

DOI: 10.7667/PSPC171166

含光伏电源配电网的自适应距离保护

冯爱成¹, 王宝华¹, 单馨²

(1. 南京理工大学, 江苏 南京 210094; 2. 国网电力科学研究院, 江苏 南京 210003)

摘要: 含光伏电源(PV)的配电网, 因光伏电源的短路电流特性造成距离保护分支系数的不确定性, 进而导致保护的拒动或误动。针对该问题, 根据故障时的复序网络提出基于保护安装处的正序和负序电流的自适应分支系数计算, 并以此为基础确立了距离保护II段阻抗整定值。以某地区配电网为例通过PSCAD/EMTDC加以仿真, 证明了在单相接地故障及相间短路故障情况下该整定方法的准确性与方便性。

关键词: 光伏电源; 配电网; 复合序网; 分支系数; 距离保护

Photovoltaic power distribution network in adaptive distance protection

FENG Aicheng¹, WANG Baohua¹, SHAN Xin²

(1. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: The fault current characteristics of photovoltaic in distribution network causes uncertainty of distance protection branch coefficient, resulting in protection devices refusing to operate or mal-operating. In order to solve this problem, this paper puts forward to proceed with adaptive branch coefficient calculation according to the positive and negative sequence current of the protection. Then, zone II setting of distance protection can be identified. Finally, one distribution network is simulated using the PSCAD/EMTDC. The single-phase grounding fault and two-phase short circuit results of simulation show the validity and convenience of the method.

Key words: photovoltaic power; distribution network; composite sequence nets; branch coefficient; distance protection

0 引言

近年来, 配电网系统中越来越多地采用分布式电源, 而随着分布式电源的大量接入, 将会改变原有电网系统拓扑结构、潮流方向及短路电流。这些都给现有的距离保护带来严重影响, 引起保护拒动或误动^[1-4]。

针对该问题, 国内学者提出了多种解决方案。文献[5]利用光伏逆变器直流侧电压、电流和交流侧电压、电流计算出等效阻抗, 并以此为基础采用序分量原理建立光伏电站等效阻抗与分支系数的关系模型。文献[6]根据不同运行方式下计算得到的光伏电站等效阻抗, 提出了基于修正测量阻抗的自适应接地距离保护方案。文献[7]分析了分布式电源接入时配电网故障电流与距离保护测量阻抗的相关特性, 并结合P/Q控制策略下光伏电源的故障电流特性提出了配电网单相接地自适应距离保护整定方法。文献[8]根据系统运行方式、分布式电源的输出

容量及故障发生时的电流特征, 提出自适应相间距离保护整定。

以上的自适应距离保护整定方案需要提供光伏电站的短路电流、逆变器的电压及电流等信息, 需要实时检测光伏电站的运行情况, 并以通信方法获取各项信息, 再进行保护整定, 较为繁琐。本文通过故障时的复序网络消去分支系数中的光伏电站电流分量, 根据保护安装处的正序及负序电流确定分支系数, 并以此为基础进行距离保护整定, 无需通信, 简便快捷。

1 PV控制策略及短路电流特点

正常运行条件下光伏电源输出有功功率, 因此功率因数约等于1^[9-10]。光伏电源的故障电流特性与其采用的低电压穿越策略有关^[11-12]。当配电网发生故障的时候, 根据国网光伏电源接入配电网技术规程要求, 接入电网的光伏电源需具有低电压穿越能力, 光伏电源无功电流输出^[13]满足式(1)。

$$\begin{cases} I_q = 0 & \frac{U_T}{U_N} > 0.9 \\ I_q \geq 1.5(0.9 - \frac{U_T}{U_N})I_N & 0.2 < \frac{U_T}{U_N} \leq 0.9 \\ I_q \geq 1.05I_N & \frac{U_T}{U_N} < 0.2 \end{cases} \quad (1)$$

式中： U_T 为光伏并网点电压； I_N 为光伏电源额定电流； U_N 为系统额定电压。

光伏电源采用 P/Q 控制策略，利用电网电压定向向量控制策略实现逆变器交流侧的有功功率无功功率的解耦，分别通过输出电流的 d 、 q 轴分量进行解耦，当检测到并网点正序电压跌落到 90% 以下时，断开功率—电压外环，并在电流内环直接给定有功、无功电流指令^[14]。为了满足式(1)所示现有并网规程要求的无功支撑要求，同时为了抑制电网发生不对称故障时的负序电流，本文采用文献[15]采用的基于并网点正序跌落电压的低电压穿越控制策略，因此光伏电源的等值计算模型可表示为

$$\begin{cases} I_{PV} = \sqrt{i_d^{*2} + i_q^{*2}} \\ \varphi_{cvi} = \varphi_{ci} - \varphi_{cv} = \arctan(i_q^* / i_d^*) \end{cases} \quad (2)$$

其中：

$$\begin{cases} i_d^* = i_{d0}^*, i_q^* = 0; \\ V_{PV(1)} \geq 0.9 \\ i_d^* = i_{d0}^*, i_q^* = 2(1 - V_{PV(1)}); \\ i_q^* \leq \sqrt{I_{PV.set}^2 - (i_{d0}^*)^2} \text{ and } 0.4 < V_{PV(1)} < 0.9 \\ i_d^* = \sqrt{I_{PV.set}^2 - i_q^{*2}}, i_q^* = 2(1 - V_{PV(1)}); \\ i_q^* > \sqrt{I_{PV.set}^2 - (i_{d0}^*)^2} \text{ and } 0.4 < V_{PV(1)} < 0.9 \\ i_d^* = 0, i_q^* = 1.2; \\ V_{PV(1)} < 0.4 \end{cases}$$

式中： i_{d0}^* 为故障前逆变器电流内环的有功电流指令； i_d^* 、 i_q^* 分别为逆变器电流内环的 d 、 q 轴分量的指令值； $V_{PV(1)}$ 故障发生时并网点电压的正序分量。

从光伏电源的正序压控电流源模型^[16-19]可以看出，不同故障情况下，光伏电源提供的是对称短路电流。当配电网发生不同类型故障及不同故障位置时，其并网点的正序电压不同，根据光伏电源的控

制策略，其提供的有功及无功电流将会不同，这将对传统的距离保护整定带来一定的影响。

2 光伏电站的接入对电网距离保护的影响

如图 1 所示为单个光伏电源的“T”型接线方式^[5-6]，S 为系统电源，PV 为光伏电源，保护 1、2 分别是安装在母线 A、B 出口处的距离保护，本文主要分析光伏电站接入后对保护 1 的距离保护 II 段的影响。

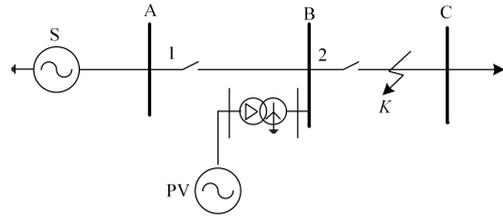


图 1 配电网算例模型

Fig. 1 Distribution network model

在非故障情况下，保护 1 的测量阻抗等于负荷阻抗。当线路发生短路故障时，保护的测量阻抗大小和保护安装点到短路点的距离成正比^[20]。母线 A 处的保护 1 的距离 I 段，保护范围只有本线路的 80%，因此并不会受光伏电站接入的影响。但是保护 1 的距离保护 II 段的保护范围需要延伸到 BC 段线路，光伏分布式电源的接入使得原来的单电源结构变成多电源网络，形成助增电源的情况，这将对距离保护的 II 段整定产生影响。

以图 1 所示的配电网中 K 点发生短路故障时的情况为例，进行分析讨论。按照对称分量法，可以求出保护安装处各相电压，此处给出 A 相电压表达式如式(3)所示，B、C 相电压类似。

$$\begin{aligned} \dot{U}_{1A} = & Z_{AB1}(\dot{I}_{11} + \dot{I}_{12}) + Z_{AB0}\dot{I}_{10} + Z_{BK1}(\dot{I}_{21} + \dot{I}_{22}) + \\ & Z_{BK0}\dot{I}_{20} + \dot{U}_{KA} = Z_{AB1}(\dot{I}_{1A} + K \times 3\dot{I}_{10}) + \\ & Z_{BK1}(\dot{I}_{2A} + K \times 3\dot{I}_{20}) + \dot{U}_{KA} \end{aligned} \quad (3)$$

式中： K 为零序电流补偿系数， $K = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1}$ ； i_{1A} 为

流过保护 1 的 A 相电流； i_{2A} 为流过保护 2 的 A 相电流； i_{11} 、 i_{12} 、 i_{10} 分别为流过保护 1 的正序、负序和零序电流； i_{21} 、 i_{22} 、 i_{20} 分别为流过保护 2 的正序、负序和零序电流； \dot{U}_{KA} 为故障点 K 处的 A 相电压； Z_{AB1} 、 Z_{AB0} 为线路 AB 的正序、零序阻抗； Z_{BK1} 、 Z_{BK0} 分别为母线 B 至短路点 K 处的正序、零序阻抗。

假设线路 BC 发生 A 相单相接地金属性短路，

保护 1 的测量阻抗为

$$Z_{1m} = \frac{\dot{U}_{1A}}{\dot{I}_{1A} + K \times 3\dot{I}_{10}} = Z_{AB1} + Z_{BK1} + Z_{BK1} \frac{\dot{I}_{PV,A} + K \times 3(\dot{I}_{20} - \dot{I}_{10})}{\dot{I}_{1A} + K \times 3\dot{I}_{10}} = Z_{AB1} + K_{f(1)} Z_{BK1} \quad (4)$$

式中: $\dot{I}_{PV,A} = \dot{I}_{2A} - \dot{I}_{1A}$, 为光伏电站提供的 A 相电流; $K_{f(1)}$ 为接地距离保护分支系数。

假设线路 BC 发生 BC 两相金属性短路, 保护 1 的测量阻抗为

$$Z_{1m} = \frac{\dot{U}_{1B} - \dot{U}_{1C}}{\dot{I}_{1B} - \dot{I}_{1C}} = Z_{AB1} + (1 + \frac{\dot{I}_{PV,B} - \dot{I}_{PV,C}}{\dot{I}_{1B} - \dot{I}_{1C}}) Z_{BK1} = Z_{AB1} + K_{f(1.1)} Z_{BK1} \quad (5)$$

式中: $\dot{I}_{PV,B}$ 、 $\dot{I}_{PV,C}$ 为光伏电站提供的 B、C 相电流; $K_{f(1.1)}$ 为相间距离保护分支系数。

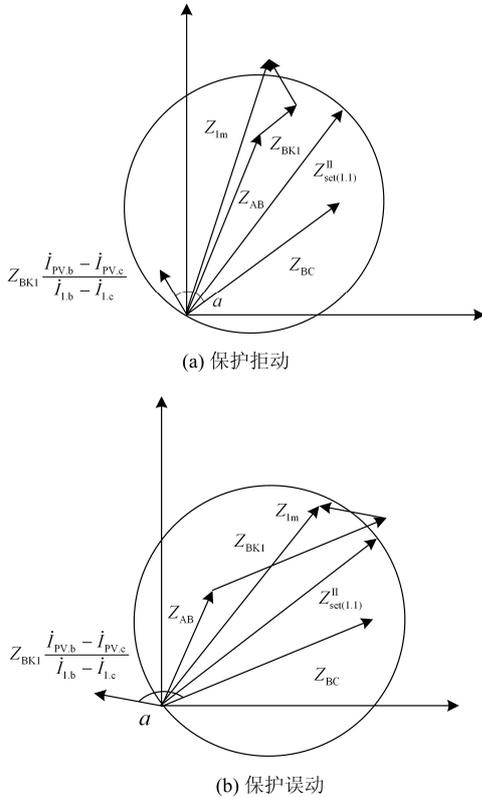


图 2 光伏短路电流对保护测量阻抗的影响

Fig. 2 Impact of PV plant short-circuit current on measured impedance

从式(4)、式(5)可以看出, 保护 1 的测量阻抗会受到光伏电源所提供的短路电流大小及相位的影响。以两相金属性短路为例, 如图2(a)所示, 其中 $Z_{set(1.1)}^{\text{II}}$ 为光伏电站未接入情况下的保护 1 处相间距离保护 II 段整定值, 当 BC 线路首端附近发生两相

短路故障, 由于光伏助增电流的影响, 造成了保护测量值超出原保护定值范围, 造成保护拒动。如图 2(b)所示, 其中 $Z_{set(1.1)}^{\text{II}}$ 为光伏电站未接入情况下的保护 1 处相间距离保护 II 段整定值, 当 BC 线路末端发生两相短路故障, 由于光伏短路电流的影响, 造成了保护测量阻抗低于保护定值范围, 造成保护误动。

因此, 基于距离保护 II 段的要求, 当下级线路发生单相接地故障或相间短路故障时, 由于光伏短路电流的影响, 不同故障位置, 并网点正序电压不同, 光伏短路电流不同, 可能会造成保护的拒动或误动。

3 基于保护安装处正序及负序电流的自适应距离保护整定

3.1 保护 1 的自适应接地距离 II 段整定

图 1 所示的配电网 K 处发生金属性 A 相接地故障时的复序图如图 3 所示。图 3 中 \dot{E}_S 为系统电源, Z_{S1} 、 Z_{S2} 、 Z_{S0} 为系统正序、负序及零序阻抗, Z_{T1} 、 Z_{T0} 为升压变压器正序、零序阻抗, \dot{U}_{k1} 、 \dot{U}_{k2} 、 \dot{U}_{k0} 为故障点的正序、负序及零序电压。

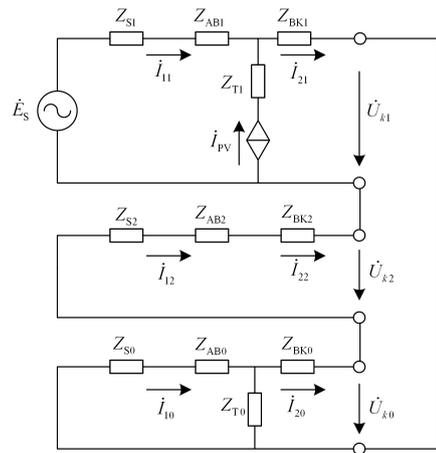


图 3 K 处发生单相接地故障, A 相不对称复合序网络

Fig. 3 A phase asymmetric composite sequence network when K occurs one-phase short circuit

根据基尔霍夫电流定律, 针对图 3 可得到下列方程:

$$\dot{I}_{20} = \dot{I}_{10} \left(1 + \frac{Z_{S0} + Z_{AB0}}{Z_{T0}} \right) \quad (6)$$

由图 3 复合序网络可得 A 相单相接地短路的边界条件:

$$\dot{I}_{21} = \dot{I}_{22} = \dot{I}_{20} \quad (7)$$

由式(4)可得:

$$K_{f(1)} = 1 + \frac{\dot{I}_{PV,A} + K \times 3(\dot{I}_{20} - \dot{I}_{10})}{\dot{I}_{1A} + K \times 3\dot{I}_{10}} \quad (8)$$

显然距离保护的分支系数受到 $\dot{I}_{PV,A}$ 分量的影响, 为了方便确认分支系数, 消除光伏电站提供的短路电流这一不确定因数, 即消去光伏电站提供的 A 相短路电流分量, 将式(6)、式(7)代入式(8)可得:

$$K_{f(1)} = 1 + \frac{(3K - 3K\alpha - \alpha + 2) \frac{\dot{I}_{12}}{\dot{I}_{11}} - 1}{(3K\alpha + \alpha + 1) \frac{\dot{I}_{12}}{\dot{I}_{11}} + 1} \quad (9)$$

式中, $\alpha = \frac{Z_{T0}}{Z_{S0} + Z_{AB0} + Z_{T0}}$ 。

根据式(9)建立基于分支系数自适应接地距离保护 II 段整定值。

$$Z_{1.set(1)}^{II} = K_K^{II} Z_{AB1} + K_K'' K_{f(1)} Z_{2.set(1)}^I \quad (10)$$

式中: $Z_{1.set(1)}^{II}$ 为保护 1 的接地距离保护 II 段的整定值; K_K^{II} 、 K_K'' 为距离保护 II 段可靠系数, 一般取 0.8; Z_{AB1} 为线路 AB 的正序阻抗; $Z_{2.set(1)}^I$ 为保护装置 2 的接地距离保护 I 段的整定值。

3.2 保护 1 的自适应相间距离 II 段整定

图 1 所示的配电网 K 处发生 BC 两相金属性相间短路故障时的复合序网图如图 4 所示^[21]。

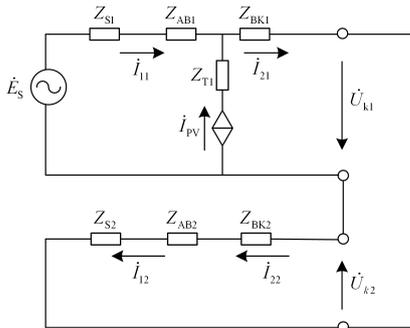


图 4 K 处发生两相接地故障, A 相不对称复合序网络
Fig. 4 A phase asymmetric composite sequence network when K occurs two-phase short circuit

根据基尔霍夫电流定律, 针对图 4 可得到下列方程:

$$\dot{I}_{21} = \dot{I}_{11} + \dot{I}_{PV} \quad (11)$$

由图 4 复合序网络可得 BC 两相短路的边界条件:

$$\dot{I}_{21} + \dot{I}_{22} = 0 \quad (12)$$

由式(12)可得:

$$\begin{cases} \dot{I}_{2B} = a^2 \dot{I}_{21} + a \dot{I}_{22} + \dot{I}_{20} = -j\sqrt{3} \dot{I}_{21} \\ \dot{I}_{2C} = a \dot{I}_{21} + a^2 \dot{I}_{22} + \dot{I}_{20} = j\sqrt{3} \dot{I}_{21} \end{cases} \quad (13)$$

由于光伏电源输出三相对称电流, 则

$$\dot{I}_{PV,B} - \dot{I}_{PV,C} = -j\sqrt{3} \dot{I}_{PV,A} \quad (14)$$

由式(5)可得:

$$K_{f(1,1)} = 1 + \frac{\dot{I}_{PV,B} - \dot{I}_{PV,C}}{\dot{I}_{1B} - \dot{I}_{1C}} \quad (15)$$

同理, 为消去光伏电站提供的 B、C 相短路电流分量, 将式(11)、式(13)及式(14)代入式(15)可得:

$$K_{f(1,1)} = 1 + \frac{1}{2 \frac{\dot{I}_{12}}{\dot{I}_{11}} - 1} \quad (16)$$

根据式(16)建立基于分支系数自适应相间距离保护 II 段整定值。

$$Z_{1.set(1,1)}^{II} = K_K^{II} Z_{AB1} + K_K'' K_{f(1,1)} Z_{2.set(1,1)}^I \quad (17)$$

式中: $Z_{1.set(1,1)}^{II}$ 为保护装置 1 的相间距离保护 II 段的整定值; K_K^{II} 、 K_K'' 为距离保护 II 段可靠系数, 一般取 0.8; Z_{AB1} 为线路 AB 的正序阻抗; $Z_{2.set(1,1)}^I$ 为保护装置 2 的相间距离保护 I 段的整定值。

4 算例验证

为了验证上述推导过程的正确性, 下面在 PSCAD 仿真平台中进行建模仿真。采用如图 5 所示的含光伏电站的配电网拓扑结构, 本文以 110 kV 配电网为例, PV 为光伏电站, 光伏电站输出电压是 690 V, 采用 1 MVA 的逆变器并网, 由 20 组逆变器并联, 经箱式变升压到 35 kV, 再经总变电站连接到 110 kV 电网。

取系统阻抗 $Z_{S1} = j1 \Omega$ 、 $Z_{S0} = j1.2 \Omega$, 箱式变容量为 1 MVA, 变比为 0.69/35 kV, 联结组别为 Dy, 漏电抗为 6.5%, 升压变容量为 20 MVA, 变比为 35/110 kV, 联结组别为 Ynd, 漏电抗为 18%, 线路 AB、BC、CD 为架空线, 型号为 LGJ-120, 参数为 $r_1 = 0.27 \Omega/\text{km}$ 、 $x_1 = 0.409 \Omega/\text{km}$, AB、BC、CD 的长度分别为 10 km、20 km 和 20 km, 馈线末端负荷 5 MVA, 功率因数 0.85。

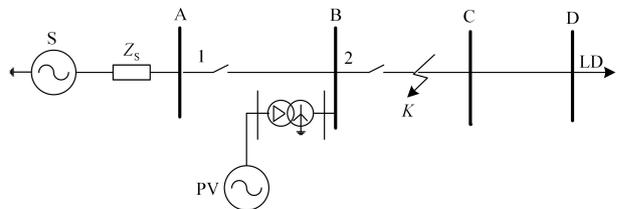


图 5 含光伏电站的配电网
Fig. 5 Distribution network with PV plant

以两相短路为例, 图 6 给出的是 20 MVA 光伏电站容量下, $t=5$ s 时刻下 BC 线路 80% 位置 BC 两相短路故障时 i_{11} 、 i_{12} 的有效值及相位。

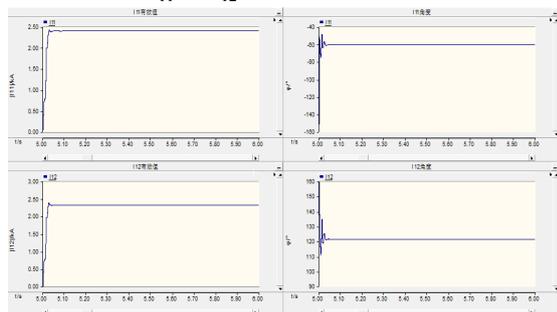


图 6 短路电流有效值及相位

Fig. 6 RMS and phase of short-circuit current

表 1 给出的是 20 MVA 光伏电站容量下, BC 线路不同短路点发生单相及两相故障时的分支系数, 说明不同故障位置, 分支系数有差别, 这将会给距离保护整定值带来影响。

表 2 给出的是不同光伏容量下 BC 线路 30% 处发生单相接地故障及相间短路故障时测量阻抗与整

定值的对比结果。由表 2 可知, 通过对比保护 1 测量阻抗与自适应距离保护整定值可以发现, 在 BC 线路 30% 处发生故障, 保护均可可靠动作, 保护范围延伸到下级线路。

表 1 不同故障位置不同故障类型下的分支系数

Table 1 Branch coefficient of different fault position and fault type

故障位置	单相接地故障分支系数	两相短路故障分支系数
90%	1.0671-j0.0112	0.9846+j0.0244
70%	1.0665-j0.0150	0.9846+j0.0197
50%	1.0656-j0.0188	0.9845+j0.0144
30%	1.0649-j0.0232	0.9851+j0.00869
10%	1.0647-j0.0284	0.9884+j0.00645

表 3 给出的是不同光伏容量下 BC 线路 80% 处发生单相接地故障及相间短路故障时测量阻抗与整定值的对比结果。由表 3 可知, 通过对比保护 1 测量阻抗与自适应距离保护整定值可以发现, 在 BC 线路 80% 处发生故障, 保护均不会动作, 保护范围不会超出下级线路距离 I 段保护范围。

表 2 BC 线路 30% 处短路故障时的仿真结果

Table 2 Simulation results of short circuit at 30% of the BC line

S/MVA	单相短路故障				两相短路故障			
	保护 1 测量 阻抗/ Ω	式(4)计算 值/ Ω	式(8)整定 值/ Ω	式(9)整定 值/ Ω	保护 1 测量 阻抗/ Ω	式(5)计算 值/ Ω	文献[8]整定 值/ Ω	式(16)整定 值/ Ω
20	4.483+j6.666	4.481+j6.655	5.530+j8.113	5.527+j8.090	4.275+j6.522	4.273+j6.511	5.087+j7.805	5.084+j7.782
15	4.501+j6.670	4.499+j6.660	5.569+j8.112	5.567+j8.101	4.283+j6.537	4.281+j6.527	5.102+j7.841	5.101+j7.816
10	4.515+j6.668	4.513+j6.657	5.601+j8.117	5.597+j8.094	4.295+j6.546	4.293+j6.536	5.130+j7.858	5.127+j7.835
5	4.526+j6.662	4.524+j6.651	5.624+j8.104	5.621+j8.081	4.308+j6.548	4.306+j6.537	5.157+j7.861	5.155+j7.838

表 3 BC 线路 80% 处短路故障时的仿真结果

Table 3 Simulation results of short circuit at 80% of the BC line

S/MVA	单相短路故障				两相短路故障			
	保护 1 测量 阻抗/ Ω	式(4)计算 值/ Ω	式(8)整定 值/ Ω	式(9)整 定值/ Ω	保护 1 测量 阻抗/ Ω	式(5)计算 值/ Ω	文献[8]整 定值/ Ω	式(16)整定 值/ Ω
20	7.395+j11.014	7.389+j10.971	5.484+j8.157	5.479+j8.122	6.810+j10.628	6.804+j10.585	5.015+j7.848	5.011+j7.814
15	7.467+j11.015	4.459+j10.970	5.542+j8.158	5.535+j8.121	6.865+j10.668	6.860+j10.625	5.060+j7.881	5.056+j7.846
10	7.520+j10.995	7.512+j10.949	5.584+j8.141	5.578+j8.104	6.935+j10.674	6.920+j10.632	5.108+j7.886	5.104+j7.851
5	7.569+j10.967	7.561+j10.921	5.623+j8.118	5.617+j8.082	6.978+j10.660	6.972+j10.616	5.150+j7.874	5.145+j7.838

将本文推导的分支系数代入式(4)、式(5)计算出的阻抗值与测量阻抗相比, 电阻值近似相等, 电抗值差值约为 0.1 km 的架空线电抗。将本文提供的整定方法与式(8)及文献[8]对比, 整定阻抗值最大相差 0.45%, 不论是在相邻 BC 线路 30% 以及 80% 处发生单相或两相短路故障, 都能保证动作的可靠性, 说明本文提供的基于保护安装处正序及负序电流的自

适应整定方法完全能够获得与前文献相同的效果, 相较前文献自适应分支系数计算需提供光伏短路电流, 本文的方法更加简便。

5 结论

本文分析了光伏电站的接入会对原线路的距离保护造成影响, 不同容量不同故障位置时的分支系数不同, 若按原定值整定, 可能导致保护的拒动或

误动。为改善保护性能, 本文通过分析光伏电站接入后单相接地故障及相间短路故障的复合序网电流之间的关系, 提出基于保护安装处正序及负序电流的自适应距离保护整定。仿真验证表明, PV 容量、故障类型和故障位置的不同会引起测量阻抗的变化, 运用该自适应分支系数能够可靠计算出自适应距离保护整定值, 保证动作的可靠性, 同时通过对比前文献的自适应距离保护, 本文提供的自适应距离保护整定方法更加简易, 并能保证准确性。

参考文献

- [1] 王鲍雅琼, 陈皓. 含分布式电源的配电网保护改进方案综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 146-154.
WANG Baoyaqiong, CHEN Hao. Overview study on improving protection methods of distribution network with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 146-154.
- [2] 张勇. 分布式发电对电网继电保护的影响综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(2): 145-151.
ZHANG Yong. Review of impact of distributed generation on distribution system protection[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(2): 145-151.
- [3] 黄大为, 潘波. 考虑 DG 接入位置和容量的配电网保护综合改进方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 64-70.
HUANG Dawei, PAN Bo. Improved methods of distribution network protection scheme considering connection locations and capacity of DG[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 64-70.
- [4] 贾科, 顾晨杰, 毕天姝, 等. 大型光伏电站汇集系统的故障特性及其线路保护[J]. 电工技术学报, 2017, 32(9): 189-198.
JIA Ke, GU Chenjie, BI Tianshu, et al. Fault characteristics and line protection within the collection system of a large-scale photovoltaic power plant[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(9): 189-198.
- [5] 张尧, 晁勤, 王厚军, 等. 基于自适应分支系数的并网光伏电站接地距离保护[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 113-117.
ZHANG Yao, CHAO Qin, WANG Houjun, et al. Ground distance protection of photovoltaic plant connected based on adaptive branch coefficient[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9): 113-117.
- [6] 翟学, 林涛, 吴俊鹏, 等. 含光伏电站的电网自适应接地距离保护研究[J]. 中国电力, 2016, 48(2): 78-83.
ZHAI Xue, LIN Tao, WU Junpeng, et al. Adaptive ground distance of power grid with photovoltaic plant[J]. Electric Power, 2016, 48(2): 78-83.
- [7] 肖慧慧, 申丹伟, 蒋东荣, 等. P/Q 控制策略下的分布式电源自适应距离整定新方法[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2015, 29(4): 86-90.
XIAO Huihui, SHEN Danwei, JIANG Dongrong, et al. New method of distributed power adaptive distance protection based on P/Q control strategy[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2015, 29(4): 86-90.
- [8] 李文泉, 李岁寒, 王上行, 等. 含分布式电源的配网自适应距离保护方案[J]. 电力科学与工程, 2012, 28(9): 1-4.
LI Wenquan, LI Suihan, WANG Shangxing, et al. An adaptive distance protection scheme for distribution system with distributed generation[J]. Electric Power Science and Engineering, 2012, 28(9): 1-4.
- [9] 曾江, 凌毓畅. 光伏电站接入电网的电能质量分析及其应用[J]. 广东电力, 2017, 30(8): 38-46.
ZENG Jiang, LING Yuchang. Analysis and application of power quality of grid-connected photovoltaic power station[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(8): 38-46.
- [10] 陈海飞, 苗淼, 常康. 大型并网光伏电站无功电压控制综述[J]. 陕西电力, 2016, 44(10): 20-26.
CHEN Haifei, MAO Miao, CHANG Kang. Review on reactive voltage control for large-scale grid-connected PV power station[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(10): 20-26.
- [11] 锁军, 张志华, 杨杉, 等. 考虑分布式电源低电压穿越特性的配电网短路电流计算方法[J]. 智慧电力, 2018, 46(4): 22-27, 56.
SUO Jun, ZHANG Zhihua, YANG Shan, et al. A short-circuit current calculation method of distribution network with distributed generation considering low voltage ride through characteristic[J]. Smart Power, 2018, 46(4): 22-27, 56.
- [12] 刘闯, 汪兴浩, 李江, 等. 具有 LVRT 能力的光伏并网系统故障特性研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(2): 98-104.
LIU Chuang, WANG Xinghao, LI Jiang, et al. Research on fault characteristics of grid-connected photovoltaic system with LVRT capability[J]. Smart Power, 2018, 46(2): 98-104.
- [13] 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(12): 106-112.
ZHANG Huizhi, LI Yongli, CHEN Xiaolong, et al. A new criterion of directional component for photovoltaic power source access to distribution network with

- LVRT[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 106-112.
- [14] 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新方法[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.
- [15] YANG Zengli, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. A novel fault-analysis method for the power grid with inverter-interfaced distribution generators[J]. Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 2015, 32(14): 214-223.
- [16] 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.
- [17] 尹项根, 张哲, 肖繁, 等. 分布式电源短路计算模型及电网故障计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 1-9.
YIN Xianggen, ZHANG Zhe, XIAO Fan, et al. Study on short-circuit calculation model of distributed generators and fault analysis method of power system with distributed generators[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 1-9.
- [18] WANG Longchang, GAO Houlei, ZOU Guibin, et al. Modeling methodology and fault simulation of distribution networks integrated with inverter-based DG[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 370-378. DOI: 10.1186/s41601-017-0063-2.
- [19] 陈杏灿, 程汉湘, 彭湃, 等. 光伏电池的建模与光伏发电系统的仿真[J]. 广东电力, 2016, 29(2): 25-29, 58.
CHEN Xingcan, CHENG Hanxiang, PENG Pai, et al. Modeling of photovoltaic cell and simulation on photovoltaic power generation system[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(2): 25-29, 58.
- [20] 贺家李, 李永丽, 董新洲, 等. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 103-106.
- [21] 杨秋霞, 姜培培, 刘同心, 等. 含光伏电源配电网的复合序网自适应保护[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 24-30.
YANG Qiuxia, JIANG Peipei, LIU Tongxin, et al. Photovoltaic power distribution network in composite sequence network adaptive protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 24-30.

收稿日期: 2017-08-03; 修回日期: 2017-09-20

作者简介:

冯爱成(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为光伏并网的配电网保护; E-mail: 1359552505@qq.com

王宝华(1968—), 男, 通信作者, 副教授, 研究生导师, 研究方向为电力系统分析、运行、控制与规划, 电力系统继电保护及安全自动装置。E-mail: wangbaohuaa@163.com

(编辑 张爱琴)