文章编号:1000-582X(2007)09-0001-04

大功率风电机组新型传动系的建模与仿真

何玉林1,李成武1,杜静1,李丽丽1,2,黎明1

(1、重庆大学 机械工程学院,重庆 400030; 2. 沈阳理工大学 机械工程学院,辽宁 沈阳 110168)

摘 要:在行星齿轮传动的基础上提出了一种用于大功率风电机组的新型液力速度控制传动系,它 包括风轮转子、行星齿轮增速机构、液力机械和同步发电机。建立了传动系统的动态数学模型,并以 MATLAB/ simulink 为仿真平台建立了其仿真框图,对液力速度控制系统的速度调节特性进行了仿真研 究。仿真结果表明新型传动系可以实现无级调速、变速输入、恒速输出,并在速度调节特性中显示了很 好的稳定性和动态性能;它可以稳定电力的输出,提高风力的发电量,并减轻传动系统的尖峰负载。

关键词:风力发电机组:液力变矩器:无级调速:PID 控制 中图分类号:TK614

风能作为可再生的清洁能源越来越受到各国政府 的重视。随着风电技术的进步,变速风轮机已经被广 泛地应用在风电技术方面,它可以提高风力发电量,稳 定电力的输出,减轻传动系的尖峰载荷。为了实现变 速运行,通常利用整流器减弱发电机转速和电网频率 的变化。在国外,已经有人提出了实现变速运行的新 方案,在文献[1]中,提出了一种流体静力学传动系, 包括水压泵、水压存储器和水压马达,通过控制与发电 机相连接的压力泵和水压马达就可以实现风轮转子的 变速。提出了一种变速风轮发电机组功率分流传动系 统,是解决中小型变速风轮机的理想方案。但风电技 术正朝大功率方向发展,这两种方案用于大型风机上 则存在一些弱点,第一种方案需要从电网吸收较多电 能,降低了风力的发电量。第二种方案液压传动效率 较低,导致整个传动系统效率偏低。近年来,随着液力 控制技术的发展,用液力控制系统实现开环或闭环控 制的例子已比较多见。笔者提出了一种新型液力速度 控制变速传动系统,建立了传动系统的动态数学模型, 并对系统的速度调节特性进行了仿真研究。该传动系 统克服了以上两种系统的缺点,适合应用在大功率风 电机组上。

文献标志码:A

1 传动系的结构方案

建立了以行星轮系+导叶可调式液力变矩器+液 力传动控制系统为核心的大功率变速风轮发电机组传 动系统。变速风轮固连在第一行星排的行星架上,经 第一、二行星排增速后与第三行星排的行星架相联接, 导叶可调式液力变矩器的泵轮与输出轴相连,涡轮固 接在第四行星排的太阳轮上。该传动系将变化的风轮 主轴转速转变为恒速后输入同步发电机,实现传动系 统的功率分流和无级调速控制,传动方案如图1所示。

2 传动系数学模型的建立

在风力的作用下,风轮主轴转速为 ω_{w} ,经第一、二 行星排增速后速度为 ω_1 ,导叶可调式液力变矩器涡轮 转速为 ω_{ι} ,泵轮转速为 ω_{μ} ,输出轴转速为 ω_{μ} 。液力机 械共用了第三和四行星排,由行星排运动方程式,得

$$\omega_{i_3} + k_3 \omega_{q_3} - (1 + k_3) \omega_{j_3} = 0 , \qquad (1)$$

$$\omega_{i_4} + k_4 \omega_{q_4} - (1 + k_4) \omega_{i_4} = 0_{\circ}$$
 (2)

收稿日期:2007-04-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50375161)

作者简介:何玉林(1945-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事风力发电技术及装备,机械设计信息化、集成化、网络化, 虚拟样机理论与技术的研究,(E-mail) heyulin@ cqu. edu. cn。



图1 传动系统方案图

式中:K₃,K₄ 分别为第三、四行星排的特性参数;t,q,j 分别代表太阳轮、齿圈和行星架。由图1 可见

$$\omega_{q_3} = \omega_{q_4} = \omega_q, \qquad \omega_{t_3} = \omega_p = \omega_g,$$

$$\omega_{j_4} = 0, \qquad \omega_{j_3} = \omega_i,$$

$$\omega_i = \omega_w i_{10} \qquad (3)$$

式中 i1 为第一、二行星排的总传动比。

将式(3)代入式(1)、(2)可得输出轴和泵轮转 速为

$$\omega_{g} = \omega_{p} = \frac{k_{3}}{k_{4}}\omega_{t} + (k_{3} + 1)\omega_{w}i_{1}, \qquad (4)$$

在动态条件下,导叶可调式液力变矩器泵轮输入 扭矩和涡轮输出扭矩分别为^[2]

$$M_{p} = \rho q_{\nu} (R_{1p} v_{i1p} - R_{2p} v_{i2p}) + \rho \iint R \frac{\partial v_{ip}}{\partial t} dV + J_{mp} \frac{d\omega_{p}}{dt}, \qquad (5)$$

$$M_{i} = \rho q_{V} (R_{1i} v_{i1i} - R_{2i} v_{i2i}) - \rho \iint_{R} \frac{\partial v_{ii}}{\partial t} dV - J_{mi} \frac{d\omega_{i}}{dt}, \qquad (6)$$

式中角标意义:1 为叶轮进口;2 为叶轮出口;p 为泵 轮;t 为涡轮。其中 ρ 为工作液密度; q_v 为循环流量; v_i 为圆周分速度;R为叶轮半径; ω 为叶轮角速度; J_m 为叶轮机械转动惯量;V为叶轮流道内液体体积。

工作液体的圆周分速度为

$$v_i = R\omega - \frac{q_V}{A} \cot\beta, \qquad (7)$$

式中:A为叶轮通流断面积;β为液流角。

根据能量守恒原则,变矩器单位时间内输入能量、 输出能量、总能量损失以及变矩器增加内能的代数和 应等于0,即

$$M_{p}\omega_{p} - M_{t}\omega_{t} - \rho g q_{v} \sum H_{m} - \frac{\partial E}{\partial t} = 0, \qquad (8)$$

式中:*E* 为变矩器的总内能; *v* 为工作液体的绝对速度;*V* 为总的控制体体积。

涡轮负载力矩方程为

$$M_t = J_m \frac{\mathrm{d}\omega_t}{\mathrm{d}t} + M_f, \qquad (9)$$

式中:*J_m* 为负载、机械传动装置等折算到变矩器涡轮 轴上的转动惯量;*M_f* 为作用在涡轮轴上的负载力矩。

由于同步发电机和泵轮同时与输出轴固连,泵轮 的转速ω,可以认为基本不变,即ω,为常数,则

$$\dot{\omega}_p = 0, \qquad (10)$$

联立式(5)、(6)、(8)-(10),可得含有涡轮转速 ω, 和 循环流量 q_v 的 2 个微分方程为

a.

$$a_{05}q_V^2 + a_{06}q_V = a_{03}q_V + a_{04}\omega_t q_V + a_{05}q_V^2 + a_{06} + f_1(\theta) \frac{d\theta}{dt}, \qquad (11)$$

$$a_{07}\omega_{t}\omega_{t} + a_{08}q_{V}q_{V} + a_{09}q_{V}\omega_{t} + a_{10}\omega_{t}q_{V} = a_{11}q_{V} + f_{2}(\theta)q_{V}^{2} + f_{3}(\theta)q_{V}^{3} + a_{12}\omega_{t} + a_{13}\omega_{t}q_{V} + a_{14}\omega_{t}q_{V}^{2} + a_{15}\omega_{t}^{2}q_{V} + f_{4}(\theta)\frac{d\theta}{dt},$$
(12)

式(11)和(12)为导叶可调式液力变矩器一负载动特性方程。式中 *a*₀₁ ~ *a*₁₅为常数。文中新型传动系中的液力变矩器是以 LB-46 型变矩器为基型变矩器设计的,方程系数为

 $a_{01} = 10, a_{02} = -11.2577, a_{03} = 8444.3,$ $a_{04} = -79.5344, a_{05} = 15373, a_{06} = -5500,$ $a_{07} = 0.0637, a_{08} = 36.0140, a_{09} = -0.0717,$ $a_{10} = -0.0717, a_{11} = 4260, a_{12} = 35.0140,$ $a_{13} = 35.3270, a_{14} = 68.1959, a_{15} = -0.2611_{\circ}$

 $f_1(\theta) \sim f_4(\theta)$ 是导叶开启角 θ 的函数。由于函数 $f_1(\theta) \sim f_4(\theta)$ 比较复杂,给系统的动态仿真带来困难。 文中所用的变矩器,可用 θ 的二次或三次线性组合表 示如下。

$$f_1(\theta) = -4.28 \times 10^{-2} + 9.4335 \times 10^{-4}\theta -$$

3.8563 × 10⁻⁵ θ^2 ,
 $f_2(\theta) = 3.0026 \times 10^3 + 6.7065\theta - 5.1366 \times 10^{-2}\theta^2 +$
3.2076 × 10⁻³ θ^3 .

$$f_3(\theta) = -1.242.6 \times 10^4 + 4.056.4 \times 10\theta - 4.267.7\theta^2 +$$

的动特性方程。

2. 280 5 × 10⁻¹ θ^3 ,

 $f_4(\theta) = 3.29 \times 10^{-2} - 7.25 2 \times 10^{-4} \theta + 2.964 5 \times 10^{-5} \theta_{\circ}$ 由上可知,方程(4)、(11)、(12)即为新型传动系

3 传动系速度液力控制的动态仿真

新型传动系包含四排行星轮和导叶可调式液力变

矩器。导叶可调式液力变矩器由变矩器本体和导叶调 节机构组成,它包含了一般控制系统的动力元件—— 泵轮,执行元件——涡轮,调节元件——可调导轮。因 此再加入信号检测、反馈、比较、放大、控制器及驱动导 叶调节机构的电动执行元件,就可以构成大功率变速 风轮发电机组新型液力速度控制系统,如图2所示。



图 2 液力速度控制系统图

电气控制部分的动特性比液力变矩器快得多,暂 不考虑其动特性,电动执行元件采用伺服电动机,视其 为积分环节;控制器采用 PID 控制器^[36]。

笔者所研究的新型传动系中的液力变矩器是以 LB-46 型变矩器为基型变矩器设计的,根据功率匹配 优化结果,确定了 i_1, k_3, k_4 的大小。泵轮输入转速 为1 500 r/min。

图 3 所示为风轮输入转速为 20 r/min 和 30 r/min 时的阶跃响应。由图可见, 液力控制系统具备良好的 动态品质, 阶跃输入为 30 r/min 时的最大超调量在 10%, 阶跃输入为 20 r/min 时没有超调量, 动态响应 时间约为 5~10 s, 仿真结果达到了设计要求。





图 4 所示为风轮转速为 20 r/min 和 30 r/min 时 的液力变矩器的转速比 *i* 的响应,由图 4 可以看出,转 速比 *i* 都稳定在液力变矩器的高效区,仿真结果与理 论设计是比较一致的。因此,文中所建立的液力传动 控制系统的数学模型是正确的。



图 4 风轮转速为 20 r/min 和 30 r/min 时转速比 i 的响应

4 结 论

在行星齿轮传动的基础上提出了一种用于大功率 风电机组的新型液力速度控制变速传动系,建立了传 动系统的动态数学模型,并在 MATLAB/Simulink 下进 行了仿真研究。为大功率风电机组新型传动系的研究 和开发奠定了初步理论基础。与传统传动系统相比, 新型传动系具备以下优点。

 无级调速。通过调节导轮叶片转角 θ,可以改 变与第四行星排太阳轮固连的变矩器涡轮转速,进而 改变输出轴转速,实现无级调速。

2) 变速输入、恒速输出。风轮随风速的变化而变 速输入,控制系统自动调节导轮叶片转角 θ,使得变矩 器涡轮转速与风轮经第一、二行星排增速后的转速合 成后的输出速度为1 500 r/min。输出轴与同步发电 机相连,有利于稳定电力的输出,减小来自电网的反作 用,发电机可以直接与高压输电网相连。

3)提高了风力的发电量,减轻了传动系统的尖峰

负载。变速风轮能最大限度地捕获风能,风轮输入功 率大部分通过行星齿轮直接传递给发电机,只有小部 分功率通过变矩器分流到第四行星排的太阳轮上,用 于调节输出轴的功率,液力变矩器传动效率又比较高, 故能提高风力的发电量;同时液力传动能减轻传动系 统的尖峰负载。

参考文献:

[1] ZHAO XUEYONG, PETER MAI BER. A novel power splitting drive train for variable speed wind power generators [J]. Renewable Energy, Germany, 2003, 28: 2001-2011.

- [2] 闫国军,董泳,张辉,等. 液力变矩器及其控制系统动特 性研究[J]. 机械工程学报,2002,2(2):62-66.
- [3] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社,2003.
- [4] 姚俊,马松辉. Simulink 建模与仿真[M]. 西安:西安电子 科技大学出版社,2002.
- [5] 侯建勋.变矩器部分充液特性用于控制系统的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学能源科学与工程学院,2004.
- [6] 机械工程手册编辑委员会.机械工程手册(补充本2)[M].北京:机械工业出版社,1988.

Modeling and Simulation of a Novel Drive Train for Wind Turbine with Large Capacity

HE Yu-lin¹, LI Cheng-wu¹, DU Jing¹, LI Li-li^{1,2}, LI Ming¹

(1. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. College of Mechanical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110168, China)

Abstract: On the basis of a planetary transmission, a novel hydrodynamic speed controlled transmission system for wind turbines with large capacity is presented. The new drive train consists of wind rotors, planet accelerators, hydro-mechanical and synchronous generators. The dynamic mathematical model of the drive train is established. The digital simulation of speed regulation characteristics for hydrodynamic speed controlled system is studied by using Matlab/Simulink. The simulation results show that continuously variable transmission and fixed speed control can be achieved, and the drive train works well in stability and dynamic performances. They can increase the power yield from the wind, smooth the electric power output, and alleviate the load peak in the new drive train.

Key words: wind turbine; hydrodynamic torque converter; continuously variable transmission; PID control

(编辑 陈移峰)