{ m}$, $J=1.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $P_{\text{rated}}=5.5 \text{ kW}$, $n_p=6$, $L=8.5 \text{ mH}$, $\Psi_f=0.21 \text{ Wb}$, $C=4700 \mu\text{F}$, $\omega_{\text{rated}}=240 \text{ rad/s}$, $v_{\text{rated}}=12 \text{ m/s}$, $R_s=0.24 \Omega$, $\lambda_{\text{opt}}=6.277$ 。控制器参数为: $k_{p1}=30.7$, $k_{i1}=15.5$, $k_{p2}=50$, $k_{i2}=1441.5$, $k_{p3}=80$, $k_{i3}=2258.9$ 。算法选择ode23tb,步长为 10^{-4} 。

4.2 仿真分析

依据风速的随机性与间歇性,可选仿真方案如图4所示,由0~2 s基本风、2~4 s阵风、4~6 s渐变风、6~10 s随机风所构成风速下的发电性能测试。

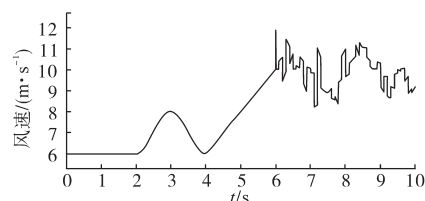


图4 风速波形

Fig.4 Waveform of wind speed

图5为直驱永磁风电机组MPPT双闭环PI控制在4种不同风速下的发电机转速、能量系数波形。由图5可知,发电机转速随风速而变化,动态响应快,发电效率保持在43.8%。

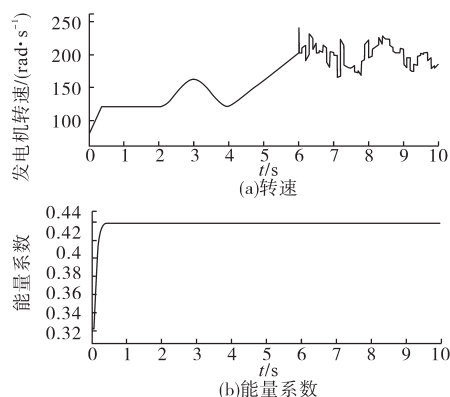


图5 发电机转速与能量系数波形

Fig.5 Waveforms of generator speed and wind turbine coefficient

定子电流波形如图6所示。由图6可知,电流虽因风速突变造成阶跃,但逐渐趋于稳定,且波形接近正弦波。

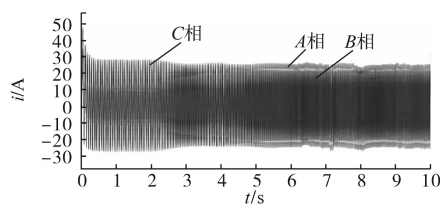


图6 定子电流波形

Fig.6 Waveforms of stator current

发电机转矩波形如图7所示,由图7可知,通过调节 d, q 轴电流使电磁转矩随风速而变化,且逐渐趋于稳定,而发电机转速随风速变化,故发电功率基本随风速变化。

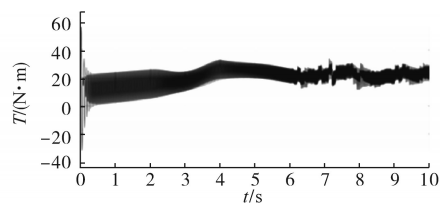


图7 发电机转矩波形

Fig.7 Waveform of generator torque

5 结论

本文基于双闭环PI控制策略研究了直驱永磁风力发电机侧控制系统,并通过仿真,证明了双闭环PI控制最大功率追踪方案在4种不同风速下的可行性,并展示出系统具有良好的动态响应和稳定性。构建的直驱永磁风电机组最大功率追踪仿真模型对风电机组控制与研究及先进控制算法的优化控制与研究提供了可行指导。

参考文献

- [1] 张庆阳,郭家康.世界风能强国发展风电的经验与对策[J].中外能源,2015,20(6):25-34.
- [2] Blaabjerg F, Ma K. Wind Energy Systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(11):2116-2131.
- [3] Putri R I, Pujiantara M, Priyadi A, et al. Maximum Power Extraction Improvement Using Sensorless Controller Based on Adaptive Perturb and Observe Algorithm for PMSG Wind Turbine Application [J]. IET Electric Power Applications, 2018, 12(4): 455-462.
- [4] 姜鑫,乔佳,张雄君,等.可再生能源发电现状及发展建议[J].煤气与热力,2018, 38(1):6-11.
- [5] 王艳春.风力发电系统技术的发展综述[J].信息记录材料,2017,18(5):27-28.
- [6] Yaramasu V, Dekka A, Durán M J, et al. PMSG-based Wind Energy Conversion Systems: Survey on Power Converters and Controls [J]. IET Electric Power Applications, 2017, 11(6): 956-968.
- [7] 孟克其劳,陈虎,钱春震,等.永磁直驱风力发电系统最大功率追踪策略研究[J].电力系统保护与控制,2012,40(22):83-87.

收稿日期:2018-05-08

修改稿日期:2018-07-02