

基于配电网电流保护的分布式电源接入位置研究

分布式电源 (Distributed Generator, DG) 的接入会使配电网的结构发生变化, 同时对配电网电流保护装置的正常动作产生影响。针对DG呈T字形直接接入公共电网线路的10 kV配电网系统, 分析DG接入位置的变化对配电网电流保护装置产生的影响。在配电网的不同位置发生短路时, 通过比较DG接入前后流经保护装置的短路电流大小和方向的变化, 并考虑保护范围及灵敏度系数校验的要求, 给出保护装置整定的约束条件, 从而对DG的接入位置进行约束。最后, 结合具体的10 kV配电网进行算例分析计算, 并分析了DG容量对DG接入范围的影响, 验证了约束条件的有效性。

刘彦超¹ 李春彦¹ 梁睿² 闫超¹ / 1. 中国矿业大学信息与电气工程学院
2. 江苏省煤矿电气与自动化工程实验室



刘彦超/硕士研究生

关键词/Keywords

分布式电源 ·
配电网 ·
电流保护 ·
接入位置 ·
整定值 ·

传统的中低压配电网大都是单侧电源、辐射形网络, 其线路电流保护一般由瞬时电流速断保护、限时电流速断保护和定时限过电流保护的三段式保护组成。当DG接入到配电网中, 配电网变成多电源结构, 在发生短路时将引起短路电流大小和方向的变化, 给继电保护的正常动作造成影响, 从而引起保护的拒动作或误动作。关于DG接入对配电网继电保护影响的研究已取得了一定的成果, 文献[1]探讨了分布式发电对配电网馈线保护及其动作行为的影响, 但只是进行了初步定性的分析; 文献[2]重点分析了DG并入配电网不同位置时对三段式过电流保护及反时限过电流保护动作行为的影响, 为针对分布式发电配电网继电保护的算法研究提供了一定的理论依据; 文献[3]研究了DG对过电流保护灵敏度的影响规律, 提出了多DG配电网的过电流保护修正方案, 但并未就DG接入位

置的选择进行更进一步的研究; 文献[4]以包含DG的35 kV配电系统为模型, 详细讨论了DG容量和并网位置这两个因素对传统三段式电流保护整定的关键变量的影响, 但其研究的模型具有一定的局限性; 文献[5]讨论了在满足继电保护可靠动作的前提下配电网允许接入DG的最大功率, 提出了一种考虑配电网保护动作和DG短路电流衰减特性影响的DG准入容量的分析方法; 文献[6]提出了一种针对架空配电网且根据短路电流信息的改进短路定位策略, 利用重合闸与DG脱网的配合, 解决了含DG架空配电网短路定位的难题。

对于DG呈T字形直接接入线路的配电网, DG接入位置的变化可能会改变短路电流的大小和方向, 对配电网电流保护装置的正常动作产生影响, DG接入位置的选择对配电网继电保护的影响至关重要。目前对这一问题的研究还很少, 本文针对该结构的配电网发生短路时流经保护装置的电流进行了详细的分析, 结合具体实例计算出可能引发保护装置拒动作或误动作的DG接入范围, 为接入位置的选择提供了依据。

含DG的配电网系统

根据《分布式光伏发电接入系统典型设计》中XGF10-T-3方案, 单个并网点容量在300 kW~6 MW的DG可以采用T接公共电网10 kV线路的方式接入电网。本文以典型的10 kV配电网系统为例进行分析, 图1为含DG的某10 kV配电网

系统的示意图。图1中，S为系统主电源； T_1 为配电变压器；L1和L2分别为两线馈线；DG经变压器 T_2 直接接入线路BC间的某一点G处。整个配电网的等效电路如图2所示，在实际情况下，由于配电变压器 T_1 距离主电源S的电气距离较远，故规定变电所变压器的10 kV低压母线最大运行方式和最小运行方式的短路容量相同。图2中， X_S 为主电源S的等效电抗； X_{T1} 为变压器 T_1 的短路电抗； $X_1 \sim X_3$ 分别为线路AB、BC和CD的等效电抗； x 为DG的接入位置G与母线B之间的距离； L 为线路BC的长度， $a = x/L$ ；为了方便分析，假设文中的线路为同一均匀传输介质，则线路BG的电抗 $X_a = aX_2$ ； X_{DG} 为DG的等效电抗； X_{T2} 为变压器 T_2 的短路电抗。

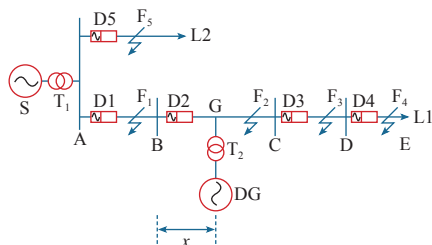


图1 含DG的某10 kV配电网系统示意图

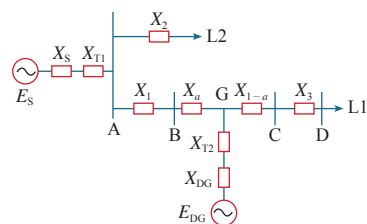


图2 含DG的某10 kV配电网系统等效电路

对于含DG的配电网短路计算，电动机类和采用间接电流控制的变流器类DG等效为电压源串联电抗的形式，且DG的短路电流衰减特性对配电网中短路电流影响很大，本文在研究 I 段保护时采用DG的次暂态电抗 X'_{DG} ，研究 II 段保护和 III 段保护时则采用DG的暂态电抗 X''_{DG} 。

DG接入位置对保护动作的影响分析

配电网中不同位置发生短路时，由于DG的接入点和短路点的相对位置不同，流经保护装置的短路电流也有很大变化。在DG下游、DG上游以及DG所在馈线的相邻馈线等位置发生短路情况下，分别分析了DG接入位置变化对保护装置的影响。

(1) DG上游 F_1 处发生短路

当线路AB上 F_1 处发生短路时，DG接入前后流经保护D1的短路电流均由主电源提供，且大小相等，所以在这种情况下DG的接入对保护D1的动作无影响。但此时会有DG提供的反向电流流经保护D2，如果反向电流值大于保护D2的整定值，会引发保护D2的误动作。因此，保护D2的整定值应大于DG所能提供的最大反向电流，即满足

$$I'_{\text{set.D2}} \geq I_{\text{RE}} = \frac{E_{\text{DG}}}{X'_{\text{DG}} + X_{T2} + X_a} \quad (1)$$

$$I''_{\text{set.D2}} \geq I'_{\text{RE}} = \frac{E_{\text{DG}}}{X''_{\text{DG}} + X_{T2} + X_a} \quad (2)$$

$$I'''_{\text{set.D2}} \geq I'_{\text{RE}} = \frac{E_{\text{DG}}}{X'''_{\text{DG}} + X_{T2} + X_a} \quad (3)$$

式中， $I'_{\text{set.D2}}$ 为保护D2中 I 段保护的整定值； $I''_{\text{set.D2}}$ 为保护D2中 II 段保护的整定值； $I'''_{\text{set.D2}}$ 为保护D2中 III 段保护的整定值； I_{RE} 为系统最大运行方式下线路AB末端B处发生三相短路时流经保护D2的电流。

(2) DG下游 F_2 处发生短路

DG接入后，当线路BC上 F_2 处发生三相短路时，设短路点 F_2 与母线B之间的距离为 d ，令 $b = d/L$ ，系统的短路示意图如图3所示。

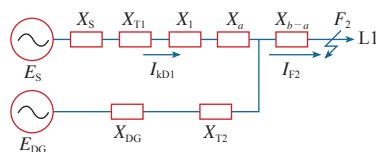


图3 F_2 处发生短路时系统示意图

短路点处的短路电流为

$$I_{F2} = \frac{E_{\text{eq}}}{X_{\text{eq}} + X_{b-a}} \quad (4)$$

其中

$$E_{\text{eq}} = \frac{E_S(X_{\text{DG}} + X_{T2}) + E_{\text{DG}}(X_S + X_{T1} + X_1 + X_a)}{X_S + X_{T1} + X_1 + X_a + X_{\text{DG}} + X_{T2}} \quad (5)$$

$$X_{\text{eq}} = (X_S + X_{T1} + X_1 + X_a) // (X_{\text{DG}} + X_{T2}) \quad (6)$$

$$X_{b-a} = (b - a)X_2 \quad (7)$$

流经保护D2的短路电流由主电源提供，则有

$$I_{k.D2(F2)} = I_{F2} \frac{X_{\text{DG}} + X_{T2}}{X_S + X_{T1} + X_1 + X_a + X_{\text{DG}} + X_{T2}} \quad (8)$$

对式(8)进行化简，令 $X' = X_S + X_{T1} + X_1 +$

X_a , $X'' = X_{DG} + X_{T2}$, $X''' = X_S + X_{T1} + X_l + X_a + X_{b-a}$, 可得

$$I_{k.D2(F2)} = \frac{1}{X''' + \frac{-X'^2 + X'''X'}{X''}} \quad (9)$$

当其他参数保持不变且仅改变DG的接入位置时, X' 和 X''' 为常数, 可得

$$f(X') = \frac{-X'^2 + X'''X'}{X''} \quad (10)$$

$$I_{k.D2(F2)} = \frac{1}{K + f(X')} \quad (11)$$

$f(X')$ 为关于 X' 的一元二次函数, 则流经保护D2的短路电流随 X' 的变化规律如图4所示。

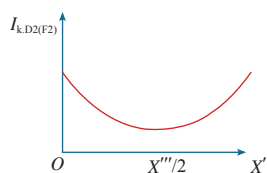


图4 流经保护D2的短路电流随 X' 的变化规律

由图4可以得出如下结论:

1) 当 $X' = X'''/2$ 时, $f(X')$ 取得最大值, 流经保护D2的短路电流将达到最小值。

2) 当主电源所在支路的等效电抗较大, 而线路BC的长度较短或为单位电抗较小的电缆线路时, 在线路BC上不存在 $X' = X'''/2$ 的点, 此时流经保护D2的短路电流随着DG与母线B之间距离的增加呈单调增大趋势。

3) 当线路BC的长度较长或为单位电抗较大的架空线路时, 流经保护D2的短路电流随着DG与母线B之间距离的增加呈先减小后增大的趋势。

当 F_2 处发生短路时, 对DG上游的保护D2而言, 故障点的电流要比保护测得的电流大, 保护的灵敏度降低, 保护范围变小, 可能会使保护拒动作。因此, 保护D2中Ⅱ段保护的整定值应满足

$$K_{sen} = \frac{\sqrt{3} I_{k.D2(C)}}{2 I_{set.D2}} \geq 1.3 \quad (12)$$

即

$$I_{set.D2} \leq 0.67 I_{k.D2(C)} \quad (13)$$

式中, $I_{k.D2(C)}$ 为线路BC末端C处发生三相短路时流

经保护D2的电流。

考虑保护D2中Ⅰ段保护的整定值应该满足

$$I'_{set.D2} \leq I_{k.D2(0.5)} \quad (14)$$

式中, $I_{k.D2(0.5)}$ 为系统最大运行方式下线路BC的中性点发生三相短路时流经保护D2的电流。

(3) DG下游 F_3 处发生短路

当线路CD上 F_3 处发生短路时, DG的接入使流经保护D3的短路电流增大, 保护的灵敏度提高, 对保护装置的动作产生有利影响。

(4) DG下游 F_4 处发生短路

当线路DE上 F_4 处发生短路时, DG的接入会对流经保护D3的短路电流产生助增作用, 使D3的保护范围扩大, 有可能延伸至相邻的下游馈线, 使保护失去配合。所以, 在考虑DG的接入位置时, 应对保护D3中Ⅰ段保护的整定值进行校验, 使其在系统最大运行方式下的保护范围不得超过所在线路CD的全长, 即满足

$$I'_{set.D3} \geq I_{k.D3(D)} \quad (15)$$

式中, $I_{k.D3(D)}$ 为系统最大运行方式下线路DE首端D处发生三相短路时流经保护D3的电流。

(5) DG所在馈线的相邻馈线上 F_5 处发生短路

由于变电站的母线上一般都装配有TV, 馈线L1首端的保护D1可以实现方向性保护, 此时DG的接入不会对相邻馈线保护装置D5的正常动作产生影响。

算例分析

利用图1的10 kV配电网系统进行算例分析, 系统参数如下: 短路容量 $S_d = 200 \text{ MV}\cdot\text{A}$, 馈线L1、L2为同种材质的架空线路, 单位长度的电抗平均值为 $x_0 = 0.38 \text{ }\Omega/\text{km}$, 线路长度 $AB = 5 \text{ km}$, $BC = 5 \text{ km}$, $CD = 18 \text{ km}$, 变压器 T_1 的容量为 $20 \text{ MV}\cdot\text{A}$, 短路电压百分数 $U_{k1\%} = 5\%$, DG的容量为 5 MW , 变压器 T_2 的容量为 $5 \text{ MV}\cdot\text{A}$, 短路电压百分数 $U_{k2\%} = 5\%$ 。在计算和分析过程中均采用标么值, 设基准容量 $S_B = 100 \text{ MV}\cdot\text{A}$, 基准电压 $U_B = 10.5 \text{ kV}$, 假设系统侧电源的次暂态电势 E_S 和DG的次暂态电势 E_{DG} 的标么值均为1.0。本文在研究Ⅰ段保护时采用DG的次暂态

电抗，Ⅱ段保护和Ⅲ段保护时则采用DG的暂态电抗，DG次暂态电抗和暂态电抗的标幺值分别取为0.1和0.5（以DG容量为基准容量）。

考虑约束条件，求出DG合理的接入范围，当DG的接入位置位于线路BC的前半段时，短路电流随DG接入位置的变化情况如图5所示。

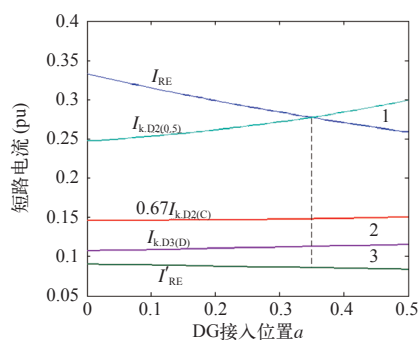


图5 短路电流随DG接入位置的变化情况

由图5可以看出，当DG的接入位置位于 $a = 0.35 \sim 0.5$ 的区间范围内时，保护D2中Ⅰ段保护可以整定在区域1内；保护D2中Ⅱ段保护和保护D3中Ⅰ段保护整定在区域2内，且满足 $I''_{\text{setD2}} = 1.2 I'_{\text{setD3}}$ ，此时馈线L1上各处的保护不受DG接入位置的影响，可以正常动作。

DG接入位置受DG容量的影响很大，当DG容量为4 MW时，短路电流随DG接入位置的变化情况如图7所示。此时DG的接入范围变大，为 $a = 0.16 \sim 0.5$ 的区间内，符合实际情况。当接入大容量的DG时，需要重新整定保护值或加装方向性保护元件，以满足配电网电流保护的要求。

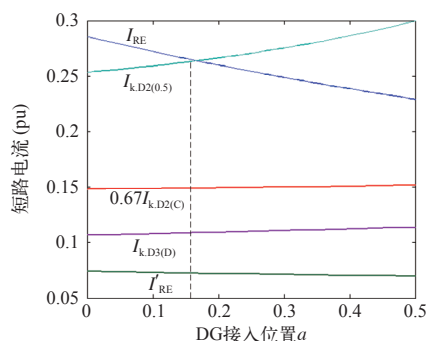


图6 DG容量为4 MW时，短路电流随DG接入位置的变化情况

结束语

本文针对DG呈T字形直接接入公共电网线路的10 kV配电网系统，分析了DG接入位置的变化对配电网电流保护产生的影响。通过对短路发生时流经保护装置的短路电流进行分析，推导出短路电流与DG接入位置之间的关系，并考虑保护范围和灵敏度系数的要求，给出保护装置整定的约束条件，从而对DG的接入范围进行约束。文中结合具体的10 kV配电网进行算例分析，描绘出短路电流随DG接入位置的变化曲线，并分析了DG容量对DG接入范围的影响。从本文得到的结果可以看出，DG接入位置的选择对配电网电流保护装置的工作有很大影响，合理地接入位置可以避免对配电网原有保护装置的改换，节约成本。

参考文献

- [1] 张超，计建仁，夏翔. 分布式发电对配电网馈线保护的影响[J]. 继电器, 2006(13): 9-12.
- [2] 周卫，张尧，夏成军，等. 分布式发电对配电网继电保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2010(3): 1-5.
- [3] 林霞，陆于平，吴新佳. 分布式发电系统对继电保护灵敏度影响规律[J]. 电力自动化设备, 2009(1): 54-59.
- [4] 陶顺，郭静，肖湘宁. 基于电流保护原理的DG准入容量与并网位置分析[J]. 电网技术, 2012(1): 265-270.
- [5] 王江海，邵能灵，宋凯，等. 考虑继电保护动作的分布式电源在配电网中的准入容量研究[J]. 中国电机工程学报, 2010(22): 37-43.
- [6] 刘健，张小庆，同向前，等. 含分布式电源配电网的短路定位[J]. 电力系统自动化, 2013(2): 36-42.

(收稿日期: 2015-05-21) EA