

基于 DBR 的交直流复用 Crowbar 低电压穿越

邓友汉¹, 肖志怀¹, 程远楚¹, 张新龙²

(1. 武汉大学 动力与机械学院, 湖北 武汉 430072;

2. 中国电力科学研究院新能源所, 江苏 南京 210003)

摘要: 在深入分析双馈风力机组数学模型的基础上, 通过对现有低电压穿越方案的控制策略和效果的研究, 提出了基于动态刹车电阻(DBR)的交直流复用 Crowbar 低电压穿越方案。所述方案有 2 种工作方式: 当电网电压轻度跌落时, 运行于直流 Crowbar 工作方式; 当电网电压深度跌落时, 运行于交直流复用 Crowbar 方式。针对 2 MW 双馈风力发电机组进行了试验, 对设计方案进行了验证。研究表明, 所述方案对电网电压轻度跌落持续可控; 对电网电压深度跌落, 利用并联整流桥取代机侧变频器输送转子故障能量至直流母线, 规避了跌落瞬间机侧变频器容量不足的缺点, 至机侧变频器重启并联整流桥退出, 恢复背靠背变频连接。对不同程度电网电压跌落, 所述方案均能实现低电压穿越, 故障期间无功支撑满足电网导则要求。

关键词: 风电; 低电压穿越; 动态刹车电阻; 直流 Crowbar; 交流 Crowbar; 无功支撑

中图分类号: TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.06.003

0 引言

随着风力发电规模的扩大与单机容量的提高, 风力发电所产生电能在我国电网中所占的比重也逐渐增加。基于双馈感应发电机(DFIG)的风电系统具有变流器容量小、有功功率与无功功率可以单独调节、调速范围广等特点, 因此在风电场中被广泛应用^[1-2]。当电网电压降低时, DFIG 风力机机端电压下降、定子电流上升, 磁通下降, 感应的转子电流升高, 若不能抑制此电流, 会导致机侧变频器(GSC)过流或过压保护而退出运行, 将造成电磁转矩不可控, 引起风力机加速, 势必引起过速停车。当电网出现电压故障时, 大规模的风力机组与电网解列, 将降低电网电压的支撑能力, 影响电网运行的稳定性。所以, 很多国家都要求并网发电的风力机必须能实现低电压穿越(LVRT)^[3], 我国也于 2009 年提出了《风电场接入电网技术规定(修订版)》^[4]。

目前, 对电网电压跌落故障下 DFIG 机组的行为特性及提高其低电压穿越能力的研究, 已成为国内外风电技术研究的热点问题^[5]。已提出的方案有: 定子侧法^[6], 在电网电压故障期间, 定子侧并网开关断开, 将定子与电网暂时切除, 直至系统电压恢复又重新并网, 此方法严格意义上并非不脱网运行; 直流母线电容保护法^[7-8], 采用直流 Crowbar 吸收转子侧多余能量, 控制直流母线不过压, 而对故障期间的直流母线电压下降的处理方法是增加超级电容

UPS, 但此方法的成本过高, 工程大量应用受到了限制; 转子侧并联交流 Crowbar 方法^[9-12], 在电网电压跌落期间利用 Crowbar 泄放转子能量, 实现风力机的低电压穿越。

我国风力发电行业起步较晚, 但发展迅速, 大量已运行的风力发电机组不具备低电压穿越能力。为使风力发电机组实现低电压穿越, 一般常采用增加硬件的方法来实现 DFIG 在电网低电压故障下低电压穿越运行。鉴于我国电网导则对低电压穿越的要求为严格意义上不脱网, 直流母线电容保护法的成本较高, 因此, 我国现行实施低电压穿越的方案中, 发电机转子侧并联交流主动式 Crowbar 方案应用相对较多。

本文通过对电网电压骤降故障下 DFIG 的瞬态特性的研究, 分析了电压跌落故障对无穿越能力的 DFIG 机组的危害, 提出了 DFIG 低电压穿越运行的具体控制目标, 并对现阶段我国应用较多的转子侧并联 Crowbar 低电压穿越方案进行分析; 在此基础上, 提出了基于动态刹车电阻(DBR)的交直流复用 Crowbar 低电压穿越方案, 并对该方案在故障过程中的风力机低电压穿越可行性及正确性进行了验证, 对故障期间的无功支撑能力、运行安全性、故障过程持续可控性方面等进行了分析。

1 DFIG 的瞬态特性分析数学模型及风电场低电压穿越目标

为了研究 DFIG 风力机在电网电压跌落故障下的瞬态特性, 首先需要建立相应的系统数学模型。按电动机在同步速旋转坐标系下, DFIG 的电压和磁链方程分别为:

$$U_s = I_s R_s + \frac{d\psi_s}{dt} + j\omega_1 \psi_s \quad (1)$$

$$U_r = I_r R_r + \frac{d\psi_r}{dt} + j\omega_s \psi_r \quad (2)$$

$$\psi_s = I_s L_s + I_r L_m \quad (3)$$

$$\psi_r = I_s L_m + I_r L_r \quad (4)$$

其中, U_s 、 U_r 分别为定子、转子电压; I_s 、 I_r 分别为定子、转子电流; ψ_s 、 ψ_r 分别为定子、转子磁链; ω_1 、 ω_s 分别为同步角转速和转差角转速。

根据式(3)、(4)得出定子电流与转子电流的表达式为:

$$I_s = \frac{L_r \psi_s - L_m \psi_r}{L_r L_s - L_m^2} \quad (5)$$

$$I_r = \frac{L_s \psi_r - L_m \psi_s}{L_r L_s - L_m^2} \quad (6)$$

对 DFIG 机组而言, 定子、转子漏抗相对于励磁电抗很小。由于故障瞬间磁通不能突变, 电网电压跌落, 定子磁通中将产生一个直流分量, 此直流分量大小与电网跌落程度保持一致性, 即跌落越深此直流分量越大。系统电源跌落瞬间, 转子转速维持跌落前的转速。因转子旋转速度较大且跌落瞬间转速不会突变, 会在转子中感应出很大的短路电流, 当电网电压三相同时跌落至 0 时, 短路电流约为 5~10 倍的额定电流, 此电流将对定子、转子及变频器产生危害, 同时, 将引起风力机齿轮箱机械扭矩突变, 严重影响风力机的安全。根据电网电压跌落对 DFIG 风力机的影响分析, 结合《风电场接入电网技术规定(修订版)》的要求, 将风力机组实现低电压穿越的主要目标归结为:

- 电网故障期间, 维持规定时间内风力发电机组不脱网;
- 在电网故障期间, 保护风力发电机组的安全;
- 在满足安全和不脱网的要求下, 提供连续、稳定、最大能力的无功功率, 以协助电网电压恢复, 减小电网电压崩溃的可能性。

2 基于 DBR 的交直流复用 Crowbar 低电压穿越方案

2.1 并联交流主动式 Crowbar 低电压穿越方案

我国现行实施低电压穿越的方案中, 发电机转子侧并联交流主动式 Crowbar 技术应用相对较多, 其系统拓扑结构图如图 1 所示。此方案的可行性在大量文献及现实应用中已经得到验证, 但需将硬件触发晶闸管型被动式 Crowbar 单元, 更换为软件触发 IGBT 型主动式 Crowbar, 改变了风力机原有的安全逻辑。

2.2 直流 Crowbar 低电压穿越方案

直流 Crowbar 的工作原理为当电网电压跌落

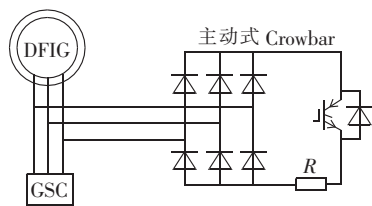


图 1 并联交流主动式 Crowbar LVRT 拓扑图

Fig.1 Topology of parallel active AC Crowbar LVRT system

时, 转子侧电压升高, 转子能量通过 GSC 整流输送至直流母线, 直流母线电压升高, 通过控制 DBR 单元泄放直流母线能量, 维持母线电压稳定, 实现转子故障能量泄放。根据 DFIG 的磁链方程式(6), 当电网电压深度跌落时, 发电机转子电压、电流升高, 考虑到风力机 GSC 过流能力的限制, 可能达到 GSC 的过电流保护值, 当检测到过电流, GSC 封锁脉冲, GSC 关断, 将导致低电压穿越失败, 且可能引起发电机转子过电压, 引发安全事故。为实现深度跌落低电压穿越, 文献[7]提出增加并联一组 GSC, 增大 GSC 的过流能力, 此方法能实现电网电压深度跌落的低电压穿越, 故障期间全可控, 但对已运行风力机硬件更换带来很大难度, 且成本很高。

2.3 交直流复用 Crowbar 低电压穿越方案

针对以上 2 种低电压穿越方案的优点和不足, 结合 DFIG 低电压穿越的主要目标的要求, 本文提出了一种基于 DBR 的交直流复用 Crowbar 低电压穿越方案, 系统拓扑图如图 2 所示。

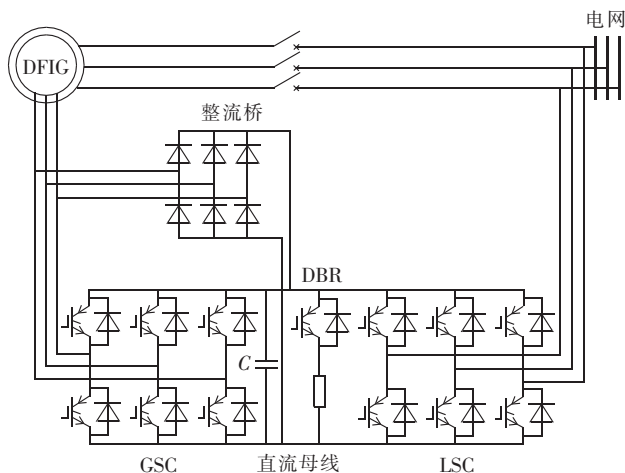


图 2 基于 DBR 的交直流复用 Crowbar LVRT 系统拓扑图

Fig.2 Topology of AC-DC multiplexing Crowbar LVRT system based on DBR

DBR 由风力机 IGBT 控制通断, 其工作原理为: 当直流母线电压大于启动电压时, 控制 DBR 回路的 IGBT 导通, 耗散直流母线的能量, 防止直流母线过压, 直至直流母线电压低于关断电压时控制关断 IGBT, 在现有风力机中, 大多已配置 DBR 装置。本方案采用

风力机已配置的 DBR 装置,添加一组整流桥单元连接于发电机转子与直流母线之间,替代并联 GSC(直流母线保护法)或者替代主动式 Crowbar(转子侧 Crowbar 法)。此整流桥单元与 GSC 并联结合 DBR 装置,实现风力机低电压穿越;当电网电压轻度跌落时,整流桥截止,DBR 与 GSC 组合形成直流 Crowbar,耗散转子故障能量,实现风力机低电压穿越;当电网电压深度跌落时,GSC 封锁脉冲关断,转子电压上升,整流桥导通,DBR 与整流桥单元组合形成转子交流 Crowbar,耗散转子故障能量,至 GSC 成功重启,整流桥截止,切换为直流 Crowbar,实现风力机的低电压穿越。

当电网电压发生轻度跌落时,对应跌落过程中 GSC 未触发故障保护的轻度电压跌落 ($u/u_r \geq 50\%$):并网接触器不动作,风力发电机组保持 GSC 不封锁脉冲仍正常运行,并联整流桥无电流,网侧变频器(LSC)正常工作,风力发电机组处于持续全可控状态,GSC 可控制发电机励磁,与电网电压跌落前运行方式保持一致,通过控制并联在直流母线上的 DBR 来吸收耗散风力机组的故障能量,从而实现风力机组的轻度跌落低电压穿越。此时 DBR 与 GSC 组合形成“直流 Crowbar 单元”,此工作方式定义为“直流 Crowbar 工作方式”。

当电网电压深度跌落时,对应 GSC 故障保护封锁脉冲的低电压跌落 ($u/u_r < 50\%$):并网接触器不动作,根据 DFIG 的磁链方程式(6),发电机转子电压、电流升高,可达到 GSC 的过电流保护值,当检测到过电流,GSC 封锁脉冲,GSC 关断,转子能量通过整流桥单元输送至直流母线,此时 IGBT 旁路二极管同样有整流电流通过。相当于整流桥单元与机侧 IGBT 旁路二极管并联,将发电机转子能量输送到直流母线,给直流母线充电,直流母线电压升高,通过控制并联在直流母线上的 DBR 通断,释放直流母线电容的能量,从而泄放转子故障能量,维持直流母线电压在设计范围内,实现风力机组的深度跌落低电压穿越。此时,并联整流桥与 DBR 组合形成一个“交流 Crowbar 单元”,此工作方式定义为“交流 Crowbar 工作方式”。当检测到整流电流小于 GSC 过流限值时,重启 GSC,工作方式切回直流 Crowbar 方式。

此方案的 Crowbar 工作方式随电网跌落程度不同会发生切换,会工作于直流和交流 Crowbar 2 种工作方式,为交直流复用型 Crowbar,因此 DBR 的阻值必须同时满足 2 种工作方式的要求。DBR 阻值的合理化选择将是保证此方案可行性、提高方案优越性的必要措施^[13-14]。文献[15]推导出了交流 Crowbar 阻值选取表达式:

$$R_{\min} = \frac{\sqrt{U_s^2 - \omega_s^2 I_{\text{safe}}^2 (L_s + L_r)^2}}{I_{\text{safe}}} \quad (7)$$

$$R_{\max} = \frac{U_{\text{dc}} \omega_s (L_s + L_r)}{\sqrt{3U_s^2 - U_{\text{dc}}^2}} \quad (8)$$

其中, I_{safe} 为 GSC 过流保护设定值; U_{dc} 为直流母线电压。

直流 Crowbar 工作方式运行时,DBR 为变频器的制动电阻,考虑到 DBR 单元 IGBT 的过流能力限制,DBR 的电流需要小于 IGBT 限制电流,且满足发电机制动的要求,电流为发电机额定电流的一半时可以达到与发电机额定扭矩相等的制动扭矩,得出:

$$R \in \left[\frac{U_{\text{dc}}}{I_{\max}}, \frac{2U_{\text{dc}}}{I_{\max}} \right] \quad (9)$$

其中, $I_{\max}$ 为 DBR 控制单元 IGBT 的过流保护设定值。

根据式(7)~(9)可得出 DBR 阻值范围,同时结合电阻的温度特性曲线,选取合适的电阻值。

3 方案验证与效果分析

3.1 试验方案

选取一个 2 MW 风力发电机进行试验,系统参数如下:额定功率 2 MW,定子电压 690 V,定转子匝比 0.36,转子电阻 114 mΩ,互感抗 2.41 mΩ,定子漏感 46 mΩ,极对数为 2,DBR 阻值 0.8 Ω。

针对图 2 所示的基于 DBR 的交直流复用 Crowbar 低电压穿越方案,分别进行电网电压为 35% 和 50% 的电压跌落试验。试验中低电压穿越过程的工作方式控制逻辑如图 3 所示。

3.2 深度跌落试验结果

当电网电压深度跌落时,根据图 3 的控制逻辑,系统处于交流 Crowbar 工作方式。对于深度跌落,满功率运行时发生电压跌落对风力机低电压穿越能力的要求最高。选电网电压平衡跌落至 35%,电网故障前风力机转速为 1800 r/min,输出功率为额定功率 2 MW,此工况下风力机组实现低电压穿越的结果如图 4 所示。图中,从上至下分别代表风力发电机组总功率(P 和 Q)、定子侧功率(P_s 和 Q_s)、LSC 功率(P_{LSC} 和 Q_{LSC})、GSC 电流 I_{GSC} 、并联整流桥电流 I_D 、电网相电压有效值 U_{RMS} 、直流母线电压 U_{dc} 、DBR 控制电压 U_{DBR} 、被动 Crowbar 电流 I_{crowbar} 。

如图 4 所示,当发生电网电压为 35% 对称电压跌落时,故障期间风力机未脱网。发生电网电压跌落,GSC 检测到过电流,GSC 脉冲封锁,GSC 关断,转子能量通过整流桥与 IGBT 旁路二极管输送给直流母线。整流桥与 DBR 组合形成一个交流 Crowbar 单元,此期间工作于交流 Crowbar 方式。故障后 45 ms 处,检测到整流电流小于 GSC 过电流限值,GSC 重启,从

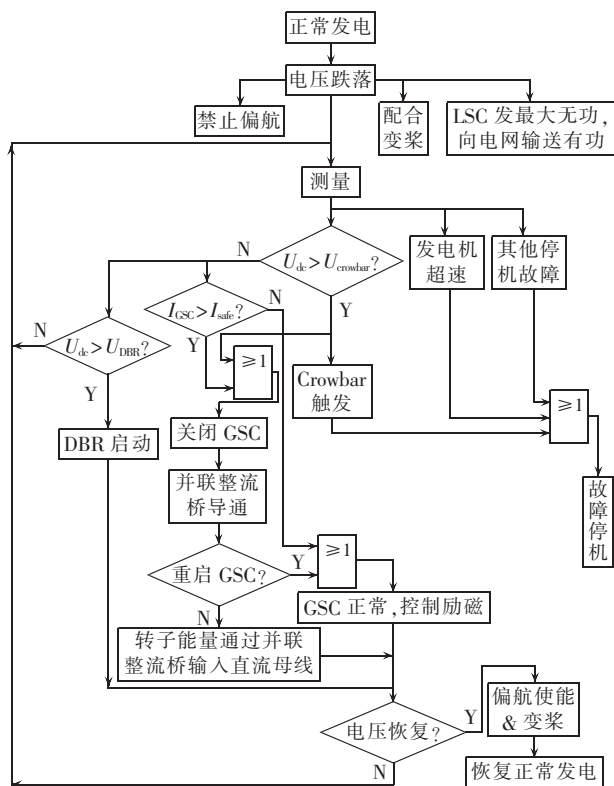


图 3 基于 DBR 的交直流复用 Crowbar LVRT 流程图

Fig.3 Flowchart of AC-DC multiplexing Crowbar LVRT based on DBR

GSC 重启至故障切除,GSC 正常运行,控制发电机励磁,此期间工作切回直流 Crowbar 方式。此次电压跌落过程,直流母线电压范围为 980~1 220 V,在设计电压范围内。发电机定子在[0,45]ms 无功功率为 0, (45,875]ms 无功功率为 559 kvar; [0,875]ms 网侧无功功率为 188 kvar。

3.3 轻度跌落试验结果

当电网电压发生轻度跌落时,根据图 3 所述,系统处于直流 Crowbar 工作方式。在轻度跌落时,风力机转速在接近同步转速区运行时发生电压跌落故障,转子故障电流幅值最大,对风力机低电压穿越要求最高。选电网电压发生 50% 不平衡跌落,电网故障前风力机转速为 1460 r/min,输出功率 500 kW。此工况下风力机组实现低电压穿越的结果如图 5 所示。

由图 5 可见,此次跌落为 50% 不对称电压跌落,整个跌落过程未脱网,GSC 未封锁脉冲,GSC 正常运行,并联整流桥无电流,DBR 根据直流母线电压控制通断,跌落过程中,直流母线电压范围为 990~1231 V,在设计电压范围内,直流母线电压稳定。发电机定子在跌落期间持续发无功功率 530 kvar,网侧无功功率 316 kvar。

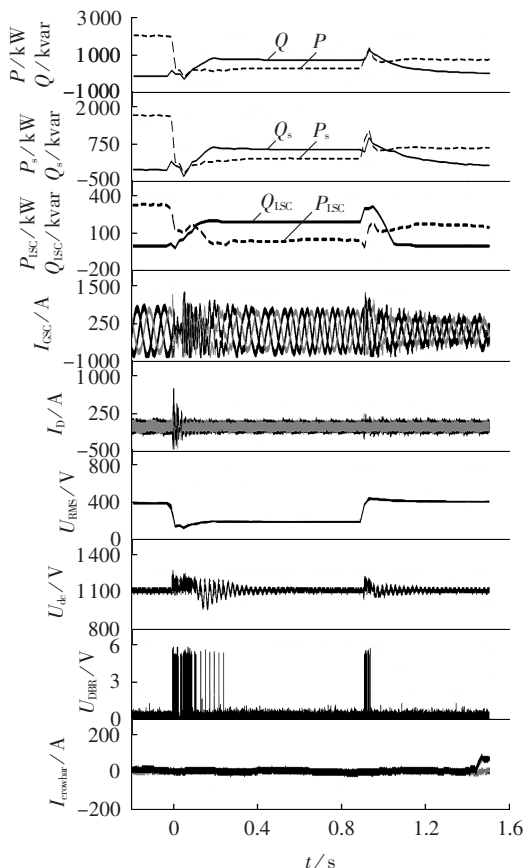


图 4 电压深度跌落 LVRT 试验结果

Fig.4 Experimental results of LVRT during deep grid voltage drop

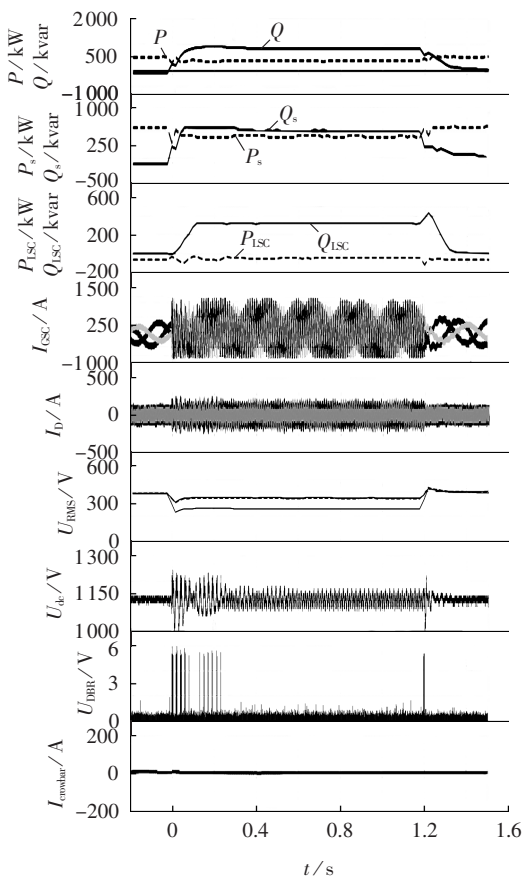


图 5 电压轻度跌落 LVRT 试验结果

Fig.5 Experimental results of LVRT during mild grid voltage drop

由以上试验结果可以得出,在电网电压跌落时,基于 DBR 的交直流复用 Crowbar 穿越方案,无论是深度跌落还是轻度跌落,均能实现风力机的低电压穿越,故障期间未与电网解列,且直流母线电压均在安全范围内运行,LSC 均能向电网提供无功支撑,发电机定子均能于 75 ms 后提供无功支撑。

4 结语

采用基于 DBR 的交直流复用 Crowbar 低电压穿越方案,可防止当电网电压跌落过程中转子电压陡升,维持风力机不与电网解列,从而实现 DFIG 机组的低电压穿越;对电网轻度跌落故障,实现了风力机故障过程持续全可控,对发电机励磁的可控,跌落期间无功支撑满足电网导则要求;对深度跌落故障,通过增加并联整流桥,使风力机形成一个闭环系统,规避了 GSC 过流能力不足的缺陷,保证了风力机深度跌落低电压穿越的可行性,亦能实现跌落期间无功支撑满足电网导则要求,降低了改造成本。同时本文所述方案未改动风力机原有硬件触发被动 Crowbar 单元的结构,维持了风力机原有安全逻辑设计,保证了风力机组运行的安全性。

参考文献:

- [1] MULLER S,DEICKE M,de DONCKER R W. Doubly fed induction generator systems for wind turbine[J]. Industry Applications Magazine,2002,8(3):26-33.
- [2] HOLDSWORTH L,WU X G,EKANAYAKE J B,et al. Comparison of fixed speed and doubly-fed induction wind turbines during power system disturbances[J]. IEE Proceedings-Generation,Transmission and Distribution,2003,1509(3):343-352.
- [3] TSILI M,PAPATHANASSIOU S. A review of grid code technical requirements for wind farms[J]. Renewable Power Generation, IET,2008(9):308-332.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. GB/T19963—2011 风电场接入电力系统技术规定[S]. 北京:中国标准出版社,2011.
- [5] 贺益康,周鹏. 变速恒频双馈异步风力发电系统低电压穿越技术综述[J]. 电工技术学报,2009,24(9):140-146.
HE Yikang,ZHOU Peng. Overview of the low voltage ride-through technology for variable speed constant frequency doubly fed wind power generation systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2009,24(9):140-146.
- [6] PETERSSON A,LUNDBERG S,THIRINGER T. A DFIG wind turbine ride through system,influence on the energy production[J]. Wind Energy,2005,8(3):251-263.
- [7] ABBEY C,JOOS G. Effect of Low Voltage Ride Through (LVRT) characteristic on voltage stability[C]//Power Engineering Society General Meeting,2005. [S.I.]:IEEE,2005:1901-1907.
- [8] 洪芦诚,魏应冬,姜齐荣,等. 基于动态电压调节器的风电机组低电压穿越策略[J]. 电力系统自动化,2011,35(16):32-38.
- HONG Lucheng,WEI Yingdong,JIANG Qirong,et al. Discussion on influence of model uncertainties on closed-up adaptive stability control design[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(16):32-38.
- [9] 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 Jianlin,ZHAO Dongli,LI Yaxi,et al. Analyze of Crowbar circuit for variable speed constant frequency doubly fed induction generator[J]. Renewable Energy,2006(5):57-60.
- [10] 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.
MA Wenlong. Application of Crowbar circuit in grid fault riding through for doubly-fed induction wind power generation system[J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(7):127-130.
- [11] 凌禹,高强,蔡旭. 紧急变桨与撬棒协调控制改善双馈风电机组低电压穿越能力[J]. 电力自动化设备,2013,33(14):18-22.
LING Yu,GAO Qiang,CAI Xu. Improvement of low voltage ride through by coordinated pitch control and Crowbar control for DFIG wind turbine[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(14):18-22.
- [12] 郑重,杨耕,耿华. 电网故障下基于撬棒保护的双馈风电机组短路电流分析[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):7-14.
ZHENG Zhong,YANG Geng,GENG Hua. Short circuit current analysis for DFIG-based wind generation system with Crowbar protection under grid faults[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(11):7-14.
- [13] 刘志星,胡婵娟,年珩,等. 双馈风电变流器低电压穿越下 Crowbar 电阻的优化设计[J]. 大功率变流技术,2012(1):44-49.
LIU Zhixing,HU Chanjuan,NIAN Heng,et al. Optimal design of Crowbar resistance for DFIG converter during low voltage ride-through[J]. High Power Converter Technology,2012(1):44-49.
- [14] 朱颖,李建林,赵斌. 双馈型风力发电系统低电压穿越策略仿真[J]. 电力自动化设备,2010,30(6):20-24.
ZHU Ying,LI Jianlin,ZHAO Bin. Simulation of LVRT strategy for DFIG wind power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(6):20-24.
- [15] 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):6-10.
KONG Xianguo,LIU Zongqi. Analysis on LVRT performance optimization of DFIG with active Crowbar[J]. Modern Electric Power,2012,29(1):6-10.

作者简介:



邓友汉

邓友汉(1983-),男,湖北潜江人,博士研究生,主要研究方向为新能源发电技术与控制(E-mail:yhdeng@whu.edu.cn);

肖志怀(1968-),男,湖北仙桃人,副教授,博士,通讯作者,主要研究方向为电力设备可视化建模与仿真、智能控制及专家系统(E-mail:xiaozhihuai@126.com)。

(下转第 24 页 continued on page 24)

制[J]. 系统工程理论与实践, 1999, 19(11): 97-101, 123.

ZHUO Debao, LIU Xiaofen. Using Johnson curves to control non-normal process[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 1999, 19(11): 97-101, 123.

[15] 唐启义. DPS 数据处理系统: 实验设计、统计分析及数据挖掘[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2010: 849-855.

[16] 周群艳, 田澎, 田志友. 基于 Johnson 转换体系的非正态过程能力指数估计[J]. 系统工程, 2004, 22(5): 98-102.

ZHOU Qunyan, TIAN Peng, TIAN Zhiyou. Estimation of non-normal process capability index based on Johnson system of transformations[J]. Systems Engineering, 2004, 22(5): 98-102.

作者简介:



王娟娟

研究生, 研究方向为风电预测。

王娟娟(1978-), 女, 山西大同人, 讲师, 博士, 研究方向为电力市场中有助辅助服务的成本及成本分摊策略(E-mail: wjj_21257@sina.com);

赵闻蕾(1972-), 女, 黑龙江讷河人, 教授, 博士, 主要研究方向为电气化铁道谐波治理等;

王兴强(1987-), 男, 山西大同人, 硕士

Wind speed prediction based on Johnson direct transformation

WANG Juanjuan, ZHAO Wenlei, WANG Xingqiang, JIN Xiaozhao

(Dalian Jiaotong University, Dalian 116028, China)

Abstract: Since the wind speed obeys abnormal distribution in most conditions, it cannot be precisely predicted by the time series method. A method of wind speed prediction is proposed based on the Johnson direct transformation, which applies the time series method to predict the preliminary wind speeds based on the stable wind speed data, constructs a suitable Johnson transformation curve according to the inherent digital features of original wind speed data, and then corrects the preliminary wind speeds by the constructed Johnson transformation curve. The analytical results of an actual case show that, with higher prediction accuracy, the distribution of the wind speeds predicted by the time series method and corrected by the Johnson transformation curve is much closer to the abnormal distribution of original wind speed data.

Key words: wind power; Johnson direct transformation; time series method; wind speed prediction; abnormal distribution; data transformation

(上接第 19 页 continued from page 19)

AC-DC multiplexing Crowbar LVRT scheme based on DBR

DENG Youhan¹, XIAO Zhihuai¹, CHENG Yuanchu¹, ZHANG Xinlong²

(1. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Renewable Energy Department of China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: The mathematical model of DFIG(Doubly Fed Induction Generator) wind generator is analyzed, the control strategy and effect of existing LVRT(Low Voltage Ride Through) schemes are studied, and an AC-DC multiplexing Crowbar LVRT scheme based on DBR(Dynamic Braking Resistance) is proposed, which has two working modes: DC Crowbar mode for mild grid voltage drop and AC-DC multiplexing Crowbar mode for deep grid voltage drop. The test results of a 2 MW DFIG wind generator show that, the wind turbine keeps controllable during mild grid voltage drop, while during deep grid voltage drop, the rectifier is used to replace the GSC(Grid-Side Converter) to transport the fault power of rotor to DC bus for avoiding the defect of insufficient GSC capacity. When GSC restarts successfully, the rectifier quits and the back-to-back converter recovers. The proposed scheme realizes LVRT during grid voltage drop, either mild or deep, and meets the requirements of the state grid guidelines for the reactive power support during grid fault.

Key words: wind power; LVRT; dynamic braking resistance; DC Crowbar; AC Crowbar; reactive power support