

DOI: 10.7667/PSPC160361

# 定子 Crowbar 电路模式切换的双馈风力发电机组 低电压穿越控制策略

周士琼<sup>1</sup>, 王倩<sup>1</sup>, 吕潇<sup>1</sup>, 倪亚玲<sup>2</sup>, 徐明雨<sup>1</sup>

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 电子科技大学机械电子工程学院, 四川 成都 611731)

**摘要:** 针对转子 Crowbar 电路的双馈风力发电机组低电压穿越需要闭锁变流器控制脉冲、直流母线电压波动无法较好地抑制, 提出了一种定子 Crowbar 电路模式切换的双馈风电机组低电压穿越控制方案。电网发生故障时, 定子 Crowbar 电路接入系统, 双馈风电机组切换至感应发电机组模式下, 转子侧变流器采用转子功率外环控制, 网侧变流器采用功率协调控制方案, 将机侧功率当作前馈量引入到网侧变流器控制策略中并向电网注入无功功率。仿真分析表明, 所提控制方案在确保实现双馈风电机组低电压穿越的同时, 能够有效地降低转子暂态电流、稳定直流母线电压, 并向电网提供无功功率。

**关键词:** 双馈风电机组; 定子 Crowbar; 模式切换; 无功支撑; 低电压穿越

## Control strategy of low voltage ride-through for double-fed wind generator with the stator Crowbar circuit mode switch

ZHOU Shiqiong<sup>1</sup>, WANG Qian<sup>1</sup>, LÜ Xiao<sup>1</sup>, NI Yaling<sup>2</sup>, XU Mingyu<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. School of Mechatronics Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

**Abstract:** Rotor low-voltage ride through of doubly-fed wind turbine with Crowbar circuit needs to lock the converter control pulses, and DC bus voltage fluctuations can not be effectively reduced. Against the above, this paper proposes a control strategy of doubly-fed wind turbine low-voltage ride through with stator Crowbar circuit mode switching. When the power grid fails, the stator Crowbar circuit is connected to system, double-fed wind turbine is switched to induction generators mode, the rotor-side converter adopts rotor power outer-loop control, grid-side converter uses power coordinated control scheme, the generator side power is taken as feedforward quantity to be introduced grid-side converter control strategy and reactive power is injected into power grid. The simulation shows that the proposed control scheme can ensure the realization of low-voltage ride through of double-fed wind turbine generator, at the same time it can reduce rotor transient current, stabilize DC bus voltage and provide reactive power to the grid.

**Key words:** double-fed wind generator; stator Crowbar; mode switching; reactive power support; low voltage ride-through

## 0 引言

由于传统常规的化石能源日益枯竭, 人类将面临能源危机, 寻找新能源受到世界各国的普遍关注。随着风力发电在电网的渗透率越来越高, 影响着电力系统的稳定运行, 因而需要研究风电系统对电网的影响<sup>[1]</sup>。然而, 实际运行当中电网故障会对风力发电机组产生较大的影响, 威胁着电力系统的稳定运行。因而, 电网故障下, 保证风电机组不脱网运行受到更多的研究与关注<sup>[2-4]</sup>。

双馈风力发电机组 (Doubly Fed Induction Generator, DFIG) 是目前主流风电机型之一, 通过较小容量的变流器实现柔性并网、有功和无功功率的解耦控制、最大功率跟踪等控制<sup>[5-6]</sup>。DFIG 并网运行时, 定子侧直接与电网相连, 若电网发生电压跌落的故障后, 由于定转子之间存在着强耦合, 在转子侧会引起暂态过电流及过电压, 威胁着风电系统的稳定运行。提高双馈风力发电机组低电压穿越 (Low Voltage Ride Through, LVRT) 能力是一个亟待解决的问题。电网电压出现小幅跌落时, 通过改进

DFIG 控制策略来提高其低电压穿越能力；当电网电压出现大值跌落时，常采用改进控制策略与硬件保护电路相结合的 LVRT 实现方案。文献[7-10]结合转子 Crowbar 电路、DC-chopper 电路以及改变网侧变流的控制策略实现 DFIG 的 LVRT，该方案增加了系统的成本，以及转子 Crowbar 在故障时接入系统需要闭锁转子侧变流器的脉冲信号、吸收系统的无功功率；文献[11-13]通过改进传统双馈风电机组的控制策略实现低电压穿越，无法运用于较大值电网电压跌落的情况；目前，双馈风电机组的低电压穿越研究主要集中在对转子 Crowbar 电路的优化、机组的控制策略的研究。转子 Crowbar 电路接入系统都将封锁转子侧变流器的脉冲信号，转子侧变流器无法正常运行且会吸收系统的无功功率。

本文采用定子 Crowbar 电路实现双馈风力发电机组的低电压穿越运行。根据 DFIG 的数学模型分析电网故障下定转子的动态响应特性；系统故障期间，定子与电网断开连接且定子 Crowbar 电路接入系统；双馈风电机组运行在感应发电机组(Induction Generator, IG)状态下，转子变流器可不闭锁，改进变流器的控制策略，稳定直流母线电压，使其向电网注入一定的无功功率，支撑电网电压。故可实现双馈风力发电机组的低电压穿越运行。

## 1 电网对称故障下 DFIG 暂态特性分析

### 1.1 DFIG 的数学模型

图 1 给出了一种含定子 Crowbar 保护电路的变速恒频双馈风力发电系统原理图，图 2 给出 DFIG 的等效电路图。

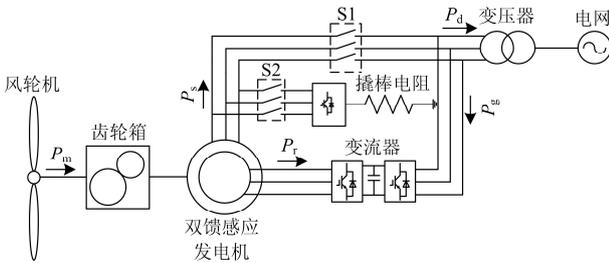


图 1 双馈风力发电机组原理图

Fig. 1 Schematic of double-fed wind turbine

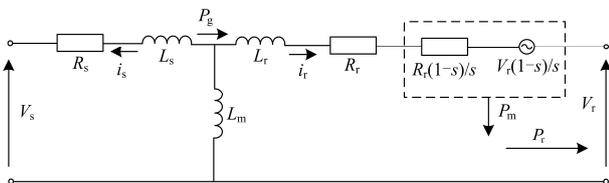


图 2 DFIG 的等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit of the DFIG

假设定、转子均采用电动机惯例，在定子静止坐标系下，DFIG 的基本数学模型方程表示为<sup>[14-15]</sup>

$$\begin{cases} V_s = R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt} + j\omega_s \psi_s \\ V_r = R_r i_r + \frac{d\psi_r}{dt} - j\omega_r \psi_r \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_s = L_s i_s + L_m i_r \\ \psi_r = L_m i_s + L_r i_r \end{cases} \quad (2)$$

$$C_{dc} U_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = P_g - P_r \quad (3)$$

$$\begin{cases} L_s = L_m + L_{ls} \\ L_r = L_m + L_{lr} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} T_e = p_n \psi_s \times i_s = p_n L_m (i_r' \times i_s) \\ T_e - T_L = \frac{J}{p_n} \cdot \frac{d\omega_r}{dt} \end{cases} \quad (5)$$

式中： $V, i, \psi, R, L, \omega$  分别表示电压、电流、磁链、电阻、电感、电角速度；下标 s, r 分别表示定子、转子分量； $C_{dc}, U_{dc}$  表示直流母线电容、电压； $L_{ls}, L_{lr}, L_m$  分别表示双馈风力发电机的定子漏感、转子漏感、定转子互感； $P_g, P_r$  分别表示网侧变流器与转子侧变流器输入的功率； $T_e, T_L$  分别表示双馈风力发电机的电磁转矩和机械转矩； $p_n$  为极对数。

由式(4)可得

$$\begin{cases} i_s = \frac{\psi_s}{L_s'} - \frac{L_m}{L_r'} \cdot \frac{1}{L_s'} \psi_r \\ i_r = -\frac{L_m}{L_s'} \cdot \frac{1}{L_r'} \psi_s + \frac{\psi_r}{L_r'} \end{cases} \quad (6)$$

式中：

$$\begin{cases} L_s' = L_s - \frac{L_m^2}{L_r} = L_{ls} + \frac{L_{lr} L_m}{L_{lr} + L_m} \\ L_r' = L_r - \frac{L_m^2}{L_s} = L_{lr} + \frac{L_{ls} L_m}{L_{ls} + L_m} \end{cases} \quad (7)$$

### 1.2 对称故障下 DFIG 的暂态运行分析

当电网电压发生对称跌落时，机端电压的矢量表示为： $E = jaV_s, 0 \leq a < 1$ 。式中， $U_s$  是故障前机端电压， $a$  是为机端电压跌落系数。

假设电网在  $t = t_0$  时刻发生电压跌落故障，由式(1)可得

$$jaV_s = R_s i_s + j\omega_e \psi_s + \frac{d\psi_s}{dt} \quad (8)$$

忽略定子项电阻，求解式(8)，可得定子磁链的表达式(9)。

$$\psi_{st} = a\psi_{s0} + (1-a)\psi_{s0}e^{-j\omega_e t}e^{-\frac{t}{T_s}} \quad (9)$$

式中:  $T_s = \frac{L'_s}{R_s}$ ;  $\psi_{s0}$  为电网故障前定子磁链的值。

由于双馈风力发电机组的定转子之间存在强耦合, 则转子电压可由定子电压表示为

$$V_r \approx jaV_s - j\omega_r\psi_s \quad (10)$$

则故障发生后的转子电压可得:

$$V_{st} \approx jaV_s(1 - \frac{\omega_r}{\omega_e}) - j\left\{\frac{(1-a)V_s}{\omega_e}\right\}\omega_r e^{-j\omega_e t}e^{-\frac{t}{T_s}} \quad (11)$$

由式(11)可知, 电网电压跌落越深, 双馈风力发电机组转子电压的幅值越大。同时, 机端电压的跌落也使得电磁功率变小, 发电机的转差率增大, 使馈入转子侧的功率增大, 进一步增大了转子电压的幅值, 威胁着转子侧变流器的稳定运行。

考虑电网电压三相短路故障, 即  $V_s = 0$ 。这种故障最为严重, 对系统的危害也最大。则定子磁链的表达式可表示为

$$\psi_{st} = \psi_{s0}e^{-j\omega_e t}e^{-\frac{t}{T_s}} = \frac{E}{\omega_e}e^{-j\omega_e t}e^{-\frac{t}{T_s}} \quad (12)$$

同理可求得系统三相短路故障后, 转子磁链的表达式为

$$\psi_{rt} = \psi_{r0}e^{-j\omega_e t}e^{-\frac{t}{T_s}} = \frac{L_m}{L_s} \cdot \frac{E}{\omega_e}e^{-j\omega_e t}e^{-j\omega_s t}e^{-\frac{t}{T_s}} \quad (13)$$

由式(5)、式(13)、式(14)得定转子短路电流为

$$\begin{cases} i_s = \frac{E}{L'_s\omega_e}e^{-j\omega_e t}\left(e^{-\frac{t}{T_s}} - \frac{L_m^2}{L_l L_{l-s}}e^{-j\omega_e t}e^{-\frac{t}{T_s}}\right) \\ i_r = \frac{L_m}{L'_r L_s\omega_e}e^{-j\omega_e t}\left(e^{-j\omega_s t}e^{-\frac{t}{T_s}} - e^{-\frac{t}{T_s}}\right) \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)可得定转子故障期间的最大电流为

$$\begin{cases} i_{s\max} = \frac{E}{L'_s\omega_e}\left(e^{-\frac{t}{T_s}} + \frac{L_m^2}{L_l L_{l-s}}e^{-\frac{t}{T_s}}\right) \\ i_{r\max} = -\frac{L_m}{L'_r L_s\omega_e}\left(e^{-\frac{t}{T_s}} + e^{-\frac{t}{T_s}}\right) \end{cases} \quad (15)$$

由以上推导分析可知, 双馈风电机组定转子存在强耦合, 电网电压的跌落程度越深, 发电机的转差率越大, 电磁暂态响应程度越剧烈, 直流母线电压越高, 威胁着双馈风电机组的稳定并网运行。为解决电网电压跌落带给风电机组的威胁, 不断地研究新的控制策略与故障辅助设备使风电机组具有较好的低电压穿越运行能力。

## 2 DFIG 的低电压穿越的控制策略

由图 1 可知, 该低电压穿越的实现方案涉及双馈发电机模式与感应发电机模式切换问题。在双馈风电机组运行模式下, 忽略变流器的功率损耗, 定子侧输出功率  $P_s$  与转子侧输出功率  $P_r$  之和构成双馈风电机组输出功率  $P_d$ 。当电网电压出现跌落的情况时, 双馈风电机组将运行在感应发电机的模式下。定子绕组与电网断开, Crowbar 电路接入系统。在此模式下, 大的瞬时转子电流和滑功率瞬变引起的电压振荡, 可以控制在可接受的水平; 变流器直流母线电压和注入到电网的无功功率由网侧变流器控制, 有功功率的输出由转子侧变流器控制。

在电网正常情况下, 双馈风电机组运行在最大功率跟踪控制下; 然而在电网故障情况下, s1 断路器开关动作, 定子与电网断开连接; 开关 s2 闭合, 定子 Crowbar 电路被激活。双馈风电机组切换到感应发电机模式下, 以变流器的额定功率对转子侧输出功率进行控制。故障结束后, 再由感应发电机切换到双馈风电机组模式下, 开关 s2 断开, s1 闭合。

### 2.1 电网故障时转子侧变流器控制策略

在电网电压跌落情况下, 风力机的功率保持不变, 而机侧无法传送更多能量, 促使发电机转速上升。故障期间, 发电机转子吸收的动能<sup>[16]</sup>为

$$(P_{s1} - P_{s2})\Delta t = \frac{1}{2}J\omega_2^2 - \frac{1}{2}J\omega_1^2 \quad (16)$$

式中:  $J$  为风力机和双馈发电机的总转动惯量, 由发电机组的总惯性时间常数  $H$  决定;  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  分别为电网电压故障前与故障后发电机的转速;  $\Delta t$  为电网故障持续时间。

由式(16)可求得, 电网故障后发电机转子的转速为

$$\omega_2 = \omega_1\sqrt{K\frac{\Delta t}{H} + 1} \quad (17)$$

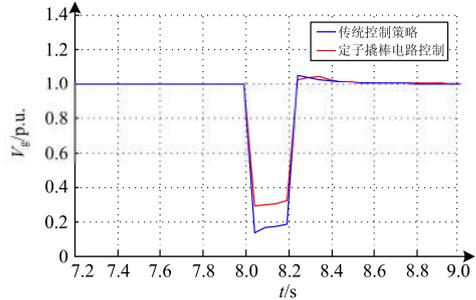
由式(17)可以得出, 电网电压跌落故障时间较短,  $K$  的取值范围在 0-1 之间, 惯性时间常数  $H$  较大。在电网故障期间, 发电机的转子转速上升幅度较小, 可认为故障前后的发电机转速保持恒定, 故不考虑风电机组转速超速问题。

当风电机组运行在感应发电机模式下, DFIG 仍可以在故障期间控制有功功率的输出, 这是比其他方案具有明显优势的地方。转子电流的  $d$  轴分量用来控制通过变流器的有功功率输出, 控制框图如图 3 所示。

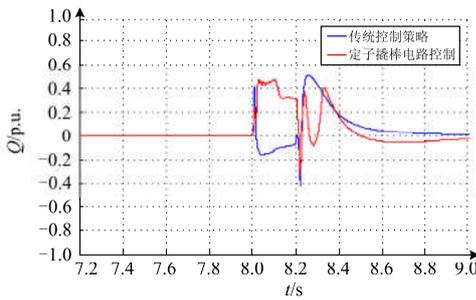




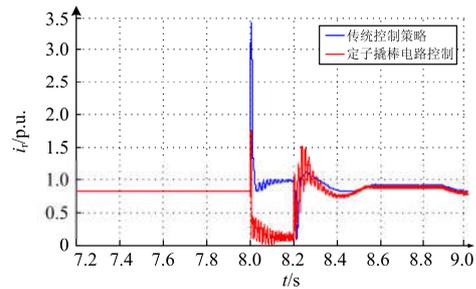
积累的动能也增多,故故障恢复后,机组输出的有功功率也有所增加。图 6(f)是发电机转子转速的响应曲线,在文中控制方案下,转子转速与传统控制相比略有上升,但并未达到转子转速的极限值。



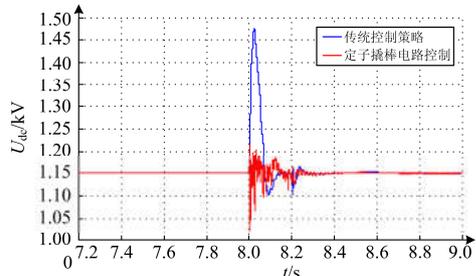
(a) DFIG并网电压



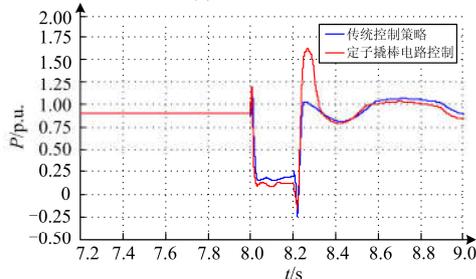
(b) DFIG输出的无功功率



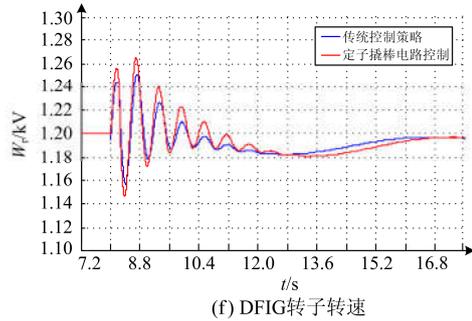
(c) DFIG转子电流



(d) DFIG直流母线电压



(e) DFIG输出的有功功率



(f) DFIG转子转速

图 6 两种控制策略仿真结果比较

Fig. 6 Simulation results comparison of the two control strategies

### 4 结束语

本文利用双馈风机能量双向流动的特性,结合定子 Crowbar 保护电路,提出一种故障期间不需要闭锁变流器的控制脉冲,两种风机运行模式的低电压穿越方案。分析了两种风机模式的等效电路,转子暂态电流作为风电场低电压穿越的一个指标。电网故障期间,定子 Crowbar 电路接入系统,双馈风电机组切换至感应发电机组模式下,系统的有功功率与无功功率可通过两侧的变流器控制,有效地抑制转子暂态电流和直流母线电压的波动,无功功率的注入有利于电网电压的恢复。仿真结果表明,定子 Crowbar 电路两种模式切换的双馈风电机组的低电压穿越能力比传统控制策略下的双馈风电机组要好得多。

### 参考文献

[1] 耿华, 刘淳, 张兴, 等. 新能源并网发电系统的低电压穿越[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.

[2] 蔺红, 晁勤. 并网型直驱式永磁同步风力发电系统暂态特性仿真分析[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(11): 1-5.

LIN Hong, CHAO Qin. Simulation and analysis of transient characteristics of grid-connected direct-drive wind power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(11): 1-5.

[3] 陈毅东, 杨育林, 王立乔, 等. 电网不对称故障时全功率变流器风电机组控制策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(7): 75-79.

CHEN Yidong, YANG Yulin, WANG Liqiao, et al. Simulation on the control strategy for a full power converter of wind generation under grid fault conditions[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(7): 75-79.

[4] 王燕萍, 郑涛, 王增平, 等. 不同转差率对双馈风机撬棒投入后的短路电流影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 8-14.

WANG Yanping, ZHENG Tao, WANG Zengping, et al.

- Impact analysis of different slips on the short circuit current of DFIG after crowbar operation[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(17): 8-14.
- [5] 李建林, 朱颖, 胡书举, 等. 风力发电系统中大功率变频器的应用[J]. *高电压技术*, 2009, 35(1): 169-175.  
LI Jianlin, ZHU Ying, HU Shuju, et al. Topology and modulation strategy for high power converter in wind power system[J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(1): 169-175.
- [6] 刘其辉, 贺益康, 张建华. 并网型交流励磁变速恒频风力发电系统控制研究[J]. *中国电机工程学报*, 2006, 26(23): 109-114.  
LIU Qihui, HE Yikang, ZHANG Jianhua. Investigation of control for AC-excited VSCF wind power generation system connected to grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2006, 26(23): 109-114.
- [7] 赵霞, 王倩, 邵彬, 等. 双馈感应风力发电系统低电压穿越控制策略研究及其分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(16): 57-64.  
ZHAO Xia, WANG Qian, SHAO Bin, et al. Low voltage ride through control strategy and its analysis of doubly fed induction generator[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(16): 57-64.
- [8] 李鸿儒, 金炜东, 胡立锦, 等. 基于无功判定法的 Crowbar 保护电路退出控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(15): 99-103.  
LI Hongru, JIN Weidong, HU Lijin, et al. Crowbar protection circuit quitting control based on the reactive power judgment[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(15): 99-103.
- [9] 栗然, 王倩, 卢云, 等. Crowbar 阻值对双馈感应发电机低电压穿越特性的影响[J]. *电力自动化设备*, 2014, 34(4): 101-107.  
LI Ran, WANG Qian, LU Yun, et al. Impact of Crowbar resistance on low voltage ride through of DFIG[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2014, 34(4): 101-107.
- [10] 李鸿儒, 金炜东, 胡立锦. 双馈风电机组低电压穿越能力的提高[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2013, 25(5): 7-12.  
LI Hongru, JIN Weidong, HU Lijin. Improved low voltage ride through capability of doubly-fed wind generator[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2013, 25(5): 7-12.
- [11] 薛安成, 陈进美, 毕天姝, 等. 基于电流补偿策略的 DFIG 系统低电压穿越研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2012, 40(20): 13-19.  
XUE Ancheng, CHEN Jinmei, BI Tianshu, et al. Research on low voltage ride-through of DFIG system based on current compensation strategy[J]. *Power System Protection and Control*, 2012, 40(20): 13-19.
- [12] 高仕红, 张昌华, 耿东山, 等. 双馈式风力发电机低电压穿越控制策略[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2014, 26(8): 34-39.  
GAO Shihong, ZHANG Changhua, GENG Dongshan, et al. Control strategy of low voltage ride-through for double-fed wind generator[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2014, 26(8): 34-39.
- [13] MOHSENI M, MASOUM M A S, ISLAM S M. Low and high voltage ride-through of DFIG wind turbines using hybrid current controlled converters[J]. *Electric Power Systems Research*, 2011, 81: 1456-1465.
- [14] 孟岩峰, 胡书举, 王玲玲, 等. 电网故障条件下双馈机组运行特性分析及其协调控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(8): 106-113.  
MENG Yanfeng, HU Shuju, WANG Lingling, et al. Characteristics analysis and coordinated control of the doubly-fed wind power system under grid transient fault[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(8): 106-113.
- [15] 姚俊, 廖勇. 基于 Crowbar 保护控制的交流励磁风电系统运行分析[J]. *电力系统自动化*, 2007, 31(23): 79-83.  
YAO Jun, LIAO Yong. Analysis on the operations of an AC excited wind energy conversion system with Crowbar protection[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(23): 79-83.
- [16] 项丹. 永磁直驱风力发电机组全功率变频器控制策略的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.  
XIANG Dan. Permanent magnet direct drive wind turbine full power converter control strategy[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [17] 边晓燕, 王本利, 陈建平, 等. 改进的 DFIG 与 VSC-HVDC 协调控制改善风电场低电压穿越能力[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(1): 9-16.  
BIAN Xiaoyan, WANG Benli, CHEN Jianping, et al. Improvement of low voltage ride through capability of wind farm using coordinated control of the improved DFIG and VSC-HVDC[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(1): 9-16.

收稿日期: 2016-03-17; 修回日期: 2016-05-16

作者简介:

周士琼(1991-), 男, 硕士研究生, 从事新能源发电与并网技术研究; E-mail: 1527230736@qq.com

王倩(1962-), 女, 硕士, 教授, 从事电力系统调度综合自动化研究;

吕潇(1992-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统运行与控制研究。

(编辑 张爱琴)