

液压型风力发电机组功率追踪方法研究

艾超¹ 陈立娟³ 孔祥东² 陈文婷³

(1. 燕山大学 重型机械流体动力传输与控制实验室 河北 秦皇岛 066004; 2. 燕山大学 先进锻压成形技术与科学教育部重点实验室 河北 秦皇岛 066004; 3. 燕山大学 机械工程学院 河北 秦皇岛 066004)

摘要:以液压型风力发电机组为研究对象,针对机组发电效率问题,建立数学模型,利用小信号线性化的方法解决相乘非线性问题,进而提出基于输出功率单一控制以及输出功率和风力机转速联合控制的两种最佳功率追踪方法。分别对两种最佳功率追踪方法的控制原理进行详细介绍,从理论上分析两种控制方法的优缺点。同时以24 kW 液压型风力发电机组实验台为基础,采用 Matlab/Simulink 仿真软件,分别针对提出的两种最佳功率追踪控制方法进行仿真和实验研究,进而验证两种控制方法的可行性和正确性,为液压型风力发电机组的进一步研究以及更好的应用奠定理论基础。

关键词:风力发电; 液压传动; 最佳功率追踪; 功率控制; 功率与转速联合控制

中图分类号: TM614 文献标识码: A
DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.06.031

引言

风力发电作为一种新的能源应用技术得到了越来越多的重视和研究^[1-2]。传统的风电机组主要为双馈型和直驱型,但两种类型的风电机组均存在价格昂贵、结构复杂和维护困难的问题^[3]。随着液压技术的发展,液压传动系统凭借其体积小、重量轻以及较大的功重比等优点被引入到风力发电中,液压型风力发电机组^[4-6](简称液压型机组)作为一种新型机型具有重要研究意义。

风速的变化具有随机性和突变性,为提高风能的利用率,必须对机组进行最佳功率追踪控制。最佳功率追踪控制是提高机组风能利用率的直接方法,是风电机组的一项关键技术,也是现代风力发电机组正常运行的要求。传统机型的最佳功率追踪方法主要为最佳叶尖速比法、爬山法等^[7]。但液压型机组的结构以及控制机理与传统机型不同,故有必要探寻液压型机组功率追踪方法。

1 液压型机组原理简介

液压型机组的组成与传统机型不同,主要包括风力机、定量泵-变量马达闭式液压传动系统、励磁同步发电机等部分,其原理如图1所示。

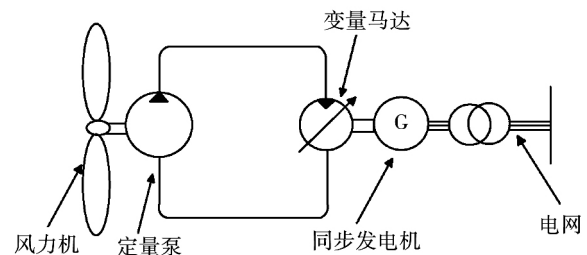


图1 液压型机组原理图

Fig. 1 The schematic diagram of hydraulic turbine generator units

液压型机组能量转化过程:(1) 风能通过风力机转换为机械能;(2) 机械能通过风力机相连的定量泵转换为液压能;(3) 液压能通过管道传输最终由变量马达转换为机械能;(4) 通过与马达同轴的励磁同步发电机将机械能转换为电能,完成从风能到电能的整个转换过程^[3]。

2 液压型机组数学模型分析

2.1 风力机特性数学模型

建立风力机输出功率和转矩特性的数学模型,其表达式如下^[8]:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p \quad (1)$$

收稿日期: 2015-05-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51475406); 河北省青年基金(QN20132017); 燕山大学青年教师自主研究计划课题(13LGB005)

作者简介: 艾超(1982-),男,河北唐山人,燕山大学硕士生导师。

$$T_m = \frac{P_w}{\omega} \quad (2)$$

式中: P_w —风力机输出功率, kW; ρ —空气密度, kg/m^3 ; R —叶片半径, m; ω —风力机转速, rad/s ; T_m —风力机气动转矩, $\text{kN} \cdot \text{m}$; v —风速, m/s ; C_p —风能利用系数, 无量纲数。

根据式(1)和式(2)可得到某一风速下的风力机输出功率和转矩随风轮转速变化的曲线,如图2所示。

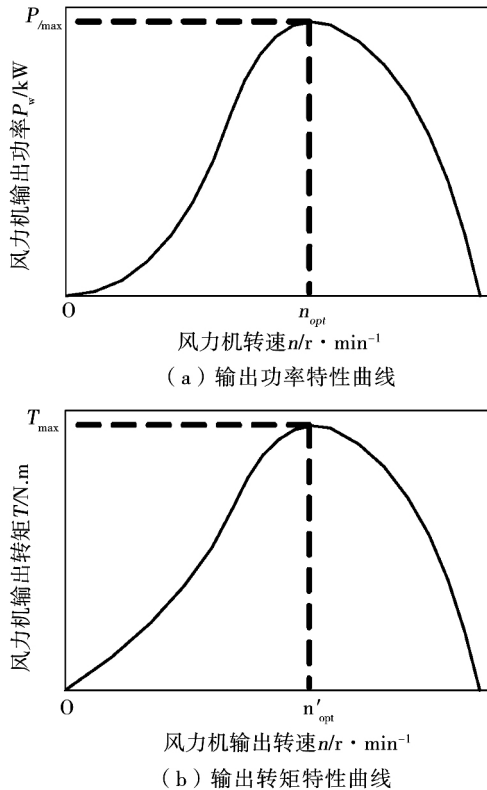


图 2 风力机特性曲线

Fig. 2 The characteristic curve of wind turbine

2.2 液压主传动系统的数学模型

液压型机组采用定量泵-变量马达闭式液压主传动系统。液压型机组最佳功率追踪控制的实质就是探寻定量泵转速变化过程中主传动系统各控制量的控制规律。依据如图3所示的原理图建立主传动系统的数学模型。

定量泵流量方程为:

$$q_p = D_p \omega_p - C_{ip}(p_h - p_l) - C_{ep} p_h \quad (3)$$

式中: q_p —定量泵流量, m^3/s ; D_p —定量泵排量, m^3/rad ; ω_p —定量泵的转速, rad/s ; C_{ip} —定量泵内泄漏系数; C_{ep} —定量泵外泄漏系数, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{Pa})$;

p_h —高压管路压力, Pa; p_l —低压管路压力, Pa。

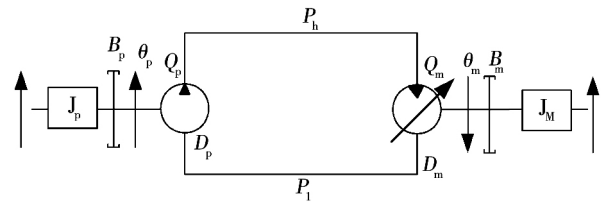


图 3 主传动系统原理图

Fig. 3 The principle diagram of main transmission system

定量泵力矩的平衡方程:

$$T_p - C_p(p_h - p_l) = J_p \frac{d^2 \theta_p}{dt^2} + B_p \frac{d\theta_p}{dt} + G_p \theta_p \quad (4)$$

式中: T_p —定量泵转矩, $\text{N} \cdot \text{m}$; J_p —定量泵的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; θ_p —定量泵转角, $(^\circ)$; B_p —定量泵的阻尼系数, $\text{N}/\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; G_p —定量泵端的负载弹簧刚度, N/m 。

变量马达的排量为:

$$D_m = K_m \gamma \quad (5)$$

式中: D_m —变量马达排量, m^3/rad ; K_m —变量马达排量梯度, m^3/rad ; γ —变量马达斜盘位置。

变量马达的流量方程:

$$q_m = D_m \omega_m + C_{im}(p_h - p_l) + C_{em} p_h \quad (6)$$

式中: q_m —变量马达流量, m^3/s ; ω_m —变量马达的转速, rad/s ; C_{im} —变量马达内泄漏系数, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{Pa})$; C_{em} —变量马达外泄漏系数, $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{Pa})$ 。

变量马达的力矩平衡方程:

$$D_m(p_h - p_l) = J_m \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} + B_m \frac{d\theta_m}{dt} + G_m \theta_m + T_m \quad (7)$$

式中: J_m —折算到变量马达轴上的总转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$; B_m —粘性阻尼系数, $\text{N}/(\text{m} \cdot \text{s})$; G_m —负载弹簧刚度, N/m ; T_m —作用在变量马达上负载转矩(电磁转矩), $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

定量泵-变量马达闭式系统高压腔流量连续性方程:

$$q_p = q_m + \frac{V_0}{\beta_e} \frac{dp_h}{dt} \quad (8)$$

联立式(5)、式(6)和式(8)可得:

$$q_p = K_m \gamma \frac{d\theta_m}{dt} + C_{im}(p_h - p_l) + C_{em} p_h + \frac{V_0}{\beta_e} \frac{dp_h}{dt} \quad (9)$$

式中: V_0 一定量泵 - 变量马达间高压管路总容积, m^3 ; β_c 一油液综合体积弹性模量, Pa; θ_m 一变量马达转角 ($^\circ$)。

液压系统传输的功率为压力和流量的乘积, 即:

$$P = q_m p_h = K_m \omega_m \gamma p_h \quad (10)$$

由于变量 γ 和 p_h 的乘积存在非线性, 基于小信号线性化的方法^[9], 在工作点 (p_{h0}, γ_0) 处线性化处理得:

$$\gamma(t) p_h(t) = \gamma_0 p_{h0} + \Delta\gamma(t) p_{h0} + \gamma_0 \Delta p_h(t) \quad (11)$$

式中: γ_0 一变量马达摆角初始值; $\Delta\gamma(t)$ 一变量马达摆角变化值; ω_{m0} 一变量马达转速初始值, rad/s; $\Delta\omega_m(t)$ 一变量马达转速变化值, rad/s。

3 最佳功率追踪控制方法研究

3.1 输出功率控制的最佳功率追踪方法

最佳功率追踪是提高风能利用率的直接方法, 液压型机组最佳功率追踪控制问题可以看成是对输出功率的控制, 故提出基于输出功率单一控制的最佳功率追踪方法。在该控制方法中, 系统主要实现 3 种功能, 即通过控制斜盘位置基准(马达摆角基准)部分, 初步使马达工作在同步转速附近; 其次通过控制马达转速部分, 精确控制马达转速为同步转速, 实现准同期并网; 最终通过控制机组输出功率部分, 实现输出功率的控制^[10], 进而实现最佳功率追踪控制, 具体的控制框图如图 4 所示。

3.2 参考功率给定

图 2 中的参考功率即最佳输出功率给定值是由风力机的转速计算得来的, 具体计算过程如下:

风力机吸收的最大功率(风速为 v) 为^[11-13]:

$$P_{max} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_{pmax} \quad (12)$$

风力机的转速 ω 与风速 v 有如下关系:

$$\omega = \frac{v \lambda_{opt}}{R} \quad (13)$$

联立式(12)和(13)可得:

$$P_{opt} = \frac{\rho \pi R^5 C_{pmax}}{2 \lambda_{opt}^3} \omega^3 = K_p \omega^3 \quad (14)$$

式中: P_{max} 一风力机吸收的最大风功率, kW; C_{pmax} 一最大风能利用系数; λ_{opt} 一最佳叶尖速比 $\lambda = \frac{R\omega}{v}$; K_p 一最佳功率系数, $kg \cdot m^2$, $K_p =$

$$\frac{\rho \pi R^5 C_{pmax}}{2 \lambda_{opt}^3}$$

式(14)描述了风力机输出功率特性曲线中的最佳功率追踪曲线, 当风速改变时, 机组将按照这条曲线进行最佳功率追踪。

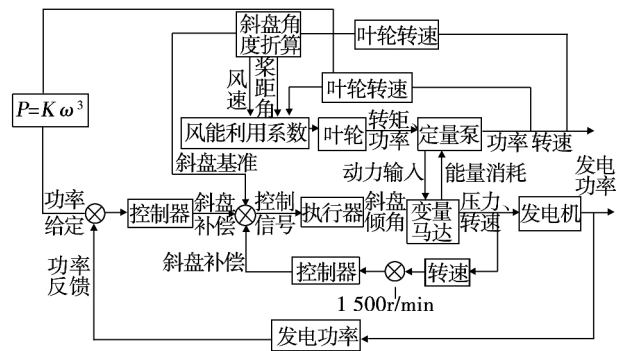


图 4 输出功率控制的最佳功率追踪方法控制框图

Fig. 4 The control block diagram of output power control in the maximum power point tracking method

3.3 功率追踪过程

基于输出功率单一控制的最佳功率追踪过程如图 5 所示。

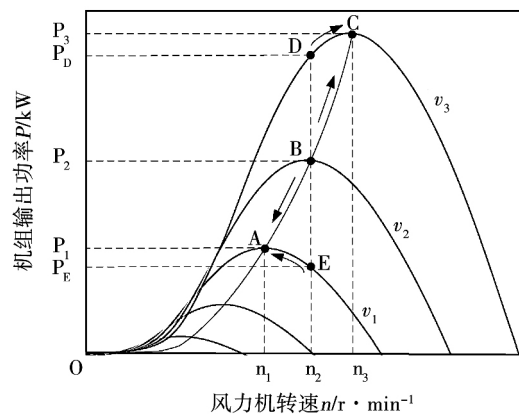


图 5 输出功率控制的最佳功率追踪方法示意图

Fig. 5 The sketch map of output power control in the maximum power point tracking method

其追踪过程如下:

令风速 $v_1 < v_2 < v_3$ (相应的最佳功率点为 A、B、C), 且风速初始时刻为 v_2 (最佳功率点为 B 点)。

当风速增大时(由 v_2 增大到 v_3), 液压型机组进行最佳功率追踪的过程如下: 由于风力机转速不能突变, 风力机的输入功率随着转速的增加将沿着

V_3 对应的功率特性曲线由 D 点运动到 C 点, 而实际的输出功率将沿着最佳功率特性曲线由 B 点运动到 C 点, 最终稳定在 C 点, 即在 C 点输入功率与输出功率相等, 完成了风速增加工况下的最佳功率追踪过程。

同理, 当风速减小时(由 v_2 减小到 v_1), 风力机输入功率随着转速的减小将沿着 v_1 对应的功率特性曲线由 E 点运动到 A 点, 实际输出功率则沿着最佳功率特性曲线由 B 点运动到 A 点, 最终稳定在 A 点, 完成了风速减小工况下的最佳功率追踪过程。

从上述理论分析可知, 基于输出功率单一控制的最佳功率追踪方法既能使机组随着风速的变化自动的进行最佳功率追踪, 又能满足机组控制在快速性和准确性方面的要求。

若在功率追踪过程中考虑效率, 则

$$P = \eta P_w < P_w \quad (15)$$

式中: P — 风力机输入的可用功率, kW; P_w — 风力机吸收的功率, kW; η — 效率系数。

当考虑到风电转化效率的影响时, 该方法追踪到的功率点低于相应风速下的最佳功率点, 不能满足准确性的要求。因此该方法在实际应用中有一定的局限性, 若要满足最佳功率追踪控制的准确性, 必须准确测定液压型机组的效率。

4 输出功率和风力机转速联合控制的最佳功率追踪方法

针对基于输出功率单一控制的最佳功率控制方法不足之处, 提出了输出功率和风力机转速联合控制的最佳功率追踪方法, 改进之处在于在原有控制系统的基础上加入控制风力机转速的部分, 相应的控制框图如图 6 所示。

无论风速增大还是减小, 改进方法的具体追踪过程与第一种方法大体相同, 唯一的不同之处在于由于风力机转速控制部分的引入, 风电机组最终稳定在最佳转速对应的最佳发电功率点上。由于控制输出功率的部分与控制风力机转速的部分之间相互关联, 故对功率进行有差控制, 而对风力机转速进行无差控制。

基于联合控制的方法弥补了单一控制输出功率方法的不足, 该方法既能使机组最终稳定在最佳工作点以最大效率吸收风能, 也能使机组的发电效率

得到很大程度的提升。

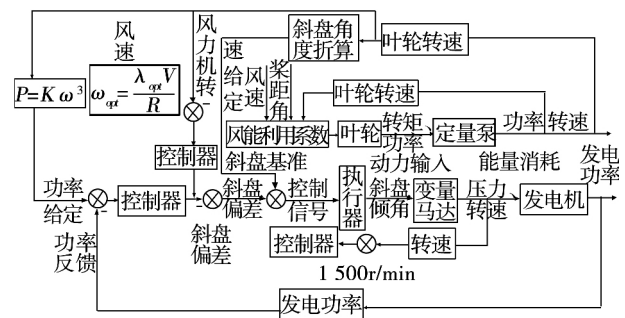


图 6 联合控制的最佳功率追踪方法控制框图

Fig. 6 The combined control block diagram of the maximum power point tracking method

5 最佳功率追踪控制仿真与实验

24 kW 液压型机组最佳功率追踪控制仿真平台如图 7 所示, 实验台实物图如图 8 所示。该仿真平台主要是基于 MATLAB/SIMULINK 软件和 AMESim 软件联合建立的, 主要包括风速模拟模块、风力机特性模拟模块、联合仿真软件接口模块、励磁同步发电机模型及并网控制模块、功率追踪主控器模块和液压传动系统模块等 6 个模块。

基于该实验平台分别对前面介绍的两种功率追踪控制方法进行仿真和实验研究, 仿真平台的液压传动系统参数如表 1 所示。

表 1 仿真平台的液压传动系统参数表

Tab. 1 The parameters table of hydraulic transmission system in simulation platform

参 数	数 值
风轮转动惯量/kg · m ²	400
定量泵排量/mL · r ⁻¹	63
变量马达排量/mL · r ⁻¹	40
系统低压管路溢流压力/MPa	1.2
系统高压管路溢流压力/MPa	35
系统补油压力/MPa	0.5
系统补油流量/L · min ⁻¹	200
定量泵转速设定范围/r · min ⁻¹	0 – 900
变量马达转速输出值/r · min ⁻¹	1 500
发电机负载转动惯量/kg · m ²	0.45
泄漏系数/m ³ · s ⁻¹ · Pa	0.85 × 10 ⁻¹¹

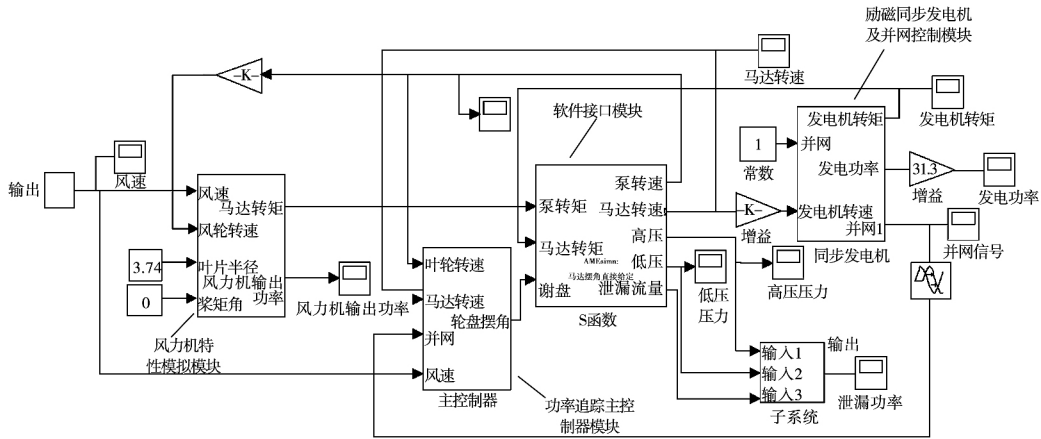


图7 液压型风力发电机组仿真平台

Fig. 7 The simulation platform of hydraulic turbine

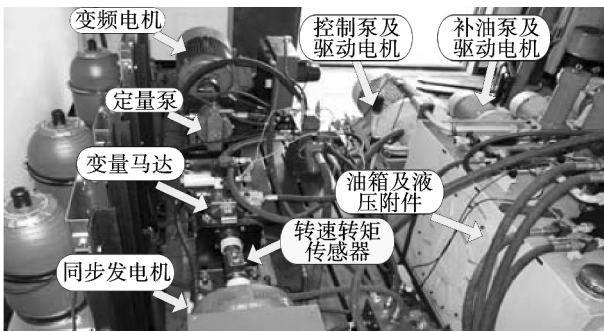


图8 24 kW 液压型机组实验台实物图

Fig. 8 The physical map of the 24 kW hydraulic turbine platform

5.1 输出功率控制的功率追踪方法研究

在阶跃风速作用下,对基于输出功率单一控制的最佳功率追踪方法进行仿真和实验研究,具体结果如图9所示。

从上述对比图中可以看出,无论风速如何变化,实验和仿真曲线有相同的变化趋势,即随着风速的增加或减小,实验和仿真曲线都能相应的呈现出上升或下降的趋势,说明数学模型建立的准确性高。在追踪过程结束时,系统的稳定工作点均偏低于风力机最佳转速以及相应的最佳功率点,这一点符合理论分析,是机组整机效率存在的缘故。若将基于输出功率单一控制的最佳功率追踪控制方法应用于工程实践中,必须考虑机组整机效率的影响。

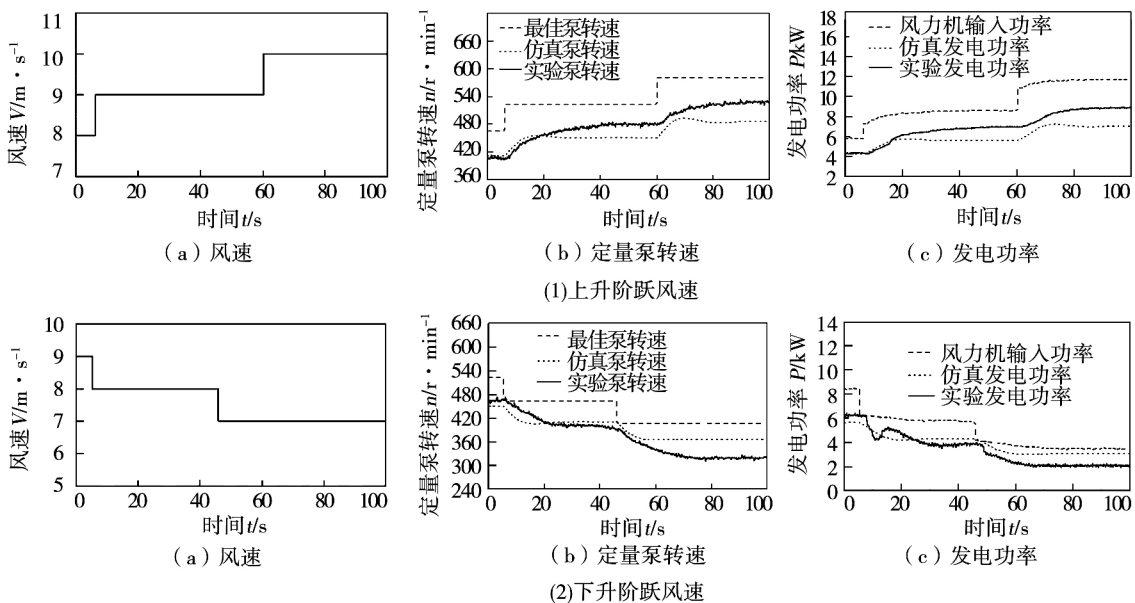


图9 实验 - 仿真对比结果

Fig. 9 The experiment-simulation results

5.2 联合控制的最佳功率追踪方法研究

分别在阶跃风速和波动风速作用下,对基于输

出功率和风力机转速联合控制的最佳功率追踪控制

方法进行仿真和实验研究,结果如图 10 所示。

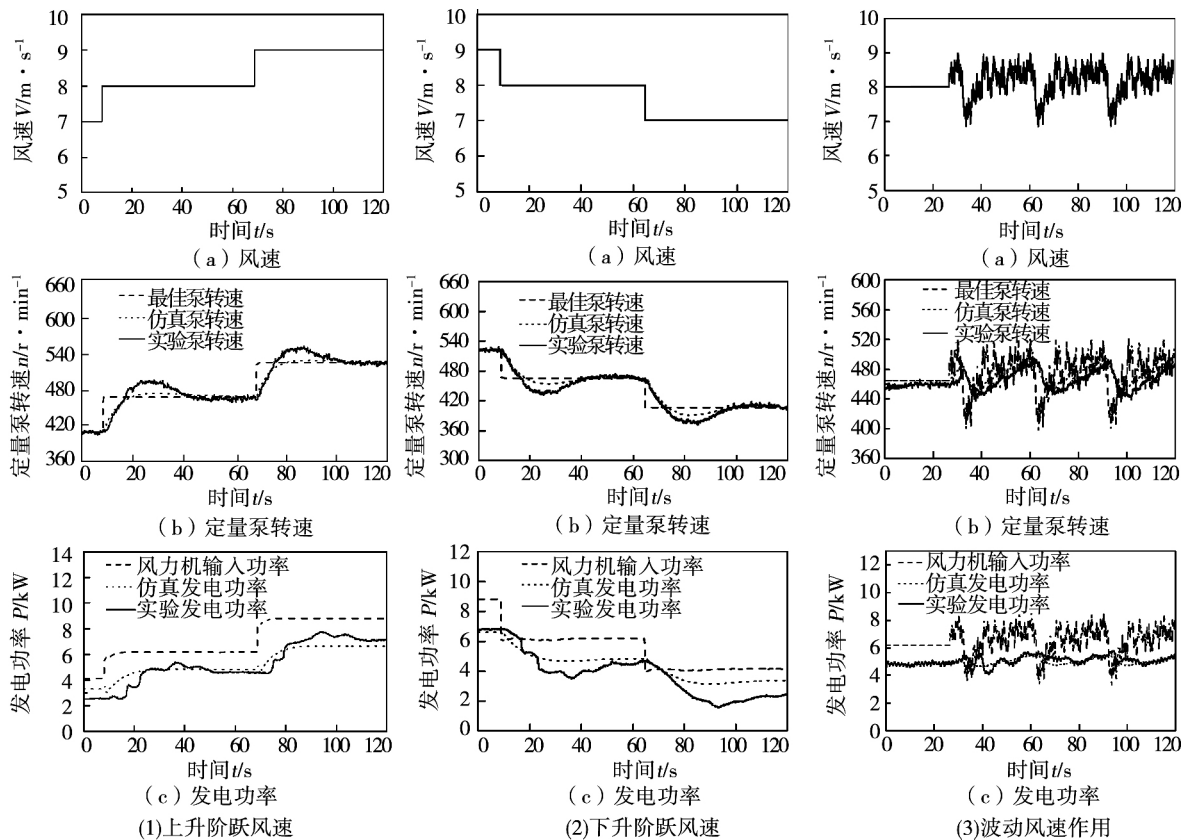


图 10 实验 - 仿真对比结果

Fig. 10 The experiment-simulation results

对比上述 3 组仿真和实验结果,在阶跃风速和波动风速作用下,基于联合控制的最佳功率追踪方法弥补了第 1 种方法的不足,即系统能够跟随风速变化进行功率追踪,并最终稳定在最佳转速点上,且能满足系统对功率追踪准确性的要求;同时在相同风速作用下,随着风速的变化,系统中的各控制量有相同的变化趋势,进而证明仿真模型的准确性。但系统的实际输出功率低于风力机的输入功率,这同样也是由于整机效率存在所致,同时该方法应用在实际工程中的效果是依赖于传感器的精度的。

6 结 论

通过小信号线性化的方法,将系统压力和马达摆角之间存在的乘积非线性线性化,故可采用上述 2 种控制方法进行最佳功率追踪,并对该 2 种控制方法进行理论分析以及仿真和实验研究,分别得到

如下结论:

- (1) 基于输出功率单一控制的最佳功率追踪控制方法,由于整机效率的存在,机组的最终稳定工作点低于于最佳转速点和相应的最佳功率点。但有随着风速的变化进行功率追踪的趋势。
- (2) 基于输出功率和风力机转速联合控制的最佳功率追踪控制方法,克服了第 1 种方法对机组效率系数的依赖性,最终稳定地工作在最佳转速点上。
- (3) 基于上述的最佳功率追踪策略,随着风速的变化,机组能够追踪到并稳定工作于最佳功率点,进而提高风能的利用率。

参考文献:

[1] Anaya L O, Jenkins N, Ekanayake J, et al. 徐政 [译]. Wind energy generation modelling and control [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011, 1-10.
Anaya L O, Jenkins N, Ekanayake J, et al. XU Zheng trans. Wind energy generation modelling and control [M]. Beijing: Machinery

Industry Press 2011, 1 - 10.

[2] 郭敏晓,蔡闻佳,王 灿,等. 风电场生命周期 CO₂ 排放核算与不确定分析[J]. 中国环境科学 2012, 32(4): 742 - 747.
GUO Min-xiao ,CAI Wen-jia ,WANG Can ,et al. Quantifying CO₂ emissions of one wind farm using life cycle assessment and uncertainty analysis[J]. China Environmental Science ,2012 ,32(4) : 742 - 747.

[3] 廖利辉. 液压型风力发电机组最佳功率追踪控制方法研究[D]. 河北: 燕山大学 2014.
LIAO Li-hui. Research on the new maximum power point tracking methods in hydraulic wind energy conversion system [D]. Hebei: Yanshan University 2014.

[4] Hamzehlouia S ,Izadian A ,Member S ,et al. Controls of hydraulic wind power transfer [A]. 37th Annual conference of the IEEE industrial electronics society [C] ,Melbourne ,VIC 2011.

[5] Pusha A ,Izadian A ,Hamzehlouia S ,et al. Modeling of gearless wind power transfer [A]. 37th Annual conference of the IEEE industrial electronics society [C] ,Melbourne ,VIC 2011.

[6] Hamzehlouia S ,Izadian A. Modeling of hydraulic wind power transfers [A]. 2012 IEEE power and energy conference at illinois (PE-CI) [C]. Champaign ,USA 2012.

[7] 秦 斌,周 浩,邱 丽,等. 基于模糊滑膜控制的风力发电系统最大风能追踪[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(7): 993 - 998.
QIN Bin ,ZHOU Hao ,QIU Li ,et al. Maximum power point tracking of wind turbine systems based on fuzzy sliding mode controller[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University 2014 ,48(7) : 993 - 998.

[8] Fernando D. Bianchi ,Hernan De Battista ,Ricardo J. Mantz. 风力机控制系统原理、建模及增益调度[M]. 刘光德[译]. 北京: 机械工业出版社 2009: 16 - 19.

Fernando D. Bianchi ,Hernan De Battista ,Ricardo J. Mantz. Wind turbine control systems principles ,modeling and gain scheduling design [M]. LIU Guangde ,trans. Beijing: Machinery Industry Press 2009: 16 - 19.

[9] 艾 超,孔祥东,陈文婷,等. 液压型风力发电机组主传动系统稳速控制研究[J]. 太阳能学报 2014, 35(9), 1757 - 1763.
AI Chao ,KONG Xiang-dong ,CHEN Wen-ting ,et al. Research on speed control of the main translation system of hydraulic wind energy conversion system [J]. Acta Energiae Solaris Sinica ,2014 ,35(9) ,1757 - 1763.

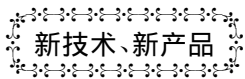
[10] 孔祥东,艾 超,闫桂山,等. 液压型风力发电机组低电压穿越控制方法研究[J]. 中国机械工程, 2014, 25(16): 2137 - 2143.
KONG Xiangdong ,AI Chao ,YAN Gui-shan ,et al. Research on control method of low voltage ride through for hydraulic wind turbine [J]. China Mechanical Engineering ,2014 ,25(16) : 2137 - 2143.

[11] Cirrincione M. ,Pucci M. ,Vitale G. Neural mppt of variable - pitch wind generators with induction machines in a wide wind speed range [J]. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS 2013 ,49(2) : 942 - 953.

[12] Rawn B G ,Lehn P W ,Maggiore M. Disturbance margin for quantifying limits on power smoothing by wind turbines [J]. IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY , 2013 ,21(5) : 1795 - 1807.

[13] Jiang Z H ,Yu X Y. Modeling and control of an integrated wind power generation and energy storage system [A]. Power & Energy Society General Meeting [C] ,Calgary ,Alberta ,Canada 2009.

(姜雪梅 编辑)



DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2015.06.032

用于浮动式液化天然气装置的 PGT25 + G4 燃气轮机

据《Diesel & Gas Turbine Worldwide》2015 年 1 - 2 月刊报道,GE 将把 4 台以机械驱动方式运行的 PGT25 + G4 航改型燃气轮机和 2 台 LM6000PF 和 2BCL907 燃压机组组成的 2 个氮气装置供货给 Petronas,用于马来西亚东海岸第二个浮动式液化天然气工厂。

LM2500 船舶气轮机是由先进可靠的 TF39/CF6 航空涡扇发动机改装而成。机械驱动用的 PGT25 燃气轮机就是基于 LM2500 燃气轮机研制的,采用 LM2500 燃气轮机的燃气发生器,但是根据燃压机组的特殊要求重新设计了,动力涡轮,即把 LM2500 的四级动力涡轮改造成二级高速动力涡轮。

PGT25 + G4 是比 PGT25 功率更大、效率更高的升级改进型机组,是当今世界上最优秀的机械驱动用燃气轮机之一,已在世界各国(包括中国)的天然气输气管线上得到广泛应用。

机械驱动用 PGT25 + G4 的技术规范和额定性能:

推出年份	ISO 额定连续功率 kW	热耗率 kJ/kW · h	效率 %	压比	空气质量流量 kg/s	涡轮转速 r/min	排气温度 °C	重量 kg	尺寸 L × W × H ,m	说明
2005	34 316	8 714	41.2	23.8	87.7	6 100	510	30 850	6.40 × 3.66 × 3.96	标准燃烧系统,无罩壳的尺寸

(吉桂明 摘译)

液压型风力发电机组功率追踪方法研究 = **Study of the Method for Tracking the Power of a Hydraulic Type Wind Power Generator Unit** [刊, 汉] AI Chao (Hebei Provincial Laboratory on Heavy-duty Machinery Fluid Dynamic Transmission and Control ,Yanshan University ,Qinhuangdao ,China ,Post Code: 066004) ,KONG Xiang-dong (Education Ministry Key Laboratory on Advanced Forging Shape-forming Technology and Science ,Yanshan University ,Qinhuangdao ,China ,Post Code: 066004) ,CHEN Li-juan ,CHEN Wen-ting (College of Mechanical Engineering ,Yanshan University ,Qinhuangdao ,China ,Post Code: 066004) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 30(6) . -946 -952

With a hydraulic type wind power generator unit serving as the object of study and an aim to enhance the utilization rate of wind power ,a model was established for solving the problem that the product of the power generation efficiency of the unit multiplying with the system model is non-linear. The small signal linearization method was used to solve the problem above-mentioned. On this basis ,the tactics for tracking both optimum powers based on the single wind turbine output power control and the output power and rotating speed joint control were proposed. The control theory of the method for tracking both optimum powers were described in detail and the merits and demerits of both control methods were theoretically analyzed. In the meantime ,on the basis of a 24 kW hydraulic type wind power generator unit semi-physic simulation test rig and by using the simulation software MATLAB/Simulink ,a simulation and experimental study of both optimum power control methods above proposed were performed respectively ,thus verifying that both methods are feasible and correct and laying a theoretical basis for further study and better applications of hydraulic type wind power generator units. **Key words:** wind power generation ,hydraulic transmission , optimum power tracking ,power and rotating joint control

某型涡轴发动机叶片锯齿形叶冠优化设计应用 = **Optimized Design and Applications of the Zigzag Blade Shrouds in Turbo-shaft Engines** [刊, 汉] YANG Fei ,CAI Xian-xin (AVIC Aviation Power and Machinery Research Institute ,Zhuzhou ,China ,Post Code: 412002) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015 30(6) . -953 -959

With a turbine blade shroud in a turbo-shaft engine serving as the object of study ,its structural optimization and design were performed. According to the specific features of the blade shroud ,a mathematical model for optimized de-