

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201481

基于ACPI的风力发电系统MPPT控制方法

苏杰, 曾喆昭

(长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410076)

摘要: 针对直驱永磁同步风力发电系统存在非线性、参数不确定性以及转矩扰动等问题, 研究了一种基于自耦PI控制理论的最大功率跟踪控制方法。该方法以转速跟踪为目标, 将发电机内部动态与外部输入转矩的不确定性定义为一个总和扰动, 从而将非线性不确定系统映射为未知线性系统, 并构建了一个在总和扰动反相激励下的受控误差系统。据此设计了基于误差速度因子的自耦PI控制器模型, 理论分析了自耦PI闭环控制系统的鲁棒稳定性和抗扰鲁棒性。仿真结果表明了该控制方法能稳定保持最大功率系数, 在风力发电系统的最大功率跟踪领域具有良好的应用前景。

关键词: 风力发电; 最大功率跟踪; 自耦PI控制; 总和扰动; 鲁棒稳定性

Maximum power point tracking based on auto-coupling PI control for a wind power generation system

SU Jie, ZENG Zhezha

(School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China)

Abstract: There are problems of nonlinearity, uncertainty parameters and torque disturbance in direct drive permanent magnet synchronous wind power generation systems. Thus a maximum power point tracking control method based on auto-coupling PI control theory is studied. Aiming at speed tracking, the uncertainty of internal dynamics and external input torque of a generator is defined as a total disturbance, and the nonlinear uncertain system is mapped to an unknown linear system, and a controlled error system under the inverse excitation of the total disturbance is constructed. Based on that, an auto-coupling PI controller model based on the error speed factor is designed, and the robust stability and anti-disturbance robustness of the autocoupled PI closed-loop control system are analyzed theoretically. Finally, the simulation results show that the proposed control method can maintain the maximum power factor in a stable fashion. This approach has a good prospect for application in the field of maximum power tracking of a wind power generation system.

This work is supported by the Key Project of Hunan Education Department (No. 17A006).

Key words: wind power generation; maximum power point tracking; autocoupled PI control; total disturbance; robust stability

0 引言

随着石油、天然气等不可再生资源的日渐枯竭, 可再生能源的研究愈发重要, 而风能由于绿色环保、投入成本低, 受到了世界各国越来越广泛的重视^[1-2]。然而, 风速信号往往存在随机性、突变性, 风力发电机存在耦合与不确定性, 因而实现风力发电系统的最大功率跟踪控制是一个挑战性课题, 对控制系统的鲁棒稳定性和抗扰动鲁棒性提出了更高要求^[3]。

风力发电的目标是尽可能实现最大功率跟踪^[4-6], 提高风能的最大利用效率。实际运行中, 风力发电系统可以分为三个阶段: 定桨变速阶段、定速变桨阶段、变速变桨阶段。目前, 风力发电系统的最大功率跟踪着重于定桨变速阶段, 其主要方法有: 爬山搜索法^[7-8]、最优转矩法^[9-10]和叶尖速比法等^[11-13]。然而由于永磁同步发电机(Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG)往往存在内部参数摄动和外部转矩扰动的问题, 以上三种传统方法无法实现最大功率点的快速跟踪。为此, 国内外学者提出了各种控制方法, 也取得了较好的最大功率跟踪

(Maximum Power Point Tracking, MPPT)控制结果,然而也都存在一些局限性,如文献[14]提出了自适应控制方法,通过在线模型辨识来实现控制,然而存在控制器结构较复杂、计算量较大的局限性;文献[15-16]提出了自抗扰控制方法,利用扩张状态观测器估计系统总扰动,并将估计值前馈到控制输入端以尽可能抵消总扰动的影响来实现自抗扰能力,然而存在参数较多、非线性非光滑函数的计算量大的局限性;文献[17-20]提出了滑模控制方法,然而因含有等速趋近率,不可避免存在抖振现象,尽管文献[20]利用非线性光滑函数来取代等速趋近率的符号函数,并引入干扰观测器来弥补控制律的不足,有效避免了抖振现象,然而涉及参数较多,增加了计算量。文献[21]提出了一种神经网络控制方法,利用梯度下降法在线训练控制器,并用粒子群算法对学习率进行修正,使控制器能快速响应风速的变化,然而结构比较复杂,计算量大,实时性欠佳。

为解决上述方法存在的局限性,本文使用了文献[22-24]提出的自耦 PI(Auto-coupling Proportional-Integral, ACPI)控制方法。在文献[25]提出的总和扰动概念基础上, ACPI 控制方法进一步将已知或未知的系统动态和外部扰动定义为总和扰动,使得任意已知或未知非线性复杂系统等价映射为一个未知线性系统,并建立了一个在总和扰动激励下的受控误差系统,据此创造性提出了一个以速度因子为核心耦合因子的自耦 PI 控制器模型。其显著特色:根据与被控对象模型无关的速度因子将比例控制力与积分控制力紧密耦合在一起,使得这两个功能各异的控制力在控制过程中表现出目标一致的协调控制行为,有效提高了控制系统的增益鲁棒性和抗扰动鲁棒性。然而,文献[22-24]仅提出了速度因子的概念,没有对速度因子做深入研究,为此,在现有研究基础上,本文对速度因子进行了全面系统的分析,并证明了速度因子与稳态误差之间的关系。

本文针对永磁直驱风力发电系统中存在参数摄动与外部转矩扰动的问题,根据 ACPI 控制理论思想,设计了一种基于速度因子的 ACPI 控制律模型,理论分析了 ACPI 控制系统的稳定性和抗扰鲁棒性,并推导出了系统稳态误差随速度因子的变化关系。

1 永磁直驱风力发电控制系统

永磁直驱风力发电控制系统包括风力机、永磁同步发电机、传动轴和控制系统,具体结构如图 1 所示。

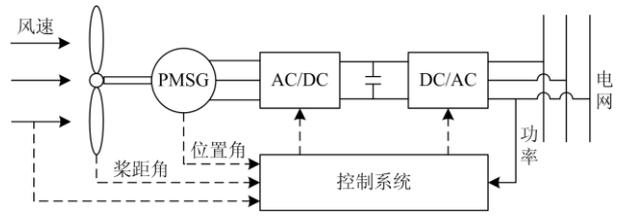


图 1 永磁直驱风力发电控制系统
Fig. 1 Control system of direct PMSG

1.1 风力机模型

风力机的工作原理是通过风轮将风能转换为机械能,再以转矩的形式输送到永磁同步发电机。根据空气动力学理论和 betz 定律,风能的功率系数(转换率) C_p 、风力机的机械输出功率 P_m 和叶尖速比 λ 可分别表示为^[5]

$$\begin{cases} C_p = 0.5176\left(\frac{116}{B} - 0.4\beta - 5\right)\exp\left(-\frac{21}{B}\right) + 0.0068\lambda \\ \frac{1}{B} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (1)$$

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R_m^2 v^3 C_p \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{\omega_m R_m}{v} \quad (3)$$

式中: β 为风轮桨距角($^\circ$); ρ 为空气密度(kg/m^3); R_m 为风轮叶片扫风半径(m); v 为风速(m/s); ω_m 为风机的角速度(rad/s)。

功率系数 C_p 、叶尖速比 λ 和桨距角 β 的关系如图 2 所示。

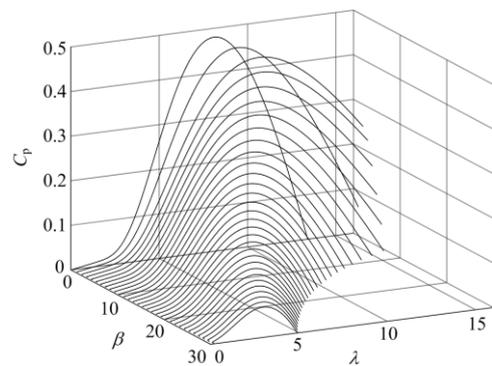


图 2 功率系数与叶尖速比关系曲线
Fig. 2 Graph of relation between power coefficient and tip speed ratio

由图 2 可知,在叶尖速比 λ 不变时,风轮桨距角 β 越小,功率系数 C_p 越大。在风轮桨距角 β 不变时,功率系数 C_p 随叶尖速比 λ 变化的曲线为一条开口向下的抛物线。因此当 β 不变时,总存在一个最

优叶尖速比 λ_{opt} 使得功率系数 C_p 取得最大值。又因为风轮桨距角 β 越小, 功率系数 C_p 越大, 因此当 β 最小为 0, 且 $\lambda_{opt} = 8.1$ 时, 有最大功率系数 $C_{pmax} = 0.48$ 。因此结合式(3)可以获得期望风机角速度为: $\omega_m^* = \frac{\lambda_{opt} v}{R_m}$ 。

根据 $P_m = T_m \omega_m$, 由式(2)和式(3)可得

$$T_m = \frac{1}{2\lambda^3} \rho \pi R_m^5 \omega_m^2 C_p \quad (4)$$

式中, T_m 为风力机的输出转矩。

1.2 永磁同步发电机模型

两相旋转坐标系 d - q 下 PMSG 数学模型为

$$\begin{cases} \dot{i}'_d = -\frac{R}{L_q} i'_q - \frac{L_d}{L_q} n_p \omega_m i'_d + \frac{1}{L_d} u_d \\ \dot{i}'_q = -\frac{R}{L_q} i'_d - \frac{L_d}{L_q} n_p \omega_m i'_d + \frac{1}{L_q} n_p \omega_m \psi_f + \frac{1}{L_q} u_q \\ \dot{\omega}_m = \frac{T_m - T_e - B \omega_m}{J} \end{cases} \quad (5)$$

式中: u_d 、 u_q 分别为发电机定子电压的 d 、 q 轴分量; i'_d 、 i'_q 分别为定子电流的 d 、 q 轴分量; L_d 、 L_q 分别为 d 、 q 轴电感; ω_m 为风机角速度; R 为定子电阻; ψ_f 为永磁体的磁链; T_e 为电磁转矩; T_m 为风机转矩; n_p 为极对数; J 为转动惯量; B 为阻尼系数。

$$T_e = \frac{3}{2} n_p [\psi_f i'_q + (L_q - L_d) i'_d i'_q] \quad (6)$$

对于表贴式 PMSG, $L_d = L_q$, 因而式(6)中电磁转矩可简化为

$$T_e = \frac{3}{2} n_p \psi_f i'_q \quad (7)$$

1.3 PMSG 模型映射

为便于分析, 分别设状态变量为: $y_1 = i'_d$, $y_2 = i'_q$, $y_3 = \omega_m$; 设 d 、 q 轴电流环与速度环的总和扰动分别为: $d_1 = -\frac{R}{L_d} i'_d - \frac{L_q}{L_d} n_p \omega_m i'_q$, $d_2 = -\frac{R}{L_q} i'_q - \frac{L_d}{L_q} n_p \omega_m i'_d + \frac{1}{L_q} n_p \omega_m \psi_f$, $d_3 = \frac{T_m - B \omega_m}{J}$; $b_1 = L_d^{-1}$, $b_2 = L_q^{-1}$, $b_3 = -1.5 n_p \psi_f J^{-1}$, 则非线性强耦合系统(5)可映射为一个未知线性系统:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = d_1 + b_1 u_d \\ \dot{y}_2 = d_2 + b_2 u_q \\ \dot{y}_3 = d_3 + b_3 i'_q \end{cases} \quad (8)$$

由于系统(8)是系统(5)的等价映射, 因此, 根据系统(8)设计的有效控制器可以实现对系统(5)的有效控制。

2 ACPI 控制系统

由于 PMSG 系统(5)或(8)是一个三自由度且两个输入的 MIMO 欠驱动系统, 为此, 本文首先根据转速环控制来获取 q 轴电流的期望指令 i'_q^* , 以便实现对 q 轴电流的控制。此外, d 轴电流的期望指令 $i'_d^* = 0$ 。转速环和电流环的控制方法分别如下。

2.1 转速环 ACPI_m 控制器设计

设风机期望转速为 $\omega_m^* = \frac{\lambda_{opt} v}{R_m}$, 则可得转速跟踪误差及其积分为: $e_{m1} = \omega_m^* - y_3$, $e_{m0} = \int_0^t e_{m1} dt$ 。

结合系统(8), 可得: $\dot{e}_{m1} = \dot{\omega}_m^* - \dot{y}_3 = \dot{\omega}_m^* - d_3 - b_3 i'_q$, 据此可建立一个在总和扰动 d_3 反相激励下的受控误差系统, 如式(9)所示。

$$\begin{cases} \dot{e}_{m0} = e_{m1} \\ \dot{e}_{m1} = \dot{\omega}_m^* - d_3 - b_3 i'_q \end{cases} \quad (9)$$

根据文献[21]的控制理论思想, 为了使系统(9)的误差 e_{m1} 稳定趋近零点, 定义受控误差系统(9)的 ACPI_m 控制器模型为

$$i'_q^* = (z_m^2 e_{m0} + 2z_m e_{m1}) b_3^{-1} \quad (10)$$

式中: $0 < z_m < \infty$ 为 ACPI_m 控制器的速度因子; i'_q^* 为 q 轴电流的期望指令。

2.2 q 轴电流环 ACPI_q 控制器设计

由式(10)获得的 q 轴电流期望指令 $i'_q^* = (z_m^2 e_{m0} + 2z_m e_{m1}) b_3^{-1}$, 可得 q 轴电流跟踪误差及其积分为: $e_{q1} = i'_q^* - y_2$, $e_{q0} = \int_0^t e_{q1} d\tau$ 。结合系统(8), 可得: $\dot{e}_{q1} = \dot{i}'_q^* - \dot{y}_2 = \dot{i}'_q^* - d_2 - b_2 u_q$, 据此可建立一个在总和扰动 d_2 反相激励下的受控误差系统:

$$\begin{cases} \dot{e}_{q0} = e_{q1} \\ \dot{e}_{q1} = \dot{i}'_q^* - d_2 - b_2 u_q \end{cases} \quad (11)$$

为使得系统(11)的跟踪误差 e_{q1} 稳定趋近零点, 根据文献[21]的控制理论, 定义受控误差系统(11)的 ACPI_q 控制器模型为

$$u_q = (z_q^2 e_{q0} + 2z_q e_{q1}) b_2^{-1} \quad (12)$$

式中, $0 < z_q < \infty$ 为 ACPI_q 控制器的速度因子。

2.3 d 轴电流环 ACPI_d 控制器设计

由于 PMSG 常采用 $i'_d^* = 0$ 控制, 因而可得 d 轴

电流跟踪误差及其积分为： $e_{d1} = -y_1$ ， $e_{d0} = \int_0^t e_{d1} d\tau$ 。结合系统(8)，可得： $\dot{e}_{d1} = -\dot{y}_1 = -d_1 - b_1 u_d$ ，据此也可建立一个在总和扰动 d_1 反相激励下的受控误差系统，如式(13)所示。

$$\begin{cases} \dot{e}_{d0} = e_{d1} \\ \dot{e}_{d1} = -d_1 - b_1 u_d \end{cases} \quad (13)$$

为了使系统(13)的误差稳定趋近零点，根据文献[19]的控制理论，定义受控误差系统(13)的 ACPI d 控制器模型为：

$$u_d = (z_d^2 e_{d0} + 2z_d e_{d1}) b_1^{-1} \quad (14)$$

式中， $0 < z_d < \infty$ 为 ACPI d 控制器的速度因子。

由 ACPI m 、ACPI d 和 ACPI q 组成的 ACPI 控制系统结构如图 3 所示，风力机将风能转化为机械能，以转矩的形式输入到永磁同步发电机，最后由发电机将电能输送到电网。同时根据风速和轮叶片扫风半径计算出发电机的期望转速，最后 ACPI 控制系统以转速跟踪为目标进行外转速环、内电流环的方式对发电机进行矢量控制。

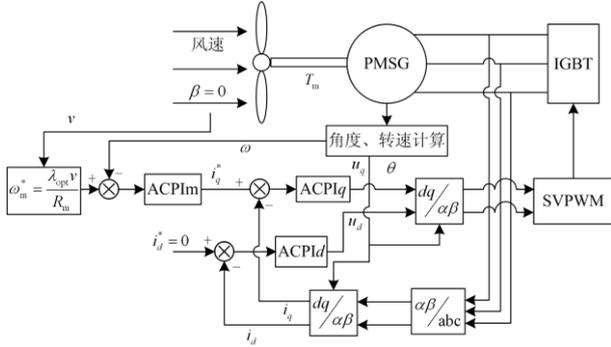


图 3 ACPI 控制系统结构图

Fig. 3 Structure diagram of ACPI control system

2.4 ACPI 闭环控制系统分析

为了分析由 ACPI m (系统 10)、ACPI q (系统 12) 和 ACPI d (系统 14) 分别组成的子闭环控制系统的鲁棒稳定性和抗扰动鲁棒性，下面给出稳定性定理及其证明。

定理 1 当 $|d_3| \leq \varepsilon_3 < \infty$ ， $|\dot{\omega}_m^*| \leq \varepsilon_m < \infty$ ， $0 < z_m < \infty$ 时，由 ACPI m 控制器组成的转速闭环系统是 大范围鲁棒稳定的，且 $|e_{m1}(\infty)| < (\varepsilon_m + \varepsilon_3) / z_m$ ，理论上可以实现零误差跟踪控制，并具有良好的抗总和扰动鲁棒性。

证明：为便于分析，设 $\hat{d}_3 = \dot{\omega}_m^* - d_3$ ，将式(10)所示的 ACPI m 控制器代入受控误差系统(9)，可得

转速闭环控制系统为

$$\begin{cases} \dot{e}_{m0} = e_{m1} \\ \dot{e}_{m1} = \hat{d}_3 - z_m^2 e_{m0} - 2z_m e_{m1} \end{cases} \quad (15)$$

由于闭环系统(15)是一个在扩张总和扰动 \hat{d}_3 激励下的误差动态系统，因而是一个因果系统。对式(15)取拉普拉斯变换得

$$\begin{cases} sE_{m0}(s) = E_{m1}(s) \\ sE_{m1}(s) = \hat{D}_3(s) - z_m^2 E_{m0}(s) - 2z_m E_{m1}(s) \end{cases} \quad (16)$$

由式(16)可得

$$E_{m1}(s) = \frac{s}{(s + z_m)^2} \hat{D}_3(s) \quad (17)$$

由式(17)可得系统传递函数为

$$H_m(s) = \frac{E_{m1}(s)}{\hat{D}_3(s)} = \frac{s}{(s + z_m)^2} \quad (18)$$

当 $0 < z_m < \infty$ 时，由于 $H_m(s)$ 仅有唯一的二重极点 $s = -z_m$ 在复频域左半平面的实轴上，因而系统(15)或(17)是大范围稳定的。又因为 z_m 与转速环的动态模型无关，因而系统(15)或(17)是大范围鲁棒稳定的。

当 $|d_3| \leq \varepsilon_3 < \infty$ ， $|\dot{\omega}_m^*| \leq \varepsilon_m < \infty$ 时，必有：

$|\hat{d}_3| = |\dot{\omega}_m^* - y_3| \leq |\dot{\omega}_m^*| + |y_3| \leq \varepsilon_m + \varepsilon_3$ 。由式(17)可得系统单位冲激响应为

$$h_m(t) = (1 - z_m t) \exp(-z_m t) \quad (19)$$

由式(19)可知： $0 < z_m < \infty$ 时， $\lim_{t \rightarrow \infty} h_m(t) = 0$ ，

且 z_m 越大， $h_m(t)$ 趋于零的速度则越快，因而称 z_m 为速度因子。结合式(19)，可求得系统(17)的时域解为

$$e_{m1}(t) = h_m(t) * \hat{d}_3(t) = \int_0^t h_m(\tau) \hat{d}_3(t - \tau) d\tau \quad (20)$$

式中，“*”表示卷积积分运算符。

考虑到： $|\hat{d}_3| \leq \varepsilon_m + \varepsilon_3$ ，由式(20)可得

$$\begin{aligned} |e_{m1}(t)| &= \left| \int_0^t h_m(\tau) \hat{d}_3(t - \tau) d\tau \right| \leq \\ &\int_0^t |h_m(\tau)| |\hat{d}_3(t - \tau)| d\tau \leq \\ &(\varepsilon_m + \varepsilon_3) \int_0^t |h_m(\tau)| d\tau \end{aligned}$$

因而有

$$|e_{m1}(\infty)| \leq (\varepsilon_m + \varepsilon_3) \int_0^\infty |h_m(\tau)| d\tau \quad (21)$$

由于 $H_m(0) = H_m(\infty) = 0$ ，且 $t \in (0, z_m^{-1})$ 时， $h_m(t) \geq 0$ ； $t \in (z_m^{-1}, \infty)$ 时， $h_m(t) < 0$ ；其中 $t_0 = z_m^{-1}$ 是

$h_m(t)$ 在 $0 < t < \infty$ 范围内唯一的零点, 因而有

$$\int_0^{\infty} |h_m(\tau)| d\tau = \int_0^{z_m^{-1}} h_m(\tau) d\tau + \int_{z_m^{-1}}^{\infty} |h_m(\tau)| d\tau \quad (22)$$

考虑到

$$\int_0^{\infty} h_m(\tau) d\tau = \int_0^{z_m^{-1}} h_m(\tau) d\tau + \int_{z_m^{-1}}^{\infty} h_m(\tau) d\tau = H_m(0) = 0$$

因而有

$$\int_0^{z_m^{-1}} h_m(\tau) d\tau = -\int_{z_m^{-1}}^{\infty} h_m(\tau) d\tau = \int_{z_m^{-1}}^{\infty} |h_m(\tau)| d\tau \quad (23)$$

将式(23)代入式(22), 可得

$$\int_0^{\infty} |h_m(\tau)| d\tau = 2 \int_0^{z_m^{-1}} h_m(\tau) d\tau = \frac{2}{e z_m} < \frac{1}{z_m} \quad (24)$$

式中, $e \approx 2.71$ 是自然常数。

将式(24)代入式(21), 可得

$$|e_{m1}(\infty)| < \frac{\varepsilon_m + \varepsilon_3}{z_m} \quad (25)$$

式(25)表明: 稳态误差随 z_m 的增加而变小, 当 $z_m \rightarrow \infty$ 时, $|e_{m1}(\infty)| = 0$, 因而理论上可以实现零误差跟踪控制。又因为稳态误差 $|e_{m1}(\infty)|$ 只与 $|\hat{d}_3| \leq \varepsilon_m + \varepsilon_3 < \infty$ 和 z_m 有关, 而与 $\hat{d}_3 = \hat{\omega}_m^* - d_3$ 的具体模型无关, 而且 z_m 也与转速环的动态模型无关, 因此, 转速环的 ACPI_m 控制系统具有良好的抗总和扰动鲁棒性, 证毕。

而文献[23]的鲁棒稳定性分析中: 根据 $\lim_{t \rightarrow \infty} h(t) = 0$, 直接由 $e_1(t) = h(t) * \hat{d}_3(t)$, 得出结论: $\lim_{t \rightarrow \infty} e_1(t) = 0$, 显得不够严谨, 为此, 本文做了上述纠正。

定理 2 当 $|d_2| \leq \varepsilon_2 < \infty$, $|i_q^*| \leq \varepsilon_q < \infty$, $0 < z_q < \infty$ 时, 由 ACPI_q 控制器组成的 q 轴电流闭环系统是大范围鲁棒稳定的, 且 $|e_{q1}(\infty)| < (\varepsilon_q + \varepsilon_2)/z_q$, 理论上可以实现零误差跟踪控制, 并具有良好的抗总和扰动鲁棒性。

定理 3 当 $|d_1| \leq \varepsilon_1 < \infty$, $0 < z_d < \infty$ 时, 由 ACPI_d 控制器组成的 d 轴电流闭环系统是大范围鲁棒稳定的, 且 $|e_{d1}(\infty)| < \varepsilon_1/z_d$, 理论上可以实现零误差跟踪控制, 并具有良好的抗总和扰动鲁棒性。

由于篇幅有限, 定理 2 和定理 3 的证明参照定理 1, 此处不再赘述。

2.5 速度因子镇定方法

由定理 1—定理 3 可知, 当 $0 < z_m < \infty$ 、 $0 < z_q < \infty$ 、 $0 < z_d < \infty$ 时, ACPI_m 控制系统、ACPI_q 控制系统以及 ACPI_d 控制系统都是大范围鲁棒稳

定的, 表明 z_m 、 z_q 和 z_d 都具有很大的镇定裕度。

考虑到转速环控制器 ACPI_m 形成的 q 轴电流指令 i_q^* 是 q 轴电流环的期望输出, 为了使 q 轴电流 i_q 快速跟踪期望指令 i_q^* , 要求电流环的速度因子 z_q 和 z_d 与 z_m 之间满足条件: $z_q = z_d = (2 \sim 10)z_m$ 。

3 仿真与分析

为验证本文控制方法的有效性, 本文在 Matlab/Simulink 平台上搭建风力机和永磁同步发电机模型, 采用本文控制方法进行控制, 并与文献[15]的自抗扰控制方法进行对比分析。

1) 风力机参数: 桨距角 $\beta = 0^\circ$, 风轮半径 $R_m = 1.5$ m, 额定输出功率为 1 500 kW, 基本风速 $v_0 = 6$ m/s, 空气密度 $\rho = 1.225$ kg/m³; 最大功率利用系数 $C_{pmax} = 0.48$, 最优叶尖速比 $\lambda_{opt} = 8.1$ 。

2) 永磁同步发电机参数: 定子电感 $L_d = L_q = 8.5 \times 10^{-3}$ H, 定子电阻 $R = 2.875 \Omega$, 转动惯量 $J = 1 \times 10^{-3}$ kg·m², 阻尼系数 $B = 8.29 \times 10^{-5}$ kg·m²/s, 极对数 $n_p = 4$, 永磁体磁链 $\psi_f = 0.175$ Wb。

3) 转速环与电流环 ACPI 控制器参数:

① CPI_m 控制器: $b_3 = -\frac{3}{2J} n_p \psi_f = -1050$, $z_m = 150$;

② PI_q 控制器: $b_2 = L_q^{-1} \approx 118$, $z_q = 600$;

③ CPI_d 控制器: $b_1 = L_d^{-1} \approx 118$, $z_d = 600$ 。

由上述 ACPI 控制器形成的控制系统在阵风、渐变风和自然风等风速下对永磁直驱风力发电系统进行最大功率跟踪控制, 同时加入了传统 PI 控制方法和滑模控制方法进行对比, 仿真实验如下。

3.1 仿真实验 1: 阵风情况下的仿真结果与分析

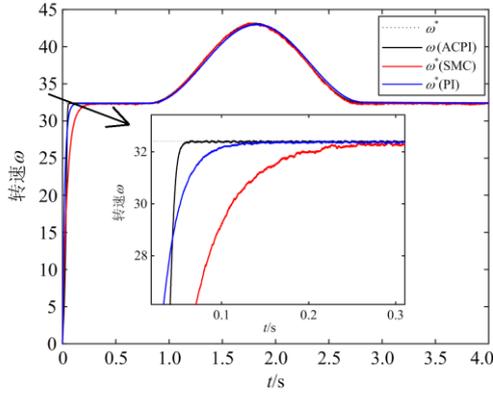
在实际分析中, 一般认为基本风不随时间变化, 即 $v_0 = 6$ m/s, 阵风则是在基本风的基础上发生波动, 即 $v = v_0 + v_g$, 阵风的动态特性可描述为^[15]

$$v_g = \begin{cases} 0 & 0 < t < t_{1g} \\ \frac{G_{max}}{2} [1 - \cos 2\pi(t - t_{1g}) / (t_{2g} - t_{1g})] & t_{1g} < t < t_{2g} \\ 0 & t > t_{2g} \end{cases} \quad (26)$$

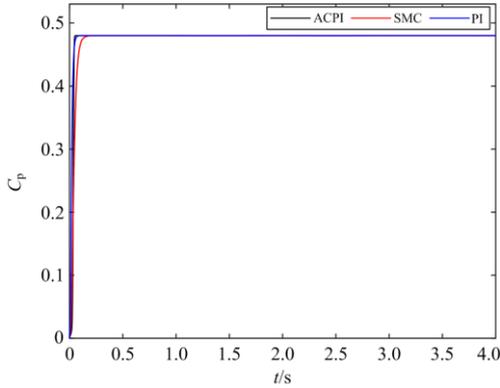
式中: $t_{1g} = 0.8$ s、 $t_{2g} = 2.8$ s 分别为阵风开始和结束时间; $G_{max} = 2$ m/s 为阵风波动最大值。

由式(19)所示, 阵风不仅能反映风速缓慢变化特性, 还能反映基本风的突变特性, 对其进行最大

功率跟踪控制实验, 仿真结果如图 4 所示, 文献[15]结果如图 5 所示。



(a) 阵风情况下转速跟踪曲线



(b) 阵风情况下功率系数

图 4 阵风情况下控制结果
Fig. 4 Control results under gust

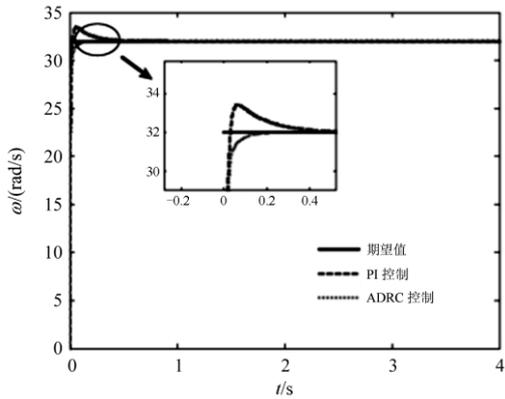


图 5 文献[15]控制结果
Fig. 5 Control results of [15]

由图 4 可知, 在风速为阵风的情况下时, 本文 ACPI 控制系统能稳定实现风电系统的最大功率跟踪控制, 不仅能在 0.1 s 内实现转速的快速跟踪, 而且无超调和振荡现象, 表明本文控制方法具有良好的动态品质。而滑模和传统 PI 控制方法大约在

0.25 s 和 0.15 s 左右达到稳定。此外, 由图 5 可知, 文献[15]采用自抗扰控制方法, 大约在 0.2 s 左右达到稳态。相比之下, 本文控制方法响应速度更快。

3.2 仿真实验 2: 渐变风情况下的仿真结果与分析

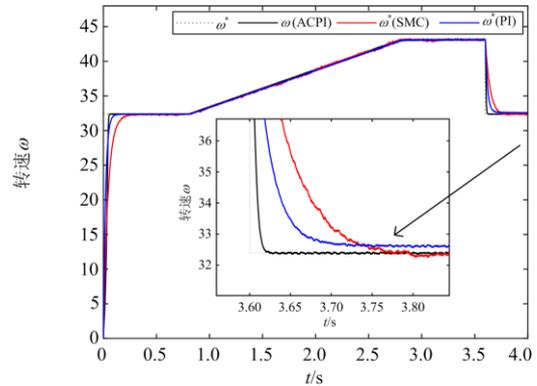
渐变风呈缓慢线性波动, 并稳定保持一段时间, 最后消失跌落成基本风, 且 $v = v_0 + v_r$, 渐变风变化特性可描述为^[15]

$$v_r = \begin{cases} 0 & 0 < t < t_{1r} \\ R_{\max}(t - t_{1r}) / (t_{2r} - t_{1r}) & t_{1r} < t < t_{2r} \\ R_{\max} & t_{2r} < t < t_{2r} + T_r \\ 0 & t > t_{2g} + T_r \end{cases} \quad (27)$$

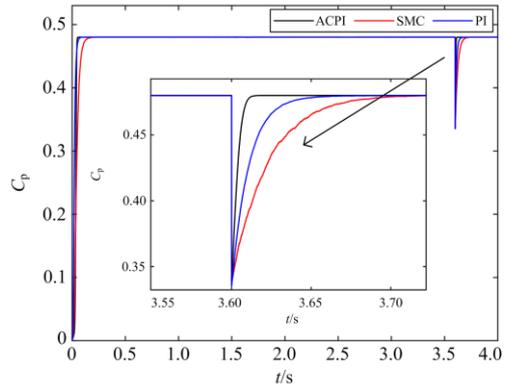
式中: $t_{1g} = 0.8 \text{ s}$ 、 $t_{2g} = 2.8 \text{ s}$ 分别为渐变风开始和趋于稳定的时间点; $T_r = 0.8 \text{ s}$ 为阵风保持时间; $R_{\max} = 2 \text{ m/s}$ 为渐变风变化最大值。

在渐变风情况下, 三种控制方法的仿真结果如图 6 所示, 文献[15]的仿真结果如图 7 所示。

由图 6 可知, 在风速为渐变风的情况下时, 即使风速持续上升, 本文 ACPI 控制系统仍能稳定实现风电系统的最大功率跟踪控制。虽然在风速瞬间跌落时功率利用系数也出现跌落, 但能在 0.03 s 内



(a) 渐变风情况下转速跟踪曲线



(b) 渐变风情况下功率系数

图 6 渐变风情况下控制结果
Fig. 6 Control results under gradual wind

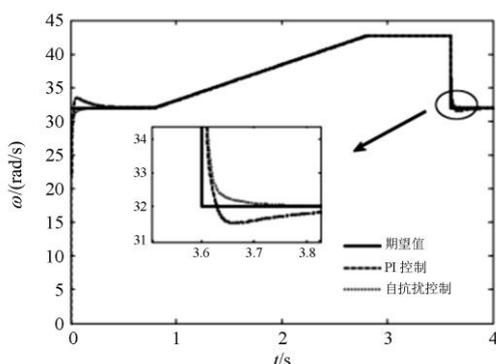


图7 文献[15]渐变风控制结果

Fig. 7 Control results under gradual wind of [15]

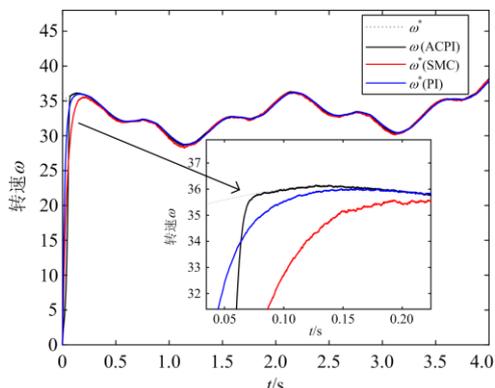
恢复到最大值, 表明本文 ACPI 控制方法具有良好的抗扰动鲁棒性。而滑模和传统 PI 控制方法大约在 0.1 s 和 0.06 s 左右达到稳定。此外, 由图 7 可知, 文献[15]采用自抗扰控制方法, 在相同的风速跌落情况下大约需要 0.1 s 才能恢复最大功率跟踪。相比之下, 本文 ACPI 控制方法抗扰能力更强。

3.3 仿真实验 3: 自然风情况下的仿真结果与分析

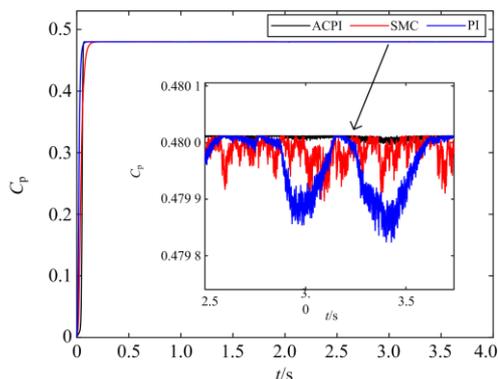
自然风由基本风、阵风、渐变风、随机风的叠加形成, 由上述阵风、渐变风模型可知, 自然风具有较强的突变特性, 又因为随机风的加入同时也具有较强的随机性。自然风情况下的仿真结果如图 8 所示。

由图 8 可知, 在风速为自然风的情况下, 即使此时风速含有较强的突变性和随机性, 本文 ACPI 控制系统仍能稳定实现风电系统的最大功率跟踪控制, 能使功率系数持续保持在最大值, 而滑模和传统 PI 控制方法则在控制过程中出现较大波动, 相比之下, ACPI 控制方法具有更强的抗干扰能力。

在阵风、渐变风和自然风三种风速情况下的仿真结果表明, ACPI 控制方法不仅响应速度快, 控制精度高, 而且无超调和振荡现象, 能稳定实现风电系统的最大功率跟踪控制。与文献[15]的自抗扰



(a) 自然风情况下转速跟踪曲线



(b) 阵风情况下功率系数

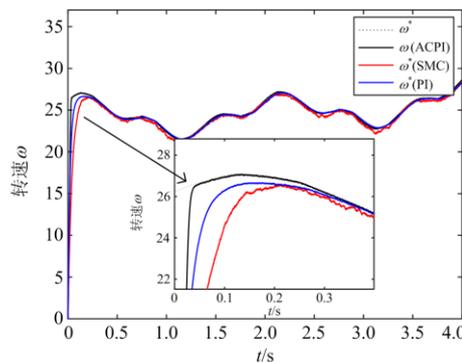
图8 自然风情况下控制结果

Fig. 8 Control results under natural wind

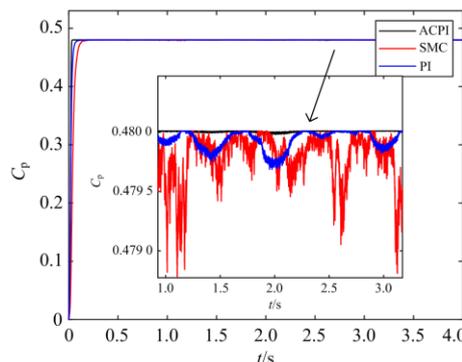
控制方法相比, 本文控制方法结构更简单, 所需镇定参数更少, 控制效果更佳。

3.4 仿真实验 4 自然风情况下的不同风机仿真结果与分析

在仿真实验 3 的基础上, 为验证不同风机参数是否会对结果造成较大影响, 保持自然风速、发电机和控制器参数不变, 将风轮半径改为 $R_m = 2\text{ m}$, 将额定输出功率改为 150 kW。然后进行仿真实验, 结果如图 9 所示。



(a) 自然风情况下转速跟踪曲线



(b) 自然风情况下功率系数

图9 自然风情况下控制结果

Fig. 9 Control results under natural wind

由图 9(a)可知,在风机的参数发生变化时,本文控制方法依然能进行有效控制,且动态响应仍比滑模和传统 PI 控制方法要快。由图 9(b)可知,在风机的参数发生变化时,滑模和传统 PI 控制方法控制下的功率系数比仿真实验 3 中的波动程度更大,而本文控制方法的功率系数基本无变化,表面本文控制方法对于不同的风机具有普遍适用性。

4 结论

针对欠驱非线性永磁直驱风力发电系统的最大功率跟踪控制问题,提出一种基于 ACPI 控制理论的最大功率跟踪策略。理论分析了 ACPI 控制系统的大范围鲁棒稳定性和抗扰鲁棒性,并合理推导出了在 ACPI 控制器控制下的速度因子与系统稳态误差之间的关系,对提高稳态精度具有重要的指导意义。此外分别在三种风速情况下进行了最大功率跟踪,仿真结果表明了本文控制方法的有效性。与传统 PI 控制方法、滑模控制方法和自抗扰控制方法相比,不仅控制结果更佳,而且控制系统结构却更为简单,每个 ACPI 控制器只涉及一个速度因子。此外,本文的 ACPI 控制方法计算量小、实时性好,更利于实际应用,同时对不同风机的仿真实验证明了本文控制方法对不同的风机都能实现有效控制,在风力发电领域具有广泛的应用价值。

参考文献

- [1] 熊立新,徐丙垠,高厚磊.一种开关磁阻风力发电机最大风能跟踪方法[J].电工技术学报,2009,24(11):1-7.
XIONG Lixin, XU Bingyin, GAO Houlei. A new control method of switched reluctance generator for maximum power point tracking in wind turbine application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(11): 1-7.
- [2] 李灵聪,施嘉昊,武庆,等.含风电接入的电力系统脆弱性分析与量化评估[J].电网与清洁能源,2020,36(1):46-54.
LI Jiongcong, SHI Jiahao, WU Qing, et al. Vulnerability analysis and quantitative evaluation of the power system containing wind power[J]. Power System Protection and Control, 2020, 36(1): 46-54.
- [3] 黄宵宁,倪双飞,杨成顺,等.带指令滤波的直驱永磁风机自适应反推积分滑模控制[J].电力系统保护与控制,2020,48(22):142-150.
HUANG Xiaoning, NI Shuangfei, YANG Chengshun, et al. Adaptive backstepping integral sliding mode control of a direct-drive permanent magnet wind generator with a command-filter[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(22): 142-150.
- [4] 苗文静,高瑜,刘其辉,等.基于风电变模式运行与 OLTC 协调的配电网电压控制策略[J].智慧电力,2019,47(11):48-53.
MIAO Wenjing, GAO Yu, LIU Qihui, et al. Voltage control strategy for distribution network based on wind power variable mode operation and coordination with OLTC[J]. Smart Power, 2019, 47(11): 48-53.
- [5] ZHENG Dehua, ESEYE A T, ZHANG Jianhua, et al. Short-term wind power forecasting using a double-stage hierarchical ANFIS approach for energy management in microgrids[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 136-145. DOI: 10.1186/s41601-017-0041-5.
- [6] 马祎炜,俞俊杰,吴国祥,等.双馈风力发电系统最大功率点跟踪控制策略[J].电工技术学报,2009,24(4):202-208.
MA Weiwei, YU Junjie, WU Guoxiang, et al. MPPT control strategy for doubly-fed wind power generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 202-208.
- [7] 田兵,赵克,孙东阳,等.改进型变步长最大功率跟踪算法在风力发电系统中的应用[J].电工技术学报,2016,31(6):226-233,250.
TIAN Bing, ZHAO Ke, SUN Dongyang, et al. Promoted variable step maximum power point tracking algorithm used in the wind energy conversion system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(6): 226-233, 250.
- [8] 刘吉臻,孟洪民,胡阳.采用梯度估计的风力发电系统最优转矩最大功率点追踪效率优化[J].中国电机工程学报,2015,35(10):2367-2374.
LIU Jizhen, MENG Hongmin, HU Yang. Efficiency optimization of optimum torque maximum power point tracking based on gradient approximation for wind turbine generator system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10): 2367-2374.
- [9] KIM K H, TAN L V, LEE D C, et al. Maximum output power tracking control in variable-speed wind turbine systems considering rotor inertial power[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8): 3207-3217.
- [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] 李咸善, 徐浩, 杜于龙. 采用叶尖速比法和爬山搜索法相结合的风力发电系统最大功率点跟踪研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 66-71.
LI Xianshan, XU Hao, DU Yulong. Maximum power tracking of wind power generation system using the combination of tip speed ratio method and climbing search method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 66-71.
- [12] LI Jianpo, DONG Pengwei. maximum power point tracking for solar power systems using the hybrid artificial fish swarm algorithm[J]. Global Energy Interconnection, 2019, 2(4): 351-360.
- [13] BENZAHIA A, BOUALAGA R, MOUSSI A, et al. A PV powered shunt active power filter for power quality improvement[J]. Global Energy Interconnection, 2019, 2(2): 143-149.
- [14] JARAMILLO-LOPEZ F, KENNE G, LAMNABHILAGARRIGUE F. A novel online training neural network-based algorithm for wind speed estimation and adaptive control of PMSG wind turbine system for maximum power extraction[J]. Renewable Energy, 2016, 86: 38-48.
- [15] 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): 94-100.
LI Juan, ZHANG Kezhao, LI Shengquan, et al. Maximum power point tracking control with active disturbance rejection controller based on the best tip speed ratio[J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(12): 94-100.
- [16] 方云熠, 曾喆昭, 刘晴, 等. 永磁直驱风力发电系统最大功率跟踪非线性抗扰控制[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 145-151.
FANG Yunyi, ZENG Zhezhaohao, LIU Qing, et al. Maximum power tracking nonlinear anti-interference control for permanent magnet direct drive wind power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 145-151.
- [17] DASH P K, PATNAIK R K, MISHRA S P. Adaptive fractional integral terminal sliding mode power control of UPFC in DFIG wind farm penetrated multimachine power system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(1): 79-92. DOI: 10.1186/s41601-018-0079-z.
- [18] SLIMANE W, BENCHOUIA M T, GOLEA A, et al. Second order sliding mode maximum power point tracking of wind turbine systems based on double fed induction generator[J]. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2020, 11(3): 716-727.
- [19] GHADERI E, TOHIDI H, KHOSROZADEH B. Maximum power point tracking in variable speed wind turbine based on permanent magnet synchronous generator using maximum torque sliding mode control strategy[J]. Journal of Electronic Science and Technology, 2017, 15(4): 391-399.
- [20] 方云熠, 曾喆昭, 王可煜, 等. 永磁直驱风力发电系统最大功率跟踪改进型积分滑模控制[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 77-83.
FANG Yunyi, ZENG Zhezhaohao, WANG Keyu, et al. MPPT control with improved integral SMC for D-PMSG wind power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 77-83.
- [21] SITHARTHAN R, PARTHASARATHY T, RANI S S, et al. An improved radial basis function neural network control strategy-based maximum power point tracking controller for wind power generation system[J]. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 2019, 41(11): 1-10.
- [22] 曾喆昭, 刘文珏. 一阶时滞系统的智慧 PI 控制[J]. 控制理论与应用, 2019, 36(8): 1322-1328.
ZENG Zhezhaohao, LIU Wenjue. Wisdom PI control for first-order systems with time-delay[J]. Control Theory & Applications, 2019, 36(8): 1322-1328.
- [23] 曾喆昭, 刘文珏. 自耦 PID 控制器[J]. 自动化学报, 2021, 47(2): 404-422.
ZENG Zhezhaohao, LIU Wenjue. Self-coupling PID controllers[J]. Acta Automatica Sinica, 2021, 47(2): 404-422.
- [24] 曾喆昭, 陈泽宇. 论 PID 与自耦 PID 控制理论方法[J]. 控制理论与应用, 2020, 37(12): 2654-2662.
ZENG Zhezhaohao, CHEN Zeyu. On control theory of PID and auto-coupling PID[J]. Control Theory & Applications, 2020, 37(12): 2654-2662.
- [25] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
HAN Jingqing. Auto-disturbances-rejection controller and its applications[J]. Control and Decision, 1998, 13(1): 19-23.

收稿日期: 2020-11-30; 修回日期: 2021-03-27

作者简介:

苏杰(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能控制; E-mail: 1396657361@qq.com

曾喆昭(1963—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为智能计算与智能控制。E-mail: 508984293@qq.com

(编辑 周金梅)