

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190730

基于阻抗修正的反时限过流保护新方案

黄景光¹, 张宇鹏¹, 李江峡¹, 郑钦杰¹, 黄静梅¹, 夏家辉¹, 刘胜¹, 陈波²

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 国网湖北省电力有限公司直流运检公司, 湖北 宜昌 443000)

摘要: 反时限过流(Inverse-Time Overcurrent, ITOC)保护因其动作时间能跟随故障电流大小变化而变化的特性在中低压配电网中广泛应用。根据反时限过流保护的整定原则, 其动作速度易受系统运行方式、故障类型及线路级数影响。另外, 分布式电源(Distributed Generation, DG)的广泛接入也对反时限过电流保护的选择性和速动性带来不利影响。针对上述问题, 首先阐述了反时限保护的基本原理及其存在的动作延时过长的问题, 并分析了 DG 接入对反时限过流保护的影响。根据不同位置故障情况下测量阻抗的变化特征, 提出了一种基于阻抗修正的反时限过流(Impedance Correction Based Inverse-Time Overcurrent, ICITOC)保护新方案。该方案采用测量阻抗百分比及阻抗修正指数对反时限特性曲线进行修正, 可在保证上下级保护配合关系的前提下, 最大程度加快保护的動作速度。理论分析和基于 PSCAD 的仿真结果验证了所提反时限过流保护新方案的正确性及有效性。

关键词: 分布式电源; 反时限过流保护; 速动性; 选择性; 测量阻抗

A novel impedance correction-based inverse-time overcurrent protection scheme

HUANG Jingguang¹, ZHANG Yupeng¹, LI Jiangxia¹, ZHENG Qinjie¹, HUANG Jingmei¹,
XIA Jiahui¹, LIU Sheng¹, CHEN Bo²

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. State Grid Hubei Electric Power Co., Ltd. DC Transportation Inspection Company, Yichang 443000, China)

Abstract: Inverse-Time Over Current (ITOC) protection is widely used in medium and low voltage distribution networks because its protection operation time varies with the fault current. With ITOC protection, operation speed is easily affected by system operation modes, fault types and line series. In addition, the wide access of Distributed Generation (DG) has a negative impact on the selectivity and speed of ITOC protection. The basic principle of ITOC protection and the problem of long operation delay are expounded, and the impacts of DG on ITOC protection are analyzed. Considering the measured impedance at different fault locations, a novel Impedance Correction based Inverse-Time Over Current (ICITOC) protection scheme is proposed. The percentage of measured impedance and impedance correction index are used to modify the inverse time characteristic curve. This can accelerate the protection operation speed to the greatest extent while the coordination relationship between protections can be guaranteed. Theoretical analysis and PSCAD-based simulation results verify the correctness and effectiveness of the proposed ICITOC protection scheme.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477090).

Key words: distributed generation; ITOC protection; speed; selectivity; measured impedance

0 引言

反时限过流保护是指保护动作速度跟随故障电流大小变化而变化的一种保护。相比于阶梯式配合的过流保护, 其能快速切除发生在靠近电源侧的故

障, 具有更为优良的动作特性, 目前广泛应用于中低压配电网中^[1-2]。

近年来, 随着风电、光伏等可再生能源的大力发展, 分布式电源一般采取就地消纳的方式接入配电网^[3-5]。大量接入的分布式电源将改变传统配电网单一的供电模式, 并对故障电流的大小及方向带来影响, 进而影响反时限保护的動作特性, 主要在于

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51477090)

上下级保护配合关系以及保护的動作時限^[6-8]。文獻[9-10]通過定量計算分析了 DG 接入對短路電流的影響, 給出了各種情況下反時限保護誤動的可能性。

針對 DG 接入對配電網反時限過流保護帶來的影響, 已有大量學者開展了相關研究。文獻[11]提出了一種無需借助通信的低電壓加速反時限過電流保護方案, 該方案採用相電壓對反時限動作方程進行修正, 能有效提升保護的動作速度。但是該方案無法保障上下級保護的配合關係。文獻[12-13]在其基礎上進行了一系列改進, 提出了新的常數整定方法以及保護分段配置的方案, 優化了保護的動作性能。然而, 以上方案均基於電壓量對反時限動作方程進行修正, 易受系統運行方式及故障類型的影響。考慮到測量阻抗同樣具有反應故障位置的能力, 且不受上述因素的影響^[14-16], 文獻[17]提出一種基於負荷阻抗的反時限低阻抗保護方案以及保護加速方法, 具有較好的動作性能。但該方法對參數整定較為苛刻, 後備保護速動性難以得到保障, 且存在上下級保護失配的風險。文獻[18]提出引入測量阻抗對反時限保護進行加速, 並採用分段配置, 但該方案無法有效提升後備保護速動性。

針對上述問題, 本文首先分析了反時限保護自身存在的問題及 DG 接入對其帶來的影響, 進而引入測量阻抗及阻抗指數對反時限特性曲線進行修正, 提出了一種基於阻抗修正的反時限過流保護新方案, 並給出了保護整定方案。理論分析和基於 PSCAD 的仿真結果表明所提反時限保護新方案可最大限度提升保護的選擇性和速動性。

1 反時限過流保護基本原理及其缺陷

1.1 反時限過流保護基本原理

不同於傳統的三段式電流保護, 反時限保護的動作速度與流經保護裝置的電流大小呈正相關。以圖 1 所示的不含 DG 的配電網結構示意圖為例, 保護 S_1 、 S_2 和 S_3 的動作方程如式(1)所示^[19-20]。

$$t_i = \frac{0.14T_{p,i}}{\left(I_i / I_{op,i}\right)^n - a} \quad (1)$$

式中: $i \in \{1, 2, 3\}$; t_i 表示保護 S_i 的動作時間; $T_{p,i}$ 表示保護 S_i 的時間常數; I_i 表示保護 S_i 的測量電流; $I_{op,i}$ 表示保護 S_i 的啟動電流, 一般大於線路最大負荷電流; a 表示平移係數, 一般取 1, 可保障系統正常運行下保護不動作; n 表示曲線形狀係數, 一般取 0.02。

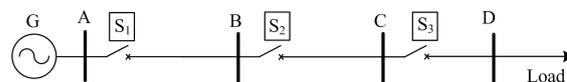


圖 1 不含 DG 的配電網結構示意圖

Fig. 1 Diagram of distribution network without DG

為確保以上保護 S_1 、 S_2 和 S_3 合理地配合動作, 各保護動作方程的曲線形狀係數及平移係數均一致, 其他參數整定方法為^[21]

$$I_{op,i} = K_{rel} K_{ss} I_{Li,max} / K_{re} \quad (2)$$

式中: K_{rel} 表示可靠係數; K_{ss} 表示自啟動係數; $I_{Li,max}$ 表示線路 i 的最大負荷電流; K_{re} 表示繼電器返回係數。通常從最末端線路保護 S_3 開始。

當保護 S_3 流過電流 $I_{op,3}$ 時, 其動作時間為 t_3 。

當線路 CD 首端發生最嚴重故障時, 故障電流為 $I_{kmax,3}$, 其動作時間為斷路器的最小動作時間 t_b , 此時即可確定保護 S_3 的反時限特性曲線; 隨後整定上一級線路保護 S_2 : 啟動電流仍然按式(2)整定, 此時動作時間為 t_2 。下級線路 CD 首端發生最嚴重故障時其動作時限比保護 S_3 高一個 Δt 。據此即可確定保護 S_2 的反時限特性曲線。保護 S_1 採取同樣的方式進行整定, 不再贅述。各保護的動作延時與故障位置的關係如圖 2 所示。

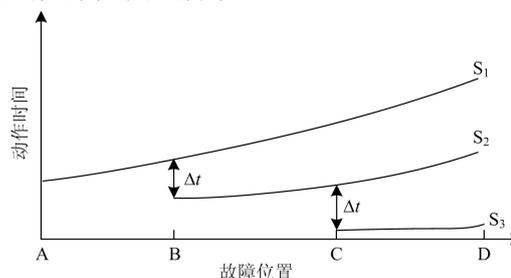


圖 2 反時限過流保護動作時間曲線

Fig. 2 Operating time curves of ITOC protection

根據上述反時限保護的整定原則以及圖 2 可知, 靠近電源側的反時限保護動作時間依舊較大, 並且當線路級數增多時, 其動作時間將進一步增大, 保護的速動性難以得到保障。另外, 在系統最小運行方式發生兩相短路故障時, 故障電流顯著降低, 導致故障切除時間較長, 這將對設備及系統的安全帶來嚴重影響。

1.2 DG 接入對反時限保護的影響

DG 的接入將對各保護感受到的故障電流帶來影響, 以圖 3 所示的含 DG 的配電網為例, 設 DG 接於母線 B 上。各保護動作時間在 DG 接入後隨故障位置的變化如圖 4 所示。

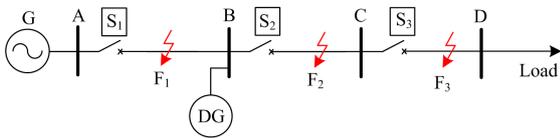


图3 含 DG 的配电网结构示意图

Fig. 3 Diagram of distribution network with DG

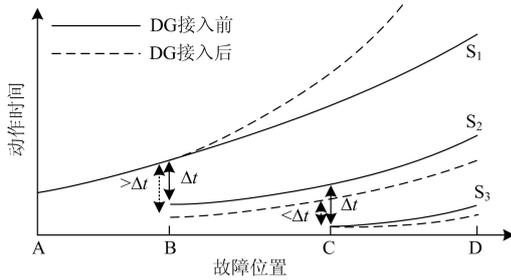


图4 DG 接入后反时限过流保护动作时间曲线

Fig. 4 Operating time curves of ITOC protection with DG

由图4可知,对于DG下游保护 S_2 和 S_3 而言,DG的接入可能导致其失配:当故障发生在线路CD上时,DG接入后将对保护 S_2 和 S_3 产生助增电流,根据反时限动作曲线,其动作时间均将降低。由于保护 S_3 已是按照最小动作时间整定,其下降幅度较保护 S_2 小。此时,将会出现保护 S_2 和 S_3 失配的情况^[22]。

对于保护 S_1 和 S_2 而言,当故障发生在线路BC上时,流经保护 S_2 的电流为流经保护 S_1 的电流与DG助增电流之和,因此DG的接入将使其动作时间减小。但对于保护 S_1 而言,DG接入将导致其电流减小,动作时间变大。因此,保护 S_1 作为BC的后备保护,DG的接入将导致其速动性降低^[23-25]。

2 现有应对方案的缺陷

针对上述问题,目前已有的应对方案主要是根据电压量或阻抗量能反映故障位置的特征,在反时限动作方程中引入电压修正因子或阻抗修正因子对反时限特性曲线进行修正以达到提升保护速动性和选择性的目的。下面以文献[11, 18]为例说明目前所提应对方案的不足之处。

(1) 文献[11]提出了一种基于低电压加速的反时限过电流保护方案,其动作方程如式(3)所示。

$$t_i = \frac{0.14T_{p,i}u^*}{\left(I_i/I_{op,i}\right)^n - a} \quad (3)$$

式中, u^* 表示电压修正因子。易知,引入电压修正因子后,在线路首端故障时,因电压较低(接近于0),保护动作时间也较低,加速了保护动作。但是,

这也将导致上下级保护的失配。以线路CD出口发生短路故障为例,此时保护 S_3 的电压修正因子为0,保护动作时间为断路器固有动作时间。而保护 S_2 的电压修正因子小于1,此时 $t_2 < \Delta t$,保护 S_2 和 S_3 将失配。另外,由于电压量易受系统运行方式及故障类型的影响,基于电压量修正的反时限保护在速动性方面均无法达到最优。

(2) 文献[18]提出利用测量阻抗反时限过电流保护进行加速的保护方案,其动作方程如式(4)所示。

$$t_i = \frac{0.14T_{p,i}Z^*}{\left(I_i/I_{op,i}\right)^n - a} \quad (4)$$

式中, Z^* 表示阻抗加速因子,其采用分段取值,如式(5)所示。

$$Z^* = \begin{cases} Z_m/Z_{line} & Z_m/Z_{line} < 1 \\ 1 & Z_m/Z_{line} \geq 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: Z_m 表示测量阻抗; Z_{line} 表示保护所在线路的阻抗。与电压修正类似,引入阻抗修正因子后,在线路首端发生故障时,对应保护的動作时限降至最低,保护能迅速切除故障。然而,该方案在区外故障时依旧沿用原有的反时限特性曲线。根据1.2节的分析可知,DG的接入将使其上游保护 S_1 的后备保护段延时增大,速动性降低。文献[18]所提的保护方案并未对此进行修正,尚存在一定的优化空间。

3 基于阻抗修正的反时限保护新方案

3.1 保护动作方程

针对上述反时限保护存在的速动性和选择性的问题,本文提出一种基于阻抗修正的反时限保护新方案,其动作方程设计如式(6)所示。

$$t_i = \frac{0.14T_{p,i}Z'}{\left(I_i/I_{op,i}\right)^n - a} \quad (6)$$

式中, Z' 表示阻抗修正系数,其计算公式如式(7)。

$$Z' = \begin{cases} (Z)^{r_1} & Z_m/Z_{line} < 1 \\ (Z)^{r_2} & Z_m/Z_{line} \geq 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: Z 表示测量阻抗百分比,其值为 $Z = Z_m/Z_{all}$, Z_{all} 表示从保护安装处起向下所有线路阻抗值; r_1 、 r_2 分别表示区内故障和区外故障情况下的阻抗修正指数。

由表达式可知,阻抗修正系数采用分段函数进行描述,当保护测量阻抗小于本线路阻抗时,可视作发生区内故障,此时测量阻抗百分比 Z 和阻抗修正指数 r_1 共同作用,主要提升保护的速动性;而当保护测量阻抗大于本线路阻抗时,可视作区外故障,

此时 Z 和阻抗修正指数 r_2 共同作用, 优化同下级保护的配合关系以使保护选择性得到满足, 并使速动性达到最优。

图 5 给出了不同阻抗修正指数下, 保护动作时间随故障位置变化情况。

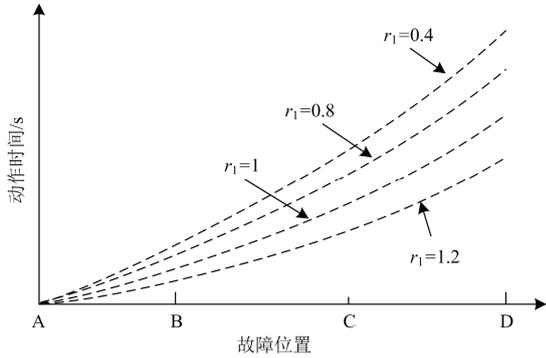


图 5 不同阻抗修正指数下反时限过流保护动作时间曲线
Fig. 5 Operating time curves of ICITOC protection with different impedance correction indexes

由图可知, 不同的阻抗修正指数下, 保护动作时间呈现不同变化率。那么可通过调整阻抗修正系数来调节测量阻抗百分比 Z 对保护的修正程度, 以使保护的速动性和选择性均达到最优。

3.2 保护参数整定

由 3.1 节可知, 所提动作方程引入了新的参数, 因此, 在保护整定时还需涉及阻抗修正指数。对于区内故障的阻抗修正指数 r_1 , 可根据具体电网对保护速动性的要求整定得到。对于区外故障的阻抗修正指数 r_2 , 则需考虑同下级线路保护相配合, 使其动作时间差既满足保护选择性要求又满足保护速动性要求。保护具体整定流程如下。

依然从最末端保护 S_3 开始整定, 由于其不涉及到 r_2 , 其整定流程与 1.1 节中所述一致。经阻抗修正后的反时限保护动作方程如式(8)所示。

$$t_3 = \frac{0.14T_{p,3}(Z_3)^{r_1}}{(I_i/I_{op,3})^{0.02} - 1} \quad (8)$$

对于保护 S_2 第一段, 根据选择性要求, 在下级线路 CD 首端发生最严重故障时, 保护 S_2 的动作时间比保护 S_3 高 Δt 。由于经测量阻抗修正, 保护 S_3 瞬时动作, 则保护 S_2 的动作时间 $t_2 = \Delta t$, 代入式(6)可得保护 S_2 第一段的时间常数, 如式(9)所示。

$$T_{p,2} = \frac{\Delta t}{0.14(Z_2)^{r_1} [(I_{k,max,3}/I_{op,2})^{0.02} - 1]} \quad (9)$$

对于保护 S_2 第二段, 需同时满足保护的选择性

和速动性。那么可以考虑在下级线路 CD 分别在首端和末端发生最严重故障时, 保护 S_2 的动作时间均比保护 S_3 高 Δt 。据此, 则可得

$$\begin{cases} \frac{0.14T_{p,2}(Z_a)^{r_2}}{(I_{k,max,3}/I_{op,2})^{0.02} - 1} = \Delta t \\ \frac{0.14T_{p,2}(Z_b)^{r_2}}{(I_{k',max,3}/I_{op,2})^{0.02} - 1} - \frac{0.14T_{p,3}}{(I_{k',max,3}/I_{op,3})^{0.02} - 1} = \Delta t \end{cases} \quad (10)$$

式中: Z_a 和 Z_b 分别表示线路 CD 首端故障和末端故障时保护 S_2 的测量阻抗百分比; $I_{k',max,3}$ 表示线路 CD 末端故障时的保护 S_2 的测量电流。联立求解方程式即可得到保护 S_2 第二段的时间常数 $T_{p,2}$ 和阻抗修正指数 r_2 。而对于保护 S_1 的整定可类比保护 S_2 , 此处不再赘述。经测量阻抗百分比和阻抗修正指数修正后的反时限动作曲线如图 6 所示。

由图 6 可知, 经阻抗修正后, 在本线路首端故障时, 保护能瞬时动作。在下级线路故障时, 本线路保护能与下级线路保护保持一个不小于 Δt 的时间差, 不仅能满足保护选择性的要求, 还使保护的速动性达到最优。

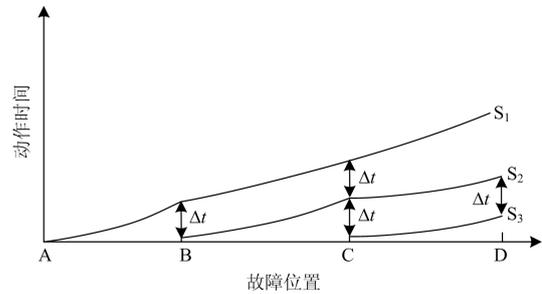


图 6 基于阻抗修正的反时限过流保护动作时间曲线
Fig. 6 Operating time curves of ICITOC protection

4 仿真分析

在 PSCAD 中搭建如图 3 所示的含 DG 的配电网仿真模型, 系统电压等级为 10 kV, 等效阻抗 $Z_s=(0.64+j0.5)\Omega$ 。各线路长度均为 10 km, 线路阻抗 $Z_l=(0.22+j0.239)\Omega/\text{km}$ 。系统容量为 5 MVA, DG 的容量为系统容量的 10%, 等效阻抗 $Z_g=(6.2+j3.7)\Omega$ 。负荷 Load 的容量为 $(0.8+j0.5)\text{MVA}$, 设 $\Delta t=0.2\text{ s}$, $t_b=0.04\text{ s}$ 。如图 5 所示, 由于测量阻抗百分比 Z 小于 1, 那么当阻抗修正指数 r_1 的值越大时, 阻抗修正系数 $(Z)^{r_1}$ 越小, 相应的区内故障时第一段保护动作速度越快, 本文暂取 $r_1=2$ 进行仿真分析。

根据上述反时限过流保护整定方案对传统反时限保护及 ICTIOC 保护进行整定, 各参数整定如表 1、表 2 所示。

表 1 传统反时限过电流保护参数整定

Table 1 Parameters setting of traditional ITOC protection

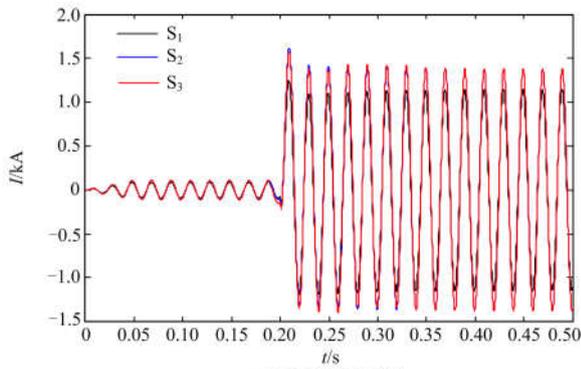
| 保护位置 | 启动电流 I_{op}/kA | 时间常数 T_p |
|----------------|------------------|------------|
| S ₁ | 0.118 | 0.151 |
| S ₂ | 0.142 | 0.074 |
| S ₃ | 0.142 | 0.012 |

表 2 ICITOC 保护参数整定

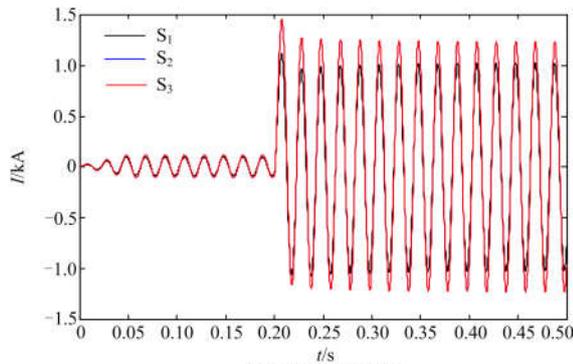
Table 2 Parameters setting of ICITOC protection

| 保护位置 | 启动电流 I_{op}/kA | 时间常数 | | 阻抗指数 | |
|----------------|------------------|----------|----------|-------|-------|
| | | T_{p1} | T_{p2} | r_1 | r_2 |
| S ₁ | 0.118 | 0.695 | 0.163 | 2 | 0.678 |
| S ₂ | 0.142 | 0.248 | 0.064 | 2 | 0.047 |
| S ₃ | 0.142 | 0.012 | — | 2 | — |

首先在线路 CD 的中点 F_3 设置三相短路故障，设置故障时刻为 0.2 s，仿真时长为 0.5 s。仿真得到保护 S₁、S₂ 和 S₃ 安装处的 A 相电流波形如图 7(a)所示。



(a) 三相短路故障



(b) 两相短路故障

图 7 F_3 发生故障时各保护安装处 A 相电流波形

Fig. 7 Phase A current waveforms at each protection relay when a fault occurs at F_3

由图 7(a)可知，故障后各保护安装处电流增大，其中保护 S₂ 和 S₃ 安装处的电流由于 DG 的助增效应大于保护 S₁ 安装处的电流。对仿真得到的波形数据进行计算得到各保护的動作时间如表 3 所示。改变故障类型为两相短路接地故障，再次进行仿真得

到各保护安装处 A 相电流波形如图 7(b)所示，同样计算得到的各保护動作时间见表 3。由表 3 可知，在线路 CD 中点 F_3 发生三相短路或两相短路故障时，各保护采用传统反时限保护動作方程得到的動作时间均大于基于 ICITOC 動作方程得到的動作时间。

表 3 F_3 点故障时各保护動作时间

Table 3 Operating time of each protection when a fault occurs at F_3

| 故障类型 | 保护位置 | 启动电流/kA | 故障电流/kA | 動作时间/s | |
|------|----------------|---------|---------|--------|--------|
| | | | | ITOC | ICITOC |
| 三相短路 | S ₁ | 0.118 | 0.814 | 0.538 | 0.511 |
| | S ₂ | 0.142 | 0.977 | 0.264 | 0.224 |
| | S ₃ | 0.142 | 0.977 | 0.044 | 0.011 |
| 两相短路 | S ₁ | 0.118 | 0.719 | 0.576 | 0.547 |
| | S ₂ | 0.142 | 0.863 | 0.282 | 0.24 |
| | S ₃ | 0.142 | 0.863 | 0.047 | 0.012 |

其次分别在线路 AB 和 BC 的中点 F_1 和 F_2 设置不同类型的故障，仿真得到各保护的動作情况如表 4、表 5 所示。

表 4 F_2 点故障时各保护動作时间

Table 4 Operating time of each protection when a fault occurs at F_2

| 故障类型 | 保护位置 | 启动电流/kA | 故障电流/kA | 動作时间/s | |
|------|----------------|---------|---------|--------|--------|
| | | | | ITOC | ICITOC |
| 三相短路 | S ₁ | 0.118 | 1.232 | 0.441 | 0.296 |
| | S ₂ | 0.142 | 1.476 | 0.217 | 0.045 |
| | S ₃ | 0.142 | 0 | — | — |
| 两相短路 | S ₁ | 0.118 | 1.083 | 0.468 | 0.314 |
| | S ₂ | 0.142 | 1.3 | 0.229 | 0.048 |
| | S ₃ | 0.142 | 0 | — | — |

表 5 F_1 点故障时各保护動作时间

Table 5 Operating time of each protection when a fault occurs at F_1

| 故障类型 | 保护位置 | 启动电流/kA | 故障电流/kA | 動作时间/s | |
|------|----------------|---------|---------|--------|--------|
| | | | | ITOC | ICITOC |
| 三相短路 | S ₁ | 0.118 | 2.242 | 0.35 | 0.045 |
| | S ₂ | 0.142 | 0 | — | — |
| | S ₃ | 0.142 | 0 | — | — |
| 两相短路 | S ₁ | 0.118 | 1.964 | 0.367 | 0.047 |
| | S ₂ | 0.142 | 0 | — | — |
| | S ₃ | 0.142 | 0 | — | — |

从表 4 可以看到，当三相短路故障发生在线路 BC 的中点时，对于后备保护 S₁ 而言，按照传统反时限動作曲线，保护動作时间为 0.441 s；而根据本文经阻抗修正后的反时限動作曲线，保护動作时间

降低至 0.296 s, 下降了约 0.15 s。从表 5 可以看出, 线路 AB 中点发生三相短路故障时, 按照传统反时限动作曲线, 保护动作时间为 0.35 s, 而本文所提保护方案动作时间仅为 0.044 s, 动作时间缩短了 0.306 s。从以上仿真结果可以得到, 在测量阻抗百分比及阻抗修正指数的共同作用下, 本文所提的基于阻抗修正的反时限过流保护无论是作为主保护还是作为后备保护, 其动作速度明显提升。在不同的故障位置及不同的故障类型下, 各保护不仅速动性得到提升, 上下级保护的配合关系均能得到满足, 最大程度改善了反时限保护的性能。

5 结论

本文深入分析了含分布式电源的配电网中反时限过流保护存在的速动性和选择性的问题, 提出了一种基于阻抗修正的反时限过流保护新方案, 并给出了相应的参数整定方法。通过理论分析和基于 PSCAD 的仿真验证, 形成以下基本结论:

(1) 所提方案采用测量阻抗百分比进行修正, 相比于电压修正, 具有不受故障类型和系统运行方式影响的优势;

(2) 对于某一特定系统, 所提方案通过采用阻抗修正指数灵活调节测量阻抗百分比对反时限特性曲线的修正程度, 可在保证上下级保护配合关系的前提下, 最大程度缩短保护的動作时间。

参考文献

- [1] 胡傲, 黄景光, 翁汉琨, 等. 基于双向配置方向过流继电器的反时限后备保护优化整定策略[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10): 166-171.
HU Ao, HUANG Jingguang, WENG Hanli, et al. Setting optimization of inverse-time backup protection based on bidirectional overcurrent relays[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 166-171.
- [2] 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.
- [3] 刘杨华, 吴政球, 涂有庆, 等. 分布式发电及其并网技术综述[J]. 电网技术, 2008, 32(15): 71-76.
LIU Yanghua, WU Zhengqiu, TU Youqing, et al. A survey on distributed generation and its networking technology[J]. Power System Technology, 2008, 32(15): 71-76.
- [4] LASSETER R H. Microgrids[C] // IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2002, New York, USA.
- [5] 范心明, 陈锦荣, 吴树鸿, 等. 离散学习优化算法在含分布式电源的配网重构中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 156-163.
FAN Xinming, CHEN Jinrong, WU Shuhong, et al. Application of discrete learning optimization algorithm to distribution network reconfiguration considering distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 156-163.
- [6] 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.
- [7] ZEINELDIN H H, SHARAF H M, IBRAHIM D K, et al. Optimal protection coordination for meshed distribution systems with DG using dual setting directional over-current relays[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1): 115-123.
- [8] 黄景光, 丁婧, 郑淑文, 等. 基于电流突变量的自适应过电流保护新原理[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 49-55.
HUANG Jingguang, DING Jing, ZHENG Shuwen, et al. A new adaptive over current protection principle based on current mutation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 49-55.
- [9] 刘玉娟, 张伟, 余莉. 配电网 DG 对反时限过电流保护的影响[J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2016, 8(4): 322-326.
LIU Yujuan, ZHANG Wei, YU Li. Distributed generation impact on inverse-time over-current protection[J]. Journal of Nanjing University of Information Science and Technology: Natural Science Edition, 2016, 8(4): 322-326.
- [10] 李季英, 刘玉. 分布式电源接入配电网对反时限过电流保护的影响[J]. 广东电力, 2014, 27(12): 30-34.
LI Jiying, LIU Yu. Impact on inverse-time overcurrent protection by distributed power source connecting to power distribution network[J]. Guangdong Electric Power, 2014, 27(12): 30-34.
- [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] 喻锴, 林湘宁, 李浩, 等. 考虑分布式电源稳定助增效应的电压修正反时限过电流保护方案[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3): 716-726.
YU Kun, LIN Xiangning, LI Hao, et al. A voltage correction based inverse-time overcurrent protection scheme considering distributed generation stable infeed effect[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 716-726.
- [13] 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.
- [14] HASHEMI S M, HAGH M T, SEYEDI H. A novel backup distance protection scheme for series-compensated transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 699-707.
- [15] 冯爱成, 王宝华, 单馨. 含光伏电源配电网的自适应距离保护[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 141-147.
FENG Aicheng, WANG Baohua, SHAN Xin. Photovoltaic power distribution network in adaptive distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 141-147.
- [16] 李彦宾, 贾科, 毕天姝, 等. 逆变型电源对距离保护的影响机理分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 54-59.
LI Yanbin, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Impact of inverter-interfaced renewable energy generators on distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 54-59.
- [17] 黄文焘, 郇能灵, 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.
- [18] 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.
- [19] 刘为, 范春菊, 张兆宁, 等. 配电网输电线路反时限过流保护探讨[J]. 继电器, 2003, 31(3): 23-25.
LIU Wei, FAN Chunju, ZHANG Zhaoning, et al. Discussion of inverse overcurrent protection for transmission line in distribution system[J]. Relay, 2003, 31(3): 23-25.
- [20] 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.
- [21] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [22] MA J, MA W, WANG X, et al. A new adaptive voltage protection scheme for distribution network with distributed generations[J]. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 2013, 36(4): 142-151.
- [23] 李乃永, 林霞, 李磊, 等. 考虑分布式电源特性的配电网保护与安全自动装置配合方案[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(19): 85-89.
LI Naiyong, LIN Xia, LI Lei, et al. Coordinated scheme of distribution network protection and automatic devices considering DG characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(19): 85-89.
- [24] 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 Systems, 2011, 35(19): 33-38.
- [25] JAMALI S, BORHANI-BAHABADI H. Protection method for radial distribution systems with DG using local voltage measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(2): 651-660.

收稿日期: 2019-06-25; 修回日期: 2019-08-25

作者简介:

黄景光(1968—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统继电保护与控制; E-mail: hjpg8008@sina.com

张宇鹏(1995—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail: zzypp1995@163.com

(编辑 姜新丽)