

DOI: 10.19666/j.rlfed.202208193

改进的风电机组转矩控制策略

许瑾¹, 邓巍¹, 李春廷², 李东林², 史祥², 王英丞¹

(1.西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054; 2.华能新能源股份有限公司, 北京 100036)

[摘要] 风电机组的变桨控制和转矩控制均基于转速信号设计, 二者在额定转速附近发生耦合, 造成转速波动, 传统转矩控制将依据转速频繁进行控制逻辑切换, 致使转速、功率大幅跌落; 且在额定风速以上, 传统转矩控制包含恒转矩和恒功率策略, 二者在转矩、功率、传动链载荷方面各有优劣。为此, 引入与桨距角相关的状态变量对转矩控制在额定转速附近的区域切换逻辑加以限制, 并将转矩-转速控制曲线中的功率满发曲线段扩充到发电机额定转速以下的区域, 以消除因转矩控制的区域频繁切换引起的转矩和功率跌落; 然后, 对转矩-转速控制曲线中的功率满发曲线段进行权值规划, 兼顾风电机组额定转速附近的功率、转矩波动性能, 并对连接最佳叶尖速比曲线段和功率满发曲线段间的过渡曲线进行动态优化。在典型湍流工况下对所提出的方法进行仿真验证, 结果表明: 改进的转矩控制策略提升了额定风速附近的风能捕获效率, 消除了高风速区发电机转矩和功率跌落现象, 合理地权值规划能兼顾转矩和功率性能。

[关键词] 风电机组; 转矩控制; 逻辑切换; 权值规划

[引用本文格式] 许瑾, 邓巍, 李春廷, 等. 改进的风电机组转矩控制策略[J]. 热力发电, 2023, 52(3): 160-167. XU Jin, DENG Wei, LI Chunting, et al. Improved torque control strategy for wind turbines[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(3): 160-167.

Improved torque control strategy for wind turbines

XU Jin¹, DENG Wei¹, LI Chunting², LI Donglin², SHI Xiang², WANG Yingcheng¹

(Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 2. Huaneng New Energy Co., Ltd., Beijing 100036, China)

Abstract: For wind power units, both torque control and pitch control are designed based on generator speed, which leads to the coupling between them near the rated speed, further resulting in rotational speed disturbances. Consequently, conventional torque control will frequently change the control logic according to generator speed, thereby causing the torque and power dips. Besides, two kinds of conventional torque control strategies above the nominal wind, constant-torque and constant-power control, have advantages and disadvantages in torque, power and drive-train loads. In order to eliminate the torque and power dips, full load curve was extended to generator speeds below the rated value. Several state variables, relevant to pitch angle, were selected to reduce the frequency of switching the torque control regions near the rated speed. A new full load curve was designed based on weight programming to comprehensively consider the power and torque performances. The transition curve connecting the optimum Lambda curve and full load curve, was optimized dynamically. Moreover, the proposed control strategy was tested under typical turbulent wind conditions. The simulation results show that, the torque and power dips at above nominal wind are eliminated and the power capture increases at rated wind by using the improved torque control strategy. Furthermore, both torque and power achieves good performance by applying the rational weight.

Key words: wind turbine unit; torque control; logic switch; weight programming

在额定风速以下, 风电机组动态调控发电机电磁转矩实现风能最大功率点跟踪; 在额定风速以上, 发电机电磁转矩常分为恒转矩和恒功率模式,

同时, 叶片变桨控制将被激活^[1-2]。然而, 转矩控制与变桨控制均是基于发电机转速设计的^[3], 在额定转速附近, 变桨距控制环和转矩控制环将发生耦

收稿日期: 2022-08-21 网络首发日期: 2023-02-25

基金项目: 中国华能集团有限公司总部科技项目 (HNKJ18-H33)

Supported by: Science and Technology Project of Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ18-H33)

第一作者简介: 许瑾 (1994), 女, 博士, 工程师, 主要研究方向为风电机组气弹分析、载荷评估、故障诊断等, drxujin_cas@163.com。

合,造成转速波动,传统转矩控制器将频繁进行控制逻辑切换,进而导致功率和转矩跌落^[4]。这不仅会对电网造成冲击,还将为传动链引入额外惯性载荷。此外,传统的恒转矩模式功率波动幅度较大,导致传动链模态阻尼减小,造成传动链扭矩大幅波动,甚至共振^[5-6];传统的恒功率模式使传动链转矩波动幅度过大,同样也为传动链引入惯性载荷^[7]。文献[8]研究了恒转矩和恒功率控制对海上风电机组功率、基础运动以及塔架底部载荷性能的影响。针对额定转速附近的转矩跌落问题,文献[9]在变桨控制环中加入基于发电机转动角加速度的解耦控制环,迫使阵风下桨距角提前启动或延迟关闭,实现转矩和变桨控制的解耦,提升额定风速附近的风能利用效率,但该方法依赖于风速的准确测量,工程上较难实现。文献[10]用桨距角目标值、桨距角测量值和变桨速率目标值等多个状态变量组成判断条件,实现转矩控制的平滑过渡,但并未减少转矩跌落的概率。文献[11]提出了扩大过渡区的控制策略,消除了额定功率点附近转矩和桨距控制频繁切换造成的功率波动,但这是以牺牲低风速区功率捕获为代价的。文献[12]在传统转矩控制的基础上,引入仅在额定转速以上工作的非线性PI转矩控制器,使得额定转速附近形成转矩滞环,进而使转矩的变化率减小,减少转矩和功率跌落幅度。文献[13]将满负荷转矩控制曲线扩充到发电机额定转速以下的区域,消除了功率和转矩跌落现象,但没有给出详细算法。现有研究暂未实现兼顾转矩、功率性能权值规划的转矩控制方法,并且以减少额定转速附近转矩变化率减少转矩跌落,可在一定程度上减少转矩跌落幅度,但牺牲了转矩控制本身的动态响应性能或低风速区域的风能捕获效率,且未减少转矩跌落的概率。

本文针对额定转速附近因转矩控制区域频繁切换导致的功率和转矩跌落问题,通过与桨距角相关的多个状态变量对转矩控制区域切换的逻辑进行限制,减少转矩跌落的概率,并将功率满发曲线段扩充到发电机额定转速以下的区域,对连接最佳叶尖速比曲线和功率满发曲线的过渡曲线进行动态优化;同时,针对额定风速以上恒转矩和恒功率控制的优缺点,对转矩-转速控制曲线中的功率满发曲线段进行权值规划,达到兼顾风电机组额定转速附近的功率、转矩波动性能的目的。

1 传统转矩控制策略

传统转矩控制策略实时检测发电机转速,并对转速进行滤波,依据滤波后的转速将转矩控制分为5个区间分别实现转矩设定,通过变流器完成由转矩设定到实现的过程^[14]。其中,典型离散滤波器的迭代方程为^[1]:

$$y_f(k) = (1 - \alpha)y(k) + \alpha y_f(k-1) \quad (1)$$

$$\alpha = e^{-2\pi\tau f_c} \quad (2)$$

式中: y_f 为滤波后发电机转速; y 为滤波前发电机转速; τ 为仿真步长; f_c 为角频率,常取叶片一阶挥舞固有频率^[1]。传统转矩控制曲线如图1所示。

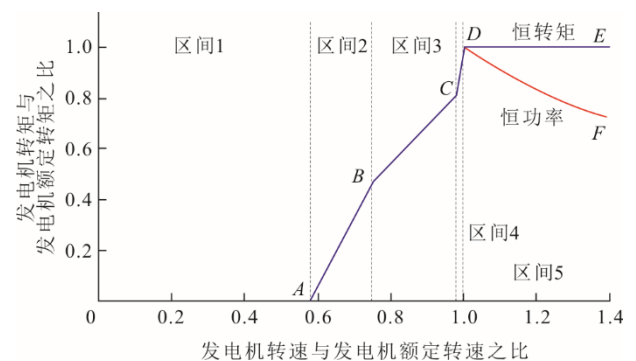


图1 传统转矩控制曲线

Fig.1 Conventional torque control curve

由图1可见,风电机组按滤波后的转速将转矩控制分成5个区间^[1]。

1) 区间1的风速未达到风电机组的启动风速,发电机转速小于切入转速 ω_A , 叶片顺桨或变桨至 40° 附近等待转速提升,风电机组不接入电网,发电机转矩和输出功率均为0。

2) 区间3中风电机组运行于额定风速以下,桨距角始终保持最佳值(通常为 0°),风电机组转矩控制目标为最大风能捕获,依据风电机组稳态最优假设,其转矩设定值 $T_{e, \lambda_{opt}}$ 与转速的平方成正比,即:

$$T_{e, \lambda_{opt}} = \frac{\pi \rho R^5 C_{pmax}}{2 \lambda_{opt}^3 n^3} \omega_g^2 \quad (3)$$

式中: ρ 为来流密度; R 为风轮半径; C_{pmax} 为最大功率系数; ω_g 为滤波后的高速轴实时转速; λ_{opt} 为最佳叶尖速比; n 为齿轮箱变速比。

3) 区间5中风电机组运行于额定风速之上,发电机进行恒转矩控制($D \rightarrow E$)或恒功率控制($D \rightarrow F$),此区间变桨控制被激活。恒功率控制和恒转矩控制

对应的转矩给定值 $T_{e,\text{full}}$ 分别如式(4)和式(5)所示。

$$T_{e,\text{full}} = \frac{P_{e,\text{rat}}}{\omega_g} \quad (4)$$

$$T_{e,\text{full}} = T_{e,\text{rat}} \quad (5)$$

式中: $P_{e,\text{rat}}$ 为发电机额定功率; $T_{e,\text{rat}}$ 为发电机额定转矩。

4) 区间 2 是区间 1 和区间 3 的线性过渡, 其作用是限定风电机组并网的最小转速。

5) 区间 4 是区间 3 和区间 5 的线性过渡, 其斜率与发电机滑差率有关^[9]。常取滑差率为 0.1, 则过渡曲线斜率为^[15]:

$$k_{\text{CD}} = (1 + 0.1) / 0.1 = 11 \quad (6)$$

2 传统转矩控制缺陷

发电机转速高于额定转速时, 风电机组的变桨控制将激活。变桨控制的目标是将发电机转速控制在额定转速附近, 防止风轮超速引发故障。

发电机转速频繁在额定转速附近波动, 则转矩控制将在图 1 所示的区间 3、区间 4 及区间 5 之间频繁切换, 进而造成转矩、功率大幅波动。即使风速始终高于额定风速, 当风速下降过快时, 风电机组所能提供气动转矩短时间内将低于额定水平, 使得风轮减速; 同时, 风轮惯性过大也将导致桨距执行器无法及时消除风扰动引起的转速变化, 造成风轮减速。当转速降低于额定转速时, 转矩控制将进入区间 4 甚至区间 3, 这也将导致转矩和输出功率大幅跌落, 从而给传动链和电网带来较大的冲击。

此外, 发电机转速在额定转速以上, 传统的恒转矩控制方式易使功率波动幅度较大, 恒定的发电机转矩使传动链模态阻尼很小, 进而引起传动链扭矩大幅波动。而恒功率控制方式会使发电机转矩波动幅度过大, 也会给传动链带来较大载荷。

3 改进转矩控制策略

风轮惯性虽降低了风能向电能转换的动态响应性能, 但相应地使风轮具备能量缓存作用, 可通过调节发电机转速以吸收和释放风轮动能, 大大提升电功率的品质, 减少功率、转矩跌落频率。本文针对恒转矩控制和恒功率控制的固有缺陷, 设计一种兼顾转矩、功率的权值规划方法, 构造新转矩控制曲线(图 2), 以新曲线上任意 1 点与恒转矩曲线和恒功率曲线上同转速点之间的距离进行权值规划。设距离分别为 d_T 和 d_P , 定义恒转矩权值 α_T 和

恒功率权值 α_P 为新曲线对转矩和功率的控制程度:

$$\alpha_T = \frac{d_P}{d_T + d_P} \quad (7)$$

$$\alpha_P = 1 - \alpha_T \quad (8)$$

当 $\alpha_T=0$ 时, 控制目标为恒定功率追踪; 当 $\alpha_T=1$ 时, 控制目标为恒定转矩追踪。

在高速区, 发电机转速在额定值 $\pm 6\%$ 范围内变化。由此, 对发电机转矩和功率的上限值取 1.06 倍额定值^[13]。

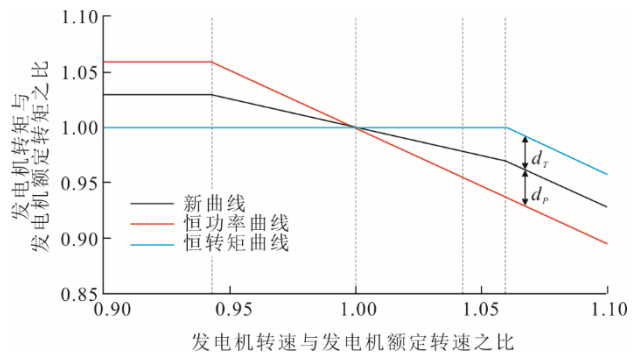


图 2 功率满发曲线
Fig.2 Full load curves

考虑功率上限值后, 恒转矩模式控制方程为:

$$\begin{cases} T_{e,\text{full}} = T_{e,\text{rat}}, & \omega_g \leq 1.06\omega_{\text{rat}} \\ T_{e,\text{full}} = \frac{1.06P_{e,\text{rat}}}{\omega_g}, & \omega_g > 1.06\omega_{\text{rat}} \end{cases} \quad (9)$$

考虑转矩上限值后, 恒功率模式控制方程为:

$$\begin{cases} T_{e,\text{full}} = 1.06T_{e,\text{rat}}, & \omega_g \leq \omega_{\text{Plim}} \\ T_{e,\text{full}} = \frac{P_{e,\text{rat}}}{\omega_g}, & \omega_g > \omega_{\text{Plim}} \end{cases} \quad (10)$$

结合式(9)一式(10), 基于式(7)一式(8)定义的权值, 利用向量知识求解得新曲线方程为:

$$\begin{cases} T_{e,\text{full}} = (1 - \alpha_T) \frac{P_{e,\text{rat}}}{\omega_g} + \alpha_T T_{e,\text{rat}}, & 1.06\omega_{\text{rat}} > \omega_g > \omega_{\text{Plim}} \\ T_{e,\text{full}} = (1.06 - 0.06\alpha_T) T_{e,\text{rat}}, & \omega_g \leq \omega_{\text{Plim}} \\ T_{e,\text{full}} = (1 + 0.06\alpha_T) \frac{P_{e,\text{rat}}}{\omega_g}, & \omega_g > 1.06\omega_{\text{rat}} \end{cases} \quad (11)$$

式中: ω_{rat} 为电机额定转速; ω_{Plim} 为额定功率曲线上 $1.06T_{e,\text{rat}}$ 转矩对应转速, $\omega_{\text{Plim}}=0.9434\omega_{\text{rat}}$ 。

针对额定转速附近转矩控制区域频繁切换引起的转矩跌落问题, 通过引入与桨距角相关的状态变量对转矩控制区域的切换逻辑加以限制, 将功率

满发曲线（满负荷曲线）扩充到发电机额定转速以下的区域，并对连接最佳叶尖速比曲线和功率满发曲线的过渡曲线进行动态优化，结果如图3所示。

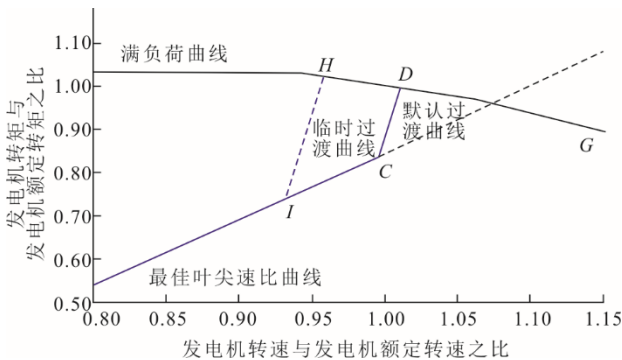


图3 改进的转矩控制曲线
Fig.3 The improved torque control curve

将转矩控制区间3到区间5的过渡曲线CD右移，使曲线CD与功率满发曲线在变桨激活转速点 ω_{pit} 转速处相交，扩大最大风能捕获的区间范围，便于提升发电量。当平均桨距角减小到 1° 却依然无法提高发电机转速时，代表当前风速已降低至额定风速以下，所能提供的气动转矩无法持续支撑风电机组保持额定功率，则转矩控制逻辑从功率满发切换到最大风能捕获。

转矩控制逻辑切换过程中，当前转速的功率满发曲线上的转矩与最佳叶尖速比曲线上的转矩不一致时，无法实现平滑过渡。因此，需构造1条运动的临时过渡曲线HI，逻辑切换过程对转矩变化率作限定。设临时过渡曲线HI的斜率与默认过渡曲线CD一致，并以速度 a 向默认曲线方向平移，直至与默认过渡曲线重合。

区间4的默认过渡曲线CD方程为：

$$T_{e,trans} = k_{CD} \frac{T_{rat}}{\omega_{rat}} (\omega_g - \omega_{pit}) + T_{e,full}(\omega_{pit}) \quad (12)$$

式中： $T_{e,full}(\omega_{pit})$ 为功率满发曲线上变桨激活转速点转速 ω_{pit} 对应的电磁转矩。

临时过渡曲线HI的方程为：

$$T_{e,transback} = k_{CD} \frac{T_{rat}}{\omega_{rat}} (\omega_g - \frac{\pi a}{30} \Delta t - \tilde{\omega}_{rat}) + T_{e,full}(\tilde{\omega}_{rat}) \quad (13)$$

式中： Δt 为当前时间与桨距角 $\theta=1^\circ$ 且变桨速率 $\dot{\theta} < 0$ 所在时刻的时间差； $\tilde{\omega}_{rat}$ 为平均桨距角 $\theta=1^\circ$ 且变桨速率 $\dot{\theta} < 0$ 所在时刻的转速。

则发电机电磁转矩在满负荷区域和最佳叶尖速比区域的切换逻辑为：

$$T_{e,set} = \begin{cases} T_{e,full}, & \theta > 1^\circ \text{ 或 } (\theta < 1^\circ \text{ 且 } \dot{\theta} > 0) \\ T_{e,transback} \text{ 或 } T_{e,\lambda_{opt}}, & \theta < 1^\circ \text{ 且 } \dot{\theta} < 0 \end{cases} \quad (14)$$

从能量传递角度考虑，该方法能够抑制转矩跌落的原理为：当风速短暂降低，风轮减速，电磁转矩会沿着图3中DH方向增大，使得风轮加快减速，释放风轮中存储的动能，并向电网补充电能，防止电功率跌落；当风速恢复或变桨机构已减少桨距角，风轮加速，从风速中吸收更多能量，对风轮中储存的动能进行补充。

4 仿真结果分析

以NREL-5MW风电机组模型为算例，用FAST软件对本文转矩控制算法在平均风速分别为额定风速及1.6倍额定风速的湍流风下进行仿真测试。图4为湍流风时间序列。

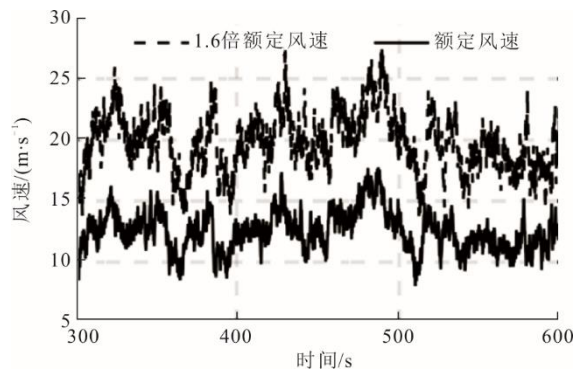
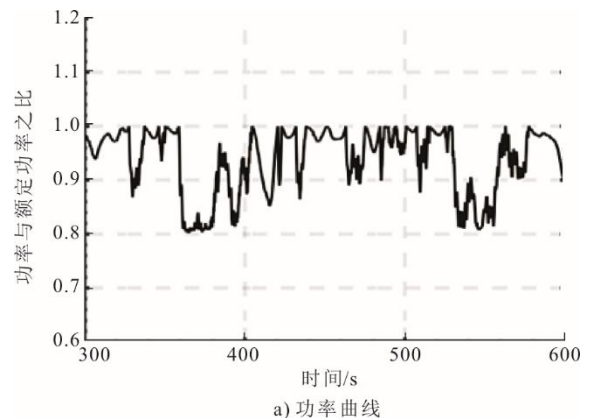


图4 仿真所用湍流风时间序列
Fig.4 Time histories of the turbulence in simulation

4.1 额定风速附近控制效果测试

对比分析传统恒功率、传统恒转矩、改进的转矩控制策略3种情况，额定风速下的仿真结果如图5—图7所示。



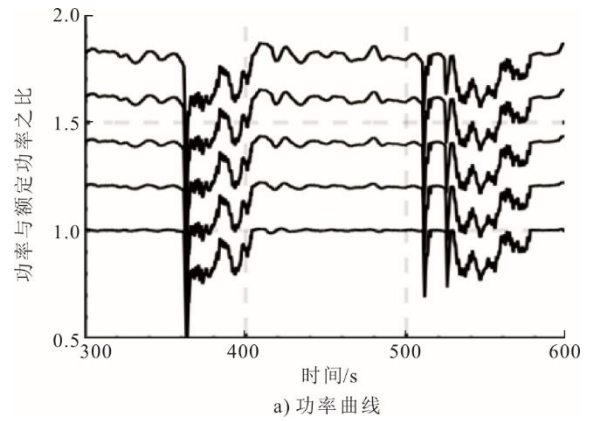
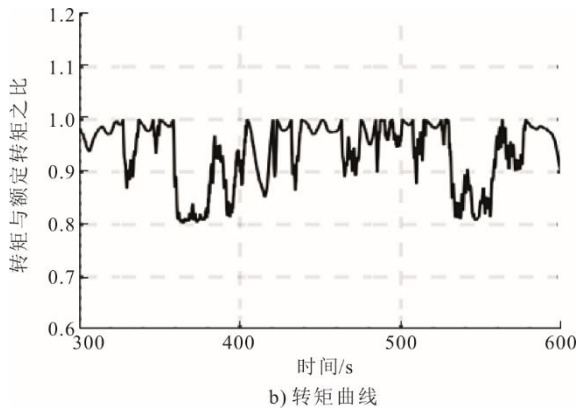


图 5 额定风速传统恒定功率控制策略功率和转矩曲线
Fig.5 The power and torque curves using conventional constant power control strategy at rated wind speed

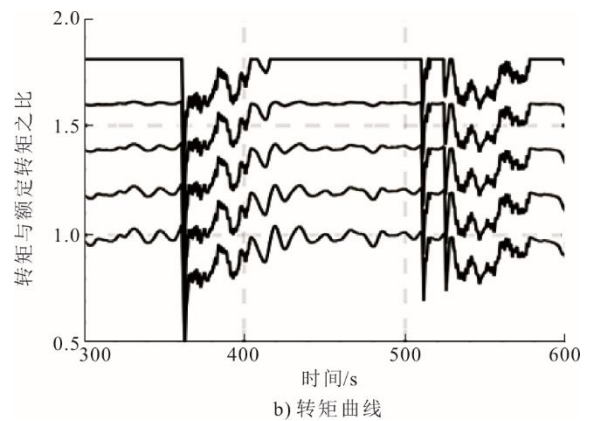
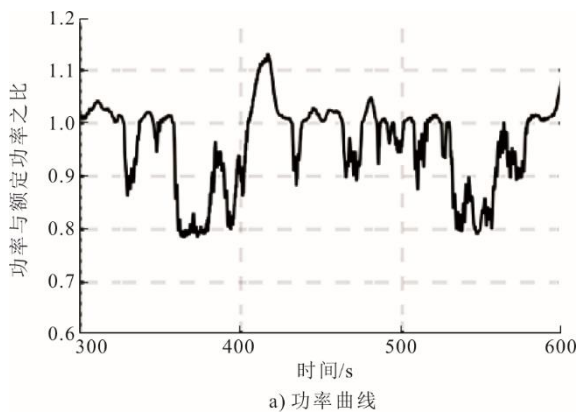


图 7 额定风速改进转矩控制策略功率和转矩曲线
Fig.7 The power and torque curves using improved torque control strategy at rated wind speed

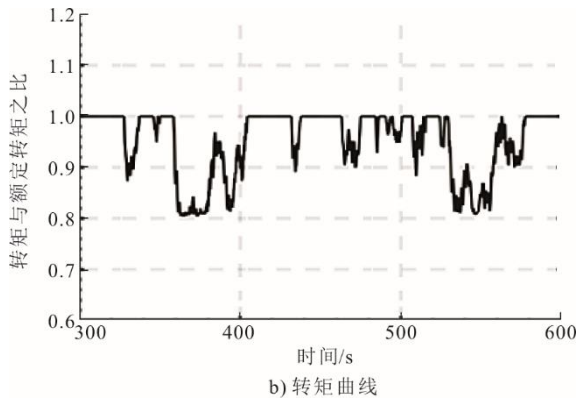


图 6 额定风速传统恒定转矩控制策略功率和转矩曲线
Fig.6 The power and torque curves using conventional constant torque control strategy at rated wind speed

由图 5 和图 6 可知：采用传统恒转矩控制模式时转矩响应在某些时间段表现出不变的额定转矩，这可能导致传动链过小的扭转阻尼，从而加剧传动轴振动^[6]；采用传统恒功率控制模式却并表现出持续恒定的额定功率，这是因为恒功率模式的实现是基于滤波后的转速信号，而恒转矩模式是直接设定额定转矩值。此外，传统恒功率控制方法，其功率波动更小，转矩波动更大。

由图 7 可知：由于对额定转速附近的转矩区间切换逻辑加以限制，其转矩和功率在风速较高的时间段（400~500 s）的跌落情况显著减缓；功率波动随 α_T 的增大而增大，转矩波动随 α_T 的增大而减小。改进的转矩控制策略消除了过高的功率峰值，缓解了传统恒转矩模式中输出功率、风力转速过载的问题。可改变 α_T 的值调节转矩波动量，避免转矩恒定而引起传动链扭矩大幅波动，甚至共振。

取额定风速下 10 min 的仿真数据进行统计分析，传统恒转矩、传统恒功率和功率数据结果的均值和方差见表 1。

表 1 额定风速下转矩和功率均值方差分析
Tab.1 Average values and standard deviations of torque and power at rated wind speed

项目	功率均值	功率方差	转矩均值	转矩方差
恒功率	0.932 2	0.090 8	0.922 8	0.075 3
恒转矩	0.954 9	0.100 4	0.944 4	0.075 7
$\alpha_T=0$	0.938 5	0.096 4	0.929 6	0.089 6
$\alpha_T=0.25$	0.941 5	0.097 0	0.932 2	0.088 1
$\alpha_T=0.50$	0.944 5	0.098 0	0.934 9	0.087 5
$\alpha_T=0.75$	0.947 4	0.099 4	0.937 7	0.087 5
$\alpha_T=1.00$	0.950 4	0.101 2	0.940 4	0.088 3

由表1可见,相对于传统恒功率控制,采用改进的转矩控制策略发电机转矩和功率波动幅度有所增大,这是由于频繁改变转矩导致发电机转速变化所致,低风速下以牺牲波动幅度捕获更多功率是值得的。

4.2 1.6 倍额定风速附近控制效果测试

对比分析传统恒功率、传统恒转矩、改进的转矩控制策略3种情况,1.6倍额定风速下的仿真结果如图8—图10所示。

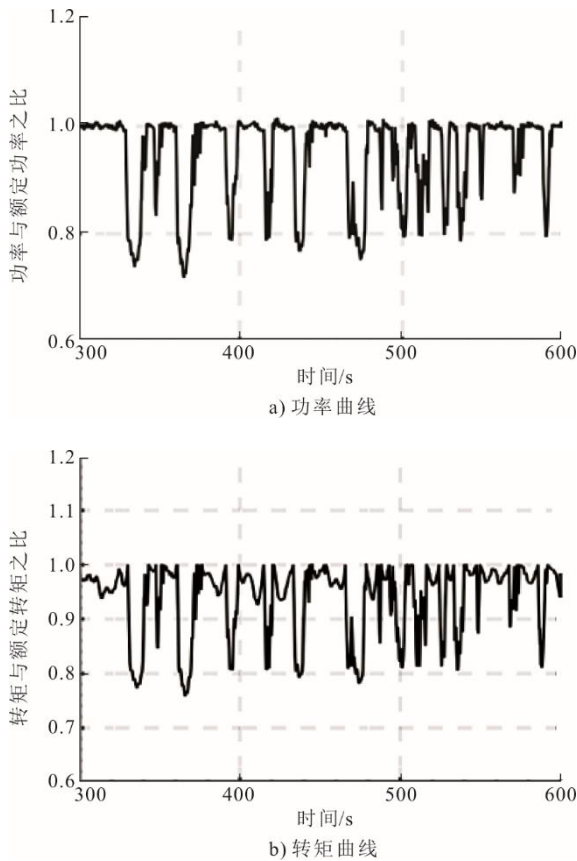


图8 1.6倍额定风速传统恒定功率控制策略功率和转矩曲线
Fig.8 Power and torque curves using conventional constant power control strategy at 1.6 times the rated wind speed

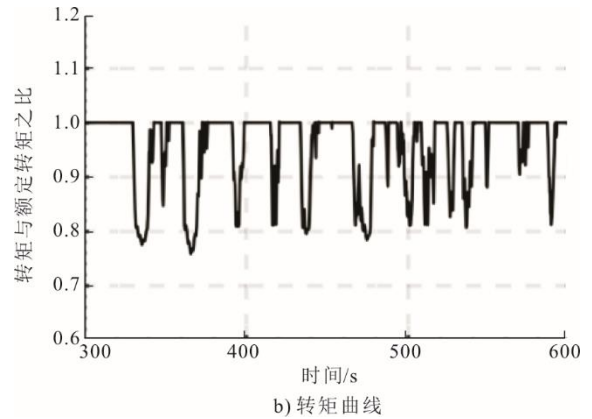
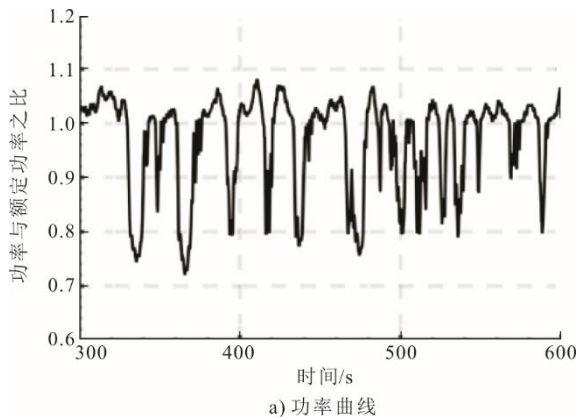


图9 1.6倍额定风速传统恒定转矩控制策略功率和转矩曲线
Fig.9 Power and torque curves using conventional constant torque control strategy at 1.6 times the rated wind speed

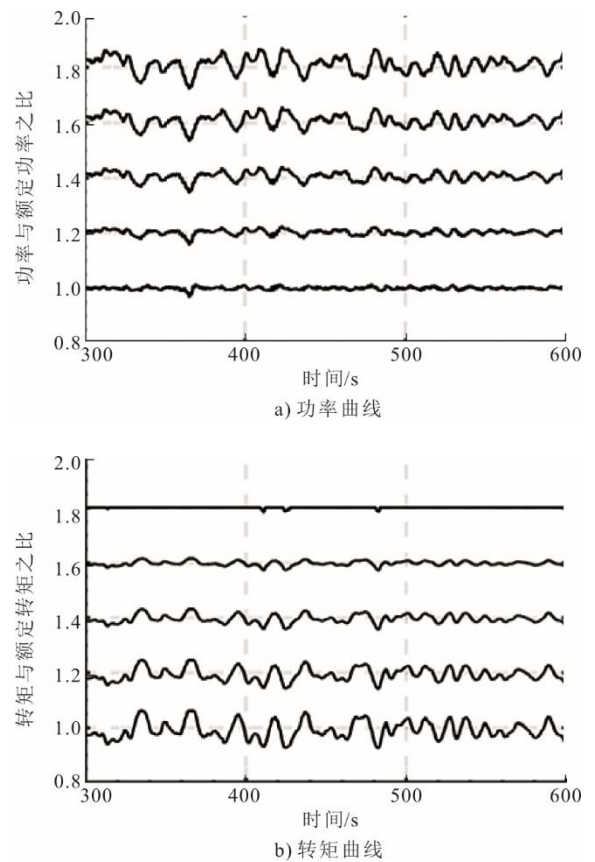


图10 1.6倍额定风速改进转矩控制策略时功率和转矩曲线
Fig.10 Power and torque curves using improved torque control strategy at 1.6 times the rated wind speed

由图8和图9可知,应用传统恒转矩和传统恒功率控制策略,即使风速始终高于风电机组额定风速(11.4 m/s),由于转速波动导致的转矩控制区域逻辑频繁切换,风电机组的转矩、功率时域响应均表现出显著跌落问题,进而导致功率损失。

由图10可知,采用改进的转矩控制策略能够消除因转矩控制区域频繁切换所引起的转矩和功

率跌落,这是将功率满发曲线扩充到额定风速以下区域并对转矩区域切换逻辑进行限制的结果。

取在额定风速下 10 min 的仿真数据进行统计分析,传统恒转矩、传统恒功率和功率数据结果的均值和方差见表 2。由表 2 可见:相对于传统转矩控制方式,采用改进的转矩控制策略发电机转矩和功率标准差减少了 57%~98%;同时,转矩和功率的均值均稳定在额定值附近,这是将功率满发曲线扩充和对转矩和功率最大值加以限制共同作用的结果。采用改进的转矩控制策略后,发电机转速平均值下降了 0.7%,这对风电机组的降噪有一定意义。使用传统转矩控制策略电机转矩跌落时,气动转矩并没有跌落,此时风轮获得角加速度,导致发电机转速超过额定转速。

应用改进的转矩控制策略,风电机组的功率波动随 α_T 增大而增大,转矩波动随之减小。当 α_T 为 1.00 时,较多区域出现恒定的转矩,且功率波动较大;当 α_T 为 0 时,转矩波动较大,功率输出较为稳定。相比于 $\alpha_T=1.00$ 、 $\alpha_T=0.75$ 时,机组不仅可避免低扭转阻尼比导致的大幅传动链扭转振动,而且功率波动还能降低 22%。 $\alpha_T=0.50$ 时,发电机的转矩波动幅度相对于 $\alpha_T=0$ 的情形减少了 51%,功率波动幅度相对于 $\alpha_T=1.00$ 的情形减少了 45%。

表 2 1.6 倍额定风速下转矩和功率均值、方差分析
Tab.2 Average values and standard deviations of torque and power at 1.6 times the rated wind speed

项目	转矩 均值	转矩 方差	功率 均值	功率 方差	速度 均值
恒功率	0.935 4	0.083 8	0.945 5	0.067 9	1.006 5
恒转矩	0.953 1	0.073 5	0.963 6	0.091 9	1.006 5
$\alpha_T=0$	0.991 4	0.031 7	0.999 8	0.005 5	0.999 3
$\alpha_T=0.25$	0.993 4	0.023 5	1.001 9	0.009 8	0.999 3
$\alpha_T=0.50$	0.995 4	0.015 6	1.004 3	0.016 2	0.999 4
$\alpha_T=0.75$	0.997 5	0.008 1	1.006 6	0.022 9	0.999 4
$\alpha_T=1.00$	0.999 6	0.001 9	1.009 0	0.029 4	0.999 4

5 结 论

本文针对额定转速附近由于转矩控制区域频繁切换导致的转矩、功率跌落问题,引入与桨距角相关的状态变量对转矩控制切换逻辑加以限制,将功率满发曲线扩充到发电机额定转速以下的区域,并对过渡曲线进行动态优化。此外,针对传统恒转矩和恒功率控制的优缺点,对转矩-转速控制曲线中的功率满发曲线段进行权值规划。

在额定风速附近,改进的转矩控制策略消除了过高的功率峰值,缓解了传统恒转矩模式中输出功率、风力转速过载的问题。相对于传统恒功率控制,改进的转矩控制策略提高了平均风能捕获效率,但转矩和功率波动幅度有所增大,这是频繁改变转矩致发电机转速变化所致,低风速下以牺牲波动幅度捕获更多功率是值得的。

在额定风速以上,采用改进的转矩控制策略消除因转矩控制区域频繁切换引起的转矩和功率跌落,这是将功率满发曲线扩充到额定风速以下区域并对转矩区域切换逻辑进行限制的结果。相对于传统转矩控制方式,采用改进的转矩控制策略使发电机转矩和功率标准差减少了 57%~98%。 $\alpha_T=0.50$ 时的转矩波动幅度相对于 $\alpha_T=0$ 的情形减少了 51%,功率波动幅度相对于 $\alpha_T=1.00$ 的情形减少了 45%。

[参 考 文 献]

- [1] JONKMAN J, BUTTERFIELD S, MUSIAL W, et al. Definition of a 5 MW reference wind turbine for offshore system development[R]. Golden, Colorado, USA: National Renewable Energy Laboratory Technical Report, 2008: 20-26.
- [2] SAVENIJE F, PEERINGA J. Control development for floating wind[C]//IOP Institute of Physics. Journal of Physics: Conference Series: 524. England: IOP Publishing Ltd., 2014: 1-11.
- [3] JONKMAN J. Definition of the floating system for phase IV of OC3[R]. Golden, CO (United States): National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2010: 22-23.
- [4] 廖勇,何金波,姚骏,等.基于变桨距和转矩动态控制的直驱永磁同步风力发电机功率平滑控制[J].中国电机工程学报,2009,29(18):71-77.
LIAO Yong, HE Jinbo, YAO Jun, et al. Power smoothing control strategy of direct-driven permanent magnet synchronous generator for wind turbine with pitch angle control and torque dynamic control[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(18): 71-77.
- [5] JONKMAN J. Influence of control on the pitch damping of a floating wind turbine[C]//American Institute of Aeronautics and Astronautics. The 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit: 1306. USA: National Renewable Energy Laboratory, 2008: 1-15.
- [6] 金鑫,钟翔,谢双义,等.大型风力发电机转矩 LQR 控制及载荷优化[J].电力系统保护与控制,2013,41(6):93-98.
JIN Xin, ZHONG Xiang, XIE Shuangyi, et al. Load reduction for large-scale wind turbine based on LQR torque control[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 93-98.
- [7] LACKNER M A. Controlling platform motions and reducing blade loads for floating wind turbines[J]. Wind Engineering, 2009, 33(6): 541-553.
- [8] 谢双义,金鑫,陈佳.恒转矩与恒功率控制对漂浮式风力机性能的影响[J].西华大学学报(自然科学版),2014,33(6):88-92.

- XIE Shuangyi, JIN Xin, CHEN Jia. Influence of constant torque and constant power control strategies on floating wind turbines[J]. Journal of Xihua University (Natural Science), 2014, 33(6): 88-92.
- [9] 林志明, 潘东浩, 王贵子, 等. 双馈式变速变桨风力发电机的转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(32): 118-124.
LIN Zhiming, PAN Donghao, WANG Guizi, et al. Torque control of doubly-fed variable speed variable pitch wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(32): 118-124.
- [10] 任海军, 何玉林, 杜静, 等. 变速变桨距风力机功率控制策略[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 59-63.
REN Haijun, HE Yulin, DU Jing, et al. Power control strategies of variable speed and variable pitch wind turbines[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 59-63.
- [11] 刘军, 何玉林, 李俊, 等. 变速变桨距风力发电机组控制策略改进与仿真[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 82-86.
LIU Jun, HE Yulin, LI Jun, et al. Design and simulation of an improved control strategy for variable-speed pitch controlled wind turbine driven generator system[J]. Automation of Electric Power System, 2011, 35(5): 82-86.
- [12] 蒋说东, 刘军. 额定风速附近变速变桨风力发电机组功率优化控制[J]. 太阳能学报, 2015, 36(5): 1097-1104.
JIANG Shuodong, LIU Jun. Power optimal control of variable speed variable pitch wind turbine near rated wind[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2015, 36(5): 1097-1104.
- [13] SCHAAK P, VAN ENGELEN T G. Torque control for variable speed wind turbines[C]//Energy Research Centre of the Netherlands. Proceedings of the European Wind Energy Conference: ECN-RX--04-125. Netherlands: ECN Wind Energy, 2004: 1-7.
- [14] YIN M, LI W, CHUNG C Y, et al. Optimal torque control based on effective tracking range for maximum power point tracking of wind turbines under varying wind conditions[J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(4): 501-510.
- [15] KOOIJMAN H J T, LINDERNBURG C, WINKELAAR D, et al. DOWEC 6 MW pre-design: aero-elastic modeling of DOWEC 6 MW pre-design in Phatas[R]. The Netherlands: Energy Research Center of the Netherlands, 2003: 28-29.

(责任编辑 杨嘉蕾)

广告目次

上海凯泉泵业(集团)有限公司.....	封三
南京苏夏工程设计有限公司.....	后彩插 1
北京柏兰达环境工程有限公司.....	后彩插 2
南京常荣声学股份有限公司.....	后彩插 3
西安热工研究院有限公司.....	后彩插 4—8
《热力发电》订阅宣传页.....	后彩插 9
上海冠龙阀门机械有限公司.....	后彩插 10
浙江顺豪科技有限公司.....	后彩插 11
隔而固(青岛)振动控制有限公司.....	后彩插 12