

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191495

# 基于复合故障补偿因子的微电网反时限电流保护方法

曹喆<sup>1</sup>, 季亮<sup>1</sup>, 常潇<sup>2</sup>, 施佳斌<sup>1</sup>, 朱兰<sup>1</sup>, 张林楠<sup>1</sup>, 包正楷<sup>1</sup>

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网山西省电力公司电力科学研究院, 山西 太原 030001)

**摘要:** 为了解决逆变型分布式能源(Distributed Generator, DG)对微电网保护速动性和协调性的影响, 提出了一种基于复合故障补偿因子和天牛须搜索(Beetle Antenna Search, BAS)算法的改进反时限微电网电流保护方法。首先, 通过分析故障时保护安装处的电压分布特性, 并结合测量阻抗特征构建复合故障补偿因子, 以解决反时限过电流保护由于短路电流变化引起的动作延时问题, 提高保护速动性。同时, 为了解决 DG 接入、微电网运行方式改变等因素引起的微电网保护协调问题, 利用 BAS 算法对改进反时限电流保护的参数进行优化, 以保证相邻保护的协调配合。最后, 在 DIGSILENT/PF 软件中建立微电网仿真模型, 以验证改进方法的有效性。仿真结果表明, 与传统反时限过电流保护相比, 改进保护方法在速动性方面明显提升, 且在微电网不同运行模式、故障条件下均满足协调性要求。

**关键词:** 微电网; 逆变型 DG; 反时限过电流保护; BAS 算法; 协调优化

## Inverse-time current protection method of a microgrid based on a composite fault compensation factor

CAO Zhe<sup>1</sup>, JI Liang<sup>1</sup>, CHANG Xiao<sup>2</sup>, SHI Jiabin<sup>1</sup>, ZHU Lan<sup>1</sup>, ZHANG Linnan<sup>1</sup>, BAO Zhengkai<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. State Grid Electric Power Research Institute of Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030001, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of the influence of an inverter interfaced Distributed Generation (DG) on the speed and coordination of microgrid protection, an improved inverse-time microgrid current protection method based on composite fault compensation factor and a Beetle Antenna Search (BAS) algorithm is proposed. First, by analyzing the voltage distribution characteristics of the protection installation at the time of the fault and combining the characteristics of the measured impedance, a composite fault compensation factor is constructed. This solves the problem of long time delay caused by the short-circuit current changes in inverse-time overcurrent protection and improves the speed of protection. In addition, in order to solve the problem of microgrid protection coordination caused by factors such as DG access and changes in the operation mode of microgrids, the BAS algorithm is used to optimize the parameters of improved inverse-time overcurrent protection to ensure the coordination and cooperation of adjacent protections. Finally, a microgrid simulation model is built in DIGSILENT/PF software to verify the effectiveness of the improved method. The simulation results show that compared with the traditional inverse-time overcurrent protection, the improved protection method significantly improves the speed performance and meets the coordination requirements under different operating modes and fault conditions of the microgrid.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51807114).

**Key words:** microgrid; inverter interfaced DG; inverse-time overcurrent protection; BAS algorithm; coordination optimization

## 0 引言

随着对电能的需求不断增加以及日益严峻的全

球性环境问题, 含光伏、风力发电、储能等分布式能源(Distributed Generator, DG)的微电网在电力系统中发挥着重要作用<sup>[1-2]</sup>。有效的微电网保护方法对于微电网的安全稳定运行以及供电可靠性有着重要的意义<sup>[3-5]</sup>。由于逆变型 DG 通过电力电子器件并

网, 其故障输出电流一般被限制在 1.2~2 倍额定电流以内, 从而导致传统反时限电流保护无法直接使用<sup>[6-7]</sup>。同时, 微电网的不同运行模式、DG 的接入进一步导致其故障特性的复杂性, 进而影响微电网保护的上下级协调配合<sup>[8-10]</sup>。

针对此类问题, 国内外学者开展了一系列相关研究。文献[11]通过分析故障电压分布特性, 构建低电压加速因子并改进反时限电流保护, 提高了保护在孤岛模式下的速动性, 但并未考虑相邻保护之间的协调配合。文献[12]提出在公共连接点(Point of Common Coupling, PCC)处安装方向故障限流器, 以削弱故障时上游电网对微电网的影响, 进而提高电流保护的适用性, 但经济性较差。文献[13]通过分析故障测量阻抗的特点, 利用故障测量阻抗与负荷阻抗关系, 构建了基于测量阻抗的反时限低阻抗保护, 解决了微电网故障电流复杂多变的问题。文献[14]利用故障前后母线测量导纳幅值和相角的变化, 构建了区内区外故障的判据, 提出了含故障定位的保护新方案, 克服了传统电流保护的不足。此外, 随着人工智能技术的发展, 一些学者致力于智能保护方法的研究与开发<sup>[15-16]</sup>。文献[15]提出了一种基于数据挖掘技术的差分保护方案, 解决了微电网的运行模式和拓扑变化的问题。文献[16]通过利用 Hilbert-Huang 变换提取微电网故障特征, 并结合机器学习对故障进行分类, 构成了一种新型差动保护方案。智能保护方法可以有效解决保护的整定和协调问题, 但可靠性难以保证。

针对以上问题, 本文通过分析逆变型 DG 对微电网电流保护的速动性和协调性的影响, 提出一种基于复合故障补偿因子的改进反时限过电流保护(Improved Inverse-Time Overcurrent Relay, I-ITOCR)方法以提高保护的速动性。同时, 采用天牛须搜索(Beetle Antenna Search, BAS)算法对保护参数进行协调优化, 以保证上下级保护的协调性。最后, 在 DigSILENT/PF 软件中建立微电网仿真模型, 验证了改进保护方法的性能。

## 1 反时限过电流保护在微电网中的适用性分析

### 1.1 反时限过电流保护的動作特性

反时限过电流保护(Inverse-Time Overcurrent Relay, ITOCR)的動作时间随着故障电流大小变化而变化, 故具有反应故障严重程度的能力<sup>[17]</sup>。根据国际标准 IEC 60255<sup>[18]</sup>, ITOCR 的動作特性方程定义为

$$\begin{cases} t = \frac{A}{M^{\alpha} - 1} \times TDS \\ M = \frac{I_f}{I_{op}} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $t$  为保护动作延时;  $A$  为时间常数, 通常取 0.14;  $M$  为启动电流倍数, 为故障时保护处测量电流  $I_f$  与保护启动电流  $I_{op}$  之比;  $\alpha$  为反时限曲线形状系数, 通常取 0.02;  $TDS$  为时间整定系数。

### 1.2 传统反时限微电网电流保护存在的问题

#### 1.2.1 保护速动性问题

根据 ITOCR 動作特性方程, 保护動作时间与故障电流成反比。如图 1 所示, 微电网中 Line2 的 f 点处发生故障。当微电网并网运行时, 流过保护 R1 和 R2 的故障电流由上游配电网和 DG1 提供, 如式(2)所示。

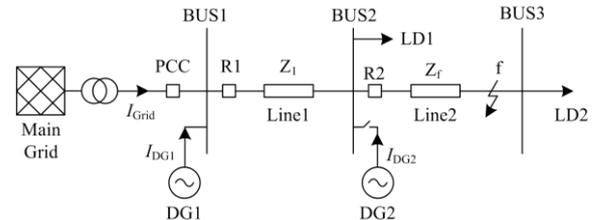


图 1 简单微电网模型

Fig. 1 Simplified microgrid model

$$I_{R1} = I_{R2} = I_{Grid} + I_{DG1} \quad (2)$$

式中:  $I_{Grid}$  为上游配电网提供的故障电流;  $I_{DG1}$  为 DG1 提供的故障电流。当微电网孤岛运行时, 流过保护 R1 和 R2 的故障电流只由 DG1 提供, 如式(3)所示。

$$I'_{R1} = I'_{R2} = I_{DG1} \quad (3)$$

如图 2(a)所示, 由于受到 DG 的控制策略、容量以及电力电子设备本身的限制等因素的影响,  $I_{DG1}$  远小于  $I_{Grid}$ , 导致保护 R1 和 R2 的動作时间延长, 因此微电网孤岛运行时, ITOCR 的速动性会受到较为明显的影响。

#### 1.2.2 保护协调性问题

微电网中 DG 的接入会影响流过保护的故障电流, 从而影响保护之间的协调性。当图 1 中的微电网并网运行且 DG2 未连接时, f 点发生故障, 流过保护 R1 和 R2 的故障电流如式(2)所示, 当 DG2 连接时, 流过保护 R1 和 R2 的故障电流为

$$\begin{cases} I'_{R1} = I_{R1} - I_{DG2} \times \frac{Z_{DG2} + Z_f}{Z_T} \\ I'_{R2} = I_{R2} + I_{DG2} \times \left(1 - \frac{Z_{DG2} + Z_f}{Z_T}\right) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $I_{DG2}$  为 DG2 输出的故障电流;  $Z_{DG2}$  为 DG2 的等效阻抗;  $Z_f$  为保护 R2 与故障点 f 之间的阻抗;  $Z_T$  为上游配电网到故障点 f 的等效阻抗。如图 2(b) 所示, 由于 DG2 输出的故障电流作用, 流过主保护 R2 和后备保护 R1 的故障电流发生变化, 从而导致相邻保护之间的协调时间间隔 (Coordination Time Interval, CTI) 被延长, 保护的协调性受到影响。

此外, 微电网运行模式变化也会影响保护的协调性。当微电网从孤岛模式切换为并网模式后, 由于微电网中故障电流的增大, 主后备保护的動作时间显著减小, 导致相邻保护之间的 CTI 低于其所允许的安全范围, 影响主后备保护的协调性, 使保护失去选择性。

综上所述, 由于微电网独特的故障特征以及 DG 故障输出电流对保护的影响, 传统 ITOCR 在微电网中很难满足速动性及协调性的要求。因此, 需要针对上述问题对传统 ITOCR 的原理进行改进。

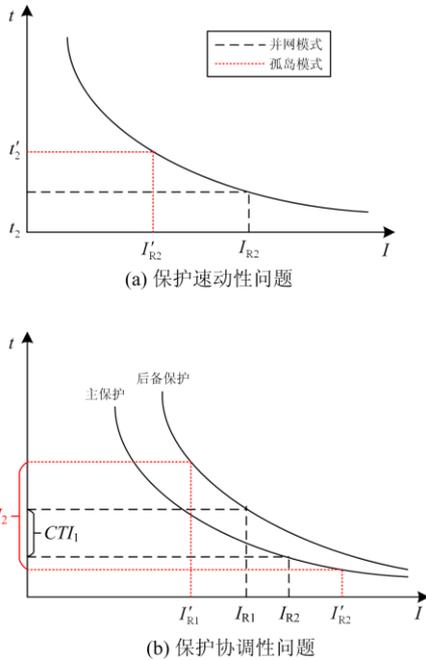


图 2 ITOCR 在微电网中存在的问题  
Fig. 2 Problems of ITOCR in microgrid

## 2 基于复合故障补偿因子的 I-ITOCR

### 2.1 复合故障补偿因子原理及 I-ITOCR 动作特性

当微电网发生故障时, 故障点越接近保护安装处, 保护安装处的电压变化就越明显, 因此保护安装处的电压变化量可以反映保护继电器到故障点的距离。

如图 1 所示, 微电网中 Line2 的 f 点处发生故

障时, 设保护  $R_i$  安装处在故障前、后测量的母线电压分别为  $U_i^{\text{prefault}}$ 、 $U_i^{\text{fault}}$ , 构建保护  $R_i$  处的故障电压系数  $U_i^*$  为

$$U_i^* = 1 - \left| \frac{U_i^{\text{fault}} - U_i^{\text{prefault}}}{U_i^{\text{prefault}}} \right| \quad (5)$$

当故障发生时, 母线电压跌落程度与故障点位置相关, 故障越靠近保护安装处, 则故障电压系数越小, 且均小于 1。

同时, 根据距离保护的原理, 保护安装处的测量阻抗也可直接反映保护点到故障点的距离, 且测量阻抗大小与保护到故障点的距离成正比。根据测量阻抗与故障距离的关系特征, 构建保护  $R_i$  的故障阻抗系数  $Z_i^*$  为

$$Z_i^* = \frac{|Z_L|}{|Z_{R_i}|} \quad (6)$$

式中:  $Z_L$  为公共连接点的母线 BUS1 到线路末端母线 BUS3 的总阻抗;  $Z_{R_i}$  为保护安装处的测量阻抗。当故障发生时, 测量阻抗与故障点位置相关, 故障越靠近保护安装处, 则故障阻抗系数越大, 且均大于 1。

综合式(5)和式(6), 构建复合故障补偿因子为

$$C_i = \frac{Z_i^*}{U_i^*} \quad (7)$$

根据复合故障补偿因子  $C_i$  可得到随着故障情况变化的  $TDS_i^*$ , 进而获得 I-ITOCR 的動作特性, 如式(8)所示。

$$\begin{cases} TDS_i^* = \frac{TDS_i}{C_i} \\ t_i = \frac{A}{M^\alpha - 1} \times TDS_i^* \end{cases} \quad (8)$$

由故障电压系数  $U_i^*$  和故障阻抗系数  $Z_i^*$  的性质, 可知复合故障补偿因子  $C_i$  大于 1, 与传统 ITOCR 相比, I-ITOCR 具备更短的动作延时。当微电网处于孤岛模式时, 由于 DG 容量小且受其控制策略的影响, 维持电压能力较弱, 补偿因子的补偿加速能力相比并网模式更强, 削减了孤岛运行时短路水平降低对保护動作时间的影响。

### 2.2 分布式电源对 I-ITOCR 的影响

微电网中 DG 除了导致故障电流复杂多变以外, 其输出的故障电流还可能影响保护安装处的故障测量阻抗<sup>[9]</sup>, 故需要分析 DG 对复合故障补偿因子的影响。如图 1 所示, 在保护 R2 下游(点 f)发生故障时, 受 BUS2 母线上 DG2 输出的故障电流影响, 保护 R1 和 R2 的测量阻抗分别为

$$\begin{cases} Z_{R1} = Z_1 + Z_f + Z_{DG}^* \\ Z_{R2} = Z_f \end{cases} \quad (9)$$

$$Z_{DG}^* = \frac{I_{DG2}}{I_{BUS1}} \times Z_f \quad (10)$$

式中:  $Z_{R1}$  和  $Z_{R2}$  分别为保护 R1 和 R2 的测量阻抗;  $Z_1$  为线路 Line1 的阻抗;  $Z_{DG}^*$  为 DG2 对保护 R1 的助增阻抗;  $I_{DG2}$  为 DG2 对故障点 f 提供的故障电流;  $I_{BUS1}$  为流过母线 BUS1 的故障电流。

当微电网处于并网运行模式时,  $I_{BUS1} \gg I_{DG2}$ ,  $Z_{DG}^*$  可忽略不计, 保护 R1、R2 的测量阻抗基本不受 DG2 的影响, I-ITOCR 能够正常的动作。当微电网处于孤岛运行模式时,  $I_{DG2}/I_{BUS1}$  的大小无法确定, 但  $I_{DG2}/I_{BUS1}$  的相角在  $\pm 90^\circ$  之间<sup>[13]</sup>。由向量关系可得保护 R1 的测量阻抗变大, 故  $Z_{R1}$  仍大于  $Z_{R2}$  且复合故障补偿因子  $C_i$  仍小于  $C_2$ 。综上所述, DG 的接入并不影响复合故障补偿因子  $C_i$  与故障距离的关系, 故 I-ITOCR 不受 DG 输出电流的影响仍能保证相邻保护的配合。

考虑到微电网孤岛运行时, 过大的助增阻抗  $Z_{DG}^*$  可能使复合故障补偿因子  $C_i$  小于 1, 影响保护的速动性。因此, 对复合故障补偿因子  $C_i$  进行改进, 在不影响复合故障补偿因子  $C_i$  对保护选择性及速动性的前提下, 当故障阻抗系数  $Z_i^*$  小于 1 时取 1 并将  $C_i$  的分子加 1, 以更好地保证复合故障补偿因子  $C_i$  的补偿效果。改进后的复合故障补偿因子  $C_i$  及 I-ITOCR 如式(11)所示。

$$\begin{cases} t_i = \frac{A}{M_i^\alpha - 1} \times \frac{TDS_i}{C_i} = \frac{A}{M_i^\alpha - 1} \times TDS_i^* \\ C_i = \frac{Z_i^* + 1}{U_i^*} \\ Z_i^* = \begin{cases} 1 & Z_i^* < 1 \\ |Z_L/Z_{Ri}| & Z_i^* \geq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (11)$$

### 3 基于 BAS 算法的保护优化协调

本文所提改进电流保护的動作特性方程为非线性分段函数, 其中复合故障补偿因子  $C_i$  又随着故障情况动态变化, 并且微电网中的故障电流复杂多变, 故改进电流保护的参数整定很难通过传统的整定方法进行整定。因此, 为了保证上下级保护的选择性, 本文将保护参数整定问题转化为对多约束非线性目标函数的求解问题。

#### 3.1 目标函数

电力系统发生故障时, 保护继电器应能够在最

短的时间将故障隔离到最小的范围内, 据此构建如式(12)所示的目标函数, 表示在微电网不同运行模式以及不同故障情况下的 I-ITOCR 的主后备保护动作延时之和最小。目标函数的优化变量为保护参数  $I_{op}$  和  $TDS$ , 为了减小故障电流对 I-ITOCR 动作延时的影响, 将指数  $\alpha$  也添加到优化变量中以便获得更好的性能效果。

$$\text{Min}_{I_{op}, \alpha, TDS} F = \sum_{m=1}^2 \sum_{n=1}^4 \left( \sum_{k=1}^2 \sum_{i=1}^N (t_{pr}^{i,k} + t_{bc}^{i,k}) \right) \quad (12)$$

式中:  $m$  表示微电网运行模式, 数字 1、2 分别表示微电网并网及孤岛运行模式;  $n$  代表不同的故障类型, 数字 1、2、3、4 分别表示单相接地故障、两相故障、两相接地故障和三相故障;  $k$  表示不同的故障位置, 数字 1、2 分别表示线路首末端;  $N$  表示微电网的线路总数;  $t_{pr}^{i,k}$  和  $t_{bc}^{i,k}$  分别表示在故障点  $k$  的主后备改进保护的動作延时。

#### 3.2 约束条件

##### (1) 保护的参数配置约束

根据 IEC 60255 标准的要求, 启动电流  $I_{opi}$  必须大于线路的最大负载电流  $I_{Li}^{\max}$ , 通常将其设置为  $I_{opi} > 1.1I_{Li}^{\max}$ <sup>[20]</sup>。为了保证保护的可靠性, 启动电流必须小于线路最小故障电流  $I_{f \min}$ , 因此启动电流  $I_{opi}$  的约束条件为

$$I_{opi}^{\min} \leq I_{opi} \leq I_{opi}^{\max} \quad (13)$$

根据标准 IEC 60255,  $\alpha_i$  设置为 0.02~13.5<sup>[21]</sup>, 本文  $TDS_i$  设置为 0.05~11 s<sup>[22]</sup>, 约束条件为

$$\begin{cases} \alpha_i^{\min} < \alpha_i < \alpha_i^{\max} \\ TDS_i^{\min} \leq TDS_i \leq TDS_i^{\max} \end{cases} \quad (14)$$

##### (2) 保护的動作延时约束

考虑到保护的速动性以及系统的稳定性, 应限制保护最小和最大動作延时。本文保护的動作延时限制为 0~2 s, 约束条件如式(15)所示。

$$\begin{cases} t_{\min} \leq t_{pr}^{i,k} \leq t_{\max} \\ t_{\min} \leq t_{bc}^{i,k} \leq t_{\max} \end{cases} \quad (15)$$

##### (3) 相邻保护的协调配合约束

考虑到断路器的操作时间和安全裕度, 主后备保护之间的 CTI 应存在最小值, 且过大的 CTI 也不利于系统的稳定性<sup>[23]</sup>。因此本文中 CTI 被限制在 0.2~0.5 s<sup>[24-26]</sup>, 约束条件如式(16)所示。

$$\begin{cases} CTI = t_{bc}^{i,k} - t_{pr}^{i,k} \\ CTI_{\min} \leq CTI \leq CTI_{\max} \end{cases} \quad (16)$$

本文采用天牛须搜索(Beetle Antenna Search, BAS)算法对上述目标函数及约束条件进行求解, 该

算法通过模仿天牛触须的感知功能来判断自身周围局部区域适应度的优劣。并利用局部区域的最优解引导个体向全局最优解移动的元启发式算法, 与常见的启发式算法相比, BAS 只需要一个个体, 大大降低了计算复杂度<sup>[27]</sup>。

## 4 仿真验证

在 DigSILENT/PF 软件中搭建如图 3 所示的微电网仿真模型, 微电网的运行模式由开关 PCC 状态控制。DG1 具有 PQ 和 V/f 两种控制方式, 在微电网孤岛运行时承担着调节系统电压和频率的作用, 其余 DG 均为 PQ 控制方式, 图中故障点均为线路中端, 且所有 DG 的最大故障输出电流限制为额定电流的 2 倍。表 1 和表 2 分别为微电网模型的参数以及基于 BAS 算法优化的保护参数整定值, 对传统

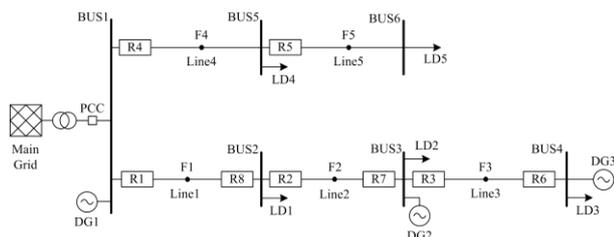


图 3 微电网仿真模型

Fig. 3 Microgrid simulation model

表 3 并网运行时不同故障位置的保护动作延时

Table 3 Protection operation delay of different fault locations during grid-connected operation

故障位置	I-ITOCR			ITOCR		
	PR	BR	CTI	PR	BR	CTI
F1	0.279 7	—	—	0.796 3	—	—
F2	0.145 1	0.512 7	0.367 6	0.543 0	1.127 9	0.584 9
F3	0.002 7	0.377 2	0.374 5	0.090 4	0.646 4	0.556 0
F4	0.208 6	—	—	0.464 0	—	—
F5	0.022 6	0.428 0	0.405 4	0.117 9	0.724 1	0.606 2

注: PR 和 BR 分别表示主保护和后备保护

从表 3 可以看出, I-ITOCR 的速动性不受故障位置的影响, 且 CTI 值均满足约束条件( $0.3 \leq CTI \leq 0.5$ ), 此外, 越靠近配电网侧的故障, ITOCR 的动作延时就越长。如图 4 所示, 以 F2 点故障为例, I-ITOCR 和 ITOCR 的动作延时分别为 0.145 1 s 和 0.543 0 s, I-ITOCR 的动作延时更短, 且在其他故障位置 I-ITOCR 同样有着更好的速动性。

### 4.1.2 不同故障类型下的保护动作延时

在微电网的 F3 点处设置不同的故障类型, 表 4 为 I-ITOCR 和 ITOCR 的动作延时。

ITOCR 按照阶梯型时限特性进行整定<sup>[28]</sup>, 仿真故障开始时间均设置为 4 s。

表 1 微电网模型的仿真参数

Table 1 Simulation parameters of the microgrid model

组成元件	参数
DG 1/DG 2/DG 3	1500/100/200 kW
Line 1/Line 2/Line 3/Line 4/Line 5	0.01+j0.015 Ω/km, 1 km
Load 1/Load 2/Load 3/Load 4/Load 5	300/100/200/200/400 kW
电压/频率 (PCC)	0.4 kV/50 Hz

表 2 保护参数的优化整定值

Table 2 Optimized setting of protection parameters

保护编号	$I_{op1} / I_{Li}^{max}$	$TDS_i$	$a_i$
R1	1.796 6	5.908 7	0.020 0
R2	2.055 7	5.592 4	0.020 1
R3	2.900 3	1.379 3	0.172 7
R4	1.180 4	3.043 9	0.020 0
R5	3.255 0	0.852 6	0.052 4

## 4.1 微电网并网运行仿真分析

### 4.1.1 不同故障位置下的保护动作延时

在微电网的 F1—F5 点处设置三相故障, 以验证改进保护方法在不同故障位置的速动性和协调性。表 3 为 I-ITOCR 和 ITOCR 的动作延时。

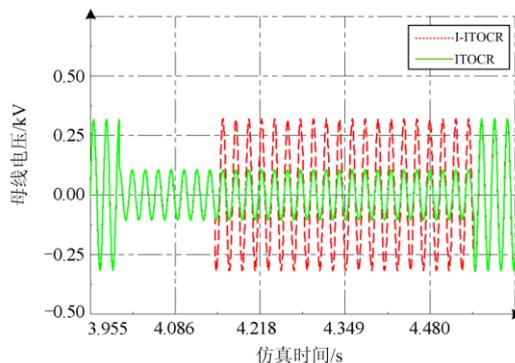


图 4 F2 点三相故障时母线电压

Fig. 4 Bus voltage during F2 point three-phase fault

从仿真结果可以看出, I-ITOCR 不受故障类型的影响, 速动性和协调性均满足要求, 且 I-ITOCR 的保护动作延时和 CTI 值均比 ITOCR 短, 故在并网运行时, 不同故障类型下 I-ITOCR 具有更优的速动性和协调性。

## 4.2 微电网孤岛运行仿真分析

### 4.2.1 不同故障位置下的保护动作延时

同样, 在微电网孤岛运行时设置不同位置的三相故障以验证改进保护方法在孤岛模式下的性能。

表 5 为 I-ITOCR 和 ITOCR 的动作延时。

表 4 并网运行时不同故障类型的保护动作延时

Table 4 Protection operation delay of different fault types during grid-connected operation

故障类型	I-ITOCR			ITOCR		
	PR	BR	CTI	PR	BR	CTI
A	0.002 7	0.374 3	0.371 6	0.100 5	0.674 2	0.573 7
B	0.007 8	0.448 6	0.440 8	0.108 5	0.671 2	0.562 7
C	0.002 7	0.388 3	0.385 6	0.095 9	0.682 0	0.586 1
D	0.002 7	0.377 2	0.374 5	0.090 4	0.646 4	0.556 0

注: A、B、C 和 D 分别表示单相接地故障、两相故障、两相接地故障和三相故障。

表 5 孤岛运行时不同故障位置的保护动作延时

Table 5 Protection operation delay for different fault locations during islanded operation

故障位置	I-ITOCR			ITOCR		
	PR	BR	CTI	PR	BR	CTI
F1	0.177 2	—	—	1.477 3	—	—
F2	0.124 8	0.484 3	0.359 5	0.793 6	1.780 8	0.987 2
F3	0.002 9	0.449 1	0.446 2	0.094 2	0.871 3	0.777 1
F4	0.167 1	—	—	0.876 3	—	—
F5	0.034 1	0.461 6	0.427 5	0.176 6	1.198 3	1.021 7

从表 5 可以看出, 由于孤岛运行时故障电流较小, ITOCR 的动作延时较长, 而 I-ITOCR 的速动性不受微电网运行模式变化的影响, 如图 5 所示, 以

F1 点故障为例, ITOCR 的主保护动作延时长达 1.477 3 s, 速动性较差, 而 I-ITOCR 的主保护动作延时仅为 0.177 2 s, 速动性更好。且 I-ITOCR 的 CTI 值均满足约束条件( $0.3 \leq CTI \leq 0.5$ )并远小于 ITOCR 的 CTI 值(最小为 0.777 1 s), 故在微电网孤岛运行时, I-ITOCR 具有更好的速动性和协调性。

### 4.2.2 不同故障类型下的保护动作延时

表 6 为微电网孤岛运行时 F3 点发生不同故障类型时, I-ITOCR 和 ITOCR 的动作延时。从仿真结果可以看出, 在孤岛模式时, 不同故障类型下 I-ITOCR 的速动性比 ITOCR 更好。且从仿真结果可以看出, 由于短路水平降低, ITOCR 的 CTI 值较长且都大于 0.75 s, 而 I-ITOCR 的 CTI 值不受其影响, 均满足约束条件( $0.3 \leq CTI \leq 0.5$ ), 故 I-ITOCR 具有更优的协调性。

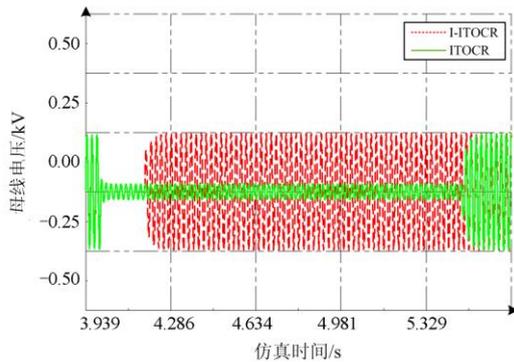


图 5 F1 点三相故障时母线电压

Fig. 5 Bus voltage during F1 point three-phase fault

表 6 孤岛运行时不同故障位置的保护动作延时

Table 6 Protection operation delay for different fault locations during islanded operation

故障类型	I-ITOCR			ITOCR		
	PR	BR	CTI	PR	BR	CTI
A	0.002 6	0.409 3	0.406 7	0.127 1	1.047 8	0.920 7
B	0.013 5	0.474 5	0.461 0	0.144 8	1.039 0	0.894 2
C	0.002 7	0.421 3	0.418 6	0.106 2	0.944 8	0.838 6
D	0.002 9	0.449 1	0.446 2	0.094 2	0.871 3	0.777 1

## 5 结论

本文首先通过分析含逆变型 DG 的微电网故障发生时保护安装处的电压分布特性, 并结合保护测量阻抗特征以构建复合故障补偿因子; 接着, 利用天牛须搜索(BAS)算法对保护参数进行优化; 进而提出了一种基于复合故障补偿因子的改进反时限过电流保护方法。仿真结果表明, 改进的反时限过电流保护方法在微电网不同运行模式、不同故障位置 and 不同故障类型下都能快速协调地切除故障, 验证了该保护方法的速动性和协调性, 且相比传统保护方法更优。

## 参考文献

- [1] MAGDY G, SHABIB G, ELBASET A A, et al. Microgrid dynamic security considering high penetration of renewable energy[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2018, 3(3): 236-246. DOI: 10.1186/s41601-018-0093-1.
- [2] SHARMA A, PANIGRAHI B K. Phase fault protection scheme for reliable operation of microgrids[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017, 54(3): 2646-2655.
- [3] 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.
- [4] 韩海娟, 牟龙华, 张凡, 等. 考虑 IIDG 低电压穿越时的微电网保护[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(1): 110-120.  
HAN Haijuan, MU Longhua, ZHANG Fan, et al. Microgrid protection considering low voltage ride-through of IIDG[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(1): 110-120.
- [5] JAIN R, LUBKEMAN D L, LUKIC S M. Dynamic adaptive protection for distribution systems in grid-connected and islanded modes[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019, 34(1): 281-289.
- [6] NAJY W K A, ZEINELDIN H H, WOON W L. Optimal protection coordination for microgrids with grid-connected and islanded capability[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013, 60(4): 1668-1677.
- [7] 韩海娟, 牟龙华, 郭文明. 基于故障分量的微电网保护适用性[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(3): 90-96.  
HAN Haijuan, MU Longhua, GUO Wenming. Adaptability of microgrid protection based on fault components[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(3): 90-96.
- [8] 王志文, 陈来军, 郑天文, 等. 采用搜索保护与差动保护的光伏微电网综合保护策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2014, 42(18): 14-19.  
WANG Zhiwen, CHEN Laijun, ZHENG Tianwen, et al. A comprehensive protection scheme for photovoltaic microgrid using scan protection and differential protection[J]. *Power System Protection and Control*, 2014, 42(18): 14-19.
- [9] 贾清泉, 孙玲玲, 王美娟, 等. 基于节点搜索的微电网自适应保护方法[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(10): 1650-1657.  
JIA Qingquan, SUN Lingling, WANG Meijuan, et al. An adaptive protection method for micro-grid based on node searching[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(10): 1650-1657.
- [10] 薛士敏, 崔淼. 基于形态学梯度算法的微电网行波保护方案[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(2): 31-39.  
XUE Shimin, CUI Miao. Current traveling wave based protection scheme for microgrids using morphological gradient algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(2): 31-39.
- [11] 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.
- [12] DEGHANPOUR E, KAREGAR H, KHEIROLLAHI R, et al. Optimal coordination of directional over-current relays in microgrids by using cuckoo-linear optimization algorithm and fault current limiter[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(2): 1365-1375.
- [13] 黄文焘, 邰能灵, 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.
- [14] 姜斌, 牟龙华, 郭文明, 等. 基于母线测量导纳变化的微电网保护[J]. *电网技术*, 2015, 39(6): 1751-1758.  
JIANG Bin, MU Longhua, GUO Wenming, et al. Microgrid protection based on change of measured bus admittance[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(6): 1751-1758.
- [15] KAR S, SAMANTARAY S R, ZADEH M D. Data-mining model based intelligent differential microgrid protection scheme[J]. *IEEE Systems Journal*, 2017, 11(2): 1161-1169.
- [16] MISHRA M, ROUT P K. Detection and classification of

- micro-grid faults based on HHT and machine learning techniques[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(2): 388-397.
- [17] 谢民, 王同文, 徐靖东, 等. 分布式电源对配网继电保护影响及综合改进保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 78-84.  
XIE Min, WANG Tongwen, XU Jingdong, et al. Effect of distributed generation on relay protection of distribution network and comprehensive improvement of protection scheme[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 78-84.
- [18] Measuring relays and protection equipment - part 151: functional requirements for over/under current protection: IEC 60255[S]. 2009.
- [19] 刘玉娟, 卫志农, 孙国强, 等. 低阻抗加速反时限过电流保护[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3424-3431.  
LIU Yujuan, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Low impedance acceleration inverse-time over-current protection[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3424-3431.
- [20] ELNAILY N, SAAD S M, HUSSEIN T, et al. A novel constraint and non-standard characteristics for optimal over-current relays coordination to enhance microgrid protection scheme[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(6): 780-793.
- [21] SHARAF H M, ZEINELDIN H H, IBRAHIM D K, et al. A proposed coordination strategy for meshed distribution systems with DG considering user-defined characteristics of directional inverse time overcurrent relays[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 65: 49-58.
- [22] DAHEJ A E, ESMAEILI S, HOJABRI H, et al. Co-Optimization of protection coordination and power quality in microgrids using unidirectional fault current limiters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 5080-5091.
- [23] 杨克杰, 黄纯. 配电网反时限过电流保护优化整定方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 163-168.  
YANG Kejie, HUANG Chun. Optimal setting method of inverse time over-current protection for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 163-168.
- [24] 白祥昌, 吕飞鹏, 杨常. 基于改进的 SOS 算法的反时限过电流保护协调优化[J]. 电测与仪表, 2018, 55(17): 9-14, 20.  
BAI Xiangchang, LÜ Feipeng, YANG Chang. Optimization of inverse-time over-current protection coordination based on SOS-AA algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(17): 9-14, 20.
- [25] HE H, CHEN L, YIN T, et al. Application of a SFCL for fault ride-through capability enhancement of DG in a microgrid system and relay protection coordination[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(7): 1-8.
- [26] GHANBARI T, FARJAH E. Unidirectional fault current limiter: an efficient interface between the microgrid and main network[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1591-1598.
- [27] 卢光辉, 滕欢, 廖寒逊, 等. 基于改进天牛须搜索算法的分布式电源选址定容[J]. 电测与仪表, 2019, 56(17): 6-12.  
LU Guanghui, TENG Huan, LIAO Hanxun, et al. Location and sizing of distributed generation planning based on the improved beetle antennae search algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(17): 6-12.
- [28] 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.

收稿日期: 2019-12-03; 修回日期: 2020-02-09

作者简介:

曹喆(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网继电保护; E-mail: shldxcaoze@163.com

季亮(1985—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: jihome2002@sina.cn

常潇(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为新能源并网、电能质量分析和储能应用技术等。

(编辑 周金梅)