

# 双馈风电机组中 Crowbar 保护综述

魏丽丽, 晁 勤, 袁铁江

(新疆大学电气工程学院 新疆 乌鲁木齐 830047)

**摘要:** 电网要求风电机组具有一定的低电压穿越能力(LVRT) 特别是双馈式风机(DFIG) 在电网的广泛应用, 研究DFIG的LVRT尤为重要。主要讲述了采用Crowbar保护电路提高DFIG的LVRT, 包括转子侧Crowbar保护和直流侧Crowbar保护, 并对Crowbar保护电阻大小的合理选择做了简要分析, 以及对Crowbar电路投切时间的选择做了详细说明, 在此基础上选择Crowbar保护可以大大提高风机的LVRT功能。

**关键词:** 低电压穿越; 转子侧 Crowbar 保护; 直流侧 Crowbar 保护; 保护电阻; 投切时间

**Abstract:** A certain low voltage ride through capability (LVRT) of wind turbine is required by power grid, in particular, the doubly-fed wind turbine (DFIG) is widely used in the grid, so studying LVRT of DFIG is particularly important. The crowbar protection circuit is adopted to improve LVRT of DFIG, including the crowbar protection of rotor side and the crowbar protection of DC side. How to select the reasonable size of crowbar protective resistor is analyzed briefly, and the selection of switching time for crowbar circuit is described in detail, so on this basis, selecting the crowbar protection can greatly improve the function of LVRT.

**Key words:** low voltage ride through (LVRT); crowbar protection of rotor side; crowbar protection of DC side; protective resistor; switching time

中图分类号: TM772 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)01-0012-04

## 0 引言

当电网故障时导致端电压骤降,引起转子过流、转速的升高以及电磁转矩的剧烈振荡,使双馈机组从电网中脱离,进而可能导致整个电网的崩溃,所以保持风机短时间持续并网非常重要。针对此问题国内外学者提出了多种控制策略,文献[1]提出利用串联制动电阻在电网故障时提升风电机组的端电压并吸收过剩有功功率进而提高风电场低电压穿越能力;文献[5]提出在改进控制策略的基础上加入静止无功补偿器的方法来实现双馈风机的低电压穿越功能;文献[6]提出一种改进转子励磁变换器控制算法和定子磁链的消磁方法来改善双馈机的低电压运行特性;文献[11]提出了基于电机暂态磁链补偿技术的控制策略,控制转子电流空间矢量和相应的漏磁场分量,以抵消定子磁链中的暂态直流分量和负序分量以避免转子过电流;文献[12]提出采用定子侧电力电子开关的方法,当故障发生时将电机定子暂时与电网切断,直到电网电压恢复到一定值之

后再快速重新并网,以避免电压突变给电机带来的电磁振荡和转子过压等问题,并且不会消耗额外的电网无功功率;文献[16]提出定子侧加装串联电抗,以提高电机定子侧的端电压,从而达到抑制磁链振荡的目的。虽然针对低电压穿越提出了很多控制策略和方案,但目前主要采用Crowbar电路来实现电压跌落时变速恒频双馈风机的不间断运行。

## 1 Crowbar 的类型

Crowbar 开关是借鉴国际测试领域内的先进技术,利用电容器的瞬间对大电感放电,当电流达到峰值时,触发Crowbar开关,使电流延续通过从而达到较长的放电形式的一种方式。按照所用元件的不同,Crowbar分为主动式(active)和被动式(passive)两种类型,其中Passive Crowbar保护中使用的器件是晶闸管,而Active Crowbar保护中采用IGBT,主要的区别在于能否强制关断。Passive Crowbar是一种自我保护形式的Crowbar电路,当电网发生故障引起转子电流升高时会触发Crowbar保护动作使风机

基金项目:新疆科技支撑项目(201091204);新疆高技术支撑计划项目(201132116)

在短时间内脱离电网,一旦 Crowbar 保护电路动作后难以自动关断,一般需要双馈电机定子从电网脱离以及转子电流衰减殆尽后,晶闸管才能回到其阻断状态,等并网条件满足时双馈电机才能重新并网运行。Active Crowbar 是一种自关断保护,当端电压骤降导致转子侧电流或直流母线电压增大到预定的阈值时触发 IGBT 开关元件动作,同时转子侧变流器中所有开关器件被关断,转子侧变换器被短接,使得转子故障电流只能流过 Crowbar 保护电路,使双馈式网机(DFIG doubly-fed wind turbine)在短时间内持续并网运行。当 DFIG 转子电流和转子变换器直流电压降低到保护值以下时,保护电路的开关器件再次动作,DFIG 就从鼠笼式异步电机的恒速运行状态过渡到变速运行状态,从而实现了一定的低压穿越(low voltage ride through, LVRT)能力。

## 2 电网故障时 DFIG 的瞬态变化分析

图1为简化的DFIG的结构图,其中双馈电机的定子直接与电网相连,转子通过交直交变换器与电网相连。

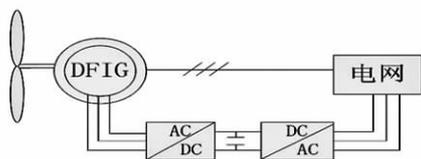


图1 简化的DFIG结构图

当电网发生故障引起机端电压骤降时,由于DFIG的定子直接与电网相连导致双馈发电机的定子电压跌落,同时引起转子电流的增大,并且使DFIG的电磁转矩和输出功率下降,电磁转矩的减小必定导致转子转速的上升,而转子电流的不断加大会导致直流侧电压升高,网侧变换器的电压以及有功、无功功率也都会产生振荡。因为端电压跌落引起的过流会损坏变换器,而过压会损坏发电机的转子绕组,为了保护DFIG转子侧的变换器,采用过流过压保护是非常关键的。

## 3 现有的 Crowbar 保护电路

### 3.1 转子侧 Crowbar 保护电路

转子侧 Crowbar 保护电路目的是当电网出现电压骤降时,为了保护转子侧变流器,立刻投入 Crowbar 保护装置,为转子侧的浪涌电流提供回路,以达到限制转子变流器过流和转子绕组过电压的作用,从而保持双馈电机在短时间内连续不脱网运行。目前转子侧典型的 Crowbar 电路有以下3种。

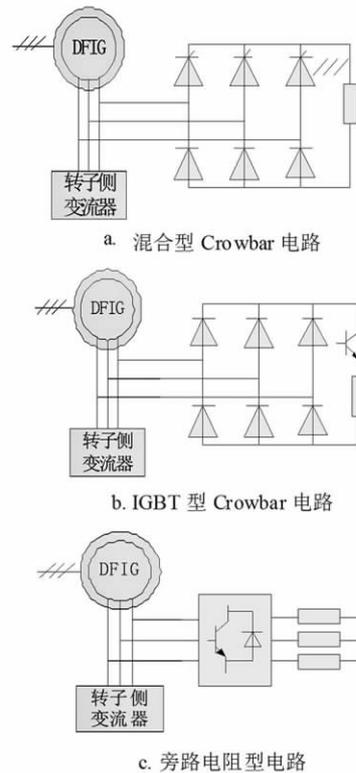


图2 转子侧 Crowbar 保护电路

(1) 混合型 Crowbar 电路(如图2a)。每个桥臂由二极管和 GTO 串联组成,直流侧串有吸收电阻。当电网正常工作时,Crowbar 保护电路不动作,当有故障产生引起转子过流、过压时,Crowbar 保护电路迅速投入电路工作,短路转子侧变流器使转子旁路形成回路,分担转子上的部分电流和电压,从而起到保护转子侧变流器的作用。

(2) IGBT 型 Crowbar 电路(如图2b)。每个桥臂由两个二极管串联组成,直流侧由一个 IGBT 和一个吸收电阻串接而成。当系统正常工作时,Crowbar 保护电路不工作,当转子过流或转速升高时,在检测信号的作用下导通 IGBT,使 Crowbar 电路投入运行,吸收电阻消耗过剩的能量,起到泄流保护作用。

(3) 旁路电阻型电路(如图2c)。当电网电压跌落时,通过功率开关器件将旁路电阻连接到转子回路中,这就为电网故障期间所产生的大电流提供

了一个通路,从而达到限制转子过电流,保护变流器的作用。

### 3.2 直流侧 Crowbar 保护电路

直流侧 Crowbar 保护电路并联在电容的两端,当电网正常运行时,Crowbar 保护电路不工作。当电网电压突然跌落时,导致直流侧输入功率大于输出功率,此时 Crowbar 电路立刻投入运行,消耗直流侧多余的能量,以限制直流侧电压的上升,从而保护了直流母线电容和变流器的安全。其直流侧典型 Crowbar 电路有以下3种。

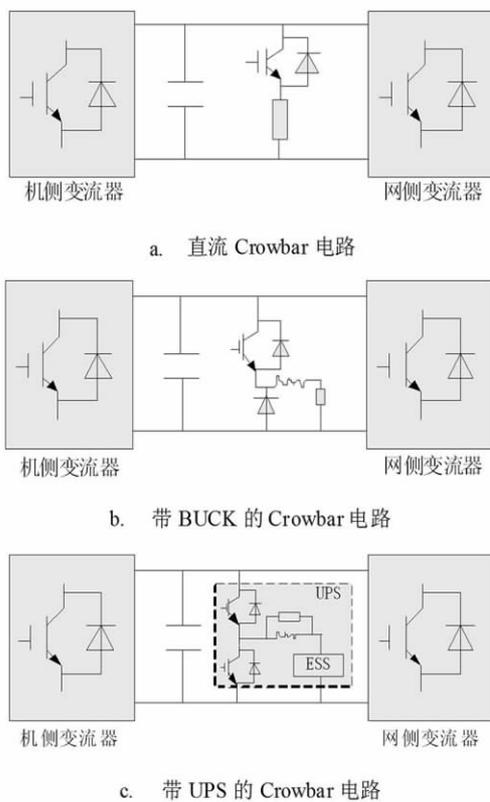


图3 直流侧 Crowbar 保护电路

(1) 直流侧 Crowbar 电路(如图3a)。当电网电压突然降低时,引起转子过电流,过电流流过直流母线电容,引起电容电压的波动,同时网侧变流器控制直流母线电压的能力减弱,不能及时将转子侧过剩的能量传递到电网上,可能导致直流母线电压迅速上升,从而危害直流母线电容的安全。此时投入直流 Crowbar 保护电路,利用电阻消耗转子侧多余的能量,为过剩能量提供适当的通道,防止直流母线电压过高。

(2) 带 BUCK 的 Crowbar 电路(如图3b)。当电网电压突然降落时,导致转子过流和直流母线电容

过压,此时使用 BUCK 电路能有效降低直流母线电压和吸收转子侧多余的能量,从而保证了变流器的安全。

(3) 带 UPS 的 Crowbar 电路(如图3c)。在电网电压下降时使用 UPS(uninterruptible power supply)维持直流母线电压一定范围内,UPS 中的 ESS(energy storage system)使用超级电容储能,当直流侧电压升高时,通过变换器把多余的能量储存在储能设备中;当直流侧电压下降时,通过电力电子开关把储存的能量释放出来,为超级电容器充电,同时可以利用储能设备的能量为电网提供有功功率,实现能量双向利用,保持直流侧电压的稳定。

## 4 Crowbar 电阻大小的选取

Crowbar 电路中的电阻  $R_c$  的选取很重要, $R_c$  阻值选择过大会导致转子电流衰减越快,但过大的  $R_c$  会导致网侧变流器中功率开关器件和转子侧变流器的交流侧过电压,从而会损坏变流器,并使直流母线电压振荡幅值增大;而阻值过小不能起到限制转子过电流的作用,而且可能故障清除后 Crowbar 仍在运行。对此相关文献中列出了选择 Crowbar 电阻  $R_c$  的两条基本原则:一是  $R_c$  应足够大,以达到限制转子故障电流幅值的要求;二是不应过大,避免电流经转子变流器上反并联二极管向直流母线充电,造成直流母线电压陡升。由文献[16]可知 Crowbar 电阻的最佳选择范围如下。

1)  $R_c$  在整定范围的最小值

$$R_{cmin} = \frac{\sqrt{U_s^2 - \omega_s^2 L_\sigma^2 I_{safe}^2}}{I_{safe}} \quad (1)$$

2)  $R_c$  在整定范围的最大值

$$R_{cmax} = \frac{U_{dc} \omega_s L_\sigma}{\sqrt{3U_s^2 - U_{dc}^2}} \quad (2)$$

式中  $U_s$  为定子电压幅值; $U_{dc}$  为直流母线正常工作上限值; $L_\sigma$  为定转子总漏磁,即  $L_\sigma = L_{\sigma s} + L_{\sigma r}$ ;  $I_{safe}$  取 1.2 倍转子额定电流; $\omega_s$  为同步电机角速度。

3) 结合式(1)和式(2)的计算可得到电阻  $R_c$  的合理取值范围,即为了对短路电流的抑制效果更好, $R_c$  一般在合理取值范围内取较大值,即  $R_c = \lambda R_{cmax}$ ,其中  $\lambda$  为安全裕度系数,一般取 0.9~0.95。在合理

范围内选取 Crowbar 阻值,既可以有效抑制故障期间的转子过电流,又有助于故障后的电网电压恢复。

### 5 Crowbar 投切时间选择

当电网故障导致转子电流或直流母线电压增大到预定的阈值时触发 IGBT 开关元件动作,这时 Crowbar 保护电路投入,同时旁路转子侧变换器使转子故障电流只能流过 Crowbar 保护电路,消耗多余能量,从而保持双馈机组的不脱网运行。

Crowbar 的切出时间是 LVRT 控制的重要指标,过早或过晚切除 Crowbar 都会对 DFIG 的 LVRT 效果产生较大影响,因此 Crowbar 切出时间的选择很关键。由文献[17]、[18]可知 Crowbar 保护电路应在故障清除前切出,而且 Crowbar 的切出时间离故障清除时间越短,系统的响应越理想。这样可以使得机端电压、DFIG 电磁转矩、转子电流和转速、直流侧电压、定子侧有功功率和无功功率的振荡最小,系统恢复时间最短,从而提高了故障清除后电网恢复稳定运行的能力。

### 6 结 语

Crowbar 保护电路虽然在实现低电压穿越时简单可行,而且不对系统正常运行产生影响而被广泛应用,但难点在于 Crowbar 电阻的选择,阻值选择过大或过小都会对低电压穿越能力产生很大影响,此外 Crowbar 保护电路中增加了许多硬件设备,大幅度地增加了风机的运行成本,因此随着低电压穿越技术的发展,改进 Crowbar 结构或寻求其他更为简单有效便宜的方法来提高低电压穿越的可靠性也是非常必要的。

#### 参考文献

[1] 王虹富,林国庆,邱家驹,等. 利用串联制动电阻提高风电场低电压穿越能力[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(18): 81-85.

[2] 李建林,赵栋利,李亚西,等. 适用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.

[3] 徐殿国,王伟,陈宁. 基于撬棒保护的双馈电机风电场

低电压穿越动态特性分析. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 29-36.

[4] Abbey C, Joos G. Effect of Low Voltage Ride Through (LVRT) Characteristic on Voltage Stability [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2005, 41(3): 1-7.

[5] 李建林,孔德国,赵斌,等. 一种风力发电机组低电压穿越控制方法: 中国 200810106044 [P]. 2008-09.

[6] 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励磁控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 164-170.

[7] 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.

[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.

[9] 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.

[10] Moren J, Haan SWH. Ride-through of Wind Turbines with Doubly-fed Induction Generator During a Voltage Dip [J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 2005, 20(120): 435-441.

[11] Da Wei, Xiang, Li Ran, Tavner PJ, Yang S. Control Of a Doubly-fed Induction Generator in a Wind Turbine During Grid Fault Ride-through [J]. IEEE Trans. Energy Conversion, 2006(21): 652-662.

[12] Ekanayake JB, Holdsworth L, Wu X, et al. Dynamic Modeling of Doubly-fed Induction Generator Wind Turbines [J]. Power System, IEEE Trans 2003(18): 803-809

[13] Petersson A, Lundberg S, Hiringer T. A DFIG Wind Turbine Ride-through System Influence on the Energy Production [J]. Wind Energy 2005 8(3): 251-263.

[14] 蒋雪冬,赵航. 应对电网电压骤降的双馈感应风力发电机撬棒控制策略[J]. 电网技术, 2008, 32(12): 84-89.

[15] 徐殿国,王伟. 基于撬棒保护的双馈电机风电场低电压穿越动态特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 22(30): 29-36.

[16] Xiangwu Yan, Giri Venkataramanan, Yang Wang, et al. Grid-fault Tolerant Operation of a DFIG Wind Turbine Generator Using a Passive Resistance Network [J]. IEEE Transactions on Power Electronics 2011 26(10): 2896-2905.

(下转第69页)

- 荷短期预测[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 56-58.
- [6] 牛东晓, 王建军, 李莉, 等. 基于粗糙集和决策树的自适应神经网络短期负荷预测方法[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(10): 30-34.
- [7] Bates J M, Granger C W J. Combination of Forecasts[J]. Journal of Operational Research Quarterly, 1969(20): 451-468.
- [8] 方仍存. 电力系统负荷区间预测[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
- [9] 马永开, 唐小我. 两种组合预测优化模型的分析 and 比较[J]. 电子科技大学学报, 1998, 27(1): 99-103.
- [10] Wang Jianzhou, Zhu Suling, Zhang Wenyu, et al. Combined Modeling for Electric Load Forecasting with Adaptive Particle Swarm Optimization [J]. Energy, 2010(35): 1671-1678.
- [11] 周四清, 王坚强. 基于多准则优化的组合预测方法[J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31(7): 1651-1654.
- [12] 毛李帆, 姚建刚, 金永顺, 等. 中长期电力组合预测模型的理论研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 53-58.
- [13] 周淦, 任海军, 李健, 等. 层次结构下的中长期电力负荷变权组合预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 47-52.
- [14] Zhao Junhua, Dong Zhaoyang, Xu Zhao, et al. A Statistical Approach for Interval Forecasting of the Electricity Price[J]. IEEE Trans. on Power System, 2008, 23(2): 267-276.
- [15] Khosravi A, Nahavandi S, Creighton D. Construction of Optimal Prediction Intervals for Load Forecasting Problems[J]. IEEE Trans. on Power System, 2010, 25(3): 1496-1503.
- [16] 徐惠莉, 吴柏林, 江韶珊. 区间时间序列预测准确度探讨[J]. 数量经济技术经济研究, 2008, 25(1): 133-140.
- [17] 游仕洪, 程浩忠, 谢宏, 等. 模糊组合预测在中长期负荷预测中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004(3): 54-56.
- [18] 曾鸣, 刘玮, 汪晓露. 含置信区间的改进 ARIMA 电价预测[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(18): 25-31.
- [19] Donald F, Specht. A General Regression Neural network [J]. IEEE Trans Neural Netw, 1991, 2(6): 568-576.
- [20] Cortes C, Vapnik V. Support Vector Networks [J]. Machine Learning, 1995, 20(1): 273-297.
- [21] Suykens J A K, Gestel V T. Least Squares Support Vector Machines [M]. World Scientific Publishing Company, 2003.
- [22] 赵文清, 朱永利, 张小奇. 应用支持向量机的变压器故障组合预测[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 14-19.
- [23] 安伟光, 孙振明, 张辉. 预测区间技术在航天器数据处理中的理论与应用研究[J]. 宇航学报, 2006(27): 109-112.
- [24] 陈攀, 李燕辉, 王文圣, 等. 电力负荷预测的灰色随机组合模型[J]. 四川水力发电, 2004, 23(3): 80-81.
- [25] 李建蹦, 吴小俊. 基于 Box-Cox 变换的分类器性能改进[J]. 计算机工程, 2009, 35(23): 172-174.

作者简介:

徐志向(1980), 男, 电气工程专业工学硕士, 工程师, 主要从事电力系统工程技术相关工作及研究。

(收稿日期: 2012-07-25)

(上接第15页)

- [17] 张靠社, 王媛, 胡德海. 基于 Crowbar 保护的双馈感应发电机组的低电压穿越研究[J]. 电网与清洁能源, 2011, 10(27): 66-71.
- [18] 孔宪国, 刘宗歧. 基于主动式 Crowbar 的双馈风电机组 LVRT 性能优化分析[J]. 现代电力, 2012, 29(1): 77-81.
- [19] 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, 23(38): 164-171.

作者简介:

魏丽丽(1987), 女, 硕士研究生, 研究方向为洁净能源与并网技术;

晁勤(1959), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为并网型风力发电系统及其控制方面。

(收稿日期: 2012-07-09)