

含风电扩展单机无穷大系统 不对称故障下的暂态稳定性分析

张雪娟, 孙士云, 郑新宇, 赵伟, 王春又

(昆明理工大学电力工程学院, 云南省昆明市 650500)

Quantitative Analysis on Transient Stability of Extended Single-Machine Infinite System Containing DFIG under Asymmetric Faults

ZHANG Xuejuan, SUN Shiyun, ZHENG Xinyu, ZHAO Wei, WANG Chunyou

(College of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology,
Kunming 650500, Yunnan Province, China)

摘要: 针对含双馈风力发电机 (double-fed induction generator, DFIG) 的扩展单机无穷大系统, 分析不对称故障下, DFIG 接入对系统暂态功角稳定性的影响。基于 DFIG 阻抗等值模型, 依据等面积定则推导不对称故障下含双馈风电系统极限切除角的详细表达式, 同时考虑风电比例、风机并网位置两种影响因素对含双馈风电系统极限切除角的影响, 从而得到两种影响因素对系统暂态功角稳定性的影响, 并分析该影响规律对不同双馈风机模型的适用性。在 PSD-BPA 中建立含 DFIG 的扩展单机无穷大系统的仿真模型, 对理论分析的正确性进行了仿真验证。

关键词: 双馈风力发电机; 不对称故障; 极限切除角; 暂态功角稳定性

Abstract: In allusion to the extended single-machine infinite system containing double-fed induction generator (DFIG), the influence of switching in DFIG on transient angle stability of the system under asymmetric faults was analyzed. Based on impedance equivalent model of DFIG, the detailed expression of the limit clearing angle of the system containing DFIG under asymmetric fault was derived according to the equal-area criterion, meanwhile the effect of the two influencing factors, i.e. the ratio occupied by the wind power and the grid-connected position of the wind turbine, on the limit clearing angle of the system containing DFIG was taken into account, thus the effect of the two influencing factors on transient angle stability of the system was obtained and the applicability of the two influencing factors for different types of DFIG models were analyzed. A simulation model of an extended single-machine infinite system containing DFIG was established in PSD-BPA to verify the correctness of the theoretical analysis. Simulation results show that the results of the theoretical analysis are correct.

Keywords: doubly-fed induction generator; Asymmetric fault; Critical clearing angle; transient angle stability

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0113

0 引言

风力发电已经成为新能源发电的主力军, 但是因为风力发电机的结构组成与控制运行特性不同于常规的同步发电机^[1-2], 所以需要深入分析风力发电机接入电力系统后对系统暂态功角稳定性的影响^[3-6]。

分析风力发电机接入系统后对系统暂态稳定性的影响方法, 现有文献中主要包括两大类, 第一类为定性分析与仿真验证相结合的方法, 第二类文献采用定量分析与仿真验证相结合的方法。采用第一类分析方法文献较多。

文献 [7-11] 都是采用定性分析与仿真验证相结合的方式; 文献 [7] 提出系统的等效机械功率随故障期间 DFIG 的功率特性的改变而改变, 反映到扩展等面积定则 (Extended Equal Area Criterion, EEAC) 上即为系统等效加速面积大小的变化; 文献 [8] 推导了双馈风机的等效外特性, 基于 EEAC 定性分析了系统的暂态稳定变化; 文献 [9] 在 EEAC 的基础上, 分析了两种风电接入方式, 即直接接入和等容量替代同步电机有功出力, 对含风电电力系统暂态稳定的影响进行了分析; 文献 [10] 通过对比分析风电场接入后对电网暂态稳定性的影响, 论证了风电场接入点不同对电网稳定性的影响; 文献 [11] 以并列运行同步机组故障清除后输出的电磁功率为指标, 研究了送端电网风火互替对系统功角稳定水平的影响。

文献 [12-13] 通过定量分析与仿真验证相结合

对风电接入系统的暂态稳定性影响进行了分析；文献 [12] 基于传统扩展等面积法原理、DFIG 结构和暂态特性，提出含风电系统暂态过程的加速面积、减速面积和稳定度计算方法；文献 [13] 提出了一种含 DFIG 风电场接入的多机系统暂态功角稳定性分析方法，用接地导纳表示风电场对外功率特性，推导了各同步机电磁功率的改变量；文献 [14] 对系统不对称故障下的暂态稳定性进行了分析，在仿真分析中针对单相瞬时故障进行研究；文献 [15] 推导了三相短路情况下含风电系统的极限切除角随风电比例、风机并网位置、故障位置、负荷接入位置 4 种影响因素的变化趋势，进行了仿真验证。

上述文献绝大多数针对对称故障进行了分析，因为三相短路故障是较严重的故障。含风电的系统不对称故障分析的文献很少，而单相短路故障发生概率最高。本文针对单相短路故障下含双馈风电系统的极限切除角随两种因素影响的变化规律，对系统暂态功角的稳定性进行分析。在含 DFIG 扩展单机无穷大系统中，建立 DFIG 阻抗等值模型，依据等面积定则分析 DFIG 接入系统，在系统发生不对称故障时，考虑风电比例、风机并网位置对系统极限切除角的影响规律，验证该影响规律对不同 DFIG 模型的适用性。

1 极限切除角计算

含 DFIG 的扩展单机无穷大系统如图 1。发电机 1 为同步发电机； T_1 、 T_2 、 T_3 分别为发电机 1 侧、无穷大系统端侧、风机侧的变压器，图中可见各变压器的接线方式；DFIG 接在母线 B 上；恒阻抗负荷接在母线 C 上。

DFIG 采用恒功率因数控制，稳态运行时，DFIG 只发出有功功率，故可以将 DFIG 等效为一负电阻 [16]。

故障期间，机端电压下降，为了使机端电压恢复，具备低电压穿越能力的 DFIG 在控制系统的作用下，向系统提供无功支撑，因此可以将风机等效为一个并联的负电阻和负电抗 [16]。

故障切除后前期，DFIG 不仅发出有功功率，同时也发出少量的无功功率，将风机等效为负电阻和负电抗并联的负阻抗 [16]。

等值电阻和等值电抗的表达式：

$$r_{wi} = \frac{U_B^2}{P_{wi}} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (1)$$

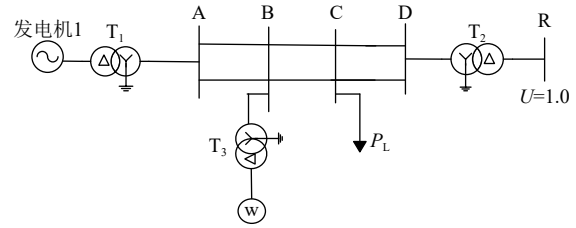


图 1 扩展单机无穷大系统接线

Fig. 1 Wiring diagram of extended single-machine infinite system

$$X_{wi} = \frac{U_B^2}{Q_{wi}} \quad (i = 1, 2) \quad (2)$$

式中： U_B 为双馈风机并网点电压； P_{wi} 、 Q_{wi} 为双馈风机的有功功率和无功功率。

1.1 稳态运行

基于 DFIG 的阻抗等值模型，可画出稳态运行时系统的等值电路如图 2。 K_1 为双馈风机接入系统的风电比例； K_2 为 AB 母线之间长度占线路 AC 长度百分比； X'_d 为同步发电机 1 的暂态电抗值； X_{T1} 为同步发电机 1 的变压器电抗值； X_{T2} 为无穷大系统变压器的电抗值； X_{T3} 为双馈风机变压器的电抗值； X_L 为 AC 单回输电线路的电抗值。其中同步发电机 1 的暂态电动势 E' 在整个暂态过程中为常数 [15]。

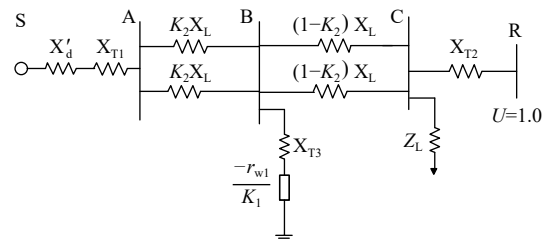


图 2 稳态运行时系统的等值电路

Fig. 2 Equivalent circuit during normal system operation

稳态运行时，含 DFIG 系统的节点导纳矩阵 Y_1 可以由图 2 写出，节点导纳矩阵 Y_1 用 WARD 等值法进行化简，只保留 S 和 R 两个节点，消去外部节点，在这个化简过程中，风机所在节点并不是被简单地消去，而是包含在同步机群节点导纳矩阵中。由式 (3) 计算得到稳态运行时同步发电机 1 与无穷大系统之间的等值互导纳。

$$\tilde{Y}_{BB0} = Y_{BB0} - Y_{BE0} Y_{EE0}^{-1} Y_{EB0} = \begin{bmatrix} Y'_{SS0} & Y'_{SR0} \\ Y'_{RS0} & Y'_{RR0} \end{bmatrix} \quad (3)$$

将式 (3) 中的 Y'_{SR0} 代入式 (4)，得到稳态运行时发电机 1 与无穷大系统之间的功角差 δ_0 。

$$\delta_0 = \arctan \frac{-P_1}{Y'_{SR0} - Q_1} \quad (4)$$

式中： P_1 和 Q_1 分别为稳态运行时无穷大系统发出的有功功率和无功功率。

1.2 单相接地短路故障

假设图 1 所示系统中线路 AB 的一回输电线路 f 点发生单相接地短路故障，系统正序、负序、零序网络等值电路如图 3 所示。 X_2 为发电机的负序电抗值； X_{L0} 为线路零序电抗值； X_g 为单相接地短路故障的附加电抗； r_{w21} 、 X_{w11} 、 r_{w22} 、 X_{w12} 分别为故障期间 DFIG 的正序等值电阻、电抗和负序等值电阻、电抗。

由图 3 (b) 可以求出系统的负序等值电抗值 $X_{\Sigma(2)}$ ；由图 3(c) 可以求出系统的零序等值电抗值 $X_{\Sigma(0)}$ ；由式 (5) 可以得到故障期间 f 点处的附加电抗 X_g 。

$$X_g = X_{\Sigma(2)} + X_{\Sigma(0)} \quad (5)$$

根据单相短路故障发生时的系统等值电路写出系统的节点导纳矩阵 Y_2 ，节点导纳矩阵 Y_2 化简过程同上，在此不再赘述。单相短路故障期间同步发电机 1 和无穷大系统之间的互导纳 Y'_{SR1} 由式 (6) 计算得到。

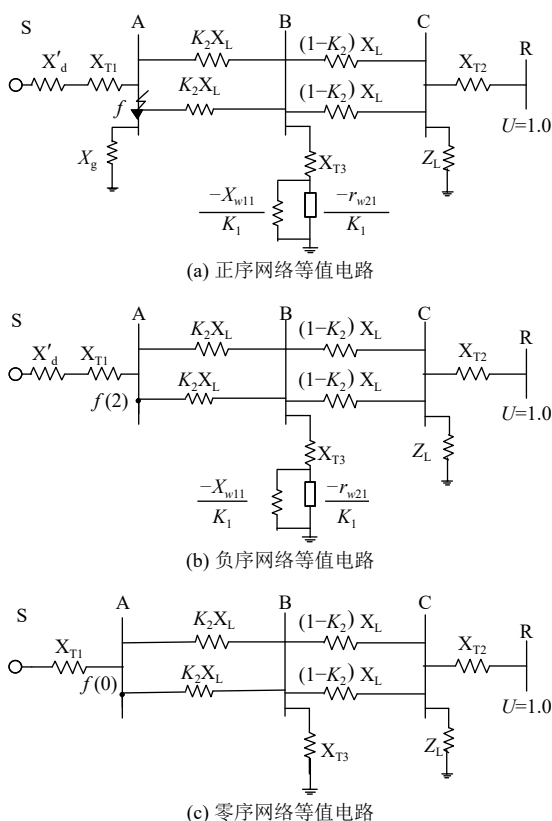


图 3 发生单相接地短路系统等值电路

Fig. 3 Equivalent circuit under single-phase ground short circuit

$$\tilde{Y}_{BB1} = Y_{BB1} - Y_{BE1} Y_{EE1}^{-1} Y_{EB1} = \begin{bmatrix} Y'_{SS1} & Y'_{SR1} \\ Y'_{RS1} & Y'_{RR1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

将式 (6) 中的 Y'_{SR1} 代入式 (7) 中，得到故障期间同步发电机 1 电磁功率的最大值 P_{2m} 。

$$P_{2m} = -Y'_{SR1} \times U \quad (7)$$

1.3 故障切除后前期

故障切除后前期系统等值电路图如图 4 所示。故障线路单回线切除。

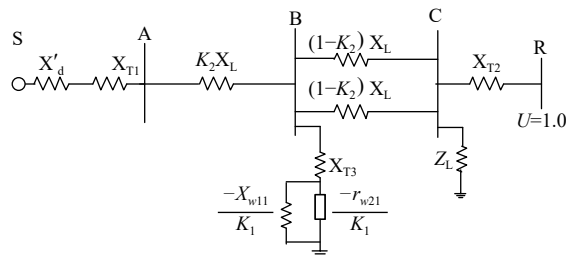


图 4 故障切除后系统等值电路

Fig. 4 System equivalent circuit diagram of fault removal

根据故障切除后的系统等值电路图写出系统的节点导纳矩阵 Y_3 ，节点导纳矩阵 Y_3 化简方法同上，故障切除后前期同步发电机 1 和无穷大系统之间的互导纳 Y'_{SR2} 由式 (8) 计算得到。

$$\tilde{Y}_{BB2} = Y_{BB2} - Y_{BE2} Y_{EE2}^{-1} Y_{EB2} = \begin{bmatrix} Y'_{SS2} & Y'_{SR2} \\ Y'_{RS2} & Y'_{RR2} \end{bmatrix} \quad (8)$$

将式 (8) 中的 Y'_{SR2} 代入下式中，得到故障切除后同步发电机 1 的电磁功率得最大值 P_{3m} 。

$$P_{3m} = -Y'_{SR2} \times U \quad (9)$$

最大允许摇摆角可由式 (10) 求得，式中 P_0 为机械功率。

$$\delta_h = \pi - \arcsin \frac{P_0}{-Y'_{SR2} \times U} \quad (10)$$

分别将式 (4)、(7)、(9)、(10) 代入式 (11)，求得含 DFIG 扩展单机无穷大系统的极限切除角 δ_{cm} 。详细表达式见式 (12)。

$$\delta_{cm} = \arccos \left(\frac{P_0(\delta_h - \delta_0) + P_{3m} \cos \delta_h - P_{2m} \cos \delta_0}{P_{3m} - P_{2m}} \right) \quad (11)$$

$$\delta_{cm} = \arccos \left(\frac{P_0 \left(\pi - \arcsin \frac{P_0}{-Y'_{SR2}} - \arctan \frac{-P_1}{-Y'_{SR0} - Q_1} \right) - Y'_{SR2} \times \cos \left(\pi - \arcsin \frac{P_0}{-Y'_{SR2}} \right) + Y'_{SR1} \times \cos \left(\arctan \frac{-P_1}{-Y'_{SR0} - Q_1} \right)}{(Y'_{SR1} - Y'_{SR2})} \right) \quad (12)$$

式(12)中的 Y'_{SR0} 、 Y'_{SR1} 、 Y'_{SR2} 杂糅了 X_{wi} 、 r_{wi} 、 X_g 、 K_1 、 K_2 等变量。通过式(12)可以得到不同DFIG模型下,考虑两种影响因素对含风电电力系统暂态功角稳定性的影响规律。

系统中发电机、变压器和线路电抗的标么值如表1所示。

表 1 算例系统电抗参数

Table 1 Reactance parameters of example system

X'_d	X_{T1}	X_{T2}	X_{T3}	X_L	X_{L0}	X_2
0.1785	0.0625	0.057	0.024	0.2	0.8	0.044

2 不同双馈风机模型的影响

对于不同的DFIG模型,基于第1节中极限切除角的理论推导,考虑两种影响因素对极限切除角的影响。从而分析对系统暂态功角稳定性的影响。

2.1 不同风机类型的确定

为了验证所提方法的适用性,首先考虑了6种DFIG类型,分别为GE风电机组模型;联合动力风电机组模型(以下简称UP);华锐风电机组模型(以下简称SV);东汽风电机组模型(以下简称DF);明阳风电机组模型(以下简称MY);江苏新誉重工科技有限公司的FD77-1500-III A(以下简称FD)风电机组模型。其中前5种为封装的厂家风电机组模型,6种双馈风机模型均考虑了风机的低电压穿越能力。

针对6种双馈风电机组模型,在图1所示系统基础上进行了仿真对比,单相短路故障发生于母线A上,为了使结果具有普遍性,在合理范围内选择了表2中的4种情况进行仿真。

分别以含6种DFIG模型的系统的功角特性和风机机端电压特性为依据,仿真结果显示6种DFIG模型的功角特性和电压特性分为3大类。GE风机模型为1类;UP、SV、DF、MY风机模型的功角特性和电压特性完全重合,为第2类;FD为第3类。通过比较选择了GE风电机组模型、DF风电机组模型(为第2类的代表)、FD风电机组模型,对3种风电机组模型分别进行仿真。以案例2为例,6种DFIG模型的功角特性与电压特性如图5至图6所示。

2.2 影响因素分析

风机接入系统后,计及上述两种影响因素对含风电电力系统的极限切除角的影响,考虑两种影响因素时的系统运行工况如表3。

表 2 仿真案例

Table 2 Simulation Case Table

案例	$K_1/\%$	$K_2/\%$
1	30(直接接入)	0
2	15(等容量替换)	50
3	20(等容量替换)	50
4	10(直接接入)	0

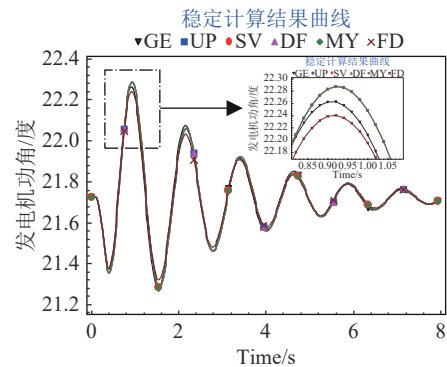


图 5 6种风机模型功角特性曲线

Fig. 5 Angle characteristic curve of six kinds of induction generator models

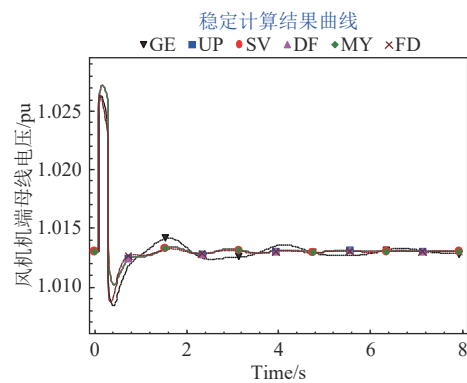


图 6 6种风机模型电压特性曲线

Fig. 6 Voltage characteristic curve of six kinds of wind turbine model

表 3 运行工况

Table 3 Operating conditions

影响因素	$K_1/\%$	$K_2/\%$
K_1 (直接接入)	/	50
K_1 (等容量替换)	/	50
K_2	10	/

分析风电比例对系统暂态功角稳定性的影响时,通过研究发现DFIG并网的方式对含风电电力系统的暂态功角稳定性的影响结果存在差异,所以考虑DFIG直接接入和DFIG等容量替换同步机有功出力两种风机并网方式,并分别展开研究。

计及3种DFIG模型,考虑两种影响因素的含双馈风电系统的极限切除角推导结果分别如表4、表5、表6所示。表7为风电比例分别为 $K_1=10\%$ 、 $K_1=15\%$ 时,系统的加速面积和减速面积。

表4 不同风电比例(直接接入)下暂态稳定水平
Table 4 Transient stability level under different direct access wind power ratios

影响因素 K_1 (直接接入)/%	$\delta_{cm}/(^{\circ})$		
	GE	DF	FD
10	133.56	147.09	146.51
15	122.04	126.13	125.71
20	113.40	112.42	112.15
25	108.01	104.85	104.71

表5 不同风电比例(等容量替换)下暂态稳定水平
Table 5 Transient stability level of different wind power ratio under equal capacity replacement

影响因素 K_1 /%(等容量替换)	$\delta_{cm}/(^{\circ})$		
	GE	DF	FD
10	124.46	124.51	124.44
15	128.04	128.09	128.06
20	132.91	132.99	132.90
25	153.15	153.08	153.17

表6 不同风机并网位置下暂态稳定水平
Table 6 Transient stability level under different grid-connected positions of wind turbines

影响因素 K_2 /%	$\delta_{cm}/(^{\circ})$		
	GE	DF	FD
0	64.23	64.92	64.23
20	64.38	65.06	64.39
40	64.53	65.2	64.55
60	64.70	65.34	64.71

表7 不同风电比例(直接接入)加减速面积
Table 7 Accelerate and decelerate area under different wind power ratio directly connected

K_1 (%)	$S_{加}$	$S_{减}$
10%	107.11	132.03
15%	94.902	119.45

由表4可知,含3种DFIG模型的系统极限切除角推导结果显示:随着直接接入风电比例的增加,系统的极限切除角均逐渐减小,即不利于系统的暂态功角稳定性。

以GE双馈风机直接接入风电比例 $K_1=10\%$ 、 $K_1=15\%$ 为例,由式(13)、式(14)分别求解

两种情况下的加速面积 $S_{加}$ 和减速面积 $S_{减}$ 。

$$S_{加} = \int_{\delta_0}^{\delta_{cm}} (P_0 - P_{2m} \sin \delta) d\delta \quad (13)$$

$$S_{减} = \int_{\delta_{cm}}^{\delta_h} (P_{3m} \sin \delta - P_0) d\delta \quad (14)$$

由表5可知,随着风机等容量替换同步机风电比例的增加,分别含3种DFIG模型的系统极限切除角均逐渐增加,极限切除角越大,系统的暂态功角稳定性越好,即风机等容量替换同步机风电比例的增加,有利于系统的暂态功角稳定性。

根据表6可知,随着风机并网位置越靠近无穷大系统端,含双馈风电系统的极限切除角逐渐缓慢增加,即随着风机并网位置越靠近无穷大系统端,越有利于系统的暂态功角稳定性。

由表7可知,随着风电比例的增加,加速面积和减速面积均减小,但是减速面积的减少量大于加速面积的减少量,系统的暂态稳定性减弱。

3 仿真实验

在PSD-BPA中搭建含DFIG扩展单机无穷大系统的仿真模型,选定的3种DFIG模型单机容量均为1.5 MW,额定电压为0.69 kV,同步发电机1的电压为16.5 kV,发电机动能为4364 MW/S。仿真模型中同步机组模型采用E'恒定的发电机模型,负荷采用恒阻抗模型,三种DFIG模型均考虑了风机的低电压穿越能力。仿真验证采用同步发电机功角差作为评价系统暂态功角稳定性优劣的指标。

3.1 直接接入风电比例

在PSD-BPA中分别搭建三种类型的DFIG直接接入系统的仿真模型,保持同步机有功出力不变,风电接入前后同步机惯量不变。仿真工况与理论分析相对应,在此不再赘述,仿真结果分别见图7、图8、图9所示。

由图7、图8、图9可知,含3种风机模型的系统功角差均呈现如下规律:随着直接接入风电比例的增加,系统的同步机功角差逐渐增大,不利于系统的暂态功角稳定性,仿真结论与理论推导一致。

3.2 DFIG等容量替换同步机

在PSD-BPA中分别搭建含3种DFIG模型的等容量替换同步发电机的仿真模型,保持系统总有功出力不变,风电接入前后同步机惯量不变。仿真工况与理论分析相对应,仿真结果分别见图10、图11、图12所示。

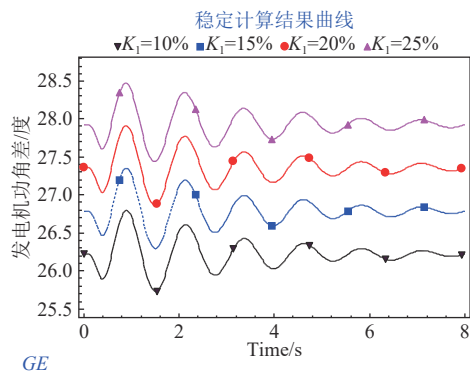


图 7 GE 风机直接接入系统发电机功角差

Fig. 7 Generator angle difference of directly grid-connected

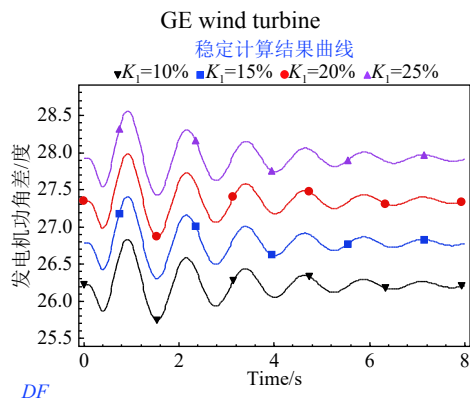


图 8 DF 风机直接接入系统发电机功角差

Fig. 8 Generator angle difference of directly grid-connected

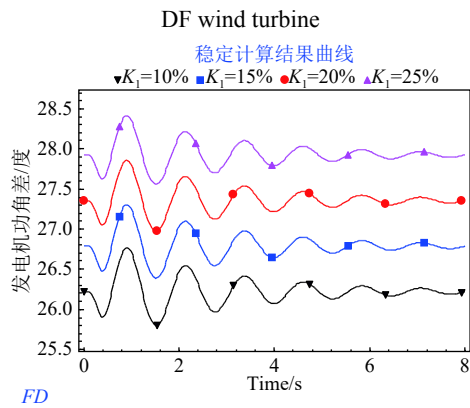


图 9 FD 风机直接接入系统发电机功角差

Fig. 9 Generator angle difference of directly grid-connected FD wind turbine

由图 10、图 11、图 12 可知，双馈风机等容量替换同步机有功出力情况下，含 3 种风机模型的系统的功角差均呈现如下规律：随着风电比例的增加，系统的同步机功角差逐渐减小，有利于系统的暂态功角稳定性，仿真结论与理论推导一致。

3.3 风机并网位置

在 PSD-BPA 中分别搭建含 3 种 DFIG 模型系

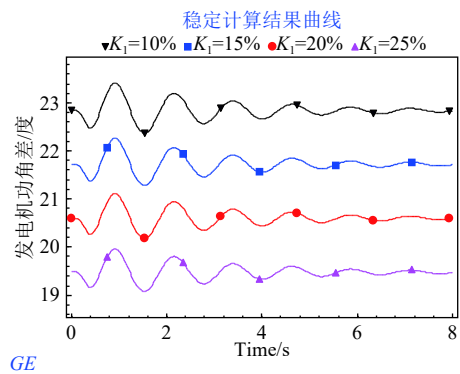


图 10 GE 风机等容量替换发电机功角差

Fig. 10 Generator angle difference of GE induction generator with equal capacity replacement

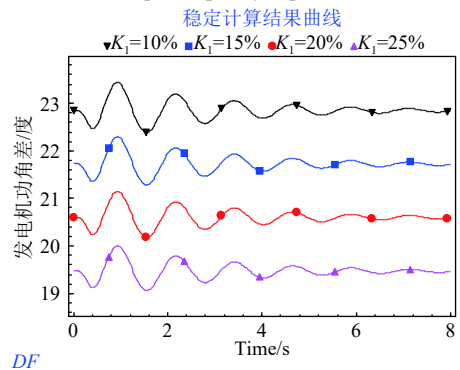


图 11 DF 风机等容量替换发电机功角差

Fig. 11 Generator angle difference of DF induction generator with equal capacity replacement

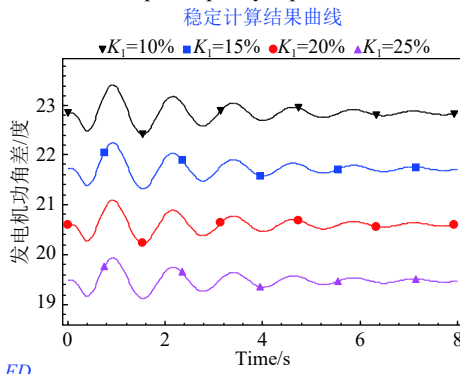


图 12 FD 风机等容量替换发电机功角差

Fig. 12 Generator angle difference of FD induction generator with equal capacity replacement

统风机并网位置不同时的仿真模型，仿真工况与理论分析相对应，仿真结果分别见图 13、图 14、图 15 所示。

由图 13、图 14、图 15 可知，随着风机并网位置越靠近无穷大系统端，系统的发电机功角差均呈现逐渐减小的趋势，即系统的暂态功角稳定性变好，仿真结论与理论推导一致。

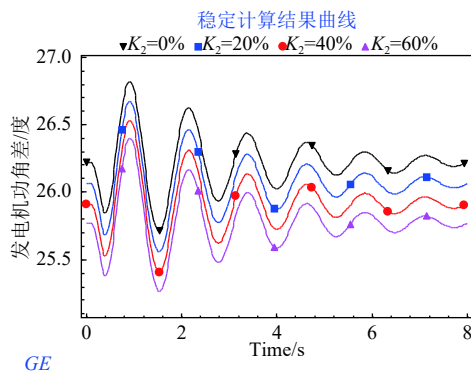


图 13 考虑 GE 风机并网位置发电机功角差

Fig. 13 Generator angle difference considering grid-connected position of GE induction generators

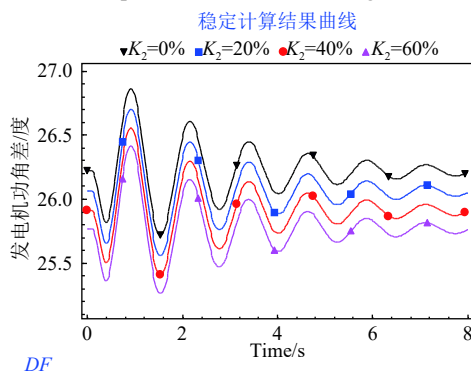


图 14 考虑 DF 风机并网位置发电机功角差

Fig. 14 Generator angle difference considering grid-connected position of DF induction generators

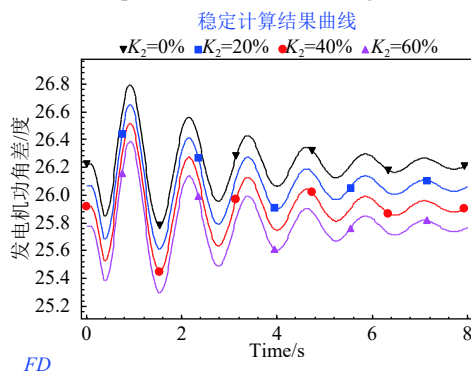


图 15 考虑 FD 风机并网位置发电机功角差

Fig. 15 Generator angle difference considering grid-connected position of FD induction generators

综上所述,各个影响因素对含双馈风电电力系统暂态功角稳定性影响分析的理论推导与仿真分析结论对比如表 8 所示。

4 结论

不对称短路故障下,对含 DFIG 电力系统的

表 8 理论仿真对比分析

Table 8 Contrastive analysis of Theoretical Simulation

影响因素	GE	DF	FD	三种风机模型结果
K_1 (直接接入)	√	√	√	一致
K_1 (等容量替换)	√	√	√	一致
K_2	√	√	√	一致

(表中√表示理论推导与仿真结果结论一致)

暂态功角稳定性进行了研究,通过理论推导以及仿真验证,得到结论如下:

1) DFIG 接入系统,不改变同步机有功出力时,随着直接接入风电比例的增加,减弱了含 DFIG 的扩展单机无穷大系统的暂态功角稳定性。

2) DFIG 接入系统,改变同步机有功出力,系统总有功出力不变时,等容量替换风电比例越大,含 DFIG 的扩展单机无穷大系统的暂态功角稳定性越好。

3) 风机接入位置越靠近无穷大系统,系统的暂态功角稳定性越好。

4) 含 3 种不同 DFIG 模型的电力系统所显示的理论分析与仿真验证表明含双馈风电系统的极限切除角求解方法的适用性良好。

参考文献

- [1] 刘斯伟,李庚银,周明.基于PSCAD的双馈风电机组暂态等值模型研究[J].现代电力,2016,33(2):64-69.
Liu Siwei, Li Gengyin, Zhou Ming. Research on a transient equivalent modelling of doubly-fed induction generator based on PSCAD [J]. Modern Electric Power, 2016, 33(2): 64-69 (in Chinese).
- [2] 陈汉杰,罗毅,张磊.DFIG虚拟惯量控制对电力系统暂态稳定性的影响[J].现代电力,2018,35(4):66-71.
Chen Hanjie, Luo Yi, Zhang Lei. Influence of doubly-fed induction generator inertia control on power system transient stability [J]. Modern Electric Power, 2018, 35(4): 66-71 (in Chinese).
- [3] 芦亮.风电并网对电力系统暂态稳定的影响[D].湖北:华中科技大学,2014.
- [4] 范高锋,赵海翔,戴慧珠.大规模风电对电力系统的影响和应对策略[J].电网与清洁能源,2008,24(1):44-48.
Induction generator Gaofeng, Zhao Haixiang, Dai Huizhu. The impact of large-scale wind power on power system and its countermeasure [J]. Power Grid

- and Clean Energy, 2008, 24(1): 44 - 48 (in Chinese).
- [5] 李媛媛, 孙自安, 张志刚, 等. 大规模风电机组集中接入对系统短路电流的影响 [J]. 中国电力, 2018, 51(4): 33 - 38.
Li Yuanyuan, Sun Zian, Zhang Zhigang, *et al.* Impact of centralized access of large-scale wind turbines on system short-circuit current [J]. Electric Power, 2018, 51(4): 33 - 38 (in Chinese).
- [6] 李建锋, 韩琴, 刘战礼. 基于风电机组分群的风电可靠性评价方法研究 [J]. 中国电力, 2018, 51(6): 136 - 143.
Li Jianfeng, HanQin, LiuZhanli. Research on wind power reliability evaluation method based on wind turbine component group [J]. Electric Power, 2018, 51(6): 136 - 143 (in Chinese).
- [7] 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.
Lin Li, Yang Yihan. Transient stability analysis of power system with large-scale wind farms based on extended equal-area rule [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(12): 105 - 110 (in Chinese).
- [8] 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(12): 3399 - 3405.
YuQiang, Sun Huadong, Tang Yong, *et al.* Effect of doubly-fed wind turbine access on power angle stability of power system [J]. Power System Technology, 2013(12): 3399 - 3405 (in Chinese).
- [9] 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, XueAncheng, ZhengYuanjie, *et al.* Effect of doubly-fed centralized wind power access on transient power angle stability [J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 875 - 881 (in Chinese).
- [10] 杨琦, 张建华, 李卫国. 电力系统接入风电场后的暂态稳定分析 [J]. 高电压技术, 2009, 35(8): 2042 - 2047.
Yang Qi, Zhang Jianhua, Li Weiguo. Transient stability analysis of power system after connecting to wind farm [J]. High Voltage Technology, 2009, 35(8): 2042 - 2047 (in Chinese).
- [11] 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.
LuoXuzhi, Yi Jun, Zhang Jian, *et al.* Combining DFIG power characteristics to study the influence of wind power integration on power angle stability of power system [J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3401 - 3407 (in Chinese).
- [12] 林润. 大规模风电并网系统暂态稳定分析及控制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [13] 姜惠兰, 吴玉璋, 周照清, 等. 含双馈风力发电场的多机系统暂态功角稳定性分析方法 [J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 999 - 1005.
Jiang Huilan, Wu Yuzhang, Zhou Zhaoqin, *et al.* Transient power angle stability analysis method for multi-generator systems with doubly fed wind farms [J]. Journal of Electrical Engineering of China, 2018, 38(4): 999 - 1005 (in Chinese).
- [14] 李立新, 陈得治, 陈树勇, 等. 风火打捆外送下风电对电网暂态失步的影响分析 [J]. 可再生能源, 2017, 35(6): 884 - 892.
Li Lixin, Chen Dezhi, Chen Shuyong, *et al.* Analysis of the influence of wind power on transient out-of-step of power grid under wind-fire bundling [J]. renewable energy, 2017, 35(6): 884 - 892 (in Chinese).
- [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(09): 85 - 94.
Zhang Xuejuan, Wu Shuijun, Sun Shiyun, *et al.* Impact on limit clearing angle with doubly-fed induction generator connected to power system [J]. Electric Machines and Control application, 2019, 46(09): 85 - 94 (in Chinese).
- [16] 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): 1325 - 1334.
MouPentao, ZhaoDongmei, Wang Jiacheng. Mechanism analysis of the impact of large-scale wind power access on power angle stability [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1325 - 1334 (in Chinese).

收稿日期: 2019-03-16

作者简介:

张雪娟 (1994), 女, 硕士研究生, 从事含风电电力系统稳定性分析研究, E-mail: 982328600@qq.com;

孙士云 (1981), 女, 通信作者, 副教授, 从事含风电电力系统稳定性分析研究, E-mail: 422416503@qq.com;

郑新宇 (1989), 男, 硕士研究生, 从事含风电电力系统稳定性分析研究, E-mail: 274015227@qq.com;

赵伟 (1994), 男, 硕士研究生, 从事含风电电力系统稳定性分析研究, E-mail: 1129991656@qq.com;

王春又 (1996), 女, 硕士研究生, 从事风电场送出线路保护研究, E-mail: 1005850903@qq.com.