

制动电阻对变速双馈风电机组故障穿越能力的影响研究

赵海岭¹, 黄伟²

(1 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2 新疆独山子石化公司乙烯电气部, 新疆 独山子 833600)

摘要: 为保持系统稳定, 必须要求风电机组具有故障穿越能力。双馈风电机组故障穿越能力已成为研究热点。介绍了故障穿越标准, 分析了双馈风电机组暂态特性与制动电阻的工作原理, 详细分析电网电压跌落情况下, 制动电阻接在风电场升压变压器低压侧与接在风电机组机端对双馈风机故障穿越能力影响。试验结果表明: 故障期间投入制动电阻, 能有效提升双馈风电场故障穿越能力。

关键词: 风力发电; 故障穿越; 制动电阻; 变速双馈风电机 (DFIG)

Abstract In order to improve the stability of power system, the capability of fault ride-through (FRT) is required for the large wind farms. The research on fault ride-through of doubly-fed induction generator (DFIG) has become a hot issue. The standards of fault ride-through are introduced, and then the transient characteristics of doubly-fed induction generator and the working principle of brake resistance are analyzed. The effects of brake resistance placed at the low side of the transformer of wind farm or the terminal of DFIG on fault ride-through of doubly-fed induction generators are analyzed in detail when there is a voltage dip in grid side. The test results show that the brake resistance can substantially improve the performance of low voltage ride-through (LVRT) of a DFIG wind farm when placing it at the low side of transformer of the wind farm.

Key words: wind power generation; fault ride-through (FRT); brake resistances; doubly-fed induction generator (DFIG)

中图分类号: TM732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2011)03-0001-04

0 引言

近几年, 风力发电技术作为可再生能源的一种重要形式, 在世界范围内得到迅速发展。尤其是变速恒频风力发电技术, 受到世界各国的亲睐。随着风电容量不断增大, 世界很多国家要求风电机组运行具有故障穿越功能^[1-3]。

目前, 对于如何提高风电机组的故障穿越能力, 国内外进行了大量研究。对于恒速恒频风电机组, 主要采用投切无功补偿装置与变桨距控制。变桨距控制缺陷是无法提供短时无功缺额。文献[1]通过仿真分析说明 STATCOM 对异步风电场的静态和暂态稳定性的贡献, 在故障时的无功支撑有效提高了风电场的故障穿越能力。文献[2-4]针对双馈风电机组, 在电网故障时采用 active crowbar 电路旁路转子侧变流器, 有效提升双馈风机的故障穿越能力。文献[6]通过在双馈风机直流侧增加卸荷电路来吸收多余能量, 达到稳定电压的目的。文献[7]利用串联制

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50867004)

动电阻提高风电场 LVRT 能力的方法, 提出基于转速-电压动态稳定域的制动电阻投切策略, 并针对基于恒速风电机组的典型风电场模型进行暂态仿真。文献[8]以某地区电网为例, 通过计算系统中所有母线依次发生短路时对风电机组端电压影响程度, 据此给出了双馈风电场 LVRT 功能中的电压限制值。串联制动电阻能够提高恒速异步风机的故障穿越能力已研究了很多年, 但能否提高变速恒频机组的故障穿越能力还很少有报道。这里主要针对制动电阻接在变速双馈风电场升压变电站的低压站与将制动电阻接在双馈风机机端, 在系统发生故障时, 对风电机组故障穿越能力的影响进行分析。试验结果表明: 不论将制动电阻接在风电场升压变压器处还是风机机端, 都能有效提高风电机组故障穿越能力。

1 故障穿越与双馈风电机组暂态特性

1.1 风电机组的故障穿越能力

故障穿越能力是指风电场 PCC 点的电压出现跌落时, 风电机组继续保持并网运行, 穿越这段故障时

间,甚至能为系统提供一定的无功支撑。所以故障穿越是对并网风机在电网出现电压跌落时仍保持并网的一种特定的运行功能要求^[5]。

德国的 E.ON 公司对风机低电压做出严格规定。风电机组的控制曲线图如图 1。

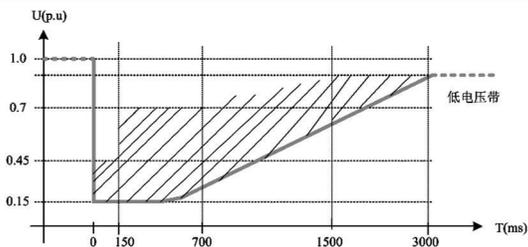


图 1 德国 E.ON 公司故障穿越功能标准

图中粗线以上区域是风电机组应该保持并网运行区域。如图 1 所示,电压降低至 0.15 p.u. 时要求风电机组在线运行 0.625 s, 0.45 p.u. 时要求风电机组继续运行 1 s, 0.7 p.u. 时继续运行 2 s 而电压在不低于 0.9 p.u. 时要求风电机组能够持续运行。

1.2 双馈风电机组暂态特性

双馈风电机组的结构是定子直接与电网相连,转子则通过一个背靠背的 PWM 变流器与电网相连。在电网发生故障时,电网电压的跌落直接反应在双馈风机定子侧。而定子磁链则不会发生突变,风轮机输入机械功率短时也不会减少,转子加速最终造成转子绕组的过电压与过电流^[9]。如果短时的过电流不能得到有效抑制,则不免会对 PWM 变流器的电力电子器件造成损坏^[10]。如果风机保护装置动作使得风机退出运行,有可能会加剧事故,这会对电网的稳定运行造成严重影响,因此,必须采取有效措施,来减少电网电压跌落时产生直流侧过电流,提高风机故障穿越能力。

2 串联制动电阻原理介绍

图 2 是风电场接入系统的模型图,在这里,制动电阻接在风电场升压变压器低压侧。串联制动电阻接在每台风机机端风电场模型如图 3 所示。串联制动电阻由电阻器、旁路开关和控制器组成。正常情况下,旁路开关处于闭合状态,将电阻器短接。在发生故障情况下,旁路开关断开,使电阻器接入电网,当故障消除,控制器使旁路开关闭合,从而电阻器退出运行。串联制动电阻的作用在于,在电网发生严重故障电压跌落很

低情况下,电阻器利用很大的短路电流产生的压降,抬升风机机端电压,吸收风机过剩有功功率,避免转子加速过多,提高了风电机组的故障穿越能力^[7]。

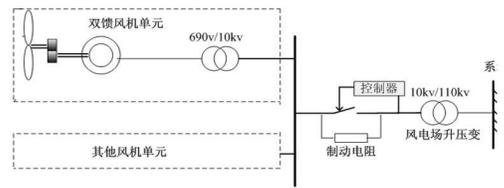


图 2 串联制动电阻接在升压变低压侧

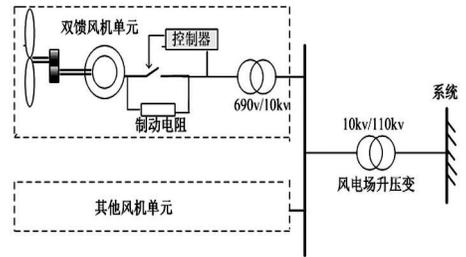


图 3 串联制动电阻接在双馈风机机端

3 制动电阻对故障穿越影响分析

主要考虑以下两种方案。方案 1:将制动电阻接在风电场升压变压器低压侧;方案 2:将制动电阻接在每台风机机端。在系统侧发生三相故障时,制动电阻对变速双馈风机故障穿越能力的影响。为增加分析结果的准确性,取以下假设条件。

- (1) 风电场风速保持不变为 14 m/s
- (2) 故障期间风电机组内部保护装置不动作;
- (3) 无桨距控制与无功补偿措施;
- (4) 设制动电阻投切控制器从判断故障到使开关动作总延时时间为 50 ms

3.1 算例系统

算例系统如图 4。算例中风电场采用“一机一变”,各风机经过机端升压变压器升至 10.5 kV,然后汇总后统一经过升压变压器接入 110 kV 系统中,再经过双回输电线路与等值外部系统相连,系统阻抗 $Z_s = 0.0164 + j0.4354$ 。PCC 为风电场接入系统的并网点。且在风电场 PCC 点接有 40 MVA 的负荷。风电场装机容量为 49.5 MW。机组采用恒功率因数控制的变速双馈风电机组。其中双馈风电机组的相关参数如下:机端电压为 690 V;额定功率为 1.5 MW;发电机转子电阻 0.0155 p.u. 转子电抗为 0.109 p.u. 定子电阻为 0.0078 p.u. 定子电抗为

0.175 p.u. 励磁电抗为 3.057 p.u. 电机参数 ω_g 为 1200 r/min; 风轮叶片参数 R 为 35.2 m, 发电机转动部分惯性时间常数 T_j 为 7.36 s 极对数为 3。

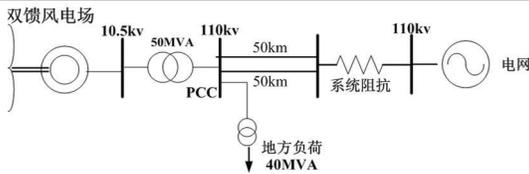


图 4 风电场接入电网的系统图

3.2 方案 1 结果分析

将制动电阻 (阻值取 15Ω)^[11] 接在风电场升压变压器低压侧, 系统侧在 1 s 时刻发生三相对地短路, 故障持续 0.3 s 结束。分别就以下三种情况进行仿真验证。

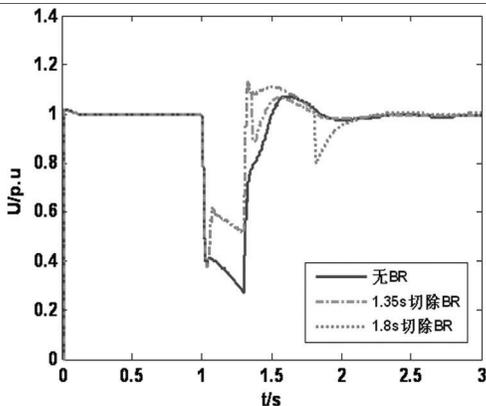


图 5 1号双馈风机机端电压

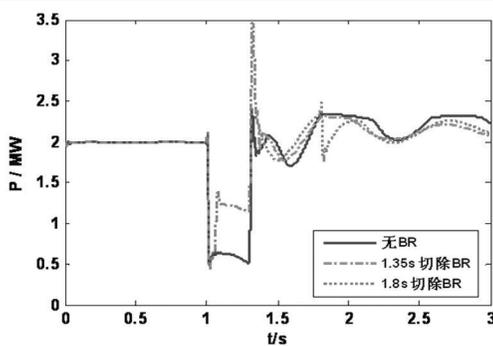


图 6 1号双馈风机机端有功功率

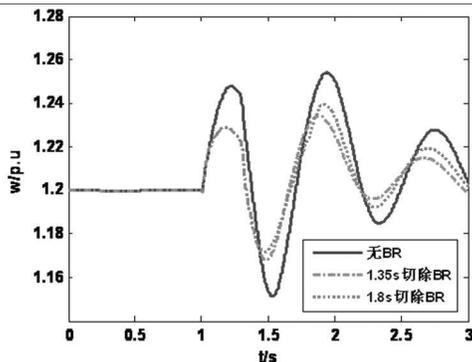


图 7 1号双馈风机转子转速

(1)故障期间不投制动电阻;

(2)时刻 1 s 故障发生, 1.05 s 制动电阻投入运行, 1.3 s 故障结束, 1.35 s 切除制动电阻;

(3)时刻 1 s 故障发生, 1.05 s 制动电阻投入运行, 1.3 s 故障结束并不切除制动电阻, 在 1.8 s 将制动电阻切除。

选取双馈风电场 1 号风机作为监测对象, 1 号风机的动态运行曲线如图 5 至图 7 所示 (机端电压、有功功率与转子转速)。

由以上仿真图可以看出, 风电机组正常运行时, 机端电压、输出有功功率均保持在额定值, 在 1 s 时刻发生三相故障时, 风电机组机端电压与输出电磁功率突然跌落, 且转子开始加速。此时将制动电阻投入系统运行, 由图 5 可以看出, 风机端电压只降低到正常电压值的 0.54 倍左右, 相比无制动电阻的情况, 风机机端电压抬升了近 0.2 倍正常值, 且故障切除后能很快回到正常值, 波动很小。但如果故障小时一段时间后切除制动电阻, 机端电压会有较大波动。由此可得, 故障期间接入制动电阻能明显提高风机机端电压。故障期间, 由于前面假设风力机无桨距控制, 风力机输入的机械功率不会减少, 在图 8 中, 不接制动电阻, 输出有功减少到 0.5 MW, 而接入制动电阻之后, 消耗了风机输出的过剩有功功率。所以相比无制动电阻接入的情况, 风机输出的电磁功率只减少到约 1 MW。制动电阻的投入, 有效减少风力发电机组的机械功率与电磁功率的不平衡^[8]。大风机的转子转速和无制动电阻时相比, 升高量也明显减小, 大大延缓风机加速, 如图 7 所示。

3.3 方案 2 结果分析

将制动电阻串接在每台风机机端, 电阻大小会使风机等值电路发生变化, 主要影响风电机组转子与定子阻抗参数, 考虑上述因素, 制动电阻阻值选择 0.01Ω , 故障方式与故障时间同上, 仍对以上三种情况进行仿真分析。选取双馈风电场 3 号风机作为监测对象, 3 号风机的动态响应曲线如图 8 至图 10。

在图 8 中, 3 号风机机端电压和无制动电阻相比, 抬升量不明显, 但在故障结束后能使机端电压很快回到正常值。但 1.8 s 时刻切除制动电阻, 会使风机机端电压发生较大波动, 使风机机端电压变得不稳定。从图 9 可以看出, 不投制动电阻, 在故障消失后风机输出有功不断波动。需经过较长时间才能稳定在额定值。但投入制动电阻风机有功减少量较小, 在

故障切除后能很快稳定到额定值。但 1.8 s 时刻切除制动电阻也会使功率发生波动。从图 10 可以明显看出,接入制动电阻可以较好地延缓风机转子加速。因此,制动电阻接在风机机端时,对机端电压提升不明显,但能很好稳定有功功率与转子转速。而且需要考虑制动电阻切除时间问题^[12]。

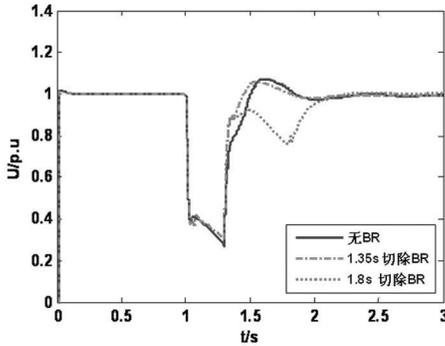


图 8 3号双馈风机机端电压

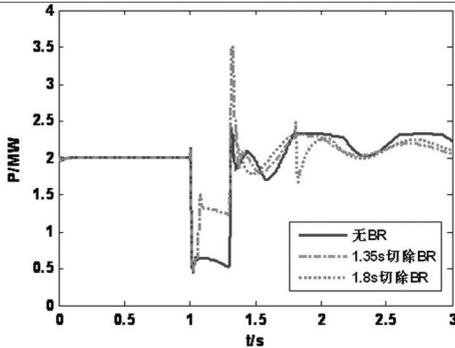


图 9 3号双馈风机机端有功功率

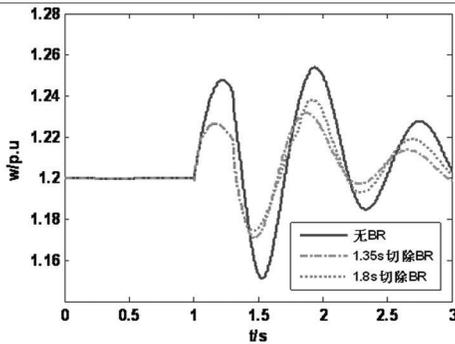


图 10 3号双馈风机转子转速

4 结 语

经过试验验证,可以得出以下结论。

(1)不论将制动电阻接在风电场升压变电站低压站处还是接在风电场每台机组机端,都可以提升风电机组故障穿越能力,有益于风机的暂态稳定性。

(2)将制动电阻接在风电场升压变电站低压站处,对于提升故障穿越要优于将制动电阻接在风机机端时的改善效果。

(3)在制动电阻投切方式上,需要考虑投切时间问题。

参考文献

- [1] 范伟,赵书强,胡炳杰.应用 STATCOM 提高风电场的电压稳定性[J].电网与清洁能源,2009,25(4):40-44.
- [2] 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.
- [3] 魏林君,迟永宁,赵建国,等.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.
- [4] 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.
- [5] 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学报,2008,20(2):1-8.
- [6] Abbey G, Joos G. Effect of Low Voltage Ride Through (LVRT) Characteristic on Voltage stability[C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting San Francisco 2005.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 胡家兵,孙丹,贺益康.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.
- [11] MORREN Johan, DE HAAN Sjoerd W H. Ride through of Wind Turbines with Doubly-fed Induction Generator during a Voltage Dip[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2005, 20(2): 435-441.
- [12] Andrew Causebrook, David J Atkinson, and Alan G. Jack. Fault Ride-Through of Large Wind Farms Using Series Dynamic Braking Resistors[J]. IEEE Transactions On Power System, 2007, 966-975.

作者简介:

赵海岭(1984),男,硕士研究生,研究方向风力发电与并网技术;

黄伟(1979),男,工程师,研究方向为电气自动化。

(收稿日期:2011-04-02)