

# 自动重合闸引起风电场连锁脱网的解决策略分析

刘欣<sup>1</sup>, 郑涛<sup>1</sup>, 黄少锋<sup>1</sup>, 杨国生<sup>2</sup>

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

**摘要:** 当前风电场规模日益扩大, 连锁故障频发。一般风电场配置完善的保护装置, 其中自动重合闸系统在永久性故障时使系统电压两次跌落, 从而引发相邻风电场连锁脱网, 对风电场的安全稳定运行造成巨大威胁。基于这一现象, 以双馈风机为例, 研究 110 kV 的风电场联络线发生故障时, 两次故障跌落时刻其相邻风电场定子磁链初值大小不同, 分析了自动重合闸重合永久性故障时系统电压两次跌落造成风电场连锁脱网的机理。在此基础上, 提出了使用改变重合闸功能配置以及延长重合时间等方法解决这一问题, 并仿真验证了两种方法的有效性。

**关键词:** 连锁脱网; 电压跌落; 重合闸; 磁链; 功能配置; 重合时间

## Analysis on solution of cascade failure caused by automatic reclosing

LIU Xin<sup>1</sup>, ZHENG Tao<sup>1</sup>, HUANG Shaofeng<sup>1</sup>, YANG Guosheng<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** With the increasing size of wind farm, cascading fault often occurs. Automatic reclosing will make the voltage drops twice when permanent faults occur in the power system, causing a chain of adjacent wind farm off the grid, which poses a great threat on the safety and stability of the wind farm. This paper analyzes the mechanism of the chains of the wind farms off-grids caused by twice voltage drops from the aspect that the initial stator flux of DFIG differs between the twice moment when the voltage drop when the short-circuit fault occurs on the 110 kV wind farm connection line. On this basis, this paper proposes two methods, namely changing the functional configuration of reclosing and extending the time of reclosing, to solve this problem. And the simulations verify the effectiveness of the two methods.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA050208).

**Key words:** cascade failure; voltage drop; reclosing; flux; functional configuration; reclosing time

中图分类号: TM614 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)05-0051-06

## 0 引言

近年来风电场连锁故障频发, 与常规发电厂相比, 风电场低电压穿越能力稍弱<sup>[1-3]</sup>。风电场由送出线接入到高压输电网, 其中送出线配置有包括自动重合闸装置在内的完善的保护装置。当在保护范围内的线路发生永久性故障时, 自动重合闸会将故障点再次带入线路, 造成系统电压两次跌落, 容易引发相邻风电场的连锁脱网。

以这些相邻风电场为研究对象, 当风电场送出线发生永久性故障时, 研究重合过程中相邻风电场

的脱网机理能够为阻止此类连锁脱网事故提供理论基础。目前风电场内的主流机型还是以双馈机为主, 本文的研究基于此机型。

自动重合闸重合于永久性故障上, 会造成系统电压跌落两次, 相邻风电场在这一过程中也受到了连续两次电压跌落的冲击, 两次电压跌落时间间隔为送出线保护动作时间加上自动重合闸的重合时间。风电场受到一次电压跌落时的暂态过程研究较多, 文献[4-6]分析了机端三相短路后撬棒投入情况下定子和转子的暂态电流, 以此为基础分析了其无功特性, 指出撬棒的投切与电压的恢复这两种暂态过程中会有转子过压过流的危险。文献[7]分析了故障期间故障风电场的撬棒投入对相邻风电场的影响, 指出本线路在发生故障后的撬棒投入造成相邻

**基金项目:** 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2012AA050208)

风电场的电压进一步下降,无功缺额严重,同时DFIG的转子电流峰值增大,甚至越限,可能造成撬棒的连锁动作。文献[8]指出永久性故障将会对风电场造成第二次冲击。上述电压跌落后风电场的暂态分析对相邻风电场也适用,上述的暂态过程只分析了一次跌落时的风电场动态过程,对于第二次电压跌落对风电场的影响没有涉及。文献[9]也仅是从电网安全运行的角度指出两次电压跌落时端电压两次跌落曲线会超出风机低电压穿越要求的不脱网运行范围,但两次电压跌落时风电场内的暂态过程造成连锁脱网的机理没有详细说明。

本文分析了风电场并网联络线发生永久性故障时,自动重合闸造成相邻风电场连锁脱网的过程,并分析了这一过程中第二次电压跌落会造成连锁脱网的原因。在此基础上,提出通过改变重合闸功能配置、延长重合时间等方法阻止连锁故障的发生,并对这两种方法做了仿真验证。

### 1 机理分析

风电基地风电场接线的典型方式如图1。图中风电场一、二、三分别经过A、B、C三个110 kV升压站和其送出线接入到500 kV变电站D。

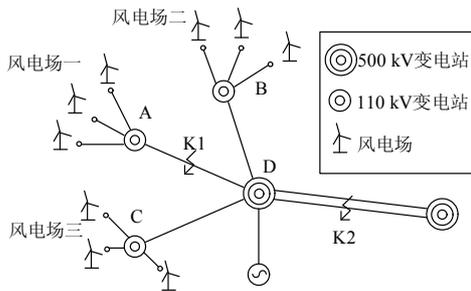


图1 风电基地接入系统的典型方式

Fig. 1 Typical way of the wind farm connected into the grid

假设风电场一的升压变电站A送出线上发生三相金属性永久性短路故障。

选取相邻的风电场二为研究对象,研究当风电场一的送出线发生永久性故障后,故障线路自动重合闸造成的系统两次电压跌落对相邻风电场的影响。

#### 1.1 相邻风电场的保护动作过程

系统电压跌落两次,风电场二的端电压也会随之跌落两次。分析风电场二的动作保护过程如下。

文献[4, 10]指出风机端电压跌落后,转子电流会在4 ms以内达到撬棒保护的定值,在转子电流达到了撬棒保护定值之后撬棒投入,即转子电流瞬时增大随后被撬棒短接。文献[4, 11]指出撬棒阻值和

投入/退出时间对LVRT效果有很大影响,并证明了撬棒在短路故障切除之前退出运行,且在撬棒退出运行的时刻尽可能接近短路故障切除时刻的情况下,对转子电流扰动影响最小。因此,为简化分析,本文假设撬棒退出和故障切除发生在同一时刻。文献[12]指出区内故障时差动保护最快在30 ms后就可以动作切除故障,考虑其他因素如文献[7]所述,可以假设送出线上发生故障到故障切除的时间为100 ms。文献[13]指出重合闸的最小时间为0.3~0.4 s。

假设所有风电场的风机都配置了撬棒,在风电场电压跌落时都能够低电压穿越,综上所述这一过程中风电场二暂态过程可以用图2的时序图来表示。

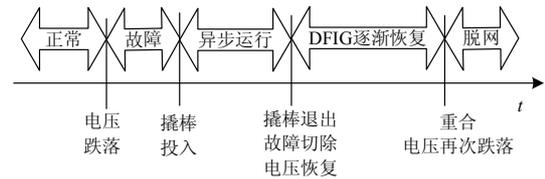


图2 相邻风电场保护动作时序

Fig. 2 Relay protection action sequence of the adjacent wind farm

#### 1.2 相邻风电场跌落的暂态过程

DFIG并网运行,DFIG机端电压会随着电网电压跌落而跌落,定子磁链却不能跟随机端电压突变。为了维持定子磁链不变,定子侧产生的电流直流分量切割旋转的转子绕组,在转子侧感生较大的电流,引起转子绕组过电压和过电流。此时如果不采取措施限制转子绕组的过电压和过电流,会损坏机组和变流器。假设风机都具有低电压穿越功能,转子绕组过流时,撬棒电路投入。

以相邻风电场为研究对象,当风电场经历上节所述的阶段,可以证明两次电压跌落对风电场的影响不同,第二次电压跌落并不是第一次的简单重复。在两次电压跌落时刻,风机定转子状态相同,都投入运行未被短接,可以在旋转坐标系中使用同样的DFIG数学模型。

$$\begin{cases} U_s = R_s I_s + D\psi_s + j\omega_1 \psi_s \\ U_r = R_r I_r + D\psi_r + j\omega_s \psi_r \\ \psi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \psi_r = L_m I_s + L_r I_r \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $U_s$ 、 $I_s$ 、 $\psi_s$ 、 $U_r$ 、 $I_r$ 、 $\psi_r$  分别代表定、转子侧电压、电流、磁链的空间矢量;  $R_s$ 、 $R_r$  分别为定、转子侧的绕组电阻;  $L_s$ 、 $L_r$ 、 $L_m$  分别为定、转子侧的自感和互感;  $\omega_1$  为同步旋转角速度;  $\omega_r$  为转子

角速度;  $\omega_s$  为转差角速度。

由于故障时刻磁链不能突变, 为了维持磁链不变, 定子侧会产生直流电流, 与此同时, 转子侧切割此非周期磁链分量, 在转子侧也感生较大的电流。感应电流的大小与磁链初始值的大小成正相关的关系。两次电压跌落时刻电流的冲击值并不相同, 从磁链的初始值的大小不同就可以证明。假设各个阶段的磁链值如图 3 所示。

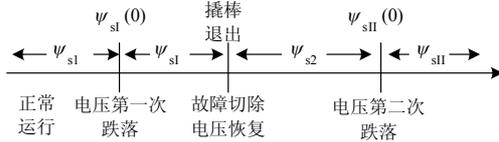


图 3 动作过程中磁链示意图

Fig. 3 Stator flux during the period

$\psi_{sl}$  是正常运行时的定子磁链的空间矢量,  $\psi_{sl}$  是电压第一次跌落到故障切除之前的定子磁链,  $\psi_{s2}$  是故障切除到第二次电压跌落之前的定子磁链,  $\psi_{sl(0)}$  是第二次电压跌落之后的定子磁链,  $\psi_{sl(0)}$ 、 $\psi_{sl(0)}$  分别是电压第一次和第二次跌落时刻的磁链值。

第一次电压跌落后, 撬棒投入到退出之前磁链值为<sup>[4]</sup>

$$\psi_{sl} = \frac{U_s}{j\omega_1} + \left( \frac{U_s}{j\omega_1} - \frac{U'_s}{j\omega_1} \right) e^{-j\omega_1 t} e^{-t/T_s} \quad (2)$$

式中,  $U'_s$  为定子跌落后的电压值。

第一次电压跌落前风电场稳定运行, 假设不计定子电阻  $R_s$ , 磁链变化率为零, 则在两相旋转坐标系下第一次故障发生时刻的磁链的初始值为<sup>[6]</sup>

$$\psi_{sl(0)} = U_s / (j\omega_1) \quad (3)$$

第二次电压跌落前, 对照图 2 风电场内撬棒都已经退出运行, 变流器投入, 风电场内部正处于恢复状态。此阶段磁链表示为图 3 中  $\psi_{s2}$ 。

分析  $\psi_{s2}$  的构成分量如下: 风机端电压恢复到正常状态, 与此正常电压  $U_s$  对应的有一个交变的强制磁链分量  $\psi_1$ ; 同时会再有一个衰减的非周期磁链分量  $\psi_2$ 。

$\psi_2$  的存在是为了维持在撬棒退出、故障恢复时刻的磁链初值不变, 这个初值是  $\psi_{sl}$  在故障切除时刻相应的值, 由式(2)可知, 会对转子绕组产生最大电流冲击的情况是故障切除、撬棒退出时刻,  $\psi_{sl}$  的周期衰减分量刚好到正最大值, 则衰减非周期分量  $\psi_2$  的初始值为  $\psi_{sl}$  两部分值的叠加。

在这种对转子最不利的条件下, 电压第二次跌

落之前的 DFIG 定子磁链  $\psi_{s2}$  可在两相旋转坐标系下表示为

$$\psi_{s2} = \psi_1 + \psi_2 \quad (4)$$

$$\psi_1 = U_s / (j\omega_1) \quad (5)$$

$$\psi_2 = \psi_{2m} e^{-j\omega_1 t} e^{-t/T_s} \quad (6)$$

则当第二次电压跌落时刻, 类似上述对转子绕组产生最大电流冲击时刻的条件,  $\psi_2$  分量到正最大值时, DFIG 定子侧磁链的初始值为

$$\psi_{sl(0)} = \psi_1 + k\psi_{2m} (k > 0) \quad (7)$$

$k\psi_{2m}$  为  $\psi_{2m}$  衰减到此时的剩余值, 对比第一次跌落时刻磁链初值  $\psi_{sl(0)}$  和第二次电压跌落时刻磁链初值  $\psi_{sl(0)}$ :

$$\psi_1 = \psi_{sl(0)} \quad (8)$$

$$\psi_{sl(0)} > \psi_{sl(0)} \quad (9)$$

即这种情况下第二次电压跌落时的磁链初始值要大于第一次的, 若重合闸时间整定的过小,  $\psi_2$  衰减量不多,  $k\psi_{2m}$  值会比较大, 则  $\psi_{sl(0)}$  的值会过大。则当转子侧切割此非周期分量的磁链时产生的过电压和过电流会比第一次电压跌落时更大, Crowbar 电阻的容量并不是无限制的, 上述分析表明, 两次电压跌落故障可能会产生转子过流和过压, 导致风机无法穿越第二次的电压跌落。

上述物理过程的分析在对称故障和非对称故障时都成立。无论送出线路配置重合闸为三相重合闸还是为单相重合闸, 相邻风电场的电压均跌落两次, 连锁脱网的现象均有可能发生。

## 2 风场重合闸配置和解决策略

### 2.1 重合闸一般配置及问题

按照《3 kV~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程》, 对于 110 kV 双端电源线路的重合闸方式选择, 原则上大电源侧选用检线路无压方式, 小电源侧选用检同期方式。当两侧都是大电源且电压等级在 110 kV 以上时, 在检定同期和检定无压重合闸装置中两侧都要装检同期和检无压继电器<sup>[14]</sup>。

若把风电场侧作为小电源侧, 系统配置自动重合闸的方式为风电场侧装设检同期装置, 电网侧装设检无压装置。永久性故障发生后, 首先由故障线路的保护切除故障点, 然后重合闸装置经过整定时限后, 系统侧的检无压装置检测到线路无压, 系统侧断路器重合, 系统再次发生永久性故障, 相邻风电场的电压再次跌落。根据第 1 节的分析, 在两次电压跌落的过程中, 转子过压和过流可能会导致相

邻风电场的连锁脱网。

## 2.2 解决策略

### 2.2.1 使用改进的自动重合闸功能配置

分析上述过程可知，装设检无压装置侧的断路器先合，但是断路器合上之后系统电压会再次跌落，故障线路的保护会再次跳开合上的断路器，装设检同期的对侧从始至终处于断开状态。

相邻风电场的低电压穿越失败而脱网的重要原因就是由于自动重合闸将永久性故障点重新带入了系统。如果避免故障点再次被带入大系统，就可以避免系统两次电压跌落，连锁脱网事故也可以避免。

实现上述目的可采取的方法是改变自动重合闸的功能配置，即将自动重合闸设置改为系统侧投入检同期装置，风电场侧投入检无压装置。具体实现如图 4 所示。

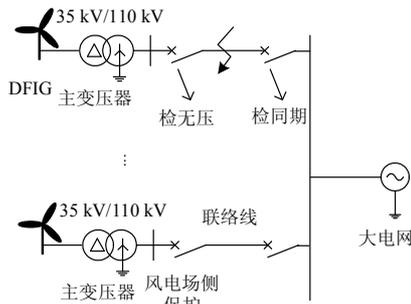


图 4 风电场自动重合闸改进功能配置图

Fig. 4 Improved functional configuration of automatic reclosing for wind farm

风电场重合闸功能配置改进效果明显，列于表 1。

表 1 风电场重合闸功能配置改进及效果对比

Table 1 Improvement of the functional configuration and the effect comparison

	风电场侧	系统侧	相邻风电场电压跌落次数
原有方案	检同期	检无压	二次
改进方案	检无压	检同期	一次

在当前脱网事故严重的情况下，改变自动重合闸的功能配置的方法对永久性故障造成的相邻风电场的脱网事故有很好的抑制作用。但是对小电源系统的冲击还需要另外考虑方法来及时补救。

需要注意，检同期的装置一直在系统侧，系统侧的断路器多次带电重合，长期的运行过程中联络线两端的断路器耗损不一致。这使得对系统侧的断路器的性能要求高于风电场侧的断路器。

### 2.2.2 延长自动重合闸的动作时间

从机理分析中可知，两次电压跌落初始磁链的

差值是  $\psi_2 = \psi_{2m} e^{-j\omega t} e^{-t/T_s}$ ，若当第二次电压跌落时， $\psi_2$  已经衰减到零，则第二次的故障就是第一次的重复，此时从风机的角度来讲第二次的冲击与第一次是相同的，有效地降低了风电场连锁脱网的危险。

## 3 仿真验证

以两个相邻风电场为例，如图 5 所示。每个风电场由 6 台 2.5 MW DFIG 组成，通过升压变压器接入 110 kV 母线，再经升压变电站接入无穷大电网。

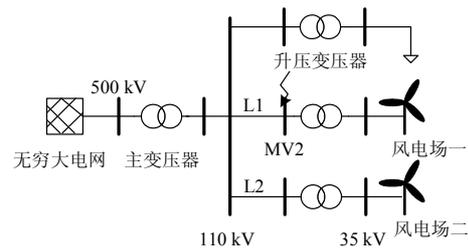
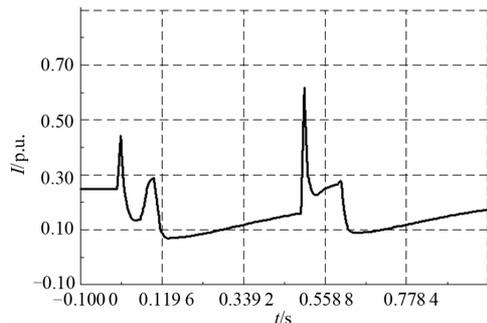


图 5 含两个相邻风电场的系统

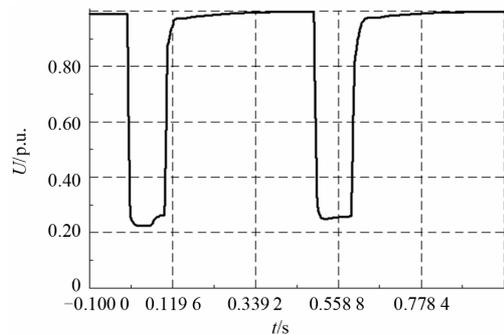
Fig. 5 A system containing two adjacent wind farms

### 3.1 采用原措施时的永久性故障

在 0 s 风电场一出口发生三相短路故障，风电场出口电压跌落到零，在 0.1 s 时，故障被切除，故障持续 100 ms。按照自动重合闸在 0.4 s 重合，风电场侧配置检同期，系统侧配置检无压的配置情况下对风电场二的端电压和电流仿真如图 6 所示。



(a) 电流



(b) 电压

图 6 系统电压两次跌落时相邻风电场电压、电流  
Fig. 6 Voltage and current of the adjacent wind farm with twice voltage drops in the grid

由图 6 可知,风电场一上出口母线故障时,风电场二受到两次电压跌落的冲击,由图 6(a)可知,风电场电压跌落两次,图 6(b)可知,风电场二在短路电流还未恢复到稳定状态又受到一次电压跌落冲击后短路电流有一个很大的峰值,这是导致风电场二连锁脱网的重要原因。

### 3.2 改变功能配置后的永久性故障

在 0 s 风电场一出口发生三相短路故障,风电场出口电压跌落到零,在 0.1 s 时,故障被切除,故障持续 100 ms。风电场侧配置检无压,系统侧配置检同期的配置情况下对风电场二的端电压和电流仿真如图 7 所示。

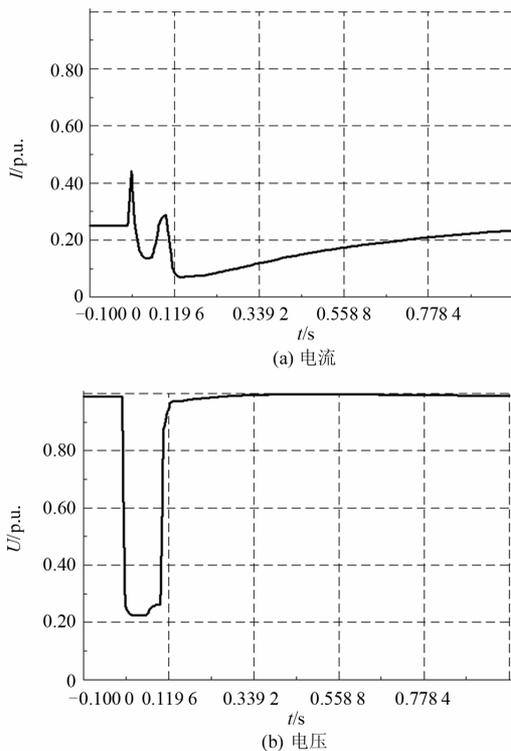


图 7 系统电压跌落一次时相邻风电场电压、电流  
Fig. 7 Voltage and current of the adjacent wind farm with once voltage drop in the grid

如图 7(a)在改变风电场自动重合闸功能配置以后,风电场二只受到一次电压跌落冲击,图 7(b)风电场电流也慢慢恢复到稳定状态,不会连锁脱网。

### 3.3 延长自动重合闸的动作时间,重合闸功能配置不变时的永久性故障

在 0 s 风电场一出口发生三相短路故障,风电场出口电压跌落到 0,在 0.1 s 时,故障被切除,故障持续 100 ms。按照自动重合闸在 0.8 s 后重合,重合闸功能配置不变的情况下对风电场二的端电压和电流仿真如图 8 所示。

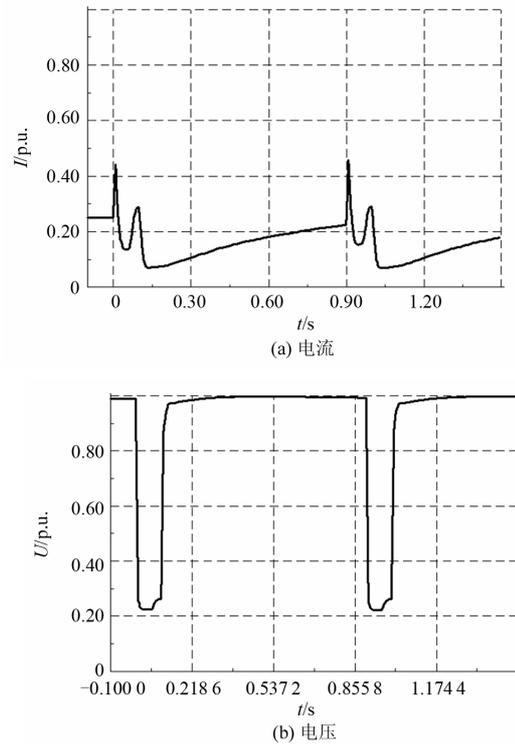


图 8 延长重合时间后相邻风电场电压、电流  
Fig. 8 Voltage and current of the adjacent wind farm after the extend of reclosing time

由图 8(a)可知,风电场电压跌落两次,由图 8(b)可知,风电场二的短路电流在恢复到稳定状态后,风电场二又发生了一次电压跌落,此时短路电流与第一次相同,与第一次时对风机的影响是相同的,同样能够穿越第二次的电压跌落,抑制了相邻风电场的连锁脱网。

## 4 总结

(1) 发生永久性故障时自动重合闸会引发相邻风电场的连锁脱网。若自动重合闸造成相邻风电场的电压两次跌落,第二次故障并不是第一次的简单重复,此时故障的磁链初始值有可能会远大于第一次的磁链初始值,造成第二次电压跌落时冲击电流过大引起风电场的连锁脱网。

(2) 改变自动重合闸的功能配置能够将两次电压跌落减少到一次,从而制止了此类故障导致的连锁脱网。延长重合闸的投入时间则是能够减小第二次跌落的电流,同样也能起到抑制连锁脱网的效果。

## 参考文献

- [1] 李辉,赵斌,史旭阳,等. 含不同风电机组的风电场暂态运行特性仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011,

- 39(13): 1-7.
- LI Hui, ZHAO Bin, SHI Xuyang, et al. Simulation study on the transient operational performances of a wind farm including different wind turbine generator systems[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 1-7.
- [2] 刘其辉, 谢孟丽. 双馈式变速恒频风力发电机的空载及负载并网策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 60-67, 78.
- LIU Qihui, XIE Mengli. Strategies of grid-connection of doubly-fed variable-speed constant-frequency wind power generator with no-load and with load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 60-67, 78.
- [3] 王毅, 付媛, 苏小晴, 等. 基于 VSC-HVDC 联网的风电场故障穿越控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 150-159.
- WANG Yi, FU Yuan, SU Xiaoqing, et al. Fault ride-through control strategy of wind farm integrated with VSC-HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 150-159.
- [4] 徐殿国, 王伟, 陈宁. 基于撬棒保护的双馈电机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.
- [5] 撒奥洋, 张哲, 尹项根, 等. 双馈风力发电系统故障特性及保护方案构建[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 233-239.
- HAN Aoyang, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Research on fault characteristic an grid connecting-point protection scheme for wind power generation with doubly-fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 233-238.
- [6] SULLA F, SVENSSON J, SAMUELSSON O. Symmetrical and unsymmetrical short-circuit current of squirrel-cage and doubly-fed induction generators[J]. Electric Power Systems Research, 2011(81): 1610-1618.
- [7] 张曼, 姜惠兰. 协调相邻风电场之间低电压穿越的综合保护方案[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1983-1989.
- ZHANG Man, JIANG Huilan. A comprehensive protection scheme for the LVRT coordination between neighboring wind farm[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1983-1989.
- [8] 何世恩, 董新洲. 大规模风电机组脱网原因分析及对策[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 131-137.
- HE Shien, DONG Xinzhou. Integration of wind power into Gansu grid and its operation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 131-137.
- [9] 郑涛, 魏占朋, 李娟, 等. 计及撬棒保护的双馈风电机组不对称短路电流特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 7-12.
- ZHENG Tao, WEI Zhanpeng, LI Juan, et al. Unsymmetrical short circuit current analysis of doubly fed induction generators with crowbar protection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 7-12.
- [10] 穆钢, 王健, 严干贵, 等. 双馈型风电机组近满载工况下连锁脱网事件分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 35-40.
- MU Gang, WANG Jian, YAN Gangui, et al. Cascading trip-off of double-fed induction generator from grid at near full-load condition in a wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 35-40.
- [11] 朱晓东, 石磊, 陈宁, 等. 考虑 Crowbar 阻值和退出时间的双馈风电机组低电压穿越[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18): 84-89.
- ZHU Xiaodong, SHI Lei, CHEN Ning, et al. An analysis on low voltage ride through of wind turbine driven doubly fed induction generator with different resistances and quitting time of Crowbar[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 34(18): 84-89.
- [12] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [13] 张保会. 电力系统继电保护[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [14] 宋少群, 付超, 张兰英, 等. 风电场并联网络线重合闸的合理配合方式[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(20): 77-79.
- SONG Shaoqun, FU Chao, ZHANG Lanying, et al. Proper coordination mode of grid connected wind farm tie line reclosure[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(20): 77-79.

收稿日期: 2014-05-21; 修回日期: 2014-08-29

作者简介:

刘欣(1987-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护;

郑涛(1975-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为新能源电力系统保护与控制; E-mail: zhengtao\_sf@126.com

黄少锋(1958-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统微机保护。

(编辑 姜新丽)