# 风电并网一次调频控制性能研究

## 夏祥武<sup>1,2</sup>,田梦瑶<sup>1</sup>

(1.上海电力大学 电气工程学院,上海 200090;2.中煤科工集团上海有限公司,上海 200030)

摘要:为了使采用双馈式异步电机的风力发电并网系统具备参与电网一次调频的能力,需要对并网系统 开展一次调频性能研究,采用下垂控制方案,解耦有功功率和无功功率,通过控制有功功率输出来动态响应频 率波动。针对传统下垂控制在响应电网频率调节过程中,输出功率与参考功率偏差较大引起的控制系统过度 调整问题,引入动态下垂系数作为原下垂控制系数负反馈相,使频率与下垂控制系数的乘积在可控范围内变 换,实现下垂系数根据目标频率实时调节;针对风机并网系统一次调频过程中的功率震荡问题,建立风电并网 虚拟同步机数学模型,采用自适应虚拟参数,并分析参数取值范围。通过Matlab/Simulink 仿真和实验验证所 提方案可以使风电并网系统一次调频控制性能更优。

关键词:风电并网系统;一次调频;非线性下垂控制;自适应虚拟惯量 中图分类号:TM273 文献标识码:A DOI:10.19457/j.1001-2095.dqcd20820

Research on the Performance of Primary Frequency Control of Wind Power Grid Connected

XIA Xiangwu<sup>1,2</sup>, TIAN Mengyao<sup>1</sup>

(1. Institute of Electric Power Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. China Coal Technology and Engineering Group Shanghai Research Institute, Shanghai 200030, China)

Abstract: In order to make the grid connected wind power system with doubly fed induction motor have the ability to participate in the primary frequency regulation of power grid, it is necessary to study the primary frequency regulation performance of the grid connected system, adopt the droop control scheme, decouple the active power and reactive power, and control the dynamic response frequency fluctuation of the active power output. Aiming at the problem of excessive adjustment of control system caused by the large deviation between output power and reference power in response to grid frequency regulation by traditional droop control, the dynamic droop coefficient was introduced as the negative feedback phase of the original droop control coefficient, so that the product of the frequency and the droop coefficient can be transformed within the controllable range to realize the real-time adjustment of the fan grid connected system for the problem of power oscillation, the mathematical model of wind power grid connected virtual synchronous machine was established, the adaptive virtual parameters were adopted, and the range of parameters was analyzed. Through Matlab/Simulink and experimental verification, the scheme proposed can make the primary frequency control performance of wind power grid connected system better.

Key words: wind power grid-connected system; primary frequency modulation; nonlinear droop control; adaptive virtual inertia

随着电网容量不断增加,区域电网结构变得 越来越复杂。为了提升电网频率的安全水平,发 电机组需参与到电网系统频率调节工作中。传 统火电、水电机组由具有旋转惯性的机械器件组 成,并且将一次能源转换为电能需要经历一系列 复杂过程,所以对频率响应速度较慢。相较于传 统火电、水电机组,新能源发电因为可以快速调 节有功出力进而改变上网频率,从而实现在并网 点具备参与电网频率快速调整能力,近年来受到 业内的广泛关注<sup>[1-3]</sup>。

基金项目:上海市科委项目(18DZ1203200);上海绿色能源并网工程技术研究中心项目(13DZ2251900) 作者简介:夏祥武(1977—),男,硕士,副研究员,Emai:18602127877@163.com

目前,针对风电一次调频控制方法主要分为:减载控制、下垂控制和转子惯量控制<sup>[4-5]</sup>。下 垂控制是模拟同步发电机的频率下垂特性,实 现频率有差调节,该一次调频是一个稳态过程, 但是由于线路阻抗和电网频率波动的影响,传 统下垂控制在运行过程中会存在较大的功率震 荡问题<sup>[6-7]</sup>。为了解决这一问题,文献[8-9]将有 功功率偏差引入下垂控制中以增加系统调节能 力。文献[10-11]将有功、无功功率各自的下垂 系数用非线性相关的一次函数来代替,根据输 出功率自动计算出该函数。文献[12-13]利用基

于 VSG 的风电机组频率控制策略实现机组响应 电网频率变化。同时考虑风机虚拟同步机的虚 拟惯量控制和下垂控制,是一种同时考虑暂态 和稳态的组合控制方案。

本文首先分析传统风机并网系统一次调频 方案,在一次调频下垂控制中引入调频死区;然 后将有功下垂系数m变为动态下垂系数,实现下 垂系数根据目标频率实时调节,建立新型非线性 下垂控制一次调频曲线,避免功率震荡;接着为 了抑制频率突变引起的功率震荡现象,在风电机 组虚拟同步机引入自适应虚拟惯量和自适应阻 尼系数,分析其控制模型并计算参数取值范围; 最后通过Matlab/Simulink和实验验证了所提方案 的有效性。

1 传统风机并网一次调频

### 1.1 风机减载控制

双馈式风机为了保证风能的最大利用率,需 要工作于最大功率点追踪(maximum power point tracking, MPPT)模式。为了实现一次调频需要使 风机留有一定的备用负荷,即减载运行状态。双 馈式风机机组减载控制方法可分为:转子超速控 制法和桨距角控制法。双馈式风机 MPPT运行曲 线与减载运行原理如图1所示。



图 1 MPPT运行曲线与减载运行原理图 Fig.1 MPPT operation curve and load-shedding

在图1中:点1是最优功率点,此时风速为v, 风机输出功率最大;点2是超速运行点,风机转子 转速大于最优转速,减少风能捕获,风机输出功 率减少,留出裕度功率并减载运行;保持风机转 子转速不变,调整桨距角从β<sub>1</sub>增加至β<sub>2</sub>,风机运 行到点3,风机捕获功率减小。风机减载运行可 以表示为

$$P_{\rm del} = K_{\rm del} \omega_{\rm r}^3 \tag{1}$$

式中: $P_{del}$ 为风机减载运行后输出功率; $K_{del}$ 为减载运行比例系数; $\omega_r$ 为转子转速。

#### 1.2 并网系统下垂控制及一次调频

在风机并网系统中,通过模仿常规发电机组 里同步发电机下垂外特性来对逆变器进行控制 的方式就是下垂控制,可表示为

$$\begin{cases} f = f_n - m(P - P_n) \\ U = U_n - n(Q - Q_n) \end{cases}$$
(2)

式中:f为下垂控制输出频率;U为下垂控制输出 电压;f<sub>n</sub>为被控系统额定频率;U<sub>n</sub>为被控系统额定 电压;m为有功功率对应下垂控制系数;n为无功 功率对应下垂系数;P为被控系统输出有功功率; Q为被控系统输出无功功率;P<sub>n</sub>为被控系统额定 有功功率;Q<sub>n</sub>为被控系统额定无功功率。

在风力发电并网系统一次调频过程中,因为 逆变装置器死区的存在,需要设置频率响应动作 门槛值 $f_d$ ,通常 $f_d = (50 \pm 0.1)$ Hz,当下垂控制输出 频率49.9Hz  $\leq f \leq 50.1$ Hz 范围时,下垂控制系统 不动作。根据逆变器的输出特性,在一次调频过 程中,系统输出有功功率调节范围为(1±10%) $P_0$ , 对应输出频率范围为49.8~50.2 Hz。根据以上分 析得到风机并网一次调频P-f下垂特性曲线如 图2所示。



$$P = P_0 - \frac{1}{m} (f - f_d)$$
(3)

式中:P。为风机并网一次调频输出功率初值。

## 2 新型非线性下垂控制

根据图2可知,在风力发电并网系统一次调 频过程中,有功下垂系数m为常数。为了响应突 变的频率,输出有功功率需要大幅度变动,这会 引起系统功率震荡,严重时会造成脱网。因此, 恒定下垂系数不适用于系统一次调频控制中。

#### 2.1 动态下垂系数

本文提出一种新型非线性下垂控制方案,通 过实时调节下垂系数来响应输出频率,当需要响 应较大范围波动的频率时,先增大下垂系数,在 逼近目标频率的过程中,逐渐减小下垂系数。这 样既能及时调整风电出力,又能有效减少频率波 动。动态下垂系数m'可以表示为

$$m' = \frac{1}{m} \frac{f - f_0}{P_n}$$
(4)

式中:f。为系统一次调频输频率初值。

将动态下垂系数与输出功率相乘作为下垂 系数的负反馈相,加入到并网变流装置一次调频 控制中,实现下垂系数根据功率实时变换,做到 自适应调节。新型风力发电并网系统下垂控制 表达式为

$$P = P_0 - (\frac{1}{m} - m'P)(f - f_d)$$
(5)

#### 2.2 新型非线性下垂控制一次调频曲线

通过引入动态下垂系数作为原下垂控制系数负 反馈相,使得频率与下垂控制系数的乘积在可控 范围内变换,实现下垂系数根据目标频率实时调节。

根据式(5),可以得到风电并网系统一次调 频非线性下垂控制曲线如图3所示。



在图3中,下垂系数可以根据当前频率与目标频率的差值实时调整,随着越来越逼近目标频率,下垂系数越来越小,即功率变化量减小,避免

引起功率震荡。与图2传统下垂曲线相比,非线 性下垂控制曲线具有光滑连续的特征,尤其是在 调频区间与死区区间相交处切换更为平滑,不存 在间断点和导数不连续点。

# 3 自适应虚拟参数控制

在风机并网系统一次调频过程中,非线性下 垂控制可以从源头减少频率调节引起的功率震 荡现象,但无法对输出功率的震荡进行抑制,风 机并网系统响应频率突变的方式类似于同步发 电机,即频率上升,机组加速,机组将输出部分电 能存储为动能;频率下降,机组减速,机组部分动 能转化为电能。

风机并网系统虚拟同步机数学模型为

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_{\rm m} - P_{\rm e}}{\omega} - D(\omega - \omega_0) \\ \frac{d\delta}{dt} = \omega \end{cases}$$
(6)

其中  $P_{m} = P_{ref} - K(\omega - \omega_{0})$  (7) 式中:J为同步机转动惯量; $\omega$ 为目标频率对应同 步机转子转速; $P_{m}$ 为同步机机械功率; $P_{e}$ 为同步 机电磁功率,即输出功率;D为阻尼系数; $\omega_{0}$ 为初 始频率对应同步机转子转速; $\delta$ 为同步机虚拟功 角; $P_{ref}$ 为同步机输出功率参考值;K为有功频静 态系数。

传统一次调频过程中,风机转动惯量为定值,J选值过小,系统响应时间可以减少,但无法 对功率震荡起到抑制作用;J选值过大,系统可以 对功率波动起到抑制作用,但大大增加了响应时 间。同理,阻尼系数D的选取也会影响功率震荡 抑制性能。

#### 3.1 自适应参数控制

当发生功率震荡时,同步机功率与转速变化 曲线如图4所示。



由图4可知,当发生功率震荡时,转速增加阶

段 $\omega > \omega_0$ ,其中a阶段 d $\omega$ /dt < 0,c阶段 d $\omega$ /dt > 0, 转速增加阶段需要增加转子惯量J来限制转子偏 移量的增加;转速减少阶段 $\omega < \omega_0$ ,其中b阶段 d $\omega$ /dt < 0,d阶段 d $\omega$ /dt > 0,转速减少阶段需要减 少转子惯量J使功率尽快恢复至稳定值。基于 此,本文提出一种自适应控制方案,在转速增加 阶段,增加转子惯量J,同时适当减少阻尼系数D; 在转速减少阶段,减少转子惯量J,同时适当增加 阻尼系数D。该方案在加速阶段通过减少阻尼系 数来保证系统响应速度,在减速阶段通过增加阻 尼系数加快功率至稳定值。

自适应虚拟惯量和转速差控制函数为

$$J = k_i |\omega - \omega_0| + J_0 \tag{8}$$

式中: $k_j$ 为虚拟惯量调节系数,该系数正负与  $\frac{\omega - \omega_0}{d\omega/dt}$ 正负一致; $J_0$ 为额定虚拟惯量。

自适应阻尼系数和转速差控制函数为

$$D = |k_{d}|(J_{0} - k_{j}|\omega - \omega_{0}|) + D_{0} \qquad (9)$$
$$k_{d} = \frac{D_{0}}{I_{0}}$$

其中

式中:k<sub>d</sub>为阻尼惯性比;D<sub>0</sub>为额定阻尼系数。

## 3.2 自适应参数分析

图 5 是风机并网发电与输电线路连接示意图。图 5 中,风力发电系统输出电压可表示为 $U_0 \angle \delta$ ,输电线路等效电抗为 $X_s$ ,负荷侧电压可表示为 $U_s \angle 0$ 。



图5 风力发电与输电线路连接示意图

Fig.5 Diagram of connection between wind power generation and transmission line

在图5中,风力发电输出功率可表示为

$$P = \frac{U_{\rm s} U_0}{X_{\rm s}} \sin\delta \tag{10}$$

因为电压相角 $\delta$ 很小,则有 $\lim_{\delta \to 0} \frac{\sin \delta}{\delta} = 1_{\circ}$ 式(10)

又可以表示为

$$P \approx \frac{U_{\rm s} U_0}{X_{\rm s}} \delta \tag{11}$$

対式(11)分別求一阶、二阶导数:  

$$\begin{cases}
\frac{dP}{dt} = \frac{U_{s}U_{0}}{X_{s}} \frac{d\delta}{dt} = \frac{U_{s}U_{0}}{X_{s}} \omega \\
\frac{d^{2}P}{dt^{2}} = \frac{U_{s}U_{0}}{X_{s}} \frac{d\omega}{dt}
\end{cases}$$
(12)

将式(12)、式(7)代入式(6)中可得:

$$P_{\rm ref} = J \frac{{\rm d}^2 P}{{\rm d}t^2} \frac{X_{\rm s}}{U_{\rm s} U_0} + K \frac{{\rm d}P}{{\rm d}t} \frac{X_{\rm s}}{U_{\rm s} U_0} + P \quad (13)$$

对式(13)建立其小信号模型并进行拉氏变换可得:

$$\frac{P_{\rm ref}(s)}{P(s)} = \frac{Js^2 + Ks + U_{\rm S}U_0/X_{\rm S}}{U_{\rm S}U_0}X_{\rm S} \qquad (14)$$

特征根为

$$_{1,2} = \frac{K \pm \sqrt{K^2 - 4JU_8U_0/X_8}}{2J}$$
(15)

#### 3.3 自适应参数选值

х

为了保证控制系统稳定,需要两个特征根都 位于复平面的左半部分,又因为虚拟同步机阻尼 系数D恒为正,为保证特征根实部为负,需保持 虚拟惯量J≥0。在功率震荡过程中,虚拟同步机 输出功率响应特性可等效为一个典型的二阶传 递函数,根据式(14)可以得到系统自然震荡转速 和阻尼比为

$$\begin{cases} \omega_{\rm s} = \sqrt{\frac{U_{\rm s}U_{\rm o}}{JX_{\rm s}}} \\ \xi = 0.5D \sqrt{\frac{X_{\rm s}}{JU_{\rm s}U_{\rm o}}} \end{cases}$$
(16)

风机虚拟同步机转速波动范围为:0.628 rad/s  $\leq \omega_s \leq 15.7$  rad/s,则额定虚拟惯量为

$$\frac{U_{\rm s}U_{\rm 0}}{15.7^2X_{\rm s}} \le J_{\rm 0} \le \frac{U_{\rm s}U_{\rm 0}}{0.628^2X_{\rm s}} \tag{17}$$

在风机并网虚拟同步机控制系统中,为获得 较快的响应速度和较少的超调量,在考虑阻尼 系数的基础上,利用最优二阶系统分析法,取 阻 尼 比  $\xi$ =0.707,设置额定阻尼系数  $D_0$ =  $\sqrt{1.414J_0U_sU_0/X_s}$ 。

# 4 Matlab/Simulink 仿真分析

为了验证本文所提控制方案的有效性,在 Matlab/Simulink下搭建如图6所示的风机并网控 制系统仿真模型,采用电压、电流双闭环控制。





仿真系统主要参数为:额定功率20 kW;直流 母线电压380 V;开关频率等于采样频率10 kHz; 电网额定电压150 V;逆变器侧电感1.5 mH;网侧 电感1 mH;直流母线侧电容4700 μF;滤波电 容10 μF;逆变器侧电阻5 Ω;网侧电阻为1.5 Ω。 非线性下垂控制参数为: $m = 1.5 \times 10^{-5}$ ,  $n = 1.2 \times 10^{-5}$ 。自适应虚拟惯量控制参数为: $J_0 = 100$ , $D_0 = 310$ , $k_i = 250$ , $k_d = 3.15$ 。

为了模仿风机并网一次调频过程,设定系统 输出初始频率为50 Hz,分别做频率阶跃上扰仿 真和频率阶跃下扰仿真,其中上扰仿真不设置负 荷,下扰仿真留有最大出力负荷的20%裕度。

图 7、图 8 分别为频率变换由 50 Hz 变化至 50.2 Hz,以及由 50 Hz 变化至 49.85 Hz 时分别采 用常规下垂控制、本文所提非线性下垂控制、本 文所提非线性下垂+自适应虚拟惯量控制得到的 频率阶跃上扰输出功率仿真波形和频率阶跃下 扰输出功率仿真波形。







Fig.8 Simulation waveforms of step down disturbance output

从图7可以看出,20s时,风机并网系统响应 50Hz变化至50.2Hz的一次调频阶跃上扰,输出 功率下降,其中采用常规下垂控制得到的输出功 率出现大范围波动,功率波动峰值较高,功率震 荡严重,需要10s功率才能稳定至目标值;相较 于常规下垂控制,采用非线性下垂控制得到的输 出功率波形的功率波动减少很多,功率波动峰值 相应减少,可更快稳定至功率目标值;相较于前 两种控制方法,采用非线性下垂+自适应虚拟惯 量控制得到的输出功率波形的功率波动峰值进 一步减少,功率震荡趋近于0,调节时间进一步缩 短,更适用于风机并网系统一次调频控制中。 从图 8 可以看出,为了响应 50 Hz 变化至 49.85 Hz的一次调频阶跃下扰控制,风机减载控 制留出满载功率20%裕度,20 s时输出功率上升, 采用常规下垂控制得到的输出功率波动峰值最 大达到额定功率的110%,功率震荡严重,极易引 起风机脱网;相较于常规下垂控制,采用非线性 下垂控制得到的输出功率波形的功率波动减少 很多,波形更为平滑;相较于前两种控制方法,采 用非线性下垂+自适应虚拟惯量控制得到的输出 功率波形几乎无超调,很快稳定至目标功率。

图 9a、图 9b 和图 10a、图 10b 分别为自适应虚 拟惯量调节系数和自适应阻尼系数在风机一次 调频阶跃上扰、下扰过程中变化波形图。



图9 一次调频阶跃上扰自适应虚拟参数变化曲线



frequency modulation step up disturbance





由图9和图10可知,本文所提虚拟惯量调节系数J和虚拟阻尼系数D可以随一次调频功率变换而自适应调节,功率波动偏差增大,J和D绝对值相应增大;功率波动偏差减小,J和D绝对值相应减小。

自适应虚拟参数调节具有连续光滑特性,可以减少 一次调频过程中的功率震荡问题,加快功率稳定至 目标值,有效提高了系统的暂态稳定性能。

# 5 实验分析

为了验证本文所提风机并网系统一次调频 控制方法动态性能,搭建了DSP+FPGA的风机并 网系统LCL三相逆变器试验平台,其中DSP选择 TI公司的TMS320F28335,FPGA选择Xilinx公司 的Spartan-7以及相关外围电路,IGBT选择Infineon公司生产的K40T120,示波器选择Tektronix 公司的MDO4104B-3型示波器,试验参数与仿真 参数相同。

分别在7s和32s两次进行交流侧频率50Hz变 化至49.8Hz的下扰实验,基于传统调频方案和本文 所提调频方案得到的功率响应波形如图10所示。





通过对比图 10a、图 10b 可以得出:当面对 60 s 内频率频繁调整的工况,本文所提控制方案得到 的功率曲线更为光滑,7 s时第一次响应频率下扰, 调节的瞬间可以提供相应的功率支持,相较于传 统调频方案调节时间缩短了2 s 左右,功率恢复时 间也相应减少。当32 s 第二次进行频率下扰实验, 传统一次调频方案功率震荡更为明显,但采用本 文所提调频方案,功率震荡得到了很好的控制,波 形畸变率不高,动态稳定性能较好,可以满足有功 功率调节误差不超过±2% 额定功率的实际要求。

# 6 结论

传统风机并网系统一次调频在响应大范围 频率变化时会引起功率不稳等问题,本文将传统 下垂控制中的有功下垂系数m变为动态下垂系数,实现下垂系数根据目标频率实时调节,建立 新型非线性下垂控制一次调频曲线,避免功率震 荡;为了抑制频率突变引起的功率震荡现象,在 风机并网虚拟同步机引入自适应虚拟惯量和自 适应阻尼系数。

仿真和实验结果表明:本文所提非线性下 垂+自适应虚拟惯量一次调频控制方案可以有效 减少功率震荡,响应频率变换时间较短,功率波 形几乎无超调,可很快稳定至目标功率。所提控 制方案可应用于风机并网一次调频领域,具有一 定的工程应用价值。

#### 参考文献

- [1] 孙钢虎,王小辉,陈远志,等.储能联合发电机组调频经济效益分析[J].电源学报,2020,18(4):151-156.
- [2] 王鑫明,寻志伟,杨沛豪.电转气技术的应用及与其它储能 方式的比较[J].上海电气技术,2019,12(1):18-22.
- [3] Yuan J S, Lin Jie, Alasad Q, et al. Ultra-low-power design and hardware security using emerging technologies for internet of things[J]. Electronics ,2017,6(3): 67.
- [4] 王鑫明,王庆,寻志伟,等.应用富氧燃烧技术提高火电机组 调峰能力[J].上海电气技术,2019,12(2):19-22.
- [5] 王晓兰,刘向辰,杨沛豪,等.基于偏差解耦扰动观测器的多重 PR控制策略[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(6):21-27.
- [6] Mu F Y , Lin J , Zhang J F , et al. Near-field beamforming based on the constrained optimization[J]. Advanced Materials Research, 2013(850):864–867.
- [7] 孙钢虎,王恩南,贺婷,等.基于自适应暂态下垂控制的光伏 频率快速响应方案[J].热力发电,2019,48(8):94-100.
- [8] Mu Fei Yan, Ye Bao Sheng, Lin Jie, et al. An L-band low spurious multi-tuned frequency synthesizer[J]. Advanced Materials Research, 2013(850):441-444.
- [9] 付国宏,杨赟,王元超,等.电子电力变压器并联运行的自适应下垂控制策略[J].电力系统及其自动化学报,2019,31 (1):77-83.
- [10] 王树东,杜巍,王焕宇,等.基于改进非线性下垂控制的微电网 并/离网切换技术研究[J].电测与仪表,2018,55(16):112-118.
- [11] 杨沛豪,王晓兰,刘向辰,等.基于新型自适应滑模观测器的 BLDC控制[J].电气传动,2019,49(4):6-10.
- [12] 赵启明,徐国祥,王煜伟,等.基于模糊自适应 PI 策略的并网 逆变器死区补偿[J].电机与控制应用,2019(7):94-99.
- [13] Ju Z, Lv X, Wu B, et al. Advanced model predictive control for three-phase inverter circuit based on disturbance observer [C]//2019 IEEE 10th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). IEEE, 2019: 900-904.

75