

DOI: 10.7667/PSPC151050

# 提升直驱型永磁风电机组故障穿越能力的 改进控制策略研究

边晓燕, 田春笋, 符杨

(上海电力学院电气工程学院, 上海 200090)

**摘要:** 为了提高直驱型永磁风电机组故障穿越能力, 提出一种新的故障穿越策略。通过采用紧急变桨技术, 减少故障期间风机的出力, 降低直流母线两端的功率不平衡, 以限制直流母线过电压。提出一种新颖的控制直流母线侧电容器投切方案, 故障期间增加直流电容容量, 进一步限制故障期间直流母线电压骤升。充分利用风电机组的无功能力, 网侧变流器采用电压控制模式, 为系统在故障期间提供无功支撑。给出了详细的故障穿越方案, 并在仿真软件 DigSILENT 中建立仿真模型, 设计了低电压故障和高电压故障两个算例。仿真结果表明, 所提出的控制策略可有效的限制故障期间直流母线过电压, 为系统提供了足够的无功支撑, 协助并网点电压快速恢复, 提升了风电机组的故障穿越能力。

**关键词:** 永磁风电机组; 故障穿越; 紧急变桨; 直流母线; 变流器

## A coordinated control strategy for fault ride-through capacity of direct-drive permanent magnet wind power generating units

BIAN Xiaoyan, TIAN Chunsun, FU Yang

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** To improve the direct-drive permanent magnet wind turbine fault ride-through capability, a new coordinated control strategy for enhancing the fault ride-through (FRT) is proposed, which adopts emergency pitch technology to reduce wind turbines' output during fault, and to reduce the active power deviation of the DC-link. A novel DC-link parallel capacitors control strategy is adopted to provide means for power evacuation during grid fault conditions, and then limit the fault during the DC bus voltage swell further. In order to make the reactive power control capability of PMSG, the grid-side converters are utilized to provide reactive power for the grid prior to operating the voltage control mode. A detailed FRT control strategy is given, and a simulation model is established by DigSILENT. The results verify that the coordinated control scheme not only limits the DC bus overvoltage, but also provides certain dynamic reactive power supporting to the grid, which has a fine effect for the wind farm achieving the low/high-voltage ride through capability during grid fault.

**Key words:** permanent-magnet synchronous generator (PMSG); fault ride-through; emergency pitch regulation; DC-link; converter

## 0 引言

近年来, 风电技术得到了快速发展, 风电场装机容量也在逐年增高, 风力发电对电网影响已经不可忽视<sup>[1]</sup>。电网对风电机组的故障穿越能力的要求

也越来越严格, 其中主要包括对风电机组低电压穿越和高电压穿越能力的要求<sup>[2-3]</sup>。我国已于 2011 年制定了风电技术接入电网规定, 不仅要求风电机组具备低电压穿越要求, 并且还要求低电压穿越期间, 风电机组具备一定的无功控制能力<sup>[4]</sup>。与电压跌落相对应, 电网电压骤升也是一种常见的故障, 澳大利亚率先制定了最为严格的风电高电压穿越要求<sup>[5]</sup>, 因此风电机组能否同时具备高电压穿越能力成为一

基金项目: 上海市科委科技创新项目 (14DZ1200905); 上海绿色能源并网工程中心 (13DZ2251900)

个亟待解决的新问题。

直驱型永磁发电机组(PMSG)与电网之间通过背靠背变流器实现了隔离,采用大功率变流器技术,相比双馈风机机组(DFIG)在故障穿越能力及无功控制能力上具有更大的优势<sup>[6]</sup>。目前,有不少研究者对直驱型永磁发电机低电压穿越能力进行了改进研究<sup>[7-15]</sup>,主要分为增加硬件设施和改进系统自身控制策略两大类。其中增加的硬件设施主要包括直流母线卸荷电路<sup>[7-8]</sup>、储能装置<sup>[9-11]</sup>,此类方法使得风电机组低电压穿越能力得到一定的提高,但增加了系统的投资预算,也增加了风电系统控制的复杂性。文献[12-14]利用了网侧变流器的无功控制能力,在系统故障期间为系统提供无功功率,网侧变流器的无功控制能力受风机运行方式及电网电压的影响,文献[15]提出协调一种协调网侧变流器和STATCOM的无功控制方式,但并未对严重电压跌落情况进行仿真验证。文献[16]通过建立直驱式永磁同步风电机组模型分析其在电网故障时的联网运行特性,并阐述了桨距角在系统故障时的重要作。上述文献虽然在一定程度上提高了直驱型全功率风电机组的低电压穿越能力,但均从单一角度进行研究,并且尚未见到关于直驱型全功率发电机组高电压穿越方面的文章。

本文提出一种故障穿越控制策略,以解决系统故障期间风电机组有功功率不平衡和无功功率支撑问题,实现直驱型风力发电机低电压与高低电压穿越。有功功率平衡方面,采取紧急变桨技术快速降低风力机汲取的能量,减少直流电容两侧功率偏差,并提出一种直流侧电容投切技术,故障期间增加直流电容容量,防止直流母线过电压;无功功率方面,故障期间网侧变流器采用电压控制模式运行,为系统提供无功支撑。最后通过仿真,验证了所提出的控制策略的可行性和有效性。

### 1 直驱风力发电机模型

本文采用的直驱型风力发电机结构模型如图1所示。永磁发电机定子通过背靠背变流器与电网相连,机侧变流器(MSC)实现对永磁同步机的控制,实现有功、无功功率的解耦控制和转速调节。其中外环为功率控制环,系统稳态运行时,根据当前转子转速,通过最佳功率曲线得到有功功率参考值,然后与发电机实际输出的有功功率进行比较,差值经PI调节器控制得到 $i_{mq}$ 参考值。内环为转子电流控制环,由 $i_{md}$ 、 $i_{mq}$ 两个控制通道组成,各自的电流误差信号经PI调节器得到电压控制量 $u_{md}$ 、 $u_{mq}$ ,经过坐标变换,进而触发PWM进行调制。一般情况下,

$i_{mq}$ 设定为0,以减少PWM变流器的损耗。

通过网侧变流器(GSC)的有功功率和无功功率解耦控制,可以实现调节电流 $d$ 轴分量控制有功功率,调节电流 $q$ 轴分量控制无功功率的功能。通常情况下网侧变流器运行在单位功率因数状态,即 $i_{sref}=0$ ,而通过在外环增加电压控制环节,可改变 $i_{sref}$ 即可以调节网侧变流器输出的无功功率。

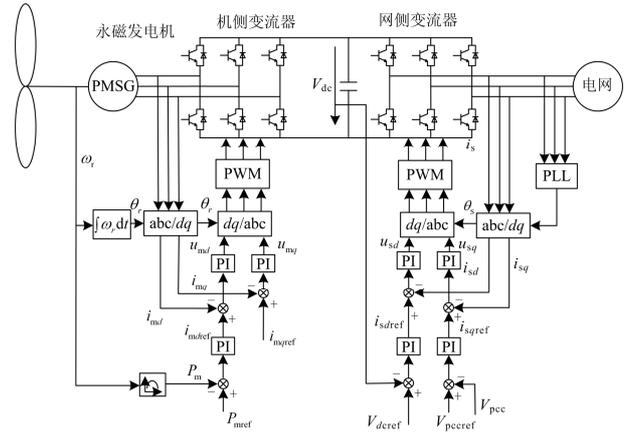


图1 永磁直驱风电机组结构和控制

Fig. 1 Structure of a PMSG-based wind generation system and controller

图2展示了直流环节的有功功率平衡, $P_c$ 为流过直流电容器C的有功功率; $P_r$ 为发电机流入转子变流器的有功功率; $P_g$ 为从直流母线环节流入到网侧变流器的有功功率<sup>[17]</sup>。

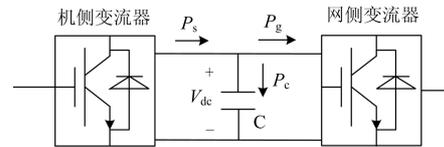


图2 直流环节的功率流动

Fig. 2 Active power flow in DC link

$$P_c = P_s - P_g \quad (1)$$

$$\frac{1}{2}C \frac{dV_{dc}^2}{dt} = P_s - P_g \quad (2)$$

对两边积分可得:

$$V_{dc} = \sqrt{\frac{2}{C} \int (P_s - P_g) dt} \quad (3)$$

由式(3)可知,当系统发生故障时,由于网侧变流器向电网输送有功功率的能力下降,直流母线两端有功偏差, $P_c$ 给电容充电,导致直流母线电压上升。为减轻直流母线过电压,可以从以下两个方面入手:(1)增加电容器的容量;(2)降低发电机的出力,以减少发电机输送到直流母线侧的有功功率传送。

## 2 风电机组故障穿越控制策略

### 2.1 桨距角切换技术

功率系数大小受到桨距角的严重影响, 因此可通过调节桨距角的大小进而实现对风力机有功功率的控制。桨距角的变化率决定了变桨控制系统的响应速度, 是影响变桨控制效果的主要因素。本文采用桨距角切换控制技术如图 3 所示<sup>[18]</sup>, 当检测到系统电压跌落至到设定值时, 桨距角控制由普通模式切换至紧急变桨模式, 由故障功率和风功率可得到故障期间的风功率系数  $C_p$ , 本文  $C_p$  的上下限分别设置为 0.05、0.45, 然后通过查表得到桨距角参考值  $\beta_0$ 。由于故障期间转子侧变流器控制目标仍是以最大风能追踪为目的, 叶尖速度比的值视为定值, 桨距角及功率系数的关系如表 1 所示。

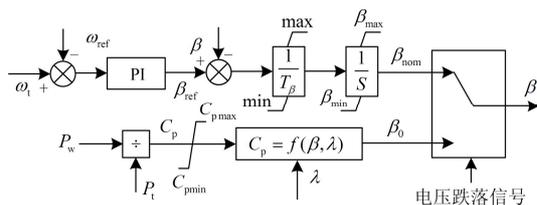


图 3 桨距角切换技术

Fig. 3 Control scheme of pitch angle controller

表 1 桨距角与功率系数的关系

Table 1 Relationship between pitch angle and power coefficient

$C_p$	0.05	0.15	0.25	0.35	0.45
$\beta_0$	35	20	13	4	0

### 2.2 并联电容器控制

图 4 给出了直流母线投切电容器组的结构模型, 电容器通过一个基于 IGBT 的开关  $KG_1$  并联在直流母线两侧, 开关  $KG_2$  用于在故障切除后接通电阻与电容器的通路, 将贮存在电容器中的能量进行释放。

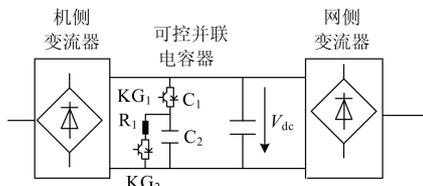


图 4 并联电容器组控制结构图

Fig. 4 General view of the proposed capacitor scheme

控制电容器投切和放电的两个开关的逻辑图如图 5 所示。当系统发生故障后, 通过直流电压测量环节检测到其值超过设定的上限值, 则开关  $KG_1$  闭合, 状态为 1, 由于直流电容的增大, 直流

母线过电压有所减缓。系统故障切除后, 当检测直流母线电压于设定的上限值, 则开关  $KG_1$  打开, 状态为 0,  $KG_2$  闭合, 状态为 1, 电容器  $C_2$  与电阻  $R_1$  形成回路, 进行放电。

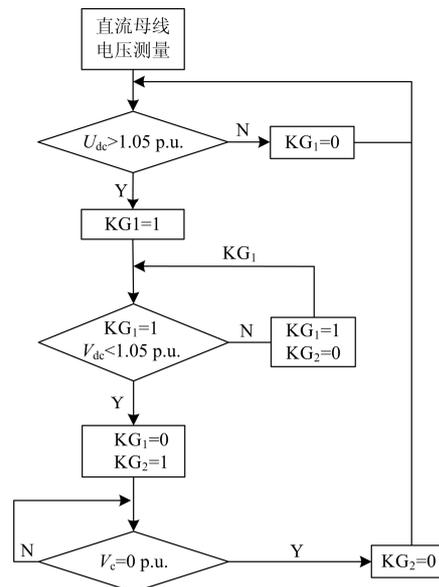


图 5 控制开关动作的流程图

Fig. 5 General flowchart of a control system

系统发生三相短路故障, 故障持续时间为 0.4 s, 并网点电压跌落到 0, 直流母线过电压如图 6 所示, 可见电容器的容量越大, 直流母线电压升高的幅度越小。

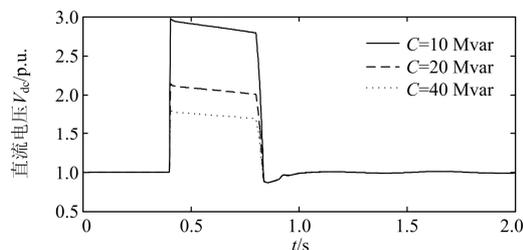


图 6 三相短路故障下不同电容器容量的直流电压

Fig. 6 DC link voltage during there-phase-three-to-ground fault

### 2.3 故障穿越策略

根据上文所述, 本文提出一种直驱型永磁发电系统故障穿越的控制策略, 控制流程图如图 7 所示, 其逻辑可描述为: 当检测到并网点电压越限时(本文设定的为  $0.9 \text{ p.u.} < V_{PCC} < 1.1 \text{ p.u.}$ ), GSC 的首要控制目标仍为稳定直流母线电压, 然而, 为了满足故障期间变流器的调制要求以及系统的无功需求, 此时 GSC 不再以单位功率因数运行, 而是切换至电网电压控制模式, 为系统提供无功支撑; 故障期间 GSC

无功能力不仅受到电网电压的限制，还受到变流器最大电流的限制，GSC 输出的无功功率约束为

$$\frac{U_g}{\omega L_g} \left( \frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} - U_g \right) \leq Q \leq U_g \sqrt{I_{gmax}^2 - I_{gd}^2} \quad (4)$$

式中： $U_g$  为电网电压幅值； $\omega$  为同步电角速度； $L_g$  为 GSC 等效电抗； $V_{dc}$  为直流母线电压； $I_{gd}$  为 GSC 电流  $d$  轴分量； $I_{gmax}$  为 GSC 最大允许电流。

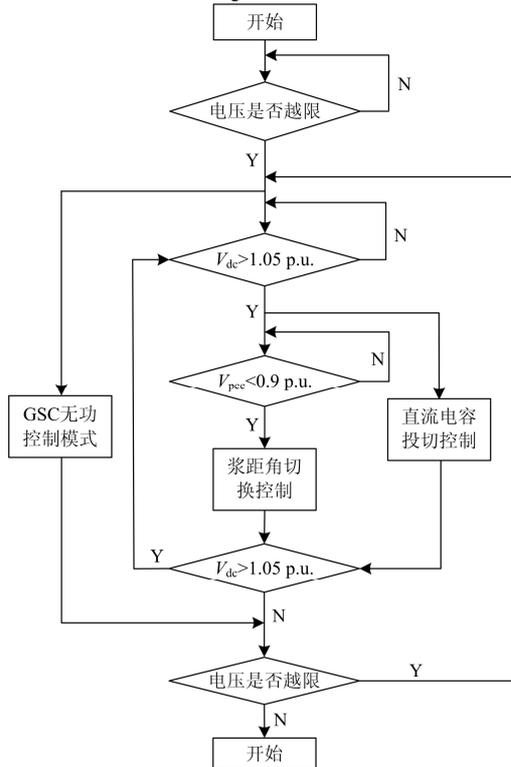


图 7 故障穿越控制流程图

Fig. 7 Flow chart of the proposed control strategy

当 GSC 有功参考电流大于其限制时，即网侧变流器已不保证直流母线电压的稳定，若不采取适当保护，直流母线电压降超过其最大可连续操作电压。本文设定直流母线电压上限为 1.05 p.u.，当检测到直流母线电压超过设定的 1.05 p.u. 时，直流侧电容器控制开始启动，以抑制电网故障引起的直流母线过电压。另一方面，若电网故障为电压跌落，桨距角控制由普通控制方式切换至紧急变桨方式，以减少风力机从空气中汲取的能量，进而减少直流母线两端的有功功率偏差。

### 3 实验仿真

本文采用的仿真系统如图 8 所示，由 50 台单机容量为 1 MW 的直驱型永磁风力发电机组成的风电场经变压器接入电网。仿真参数如下：(1) 风力机，额定风速为 13 m/s，风轮半径 30 m。(2) PMSG，额

定功率 1 MVA，额定电压 690 V，以 PMSG 的额定容量和额定电压为基准值，转换得到定子电阻为 0.008 566 p.u.，定子电感为 0.003 59 p.u.，变流器的容量为 1 MVA。

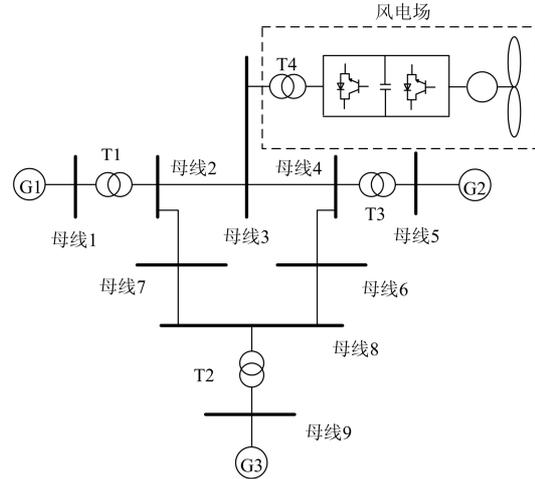


图 8 仿真系统接线图

Fig. 8 Simulation model for the case study

为了验证所提出故障穿越策略的有效性，考虑了两种不同的方案：方案一采用本文所提出的控制方案，即采用紧急变桨技术配合直流母线侧电容器投切技术，网侧变流器采用电网电压控制模式运行；方案二风力机采用普通的变桨技术，故障时投入直流卸荷电路，机侧变频器及网侧变频器运行在单位功率因数模式，即均不为系统提供任何无功功率。

#### 3.1 低电压穿越仿真

设定系统并网点电压跌落至 0.2 p.u.，持续时间为 0.625 s，仿真结果如图由 9 所示。可以看出电网电压落后后，根据协调控制要求，此时网侧变流器为系统提供无功支撑，能够使得并网点电压水平在系统故障期间有所提升，并能在故障切除后快速恢复正常值。电压跌落期间，网侧变流器输出的无功功率收到了视在功率以及其最大电流的限制，提供了约为 0.3 p.u. 的无功功率；该严重故障下，若不采用保护措施，直流母线两端的功率偏差，导致直流母线电压急剧升高，超过设定的上限 1.05 p.u.，采用联合保护措施后，紧急变桨控制技术快速增加桨距角，从而减小了直流木箱两端的功率偏差，另外直流母线电容的投切，增加了直流电容的大小，有效地抑制了直流母线过电压情况的发生。

#### 3.2 高电压穿越仿真

图 10 给出了在并网点电压骤升至 1.3 p.u. 并持续 1 s 时的仿真结果，可以看出，当风电机组采用普通控制方式时，电网电压的骤升，网侧变流器无

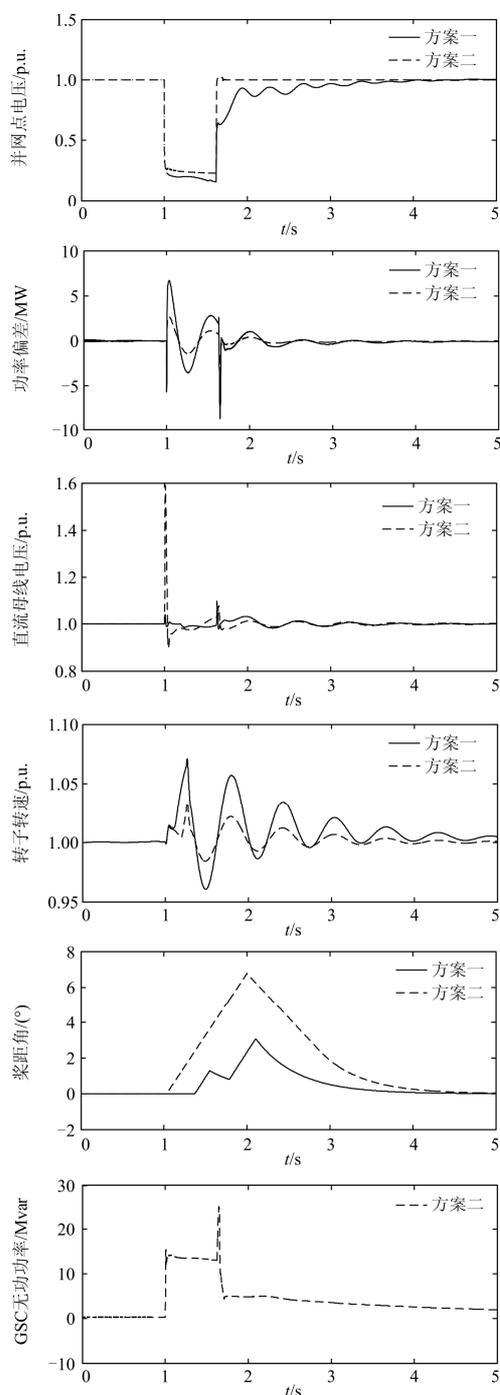


图9 低电压穿越仿真结果  
Fig.9 Simulation results of LVRT

法提供满足稳态运行的调制电压, 导致风机向电网输送的功率受到限制, 直流电压也升高并超过了1.05 p.u., 并导致电磁功率出现较大波动, 最终风电机组脱网运行。采用本文所提出的控制策略之后, 网侧变流器在系统故障期间吸收了大量的无功功率, 有效的降低并网点电压至1.1 p.u., 直流母线电压限制在设定的范围之内。

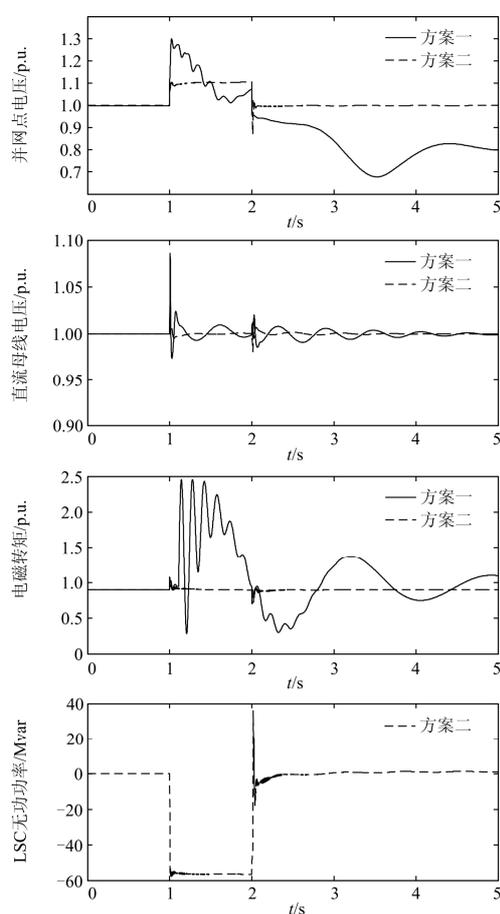


图10 高电压穿越仿真结果  
Fig.10 Simulation results of HVRT

#### 4 结论

本文从有功功率和无功功率的角度, 提出一种联合紧急变桨技术、并联直流电容器技术和网侧变流器电压控制方式, 提升风电系统故障穿越能力。通过低电压穿越及高电压穿越仿真计算, 得出以下结论:

(1) 紧急变桨技术较普通桨距角控制, 反应速度更快, 桨距角变化速率更大, 可有效地降低直流母线两侧的有功功率偏差。

(2) 并联电容器控制技术可有效的故障期间降低直流母线电压升高。将超级电容器替换为目前所用的电容器, 可作为本文的后续工作。

(3) 系统故障期间, 充分发挥DFIG的无功控制能力, 既满足了系统提供无功支持, 又符合了我国制定的风电接入电网的要求。既能在系统电压跌落时发出容性无功, 又能在电压升高时发出感性无功。

#### 参考文献

[1] 董博, 许晓艳, 马烁, 等. 基于长过程动态仿真的风电

- 接入对系统频率控制影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 57-64.
- DONG Bo, XU Xiaoyan, MA Shuo, et al. Influence study of wind power on system frequency control based on long-term dynamic simulation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 57-64.
- [2] MOHSENI M, ISLAM S M. Review of international grid codes for wind power integration: diversity, technology and a case for global standard[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(6): 3876-3890.
- [3] NETZ E. Grid code: high and extra high voltage[R]. Bayreuth, 2006.
- [4] GB/T Q9963-2011 风电场接入电力系统技术规定[S]. 2011.
- GB/T Q9963-2011 technical rule for connecting wind farm to power system[S]. 2011.
- [5] TSILI M, PAPATHANASSIOU S. A review of grid code technical requirements for wind farms[J]. IET Renew Power Generation, 2009, 3(3): 308-332.
- [6] 高峰, 周孝信, 朱宁辉, 等. 直驱式风电机组机电暂态建模及仿真[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 29-34.
- GAO Feng, ZHOU Xiaoxin, ZHU Ninghui, et al. Electromechanical transient modeling and simulation of direct-drive wind turbine system with permanent magnet synchronous generator[J]. Power System Technology, 2011, 35(11): 29-34.
- [7] CAUSEBROOK A, ATKINSON D J, JACK A G. Fault ride through of large wind farms using series dynamic braking resistors[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3): 966-975.
- [8] 胡书举, 李建林, 许洪华. 直驱式 VSCF 风电系统直流侧 Crowbar 电路的仿真分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(3): 118-123.
- HU Shuju, LI Jianlin, XU Honghua. Simulation analysis of DC-link crowbar for direct-drive VSCF wind power system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 20(3): 118-123.
- [9] 党存禄, 林国富. 超导储能并网直驱风电系统中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 48-53.
- DANG Cunlu, LIN Guofu. Application research of superconducting magnetic energy storage in grid-connected directly-driven wind power generation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 43-58.
- [10] 姚骏, 陈西寅, 夏先锋, 等. 含飞轮储能单元的永磁直驱风电系统低电压穿越控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(13): 36-44.
- YAO Jun, CHEN Xiyin, XIA Xianfeng, et al. A low voltage ride-through control strategy for direct-driven permanent magnet wind power generation system with flywheel energy storage unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(13): 36-44.
- [11] 张坤, 毛承雄, 陆继明, 等. 基于储能的直驱风力发电系统的功率控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 7-14.
- ZHANG Kun, MAO Chengxiong, LU Jiming, et al. Power control strategy of directly driven wind turbine with energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 36(13): 36-44.
- [12] 刘胜文, 包广清, 范少伟. PMSG 无功控制和低电压穿越能力的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 135-140.
- LIU Shengwen, BAO Guangqing, FAN Shaowei. Research on reactive power control and the low-voltage ride-through capability of PMSG[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 135-140.
- [13] LEE Kyoungjun, LEE Jongpil, KIM Taejin, et al. A simple reactive power control strategy for grid-connected inverter based PMSG wind energy system[C] // 8th International Conference on Power Electronics-ECCE Asia: "Green World with Power Electronics", 2011: 83-87.
- [14] 李建林, 胡书举, 孔德国, 等. 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, et al. Analysis on the low voltage ride through capability of direct drive permanent magnetic generator wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(19): 92-95.
- [15] NGUYEN T H, LEE D C. Advanced fault ride-through technique for PMSG wind turbine systems using line-side converter as STATCOM[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(7): 2842-2850.
- [16] 蔺红, 晁勤. 电网故障下直驱式风电机组建模与控制仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 189-195.
- LIN Hong, CHAO Qin. Simulation and analysis of transient characteristic of grid-connected direct-drive wind power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 189-195.
- [17] 管维亚, 吴峰, 鞠平. 直驱永磁风力发电系统仿真与优化控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 54-60.
- GUAN Weiya, WU Feng, JU Ping. Simulation and optimized control of direct-drive permanent magnet wind power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 54-60.
- [18] SUN T, CHEN Z, BLAABJERG F. Voltage recovery of grid connected wind turbines with DFIG after a short-circuit fault[C] // The 35th Annual IEEE Specialists Conference on Power Electronics. Aachen, Germany: IEEE, 2004: 1991-1997.

收稿日期: 2015-06-24; 修回日期: 2015-07-09

作者简介:

边晓燕(1978-), 女, 博士, 教授, 研究方向为电力系统稳定与控制, 新能源发电技术; E-mail: kuili@163.com

田春笋(1990-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为风电机组故障穿越; E-mail: tchs2190@163.com

符杨(1970-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统分析. E-mail: mfudong@126.com

(编辑 姜新丽)