

# 关于风电场适应性继电保护的探讨

文玉玲<sup>1</sup>, 晁勤<sup>1</sup>, 吐尔逊·依不拉音<sup>1</sup>, 刘军<sup>2</sup>

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830008; 2. 独山子电力调度中心, 新疆 独山子 833600)

**摘要:** 风电场机组容量正逐年增加, 大规模风电接入系统对电力系统电能质量影响较大, 由于风能的随机性和不控性, 使风电所占系统容量份额增加的同时, 向系统提供的短路电流也越来越大。因此风电保护配置对电网的影响也是重要的。使用 Matlab 中动态仿真工具 Simulink, 对包含风电场的单机无穷大电力系统当联络线发生故障时进行动态仿真, 通过双馈发电机在不同故障类型下的故障电压、电流曲线, 通过实例分析得出风电场应采用适应性保护, 并对风电对电网继电保护的影响进行了分析。

**关键词:** 风电保护; 短路电流; 故障类型; 继电保护

## Study on adaptive protection of wind farm

WEN Yu-ling<sup>1</sup>, CHAO Qin<sup>1</sup>, TUERXUN.yibulayin<sup>1</sup>, LIU Jun<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Wulumuqi 830008, China;

2. Dispatching Center of Dushanzi Power Grid Company, Dushanzi 833600, China)

**Abstract:** The installed capacity of wind energy is increasing every year. At present, large amount of wind power integrating into power system brings great influence on the power quality. So the windy energy is promiscuous and can't be controlled, the short circuit of system caused by wind-electricity increases with the proportion of wind-electricity in electricity system increasing. So, protection configuration of wind farm has important influence for power system. In this paper, power system tie-line that the wind power generation sets are connected to single infinite bus system occurs short circuit fault, which is set up in Matlab/Simulink to dynamic simulation. Through DFIG fault voltage and current curve of different fault types, it reaches to conclusion that wind farm should apply adaptive relaying for the protection. And impact of wind farm intergration on power system protection is analyzed.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (No. 50667002) and Major Projects of Xinjiang Education (No. XJ EDU2005I01)

**Key words:** protective relay of wind farm; short circuit currents; fault type; relay protection

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)05-0047-05

## 0 引言

风力发电机组的并网特性一直以来都是大家比较关心的问题, 以往的研究工作主要集中在考虑风电场特性时的各类潮流优化算法、风电场对系统稳定性以及电能质量的影响等研究内容<sup>[1,2]</sup>, 而关于短路故障期间风电机所提供短路电流的特性及风电机组保护似乎并没有引起人们足够的重视, 获得的研究成果也相应较少。

如果电网发生故障, 风电场电容量大到一定程度, 风电场提供的短路电流可能会超过系统侧提供

的短路电流, 在进行电网设备选择、校验和继电保护配置、整定时, 就应该考虑风电短路电流的影响<sup>[3-5]</sup>。因此, 研究在故障状态下风电机组的短路电流的特性及风电机组的保护是非常必要的。

文献[4]对电网故障时对风电系统进行了辅助研究。文献[5]对电网发生单相接地故障时风电场的故障电压、故障电流进行了仿真分析。本文在 Matlab/Simulink 中建立了包含双馈式异步机风电场的单机无穷大电力系统仿真模型, 通过仿真对各种故障状态下风电故障电压、电流进行分析, 通过实例得出风电场在电网各种故障状态下的短路电压、电流特性是不同的, 故而得出风电场保护应采用适应性保护配置。

## 1 双馈式异步发电机组数学模型

### 1.1 风力机数学模型

由气动理论, 风力机的转矩可表达为:

$$T_m = \frac{1}{2} \rho \sigma_p n_1 \int_{r_0}^{r_m} x l_1(x) \delta_1(x)^2 C_l(\alpha) \cdot \sin [B(x) + \alpha] \left\{ 1 - \frac{C_d(\alpha)}{C_l(\alpha)} \cot[B(x) + \alpha] \right\} dx \quad (1)$$

其中:  $\rho$  为空气密度;  $n_1$  为风机叶片数;  $r_m$  为风力机最大半径;  $r_0$  为风机起始半径;  $l_1(x)$  为半径  $x$  处桨叶的弦长;  $\delta_1(x)$  为半径  $x$  处风对于叶片的相对速度;

$$\delta_1(x) = V_w \sqrt{(1-a_k)^2 + \lambda(x)^2 (1+b_k)^2} \quad (2)$$

其中:  $V_w$  为风速,  $\lambda(x)$  为半径  $x$  处叶尖速比:

$\lambda(x) = \frac{\omega x}{V_w}$ ;  $a_k$  为轴向诱导速度系数;  $b_k$  为切向诱导速度系数;

$$a_k = \frac{K_L \lambda(x)^2}{(1-K_L)^2 (1 + \frac{\lambda(x)^2}{(1-K_L)^2})} \quad (3)$$

$$b_k = \frac{K_L}{(1-K_L)(1 + \frac{\lambda(x)^2}{(1-K_L)^2})} \quad (4)$$

其中:  $K_L$  为拉格朗日系数,  $K_L=1/3$ ;  $B(x)$  为半径  $x$  处的桨距角:

$$B(x) = B_0(x) + B \quad (5)$$

$B_0(x)$  为半径  $x$  处的原始桨距角,  $B$  为给定的桨距角。

综上所述, 风力机的转矩可最终表达为以风速  $V_w$ 、旋转角速度  $\omega$  和桨距角  $B$  为自变量的函数:

$$T_m = T_m(V_w, \omega, B) \quad (6)$$

### 1.2 双馈式异步发电机暂态数学模型

$$\text{电压方程: } \begin{cases} u_A = p\psi_A + R \cdot i_A \\ u_B = p\psi_B + R \cdot i_B \\ u_C = p\psi_C + R \cdot i_C \\ u_a = p\psi_a + r \cdot i_a \\ u_b = p\psi_b + r \cdot i_b \\ u_c = p\psi_c + r \cdot i_c \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $u_A$ 、 $u_B$ 、 $u_C$ 、 $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$  为定转子的各相电压;  $i_A$ 、 $i_B$ 、 $i_C$ 、 $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$  为定转子的各相电流;  $\psi_A$ 、 $\psi_B$ 、 $\psi_C$ 、 $\psi_a$ 、 $\psi_b$ 、 $\psi_c$  为定转子的各相磁链;  $R$ 、 $r$  分别为定、转子的相电阻;  $p$  为微分算子。

$$\text{磁链方程: } [\psi_D] = [L_D] \cdot [I_D] \quad (8)$$

$$\text{磁链: } [\psi_D] = [\psi_A, \psi_B, \psi_C, \psi_a, \psi_b, \psi_c]^T \quad (9)$$

$$\text{电流: } [I_D] = [i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c]^T \quad (10)$$

电感矩阵:

$$[L_D] = \begin{bmatrix} L_{AA} & M_{AB} & M_{AC} & M_{Aa} & M_{Ab} & M_{Ac} \\ M_{BA} & L_{BB} & M_{BC} & M_{Ba} & M_{Bb} & M_{Bc} \\ M_{CA} & M_{CB} & L_{CC} & M_{Ca} & M_{Cb} & M_{Cc} \\ M_{aA} & M_{aB} & M_{aC} & L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{bA} & M_{bB} & M_{bC} & M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{cA} & M_{cB} & M_{cC} & M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中:  $L$  和  $M$  分别为各相定、转子绕组间的自感和互感。

双馈发电机电磁转矩:

$$T_e = \frac{P}{2} [I_D]^T \frac{\partial [L_D]}{\partial y} [I_D] \quad (12)$$

式中:  $P$  为极对数。

双馈异步发电机转子运动方程:

$$J \frac{1}{P} \frac{d^2 r}{dt^2} = T_m - T_e \quad (13)$$

式中:  $J$  为发电机转子的转动惯量;  $T_m$  为作用于发电机转子的机械转矩;  $T_e$  为发电机的电磁转矩;  $P$  为发电机极对数。

## 2 含风电的电网故障仿真分析:

### 2.1 含双馈发电机风电的仿真系统图

本文算例为风电场接入单机无穷大系统, 如图 1 所示。其中, 双馈风力发电机组接入单机无穷大系统, 风电场由 9 MW 双馈风力发电机组组成。风力发电机出口电压为 690 V, 通过升压将电压升至 25 kV, 再通过两条分别为 10 km、20 km 长的 25 kV 输电线路送至升压站, 电压升至 120 kV, 最终接入无穷大系统, 两条 25 kV 输电线路之间在 5 s 时刻发生 0.15 s 的短路故障。

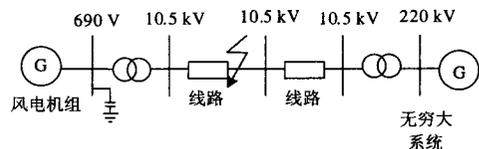


图 1 仿真系统图

Fig. 1 Model diagram of the simulation system

通过 Matlab/Simulink7.0 仿真如下:

(1) 当风电机在“Voltage regulation”模式下, 可以看到, 在单相接地故障期间, 风力机输出的正序电压(V1\_B575)下降到 0.8 pu, 高于保护的阈值 (0.75 pu), 此时风电机组依然继续运行<sup>[5]</sup> (见图 2、

3)。根据规程规定: 在不接地系统发生单相接地故障时, 允许设备带故障运行 2 h。

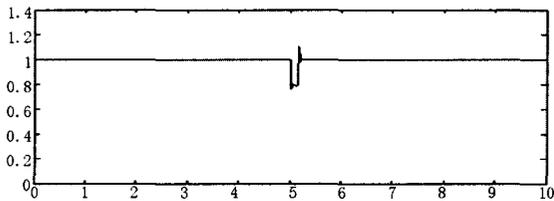


图 2 单相接地故障风电场出口电压 (V1\_B575)

Fig. 2 A single line to ground fault voltage of wind farm (V1\_B575)

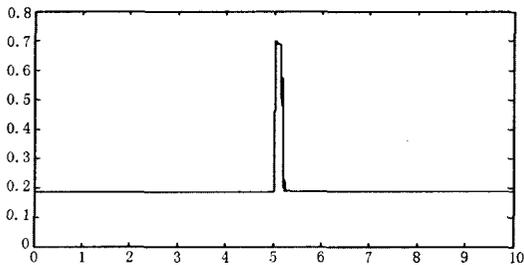


图 3 单相接地故障风电场电流 (I1\_B575)

Fig. 3 A single line to ground fault current of wind farm (I1\_B575)

(2) 当风电机在“Voltage regulation”模式下, 可以看到, 在三相故障期间, 风力机输出的正序电压 (V1\_B575) 下降到 0 pu, 低于保护的阈值 (0.75 pu), 双馈风力发电机提供瞬间性短路电流, 持续短路电流 ( $I \approx 0$ )。此时风电机组被低电压保护切除, 风电机组停止运行 (见图 4、5)。当故障被切除, 风机出口电压恢复为额定电压。

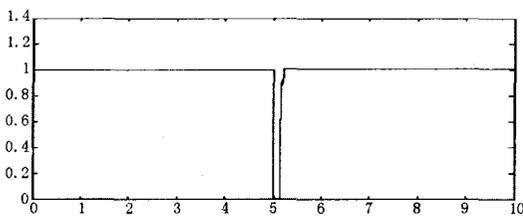


图 4 三相故障风电场出口电压 (V1\_B575)

Fig. 4 Three-phase fault voltage of wind farm (V1\_B575)

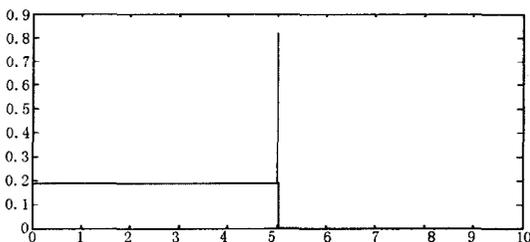


图 5 三相故障风电场电流 (I1\_B575)

Fig. 5 Three-phase fault current of wind farm (I1\_B575)

(3) 当风电机在“Voltage regulation”模式下, 可以看到, 在两相故障期间, 风力机输出的正序电压 (V1\_B575) 下降到 0.4 pu, 低于保护的阈值 (0.75 pu), 双馈风力发电机提供持续短路电流。此时风电机组被低压保护切除, 风电机组停止运行 (见图 6、7)。当故障被切除风机出口电压恢复为额定电压。

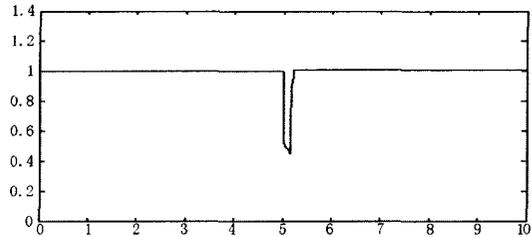


图 6 两相故障风电场出口电压 (V1\_B575)

Fig. 6 Two-phase fault voltage of wind farm (V1\_B575)

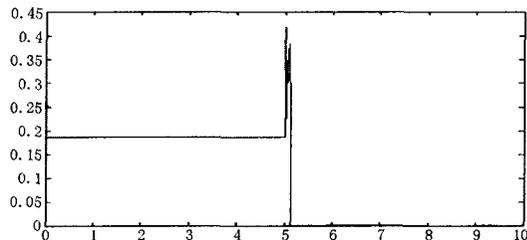


图 7 两相故障风电场电流 (I1\_B575)

Fig. 7 Two-phase fault current of wind farm (I1\_B575)

综上所述: 随着电网故障类型、故障点的不同, 风电场保护动作特性也会不同。因此常规的风电场电流保护如果一成不变, 将会影响风电场保护动作的可靠性、有效性, 会对风电场造成一定的损坏。因此, 风电场保护应采用适应性保护<sup>[6-8]</sup>, 根据故障类型、短路状态来改变同型保护的定值。

### 3 实例分析

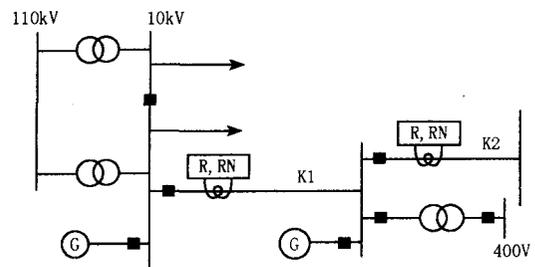


图 8 包含风电的系统图

Fig. 8 Diagram of wind farm interconnected with power system

(图 8 中: R 是有时间延迟的过电流继电器, RN 是有时间延迟的接地故障过电流继电器, G 为风力发

电机。

(1) 风电接入配电网, 则由继电器感知的故障电流可能增加或减少, 取决于发电机和故障的位置。

(2) K1 处故障, 由 10 kV 馈线继电器看到的故障电流增加了, 而在 K2 处故障, 由 10 kV 馈线继电器看到的故障电流可能减少了, 因为风电的接入, K2 处故障时, 风电接入点残压提高了, 由系统提供的短路电流小了。

因此, 电网故障类型、故障点的不同, 风电场保护动作特性也会不同, 因此风电场保护应采用适应性保护, 以提高保护动作的可靠性和有效性, 使风电场稳定。

#### 4 风电对电网继电保护的影响

(1) 与常规配电网保护不同, 风电是间隙性的, 风电场中有些元件通过的潮流可能是双向的。风力发电机组在有风期间都是和电网相连的, 当风速在起动风速附近变化时, 为防止风电机组频繁投切对接触器的损害, 允许风电机组短时电动机运行。此时改变系统的潮流方向, 容易引起保护装置误动作。

(2) 并网运行的固定转速异步发电机短路故障发生瞬间电机各相电流发生突变, 并按照指数规律衰减, 最终衰减到零。因为固定转速风电机组采用的是普通感应电机, 而感应电机模型中转子只考虑励磁支路, 所以感应电机的短路电流初值由定子暂态电抗与定子绕组非周期电流的初值决定, 其短路电流依次根据暂态时间常数与定子绕组时间常数按照指数规律衰减, 短路电流频率由转子转速决定<sup>[9-12]</sup>。

异步发电机没有独立的励磁机构, 在电网发生短路故障时由于机端电压显著降低, 发电机失去励磁, 很难向电网输送短路电流。异步发电机在三相短路故障时仅能提供很小的持续短路电流 ( $I \approx 0$ ), 两相短路时异步发电机提供的短路电流最大。风机出口电压是低压系统如 0.69 kV, 折算到 35 kV (或更高电压等级) 侧时其阻抗需乘以  $K_2 = (U_{35} / U_{0.69})^2$ , 因此从 35 kV 侧的等值电路来看, 风力发电机及相应的低压电缆相当于一个很大的限流电抗<sup>[13]</sup>, 短路电流无法送出。

(3) 并网运行的双馈风电机组与基于普通异步发电机的定速风电机组的短路电流特性有很大的不同, 短路故障发生瞬间电机各相电流发生突变, 并按照指数规律衰减, 最终达到稳态短路状态, 维持运行。双馈变速风电机组模型中, 双馈电机转子只考虑了励磁支路, 所以其短路电流初值由定子绕组暂态电抗与定子绕组非周期电流的初值决定, 其

短路电流依次根据定子绕组暂态时间常数与定子绕组时间常数按照指数规律衰减。当线路发生三相短路故障时, 双馈风力发电机在三相短路故障时仅能提供瞬间性短路电流, 持续短路电流 ( $I \approx 0$ )。当线路发生两相短路故障时, 双馈风力发电机提供的持续短路电流很大。

(4) 风电场故障电流主要是公用电网电源提供的。风电场保护的困难是要根据有限的故障电流识别故障的发生。

#### 5 结论

本文对风电系统保护进行了论述, 风电对电网继电保护的影响进行了分析, 使用 Matlab 中动态仿真工具 Simulink 对电网发生的不同故障进行了仿真分析, 得出电网故障类型、故障点的不同, 风电场保护动作特性也会不同, 因此风电场保护应采用适应性保护, 以提高保护动作的可靠性和有效性, 使风电场稳定。

#### 参考文献

- [1] 王承熙, 张源. 风力发电[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.  
WANG Cheng-xi, ZHANG Yuan. Wind Power Generation [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [2] 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 Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin. Dynamic Power System Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [3] 冯双磊. 基于PSCAD / EMTDC 的变速风电机组控制系统仿真研究[D]. 北京: 中国电力科学院, 2005.  
FENG Shuang-lei. Studies on the Variable Speed Wind Turbine Control System Based on PSCAD/EMTDC[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2005.
- [4] 李春兰. 风电系统故障分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.  
LI Chun-lan. Analysis of Fault of Wind-electricity System[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2003.
- [5] 王纯琦, 吐尔逊·依布拉音, 晁勤. 基于 Matlab 的含风电电网建模与仿真[J]. 可再生能源, 2006, (5): 61-64.  
WANG Chun-qi, TUERXUN Yibulayin, CHAO Qin. Modeling and Simulation of the Wind Power System Based on Matlab[J]. Renewable Energy, 2006, (5): 61-64.

- [6] Ostrow S L. WARFTM: A Modular Wind Power System for Distributed Electric Utility Application[J]. IEEE, 1995.
- [7] Vestas Wind Systems A / S. Technical Report of Wind Turbine Generators[R]. 2001.
- [8] Salman S K, Liang F, Rogers W J S. Effects of Wind Power Generators on the Voltage Control of Utility Distribution Networks[Z].
- [9] Sun Tao, Chen Z, Blaabjerg F. Transient Analysis of Grid-Connected Wind Turbines with DFIG after an External Short-Circuit Fault[A]. In: Nordic Wind Power Conference[C]. Chalmers University of Technology, 2004.
- [10] Kundur P. Power System Stability and Control [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.
- [11] 迟永宁, 王伟胜, 刘燕华. 大型风电场对电力系统暂态稳定性的影响[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(15): 10-14.  
CHI Yong-ning, WANG Wei-sheng, LIU Yan-hua. Impact of Large Scale Wind Farm Integration on Power System Transient Stability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(15): 10-14(in Chinese).
- [12] 雷亚洲. 与风电并网相关的研究课题[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 84-89.  
LEI Ya-zhou. Studies on Wind Farm Integration Into Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8): 84-89.
- [13] 宋伟, 李昌禧. 大型风力发电机组并网运行的探讨[J]. 河北电力技术, 2003, (1): 50-53.  
SONG Wei, LI Chang-xi. Discussions on On-line Parallel Operation of Large Windmill Generators[J]. Hebei Electric Power Technology, 2003, (1): 50-53.
- [14] 王建生. 基于 MATLAB 的风力异步发电机动态仿真[J]. 电力学报, 2005, 20(3): 237-239.  
WANG Jian-sheng. Dynamic Simulation of the Wind Turbine Asynchronous Generator in Matlab[J]. Journal of Electric Power, 2005, 20(3): 237-239.
- [15] 李晶, 宋家骅, 王伟胜. 大型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.  
LI Jing, SONG Jia-hua, WANG Wei-sheng. Modeling and Dynamic Simulation of Variable Speed Wind Turbine with Large Capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 100-105.
- [16] Windrow B, Winter R. Adaptive Signal Processing[M]. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1985.

收稿日期: 2008-04-26; 修回日期: 2008-08-28

作者简介:

文玉玲(1975-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护整定计算; E-mail: wenyuling2009@yahoo.com.cn

晁勤(1959-), 女, 教授, 博士研究生导师, 主要从事电力系统综合自动化及风力发电技术与教学工作。

(上接第 5 页 continued from page 5)

- [13] 林添顺, 黄阜民, 张尧. 单相自适应检测在三相无功及谐波电流检测中的应用[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(3): 66-68.  
LIN Tian-shun, HUANG Fu-min, ZHANG Yao. The Adaptive Detection of Single-phase Circuit Applied in Harmonic and Reactive Currents Detection of Three-phase Circuit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(3): 66-68.
- [14] 高大威, 孙孝瑞, 卢青春. 基于神经网络电流检测的有源电力滤波器研究[J]. 电力电子技术, 2002, 36(5): 48-56.  
GAO Da-wei, SUN Xiao-rui, LU Qing-chun. Active Power Filter Based on Current Detection with Neural Network[J]. Power Electronics, 2002, 36(5): 48-56.
- [15] 高大威, 孙孝瑞. 三相不对称非线性负载情况下的畸变电流检测[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(13): 45-47.  
GAO Da-wei, SUN Xiao-rui. A Detecting Method of Current Distortion Under the Condition of Unbalanced Nonlinear Loads[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(13): 45-47.
- [16] Widrow B, Winter R. Adaptive Signal Processing[M]. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N J, 1985.

收稿日期: 2008-04-28; 修回日期: 2008-05-28

作者简介:

李自成(1967-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力电子技术及其应用; E-mail: lifengli9222@ujs.edu.cn

孙玉坤(1958-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为特种电机非线性智能控制、电能质量控制技术、磁悬浮无轴承电机等。