

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.02.021

计及逆变型分布式电源输出特性的 配电网自适应电流保护研究

贾健飞¹, 李博通¹, 孔祥平², 高磊², 张惠智³

(1. 天津大学智能电网教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 南京 210008;
3. 西安理工大学, 西安 710048)

摘要: 分布式电源输出的间歇性、非线性特点给配电网的继电保护配置与整定带来很大困难, 考虑配电网结构的复杂性以及通信设备覆盖全网的高成本问题, 需要研究仅利用保护本地信息进行保护自适应整定的方法。分析并建立了逆变型分布式电源的输出特性方程, 通过求解故障前分布式电源运行点获取分布式电源的实时输出特性, 针对下游保护研究并提出基于本地信息进行自适应电流保护整定的原理及方法。该方法能够不依赖于通信, 准确获取逆变型分布式电源的实时运行参数, 从而提高电流保护整定的可靠性。提出的方法能够在保护定值整定过程中准确计及分布式电源的输出, 对于降低保护配置成本、提高保护整定的可靠性具有重要意义。

关键词: 逆变型分布式电源; 故障输出特性; 自适应电流保护; 本地信息

Research on Adaptive Current Protection for Distribution Network Considering the Output Characteristics of Inverter-interfaced Distributed Generator

JIA Jianfei¹, LI Botong¹, KONG Xiangping², GAO Lei², ZHANG Huizhi³

(1. The Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 210008, China; 3. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The intermittent and nonlinear characteristics of the distributed generator make it difficult to configure and set the relay protection of the distribution network. Considering the complexity of distribution network structure and the high cost of communication equipment covering the whole network, it is necessary to study the protection adaptive setting method using only local information. In this paper, the output characteristics of inverter interfaced distributed generator is analyzed. The method of calculating the running point for distributed generator before the fault occurs based on local information is proposed, the principle and method of self - adaptive current protection are proposed. This method is independent of communication, and can accurately obtain the real-time operating parameters of the distributed generator, thereby improving the reliability of current protection setting. With the method in this paper, the output of distributed generator can be accurately taken into account in the process of setting the value of protection, which is of great significance to reduce the cost of protection configuration and improve the reliability of protection setting.

Key words: inverter - interfaced distributed generator; fault output characteristics; adaptive current protection; local information

收稿日期: 2018-06-26; 修回日期: 2018-08-20

基金项目: 国家电网公司科技项目(适应高渗透率分布式电源接入的配电网继电保护技术研究); 国家自然科学基金项目(配备直流断路器的多端柔性直流系统电缆线路继电保护技术研究)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC(Research on Relay Protection for Distribution Network with High Permeability DGs), the National Natural Science Foundation of China(Research on Relay Protection Technology of Cable Lines in Multi-terminal VSC-HVDC System Equipment with DC Circuit Breakers).

0 引言

逆变型分布式电源(inverter interfaced distributed generator, IIDG)是太阳能等清洁能源利用的重要途径^[1-5],多采用分散接入的方式实现并网。与传统同步发电机相比,其输出特性具有如下特点:一是IIDG的输出受外界环境影响大,具有明显的不规律性和间歇性;二是IIDG采用的电力电子设备使其输出特性呈高度非线性。上述特点给配电网的故障分析和保护整定工作带来了诸多困难,在考虑IIDG影响基础上改进传统配电网的保护原理及整定方法,对提高配电网保护的选择性和可靠性具有重要的实用意义^[6-7]。

目前,针对含IIDG的配电网保护的研究工作可以分为两类,一是基于通讯的手段获取IIDG的信息进行保护原理的改进^[8-9],该类保护可以消除IIDG的故障特性对配电网保护整定的影响,能够实现准确且快速的故障定位^[10-14]。该类保护利用配电网中的远程多点信息,与传统保护相比具有更好的选择性,但对通信的依赖程度很大。另外一类则基于本地信息进行保护的整定与配合。文[15]提出了一种通过高级馈线终端单元(advanced feeder terminal unit, AFTU)进行本地实时检测,并与相邻的AFTU进行信息交互,实现故障区段快速定位并隔离的保护方案。这种方法虽不需要远程多点通信,但仍未脱离外界信息的获取。采用类似方法的还有文[16]提出的针对IIDG多点接入配电网的集成保护方案。另外文[17-18]提出相继速动保护以及无通道保护原理,通过线路对端保护动作信息实现本端保护的加速。此外,文[19]建议在配电网中用距离保护原理替代电流保护,避免IIDG运行方式对保护范围的影响;文[20]提出一种根据配网拓扑结构和运行方式计算故障期间IIDG对故障电流贡献因子的方法,在此基础上提出了保护自适应整定方法。文[21]提出一种利用正序电压和流过保护的电流之间的关系自适应正序电流速断保护方法。上述方法或依赖通讯,或采用了更为复杂的保护原理且需要更多的电气量输入,在经济性和对现有电流保护改进的便利性上仍有不足。

文中针对位于IIDG下游线路的电流保护,研究并提出仅利用保护安装处的电气信息进行IIDG输出功率实时计算计算的方法,在此基础上研究考虑IIDG实时输出功率的自适应电流保护整定方法。

1 逆变型分布式电源输出特性分析

光伏等IIDG一般采用恒功率控制(PQ控制)作为并网控制策略,且采用同步旋转坐标系下的解耦控制方式,在进行等幅Park变换后其输出的有功电流和无功电流与IIDG输出的有功和无功功率的关系为

$$\begin{cases} P_{\text{out}} = \frac{3}{2} u_d i_d \\ Q_{\text{out}} = -\frac{3}{2} u_d i_q \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: P_{out} 、 Q_{out} 分别为IIDG实际输出的有功功率和无功功率; i_d 、 i_q 分别为逆变器的输出电流在 d - q 坐标系下的 d 轴和 q 轴分量,即有功电流和无功电流; u_d 为 d - q 坐标系下的并网点电压 d 轴分量,实际上,由于 d 轴方向与电压矢量同向,并网点电压的 q 轴分量 u_q 为0。

实际中,为改善IIDG的输出特性,上述功率控制多在正序分量中进行,且采用负序电流抑制的控制策略来消除IIDG输出的负序电流。此外,在配电网发生故障时,还要求IIDG具有有限短路电流,以及在一定条件下维持一段时间的不脱网运行,即低电压穿越的能力。

目前国际上比较成熟的关于并网分布式电源的低电压穿越能力的标准是德国提出的,要求当并网点电压跌落超过10%时,电压每跌落1%,分布式电源需额外提供至少2%的无功电流用于支撑电压,同时要求无功响应时间在20 ms之内。另外,根据我国国家电网关于光伏电站并网的技术规范要求,光伏电站在故障输出电流不超过1.2倍额定电流的情况下应连续工作不低于60 s^[22-23]。

根据上述分析,在控制性能良好,IIDG输出电流能够及时跟踪电流指令的情况下,单位功率因数输出下,考虑控制策略、限流措施以及低电压穿越后的IIDG的输出电流在标么制下的表达式为

$$\begin{cases} i_q^* = \begin{cases} 0 & U_{\text{pcc}(l)}^* > 0.9 \\ -2(1 - U_{\text{pcc}(l)}^*) & 0.4 \leq U_{\text{pcc}(l)}^* \leq 0.9 \\ -1.2 & U_{\text{pcc}(l)}^* < 0.4 \end{cases} \\ i_d^* = \min\left(\frac{P_{\text{ref}}^*}{U_{\text{pcc}(l)}^*}, \sqrt{1.2^2 - i_q^{*2}}\right) \\ i_{\text{DG}}^* = \sqrt{i_d^{*2} + i_q^{*2}} \angle \arctan \frac{i_q^*}{i_d^*} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: i_{DG}^* 为IIDG输出电流; P_{ref}^* 为IIDG的有功输出指令; $U_{\text{pcc}(l)}^*$ 为并网点正序电压。

可见,在 P_{ref} 确定的情况下,IIDG可以等效成一个受并网点正序电压控制的正序电流源,对式(2)简化表示为

$$I_{\text{DG}} = f(U_{\text{pcc(l)}}) \quad (3)$$

即IIDG输出的电流为并网点电压的一个非线性函数。

2 基于本地信息的自适应电流保护整定方法

对含有IIDG的配电网的保护,利用远程信息进行保护整定仍需要较高成本,且对信息的准确性要求较高。因此,文中主要研究利用保护本地信息获取保护背侧IIDG的输出特性的原理和方法,并进行保护的自适应整定。

2.1 分布式电源运行参数计算方法

根据文1节的分析,IIDG的输出特性为并网点电压控制的正序电流源,且会受到故障限流控制措施、低电压穿越控制策略的影响,使其故障时的外特性更为复杂。考虑控制策略、限流措施以及低电压穿越后的IIDG的输出电流表达式如式(2)所示。

由此可知,当IIDG的控制策略及参数已知,电流 I_{DG} 为并网点电压 U_{pcc} 的函数。而实际中的IIDG的功率输出参考 P_{ref} 由于最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)而处于动态变化中,对于线路保护而言,在不具备通信的情况下无法获功率参数,因此电流 I_{DG} 应看作 U_{pcc} 和 P_{ref} 的函数,即

$$I_{\text{DG}} = f(U_{\text{pcc}}, P_{\text{ref}}) \quad (4)$$

因此对于不具有通信能力的保护,需要研究依靠本地信息进行IIDG故障前运行点的计算方法,从而更加准确地进行保护定值的整定。

网络拓扑图见图1。对含IIDG的配电网保护进行分析,研究仅依靠本地量获取保护背侧IIDG故障前运行点的方法。

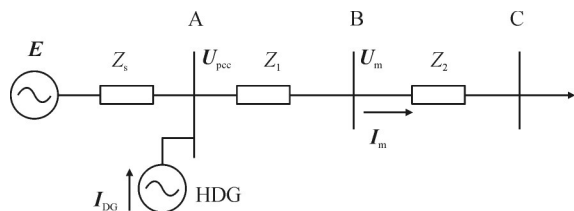


图1 含分布式电源的简单配电网

Fig. 1 Distribution network with distributed generator

对于如图1所示网络,IIDG上游侧系统等效为电压源 E 与电源内阻 Z_s 的串联,并网点正序电压为 $U_{\text{pcc(l)}}$,IIDG输出电流为 I_{DG} ,两段配电线路的阻抗分别为 Z_1 和 Z_2 ,保护安装处的正序测量电压为

U_m ,流过保护的序电流为 I_m ,则可以得到以下关系

$$(I_{\text{DG}} + \frac{E - U_{\text{pcc(l)}}}{Z_s})Z_L = U_{\text{pcc(l)}} \quad (5)$$

$$Z_L = Z_1 + U_{m(l)} / I_{m(l)} \quad (6)$$

式(5)-(6)中: E 为系统等效电源相电压; Z_s 为系统等值阻抗。则DG输出电流可以写为

$$I_{\text{DG}} = \frac{(Z_s + Z_L)U_{\text{pcc(l)}}}{Z_s Z_L} - \frac{E}{Z_s} \quad (7)$$

由式(2)、(7)可以绘出特性关系曲线图,见图2。

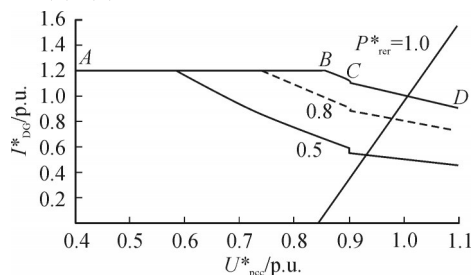


图2 DG输出特性与外部网络特性关系示意图

Fig. 2 Diagram of the relationship between the output characteristics and external network characteristics

图2中的分段曲线为根据式(2)所作的IIDG的输出特性曲线,横坐标为并网点电压标么值,纵坐标为DG输出电流的标么值。IIDG的有功指令发生改变时输出曲线也会发生移动,当 P_{ref}^* 为1.0、0.8、0.5 p.u.时,可以得到图中的3条分段曲线。以 $P_{\text{ref}}^* = 1.0$ p.u.时的DG输出特性曲线为例,该曲线可以分为3段:

1)CD段:并网点电压大于0.9 p.u.时, i_q^* 为0, i_d^* 按照PQ控制策略其值等于 $P_{\text{ref}}^* / U_{\text{pcc}}^*$ 。

2)BC段:并网点电压低于0.9 p.u.,无功电流按低电压穿越策略输出,有功电流 i_d^* 仍按照PQ控制策略进行输出,其值等于 $P_{\text{ref}}^* / U_{\text{pcc}}^*$ 。

3)AB段:DG输出电流达到1.2倍额定电流限制;电压大于0.4 p.u.时,无功电流 i_q^* 小于1.2 p.u.,与并网点电压跌落幅度成两倍正比关系,而有功电流 i_d^* 为 $\sqrt{1.2^2 - i_q^{*2}}$;当并网点电压低于0.4 p.u.时,此时无功电流为1.2 p.u.,有功电流为0,该段曲线与AB段在图中表现一致,未在图2中画出。

图2中的倾斜的直线对应式(7),为考虑IIDG外部网络特性得到的方程(以下称其为外部网络特性曲线),在考虑IIDG外部网络时,IIDG输出电流的大小与并网点电压应该满足该关系。因此,IIDG输出特性曲线与该外部网络特性曲线的交点即为在当前状态下IIDG的实际运行点。式(7)所表示的直线是可以由本地测量确定的,因此总能由两条曲线的

交点确定IIDG的实际运行状态,即式(2)与式(7)联立形成的方程组总是可以求解的,且有唯一解。

相应的,若已知IIDG运行点,同样可以由运行点与式(7)确定IIDG当前输出特性曲线,即确定当前的有功输出指令 P_{ref} 。当系统发生故障时,IIDG的有功指令不会改变,而外部网络特性曲线会发生改变,从而能求得故障后IIDG的运行点,见图3。图3中,直线 l_1 为故障发生前的外部网络特性,直线 l_2 为故障后的外部网络特性。

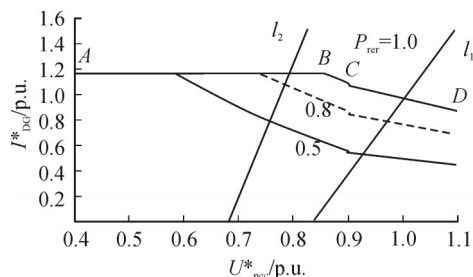


图3 系统故障后IIDG实时运行点示意图

Fig. 3 Real-time running point of IIDG with network fault

下面以图1中BC段线路首端(母线B处)的保护为例,对利用该原理获取上游母线A处接入的IIDG的输出参数的方法步骤进行详细说明。

1)测量正常运行状态时(故障前时刻)保护安装处的基频电压、电流 U_B 、 I_B ,并由此计算保护下游的等效阻抗 $Z_B = U_B/I_B$,由系统等效电势 E 及并网点上游系统等效阻抗 Z_s 、并网点至保护安装处的线路阻抗 Z_1 共同确定IIDG外部网络特性曲线。

$$I_{DG} = \left(\frac{1}{Z_s} + \frac{1}{Z_1 + Z_B} \right) U_{pcc} - \frac{1}{Z_s} E \quad (8)$$

2)根据保护安装处电压 U_B 可以计算得到实时并网点电压 U_{pcc} ,代入上式从而可以确定IIDG的当前运行状态 (U_{pcc}, I_{DG})。其中 U_{pcc} 可以由线路阻抗信息计算

$$U_{pcc} = U_B \left(1 + \frac{Z_1}{Z_B} \right) \quad (9)$$

3)将该运行点代入IIDG的输出特性方程中,就可以确定当前IIDG的输出参考功率定值 P_{ref} ,将该定值代入式(2)即能确定IIDG当前的输出特性方程。由于正常运行时曲线与直线的交点必然在CD段,即此时IIDG仅输出有功电流,IIDG输出的电流与并网点电压同相位,因此求解公式可以简化为

$$P_{ref}^* = U_{pcc}^* I_{DG}^* \quad (10)$$

2.2 自适应电流保护整定方法

电流速断保护作为相间短路故障的保护手段,一般根据保护范围,计算保护范围末端发生短路故

障时的短路电流并作为保护整定的依据。

当配电网线路发生两相相间短路故障时,可由已知的电气信息确定图3中对应被保护线路末端发生两相相间短路的 l_2 ,继而求出IIDG的运行点,即得到故障输出电流 $I_{DG,f}$ 。因此,采用该方法可以准确考虑保护背侧IIDG的输出,提高保护整定的可靠性。

对于两相相间短路故障,由于IIDG仅输出正序电流,因此保护线路末端故障时IIDG故障输出的电流需在正序网络下计算,自适应电流速断保护也相应为正序电流保护。

以图1中BC段线路首端(母线B处)的保护为例,当距B节点 α ($0 < \alpha < 1$)处发生两相相间短路时,系统的复合序网图见图4。图4中忽略了故障点下游负荷及线路的等值阻抗。

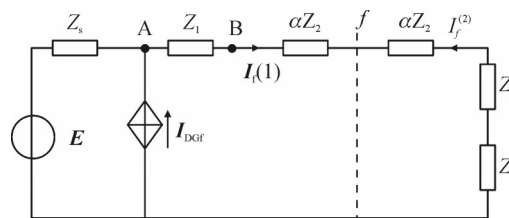


图4 线路BC发生两相相间短路后复合序网图

Fig. 4 Composite sequence network under phase-to-phase short circuit in line BC

由复合序网可以得到当BC段线路距离B端 α 处发生两相相间短路时的正序电流

$$I_f^{(1)} = \frac{E + I_{DG,f} Z_s}{2(Z_s + Z_1 + \alpha Z_2)} \quad (11)$$

式(11)中, $I_f^{(1)}$ 流经保护的序故障电流; $I_{DG,f}$ 为IIDG输出的故障电流; Z_s 为IIDG背侧系统等效阻抗; Z_1 、 Z_2 分别为AB、BC段线路的阻抗。

由此可以得到BC末端 ($\alpha=1$) 发生两相相间短路时的正序故障电流为

$$I_f^{(1)} = \frac{E + I_{DG,f} Z_s}{2(Z_s + Z_1 + Z_2)} \quad (12)$$

$I_{DG,f}$ 由对应线路末端发生两相相间短路故障的外部网络特性曲线与IIDG的输出特性曲线求解获得。

保护的序电流保护整定值为

$$I_{act}^{(1)} = K_{rel} \left| \frac{E + I_{DG,f} Z_s}{2(Z_s + Z_1 + Z_2)} \right| \quad (13)$$

式(13)中考虑了IIDG的故障输出电流对保护定值的影响,且该故障输出电流为以故障前IIDG的实时有功指令计算得到,考虑了IIDG运行方式的变化,保护定值更加准确,且具有自适应的特点。

对于三相短路故障,由于网络中仅含有正序分

量,其故障网络图更加简单,该整定原理同样适用。 BC 线路发生三相短路后的故障电流为

$$I_f = \frac{E + I'_{DG,f} Z_s}{Z_s + Z_1 + \alpha Z_2} \quad (14)$$

式(14)中: I_f 流经保护的故障电流; $I'_{DG,f}$ 为三相短路时 IIDG 输出的故障电流。则保护定值应为

$$I_{act} = K_{rel} \left| \frac{E + I'_{DG,f} Z_s}{Z_s + Z_1 + Z_2} \right| \quad (15)$$

3 仿真验证

为验证文中提出的分布式电源运行参数计算原理及自适应电流保护整定方法的正确性,在 PSCAD/EMTDC 中搭建仿真模型,分别针对文 2.1 节与 2.2 节的原理方法进行仿真验证。

3.1 分布式电源运行参数计算方法仿真验证

如图 1 所示拓扑结构的配电网,电压等级为 10 kV,其中接入的分布式电源采用正序 PQ 控制策略,并采用负序电流抑制策略消除 IIDG 的负序输出。

模型的参数如下:系统线电压有效值为 10.5 kV,

系统等效阻抗 Z_s 为 $2.295\ 6 + j1.377\ 3\ \Omega$; AB 段线路与 BC 段线路阻抗均为 $0.918\ 2 + j0.688\ 7\ \Omega$; C 节点接负载,认为负载等效阻抗未知。

令 DG 的有功输出指令为额定有功功率 3 MW,测得保护安装处的电压与电流数据见表 1。

表 1 额定有功时保护安装处的电压电流测量值

Table 1 Measured value of the voltage and current at Protection installation under rated power

相电压有效值/ kV	相电压相位/ rad	电流有效值/ kA	电流相位/ rad
5.403 4	0.051 1	0.276 9	-0.592 3

由式(6)可以计算得到并网点下游等值阻抗 $Z_L = 16.530\ 5 + j12.395\ 4\ \Omega$,从而能够确定该配电网的 DG 外部特性曲线方程。由式(9)可以计算得到并网点电压 $U_{pcc} = 5.721\ 2 \angle 0.051\ 1\ \text{p.u.}$,将电压代入式(7),即可求得当前 DG 输出电流 $I_{DG} = 0.174\ 4 \angle 0.054\ 4\ \text{p.u.}$,再利用式(10)计算得到实际输出有功 $P_{ref} = 2.993\ 4$ 。

通过调整 IIDG 的有功输出指令,重复进行上述仿真和计算过程,仿真数据及计算结果见表 2。

表 2 仿真结果与计算结果的对比

Table 2 Comparison between simulation results and computational results

有功指令 P_{ref}/MW	测量相电 压有效值/ kV	测量相电 压相位/ rad	测量电 流有效 值/kA	测量电 流相位/ rad	并网点相 电压有效 值/kV	并网点相 电压相位/ rad	DG 输出电 流有效值/ kA	DG 输出 电流相 位/rad	DG 有功 指令计算 值/MW	有功指 令误差 率/%
2.7	5.371 9	0.046 5	0.275 4	-0.596 8	5.688 0	0.046 5	0.156 9	0.039 1	2.677 4	0.837 0
2.4	5.345 7	0.042 0	0.273 9	-0.601 4	5.660 1	0.042 0	0.141 2	0.034 5	2.397 0	0.125 0
2.1	5.314 2	0.037 4	0.272 3	-0.606 0	5.626 8	0.037 4	0.123 6	0.030 6	2.086 4	0.647 6
1.8	5.285 3	0.032 7	0.270 8	-0.610 7	5.596 2	0.032 7	0.107 0	0.021 4	1.796 7	0.183 3
1.5	5.256 5	0.028 1	0.269 3	-0.615 4	5.565 6	0.028 1	0.090 6	-0.005 5	1.512 7	0.846 7

由表 2 可以看出,当 IIDG 的有功指令发生变化时,利用保护安装处测量得到的电压和电流信息能够求解得到当前 IIDG 的输出指令,且仿真的误差率小于 1%,在进行故障分析和保护整定方面能够满足精度要求。仿真验证表明,该计算原理能够利用本地信息准确计算 IIDG 的运行参数 P_{ref} ,因此能够运用于含 IIDG 的配电网自适应电流保护方案的制定。

3.2 自适应电流保护仿真验证

为验证文 2.2 节所述保护整定方法的正确性,在 PSCAD 中建立拓扑的含分布式电源的配电网模型,见图 5。以两相相间短路故障为例进行仿真验证。

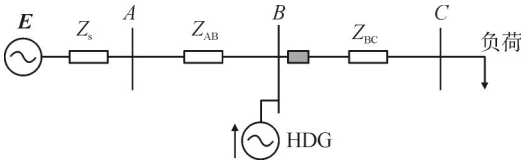


图 5 含 IIDG 的配电网仿真模型拓扑

Fig. 5 Topology of distribution network simulation model with IIDG

系统电源电压有效值为 10.5 kV,等效阻抗 $Z_s = j0.328\ \Omega$,配电线路 Z_{AB} 与 Z_{BC} 阻抗均为 $0.7875 + j1.05\ \Omega$,IIDG 采用正序 PQ 控制策略,额定输出有功为 10.5 MW,额定无功功率为 0,控制策略中包含低电压穿越及输出电流限制,最大电流为

1.2 p.u.。负荷采用三相对称负载,额定功率为 $3.78 + j2.835$ MW。保护安装位置见图5所示。

在线路BC上发生两相短路故障时的仿真结果见表3。

表3 线路BC发生两相相间短路时仿真结果

Table 3 Simulation results under phase-to-phase short circuit in line BC

故障点距B节 点的距离 α	故障电流/kA	定值/kA	
		考虑DG	不考虑DG
0.1	2.216 8		
0.2	2.064 2		
0.3	1.927 6		
0.4	1.809 6		
0.5	1.706 8		
0.6	1.615 2	1.424 8	1.256 8
0.7	1.533 6		
0.8	1.459 6		
0.9	1.394 4		
1.0	1.334 8		

从表3容易看出,在线路BC发生短路故障后,保护在整定时由文2.1节所述方法求解背侧IIDG的输出特性,得到BC段末端相间短路时的IIDG输出电流 $I'_{DG.f}$,其有效值计算结果为0.692 4 p.u,相角为 $-0.248 1$ rad。由表3还可知,保护3的保护范围大于80%,能够满足要求。而在不考虑IIDG时,正序电流保护的整定值为1.256 8 p.u,小于线路末端短路时的短路电流,会造成保护的越级误动。仿真结果表明,提出的仅利用本地信息进行自适应电流保护整定的方法对两相相间短路故障是有效的。

4 结语

针对分布式电源接入的配电网,研究位于分布式电源下游的电流保护的自适应整定方法,提出了仅利用保护安装处的测量电气量进行上游分布式电源实时运行参数获取的原理,并依据该原理针对相间短路故障提出了考虑保护背侧分布式电源实时输出的自适应电流保护整定方法。与传统的自适应保护方案相比,文中提出的原理及方法能够不依赖通讯进行远程分布式电源参数获取,即能够由故障时刻保护安装处的测量电气量,准确计算IIDG当前运行方式下被保护线路末端发短路时IIDG输出的故障电流,并考虑该故障电流对保护定值进行自适应整定,因此能够显著提高保护整定的可靠

性。最后,对提出的基于保护本地信息的背侧分布式电源运行参数计算原理及两相相间短路故障的自适应电流保护整定方法进行了仿真验证,仿真结果证明了该原理及方法的正确性。

参考文献:

- [1] KANWAR N, GUPTA N, NIAZI K R, et al. Optimal distributed generation allocation in radial distribution systems considering customer-wise dedicated feeders and load patterns[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2015, 3(4): 475-484.
- [2] LASSETER R H. Microgrid and distributed generation[J]. Journal of Energy Engineering, 2007, 133(3): 144-149.
- [3] 王成山,李 鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14.
WANG Chengshan, LI Peng. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power System, 2010, 34(2): 10-14.
- [4] HAJAHMED M A, ILLINDALA M S. The influence of inverter-based dgs and their controllers on distribution network protection[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(4): 2928-2937.
- [5] 武 星,殷晓刚,宋 昕,等. 中国微电网技术研究及其应用现状[J]. 高压电器, 2013, 49(9): 142-149.
WU Xing, YING Xiaogang, SONG Xin, et al. Research on microgrid and its application in China[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(9): 142-149.
- [6] 张玉凤,陈松立,吉高卿. 含有逆变器的微网保护方法的研究[J]. 高压电器, 2016, 52(3): 161-164.
ZHANG Yufeng, CHEN Songli, JI Gaoqing. Study on protection method of micro - grid with inverter[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(3): 161-164.
- [7] 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.
- [8] 曾德辉,王 钢,郭敬梅,等. 含逆变型分布式电源配电网自适应电流速断保护方案[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 86-92.
ZENG Dehui, WANG Gang, GUO Jingmei, et al. Adaptive current protection scheme for distribution network with inverter-interfaced distributed generators[J]. Automation of Electric Power System, 2017, 41(12): 86-92.
- [9] 张青杰,陆于平. 基于故障相关区域自适应划分的分布式保护新原理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 39-43.
ZHANG Qingjie, LU Yuping. A new distributed protection principle based on adaptive division for relevant fault area[J].

- Automation of Electric Power System, 2008, 32(7): 39-43.
- [10] 司新跃, 陈青, 高湛军, 等. 基于电流相角突变变量方向的有源配电网保护[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 97-103.
- SI Xinyue, CHEN Qing, GAO Zhanjun, et al. Protection scheme for active distribution system based on directions of current phase angle variation[J]. Automation of Electric Power System, 2014, 38(11): 97-103.
- [11] 孙景钊, 陈荣柱, 蔡轼, 等. 含分布式电源配电网的故障定位新方案[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1645-1650.
- SUN Jingliao, CHEN Rongzhu, CAI Shi, et al. A new fault location scheme for distribution system with distributed generations[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1645-1650.
- [12] 贾浩帅, 郑涛, 赵萍, 等. 基于故障区域搜索的配电网故障定位算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(17): 62-66.
- JIA Haoshuai, ZHENG Tao, ZHAO Ping, et al. Fault location algorithm for distribution system based on fault region searching[J]. Automation of Electric Power System, 2012, 36(17): 62-66.
- [13] 徐丙垠, 薛永端, 李天友, 等. 智能配电网广域测控系统及其保护控制应用技术[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 2-9.
- XU Bingyin, XUE Yongrui, LI Tianyou, et al. A wide area measurement and control system for smart distribution grids and its protection and control applications[J]. Automation of Electric Power System, 2012, 36(18): 2-9.
- [14] 李乃永, 梁军, 赵义术, 等. 考虑分布式电源随机性的配电网保护方案[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 33-38.
- LI Naiyong, LIANG Jun, ZHAO Yishu, et al. Protection schemes for distribution network considering the randomness of distributed generations[J]. Automation of Electric Power System, 2011, 35(19): 33-38.
- [15] 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.
- [16] 李斌, 张慧颖, 王敬朋, 等. 分布式电源多点接入配电系统的集成保护[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15): 90-95.
- LI Bin, ZHANG Huiying, WANG Jingpeng, et al. Integrated protection of distribution system with multi distributed generators integrated[J]. Automation of Electric Power System, 2015, 39(15): 90-95.
- [17] 施慎行, 许刚, 董新洲, 等. 基于无通道保护的配电线路自动化系统现场应用方案[J]. 电工电能新技术, 2013, 32(1): 94-97.
- SHI Shenxing, XU Gang, DONG Xinzhou, et al. A field scheme of feeder automation system based on non-communication protection[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2013, 32(1): 94-97, 103.
- [18] 蔡超豪. 微电网无通道保护研究[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2012, 8(3): 224-227.
- CAI Chao hao. Research on non-communication protection of microgrid[J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2012, 8(3): 224-227.
- [19] 谢昊, 夏冬平, 卢继平. 距离保护在具有分布式电源的配电网系统中的应用[J]. 电气应用, 2006, 25(12): 56-60.
- XIE Hao, XIA Dongping, LU Jiping. Application study of distance relay in the distribution system with distributed generations[J]. Electrotechnical Application, 2006, 25(12): 56-60.
- [20] 马静, 王希, 米超, 等. 含分布式电源的配电网自适应保护新方法[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 204-208.
- MA Jing, WANG Xi, MI Chao, et al. A New adaptive protection approach for distribution network containing distributed generation[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 204-208.
- [21] 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(9): 107-112.
- CHEN Xiaolong, LI Yongli, TAN Huizheng, et al. An adaptive instantaneous trip protection based on positive-sequence current for distribution network with IBDG[J]. Automation of Electric Power System, 2015, 39(9): 107-112.
- [22] 潘国清, 曾德辉, 王钢, 等. 含PQ控制逆变型分布式电源的配电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 555-561.
- PAN Guoqing, ZENG Dehui, WANG Gang, et al. Fault analysis on distribution network with inverter interfaced distributed generations based on PQ control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 555-561.
- [23] 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.

贾健飞(1991—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统保护与控制。