

# 双馈风机调频特性对系统暂态功角稳定性的影响

赵伟<sup>1</sup>, 张雪娟<sup>1</sup>, 吴水军<sup>2</sup>, 孙士云<sup>1</sup>, 杨兴雄<sup>1</sup>, 黄柯昊<sup>1</sup>, 海世芳<sup>3</sup>

[1. 昆明理工大学 电力工程学院, 云南 昆明 650500;

2. 云南电力试验研究院(集团)有限公司, 云南 昆明 650217;

3. 青州市范公亭南街12号, 山东 潍坊 262500]

**摘要:** 计及双馈风机(DFIG)调频特性, 建立适用于暂态功角稳定性分析的DFIG等值阻抗模型。在含DFIG的扩展双机系统中, 将其等值为含DFIG的扩展单机无穷大系统, 基于等面积定则推导出极限切除角关于风电比例和调频控制中下垂系数的表达式, 进而理论分析系统极限切除角随DFIG的风电比例和下垂系数的变化趋势, 并结合功角特性曲线揭示其变化的内在机理。充分考虑DFIG低电压穿越特性和调频控制特性, 在PSD-BPA中对DFIG进行详细建模, 搭建了含详细风电模型的扩展两机系统和云南电网仿真模型, 对理论分析结果进行仿真验证。理论分析与仿真结果均表明, DFIG参与调频对系统暂态功角稳定性具有一定的改善作用。

**关键词:** 双馈风机; 调频特性; 等值阻抗; 等面积定则; 风电比例; 功角稳定性

**中图分类号:** TM 315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)06-0110-09

**doi:** 10.12177/emca.2020.011

## Influence of Frequency-Modulation Characteristics of Doubly-Fed Induction Generator on Transient Power-Angle Stability of Power System

ZHAO Wei<sup>1</sup>, ZHANG Xuejuan<sup>1</sup>, WU Shuijun<sup>2</sup>, SUN Shiyun<sup>1</sup>, YANG Xingxiong<sup>1</sup>, HUANG Kehao<sup>1</sup>, HAI Shifang<sup>3</sup>

[1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;

2. Yunnan Electric Power Test and Research Institute (Group) Co., Ltd., Kunming 650217, China;

3. No. 12, South Fangongting Street, Qingzhou City, Weifang 262500, China]

**Abstract:** Taking into account the frequency-modulation characteristics of doubly-fed induction generator (DFIG), the equivalent impedance model of DFIG for transient power angle stability analysis is established. For the extended dual-machine system with DFIG, it is equivalent to an extended single-machine infinite-bus system. Based on the equal-area criterion, the expression of the limit clearing angle about the wind power proportion and the droop coefficient in frequency-modulation control is derived. The change trend of the limit clearing angle of the system with the wind power proportion and droop coefficient of DFIG is analyzed theoretically, and the internal mechanism of the change is revealed in combination with the trend of power-angle characteristics. Considering the low-voltage ride-through characteristics and frequency-modulation control of DFIG, a detailed model of DFIG is built in PSD-BPA. The extended dual-machine system with detailed wind power model and Yunnan power grid simulation model are built to verify the theoretical analysis results. Theoretical analysis and simulation results show that DFIG participating in

收稿日期: 2020-02-26; 收到修改稿日期: 2020-03-13

作者简介: 赵伟(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为含风电的电力系统暂态稳定。

张雪娟(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为含风电的电力系统暂态稳定。

吴水军(1980—), 男, 高级工程师, 研究方向为新能源接入对电力系统的影响。

frequency-modulation can improve the transient power angle stability.

**Key words:** doubly-fed induction generator (DFIG); frequency-modulation characteristics; equivalent impedance; equal-area criterion; wind power proportion; power-angle stability

## 0 引言

随着风电的不断发展,风电在电网的占比不断增加,因此电力系统对风电并网的稳定性要求逐渐增加。由于风电场的机型大多是双馈风机(DFIG),其不同于一般发电机的有功无功解耦特性会导致风机不能响应系统的频率变化,因此大规模风电接入电网引起了系统中同步机的调频压力增大。国内外发布的一些电网导则均明确提出并网风电场需能够参与系统调频,但是风机参与调频会对系统的暂态稳定性产生影响<sup>[1-2]</sup>。以云南电网为例,云南电网与外界异步联网,为了防止电网高频问题以及减少直流频率限制控制器(FLC)动作次数,需要风电参与调频,但影响了系统的稳定性。

针对 DFIG 并网对系统暂态稳定性问题的研究大致分为 3 类:(1)从 DFIG 调频特性进行研究<sup>[3-7]</sup>;(2)从 DFIG 并网影响因素考虑风机接入对系统暂态稳定性的影响<sup>[8-16]</sup>;(3)将前两类结合,定性分析 DFIG 计及调频特性对系统暂态稳定性的影响<sup>[17-19]</sup>。

DFIG 是目前使用最广泛的风电机组,不少文献对 DFIG 的调频特性以及调频控制策略进行了深入的研究。文献[3]分析了 DFIG 转子惯性控制、超速控制、变桨控制、组合控制以及储能与风电机组结合参与系统频率响应的发展趋势。文献[4]将转子惯性控制与超速减载控制相结合构成协调控制,参与电网一次调频,并对 DFIG 的下垂系数、惯量系数进行整定,得到与风速耦合的变参数控制方法。文献[5]将附加惯性控制、超速控制和桨距角控制 3 种调频结合,提出在最大功率追踪区采用附加惯性与超速控制相结合,在恒转速和恒功率区采用附加惯性与桨距角结合的控制策略。文献[6]通过设计调频、调压控制器,使风机对电网具有同步发电机的外特性,调节风机输出的有功、无功功率,维持电网频率、电压稳定。文献[7]提出了一种基于桨距角控制的 DFIG 参与电网二次调频控制策略,风机利用可控的二次调频能力,有效地降低了严重负荷扰动下系统频率的变化率。

针对 DFIG 并网影响因素考虑 DFIG 并网对系统暂态稳定性的影响,已有大量的文献进行了研究。文献[8-9]提出了一种 DFIG 简化模型,利用扩展等面积定则和直流潮流计算方法分析 DFIG 接入两机系统后暂态功角稳定性的变化,同时考虑同步机出力、风电渗透率和风电并网位置对系统暂态功角稳定性的影响。文献[10]基于等面积定则分析了含风电场的电力系统暂态稳定性,把风电场的功率等值为同步机的机械功率,研究了风电场控制作用对同步机等值机械功率的影响,风电场的转速控制、桨距控制对系统的加速面积和减速面积均有一定的改善,提高了系统的暂态稳定性。文献[13]对含高渗透率风电的送端电网系统暂态稳定性进行了研究,分析了运行方式、故障位置、火风电比对系统暂态稳定性的影响<sup>[11-12]</sup>。文献[14]考虑了 DFIG 直接接入与等容量替换同步机时的系统同步机功角特性方程,并定性分析了 2 种风电接入方式对系统加减速面积、不稳定平衡点、稳定裕度的影响特性。DFIG 直接接入同步机暂态功角稳定性降低;等容量替换同步机出力时,同步机的暂态功角稳定性提高。文献[15]将含 DFIG 机组的扩展两机系统等值为单机无穷大系统,利用等面积法则分析了极限切除角随风电比例、风机并网位置、故障位置和负荷接入位置的变化趋势,并在 PSD-BPA 和 FASTEST 中搭建仿真模型以功角变化趋势和 CCT 值对理论分析进行验证。文献[16]研究了大规模双馈风电接入对东北电网稳定性的影响,得出在风电场采用恒电压控制的情况下,随着风电比例的增加,系统的功角稳定性变强。

考虑 DFIG 计及调频特性对系统暂态稳定性的影响已有少量文献展开了研究。文献[17]通过在含风电电压源换流器的高压直流输电(VSC-HVDC)的两机等值电力系统模型中,利用等面积定则分析了在发生接地短路故障和负荷突变时,考虑调频参与的风电 VSC-HVDC 对同步机组的功角影响,得到故障切除后风电 VSC-HVDC 的并网有功减少,同步发电机组的减速面积增大,提高了系统的暂态稳定性。文献[18]基于惯性中心

理论分析了大规模含附加频率控制系统 DFIG 接入电网后,系统暂态特性的变化,得出含附加频率控制的 DFIG 对系统暂态稳定性影响的关键因素。文献[19]阐述了 DFIG 虚拟惯量控制在满足系统调频需求的前提下,其快速响应特性会对系统暂态稳定造成影响;基于等面积定则考虑了 DFIG 附加虚拟惯量控制对系统暂态稳定的影响。

综上可知,对于 DFIG 调频特性对系统暂态稳定性的影响研究较少。本文结合 DFIG 调频特性,建立了适用于暂态功角稳定性分析的 DFIG 等值阻抗模型。基于等面积定则解析推导出极限切除角关于风电比例和下垂系数的表达式,理论分析系统极限切除角随 DFIG 风电比例和下垂系数的变化趋势,并结合功角特性曲线揭示其所呈现变化趋势的内在机理。最后,在 PSD-BPA 中对 DFIG 进行详细建模,搭建了含详细风电模型的扩展两机系统和云南电网仿真模型,对理论分析结果进行了仿真验证。

## 1 含 DFIG 的扩展单机无穷大系统等值模型

本文考虑大规模风电接入系统,将扩展双机系统等值为扩展单机无穷大系统,在含风电的扩展单机无穷大系统里对等值同步机的暂态功角稳定性进行理论分析。

将由多台 DFIG 组成的风电场等值为 1 台 DFIG,将同步发电机组等值为 2 台同步发电机 G1、G2,DFIG 从 A 母线接入系统,扩展双机系统接线图如图 1 所示。

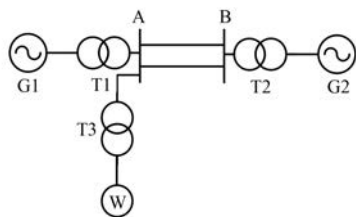


图 1 扩展双机系统接线图

同步发电机 G1、G2 的转子运动方程分别为

$$M_1 \frac{d^2 \delta_1}{dt^2} = P_{m1} - P_{e1} \quad (1)$$

$$M_2 \frac{d^2 \delta_2}{dt^2} = P_{m2} - P_{e2} \quad (2)$$

式中: $M_1$ 、 $M_2$  分别为同步发电机 1、2 的惯性时间常数; $\delta_1$ 、 $\delta_2$  分别为同步发电机 1、2 的功角; $P_{m1}$ 、 $P_{m2}$  分别为同步发电机 1、2 的机械功率; $P_{e1}$ 、 $P_{e2}$  分别为同步发电机 1、2 的电磁功率。

同步发电机 1、2 的功角差为  $\delta = \delta_1 - \delta_2$ , 则式(1)与式(2)相减得:

$$\frac{d^2 \delta}{dt^2} = \left( \frac{P_{m1}}{M_1} - \frac{P_{m2}}{M_2} \right) - \left( \frac{P_{e1}}{M_1} - \frac{P_{e2}}{M_2} \right) \quad (3)$$

对式(3)进行整理可得:

$$M_{12} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{m12} - P_{e12} \quad (4)$$

且有:

$$M_{12} = \frac{M_1 M_2}{M_1 + M_2} \quad (5)$$

$$P_{m12} = \frac{M_2}{M_1 + M_2} P_{m1} - \frac{M_1}{M_1 + M_2} P_{m2} \quad (6)$$

$$P_{e12} = \frac{M_2}{M_1 + M_2} P_{e1} - \frac{M_1}{M_1 + M_2} P_{e2} \quad (7)$$

式中: $M_{12}$  为同步发电机的等值惯性时间常数; $P_{m12}$ 、 $P_{e12}$  分别为系统的等值机械功率和电磁功率。

式(3)为扩展双机系统等值为扩展单机无穷大系统的转子运动方程,扩展单机无穷大系统接线图如图 2 所示。其中,同步发电机 S 为扩展单机无穷大系统的等值同步发电机,R 为无穷大系统。

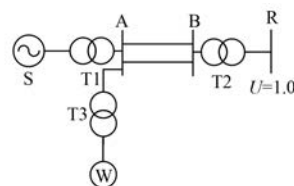


图 2 扩展单机无穷大系统接线图

## 2 DFIG 调频控制等值模型

### 2.1 DFIG 附加调频控制模块

DFIG 调频控制一般有转子惯性控制、超速减负载控制、变桨控制、组合控制、储能控制等,其中转子惯性控制又分为下垂控制、惯性控制。本文选取下垂控制作为 DFIG 的调频控制方式,调频控制模块如图 3 所示。以系统频率变化量为输入,风机功率变化量为输出。通过改变 DFIG 有功出

力的大小来调节系统的频率:

$$k_f = \frac{\Delta P}{\Delta f} \quad (8)$$

式中:  $k_f$  为下垂系数;  $\Delta P$  为 DFIG 的功率变化量;  $\Delta f$  为系统的频率变化量。

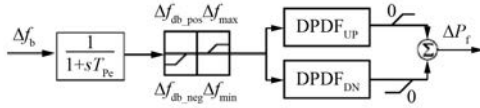


图3 DFIG 附加调频控制框图

图3中, DPDF\_UP 表示正频率偏差对应的功率变化率, DPDF\_DN 表示负频率偏差对应的功率变化率。

## 2.2 DFIG 等值模型

DFIG 采用恒功率因数控制, 通过调频特性 DFIG 的仿真分析, 得到 DFIG 功率特性曲线如图4所示。

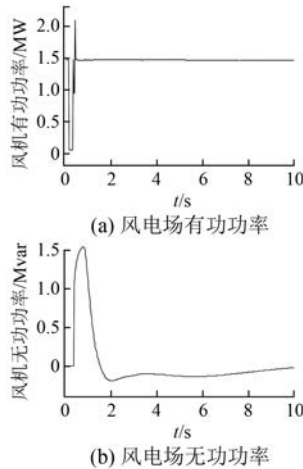


图4 风电场暂态响应特性

由图4可知, 正常情况下 DFIG 只向系统提供有功功率, 无功功率为零<sup>[14]</sup>。因此, 正常情况下的 DFIG 等效为一负电阻  $R_w$ 。  $R_w$  的值则和 DFIG 并网点的电压和风机的有功出力有关, 有:

$$R_w = U_B^2 / P_w \quad (9)$$

式中:  $R_w$  为正常情况下 DFIG 的等值电阻;  $U_B$  为 DFIG 并网电压;  $P_w$  为 DFIG 的有功功率。

当系统发生三相金属性短路故障时, DFIG 向系统提供一定的无功支撑, 因此在故障期间 DFIG 可以等值为一个并联的负电阻  $R_{w1}$  和一个负电抗  $X_{w1}$ <sup>[14]</sup>。  $X_{w1}$  值则与 DFIG 并网点的电压和风

机的无功出力有关:

$$R_{w1} = U_B^2 / P_{w1} \quad (10)$$

$$X_{w1} = U_B^2 / Q_{w1} \quad (11)$$

式中:  $R_{w1}$ 、 $X_{w1}$  分别为故障下 DFIG 的等值电阻、电抗;  $P_{w1}$  为故障下 DFIG 的有功功率;  $Q_{w1}$  为故障下 DFIG 的无功功率。

故障清除后, DFIG 的有功功率和无功功率按照一定的速率开始恢复<sup>[14]</sup>, 可得:

$$R_{w2} = U_B^2 / P_{w2} \quad (12)$$

$$X_{w2} = U_B^2 / Q_{w2} \quad (13)$$

式中:  $R_{w2}$ 、 $X_{w2}$  分别为故障清除后 DFIG 的等值电阻、电抗;  $P_{w2}$  为故障清除后 DFIG 的有功功率;  $Q_{w2}$  为故障清除后 DFIG 的无功功率。

## 3 DFIG 调频控制的系统极限切除角推导

### 3.1 正常运行

DFIG 接入扩展单机无穷大系统正常运行时的系统接线图如图5所示。图5中,  $k_1$  为接入系统的风电比例,  $k_f$  为下垂系数, 线路 AB 的电抗值为  $X_1$ ,  $X_{12}$  和  $X_{13}$  分别为变压器 T2、T3 的电抗值。

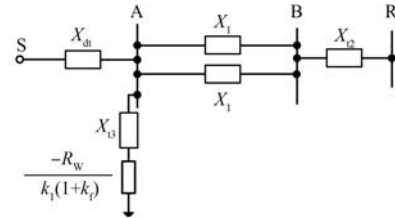


图5 正常运行时的系统接线图

根据图5, 采用 WARD 等值法消去 A、B 节点, 保留 S、R 节点, 得到 S、R 节点的互导纳  $Y'_{SR1}$ , 则可得节点 S、R 之间正常运行的等值电抗  $X'_{SR1}$  的表达式为

$$X'_{SR1} = -1/Y'_{SR1} \quad (14)$$

假设等值同步发电机 S 的暂态电动势  $E'$  在暂态过程中保持不变, 则可得正常运行情况下等值同步发电机 S 与无穷大系统的功角差  $\delta_0$ :

$$\delta_0 = \arctan \frac{P_1 X'_{SR1}}{U + Q_1 X'_{SR1}} \quad (15)$$

式中:  $P_1$ 、 $Q_1$  分别为无穷大系统的有功功率和无功功率;  $U$  为无穷大母线的电压。

### 3.2 故障状态

假设三相金属性短路故障发生在  $F$  点处,则故障时的系统接线图如图 6 所示。

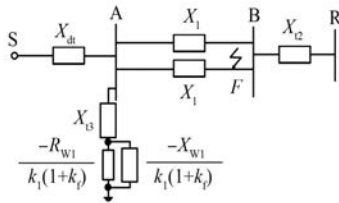


图 6 故障时的系统接线图

根据图 6 可写出该系统的节点导纳矩阵,利用 WARD 等值法消去 A、B 节点,剩余 S、R 节点,得到 S、R 节点的互导纳  $Y'_{SR2}$ ,则故障期间节点 S、R 之间的等值电抗  $X'_{SR2}$  的表达式

$$X'_{SR2} = -1/Y'_{SR2} \quad (16)$$

由此,计算出等值同步发电机 S 的最大电磁功率  $P_{II M}$ :

$$P_{II M} = U/X'_{SR2} \quad (17)$$

### 3.3 故障清除后前期

故障清除后,切除故障点  $F$  所在的单回输电线路,得到系统的等值接线图如图 7 所示。

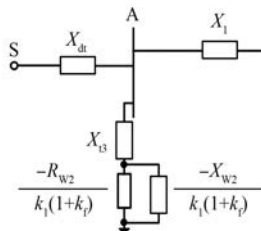


图 7 故障清除后的系统的等值接线图

根据故障清除后的系统接线图得到系统的节点导纳矩阵,利用 WARD 等值法消去 A、B 节点,保留 S、R 节点,得到节点 S、R 的导纳  $Y'_{SR3}$ ,则系统故障清除后的等值电抗  $X'_{SR3}$  的表达式为

$$X'_{SR3} = -1/Y'_{SR3} \quad (18)$$

根据系统的等值电抗  $X'_{SR3}$ ,或计算出最大摇摆角  $\delta_h$  和等值同步机的最大电磁功率  $P_{III M}$ :

$$\delta_h = \pi - \arcsin \frac{P_0 X'_{SR3}}{U} \quad (19)$$

$$P_{III M} = U/X'_{SR3} \quad (20)$$

将式(15)、式(17)、式(19)、式(20)代入式(21),可得到系统的极限切除角<sup>[20]</sup>:

$$\delta_{cm} = \arccos \frac{P_T(\delta_h - \delta_0) + P_{III M} \cos \delta_h - P_{II M} \cos \delta_0}{P_{III M} - P_{II M}} \quad (21)$$

式中: $P_T$  为同步机的机械功率。

$$\delta_{cm} = \frac{1\,007\,958\,012\,753\,983 \left[ \pi - \arccos \left( \frac{\alpha + \beta + \gamma}{\mu} \right) \right]}{17\,592\,186\,044\,416} \quad (22)$$

$$\text{其中: } \alpha = \frac{\pi \left[ \pi - \delta_0 + \arcsin \left( \frac{A_1}{C_1} \right) \right]}{180}; \quad \beta =$$

$$\sqrt{1 - \frac{A_1^2}{[R_{w2} + X_{w2}i + X_{i3}k_1(-i) + X_{i3}k_1k_f(-i)]^2}} C_1; \quad \gamma = \frac{X_1 \cos(\delta_0)}{B_1}; \quad \mu = \frac{C_1}{A_1} - \frac{X_1 D_1}{B_1};$$

$$A_1 = R_{w2} X_{dt} i + R_{w2} X_1 i + R_{w2} X_{i2} i - X_{dt} X_{w2} - X_1 X_{w2} - X_{i2} X_{w2} + X_{dt} X_1 k_1 + X_{dt} X_{i2} k_1 + X_{dt} X_{i3} k_1 + X_1 X_{i3} k_1 + X_{i2} X_{i3} k_1 + X_{dt} X_1 k_1 k_f + X_{dt} X_{i2} k_1 k_f + X_{dt} X_{i3} k_1 k_f + X_1 X_{i3} k_1 k_f + X_{i2} X_{i3} k_1 k_f; B_1 = R_{w1} X_{dt}^2 i - X_1^2 X_{w1} + R_{w1} X_{dt} X_1 2i + R_{w1} X_{dt} X_{i2} i + R_{w1} X_1 X_{i2} i - 2X_{dt} X_1 X_{w1} - X_{dt} X_{i2} X_{w1} - X_1 X_{i2} X_{w1} + X_{dt} X_1^2 k_1 + X_1^2 X_{i3} k_1 + X_{dt} X_1^2 k_1 k_f + X_1^2 X_{i3} k_1 k_f + X_{dt} X_1 X_{i2} k_1 + 2X_{dt} X_1 X_{i3} k_1 + X_{dt} X_{i2} X_{i3} k_1 + X_1 X_{i2} X_{i3} k_1 + X_{dt} X_1 X_{i2} k_1 k_f + 2X_{dt} X_1 X_{i3} k_1 k_f + X_{dt} X_{i2} X_{i3} k_1 k_f + X_1 X_{i2} X_{i3} k_1 k_f; C_1 = R_{w2} + X_{w2} i - X_{i3} k_1 i - X_{i3} k_1 k_f i; D_1 = R_{w1} + X_{w1} i - X_{i3} k_1 i - X_{i3} k_1 k_f i。$$

## 4 极限切除角的影响因素分析

通过式(22)可知,系统的极限切除角包含着  $k_1$ 、 $k_f$  等变量,系统电抗参数如表 1 所示。

针对系统极限切除角的影响因素分析主要从以下 2 个方面进行分析。

表 1 系统电抗参数

| $X_{dt1}$ | $X_{i2}$ | $X_{i3}$ | $X_1$   |
|-----------|----------|----------|---------|
| 0.626 5   | 0.121 0  | 0.024 0  | 0.200 0 |

### 4.1 DFIG 接入系统风电比例对系统极限切除角的影响

计及 DFIG 直接接入系统和等容量替换同步机 2 种接入方式。当下垂系数  $k_f = 1.25$ ,系统发生三相金属性短路时,每种 DFIG 接入方式下有无风机参与系统调频 2 种情况下的系统极限切除角

分别如图 8、图 9 所示。

将  $k_f = 1.25$  和系统电抗参数代入式 (22), 得到 DFIG 计及调频特性后, DFIG 直接接入时系统极限切除角的变化趋势如图 8 所示。

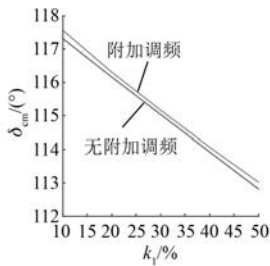


图 8 风电直接接入  $\delta_{cm}$  变化趋势对比图

由图 8 可知, 当 DFIG 直接接入系统时, 随着风电比例的增加, 系统的极限切除角逐渐减小, 系统的暂态功角稳定性变差。DFIG 考虑调频时系统的暂态功角稳定性相对较好。

将  $k_f = 1.25$  和系统电抗参数代入式 (22), 得到 DFIG 计及调频特性后, DFIG 等容量替换同步电机时系统极限切除角的变化趋势如图 9 所示。

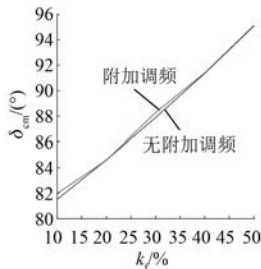


图 9 等容量替换  $\delta_{cm}$  变化趋势对比图

由图 9 可知, 当 DFIG 等容量替换同步发电机有功出力时, 随着风电比例的增加, 系统的极限切除角逐渐增加, 系统的暂态功角稳定性变好。在风电比例在 10% ~ 40% 时, DFIG 考虑调频特性情况下系统暂态功角稳定性相对较好; 风电比例在 40% ~ 50% 时, DFIG 考虑调频特性对系统的暂态功角稳定性的影响并不是很明显。

4.2 DFIG 调频控制中下垂系数对系统极限切除角的影响

以 DFIG 直接接入系统为例,  $k_1 = 10\%$ , 系统发生三相金属性短路。

将  $k_1 = 10\%$ 、 $k_f$  和系统电抗参数代入式 (22), 得到 DFIG 计及调频特性后, DFIG 调频控制中下垂系数对系统极限切除角的影响如图 10 所示。

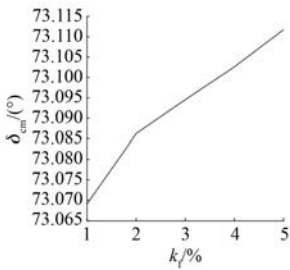


图 10  $\delta_{cm}$  随下垂系数变化趋势

由图 10 可知,  $k_1 = 10\%$  时, 随着 DFIG 调频控制中下垂系数的增加, 系统的极限切除角随之增加, 系统的暂态功角稳定性得到改善。

5 暂态稳定性机理分析

电力系统的暂态稳定性, 实质就是系统在故障期间内部积攒的能量能否在故障清除后消耗。将减速面积和加速面积的差值除以加速面积, 可定义为暂态稳定裕度:

$$\eta = \frac{A_3 - A_2}{A_2} \times 100\% \tag{23}$$

式中:  $\eta$  为稳定裕度;  $A_2$ 、 $A_3$  分别为系统的加速、减速面积。

以风电比例直接接入系统, 风电比例从 10% 增加到 50% 为例, 加速面积  $A_2$ 、减速面积  $A_3$ 、稳定裕度如表 2 所示。根据式 (22) 以及加、减速面积, 可得在风电比例分别为 10%、50% 时, 系统的同步发电机功率特性曲线如图 11 所示。

表 2 不同风电比例 (直接接入) 下的加、减速面积和稳定裕度

| $k_1/\%$  | 10        | 20        | 30        | 40        | 50        |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| $A_2$     | 83.121 2  | 80.072 2  | 77.079 5  | 74.172 3  | 71.319 0  |
| $A_3$     | 114.110 0 | 112.888 1 | 111.758 6 | 110.687 9 | 109.654 3 |
| $\eta/\%$ | 37.28     | 40.98     | 44.99     | 49.23     | 53.75     |

图 11 中, 当风电比例为 10% 时, 同步发电机暂态过程中的功率特性曲线分别为  $P_I$ 、 $P_{II}$ 、 $P_{III}$ , 同步发电机输出的机械功率  $P_T = P_0$  (假设扰动后  $P_T$  保持不变)。风电比例为 50% 时, 同步发电机正常运行时和故障清除后的功率特性曲线分别降为  $P'_I$ 、 $P'_{III}$ , 故障期间的功率特性曲线  $P_{II}$  几乎不变。风电比例从 10% 增加到 50%,  $\delta_0$  向右移, 变为  $\delta'_0$ , 极限切除角  $\delta_c$  向左移, 变为  $\delta'_c$ 。风电比例



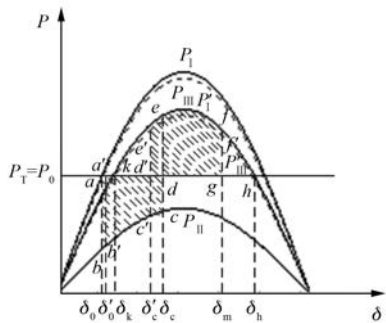


图 11 DFIG 直接接入同步机的功率特性曲线

为 10% 时加速面积为  $A_{abcd}$ , 减速面积为  $A_{defg}$ 。风电比例为 50% 的加速面积为  $A_{a'b'c'd'}$ , 减速面积为  $A_{d'e'f'g'}$ 。风电比例变化前后的加、减速面积之间的关系可表示为

$$A_{abcd} > A_{a'b'c'd'} \tag{24}$$

$$A_{defg} > A_{d'e'f'g'} \tag{25}$$

由表 2 可知, 风电比例从 10% 增加到 50%, 暂态稳定裕度从 37.28% 增大到 53.75%, 稳定裕度逐渐增大。因此, DFIG 直接接入系统后, 系统的暂态稳定性变差。

6 仿真验证与分析

充分考虑 DFIG 低电压穿越特性和调频控制特性, 在 PSD-BPA 中对 DFIG 进行详细建模, 搭建了含详细风电模型的扩展双机系统和云南电网仿真模型, DFIG 低电压穿越特性和调频控制特性参数均为实测数据。

6.1 含 DFIG 扩展双机系统仿真结果

在 PSD-BPA 仿真平台上搭建含风电的扩展双机系统模型, 仿真模型同第 4 节, 仿真参数如下: DFIG 单机容量为 1.5 MW, 额定电压为 0.69 kV, 同步发电机 1 的额定电压为 16.5 kV, 发电机动能为 3 147 MW·s。同步发电机 2 的额定电压为 18 kV, 发电机动能为 1 387 MW·s。仿真系统的电抗参数如表 3 所示。

表 3 仿真系统电抗参数

| $X_{d1}$ | $X_{12}$ | $X_{13}$ | $X_1$   |
|----------|----------|----------|---------|
| 0.303 5  | 0.121 0  | 0.024 0  | 0.200 0 |

6.1.1 DFIG 直接接入

当 DFIG 直接接入系统, 风电比例从 10% 增

加到 50% 时, 考虑 DFIG 调频特性前后的发电机功角差曲线分别如图 12、图 13 所示。选取  $k_1 = 50\%$  时的最大发电机功角差曲线作对比, 如图 14 所示。

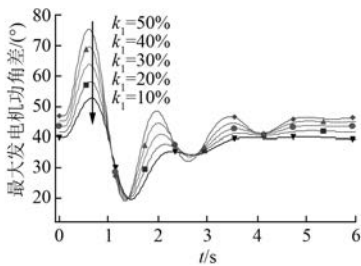


图 12 DFIG 直接接入功角摇摆曲线(无调频)

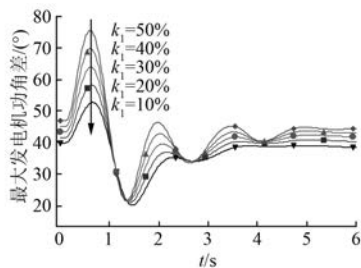


图 13 DFIG 直接接入功角摇摆曲线(调频)

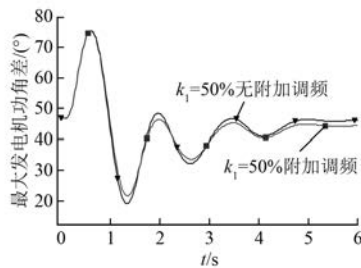


图 14 DFIG 直接接入功角摇摆曲线对比图

由图 12、图 13 可知, 随着风电比例的增加, 发电机功角差曲线峰谷值逐渐变大, 系统的暂态功角稳定性变差。由图 14 可知, 故障时 DFIG 参与调频, 故障清除后, 考虑 DFIG 调频特性时的发电机功角差曲线峰谷值更小, 且功角摇摆曲线趋于稳定的时间更短, 系统的暂态稳定性得到改善, 仿真结果与理论推导一致。

6.1.2 DFIG 等容量替换同步机有功出力

DFIG 等容量替换同步机出力, 风电比例从 10% 增加到 50%, 考虑 DFIG 调频特性时的发电机功角差曲线如图 15、图 16 所示。选取  $k_1 = 30\%$  时的最大发电机功角差曲线作对比分析, 如图 17 所示。

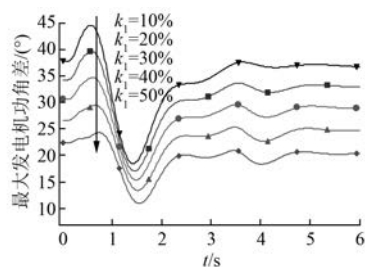


图 15 DFIG 等容量替换功角摇摆曲线(无调频)

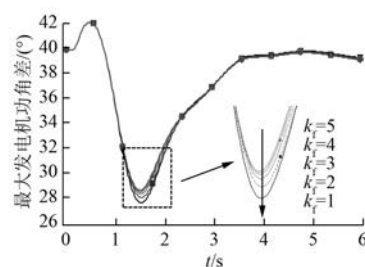


图 18 DFIG 下垂系数功角摇摆曲线

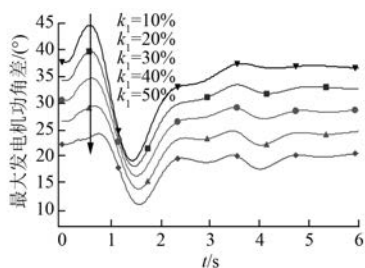


图 16 DFIG 等容量替换功角摇摆曲线(调频)

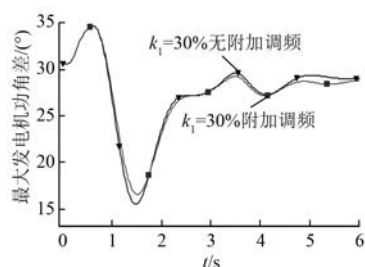


图 17 DFIG 等容量替换功角摇摆曲线对比图

由图 15、图 16 可知,当风电比例从 10% 增加到 50% 时,发电机功角差曲线峰谷值均在逐渐减小,系统的暂态功角稳定性得到改善。由图 17 可知,故障期间考虑 DFIG 调频特性时,发电机功角差曲线峰谷值更小,系统的暂态功角稳定性更好,仿真结果与理论推导一致。

### 6.1.3 下垂系数

系统发生故障时,DFIG 参与系统调频,通过改变  $k_f$  的大小来增加 DFIG 的调频能力,仿真所得发电机功角差曲线如图 18 所示。

由图 18 可知,随着 DFIG 的增加,发电机功角差曲线峰谷值逐渐减小,系统的暂态功角稳定性得到改善。但是,随着  $k_f$  增加到 3 以上时,发电机功角差曲线峰谷值变化较小, $k_f$  的增加对系统暂态功角稳定性的影响较小,仿真结果与理论

推导一致。

## 6.2 大理地区风电场计及调频特性仿真

将云南大理地区五子坡、马鞍山等 9 个风电场附加调频控制模块,替换的风电场总容量约为 1 390.5 MW。云南楚雄到广东穗东 800 kV 直流线路发生单极闭锁时,分别得到大理周边地区部分发电机的功角曲线,如图 19、图 20 所示。

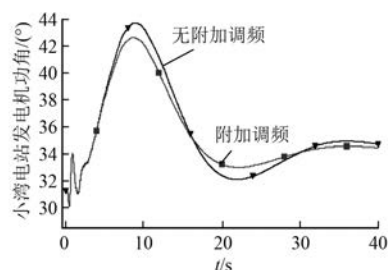


图 19 小湾电站发电机功角摇摆曲线对比图

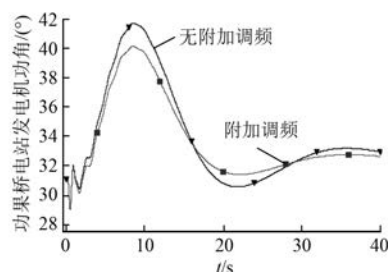


图 20 功果桥电站发电机功角摇摆曲线对比图

由图 19、图 20 可知,当楚穗直流发生单极闭锁时,大理周边风电场参与系统调频,大理地区电站功果桥水电站在故障期间调频效果明显,发电机功角摇摆曲线峰谷值较小,系统的暂态功角稳定性更好。小湾电站在故障期间,DFIG 调频特性对功角摇摆曲线影响较小,原因是大理至小湾电站的电气距离相对较远。在故障后调频效果明显,发电机功角摇摆曲线峰谷值更小,系统暂态功



角稳定性更好。

## 7 结 语

本文考虑 DFIG 调频特性,建立了适用于暂态功角稳定性分析的 DFIG 等值阻抗的模型。在含风电的扩展单机无穷大系统,分析系统极限切除角随 DFIG 风电比例和调频控制参数的变化趋势,并结合功角特性曲线揭示其变化的内在机理。最后,在 PSD-BPA 中搭建了含详细风电模型的扩展两机系统和云南电网仿真模型,理论分析与仿真结果结论如下:

(1) DFIG 直接接入系统,随着风电比例的增加,系统的暂态功角稳定性变差。当 DFIG 调频控制时,系统的暂态稳定性得到改善,随着下垂系数的增大,系统的暂态稳定性提升更加明显。

(2) DFIG 等容量替换同步机有功出力时,随着风电比例的增加,系统的暂态功角稳定性有所提升。当 DFIG 调频控制时,系统的暂态功角稳定性得到改善。

## 【参 考 文 献】

[1] Nordel. Nordic grid code 2007 (Nordic collection of rules) [EB/OL]. 2007-01-15 [2014-11-15]. [https://www.entsoe.eu/fileadmin/user\\_upload/library/publications/nordic/planning/070115\\_entsoe\\_nordic\\_Nordic\\_Grid\\_Code.pdf](https://www.entsoe.eu/fileadmin/user_upload/library/publications/nordic/planning/070115_entsoe_nordic_Nordic_Grid_Code.pdf).

[2] 国家电力监管委员会. GB/T 19963—2011: 风电场接入电力系统技术规定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.

[3] 唐西胜, 苗福丰, 齐智平, 等. 风力发电的调频技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4304.

[4] 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.

[5] 赵冬梅, 许瑞庆, 郑立鑫. 全风况下双馈风机参与调频的协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 53.

[6] 祁晓笑, 耿丽红, 于永军, 等. 风电机组参与调频调压对电网稳定性影响研究[J]. 机械与电子, 2019, 37(11): 50.

[7] 刘柳, 王德林, 杨仁杰, 等. 基于桨距角控制的双馈风机参与电网二次调频控制策略研究[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(5): 10.

[8] 汤蕾, 沈沉, 张雪敏. 大规模风电集中接入对电力系统暂态功角稳定性的影响(一): 理论基础[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(15): 3832.

[9] 汤蕾, 沈沉, 张雪敏. 大规模风电集中接入对电力系统暂态功角稳定性的影响(二): 影响因素分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4043.

[10] 林俐, 杨以涵. 基于扩展等面积定则的含大规模风电场电力系统暂态稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(12): 105.

[11] 牟澎涛, 赵冬梅, 王嘉成. 大规模风电接入对系统功角稳定影响的机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1324.

[12] 张师, 于锡平, 秦英伟, 等. 风电接入位置对系统暂态稳定性的影响分析[J]. 分布式能源, 2017, 2(6): 78.

[13] 张明理, 徐建源, 李佳珏. 含高渗透率风电的送端系统电网暂态稳定研究[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 740.

[14] 王清, 薛安成, 郑元杰, 等. 双馈型风电集中接入对暂态功角稳定的影响分析[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 875.

[15] 张雪娟, 吴水军, 孙士云, 等. 双馈风机接入对系统极限切除角的影响[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(9): 85.

[16] 岳涵, 郑宽, 于洋, 等. 大规模双馈风电接入对东北电网稳定性的影响[J]. 电工电能新技术, 2013, 32(4): 1.

[17] 唐西胜, 陆海洋. 风电柔性直流并网及调频控制对电力系统功角稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4027.

[18] 刘晋, 王哲, 韩民晓, 等. 计及风电附加频率控制作用的电力系统暂态稳定性分析[J]. 现代电力, 2019, 36(2): 66.

[19] 陈汉杰, 罗毅, 张磊, 等. 双馈风机虚拟惯量控制对电力系统暂态稳定的影响[J]. 现代电力, 2018, 35(4): 66.

[20] 宋杰, 窦金生. 不同短路故障情况下简单电力系统的暂态稳定性分析[J]. 电子设计工程, 2015, 23(11): 135.