

# 考虑输入饱和的直驱式永磁同步风力发电系统最大功率跟踪控制

王天钰<sup>1</sup>, 魏 星<sup>2</sup>, 徐家俊<sup>1</sup>, 王晓茹<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610016)

**摘要:** 针对具有大转动惯量、模型参数不确定性的直驱永磁同步风力发电机, 为解决风机变流器输入饱和约束引发的控制稳定性问题, 利用 Lyapunov 稳定性理论, 提出一种同时考虑输入饱和与损耗转矩参数不确定性的自适应转速控制策略, 使风机在低风速阶段快速跟踪最大功率点, 提高对风能的捕获效率。仿真验证所提出控制器的有效性, 结果表明, 在系统出现输入饱和情况时, 考虑饱和输入的自适应控制方法可以保证系统稳定, 具有响应速度快、超调量小的优点, 保证了转速跟踪的效果, 实现最大风能跟踪的控制。

**关键词:** 直驱式永磁同步发电机; 最大功率点跟踪; 自适应控制; 输入饱和; 风电; 稳定性

**中图分类号:** TM 614

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-6047.2015.07.018

## 0 引言

与恒速恒频风力发电机相比, 变速恒频风力发电机在并网操作与稳定运行方面有诸多优点, 因此受到了更广泛的关注, 并成为近年来大力发展的首选机型。它包括双馈式异步风力发电机和直驱式永磁同步风力发电机(PMSG)2 种类型。与双馈式风机相比, 直驱式永磁风机不仅省去了故障率较高的齿轮箱结构, 而且通过全功率变流器连接电网, 对电网故障具有更强的穿越能力。随着永磁体价格的下降, 直驱式风机近年来所占的市场份额越来越大, 具有更广阔的发展前景<sup>[1-2]</sup>。变速风电机组在不同的风速下有着不一样的控制策略: 在风速高于额定风速时, 启动变桨距控制保证输出功率不超过额定功率; 在风速低于额定风速时, 采用最大功率点跟踪的运行方式。增强对最大功率点的跟踪能力, 可实现对风能的最大捕获, 提高对风能的利用效率, 因此研究风力发电系统的最大功率跟踪控制具有重要的意义。

最大功率跟踪运行的实质是风电机组的转速控制过程, 通过控制发电机的电磁转矩来实现。对于直驱式永磁同步风电发电机, 电磁转矩与  $dq$  解耦控制后的有功电流成线性关系, 即可通过控制发电机变流器电流实现对转速的控制<sup>[3-4]</sup>。传统最大功率跟踪控制方法主要有叶尖速比法、爬山法<sup>[5]</sup>和最佳特性曲线法<sup>[6-7]</sup>。由于风速难以被精确测量, 导致叶尖速比法实用性不高; 爬山法适用于转动惯量小且参数不明确的小型风机系统<sup>[8]</sup>, 虽然不需知道风机的特性曲线, 但当风速变化较快时存在跟踪失效的现象; 最佳特性曲线法是指控制风机输出功率或转矩与风机转速满足最佳功率曲线或最佳转矩曲线<sup>[9]</sup>, 但是由于系统损耗的存在, 导致传统的功率反馈法具有缺

陷。文献[10]建立考虑损耗转矩的风机模型, 通过给出最佳电流实现最大功率跟踪, 但需要根据实验测得损耗系数, 对于不同容量的发电机或当风机运行在不同风速下时, 其损耗参数是变化的, 因此实验所得的损耗系数不具有通用性, 导致该方法的实用性不高。

风力发电系统具有强非线性, 不仅风机具有较大的转动惯量, 而且在运行过程中伴随着多种扰动, 系统模型参数具有不确定性, 传统的方法难以实现对最佳转速的快速跟踪。针对此问题, 滑模变结构控制<sup>[11-13]</sup>、自适应控制<sup>[14-15]</sup>、自抗扰控制<sup>[16-17]</sup>等方法<sup>[18-19]</sup>得以引入, 在线估计不确定参数扰动, 使得风电机组在低风速阶段能快速跟踪最大功率点, 提高了对风能的捕获效率。

但是上述传统方法与非线性控制器设计时并没有考虑到风机的输入饱和问题。当风速快速变化时, 最优转速也快速变化。由于系统惯性的存在使风机实际转速不会瞬间变化, 为了达到快速跟踪的效果, 系统将产生较大的控制输入量, 导致出现输入饱和的情况<sup>[20]</sup>, 输入饱和和受限与线性控制器的 windup 现象相似, 如果不加以控制, 饱和约束将会降低控制系统的稳定性<sup>[21]</sup>。因此, 对于风力发电系统, 设计一种考虑输入饱和与模型参数不确定性的风机转速控制器, 提高风机对最大功率点的跟踪能力, 并保证系统在特殊运行情况下的稳定性, 具有重要意义。

本文针对直驱式永磁同步风力发电机组, 提出了一种同时考虑输入饱和与参数不确定性的自适应转速控制策略, 使风机能在低风速阶段快速跟踪最大功率点, 提高对风能的捕获效率。首先对直驱式永磁风力发电机运行特性与风机最大功率跟踪原理进行分析, 然后分别就不考虑输入饱和与考虑输入饱和 2 种情况设计基于 Lyapunov 稳定性理论的自适应转速控制器, 并对控制器性能进行分析, 并通过仿真验

证控制器的有效性。

## 1 风力发电系统模型

### 1.1 风力机模型

直驱式永磁同步风力发电机的电路拓扑结构如图 1 所示。风力机将风能转化为机械能,通过传动轴将能量传递到采用多级永磁结构的同步发电机,发电机将能量转化为电能,通过背靠背全功率变流器与电网相连接。

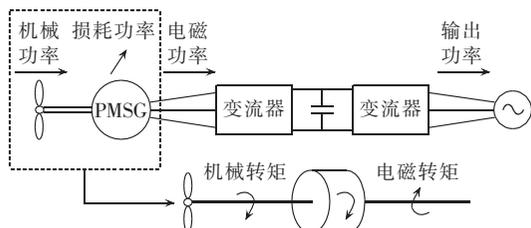


图 1 直驱式永磁同步风力发电系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of D-PMSG wind power generation system

图 1 所示为将风力机与发电机等效为一质量块(如图中虚线框所示)的刚性轴模型。根据风机叶片的空气动力学理论可知,风力机捕获转化的机械功率  $P_m$  为<sup>[22]</sup>:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (1)$$

其中,  $\rho$  为空气密度;  $R$  为风轮叶片半径;  $v$  为风速;  $C_p(\lambda, \beta)$  为风能利用系数, 表征风力机运行功效, 是桨距角  $\beta$  与叶尖速比  $\lambda$  的非线性函数。

根据贝兹理论可知, 风能利用系数的最大值为 0.593<sup>[22]</sup>, 其值越大, 表明风力机捕获转化风能的能力越强, 风力机的效率越高。通常情况下, 难以获取  $C_p(\lambda, \beta)$  的准确值, 可用下式表述:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-12.5/\lambda_i} \quad (2)$$

$$\lambda_i = 1 / \left( \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) \quad (3)$$

其中,  $\beta$  为桨距角;  $\lambda$  为叶尖速比, 即为桨叶尖部速度与风速之比。

$$\lambda = \frac{R\omega}{v} \quad (4)$$

其中,  $\omega$  为风力机的转速。

变桨距风力机的特性曲线如图 2(a) 所示, 当桨距角固定后, 存在一个最大的风能利用系数  $C_{pmax}$  以及相对应的最佳叶尖速比  $\lambda_{opt}$ 。随着桨距角的增大, 对应的风能利用系数逐渐减小。当风机运行在最佳叶尖速比状态时, 风力机转速和风速构成线性关系:

$$v = \frac{R\omega}{\lambda_{opt}} \quad (5)$$

此时, 风力机输出的机械功率可表示为:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_{pmax} \left( \frac{R\omega}{\lambda_{opt}} \right)^3 = K_{opt} \omega^3 \quad (6)$$

图 2(b) 表示在不同风速下风力机输出的机械功率与转速的关系, 将不同风速下最大功率点相连接, 即获得风机的最大功率输出曲线(如虚线所示)。当风速变化时, 通过调整转速使风机能稳定地运行在最佳叶尖速比下, 可获得最大的输出功率, 此过程即为风力发电系统的最大功率跟踪过程。

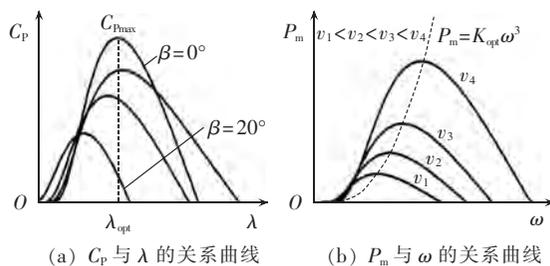


图 2 风力机特性曲线

Fig.2 Characteristic curves of wind turbine

由式(6)可得风力机轴上的机械转矩  $T_m$ :

$$T_m = \frac{P_m}{\omega} = \frac{1}{2\lambda} \rho \pi R^3 C_p(\lambda, \beta) v^2 \quad (7)$$

机械功率通过传动轴传递给发电机。由于在功率传递的过程中, 传动轴上势必会产生扭转损耗, 发电机内部也会产生铁耗、铜耗以及杂散损耗。损耗  $T_{loss}$  随着风速的变化而变化, 不可被忽略<sup>[10]</sup>, 但又难以获得其准确值, 可用下式表示:

$$T_{loss} = c + b\omega \quad (8)$$

风力机刚性传动链特性数学模型为:

$$J\dot{\omega} = T_m - T_e - T_{loss} \quad (9)$$

其中,  $J$  为等效转动惯量;  $T_e$  为发电机电磁转矩。

### 1.2 永磁同步电机模型

最大功率跟踪运行的实质是风电机组的转速控制过程, 通过控制发电机的电磁转矩来实现。对于直驱式永磁同步风力发电机, 基于转子磁场定向矢量控制技术, 在  $dq$  坐标系下, 根据电动机惯例, 可得电机的定子电压方程<sup>[23]</sup>:

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} + L_d \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_e L_q i_{qs} \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + L_q \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_e (L_d i_{ds} + \psi_f) \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $u_{ds}$ 、 $u_{qs}$  分别为定子电压  $d$ 、 $q$  轴分量;  $i_{ds}$ 、 $i_{qs}$  分别为定子电流  $d$ 、 $q$  轴分量;  $L_d$ 、 $L_q$  分别为  $d$ 、 $q$  轴电感;  $R_s$  为定子电阻;  $\omega_e$  为发电机转子转速;  $\psi_f$  为永磁体磁链。

电磁转矩如下:

$$T_e = \frac{3}{2} p_n [\psi_f i_{qs} + (L_d - L_q) i_{qs} i_{ds}] \quad (11)$$

其中,  $p_n$  为发电机转子的极对数。

对于隐极式发电机, 或者当控制定子电流的  $d$  轴

分量始终为 0 时,电磁转矩可简化为:

$$T_e = \frac{3}{2} p_n \psi_f i_{qs} = K_t i_{qs} \quad (12)$$

## 2 最大功率跟踪自适应控制器设计

### 2.1 考虑参数不确定性的转速控制器

由 1.1 节知,最大功率跟踪的实质是对转速的控制,考虑风机模型参数不确定性,设计如下自适应转速控制器,提高在低风速阶段风机最大功率跟踪能力。

由式(8)和式(9)可得:

$$\begin{cases} J\dot{\omega} = T_m - K_t i_{qs} - b\omega - c \\ J\dot{\theta} = T_m - K_t i_{qs} - b\dot{\theta} - c \end{cases} \quad (13)$$

其中,  $\theta$  为转子角度。

定义转子角度误差  $e$  与转子转速误差  $\dot{e}$  如下:

$$\begin{cases} e = \theta - \theta_d \\ \dot{e} = \omega - \omega_d \end{cases} \quad (14)$$

其中,  $\theta_d$  和  $\omega_d$  分别为转子角度和转速的最优参考值。

为使风机时刻运行于最佳叶尖速比下,需要保证式中的转速误差项  $\dot{e}$  趋向于 0。为了使系统响应速度更快,同时引入转速积分项的误差,即角度误差  $e$ 。定义复合误差  $q = \dot{e} + \alpha e$ , 其中  $\alpha$  为大于 0 的常数,表示误差权重,可根据试验获取其值变化对系统响应的规律,得到使系统控制性能较优的值。由复合误差  $q$  可得:

$$\dot{q} = \ddot{e} + \alpha \dot{e} = \ddot{\theta} - (\ddot{\theta}_d - \alpha \dot{e}) \quad (15)$$

将式(13)代入式(15)中,可得系统跟踪误差:

$$J\dot{q} = -K_t i_{qs} - [J(\ddot{\theta}_d - \alpha \dot{e}) + c + b\dot{\theta} - T_m] = u - H\varphi \quad (16)$$

其中,  $u = -K_t i_{qs}$  为中间输入变量; 矩阵  $H \in \mathbf{R}^{1 \times 4}$ 、 $\varphi \in \mathbf{R}^4$  为待估计的参数矩阵,代表具有不确定性的模型参数。

$$\begin{cases} H = [\ddot{\theta}_d - \alpha \dot{e}, 1, \dot{\theta}, -1] \\ \varphi = [J, c, b, T_m]^T \end{cases} \quad (17)$$

当不考虑系统输入饱和,只考虑模型参数不确定性时,可按式(17)设计控制器:

$$u = H\hat{\varphi} - k_1 q \quad (18)$$

即变流器最佳控制电流值为:

$$i_{qs}^* = -\frac{1}{K_t} (-k_1 q + H\hat{\varphi}) \quad (19)$$

其中,  $k_1 > 0$ , 为控制器参数,该参数的大小对转速跟踪响应的快慢有较大影响;  $\hat{\varphi} \in \mathbf{R}^4$ , 为不确定性参数矩阵  $\varphi$  的估计值。设计自适应律如下:

$$\dot{\hat{\varphi}} = -\Gamma_1 H^T q \quad (20)$$

其中,参数对角阵  $\Gamma_1 = \text{diag}(\gamma_{11}, \gamma_{12}, \gamma_{13}, \gamma_{14})$ ,  $\gamma_{11}, \gamma_{12}, \gamma_{13}, \gamma_{14}$  为自适应控制器学习率,值均大于 0。自适应律保证了风力发电系统的参数矩阵  $\varphi$  可以被在线估计,即使参数具有不确定性,控制器仍可自适应调整控制输入,实现发电机转速的精确跟踪。

利用 Lyapunov 稳定性理论对控制器的稳定性进行分析。定义系统估计误差  $\tilde{\varphi} = \varphi - \hat{\varphi}$ , 式(20)所设计的自适应律可以改写为:

$$\dot{\tilde{\varphi}} = \Gamma_1 H^T q \quad (21)$$

构造如下 Lyapunov 能量函数:

$$V = \frac{1}{2} J q^2 + \frac{1}{2} \tilde{\varphi}^T \Gamma_1^{-1} \tilde{\varphi} \quad (22)$$

对能量函数求导并将式(21)代入可得:

$$\dot{V} = J q \dot{q} + \tilde{\varphi}^T \Gamma_1^{-1} \dot{\tilde{\varphi}} = -k_1 q^2 \quad (23)$$

根据 Lyapunov 稳定性原理,如果能量函数  $V$  满足  $V > 0$  且  $\dot{V} < 0$ , 则系统是全局渐近稳定的。

从式(23)中可知,  $\dot{V}$  是半负定的,因此  $V$  函数具有上界  $V(0)$ , 结合式(22)可以得知误差  $q$  与矩阵  $\tilde{\varphi}$  均有上界,控制输入量  $u$  是有界的。根据式(14),由于复合误差  $q$  的有界性可知,误差  $e$  和  $\dot{e}$ 、 $\theta$  和  $\dot{\theta}$  均有上界,从而使得  $\dot{q}$  有界。对式(23)求导可以得到  $\ddot{V} = -2k_2 q \dot{q}$ , 因此  $\dot{V}$  也是有界的,从而得出结论,  $\dot{V}$  是一致连续的。引入巴尔巴拉引理(Barbalat's Lemma)如下: 如果函数  $f(t)$  是一致连续的,并且  $\lim_{t \rightarrow \infty} \int_0^t f(\tau) d\tau$  存在且有界,则有  $\lim_{t \rightarrow \infty} f(t) = 0$ 。

根据上文的分析可知,  $\dot{V}(t)$  是半负定且一致连续的,并且  $V(t)$  存在且有界。根据巴尔巴拉引理可知:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{V}(t) = 0 \quad (24)$$

由式(23)中  $\dot{V}$  与复合误差  $q$  的关系,可得:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} q(t) = 0 \quad (25)$$

求解方程  $q = \dot{e} + \alpha e$ , 得误差  $e$  的解为:

$$e(t) = \exp\left(-\alpha t + \int_0^t \frac{q(\tau)}{e(\tau)} d\tau + \ln e(0)\right) \quad (26)$$

当  $t \rightarrow \infty$  时,  $q(t)$  趋向于 0,  $e(t)$  和  $\dot{e}(t)$  均趋向于 0, 即保证了转子角度误差和转子转速误差均趋向于 0。因此,针对模型参数不确定的风力发电系统,若对变流器  $q$  轴电流采用式(19)所示的控制律,对系统待估计参数采用式(20)所示的自适应律,闭环系统是稳定的。并且通过调整控制器参数,可使转子转速的跟踪误差充分小,即风速变化时,可完成对风能的快速追踪,较好地实现最大功率点跟踪运行。

然而,若风速快速变化,最优转速  $\omega_d$  也将快速变化,导致复合误差  $q$  瞬间增大,为了达到快速跟踪的效果,系统将产生较大的控制输入量,导致出现输入饱和的情况。

## 2.2 考虑输入饱和与参数不确定性的转速控制器

### 2.2.1 转速控制器设计

当出现输入饱和限制时,若继续使用 2.1 节所设计的控制器,将使跟踪误差不可控制地增大,从而导致系统的稳定性遭到破坏。基于此,借用控制器内

补偿思想<sup>[24]</sup>,改进为考虑输入饱和和限制的控制,使系统保持稳定。

考虑电磁转矩  $T_e$  的限制,则变频器  $q$  轴电流的输入限制如下:

$$i_{qs} = \text{sat}(i_{qs\chi}) = \begin{cases} i_{qsM} & i_{qs\chi} > i_{qsM} \\ i_{qs\chi} & i_{qsM} < i_{qs\chi} < i_{qsM} \\ i_{qsM} & i_{qs\chi} < i_{qsM} \end{cases} \quad (27)$$

其中,  $i_{qsM}$ 、 $i_{qsM}$  为最佳输入量的限值;  $i_{qs\chi}$  为要设计的输入量。

根据式(27)可得中间输入变量  $u$  的限值,即:

$$u = \text{sat}(u_\chi) = \begin{cases} u_M & u_\chi > u_M \\ u_\chi & u_m < u_\chi < u_M \\ u_m & u_\chi < u_m \end{cases} \quad (28)$$

按下式设计内补偿辅助函数:

$$\dot{\chi} = -\frac{\eta}{\hat{J}}\chi + \frac{u - u_\chi}{\hat{J}} \quad (29)$$

其中,  $\eta$  为常量参数。重新定义跟踪误差  $\bar{q} = q - \chi$ , 得到系统跟踪误差:

$$J\dot{\bar{q}} = J\dot{q} - J\dot{\chi} = u - H\varphi - J\dot{\chi} \quad (30)$$

考虑到控制器输入饱和和特性,式(18)与式(20)所示的控制律及自适应律修正为:

$$u_\chi = H\hat{\varphi} - k_2\bar{q} - \eta\chi + \zeta \quad (31)$$

$$\dot{\hat{\varphi}} = -\Gamma_2 H^T \bar{q} \quad (32)$$

其中,参数对角阵  $\Gamma_2 = \text{diag}(\gamma_{21}, \gamma_{22}, \gamma_{23}, \gamma_{24})$ ,  $\gamma_{21}$ 、 $\gamma_{22}$ 、 $\gamma_{23}$ 、 $\gamma_{24}$  为控制器参数,值均大于 0,具有与对角阵  $\Gamma_1$  相同的作用;控制量  $\zeta = -k_3 \cdot \text{sgn}(\bar{q})$ ,旨在提高系统的鲁棒性。

最终得到变频器最佳控制电流值为:

$$i_{qs}^* = -\frac{1}{K_1}(-k_2\bar{q} + H\hat{\varphi} - \eta\chi + \zeta) \quad (33)$$

### 2.2.2 转速控制器稳定性分析

采取与 2.1 节相同的方法分析控制器的稳定性。首先构造 Lyapunov 能量函数:

$$V = \frac{1}{2}J\bar{q}^2 + \frac{1}{2}\tilde{\varphi}^T \Gamma_2^{-1} \tilde{\varphi} \quad (34)$$

对式(34)构造的 Lyapunov 能量函数  $V$  求导,并将式(21)与式(30)代入可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \bar{q}J\dot{\bar{q}} + \tilde{\varphi}^T \Gamma_2^{-1} \dot{\tilde{\varphi}} = \\ & \bar{q}(u - H\hat{\varphi} - J\dot{\chi}) + \tilde{\varphi}^T \Gamma_2^{-1} (\Gamma_2 H^T \bar{q}) = \\ & \bar{q} \left[ u - H\hat{\varphi} - J \left( -\frac{\eta}{\hat{J}}\chi + \frac{u - u_\chi}{\hat{J}} \right) + H\hat{\varphi} \right] = \\ & \bar{q} \left[ u - H\hat{\varphi} - J \left( -\frac{\eta}{\hat{J}}\chi + \frac{u - u_\chi}{\hat{J}} \right) \right] \end{aligned} \quad (35)$$

令  $\varepsilon = \frac{J}{\hat{J}} - 1$ , 则有:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \bar{q} [u - H\hat{\varphi} + (1 + \varepsilon)(\eta\chi - u + u_\chi)] = \\ & \bar{q} [-H\hat{\varphi} + \eta\chi + u_\chi + \varepsilon(\eta\chi - u + u_\chi)] \end{aligned} \quad (36)$$

将  $u_\chi = H\hat{\varphi} - k_2\bar{q} - \eta\chi + \zeta$  代入式(36)中,有:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \bar{q} [-k_2\bar{q} + \zeta + \varepsilon(\eta\chi - u + u_\chi)] = \\ & \bar{q} [-k_2\bar{q} - k_3 \cdot \text{sgn}(\bar{q}) + \varepsilon(\eta\chi - u + u_\chi)] \end{aligned} \quad (37)$$

假设存在合适的  $\varepsilon^*$  满足  $\varepsilon^* > |\varepsilon| = \left| \frac{J}{\hat{J}} - 1 \right|$ , 且

存在合适的  $u^*$  满足  $u^* > |\eta\chi - u + u_\chi|$ , 使得:

$$\dot{V} \leq -k_2\bar{q}^2 - \bar{q}(k_3 \cdot \text{sgn}(\bar{q}) - \varepsilon^* u^*) \quad (38)$$

由于  $\varepsilon^*$  与  $u^*$  均有界,若能选择  $k_3 \geq \varepsilon^* u^*$ , 则可以使得  $-\bar{q}(k_3 \cdot \text{sgn}(\bar{q}) - \varepsilon^* u^*) \leq 0$ , 即保证:

$$\dot{V} \leq -k_2\bar{q}^2 - |\bar{q}|(k_3 \cdot \text{sgn}(\bar{q}) - \varepsilon^* u^*) \leq 0 \quad (39)$$

因此,根据 Lyapunov 稳定性原理,能量函数  $V$  满足  $V > 0$  且  $\dot{V} < 0$ , 系统是全局渐近稳定的。并且由 2.1 节的分析可知,在  $t \rightarrow \infty$  时,  $e(t)$  和  $\dot{e}(t)$  趋向于 0。

因此,针对带有模型参数不确定的风力发电系统,当考虑风速的快速变化导致控制输入电流短时达到饱和和限制时,通过引入式(29)所定义的内补偿辅助函数,采用式(33)所示的控制律及式(32)所示的自适应律,并使参数  $k_3 \geq \varepsilon^* u^*$ , 可保证闭环系统稳定。并且通过调整控制器参数,可使转速跟踪误差充分小,克服了饱和和受限引起的不稳定现象。

从对内补偿辅助函数的定义中可看出,当控制输入达到饱和值时,虽然转子角度误差和转速误差共同决定的复合误差量  $q$  持续增大,但是此时函数  $\chi$  也持续增大,因此可保证新的复合误差  $\bar{q}$  不会出现较大冲击。但在 2.1 节的控制方法中,复合误差突然变化后产生连锁反应,对系统稳定性产生破坏作用。而故障消除后,函数  $\chi$  减小到 0,系统恢复正常运行,此时的控制器与 2.1 节保持一致。

## 3 仿真分析

为了验证所提控制方法的有效性,在 MATLAB/Simulink 上仿真分析分别采用传统 PID 控制、自适应控制以及考虑输入饱和的自适应控制方法时,发电机转子转速跟踪情况。

风机的主要参数如下:额定功率  $P = 1.5 \text{ MW}$ , 风机额定转速  $\omega_N = 2 \text{ rad/s}$ , 额定转矩  $T_{eN} = 75000 \text{ N}\cdot\text{m}$ , 风轮半径  $R = 38.5 \text{ m}$ , 惯性时间常数  $T_j = 5 \text{ s}$ , 空气密度  $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ , 极对数  $p_n = 46$ , 摩擦系数  $B = 0.01 \text{ p.u.}$ , 输入饱和和限制为  $1.1 \text{ p.u.}$ 。控制器参数如下:参数  $k_1 = 10$ ,  $k_2 = 10$ ,  $k_3 = 5$ ; 自适应学习率  $\gamma_{11} = \gamma_{21} = 0.01$ ,  $\gamma_{12} = \gamma_{22} = 0.1$ ,  $\gamma_{13} = \gamma_{23} = 0.1$ ,  $\gamma_{14} = \gamma_{24} = 1$ ; 补偿系数  $\eta = 800$ ; 参数初始值为 0。控制器参数是在仿真中经过反复试验和比较后得到的。对风机采用标么值系统建模,选

取额定功率、额定转矩为基值。在标么制下,最佳控制电流与最佳控制转矩相等,考虑转矩的限制为 1.1 p.u.,因此输入饱和限制为 1.1 p.u.。

图 3 所示为风速曲线。在 60~65 s 时间段内,出现阵风扰动。系统损耗参数的扰动(标么值)如图 4 所示。图 5 所示为只考虑参数不确定性时,在自适应控制与传统 PID 控制方法下的转速跟踪误差(标么值)。图 6 给出了分别在 2 种控制方法下的控制输入(标么值)。从图中可以看出,在前 60 s 内,模型参数具有不确定性,在 PID 控制方法下,系统的控制

输入连续振荡,转速跟踪误差较大;而自适应转速控制方法可以克服参数不确定性带来的影响,保证发电机转速较好地跟踪最佳转速,达到最大功率跟踪的目的。

再考虑变流器电流达到饱和限制时对发电机转速的影响。阵风扰动导致控制输入受到饱和和限制。图 7 所示为最佳转速与在考虑饱和和自适应控制、自适应控制、PID 控制 3 种方法下的实际转速(标么值)曲线;图 8 所示为在 3 种控制方法下的转速跟踪误差(标么值)。从图 7、图 8 中可看出,在恢复阶段,在 PID 控制方法下转速出现剧烈振荡现象且持续较长时间;在自适应控制方法下,转速跟踪误差出现较大的超调量,需要较长时间的调整过程;而在考虑饱和和自适应控制方法下,经过短暂的调整可以迅速恢复对最佳转速的跟踪。

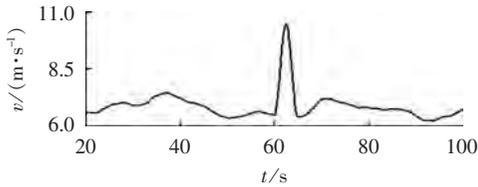


图 3 风速曲线

Fig.3 Curve of wind speed

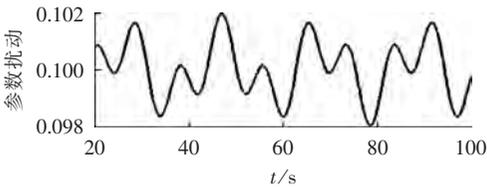


图 4 不确定参数扰动

Fig.4 Disturbance of uncertain parameters

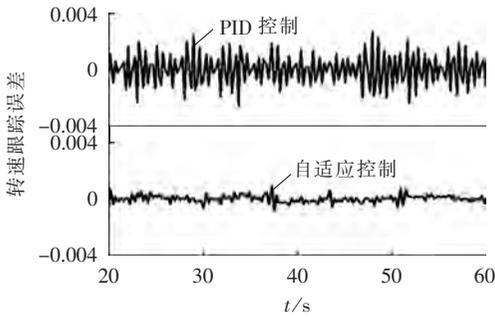


图 5 自适应控制与 PID 控制方法下的转速跟踪误差

Fig.5 Rotor speed tracking error of adaptive control and PID control

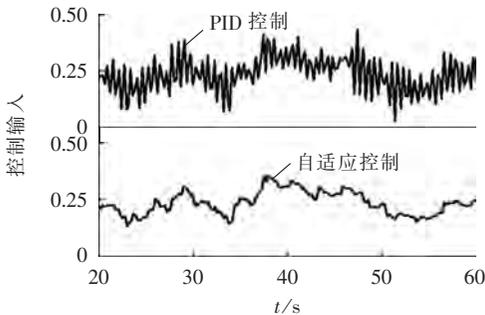


图 6 自适应控制与 PID 控制方法下的控制输入  
Fig.6 Control input of adaptive control and PID control

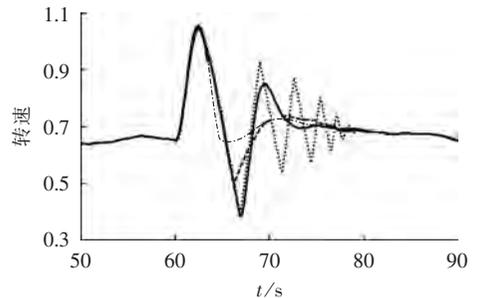


图 7 最佳转速与实际转速  
----- 最佳转速, ----- 考虑饱和和自适应控制  
—— 自适应控制, - - - - - PID 控制

Fig.7 Optimal rotor speed and actual rotor speed

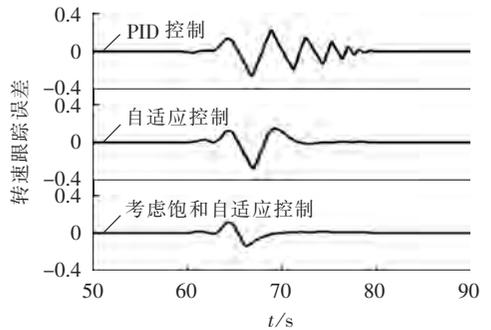


图 8 3 种控制方法下的转速跟踪误差  
Fig.8 Rotor speed tracking error of three control methods

图 9 给出了在 3 种控制方法下的控制输入量(标么值),即变流器电流的大小。在恢复阶段,在 PID 控制方法下,控制输入经过较长时间的振荡后恢复稳定,振荡幅值在上下限值间不断切换。在自适应控制方法下,控制输入在受限后需要经过一段时间的调整过程才恢复稳定;而考虑饱和和自适应控制器使控制输入不会出现长时间振荡过程,在受限后能迅速恢复稳定。

在实际运行中,风速变化具有多种可能,在连续

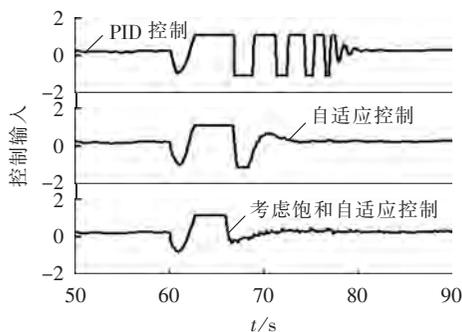


图 9 3 种控制方法下的控制输入

Fig.9 Control input of three control methods

出现大风扰动情况下,如果控制方法不考虑输入饱和限制,将导致闭环系统失稳,从而降低对最大风能的捕获效率。而通过上述分析可以看出,考虑饱和的自适应控制方法,即使面对恶劣的风速变化,仍能较好地实现最大功率跟踪。

## 4 结论

本文考虑模型参数不确定性的情况,并在考虑与不考虑输入饱和 2 种情况下,基于 Lyapunov 理论,设计了直驱式永磁风力发电机的转速自适应控制器;在 MATLAB/Simulink 仿真平台上,对比了相同风速条件下 PID 控制、自适应控制与考虑饱和的自适应控制 3 种控制方法下的转速跟踪误差。结果表明,在模型参数具有不确定性时,自适应转速控制方法可以使发电机转速较好地跟踪最佳转速,实现最大功率跟踪的控制;在出现大风扰动导致输入饱和时,本文提出的考虑饱和的自适应控制方法可以保证系统稳定,并且具有响应速度快、超调量小的优点,保证了转速跟踪的效果,使风机能在低风速阶段快速跟踪最大功率点,提高对风能的捕获效率。

## 参考文献:

- [1] GRAUERS A. Efficiency of three wind energy generator systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1996, 11(3): 650-657.
- [2] CHINCHILLA M, ARNALTES S, BURGOS J C. Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(1): 130-135.
- [3] LIN W M, HONG C M, CHENG F S. On-line designed hybrid controller with adaptive observer for variable-speed wind generation system [J]. Energy, 2010, 35(7): 3022-3030.
- [4] 尹明, 李庚银, 张建成, 等. 直驱式永磁同步风力发电机组建模及其控制策略 [J]. 电网技术, 2007, 31(15): 61-65.  
YIN Ming, LI Gengyin, ZHANG Jiancheng, et al. Modeling and control strategies of directly driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator [J]. Power System Technology, 2007, 31(15): 61-65.
- [5] WANG Q, CHANG L C. An intelligent maximum power extrac-

- tion algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5): 1242-1249.
- [6] 刘其辉, 贺益康, 赵仁德. 变速恒频风力发电系统最大风能追踪控制 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 62-67.  
LIU Qihui, HE Yikang, ZHAO Rende. The maximal wind-energy tracing control of variable-speed constant frequency wind power generation system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 62-67.
- [7] 姚骏, 廖勇, 瞿兴鸿, 等. 直驱永磁同步风力发电机的最佳风能跟踪控制 [J]. 电网技术, 2008, 32(10): 11-15.  
YAO Jun, LIAO Yong, QU Xinghong, et al. Optimal wind-energy tracking control of direct-driven permanent magnet synchronous generators for wind turbines [J]. Power System Technology, 2008, 32(10): 11-15.
- [8] 陈家伟, 陈杰, 龚春英. 变速风力发电机组恒带宽最大功率跟踪控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(27): 32-38.  
CHEN Jiawei, CHEN Jie, GONG Chunying. A constant bandwidth MPPT strategy for variable-speed WECS [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(27): 32-38.
- [9] 赵仁德, 王永军, 张加胜. 直驱式永磁同步风力发电系统最大功率跟踪控制 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(27): 106-111.  
ZHAO Rende, WANG Yongjun, ZHANG Jiasheng. Maximum power point tracking control of the wind energy generation system with direct-driven permanent magnet synchronous generators [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(27): 106-111.
- [10] 朱瑛, 程明, 花为, 等. 考虑损耗转矩的风力发电系统最大风能跟踪控制 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 39-46.  
ZHU Ying, CHENG Ming, HUA Wei, et al. Maximum power point tracking control for wind energy conversion systems considering loss torque [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(19): 39-46.
- [11] LEVRON Y, SHMILOVITZ D. Maximum power point tracking employing sliding mode control [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 2013, 60(3): 724-732.
- [12] BARAMBONES O, de DURANA J M G. An adaptive sliding mode control law for the power maximization of the wind turbine system [C] // Energy and Electrical Drives (POWERENG), Proceedings of the 2011 International Conference on Power Engineering, Malaga, Spain: IEEE, 2011: 1-6.
- [13] 李生民, 何欢欢, 张玉坤, 等. 基于滑模变结构的双馈风力发电机直接功率控制策略研究 [J]. 电网技术, 2013, 37(7): 2006-2010.  
LI Shengmin, HE Huanhuan, ZHANG Yukun, et al. A sliding mode variable structure-based direct power control strategy for doubly fed induction generator [J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 2006-2010.
- [14] MENG W C, YANG Q M, YING Y, et al. Adaptive power capture control of variable-speed wind energy conversion systems with guaranteed transient and steady-state performance [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(3): 716-725.
- [15] KHANNA R, ZHANG Q H, STANCHINA W E, et al. Maximum power point tracking using model reference adaptive control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(3): 1490-1499.
- [16] 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.  
XIA Anjun, HU Shuju, XU Honghua. Speed control of large

- scale wind turbines based on active disturbance rejection control[J]. *Electric Machines and Control*,2012,16(9):33-38.
- [17] 赵永祥,夏长亮,宋战锋,等. 变速恒频风力发电系统风机转速非线性PID控制[J]. *中国电机工程学报*,2008,28(11):133-138. ZHAO Yongxiang,XIA Changliang,SONG Zhanfeng,et al. Non-linear PID rotating speed control of variable speed constant frequency wind turbine system[J]. *Proceedings of the CSEE*,2008,28(11):133-138.
- [18] 耿华,杨耕,周伟松. 考虑风机动态的最大风能捕获策略[J]. *电力自动化设备*,2009,29(10):107-111. GENG Hua,YANG Geng,ZHOU Weisong. Power plant maintenance scheduling considering unit failures[J]. *Electric Power Automation Equipment*,2009,29(10):107-111.
- [19] 阮春长,王宏华,阮曰鱼. 基于模糊控制的开关磁阻风力发电系统最大功率点跟踪控制[J]. *电力自动化设备*,2012,32(5):129-132. RUAN Chunchang,WANG Honghua,RUAN Yueyu. MPPT based on fuzzy control technology for wind power system with switched reluctance generator[J]. *Electric Power Automation Equipment*,2012,32(5):129-132.
- [20] LU L,YAO B. Control of wind turbine systems with input saturation using online trajectory replanning[C]//ASME 2010 Dynamic Systems and Control Conference. Cambridge,Massachusetts,USA:[s.n.],2010:911-917.
- [21] POLYCARPOU M,FARRELL J,SHARMA M. On-line approximation control of uncertain nonlinear systems:issues with control input saturation[C]//American Control Conference. Denver,Colorado,USA:IEEE,2003:543-548.
- [22] 刘立群,王志新,张华强,等. 分布式风力发电系统 MPPT 控制[J]. *电力自动化设备*,2011,31(8):6-10. LIU Liqun,WANG Zhixin,ZHANG Huaqiang,et al. MPPT control of distributed wind power generation system[J]. *Electric Power Automation Equipment*,2011,31(8):6-10.
- [23] 付勋波,郭金东,赵栋利,等. 直驱式风力发电系统的仿真建模与运行特性研究[J]. *电力自动化设备*,2009,29(2):1-5. FU Xunbo,GUO Jindong,ZHAO Dongli,et al. Characteristics and simulation model of direct-drive wind power system [J]. *Electric Power Automation Equipment*,2009,29(2):1-5.
- [24] CHEN M,GE S S,HOW B V. Robust adaptive neural network control for a class of uncertain MIMO nonlinear systems with input nonlinearities[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*,2010,21(5):796-812.

#### 作者简介:



王天钰(1990—),女,辽宁鞍山人,硕士研究生,研究方向为电力系统保护与安全稳定控制、新能源发电及并网技术(E-mail:wang\_tianyu2012@163.com);

魏星(1987—),男,湖北孝感人,助理工程师,硕士,研究方向为变电站电气一次设计、电力系统稳定分析与控制;

徐家俊(1990—),男,山东济宁人,硕士研究生,研究方向为电力系统保护与安全稳定控制;

王晓茹(1962—),女,四川成都人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统保护与安全稳定控制。

## MPPT control considering input saturation for D-PMSG system

WANG Tianyu<sup>1</sup>,WEI Xing<sup>2</sup>,XU Jiajun<sup>1</sup>,WANG Xiaoru<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Sichuan Electric Power Design & Consulting Co.,Ltd., Chengdu 610016, China)

**Abstract:** Aiming at the control stability problem caused by the converter input saturation of the D-PMSG (Direct-driven Permanent Magnetic Synchronous Generator) with big inertia moment and uncertain model parameters, an adaptive control strategy considering both the input saturation and the uncertainty of loss torque is proposed based on the Lyapunov stability theory, which realizes the fast MPPT (Maximum Power Point Tracking) to improve the capture efficiency of wind energy at low wind speed stage. Simulations are carried out to verify the effectiveness of the proposed adaptive control strategy and results show that, it ensures the system stability during the input saturation and the speed tracking effect to realize the MPPT, with quick response and small overshoot.

**Key words:** direct-driven permanent magnetic synchronous generator; maximum power point tracking; adaptive control; input saturation; wind power; stability