基于自抗扰控制的双馈风力发电系统最大功率追踪研究*

李华柏，　粟慧龙，　谢永超
（湖南铁道职业技术学院 轨道交通机车车辆学院，湖南 株洲　412001）

摘　要：为了实现双馈风力发电系统在额定风速以下运行时发电功率的最大输出与平稳运行，提出一种电流内环与自抗扰控制（ADRC）速度外环的控制方式，使双馈风力发电机（DFIG）电流与转速能快速响应风速变化，进行最大功率追踪。仿真分析验证了 ADRC 控制具备优良的抗干扰性能与应变性，能够实现风力发电系统的最大功率追踪。

关键词：双馈风力发电机；自抗扰控制；风力机；最大功率追踪；扩张状态观测器；风能利用系数
中图分类号：TM 614　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1673-6540(2021)02-0071-05
doi：10.12177/emca.2020.190

Research on Power Control of Doubly-Fed Wind Power Generation System Based on ADRC*

LI Huabo，　*SU Huilong*，　*XIE Yongchao*
(School of Locomotive and Vehicle, Hunan Railway Professional Technology College, Zhuzhou 412001, China)

Abstract: Although the doubly-fed wind power generation system operates below the rated wind speed, the maximum output and stable operation need to be maintained. In order to realize this goal, a control mode of current inner loop and active disturbance rejection control (ADRC) speed outer loop is proposed, which makes the current and speed of doubly-fed induction generator (DFIG) quickly respond to the wind speed changes and conduct maximum power tracking. Simulation results show that ADRC has excellent anti-interference performance and adaptability, and can realize maximum power tracking of wind power generation system.

Key words: doubly-fed induction generator (DFIG); active disturbance rejection control (ADRC); wind turbine; maximum power tracking; extended state observer; wind energy utilization coefficient

0　引　言

双馈异步风力发电系统中风力机捕获的风能取决于风速与桨距角，因此在风速小于额定风速时，系统需要进行最大功率追踪。由于风电机组多干扰、强耦合、多变量的非线性特性，很难获得其准确的数学模型，解决其受扰与非线性问题，对于风电系统的功率控制具有重要的意义。

最大功率输出控制常采用的方法有基于风力机功率曲线与基于最佳叶尖速比的最大功率点跟踪（MPPT）控制。

针对双馈风电机组的 MPPT 研究，文献[1]采用自适应遗传和模糊布谷鸟算法整定的自抗扰控制（ADRC）技术[1]。文献[2]提出最佳叶尖速

收稿日期：2020-10-15；收到修改稿日期：2020-12-10
* 基金项目：湖南省自然科学基金项目（2020JJ6095）
作者简介：李华柏（1973—），男，硕士，副教授，研究方向为电机及其控制，电力电子及其传动。
粟慧龙（1982—），男，硕士，副教授，研究方向为智能控制。（通信作者）

比的 ADRC 策略。滑模变结构控制[3]、模糊逻辑控制[4]应用到风电系统功率控制，也取得了较好的效果。文献[5－8]的研究表明 ADRC 在最大功率追踪、最大风能捕获方面有良好的控制效果。

本文针对风电系统最大功率追踪区发电效率低、功率输出不稳定等问题，将 ADRC 应用于 MPPT 中的双馈风力发电机(DFIG)转速控制，以快速追踪风速变化，输出最大功率。

1　风力机最大功率追踪的控制

PFIG 输出功率可以表示为

$$P=\frac{\pi}{2}C_{\mathrm{P}}r^2\rho v^3 \tag{1}$$

风能利用系数 C_{P} 是叶尖速比 λ 与桨距角 θ 的函数，特性曲线如图 1 所示。可知，当 λ 一定时，θ 越大，C_{P} 越小。

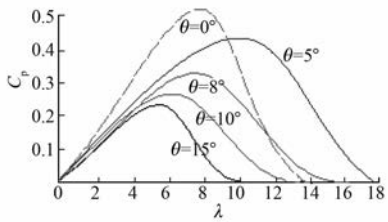

图 1　叶尖速比与风能利用系数特性曲线

在额定风速以下时，当桨距角为定值时，当 $\lambda=\lambda_{\mathrm{opt}}$(最佳叶尖速比)，此时 $C_{\mathrm{p}}=C_{\mathrm{Pmax}}$，风力机转换效率最高。因此，只要让风轮转速实时追踪风速的变化，保持最佳叶尖速比不变，就能输出最大功率[3－4]：

$$P_{\mathrm{m(max)}}=\frac{0.5\rho\pi r^2(r/\lambda_{\mathrm{m}})^3C_{\mathrm{Pmax}}\omega_{\mathrm{r}}{}^3}{1-\omega_{\mathrm{s}}/\omega_{\mathrm{r}}} \tag{2}$$

式中：ω_{r} 为转子电角速度；ω_{s} 为转差角频率，$\omega_{\mathrm{s}}=\omega_1-\omega_{\mathrm{r}}$，$\omega_1$ 为定子磁场同步转速。

风电机组 MPPT 原理如图 2 所示。跟踪过程为：设风力机运行于 C 点，如风速从 v_2 突然降到 v_1，机械功率将由 P_{C} 突然降到 P_{B}，此时风力机因为惯性作用仍然在转速 ω_2 下运行(B 点)。

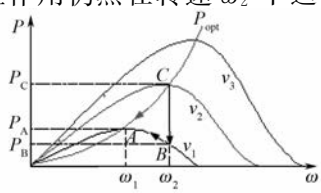

图 2　风电机组 MPPT 原理图

因 $P_{\mathrm{B}}<P_{\mathrm{C}}$，发电机转速下降。因此，风力机沿 BA 曲线运行，发电机沿 CA 曲线运行，当到达 A 点时，功率重新达到平衡，系统稳定运行于 A 点。

根据以上分析，为了使风力机始终沿最佳功率曲线 P_{opt} 运行，获得最佳叶尖速比与最大风能利用系数，输出最大功率。本文设计了电流内环控制器，以及 ADRC 转速外环调节器，在捕获最大风能的同时，DFIG 转速、电流能快速追踪风速变化，输出最大功率。

2　DFIG 电流内环与转速外环控制器的设计

2.1　DFIG ADRC 转速控制器设计

ADRC 控制器由跟踪微分器(TD)、扩张状态观测器(ESO)、非线性状态误差反馈(NLSEF)和扰动补偿组成[9]。

ADRC 转速控制原理如图 3 所示。

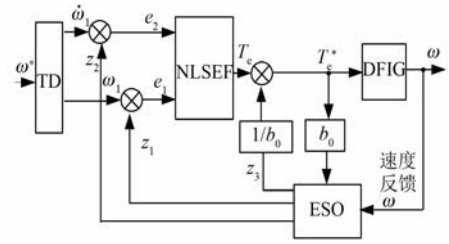

图 3　双馈电机 ADRC 转速 ADRC 原理

图 3 中，ω 为角速度，ω^* 是 TD 的输入信号，ω_1 为 ω^* 的跟踪值，$\dot{\omega}_1$ 为 ω^* 的微分信号，z_1 为实际转速 ω 的观测值，z_2 为总扰动 z_3 的估计值。

由 DFIG 机械运动方程可得：

$$\frac{\mathrm{d}\omega_{\mathrm{r}}}{\mathrm{d}t}=\frac{T_{\mathrm{e}}\cdot p}{J_{\mathrm{g}}}-\frac{T_{\mathrm{z}}\cdot p}{J_{\mathrm{g}}}-\frac{D\cdot\omega_{\mathrm{r}}}{J_{\mathrm{g}}} \tag{3}$$

式中：T_{e} 为电磁转矩；p 为转子极数；J_{g} 为转动惯量；T_{z} 为阻力矩。

DFIG 转速受转动惯量、负载转矩与阻尼系数等内外扰动的影响，将系统所受内外扰动总和记为 $z_3(t)$：

$$z_3(t)=\frac{T_{\mathrm{z}}\cdot p}{J_{\mathrm{g}}}+\frac{D\cdot\omega_{\mathrm{r}}}{J_{\mathrm{g}}} \tag{4}$$

式(3)可以表示为

$$\frac{\mathrm{d}\omega_{\mathrm{r}}}{\mathrm{d}t}=\frac{T_{\mathrm{e}}\cdot p}{J_{\mathrm{g}}}-z_3(t) \tag{5}$$

$z_3(t)$是未知的非线性不确定因素，只需要根

据风速变化实时前馈补偿到系统中。

采用 fsun 函数设计一阶 TD：

$$\dot{\omega}_1 = \mathrm{fsun}(\omega_1 - \omega^*, \varepsilon, \delta) \tag{6}$$

ESO 的方程为[5]

$$\begin{cases} e_{(t)} = z_1 - \omega \\ \dot{z}_1 = z_2 - \eta_1 \mathrm{fal}[e_{(t)}, \varepsilon, \delta) + b_0 u \\ \dot{z}_2 = -\eta_2 \mathrm{fal}(e_{(t)}, \varepsilon, \delta) \end{cases} \tag{7}$$

式中：ε 为滤波因数，取 0.5；δ 为线性区间的宽度；e 为输入误差信号；η_1、η_2 为反馈增益；fal 为非线性函数；b_0 为补偿因子 $b=\dfrac{1}{J}$；u 为控制量，$u=T_e-T_L$。

$$\mathrm{fal}(e,\varepsilon,\delta) = \begin{cases} |e|^{\varepsilon}\mathrm{sgn}(e), & |e|>\delta \\ \dfrac{e}{\delta^{1-\varepsilon}}, & |e|<\delta \end{cases} \tag{8}$$

TD 方程为

$$\begin{cases} e_0 = \omega_1 - \omega^* \\ \dot{\omega}_1 = -\eta_0 \cdot \mathrm{fal}(e_0, \alpha_0, \delta) \end{cases} \tag{9}$$

式中：sgn 为符号函数。

NLSEF 方程为

$$\begin{cases} e_1 = \omega_1 - z_1 \\ e_2 = \dot{\omega}_1 - z_2 \\ T_e = k_1 \mathrm{fal}(e_1, \alpha_1, \delta) + k_2 \mathrm{fal}(e_2, \alpha_2, \delta) \end{cases} \tag{10}$$

式中：k_1、k_2 为可调参数。

再由 ESO 实时估计出的扰动 z_3 进行补偿，得到转矩扰动观测值，即输出控制量为

$$T_e^* = T_e - z_3/b_0 \tag{11}$$

2.2　DFIG 电流内环控制器的设计

无刷 DFIG 的电磁转矩方程为

$$T_e = 1.5pL_m(i_{sq}i_{rd} - i_{sd}i_{rq}) \tag{12}$$

采用定子磁链定向矢量控制时，DFIG 方程为

$$\begin{cases} i_{rd} = (L_s i_{sd} - \psi_s) \\ i_{rq} = L_s i_{sq}/L_m \\ L_s i_{sd} + L_m i_{rd} = \psi_s \\ L_s i_{sq} + L_m i_{rq} = 0 \end{cases} \tag{13}$$

定子侧无功功率为

$$Q_s = \frac{3U_m i_{sd}}{2} \tag{14}$$

由式(12)～式(14)，可得定子与转子电流值为

$$\begin{cases} i_{sd} = \dfrac{2Q_s}{3U_m} \\ i_{sq} = \dfrac{2T_e}{3p\psi_s} \\ i_{rd} = \dfrac{3\psi_s U_m - 2L_s Q_s}{3U_m L_m} \\ i_{rq} = \dfrac{2T_e L_s}{3p\psi_s L_m} \end{cases} \tag{15}$$

式中：下标 d、q 分别为 d 轴与 q 轴分量；s、r 分别为定子与转子；ω_1 为定子磁场同步角速度；L_m 为互感；U_m 为定子电压矢量幅值。

风速变化时，为了提高 DFIG 电流响应的速度，设计电流内环控制，如图 4 所示。其中，上标 * 为参数的目标值。由给定风速 v 得到 DFIG 的转子转速目标值 ω_r^*。电流内环中，给定转速信号 ω_r^* 和实际转速 ω 信号作为输入信号，PI 调节器输出电磁转矩目标值 T_e^*。

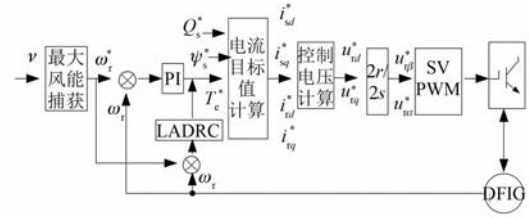

图 4　基于电流内环与 ADRC 转速外环 MPPT 控制原理

2.3　基于电流内环与 ADRC 转速外环最大功率追踪控制设计

根据以上分析，以给定转速 ω_r^* 和实际转速 ω 作为输入信号，电磁转矩目标值 T_e^* 作为输出信号，设计 ADRC 转速外环控制器(见图 4)。T_e^* 结合无功功率目标值 Q_s^* 与定子磁链值目标值 ψ_s^*，经电流计算模块、控制电压计算模块、坐标系转换，最终输出电压控制量 $u_{r\alpha}^*$、$u_{r\beta}^*$，经过空间矢量脉宽调制(SVPWM)，控制开关器件 IGBT。在风速变化时，DFIG 电流与转速均能快速响应，实现最大功率追踪[10]。

3　仿真验证

仿真参数设置如下[3]：风轮半径 $R=15$ m，$\omega_c=5$，$b_0=10$，$\omega_0=20$，$\tau=0.2$，额定风速 $v_N=12$ m/s，切入风速 $v_{in}=4$ m/s，切出风速 $v_{out}=$

24 m/s,空气密度 $\rho=1.25$ kg/m^3,齿轮箱传动比 $n=28$,$C_P=0.5$,$J_z=3.2\times10^5$ kg·m^2。

发电机参数设置如下:$U_N=220$ V,$p=3$,$n_N=1\ 500$ r/min,$R_s=0.451\ \Omega$,$R_r=0.422\ \Omega$,$L_s=6.251$ mH,$L_r=5.632$ H,$L_m=6.726$ mH,$P_N=20$ kW,$J_g=3.5\times10^5$ kg·m^2。

如图 5 所示,为了验证平稳风条件下系统的最大功率输出控制性能,风速 v 为额定风速 12 m/s,在 0.6 s 时突变为 14 m/s 时,λ 随着风速增大稍有下降,C_P 基本保持在 0.5 左右。由图 2 可知,当风速高于额定风速时,$\theta=0°$,$\lambda_{opt}\approx7$,$C_{pmax}\approx0.48$,与图 1 中 $\theta=0°$特性曲线中最大风能利用系数与最佳叶尖速比的值基本相同。

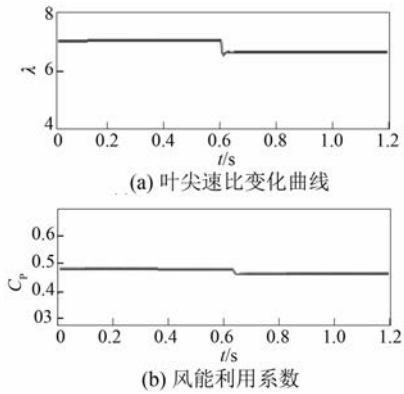

图 5　风速变化时 λ 与 C_P 变化曲线

由于风力发电系统风速多变、非线性的特性,采用传统 PI 控制方法时,系统动态反应阶段幅值波动较大,调节时间较长。图 6 对比了 PID 控制与 ADRC 2 种控制方式下风速变化时风电机组输出功率响应波形。风速在 24 s 时由最初的 10 m/s 变为额定转速 12 m/s。

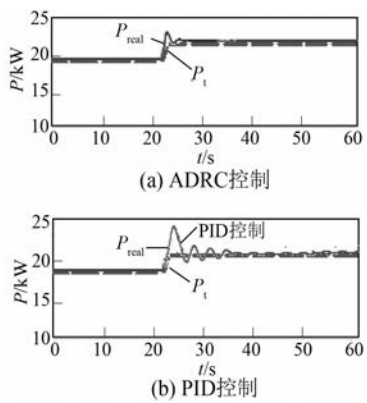

图 6　功率响应曲线追踪情况

由式(2)计算可得:$v=10$ m/s 时,$P\approx18$ kW;$v=12$ m/s 时,$P\approx20$ kW。

图 6 表明,在风速变化时,2 种控制方式下 DFIG 输出功率 P_{real} 均能跟踪设定功率 P_t 的变化而变化,但是 ADRC 控制下的功率响应曲线具有更小的超调量,调节时间更短,跟踪性能优于 PID 控制,验证了 ADRC 控制方式下最大功率追踪的有效性。

如图 7 所示,随机风在 0～20 s 风速平均值约为 11 m/s,$v<v_N$,此时桨叶最大限度打开,桨距角为零,按最佳功率曲线进行最大功率追踪,输出即时风速下的最大功率,C_P 基本保持在约 0.45。20 s 以后,$v>v_N$,通过变桨距对风力机的转速进行控制,输出恒定功率约 20 kW。图 7 表明 ADRC 控制器面对随机风的变化,仍然能取得良好的抗扰性能。

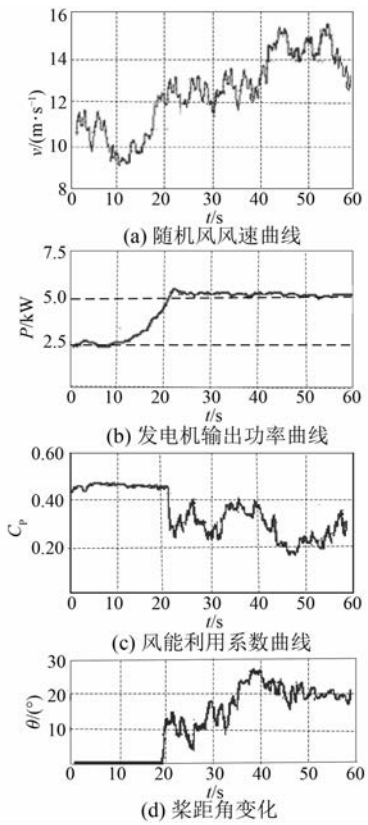

图 7　随机风条件下仿真波形

4　结　语

本文设计了 MPPT 控制 ADRC 转速外环与电流内环控制策略,得出以下结论:

(1) 建立了 PI 电流内环与 ADRC 转速外环

控制器,DFIG 电流与转速能快速追踪风速变化,捕获最大风能,进行 MPPT 追踪。

(2) 仿真研究表明,ADRC 具有抗扰性能强的特性,能够实现风力发电系统最大功率输出的目标。且 ESO 能够实时地对系统的风速扰动进行实时估计并及时进行主动补偿,使得系统跟踪性能更好。因此,与传统 PID 控制方法相比,ADRC 具有更好的转速跟踪性能,更小的超调量,更快的响应速度。

【参 考 文 献】

[1] 田黄田. 风电机组变桨距系统自杭扰控制器的设计及参数优化[D]. 上海:上海电机学院,2019.

[2] 李娟,张克兆,李生权,等. 最佳叶尖速比的最大功率自抗扰跟踪控制[J]. 电机与控制学报,2015,19(12):94.

[3] 汪秀才. 基于滑模变结构的中小型风力发电机组功率控制研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2017.

[4] 王一森. 基于滑模变结构的双馈风力发电机功率解耦控制策略研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2018.

[5] 刘英培,梁海平,栗然. 基于无源性与自抗扰控制的双馈风力发电系统研究[J]. 电工技术学报,2015,30(18):121.

[6] 何海艳. 双馈风力发电系统的变桨距自抗扰控制研究[D]. 沈阳:东北大学,2016.

[7] 孙凌艳. 自抗扰控制技术在风电变桨系统中的应用研究[D]. 保定:河北大学,2015.

[8] 张辰. 基于先进优化算法的 LADRC 风力发电过程控制研究[D]. 北京:华北电力大学,2015.

[9] 李建忠,瞿遂春,周飞,等. 开关磁阻电机自抗扰控制研究[J]. 湖南工业大学学报,2012,26(5):37.

[10] 刘波,孙德清. 基于自抗扰控制的双馈风力发电系统功率控制[J]. 微电机,2012,45(8):62.

(上接第 70 页)

[8] 杜宝星,刘观起,杨玉新. 电网电压跌落时双馈风电系统无功支持策略[J]. 电气技术,2012(12):1.

[9] 王伟,孙明冬,朱晓东. 双馈式风力发电机低电压穿越技术分析[J]. 电力系统自动化,2007,31(23):84.

[10] 吴俊玲,吴畏,周双喜. 超导储能改善并网风电场稳定性的研究[J]. 电工电能新技术,2004,23(3):59.

[11] 李鸿儒,金炜东,胡立锦,等. 基于无功判定法的 Crowbar 保护电路退出控制[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(15):99.

[12] 唐浩,郑涛,黄少锋,等. 考虑 Chopper 动作的双馈风电机组三相短路电流分析[J]. 电力系统自动化,2015,39(3):76.

[13] 许建兵,江全元,石庆均. 基于储能型 DVR 的双馈风电机组电压穿越协调控制[J]. 电力系统自动化,2013,37(4):14.

[14] 郑丽,马维新,李立春. 超导储能装置提高电力系统暂态稳定性的研究[J]. 清华大学学报(自然科学版),2001,41(3):73.

[15] 汪春莉,徐玉琴,王磊,等. 运用 STATCOM 解决风电场 LVRT 问题的控制措施研究[J]. 可再生能源,2015,33(4):551.

[16] 边相阳,袁帅,孟令剑,等. SMES 提高 DFIG 低电压穿越能力策略研究[J]. 吉林电力,2019,47(6):27.

[17] 范高锋,迟永宁,赵海翔,等. 用 STATCOM 提高风电场暂态电压稳定性[J]. 电工技术学报,2007,22(11):158.

[18] 李鸿儒,金炜东,胡立锦. 双馈风电机组低电压穿越能力的提高[J]. 电力系统及其自动化学报,2013,25(5):7.

[19] 吴杰,孙伟,颜秉超. 应用 STATCOM 提高风电场低电压穿越能力[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(24):47.