

# 轨道交通供电系统中两种保护方案的技术比较

■ 西门子电力自动化有限公司 姚刚 张云  
北京城建设计研究总院 傅宝文

摘要：通过对城市轨道交通供电系统中两种保护方案的基本原理及主要特点的介绍，并结合供电系统中所面临的主要问题，阐述了两种方案在解决这些问题时所带来的技术差异。

关键词：光纤纵差保护 电流选跳保护 供电区间 选择性

## 1 引言

目前，国内轨道交通供电系统中线路保护具有两种解决方案，一种是当前主流的线路光纤纵差保护原理，另一种是经济型的电流选跳保护原理。这两种保护解决方案存在比较大的技术差异，通过这些技术差异的比较，分析其对轨道交通供电系统可靠性带来的影响。

## 2 轨道交通供电系统概述

### 2.1 供电系统的结构

国内轨道交通的供电系统通常采用 110kV/35kV 两级电压集中供电方式，全线设置两座或三座 110kV/35kV 主变电站。整个供电系统分成若干个供电区间，各供电区间之间设

置联络开关连接。每个供电区间由相应的主变电站提供两路电源，且供电区间内的各车站变电所（牵引降压混合变电所、降压变电所及跟随式降压变电所）采用双环网供电方式供电。各车站内的变电所均采用单母分段的供电结构。如图 1 所示为一个供电区间供电系统结构。

### 2.2 供电系统的运行方式

#### 2.2.1 正常运行方式

主变电站的两台主变分列运行；站内 35kV 系统两段母线独立运行，为各供电区间提供两路电源；站内的 35kV 母联断路器处于分闸状态。

各车站变电所两回 35kV 电源进线各自独立运行，为相应母线段的负载供电，所内的 35kV 母联断路器处于分闸状态。

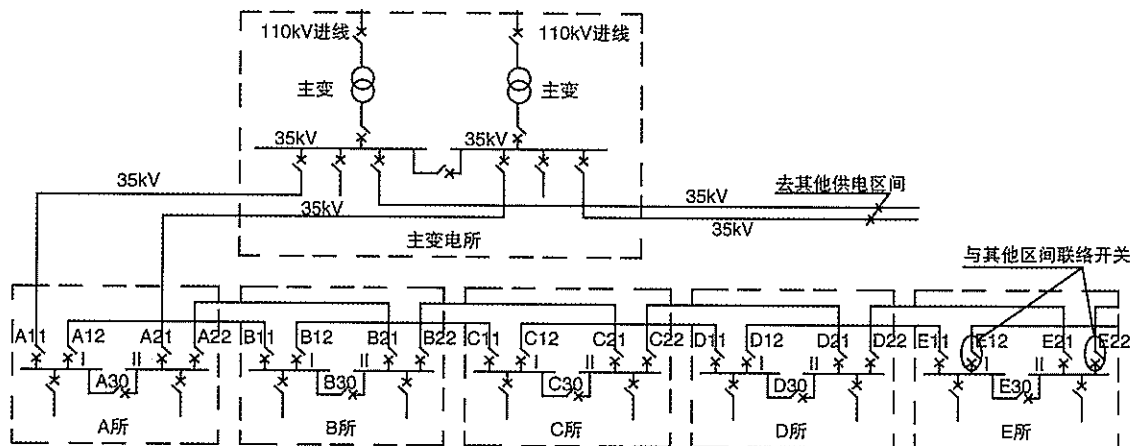


图 1 轨道交通的供电区间系统结构示意图

## 轨道交通专题

Safe Automation of electric power  
技术应用

两个相邻供电区间的联络开关处于分闸状态，各供电区间独立运行。

### 2.2.2 故障运行方式

当主变电站的一台主变出现故障或相应的 110kV 进线电源出现故障时，在保护装置跳开主变压器低压侧 35kV 断路器后，站内的 35kV 母联断路器合闸，由另一台主变向由该主变电站供电的区间供电。

当主变电站的两台主变同时出现故障或两回 110kV 进线电源同时出现故障时，在保护装置跳开主变压器低压侧 35kV 断路器后，供电区间的联络开关合闸，由相邻的供电区间提供电源恢复对本区间的供电。

当各车站变电所一回 35kV 电源进线出现故障，在保护装置切除故障后，所内 35kV 母联断路器合闸，由另一回 35kV 电源进线供电。

## 3 继电保护系统对该供电结构需要解决的几个主要问题

### 3.1 整个保护系统的速动性与选择性的问题

城市轨道交通供电系统中，各供电区间采用多级供电方式。各级断路器距离主变电站越近时，通过其负荷电流越大，当故障发生的地点距离主变电站越近时，故障电流也越大，因此要求动作时间越短。而过流保护为了满足保护系统的选择性，在距离主变电站越近时，其设定的保护动作时限要求越长。

### 3.2 整个保护系统的可靠性问题

城市轨道交通对于居民生活越来越重要，这对轨道交通供电系统的稳定性提出了更高的要求，因此保护系统配置的可靠性也显得尤为重要。

### 3.3 对运行方式的自适应问题

由于多方面的原因，很多城市轨道交通的建设项目需要分期进行，因此后期保护系统的建设对前期已运行的系统所带来的影响应该避免。放眼长远，还应该考虑到以后对整个二次保护系统升级的问题。

## 4 轨道交通供电系统中线路保护的两种方案

当前，对于轨道交通供电系统中供电线路的保护有两种解决方案：一种是目前市场主流的光纤纵差保护 + 后备过流保护；另一种是电流选跳保护 + 后备过流保护。其各自的基本原理与主要特点如下：

### 4.1 光纤纵差保护

#### 4.1.1 基本原理

纵联差动保护是以电流比较为基础的。在线路的两端各安装一台保护装置，两侧的保护装置分别测量本地的电流，

同时通过光纤连接将对侧的电流参数传动到本地保护装置中进行电流大小和相位的比较，当比较电流的差值超出设定的整定值，线路两端的断路器就会同时跳闸。电流差动保护的原理接线如图 2 所示，我们以西门子线路差动保护的原理为例来说明。

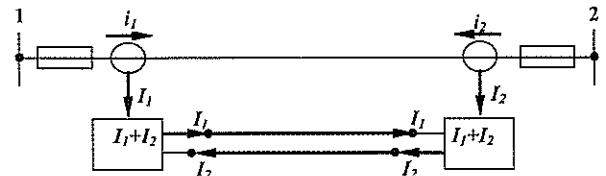


图 2 电流纵差保护原理示意图

(1) 普通差动段的计算公式：

$$I_{diff} = |I_1 + I_2|$$

$$I_{rest} = I_{diff} > + \sum (I_{error})$$

式中：

$I_1$ 、 $I_2$  —— 线路两侧的电流，电流的方向均为指向线路；

$I_{diff}$ 、 $I_{rest}$  —— 差动电流和制动电流；

$I_{diff} >$  —— 设定最小差动启动值；

$\sum (I_{error})$  —— 实时动态综合误差电流之和；

该方式直接反映由两侧 CT 流过实际电流所产生的测量误差和对时误差，因此比用两侧电流绝对值之和作为制动量的保护有更高的灵敏度，更容易检测出高阻故障。

(2) 高速差动段的计算公式：

$$\Delta Q_{diff} = |\hat{Q}_1 + \hat{Q}_2|$$

$$\Delta Q_{rest} = |\hat{Q}_1| + |\hat{Q}_2|$$

式中：

$\Delta Q_{diff}$  —— 差动电荷量；

$\Delta Q_{rest}$  —— 制动电荷量；

$\hat{Q}$  —— 特定时间段电荷矢量值；

该方式是同时对流过线路二侧 CT 的二次电流按时间进行快速积分，分别得到某一个特定时间段（5ms 一个时间窗）内流过线路二侧 CT 的电荷数量  $Q_1$ 、 $Q_2$ ，用于快速切除区内外金属故障。

#### 4.1.2 主要特点

(1) 光纤纵差保护对线路两端的电流做矢量差值比较，与负载大小无关。保护灵敏度高。

(2) 光纤纵差保护动作迅速，装置出口时间不大于 16ms，保护速动性强。

(3) 光纤纵差保护对于系统的适应性强，仅与被保护的

线路有关，不受供电系统运行方式改变的影响，选择性强，保护设置简单易操作，维护方便。

(4) 由于采用主保护装置（差动保护）与后备保护装置独立设置的方式，后备保护装置提供持续不间断的保护，当光纤通道或主保护装置出现故障时，供电系统始终运行在有保护的情况下，提高系统的可靠性。

## 4.2 电流选跳保护

### 4.2.1 基本原理

电流选跳保护是以过流保护装置间的直接通信功能为基础，它通过逻辑编程，对线路两端过流保护装置的电流元件动作与否进行比较来判别线路故障区段，实现选择性地切除故障线路。我们以图 3 所示来说明电流选跳保护的基本原理：

图中设置 4 个车站变电所：A 所、B 所、C 所和 D 所，且每车站变电所仅示意出其中一段母线。其中 A11 代表 A 站的进线保护，A12 代表 A 站的出线保护，同理依此类推。图中 4 个车站变电所内的进出线保护装置之间采用数据通信线连接。供电系统正常运行时，供电方向为 A→B→C→D。对于选跳保护来说，在点 1 出现故障时：继电保护 A12 的过流元件启动，B11 的过流元件不启动。A12 保护装置和 B11 保护装置通过数据连接线交换信息后，经过装置内部预存的逻辑判断故障点的地点为 A 所与 B 所之间。此时，由 A12 和 B11 的保护发出跳闸指令，A12 和 B11 的断路器跳闸，切除故障线路。电流选跳的过流保护启动判据为：

$$I_{zd} = K \cdot I_N$$

式中：

$I_N$ ——实际流过断路器的最大负荷电流

$K$ ——大于 1 的整定系数，根据工程实际负荷调整

$I_{zd}$ ——整定电流值

### 4.2.2 主要特点

(1) 电流选跳逻辑只判别两侧的过流元件是否启动，各

开关的保护之间通过通讯传输电流元件的启动信号（或装置故障闭锁信号），而并不传输实际电流信号，也就是说，电流选跳系统并不对被保护线路进行差流计算。

(2) 被保护线路两侧使用过流保护来实现区内外故障的识别，保护原理和算法简单，此解决方案的装置成本较低。

## 5 两种线路保护方案的性能比较

### 5.1 保护性能

在实际项目中，两种方案通常均采用配置主保护装置 + 后备保护装置来实现。装置正常运行时，通过主保护装置（光纤纵差保护或电流选跳保护）判断故障点发生的位置，切除相应的故障线路。这时两种方案的动作时间差别比较大：对于金属性故障，差动保护动作跳两侧断路器动作时间小于 12ms；而电流选跳受过流保护原理的限制，其过流元件固有的启动时间为 20ms，保护通讯延时约 5ms，保护内部出口继电器动作时间约 5ms，最快跳闸出口时间为 30ms，动作迟缓，故障切除时间长，减少一次设备的使用寿命。

光纤纵差保护使用分相差动加零流差动的原理，其通常能检测出 0.1A 的二次侧差流且与负荷电流的大小无关，对高阻故障灵敏；电流选跳保护必须躲开负荷电流，过流元件的启动值必须设的较高，因此对故障不灵敏，无法清除高阻故障，级联的区间越多、离电源端越近问题越严重，因此灵敏度低。

### 5.2 对故障的选择性和可靠性

光纤纵差保护是专门针对 35kV 及以上电压等级的输配电线路设计，国家对其有严格的动模考核指标，光纤电流纵差保护能对区内外单相和多相永久故障、转换性故障均能正确可靠动作。而电流选跳方案只能识别单一故障，对区内外同相多点故障是无法区分的，可靠性低，电流选跳方案无法通过电力系统的动模试验，提供入网许可报告，这给轨道交通系统的运行带来风险和隐患。

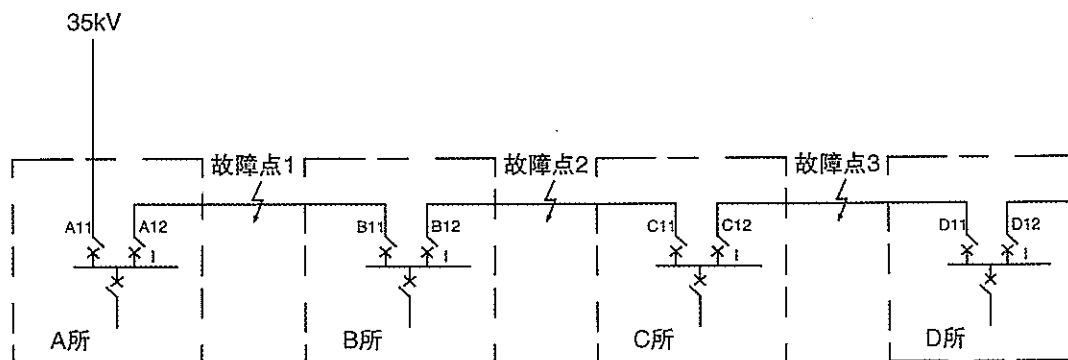


图 3 电流纵差保护原理示意图

### 5.3 对于供电系统运行方式适应性, 两种方案存在很大的差别

光纤纵差保护方案中差动保护的设置仅与被保护线路有关, 不受系统运行方式的改变和未来扩建的影响, 保护装置内部逻辑不用作出相应的变动。但电流选跳方案由于受选跳原理的限制, 必须根据前后保护装置中过流元件动作的信号来判断故障点位置从而有选择性的切除故障线路。例如: 当一个供电区间两回进线电源均出现故障时, 合上联络开关, 由相邻供电区间为本区间供电, 光纤纵差解决方案可以很方便地适应这种运行模式而电流选跳方案需要额外的判据, 且实现切换的方法同样存在额外的风险。

对于已经使用光纤纵差解决方案的轨道交通前期已投运的项目, 在后期建设中用户可根据前期的运行情况自由选择不同品牌的供货商; 但对于电流选跳方案则用户必须接受同一品牌的解决方案。

### 6 关于后备过流保护级差配合的思考

当主保护(光纤纵差保护或电流选跳保护)由于各种原因(如: 装置通讯口故障、光纤通道故障等)退出运行时, 主保护被闭锁, 同时投入后备过流保护。这时, 两种保护方案的选择性都只能依靠过流保护的时限来完成。在这种情况下, 由于各供电区间(如图1)均采用梯级供电方式, 区间内的线路后备过流保护在时限上的级差配合是需要着重思考的问题。

首先, 两种方案实现后备过流保护不越级的原理是一样的。它们都是利用主保护通道传送闭锁信号及保护内部的辅助逻辑来闭锁后备过流保护的动作用, 以实现后备过流保护不越级。

其次, 通过通讯方式闭锁后备过流保护不动作来实现不越级存在一定的风险。由于后备过流保护装置被外部的信号闭锁, 使得原来本应该独立的后备过流保护变成失去独立性的一个大的保护系统的一部分。当系统的供电线路中出现一个故障点时, 如图3中的故障点3, C12后备过流保护功能启动, 并向B12, B11, A12, A11过流保护装置发出闭锁信号, 如果B12与C11段的通讯中断或保护装置损坏, A11和A12后备过流保护将不会被闭锁, 同样会出现越级现象。

再次, 这种基于整个通讯的可靠性和复杂逻辑来实现的后备保护不越级功能, 在实际工程中是很难通过试验来真实验证, 其实现的基础是整个系统内所有保护装置之间的通讯正确且每一个保护装置都工作正常, 其只考虑单一故障发生的情况而忽略多重故障的可能性, 因此从原理上存在缺陷, 且对以后工程扩建和改造带来很大的施工难度。

因此, 作者认为要从根本上解决以上问题还是需合理布置供电的电源点, 减少供电区间内的梯级数量来提高供电系统的可靠性。即使考虑到投资成本的原因, 也可采取供电区间内几个供电段使用同一个后备过流定值, 以减少越级的数量。

### 7 结束语

对于轨道交通供电系统中的线路保护, 当前主流的光纤纵差保护方案与电流选跳保护方案均能满足不同用户的要求。但是从保护的技术性能及可靠性上说, 光纤纵差保护方案要远优于电流选跳方案, 而电流选跳代替光纤差动可以降低成本, 能满足部分项目资金紧张、对供电系统可靠性要求不高用户的需求, 但会带来后期维护和扩建的问题。

### 参考文献

- [1] 唐涛、诸伟楠、杨仪松. 发电厂与变电站自动化技术及其应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [2] Siemens. SIPROTEC 7SD610 V4.2, Differential Protection Relay, Manual No.C53000-G1176-C145-2
- [3] 马啸松、赵凯. 电流选跳保护在轨道交通供电系统中的应用. 上海电气技术 2007 No.2

### 作者简介

姚刚, 男, 西门子电力自动化有限公司技术顾问, 长期从事轨道交通保护应用研究。

张云, 男, 西门子电力自动化有限公司技术经理, 长期从事保护和监控系统的应用研究。

傅宝文, 男, 北京城建设计研究总院高级工程师, 负责国内多条轨道交通线路供电系统设计、咨询工作。