

文章编号: 0254-0096(2020)04-0153-11

风电机组虚拟惯量一阶自抗扰控制研究

王 义¹, 江汉红¹, 邢鹏翔²

(1. 海军工程大学舰船综合电力技术国防科技重点实验室, 武汉 430033; 2. 武汉大学电气工程学院, 武汉 430072)

摘要: 为改善独立微网中由于系统惯量小导致的频率暂态稳定性差的问题, 该文研究利用风电机组虚拟惯量参与调频的控制算法。首先, 分析风电机组虚拟惯量控制(VIC)机理和其存在转速快速恢复和超调过程造成调频能力下降的问题, 并说明传统比例微分(PD)控制的原理; 然后, 利用系统频率动态响应方程, 推导虚拟惯量一阶自抗扰控制(ADRC)的设计过程; 最后, 通过仿真和实验验证得出 ADRC 比 PD 控制优势在于能降低转速恢复速度和抑制转速超调, 能更充分的释放虚拟惯量, 因此 ADRC 进一步减小了微网暂态频率偏差和稳定时间。

关键词: 风电机组; 自抗扰控制; 虚拟惯量控制; PD 控制; 直驱式永磁同步发电机; 转速恢复

中图分类号: TM732

文献标志码: A

0 引言

独立型微电网是解决高山、海岛和偏远地区供电的有效途径, 其原理是利用收集的风、光或生物能源与传统同步发电机组联网, 构建独立于大电网的供电系统^[1]。随着风力发电技术的进步, 其在独立型微电网中的应用越来越广泛。直驱永磁风力同步发电机组(directly-driven wind turbine with permanent magnet synchronous generator, D-PMSG)具有控制灵活、可靠性好和发电效率高等优点, 具有良好的应用前景^[2-3]。微型燃气轮机(micro turbine, MT)具有排放少、效率高、燃料适应性好和便于灵活控制等优点^[4]。本文以直驱永磁风力同步发电机组和微型燃气轮机构建的独立型微网为对象, 分析微网中频率暂态稳定性问题。

微型燃气轮机是独立型微网系统的主控电源, 因此系统的频率稳定性主要依赖微型燃气轮机。一方面, 由于经济原因, 燃气轮机的设计容量要和本地负荷需求相匹配, 导致微网容量有限, 系统惯量较小。另一方面, 由于技术原因, 系统惯量只能阻尼系统频率扰动, 无法完全阻止系统频率变化。因此可借助风电机组参与系统调频, 改善频率稳定性。一般而言, 风电机组参与系统频率调节有 2 种方式: 1) 风电机组降额运行, 系统频率出现偏差时, 风电机组释放备用

功率来参与系统调频, 这个过程是长时间的, 是以牺牲风能利用率和降低风电机组运行经济性为代价, 难以推广应用; 2) 以虚拟惯量控制, 由于风电机组本身具有机械惯性, 其在运行中存在可利用的转子动能, 通过控制将转子动能转化为电磁功率, 为系统频率提供支撑, 这个过程时间短并且“零功耗”, 有不少学者对虚拟惯量控制进行研究。文献[5]提出一种研究 D-PMSG 虚拟惯量控制(virtual inertia control, VIC)的实验研究和系统设计方法, 通过实验装置有效模拟风电机组的转矩响应特性和惯性响应特性, 这在实验室研究风电机组虚拟惯量打下基础。文献[6]构建一套完整的风力机模拟控制平台, 对不同风速、负载以及转动惯量等条件下的风力机运行特性进行了模拟。文献[7]采取比例微分(proportional differentiation, PD)虚拟惯量控制使 D-PMSG 为系统提供频率支撑, 分析不同风速区机组转子动能和变流器容量对机组调频能力的影响, 对多机协同控制进行了研究。文献[8]提出一种带 PD 环节的双馈抽水蓄能机组改进虚拟惯量控制策略, 可提高双馈抽水蓄能机组参与调频的能力, 并给出了改进虚拟惯量控制相关的参数整定方法。文献[9]研究了减缓风电机组转速恢复的改进方案, 采用 PD 控制并附加恒定功率的控制策略, 克服了释放转子动能后会立即进行转速恢复的固有缺点。

收稿日期: 2017-09-18

基金项目: 国家重点基础研究发展(973)计划(613294); 国家自然科学基金(51377167)

通信作者: 王 义(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事微网系统稳定与控制方面的研究。wangyi500500@163.com

文献[10]为避免转速快速恢复过程中,可能出现的二次频率下跌,设计一种动能损失负反馈的转速保护策略。

上述文献说明了利用虚拟惯量参与系统调频的可行性,并且PD虚拟惯量控制具有一定实用性,但PD控制有其固有的局限性,如很难选取合适的PD参数,尽管文献[8-9]对PD控制进行了优化的参数整定或改进的控制策略,但PD控制固有的快速响应和超调的矛盾难以克服。本文拟采用抑制系统频率扰动的角度,设计一种控制器,能够减缓转速恢复过程和避免转速超调。文献[11]研究自抗扰控制器(active disturbance rejection control, ADRC)的牵引网网压低频振荡抑制方法,将ADRC的方法用于动车牵引网网压低频振荡的问题,可克服传统PI控制的快速性和超调之间的矛盾,能更好的抑制低频振荡。文献[12]研究ADRC技术的微网运行控制器,采用自抗扰控制解决逆变器模式切换问题,可有效降低频率波动,提高了控制器的鲁棒性。文献[13]将自抗扰控制用于可变速抽水蓄能机组交流励磁系统,用二阶自抗扰控制器代替传统PI控制,使控

制器具有更好的鲁棒性和抑制扰动效果。文献[14]研究负荷频率控制系统的线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control, LADRC)方法,其所需整定参数少,能够取得比PID(比例、积分、微分)控制更好的抗干扰性能。文献[15]研究线性自抗扰控制器在孤岛微网负荷频率控制中的应用,给出了自抗扰控制器的线性化设计和参数整定方法,以及扩张状态观测器和动态补偿线性化等相关概念。

基于上述学者研究的成果,本文针对PD和一阶ADRC这2种算法展开研究,并分析它们的调频机理。在不超出风电机组虚拟惯量调频能力前提下,通过仿真和实验对比分析这2种算法的特点。

1 风电机组虚拟惯量控制

1.1 风电机组并网结构

单个风电机组并入电网后的系统结构如图1所示,风电机组包含风力机、永磁同步发电机、全功率变流器及其控制系统。

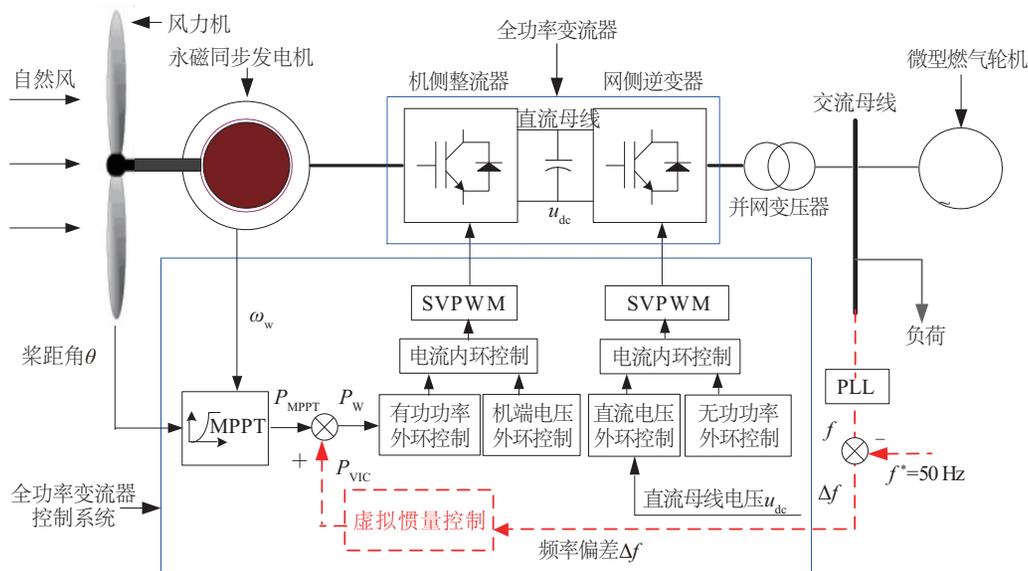


图1 风电机组并网系统结构

Fig. 1 A wind turbine system structure after grid-connection

风力机通过风轮捕获风能驱动永磁同步发电机发电,再通过机侧整流器和网侧逆变器实现并网。风电机组转子运动方程为:

$$2H_w \frac{d\omega_w}{dt} = P_{wind} - P_w \quad (1)$$

式中, H_w —— 永磁同步发电机的惯性时间常数; ω_w —— 风力机风轮的转速, m/s; P_{wind} —— 风力机捕获的机械功率, kW; P_w —— 风电机组的电磁功率, kW。

通过调节风力机桨距角 θ 和转速 ω_w 可使风电机组实现最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制,则其输出功率为 $P_{MPPT} = P_{wind}$ 。当无虚拟惯量控制时,机侧整流器的有功功率指令为 $P_w = P_{MPPT}$,当引入虚拟惯量控制后,则 P_w 的表达式为:

$$P_w = P_{MPPT} + P_{VIC} \quad (2)$$

式中, P_{VIC} —— 虚拟惯量控制输出的辅助调频功率,

kW。 P_{VIC} 可通过系统频率偏差 Δf 的计算得来。

1.2 风电机组虚拟惯量控制的响应机理分析

永磁同步发电机传动系统的动态方程可简化表示为：

$$J_w \frac{d\omega_w}{dt} = T_w - T_e \quad (3)$$

式中, J_w ——永磁同步发电机传动系统的等效转动惯量; T_w ——风力机输出的机械转矩; T_e ——电磁转矩。

$$T_w = P_{wind} / \omega_w \quad (4)$$

$$T_e = P_w / \omega_w \quad (5)$$

风电机组并网运行时,在达到稳态前并未达到最优转速,风电机组运行过程包含 MPPT 控制和虚拟惯量控制过程。图 2 为风电机组在 MPPT 控制和虚拟惯量控制下的响应特性曲线图,图中风速保持恒定定为 7 m/s,系统稳定后,突增 20% 的系统负荷。

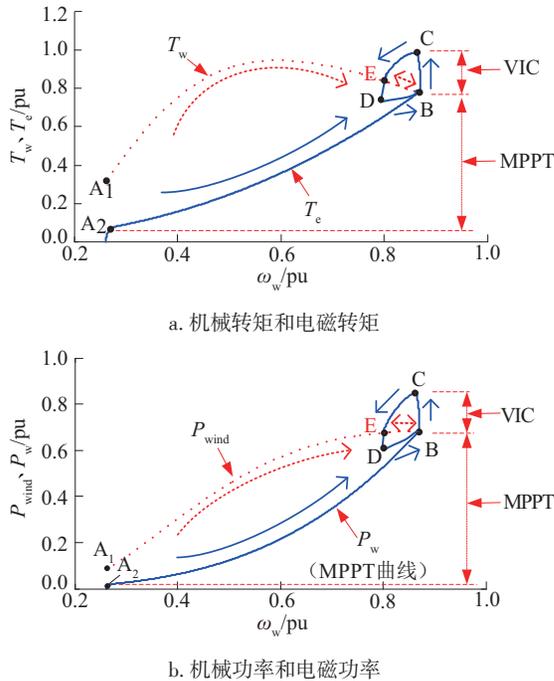


图2 风电机组 MPPT 控制和 VIC 的响应过程

Fig 2 Wind turbine MPPT control and VIC response process

虚拟惯量控制过程(B→C→D→B):当系统因负荷突增导致系统频率下跌时,风电机组的虚拟惯量控制使得 T_e 和 P_w 由 B 点快速爬升至 C 点。在该过程中,由于风电机组固有的惯性作用, ω_w 不会突变,因此风电机组的 T_w 和 P_{wind} 仍保持在 B 点。此时,由于 T_w 小于 T_e , ω_w 开始下降。 ω_w 下降过程中, T_w 和 P_{wind} 沿曲线 B→E 变化, T_e 和 P_w 沿曲线 C→D 运行。最终在 D 点处 ω_w 达到最小,此时 T_w 大于 T_e ,风电机组转速 ω_w 增加, T_w

和 P_{wind} 沿曲线 E→B 变化, T_e 和 P_w 沿曲线 D→B 运行,最终回到 B 点,风电机组的电磁转矩 T_e 和机械转矩 T_w 再次平衡, ω_w 稳定到最优转速 B 点。MPPT 控制过程(A_i→B):风电机组从点 A_i 点($i=1,2$)变化到运行点 B 的过程为在恒风速条件下的 MPPT 过程。该过程中, P_w 沿 MPPT 控制曲线变化,机械出力沿其特性曲线变化。由于 P_{wind} 大于 P_w ,因此 ω_w 不断升高,最终稳定在运行点 B 处。从图 2b 中风电机组的 P_w 曲线可见,B 点即为该风速下机组的最大功率点。

虚拟惯量控制过程,主要是将风电机组的转子动能转化为电磁功率,来减缓系统中负荷扰动对微网的冲击,从而减小系统暂态频率的偏差和稳定时间。

1.3 转速恢复和超调

如图 3 所示,当系统频率下降时,虚拟惯量控制能使转速迅速下降,释放转子动能,风电机组向系统短时输送有功功率,为微网频率提供支撑。这一过程的固有缺点是:在转速快速恢复过程中,一方面会引起功率和转速的振荡超调,另一方面转速恢复过程中,风电机组向电网吸收能量,而给微网提供的功率变小(如图 3 中阴影部分所示),不利于频率恢复稳定。事实上,转速恢复过程是在频率未稳定时进行,这个过程使风电机组输出功率减小和系统负荷增加,是对频率下降起到“叠加效应”,使频率响应特性变差,严重时可能造成系统频率二次跌落^[9-10]。

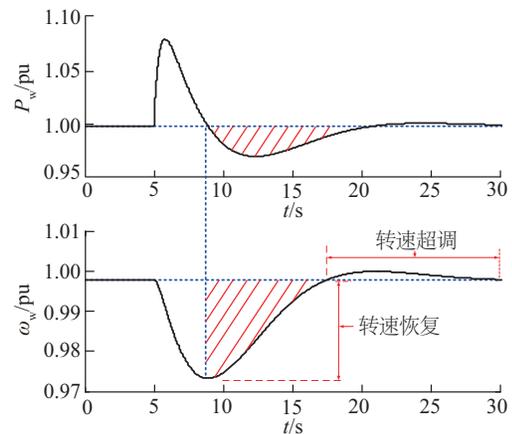


图3 转速恢复和超调

Fig. 3 Recovery and overshoot of rotating speed

2 常规 PD 虚拟惯量控制

单风电机组并网系统的简化模型如图 4 所示。图中 P_{ref} 、 P_{MT} 、 P_L 、 ΔP 分别代表输入燃气轮机参考功率(kW)、燃气轮机输出功率(kW)、负载功率(kW)、并网

系统功率扰动(kW), T_G 、 T_{CH} 分别代表伺服电机常数、微型燃气轮机常数, k_{max} 、 k_p 、 k_d 分别代表 MPPT 控制系数、PD 控制比例系数、PD 控制微分系数, v 代表风速(m/s), ρ 代表空气密度(g/L), R 、 R_0 分别代表风力机半径(m)、调速器常数, C_p 代表风力机发电效率常数, H 、 D 分别代表系统的惯性时间常数和系统阻尼系数。

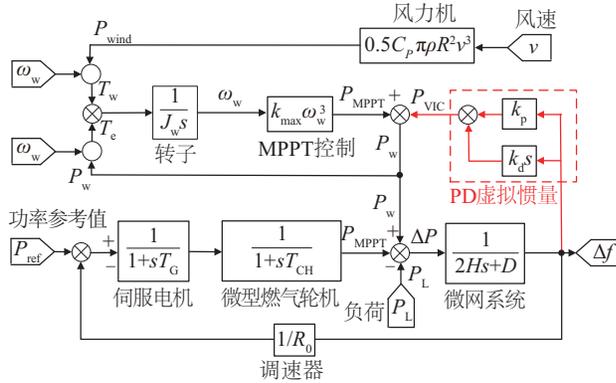


图4 风电机组并网系统的简化模型

Fig. 4 Simplified model of wind turbine grid-connected system

图4中,系统频率的动态响应方程为:

$$\Delta f = \frac{1}{2Hs + D} \times (P_w + P_{MT} - P_L) \quad (6)$$

由式(6)拉氏反变换可得:

$$2H \frac{d\Delta f}{dt} = P_w + P_{MT} - P_L - D\Delta f \quad (7)$$

引入虚拟惯量控制后,将式(2)代入式(7)可得:

$$2H \frac{d\Delta f}{dt} = (P_{MPPT} + P_{VIC}) + P_{MT} - P_L - D\Delta f \quad (8)$$

如图4所示,PD虚拟惯量调频是通过引入与系统频率偏差 Δf 的比例微分(PD)项后,通过求和计算产生辅助调频功率,使风电机组在系统频率波动时改变其出力,从而实现惯性响应,其辅助功率计算公式为:

$$P_{VIC} = -k_p \Delta f - k_d \frac{d\Delta f}{dt} \quad (9)$$

将式(9)代入式(8),可得PD虚拟惯量控制引入后的系统频率动态响应方程:

$$2(H + k_d/2) \frac{d\Delta f}{dt} = P_{MPPT} + P_{MT} - P_L - (D + k_p)\Delta f \quad (10)$$

对比式(8)和式(10)可见,PD虚拟惯量控制方式下系统的惯性时间常数增加了 $k_d/2$,系统阻尼系数增加了 k_p 。可见风电机组的PD虚拟惯量控制从系统惯性和系统阻尼2个方面为系统频率提供支持。

常规PD虚拟惯量控制原理简单,物理意义清晰,但难以获取合适PD参数,取值太小则虚拟惯量不能充

分释放,取值过大则会增加转速恢复过程和超调造成的调频能力快速下降,严重时造成频率二次跌落。经参考文献[8,10]的参数整定方法,本文仅针对不同PD参数进行了定性分析,仿真波形如图5所示。首先,选择一组适当的PD参数(实线),使风电机组参与系统调频。为增加虚拟惯量释放力度,需要增加PD参数(点划线),则频率出现了超调现象;当PD参数进一步增加时(虚线),频率出现了二次跌落。

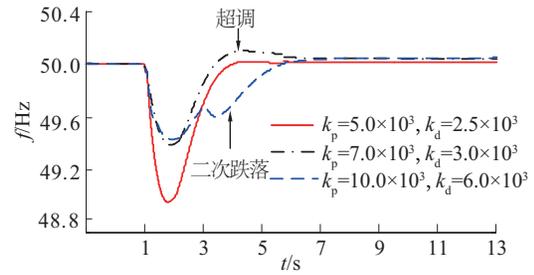


图5 不同PD参数调频效果

Fig. 5 Frequency regulation effects of different PD parameters

3 ADRC 虚拟惯量控制

ADRC 由韩京清^[16-17]提出,是在传统PID误差反馈控制理论上,结合现代控制理论发展而来。对被控对象数学模型精度依赖性较低,主要思想是利用扩张状态观测器(ESO)估计出系统实时扰动并对其进行补偿。

3.1 n阶ADRC

考虑如式(11)所示的n阶不确定非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = x_{i+1}, & i = 1, 2, \dots, n-1 \\ \dot{x}_n = f(x_1, x_2, \dots, x_n, w(t)) + bu(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (11)$$

式中, \mathbf{x} ——状态向量, $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$; $u(t)$ ——系统控制变量; y ——系统输出; b ——控制输入系数; $w(t)$ ——未知外部扰动。

n阶ADRC控制器的结构如图6所示,图中的TD跟踪参考输入信号 $v(t)$,柔化 $v(t)$ 的变化,减少系统输出的超调量。TD输出 v_1, v_2, \dots, v_n ,分别代表经过柔化后的过渡量。

ESO依据测量输入信号 $x(t)$ 和控制输入 $v(t)b$,实时估计外部扰动 $w(t)$ 和系统的内部不确定性(如被控对象的参数摄动),从而给出被控对象的状态变量估计值 z_1, z_2, \dots, z_n ,以及对象内部和外部扰动作用之和的估计值 z_{n+1} , a 为估计值 z_{n+1} 的补偿系数。

ESO 观测下产生的状态估计变量和 TD 产生的柔化过渡量的差值 $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$, 经过 NLSEF 运算, 其输出结果减去 $a \times z_{n+1}$ 得到控制量 $u(t)$, 从而实现对被控对象的控制^[17]。

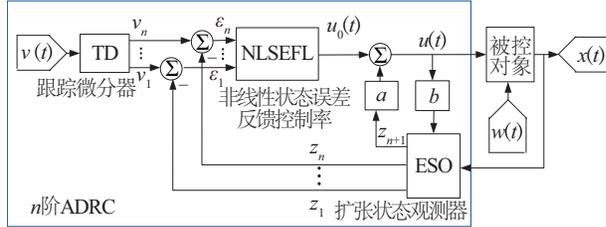


图6 n阶ADRC的结构简图

Fig. 6 Simplified structure of n -order active disturbance rejection control

3.2 一阶ADRC虚拟惯量控制设计

由式(8)可得虚拟惯量调频控制的系统频率响应动态方程为:

$$\frac{d\Delta f}{dt} = \frac{1}{2H}(P_{MPPT} + P_{MT} - P_L - D\Delta f) + \frac{P_{VIC}}{2H} \quad (12)$$

取 $x = \Delta f$, 由式(12)可得系统频率响应状态方程如式(13)所示:

$$\begin{cases} \dot{x} = g(x, w(t)) + bu(t) \\ y = x \end{cases} \quad (13)$$

式中, $g(x, w(t)) = (P_{MPPT} + P_{MT} - P_L - D\Delta f)/2H$; $u(t) = P_{VIC}$; $b = 1/2H$ 。

由式(13)可见频率响应过程可用一阶系统简化表示, 式(12)中的 $(P_{MPPT} + P_{MT} - P_L - D\Delta f)/2H$ 可处理为系统扰动项 $g(x, w(t))$ 。

一阶ADRC虚拟惯量控制的设计主要基于式(13)所示的非线性系统进行。非线性系统控制设计较为复杂, 而线性系统则相对简单^[18]。ADRC是通过ESO实现对系统扰动实时观测, 得到系统扰动的观测量, 并在控制量中进行补偿, 从而实现线性化。为便于理解推导过程, 不妨先假设能够对系统总扰动 $g(x, w(t))$ 的准确估计, 且估计值为 z_2 , 即:

$$z_2 = g(x, w(t)) \quad (14)$$

则可将扰动观测量 z_2 作为控制补偿量引入控制系统, 则有 $u(t) = u_0(t) - z_2/b$, 在控制量 $u(t)$ 的作用下, 式(13)的非线性系统可变为:

$$\begin{cases} \dot{x} = bu_0(t) \\ y = x \end{cases} \quad (15)$$

此时, 系统在形式上由非线性系统变换为线性系

统, 上述简化的过程称为动态补偿线性化^[15]。为实现对系统扰动估计, 需要进行状态变量扩张, 将式(13)所示的系统中总扰动项 $g(x, w(t))$ 用扩张状态变量 x_2 代替, 得到:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + bu(t) \\ \dot{x}_2 = G(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (16)$$

式中, $x_1 = \Delta f$, $x_2 = g(x, w(t))$ 为扩张变量; $G(t)$ ——未知函数。

通过ESO可实现对状态量 x_1 和 x_2 的实时观测。文献[17]给出了ESO的设计方法, 其具体算法为:

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ sz_1 = z_2 - \beta_1 e + bu(t) \\ sz_2 = -\beta_2 e \end{cases} \quad (17)$$

式中, z_1, z_2 ——系统对状态变量 x_1 及 x_2 的观测量; β_1, β_2 ——控制器参数; $fe = fal(e, \alpha_1, \delta)$, $fe_1 = fal(e, \alpha_2, \delta)$ 为非线性函数。

$$fal(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} \frac{e}{\delta^{1-\alpha}}, & |e| \leq \delta \\ |e|^\alpha \text{sign}(e), & |e| > \delta > 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中, δ, a ——常数; $\text{sign}(e)$ ——符号函数。

当 $a=1$ 时, $fal(e, \alpha, \delta) = e$ 。在实际工程中能满足控制效果情况下, 可用 e 代替式(17)中的 fe 和 fe_1 , 从而将式(17)简化为:

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ sz_1 = z_2 - \beta_1 e + bu(t) \\ sz_2 = -\beta_2 e \end{cases} \quad (19)$$

式(19)为系统扩张观测器的线性实现方法, 状态扩张后, 式(13)方程可变为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = bu_0(t) \\ y = x_1 \end{cases} \quad (20)$$

ADRC的目标通过控制使得 x_1 趋向于 $\Delta f_{ref} = 0$, 即抑制到的频率偏差为零。为此式(20)的控制量 $u_0(t)$ 可取为:

$$u_0(t) = \beta_3(\Delta f_{ref} - x_1) \quad (21)$$

式中, β_3 ——控制参数。

由于 z_1 是 x_1 的观测量, 因此可用 z_1 对 x_1 进行替换, 得到:

$$u_0(t) = \beta_3(\Delta f_{ref} - z_1) \quad (22)$$

式(22)称为系统的线性状态误差反馈律(linear state error feedback law, LSEFL)^[18]。组合式(19)、式(22)和 $u(t) = u_0(t) - z_2/b$, 可得到线性化处理的一阶ADRC表达式为:

$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ sz_1 = z_2 - \beta_1 e + bu(t) \\ sz_2 = -\beta_2 e \\ e = \Delta f_{ref} - z_1 \\ u_0(t) = \beta_3 \varepsilon \\ u(t) = u_0(t) - z_2/b \end{cases} \quad (23)$$

式(23)控制器的结构如图7所示,由于 $\Delta f_{ref} = 0$,则可省去 n 阶ADRC设计中的跟踪微分器TD。

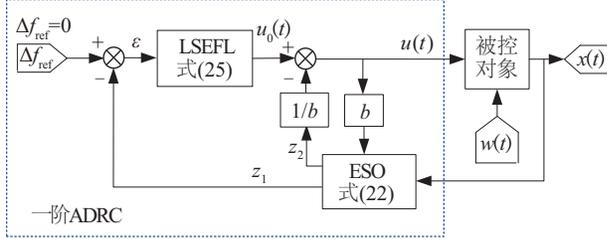


图7 一阶ADRC的结构图

Fig. 7 Simplified structure of first-order active disturbance rejection control

在实际工程应用中,需要将采用的算法进行离散化,文献[17]给出了式(23)的离散化处理方法,具体为:

$$\begin{cases} e(k) = z_1(k) - y(k) \\ z_1(k+1) = z_1(k) + h(z_2(k) - \beta_1 e(k) + bu(k)) \\ z_2(k+1) = z_2(k) + h(-\beta_2 e(k)) \\ \varepsilon(k) = \Delta f_{ref} - z_1(k) \\ u_0(k) = \beta_3 \varepsilon(k) \\ u(k) = u_0(k) - z_2(k)/b \end{cases} \quad (24)$$

式中, h ——采样步长, h 取值随控制精度而定(通常取值在0.0001~0.1000之间),本文借鉴了文献[15,17]参数整定方法,限于篇幅不展开叙述,控制器参数取 $\beta_1 = 1/h$ 、 $\beta_2 = 0.2/h$ 和 $\beta_3 = 1/(250h^2)$ 。需说明的是ADRC参数整定过程只需关注虚拟惯量的充分释放,而不用过多关注转速超调问题,这是其优于PD控制的地方。通过仿真可得 β_1 、 β_2 、 β_3 参数变化对微网频率的影响。如图8所示,合理范围内增加 β_1 、 β_2 和 β_3 可提高虚拟惯量释放力度,改善暂态频率最大偏差,但没造成频率超调的现象。

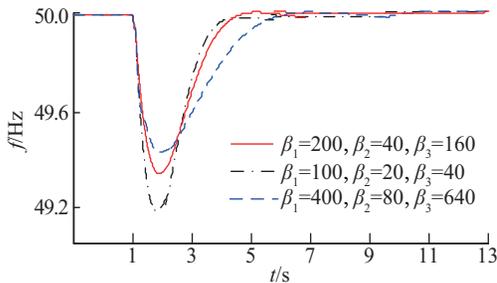


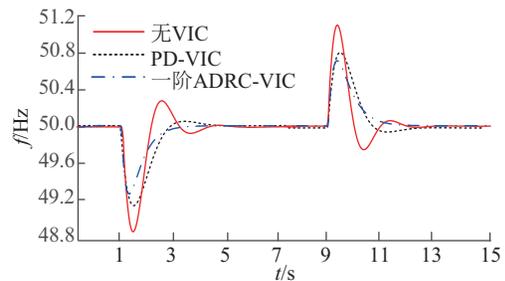
图8 ADRC参数整定特性分析

Fig. 8 Analysis of characteristics of ADRC parameter tuning

4 仿真分析

在 Matlab/Simulink 中搭建由单台风电机组和微型燃气轮机组成的独立微网仿真模型。风电机组额定功率 $P_{wn} = 100$ kW,额定转速 $\omega_{wn} = 16$ rad/s。微型燃气轮机额定功率 $P_{Mtn} = 200$ kW,惯性时间常数 $T_{CH} = 6$ s。固定负荷 $P_{load0} = 130$ kW,可投切负荷 $P_{load1} = 50$ kW。PD控制参数 $k_p = 5.0 \times 10^3$ 、 $k_d = 2.5 \times 10^3$ (参考文献[12]参数整定方法)。ADRC控制参数 $\beta_1 = 200$ 、 $\beta_2 = 40$ 、 $\beta_3 = 160$ 、 $b = 1/12$ 。

仿真场景设计:风速设定为7 m/s,在 $t = 0$ 时,单台风电机组和微型燃气轮机并网发电,共同承担固定负荷 P_{load0} ,风电机组输出功率 $P_w = 60$ kW,燃气轮机输出功率 $P_{MT} = 70$ kW;在 $t = 1$ s时,投入负荷 P_{load1} ;在 $t = 9$ s时,切除负荷。在 $t = 1$ s投入 P_{load1} 时,当风电机组的虚拟惯量不参与调频时(图9中实线所示),微型燃气轮机独立承担负荷扰动, f 跌落到48.9 Hz,经过2次振荡后,约在 $t = 4.9$ s时稳定, $P_w = 60$ kW和 $\omega_w = 12$ rad/s维持不变, P_{MT} 阶跃增加到120 kW。当采用PD虚拟惯量控制时(图9中虚线所示),风电机组利用虚拟惯量参与调频, f 跌落最低点为49.1 Hz,经过一次振荡后约在 $t = 4.1$ s时稳定, P_w 和 ω_w 均出现了振荡超调现象, ω_w 跌落最大偏差值为0.7 rad/s。由于 P_w 的扰动造成 P_{MT} 到120 kW时出现了超调现象。当采用ADRC虚拟惯量控制时(图9中点划线所示),风电机组同样利用虚拟惯量参与了调频, f 跌落最低点为49.3 Hz,无明显振荡的情况下约在 $t = 3.2$ s时稳定, P_w 和 ω_w 均未出现振荡超调, ω_w 跌落最大偏差值为0.9 rad/s,即ADRC在更充分释放虚拟惯量前提下,能使风电机组转速恢复变慢,且有效避免了转速超调。对比 P_{MT} 波形可得,相比于PD虚拟惯量控制,ADRC能使 P_{MT} 更“平滑”的增加到120 kW,从而更好的减小负荷扰动对微型燃气轮机的冲击,减小暂态频率波动。同理,在 $t = 9$ s切除负荷时,可得与上述等效结论,文中不再赘述。



a. 频率

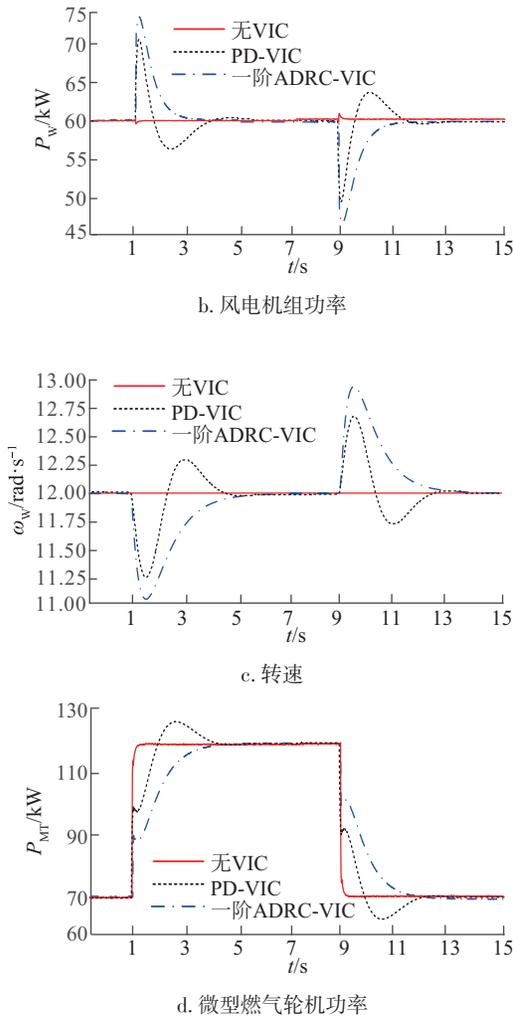


图9 突增和突卸负荷仿真波形
Fig. 9 Simulation waveform of sudden increasing and sudden decreasing load

由仿真实验可得,PD 和 ADRC 均能利用风电机组虚拟惯量参与系统调频,有效改善系统频率暂态稳定性。相比于 PD 虚拟惯量控制,ADRC 虚拟惯量控制使频率波动最大偏差减小了 0.2 Hz,稳定时间减小了 0.9 s。PD 虚拟惯量控制的转速快速恢复和超调是造成风电机组调频能力不能充分发挥的固有原因,ADRC 虚拟惯量控制能减小这种固有不足的影响,进一步改善电网频率暂态稳定性。

5 实验验证

5.1 模拟实验平台设计

为进一步验证上述算法的有效性和可行性,搭建一套系统容量为 27.5 kVA 的模拟风电并网实验系统,包括 1 台模拟风力发电机组,其结构如图 1 所示,网侧直

变器稳住直流母线,机侧整流器实现 MPPT 控制和虚拟惯量控制算法。另外,还包括一套“背靠背”全功率变流器模拟的同步发电机,其按文献[19]的算法模拟微型燃气轮机频率特性。通过直流电动机来模拟风力机,通过飞轮来模拟风力机惯量。通过 RS485 串口通信,实现 2 台 PC 机与 DSP F29812 控制器进行数据交互,上位机采用 Labwindows/CVI 界面采集数据并绘制功率、频率等曲线。

模拟实验系统结构图和实物图分别如图 10a 和图 10b 所示。实验系统中,模拟风力机的额定功率为 $P_{wn}' = 7.5 \text{ kW}$,额定转速 $\omega_{wn}' = 18.8 \text{ rad/s}$ 。模拟微型燃气轮机的容量 $P_{MTn}' = 20 \text{ kW}$,惯性时间常数 $T_{CH}' = 10 \text{ s}$ 。固定负荷为 $P_{load0}' = 10 \text{ kW}$,可投切负荷 $P_{load1}' = 5 \text{ kW}$ 。PD 控制参数 $k_p' = 0.6 \times 10^3$ 、 $k_i' = 0.2 \times 10^3$,ADRC 控制参数 $\beta_1' = 100$ 、 $\beta_2' = 20$ 、 $\beta_3' = 40$ 、 $b' = 1/20$ 。

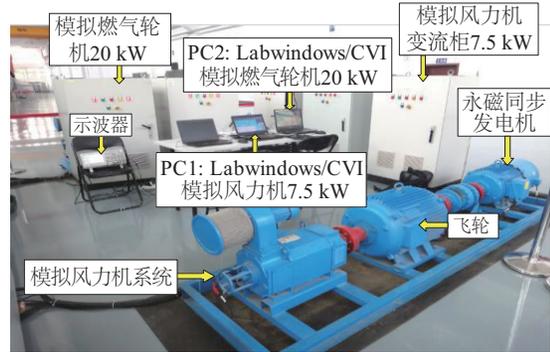
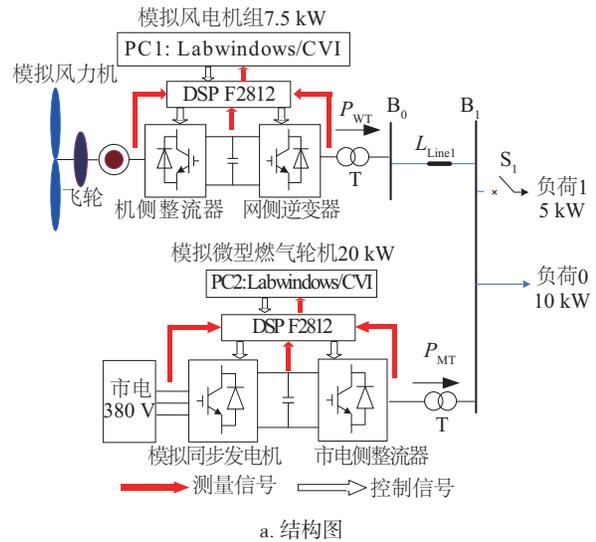


图 10 模拟实验平台结构和实物图

Fig. 10 Schematic diagram and physical map of simulation experimental platform

实验场景设计:模拟风电机组的风速设定为 5 m/s, 在 $t=0$ 时, 风电机组和微型燃气轮机处于并网状态, 且 $P_w = 2.5 \text{ kW}$, $P_{MT} = 7.5 \text{ kW}$ 。在 $t=7.5 \text{ s}$ 时, 投切负荷 P'_{load1} , 分别按无虚拟惯量控制、PD 虚拟惯量控制、一阶 ADRC 虚拟惯量控制进行 3 组实验。

5.2 实验结果分析

图 11~图 13 分别是负荷投切期间无虚拟惯量控制、PD 虚拟惯量控制、ADRC 虚拟惯量控制的实验波形。图 11 为无虚拟惯量控制实验波形, 在 $t=7.5 \text{ s}$ 时, 突增(左侧图)/突卸(右侧图)5 kW 负荷时, 模拟微型燃气轮机独立承担负荷扰动, 其频率波动特性与微型燃气轮机相似, 频率波动偏差最大值约为 $\Delta f_{max} = 1.22 \text{ Hz}$, 经过 3 次振荡后, 频率稳定时间约在 $t=19.6 \text{ s}$, $P_w = 2.5 \text{ kW}$ 和 $\omega_w = 14 \text{ rad/s}$ 维持不变, P_{MT} 随负荷的投切而阶跃式增/减 5 kW。

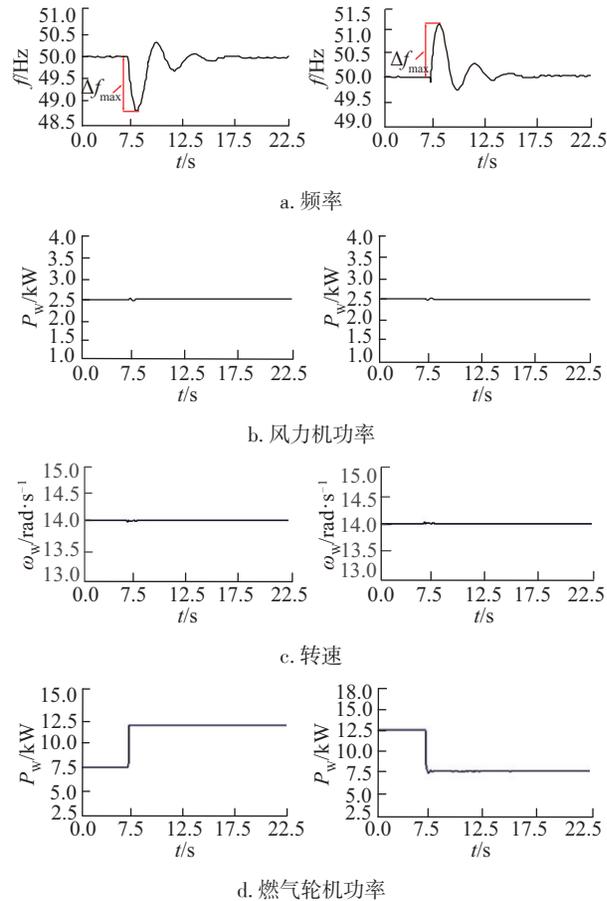


图 11 无虚拟惯量控制实验波形

Fig. 11 Experiment waveforms without VIC

图 12 为 PD 虚拟惯量控制实验波形, 在 $t=7.5 \text{ s}$ 时, 突增(左侧图)/突卸(右侧图)5 kW 负荷时, 频率波

动偏差最大值约为 $\Delta f_{max} = 0.93 \text{ Hz}$, 经过 2 次振荡后, 稳定时间约在 $t=15.2 \text{ s}$ 。由于模拟实验平台的风电机组转子动能有限, 因此 PD 控制造成的 ω_w 和 P_w 振荡超调现象较小, 但不影响控制算法的定性分析和对比研究。图中 P_w 的扰动也造成 P_{MT} 出现轻微的超调现象。

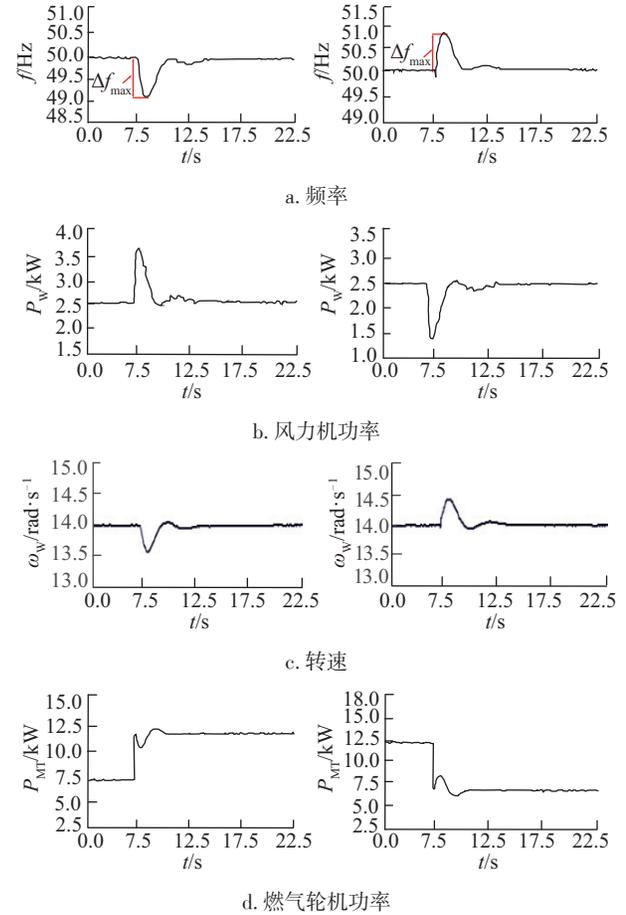


图 12 PD 虚拟惯量控制实验波形

Fig. 12 Experiment waveforms with PD VIC

图 13 为 ADRC 虚拟惯量控制实验波形, 在 $t=7.5 \text{ s}$ 时, 突增(左侧图)/突卸(右侧图)5 kW 负荷时, 频率波动偏差最大值约为 $\Delta f_{max} = 0.75 \text{ Hz}$, 频率恢复稳态时间约在 $t=13.6 \text{ s}$, 没有出现明显的振荡过程。在 ADRC 的转速 ω_w 跌落最大偏差值大于 PD 控制, 即风电机组虚拟惯量释放更加充分时, 一阶 ADRC 虚拟惯量控制使风电机组转速恢复变慢, 并避免了转速超调现象。对比 PD 控制的 P_{MT} 波形可得一阶 ADRC 虚拟惯量控制未造成 P_{MT} 的超调, 其更好的弱化负荷扰动对微型燃气轮机的影响, 使燃气轮机功率过渡更“平滑”, 从而改善暂态频率稳定性。ADRC 比 PD 虚拟惯量控制的微网频率

波动幅度值偏差 Δf_{\max} 减小了 0.18 Hz, 同时稳定时间也减小了约 1.6 s。

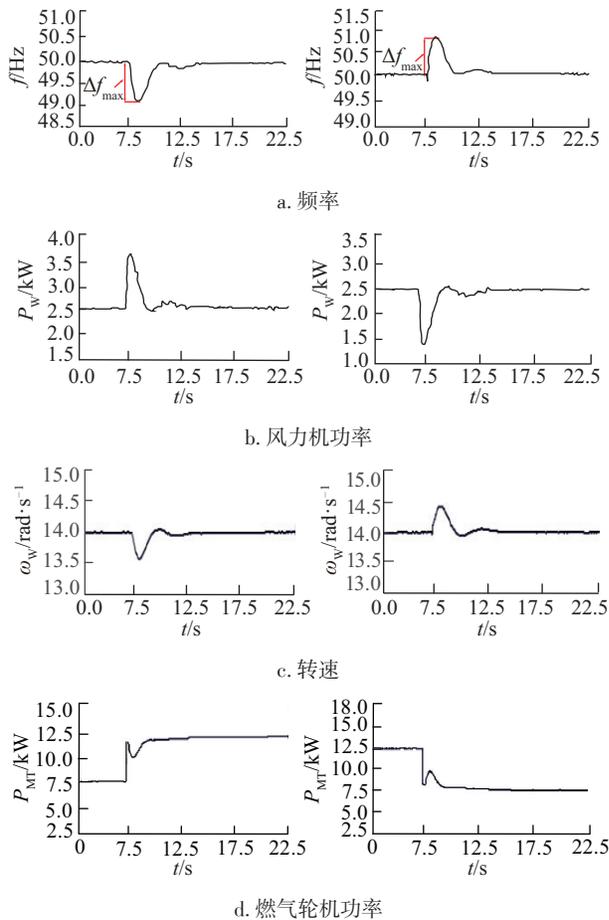


图 13 一阶 ADRC 虚拟惯量控制实验波形

Fig. 13 Experiment waveforms with first-order ADRC-VIC

6 结 论

本文以独立型微网为背景, 研究利用风电机组虚拟惯量参与系统调频的控制算法, 分析虚拟惯量控制存在转速快速恢复过程和超调造成调频能力降低的固有问题, 并说明了 PD 虚拟惯量控制原理。ADRC 是一种从抑制系统频率扰动的角度设计的控制器, 主要思想是通过扩展状态观测器来估计频率扰动, 再通过动态补偿来抑制扰动。ADRC 能有效减缓转速恢复和抑制超调, 本文给出一阶 ADRC 虚拟惯量控制的设计过程。

通过仿真和实验验证, 尽管 PD 和 ADRC 控制器结构和控制参数都不一致, 通过比较可得 ADRC 在能更充分释放虚拟惯量的前提下, 同时能减缓转速恢复速度和避免转速超调, 其暂态频率偏差和稳定时间都小于 PD 控制, 可得一阶 ADRC 虚拟惯量控制的效果

更优。

文中控制算法均是以不超出风电机组虚拟惯量调频能力为前提, 但是并未解决风电机组调频能力如何充分释放的问题, 而控制器的参数最优设计要与调频能力相结合, 因此文中 ADRC 参数也并非最优, 后续需研究如何结合调频能力的充分释放整定最优参数。另外, 本文仅针对单台风电机组参与调频算法研究, 多台或多微源协同调频是下步可开展的研究。

[参考文献]

- [1] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14.
WANG C S, LI P. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system[J]. Automation of electric power systems, 2010, 34(2): 10-14.
- [2] 王刚, 侍乔明, 崔志勇, 等. 一种风力机虚拟惯量控制与传统发电机调速控制的协调方法[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2794-2801.
WANG G, SHI Q M, CUI Z Y, et al. A Coordinated strategy of virtual inertia control of wind turbine and governor control of conventional generator[J]. Power system technology, 2015, 39(10): 2794-2801.
- [3] 吴优, 付立军, 侍乔明, 等. 直驱永磁风电机组虚拟惯量控制简化实验方法[J]. 太阳能学报, 2017, 38(5): 1361-1368.
WU Y, FU L J, SHI Q M, et al. A simplified experimental method of D-PMSG with virtual inertial control[J]. Acta energiae solaris sinica, 2017, 38(5): 1361-1368.
- [4] HUANG W, ZHANG J H, WU Z P, et al. Dynamic modeling and simulation of a micro-turbine generation system in the microgrid [C]//Proceedings of IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies, Singapore, 2008.
- [5] 侍乔明, 王刚, 马伟明, 等. 直驱永磁风电机组虚拟惯量控制的实验方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 2033-2042.
SHI Q M, WANG G, MA W M, et al. An experimental study method of D-PMSG with virtual inertia control[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 2033-2042.
- [6] 陈杰, 陈家伟, 陈冉, 等. 基于永磁同步电机的风力机动态特性模拟[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(15): 40-46.

- CHEN J, CHEN J W, CHEN R, et al. Static and dynamic behaviour simulation of wind turbine based on PMSM [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(15): 40-46.
- [7] 陈宇航, 王刚, 侍乔明, 等. 一种新型风电场虚拟惯量协同控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 27-33.
- CHEN Y H, WANG G, SHI Q M, et al. A new coordinated virtual inertia control strategy for wind farms [J]. Automation of electric power systems, 2015, 39(5): 27-33.
- [8] 李辉, 刘海涛, 宋二兵, 等. 双馈抽水蓄能机组参与电网调频的改进虚拟惯性控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(10): 58-65.
- LI H, LIU H T, SONG E B, et al. Improved virtual inertial control strategy of doubly fed pumped storage unit for power network frequency modulation [J]. Automation of electric power systems, 2017, 41(10): 58-65.
- [9] 刘彬彬, 杨健维, 廖凯, 等. 基于转子动能控制的双馈风电机组频率控制改进方案[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 17-22.
- LIU B B, YANG J W, LIAO K, et al. Improved frequency control strategy for DFIG-based wind turbines based on rotor kinetic energy control [J]. Automation of electric power systems, 2016, 40(16): 17-22.
- [10] 丁磊, 尹善耀, 王同晓, 等. 考虑惯性调频的双馈风电机组主动转速保护控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(24): 29-35.
- DING L, YIN S Y, WANG T X, et al. Active rotor speed protection strategy for DFIG-based wind turbines with inertia control [J]. Automation of electric power systems, 2015, 39(24): 29-35.
- [11] 姚书龙, 刘志刚, 张桂南, 等. 基于自抗扰控制的牵引网网压低频振荡抑制方法[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 207-213.
- YAO S L, LIU Z G, ZHANG G N, et al. A novel approach based on ADRC to traction network voltage low frequency oscillation suppression research [J]. Power system technology, 2016, 40(1): 207-213.
- [12] 徐晓宁, 周雪松, 马幼捷, 等. 基于自抗扰控制技术的微网运行控制器[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3336-3346.
- XU X N, ZHOU X S, MA Y J, et al. Micro grid operation controller based on ADRC [J]. High voltage engineering, 2016, 42(10): 3336-3346.
- [13] 纪历, 邵宜祥, 高苏杰, 等. 可变速抽水储能机组交流励磁系统自抗扰控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 162-165.
- JI L, SHAO Y X, GAO S J, et al. Active disturbance rejection control for AC excitation system of variable speed pumped storage units [J]. Automation of electric power systems, 2017, 41(13): 162-165.
- [14] 谭文, 周宏, 傅彩芬. 负荷频率控制系统的线性自抗扰控制[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1580-1588.
- TAN W, ZHOU H, FU C F. Linear active disturbance rejection control for load frequency control of power systems [J]. Control theory & applications, 2013, 30(12): 1580-1588.
- [15] 唐艳梅. 线性自抗扰控制器在孤岛微网负荷频率控制中的应用[D]. 保定: 华北电力大学, 2015.
- [16] 韩京清. 自抗扰控制技术--估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- HAN J Q. Active disturbance rejection control technique--The technique for estimating and compensating the uncertainties [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.
- [17] 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 J Q. Auto-disturbance-rejection controller and its applications [J]. Control and decision, 1998, 13(1): 19-23.
- [18] 李杰, 齐晓慧, 夏元清, 等. 线性/非线性自抗扰切换控制方法研究[J]. 自动化学报, 2016, 42(1): 202-211.
- LI J, QI X H, XIA Y Q, et al. On linear/nonlinear active disturbance rejection switching control [J]. Acta automatica sinica, 2016, 42(1): 202-211.
- [19] 侍乔明, 王刚, 付立军, 等. 基于虚拟同步发电机原理的模拟同步发电机设计方法[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 783-790.
- SHI Q M, WANG G, FU L J, et al. A design method of simulative synchronous generator based on virtual synchronous generator theory [J]. Power system technology, 2015, 39(3): 783-790.

RESEARCH OF WIND TURBINE VIRTUAL INERTIA FIRST-ORDER ACTIVE DISTURBANCE REJECTION CONTROL

Wang Yi¹, Jiang Hanhong¹, Xing Pengxiang²

(1. *National Key Laboratory of Vessel Integrated Power System Technology, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China;*

2. *School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China*)

Abstract: In order to improve the frequency transient stability in an independent micro-grid, this paper studies the algorithm of using the wind turbine virtual inertia to participate in frequency regulation. Firstly, the mechanism of wind turbine virtual inertia frequency regulation is analyzed, and the principle of tradition PD virtual inertia control is described. Secondly, using the system frequency dynamic response equation, the designing process of one-order ADRC virtual inertia control is deduced. Thirdly, through simulation and experiment verification, it is concluded that ADRC is superior to PD in that it can reduce the recovery speed of the rotating speed and suppress the rotating speed overshoot, and more fully release the virtual inertia, so ADRC algorithm can further improve the transient frequency deviation and the settling time.

Keywords: Wind turbine; ADRC; virtual inertia control; PD control; D-PMSG; rotating speed recovery