

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210687

大规模风电并网对送端系统功角稳定的影响研究

盛四清¹, 俞可¹, 张文朝², 赵峰³, 王蒙⁴, 赵伟³

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003; 2. 北京科东电力控制系统有限责任公司, 北京 100192;
3. 国家电网公司华北分部, 北京 海淀 100053; 4. 国家电网公司西北分部, 陕西 西安 710048)

摘要: 随着我国风电能源的不断发展, 大规模风电集中接入电网对送端系统暂态功角稳定的影响问题仍然不容忽视。以双馈型风电集中接入受端大系统为分析对象建立等效模型, 并基于双馈风机的功角特性和暂态特性展开分析。首先, 采用单端送电系统同步机的电磁功率解析表达式, 通过分析风电等出力置换火电出力接入系统对电磁功率方程的影响推断出风电接入对同步机初始功角的影响。其次, 通过负负荷接入与风电接入两种接入方式的对比分析了双馈风机在故障发生后有功功率和无功功率特性对同步机电磁功率方程的影响, 并基于等面积定则(EAC)分析了双馈风机接入对系统暂态功角稳定性的影响。研究表明, 风电等出力置换火电出力时同步机初始功角减小, 暂态稳定性升高; 双馈风机的有功功率和无功功率特性对系统暂态功角稳定性具有正向作用。最后, 通过仿真验证了理论的正确性, 并在实际电网中得到了验证。

关键词: 双馈风机; 暂态功角稳定; 初始功角; 有功恢复; 等面积定则

Influence of large-scale wind power grid connection on the power angle stability of the sending end system

SHENG Siqing¹, YU Ke¹, ZHANG Wenchao², ZHAO Feng³, WANG Meng⁴, ZHAO Wei³

(1. School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. Beijing Kedong Power Control System Limited Liability Company, Beijing 100192, China;
3. North China Branch of State Grid Corporation of China, Beijing 100053, China;
4. Northwest Branch of State Grid Corporation of China, Xi'an 710048, China)

Abstract: With the continuous increase of the scale of wind power in China, it is important to look at the mechanism of the influence of large-scale wind power centralized access to the power grid on the transient power angle stability of the transmission system. An equivalent model is established as the research object for the centralized connection of the doubly-fed wind power to the large receiving end system. The analysis is carried out based on the transient characteristics and low voltage ride-through characteristics of the doubly-fed wind turbine. First, we adopt the electromagnetic power analysis expression of the synchronous machine of the single-ended power transmission system, and infer the influence of wind power connection on the initial power angle of the synchronous machine by analyzing the influence of wind power equivalent output replacement thermal power access system on the electromagnetic power equation. Secondly, through the comparison of the two access methods of negative load and wind power access, the influence of the active power and reactive power characteristics of the doubly-fed wind turbine on the electromagnetic power equation of the synchronous machine after the fault occurs is analyzed. Based on the equal area rule (EAC), the influence of the doubly-fed fan connection on the system transient power angle stability is analyzed. The results show that when wind power is equivalent to replacing thermal power output, the initial power angle of the synchronous machine decreases, and the transient stability increases; the active power and reactive power characteristics of the doubly-fed fan have a positive effect on the transient power angle stability of the system. Finally, the correctness of the theory is verified by simulation, and it is verified in the actual power grid.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No. 5100-202116005A-0-0-00).

Key words: doubly fed induction generator (DFIG); transient power angle stability; initial power angle; active recovery; equal-area criterion

0 引言

近十年, 我国风力行业迅猛发展, 风电的装机容量在整个电网中的占比不断增加。目前我国的风电主要分布在“三北”地区和沿海区域。但其中较多地区负荷水平较低, 远离负荷中心, 大量的风电还不能够就地消纳, 需要远距离输送至华东、华中负荷中心^[1]。采用风火打捆的方式将大规模风电集中并入电网, 不仅可以有效降低并网后输电通道有功的大幅波动, 满足大规模输送能源的基本需求, 还可以确保高压输电功率稳定传输, 提升了运行经济性^[2]。

当前, 我国主流的风电机型是双馈型风力发电机(Doubly Fed Induction Generator, DFIG)。大规模双馈风电机组集中接入电网会对系统暂态稳定性产生较大影响。目前暂态稳定性研究仍然是风火打捆外送工程的主要问题, 国内外对于风电并网后系统暂态稳定性大多处于定性研究。

文献[3-4]探讨了双馈风机的功角特性与同步机机械惯量对系统功角稳定性的影响。文献[5]研究了孤岛系统外送系统在不同风火打捆比例下失稳的风险性。文献[6-7]从双馈风机的调频特性出发, 基于等面积定则分析了风电比例与下垂系数对极限切除角的影响, 并理论分析调频特性对系统暂态稳定性的影响。文献[8]通过改进 DFIG 的矢量控制, 能有效减少故障期间对继电保护的不利影响。文献[9]研究了特高压直流外送在直流双极闭锁故障下送端系统暂态电压稳定性, 并推导故障后换流母线暂态电压的方程式。文献[10]提出了一种改善多馈入直流系统连续换相失败的策略, 并有效提高其协调恢复速度。文献[11]开发了一种新的直接功率控制(DPC)方法, 以便在电网故障期间控制定子功率并帮助风力发电机运行。文献[12]探讨了含有限流式 SSSC 的风火打捆系统的暂态稳定性, 通过建立系统功率特性方程研究了限流式 SSSC 在不同状态下对系统暂态稳定的影响机理。文献[13-14]基于双馈风机的功角以及暂态特性, 推导了风电接入下系统同步机功角特性方程, 并借助等面积定则分析了风电比例对系统暂态特性的影响。文献[15-17]对双馈风机并网控制进行仿真建模并分析研究。文献[18]主要研究风机并网系统在故障清除后同步机电磁功率与功角的关系特性。文献[19]对双馈风机有功无功控制环节施加一种控制策略来提高系统暂态稳定性。文献[20-21]建立双馈风机功率注入模型, 基于直流潮流和扩展等面积定则, 分析双馈风机并网后对系统暂态功角稳定的影响机理。文献[22]分析了风机并

网系统在直流通道闭锁后双馈风机有功恢复和切除电容器对系统暂态稳定性的影响。文献[23]以系统功角的感知偏差为衡量指标, 提出对风电接入后系统暂态稳定风险评估模型。

本文基于双馈风机的暂态功率输出特性, 建立双馈型风电集中接入受端大系统的等效模型并对其进行分析, 并采用单端送电系统同步机的功角方程表达式。在此基础上分析风机等出力置换火电出力接入对系统电磁功率曲线的影响以及对同步机初始功角的影响。其次, 通过负负荷接入与风电接入两种方式作对比, 基于 DFIG 的有功恢复特性以及无功补偿特性, 探讨风电接入系统对同步机功角曲线的影响, 并基于等面积准则(EAC)分析风电接入后对系统暂态功角稳定性的影响规律。最后, 通过仿真验证得到结果, 同时也在实际电网中得到验证。

1 系统模型

1.1 系统结构及等效电路

双馈型风电集中接入受端大系统结构如图 1 所示。送端的火电和风电通过高压线路传输至受端单机大系统。其中, 同步发电机采用二阶经典模型, 风力发电机为双馈型风电机组, 线路以及变压器只保留电抗^[24]。

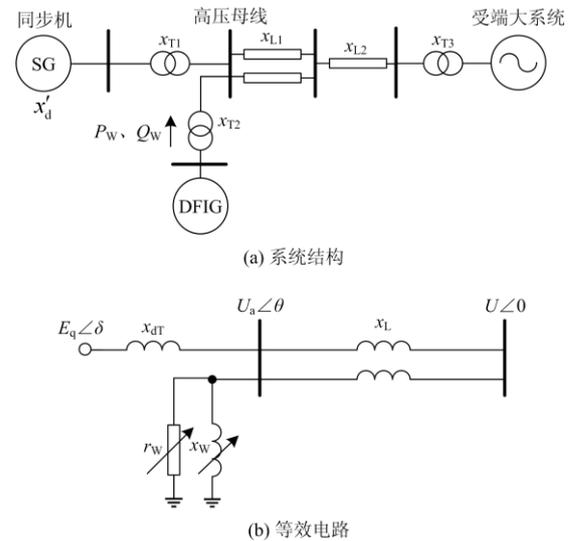


图 1 风火打捆外送典型系统

Fig. 1 Typical wind and fire bundling delivery system

系统等效电路如图 1(b)所示。图 1 中, E_q 为同步发电机内电势, x_{dT} 为同步机内抗 x'_d 和变压器电抗 x_{T1} 之和, x_L 为线路电抗(双回线), U_a 和 θ 分别为高压母线的电压和相角, P_w 和 Q_w 分别为双馈机组的有功功率和无功功率。其中, r_w 和 x_w 并非真实

存在的电阻和电抗,是为了方便推导同步机电磁功率而引入的中间量,其可变阻抗的阻值为

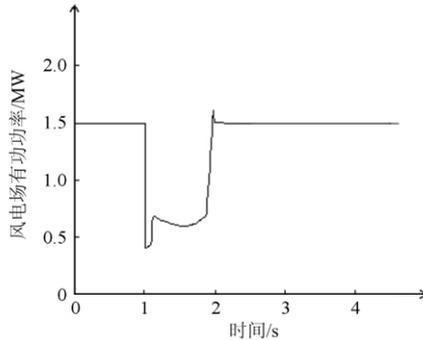
$$\begin{cases} r_w = -\frac{U_a^2}{P_w} \\ x_w = -\frac{U_a^2}{Q_w} \end{cases} \quad (1)$$

1.2 双馈风机暂态特性分析

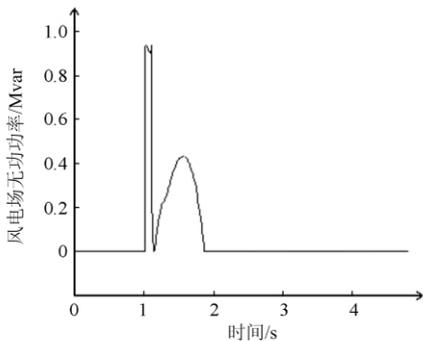
双馈风机作为风力发电机的主流机型,能够分别控制有功和无功,可以更好地调节系统,提高稳定性。在系统正常运行时,DFIG运行在恒功率因数下,风力机组只向系统输送有功功率,无功功率输出为0;系统发生短路时,故障期间DFIG进入低电压穿越模式,并向系统输送无功功率用以支撑;故障结束后DFIG退出低穿模式,并且有功功率按照一定的速率恢复。

双馈型风电机并网点发生短路故障,短时间内故障清除,双馈风电机组有功、无功、端电压暂态特性参见文献[24]。

由图2可知,系统发生故障前,仅向系统输出有功功率,无功功率输出为0,即 $x_w=0$,此时可以将双馈风机等效为一个恒定负电阻。系统发生故障



(a) 风电场有功功率



(b) 风电场无功功率

图2 DFIG暂态响应特性

Fig. 2 DFIG transient response characteristics

期间,双馈风机等效为一个可变负电阻和一个可变负电抗并联在并网口,其值则与并网点电压和有功无功输出有关。在故障清除后前期,双馈风机有功功率快速恢复,无功功率维持一定水平并逐渐减小。在故障清除后期,双馈风机的有功无功输出达到恒定值,与故障前基本一致。

2 DFIG接入后对同步机初始功角的影响

2.1 风电接入系统前

单端送电系统同步机的电磁功率 P_e 为

$$P_e = \frac{E_q^2}{|Z_{11}|} \sin \alpha_{11} + \frac{E_q U}{|Z_{12}|} \sin(\delta - \alpha_{12}) \quad (2)$$

式中: E_q 为发电机内电势; U 为受端电压; δ 为内电势与受端电压之间的角度; Z_{11} 和 Z_{12} 分别为同步机组的自阻抗以及与受端系统间的互阻抗; α_{11} 和 α_{12} 分别为自阻抗角和互阻抗角的余角。由式(3)可以看出,同步机的电磁功率方程由一个正弦量 $E_q U \sin(\delta - \alpha_{12})/|Z_{12}|$ 和一个直流偏移量 $E_q^2 U \sin(\delta - \alpha_{12})/|Z_{11}|$ 组成。

图3为DFIG接入系统前正常运行时的等效电路图,此时系统仅有同步机组输出功率,风电机组出力为0。



图3 纯火电系统等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit of pure thermal power system

此时同步机的电磁功率 P_e 为

$$P_e = \frac{E_q U}{x_\Sigma} \sin \delta \quad (3)$$

式中, x_Σ 为发电机暂态电抗、变压器漏抗和线路电抗的总和。

$$E_q = \sqrt{(U_a + \Delta U)^2 + (\delta U)^2} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \Delta U = \frac{PR + QX}{U_a}, \quad \delta U = \frac{PX - QR}{U_a} \\ \Delta \delta = \arctan\left(\frac{\delta U}{\Delta U + U_a}\right) \end{cases} \quad (5)$$

式中: ΔU 和 δU 分别为 E_q 到 U 电压降的纵峰量和横峰量; $\Delta \delta$ 为 E_q 与 U 之间的电角度之差。

2.2 风电接入系统后

DFIG等出力置换火电出力接入系统后正常运行时等效为一恒定负电阻,如图4所示。

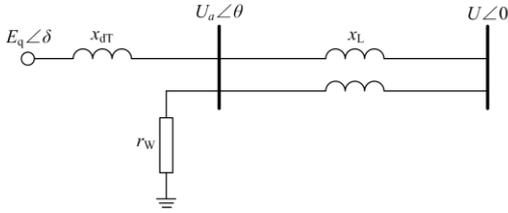


图4 正常运行系统等效电路图

Fig. 4 Equivalent circuit of normal operating system

此时同步机电磁功率 P_e 如式(2)所示, 系统的自阻抗 Z_{11} 和互阻抗 Z_{12} 分别为

$$Z_{11} = jx_{dT} + (r_W) // (jx_L) = \frac{-P_W x_L^2 U_a^2}{U_a^4 + P_W^2 x_L^2} + \quad (6)$$

$$j \left(x_{dT} + \frac{x_L U_a^4}{U_a^4 + P_W^2 x_L^2} \right) = a_{11} + jb_{11} = |Z_{11}| \angle \varphi_{11}$$

$$Z_{12} = j(x_{dT} + x_L) + \frac{jx_{dT} \cdot jx_L}{r_W} = \frac{P_W x_{dT} x_L}{U_a^2} + \quad (7)$$

$$j(x_{dT} + x_L) = a_{12} + jb_{12} = |Z_{12}| \angle \varphi_{12}$$

由式(6)可得当风电接入系统时, 即 $P_W > 0$, 此时 $a_{11} < 0$, $b_{11} > 0$, 则 $\varphi_{11} \in (90^\circ, 180^\circ)$, 因此 $\alpha_{11} < 0$ 。同理由式(8)可得当有 DFIG 接入系统时, $\alpha_{12} > 0$, $b_{12} > 0$, 则 $\varphi_{12} \in (0, 90^\circ)$, $|Z_{12}| > x_\Sigma$, 因此 $\alpha_{12} > 0$ 。由此可以得到 DFIG 接入系统后的同步机功角曲线在纵向上向下平移, 在横向上向右平移, 并且正弦量的幅值减小。

DFIG 接入前后送端同步机的等效内电抗 x_d 不变, 仅是减小同步机的出力, 且同步机惯量前后也保持不变。由于 DFIG 与同步机整体出力前后保持不变, 可以推断出传输线路上的功率以及高压母线电压基本保持不变。由式(5)、式(6)可以得到

$$\begin{cases} E_q = \sqrt{U_a^2 + 2Qx_{dT} + \frac{(P^2 + Q^2)x_{dT}^2}{U_a^2}} \\ \Delta\delta = \arctan\left(\frac{Px_{dT}}{Qx_{dT} + U_a^2}\right) \end{cases} \quad (8)$$

如式(8)所示, 同步机的出力 P 减少后, E_q 和 $\Delta\delta$ 也随之减小, 因此同步机的初始功角在 DFIG 替换后有所减小, 如图 5 所示。

如图 5, DFIG 等出力置换火电出力后的功角曲线沿着右下方向移动, 但由于同步机的机械功率减小, 反而同步机的初始功角有所减小。

3 DFIG 有功恢复对暂态稳定性的影响

假设图 1 所示系统中高压传输线路的其中一回线路在靠近同步发电机侧发生三相短路故障, 故障

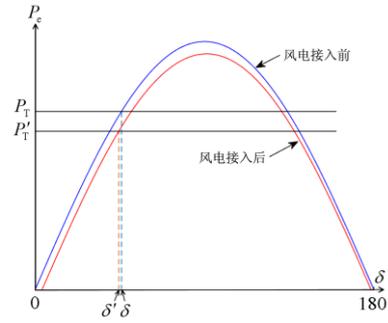


图5 DFIG 等出力替换火电系统前后同步机功角曲线关系

Fig. 5 Synchronous power angle curve relationship before and after DFIG equivalent output replaces thermal power system

持续 0.1 s 后切除故障线路, 传输线路转单回线运行。在系统故障清除后, DFIG 有功恢复特性由机组控制系统及参数决定。由图 2 可知, 在系统短路故障期间, DFIG 发出的有功功率为零, 当故障清除后, 系统电压水平骤升, DFIG 向系统输送的有功功率也跃升为 P_{wc} , 并在一段时间后逐渐升至额定有功功率水平。下面通过负负荷与 DFIG 进行对比分析故障清除后 DFIG 有功恢复特性对系统暂态特性的影响。

3.1 负负荷接入系统

在高压母线上并上一个负负荷相当于在并网处并联一个负的电阻来模拟 DFIG 的有功出力。图 6 为高压母线并上负负荷的等效电路图。

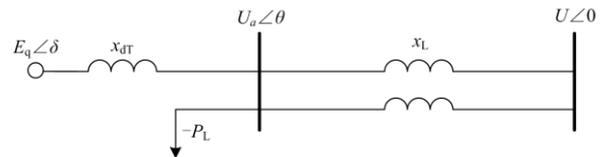


图6 负负荷接入系统等效电路图

Fig. 6 Equivalent circuit of negative load access system

在故障期间, 高压母线上的负负荷量迅速变成 0, 在故障清除后迅速恢复至正常水平。负负荷的有功出力在故障前后保持一致。此处, 采用负负荷与 DFIG 作对比可以更好地分析故障后 DFIG 的有功恢复特性对系统暂态稳定的影响。

系统短路故障期间同步机的加速面积为 $S_{加}$, 在故障清除后同步机的减速面积为 $S_{减}$ 。下面通过等面积定则对系统暂态稳定性进行定量分析。

故障清除时刻同步机的功角 δ_c 和同步机的加速面积 $S_{加}$ 分别为

$$\begin{cases} \delta_c = \delta_0 + \frac{1}{2} \times \frac{P_T}{P_n} \times \frac{\omega_0}{T_j} \times \Delta t^2 \\ S_{\text{加}} = (\delta_c - \delta_0) \times P_T \end{cases} \quad (9)$$

式中： δ_0 为故障开始时刻的功角； P_n 为同步机额定容量； T_j 为同步机转动惯量； ω_0 为同步机的额定转速。

同步机不稳定平衡点 δ_u 和系统的最大可用减速面积 $S_{\text{减}}$ 分别为

$$\begin{cases} \delta_u = \pi + \alpha_{12} - \arcsin\left(\frac{P_T - E_q^2 \sin \alpha_{11} / |Z_{11}|}{E_q U_a / |Z_{12}|}\right) \\ S = \int_{\delta_c}^{\delta_u} (P_e - P_T) d\delta \end{cases} \quad (10)$$

式中： $E_q^2 \sin \alpha_{11} / |Z_{11}|$ 为电磁功率自阻抗项； $E_q U_a / |Z_{12}|$ 为电磁功率互阻抗项的幅值。

3.2 DFIG 等出力置换火电出力

图7为DFIG接入系统故障清除后的等效电路图。

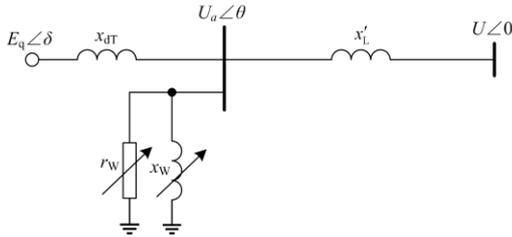


图7 故障清除后等效电路图

Fig. 7 Equivalent circuit after fault clearing

如图7所示，故障清除后传输线路单回运行，由于本节考虑的是DFIG有功恢复特性对系统暂态特性的影响，因此在下列计算中暂时不考虑DFIG无功功率。则此时系统自阻抗 Z_{11} 、互阻抗 Z_{12} 计算公式同式(6)、式(7)，其中线路阻抗变为 x'_l 。

由图2可知在故障清除后前期，DFIG的有功出力 $P_{wc} < P_w$ 。对式(6)进行分析，由于 x'_l 的值很小，远小于 U_a ，因此 $|a_{11}|$ 随 P_w 的减小而减小， b_{11} 随 P_w 的减小而增大，且 $|a_{11}|$ 也远小于 $|b_{11}|$ 。电磁功率的自阻抗项为

$$E_q^2 \sin \alpha_{11} / |Z_{11}| = \frac{-a_{11} E_q^2}{a_{11}^2 + b_{11}^2} \quad (11)$$

由式(11)可知，当 P_w 减小时，自阻抗项模值也随之减小，同步机电磁功率曲线向上移动，有利于系统功角稳定。

对式(7)进行分析，互阻抗实部 a_{12} 以及余角 α_{12} 均大于零，随着 P_w 的减小， a_{12} 和 α_{12} 也均减小，

虚部 b_{12} 保持不变，因此互阻抗 $|Z_{12}|$ 也随之减小，同步机电磁功率曲线向左上方移动，有利于系统功角稳定。图8分别为负负荷接入系统和DFIG接入系统在故障清除后电磁功率随时间变化的曲线。

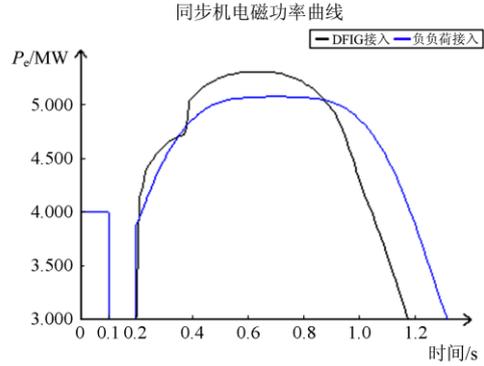


图8 故障清除后两种系统的同步机电磁功率曲线

Fig. 8 Electromagnetic power curve of the synchronous machine of the two systems after the fault is cleared

如图8所示，由于DFIG有功功率在故障清除后不能马上恢复到额定功率，因此同步机增发电磁功率，即 $P'_e > P_e$ 。

DFIG等出力置换火电出力时，故障前的功率输出与负负荷提供的功率相同，因此同步机故障清除时刻功角 δ'_c 和加速面积 $S'_{\text{加}}$ 与上节不变。

风电等出力置换后的同步机不稳定平衡点 δ'_u 和最大可用减速面积 $S'_{\text{减}}$ 计算公式同式(10)。

根据上文分析可知：

$$\begin{cases} \delta'_u - \delta'_c > \delta_u - \delta_c \\ P'_e > P_e \end{cases} \quad (12)$$

从而有 $S'_{\text{减}} > S_{\text{减}}$ 。

图9分别为负负荷接入系统和DFIG接入系统在故障清除后同步机功角曲线对比图。

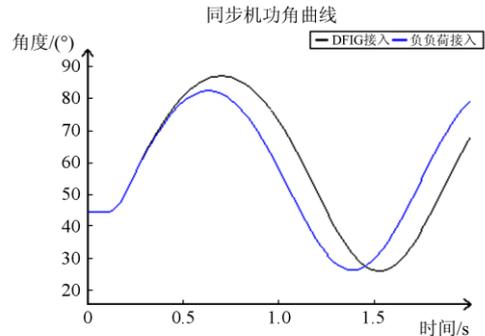


图9 故障清除后两种系统的同步机功角曲线

Fig. 9 Synchronous machine power angle curves of the two systems after the fault is cleared

如图 9 所示, 当 DFIG 接入时, 同步机最大摆角减小, 有利于系统功角稳定性。而且 DFIG 有功恢复速率越低, 系统功角稳定性越高。

4 DFIG 无功补偿对暂态稳定性的影响

由第 1 章可知, DFIG 在故障期间进入低电压穿越模式, 并向系统提供无功支撑, 且在故障清除后维持一段时间。考虑到 DFIG 发出的无功功率, 系统模型如图 7 所示, 此时系统的自阻抗 Z_{11} 和互阻抗 Z_{12} 分别为

$$Z_{11} = jx_{dT} + (r_w) // (jx_w) // (jx'_L) = \frac{-P_w x'_L{}^2 U_a^2}{(U_a^2 - Q_w x'_L{}^2)^2 + P_w^2 x'_L{}^2} + j \left(x_{dT} + \frac{x'_L U_a^2 (U_a^2 - Q_w x'_L)}{(U_a^2 - Q_w x'_L{}^2)^2 + P_w^2 x'_L{}^2} \right) = \quad (13)$$

$$Z_{12} = j(x_{dT} + x'_L) + \frac{jx_{dT} \cdot jx'_L}{(r_w) // (jx_w)} = \frac{P_w x_{dT} x'_L}{U_a^2} + j \left(x_{dT} + x'_L - \frac{Q_w x_{dT} x'_L}{U_a^2} \right) = \quad (14)$$

$$a_{12} + jb_{12} = |Z_{12}| \angle \varphi_{12}$$

DFIG 在故障期间以及故障清除后的一段时间发出无功功率, 可以视作在高压母线出并上无功补偿装置, 在故障发生时补偿无功, 对高压母线的电压幅值 U_a 具有提升作用, 如图 10 所示。

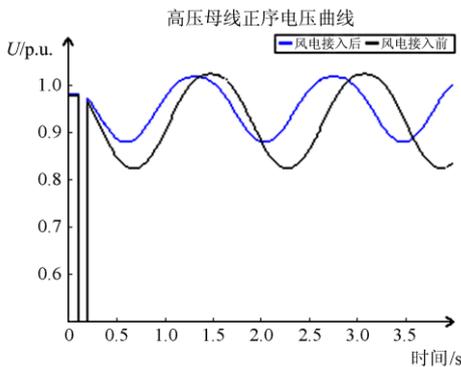


图 10 故障清除后高压母线电压幅值
Fig. 10 High voltage bus voltage amplitude after fault clearing

对式(13)进行分析, 由于 x'_L 的值很小, 相比较远小于 U_a 。因此 $U_a^2 - Q_w x'_L \rightarrow U_a^2$, 所以 $|a_{11}|$ 随 U_a 的增大而减小, b_{11} 随着 U_a 的增大而增大。自阻抗表达式如式(11)所示, 当 U_a 增大时, 自阻抗项模值

也随之减小, 同步机电磁功率曲线向上移动, 有利于系统功角稳定。

对式(14)进行分析, 易得到互阻抗实部 a_{12} 随着 U_a 的增大而减小, 然而互阻抗虚部 b_{12} 随 U_a 的增大而增大, 随 Q_w 的增大而减小。又由于补偿无功对高压母线电压幅值提升作用不大, 因此在对互阻抗虚部进行分析时 Q_w 的变化占主导因素, 所以 b_{12} 将随之减小, 因此互阻抗 $|Z_{12}|$ 也随之减小。互阻抗项余角 α_{12} 的正切值 $\tan\alpha_{12}$ 为

$$\tan\alpha_{12} = \frac{P_w x_{dT} x'_L}{(x_{dT} + x'_L) U_a^2 - Q_w x_{dT} x'_L} \quad (15)$$

式(15)中, $x_{dT} + x'_L \gg x_{dT} x'_L$, 因此 U_a 的变化对 $\tan\alpha_{12}$ 占主导因素, 随着 U_a 的增加, $\tan\alpha_{12}$ 将减小, 即 α_{12} 将减小, 因此同步机电磁功率曲线向左上方移动, 有利于系统功角稳定。

根据上文的分析可以得到, 由于 DFIG 的无功补偿作用, 同步机电磁功率增加, 可以增大系统的最大可用减速面积, 从而实现提高系统暂态功角稳定性的作用。由于无法定量分析 Q_w 和 U_a 共同对同步机电磁功率的影响程度, 目前只能定性分析 DFIG 无功作用对系统功角稳定性的影响。

5 仿真实验

5.1 系统仿真模型

在 PSD-BPA 仿真软件中对图 1 双馈型风电集中接入受端大系统进行建模仿真, 其中: 风电机组采用额定容量为 1.5 MW 的典型双馈电机模型, 总容量为 3 000 MW; 同步机采用经典二阶模型, 额定容量为 7 500 MW。系统参数如表 1 所示。

表 1 仿真系统参数

Table 1 Parameters of components in the simulation system

元件名称	参数	数值/p.u.
同步机	x'_d	0.003 3
线路	x_{L1}	0.004 3
	x_{L2}	0.008 5
	x_{T1}	0.002
变压器	x_{T2}	0.000 1
	x_{T3}	0.001

5.2 同步机初始功角验证

5.2.1 风电接入系统前

设置火电机组出力为 4 500 MW, 风电出力为 0。仿真可以得到传输线路上的功率为 $S_0 = P_0 + jQ_0 = 45 + j10.922$ 以及高压母线电压 $U_a = 0.973 \angle 32.59^\circ$ 。

由式(4)、式(5)可以得到发电机电势为

$$E_q = 1.0619 \angle 46.02^\circ \quad (16)$$

由式(3)进一步得到同步机的电磁功率为

$$P_e = 62.526 \sin \delta \quad (17)$$

采用 BPA 仿真得到同步机电磁功率方程为

$$P_{e0} = 62.538 \sin \delta \quad (18)$$

由式(17)、式(18)对比得到仿真结果与计算结果误差小于 0.1%，说明计算结果基本准确。

5.2.2 风电等出力置换火电出力

在上一小节的基础上减少同步机出力 500 MW，增加 500 MW 的风电出力。仿真可以得到传输线路上的功率为 $S_2 = P_2 + jQ_2 = 45 + j10.922$ 以及高压母线电压 $U_a = 0.973 \angle 32.59^\circ$ 。仿真得到传输线路上的功率以及高压母线电压基本保持不变。

由式(4)、式(5)可得到发电机电势为

$$E_q = 1.0571 \angle 44.52^\circ \quad (19)$$

与纯火电系统的功角相比减少了 1.5° 。此时，可由式(2)和式(6)、式(7)得到同步机电磁功率为

$$P_e = 62.231 \sin(\delta - 1.10^\circ) - 277.0 \quad (20)$$

将式(19)中的功角代入式(20)，可得到 $P_e = 4000.1$ MW，验证准确，因此可以得到当 DFIG 等容量替换火电接入系统时，虽然功角曲线会沿着右下的方向移动，但是由于减少了同步机的出力，同步机的初始功角反而有所减小。

在不同同步机组有功出力和不同风电有功出力下，同步机初始功角对比结果如表 2 所示。

表 2 不同运行状况下的同步机初始功角

Table 2 Initial power angle of the synchronous machine under different operating conditions

组号	P_G/MW	P_W/MW	初始功角 $\delta_0/(\circ)$	
			计算值	仿真值
1	4 500	0	46.02	46.02
	4 400	100	45.73	45.72
	4 300	200	45.45	45.42
	4 200	300	45.16	45.12
	4 100	400	45.90	45.82
	4 000	500	44.71	44.52
2	4 000	0	40.39	40.40
	3 900	100	40.10	40.10
	3 800	200	40.81	40.80
	3 700	300	39.52	39.50
	3 600	400	39.22	39.20
	3 500	500	38.93	38.90

表 2 中 1、2 两组数据表明，保持风火总出力不变，同步机初始功角随着风电比例的增加呈一定线

性比例减小，且计算值和仿真值基本吻合，可以根据风电出力的改变较为准确地量化同步机初始功角的变化。

5.3 系统暂态稳定程度验证

对系统进行故障模拟，系统参数不变，如表 1 所示，此时传输线路单回运行 $x_{L1} = 0.0043$ 。根据理论计算得到不同风电或负负荷接入比例下的加速面积、最大减速面积、最大摆角如表 3 所示，其中 k 为风电或负负荷接入比例。

表 3 不同接入比例下的计算结果

Table 3 Calculation results under different penetration levels

组号	$k/\%$	P_G/MW	$P_W(P_L)/\text{MW}$	加速面积/p.u.	最大减速面积/p.u.	最大摆角/ $(^\circ)$
1	0	4 500	0	530.14	868.66	95.26
	11.1	4 000	500	418.88	1 249.34	81.60
	22.2	3 500	1 000	320.70	1 710.28	74.05
	33.3	3 000	1 500	235.62	2 235.79	67.91
	44.4	2 500	2 000	163.63	2 832.88	60.78
2	0	4 500	0	530.14	869.84	95.26
	11.1	4 000	500	418.88	1 001.47	87.16
	22.2	3 500	1 000	320.70	1 186.34	80.06
	33.3	3 000	1 500	235.62	1 421.69	73.65
	44.4	2 500	2 000	163.63	1 699.77	67.75

表 3 结果表明，DFIG 接入系统后，加速面积为接入前的 $(1-2k)$ 倍，随着风电比例的最大减速面积按一定比例增大，同步机最大摆角也按一定比例减小。对比不同组号相同的接入比例，加速面积不变，接入 DFIG 时的最大减小面积较大，最大摆角较小。可以得出，由于 DFIG 存在有功恢复特性以及无功补偿特性，系统的暂态稳定水平有所提高。

5.4 实际应用

本文仿真模型已经在华北某实际电网中得到了验证。在一个实际的火电容量为 7 300 MW，风电容量为 7 000 MW 的风火打捆交直流外送系统中，双馈型风电机组是主要的风力发电机且闭锁直流通道仅采用交流通道外送。交流送出极限在风电出力占额定容量的 30%时(风电渗透率为 28.2%)，提高了 37.2%；当风电出力占额定容量的 50%时(风电渗透率为 41.1%)，提高了 57.1%。可以见得：当风电出力不超过总容量 50%时，系统的暂态稳定水平与风电接入比例呈正比；当风电容量超过 50%之后，系统的暂态稳定性变化还需要进一步研究。

6 结论

本文在基于含风电的受端大系统中，分析了风电等出力置换同步机出力的接入方式对同步机功角

特性方程的影响, 并基于等面积定则分析了风机在故障清除后有功功率特性以及无功功率特性对同步机暂态功角稳定性的影响。现有结论如下:

1) 双馈型风电机组等出力置换同步机出力接入系统后, 同步机功角曲线将向右下方向移动。且同步机初始功角随风电比例的增加呈一定线性比例减小。

2) 双馈型风机等出力置换同步机出力时, DFIG 的有功慢恢复特性增加了系统的减速面积, 提高了系统暂态稳定性。

3) 双馈型风机等出力置换同步机出力时, DFIG 在系统故障后的无功功率支撑提升了高压母线的电压, 同时也增加了系统的减速面积, 提高了系统暂态稳定性。

参考文献

- [1] 赵云灏, 夏懿, 周勤勇, 等. 风火打捆直流外送系统的直流系统无功补偿装置协调控制策略及配置方案[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2081-2086.
ZHAO Yunhao, XIA Yi, ZHOU Qinyong, et al. Coordinated control strategy and configuration scheme of RPCD of DC system for wind-thermal-bundled power transmission[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2081-2086.
- [2] 王树东, 王阔, 高翔, 等. 风电比例对风火打捆系统暂态稳定性影响[J]. 工业仪表与自动化装置, 2016(3): 10-13, 63.
WANG Shudong, WANG Kuo, GAO Xiang, et al. Influence of proportion of wind power to wind-thermal bundled system transient stability[J]. Industrial Instrumentation & Automation, 2016(3): 10-13, 63.
- [3] 李生福, 张爱玲, 李少华, 等. “风火打捆”交直流外送系统的暂态稳定控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 108-114.
LI Shengfu, ZHANG Ailing, LI Shaohua, et al. Study on transient stability control for wind-thermal-bundled power transmitted by AC/DC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 108-114.
- [4] 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): 105-110, 115.
LIN Li, YANG Yihan. Analysis of transient stability of power system including large scale wind power based on the extended equal area rule[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 105-110, 115.
- [5] 沙志成, 王艳, 郑帅. 风火打捆比例对直流孤岛系统稳定性影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 148-154.
SHA Zhicheng, WANG Yan, ZHENG Shuai. Study on the effect of wind-thermal installed capacity ratio on the stability of DC islanded system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 148-154.
- [6] 赵伟, 张雪娟, 吴水军, 等. 双馈风机调频特性对系统暂态功角稳定性的影响[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(6): 110-118.
ZHAO Wei, ZHANG Xuejuan, WU Shuijun, et al. Influence of frequency-modulation characteristics of doubly-fed induction generator on transient power-angle stability of power system[J]. Electric Machines and Control Application, 2020, 47(6): 110-118.
- [7] 张雪娟, 束洪春, 孙士云, 等. 双馈风机参与系统调频对系统暂态功角稳定性的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(2): 18-29.
ZHANG Xuejuan, SHU Hongchun, SUN Shiyun, et al. Effect analysis of a doubly-fed induction generator participating in system frequency modulation on system transient power angle stability[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(2): 18-29.
- [8] 于淼, 汤亚芳, 黄亦欣, 等. 双馈风机控制方式对继电保护影响的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 180-187.
YU Miao, TANG Yafang, HUANG Yixin, et al. Research on the influence of control mode of DFIG on relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 180-187.
- [9] 李欣悦, 李凤婷, 尹纯亚, 等. 直流双极闭锁故障下送端系统暂态过电压计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 1-8.
LI Xinyue, LI Fengting, YIN Chunya, et al. Transient overvoltage calculation method of HVDC sending-end system under DC bipolar blocking[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 1-8.
- [10] 张伟晨, 熊永新, 李程昊, 等. 基于改进 VDCOL 的多馈入直流系统连续换相失败抑制及协调恢复[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 63-72.
ZHANG Weichen, XIONG Yongxin, LI Chenghao, et al. Continuous commutation failure suppression and coordinated recovery of multi-infeed DC system based on improved VDCOL[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 63-72.
- [11] MENSOU S, ESSADKI A, NASSER T, et al. A direct power control of a DFIG based-WECS during symmetrical voltage dips[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 36-47.
- [12] 李娟, 李方媛, 王鹏, 等. 限流式 SSSC 提高 DFIG 型风火打捆系统暂态稳定分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(5): 68-76.

- LI Juan, LI Fangyuan, WANG Peng, et al. Analysis of improving transient stability of DFIG type wind-thermal binding system by current-limiting SSSC[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2021, 33(5): 68-76.
- [13] 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): 875-881.
- WANG Qing, XUE Ancheng, ZHENG Yuanjie, et al. Impact of DFIG-based wind power integration on the transient stability of power systems[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 875-881.
- [14] 于强, 孙华东, 汤涌, 等. 双馈风电机组接入对电力系统功角稳定性的影响[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3399-3405.
- YU Qiang, SUN Huadong, TANG Yong, et al. Impact on angle stability of power system with doubly fed induction generators connected to grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3399-3405.
- [15] 员超, 张新燕. 双馈型风力发电机的并网建模与仿真[J]. 电机技术, 2007(6): 1-5.
- YUAN Chao, ZHANG Xinyan. Modeling and simulating the doubly-fed induction generator in wind turbines linked with power systems[J]. Electrical Machinery Technology, 2007(6): 1-5.
- [16] 罗秀华. 双馈风力发电机并网控制研究[J]. 黑龙江科学, 2020, 11(14): 68-69.
- LUO Xiuhua. Research of grid-connected control of doubly-fed wind generator[J]. Heilongjiang Science, 2020, 11(14): 68-69.
- [17] 张冬冬, 韩顺杰, 于佳文, 等. 双馈风力发电机并网运行控制及仿真[J]. 科技创新与应用, 2018(16): 10-12.
- ZHANG Dongdong, HAN Shunjie, YU Jiawen, et al. Grid-connected operation control and simulation of doubly-fed wind turbine[J]. Technology Innovation and Application, 2018(16): 10-12.
- [18] 罗煦之, 易俊, 张健, 等. 结合 DFIG 功率特性研究风电并网对系统功角稳定性的影响[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3401-3407.
- LUO Xuzhi, YI Jun, ZHANG Jian, et al. Research on influence of integrated wind plants on power angle stability based on output characteristic of DFIG[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3401-3407.
- [19] 徐超, 卢锦玲, 张洁, 等. 提高双馈风力发电机并网系统暂态稳定性的控制策略[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(6): 45-51.
- XU Chao, LU Jinling, ZHANG Jie, et al. Control strategy for transient stability improvement of doubly-fed wind power generation system[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015, 34(6): 45-51.
- [20] 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): 3832-3842.
- TANG Lei, SHEN Chen, ZHANG Xuemin. Impact of large-scale wind power centralized integration on transient angle stability of power systems-part I: theoretical foundation[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(15): 3832-3842.
- [21] 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): 4043-4051.
- TANG Lei, SHEN Chen, ZHANG Xuemin. Impact of large-scale wind power centralized integration on transient angle stability of power systems-part II: factors affecting transient angle stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4043-4051.
- [22] 张炎, 丁明, 韩平平, 等. 直流闭锁后风电送端系统暂态稳定及控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(17): 3714-3726.
- ZHANG Yan, DING Ming, HAN Pingping, et al. Study on the transient stability and control schemes of the sending-end system involving wind power after UHVDC block[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(17): 3714-3726.
- [23] 何廷一, 李胜男, 吴水军, 等. 大规模风电接入对电力系统暂态稳定风险的影响研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(20): 17-22.
- HE Tingyi, LI Shengnan, WU Shuijun, et al. Study on the influence of large-scale wind power integration on power system transient stability risk[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(20): 17-22.
- [24] WANG Qing, XUE Ancheng, BI Tianshu, et al. Impact of DFIG-based wind farm on transient stability of single machine infinite bus system[C] // The 5th IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), December 8-11, 2013, Hong Kong, China: 1-6.

收稿日期: 2021-06-09; 修回日期: 2021-09-02

作者简介:

盛四清(1965—), 男, 硕士生导师, 研究方向为电力系统分析控制; E-mail: sqsheng@ncepu.edu.cn

俞可(1997—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: 185409102@qq.com

张文朝(1978—), 男, 博士, 硕士生导师, 教授级高级工程师, 主要从事电力系统分析与控制方面的研究工作。E-mail: zwenchao72@126.com

(编辑 葛艳娜)