

双馈型机组风电场三相电网短路故障暂态特性分析

包能胜^{1,2}, 朱瑞丹², 倪维斗¹

(1. 清华大学 热能工程系, 北京 100084;

2. 汕头大学 工学院 智能制造技术教育部重点实验室, 广东 汕头 515063)

摘要: 风电场三相电网短路故障暂态特性是研究大型风电场和电网之间相互关系的问题之一. 首先基于机理分析, 建立了机组和电网数学模型. 然后利用Matlab/Simulink仿真环境和机组参数, 建立了风电场全系统的仿真模型. 最后通过对双馈型机组风电场三相电网短路故障下的数字仿真, 得到了风电场和机组各关键参数的响应特性, 并着重对它们的暂态特性进行了分析. 所建立的模型和仿真结果为今后进一步研究风电场与电网之间的相互影响提供了理论基础.

关键词: 风电场; 双馈电机; 电网故障; 数字仿真

中图分类号: TM614 **文献标识码:** A

Three phase short circuit fault transient analysis of wind farm installed with DFIG wind turbine system

BAO Neng-sheng^{1,2}, ZHU Rui-dan², NI Wei-dou¹

(1. Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. The Key Laboratory of Intelligent Manufacturing Technologies, Ministry of Education (at Shantou University), College of Engineering, Shantou University, Shantou Guangdong 515063, China)

Abstract: Three phase short circuit fault transient analysis of wind farm installed with DFIG wind turbine system deals with the impact between the wind farm and electrical network. First, based on theoretical analysis, a dynamic model of wind turbine system and power grid were built. Then, applying Matlab/Simulink to parameters of the system, the simulation model of wind farm was programmed. Finally, with the digital simulation and analysis, the transient characteristics of key parameters of the wind farm and wind turbine unit were discussed. The built model and simulation results provided the theoretical basis of research of the impact between the wind farm and the electrical network.

Key words: wind farm; DFIG; grid fault; digital simulation

1 引言(Introduction)

双馈型变转速机组是当今风电发展的主要型号之一, 它在额定工况以上时通过调节桨距角来实现功率的恒定输出, 在额定工况以下时通过调节部分容量变频器输入到发电机绕组的频率来调节风轮的转速, 提高机组在低风速下的气动效率, 同时降低机组的疲劳负荷, 并通过调节发电机无功的输入输出来有效地提高机组电能输出质量^[1,2].

由于双馈型机组的突出优点, 国内外许多的学者对它进行了研究, 图1为双馈型机组整体模块示意图^[2]. 从图中可以看出, 双馈型机组与其他型号的机组相比, 在气动模块部分增加了一套桨叶桨距角调节装置, 用于调节机组的功率输出, 在电控部分增加了部分容量的变频器, 用于调节风轮的转速, 跟踪最优转速功率曲线.

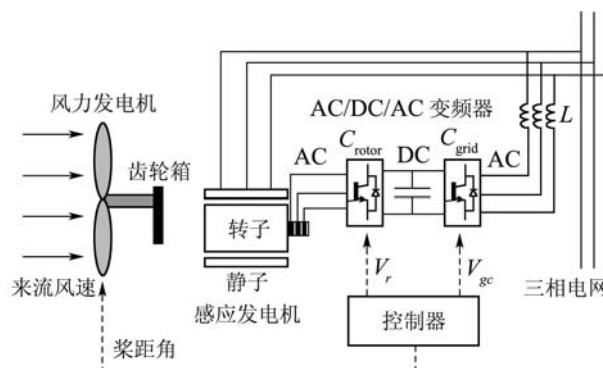


图 1 双馈型风力机整体模块示意图

Fig. 1 Sketch of DFIG wind turbine system

稳定性是电网安全运行的最主要目标, 电网稳定性包括电压稳定性、频率稳定性和电能质量等^[3,4]. 我国风电场一般接在电网的末端, 容易造成电网电压过低而使得机组不能并网或者使得已并网的机

组频繁地从电网解列,因此研究各型机组与电网之间的相互影响是十分必要的.本文通过对双馈型机组风电场三相电网短路故障下的仿真与分析,为今后进一步研究风电场与电网之间的相互关系提供基础.

2 机理模型(Theoretical model)

双馈型机组系统可分为4个主要子系统,包括气动设备、能量传递装置、异步发电机以及变频器等.

2.1 机组模型(Wind turbine model)

在推导了各子系统的模型之后,双馈型机组的全系统模型即可得到.这里的全系统模型只考虑气动、转子、发电机以及控制系统组成的风力发电机全系统模型.双馈型机组全系统模型为^[3,5,6]

$$\frac{d\bar{E}'}{dt} = -js\omega_s \bar{E}' - \frac{1}{T_0'}(\bar{E}' - j(X - X')\bar{I}_s), \quad (1)$$

$$\bar{V}_s - \bar{E}' = (R_s + jX')\bar{I}_s,$$

$$2H \frac{ds}{dt} = T_r - T_D - T_e, \quad (2)$$

$$T_D = \frac{C_D \omega_r}{T_{r0}} = K_D \omega_r, \quad (3)$$

$$T_e = P_e = E_q' i_{sq} + E_d' i_{sd}, \quad (4)$$

$$T_r = \frac{C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{1}{2} \rho \pi R^2 \cdot V^3}{\omega_r T_{r0}}, \quad (5)$$

$$\dot{\beta} = \frac{1}{T_\beta}(\beta_r - \beta), \quad (6)$$

$$\beta_r = \begin{cases} K_P \Delta P_e + K_I \int \Delta P_e dt, & \Delta P_e \geq 0, \\ 0, & \Delta P_e < 0, \end{cases} \quad (7)$$

$$\Delta P_e = P_e - P_{eB}, \quad (8)$$

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) \times e^{(-\frac{12.5}{\lambda_i})}, \quad (9)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}. \quad (10)$$

其中: $C_p(\lambda, \beta)$ 是功率系数, P_r 是风轮输出功率, ρ 为空气密度, R 为风轮半径, V 为有效平均风速, λ 是叶尖速比, T_{r0} 为风轮额定扭矩, T_β 为叶片桨距角执行机构时间常数, β_r 为桨距角参考输入, V_s 为异步发电机定子电压, E' 为异步发电机等效的暂态电势, I_s 为定子电流, R_s 为定子电阻, X_s 为定子电抗, R_r 为转子电阻, X' 为异步发电机等效的暂态电抗, T_0' 为定子绕组开路时转子绕组的时间常数.

$$\bar{E}' = E_q' + jE_d', \bar{V}_s = V_{sq} + jV_{sd},$$

$$\bar{I}_s = I_{sq} + jI_{sd}, X' = X_1 + \frac{X_2 X_m}{X_2 + X_m},$$

$$X = X_1 + X_m.$$

$X_1 = l_1 \omega_s$ 为定子漏抗, $X_2 = l_2 \omega_s$ 为转子漏抗, $X_m = l_{rs} \omega_s$ 为定子转子间互抗, l_1 为定子相绕组的漏磁自感系数, l_2 为转子相绕组的漏磁自感系数, l_{rs} 为定子转子绕组间的互感系数^[3,7], s 为异步电机的转差率, ω_s 为发电机同步转速.

2.2 电网模型(Power grid model)

电网部件模型包括电网模型、电缆模型、变压器模型以及断路器模型等,这些模型的动态方程是分析风电场与电网相互关系的重要基础之一,变压器模型和断路器模型由标准库给出.

3 仿真(Simulation model)

依据前面建立的双馈型机组以及电网的数学模型,应用MATLAB中的Simulink 仿真平台,本文建立了整个风电场的仿真模型,如图2所示.整个风电场由9台2MW的双馈型机组组成,风电场的总容量为18MW,详细的仿真参数见表1^[3].风电场中各风力发电机的额定电压为690V,通过塔架下的一次变压器升压到10kV,再连接到风电场的内部电网,再通过1km的输电线到风电场的总升压站变压器升压到110kV,升压站再通过20km的输电电缆连接到外部的电网中.

由于电网三相短路时间非常短,只有几百毫秒,为了便于分析,这里假设加载到每台机组的风速是一致的且都为额定风速,并且在整个仿真时间内不变.

表1 单台风力发电机组的电气参数

Table 1 Electrical parameters of DFIG WT unit

参数	符号	单位	2 MW
额定功率	P	MW	2.0
额定电压	V_s	V	690
风轮直径	D	m	80
额定风速	V	m/s	13
执行器时间常数	T_β	s	0.5
阻尼系数	K_D	—	0.01
比例控制器常数	K_P	—	5
积分控制器常数	K_I	—	25
机组时间常数	H	s	3.5
定子电阻	R_s	pu	0.00488
定子电抗	X_s	pu	0.09241
转子电阻	R_r	pu	0.00549
转子电抗	X_r	pu	0.09955
定转互抗	X_m	pu	3.9527
额定滑差	s_0	—	-0.010
同步电抗	X	pu	4.0451
等效暂态电抗	X'	pu	0.1895
转子绕组时间常数	T_0'	s	2.3499

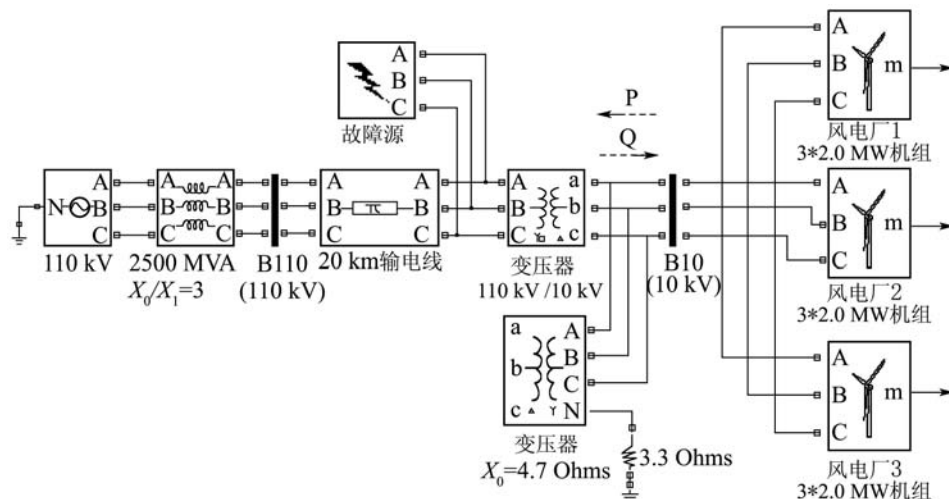


图2 风电场在Matlab/Simulink 仿真模型框图

Fig. 2 Simulation model sketch of wind farm in Matlab/Simulink

4 暂态分析(Transient analysis)

随着风电场的容量越来越大,分析风电场和电网之间相互影响是建立风电场系统模型的一个重要原因.为了更好地研究风电场和电网之间的相互影响,对上面建立的数学模型在给定来流风速为13 m/s条件下,研究了在二次升压站110kV侧输电线发生短路故障时系统重要参数的动态响应.设定故障模块中的故障类型为三相短路故障,故障开始时间为0.1 s,持续200 ms,然后在0.3 s时故障清除.需要说明的是,为了完全研究系统的动态特性,在模型仿真的时候把各机组的保护系统设为不起作用.

风电场的出力是令人十分关心的参数,图3和图4分别给出了在电网升压站10kV侧,也就是风电场出力注入电网输电线处的有功无功动态响应.从图中可以看出,当输电线发生电网三相短路时,风电场的有功输出急剧下降到零,而风电场还有震荡的无功输出,用于支持电网输电线的电压.当故障清除后,风电场的有功震荡恢复到稳态值,无功也同样恢复到稳态值.对比安装失速型机组的风电场在发生同样故障时,风电场大量从电网吸收无功的情况,加剧了电网输电线电压的波动.可以看出,双馈型机组对电网的稳定性影响比失速型机组要好的多.而且在必要时,可以在低风速条件下,通过调节变频器,使得机组不输出有功而全部输出无功,用于支持电网电压的稳定性.

输电电压对风电机组保护系统的设定值密切相关,是一个重要参数.图5给出了输电线上升压站110kV和10kV侧的相电压动态响应.从图中的结果可以看出,升压站10kV处,即图2中B10测

量标识处,其相电压在故障发生后急剧下降到零附近震荡,只有当故障排除后又震荡恢复.而升压站110kV处,也就是图2中B110测量标识处,其相电压只下降到额定电压的6成左右,这主要是因为由外部电网的支撑.

机端相电压是机组保护系统主要的检测参数之一,图6给出了它的动态响应曲线.从图中的结果可以看出,故障发生时,电压急速下降到零,然后开始小幅震荡.等故障排除后,电压又急速回升到正常值附近,并震荡恢复到稳态值.它的动态响应趋势和升压站10kV处相电压的动态响应趋势是一致的.

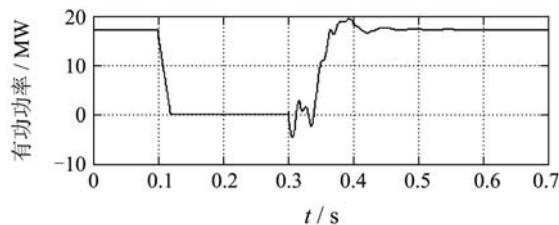


图3 升压站10kV侧有功动态响应曲线

Fig. 3 Active power dynamic response of transformer located at 10 kV

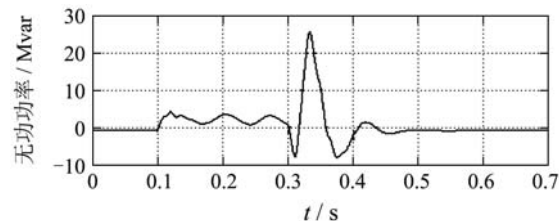


图4 升压站10kV侧无功动态响应曲线

Fig. 4 Reactive power dynamic response of transformer located at 10 kV

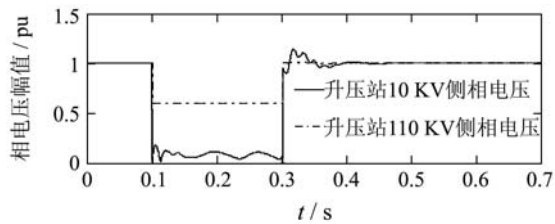


图5 输电线上各相电压动态响应曲线

Fig. 5 Phase voltage dynamic responses of transmission line

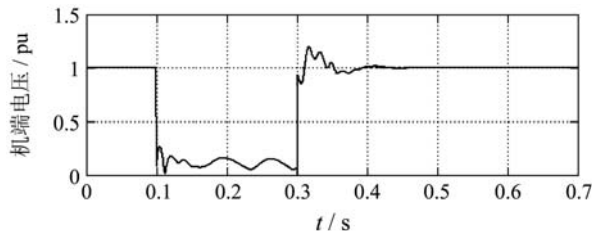


图6 机端相电压动态响应曲线

Fig. 6 Phase voltage dynamic response of wind turbine units

5 结论(Conclusions)

本文基于双馈型风电机组和电网的数学模型,在MATLAB/Simulink环境下仿真了当电网发生三相短路故障时风电场以及机组各主要特性参数的动态响应。从仿真的结果可以看出,输电线以及机组的主要参数在故障发生时,从稳态值快速下降到零值并开始震荡,等故障排除后,又快速震荡回

升到稳态值。而非常有意义的是,双馈型机组在电网发生故障时还可以向电网输出一定的无功,用于支持电网电压的稳定性,使得双馈型机组对电网的稳定性影响比失速型机组要好的多。

参考文献(References):

- [1] JOSE C, ANDRES F. A linear dynamic model for asynchronous wind turbines with mechanical fluctuations[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2002, 17(3): 681 – 687.
- [2] ANDRES F, JOSE C. A third order model for the doubly-fed induction machine[J]. *Electric Power Systems Research*, 2000, 56(2): 121 – 127.
- [3] HOLDSWORTH L, CHARALAMBOUS I, EKANAYAKE J B, et al. Power system fault ride through capabilities of induction generator based wind turbines[J]. *Wind Engineering*, 2004, 28(4): 399 – 412.
- [4] SALMAN S K, TEO A L J. Windmill modeling consideration and factors influencing the stability of a grid-connected wind power-based embedded generator[J]. *IEEE Trans on Power Systems*, 2003, 18(2): 793 – 802.
- [5] BAO N S, YE Z Q. Active pitch control in larger scale fixed speed horizontal axis wind turbine systems, part II: non-linear controller design[J]. *Wind Engineering*, 2002, 26(1): 27 – 38.
- [6] BAO N S, YE Z Q. Active pitch control in larger scale fixed speed horizontal axis wind turbine system, part I: linear controller design[J]. *Wind Engineering*, 2011, 25(6): 339 – 351.
- [7] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
(NI yixin, CHEN Shousun, ZHANG Baolin. *Theory and Analysis of Dynamic Power System*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.)