

基于专家系统的风电机组协调控制策略研究

针对变速变桨风电机组的转矩控制和变桨控制的协调控制策略进行了研究,分析了风电机组的特性,并在此基础上建立专家系统以消除转矩控制与变桨控制之间存在的干扰,提高机组的运行性能。基于Matlab/Simulink 软件在2 MW 风电机组模型上进行了协调控制策略仿真研究,结果表明该控制策略的控制效果良好。

史朝晖¹ 白 明² 盖东飞¹ 傅 钧¹ 夏安俊²/1. 山东电力咨询院有限公司
2. 山东省科学院能源研究所



史朝晖/高级工程师

0 引言

在风电大规模发展的今天,风电机组的运行性能受到了广泛关注。变速变桨风电机组的转矩控制和变桨控制之间的协调控制对风电机组的运行有直接的影响。

目前大型风电机组的协调控制通常采用将转速控制和变桨控制的耦合点提前的方法。该方法会缩短机组变速运行的转速范围,降低机组的发电量。文献[1]在考虑变桨速率对机组控制性能的基础上提出了一种最优控制方法,并在变速和恒速运行两种情况下分析了最优标准与机组的功率控制和变桨速率之间的选择方法所存在的联系。这种方法已在近两年工程案例中得到体现。文献[2]提出了采用专家系统为风电机组的变速控制和变桨控制确定适当的起动条件,以达到变速和变桨的协调控制的目的,该方法的不足之处是在机组控制状态的切换中存在对相应PID控制器参数进行实时调整的情况,容易出现振荡现象,很难实现机组在状态切换中的平滑控制。文献[3]在变桨距控制器中同时引入转速误

差和转矩误差项。该方法能够避免变桨控制器在机组转矩未到额定值时动作,使转速控制和变桨控制两者不出现干扰现象。文献[4]中提出了一种利用PID控制器积分饱和特性的联合控制策略,使转矩PID控制器和变桨距PID控制器之间避免干扰,但是该方法在机组运行状态接近额定值时,容易出现转速和机组功率超调的现象。

风电机组变速控制和变桨距控制之间的协调控制策略的优劣,对机组的整体运行性能和使用寿命有直接的影响。因此针对上述现状,本文对变速变桨风电机组的转矩控制和变桨控制的协调控制策略进行了分析和研究,通过建立专家系统来消除转矩控制与变桨控制之间干扰,实现了转速控制与变桨控制之间的解耦,保证了机组在不同运行状态之间平滑地过渡,在提高机组发电量的同时能够增强机组运行的稳定性。

1 风电机组特性分析

风电机组从自然风中捕获的功率可表示为^[5-6]

$$P_{wt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) A \rho v^3 \quad (1)$$

式中, P_{wt} 为风电机组捕获的功率; $C_p(\lambda, \beta)$ 为风能转换系数; λ 为叶尖速比; β 为叶片的桨距角; A 为风轮的扫风面积; ρ 为空气密度; v 为风速。

风能转换系数 $C_p(\lambda, \beta)$ 是叶尖速比 λ 和机组桨距角 β 的函数。

在桨距角 β 一定时, 风能转换系数 $C_p(\lambda, \beta)$ 与叶尖速比 λ 之间的关系如图1

关键词/Keywords

风电机组 ·
变速控制 ·
变桨控制 ·
协调控制 ·
专家系统 ·

所示。

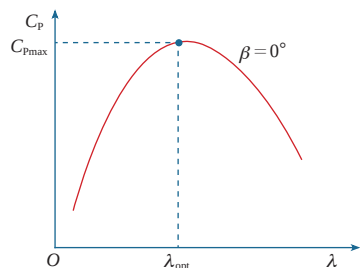


图1 风能转换系数 C_p

由图1可知, 风能转换系数 $C_p(\lambda, \beta)$ 随着叶尖速比 λ 变化, 当机组的叶尖速比为 λ_{opt} 时, 机组的风能转换系数达到最大值, 此时机组运行在最大风能捕获状态^[7]。

当机组的桨距角发生变化时, 机组的风能转换系数如图2所示。

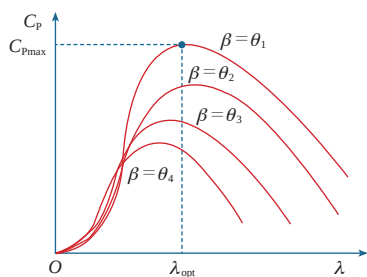


图2 风能转换系数与桨距角及叶尖速比的关系

在图2中, $\theta_1 < \theta_2 < \theta_3 < \theta_4$ 。由图2可以看出, 随着机组桨距角 θ 的增加, 机组的风能转换系数不断降低。

因此, 通过改变风电机组桨距角 θ 就可以实现机组风能转换系数的调节, 进而控制机组的输出功率, 达到通过变桨距控制来实现机组功率或转速的调节。

通常情况下, 变速变桨风电机组在低风速下通过改变机组的转速来维持最佳叶尖速比, 实现最大风能捕获, 使机组的发电效率最大化; 在高风速下则通过改变机组的桨距角, 降低机组捕获的风能, 进而将机组的转速和功率限制在所允许的的运行范围内。由于机组机械结构强度的限制, 一般情况下, 随着风速的增加, 机组的转速先于机组的输出功率到达额定值。在此情况下, 机组存在一个转速保持不变而转矩随着风速的增加而

增加的状态。

变速变桨风电机组的转速转矩控制关系如图3所示。在图3中, AB段为机组的变速运行区域, BC段为机组的转速不变而转矩随着风速的增加而增加的区域, CD段为机组的变桨恒转矩运行区域。

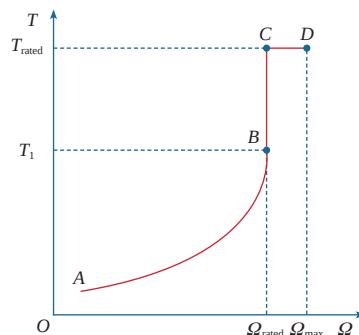


图3 机组转速与转矩的控制关系图

由风电机组转速与转矩的控制关系可知, 机组所在的BC段的转矩控制目标和变桨控制目标都为机组的转速, 即两者的控制目标都是将机组的转速控制在额定值, 因此两者的控制存在耦合关系, 即两者之间的控制出现相互干扰的现象。

2 控制策略

本文研究的主要内容是机组在BC段的转矩控制和变桨控制的协调问题(见图3)。由于机组在BC段的转矩控制目标和变桨控制目标相同, 因此需要设置合理的切换机制以消除两者之间的干扰来保证机组的正常运行。

就变速变桨机组的控制要求来说, 机组的变桨控制一般是用于限制机组捕获的风能, 以防止机组的功率或转速超过运行范围。在机组未达到额定功率时, 机组的转速主要由发电机的转矩来控制。

因此针对上述要求, 根据风电机组四种典型工况, 在保证机组发电效率最大化的前提下, 采用专家系统来设计机组的协调控制策略, 并建立相应的推理及决策输出规则。专家系统的输入为转矩控制系统输出的转矩指令 T_e^{**} 和变桨控制系统输出的桨距角指令 β^{**} 。输出为转矩执行机构和变桨执行机构的给定 T_e^* 和 β^* 。

建立了如下推理及决策输出规则:

1) 规则1。当机组的转矩未达到额定值而机组的桨距角为 0° 时, 机组的桨距角保持为 0° , 机组的转矩由转矩控制系统根据当前机组的转速与额定转速的差值进行控制。

2) 规则2。当机组的转矩未达到额定值而机组的桨距角大于 0° 时, 机组的变桨控制系统按 $8^\circ/\text{s}$ 的变桨速率将桨距角调整到 0° 并保持, 机组的转矩由转矩控制系统根据当前机组的转速与额定转速的差值进行控制。

3) 规则3。当机组的转矩达到额定值而机组的桨距角为 0° 时, 机组的转矩保持不变, 说明当前的风速是在额定风速下, 因此根据当前机组的转速与额定转速的差值进行控制。

4) 规则4。当机组的转矩达到额定值而机组的桨距角大于 0° 时, 机组的转矩保持不变, 而机组的桨距角由变桨控制系统根据当前机组的转速与额定转速的差值进行控制。

基于专家系统的风电机组变速变桨协调控制系统的结构图如图4所示。

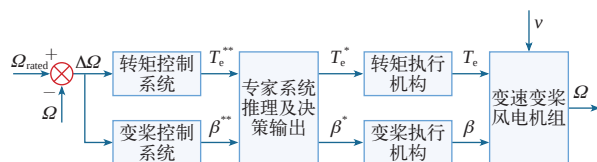


图4 基于专家系统的风电机组变速变桨协调控制系统

由图4可知, 机组转矩控制系统和变桨控制系统根据实际转速 Ω 与额定转速 Ω_{rated} 的误差 $\Delta\Omega$ 得出转矩和桨距角的给定值 T_e^* 和 β^* , 再经过专家系统的推理决策规则后得到转矩执行机构和变桨执行机构的给定 T_e^* 和 β^* , 分别输出给机组转矩执行机构和变桨执行机构, 以控制机组的转速和输出功率。在上述的协调控制系统中, 专家系统根据机组所处的不同工况对转矩控制系统和变桨控制系统进行解耦控制, 在两个控制系统的控制目标相同的情况下, 消除转矩控制与变桨控制之间存在的干扰, 实现对机组转速的有效控制, 保证机组得以最大功率输出。

3 仿真分析

根据上述的协调控制思想, 采用Matlab/Simulink

软件在2 MW风电机组模型上进行仿真分析和验证。机组的模型参数为: 额定功率为2 MW; 额定转速为 1.889 rad/s ; 发电机额定转矩为 $12.78 \text{ kN}\cdot\text{m}$; 桨距角变化范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$; 最大变桨速率为 $8^\circ/\text{s}$; 额定风速为 11.5 m/s 。

以下为采用本文所提出的协调控制策略的2 MW变速变桨风电机组的仿真结果。

仿真采用的风速平均值为 11 m/s , 纵向湍流强度为 10.2% , 如图5所示。

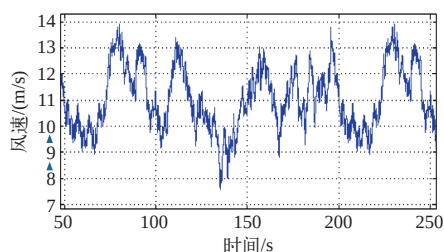


图5 风速波形

图6为机组的转速波形, 转速的控制目标为额定转速 1.889 rad/s 。由转速的仿真波形可以看出机组的转速基本保持稳定, 超调量较小。

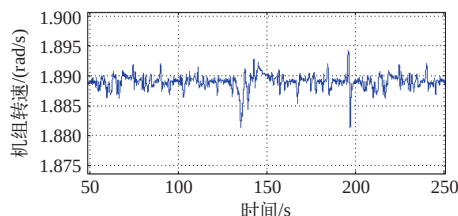


图6 机组转速波形

图7为机组的桨距角波形, 由图7可以看出机组桨距角的变化较平稳。

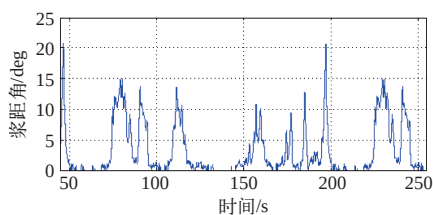


图7 机组桨距角波形

图8为机组的发电机转矩。由图8可以看出当风速在额定值附近变化时, 机组转矩也在额定值的变化, 转矩的控制没有受到机组变桨控制的干扰而导致转矩长时间偏离额定值。

图9为机组的输出功率波形。由图9可以看出当风速在额定值附近变化时, 机组输出功率在额

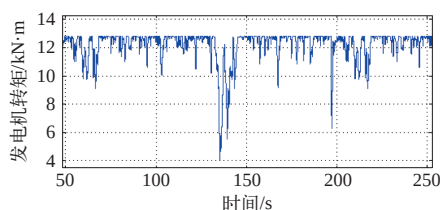


图8 发电机转矩

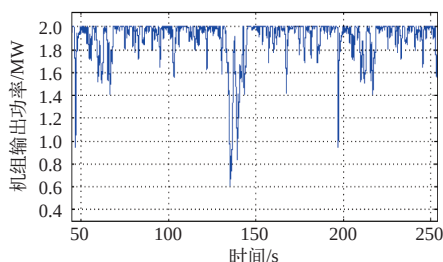


图9 机组输出功率波形

定值的变化,从而保证了机组在风速大于额定值时能够实现额定功率输出。

由上述的仿真结果可知,当外界风速变化时,本文所提出的控制策略能够消除变桨控制和转矩控制之间的干扰,实现转矩和变桨的解耦控制。仿真结果充分验证了本文控制策略的有效性和可行性。

4 结束语

由于变速变桨风电机组在额定风速附近运行时通常存在机组的转速不变而机组的输出功率随着转矩的增加而增加的状态,此时机组的转矩控制和变桨控制将出现相互耦合的情况。为了提高机组的发电效率和整体运行性能,需要对机组的转矩控制和变桨控制进行解耦控制。针对此情况,本文提出了一种基于专家系统的风电机组的协调控制策略。由仿真结果可知,该策略能够很好地解决转矩控制和变桨控制之间的切换问题,保证风电机组在额定风速之上时以额定功率输

出,控制效果良好,同时避免了两者之间的干扰,实现了平滑切换,从而充分说明了该策略具有一定的有效性和可行性。

参考文献

- [1] Bianchi F D, Mantz R J, Christiansen C F. Power regulation in pitch-controlled variable-speed WECS above rated wind speed [J]. Renewable Energy, 2004 (29): 1911-1922.
- [2] 邢作霞. 大型变速变距风力发电机组的柔性协调控制技术研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [3] 叶杭冶, 潘东浩. 风电机组变速与变桨距控制过程中的动力学问题研究 [J]. 太阳能学报, 2007, 28 (12): 1321-1328.
- [4] 俞斌, 屈虎, 杜煜, 等. 一种兆瓦级风力发电机组联合控制策略: 中国, 200910183567.6 [P]. 2009-09-23.
- [5] 夏安俊, 胡书举, 许洪华. 大型风电机组自抗扰转速控制 [J]. 电机与控制学报, 2012, 16 (9): 33-38.
- [6] Cardenas R, Pena R. Sensorless vector control of induction machines for variable-speed wind energy applications [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2004, 19 (1): 196-205.
- [7] Eftichios Koutroulis, Kostas Kalaitzakis. Design of a maximum power tracking system for wind-energy-conversion applications [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53 (2): 486-494.
- [8] 潘庭龙, 马忠鑫, 卢恩超, 等. 风力发电系统独立变桨距载荷优化控制研究 [J]. 控制工程, 2014 (2).

(收稿日期: 2016-01-13) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告