

DOI: 10.7667/PSPC160432

## 提高直驱永磁风机低电压穿越能力的控制策略

张谦<sup>1,2</sup>, 李凤婷<sup>1</sup>, 蒋永梅<sup>1</sup>, 陈伟伟<sup>3</sup>

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 国网浙江电力公司舟山供电公司, 浙江 舟山 316000;  
3. 国网新疆电力公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

**摘要:** 为提高直驱风电机组低电压穿越能力和改善故障穿越后风电机组的稳定运行能力, 提出了一种基于变阻值和变功率因数无功控制的直驱风电机组低电压穿越综合控制策略(the comprehensive control strategy, CCS)。在直流侧采用 IGBT 与变阻值卸荷电阻串联构成变阻值卸荷电路, 且在长时故障时引入磁控型动态无功补偿装置进行无功补偿, 根据实际电压值与预设电压阈值的比较结果动态投切卸荷电路。在网侧根据电压跌落程度所处的阶梯范围, 动态调整直驱风电机组发出的无功功率。在 PSCAD/EMTDC 中搭建了直驱风电场的仿真模型, 应用某实际运行的 1.5 MW 直驱风机参数, 在卸荷电阻值、无功功率因数分别不同时仿真验证了该控制策略的有效性。结果表明: 该控制策略不仅能够提升机组的 LVRT 能力, 而且可以改善故障穿越结束后机组的稳定运行特性。

**关键词:** 直驱风电机组; 低电压穿越; 变阻值卸荷电路; 变功率因数无功控制

### Comprehensive control strategy for improving low voltage ride through capability of permanent magnet synchronous generator

ZHANG Qian<sup>1,2</sup>, LI Fengting<sup>1</sup>, JIANG Yongmei<sup>1</sup>, CHEN Weiwei<sup>3</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. Zhoushan Power Supply Co., State Grid Zhejiang Electric Power Company, Zhoushan 316000, China;

3. Economic Research Institute, State Grid Xinjiang Electric Power Company, Urumqi 830047, China)

**Abstract:** In order to improve permanent magnet synchronous generators (PMSGs) low voltage ride through (LVRT) capability and operation stability after LVRT, a comprehensive control strategy (CCS) of PMSG based on variable resistance and power factor is proposed, which can be described as that, a series circuit of IGBT and variable-value unloading resistor is utilized in the DC side, a dynamic reactive power compensation device based Magnetically Controlled Reactor (MSVC) is utilized under long period faults, the series circuit and MSVC device are accessed according to the comparison of actual voltage value and preset limit voltage. According to the voltage drop level, the reactive power generated by PMSG is adjusted. A simulation model is established in PSCAD/EMTDC, based on parameters of an actual operational PMSG with the output power of 1.5 MW, the efficiency of the proposed control strategy is verified under different unloading resistances and power factors. The results shown that, not only the LVRT capability of PMSG can be enhanced, but also the operation stability after LVRT can be improved.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51267019 and No. 51467019).

**Key words:** permanent magnet synchronous generator; low voltage ride through; dynamic chopper circuit; variable power factor reactive power control

## 0 引言

随着风电在电网电源中的比例迅速增长, 风电脱网对电网安全运行的影响也愈加严重。为此, 《风电并网技术规程》要求风电机组具有低电压穿越

(Low Voltage Ride Through, LVRT)能力以提升对系统稳定运行的支撑能力<sup>[1]</sup>。直驱永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG) 因其优越性成为风电场的主流机型<sup>[2-3]</sup>, 针对 PMSG 低电压穿越的研究得到国内外学者的广泛关注<sup>[4-13]</sup>。

目前关于低电压穿越研究主要集中在以下三个方面: 减少机组机侧变流器输入功率<sup>[4-5]</sup>, 如桨距角

调节、限制发风电机组电磁功率；消除直流母线处不平衡功率<sup>[6-11]</sup>，如增加卸荷电路、储能装置、辅助变流器；增大机组网侧变流器输出功率<sup>[12-13]</sup>，如机组发无功控制策略、无功补偿。研究对比发现，LVRT 方法都存在一定的缺陷，如：桨距角调节的响应时间较长；卸荷电路不适应电压跌落较深的情况；储能装置、增加辅助变流器成本较大，性价比较低；机组发无功控制策略在故障穿越后会造成功率波动。

本文综合考虑经济性、技术性可行性及响应速度，以提升风电机组的 LVRT 能力和改善故障穿越结束后风电机组的稳定运行能力为出发点，提出一种基于变阻值卸荷电路和变功率因数无功控制的直驱风电机组低电压穿越综合策略。并在 PSCAD 平台上搭建含直驱风电机组的风电场模型，仿真验证了综合控制策略的优越性。

## 1 PMSG 的低电压穿越技术

目前 PMSG 实现低电压穿越所采用方法的基本原理主要从以下三个角度出发：减少机组机侧变流器输入功率；消除直流母线处不平衡功率；增大机组网侧变流器输出功率。具体如图 1 所示。

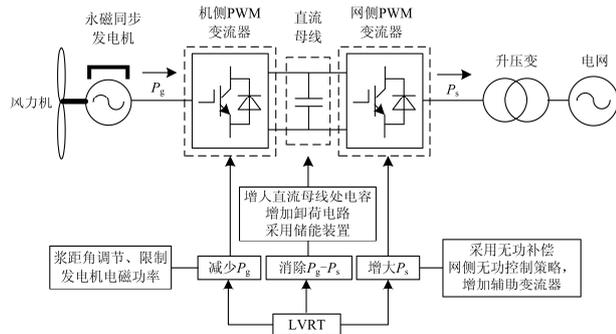


图 1 PMSG 低电压穿越技术原理框图

Fig. 1 Block diagram of PMSG for LVRT theory

研究表明，目前 PMSG 低电压穿越技术存在一定的缺陷。减少机组机侧变流器输入功率的方法存在响应速度慢的问题；消除直流母线处不平衡功率的方法存在经济性差、增加占用体积、控制复杂等问题；增大机组网侧变流器输出功率的方法存在成本高、提升 LVRT 能力有限等问题。各类 LVRT 方法均以实现或提升机组低电压穿越为目的，对低电压穿越结束后机组恢复稳态运行能力考虑较少。

## 2 PMSG 控制策略

### 2.1 直流侧变阻值卸荷电路

针对各种 LVRT 方法存在的不足，本文提出一

种基于变阻值卸荷电路和动态无功控制的直驱风电机组低电压穿越综合策略。

直流侧变阻值卸荷电路由绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 和变阻值卸荷电阻串联构成，并联在直流侧电容两侧。具体工作原理：当直流侧电压  $U_{dc}$  大于允许值  $U_{dcmax}$  时，IGBT 导通，卸荷电阻快速投入，同时根据电压跌落程度选择对应的卸荷电阻值；当直流侧电压  $U_{dc}$  小于允许值  $U_{dcmax}$  时，IGBT 关断，卸荷电路退出运行，本文  $U_{dcmax}$  取 1.1 p.u.。

忽略风电机组变流器自身其他损耗，直流侧功率方程为

$$\Delta P = \frac{1}{2} C \frac{d(U_{dc}^2)}{dt} = P_g - P_s \quad (1)$$

式中： $U_{dc}$  为直流母线电压； $P_g$  为机侧输入功率； $P_s$  为网侧输出功率； $C$  为直流侧电容； $\Delta P$  为风电机组机侧变流器输入功率与网侧变流器输出功率的偏差。

当直流侧电压取最大允许电压，机侧与网侧功率偏差为最小值(其值对应于卸荷电路恰能投运时机侧与网侧的功率偏差)时，卸荷电路电阻值为

$$R_{dmax} = \frac{U_{dcmax}^2}{\Delta P_{min}} \quad (2)$$

$$\Delta P_{min} = P_N - P_{smax} = P_N - (U_* I_{g*} + I_{g*}^2 Z_*) S_B \quad (3)$$

式中： $U_{dcmax}$  为直流母线最大允许电压； $\Delta P_{min}$  为卸荷电路恰能投运时机侧与网侧的功率偏差。 $P_N$  表示机侧输入功率为额定功率； $P_{smax}$  为网侧输出最大功率； $S_B$  为网侧基准容量； $I_{g*}$  为网侧变流器最大允许电流  $I_g$  的标幺值； $U_*$  为电网电压； $Z_*$  为变压器的电抗值和网侧阻抗。

由式(3)可得  $\Delta P_{min}$ ，将  $\Delta P_{min}$  代入式(2)中，可得  $R_{dmax}$ ，将  $R_{dmax}$  代入直驱机组的等效模型中，可得  $U_{dc}$ ，若  $U_{dc} \geq U_{dcmax}$ ，将  $U_{dcmax} - (U_{dc} - U_{dcmax})$  作为新的  $U_{dcmax}$ ，代入式(2)中可得  $R_{dmax}$ ，如此反复迭代，直到  $U_{dc} \leq U_{dcmax}$ ，可得卸荷电阻实际最大值  $R_{dmax}$ 。

卸荷电路投入时，针对不同电压跌落情况下的卸荷电路电阻取值通过调节  $\alpha$  实现：

$$\Delta P = \frac{U_{dc}^2}{\alpha \cdot R_{dmax}} = P_g - P_s \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{U_{dc}^2}{R_{dc} (P_g - P_s)} \quad (5)$$

式中， $\alpha$  为卸荷电路电阻值调节系数，取值范围为  $0 < \alpha \leq 1$ 。

通过推导得到卸荷电阻最大值，再根据公式得

到不同电压跌落水平下的实时电阻值，通过调节卸荷电阻系数实现变阻值控制。

传统直驱风电机组的直流卸荷电路采用固定电阻值，相关研究表明，卸荷电阻过大或过小均存在一定的弊端。本文采用的变阻值卸荷电路能更好地适应不同电压跌落的情况，相当于每个电压跌落水平下投入的电阻均为最优值，一定程度上改善了低电压穿越结束后机组的稳定运行能力。

### 2.2 网侧变流器变功率因数无功控制

多数风电机组网侧变流器的无功控制策略为：当电网电压跌落程度超过低电压允许值时，无论电压跌落程度如何，变流器将改变单位功率因数控制策略，运行在某个给定功率因数下，发出恒定的无功功率。功率因数范围一般为超前 0.9 到滞后 0.9，一般取 0.95。但该策略对于电压跌落程度轻、电网网架较弱的系统，可能造成无功功率过剩，抬升系统电压，影响系统电压稳定。

本文提出适应于电压跌落程度的网侧变流器变功率因数无功控制策略：根据电网电压跌落的程度采用不同的功率因数。即当电网电压跌落程度在 0.1 p.u. 以内，网侧变流器运行在单位功率因数下；当电网电压跌落至  $X \sim 0.9$  p.u. 时，风电机组根据功率因数曲线发少量的无功功率，随着跌落程度的加深，风电机组所发的无功功率也随之增大；其中， $X$  根据直驱机组在不同电压跌落水平的仿真分析可得；当电压跌落程度超过  $X$  时，风电机组发出所允许的最大无功功率。其网侧动态无功控制流程图、控制策略如图 2、图 3 所示。(图中参数含义见文献[14])。

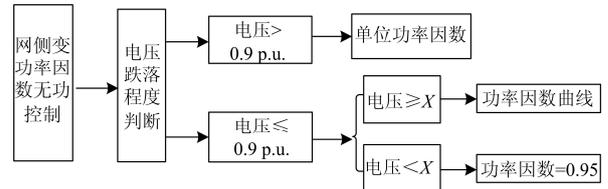


图 2 网侧变功率因数无功控制流程

Fig. 2 Flow chart of variable power factor reactive power control for the grid side converter

### 2.3 磁控型动态无功补偿装置(MSVC)

直流卸荷电路保护适用于短时电网电压跌落的情况，且作用效果明显。而当电网电压跌落时间较长时，采用 MSVC 无功补偿可以有效弥补直流卸荷电路的短板和不足，并能更好地提升机组的 LVRT 能力，与卸荷电路配合对 PMSG 进行 LVRT 控制。

本文采用的 MSVC 由磁控电抗器(MCR)、固定电容器(FC)及无功补偿控制单元 3 部分组成。FC 提供固定的容性无功，MCR 提供可调的感性无功。MCR 通过改变可控硅控制角，平滑调节电抗器容量，进而调节 MCR 输出的感性无功功率。风电场加装 MSVC(MCR 的额定功率为 100 MW, FC 的容性无功为 200 Mvar)的补偿效果说明 MSVC 能够实时跟踪机端电压进行补偿，如图 4 所示。

与传统的 TCR 型 SVC 相比，MCR 电气结构简单，占地面积小，基础投资小；MCR 自身有功损耗低至 0.8%；MCR 装置造价远小于 TCR 型 SVC；MCR 只承受 1% 左右的总电压，可控硅不容易被击穿，运行稳定可靠；工作效率较高；储能元件容量大；能适应风沙环境，对环境要求不高。

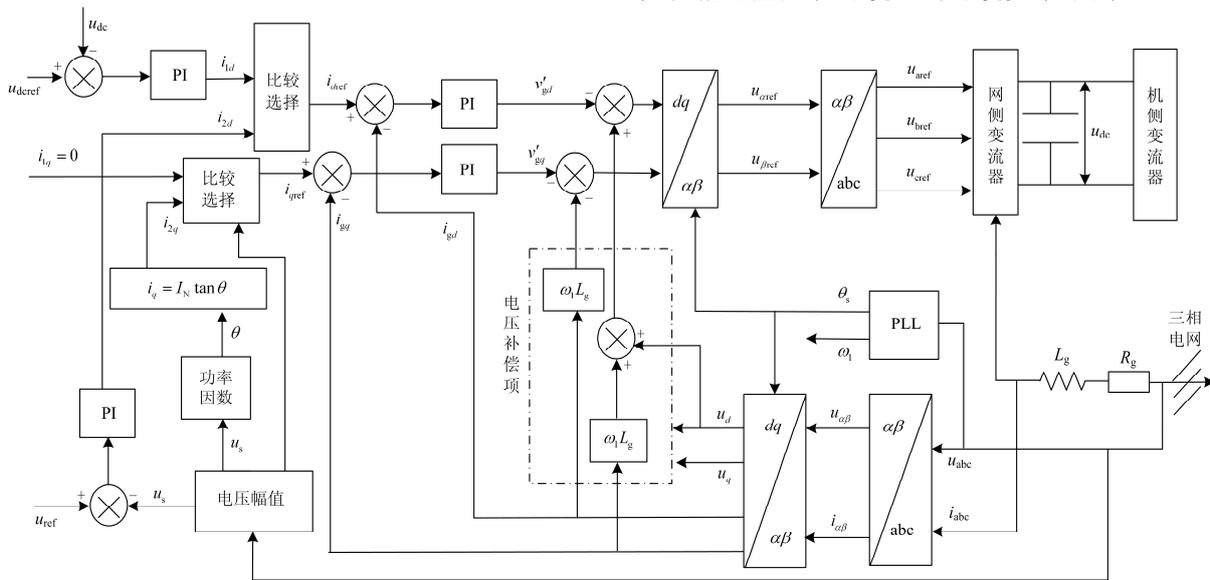


图 3 网侧变流器控制框图

Fig. 3 Block diagram of the grid side converter control

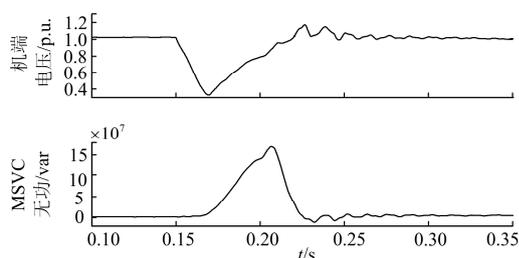


图4 投入 MSVC 的补偿效果

Fig. 4 Compensation effect with MSVC

### 3 基于 CCS 的 PMSG 的 LVRT 验证分析

#### 3.1 低电压穿越仿真模型

为验证本文提出的 LVRT 综合控制策略的可行性, 参照新疆达坂城某风电场的相关数据, 在 PSCAD 平台搭建基于 PMSG 的风电场并网模型, 如图 5 所示。本文所选取的 PMSG 部分参数见表 1。

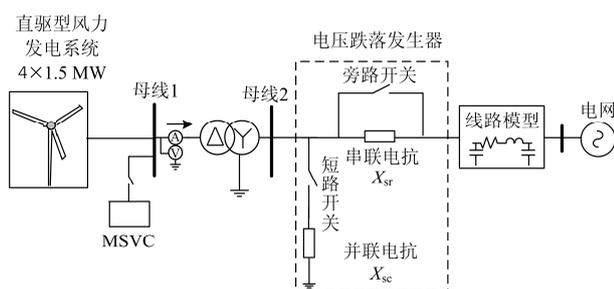


图5 风电系统 LVRT 仿真模型

Fig. 5 Simulation model of wind power system for LVRT

表 1 PMSG 参数

Table 1 Parameters of PMSG

额定容量/MW	额定频率/Hz	额定风速/(m/s)	定子电阻/p.u.
1.5	50	12	0.005 876
转子电阻/p.u.	定子电抗/p.u.	转子电抗/p.u.	互感电抗/p.u.
0.006 613	0.976	0.1634	5.136

根据算例机组的运行数据, 求得网侧变流器功率因数拟合曲线, 如图 6 所示, 进而得到其功率因数函数表达式为

$$\cos \theta = f(U_s) = \frac{1.123}{e^{\frac{U_s - 1.1648}{2.15}}} + \frac{0.105}{e^{\frac{U_s - 0.4194}{0.2592}}} \quad (6)$$

$(0.6 \leq U_s < 0.9)$

通过对算例机组在不同电压跌落水平下的大量仿真, 网侧变流器功率因数电压分界点  $X$  为 0.6 p.u.

#### 3.2 PMSG 的 LVRT 特性

基于仿真模型, 仿真比较单一控制策略和综合控制策略下风电机组的低电压穿越特性。仿真算例中,  $t=2.0$  s 时, 风电场升压变高压侧电压跌落至 0.2 p.u.,

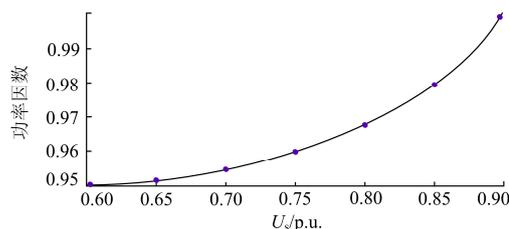


图6 功率因数函数拟合曲线

Fig. 6 Curve for power factor function

持续时间为 0.625 s。图 7 为单位功率因数下, 卸荷电阻值不同时风电机组 LVRT 特性的仿真波形。图 8 为卸荷电阻值固定不变, 功率因数不同时风电机组 LVRT 特性的仿真波形。图 9 为 CCS 和传统控制策略 (Traditional Control Strategy, TCS) 的风电机组 LVRT 对比仿真波形。

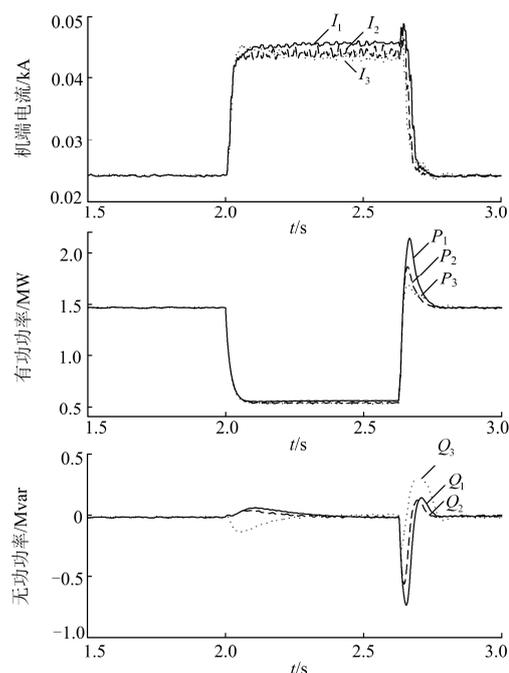


图7 卸荷电阻值不同时直驱风电机组的 LVRT 特性

Fig. 7 LVRT of PMSG when chopper resistor is different

由图 7 仿真结果可知, 风电机组网侧变流器运行在单位功率因数下, 对于同一电压跌落深度, 卸荷电阻值不同, 机组在电压跌落结束后恢复稳态时发生的波动大小不一, 同时机组从电网吸收的无功功率也不同, 机组机端电流大小也不同。可见卸荷电阻的取值影响机组在电压跌落结束后运行的稳定性。同理在其他不同电压跌落水平下也表现出类似规律, 且不同电压跌落水平下对应的最优卸荷电阻值也是变化的, 而非固定值。

由图 8 仿真结果可知, 风电机组网侧变流器运行在不同功率因数下时, 其中卸荷电阻值不变, 对

于同一电压跌落深度，功率因数不同，机组在电压跌落结束后恢复稳态时机组运行的波动大小不一，机组机端电流大小也不同。可见电压跌落期间机组网侧变流器无功控制策略影响机组在电压跌落结束后的稳定运行。

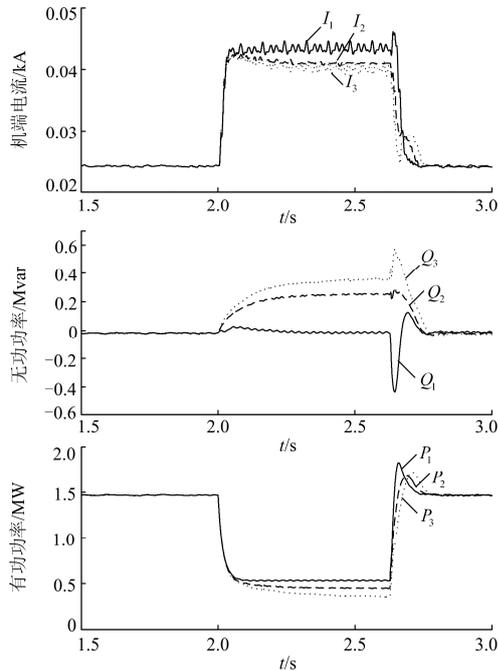


图 8 功率因数不同时直驱风电机组的 LVRT 特性  
Fig. 8 LVRT of PMSG when power factor is different

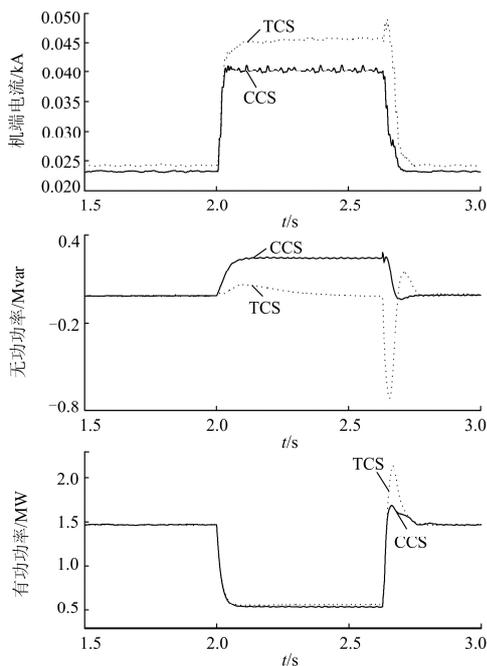


图 9 CCS 和 TCS 下直驱风电机组的 LVRT 特性  
Fig. 9 LVRT of PMSG under CCS and TCS

如图 9 所示，在 2~2.625 s 的故障期间，采用 CCS 控制的直驱风机出现的过电流低于 TCS 控制的；在故障穿越后，有功功率和无功功率的波动明显小于 TCS 控制的，有助于提高直驱风机的故障稳定性。因此，本文提出的 CCS 能够适应不同的电压跌落程度，不仅在电压跌落期间能够提升机组的低电压穿越能力，满足风电并网技术规程对并网风电机组 LVRT 特性的要求，而且能够改善低电压穿越结束后机组的稳定运行能力。

#### 4 结论

本文兼顾提升机组的 LVRT 能力和故障穿越结束后机组的稳定运行能力，提出一种基于变阻值卸荷电路和动态无功控制的低电压穿越综合策略。卸荷电阻值和机组网侧变流器的功率因数随电压跌落水平呈动态变化。搭建仿真模型，验证了 LVRT 综合策略的可行性和优越性。该策略不仅能够提升机组的 LVRT 能力，而且可以改善故障穿越结束后机组的稳定运行特性。

#### 参考文献

- [1] 风电并网技术标准[S]. 北京: 国家能源局, 2009.
- [2] 赵勇, 韩斌, 房刚利. 风力发电机状态监测与故障诊断技术综述[J]. 热力发电, 2016, 45(10): 1-5.  
ZHAO Yong, HAN Bin, FANG Gangli. A survey of condition monitoring and fault diagnosis for wind power generators[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(10): 1-5.
- [3] 徐创学, 刘鲁清, 谢云明, 等. 基于实时数据的风力发电机组性能在线评价[J]. 热力发电, 2015, 44(4): 88-91.  
XU Chuangxue, LIU Luqing, XIE Yunming, et al. Real-time data based online evaluation of output performance for wind turbine units[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(4): 88-91.
- [4] 韩兵, 周腊吾, 陈浩, 等. 大型风机的独立变桨控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 1-8.  
HAN Bing, ZHOU Lawu, CHEN Hao, et al. Methods of individual pitch control for large wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 1-8.
- [5] 王丹, 刘崇茹, 李庚银. 永磁直驱风电机组故障穿越优化控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 83-89.  
WANG Dan, LIU Chongru, LI Gengyin. Research on the Fault ride-through optimal control strategy of PMSG-based wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 83-89.
- [6] 齐尚敏, 李凤婷, 何世恩, 等. 具有低电压穿越能力的

- 集群接入风电场故障特性仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 55-62.
- QI Shangmin, LI Fengting, HE Shien, et al. Research on fault characteristics of grid-connected large scale wind farms with LVRT capability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 55-62.
- [7] ABBEY C, JOOS G. Super capacitor energy storage for wind energy applications[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2007, 43(3): 769-776.
- [8] 朱小军, 姚骏, 蒋昆, 等. 电网不对称故障下含飞轮储能单元的永磁直驱风电系统增强运行控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(5): 1454-1463.
- ZHU Xiaojun, YAO Jun, JIANG Kun, et al. Enhanced control of direct-drive permanent magnet wind power generation system containing flywheel energy storage unit during asymmetrical fault in power grid[J]. Power System Technology, 2013, 37(5): 1454-1463.
- [9] 王鹏, 王晗, 张建文. 超级电容储能系统在风电系统低电压穿越中的设计及应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1528-1537.
- WANG Peng, WANG Han, ZHANG Jianwen. Design and application of supercapacitor energy storage system used in low voltage ride through of wind power generation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1528-1537.
- [10] MUYEENS M, TAKAHASHI R, MURATA T, et al. Integration of an energy capacitor system with a variable-speed wind generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(3): 740-749.
- [11] 李少林, 李庆, 谭理华, 等. 电网电压跌落时风机变流器功率平衡控制策略[J]. 电网技术, 2011, 35(6): 149-154.
- LI Shaolin, LI Qing, TAN Lihua, et al. Power balance control of wind turbine converter under voltage sag in power grid[J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 149-154.
- [12] 李建林, 徐少华. 直接驱动型风力发电系统低电压穿越控制策略[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(1): 29-33.
- LI Jianlin, XU Shaohua. Control strategy of low-voltage ride-through for direct-drive wind power generation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(1): 29-33.
- [13] 李建林, 胡书举, 孔德国. 全功率变流器永磁直驱风电系统低电压穿越特性研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(19): 92-95.
- LI Jianlin, HU Shuju, KONG Deguo. Studies on the low voltage ride through capability of fully converted wind turbine with PMSG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 92-95.
- [14] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-126, 131.
- YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-126, 131.

收稿日期: 2016-03-28; 修回日期: 2016-10-29

作者简介:

张 谦(1989-), 男, 硕士研究生, 从事可再生能源并网技术与电力系统继电保护研究; E-mail: zq41911@163.com

李凤婷(1965-), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 从事含间歇性能源、负荷的系统运行控制与保护研究; E-mail: xjlt2009@sina.com

蒋永梅(1989-), 女, 硕士研究生, 从事可再生能源并网技术研究。E-mail: 540984638@qq.com

(编辑 魏小丽)