

Influence of DFIG on Transient Power Angle Stability of Power System

Xiaodong Tian¹, Tao Qin², Yujuan Qi¹, He Nie¹, Li Wang³

¹State Grid Tianjin Cable Company, Tianjin

²State Grid Tianjin Economic Research Institute, Tianjin

³State Grid Tianjin Chengxi Electric Power Supply Company, Tianjin

Email: 285861875@qq.com

Received: Nov. 12th, 2019; accepted: Nov. 29th, 2019; published: Dec. 6th, 2019

Abstract

Due to the randomness, intermittence and non controllability of wind power station, the access of large-scale wind power will change the original power flow distribution and the inertia of the whole system. These will have an impact on the transient stability of the power system after the wind power is connected to the grid. This paper analyzes the power characteristics of a doubly-fed wind turbine after it is connected to a power system. This paper also studies the transient power angle stability of doubly-fed wind turbine connected to single ended power transmission system, and analyzes the impact on the stability of the system transient power angle.

Keywords

Doubly-Fed Wind Turbine, Transient Stability, Power Angle Characteristics, Power Angle Stability

双馈风电机组接入对电力系统暂态功角稳定性的影响

田笑冬¹, 秦 涛², 齐玉娟¹, 聂 赫¹, 王 立³

¹国网天津电缆公司, 天津

²国网天津经研院, 天津

³国网天津城西供电分公司, 天津

Email: 285861875@qq.com

收稿日期: 2019年11月12日; 录用日期: 2019年11月29日; 发布日期: 2019年12月6日

文章引用: 田笑冬, 秦涛, 齐玉娟, 聂赫, 王立. 双馈风电机组接入对电力系统暂态功角稳定性的影响[J]. 电力与能源进展, 2019, 7(6): 118-126. DOI: 10.12677/aepe.2019.76014

摘要

风力发电所固有的随机性、间歇性和不可调控性等特点，导致大规模风电的接入会使系统原有的潮流分布及整个系统的惯量发生改变。这些都会对风电并网后的电力系统的暂态稳定性产生影响。本文分析了双馈风电机组接入电力系统后的功率特性，在此基础上研究了双馈风电机组接入单端送电系统后的暂态功角稳定性，并且对系统暂态功角稳定性的影响进行了分析。

关键词

双馈风电机组，暂态稳定，功角特性，功角稳定

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来，随着风电应用越来越广泛，而且风电机组与传统机组有不同的动态特性和控制技术，加上风力发电所固有的随机性、间歇性和不可调控性等特点，使得风电并网对电力系统稳定性的影响越来越突出。因此研究风电并网对电力系统暂态功角稳定性的影响是非常有意义且必要的。由于运行速度范围较广、发电效率较高、对电网波动影响较小，双馈风电机组是如今较为流行且在风电装机容量中占据比例较大的变速恒频风电机组，近年来双馈风电机组无论是在单机容量方面，还是风力发电总量在电力系统中所占的比例都在不断增长。

由于风电机组自身的特殊性以及双馈机组独特的励磁控制策略，使其在暂态过程中呈现出与常规同步发电机组不一样的特性。此外，双馈型风力发电机可在较大范围下实现变速运行，其定子电气量与转子机械量之间近乎实现解耦运行，使得双馈风电机组对外不体现转动惯量，这都将会给电力系统的运行特性带来新的变化。因此对双馈风电机组模型的准确建立是分析和研究双馈风电机组接入下电网功角稳定性的关键。

2. 双馈风电机组的基本结构与数学模型

2.1. 基本结构

双馈机组发电的整个过程是由风轮的转动来进行的，风轮的转动带动发电机转子旋转并在变频器和相应控制系统的调节作用下进行并网发电，从而实现风能到电能的变换。

双馈发电机组的控制系统分为电气控制系统和桨距角控制系统两部分。桨距角控制系统通过改变风轮叶片的桨距角优化风力机的功率输出，同时在风速超出额定风速时限制风力机的机械功率。电气控制部分主要通过调节换流器交流侧电压实现对风电机组转子转速和有功无功的解耦控制，一方面能够将风速波动产生的机械功率波动转化为转子动能，减低对齿轮箱和电网的冲击，另一方面能够调节无功输出提高机组功率因数，并能在动态过程控制无功功率以支持电网电压[1] [2]。

2.2. 数学模型

双馈风电机组是双馈风力发电系统的关键设备，其动态行为直接关系到与其并联的电力系统的稳定

性。因此,准确而完善的双馈风电机数学模型是分析风电机接入对电力系统暂态功角稳定性影响的关键。

双馈电机是一个高阶、强耦合、非线性的多变量系统,在对其数学模型进行推导前通常作如下规定和假设:

- 1) 电机定、转子绕组三相对称。
- 2) 双馈电机磁路关于直轴 d 和交轴 q 对称,且 q 轴超前 d 轴 90° 。
- 3) 绕组中的电流在空间和气隙中产生的磁动势沿电枢内侧正弦分布。
- 4) 双馈电机定、转子绕组正方向采用电动机惯例,流入绕组方向为电流正方向,正的电流产生正的磁链。
- 5) 忽略谐波、忽略磁滞饱和和铁芯损耗。
- 6) 忽略温度和频率变化对电机参数的影响。

选取不同的坐标系,双馈机组有不同的数学模型,三相对称基频交流量,经过 dq 变换后可表示为在同步旋转坐标系上的直流量,从而可以使双馈系统的分析进一步得到简化。因此在分析和计算风电接入对电力系统暂态功角稳定性的影响时,一般采用 dq 坐标系。

dq 同步旋转坐标系下的数学模型如下:

定子电压方程为:

$$\begin{cases} u_{ds} = R_s i_{ds} + P\psi_{ds} - \omega_s \psi_{qs} \\ u_{qs} = R_s i_{qs} + P\psi_{qs} + \omega_s \psi_{ds} \end{cases} \quad (1)$$

电机转子电压方程为:

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} + P\psi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{qr} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + P\psi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{dr} \end{cases} \quad (2)$$

定子磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr} \\ \psi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr} \end{cases} \quad (3)$$

转子磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_{dr} = L_s i_{ds} + L_r i_{dr} \\ \psi_{qr} = L_s i_{qs} + L_r i_{qr} \end{cases} \quad (4)$$

电磁转矩方程为:

$$T_e = p(\psi_{ds} i_{qs} - \psi_{qs} i_{ds}) \quad (5)$$

对称运行时,双馈电机定子端输入的有功功率和无功功率为:

$$\begin{cases} P_s = u_{ds} i_{ds} + u_{qs} i_{qs} \\ Q_s = u_{qs} i_{ds} - u_{ds} i_{qs} \end{cases} \quad (6)$$

双馈感应风力电机的 dq 坐标系下的运动方程与三相静止坐标系的运动方程一致。

此数学模型不仅消除了因转子旋转造成的定、转子互感之间的变化,而且将定、转子各个变量从交流量变换为直流量,大大简化了双馈电机接入系统对系统暂态功角稳定性的影响分析与计算。

3. 双馈风电机组对电力系统暂态功角稳定性的影响

3.1. 双馈风电机组的外特性

双馈风电机组正常运行时通常运行在恒功率因数控制方式下，在电网故障期间以及故障恢复初期，由于双馈风电机组控制系统的调节作用，其通常会向系统产生一定容量的无功功率，故障清除后期恢复为恒功率因数运行方式。双馈风电机组的机械部分和电气部分能够实现解耦运行，其对系统通常不体现转动惯量。

因此，作为一种新的发电方并入电网，双馈机组主要通过其外特性的变化对系统产生影响。

1) 故障发生前以及故障恢复后的后期双馈风电机组的等效外特性故障发生前以及故障恢复后期，双馈风电机组运行在恒功率因数运行方式下，其等效外特性为一恒定的负电阻 $-r$ 。

2) 故障期间以及故障恢复后的前期双馈风电机组的等效外特性。

假设 $t = t_0$ 时，电网发生故障导致极端电压幅值跌落到 hU_s ，忽略电网频率波动以及转子电流项，可得

$$\dot{\psi}_s = \frac{h\dot{U}_s}{\omega_s} + (1-h)\frac{\dot{U}_s}{\omega_s} e^{-(R_s/L_s + j\omega_s)t} \quad (7)$$

根据双馈风电机组功角特性，可得总的机端有功功率为：

$$P_g = -(1-s)\frac{E'U_s}{x'} \sin \delta_g \quad (8)$$

由于定、转子电抗、与励磁电抗数值相差不大，且转子电流指令值通常小于定子电流，数值较小，因此可忽略转子磁链中转子电流指令值项[3]。则不考虑定子磁链暂态过程可得：

$$\begin{cases} \dot{\psi}_s = \frac{h\dot{U}_s}{\omega_s} \\ \dot{\psi}_r = \frac{L_m}{L_s} \cdot \frac{h\dot{U}_s}{\omega_s} \end{cases} \quad (9)$$

则双馈风电机组有功功率等效外特性为：

$$r = u_s^2 / p_g = -\frac{u_s^2}{(1-s)\frac{e'u_s}{x'} \sin \delta_g} = -\frac{\psi_s x'}{(1-s)\frac{L_m}{L_r} \psi_r \sin \delta_g} \approx -\frac{x'}{\sin \delta_g} \quad (10)$$

同理基于线路无功功率传递方程可将双馈风电机组无功功率外特性等效为一负的电抗 x ，则有：

$$x = u_s^2 / q_g = -\frac{u_s^2}{\frac{(e')^2}{x'} - \frac{e'u_s}{x'} \cos \delta_g} \approx -\frac{x'}{1 - \cos \delta_g} \quad (11)$$

因此可知，故障期间以及故障切除后前期双馈机组的等效外特性为：

$$\begin{cases} r = -\frac{x'}{\sin \delta_g} \\ x = -\frac{x'}{1 - \cos \delta_g} \end{cases} \quad (12)$$

由上式可知，双馈风电机组的等效外特性的大小与其功角的大小有直接关系。由定、转子磁链方程可知，

定子磁链空间矢量与转子磁链空间矢量都取决于定子、转子之间的电流量，由于定、转子电感以及励磁电感在数值上即为接近，因此暂态过程中定、转子空间矢量之间的角度差在暂态过程中相差并不大，即暂态过程中 DFIG 的功角的数值变化在一定范围内，通常为 $0^\circ \sim 90^\circ$ [4]。

3.2. 双馈风电机组接入对同步发电机组功率特性的影响

1) 故障发生前以及故障恢复后期双馈风电机组接入后同步机组的功率特性

由上节分析可知，故障发生前以及故障恢复后期双馈风电机组等效为一电阻 $-r$ ，如图 1 所示。因此根据电力系统的电磁功率特性关系可知：

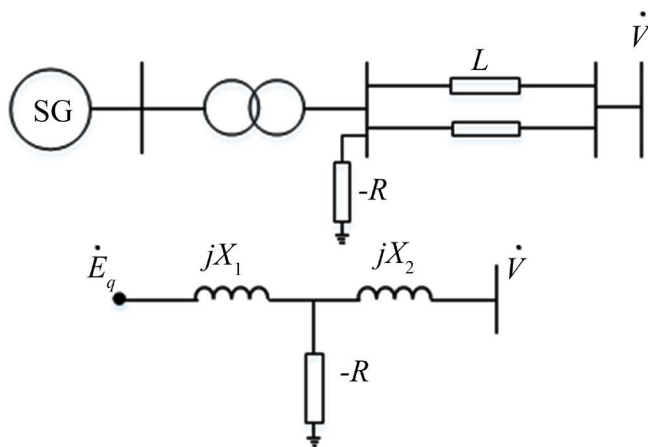


Figure 1. Schematic diagram of single end power transmission system
图 1. 单端送电系统示意图

$$P_{Eq} = \frac{E_q^2}{|Z_{11}|} \sin \alpha_{11} + \frac{E_q V}{|Z_{12}|} \sin (\delta - \alpha_{12}) \quad (13)$$

其中， Z_{11} ， Z_{12} 分别为送端同步机组自阻抗以及转移阻抗； α_{11} ， α_{12} 分别为自阻抗以及转移阻抗相应阻抗角的余角。由于 α_{11} 小于 0 ， α_{12} 大于 0 ，因此较双馈风电机组接入前的同步机组功角特性，双馈风电机组接入后同步发电机组的功率特性曲线向右向下移动。如图 2 所示：

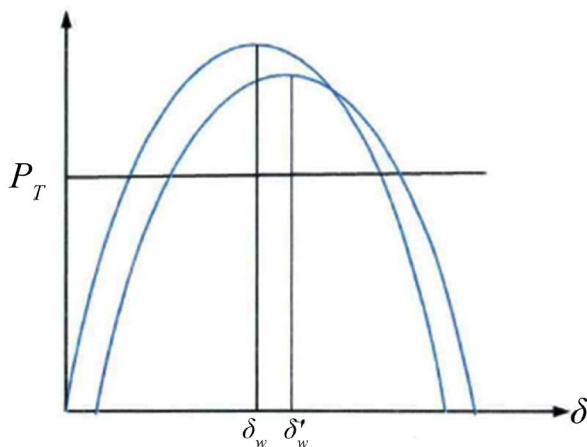


Figure 2. Schematic diagram of power characteristic curve of synchronous unit after DFIG is connected
图 2. 双馈风电机组接入后同步机组的功率特性曲线示意图

2) 故障期间以及故障恢复初期双馈风电机组接入后同步机组的功率特性单端送电系统示意图如图 3 所示。

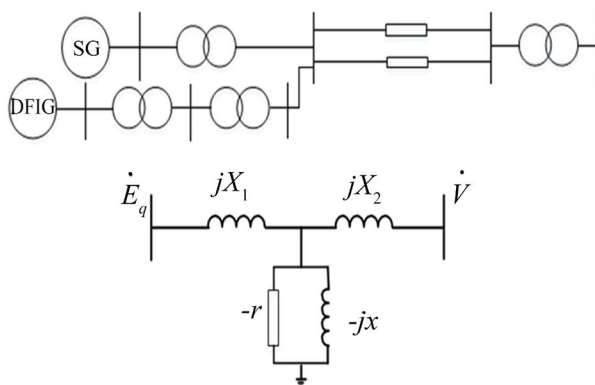


Figure 3. Including DFIG single terminal power transmission system
图 3. 含 DFIG 单端送电系统

双馈风电机组等效外特性可知:

$$z = X_1 X_2 \left(\frac{1}{r} - j \frac{1}{x} \right) = \frac{X_1 X_2}{x} (\sin \delta_g - j(1 - \cos \delta_g)) \quad (14)$$

则由式(13)可得向量图如图 4 所示:

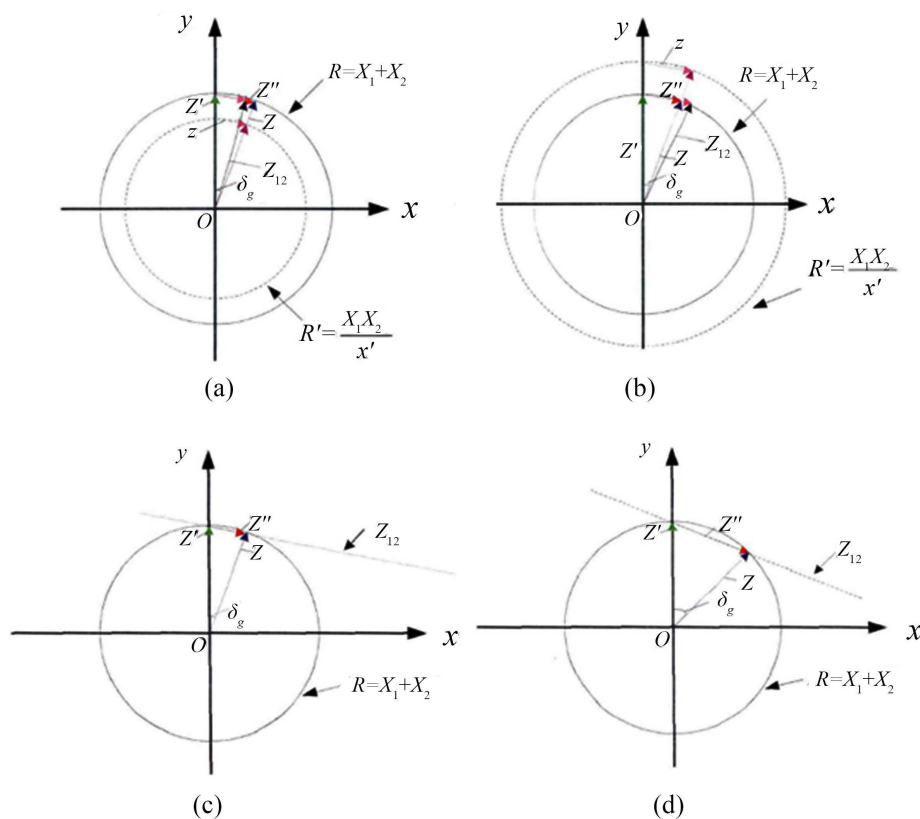


Figure 4. Transfer impedance vector diagram
图 4. 转移阻抗向量图

由图可知, 在以半径为的相量圆上有:

$$Z = Z' + Z'' \quad (15)$$

则有:

$$\begin{cases} Z = Z' e^{-j\delta_g} \\ Z'' = (X_1 + X_2) \sin \delta_g + j(X_1 + X_2)(1 - \cos \delta_g) \end{cases} \quad (16)$$

因此, 电抗 X_2 的大小将直接影响到送端系统的功率特性。当电抗 X_1 较小时, 送端系统的转移阻抗 Z_{12} 也落在半径为 $|X_1 + X_2|$ 的圆内, 其转移阻抗模值较双馈机组接入前同步电机的转移阻小, 进而改善了送端系统的功率特性, 见图 4(a)所示; 相反, 当线路电抗较大时, 送端系统的转移阻抗将落在半径为 $X_1 + X_2$ 的圆外, 恶化了送端系统的功率特性, 见图 4(b)所示。随着线路电抗 X_2 的逐步增大, 送端系统的转移阻抗 Z_{12} 将沿着图 4(c)中的虚线变化, 即从半径为 $|X_1 + X_2|$ 的圆内向圆外运动[5]。当电力系统发生故障时, 双馈风电机组在暂态期间功角随之增大, 送端系统的转移阻抗落在半径为 $|X_1 + X_2|$ 的圆内区域也将随之增大, 此时, 转移阻抗模值进一步得到减少, 送端系统的稳定裕度得到提高, 送端系统能够迅速恢复稳定, 如图 4(d)所示。

通常, 火电机组的同步电抗 x_d 取值为 1.0~2.3, 双馈机组等效电抗 x 取值为 0.8~1.2, 而线路电抗 X_2 远小于发电机电抗以及双馈机组等效电抗。可知转移阻抗相量位于半径为 $|X_1 + X_2|$ 的圆内区域, 因此可得转移阻抗模值也较双馈机组接入之前小。可得故障期间以及故障恢复初期, 双馈机组接入系统后提高了送端系统的功率极限, 增加了功率极限角, 同时增加了同步机组的起始功角。

3.3. 并网 DFIG 与系统暂态功角稳定模式的交互影响

系统暂态功角稳定性的研究对象主要为系统内同步发电机组的功角—转速暂态行为特性, 围绕同步发电机的转子运动方程和同步发电机间的互同步稳定化制展开。暂态功角失稳有两种表现形式: ① 非周期失稳, 主要取决于与系统同步为矩相关的系统故障后第一、二摇摆的稳定性; ② 振荡失稳, 主要取决于与系统阻尼力矩相关的系统振荡模式的稳定性[6]。

基于本章对并网 DFIG 暂态行为特征的分析, 对于并网 DFIG 而言, 其与系统暂态功角稳定模式的交互影响体现为:

1) 从并网 DFIG 的角度来看, 并网 DFIG 的功率输出特性和自身的暂态运行失稳机制都是主要取决于其机端电压的跌落程度和变流器控制系统的控制策略及其暂态稳定性, 而与系统内同步发电机组的转速和转子角的暂态行为没有直接关联, 因此实现了强机电解耦的并网 DFIG 在系统暂态过程中不像传统同步发电机组一样直接受到系统暂态功角稳定模式的制约。

2) 从电网的角度来看, 并网 DFIG 通过交流励磁实现了转子机械量与发电机定子电气量的解耦, 使得并网 DFIG 不能像同步发电机一样为同步系统提供直接的惯性支持, 因此并网的 DFIG 的转速信息和等效功角既无法直接反映 DFIG 的稳定状态, 而对于系统内的同步发电机组构造互同步稳定机制也没有直接的物理意义。

由上述分析可以认为, 在系统暂态过程中, 并网 DFIG 与系统内同步发电机组既不构成互同步稳定化制, 彼此间也不存在转子相对摇摆的概念。并网 DFIG 通过其功率输出特性影响系统内同步发电机的暂态功率响应, 进而影响系统内同步发电机的转子运动情况和功角稳定性, 是其参与影响系统暂态功角稳定的基本方式。

3.4. 双馈风电机组接入下的单机系统暂态功角稳定分析

双馈机组接入前, 系统始端发生三相瞬时接地短路故障后, 等效为在始端通过 0 阻抗直接接地, 此

时送端系统功率特性曲线为 0。故障清除后, 送端系统的功率特性曲线恢复为故障发生前的功率特性[7]。

评估双馈风电机组接入后送端系统的暂态稳定性, 主要是评估双馈机组接入对送端系统功率特性的影响。由上一节分析可知, 双馈风电机组接入系统后改善送端系统的功率特性。双馈风电机组接入后送端系统的面积定则如图 5 所示。

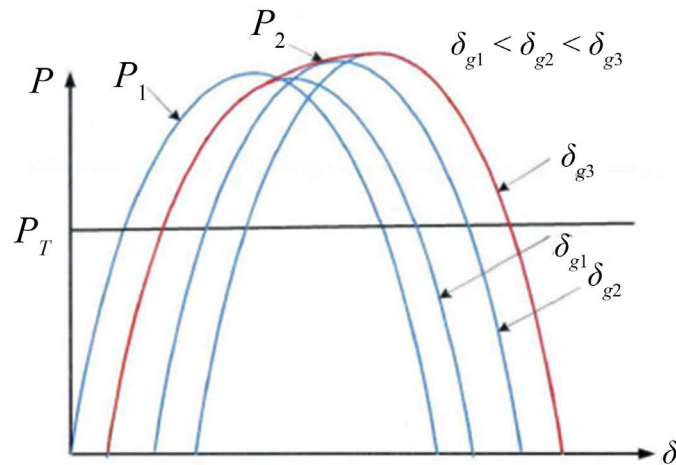


Figure 5. Schematic diagram of power characteristics of DFIG connected to the back-end system
图 5. 双馈风电机组接入后送端系统的功率特性示意图

由于线路电抗较小, 送端系统功率特性曲线右移, 且功率极限增加, 减速面积增加, 送端系统易于稳定[8]。此外, 随着暂态期间双馈机组功角的增加, 送端系统功率特性曲线继续向右移动, 功率极限也不断增加, 进一步增加了送端系统的减速面积, 进而送端系统能够快速恢复其功角稳定, 此时, 送端系统的功率曲线如图 5 与图 6 中的曲线 P_2 所示。

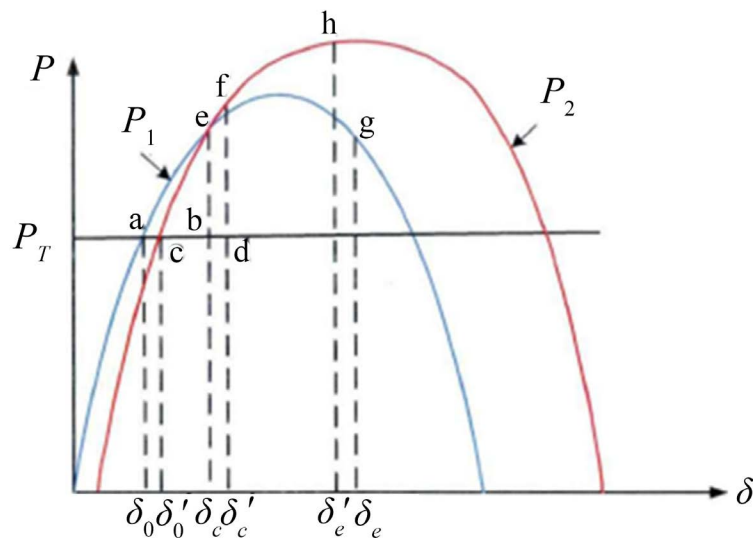


Figure 6. Equal area rule of sending end system during and before fault clearing
图 6. 故障期间以及故障清楚前期送端系统的等面积定则

双馈风电机组接入系统后, 当始端发生三相瞬时短路故障, 同步机组电磁功率降为 0, 发电机转子在不平衡功率的作用下开始从初始功角而 δ_0' 开始加速, 当功角加速到 δ_c' 时故障清除, 此时同步机组电磁

功率位于功率曲线 P_2 上 f 点, 由于电磁功率大于机械功率, 发电机转子开始做减速运动, 当转子运动到 δ'_c 时, 转子加速面积等于减速面积。转子位于同步速, 此后发电机转子反方向做加速运动。由图 6 可知, P_1 为双馈机组接入前同步发电机组的功率特性曲线, 同步机组在同样的加速面积下, 发电机转子从 δ_0 开始加速, δ_c 时故障清除, 转子开始减速,

由于此时同步机组的功率曲线 P_1 小于功率曲线 P_2 , 因此发电机转子需运动到大于 δ'_c 的 δ_c 功角位置, 其转子位于同步速, 此后在不平衡功率下开始反向加速。因此可知, 双馈风电机组接入后送端系统的第一摆角度较双馈机组接入前有所减小, 送端机组功角稳定裕度较高[9]。

故障恢复后期, 双馈风电机组接入后同步机组的功率特性曲线为中 P_3 , 考虑同等加速面积下, 双馈机组接入前同步机组平衡加速面积 hkl 的减速面积为 lno , 此时功角从 δ_a 经过稳定功角点 δ_s 转动到 δ_b 处。而双馈机组接入后同步发电机组平衡同等大小的加速面积 jkm 的减速面积为 mpq , 此时发电机功角从 δ'_a 经过稳定功角点 δ'_s 转动到 δ'_b 。由于功率曲线 P_3 小于功率曲线 P_1 , 因此可知 $(\delta'_b - \delta'_s)$ 要大于 $(\delta_b - \delta_s)$, 因此故障清除后期双馈机组接入后同步机组的功角较双馈机组接入前摆动幅度较大, 导致故障清除后的同步机组功角的阻尼比变小, 阻尼特性变差。

4. 结论

本文分析了 DFIG 的基本结构、运行原理、功率特性, 研究了 DFIG 的 dq 坐标系下的数学模型。 dq 坐标系下的数学模型的优点是: 不仅消除了因转子旋转造成的定、转子互感之间的变化, 而且将定、转子各个变量从交流量变换为直流量, 大大简化了双馈电机接入系统对系统暂态功角稳定性的影响分析与计算。数学模型不是从时域的系统运动轨迹判别稳定与否, 而是从系统能量及其转化的角度去判别系统的稳定性, 因此可快速进行系统稳定性分析, 且能给出系统的稳定程度。在此模型的基础上分析了 DFIG 的暂态功角特性。

DFIG 接入单端送电系统影响了电力系统暂态功角稳定性, 并网 DFIG 通过其功率输出特性影响系统内同步发电机的暂态功率响应, 进而影响系统内同步发电机的转子运动情况和功角稳定性, 是其参与影响系统暂态功角稳定的基本方式。

参考文献

- [1] 郝正航. 双馈风电机组的暂态行为及其对电力系统稳定性影响[D]: [博士学位论文]. 天津: 天津大学, 2011.
- [2] 李帅兵. 前端调速式风电机组并网特性研究[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
- [3] 王阔. 风火打捆外送系统暂态稳定性及控制策略研究[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
- [4] 马敏. 风电接入对电网暂态稳定性及调峰能力的影响研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [5] 邓丽. 风电并网对电力系统安全稳定的影响[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东大学, 2013.
- [6] 刘斯伟. 并网双馈风电机组对电力系统暂态稳定性的影响机理研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [7] 张竹生. 微分半动力系统的不变集[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京大学数学系, 1983.
- [8] 林旻威. 大规模风电接入对电力系统暂态稳定性影响研究综述[J]. 电气技术, 2017, 12(1): 3-8.
- [9] 杨帆. 大规模风电机组连锁脱网仿真分析及对策[J]. 电力科学与工程, 2013, 35(5): 2-7.