

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.09.020

双馈风电场的频率特性对距离保护的影响

杨欢红¹, 李庆博¹, 寇柯², 彭富强³, 马改园²

(1. 上海电力学院电气工程学院, 上海 200090; 2. 许继集团许继软件技术中试部, 河南 许昌 461000;
3. 北京送变电公司, 北京 102401)

摘要: 基于双馈的风力发电场送出线路发生故障时, 风力发电机的短路电流的特性与常规电力系统短路电流特性有明显的差别, 主要表现在短路电流可能非工频, 这种特性使得利用工频傅氏算法进行信号的基频相量的提取和计算不正确。为了深入分析双馈风电场短路电流的这种特性, 文中将结合双馈风电场的等效电路, 从理论上分析送出线路故障时, 风电场侧电流、电压的频率主要成分, 并通过频谱分析进行验证。根据风电场侧电流、电压的频率不一致的特性, 在 PSCAD 中仿真分析该种特性对送出线路上传统距离保护的影响。通过对某地区风电场仿真的实验结果可知, 短路电流偏移工频, 使得基于傅里叶工频算法的传统距离保护不能准确地测得阻抗, 从而造成距离元件的误动作。

关键词: 双馈风电场; 低电压穿越; 频率; 距离保护; 阻抗

Impact of Frequency Characteristics in Wind Farms Based on Doubly-fed Induction Generators Wind Farm on Distance Protection

YANG Huanhong¹, LI Qingbo¹, KOU Ke², PENG Fuqiang³, MA Gaiyuan²

(1. Shanghai University of Electric Power, Electric Power Engineering, Shanghai 200090, China; 2. XJ Group Corporation XJ Software Technology, Henan Xuchang 461000, China; 3. Beijing Transmission and Distribution Company, Beijing 102401, China)

Abstract: When a fault occurs in wind farms based on doubly fed induction generators (DFIG), the characteristics of DFIG short-circuit current is differences from conventional power system, which is mainly not power frequency, and makes pitch extraction and calculation incorrect in constant frequency-fourier method. For understanding of the characteristic of short circuit current for doubly-fed wind farm, the paper is combined with the equal circuit of DFIG wind farm, which analyses the frequency components of short circuit voltage and current with the fault, which the result is validated by the pectrum analysis technique. Following the frequency's feature of voltage and current, simulations based on PSCAD is made to verify the adaptive failings of distance protection in wind farms. Through the simulation of wind farms in actual situation, the short-circuit current offsetting constant frequency, which makes traditional distance protection based on Fourier power frequency algorithm does not accurately measure the impedance resulting in the malfunction of the component.

Key words: doubly fed induction generators(DFIG) wind farm; low voltage ride through(LVRT); frequency; distance protection; impedance

0 引言

现阶段, 中国的风电场多以集团式接入为主, 风电场送出线路的保护配置仍旧遵循传统输电线路的方法, 并没有考虑到大规模风电场在故障时产生的影响^[1-3]。由于风电场的容量越来越大, 此时在送出

线路上, 保护的整定和配置计算过程中不考虑风电场的影响是极其不合理的^[4-8]。根据双馈风电机组短路电流的非工频特性可知, 在送出线路发生故障时, 双馈风电场将会向短路点提供一定的非工频短路电流^[9]。在微机继电保护中, 常用基于工频的傅氏算法来进行信号基频相量的提取和计算^[10-11]; 当信号的频率非工频时, 非工频信号在一个采样周期内采样

收稿日期: 2016-03-14; 修回日期: 2016-05-16

的点数偏移了工频信号在该采样周期采样的点数,由此工频傅式算法无法正确地提取信号的基波相量^[10]。

文中首先阐述了双馈风力发电机故障电流非工频的机理,并将仿真波形与理论波形进行对比,验证仿真模型的正确性,进而通过仿真结果说明不同工况下的频率特征^[12-13]。对含风电场的电网系统网络图进行简化,分析了在风电场送出线路发生故障时,风电场侧电压、电流表现出不同的频率特性;根据上述所阐述的风电场侧电压、电流的频率特征,分析风电场该种特性对送出线路上距离保护的影响,并在PSCAD中建立某风电场的仿真模型,经由仿真验证结论的正确性。文中从频率的角度证明风电场对传统距离保护影响的思想,同时适用于其他保护的分析。

1 双馈风力发电机组的暂态电流

为了避免故障时,风电场大规模脱网,对于双馈风力发电机要具备低电压穿越的能力^[14-16]。假设在风电场送出线路上发生三相对称短路故障,双馈发电机组定子端三相电压对称跌落;此时Crowbar保护电力瞬间动作,在故障期间Crowbar电路一直投入,双馈发电机相当于普通的异步发电机运行^[3]。故障期间双馈发电机定子端故障电流可表示为^[17]

$$i_s = C_1 e^{j(\omega_1 t + \varphi_1)} - C_2 e^{j\varphi_2} e^{-t/T_s'} + C_3 e^{j\varphi_3} e^{-t/T_r'} e^{j\omega_r t} \quad (1)$$

则可获得定子A相电流为

$$i_A = C_1 \cos(\omega_1 t + \varphi) - C_2 e^{-t/T_s'} \cos\varphi + C_3 e^{-t/T_r'} \cos(\omega_r t + \varphi) \quad (2)$$

式(1)、(2)中: C_1 、 C_2 、 C_3 为常数; ω_1 、 ω_r 分别为定子同步和转子旋转角速度;转子 φ 为短路时的相角; T_s' 、 T_r' 分别为定、转子时间常数;交流分量 $C_3 e^{-t/T_r'} \cos(\omega_r t + \varphi)$ 为定子暂态电流的主要分量。

由式(2)可知,故障期间风电机组短路电流的频率受故障发生瞬间转子转速的影响,由于双馈风力发电机运行在不同工况下,其短路电流的频率也随之变化,出现非工频的情况^[3,18]。

以PSACAD为平台,对双馈风力发电机故障电流的频率特性进行理论验证,见图1。

由图1可知:当 $t=4$ s时发生三相对称短路,假设Crowbar保护电路立即投入;故障发生瞬间转差率 $s=0.2$,即 $\omega_r=0.8$ p.u.时,故障电流的频率为 $0.8 \times 50=40$ Hz,理论波形与仿真波形差别不大,从而验证了仿真模型的正确性。在上述仿真条件下,双馈发电机运行于 $\omega_r=0.8$ p.u.和 $\omega_r=1.25$ p.u.两种工况下,得到故障电流波形,见图2。由图2知,当 $\omega_r=0.8$ p.u.时,故障电流的频率约为40 Hz;当 $\omega_r=1.25$ p.u.时,故障电流频率约为62.5 Hz,验证了故障电流的频率

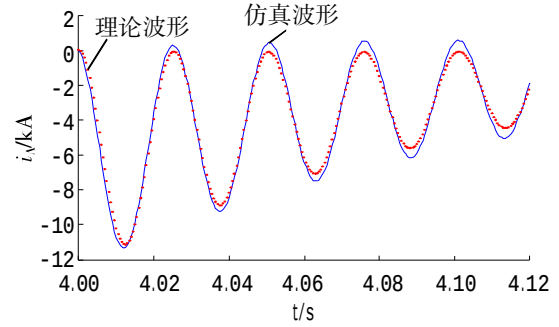


图1 在 $s=0.2$ 条件下,发生三相短路故障,定子电流理论值与仿真值对比定子电流理论与仿真波形比较

Fig. 1 Comparison of DFIG fault current among theory and simulation in three-phase short circuit fault when $s=0.2$, 由故障发生瞬间的转子转速决定。

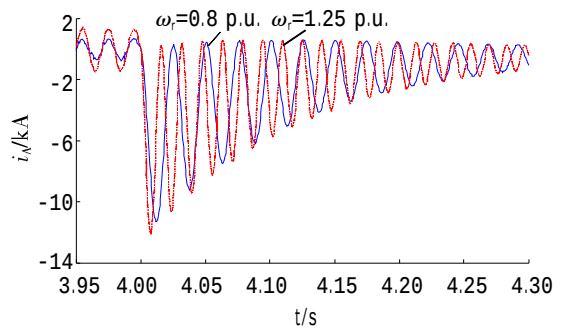


图2 不同工况下,双馈风机定子侧故障电流频率比较

Fig. 2 Comparison of DFIG fault current frequency among different working conditions

2 送出线路故障时,距离保护正确性分析

2.1 风电场侧故障量频率分析

由第1章可知,故障期间双馈发电机组的短路电流频率由故障前转子转速决定;当 $s \neq 0$ 时,故障期间电网中有非工频的电源励磁,利用叠加原理对风电场和系统侧故障电压、电流进行分析,故障期间电网系统等值网络见图3^[9,19]。

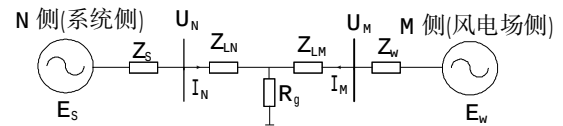


图3 电网系统等值网络

Fig. 3 Circuit diagram of power grid system

图3中: Z_w 为风电场内部等值阻抗; Z_s 为系统侧等值阻抗; Z_{LN} 、 Z_{LM} 分别为系统侧和风电场侧到故障点的线路等值阻抗; R_g 为过渡电阻; E_s 、 E_w 分别为系统电势和风电场电势。一般规定风电场的容量应当不超过系统短路容量的10%,则在等值网络中, Z_w 要远大于其他等值阻抗^[18-19]。

根据图3可得,N侧系统电源单独作用时,N侧电流 I_N' ;风电场单独作用时,M侧电流 I_M' ,其表达式为^[9,13,19]:

$$I_N' \approx \frac{E_s}{Z_s + Z_{LN} + R_g}; \quad (3)$$

$$I_M' \approx \frac{E_w}{Z_w + Z_{LM} + R_g}. \quad (4)$$

当系统与风电场同时作用时,系统N侧和风电场M侧保护所测得的电压、电流为^[9,13,19]:

$$U_N = I_N' \left[\frac{I_M'}{I_N'} \frac{R_g Z_s}{R_g + Z_{LN} + Z_s} + Z_{LN} + \frac{R_g (Z_{LM} + Z_w)}{R_g + Z_{LM} + Z_w} \right] \approx I_N' (Z_{LM} + R_g); \quad (5)$$

$$I_N = -I_M' \frac{R_g}{R_g + Z_{LN} + Z_s} + I_N' \approx I_N'; \quad (6)$$

$$U_M = \frac{R_g E_w}{R_g + Z_{LM} + Z_w} I_N' + I_M' \left[Z_{LM} + \frac{R_g (Z_{LN} + Z_s)}{R_g + Z_{LN} + Z_s} \right] \approx I_N' R_g; \quad (7)$$

$$I_M = I_M' - \left(\frac{R_g}{R_g + Z_{LM} + Z_w} I_N' \right) \approx I_M' - \frac{R_g}{Z_w} I_N'. \quad (8)$$

由式(5)、(6)可以看出,系统侧保护所测得的电压、电流可近似认为是电网电源单独作用时的结果,系统侧的电压和电流主要频点为工频 50 Hz; 由式(7)、(8)可以看出,风电场侧保护所测得的电压主要频率为工频 50 Hz,而风电场侧电流成分,将会受 R_g 和 Z_w 相对关系的影响,但由于 Z_w 很大,风电场侧的电流还是以非工频为主。

2.2 频率偏移特征对距离保护正确性影响

具有低电压穿越能力的双馈风力发电机组,在风电场送出线路发生三相对称短路时,故障电流的频率主要取决于故障瞬间的转子转速。若故障前转子转速 $\omega_r = 1.0$ p.u.,故障电流的频率仍以工频 50 Hz 为主,对基于工频傅式算法的距离保护而言,能够正确的提取基频的幅值与相位^[10]。由于双馈风力发电机转速变化范围为 ± 0.3 p.u.^[18-19],则故障电流的频率将在 35~50 Hz 范围内变化。

当风电场故障前转速 $\omega_r \neq 1.0$ p.u.时,风电场侧保护处的电流非工频,傅式算法并不能准确地提取故障电流的基波相量^[10];并且由于风电场侧电压主要为工频成分,该侧保护处的故障电压、电流频率不同,利用傅式算法的距离元件计算的测量阻抗有很大误差;导致所得到的测量阻抗的轨迹是一条螺旋的曲线^[9],测量阻抗波动较大且测量不准确,多次穿越阻抗整定圆,导致距离元件的误动作。

3 算例分析

在 PSCAD 环境下,搭建某地区风电场的仿真模型,通过仿真验证送出线路发生三相对称故障时,风电场侧电压、电流的成分;同时通过仿真验证风电场故障电流非工频的特点对风电场侧距离保护的影响。

该地区风电场结构见图 4,其参数设置^[19]:风电

场容量为 50 MW,由 33 台额定容量为 1.5 MW 的双馈感应风力发电机并联在同一 35 kV 汇流母线上;单台双馈感应风力发电机额定容量为 1.5 MW,额定电压为 690 V,定子阻抗 $R_s + jX_s = 0.011 + j0.182$ p.u.,转子阻抗 $R_r + jX_r = 0.009 + j0.144$ p.u.,励磁阻抗 $X_m = 5.890$ p.u., $R_c = 0.055 \Omega$;箱式变压器 690 V/38.5 kV,阻抗 $R_b + jX_b = 0.0017 + j0.05$ p.u.,容量为 1.6 MW;风电场主变压器 38.5 kV/110 kV,阻抗 $R_T + jX_T = 0.0053 + j0.16$ p.u.,容量为 63 MW;所有电阻、电抗的标幺值均将自身额定值作为基准值。送出线路正序阻抗 $Z_{L1} = 0.131 + j0.401 \Omega/\text{km}$,零序阻抗 $Z_{L0} = 0.328 + j1.197 \Omega/\text{km}$,送出线路全长 13.7 km。

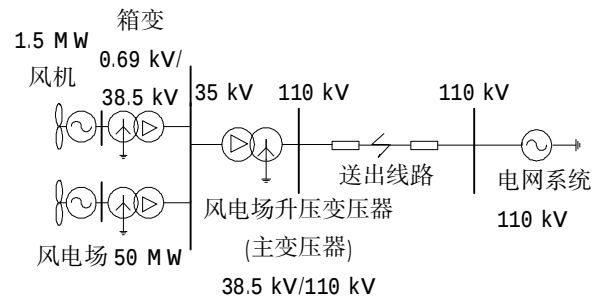


图4 风电场结构图

Fig. 4 Wiring diagram of wind farm system

3.1 故障电压、电流频谱分析

假设故障发生前,风电场运行在 $\omega_r = 0.8$ p.u.的工况下。送出线路上发生三相故障后,根据采集的风电场侧和系统侧电压和电流,进行频谱分析^[20]结果见图 5-8。

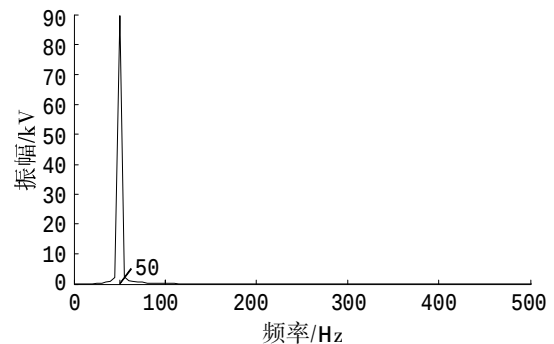


图5 系统侧故障电压幅频图

Fig. 5 The fault voltage spectrum diagram of system side

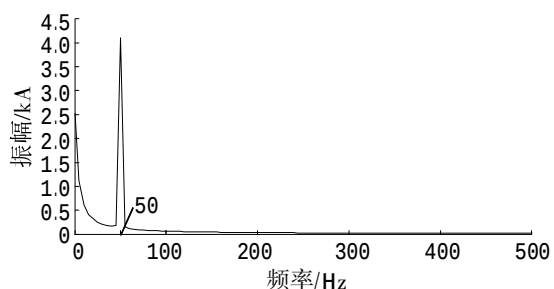


图6 系统侧故障电流幅频图

Fig. 6 The fault current spectrum diagram of system side

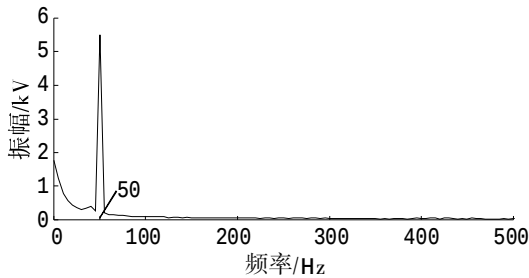


图7 风电场侧故障电压幅频图

Fig. 7 The fault voltage spectrum diagram of wind farm side

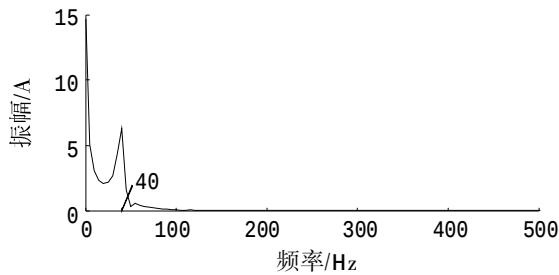


图8 风电场侧故障电流幅频图

Fig. 8 The fault current spectrum diagram of wind farm side

由图5、6看出,送出线路发生三相故障时,系统侧的电压、电流主要频率为工频50 Hz;由图7、8可以看出,风电场侧的电压主要成分为工频,风电场侧的故障电流偏移了工频为40 Hz。从频谱图中可得出,具有低电压穿越能力的双馈风电场其送出线路发生三相故障时,风电场侧的电压、电流可能出现频率不一致的情况,故障电流非工频;这种特性将会对传统的基于工频分量的距离保护产生影响,使其不能准确地计算测量阻抗,严重影响了距离元件的准确性。

3.2 频率偏移对距离保护的影响仿真

在上述工况,过渡电阻 $R_g=1\ \Omega$ 时,对风电场侧距离保护的区内、区外的动作情况进行仿真,其具体情况见图9、10。

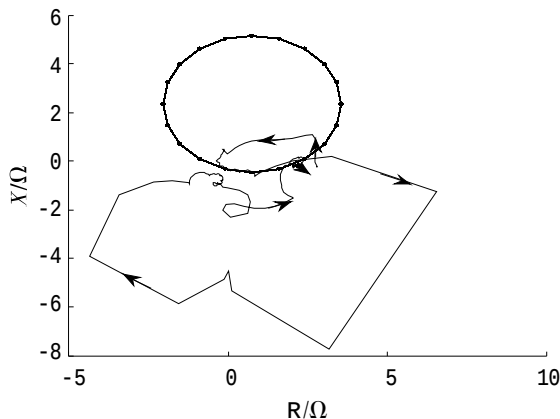


图9 区内故障距离元件动作特性

Fig. 9 The measured impedance in internal fault

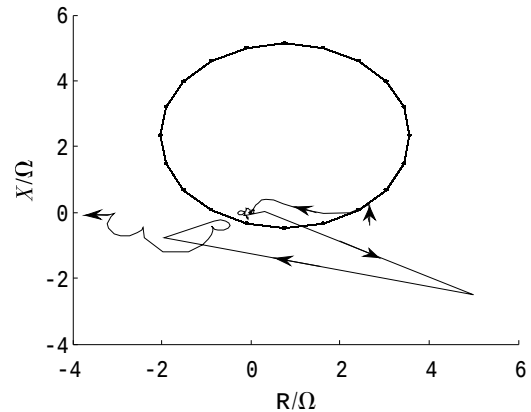


图10 区外故障距离元件动作特性

Fig. 10 The measured impedance in external fault

由图9、10看出,发生区内故障时,测量阻抗的轨迹先以逆时针方向进入整定阻抗圆后,在多次进出阻抗圆,最后偏离阻抗圆;在发生区外故障时,测量阻抗的轨迹以逆时针的方向进入动作区,最后旋转离开阻抗圆。由上述可知,本应测量阻抗在故障后的暂态过程中迅速收敛至以稳定值;但由于风电场侧电流的非工频致使电压、电流频率不同,传统的距离保护元件测得的测量阻抗在动作区和非动作区多次进出,从而可能造成了距离保护元件的误动作。

4 结语

文中从双馈发电机组故障电流的频率特性入手,通过频谱分析进行说明分析了在风电场送出线路上发生三相故障时,风电场侧电流可能非工频、与该侧电压频率不一致;由于风电场的这种特性,将对传统距离保护产生影响,通过仿真某地区的风电场来进行验证。风电场工况下,该侧故障电流偏移工频,使得基于傅里叶工频算法的传统距离保护不能准确地测得阻抗,算出的阻抗轨迹不断地进出动作区,从而造成距离元件的误动作。

参考文献:

- [1] 张丽英,叶廷路,辛耀中,等.大规模风电接入电网的相关问题及措施[J].中国电机工程学报,2010,30(25):1-9.
ZHANG Liying, YE Tinglu, XIN Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25):1-9.
- [2] SMITH J C, MILLIGAN M R, DEMEO E A, et al. Utility wind integration and operating impact state of the art[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(3):900-908.
- [3] 张保会,王进,原博,等.风电接入对继电保护的影响(四)——风电场送出线路保护性能分析[J].电力自动化设备,2013,33(4):1-6.

- ZHANG Baohui, WANG Jin, YUAN Bo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection(4): Problem analysis for wind farm outgoing transmission line protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4):1-6.
- [4] 杨国生, 李欣, 周泽昕. 风电场接入对配电网继电保护的影响与对策[J]. 电网技术, 2009, 33(11): 88-94.
- YANG Guosheng, LI Xin, ZHOU Zexin. Impacts of wind farm on relay protection for distribution network and its countermeasures[J]. Power System Technology, 2009, 33(11): 88-94.
- [5] BRAND A J, GIBESCU M, KLINGWIL, et al. Impacts of wind power on thermal generation unit commitment and dispatch[J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 2007, 22(1):44-51.
- [6] 李丹, 贾琳, 许晓菲, 等. 风电机组脱网原因及对策分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22):41-44.
- LI Dan, JIA Lin, XU Xiaofei, et al. Cause and countermeasure analysis on wind turbine's trip-off from grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22):41-44.
- [7] 刘岱, 庞松岭. 风电集中接入对电网影响分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(3):156-160.
- LIU Dai, PANG Songling. System impacts analysis for interconnection of wind farm and power grid[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(3):156-160.
- [8] 文玉玲, 晁勤, 叶尔逊·依布拉克. 风电场对电网继电保护的影响[J]. 电网技术, 2008, 32(14):15-18.
- WEN Yuling, CHAO Qin, TUERXUN Yibulayin. Impact of interconnected wind farm on power system protection[J]. Power System Technology, 2008, 32(14):15-18.
- [9] 卜强生, 高磊, 宋亮亮, 等. 风电场短路电压电流频率不一致对距离保护及测试的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8):21-27.
- BU Qiangsheng, GAO Lei, SONG Liangliang, et al. Short circuit current and voltage frequency inconsistency in wind farm and its effect on distance protection and relay protection test[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8):21-27.
- [10] 高亮. 电力系统微机继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007:115-118.
- GAO Liang. The microcomputer relay protection in power systems[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007: 115-118.
- [11] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009:110-111.
- ZHANG Baohui, YIN Xianggen. Power system relay protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009:110-111.
- [12] 党存禄, 宫有民, 周明星. 双馈型风电系统电网故障不间断运行研究[J]. 电气自动化, 2011, 33(5):37-40.
- DANG Cunlu, GONG Youmin, ZHOU Mingxin. Doubly-fed type wind power system the research of the grid's fault in riding through the grid[J]. Electrical Automation, 2011, 33(5): 37-40.
- [13] 欧阳金鑫, 熊小伏. 接入配电网的双馈风力发电机短路电流特性及影响[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(23):106-110.
- OUYANG Jinxin, XIONG Xiaofu. Characteristics of short-circuit current of wind turbine driven dfig and its impacts on grid-connected distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(23):106-110.
- [14] 徐海亮, 章玮, 贺益康, 等. 双馈型风电机组低电压穿越技术要点及展望[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(20):8-15.
- XU Hailiang, ZHANG Wei, HE Yikang, et al. A review on low voltage ride-through technologies and prospect for DFIG wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(20):8-15.
- [15] SCBLABBACB J. Low voltage fault ride through criteria for grid connection of wind turbine generator[C]//the 5th International Conference on the European Electricity Market. Lisbon, Portugal: IEEE, 2008:18-21.
- [16] 张学广, 徐殿国. 电网对称故障下基于 Active Crowbar 双馈发电机控制[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(1): 99-103.
- ZHANG Xueguang, XU Dianguo. Research on control of DFIG with Active Crowbar under symmetry voltage fault condition[J]. Electric Machines and Control, 2009, 13(1): 99-103.
- [17] 李建林, 许洪华. 风力发电系统低电压运行技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008:19-21.
- LI Jianlin, XU Honghua. Wind power system low voltage ride through technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2008:19-21.
- [18] 张保会, 王进, 郝治国, 等. 风电接入对继电保护的影响(三)——风电场送出变压器保护性能分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3):1-5.
- ZHANG Baohui, WANG Jin, HAO Zhiguo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection(3): problem analysis for wind farm outgoing transformer protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3):1-8.
- [19] 张保会, 张金华, 原博, 等. 风电接入对继电保护的影响(六)——风电场送出线路距离保护影响分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6):1-6.
- ZHANG Baohui, ZHANG Jinhua, YUAN Bo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection(6): Analysis of distance protection for wind farm outgoing transmission line[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6):1-6.
- [20] 王婷, 李凤婷, 何世恩. 影响风电场联络线距离保护的因素及解决措施[J]. 电网技术, 2014, 38(5):1420-1424.
- WANG Ting, LI Fengting, HE Shi'en. Factors impacting distance protection for tie line of wind farm and corresponding countermeasures[J]. Power System Technology, 2014, 38(5):1420-1424.

杨欢红(1965—),女,副教授,从事电力设备状态监测与故障诊断及电力系统安全评估技术等方面的研究。

李庆博(1990—),女,硕士研究生,从事风力发电技术及其保护。