

DOI: 10.7667/PSPC170670

海上风电场故障特性及保护配合的研究

卢智雪, 刘天琪, 丁媛媛

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 一般海上风电场所选用设备和线路与陆上风电场有所不同, 有必要对海上风电场的继电保护配置进行专门研究。利用 ETAP 仿真软件对风电场内元件及送出线故障时各元件的短路电流和机端电压跌落情况进行分析, 并研究海上风电场本身特征和故障特性。在多个风电场并网时, 风机会提供不容忽视的短路电流, 短路点成为双侧电源供电。为此, 考虑其特性及风机低电压穿越能力, 提出海上风电场各元件和线路的保护配置方案及其整定原则。并对 ETAP 软件上搭建的某海上风电场模型进行保护及动作时序配合的仿真, 验证了所提保护配置方案及动作时序的正确性和合理性。

关键词: 海上风电场; 故障特性; 继电保护; 配合方案; 整定原则

Study on fault characteristics and protection cooperation of the offshore wind farm

LU Zhixue, LIU Tianqi, DING Yuanyuan

(School of Electrical Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In general, the equipment and lines used in offshore wind farms are different from those of onshore wind farms. Therefore, it is necessary to study the configuration of relay protection for offshore wind farms. This paper analyzes the short circuit current and terminal voltage drop with the fault of the components in the wind power field and the outgoing line by the simulation software of ETAP, and studies the characteristics and fault characteristics of the offshore wind farm. When multiple wind farms are connected to the grid, the wind turbines will provide short-circuit current that cannot be ignored and it will be a bilateral power supply for the short-circuit point. Therefore, considering the characteristics and the low-voltage ride-through capability of the wind turbine, it proposes the protection scheme and the setting principle of the components and lines of the offshore wind farm. The cooperation of the protection program and action sequence of the offshore wind farm model built on the software ETAP is simulated, and the correctness and rationality of the proposed protection scheme and action sequence are verified.

Key words: offshore wind farm; fault characteristics; relay protection; cooperation program; setting principle

0 引言

风力发电技术已较为成熟, 但人们研究对象主要集中在陆上风电。随着风电容量的不断增加, 陆上风电受到许多限制, 海上风电得以开发和研究。海上风电与陆上风电相比, 风力资源更丰富, 风速、风向更稳定, 且不占用土地资源, 规模更大^[1-2]。但很多研究表明, 大规模风电接入电网, 风机会提供较大的短路电流, 使系统短路元件成为双侧电源供电, 这对继电保护产生很大影响^[3-4]。风机提供的短路电流受机组类型、风况、短路类型等影响。为了避免因小故障而造成大面积切机, 风机需具有低电压穿越能力, 继电保护要与其相配合。海上风电的

输电线路、并网方式与陆上风电有所区别: 海上风电场输电常采用海缆; 并网方式主要有高压交流和高压直流输电^[5], 根据不同的传输距离选择。因此, 需要研究海上风电场的故障特性, 为准确配置继电保护提供依据。在继电保护配置和整定时, 必须考虑海上风电的特殊性, 将场内元件和线路均看作双侧电源供电, 考虑各元件保护之间和低电压穿越与各种保护之间的配合, 保证各保护可靠动作, 避免造成大面积停电。

目前, 国内外已有一些关于海上风电场和风电场继电保护的研究。文献[6]对目前海上电气系统进行分析, 指出海上风电场保护要求设备有更高的远程监控能力, 且应尽量实现故障定位与恢复, 提出

箱变与海缆的保护需特殊考虑, 但没有提及时间上的配合。文献[7]研究了风电场中的电网保护与保护之间的协调, 举例讨论包括风电场内的故障情况, 但是没有提出海上风电场具体的继电保护方案。文献[8-9]提出了具有低压穿越能力的风电场各元件的继电保护配置整定方法, 但只对集电线保护进行了验证分析, 没有分析各部分保护之间的配合。

继电保护对电力系统稳定十分重要^[10]。在系统分析海上风电场故障特性的基础上, 主要研究海上风电场继电保护的配合。从海上风电场的四个组成部分进行研究, 对其故障特征进行归纳分析, 指出在配置保护时需要考虑的因素, 提出具有低压穿越能力且动作时限均有配合的继电保护方案; 并在 ETAP 软件平台上搭建相应模型, 仿真验证了所提

方案的正确性。

1 海上风电场故障特性与低电压穿越

1.1 海上风电场短路故障特性分析

海上风电场包括直流组网方式和交流组网方式, 这里主要研究交流组网方式下的故障特性。海上风电场主要由风电机组、集电系统、海上升压站、海上高压电缆等四部分组成^[11]。

某海上风电场接线如图 1 所示, 共有 6 个相同的风电场并网, 每个电场装机容量 300 MW, 单个风机出口电压 0.69 kV, 集电系统电压等级为 35 kV, 并网电压等级为 220 kV, 集电线和送出线均为海底电缆。

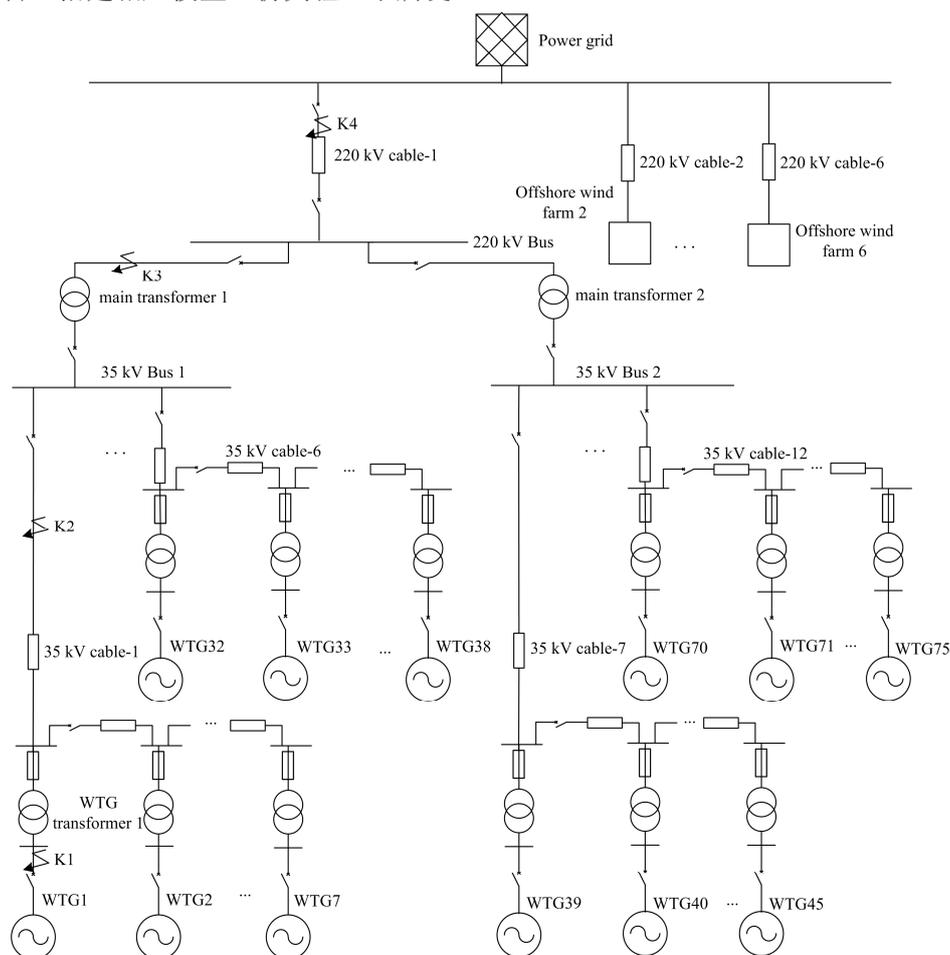


图 1 某海上风电场接线图

Fig. 1 Wiring diagram of an offshore wind farm

海上风机在高湿度、强腐蚀的环境下运行, 加剧了其定、转子绕组绝缘能力降低, 增加了风机故障率^[12]。海上风机通常采用永磁直驱风机(Direct-driven wind turbine with Permanent Magnet Synchronous

generators, D-PMSG)和双馈风力发电机(Double-fed Induction Generator, DFIG), 两种风机都能在功率因素为0.95~1下运行^[13], 功率因素越大, 提供的短路电流越大。D-PMSG的变换器通常带有限流环节,

当其出口发生三相短路时，电压跌落至零，短路电流瞬间增大并快速稳定于约为额定电流的1.3~1.4倍^[14]；电网故障，风机的限流和电压跌落造成的机、网侧变换器功率失衡，不利于风机低电压穿越。可以考虑对变换器进行控制，提高其低电压穿越能力。DFIG故障，机端电压降为零，定子电流瞬时倍增，随后逐渐衰减，最大短路电流通常能达到额定电流的6倍以上；变流器在发生故障时会继续工作，为维持转子励磁电压不变，转子自身磁链产生电流，同时定子切割转子绕组使转子感应出较大的电流^[15]，所以必须增加转子保护并实现风机低电压穿越。在系统发生短路故障时，D-PMSG的电压跌落程度往往比DFIG的电压跌落程度深，D-PMSG电压会跌落至0.1 p.u.以下，所以在配置风机低压保护时要充分考虑这个情况，将低压保护最小值按最低可能值设置。

海上风电场集电系统包括集电线和汇集母线。某条集电线短路时，流过它的短路电流较大，由电网和非故障线路所连机组共同提供，指向风机侧；流过其它集电线的短路电流只由本条线路所连机组提供，指向电网侧。为了避免造成非故障线路上风机的脱网，在配置继电保护时可增大保护定值或设置方向。在某汇集母线所连任一条集电线近端(靠汇集母线处)短路时，这条汇集母线所连的全部风机电压跌落程度很相近，因此在配置集电线保护时必须保证故障线路保护能可靠地在风机低压保护启动之前动作。集电海缆通常较短，阻抗较小，图1所示模型中，线路末端短路电流为14.82 kA，线路近端短路流过保护装置的短路电流为15.26 kA，近端与末端短路电流相差不大。

升压站变压器在运行中往往会产生稳态和暂态两种不平衡电流，这些不平衡电流会造成其纵联差动保护误动。但电压等级为220 kV及以上的大容量海上风电场中海上升压站的容量较大，它在空载投入或外部故障切除电压恢复时产生的励磁涌流相对较小，会在短时间内衰减很小，所以可以忽略励磁涌流对差动保护的影响。在大容量风电场中，升压站变压器的短路电流受风机运行工况、低压穿越控制策略的影响，两侧的故障电流变为非工频，会影响差动保护的動作判定^[16]，基于此可考虑配置双重主保护。

海上高压电缆是风电场与电网间的并网输电线(送出线)。当送出线故障时，所连风电场侧和电网侧均会流过大电流，并网点电压通常会跌落至20%额定电压以下。送出线在发生单相接地故障时

电容充电电流较大，因此在配置零序后备保护时，要考虑充电电容的作用。在图1送出线末端 K_4 点设置三相短路故障，在不同机组数下从电网侧和风机侧提供给故障线路的短路电流如表1所示。

表1 送出线短路电流情况

Table 1 Short circuit current of the outgoing line

电网侧提供	只考虑电网	考虑其他风电场
	13.12 kA	16.8 kA
风机侧提供	37 台风机	74 台风机
	0.616 kA	1.2 kA

从表1可知当风电场并网容量较大时，风电场给送出线提供的短路电流较大，在配置保护时，线路两侧均需考虑风机的作用，否则会造成保护误动。

1.2 低电压穿越要求

多个海上风电场同时并网，电网故障时，风机端电压跌落，风机若因自我保护瞬时大面积脱网，会破坏系统潮流稳定性，甚至导致系统崩溃^[17]。因此，为保证风机在电网发生故障且电压降落在一定范围内能继续向电网提供功率支撑，我国规定风机必须具有低电压穿越能力，其具体要求^[18]如图2所示，其中 U 为并网点电压， t 为动作延时。

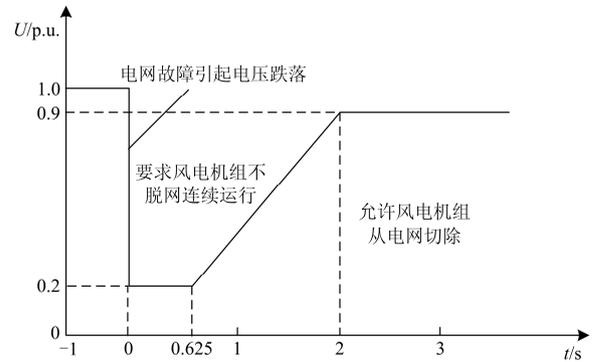


图2 风电场低电压穿越要求

Fig. 2 Requirements of wind farm low-voltage ride-through

风机的低电压穿越实际上是电网故障时机端和并网点电压的配合，使风机低压保护能给除风机本体和其出口故障的其它位置故障留下足够时间切除故障。系统故障，并网点和机端的电压跌落程度受场内海缆长度(阻抗)、变压器与无功补偿装置的容量、故障位置、故障类型等因素影响，这里主要分析不同位置发生三相短路故障时它们之间的电压跌落关系。电网故障，由于海上高压电缆较长，并网点与机端电压均不会跌落至0.2 p.u.以下^[19]，故障点越靠近风电场，它们的电压跌落程度均越深；海上高压电缆故障会导致并网点电压低于0.2 p.u.，但机

端电压仍高于 0.2 p.u.; 场内即在并网点与风机之间故障, 故障点越靠近的那一侧电压跌落越大; 风机本体或风机出口处故障, 相当于场内故障且距离并网点最远, 并网点电压降落很小, 机端电压降为零。综上所述, 机组的低压保护必须综合考虑低电压穿越时限要求和机端与并网点电压跌落关系来配置整定值。

2 继电保护配置与整定

2.1 风电机组

2.1.1 风机本体

风机本体通常配置电流保护、频率越限、电压越限等。依据相关导则和短路故障特性, 其保护整定原则如下:

1) 电流保护

不同风机类型应根据各自的短路电流特性进行整定。为保护风机的转子与换流器, 双馈风机加装撬棒电路, 永磁直驱风机加装卸荷电路; 定子主保护配置电流速断保护, 反应定子绕组相间短路引起的过电流, 按最大运行方式下风机内部相间短路电流整定, 瞬时动作; 后备保护配置复合电压闭锁过电流保护, 防止启动或电流波动时引起过电流保护误动, 启动电流按风机额定负荷下可靠返回整定, 电压元件整定为 $(0.5 \sim 0.6)U_n$, 动作时限应与低压保护和下一元件后备保护相配合。

2) 频率越限保护

根据文献[20]的要求, 考虑海上风电场维修不便, 应尽量减少风机脱网, 频率越限保护设定一段报警频率, 而非直接跳闸。

3) 电压越限保护

过电压保护按常规整定原则设置两段。

为发挥风机的低电压穿越能力, 风机低压保护需与之配合。根据 1.2 节的分析, 海上风电场的故障应更快切除, 避免故障加深导致系统失稳。风机或风机出口故障时, 故障机组立即切除, 设置短延时 0.01 s; 场内故障时, 为给场内故障切除留下充足时间, 动作延时一个时间级差 0.3~0.5 s; 电网故障时, 至少有 0.625 s 来切除其故障; 撬棒保护或卸荷保护使机组电压处于一个恢复过程, 因此低压保护定值设置为随时间变化的动态值。机组低压保护配合关系如图 3 所示, 曲线 II 下方为风机保护动作区域。

2.1.2 箱式变压器

海上风电场箱变的保护既要满足能使故障准确定位, 也要保证在其他地方故障时具有选择性, 仍然加装熔断器, 且动作时限不小于 0.1 s, 作为机端与集电线的远后备保护。

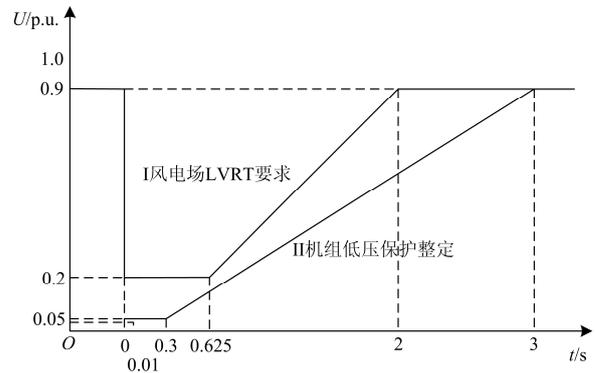


图 3 机组低压保护配合关系图

Fig. 3 Cooperation diagram of wind turbines' low-voltage protection

2.2 集电系统

2.2.1 35 kV 集电线

根据 1.1 节的分析配置具有方向的电流保护。集电线一般配置三段式过电流保护^[21], I 段按躲过本线路末端最大三相短路电流整定, 但近、末端的短路电流相差不大, 按此原则整定可能造成保护拒动。

集电线保护既要满足集电线末端箱变短路时熔断器熔断, 也要满足非故障线路所连风机不脱网。兼顾线路相间短路保护的快速性与选择性, 电流速断保护按本线路末端最小两相短路有灵敏度整定, 考虑风机撬棒保护投入会导致短路电流衰减^[22], 因此延时不宜过长, 可取 0.1~0.2 s, 熔断器的反时限特性决定在集电线故障时其速断保护可靠先动作; 图 1 中集电线 35 kV cable-1 近端三相短路, 母线 35 kV Bus 1 所连机组电压均跌落至小于 0.1 p.u., 由图 3 可知机组会在 0.3 s 后脱网, 所以能满足先切除集电线, 保证非故障机组不脱网。过电流保护为过负荷保护, 作为风机和箱变的远后备保护, 按躲过线路最大负荷电流整定, 时间与风机后备段相配合, 且不低于低压穿越的最短时间, 可取 0.625~1 s。在每一根集电线处均加装断路器, 减少风机脱网数量。可在主变低压侧配置远后备保护。

2.2.2 35 kV 母线

海上风电场多采用单母线接线方式, 母线容量较小, 在双侧电源网络中可通过与其相连线路的后备保护动作跳闸来切除母线故障^[23]。

2.3 海上升压站

考虑低电压穿越能力和双侧电源作用, 海上升压站变压器(主变)需在两侧配置双重化保护。主保护不仅配置差动保护, 针对区内故障, 还应再配置一套过电流保护以防止差动保护拒动。

后备保护配置相间短路和接地短路后备保护。

双侧电源供电的主变在外部或自身绕组短路引起相间短路过电流时，为满足相应的灵敏度，在两侧均配置有方向的复压闭锁过电流保护，设置两至三段延时。主变低压侧的保护指向低压母线，作为集电系统的远后备保护，按低压侧母线短路时对主变低压侧短路电流有足够灵敏度整定，动作时限与集电线过电流保护相配合。主变高压侧的保护指向主变，作为主变近后备保护、集电系统的远后备保护，按低压侧母线短路时对高压侧短路电流有足够灵敏度整定，其时限同时与相邻两侧保护相配合；高压侧电网容量大，使得流过其保护的相反电流很大，按此原则整定可不增设方向元件，且不存在电压死区，能可靠动作。针对接地故障的零序过电流保护，整定原则与主变中性点接地方式有关。

2.4 海上高压电缆

基于 1 节的讨论，配置电流纵联差动保护、两侧均指向海缆的三段式过电流保护和三段零序电流保护。纵联差动保护和方向过电流 I 段作为主保护，并且互为后备保护，防止主保护拒动，瞬时切除故障；其余作为送出线的近后备保护。

风场侧是弱电流侧，可能会因为系统运行工况、场内风况等原因造成风场侧流过的短路电流较小，使本侧电流保护 I 段拒动。为提高保护的可靠性和灵敏性，本侧电流保护 I 段可按不低于 50% 保护范围整定。由于系统运行方式改变会造成电流速断保护范围的变化，当系统处于最大运行方式时，系统等值阻抗最小，保护范围将达到最大。为保证其电流速断保护能准确、可靠动作，整定值不能高于最大运行方式时的短路电流值；电缆充电功率影响较大，则零序 III 段电流保护定值按躲过本线路电容电流整定，延时动作。其余电流保护均按常规原则整定。海缆故障主要由绝缘损坏造成，是永久性故障，所以不配置自动重合闸。

3 保护配合验证

在 ETAP 仿真软件上搭建图 1 所示的海上风电场模型，风机选用 D-PMSG，按上述配置方案与整定原则选取四个主要故障点进行保护配合验证。

3.1 风机出口故障

2 s 时在风机 WTG1 出口 K_1 点设置三相短路故障，故障机组 WTG1 和非故障机组 WTG2 的暂态仿真波形如图 4 所示。

由图 4 可以看出：此时故障机组电压跌落为 0，短路电流较大，非故障机组电压跌落和短路电流均很小，因此故障机组低压保护立刻动作于出口断路器，切除故障机组，而非故障机组不切除。随着故

障的切除，系统电压、电流逐渐恢复稳定，使系统继续正常运行。仿真动作时序如图 5 所示。

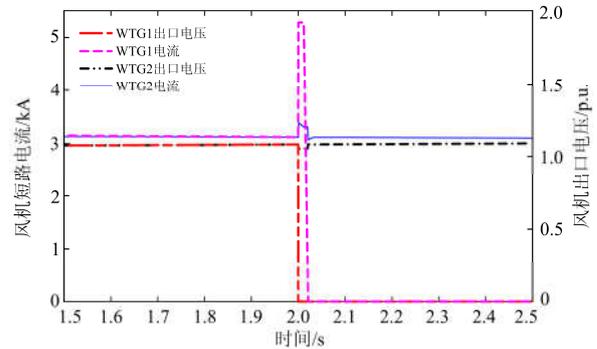


图 4 风机出口故障暂态仿真波形

Fig. 4 Transient simulation waveform of the fault wind turbine

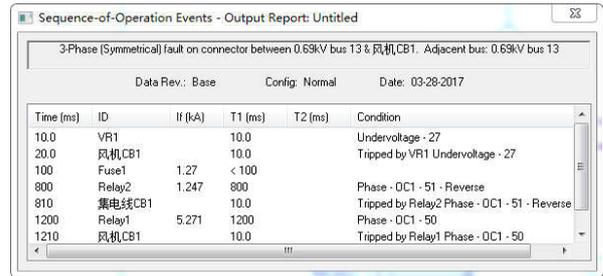


图 5 风机出口故障动作时序图

Fig. 5 Action sequence diagram of the fault wind turbine

由图 5 可以看出：机组出口故障时，故障机组的低压保护能正确动作；若风机的主保护拒动，设置在箱变和 35 kV 集电线处的远后备保护会及时动作，切除故障风机。

3.2 35 kV 集电线故障

2 s 时在集电线 35 kV cable-1 近端 K_2 点设置三相短路故障，暂态仿真波形如图 6 所示。

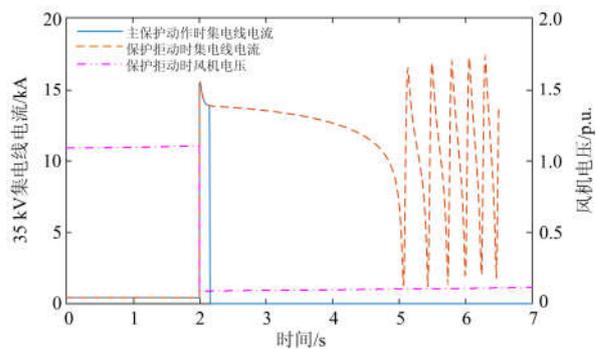


图 6 集电线故障暂态仿真波形

Fig. 6 Transient simulation waveform of the fault collector line

此处故障相当于汇集母线故障，从图 6 可以看

出: 若保护拒动, 汇集母线 35 kV Bus1 所连风机的电压跌落至 0.1 p.u.左右, 且长时间不能恢复, 将会造成故障所在场内所有风机脱网; 汇集母线 35 kV Bus2 所连风机的电压跌落至 0.8 p.u.左右, 其它风电场风机电压跌落幅度小于 0.1 p.u., 所以其他风电场风机不会脱网; 集电线电流将一直波动于较高的短路电流, 所以故障线路保护应立即动作切除故障, 保证系统内其他元件或线路正常运行; 非故障线路短路电流方向相反, 保护不动作。仿真动作时序如图 7 所示。

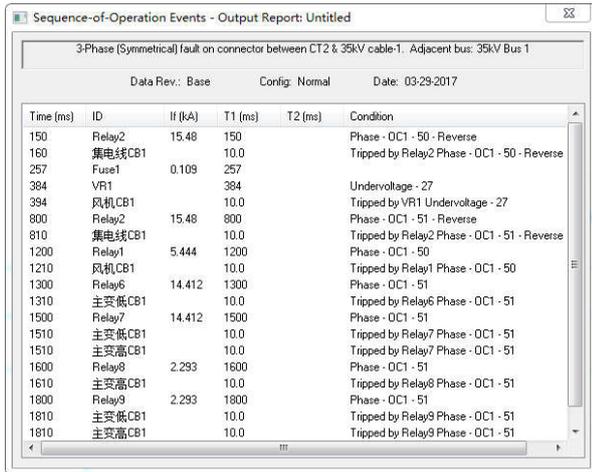


图 7 集电线故障动作时序图

Fig. 7 Action sequence diagram of the fault collector line

从图 7 可以看出: 故障后 160 ms, 集电线主保护正确动作, 满足了在场内故障时风机至少能连续运行 0.3 s 不脱网; 若主保护拒动, 集电线近后备保护和设置在主变高、低压侧的远后备保护均能正确动作切除故障, 保证跌落程度较小的风机不脱网。

3.3 海上升压站高压侧故障

2 s 时在主变 main transformer 1 高压侧 K₃ 点设置三相短路故障, 暂态仿真波形如图 8 所示。

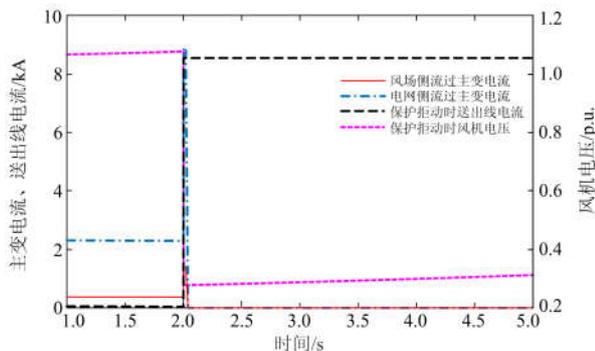


图 8 主变故障暂态仿真波形

Fig. 8 Transient simulation waveform of the fault main transformer

从图 8 可以看出: 主变两侧存在电流差, 其快速主保护会立即动作; 但如果主变保护拒动, 送出线短路电流很大, 全场风机电压均跌落至 0.3 p.u.左右, 其他场风机电压跌落至 0.65 p.u.左右, 送出线保护会启动切除故障, 因此风机的低压穿越会给主变留下足够的时间来切除故障。仿真动作时序如图 9 所示。

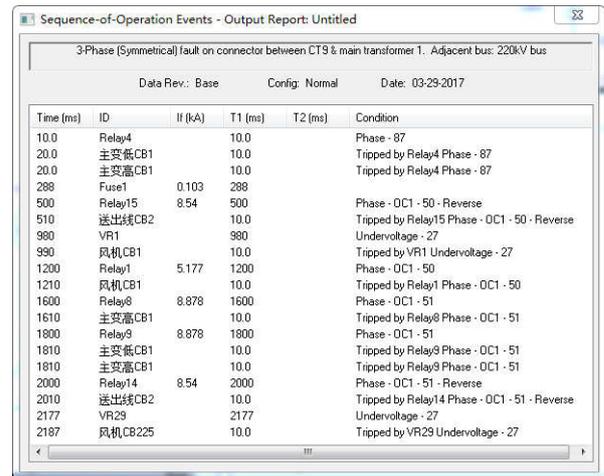


图 9 主变故障动作时序图

Fig. 9 Action sequence diagram of the fault main transformer

从图 9 可以看出: 主变故障时, 其主保护立即动作, 切除故障; 若主保护拒动, 可通过设置在主变高压侧的近后备保护和设置在送出线的远后备保护动作来解除故障, 把风机脱网的数量降到最低。

3.4 海上高压电缆故障

2 s 时在送出线 220 kV cable-1 近端 K₄ 点设置三相短路故障, 暂态仿真波形如图 10 所示。

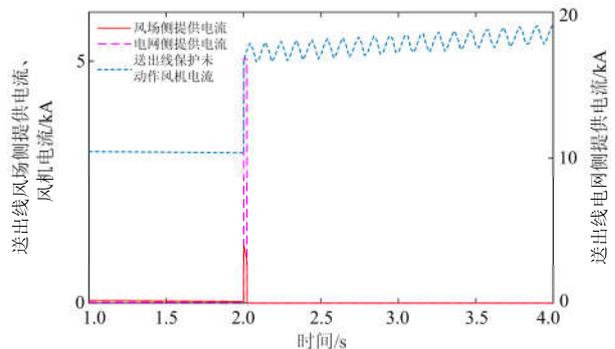


图 10 送出线故障暂态仿真波形

Fig. 10 Transient simulation waveform of the fault outgoing line

从图 10 可以看出: 送出线两侧具有电流差, 会触发其纵联保护快速动作切除故障。但如果送出线主保护不能快速灵敏动作, 风机的短路电流较大,

风机保护会启动切机。此处所接母线是 6 个风电场的共同母线，所有风机电压跌落程度和短路电流大小几乎相同，将会造成整个系统风机脱网，因此送出线必须配置灵敏度高、可靠性好的快速主保护。仿真动作时序如图 11 所示。

Time (ms)	ID	If (kA)	T1 (ms)	T2 (ms)	Condition
10.0	Relay11	10.0	10.0		Phase - 87
20.0	送出线CB1		10.0		Tripped by Relay11 Phase - 87
20.0	送出线CB2		10.0		Tripped by Relay11 Phase - 87
20.0	Relay14	16.805	20.0		Phase - OC1 - 50 - Reverse
30.0	送出线CB2		10.0		Tripped by Relay14 Phase - OC1 - 50 - Reverse
308	Fuse1	0.1	308		
500	Relay13	1.199	500		Phase - OC1 - 50 - Forward
500	Relay15	16.805	500		Phase - OC1 - 50 - Reverse
510	送出线CB1		10.0		Tripped by Relay13 Phase - OC1 - 50 - Forward
510	送出线CB2		10.0		Tripped by Relay15 Phase - OC1 - 50 - Reverse
1200	Relay1	5.027	1200		Phase - OC1 - 50
1210	风机CB1		10.0		Tripped by Relay1 Phase - OC1 - 50
1221	VR1		1221		Undervoltage - 27
1221	VR29		1221		Undervoltage - 27
1231	风机CB1		10.0		Tripped by VR1 Undervoltage - 27
1231	风机CB225		10.0		Tripped by VR29 Undervoltage - 27
1500	Relay12	1.199	1500		Phase - OC1 - 51 - Forward
1510	送出线CB1		10.0		Tripped by Relay12 Phase - OC1 - 51 - Forward
2000	Relay14	16.805	2000		Phase - OC1 - 51 - Reverse
2010	送出线CB2		10.0		Tripped by Relay14 Phase - OC1 - 51 - Reverse

图 11 送出线故障动作时序图

Fig. 11 Action sequence diagram of the fault outgoing line

从图 11 可以看出：出线故障时，纵联差动保护和电流速断保护两套主保护，若其纵联差动保护不能正确动作，电流速断保护也能正确快速动作以切除故障，保证系统稳定，风机能够实现低压穿越，若出线保护均不能正确动作，为保护风机，可以在低压保护范围内切机。

4 结论

为保证机组保护具有选择性，风机通常会选择具有低电压穿越能力的风机。在配置海上风电场保护时，既要考虑各保护之间的配合，也要考虑与低压穿越的配合。根据搭建的海上风电场模型仿真分析了集电系统和高压送出电缆的短路电流情况，综合分析配置保护需要考虑的因素，结合风电场要求，提出了兼顾保护间配合和时序配合的海上风电场继电保护配置方案和整定原则：1) 修正风机低压保护整定值；2) 集电线保护加入方向，且修正动作时限；3) 海上升压站需设置两重主保护，在两侧均配置完善的方向后备保护；4) 送出线配置方向保护，不配置自动重合闸。仿真结果表明所提方案和整定原则是正确、合理的。

参考文献

[1] 李晓燕, 余志. 海上风力发电进展[J]. 太阳能学报, 2004, 25(1): 78-84.
LI Xiaoyan, YU Zhi. Developments of offshore wind

power[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2004, 25(1): 78-84.

- [2] 李芄达, 李东东. 海上风电场集电系统拓扑结构优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 102-107.
LI Pengda, LI Dongdong. Study on topology optimization of electrical collector system for offshore wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 102-107.
- [3] EKANAYAKE J B, HOLDSWORTH L, WU X G, et al. Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 803-809.
- [4] 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 Shien, YAO Xu, XU Shanfei. Impacts of large-scale wind power integration on relay protection and countermeasures[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 21-27.
- [5] 王锡凡, 卫晓辉, 宁联辉, 等. 海上风电并网与输送方案比较[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5459-5466.
WANG Xifan, WEI Xiaohui, NING Lianhui, et al. Integration techniques and transmission schemes for off-shore wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5459-5466.
- [6] 黄玲玲, 曹家麟, 符杨. 海上风电场电气系统现状分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 147-154.
HUANG Lingling, CAO Jialin, FU Yang. Review of electrical systems for offshore wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 147-154.
- [7] OLIMPO A L, DAVID C G, EDGAR M G, et al. Offshore wind energy generation: control, protection, and Integration to electrical systems[EB/OL]. [2014-04-25]. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118701638.ch6/summary>.
- [8] 毕天姝, 李彦宾, 马丽红, 等. 风场及其送出线保护配置与整定研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 45-50.
BI Tianshu, LI Yanbin, MA Lihong, et al. Configuration and setting of relay protection for wind farm and its outgoing line[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 45-50.
- [9] 梁宇. 大规模风电场并网运行的故障分析及保护策略研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
LIANG Yu. Research on the failure analysis and protection strategy of grid connected large-scale wind farm[J]. Wuhan: Huazhong University of Science &

- Technology, 2013.
- [10] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.
- [11] 赵发坤. 基于 PSCAD/EMTDC 的海上风电场等效模型与无功补偿研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- ZHAO Fakun. Equivalent model and reactive power compensative for offshore wind farm on PSCAD/EMTDC[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [12] 魏书荣, 何之倬, 符杨, 等. 海上风电机组故障容错运行研究现状分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 145-154.
- WEI Shurong, HE Zhizhuo, FU Yang, et al. Research status and prospect of offshore wind turbine fault tolerance[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 145-154.
- [13] 韩璐, 李凤婷, 王春艳, 等. 风电接入对继电保护的影响综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 163-169.
- HAN Lu, LI Fengting, WANG Chunyan, et al. A survey on impact of wind farm integration on relay protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 163-169.
- [14] 栗然, 高起山, 刘伟. 直驱永磁同步风电机组的三相短路故障特性[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 153-158.
- LI Ran, GAO Qishan, LIU Wei. Characteristics of direct-driven permanent magnet synchronous wind power generator under symmetrical three-phase short-circuit fault[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 153-158.
- [15] 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 Baohui, WANG Jin, LI Guanghui, 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.
- [16] 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): 1-8.
- ZHANG Baohui, WANG Jin, HAO Zhiguo, et al. Impact of wind farm integration on relay protection (3): performance analysis for wind farm outgoing transformer protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 1-8.
- [17] OKEDU K E, MUYEEN S M, TAKAHASHI R, et al. Wind farms fault ride through using DFIG with new protection scheme[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(2): 242-254.
- [18] 风电场接入电力系统技术规定: GB/T 19963—2011[S]. Technical rule for connecting wind farm to power system: GB/T 19963—2011[S].
- [19] TANG Lixin, ZHONG Limin, RAHMAN M F, et al. A novel direct torque control for interior permanent-magnet synchronous machine drive with low ripple in torque and flux - a speed-sensorless approach[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(6): 1748-1756.
- [20] 大型风电场并网设计技术规范: NB/T 31003—2011[S]. Design regulations for large-scale wind power connecting to the system: NB/T 31003—2011[S].
- [21] 武晗, 孙建龙, 乔黎伟, 等. 考虑 LVRT 的风电场馈线短路电流特性与保护整定计算[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 3019-3028.
- WU Han, SUN Jianlong, QIAO Liwei, et al. Short circuit current characteristics and calculation of current protection setting of feeder lines in wind farms considering LVRT[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3019-3028.
- [22] 车倩, 陆于平. 采用 Crowbar 实现低电压穿越的风电场继电保护定值整定研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 97-102.
- CHE Qian, LU Yuping. Research on wind farm relay protection value setting based on crowbar circuit LVRT technology[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 97-102.
- [23] 周新刚, 吕应刚, 李毅, 等. 海上电力孤岛组网工程技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 134-135.

收稿日期: 2017-05-06; 修回日期: 2017-08-03

作者简介:

卢智雪(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制、高压直流输电; E-mail: 1162408502@qq.com

刘天琪(1962—), 女, 通信作者, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析计算与稳定控制、高压直流输电、调度自动化; E-mail: tqliu@sohu.com

(编辑 张爱琴)