

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202007030



采用模糊规则的风机超速区 变参数综合惯性控制方法

赵熙临, 曹娅

(湖北工业大学 电气与工程学院, 湖北 武汉 430068)

摘要: 对风机参与电力系统调频的控制策略进行研究,提出一种基于模糊规则的风机超速区变参数综合惯性控制方法.首先,分析风机传统综合惯性控制方法,针对电网频率的二次跌落问题,对风机超速状态下的惯性响应特性进行研究,使风机具有更好的转速恢复能力;然后,针对风机实际运行状态与惯性控制系统参数间的动态匹配问题,以频率差值和频率变化率为考量标准,制定模糊规则,实现风机惯性控制更优的动态响应,并进一步减小电网频率的二次跌落.仿真实验表明:文中方法具有可行性和有效性.

关键词: 风力发电机; 惯性控制; 超速运行; 变参数

中图分类号: TP 18 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2021)02-0238-07

Variable Parameter Integrated Inertial Control Method of Wind Generator Overspeed Zone Using Fuzzy Rules

ZHAO Xilin, CAO Ya

(School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: The control strategy of wind turbine participating in power system frequency regulation is studied. A variable parameter integrated inertial control method of a wind generator in overspeed zone based on fuzzy rules is proposed. Firstly, the traditional integrated inertial control method of wind turbine is analyzed. Aiming at the second drop of grid frequency, the inertia response characteristics of wind turbine under overspeed condition are studied, so that the wind turbine has better speed recovery ability. Then, aiming at the dynamic matching problem between the actual operation state of the wind turbine and the parameters of the inertial control system, the fuzzy rules are formulated based on the criteria of the amplitude and rate of frequency fluctuation, which can achieve better dynamic response of the wind turbine inertial control and further reduce the secondary drop of the grid frequency. Simulation experimental results show that the proposed method is feasible and effective.

Keywords: wind turbine; inertial control; overspeed operation; variable parameters

随着可再生能源的发展,以风力发电为主的清洁能源在电力系统中的占比逐渐增大^[1-3].然而,由于风力发电具有随机性和间歇性等特点,且风机转子与电网频率解耦,即不具备与常规同步发电机相似的频率响应能力,因此,大规模的风电并网会降低电力系统的转动惯量,影响电网频率的稳定性^[4-5].

为了保障电力系统安全稳定的运行,许多学者对风电参与电力系统调频的控制策略进行了大量研究^[6-18].利用转子动能参与系统调频的传统综合惯性控制方法虽然能够满足风机输出功率应对系统功率的需求,但该方法的风机一般处于最大功率输出状态,一旦系统负荷增加,电网频率下降,风机就会短

收稿日期: 2020-07-14

通信作者: 赵熙临(1969-),男,教授,博士,主要从事电力系统自动化的研究. E-mail: zhaoxl@mail.hbut.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61473116, 61603127)

时降低转速提取转子动能,当转速恢复时,风机又向电网吸收能量,影响电网频率的回稳过程,导致频率的二次跌落.针对此问题,文献[3]提出一种基于转子动能控制的风机频率控制改进方案,通过引入恒定附加功率,让转速恢复过程在系统频率稳定后进行,以此改善转速恢复对频率二次跌落的不利影响.文献[13]设计了虚拟惯性控制环节和下垂控制环节,以频率变化率和频率偏差作为输入,动态调节下垂控制系数,可在一定程度上减少二次跌落.文献[19]在传统虚拟惯性控制的基础上,增加转速保护模块和功率限幅模块,使风机不会因过度提取动能而导致过多的频率二次跌落.

针对传统惯性控制容易导致风机失速的问题,学者们提出在超速区进行惯性控制的方法.文献[20]提出一种结合超速备用和模拟惯性控制的双馈风机(DFIG)联合控制策略,使风机运行于减载状态,通过惯性控制吸收或释放转子动能,解决系统频率波动的问题.文献[21]在微电网中使用 DFIG 虚拟惯性和超速控制的协调控制策略,通过试错法得到不同风速下的虚拟惯性控制系数和功率静特性系数的取值曲线,实现电网调频控制,改善频率二次跌落的不利影响.虽然对超速区进行惯性控制可在一定程度上减小频率的二次跌落,但控制过程中由于参数的固定,系统无法根据实际状态动态地改变风机惯性响应深度.基于此,本文采用目前主流的 DFIG 机型,提出一种基于模糊规则的风机超速区变参数综合惯性控制方法.

1 风机综合惯性控制方法

风机参与系统调频主要采用惯性控制实现机组对电网频率的响应,通过控制发电机电磁功率,快速提取和释放转子中的动能,实现风机输出功率的短时调整.

1.1 风机的数学模型

风机的输出功率取决于风速的变化,根据空气动力学模型,风机的机械功率(P_t)^[22]为

$$P_t = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho A v^3. \quad (1)$$

式(1)中: C_p 为风机性能系数; ρ 为空气密度; A 为扫风面积; v 为风速; β 为桨距角; λ 为叶尖速比,即

$$\lambda = R_r \omega_t / v. \quad (2)$$

式(2)中: ω_t 为风轮机转速; R_r 为风机叶片半径.

风机性能系数 C_p 是 λ 和 β 的函数,有

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \times \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) \exp\left(-\frac{21}{\lambda_i}\right) + 0.0068\lambda, \quad (3)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}. \quad (4)$$

为了尽可能地利用风能,风电机组通常采用最大功率跟踪(MPPT)方式运行,即保证风机性能系数取最大值.在不考虑损耗的情况下,风机的最大捕获功率(P_{opt})为

$$P_{opt} = K_{opt} \omega_g^3, \quad K_{opt} = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{C_p}{\lambda_{opt}^3} \right) \pi R_r^5, \quad \omega_g = G \omega_t. \quad (5)$$

式(5)中: K_{opt} 为最大功率跟踪系数; G 为齿轮箱传递系数; λ_{opt} 为最优叶尖速比; ω_g 为转子转速.

1.2 风机综合惯性控制原理

综合惯性控制通过提取风机的转子动能补偿系统的有功缺额,储存在转子上的动能(E_k)^[23]为

$$E_k = \frac{1}{2} J \omega_t^2. \quad (6)$$

式(6)中: J 为旋转轴系的转动惯量.

主流的风机控制方法通常是在 MPPT 基础上增加附加频率控制回路,即考虑频率偏差的下垂控制和频率变化率的虚拟惯性控制,形成传统综合惯性控制方法.风机输出有功功率参考值(P_{ref})为

$$P_{ref} = P_{MPPT} + \Delta P = P_{MPPT} - (K_d \frac{df}{dt} + K_p \Delta f). \quad (7)$$

式(7)中: P_{MPPT} 为风机 MPPT 状态下的输出有功功率参考值; ΔP 为额外有功功率参考值; f 为频率; Δf 为频率偏差; K_d 为虚拟惯性控制系数; K_p 为下垂控制系数, $K_p = 1/R_0$, R_0 为调差系数; t 为时间.

综合惯性控制框图^[13],如图 1 所示.图 1 中: f_{nom} 为参考频率; f_{sys} 为系统频率.DFIG 惯性控制下的功率特性曲线,如图 2 所示.图 2 中:点 A 为风机的初始运行点;点 B 为风机惯性控制响应时刻输出电磁功率最大时对应的运行点;点 C 表示风机电磁功率和机械功率新的平衡点; $v_1 \sim v_3$ 为不同风速; P_{WT} 为风机输出有功功率;p. u. 为标么值.由图 2 可知:初始时刻(点 A)风机处于 MPPT 状态,此时电磁功率和机械功率相等;当电网频率下降时,风机采用传统综合惯性控制方法参与系统调频,使风机输出的电磁功率沿曲线 A-B-C 变化,捕获的机械功率沿曲线 A-C 变化,由于电磁功率大于机械功率,转子将通过减速释放转子动能,向电网提供有功支撑;在转速恢复阶段(曲线 C-A),风机转子需要加速才能回到 MPPT 状态,由于点 C 始终低于点 A,此时,风机等效于负载,风机向电网吸收能量,输出有功功率减少,导致电网频率的二次跌落.由于风机稳定运行曲线的凸特性,为克服惯性响应过程中风机运行点低于点 A 的现象,考虑将惯性响应移入超速区执行.

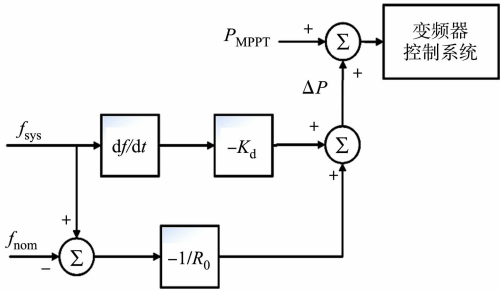


图 1 综合惯性控制框图

Fig. 1 Integrated inertial control block diagram

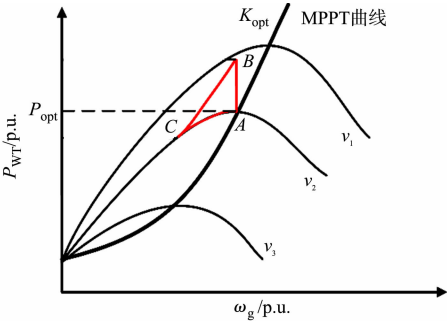


图 2 DFIG 惯性控制下的功率特性曲线

Fig. 2 Power characteristic curves under DFIG inertial control

2 风机超速区综合惯性控制

DFIG 超速区功率特性曲线,如图 3 所示.图 3 中:类似于图 2,点 A' 为超速区初始运行点,点 B' 和点 C' 为风机在超速区惯性控制过程中的工作点; P_{de} 为减载状态下的功率; K_{de} 为减载功率跟踪系数.

由图 3 可知:初始时刻(点 A')风机处于高转速的减载状态;当电网频率下降时,风机采用超速区综合惯性控制参与系统调频,风机输出的电磁功率沿曲线 A'-B'-C'-A' 变化,捕获的机械功率沿曲线 A'-C'-A' 变化;在转子减速阶段(曲线 A'-C'),由于电磁功率大于机械功率,风机释放转子动能抑制频率变化;在转子加速恢复阶段(曲线 C'-A'),风机始终运行于点 A' 之上,属于功率补偿状态.因此,相较于传统综合惯性控制,超速区的惯性响应在一定程度上能改善频率二次跌落的不利影响,且具有较好的转速恢复能力.

为实现上述控制方式,根据 MPPT 曲线的表示方法,将超速状态下的输出功率表示为减载功率跟踪曲线,改变风机转子侧变流器的功率参考值,以达到风机运行于超速区的目的.

设减载率为 d ,在某一确定风速下,由式(1)可得减载状态下的功率(P_{de})为

$$P_{de} = (1 - d) \cdot \frac{\rho A v^3}{2} \cdot C_{p,max} = \frac{\rho A v^3}{2} \cdot C_{p,de} \tag{8}$$

式(8)中: $C_{p,max}$ 为风机性能系数最大值; $C_{p,de}$ 为减载状态下的风机性能系数,计算公式为

$$C_{p,de} = (1 - d) C_{p,max} \tag{9}$$

由于风机参与系统调频时,机组处于功率跟踪状态,桨距角一般为 0,根据式(3),(4)可得 C_p 与 λ 的单值函数关系.为简化计算,经拟合可得

$$C_p(\lambda) = 0.061(\lambda - \pi) - 0.002 \times (\lambda - 10)^2 + 0.42 \tag{10}$$

经计算可得 $C_{p,max}$,因此,当减载率 d 确定时, $C_{p,de}$ 随之确定,由此得到减载叶尖速比 λ_{de} .由于 C_p 曲

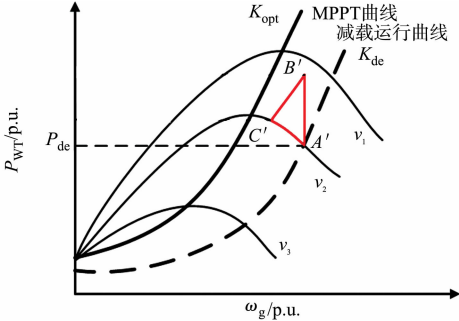


图 3 DFIG 超速区功率特性曲线

Fig. 3 Power characteristic curves of DFIG overspeed zone

线的凸特性,可求得两个数值解,文中采用超速控制,故选择较大的数值^[24]. 类比式(5),可得减载功率($P_{\text{ref_de}}$)为

$$P_{\text{ref_de}}=K_{\text{de}}\omega_{\text{g}}^3, \quad K_{\text{de}}=\frac{1}{2}\rho(C_{\text{p,de}}/\lambda_{\text{de}}^3)\pi R_{\text{r}}^5.$$

(11)

由此构建超速减载控制框图,如图 4 所示.

3 基于模糊规则的参数调整

固定参数的惯性控制方法不利于风机的动态响应. 因此,根据电网频率变化的特性,采用模糊策略在线调节风机惯性控制系数 K_{d} , K_{p} ,在保证惯性足额提取的基础上,获得更好的风机转速恢复特性,进一步改善频率二次跌落的不利影响.

电力系统的频率调整以频率偏差 Δf ($-0.3\leq\Delta f\leq0.3$)和频率变化率 $\text{d}f/\text{d}t$ ($-0.5\leq\text{d}f/\text{d}t\leq0.5$)作为模糊规则的输入物理量,频率偏差主要反映频率偏离额定值的程度,频率变化率主要体现频率变化的动态趋势;以 K_{d} ($8\leq K_{\text{d}}\leq12$)和 K_{p} ($20\leq K_{\text{p}}\leq50$)作为输出物理量, K_{d} 调整综合惯性控制的输出功率, K_{p} 调整下垂控制的输出功率.

根据系统状态和附加频率控制原理,对模糊规则进行设计. 当 Δf , $\text{d}f/\text{d}t$ 同为负值,且数值较大时,说明电力系统频率偏差较大,并持续增大,此时,应该提高风机的输出功率, K_{d} , K_{p} 可取较大值;当 Δf , $\text{d}f/\text{d}t$ 异号,且数值较小时,说明频率波动得到初步抑制,则 K_{d} , K_{p} 可取较小值. 在模糊逻辑控制器中,采用 Z 形隶属函数、三角隶属函数和 S 状隶属函数,将 Δf , $\text{d}f/\text{d}t$ 划分为正大(PB)、正小(PS)、零(ZO)、负小(NS)、负大(NB)5 个等级,如图 5 所示. 将 K_{d} , K_{p} 划分为大(B)、中(M)、小(S)、零(Z)4 个等级,其模糊逻辑表,如表 1,2 所示.

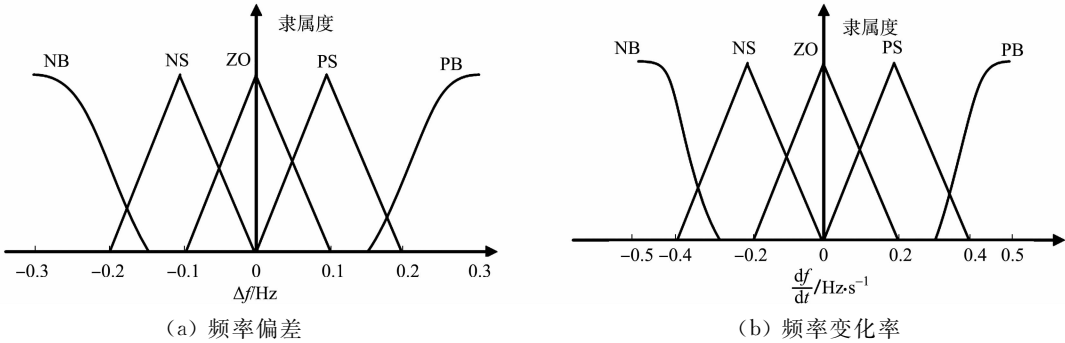


图 5 输入变量的隶属函数

Fig. 5 Membership functions of input variable

表 1 K_{d} 模糊逻辑表

Tab. 1 Fuzzy logic table of K_{d}

$\text{d}f/\text{d}t$ 等级	Δf 等级				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	B	M	M	Z	S
NS	M	M	S	S	S
ZO	S	S	Z	S	S
PS	S	S	S	M	M
PB	S	Z	M	M	B

表 2 K_{p} 模糊逻辑表

Tab. 2 Fuzzy logic table of K_{p}

$\text{d}f/\text{d}t$ 等级	Δf 等级				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	B	M	M	M	Z
NS	M	M	M	M	S
ZO	S	S	Z	S	S
PS	S	S	M	M	M
PB	S	Z	M	M	B

4 仿真分析

在 Matlab/Simulink 环境下搭建仿真模型,将文中方法与传统综合惯性控制方法、超速区固定参数综合惯性控制方法进行对比,以验证文中方法的有效性. 常规机组采用 1 台 900 MW 的汽轮机,风电部

分采用 160 台 3.6 MW 的双馈风机,风电渗透率约为 40%,减载率为 10%。

风机参与的自动发电控制(AGC)系统仿真模型,如图 6 所示.图 6 中:ACE 为区域控制偏差; ΔX_g 为调节阀位置偏差; ΔP_r 为再热式汽轮机输出热功率增量; ΔP_{WT} 为风机输出有功功率差额; ΔP_G 为火电机组输出功率差额; ΔP_L 为负荷扰动; H 为电力系统惯性时间常数; D 为负荷阻尼系数; T_g 为调速器时间常数; T_t 为汽容时间常数; R 为发电机频率因子; B 为自然频率因子; K_r 为再热系数; T_r 为再热时间常数. AGC 系统参数表,如表 3 所示. 风机控制参数表,如表 4 所示. 表 4 中: P_{base} 为基本功率; n_p 为发电极对数; β_{max}, β_{min} 分别为桨距角最大值和最小值; T_w 为滤波器时间常数.

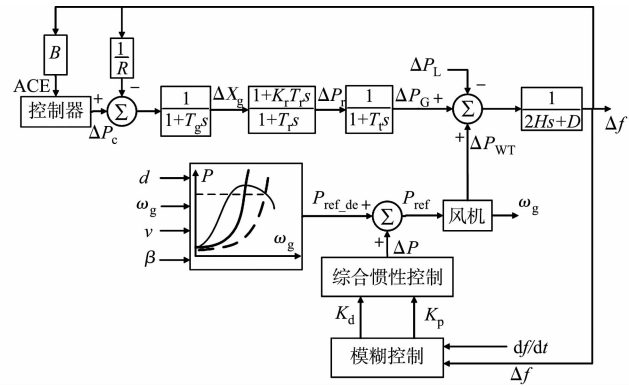


图 6 风机参与的 AGC 系统模型

Fig. 6 AGC system model with wind turbine participation

表 3 AGC 系统参数表

Tab. 3 Table of AGC system parameters

参数	取值	参数	取值	参数	取值
T_r/s	11	T_t/s	0.2	T_g/s	-0.15
$R/p.u. \cdot Hz^{-1}$	0.062 5	$D/Hz \cdot p.u.^{-1}$	1.92	$B/Hz \cdot p.u.^{-1}$	17.92
H/s	5.92	K_r	0.3		

表 4 风机控制参数表

Tab. 4 Table of DFIG control parameters

参数	取值	参数	取值	参数	取值
P_{base}/MW	3.6	A/m^2	11 300	n_p	2
$K_p/(m \cdot s)^{-3}$	1.901×10^{-3}	$\rho/kg \cdot m^{-3}$	1.225	$\beta_{max}/(^{\circ})$	0
R_r/m	58.5	T_w/s	10	$\beta_{min}/(^{\circ})$	45

在 $7.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的恒风速下,采用 60 s 仿真验证,DFIG 机组采用不同的控制方式参与系统调频.为考察风机响应能力,在 10 s 时,分别增加和减少 0.1 p. u. 的负荷,从系统频率偏差、风机输出有功功率、风机转子转速 3 个方面进行分析.当负荷突变时,系统频率偏差曲线和 DFIG 响应曲线,如图 7,8 所示.

由图 7 可知:当负荷突变时,相较于传统综合惯性控制方法,超速区固定参数综合惯性控制方法能

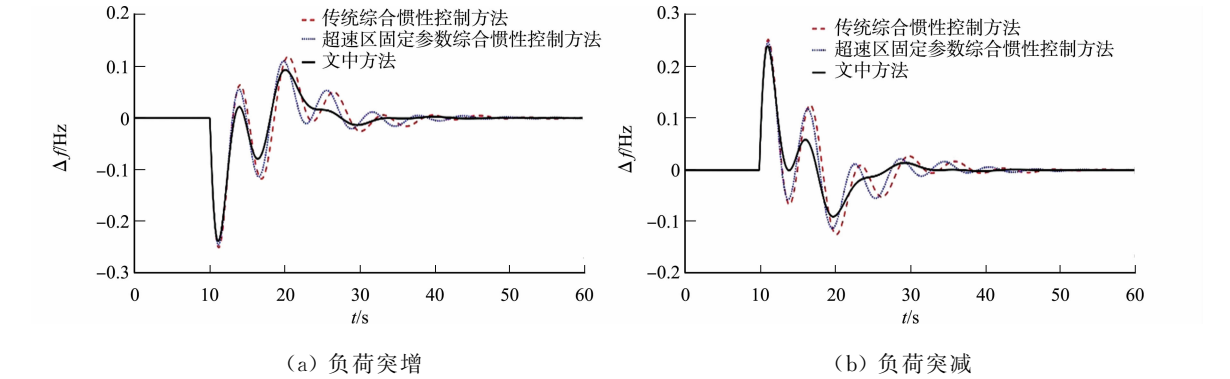


图 7 负荷突变时的系统频率偏差曲线

Fig. 7 System frequency fluctuation curves under sudden load change

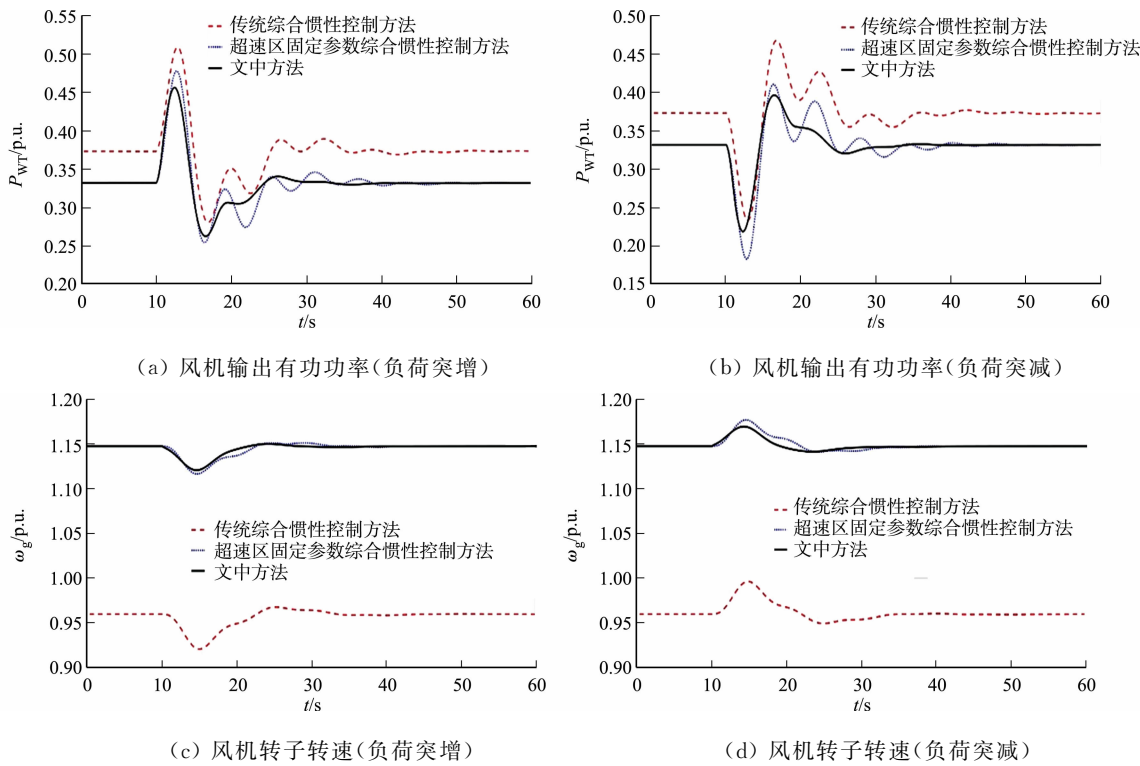


图 8 负荷突变时 DFIG 响应曲线

Fig. 8 DFIG response curves under sudden load change

够较好地改善频率二次跌落的不利影响;相较于超速区固定参数综合惯性控制方法,文中方法能够较好地控制频率偏差和时间;在响应初期,文中方法可在一定程度上抑制频率最大偏移量;在响应中期,文中方法的频率波动幅度较小,能够较好地改善频率二次跌落的不利影响;在响应后期,文中方法能使频率更快趋于稳定。

由图 8(a),(b)可知:相较于传统综合惯性控制方法,超速区固定参数综合惯性控制方法和文中方法的有功输出减少约 10%,说明风机处于减载运行状态;相较于超速区固定参数综合惯性控制方法,文中方法可根据系统状态动态调节转子侧变流器的参考值,快速响应系统需求,动态改变风机输出,使输出有功功率曲线更加平滑。

由图 8(c),(d)可知:超速区固定参数综合惯性控制方法和文中方法可改变风机转速,使其运行在特性曲线的另一端,实现风机超速运行状态;文中方法可使转速调整更加平滑,并且能快速进入稳态。

5 结论

1) 在超速区采用惯性控制方法能够防止传统综合惯性控制因风机提取动能而产生的失速问题,并且在超速区进行转速恢复可在一定程度上改善频率二次跌落的不利影响。

2) 以频率差值和频率变化率为考量标准,制定模糊规则调整综合惯性控制的对应参数,使综合惯性控制能够根据系统状态动态调整转子侧有功功率参考值,实现风机的动态响应,改变风机的输出有功功率,适应系统负荷的变化。

3) 文中方法考虑了超速区综合惯性控制的特性,通过变参数动态改变风机参与系统调频的惯性响应深度,在超速区的基础上,进一步减小电网频率二次跌落的幅度。

参考文献:

[1] 范林源,王德林,李颖颖,等. 高渗透率风电并网后的调频控制策略研究[J]. 电工技术,2019,13(1):26-29,33. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1388.2019.13.009.

[2] 刘吉臻,姚琦,柳玉,等. 风火联合调度的风电场一次调频控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(12):3462-3469. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.161663.

- [3] 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. DOI:10.7500/AEPS20150930009.
- [4] 苗福丰,唐西胜,齐智平. 风储联合调频下的电力系统频率特性分析[J]. 高电压技术,2015,41(7):2209-2216.
- [5] ZHANG Z S,SUN Y Z,LIN J,*et al.* Coordinated frequency regulation by doubly fed induction generator-based wind power plants[J]. *Iet Renewable Power Generation*,2012,6(1):38-47. DOI:10.1049/iet-rpg.2010.0208.
- [6] LIU Juelin,YANG Zhifang,YU Juan,*et al.* Coordinated control parameter setting of DFIG wind farms with virtual inertia control[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*,2020,122:106167. DOI:10.1016/j.ijepes.2020.106167.
- [7] 李少林,王伟胜,张兴,等. 风力发电对系统频率影响及虚拟惯量综合控制[J]. 电力系统自动化,2019,43(15):64-70. DOI:10.7500/AEPS20190103005.
- [8] LIU Yancheng,ZHUANG Xuzhou,ZHANG Qinjin,*et al.* A novel droop control method based on virtual frequency in DC microgrid[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*,2020,119:105946. DOI:10.1016/j.ijepes.2020.105946.
- [9] LEE J,YONG C K,MULJADI E,*et al.* Droop assignment algorithm for the inertial control of a DFIG-based wind power plant for supporting the grid frequency[C]//IEEE Symposium on Power Electronics and Machines for Wind and Water Applications. Milwaukee,IEEE Press,2014:1-5. DOI:10.1109/PEMWA.2014.6912223.
- [10] 陈曦寒,高赐威. 考虑定桨距和变桨距风机联合控制的风电场有功功率控制策略[J]. 电网技术,2015,39(7):1892-1899. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2015.07.020.
- [11] DÍAZ-GONZÁLEZ F,HAU M,SUMPER H. Participation of wind power plants in system frequency control: Review of grid code requirements and control methods[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*,2014,34:551-564. DOI:10.1016/j.rser.2014.03.040.
- [12] 姜莹,边晓燕,李东东,等. 基于可变减载率超速控制的双馈异步风机参与微电网调频研究[J]. 电机与控制应用,2017,44(9):118-124. DOI:10.3969/j.issn.1673-6540.2017.09.022.
- [13] BAO Yuqing,LI Yang. On deloading control strategies of wind generators for system frequency regulation[J]. *International Transactions on Electrical Energy Systems*,2015,25(4):623-635. DOI:10.1002/etep.1855.
- [14] 陈斌,王德林,张俊武,等. 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[J]. 电工电能新技术,2018,37(11):40-47. DOI:10.12067/ATEEE1802005.
- [15] 付媛,王毅,张祥宇,等. 变速风电机组的惯性与一次调频特性分析及综合控制[J]. 中国电机工程学报,2014(27):4706-4716. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.2014.27.018.
- [16] 张昭遂,孙元章,李国杰,等. 超速与变桨协调的双馈风电机组频率控制[J]. 电力系统自动化,2011,35(17):20-25,43.
- [17] 张旭,陈云龙,岳帅,等. 风电参与电力系统调频技术研究的回顾与展望[J]. 电网技术,2018,42(6):1793-1803. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2018.0359.
- [18] 赵嘉兴,高伟,上官明霞,等. 风电参与电力系统调频综述[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(21):157-169. DOI:10.7667/PSPC161762.
- [19] 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. DOI:10.7500/AEPS20140212007.
- [20] 丁磊,尹善耀,王同晓,等. 结合超速备用和模拟惯性的双馈风机频率控制策略[J]. 电网技术,2015,39(9):2385-2391. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2015.09.002.
- [21] 赵晶晶,吕雪,符杨,等. 基于可变系数的双馈风机虚拟惯量与超速控制协调的风光柴微电网频率调节技术[J]. 电工技术学报,2015,30(5):59-68. DOI:10.3969/j.issn.1000-6753.2015.05.008.
- [22] REYES V,RODRIGUEZ J J,CARRANZ O,*et al.* Review of mathematical models of both the power coefficient and the torque coefficient in wind turbines[C]//IEEE International Symposium on Industrial Electronics. Buzios:IEEE Press,2015:1458-1463. DOI:10.1109/ISIE.2015.7281688.
- [23] 马少康,耿华,杨耕,等. 基于功率跟踪曲线切换的变速风电机组虚拟惯量控制[J]. 电力系统自动化,2018,42(17):42-48. DOI:10.7500/AEPS20170901004.
- [24] 胡一鸣. 双馈风力发电机参与电力系统频率调节的控制策略研究[D]. 成都:西南交通大学,2017.

(责任编辑:钱筠 英文审校:吴逢铁)