

风轮机 - 双馈感应发电机 (DFIG) 接入电网流行的原理分析与稳定特征研究

曾庆禹

中国电力科学研究院, 北京 100192

The Analysis on Original Principle and Study on Stability Character of Wind Turbine Doubly-Fed Induction Generator Integrated to Grid

Zeng Qingyu

China electrical power research institute, Beijing, 100192

ABSTRACT: In this paper the original working principle of the wind turbine- doubly-fed induction generator is analyzed. Then the working principle of the wind turbine- doubly-fed induction generator and stability character are studied based on its real construction and its real physic model. It can be seen from the result of the analysis and study that the the original principle of the wind- turbine doubly-fed induction generator are not agree with the. electromagnetic induction theory and electric circuit theory of generator, and transmission principle of the mechanical power for the wind turbine- induction (asynchronous) generator.

The wind- turbine doubly-fed induction generator is also induction generator. The Sf current on its rotor does not produce rotating electromagnetic field like synchronous generator. The doubly-fed induction generator is not equivalent to synchronous generator. There is no possibility of "doubly-fed" electric power from the stator and rotor of doubly-fed induction generator to the grid. It is the main resource for wind- turbine doubly-fed induction generator cascade out away from grid, that its electric-magnetic power is proportional to U_s^2 . The various frequency currents produced by doubly-fed induction generator are important resources of sub synchronous oscillation(SSO) and sub synchronous resonance(SSR) on the wind farm integrated to grid. The performance and economy of doubly-fed induction generator is not better than induction generator.

KEY WORDS: wind turbine; doubly-fed induction generator; original principal; grid; stability character

摘要: 首先分析了风轮机 - 双馈感应发电机 (DFIG) 流行的原理。接着基于真实的物理结构及异步和感应物理模型其等值电路首次进行了风轮机 - 双馈感应发电机 (DFIG) 原理和稳定性特征的研究。从分析流行的原理和基于真实的物理结构及异步和感应物理模型开展的研究结果可以看出: 风轮机 - 双馈感应发电机流行的原理不符合感应 (异步)

发电机电磁感应原理和等值电路理论。风轮机 - 双馈感应发电机 DFIG 仍然是感应 (异步) 发电机。双馈感应发电机 DFIG 的转子绕组的 Sf 电流不可能产生交流旋转磁场, 不能等同于同步发电机。双馈感应发电机 DFIG 不可能定转子向电网 "双馈" 电。电磁功率与机端电压成正比是风轮机 - 双馈感应发电机 DFIG 连锁脱网的主要根源。GSC-D-RSC 对转子绕组 Sf 电流控制引起电磁元件饱和产生次同步功率振荡 (SSO) 是风轮机 - 双馈感应发电机 DFIG 接入电网次同步功率谐振 (SSR) 的重要根源。它的性能和经济性不可能好于感应 (异步) 发电机。

关键词: 风轮机; 双馈感应发电机; 流行的原理; 电网; 稳定特征

引言

"碳达峰, 碳中和" 目标的实现, 在电力能源领域必须大力提升以可再生、新能源发电替代传统的化石能源发电, 构筑新型电力系统。全球风能资源非常丰富, 可转化为电功率的风电功率大约为 1.26×10^9 MW, 相当于目前全球总能源消费功率的 20 倍。风能发电正在成为新型电力系统 "源网荷" 的重要组成部分。^[1]

风电场的主力机组多为感应 (异步) 发电机或线绕式转子结构感应发电机为基础的双馈感应发电机 (doubly-Fed Induction Generator 简称 DFIG)。

感应发电机和双馈感应发电机 DFIG 构成的风电场的建设和投入运行进入二十一世纪发展迅速。二十多年来, 感应发电机和双馈感应发电机 DFIG 构成的风电场接入电网面临低电压和高电压脱网连锁反应, 发电机引发次同步功率振荡 (SSO) 和次同步功率谐振 (SSR), 严重危及新型电力系统安全稳定运行。这类安全稳定事故发生的频次远高于

传统的同步发电机的同步电网。高频次的稳定事故引起了国内外业界的高度关注。不少文献，如参考文献 [2][3][4][5][6][7][8][9] 等对现场稳定事故作了简要介绍，又对稳定事故以直接或间接用同步机概念进行了初步分析研究。从双馈感应发电机 DFIG 的真实物理和异步物理特性研究双馈感应发电机 DFIG 构成的风电场接入电网的安全稳定特征，至今未检索到此类文献。本文进行的研究可以说是首次研究。

本文根据阐明双馈感应发电机 (DFIG) 工作原理的参考文献 [10][11][12][13][14][15][16][17] 及其大量的双馈感应发电机接入电网运行性能分析中包含的机组的原理叙述，分析研究风轮机-双感应发电机 DFIG 构成的风电场接入电网的稳定运行问题，特别是稳定特征问题。这种研究对按经济高效安全原则选择构成风电场主力风能机组是十分必要的，对推进高效安全的新型电力系统发展亦具有重要意义。

本文首先介绍目前流行的风轮机-双馈感应发电机组风轮机 DFIG 的原理，并应用感应 (异步) 发电机电磁感应原理及其等值电路对风轮机-双馈感应发电机 DFIG 流行的原理进行分析。接着，基于风轮机-双馈感应发电机 DFIG 的实际结构和符合感应 (异步) 发电机电磁感应原理的物理模型及等值电路，研究双馈感应发电机 DFIG 电磁功率模型、风轮机-DFIG 接入电网静态、暂态稳定性模型。然后从风轮机-DFIG 真实原理出发研究风轮机-双馈感应发电机 DFIG 接入电网的稳定事故根源。

研究表明：风轮机-双馈感应发电机 DFIG 的电磁功率和转子运动方程均是转差率 S 的函数，本身没有励磁电源，励磁电流来自外部，表明它仍然是感应 (异步) 发电机。双馈感应发电机 DFIG 转子绕组的 Sf 电流不能产生交流旋转磁场，它的运行性能不可能等同于同步发电机。”双馈”电是在违背感应发电机电磁功率平衡转子机械功率原理推导而来，是不可能实现的。电磁功率与机端电压 U_s^2 成正比是风轮机-双馈感应发电机 DFIG 连锁脱网的主要根源，GSC-D-RSC 对转子绕组 Sf 电流控制引起电磁元件饱和产生次同步功率振荡 (SSO) 是风轮机-双馈感应发电机 DFIG 接入电网次同步功率谐振 (SSR) 的重要根源，已为运行实践所证实。

1 风轮机-双馈感应发电机 DFIG 目前流行的基本原理与分析

1.1 双馈感应发电机 DFIG 流行的基本原理性结构

文献 [9][10][11][12] 是专门介绍风轮机-双馈

感应发电机工作原理的文献。国内外大量研究风轮机-双馈感应发电机组是接入电网运行性能研究的文献也含有 DFIG 的类似工作原理说明。文献 [9][10][11][12] 给出的双馈感应 (异步) 发电机以等值电路表示的原理性结构，如图 (1)、(2)、(3)，所示。图 1 线绕式转子感应 (异步) 发电机等值电路图。图中 S 为异步电机的转差率， $S=(W_s - W_r)/W_s$,

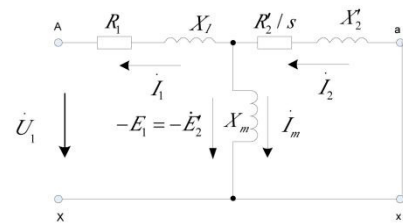


图 1 线绕式转子感应 (异步) 发电机等值电路图
Fig. 1 Equivalent circuit diagram of wire wound-rotor induction (asynchronous) generator

图 2 是双馈感应发电机 DFIG 等值电路。

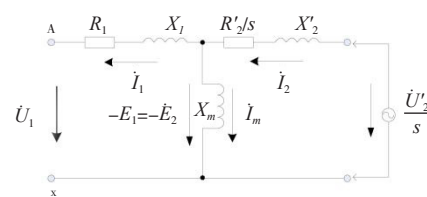


图 2 DFIG 等值电路图
Fig. 2 DFIG equivalent circuit diagram

图 2 中转子侧各电气量已转换至定子侧电压， U_2/s 为 U_2 经频率率转换的 Sf 电压。双馈感应发电机 DFIG 就是原感应 (异步) 发电机三相对称转子绕组外接到 Sf 电压源的异步发电机。

图 3 是风轮机-双馈感应发电机 DFIG 转差频率电压的供电路径。转差频率电压由异步发电机端电压经电压源背靠背换流逆变器 (GSC-D-RSC) 供电并控制。转差频率电压的路径，同时还是 DFIG “双馈” 馈电路径。

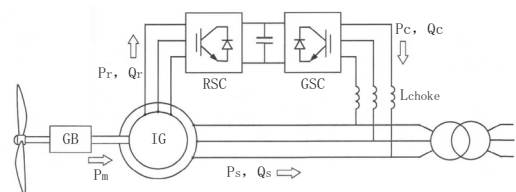


图 3 风轮机-双馈感应发电机 DFIG Sf_1 频率供电路径和“双馈”馈电路

Fig. 3 Wind turbine - doubly fed induction generator DFIG Sf_1 frequency power supply path and “doubly fed” feeder circuit

图 3 中， P_s ， P_r 为定子和转子输出有功功率，

Q_s , Q_r 为定子和转子输出无功功率, GB 为变速齿轮箱, IG 为感应 (异步) 发电机。

1.2 双馈感应发电机 DFIG 流行的交流旋转磁场原理与分析

1.2.1 流行的原理

文献 [11] 还给出了另一个双馈感应发电机 DFIG 的工作原理, 即是: “在转子的三相对称绕组中通入转差频率 (Sf_1) 的电流”, $S = (n_1 - n) / n_1$, “三相对称转子绕组的差频 (Sf_1) 电流形成差频磁场”, “三相对称转子绕组的差频磁场构成旋转速度 n_2 的交流旋转磁场”, 它的转速 n_2 与可变机械转速 n 构成同步频率转速 n_1 , “ $n + n_2 = n_1$ ”。“双馈感应发电机 DFIG 如同同步发电机一样, 在定子绕组感应出同步频率电势”。DFIG 便成为同步发电机。

1.2.2 交流旋转磁场原理分析

1) DFIG 实际运行时, 三相转子绕组的差频交流磁场随转子同速 n 旋转, 不存在单独的 n_2 旋转速度。2) 三相定转子产生的电磁力矩方向是沿定转子气隙圆周切线方向, 其综合力矩为旋转力矩。三相转子绕组的差频 Sf 交流磁场的等值相量方向指向圆的径向方向, 不能形成类似同步发电机样的交流同步磁场。3) 文献 (10) 直接将发电机认定为机端电压恒定的同步发电机, 文献 (11) 还将发电机经过 dq0 转换、隐形转化为机端电压恒定的同步发电机, 所设定的 q 轴具有随意性。4) 目前, 在风轮机 - 双馈感应发电机 DFIG 接入电网的有功无功控制和稳定分析与控制中, 无一例外不是将 DFIG 模型以不同方法转化为等效同步机模型。以这种模得到的分析和控制结果的真实可信性尚未有物理仿真检验。分析认为: DFIG 交流旋转磁场理论, 变感应为同步, 均缺乏理论根据和实际应用的精准可信度的物理仿真检验。

1.3 风轮机 - 双馈感应发电机 DFIG 流行的”双馈”电原理与分析

1.3.1 现流行的原理。

文献 [9][10][11][12] 及相关文献认为: 风轮机双馈感应发电机 DFIG 可分别在定、转子绕组产生有功功率和无功功率, 通过如图 2 所示的 GSC-D-RSC 通道形成”双馈”馈电系统。

文献认为定子的电磁转矩 T_e 等于转子机械转矩 T_m 。转子电磁功率 P_r 便可表示为如式 (1) 所示:

$$P_r = P_m - P_s = T_m W_r - T_e W_s$$

$$= -T_m \left(\frac{W_s - W_r}{W_s} \right) W_s = -ST_m W_s = -SP_s \quad (1)$$

式中: $S = (W_s - W_r) / W_s$, P_m 为转子机械功率。然后由式 (1) 可导出定子电磁功率 P_s 和 P_r 和转子机械功率的关系, 如式 (2) 所示:

$$P_{ss} = P_m / (1 - S), P_r = -SP_m / (1 - S) \quad (2)$$

最后得出结论: $P_m = P_s + P_r$ 双馈感应发电机 DFIG 输入的的机械功率等于定转子电磁功率之和

1.3.2 双馈电原理分析。
1) 在前述推导中, 设定 $T_e = T_m$, 违背了发电机电磁功率与转子机械功率平衡原理。2) 设定发电机定转子功率 P_s 和 P_r 违背了感应发电定、转子交流电磁场相互作用产生唯一电磁功率的基本原理。3) GSC-D-RSC 同时完成 Sf 供电控制和双馈电控制也是相当困难的。

分析认为: 双馈电是不可能实现的。

1.4 风轮机 - 双馈感应发电机 DFIG 流行的感应工作原理与分析

1.4.1 流行的感应工作原理。

文献 [9][10][11][12] 给出的双馈感应 (异步) 发电机 (简称 DFIG) 的理念是: 定子绕组的 f_1 工频电流在转子绕组感应出 Sf_1 转差频率电流, 转子绕组 Sf_1 电流在定子绕组感应出 f_1 电流。

文献给出了如图 4 所示的 DFIG 等值相量图。它是双馈感应发电机 DFIG 流行的工作原理的主要表述, 是双馈感应发电理念的集中表现。

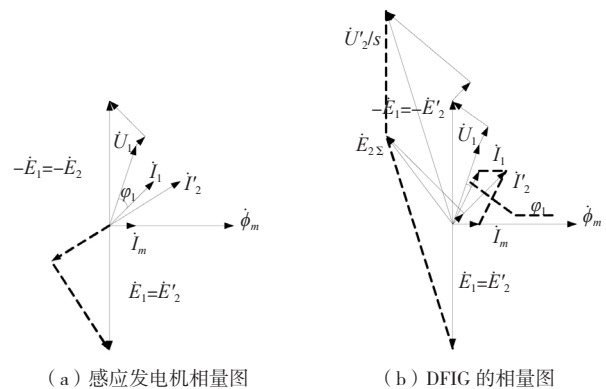


图 4 DFIG 的相量图

Fig. 4 Phasor diagram of DFIG

由图 4 (b) 相量图可以看出: 变换器 (GSC-D-RSC) 的转差频率输出电压 U_2 进入转子回路后变成 U_2' / S , 使转子绕组 Sf 差频电流在定子绕组的感应电势大大高于机端电压。这样, 如文献所述可以改变机端电压电流相位, 实现有功无功独立调节或有功无功的解耦控制。 U_2 / S 是其原理的关键。

1) 流行的工作原理分析。

① U_2 是由机端电压经 GSC-D-RSC 交交变换

而得。根据 GSC-D-RSC 的脉宽调制 (PWM) 原理, U_2 最大值不可能大于 $0.7U_s$ 。从 U_2 输入转子绕组的控制原理看也不可能大于 $U_2(S \ll 1)$ 。因此, 转子绕组 Sf_1 差频电流不可能在定子绕组感应的电势大大高于机端电压。

②文献给出的图(一)符合感应发电机的定、转子同相同频电磁感应原理。图(一)便否定了前述的 DFIG 发电机电磁感理念。

③转子的 Sf_1 大电流值但 DFIG 不能稳定运行, 而且将引起发电机电磁回路处于严重磁饱和状态, 产生次同步频率诱发, 次同步功率振 (SSO)

④文献给出的 DFIG 的相量图(四)将 Sf_1 电势相量与原定子 f_1 电势绘在同一相量图上违背了发电机基本电路原理, 并且不能计算发电机电磁功率。

分析认为: 流行的双馈感应发电机 DFIG 电磁感应原理存在原理性问题, 不能反映 DFIG 的电磁功率与其机端电压 U_s^2 成正比的本质特性。本文后续将论述, 这个本质特征是形成风轮机-DFIG 连锁脱网的根源。

2 双馈感应发电机 DFIG 电磁功率模型及其计算

2.1 DFIG 电磁功率模型

由于流行的工作原理未给电磁功率表达式, 下面将根据 DFIG 的真实结构建立其电磁功率模型。DFIG 电磁功率等于定转子感应频率 f_1 的电磁功率和 Sf_1 电磁感应的电磁功率之和, DFIG 等值电路在电路图(一)基础上加入 Sf_1 电路构成。定子绕组对转子绕组感应形成的 f_1 电磁功率由图1经简化的通用的等值电路图进行计算。 Sf_1 电磁功率可在图2等值电路结构基础上, 为了尽可能使 Sf_1 电流减少对发电机电磁回路饱和度的作用, 将 U_2'/S 换成 SU_2' , 电抗改为 Sf_1 电抗并进行电路图重构为新电路图进行计算。^[18]

2.2 f_1 电磁感应功率计算

f_1 电磁功率表达式可由通用的简化等值电路图5进行计算。

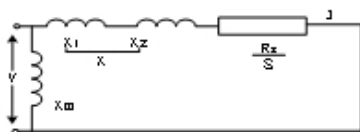


图5 f_1 电磁功率计算等值电路图

Fig. 5 Equivalent circuit diagram for f_1 electromagnetic power calculation

按等值电路, P_{f1} 的计算表达式如下

$$P_{f1} = P3I^2(R_2/S) = P3V^2R_2S/(R_2^2 + (sx)^2) \quad (3)$$

$$= PU_s^2R_2S/(R_2^2 + (sx)^2)$$

式中 U_s 为机端线电压, P 为发电机极对数

2.3 Sf_1 电磁感应功率计算

将图2所有电抗 X 变成 SX 。由于 Sf_1 电流流向电网, 拟将 SX_1 扩张到包括电网的电抗。风电场各台发电机通过串并联通常汇集于 35 kV 母线, 对于单台发电机来说 35 kV 可以看成无穷大母线。35 kV 及以上电网的 Sf_1 电抗折算到低电压 690 V 已非常小, 电网 SX_G 计算到 35 kV 升压变压器低压侧已有足够的精度。在等值电路重构基础上, 忽略电阻 R_1 , 并进行电路转换, 得到如图6所示的 Sf_1 电磁功率计算等值电路图

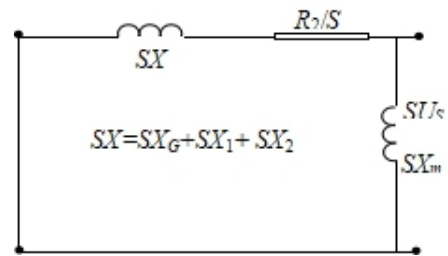


图6 Sf_1 电磁功率计算等值电路图

Fig. 6 Equivalent circuit diagram for Sf_1 electromagnetic power calculation

Sf_1 电磁感应功率计算表达式如式(4)所示:

$$P_{sf1} = P3I^2(R_2/S)$$

$$= P(SU_s)^2(R_2/S)/((R_2/S)^2 + (SX)^2) \quad (4)$$

$$= PS^3U_s^2R_2/(R_2^2 + (S^2X)^2)$$

式中 $SX = SX_G + SX_1 + SX_2$, SU 为注入的 Sf_1 线电压, P 为极对数

DFIG 电磁功率 $P_e = P_{f1} + P_{sf1}$ 。从式(10)可知, 定子绕组对转子绕组电磁感应形成的电磁功率与机端电压 U_s^2 成正比。从式(11)可知, 转子绕组对定子绕组电磁感应形成的 Sf_1 电磁功率与 $S^3U_s^2$ 成正比, 在 S 的变化范围内, SU_s 与 U_s 相比小几个数量级, $S^2X \ll R_2$ 。可以认为:

$$P_{sf1} = PS^3U_s^2/R_2 \quad (5)$$

将式(4)与(5)比较。不难看出: $P_{f1} \gg P_{sf1}$ 。因此, DFIG 电磁功率可认为等于定子绕组对转子绕组电磁感应形成的电磁功率, 如式(6)所示:

$$P_e = PU_s^2R_2S/(R_2^2 + (sx)^2) \quad (6)$$

DFIG 电磁功率 P_e 与其机端电压 U_s^2 成正比, 与转子的转差率 S 相关。

DFIG 向电网送出有功功率, 同时从电网 35kV 母

线吸收无功功率, 以支持 U_s 达到确定值。DFIG 吸收的无功功率, 如式 (7) 所示:

$$Q_e = P(U_s^2 / X_m + I^2(X_1 + X_2)) \quad (7)$$

式 (6) P_e 与转差率 S 的关系可以绘出 P_e 随 S 变化的风轮机-DFIG 功率特性曲线, 如图 7 所示的 P_e 曲线。

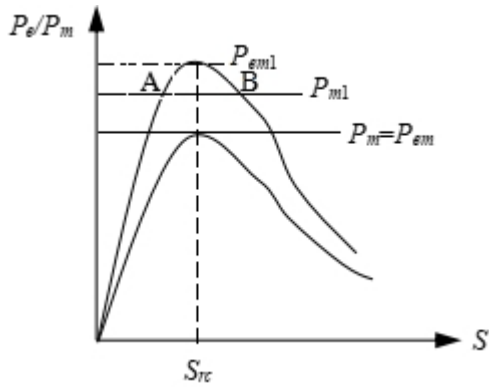


图 7 双馈感应发电机 DFIG 电磁功率特性曲线
风轮机-双馈感应发电机 DFIG 静态稳定模型示意图

Fig. 7 Electromagnetic power characteristic curve of doubly fed induction generator DFIG Schematic diagram of static stability model for wind turbine doubly fed induction generator DFIG

3 风轮机的输入输出功率和双馈感应发电机 DFIG 的机械功率计算

流入风轮机的风功率如式 (8) 所示^[13],

$$P_{T1} = (1/2) DS_w V_w^3 \quad (8)$$

风轮机的输出功率 P_T 如式 (9) 所示^[14]:

$$P_T = W_T T_{TO} = (1/2) DS_w C_p(\lambda\beta) \cdot V_w^3 \quad (9)$$

式中 D 为流入风轮机的空气密度 $D(\text{kg}/\text{m}^3)$, $S_w(\text{m}^2)$ 为风轮机叶片圆周面积, $V_w(\text{m}/\text{min})$ 为风速, $C_p(\lambda\beta)$ 为 P_T/P_{T1} 的比值, 即风轮机转化风动能(风功率)为机械功率的转化效率系数。

风轮机输出功率经齿轮箱转速变换, 形成高速旋转的齿轮箱输出功率 P_g , 如式 (8) 所示:

双馈感应发电机 DFIG 的机械功率如式 (10) 所示:

$$P_G = W_G X_{TG} = P_i - f_G W_G^2 \quad (10)$$

式中 $f_G W_G^2$ 为齿轮箱的机械功率。

输入转子的机械功率 P_m , 如式 (11) 所示:

$$P_m = (1/2) DS_w C_p(\lambda\beta) \cdot V_w^3 - f_b(1-S)^2 W_s^2 \quad (11)$$

以标么值表示, 如式 (12) 所示:

$$P_m = (1/2) DS_w C_p(\lambda\beta) \cdot V_w^3 - f_b(1-S)^2 \quad (12)$$

4.1 风轮机-DFIG 接入电网的稳定性分类

风轮机-DFIG 接入电网的稳定性可分为

1) 静态稳定性: 风速变化引起风功率变化导致 DFIG 转子输入机械功率 P_m 变化, 或电网电压

变化引起 DFIG 机端电压产生电磁功率变化所形成的稳定性。

2) 暂态稳定性: 电网对称接地故障和不对称接地故障, 或风电场汇集母线及机端低压侧或高压侧对称接地故障和不对称接地故障形成的 DFIG 低电压穿越稳定性。

3) 动态稳定: 风轮机-DFIG 的 GSC-D-RSC 对 S_f 转子绕组控制作用形成的次同步功率振荡 (SSO) 及次同步功率谐振 (SSR) 的稳定性。

4.2 风轮机-DFIG 接入电网静态稳定性模型

在图 7 双馈感应发电机 DFIG 电磁功率基础上加入机械功率及临界转差率等绘制成能表征 P_e , P_m 和 S 相互关系的曲线图, 用于静态稳定分析的曲线图, 便是其静态稳定模型。

图中, 临界转差率 S_{Cr} 如式 (13) 所示

$$S_{Cr} = R_2 / X \quad (13)$$

最大电磁功率 P_{em} , 如式 (14) 所示

$$P_{em} = P(U_s^2 / 2X) \quad (14)$$

4.3 风轮机-DFIG 接入电网暂态稳定性模型

风轮机-DFIG 接入电网暂态稳定性模型^[19] 就是其接入电网的转子运动方程。发电机通用转子运动方程, 如式 (15) 所示:

$$(J / W_s)(dW_r / dt) = P_r - P_e \quad (15)$$

对于异步发电机, $W_{r2} = (1-S)W_s$, 将其代入式 (18), 则得到式 (19)

$$\left(\frac{J}{W_s}\right)(d(1-S)W_s / dt) = P_m - P_e, \quad (16)$$

$$J(d(-S) / dt) = P_m - P_e$$

在 $-S$ 取正值的情况下, 风轮机-DFIG 接入电网的转子运动方程, 如式 (17) 所示:

$$\frac{JdS}{dt} = P_m - P_e = (1/2) DS_w C_p(\lambda\beta) \cdot V_w^3 \quad (17)$$

$$-f_b(1-S)^2 - PU_s^2 R_2 S / (R_2^2 + (SX)^2)$$

式中 $J = J_r / G^2 + J_{IG}$; J_r 为风轮机转动惯量; J_{IG} 为感应发电机转动惯量; G 为齿轮转速比。

5 风轮机-DFIG 接入电网的稳定特征研究

5.1 风轮机-DFIG 接入电网静态稳定特征研究

首先讨论风轮机-DFIG 接入电网的静态稳定性及其与相关参数的关联性, 从图 7 可以看出: 电磁功率与机械功率平衡在 A 点运行是稳定的, 而在 B 点, 大于临界转差率 S_{Cr} , 运行是不稳定的。随着机械功率的增加, 导致稳定裕度减少, 运行稳定性变差。当机械功率等于电磁功率最大值 P_{em} 时, 转子旋转达到临界转差率 S_{Cr} , 风轮机-DFIG

运行进入临界稳定性。转子旋转超过临界转差率 S_{CT} ，风轮机-DFIG将不可逆脱网。当机端电压降低，电磁功率最大值 P_{em} 减少到等于机械功率，转子旋转达到临界转差率 S_{CT} ，风轮机-DFIG运行同样进入临界稳定性，超过临界转差率 S_{CT} ，风轮机-DFIG同样将不可逆脱网。

由式(16)可知，DFIG的电磁功率最大值 P_{em} 与机端电压 U_s^2 成正比， U_s 的降低显著降低 P_{em} ，从而显著地增加风轮机-DFIG静态脱网风险。

如前所述，风电场的风轮机-DFIG经升压变压器升至35kV后串并联接入35kV汇集母线。在35kV恒定电压条件下，经潮流计算可得到风电场各机组的 U_s 值。由式(16)算出各机组的 P_{em} 值，以测得风电场的风速空间分布数据，估算各机组的 P_m ，可估计风电场的风轮机-DFIG脱网风险。35kV汇集母线电压受全网运行电压的影响而波动，在重负荷情况下，35kV母线运行电压受影响而降低。这将进一步降低机组 U_s ，从而进一步增加风电场机组静态脱网的风险。

5.2 风轮机-DFIG接入电网暂态稳定特征研究

风轮机-DFIG接入电网是否暂态稳定可应用风轮机-DFIG转子运动方程式(20)求解各-DFIG机的差频率 S 随时间的变化曲线，当变化曲线收敛，表明系统稳定，不存在低电压脱网问题，否则表明系统不稳定，存在低电压脱网。由于风速变化形成的转子机械功率变化过程的时间大于机电暂态过程，在暂态稳定计算时，设定机械功率为常数、风电场风轮机-DFIG接入电网的暂态稳定求解过程与多机同步电网求解功角稳定性类似。通过暂态稳定计算和判别分析，可评估风电场风轮机-双馈感应发电机DFIG低电压连锁脱网问题。

下面仅定性讨论单个风轮机-DFIG低压侧故障风电连锁脱网问题。单个风轮机-DFIG低压侧故障将引起35kV母线运行电压降低。远离35kV母线的风轮机-DFIG低压侧故障可使35kV母线运行电压降低较少，而接近接入35kV母线的风轮机-DFIG低压侧故障时，35kV母线运行电压降低严重。在35kV母线运行电压降低较少的情况下，只有少数远离35kV母线的风电场非故障风轮机-DFIG的机端电压 U_s 和最大电磁功率 P_{em} 降低到脱网的临界状态。在35kV母线运行电压降低严重情况下，风电场非故障风轮机-DFIG的机端电压 U_s 和最大电磁功率 P_{em} 的严重降低可使相当多的机组在不同时间进入或超过脱网临界状态，而

形成风电场大规模风轮机-DFIG连锁脱网。单个风轮机-DFIG对称和不对称接地故障存在连锁脱网风险。由于DFIG转子机械功率 P_f 随风功率的随机变化，快速切除接地故障机将大大降低风轮机-DFIG脱网故障机组引发连锁脱网风险。

5.3 风轮机-DFIG接入电网次同步功率振荡(SSO)及次同步功率谐振(SSR)动态稳定特征研究

风轮机-DFIG的GSC-D-RSC对 S_f 转子绕组控制作用过强，将使转子绕组 S_f 电流过大，双馈感应电机系统：出现电磁饱和，产生高于 S_f 频率的次同步或超同步功率振荡。在一定的控制条件和双馈感应电机接入电网一定的运行条件下，风电场电网系统呈现零阻尼运行状态将产生持续等幅的次同步功率振荡。如果风电场电网系统呈现负阻尼运行状态将产生增幅型次同步或超同步振荡的动态不稳定，危及整个风电场的安全稳定运行。这种风电场次同步振荡与外部电网某些电气元器件产生谐振，便可产生次同步谐振(SSR)，如果整个电力系统运行呈现零阻尼或负阻尼将出现持续的次同步谐振的动态不稳定，危及整个电力系统安全运行

5.4 风轮机-DFIG接入电网稳定问题突出的根源

综合以上静态稳定和暂态稳定及动态稳定特征的讨论，风轮机-DFIG接入略电网稳定问题突出的主要根源是：

1) DFIG的电磁功率 P_e 包括最大电磁功率 P_{em} 与机端电压 U_s^2 成正比，机端电压 U_s 降低将显著降低电磁功率，形成 $P_m > P_{em}$ ，导致转差率 $S > S_{ct}$ ，形成静态失稳和暂态失稳，机组脱网。

2) DFIG的机端电压 U_s 不能自主确定和控制，由35kV汇集母线按潮流分布决定各机机端电压 U_s ，造成风电场内各机组定子端电压 U_s 的明显差异，35kV母线电压在重负荷和电网故障情况下将明显降低，将加剧 U_s 低的机组形成 $P_m > P_{em}$ ，导致转差率 $S > S_{ct}$ ，造成机组脱网，进一步发展形成DFIG机组连锁脱网。

3) DFIG的特点是向电网发出有功，同时从电网吸收无功，吸收的无功随发出的有功而增加，机组吸收无功是保持机端电压恒定的条件。机组串并联接入汇集母线结构形态，使各机组机端电压 U_s 关联度强。单一机组从电网吸收无功，吸收的无功随发出的有功而增加，机组吸收无功是保持机端电压恒定的条件。机组串并联接入汇集母线结构形态，使各机组机端电压 U_s 关联度强，单一机组输入无功的变化可引起关联机组端电功率明显下降。

从而促进 DFIG 机组连锁脱网。

4) 风轮机-DFIG 的 GSC-D-RSC 对 Sf 转子绕组的控制作用是风场和电网的等幅或增幅次同步和超同步同步功率振荡 (SSO) 及次同步谐振 (SSR) 的不稳定性的主要根源

6 结论

本文的分析和研究可以得出供讨论的如下结论:

1) 风轮机-双馈感应发电机 DFIG 的电磁功率和转子运动方程均是转差率 S 的函数, 本身没有励磁电源, 励磁电流来自外部, 表明它仍然是感应(异步)发电机;

2) 双馈感应发电机 DFIG 转子绕组的 Sf 电流不能像同步发电机那样产生交流旋转磁场, 它的运行性能不可能等同于同步发电机;

3) ”双馈”电是在违背感应发电机电磁功率平衡转子机械功率原理推导而来, 是不可能实现的。

4) 电磁功率与机端电压 U_s^2 成正比是风轮机-双馈感应发电机 DFIG 连锁脱网的主要根源, GSC-D-RSC 对转子绕组 Sf 电流控制可引起电磁元件饱和和产生次同步功率振荡 (SSO) 是风轮机-双馈感应发电机 DFIG 接入电网次同步功率谐振 (SSR) 的重要根源, 己为运行实践所证实。

风轮机-双馈感应发电机 DFIG 接入电网的运行性能和经济性不可能优于传统的感应(异步)发电机。

参考文献

- [1] 康俊杰, 赵春阳, 周国鹏, 赵良. 风光水火储多能互补示范项目发展现状及实施路径研究 [J]. 发电技术, 2023, 44(3): 407-416.
- [2] 贺益家, 胡家兵双馈异步风力发电机并网运行中的几个热点问题, 2012年9月25日 Vol32 No 7, 中国电机工程学报
- [3] 高本峰, 张学伟, 李忍 大规模风电送出系统的次同步振荡问题研究综述, 2015 10(7)1-10, 中国电机工程学报
- [4] Adams.J Carter.C ERCO Texperince with sub synchronous control interacting in vicinity of series capacitor bank, IEEE Power and Energy Society general meeting .2012.PP1-5
- [5] 董晓, 田旭, 张勇等沽源风电场串补输电系统次同步振荡典型事件及影响因素分析, 2017, 43{1}: 321-328 高电压技术
- [6] B.Badrzadch, M.Shania, Y Zou General methodology for analysis of sub synchronous Interaction in wind power plant IEEE Trans on power systems 2013 28(2): 1858-1869
- [7] 大规模风电并网次同步振荡 <https://baik.baidu.com/item/大规模风电并网次同步振荡 /21516805>
- [8] Rue Melicio, Vict M.F Characterization of sbsynchronous oscillation with wind farm using describing function, IEEE Trans. Power system cdol. Co 1109/TPWRS 2009
- [9] Lwang, X.xie, Review of emerging SSO/SSR and their clasication, The journal of engineering Vol2017 PP1666-1670 2017
- [10] S.Muller,.M.Deickl &Rik.W, De Doncker Doubly fed induction generator system for wind turbines , IEEE Industry application magazine may 2002
- [11] 李铮, 郭小江, 申旭辉, 等. 我国海上风电发展关键技术综述 [J]. 发电技术, 2022, 43(2): 186-197.
- [12] Dr.Johm Fletcher and Jin Yang Introduction to doubly-fed induction generator for wind power application 25.8.2018 <htts://www.intechpen.com>
- [13] 第七章双馈风力发电机工作原理 <https://max.book118.com/html/2019/0725/6001142015002051shtm、>
- [14] 双馈异步发电机工作原理 <https://max.book118.com/html/20211015/7055130604021shtm>
- [15] Rorbert Thresher, Michael Robinson, Paul Veers Wind energy technology: current status and R&D future <http://www.ntis.gov/ordering.htm>
- [16] 陆彬, 高山, 李德胜. 基于发电机运行实际的电力系统日前动态无功优化研究 [J]. 发电技术, 2021, 42(1): 122-130.
- [17] WeiTong Chapter1Fundamentals of windenergy <https://www.witpress.com/secure/elibrary/papers/4781845642051001FU1.pdf>
- [18] 康佳乐, 余浩, 段瑶, 等. 风电场次同步振荡等值建模方法研究 [J]. 发电技术, 2022, 43(6): 880-891.
- [19] 余潇, 卜广全, 王姗姗. 风电经柔直孤岛送出交流暂态过电压抑制策略研究 [J]. 发电技术, 2022, 43(4): 618-625.



曾庆禹

收稿日期: 2023年8月18日。

作者简介:

曾庆禹(1939), 男, 教授级高级工程师, 主要研究方向: 电力系统运行与控制, 特高压电网, 智能电网, 新能源发电。

E-mail: qyzeng39@139.com。

曾任中国电科院副院长和中国电机工程学会秘书长