

文章编号: 1671-251X(2023)03-0107-08

DOI: 10.13272/j.issn.1671-251x.2022080092

# 矿山电网瞬时电流速断保护整定策略

于群<sup>1</sup>, 崔国亮<sup>1</sup>, 古锋<sup>2</sup>, 刘韬<sup>2</sup>

(1. 山东科技大学 电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590;  
2. 兖矿能源集团股份有限公司 机电管理部, 山东 济宁 273500)

**摘要:** 矿山电网作业环境较差, 当井下供电系统发生短路故障时, 使用复杂的防越级跳闸保护装置会使整个电网的可靠性降低、成本提高, 并且矿山电网需要保证电流速断保护能够瞬时动作以切除短路故障, 尤其是线路出口处的短路故障。目前矿山电网防越级跳闸保护方案不能兼顾保护速动性、供电可靠性和设备经济性。针对上述问题, 根据矿山电网井下发生短路事故不能越级到井上的最低原则, 提出了一种基于整体最优原则的矿山电网瞬时电流速断保护整定策略。分析了矿山电网短路电流与短路点位置的关系及线路首末端短路电流的分布特征, 对比研究了传统单一整定方法存在的缺陷。定义了最小-最大系统阻抗比、最大系统阻抗与线路阻抗比、相邻线路阻抗比 3 个指标, 用来表示不同短路电流分布场景的特征关系式和各整定方法满足要求的条件, 从而判定不同短路电流分布场景下瞬时电流速断保护所适用的整定方法, 并给出相应的最优整定策略流程。以典型矿山供电线路为例, 根据所提整定策略对其各级保护开关进行整定计算, 结果表明: 采用该整定策略对矿山电网模型中 5 个存在越级跳闸风险的保护开关进行整定, 可将其中 4 个保护开关的保护范围控制在 2 级线路之内, 减少了越多级跳闸事故的次数, 降低了矿山电网井下短路故障延伸到井上的概率。

**关键词:** 矿山电网; 煤矿供电系统; 越级跳闸; 短路故障; 瞬时电流速断保护

中图分类号: TD611.5

文献标志码: A

Setting strategy of instantaneous current quick-breaking protection for mine power grid

YU Qun<sup>1</sup>, CUI Guoliang<sup>1</sup>, GU Feng<sup>2</sup>, LIU Tao<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 2. Electromechanical Management Department, Yankuang Energy Group Company Limited, Jining 273500, China)

**Abstract:** The mine power grid operating environment is poor. When a short circuit fault occurs in the underground power supply system, the use of complex anti-skip trip protection device will reduce the reliability of the entire power grid and increase the cost. The mine power grid needs to ensure that the current quick-break protection can act instantaneously to remove the short circuit fault, especially at the line outlet. The current mine power grid protection scheme of the anti-skip trip can not take into account the protection quick-action, power supply reliability and equipment economy. In order to solve the above problems, according to the minimum principle that short-circuit accident in the mine power grid can not skip to the ground, a setting strategy of instantaneous current quick-breaking protection for mine power grid based on the overall optimal principle is proposed. The relationship between the short-circuit current value and the location of short-circuit point and the distribution characteristics of short-circuit current at the beginning and end of the line are analyzed. The shortcomings of the traditional single-setting method are compared and studied. Three indexes are defined, which are minimum-maximum system impedance ratio, maximum system impedance and line impedance ratio, and

收稿日期: 2022-08-31; 修回日期: 2023-03-05; 责任编辑: 王晖, 郑海霞。

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2016EEM13); 兖矿能源集团股份有限公司科技项目(1000B2021000029)。

作者简介: 于群(1970—), 男, 山东淄博人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要研究方向为电力系统运行与控制、电力系统继电保护等, E-mail: yuqun\_70@163.com。

引用格式: 于群, 崔国亮, 古锋, 等. 矿山电网瞬时电流速断保护整定策略[J]. 工矿自动化, 2023, 49(3): 107-114.

YU Qun, CUI Guoliang, GU Feng, et al. Setting strategy of instantaneous current quick-breaking protection for mine power grid[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(3): 107-114.



扫码移动阅读

adjacent line impedance ratio. The indexes are used to represent characteristic relational expressions of different short-circuit current distribution scenarios and conditions for each setting method to meet the requirements. The setting methods applicable to instantaneous current quick-breaking protection under different short-circuit current distribution scenarios are determined. The corresponding optimal setting strategy flow is proposed. Taking a typical mine power supply line as an example, according to the proposed setting strategy, the setting calculation of the protection switch at all levels is carried out. The results show that the setting strategy is used to set five protection switches with the risk of the skip trip in the mine power grid model. The protection range of four protection switches can be controlled within the two-level line. The times of skip trip accidents are reduced. The probability of underground short-circuit faults extending to the surface of the mine power grid is reduced.

**Key words:** mine power grid; coal mine power supply system; anti-skip trip; short-circuit fault; instantaneous current quick-breaking protection

## 0 引言

随着井下巷道和采掘工作面的推进, 矿山电网结构愈加复杂, 供电距离和供电负荷不断增加<sup>[1]</sup>。当供电线路上发生短路并造成越级跳闸事故时, 会严重威胁矿井生产和工人生命安全。继电保护的配置原则和整定计算是确保矿山电网安全运行的重要组成部分<sup>[2-3]</sup>。根据《煤矿安全规程》第四百五十六条规定: 井下配电线路均应装设过流、短路保护装置。但由于矿山供电系统特殊, 一般是由多段短电缆组成的逐级控制干线式电网, 且所用电缆每千米阻抗较小(0.06~0.08 Ω/km)<sup>[4-5]</sup>, 所以普遍存在各段线路首端最小两相短路电流小于末端最大三相短路电流, 甚至小于其下级线路末端最大三相短路电流的情况, 使得矿山电网继电保护整定非常困难<sup>[6-8]</sup>。当井下供电系统发生短路故障时, 短路电流瞬间达到上级开关速断保护整定值, 造成越级跳闸事故, 保护失去选择性<sup>[9-10]</sup>, 甚至会出现越多级跳闸的情况, 导致故障影响范围延伸到井上<sup>[11-12]</sup>, 因此需要在矿山电网配置防越级跳闸的保护装置或保护策略。

许多学者对矿山电网防越级跳闸的方法进行了研究。文献<sup>[13-14]</sup>提出了基于全网共享的数字化变电站防越级跳闸技术, 通过光纤将电气信息传递到数字化变电站进行处理, 这种方法虽然能够达到控制防越级跳闸的效果, 但在设计和安装过程中需要严格与其他继电保护装置区分, 很难保证设备的安全性和稳定性。文献<sup>[15]</sup>提出了基于分布式智能速断保护原理的光纤级联纵差保护, 采用分层、分散式的保护动作原理, 提高了井下供电可靠性, 但由于光纤级联纵差保护装置的成本较高、安装过程复杂, 实际在矿山电网中无法得到普遍应用。文献<sup>[16]</sup>通过设置三段式电流保护动作时间延时来防止越级跳闸, 根据保护开关所在位置选择性设置保护动作时间, 能够保证在 0.5 s 内切除故障, 但是这样降低了继

电保护的速动性。由于矿山电网作业环境较差, 全面更换保护装置不现实, 若使用复杂的保护装置会使整个电网的可靠性降低、成本提高, 并且矿山电网需要保证电流速断保护能够瞬时动作以切除短路故障, 尤其是线路出口处的短路故障<sup>[17]</sup>, 而目前矿山电网的防越级保护方案并不能兼顾保护速动性、供电可靠性和设备经济性。

针对上述防越级保护方案中存在的问题, 本文考虑到矿山电网短路电流分布主要与系统阻抗和线路阻抗有关, 通过分析矿山电网短路电流分布特征和整定方法满足要求的条件, 遵循矿山电网井下发生短路事故不能越级到井上的最低原则, 提出了基于整体最优原则的矿山电网瞬时电流速断保护整定策略, 在保证保护速动性、供电可靠性和设备经济性的前提下, 有效降低了矿山电网多种短路情况下发生越多级跳闸事故的概率。

## 1 短路电流分布特征及分类

### 1.1 短路电流分布特征

在供电系统中, 短路电流大小与系统阻抗、线路阻抗、短路点位置及短路类型有关。供电线路的最大三相短路电流和最小两相短路电流为

$$I_{k,max} = \frac{1}{Z_{s,min} + Z_k} = \frac{1}{Z_{s,min} + Zl_k} \quad (1)$$

$$I_{k,min} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1}{Z_{s,max} + Z_k} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1}{Z_{s,max} + Zl_k} \quad (2)$$

式中:  $I_{k,max}$  为被保护线路在最大运行方式下发生三相短路时流过保护装置的短路电流标幺值;  $Z_{s,min}$  为最大运行方式下保护安装处至系统等效电源之间的阻抗标幺值;  $Z_k$  为短路点至保护安装处之间的阻抗标幺值;  $Z$  为被保护线路的单位阻抗标幺值;  $l_k$  为短路点至保护安装处的距离;  $I_{k,min}$  为被保护线路在最小运行方式下发生两相短路时流过保护装置的短路电流标幺值;  $Z_{s,max}$  为最小运行方式下保护安装处至系统

等效电源之间的阻抗标么值。

由式(1)和式(2)可得短路电流与短路点位置的函数关系式  $I_{k,max}=f(l_k)$  及  $I_{k,min}=f(l_k)$ ，将其绘出，如图1所示。图中  $I_k$  为短路电流， $M$  为短路点与系统等效电源的距离， $B_i$  为第  $i$  个保护开关前的母线， $L_i$  为第  $i$  个保护开关所在线路。

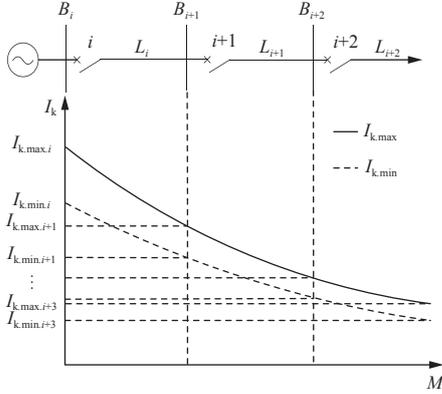


图1 短路电流分布场景1

Fig. 1 Short-circuit current distribution scenario 1

在图1中，供电系统的运行方式变化较小，供电线路较长，因此同一短路点最大和最小短路电流差值较小，线路首端和末端同一类型短路电流差值较大，将图1所示短路电流分布场景定义为场景1。由图1可看出，场景1的短路电流分布特征为线路首端最小两相短路电流  $I_{k,min,i}$  在本线路首端最大三相短路电流  $I_{k,max,i}$  和末端最大三相短路电流  $I_{k,max,i+1}$  之间。

用阻抗表示时，有

$$\frac{1}{Z_{s,min,i} + Z_{L_i}} < \frac{0.866}{Z_{s,max,i}} < \frac{1}{Z_{s,min,i}} \quad (3)$$

式中： $Z_{s,min,i}$  为归算到母线  $B_i$  处的最小系统阻抗标么值； $Z_{L_i}$  为线路  $L_i$  的阻抗标么值； $Z_{s,max,i}$  为归算到母线  $B_i$  处的最大系统阻抗标么值。

为了更清晰地表示系统阻抗与线路阻抗对供电系统短路电流分布的影响，定义了最小—最大系统阻抗比  $Z_{s,min,max,i}$ 、最大系统阻抗与线路阻抗比  $Z_{s,max,L_i}$ 、相邻线路阻抗比  $Z'_{L_i}$  3个指标。

$$Z_{s,min,max,i} = \frac{Z_{s,min,i}}{Z_{s,max,i}} \quad (4)$$

$$Z_{s,max,L_i} = \frac{Z_{s,max,i}}{Z_{L_i}} \quad (5)$$

$$Z'_{L_i} = \frac{Z_{L_i}}{Z_{L_{i+1}}} \quad (6)$$

将上述3个指标代入式(3)来表示场景1中短路电流分布关系式，可得

$$0 < Z_{s,max,L_i} < \frac{0.866}{1 - 0.866 Z_{s,min,max,i}} \quad (7)$$

$$0 < Z_{s,max,L_{i+1}} < \frac{0.866 Z'_{L_i}}{1 - 0.866 Z_{s,min,max,i}} \quad (8)$$

式中  $Z_{s,max,L_{i+1}}$  为  $Z_{s,max,i}$  与  $Z_{L_{i+1}}$  的比值。

### 1.2 常见矿山电网短路电流分布场景

通常矿山供电系统的运行方式变化较大，上下级变电所、配电点距离近，配电线路级数多，导致同一短路点最大三相短路电流和最小两相短路电流差值大，而线路首端和末端同一类型短路电流差值小<sup>[18]</sup>，因此在矿山电网中常见的短路电流分布场景如图2和图3所示。

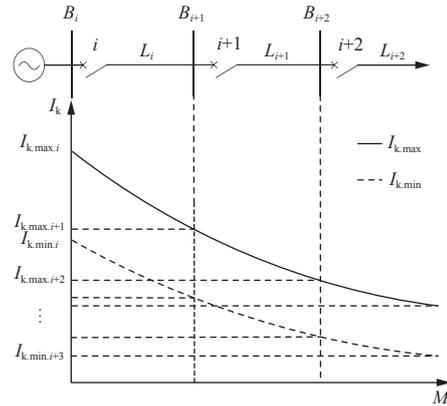


图2 短路电流分布场景2

Fig. 2 Short-circuit current distribution scenario 2

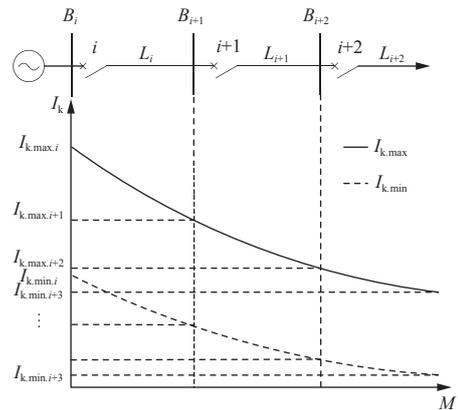


图3 短路电流分布场景3

Fig. 3 Short-circuit current distribution scenario 3

用  $Z_{s,min,max,i}$ 、 $Z_{s,max,L_i}$ 、 $Z'_{L_i}$  表示图2和图3中短路电流分布特征关系式，3种场景下的短路电流分布特征见表1。

## 2 传统整定方法

传统三段式电流保护利用相间短路后短路电流幅值增大的特性，来区分线路正常运行状态与故障状态，以动作电流大小及动作时限长短的配合来保证有选择地切除故障<sup>[19-21]</sup>。目前，矿山电网线路瞬时电流速断保护的整定方法主要有3种。

方法1：按躲过线路末端最大三相短路电流进行整定。以图2为例，第  $i$  个保护开关的整定值为

$$I'_{act,i} = K'_{rel} I_{k,B_{i+1},max} = K'_{rel} \frac{1}{Z_{s,min,i} + Z_{L_i}} \quad (9)$$

表 1 短路电流分布特征

Table 1 Features of short-circuit current distribution

场景	特征	关系式
1	线路首端最小两相短路电流在本线路首端和末端最大三相短路电流之间	$0 < Z_{s,\max,L_i} < \frac{0.866}{1 - 0.866Z_{s,\min,\max,i}}$ 或 $0 < Z_{s,\max,L_{i+1}} < \frac{0.866Z'_{L_i}}{1 - 0.866Z_{s,\min,\max,i}}$
2	线路首端最小两相短路电流在本线路末端和下级线路末端最大三相短路电流之间	$\frac{0.866}{1 - 0.866Z_{s,\min,\max,i}} < Z_{s,\max,L_i} < \frac{0.866(1 + 1/Z'_{L_i})}{1 - 0.866Z_{s,\min,\max,i}}$ 或 $\frac{0.866Z'_{L_i}}{1 - 0.866Z_{s,\min,\max,i}} < Z_{s,\max,L_{i+1}} < \frac{0.866(1 + 1/Z'_{L_i})}{1 - 0.866Z_{s,\min,\max,i}}$
3	线路首端最小两相短路电流小于下级线路末端最大三相短路电流	$Z_{s,\max,L_i} > \frac{0.866(1 + 1/Z'_{L_i})}{1 - 0.866Z_{s,\min,\max,i}}$ 或 $Z_{s,\max,L_{i+1}} > \frac{0.866(1 + 1/Z'_{L_i})}{1 - 0.866Z_{s,\min,\max,i}}$

式中： $K'_{rel}$ 为瞬时电流速断保护整定的可靠系数， $K'_{rel}=1.2$ ； $I_{k.B_{i+1},\max}$ 为母线 $B_{i+1}$ 上的最大三相短路电流，即线路 $L_i$ 末端最大三相短路电流。

用方法 1 对第  $i$  个保护开关进行整定时，可以保证保护装置在下级线路短路故障时不会动作，即不会发生越级跳闸。

根据《煤矿安全规程》第四百五十六条规定，必须用最小两相短路电流校验保护装置的可靠动作系数。利用最小保护范围来校验瞬时电流速断保护的可靠性，设在最小运行方式下发生两相短路时的最小保护范围为

$$\alpha_{pl,\min} = \frac{0.866(Z_{s,\min,i} + Z_{L_i})}{K'_{rel}Z_{L_i}} - \frac{Z_{s,\max,i}}{Z_{L_i}} \quad (10)$$

根据继电保护的要求，瞬时电流速断保护范围应不小于线路全长的 15%~20%。当不满足  $Z_{s,\max,L_i} < \frac{0.57}{1 - 0.72Z_{s,\min,\max,i}}$  时，通过方法 1 整定，其结果存在保护范围不合格的问题。

方法 2：按瞬时电流速断保护对线路首端发生最小两相短路时的短路电流有 1.5 倍的灵敏度进行逆整定。以图 2 为例，第  $i$  个保护开关的整定值为

$$I'_{act,i} = \frac{I_{k.B_i,\min}}{K_{sen}} = \frac{0.866}{K_{sen}Z_{s,\max,i}} \quad (11)$$

式中： $I_{k.B_i,\min}$ 为母线 $B_i$ 上的最小两相短路电流； $K_{sen}$ 为灵敏系数， $K_{sen}=1.5$ 。

用方法 2 对第  $i$  个保护开关进行整定时，可以保证有一定的最小保护范围。

设在最大运行方式下发生三相短路时的保护范

围末端到第  $i$  个保护安装处的阻抗为

$$Z_{pl,\max} = \frac{K_{sen}Z_{s,\max,i}}{0.866} - Z_{s,\min,i} \quad (12)$$

用方法 2 对第  $i$  个保护开关进行整定时的最大保护范围为

$$\alpha_{pl,\max,2} = \frac{Z_{pl,\max}}{Z_{L_i}} = (1.732 - Z_{s,\min,\max,i})Z_{s,\max,L_i} \quad (13)$$

当不满足  $Z_{s,\max,L_i} < \frac{1}{1.732 - Z_{s,\min,\max,i}}$  时，通过方法 2 整定，其结果存在越级跳闸的问题。当线路的  $Z_{s,\max,L_i}$  不满足  $Z_{s,\max,L_{i+1}} < \frac{1 + Z'_{L_i}}{1.732 - Z_{s,\min,\max,i}}$  时，通过方法 2 整定，其结果存在越两级跳闸的问题。

3) 当瞬时电流速断保护的最小保护范围为本条线路长度的 15% 时，对保护开关进行逆整定。以图 2 为例，第  $i$  个保护开关的整定值为

$$I'_{act,i} = \frac{0.866}{Z_{s,\max,i} + \alpha_{pl,\min}Z_{L_i}} \quad (14)$$

用方法 3 对第  $i$  个保护开关进行整定时，其最小保护范围满足要求，整定时的最大保护范围为

$$\alpha_{pl,\max,3} = \frac{Z_{pl,\max}}{Z_{L_i}} = (1.155 - Z_{s,\min,\max,i})Z_{s,\max,L_i} + 0.173 \quad (15)$$

当不满足  $Z_{s,\max,L_i} < \frac{0.827}{1.155 - Z_{s,\min,\max,i}}$  时，通过方法 3 整定，其结果存在越级跳闸的问题。当线路的  $Z_{s,\max,L_i}$  不满足  $Z_{s,\max,L_{i+1}} < \frac{1 + 0.827Z'_{L_i}}{1.155 - Z_{s,\min,\max,i}}$  时，通过方法 3 整定，其结果存在越两级跳闸的问题。

### 3 最优整定配置策略

#### 3.1 整定方法适配分析

根据 3 种短路电流分布场景的特征和 3 种整定方法满足要求的条件关系式，对短路电流分布场景匹配合适的整定方法。3 种整定方法满足要求的  $Z_{s,\max,L_i}$  条件范围从小到大依次为：方法 2 < 方法 1 < 方法 3，即在  $0 < Z_{s,\min,\max,i} < 1$  时，满足

$$\frac{1}{1.732 - Z_{s,\min,\max,i}} < \frac{0.57}{1 - 0.72Z_{s,\min,\max,i}} < \frac{0.827}{1.155 - Z_{s,\min,\max,i}} \quad (16)$$

在场景 1 中有

$$\frac{0.827}{1.155 - Z_{s,\min,\max,i}} < \frac{0.866}{1 - 0.866Z_{s,\min,\max,i}} \quad (17)$$

由式(16)和式(17)可知，3 种方法满足要求的条件范围均在场景 1 特征关系式范围之内。因此，得到根据  $Z_{s,\max,L_i}$  的值选择整定方法的规则如下。

规则 1：当满足  $Z_{s,\max,L_i} < \frac{1}{1.732 - Z_{s,\min,\max,i}}$  时，3 种方法均适用。

规则 2: 当满足  $\frac{1}{1.732 - Z_{s,\min.\max.i}} < Z_{s,\max.L_i} < \frac{0.57}{1 - 0.72Z_{s,\min.\max.i}}$  时, 用方法 2 整定会发生越级跳闸, 不满足要求。此时, 方法 1 和方法 3 适用。

规则 3: 当满足  $\frac{0.57}{1 - 0.72Z_{s,\min.\max.i}} < Z_{s,\max.L_i} < \frac{0.827}{1.155 - Z_{s,\min.\max.i}}$  时, 用方法 1 整定的保护范围不合格, 不满足要求; 用方法 2 整定会发生越级跳闸, 不满足要求。此时, 方法 3 适用。

规则 4: 当不满足  $Z_{s,\max.L_i} < \frac{0.827}{1.155 - Z_{s,\min.\max.i}}$  时, 3 种方法均不适用。当  $0 < Z_{s,\max.L_i} < 0.3$  时,  $\alpha_{pl.\max.2} < \alpha_{pl.\max.3}$ , 即方法 2 的越级范围小于方法 3, 此时方法 2 更适用; 当  $Z_{s,\max.L_i} > 0.3$  时,  $\alpha_{pl.\max.2} > \alpha_{pl.\max.3}$ , 即方法 2 的越级范围大于方法 3, 此时方法 3 更适用。

在场景 2 中, 由式(16)和式(17)可知 3 种整定方法均不满足要求。用方法 1 整定时没有保护范围, 用方法 2 和方法 3 整定时均会发生越级跳闸。

当  $0 < Z'_{L_i} < 5.77$  时, 用方法 3 整定不会发生越 2 级跳闸, 用方法 2 整定会发生越级跳闸; 当  $Z'_{L_i} > 5.77$  时, 方法 2 和方法 3 均会发生越两级跳闸, 对比两者越级范围大小, 结果与场景 1 中规则 4 相同。

在场景 3 中, 用方法 2 和方法 3 整定, 在最大保护范围处均会发生越两级跳闸。对比两者越级范围大小, 结果同场景 1 中规则 4 相同。

### 3.2 整定配置策略流程

1) 整理系统参数, 计算各线路首端系统阻抗及线路阻抗, 并计算  $Z_{s,\min.\max.i}$ ,  $Z_{s,\max.L_i}$ ,  $Z'_{L_i}$  指标值。

2) 根据表 1 中短路电流分布特征关系式, 代入指标值, 判断各线路所属短路电流分布场景。

3) 根据 3 种短路电流分布场景中整定方法的适配规则, 依次对线路的保护开关进行整定方法选择和整定计算, 保护开关的整定顺序为由下级到上级。整定策略流程如图 4 所示。

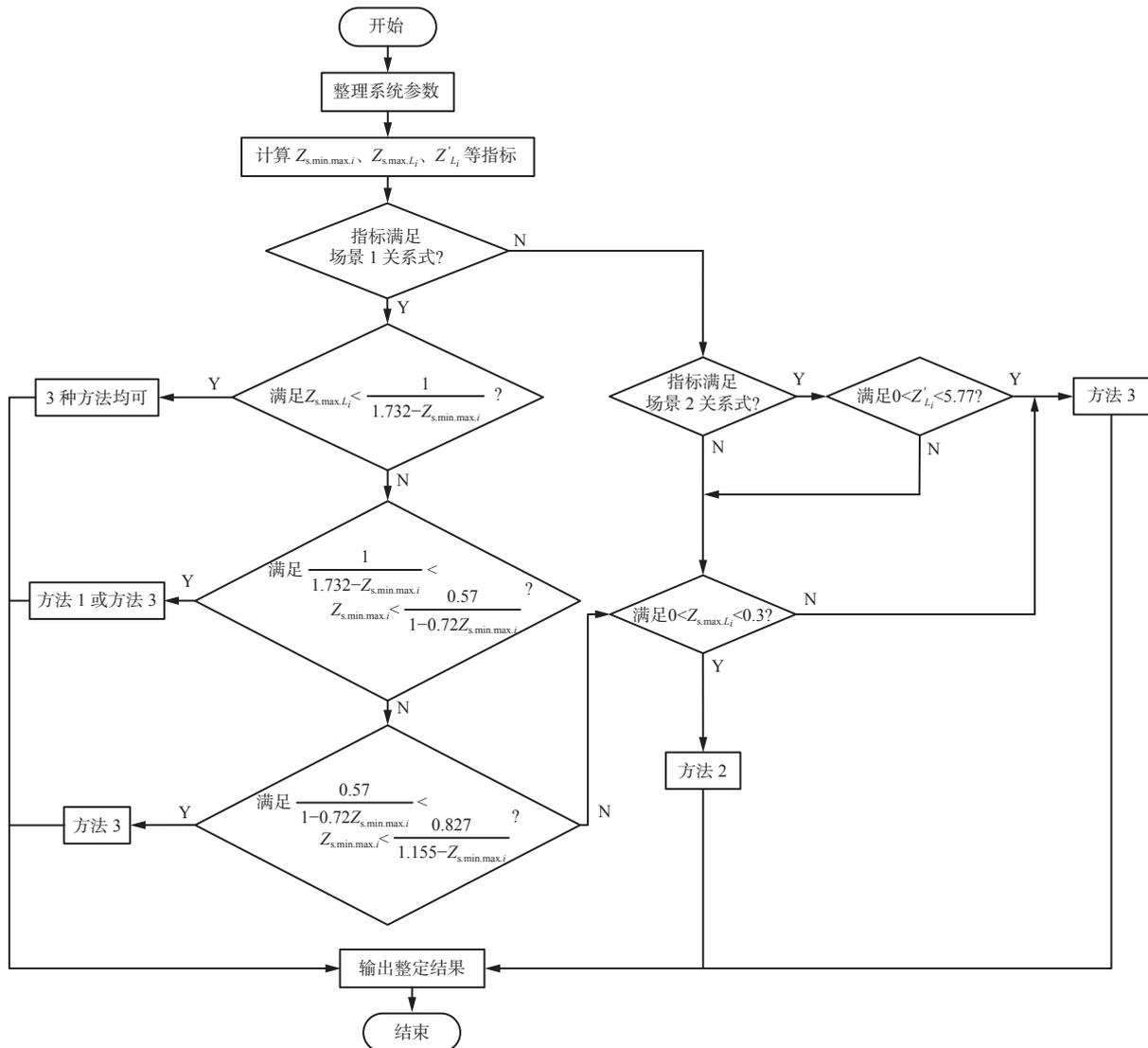


图 4 整定策略流程

Fig. 4 Setting strategy process

4 算例及结果分析

以 10 kV 矿山电网模型(图 5)为例,对本文所提整定策略进行验证。该模型包括井上和井下 2 个部分,共 9 条母线、11 条支路、2 台配电点变压器和 1 台高压电动机。已知地面 35 kV 变电所归算到 10 kV 母线处的最大系统阻抗  $Z_{s,max}^* = 0.1393 + j0.9977$  和最小系统阻抗  $Z_{s,min}^* = 0.108 + j0.813$ ,基准容量  $S = 100 \text{ MVA}$ 。

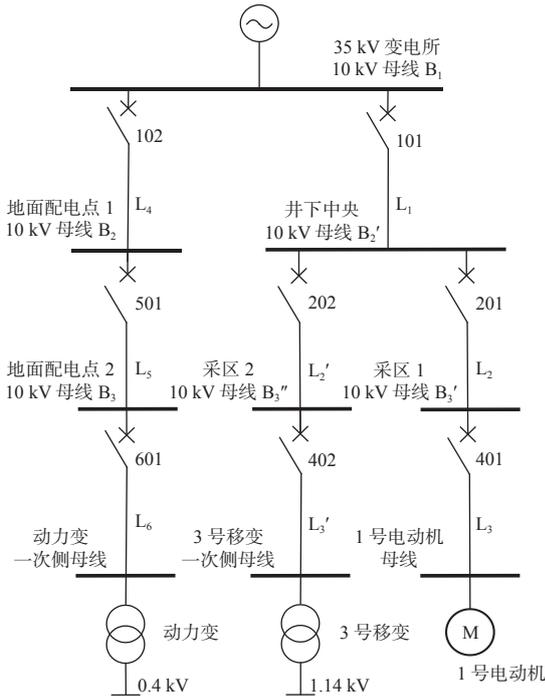


图 5 矿山电网模型

Fig. 5 Mine power grid model

在矿山电网模型中,线路阻抗参数见表 2。根据阻抗参数计算得到各母线处最大三相短路电流和最小两相短路电流有名值,见表 3。

表 2 线路阻抗参数

Table 2 Line impedance parameters

名称	阻抗	名称	阻抗
L <sub>1</sub>	0.093 8+j0.086 8	L <sub>3</sub> '	0.122 2+j0.029 1
L <sub>2</sub>	0.393 0+j0.123 6	L <sub>4</sub>	0.653 1+j0.365 0
L <sub>3</sub>	0.126 2+j0.030 1	L <sub>5</sub>	0.204 0+j0.049 1
L <sub>2</sub> '	0.454 2+j0.142 8	L <sub>6</sub>	0.323 4+j0.134 1

根据整定流程,计算 10 kV 各线路的  $Z_{s,min,max,i}$ ,  $Z_{s,max,L_i}$  及  $Z_{L_i}$  指标值,并判断各线路所属短路电流分布场景及适用的整定方法,结果见表 4。

由表 4 可知,线路 L<sub>4</sub>-L<sub>5</sub> 符合短路电流分布场景 1 的特征,线路 L<sub>1</sub>-L<sub>2</sub>, L<sub>1</sub>-L<sub>2</sub>', L<sub>2</sub>'-L<sub>3</sub>' 符合短路电流分布场景 2 的特征,线路 L<sub>2</sub>-L<sub>3</sub>, L<sub>5</sub>-L<sub>6</sub> 符合短路电

表 3 短路电流有名值

Table 3 Short-circuit current nominal value

位置	短路点	短路电流有名值/kA	
		最大三相	最小两相
井上	B <sub>1</sub>	6.703	4.727
	B <sub>2</sub>	3.920	3.019
	B <sub>3</sub>	3.525	2.757
	动力变一次侧	2.936	2.343
井下	B <sub>2</sub> '	5.960	4.290
	B <sub>3</sub> '	4.646	3.500
	B <sub>3</sub> ''	4.465	3.385
	1号电动机母线	4.305	3.286
	3号移变一次侧	4.151	3.186

表 4 指标值

Table 4 Index value

线路	$Z_{s,min,max,i}$	$Z_{s,max,L_i}$	$Z_{L_i}$	所属场景	选择方法
L <sub>1</sub> -L <sub>2</sub>	0.814	7.833	0.310	2	3
L <sub>1</sub> -L <sub>2</sub> '	0.814	7.833	0.268	2	3
L <sub>4</sub> -L <sub>5</sub>	0.814	1.347	3.566	1	1
L <sub>2</sub> -L <sub>3</sub>	0.831	2.690	3.177	3	3
L <sub>2</sub> '-L <sub>3</sub> '	0.831	2.330	3.791	2	3
L <sub>5</sub> -L <sub>6</sub>	0.890	7.512	0.570	3	3

流分布场景 3 的特征。

整定结果及对比见表 5(整定值为有名值,  $\alpha_p$  为保护范围)。可看出保护开关 101, 201, 202, 501 适用方法 3; 保护开关 102 符合场景 1 中规则 2 关系式, 方法 1 和方法 3 均适用; 保护开关 401, 402, 601 为末端保护, 不做防越级要求, 用方法 2 或方法 3 整定。

表 5 保护整定结果及对比

Table 5 Protection setting results and comparison

保护开关	方法 1		方法 2		方法 3	
	整定值/kA	$\alpha_p$	整定值/kA	$\alpha_p$	整定值/kA	$\alpha_p$
401	5.166	$\alpha_p < 0$	2.333	$\alpha_p > 1$	3.363	$\alpha_p > 1$
402	4.981	$\alpha_p < 0$	2.257	$\alpha_p > 1$	3.652	$\alpha_p > 1$
201	5.575	$\alpha_p < 0$	2.860	$\alpha_p > 2$	4.183	$\alpha_p > 2$
202	5.358	$\alpha_p < 0$	2.860	$\alpha_p > 2$	4.165	$1 < \alpha_p < 2$
101	7.152	$\alpha_p < 0$	3.151	$\alpha_p > 2$	4.669	$1 < \alpha_p < 2$
601	3.871	$\alpha_p < 0$	1.838	$\alpha_p > 1$	2.735	$\alpha_p > 1$
501	4.230	$\alpha_p < 0$	2.012	$\alpha_p > 2$	2.986	$1 < \alpha_p < 2$
102	4.704	$\alpha_p > 0.15$	3.151	$\alpha_p > 2$	4.424	$\alpha_p < 1$

由表 5 可知, 保护开关 101, 202 通过方法 3 进行整定, 当井下采区配电点线路短路时井上保护不会

动作,减少了井下线路短路故障引起井上保护动作事故的发生;保护开关102通过方法1整定时,不会发生越级跳闸;保护开关501通过方法3整定时,不会发生越两级跳闸。通过算例分析结果可知,本文所提整定策略可以有效减少矿山电网发生越多级跳闸事故的概率,提高了矿山供电系统的可靠性。

## 5 结语

提出了一种基于整体最优原则的矿山电网瞬时电流速断保护整定策略。首先分析了目前矿山电网防越级跳闸保护方案的不足;然后定义了 $Z_{s,\min,max,i}$ ,  $Z_{s,\max,L_i}$ ,  $Z_{L_i}$  3个指标来表示矿山电网中短路电流的分布特征和传统整定方法满足要求的约束条件,计算得出不同短路电流分布场景下所适用的整定方法,并给出相应的整定流程;最后通过矿山电网模型来验证所提策略的有效性。实际应用表明,通过所提整定策略对矿山电网保护开关进行整定,有效降低了矿山电网井下短路故障延伸到井上的概率,提高了矿山供电系统的可靠性。

## 参考文献(References):

- [1] 倪少军,李双良,匡欣欣,等.面向煤矿供电的智能分布式防越级保护系统[J].工矿自动化,2021,47(增刊1):78-80,87.  
NI Shaojun, LI Shuangliang, KUANG Xinxin, et al. Intelligent distributed anti-override protection system for coal mine power supply[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(S1): 78-80, 87.
- [2] 张文瑞.煤矿供电防越级跳闸监控系统[J].工矿自动化,2018,44(9):98-101.  
ZHANG Wenrui. Anti-override trip monitoring system of coal mine power supply[J]. Industry and Mine Automation, 2018, 44(9): 98-101.
- [3] 高启业,李军.煤矿供电智能化建设关键技术[J].煤矿安全,2021,52(6):153-157.  
GAO Qiye, LI Jun. Key technology of intelligent construction of power supply in coal mines[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(6): 153-157.
- [4] 张根现,马星河,张传书,等.井下高压电网防越级跳闸系统研究[J].煤矿机电,2009,30(2):56-58.  
ZHANG Genxian, MA Xinghe, ZHANG Chuanshu, et al. Research on avoiding override trip system of underground high-voltage distribution network[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2009, 30(2): 56-58.
- [5] 曹娜,史文秀,于群.基于PSCAD矿山电网越级跳闸实验教学仿真平台[J].实验室研究与探索,2017,36(3):100-104.  
CAO Na, SHI Wenxiu, YU Qun. An experimental simulation platform of mine network leapfrog tripping based on PSCAD/EMTDC[J]. Research and Exploration in Laboratory, 2017, 36(3): 100-104.
- [6] 郝亚锋,沈会初.煤矿井下供电监控及防越级跳闸系统的设计[J].煤矿机电,2018(6):27-29.  
HAO Yafeng, SHEN Huichu. Design of power supply monitoring and anti-overstep trip system in underground coal mine[J]. Colliery Mechanical & Electrical Technology, 2018(6): 27-29.
- [7] 王鹏飞.煤矿供电系统防越级跳闸技术研究[D].徐州:中国矿业大学,2021.  
WANG Pengfei. Research on anti-tripping technology of coal mine power supply system[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [8] 姚福强,柏猛,杜兆文.GOOSE信号闭锁在煤矿供电系统防越级跳闸中的应用[J].电力系统及其自动化学报,2016,28(7):37-41.  
YAO Fuqiang, BAI Meng, DU Zhaowen. Application of GOOSE blocking to anti-override trip of power system in coal mine[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(7): 37-41.
- [9] 吴文瑕,陈柏峰,高燕.井下电网越级跳闸的研究及解决建议[J].工矿自动化,2008,34(6):136-138.  
WU Wenxia, CHEN Baifeng, GAO Yan. Research of grade-skip trip of underground power grid and its suggestion of resolution[J]. Industry and Mine Automation, 2008, 34(6): 136-138.
- [10] 史丽萍,钟世华,申坤,等.煤矿高压电网防越级跳闸系统研究[J].煤矿安全,2015,46(12):113-115.  
SHI Liping, ZHONG Shihua, SHEN Kun, et al. Research on anti over-ride trip system for high-voltage power grid of coal mine[J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(12): 113-115.
- [11] 丁静波.煤矿供电越级跳闸问题解决方案研究[J].煤炭科学技术,2014,42(2):63-67.  
DING Jingbo. Study on override trip solutions plan of coal mine power supply system[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(2): 63-67.
- [12] 栾永春,陈坤鹏.井下供电系统防越级跳闸方案浅析[J].工矿自动化,2015,41(9):87-89.  
LUAN Yongchun, CHEN Kunpeng. Analysis of anti-override trip program for underground power supply system[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(9): 87-89.
- [13] 吕延森.煤矿供电系统防越级跳闸技术应用研究[J].煤炭科学技术,2017,45(增刊1):157-160.  
LYU Yansen. Research on application of anti trip technology in coal mine power supply system[J]. Coal Science and Technology, 2017, 45(S1): 157-160.

- [14] 王超, 杜英, 苟全峰, 等. 煤矿供电系统中越级跳闸问题研究[J]. 煤炭技术, 2018, 37(10): 312-314.  
WANG Chao, DU Ying, GOU Quanfeng, et al. Study on override trip problem in coal mine power supply system[J]. Coal Technology, 2018, 37(10): 312-314.
- [15] 王钺, 秦文萍, 杨世坤, 等. 光纤级联纵差保护在井下防越级跳闸的应用[J]. 煤炭工程, 2016, 48(7): 75-78.  
WANG Tan, QIN Wenping, YANG Shikun, et al. Application of fiber cascaded differential protection in override trip prevention for coal mine[J]. Coal Engineering, 2016, 48(7): 75-78.
- [16] 刘波. 电力监控及防短路越级跳闸系统在煤矿的应用[J]. 煤炭工程, 2016, 48(12): 66-69.  
LIU Bo. Application of power monitoring and override trip prevention system in coal mine[J]. Coal Engineering, 2016, 48(12): 66-69.
- [17] 卢喜山, 张祖涛, 李卫涛. 煤矿供电系统基于纵联差动保护原理的防越级跳闸技术研究[J]. 煤矿机械, 2011, 32(4): 71-73.  
LU Xishan, ZHANG Zutao, LI Weitao. Research on avoiding override trip based on principle of longitudinal differential protection in mine power supply system[J]. Coal Mine Machinery, 2011, 32(4): 71-73.
- [18] 李建冬, 侯炜, 陈俊, 等. 基于GOOSE的煤矿供电防越级速断保护原理研究及应用[J]. 煤炭技术, 2019, 38(5): 182-185.  
LI Jiandong, HOU Wei, CHEN Jun, et al. Research and application of anti-override instantaneous protection principle for coal mine power supply system based on GOOSE[J]. Coal Technology, 2019, 38(5): 182-185.
- [19] 张保会, 尹项银. 电力系统继电保护[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2009.  
ZHANG Baohui, YIN Xiangyin. Power system relay protection[M]. 2nd ed. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [20] 顾永辉. 煤矿电工手册: 第二分册 矿井供电(上)[M]. 3版. 北京: 煤炭工业出版社, 2015.  
GU Yonghui. Coal mine electrical manual: part II mine power supply (volume 1) [M]. 3rd ed. Beijing: China Coal Industry Press, 2015.
- [21] 陈仁明. 煤矿供电设计与继电保护整定计算示例[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2013.  
CHEN Renming. Example of coal mine power supply design and relay protection setting calculation[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2013.
- ~~~~~
- (上接第 5 页)
- [15] 孙继平, 余星辰. 基于CEEMD分量样本熵与SVM分类的煤矿瓦斯和煤尘爆炸声音识别方法[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(5): 1061-1070.  
SUN Jiping, YU Xingchen. Sound recognition method of coal mine gas and coal dust explosion based on CEEMD component sample entropy and SVM classification[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(5): 1061-1070.
- [16] 孙继平, 余星辰. 基于声音特征的煤矿瓦斯和煤尘爆炸识别方法[J]. 中国矿业大学学报, 2022, 51(6): 1096-1105.  
SUN Jiping, YU Xingchen. Recognition method of coal mine gas and coal dust explosion based on sound characteristics[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2022, 51(6): 1096-1105.
- [17] 余星辰, 王云泉. 基于小波包能量的煤矿瓦斯和煤尘爆炸声音识别方法[J]. 工矿自动化, 2023, 49(1): 131-139.  
YU Xingchen, WANG Yunquan. Coal mine gas and coal dust explosion sound recognition method based on wavelet packet energy[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(1): 131-139.
- [18] 周心权, 吴兵, 徐景德. 煤矿井下瓦斯爆炸的基本特性[J]. 中国煤炭, 2002, 28(9): 8-11, 4.  
ZHOU Xinquan, WU Bing, XU Jingde. Basic characters of gas explosion in underground coal mines[J]. China Coal, 2002, 28(9): 8-11, 4.
- [19] 景国勋, 彭乐, 班涛, 等. 甲烷煤尘耦合爆炸传播特性及伤害研究[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(1): 72-78.  
JING Guoxun, PENG Le, BAN Tao, et al. Research on pressure propagation and injury of methane and coal dust coupled explosion[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(1): 72-78.
- [20] 江丙友, 林柏泉, 陈健, 等. 瓦斯爆燃防爆安全距离及传播特征的数值模拟[J]. 采矿与安全工程学报, 2014, 31(1): 139-145.  
JIANG Bingyou, LIN Baiquan, CHEN Jian, et al. Numerical simulation of explosion-proof safety distance and propagation characteristics of gas deflagration[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(1): 139-145.
- [21] 彭佑多, 谢伟华, 郭迎福, 等. 矿井掘进工作面粉尘对机器噪声衰减的影响[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2012, 27(1): 23-29.  
PENG Youduo, XIE Weihua, GUO Yingfu, et al. Studies on the spread and attenuation of machine noise influenced by the heading face of mine roadway dust[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2012, 27(1): 23-29.