

光伏并网发电对保护及重合闸的影响与对策

李 斌^{1,2}, 袁 越¹

(1. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 210098; 2. 青海大学 水利电力学院, 青海 西宁 810016)

摘要: 分析了光伏发电对保护、重合闸的影响。为了防止光伏电源提供的反向电流引起的拒动、误动, 给出了保护整定电流应满足的条件。在传统保护配置的基础上提出了2种含光伏发电并网的馈线保护新方案: 方案1根据光伏电源接入位置的不同, 配置方向纵联保护并引入反时限过电流保护形式, 电源输出功率变化时故障也能被可靠切除; 方案2在方向电流保护的基础上, 将光伏发电上游每条馈线保护的I段与其下一级馈线保护的I段构成通信单元, 依据新整定原则及2级保护动作结果进行综合判断, 将故障快速地隔离在最小范围内。通过一个10 kV 配电系统, 验证了保护方案的有效性。

关键词: 光伏; 发电; 并网; 继电保护; 重合闸; 模型

中图分类号: TM 615; TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.04.003

0 引言

近年来, 光伏发电已经受到广泛的关注。《青海省太阳能产业发展及推广应用规划》将光伏产业列为青海省的第五大支柱产业。计划到2020年, 形成7500 MW 的光伏并网发电容量。

随着光伏发电接入配电网, 供电模式将有所改变, 当配电网发生故障时, 光伏电源将对故障点提供故障电流, 影响配电网保护装置的正常运行^[1-5]。文献[6]提出了限制注入容量的方法, 但是随着光伏发电应用的日益广泛, 其注入的容量也越来越大, 这种方法无法满足未来光伏发电发展的要求。文献[7]提出采用加装方向元件的方法, 但光伏发电出力随自然条件变化随机波动, 可能出现故障时流过方向元件的短路电流太小, 导致保护动作不正确。

目前, 光伏发电的研究以光伏系统本身以及对外部电网的影响^[8-16]为主。本文建立光伏并网发电系统模型, 分析并网对保护及重合闸的影响。在传统保护配置的基础上, 提出2种含光伏发电配电网馈线保护的新方案。随着光伏电源的接入和光伏电源输出功率的变化, 2种方案能在系统电源与光伏电源之间的线路上实现故障的可靠快速切除。

1 光伏发电系统模型

光伏发电系统由光伏阵列、逆变器及交流电路组成, 系统组成结构如图1所示。

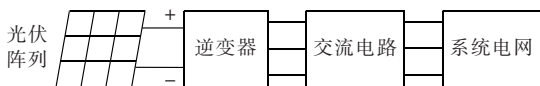


图1 三相光伏发电系统构成

Fig.1 Configuration of three-phase PV power generation system

1.1 光伏阵列模型

光伏阵列由光伏组件组成, 其输出电流为:

$$I_p = MI_1 - MI_0 \times \left\{ \exp \left[\frac{q \left(NU + \frac{I_p R_s N}{M} \right)}{NAkT_p} \right] - 1 \right\} - \frac{NU + \frac{I_p R_s N}{M}}{NR_{sh}/M} \quad (1)$$

其中, U 、 I_p 为光伏阵列的输出电压和电流; N 、 M 为光伏组件串的串联数和并联数; I_1 为单位光伏组件产生的光电流; I_0 为二极管反向饱和电流; A 为光伏组件的理想因子; R_s 、 R_{sh} 为单位光伏组件的串联和并联阻抗; k 为玻尔兹曼常数; q 为电荷常数; T_p 为电池表面温度。

1.2 逆变器模型

光伏并网系统采用电压源逆变器, 根据图1由KCL和KVL得到以下方程:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \end{bmatrix} = -\frac{1}{l} \begin{bmatrix} r & & \\ & r & \\ & & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \frac{1}{l} \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} + \frac{u}{l} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\theta = \omega t - \delta \quad (3)$$

$$u = u_i / 2 \quad (4)$$

其中, u_a 、 u_b 、 u_c 为交流母线电压基波分量; i_a 、 i_b 、 i_c 为逆变器三相输出电流; r 、 l 为逆变器交流电路等值电阻、电抗; ω 为系统基波角速度; u_i 为逆变器输出电压的基波量; δ 为 u 和 u_i 之间的相角差。

1.3 光伏发电系统控制模型

光伏发电系统采用电流和电压协调控制结构, 电压控制单元以光伏阵列电压与参考值的差值为

输入信号,来确定电流控制单元电流输入信号;电流控制单元实现逆变器与系统电流的跟踪控制;锁相环(PLL)实现电网电压相位的跟踪,为逆变器提供控制信号;最大功率点跟踪(MPPT)负责最大功率点的确定,完成 PWM 以控制逆变器。控制框图见图 2。

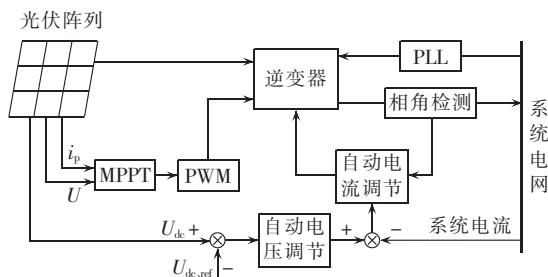


图 2 光伏发电系统控制框图

Fig.2 Block diagram of PV power generation system control

2 含光伏电源配电系统的故障特性

光伏电源通过逆变控制装置接入电网,可改善传统电机直接并网带来的问题。光伏并网运行时采用电流型 PQ 控制方式,通过调整逆变器输出的电流使输出的有功和无功达到设定值。系统发生故障瞬间有一个暂态过程,该过程输出功率变大,短时后输出的有功和无功回到给定的参考值。故障后光伏电压接入点的电压降低,输出电流与故障前相比变大。图 3 所示母线 B 处接有光伏配电系统,针对故障前后光伏电源输出电流的不同,根据电路替代定理用电流源来代替不同状态下的光伏电源,其中电流源的值即为相应状态下光伏电源的输出电流。当线路 AB 的 f 点发生故障,用电流源 I_{PV} 代替光伏电源, I_{PV} 即为故障后某状态下光伏电源的输出电流。

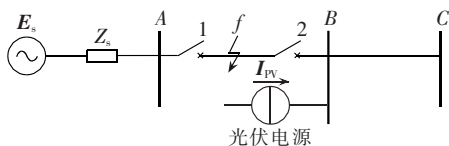


图 3 接有光伏电源的配电系统

Fig.3 Distribution system with PV power generation system

3 光伏发电对保护及重合闸的影响

3.1 对保护及重合闸前加速的影响

3.1.1 倒送短路电流

如图 4 所示,当相邻馈线发生故障时,光伏电源通过母线向故障点提供反向短路电流 I 。由于断路器 1 与 2 配备的保护不具有识别故障方向的能力,会引起断路器 1 与 2 的保护误动作,造成光伏电源所在线路中断供电。根据保护的要求,相邻线路故障光伏电源产生的短路电流不应启动速断保护 1,即保护整定值满足下列条件:

$$I \leq I_{set1} \quad (5)$$

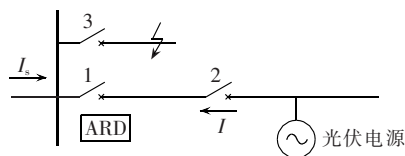


图 4 光伏发电系统倒送短路电流

Fig.4 Inverse short circuit current from PV power generation system

其中, I_{set1} 为保护 1 电流速断保护的整定值。

断路器 1 与 2 的过电流保护有一定的时延,可从时间上与故障线路断路器 3 的速断保护相配合。若故障是瞬时性的,相邻线路重合闸重合后,线路恢复正常运行;若故障是永久性的,故障线路的电流速断保护被重合闸闭锁,由过电流保护有选择性地切除故障;若故障发生在近母线处,断路器 3 的过电流保护需较长延时 t 动作, t 大于断路器 1 或 2 的过电流保护的動作时间,造成断路器 1 或 2 先于 3 动作跳闸,中断了健康线路的正常供电。因此,要求下式成立:

$$I \leq I_{min} \quad (6)$$

其中, I_{min} 为断路器 1 和 2 过电流保护的整定值中的较小值。

当相邻线路故障时,光伏电源提供的最大反向短路电流应满足式(6)。对于发生故障的馈线断路器 3 的保护而言,其感受到的电流为系统和光伏电源共同提供的总故障电流,其值大于光伏电源接入前只有系统提供的故障电流,若故障线路为终端线,此影响是有利的,保护更加灵敏。

3.1.2 降低线路保护灵敏度

如图 5 所示,光伏电源 PV_1 接在变电站附近,重合闸装置安装在变电站处,光伏电源 PV_2 接在转送的终端线路上。

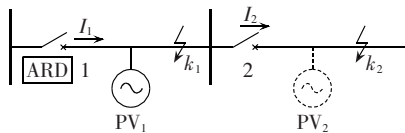


图 5 降低线路保护灵敏度

Fig.5 Reduction of line protection sensitivity

若故障发生在 k_1 ,系统侧保护 1 的电流速断保护动作切除故障,然后保护 1 的重合闸前加速进行重合以恢复供电,由电路原理知, PV_1 的接入减小了保护 1 检测到的故障电流,从而降低其动作灵敏度,严重时保护可能会拒动。接入 PV_1 后,线路发生短路故障时,保护 1 所检测到的最小短路电流 I_1 应能使保护 1 的电流速断保护可靠动作,以满足重合闸前加速方式下故障瞬时切除的特性。根据电网短路故障特性,线路末端发生两相短路故障时,短路电流 I_1 最小,要求满足下式:

$$I_1 \geq I_{set1} \quad (7)$$

其中, $I_{\text{set}1}$ 为保护 1 的电流速断保护的整定值。

PV₂ 的接入对保护 1 动作行为没有影响, 对保护 2 提供反向短路电流, 对保护 2 的影响同 3.1.1 节, 即要求满足式(5)、(6)。

若故障发生在下游 k_2 , 系统侧保护 1 的电流速断保护动作切除故障, 然后保护 1 的重合闸前加速进行重合以恢复供电。对于保护 1 而言, PV₁、PV₂ 的接入降低了保护的灵敏度, 要求满足式(7); 如果断路器 1 跳闸后, 由重合闸前加速进行重合以恢复供电, 若重合于永久性故障, 则保护 2 的过电流保护应能可靠动作, 以切除故障。如果配电线路只接有 1 台 PV₁, 此时 PV₁ 所产生的故障电流使保护 2 过电流保护检测到的故障电流增大, 其可靠性增加, 故对 PV₁ 提供的短路电流没有限制。若接 PV₂ 或多台光伏电源, 故障发生时, 则由系统电源、PV₁、PV₂ 提供的流过保护 1 和保护 2 的短路电流 I_1 和 I_2 的变化无法确定, 所以 I_2 还需满足下式:

$$I_2 \geq I_{\text{set}2} \quad (8)$$

其中, $I_{\text{set}2}$ 为保护 2 的过电流保护整定值。

3.2 对保护及重合闸后加速的影响

3.2.1 引起正常运行线路的保护误动作

如图 6 所示, 相邻线路发生故障时, 根据重合闸后加速方式下保护整定原则, 保护 3 的定时限过电流保护动作切除故障, 由于保护 3 的定时限过电流保护的整定时间可能大于保护 1 和保护 2 的过电流保护动作整定时间, 使得保护 1 和保护 2 在光伏电源提供的反向短路电流作用下引起误动。为协调保护之间的配合关系, 要求光伏电源提供的短路电流 I 应满足下式:

$$I < I_{\min} \quad (9)$$

其中, $I_{\min}$ 为保护 1 和保护 2 的定时限过电流保护定值中的较小值。

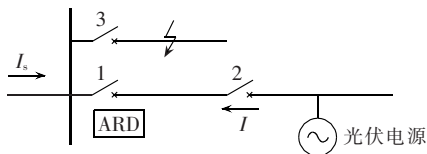


图 6 光伏发电系统引起正常运行线路保护误动作

Fig.6 Misoperation of up-level normal line protection caused by PV power generation system

若发生瞬时性故障, 则断路器 3 重合后线路恢复正常运行; 若发生永久性故障, 重合后瞬时跳闸, 由于保护 1 和保护 2 的过电流保护的延时性, 此时光伏电源提供的反向短路电流不会对保护 1 和保护 2 的过电流保护产生影响。

3.2.2 引起上游线路的保护拒动

如图 7 所示, 若故障发生在 k_2 点, 根据电路原理, 可得保护 2 检测到的短路电流增大, 而保护 1 检

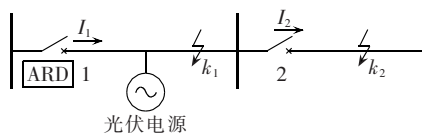


图 7 光伏发电系统引起上游保护的拒动

Fig.7 Refuse-to-trip of up-level protection caused by PV power generation system

测到的短路电流减小, 这就使得保护 2 的动作灵敏性增大, 而保护 1 的灵敏性降低。根据重合闸后加速的原理, 光伏电源的接入更有利于重合闸后加速方式下保护之间的协调。若故障发生在 k_1 点, 光伏电源的接入使保护 1 检测到的故障电流减小, 当光伏电源容量足够大时, 就可能使保护 1 的过电流保护无法启动。因此, 短路电流应满足下式:

$$I_1 > I'_{\text{set}1} \quad (10)$$

其中, $I'_{\text{set}1}$ 为保护 1 的定时限过电流保护的整定值。

3.2.3 引起下游线路保护误动作

如图 8 所示, 在重合闸后加速方式下, 故障发生在 k_1 点时, 根据保护 1 和保护 2 的过电流保护整定时间上的配合关系, 保护 1 的过电流动作时间较长。在这段时间内, 保护 2 过电流保护极有可能在光伏电源的作用下动作而跳闸, 从而扩大事故的影响范围。此时对光伏电源提供的短路电流限制为:

$$I_2 < I_{\text{set}2} \quad (11)$$

其中, $I_{\text{set}2}$ 为保护 2 的过电流保护整定值。

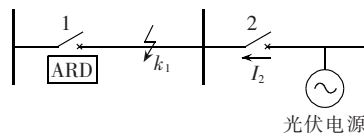


图 8 光伏发电系统引起下游保护的误动作

Fig.8 Misoperation of down-level protection caused by PV power generation system

4 含光伏电源配电网保护方案

4.1 保护方案 1

如图 9 所示, 根据光伏电源接入的位置将馈线 2 分成 2 个区域: 光伏电源上游区域, 由线路 AB 和 BC 组成; 光伏电源下游区域, 由线路 CD 和 DE 组成。上游区域加装断路器 5 和保护装置 5, 下游区域需加装断路器 3 和保护装置 3。

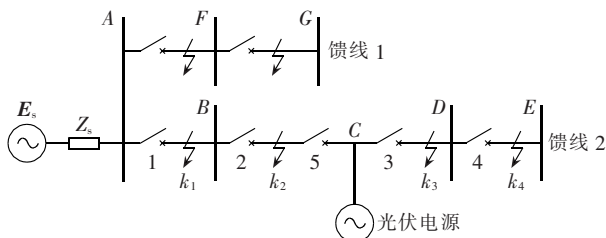


图 9 方案 1

Fig.9 Scheme 1

为了能在发生故障时较快地切除故障,以减小短路对光伏电源的破坏,引入反时限过电流保护。该保护克服了短路点越靠近电源,保护动作时间越长的缺点。整定原则:在最大运行方式下,下一级线路出口短路时,上一级保护的動作时限要比下一级保护高一个时间阶梯 Δt ,保证其他运行方式下保护動作时限均能满足选择性要求。 k_4 点发生短路,保护 4 整定为瞬时动作,保护 3 動作时限比保护 4 高出一个时间阶梯 Δt 。当光伏电源输出功率变小或退出运行时,保护 3 和保护 4 能够可靠配合。 k_3 点短路时,保护 2 的動作时限比保护 3 高出一个时间阶梯 Δt ,当光伏电源接入以后,保护 2 和保护 3 能够满足选择性要求。保护 1 处的反时限保护,按照相同方法与保护 2 进行时限上的配合。

当系统和光伏电源同时存在时,在保护 1、2、5 处加装功率方向元件,保证各保护之间动作的选择性。保护安装地点附近正方向发生三相短路,由于母线电压降低至零,方向元件失去判别依据,导致保护拒动,方向电流保护存在动作的“死区”。因此,在光伏电源上游区域保护 1 和 5 处配置方向比较式纵联保护,它可以快速地切除保护范围内部的各种故障。考虑到光伏电源上游区域发生故障时,光伏电源输出功率较小或已退出运行,导致方向比较式纵联保护 5 处方向元件灵敏度不足,在保护 5 处配置弱馈保护。在保护 1 和 5 处设置重合闸功能,采用重合闸前加速保护方式,利用重合闸提供的条件加速切除故障。如果光伏电源上游区域故障是瞬时性的,重合闸动作之后就恢复供电;如果故障是永久性的,故障由过电流保护 1 或 2 有选择性地切除。保护 1 配置一般重合闸,保护 5 的重合闸功能在保护 1 判定为瞬时性故障时由保护 1 来启动,此时光伏电源存在,保护 5 重合闸需检同期。对于馈线 1,按照传统的重合闸前加速或后加速方式的电流保护进行配置。保护动作行为:光伏电源上游区域内任一点发生故障时,方向比较式纵联保护两侧的方向元件判断为正方向,认为发生了区内故障,可靠动作断开保护 1 处和保护 5 处的断路器。随后保护 1 处断路器快速重合,如果是瞬时性故障,重合后故障消失,接着保护 5 处断路器重合,恢复对整条馈线的供电。如果是永久性故障,由保护 1 处和保护 2 处的反时限过电流保护选择性动作切除故障。光伏电源输出功率变小或退出运行,导致保护 5 处的方向元件灵敏度降低,由于保护 5 处装设了弱馈保护,可保证弱电源侧可靠动作。

当光伏电源下游区域内发生故障时,以重合闸前加速方式为例,首先保护 3 处的电流速断保护瞬时动作,随后重合。如果是瞬时性故障,重合后故障将消失;如果是永久性故障,则由保护 4 处或保护 3 处的

反时限过电流保护选择性动作切除故障。光伏电源下游的反时限保护按光伏电源的最大出力来进行配合,当光伏电源的输出功率变小或退出运行时,光伏电源下游发生故障后有选择性地动作,不受光伏电源输出功率变化的影响。

相邻馈线 1 发生故障时,光伏电源上游区域加设了方向元件,保护 1 和保护 2 不会误动作。

保护 5 动作可能形成孤岛,含光伏电源的配电网与主配电网分离后,继续向所在的独立配电网输电,形成的孤岛对系统、用户设备、维护人员等造成危害,运行过程出现的供需不平衡损害电能质量,降低配电网供电可靠性。配电网需有事先策略来应付孤岛的出现,对此可进行孤岛的划分,以维持孤岛内功率平衡以及电压频率的稳定。孤岛是光伏并网出现的一种新的运行方式。

4.2 保护方案 2

在光伏电源上游线路两端电流保护加装方向元件,借助两端通信的方法来满足选择性要求。如图 10 所示,对光伏电源上游的线路、电源侧装设两段式方向电流保护,对侧不装设保护。

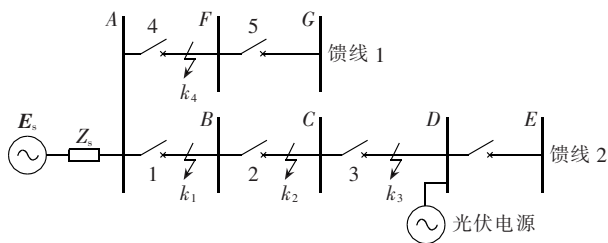


图 10 方案 2

Fig.10 Scheme 2

方向电流保护 I 段电流定值 I_{set}^I 按照系统最小运行方式下线路末端短路动作的原则整定,動作时间 $t_1=0$ s,即:

$$I_{set}^I = K_{rel} I_{k,min} \quad (12)$$

其中, K_{rel} 取 0.9; $I_{k,min}$ 为线路末端短路的最小短路电流。

方向电流保护 II 段电流定值 I_{set}^{II} 按照躲开负荷电流的原则整定,動作时限取阶梯型,与常规的电流 III 段整定原则相同。

如图 11 所示,保护 I 段与相邻馈线保护 I 段构成通信单元,相邻馈线 I 段保护不动作开放本地馈线 I 段保护,反之,闭锁本地馈线 I 段。本地馈线 I 段保护动作且收不到闭锁信号就判为内部故障,跳开本侧断路器同时发送遥控信息到对端,使对侧断路器也跳闸,将故障隔离。

光伏电源上游最末线路末端需装设方向元件,将线路的两侧保护构成通信单元,当出口保护 I 段动作且末端功率方向为正时,判为本地线路故障,跳开两侧断路器。光伏电源下游保护按三段式电流保

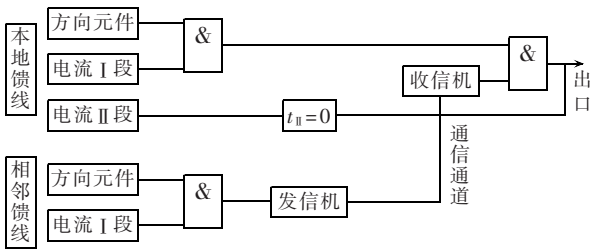


图 11 方案 2 的动作原理框图

Fig.11 Schematic diagram of scheme 2

护助增情况整定。

保护动作行为: k_1 点故障时,保护 1 功率方向为正,电流 I 段动作;保护 2 功率方向为负,方向电流保护不动作,不给保护 1 发闭锁信号;保护 1 跳闸,同时发送遥控信息控制断路器 2 跳闸,将故障隔离。 k_2 点故障,保护 1 和保护 2 方向电流 I 段动作,保护 3 功率方向为负,方向电流保护不动作;保护 2 给保护 1 发闭锁信号,保护 1 不动作;保护 3 不向保护 2 发送闭锁信号,保护 2 判为内部故障,断开 BC 两侧断路器,将故障隔离。同理, k_3 点故障时,保护 2 方向电流 I 段动作,保护 4 功率方向为正,判为线路 CD 内部故障,断开两侧断路器,将故障隔离。

当有多个光伏电源接入时,保护的配置以及整定分析方法类似。本文提出的 2 种保护方案能有效解决文献[6-7]中提到的保护问题。

5 算例分析

10 kV 配电网参数为 $S_B=600\text{ MV}\cdot\text{A}$, $U_B=10.5\text{ kV}$; 架空线路的参数为 $r_1=0.27\text{ }\Omega/\text{km}$, $x_1=0.347\text{ }\Omega/\text{km}$, 在每个节点处接入额定容量为 $5\text{ MV}\cdot\text{A}$ 、额定功率因数为 0.85 的负荷,光伏发电系统的容量取 6、12 $\text{MV}\cdot\text{A}$ 。配电系统如图 12 所示。利用 PSASP 对此系统进行仿真分析。

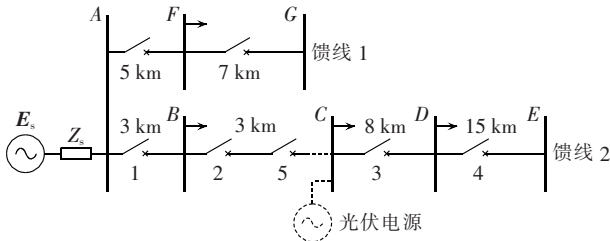


图 12 10 kV 配电网络系统

Fig.12 10 kV distribution system

仿真方案 1:不接入光伏电源,馈线 2 上各保护流过的最大负荷电流以及相应的过电流保护定值见表 1。

在系统最小运行方式下,馈线 2 各段线路末端发生两相短路时流过各保护的短路电流见表 2。

接入 PV 最小运行方式下各段线路末端故障时,流过馈线 2 各保护的短路电流如表 3 所示。

表 1 无光伏发电系统时流过馈线 2 保护的
最大负荷电流及整定值

Tab.1 Maximum load current and setting value of feeder protection 2 without PV power generation system

保护	最大负荷电流/kA	过电流保护整定值/kA
1	0.942	1.356
2	0.657	0.944
3	0.403	0.577
4	0.188	0.267

表 2 无光伏发电系统时最小运行方式下流过馈线 2
各保护的短路电流

Tab.2 Short circuit current of protections for feeder 2 in minimum operating mode without PV power generation system

保护	短路电流/kA			
	AB 末端短路	BC 末端短路	CD 末端短路	DE 末端短路
1	5.328	2.880	1.666	1.211
2		2.760	1.463	0.890
3			1.330	0.699
4				0.581

表 3 接入光伏发电系统时最小运行方式下流过馈线 2
各保护的短路电流

Tab.3 Short circuit current of protections for feeder 2 in minimum operating mode with PV power generation system

光伏电源出力/(MV·A)	保护	短路电流/kA			
		AB 末端短路	BC 末端短路	CD 末端短路	DE 末端短路
6	1	5.328	2.880	1.458	0.904
	2		2.760	1.246	0.663
	3			1.506	0.768
	4				0.635
12	1	5.328	2.880	1.380	0.720
	2		2.760	1.158	0.470
	3			1.668	0.826
	4				0.690

综合表 1—3 可知,光伏电源出力发生变化,当线路 CD、DE 末端发生故障时,保护 3、4 能可靠动作切除故障。当线路 BC 末端发生故障时,光伏电源出力为 0,方向纵联保护能可靠动作,随后保护 1 处的断路器重合,如果是永久性故障,保护 2 将可靠跳闸。当线路 AB 末端发生永久性故障时,保护 1 能可靠动作。当相邻馈线始端发生故障且光伏电源出力最大时,流过保护 1、2 的短路电流分别为 1.26 kA 和 1.212 kA,由于保护 1、2 处分别加装了方向元件,故它们不会误动作。

仿真方案 2:取系统最大运行方式下的阻抗 $X_{s,\min}=0.091\text{ }\Omega$,取最小运行方式下的阻抗 $X_{s,\max}=0.126\text{ }\Omega$;取末端负荷阻抗为 $30+j15.7\text{ }\Omega$,取光伏电源的容量为 $6\text{ MV}\cdot\text{A}$ 。根据式(12)计算出保护 1 和保护 2 的 I 段整定值为: $I_{\text{set}1}^I=5.44\text{ kA}$, $I_{\text{set}2}^I=2.905\text{ kA}$ 。系统最大运行方式下,各线路末端三相短路时,流过馈线 2 的短路电流为:线路 AB 末端短路,故障电流为 7.002 kA ;线路 BC 末端短路,故障电流为 3.154 kA ;

线路 CD 末端短路,故障电流为 1.215 kA;线路 DE 末端短路,故障电流为 0.834 kA。可知,线路 AB 末端故障后, $I_d > I_{set1}$, 保护 1 的方向电流 I 段动作,保护 2 的方向电流 I 段不动作,不向保护 1 发闭锁信号,则保护 1 跳闸,同时发送遥控信息控制断路器 2 跳闸,将故障隔离。

通过实例分析,采用以上保护方案后,对于接有光伏电源的配电网,2 种方案均能正确动作。

6 结论

本文提出了 2 种含光伏电源的配电网馈线保护方案。方案 1 根据光伏电源接入点的位置,对被保护线路进行分区,光伏电源上游区域的保护配置是用瞬时动作的方向纵联保护组成的重合闸前加速方式,为了快速地切除故障,引入反时限过电流保护。方案 2 将光伏电源上游线路电流保护 I 段退出,保留 II 段和 III 段,加上方向元件。II 段、III 段定值按照未接入光伏电源的情况整定,II 段动作时限改为 0 s 作为新 I 段,新光伏电源接入不需更改定值。本文用 PSASP 对所提出的 2 种保护方案进行了仿真验证,结果表明保护具有良好的选择性。

目前,青海省正在积极推进太阳能及产业的发展,今后的配电网将是含有大量光伏电源的网络,含光伏电源配电网的馈线保护方案必将得到越来越广泛的应用。

参考文献:

- [1] 庞建业,夏晓宾,房牧. 分布式发电对配电网继电保护的影响[J]. 继电器,2007,35(11):5-8.
PANG Jianye,XIA Xiaobin,FANG Mu. Impact of distributed generation to relay protection of distribution system[J]. Relay, 2007,35(11):5-8.
- [2] 袁超,吴刚,曾祥君,等. 分布式发电系统继电保护技术[J]. 继电器,2009,37(2):99-105.
YUAN Chao,WU Gang,ZENG Xiangjun,et al. Protection technology for distributed generation systems[J]. Relay,2009,37(2): 99-105.
- [3] 温阳东,王欣. 分布式发电对配电网继电保护的影响[J]. 继电器,2008,36(1):12-13.
WEN Yangdong,WANG Xin. Effect of distributed generation on protection in distribution system[J]. Relay,2008,36(1):12-13.
- [4] 周林,武剑. 光伏阵列最大功率点跟踪控制方法综述[J]. 高压技术,2008,34(6):1145-1154.
ZHOU Lin,WU Jian. Survey of maximum power point tracking techniques for photovoltaic array[J]. High Voltage Technology, 2008,34(6):1145-1154.
- [5] 卢志刚,董玉香. 含分布式电源的配电网故障恢复策略[J]. 电力系统自动化,2007,31(1):89-92.
LU Zhigang,DONG Yuxiang. Service restoration strategy for the

distribution system with DGs[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(1):89-92.

- [6] 雷金勇,黄伟,夏翔,等. 考虑相间短路影响的分布式电源准入容量计算[J]. 电力系统自动化,2008,32(3):82-86.
LEI Jinyong,HUANG Wei,XIA Xiang,et al. Penetration level calculation with considerations of phase-to-phase short circuit fault [J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(3):82-86.
- [7] BRAHMA S. Development of an adaptive protection scheme for power distribution systems with high penetration of distributed generation[D]. Clemson,SC,USA:Clemson University,2003.
- [8] DAVIS M,COSTYK D,NARANG A. Distributed and electric power system aggregation model and field configuration equivalency validation testing[EB/OL]. [2006-12-01]. <http://www.osti.gov/bridge/>.
- [9] SO C W,LI K K. Protection relay coordination on ring-fed distribution network with distributed generations[C]//Proceedings of 2002 IEEE Region 10 Conference on Computers,Communications,Control and Power Engineering. Beijing,China:IEEE,2002: 1885-1888.
- [10] DUGAN R C,THOMAS S A,RIZY D T. Integrating Dispersed Storage and Generation(DSG) with an automated distribution system[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems,1984, 103(3):1142-1146.
- [11] GIRGIS A,BRAHMA S. Effect of distributed generation on protective device coordination in distribution system[C]//Proceedings of 2001 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering. Halifax,Canada:[s.n.],2001:115-119.
- [12] URDANETA A J,NADIRA R,PEREZ L G. Optimal coordination of directional overcurrent relays in interconnected power systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery,1988,3(3):903-911.
- [13] PEREZ L G,SORRENTINO E,HERNANDEZ A E,et al. Application of adaptive reclosers to automatic distribution systems [C]//Proceedings of IEEE PES Winter Meeting. Caraca, Venezuela:IEEE,1995:159-163.
- [14] LI Yongli,LI Shengwei,LIU Sen. Effects of inverter-based distributed generation on distribution feeder protection[C]//Proceedings of the 8th International Power Engineering Conference. Singapore:[s.n.],2007:1386-1390.
- [15] WAN Hui. Protection coordination in power system with distributed generations[D]. Hong Kong,China:Hong Kong Polytechnic University,2006.
- [16] VIAWAN F A,KARLSSON D,SANNINO A,et al. Protection scheme for meshed distribution systems with high penetration of distributed generation[C]//Power Systems Conference:Advanced Metering,Protection Control,Communication and Distributed Resources. Clemson,SC,USA:[s.n.],2007:99-104.

作者简介:

李 斌(1971-),男,河南孟州人,副教授,博士研究生,研究方向为电力系统继电保护、可再生能源发电技术(E-mail: Bin_li920723@163.com);

袁 越(1966-),男,陕西西安人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统优化运行、电力系统稳定分析与控制、电力经济技术与运营管理。

(下转第 23 页 continued on page 23)

[19] CONROY J F,WATSON R. Low-voltage ride-through of a full converter wind turbine with permanent magnet generator [J]. IET Renewable Power Generation,2007,1(3):182-189.

作者简介:

凌 禹(1975-),男,山西阳高人,讲师,博士研究生,从

事风力发电技术、电力电子及其应用等方面的研究(E-mail:pleasurely@126.com);

高 强(1975-),男,福建龙岩人,副教授,博士,研究方向为风力发电技术、电机控制;

蔡 旭(1964-),男,江苏徐州人,教授,博士研究生导师,研究方向为风力发电、电力系统、储能。

Improvement of low-voltage ride-through by coordinated pitch control and Crowbar control for DFIG wind turbine

LING Yu^{1,2},GAO Qiang¹,CAI Xu^{1,3}

(1. WPRC,School of Electronic Information and Electrical Engineering,Shanghai Jiao Tong University,Shanghai 200240,China;2. Department of Electrical Engineering,Shanxi Datong University,Datong 037003,China; 3. SKLOE,School of Naval Architecture,Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University,Shanghai 200240,China)

Abstract: A scheme of coordination between pitch control and Crowbar control is presented,which prevents the over-speed trip,improves the system speed stability and ensures the low-voltage ride-through of DFIG (Doubly Fed Induction Generator) wind turbines by limiting the over current of rotor and suppressing the rapid increase of its speed. Simulative experiments are performed with MATLAB/Simulink for two voltage faults with different time durations and results show that the enhancement of ride-through capability is more obvious for long time voltage fault,verifying the validity of the proposed ride-through scheme.

Key words: doubly fed induction generator; Crowbar protection; wind power; pitch control; coordinated control

(上接第 17 页 continued from page 17)

Impact of grid-connected photovoltaic power generation on protection and reclose,and its countermeasures

LI Bin^{1,2},YUAN Yue¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering,Hohai University,Nanjing 210098,China; 2. Hydroelectric Engineering Department,Qinghai University,Xining 810016,China)

Abstract: The impact of grid-connected photovoltaic power generation on protection and reclose is analyzed and the setting current of protection is given for preventing it from improper operations caused by the reverse current from photovoltaic power generation system. Based on the traditional protection configuration, two feeder protection schemes are proposed for the distribution network including photovoltaic power generation system. Scheme 1:the directional pilot protection and the inverse-time over-current protection are configured according to the grid-connection location of photovoltaic power generation system,which can switch out the fault reliably when the output power changes. Scheme 2:based on the directional current protection,the section I of each feeder protection at the level higher than the photovoltaic system and the section I of the feeder protection at lower level are included in a communication unit and the fault is rapidly isolated in the smallest area by the protection according to the new setting principle and the operating results of two-stage protection. Simulative results for a 10 kV distribution system have verified the validity of the proposed schemes.

Key words: photovoltaic; electric power generation; grid connection; relay protection; reclose; models