

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211662

非全相运行对线路零序电流保护的影响分析

郝奕华¹, 陈朝晖², 何进锋^{2,3}, 李银红¹, 石东源¹

(1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074; 2. 中国南方电网电力调度控制中心, 广东 广州 510663; 3. 贵州电网有限责任公司六盘水供电局, 贵州 六盘水 553001)

摘要: 非全相运行是电力系统中一种常见的不对称运行状态, 可能会对线路零序电流保护造成影响, 使其失去选择性, 发生越级动作。为此, 研究了线路零序电流保护的整定计算原则, 推导了发生短路故障和出现非全相运行状态时零序分支系数的计算公式, 对两种情况下的零序分支系数计算公式进行了对比分析, 并在此基础上分析了非全相运行状态下零序电流保护越级动作的原因, 与短路故障相比, 非全相运行时的零序分支系数越大, 越容易发生越级动作。结合 IEEE39 节点系统算例, 验证了非全相运行时零序分支系数的增大可能引起线路零序电流保护发生越级动作。最后, 针对非全相运行时零序电流保护可能越级动作这一问题, 从定值离线校验和在线管理两个方面给出了应对策略。

关键词: 非全相运行; 线路零序电流保护; 整定计算; 零序分支系数; 越级动作

Analysis of the influence of non-full-phase operation on line zero-sequence current protection

HAO Yihua¹, CHEN Zhaohui², HE Jinfeng^{2,3}, LI Yinhong¹, SHI Dongyuan¹

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 2. China Southern Power Grid Power Dispatching and Control Center, Guangzhou 510663, China; 3. Liupanshui Power Supply Bureau, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Liupanshui 553001, China)

Abstract: Non-full-phase operation is a common asymmetric operational state in a power system. It will affect line zero-sequence current protection, causing it to lose selectivity and override. Therefore, the setting calculation principle of line zero-sequence current protection is studied. Then the calculation formulas of the zero-sequence branch coefficient under short-circuit fault and non-full-phase operation are deduced. By comparing the calculation formula of zero-sequence branch coefficient in two cases, the reason for the override of zero-sequence current protection under non-full-phase operation is analyzed. Compared with the zero-sequence branch coefficient of a short-circuit fault, the greater the zero-sequence branch coefficient of non-full-phase operation is, the easier the occurrence of override. Combined with the example of the IEEE39 bus system, it is verified that the increase of zero-sequence branch coefficient may cause the line zero-sequence current protection to override in the condition of non-full-phase operation. Finally, given the problem that zero-sequence current protection may override during non-full-phase operation, coping strategies are given from the two aspects of settings off-line verification and on-line management.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0900100).

Key words: non-full-phase operation; line zero-sequence current protection; setting calculation; zero-sequence branch coefficient; override

0 引言

零序电流保护由于在改善接地保护灵敏性等方

面具有显著的特点, 被广泛应用于 110 kV 及以上电压等级的电网中^[1-2], 作为输电线路的后备保护投入使用。为了保证零序电流保护动作的选择性, 避免出现越级动作的情况, 在零序电流保护整定计算过程中, 应保证待整定保护的保护区不越过相邻设备保护的保护区。考虑到 110 kV 及以上电网呈现

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0900100);
国家自然科学基金项目资助(51777081)

多电源^[3-7]、多环网^[8-10]的结构特征, 为了实现待整定线路保护和相邻线路保护的配合, 引入了零序分支系数的概念。零序分支系数, 即相邻线路保护的配合范围末端发生故障时, 流过待整定保护和相邻线路保护零序电流的比值。这里的故障, 通常仅考虑了短路故障。

非全相运行状态是电力系统一种常见的不对称运行状态。某一线路单相接地短路后故障相开关跳闸、输电线路一相或两相断线、开关合闸过程中三相触头不同时接通等原因都会导致电力系统处于非全相运行状态^[11]。与短路故障相比, 非全相运行状态是一种纵向不对称故障, 故障端口的构成不同, 故障后电气量的分布也不同。考虑到电力系统中的保护定值通常仅按照短路故障进行整定计算, 非全相运行状态可能会导致保护的性能受到影响。

文献[12]分析了非全相运行对距离保护的影响, 指出两相运行期间方向阻抗继电器的性能将恶化, 可能引起保护误动。文献[13]指出非全相运行会对振荡闭锁元件造成影响, 从而影响距离保护的動作速度。文献[14]分析了非全相运行对方向高频保护的影响, 指出非全相运行情况下会对故障位置造成误判, 导致高频零序方向保护误动。文献[15-18]指出发电机机端断路器易发生非全相故障, 并提出了新的发电机非全相保护方案。文献[19]分析了非全相运行时的电气特征及导致零序方向保护误动的机理。文献[20-22]指出非全相运行期间产生的零序电流会造成零序电流保护失去选择性, 发生越级动作情况, 但是没有具体分析零序电流保护越级动作的原因。目前, 鲜有文献涉及非全相运行状态下零序分支系数的变化特征以及非全相运行状态下零序电流保护越级动作的原因分析。

为此, 本文首先介绍了线路零序电流保护的整定计算原则, 然后推导了短路故障和非全相运行状态下零序分支系数的计算公式并对比了其差异, 接着分析了非全相运行状态下零序电流保护越级动作的原因, 最后结合 IEEE39 节点系统算例进行了验证。

1 线路零序电流保护的整定计算原则

零序电流保护整定计算的基本目标是保证保护动作的选择性和灵敏性。本节以三相重合闸的四段式线路零序电流保护^[23]为例, 简要说明线路零序电流保护的整定计算原则。

四段式线路零序电流保护中, 零序 I 段为无延时保护, 其电流定值主要考虑保护动作的选择性, 按同时躲过本线路区外故障最大零序电流和断路器

三相不同步合闸出现的零序电流整定。零序 II、III、IV 段为带延时保护, 其保护范围可能伸出本线路末端。为了保证保护动作的选择性, 其电流定值需与相邻线路保护的配合范围进行配合, 即不越过相邻线路保护的配合范围末端; 其时间定值需与相邻线路保护的動作时间进行配合, 即大于相邻线路保护的動作时间一个时延。

以本线路零序 IV 段和相邻线路零序 III 段配合为例, 其整定计算公式如式(1)、式(2)所示。

$$I_{\text{set}}^{\text{IV}} \geq K_k K_f I_{\text{set-n}}^{\text{III}} \quad (1)$$

$$t_{\text{set}}^{\text{IV}} \geq t_{\text{set-n}}^{\text{III}} + \Delta t \quad (2)$$

式中: $I_{\text{set}}^{\text{IV}}$ 为本线路零序 IV 段电流定值; $I_{\text{set-n}}^{\text{III}}$ 为相邻线路零序 III 段电流定值; K_k 为可靠系数, $K_k \geq 1.1$; K_f 为零序分支系数; $t_{\text{set}}^{\text{IV}}$ 为本线路零序 IV 段时间定值; $t_{\text{set-n}}^{\text{III}}$ 为相邻线路零序 III 段时间定值; Δt 为一个固定时延。

若计算所得的配合定值不满足灵敏度要求, 则再与相邻线路保护配合范围较长的段重新进行选择配合, 提升配合定值的灵敏性。仍以零序 IV 段和相邻线路零序 III 段配合为例, 如果所得定值不满足灵敏度要求, 可以与相邻线路零序 IV 段进行配合, 其整定计算公式与式(1)、式(2)类似, 将配合定值替换为相邻线路的 IV 段定值。

从上述公式可以看出, 为了实现待整定保护和相邻线路保护配合范围的配合, 引入了零序分支系数的概念。零序分支系数 K_f , 即相邻保护范围末端发生故障时, 本线路流过的零序电流与相邻需配合线路流过的零序电流的比值。在计算 K_f 时, 通常仅考虑短路故障。而且, 为了简化计算, 一般将故障点位置设置在相邻线路末端。

以图 1 所示系统为例, 当计算保护 1 与保护 2 的零序分支系数时, 通常假设母线 k 处发生短路故障, 然后计算此时流过线路 mn 的零序电流 I_{mn} 与流过线路 nk 的零序电流 I_{nk} 的比值。

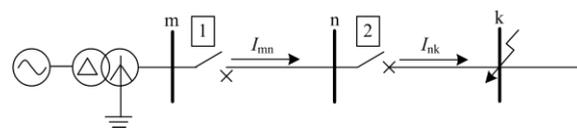


图 1 某系统简图

Fig. 1 Simple diagram of a system

从式(1)还可以看出, 如果 K_f 的计算不准确, 可能会导致本线路保护的配合范围越过相邻线路保护的配合范围, 从而不能满足保护动作的选择性要求。

2 零序分支系数计算公式推导及对比分析

在非全相运行状态下, 由于故障端口的构成与短路故障不同, 零序电流的分布情况也不同。考虑到零序电流保护的选择性主要通过计算故障状态下的零序分支系数来保证, 本节将以图 2 所示系统为例, 针对线路 k1 末端母线 1 发生短路故障、线路 k1 发生非全相运行状态两种情况, 推导两正常线路保护(即保护 1 与保护 2)之间的零序分支系数、正常线路与故障线路保护(即保护 2 与保护 3)之间的零序分支系数的计算公式, 对比分析零序分支系数的差异, 为研究非全相状态对零序电流保护的影响奠定基础。

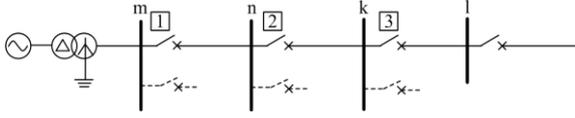


图 2 系统结构示意图

Fig. 2 System structure diagram

2.1 短路故障下的零序分支系数

当母线 1 处发生不对称接地短路故障时, 将保护 1 与保护 2、保护 2 与保护 3 的零序分支系数分别记为 K_{f12} 、 K_{f23} , 其具体计算步骤如下。

步骤 1: 形成故障前系统的零序阻抗矩阵 $\mathbf{Z}_{(0)}$ 。

步骤 2: 建立短路故障后零序分支系数的计算模型, 在故障点注入零序电流 $I_{(0)}$, 如图 3 所示。

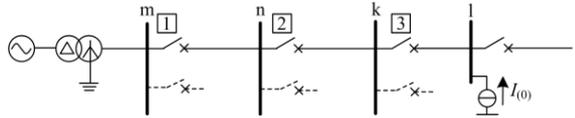


图 3 短路故障下零序分支系数计算模型

Fig. 3 Calculation model of zero-sequence branch coefficient under short circuit fault

步骤 3: 计算流过保护 1、保护 2 和保护 3 的零序电流, 分别如式(3)一式(5)所示。

$$I_{mn(0)} = \frac{I_{(0)}Z_{ml(0)} - I_{(0)}Z_{nl(0)}}{z_{1(0)}} \quad (3)$$

$$I_{nk(0)} = \frac{I_{(0)}Z_{nl(0)} - I_{(0)}Z_{kl(0)}}{z_{2(0)}} \quad (4)$$

$$I_{kl(0)} = \frac{I_{(0)}Z_{kl(0)} - I_{(0)}Z_{ll(0)}}{z_{3(0)}} \quad (5)$$

式中: $Z_{ml(0)}$ 为母线 m 与母线 l 之间的零序互阻抗; $Z_{nl(0)}$ 为母线 n 与母线 l 之间的零序互阻抗; $Z_{kl(0)}$ 为母线 k 与母线 l 之间的零序互阻抗; $Z_{ll(0)}$ 为母线 l

的零序自阻抗; $z_{1(0)}$ 为线路 mn 的零序阻抗; $z_{2(0)}$ 为线路 nk 的零序阻抗; $z_{3(0)}$ 为线路 kl 的零序阻抗。

步骤 4: 计算流过保护 1 与保护 2、保护 2 与保护 3 的零序电流的比值, 其计算公式如式(6)、式(7)所示。

$$K_{f12} = \frac{I_{mn(0)}}{I_{nk(0)}} = \frac{z_{2(0)}}{z_{1(0)}} \cdot \frac{Z_{ml(0)} - Z_{nl(0)}}{Z_{nl(0)} - Z_{kl(0)}} \quad (6)$$

$$K_{f23} = \frac{I_{nk(0)}}{I_{kl(0)}} = \frac{z_{3(0)}}{z_{2(0)}} \cdot \frac{Z_{nl(0)} - Z_{kl(0)}}{Z_{kl(0)} - Z_{ll(0)}} \quad (7)$$

2.2 非全相运行状态下的零序分支系数

线路 k1 处于非全相状态时, 将保护 1 与保护 2、保护 2 与保护 3 的零序分支系数分别记为 K_{12} 、 K_{23} , 其计算具体步骤如下。

步骤 1: 形成故障前系统的零序阻抗矩阵 $\mathbf{Z}_{(0)}$ 。

步骤 2: 建立非全相运行状态下零序分支系数的计算模型, 设非全相运行状态下故障端口两节点分别为 f 和 f', 在两故障端口分别注入零序电流 $I_{(0)}$ 和 $-I_{(0)}$, 如图 4 所示。

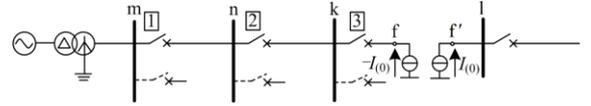


图 4 非全相运行状态下零序分支系数计算模型

Fig. 4 Calculation model of zero-sequence branch coefficient under non-full-phase operation

步骤 3: 形成非全相运行状态下修改的零序阻抗矩阵 $\mathbf{Z}'_{(0)}$ 。首先去掉支路 kl, 零序阻抗矩阵按式(8)进行修改。

$$Z'_{ij(0)} = Z_{ij(0)} - \frac{(Z_{ik(0)} - Z_{il(0)})(Z_{kj(0)} - Z_{lj(0)})}{Z_{kk(0)} + Z_{ll(0)} - 2Z_{kl(0)} - z_{3(0)}} \quad (8)$$

式中: $i, j=1, 2, \dots, p$, p 为零序阻抗矩阵的阶数; $Z_{ij(0)}$ 为系统发生故障前的零序阻抗矩阵第 i 行第 j 列的元素; $Z'_{ij(0)}$ 为系统故障后修改的零序阻抗矩阵第 i 行第 j 列的元素。

步骤 4: 分别计算流过保护 1、保护 2 和保护 3 的零序电流, 如式(9)一式(11)所示。

$$I_{mn(0)} = \frac{I_{(0)} \cdot (Z'_{mf(0)} - Z'_{mf(0)} - Z'_{nf(0)} + Z'_{nf(0)})}{z_{1(0)}} \quad (9)$$

$$I_{nk(0)} = \frac{I_{(0)} \cdot (Z'_{nf(0)} - Z'_{nf(0)} - Z'_{kf(0)} + Z'_{kf(0)})}{z_{2(0)}} \quad (10)$$

$$I_{kl(0)} = I_{(0)} \quad (11)$$

步骤 5: 计算流过保护 1 与保护 2、保护 2 与保护 3 的零序电流的比值, 如式(12)、式(13)所示。

$$K_{12} = \frac{Z_{2(0)} \cdot \frac{Z'_{mf'(0)} - Z'_{mf(0)} - Z'_{nf'(0)} + Z'_{nf(0)}}{Z'_{nf'(0)} - Z'_{nf(0)} - Z'_{kf'(0)} + Z'_{kf(0)}}}{Z_{1(0)}} \quad (12)$$

$$K_{23} = \frac{Z'_{nf'(0)} - Z'_{nf(0)} - Z'_{kf'(0)} + Z'_{kf(0)}}{z_{2(0)}} \quad (13)$$

根据零序阻抗矩阵元素关系及式(8), 对式(12)、式(13)进行修改, 将表达式中修改后的零序阻抗矩阵元素替换为故障前零序阻抗矩阵的元素, 得到式(14)、式(15)。

$$K_{12} = \frac{z_{2(0)} \cdot \frac{Z_{nk(0)} - Z_{mk(0)} - Z_{nl(0)} + Z_{ml(0)}}{Z_{kk(0)} - Z_{nk(0)} - Z_{kl(0)} + Z_{nl(0)}}}{z_{1(0)}} \quad (14)$$

$$K_{23} = \frac{z_{3(0)} \cdot \frac{Z_{kl(0)} - Z_{nl(0)} - Z_{kk(0)} + Z_{nk(0)}}{Z_{ll(0)} - Z_{kl(0)} + Z_{kk(0)} - Z_{kl(0)} - z_{3(0)}}}{z_{2(0)}} \quad (15)$$

2.3 零序分支系数对比分析

令 $a = Z_{nk(0)} - Z_{mk(0)}$, $b = Z_{kk(0)} - Z_{nk(0)}$, $c = Z_{kk(0)} - Z_{kl(0)} - z_{3(0)}$, 代入式(14)、式(15), 得到式(16)、式(17)。

$$K_{12} = \frac{z_{2(0)} \cdot \frac{Z_{ml(0)} - Z_{nl(0)} + a}{Z_{nl(0)} - Z_{kl(0)} + b}}{z_{1(0)}} \quad (16)$$

$$K_{23} = \frac{z_{3(0)} \cdot \frac{Z_{kl(0)} - Z_{nl(0)} - b}{Z_{ll(0)} - Z_{kl(0)} + c}}{z_{2(0)}} \quad (17)$$

根据零序阻抗矩阵元素特点, a 、 b 、 c 的大小具有以下规律: (1) a 为母线 m 和 n 与母线 k 的互阻抗之差, 可能大于 0, 也可能小于 0; (2) 节点的自阻抗总是大于该节点与其他节点的互阻抗, 因此有 $b > 0$; (3) $z_{3(0)}$ 的值等于在线路 kl 上流过单位电流时, 母线 k 和母线 l 之间的电压差。由于母线 k 不止与母线 l 一个母线相连, 在母线 k 注入单位电流时, 流过线路 kl 的电流必小于单位电流, 所以 $Z_{kk(0)} - Z_{kl(0)} < z_{3(0)}$, 即 $c < 0$ 。

对比式(6)与式(16)、式(7)与式(17)可以发现:

(1) 短路故障和非全相运行状态下, 两正常线路之间的零序分支系数 K_{12} 与 K_{f12} 及正常线路与故障线路之间的零序分支系数 K_{23} 与 K_{f23} , 其计算公式形式比较类似; (2) 与短路故障下的零序分支系数相比, 非全相运行状态下的零序分支系数在分子分母中分别添加了 a 、 b 和 c ; (3) 对于 K_{12} 和 K_{f12} , 虽然 b 使得分母增大, 但是由于 a 的正负不确定, K_{12} 可能大于、等于或小于 K_{f12} ; (4) 对于 K_{23} 和 K_{f23} , 虽然 c 使得分母减小, 但是由于分子中减去 b , 同样使得

分子减小, K_{23} 也可能大于、等于或小于 K_{f23} 。

3 非全相运行状态下零序电流保护越级动作原因分析

根据前述分析, 在非全相运行状态下, 随着常数项大小的不同, 零序分支系数与短路故障下相比也不同, 可能出现变小、不变或者变大的情况。由于零序电流保护通常仅按照短路故障进行整定计算, 因此当系统处于非全相运行状态时, 零序电流保护的性能可能会受到影响, 失去选择性, 发生越级动作的情况。本节以零序电流保护 IV 段为例, 分析零序电流保护越级动作的产生原因。

3.1 基于短路故障的保护定值整定

以图 2 中保护 2 的 IV 段为例, 假设按照短路故障下保护 2 的 IV 段与保护 3 的 III 段配合进行整定, 则保护 2 的 IV 段定值满足式(18)所示条件。

$$I_{set-2}^{IV} \geq K_k K_{f23} I_{set-3}^{III} \quad (18)$$

式中: I_{set-2}^{IV} 表示保护 2 的 IV 段定值; K_{f23} 为保护 2 与保护 3 的零序分支系数; I_{set-3}^{III} 表示保护 3 的 III 段定值。

按照上述计算公式, 保护 2 的 IV 段保护范围不越过保护 3 的 III 段保护范围, 发生短路故障时, 保护 2 的零序 IV 段满足选择性要求。如图 5 所示, 在保护 3 的 III 段保护范围内发生短路故障时, 保护 3 优先动作。

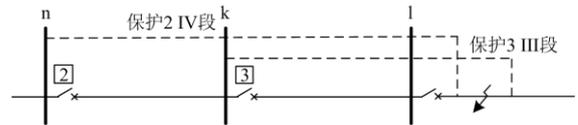


图 5 零序电流保护范围

Fig. 5 Protection range of zero-sequence current protection

3.2 非全相状态下的保护配合关系分析

假设线路 kl 处于非全相运行状态, 流过保护 3 的零序电流为 $I_{3(0)}$, 则流过保护 2 的零序电流 $I_{2(0)}$ 可以用式(19)表示。

$$I_{2(0)} = K_{23} I_{3(0)} \quad (19)$$

式中, K_{23} 为非全相运行状态下保护 2 与保护 3 配合时的零序分支系数。

忽略式(18)中的可靠系数, 并假定整定值取等号, 将式(18)、式(19)两边分别相除, 可以得到等式(20)。

$$\frac{I_{set-2}^{IV}}{I_{2(0)}} = \frac{K_{f23} I_{set-3}^{III}}{K_{23} I_{3(0)}} \quad (20)$$

从该等式可以看出, 非全相状态下保护 2 和保护 3 的配合关系取决于 K_{23} 与 K_{f23} 的关系。当流过保护 3 的零序电流 $I_{3(0)}$ 小于保护 3 的 III 段动作值时, 保护 3 的 III 段不动作。

1) 若 $K_{23} < K_{f23}$, 则式(20)等号右侧大于 1, 满足式(21)条件, 保护 2 不动作。

$$\begin{cases} 3I_{3(0)} < I_{\text{set-3}}^{\text{III}} \\ 3I_{2(0)} < I_{\text{set-2}}^{\text{IV}} \end{cases} \quad (21)$$

2) 若 $K_{23} > K_{f23}$, 则式(20)等号右侧可能小于 1, 若满足式(22)条件, 保护 3 不动作, 保护 2 动作, 即发生越级动作情况。

$$\begin{cases} 3I_{3(0)} < I_{\text{set-3}}^{\text{III}} \\ 3I_{2(0)} > I_{\text{set-2}}^{\text{IV}} \end{cases} \quad (22)$$

3) K_{23} 与 K_{f23} 相比增大的值越大时, 越容易发生越级动作情况。

该现象还可以以图 6 为例进一步说明。

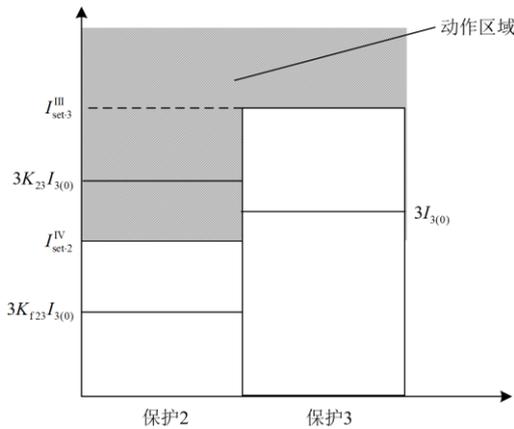


图 6 零序电流保护越级动作示意图

Fig. 6 Schematic diagram of skip action of zero-sequence current protection

线路 k1 处于非全相运行状态时流过保护 3 的零序电流为 $I_{3(0)}$, 其大小满足小于保护 3 的 III 段定值, 此时保护 3 不动作。若保护 2 和保护 3 按照短路下的配合关系考虑, 则流过保护 2 的零序电流为 $3K_{f23}I_{3(0)}$, 此电流值小于保护 2 的 IV 段的电流定值, 保护 2 的 IV 段不动作。但是在非全相运行状态下, 保护 2 与保护 3 配合时的零序分支系数增大, 即 $K_{23} > K_{f23}$, 此时流过保护 2 的零序电流为 $K_{23}I_{3(0)}$, 由于 $K_{23} > K_{f23}$, 大于保护 2 的 IV 段电流定值, 因此, 保护 2 的 IV 段将发生越级动作。

此外, 根据 2.3 节分析可知, 当线路处于非全

相运行状态时, 两条正常运行的线路之间的零序分支系数也会发生变化, 即当图 2 中线路 k1 处于非全相运行状态时, 保护 1 与保护 2 的零序分支系数也与短路故障下不同。类似地, 由于在短路故障下满足选择性要求, 当 K_{12} 与 K_{f12} 相比不变或变小时, 保护 1 的保护范围不会越过保护 2 的保护范围。但是当 K_{12} 与 K_{f12} 相比变大时, 保护 1 的保护范围也可能会越过保护 2 的保护范围, 发生越级动作。

综上所述, 可得以下结论。

1) 当线路处于非全相运行状态时, 由于故障端口的构成不同, 零序分支系数与短路故障情况不同, 当非全相运行状态下零序分支系数与短路故障下零序分支系数相比变大时, 按短路故障进行整定计算得到的零序电流保护定值, 在非全相运行状态下可能失去选择性, 发生越级动作。

2) 当非全相运行状态下零序分支系数与短路故障下零序分支系数相比增大的值越大时, 越容易发生越级动作。

4 算例分析

4.1 算例系统概况

本文算例采用 IEEE39 节点系统, 系统示意图如图 7 所示。该系统包含 10 台发电机和 46 条支路, 发电机、节点、支路参数采用 IEEE39 节点系统标准参数。

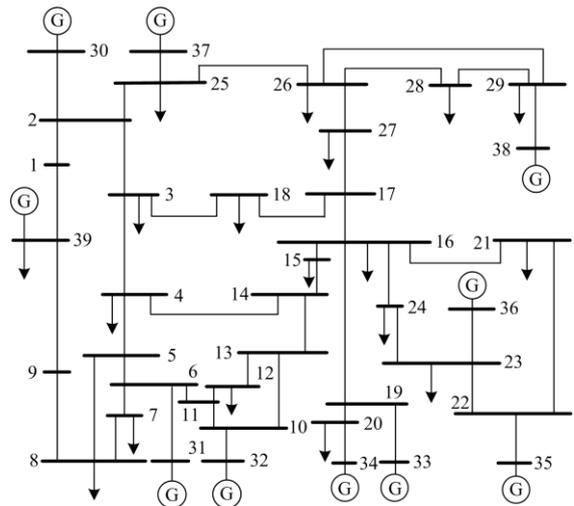


图 7 IEEE39 节点系统示意图

Fig. 7 IEEE39-bus power system

4.2 非全相运行状态与短路故障下零序分支系数对比

取 IEEE39 母线系统中的节点 3、4、5、6 分别对应图 2 中的母线 m、n、k、l, 分别按式(6)、式(7)、

式(14)和式(15)计算母线1发生不对称接地短路故障和线路 k1 处于非全相运行状态下保护 1 与保护 2、保护 2 与保护 3 的零序分支系数。根据 IEEE39 节点系统参数, 得到计算所需的零序阻抗矩阵参数及线路参数, 如表 1 所示。零序分支系数对比如表 2 所示。

表 1 算例 1 零序阻抗矩阵参数及线路参数

Table 1 Zero-sequence impedance matrix parameters and line parameters in case 1

| $z_{1(0)}$ | $z_{2(0)}$ | $z_{3(0)}$ | $Z_{m1(0)}$ | $Z_{n1(0)}$ |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0.0639 | 0.0384 | 0.0078 | 0.0035 | 0.0084 |
| $Z_{k1(0)}$ | $Z_{l1(0)}$ | $Z_{nk(0)}$ | $Z_{mk(0)}$ | $Z_{kk(0)}$ |
| 0.0135 | 0.0145 | 0.0112 | 0.0047 | 0.0190 |

表 2 算例 1 零序分支系数对比

Table 2 Comparison of zero-sequence branch coefficient in case 1

| 短路故障下线路零序分支系数 | | 非全相运行状态下零序分支系数 | |
|---------------|-----------|----------------|----------|
| K_{f12} | K_{f23} | K_{12} | K_{23} |
| 0.5684 | 0.9746 | 0.3979 | 0.4291 |

表 2 结果显示, 受非全相运行状态下故障端口变化的影响, 在非全相运行状态下零序分支系数 K_{12} 与 K_{23} 均小于短路故障下零序分支系数 K_{f12} 与 K_{f23} 。

取图 7 中的节点 4、3、2、25 分别对应图 2 中的节点 m、n、k、l, 此时计算所需的零序阻抗矩阵参数及线路参数如表 3 所示, 零序分支系数对比如表 4 所示。

表 3 算例 2 零序阻抗矩阵参数及线路参数

Table 3 Zero-sequence impedance matrix parameters and line parameters in case 2

| $z_{1(0)}$ | $z_{2(0)}$ | $z_{3(0)}$ | $Z_{m1(0)}$ | $Z_{n1(0)}$ |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0.0639 | 0.0453 | 0.0258 | 0.0014 | 0.0032 |
| $Z_{k1(0)}$ | $Z_{l1(0)}$ | $Z_{nk(0)}$ | $Z_{mk(0)}$ | $Z_{kk(0)}$ |
| 0.0051 | 0.0136 | 0.0063 | 0.0027 | 0.0113 |

表 4 算例 2 零序分支系数对比

Table 4 Comparison of zero-sequence branch coefficient in case 2

| 短路故障下线路零序分支系数 | | 非全相运行状态下零序分支系数 | |
|---------------|-----------|----------------|----------|
| K_{f12} | K_{f23} | K_{12} | K_{23} |
| 0.7051 | 0.1219 | 0.4149 | 0.1615 |

表 4 结果显示, 受非全相运行状态下故障端口变化的影响, 在非全相运行状态下零序分支系数 K_{12} 小于短路故障下零序分支系数 K_{f12} , 非全相运行状态下零序分支系数 K_{23} 大于短路故障下零序分支系数 K_{f23} 。

遍历 IEEE39 节点系统中所有与图 2 中保护 1、保护 2 和保护 3 配合关系相符的结构, 共 166 个。统计其零序分支系数情况, 结果如表 5 所示。

表 5 IEEE39 节点系统零序分支系数情况

Table 5 Zero-sequence branch coefficient of IEEE39 bus system

| 零序分支系数大小关系 | $K_{12} > K_{f12}$ | $K_{12} = K_{f12}$ | $K_{12} < K_{f12}$ |
|------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 数目 | 57 | 49 | 60 |
| 零序分支系数大小关系 | $K_{23} > K_{f23}$ | $K_{23} = K_{f23}$ | $K_{23} < K_{f23}$ |
| 数目 | 60 | 50 | 56 |

根据表 5 可知, 在非全相运行状态下, 由于故障端口与短路故障不同, 非全相运行状态下零序分支系数与短路故障相比会表现出不同的性质。

4.3 非全相运行状态下零序电流保护越级动作分析

取 IEEE39 节点系统中的节点 11、10、13 分别对应图 2 中的母线 n、k、l, 当母线 l 处发生不对称接地短路故障时, 流过保护 3 与流过保护 2 的零序电流的比值 $K_{f23} = 0.2205$, 当线路 k1 处于非全相运行状态时, 流过保护 3 与流过保护 2 的零序电流的比值 $K_{23} = 0.3757$, 该值大于短路故障下的值。假设在某次整定计算过程中得到保护 3 的 III 段定值 $I_{set-3}^{III} = 1389.71 \text{ A}$ 。当保护 2 与保护 3 配合进行整定计算时, 得到保护 2 的 IV 段的定值 $I_{set-2}^{IV} = 306.43 \text{ A}$, 在短路故障下满足选择性要求, 保护 2 不会发生越级动作情况。但是当线路 k1 处于非全相运行状态时, 流过保护 2 与流过保护 3 的零序电流的比值变大, 假设此时流过保护 3 的 3 倍零序电流为 1000 A, 则流过保护 2 的 3 倍零序电流为 375.70 A, 保护 3 的 III 段不动作, 保护 2 的 IV 段动作, 即保护失去选择性, 发生越级动作。

通过算例分析可以发现, 由于非全相运行状态下故障端口的的位置与短路故障不同, 零序分支系数的大小也不同。当非全相运行状态下的零序分支系数大于短路故障下的零序分支系数时, 按照短路故障进行整定计算得到的定值很可能不适用于非全相运行的情况, 从而导致在非全相运行状态下零序电流保护发生越级动作。

5 应对策略

根据前述分析, 非全相运行可能导致零序电流保护失去选择性, 发生越级动作。因此, 本节从定值离线校验和在线管理两方面给出了应对策略。

5.1 定值离线校验

定值离线校验即在通过整定计算得到一组零序电流保护的定值后, 校验在非全相运行情况下定值

是否能满足选择性要求,不发生越级动作。定值离线校验的流程如下。

1) 确定可能发生非全相运行的线路,计算所有运行条件下线路非全相运行时的零序电流。

2) 当流过非全相运行的线路的零序电流较小时,只需校验非全相运行线路及相邻线路定值能否满足选择性要求。如果不满足,则调整对应保护的定值。

3) 当流过非全相运行的线路的零序电流较大时,需校验非全相运行线路及相邻多级线路的定值能否满足选择性要求。如果不满足,则调整对应保护的定值。

5.2 定值在线管理

继电保护故障信息系统能够实时采集保护设备的信息,支持对保护设备的整定值进行远程修改,为定值的在线管理提供了有利条件^[24]。通过定值在线管理的方式可以实时采集电网运行方式变化信息、计算新定值并快速下发定值,更有利于实现保护定值之间的配合,缩短保护动作时间,优化保护性能。可以考虑采用定值在线管理的方式应对非全相运行对零序电流保护的影响。定值在线管理的流程如下。

1) 实时采集电网运行方式变化信息,上传至调度端。

2) 由调度端的在线整定服务器进行在线整定,得到在非全相运行情况下满足选择性的定值。

3) 调度端向保护装置下发新的定值,在线调整定值。

6 结论

由于非全相运行状态下故障端口位置与短路故障不同,零序分支系数的大小也不同,所以可能导致按短路故障进行整定计算得到的定值在非全相运行状态下失去选择性,从而出现发生越级动作的情况。本文首先给出了线路零序电流保护的整定计算原则,然后推导了短路故障和非全相运行状态下零序分支系数的计算公式并对比了其差异,非全相运行状态下零序分支系数与短路故障下零序分支系数计算公式形式类似,但是在非全相运行状态下零序分支系数的计算公式中分子分母分别添加了一个常数项,常数项会影响零序分支系数的大小,使非全相运行状态下零序分支系数与短路故障下零序分支系数相比表现出大于、等于或小于的不同性质。接着分析了非全相运行状态下零序电流保护越级动作的原因,当非全相运行状态下零序分支系数与短路故障下零序分支系数相比变大时,容易发生越级动

作情况。之后结合 IEEE39 节点系统进行了算例分析。算例分析结果验证了非全相运行对零序电流分布的影响,表明非全相运行状态可能使零序电流保护失去选择性,发生越级动作情况。从定值离线校验和在线管理两方面出发,给出了非全相运行状态下零序电流保护越级动作问题的应对策略。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 张培夫,金能,章建玲,等. 一种面向线路零序过流保护的防励磁涌流所致误动闭锁策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7609-7622.
ZHANG Peifu, JIN Neng, ZHANG Jianling, et al. A line zero-sequence over current protection blocking strategy against maloperation caused by inrush[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(23): 7609-7622.
- [3] 王艺,王宾,刘阳,等. 计及分布式电源动态行为的配电网重构优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 164-172.
WANG Yi, WANG Bin, LIU Yang, et al. Optimization strategy for distribution network reconfiguration considering the dynamic behavior of DGs[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 164-172.
- [4] DAS T, ROY R, MANDAL K K. Impact of the penetration of distributed generation on optimal reactive power dispatch[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(4): 332-357.
- [5] 王秀强. 新型电力系统构建“源网荷储”新生态[J]. 能源, 2021(7): 28-30.
WANG Xiuqiang. New power system to build a new ecology of “source network load storage”[J]. Energy, 2021(7): 28-30.
- [6] 李翠萍,东哲民,李军徽,等. 配电网分布式储能集群调压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(4): 133-141.
LI Cuiping, DONG Zhemin, LI Junhui, et al. Control strategy of voltage regulation for distributed energy storage cluster in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(4): 133-141.
- [7] 潘本仁,王和春,张妍,等. 含分布式电源的主动配电网重构策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 102-107.
PAN Benren, WANG Hechun, ZHANG Yan, et al. Study on an active distribution network reconstruction strategy with distributed power supply[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 102-107.
- [8] 徐泽,杨伟,张文强,等. 基于连锁环网与改进离散粒子群算法的多目标配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 114-123.
XU Ze, YANG Wei, ZHANG Wenqiang, et al. Multi-objective distribution network reconfiguration based on chain loops and improved binary particle swarm optimization[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 114-123.

- [9] 贾晓峰, 颜伟, 周家启, 等. 复杂电网的分层解耦潮流算法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 56-61.
JIA Xiaofeng, YAN Wei, ZHOU Jiaqi, et al. Layer-decoupled power flow algorithm for complex networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 56-61.
- [10] 翁蓝天, 王禹民, 刘开培, 等. 链表拓扑环境下基于配网结构特点的多源有环短路计算[J]. 电工技术学报, 2010, 25(10): 150-157.
WENG Lantian, WANG Yumin, LIU Kaipei, et al. Multi-power short circuit calculation on middle and lower voltage distribution grid's structure characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(10): 150-157.
- [11] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2016.
- [12] 邹力, 苗世洪, 刘沛. 高压线路非全相运行对距离保护的影响[J]. 继电器, 2003, 31(5): 1-4.
ZOU Li, MIAO Shihong, LIU Pei. Influence of 2-phase work condition of high voltage transmission line on distance protection relay[J]. Relay, 2003, 31(5): 1-4.
- [13] 魏曜, 薛明军. 一种适用于高压线路非全相运行时的距离保护振荡闭锁的开放方案[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 70-75.
WEI Yao, XUE Mingjun. A new method for opening distance protection when the high voltage transmission lines is non-full-phases operation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 70-75.
- [14] 林峻嵩. 非全相运行对方向高频保护的影响[J]. 广东电力, 2001, 14(4): 16-18.
LIN Junsong. Influence of open-phase running on directional comparison pilot protection[J]. Guangdong Electric Power, 2001, 14(4): 16-18.
- [15] 朱子娇, 杨涛, 王慧芳, 等. 发电厂非全相运行电气量计算方法及保护方案[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(10): 97-103.
ZHU Zijiao, YANG Tao, WANG Huifang, et al. Calculation method and protection Scheme of power plant in open-phase operation[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2018, 30(10): 97-103.
- [16] 贺儒飞, 李荷婷. 发电机机端断路器非全相保护新型判据的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(17): 165-170.
HE Rufe, LI Heting. Research on the new open-phase protection criterions of the generator circuit breaker[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(17): 165-170.
- [17] 陈俊, 李华忠, 徐青山, 等. 基于断口两侧电压相量差的发电机机端断路器非全相保护[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(21): 125-130.
CHEN Jun, LI Huazhong, XU Qingshan, et al. Open-phase protection of generator circuit breaker based on voltage phasor differences between two sides of breaking point[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(21): 125-130.
- [18] 李荷婷, 桂林, 贺儒飞, 等. 基于电压型故障特征量的发电机机端断路器非全相保护[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 140-144.
LI Heting, GUI Lin, HE Rufe, et al. Voltage features based open-phase protection of generator circuit breaker[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(1): 140-144.
- [19] 戴飞扬, 王兴国, 杨国生, 等. 基于站域信息的同塔多回线零序方向保护防误动方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(13): 131-138.
DAI Feiyang, WANG Xingguo, YANG Guosheng, et al. Substation information based method for preventing mal-operation of zero-sequence directional protection on multi-circuit transmission lines on the same tower[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(13): 131-138.
- [20] 卫琳, 张健康, 粟小华, 等. 大型发电机组非全相保护存在问题及对策[J]. 电网技术, 2020, 44(6): 2336-2342.
WEI Lin, ZHANG Jiankang, SU Xiaohua, et al. Problems and solutions of open-phase protection for large generator-transformer unit[J]. Power System Technology, 2020, 44(6): 2336-2342.
- [21] 袁浩, 王琰, 倪益民, 等. 高压线路保护非全相运行状态下的考虑[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(20): 103-107.
YUAN Hao, WANG Yan, NI Yimin, et al. Considerations for high voltage line protection under open-pole operation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(20): 103-107.
- [22] 刘亚东, 孙集伟, 杨国生, 等. 断线故障对零序过流保护的影响及保护新方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 130-134, 141.
LIU Yadong, SUN Jiwei, YANG Guosheng, et al. Impact of open-circuit fault on zero-sequence over-current protection and improved protection scheme[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 130-134, 141.
- [23] 220 kV-750 kV 电网继电保护装置运行规程: DL/T 559—2007[S]. 北京: 中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2007.
Setting regulations for relay protection operation of 220 kV-750 kV power networks: DL/T 559—2007[S]. Beijing: National Development and Reform Commission of China, 2007.
- [24] 段惠明, 何飞跃, 李志宏, 等. 基于EMS和故障信息系统的在线定值管理系统构想[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(10): 97-99, 104.
DUAN Huiming, HE Feiyue, LI Zhihong, et al. Online setting management system based on EMS and fault information system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(10): 97-99, 104.

收稿日期: 2021-12-07; 修回日期: 2022-01-21

作者简介:

郝奕华(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统继电保护分析及整定计算。E-mail: haoyihua@hust.edu.cn

(编辑 许威)