基于动态电压调节器的风电机组低电压穿越策略

洪芦诚1,魏应冬1,姜齐荣1,王志永2

(1. 清华大学电机系柔性输配电系统研究所,北京市 100084; 2. 北京三得普华科技有限责任公司,北京市 100086)

摘要:随着并网大型风电场装机容量的逐年增长,低电压穿越(LVRT)能力已经逐渐成为风电机 组并网的一个重要指标。文中提出了一种利用动态电压调节器(DVR)辅助风电机组在电网电压 跌落工况下实现 LVRT 的策略。DVR 串联接入风电机组机端和电网公共连接点(PCC)之间,电 网电压正常时通过静态开关柜将其旁路,电网电压跌落时利用反压技术进行快速投切,DVR 通过 调节使风电机组机端电压维持正常;同时,DVR 在风电机组和电网之间提供功率通道,利用直流母 线上的刹车电阻消耗掉过剩功率,保证直流电容电压的稳定及风电机组的正常运行。利用恒速异 步风力发电机(FSIG)配合 DVR 建立了仿真模型和实验平台,给出了在 PSCAD/EMTDC 环境下 的仿真及实验结果。

关键词:风力发电;感应发电机;电压跌落;动态电压调节器;低电压穿越

0 引言

在风力发电技术逐渐成熟的今天,随着并网风 电场装机容量的逐年增长,风电场对系统稳定性的 影响已不容忽视^[1-2],很多国家对风电场并网提出了 严格的技术要求^[3-4],甚至用常规火电厂的标准要求 风电场。在这些技术要求中最为人们重视的是风电 机组的低电压穿越(low voltage ride-through, LVRT)能力,即当电网发生故障或扰动引起风电场 并网点电压跌落时,在一定的电压跌落范围内,风电 机组能够不间断并网运行。

目前市场上的风力发电机类型可以概括为 3类^[5],即直接并网的恒速异步风力发电机(FSIG)、 双馈式异步发电机(DFIG)和直驱式永磁同步发电机(PMSG)。

FSIG与DFIG都是定子侧直接连接电网,这种 直接耦合的方式使得电机很容易受到电网电压跌落 的影响。其中,FSIG不包含电力电子器件,电压跌 落期间的主要问题是电磁转矩衰减导致的转速飞 升。其简单的结构使得能采取的措施也很有限,一 般通过静止无功补偿器(SVC)^[6]或静止同步补偿器 (STATCOM)^[7]进行无功补偿,在电压跌落期间缓 解公共连接点(PCC)的电压,故障切除后为FSIG 迅速恢复提供足够无功功率,实现风电机组的 LVRT。但是,电网的低电压限制了设备的无功补 偿能力,电网本身的短路容量决定了无功补偿的电 压支撑效果,所以无功补偿主要的贡献在于故障切 除后辅助机组的快速恢复,而非针对故障过程本身。 与FSIG相比,DFIG本身包含电力电子器件,具备 一定的无功调节能力,遭遇电压跌落时可以通过控 制策略的调整以及添加硬件电路实现LVRT。基 于改进矢量控制^[8]或鲁棒控制^[0]的控制策略可以有 效应对电压的浅度跌落,但该方案的控制效果往往 受到 DFIG本身励磁变频器容量的限制,存在可行 性区域的限制。更加主流的策略是在 DFIG 转子侧 安装 Crowbar 系统^[10-12],但 Crowbar 动作期间, DFIG 等效为鼠笼式异步发电机运行,将从电网吸 收大量无功功率用于励磁,这不利于电网故障的迅 速恢复。

与 FSIG 和 DFIG 不同, PMSG 通过背靠背全 功率逆变器与电网连接, 定子端与电网完全解耦, 因 此故障穿越能力较强。电压跌落期间, PMSG 的主 要问题在于功率不平衡导致直流母线电压上升, 文 献[13-14]讨论了通过对 PMSG 逆变器硬件部分的 改装和网侧变流器控制策略的调整可以较好地实现 LVRT。

实现 LVRT 的理想方案是在电压跌落期间将 风电机组从电压跌落点隔离出来,避免受到电压跌 落的影响。在这一点上,PMSG 具有先天的优势, 而 FSIG 和 DFIG 则通过外部设备辅助实现。美国 超导公司推出了一种无功补偿器 D-VAR RT^[15]用 于辅助 FSIG 或 DFIG 实现 LVRT,装置在故障期 间可以为电网提供无功支持,D-VAR RT 的主体结 构与 PMSG 的全桥逆变器是基本相同的。诸如静 止串联补偿器(SSC)和动态电压调节器(DVR)之类 的串联电压补偿装置同样可以用于辅助实现风电机

收稿日期: 2011-04-19; 修回日期: 2011-05-03。

组的 LVRT。DVR 可以在电网电压跌落的工况下 有效地支撑风电机组端口电压,辅助机组完成 LVRT。

文献[16-17]提出用 DVR 连接风电机组和电 网,利用 3 个单相 DVR 逆变器分别通过变压器在 风电机组和电网之间实现串联电压补偿。但是,这 种要求 DVR 在正常工况下长时间串联运行的工作 方式增加了损耗,给系统的稳定运行带来了不确定 因素;同时,这种通过串联变压器进行补偿的结构会 导致涌流效应。

本文提出了一种用于辅助风力发电机 LVRT 的新型结构 DVR 方案,简称 LVRT-DVR,采用三 单相结构,每相的控制独立,并使用单独的静态开关 柜进行投切。由于风电机组机端电压较低,LVRT-DVR输出端采用了与电网直接耦合的方式,在不控 整流桥侧利用单相隔离变压器对系统和 LVRT-DVR 直流母线进行隔离。在投切控制方面,通过引 人反压技术,实现静态开关柜内并联晶闸管的快速 关断,将 LVRT-DVR 的动态响应时间有效地控制 在 3 ms 之内。该设备为风电机组带来了一种新的 LVRT 解决方案,在辅助 DFIG 和 FSIG 时尤其有 效。

1 系统配置及 LVRT-DVR 结构

仿真系统组成如图 1 所示,包括一台额定功率 为 850 kW 的 FSIG。FSIG 的详细参数见附录 A。



图 1 FSIG-DVK 反电系统结构示息图 Fig. 1 FSIG wind turbine system with ride-through capability DVR

本文 LVRT-DVR 采用三单相结构,图 1 给出 了单相的简图,LVRT-DVR 串联在 FSIG 机端和电 网之间,通过逆变器输出端提供补偿电压。设备在 整流侧通过 3 个单相变压器(5 kVA,0.69 kV/ 0.4 kV)将直流母线和电网隔离;直流电容(6 mF) 通过 3 个单相不控整流桥充电;动态刹车电阻器由 刹车电阻(1 Ω)和开关串联组成,并联在直流电容 上,用于故障期间消耗多余的功率;低通 LC 滤波单 元(L_i =0.16 mH, C_i =240 μ F)与 LVRT-DVR 逆 变器交流侧相连,用于滤除逆变器输出的高次谐波; 静态开关柜由 2 个反向并联的晶闸管组成,并联在 LC 滤波单元的电容两端,电网电压正常时,静态开 关柜导通,LVRT-DVR 处于旁路模式,电网电压异 常时,静态开关柜关断,LVRT-DVR 被串联入主电 路,进入工作模式。

FSIG及LVRT-DVR由Y,d连接的三相两绕 组变压器(1.5 MVA,0.69 kV/33 kV)接入电网。

2 LVRT-DVR 补偿策略

在电网故障的工况下,LVRT-DVR 可以通过 输出幅值和相位均可调节的电压实现对风电机组机 端电压的补偿,从而辅助风电机组实现 LVRT。传 统 DVR 主要有 3 种补偿策略:同相补偿、完全补偿 和最小能量补偿^[18]。由于风力发电机对相位较为 敏感,本文使用了完全补偿策略,图 2 给出了电压暂 降工况下的补偿相量图。



图 2 DVR 完全补偿策略相量图 Fig. 2 DVR phasor diagram for voltage sag

- 33 -

通过分析可知,补偿相量 \dot{U}_{comp} 的幅值 U_{comp} 和相位 φ_{comp} 分别为:

$$\varphi_{\rm comp} = \sqrt{U_{\rm s}^2 + U_{\rm ref}^2 - 2U_{\rm s}U_{\rm ref}\cos\varphi_{\rm s}}$$
(1)
$$\varphi_{\rm comp} = \begin{cases} -\arccos\left(\frac{U_{\rm comp}^2 + U_{\rm ref}^2 - U_{\rm s}^2}{2U_{\rm comp}U_{\rm ref}}\right) & \varphi_{\rm s} \ge 0 \\ (U_{\rm s}^2 + U_{\rm s}^2 - U_{\rm s}^2) & U_{\rm s}^2 \end{cases}$$

$$\left(\arccos\left(\frac{U_{\text{comp}}^{*} + U_{\text{ref}}^{*} - U_{s}^{*}}{2U_{\text{comp}}U_{\text{ref}}} \right) \qquad \varphi_{s} < 0$$
(2)

式中:U_s为系统电压;U_{ref}为系统参考电压; *φ*_s为系统电压跌落后的相移。

完全补偿策略可以令风电机组机端电压在故障 前后的幅值和相位均无变化。作为最理想的补偿策 略,完全补偿策略要求有较大的装置极限补偿电压 作为支撑。

3 LVRT-DVR 控制方法

3.1 LVRT-DVR 投切策略

电网电压跌落故障在大多数情况下持续时间较短,继电保护装置会迅速将故障线路切除,电压随之恢复正常。本文装置中采用静态开关柜,正常工作状态下静态开关柜导通,LVRT-DVR旁路,检测到故障后静态开关柜迅速动作,将LVRT-DVR串联接入,实现补偿。这样的设计方式大大减少了对LVRT-DVR电力电子器件的损耗,延长了LVRT-DVR的寿命。

如图 3 所示,静态开关柜由 2 个反向并联的晶 闸管组成,晶闸管本身的特性决定了其无法通过门 级控制立即关断,必须等到系统电压下一个过零点, 这对 LVRT-DVR 补偿的及时性提出了挑战。



图 3 LVRT-DVR 单相等效电路图 Fig. 3 Single-line circuit diagram of LVRT-DVR

本文通过对逆变器控制方法的改进,解决了这一问题,即利用 LVRT-DVR 逆变器,在检测到故障的第一时刻,在晶闸管两端形成一个持续时间1 ms,且与当前导通晶闸管电流方向相反的电压

时,强制晶闸管迅速关闭,令 LVRT-DVR 进入补偿 模式。图中:*i*_{SCR}为晶闸管电流;*i*₀ 为系统电流;*i*_{fL}为 低通滤波电感电流;*i*_{fC}为低通滤波电容电流;*u*₀ 为 风电机组机端电压;*u*_{inv}为 LVRT-DVR 逆变器输出 电压;*u*_c 为滤波电容两端电压;*u*₁ 为电感电压。

图 4 给出了反压控制的流程图。



图 4 反压控制流程 Fig. 4 Flow chart of anti-voltage control

3.2 LVRT-DVR 逆变器控制策略

目前,DVR的控制方法主要有前馈控制^[19]、输 出电压反馈控制^[20]以及电压外环加电流内环反馈 控制^[21]等。其中,电压外环加电流内环反馈控制在 电压反馈的基础上增加了电流内环,可以对电压波 动、死区时间影响、输出电流变化等各种干扰起到调 节作用,使系统的稳定性和动态特性大大提高。

如图 3 所示 LVRT-DVR 逆变器模块示意图, 其状态方程为:

$$\begin{cases} i_{\rm fL} + i_0 = i_{\rm fC} \\ u_{\rm L} = u_{\rm inv} - u_{\rm s} + u_0 \\ u_0 = u_{\rm s} + u_{\rm C} \end{cases}$$
(3)

电压反馈一般分为电压有效值反馈和电压瞬时 值反馈,有效值反馈具有较好的稳态性能,相比而 言,瞬时值反馈则能保证更快的响应速度和更好的 输出波形;电流反馈也有2种,滤波电容电流反馈和 滤波电感电流反馈,本装置中电感电流即风力发电 机输出电流较为稳定,能够较好地抑制各种干扰。 综上所述,本文采用了输出电压瞬时值外环反馈加 滤波电感电流瞬时值反馈的控制方法。控制流程如 图5所示。其中,u_{sig}为生成的调制波。



3.3 动态刹车电阻器控制策略

在不考虑损耗的情况下,发电机输出的电磁功

率 P_{gen} 和风电机组的并网功率 P_{grid} 满足如下的功率 平衡方程:

$$P_{\rm gen} - P_{\rm grid} = \frac{\mathrm{d}\left(\frac{1}{2}Cu_{\rm dc}^2\right)}{\mathrm{d}t} \tag{4}$$

式中:C为直流母线电容。

在稳态时, $P_{gen} = P_{grid}$, 直流母线电压 u_{de} 也稳定。当电网电压跌落, LVRT-DVR 进入工作模式后, 风力发电机产生的功率将通过 LVRT-DVR 进入电网, 而 LVRT-DVR 输入端与输出端的电压差, 将会产生不平衡功率 P_{DVR} :

$$P_{\rm DVR} = P_{\rm gen} - P_{\rm grid} \tag{5}$$

由式(4)可知,不平衡功率 P_{DVR}将导致直流母 线电压 u_{de}上升。当直流母线电压超过电容的耐压 值,就会损坏 LVRT-DVR 设备。本文采用了在直 流母线电容两端并联动态刹车电阻器的方法,及时 消耗多余的功率,保持直流母线电压 u_{de}的稳定。

由于增加了动态刹车电阻器,LVRT-DVR与 传统 DVR 在运行方式上有着显著的区别。传统 DVR 的作用对象是敏感负载,其控制目标是在电网 电压跌落的情况下维持敏感负载端电压的稳定,所 以当电网电压发生跌落时,功率分别通过 DVR 的 逆变侧和整流侧向负载提供。LVRT-DVR 的作用 对象是风电机组,其控制目标是在电网电压跌落的 情况下维持风电机组机端电压正常,并且消耗多余 的功率,显然 LVRT-DVR 逆变器端口吸收的功率 必然大于其送出的功率,其不控整流侧在设备正常 工作的情况下不需要传递功率。

动态刹车电阻器通过滞环控制将直流母线电压 u_{de} 维持在 0.54~0.65 kV,同时不控整流侧隔离变 压器的变比设定为 0.69 kV/0.35 kV,通过简单的 计算(0.35 kV× $\sqrt{2}$ = 0.495 kV<0.54 kV)可以看 出,LVRT-DVR 正常工作时,不控整流桥一直处于 电压反制状态。不控整流桥只用于初始时对直流电 容进行充电。

4 仿真算例

为了验证所述 LVRT-DVR 算法的有效性和稳定性,本文在 PSCAD/EMTDC 仿真环境下对图 1 所示的系统进行了仿真,参数见第 1 节。其中,系统频率为 50 Hz,绝缘栅双极型晶体管(IGBT)开关频 率为 3.2 kHz,考虑到风电机组过载的工况,FSIG 的功率选择为其额定功率的 1.2 倍。故障开始时间 为 0.405 s,持续时间为 0.1 s。

4.1 单相电压跌落

由于装置选择了三单相的结构,独立投切,分相 控制,首先在单相电压跌落情况下进行了分析。

图 6 和图 7 分别给出了电压跌落期间系统电压和 FSIG 机端电压的波形,由于 LVRT-DVR 的补偿作用,故障期间,FSIG 机端电压保持了原有的电压水平,实现了故障穿越。



图 8 通过 FSIG 机端电压给出了电压跌落瞬间 LVRT-DVR 的动态响应过程。



Fig. 8 Comparison between FSIG stator voltage and reference voltage

图中,阴影部分为1 ms 的反向并联晶闸管关断时间,这段时间里,控制器通过 LVRT-DVR 逆变器向晶闸管两端提供一个与当前导通晶闸管方向相反的电压,确保晶闸管关断。1 ms 后,LVRT-DVR 进

入正常工作模式。仿真表明,在当前的控制方法下, LVRT-DVR的动态响应时间在3ms以内。

图 9 给出了电压跌落前后 FSIG 输出有功功率 和输入电网有功功率的波形。





故障期间,FSIG 输出的功率无法完全送入电 网,出现了功率不平衡,这部分过剩的功率通过 LVRT-DVR 的动态刹车电阻消耗,如图 10 所示。 过剩的功率导致直流母线电容电压上升,通过对刹 车电阻的滞环控制,直流电容电压可以控制在 520~650 V之间。





4.2 三相电压跌落

图 11 和图 12 给出了电网电压不对称跌落工况下,电网侧电压和 FSIG 机端电压波形。三单相的结构使得装置能够有效应对电网各种故障所导致的电压跌落工况。



图 11 电网侧三相电压波形 Fig. 11 Three-phase voltage waveforms of power grid



图 12 补偿后 FSIG 机端三相电压波形 Fig. 12 Stator three-phase voltage waveforms of FSIG after compensation

5 实验结果

为进一步验证该装置的工程实用性,建立了由 异步发电机、电压跌落发生器及 LVRT-DVR 装置 组成的实验平台。实验平台电压等级为 400 V,发 电机额定功率为 40 kW。附录 B 图 B1 即为电压跌 落装置以及 LVRT-DVR 装置。

利用电压跌落发生器可以实现 20%,50%, 90%程度的单相、三相平衡乃至三相不平衡电压跌 落。由于篇幅限制,且 LVRT-DVR 采用三单相结 构,故仅在附录C中给出单相 50%和单相 90%程度 跌落工况下的实验波形。

通过实验波形可以证实,在电网电压跌落 50% 和 90%的工况下,LVRT-DVR 的响应时间在 3 ms 之内,表现出了良好的动态特性;其补偿效果也体现 了装置良好的稳态性能,在电压跌落期间对发电机 机端电压起到了很好的维持作用,实验中发电机并 未脱网。

6 结语

近年来风电发展迅速,其占系统的比重逐年攀升,当电网故障导致风电机组机端电压跌落时,如果为了保护设备,允许大规模风电机组解列,机组将失去对电网的电压支撑能力,严重时会导致连锁反应,对电网的稳定运行造成恶劣影响。因此,开展有关 增强风电机组 LVRT 能力的研究显得尤为重要。

本文设计的 LVRT-DVR 可以在发生电压跌落 时隔离风电机组和电网,保持机端正常电压,辅助风 电机组实现 LVRT。

附录见本刊网络版(http://aeps.sgepri.sgcc. com.cn/aeps/ch/index.aspx)。

参考文献

[1] CHOMPOO-INWAI C, LEE W J, FUANGFOO P, et al. System impact study for the interconnection of wind generation and utility system[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2005, 41(1): 163-168.

[2] 迟永宁,刘燕华,王伟胜,等.风电接入对电力系统的影响[J].电网技术,2007,31(3):77-81.
 CHI Yongning, LIU Yanhua, WANG Weisheng, et al. Study

on impact of wind power integration on power system [J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 77-81.

- [3] CASE C. Connecting wind farms to the grid-what you need to know[R]. Vancouver, Canada, 2006.
- [4]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):79-82.
 GUAN Hongliang, ZHAO Haixiang, CHI Yongning, et al. Requirement for LVRT capability of wind turbine generator in power system[J]. Power System Technology, 2007, 31(7): 79-82.
- [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.
 ZHANG Xing, ZHANG Longyun, YANG Shuying, et al. Low voltage ride-through technologies in wind turbine generation[J].
 Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 20(2): 1-8.
- [6] CHOMPOO-INWAI C, YINGVIVATANAPONG C, METHAPRAYOON K, et al. Reactive compensation techniques to improve the ride-through capability of wind turbine during disturbance [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2005, 41(3): 666-672.
- [7] MOLINAS M, VAZQUEZ S, TAKAKU T, et al. Improvement of transient stability margin in power systems with integrated wind generation using a STATCOM: an experimental verification [C]// Proceedings of Future Power Systems Conference, November 16-18, 2005, Amsterdam, Netherlands.
- [8] XIANG Dawei, LI Ran. Control of a doubly fed induction generator in a wind turbine during grid fault ride-through[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2006, 21(3): 652-662.
- [9] RATHI M R, MOHAN N. A novel robust low voltage and fault ride through for wind turbine application operating in weak grids[C]// Proceedings of the 31st Annual Conference of IEEE on Industrial Electronics Society, November 6-10, 2005, Raleigh, NC, USA: 1-6.
- [10] 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.
- [11] MORREN J, de HAAN S W H. Short-circuit current of wind turbines with doubly fed induction generator[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(1): 174-180.
- [12] 朱晓东,石磊,陈宁,等.考虑 Crowbar 阻值和退出时间的双馈 风电机组低电压穿越[J].电力系统自动化,2010,34(18): 84-89.

ZHU Xiaodong, SHI Lei, CHEN Ning, et al. An analysis on low voltage ride through of wind turbine driven doubly fed induction generator with different resistances and quitting time of Crowbar[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 84-89.

- [13] OTTERSTEN R, PETERSSON A, PIETILAINEN K. Voltage sag response of PWM rectifiers for variable-speed wind turbines[R]. Helsinki Finland: Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics, Chalmers University of Technology, 2004.
- [14] 姚骏,廖勇,庄凯.电网故障时永磁直驱风电机组的低电压穿越 控制策略[J].电力系统自动化,2009,33(12):91-96. YAO Jun, LIAO Yong, ZHUANG Kai. A low voltage ridethrough control strategy of permanent magnet direct-driven wind turbine under grid faults [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(12): 91-96.
- [15] IBRAHIM A O, NGUYEN T H, LEE D C, et al. Ridethrough strategy for DFIG wind turbine systems using dynamic voltage restorers [C]// Proceedings of Energy Conversion Congress and Exposition, September 20-24, 2009, San Jose, CA, USA.
- [16] ABDEL-BAQI O, NASIRI A. A dynamic LVRT solution for doubly fed induction generators [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2010, 25(1): 193-196.
- [17] MOLINAS M, VAZQUEZ S, TAKAKU T, et al. Improvement of transient stability margin in power systems with integrated wind generation using a STATCOM: an experimental verification [C]// Proceedings of International Conference on Future Power Systems, November 16-18, 2005, Amsterdam, Netherlands: 1-6.
- [18] CHOI S S, LI B H, VILATHGAMUWA D M. Dynamic voltage restoration with minimum energy injection[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 51-57.
- [19] SU C, JOOS G. Series and shunt active power conditioners for compensating distribution system faults[C]// Proceedings of the 2000 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, March 7-10, 2000, Halifax, Canada.
- [20] DIVAN D M. Inverter topologies and control techniques for sinusoidal output power supplies [C]// Proceedings of Applied Power Electronics Conference and Exposition, March 10-15, 1991, Los Angeles, USA.
- [21] 杨潮,韩英铎,马维新.单相串联电压质量补偿器控制器的研究
 [J].电力系统自动化,2002,26(15):45-48.
 YANG Chao, HAN Yingduo, MA Weixin. Control method of single phase series voltage quality compensation [J].
 Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(15): 45-48.

洪芦诚(1985—),男,博士研究生,主要研究方向:风力 发电及电力系统稳态分析、风电机组(场)低电压穿越技术。

魏应冬(1979—),男,博士,主要研究方向:风电技术以 及电力电子技术。

姜齐荣(1969—),男,通信作者,博士,博士生导师,主要 研究方向:电力系统分析与控制、柔性交流输配电系统建模 与控制、电能质量分析与优化、电力电子设备以及新能源技

术。E-mail: qrjiang@mail.tsinghua.edu.cn

(下转第53页 continued on page 53)

— 37 —

Low Voltage Ride Through Strategy for Wind Turbine Systems Using Dynamic Voltage Restorers

HONG Lucheng¹, WEI Yingdong¹, JIANG Qirong¹, WANG Zhiyong²

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Beijing Sound-Puhua Technology Co. Ltd., Beijing 100086, China)

Abstract: With the penetration level of large-scale grid-connected wind farms increasing year by year, low voltage ride through (LVRT) capability is required by many countries for power quality and fail-safe operation of grid faults. A new dynamic strategy using dynamic voltage restorer (DVR) is proposed to improve LVRT capability of wind turbine generators (WTGs). During the voltage dip, DVR will be connected in series between grid and the generator by opening the static switch cabinet. And the power balance between grid and generator is achieved by using the dynamic braking resistor of DVR. In order to increase the response speed of DVR, anti-voltage technology is used to make the thyristor control rectifier in static switch cabinet shutting off immediately. PSCAD/EMTDC simulations and experiments are carried out to prove the effectiveness of the proposed technique.

Key words: wind power; induction generator; voltage sag; dynamic voltage restorer (DVR); low voltage ride through (LVRT)

附录 A

FSIG 参数: FSIG 的切入风速、额定风速以及切出风速分别为 V_{ci}=3m/s、V_r=13.5m/s、V_{co}=20m/s。额定容量 850kW, 额定电压 690V,转子阻抗 Z_r=0.00373+*j*0.10906 p.u.,定子漏抗 X_s=0.09985 p.u.,励磁电抗 X_m=3.54708 p.u.。

附录 B



图 B1 电压跌落发生器及 LVRT-DVR 装置 Fig.B1 Voltage-dip generator and LVRT-DVR device

附录 C

如附录 C 中图 C1 所示,运行过程中,电网电压经历了跨度为 300ms 的跌落,其有效值从 231V 跌落到 115V,检测到电压跌落后,LVRT-DVR 迅速响应,将发电机机端电压维持在正常状态下的水平;故障恢复后,LVRT-DVR 被晶闸管旁路,电网电压与发电机机端电压恢复一致。图 C2 则给出了电网电压跌落 90%工况下的补偿波形,如图所示,电网电压在故障期间有效值约 30V,可见本装置能在电网电压接近于零的情况下辅助发电机组实现低压穿越。



图 C1 50%跌落工况下系统电压及发电机端电压 Fig.C1 Grid voltage and stator voltage of FISG under 50% grid voltage dip



Fig.C2 Grid voltage and stator voltage of FISG under 90% grid voltage dip