

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181524

分布式电源对配网继电保护影响及综合改进保护方案

谢民¹, 王同文¹, 徐靖东², 邵庆祝¹, 于洋¹, 张炜¹

(1. 国网安徽省电力有限公司, 安徽 合肥 230022; 2. 西安交通大学电力设备电气绝缘
国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 随着大规模分布式电源的接入, 配电网的运行方式、潮流特性及短路电流等都将发生很大变化, 这对配电网线路的反时限过电流保护产生较大影响。在传统电力系统反时限过电流保护基础上, 分析了分布式电源在故障发生时的助增电流对配电网反时限保护的影响机理和特性, 提出一种利用电压因子修正的综合改进反时限过电流保护方案, 以改善相邻线路保护间的配合特性来满足分布式电源接入下的继电保护要求。在 PSCAD / EMTDC 环境中建立了仿真模型, 验证了所提方案选择性和速动性的有效性。

关键词: 分布式电源; 配电网; 继电保护; 助增电流; 电压因子修正

Effect of distributed generation on relay protection of distribution network and comprehensive improvement of protection scheme

XIE Min¹, WANG Tongwen¹, XU Jingdong², SHAO Qingzhu¹, YU Yang¹, ZHANG Wei¹

(1. State Grid Anhui Electric Power Co., Ltd., Hefei 230022, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: With the access of large-scale distributed generators, the operation mode, power flow characteristics and short-circuit current of distribution network will change greatly, which has a great impact on the reverse-time over-current protection of distribution network lines. Based on the traditional inverse-time current protection of power system, this paper analyses the mechanism and characteristics of the influence of the auxiliary current of distributed generation on the inverse-time protection of distribution network when the fault occurs. And a comprehensive improved reverse-time over-current protection scheme using voltage factor correction is proposed. It meets the requirements of relay protection under the access of distributed generation. A simulation model is established in PSCAD/EMTDC environment to verify the effectiveness of the selectivity and speed of the proposed scheme.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277143).

Key words: distributed generation; distribution network; relay protection; augmented current; voltage factor correction

0 引言

随着智能电网建设的不断推进, 以分布式光伏发电、风力发电及储能等接入配电网的比例越来越高, 改变了传统配电系统原有单一电源放射状的供电结构^[1-3]。高比例分布式电源的接入使得配电网的运行方式、潮流特性及短路电流等都发生了较大的变化, 这给配电网的继电保护带来了新的问题, 使得传统的配电网继电保护不再适用新一代配电网的

可靠性和安全性需求^[4-6]。

针对分布式电源接入配电网的继电保护问题, 国内外学者也开展了大量的研究。文献[7]提出基于区域电流相位关系的故障搜索定位方法, 该方法的故障搜索区域是根据电流综合幅值比较进行判断, 是一种电流型的保护方案; 文献[8]提出了根据分布式电源运行特征而将过电流保护定制进行自动调整的网络化保护方案; 上述文献均没有对分布式电源接入位置和容量对传统电流保护的影响做详细分析。除此之外, 基于通信方式的继电保护方法也得到了一定的应用, 文献[9-10]提出一种采用通信方式将故障后分布式电源的故障电流发送给保护系统来

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51277143); 国网安徽省电力有限公司科技项目(52120017001G)

实现线路及故障区域的保护;文献[11-12]采用通信手段将传统配电网的过电流和低电压进行配合的保护方案。该类通信方法具有成本高且电气信号和状态信号之间往往难以同步,当通信发生干扰时,继电保护可能出现误动或者拒动。因此目前关于分布式电源接入配网的研究在可靠性方面均存在不足,且未从机理反面进行深入研究。

本文首先从传统反时限过电流保护原理入手,分析了分布式电源接入位置和容量对传统反时限继电保护的影响特性和机理,指出分布式电源接入配网后会使得反时限电流保护出现选择失配问题。因此提出一种采用电压因子修正的综合改进反时限电流保护方案,能够有效解决保护间的选择配合问题,同时能够提高保护的速动性。最后在 PSCAD/EMTDC 环境中搭建典型的含分布式电源接入的配电网模型,对文中的机理分析和所提方案进行了有效性的验证。

1 反时限过流保护工作原理

电力系统继电保护整定中的关键部分是检测线路中的电流,其中反时限过电流保护的实现是基于继电器的反时限动作特性,线路保护动作的故障电流大小是和动作时间相关联。反时限电流保护装置启动电流的整定原则是躲过最大负荷电流^[13-14],保护的启动电流如式(1)所示。

$$I_p = \frac{K_{rel}^{III} K_{ss}}{K_{re}} I_{L,max} \quad (1)$$

式中: $I_{L,max}$ 是电力系统正常运行下的最大负荷电流; K_{re} 是电流继电器的返回系数,一般取 0.85~0.95; K_{rel}^{III} 是可靠性系数,一般取 1.15~1.25; K_{ss} 是电动机自启动系数,一般取值大于 1,具体是由电网络具体接线及负荷性质来确定。

对于电流保护中反时限继电器的继电特性而言,继电器动作时间是随着故障电流的大小而呈现反比例关系的变化趋势,即当故障电流较大时,继电器保护动作时间则越短,反之当故障电流较小时,继电器保护动作时间则越长,因而能够形象地描述故障的严重程度^[15-16]。在国内外配电网保护系统中,反时限过电流保护得到了广泛的应用^[17-18],其对应的数学模型可以表示为

$$t = \frac{t_p}{(I/I_p)^n - \alpha} \quad (2)$$

式中: t 是保护动作的时间; t_p 是时间常数; I_p 是保护启动电流,一般是大于线路的负荷电流; α 是曲线平移系数,取值通常为 1; n 是曲线形状系数,取

值通常在 0~2 之间。

因此根据曲线形状系数 n 的不同,国际电工委员会标准给出了以下 3 种反时限曲线^[19-20]:

(1) 常规反时限曲线

$$t = \frac{t_p}{(I/I_p)^{0.02} - \alpha} \quad (3)$$

(2) 非常反时限曲线

$$t = \frac{t_p}{(I/I_p) - \alpha} \quad (4)$$

(3) 极端反时限曲线

$$t = \frac{t_p}{(I/I_p)^2 - \alpha} \quad (5)$$

上述 3 种反时限特性曲线的形状如图 1 所示。根据图 1 可知,在故障电流相同的情况下,常规反时限具有最长的动作时间,但对应的斜率是十分平缓的。另外,保护的動作时间是和流过继电器的电流成反比例关系,即较大的故障电流对应较短的動作时间。

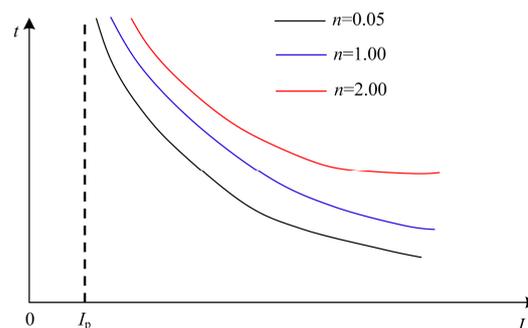


图 1 n 取值不同时反时限曲线

Fig. 1 Inverse time-limit curves with different n values

2 分布式电源接入对反时限过流保护的影响

当配电网接入分布式电源时,由于故障电流的影响,导致反时限过电流保护的動作特性曲线发生变化,从而给保护造成一定的影响。以图 2 为例,对分布式电源接入后的反时限过流保护影响特性及机理进行深入分析,图中 E_s 是配网等值供电电源, Z_s 是电源等值阻抗, L_1 、 L_2 和 L_3 分别是不同线路区域, DG 是分布式电源。

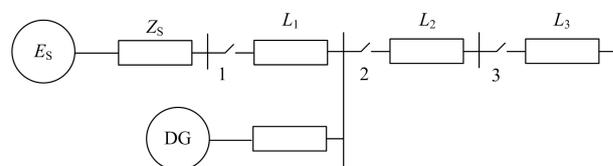


图 2 含分布式电源的配网结构图

Fig. 2 Distribution network structure with distributed generation

2.1 反时限过流保护影响特性分析

根据图 2 的分布式电源接入配电网的结构可知,在分布式电源的下游,配电网的接线形式并未发生改变,采用传统的反时限过流保护进行保护整定,能够满足继电保护的速动性和选择性。但是,当接入分布式电源的容量较大时,在同一个位置发生故障时的电流也会相应地增大,带来的结果是动作特性曲线发生下移。

对于分布式电源的上游保护和下游保护来说,当线路发生了短路故障时,分布式电源会产生助增电流^[21-23],并输送到下一级的输电线路,导致离分布式电源距离最近的下游保护短路电流增加。从而使得上游保护的动作时限整定受到较大的影响,进一步影响分布式电源上游保护和下游保护的时间配合。

因此由上述分析可知,在接入分布式电源的配电网中,如果短路故障是发生在分布式电源的上游,而助增电流是流向分布式电源的下一级,对上游几乎没有大的影响。如果短路故障是发生在分布式电源的下游,则会对下游的故障短路电流起到助增的作用。根据反时限特性可知,助增电流会使得保护动作速度加快,而上游一般是下游的远后备保护,由于上游的故障电流减少从而带来其动作时限变长,使得上游保护的動作时间有所延长,甚至可能发生拒动,直接影响了分布式电源上游保护和下游保护之间在动作时间上的配合。这使得反时限动作特性曲线上移,降低了配网的保护性能。

2.2 助增电流对反时限保护影响机理

在 2.1 节中已分析分布式电源接入的最终影响结果是分布式电源上游保护和下游保护之间在动作时间上的配合。下面从机理方面分析了上游保护和下游保护动作时间差受分布式电源助增电流的影响特性。

当图 2 中不含分布式电源时,假设电流 I_1 、 I_2 分别是 L_1 和 L_2 的故障电流, t_1 、 t_2 分别是 L_1 和 L_2 处动作时间。结合反时限保护基本原理, L_1 处和 L_2 处保护动作的时间差可以推导得到

$$\Delta t_{12} = t_1 - t_2 = \frac{\Delta t}{(I_1/I_p)^n - 1} \left[\left(\frac{I_2^{\max}}{I_{p1}} \right)^n - 1 \right] \quad (6)$$

式中: I_{p1} 为 L_1 处启动电流整定值; I_2^{\max} 为故障电流最大值; Δt 为故障点 2 处发生短路的时间差。

由式(6)可知,时间差仅仅和故障电流 I_1 相关。当分布式电源接入后, I_1 特性发生很大变化,对应的时间差也会发生变化。可进一步求得此时 t_1 、 t_2 的比值。

$$\frac{t_1}{t_2} = M \frac{(I_2/I_{p1})^n - 1}{(I_1/I_{p2})^n - 1} \quad (7)$$

其中,

$$M = \frac{(\Delta t + t_2^s) \left[\left(\frac{I_1^{\max}}{I_{p1}} \right)^n - 1 \right]}{t_2^s \left[\left(\frac{I_2^{\max}}{I_{p2}} \right)^n - 1 \right]} \quad (8)$$

式中: t_2^s 是继电器的动作时间; I_{p2} 是 L_2 处启动电流整定值。

若要满足上下游保护动作时间的配合,需满足 $t_1 > t_2$, 因此由式(7)可知, M 需满足式(9)。

$$\frac{(I_2/I_{p1})^n - 1}{(I_1/I_{p2})^n - 1} > \frac{1}{M} \quad (9)$$

结合上述分析,分布式电源引起的助增电流会对动作时间 t_1 、 t_2 产生影响,因此可以画出动作时间 t_1 、 t_2 随故障点离分布式电源距离的关系图,如图 3 所示。由图 3 可知,当配网故障距离逐渐远离分布式电源时,分布式电源的助增电流影响会逐渐减弱, L_2 处的电流具有更快的下降速率,因此 L_2 处保护动作时间 t_2 具有更快的上升速度。这带来的结果是动作时间 Δt_{12} 逐渐减小,会在某一个位置点出现 $\Delta t_{12} = \Delta t$, 之后 L_1 和 L_2 处的保护将失去选择性。

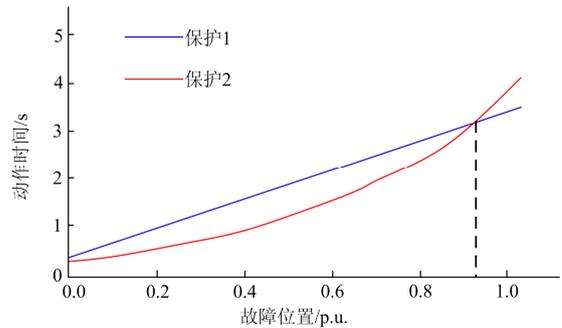


图 3 助增电流作用下的反时限电流保护动作时间特性
Fig. 3 Operating time characteristics of reverse-time current protection under augmented current

因此,随着分布式电源接入配电网的比例逐渐提高,分布式电源接入带来的助增电流会对传统反时限电流保护带来较大的影响,已难以适应高渗透率分布式电源接入配电网的继电保护要求。

3 电压因子修正的综合改进保护方案

为解决上述分布式电源助增电流对反时限保护在时间配合上的影响,本文提出一种综合改进保护方案,该方案采用电压因子修正对反时限电流保护策略进行修正。

3.1 电压因子修正反时限过电流保护原理

由于含分布式电源的配电网在故障时, 保护设备位置的电压会发生下降, 电压因子修正反时限过电流保护动作特性曲线可表示为

$$\begin{cases} t = \frac{t_p}{[I/(V^* I_p)]^n - \alpha} \\ V^* = \frac{V}{kV_N} \end{cases} \quad (10)$$

式中: V^* 是实际检测电压和最低限值的比值; V 和 V_N 是保护处的检测电压和电压额定值; k 是电能质量要求范围内的最低电压系数值, 其取值一般为 0.9。

将式(3)进一步变换能够得到

$$t = \frac{t_p}{\left(\frac{kIV_N}{rVI_L^{\max}}\right)^n - \alpha} = \frac{t_p}{\left(m\frac{Z_L^{\min}}{Z}\right)^n - \alpha} \quad (11)$$

式中: r 为启动电流的系数; I_L^{\max} 为最大的负荷电流; $m = k/r$ 为等值系数; Z 和 Z_L^{\min} 分别为测量阻抗和动作阻抗。

由式(11)可知, 将电压因子引入到反时限电流保护策略中, 其动作特性曲线不再是和电流因素相关, 而是和故障阻抗及负荷阻抗相关联。同时由式(11)可以看出, 反时限保护动作时间随着故障电压的增大而增大, 同时随着故障电流的增大而减小, 因此结合欧姆定律可以得出结论: 随着测量阻抗的减小, 动作时间成反时限特性且逐渐减小。

3.2 电压因子修正反时限过电流保护实现

在 2.2 节中已指出, 为满足故障处上游和下游在保护时间上的配合, L_2 处的动作时间 t_1 应该小于 L_1 处动作时间 t_1 。因此, 当采用电压因子修正反时限过电流保护时, 动作时间 t_1 和 t_2 可以修正为

$$\begin{cases} t_1 = \frac{t_{p1}}{\left(m\frac{Z_{L1}^{\min}}{Z_{f1}}\right)^n - \alpha} \\ t_2 = \frac{t_{p2}}{\left(m\frac{Z_{L2}^{\min}}{Z_{f2}}\right)^n - \alpha} \end{cases} \quad (12)$$

式中: t_{p1} 和 t_{p2} 分别为保护 L_1 和 L_2 处的时间常数; Z_{L1}^{\min} 和 Z_{L2}^{\min} 分别为保护 L_1 和 L_2 处的最小负荷阻抗; Z_{f1} 和 Z_{f2} 分别为保护 L_1 和 L_2 处的故障阻抗。假设保护 L_1 和 L_2 处的系数 m 和 α 都是相等的。

则进一步可求得 t_1 、 t_2 的比值如式(13)所示。

$$\frac{t_1}{t_2} = \frac{t_{p1}}{t_{p2}} \frac{\left(m\frac{Z_{L2}^{\min}}{Z_{f2}}\right)^n - \alpha}{\left(m\frac{Z_{L1}^{\min}}{Z_{f1}}\right)^n - \alpha} \quad (13)$$

由式(13)可以看出, 当 $\left|\frac{Z_{L1}^{\min}}{Z_{f1}}\right| = \lambda \left|\frac{Z_{L2}^{\min}}{Z_{f2}}\right|$ 并且满足

$\lambda < 1$ 时, 则 t_1/t_2 是关于 $\left|\frac{Z_{L2}^{\min}}{Z_{f2}}\right|$ 的增函数, 也就是说

在满足上述条件下, 分布式电源上游和下游保护的的动作时间差是随着短路阻抗的增大而增加。

因此, 为使得分布式电源接入后, 上下游保护时间之间的配合, 应对测量阻抗的大小进行分析。同样地以图 2 为例, 假设短路故障发生在分布式电源下游处, 则 L_1 和 L_2 保护处的测量阻抗可分别表示为

$$\begin{cases} Z_1 = Z_{\text{line1}} + \left(1 + \frac{I_{\text{DGG}}}{I_{\text{f1}}}\right)Z_1 \\ Z_2 = lZ_{\text{line2}} \end{cases} \quad (14)$$

式中: Z_{line1} 和 Z_{line2} 分别为 L_1 和 L_2 段线路阻抗; I_{f1} 为流过保护 1 处的短路电流; I_{DGG} 为分布式电源提供的短路电流; l 为故障点和 L_2 保护处的距离。

由式(14)可知, 在含分布式电源的配电网中, 保护 L_1 处的测量阻抗 Z_1 是大于保护 L_2 处的测量阻抗 Z_2 , 将测量阻抗代入式(11)即可实现消除分布式电源助增电流影响的电压因子修正反时限电流保护方案。因此要实现分布式电源上游和下游保护时间之间的配合, 只需要满足上游最小负荷阻抗整定值是小于下游。

因此, 当采用电压因子修正的反时限电流保护策略时, 同样可以画出动作时间 t_1 、 t_2 随故障点离分布式电源距离的关系图, 如图 4 所示。由图 4 可知, 保护 L_1 和 L_2 处的动作时间差逐渐增大, 即保

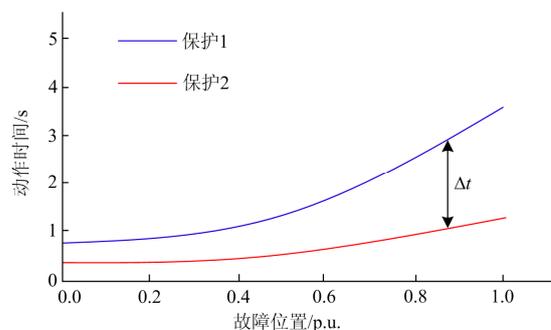


图 4 采用电压修正下的反时限电流保护动作时间特性
Fig. 4 Operating time characteristics of reverse-time current protection with voltage correction

护 L_1 和 L_2 处之间的选择性能根据两者的自动延时而得到有效配合, 避免了图 3 中所示的分布式电源助增电流对反时限电流保护的不利影响, 可有效提高含分布式电源反时限保护的可靠性。

4 仿真实证

根据上述理论分析, 在 PSCAD/EMTDC 环境中搭建了图 2 所示的单电源辐射型配电网络, 如图 5 所示。分别从保护选择性和保护速动性两方面对文中所提的电压因子修正反时限过电流保护方案的可行性和有效性进行了验证。仿真系统元件参数设置如下: 配电网的电源为 35 kV, 系统阻抗为 $6.48+j3.46 \Omega$, 线路单位长度的线路阻抗为 $0.65+j0.13 \Omega$, 分布式电源的等效阻抗为 $8+j5.6 \Omega$, L_1 、 L_2 、 L_3 配电线路长度均为 50 km, 负荷容量大小为 $3+j1 \text{ MW}$ 。综合考虑断路器、继电器及通信等响应时间影响, 设定分布式电源下游故障时的上游和下游的动作时间差满足 $\Delta t = 0.2 \text{ s}$ 。

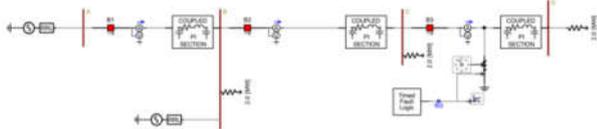


图 5 含分布式电源的配电系统仿真图

Fig. 5 Distribution system simulation diagram with distributed generation

4.1 保护选择性验证

分别设定分布式电源的容量 S_{DG} 为 1 MW、0.8 MW 和 0.6 MW, 发生短路位置按照每 1 km 进行移动, 在相同故障下分别记录了传统反时限过电流保护和所提电压修正下的反时限电流保护方案下的上下游保护动作的时间差 Δt_{12} , 对反时限电流保护选择性进行验证, 分别如图 6 和图 7 所示。

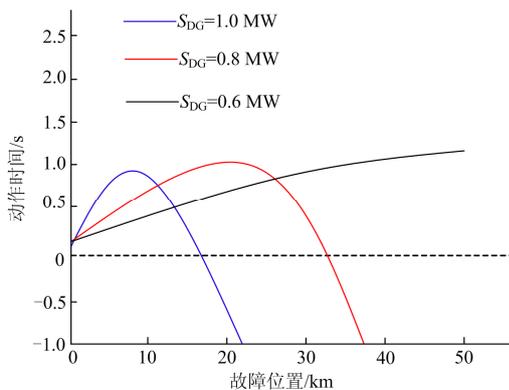


图 6 传统反时限电流保护动作时间差

Fig. 6 Time difference of traditional reverse-time current protection operation

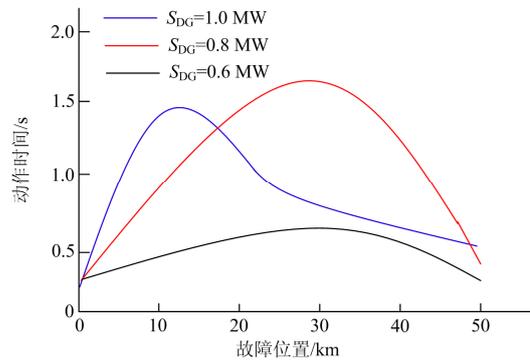


图 7 电压因子修正反时限过电流保护动作时间差

Fig. 7 Operation time difference of voltage factor correction inverse-time overcurrent protection

图 6 是传统反时限过电流保护动作时间差的仿真结果, 可以看出配电网接入的分布式容量越大, 其助增电流对反时限电流保护动作时间差的影响越明显, 即反时限电流保护动作时间差 Δt_{12} 越大。而随着故障点离分布式电源的距离逐渐增大, Δt_{12} 首先增大, 达到最大值之后便开始逐渐降低, 直至减小为负值, 保护动作之间的配合将失去选择性。另外, 当分布式电源容量降低时, Δt_{12} 的变化趋势是一致的, 不同的是保护失配位置点向后移动了。

图 7 是所提电压修正下的反时限电流保护方案保护动作时间差的仿真结果, 经过电压因子修正后, 反时限动作行为曲线得到了改善, 能够灵敏、可靠地反映线路的故障, 不同分布式电源容量下的保护动作的时间差 Δt_{12} 均是大于零, 上下游的保护能够进行配合, 可避免分布式电源助增电流带来的不利影响, 从而具有有效的保护选择性。

4.2 保护速动性验证

同样地, 在 L_2 处(距离分布式电源 20 km 处)分别设置三相短路故障和两相短路故障, 对传统反时限电流保护和电压因子修正反时限过电流保护的動作时间进行了对比分析。不同故障类型下的動作时间如图 8 所示。

从图 8 可以看出, 相较于传统的反时限电流保护而言, 电压因子对反时限电流保护修正之后, 不同类型故障下的保护动作时间都明显得到了提升, 具有良好的速动性。同时, 当发生三相短路故障时, 所提保护方案具有更好的速动性, 这是因为三相短路故障比两相短路故障的电压跌落程度更深, 使得电压因子对反时限电流保护的修正作用更加突出, 这也反映了所提的电压因子修正反时限电流保护方案能够感知不同故障严重程度而自适应地对动作时间进行调节。

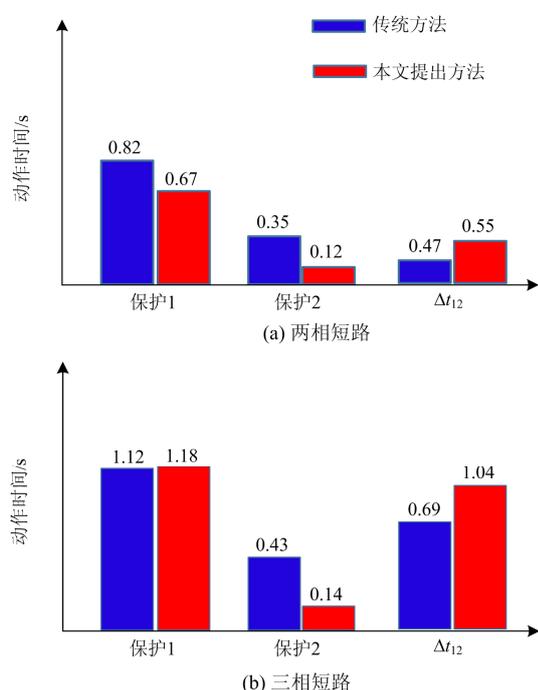


图8 不同故障下的保护动作时间对比

Fig. 8 Comparison of protective action time under different faults

综上所述,文中所提的电压因子修正反时限过电流保护方案能够同时满足保护选择性和速动性的要求,能够适用高渗透率分布式电源接入的配电网保护系统。

5 结论

针对分布式电源接入配电网带来的传统反时限电流保护选择性失配等问题,文中在传统反时限原理基础上分析了配网故障下的分布式电源助增电流对传统反时限电流保护的影响特性和机理,进而提出了一种考虑助增电流影响的电压因子修正综合改进反时限电流保护方案,并建立 PSCAD/EMTDC 仿真模型,对所提影响特性和保护方案进行了验证。结果表明,所提方案改善了分布式电源接入后配电网相邻线路保护之间的选择配合性以及保护动作速动性。

参考文献

[1] 黄伟,高怡芳,张勇军. 计及不确定性的分布式光伏接入配电网极限容量评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(14): 9-16.
HUANG Wei, GAO Yifang, ZHANG Yongjun. Evaluation of ultimate capacity for distributed photovoltaic access distribution network considering uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(14): 9-16.

[2] 李昱佳,董川. 基于两种仿生算法的低碳主动配电网规划[J]. 中国电力, 2017, 50(4): 66-70.
LI Yujia, DONG Chuan. Low-carbon active distribution network planning based on two bionic algorithms[J]. Electric Power, 2017, 50(4): 66-70.

[3] 李蕊,李跃,郭威,等. 分布式电源接入对配电网可靠性影响的仿真分析[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2016-2021.
LI Rui, LI Yue, GUO Wei, et al. Simulation analysis of the influence of distributed generation on the reliability of distribution network[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2016-2021.

[4] ZHAN H, WANG C, WANG Y, et al. Relay protection coordination integrated optimal placement and sizing of distributed generation sources in distribution networks[C] // Power and Energy Society General Meeting, IEEE, 2016: 1-1.

[5] 陈创,陈文睿,李津. 面向继电保护系统级测试的缺陷自动定位方法[J]. 中国电力, 2018, 51(5): 10-16.
CHEN Chuang, CHEN Wenrui, LI Jin. Automatic defect locating method for relay protection systematic testing[J]. Electric Power, 2018, 51(5): 10-16.

[6] 高亮,郎陈杰,夏能弘. 分布式电源并网条件下配电网继电保护方案设计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(18): 143-149.
GAO Liang, LANG Chenjie, XIA Nenghong. Automatic defect locating method for relay protection systematic testing[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(18): 143-149.

[7] 林霞,陆于平,王联合. 分布式发电条件下的新型电流保护方案[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 50-56.
LIN Xia, LU Yuping, WANG Lianhe. New current protection scheme considering distributed generation impact[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 50-56.

[8] 李满礼,王海龙,张濛姣. 含分布式电源的配电网自适应保护方法[J]. 电力科学与工程, 2014(5): 62-66.
LI Manli, WANG Hailong, ZHANG Mengjiao. An adaptive protection scheme for meshed distribution system with DG[J]. Electric Power Science and Engineering, 2014(5): 62-66.

[9] 郭煜华,姜军,范春菊,等. 改进的配电网反时限过电流保护[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 45-50.
GUO Yuhua, JIANG Jun, FAN Chunju, et al. Improved inverse-time over-current protection for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 45-50.

- [10] 吴在军, 赵上林, 胡敏强, 等. 交流微网边方向变化量保护[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 158-166.
WU Zaijun, ZHAO Shanglin, HU Minqiang, et al. Branch directional variation protection of AC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 158-166.
- [11] LAAKSONEN. Protection principles for future microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(12): 2910-2918.
- [12] SHARAF H M, ZEINELDIN H H, EL-SAADANY E. Protection coordination for microgrids with grid-connected and islanded capabilities using communication assisted dual setting directional overcurrent relays[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 9(1): 143-151.
- [13] 黄超, 杨彦, 田君杨. 反时限过流保护整定优化研究[J]. 电力科学与工程, 2016, 32(10): 15-20.
HUANG Chao, YANG Yan, TIAN Junyang. Research on optimal coordination of inverse-time overcurrent protection[J]. Electric Power Science and Engineering, 2016, 32(10): 15-20.
- [14] 严琪, 肖万芳. 反时限电流保护整定计算相关问题研究[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(7): 77-80.
YAN Qi, XIAO Wanfang. Setting coordination of inverse-time over-current relays[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(7): 77-80.
- [15] 杨博, 陈庆新, 张爱军, 等. 发电厂继电保护装置故障案例的特点分析及建议[J]. 热力发电, 2010, 39(3): 106-108.
YANG Bo, CHEN Qingxin, ZHANG Aijun, et al. Analysis of features in relay protection failure cases and recommendations thereof[J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(3): 106-108.
- [16] 柳焕章, 周泽昕, 周春霞, 等. 输电线路突变量电流差动继电器[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 146-152.
LIU Huanzhang, ZHOU Zexin, ZHOU Chunxia, et al. current differential relay of transmission lines based on incremental quantity[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 146-152.
- [17] SHANG J, NENGLING T, LIU Q. Allowable capacity of ACDG considering inverse time overcurrent protection[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2016, 25(11): 2865-2876.
- [18] 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.
- [19] 国家标准化管理委员会. 国际电工委员会标准目录[M]. 北京: 中国标准出版社, 2001.
- [20] 杨常, 周步祥, 杜蜻蜓. 反时限过电流保护与改进距离保护整定的配合[J]. 水电能源科学, 2018, 36(3): 188-191.
YANG Chang, ZHOU Buxiang, DU Qingting. Method of inverse-time overcurrent and distance relays coordination based on improved tripping characteristic for distance relays[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(3): 188-191.
- [21] HEIDARIA, AGELIDIS V G, ZAYANDEHROODI H, et al. Prevention of overcurrent relays miscoordination in distribution system due to high penetration of distributed generation[C] // International Conference on Renewable Energy Research and Applications, October 20-23, 2013, Madrid, Spain: 342-346.
- [22] 郑涛, 贾仕龙, 潘玉美, 等. 基于配电网原故障定位方案的分布式电源准入容量研究[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2257-2262.
ZHENG Tao, JIA Shilong, PAN Yumei, et al. Research on allowed penetration level of DGs based on the traditional fault location methods[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2257-2262.
- [23] 贺敏, 徐光福, 伊洋. 含高渗透率 DG 的配电网实用化保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 136-143.
HE Min, XU Guangfu, YI Yang. A practical protection scheme for distribution network with high penetration of DG[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 136-143.

收稿日期: 2018-12-06; 修回日期: 2019-01-23

作者简介:

谢 民(1975—), 男, 本科, 高级工程师, 从事电力系统继电保护技术研究; E-mail: xiem261x@ah.sgcc.com.cn

王同文(1981—), 男, 博士研究生, 从事电力系统继电保护技术研究。

(编辑 张爱琴)