

一种新型风力发电用电压跌落发生器

武浩¹, 王淑红¹, 曹建文², 郅瑞腾¹, 王一帆³

(1. 太原理工大学电气与动力工程学院, 山西省太原市 030024; 2. 山西天地煤机装备有限公司, 山西省太原市 030006; 3. 西南交通大学电气工程学院, 四川省成都市 611756)

A Novel Voltage Sag Generator for Wind Farm

WU Hao¹, WANG Shuhong¹, CAO Jianwen², GAO Ruiteng¹, WANG Yifan³

(1. College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, Shanxi Province, China;
2. Shanxi Tiandi Coal Machine Equipment Co. LTD, Taiyuan 030006, Shanxi Province, China;
3. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan Province, China)

摘要: 低电压穿越能力是各国风电场并网规程对风电机组提出的最具挑战性的要求之一。风电机组在低电压穿越期间的性能和过电流的大小除了和故障的类型有关外, 还和故障发生时电网电压的相位有关。为了研究和测试风电机组在最严峻的故障情况下的低电压穿越性能, 研制了一种采用交流无触点开关的基于阻抗形式的电网电压不对称跌落发生器, 应用电阻-电容-二极管吸收电路吸收绝缘栅双极型晶体管两端的过电压, 采用改进的反切函数准确计算电网电压相位角, 采用单片机作为控制器。实验结果表明该装置能够比较准确地模拟电网不对称电压跌落故障, 且该装置结构简单, 实现方便, 制作成本相对较低, 实用性较强。

关键词: 电压跌落发生器; 电网相位; 交流无触点开关; 吸收电路; 相位角计算;

Abstract: Low voltage ride through capability is one of the most challenging requirements to the wind power generation unit in the operating instruction for wind farms all around the world. The performance of the wind power generation unit in the course of the low voltage ride through and the magnitude of the current not only relates to type of the failure, but also to the phase of power grid voltage while the fault occurs. To research and measure the low voltage ride-through performance of wind power generation unit under the most serious failure situation, adopting AC contactless switch an impedance form based power network voltage asymmetrical sag generator was de-

veloped to absorb the overvoltage at both ends of insulated gate bipolar transistor (abbr. IGBT) by the absorbing circuit composed by resistance-capacitance-diode (abbr. RCD), besides, the phase angle of power network voltage was computed by the improved arctangent function and the single-chip microcomputer was used as the controller. Experiment results show that the developed device can fairly accurately simulate the fault of power network voltage asymmetrical sag at the given phase angle of power network, and it possesses such advantages as simple in structure, convenient to achieve, relative low manufacturing cost and good practicability.

Keywords: low voltage ride-through; voltage sag generator; grid phase; alternating current AC contactless switch; absorption circuit; phase angle calculation

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0307

0 引言

随着电网内所联风电机组及风电容量的不断增加, 风电场并网对电网稳定性和安全性的影响日益凸显。为了保障电网的稳定性和安全性, 各国风电场并网规程对风电机组的运行要求越来越多, 其中低电压穿越能力是最具挑战性的要求之一。所谓低电压穿越是指当电网故障或扰动引起三相电压对称或不对称跌落时, 在一定的电压跌落范围或时间间隔内风电机组保证不脱网连续运行的能力^[1]。研究表明, 风电机组在低电压穿越期间的性能和过电流的大小除了和故障的类型有关外, 还和故障发生时电网电压的相位有关^[2-4], 电网若在某一电压相位发生故障, 风电机组会遭受更为严峻的过电流考验。

基金项目: 国家自然科学基金 (51477110); 山西省重点研发计划 (高新领域) 一般项目 (201903D121024)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51477110); Shanxi Province Key R&D Program (High-tech Field) General Project (201903D121024)

为了研究和测试风电机组的低电压穿越能力,必须使用模拟电网故障的电压跌落发生器(Voltage Sag Generator, VSG)。从现有文献来看,VSG的拓扑结构可以分为阻抗形式、变压器形式和电力电子变换形式3类^[5]。文献^[6]提出了一种新型可编程电网故障模拟电源的设计方案,能够产生多种电网故障,功能齐全;文献^[7]提出了一种基于比例积分谐振控制器的电压跌落发生器控制策略来实现电压跌落,有较好的静态和动态性能;文献^[8]设计了一种50 VA电压暂降发生器主回路结构,采用整流与逆变电路配合模拟电压暂降,能够实现多种电压暂降用于风机低电压穿越测试。基于电力电子变换形式的VSG^[6-8]可以模拟多类电网故障,但是其拓扑结构和控制算法一般都较为复杂,成本也比较高;基于变压器形式的VSG分为单个升压或降压变压器组合形式实现的VSG和以中心抽头变压器形式实现的VSG^[9-11],其受功率等级的限制,功率越大,变压器体积越大,且变压器的制作成本高,设计工艺复杂;基于阻抗形式的VSG通过在主电路中并联或串联电阻/电抗实现电压跌落,其结构简单、实现方便,制作成本相对较低,实用性较强^[12-14];文献^[12, 13-14]使用阻抗与开关配合实现电压跌落,但是3篇文章中使用机械开关无法锁定电网相位,而且其跌落速度较慢。

基于阻抗形式和变压器形式的VSG均需要使用交流开关来达到控制目的。机械开关(例如接触器)成本低,系统结构简单,但开关分开、闭合的时间在ms级^[15],在某一特定的电网相位模拟所需的电网故障时,误差过大致使无法完成电网故障最严峻情况时的低电压穿越实验。而无触点开关具有开关速度快,无弧的优点^[15],可以在任意电网相位模拟所需的故障,控制精度较高。从现有文献来看,目前国内鲜有控制故障发生时电网相位的电压跌落发生器。

本文研制的能够在电网设定相位模拟电网不对称电压跌落的基于阻抗形式的VSG系统结构简单,成本较低,且跌落的快速性能能够实现电网相位的准确控制。本文提出的电压跌落方法较已有基于阻抗形式的方法优势之处在于采用无触点开关替代机械开关,大大提高了控制精度,同时也满足了目前风力发电机低电压穿越测试的要求。本文提出的基于阻抗形式电压跌落发生器相

较于AC电源的优势在于结构简单、制作成本低并且算法简单易于实现。经单相接地故障、两相接地故障、两相相间短路等不对称故障的实验结果验证了对设定电网电压相位模拟电压跌落的可行性。

1 新型电压跌落发生器工作原理

1.1 新型电压跌落发生器拓扑结构

电网电压跌落是电力系统最为常见的故障之一,电压跌落故障的类型有三相故障、相间故障(P-P)、两相接地故障(P-P-N)、单相接地故障(P-N)等^[16]。其中三相故障发生概率最低,单相接地故障发生概率最高。图1为本文设计的VSG拓扑结构,用以模拟电网电压不对称故障。该拓扑结构很容易推广到模拟三相对称故障。

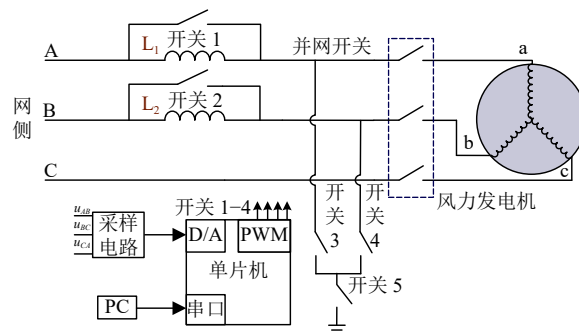


图1 新型电压跌落发生器拓扑结构

Fig. 1 Topological structure of novel voltage sag generator

图1中,限流电抗器 L_1 和 L_2 用以抑制故障发生时线路的短路电流。开关1—开关4选用绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)作为无触点开关,其拓扑结构见图2,开关5选用断路器。通过控制开关1—开关5的开通关断可以模拟单相接地故障、两相接地故障、两相相间短路。

本文设计的VSG有正常工作和故障工作2种工作模式:正常工作模式时,开关1和开关2闭合,限流电抗 L_1 和 L_2 被短路,开关3、开关4和开关5全部断开,电网三相交流电压直接连接到风力发电机;故障工作模式时,开关的工作状态需要相互配合,不同的故障对应的各个开关状态不一致,详见表1。改变VSG的输入三相交流电相序,可以实现任意相的不对称故障。

1.2 交流无触点开关拓扑结构

图2是基于IGBT的交流无触点开关^[15],由

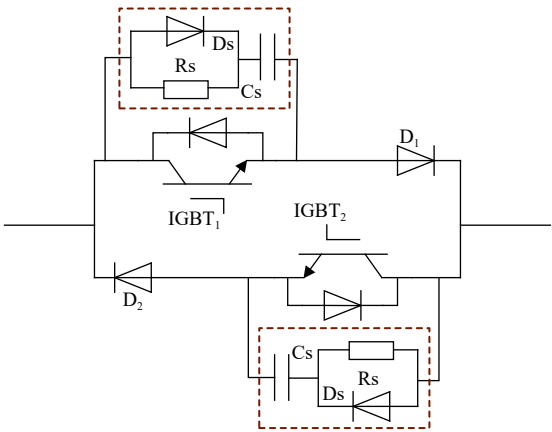


图 2 开关 1-开关 4 的拓扑结构

Fig. 2 Topological structure of switches from No.1 to No.4

表 1 3 种不对称故障对应的开关状态

Table 1 Switch states corresponding to three asymmetric faults

故障类型/开关	开关1	开关2	开关3	开关4	开关5
a相P-N故障	断开	闭合	闭合	断开	闭合
a、b两相P-P故障	断开	断开	闭合	闭合	断开
a、b两相P-P-N故障	断开	断开	闭合	闭合	闭合

两个带有反并联的 IGBT 串联二极管组成，因此 IGBT₁ 和 IGBT₂ 串联 D₁ 和 D₂ 使各个 IGBT 支路单方向导通，以实现开关的全控。电路工作在正半波时，IGBT₁ 和 D₁ 导通，IGBT₂ 和 D₂ 截止，工作在负半波时，反之。

由图 1 和图 2 可见，低电压穿越故障实验中，IGBT 断开时，瞬间断开线路，线路中电感存储的能量产生电磁振荡，会在 IGBT 两端产生冲击电压^[17]，冲击电压的高低与线路断开时电流的大小密切相关，线路电流越大，产生的冲击电压越大，极易损坏 IGBT，因此吸收电路的设计尤其重要。图 2 虚线框中是电阻-电容-二极管 (Resistance-capacitance-diode, RCD) 吸收电路。吸收电路中的快速二极管 D_s 能快速地抑制 IGBT 两端的冲击电压，防止 IGBT 过电压。缓冲电容 C_s 上吸收的能量，在下一个开关周期 IGBT 开通时，经 IGBT、C_s 和 R_s 组成的回路消耗在电阻 R_s 上，完成 C_s 的放电过程。

2 电网电压相位检测方法

电网电压相位检测算法采用反正切函数^[18]。基本思想是将电网三相电压经 3/2 变换，转换到 αβ 两相静止坐标系，利用公式 (1) 求解相位角。

当 u_α 的值接近 0 时，电压分量很小的误差，将会引起较大的相角计算误差。

$$\theta = \arctan(u_\beta/u_\alpha) \quad (1)$$

文献 [18] 提出了改进方案，正切函数 $\tan(\theta)$ 在 $\theta \in [-\pi/4, \pi/4]$ 内具有良好的线性度，且函数单调。若公式 (1) 求解出的相角处于该范围，将会减小计算误差。反正切函数检测电网相位的算法如下：

若电网电压相位处在第 I、IV 象限，将 θ 进行等比例压缩：

$$\tan\theta^* = \tan\frac{\theta}{2} = \frac{u_\beta}{u_\alpha + \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}}, u_\alpha \geq 0 \quad (2)$$

若电网电压相位 θ 处在第 II、III 象限，将 θ 先移相再等比例压缩：

$$\tan\theta^* = \tan\frac{\theta - \pi}{2} = \frac{-u_\beta}{-u_\alpha + \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}}, u_\alpha < 0 \quad (3)$$

根据公式 (2) 和 (3) 可以得出如式 (4) 所示的 θ 的计算公式。

$$\theta = \begin{cases} 2\arctan\frac{u_\beta}{u_\alpha + \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}}, u_\alpha \geq 0 \\ 2\arctan\frac{-u_\beta}{-u_\alpha + \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}} + \pi, u_\alpha < 0 \end{cases} \quad (4)$$

作上述处理后，当 u_α 的值接近 0 时，电压分量的误差对反正切函数求解出的相角影响减小，从而提高相位的计算精度。电网相位角的计算流程图如图 3 所示。

3 实验

根据上述 VSG 的工作原理，搭建的 VSG 装置如图 4 所示。VSG 装置的微控制器是一块基于 Atmel SAM3X8E CPU 的微控制器板 (Arduino Due)。限流阻抗的电感值是 10 mH。IGBT 型号 FD300R12KS4_B5，其中 IGBT 的 V_{CES} (集电极-发射极额定电压) 为 1200 V， I_C (集电极额定电流) 是 300 A，其串联二极管的 V_{PRM} (反向重复峰值电压) 为 1200 V， I_F (正向平均电流) 是 300 A。在图 1 中并网开关断开的情况下，利用该装置模拟了电网 P-N、P-P 和 P-P-N 故障。图 5、图 6 和图 7 分别为 P-N、P-P 和 P-P-N 故障时的实验结果。

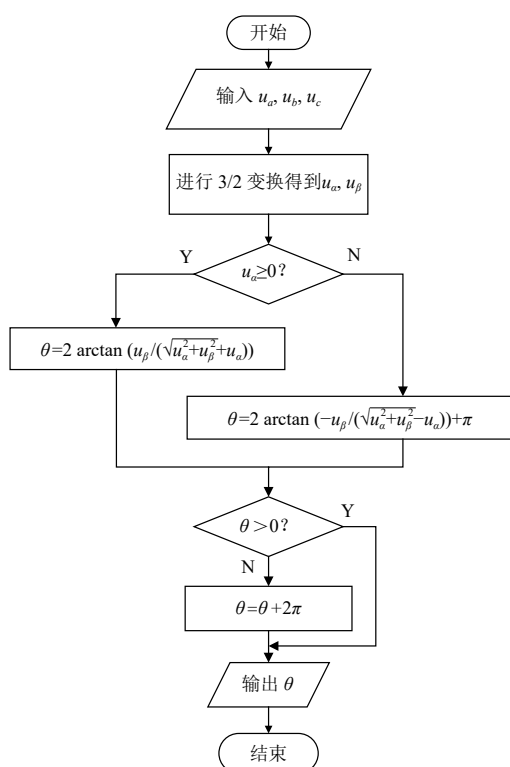


图3 相位检测算法流程图

Fig. 3 Flow chart of the phase detection algorithm



图4 电压跌落发生器装置图

Fig. 4 Photo of the voltage sag generator

电网采用星型接法, 设图1中a相接地, P-N故障时线电压:

$$\begin{bmatrix} u_{ab} \\ u_{bc} \\ u_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{3}\right) \\ \sqrt{3}U \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \\ U \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) \end{bmatrix} \quad (5)$$

设ab相间短路, P-P故障时线电压:

$$\begin{bmatrix} u_{ab} \\ u_{bc} \\ u_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{3}{2}U \sin \omega t \\ -\frac{3}{2}U \sin \omega t \end{bmatrix} \quad (6)$$

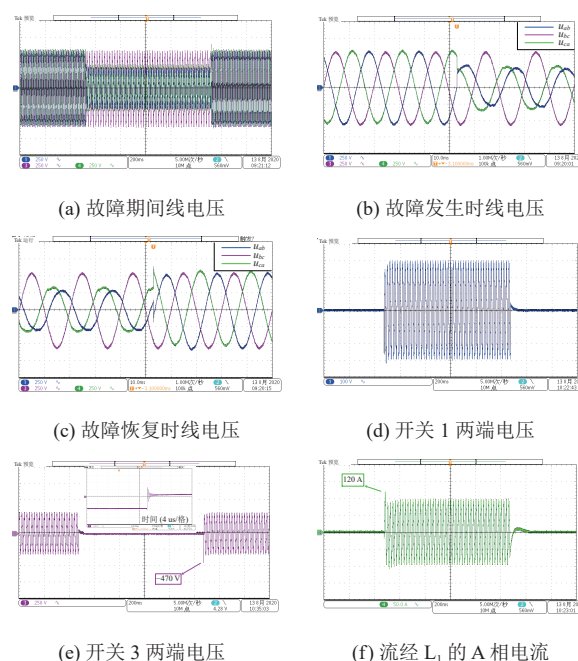


图5 ab线电压相位角为0°时发生P-N故障实验结果

Fig. 5 The experimental results of grid P-N occur when the phase angle of ab line voltage is 0°

设ab两相接地, P-P-N故障时线电压:

$$\begin{bmatrix} u_{ab} \\ u_{bc} \\ u_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ U \sin \omega t \\ -U \sin \omega t \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(5)—(7)中: U 为相电压的幅值。

3.1 P-N故障的实验结果

如图5(a)—(c)所示, 在线电压 u_{ab} 的相位角等于0°时图1中a相发生单相接地故障(P-N), 故障持续1s后清除。故障前线电压的幅值为550V, 故障后三相线电压与公式(5)相符。图5(d)和(e)分别为开关1和开关3两端的电压, 图5(f)为流经电抗 L_1 的电流, 峰值电流为120A。

由图(d)、(e)和(f)可见, 在故障清除, 也就是线路电流断开的瞬间, 开关1两端没有冲击电压, 开关3的冲击电压为-470V, 表明RCD吸收电路设计的合理性。图5(e)中故障发生前开关3的两端电压即为a相相电压, 由该图可见, 故障发生后a相电压在小于1μs的时间内跌落到0, 从而保证了故障时相位控制的准确性。

3.2 P-P故障和P-P-N故障的实验结果

图6和图7分别为图1中a、b两相发生相间故障(P-P)和两相接地故障(P-P-N)的实验结果, 故障持续1s。如图6(a)—(c)所示, 在线电压 u_{ab} 的相位角等于90°时发生a、b相间短路,

由图 (b) 可知, ab 线电压在 $1\mu\text{s}$ 以内跌落到 0。如图 7(a)—(c) 所示, 在线电压 u_{ab} 的相位角等于 180° 时发生 a、b 两相接地故障, 由图 (b) 可知, ab 线电压 $1\mu\text{s}$ 以内跌落到零。由图 6 和图 7 可见, 在故障发生时, 图 6(d) 开关 1 的冲击电压是 375 V, 在故障清除也就是线路电流断开的瞬间, 图 6(e) 开关 3 的冲击电压 410 V, 其余的开关两端均没

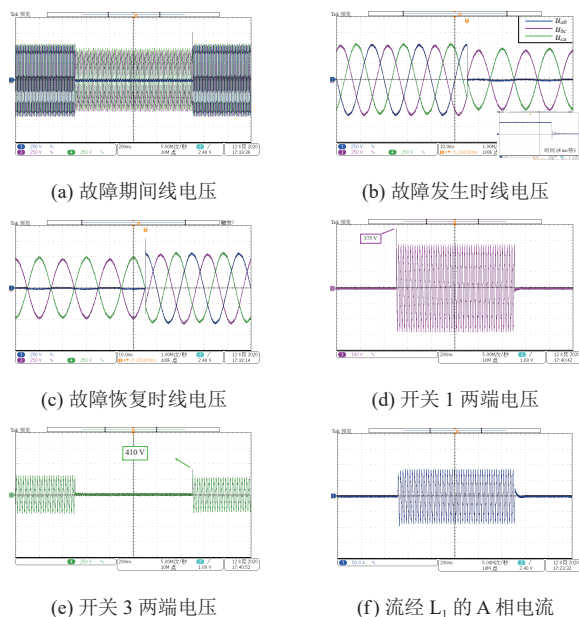


图 6 在 ab 线电压相位角为 90° 发生电网 P-P 实验结果

Fig. 6 The experimental results of grid P-P occur when the phase angle of ab line voltage is 90°

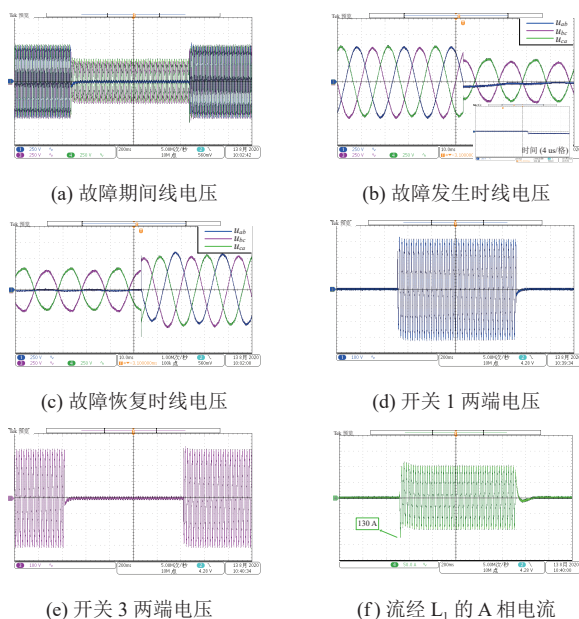


图 7 在 ab 线电压相位角为 180° 发生电网 P-P-N 实验结果

Fig. 7 The experimental results of grid P-P-N occur when the phase angle of ab line voltage is 180°

有冲击电压, 表明 RCD 吸收电路设计合理, 有效保证了 IGBT 安全工作。

4 结论

本文研制的基于 IGBT 的能够在电网设定相位模拟电网不对称电压跌落故障的阻抗形式 VSG, P-N、P-P 和 P-P-N 故障实验结果表明: 可以实现故障时电网相位的准确控制, 电压跌落和恢复时, 输出电压波形没有中断现象, 吸收电路使 IGBT 两端的冲击电压抑制到安全范围内。所设计的 VSG 结构简单, 成本较低, 可靠性高, 具有较强的实用性, 可用于测试风电机组在最严峻的故障情况下的低电压穿越能力。

参考文献

- [1] 国家标准化管理委员会. GB/T 36995-2018. 风力发电机组故障电压穿越能力测试规程[S]. 2017.
National Standardization Management Committee. GB/T 36995-2018. Test procedure for fault voltage ride-through capability of wind turbines[S]. 2017(in Chinese).
- [2] MORREN J., S. W. H. de Haan, "Short-Circuit Current of Wind Turbines With Doubly Fed Induction Generator," in IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 22, no. 1, pp. 174-180, March 2007.
- [3] GHOLIZADEH M., ORAEE A., TOHIDI S., *et al.*, "An analytical study for low voltage ride through of the brushless doubly-fed induction generator during asymmetrical voltage dips," Renewable Energy, vol. 115, DOI 10.1016/j.renene.2017.08.020, pp. 64-75, Jan. 2018.
- [4] LONG T., SHAO S., ABDI E., *et al.* Asymmetrical Low-Voltage Ride Through of Brushless Doubly Fed Induction Generators for the Wind Power Generation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(3): 502-511.
- [5] 胡书举, 李建林, 许洪华. 风力发电用电压跌落发生器研究综述[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(2): 101-103.
HU Shuju, LI Jianlin, XU Honghua. Review of voltage sag generator for wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(2): 101-103(in Chinese).
- [6] 徐海亮, 章玮, 胡家兵, 等. 可编程电网故障模拟电源的设计[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 91-97.
XU Hailiang, ZHANG Wei, HU Jiabing, *et al.* Design of a programmable grid-fault emulating power supply[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 91-97(in Chinese).
- [7] 赵洪, 曾嵘, 年珩, 等. 用于低电压穿越测试的电压跌落发

- 生器研究[J]. 电力电子技术, 2011, 45(1): 27-29.
- ZHAO Hong, ZENG Rong, NIAN Heng, *et al.* Research on voltage sag generator for low voltage ride-through capability test of wind turbines[J]. *Power Electronics*, 2011, 45(1): 27-29(in Chinese).
- [8] 马明, 邱继浪, 雷二涛, 等. 大功率电压暂降发生器主电路设计研究[J]. 电气自动化, 2020, 42(5): 51-54.
- MA Ming, QIU Jilang, LEI Ertao, *et al.* Research on Main Circuit Design for the High-power Voltage Sag Generator[J]. *Electrical Automation*, 2020, 42(5): 51-54(in Chinese).
- [9] 胡书举. 一种新型风力发电用电压跌落发生器的研制[J]. 大功率变流技术, 2009(6): 49-52+57.
- HU Shuju. Development of the novel voltage sag generator for wind power system[J]. *High Power Converter Technology*, 2009(6): 49-52+57(in Chinese).
- [10] 胡书举, 李建林, 梁亮, 等. 适用于风力发电的一种低成本VSG实现方法[J]. 电气应用, 2007(11): 50-53.
- HU Shuju, LI Jianlin, LIANG Liang, *et al.* A cost-effective solution of VSG suitable for wind power system[J]. *Electrotechnical Application*, 2007(11): 50-53(in Chinese).
- [11] 何亮, 张俊杰. 一种低穿现场测试用的电压跌落发生器的研制[J]. 电气自动化, 2015, 37(2): 106-107+114.
- HE Liang, ZHANG Junjie. Development of a voltage sag generator for LVRT field test[J]. *Electrical Automation*, 2015, 37(2): 106-107+114(in Chinese).
- [12] 张文娟. 一种新的阻抗型电压跌落发生器设计[J]. 机械与电子, 2018, 36(7): 3-6+10.
- ZHANG Wenjuan. Design of a new impedance voltage sag generator[J]. *Mechanics and Electronics*, 2018, 36(7): 3-6+10(in Chinese).
- [13] 刘家乐, 张永明, 庄骏, 等. 一种新型低成本低电压穿越测试装置[J]. 电气自动化, 2014, 36(4): 109-111.
- LIU Jiale, ZHANG Yongming, ZHUANG Jun, *et al.* A novel low-cost LVRT testing device[J]. *Electrical Automation*, 2014, 36(4): 109-111(in Chinese).
- [14] 邢作霞, 项尚, 芦彦东, 等. 风力发电的电压故障发生器设计与实验研究[J]. 实验技术与管理, 2019, 36(2): 108-112.
- XING Zuoxia, XIANG Shang, LU Yandong, *et al.* Design and experimental study of voltage fault generator for wind power generation[J]. *Experimental Technology and Management*, 2019, 36(2): 108-112(in Chinese).
- [15] 黄胜利, 裴玮. 交流固态开关技术综述[J]. 电器与能效管理技术, 2017(14): 1-8, 31.
- HUANG Shengli, PEI Wei. Overview of AC solid-state switch technology[J]. *Electrical Appliances and Energy Efficiency Management Technology*, 2017(14): 1-8, 31(in Chinese).
- [16] 张明锐, 金鑫, 刘金辉. 一种抑制固态断路器过电压的新方法[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 37-41.
- ZHANG Mingrui, JIN Xin, LIU Jinhui. Over-voltage suppression of solid-state circuit breaker[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2012, 32(3): 37-41(in Chinese).
- [17] 高洁, 陈增禄, 王宁, 等. 精确检测电网电压矢量相位角方法的研究[J]. 西安工程大学学报, 2016, 30(2): 225-229.
- GAO Jie, CHEN Zenglu, WANG Ning, *et al.* Study on the method of phase angle measurement of voltage vector in power network[J]. *Journal of Xi'an Polytechnic University*, 2016, 30(2): 225-229(in Chinese).
- [18] SANNINO A, BOLLEN M, SVENSSON J. Voltage tolerance testing of three-phase voltage source converters[J]. *IEEE Trans. Power Del.*, 2005, 20(2): 1633-39.

收稿日期: 2020-08-31

作者简介:

武浩(1994), 男, 硕士, 通信作者, 研究方向: 无刷双馈感应风力发电机的不对称低电压穿越控制策略, E-mail: tyutwuhao@163.com;

王淑红(1965), 女, 博士, 教授, 研究方向: 新型电机理论与控制技术, E-mail: wangshh_650@126.com;

曹建文(1975), 男, 硕士, 从事于煤矿电气传动研究, E-mail: caojianwen1@126.com;

邵瑞腾(1994), 男, 硕士, 研究方向: 新型电机理论与控制技术, E-mail: 1440125292@qq.com;

王一帆(1993), 男, 硕士, 研究方向: 无刷双馈感应风力发电机组的控制策略及高电压穿越方法研究, E-mail: 727601965@qq.com。