风场及其送出线保护配置与整定研究

毕天姝[1]，李彦宾[1]，马丽红[2]，刘大鹏[2]，崔运海[2]，王忠义[2]

（1.华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室，北京 102206；2.吉林省电力公司，吉林 长春 130021）

摘要：现有风场及其送出线保护多从保障风机或各元件自身安全角度进行简单配置整定，可能存在保护范围不明确，选择性和灵敏性未进行系统校验等问题。结合风电故障特征，给出了风电场提供故障电流最大值的简化计算公式，提出了兼顾风机安全与系统可靠性的风场及送出线保护配置与整定原则。并以吉林某风场为例，尝试给出了风机、箱变、集电线、母线、主变在内的风场及其送出线保护的配置原则，定量化校验了集电线路电流保护配置与整定的合理性。

关键词：风场；送出线；继电保护；配置与整定

Configuration and setting of relay protection for wind farm and its outgoing line

BI Tian-shu[1], LI Yan-bin[1], MA Li-hong[2], LIU Da-peng[2], CUI Yun-hai[2], WANG Zhong-yi[2]

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Jilin Electric Power Company Limited, Changchun 130021, China)

Abstract: The relay protections of the wind farm and its outgoing line are set for the security of wind generators or the protected components. The protection zones might be unclear. Moreover, the selectivity and the sensitivity of the protections have not been examined systematically. Combined with wind power fault characteristics, the maximum fault current provided by wind generators is calculated. The configuration and setting of relay protection for wind farm and its outgoing line is proposed with the compromise between the security of wind generators and the reliability of the whole system. Furthermore, a typical wind farm in Jilin province is taken as an example to do the setting and sensitivity calculations. The relay settings of the wind generator, step-up transformer, collector line, bus, main transformer and outgoing line are discussed in detail. The overcurrent protection of collector line is set and the selectivity and sensitivity of the protection is analyzed as well.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA050208), National Natural Science Foundation of China (No. 51222703), and 111 Project (No. B08013).

Key words: wind farm; outgoing line; relay protection; configuration and setting

中图分类号： TM77 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2014)05-0045-06

0 引言

随着风电大规模集中接入电力系统，风场及其送出线保护配置与整定问题逐渐引起人们的关注。如果场内各元件及送出线保护仍简单把风场看成负荷进行配置和整定，当电网发生故障时风机提供的短路电流可能会导致场内集电线路保护误动，致使风机大量脱网并诱发电网连锁故障。因此，包含集电线在内的风场各元件及送出线保护配置与整定需要深入研究。

近年来，国内外学者对风场及其送出线的继电保护进行了大量研究，取得了一系列的成果。文献[1]仿真分析了双馈机故障电磁暂态特性，指出电流差动保护的灵敏性和选相元件的动作可靠性将受到影响。文献[2]仿真分析了风场集电系统不同位置发生不同类型故障时，风机保护、箱变熔断器保护和集电线电流保护的动作特性。文献[3]分析了风电出力、阻抗特性等因素对送出线距离保护的影响，提出了基于风场侧信息的自适应距离保护。文献[4]综述了风电的电磁暂态特性以及风电接入后集电线路保护和送出线保护面临的适应性问题。上述文献从风机电磁暂态特性出发分析了不同原理保护的适应性，但未涉及风场内各元件保护配置与整定问题。文献[5]描述了酒泉风电基地风场及送出线保护配

基金项目：国家高技术研究发展计划资助项目(863 项目)(2012AA050208)；国家自然科学基金项目（51222703）；高等学校学科创新引智计划（B08013）

置的现状，定性分析了保护的适应性问题，但没有提及各元件保护定值和动作时间的整定与配合。文献[6]分析了场内各元件及送出线保护的动作时间与风机低电压穿越特性的配合关系，提出了风机具备低电压穿越能力后集电线路、主变和送出线保护需要注意的问题，但没有具体分析各元件保护定值的整定原则与配合关系。文献[7-8]介绍了风场及送出线保护的配置，定性提到各元件保护之间应该相互配合以保障选择性动作，但没有具体提出各元件保护的整定原则。

本文系统分析并提出了风场内各元件及其送出线保护的配置与整定原则，并以吉林某风场为例给出了具体计算过程，着重校验了集电线路电流保护配置与整定原则的合理性。

1 吉林某风场概述

本文以吉林某典型风场为例，阐述风场及送出线保护配置和整定问题。该风场容量为 49.5 MW，包含 33 台 1.5 MW 永磁型风机，风机机端电压为 690 V。该风场通过 3 条集电线汇集到 35 kV 低压母线（每条集电线带 11 台风机），经风场主变将电压升高到 220 kV。风场一次主接线如图 1 所示。

依据连接风场个数不同，送出线可分为专线送出线和多点 T 接送出线。专线送出线仅连接一个风电场，多点 T 接送出线连接了多个风电场。

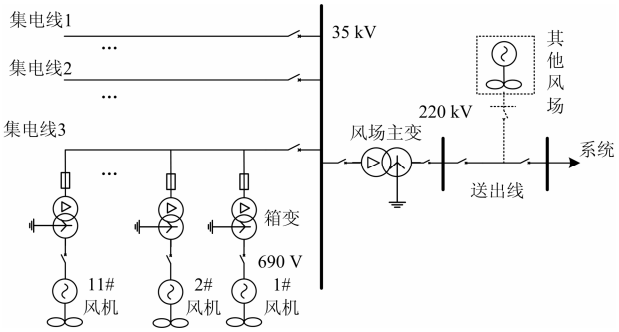


图 1 吉林某风场主接线示意图

Fig. 1 Single line diagram of a typical wind farm in Jilin

2 风机和箱变保护的配置与整定

风机保护可分为自身保护和涉网保护，前者包括温升保护、振动超限保护等，后者包括电压越限保护、频率越限保护等。风机自身保护依据风机器件温度、振动等方面的耐受能力来整定；涉网保护一般仅考虑风机自身安全，依据风机器件的耐压通流能力来整定，没有考虑风机涉网保护动作对电网的影响。

随着风电接入比例快速升高及大面积风机脱网事故的频繁发生，电网越来越重视系统发生故障后风场的行为及其对电网安全的影响，并具体给出了风机在电力系统不同电压和频率范围内的运行规定[9]。一般来说，风机涉网保护定值与系统运行规定应相互配合。当风机涉网保护定值不能满足系统安全运行需求时，需要研发先进风机制造与控制技术，提高风机运行限值；否则应在涉网保护动作定值范围内，保障风机安全的前提下，满足系统运行规定，保障全系统的安全。二者若不协调时，就有可能导致风机大面积脱网事故，甚至引发系统连锁故障。

图 1 所示风场某型号风机高、低电压定值分别为 1.1 p.u.、0.9 p.u.，动作时间均为 0.2 s；当低电压穿越功能投入时，设定另一低电压定值 0.2 p.u.，原低电压定值仍为 0.9 p.u.，但动作时间改为 3s。该风机的高、低频率定值分别为 51 Hz、49 Hz，动作时间均为 0.1 s。运行规定[9]要求系统频率处于 49.5~50.2 Hz之间时风机正常运行，当频率低于49.5 Hz 且处于 48~49.5 Hz 之间时风场至少运行 30 min，当频率高于 50.2 Hz 时风场至少运行 5 min。由上述定值对比可知，频率越限保护与系统 50.2 Hz 以上频率范围和 49.5 Hz 以下频率范围的运行要求不相协调，电网故障时可能会导致风机涉网保护先动作，造成风机大量脱网并引发系统连锁故障。

箱变一般在高压侧配置熔断器作为本体及低压侧短路故障保护。熔断器熔断电流的选择应遵循以下两个原则：当箱变本体及低压侧发生故障时，熔断器应可靠快速熔断；当区外故障以及流过最大负荷电流、励磁涌流时，熔断器应可靠不熔断。

3 集电线路保护的配置与整定

集电线路一般配置电流保护作为相间短路故障保护。本节尝试提出风机提供最大短路电流的简化计算方法，并通过整定计算，定量校验所提集电线电流保护配置与整定原则的合理性。

3.1 风机提供最大短路电流简化计算方法

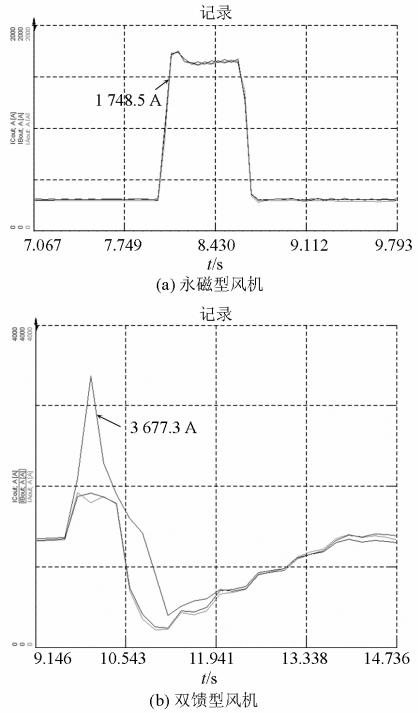
由于风机及并网电力电子设备尚没有成熟的故障计算模型，很难定量计算风机提供的短路电流，而整定、校验风场的电流保护又需要进行短路电流计算，所以尝试从传统同步发电机短路电流的计算方法出发，近似简化计算风机能够提供的最大短路电流。

由同步发电机短路电流的计算公式可知：

$$X_{\Sigma}=\frac{1}{I_{\mathrm{d}}} \tag{1}$$

若由现场录波或理论仿真数据能够已知风机提供的最大短路电流，则由式（1）可求得对应的风机等值电抗。借用传统故障计算模型，代入计算得到的风机等值电抗，就可以近似简化计算集电线路上流过的最大短路电流，用于定量化整定、校验集电线电流保护。该方法的优点是能够给出风机提供的最大短路电流，计算最严重情况下具体量化的保护整定与校验结果。但风机实际短路电流受控制策略等多种因素影响，其波形与按本方法求得的短路电流波形不相符，故短路电流计算结果不能用于保护动作行为分析。

1.5 MW 风机的额定电流为 1 255 A，图 2 为 1.5 MW 永磁型和双馈型风机低电压穿越试验波形，其最大短路电流分别为 1 748.5 A 和 3 364.3 A，达到额定电流的 1.40 倍和 2.93 倍。图 3 为 1.5 MW 永磁型和双馈型风机 RTDS 仿真试验波形，其最大短路电流分别为 2 774.1 A 和 4 771.3 A，达到额定电流的 1.56 倍和 2.68 倍。再结合风场短路试验数据和实际故障录波数据，永磁型和双馈型风机能够提供的最大短路电流可取为额定电流的 1.5 倍和 3 倍。当基准容量和基准电压分别取 100 MVA、35 kV 时，由式（1）可求得 1.5 MW 永磁型和双馈型风机的电抗标幺值分别为 44.4 和 22.2。

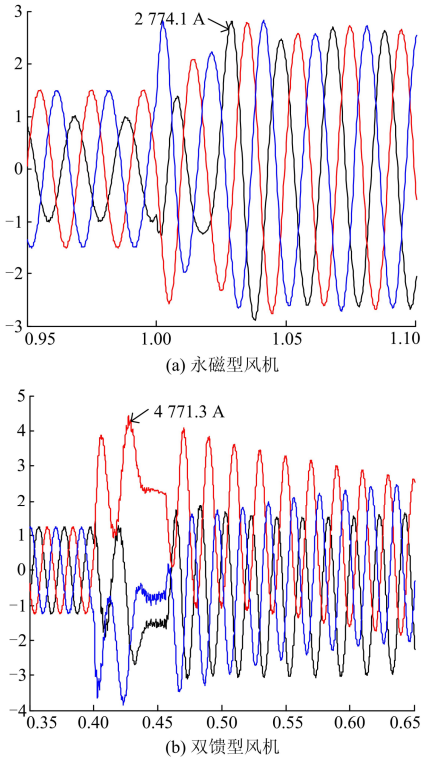


(a) 永磁型风机

(b) 双馈型风机

图 2　1.5 MW 风机低穿试验时短路电流有效值波形

Fig. 2 1.5 MW WTG's RMS fault current during LVRT test



(a) 永磁型风机

(b) 双馈型风机

图 3 1.5 MW 风机 RTDS 仿真试验时短路电流波形

Fig. 3 1.5　MW WTG's fault current during RTDS test

根据计算得到的永磁型和双馈型风机电抗标幺值，假设 11 台风机等距离分布，则形成图 1 所示永磁型风场的等值阻抗图，如图 4 所示（括号内数值对应双馈型风场的等值阻抗，其网架结构与永磁型风场一样，仅将永磁型风机替换双馈型风机）。箱变、集电线、风场主变的阻抗和系统大、小方式下的等值阻抗均为实际数据。

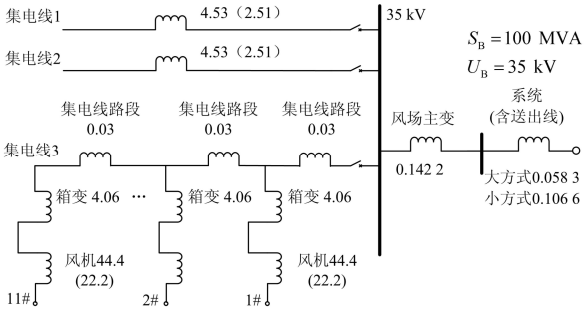


图 4　含风场的系统阻抗图

Fig. 4 Impedance diagram of a typical wind farm

3.2　电流保护配置与整定

集电线路电流速断保护共有三种整定方式，即：

A 方式：躲首个箱变低压侧故障的最大短路电流；

B 方式：对集电线末端两相短路故障有灵敏度；

C 方式：躲集电线末端故障的最大短路电流。

A 方式集电线路电流保护按不伸出首个箱变的保护范围整定，基本保证了集电线路保护和箱变保护之间的选择性，但需考虑线路保护和箱变保护之间的时间配合关系，以确保保护的选择性。A 方式能否保护集电线全长与箱变阻抗有关，若计算后对线路末端两相短路故障有灵敏度，那么加上一段后备保护，只需配置两段式电流保护，否则需配置三段式电流保护。

B 方式集电线路电流保护按可靠保护本线路全长整定，灵敏性好。由于速断保护能够保护线路全长，故加上后备段，只需配置两段式电流保护。但是 B 方式的选择性较差，需重点考虑它和箱变保护之间的配合问题。

C 方式集电线路电流保护按最严重故障情况下瞬时动作仍能确保保护选择性整定，选择性最好。但是它不能保护线路全长，灵敏性最差，应配置限时电流速断保护，再加上后备段，需配置三段式电流保护。

为对比分析三种整定方式的特点，分别对永磁型和双馈型风场集电线电流速断保护定值进行计算，整定结果如表 1 所示。

表 1 两类风场集电线电流速断保护整定结果

Table 1 Setting results of instantaneous overcurrent protection of PMSG and DFIG wind farm

整定方式	定值/A		保护范围	
	永磁型	双馈型	永磁型	双馈型
A	482.0	469.9	伸入各个箱变 54.8%~63.5%	伸入各个箱变 53.4%~63.5%
B	1 682.7	1 705.6	伸入各个箱变 6.4%~14.0%	伸入各个箱变 5.9%~13.5%
C	4 087.8	4 112.5	伸入前 4 个箱变 0.1%~2.2%	伸入前 4 个箱变 0.4%~2.5%

从整定结果可知，对于双馈型和永磁型风场，A 方式下电流速断保护定值小于 B 方式下电流速断保护定值，电流速断保护按 A 方式与 B 方式整定时对集电线路故障均能全线速动，均只需配两段式电流保护。但是当箱变内部故障时速断保护均有误动的可能，因为集电线路速断保护范围均伸入到各箱变中，且 A 方式下伸入各箱变的保护范围远大于 B 方式下伸入各箱变的保护范围。C 方式按照躲集电线路末端最大三相短路电流整定，说明 C 方式下的定值对线路末端两相短路故障没有灵敏度，电流速断保护按 C 方式整定时不具备全线速动能力，需配置三段式电流保护。同时 C 方式速断保护的保护范围仅伸入前 4 个箱变且伸入范围小于 B 方式，所以当箱变故障时 C 方式下电流速断保护误动的可能性最小，但仍存在误动的可能。由上述分析可知，B 方式最好地兼顾了电流速断保护的选择性和灵敏性，为推荐的整定方式。

然而，B 方式下电流速断保护的保护范围仍伸入各个箱变，若要实现与箱变熔断器的完全配合，电流速断保护需增加小延时，躲过箱变内部故障时熔断器的熔断时间。但是集电线电流速断保护增加小延时后，可能造成本集电线箱变内部故障时，在熔断器熔断之前，相邻集电线路的风机感受到低电压而脱网。为验证这种可能性是否存在，进行下面计算分析。

由图 1 和图 4 可知，由于线路阻抗非常小，所以在首个箱变高压侧发生故障时与在集电线出口发生短路故障时情况非常相近。为计算方便，假设图 4 中集电线 1 出口发生三相短路故障，则由图中各阻抗值通过短路计算可得 11 台风机机端残压最值如表 2 所示。由于是出口故障，认为其他两条非故障集电线上各风机最值与表 2 结论相同。

表 2 11 台风机机端残压最值

Table 2 Maximum and minimum terminal voltage of 11 WTGs

风场类型	最小值/p.u.	最大值/p.u.
永磁型	0.089 8	0.120 0
双馈型	0.164 7	0.214 6

从表 2 可知，永磁型风场 3 条集电线路上风机机端残压最大值为 0.12 p.u.、最小值为 0.089 8 p.u.，而双馈型分别为 0.214 6 p.u.、0.164 7 p.u.。若风机低电压保护一旦检测到机端电压小于 0.2 p.u.即瞬时动作，那么电流速断保护增加小延时动作会导致永磁型风场 2 条非故障集电线上所有风机均脱网，导致双馈型风场 2 条非故障集电线路上部分风机脱网。从电网角度来说，电流速断保护延时动作导致风机脱网数量增加，从而影响其稳定运行。因此电流速断保护不建议增加延时。

过电流保护作为集电线路的近后备保护和箱变的远后备保护，定值按照集电线路末端箱变低压侧故障有灵敏度整定，计算结果如表 3 所示。考虑风机对扰动的敏感性，过电流保护的动作时间在考虑与熔断器最长熔断时间配合的前提下应尽可能小。

表 3 集电线过电流保护定值

Table 3 Setting values of definite-time overcurrent protection

风场类型	定值/A
永磁型	240.3
双馈型	228.8

3.3 电流保护的性能

影响集电线路电流保护性能的因素有三个：箱变的励磁涌流、正常运行时风机提供的最大负荷电流、相邻集电线故障时风机提供的短路电流。集电线路流过上述三种电流时，其电流保护不应该误动。

与 1.5 MW 风机配套的箱变容量为 1.6 MVA，额定电流为 26.4 A，其最大励磁涌流为 10~12 倍的额定电流，从而图 1 中连接了 11 台风机的集电线可能流过的最大励磁涌流为 2 904~3 484.8 A。考虑到 11 台箱变并联运行，还可能出现衰减时间很长的和应涌流，会导致延时躲励磁涌流的方法失效。若电流速断保护定值躲如此大的励磁涌流，则将失去保护范围；而且 11 台风机同时出现最大励磁涌流的可能性很小，因此建议速断电流保护定值不考虑躲励磁涌流。

受风机自身控制策略的限制，不管是永磁型还是双馈型风机，正常运行时能够提供的最大负荷电流均为额定电流，从而图 1 中连接了 11 台风机的集电线上可能流过的最大负荷电流为 272 A。与表 1 和表 3 数据对比可知，对于永磁型和双馈型风场，最大负荷电流均小于集电线电流速断保护定值，但均大于过电流保护定值。而负荷电流大小与集电线路连接的风机台数有关。现场应依据风机台数计算实际负荷电流大小，若其大于过电流保护定值，可考虑配置电压闭锁元件。

集电线路出口发生三相短路故障时非故障集电线路上流过的反向短路电流最大，由图 4 中各元件的阻抗值，通过短路计算得到永磁型和双馈型风场集电线的最大反向短路电流分别为 362.6 A 和 657.2 A。与表 1 和表 3 数据对比可知，对于永磁型和双馈型风场，最大反向短路电流均小于集电线电流速断保护定值，但均大于过电流保护定值。同样，反向短路电流也与连接的风机台数有关，当实际反向短路电流大于过电流保护定值时，可考虑配置方向元件。

4　主变、母线及送出线保护的配置和整定

4.1 主变和母线保护的配置与整定

220 kV 及以上电压等级的风场主变保护均按双重化配置。主保护配置纵联电流差动保护，其定值按躲过区外短路产生的不平衡电流整定，动作时间为 0 s。

接地故障后备保护的配置与主变中性点接地方式有关。当中性点直接接地时，配置两段式零序电流保护，I 段定值与送出线零序电流保护 I 段或 II 段配合，II 段定值与送出线零序电流保护的后备段配合；当中性点经间隙接地时，配置反应间隙放电的零序电流保护和零序过电压保护，零序电流保护定值对间隙击穿时有足够灵敏度，动作时间 0.3~0.5 s，零序过电压保护定值可整定为 180 V，动作时间 0.5 s[10]。

相间短路后备保护配置时应将风场看成电源，按主变两侧均有电源的原则来配置。如图 5 所示为从实际故障录波数据得到的两次外部故障时风场的短路电流有效值波形。从图 5（a）可以看出，送出线以外电网故障时，风场提供的短路电流均达到 500 A 以上且直到故障切除后才减小，若风场外部故障不能及时切除，可以推测风场提供的短路电流将以 500 A 以上大小持续下去，图 5（b）送出线故障时风场提供的短路电流与上述类似。两个风场主变的容量均为 100 MVA，额定电流为 260 A，考虑主变过电流保护定值取 1.3 倍的额定电流，即为 338 A，而两次风场外部故障中风场提供短路电流达到 500 A 以上，保障主变过电流保护可靠启动并在延时之后动作。

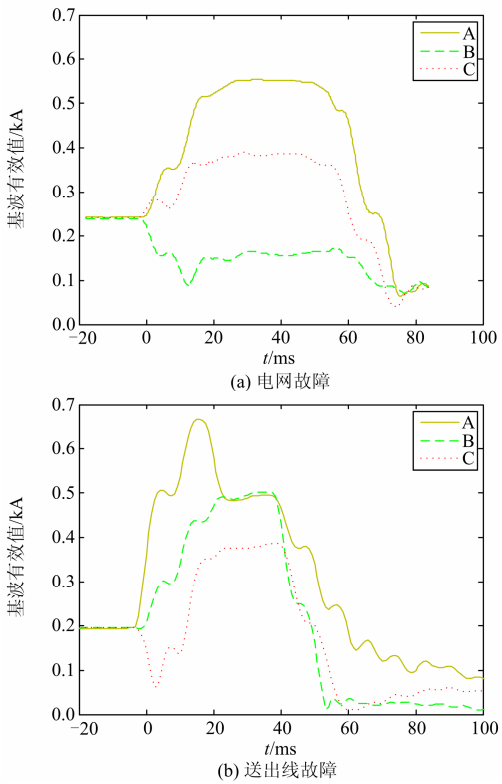


图 5 外部故障时风场提供的短路电流有效值波形

Fig. 5 WF's RMS fault current during external faults

两侧有电源的主变相间短路后备保护宜两侧均配置复压闭锁过电流保护，电流定值躲过各侧额定电流，时限躲过两侧出线相间短路保护的最长动作

时间。为降低切除低压母线故障的动作时间，可在主变低压侧增配一段方向指向低压母线的过电流保护，定值与集电线电流保护配合并对低压母线故障有足够灵敏度。

高压侧母线保护的配置与整定应符合规程[10-11]要求。考虑快速切除母线故障以防止风机大规模脱网，主变低压侧汇集母线配置一套母差保护，并按规程[12]进行整定。

4.2 送出线保护的配置与整定

从图 5 可知，当送出线及电网发生故障时，风场能够持续提供较大的短路电流。送出线的保护配置应按线路两侧均有电源考虑，并在两侧均配置完善的保护。但现有保护原理尚不能满足送出线风场侧保护的需求，需要研究风场侧保护新原理、多端纵联保护等。

5 结论

本文给出了风电场提供故障电流最大值的简化计算公式，提出了兼顾风机安全与系统可靠性的风场及送出线保护配置与整定原则。并以吉林某风场为例，尝试给出了风机、箱变、集电线、母线、主变在内的风场及其送出线保护的配置原则，即为实现对电网的支撑，提出了风机涉网保护在保证自身安全的前提下，应与系统的运行规定相协调。集电线路应配置两段式过电流保护，电流速断保护定值按对集电线路末端两相短路故障有灵敏度整定，动作时间 0s；过电流保护定值按末个箱变低压侧故障有灵敏度整定，动作时间在考虑与熔断器最长熔断时间配合的前提下应尽可能小。现场依据实际负荷电流和反向短路电流的情况，若大于电流保护定值，可分别考虑配置电压闭锁元件和方向元件。考虑风电的电源特性，提出主变相间短路后备保护配置和送出线保护配置均应按两侧有电源考虑。

参考文献

[1] CAI Rong, SU Bin. Study on protection of large-scale wind power integration[C] // 2011 International Conference on Advanced Power System Automation and Protection, 2011.

[2] KAWADY T A, MANSOUR N M, TAALAB A I. Performance evaluation of conventional protection systems for wind farms[C] // 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2008.

[3] PRADHAN A K, JOOS G. Adaptive distance relay setting for lines connecting wind farms[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(1): 206-213.

[4] 焦在强. 大规模风电接入的继电保护问题综述[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 195-201.
JIAO Zai-qiang. A survey on relay protection for grid-connection of large-scale wind farm[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 195-201.

[5] 何世恩, 姚旭, 徐善飞. 大规模风电接入对继电保护的影响与对策[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 21-27.
HE Shi-en, YAO Xu, XU Shan-fei. Impacts of large-scale wind power integration on relay protection and countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 21-27.

[6] 张保会, 王进, 李光辉, 等. 具有低电压穿越能力的风电接入电力系统继电保护的配合[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 1-6.
ZHANG Bao-hui, WANG Jin, LI Guang-hui, et al. Cooperation of relay protection for grid-connected wind power with low-voltage ride-through capability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(3): 1-6.

[7] HORNAK D, CHAU N H J. Green power-wind generated protection and control considerations[C] // 57th Annual Conference for Protective Relay Engineers, 2004.

[8] IEEE PES Wind Plant Collector System Design Working Group. Wind plant collector system fault protection and coordination[C] // 2010 IEEE /PES Transmission and Distribution Conference & Exposition, 2010.

[9] GB/T 19963-2011 风电场接入电力系统技术规定[S].
GB/T 19963-2011 technical rule for connecting wind farm to power system[S].

[10] DL/T 559-2007 220 kV~750 kV 电网继电保护装置运行整定规程[S].
DL/T 559-2007 setting guide for 220 kV~750 kV power system protection equipment[S].

[11] GB/T 14258-2006 继电保护和安全自动装置技术规程[S].
GB/T 14258-2006 technical code for relaying protection and security automatic equipment[S].

[12] DL/T 584-2007 3 kV~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程[S].
DL/T 584-2007 setting guide for 3 kV~110 kV power system protection equipment[S].

收稿日期：2013-11-11

作者简介：

毕天姝（1973-），女，教授，博士生导师，主要研究方向为电力系统保护与控制、WAMS 应用研究等；E-mail: tsbi@ncepu.edu.cn

李彦宾（1989-），男，博士研究生，主要研究方向为新能源电力系统保护与控制。