

# 改进的配电网反时限过电流保护

郭煜华, 姜 军, 范春菊, 邓桂敏

(上海交通大学 电气工程系, 上海 200240)

**摘要:** 配电网反时限过电流保护的動作特性与保护配合会受到接入的分布式电源影响。分析了反时限过电流保护的動作特性,在此基础上提出了基于通信的反时限过电流保护方案,该保护方案借助通信信道将分布式电源支路的故障助增电流数据发送至上级线路保护,改善了保护间的配合特性。在反时限动作方程中引入低电压加速因子构成低电压加速反时限过电流保护,改进了动作方程中时间常数的整定方法,在保证上下级保护配合特性的同时加速了保护的動作时间。PSCAD 仿真结果验证了所提反时限过电流保护方案的有效性。

**关键词:** 分布式发电; 配电网; 继电保护; 反时限过电流保护; 低电压加速; PSCAD; 通信

中图分类号: TM 73

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.10.007

## 0 引言

随着电网智能化水平的提升,微电网技术得到了迅速的发展,包括光伏电池发电、风力发电、储能技术等分布式发电 DG(Distributed Generation)在配电网中得到了广泛的应用<sup>[1-7]</sup>。

与传统配电网相比,含有微电源、线路与负荷的配电网具有一定的独立运行能力,但微电源的存在、复杂的故障特性等均给原有保护配置带来了新的问题,使得传统的配电网继电保护不再适用<sup>[8-13]</sup>。文献[14]结合微电网结构和故障特点提出了一种基于负荷阻抗的微电网反时限低阻抗保护,但该保护实现复杂,可靠性较低。本文提出了 2 种适用于含 DG 配电网的反时限过电流保护方案,即基于通信的反时限过电流保护和改进的低电压加速反时限过电流保护。这 2 种保护方案的实施,可以有效改善反时限过电流保护在微电网中应用的動作特性以及保护之间的配合特性,具有良好的应用价值。

## 1 反时限过电流保护在微电网中的应用特性

### 1.1 传统反时限过电流保护的整定与配合

电力系统的反时限过电流保护的動作时间与被保护线路中的故障电流大小有关,它是利用继电器的反时限動作特性构成的,保护的启动电流如式(1)所示。

$$I_p = \frac{K_{rel}^m K_{ss}}{K_{re}} I_{Lmax} \quad (1)$$

其中,  $I_{Lmax}$  为系统正常运行时的最大负荷电流;  $K_{re}$  为电流继电器的返回系数,一般取 0.85~0.95;  $K_{rel}^m$  为可

靠系数,一般取 1.15~1.25;  $K_{ss}$  为自启动系数,数值大于 1,由网络具体接线及负荷性质来确定。

为了保证各保护之间动作的选择性,其動作时应该逐级配合确定。图 1 所示为一简单的配电网网络接线图,保护 3 的启动电流按式(1)整定为  $I_{act,3}$ ,其動作时间为  $t_3$ 。保护 3 出口短路时,其動作的时间为继电器的固有動作时间  $t_0$ ,由此确定保护 3 的反时限特性曲线。然后根据选择性的要求,保证在保护 3 出口短路时,保护 2 的動作时间比保护 3 的動作时间高出一个  $\Delta t$ ,由此确定保护 2 的反时限動作特性曲线。依此逐级进行整定配合,可以得到各保护的反时限特性曲线<sup>[15]</sup>。图 2 为各保护逐级配合示意图,横轴为故障位置,纵轴为動作时间,曲线 1、2、3 分别为保护 1、2、3 的反时限特性曲线。

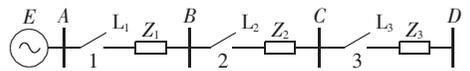


图 1 配电网接线图

Fig.1 Wiring diagram of distribution network

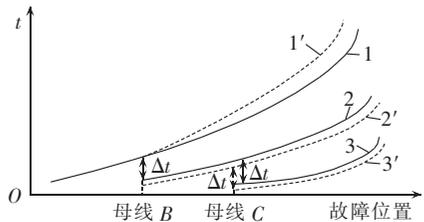


图 2 各保护逐级配合示意图

Fig.2 Protective coordination among different stages

### 1.2 传统反时限过电流保护应用在微电网中存在的问题

图 3 为微电网雏形,即含有 DG 的配电网系统结构图。在该配电网系统结构图中,  $E$  为系统电源,  $DG$  为接入配电网的分布式电源。

接入 DG 后,由于助增电流的影响,各保护动作

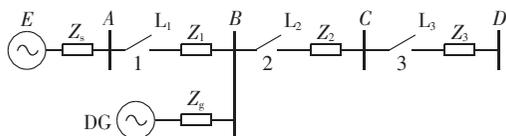


图 3 含有分布式电源的配电系统结构图

Fig.3 Structure of distribution network with DG

特性曲线有所变化。

a. 对于 DG 下游保护 2 和保护 3, 接入 DG 后该配电线路仍为单侧电源辐射状配电网, 按照传统的反时限过电流保护整定原则来进行整定, 保护 2 和 3 的动作时间能够配合, 满足继电保护对选择性和速动性的要求。但接入 DG 相当于系统容量增大, 因此相同位置发生故障时故障电流也会增大, 导致动作特性曲线下移。

b. 对于 DG 上游保护 1 和下游保护 2, 接入 DG 后: 当线路  $L_2$  发生故障时, DG 会向保护 2 提供助增电流  $I_{DC}$ , 流过保护 2 的故障电流  $I_{k2}$  为流过保护 1 的故障电流  $I_{k1}$  与  $I_{DC}$  之和, 大于  $I_{k1}$ , 保护 1 和保护 2 的时间配合会受到影响; 而流过保护 1 的故障电流和未接入 DG 时相比有所减小, 保护 1 动作时间将延长, 动作特性曲线上移, 保护性能降低; 当线路  $L_1$  发生故障时, 流过保护 1 的故障电流与 DG 支路无关, 动作特性曲线不变。

接入 DG 后各保护的動作特性曲线变为图 2 中的曲线 1'、2' 和 3'。为保证保护的速动性和保护之间的配合特性, 下文提出了 2 种改进的反时限过电流保护方案。

## 2 基于通信的反时限过电流保护方案

针对接入 DG 后对反时限过电流保护的影响, 本文提出了一种基于通信的反时限过电流保护的方案。系统结构图如图 3 所示。

### 2.1 DG 下游保护之间的配合

对于 DG 下游的保护 2 和保护 3, 接入 DG 前后, 该配电线路均为单侧电源辐射状配电网, 不影响保护间的配合特性, 可以按照传统的反时限过电流保护的整定原则整定。保护 2 和 3 的启动电流按式(1)整定, 各段保护启动电流值为  $I_{pi}(i=2,3)$ 。

保护 2 和 3 的反时限动作方程参照式(2):

$$t_i = \frac{t_{pi}}{(I_i/I_{pi})^{0.02} - 1} \quad i=2,3 \quad (2)$$

其中,  $I_i$  为保护 2 或 3 测量到的故障电流。

对于保护 3, 在其出口处发生三相短路时, 其动作时间整定为继电器的固有动作时间  $t_b$ , 则可以得到保护 3 的反时限动作方程时间常数为:

$$t_{p3} = t_b [(I_{k3}/I_{p3})^{0.02} - 1] \quad (3)$$

对于保护 2, 根据保护选择性的要求, 在保护 3 出口处发生故障时, 保护 2 的动作时间要比保护 3 的

动作时间至少高出 1 个  $\Delta t$  (可以设为 0.5 s)。所以, 在保护 3 出口处发生故障时, 保护 2 的动作时间为  $t_2 = \Delta t + t_b$ 。故可得到保护 2 的反时限动作方程时间常数为:

$$t_{p2} = (\Delta t + t_b) [(I_{k3}/I_{p2})^{0.02} - 1] \quad (4)$$

根据上述方法进行整定, 可以得到保护 2 和保护 3 的反时限动作方程。

### 2.2 DG 上游线路保护与下游线路保护之间的配合

DG 的类型有风电、光伏发电、储能电站等。系统短路时, DG 提供的短路电流随着 DG 类型、控制策略、短路位置的不同而不同, 使得保护的整定变得困难。但是, 借助通信信道传递 DG 提供的短路电流信息, 可以实现 DG 上、下级保护的有效配合。

对于 DG 下游的保护 2 和 DG 上游的保护 1, 保护 1 的启动电流按照式(1)整定。为了获得保护 2 出口短路时 DG 的助增电流, 在保护 1 和 DG 侧分别装设通信装置, 借助通信信道, 将 DG 侧的助增电流相量  $I_{DG}$  发送给主电源 E 侧保护 1, 流过保护 1 的故障电流  $I_{k1}$  加上接收到的 DG 的助增故障电流相量  $I_{DG}$  作为保护 1 的反时限动作时间方程中的测量电流  $I$ 。对保护 1 的反时限动作时间方程进行调整后, 保护 1 的动作时间如式(5)所示。下文中白斜体表示的电流为对应电流的标量形式。

$$t_{k1} = \frac{t_{p1}}{\left( \frac{I_{k1} + I_{DG}}{I_{p1}} \right)^{0.02} - 1} \quad (5)$$

根据保护选择性的要求, 在保护 2 线路出口处发生故障时, 保护 1 的动作时间要比保护 2 的动作时间至少高出 1 个  $\Delta t$ , 此时保护 1 的动作时间为  $t_{k1} = t_{k2} + \Delta t$ , 其中  $t_{k2}$  为保护 2 的动作时间:

$$t_{k2} = \frac{t_{p2}}{(I_{k2}/I_{p2})^{0.02} - 1} \quad (6)$$

则保护 1 的反时限动作方程时间常数为:

$$t_{p1} = (t_{k2} + \Delta t) \left\{ \left[ (I_{k1} + I_{DG}) / I_{p1} \right]^{0.02} - 1 \right\} \quad (7)$$

这样就能够消除接入 DG 后 DG 所提供的助增电流  $I_{DC}$  的影响, 使得保护 1 和保护 2 能够有效配合动作, 改善了保护之间的配合特性。针对接入 DG 对原有反时限过电流保护所产生的影响, 基于通信的反时限过电流保护改善了 DG 两侧保护间的配合情况, 并且无需考虑 DG 故障后助增电流的特性, 保证了相邻线路后备保护的速动性。

## 3 改进的低电压加速反时限过电流保护方法

### 3.1 低电压加速反时限过电流保护原理

线路发生短路故障时, 故障点越接近保护安装处, 保护测得的电压越小, 短路电流越大, 保护的动作时间应该越短。但是由于传统反时限过电流保护

之间的配合,使得保护出口短路时,保护的動作时间比较长,为了解决这个问题,文献[16]提出了低电压加速反时限过电流保护。在反时限过电流保护的動作方程中引入低电压加速因子  $u^*$ ,能够改善反时限过电流保护的性。引入低电压加速因子  $u^*$  后的反时限動作方程为:

$$t_{lv} = \frac{t_p u^*}{(I/I_p)^{0.02} - 1} \quad (8)$$

其中,  $I_p$  为整定电流。

发生不同类型的故障时,其对应着不同的电压特征。保护检测到系统发生故障后,可以测量 3 个相电压和 3 个线电压的数值,并进行比较,  $u^*$  取其中最小的值。这样使得不同类型故障发生的情况下,保护的動作时间都有最好的改善效果<sup>[16]</sup>。

线路发生故障时,低电压加速因子  $u^*$  的大小与故障点和保护之间距离成正比例关系,即保护装置越接近故障点,其低电压加速因子越小,保护的動作速度越快。保护的加速作用随着故障点与保护的距離而变化,其最大优点便是确保了在线路出口处发生严重故障时保护可以快速地動作以切除故障,另外,配电网的线路都比较短,在线路内部故障时,保护的動作时间都比较短。

### 3.2 引入低电压加速因子对反时限过电流保护配合的影响

系统结构图仍如图 3 所示。以保护 2 和保护 3 为例,未引入低电压加速因子时,按照式(1)~(4)的方法整定确定,動作时限相差 1 个  $\Delta t$ 。引入低电压加速因子后,反时限動作方程为式(8)。保护 3 出口短路时,保护 2 和保护 3 处的电压标幺值分别如方程式(9)和(10)所示。

$$u_{2-3}^* = I_{k3} Z_2 / E < 1 \quad (9)$$

$$u_3^* = 0 \quad (10)$$

其中,  $u_{2-3}^*$  为保护 3 出口三相短路时保护 2 处的低电压加速因子;  $I_{k3}$  为保护 3 出口短路时的短路电流。此时保护 2 和保护 3 的動作时间如方程式(11)和(12)所示。

$$t_2' = \frac{t_{p2} u_{2-3}^*}{(I_{k3}/I_{p2})^{0.02} - 1} \quad (11)$$

$$t_3' = 0 \quad (12)$$

根据式(9)和(11)可得  $t_2' - t_3' < \Delta t$ , 保护 2 和保护 3 之间的时限配合不能满足选择性的要求。同样, DG 上下游的保护 1 和保护 2 之间的时限配合也无法满足要求。因此,必须对低电压加速反时限过电流保护进行改进。

### 3.3 低电压加速的反时限过电流保护的改进方案

图 2 中,各保护反时限过电流保护的動作方程如式(1)所示。引入低电压加速因子后的低电压加速反时限过电流保护配合方案如下。

a. 保护 3 仍按式(1)和(3)整定。

b. 对于保护 2,根据选择性的要求,在保护 3 出口发生三相短路时,保护 2 的動作时间比保护 3 高出  $\Delta t$ ,而在低电压加速因子的作用下,保护 3 瞬时動作,故保护 2 的動作时间为  $\Delta t$ 。将  $t_2' = \Delta t$  代入式(11)中保护 2 的動作时限方程,可得方程式(13):

$$t_{p2} = \frac{1}{u_{2-3}^*} \Delta t [(I_{k3}/I_{p2})^{0.02} - 1] \quad (13)$$

令  $K_{p2}$  为保护 2 的配合系数:

$$K_{p2} = \frac{1}{u_{2-3}^*} = \frac{E}{I_{k3} Z_2} \quad (14)$$

则保护 2 改进的反时限動作方程的时间常数为:

$$t_{p2} = K_{p2} \Delta t [(I_{k3}/I_{p2})^{0.02} - 1] \quad (15)$$

c. 对于 DG 上游的保护 1,根据选择性的要求,一方面保护 2 出口三相短路时,保护 1 的動作时间要高出  $\Delta t$ ,而在低电压加速因子的作用下保护 2 可以瞬时動作,故保护 1 的動作时间为  $\Delta t$ ,其動作方程为:

$$t_1 = \frac{t_{p1} u_{1-2}^*}{(I_{k12}/I_{p1})^{0.02} - 1} \quad (16)$$

其中,  $u_{1-2}^*$  为保护 2 出口三相短路时保护 1 处的低电压加速因子;  $I_{k12}$  为保护 2 出口三相短路时流过保护 1 的电流。令  $K_{p1-1}$  为保护 1 的配合系数:

$$K_{p1-1} = \frac{1}{u_{1-2}^*} = \frac{Z_s + Z_1}{Z_1} \quad (17)$$

将  $t_1 = \Delta t$  代入式(16),则时间常数为:

$$t_{p1-1} = K_{p1-1} \Delta t [(I_{k12}/I_{p1})^{0.02} - 1] \quad (18)$$

另一方面,在保护 3 出口三相短路时,保护 1 的動作时间要比保护 3 高出  $2\Delta t$ ,而保护 3 可瞬时動作,故保护 1 動作时间为  $2\Delta t$ 。同样地,保护 1 的動作方程为:

$$t_1 = \frac{t_{p1} u_{1-3}^*}{(I_{k13}/I_{p1})^{0.02} - 1} \quad (19)$$

其中,  $u_{1-3}^*$  为保护 3 出口三相短路时保护 1 处的低电压加速因子;  $I_{k13}$  为保护 3 出口三相短路时流过保护 1 的电流。配合系数经计算为:

$$K_{p1-2} = \frac{1}{u_{1-3}^*} = \frac{Z_2(Z_g + Z_s + Z_1) + Z_g(Z_s + Z_1)}{Z_2(Z_g + Z_s + Z_1) + Z_g Z_1} \quad (20)$$

将  $t_1 = 2\Delta t$  代入式(19),则时间常数为:

$$t_{p1-2} = K_{p1-2} \cdot 2\Delta t [(I_{k13}/I_{p1})^{0.02} - 1] \quad (21)$$

为了保证保护 2 和保护 3 出口处短路时,保护 1 均能满足选择性的要求,因此比较  $t_{p1-1}$  和  $t_{p1-2}$  的大小,取较大者作为保护 1 的时间常数  $t_{p1}$ ,即:

$$t_{p1} = \max(t_{p1-1}, t_{p1-2}) \quad (22)$$

按照上述方案对反时限过电流保护的参数进行整定后,引入低电压因子的反时限过电流保护在时限上就能够很好地配合,满足选择性的要求。

图 4 所示为应用低电压加速反时限过电流保护配合方案后的保护 1、2 和 3 的動作曲线图。可以看到,在保护 3 出口三相短路时,保护 2 和 3 的動作时

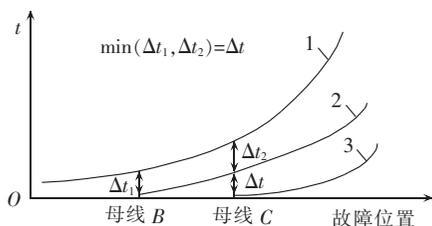


图 4 改进的低电压加速反时限过电流保护动作时间曲线

Fig.4 Operating time curves of improved low-voltage acceleration ITOC

间差为  $\Delta t$ , 满足选择性的要求; 而保护 2、保护 3 出口三相短路时, 保护 1 和保护 2 也能够配合, 在其中一个短路位置处能够保证动作时间差最短, 为  $\Delta t$ 。

#### 4 仿真验证与比较

在 PSCAD 中搭建配电网如图 5 所示含 DG 的低压配电系统, 电压等级为 10 kV。E 为主电源, 系统阻抗  $Z_s = 0.7 + j0.458 \Omega$ 。配电线路  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  长度均为 1 km, 线路单位长度的线路阻抗  $Z_1 = 0.26 + j0.255 \Omega$ 。DG 接在母线 B 上, DG 等效阻抗  $Z_g = 7 + j4.6 \Omega$ 。保护 1、2、3 为相应配电线路安装的保护,  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  分别为保护出口处的故障点位置。

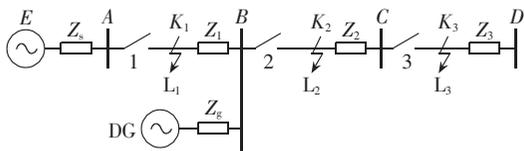


图 5 含分布式电源的配电网系统结构图

Fig.5 Structure of distribution network with DG

##### 4.1 基于通信的反时限过电流保护方案

各保护的启动电流按式(1)整定, 动作时限表达式和相关参数按照 2.1 和 2.2 节的方法确定。在仿真中设置不同故障点和故障类型, 仿真结果如下。

$K_3$  点发生不同类型的故障时, 各保护的動作情况如表 1 所示,  $K_2$  点发生不同类型的故障时, 各保护的動作情况如表 2 所示, 不同情况下保护動作时间如图 6 所示。

仿真结果表明, 应用了基于通信的反时限过电流保护方案后, 保护 1 作为保护 2、3 的后备保护时动

表 1  $K_3$  点短路时各保护动作情况

Table 1 Operational data of protections when short circuit occurs at  $K_3$

故障类型	保护	启动电流/kA	故障电流/kA	动作时间/s	
				传统保护	改进保护
三相短路	1	0.60	2.30	1.48	1.21
	2	0.46	2.50	0.54	0.54
	3	0.34	2.50	0.04	0.04
两相短路	1	0.60	2.06	2.23	1.66
	2	0.46	2.22	0.72	0.72
	3	0.34	2.22	0.05	0.05

表 2  $K_2$  点短路时各保护动作情况

Table 2 Operational data of protections when short circuit occurs at  $K_2$

故障类型	保护	启动电流/kA	故障电流/kA	动作时间/s	
				传统保护	改进保护
三相短路	1	0.60	3.27	0.80	0.77
	2	0.46	3.52	0.27	0.27
两相短路	1	0.60	2.85	1.13	1.05
	2	0.46	3.07	0.36	0.36

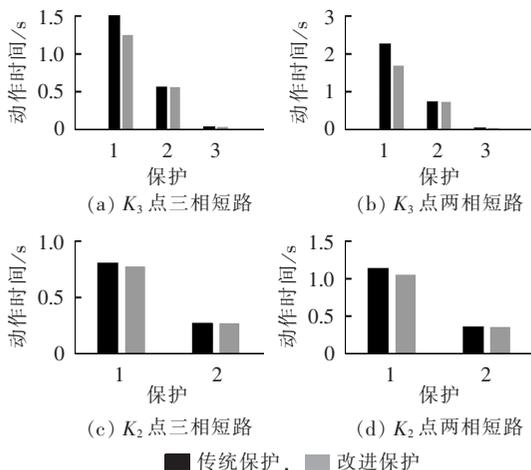


图 6 不同短路类型与短路地点下的保护动作时间

Fig.6 Operating time of protections for different short circuit types and locations

作时间缩短, 改善了保护间的时限配合, 提升了保护性能。在发生两相故障时, 改善效果最为明显。

##### 4.2 改进的低电压加速反时限过电流保护方法

在仿真中设置不同故障点和故障类型, 分别计算传统反时限过电流保护、引入低电压加速因子的反时限过电流保护, 以及低电压加速反时限过电流保护配合方案的動作时间。

$K_3$  点发生不同类型的故障时, 各保护的動作情况如表 3 所示,  $K_2$  点发生不同类型的故障时, 各保护的動作情况如表 4 所示, 不同情况下保护動作时间与上、下级保护配合情况如图 7 所示。图中,  $\Delta t_{1-2}$  和  $\Delta t_{2-3}$  分别为保护 1 和 2、保护 2 和 3 的動作时限之差。

上级保护的動作时限至少应比下级高 1 个  $\Delta t$ 。传统保护、仅引入低电压加速保护、改进配合的低电压加速保护在各种短路情况下能否满足配合时限要求的情况列于表 5, 表中, “√”表示满足, “×”表示不满足。

从仿真结果可以看出, 引入低电压加速因子后, 传统反时限过电流保护的配合可能失去选择性。采用改进的低电压加速反时限过电流保护配合方案后, 既能保证大部分情况下保护出口故障时快速动作, 又能满足相邻线路保护動作时限的配合要求。

##### 4.3 2 种改进方法的比较

从保护原理上分析, 基于通信的保护方法整定简单, 且不受 DG 特性的影响, 只需要传递 DG 支路电

表 3  $K_3$  点短路时各保护动作情况

Table 3 Operational data of protections when short circuit occurs at  $K_3$

故障类型	保护	启动电流/kA	故障电流/kA	低电压加速因子 $u^*$	动作时间/s		
					传统保护	引入 $u^*$ 后保护	改进配合的低电压加速保护
三相短路	1	0.60	2.30	0.58	1.48	0.86	1.01
	2	0.46	2.50	0.32	0.54	0.17	0.51
	3	0.34	2.50	0.04	0.04	0	0
两相短路	1	0.60	2.06	0.96	2.23	2.14	1.80
	2	0.46	2.22	0.57	0.72	0.41	0.96
	3	0.34	2.22	0.05	0.05	0	0.01

表 4  $K_2$  点短路时各保护动作情况

Table 4 Operational data of protections when short circuit occurs at  $K_2$

故障类型	保护	启动电流/kA	故障电流/kA	低电压加速因子 $u^*$	动作时间/s		
					传统保护	引入 $u^*$ 后保护	改进配合的低电压加速保护
三相短路	1	0.60	2.30	0.42	0.80	0.34	0.57
	2	0.46	2.50	0.05	0.27	0.01	0.06
两相短路	1	0.60	2.06	0.75	1.13	0.85	1.11
	2	0.46	2.22	0.07	0.36	0.03	0.10

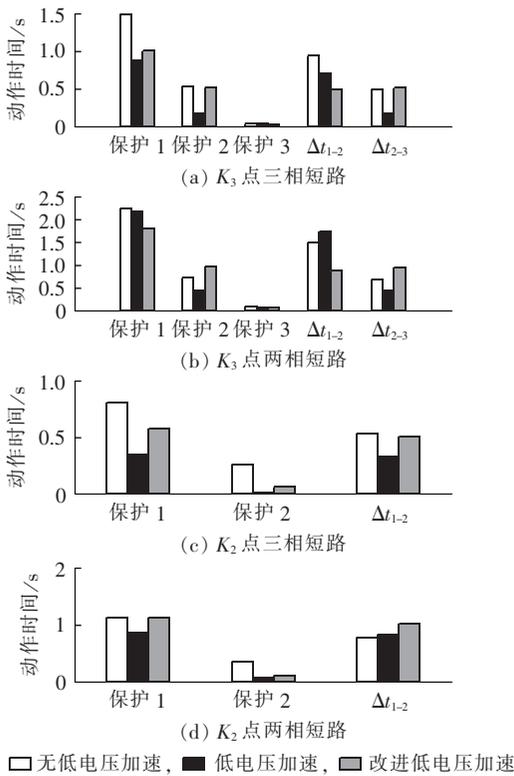


图 7 不同短路类型与地点下的保护动作时间  
Fig.7 Operating time of protections for different short circuit types and locations

表 5 3 种保护在各短路情况下满足配合时限要求情况的比较

Table 5 Comparison of operating time coordination among three protection types for different short circuit conditions

保护类型	$K_3$ 点三相短路	$K_3$ 点两相短路	$K_2$ 点三相短路	$K_2$ 点两相短路
无低电压加速传统保护	√	√	√	√
仅引入 $u^*$ 的低电压加速保护	×	×	×	√
改进配合的低电压加速保护	√	√	√	√

流,适用于有保护间通信条件的配电线路;改进的低电压加速保护方法只需修改整定方法,具有动作时间短、无需通信信道的优点,但动作时间受到 DG 故障特性的影响,并且需要测量故障后线路的电压量作为低电压加速因子。

从仿真结果来看,2 种改进的反时限过电流保护方法都能有效满足速动性和选择性的要求,可以作为线路后备保护。

### 5 结语

针对含 DG 配电网的反时限过电流保护可能存在的保护速动性降低的问题,本文提出了 2 种改进方法。本文提出了基于通信的反时限过电流保护方案,借助通信信道将短路时 DG 提供的馈电流传递至上游保护,在保证选择性的前提下最大限度地提高了保护的速动性。同时,本文提出了低电压加速反时限过电流保护的配合方案。低电压加速反时限过电流保护应用到含 DG 的配电网中,确实可以加速反时限过电流保护的配合方案。低电压加速反时限过电流保护的配合方案,能够消除低电压加速因子对动作时限的影响,确保上下级保护动作时限的配合。这 2 种保护方案的实施,可以有效改善反时限过电流保护在微电网中应用的动作特性以及保护之间的配合特性,具有良好的应用价值。

### 参考文献:

[1] 余贻鑫,栾文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报,2009,29(34):1-8.  
YU Yixin,LUAN Wenpeng. Smart grid and its implementations [J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(34):1-8.

- [4] 兰征. 微网光伏并网及电能质量控制[D]. 长沙:湖南大学, 2011.  
LAN Zheng. Grid-connected photovoltaic with power quality control system[D]. Changsha:Hunan University,2011.
- [5] 梁有伟,胡志坚,陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术,2003,27(12):71-75.  
LIANG Youwei,HU Zhijian,CHEN Yunping. A survey of distributed generation and its application in power system[J]. Power System Technology, 2003,27(12):71-75.
- [4] 张国驹,唐西胜,齐智平. 超级电容器与蓄电池混合储能系统在微网中的应用[J]. 电力系统自动化,2010,34(12):85-89.  
ZHANG Guoju,TANG Xisheng,QI Zhiping. Application of hybrid energy storage system of super-capacitors and batteries in a microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(12):85-89.
- [5] 唐西胜,邓卫,李宁宁,等. 基于储能的可再生能源微网运行控制技术[J]. 电力自动化设备,2012,32(3):99-103.  
TANG Xisheng,DENG Wei,LI Ningning,et al. Control technologies of micro-grid operation based on energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(3):99-103.
- [6] 李鹏,窦鹏冲,李雨薇,等. 微电网技术在主动配电网中的应用[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):8-16.  
LI Peng,DOU Pengchong,LI Yuwei,et al. Application of microgrid technology in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):8-16.
- [7] BARTON J P,INFIELD D G. Energy storage and its use with intermittent renewable energy[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2004,19(2):441-448.
- [8] 孙鸣,赵月灵,王磊. DG容量及接入方式对变电站继电保护定值的影响[J]. 电力自动化设备,2009,29(9):46-49.  
SUN Ming,ZHAO Yueling,WANG Lei. Impact of DG capacity and location on relay protection of substation[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(9):46-49.
- [9] 丛伟,苟堂生,肖静,等. 包含多微网的配电系统故障检测算法[J]. 电力自动化设备,2010,30(7):50-53.  
CONG Wei,XUN Tangsheng,XIAO Jing,et al. Faulty section detection algorithm for distribution system with multi micro-grids[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(7):50-53.
- [10] 邓虹,杨秀,刘隽,等. 微网保护技术综述[J]. 华东电力,2014,42(3):504-508.  
DENG Hong,YANG Xiu,LIU Jun,et al. Review of microgrid protection technology[J]. East China Electric Power,2014,42(3):504-508.
- [11] 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,2014,30(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,2014,30(5):62-66.
- [12] 郭如春. 分布式发电对配电网的影响[D]. 天津:天津大学,2010.  
GUO Ruchun. Impact of distributed generation on distribution network[D]. Tianjin:Tianjin University,2010.
- [13] 赵上林,吴在军,胡敏强,等. 关于分布式发电保护与微网保护的思考[J]. 电力系统自动化,2010,34(1):73-77.  
ZHAO Shanglin,WU Zaijun,HU Minqiang,et al. Thought about protection of distributed generation and microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(1):73-77.
- [14] 黄文焘,邵能灵,杨霞. 微网反时限低阻抗保护方案[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):105-114.  
HUANG Wentao,TAI Nengling,YANG Xia. Inverse-time low-impedance protection scheme for microgrids[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(1):105-114.
- [15] 邵能灵,范春菊,胡炎. 现代电力系统继电保护原理[M]. 北京:中国电力出版社,2012.
- [16] 李永丽,金强,李博通,等. 低电压加速反时限过电流保护在微电网中的应用[J]. 天津大学学报,2011,44(11):955-960.  
LI Yongli,JIN Qiang,LI Botong,et al. Application of inverse-time overcurrent protection based on low voltage acceleration in micro-grid[J]. Journal of Tianjin University,2011,44(11):955-960.

#### 作者简介:



郭煜华

郭煜华(1991—),男,陕西西安人,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为电力系统继电保护(**E-mail**:eatisfy@126.com);

姜军(1991—),男,江苏无锡人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护(**E-mail**:Eric0327@sjtu.edu.cn);

范春菊(1967—),女,江苏海门人,副教授,博士,主要研究方向为人工智能在继电

保护及综合自动化中的应用(**E-mail**:fanchunju@sjtu.edu.cn);

邓桂敏(1992—),男,广东茂名,主要研究方向为电力系统继电保护(**E-mail**:dengguimincg@163.com)。

## Improved inverse-time over-current protection for distribution network

GUO Yuhua,JIANG Jun,FAN Chunju,DENG Guimin

(Department of Electrical Engineering,Shanghai Jiao Tong University,Shanghai 200240,China)

**Abstract:** The operating characteristic of ITOC(Inverse-Time Over-Current protection) of distribution network and its protective coordination are affected by the integration of DG(Distributed Generation). The operating characteristic of ITOC is analyzed and a communication-based scheme is proposed,which sends the fault infeed current information of DG branch to the superordinate protection via communication channel to improve the coordination among protections. A low-voltage acceleration factor is introduced to the inverse-time operation equation to form the low-voltage acceleration ITOC and the setting of its time constant is improved to guarantee both protective coordination and operating speed. The results of simulation with PSCAD verify the effectiveness of the proposed schemes.

**Key words:** distributed power generation; distribution networks; relay protection; inverse-time over-current protection; low voltage acceleration; PSCAD; communication