

文章编号: 1006-4710(2012)02-0225-05

# 风电场并网联络线的自适应电流保护研究

雷显国<sup>1,2</sup>, 段建东<sup>1</sup>

(1. 西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048;

2. 安康职业技术学院, 陕西 安康 725000)

**摘要:** 针对现有联络线源侧大多使用定值保护方案因而容易受风电特性影响而误动的现状, 分析了风力发电机短路电流特性, 得出了双馈型风力发电机的故障电流与电网故障发生时刻、故障类型、撬棒电路动作情况、故障后电压的跌落深度等密切相关的结论, 并在此基础上提出了综合电流、电压信息的风电场联络线自适应速断保护原理与算法。该保护方法以某示范性分布式风电场并网进行 DIGSILENT 软件的仿真测试, 结果验证了所提保护配置方案的自适应性和有效性。

**关键词:** 风电场; 联络线; 自适应保护; 双馈风力发电机

中图分类号: TM77      文献标志码: A

## Research on Adaptive Current Protection for Wind Farm Tie-Line

LEI Xianguo<sup>1,2</sup>, DUAN Jiandong<sup>1</sup>

(1. Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Ankang Vocational Technical College, Ankang 725000, China)

**Abstract:** With an aim at the existing tie-line resource side with fixed value protection schemes, resulting in mal-operating situation because of being subject to the wind power characteristics, this paper analyzes the short circuit current behavior of the wind power generators, whereby such conclusions are obtained as defect types, crowbar circuit action, and fault-induced voltage sag level which are closely related to the occurrences of fault current of double-fed induction generator and the power grid fault, on the basis of which the new relay adaptive protection principle and algorithm for comprehensive electric current and voltage information for the tie-line in the wind farm are suggested. Finally, this protection scheme is tested on a certain exemplary distributed wind farm by the DIGSILENT simulation software. The test results show that the proposed protection scheme is adaptive and able to distinguish the internal or external faults effectively.

**Key words:** wind farm; tie-line; adaptive protection; DFIG

风电场并网联络线是风电场向电网输送能量的通道, 确保联络线保护装置在电网发生故障时可靠、选择性地动作对风电场至关重要。目前, 国内已投运的风电机组主流机型采用双馈风力发电机 (Doubly-fed induction generator, DFIG)。但风速变化、湍流和风机的尾流等原因使风电机组的输出功率波动, 特别是风电机组的短路电流特性, 容易导致目前采用固定整定值的联络线保护装置可能发生误

动或拒动。

文献[1][2]通过仿真得出随着电网故障类型、故障点的不同, 风电场保护动作特性也会不同。提出风电场应采用适应性保护, 以提高保护动作的可靠性, 保证风电场的稳定, 但文献仅提到可以应用自适应保护的思想。文献[3][4]分析了风力发电机的测量阻抗, 导出测量阻抗的计算式, 提出利用自适应距离保护来实现联络线保护。

收稿日期: 2011-12-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50707026); 陕西省重点学科建设专项基金资助项目(00x901); 陕西省教育厅专项科研计划基金资助项目(2010JK747)。

作者简介: 雷显国(1979-), 男, 陕西白河人, 硕士生, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: leisure8088@163.com。段建东(1973-), 男, 湖南武冈人, 教授, 博士, 研究方向为电力系统分析与保护、分布式风电。E-mail: duanjid@xaut.edu.cn。

自适应距离保护对于 220 kV 联络线保护是有效的,但对以分布式发电接入配电网的短长度的联络线并不适用。文献[5]提出故障期间改变风电机组的控制策略,减小对电网频率和电压的波动。文献[6]探讨故障造成电网电压骤降时 DFIG 系统的低电压穿越控制和保护方案,通过改变控制策略能部分改善风电机的短路电流特性,但这些研究没有讨论对联络线保护的影响。

本研究通过分析双馈风力发电机短路电流特性,利用自适应电流保护原理构成联络线风电场侧速断保护方案,克服双馈风力发电机短路电流的“多态性”对联络线保护的影响,最后通过某示范性分布式风电场接入系统联络线进行仿真研究。

## 1 双馈风力发电机的短路电流特性分析

通过电机的 Park 模型<sup>[7-8]</sup>,可以得到双馈风力发电机的等效模型(见图 1)。

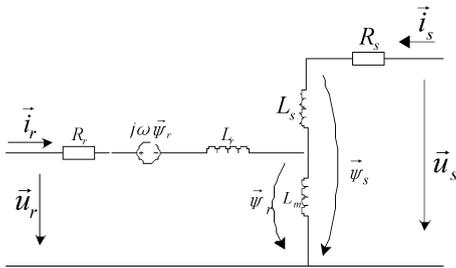


图 1 DFIG 等效模型

Fig. 1 DFIG equivalent model

图 1 中,  $\vec{u}_s$ 、 $\vec{i}_s$ 、 $\vec{\psi}_s$  为定子电压、电流和磁链矢量;  $\vec{u}_r$ 、 $\vec{i}_r$ 、 $\vec{\psi}_r$  为归算到定子侧的转子电压、电流和磁链矢量;  $L_s$ 、 $R_s$  分别为定子电感和定子电阻;  $L_r$ 、 $R_r$  分别为转子侧归算到定子侧的电感和电阻。

为了简化计算,将转子侧变量都归算到定子侧。按照电机学惯例 Park 模型可以表示为:

$$\vec{u}_s = R_s \vec{i}_s + \frac{d}{dt} \vec{\psi}_s \quad (1)$$

$$\vec{u}_r = R_r \vec{i}_r + \frac{d}{dt} \vec{\psi}_r - j\omega \vec{\psi}_r \quad (2)$$

风力发电机的转子侧直接和电网相连,就意味着定子电压  $\vec{u}_s$  直接受电网电压影响。转子电压  $\vec{u}_r$  受到变频器的控制和转子磁链的变化影响。

定转子磁链表达式为:

$$\vec{\psi}_s = L_s \vec{i}_s + L_m \vec{i}_r \quad (3)$$

$$\vec{\psi}_r = L_r \vec{i}_r + L_m \vec{i}_s \quad (4)$$

在上述方程中所有的参数都已经归算到定子

侧。由方程(3)和(4)可以得到关于磁链的定转子电流方程为:

$$\vec{i}_s = \frac{1}{L_s - \frac{L_m^2}{L_r}} \vec{\psi}_s - \frac{L_m}{L_r} \frac{1}{L_s - \frac{L_m^2}{L_r}} \vec{\psi}_r \quad (5)$$

$$\vec{i}_r = -\frac{L_m}{L_s} \frac{1}{L_r - \frac{L_m^2}{L_s}} \vec{\psi}_s + \frac{1}{L_r - \frac{L_m^2}{L_s}} \vec{\psi}_r \quad (6)$$

在方程(5)和(6)中令  $L'_s = L_s - (L_m^2/L_r)$ , 定义  $L'_s$  为定子暂态电感; 令  $L'_r = L_r - (L_m^2/L_s)$ , 定义  $L'_r$  为转子暂态电感; 令  $k_s = L_m/L_s$ , 定义  $k_s$  为定子耦合系数; 令  $k_r = L_m/L_r$ , 定义  $k_r$  为转子耦合系数。则方程(5)和(6)简化为方程(7)和(8), 即:

$$\vec{i}_s = \frac{\vec{\psi}_s}{L'_s} - k_r \frac{\vec{\psi}_r}{L'_r} \quad (7)$$

$$\vec{i}_r = -k_s \frac{\vec{\psi}_s}{L'_r} + \frac{\vec{\psi}_r}{L'_r} \quad (8)$$

同时定义漏感系数为:

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \quad (9)$$

在系统正常运行时,假设定子电压为:

$$\vec{u}_s = V_s e^{j\omega_s t} \quad (10)$$

其中  $\omega_s$  为同步转速。如果忽略定子电阻,则可得到定子磁链的表达式为:

$$\vec{\psi}_s = \frac{V_s}{j\omega_s} e^{j\omega_s t} \quad (11)$$

稳态运行时转子磁链是一个幅值为常数的向量,其中的幅值受电网电压影响。当电网发生对称短路和不对称短路,以及短路后双馈风力发电机的撬棒电路是否投入都会影响双馈风力发电机的短路电流。设在  $t = t_0$  时系统发生对称短路,短路后风电机组端电压为<sup>[9]</sup>:

$$\vec{u}_s(t \geq t_0) = k V_s e^{j\omega_s t} \quad (12)$$

其中  $k \in [0, 1]$ 。

电网发生不对称短路的情况下,由对称分量法可将短路后机端电压空间矢量分解为 3 个序分量之和,即:

$$\vec{u}_s(t \geq t_0) = V_1 e^{j\omega_s t} + V_2 e^{-j\omega_s t} + V_0 \quad (13)$$

式中,  $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_0$  分别为正序、负序和零序电压分量。分别计算四种情况下的短路电流为:

1) 对称短路时撬棒电路未投入时的短路电流为:

$$\vec{i}_s(t \geq t_0) = \frac{k V_s}{j\omega_s L_s} e^{j\omega_s t} - \frac{L_m \vec{i}_r}{L_s} + \frac{(1-k)V_s}{j\omega_s L_s} e^{j\omega_s t_0} e^{-\frac{R_s}{L_s}(t-t_0)} \quad (14)$$

2) 对称短路时撬棒电路投入时的短路电流为:

$$\vec{i}_s = \left( \frac{kV_s}{j\omega_s L'_s} e^{j\omega_s t} + \frac{(1-k)V_s}{j\omega_s L'_s} e^{j\omega_s t_0} e^{-\frac{R_s}{L_s}(t-t_0)} \right) \times \left( 1 - \frac{k_s k_r (R_r + R_{cb})}{(R_r + R_{cb}) - j\omega_s L'_r} \right) \quad (15)$$

3) 不对称短路时撬棒电路未投入时的短路电流为:

$$\vec{i}_s(t \geq t_0) = \frac{V_1}{j\omega_s L_s} e^{j\omega_s t} - \frac{V_2}{j\omega_s L_s} e^{j\omega_s t} + \frac{V_s - V_1 + V_2}{j\omega_s L_s} e^{j\omega_s t_0} e^{-\frac{R_s}{L_s}(t-t_0)} - \frac{L_m \vec{i}'_r}{L_s} \quad (16)$$

4) 不对称短路时撬棒电路投入时的短路电流为:

$$\vec{i}_s = \frac{k_s(1-k_r)(R_r + R_{cb})}{(R_r + R_{cb}) - j\omega_s L'_r} \left( \frac{V_1 e^{j\omega_s t}}{j\omega_s L'_s} - \frac{V_2 e^{j\omega_s t}}{j\omega_s L'_s} + \frac{V_s - V_1 + V_2}{j\omega_s L'_s} e^{j\omega_s t_0} e^{-\frac{R_s}{L_s}(t-t_0)} \right) \quad (17)$$

对比(14)~(17)式可见,故障电流与外部故障发生的时刻  $t_0$ 、故障类型、撬棒电路是否动作和故障后电压跌落深度等有关,即短路电流存在“多态性”。对于风电场联络线的风电场侧保护,若采用定值保护容易引起保护装置的误动和拒动,本研究利用自适应保护原理研究联络线保护以适应“多态性”问题。

## 2 自适应电流保护原理算法

所谓自适应保护就是根据电力系统当前的实际运行状态实时、自动地整定计算<sup>[10-11]</sup>,无需人工参与,电流整定值可表示为:

$$I_{set} = \frac{K_k K_d \dot{E}}{Z_m + Z_L} \quad (18)$$

其中,  $\dot{E}$  为风电机的等效相电势、 $Z_m$  为风电场侧的综合阻抗、 $Z_L$  为被保护线路的阻抗、 $K_d$  为故障类型系数,三相故障取  $K_d = 1$ ,两相短路时取  $K_d = \sqrt{3}/2$ ,  $K_k$  为可靠系数。

在电流整定值(18)式中,首先要解决的问题是在故障发生后能快速地计算出风电场侧的等效阻抗  $Z_m$ ,一般利用系统的故障分量原理来计算其正序参数  $Z_{m1}$ ,其计算方法如公式(19)所示。另外,由公式(20)可以计算出保护安装处的等效电动势。

$$Z_m = Z_{m1} = - \frac{\dot{U}_{1mg}}{\dot{I}_{1mg}} \quad (19)$$

$$\dot{E} = \dot{U}_m + \dot{I}_m Z_m \quad (20)$$

上两式中,  $\dot{U}_m, \dot{I}_m$  分别为联络线故障时风电场侧保护测量到的电压和电流。

由公式(18)可以计算出保护的实时整定值  $I_{set}$ ,当测量到的故障电流  $I_k > I_{set}$  时,则保护瞬时动作。该自适应电流保护的流程如图2所示。

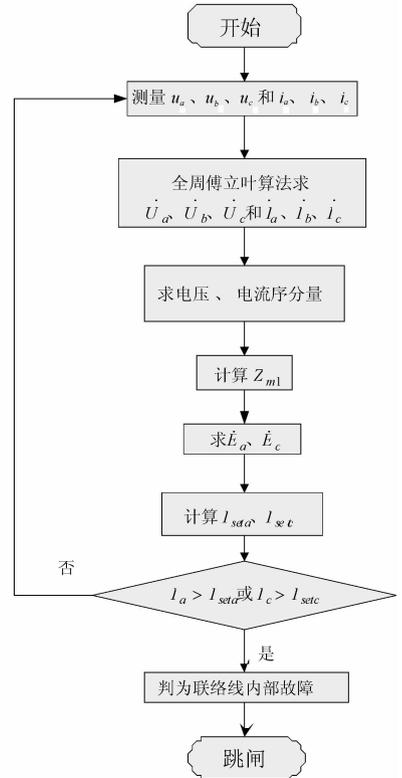


图2 自适应保护的流程图

Fig.2 Flow chart of adaptive protection

## 3 保护的仿真研究

在国际知名的电力系统仿真软件 DIgSILENT 平台上建立了某示范性分布式风电场(一期装机容量 9 MW)接入配电系统的仿真模型,如图3所示。

图3中母线 system 为风电场出口母线,额定电压为 35 kV;风电场容量为  $6 \times 1.5$  MW,机型为 MY1.5s-82/65 双馈型风力发电机组;联络线长度为 18 km,正序参数为  $0.17 + j0.3299 \Omega/\text{km}$ 。在图3中的  $K_1, K_2, K_3$  分别测试短路时间不同、撬棒电路的投入与否以及风电场的容量不同等情况下自适应电流保护的性能效果。

以 0.3 s 时  $K_1$  点发生三相短路、故障后撬棒电路投入的情况为参考状态,在这种情况下保护安装处的 A 相和 C 相电流测量值和整定值如图4所示。从图4可以看出,自适应电流保护在这种故障时能正确动作。

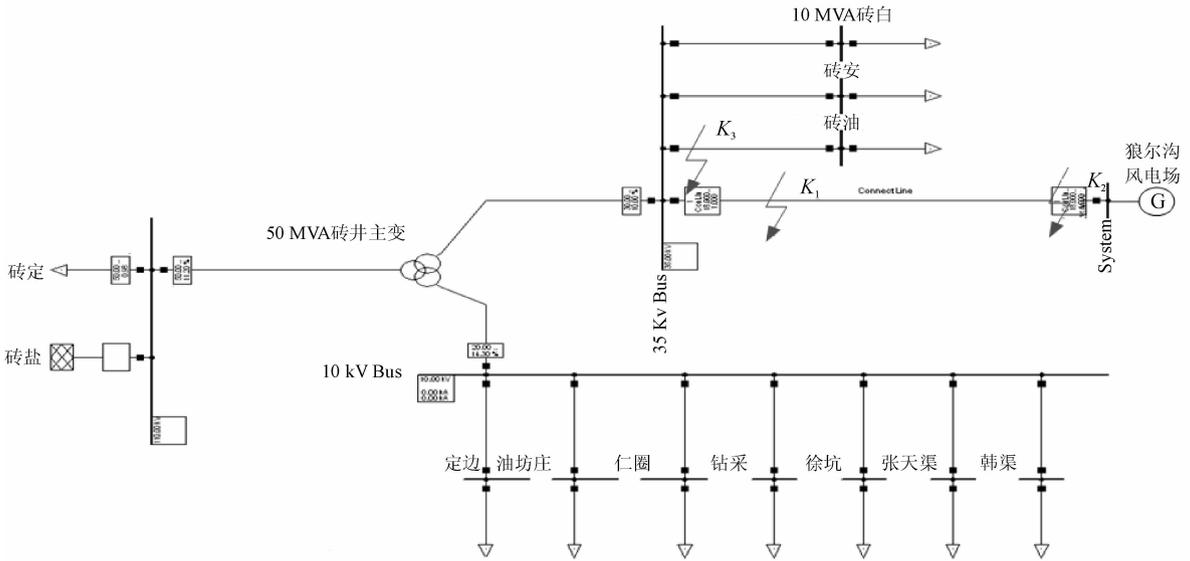


图3 含分布式风电的仿真系统

Fig. 3 The simulation system with the distributed wind farm

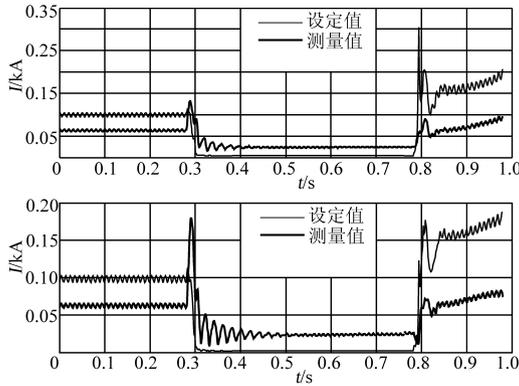


图4. 0.3 s发生短路的三相电流与保护整定

Fig. 4 Three-phase short circuit current at 0.3 s and the protection setting

1) 短路时间不同的测试结果

在0.295 s时  $K_1$  点发生三相短路,A相与C相电流的测量值和整定值如图5所示,对比图4和图5可以看出,短路时间不同时自适应电流保护仍能正确动作。

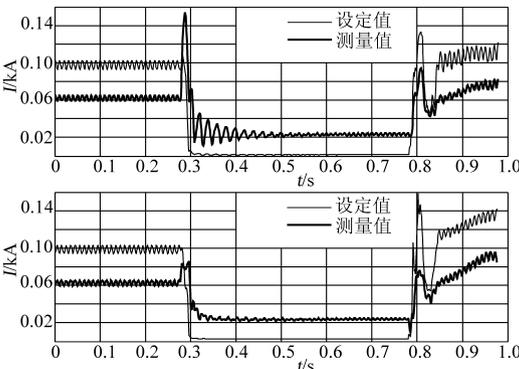


图5 0.295 s发生短路的三相电流与保护整定

Fig. 5 Three-phase short circuit current at 0.295 s and the protection setting

2) 故障后撬棒电路是否投入的测试结果  
在  $K_1$  点发生三相短路故障,但故障后撬棒电路未投入,短路电流测量值和整定值波形如图6所示。

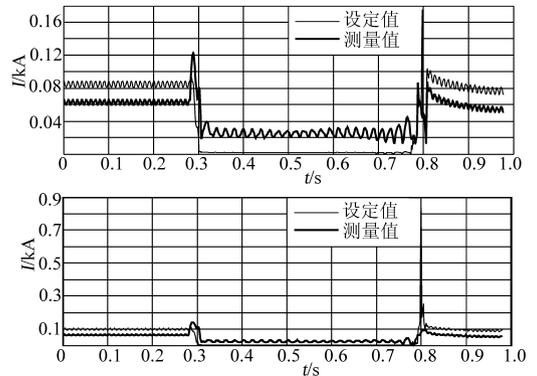


图6 撬棒电路未动作时三相短路电流与保护整定  
Fig. 6 Three-phase short circuit current at crowbar not operation and protection setting

对比图4和图6可以看出,当故障后撬棒电路投入和不投入,自适应电流保护均能正确动作。

3) 故障位置、风电出力不同时发生三相短路自适应保护的仿真结果如表1所示。

表1 故障位置与风电出力不同时保护动作情况  
Tab. 1 Protection operation results at different fault location and wind power capacity

短路位置		$K_1$	$K_2$	$K_3$
两相相间	9 MW	+	+	-
短路	3 MW	+	+	-
两相短路	9 MW	+	+	-
接地	3 MW	+	+	-
单相短路	9 MW	+	+	-
接地	3 MW	+	+	-

注：“+”表示保护动作，“-”表示保护不动作。

从表1的仿真情况可以看出,风电场的实际出力不同、故障位置不同以及不同的故障类型,自适应电流保护在故障后均能很好的动作。

另外,就以上各种情形及其组合情况,本研究还进行了大量的仿真实验测试,这些测试结果都表明,在联络线的风场侧配置所提出的自适应电流保护,能够实现对联络线进行可靠的保护。

## 4 结 论

本研究针对分布式风电场接入配电网的联络线继电保护方案进行了研究,得到结论:

1) 分析了双馈风力发电机在外部故障时提供的短路电流,该短路电流与外部故障发生的时刻、故障类型、撬棒是否动作和故障后电压跌落深度等有很大关系,即短路电流存在“多态性”;

2) 利用自适应电流保护原理构成了联络线上风电场侧保护方案,克服双馈风力发电机短路电流的“多态性”对联络线定值保护的影响;

3) 以某示范性分布式风电场接入配电网为实例,通过DIGSILENT软件建模与大量仿真,测试显示所研究的风电场并网联络线自适应电流保护方案是有效的。

## 参考文献:

- [1] 文玉玲,晁勤,吐尔逊·依不拉音,等. 关于风电适应性继电保护的探讨[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(5):47-51.  
Wen Yuling, Chao Qin, Tuerxun · Yibulayin, et al. Study on adaptive protection of wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(5): 47-51.
- [2] 文玉玲,晁勤,吐尔逊·依布拉音. 风电场的继电保护[J]. 可再生能源,2009,27(1):93-96.  
Wen Yuling, Chao Qin, Tuerxun · Yibulayin. Study on the relay protection for wind farm[J]. Renewable Energy Resources, 2009, 27(1): 93-96.
- [3] Pradhan K, G'za J. Adaptive distance relay setting for lines connecting wind farms[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007,22(1):202-216.
- [4] 张华中,王维庆,朱玲玲,等. 风电场联络线距离保护的自适应整定方法[J]. 电网技术,2009,33(3),89-93.  
Zhang Huazhong, Wang Weiqing, Zhu Lingling, et al. An

adaptive setting method for distance protection of transmission lines connecting wind farms[J]. Power System Technology, 2009, 33(3),89-93.

- [5] 杨之俊,吴红斌,丁明,等. 故障时风力发电系统的控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(1):14-18.  
Yang Zhijun, Wu Hongbin, Ding Ming, et al. Control strategy of doubly-fed wind generation system for power grid fault[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 14-18.
- [6] 苏平,张靠社. 基于主动式IGBT型Crowbar的双馈风力发电系统LVRT仿真研究[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(23):165-171.  
Su Ping, Zhang Kaoshe. Simulation research for LVRT of DFIG with active IGBT crowbar[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 165-171.
- [7] Jes's L, Pablo S, Xavier R, et al. Dynamic behavior of the doubly fed induction generator during three-phase voltage dips[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(3): 709-717.
- [8] 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):107-110.  
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): 107-110.
- [9] 欧阳金鑫,熊小伏,张涵轶. 电网短路时并网双馈风电机组的特性研究[J]. 中国电机工程学报,2011,31(22):17-25  
Ouyang Jinxin, Xiong Xiaofu, Zhang Hanyi. Characteristics of DFIG-based wind generation under grid short circuit[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22):17-25
- [10] 徐殿国,王伟,陈宁. 基于撬棒保护的双馈点击风电场低电压穿越动态特性分析[J]. 中国电机工程学报,2010,30(22):29-36  
Xu Dianguo, Wang Wei, Chen Ning. Dynamic characteristic analysis of doubly-fed induction generator low voltage ride-through based on crowbar protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 29-36
- [11] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 第二版. 西安:西安交通大学出版社,2007.

(责任编辑 李虹燕)