

DOI: 10.7667/PSPC151666

含光伏电源配电网的复合序网自适应保护

杨秋霞¹, 姜培培², 刘同心¹, 魏玲玲¹

(1. 燕山大学电气学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 国网宁晋县供电公司, 河北 邢台 055550)

摘要: 含光伏电源(PV)的配电网, 因光伏电源容量、并入位置不同, 导致传统的三段式电流保护不能准确动作。针对这一问题, 提出根据保护点复合序网电压和电流进行自适应电流保护整定的方案。首先, 提取故障电压和正序故障电流相位差来判定故障发生在光伏电源上游还是下游。然后, 由序分量判定故障类型, 选定故障区域。最后, 利用复合序网电压求取保护安装处的电流整定值, 进行自适应保护动作。通过仿真验证了该保护方案可根据光伏电源并入位置、容量、发生故障位置的不同, 实现自适应在线保护整定, 能够有效提高本地保护范围。

关键词: 光伏电源; 配电网; 复合序网; 自适应电流保护; 故障方向判定

Photovoltaic power distribution network in composite sequence network adaptive protection

YANG Qiuxia¹, JIANG Peipei², LIU Tongxin¹, WEI Lingling¹

(1. School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China;
2. State Grid Ningjin County Power Supply Company, Xingtai 055550, China)

Abstract: Traditional three-step current protection in distribution network containing photovoltaic power (PV) power can't operate accurately due to different PV supply capacity and incorporated position. In order to solve this problem, this paper puts forward to proceed with adaptive current protection setting according to the composite sequence network voltage protection point. First of all, it extracts the fault voltage and positive sequence fault current phase difference to determine the fault occurred in the PV power supply upstream or downstream. Then, it selects sequence component to judge fault type and fault zone. Finally, it uses the composite sequence network voltage to obtain the current setting value in protection installation, to carry out adaptive protection setting movement. The protection scheme is verified by the simulation. It can realize adaptive on-line protection setting and effectively improve the scope of local protection based on different incorporated position, capacity, and failure location of PV power.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61573303).

Key words: photovoltaic power; distribution network; composite sequence nets; adaptive current protection; fault direction judgement

0 引言

光伏电源(PV)并入电网后, 不仅会改变原有配电网拓扑结构, 并且网络中潮流方向和短路电流会随着光伏电源容量、并入位置的情况实时变化。这都给现有的三段式电流保护带来严重影响, 引起保护拒动或误动^[1-3]。

针对光伏电源对配电网保护的影响, 相继提出了多种解决方案。文献[4]提出了基于高级馈线终端单元(AFTU)的保护控制技术, 根据本地及临近的信息, 定位故障区段, 实现故障的隔离及孤岛运行。

文献[5]提出了基于通信技术的区域保护方案, 对配电网进行区域划分, 通过一次和二次两步定位确定故障区域实现保护。但若信息传输有误, 将直接影响保护动作。文献[6]通过保护安装处的正序电压和正序电流之间的关系, 提出了配电网正序电流速断保护。但没有针对光伏上下游电流方向进行分析, 容易引起多段线路保护同时动作。本文根据保护处的信息, 先判定了 PV 上下游故障方向再进行复合序网的自适应电流保护动作。

1 光伏并网仿真算例

在配电网发生故障时, 光伏电源采用恒功率控制^[7-8], 光伏并网逆变器内的限流装置, 可以限制光

伏电源输出电流, 使 PV 最大输出电流限定为 1.2 倍的额定电流^[9]。因光伏电源输出为三相正序电流, PV 可等效为存在于正序网络的压控电流源^[10]。

本文以 10 kV 配电网为例, 系统基准容量为 500 MVA, 基准电压 10.5 kV。主要研究系统发生最严重故障(最大运行方式)时的保护情况, 取系统阻抗为 0.29 mH, 即 $Z_{S,min} = j0.091 \Omega$, 馈线负荷为 $Z_L = 30 + j15.7 \Omega$ ^[11]。架空线型号选取 LGJ-120/25, 电缆线型号选取 YJLV22-150/60^[12], 线路参数参考表 1。搭建模型线路图如图 1 所示。

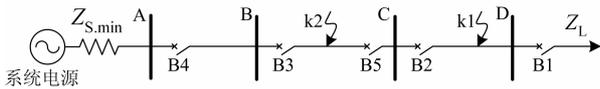


图 1 配电网算例模型

Fig. 1 Distribution network model

表 1 算例线路参数

Table 1 Example circuit parameters

配电网线路参数			
线路名称	线路长度/km	线路类型	线路总阻抗/ Ω
AB	2	架空线	$0.54+j0.694$
BC	2	架空线	$0.54+j0.694$
CD	7	电缆	$1.81+j0.654$

在算例中并入等效的光伏电源, 研究光伏电源在不同位置以不同容量并入到配电网时, 对线路短路电流的影响。本文选用 5 MVA 光伏电源和 10 MVA 光伏电源分别并入到馈线的 A 母线和 C 母线上, 在 PSCAD 中搭建仿真模型如图 2 所示。

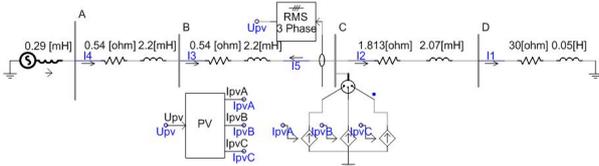


图 2 PSCAD 中含光伏并网的仿真模型

Fig. 2 Simulation model of PSCAD containing PV grid

在图 2 仿真模型中, 首先, 考虑未加入光伏等效电源, CD 线路末端三相短路故障时, PV 上游和下游流过保护装置的电流。然后, 在母线 C 上并入 5 MVA 光伏电源, 分析相同位置发生相同短路故障时流过保护装置的电流。并入 PV 前后保护 2 和保护 3 的电流波形如图 3 所示。其中, 0.4 s 加入故障, I_2 和 I_3 分别为流过保护 2 和保护 3 的电流。

1) 由图 3 分析, PV 并网后其下游发生故障时,

PV 对上游电流有汲出作用, 对下游电流有助增作用。这将引起 PV 上游流过保护的故障电流小于原有的保护整定值, 引起保护拒动, 导致不能及时切除故障。PV 下游流过保护的短路电流增加, 可能会达到下游保护整定值, 导致无故障线路断开, 引起保护误动。

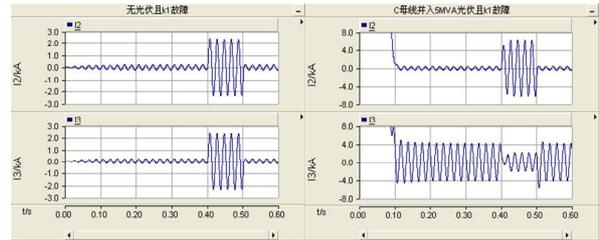


图 3 C 母线并入光伏前后的电流波形

Fig. 3 Current waveform before and after C bus is connected to PV

2) 图 4 为 C 母线并入 10 MVA 光伏和 A 母线并入 5 MVA 光伏下, CD 末段发生三相短路的电流波形。

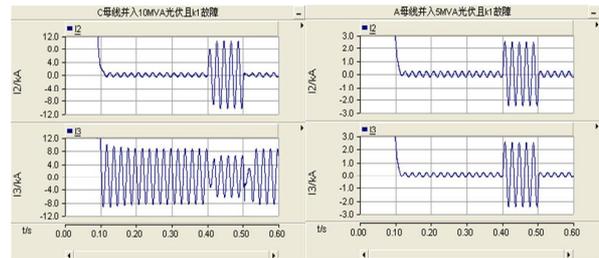


图 4 光伏并入不同母线后的电流波形

Fig. 4 Current waveform when PV is connected into different buses

结合图 3 和图 4 分析可得, 当 PV 与故障点距离增大, PV 对其上游故障电流的汲出作用增大, 对其下游故障电流的助增作用减小。随着 PV 容量增大, 其对上下游线路电流的影响程度也就越大。

2 自适应复合序网电流保护方案

为解决配电网因光伏并网而引起保护误动或拒动问题, 本文采用故障下的复合序网进行分析, 研究出适用于光伏接入的自适应电流保护方法, 并按对称故障和不对称故障两种整定方案进行整定。

2.1 发生两相故障时情况

1) 光伏下游 k1 发生两相故障

采用图 1 算例, 在 CD 线路的 k1 处发生 BC 两相短路。两相相间短路为不对称故障, 不对称故障的复合序网由正序、负序和零序网络叠加而成^[13]。 α 为故障线路占本段线路的百分比, E_s 为系统侧电

压相量, \dot{I}_{PV} 为光伏输出电流相量。 \dot{U}_{B2} 为保护 B2 不对称复合序网的测量电压, \dot{U}_{k1} 为复合序网在故障点 k1 处的电压。 $\dot{U}_{B3}^{(1)}$, $\dot{U}_{B2}^{(1)}$, $\dot{U}_{k1}^{(1)}$ 为其正序网络测量值, $\dot{U}_{B3}^{(2)}$, $\dot{U}_{B2}^{(2)}$, $\dot{U}_{k1}^{(2)}$ 为其负序网络测量值。其他变量定义同理。图 5 为 k1 处发生两相短路故障时, A 相不对称正序网络图。

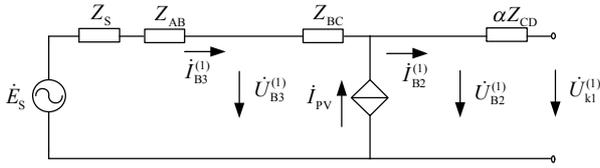


图 5 k1 处两相短路, A 相不对称正序网络

Fig. 5 A phase asymmetric positive sequence network when k1 occurs two-phase short circuit

不对称负序网络是将正序网络中的电压源短路, 电流源开路, 此时短路点端口电压为 $\dot{U}_{k1}^{(2)}$, 图 6 为 k1 处两相短路, A 相不对称负序网络。

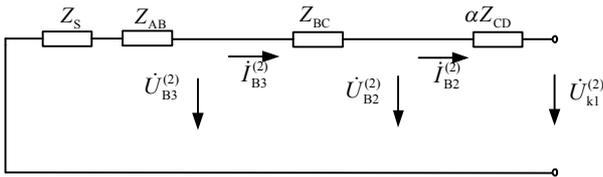


图 6 k1 处两相短路, A 相不对称负序网络

Fig. 6 A phase asymmetric negative sequence network when k1 occurs two-phase short circuit

两相短路电流的不对称分量中只存在正序和负序分量, 并且正序网络和负序网络在短路点处的等效端口并联^[14], 所得复合序网如图 7 所示。其中, $Z_1 = Z_S + Z_{AB} + Z_{BC}$ 。

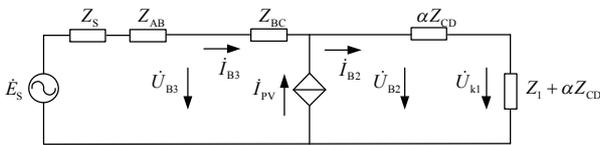


图 7 k1 处两相短路, A 相不对称复合序网络

Fig. 7 A phase asymmetric composite sequence network when k1 occurs two-phase short circuit

由图 7 可得到保护 2 处的复合序网电压 \dot{U}_{B2} 和复合序网电流 \dot{I}_{B2} 的关系式为

$$\dot{U}_{B2} = \dot{I}_{B2} (Z_1 + 2\alpha Z_{CD}) \quad (1)$$

由自适应电流保护整定原则^[15], 考虑保护动作选择性, 取 $\alpha=1$ 。并考虑一定的可靠性而引入可靠系数 $K_k=1.25$, 则在保护 B2 处, 根据复合序网定义可得 B2 的整定电流为

$$I_{B2d} = \left| \frac{K_k \dot{U}_{B2}}{Z_1 + 2Z_{CD}} \right| \quad (2)$$

在式(2)中, B2 整定值会随着保护处的测量电压值在线求得, 并会随着故障类型、故障位置、PV 并网容量的变化而变化, 可以达到自适应实时修改整定电流值, 保障保护准确动作。

2) 光伏上游 k2 发生两相故障

k2 发生 BC 两相短路时, A 相单相运行。分别求出正序、负序网络, 再将正序、负序网络在短路点并联, 可得两相短路时的复合序网, 如图 8 所示。其中, 阻抗 $Z_2 = Z_{CD} + Z_L$, Z_3 为复合序网络的端口等效阻抗, $Z_3 = Z_S + Z_{AB} + \alpha Z_{BC}$ 。

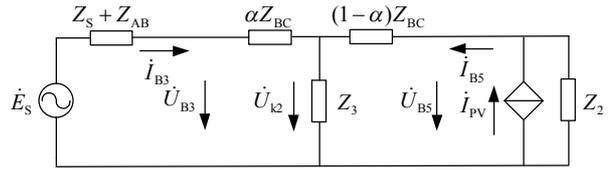


图 8 k2 处两相短路, A 相不对称复合序网络

Fig. 8 A phase asymmetric composite sequence network when k2 occurs two-phase short circuit

对于 PV 上游发生两相短路故障时, 要考虑 PV 上下游保护断开的顺序, 首先考虑 PV 上游保护 B3 断开的整定电流 I_{B3d} 为

$$I_{B3d} = \left| K_k \frac{\dot{U}_{B3} - \dot{I}_{PV} Z_1}{Z_S + Z_{AB} + 2Z_{BC}} \right| \quad (3)$$

根据系统电源电压相量 \dot{E}_S , 得到流过 PV 下游保护 B5 的整定电流 I_{B5d} 为

$$I_{B5d} = \left| K_k \frac{2\dot{U}_{B5} - \dot{E}_S}{Z_S + Z_{AB} + 2Z_{BC}} \right| \quad (4)$$

在线可测得不同故障、不同位置情况下光伏并网的电流, 也可测得保护 B3 和 B5 的电压, 因此保护装置动作的整定电流可以实时自适应调整。而 B3、B5 动作顺序结合下述光伏故障电流方向来判定。

2.2 发生三相短路故障

1) 在 PV 下游 k1 点发生三相短路

三相短路是对称短路, 而光伏电源只能提供三相正序电流, 因此, 含 PV 的配电网其三相短路电流也是对称的。并且, 系统故障时的等值序网只存在正序网络, 无负序和零序网络, 即三相短路的正序网络就是系统复合序网络。k1 处发生三相短路时, 复合序网络为图 9 所示。

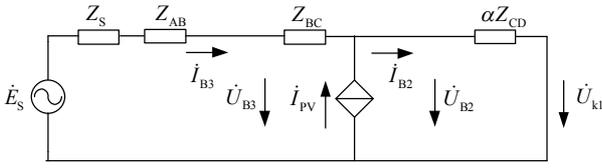


图 9 k1 处三相短路, A 相复合网络

Fig. 9 A phase composite sequence network when k1 occurs three-phase short circuit

保护 B2 的整定电流为

$$I_{B2d} = \left| \frac{K_k \dot{U}_{B2}}{Z_{CD}} \right| \quad (5)$$

不同故障时, 保护处电压可以取在线测量值, 因此保护的整定电流值能实现自适应在线整定。

2) 在 PV 上游 k2 点发生三相短路

图 10 为 k2 点发生三相短路时, A 相复合序网。

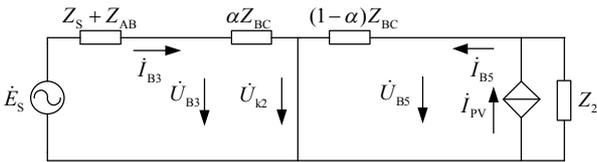


图 10 k2 处三相短路, A 相复合网络

Fig. 10 A phase composite network when k2 occurs three-phase short circuit

考虑一定的可靠性, 由保护 3 和保护 5 处电压电流关系, 可分别求得各保护处的整定电流。

上游保护 B3 整定电流 I_{B3d} 为

$$I_{B3d} = \left| K_k \frac{\dot{U}_{B3}}{Z_{BC}} \right| \quad (6)$$

下游保护 B5 整定电流 I_{B5d} 为

$$I_{B5d} = \left| K_k \frac{\dot{U}_{B5}}{Z_{BC}} \right| \quad (7)$$

不同故障、不同位置光伏并网情况下可在线测得保护 B3 和 B5 处的电压, 由式(6)和式(7)计算得到保护装置的整定电流进行在线实时整定。

3 算例仿真

3.1 保护实现的方向判定

配电网现有的方向元件是功率方向元件, 主要根据非故障相相间电压与保护安装处电流的夹角范围判定故障方向。但光伏电源在任何故障均输出三相对称正序电流, 这将影响到保护点的故障特性, 尤其是不对称故障电压电流特性。

本文中光伏电源处于恒功率模式, 仅输出有功电流, 即光伏并网点电压标幺值大于 0.9^[16], 结合文献[17], 本文提出在正序网络中, 采取正序故障电流和故障前电压相位信息来判定故障方向, 再判断故障类型进行保护动作的方案。设定保护 B1, B2, B3 和 B4 为系统正向保护(光伏反向保护), 保护 B5 为光伏正向保护。

1) PV 下游 k1 点故障

系统总是向故障点供出正序有功功率 P_s 及无功功率 Q_s , 则系统电压 \dot{E}_s 与系统提供的流经正向保护 B2 的正序故障电流 $i_{B2}^{(1)}$ 的夹角 θ_s 满足:

$$\begin{cases} P_s = |\dot{E}_s| |i_{B2}^{(1)}| \cos \theta_s \geq 0 \\ Q_s = |\dot{E}_s| |i_{B2}^{(1)}| \sin \theta_s \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可得:

$$0^\circ \leq \theta_s \leq 90^\circ \quad (9)$$

考虑故障前配电网线路各点电压相位近似相等, 可用故障前各保护安装处电压相量 \dot{U}_B 的相位代替 \dot{E}_s 的相位。则保护处电压 \dot{U}_B 和正序电流 $i_B^{(1)}$ 相角关系按 PV 下游故障考虑, 满足式(10)。

$$0^\circ \leq \arg \frac{U_B}{I_B^{(1)}} \leq 90^\circ \quad (10)$$

2) PV 上游 k2 点故障

本文采用正序网络分析光伏电源供出的故障电流相位特征。k2 点对称和不对称故障情况下系统正序网络均为图 10 所示, 利用戴维南定理, 将图 10 进行等效代换, 如图 11 所示。

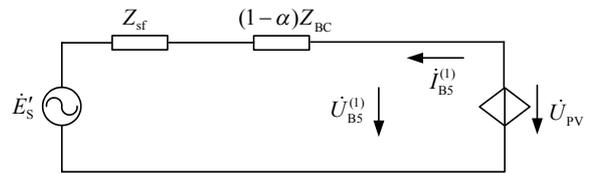


图 11 k2 处故障, A 相等效正序网络

Fig. 11 A phase equivalent positive sequence network when k2 fault

$$\dot{E}'_s = \dot{E}_s \frac{Z_{sf}}{Z_s + Z_{AB} + \alpha Z_{BC}} \quad (11)$$

$$Z_{sf} = Z_3 + \frac{Z_3 [(1-\alpha)Z_{BC} + Z_2]}{Z_3 + (1-\alpha)Z_{BC} + Z_2} \quad (12)$$

$$Z_{SPV} = Z_{sf} + (1-\alpha)Z_{BC} = R_{PV} + jX_{PV} \quad (13)$$

图 11 中, \dot{E}'_s 为系统等效电压量; Z_{sf} 为系统等效阻抗; Z_{SPV} 为系统与 PV 的等效阻抗; 阻抗角设为 φ 。

不考虑无功功率,由电压降落公式可推导出 PV 输出有功功率 P_{PV} 时纵分量满足式(14)。

$$|\dot{U}_{PV} - \dot{E}'_S| = \frac{P_{PV} X_{PV}}{|\dot{U}_{PV}| \sin \varphi} \quad (14)$$

根据 \dot{E}'_S 、 \dot{U}_{PV} 和 $\dot{U}_{PV} - \dot{E}'_S$ 的相量关系, 可得式(15), 再求 \dot{E}'_S 和 \dot{U}_{PV} 的夹角 δ 。

$$\frac{|\dot{E}'_S|}{\sin \varphi} = \frac{|\dot{U}_{PV} - \dot{E}'_S|}{\sin \delta} = \frac{P_{PV} X_{PV}}{|\dot{U}_{PV}| \sin \varphi \sin \delta} \quad (15)$$

设定系统等效电压相量 \dot{E}'_S 滞后系统电压相量 \dot{E}_S 的角度为 θ_E , 由式(11)中的阻抗相角关系可得 $\theta_E \in (2^\circ, 24^\circ)$ 。因光伏电源输出的正序故障电流 $i_B^{(1)}$ 与系统侧电压相量 \dot{E}_S 的夹角 $\theta = \delta - \theta_E$, 结合式(15), 可解得 $\theta \in (-64^\circ, 18^\circ)$ 。

因此, 光伏电源上游发生故障时, 其正向保护的故障电流主要由 PV 提供。同样, 用故障前各保护安装处电压相量 \dot{U}_B 的相位代替 \dot{E}_S 的相位。从 PV 角度研究故障发生位置, 判定故障方向, 其正向保护处故障前电压 \dot{U}_B 和正序电流 $i_B^{(1)}$ 相角关系按 PV 上游故障考虑, 满足式(16)。

$$-64^\circ \leq \arg \frac{\dot{U}_B}{i_B^{(1)}} \leq 18^\circ \quad (16)$$

然而, PV 反向保护的故障电流主要由系统提供。从 PV 角度研究故障发生位置, 判定故障方向, 则保护处故障前电压 \dot{U}_B 和正序电流 $i_B^{(1)}$ 相角关系按 PV 上游故障考虑, 满足

$$-180^\circ \leq \arg \frac{\dot{U}_B}{i_B^{(1)}} \leq -90^\circ \quad (17)$$

结合式(10)、式(16)和式(17), 本文根据保护处故障前电压和正序故障电流的相角判定上下游故障方向, 再按两种整定值进行自适应电流保护动作。判定流程如图 12 所示。

3.2 故障类型的确定

在图 12 中, 对称故障类型的确定可以通过序分量来判定。首先得到保护处各序电流分量 $I^{(1)}$, $I^{(2)}$, $I^{(0)}$ 。当零序分量 $I^{(0)}$ 和负序分量 $I^{(2)}$ 均等于零则说明发生了三相对称故障; 当零序分量不为零则说明发生了不对称接地故障^[18]。故障类型判定流程如图 13 所示。

3.3 算例仿真

继续采用图 1 的模型进行仿真分析, 为了验证不同位置、不同光伏容量下发生不同类型的故障时, 各保护装置整定值可以自适应设定。仿真时, 分别在线路 $\alpha = 0.3, 0.6, 0.9$ 处设定故障点, 而在 C 母

线并入光伏电源, 容量取 5 MVA 和 10 MVA, 仿真数据如表 2、表 3 所示。其中 α 为故障发生位置占保护线路的百分比。

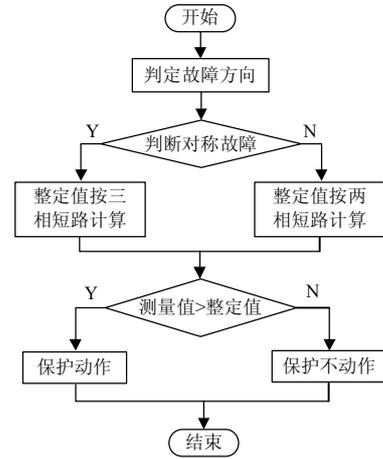


图 12 保护实现流程图

Fig. 12 Flow chart of protection implementation

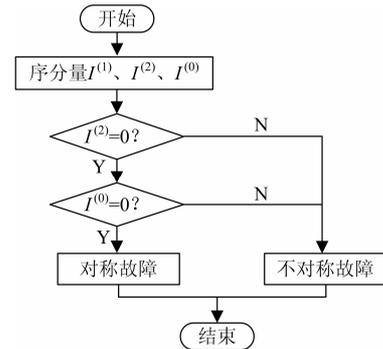


图 13 故障类型判定流程图

Fig. 13 Flow chart of fault type judgement

按照流程图 12 进行仿真, 并进行整定。两相故障时, 仿真结果如表 2 所示。考虑 PV 下游 CD 线段 k1 发生故障情况。无 PV 时, 保护 B2 的保护范围最大为 79.1%, 最小保护范围为 66.0%。在 C 母线上并入 5 MVA 的光伏电源, 但不改变传统保护整定原则, 保护 B2 的保护范围降低为 47%。但是, 采用本文中的复合序网整定原则, 在光伏容量和故障位置不同时, 保护 B2 均能准确动作, 大大提高了保护范围。当 PV 上游 BC 线路 k2 发生两相短路故障, 保护 B3 和保护 B5 的动作整定值会随着光伏并网容量和短路位置的不同, 而自适应地改变, 并大于测量值, 进而实现保护动作。

三相故障时, 仿真结果如表 3 所示。k1 发生三相故障, 在光伏容量和故障位置不同时, 按本文方案进行整定, B2 的保护范围大约维持在线路全长

的 84.2%, 受其他因素影响较小。当 k2 发生三相短路故障时, 无 PV 时, BC 线路最大保护范围为 77.9%, 最小保护范围为 62.1%。在 C 母线上并入光伏电源, k2 在线路不同位置时, 线路首端保护 B3 的保护范围大约为 85.9%, 无法保护线路全长, 但相比于原有保护范围有所提高。而末端保护 B5 随着并入光伏容量, 和 BC 线段故障位置不同, 整定值自适应整定变动, 可以实现保护准确动作。

表 2 BC 两相短路时的仿真结果

Table 2 Simulation results of BC phase short circuit

两相短路时仿真结果							
α	S/ MVA	k1 点故障		k2 点故障			
		保护 B2		保护 B3		保护 B5	
		整定 值/kA	测量 值/kA	整定 值/kA	测量 值/kA	整定 值/kA	测量 值/kA
0.3	5	0.653	2.471	1.087	4.171	0.029	0.421
	10	0.703	2.671	1.044	4.077	0.067	0.788
0.6	5	0.733	1.966	1.223	4.076	0.025	0.433
	10	0.786	2.111	1.173	3.317	0.058	0.811
0.9	5	0.785	1.621	1.316	2.884	0.021	0.439
	10	0.843	1.731	1.262	2.786	0.049	0.827

表 3 三相短路时的仿真结果

Table 3 Simulation results of the three phase short circuit

三相短路时仿真结果							
α	S/ MVA	k1 点故障		k2 点故障			
		保护 B2		保护 B3		保护 B5	
		整定 值/kA	测量 值/kA	整定 值/kA	测量 值/kA	整定 值/kA	测量 值/kA
0.3	5	0.824	3.139	1.329	4.894	0.909	1.626
	10	0.968	3.609	1.331	4.893	1.354	2.327
0.6	5	1.289	2.420	2.163	4.021	0.643	3.111
	10	1.437	2.689	2.165	4.018	0.981	3.044
0.9	5	1.585	1.981	2.746	3.408	0.402	3.770
	10	1.743	2.169	2.729	4.041	0.629	5.655

综上, 采用本文提出的上下游不同保护整定值公式, 可以自适应改变整定值, 有效提高保护动作的准确性。

4 结语

含光伏电源配电网的故障特性和传统辐射式配电网有很大不同。为改善保护性能, 本文通过分析不同位置、不同类型故障情况下, 保护安装处的复合序网电压和流过保护的复合序网电流之间的关系, 研究出适用于 PV 接入的自适应复合序网电流保护方案。仿真验证结果表明, PV 容量、故障类型和故障位置的不同会引起保护范围的变化, 而本文所提出的自适应保护方案可有效改善系统的保护性能。

参考文献

- [1] 周龙, 齐智平. 微电网保护研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 147-154.
ZHOU Long, QI Zhiping. A review of the research on microgrid protection development[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(13): 147-154.
- [2] MARTINEZ J A, MARTIN-ARNEDO J. Impact of distributed generation on distribution protection and power quality[C] // Power and Energy Society General Meeting. Calgary, Canada: IEEE, 2009: 1-6.
- [3] SHAHRIARI S A A, ABAPOUR M, YAZDIAN A, et al. Minimizing the impact of distributed generation on distribution protection system by solid state fault current limiter[C] // Transmission and Distribution Conference and Exposition. New Orleans, LA, USA: IEEE, 2010: 1-7.
- [4] 唐志军, 邹贵彬, 高厚磊, 等. 含分布式电源的智能配电网保护控制方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 9-14.
TANG Zhijun, ZOU Guibin, GAO Houlei, et al. Protection and control scheme for smart distribution grid with distributed resource[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 9-14.
- [5] 肖伟栋, 夏明超, 唐念. 考虑多 DG 接入的配电网区域保护新方案[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 103-109.
XIAO Weidong, XIA Mingchao, TANG Nian. A new regional protection scheme for distribution network considering the introduction of multi-DGs[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 103-109.
- [6] 陈晓龙, 李永丽, 谭会征, 等. 含逆变型分布式电源的配电网自适应正序电流速断保护[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 107-112.
CHEN Xiaolong, LI Yongli, TAN Huizheng, et al. An adaptive instantaneous trip protection based on positive sequence current for distributed distribution network with IBDG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 107-112.
- [7] 王爱霞. 基于恒功率控制的并网模式下微源逆变器控制系统设计[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(3): 48-53.
WANG Aixia. Design of micro-source inverter control system in grid-connected mode based on power control [J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(3): 48-53.
- [8] 陈奇方, 朱小兰, 张文青, 等. 基于 Matlab/Simulink 的分布式电源控制方法[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(4): 36-41.
CHEN Qifang, ZHU Xiaolan, ZHANG Wenqing, et al.

- Control strategy of DG based on Matlab/Simulink[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(4): 36-41.
- [9] 赵拥华, 方永毅, 王娜, 等. 逆变型分布式电源接入配电网对馈线自动化的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 117-122.
ZHAO Yonghua, FANG Yongyi, WANG Na, et al. Research on the impacts on feeder automation by inverter-based distribution generation connected to the distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 117-122.
- [10] 刘健, 同向前, 张小庆, 等. 配电网继电保护与故障处理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [11] 姜玉靓. 适应分布式电源接入的配电网保护研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2014.
JIANG Yuliang. Study on relay protection of distribution system with distributed generations[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2014.
- [12] 陈璐璐. 含分布式电源的配电网保护方案设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
CHEN Lulu. Research on protection of distribution network with distributed generation[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2014.
- [13] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 含逆变型分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 65-74.
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study on fault current characteristics and fault analysis method of power grid with inverter interfaced distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 65-74.
- [14] 夏道止. 电力系统分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [15] 孙景钉, 李永丽, 李盛伟, 等. 含逆变型分布式电源配电网自适应电流速断保护[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(14): 71-76.
SUN Jingliao, LI Yongli, LI Shengwei, et al. Study on adaptive current instantaneous trip protection scheme for distribution network with inverter interfaced DG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(14): 71-76.
- [16] 张海玉, 刘闯, 晁勤, 等. 具有 LVRT 能力的并网光伏系统继电保护问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 53-60.
ZHANG Haiyu, LIU Chuang, CHAO Qin, et al. Research on relay protection issues of grid-connected photovoltaic system with LVRT ability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 53-60.
- [17] 张惠智, 李永丽, 陈晓龙, 等. 具有低电压穿越能力的光伏电源接入配电网方向元件新判据[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(25): 108-109.
ZHANG Huizhi, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. New criteria of directional component in distribution network with photovoltaic generator of low voltage ride through capability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(25): 108-109.

收稿日期: 2015-09-17; 修回日期: 2015-11-26

作者简介:

杨秋霞(1972-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为光伏发电技术; E-mail: yangqx_fly@163.com

姜培培(1990-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为光伏并网的配电网保护; E-mail: jiangpeipei90@163.com

刘同心(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为含新能源发电的优化调度。

(编辑 周金梅)