

文章编号: 1000-582X(2013)01-062-07

# 永磁同步风力发电机组的不对称故障穿越控制策略

杜 雄, 戴朋岑, 李珊珊, 周雒维

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘 要:** 永磁同步风力发电机组在不对称电网故障下运行, 将导致并网电流不对称、畸变, 直流母线电压上升并含有 2 倍工频纹波等问题。为了提高永磁同步风力发电机组在不对称电网故障下的穿越能力, 提出一种 PMSG 机组的控制策略: 在网侧换流器的控制中采用电网负序电压前馈的方法来消除并网电流负序分量; 在机侧换流器的控制中提出了一种新的发电机电磁功率跟踪控制思想, 使发电机的输出功率跟踪网侧换流器的输出功率, 消除了不对称故障情况下直流母线电压的 2 倍工频纹波和限制直流侧电压上升, 避免直流母线电压波动超出电容电压的额定值。1 MW 机组的仿真结果表明, 所提出的控制策略可实现不对称故障穿越, 验证了所提出控制策略的有效性。

**关键词:** 永磁; 不对称故障; 故障穿越; 控制方法

**中图分类号:** TM614

**文献标志码:** A

## An asymmetric fault ride-through control strategy for PMSG wind turbine

DU Xiong, DAI Pengceng, LI Shanhu, ZHOU Luowei

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** In order to improve the asymmetric fault ride-through capability of PMSG wind turbine, a novel control method is proposed. This method can reduce the negative sequence current component in the grid side converter and eliminate the 2<sup>nd</sup> order voltage fluctuation in the DC link capacitor voltage of the AC-DC-AC converter. The proposed control method employs the grid voltage feed forward to reduce the grid side negative sequence current component, while a novel power control concept, output power of generator tracking the grid side power, is applied to control the electro-magnetic power of the PMSG to eliminate the 2<sup>nd</sup> order voltage ripple in the DC link. Simulation results for a 1 MW case study show that the control method can eliminate the grid side negative sequence current component and the 2<sup>nd</sup> order voltage ripple in the DC link at the same time.

**Key words:** permanent magnet; unbalanced fault; fault ride-through; control method

随着风电场的规模和风机单机容量越来越大, 风电接入后对电网运行的影响也日益突出。电网公司要求风电机组在故障情况下能够满足规程要求并

网运行, 实现故障穿越<sup>[1]</sup>。永磁同步发电机(PMSG)在采用全功率变换的风力发电拓扑中得到了大量应用, 针对永磁同步风力发电机组在稳态和

收稿日期: 2012-08-05

基金项目: 教育部新世纪人才计划项目(NCET-09-0839); 全国优秀博士学位论文作者专项基金项目(200948); 重庆市自然科学基金计划资助项目(CSTC2009BB6036); 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目(2007DA10512709210)

作者简介: 杜雄(1979-), 男, 重庆大学博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力电子拓扑与控制、电能质量、可再生能源发电、航空电源系统等研究, (E-mail)duxiong@cqu.edu.cn。

故障情况下的控制问题,许多文献<sup>[2-15]</sup>进行了讨论。特别针对故障穿越问题,以研究对称故障问题居多。对称故障情况下,由于网侧电压短时下降,风机输入机械功率近似不变,并网功率将减小,永磁同步发电机组需要实现对称故障穿越的主要问题是解决有功不平衡问题,不同文献提出了不同的有功不平衡解决方案<sup>[2,3,6]</sup>。在不对称故障情况下,电网电压中会产生负序分量,风电机组故障穿越除了会产生对称故障情况下的有功不平衡问题外,还会产生由于电压负序分量带来的并网负序电流和交直换流器直流母线电压的 2 倍工频纹波问题<sup>[15]</sup>。如在不对称故障情况下,网侧变换器的控制仍采用和对称情况下相同的电流控制方法<sup>[5-8]</sup>,将会在并网电流中产生负序分量,使网侧三相电流不对称;同时会由于正、负序电压分量和正、负序电流分量的相互作用产生 2 倍功率波动,进而会在交直换流器的直流侧电压中产生 2 倍工频纹波问题<sup>[15]</sup>。为了消除不对称故障情况下网侧换流器输出电流中的负序分量,文献<sup>[10-12]</sup>提出通过改变网侧变换器的控制策略,可使其输出三相电流对称,但直流侧电压中仍含有二次纹波。为了消除交直换流器中直流侧电压的 2 倍工频纹波,文献<sup>[13-15]</sup>提出按照电网电压的正、负序分量大小关系分别控制网侧换流器并网电流中正、负序分量的大小,以消除直流侧电压纹波,但该方法会使网侧输出电流中含有负序分量。不对称故障情况下 PMSG 机组的故障穿越问题,目前文献中的解决方案均只能解决并网负序电流和直流侧 2 倍工频纹波中的一个问题,不能同时解决这两个问题。

笔者将首先分析不对称故障情况下 PMSG 机组的功率关系,然后提出一种 PMSG 的不对称故障穿越控制策略,该策略可同时消除并网负序电流和直流侧 2 倍工频纹波问题,最后通过仿真案例进行验证。

## 1 不对称故障情况下 PMSG 风力发电机组功率分析

以图 1 所示的全功率变换型永磁同步风力发电机组拓扑为对象进行分析。PMSG 的输出功率经交直换流器后并入电网,风轮机输出的机械功率为  $p_m$ ,发电机输出的电磁功率为  $p_e$ ,逆变器并入电网的功率为  $p_g$ 。

在正常工作情况下,风轮机的输出功率与发电机输出功率以及并网功率相等(忽略损耗)。

$$p_m = p_e = p_g. \quad (1)$$

当电网发生不对称故障时,电网电压除含正序

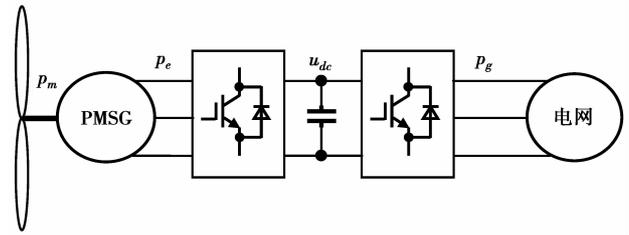


图 1 PMSG 风电机组拓扑机构

分量减小外,还会产生负序分量。由于网侧换流器的电流处理能力有限,故障情况下的并网有功功率相比正常情况将会减小。如果仍然采用常规的控制方式,并网电流中除正序电流外,还会产生负序电流。故障情况下,分别将电网电压、电流的正、负序分量变换到正、负序  $dq$  轴系,可得到正、负序分量分别在正、负序  $dq$  轴系上的直流分量<sup>[14]</sup>。如果记  $e_{dp}$ 、 $e_{qp}$  分别为电网电压正序分量的正序  $dq$  轴系变换结果; $e_{dn}$ 、 $e_{qn}$  分别为电网电压负序分量的负序  $dq$  轴系变换结果; $i_{dp}$ 、 $i_{qp}$  分别为电网电流正序分量的正序  $dq$  轴系变换结果; $i_{dn}$ 、 $i_{qn}$  分别为电网电流负序分量的负序  $dq$  轴系变换结果<sup>[14-15]</sup>,并网有功  $p_g$  和无功  $q_g$ <sup>[15]</sup>可表示为

$$\begin{cases} p_g = P_g + P_{g\cos} \cos(2\omega t) + P_{g\sin} \sin(2\omega t), \\ q_g = Q_g; \end{cases} \quad (2)$$

式中:

$$\begin{cases} P_g = \frac{3}{2}(e_{dp}i_{dp} + e_{qp}i_{qp} + e_{dn}i_{dn} + e_{qn}i_{qn}), \\ Q_g = \frac{3}{2}(e_{qp}i_{dp} - e_{dp}i_{qp} - e_{qn}i_{dn} + e_{dn}i_{qn}), \\ P_{g\cos} = \frac{3}{2}(e_{dp}i_{dn} + e_{qp}i_{qn} + e_{dn}i_{dp} + e_{qn}i_{qp}), \\ P_{g\sin} = \frac{3}{2}(e_{dp}i_{qn} - e_{qp}i_{dn} + e_{qn}i_{dp} - e_{dn}i_{qp}). \end{cases} \quad (3)$$

从式(2)可以看出,并网有功功率除直流分量  $P_g$  外,还含有 2 倍工频的波动分量,其峰值  $P_{g2}$  由式(2)中有功正弦和余弦分量共同决定,为

$$P_{g2} = \sqrt{P_{g\cos}^2 + P_{g\sin}^2}. \quad (4)$$

电网短时不对称故障情况下,风速可近似认为恒定,风轮机的转速也不变,其输出机械功率  $p_m$  在故障期间将维持恒定,同样发电机的输出电磁功率  $p_e$  也将维持恒定,由于网侧换流器的限流作用,并网功率  $p_g$  将减小,同时会产生式(2)中的功率波动。PMSG 风电机组在  $[t_1, t_2]$  区间发生故障时的功率关系如图 2 所示。

从图 2 可以看出,电网不对称故障情况下,并网功率  $p_g$  的直流分量  $P_g$  减小,使得

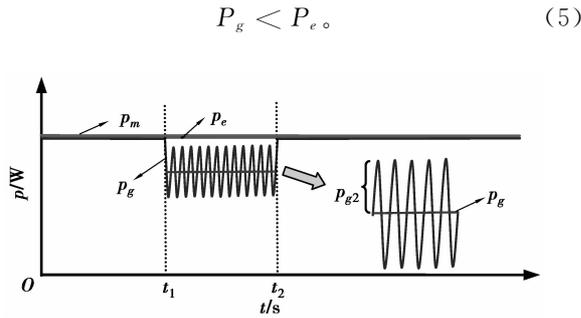


图 2 风电机组在不对称故障下的功率关系

该有功不平衡与对称故障情况相似,会使换流器直流侧电容电压  $u_{dc}$  泵升<sup>[2-3]</sup>,可通过限制发电机的输出电磁功率来避免该电压泵升。并网功率  $p_g$  中同时还含有 2 倍工频的波动分量,而直流侧电容电压的功率关系满足下式:

$$p_e - p_g = \frac{d(\frac{1}{2}Cu_{dc}^2)}{dt} \quad (6)$$

直流侧电压波动与机侧的电磁功率  $p_e$ 、并网功率  $p_g$ 、直流侧电容值有关。因而该功率波动会在直流侧母线上产生 2 倍工频的电压波动。该电压波动将会严重影响换流器的正常工作,为了消除该电压波动,文献[15]在控制中通过注入一定的并网电流负序分量使得式(3)中的  $P_{g\cos}$  和  $P_{g\sin}$  等于 0,消除了并网功率  $p_g$  的波动,进而消除了电容电压波动。该方法以注入负序电流分量为代价消除了直流侧 2 倍工频电压波动,笔者将提出一种无需注入并网电流负序分量的控制方法来消除直流侧 2 倍工频电压波动。

## 2 不对称故障穿越控制策略

从第 1 节中的分析可以看出,在发生不对称故障时,如要使并网电流无负序分量,会在并网功率中产生波动分量,该波动分量将在直流母线上产生相应的低频电压纹波。如果在电网不对称故障情况下,能够控制发电机输出电磁功率  $p_e$  跟踪波动的并网功率  $p_g$ ,即

$$P_g = P_e \quad (7)$$

那么由式(6)可知,在该控制思想下,可以消除直流侧电容电压纹波,此时 PMSG 机组的功率关系如图 3 所示。

在图 3 所示的功率控制方式下,可以通过控制网侧换流器使其仅注入正序电流,此时并网功率信号  $p_g$  将作为机侧换流器的功率参考信号,通过控制使二者满足式(7),就可同时消除并网电流的负序分

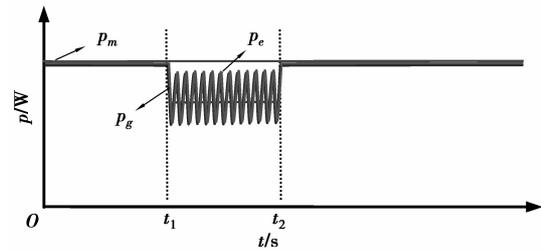


图 3 提出的功率控制思想

量和直流母线电容的 2 倍工频纹波分量。

### 2.1 网侧变换器控制策略

在电网电压不对称情况下,为了消除网侧电流的负序分量,可参考三相 PWM 整流器的控制策略,在网侧换流器的电流控制环中引入电网电压负序分量前馈<sup>[10]</sup>,在  $dq$  轴系下的网侧换流器控制框图如图 4 所示。

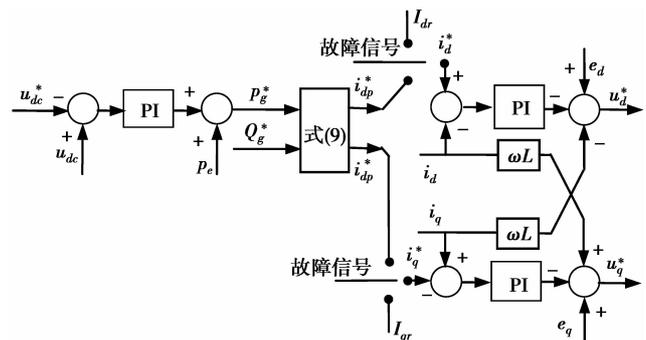


图 4 网侧变换器控制框图

通过检测电网电压判断是否发生故障,根据“故障信号”实现正常工况和故障工况的控制策略切换。

正常工况下, $dq$  轴的电流参考信号为

$$\begin{cases} i_d^* = i_{dp}^* \\ i_q^* = i_{qp}^* \end{cases} \quad (8)$$

由于网侧电压检测采用  $d$  轴电压定向, $e_{qp}$  可忽略不计,因此  $i_{dp}^*, i_{qp}^*$  可由有功无功指令信号  $P_g^*, Q_g^*$  经过下式计算得到

$$\begin{bmatrix} i_{dp}^* \\ i_{qp}^* \end{bmatrix} = \frac{2}{3(e_{dp}^2 + e_{qp}^2)} \begin{bmatrix} e_{dp} & e_{qp} \\ e_{qp} & -e_{dp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_g^* \\ Q_g^* \end{bmatrix} \approx \frac{2}{3(e_{dp}^2 + e_{qp}^2)} \begin{bmatrix} e_{dp} & 0 \\ 0 & -e_{dp} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_g^* \\ Q_g^* \end{bmatrix} \quad (9)$$

在电网故障情况下,断开电容电压反馈环,电流参考值直接给定为

$$\begin{cases} i_d^* = I_{dr} \\ i_q^* = I_{qr} \end{cases} \quad (10)$$

根据故障穿越标准和电网指令设定网侧输出无

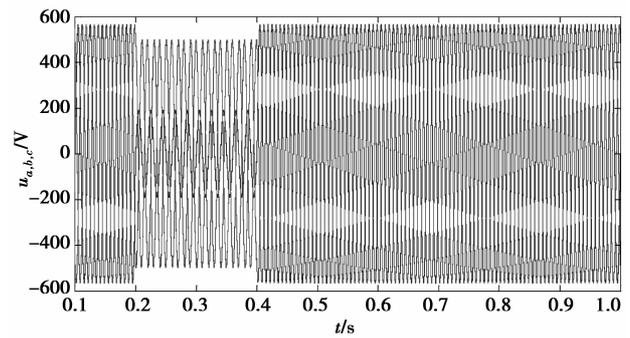


的故障穿越控制方法进行了验证。同时给出了文献[3]中限制电磁功率控制方法的仿真结果以对比,仿真参数如表 1 所示。电力系统中常见的不对称故障有单相接地短路故障、相间短路故障和两相接地故障<sup>[20]</sup>。其中单相接地故障最常见,限于篇幅,笔者只给出了风机工作于额定风速情况下发生单相故障的仿真结果。笔者方法是通过发电机转子储能来解决有功功率的不平衡,由于发电机转子储能有限,需要结合桨距角控制应用,而桨距角控制的动态响应时间在 200 ms 左右,因此仿真中故障持续时间选择了 0.2 s。当故障时间超过 0.2 s 时,桨距角调节将减小输入的机械功率  $p_m$ ,来消除电网电压有效值降落带来的有功功率不平衡,而发电机电磁功率  $p_e$  仍然跟踪并网功率瞬时值。仿真时的单相接地故障发生在 0.2~0.4 s 之间,正常情况下,电网相电压有效值  $U_{rms} = 398.31$  V;故障情况下,正序电压有效值  $U_{rms}^+ = 265.58$  V,负序电压有效值  $U_{rms}^- = 132.79$  V。电压不平衡度为 50%。参考我国风电并网标准中要求无功调节容量范围为额定运行时功率因数 0.97(超前)~0.97(滞后)<sup>[21]</sup>,故仿真中正常时段和故障时段网侧无功功率分别控制为 0 和 0.243 MVar,机侧换流器和网侧换流器在故障情况下均按额定电流的 1.2 倍限幅。

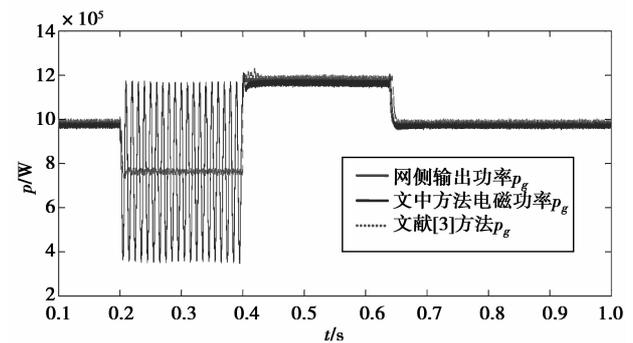
表 1 1 MW PMSG 风力发电机组仿真参数

参数	数值	参数	数值
额定容量 $S_N$ /MW	1	定子相电阻 $R_s/\Omega$	0.01
额定转速 $\omega_N/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	4.2	交轴电感 $L_q/\text{mH}$	0.4
定子额定电压 $U_N/\text{V}$	690	直轴电感 $L_d/\text{mH}$	0.4
极对数 $p$	48	直流侧电压 $U_{dc}/\text{V}$	1 200
直流侧电容值 $C/\text{mF}$	3.8	电网频率 $f/\text{Hz}$	50

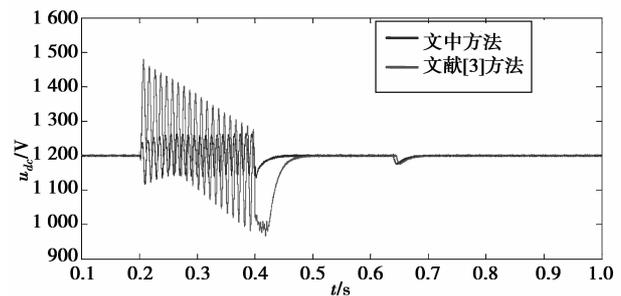
PMSG 工作在额定风速 ( $v_N = 14$  m/s), 遭遇电网单相接地故障时,网侧变换器  $d$  轴电流参考值受限于最大限定值,需要通过电机储能消除“有功不平衡”。图 6(a)为网侧电压波形;图 6(b)为网侧输出功率  $p_g$  和发电机输出电磁功率  $p_e$  波形,故障期间并网功率存在 2 倍工频波动,采用 2.2 节中机侧换流器控制方法,发电机输出的电磁功率  $p_e$  较好地跟踪了网侧输出功率  $p_g$ ,而采用文献[3]中的控制方法,发电机电磁功率仅与并网功率的直流分量相当,在故障消除后的 0.4~0.6 s,由于发电机将故障期间储存的能量释放回电网,因此存在过载恢复功率;



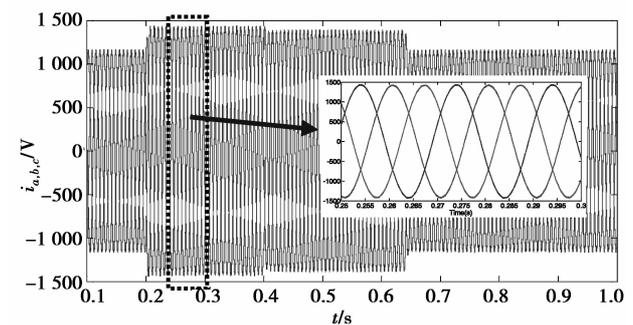
(a) A相短路故障时网侧电压波形



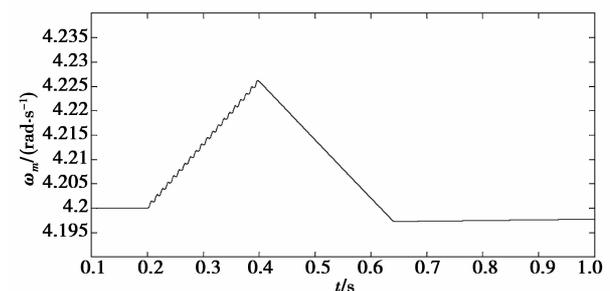
(b) 有功功率



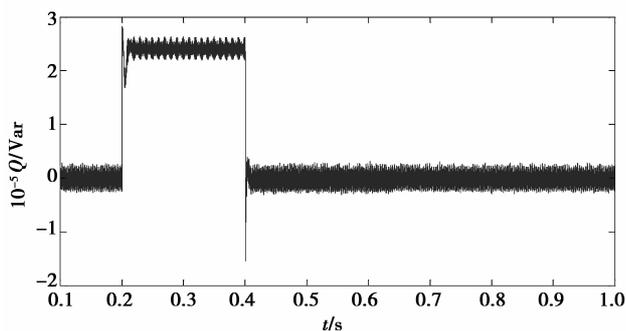
(c) 直流侧电压



(d) 网侧输出电流



(e) 发电机机械角速度



(f)无功功率

图 6 额定风速时的仿真结果

图 6(c)为直流侧电容电压波形,同时给出了笔者方法与文献[3]中方法的对比波形,从仿真结果可以看出文献[3]中电压波动约为 280 V,而采用笔者提出的方法后,直流侧电压波动减小至 70 V,约为稳态值的 5.8%;图 6(d)为网侧电流波形,电流只含有正序分量,消除了负序分量;图 6(e)为发电机转速波形,故障期间,发电机转速略有上升,转子存储部分有功功率,同时由于发电机输出功率为交变值,在转速上升的过程中,还存在 100 Hz 的转速脉动;图 6(f)为网侧输出无功功率,可看出故障期间风机实现了对电网的无功支撑。

从仿真结果可以看出,笔者提出的控制策略实现了并网电流无负序分量,同时消除了直流侧电容电压的 2 倍工频波动。

## 4 结 语

针对采用永磁同步发电机的风力发电系统,笔者分析了不对称故障情况下,PMSG 系统的功率关系,提出了机侧换流器和网侧换流器控制策略,使故障情况下发电机输出电磁功率跟踪网侧变换器输出功率,实现了网侧换流器无负序并网电流,同时可消除交直变换流器的直流侧电容电压 2 倍工频波动。笔者讨论的控制方法不需增加额外的硬件装置,仅需对换流器控制算法进行修改,该方法与目前工程上使用的故障穿越方法相结合,具有一定的工业应用前景。

### 参考文献:

[1] Tsili M, Papathanassiou S. A review of grid code technical requirements for wind farms [J]. IET

Renewable Power Generation, 2009,3(3): 308-332.

[2] Abedini A, Nasiri A. PMSG wind turbine performance analysis during short circuit faults[C]// Proceedings of the IEEE Canada Electrical Power Conference, October 25-26, Montreal, Canada. Piscataway: IEEE Press, 2007:160-165.

[3] 姚骏,廖勇,庄凯. 电网故障时永磁直驱风电机组的低电压穿越控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(12):91-96.

YAO Jun, LIAO Yong, ZHUANG Kai. A low voltage ride-through control strategy of permanent magnet direct-driven wind turbine under grid faults [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009,33(12): 91-96.

[4] 廖勇,何金波,姚骏,等. 基于变桨距和转矩动态控制的直驱永磁同步风力发电机功率平滑控制[J]. 中国电机工程学报, 2009,29(18):71-77.

LIAO Yong, HE Jinbo, YAO Jun, et al. Power smoothing control strategy of direct-driven permanent magnet synchronous generator for wind turbine with pitch angle control and torque dynamic control [J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(18):71-77.

[5] Daniela H A, Gabrielle M. Modeling and control of variable-speed multi-pole permanent magnet synchronous generator wind turbine[J]. Wind Energy, 2008, 11(5):537-554.

[6] Akhmatov V. Modelling and ride-through capability of variable speed wind turbines with permanent magnet generators[J]. Wind Energy, 2006, 9(4):313-326.

[7] 陈瑶. 直驱型风力发电系统全功率并网交流技术的研究[D]. 北京:北京交通大学,2008.

[8] 王锋,姜建国. 风力发电机用双 PWM 变换器的功率平衡联合控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(22):134-139.

WANG Feng, JIANG Jianguo. Research of power-balancing combined control scheme for back to back PWM converters used in the wind generator [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(22):134-139.

[9] 徐金榜,何顶新,赵金,等. 电压不平衡情况下 PWM 整流器功率分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16):80-85.

XU Jinbang, HE Dingxin, ZHAO Jin, et al. A new power analysis method of PWM rectifier with unbalanced voltage condition [J]. Proceedings of the CSEE,2006, 26(16):80-85.

[10] Kim H S, Mok H S, Choe G H, et al. Design of current

- controller for 3-phase PWM converter with unbalanced input voltage[C]// Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference, May 17-22, 1998, Fukuoka, Japan. Piscataway: IEEE Press, 1998, 1: 503-509.
- [11] Alepuz S, Busquets S, Bordonau J. Control of neutral-point-clamped converter in distributed power generation to fulfill low voltage ride-through requirements[C]// Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 17-21, 2007, Orlando, Florida. Piscataway: IEEE Press, 2007: 2322-2327.
- [12] Alepuz S, Busquets-Monge S, Bordonau J, et al. Predictive current control of grid-connected neutral-point-clamped converters to meet low voltage ride-through requirements[C]// Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 15-19, 2008, Rhodes, Greece. Piscataway: IEEE Press, 2008:2423-2428.
- [13] Moran L, Ziogas P D, Joos G. Design aspects of synchronous PWM rectifier-inverter systems under unbalanced input voltage conditions [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1992, 28(6): 1286-1293.
- [14] Rioual P, Pouliquen H, Louis J P. Regulation of a PWM rectifier in the unbalanced network state using a generalized model[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1996, 11(3):495-502.
- [15] Ng C, Ran L, Bumby J. Unbalanced grid fault ride-through control for a wind turbine inverter [C]// Proceedings of the 2007 IEEE Industry Applications Conference, 42nd IAS Annual Meeting, September 23-27, 2007, New Orleans, LA. Piscataway: IEEE Press, 2007:154-164.
- [16] Ran L, Bumby J R, Tavner P J. Use of turbine inertia for power smoothing of wind turbines with a DFIG[C]// Proceedings of the IEEE 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, September 12-15, 2004, Lake Placid, USA. Piscataway: IEEE Press, 2004:106-111.
- [17] 张加胜, 张磊. PWM 逆变器的直流侧等效模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4):103-107.  
ZHANG Jiasheng, ZHANG Lei. Research on the DC-side equivalent model of PWM inverters [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(04):103-107
- [18] 张卓然, 周竞捷, 朱德明, 等. 多极低速电励磁双凸极风力发电机及整流特性[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(6):67-72.  
ZHANG Zhuoran, ZHOU Jingjie, ZHU Deming, et al. Multi-pole low speed doubly salient electromagnetic wind turbine generator and its rectification characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(6):67-72.
- [19] 郭伟, 赵争鸣. 新型同步磁阻永磁电机的结构与电磁参数关系分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 124-128.  
GUO Wei, ZHAO Zhengming. Analysis of the relation between the electro-magnetic parameters and the structure of synchronous reluctance permanent magnetic motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11):124-128.
- [20] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京:中国电力出版社, 2006.
- [21] 中国电力科学研究院. 国家电网公司风电场接入电网技术规定(修订版)[EB/OL]. [2010-12-12] <http://wenku.baidu.com/view/a3486a323968011ca300917c.html>.

(编辑 王维朗)