

# 基于系统最大频率偏差的DFIG自适应下垂控制策略

薛水莲<sup>1</sup>,殷志龙<sup>2</sup>,於 锋<sup>3</sup>,王 琦<sup>4</sup>,桑 顺<sup>3</sup>

(1.南京沐儒检测认证有限公司,江苏南京 211100; 2.西安德纳检验检测有限公司,陕西西安 710061; 3.南通大学电气工程学院,江苏南通 226019; 4.陕西省电子信息产品监督检验院,陕西西安 710004)

**摘要:**针对现有双馈异步风力发电机组(DFIG)调频策略无法兼顾发挥调频潜力与保障自身调频运行安全稳定问题,提出一种基于系统最大频率偏差的DFIG自适应下垂控制策略。首先,搭建DFIG的风能捕获模型,明确最大功率跟踪运行机理;然后,引入模糊控制对现有下垂控制中的控制增益进行改进,使DFIG在保障自身运行稳定的情况下实时调整调频增发功率,以改善系统频率跌落;最后,在Matlab/Simulink中搭建电力仿真系统模型,验证所提策略的有效性。算例分析表明,所提策略在不同工况下均可充分发挥DFIG自身调频潜力,减少系统最大频率偏差。

**关键词:**双馈异步风力发电机组;下垂控制;控制系数;频率偏差;模糊控制

中图分类号:TM614 文献标志码:A 文章编号:2096-4145(2024)08-0098-07

## DFIG Adaptive Droop Control Strategy Based on Maximum System Frequency Deviation

XUE Shuilian<sup>1</sup>, YIN Zhilong<sup>2</sup>, YU Feng<sup>3</sup>, WANG Qi<sup>4</sup>, SANG Shun<sup>3</sup>

(1.Nanjing Moral Testing and Certification Co., Ltd., Nanjing 211100, China; 2.Xi'an Dynamic Inspection and Testing Co., Ltd., Xi'an 710061, China; 3.School of Electrical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China; 4.Shaanxi Electronic Information Products Supervision and Inspection Institute, Xi'an 710004, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the existing frequency regulation strategy cannot give full play to the potential of frequency regulation and ensure the safety and stability of DFIG frequency regulation operation, an adaptive droop control strategy of DFIG based on maximum frequency deviation is proposed. Firstly, the wind energy capture model of DFIG is built to clarify the maximum power point tracking mechanism. Then, the control gain is improved in the existing traditional droop control method for wind turbines by fuzzy control. DFIG can adjust the frequency regulation power in real time and improve the frequency drop of the system while ensuring its own stable operation. Finally, the power simulation system model is built in Matlab/Simulink to verify the effectiveness of the proposed strategy. Case analysis shows that the proposed adaptive droop control can make fully use of the frequency regulation potential of DFIG and reduce the maximum frequency deviation of the system under different operating conditions.

**Key words:** DFIG; droop control; control coefficient; frequency deviation; fuzzy control

## 0 引言

随着“双碳”目标的不断实施,以风力发电机组为主的大规模新能源被逐步并入电网<sup>[1-4]</sup>。双馈异步风力发电机组(Doubly-fed Induction Generator, DFIG)凭借其体积小、成本低、控制灵活等优势被广

泛应用于风力发电中<sup>[5-7]</sup>,但其通过电力电子器件并网导致系统频率稳定性降低,极易引发DFIG脱网造成大规模停电事故<sup>[8-10]</sup>。而DFIG转子具有较大的调速范围,可将转子动能作为调频的能量来源,模拟同步机的惯性响应为系统输出调频功率<sup>[11-13]</sup>。因此,以英国为代表的新能源高占比国家提出风电场应具备一定的调频能力<sup>[14-16]</sup>。

以虚拟惯量控制为首的传统调频策略以其结构简单、反应速度快、稳定性高等优点受到广泛的青睐<sup>[17-20]</sup>。文献[21]通过分析DFIG主动参与调频对系统频率

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52307208)

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (52307208)

响应的影响,提出一种基于参数模糊推理的虚拟惯量优化控制策略,以提高系统频率稳定性。考虑到频率微分量采集计算极易引入系统噪声,文献[22]通过对下垂系数优化,提出1种自适应下垂系数的DFIG一次调频策略,最大限度地释放可用转子动能。文献[23]针对风力发电机组传统虚拟惯量调频存在可靠性偏低的缺陷,提出采用两段下垂调频策略来替代综合惯量,建立其频率解析模型并给出参数整定方法。然而,现有调频策略仍存在控制系数难以确定的问题,若对其继续进行时域优化则会产生类似问题,并进入到不断循环之中。近年来,智能化算法逐渐被应用到风电机组调频控制中<sup>[24-27]</sup>,但其需要大量的数据支持,且数学模型和计算方法复杂,限制了算法的应用。

综上所述,本文针对现有DFIG调频策略无法兼顾发挥调频潜力与保障自身调频运行安全稳定的问题,提出一种基于系统最大频率偏差的DFIG自适应下垂控制策略。研究的创新之处在于,采用模糊控制不仅弱化了智能化算法的复杂性,同时避免了传统调频策略中参数循环优化的问题,并且对转子转速与调频功率建立耦合关系,在充分发挥DFIG调频潜力的同时实现稳定运行。

## 1 DFIG的风能捕获模型与最大功率跟踪运行机理

### 1.1 DFIG的风能捕获模型

DFIG主要由叶轮、齿轮箱、感应电机、背靠背变流器及DFIG控制系统组成。当空气中的风经叶轮捕获后,由齿轮箱将能量从低速轴传递到感应电机的高速轴,感应电机定子侧与电网直连,转子侧经过背靠背变流器与电网相连。DFIG并网结构示意图如图1所示。

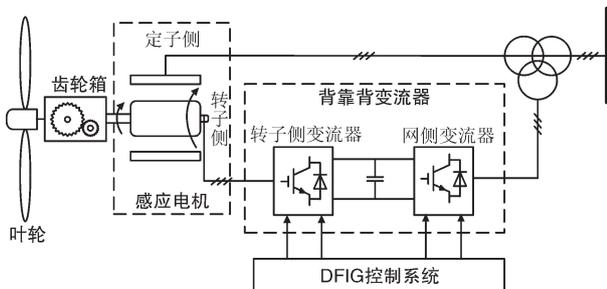


图1 DFIG并网结构示意图

Fig.1 Grid-connected structure of DFIG

由于在实际运行过程中存在一定的能量损耗,因此,引入风能利用系数 $C_{wpu}$ 来描述叶轮将风能转

化为机械能的能力大小,则DFIG捕获风能转化而来的机械功率 $P_{mac}$ 及相关变量表达式为:

$$\begin{cases} P_{mac} = \frac{1}{2} C_{wpu} \pi \rho_{DFIG} R^2 v_{DFIG}^3 \\ C_{wpu} = 0.645 \left\{ 0.00912\lambda + \frac{-5 - 0.4(2.5 + \beta) + 116a}{e^{21a}} \right\} \\ \lambda = \frac{\omega_{DFIG,r} R^2}{2v_{DFIG}} \\ a = \frac{1}{\lambda + 0.08(2.5 + \beta)} - \frac{0.035}{1 + (2.5 + \beta)^3} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\rho_{DFIG}$ 为DFIG所处环境的空气密度; $R$ 为DFIG自身的叶片半径; $v_{DFIG}$ 为DFIG检测到的风速; $\lambda$ 为叶尖速比,是风轮叶片尖端线速度与 $v_{DFIG}$ 之比,为归一化处理的数据; $\beta$ 为桨距角; $a$ 为中间变量; $\omega_{DFIG,r}$ 为DFIG的转子转速。

### 1.2 DFIG最大功率跟踪运行机理

由于 $C_{wpu}$ 的取值很大程度上决定了DFIG的工作效率,结合式(1)可得 $C_{wpu}$ 与 $\lambda, \beta$ 的三维曲面如图2所示。

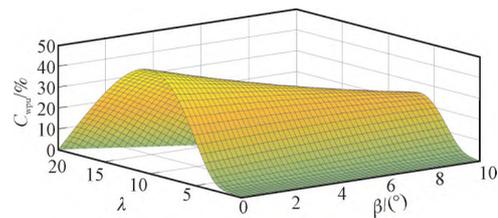


图2  $C_{wpu}$ 与 $\lambda, \beta$ 的三维曲面

Fig.2  $C_{wpu}$  and  $\lambda, \beta$  three-dimensional surface

由图2可知,当 $\lambda$ 恒定时,随着 $\beta$ 逐渐降低, $C_{wpu}$ 随之增大;当 $\beta$ 恒定时,存在唯一与之对应的 $\lambda$ 使 $C_{wpu}$ 最大。通常DFIG通过固定 $\beta$ 改变 $\lambda$ 来调节捕获的机械功率。为实现风能利用最大化,常将 $\beta$ 固定在 $0^\circ$ ,使 $\lambda$ 达到最优叶尖速度比 $\lambda_{opt}$ 。在不同风速下,DFIG对应唯一 $\lambda_{opt}$ 使DFIG运行最优。

连接不同风速下对应的最大功率点连线称为最大功率跟踪控制(Maximum Power Point Tracking, MPPT)运行曲线。结合式(1),可得MPPT运行曲线如图3所示。其中, $P_{MPPT}^{out}$ 为MPPT环节输出功率; $v_{DFIG,1}, v_{DFIG,2}, v_{DFIG,3}, v_{DFIG,4}$ 为DFIG中不同风速,其大小关系为 $v_{DFIG,1} < v_{DFIG,2} < v_{DFIG,3} < v_{DFIG,4}$ 。本文后续研究所用物理量均为标么值。由图3可知,随着 $v_{DFIG}$ 的增加, $P_{MPPT}^{out}$ 随之增加。因此,MPPT运行模式下,DFIG仅根据 $\omega_{DFIG,r}$ 变化调节有功功率输出,且 $\omega_{DFIG,r}$

取决于运行工况。因此,即使电网频率遭受不平衡功率扰动时,DFIG 也不会参与惯性响应。

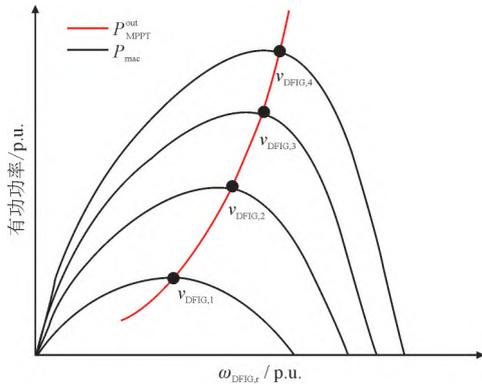


图3 MPPT运行曲线  
Fig.3 MPPT operation curve

## 2 基于系统最大频率偏差的DFIG自适应下垂控制策略

### 2.1 下垂控制

为有效释放 DFIG 的转子动能,发挥 DFIG 调频潜力,提出虚拟惯性控制与下垂控制 2 种调频控制。由于虚拟惯性控制中频率微分量极易引入噪声干扰,因此本文重点对下垂控制展开优化设计。下垂控制的表达式为:

$$P_{DFIG}^{out} = P_{MPPT}^{out} - \Delta P_{DC}^{FA} \quad (2)$$

$$\Delta P_{DC}^{FA} = -K_{DC} \Delta f \quad (3)$$

式中:  $P_{DFIG}^{out}$  为 DFIG 输出功率;  $\Delta P_{DC}^{FA}$  为下垂控制中的调频增发功率;  $K_{DC}$  为下垂控制增益;  $\Delta f$  为系统频率偏差。

系统发生扰动后,DFIG 按照式(2)—式(3)的方式切换到调频模式,在自身转速限制内释放自身旋转动能,增发调频功率。而 DFIG 转子中可释放的动能  $E_{DFIG}$  为:

$$E_{DFIG} = H_{DFIG}^{inc} \left[ \omega_{DFIG,r}^2 - (\omega_{DFIG,r}^{min})^2 \right] \quad (4)$$

式中:  $H_{DFIG}^{inc}$  为 DFIG 的惯性时间常数;  $\omega_{DFIG,r}^{min}$  为 DFIG 转子转速最小值。

由式(4)可知,DFIG 的调频潜力与  $\omega_{DFIG,r}$  息息相关。而传统下垂控制的  $K_{DC}$  采用固定增益,不仅对复杂工况适应性不强,还与 DFIG 自身状态解耦,易发生 DFIG 调频潜力未充分利用或触发 DFIG 失速的现象。

### 2.2 DFIG 自适应下垂控制策略

为保证 DFIG 的安全稳定运行及充分发挥

DFIG 调频潜力,本文应用模糊控制提出基于系统最大频率偏差的 DFIG 自适应下垂控制策略,改善系统最大频率偏差。模糊控制器是非线性控制器之一,具有更好的鲁棒性和适应性,当受控过程复杂或难以准确建立数学模型时,模糊控制变得更加实用。采用 DFIG 转子动能作为弥补系统功率缺额的能量来源,导致系统功率缺额与  $\Delta f$  正相关,可通过  $\Delta f$  反映系统频率所需的旋转动能。由式(4)可知,  $\omega_{DFIG,r}$  与  $E_{DFIG}$  存在耦合关系,可通过  $\omega_{DFIG,r}$  反映 DFIG 的调频潜力。因此,将  $\Delta f$  和  $\omega_{DFIG,r}$  作为模糊控制的输入数据。在模糊控制系统中对  $\Delta f$  和  $\omega_{DFIG,r}$  进行模糊处理,进而确定适用于该工况的  $K_{DC}$ 。

基于系统最大频率偏差的 DFIG 自适应下垂控制策略控制框图如图 4 所示。其中,  $f$  为系统频率,  $f_{ref}$  为  $f$  的标准值,  $H_{hps}$  为高通滤波器的时间常数,  $s$  为拉式算子。

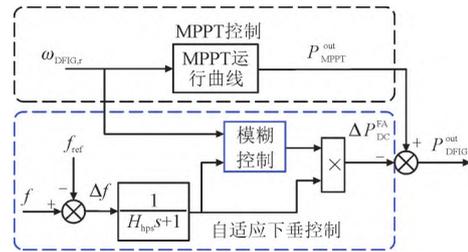


图4 基于系统最大频率偏差的DFIG自适应下垂控制策略控制框图

Fig.4 Control block diagram of maximum-frequency-deviation-oriented adaptive droop control strategy for DFIG

模糊控制器根据  $\Delta f$  和  $\omega_{DFIG,r}$  动态改变  $K_{DC}$ , 实现 DFIG 自适应下垂控制。考虑到模糊控制隶属度函数的划分依据主要基于模糊集合和模糊规则之间的相互配合,为便于分析采用均分的三角形隶属度函数,通过调整模糊规则以实现对系统的精确控制。模糊子集是模糊语言变量的数学表达,模糊子集为模糊语言变量提供了量化的方法。通过隶属函数,可以将模糊语言变量中的模糊概念转化为具体的数值,从而在数学上处理这些概念,隶属度是一个介于 0 和 1 之间的数值,没有单位。模糊控制的隶属度函数曲线如图 5 所示。其中,  $\Delta f$ ,  $\omega_{DFIG,r}$  和  $K_{DC}$  均包含 7 个模糊子集,与其对应的有 7 个表述模糊现象的模糊语言变量。其中,  $\Delta f$  的模糊语言变量为: NB(负大)、NM(负中)、NS(负小)、Z(零)、PS(正小)、PM(正中)、PB(正大);  $\omega_{DFIG,r}$  的模糊语言变量为: SS(极小)、MS(小)、S(较小)、M(中)、SB(较大)、MB(大)、B(极大);  $K_{DC}$  的模糊语言变量为: Z(零)、SS

(极小)、MS(小)、S(较小)、SB(较大)、MB(大)、B(极大)。

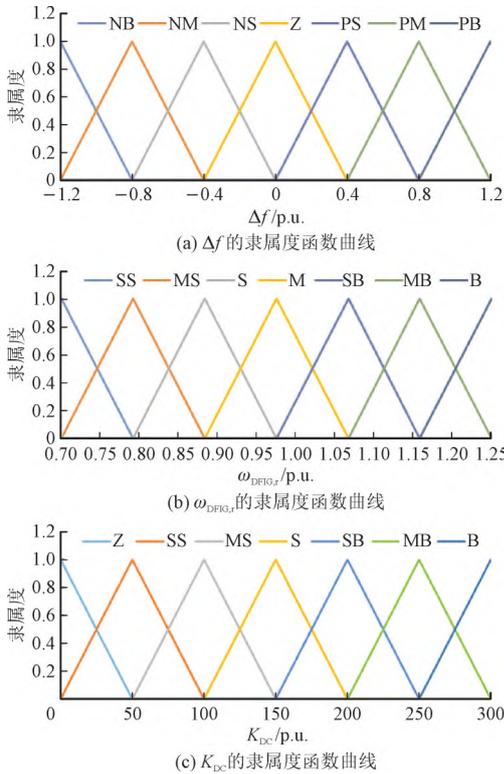


图5 模糊控制的隶属度函数曲线

Fig.5 Membership function curve of fuzzy control

$\Delta f$ 和 $\omega_{DFIG,r}$ 变化下 $K_{DC}$ 的模糊逻辑规则表如表1所示。

表1  $\Delta f$ 和 $\omega_{DFIG,r}$ 变化下 $K_{DC}$ 的模糊逻辑规则表  
Table 1 Fuzzy logic rules of  $K_{DC}$  under  $\Delta f$  and  $\omega_{DFIG,r}$  Variations

$\Delta f$	$\omega_{DFIG,r}$						
	SS	MS	S	M	SB	MB	B
NB	SS	MS	S	SB	MB	B	B
NM	Z	SS	MS	S	SB	MB	B
NS	Z	Z	SS	MS	S	SB	MB
Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z	Z
PS	MB	SB	S	MS	SS	Z	Z
PM	B	MB	SB	S	MS	SS	Z
PB	B	B	MB	SB	S	MS	SS

由表1可知,当 $\Delta f=NB$ 时, $K_{DC}$ 随 $\omega_{DFIG,r}$ 的增加而增加。当 $K_{DC}$ 达到最大值时保持,即 $\omega_{DFIG,r}=MB$ 或 $B$ 时, $K_{DC}=B$ 。表1体现了下述模糊逻辑规则:(1)当 $\Delta f$ 由 $Z$ 逐渐向 $NB$ 靠近时, $K_{DC}$ 随 $\omega_{DFIG,r}$ 增大( $SS\sim B$ )而增大( $Z\sim B$ );(2)当 $\Delta f$ 由 $Z$ 逐渐向 $PB$ 靠近时, $K_{DC}$ 随 $\omega_{DFIG,r}$ 增大( $SS\sim B$ )而减小( $B\sim Z$ );(3)当 $\Delta f=Z$ 时,DFIG不参与调频, $K_{DC}=Z$ 。

由表1推导可得,模糊逻辑推理结果如图6所示。

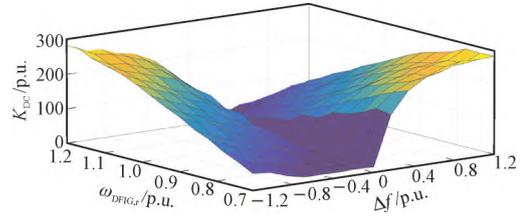


图6 模糊逻辑推理结果

Fig.6 Fuzzy logic reasoning results

由图6可知,模糊逻辑推理结果根据 $\Delta f$ 数值不同分为2种情况:(1) $\Delta f < 0$ 时,系统出现功率缺额,DFIG需要输出调频功率以抑制频率跌落(当 $\omega_{DFIG,r}$ 值较大时,随着 $\Delta f$ 下降 $K_{DC}$ 增大,DFIG释放大量转子动能,抑制频率跌落;当 $\omega_{DFIG,r}$ 值较小时,为保障DFIG自身运行的稳定性, $K_{DC}$ 逐渐减小到0,DFIG平缓退出调频);(2) $\Delta f > 0$ 时,系统出现功率富裕,DFIG需要吸收调频功率以抑制频率上升(当 $\omega_{DFIG,r}$ 值较小时,随着 $\Delta f$ 上升 $K_{DC}$ 增大,DFIG吸收大量转子动能,抑制频率上升。当 $\omega_{DFIG,r}$ 值较大时, $K_{DC}$ 逐渐减小到0,DFIG平缓退出调频)。

### 3 算例分析

#### 3.1 场景设置

为验证所提控制策略的有效性,在Matlab/simulink中搭建仿真系统模型,如图7所示。其中,SG1—SG3为3台133 MW火电机组,负荷1、负荷2为2个138 MW的静负荷,105 MW的DFIG聚合风电场由21台5 MW的DFIG组成。

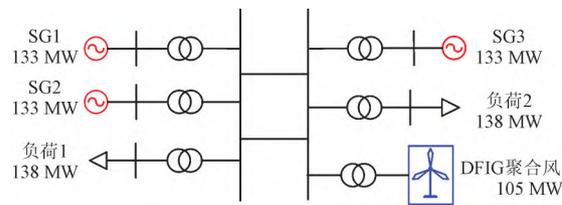


图7 仿真系统模型

Fig.7 Model of simulation system

本文将系统扰动设置为第40s负荷增加0.1 p.u.,第60s负荷继续增加0.1 p.u.。第90s负荷减小0.2 p.u.的连续型系统扰动如图8所示。

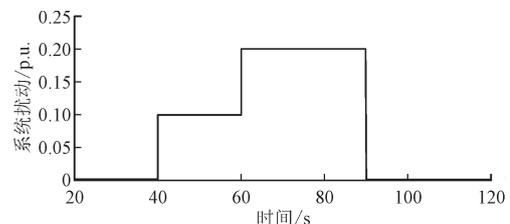


图8 系统扰动

Fig.8 System disturbance

### 3.2 控制策略方法仿真对比

本文在恒定风速下设置扰动相同,风电渗透率和  $v_{DFIG}$  不同的 3 个仿真算例,以模拟 DFIG 实际运行的复杂环境。仿真算例参数设置如表 2 所示。

表 2 仿真算例参数设置  
Table 2 Setting of simulation case

仿真算例	风电渗透率/%	$v_{DFIG}/p.u.$
1	20	0.818
2	20	0.909
3	25	0.818

本文对 DFIG 采用 4 种控制策略进行调频有效性分析,4 种控制策略具体如下:(1)MPPT 策略;(2)传统下垂控制策略( $K_{DC}=30$ );(3)计及转子转速的自适应频率支撑策略<sup>[28]</sup>;(4)改进自适应下垂控制策略。

#### 3.2.1 算例 1 仿真分析

算例 1 仿真结果如图 9 所示。

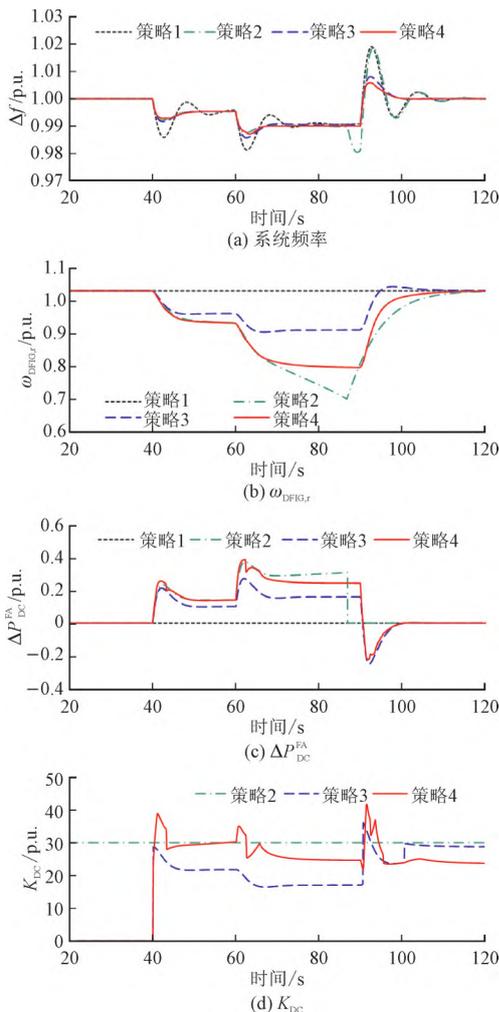


图 9 算例 1 仿真结果

Fig.9 Simulation results of case 1

由图 9 可知,图 9(a)中,DFIG 采用策略 4 的调频效果最好,将  $\Delta f$  减小到 0.0131 p.u.,策略 3 的调频

效果次之。图 9(b)中,DFIG 采用策略 2 时,在 86.93 s 时  $\omega_{DFIG,r}$  达到  $\omega_{DFIG,r}^{\min}$ ,DFIG 退出调频,使  $\Delta f$  增加到 0.0196 p.u.。图 9(c)—图 9(d)中,策略 1 无调频控制,故无  $K_{DC}$  图像,当 DFIG 采用策略 4 时, $K_{DC}$  变化范围在 4 种策略中最大,使  $\Delta P_{DC}^{FA}$  在 -0.22~0.39 p.u. 的范围内变化时,有利 DFIG 参与调频并维护系统的频率稳定。分析表明,所提控制策略能使  $K_{DC}$  随  $\omega_{DFIG,r}$  和  $\Delta f$  实时变化,在保障 DFIG 自身运行稳定的情况下,实现充分发挥 DFIG 调频潜力和抑制系统频率变化的目的。

#### 3.2.2 算例 2 仿真分析

当  $v_{DFIG}$  达到 0.909 p.u.时,DFIG 转子转速提升,算例 2 仿真结果如图 10 所示。

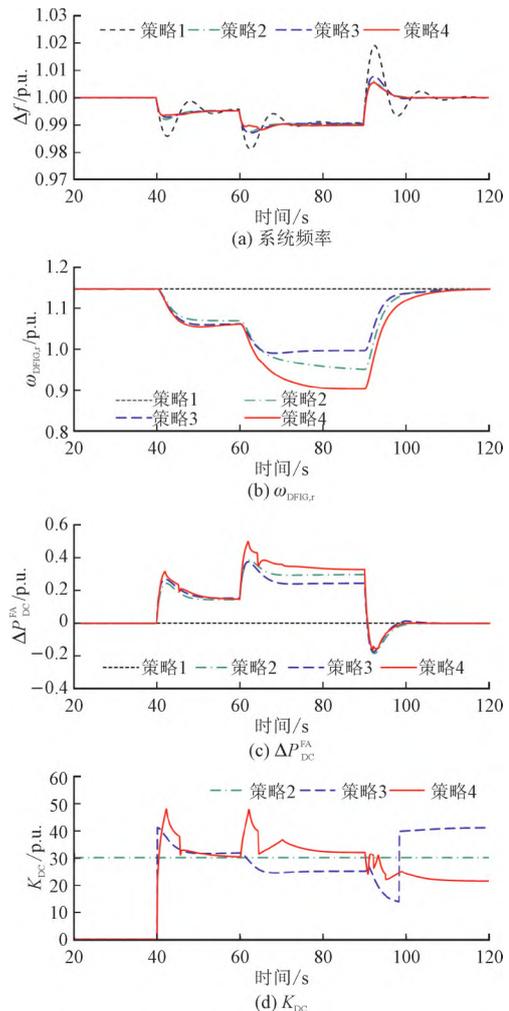


图 10 算例 2 仿真结果

Fig.10 Simulation results of case 2

由图 10 可知,图 10(a)中,随着  $v_{DFIG}$  的增加,DFIG 采用策略 4 将  $\Delta f$  减小到 0.0121 p.u.,调频效果仍为 4 种策略最好。图 10(b)中,相比算例 1,DFIG 调频前转速随  $v_{DFIG}$  增加而增加,策略 2 中  $\omega_{DFIG,r}$  最低

点为 0.95 p.u., 未发生  $\omega_{DFIG,r}$  达到  $\omega_{DFIG,r}^{\min}$  时导致的 DFIG 失速现象。图 10(c)—图 10(d)中, 策略 1 无调频控制, 故无  $K_{DC}$  图像, 策略 3、策略 4 仍能保持  $K_{DC}$  实时调整, 策略 4 的  $\Delta P_{DC}^{FA}$  变化范围为  $-0.15\sim 0.47$  p.u., 使 DFIG 调频效果达到最好。分析表明, 随  $v_{DFIG}$  增加, DFIG 调频潜力增加。所提策略在不同  $v_{DFIG}$  下能保持充分发挥 DFIG 调频潜力, 保持优良的调频性能。

### 3.2.3 算例 3 仿真分析

随着高比例新能源系统的构建, 系统中风电渗透率势必会不断增加, 故本文将风电渗透率增加到了 25%。算例 3 仿真结果如图 11 所示。

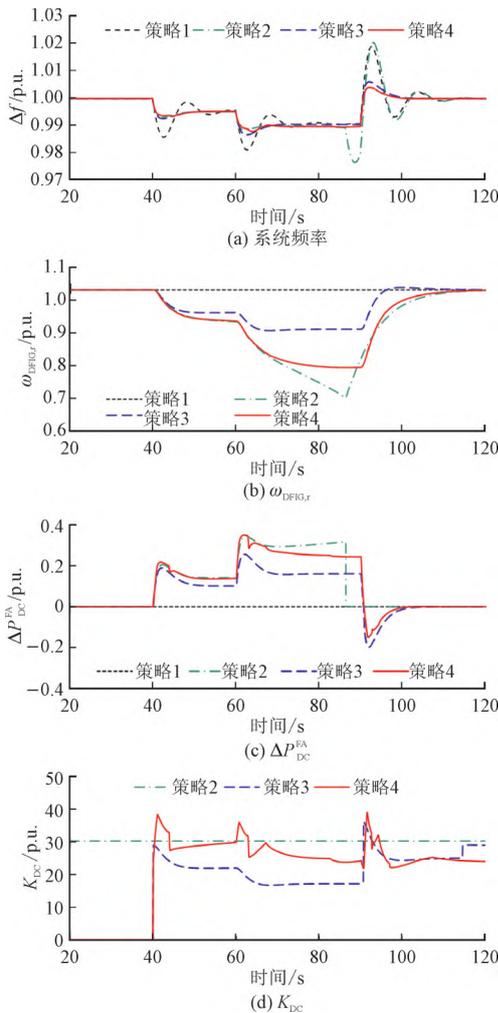


图 11 算例 3 仿真结果

Fig.11 Simulation results of case 3

由图 11 可知, 随着风电渗透率的提高, 系统的频率稳定性变得更加敏感和脆弱。图 11(a)中, DFIG 采用策略 1 时,  $\Delta f$  达到 0.0192 p.u., 策略 4 的调频效果最好,  $\Delta f$  仅为 0.0121 p.u.。图 11(b)中, 随着风电渗透率的增加, 策略 2 在第 86.6 s 出现 DFIG

退出调频现象, 使  $\Delta f$  增加到 0.023 2 p.u.。图 11(c)和图 11(d)中, 策略 1 无调频控制, 故无  $K_{DC}$  图像, 策略 3 中  $\Delta P_{DC}^{FA}$  的变化范围比策略 4 小 0.09 p.u., 这是因为策略 4 中  $K_{DC}$  的变化范围为 21.92~38.91 p.u., 以适应风电渗透率的变化。分析表明, 在不同风电渗透率下, 所提控制策略使  $K_{DC}$  在连续扰动下仍实时变化, 充分发挥 DFIG 的调频潜力, 抑制频率波动。

## 4 结论

本文针对现有 DFIG 调频策略无法兼顾发挥调频潜力与保障自身调频运行安全稳定的问题, 采用模糊控制提出一种基于系统最大频率偏差的 DFIG 自适应下垂控制策略, 实现在充分发挥 DFIG 调频潜力的同时, 保障自身运行稳定。经算例分析得到以下结论:

1) 从系统调频角度出发, 采用模糊控制实现变增益的下垂控制, 不仅使 DFIG 调频输出实时调整, 更使 DFIG 调频策略适应不同运行工况, 充分发挥 DFIG 自身调频潜力, 改善系统频率跌落。

2) 从 DFIG 自身角度出发, 将  $\omega_{DFIG,r}$  作为模糊控制的输入项, 能有效缓解 DFIG 转子动能过度释放, 造成的 DFIG 失速现象, 保障 DFIG 调频期间的运行稳定。

### 参考文献

- [1] 王一清, 沙倩, 刘秋林. 区域综合能源系统接入的配电网扩展规划研究[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(6): 198-205.  
WANG Yiqing, SHA Qian, LIU Qiulin, et al. Research on distribution network expansion planning for regional integrated energy system access[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(6): 198-205.
- [2] 杨滢, 杨晓雷, 项中明, 等. 参与一次调频储能型风电场的交流外送振荡特性分析[J]. 智慧电力, 2023, 51(9): 105-112.  
YANG Ying, YANG Xiaolei, XIANG Zhongming, et al. Oscillation characteristic analysis of wind farm with energy storage participating primary frequency control[J]. Smart Power, 2023, 51(9): 105-112.
- [3] 赵雪璐, 刘天琪, 何川, 等. 基于汇聚效应的风电集群接入与区域电网协调规划研究[J]. 电测与仪表, 2023, 60(12): 51-58.  
ZHAO Xuejun, LIU Tianqi, HE Chuan, et al. Coordinated planning of wind farm cluster access and regional grid based on convergence effect[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(12): 51-58.
- [4] 郑云平, 焦春雷, 亚夏尔·吐尔洪, 等. 基于新能源发电的构网型协调储能控制策略研究[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 65-74.  
ZHENG Yunping, JIAO Chunlei, YAXAR Turgun, et al. Research on grid forming coordinated energy storage control strategy based

- on converter interfaced generation[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 65-74.
- [5] CHANGQING C, YI S, TONGGUANG Y, et al. Virtual inertia coordination control strategy of DFIG-based wind turbine for improved grid frequency response ability[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 216: 109076.
- [6] DENDOUGA A, ESSOUNBOULI N. High performance of variable-pitch wind system based on a direct matrix converter-fed DFIG using third order sliding mode control[J]. Wind Engineering, 2024, 48(3): 325-348.
- [7] 杨本星, 王伟, 杨明轩, 等. 辅助风电电网的构网型储能控制策略研究[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 56-64.  
YANG Benxing, WANG Wei, YANG Mingxuan, et al. Research on grid forming energy storage control strategy for auxiliary wind power grid connection[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(7): 56-64.
- [8] 杨立滨, 张磊, 刘艳章, 等. 基于分布式框架的新能源场站并网性能评估[J]. 电力建设, 2022, 43(5): 137-144.  
YANG Libin, ZHANG Lei, LIU Yanzhang, et al. Grid-connection performance evaluation of renewable energy station under distributed framework[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(5): 137-144.
- [9] 孙华东, 许涛, 郭强, 等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6183-6192.  
SUN Huadong, XU Tao, GUO Qiang, et al. Analysis on blackout in Great Britain power grid on august 9th 2019 and its enlightenment to power grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6183-6192.
- [10] 蔡文亮, 赵正晖, 汪洋, 等. 面向新型能源结构的系统调频技术回顾与展望[J]. 电测与仪表, 2023, 60(10): 1-9.  
CAI Wenliang, ZHAO Zhenghui, WANG Yang, et al. Review and prospect of frequency modulation technology for new energy structure[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(10): 1-9.
- [11] 刘洪波, 彭晓宇, 张崇, 等. 风电参与电力系统调频控制策略综述[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(11): 81-92.  
LIU Hongbo, PENG Xiaoyu, ZHANG Chong, et al. Overview of wind power participating in frequency regulation control strategy for power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 81-92.
- [12] 陈长青, 李欣然, 杨祥, 等. 基于风机调频特性的储能配置方法及协调运行策略[J]. 电力建设, 2022, 43(1): 96-103.  
CHEN Changqing, LI Xinran, YANG Yang, et al. Energy storage configuration method and coordinated operation strategy based on wind power frequency regulation characteristics[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(1): 96-103.
- [13] 刘辉, 罗薇, 苏懿, 等. 计及ROCOF与转子动能的风电机组自适应下垂控制策略[J]. 电力工程技术, 2023, 42(6): 161-169.  
LIU Hui, LUO Wei, SU Yi, et al. Adaptive droop control strategy for wind turbines based on ROCOF and rotor kinetic energy[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 161-169.
- [14] 崔幼石, 严干贵, 刘耀霞, 等. 一种基于双馈风机锁相环动态响应的风-火协同调频策略[J]. 智慧电力, 2023, 51(1): 38-45, 77.  
CUI Youshi, YAN Gangui, LIU Zhaorui, et al. Wind-thermal power coordinated frequency regulation strategy based on dynamic response of phase-locked loop for double-fed wind turbine[J]. Smart Power, 2023, 51(1): 38-45, 77.
- [15] 楼佩婕, 边晓燕, 崔勇, 等. 计及辅助服务的微电网源荷协同调频优化控制策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(1): 156-163, 177.  
LOU Peijie, BIAN Xiaoyan, CUI Yong, et al. Optimal control strategy of source-load coordinated frequency regulation in microgrid considering ancillary service[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 156-163, 177.
- [16] CHEN C, LI X, LIU X, et al. Reliability improvement of wind power frequency modulation based on look-ahead control strategy and stage of charge optimization of energy storage[J]. International Journal of Energy Research, 2021, 46(4): 4739-4753.
- [17] 李世春, 王丽君, 薛臻瑶, 等. 基于惯量“削弱-补偿”责任分担的风电场虚拟惯量控制方法[J]. 智慧电力, 2023, 51(11): 30-37.  
LI Shichun, WANG Lijun, XUN Zhenyao, et al. Virtual inertia control method for wind farm based on inertia “weakening-compensation” responsibility sharing[J]. Smart Power, 2023, 51(11): 30-37.
- [18] 屈兴武, 王栋, 马天诚, 等. 支撑电网频率稳定的双馈风机一次调频控制需求分析[J]. 智慧电力, 2023, 51(10): 38-46.  
QU Xingwu, WANG Dong, MA Tiancheng, et al. Requirement analysis of DFIG primary frequency regulation control supporting grid frequency stability[J]. Smart Power, 2023, 51(10): 38-46.
- [19] LI T, SUN S, LI M, et al. Intelligent ADRC-based inertia control for offshore wind farm[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2023, 18(3): 530-541.
- [20] 王鑫, 杨德健, 金恩淑, 等. 双馈风电机的虚拟惯性控制优化策略[J]. 智慧电力, 2022, 50(8): 1-6, 81.  
WANG Xin, YANG Dejian, JIN Enshu, et al. Improved virtual inertial control strategy of doubly-fed induction generator[J]. Smart Power, 2022, 50(8): 1-6, 81.
- [21] 黎静华, 宋诚鑫, 兰飞. 基于参数模糊推理的风机虚拟惯量优化控制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(20): 125-133.  
LI Jinghua, SONG Chengxin, LAN Fei. Optimal control strategy of virtual for wind turbine based on fuzzy inference of parameters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(20): 125-133.
- [22] LIU J, WANG X. Analytical determination of stable droop loop gain for a DFIG participating in frequency regulation[J]. The Journal of Engineering, 2017, 2017(13): 1447-1452.
- [23] 高海淑, 张峰, 丁磊. 风电机组两分段下垂调频控制策略及参数整定方法[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(18): 111-121.  
GAO Haishu, ZHANG Feng, DING Lei. Two-segment droop frequency regulation control strategy and parameter setting method for wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 111-121.
- [24] 王中冠, 刘嘉琛, 郭力, 等. 基于状态空间映射的模型不完备风电场调频能力在线评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(3): 927-939.  
WANG Zhongguan, LIU Jiachen, GUO Li, et al. Online frequency characteristics analysis for incomplete-model wind farms based on state space mapping[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3): 927-939.
- [25] LIU B, ZHAO J, HUANG Q, et al. Nonlinear virtual inertia control (下转第128页)

距离[J]. 自动化博览, 2023, 40(4): 70-74.  
 LI Yongsheng, LI Zhiyu. Optimisation of the best distance for coordinated combination of overcurrent relay and distance relay[J]. Automation Expo, 2023, 40(4): 70-74.

[16] 翟博龙, 唐志军, 宋福海, 等. 基于OPNET的保护性能评估及采样值估计算法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(4): 160-166.  
 ZHAI Bolong, TANG Zhijun, SONG Fuhai, et al. Protection performance evaluation and sampling value estimation algorithm based on OPNET[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(4): 160-166.

[17] 陈敬德, 李雅晴, 杨欢红, 等. 基于改进Shapley特征优选及ResNet50深度学习模型的继电保护状态评估研究[J]. 供用电, 2023, 40(12): 72-78, 106.  
 CHEN Jingde, LI Yaqing, YANG Huanhong, et al. Research on relay protection state assessment based on improved Shapley feature optimization and ResNet50 deep learning model[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(12): 72-78, 106.

[18] XU H, CAI Y, QU X, et al. An improved strategy for out-of-step oscillation separation devices based on apparent impedance angle applied to a series compensated line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7: 1-8.

[19] 董小瑞, 孙伟, 樊群才, 等. 基于K LDA-INFLO的继电保护整定数据异常识别方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6): 132-137, 149.  
 DONG Xiaorui, SUN Wei, FAN Quncai, et al. K LDA-INFLO-based anomaly identification method for relay protection calibration data[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(6): 132-137, 149.

[20] 宁楠, 孙睿择, 潘凯岩, 等. 基于运行方式与故障信息融合的配电网保护策略优化[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(2): 54-61.  
 NING Nan, SUN Ruizhe, PAN Kaiyan, et al. Optimization of distribution network protection strategy based on fusion of operation mode and fault information[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(2): 54-61.

[21] 来智浩, 高钰琛, 翟常营, 等. 基于信号路径跟踪算法与并发分层架构的热过载保护装置自动校验方法研究[J]. 高压电器, 2022, 58(11): 121-127.  
 LAI Zhihao, GAO Yuchen, ZHAI Changying, et al. Research on automatic calibration method of thermal overload protection device

based on signal path tracking algorithm and concurrent layered architecture[J]. High Voltage Electrical Apparatus, 2022, 58(11): 121-127.

[22] 张峰毓, 霍政界, 李铭, 等. 基于时空分析的变电站继电保护故障信息检测系统设计[J]. 电子设计工程, 2022, 30(4): 110-114.  
 ZHANG Fengyu, HUO Zhengjie, LI Ming, et al. Design of substation relay protection fault information detection system based on spatio-temporal analysis[J]. Electronic Design Engineering, 2022, 30(4): 110-114.

[23] 王英英, 王玉龙, 吕东晓, 等. 同塔双回线接地故障断路器误动的改进策略[J]. 高压电器, 2022, 58(5): 172-179.  
 WANG Yingying, WANG Yulong, LYU Dongxiao, et al. Improvement strategy for ground fault circuit breaker misoperation of double return lines with the same tower[J]. High Voltage Electrical Apparatus, 2022, 58(5): 172-179.

[24] 糟伟红, 祁晓笑, 董雪涛, 等. 一种适用于微电网的分散式自适应过电流保护[J]. 四川电力技术, 2023, 46(2): 52-58.  
 NIAN Weihong, QI Xiaoxiao, DONG Xuetao, et al. A decentralized adaptive overcurrent protection for microgrids[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2023, 46(2): 52-58.

[25] 谭金龙, 熊小伏, 南东亮, 等. 基于变电站监控系统的继电保护自动检验方法研究[J]. 电子设计工程, 2023, 31(8): 10-14.  
 TAN Jinlong, XIONG Xiaofu, NAN Dongliang, et al. Research on automatic relay protection inspection method based on substation monitoring system[J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(8): 10-14.

[26] 李文伟, 韦思南, 汪清涓, 等. 基于组合算法的配电网继电保护优化整定计算方法[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2023, 45(4): 600-607.  
 LI Wenwei, WEI Sinan, WANG Qingjuan, et al. Optimal adjustment calculation method for distribution network relay protection based on combinatorial algorithm[J]. Journal of Hubei University (Natural Science Edition), 2023, 45(4): 600-607.

(责任编辑 钱文姝)

收稿日期: 2024-03-27; 修改日期: 2024-07-05

作者简介: 栾士岩(1984), 男, 河北冀州人, 硕士研究生, 副高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化。

(上接第104页)

of WTGs for enhancing primary frequency response and suppressing drivetrain torsional oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 4102-4113.

[26] 陈汝斯, 李大虎, 周泓宇, 等. 基于梯次启动与优化算法的多集群风机最优调频方法[J]. 电力建设, 2023, 44(11): 54-63.  
 CHEN Rusi, LI Dahu, ZHOU Hongyu, et al. Optimal frequency regulation in multi-cluster wind turbines using a step start-up and optimization algorithm[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(11): 54-63.

[27] 聂永辉, 刘家僮, 孙斌, 等. 基于转子动能释放的风电并网系统非线性频率控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(23): 9127-9136.

NIE Yonghui, LIU Jiatong, SUN Bin, et al. Research on nonlinear frequency control strategy of wind power grid connected system based on rotor kinetic energy release[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(23): 9127-9136.

[28] DEJIAN Y, XIN W, WEI C, et al. Adaptive frequency droop feedback control-based power tracking operation of a DFIG for temporary frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 2(39): 2682-2692.

(责任编辑 李萌)

收稿日期: 2024-05-10; 修改日期: 2024-07-10

作者简介: 薛水莲(1988), 女, 陕西渭南人, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为新能源发电技术、新能源系统的建模和分析。