

大型风电机组满发段功率与载荷协同模糊控制方法

张 政¹, 姚世刚¹, 余梦婷¹, 刘永前², 孙冬梅³

(1. 北京金风科创风电设备有限公司研发中心, 北京 100176;

2. 华北电力大学新能源学院, 北京 102206;

3. 中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司电网工程分公司电网技经处, 北京 100120)

摘 要: 针对额定风速附近功率/扭矩控制技术在大型风电机组上的适用性难题, 提出一种针对大型风电机组的满发段输出功率与载荷协同模糊控制策略。首先, 利用模糊算法对风电机组满发段的转速变化趋势进行智能判断; 接着, 提出最大/最小扭矩系数及功率切换系数, 并根据风电机组的转速变化趋势灵活选择控制策略, 实现恒功率与恒扭矩控制的有机融合; 最后, 通过仿真实验验证所提方法的有效性。该方法不仅能保持输出功率的相对稳定, 确保风电机组及电网的安全运行, 还能有效降低风电机组大部件的疲劳载荷, 从而延长风电机组的使用寿命。

关键词: 风电机组; 模糊控制; 载荷控制; 满发段控制策略; 恒功率控制; 恒扭矩控制

中图分类号: TK83

文献标志码: A

0 引 言

风能作为一种永不枯竭且清洁无污染的可再生能源, 其开发与利用正日益受到全球各国的广泛关注与重视。随着世界能源危机逐步加剧和能源结构的转变, 国内外对风电的需求日益增加, 各项相关技术的研究也大大促进了风电机组的更新换代, 在变革中先后出现了定桨距失速型风可力机、变桨距恒速型风电机组、变速恒频风电机组^[1]。相较于失速型风电机组, 变速恒频风电机组主要依赖于变桨距控制技术。在风速过高的情况下, 通过调节桨距角来改变气流对叶片的攻角, 进而调整风电机组所获取的空气动力转矩, 确保风电机组的功率输出维持稳定, 并有效降低风载负荷。所以变速恒频风电机组的优点是额定风速以上输出功率相对平稳, 目前已成为当今主流机型^[2]。随着风电需求的增加, 风电机组单机容量已突破 20 MW, 风电机组的叶片长度不断增加, 塔架高度已突破 170 m。

随着大型风电机组叶片长度增加, 扫风面积会更大, 叶轮可吸收的风能更多, 同时承受的疲劳载荷(尤其是叶根载荷合成到轮毂中心后)也更大。相比于传统的短叶片, 长柔叶片的长度在 100 m 以上, 采用碳纤维和玻璃纤维混合材料制造, 柔性更大且阻尼更小, 对风载更敏感, 即使是很小的风速变化, 也可能引起很大的载荷波动造成叶片发生形变^[3]。另外, 叶轮转速受风速变化的影响更明显, 这会显著增加轮毂及叶根的疲劳载荷。其次, 随着塔架高度的提升, 塔顶(塔

底)因风速改变而产生的振动幅度更大, 这会显著增加塔架的疲劳载荷, 乃至严重影响塔架寿命^[4-5]。重要的是, 大型风电机组的输出功率大, 相对小功率风电机组而言, 相同的功率波动百分比下, 大型风电机组的功率波动范围更大, 若超发过多, 不仅会超出变流器容量对变流器造成严重损伤, 甚至会影响电网适应性。例如对于额定功率 7.5 MW 的风电机组, 15% 的功率波动范围为 ± 1125 kW; 而对于 16 MW 的大型风电机组而言, 波动范围为 ± 2400 kW。因此, 大型风电机组对保持输出功率稳定及降低关键部件疲劳载荷的需求相对小功率风电机组更大。综上, 大型风电机组运行在额定风速以上时, 既要使输出功率相对平稳, 避免超出变流器容量边界, 从而提高电网友好性; 又要使风电机组关键部件载荷保持在可控范围内, 从而延长风电机组关键部件的寿命^[6-7]。

在相关技术中, 韩志英等^[8]讨论了适用于中低风速下风电机组的“转速-扭矩”控制曲线算法, 研究了在复杂风况下, 风电机组控制不能实时跟踪风况变化而带来发电量损失的技术问题。例如当叶片在复杂工况下产生大幅度变形时, 风电机组不能追踪最佳叶尖速比, 无法最大限度吸收风能。研究虽然讨论了当风电机组进入满发状态后, 可通过动态控制变桨角度保持动态额定功率输出, 但未关注恒功率或恒扭矩控制方法的优缺点, 以及二者对风电机组疲劳载荷的影响。田德等^[9]主要研究采用线性自抗扰变桨控制技术来实现变速恒频风电机组在额定风速以上的功率稳定输出。首先基于自抗扰控制理论建立了风电机组的动力学模型, 然后设计了

变桨控制器,通过仿真证明在额定风速以上可将发电机输出功率较好地维持在额定功率附近做恒功率运行。功率稳定是风力机正常并网发电的关键,黄晓军^[10]提出在中低风速区通过调节扭矩、在高风速区通过变桨控制实现恒功率控制,以达到风能的最大利用化;夏宗朝等^[11]注意到在风电机组运行全风速段中频繁变桨会导致载荷增加的问题,提出一种自适应的降低变桨系统疲劳载荷的控制方法,即基于风速制定区间,并根据桨角所处区间确定是否变桨。

但上述文献一方面仅关注了恒功率控制可稳定功率输出,未注意到恒功率控制对风电机组关键部件疲劳载荷的影响;另一方面仅关注了降低疲劳载荷而忽略了功率稳定性。虽然有研究^[12]提到使用恒功率或恒扭矩控制的区别,但未注意到可将二者进行有机结合而综合恒功率/恒扭矩控制优点,未从根本上解决如何保证大型风电机组在满发段输出功率稳定的同时降低风电机组关键部件载荷这一问题。

当风速达到额定后,风电机组进入满发状态,常用的方法是基于恒功率或恒扭矩的方法动态控制变桨角度,使得风电机组运行在额定转速附近。通过仿真测算可知,恒功率控制和恒扭矩控制各有优缺点:恒功率控制下风电机组输出功率更稳定但关键部件的载荷较大,而恒扭矩控制下风电机组关键部件的载荷更小但输出功率不稳定。虽然在额定风速附近的恒功率与恒扭矩切换的控制已在风电机组得以应用,但大多需在限功率等状态下实施,且目前在大批量风场中鲜有应用案例。本文提出适用于大型风电机组的满发段输出功率及载荷协同模糊控制方法,该方法采用模糊算法判断风电机组转速变化趋势;然后提出3组相关的参数,确定机组在不同转速变化趋势下的参数取值,实现根据机组实时运行情况选择不同的控制策略,有机结合恒功率控制及恒扭矩控制的优点。仿真验证该方法可实现在满发段输出功率相对平稳的基础上,降低机组关键部件疲劳载荷,延长机组寿命。

1 整机闭环控制系统目标

风电机组整机闭环控制系统的目标如图1所示,可分为IV个区。

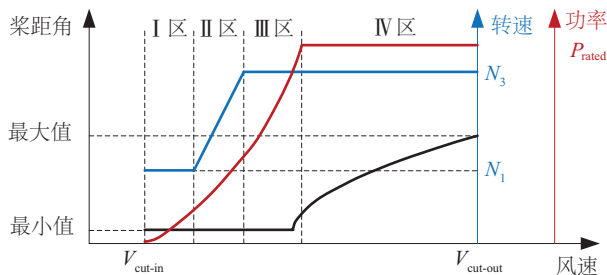


图1 风力发电机组整机控制目标

(风速-转速,风速-功率,风速-桨角曲线)

Fig. 1 Wind turbine control objectives (wind speed-generator speed, wind speed-power, wind speed-pitch angle curve)

I区(小风启机):风电机组叶片处于设计最优桨角,通过扭矩比例-积分(proportional-integral, PI),或扭矩比例-积分-微分(proportional-integral-derivative, PID)控制风电机组转速处于启机最小转速。

II区(K_{opt} 区):风电机组叶片处于设计最优桨角,根据 $T = K_{opt} \times \omega^2$ (其中, T 为当前扭矩, ω 为当前转速, K_{opt} 为风电机组的最优增益值),通过调节变流反馈扭矩执行变速控制,使转速维持在最佳叶尖速比,实现最大效率捕获风能。

III区(过渡段):风电机组叶片处于设计最优桨角,再次通过扭矩 PI(或扭矩 PID)控制机组转速维持在额定转速。

IV区(满发段):通过变桨 PI(或变桨 PID)控制风电机组转速维持在额定转速,该区域的控制策略包括:

1)恒功率控制:风电机组以额定功率为控制目标,通过变桨 PI(或变桨 PID)控制调节变桨角度实现机组输出功率稳定,扭矩 $T = \frac{P_{rated}}{\omega_m}$, 其中, P_{rated} 为额定功率, ω_m 为实时转速。

理论上,在低转速时发电机的扭矩较大,而在高转速时发电机的扭矩会减小,因此在该控制方式下,不论风电机组处于任何转速均可维持输出功率保持相对恒定,这对风电机组变流端及电网更友好。由于在恒功率控制下风电机组以稳定功率为控制目标,所以扭矩波动较大,这会增加风电机组疲劳载荷、缩短机组寿命。因此,恒功率控制策略通常应用于两类关键场景:①针对需在宽速域范围内维持功率输出恒定的负载设备;②适用于对并网质量要求严苛、需严格限制功率波动以保障电网安全稳定运行的电力系统环境。

2)恒扭矩控制:与恒功率控制不同的是,风电机组以额定转速为控制目标,但控制量依然是变桨角度。通过变桨 PI(或变桨 PID)控制风电机组维持输出扭矩恒定,扭矩 $T = \frac{P_{output}}{\omega_r}$, 其中, P_{output} 为输出功率, ω_r 为额定转速。理论上,在低转速时输出功率降低,在高转速时输出功率会升高,由于控制目标是扭矩相对平稳,这表明机组在处于不同转速工况时,均能使输出扭矩维持在相对恒定的状态;所以,风电机组在恒扭矩控制下的扭矩波动较小、对风电机组疲劳载荷更友好,有利于延长机组寿命。然而,由于功率波动大,若输出功率超出额定功率较多,会对电网造成冲击。随着行业内对电网适应性要求愈发严格,目前大多风电机组已切换至恒功率控制。

2 基于模糊算法判断机组转速变化趋势

确定风电机组转速变化趋势的流程如下:1)基于发电机转速得到转速过速百分比及过速百分比的变化率;2)将二者作为模糊控制模块的输入,得到转速变化速率;3)根据转速变化速率计算变化系数,基于此判断转速变化趋势,如图2所示。

综上,大型风电机组叶片越来越长且越来越柔,若要实

现在防止风电机组功率超发过多的同时降低风电机组载荷, 则需转速变化趋势能更快更准地介入控制。因此图 2 中将过速百分比和过速变化率百分比同时作为模糊控制的输入。

针对大型风力发电机组满发段输出功率及载荷协同控制方法的示意性框图如图 3 所示, 其中, 基于模糊算法判断机组转速变化趋势控制框图如其中椭圆框中的部分所示, 其具体的计算逻辑为: 1) 将机组当前的实测发电机转速与额定

发电机转速进行比较, 确定转速差异 (即转速过速百分比); 2) 对转速差异求微分, 确定转速差异变化率 (即过速百分比的变化率); 3) 基于转速差异和转速差异变化率, 经模糊处理确定转速变化速率; 4) 基于转速变化速率, 经死区处理得到转速变化系数, 根据得到的变化系数确定发电机转速的变化趋势。其中, 转速差异为 $[(\text{实测发电机转速} - \text{额定发电机转速}) / \text{额定发电机转速} \times 100\%]$ 。

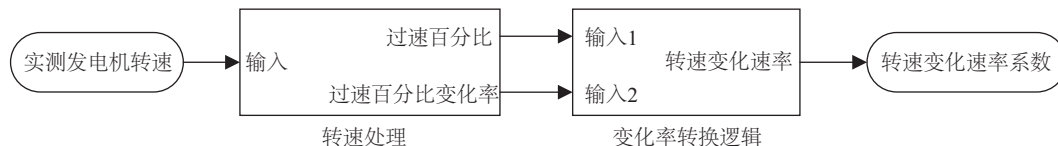


图 2 确定转速变化趋势流程

Fig. 2 Flow chart of determining rotation speed change trend

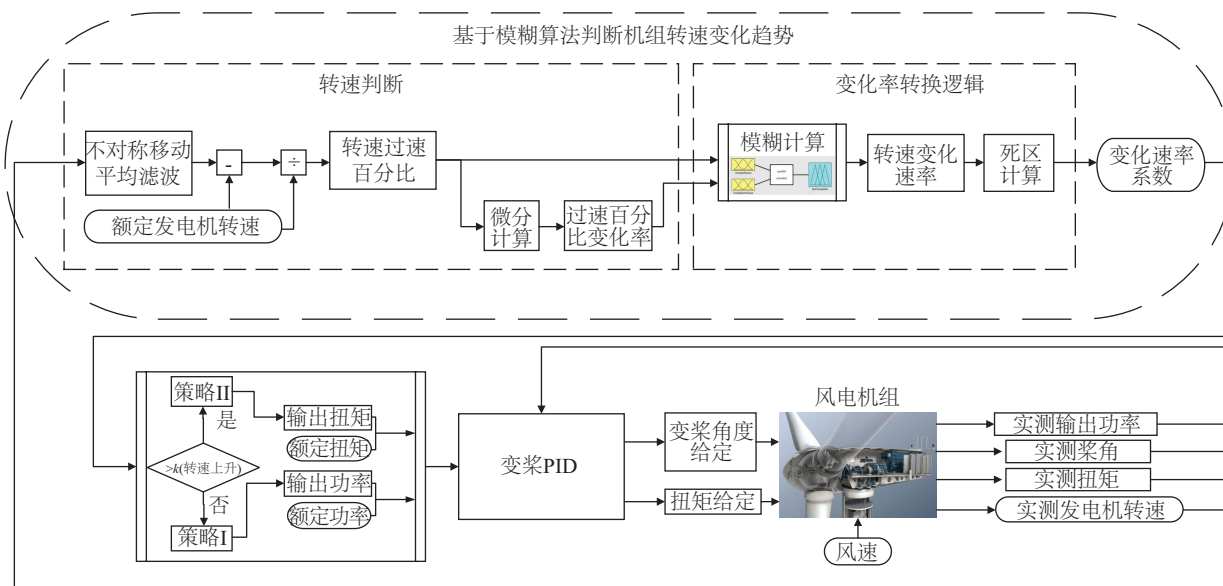


图 3 大型风电机组满发段输出功率及载荷协同模糊控制框图

Fig. 3 Block diagram of power and load cooperative control using fuzzy control for large wind turbine in full generation section

此外, 为避免转速跳变对策略的影响, 可对实测发电机转速做不对称移动平均滤波处理, 然后将滤波后的转速数据与预设发电机转速进行比较, 得到转速偏差。其次, 可对初始过速百分比及初始过速变化率进行饱和计算, 然后将计算后的结果作为模糊控制逻辑工具箱的输入, 从而避免数据溢出或其他原因影响运算结果的正确性。另外, 为降低不必要的切换动作, 减少变桨动作保护变桨执行机构, 可对模糊计算输出的转速变化速率进行死区保护, 将转速变化速率限制在预设的速率范围 (即上述死区) 内, 以确定转速变化趋势。

3 满发段输出功率及载荷协同控制

当现场风速达到风力机设计的满发风速后, 理论上机组的转速和输出功率均处于稳定状态, 整机闭环控制系统存在 $P = K \times \omega \times T$, 其中, P 为实时功率, k 为常数, ω 为实时转速, T 为扭矩。假设机组功率输出平稳, 则发电机的转速与扭

矩成反比。此时存在恒功率或恒扭矩两种控制方式。

由于恒功率控制和恒扭矩控制各有优缺点, 无法满足在输出功率稳定的同时实现安全降载的需求。本文提出一种适用于满发段的功率与载荷协同控制方法, 可综合恒功率控制下功率稳定及恒扭矩控制下载荷较小的优点: 首先, 基于模糊算法判断风电机组转速的变化趋势; 然后, 通过添加 3 组控制参数: 最小扭矩系数 $T_{\min F}$ 、最大扭矩系数 $T_{\max F}$ 和切换功率系数 P_{pwrF} , 根据所得的转速变化趋势确定不同变化趋势下的控制策略 (参数取值), 实现根据风电机组运行情况选择控制策略, 达到融合两种控制方法优点的目的。在不同转速变化趋势下的控制策略 (参数取值) 如下:

策略 I: 将给定功率作为风电机组的控制目标, 将最小扭矩系数 $T_{\min F}$ 调整在范围 A 内, 将最大扭矩系数 $T_{\max F}$ 调整在范围 B 内, 将切换功率系数 P_{pwrF} 调整为预设功率系数, 且最小扭矩系数 $T_{\min F} < \text{最大扭矩系数 } T_{\max F}$;

策略Ⅱ,将给定扭矩作为机组的控制目标,将最小扭矩系数 $T_{\min F}$ 和最大扭矩系数 $T_{\max F}$ 均调整为预设扭矩系数,将切换功率系数 P_{pdf} 调整在范围 C 内。

其中,最小扭矩系数 $T_{\min F}$ 和最大扭矩系数 $T_{\max F}$ 用于确定风电机组扭矩的控制目标。由满发段关系 ($P = K \times \omega \times T$) 可知,当转速变大时扭矩在变小;同理,在转速变小时扭矩在变大,为避免扭矩太小(太大)而小于(大于)负载所需转矩引起事故,设置最小和最大扭矩系数以对扭矩的范围进行限制。防止扭矩发生跳变造成关键部件载荷波动过大而影响风电机组安全,根据大型风电机组的稳定性判断经验,预留 $\pm 10\%$ 的波动余量,即 $A \in [90\%, 100\%]$, $B \in [100\%, 110\%]$ 。因此,最小扭矩系数和最大扭矩系数的取值为: $0.9 \leq T_{\min F}(T_{\max F}) \leq 1.0$ (或 $1.0 \leq T_{\min F}(T_{\max F}) \leq 1.1$), 且 $T_{\min F} < T_{\max F}$ 。

如上述所知,大型风电机组的额定功率基数大,相比于小功率机组在相同功率波动百分比下功率波动范围更大,会对电网产生更大的冲击。本文通过设计切换功率系数 P_{pdf} 限定功率波动范围,设置的目的是实现安全保护,防止输出功率过高对电网产生冲击。根据电网适应性经验要求,预留 $\pm 15\%$ 的波动余量,即 $C \in [100\%, 115\%]$, 因此,切换功率系数的取值为: $1.00 \leq P_{\text{pdf}} \leq 1.15$ 。

机组允许的功率限值可基于切换功率系数和机组的额定功率共同确定,即额定功率 $\times P_{\text{pdf}}$ 。当输出功率超过功率限值后,强制切换为策略Ⅰ控制,保持功率稳定。此后,机组可重新根据转速变化趋势判断是否进行策略转换,完成控制策略Ⅰ和Ⅱ转换,实现维持输出功率相对稳定,同时降低机组关键部件载荷。可看出,只有当机组处于策略Ⅱ控制时,系数 P_{pdf} 才起作用,以防止功率发生跳变对电网产生冲击。

综上,本文设置 3 组系数,基于不同的转速变化趋势设定相应的取值范围,可根据机组运行情况选择合适的控制策略,达到在满发段输出功率不超发的基础上降低疲劳载荷的目的,融合恒功率和恒扭矩控制的优点。表 1 给出了

表 1 系数设置的不同组合的示例

Table 1 Examples of different combinations of coefficient settings

参数	数值	备注
$T_{\min F}$	0.95	恒功率控制
$T_{\max F}$	1.06	
P_{pdf}	1.00	
$T_{\min F}$	1.00	恒扭矩控制
$T_{\max F}$	1.00	
P_{pdf}	1.15	
$T_{\min F}$	0.95	转速上升:采用恒扭矩控制 转速下降:采用恒功率控制
$T_{\max F}$	1.00	
P_{pdf}	1.00~1.15	

上述 3 组系数的不同组合示例,可根据实际需要修改系数取值。

4 仿真实验

本文使用 Bladed 4.10 建立机组模型,经与现场样机进行系统辨识对比,结果显示模型准确度达到 90% 以上。另外,仿真模型满足以下标准:叶片长度 $> 85 \text{ m}$; 叶轮直径 $> 170 \text{ m}$; 塔架高度 $> 100 \text{ m}$; 单机容量 $> 8 \text{ MW}$, 额定风速 $> 11 \text{ m/s}$; 传动比 > 72 。

4.1 恒功率控制与恒扭矩控制

恒功率控制和恒扭矩控制各有优缺点:在恒功率控制下机组输出功率更稳定,但会增加机组疲劳载荷;而在恒扭矩控制下机组关键部件的载荷更小,但输出功率波动大。

基于某陆上大型风电机型平台做仿真测算,选取 DLC 1.2 工况中风速为 14 m/s 的子工况(风速如图 4 所示),恒功率及恒扭矩控制能力的对比结果如表 2 所示。

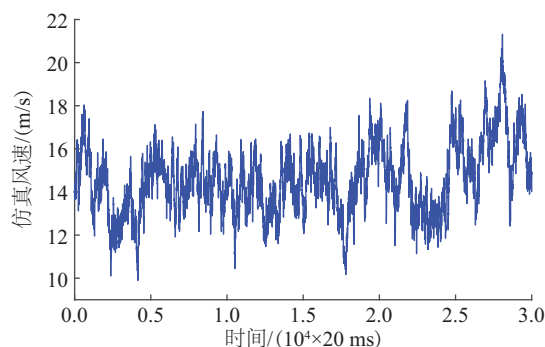


图 4 仿真子工况风速时序(DLC 1.2)

Fig. 4 Wind speed of simulation sub-condition (DLC 1.2)

表 2 恒功率&恒扭矩控制能力汇总

Table 2 Summary of constant power & constant torque control capabilities

控制方式	变量	最大值/%	最小值/%	平均值/%	标准差/%
恒功率控制	发电机扭矩	106.01	94.33	100.02	2.45
	输出功率	104.57	95.27	100.00	1.00
恒扭矩控制	发电机扭矩	100.26	99.65	100.00	0.07
	输出功率	108.03	98.89	100.01	2.06

如表 2 所示,在恒功率控制下,机组输出功率标准差相对更小,说明在恒功率控制下机组输出功率相对稳定;而在恒扭矩控制下发电机扭矩的标准差相对更小,说明在恒扭矩控制下发电机扭矩波动更小。以机组输出功率及塔底 M_y 载荷为例,其时序与发电机转速的关系如图 5 所示。

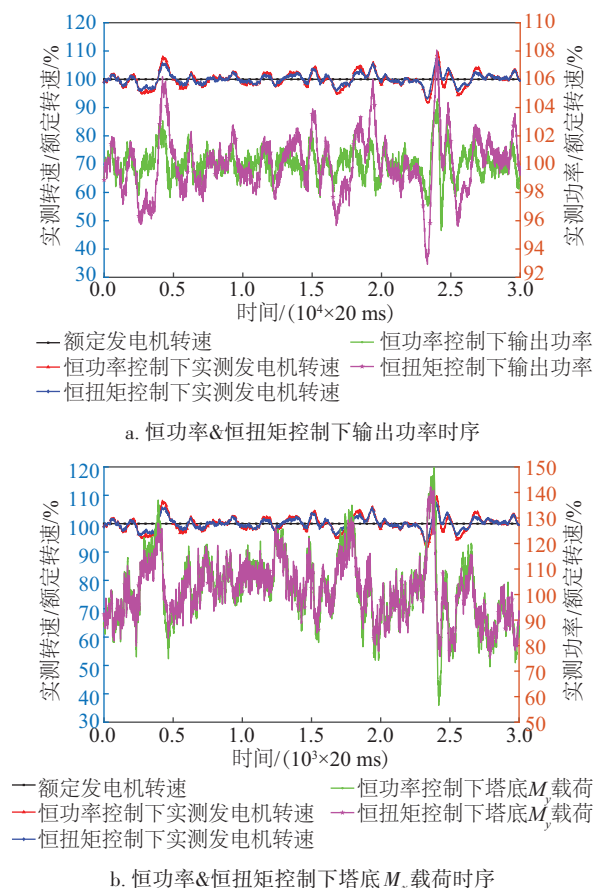


图5 发电机转速与恒功率&恒扭矩控制下输出功率及塔底 M_y 载荷的关系

Fig. 5 Curve of generator rotation speed with power & tower bottom M_y load in constant power & constant torque control

如图5所示,对比相同工况下的发电机转速与输出功率及塔底 M_y 载荷时序发现,当转速上升或下降时,机组输出功率和塔底 M_y 的波动较大,且二者在恒功率控制和恒扭矩控制下的差别更加明显。

4.2 不同策略下的机组输出功率比较

在 DLC 1.2 的 14 m/s 的子工况(如图4所示)下,根据表1所示的3个组合设置参数,对比基于恒功率控制、恒扭矩控制及本文所提方法的机组输出功率情况,结果如图6和表3所示。

如图6及表3所示,采用本文提出的方法,机组输出功率的标准差介于恒功率及恒扭矩控制之间。本文所提方法相对恒扭矩控制可减少机组超发,使输出功率相对稳定,对电网更友好。针对 DLC 1.2 全工况,从切入风速到切出风速下,统计基于3种控制方法的机组输出功率如图7所示。其中,图7a为3种控制下的输出功率最大值,图7b为输出功率标准差。

如图7所示,采用本文所提方法,在满发段(风速12~20 m/s): 1)功率最大值均小于处于恒扭矩控制时,且与恒功率控制时的功率最大值接近(如图9a所示); 2)输出功率的标准差均小

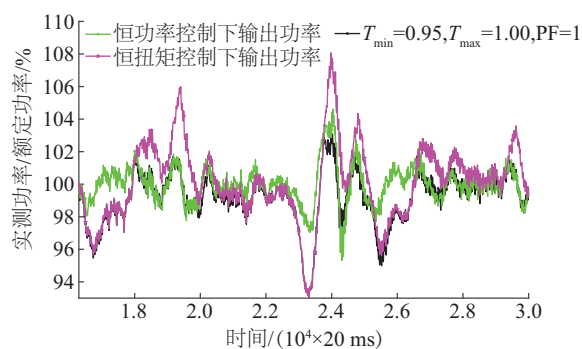


图6 基于不同控制方法的机组输出功率时序

Fig. 6 Time series of unit output power under different control methods

表3 不同控制方法的机组输出功率汇总

Table 3 Summary of unit output power with different control methods

控制方式	变量	最大值/ %	最小值/ %	平均值/ %	标准差/ %
本文所提方法	输出功率	104.06	93.67	100.00	1.42
恒功率控制	输出功率	105.41	96.04	100.81	1.01
恒扭矩控制	输出功率	108.91	93.64	100.82	2.07

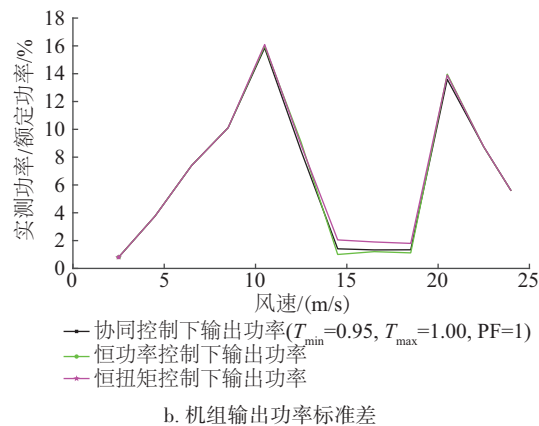
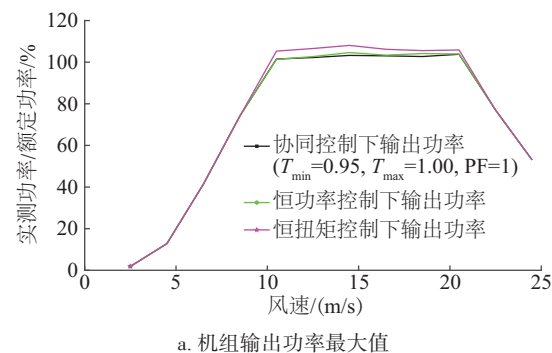


图7 基于不同控制方法在 DLC 1.2 工况下的输出功率统计结果

Fig. 7 Statistic results of electrical power under DLC 1.2 with different control methods

于处于恒扭矩控制时,且与恒功率控制时的标准差接近(如图9b所示)。如此证明,采用本文所提控制方法相比恒扭矩控制可减少机组功率超发(如表3所示,减少超发约5%)且波动小,对电网更友好;发电量损失更少,可继承恒功率控制的优点。

4.3 不同策略下的机组塔底 M_y 载荷比较

在相同设置下,对比在恒功率、恒扭矩、本文所提方法下的塔底 M_y 载荷,结果如图8及表4所示。

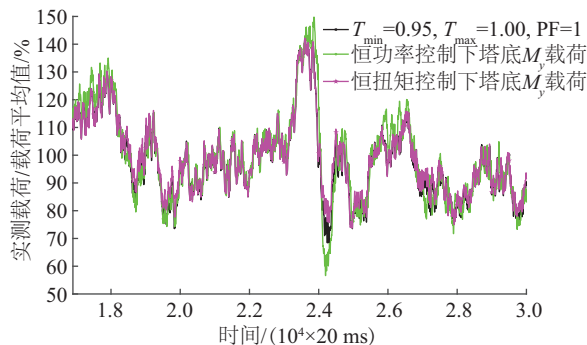


图8 基于不同控制方法的机组塔底 M_y 载荷时序

Fig. 8 Time series of tower bottom M_y load under different control methods

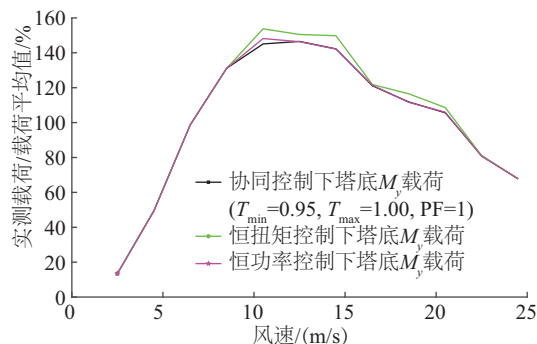
表4 不同控制方法的机组塔底 M_y 载荷汇总

Table 4 Summary of M_y loads at tower bottom of units under different control methods

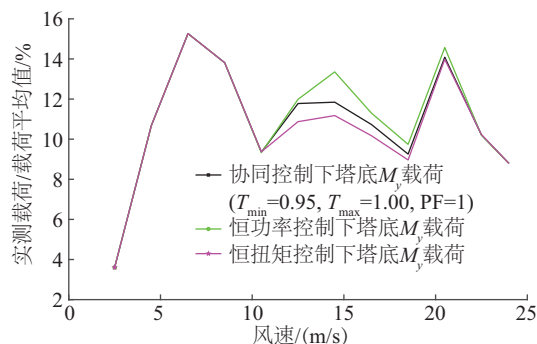
控制方式	变量	最大值/%	最小值/%	平均值/%	标准差/%
本文所提方法	塔底 M_y 载荷	141.12	67.77	100.00	11.75
恒功率控制	塔底 M_y 载荷	148.58	56.16	101.04	13.25
恒扭矩控制	塔底 M_y 载荷	140.99	73.16	100.86	11.08

如图8及表4所示,采用本文所提方法,机组塔底 M_y 载荷的标准差介于恒功率及恒扭矩控制之间。本文所提方法相比恒功率控制,可降低塔底 M_y 载荷,对塔架疲劳载荷更友好,有利于延长塔架寿命。针对 DLC 1.2 全工况,从切入风速到切出风速下,统计恒功率、恒扭矩、本文所提方法下的机组塔底 M_y 载荷,得到结果如图9所示,其中,图9a为3种控制下的塔底 M_y 载荷最大值,图9b为3种控制下的塔底 M_y 载荷标准差。

如图9所示,采用本文所提控制方法,在满发段(风速12~20 m/s):1)如9a所示,塔底 M_y 载荷的最大值均低于处于恒功率控制模式下的数值,且与恒扭矩控制模式下的数值接近;2)如9b所示,塔底 M_y 载荷的标准差小于处于恒功率控



a. 机组塔底 M_y 载荷最大值



b. 机组塔底 M_y 载荷标准差

图9 基于不同控制方法在 DLC1.2 工况下的塔底 M_y 载荷统计结果

Fig. 9 Statistic results of tower bottom M_y load under DLC 1.2 with different control methods

制模式下的标准差,且与恒扭矩控制模式下的标准差相近。如此证明,采用本文所提控制方法塔底 M_y 载荷相比恒功率控制时更小(如表4所示,减小塔底 M_y 载荷约7%)且波动小,对塔架疲劳载荷更友好,有利于延长机组寿命,可继承恒扭矩控制的优点。

4.4 不同策略下的机组轮毂 M_x 载荷比较

在相同工况下,比较处于恒功率、恒扭矩、所提方法下的机组轮毂 M_x 载荷,如图10及表5所示。

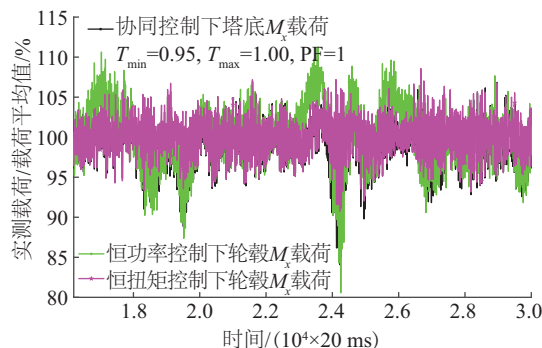


图10 基于不同控制方法的机组轮毂 M_x 载荷时序

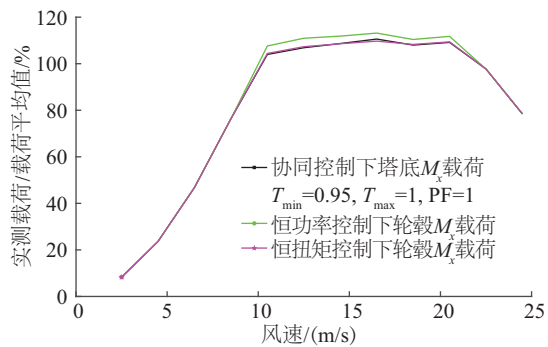
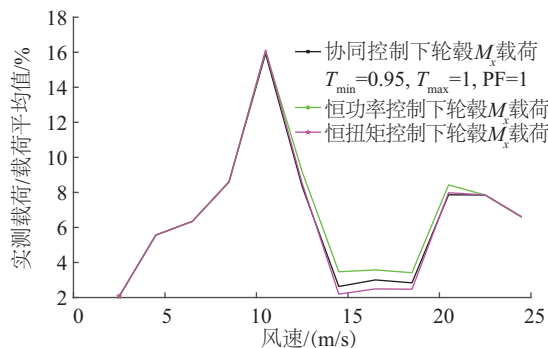
Fig. 10 Hub M_x load under different control methods

表5 不同控制方法的机组轮毂 M_x 载荷汇总Table 5 Summary of M_x Loads on unit hub under different control methods

控制方式	变量	最大值/%	最小值/%	平均值/%	标准差/%
本文所提方法	轮毂 M_x 载荷	109.49	84.71	100.00	2.65
恒功率控制	轮毂 M_x 载荷	112.69	81.15	100.95	3.49
恒扭矩控制	轮毂 M_x 载荷	109.38	91.43	100.77	2.21

如图 10 及表 5 所示,采用本文所提控制方法,机组轮毂 M_x 载荷的标准差介于恒功率及恒扭矩控制之间。本文所提方法相比恒功率控制,可降低轮毂 M_x 载荷,对轮毂疲劳载荷更友好,有利于延长主轴寿命。针对 DLC1.2 全工况,从切入风速到切出风速下,统计 3 种控制方法下的机组轮毂 M_x 载荷,得到结果如图 11 所示,其中,图 11a 为轮毂 M_x 载荷最大值,图 11b 为轮毂 M_x 载荷标准差。

如图 11 所示,采用本文所提控制方法,在满发段(风速 12~20 m/s):1)如 11a 所示,轮毂 M_x 载荷的最大值均低于恒功率控制工况下的数值,且与恒扭矩控制工况下的数值较为接近;2)如 11b 所示,轮毂 M_x 载荷的标准差小于恒功率控制

a. 机组轮毂 M_x 载荷最大值b. 机组轮毂 M_x 载荷标准差图 11 基于不同控制方法在 DLC 1.2 工况下的轮毂 M_x 载荷统计结果Fig. 11 Statistic results of hub M_x load under DLC 1.2 with different control methods

工况下的标准差,且与恒扭矩控制工况下的标准差相近。如此证明,采用所提方法可降低轮毂 M_x 载荷(如表 5 所示,减小轮毂 M_x 载荷约 3%)且波动小,对轮毂疲劳载荷更友好,有利于延长主轴寿命,可继承恒扭矩控制的优点。

4.5 不同策略下的机组关键部件疲劳载荷

表 6 为分别在恒功率、恒扭矩、所提控制下的机组关键部件疲劳载荷的对比,注:以恒功率控制为基准,且 Wohler 指数(m 值)=10 为例。

表 6 3 种控制方法下机组关键部件疲劳载荷汇总

$$(T_{\min}=0.95, T_{\max}=1.00, P_{\text{pwr}}=1, m=10)$$

Table 6 Summary of fatigue loads on key components of unit under three control methods

$$(T_{\min}=0.95, T_{\max}=1.00, P_{\text{pwr}}=1, m=10)$$

控制方式	轮毂 M_x	叶根 M_y	塔顶 M_x	偏航轴承 M_x	塔底 M_y
恒功率控制/%	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
恒扭矩控制/%	96.44	95.43	96.11	96.11	95.67
本文所提方法/%	94.94	97.21	95.60	95.60	96.82

如表 6 所示,在当前叶片、塔架等参数基础上,本文所提方法可降低轮毂 M_x 、塔顶 M_x 、偏航轴承 M_x 、塔底 M_y 疲劳载荷约 5%。此外,可降低叶根 M_y 载荷约 3%。除上述部件及方向外,本文所提方法对其他方向也有降载效果。

4.6 小 结

当转速发生变化时进行控制方式的转换,可使机组输出功率相对稳定,从而避免输出功率过高导致超发,提高电网友好性;同时减小机组关键部件疲劳载荷,从而延长机组寿命。通过上述仿真证明,通过增加 3 组参数并设定参数的动作范围,可满足融合恒功率控制和恒扭矩控制各自优点的需求,实现关键部件降载约 5%。

需说明的是,仿真验证得到的参数选择结果仅基于某个机型平台仿真结果得出,并不能代表所有机型。

第 3 节中阐述,可基于既有经验对策略 I 与策略 II 所涉及的 3 组系数(即 A 、 B 、 C)的取值范围予以确定,但由于不同机型的叶片和塔架等配置不同,参数的具体选择可能不同。因此需针对不同机型进行仿真,从而在对应的取值范围内确定与机型配置相符的最优的系数取值组合,本文的仿真结果仅作实例展示使用,证明根据本文所提方法可综合恒功率&恒扭矩的优点。此外,为减少故障率提升产品质量,需进行更多的仿真查验该方法与其他增功、降载策略的适应性和耦合性。

5 结 论

本文提出一种适用于大型风电机组满发段的输出功率与载荷协同模糊控制方法, 有机结合了恒功率控制下功率稳定和恒扭矩控制下扭矩较小的优点。该方法基于模糊算法对机组运行转速变化趋势进行判断; 提出 3 组控制参数并根据不同的转速变化趋势设计不同的控制策略, 实现根据机组运行情况选择控制方式, 使机组输出功率相比恒扭矩控制时更稳定且超发小, 对电网更友好; 同时使关键部件疲劳载荷相比恒功率控制时更小, 对机组疲劳载荷更友好, 有利于延长机组寿命。仿真验证证明采用本文所提方法可相对降低机组超发约 4%, 同时降低机组关键部件载荷 3%~5%。该方法无需修改原 PID 控制器, 仅通过修改参数便可实现在保证机组和电网安全的基础上降低机组关键部件疲劳载荷的目的, 确保机组运行的安全性和稳定性, 该算法计算复杂度小, 简易可靠。

[参考文献]

- [1] 曲文浩. 智能化技术在风力发电自动化控制系统中的应用[J]. 光源与照明, 2021(7): 101-102.
QU W. Application of intelligent technology in automatic control systems for wind power generation[J]. Lamps and Lighting, 2021(7): 101-102.
- [2] 耿丽红, 王朝东, 谢金娟, 等. 基于削峰调节的风电机组载荷优化控制技术[J]. 太阳能学报, 2020, 41(2): 126-130.
GENG L H, WANG C D, XIE J J, et al. Load optimization control of wind turbine based on peak shaver[J]. Acta energiae solaris sinica, 2020, 41(2): 126-130.
- [3] 王泽栋, 王骥, 漆良文, 等. 考虑大变形的柔性风电叶片气弹性分析[J]. 太阳能学报, 2024, 45(2): 143-151.
WANG Z D, WANG D, QI L W, et al. Dynamic response of flexible wind turbine blades considering large-deflection[J]. Acta energiae solaris sinica, 2024, 45(2): 143-151.
- [4] 陈俊岭, 高洁, 赵邦州, 等. 风电机组钢塔架与钢-混凝土组合塔架动力响应对比分析[J]. 太阳能学报, 2023, 44(3): 225-231.
CHEN J L, GAO J, ZHAO B Z, et al. Comprehensive analysis of dynamic response of steel and steel-concrete combined wind turbine towers[J]. Acta energiae solaris sinica, 2023, 44(3): 225-231.
- [5] 包道日娜, 王鹏, 吴胜胜, 等. 新型变桨风力机关键部件载荷特性试验研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(7): 242-248.
BAO D R N, WANG P, WU S S, et al. Experimental study on load characteristics of key components of new variable pitch wind turbine[J]. Acta energiae solaris sinica, 2022, 43(7): 242-248.
- [6] 陶月虎, 杨策, 丁开放, 等. 兆瓦级风电机组叶片延长载荷分析及平稳运行控制方法[J]. 电气应用, 2024, 43(2): 7-12.
TAO Y H, YANG C, DING K F, et al. Analysis of blade extension load and smooth operation control method for megawatt wind turbines[J]. Electrotechnical application, 2024, 43(2): 7-12.
- [7] 韩信, 邓钰婷, 耿子越, 等. 大规模风电场协调控制架构及算法综述[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(1): 1-18.
HAN J, DENG Y T, GENG Z Y, et al. Review on coordinated control architecture and algorithm of large-scale wind farms[J]. Journal of electric power science and technology, 2025, 40(1): 1-18.
- [8] 韩志英, 杨端, 孙曼, 等. 中低风速下“转速-扭矩”控制曲线算法: CN118728639A[P]. 2024-10-01.
HAN Z Y, YANG D, SUN M, et al. “RPM-torque” control curve algorithm under medium and low wind speed: CN118728639A[P]. 2024-10-01.
- [9] 田德, 黄明月, 唐世泽, 等. 大型风电机组输出功率与塔架载荷自抗扰控制[J]. 太阳能学报, 2023, 44(5): 466-472.
TIAN D, HUANG M Y, TANG S Z, et al. Output power and tower load control of large-scale wind turbines based on active disturbance rejection control[J]. Acta energiae solaris sinica, 2023, 44(5): 466-472.
- [10] 陕西华电新能源发电有限公司. 风电机组场群协同增效控制方法及系统: CN121854321A[P]. 2026-04-14.
China Huadian Shaanxi New Energy Power Generation Co., Ltd. Cooperative efficiency improvement control method and system for wind turbine farm group: CN121854321A[P]. 2026-04-14.
- [11] 夏宗朝, 黄国燕, 王明江, 等. 一种降低风力发电机组变桨系统疲劳载荷的控制方法. CN202010099254.9 [P]. 2024-12-23.
XIA Z C, HUANG G Y, WANG M J, et al. Constant power control method and device for wind turbine generator under full-load condition and wind turbine generator: CN111255629A[P]. 2024-12-23.
- [12] 黄国燕, 朱敏, 李强, 等. 一种风电机组满发工况恒功率控制方法、装置及风电机组: CN103615356B [P]. 2024-12-23.
HUANG G Y, ZHU M, LI Q, et al. Constant power control method and device for wind turbine generator under full-load condition and wind turbine generator: CN103615356B[P]. 2024-12-23.

POWER AND LOAD COOPERATIVE FUZZY CONTROL METHOD OF LARGE WIND TURBINES DURING FULL GENERATION STAGE

Zhang Zheng¹, Yao Shigang¹, Yu Mengting¹, Liu Yongqian², Sun Dongmei²

(1. *R&D Center, Beijing Goldwind Science & Creation Wind power Equipment Co., Ltd., Beijing 100176, China;*

2. School of Renewable Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

*3. Techno-Economic Division, Power Grid Power Grid, North China Power Engineering Co., Ltd. of
China Power Engineering Consulting, Beijing 100120, China)*

Abstract: Because of the applicability challenges of power/torque control technology near the rated wind speed for large wind turbines, this paper proposes a fuzzy-based electrical power and load cooperative control strategy for large wind turbines in the full-generation stage. Firstly, a fuzzy algorithm is used to intelligently judge the rotation speed change trend of the generator's speed change during full-generation stage. Secondly, maximum/minimum torque coefficients and power switching coefficients are proposed, and different control strategies are flexibly selected based on the trend of rotation speed change of generator. That achieve the organic combination of constant-power and constant-torque control method. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified through simulation experiments. This method can not only maintain relatively stable of electrical power and ensure the operation safe of wind turbines and the grid, but also effectively reduce the fatigue loads on the major components of wind turbines, which can extend its service life.

Keywords: wind turbines; fuzzy control; load control; full-generation-stage control strategy; constant-power control; constant-torque control