

# 直驱式永磁风力发电机软并网与功率调节的控制集成

何东升, 刘永强

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 为实现直驱式永磁同步风力发电机无冲击并网与风能最大跟踪控制, 设计了一种软并网与功率调节一体化的控制集成装置. 基于广义功角特性, 提出了一种对逆变器输出功率进行直接控制, 从而实现最大风能跟踪的控制策略. 新的控制策略可使发电机的转速按所期待的动态运动, 因而具有良好的静态与动态性能. 另外, 该控制律中对电机参数具有很强的鲁棒性, 因而该控制器能适应各种不同参数的同步风力发电机, 成为同步风力发电并网与功率调节的独立装置.

**关键词:** 永磁风力发电机; 最大风能跟踪; 软并网

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A

## Integrated control of soft cut-in and power regulation for direct-drive permanent magnet wind turbine generator

HE Dong-sheng, LIU Yong-qiang

(School of Electrical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China)

**Abstract:** Connecting grid with no-impact and tracking the maximum wind energy, an integrated control system of soft cut-in and power regulation is designed in this paper. Based on generalized power angle characteristics, a new control scheme is proposed to control the output power of the inverter directly to realize the maximum wind energy tracking. The proposed control strategy can govern the rotor speed of generator, and make the rotor speed dynamics to track the desired rotation, thus the control strategy has excellent static and transient performances. On the other hand, the proposed control law is also robust to the generator parameters, the integrated controller is thus applicable to different synchronous wind turbine generator. In fact, the controller is a separate device for connecting grid and regulating power of synchronous wind turbine generator.

**Key words:** permanent magnet wind turbine generator; maximum wind energy tracing; soft cut in

### 1 引言(Introduction)

并网型风力发电机组的并网技术以及最大风能跟踪(功率调节)的控制技术是实现风力系统安全经济运行的关键技术. 实现软并网将大大提高风电机组并网的安全性及可靠性; 实现最大风能跟踪将提高风力发电的经济性有着重要的意义. 国内外对直驱式永磁同步风力发电机组的交流并网控制进行了一定的研究<sup>[1~7]</sup>. 采用永磁同步发电机作为风力发电机, 经整流将频率不稳、电压不稳的交流电变换为直流电, 再经适当控制的逆变器将其转化为恒频、恒压的交流电, 然后再经升压变压器接入电网. 考虑到风力较小时电机端口电压较低, 因此通常选择略低的逆变器输出电压是恰当的. 在传统的发电技术中并网装置与功率调节装置是各自独立的, 结

构复杂且成本较高. 另外现有的最大风能跟踪控制, 控制算法复杂, 且依赖电机参数, 因此适应性不强. 本文从直驱式永磁同步风力发电机交流并网运行的可靠性和控制的简单性出发, 采用简单可行的并网电路和精确可靠、简单的控制方法, 实现软并网及最大风能跟踪.

### 2 软并网与电信号采样(Soft cut in and electrical signal sampling)

系统原理框图如图1所示.

为保证并网瞬间发电机与电网上的电压、频率、相序一致, 通过控制器采集电网电压、频率、相位等参数, 并将电网电压信号作为逆变器的调制信号使逆变器输出电压与升压变压器二次侧的归算电压相同, 即达到无冲击软并网的理想条件后实施并

网. 实现并网后逐步改变逆变器调制信号使逆变器输出电压相位超前, 从而逐步增大风力发电机向电网的输送功率.

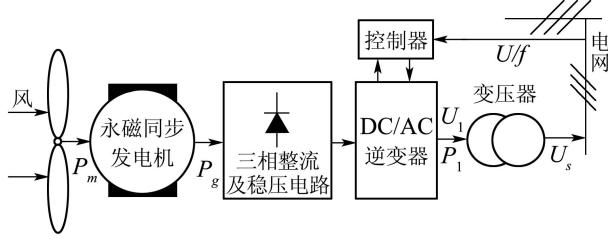


图1 并网型直驱式永磁同步风力发电机拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of grid-connected direct-drive permanent magnet wind turbine generator

为简化实现技术, 可设定电网电压、电流为三相完全对称的理想正弦波形. 设每个周波采样 $N$ 点,  $n$ 为采样时刻, 相邻两个采样点相隔 $\pi/2$ ,  $n_1$ 和 $n_2$ 为相邻的两个采样点. 用 $u_1$ 和 $u_2$ 表示相邻两个时刻的电压采样值, 则有

$$u_1 = u(n_1) = \sqrt{2}U \sin(2\pi n_1/N + \alpha), \quad (1)$$

$$u_2 = u(n_2) = \sqrt{2}U \sin(2\pi n_2/N + \alpha). \quad (2)$$

将上两式平方后相加得

$$U^2 = (u_1^2 + u_2^2)/2, \quad (3)$$

即可得电压有效值.

将式(1)与(2)相乘, 则有

$$\alpha = 0.5 \arcsin(u_1 u_2 / U^2) - 2\pi n_1 / N. \quad (4)$$

由于假设电压对称, 因此只需检测一相电量即可. 同理, 电流采用类似的检测方法.

### 3 风力机功率特性(Characteristics of wind turbine)

在一定风速下, 风力机功率曲线都有一最大功率点, 将不同风速的最大功率点连起来即为最优功率曲线. 最优功率曲线只与转速有关<sup>[8]</sup>:

$$P_{opt} = \frac{1}{2} C_P \max A \rho v^3, \quad (5)$$

$$T = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{1}{2} C_P A \rho \frac{R}{\lambda} v^2. \quad (6)$$

式中:  $P_{opt}$ 为风轮最大输出功率,  $C_P \max$ 为风轮的利用系数,  $A = \pi R^2$ 为风轮扫掠面积,  $\rho$ 为空气密度,  $v$ 为风速,  $R$ 为风轮半径,  $\lambda = \omega_m R / v$ 为叶尖速比,  $\omega_m$ 为风轮机械角速度,  $\alpha$ 为风机桨矩角,  $T$ 为机械转矩.

由式(5)和式(6)可知, 最大风能跟踪的要求就是风速变化时转速跟踪变化, 保持运行在最优功率曲线上.

## 4 最大风能跟踪控制(Maximum wind energy tracking control)

### 4.1 最大风能跟踪控制策略(Stratgy of maximum wind energy tracking control)

风力机系统是一个非线性的复杂系统, 它包含多种机电动态. 完整的变速控制模式需要建立一个有效的能计及各种动态的模型. 由于风力机建模和电力电子系统模型的复杂性, 系统不易完整建模. 不同于采用复杂发电机数学模型的控制方法以及通过中间直流变换或通过功率扰动实现最大风能跟踪的方法<sup>[4,5]</sup>. 本文提出了通过对逆变器输出端与网端广义功角的检测, 实现对风力发电机输出功率的直接控制与最大风能跟踪.

忽略发电机定子绕组电阻与转子阻尼后, 有如下功率关系<sup>[8]</sup>(见图2):

$$P_m = P_g + J \frac{\Omega_r d\Omega_r}{dt} = P_1 + C \frac{U_{dc} dU_{dc}}{dt} + J \frac{\Omega_r d\Omega_r}{dt} + P_{\Delta}. \quad (7)$$

式中:  $P_m$ 为风力机输出功率,  $P_g$ 为发电机输出功率,  $\Omega_r$ 为转子角速度,  $P_1$ 为逆变器输出功率,  $P_{\Delta}$ 为电力电子部分总的损耗,  $J$ 为风力机和发电机总的转动惯量,  $C$ 为直流稳压部分电容值.

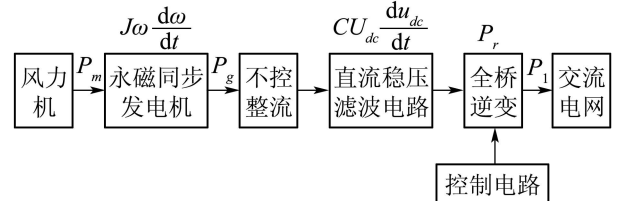


图2 并网型直驱式永磁风力发电机组功率流动

Fig. 2 Power flow of grid-connected direct-drive permanent magnet wind turbine generator

只要直接控制网侧逆变器输出有功功率, 控制发电机转速, 使风轮功率按照式(5)变化, 就能实现最大风能跟踪<sup>[6,7]</sup>. 若认为直流侧电压恒定, 则

$$P_m = P_1 + J \frac{\Omega_r d\Omega_r}{dt} + P_{\Delta}. \quad (8)$$

逆变器输出功率为:

$$P_1 = \frac{m U_1 U_s}{x_t} \sin \delta. \quad (9)$$

式中:  $P_1$ 为逆变器输出功率,  $m$ 为相数( $=3$ ),  $U_1$ 为逆变器输出电压,  $U_s$ 为折算至变压器一次侧的电网电压,  $x_t$ 为折算到一次侧的变压器电抗,  $\delta$ 为 $U_1$ 与 $U_s$ 的夹角, 即广义功角. 设电力电子部分总的损耗为

$$P_{\Delta} = K_p P_1. \quad (10)$$

式中:  $K_p$ 为系数, 随 $P_1$ 的变化而变化, 通过查表法可得, 近似情况下也可认为 $K_p$ 是一常数.

发电机输出功率为

$$P_g = P_1 + P_\Delta = (1 + K_p)P_1 = K_e P_1. \quad (11)$$

式中:  $P_g$  为发电机输出功率,  $K_e = 1 + K_p$  为转换系数. 忽略定子绕组电阻损耗及附加损耗时, 发电机的输出功率  $P_g$  近似等于其电磁功率, 即

$$P_g = K_e P_1 = K_e m \frac{U_1 U_s}{x_t} \sin \delta \approx P_{em} = T_{em} \Omega_r. \quad (12)$$

式中:  $P_{em}$  为电磁功率,  $T_{em}$  为发电机的电磁转矩.

当风力发电系统实现风能最大捕获时, 对应的角速度为  $\Omega_r^*$ , 发电机功率为  $P_g^*$ , 其功角为

$$\delta_{opt} = \sin^{-1} \left( \frac{P_g^* x_t}{K_e m U_1 U_s} \right). \quad (13)$$

考虑阻尼系数为  $K_D$  的转子运动方程:

$$J \frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{P_m}{\Omega_r} - \frac{P_g}{\Omega_r} - K_D \Omega_r = \frac{P_m}{\Omega_r} - K_e \frac{m U_1 U_s}{x_t \Omega_r} \sin \delta - K_D \Omega_r. \quad (14)$$

设存在大于零的常量  $K_1$ , 使下式成立, 即

$$P_g(\Omega_r) = P_g^* + (P_m - P_{opt}) - K_D(\Omega_r^2 - \Omega_r^{*2}) + K_1 \Omega_r (\Omega_r - \Omega_r^*). \quad (15)$$

式中:  $P_g^* = K_e \frac{m U_1 U_s}{x_t} \sin \delta_{opt}$  为发电机最佳功率值. 把式(15)式代入到式(14)中, 有

$$J \Omega_r \frac{d\Omega_r}{dt} = -P_g^* + P_{opt} - K_D \Omega_r^2 - K_1 \Omega_r (\Omega_r - \Omega_r^*). \quad (16)$$

注意到  $-P_g^* + P_{opt} - K_D \Omega_r^{*2} = 0$ , 因此

$$J \frac{d(\Omega_r - \Omega_r^*)}{dt} = -K_1 (\Omega_r - \Omega_r^*). \quad (17)$$

方程(17)的解为

$$\Omega_r = \Omega_r^* + C \exp(-K_1 t / J). \quad (18)$$

这里  $C$  为待定常数, 其大小取决于转速的初始值. 由式(18)知, 当  $t \rightarrow \infty$  时, 有  $\Omega_r \rightarrow \Omega_r^*$ , 只要恰当地选择  $K_1$  便可使系统达到我们所期待的动态品质且无静差. 综合式(12)与式(15), 广义功角为

$$\delta = \sin^{-1} \left( \frac{P_g^* + (P_m - P_{opt}) - K_D(\Omega_r^2 - \Omega_r^{*2})}{K_e m U_1 U_s} x_t + \frac{K_1 \Omega_r (\Omega_r - \Omega_r^*)}{K_e m U_1 U_s} x_t \right). \quad (19)$$

式(19)可看作是实现在风能最大捕获的广义功角的控制律. 通过实时监测升压变二次侧电压, 由式(19)给出逆变器调制信号, 从而实现最大风能的跟踪.

#### 4.2 控制约束(Control restriction)

根据同步发电机运行理论, 为防止发电机进入不稳定区域, 对广义功角  $\delta$  的控制是有约束的. 设  $E_0$  为

永磁同步发电机的空载电势,  $E_0$  与机端电压  $U_g$  的夹角, 即发电机的功角为  $\delta_G$ , 则发电机的输出功率满足

$$P_g = K_e \frac{m U_1 U_s}{x_t} \sin \delta = \frac{m E_0 U_g}{x_d} \sin \delta_G. \quad (20)$$

为防止发电机进入不稳定区域, 电机正常运行时要求  $\delta_G < \pi/2$ , 即不等式

$$\delta_{\max} < \sin^{-1} \frac{E_0 U_g x_t}{U_1 U_s K_e x_d}$$

对永磁同步发电机, 可以认为空载电势正比于发电机的转速即  $E_0 = \alpha \Omega_r$ , 因此

$$\delta_{\max} < \sin^{-1} \frac{\alpha \Omega_r U_g x_t}{U_1 U_s K_e x_d}. \quad (21)$$

#### 4.3 控制器仿真(Control simulation)

考虑某直驱式永磁同步风力发电机组的结构如图1所示. 发电机的初始转速为 35 rad/s, 所对应风速为 7.6 m/s. 图3给出了风速转速的关系曲线, 在图3中现风速为 12 m/s, 当风力机组转速达到 55 rad/s 可捕获最大风能  $P_{opt} = 10$  kW. 发电机最佳功率为  $P_g^* = 9.6975$  kW. 发电系统参数:  $J = 5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,  $K_D = 0.1$ ,  $x_t = 0.8 \Omega$ ; 控制器参数  $K_1 = 4$ .

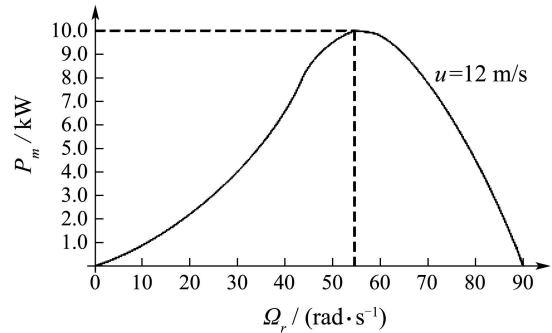


图3 功率速度特性

Fig. 3 Characteristic of power versus speed

图4(a)(b)则给出了风力发电机组施加控制后, 转速的变化与广义功角的变化. 从图4中不难看出本文所提出的控制策略具有良好的静态性能与动态性能.

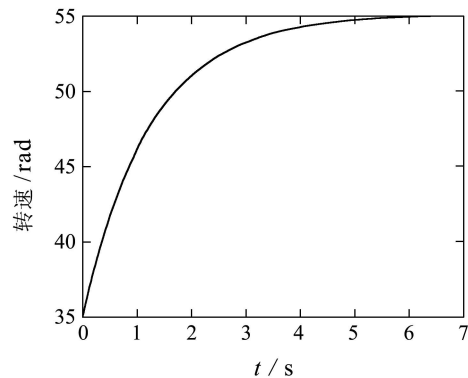
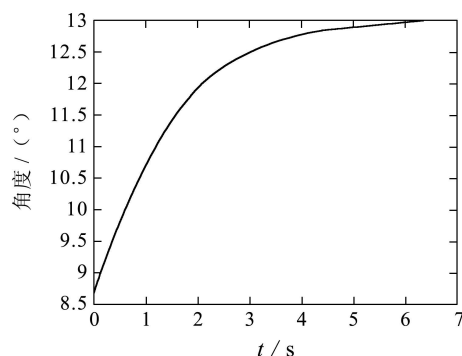


图4(a) 转速随时间的变化

Fig. 4(a) Characteristic of rotor speed versus time

图4(b)  $\delta$ 随时间的变化Fig. 4(b) Variation of  $\delta$  versus time

## 5 结论(Conclusions)

不可控整流加可控逆变的交-直-交结构是直驱式风力发电机较理想的实现方案. 调节逆变器输出电压使其与电网电压完全相同实现软并网, 而保持电压幅值不变调节电压的相位就可调节发电机输出功率实现最大风能跟踪. 在本文中所谓软并网与功率调节控制就是在不同工况下(并网与不同风速均视为不同之工况)给出最理想的逆变器调制波即给出调制电压的相位与幅值. 本文所提出的控制方法无需控制发电机或直流环节就可以较好地实现风能跟踪. 新的控制方法具有算法简单、经济、控制鲁棒性强的优点, 是一种具有实用意义的集成控制方法.

## 参考文献(References):

- [1] GRAUERS A. *Design of direct-driven permanent-magnet generators for wind turbines*[D]. Goteborg, Sweden; Chalmers University

of Technology, 1996.

- [2] 何山. 兆瓦级永磁同步风力发电机的电磁场分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2005.  
HE Shan. *The electromagnetic field analysis of mega-watt permanent magnet synchronization wind Turbine generator*[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2005.
- [3] 李庚银, 吕鹏飞, 李广凯, 等. 轻型高压直流输电技术的发展与展望[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 77 – 81.  
LI Gengyin, LU Pengfei, LI Guangkai, et al. Development and prospects for HVDC light[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(4): 77 – 81.
- [4] WANG Fengxiang, HOU Qingming, BO Jianlong, et al. Study on control system of low speed PM generator direct driven by wind turbine[C]//*Proceedings of International Conference on Electrical Machines and Systems*. Nanjing, China: Southeast University Press, 2005, Vol2: 1009 – 1012.
- [5] ESMAILI R, XU L, NICHOLS D K. A new control method of permanent magnet generator for maximum power tracking in wind turbine application[C]//*Proceedings of Power Engineering Society General Meeting*. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2005, 3: 1162 – 1167.
- [6] WANG Quincy, CHANG Liuchen. An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2004, 19(5): 1242 – 1249.
- [7] CHINCHILLA M, ARNALTES S, BURGOS J C. Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2006, 21(1): 130 – 135.
- [8] 王承煦, 张源. 风力发电[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.  
(WANG Chengxu, ZHANG Yuan. *Wind-Power Generation*[M]. Beijing: China Electric Power Industry Press, 2003.)

(上接第356页)

## 参考文献(References):

- [1] 吴捷, 杨俊华. 绿色能源与生态环境控制[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(6): 864 – 869.  
(WU Jie, YANG Junhua. Control on green energy source and ecology environment[J]. *Control Theory & Applications*, 2004, 12(6): 864 – 869.)
- [2] 祖丽楠, 田彦涛, 梅昊. 大规模多移动机器人合作任务的分布自主协作系统[J]. 机器人, 2006, 28(5): 470 – 477.  
(ZU Linan, TIAN Yantao, MEI hao. Distributed autonomous cooperation system for the large-scale cooperation task of multiple mobile robots[J]. *Robotics*, 2006, 28(5): 470 – 477.)
- [3] 何铁璇, 罗毅, 涂光瑜. EMS数据流管理系统的框架设计[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(24): 33 – 38.  
(HE Yixuan, LUO Yi, TU Guangyu. Design of the frame of data stream management system for the energy management system[J]. *Automation of Electric Power System*, 2006, 30(24): 33 – 38.)
- [4] MATURANA F P, TICHY P, SLECHTA P. Distributed multi-agent architecture for automation systems[J]. *Expert Systems with Applications*, 2004, 26(1): 49 – 56.
- [5] 黄天辰, 韩京才. 基于Agent技术的复杂适应系统分析与建模[J]. 计算机仿真, 2005, 22(9): 58 – 60.  
(HUANG Tianzhen, HAN Jingcai. Agent-based analysis and modeling of complex adaptive system[J]. *Computer Simulation*, 2005, 22(9): 58 – 60.)
- [6] ZHAI Wenbin, ZHANG Jie, YAN Junqi, et al. Agent-oriented colored petri-net based interactive protocol modeling technologies of semiconductor fabrication line[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2005, 39(7): 1150 – 1154.