

# 风电用变压器型电压跌落器及保护系统的研究与设计

李军军, 易吉良, 张松科, 周亚星, 姜建伟

(湖南工业大学电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 风电机组并网运行前, 需要进行低电压穿越能力的测试, 专门的电压跌落模拟装置必不可少。基于此, 研究了一种风力发电用变压器型电压跌落装置, 可以模拟不同类型的故障, 实现不同深度的电压跌落, 电压跌落持续时间可调。为保证电压跌落测试系统能安全可靠工作, 设计了完备的故障保护系统。通过建模仿真与现场测试实验, 该装置可以满足实际工程需求, 为风电机组低电压穿越测试中电压跌落装置实现方案提供选择与参考。

**关键词:** 低电压穿越; 电压跌落; 风力发电; 变压器型

## Research and design of transformer typed voltage sag generator and protection system for wind power generation

LI Junjun, YI Jiliang, ZHANG Songke, ZHOU Yaxing, JIANG Jianwei

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China)

**Abstract:** Low voltage ride-through test of wind power generation system is carried out before connected with grid, it is necessary to use special voltage sag simulated generator for this test. A transformer typed voltage sag generator special for wind power system is researched, different type faults and voltage sag deep can be simulated, voltage sag last time is also adjusted. In order to ensure safe and stable operation of voltage sag test system, complete breakdown protection schemes are designed. Simulation and spot test shows this voltage sag generator is satisfied with practical engineering application, which provides implementation scheme and reference of voltage sag generator for wind power generation system low voltage ride through test.

**Key words:** low voltage ride through; voltage sag generator; wind power generation; transformer typed

中图分类号: TM614 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)15-0096-07

## 0 引言

随着风电场及单台风电机组容量的不断增大, 风电场脱网事故对电网安全运行的影响日趋严重, 较小故障引起的电网电压较大波动, 就可能造成大规模风电机组脱网, 引发大面积停电事故。2012年我国西北地区发生了三起风机大规模脱网事故, 在电网电压跌落时引起连锁反应, 致使众多风电机组脱网, 损失出力达54.4%, 造成西北电网主网频率下降。事故后调查表明, 风电机组不具备低电压穿越能力引发了上述事故, 反映出目前的风电机组技术性能尚不能满足并网安全要求。对于风电机组的并网运行, 多国电力主管部门都规定了风电机组必

须具备低电压穿越(Low voltage ride-through, LVRT)能力。2012年, 我国新标《风电场接入电力系统技术规定》实施(简称“标准”), 对风电机组的低电压穿越能力等技术指标做了明确的强制性规定。

## 1 电压跌落器(Voltage sag generator, VSG)

要使风电机组满足并网的技术要求, 风电机组出厂前的电压穿越测试实验非常重要, 风电机组用电网电压跌落模拟装置必不可少, 需能够模拟多种电网电压跌落故障——单相对地、两相对地、三相对地等故障。

现有风电用LVRT测试VSG实现方案有以下三类: 阻抗型VSG, 有串联与并联两种形式, 结构简单, 实现方便, 但阻抗在正常运行或电压跌落时流过功率, 能量损耗较大, 负载变化时阻抗的匹配无法固定<sup>[1-2]</sup>。

**基金项目:** 湖南省高校科学研究项目(12C0055); 湖南省省市联合自然科学基金(12JJ9042)

电力电子变换型 VSG, 通常采用 MOSFET、IGBT 等作为开关器件, 实现方案灵活多样, 功能强大, 但电力电子器件成本高, 控制复杂, 且器件自身抵抗故障能力有限, 应用受到了限制<sup>[3-4]</sup>。

变压器型 VSG, 有并联或串联形式、带中心抽头形式以及自耦变压器形式<sup>[5]</sup>, 适合大功率的应用场合。变压器型 VSG 体积、重量很大, 携带不便; 普通变压器变比不可调, 电压跌落深度是固定的; 而带中心抽头的变压器, 设计和制造工艺复杂。

比较可知, 上述三类 VSG 各有优缺点。考虑到本设计的 VSG 主要应用于兆瓦级风电机组出产时的低电压穿越测试, 风电机组通常通过升压变压器并网, 变压器型 VSG 既承担了变压器的功能, 又能实现不同类型的故障下不同程度的电压跌落, 简化了测试系统。因此, 本设计采用带多抽头的变压器型 VSG, 并在此基础上设计了故障保护系统, 以满足实际测试的需要。

## 2 LVRT 测试及保护系统

### 2.1 VSG 结构

风电机组低电压穿越测试及保护系统结构如图 1 所示。

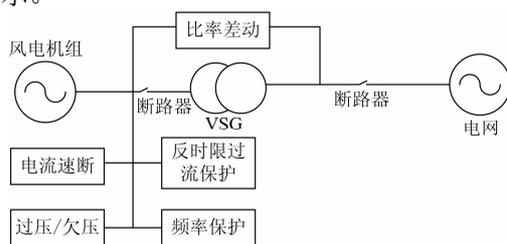


图 1 VSG 及其保护系统

Fig. 1 VSG and protection system

VSG 变压器型电压跌落装置, 可用于双馈型及直驱型风电机组, 满足风电机组低电压穿越测试需求。

VSG 一、二次侧通过断路器分别与电网、风电机组相连, 采用 Y/Δ11 连接, 按需求设定 20%、35%、50%、75%、90% 以及正常六档。

VSG 具体结构如图 2 所示。每档位通过两 IGBT 反向串联连接, 通过控制 IGBT 的导通与关断实现该档位的投入与切除, 为档位顺利切换, 档位间 IGBT 的切换必须遵循关断后导通原则进行。

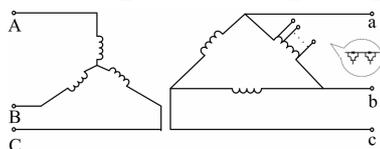


图 2 VSG 结构示意图

Fig. 2 VSG structure schematic

VSG 三相档位同时投切, 可实现三相电压跌落; 一相或两相投切则可实现单相或两相电压跌落; 通过不同档位间的投切, 可模拟不同故障下的不同程度的电压跌落。根据“标准”, 不同程度电压跌落的持续时间是不同的, 如 20% 电压跌落时, 持续时间为 625 ms, 不同程度的电压跌落持续时间是可调的。

### 2.2 VSG 保护系统

为保证风电机组在正常工作以及在外部电网电压严重跌落低电压穿越时不受损, 设计了较为完善的保护功能<sup>[6-7]</sup>, 如图 1 所示。

#### 2.2.1 有源 Crowbar

低电压保护的硬件配置的位置可各不相同, 其中在转子侧安装撬棒(Crowbar)是一种最常见的形式。Crowbar 有多种拓扑结构<sup>[8-11]</sup>, 文献[12]还介绍了一种采用超级电容器储能的 Crowbar。本设计采用了常用的有源 Crowbar, 由三相整流桥、功率开关器件 IGBT 和泄放电阻构成, 如图 3 所示。三相整流桥与 DFIG 转子相连, 当转子三相电流超过设定值, IGBT 将泄放电阻  $R$  连接到转子回路中并通过泄放电阻来消耗, 保护转子侧变流器免遭过电流的损害。

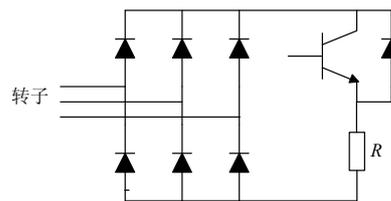


图 3 有源 Crowbar

Fig. 3 Active Crowbar

$R$  的取值是关键<sup>[13-14]</sup>, 阻值大可迅速衰减转子侧过电流, 但可能引起转子侧的过压, 造成直流母线电容反充电, 可能损坏转子侧变换器, 并且电阻的瞬态功耗也比较大; 阻值过小可能造成 Crowbar 多次投切, 引起振荡。

Crowbar 的投入使双馈电机转子短路, 此时双馈电机相当于异步电机, 要从电网吸收大量的无功, 投入时间过长对不利于电压的恢复。为了避免 Crowbar 的再次投入, 当转子电流低于动作值(设定为 1.5 p.u.), 延时两周波后再判定一次电流是否低于动作值, 满足条件后再切除 Crowbar 装置, 可以获得较好的抑制转子电流的效果。机组正常工作时, 转子 Crowbar 投入信号封锁, 不投入运行。

#### 2.2.2 直流泄放电路

直流泄放电路由 IGBT 和泄放电阻  $R_c$  构成, 如

图 4 所示。通过泄放电阻来释放直流母线电容上的过电压能量，将直流电压限制在两侧变流器功率开关器件允许的范围之内。当直流电压  $U_{dc}$  超过设定的阈值，投入卸荷电路，为避免保护频繁动作，采用滞环结构，动作阈值可下限设定为 1.4 p.u.，滞环宽度 0.05 p.u.。

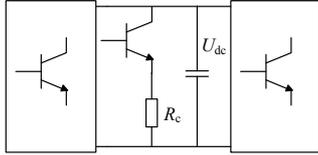


图 4 直流泄放电路

Fig. 4 DC side damp load circuit

### 2.2.3 反时限过流保护

动作时间随过电流的增大而减小，以防止发电机遭受过电流的损坏。本保护配置方案中采用极端反时限特性

$$t = \frac{A}{I_c^2 - (1 + \alpha)} \quad (1)$$

式中： $\alpha$  为与电机定子绕组温升特性、温升裕度等因素有关的修正系数； $I_c$  为发电机额定电流并作为基值； $A$  为常数。

### 2.2.4 速断过流保护

风电机组定子绕组出现短路时，应及时采取保护措施，避免发电机严重损坏。若反时限过流保护动作时限过长，应装设速断保护装置。

起动时，速断保护的動作值应按躲过起动电流来设定；起动过程结束后，動作值应自动减小至合适的设置值，保障速断保护的灵敏性。

其动作条件为

$$\begin{aligned} I_p &\geq I_{sl}, t < T_1 \\ I_p &\geq I_{sl}, t \geq T_2 \end{aligned} \quad (2)$$

式中： $I_p$  为相电流； $I_{sl}$  为起动时速断保护动作值， $I_{sl}$  为正常运行时的速断保护动作值； $T_1$ 、 $T_2$  为速断延时定值。

### 2.2.5 欠压/过压保护

电网电压异常时，保护应动作于断路器并跳闸，将风电机组与电网脱离，使机组免受损坏。电源三相电压过低或消失，欠压保护动作

$$U \leq U_{OL} \quad (3)$$

式中： $U_{OL}$  表示低电压动作设定值；电压跌落时，欠压保护闭锁， $U$  为发电机机端电压。

过电压保护动作设定值可按电机可承受的冲击电压值来确定，过压动作条件为

$$U \geq U_{LV} \quad (4)$$

式中， $U_{LV}$  为过电压动作设定值。

### 2.2.6 低/过频保护

为了保证风电机组正常运行，需持续测量频率，若超出上、下限定风电机组退出电网。过频率动作条件为

$$f > f_{of} \quad (5)$$

式中， $f_{of}$  为频率上限设定值。

低频率动作条件为

$$f < f_{Lf} \quad (6)$$

式中： $f_{Lf}$  为频率下限设定值； $f$  为发电机频率。

### 2.2.7 变压器的差动保护<sup>[15-16]</sup>

差动保护通常作为变压器的主保护，用来防止变压器绕组内部及其引出线上发生的各种相间短路引发的故障。本设计采用比率制动差动保护，其动作特性曲线采用二段折线型，如图 5 所示。动作条件为

拐点前

$$I_{op} > I_{op.min}, I_{res} < I_{res.min} \quad (7)$$

拐点后

$$I_{op} > I_{op.min} + K_{res}(I_{res} - I_{res.min}), I_{res} \geq I_{res.min} \quad (8)$$

式中： $I_{op}$  为差动电流的幅值； $I_{res}$  为制动电流幅值； $I_{op.min}$  为差动保护最小动作电流； $I_{res.min}$  为差动保护最小制动电流； $K_{res}$  为制动系数。以 A 相为例，其差动电流和制动电流为

$$I_{op} = |I_A - I'_a|, I_{res} = |I_A + I'_a|/2 \quad (9)$$

式中： $I_A$  为 A 相相电流； $I'_a$  为低压侧 A 相相位补偿后电流。变压器为 Y/ $\Delta$ 11 接线方式，一、二次侧相应电压互差 30° 相角，差动保护前需相位和幅值补偿，按式(10)实现。

$$\begin{bmatrix} I'_a \\ I'_b \\ I'_c \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (10)$$

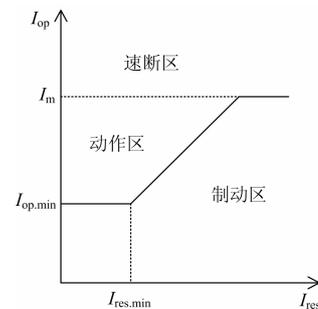


图 5 二段折线型变压器的差动保护

Fig. 5 Two broken line type transformer differential protection

### 3 仿真与测试

为了检验设计的变压器型 VSG 及其保护系统能否可靠运行、满足测试的需求,进行了建模仿真与测试<sup>[17-19]</sup>。

如图 6~图 8 所示,变压器型 VSG 可以模拟不同故障类型的不同程度的电压跌落,在电压跌落过程中,直流电压被抬升,泄放电路保证了直流电压不超限,可有效保护逆变器过压,如图 9 所示。电压跌落期间,DFIG 转子电流较大幅增加,Crowbar 的投入使得电流可显著降低,如图 10、图 11 所示。说明直流泄放电路与 Crowbar 可在电压跌落期间有效保护系统的安全运行。

为了验证模型的正确性,将仿真与测试结果做了对比。测试系统如图 12 所示,在 VSG 高、低压测各设一个测试点,所得数据送入控制与保护系统。为了便于比较,整个运行过程分为如图 13 所示的三个区域<sup>[20]</sup>,即:A 区(故障前)、B 区(故障中)、C 区(故障后)三个时段;B、C 时段又分为 B1(暂态)和 B2(稳态)区间及 C1(暂态)、C2(稳态)。

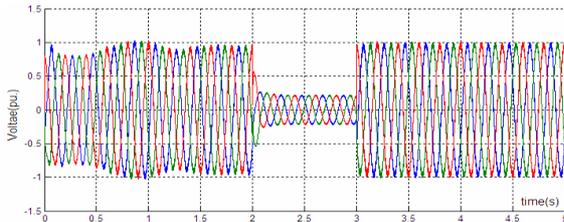


图 6 三相电压 20%跌落

Fig. 6 Three phases voltage 20% sag

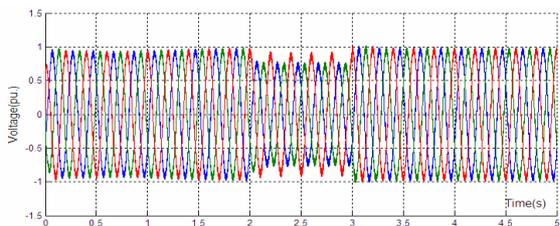


图 7 两相电压 75%跌落

Fig. 7 Two phases voltage 75% sag

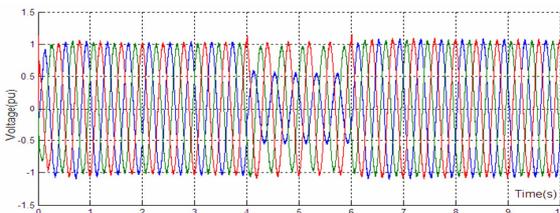


图 8 单相电压 50%跌落

Fig. 8 Single phase voltage 50% sag

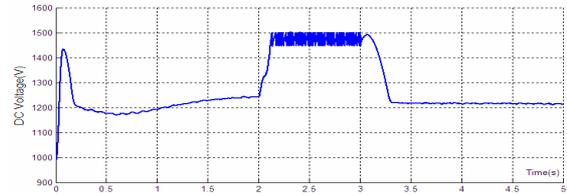


图 9 三相电压 20%跌落时的直流电压

Fig. 9 DC voltage when three phases voltage 20% drop

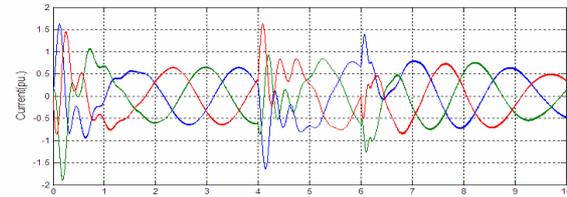


图 10 三相电压 20%跌落时不带 Crowbar 的 DFIG 转子电流

Fig. 10 DFIG rotor current without Crowbar under three phases voltage 20% sag

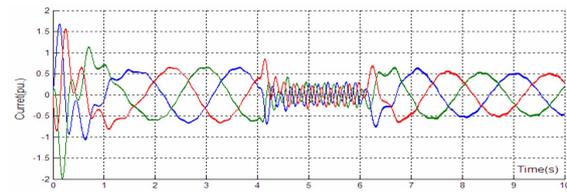


图 11 三相电压 20%跌落带 Crowbar 时 DFIG 转子电流

Fig. 11 DFIG rotor current with Crowbar under three phase voltage 20% sag

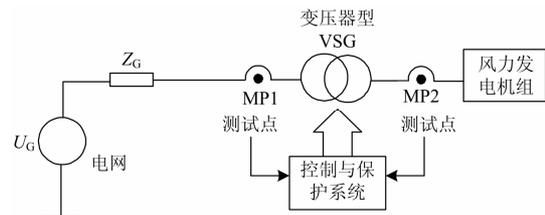


图 12 电压跌落测试系统

Fig. 12 Voltage sag test system

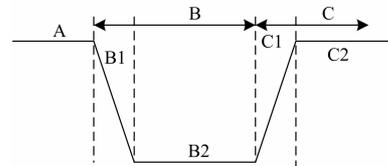


图 13 电压跌落过程的分区

Fig. 13 Voltage sag procedure partition

计算测试数据与仿真数据间的偏差,计算的电气量包括:有功功率  $P$ 、无功功率  $Q$ 、无功电流  $I_Q$ 。计算基频正序分量差值的算术平均值,用  $F$  表示。

$$F = \left| \frac{\sum_{i=K_{Start}}^{K_{End}} (X_M(i) - X_S(i))}{K_{End} - K_{Start} + 1} \right| \quad (11)$$

式中： $X_S$  和  $X_M$  分别表示仿真数据和测试数据基频正序分量标么值； $K_{Start}$ 、 $K_{End}$  表示计算偏差时第一个和最后一个仿真、测试数据的序号。

整个过程的加权平均绝对偏差以三个区的平均绝对偏差加权平均得到：

$$F_G = 0.1F_A + 0.6F_B + 0.3F_C \quad (12)$$

机组向电网提供的动态无功电流  $I_T$

$$I_T \geq 1.5(0.9 - U_T)I_N, \quad (0.2 \leq U_T \leq 0.9) \quad (13)$$

式中： $U_T$  为故障期间并网点电压标么值； $I_N$  为风电场的额定电流。按上式可确定不同电压跌落深度时风电机组需向电网注入的无功功率。电压跌落时，

为保证风电机组不脱网运行，风电实际注入电网的无功电流不应低于上式计算值的 0.9 倍。

仿真与测试波形如图 14~图 17 所示，表 1 为电压跌落 20% 时按上述方法所计算的偏差。 $F_1$  为稳态区间平均偏差； $F_2$  为暂态区间平均偏差； $F_3$  为稳态区间平均绝对偏差； $F_4$  为暂态区间平均绝对偏差； $F_5$  为稳态区间最大偏差。 $F_1 \sim F_4$  计算原理相同。

从图 14~图 17 可知，除有功功率，跌落电压、无功功率、无功电流的仿真与实测值吻合较好，表 1 计算的数据也反映了这一点。暂态误差较大，尤其在电压恢复过程 C<sub>1</sub> 区。有功功率误差较大，这与其控制策略有关，“标准”并未对电压跌落时有功功率做出明确规定，可根据实际情况设定；暂态误差较大，与建模的准确程度、功率控制策略及机组实际运行工况有关。

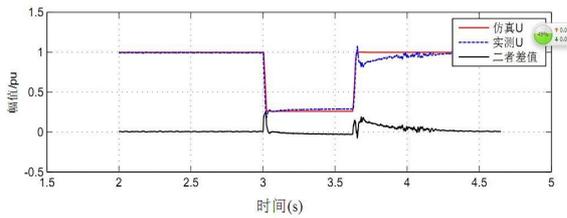


图 14 20%跌落时三相电压仿真与实测比较

Fig. 14 Three phases voltage comparison between simulation and spot test when 20% sag

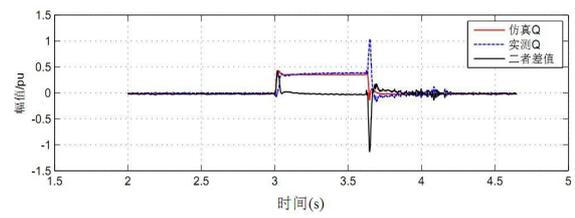


图 15 20%跌落时无功仿真与实测比较

Fig. 15 Reactive power comparison between simulation and spot test when 20% sag

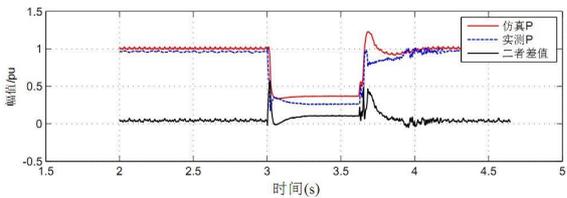


图 16 20%跌落时有功仿真与实测比较

Fig. 16 Active power comparison between simulation and spot test when 20% sag

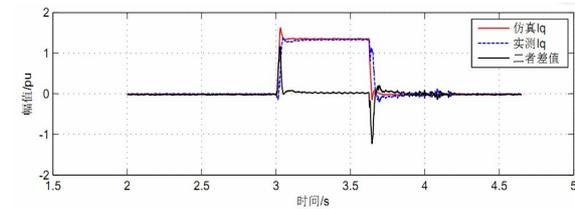


图 17 20%跌落时无功电流仿真与实测比较

Fig. 17 Reactive current power comparison between simulation and spot test when 20% sag

表 1 电压 20%跌落时，不同区段平均误差计算

Table 1 Average deviation computation of different time section under 20% voltage sag

	A			B				C				全区 $F_G$		
	稳态			稳态		暂态		稳态		暂态				
	$F_1$	$F_3$	$F_5$	$F_1$	$F_3$	$F_5$	$F_2$	$F_4$	$F_1$	$F_3$	$F_5$		$F_2$	$F_4$
有功	0.043	0.043	0.075	0.094	0.095	0.577	0.287	0.289	0.069	0.071	0.484	0.136	0.136	0.086
无功	0.020	0.020	0.036	0.008	0.032	0.419	0.141	0.152	0.015	0.040	1.135	0.357	0.370	0.037
无功 电流	0.020	0.020	0.036	0.059	0.059	1.164	0.235	0.246	0.013	0.042	1.215	0.587	0.589	0.056

## 4 结论

从仿真和测试结果可以看出, 该变压器型 VSG 可以模拟不同类型故障下不同深度的电压跌落, 保护系统可靠工作, 有效保护机组的运行安全, 仿真和现场测试结果吻合较好。所设计的变压器型 VSG 既具备变压器的功能, 又能实现电压跌落, 简化了测试系统结构, 可满足风电机组出厂前低电压穿越测试的需求。

### 参考文献

- [1] 胡书举, 李建林, 梁亮. 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): 101-106.  
HU Shuju, LI Jianlin, LIANG Liang. Review of voltage sag generator for wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(2): 101-106.
- [2] 赵静, 周鹏, 章玮. 一种用于风力发电的电压跌落发生器[J]. 电源技术与应用, 2009, 35(12): 74-77.  
ZHAO Jing, ZHOU Peng, ZHANG Wei. Voltage sag generator for wind power generation system[J]. Power Supply Technology and Its Application, 2009, 35(12): 74-77.
- [3] 林小进, 吴蓓蓓, 包斯嘉. 新型移动式低电压穿越测试装置设计与开发[J]. 高压电器, 2013, 49(4): 105-109.  
LIN Xiaojin, WU Beibei, BAO Sijia. Design and development of a mobile LVRT testing device[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(4): 105-109.
- [4] 宋小亮, 蔚兰, 朱益波. 风力发电模拟电压跌落的实现方法[J]. 水电能源科学, 2009, 27(5): 221-224.  
SONG Xiaoliang, YU Lan, ZHU Yibo. Voltage-sag methods utilized in wind power simulation[J]. Water Resource and Power, 2009, 27(5): 221-224.
- [5] 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): 49-54.  
HU Shuju. Development of a novel voltage sag generator for wind power system[J]. High Power Converter Technology, 2009(6): 49-54.
- [6] 赵静. 双馈异步风力发电机低电压穿越时的 Crowbar 保护技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.  
ZHAO Jing. Crowbar protection technology of DFIG power system under low voltage ride through[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
- [7] 撤奥洋, 张哲, 尹项根. 双馈风力发电系统故障性及保护方案构建[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 233-240.  
KAN Aoyang, ZHANG Zhe, YIN Xianggen. Research on fault characteristic and grid connecting point protection scheme for wind generation with doubly fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 233-240.
- [8] 孙勇, 陈晨, 王瑞明. 电压两次跌落对双馈型风电机组的影响分析[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(8): 109-114.  
SUN Yong, CHEN Chen, WANG Ruiming. Impact on DFIG wind turbine during the voltage double dip[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(8): 109-114.
- [9] 贺益康, 周鹏. 变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 system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 140-146.
- [10] 成红兵, 袁炜, 周伟, 等. 基于 DBR 的双馈风力机组低电压穿越方案设计[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 123-129.  
CHENG Hongbing, YUAN Wei, ZHOU Wei, et al. Design for the LVRT scheme of DFIG based on DBR[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 123-129.
- [11] 张曼, 姜慧. 基撬棒并联动态电阻的自适应双馈风力发电机低电压穿越[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 271-277.  
ZHANG Man, JIANG Hui. An adaptive low voltage ride through of doubly-fed induction generator based on Crowbar with a parallel dynamic resistor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 271-277.
- [12] 邹和平, 于帆, 周玮, 等. 基于超级电容器储能的双馈风力发电机低电压穿越研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 48-52.  
ZOU Heping, YU Fan, ZHOU Wei, et al. Study on the low voltage ride through of doubly fed wind generator based on the supercapacitor storage[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 48-52.
- [13] 张建华, 王健, 莫岳平. 双馈电机的 Crowbar 参数整定及保护特性研究[J]. 电机与控制学报, 2011, 29(2): 33-40.  
ZHANG Jianhua, WANG Jian, MO Yueping. Study on Crowbar parameter tuning and protection features of doubly fed induction generator[J]. Electric Machines and

- Control, 2011, 29(2): 33-40.
- [14] 龚文明, 胡书举, 许洪华. 双馈风电机组低电压穿越特性分析与 Crowbar 电阻的功率复核整定方法[J]. 电工电能新技术, 2012, 31(增刊): 128-132.
- GONG Wenming, HU Shuju, XU Honghua. Analysis of LVRT response of DFIG wind power generator and optimal design of active Crowbar resistor considering power feature[J]. Advanced Technology of Electric Engineering and Energy, 2012, 31(S): 128-132.
- [15] 韩笑, 戈祥麟, 汪经华. 基于 S 函数的数字式变压器差动保护仿真[J]. 继电器, 2007, 35(9): 1-6.
- HAN Xiao, GE Xianglin, WANG Jinghua. Digital transformer protection simulation based on S-function[J]. Relay, 2007, 35(9): 1-6.
- [16] 车倩, 陆于平. 采用 Crowbar 实现低电压穿越的风电场继电器保护值整定研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 97-101.
- CHE Qian, LU Yuping. Research on wind farm relay protection value setting based on Crowbar circuit LVRT technology[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 97-101.
- [17] 胡书举, 赵栋利, 赵斌. 双馈风电机组低电压穿越特性的试验研究[J]. 高电压技术, 2010, 36(3): 789-796.
- HU Shuju, ZHAO Dongli, ZHAO Bin. Experimental research on LVRT capability of DFIG wind turbine[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(3): 789-796.
- [18] 王佳, 章跃进. 基于 Crowbar 的双馈异步风力发电系统低电压穿越的仿真与分析[J]. 电机与控制学报, 2011, 38(11): 39-45.
- WANG Jia, ZHANG Yuejin. Simulation and analysis on low voltage ride through of doubly-fed induction generator wind power generation system based on Crowbar circuit[J]. Electric Machines and Control, 2011, 38(11): 39-45.
- [19] 贾波, 张辉. 直驱永磁同步风电系统低电压穿越控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(2): 15-19.
- JIA Bo, ZHANG Hui. Low voltage ride through control strategy for direct-drive permanent magnet synchronous wind power generation system[J]. Proceeding of the CSU-EPSS, 2015, 27(2): 15-19.
- [20] GB/T 19963-2011 风电场接入电力系统技术规定[S]. GB/T 19963-2011 technical rule for connecting wind farm to power system[S].
- 
- 收稿日期: 2014-09-26; 修回日期: 2015-04-19
- 作者简介:  
李军军(1976-), 男, 博士, 讲师, 主要从事分布式发电的研究。E-mail: lijunjun8181972@sina.com  
(编辑 葛艳娜)