

基于主动式 IGBT 型 Crowbar 的双馈风力发电系统 LVRT 仿真研究

苏平¹, 张靠社²

(1. 西北电网有限公司西安输变电运行公司, 陕西 西安 710075; 2. 西安理工大学水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 讨论了电网电压骤降下双馈感应风电 (DFIG) 系统的低压穿越控制策略和保护方案。在分析主动式 IGBT 型 Crowbar 电路的拓扑结构以及电网电压跌落时 Crowbar 电路作用的基础上, 采用计及电网电压变化的 DFIG 数学模型, 建立了 LVRT 控制模型。通过仿真详细研究了 Crowbar 投切策略, 仿真结果验证了 Crowbar 电路以及控制策略的有效性, 表明 Crowbar 电路能有效抑制转子过电流、直流母线过电压以及电磁转矩的振荡, 并可在故障时向电网注入无功电流以帮助电网电压的恢复, 使 DFIG 实现低电压穿越。

关键词: 双馈感应电机; 电压跌落; 风力发电; Crowbar; 低电压穿越

Simulation research for LVRT of DFIG with active IGBT Crowbar

SU Ping¹, ZHANG Kao-she²

(1. Xi'an Transmission and Transformation Operation Company, Northwest China Grid Company Limited, Xi'an 710075, China;
2. Institute of Water Resources and Hydro-electric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The LVRT control strategy and protection schemes of DFIG are discussed in condition of large external voltage dip. On the basis of analyzing active IGBT Crowbar circuit topology as well as the effect of the Crowbar circuit to the fault during grid voltage dip, the DFIG mathematical model with considering the changed grid voltage is adopted and the control model of LVRT is established. The switching strategy of Crowbar is researched in detail during simulation. The simulation results verify that Crowbar circuit and the control strategy are active and prove that Crowbar control strategy could limit the over current in the rotor and the over voltage of the DC bus as well as the transient oscillation of the electromagnetic torque efficiently. Moreover, a reactive current is injected into the grid to assist the recovery of the grid voltage, which is in favor of achieving the LVRT of DFIG.

Key words: doubly fed induction generator (DFIG); voltage dip; wind power; Crowbar; low voltage ride through (LVRT)

中图分类号: TM614 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)23-0164-08

0 引言

目前大型变速恒频风力发电系统中双馈电机占了很大比重, 随着双馈感应风力发电机组单机容量和装机容量的不断增大, 发电机与电网的相互影响变得越来越重要^[1]。根据电网规程的新要求, 在电网发生故障如电压跌落 (处于一定范围内) 时, 风力发电机装置必须保持和电网相连。因此双馈感应发电机组低电压穿越 (LVRT) 已成为国内外学者的研究热点之一。风力发电技术领先的国家已经相继发布了故障穿越的定量标准^[2-4]。

当电网发生短路等电压跌落故障时, 双馈感应发电机机端电压骤降, 这导致定、转子绕组出现暂

态电流, 控制转子电流则需要增加转子电压, 当所需的转子电压超过变频器的电压限制, 就会使得定、转子电流上升, 如果转子电流超过变流器承受的电流限额, 会损坏变流器。此外, 由于暂态过程中机械、电气功率的不平衡会导致 DC-Link 上出现过、欠电压, 电磁转矩的衰减以及传动轴柔性等因素还会导致转速上升以及转矩、转速等的振荡^[5-7]。

当外部故障不严重时, 可以通过改进控制策略使双馈机组实现低电压穿越。文献 [8-11] 对双馈机传统数学模型进行了改进, 计及定子磁链的暂态过程, 并以此得出新的控制策略。与传统控制策略相比, 此法实现了故障过程中对转子电流较好地控制, 但故障过程中转子电压波动会比传统方法稍大。

对于严重的电网故障, 仅仅改进控制策略难以控制转子的过电流和过电压。目前主要采用Crowbar电路来实现电压跌落时DFIG不间断运行。文献[13]对比了多种适合变速恒频DGIG的Crowbar电路各自的优缺点, 最后介绍了变速恒频双馈发电机相关保护控制策略和新型旁路系统, 但未给出具体控制方式及效果。文献[14]介绍了三相交流开关加旁路电阻构成Crowbar保护电路的方案, 故障时, 触发双向开关, 将旁路电阻接入双馈感应发电机转子回路中, 保护转子侧变频器。文献[15]介绍和分析了三相交流开关加旁路电阻构成Crowbar保护电路的保护控制原理及交流励磁风电系统的暂态运行行为, 分析表明保护电阻的合理选取是有效实现Crowbar保护控制的关键。文献[16]研究了以Active Crowbar为保护措施的电网对称故障下双馈风力发电机控制策略。文献[17]研究了转子快速短接IGBT型Crowbar保护电路在电网暂态过程中可以有效防止过电流对转子变频器的危害, 其切除时刻对故障电网恢复和变频器保护有较大影响, 但并没有给出具体的投切策略。

本文首先介绍了国外最新风电标准对低电压穿越能力的要求。接着介绍了主动式IGBT型Crowbar电路的拓扑结构, 分析了电网电压突然跌落时Crowbar电路对故障的影响。然后研究建立了考虑电网电压变化的DFIG数学模型和电网对称故障下DFIG的控制策略。最后在PSCAD /EMTDC仿真环境下建立了一台DFIG风电系统的模型, 对电网三相对称短路故障下IGBT型Crowbar的投切策略进行了仿真研究。

1 风电标准对低电压穿越能力的要求

各国电网公司依据自身实际情况, 针对低电压穿越能力, 提出了各自的标准。图1为美国电网LVRT标准, 从图中可以看出: 曲线以上的区域是

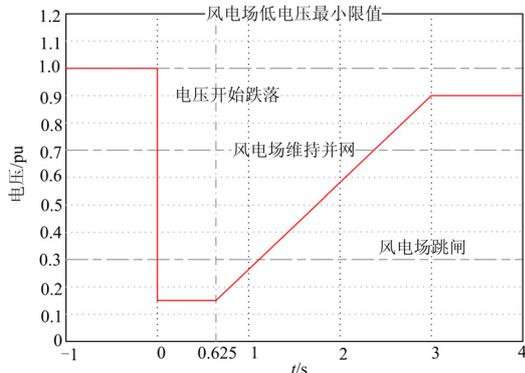


图1 美国风电场低电压穿越能力标准

Fig.1 LVRT requirement in United State grid code

风电场需要保持同电力系统链接的部分, 只有在曲线以下的区域才允许脱离电网。风电场必须具有在电网电压跌落至额定电压 15%能够维持并网运行 625 ms 的低电压穿越能力; 风电场并网点电压在发生跌落故障后 3 s 内能够恢复到额定电压的 90%时, 风电场必须保持并网运行。

2 DFIG 数学模型与控制策略

图2为变速恒频DFIG风力发电系统原理图, 其中转子侧带有IGBT型Crowbar电路。如图2所示, IGBT型Crowbar电路的每个桥臂有两个串联二极管, 直流侧由一个IGBT和一个吸收电阻串联组成。这种保护电路使转子侧变频器在电网故障时可以与转子保持连接, 当故障消除后通过切除保护电路, 使风电系统快速恢复正常运行, 因而具有更大的灵活性。

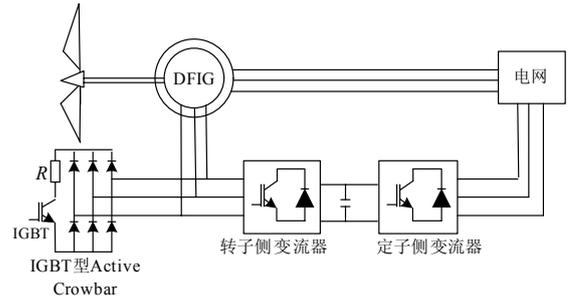


图2 变速恒频DFIG风力发电系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of VSCF-DFIG wind energy generation system

Crowbar电路在电网电压突降之后将双馈发电机转子短路, 可以防止发电机转子回路的浪涌电流流入变频器, 实现对变频器的保护, 同时可以阻止能量从发电机转子传递到直流母线中, 因而可以抑制直流母线电压的升高。不仅如此, Crowbar还可以迅速衰减发电机转子中故障电流的瞬态直流分量, 减小故障对发电机的冲击, 迅速恢复对DFIG系统有功、无功功率的控制能力, 实现对电网的无功功率支撑。转子回路电阻对定子侧的过电流有着明显的抑制作用, 在降低转子侧过电流的同时可以有效地降低定子侧过电流, 从而有效地对变频器进行保护, 并且同时还能抑制转速上升。

首先建立考虑电网电压变化的 DFIG 数学模型^[7-9]。

同步旋转坐标系下 DFIG 的电压方程为:

$$\begin{cases} \vec{V}_s = R_s \vec{I}_s + \frac{L_m d\vec{I}_{mo}}{dt} + j\omega_1 \vec{\psi}_s \\ \vec{V}_r = R_r \vec{I}_r + \frac{\sigma L_r d\vec{I}_r}{dt} + \frac{L_m^2 d\vec{I}_{mo}}{L_s dt} + j\omega_s \vec{\psi}_r \end{cases} \quad (1)$$

采用速度控制模式,通过速度反馈增加了一个速度外环,将发电机模型的动力部分包含在闭环控制系统中,系统有功功率和转矩的平衡过程以及转速的调节过程是可控的。显然,整个系统的动态响应速度就比采用传统的电流控制模式^[5]时的动态响应速度要快得多。速度控制模式包含了状态变量 i_{qr} 和 ω_r ,反映了系统控制对象的全部状态信息,将两个状态变量作为反馈量构成电流闭环和转速闭环,能控制包括电磁量和机械量的全部物理量的响应过程。因此,速度控制模式的动态性能要优于电流控制模式下的动态性能。

3 LVRT仿真研究

为全面深入研究IGBT型Active Crowbar在电网电压跌落时的运行特性,本文在PSCA D/EMTDC中建立了一台DFIG风力发电系统仿真模型,对电网对称短路故障时采用Crowbar保护控制的发电机系统进行了仿真。具体的仿真参数设置如下:

双馈发电机(DFIG)参数:额定功率为300 kVA,定子额定电压为13.8 kV;额定频率为50 Hz;额定转速为380 rad/s;定子电阻为0.005 4 p.u.;定子漏感为0.102 p.u.;转子电阻为0.006 07 p.u.;转子漏感为0.11 p.u.;转动惯量为0.726 7 s,机械阻尼为0.001 p.u。

选取Crowbar电路的限流电阻值^[20] $R_{crow} = 0.8 \text{ pu}$ 。

系统取电网侧母线发生三相短路故障,在3 s时故障发生,3.25 s时故障清除,持续0.25 s。故障发生时风速保持恒定,故障使得系统电压跌落至0.25 pu。设置Crowbar不同的投切方案,对比系统各物理量的变化。Crowbar的投切方案分别设定为:

- ① 故障发生时不投入Crowbar;
- ② 故障发生时投入,故障清除后继续运行一段时间再切除。
- ③ 故障发生时投入,故障清除后立即切除;
- ④ 故障发生时投入,故障清除前切除。

3.1 方案①时,系统的工作情况

图4中依次给出的是Crowbar电流、电网电压、转子电流、转子转速、发电机励磁转矩、直流侧电压、定子侧有功功率和定子侧无功功率(以下各方案相同)。由图4可以看出,故障发生之前,电网电压保持恒定,DFIG工作在额定情况下,发电机在额定转速下运行,发出额定功率,变流器直流母线上

的电压保持恒定,Crowbar电路未投入运行。

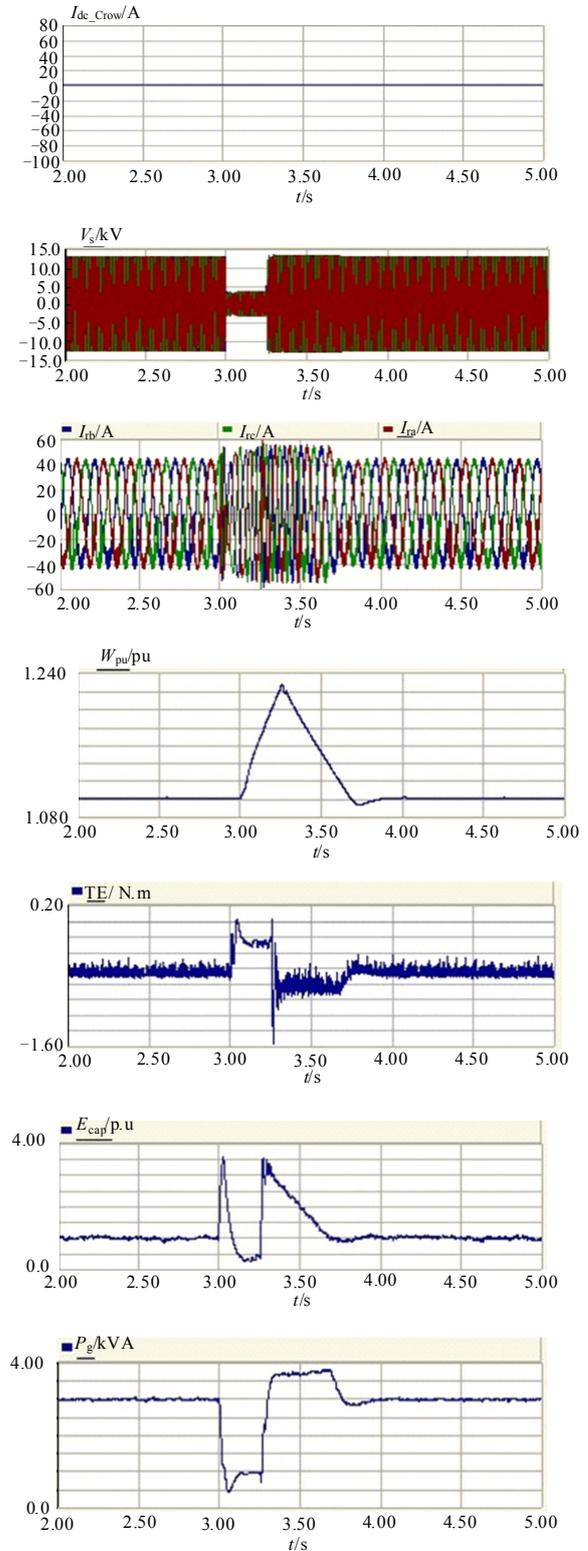


图4 无Crowbar保护的DFIG动态响应

Fig.4 Dynamic response of DFIG without Crowbar

由图 4 可见，在电网电压大幅跌落的情况下，若不投入 Crowbar，在电压跌落时，由于控制系统中给定值与实际值的差别变大，导致大部分 PI 调节器输出深度饱和，难以恢复到有效调节状态，使电压下降和恢复之后的一段时间内机组实际上处于失控状态，有功、无功都无法稳定，对电网产生非常不利的影响，不利于电网电压的恢复。DFIG 定、转子电流迅速变大，这将对定、转子绕组特别是变频器产生极大的损害。而且，转子转速急速上升，电磁转矩剧烈振荡，其幅值达到额定值的 2 倍以上，这对风电机组转轴系统产生很大的机械应力冲击。这是因为电压减小，磁链减小，因而电磁转矩也减小，而风力机在额定风速下输入的机械转矩不变，所以发电机的转速会增大，故障切除后，由于惯性的原因发电机转速将继续增加，但是此时发电机的输入机械功率小于输出电磁功率，发电机开始减速，经短暂的控制调节后发电机转速再次稳定。

3.2 方案②时，系统的工作情况

方案②是在 3 s 时投入 Crowbar，故障清除后 Crowbar 继续运行 0.55 s，即在 3.8 s 时切除。如图 5。

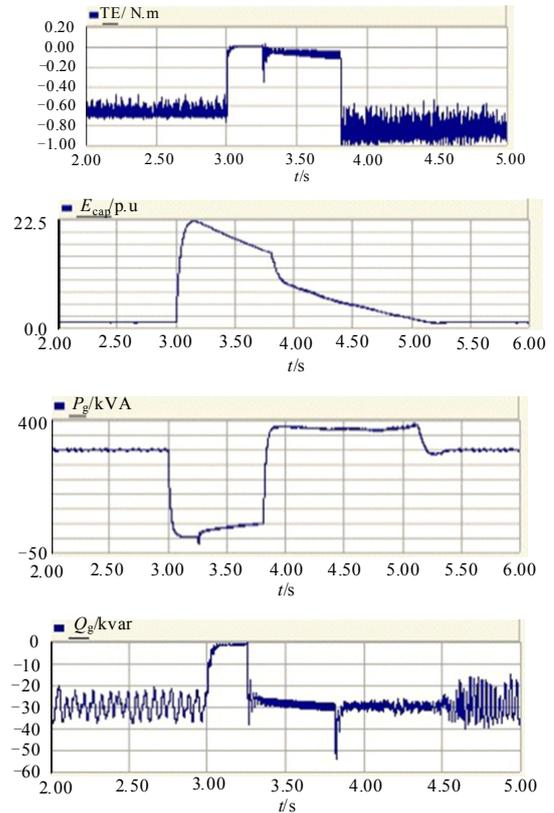
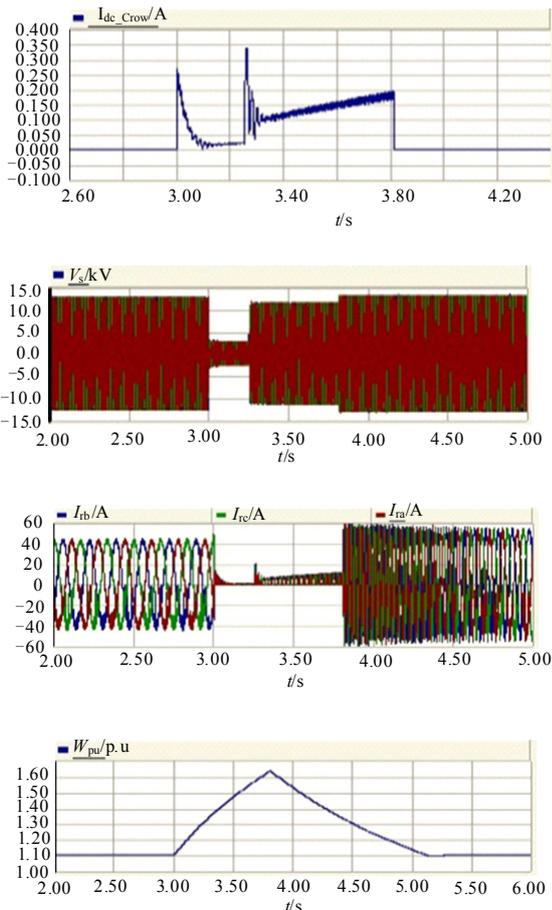


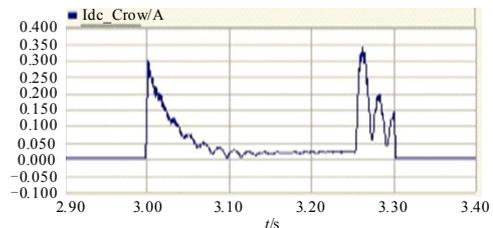
图 5 故障清除后继续运行 0.55 s 切除 Crowbar 的 DFIG 动态响应
Fig.5 Dynamic response of DFIG when removing Crowbar after clearing fault 0.55 s

由图5可见，在电压跌落时投入Crowbar，转子侧变流器被短路，直流侧电压幅值明显下降并且没有出现二次上升，故障期间发电机输出无功功率，可帮助电网恢复。可见Crowbar保护电路可以起到保护风电机组的作用。

但是由于Crowbar保护电路在故障恢复过程中仍然保持工作，发电机长时间处于机械、电气功率的不平衡状态，加上传动轴系柔性因素的影响，使得故障切除后发电机转速出现较大的振荡，从而导致故障后电磁转矩、转子电流、发电机输出有功功率的较大振荡。

3.3 方案③时，系统的工作情况

方案③是在 3 s 时投入 Crowbar，3.3 s 时切除。如图 6。



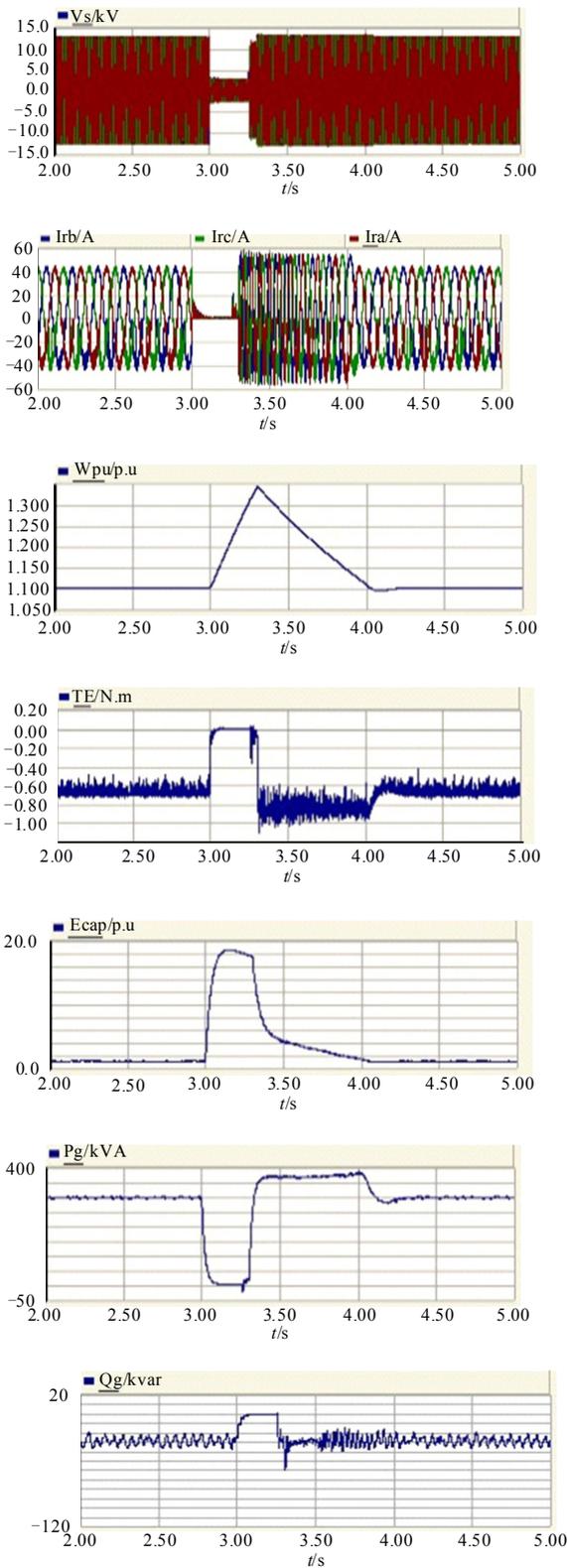
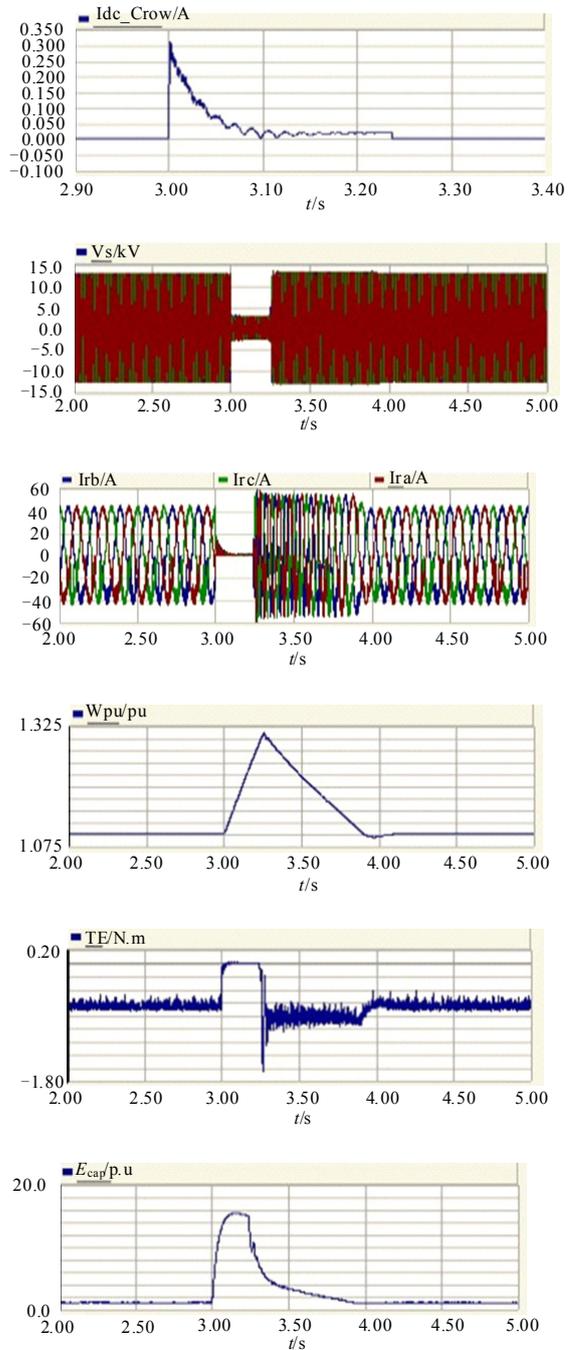


图 6 故障清除后立即切除 Crowbar 的 DFIG 动态响应
Fig.6 Dynamic response of DFIG when removing Crowbar after clearing fault immediately

由图 6 可见,故障切除后,电网电压、转子电流、转子转速、发电机励磁转矩、直流侧电压、定子侧有功功率和定子侧无功功率的振荡相比方案②时的情况时要小得多。系统的恢复时间相比方案②时的 5.25 s 缩短为现在的 4.0 s,恢复时间明显变短。

3.4 方案④时,系统的工作情况

方案④是在 3 s 时投入 Crowbar,3.24 s 时切除,如图 7。



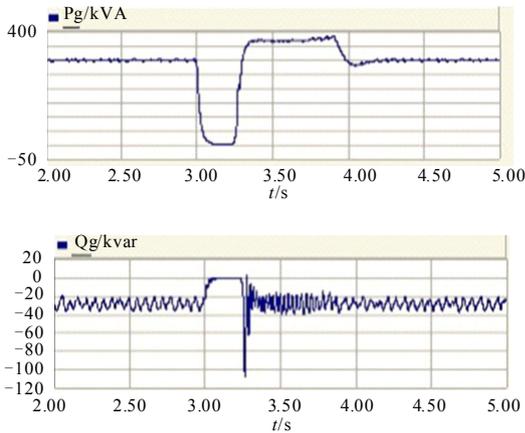


图 7 故障前切除 Crowbar 的 DFIG 动态响应

Fig.7 Dynamic response of DFIG when removing Crowbar before clearing fault

由图 7 可见，方案④相比于方案②和方案③，在故障切除后，电网电压、转子电流、转子转速、发电机励磁转矩、直流侧电压、定子侧有功功率和定子侧无功功率的振荡最小，恢复时间最短（3.8 s 时即可恢复）。因此方案④为 Crowbar 的最佳投切方案。

4 结论

本文在 PSCAD/EMTDC 仿真环境下建立了一台计及电网电压变化 DFIG 风电系统的模型以及其 LVRT 控制模型，对电网三相对称短路故障下 IGBT 型 Crowbar 的投切策略进行了仿真研究。仿真结果表明：

(1) 在电网电压大幅跌落时，投入 Crowbar 电路能有效抑制转子过电流、直流母线过电压、转子转速上升以及电磁转矩的振荡，保护定、转子侧变流器，并可在故障时向电网注入无功以帮助电网电压的恢复。

(2) Crowbar 电路一旦投入，应在电网故障清除前切除 Crowbar，而且 Crowbar 的切除时间离故障清除时间越短，系统的响应越理想。这样可以使得电网电压、转子电流、转子转速、发电机励磁转矩、直流侧电压、定子侧有功功率和定子侧无功功率的振荡最小，系统恢复时间最短。

参考文献

[1] Carrasco J M, Bialasiewicz J T, Portillo Guisado R C, et al. Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: a survey[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2006, 53 (4) : 1002-1016.

[2] Mullane A, Lightbody G, Yacamini R. Wind-turbine

fault ride through enhancement[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20 (4) : 1929-1937.

[3] 操瑞发, 朱武, 涂祥存, 等. 双馈式风力发电系统低电压穿越技术分析[J]. 电网技术, 2009, 33 (9) : 72-77. CAO Rui-fa, ZHU Wu, TU Xiang-cun, et al. Analysis on low voltage ride-through techniques for wind turbines using doubly-fed induction generator[J]. Power System Technology, 2009, 33 (9) : 72-77.

[4] Johan Monen, Sjoerd W H de Haan. Ride through of wind turbines with doubly-fed induction generation system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1995, 10 (4) : 435-441.

[5] 向大为, 杨顺昌, 冉立. 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[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (10) : 130-135. XIANG Da-wei, YANG Shun-chang, RAN Li. System simulation of a doubly fed induction generator ride through control for symmetrical grid fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (10) : 130-135.

[6] 李梅, 李建林, 赵斌, 等. 不同电网故障情况下 DFIG 运行特性比较[J]. 高电压技术, 2008, 34 (4) : 777-782. LI Mei, LI Jian-lin, ZHAO Bin, et al. Comparison of response of wind turbine with DFIG during different grid voltage dips[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4): 777-782.

[7] 郑太一, 严干贵, 周志强, 等. 电网跌落时风电机组运行仿真与实证分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 3 (21) : 90-97. ZHENG Tai-yi, YAN Gan-gui, ZHOU Zhi-qiang, et al. Simulation and verification of DFIG wind turbine to grid voltage sags[J]. Proceeding of the CSU-EPSA, 2009, 3 (21) : 90-97.

[8] 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. HU Jia-bing, SUN Dan, HE Yi-kang, et al. Modeling and control of DFIG wind generation system under grid voltage dip[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (8) : 21-26.

[9] He Yi-kang, Hu Jia-bing, Zhao Ren-de. Modeling and ccontrol of wind turbine used DFIG under network fault conditions[C].//Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems. Nanjing: 2005.

[10] Xiang Dawei, Li Ran. Control of a doubly fed induction generator in a wind turbine during grid fault ride-through[C]. //Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting. Montreal(Canada): 2006.

[11] Rathi M R, Mohan N. A novel robust low voltage and fault ride through for wind turbine application operating

- in weak grids[C]. //Proceedings of IEEE 2005 31st Annual Conference of the Industrial Electronics Society. USA: 2005.
- [12] 张兴, 张龙云, 杨淑英, 等. 风力发电低电压穿越技术综述[J]. 电力系统及其自动化, 2008, 20 (2): 1-8. ZHANG Xing, ZHANG Long-yun, YANG Shu-ying, et al. Low voltage ride-through technologies in wind turbine generation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 20 (2): 1-8.
- [13] 李建林, 赵栋利, 李亚西, 等. 适合于变速恒频双馈感应发电机的Crowbar对比分析[J]. 可再生能源, 2006 (5): 57-60. LI Jian-lin, ZHAO Dong-li, LI Ya-xi, et al. Analysis of Crowbar circuit for variable speed constant frequency doubly fed induction generator[J]. Renewable Energy, 2006, (5): 57-60.
- [14] Niiranen J. Voltage dip ride through of a doubly-fed generator equipped with an active crowbar[C]. //Proceedings of Nordic Wind Power Conference. Sweden: 2004.
- [15] 姚骏, 廖勇. 基于Crowbar保护控制的交流励磁风电系统运行分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (23): 79-83. YAO Jun, LIAO Yong. Analysis on the operations of an AC excited wind energy conversion system with Crowbar protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (23): 79-83.
- [16] 张学广, 徐殿国. 电网对称故障下基于active crowbar双馈发电机控制[J]. 电机与控制学报, 2009, 13 (1): 99-103. ZHANG Xue-guang, XU Dian-guo. Research on control of DFIG with active crowbar under symmetry voltage fault condition[J]. Electric Machines and Control, 2009, 13 (1): 99-103.
- [17] 杨涛, 迟永宁, 郑涛. 双馈变速风电机组低电压穿越控制方案的研究[J]. 现代电力, 2009, 26 (4): 36-40. YANG Tao, CHI Yong-ning, ZHENG Tao. LVRT control strategies for DFIG based plants[J]. Modern Electric Power, 2009, 26 (4): 36-40.
- [18] Strachan Nicholas P W, Jovicic Dragon. Dynamic modeling, simulation and analysis of an offshore variable-speed directly-driven permanent-magnet wind energy conversion and storage system (WECSS) [C]. //OCEANS Europe. 2007: 1-6.
- [19] Teodorescu R, Blaabjerg F. Flexible control of small wind turbines with grid failure detection operating in sand-alone and grid-connected mode[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2004, 19 (5): 1323-1332.
- [20] 蒋雪冬, 赵航. 应对电网电压骤降的双馈感应风力发电机Crowbar控制策略[J]. 电网技术, 2008, 32 (12): 84-89. JIANG Xue-dong, ZHAO Fang. Crowbar control strategy for doubly fed induction generator of wind farm during power grid voltage dip[J]. Power System Technology, 2008, 32 (12): 84-89.

收稿日期: 2009-12-01; 修回日期: 2010-01-12

作者简介:

苏平(1985-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事变电设备运行与检修工作; E-mail: suping-1214@163.com

张靠社(1965-), 男, 副教授, 博士, 主要从事电力系统稳定控制和电力市场的研究。

(上接第 163 页 continued from page 163)

- GUO Zhi-hong, YAO Jin-xia, CHENG Xue-qi, et al. Study and measurement of induced voltage and current for 500 kV double-circuit line on same tower[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32 (5): 11-15.
- [14] 韩彦华, 黄晓民, 杜秦生. 同杆双回线路感应电压和感应电流测量与计算[J]. 高电压技术, 2007, 33 (1): 140-143. HAN Yan-hua, HUANG Xiao-min, DU Qin-sheng. Induced voltage and current on double circuits with same tower[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33 (1): 140-143.

收稿日期: 2009-12-01; 修回日期: 2010-01-29

作者简介:

余涛(1974-), 男, 副教授, 博士, 长期从事电力系统稳定性、非线性鲁棒协调控制等方面的研究工作; E-mail:taoyul@xcut.edu.cn

叶文加(1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统自动控制; E-mail: delshaet@163.com

梁海华(1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统自动控制。