

基于削峰调节的风电机组载荷优化控制技术

耿丽红, 王朝东, 谢金娟, 王建伟, 刘晓辉

(许继风电科技有限公司, 许昌 461000)

摘 要: 大型变速变桨风力发电机组在变桨距控制过程中, 由于额定风速附近推力呈尖峰变化趋势, 导致机组的极限载荷较大, 针对该问题提出一种修正变桨动作的削峰调节控制器。将该功能编程写入外部控制器, 通过 Bladed 软件设置不同的工况, 对某 3 MW 风电机组进行仿真验证, 仿真结果表明该控制器能够改善变桨控制的动态特性, 降低关键部件的载荷, 提高机组的可靠性和安全性。

关键词: 风电机组; 变速变桨 PID 控制; 载荷控制; 削峰调节; 推力

中图分类号: TP273

文献标志码: A

0 引 言

随着风电产业的飞速发展, 风力发电机组叶片向大型化方向发展, 机组承受巨大载荷冲击导致极限载荷偏大的问题越来越突出^[1]。降低关键部件的载荷, 优化机组承受的动态载荷, 增加机组安全性, 延长其使用寿命是大型变速变桨发电机组的重点研究方向^[2]。

对于变速变桨风电机组, 在额定风速附近, 由于叶片的翼型特性, 塔顶会受到非常大的尖峰推力, 导致机组的极限载荷很大^[3]。在极限风切变、极限运行阵风等工况中尖峰推力对机组的冲击载荷尤为严重, 甚至发生极限载荷大于设计载荷的情况, 这给风电机组的运行带来极大的安全隐患^[4]。近几年, 随着风力发电机组叶片长度的增加, 该问题尤为突出。

针对上述问题, 本文在基本变桨和转矩控制的基础上, 提出一种削峰调节控制器, 用以减小塔顶的推力, 从而达到降低机组关键部件载荷的目的。最后利用风力发电设计软件 Bladed 对本文提出的控制器进行仿真验证, 结果表明该控制器对整机载荷优化有较好的效果。

1 变速风力发电机组基本控制策略

变速风力发电机的控制目标是保持风轮转速和输出功率在允许范围内波动^[5]。控制系统包含 2 个闭环——转矩-速度环和桨距-速度环。控制系统的工作曲线如图 1 所示。在 B 点、C 点之间风力机桨距角固定不变, 保持最优叶尖速比, 按照最优转矩-转速曲线

运行; 当转速达到 N_3 , 转矩线性增加, 功率从 C 点增长至 D 点, D 点的功率达到额定功率 P_r ; 达到额定功率后利用转矩-速度环保持功率恒定, 利用变桨-速度环保持转速在限定范围内波动。

图 1 中, N_1 为发电机并网转速; N_{L1} 为最优曲线起始转速; N_2 为区域 1 和区域 2 的中间转速; N_3 为转矩线性增加起始转速; N_r 为发电机额定转速。图中根据发电机的转速, 控制区域分为 3 个区——区域 1、区域 2、区域 3; 依据发电机转速、测量的发电机功率、桨距角的变化、转矩控制、变桨控制在上述 3 个区域内切换工作。

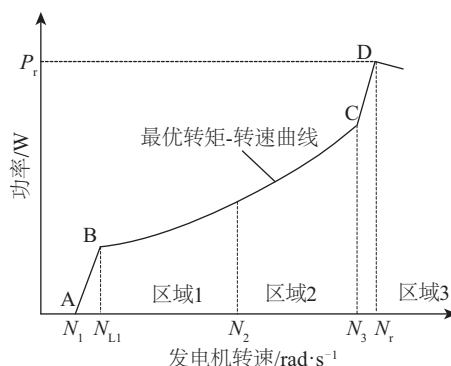


图 1 控制系统功率-转速曲线

Fig. 1 Power speed curve

2 削峰调节控制器

变速变桨风力发电机在发电过程中, 外界风资源转

收稿日期: 2017-08-15

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFB0904000)

通信作者: 耿丽红(1984—), 女, 硕士、工程师, 主要从事风电机组控制策略及整机载荷优化方面的研究。genglihong19@163.com

换为风力机的气动转矩和推力^[6]。其中风力机所受推力 F_a 可由非线性等式(1)拟合表示。

$$F_a = C_t(\lambda, \theta) \cdot \frac{1}{2} \rho_{\text{air}} \pi R^2 \cdot V^2 \quad (1)$$

$$\lambda = \frac{\Omega_r \cdot R}{V} \quad (2)$$

式中, λ ——叶尖速比; $C_t(\lambda, \theta)$ ——推力系数; θ ——桨距角, ($^\circ$); ρ_{air} ——空气密度, kg/m^3 ; R ——风轮半径, m ; V ——风轮上游风速, m/s ; Ω_r ——风轮角速度, rad/s 。

由式(1)可看出, 风轮半径、风速对推力的影响非常大, 都是呈平方关系增大。但变桨矩机组并不像定桨矩机组一样, 即推力会随风速增大而一直增大, 变桨矩机组所受静态推力随风速变化趋势如图2所示。

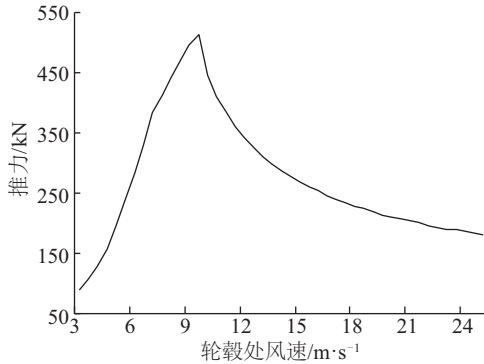


图2 推力静态变化曲线

Fig. 2 Steady thrust force curve

由图2可看出, 在额定风速附近, 机组所受的推力最大, 表现为狭窄的尖峰。对于该尖峰, 如果不加处理, 当风力机依据基本控制策略运行在此处时, 塔顶推力较大且变化急剧, 易引起较大的极限载荷, 同时最小净空(叶尖与塔架间的最小距离)也会变小, 降低了机组的安全性。另外, 塔顶的结构阻尼一般都较小, 推力的尖峰变化易引起塔筒前后向大范围位移, 增加塔筒的疲劳载荷, 严重者会引起共振, 破坏塔筒。当机组风轮直径增加或遭遇极限运行阵风(墨西哥草帽风)等情况时, 这种现象会更加严重影响机组的安全, 同时也会缩短风力机的整体寿命。

为减小额定风速处机组所受推力, 减少叶片变形, 增加最小净空, 优化整机载荷, 本文对变速风力发电机基本控制策略进行改进, 变桨PID控制后执行以滤波功率为基础的削峰调节控制器。具体原理为变桨PID控制计算的桨距角会受到削峰调节控制器规划的最小允许桨距角曲线限制, 最小允许桨距角曲线是由预先设定的2个桨距角线性内插得到的; 同时, 削峰调节

控制器设置最大开桨速率对叶片的变桨速率进行限制。另外, 基于温度对整机载荷影响的分析^[7], 依据变化的空气密度对最小允许桨距角曲线进行修正, 以确保整机载荷保持最优。带削峰调节控制器的变桨闭环控制框图如图3所示。

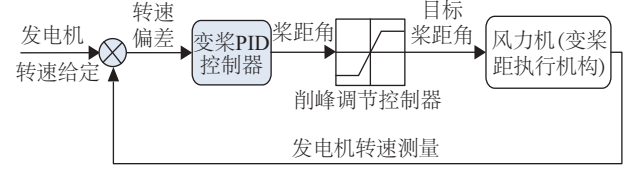


图3 带削峰调节的变桨-转速闭环控制

Fig. 3 Pitch-speed control loop with peak shaver

削峰调节控制器规划的最小允许桨距角曲线是根据机组当前待优化载荷、关键部件的几何设计、叶片的翼型及机组推力变化情况确定的, 如图4所示, O—E—F为规划的最小允许桨距角曲线变化趋势。图4中, θ_r 为额定功率时最小允许桨距角; θ_{opt} 为最优桨距角; P_{opt} 为削峰调节控制起始功率; P_{opt_2} 为削峰调节功率范围10%处功率值; P_r 为额定功率。

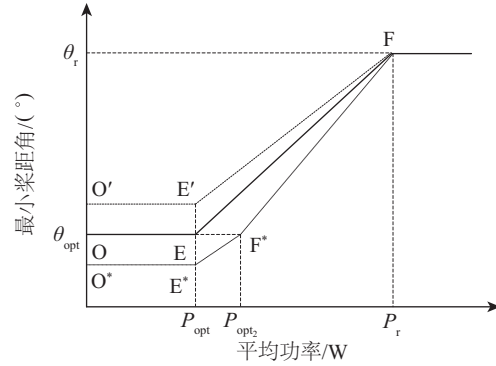


图4 削峰调节最小允许桨距角曲线

Fig. 4 Minimum pitch angle curve

风力发电机在额定风速以下正常发电运行时, 变桨控制桨距角规定有最小值 β_{min} 。当削峰调节最小允许桨距角 θ_{opt} 比变桨桨距角最小值 β_{min} 小时, θ_{opt} 调整为与 β_{min} 相等的值, 即图4中最小允许桨距角曲线上移沿 O'—E'—F 计算。当削峰调节最小允许桨距角 θ_{opt} 比变桨桨距角最小值 β_{min} 大时, 要求在削峰调节功率范围10%以内, 确保叶片桨距角 β_{min} 能够线性增大至与削峰调节最小允许桨距角 θ_{opt} 相等的值, 即图4中最小允许桨距角曲线下移沿 O*—E*—F*—F 计算。

削峰调节控制器执行的策略步骤:

1) 计算削峰调节功率范围10%处功率值 P_{opt_2} 。

$$P_{opt2} = P_{opt} + \frac{P_r - P_{opt}}{10} \quad (3)$$

2)检测风力发电机组实时输出功率,并对输出功率进行滤波处理,滤波处理后的功率为 P_{mean} 。

3)根据风力发电机组当前的功率,依据图 4 中最小允许桨距角曲线,计算机组最小允许桨距角 θ ,即:

①当 $P_{mean} \leq P_{opt}$, $\theta = \beta_{min}$; 若 $\theta_{opt} < \beta_{min}$, $\theta_{opt} = \beta_{min}$;

若 $\theta_{opt} \leq \beta_{min}$, $P_{opt2} = P_{opt}$;

②当 $P_{opt} < P_{mean} < P_{opt2}$, $\theta = \frac{\theta_{opt} - \beta_{min}}{P_{opt2} - P_{opt}} \cdot (P_{mean} - P_{opt}) + \beta_{min}$;

③当 $P_{opt2} \leq P_{mean} \leq P_r$, $\theta = \frac{\theta_r - \theta_{opt}}{P_r - P_{opt2}} \cdot (P_{mean} - P_{opt2}) + \theta_{opt}$;

④当 $P_{mean} \geq P_r$, $\theta = \theta_r$ 。

4)当实际桨距角小于 θ_r 时,启用设定的变桨速率限制值,防止机组开桨过快。

5)将最小允许桨距角及最大开桨速率限制应用到削峰调节控制器中,对变桨控制的目标角度及速率进行限制。

6)当空气密度发生变化时,合理修正最小允许桨距角曲线,即修正 θ_{opt} 、 θ_r 值。

3 仿真分析

本文采用 3 MW 永磁同步风力发电机组进行仿真。该风力发电机组基本结构采用三叶片上风向,三叶片同步变桨距,叶轮直径为 130 m,轮毂高度为 90 m,额定功率为 3 MW,额定转速为 403 r/min,额定风速为 9.5 m/s。将削峰调节控制功能写入外部控制器中,通过 Bladed 软件仿真,验证削峰调节控制器的作用。由于计算整机载荷时,不同部件不同部位出现极限载荷的工况是不一样的,因此本文的外部运行环境分别选择 GL (Germanischer Lloyd) 标准规定正常风廓线模型(normal wind profile model, NWP)、正常湍流模型(normal turbulence model, NTM),设定不同的工况对削峰调节控制器的控制功能进行仿真对比^[8]。

3.1 削峰调节对推力、最小净空的影响比较

采用 GL 标准规定的 NWP 作为外界风激励(NWP 风是 GL 标准、IEC 61400-1 规定工况),风速初始值为 8 m/s,变化幅值为 4 m/s,即风况变化趋势为从 8 m/s 增大至 12 m/s,然后在规定的时间内降至 8 m/s,风速曲线如图 5 所示。

图 6 是开启、关闭削峰调节控制功能时的仿真结果。图 6a 是塔顶处推力的对比曲线,图 6b 是最小净

空的对比曲线。通过图 6a 可看出开启削峰调节控制功能时,轮毂处的轴向推力无尖峰,减小明显,图 6a 中关闭削峰调节时最大推力为 588.73 kN,开启削峰调节时最大推力为 531.27 kN。图 6b 中,开启削峰调节控制后最小净空增大了,最小净空由 7.86 m 增至 8.52 m。

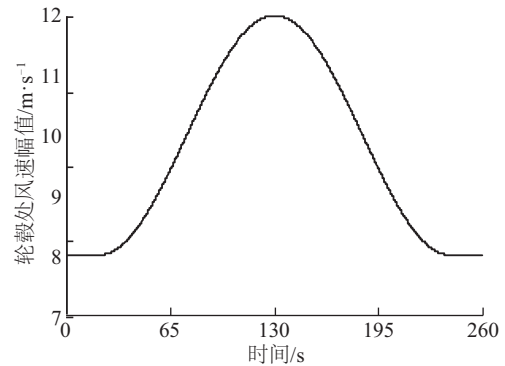
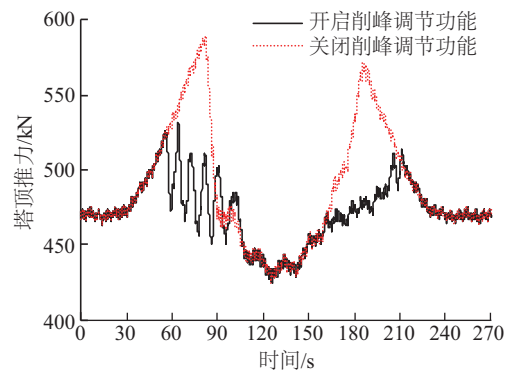
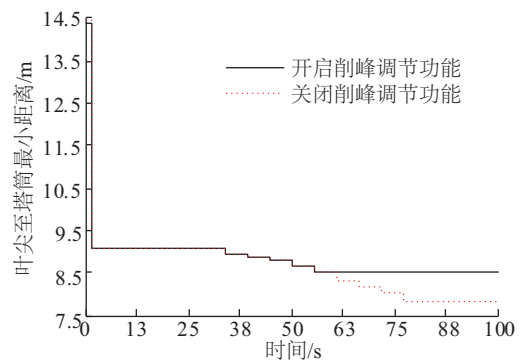


图5 NWP曲线

Fig. 5 Normal wind profile model curve



a. 塔顶推力变化对比



b. 最小净空

图6 开启、关闭削峰调节结果对比

Fig. 6 Contrast of peak shaver on and off

3.2 削峰调节对叶根载荷的影响比较

风模型采用 GL 标准规定的 NTM,风速选择 9.5 m/s,

风模型变化曲线如图 7 所示。

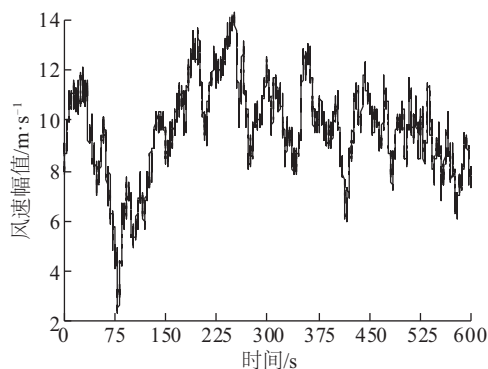


图 7 9.5 m/s 湍流风

Fig. 7 9.5 m/s turbulence source

表 1 是打开、关闭削峰调节控制功能时,叶根处合弯矩 M_y 的 Bladed 仿真对比结果。同步变桨距的三叶片由于方位不一样,所承受的载荷是不一样的。

表 1 叶根合弯矩

Table 1 Blade root resultant bending moment

工况	M_y/Nm		
	叶根 1	叶根 2	叶根 3
开启	8.44×10^6	8.70×10^6	8.62×10^6
关闭	9.35×10^6	9.73×10^6	9.39×10^6

由表 1 可看出开启削峰调节控制功能后,3 个叶片叶根处的合弯矩都明显减小。经统计计算,削峰调节功能降低了叶根合弯矩约 11.84% 的载荷。

3.3 削峰调节对塔筒底部载荷的影响比较

风模型采用 GL 标准规定的 NTM 模型,风速选择 12 m/s,风模型变化曲线与图 7 类似。图 8 是分别打开、关闭削峰调节控制功能时,塔筒底部载荷的 Bladed 仿真对比结果。

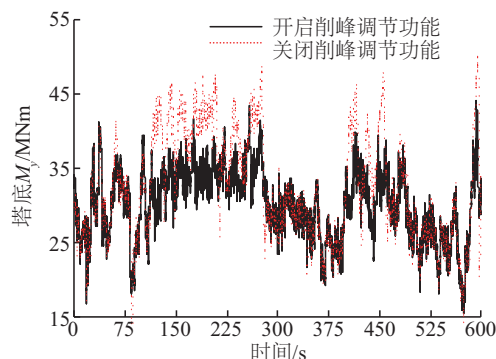


图 8 塔底 M_y 载荷

Fig. 8 Tower bottom load M_y

由图 8 可看出关闭削峰调节控制功能后,塔筒底部

倾斜力矩 M_y 明显增大。开启削峰调节功能时塔筒底部 M_y 极值为 44.0225 MNm,关闭削峰调节功能时塔筒底部 M_y 极值为 50.4203 MNm。塔底的载荷减小了,同时能降低地基的载荷,提高机组的安全性。

4 结 论

本文在分析变速变桨风力机基本控制策略的基础上,针对额定风速处推力尖峰变化导致机组极限载荷较大的问题,提出削峰调节控制器。当功率达到一定限值时,开始提前变桨,减小推力,优化机组的载荷,增加最小净空。通过在 Bladed 软件上仿真验证,结果表明,机组关键部件载荷得到显著减低。本文提出的控制器在不修改关键部件的几何设计的基础上优化了整机载荷,缩短了设计周期,具有实际应用价值。

[参考文献]

- [1] 姚兴佳, 谢洪放, 朱江生, 等. 基于 LMI 的 5 MW 海上风力发电机组载荷控制技术研究[J]. 可再生能源, 2016, 34(1): 44-48.
YAO X J, XIE H F, ZHU J S, et al. LMI-based load control for 5 MW offshore wind turbine[J]. Renewable energy resources, 2016, 34(1): 44-48.
- [2] 何玉林, 苏东旭, 黄帅, 等. MW 级风电系统的变桨距控制及载荷优化[J]. 控制工程, 2012, 19(4): 619-622.
HE Y L, SU D X, HUANG S, et al. Pitch control and load optimization of megawatt wind power system[J]. Control engineering of China, 2012, 19(4): 619-622.
- [3] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
YE H Y. Control technology of wind power[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [4] 林志明, 潘东浩, 王贵子, 等. 双馈式变速变桨风力发电机组的转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(32): 118-124.
LIN Z M, PAN D H, WANG G Z, et al. Torque control of doubly-fed variable speed variable pitch wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(32): 118-124.
- [5] 姚兴佳, 宋俊. 风力发电机组原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
YAO X J, SONG J. Principle and application of wind power[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [6] BOUKHEZZAR B, SIGUERDIDJANE H. Nonlinear control with wind estimation of a DFIG variable speed wind turbine for power capture optimization[J]. Energy

- conversion and management, 2009, 50(1): 885-892.
- [7] Germanischer Lloyd Wind Energie GmbH, Technical Note 067. Certification of wind turbines for extreme temperatures (Here: Cold Climate), Revision 4[S]. 2011
- [8] Germanischer Lloyd Wind Energie GmbH, Guideline for the certification of wind turbines[S]. 2010.

LOAD OPTIMIZATION CONTROL OF WIND TURBINE BASED ON PEAK SHAVER

Geng Lihong, Wang Chaodong, Xie Jinjuan, Wang Jianwei, Liu Xiaohui

(XJ Wind Power Technology Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: In the process of pitch control of the large VSVP(variable speed variable pitch wind turbine, VSVP), in order to avoid the high load due to thrust force peak change at rated wind speed, an peak shaver controller schedules the pitch is proposed. The Bladed external controller of a 3 MW wind turbine was used to simulate in different load cases. It's shown that the proposed controller can improve the dynamic characteristics of variable pitch control and reduce the loads of crucial parts of the wind turbine. Reliability and security are also improved.

Keywords: wind turbines; pitch PID control; load control; peak shaver; thrust force