基于 Crowbar 电路的双馈风电机组低电压穿越能力

周志宇[1]，郭钰锋[2]

（1. 华北电力大学 电气与电子工程学院，102206 北京；2. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院，150001 哈尔滨）

摘 要：针对传统控制策略的双馈风电机组的低电压穿越能力非常有限，不能满足我国电网运行条例中关于低电压穿越能力的要求. 通过在转子侧增加撬棒（Crowbar）电路，在不改善控制策略的情况下，对 Crowbar 电路提高双馈风电机组的低电压穿越能力进行理论分析，并利用综合稳定程序（PSASP）对没有加装 Crowbar 电路和加装了 Crowbar 电路的双馈风电机组进行仿真比对. 结果表明，Crowbar 电路可以提高双馈风电机组的低电压穿越能力. 利用风电机组低电压穿越试验装置在某地进行了现场试验，进一步证明了加装 Crowbar 电路不仅在理论上可以提高 DFIG 的低电压穿越能力，在实际应用中也是完全可行的方法.

关键词：双馈；风电机组；低电压穿越；Crowbar 电路；仿真；试验

中图分类号：F407.61 **文献标志码**：A **文章编号**：0367－6234(2013)04－0122－07

Low voltage ride-through capability of doubly fed wind power generators based on crowbar circuit

ZHOU Zhiyu[1], GUO Yufeng[2]

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, 102206 Beijing;
2. School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin)

Abstract: Based on traditional control strategy, it is very limited to low voltage ride-through (LVRT) of doubly fed wind power generators. It can not meet technical rule for connecting wind farm to power system of China. It has to add the hardware circuit if the control strategy is not improved. The popular method is to add crowbar circuit to the rotor side. A model of doubly fed wind power generators based on traditional control strategy is built in this paper. The theory of LVRT was analyzed. Simulation of doubly fed wind power generators with crowbar circuit was undertaken and an experiment was undertaken in order to verify its virtue. The results show doubly fed wind power generators with crowbar circuit is more practical, which provides a powerful reference for improving the ability of LVRT of wind farm wind.

Key words: doubly fed; wind power generators; low voltage ride-through; crowbar circuit; simulation; experiment

随着风电机组的装机容量的增大，风电机组与电网的相互影响变得越来越重要. 由文献[1]可知，我国对含风电场的电力系统发生短路等电压跌落故障（一定范围内）时，要求风电机组必须保持与电网相连，不得脱网. 而目前已装机的风电机组中双馈型感应风力发电机组（DFIG）占了很大比重，双馈风电机组的单机容量也在不断增大，因此双馈风电机组的低电压穿越（Low voltage ride-through, LVRT）能力对于系统的安全稳定运行非常重要.

当电网发生短路故障时，双馈型风力发电机组 DFIG 在电压跌落情况下的运行[2－5]，DFIG 的定子电流会突然增加，定子的电压和磁通会突然降低，而在转子侧则会感应出非常大的感应电流，感应电流的幅值甚至可以达到额定电流的 2～3 倍，导致转子侧过电流，由于转子侧变频器的额定功率有限，通过转子侧变换器 IGBT 开关的转子电流的上限不能比转子额定电流超过太多，否则，变频器就会发生闭锁现象，来保护 IGBT 开关

收稿日期：2012－12－18.
基金项目：国家高技术研究发展计划项目（2011AA05A105）；
国家自然科学基金资助项目（51107014）.
作者简介：周志宇（1991—），男，学士.
通信作者：郭钰锋，guoyufeng@hit.edu.cn.

免受电气过载或热过载. 不对称故障会使过压、过流的现象更加严重，因为在定子电压中含有负序分量，而负序分量可以产生很高的滑差，过流会损害变流器，而过压会损坏发电机的转子绕组，这种暂态电流如果不能得到及时有效地抑制，那么 DFIG 转子侧的变流器则会因为承受不了这么大的电流而退出运行，进而 DFIG 将失去对电磁转矩的有效控制，风力发电机组的转速瞬间增大，转速增大到极限时，DFIG 就会退出运行，DFIG 低电压穿越能力达不到规定的要求时，会对电网的安全稳定运行产生非常不利的影响[6-8]，甚至会发生大规模风电场脱网等重大事故.

目前，文献[2－14]对双馈风电机组的低电压穿越能力进行了理论和仿真分析，所得的研究的结论是：当电网故障不太严重时，不加装 Crowbar 电路的双馈风电机组可以通过改进控制策略使其实现低电压穿越. 然而当电网故障非常严重时，仅仅通过改进控制策略的方法将难以控制转子的过电流和过电压. 所以为了保护连接在转子侧的变流器免受过电压、过电流的影响，DFIG 必须采取过电压、过电流的保护措施. 文献[8－20]用仿真分析的方法证明了加装 Crowbar 电路后可以提高双馈风电机组的低电压穿越能力，但文献中少见使用试验方法对仿真进行验证. 本文从 Crowbar 电路提高双馈风电机组的低电压穿越能力进行了理论分析，并基于 PSASP 程序，仿真分析了电网发生三相短路故障时对风电机组的低电压穿越能力的影响，并整定出可以指导试验的 Crowbar 电路参数，利用风电机组低电压穿越能力测试装置，在黑龙江省七台河市佳兴风电场，应用仿真所整定的电路参数对风电机组的低电压穿越能力进行了现场试验，证明仿真分析确定的 Crowbar 电路及参数在实践应用中的可行性，为风电机组的低电压穿越能力的提高提供了有力的理论及试验支持.

1　基于 Crowbar 电路的 LVRT 保护方法

当电网故障不太严重时，DFIG 可以通过改进控制策略使其实现低电压穿越. 然而当电网故障非常严重时，仅仅通过改进控制策略的方法将难以控制转子的过电流和过电压. 所以为了保护连接在转子侧的变流器免受过电压、过电流的影响，DFIG 必须采取过电压、过电流的保护措施. 目前，最常用的方法就是在 DFIG 转子侧加装 Crowbar 电路.

根据 DFIG 的以上特点，加装 Crowbar 电路后的 DFIG 结构简图如图 1 所示[11].

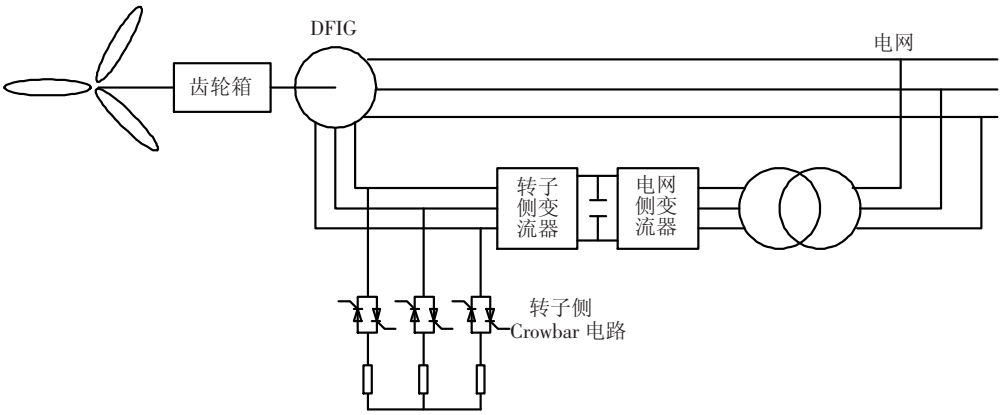


图 1　双馈风力发电机组加装 Crowbar 电路后的结构简图

从图 1 中可以看出 DFIG 的定子侧直接与电网相连，所以电网电压的跌落即是 DFIG 定子电压的跌落. 根据电路分析叠加原理，定子三相电压对称跌落的过程可视为在定子侧施加与原电压方向相反、幅值为跌落幅值的电压过程. 因为转子侧电压不影响 DFIG 在定子侧电压跌落情况下的响应，所以转子回路可看成短路[12].

设定子短路电流为

$$i_s = i_{s0} + i_{s1}, \tag{1}$$

定子电压为

$$u_s = -\mathrm{j}U_m \mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega_s t+\varphi)}. \tag{2}$$

在转子坐标系下

$$u_s' = u_s \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\omega_r t} = -\mathrm{j}U_m \mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega_s t+\varphi)}. \tag{3}$$

所以定子电压骤降前的电流为

$$i_{s0}' = u_s'/(R_s + \mathrm{j}\omega_1 L_s) = -\mathrm{j}U_m \mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega_s t+\varphi)}/(R_s + \mathrm{j}X_s). \tag{4}$$

一般，X_s 远大于 R_s，所以可得

$$i_{s0}' \approx -U_m \mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega_s \tau+\varphi)} \frac{1}{X_s}. \tag{5}$$

在转子坐标系中，当定转子的磁链初始值为 0 时，通过定子电压方程的拉式变换可得

$$i_{s1}' \approx AU_m \mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega_s t+\varphi)}[1 - \mathrm{e}^{-(\alpha+\mathrm{j}\omega_1+\mathrm{j}\omega_s)t}] \frac{1}{X_s} + AU_m \mathrm{e}^{\mathrm{j}\varphi}\left(\frac{1}{X_s'} - \frac{1}{X_s}\right)[\mathrm{e}^{-\frac{t}{T_\tau}} - \mathrm{e}^{-(\alpha+\mathrm{j}\omega_r)t}]. \tag{6}$$

由式(4),可得 $i_s = i'_s e^{j\omega_r t} = (i'_{s0} + i'_{s1}) e^{j\omega_r t}$,所以有

$$i_s = (A-1)U_m e^{j(\omega_1 t+\varphi)} \cdot \frac{1}{X_s} - AU_m e^{j\varphi} e^{-\alpha t} \cdot \frac{1}{X'_s} + AU_m e^{j\varphi}\left(\frac{1}{X'_s} - \frac{1}{X_s}\right) e^{-\frac{t}{T'_r}} e^{j\omega_r t}]. \quad (7)$$

可以推导出,在电网故障情况下,DFIG 定子侧一相电流如下式所示.

$$i_a = \mathrm{Re}(i_s) = (A-1)\frac{U_m}{X_s}\cos(\omega_s t+\varphi) - \frac{AU_m}{X_s} e^{-\alpha t}\cos\varphi + AU_m\left(\frac{1}{X'_s} - \frac{1}{X_s}\right) e^{-\frac{t}{T'_r}}\cos(\omega_r t+\varphi). \quad (8)$$

其中:i_s 为定子短路电流;i_{s0} 为定子电压骤降前定子稳态电流;i_{s1} 为定子端突然施加反方向三相电压时所产生的定子电流; A 为比例系数;U_m 为定子电压幅值;ω_s 为转差角速度;φ 为定子电压空间矢量初始相位;α 为定子直流分量衰减系数;X'_s 为定子暂态电抗;X_s 为定子电抗;τ'_r 为瞬态时间常数;ω_r 为转子旋转电角速度.

从式(8) 中可以看出,定子电流可由 3 部分组成. 其中,$(A-1)\frac{U_m}{X_s}\cos(\omega_s t+\phi)$ 为定子侧电流的稳态分量,其大小由电压跌落幅度所决定. $-\frac{AU_m}{X_s} e^{-\alpha t}\cos\varphi$ 为暂态电流的直流分量,短路时的相位角决定其幅值的大小,此分量以定子时间常数衰减. $AU_m[\frac{1}{X'_s} - \frac{1}{X_s}] e^{-\frac{t}{T'_r}}\cos(\omega_r t+\varphi)$ 为暂态交流分量,以瞬态时间常数衰减.

从以上推导的数学模型可知,定子故障时的暂态电流主要受故障电压跌落幅值、电压跌落时刻和 DFIG 定转子电阻、电感的影响. 所以改变 DFIG 在电网故障情况下的定转子电感、电阻是可行的办法. 因为 DFIG 在正常运行时,转子侧电流要小于定子侧电流,所以改变 DFIG 转子侧电阻的方法更加可行和合理. 所以,在 DFIG 转子侧加装 Crowbar 电路,在电网电压跌落时,增加了 DFIG 转子侧的电阻,可以抑制暂态故障电流的交流分量,使变流器能够正常工作,使 DFIG 具备更强的低电压穿越能力.

Crowbar 电路的保护原理就是利用可控元件(如 IGBT)控制其保护电阻的投切. 当 DFIG 检测到定子电压跌落时,立即断开转子侧变流器与转子回路,通过 IGBT 控制将转子旁路保护电阻串接到转子回路,这相当于增大了转子的阻抗,从而降低了转子回路在电压跌落和恢复过程中的最大电流.

DFIG 的 Crowbar 阻值整定受转子侧变流器电流和网侧变流器电压的约束. 当电网发生短路故障时,Crowbar 阻值过小将不能有效抑制转子侧的短路电流,从而可能损坏转子侧变流器;Crowbar 阻值过大,可能会导致电网侧变流器的直流侧出现过电压,也会损坏电网侧变流器. 通常,在合理取值范围内,Crowbar 阻值越大对转子侧过电流的抑制效果就越明显.

当电网发生故障导致 DFIG 的低电压一直存在的情况下,加装 Crowbar 电路的 DFIG 控制过程为:1)短路故障发生时,Crowbar 电路为转子侧变流器提供旁路,电网侧的变流器依然通过变压器与电网相连;2)DFIG 通过桨距角控制系统调节叶片的迎风角度,降低叶片捕获的风能,重新建立 DFIG 的机端电压;3)电网的故障被清除之前,Crowbar 电路退出运行;4)电网的故障被清除之后,DFIG 端电压恢复,转子侧变流器投运,恢复正常运行.

2 基于 Crowbar 电路的 DFIG LVRT 仿真

2.1 基于 PSASP 的系统仿真模型

本文基于以上分析,进行了风电机组接入实际电网进行电网故障情况下的低电压穿越能力仿真计算. 仿真的风电机组通过容量 1.8 MW 的升压变压器接入佳兴风电场内的汇流母线,短路点设置为风电机组升压变高压侧. 以 2012 年冬季大运行方式数据为基础,系统容量基准值为100 MVA. 采用电力系统综合稳定程序(PSASP)仿真软件建立了如图 2 所示的仿真系统. 风电机组采用恒功率因数控制的双馈变速风电机组,参数选取如下:风电机组额定功率为 1.5 MW;额定电压为 690 V;额定频率为 50 Hz;额定风速为11 m/s;叶片直径为 52 m;转子额定转速1 810 为 r/min;定子电阻标幺值为 0.004 p.u.;定子电抗标幺值为 0.100 p.u.;转子电阻标幺值为 0.010 p.u.;转子电抗标幺值为 0.100 p.u..

2.2 仿真分析

仿真时,正确选取 Crowbar 电路的阻值以及投切时间尤为重要,文献[8-15] 均以短路电流的分析方法对 Crowbar 电路的参数进行整定,在对这些文献进行综合分析的基础上,本文采用文献[15]的整定方法. 选取 Crowbar 电路的限流电阻标幺值为 0.8 p.u.,短路故障发生时,投入 Crowbar 电路,电网故障清除之前退出,具体的保护控制过程如前文所述.

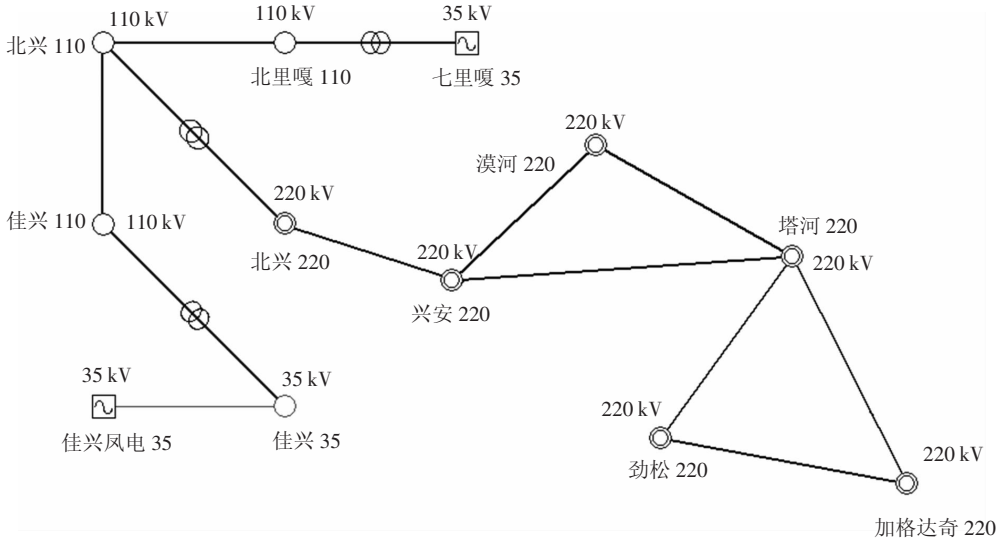
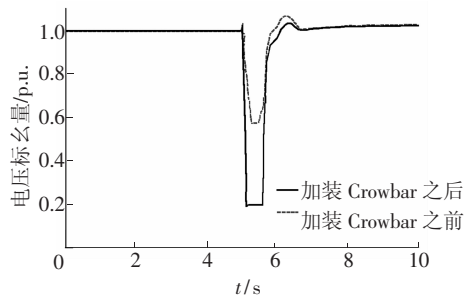
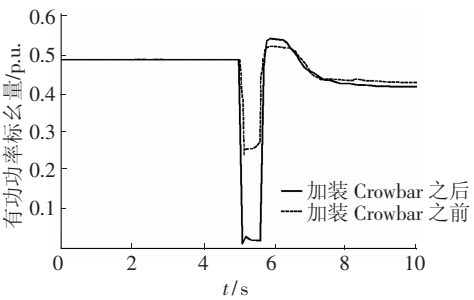


图 2　低电压穿越能力仿真系统接线图

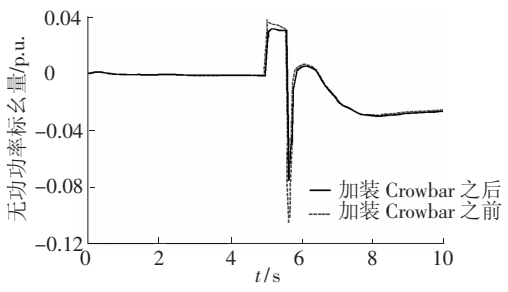
以图 2 所示的系统模型为基础，仿真分析在 5 s 时，系统发生三相短路故障，导致此风电机组机端电压跌落，故障持续时间为 625 ms，此风电机组没有 Crowbar 电路保护和加装了 Crowbar 电路的低电压穿越过程中的电压变化、有功功率和无功功率的变化曲线如图 3 所示.



(a) 风电机组电压变化曲线



(b) 风电机组有功功率变化曲线



(c) 风电机组无功功率变化曲线

图 3　加装 Crowbar 保护电路前后的电压、有功/无功功率仿真曲线

由图 3(a) 可以看出，没有 Crowbar 电路保护的 DFIG 电压最低跌落至额定电压的 57%，加装了 Crowbar 电路的 DFIG 最低可跌落至额定电压的 20%；图 3(b) 表明有功功率的最小出力受跌落深度的影响；图 3(c) 表明加装了 Crowbar 电路的 DFIG 的无功功率曲线更加平滑，有效地较少了 DFIG 在电网电压恢复时受到的冲击.

由仿真结果可见，加装了 Crowbar 电路并整定为合适电路参数的 DFIG 的低电压穿越能力显著提高了，具备了低电压穿越的能力. 验证了理论分析中，在电网电压跌落时，在 DFIG 转子侧加装 Crowbar 电路，增加了 DFIG 转子侧的电阻，可以抑制暂态故障电流的交流分量，使变流器能够正常工作，使 DFIG 具备更强的低电压穿越能力.

3　DFIG 加装 Crowbar 电路后的 LVRT 试验验证

3.1　LVRT 试验原理

以上仿真分析得出的结论证明了在理论上加装 Crowbar 电路提高 DFIG 低电压穿越能力的是完全可行的. 为了证实以上仿真分析结果的正确性以及在实际应用中可行性及可靠性，在上面所介绍的电网架构的基础上，在黑龙江省七台河佳兴风电场设计了相应的试验进行验证.

本文所采用的风电机组 LVRT 测试装置如图 4 所示，即采用阻抗分压结构形式. 装置中 CB1、CB2、CB3、CB4 均为可控断路器. 限流电抗器 $X1$、短路电抗器 $X2$ 均采用可调电抗器设计，通过改变阻抗分压比可实现多种跌落深度组合，可有效补偿因系统运行方式改变给跌落精度造成的偏差. 设备电压跌落和恢复功能的实现通过闭合和断开断路器 CB4 来实现.

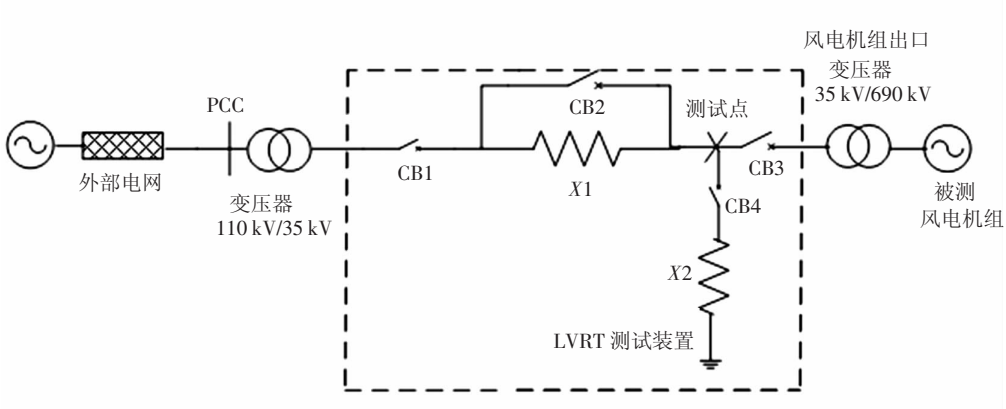


图 4 LVRT 测试装置图

3.2 试验结果

对某制造商生产的容量为 1.5 MW 并加装了 Crowbar 电路的双馈型风力发电机组，进行了 LVRT 现场试验，此试验的风电机组参数和 Crowbar 电路的参数与仿真时所建立的风电机组模型参数完全相同，Crowbar 保护电路的控制过程如前文所述. 将 LVRT 测试装置串接在此风电机组箱式变压器高压侧（35 kV）与电网之间. 风电机组在电压跌落至 20% 情况下参数如表 1 所示.

表 1 风电机组在电压跌落至 20% 情况下的参数

工况	电压跌落深度标幺量/p. u.	跌落时间/ms	跌落期间有功功率标幺量/p. u.	跌落期间无功功率标幺量/p. u.
空载	0. 20	628	—	—
小负荷	0. 21	628	0. 1	0. 1
大负荷	0. 21	630	0. 2	0

图 5 给出了三相空载试验测试曲线. 跌落前线电压标幺量为 1.01 p. u.，实际跌落深度为 0.2 p. u.，电压跌落时间为 628 ms.

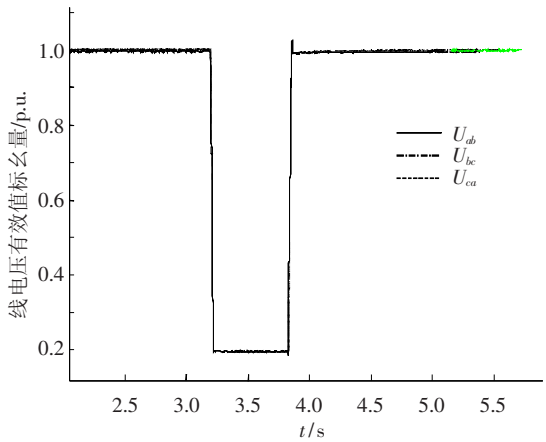


图 5 三相空载试验测试曲线

风电机组运行在有功功率标幺值为 0.1 ~ 0.3 的工况下，风电机组出口三相电压跌落至 20% 额定电压时的电压、电流、有功功率及无功功率的测试波形如图 6 ~ 8 所示. 由图 6 ~ 8 可知试验过程中实际电压跌落至 0.21 p. u.，持续时间为 628 ms. 试验前的风电机组有功功率标幺值为 0.22 p. u.，无功功率标幺值为 0 p. u.；电压跌落过程中有功功率标幺值为 0.1 p. u.，无功功率标幺值为 0.1 p. u. .

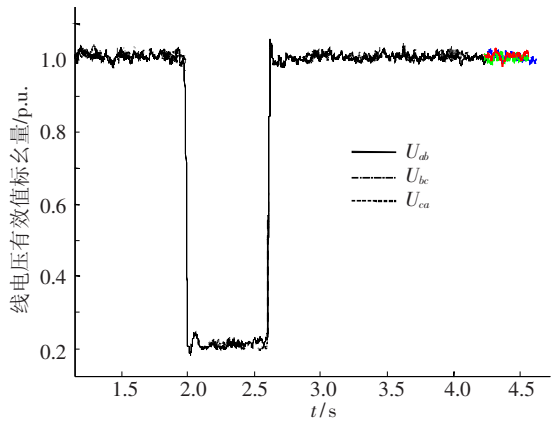


图 6 风电机组出口三相电压标幺量跌落至 0.2 p. u. 时的电压测试波形

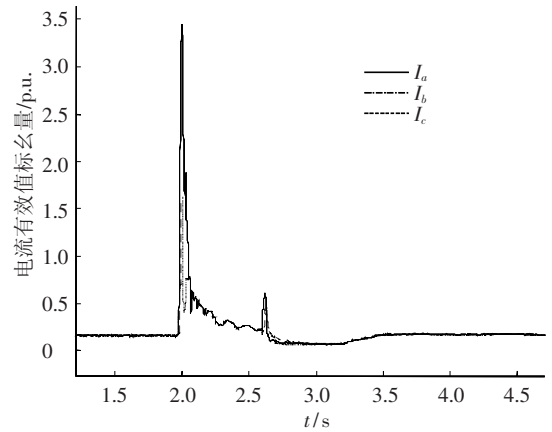


图 7 风电机组出口三相电压跌落至 20%U_N 时的电流测试波形

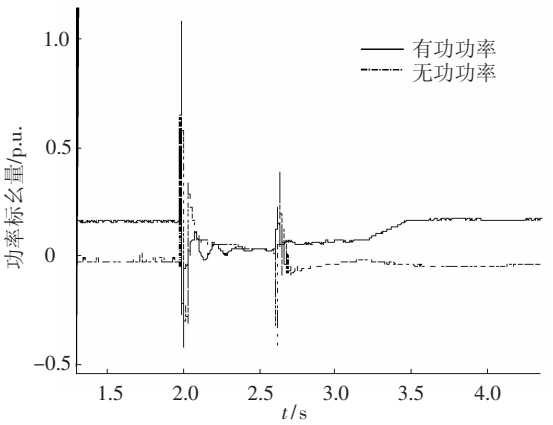


图 8　风电机组出口三相电压标幺量跌落至 0.2 p. u. 时的有功及无功功率测试波形

风电机组运行在有功功率标幺值大于 0.9 p. u. 的工况下,风电机组出口三相电压标幺值跌落至 0.2 p. u. 时的电压、电流、有功功率及无功功率的测试波形如图 9 ~ 13 所示. 由图 9 ~ 11 可知试验过程中实际电压标幺值跌落至 0.21 p. u. ,持续时间为630 ms. 试验前的风电机组有功标幺值为 0.95 p. u. ,无功功率标幺值接近于 - 0.1 p. u. ;试验过程中有功功率标幺值为 0.2 p. u. ,无功功率标幺值为 0 p. u. .

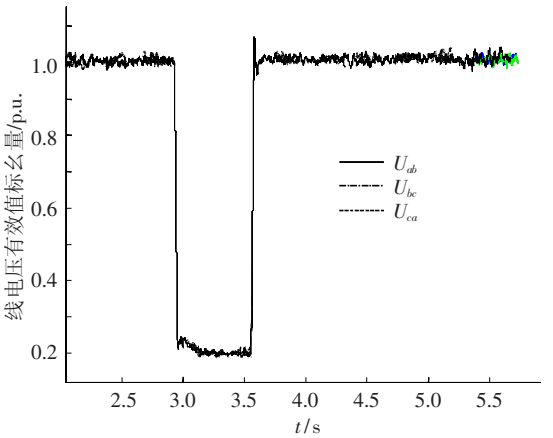


图 9　风电机组出口三相电压标幺量跌落至 0.2 p. u. 时的电压测试波形

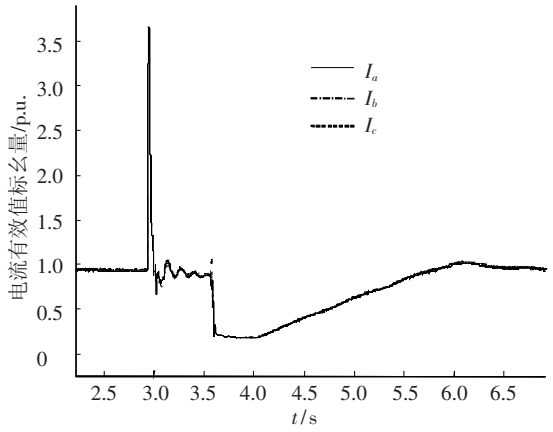


图 10　风电机组出口三相电压标幺量跌落至 0.2 p. u. 时的电流测试波形

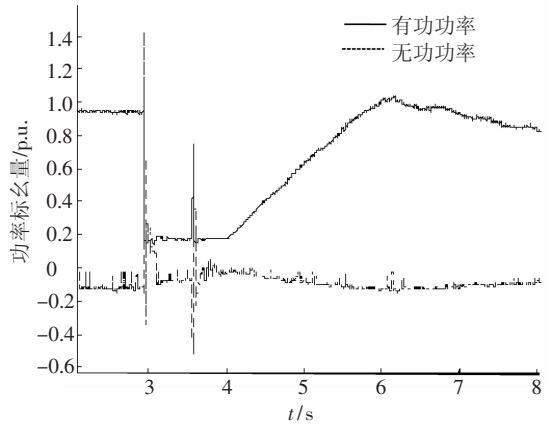


图 11　风电机组出口三相电压标幺量跌落至 0.2 p. u. 时的有功及无功功率测试波形

从试验波形图中可以看出: 1)该风电机组在其出口电压跌落额定电压的 20% 的情况下能够保证不脱网连续运行,满足国标要求. 2)在电压跌落结束后,风电机组的有功功率均可以以每秒不小于 10% 额定功率的变化率恢复至故障前的值,故障结束后的有功功率恢复时间满足国标要求.

与仿真波形图 3 对比分析可知,仿真结果显示风电机组机端电压跌落深度为 0.2 p. u. ,故障持续时间为 625 ms;现场试验波形显示风电机组机端电压实际跌落深度为 0.21 p. u. ,故障持续时间为 628 ~ 630 ms. 可以看出,仿真分析数据与现场试验数据误差很小,充分说明了仿真分析的指导性和现场试验的准确性.

4　结　论

1)对 Crowbar 电路提高双馈风电机组的低电压穿越能力进行了理论分析,利用综合稳定程序(PSASP)对没有加装 Crowbar 电路和加装了 Crowbar 电路的双馈风电机组进行仿真比对,并利用风电机组低电压穿越试验装置验证了电网在发生故障时,已并网的加装 Crowbar 电路的 DFIG 具备低电压穿越能力.

2)在 DFIG 转子侧加装 Crowbar 电路,在电网电压跌落时,增加了 DFIG 转子侧的电阻,可以抑制暂态故障电流的交流分量,使变流器能够正常工作,使 DFIG 具备更强的低电压穿越能力.

3)当电网发生故障时,DFIG 可以通过改进控制策略使其具有一定的低电压穿越能力,但电压最低跌落至额定电压的 57%,而加装了 Crowbar 电路的 DFIG 可以跌落至额定电压的 20%,而且有效地较少了 DFIG 在电网电压恢复时受到的冲击,在理论上 Crowbar 电路明显提高了 DFIG 的低电压穿越能力.

4)通过对加装 Crowbar 电路的 DFIG 的低电压穿越能力的现场试验,验证了加装 Crowbar 电路的 DFIG 具备低电压穿越能力. 说明了加装 Crowbar 电路不仅在理论上可以提高 DFIG 的低电压穿越能力,在实际应用中也是完全可行的方法.

5)仿真模拟可以用于特定工程条件下的 Crowbar 电路参数整定,能够指导工程实际工作,由于低电压穿越试验具有一定的风险,为 Crowbar 电路的大量应用提供了一种工程整定参数的方法.

参考文献

[1] 张丽英,叶廷路,辛耀中. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25):1 - 9.

[2] 苏平,张靠社. 基于主动式 IGBT 型 Crowbar 的双馈风力发电系统 LVRT 仿真研究[J]. 电力系统保护与控制,2010, 38(23):164 - 171.

[3] 肖盛,张建华,郭世繁,等. 并网双馈风电机组低电压穿越能力研究[J]. 电网与清洁能源,2010,26(2):69 - 73.

[4] 闫广新,李江,张峰,等. 变速双馈风电机组低电压穿越功能仿真[J]. 电网与清洁能源,2009,25(6):49 - 52.

[5] 李晶,王伟胜,宋家骅. 变速恒频风力发电机组建模与仿真[J]. 电网技术,2003,27(9):14 - 17.

[6] LEDESMA P, USAOSA J. Doubly fed induction generator model for transient stability analysis [J]. IEEE Trans on Energy Conversion,2005,20(2):388 - 397.

[7] MAGUEED F A,SANNINO A,SVENSSON J. Transient performance of voltage source converter under unbalanced voltage dips[C]//DRPT 2004. Hong Kong: IEEE,2004:1163 - 1168.

[8] SUN T, CHEN Z,BLAABJERG F. Voltage recovery of grid-connected wind turbines with DFIG after a short circuit fault [C]//PESC2004. Xi'an: IEEE, 2004: 20 - 25.

[9] 郑斌,张新燕. 双馈感应式风力发电系统低压穿越能力仿真研究[J]. 电机技术,2011,32(2):38 - 41.

[10] CHOWDHURY B H, CHELLAPILLA S. Double-fed induction generator control for variable speed wind power generation [J]. Electric Power Systems Research, 2006, 76(12):786 - 800.

[11] 李建林,梁亮,许洪华. 双馈感应式风力发电系统低电压运行特性研究[J]. 电网与水力发电进展,2008,24(1):39 - 43.

[12] 李建林,许洪华. 风力发电中的电力电子变流技术[M]. 北京:机械工业出版社,2008:176 - 180.

[13] SLOOTWEG J G, DE HAAN S W H, POLINDER H, *et al*. General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations [J]. Power Systems, IEEE Transactions on, 2003, 18(1): 144 - 151.

[14] 张建华,王健,莫岳平,等. 双馈电机的 Crowbar 参数整定及保护特性研究[J]. 可再生能源,2011,29(2):33 - 38.

[15] 苏平,张靠社. 基于主动式 IGBT 型 Crowbar 的双馈风力发电系统 LVRT 仿真研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(23):164 - 171.

[16] 蒋雪冬,赵舫. 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.

[17] 唐彬伟,袁铁江,常喜强,等. 基于 Crowbar 电路的双馈感应风力发电系统低电压穿越的仿真分析[J]. 低压电器, 2012,12:26 - 31.

[18] 杜强,张惠娟,张同庆. 双馈风力发电机组撬棒电路保护技术的研究[J]. 电力电子技术,2011,45(8):48 - 50,92.

[19] 马文龙. Crowbar 保护在双馈异步风力发电系统电网故障穿越中的应用[J]. 电力自动化设备,2011,31(7):127 - 130.

[20] 程孟增,窦真兰,张建文,等. 电压跌落时带有 Crowbar 电路的双馈感应发电机的瞬态分析[J]. 电网与清洁能源,2012,28(5):54 - 60.

(编辑 魏希柱)