

文章编号:1000-582X(2011)07-063-06

双馈风电机组总体控制策略及运行性能

张治俊¹, 李 辉¹, 陈宏文¹, 杨 超¹, 唐显虎²

(1. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆前卫仪表厂风电控制设备分公司, 重庆 401121)

摘 要:为了全面准确分析并网风力发电机组实时运行特性,有必要对风电机组总体控制策略及其运行性能进行研究。针对双馈风力发电机组类型,建立了风力机、传动链和双馈发电机的数学模型。从风能最大利用和风机安全运行角度,提出了考虑电机损耗最小的风电机组最大功率输出控制策略,以及考虑转速和功率限制的变桨控制策略。结合双馈发电机功率解耦控制策略对风电机组的总体运行性能进行了仿真。通过仿真、理论分析以及实际风电机组运行数据的比较,结果表明所建立的双馈风电机组数学模型和总体控制策略是有效的。

关键词:风力发电;双馈发电机;总体控制策略;最大风能捕获;变桨控制;矢量控制

中图分类号:TM614

文献标志码:A

Overall control strategy and operational performances of a doubly fed wind turbine generator system

ZHANG Zhi-jun¹, LI Hui¹, CHEN Hong-wen¹, YANG Chao¹, TANG Xian-hu²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. Wind Power Control Equipment Sub-Company of Chongqing Qianwei Instrument & Meter Factory, Chongqing 401121, P. R. China)

Abstract: In order to comprehensively and correctly analyze the real-time operational characteristics of a grid-connected wind turbine generator system, it is necessary to analyze the overall control strategies and operation performances of the wind turbine generator system. According to the type of a doubly fed wind turbine generator system, the mathematical models of wind turbine, drive train and doubly fed induction generator (DFIG) are presented. From the viewpoints of the maximum wind energy capture and safe operation of the wind turbine, a maximum power output control strategy is proposed by considering the DFIG loss minimization, and a variable pitch control strategy is also presented by considering generator rotational speed restriction and the output power restriction. Combined with a power decoupling strategy of DFIG, the overall operational performances of the doubly fed wind turbine generator system are simulated. By comparing the simulation, theoretical analysis and actual operational data, the results show that the presented model and overall control strategies of the doubly fed wind turbine generator system are valid.

Key words: wind power; doubly fed induction generator; overall control strategy; maximum wind energy capture; variable pitch control; vector control

收稿日期:2011-01-25

基金项目:重庆市科技攻关计划项目(CSTC2008AB3050);教育部留学回国人员启动基金(2008-890-2);输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目(2007DA10512710101)

作者简介:张治俊(1953-),男,重庆大学高级工程师,主要从事电机及其控制研究,(E-mail)doublepass@sina.com。

近年来,由于变速恒频风力发电系统在低风速时能根据风速的变化在运行中保持最佳叶尖速比,从而最大限度地捕获风能,另外在高风速时能利用风轮转速的变化,储存或释放部分容量,提高传动系统的柔性,使功率输出更加稳定,因此变速恒频风力发电系统得到广泛的应用^[1-2]。目前,随着单机容量为兆瓦级大型风力发电机组以及上百兆瓦风电场的迅速发展,风电系统的安全、可靠运行的要求需要得到更高层次的保证,使得风电系统运行性能及其总体控制策略的研究对于风电机组的控制系统设计具有重要的现实意义。

目前,对双馈风电机组的建模和控制策略研究已有些文献报道^[5-10],但大多数就某一运行阶段的控制策略展开讨论,从双馈风电机组总体控制策略和全风速运行性能角度研究的文献比较少。文献[5]利用爬山法实现风电系统的最大风能捕获,即通过测量风力机转速和输出功率,利用经典数学寻优方法调节电机转速实现最大风能捕获。文献[6]提出一种可以实现动静态过程风电系统最大风能捕获的方法,该策略根据风机机械转矩的变化,动态补偿风力发电机的输出功率,提高系统的动态风能捕获量。但是以上 2 种方法几乎忽略了双馈发电机本身发电效率问题。由于双馈发电机发电效率会随着电机参数和运行工况改变,风力机即使能够实现最大风能捕获,发电机发出的有功功率也会随着运行效率而改变,因此在保证发电机效率前提下来实现最大风能捕获是非常有意义的。文献[7]考虑转速限制因素,在风力机的变桨控制策略中采用转速控制的方法,但是没有考虑功率限制往往使变桨策略不能很好地实现额定功率的平稳输出。

基于此,为了深入研究双馈风电机组全风速下的运行性能,笔者提出对风电机组总体控制策略进行研究。首先建立了风力机、传动链和双馈发电机的数学模型。其次,从风能最大利用和风机安全运行角度,提出了考虑电机损耗最小的风电机组最大功率输出控制策略,以及考虑转速和功率限制的变桨控制策略。最后,结合双馈发电机功率解耦控制策略对风电机组的总体运行性能进行仿真,并将仿真结果与理论分析和实际运行数据进行比较和验证。

1 双馈风力发电机组模型

1.1 风力机特性

根据贝兹理论,风力机捕获的机械功率^[11]:

$$P_m = \frac{1}{2} C_P A \rho v^3, \quad (1)$$

式中: C_P 为风力机的功率系数; A 为风力机叶轮扫掠面积; ρ 为空气密度; v 为风速。从上式可以看出,在风速给定情况下,风力机获得的功率将取决于功率系数 C_P ,而 C_P 是叶尖速比 λ 和桨叶节距角 β 的函数,其典型的函数关系为^[11]:

$$\begin{cases} C_P(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) \frac{21}{\lambda} + 0.0068 \\ \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^2 + 1} \end{cases}, \quad (2)$$

叶尖速比可以表示为:

$$\lambda = \frac{\omega_T R_T}{v}, \quad (3)$$

式中: ω_T 为风力机叶轮角速度; R_T 为叶片半径; v 为风速; β 为桨叶节距角。

从式(1)-(3)可以看出,当节距角和风速一定时,风力机只有运行在对应于最佳的转速下才能捕获到最大的风能。为了保持最佳叶尖速比,随着风速改变,需要改变风电机组转速才能实现最大风能的捕获。

1.2 风力机传动链等效模型

典型风力发电机系统的机械传动链示意图如图 1 所示。

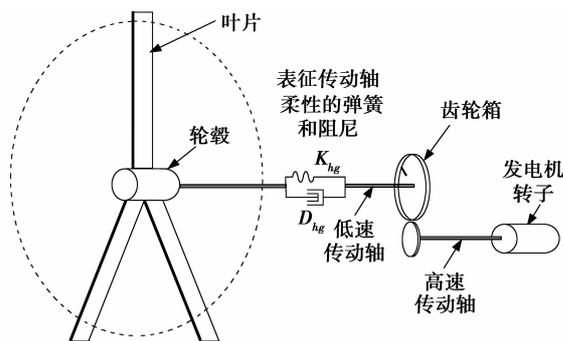


图 1 机械传动链等效模型示意图

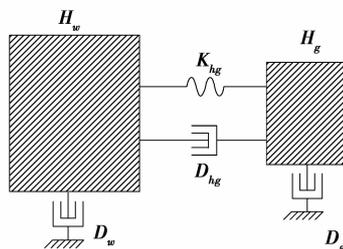


图 2 两个质量块风力机等效模型示意图

考虑到双馈风电机组传动链上通常有齿轮箱的存在,使得风力发电机组传动轴存在很大的柔性。由于传动轴的柔性主要来源于低速传动轴,通常将高速传动轴的柔性忽略或者计入低速传动轴中,将齿轮箱的惯性时间常数计入发电机转子中。对于风力机传动轴系建模,一般采用等效集中质量法^[12-13],可将风力机和发电机转子分别等效为一个质量块,建立两个等效质量块的风力机轴系模型,如图 2 所示。将风力机低速轴各量折算成发电机转子的高速侧,用标么值形式表示的运动方程为:

$$\begin{cases} 2H_w \frac{d\omega_w}{dt} = T_w - K_s \theta_s - D_s (\omega_w - \omega_g) - D_w \omega_w \\ 2H_g \frac{d\omega_g}{dt} = K_s \theta_s - T_e + D_s (\omega_w - \omega_g) - D_g \omega_g \\ \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_0 (\omega_w - \omega_g) \end{cases}, \quad (4)$$

式中: H_w 、 H_g 为风力机和发电机转子(含齿轮箱)的惯性时间常数; ω_w 、 ω_g 为风力机和发电机转子的电角速度; ω_0 为系统电角频率基值; θ_s 为风力机相对于发电机转子角位移; D_s 为风力机和发电机之间阻尼系数; D_w 、 D_g 分别为风力机和发电机转子自身阻尼系数; K_s 为传动轴系的刚度系数。

1.3 双馈发电机电磁暂态模型

假设双馈发电机定转子侧电压电流正方向都按电动机惯例,可得双馈发电机在 d - q 同步轴系下电磁暂态的电压电流方程(q 轴超前于 d 轴)为^[14]

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_s \psi_{sq} + \frac{1}{\omega_0} p \psi_{sd} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_s \psi_{sd} + \frac{1}{\omega_0} p \psi_{sq} \\ u_{rd} = R_r i_{rd} - s \omega_s \psi_{rq} + \frac{1}{\omega_0} p \psi_{rd} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + s \omega_s \psi_{rd} + \frac{1}{\omega_0} p \psi_{rq} \end{cases}, \quad (5)$$

其中,磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_{ss} i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_{ss} i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = L_m i_{sd} + L_{rr} i_{rd} \\ \psi_{rq} = L_m i_{sq} + L_{rr} i_{rq} \end{cases}, \quad (6)$$

式中: ω_s 为定子电压电角频率; ω_0 为系统电角频率基值; R_s 、 R_r 为定、转子电阻; u_{sd} 、 u_{sq} 、 u_{rd} 、 u_{rq} 、 i_{sd} 、 i_{sq} 、

i_{rd} 、 i_{rq} 、 ψ_{sd} 、 ψ_{sq} 、 ψ_{rd} 、 ψ_{rq} 分别为同步坐标轴系下的电压、电流、磁链,下标 d 、 q 分别为 d 轴、 q 轴分量,下标 s 表示定子方的量,而下标 r 则表示转子方的量; L_{ss} 、 L_{rr} 为定、转子绕组的自感; L_m 为定转子绕组之间的互感; s 为电机转差率; p 为微分算子。

双馈发电机的电磁转矩为

$$T_e = \frac{3}{2} n_p L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}), \quad (7)$$

式中 n_p 为电机极对数。

2 双馈风电机组总体控制策略

2.1 基于电机损耗最小的风能最大输出控制策略

由于双馈发电机发电效率会随着电机参数和运行工况改变,因此风力机即使能够实现最大风能捕获,发电机发出的有功功率也会随着运行效率而改变。为了使双馈风力发电系统尽可能地利用风能以及保持较高的发电效率,笔者提出了基于电机损耗最小的最大输出控制策略。

双馈发电机定、转子铜耗可表示为^[11]:

$$p_{Cu} = p_{Cus} + p_{Cur} = R_s (I_{sd}^2 + I_{sq}^2) + R_r (I_{rd}^2 + I_{rq}^2). \quad (8)$$

又由双馈电机的定转子电流关系:

$$\begin{cases} I_{sd} = B[A(X_m I_{rq} - U_s) + X_m I_{rd}] \\ I_{sq} = B[(X_m I_r - U_s) - A X_m I_{rd}] \end{cases}, \quad (9)$$

其中 $A = P_s / X_s$, $B = X_s / (X_s^2 + R_s^2)$ 。

将上式代入式(8),可得双馈发电机最小铜耗运行时的转子电流分量 I_{rqopt} 最优值,以及对应的定子电流分量为 I_{sqopt}

$$\begin{cases} I_{rqopt} = \frac{(1 + A^2) B^2 R_s X_m}{P_r + (1 + A^2) B^2 X_m^2 R_s} U_s \\ I_{sqopt} = \frac{-U_s}{X_s} + \frac{X_m}{X_s} I_{rqopt} \end{cases}. \quad (10)$$

从上式看出,当定子电压一定时,要使双馈发电机铜耗最小,转子电流分量 I_{rqopt} 是一个仅仅与电机参数有关的常数。因此,可以通过控制转子电流分量实现电机最小铜耗运行。

为了实现双馈发电机转子电流上述变化规律,保证发电机损耗最小运行,需要必要的励磁控制策略。另外为了满足对控制性能的要求和控制结构最简化的原则,笔者采用定子磁链作为定向矢量建立了转子侧变流器控制框图。

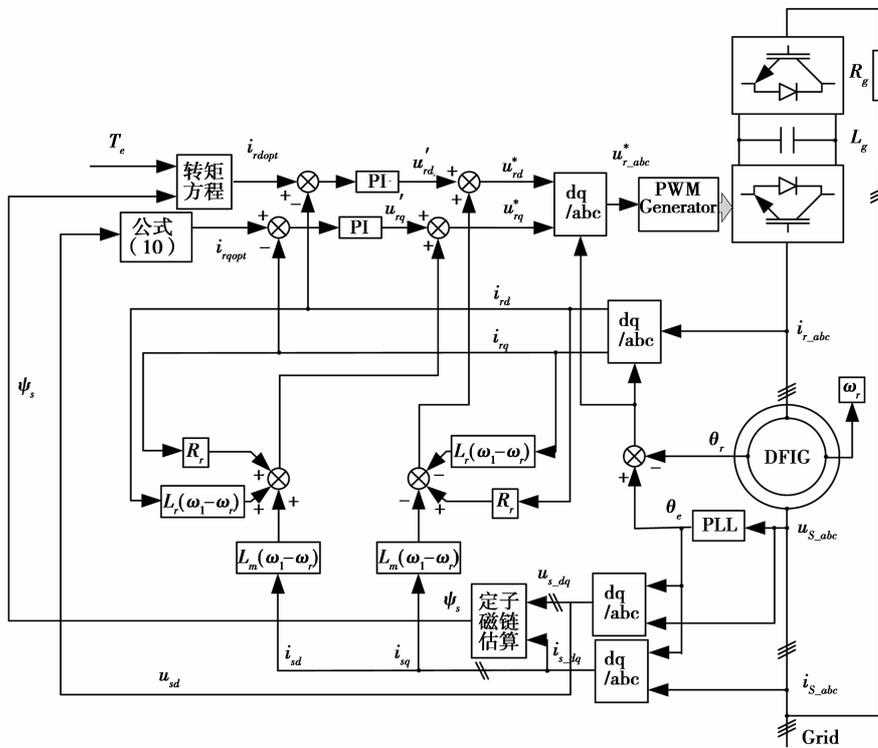


图 3 转子侧变流器控制策略框图

其中,转子电流的给定值由电磁转矩可得。

$$i_{rd} = L_s \frac{n_p \psi_s}{L_m} T_e \quad (11)$$

另外,根据式(1)和(3),得风机最大输出功率:

$$P_{m \max} = \frac{1}{2} C_{p \max} A \rho (R_T / \lambda_{opt})^3 \omega_T^3 \quad (12)$$

由式(12)可以看出,在同一风速下,不同风力机转速会使风力机输出不同的功率,为了实现最大风能的追踪,必须在风速变化时实时地调整电机转速。由此可见,风力机的最大功率值与转速的立方成正比,并用转速检测代替了风速检测。转速测量相比风速测量更加简单、容易、可靠、稳定。另外可依据已知的风力机最佳功率输出曲线,查表得到机组转速参考值,再对 DFIG 机组进行控制。

基于转速信号反馈法建立最大功率捕获控制基本原理框图如图 4 所示。

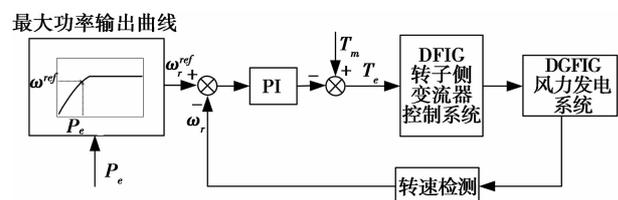


图 4 最大风能捕获控制原理框图

图 4 的机组转速给定信号则可通过计算输出功率以及机组功率特性而得,同时用机组转矩平衡方程来控制机组的电磁转矩,从而实现最优转速控制,达到风电机组最大风能捕获和跟踪目的。

2.2 基于转速和功率限制的变桨距控制策略

当风速高于额定风速以上运行时,风力发电机组受机械强度、发电机容量和变频器容量限制,必须调节风力机的功率系数,降低风轮捕获的能量,保持发电机输出恒定的功率。只单独考虑转速限制或者功率限制的变桨距控制策略,并不能很好地实现机组最大风能的跟踪运行,因此有必要建立基于转速和功率限制的变桨距控制策略。图 5 显示了该变桨距控制策略的基本原理框图。

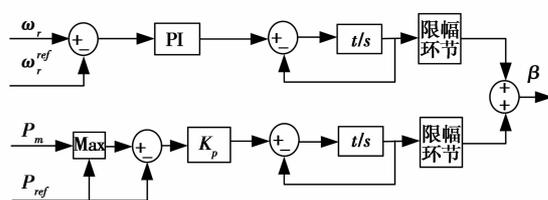


图 5 变桨距控制系统基本原理框图

图中 P_m 、 P_{ref} 、 ω_r 、 ω_r^{ref} 分别是风力机捕获的机械功率、有功功率限制值、发电机的实际转速、发电

机的转速参考值,且均为标么值。Max 表示取 2 个输入信号中的较大值,用于保证只有当风力机捕获机械功率高于限定功率时,桨距角控制器才起功率限制的作用, K_p 为比例控制参数, β 为考虑转速和功率限制后的桨距角。

3 双馈风力发电系统全风速运行性能的仿真

为了综合验证笔者研究的功率解耦控制策略、最大风能捕获策略及风力机变桨距控制策略在并网双馈风电机组中的控制效果,本节对并网后双馈风电机组全风速运行性能进行仿真。仿真用 2MW 风电机组参数为:额定功率 $P_N=2\ 150\ \text{kW}$;额定电压 $U_N=690\ \text{V}$;定子电阻 $R_s=0.007\ 06\ \text{p. u.}$;定子漏感 $L_{\sigma}=0.171\ \text{p. u.}$;折算到定子侧的转子电阻 $R_r=0.005\ \text{p. u.}$;折算到定子侧的转子漏感 $L_{\sigma}=0.156\ \text{p. u.}$;定、转子互感 $X_m=2.9\ \text{p. u.}$;发电机惯性常数 $H_g=0.951\ \text{s}$;极对数 $np=3$;变流器直流侧电容设定电压 $V_{dc}=1\ 200\ \text{V}$;风力机惯性常数 $H_w=4.05\ \text{s}$,传动轴刚度系数 $K_s=0.3\ \text{p. u.}$;额定风速 $v=11\ \text{m/s}$ 。设定风速为 2 s 时开始从 5 m/s 逐步上升至 20 m/s,其全风速运行范围内的仿真结果如图 6 所示。图 7 显示了全运行过程的定子电流和转子电流的变化过程。

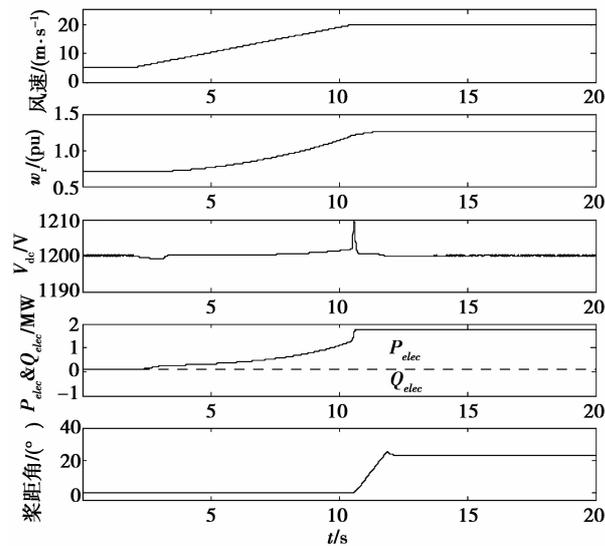


图 6 双馈风电机组总体控制的运行性能仿真结果

由图 6 可以看出,随着风速 v 的上升,发电机转速 ω_r 也从 0.703 pu 逐步上升至 1.255 p. u. ($t=8.7\ \text{s}$ 时达到同步转速);直流链电压基本上能够稳定工作在 1 200 V,证明网侧变流器工作正常;还可

以看出 DFIG 输出总的电能有功功率 P_{elec} 和无功功率 Q_{elec} 能够顺利实现功率的解耦控制, P_{elec} 在转速 ω_r 达到限定转速 1.21 p. u. 以前跟随风速逐渐变大,实现最大风能捕获;当机组达到额定功率以上时变桨系统开始工作,限定机械载荷和转速的进一步提高,机组则保持风力机额定功率平稳运行。

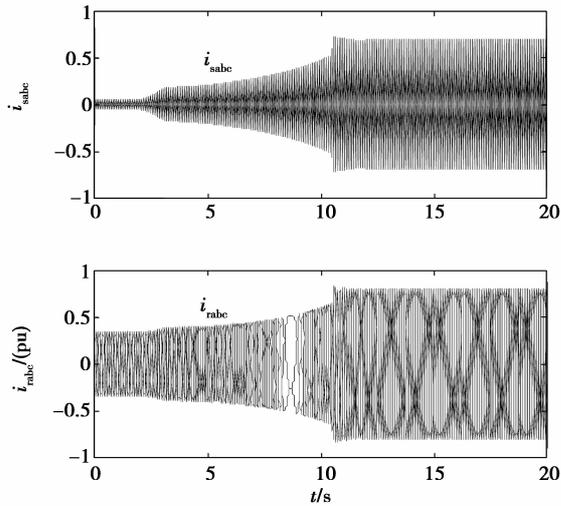


图 7 双馈风电机组总体运行的定、转子电流

由图 7 中可以看出,随着风速的变化导致发电机输出有功功率相应变化时,在电网电压恒定的情况下定子电流表现为幅值的相应变化,转子电流表现为幅值、频率及相序的相应变化。

为了进一步验证笔者所建立模型和总体控制策略的有效性,笔者将风电机组功率特性曲线的仿真结果与实际测得某 2 MW 双馈风电机组输出有功功率特性曲线进行比较,如图 8 所示。

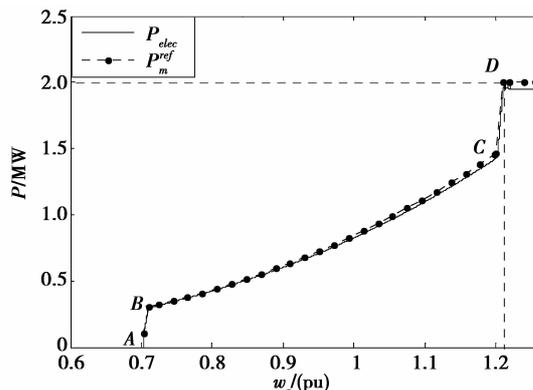


图 8 双馈风电机组功率特性仿真和实际结果比较

图中实线为实际测得的 DFIG 总的输出有功功

率 P_{dec} 对转速 ω_r 的变化曲线,加实点标记的虚线为双馈风电机组最大功率跟踪值 P_m^{ref} 对转速 ω_r 的变化曲线。可以看出,双馈风电机组总体运行结果和实际风电机组测试结果基本吻合;此外,通过应用笔者提出的发电机损耗最小的最大功率跟踪策略,额定功率以下每转速点对应的最大功率大于实测机组的功率,验证了所提出控制策略的优越性。

4 结 语

为了全面准确分析并网风力发电机组实时运行特性,针对双馈风力发电机组类型,首先建立了风力机、传动链和双馈发电机的数学模型。其次,从风能最大利用和风机安全运行角度,提出了一种考虑电机损耗最小的风电机组最大功率输出控制策略,以及考虑转速和功率限制的变桨控制策略。最后,结合双馈发电机功率解耦控制策略对风电机组的总体运行性能进行了仿真。通过仿真、理论分析以及与实际风电机组运行数据的比较,提出的最大功率输出控制策略,能很好地跟踪最大输出功率点,其最优转速和理论分析一致。通过仿真输出功率和实际风电机组输出功率比较,双馈风电机组全程运行结果和实际风电机组测试结果基本吻合,且可以看出在额定功率以下每转速点对应的最大功率大于实测机组的功率,进一步验证了所提出控制策略的优越性。

参考文献:

- [1] 吴聂根,程小华. 变速恒频风力发电技术综述[J]. 微电机, 2009, 42(8): 69-72.
WU NIE-GEN, CHENG XIAO-HUA. Review of variable speed constant frequency wind power generation system [J]. Micromotors, 2009, 42 (8): 69-72.
- [2] KO H S, YOON G G, KYUNG N H, et al. Modeling and control of DFIG based variable-speed wind-turbine [J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78 (11): 1841- 1849.
- [3] CHEN Z. Issues of connecting wind farms into power systems [C]//2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition: Asia and Pacific, August 8, 2005, Dalian, China. [S. l.]: IEEE, 2005:1-6.
- [4] ERLICH I, WINTER W, DITTRICH A. Advanced grid requirements for the integration of wind turbines into the german transmission system [C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 18-22, 2006, Montreal, Canada. [S. l.]: IEEE, [2006-10-16].
- [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]//IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005, June 12-16, 2005, San Francisco, California, USA. [S. l.]: IEEE, [2005-08-01]:1162-1167.
- [6] 耿华,杨耕,周伟松. 考虑风机动态的最大风能捕获策略[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(10):107-111.
GENG HUA, YANG GENG, ZHOU WEI-SONG. MPPT strategy considering wind turbine dynamics [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(10): 107-111.
- [7] 马蕊,鄂春良,付勋波,等. 兆瓦级变速恒频风电机组变速变桨距控制技术研究[J]. 电气传动, 2010, 40(4):7-10.
MA RUI, E CHUN-LIANG, FU XUN-BO, et al. Varying speed and pitch control strategy of MW variable speed constant frequency wind turbine [J]. Electric Drive, 2010, 40(4):7-10.
- [8] 刘其辉,贺益康,张建华. 交流励磁变速恒频风力发电机的运行控制及建模仿真[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5):43-50.
LIU QI-HUI, HE YI-KANG, ZHANG JIAN-HUA. Operation control and modeling-simulation of AC-excited variable speed Constant-frequency (AEVSCF) wind power generator [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 43-50.
- [9] CHOWDHURY B H, CHELLAPILLA S. Double-fed induction generator control for variable speed wind power generation [J]. Electric Power System Research, 2006, 76(9/10):786-800.
- [10] EKANAYAKE J B, HOLDSWORTH L, WU X G, et al. Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2):803-809.
- [11] 李辉,何蓓. 双馈风力发电系统的最大风能控制策略[J]. 太阳能学报, 2008, 29(7):797-803.
LI HUI, HE BEI. Control strategy of maximizing the wind energy for turbines with a DFIG [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2008, 29(7):797-803.
- [12] HOLDSWORTH L, WU X G, EKANAYAKE J B, et al. Comparison of fixed speed and doubly-fed induction wind turbines during power system disturbances [J]. IET Research Journal-Generation Transmission and Distribution, 2003, 150(3):343-352.
- [13] MUYEEN S M, ALI M H, TAKAHASHI R, et al. Transient stability analysis of wind generator system with the consideration of multi-mass shaft model [C]// International Conference on Power Electronics and Drives Systems, 2005, PEDS 2005, November 28-December 1, 2005, Kuala Lumpur, Malaysia. [S. l.]: IEEE, [2006-02-18]: 511-516.
- [14] MORREN J, DE HAAN S W H. Ride through of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(2):435-441.