

煤矿井下高压电网过流保护整定计算方法的改进研究

马星河¹, 李林蔚¹, 李自强², 韩鹏举³

(1. 河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454150; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000;
3. 中国平煤神马集团安全监察局, 河南 平顶山 467000)

摘要: 为了提高煤矿过流保护的可靠性, 针对各级变电所 6 kV 出线开关, 给出了一种改进的过流保护整定计算方法。分析了传统方法的不足, 并详细介绍了新方法的整定计算过程。新方法中用线路载流量对定时过流与过负荷保护进行了整定, 并介绍了瞬时速断保护是否设置的判定方法。以定时过流保护为例, 介绍了灵敏度不合要求时的处理方法。最后以河南大有能源某煤矿局部供电系统为例进行了计算论证, 并进行了分析。结果表明, 新方法是有效和实用的, 能够保证过流保护装置可靠动作, 从而提高过流保护的可靠性。

关键词: 过流保护; 改进的; 整定计算; 新方法; 载流量; 灵敏度; 有效

Improvement and research on the setting calculation method of overcurrent protection of the underground high-voltage distribution network of coal mine

MA Xing-he¹, LI Lin-wei¹, LI Zi-qiang², HAN Peng-ju³

(1. Dept of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454150, China; 2. XJ Electric Co., Ltd, Xuchang 461000, China; 3. Safety Supervision Bureau of China Pingmei Shenma Group, Pingdingshan 467000, China)

Abstract: In order to improve the reliability of overcurrent protection of coal mine, for 6 kV outlet switch of substation of all levels, this paper gives an improved setting calculation method of overcurrent protection. It analyses the shortcomings of traditional method and introduces setting calculation process of the new method. The new method uses the line ampacity to set the timing overcurrent and overload protection, and introduces the judging method of setting instantaneous overcurrent protection or not. Taking the timing overcurrent protection as an example, it introduces the processing method when sensitivity does not meet the requirement. Finally, the local power supply system of a mine of Henan Da You Energy is taken as an example to calculate and demonstrate, and then make analyses. The results show that the new method is effective and practical, and it can guarantee the overcurrent protection device action reliably, so as to improve the reliability of overcurrent protection.

Key words: overcurrent protection; improved; setting calculation; new method; line ampacity; sensitivity; effective

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)10-0090-06

0 引言

近年来, 随着我国电力行业的不断发展, 我国的煤矿生产系统已逐步实现了电气化和自动化。煤矿供电系统是煤矿生产的动力来源, 担负着煤矿的安全生产和人民的正常生活等重要任务。众所周知, 煤矿井下高压供电系统有三大保护, 即过流保护、漏电保护和接地保护^[1]。其中, 对漏电保护和接地保护的研究已经比较成熟, 装置也比较先进, 在工程现场实践中取得了很好的效果^[2-7]。但过流保护的

整定计算一直以来都困扰着各国的学者与工程师。这是因为, 煤矿井下高压供电系统结构非常特殊, 均为由多段短电缆组成的逐级控制干线式电网, 每段电缆长度多为 60~1 500 m, 而且电缆每公里阻抗很小 (0.06~0.08 Ω/km), 就会造成线路始末两端短路电流幅值相差很小, 很多情况下甚至出现各段电缆首端的最小两相短路电流小于其末端的最大三相短路电流^[8-9], 这就使得过流保护的整定非常困难。另外, 由于煤矿井下高压供电系统级数较多, 而受上级供电部门继电保护时限以及《煤矿安全规程》的约束, 使得采用在各级增加时限级差来满足纵向选择性非常困难, 因此经常会出现越级跳闸^[8]。

基金项目: 中国博士后科学基金

基于以上情况, 本文提出了一种新型的煤矿井下高压供电系统过流保护整定方案。

针对煤矿主要电气设备, 如 6 kV 高压电动机、动力变压器和电缆线路等, 在保护设置与整定方法上有了很大的改进, 同时增加了灵敏度不合格时的修正方法。下面笔者就以各级变电所 6 kV 出线开关为例, 来介绍改进后的整定计算方法。

1 传统整定方法

传统的过流保护整定是采用三段式保护, 即瞬时电流速断(过流 I 段)、限时电流速断(过流 II 段)和定时过流保护(过流 III 段)。

瞬时速断保护是为了快速切除故障而设置的。为了满足纵向选择性, 按躲过被保护线路末端的最大三相短路电流来整定, 这样可以避免越级跳闸, 但不能保护线路全长, 其保护范围应不小于线路全长的 15%~20%。整定公式为

$$I_{dzI} = K_k I_{dlMAX}^{(3)} \quad (1)$$

其中: K_k 是可靠系数, 为 1.2~1.3; $I_{dlMAX}^{(3)}$ 为本线路末端最大三相短路电流。

由于瞬时速断无法保护线路全长, 可以增加一段带有短延时(0.25~0.3 s)的限时电流速断, 既能保护线路全长, 又能满足选择性和快速性的要求^[10]。其整定值和时限要与下一级线路的瞬时速断相配合, 可以作为本级线路的后备保护。整定公式为

$$I_{dzII} = K'_k I_{dz2I} \quad (2)$$

其中: K'_k 是可靠系数, 为 1.1~1.2; I_{dz2I} 为下级线路瞬时速断整定值。延时时限比下一级瞬时速断大 0.25 s, 即为 0.25 s。

要对其进行灵敏度校验, 校验公式为 $K_s =$ 保护范围末端发生金属性短路故障时的最小两相短路电流 / 保护装置的动作参数^[11]。作为主保护来说, 要求灵敏度不小于 1.5, 最低不得小于 1.25; 作为后备保护, 要求灵敏度不得小于 1.15^[11]。

定时过流保护常用来保护线路的全长, 并利用延时时间的不同, 满足纵向选择性的要求, 它不仅作为本级线路的后备保护(近后备), 还可以为下级线路提供后备保护(远后备)。整定值应躲过正常最大负荷电流 $K_{zq} I_{gm}$, 整定公式为

$$I_{dzIII} = K''_k K_{zq} I_{gm} \quad (3)$$

其中: K''_k 为可靠系数, 取 1.15~1.25; K_{zq} 为自启动系数, 取 1.5~2.5; I_{gm} 为该线路最大长时负荷电流。

要对定时过流保护进行灵敏度校验, 作为主保护, 要求不小于 1.5; 作为后备保护, 要求灵敏度大于 1.2。

三段式保护是煤矿高压电网整定计算的主要方式。在工程实践中, 对于各级 6 kV 线路出线开关, 通常选用 I 段和 III 段或 II 段和 III 段组成两段式过流保护, 其中一段作主保护, 另外一段作后备保护。因 III 段与 I 段或 II 段是相对独立的, 同时考虑到保护的快速性, 因此通常选用 I 段和 III 段组成两段式保护, I 段做主保护, III 段做后备保护。除了过流保护外, 还应当设置动作于信号的过负荷保护。具体整定方案如下。

1) 瞬时速断

考虑到煤矿短距离电缆线路较多, 对于长度仅为 1~2 km 的电缆来说, 常规的瞬时速断整定方法是行不通的, 直接的后果就是保护范围为零。这里可以采取“逆向整定”的方法: 令瞬时速断作为主保护保护线路全长。先设定一个不小于 1.5 的灵敏系数, 再用灵敏度校验公式反算出整定值^[1,10,12]。但注意一点, 该整定值必须要大于同级线路定时过流的整定值。整定公式为

$$I_{dzI} = \frac{I_{dmin}^{(2)}}{K_L} \quad (4)$$

这里, $I_{dmin}^{(2)}$ 为本级线路末端的最小两相短路电流, K_L 为设定的大于 1.5 的灵敏度。

2) 定时过流

此开关应设置定时过流保护, 动作电流按躲过线路正常最大工作电流 $K_{zq} I_{gm}$ (尖峰电流)整定。这里的正常最大工作电流, 即尖峰电流是指在短路故障切除后, 系统母线电压恢复, 部分电动机自行启动所形成的电流。该电流在工程上是用一个综合的、经验数值为 1.5~3 的自启动系数 K_{zq} 乘以线路的计算电流 I_{js} 来确定的^[10]。这里, I_{gm} 和 I_{js} 在数值上是相等的, I_{gm} 是由负荷曲线得出的半小时平均最大负荷, 是用计算电流 I_{js} 来等效的^[10]。一次整定为

$$I_{dzIII} = K_k K_{zq} I_{gm} = 1.25 \times 2 \times I_{gm} = 2.5 I_{gm} \quad (5)$$

动作时限比上一级定时过流少 0.25 s。

3) 过负荷保护

线路长时间过负荷运行会对电网安全造成严重威胁, 增大停电事故的风险^[13], 因此应设置过负荷保护。整定公式(二次值)为

$$I_{dzj} = \frac{K_k I_{gm}}{K_f n_1} = \frac{1.1 I_{gm}}{0.95 n_1} = \frac{1.16 I_{gm}}{n_1} \quad (6)$$

保护动作于信号，延时时限为 20 s。

2 改进的整定方法

在此方法中，各级变电所 6 kV 出线开关仍设置瞬时速断、定时过流和过负荷保护。这里把定时过流作为主保护，保护线路全长，动作时限比上一级定时过流少 0.25 s，并能作为相邻下一级线路的远后备保护。这里之所以把定时过流作为本线路的主保护是因为电缆每公里的阻抗很小，而煤矿电网中每级电缆线路长度通常只有 1~2 km，这样就会造成线路始末两端短路电流幅值相差很小，通常情况下瞬时速断就没有保护范围，或者保护范围非常小，达不到 15%~20% 的要求。若按照传统方法，优先考虑快速性而把瞬时速断作为主保护的话，是没有意义的。所以这里把定时过流作为主保护，而把瞬时速断作为辅助保护，只为线路的首端部分的故障提供快速跳闸即可。具体整定方案如下。

1) 式 (5) 是正规的定时过流整定方法，但在整定计算中需考虑系统故障时的运行方式，也就是说需要设置多套定值，这使得整定计算变得非常繁琐。在这里，我们可以用线路的载流量 I_y 来代替 I_{gm} ，将式 (5) 变为

$$I_{dzIII} = K_k K_{zq} I_y = 2.5 I_y \quad (7)$$

要对定时过流保护的灵敏度进行校验，校验公式为

$$K_{SIII} = \frac{I_{dmin}^{(2)}}{I_{dzIII}} \quad (8)$$

其中： $I_{dmin}^{(2)}$ 为被保护线路末端最小两相短路电流，对于近后备， $K_{SIII} \geq 1.5$ ；对于远后备， $K_{SIII} \geq 1.2$ ，远后备校验中， $I_{dmin}^{(2)}$ 为相邻下一级线路末端最小两相短路电流，若有多条线路，应取最小的短路电流。

定时过流保护的動作时限按 0.25 s 时限级差逐级向电源侧递增，但控制下井电缆的出线开关定时过流的延时时限原则上不大于 1 s。

2) 为了给线路首端部分的短路故障提供快速跳闸保护，应设置瞬时速断保护作为辅助保护。为了保证其保护范围不会越到下一级线路，动作电流按躲过本级线路末端的最大三相短路电流来整定。

因煤矿供电线路为电缆，每级线路阻抗很小(每公里约为 0.06~0.08 Ω)，且每级供电线路距离短，使得线路始末两端短路电流差异很小^[8]。因此通常情况下瞬时速断的保护范围很小，甚至为零，也就不设置此保护。这里，我们可以根据式 (9) 来判断是否设置瞬时速断保护，若

$$I_{d1min}^{(2)} - 1.15 I_{d2max}^{(3)} > 0 \quad (9)$$

则设置瞬时速断保护；否则不设置。其中 $I_{d1min}^{(2)}$ 为本线路首端最小两相短路电流； $I_{d2max}^{(3)}$ 为本线路末端最大三相短路电流。

瞬时速断的一次整定值为

$$I_{dzI} = 1.15 I_{d2max}^{(3)} \quad (10)$$

瞬时速断只要能保护线路的首端部分即可。

3) 为了防止线路所带负载长时间过负荷运行引起的高温损坏线路绝缘，应设置过负荷保护。这里同样是使用线路载流量 I_y 来进行整定的。整定公式

(二次值) 为

$$I_{dzj} = \frac{K_k I_y}{K_f n_1} = \frac{1.1 I_y}{0.95 n_1} = \frac{1.16 I_y}{n_1} \quad (11)$$

保护动作于信号，延时时限为 20 s。这里的 20 s 只是一个默认时间，工程人员可以根据实际情况进行修改。过负荷保护的整定时间要大于线路所带电动机或变压器的起动时间。如有的风机起动时间长达 40 多秒，则过负荷的整定时间最少要大于这个时间。各级过负荷之间要设置一个时限级差，3~5 s 均可。

在工程实践中，可能会出现灵敏度不符合要求的情况。煤矿电网 6 kV 出线的灵敏度，一般情况下来说都是符合要求的。这里所做的灵敏度修正是针对一些不常见的极端特殊的情况。比如说，有的煤矿为了简单，从一水平采区变电所接到二水平采区变电所后，直接就接到采区配电点了，而没有经过二水平变电所出线。这时电缆线路就会很长，有时可能会达到 6~7 km，有时甚至十几公里。虽说电缆的电抗很小，但电阻不小，我们在计算中也要考虑电阻。阻抗是按照电阻与电阻相加，电抗与电抗相加，再开平方来计算的。随着线路的增长，电缆的电阻分量在增加，当线路很长的时候，线路末端的最小两相短路电流就可能满足不了灵敏度的要求。灵敏度修正就是针对这种情况进行的。

若出现这种情况，可以按以下方法处理：理论上来说，只要灵敏度大于 1 就可以，但在实践中，由于各种因素以及误差的影响，要求灵敏度大于 1.5，至少要大于 1.25 才行。因此，我们可以采取牺牲灵敏度的方式来确定整定值。此外，我们还可以降低整定值来满足灵敏度的要求。在这个修正过程中，可以采取一些方法，例如改变电动机的起动方式，限制电动机的自起动，降低自起动系数等。但这些方法都是有下限的，即要保证灵敏度最低要大于 1.25，而且整定值最低要满足发生故障时能够可靠动作。当然，有些时候也要靠实践经验。

以定时过流保护的近后备灵敏度校验为例来说明。若式 (8) 校验不合格，这时首先可降低自启动

系数, 将 K_{zq} 的取值依次递减 0.1, 直至 $K_{zq}=1.3$ 为止, 重复计算整定值与灵敏系数, 确定最先使灵敏系数达到 1.5 的值作为整定值。若此时仍不满足, 则可以牺牲部分灵敏度, 即在计算过程中, 确定最先使灵敏系数达到 1.25 的值作为整定值。在这种情况下如果仍不满足的话, 则需要依靠实践经验了。此时, 按 $I_{dz.m}=1.5 I_y$ 确定一次整定值, 此时灵敏度必大于 1.25, 这种做法就是基于长期的工程实践中积累的经验而得来的。

《现代供电技术》中有这么一句话“在保证灵敏性方面, 以保证主保护和近后备保护的灵敏性为主, 并兼顾远后备保护的灵敏度。若远后备保护的灵敏度过低, 则放弃远后备保护^[12]”。因此, 若定时过流保护远后备灵敏度校验不合格, 仍确定 $I_{dz.m}$ 为动作值, 但该条 6 kV 馈出线不能承担所校验线路的远后备保护任务。然后再取倒数第二小的短路电流进行校验, 直到全部校验完为止。

3 整定计算改进原因分析

新方法与传统方法相比, 有下面几点改进:

(1) 新方法中没有将瞬时速断作为主保护, 来保护线路全长, 运用“逆向整定”的方法来计算整定值, 而只是当作一个辅助保护, 根据首末两端的短路电流进行判定来决定是否设置。这是因为, 若每级线路都设置瞬时速断来保护线路全长(同一灵敏度法来整定)的话, 由于两级母线之间电缆线路很短, 则相邻两级母线的最小两相短路电流相差很小。因此, 本级线路的瞬时速断电流在很多情况下对于下一级线路末端也有足够的灵敏度。因此很容易出现越级跳闸现象, 这反而扩大了事故范围。新方法是利用保护范围来进行判定的, 有保护范围就设置, 没有就不设。这正体现了设置瞬时速断的初衷, 即用该保护来为线路首端故障提供快速跳闸保护, 体现了该方法的合理性。

(2) 新方法对定时过流保护的整定进行了改进, 用线路载流量 I_y 代替了长时最大负荷电流 I_{gm} 。因线路允许载流量 I_y 不会随着系统运行方式的变化而变化, 则使用此方法进行整定, 就不必再考虑故障运行方式, 只需设置一套定值, 使整定一劳永逸。之所以可以这样做, 是因为对于多级干线式电缆电网, 由于每段干线长度一般不大于 1.5 km, 多数在 1 km 以内, 故线路始、末两端的短路电流差异很小, 这就使得定时过流的灵敏度很高, 常超过 10。实际上只要 $K_s \geq 1.5$, 保护的可靠性就有保证, 这就为在保证保护的可靠性的前提下提高动作值创造了条件。对于双回路干线式供电, 要求每一回路均应具有独立承担该供

电系统全部负荷的能力^[12]。而在选择电缆等时, 该全部负荷亦不允许大于每一回线路的允许载流量。

因此, 只要能满足 $K_s \geq 1.5$, 不论该回路实际的长时最大负荷电流 I_{gm} 是多少, 都可以用该线路的允许载流量 I_y 来代替。

此外, 由于煤矿井下高压电网大多是电缆线路, 阻抗小、距离短的特点使得发生短路时的短路电流非常大, 通常为十几到几十倍的 I_{gm} , 要远远大于 $2.5 I_{gm}$, 也就大于 $2.5 I_y$, 证明这种整定方法在数值上也是合理的。

因此, 我们可以看出, 对于 6 kV 出线开关来说, 新方法是一套以线路载流量 I_y 为基本整定参数的整定方案。因 I_y 不受运行方式的影响, 故一套整定值即可满足要求, 使整定计算得到了简化, 提高了保护的可靠性。

(3) 新方法中增加了灵敏度修正这一环节。在工程实践中, 可能会出现灵敏度不合要求的情况。我们必须想办法来修正灵敏度, 使整定计算能够继续下去。新方法中给出了灵敏度修正方案, 如牺牲部分灵敏度、调整定值等, 并以定时过流的近后备灵敏度为例进行了说明。这就给我们以后的整定计算提供了新思路, 让我们知道灵敏度不合要求时怎样处理。

4 算例

下面我们以河南大有能源某煤矿局部供电系统为算例, 运用本文中介绍的方法进行整定计算, 来验证此方法的正确性。杨村矿井下局部供电系统图如图 1 所示。已知地面 35 kV 变电所 6 kV 母线上的系统电抗 (100 MVA) 为: 最大运行方式:

$X_{x.n}^*=1.2105$; 最小运行方式: $X_{x.m}^*=1.4561$ 。

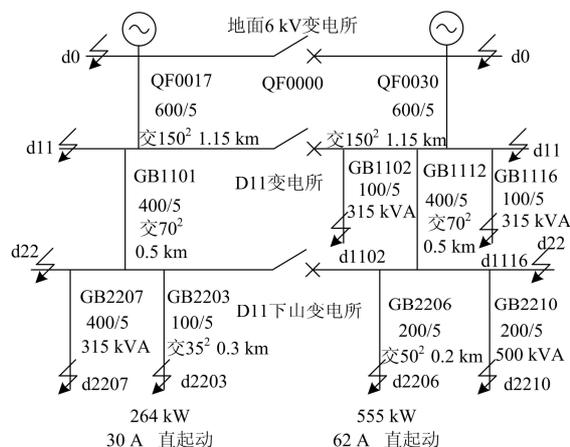


图 1 某煤矿局部供电系统图

Fig. 1 Local power supply system diagram of a coal mine

下面就运用文中所述方法进行计算论证。

1) QF0017、0030 (出线开关, 交联 150², $I_y=378$ A)。

①定时过流一次整定值为 945 A, 时限为 1.0 s (需要顾及四级结构, 地面整体保持一致)。近后备灵敏度为 5.02, 符合要求; 远后备灵敏度为 4.48 (取除变压器外最小的 $I_d^{(2)}$), 符合要求。二次整定值为 8.3 A。

②因 $I_{d1.min}^{(2)} - 1.15I_{d2.max}^{(3)} = 5.45 - 1.15 \times 6.38 < 0$, 故不设置瞬时速断。

③过负荷二次整定值为 3.8 A, 时限为 20 s。

2) GB1101、1112 (出线开关, 交联 70², $I_y=233$ A)。

线路首端最小两相短路电流为 4.74 kA; 线路末端最大三相短路电流为 5.53 kA, 最小两相短路电流为 4.23 kA。

①定时过流一次整定值为 583 A, 时限为 0.5 s。近后备灵敏度为 7.26, 符合要求; 远后备灵敏度为 6.36, 符合要求。二次整定值为 7.7 A。

②因 $I_{d1.min}^{(2)} - 1.15I_{d2.max}^{(3)} = 4.74 - 1.15 \times 5.53 < 0$, 故不设置瞬时速断。

③过负荷保护二次整定值为 3.5 A, 时限为 20 s。

运用新方法得出的整定值, 比该矿设置的整定值稍大。这是因为, 新方法是以前线路载流量 I_y 为参数进行整定的, 必然比用长时最大负荷电流 I_{gm} 得出的整定值要大。但经验证明, 在发生故障时, 该套定值能使保护可靠动作。因此, 该方法在实践上是可行的。

5 总结

本文以各级线路 6 kV 出线开关为例, 提出了一种新型的煤矿井下高压电网过流保护整定方法。相对于传统方法, 该方法在很多方面都提出了改进, 体现了其先进性, 并且简化了计算。在河南大有能源股份有限公司某煤矿使用该方法进行了整定计算, 取得了良好的效果。

参考文献

[1] 张根现, 邹有明, 陈鹏飞. 矿山过流保护技术[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2005: 176-197.
ZHANG Gen-xian, ZOU You-ming, CHEN Peng-fei. Overcurrent protection technology of the mine[M]. Beijing: Coal Industry Press, 2005: 176-197.

[2] 刘洋, 崔翔, 赵志斌, 等. 变电站接地网腐蚀诊断磁场检测系统的设计与应用[J]. 电工技术学报, 2009, 24(1): 176-182.
LIU Yang, CUI Xiang, ZHAO Zhi-bin, et al. Design and application of testing magnetic field system for corrosion diagnosis of grounding grids in substation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(1): 176-182.

[3] 季涛. 利用电磁式电压互感器实现小电流接地系统行波故障定位和选相[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 172-178.
JI Tao. Study of the fault location and fault phase position selection based on traveling waves using electromagnetic voltage transformer in neutral non-effective grounding system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 172-178.

[4] 陈奎, 孙常青, 唐轶. 矿井低压电网中性点接地方式与漏电保护技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 237-246.
CHEN Kui, SUN Chang-qing, TANG Yi. Research on neutral grounding mode and technology of leakage protection in mine low-voltage electric network[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 237-246.

[5] 袁涛, 雷超平, 司马文霞, 等. 提高接地极散流效率的冲击接地降阻分析[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 278-284.
YUAN Tao, LEI Chao-ping, SIMA Wen-xia, et al. Analysis of grounding resistance reduction effect based on enhancing impulse current leakage efficiency[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 278-284.

[6] 杨兰, 杨廷方, 曾祥君. 自适应接地距离继电器的研究[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 77-81.
YANG Lan, YANG Ting-fang, ZENG Xiang-jun. Study of adaptive grounding distance relay[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 77-81.

[7] 梁睿, 王崇林, 辛健. 煤矿电网含并联供电线路的小电流选线[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 108-113.
LIANG Rui, WANG Chong-lin, XIN Jian. Fault line selection for non-solidly earth network with parallel supply in mine power systems[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 108-113.

[8] 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(2): 56-57.
- ZHANG Gen-xian, MA Xing-he, ZHANG Chuan-shu, et al. Research on avoiding override trip system of underground high-voltage distribution network[J]. Coal Mine Electromechanical, 2009(2): 56-57.
- [9] 陈奎, 张丽, 孙常青. 煤矿高压防爆开关综合保护新技术[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 137-141.
- CHEN Kui, ZHANG Li, SUN Chang-qing. A new technology of HV flameproof switchgear comprehensive protection in coal mine[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(24): 137-141.
- [10] 邹有明. 煤矿 6 kV 电网过流保护的设置与整定[OL]. [2013-07-25].
<http://wenku.baidu.com/view/a507e14fe45c3b3567ec8b68.html>.
- ZOU You-ming. The setting of overcurrent protection of the coal mine 6 kV network[OL]. [2013-07-25].
<http://wenku.baidu.com/view/a507e14fe45c3b3567ec8b68.html>.
- [11] 李佑光, 林东. 电力系统继电保护原理及新技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 45-58, 157-171.
- LI You-guang, LIN Dong. The theory of relay protection of power system and new technology[M]. Beijing: Science Press, 2009: 45-58, 157-171.
- [12] 邹有明. 现代供电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 30-66, 156-170.
- ZOU You-ming. Modern power supply technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008: 30-66, 156-170.
- [13] 董新洲, 曹润彬, 王宾, 等. 印度大停电与继电保护的三大功能[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 19-25.
- DONG Xin-zhou, CAO Run-bin, WANG Bin, et al. India blackout and three functions of protective relay[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 19-25.

收稿日期: 2013-08-02; 修回日期: 2013-11-04

作者简介:

马星河(1979-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事煤矿智能电网的教学与科研工作; E-mail: maxinghe@hpu.edu.cn

李林蔚(1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为煤矿井下高压智能电网;

李自强(1986-), 男, 本科, 工程师, 从事工业供用电系统设备的开发与应用工作。