

The Influence of Crowbar Protection Based on Different Cutting Time on Doubly-Fed Induction Generators

Cheng Zeng^{1,2}, Dajun Si³, Dada Wang⁴, Junzhen Peng^{1,2}, Hui Zhang²

¹Graduate Workstation of Kunming University of Science and Technology and Yunnan Power Grid Corporation, Kunming

²Kunming University of Science and Technology, Kunming

³Yunnan Power Grid Corporation, Kunming

⁴The Electric Power Research Institute in Yunnan Electric Power Research Institute, Kunming

⁵Graduate Workstation of North China Electric Power University and Yunnan Power Grid Corporation, Kunming

Email: 609312011@qq.com

Received: Aug. 27th, 2013; revised: Sep. 25th, 2013; accepted: Oct. 6th, 2013

Copyright © 2013 Cheng Zeng et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2013 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Cheng Zeng et al. All Copyright © 2013 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: Low voltage ride through ability is becoming one of the essential features of large grid-connected wind generators. When the power grid voltage drop occurs, it is necessary for the wind turbines to maintain connecting and return to normal after the fault is eliminated quickly. The most common method of low voltage through is to increase the crowbar protection module, but the protection operations may generate instantaneous current impact, damaging the rotors of generator. This paper analyzes the influences of the input and removal strategy of rotor crowbar protection and action time on doubly-fed induction generator (DFIG). Simulations and analysis are made based on the electromagnetic transient simulation software PSCAD/EMTDC.

Keywords: LVRT; Voltage Dip; Crowbar Protection; DFIG

双馈风力发电机组撬棒保护投切时间不同的影响

曾 成^{1,2}, 司大军³, 王达达⁴, 彭俊臻^{1,2}, 张 慧⁵

¹昆明理工大学云南电网公司研究生工作站, 昆明

²昆明理工大学, 昆明

³云南电网公司, 昆明

⁴云南电力试验研究院(集团)有限公司电力研究院, 昆明

⁵华北电力大学云南电网公司研究生工作站, 昆明

Email: 609312011@qq.com

收稿日期: 2013年8月27日; 修回日期: 2013年9月25日; 录用日期: 2013年10月6日

摘 要: 低电压穿越能力(Low Voltage Ride Through, LVRT)正逐渐成为大型并网风电机组的必备功能之一, 要求风电机组在电网电压跌落发生时保持并网, 故障消除后快速恢复正常运行。作为现在最通用的低电压穿越方法是增加撬棒保护(Crowbar Protection)模块, 但保护的投切易产生瞬时电流冲击, 对发电机转子造成损害。本文分析了转子撬棒保护投入与切除策略及动作时间对双馈感应发电机(DFIG)的影响, 并基于电磁暂态仿真软件PSCAD/EMTDC对某模型进行仿真论证。

关键词: 低电压穿越; 电压跌落; 撬棒保护; 双馈感应发电机

1. 引言

双馈感应发电机(DFIG)具备有功和无功功率独立控制、可变速运行及励磁变流器容量小等特点,已成为兆瓦级并网风力发电机组的首选机型。对于并网的DFIG,由于其定子侧与电网直接相连,当电网故障引起电压突降时,会导致DFIG定子侧电压骤降,并在转子侧感应出较大的电流,导致转子侧出现过电流和过电压^[1-3],严重时可能损坏变流器和电机^[3-5]。随着风电并网规模的不断增加,越来越多的国家在其风电并网导则中明确要求风电机必须具备低电压穿越(LVRT)能力^[6,7]。

如何在电网出现故障时对双馈感应发电机实行有效控制,以防止发电机定、转子出现冲击电流、转矩突变等问题,造成发电机从电网解列,各国学者纷纷对风电系统的LVRT技术开展研究^[8,9],取得了相当研究成果^[10-14]。该成果大体分为两大类:一类是增加拓扑结构与控制方法;一类是完全依靠改进变流器的控制策略方法。前一类包括:(1)增加Crowbar电路实现风力发电机的LVRT运行^[10,11];(2)使用能量存储系统(Energy Storage System, ESS)^[12]。其中方法(1)简单有效、成本较低、便于实现。但故障过程中发电机作为感应电动机运行,从电网吸收无功功率,不利于电网恢复,且当电网从故障状态恢复到正常状态过程中,Crowbar电路必须切除,这将延长恢复时的暂态过程;方法(2)将电网故障期间的过剩能量储存起来,并在故障结束后送回电网,但在双馈机风力发电中,ESS无法对转子电流进行有效控制,从而需要增大转子变流器的容量。另外,使用能量存储系统也增加了系统的成本和复杂程度。后一类包括:(1)改进传统发电机数学模型^[5];(2)针对故障期间定子磁链出现的负序和直流分量制定控制策略^[13];(3)采用现代控制理论中的H及μ-analysis方法设计全新的控制器^[14],这三种方法,算法复杂、计算量大。所以现在采用最多的仍然是第一类中第一种方法,增加Crowbar电路实现风力发电机的LVRT运行,但是由于故障时各分量物理意义不明确,且没有考虑到故障清除后切断保护时间对转子电流的影响,所以仍可能在故障清除时对转子和变流器造成损害。

本文推导了DFIG再并网运行情况下发生机端三相短路后的转子电流表达式和最大转子电流估算式。

以500 MW DFIG的风机群为例,分析了Crowbar电路投切时间不同情况下DFIG的LVRT的效果。

2. 双馈风力发电机(DFIG)模型

图1为双馈风电机组系统。

双馈风力发电机通过对变换器的控制,可以改变励磁电流的幅值和相位,从而实现有功功率和无功率的解耦控制。结构上与普通感应电机相比,增加了转子上的滑环,定转子间为背靠背双向变流器。定子直接与电网相连,而转子接至机侧变流器,通过变流器对电流和电压的频率、相位、幅值的调节,可以实现变速恒频。转子绕组可以通过变频器与电网实现能量双向流动。

为了消除电机数学模型的强耦合性,同时,发电机输出电压的幅值、相位也不受转子转速和瞬时位置的影响,采用矢量控制技术建立了双馈异步电机在同步旋转坐标系下的模型,弥补了三相坐标系下,不能消除双馈感应电机各个控制量之间强耦合关系的缺陷。此坐标系内,双馈电机的数学模型包括电压方程、磁链方程、转矩方程以及运动方程(其中, d 、 q 分别代表 D 、 Q 轴分量),以上方程可由电路理论和电机学原理推出:

电机电压方程:

$$\begin{cases} u_s = -R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt} + j\omega_1 \psi_s \\ u_r = R_r i_r + \frac{d\psi_r}{dt} + j(\omega_1 - \omega_r) \psi_r \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可以整理出 D 、 Q 轴的定、转子电压方程分别为:

电机定子电压方程:

$$\begin{cases} u_{sd} = -R_s i_{sd} - p\psi_{sd} + \omega_1 \psi_{sq} \\ u_{sq} = -R_s i_{sq} - p\psi_{sq} - \omega_1 \psi_{sd} \end{cases} \quad (2)$$

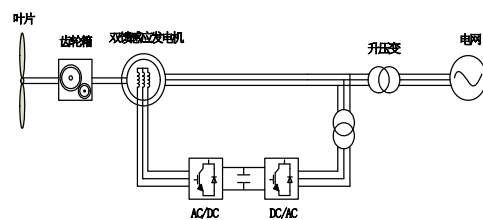


Figure 1. Doubly-fed wind power generator system
图 1. 双馈风电机组系统

电机转子电压方程:

$$\begin{cases} u_{rd} = -R_r i_{rd} - p\psi_{rd} + (\omega_l - \omega_r)\psi_{rq} \\ u_{rq} = -R_r i_{rq} - p\psi_{rq} - (\omega_l - \omega_r)\psi_{rd} \end{cases} \quad (3)$$

电机磁链方程式:

$$\begin{cases} \psi_s = -L_s i_s + L_m i_m \\ \psi_r = L_s i_{sd} - L_m i_m \end{cases} \quad (4)$$

在 D 、 Q 轴下进一步整理可得出以下的电机定、转子磁链方程为:

电机定子磁链方程:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = -L_s i_{sd} - L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = -L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \end{cases} \quad (5)$$

电机转子磁链方程:

$$\begin{cases} \psi_{rd} = -L_s i_{rd} - L_m i_{sd} \\ \psi_{rq} = -L_s i_{rq} + L_m i_{sq} \end{cases} \quad (6)$$

L_s ——电机定子电感;

L_r ——电机转子电感;

L_m ——电机定转子之间的互感。

电磁转矩方程:

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

运动方程:

$$T_L - T_e = \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_r}{dt}$$

J ——转动惯量;

n_p ——电机极对数;

T_L ——机械转矩;

T_e ——电机电磁转矩

3. 风电机组低电压穿越原理及模型

风力发电机组的低电压穿越(Low Voltage Ride Through, LVRT)能力是指机组在端电压降低到一定值的情况下不脱离电网而继续维持运行,甚至还可以为系统提供一定的无功以帮助系统恢复电压的能力。LVRT 能力可以使风机躲过保护动作时间,等故障切除后恢复正常运行,这样可大大减少风电机组在故障时反复并网的次数,减少对电网的冲击。

当风电机端电压发生严重跌落时, Crowbar 保

护电路将短接双馈感应发电机的转子绕组,起到保护变流器的作用,其典型结构图如图 2 所示。

变频器的过电流能力一般为 2~3 倍的额定电流,因此 Crowbar 的投入也应按其过电流能力来整定,但为了实现双馈风电机组的低电压穿越,兼顾机组及系统的暂态稳定,可以对其串联电阻的大小及 Crowbar 的退出时间进行控制。Crowbar 短接时间很短,约为 60~80 ms。Crowbar 的电阻可以阻尼转子磁链,但其阻值的大小将直接影响到故障期间及故障清除后系统及机组的暂态稳定。电阻值越大,转子过电流衰减得越快,但 Crowbar 投入期间,机组从系统吸收的无功功率越多。当转子磁链衰减后 Crowbar 就可以退出,此时稳态短路电流已不是很大。Crowbar 退出后,变频器重新同步,控制能力恢复。

Crowbar 保护电路可以分为被动式保护电路和主动式保护电路^[15]。两者的基本原理为:当检测到转子绕组电流超过所整定阈值时,将通过 Crowbar 保护电路短接双馈感应发电机的转子绕组,切除转子侧变流器,达到保护转子侧变流器的目的。此时双馈感应发电机将从双馈调速可控状态过渡到笼型异步电机不可控运行状态。两者的不同点是:被动式 Crowbar 保护电路主要采用不可控电力电子元件作为投切控制开关,不能按电网要求在任何需要的时候马上恢复转子侧变流的正常工作。而主动式 Crowbar 保护电路中主要采用可关断的电力电子器件作为投切控制开关,可以根据电网对双馈感应风力发电机组的要求,在 Crowbar 保护电路动作后,在适当的时候断开,从而使得风力发电机组能够在不脱离电网的情况下恢复转子侧变流器的工作,缩短了从异步电机运行状态恢复到双馈调速可控状态的过渡时间,有利于机组和电网的运行。

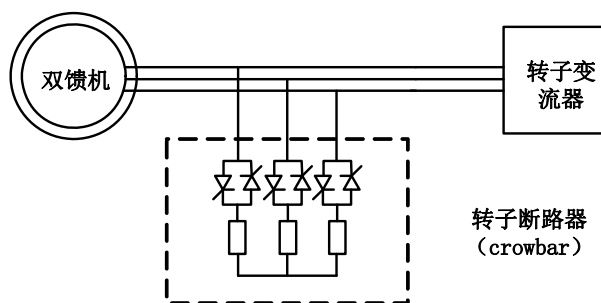


Figure 2. Crowbar typical structure figure
图 2. Crowbar 典型结构图

目前在发电机转子侧安装保护电路是较为常用的措施^[16]。当检测到电网发生故障出现严重的电压跌落时, Crowbar 能够闭锁发电机励磁变流器, 投入转子回路的保护装置, 达到保护变流器的目的。但是这个方案最大的问题是动作期间, 由于变流器被短接双馈机成为普通的异步机并从电网吸收大量无功, 使电网故障恶化。

4. 仿真分析

4.1. 算例系统

本文在 PSCAD/EMTDC 中建立了一个模拟的风电场模型, 风电场装机 500 MVA, 风电机组采用恒转矩控制模式。采用集中等效风方式, 将多个风机等效为一个风机。定子出口额定电压为 13.8kV, 电机参数为: $r_s = 0.0054 \text{ pu}$ 、 $x_s = 0.102 \text{ pu}$ 、 $r_r = 0.00607 \text{ pu}$ 、 $x_r = 0.11 \text{ pu}$ 、 $x_m = 4.362 \text{ pu}$ 。仿真示意图如图 3 所示, 在 F 点设置故障。

4.2. 关于风电机组 LVRT 保护投切时间仿真

在风电场升压变低压侧母线设置 1.5 s 发生三相接地短路故障, 故障持续时间为 0.5 s, 设置 Crowbar 在故障清除前退出和在故障清除后退出两种情况进行对比, 情况如图 4~7 所示。

图 4~7 为在同一故障下对比 Crowbar 不同切除时间对电网的不同影响。其中, 绿色的线条代表故障清除后切除 Crowbar 保护电路, 红线则是故障清除前切除 Crowbar 保护电路。从图 4 可以看出, 转子撬棒保护动作后, 转子侧过电流经旁路电阻迅速衰减而不再流经变流器, 从而保护了电力电子器件。对比保护的切除时间, 故障清除后切除比故障清除前切除冲击电流更大, 几乎达到了 2 倍左右。这对转子与变流器都是不利的。从图 5 可以看出, 故障清除前切除保护的话可以让额定电压更快回到额定值, 快了大概 100 ms 时间。从图 6、图 7 有功功率和无功功率变化情况看, 故障清除前切除保护可以让有功功率更快恢复到额定输出。故障线路清除后切除保护, 机组恢复到稳定前需要从电网吸收大量的无功功率, 这样不利于并网点电压的恢复。

5. 结论

本文在电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 中建

立了双馈风电机组模型及其低电压穿越控制模型, 分析了故障电压跌落时 Crowbar 保护切除时间不同对风机各变量和电网参数的影响。研究表明, 通过外加辅助电路实现低电压穿越是必需的; 转子撬棒保护在故障清除前切除对转子和变流器的冲击更小, 更有利于机组迅速恢复正常运行和并网点电压快速恢复。在实际电力系统中, 应根据电网实际运行情况, 在风电场规划阶段即对机组转子撬棒投切时间做出合理的设

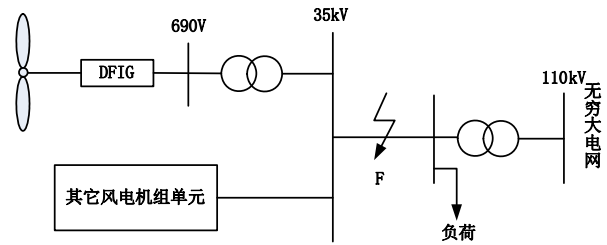


Figure 3. The simulation diagram
图 3. 仿真示意图

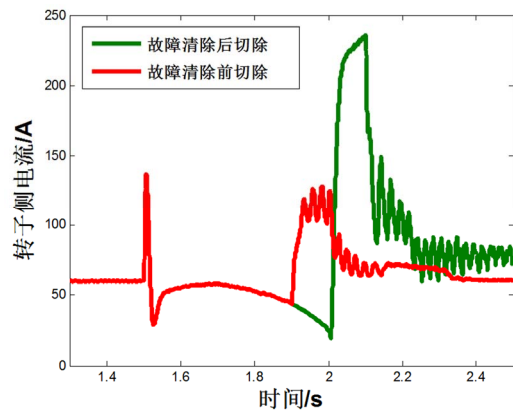


Figure 4. Current changes in the rotor side
图 4. 转子侧电流变化情况

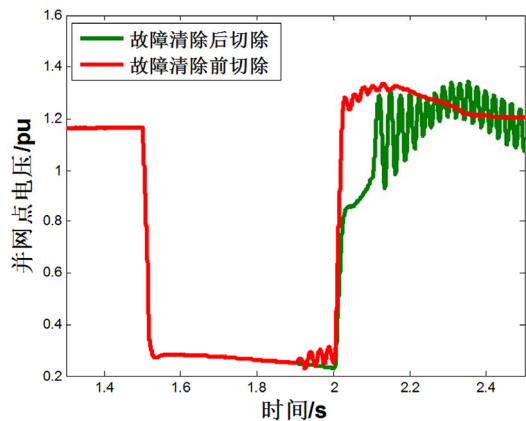


Figure 5. Voltage changes in the PCC
图 5. 并网点电压变化情况

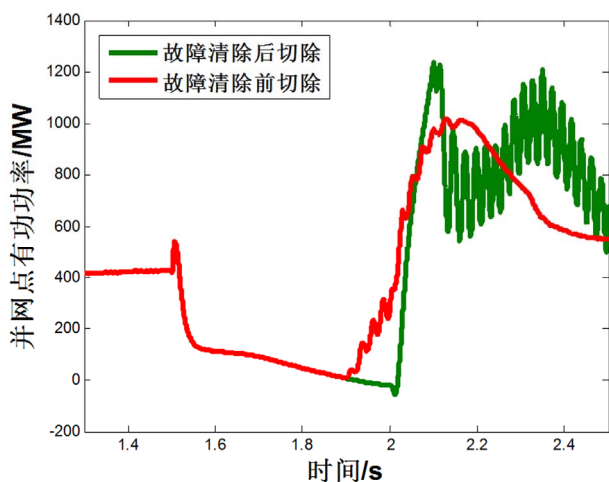


Figure 6. Active power changes in the PCC
图 6. 并网点有功功率变化情况

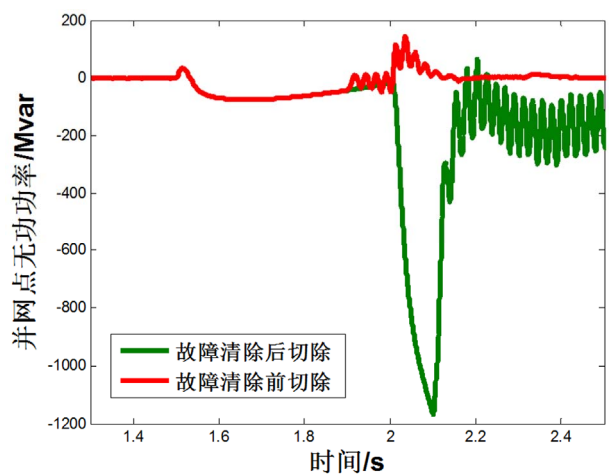


Figure 7. Reactive power changes in the PCC
图 7. 并网点无功功率变化情况

置，以便电网故障后风电场快速恢复正常运行。

参考文献 (References)

[1] Han, A.Y., Zhang, Z., Yin, X.G., et al. (2008) Study of the factors affected the rotor over-current of DFIG during the three-phase voltage dip. *Proceedings of the 3rd International Conference on*

Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 6-9 April 2008, Nanjing, 2647-2652.

[2] Moren, J. and De Haan, S.W.H. (2005) Ride through of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip. *IEEE Trans on Energy Conversion*, **20**, 435-441.

[3] 向大为, 杨顺昌, 冉立 (2006) 电网对称故障时双馈感应发电机不脱网运行的系统仿真研究. *中国电机工程学报*, **26**, 30-35.

[4] Xiang, D.W., Ran, L., Tavner, P.J., et al. (2006) Control of a doubly fed induction generator in a wind turbine du ring grid fault ride-through. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **21**, 652-662.

[5] 胡家兵, 贺益康 (2008) 双馈风力发电系统的低压穿越运行与控制. *电力系统自动*, **32**, 49-52.

[6] Lopez, J., Sanch, P., Roboam, X., et al. (2007) Dynamic behavior of the doubly fed induction generator during three-phase voltage dips. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **22**, 709-717.

[7] Basso, T.S. and DeBlasio, R.D. (2003) IEEE P1547-series of standards for interconnection. *Proceedings of 2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Vol. 2, Dallas, 7-12 September 2003, 556-561.

[8] Muljadi, E., Butterfield, C.P., Parsons, B., et al. (2007) Effect of variable speed wind turbine generator on stability of a weak grid. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **22**, 29-36.

[9] 向大为, 杨顺昌, 冉立 (2006) 电网对称故障时双馈感应发电机不脱网运行的励磁控制策略. *中国电机工程学报*, **26**, 164-170.

[10] Morren, J. and De Haan, S.W.H. (2005) Ride through of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **20**, 435-441.

[11] Dittrich, A. and Stoev, A. (2005) Comparison of fault ride-through strategies for wind turbines with DFIM generators. *2005 European Conference on Power Electronics and Applications*, Dresden, 1-8.

[12] Abbey, C. and Joos, G. (2005) Short-term energy storage for wind energy applications. *Conference Record of the Industry Applications Conference*, 2-6 October 2005, 2035-2042.

[13] Xiang, D.W., Ran, L., Tavner, P.J., et al. (2006) Control of a doubly fed induction generator in a wind turbine during grid fault ride-through. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **21**, 652-662.

[14] Rathi, M.R. and Mohan, N. (2005) A novel robust low voltage and fault ride through for wind turbine application operating in weak grids. *31st Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, 6-10 November 2005, 2481-2486.

[15] Gautam, D., Vittal, V. and Harbour, T. (2009) Impact of increased penetration of DFIG based wind turbine generators on transient and small signal stability of power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, **24**, 1426-1434.

[16] 李欣 (2009) 风电机组的短路电流特性及低电压穿越研究. 华北电力大学, 北京.