

直驱式风电机组建模及最大功率跟踪控制

蔺红, 晁勤

(新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 针对新疆达板城风电场直驱式风力发电机组, 采用高效大功率变流电路的拓扑结构, 建立了直驱式风电机组数学模型和最大功率跟踪控制模型, 应用基于 BP 算法的神经网络控制策略对风力机桨距角进行控制, 达到了既能满足电网电能质量要求又能实现最大功率跟踪的目的。

关键词: 直驱式风电机组; 神经网络控制; 建模; 仿真分析; 最大功率跟踪

Modeling and Maximum Power Point Tracking Control of Direct-driven Wind Generator

Lin Hong, Chao Qin

(College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi Xinjiang 830000)

Abstract: Based on the direct-driven wind turbine-generator with high efficiency and large capacity power converter in the Daban city wind farm, the mathematical models of direct-driven wind turbine-generator and the maximum power point tracking are built in this paper. After using neural network based on BP algorithm for the control of blade angle of wind turbine, the maximum power point tracking is achieved and the requirement on power quality is meet.

Key Words: direct-driven wind generator; BP control; modeling; simulation analysis; maximum power point tracking

中图分类号: TM315

文献标识码: A

文章编号: 0559-9342(2010)01-0086-03

0 引言

直驱式变频恒速风力发电机组是目前性能最优、可靠性和性价比最高的风力发电方式, 成为当前风力发电技术研究的热点。本文针对新疆达板城风场的 1.2 MW 直驱式永磁风力发电机组建模及最大功率跟踪控制, 采用高效大功率变流电路的拓扑结构, 对所建模型通过仿真, 验证模型的正确性; 应用基于 BP 算法的神经网络控制策略对风力机桨距角进行控制, 与 PI 控制进行比较, 表明本文控制策略的有效性。达板城风场并网型 1.2 MW 直驱式永磁发电机组的变频电路如图 1 所示。

1 直驱式风力机组数学模型

1.1 风力机数学模型

风力机数学模型

$$T_w = 0.5\pi\rho R^3 V_w^2 C_p(\gamma, \beta) / \gamma \quad (1)$$

$$C_p(\omega_w, \beta) = \frac{1}{2}(\gamma(\omega_w) - 0.022\beta^2 - 5.6)e^{-0.17\gamma(\omega_w)} \quad (2)$$

式 (1)、(2) 中, ρ 为空气密度; R 为风力机转子

半径; β 为桨叶的桨距角; $\gamma = \omega_w R / V_w$ 为叶尖速比, V_w 为风速, ω_w 为风力机转子的角速度; $C_p(\gamma, \beta)$ 为风能利用系数是桨距角 β 和叶尖速比 γ 函数。

1.2 永磁同步发电机模型

同步旋转坐标系下建立的永磁同步发电机组数学模型

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R_a}{L}i_d + \omega_e i_q + \frac{1}{L}u_d \quad (3)$$

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R_a}{L}i_q - \omega_e (i_d + \frac{1}{L}\psi_0) + \frac{1}{L}u_q \quad (4)$$

运动方程

$$\frac{d\omega_e}{dt} = (T_e - T_w - B_m\omega_e) / J_{eq} \quad (5)$$

电磁转矩表达式

$$T_e = 1.5P[(L_d - L_q)i_d i_q + i_q \psi_0] = 1.5P\psi_0 i_q \quad (6)$$

式 (3) ~ (6) 中, i_d 和 i_q 分别为发电机的 d 轴和 q

收稿日期: 2009-05-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(50667002); 新疆教育厅重点项目(xjedu2005i01)

作者简介: 蔺红(1969—), 女, 山东莱芜人, 副教授, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制。

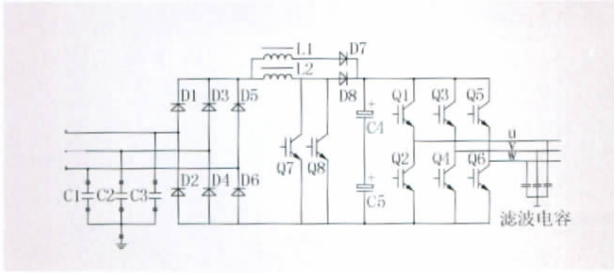


图 1 交-直-交变频器电路

轴电流； u_d 和 u_q 分别为 d 轴和 q 轴电压分量； $L=L_d=L_q$ ， L_d 和 L_q 分别 d 轴和 q 轴电感； T_e 为电机的电磁转矩； T_w 为风轮获取的气动转矩； ω_g 为发电机转子的转速， $\omega_g=\omega_w$ ； ω_e 为电角频率； R_a 为定子电阻； ψ_0 为永磁体的磁链； J_{eq} 为风力机的等效转动惯量； B_m 为转动粘滞系数； P 为转子的极对数。

2 最大功率控制策略

- (1) 在低风速段，当风速变化时，通过调节变频电路的占空比来实现最大功率点跟踪控制。
- (2) 在高风速段，受机械强度、发电机容量和变频器容量等限制，需降低风轮捕获的能量，对桨距角进行控制，使机组保持在额定功率附近。

2.1 最大功率点跟踪控制

风力发电机发出的交流电压经整流电路转变为直流电压，再经斩波电路升压，升压斩波器输入输出电压可表示为占空比 α 的函数， $V_R=V_{dc}/(1-\alpha)$ ，再将推导变换为

$$R_{dc}=(1-\alpha)^2R_L \tag{7}$$

$$R_L=\frac{2}{3}V_{dc}^2\frac{\sqrt{R_a^2+X_s^2}+R_a}{(E)^2} \tag{8}$$

式 (7)、(8) 中， V_{dc} ， R_{dc} 为二极管整流器端口输出电压及等效电阻； V_R ， R_L 为升压斩波器输出电压及接电网侧电路的等效电阻； $\alpha=t_{on}/(t_{on}+t_{off})$ ， t_{on} 和 t_{off} 分别为斩波器开关器件的开通时间和关断时间； E 永磁发电机的感应电动势， R_a 和 X_s 分别为等效电阻及电抗。

直驱式风力发电机的转速总是随着风速在不断的变化，为了有效的获取电能，对升压斩波器的占空比进行控制，从而得到最大功率。最大功率点时的占空比 α_{max} 的值

$$\alpha_{max}=\frac{\pi\sqrt{R_L}}{\pi\sqrt{R_L}+3\sqrt{2\sqrt{R_a^2+X_s^2}}} \tag{9}$$

2.2 神经网络桨距角控制策略

变桨距机构数学模型

$$\frac{d\beta}{dt}=-\frac{1}{T_\beta}(\beta_{ref}-\beta) \tag{10}$$

式 (10) 中， T_β 为时间常数； β_{ref} 为参考桨距角。

风机特性的非线性特点非常适合使用神经网络控制器，神经网络桨距角控制器模型如图 2 所示。

选择神经网络结构为一个双层网络，它采用误差反向传播学习算法。第一层使用正切 S 型函数，第二层使用对数 S 型函数。本文选择风速 V_w 作为输入，输出桨距角 β 。图 2 是一个包含多层感知器的神经网络，这个网络在得到风速后，可以估计出控制器需要的桨叶桨距角度。神经网络系统被训练成可以离线学习的风力发电机组的反向动态模型。

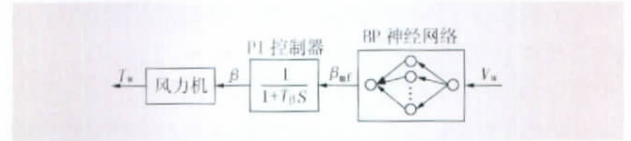


图 2 神经网络桨距角控制器模型

3 仿真实验

3.1 风力机组仿真分析

本文仿真具体参数如下：直驱式风力机组的额定容量为 1.2 MW，额定电压为 0.62 kV，定子电阻 $R_a=0.01$ ，电感 $L=0.003$ H，极对数 $p=32$ ，额定风速 $v_{wind_N}=12$ m/s，风力机转子半径 $R=42$ m，等效转动惯量 $J_{eq}=8\times10^3$ kgm²，转动粘滞系数 $B_m=0$ 。

直驱式风力发电机输出电压波形见图 3，从图 3 中可看出，输出电压波形在 600 V 左右，波动很大，由于受风速、后续的变频设备的影响以及离散采样的原因，电压纹波较多较大，不能满足并网运行的要求。

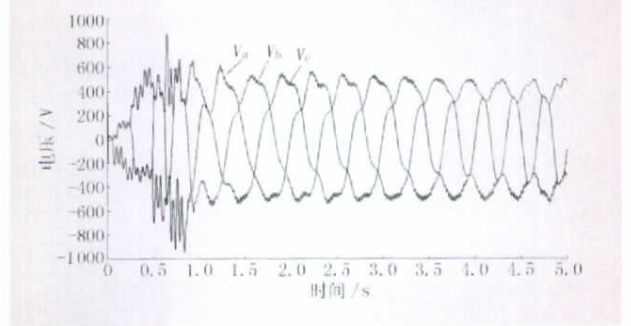


图 3 风力发电机输出的电压波形

为减少纹波，在逆变器后加滤波电容，本文采用双重 PWM 线电压控制方式，能有效减少 IGBT 开关的损耗，提高直流电压的利用率，降低低次谐波的含量，能实现良好的控制输出效果。双重 PWM 波叠加的输出三相电压为平滑的正弦波形如图 4 所示，它符合系统并网要求。

3.2 桨距角控制仿真

(1) 渐变风下的桨距角及功率响应。图 5 为渐变风模型及渐变风下采用 PI 控制和神经网络控制的桨距角变化曲线及有功功率输出曲线。从曲线中可见，能做到跟随风速的变化，及时调节桨距角使功

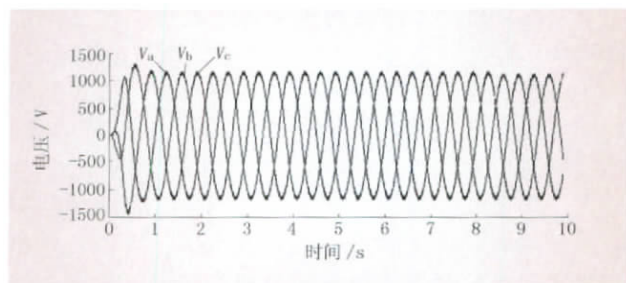


图4 经变换器后输出的电压波形

率输出达额定；由于PI控制滞后的缺点，在风速不再变化时，没有及时停止调节，出现超调问题，输出功率继续减少，约21 s时，输出功率达额定值。而由神经网络控制器作用的变桨系统，在风速不再变化时，按照变桨速率0.5的约束快速将变桨系统桨距角调整到最佳值 20° ，减少了风速过高对机组的破坏，在17 s时输出功率达额定值。可见神经网络控制的调节作用比PI控制跟随更及时更有效，表现出了良好的控制性能。

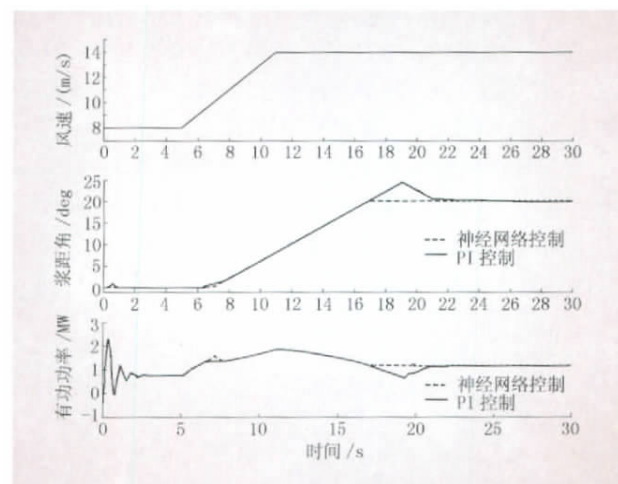


图5 渐变风下风力机组响应

(2) 随机风下的桨距角与功率响应。图6为随机风模型及随机风条件下桨距角变化关系曲线及有功功率曲线，当风速变动时，PI控制变桨系统会随之调节桨距角的输出值，基本能够跟随风速变动桨距角，但系统有一定的滞后性，跟随偏差量较大，但是随着渐变风变化率的降低，这种滞后的问题会适当减轻。在第12 s风速低于变桨系统的动作设定风速9 m/s时，变桨系统能够按照设定情况保持最大功率输出时要求的桨距角为 0° 。

从随机风下的功率输出曲线可见，在高风速情况下，用神经网络策略和PI控制器对系统进行控制，能够保持输出功率稳定在允许的最大值；当风速发生突变时，系统有微小的波动，但仍然能够保持功率输出较平稳地保持在允许的范围内，显然控制系统起到了很好的抗风速突然波动的作用，减小了发电机输出

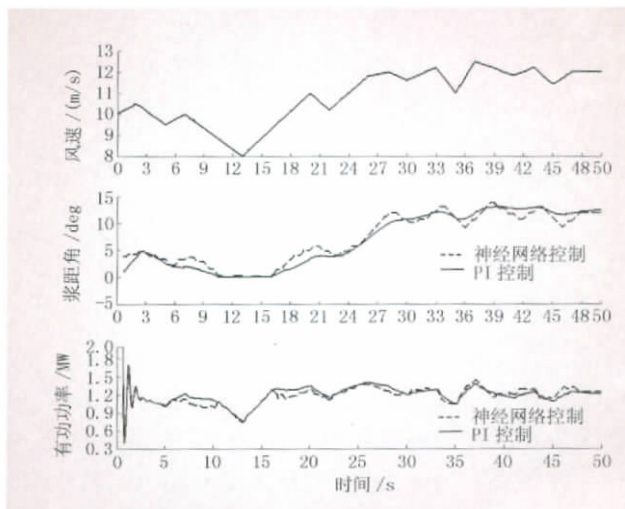


图6 随机风下风电机组响应

功率波动，并能使其保持较为稳定的运行状态。神经网络控制策略的跟随性明显要比PI控制好。

5 结论

本文建立了直驱式风力发电机组模型及最大功率跟踪控制策略，应用基于BP算法的神经网络控制策略对风力机桨距角进行控制，与PI控制的控制结果进行比较，表明神经网络控制策略的优越性。计算机建模与仿真验证了文中所提出的变速恒频风力发电系统控制策略满足变速恒频和追踪最大风能的要求，达到了既能满足电网电能质量要求又能实现最大功率跟踪的良好效果，对实际系统的运行控制具有指导意义。

参考文献：

- [1] 雷亚洲. 与风电并网相关的研究课题[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 84-89.
- [2] 迟永宁, 王伟胜, 刘燕华, 等. 大型风电场对电力系统暂态稳定性的影响[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(15): 10-14.
- [3] 伍小杰, 柴建云, 王祥珩. 变速恒频双馈风力发电系统交流励磁综述[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23): 92-96.
- [4] 胡家兵, 孙丹, 贺益康, 等. 电网电压骤降下双馈风力发电机建模与控制[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 21-26.
- [5] 刘其辉, 贺益康, 赵仁德. 变速恒频风力发电系统最大风能追踪控制[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 62-67.
- [6] 卞松江, 吕晓美, 相会杰, 等. 交流励磁变速恒频风力发电系统控制策略的仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(16): 57-62.
- [7] 李晶, 宋家骅, 王伟胜. 大型变速恒频风力发电机组建模与仿真[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 100-105.
- [8] 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.
- [9] 吴迪, 张建文. 变速直驱永磁风力发电机控制系统研究[J]. 大电机技术, 2006, (6): 51-55.

(责任编辑 刘书秋)