

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201420

# 基于 MMC 的风电机组低电压穿越测试装置控制策略研究

刘正富<sup>1,2</sup>, 王朋<sup>1</sup>, 郭敬梅<sup>2</sup>, 赵伟<sup>1</sup>, 朱良合<sup>2</sup>, 区文俊<sup>2</sup>, 苏雷涛<sup>1</sup>, 吴小可<sup>2</sup>

(1. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510080;  
2. 广东电科院能源技术有限责任公司, 广东 广州 510080)

**摘要:** 电力电子型风电机组低电压穿越(Low Voltage Ride Through, LVRT)测试装置具有控制灵活、精度高、功能多样、对电网干扰小等优点。如何准确模拟标准要求的各种电网故障电压波形是该装置控制策略要解决的关键问题。为此, 首先构造了三相短路和两相短路的虚拟故障电路, 利用对称分量法, 详细推导了以电压跌落百分比为输入条件的电网故障电压和短路阻抗比的解析表达式。其次, 将电网故障电压作为 LVRT 测试装置的电压跌落指令参考值, 通过闭环控制即可输出需要的测试电压波形。最后, 结合基于模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)的风电机组 LVRT 测试装置, 给出了电网侧 MMC 和风机侧 MMC 的控制策略。在 PSCAD/ETMDC 中搭建了大容量风电机组低电压穿越测试装置仿真模型, 通过 LVRT 测试中的 2 种典型工况仿真验证了该方法的有效性。

**关键词:** 风电机组; 低电压穿越; 模块化多电平变流器; 电压跌落; 测试装置

## Control strategy of wind turbine LVRT test equipment based on MMC

LIU Zhengfu<sup>1,2</sup>, WANG Peng<sup>1</sup>, GUO Jingmei<sup>2</sup>, ZHAO Wei<sup>1</sup>, ZHU Lianghe<sup>2</sup>, OU Wenjun<sup>2</sup>, SU Leitao<sup>1</sup>, WU Xiaoke<sup>2</sup>

(1. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China;  
2. Guangdong Electric Power Research Institute Energy Technology Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** The Low Voltage Ride Through (LVRT) test device of a wind turbine based on power electronics has the advantages of flexible control, high precision, diverse functions and low interference to the power grid. The key problem of the device's control strategy is how to emulate different kinds of grid-fault voltage waveform as defined in standards. To this end, three-phase and two-phase virtual fault circuits are constructed first. By using the symmetrical component method, the analytical expressions of grid-fault voltage and short circuit impedance ratio of power grid with voltage drop percentage as an input condition are derived in detail. Secondly, the grid fault voltage is taken as the reference value of the voltage drop instruction of the LVRT test device, and the required test voltage waveform can be output through closed-loop control. Considering the LVRT test device of a wind turbine based on modular multilevel converter topology, the control strategy of MMCs connected to the grid and wind turbine separately is provided finally. A simulation model of the LVRT test device for large capacity wind turbines is built, and the effectiveness of the method is verified by simulation of two typical working conditions.

This work is supported by the Key Science and Technology Project of China Southern Power Grid Company Limited (No. GDKJXM20193406).

**Key words:** wind turbine; low-voltage ride through; modular multilevel converter; voltage dip; test device

## 0 引言

风电具有清洁、可再生等特点, 随着技术的不断成熟, 风电已成为现阶段发展最快的可再生能源

之一, 发展前景广阔。根据全球风能理事会(Global Wind Energy Council, GWEC)发布的《全球风能报告 2019》, 2019 年全球风电新增装机容量 60.4 GW, 比 2018 年增长了 19%, 累计装机容量达到 650 GW<sup>[1]</sup>; 根据国家能源局统计数据, 2019 年我国风电新增并网装机容量 25.74 GW, 占我国全部发电装机容量的 10.4%<sup>[2]</sup>, 风电已成为我国占比最高的非水可

基金项目: 中国南方电网有限责任公司重点科技项目 (GDKJXM20193406)

再生能源。当接入电网的风电装机容量比例较高时, 如果发生电网故障并引起大量风机脱网, 会导致系统潮流发生大幅变化, 引起电网电压、频率等稳定问题<sup>[3-11]</sup>。因此德国、英国、丹麦、中国等国家出台的风电技术导则, 都对风电机组提出了低电压穿越能力要求, 即要求当电网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, 并提供必要的动态无功支撑<sup>[12-14]</sup>。

为了测试风电机组的低电压穿越能力, 国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)2008 年发布的第 2 版标准 IEC 61400-21 《Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines》给出了风电机组低电压穿越的测试方法、测试设备等<sup>[15]</sup>。我国在借鉴了国外标准的基础上, 也制定了相关的测试标准, 如 NB/T 31051-2014 《风电机组低电压穿越能力测试规程》、GB/T 36995-2018 《风力发电机组故障电压穿越能力测试规程》<sup>[16-17]</sup>。风电机组 LVRT 测试装置根据原理的不同主要有以下三类: 基于阻抗形式、基于变压器形式和基于电力电子形式<sup>[18-25]</sup>。基于阻抗形式目前应用最广泛, 而基于电力电子形式的 LVRT 测试装置具有控制灵活、精度高、功能多样等优点, 受到国内外学者的广泛关注。电力电子形式的 LVRT 测试装置的关键技术之一为 LVRT 控制, 即电压跌落指令的合成, 目前相关的研究主要集中在电压跌落/暂降的检测算法方面, 而在电压跌落指令合成方面的研究文献不多, 特别是针对三相不对称故障。

根据目前我国风电机组 LVRT 测试要求, 本文提出了一种电压跌落指令合成方法。基于虚拟的短路故障电路, 在给定电压跌落幅度百分比条件下, 详细推导了三相对称电压故障和三相不对称电压故障的短路阻抗比及三相参考电压的解析表达式, 将该参考电压作为电力电子形式的 LVRT 测试装置的外环控制电压给定值, 可以很好地实现给定电网故障类型和电压跌落幅值的模拟, 满足标准测试要求。最后通过仿真验证了该方法的有效性。

## 1 风电机组 LVRT 测试要求

我国标准 GB/T 19963—2011 《风电场接入电力系统技术规范》规定: “风电场并网点电压跌落至 20% 标称电压时, 风电场内的风力发电机组能够保证不脱网连续运行 625 ms; 风电场并网点电压在发生跌落 2 s 内能够恢复到标称电压的 90% 时, 风电场内的风电机组应保证不脱网连续运行。”如图 1

所示, 该曲线是针对风电场提出的, 同样适用于风电场中的风电机组, 作为风电机组 LVRT 测试的依据, 其中风电机组并网点电压为线电压标么值。

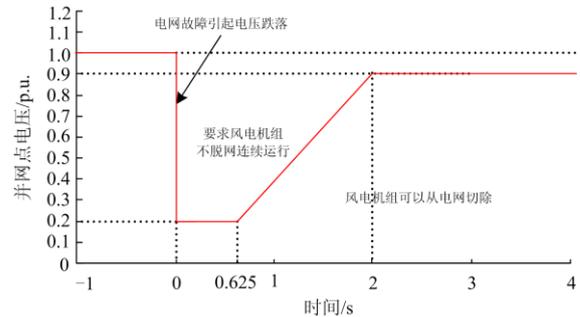


图 1 我国风电场低电压穿越要求

Fig. 1 Requirement of low-voltage ride through capability of wind farm in China

国标 GB/T 36995-2018 《风力发电机组 故障电压穿越能力测试规程》给出了风电机组 LVRT 测试的具体要求和测试方法。其中测试的电压故障包括三相对称电压故障和三相不对称电压故障, 三相对称电压故障对应三相短路时的故障电压, 三相不对称电压故障对应两相短路时的故障电压。LVRT 测试点为风电机组变压器高压侧, 风电机组 LVRT 测试主要考核风电机组的有功功率恢复时间、无功电流响应时间、无功电流稳态均值、风电机组是否未脱网连续运行等指标, 具体要求见国标 GB/T 36995—2018 《风力发电机组 故障电压穿越能力测试规程》第 5.2 款。

## 2 LVRT 电压跌落指令合成方法

电力电子形式的风电机组 LVRT 测试装置的三相电压可以分相控制, 通过闭环控制跟随给定的三相参考电压, 以满足国标 GB/T 36995—2018 《风力发电机组 故障电压穿越能力测试规程》的测试要求。因此控制器设计的关键是给出在不同故障条件下、不同电压跌落幅度百分比条件下的 A、B、C 三相电压参考值, 即电压跌落指令。下面将根据不同类型电压故障的特征, 推导出不同类型电压故障下 LVRT 电压跌落指令的解析表达式。

### 2.1 三相对称电压故障

为了得到三相对称电压故障下的 LVRT 电压跌落指令, 首先构建虚拟的三相电路(如图 2 所示), 分析三相对称短路的故障电压特征, 图中:  $\dot{E}_{eq}$  为系统侧等值电压;  $Z_{FF}$  为系统等值阻抗, 其中  $Z_{FF(1)}$ 、 $Z_{FF(2)}$ 、 $Z_{FF(0)}$  分别为系统等值正序阻抗、负序阻抗、

零序阻抗； $Z_f$  为三相短路阻抗； $\dot{V}_{fa}$ 、 $\dot{V}_{fb}$ 、 $\dot{V}_{fc}$  为三相短路时的故障电压； $\dot{I}_{fa}$ 、 $\dot{I}_{fb}$ 、 $\dot{I}_{fc}$  为故障电流。假设：(1)  $t=0$  时刻发生故障，短路故障前短路点的相电压为  $\dot{E}_{eq}^{(0)} = \dot{V}_F^{(0)}$ ；(2)  $Z_{FF(1)}$  和  $Z_f$  均满足  $X \gg R$ ，其中  $X$  为电抗分量、 $R$  为电阻分量，短路阻抗比  $k_f = Z_f/Z_{FF(1)}$ ， $k_f$  为正实数。

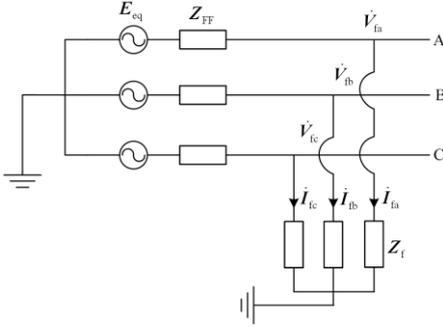


图 2 虚拟三相短路故障电路

Fig. 2 Virtual circuit of three phase short circuit fault

由于三相对称短路故障只有正序分量，没有负序和零序分量，根据电路原理，可以得到以下方程：

$$\dot{V}_F^{(0)} - Z_{FF(1)} \cdot \dot{I}_{F(1)} = \dot{V}_{F(1)} \quad (1)$$

$$\dot{V}_{F(1)} = Z_f \cdot \dot{I}_{F(1)} \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可得发生三相短路后的故障电压为

$$\dot{V}_{F(1)} = \dot{V}_F^{(0)} \frac{Z_f}{Z_f + Z_{FF(1)}} \quad (3)$$

进而可以得到电压跌落的幅值百分比  $K_{set}$ ：

$$K_{set} = \left| \frac{\dot{V}_{Fab(1)}}{\dot{V}_{Fab(1)}^{(0)}} \right| = \left| \frac{\dot{V}_{Fa(1)}}{\dot{V}_{Fa(1)}^{(0)}} \right| = \left| \frac{Z_f}{Z_f + Z_{FF(1)}} \right| = \frac{k_f}{k_f + 1} \quad (4)$$

电压跌落的幅值百分比  $K_{set}$  可以设定为[20%, 90%]之间的任何值，假设给定参考值  $K_{set} = K_{ref}$ ，从而可以得到短路阻抗比  $k_f$ ，以及电压跌落指令参考值  $\dot{V}_{Faref}$ 、 $\dot{V}_{Fbref}$  和  $\dot{V}_{Fcref}$ 。

$$k_f = \frac{K_{ref}}{1 - K_{ref}} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \dot{V}_{Faref} = K_{ref} \dot{V}_F^{(0)} \\ \dot{V}_{Fbref} = K_{ref} \dot{V}_F^{(0)} e^{-j\frac{2}{3}\pi} \\ \dot{V}_{Fcref} = K_{ref} \dot{V}_F^{(0)} e^{j\frac{2}{3}\pi} \end{cases} \quad (6)$$

根据给定的电压跌落幅值百分比  $K_{ref}$ ，利用公式(6)，即可得到 LVRT 测试装置三相电压参考值，通过 LVRT 测试装置电压闭环控制，即可输出 LVRT 测试所需电压波形。

## 2.2 三相不对称电压故障

为了得到三相不对称电压故障(标准仅需要考核两相短路故障，以下指两相短路故障)下的 LVRT 电压跌落指令，不失一般性地，假设 BC 相发生相间短路故障，首先构建虚拟的三相电路(如图 3)，分析三相对称短路的故障电压特征。图中： $\dot{E}_{eq}$  为系统侧等值电压； $Z_{FF}$  为系统等值阻抗； $Z_{FF(1)}$ 、 $Z_{FF(2)}$ 、 $Z_{FF(0)}$  分别为系统等值正序阻抗、负序阻抗、零序阻抗； $Z_f$  为三相短路阻抗； $\dot{V}_{fa}$ 、 $\dot{V}_{fb}$ 、 $\dot{V}_{fc}$  为三相短路时的故障电压； $\dot{I}_{fa}$ 、 $\dot{I}_{fb}$ 、 $\dot{I}_{fc}$  为故障电流。假设：(1)  $t=0$  时刻发生故障，短路故障前短路点的相电压为  $\dot{E}_{eq}^{(0)} = \dot{V}_F^{(0)}$ ；(2)  $Z_{FF(1)}$ 、 $Z_{FF(2)}$  和  $Z_f$  均满足  $X \gg R$ ，其中  $X$  为电抗分量、 $R$  为电阻分量， $Z_{FF(1)} = Z_{FF(2)}$ ，短路阻抗比  $k_f = Z_f/Z_{FF(1)}$ ， $k_f$  为正实数。

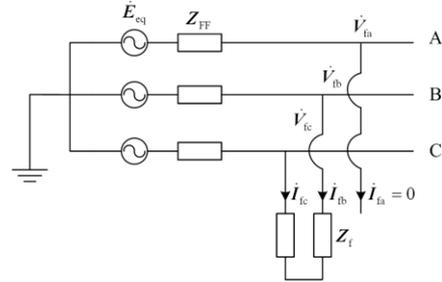


图 3 虚拟两相短路故障电路

Fig. 3 Virtual circuit of two phase short circuit fault

由于两相短路故障只有正序电流分量和负序电流分量，没有零序电流，根据电路原理，可以得到以下网络端口方程和边界方程：

$$\begin{cases} \dot{V}_F^{(0)} - Z_{FF(1)} \cdot \dot{I}_{F(1)} = \dot{V}_{F(1)} \\ -Z_{FF(2)} \cdot \dot{I}_{F(1)} = \dot{V}_{F(2)} \\ -Z_{FF(0)} \cdot \dot{I}_{F(1)} = \dot{V}_{F(0)} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \dot{I}_{Fa} = 0 \\ \dot{V}_{Fb} - Z_f \cdot \dot{I}_{Fb} = \dot{V}_{Fc} - Z_f \cdot \dot{I}_{Fc} \\ \dot{I}_{Fb} = -\dot{I}_{Fc} \end{cases} \quad (8)$$

通过公式推导，可以得到故障发生后的相电压和线电压：

$$\begin{cases} \dot{V}_{Fa} = \dot{V}_F^{(0)} \\ \dot{V}_{Fb} = \dot{V}_F^{(0)} \frac{-1 - k_f + j\sqrt{3}k_f}{2 + 2k_f} \\ \dot{V}_{Fc} = \dot{V}_F^{(0)} \frac{-1 - k_f - j\sqrt{3}k_f}{2 + 2k_f} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \dot{V}_{Fab} = \sqrt{3}V_F^{(0)} \frac{-\sqrt{3}(1+k_f) + jk_f}{2+2k_f} \\ \dot{V}_{Fbc} = \sqrt{3}V_F^{(0)} \frac{j\sqrt{3}k_f}{1+k_f} \\ \dot{V}_{Fca} = \sqrt{3}V_F^{(0)} \frac{\sqrt{3}(1+k_f) + jk_f}{2+2k_f} \end{cases} \quad (10)$$

$k_f$  为正实数, 从式(10)容易证明三相线电压幅值满足:  $|\dot{V}_{fab}| = |\dot{V}_{fca}| > |\dot{V}_{fbc}|$ , 根据低电压穿越三相不对称电压跌落幅值的定义, 可得电压跌落的幅值百分比  $K_{set}$  为

$$K_{set} = \frac{|\dot{V}_{Fbc}|}{|\dot{V}_{Fbc}^{(0)}|} = \frac{k_f}{k_f + 1} \quad (11)$$

电压跌落的幅值百分比  $K_{set}$  可以设定为[20%, 90%]的任意值, 假设给定参考值  $K_{set} = K_{ref}$ , 从而可以得到短路阻抗比  $k_f$ , 以及电压跌落指令参考值  $\dot{V}_{Faref}$ 、 $\dot{V}_{Fbref}$  和  $\dot{V}_{Fcref}$ 。

$$k_f = \frac{K_{ref}}{1 - K_{ref}} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \dot{V}_{Faref} = \dot{V}_F^{(0)} \\ \dot{V}_{Fbref} = \dot{V}_F^{(0)} \cdot \frac{1}{2}(-1 + j\sqrt{3}K_{ref}) \\ \dot{V}_{Fcref} = \dot{V}_F^{(0)} \cdot \frac{1}{2}(-1 - j\sqrt{3}K_{ref}) \end{cases} \quad (13)$$

根据给定的电压跌落幅值百分比  $K_{ref}$ , 并利用公式(13), 即可得 LVRT 测试装置三相电压参考值。

### 3 MMC 型风电机组 LVRT 测试装置控制策略

MMC 具有电平数多、等效开关频率高、谐波特性好、不需要滤波器、易扩容等优点, 在柔性直流输电/直流配电等系统中得到了广泛应用。基于 MMC 的风电机组 LVRT 测试装置主电路如图 4 所示, 测试装置串接于电网与被测风机之间, 其中 MMC1 与交流电网连接, MMC2 与被测风机连接, 图中 MMC 采用基于半桥子模块的拓扑结构, 工作原理详见参考文献[26]。

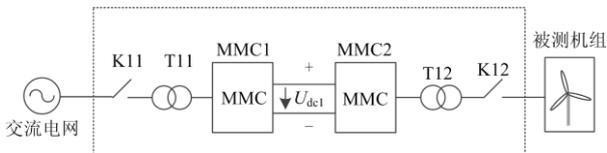


图 4 MMC 型风电机组 LVRT 测试装置

Fig. 4 LVRT test device based on MMC

从等效电路角度考虑, MMC 型风电机组 LVRT 测试装置可以等效为一个电压幅值、相位、频率等都可以调节的电源。下面基于 LVRT 电压跌落指令的合成方法, 对图 4 所示的基于 MMC 的风电机组 LVRT 测试装置的控制策略进行设计。

#### 3.1 电网侧 MMC 控制策略

接入交流电网侧的 MMC1 运行在整流模式, 即定直流电压  $U_{dc}$  和定交流电压  $U_{ac}$  或定无功功率  $Q_{ac}$ , 采取基于  $dq$  坐标系下内环电流控制和外环功率控制的双闭环控制策略, 控制框图如图 5, 其中  $\theta$  为根据系统侧交流电压  $u_{sabc}$  经锁相环得到的相位角。主要控制目标是在测试装置工作过程中维持直流电压, 同时根据实际交流电网运行的需要, 对交流电网提供一定的无功补偿。

#### 3.2 风机侧 MMC 控制策略

与被测风电机组相连接的 MMC2 运行在逆变模式, 采用定交流电压  $V_{ac}$  和定交流频率  $f$  的分相控制策略, 模拟电网并为被测风电机组提供测试需要的电压波形, 控制框图如图 6。图 6 中:  $\dot{V}_{Faref}$ 、 $\dot{V}_{Fbref}$  和  $\dot{V}_{Fcref}$  为电压跌落指令参考值, 根据电压跌落的故障类型和幅值百分比, 计算方法见式(6)、式(13);  $\dot{u}_{sa}$ 、 $\dot{u}_{sb}$  和  $\dot{u}_{sc}$  分别为 MMC2 交流侧输出三相电压实测值;  $f_{ref}$  为给定频率参考值, 对于风电机组 LVRT 测试一般设为额定频率  $f_N$ 。

图 6 中的控制过程主要包括 PI 控制、前馈控制、限幅模块, 把第  $j$  ( $j$  指代 A、B、C 三相中的任意一相) 相的电压幅值参考值分别与对应相的电压有效值求偏差, 对该偏差值通过 PI 控制以调整调制波幅值参考值; 由于在模拟电压跌落时每相的电压幅值参考值会发生阶跃突变, 为了提高响应速度, 对电压幅值参考值引入前馈控制; 在余弦函数生成器中输入已设置的初相参考值和风电机组额定频率, 最终得到三相电压的调制参考波, 本控制环节引入限幅模块主要是为了限制过电压和过电流。

### 4 仿真算例

在 PSCAD/EMTDC 中搭建了 16 MVA 的 MMC 型风电机组 LVRT 测试装置和 8 MW 的永磁直驱风电机组模型, 电路示意图如图 4 所示。考虑到实际装置的容量太大时, 不方便集装箱式布置、运输和吊装, 16 MVA 的 MMC 型风电机组 LVRT 测试装置采用 2 套 8 MVA 的 MMC 型风电机组 LVRT 测试装置并联实现。单套 8 MVA 的 LVRT 测试装置、被测风电机组的仿真参数见表 1。首先测试 LVRT 测试装置不带载时的输出电压特性; 然后再测试风电



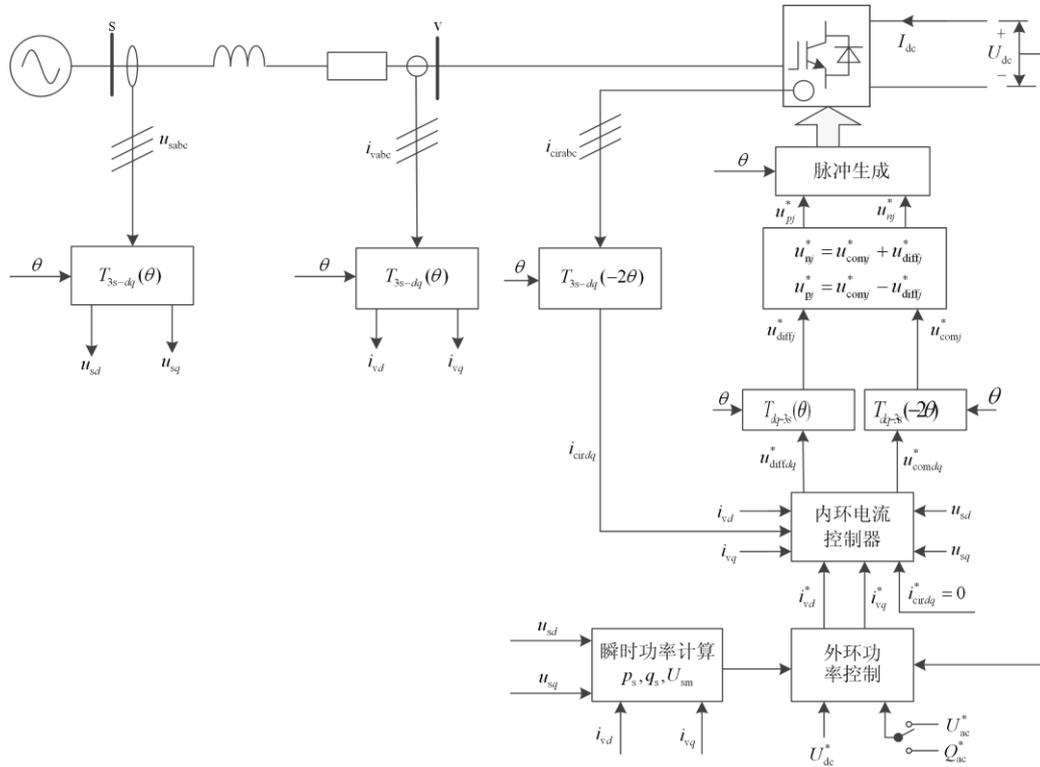


图 5 电网侧 MMC1 控制框图

Fig. 5 Control chart of MMC1 connected to the grid

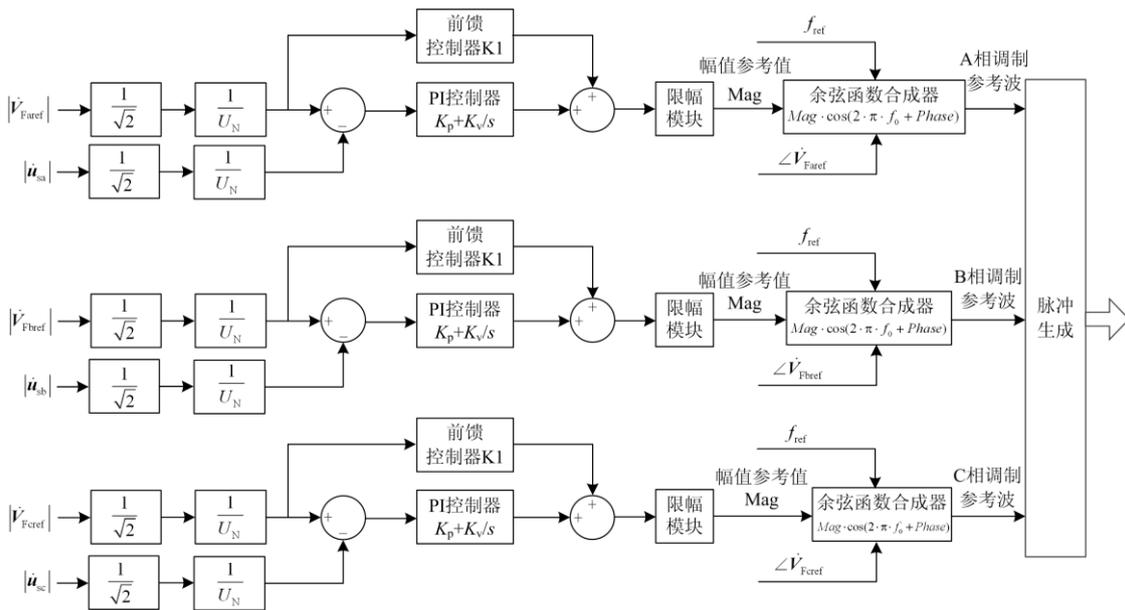


图 6 风机侧 MMC2 控制框图

Fig. 6 Control chart of MMC2 connected to the wind turbine

机组在满发工况下，在不同类型、跌落深度等条件下的低电压穿越响应。根据国标 GB/T 36995—2018《风力发电机组 故障电压穿越能力测试规程》，不失一般性地，选择 0.2 p.u./625 ms、0.5 p.u./1214 ms

两种典型工况作为验证算例，每种工况都分别考虑不带载/满载、三相对称电压/三相不对称电压故障。所有波形都以风电机组额定电压、额定电流、额定容量作为基准值进行标么化处理。根据国标，风电

机组 LVRT 的测试点位于风电机组变压器的高压侧, 因此风电机组的电流、有功、无功信号取自风电机组变压器的高压侧, 风电机组的电压与 LVRT 测试装置输出电压一致, 不再重复给出。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

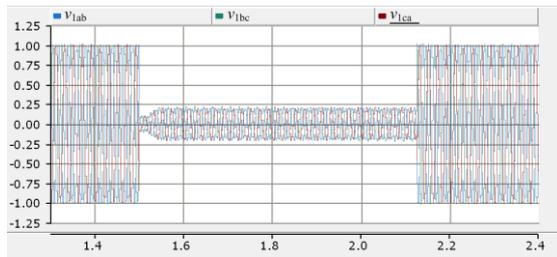
仿真参数		参数值
额定容量/MW		8
子模块数/个		32
直流电压等级/kV		25.5
功率模块型号		1 700 V/600 A
单套 8 MVA 的 LVRT 测试 装置	变压器容量/MVA	8
	网侧绕组额定(线)电压/kV	35
	变压器短路阻抗	12%
	变压器接法	Y-Yn
	子模块电容/ $\mu\text{F}$	8 000
	桥臂电抗器/mH	10
	平波电抗器/mH	10
	启动电阻/ $\Omega$	100
	额定容量/MW	8
	被测风 电机组	高压侧额定电压/kV
	低压侧额定电压/kV	0.69
	风机类型	永磁直驱, 全 功率逆变器型

#### 4.1 工况1: 0.2 p.u./625 ms

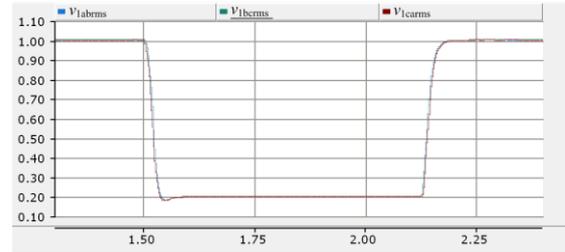
##### 4.1.1 三相对称电压故障

利用 LVRT 测试装置模拟 0.2 p.u./625 ms 三相对称电压故障, 不带载(即将风电机组切除)和满载(即将风电机组投入同时风电机组满发)时 LVRT 测试装置输出三相电压和风电机组升压变压器高压侧的仿真波形如图 7、图 8 所示。

从图 7、图 8 中可以看出, 三相线电压的跌落时间和恢复时间都在 20 ms 以内, 不带载和满载时电压跌落稳态值分别为 0.199 7 p.u.和 0.199 6 p.u., 控制偏差远低于标准要求的  $\pm 5\%$  以内。从图 8 还可得工况 1 满载且三相对称电压故障时, 风电机组有功功率恢复时间为 0.08 s, 无功电流响应时间为 110 ms, 无功电流稳态均值为 1.240 p.u.。



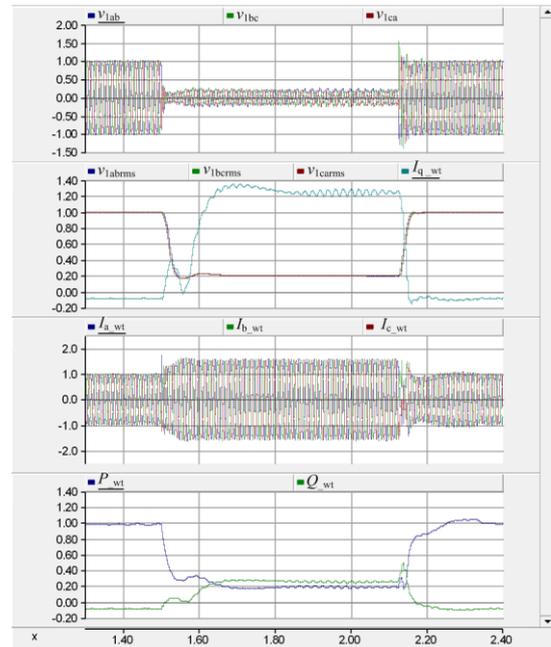
(a) 瞬时值( $V_{1ab}$ 、 $V_{1bc}$ 、 $V_{1ca}$ 为测试装置输出线电压瞬时值, 单位为 p.u., 后图中变量含义和单位不变)



(b) 有效值( $V_{1abrms}$ 、 $V_{1bcrms}$ 、 $V_{1ccrms}$ 为测试装置输出线电压有效值, 单位为 p.u., 后图中变量含义和单位不变)

图 7 工况 1 不带载时三相对称电压波形

Fig. 7 Three-phase symmetrical voltage waveforms of no-load test of operation mode 1



( $I_{a\_wt}$ 、 $I_{b\_wt}$ 、 $I_{c\_wt}$ 为风电机组三相电流瞬时值,  $I_{d\_wt}$ 为风电机组无功电流分量有效值,  $P_{wt}$ 、 $Q_{wt}$ 为风电机组有功功率、无功功率, 单位都是 p.u., 后图中变量含义和单位不变)

图 8 工况 1 满载且三相对称电压故障时仿真波形

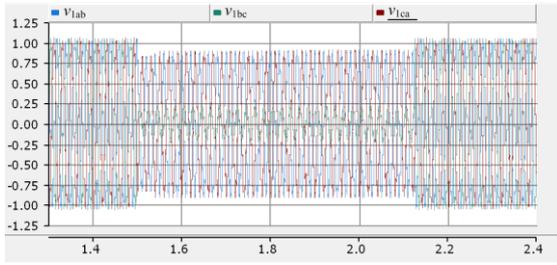
Fig. 8 Simulation waveforms of three-phase symmetrical voltage fault and full scale test of operation mode 1

##### 4.1.2 三相不对称电压故障

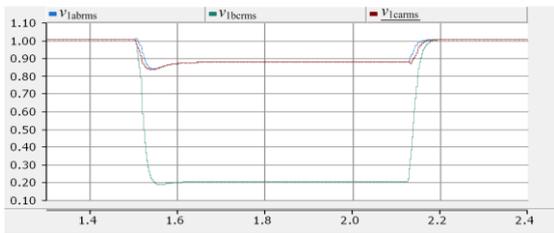
利用 LVRT 测试装置模拟 0.2 p.u./625 ms 三相不对称电压(BC 相间短路)故障, 不带载和满载时 LVRT 测试装置输出三相电压和风电机组升压变压器高压侧的仿真波形如图 9、图 10 所示。

从图 9、图 10 中可以看出, 三相线电压的跌落时间和恢复时间都在 20 ms 以内, 不带载和满载时电压跌落稳态值分别为 0.204 1 p.u.和 0.203 1 p.u., 控制偏差远低于标准要求的  $\pm 5\%$  以内。从图 10 还可得工况 1 满载且三相不对称电压故障时, 风电机组

有功功率恢复时间为 0.018 s。



(a) 瞬时值



(b) 有效值

图 9 工况 1 不带载时三相不对称电压波形

Fig. 9 Three-phase asymmetric voltage waveforms of no-load test of operation mode 1

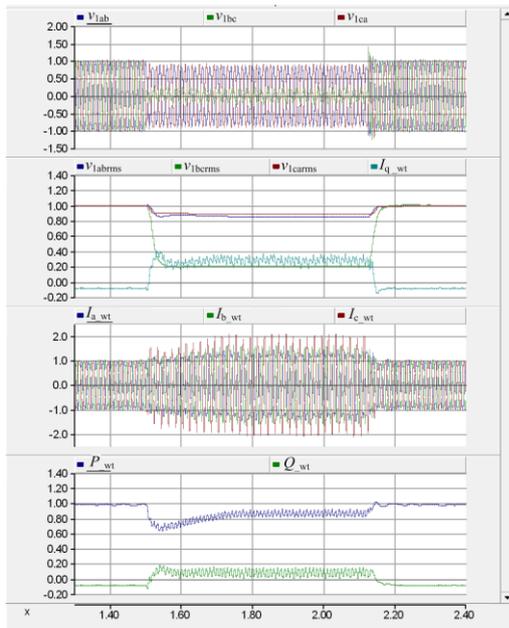


图 10 工况 1 满载且三相不对称电压故障时仿真波形

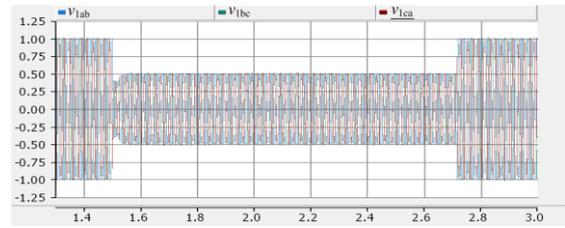
Fig. 10 Simulation waveforms of three-phase asymmetrical voltage fault and full scale test of operation mode 1

#### 4.2 工况2: 0.50 p.u./1214 ms

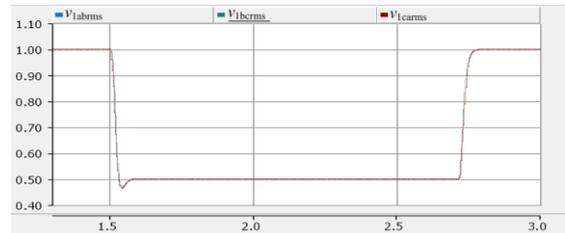
##### 4.2.1 三相对称电压故障

利用 LVRT 测试装置模拟 0.50 p.u./1214 ms 三相对称电压故障，不带载和满载时 LVRT 测试装置输出三相电压和风电机组升压变压器高压侧的仿真

波形如图 11、图 12 所示。



(a) 瞬时值



(b) 有效值

图 11 工况 2 不带载时三相对称电压波形

Fig. 11 Three-phase symmetrical voltage waveforms of no-load test of operation mode 2

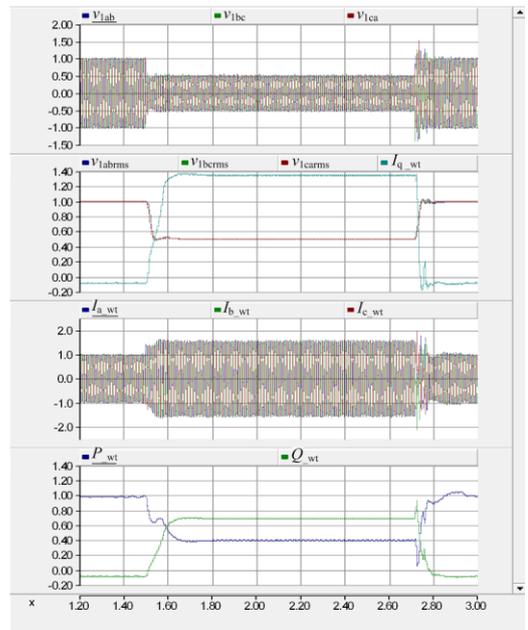


图 12 工况 2 满载且三相对称电压故障时仿真波形

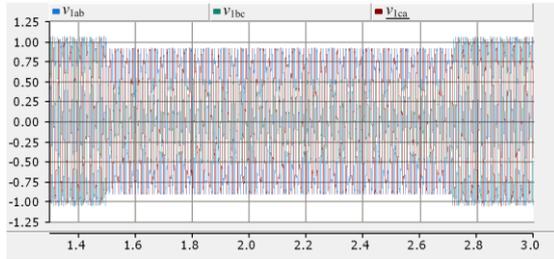
Fig. 12 Simulation waveforms of three-phase symmetrical voltage fault and full scale test of operation mode 2

从图 11、图 12 中可以看出，三相线电压的跌落时间和恢复时间都在 20 ms 以内，不带载和满载时电压跌落稳态值分别为 0.500 4 p.u. 和 0.500 2 p.u.，控制偏差远低于标准要求的±5%以内。从图 12 还可得工况 2 满载且三相对称电压故障时，风电机组有功功率恢复时间为 0.054 s，无功电流响

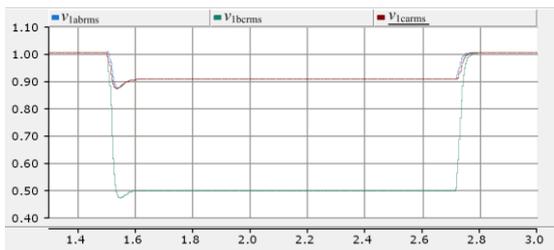
应时间为 70 ms, 无功电流稳态均值为 1.344 p.u.。

#### 4.2.2 三相不对称电压故障

利用 LVRT 测试装置模拟 0.50 p.u./1214 ms 三相不对称电压(BC 相间)故障, 不带载和满载时 LVRT 测试装置输出三相电压和风电机组升压变压器高压侧的仿真波形如图 13、图 14 所示。



(a) 瞬时值



(b) 有效值

图 13 工况 2 不带载时三相不对称电压波形

Fig. 13 Three-phase asymmetric voltage waveforms of no-load test of operation mode 2

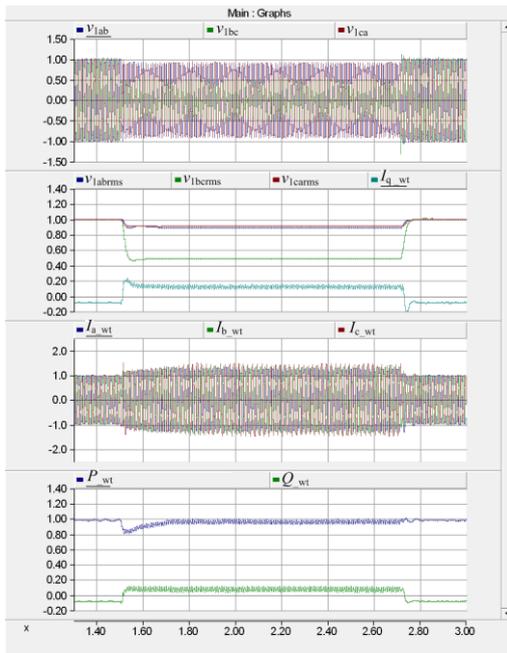


图 14 工况 2 满载且三相不对称电压故障时仿真波形

Fig. 14 Simulation waveforms of three-phase asymmetrical voltage fault and full scale test of operation mode 2

从图 13、图 14 中可以看出, 三相线电压的跌落时间和恢复时间都在 20 ms 以内, 不带载和满载时电压跌落稳态值分别为 0.497 6 p.u.和 0.490 1 p.u., 控制偏差远低于标准要求的  $\pm 5\%$  以内。从图 14 还可得工况 2 满载且三相不对称电压故障时, 风电机组有功功率恢复时间为 0.016 s。

#### 4.3 仿真小结

将工况 1、工况 2 的仿真数据进行汇总, 如表 2—表 4 所示。从表 2 和表 3 可以看出, 在标准要求的各种测试工况下, 利用本文提供的电压跌落指令合成方法及控制策略, LVRT 测试装置输出的电压跌落波形都可以很好地满足标准要求: 在响应时间方面, 电压跌落时间和电压恢复时间都在 20 ms 以内; 在电压偏差方面, 不带载试验时 LVRT 的输出电压最大偏差绝对值为 0.004 1 p.u., 满载试验时 LVRT 的输出电压最大偏差绝对值为 0.009 9 p.u., 都远低于标准要求的  $\pm 5\%$  偏差范围要求。

表 2 不带载试验仿真数据

不带载	三相对称			三相不对称(BC 短路)		
	参考值	实际值	偏差	参考值	实际值	偏差
工况 1	0.2	0.199 7	0.000 3	0.2	0.204 1	-0.004 1
工况 2	0.5	0.500 4	-0.000 4	0.5	0.497 6	0.002 4

表 3 满载试验仿真数据

满载	三相对称			三相不对称(BC 短路)		
	参考值	实际值	偏差	参考值	实际值	偏差
工况 1	0.2	0.199 6	0.000 4	0.2	0.203 1	-0.003 1
工况 2	0.5	0.500 2	-0.000 2	0.5	0.490 1	0.009 9

表 4 对照国标 GB/T 36995—2018《风力发电机组 故障电压穿越能力测试规程》第 5.2 款, 统计了不同工况下被测风电机组的有功功率恢复时间、无功电流响应时间、无功电流稳态均值、风电机组是否未脱网连续运行等指标, 判断被测风电机组是否满足国标要求。从表 4 可知, 在各种工况下, 被测风电机组都保持未脱网连续运行, 有功功率恢复时间、无功电流稳态均值满足标准要求, 但工况 1 三相对称电压故障时的无功电流响应时间为 110 ms, 超过了标准要求的 75 ms 限值, 因此被测风电机组整机不满足国标 GB/T 36995—2018《风力发电机组故障电压穿越能力测试规程》对风电机组 LVRT 的要求, 建议优化调整风电机组的控制参数, 提升风电机组 LVRT 期间的无功电流响应速度, 以满足标准要求。

表 4 被测风电机组低电压穿越响应数据

Table 4 LVRT characteristics of wind turbine be tested

故障类型	有功功率恢复时间/s	无功电流响应时间/ms	无功电流稳态均值/p.u.	风电机组是否未 脱网连续运行	是否满足标准要求
工况 1 三相对称电压故障	0.080	110	1.240	是	否
工况 1 三相不对称电压故障	0.018	不考核	不考核	是	是
工况 2 三相对称电压故障	0.054	70	1.344	是	是
工况 2 三相不对称电压故障	0.016	不考核	不考核	是	是

## 5 结论

本文针对电力电子型 LVRT 测试装置, 根据我国风电机组 LVRT 测试标准的要求, 在分析不同类型电网故障特性的基础上, 提出了一种电压跌落指令合成方法。详细推导了三相对称电压故障和不对称电压故障下的电压跌落指令、短路阻抗比的解析表达式。该方法可以为电力电子型 LVRT 测试装置提供输出电压指令的参考值。

本文还给出了一种基于 MMC 的风电机组 LVRT 测试装置, 基于电压跌落指令合成方法, 详细设计了 MMC 型风电机组 LVRT 测试装置电网侧 MMC 和风机侧 MMC 的控制策略。在 PSCAD/EMTDC 中搭建了 16 MVA 测试装置和 8 MW 永磁直驱风电机组仿真模型, 通过两种不同典型工况的不带载/满载、三相对称/不对称故障仿真试验, 验证了该方法的有效性。

## 参考文献

- [1] Global wind report 2019[R]. Global Wind Energy Council, 2020.
- [2] 国家能源局. 2019 年风电并网运行情况[EB/OL]. [2020-02-28]. [http://www.nea.gov.cn/2020-02/28/c\\_138827910.htm](http://www.nea.gov.cn/2020-02/28/c_138827910.htm).
- [3] 张长久, 鄢小波, 谢小英. 基于 GB/T33593 标准的 DG 低电压穿越输出特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 76-83.  
ZHANG Changjiu, WU Xiaobo, XIE Xiaoying. Research on low voltage ride through of DG characteristics based on GB/T33593 standard[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 76-83.
- [4] 钱峰, 陈艺, 刘俊磊, 等. 大规模风电接入的电力系统协调控制策略[J]. 广东电力, 2019, 32(11): 12-18.  
QIAN Feng, CHEN Yi, LIU Junlei, et al. Coordinated control strategy for power systems with large-scale wind power integration[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(11): 12-18.
- [5] 林泽坤, 彭显刚, 陈深. 风力发电机组脱网的概率模型[J]. 广东电力, 2015, 28(8): 23-27.  
LIN Zekun, PENG Xiangang, CHEN Shen. Probability model of wind turbines off-grid[J]. Guangdong Electric Power, 2015, 28(8): 23-27.
- [6] 周计晨, 吕胤杰, 杨诚之, 等. 考虑风电出力不确定性的分布鲁棒主备协同优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 66-73.  
ZHOU Jichen, LÜ Yinjie, YANG Chengzhi, et al. Distributionally robust co-optimization of energy and reserve dispatch considering uncertain wind power output[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 66-73.
- [7] 孙华东, 张振宇, 林伟芳, 等. 2011 年西北电网风机脱网事故分析及启示[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 76-80.  
SUN Huadong, ZHANG Zhenyu, LIN Weifang, et al. Analysis and enlightenment of 2011 Northwest Power Grid fan off-grid accident[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 76-80.
- [8] 贺静波, 庄伟, 许涛, 等. 暂态过电压引起风电机组连锁脱网风险分析及对策[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1839-1844.  
HE Jingbo, ZHUANG Wei, XU Tao, et al. Risk analysis and countermeasures of chain off-grid of wind turbines caused by transient overvoltage[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1839-1844.
- [9] 刘璐, 耿华, 马少康, 等. 低电压穿越过程中 DFIG 型风电场同步稳定及无功电流控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(15): 4399-4407.  
LIU Lu, GENG Hua, MA Shaokang, et al. DFIG type wind farm synchronous stability and reactive current control method during low voltage ride through[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(15): 4399-4407.
- [10] 胡文平, 周文, 王磊, 等. 基于联合仿真的风电机组低电压穿越传动链扭振抑制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 196-201.  
HU Wenping, ZHOU Wen, WANG Lei, et al. Study on suppression strategy for wind turbine drive train torsional vibration under grid fault based on co-simulation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 196-201.

- [11] 温栋, 贾嵘, 韩杰, 等. 风电大规模集中并网下无功补偿计算[J]. 高压电器, 2019, 55(4): 193-197.  
WEN Dong, JIA Rong, HAN Jie, et al. Reactive power compensation calculation for large-scale centralized wind power grid integration[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(4): 193-197.
- [12] Grid connection regulations-high and extra high voltage [S]. Germany: TenneT TSO GmbH, 2019.
- [13] The Grid Code[S]. Great Britain: National Grid Electricity Operator Limited, 2020.
- [14] Wind turbines connected to grids with voltages above 100 kV-Technical regulations for the properties and the regulation of wind turbines[S]. Denmark: ELKRAFT System and ELTRA, 2004.
- [15] 风电场接入电力系统技术规定: GB/T 19963—2011[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2011.
- [16] 刘纯, 石文辉, 赵海翔. 中国风电并网标准与国外同类标准比较[J]. 智能电网, 2014, 2(9): 48-51.  
LIU Chun, SHI Wenhui, ZHAO Haixiang. Comparison of China's wind power grid connection standards with similar foreign standards[J]. Smart Grid, 2014, 2(9): 48-51.
- [17] Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines: IEC 61400-21[S]. International Electrotechnical Commission, 2019.
- [18] 风电机组低电压穿越能力测试规程: NB/T 31051—2014[S]. 北京: 国家能源局, 2014.
- [19] 风力发电机组故障电压穿越能力测试规程: GB/T 36995—2018[S]. 北京: 中国国家标准化管理委员会, 2018.
- [20] 杜慧成. 风电机组低电压穿越测试系统的研究与应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.  
DU Huicheng. Research and application of wind turbine LVRT testing system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [21] 林小进, 吴蓓蓓, 包斯嘉, 等. 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, 50(4): 111-115.  
LIN Xiaojin, WU Beibei, BAO Sijia, et al. Design and development of a new mobile low-voltage ride-through test device[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 50(4): 111-115.
- [22] 宋海涛. 低电压穿越(LVRT)测试装置的研制[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.  
SONG Haitao. The development of low voltage ride through (LVRT) test device[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [23] 周稳, 毕大强, 戴瑜兴, 等. 新能源发电低电压穿越的VSG实验平台研制[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 107-111.  
ZHOU Wen, BI Daqiang, DAI Yuxing, et al. Development of VSG experimental platform for low-voltage ride-through of new energy power generation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 107-111.
- [24] 周步祥, 董申, 林楠, 等. 计及撬棒电路的双馈风电机组二次骤升故障穿越特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 152-159.  
ZHOU Buxiang, DONG Shen, LIN Nan, et al. Analysis of double-fed wind turbine's secondary high voltage ride-through characteristics considering the crowbar circuit[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 152-159.
- [25] 董鹤楠, 王刚, 邢作霞, 等. 风电场低电压穿越测试方法对比研究[J]. 可再生能源, 2013, 31(7): 25-28.  
DONG Henan, WANG Gang, XING Zuoxia, et al. Comparative study of low voltage ride-through test methods for wind farms[J]. Renewable Energy, 2013, 31(7): 25-28.
- [26] 徐政, 屠卿瑞, 管敏渊, 等. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.

收稿日期: 2020-11-17; 修回日期: 2021-04-16

#### 作者简介:

刘正富(1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电能质量、新能源并网运行与控制; E-mail: 13926164040@126.com

王朋(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为智能控制技术在电力系统中的应用;

郭敬梅(1987—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为多端柔性直流输电运行控制、新能源并网检测和仿真建模技术。

(编辑 魏小丽)