

Analysis on Low Voltage Ride Through of DFIG for Wind Power Generation

Cheng Zeng^{1,2}, Dajun Si³, Dada Wang⁴, Junzhen Peng^{1,2}, Jiao Wang²

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

Email: 609312011@qq.com

Received: Aug. 12th, 2013; revised: Sep. 5th, 2013; accepted: Sep. 13th, 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.

Abstract: System faults may result in voltage dip due to large proportion wind power in the system. And the system stability is influenced severely when wind farms exit. So the low voltage ride through (LVRT) characteristic of wind turbines is necessary to keep wind turbine units connected to the grid after system failure. This paper analyzes the principle of LVRT in doubly fed induction generators (DFIG) and control strategy of LVRT based on rotor crowbar protection, and builds the DFIG and LVRT model in the software PSCAD/EMTDC. Analyzing the inputting or not of crowbar protection on the influence of rotor current, it is concluded that crowbar protection makes the rotor current attenuation affect on fault, protection of the inverter, and reduces the fault current of the impact of wind turbines.

Keywords: DFIG; Voltage Dip; LVRT; Crowbar Protection

双馈风力发电机组低电压穿越技术分析

曾 成^{1,2}, 司大军³, 王达达⁴, 彭俊臻^{1,2}, 王 娇²

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

Email: 609312011@qq.com

收稿日期: 2013年8月12日; 修回日期: 2013年9月5日; 录用日期: 2013年9月13日

摘要: 当系统中风电装机容量比例较大时, 系统故障导致电压跌落后, 风电场切除会严重影响系统运行的稳定性, 这就要求风电机组具有低电压穿越(Low Voltage Ride Through, LVRT)能力, 保证系统发生故障后风电机组不间断并网运行。分析了双馈风电机组的 LVRT 原理和基于转子撬棒保护(crowbar protection)的 LVRT 控制策略, 在 PSCAD/EMTDC 中建立双馈风电机组的模型及其 LVRT 的控制模型, 分析了有无撬棒保护对转子电流的影响, 得出有撬棒保护对故障时转子电流起到衰减作用, 既保护了变流器, 又减少了故障电流对风电机组的冲击。

关键词: 双馈风电机组; 电压跌落; 低电压穿越; 撬棒保护

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。目前, 以 DFIG 风电系统为主的大型并网风电场的容量不断提升, 使得该类型发电系统与电网的相互影响作用变得

越来越重要, 如何进一步提高 DFIG 风电系统在电网异常或故障情况下的不间断运行能力成为当前研究的热点问题^[1-8]。

随着集中型并网风电场的大规模建设, 大大增加了风力发电容量在整个电力系统中的比例, 风电场和电网之间的相互作用也越来越明显, 因而必须加强考虑风力发电对电网安全与稳定性的影响, 研究先进的控制策略以及先进的保护设备迫在眉睫。在承受电力系统故障时, 双馈感应式风力发电机的能力有限, 因此研究 DFIG 低电压穿越技术具有很重要的意义。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。

对于当前应用较为广泛的双馈风电机组(Doubly-Fed Induction Generators, DFIG), 电网发生故障导致机组机端电压跌落时, 由于机械功率不会瞬时消失, 而此时对于多余为消耗的功率就会造成定子电流增加。由于转子与定子之间存在耦合作用, 快速增加的定子电流将导致转子电流急剧上升和变流器直流侧母线的过电压。因此, 电网故障时双馈风电机组控制策略研究的主要目标是限制转子过电流和直流过电压, 以免对转子侧变流器造成损坏^[9]。

对于 DFIG 系统, 转子侧增加保护电路是最常用的而且非常有效的方法。在电网发生故障时, 可以较为迅速的投入保护电路, 从而使转子中产生的大电流得到有效的抑制, 进而防止大电流对变频器造成不利。在电网电压跌落期间, 转子侧保护电路和背靠背变换器相互作用, 让发电机向电网输出较为合适的无功功率, 从而使电网电压能够迅速的上升。在电网故障的情况下, Crowbar 保护电路可以有效地对变频器提供保护, 并且可以迅速向电网馈送无功功率, 使电网电压恢复正常^[10]。

因此本文在 PSCAD/EMTDC 中建立了双馈风力发电机模型及常用的 LVRT 模型, 分析机端电压跌落时风电机组的运行特性。

2. 风电机组低电压穿越能力

低电压穿越能力是指在风力发电机组并网点发生电网故障的时候, 机组能够继续保持不脱网运行, 甚至能够向电网提供适当的无功, 使电网电压能够尽可能快的上升, 直到电力系统能够正常运行, 从而使风力发电机组能够“穿越”这个低压区域。

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。其中比较典型的有德国、美国等国家制定的 LVRT 标准。

1) 德国电网 LVRT 标准

图 1 为德国电网 LVRT 标准, 从图中可以看出, 当电网电压在曲线以上的区域时, 风机应该能够保持正常并网运行, 当电网电压下降到曲线下方时, 风机才能摆脱电网。且当电压位于图中阴影区域时, 还要求发电机向电网提供一定的无功, 使电网电压能够快速上升, 进而使风电机组能够正常运行。

2) 美国电网 LVRT 标准

图 2 为美国电网 LVRT 标准, 从图中可知: 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。

3. DFIG 模型

图 3 为双馈风电机组系统。

在忽略阻尼绕组影响的前提下, 感应发电机在同步旋转坐标系下的方程为:

电压方程:

$$\begin{cases} u_{sd} = R_s i_{sd} + p\psi_{sd} - \omega_s \psi_{sq} \\ u_{sq} = R_s i_{sq} + p\psi_{sq} + \omega_s \psi_{sd} \\ u_{rd} = R_r i_{rd} + p\psi_{rd} - (\omega_s - \omega_r) \psi_{rq} \\ u_{rq} = R_r i_{rq} + p\psi_{rq} + (\omega_s - \omega_r) \psi_{rd} \end{cases} \quad (1)$$

磁链方程:

$$\begin{cases} \psi_{sd} = L_s i_{sd} + L_m i_{rd} \\ \psi_{sq} = L_s i_{sq} + L_m i_{rq} \\ \psi_{rd} = L_m i_{sd} + L_r i_{rd} \\ \psi_{rq} = L_m i_{sq} + L_r i_{rq} \end{cases} \quad (2)$$

d - q 坐标系下, 发电机电磁转矩为:

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

转子运动方程:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (T_m - T_e) \quad (4)$$

式中 u_{sd} 、 u_{sq} 、 ψ_{sd} 、 ψ_{sq} 和 i_{sd} 、 i_{sq} 分别为定子侧电

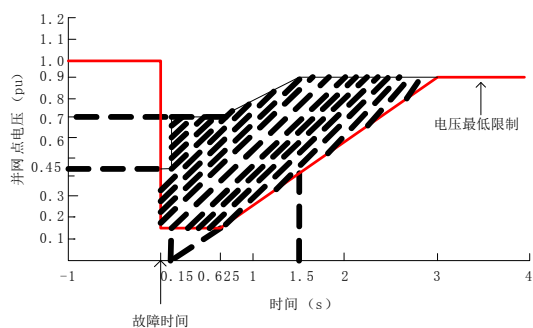


Figure 1. German LVRT standard
图 1. 德国 LVRT 标准

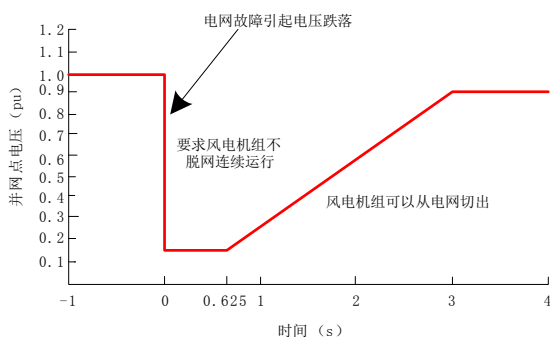


Figure 2. America LVRT standard
图 2. 美国 LVRT 标准

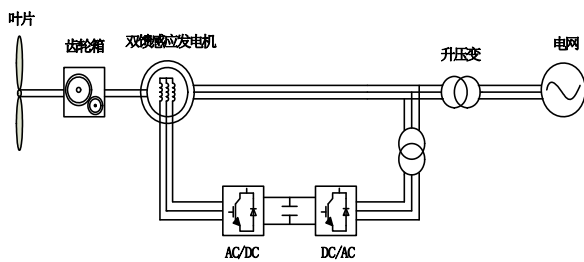


Figure 3. Doubly-fed wind power generator system
图 3. 双馈风电机组系统

压、磁链和电流；

u_{rd} 、 u_{rq} 、 ψ_{rd} 、 ψ_{rq} 和 i_{rd} 、 i_{rq} 分别为转子侧电压、磁链和电流；

R_s 、 R_r 分别为定、转子绕组电阻；

ω_s 、 ω_r 分别为同步磁场转速、转子电角速度；

T_m 、 T_e 分别为机械转矩和电磁转矩；

n_p 为电机极对数；

p 为微分算子。

4. 双馈电机的 LVRT 原理及模型

4.1. 转子撬棒保护模型

当风电机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，其典型结构如图 4 所示。各相均串联一个可关断晶闸管和一个电阻器，并与转子侧变流器并联。

变流器的过流能力一般为 2~3 倍额定电流，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。

4.2. LVRT 控制

在外部系统发生故障时，双馈发电机机端电压突然降落，定子电流增大，在转子侧感应出较大的电流，系统此时无法正常向电网输送电能。由于风力惯性较大，调桨系统在很短的时间内能调节的范围比较有限，于是捕获的风能将有一部分过剩，此时转子的转速将增大，只通过控制来调节显然是不能给这些能量一个释放通道的。所以单纯靠控制策略的改进将难以实现低电压穿越，必须增加硬件辅助电路为系统多余的能量提供释放通道。对于双馈型风机，增加硬件电路最为常用的就是转子侧增加保护电路。此保护电路将多余能量吸收，避免转子侧变流器受到大电流损坏，且使机组持续运行，不致从电网解列^[11]。双馈变速风电机组的控制过程如下：

- 1) 当转子侧电流超过设定值时，转子撬棒投入运行，转子侧变流器断开，电网侧变流器及定子侧仍与电网相连；
- 2) 风力机桨距角控制系统即刻启动，以减少风力机捕获的功率，减小机械转矩；
- 3) 根据具体设置退出转子撬棒保护，系统恢复正常运行。

低电压穿越控制策略如图 5 所示。

当发生电网电压跌落故障，双馈电机定子和转子出现过流，定子或转子电流一旦超过设定的电流上限，即刻投入转子侧 Crowbar 电路、封锁转子侧变流器输出脉冲；当定子和转子电流同时低于设定的下限电流时，切出转子侧 Crowbar 电路、恢复转子侧变流器的工作。转子侧 Crowbar 电路的投切以定子和转子是否出现过电流为判断条件，不依赖于电网故障信号的检测。图 5 为转子 Crowbar 电路投切原理图，图中

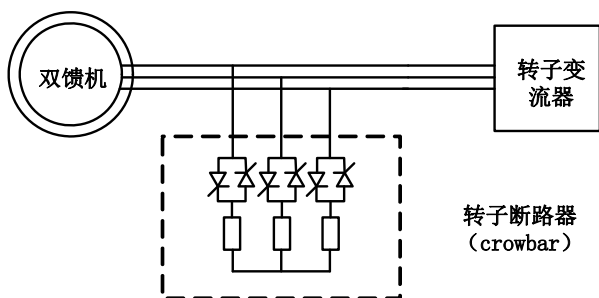


Figure 4. Crowbar typical structure figure
图 4. Crowbar 典型结构图

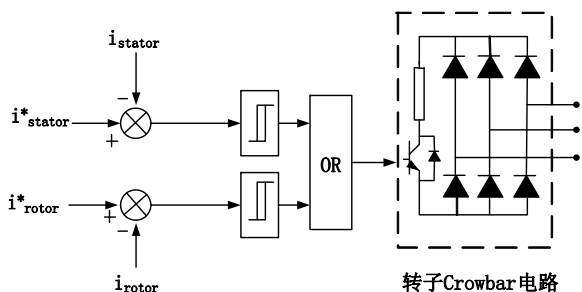


Figure 5. Rotor crowbar the circuit principle diagram of the cutting
图 5. 转子 Crowbar 电路投切原理图

i^*_{stator} 和 i^*_{rotor} 分别为定子和转子电流 Crowbar 电路动作设定值; i_{stator} 和 i_{rotor} 分别为定子和转子电流实际值。

5. 风电机组 LVRT 仿真

5.1. 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 13.8 kV, 电机参数为: $r_s = 0.0054 \text{ pu}$ 、 $x_s = 0.102 \text{ pu}$ 、 $r_r = 0.00607 \text{ pu}$ 、 $x_r = 0.11 \text{ pu}$ 、 $x_m = 4.362 \text{ pu}$ 。

5.2. 仿真分析

取非故障情况风电场以恒定风速 15 m/s 正常运行时, 转子电流波形如图 6 所示。

设置风力发电机出口 PCC 点处 1.5 s 发生三相接地短路故障, 故障持续时间为 0.5 s, 投与不投保护情况下仿真各参数变化情况如下图所示。

如图 7 所示, 在未投入 crowbar 保护时 1.5 s 电压跌落 74%, 此时定子电压和电网电压之间的差值电压加在定子电阻和漏感上, 定子回路就会产生很大的瞬

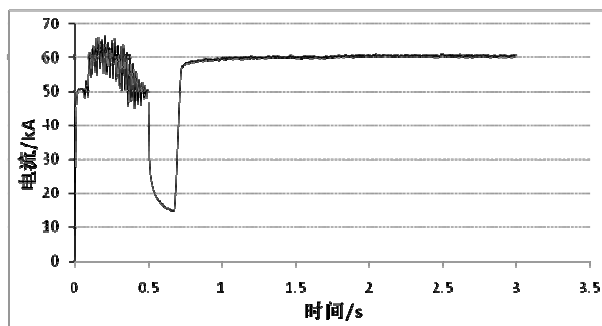


Figure 6. The rotor side current
图 6. 转子侧电流

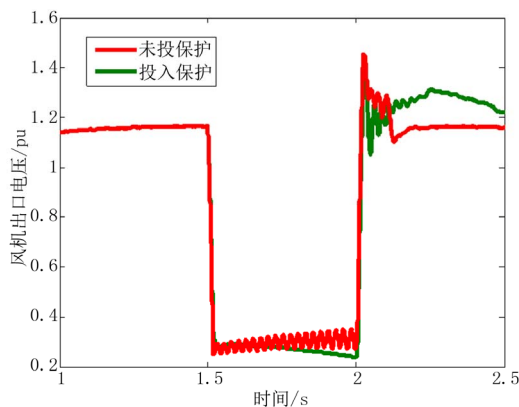


Fig.7 wind turbines export voltage changes
图 7 风机出口电压变化情况

态故障浪涌电流。由于定、转子之间的强耦合, 故障电流立刻被传递到转子侧, 如图 8 所示, 1.5 s 故障后转子电流迅速上升达到 103 A, 比正常运行时 60 A 高出了 43 A 的电流, 造成转子侧过流, 对变流器会造成致命性的伤害。又因为电压骤降引起电磁转矩变小, 而此时机械转矩增加, 如图 9 所示, 所以运行滑差增大, 使馈入转子的功率增加, 进一步引起转子回路的过压和过流。大电流还会引起电机铁芯饱和、电抗减小, 实际转子电流还会增大。又由于故障前电机运行在超同步状态, 转子能量流经转子侧变化器之后, 部分被网侧变流器传递到电网, 剩余部分为直流母线电容充电, 导致母线电压快速升高, 如图 10 所示。如果此时不采取相应的保护措施, 定、转子绕组紧靠自身电阻和漏抗不足以抑制浪涌电流, 过大的电流和电压会对励磁变化器、定、转子绕组及母线电容造成损坏。转子侧变换器也会因为过电流而退出运行, 此时电机会因无法控制励磁电流而失去对电磁转矩的控制, 发电机转速会在短时间内加大, 当达到风力发电机的转速极限时就会引发刹车而导致电机退出运行。

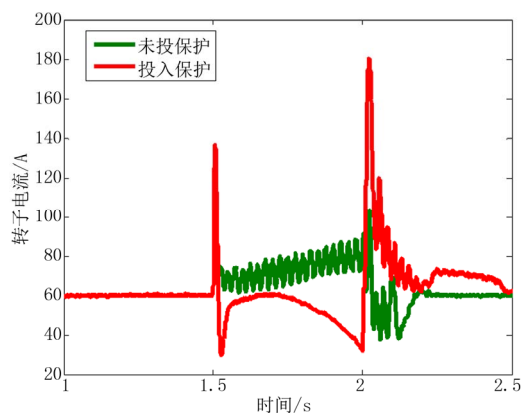


Figure 8. Rotor current changes
图 8. 转子电流变化情况

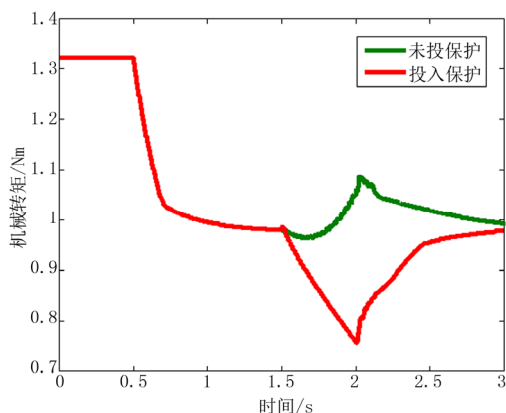


Figure 9. Mechanical torque changes
图 9. 机械转矩变化情况

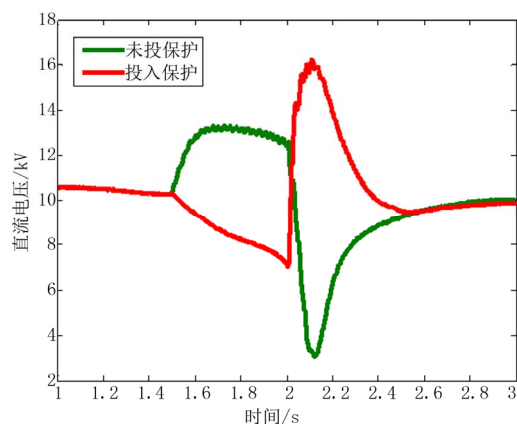


Figure 10. DC voltage changes
图 10. 直流电压变化情况

这将很难满足日益严苛的电网规则对发电系统的要求。因此需要在原有系统结构上增加一个故障处理设备——Crowbar 电路。它在电网电压瞬间骤降之后将双馈发电机转子短路，防止发电机转子回路额定涌电流流入变流器，实现对变化器的保护。如图 11 和 12

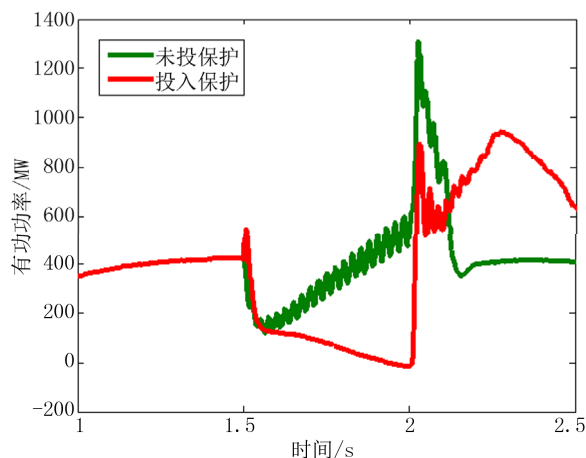


Figure 11. Active power changes
图 11. 有功功率变化情况

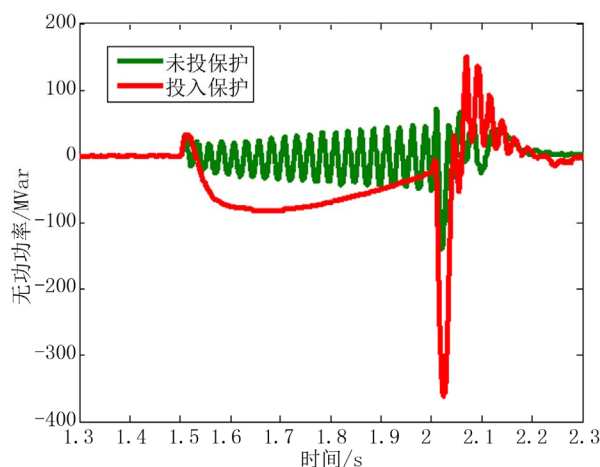


Figure 12. Reactive power changes
图 12. 无功功率变化情况

所示，保护投入将让有功很快恢复到额定输出状态，但是保护的动作用会使发电机向电网吸收大量无功，对电压恢复造成影响，这还需进一步改进。由于阻止了能量从发电机转子传递到直流母线中，直流母线电压的升高也得到了抑制，从而保护 DFIG 系统中直流母线电容器。Crowbar 电路可以迅速衰减发电机转子中故障浪涌电流，减小发电机组的冲击，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，满足电网要求。

6. 结论

为了评价电网故障下大容量并网双馈风电机组在现有 Crowbar 保护下是否能穿越过低电压状况，到底 Crowbar 保护对低电压穿越是够有贡献。本文在建立双馈式风力发电机组数学模型和控制策略的基础

上, 对双馈发电机组的 LVRT 原理进行分析, 并实际加入了 Crowbar 保护并与没有加入保护前情况进行仿真对比。结果表明, 采用 Crowbar 保护电路可以有效迅速的闭锁变流器, 并且转子电流在经过保护电路后明显减少, 减小了对发电机组的冲击, 对 DFIG 系统的有功、无功功率的恢复起到一定作用, 实现对电网的无功功率支撑, 使双馈风电机组成功越过低电压阶段, 满足电网要求。

参考文献 (References)

- [1] E.ON Netz GmbH. Grid code for high and extra high voltage. 2006. <http://www.Eon-netz.Com>
- [2] I. Erlich, M. Wilch and S. C. Felte. Reactive power generation by DFIG based wind farms with AC grid connection. Proceedings of 2007 the 12th European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, 2-5 September 2007: 1-10.
- [3] 杨淑英, 张兴, 张崇巍等. 电压跌落激起的双馈型风力发电机电磁过渡过程[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 85-90.
- [4] 李建林, 许鸿雁, 梁亮等. VSCF-DFIG 在电压瞬间跌落情况下的应对策略[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(19): 65-68.
- [5] 姚骏, 廖勇, 唐建平. 电网短路故障时交流励磁风力发电机不脱网运行的励磁控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(30): 64-71.
- [6] 胡家兵, 贺益康. 双馈风力发电系统的低压穿越运行与控制[J]. 电力系统自动, 2008, 32(2): 49-52.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 王伟, 孙明冬, 朱晓东. 双馈式风力发电机低电压穿越技术分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(23): 84-89.
- [10] 魏林君, 迟永宁, 赵建国, 王伟胜. 双馈变速风电机组低电压穿越控制[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(2): 41-45.
- [11] 关宏亮, 赵海翔, 迟永宁等. 电力系统对并网风电机组承受低电压能力的要求[J]. 电网技术, 2007, 31(7): 78-82.