

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

张保会¹,王 进¹,李光辉¹,郝治国¹,刘志远²,薄志谦³

(1. 西安交通大学 电气工程学院,陕西 西安 710049;2. 宁夏电力公司调度中心,宁夏 银川 750001;

3. ALSTOM 输配电有限公司,英国 斯塔福德 ST174LX)

摘要: 具备低电压穿越能力的风电机组要求在一定的故障条件下不脱网,需要相关继电保护与之配合。详细分析了风电场送出线以外输电系统元件故障、风电场送出线故障、风电场内部电网故障以及风电机组本体故障情况下,输电系统保护以及风电场内部保护应有的配合关系。进一步分析了当前集中式接入风电场的继电保护配置,指出风电机组保护及变流器保护选择性不强,在风电场内部保护或系统保护动作切除故障之前,风电机组已经脱网,而且将风电场等同于单侧电源的配电网,没有考虑风电机组对短路的贡献。最后分析了单风电机组本体保护、风电场主变保护、风电场送出线保护需要进行的改进,以保证低电压穿越能力的发挥,并指出各保护需要注意的问题。

关键词: 风电; 低电压穿越; 电力系统; 继电保护; 配合

中图分类号: TM 77; TM 614

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2012)03-0001-06

0 引言

随着大规模风电的并网运行,风电接入电力系统带来一系列技术问题^[1],其中与风电相关的继电保护研究是热点之一^[2-4]。在风力发电的初期,由于风电在电网中所占比例很小,一般不要求并网风电机组参与电力系统控制。当电网发生故障时,通常采取切除风电机组的措施来保证风电场及电网的安全。电力系统继电保护配置和整定计算时往往没有考虑风电场的影响,而是简单地将风电场看作一个负荷。

随着风电机组并网容量的提高,电力系统继电保护配置和整定计算时不能再忽略风电场的影响,短路计算时一般将风电场看作同容量的火电机组。当电网发生故障造成电压跌落时,如仍采取切除风机的简单做法,有可能导致系统潮流大幅变化甚至引起大面积的停电,带来系统稳定问题。因此,大规模风电接入与电网继电保护配置及稳定运行的主要矛盾表现为风机电气量保护以保护风机为目标与电网继电保护以维护系统稳定为目标之间的矛盾。

我国东北地区、甘肃酒泉、宁夏等风电基地曾多次发生因小的电网故障造成大面积风电机组被切除的事故,损失出力最高达百万千瓦,造成事故扩大,因此有必要逐步要求风电场内风电机组具备低电压穿越能力^[5-8],并与电网保护相配合。

要满足低电压穿越能力的要求,一方面要求并网风电机组的暂态特性得到改善,具备足够的故障穿越能力;另一方面要求继电保护等控制措施与之配

合,才能在故障时使这种低电压穿越能力得到发挥。

1 低电压穿越特性及与保护动作时间关系

为了能使风力发电得到大规模的应用,而且不危及电网的稳定运行,当电网发生电压跌落故障时,风电机组必须在一定范围内不脱离电网,并且要类似常规电源向电网提供有功功率(频率)和无功功率(电压)支撑。电力部门针对风力发电机组并网发电,已经开始出台了一些相关的法规,但目前不同国家甚至同一国家的不同地区可能有不同的规定,并且有些规定还在不断地修改。

我国国家电网公司企业标准 Q/GDW 392—2009《风电场接入电网技术规定》对风电场低电压穿越能力的要求如图 1 所示(图中纵轴 U 为并网点电压,标么值)。其规定:

a. 风电场内的风电机组具有在并网点(与公共电网直接相连的风电场升压变压器高压侧母线或节点)电压跌至 20% 额定电压时能够保证不脱网连续运行 625 ms 的能力;

b. 风电场并网点电压在发生跌落 2 s 内能够恢复到额定电压的 90% 时,风电场内的风电机组能够保证不脱网连续运行。



图 1 风电场低电压穿越要求

Fig.1 Requirements of wind farm low-voltage ride-through

收稿日期:2011-12-28;修回日期:2012-02-09

基金项目:国家 973 计划资助项目(2009CB219704)

Project supported by the Major State Basic Research Development Program of China(973 Program)(2009CB219704)

为实现风电场低电压穿越的要求,需要继电保护等控制措施与之配合。

1.1 风电场送出线以外输电系统元件故障

风电场并网技术规定一般针对参与其中的所有利益相关者和输电系统^[9],风电场低电压穿越要求的制定主要是基于在风电场送出线以外输电系统元件故障待切除的时段内,风电场不应脱网。要求风电场具有低电压穿越能力,就是给输电系统保护留下动作时间,可在规定时间内切除输电网内故障。为实现在低电压穿越期间机组不脱网的目标,同时要求风电机组保护在输电系统故障时可靠不误动切除机组。

1.1.1 给输电系统保护留下动作时间

集中式并网运行风电场一般接入 220 kV 或更高电压等级系统,当风电场送出线路以外的线路发生三相短路故障时,风电场并网点瞬时电压大都跌落至 20% 额定电压以上^[9]。此时,按照图 1 风电场低电压穿越要求,风电机组应该不脱网连续运行,从而为输电线路保护切除故障线路留下时间。高压输电线路一般配置双套完善的主保护,动作时间仅为数周期,而后备保护动作时间也仅有 0.5 s,加上保护启动延时时间(约 0.125 s),因此取最低电压穿越时间为 0.625 s,可以保证风电机组在故障电压短时跌落期间,电网保护将电网中的故障清除。

1.1.2 保证风电机组保护可靠不误动作

对风电机组而言,保证机组安全的各种保护也必须满足风电场低电压穿越的要求,保证风电场送出线以外输电系统故障时,风电机组低电压保护、频率越限保护、电流保护等可靠不误动作。

图 2 为具备低电压穿越能力的 Vestas 某风电机组低电压保护设定值,当机组机端电压落入低电压曲线下方时,机组将跳闸停机。当风电场送出线以外输电系统故障时,风电场并网点电压大都跌落至 20% 额定电压以上,此时各机组机端电压将会更高,由图 2 看出机组不会立即跳闸,风电机组的低电压保护特性满足风电场的低电压穿越能力的要求。图 2 的机组低电压保护动作特性还为有选择性地切除风电场内部故障元件、减少风电场内部故障时脱机的台数留下了动作时间。

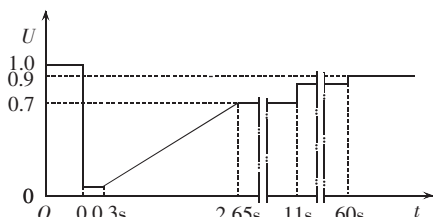


图 2 某风电机组低电压保护设定值

Fig.2 Setting of low-voltage protection for wind turbine

在风电发展比较发达的国家,不同的风电场会有不同的低电压穿越要求,由于一个风电场内会有不同厂家不同类型的风电机组,因此需要计算确认各机组能够符合该风电场并网要求。

1.2 风电场送出线故障

当本风电场送出线路发生故障时,风电场并网点的瞬时电压一般会跌落至 20% 额定电压以下。此时各风电机组机端仍会有一定残压,具有图 2 低电压保护的风电机组也不会立即跳闸,这将会给送出线保护留下至少 0.3 s 动作时间来切除故障。由于风电一般经单回高压输电线路送出,送出线路配置双套完善的主保护,线路故障会在 100 ms 内切除。由于各风电机组未脱网,为输电线路重合闸后将风电场并入系统创造了条件。

1.3 风电场内部电网故障

与输电系统故障不同,风电场内部电网故障会导致风电场内部网络电压严重下降,但不会造成输电电网广大区域的电压严重下降。此时各风电机组机端仍会有一定残压,具有图 2 低电压保护的风电机组也不会立即跳闸,这将会给风电场内部电网保护留下至少 0.3 s 动作时间。

风电场内部电网保护可以充分利用机组允许低电压运行 0.3 s,在此时段内风电场内部电网保护有选择性地切除部分故障元件,而不是将整个风电场切除。而风电场内部保护的配置与配合是否满足选择性则需要进一步分析。

1.4 风电机组本体故障

当风电机组本体故障或机组机端发生故障时,机端电压跌落很深,故障机组的低电压保护、电流速断保护等会在瞬时切除机组,而非故障机组各保护仍需可靠不误动。

2 当前风电场保护的配置与配合及存在问题

风电场并网方式一般有分散式接入和集中式接入 2 种:分散式接入是容量较小的风电场分散接入地区配电网,以就地消纳为主;集中式接入是在风能资源丰富区集中开发风电基地,通过输电通道集中外送,以异地消纳为主,接入电压等级较高,对系统影响较大。我国风电场多为大规模、集中式接入,如正在开发的内蒙古、甘肃、江苏沿海等千万千瓦级风电基地^[10]。

集中式接入风电场的典型接线方式为风电机组通过单机单变,将出口电压(一般为 690 V)升高到中压(10 kV 或 35 kV),多台风电机组汇集到一个集电线接入中压母线,通过风电场主变升高到更高的电压等级(110 kV、220 kV 或更高),并通过风电场送出线并入系统^[11],如图 3 所示。

当前国内多数风电场仍不具备低电压穿越能力,在风电集中接入电力系统的网络中,配置保护装置的有风电机组、集电线路、汇流母线、风电场主变、高压母线以及风电场送出输电线路等。

2.1 单风电机组本体保护

这里讨论的风电机组,除了风力机和发电机以外,还包括电力电子变流器和对应的机组升压变压

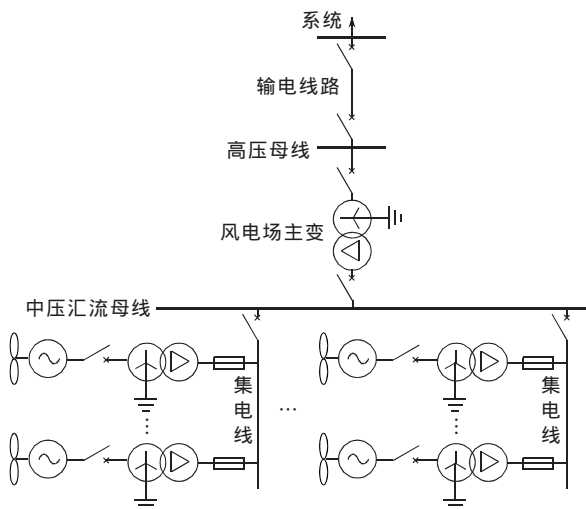


图3 风电集中接入系统示意图

Fig.3 Schematic diagram of wind farm centrally connected to power grid

器(箱变)。风电机组的接线大都采用单元接线,一台风力发电机配备一台箱变。风电机组保护配置如图4所示,下面分别介绍。

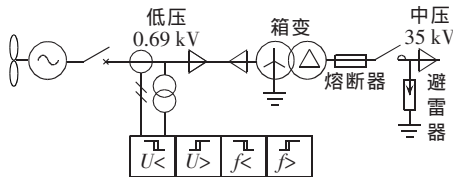


图4 风电机组保护配置

Fig.4 Protection configuration of wind turbine

2.1.1 机组保护

以保护风机自身安全为目的,机组配置了多种保护,动作于风机出口低压(如690 V)断路器,由风机制造厂家根据国家有关标准进行配置,不具备低电压穿越能力的机组保护主要有以下几种。

a. 电压越限保护,用于电压波动较大时,及时将风力发电机切除。由于风电场一般远离负荷中心,处于电网边缘,电压波动大,系统电压过高容易导致风机元件损坏,而电压过低则容易导致风机控制系统紊乱,因此,机端电压越限时,风机与系统解列并停机。电压越限保护典型值为机端电压 $U \geq 1.1U_N$,延时 $t \leq 100 \text{ ms}$; $U \leq 0.9U_N$,延时 $t \leq 100 \text{ ms}$ 。

b. 频率越限保护,用于频率波动较大时,及时将风力发电机切除。电网频率波动会影响风机的正常工作。电网频率超过风机设定的高、低定值时,频率越限保护动作,风机与系统解列并停机。频率越限保护典型值为频率 $f \geq 50.5 \text{ Hz}$,延时 $t \leq 100 \text{ ms}$; $f \leq 49.5 \text{ Hz}$,延时 $t \leq 100 \text{ ms}$ 。

c. 电流保护,通常配置电流速断保护和过电流保护。电流速断保护动作电流按照发电机内部相间短路电流整定,动作时间 $0 \sim 0.05 \text{ s}$;过电流保护动作电流一般按照额定电流的2倍整定,动作时间 $1 \sim 3 \text{ s}$ [12]。

此外,风机还装设三相电压/电流不平衡保护及

转速升高、温度升高、振动超限、电缆扭绞等保护。

2.1.2 变流器保护

对于变速恒频风电机组,电力电子变流器被广泛使用以实现矢量解耦控制,由于其热容量有限,变流器 IGBT 开关的电流上限通常不能比额定电流超出太多,因此需配置快速电子保护,其动作时限应在毫秒级。目前,各风电场大多采用双馈式感应发电机,因此,以下对双馈感应风力发电机变流器保护配置进行简要说明。

双馈式风机并网运行时,其定子侧直接接入690 V 交流电压,电网故障时,机端电压跌落,而定子磁链不能跟随机端电压突变。为维持定子磁链不变,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,如果不采取保护措施限制转子绕组的过电压和过电流,则会损坏机组和变流器 [13-14]。

当前双馈式风电机组变流器保护一般采用 Crowbar (撬杠) 保护 [15],电力电子开关一般为晶闸管,可以控制导通,不可强制关断,如图5所示。

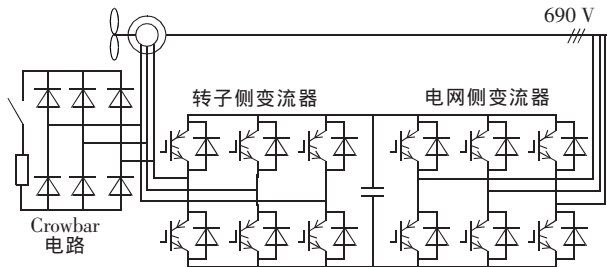


图5 变流器 Crowbar 保护

Fig.5 Crowbar protection of converter

Crowbar 保护系统监测的参数通常有:转子过流;电网侧变流器支路过流;直流环节过压等。为了保护变流器安全,这些参数定值设置非常灵敏。当这些被监测参数至少有一个超过其保护定值时,Crowbar 保护电路就会投入,典型动作时间为几毫秒。此时三相转子绕组被短路,转子侧变流器能够迅速地被旁路而退出运行,而网侧变流器将会保持不间断运行来平衡直流环节电压。发电机成为常规感应发电机,它继续从定子端向电网提供有功功率并从电网吸收无功功率,从而影响电网电压的恢复。

为了减少对电网电压的不利影响,不具备低电压穿越能力的风电机组都会在 Crowbar 保护投入后立刻将风机出口690 V 断路器跳开,由于其为机械式开关,动作时间比电子式 Crowbar 保护切断变流器延迟数十毫秒。

2.1.3 箱变保护

从经济性考虑,箱变高压侧配置熔断器保护、避雷器保护和负荷开关。高压熔断器作为短路保护,避雷器用于防御过电压,负荷开关用于正常分合电路。

当风电机组或箱变故障时,风机的保护控制箱

变低压侧断路器(风机出口 690 V 断路器)跳闸,从而保证风机的安全;而高压侧靠熔断器熔断或上级保护跳开集电线路切除故障。

箱变熔断器既要保证在箱变低压侧故障时可靠熔断,又要与 35 kV 集电线路保护配合,熔断器的熔断电流按照避开正常运行时箱变高压侧的最大负荷电流选择。当短路电流大于负荷开关允许断开电流时熔断器应当熔断,并且为了保证继电保护的选择性,熔断时间应当很短,一般要求小于 0.1 s。

2.2 风电场内部电网保护

对于不具备低电压穿越能力的风电场内部电网保护,一般将风电场作为外部电网的终端配电网,不考虑各风电机组提供的短路电流。

2.2.1 集电线路保护

集电线路保护采用常规馈线保护配置,即配置阶段式电流保护或距离保护,如图 6 所示,虚线框内即为图 4 所示风电机组。本文按配置两段式电流速断和过电流保护讨论集电线路的保护。

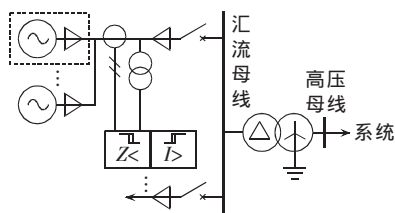


图 6 集电线路保护配置

Fig.6 Protection configuration of collector line

根据选择性的要求,在箱变高压侧短路时,应由箱变熔断器切除故障,因此集电线路电流速断的动作时间应当大于箱变熔断器的熔断时间,一般取 0.2~0.3 s。电流速断保护可按照最小运行方式下线路末端两相短路有规定的灵敏度来考虑。过电流保护则与电流速断保护配合,作为后备保护。

2.2.2 汇流母线保护

在风电场变电站中,汇流母线需配置专门的母线保护,一般采用高阻或低阻母差保护,用于快速清除汇流母线故障,按照躲开母线风电场侧故障时所产生的最大不平衡电流整定,动作时间一般取 0.1~0.2 s。

2.2.3 风电场主变保护

风电场主变一般按照降压变方案配置保护,采用双套不同原理的差动保护作为主保护,保护动作跳开主变两侧断路器,动作时间一般取 0.1~0.2 s。而后备保护只需在高压侧配备。

2.2.4 高压母线与送出线保护

风电场高压母线与送出线保护配置与电力系统常规变电站相同,均配备快速保护,可以在数周期内切除故障。风电场送出线一般采用光纤电流差动或纵联距离保护作为主保护,后备保护按照单电源方案配置,在系统侧安装三段式距离保护即可。

2.3 主要存在的问题

对于不具备低电压穿越能力的风电接入电力系

统继电保护,风电机组保护及变流器保护选择性不强。当系统或者风电场内部发生故障时,机组机端母线电压一般会低于 $0.9U_N$,机组低电压保护或频率越限保护都会在 100 ms 内切除风电机组。而变流器 Crowbar 保护设置更为灵敏,电网轻微故障都会使得机组变流器 Crowbar 保护瞬时投入,继而造成风电机组脱机。因此,在风电场内部保护或系统保护动作切除故障之前,风电机组已经脱网,无法实现保护的选择性。这也是各风电基地多次发生大面积风电机组脱网事故的原因。

将风电网等同于单侧电源的配电网,没有考虑风电机组对短路的贡献,与实际情况差别较大。在实际风电场运行时,也多次发生因风电电源特性造成继电保护不正确动作的现象,需要引起足够的重视。

3 具备低电压穿越能力后风电场保护配合及需要注意的问题

为使风电机组具有低电压穿越能力,需要对现有机组硬件及软件控制技术进行改造,同时风电场保护也需要进行相关改进,保证与机组低电压穿越特性的配合。

3.1 单风电机组本体保护的改进

3.1.1 变流器保护

不具备低电压穿越能力的风电机组在检测到故障发生时,变流器 Crowbar 保护电路瞬时投入,由于其电力电子开关器件一般为晶闸管,不可控制其退出运行,因此在 Crowbar 投入后机组将直接脱网。具备低电压穿越能力的机组,其变流器 Crowbar 保护电路的电力电子开关为 IGBT,可分别控制其导通与关断。

以具有图 2 所示低电压保护的风电机组为例,一旦风机的主控系统监测到机组机端电压低于 $0.9U_N$ 时,不发出电网故障紧急停机的命令,风电机组进入低电压穿越程序,控制变流器进行低电压穿越的相关动作,Crowbar 电路瞬时投入,此时转子侧变流器被旁路。同时,风力机桨距角控制系统即刻启动,减少风力机捕获的功率,减小机械转矩,防止感应发电机进一步超速。为了有助于电网故障的恢复,一般网侧变流器控制发出一定无功功率。当故障消除电网电压恢复后,Crowbar 电路会退出运行,转子侧变流器将会被同步并重新启动,变流器逐渐恢复对机组的控制,系统恢复正常运行。

3.1.2 机组保护

不具备低电压穿越能力的风电机组电压越限、频率越限保护等设置非常灵敏,将会在系统或风电场故障期间切除机组,因此需要风机主控系统在低电压穿越期间闭锁这些机组保护,而机组低电压保护按照图 2 所规定的低电压保护曲线对机组进行保护。如果机组机端电压落入低电压保护曲线下方,则

会动作于风机出口 690 V 断路器跳闸,风机停机。

对于电流保护,电流速断保护动作时间为 0~0.05 s,当本机组以外故障时,需要校验由本机组向故障点提供的短路电流,不致引起电流保护误动作。对于其他机械类保护,同样通过各种控制策略,如桨距角控制,保证本机组以外故障时不误动作。

由第 1.4 节分析,当风电机组本体故障或机端电压发生跌落很深,故障机组的低电压保护、电流速断保护等会在瞬时切除机组,而非故障机组距离故障点较远,机端电压会比较低,电压、电流等保护可靠不误动,可以实现非故障机组的低电压穿越运行。

需要注意的是,当本机组以外故障时,非故障机组 Crowbar 电路突然投入,机组成为感应电机开始从电网吸收无功功率,或者外部故障清除,Crowbar 电路退出运行,这种突然的冲击或者机组大状态逆转也许会造成机组保护误动,需要进行详细分析。如引起保护误动,需将其闭锁一段时间躲过该过程。

3.2 风电场内部保护的改进

为了实现风电机组的低电压穿越,当前风电场内部保护也需进行改进。具备低电压穿越能力的风电机组将会在系统故障期间提供持续的短路电流,其特性受风电机组类型、运行工况、低电压穿越控制策略等因素的影响,短路电流将与传统同步机完全不同。除了快速保护受风电短路电流影响外,后备保护也同样受其影响。

3.2.1 集电线路保护

集电线路电流速断保护动作时间为 0.2~0.3 s,由第 1.3 节分析,集电线路故障时,其电流速断保护可以充分利用机组至少允许低电压运行 0.3 s,在此时段内有选择性地切除故障的集电线路,而不是将整个风电场切除。

需要注意的是,风电场中集电线路保护本身不具方向性。对于故障的集电线路,流过其保护安装处的电流是外部系统和风电场内其他机组共同提供的短路电流;而非故障的集电线路流过的是本集电线路所接机组向故障点提供的反方向短路电流,如果大于保护的動作值将会误动,需要加装方向元件。

3.2.2 风电场主变保护

具备低电压穿越能力后,风电场主变除高压侧需配置完善的后备保护外,低压侧也需配置一短延时的后备保护。

由第 1.3 节分析,风电场主变故障时,可以充分利用机组至少允许低电压运行 0.3 s,在此时段内有选择性地切除风电场主变。

需注意,用于风电场的主变差动保护,当区内故障时,两侧故障电流分别为风电场短路电流和系统短路电流,而风电场提供的短路电流波形受风电机组类别、特性等的影响,与同步机有较大差异,差动保护能否在区内故障正确动作将受到极大影响;当区外系

统侧故障时,流经保护的电流为风电场提供的短路电流,保护能否可靠不误动同样需要深入研究。

3.2.3 风电场送出线保护

具备低电压穿越能力后,风电场送出线保护需要在系统侧与风电场侧均配置三段式距离后备保护。

当风电场送出线以外输电系统元件故障时,输电系统保护可以充分利用机组至少允许低电压运行 0.625 s 切除故障元件,保证风电场不脱网。当风电场送出线故障时,具备低电压穿越能力的风电机组故障后不同时段电压、电流的特征变化,输电线路纵联保护风电场侧保护元件性能将严重受其影响,其保护原理适应性问题需要深入研究。

3.3 发挥低电压穿越能力的保护动作时序配合

综上所述,为发挥风电机组低电压穿越的能力,风电接入电力系统的继电保护需与之配合,保护动作时序如图 7 所示。

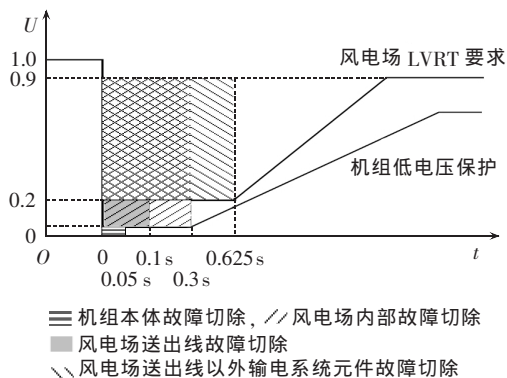


图 7 发挥低电压穿越能力的保护动作时序配合

Fig.7 Cooperation of protection action sequence for low-voltage ride-through

图 7 中,“风电场 LVRT 要求”曲线纵坐标对应风电场并网点电压,“机组低电压保护”曲线纵坐标对应风机机端电压,为便于说明问题,将两者放在同一坐标系中,并且有些保护动作时序有重叠。当风电场送出线以外输电系统元件故障时,输电系统保护可以充分利用机组至少允许低电压运行 0.625 s 切除故障元件;当风电场送出线或风电场内部故障时,送出线保护或风电场内部保护可以充分利用机组至少允许低电压运行 0.3 s 切除故障元件,但两者保护动作时间不同;当风电机组本体故障时,故障机组将在 0.05 s 内被切除,非故障机组不会脱网。

4 结论

当前国内风电场多不具备低电压穿越能力,风电机组保护无法保证选择性,系统轻微故障都将使得机组脱网。随着并网运行的风电机组逐步具备低电压穿越能力,正确发挥低电压穿越能力需要与继电保护相配合。本文详细分析了风电机组低电压穿越特性及与保护动作时间的配合关系,以及风电接入电力系统继电保护需要注意的问题,具有十分重要的现实意义。

致 谢

本文的研究工作得到了风电机组制造厂商 Vestas 公司的支持。感谢该公司的研究人员为本文提供的诸多宝贵资料和建议。

参考文献:

- [1] 张保会. 分散式能源发电接入电力系统科学技术问题的研究[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(12): 1-4.
ZHANG Baohui. On connection of distributed energy generation to power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(12): 1-4.
- [2] 苏常胜, 李凤婷, 武宇平. 双馈风电机组短路特性及对保护整定的影响[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(6): 86-91.
SU Changsheng, LI Fengting, WU Yuping. An analysis on short-circuit characteristic of wind turbine driven doubly fed induction generator and its impact on relay setting[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(6): 86-91.
- [3] 周宏林, 杨耕. 不同电压跌落深度下基于撬棒保护的双馈式风机短路电流特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(增刊 1): 184-191.
ZHOU Honglin, YANG Geng. Short circuit current characteristics of doubly fed induction generator with crowbar protection under different voltage dips[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(Supplement 1): 184-191.
- [4] 文玉玲, 晁勤, 吐尔逊·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 inter-connected wind farm on power system protection[J]. Power System Technology, 2008, 32(14): 15-18.
- [5] ABBEY C, JOOS G. Effect of Low Voltage Ride Through(LVRT) characteristic on voltage stability[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2005, 41(3): 1-7.
- [6] MUYEEN S M, TAKAHASHI R, MURATA T, et al. A variable speed wind turbine control strategy to meet wind farm grid code requirements[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010, 25(1): 331-340.
- [7] ABDEL-BAQI O, NASIRI A. A dynamic LVRT solution for doubly fed induction generators[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2010, 25(1): 193-196.
- [8] MENDES V, de SOUSA C V, SILVA S R, et al. Modeling and ride-through control of doubly fed induction generators during symmetrical voltage sags[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2011, 26(4): 1161-1171.
- [9] 中国电力科学研究院. 风电并网研究成果汇编[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010: 12-45.
- [10] 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.
- [11] 朱永强, 张旭. 风电场电气系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 10-24.
- [12] 姚兴佳, 宋俊. 风力发电机组原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 193-227.
- [13] 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.
- [14] 姚骏, 廖勇, 唐建平. 电网短路故障时交流励磁风力发电机不脱网运行的励磁控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(30): 64-71.
YAO Jun, LIAO Yong, TANG Jianping. Ride-through control strategy of AC excited wind-power generator for grid short-circuit fault[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(30): 64-71.
- [15] 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: 162-184.
- [16] 张保会, 李光辉, 王进, 等. 风电接入电力系统故障电流的影响因素分析及对继电保护的影响[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(2): 1-8.
ZHANG Baohui, LI Guanghui, WANG Jin, et al. Affecting factors of grid-connected wind power on fault current and impact on protection relay[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(2): 1-8.

作者简介:

张保会(1953-), 男, 河北魏县人, 教授, 博士研究生导师, 从事电力系统继电保护、安全自动装置、电力系统通信等方面的研究(E-mail: bhzhang@mail.xjtu.edu.cn);

王进(1988-), 男, 山东聊城人, 硕士研究生, 从事分布式电源接入电力系统相关研究(E-mail: windmill.xjtu@gmail.com)。

Cooperation of relay protection for grid-connected wind power with low-voltage ride-through capability

ZHANG Baohui¹, WANG Jin¹, LI Guanghui¹, HAO Zhiguo¹, LIU Zhiyuan², BO Zhiqian³

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Control Center of Ningxia Electric Power, Yinchuan 750001, China; 3. ALSTOM T & D Automation, Stafford ST174LX, UK)

Abstract: The wind turbine with low-voltage ride-through capability is required not to disconnect from grid under certain fault conditions, for which the relevant relay protections should cooperate with it. The cooperation between the relay protection of transmission system beyond the wind farm outgoing line and the relay protection of wind farm is analyzed for different faults of transmission system components, wind farm outgoing line, wind farm internal grid and wind turbine. The current configuration of relay protection for the wind farm centrally connected to power grid is analyzed and it is pointed out that, the selectivity of wind turbine protection and converter protection is not enough, which leads to the disconnection of wind farm from grid before the fault is removed by wind farm internal relay protection or system relay protection, and the current configuration regards the wind power as a distribution network with single source, which neglects the contribution of wind turbine to short-circuit fault. Improvements are proposed for the relay protections of wind turbine, main transformer and outgoing line to ensure the successful low-voltage ride-through, and their problems are pointed out.

Key words: wind power; low-voltage ride-through; electric power systems; relay protection; cooperation