

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.11.022

电网扰动故障下双馈风电机组建模及模型验证^{*}

王 青^{1,2}, 程晨光², 杨 靖^{1,2}, 王杭烽², 沈 晗³

(1. 风力发电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310012; 2. 浙江运达风电股份有限公司, 浙江 杭州 310012;
3. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200444)

摘要:针对分析风电机组并网对系统稳定性影响, 需要建立风力发电机的模型的问题, 对电网扰动故障下双馈风电机组的模型进行研究, 并且开展了模型有效性验证。首先, 建立了用于电力系统仿真计算的包括电网扰动模型、双馈发电机模型、变流器模型、风轮模型、传动链模型、变桨模型、变速变桨控制模型等的双馈风电机组模型。然后以 WD77-1500 型双馈风电机组为例子, 在 Matlab/Simulink 环境下, 搭建出该机型的仿真模型, 并研究双馈风电机组在电网扰动故障下的动态响应特性; 最后, 通过分析对比模型仿真结果和现场低电压穿越测试结果, 验证了该模型的正确性和有效性。模型验证结果表明, 所搭建的风电机组模型适用于后续的风电场建模和研究对电力系统稳定性的影响, 具有重要的工程应用价值。

关键词:双馈风电机组; 低电压穿越; 模型验证; 电网故障; 变速变桨控制

中图分类号:TM614; TK8

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)11-1403-07

Modeling and model validation for DFIG wind turbines under grid voltage dip

WANG Qing^{1,2}, CHENG Chen-guang², YANG Jing^{1,2}, WANG Hang-feng², SHEN Han³

(1. State Key Laboratory of Wind Power System, Hangzhou 310012, China; 2. Zhejiang Windey Co., Ltd, Hangzhou 310012, China; 3. School of Mechatronic Engineering and Automation, Shanghai 200444, China)

Abstract: Aiming at the analysis of the influence of wind power generation on power system stability and need to establish wind power generator model the model for DFIG wind turbine under grid voltage dip was researched and the validity of the model was verified. Firstly, the model of DFIG wind turbine in Power system simulation were developed, which included variable-speed and variable-pitch control model, converter model, drive train model, pitch system model, rotor model, double-fed induction generator model, grid model and so on. Secondly, as an example, the WD77-1500 wind turbine's model was build in Matlab/Simulink software, and the dynamic response character of the wind turbine under grid fault was simulated and analyzed. Finally, the comparison result of simulation and field test verified the correctness and effectiveness of the model of DFIG wind turbine presented. Model validation results indicate that the model is suitable for the wind farm model and research on the power system stability, and has important engineering application value.

Key words: DFIG wind turbines; low voltage ride-through; model validation; grid fault; variable-speed and variable-pitch

0 引 言

风能是 21 世纪最重要的绿色可再生能源之一, 也是化石能源的重要替代能源之一, 备受世界各国的广泛关注和重视^[1-2]。近年, 我国风电装机容量迅猛增

加, 风电装机容量占电力总装机容量的比重也越来越高, 局部电网的风电装机容量甚至超过总容量的 20% 以上。而风电具有出力随机性、可调度性差等特点, 随着风电比例在电力系统比重不断增加, 电力系统稳定性问题日益严重^[3-4]。

近期, 在甘肃、河北、内蒙、东北等风电装机集中地

收稿日期: 2016-10-30

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2015BAA06B01)

作者简介: 王 青(1967-), 女, 浙江杭州人, 高级工程师, 主要从事风力发电方面的研究。E-mail: wangq@chinawindey.com

区,由于风电引起的电网事故频发。因此,国内开始加强对风电大规模并网引起电力系统稳定性问题的研究,并制定相应风电场并网导则—GB/T 19963—2011《风电场接入电力系统技术规定》,该并网导则对风电机组的低电压穿越能力、电网适应性、电能质量、功率调节特性、模型验证等都做了相应要求。

目前,国内已经具备大型风电机组低电压穿越、电网适应性、电能质量、功率调节特性的测试认证能力,并且国内已经有几十款机型经过了低电压穿越测试认证。而国内对用于电力系统仿真计算的风电机组模型研究及模型验证工作才刚刚起步。

双馈风电机组以调速范围宽,有功和无功功率可独立解耦控制等特点,成为应用最广泛的机型,占70%的市场份额以上^[5-6]。但双馈风电机组是实现低电压穿越功能及进行模型验证最困难机型之一。

本研究将开展对电网扰动故障下双馈风电机组建模仿真及模型验证工作。首先,根据双馈风电机组特点,详细分析双馈发电机模型、变流器模型、风轮模型、传动链模型、变桨模型、变速变桨控制模型等;然后,以浙江运达 WD77—1500 型双馈风电机组为例子,在 Matlab/Simulink 环境下研究双馈风电机组在电网扰动故障下的动态响应特性;最后,通过对比仿真结果和现场测试结果,验证所搭建的双馈风电机组模型的正确性和有效性。

1 电网扰动故障下双馈风电机组模型

电网扰动故障下双馈风电机组模型的组成框图如图 1 所示。

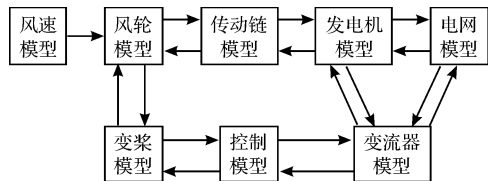


图 1 双馈风电机组模型结构框图

从图中可以看出,用于研究电网扰动故障下的双馈风电机组模型包括电网扰动模型、风速模型、发电机模型、变流器控制模型、变桨系统模型、传动链模型、风轮模型、变速变桨控制(VSPR)模块等。

1.1 电网扰动模型

电网的电压短路故障是最常见的电网故障,通过调节短路电抗 X_2 的大小,可以设置不同的电压跌落深度,测试点电压(风电机组高压出口侧电压) U_{test} 为:

$$U_{\text{test}} = U_{\text{grid}} * \frac{X_2}{X_c + X_1 + X_2} \quad (1)$$

式中: U_{grid} —外部电网电压, X_c —外部电网内阻抗, X_1 —限流电抗, X_2 —短路电抗。

当进行电网电压跌落故障模拟时,断路器 CB1、CB2、CB3、CB4 动作逻辑关系为:

- (1) 初始条件为:CB3 断开,CB1、CB2、CB4 闭合;
- (2) 步骤 1:断开 CB2;
- (3) 步骤 2:闭合 CB3,短路,电压跌落;
- (4) 步骤 3:打开 CB3;
- (5) 步骤 4:闭合 CB2。

用于模拟电网电压跌落故障的模型结构图如图 2 所示。

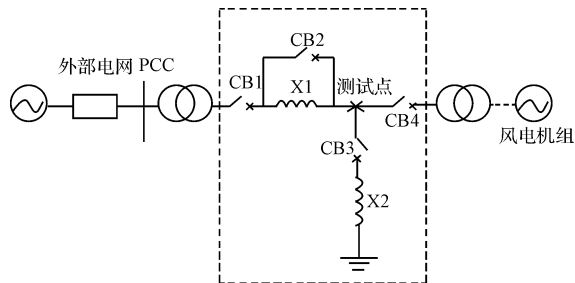


图 2 电网扰动模型结构图

1.2 风速模型

在风电机组仿真计算中,风速通常可采用湍流风模型和稳态风模型。湍流风模型能比较真实模拟自然界中风速变化情况。风速湍流模型描述主要平均风速和湍流强度,根据 GL2010 标准,10 min 平均风速为 v 的纵向风速分量的湍流强度特征值 I_v :

$$I_v = I_{15} (a + 15/v) (a + 1) \quad (2)$$

式中: I_{15} —10 min 平均风速为 15 m/s 的湍流强度特征值, a —斜率参数。

然而,在电力系统仿真计算时,为了提高仿真速度,风速通常还可以采用稳态风速模型(即风速一直保持恒定)。

1.3 双馈发电机模型

根据文献[7],感应发电机五阶暂态模型能准确用于仿真风电机组在电网扰动故障下的暂态特性,因此本研究将构建感应发电机五阶暂态模型。

为实现有功、无功的解耦控制,双馈发电机通常采用定子磁链定向的矢量控制方法。假定双馈发电机定子、转子侧电压电流正方向按电动机惯例,可得双馈发电机在 $d-q$ 同步轴系下电磁暂态的电压方程和磁链方程分别为^[8]:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_s \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_s \psi_{sd} \\ u_{rd} = R_r i_{rd} + \frac{d\psi_{rd}}{dt} - s\omega_s \psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \frac{d\psi_{rq}}{dt} + s\omega_s \psi_{sd} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = L_r i_{rd} + L_m i_{sd} \\ \psi_{rq} = L_r i_{rq} + L_m i_{sd} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $u_{sd}, u_{sq}, u_{rd}, u_{rq}$ —定子、转子电压的 d, q 轴分量; $i_{sd}, i_{sq}, i_{rd}, i_{rq}$ —定子、转子电流的 d, q 轴分量; $\psi_{sd}, \psi_{sq}, \psi_{rd}, \psi_{rq}$ —定子、转子磁链的 d, q 轴分量; L_s, L_r —定子、转子的电感; L_m —定子与转子绕组之间的互感; ω_s —坐标系统旋转角速度; s —转差率。

双馈发电机的电磁转矩为:

$$T_e = \frac{3}{2} n_p L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \quad (5)$$

式中: n_p —发电机电对数。

定子侧在 $d-q$ 同步轴系下有有功功率 P_s 和无功功率 Q_s 的如下:

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} (u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq}) \\ Q_s = \frac{3}{2} (u_{sq} i_{sd} - u_{sd} i_{sq}) \end{cases} \quad (6)$$

1.4 变流器模型

双馈变流器转子部分采用交-直-交变换器进行控制,而交-直-交变换器包括转子侧变换器和网侧变换器 2 个独立控制电压型变换器。2 个变换器的控制均采用矢量控制技术,以实现有功和无功的解耦控制。

1.4.1 转子侧控制模型

为了实现对双馈感应电机有功功率(电磁转矩和转速)和无功功率(转子励磁电流)的解耦,转子侧的变换器采用基于定子磁链定向的矢量控制,即以定子的磁链 ψ_s 的方向作为转子侧变换器矢量控制参考坐标系的 d 轴方向。

定子电压定向时,双馈机组定子输出的有功功率、无功功率与转子 d 轴、 q 轴电流的关系如下:

$$\begin{cases} P_s \approx \frac{3}{2} \frac{L_m}{L_s} U_s i_{rd} \\ Q_s \approx -\frac{3}{2} \frac{U_s}{w_1 L_s} (U_s + w_1 L_m i_{rq}) \end{cases} \quad (7)$$

根据以上公式可得,当定子电压保持恒定时,控制转子 d 轴电流实现机组有功功率控制,控制转子 q 轴电流实现机组无功功率控制,实现双馈机组的有功功率和无功功率的解耦控制,即转子侧变流器的矢量控制。

转子电流闭环控制器按照 d 轴、 q 轴分量的转子电压方程设计,如下:

$$\begin{cases} u_{rd} = R_r i_{rd} + \sigma L_r \frac{di_{rd}}{dt} - w_{slip} \left(-\frac{L_m}{w_1 L_s} U_s + \sigma L_r i_{rq} \right) \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + \sigma L_r \frac{di_{rq}}{dt} + w_{slip} \sigma L_r i_{rd} \end{cases} \quad (8)$$

整个机侧变流器的控制系统分为两个环节:功率外环控制和电流内环控制,变流器转子侧的矢量控制结构框如图 3 所示。

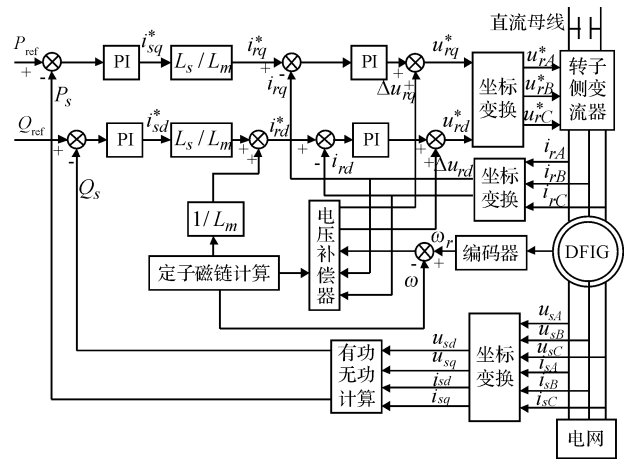


图 3 变流器转子侧矢量控制结构框图

1.4.2 网侧控制模型

为了实现网侧变换器与电网间流动的有功和无功的解耦控制,网侧变换器采用基于电网电压定向的矢量控制,即以电网电压 u_s 的方向作为网侧变换器矢量控制参考坐标系的 d 轴方向。变流器定子变换器的控制结构框图如图 4 所示。

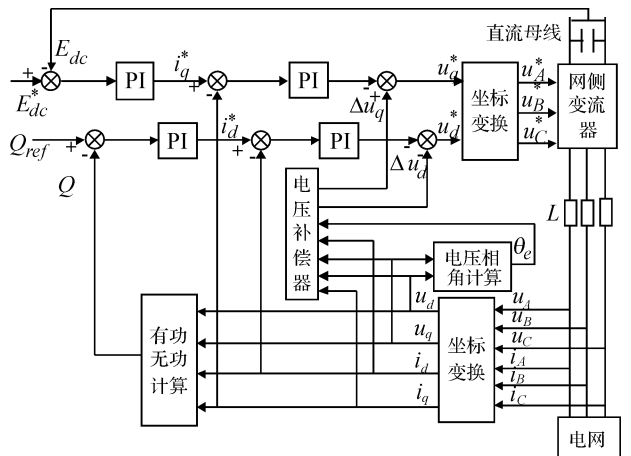


图 4 变流器网侧矢量控制结构框图

1.5 风轮模型

风电机组的风轮是将风能转化为机械能的装置,根据 Betz 理论可知,风轮从风能中捕获的功率 P_m 和气动转矩 T_m 分别为^[9]:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho S v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (9)$$

$$T_m = P_m / \omega_m = \frac{\rho S v^3 C_p(\lambda, \beta)}{2 \omega_m} \quad (10)$$

式中: ρ —空气密度; S —风轮面积; v —风速; $C_p(\lambda, \beta)$ —风能利用系数; ω_m —叶轮转速; β —节距角; λ —尖速比。

尖速比 λ 为叶尖线速度与风速之比:

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v} \quad (11)$$

式中: R —风轮半径。

由公式(9)可知,对于确定风速,风轮捕获的功率由风能利用系数 $C_p(\lambda, \beta)$ 决定,而风能利用系数 C_p 与尖速比 λ 、节距角 β 成非线性关系,可以用公式近似表示它们之间的关系^[10]:

$$C_p = (0.44 - 0.0167\beta) \sin\left[\frac{\pi(\lambda - 3)}{15 - 0.3\beta}\right] - 0.00184(\lambda - 3)\beta \quad (12)$$

风轮模型结构图如图 5 所示。

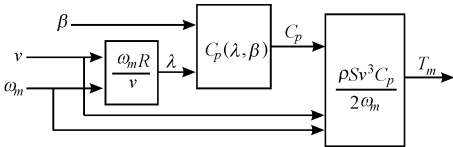


图 5 风轮模型结构图

1.6 机械传动链模型

风力发电机组的机械传动系统由风力机、低速轴、高速轴以及变速箱组成,由于传动系统机理建模非常复杂,所以对于研究电网故障扰动下的双馈机组的特性,将机械传动链简化为双质量块模型。双质量块模型是将传动轴等效为两个质量块:风力机质块和发电机质块,其中风力机质块对应于风力机转子惯量,发电机质块对应于发电机惯量(包括了变速箱惯量)。

风电机组的传动链模型通常采用双质量块模型,传动链双质量块模型的标幺值方程为^[11]:

$$\begin{cases} 2H_r \frac{d\omega_r}{dt} = T_r - K_s \theta_s - D_s(\omega_r - \omega_g) \\ 2H_g \frac{d\omega_g}{dt} = K_s \theta_s - T_g + D_s(\omega_r - \omega_g) \\ \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_0(\omega_r - \omega_g) \end{cases} \quad (13)$$

式中: H_r —风轮惯性常数, H_g —发电机惯性常数, K_s —低速轴等效刚度, D_s —低速轴等效阻尼系统, θ_s —低速轴相对扭转角, ω_g —发电机转速, T_g —发电机转矩, ω_0 —电网基准系统转速。

1.7 变速变桨控制算法(控制系统模型)

风电机组采用变速变桨控制技术的目的:在额定风速以下实现最大能量捕获,额定风速以上实现发电机输出功率稳定。

发电机转速—矩阵控制曲线如图 6 所示。

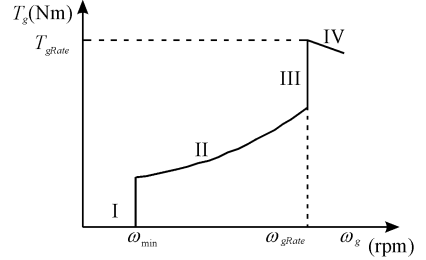


图 6 发电机转速—矩阵控制曲线

风电机组 VSPR 控制算法把发电机转速-发电机转矩控制曲线划为 4 个控制区域:

- (1) 区域 I。当风速非常小时,通过转矩控制,把发电机转速稳定在最小转速附近;
- (2) 区域 II。当风速比较小时,通过转矩控制,实现风电机组的最大能量跟踪;
- (3) 区域 III。当风速比较大时,通过转矩控制,把发电机转速稳定在额定转速附近;
- (4) 区域 IV。当风速大于额定风速时,通过变桨控制实现发电机输出功率稳定。

1.7.1 转矩控制环

风电机组运行在控制区域 I 和 III 时的转矩控制环结构框图,通过一个 PI 控制器实现转速控制恒定如图 7 所示。

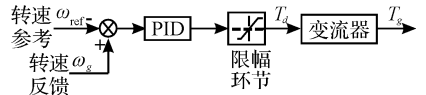


图 7 转矩控制结构框图(区域 I 和区域 III)

风电机组运行在控制区域 II 时,转矩控制环以下公式的规律进行控制:

$$T_g = k_{opt} \omega_g^2 \quad (14)$$

式中: k_{opt} —最优转矩增益系数。

1.7.2 变桨控制环

风电机组运行在控制区域 IV 时的变桨控制环结构框图,通过一个 PI 控制器实现功率输出恒定如图 8 所示。

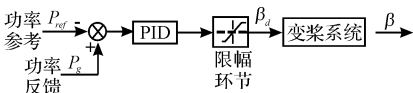


图 8 变桨控制结构框图(区域 IV)

1.7.3 传动链阻尼控制

双馈风电机组为了减少齿轮箱载荷,通过需要在转矩控制环新增一个传动链加阻器,用于增加传动链阻尼^[11],传动链加阻控制框图如图 9 所示。

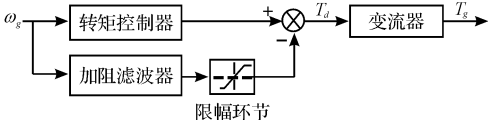


图 9 传动链加阻控制结构框图

1.8 变桨系统模型

大型风电机组变桨距系统通常采用液压控制系统,根据功率测量值和参考值产生功率偏差信号,并经过放大器后控制液压变桨机构调节。

由于大型风电机组变桨距系统的固有频率远大于风机的固有频率,可以近似地把变桨距液压系统等效为一阶系统:

β = 1 / (T_β s + 1) β_d (15)

式中:β_d— 桨距角给定指令,T_β— 一阶时间常数。

2 电网扰动故障下双馈风电机组仿真研究

以浙江运达 WD77-1500 型双馈风电机组为例子,在 Matlab/Simulink 环境下,搭建出该机型整机模型,并研究电网扰动故障下,双馈风电机组动态响应特性。WD77-1500 型机组的主要参数为:额定功率1 500 kw,风轮直径 77 m,额定风速 11.2 m/s,发电机额定转速 1 800 r/min,发电机转速运行范围 1 000 r/min - 2 000 r/min,齿轮箱速比 1:105,最佳尖速比 8.5,切入风速3 m/s,切出风速 25 m/s,额定电压 690 V(线电压),电压运行范围 0.9 Un ~ 1.1 Un,频率运行范围 47.5 Hz ~ 51 Hz,功率因素运行范围 -0.95 ~ 0.95。

假定风电机组运行在平均风速为 15 m/s 湍流风况下,在第 15 s 时刻电网高压侧(35 KV)分别发生对称 20% 电压跌落故障,故障持续 625 ms 后消除。

大风工况,对称 20% 跌落的仿真结果如图 10 所示。

从图 10 可知:

(1)当电网高压侧(35 KV)电压跌落到 20% 时,由于变压器的作用,风电机组出口低压侧电压还剩约

30% 的余压;
(2)发电机转速由于电网发生短暂故障,出现持续 4 s 左右振荡,且振荡处的最大转速约为 1 850 r/min,还处于风电机组允许运行转速范围内。

(3)桨距角在电网故障发生短路故障时,会往顺桨方向变桨,以抑制发电机转速增加,避免机组发生超速故障,而导致停机;

(4)在电网电压发生 20% 对称和不对称跌落故障的整个跌落过程,风电机组还是提供一定有功支撑,并在电网短路故障消除 2 秒后,有功出力就基本恢复正常;

(5)在电网电压发生 20% 对称和不对称跌落故障的整个跌落过程,风电机组还是提供一定无功支撑(对称跌落约 700 kVA,不对称跌落约 300 kVA),以支撑电网电压的恢复。

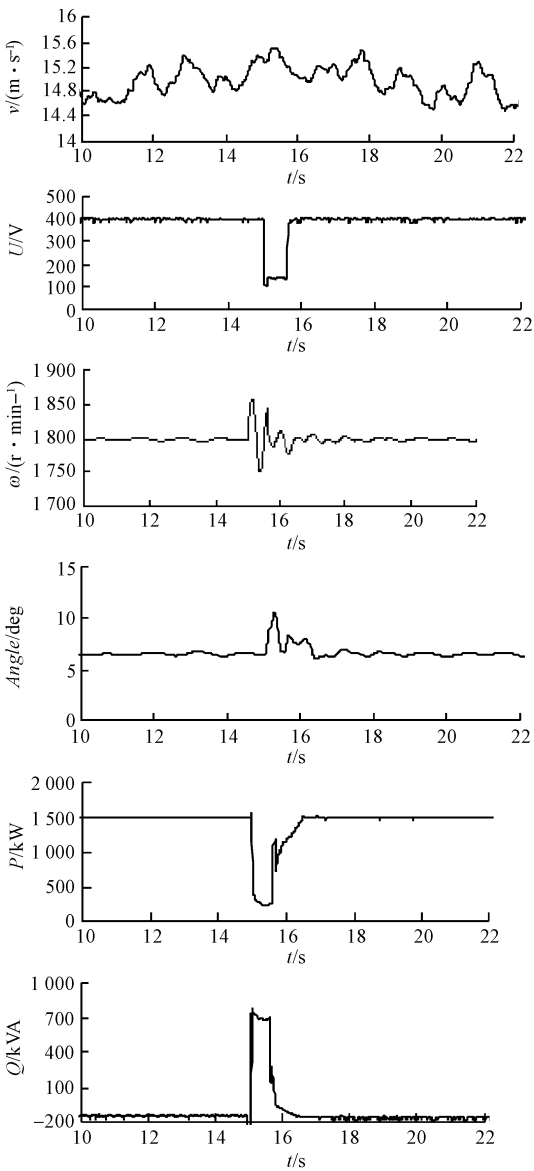


图 10 大风工况,对称 20% 跌落的仿真结果

3 双馈风电机组低电压穿越现场测试及模型验证

为了验证上述仿真模型正确性和有效性,把上述得到仿真结果与 WD77-1500 型机组现场低电压穿越测试结果进行对比研究。

大风工况对称 20% 跌落故障和不对称 20% 跌落故障情况下,风机出口电压、有功功率、无功功率、无功电流的仿真和测试对比结果(正序有效标么值)如(图 11,图 12)所示。

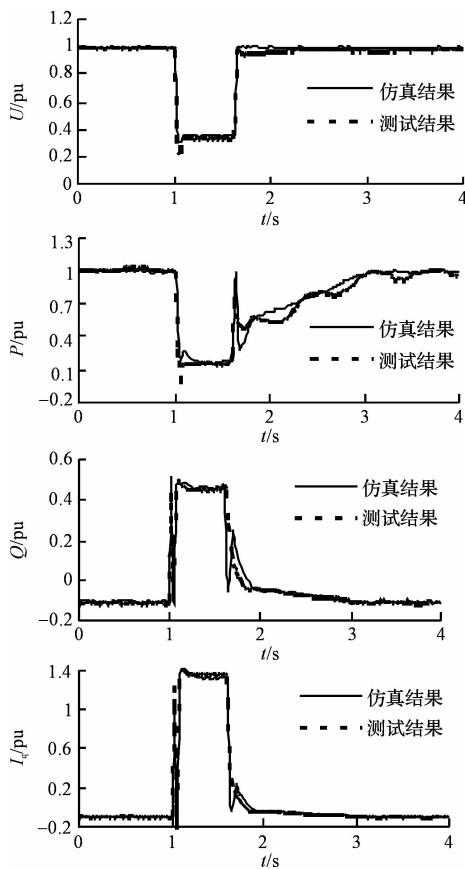


图 11 仿真结果与测试结果对比(大风 20% 对称跌落)

从图 11、图 12 中可以看出,在电网电压跌落期间,风电机组向电网注入无功功率电流,其值大小为 $1.35I_N$ (I_N ,风电机组额定电流),并且测试和仿真结果动态无功电流的响应时间有所不同,但均小于 75 ms。

在电网跌落瞬间和电网电压恢复瞬间的电磁暂态过程中,风机出口电压、有功功率、无功功率、无功电流的仿真结果与测试结果的拟合非常好,详细对比分析如下:

(1)以实际测试数据为依据,对故障过程进行分区,即:根据测试电压数据,将测试与仿真的数据序列分为 A(故障前)、B(故障期间)、C(故障后)3 个时段;

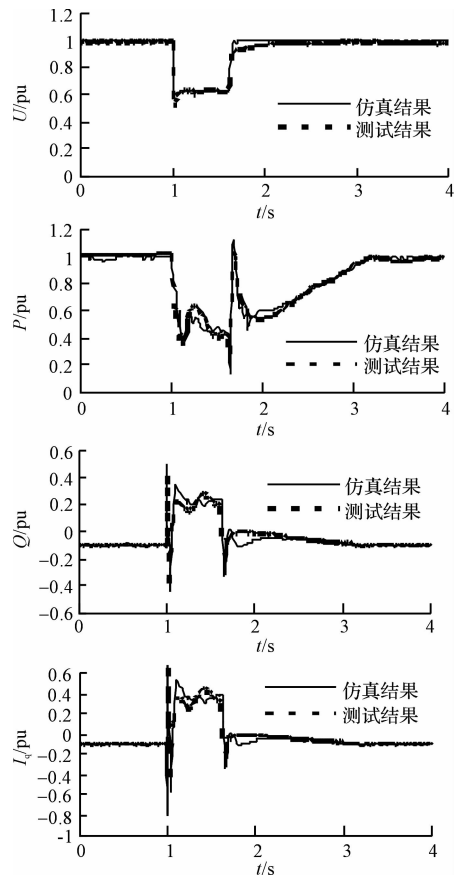


图 12 仿真结果与测试结果对比(大风 20% 不对称跌落)

判定 A、B、C 时段的开始和结束时刻方法如下:①电压跌落前 1 s 为 A 时段开始;②电压跌落至 $0.9 U_n$ 时刻的前 20 ms 为 A 时段结束, B 时段开始;③故障清除开始时刻的前 20 ms 为 B 时段结束, C 时段开始;④故障清除后,风电机组有功功率开始稳定输出后的 1 s 为 C 时段结束。

(2)经过对仿真结果与测试结果数据处理分析可知, A(故障前)稳态区间的有功功率、无功功率、无功电流平均值偏差都不超过 5%, 最大偏差也都不超过 15%。

(3) B(故障期间)包含暂态和稳态两个区间,其中电压瞬时跌落阶段为暂态区间(通常为 100 ms),跌落后的稳定运行阶段为稳态区间。经过对仿真结果与测试结果数据处理分析可知,稳态区间的有功功率、无功功率、无功电流平均值偏差都不超过 5%, 最大偏差也都不超过 15%。暂态区间有功功率、无功功率、无功电流平均值偏差都不超过 10%, 最大偏差也都不超过 20%。

(4) C(故障后)包含暂态和稳态两个区间,其中对电压恢复引起的暂态区间,功率和电流的波动进入该时段平均值的 $\pm 10\%$ 范围内的后 20 ms 为暂态过程的结束。电压恢复后的稳定运行阶段为稳态区间。经过

对仿真结果与测试结果数据处理分析可知,稳态区间的有功功率、无功功率、无功电流平均值偏差都不超过 5%,最大偏差也都不超过 15%。暂态区间有功功率、无功功率、无功电流平均值偏差都不超过 10%,最大偏差也都不超过 20%。

分析上述仿真结果和测试结果存在一定差异(尤其是暂态过程)的原因主要有:①电网、变压器、线路的仿真参数与实际风场实际参数存在一定偏差;②建模过程中,风机双馈风电机组部分环节进行了简化,也会导致仿真和测试结果存在一些差异;③仿真所用风况和现场实际运行风况也存在偏差。

当然,对于用于电力系统仿真计算的所需风机模型来说,根据上述仿真和测试对比结果已经表明该模型可以非常准确体现实际风电机组在电网扰动故障下的动态响应过程,即验证了本研究所搭建的风机模型正确性和有效性。因此,本研究所搭建风电机组模型已经适用于后续的风电场建模和研究对电力系统稳定性的影响,具有重要的工程应用价值。

4 结束语

众所周知,建立风电机组的精确模型非常困难,但是又是一个必须面临和攻克的难题。机组的模型是对机组进行运行性能分析、并网性能分析的前提条件,建立精确的风电机组模型、具备低电压穿越特性的风电机组仿真模型已经受到业界的广泛关注。

根据双馈风电机组特点,本研究搭建了用于电力系统仿真计算的双馈风电机组模型,同时以 WD77 - 1500 双馈风电机组为例子,在 Matlab/Simulink 环境下,对电网扰动故障下双馈风电机组动态响应特性进行了研究。通过对比仿真结果和现场测试结果,验证

本研究搭建模型的正确性和有效性(即完成了模型验证工作)。模型验证结果表明所搭建风电机组模型适用于后续的风电场建模和研究对电力系统稳定性的影响,具有重要的工程应用价值。

参考文献(References):

- [1] 李 晶,宋家骅,王伟胜. 大风变速恒频风力发电机组建模与仿真[J]. 中国电机工程学报,2004,24(6):100-105.
- [2] 徐太平,肖运启,秦 涛,等. 变桨距型双馈风电机组并网控制及建模仿真[J]. 电网技术,2008,32(6):100-105.
- [3] 赵清声,王志新. 双馈风力风电机组系统接入与稳定运行仿真[J]. 电网技术,2007,31(22):69-74.
- [4] 迟永宁,王伟胜,戴慧珠. 改善基于双馈感应发电机的并网风电场暂态电压稳定性研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(25):25-31.
- [5] 胡家兵,孙 丹,贺益康等. 电网电压骤降故障下双馈风力发电机建模与控制[J]. 电力系统自动化,2006,30(8):21-26.
- [6] 丁 明,李宾宾,韩平平. 双馈风电机组运行方式对系统电压稳定性的影响[J]. 电网技术,2012,34(10):26-31.
- [7] 弗拉基斯拉夫·阿赫玛托夫. 风力发电机用感应电机[M]. 北京:中国电力出版社,2009.
- [8] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
- [9] 应 有,许国东. 基于载荷优化的风电机组变桨控制技术研究[J]. 机械工程学报,2011,47(16):106-111.
- [10] BOSSANYI E. Individual blade pitch control for load reduction[J]. *Wind Energy*,2003,6(2):119-128.
- [11] 李治艳. 双馈风力发电机降阶模型研究[D]. 北京:华北电力大学电气与电子工程学院,2014.

[编辑:周昱晨]

本文引用格式:

王 青,程晨光,杨 靖,等. 电网扰动故障下双馈风电机组建模及模型验证[J]. 机电工程,2016,33(11):1403 - 1409.

WANG Qing, CHENG Chenguang, YANG Jing, et al. Modeling and model validation for DFIG wind turbines under grid voltage dip[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016,33(11):1403 - 1409.

《机电工程》杂志:<http://www.meem.com.cn>