

双馈风电机组参与电网一次调频的多风速段综合控制 及变参数整定

陈 斌, 王德林, 张俊武, 范林源, 李颖颖, 康积涛
(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 双馈风力发电机(DFIG)作为风力发电的主流机型,由于其转子转速与系统频率的解耦控制,导致风机没有调频能力,影响系统频率的稳定性。因此,为了使风机响应系统频率的变化,本文提出了一种基于变参数整定的多风速段下风机参与电网一次调频的综合控制策略。将转子惯性控制与超速减载控制相结合实现协调控制,并对其下垂系数、惯量系数进行变参数整定,得到与风速耦合的变参数控制方法。最后,将风速进行分段并得出在多风速段下风机参与电网一次调频的综合控制策略。仿真结果表明,变参数整定后的控制方法能够很好地随着风速的变化响应系统频率的变化,而且多风速段下风机的一次调频综合控制能够提高风机的调频效果。

关键词: 双馈风力发电机; 一次调频; 综合控制; 变参数整定; 多风速段

DOI: 10.12067/ATEEE1802005

文章编号: 1003-3076(2018)11-0040-08

中图分类号: TM614

1 引言

双馈风力发电机(Double-Fed Induction Generator, DFIG)是风力发电的主流机型。由于双馈风力发电机转子与电网间通过变换器相连,使风机的转子转速与系统频率完全解耦,不能响应系统频率的变化,因此,大规模风电并入电网后将导致系统的调频能力减弱,影响系统的稳定性。

为了解决风电并网没有调频能力的问题,大部分国家对风电并网都做了相应的规范要求。挪威电网要求风电场应该具备依据系统频率改变有功输出的能力^[1]。由丹麦、芬兰、挪威、瑞典共同发布的北欧电网导则^[2]、英国电网导则^[3]均规定风电场必须具备有功功率调节、响应系统的频率变化的能力。2011年12月30日,我国颁布了国家标准 GB/T19963-2011《风电场接入电力系统技术规定》,该规定明确指出,风电场应符合 DL/T1040 标准,具备参与电力系统调频、调峰和备用的能力^[4]。

文献[5,6]将存储在 DFIG 转子上的旋转动能

转化为电磁功率,通过释放/吸收转子动能改变 DFIG 输出的有功功率来为系统频率控制提供一定的有功支撑。文献[7]推导了风电机组模拟惯量控制后,其风能利用系数与系统频率变化之间的关系,通过检测系统频率变化来调节风功率跟踪曲线,释放风电机组“隐藏”动能参与系统频率调整。文献[8-10]分别对 DFIG 中的惯性控制在电网频率下降和上升情况下进行了仿真分析,仿真结果表明惯性控制可以有效地改善系统最低和最高点的频率值。文献[11]认为风电机组如果具有和同步发电机一样的频率下垂特性将有利于维持系统频率稳定。文献[12]通过给定发电机电磁转矩和系统频率之间的下垂曲线,以查表的方式控制风电机组出力跟随系统频率变化,实现了风电机组有功功率与系统频率间的下垂控制特性。文献[13]中同样对三种不同区间风速下风机参与调频进行了讨论,并根据风速的不同提出了超速与变桨相互协调的频率控制方法。文献[14]在控制系统中增加了风速模式判定环节,在中低风速下对转子进行超速控制。文献

收稿日期: 2018-02-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(51477143)

作者简介: 陈 斌(1992-),男,四川籍,硕士研究生,研究方向为风力发电的运行与控制、风电场的调频及并网;
王德林(1970-),男,河南籍,副教授,博士,研究方向为大规模电力系统连续体建模、机电动态、频率稳定控制和风力发电等(通讯作者)。

[15]通过分析风电机组的一次调频特性,利用变桨技术,进一步提出可整定风电机组静调差系数的频率控制策略,并与虚拟惯性控制有机结合,实现风电机组对系统频率的综合控制。

本文在风机参与电网一次调频控制方法研究的基础上,将超速减载与转子惯性控制方法相结合实现协调控制;对其中的下垂系数、惯量系数进行理论推导,得到与风速、风机转速耦合的变参数整定后的控制方法,使风机在调频时能响应风速的变化;结合不同风速下风机的运行状态及输出功率情况,定义并给出风速判定模块,对风速进行分段控制,将变参数整定后的控制方法与改进后的变桨距控制相结合,提出了多风速段下风机参与电网一次调频的综合控制策略。为了验证本文提出的控制方法及调频策略的有效性,在4机2区域模型中对其进行仿真验证。结果表明DFIG通过综合控制在不同风速情况下能有效地参与调频。

2 DFIG 变参数整定的协调控制

2.1 DFIG 参与系统一次调频的协调控制

常规同步发电机中转子转速和系统频率之间存在耦合关系,同步发电机调速器工作使其输出功率随着系统频率的变化而变化,表现出的下垂特性为:

$$\Delta P = -K_1 \Delta f \tag{1}$$

式中, ΔP 为发电机有功功率变化量; Δf 为系统频率变化量; K_1 为下垂系数。

常规同步发电机中,转动惯量和发电机转速同样存在着耦合关系,发电机转子运动方程可表示为:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e \tag{2}$$

式中, J 为发电机的转动惯量; T_m 为机械转矩; T_e 为电磁转矩; ω 为转子角速度。

为了使风机模拟同步发电机的调频特性,将系统的频率变化量及其变化率作为输入来改变风机的输出功率。在风机中加入控制后,其输出功率的改变量为:

$$\Delta P = -K_1 \Delta f - K_2 \frac{d\Delta f}{dt} \tag{3}$$

式中, K_2 为惯量系数。

DFIG 超速减载控制原理如图 1 所示。当风机不采取任何控制时,其内部运行曲线为最大功率点跟踪(MPPT)曲线,此时为最大功率输出,没有备用功率参与系统的频率调节。为了使风机能够参与系统调频,必须使风机有备用功率,因此需要让风机偏

离 MPPT 曲线运行。图 1 中,当风速为 v_3 时风机自身运行于 1 点,为了让风机拥有备用功率,需要采取控制方法使风机运行于 2、3 点,这样风机就实现了减载运行。但是,当风机运行于 3 点时,如果系统频率减小,风机需要增大输出功率向 1 点靠近,此时转速也增大会吸收部分能量,所以 3 点为不稳定运行点。当风机运行于 2 点时,系统频率减小,风机向 1 点靠近,增大了输出功率,同时转速减小释放了动能,所以能很好地响应频率的改变,参与系统调频。因此,对风机通常采用超速减载控制,让其运行于图 1 中的减载曲线。

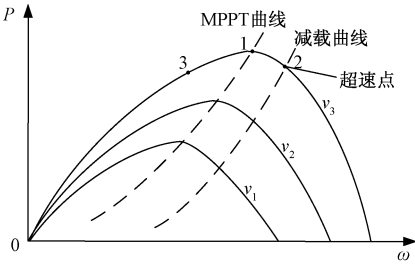


图 1 DFIG 超速减载控制原理

Fig. 1 Control principle of overspeed and load shedding of DFIG

根据上述理论分析,本文将转子惯性控制与超速减载控制相结合,得到风机参与调频的协调控制,其控制原理如图 2 所示。其中, P 为 DFIG 减载运行后的有功功率, ΔP 为有功功率改变量, P_w 为最终的有功功率。

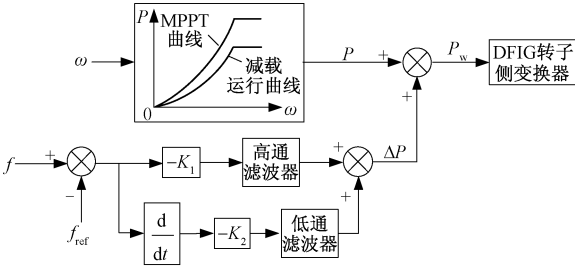


图 2 DFIG 协调控制原理

Fig. 2 Coordinated control principle of DFIG

2.2 DFIG 协调控制的变参数整定

电力系统频率变化反映了系统发电机输出功率与负荷的平衡关系。当发电机有功不足或者系统负荷增大时,系统频率减小,反之系统频率将增大。当系统处于稳定时,有功功率平衡关系为:

$$P_A = P_w + P_G + P_T - P_L = 0 \tag{4}$$

式中, P_w 为风机输出有功功率; P_G 为传统同步机输出有功功率; P_T 为其他电力系统传输的有功功率; P_L

为负荷有功功率; P_A 为系统供需有功功率之差。

当系统负荷发生改变时,频率出现波动,则有:

$$2H_s \frac{d\Delta f}{dt} = P_A - D\Delta f$$

$$= P_W + P_G + P_T - P_L - D\Delta f \quad (5)$$

式中, H_s 为系统惯性常数; D 为负荷阻尼系数; Δf 为系统频率改变量。

风机加入调频模块后,输出有功功率 P_W 为:

$$P_W = P_W^0 + \Delta P \quad (6)$$

$$\Delta P = -K_1 \Delta f - K_2 \frac{d\Delta f}{dt} \quad (7)$$

式中, P_W^0 为不加控制模块时风机原始输出功率; ΔP 为加入控制模块时风机输出的有功功率改变量。将式(6)、式(7)代入式(5)可得:

$$(2H_s + K_2) \frac{d\Delta f}{dt} = P_W^0 + P_G + P_T - P_L - (D + K_1) \Delta f \quad (8)$$

$$H_s^* = H_s + \frac{K_2}{2}, D^* = D + K_1 \quad (9)$$

式中, H_s^* 为风机参与调频时系统的等效时间常数; D^* 为风机参与调频时系统的等效阻尼系数。

由式(9)可见,当风机参与调频时,系统的等效时间常数和等效阻尼系数都将增大,有利于系统的稳定。因此,在风机参与调频的控制环节中,对系数 K_1 、 K_2 的整定尤为重要,它将直接影响风机的调频效果。

2.2.1 下垂系数 K_1 的整定

当双馈风机模拟同步发电机的下垂特性时, $\Delta P = -K_1 \Delta f$, 在传统同步发电机中有:

$$K_G^* = \frac{1}{\delta_G}, K_G = K_G^* \frac{P_{GN}}{f_{ref}}, \Delta P_G = -K_G \Delta f \quad (10)$$

式中, K_G^* 为传统同步发电机单位调节功率标么值; δ_G 为传统同步发电机调差系数; K_G 为传统同步发电机单位调节功率; P_{GN} 为传统同步发电机额定有功功率; f_{ref} 为额定频率 50Hz。

因此,模拟传统同步发电机的表达式(10)可得风机中有如下表达式:

$$\Delta P = -K_1 \Delta f = -K_W \Delta f = -K_W^* \frac{P_{WN}}{f_{ref}} \Delta f = -\frac{P_{WN}}{\delta_W f_{ref}} \Delta f \quad (11)$$

式中, K_W^* 为 DFIG 单位调节功率标么值; δ_W 为 DFIG 调差系数; K_W 为 DFIG 单位调节功率; P_{WN} 为 DFIG 额定有功功率。因此有:

$$K_1 = \frac{P_{WN}}{\delta_W f_{ref}} \quad (12)$$

由式(12)可知,系数 K_1 与风机额定功率及风机调差系数有关。根据电力系统传统同步发电机调差系数的定义公式来定义 DFIG 的调差系数 δ_W 为:

$$\delta_W = -\frac{\Delta f_W / f_{ref}}{\Delta P_W / P_{WN}} \quad (13)$$

式中, Δf_W 为系统频率变化量,取 0.2Hz; ΔP_W 为风机减载的储备功率,本文风机减载水平取 20%。仿真不同风速情况下风机的运行情况时,对风机减载 20% 后的运行曲线插值得到不同风速下的风机减载储备功率,并通过式(13)计算得到对应的 δ_W ,结果如表 1 所示。将风机调差系数、风速的数据进行拟合,可得 V - δ_W 关系曲线。最终得到变参数整定后的 K_1 。

表 1 风机不同风速运行情况相关数据

风速 $V/(m/s)$	风机减载储备功率 $\Delta P_W(pu)$	风机调差系数 δ_W
6	0.017	0.235
7	0.032	0.125
8	0.045	0.089
9.5	0.072	0.056
10.5	0.105	0.038
12	0.145	0.028
13	0.2	0.020
14	0.2	0.020

2.2.2 惯量系数 K_2 的整定

当 DFIG 转速为 ω_1 时,其对应的转子动能为:

$$E_1 = \frac{1}{2} J \omega_1^2 \quad (14)$$

式中, E_1 为 DFIG 的转子动能; J 为转动惯量; ω_1 为转子转速。

系统负荷发生波动,使系统频率突然增大或者减小时,通过调整风机的转速增大或者减小到 ω_2 ,阻碍系统频率的变化,可达到调频的效果。此过程风机转子吸收或者释放的能量为:

$$\Delta E = \frac{1}{2} J (\omega_2^2 - \omega_1^2) \quad (15)$$

因此,在风机内部通过加入附加控制,释放隐藏在转子内部的动能,弥补转速与系统频率解耦的不足,可以达到模拟同步机参与系统调频的效果。

当风机释放转子中的动能 $E = J\omega^2/2$ 时,其可转化的有功功率 P 为:

$$P = \frac{dE}{dt} = J\omega \frac{d\omega}{dt} \quad (16)$$

惯性常数 H 定义为:

$$H = \frac{E}{S} = \frac{J\omega_{\text{ref}}^2}{2S} \quad (17)$$

式中, ω_{ref} 为 DFIG 的额定角速度; S 为 DFIG 的视在功率。由式(16)、式(17)可得:

$$\frac{P}{S} = 2H \frac{\omega}{\omega_{\text{ref}}} \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ref}}} \right) \quad (18)$$

用标么值可表示为:

$$P^* = 2H\omega^* \frac{d\omega^*}{dt} \quad (19)$$

通过以上分析可知,当风机响应系统的频率变化,通过附加控制使转子转速由 ω_1 变为 ω_2 时,风机动能的改变量转化为有功功率改变量 ΔP 。可由式(15)~式(18)得到 ΔP 的标么值表达式为:

$$\Delta P^* = 2H(\omega_2^* \frac{d\omega_2^*}{dt} - \omega_1^* \frac{d\omega_1^*}{dt}) \quad (20)$$

当 $\Delta f = f - f_{\text{ref}}$, $\Delta\omega = \omega - \omega_{\text{ref}}$ (f 为系统频率的瞬时值, ω 为风机转速) 时,式(20)可改写为:

$$\Delta P^* = 2H(\omega^* \frac{d\omega^*}{dt} - \omega_{\text{ref}}^* \frac{d\omega_{\text{ref}}^*}{dt}) \quad (21)$$

当 f, ω 取标么值时,则 $f^* = \omega^*$ 。因为 $\omega_{\text{ref}}^* = 1$, $\Delta f^* = \Delta\omega^*$, $d\Delta\omega^* = d(\omega^* - \omega_{\text{ref}}^*) = d(\omega^* - 1) = d\omega^*$, 所以由式(21)可得:

$$\Delta P^* = 2H\omega^* \frac{d\Delta f^*}{dt} \quad (22)$$

因为 $\Delta P^* = \Delta P/S$, $\Delta f^* = \Delta f/50$, 代入式(22)得:

$$\Delta P = \frac{HS\omega^*}{25} \frac{d\Delta f}{dt} \quad (23)$$

由式(23)可得 $K_2 = HS\omega^*/25$, 其中, H 为风机惯性时间常数, 本文取 $H = 4\text{s}$; S 为风机额定容量, 本文取 $S = 600\text{MV} \cdot \text{A}$; ω^* 为风机转速标么值, 可在仿真中测得其值。

3 多风速段下双馈风电机组一次调频综合控制策略

3.1 变桨距技术

在实际情况下,风速可能时刻变化,当风速太大实行超速减载时如果转子转速已经达到最大,风速再增大将导致减载水平减小,此时已不能提供足够的备用功率。而此时风能充足,输出功率大,为了充分利用风能并留有足够的备用功率,需要改变风机的桨距角实现减载。当风速超过临界风速时,通过增大风机桨距角实行减载,使得留有充足的备用功

率参与调频的方法叫做变桨距技术。DFIG 中风机捕获的机械功率 P_m 可表示为:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi C_p(\lambda, \beta) R^2 V^3 \quad (24)$$

式中, ρ 为空气密度; R 为风轮半径; V 为风速; λ 为叶尖速比, $\lambda = \omega R/V$; β 为风机桨距角; $C_p(\lambda, \beta)$ 为风机的风能利用系数,可表示为^[13]:

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.44 - 0.0167\beta) \sin \frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta} - 0.00184(\lambda - 3)\beta \quad (25)$$

在转速恒定区,即转速达到最大值时 $\omega = \omega_{\text{max}}$, $\lambda_c = \omega_{\text{max}} R/V$, 当 $\beta = 0^\circ$ 时具有最大风能利用系数,即

$$C_{pC}(\lambda_c, 0) = 0.44 \sin \frac{\pi(\lambda_c - 3)}{15} \quad (26)$$

当风机减载水平为 $d\%$ 时风机的风能利用系数可表示为:

$$\begin{aligned} C_{pL}(\lambda_c, \beta_0) &= (0.44 - 0.0167\beta_0) \sin \frac{\pi(\lambda_c - 3)}{15 - 0.3\beta_0} - \\ &0.00184(\lambda_c - 3)\beta_0 \\ &= (1 - d\%) C_{pC}(\lambda_c, 0) \\ &= (1 - d\%) 0.44 \sin \frac{\pi(\lambda_c - 3)}{15} \end{aligned} \quad (27)$$

通过计算得出风机采用变桨距控制参与调频时的预留桨距角 β_0 , 设计出改进桨距角控制图, 如图 3 所示。其中, K_β 为桨距角调节系数, T_β 为时间常数, β_0 为变桨距时预留桨距角, β 为风机最终桨距角。

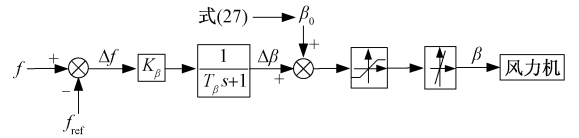


图 3 改进桨距角控制图

Fig. 3 Control chart of improved pitch angle

3.2 不同风速下 DFIG 一次调频综合控制策略

为了充分利用风能,使风机有效参与系统调频,不同的风速下风机应该处于不同的运行状态。本文通过定义不同风速,得出风速判定模块,并对风机不同风速下的运行方式进行讨论。

(1) 当风速小于风机的切入风速 V_1 , 即 $V < V_1$ 时。为了保护风机应该使风机停止工作,此时风机输出功率为零,不参与系统调频工作。

(2) 当风速 $V_1 < V < V_2$ 时,风机处于最大功率输出区域,为了使风机参与系统调频对其进行变参数整定

后的协调控制。 V_2 取值标准可通过式(28)进行整定,整定依据是当风速为 V_2 时风机减载 $d\%$ 后输出功率等于该风速下的最大功率跟踪的输出功率 P_{opt} 。

$$P_{opt} = (1 - d\%) \frac{1}{2} \rho \pi C_{PC}(\lambda_c, 0) R^2 V_2^3$$
$$= \frac{1}{2} \rho \pi C_{Pmax}(\lambda, 0) R^2 V_2^3 \tag{28}$$

(3) 当风速 $V_2 < V < V_3$ 时,其中 V_3 为风机的切

出风速,由于风机转子转速已达到最大值,为了利用多余的风能参与系统调频,改变风机的桨距角进行有功储备。此时风机参与系统调频的控制方式为变参数整定后的协调控制和变桨距相结合。

(4) 当风速 $V > V_3$ 时,为了保护风机使其停止工作,输出功率为零,不参与系统调频工作。

综上,不同风速段下 DFIG 一次调频控制策略如图 4 所示。

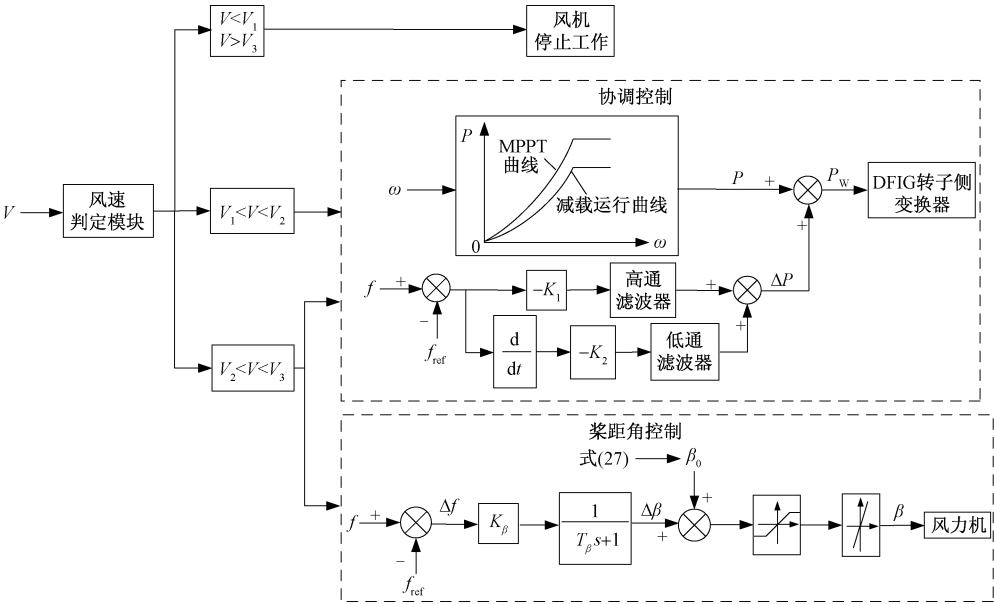


图 4 不同风速下 DFIG 一次调频综合控制策略

Fig.4 Control strategy of primary frequency modulation of DFIG under different wind speed

4 仿真分析

基于 MATLAB/Simulink 仿真平台建立 4 机 2 区域仿真模型对本文方法进行仿真分析,仿真模型如图 5 所示。其中 4 台同步发电机 $G_1 \sim G_4$ 的额定功率分别为 700MW,惯性时间常数为 6.5s;1 台等值的双馈风机 G_w 的额定功率为 1200MW,惯性时间常数为 4s,风机额定风速为 12m/s,风机减载水平为 20%;系统负荷 L 有功功率为 3000MW。

4.1 DFIG 协调控制的变参数整定

通过理论计算,对协调控制方法中的参数进行整定,在 4 机 2 区域模型中对变参数整定后的协调控制方法进行仿真,仿真时间为 110s,仿真结果如图 6 所示。其中系统负荷 L 在 40s 时突增 300MW,60s 时突减 200MW,80s 时突减 200MW。

由图 6 可知,40s 时负荷突增导致系统频率减小,风机通过协调控制方法参与系统的一次调频,使系统频率的改变量减小,并且响应迅速。当风速较

大时,变参数整定后的协调控制方法使系统频率提升了 0.05Hz。由仿真可知变参数整定后的协调控制效果要优于整定前的协调控制效果,验证了本文方法的有效性。

4.2 多风速段下 DFIG 的一次调频综合控制

由于实际情况中风速处于变化过程,不同风速段下风机应有不同的调频控制策略,在 4 机 2 区域模型中对多风速段下风机一次调频综合控制进行仿

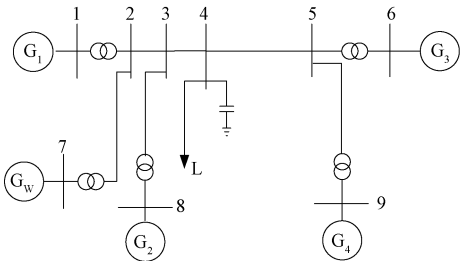


图 5 4 机 2 区域模型

Fig.5 4 machine 2 zone model

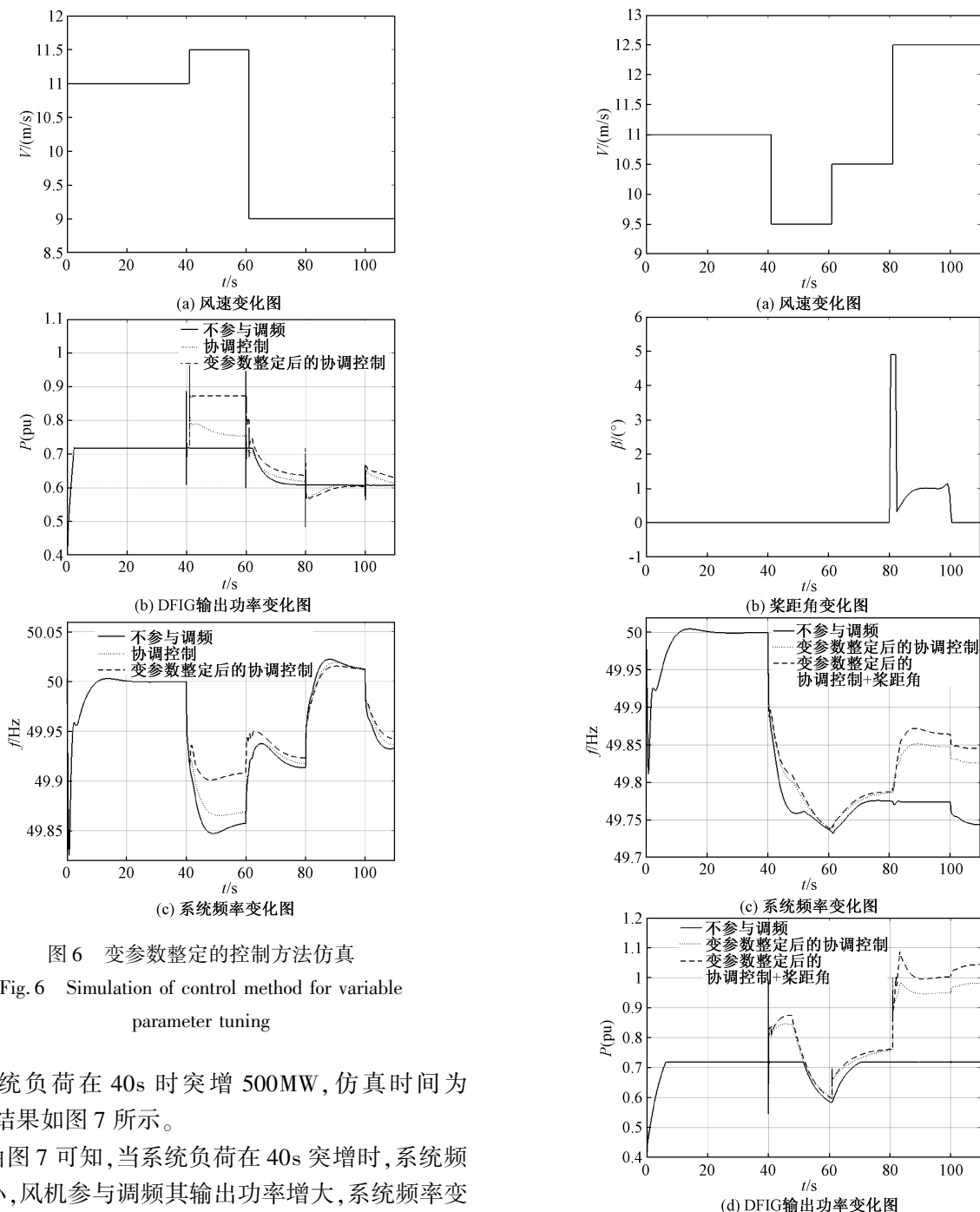


图6 变参数整定的控制方法仿真

Fig.6 Simulation of control method for variable parameter tuning

真,系统负荷在40s时突增500MW,仿真时间为110s,结果如图7所示。

由图7可知,当系统负荷在40s突增时,系统频率减小,风机参与调频其输出功率增大,系统频率变化量减小,并且响应迅速。40~80s风速较小,风机能提供的有功支持也较小,所以对系统频率改变量的减小作用也较小。80s时风速增大,在较大风速下风机风能较大,对频率能有足够的有功支持。因为高风速下风机桨距角增大而储备有功功率,所以此时通过减小桨距角释放储备的有功功率参与系统调频,释放出较多有功功率,使频率的改变量大大减小,相对于风机不参与调频时系统频率提升了0.09Hz,此过程中系统频率重新稳定到49.8Hz内,起到了很好的一次调频效果。

图7 多风速段DFIG一次调频综合控制仿真

Fig.7 Simulation of primary frequency of multi-wind speed section DFIG

5 结论

本文在大规模风电接入电网并参与系统调频的前提下,模拟传统同步机的调频特性,提出相应的风机调频控制方法,使风机能够响应系统频率变化并参与一次调频环节。通过理论分析与仿真,得出以

下结论:

(1)对协调控制的下垂系数、惯量系数进行变参数整定,可使风机在风速发生变化时较好地参与系统调频。

(2)多风速段下风机参与系统一次调频的综合控制策略,能在风速较大时充分利用风能,并使风机调频能力提升,减小了系统频率变化的偏差。

本文只是仿真了部分风速段下的情况,未对随机风下的情况进行研究,这也是今后工作中深入研究的重点。

参考文献 (References):

- [1] Nordic Grid. Nordic grid code 2007 [R]. Norway: Nordic Grid, 2007.
- [2] Nordel. Nordic grid code 2007 (Nordic collection of rules) [DB/EB]. <http://webhotel2.tut.fi/units/set/research/adine/materiaalit/Active%20network/System%20integration/Grid%20codes/Nordel%20grid%20code%202007-00129-01-E.pdf>, 2004.
- [3] National Grid (Great Britain). Grid code documents; Connection conditions [DB/EB]. <http://www.nationalgrid.com/uk/Electricity/Codes/gridcode/gridcodedocs/>, 2009-7.
- [4] GB/T 19963-2011, 风电场接入电力系统技术规定 (Technical rule for connecting wind farm to power system) [S].
- [5] 李生虎, 朱国伟 (Li Shenghu, Zhu Guowei). 基于有功备用的风电机组一次调频能力及调频效果分析 (Capability and effect of primary frequency regulation by wind turbine generators with active power reserve) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2015, 34 (10): 28-33.
- [6] 赵晶晶, 胡晓光, 吕雪, 等 (Zhao Jingjing, Hu Xiaoguang, Lv Xue, et al.). 含 STATCOM 的双馈电机风电场无功电压协调控制策略 (Research on coordination control strategy of DFIG wind farm with Crowbar circuit) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2016, 35 (10): 17-22.
- [7] 李和明, 张祥宇, 王毅, 等 (Li Heming, Zhang Xiangyu, Wang Yi, et al.). 基于功率跟踪优化的双馈风力发电机组虚拟惯性控制技术 (Virtual inertia control of DFIG-based wind turbine based on the optimal power tracking) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2012, 32 (7): 32-39.
- [8] 关宏亮, 迟永宁, 王伟胜, 等 (Guan Hongliang, Chi Yongning, Wang Weisheng, et al.). 双馈变速风电机组频率控制的仿真研究 (Simulation on frequency control of doubly fed induction generator based wind turbine) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2007, 31 (7): 61-65.
- [9] 曹军, 王虹富, 邱家驹 (Cao Jun, Wang Hongfu, Qiu Jiaju). 变速恒频双馈风电机组频率控制策略 (Frequency control strategy of variable speed constant frequency doubly fed induction generator wind turbines) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2009, 33 (13): 78-82.
- [10] 吴迪 (Wu Di). 双馈风电机组频率控制建模及其应用研究 (Research on frequency control modeling and its application of doubly fed induction generator wind turbine) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2012.
- [11] 刘巨, 姚伟, 文劲宇, 等 (Liu Ju, Yao Wei, Wen Jinyu, et al.). 大规模风电参与系统频率调整的技术展望 (Prospect of technology for large-scale wind farm participating into power grid frequency regulation) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2014, 38 (3): 638-646.
- [12] Ramtharan G, Ekanayake J B, Jenkins N. Frequency support from doubly fed induction generator wind turbines [J]. IET Renewable Power Generation, 2007, 1 (1): 3-9.
- [13] 张昭遂, 孙元章, 李国杰, 等 (Zhang Zhaosui, Sun Yuanzhang, Li Guojie, et al.). 超速与变桨协调的双馈风电机组频率控制 (Frequency regulation by double fed induction generator wind turbines based on coordinated overspeed control and pitch control) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2011, 35 (17): 20-25.
- [14] 曹张洁 (Cao Zhangjie). 双馈感应风电机组参与系统一次调频的控制策略研究 (Research on control strategy of doubly fed induction wind turbine participating system primary frequency regulation) [D]. 成都: 西南交通大学 (Chengdu: Southwest Jiaotong University), 2012.
- [15] 付媛, 王毅, 张祥宇, 等 (Fu Yuan, Wang Yi, Zhang Xiangyu, et al.). 变速风电机组的惯性与一次调频特性分析及综合控制 (Analysis and integrated control of inertia and primary frequency regulation for variable speed wind turbines) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2014, 34 (27): 4706-4716.

Integrated control of multi-wind speed section and variable-parameter tuning on DFIG participating in primary frequency regulation of power grid

CHEN Bin, WANG De-lin, ZHANG Jun-wu, FAN Lin-yuan, LI Ying-ying, KANG Ji-tao

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Doubly fed wind generator (DFIG) is the mainstream model of wind power generation. Because of the decoupling control between rotor speed and system frequency, the DFIG has no ability to adjust the frequency and the stability of the system frequency is affected. Therefore, in order to make the DFIG respond to the change of the system frequency, this paper proposes an integrated control strategy based on the variable parameter tuning of the wind turbine under multiple wind speeds to participate in the primary frequency regulation of the power grid. The coordinated control is realized by combining the rotor inertia control with the overdrive load reduction control, and the droop coefficient and the inertia coefficient are adjusted with different parameters, thus, the control method of variable parameters coupled with wind speed is obtained. Finally, the wind speed is piecewise controlled, and the integrated control strategy of the wind turbine participating in the primary frequency regulation of the power grid under multiple wind speeds is analyzed. The simulation results show that, the control method after variable parameters tuning can well respond to the change of system frequency which is influenced by wind speed. Moreover, the primary frequency regulation control under multiple wind speeds can improve the frequency regulation effect of the DFIG.

Key words: DFIG; primary frequency regulation; integrated control; variable parameter tuning; multi-wind speed section