

# 西南交通大学

## 课程设计（实训）报告

题    目	城轨供电系统继电保护设计
专    业	电气工程与智能控制
班    级	智控 2020-04 班
学    号	2020117568
姓    名	伍维
指导教师	杨乃琪

电气工程学院

二〇二三年九月至二〇二三年十一月

西南交通大学  
本科课程设计

城轨供电系统继电保护课程设计

年    级：智控 2020 级-04班  
学    号：2020117568  
姓    名：伍维  
专    业：电气工程与智能控制  
指导老师：杨乃琪

2023 年    11 月

学生姓名	伍维	学生学号	2020117568	
学生专业	电气工程与智能控制	学生班级	智控 2020-04 班	
发题日期	2023 年 9 月 22 日	完成日期	2023 年 11 月 19 日	
课程名称	城轨供电系统继电保护课程设计		指导教师	杨乃琪
设计题目	城轨变电站继电保护设计(第 1 组)			
<p><b>课程设计（实训）主要目的：</b></p> <p>（1）能把所学过的理论知识进行综合运用，从而达到巩固、加深及扩大专业知识，并使之系统化。</p> <p>（2）正确领会和贯彻国家的方针、技术经济政策，培养正确的设计思想，并掌握设计的基本方法。</p> <p>（3）培养运用所学的理论知识，提高独立分析和解决问题的能力，掌握实际工程设计中的一些基本技能。</p> <p>（4）培养作为工程技术人员必须具备的计算、绘图、使用规程、手册、资料及编写设计说明书等的技能。</p>				
<p><b>原始资料：</b></p> <p>地铁牵引变电所图纸及相关资料（另附）</p>				
<p><b>课程设计（实训）主要任务：</b></p> <p><b>2.1 要求完成的主要任务：</b></p> <p>（包括课程设计工作量及其技术要求，以及说明书撰写等具体要求）</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) 牵引变电所继电保护方案的讨论。</li> <li>2) 设备选型。</li> <li>3) 整定计算。</li> <li>4) 讨论说明。</li> <li>5) 整理成册。</li> </ol> <p><b>2.2 设计文件应包括9部分内容</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1、设计任务书</li> <li>2、目录</li> <li>3、方案讨论说明</li> <li>4、整定计算原则</li> <li>5、设备选型</li> <li>6、分析说明</li> </ol>				

7、附图			
8、参考资料			
9、后记			
课程设计（实训）进度安排：（共 8 周）			
序号	内容安排	时间安排	
1	根据布置课程设计内容、熟悉课程设计的要求	1 周	
2	完成城轨供电方案的讨论，绘制主变电所、中压环网、牵引降压混合变电所、降压变电所主接线图	2 周	
3	完成高压系统保护配置、中压系统保护配置、直流系统保护配置	2 周	
4	各种系统保护配置的原理及整定原则，保护设备选型，绘制保护逻辑图	1 周	
5	根据降压所给出的基本参数，对各级保护进行整定计算及保护配合验证	1 周	
6	按照要求整理课程设计报告	1 周	
课程设计（实训）参考文献：			
[1]. 张保会，尹项根 主编.电力系统继电保护.北京:中国电力出版 2005			
[2]. 贺家李,宋从矩，李永丽，董新洲.电力系统继电保护原理. 北京：中国电力出版社，2004，增订版			
[3]. 上海申通地铁集团有限公司 编著.城市轨道交通变配电技术. 北京：中国铁道出版社,2014			
[4].潘启敬 主编.牵引供电系统继电保护. 北京：中国铁道出版社， 1993			
[5].丁毓山，南俊星 主编.微机保护与综合自动化系统. 北京：中国水利电力出版社，2002 年 4 月.			
[6] 张玉诸.发电厂及变电所的二次接线，华北电力学院			
[7] 王维俭.电气主设备继电保护原理与应用，1996 年 1 月			
[8] 各种继电器产品样本			
[9] 各种设计施工图			
成绩		指导教师签字	



## 摘 要

随着当今科技发展与国家交通强国相关政策扶持，城市轨道交通已经成为了我国交通运输行业的主力军。城市轨道交通运输能力强、准时性高、速达性高、舒适性高、安全性好、系统运营成本低、污染小的特点在大中型城市中颇具优势，近年来，我国多个城市规划、建设并投入使用城市轨道交通线路，带动区域经济的高速发展，为我国国民经济增速带来了良性循环的效果。城市轨道交通供电系统作为一种电力系统，在运行中往往难以避免出线故障，因此需为其配置成套的继电保护装置。而在城市轨道交通中主要采用直流牵引供电方式，其供电系统与轨道交通牵引系统存在差异，因此其继电保护方案和设备也存在些许差异。通过对城市轨道交通供电系统的接线形式进行讨论和分析可设计出典型的主变电所、中压环网、牵引降压混合变电所、降压变电所电气主接线图，进而根据继电保护的要求及整定原则进行相应整定计算，以完成城市轨道交通高压系统、中压系统以及直流部分的继电保护设备选型及相应逻辑图的绘制。

**关键词：**城轨供电系统; 继电保护; 整定计算; 设备选型

## Abstract

With the current technological advancements and support from national policies related to the development of a strong transportation network, urban rail transit has become a cornerstone of China's transportation industry. Urban rail transit is characterized by its robust transport capacity, high punctuality, rapid accessibility, passenger comfort, safety, low operational costs, and minimal environmental impact, making it a highly advantageous mode of transportation in large and medium-sized cities. In recent years, numerous Chinese cities have planned, constructed, and put into operation urban rail transit lines, driving rapid regional economic growth and contributing to a positive feedback loop for the country's overall economic development.<sup><empty citation></sup> The power supply system for urban rail transit, as an electrical system, often encounters inevitable line faults during its operation. Consequently, it requires a comprehensive set of relay protection devices. In urban rail transit, the predominant method of traction power supply is direct current (DC), which differs from the power supply systems in other rail transportation systems. Therefore, the relay protection schemes and equipment for urban rail transit exhibit some differences. By discussing and analyzing the wiring configurations of the power supply system for urban rail transit, we can design typical electrical connection diagrams for primary substations, medium-voltage ring networks, mixed traction and voltage reduction substations, and voltage reduction substations. Subsequently, based on the requirements and principles of relay protection, we can perform the relevant setting calculations to determine the selection of relay protection equipment for the high-voltage system, medium-voltage system, and DC section of urban rail transit, along with the corresponding logic diagrams.

**Key words:** Urban Rail Transit Power Supply System; Relay Protection; Setting Calculations; Equipment Selection

# 目 录

摘要 . . . . .	II
Abstract . . . . .	III
第 1 章 继电保护概述 . . . . .	1
1.1 继电保护任务 . . . . .	1
1.2 继电保护整定原则 . . . . .	1
1.2.1 继电保护种类及整定原则 . . . . .	1
1.2.2 变压器保护整定原则 . . . . .	2
1.2.3 三段式电流保护 . . . . .	2
1.2.4 阶段式电流保护 . . . . .	2
1.3 继电保护装置基本要求 . . . . .	2
1.3.1 选择性 . . . . .	2
1.3.2 速动性 . . . . .	2
1.3.3 灵敏性 . . . . .	3
1.3.4 可靠性 . . . . .	3
1.4 继电保护的分类 . . . . .	3
1.5 继电保护装置维护的相关规程 . . . . .	4
第 2 章 工程概况 . . . . .	5
2.1 供电方式 . . . . .	5
2.2 供电电压方式 . . . . .	6
2.3 主所数目 . . . . .	6
2.4 牵引供电系统和动力照明系统采用何种方式 . . . . .	7
2.5 主接线形式分析 . . . . .	7
2.5.1 主接线方案比较分析 . . . . .	8
2.5.2 主变压器接线形式 . . . . .	9
2.6 牵降混合所主接线分析 . . . . .	10
2.6.1 35KV 交流侧牵引降压混合所主接线 . . . . .	10
2.6.2 1500V 直流侧牵引降压混合所主接线 . . . . .	11
2.7 降压所主接线 . . . . .	12



2.7.1	中压主接线和运行方式 . . . . .	12
2.7.2	直流主接线和运行方式 . . . . .	12
2.7.3	降压部分 . . . . .	14
<b>第 3 章</b>	<b>主变电所保护配置 . . . . .</b>	<b>15</b>
3.1	110KV 侧环进线保护 . . . . .	15
3.1.1	过电流保护 I 与 II—跳闸 . . . . .	15
3.1.2	零序过电流保护 I 与 II—跳闸 . . . . .	15
3.2	110KV 侧环出线保护 . . . . .	15
3.2.1	过电流保护（或低压过流）—跳闸 . . . . .	16
3.3	变压器 35KV 侧保护 . . . . .	16
3.3.1	过电流（低压过流）保护—跳闸 . . . . .	16
3.3.2	零序过电流保护—跳闸 . . . . .	17
3.4	35KV 接地变保护 . . . . .	17
3.4.1	电流速断—跳闸 . . . . .	17
3.4.2	过电流-跳闸 . . . . .	17
3.5	35KV 所用变保护 . . . . .	17
3.5.1	过电流保护 . . . . .	17
3.5.2	零序过电流保护 . . . . .	17
3.5.3	反时限过电流保护 . . . . .	17
<b>第 4 章</b>	<b>牵引降压混合变电所保护配置 . . . . .</b>	<b>19</b>
4.1	35KV 进线保护 . . . . .	19
4.1.1	过电流保护 . . . . .	19
4.1.2	零序过电流保护 . . . . .	19
4.1.3	差动保护 . . . . .	19
4.2	35KV 出线保护 . . . . .	20
4.3	35KV 母联保护 . . . . .	20
4.3.1	延时速断保护 . . . . .	20
4.3.2	零序过电流保护 . . . . .	20
4.3.3	后加速过电流保护 . . . . .	20
4.3.4	后加速零序过电流保护 . . . . .	20
4.4	整流机组保护 . . . . .	21
4.4.1	电流速断保护 . . . . .	21
4.4.2	过电流保护 . . . . .	21
4.4.3	反时限过电流保护 . . . . .	21
4.4.4	零序过电流保护 . . . . .	21
4.4.5	重负荷保护 . . . . .	22

4.4.6	过负荷保护	22
4.4.7	温度保护	22
4.5	配电变压器保护	22
4.6	电流速断保护	22
4.6.1	反时限过电流保护	22
4.6.2	零序过电流保护	22
4.6.3	温度保护	23
4.7	直流 1500V 系统保护	23
4.7.1	1500V 馈线保护	23
4.7.1.1	$I_{max}$ 最大电流	23
4.7.1.2	$\Delta I$ 电流增量	23
4.7.1.3	$\frac{di}{dt}$ 电流上升率	23
4.7.1.4	$I_{DMT}$ 定时限过流	24
4.7.1.5	热过负荷保护	24
4.7.2	大电流脱扣	24
4.7.2.1	双边联跳	24
4.7.3	钢轨电位限制	24
4.7.4	负极柜	24
4.7.4.1	电压型框架保护	24
4.7.4.2	电流型框架保护	24
第 5 章	降压所整定计算	25
5.1	电力变压器开关整定值计算	25
5.1.1	311 开关保护装置速断保护 ( $I >>$ ) 整定计算	26
5.1.2	311 开关保护装置过电流保护 ( $I >$ ) 整定计算:	26
5.1.3	311 开关保护装置反时限过电流保护整定计算:	26
5.2	与上游 10kV 断路器整定配合	26
5.3	与下游 400kV 断路器整定值配合	26
第 6 章	分段母线 (非环网) 继电保护逻辑图分析	27
6.1	10s 维持触发	28
6.2	自投跳进线 1	28
6.3	自投合闸	28
6.4	自投跳进线 2	28
6.5	过滤零流跳闸	29
6.6	下一级断路器失灵跳闸	29
6.7	断路器合闸允许	29

第 7 章 课程优化建议以及自我反思 . . . . .	31
7.1 课程优化建议 . . . . .	31
7.2 个人反思 . . . . .	31
致谢 . . . . .	33
参考文献 . . . . .	35



# 第 1 章 继电保护概述

## 1.1 继电保护任务

为了实现继电保护装置的任务，必须在技术上满足四个基本要求：选择性、速动性、灵敏性和可靠性。对于用于继电器跳闸的继电保护，它应同时满足这四个基本要求。而对于用于信号传递以及仅反映不正常运行情况的继电保护装置，可以放宽其中一些要求。

## 1.2 继电保护整定原则

### 1.2.1 继电保护种类及整定原则

#### 1. 差动电流速断保护

整定原则包括躲开设备启动时最大负荷电流、外部短路时的不平衡电流、变压器最大励磁涌流等条件。

#### 2. 纵差保护

整定原则基于躲过设备启动时的不平衡电流，通常使用比率制动系数  $K$  来计算最大制动系数。

#### 3. 瞬时电流速断保护

整定依据躲过线路末端的最大故障电流。

#### 4. 定时限电流速断保护

整定需要配合相邻元件末端的最大三相短路电流或相邻元件电流速断保护的動作电流，选择两个条件中较大的整定值。

#### 5. 过电流保护

整定基于分支线上设备的最大起动电流之和。

#### 6. 过负荷保护

整定依据额定负荷电流。

#### 7. 低电压保护

整定需要考虑设备起动时供电母线的最小允许电压，以及可靠系数和电压继电器的返回系数。

#### 8. 过热保护

过热保护的整定需要考虑发热时间常数和散热时间。

#### 9. 接地保护

整定基于外部最小单相接地故障电流。

### 1.2.2 变压器保护整定原则

#### 1. 差动电流速断保护

整定原则包括躲开变压器的最大负荷电流、外部短路时的最大不平衡电流、变压器最大励磁涌流。

#### 2. 零序差动保护

整定需要考虑外部单相接地短路时的不平衡电流，低压侧母线三相短路电流，分支线上需要自起动的电动机的最大起动电流之和，以及低压侧零序过电流保护的整定。

#### 3. 高压侧过负荷保护

对称过负荷保护的動作电流按照额定电流进行整定。

### 1.2.3 三段式电流保护

三段式电流保护包括瞬时电流速断保护、限时电流速断保护和定时限过电流保护。瞬时电流速断保护作为线路首端的主保护，限时电流速断保护作为近后备和末端的主保护，定时限过电流保护作为近后备和远后备。

这种三段式电流保护适用于不同情况，以确保线路的可靠保护。

### 1.2.4 阶段式电流保护

阶段式电流保护包括无时限电流速断、带时限电流速断和过电流保护。这些保护装置的组合构成了一整套输电线路阶段式电流保护系统，可以根据具体需要选择装置的数量和类型。

## 1.3 继电保护装置基本要求

### 1.3.1 选择性

选择性意味着在电力系统的设备或线路发生短路时，继电保护只需将故障的设备或线路从电力系统中切除。如果故障设备或线路的保护或断路器无法动作，相邻设备或线路的保护应负责切除故障。

### 1.3.2 速动性

速动性表示继电保护装置应能够尽快切除故障，以减少设备和用户在高电流、低电压条件下的运行时间，从而降低设备的损害程度，并提高系统的并行运行稳定性。

通常需要快速切除的故障包括：(1) 使发电厂或重要用户的母线电压降至有效值以下（通常为额定电压的 0.7 倍）。(2) 大容量发电机、变压器和电动机的内部故障。(3) 中、低压线路导线截面太小，不允许延迟切除以避免过热。(4) 可能危及人身安全或对通信系统造成严重干扰的故障。故障切除时间包括保护装置和断路器的动作时间。通常，快速保护的动作为 0.04 秒至 0.08 秒，最快可达 0.01 秒至 0.04 秒。一般断路器的跳闸时间为 0.06 秒至 0.15 秒，最快可达 0.02 秒至 0.06 秒。对于反应非正常运行情况的继电保护装置，通常不需要快速动作，而应根据选择性的条件带有延迟的信号。

### 1.3.3 灵敏性

灵敏性表示电气设备或线路在受到保护的范围内发生短路故障或不正常运行情况时，保护装置的响应能力。具备良好灵敏性的继电保护能在规定的范围内对各种短路位置和类型作出正确响应，即使存在过渡电阻或在系统的最大和最小运行方式下也能可靠动作。系统的最大运行方式指被保护线路末端短路时，系统等效阻抗最小，因此保护装置需要能够在最大负荷下快速响应。系统的最小运行方式下，即在同样的短路情况下，系统等效阻抗最大，要求保护装置在此情况下也能可靠动作。保护装置的灵敏性通过灵敏系数来衡量。

### 1.3.4 可靠性

可靠性包括安全性和可信赖性，这是继电保护的最根本要求。安全性要求继电保护在不需响应时可靠地保持不响应，以避免误动。可信赖性要求继电保护在规定的保护范围内出现应该响应的故障时可靠地响应，以避免拒动。继电保护的误动和拒动都可能对电力系统造成严重危害。尽管针对相同的电力元件，随着电网的发展，保护不误动和不拒动对系统的影响也会有所变化。这四个基本要求是设计、配置和维护继电保护的基础，也是分析和评估继电保护性能的依据。虽然这些要求之间可能存在矛盾，但在实际工作中，需要根据电网结构和用户需求进行综合考虑。

## 1.4 继电保护的分类

### 1、按被保护对象分类

1. 输电线保护 2. 主设备保护（如发电机、变压器、母线、电抗器、电容器等保护）

### 2、按保护功能分类

1. 短路故障保护 2. 主保护 3. 后备保护 4. 辅助保护 5. 异常运行保护 6. 过负荷保护 7. 失磁保护 8. 失步保护 9. 低频保护 10. 非全相运行保护等

### 3、按保护装置进行比较和运算处理的信号量分类

1. 模拟式保护 2. 机电型 3. 整流型 4. 晶体管型 5. 集成电路型（运算放大器） 6. 数字式保护 7. 使用微处理机和微型计算机的保护装置，反映的是经过采样和模/数转换后的离散数字量。

#### 4、按保护动作原理分类

1. 过电流保护 2. 低电压保护 3. 过电压保护 4. 功率方向保护 5. 距离保护 6. 差动保护 7. 纵联保护 8. 瓦斯保护等

这些分类方式有助于对继电保护装置和系统进行更系统化的管理和理解，以确保电力系统的可靠性和安全性。

## 1.5 继电保护装置维护的相关规程

### 一、二次回路检验（通用部分）

在进行被保护设备的断路器、电流互感器以及电压回路与其他单元设备的回路完全断开之后，方可进行检验。

### 二、电流互感器二次回路检查

检查电流互感器二次绕组的所有二次接线是否正确，端子排引线螺钉是否可靠。检查电流二次回路的接地点和接地状态。每个电流互感器的二次回路必须只有一个接地点。对于由多组电流互感器二次回路组成的情况，应在有直接电气连接的地方设置一个接地点。

### 三、电压互感器二次回路检查

检查电压互感器二次绕组的所有二次回路接线是否正确，端子排引线螺钉是否可靠。为确保接地的可靠性，不得将各电压互感器的中性线连接到可能断开的断路器或接触器上。对于独立的二次回路，与其他互感器二次回路没有直接电气联系的情况下，可以在控制室或开关站实现一点接地。检查电压互感器二次回路中所有熔断器（自动开关）的装设地点、熔断（脱扣）电流是否适当（自动开关的脱扣电流需通过试验确定）、质量是否良好，能否保证选择性，以及自动开关线圈阻抗值是否合适。检查串联在电压回路中的断路器、隔离开关以及切换设备触点接触的可靠性。测量电压回路自互感器引出端子到配电屏电压母线的每相直流电阻，并计算电压互感器在额定容量下的压降，其值不应超过额定电压的 3 %。

### 四、二次回路绝缘检查

在对二次回路进行绝缘检查之前，必须确认所有断路器、电流互感器已断电，交流电压回路已与其他单元设备的回路断开，并且与其他回路隔离良好。只有在这种情况下才允许进行绝缘测试。在进行绝缘测试时，需要注意以下事项：

1. 试验线连接必须牢固。
2. 在进行每项绝缘试验后，必须对试验回路进行放电。
3. 对于母线差动保护、断路器失灵保护和安全自动装置等情况，如果不可能同时停电所有被保护的设备，那么绝缘电阻检验必须分段进行，即每次只测定一个被保护单元



所属回路的绝缘电阻。

#### 五、断路器、隔离开关二次回路的检验

继电保护检验人员需要了解以下信息：设备的技术性能和调试结果。电保护屏柜引出到断路器（包括隔离开关）二次回路端子排的电缆线连接的正确性以及螺钉的压接可靠性。此外，继电保护检验人员还需要了解以下内容：

1. 断路器跳闸线圈和合闸线圈的电气连接方式，包括防止断路器跳跃回路和三相不一致回路等措施。
2. 与保护回路相关的辅助触点的状态、开闭时间、构成方式以及触点容量。
3. 断路器二次操作回路中气压、液压等监视回路的工作方式。
4. 断路器二次回路的接线图。
5. 断路器跳闸和合闸线圈的电阻值以及在额定电压下的跳闸和合闸电流。
6. 断路器的跳闸电压和合闸电压，其值应符合相关规程的规定。
7. 断路器的跳闸时间、合闸时间以及三相触头不同时开闭的最大时间差，不应超过规定值。

#### 六、运维和能力提升

此部分涉及到对其他设备的运维和技能提升，需要继电保护检验人员了解和熟悉设备的操作和维护程序，以提高设备的可靠性和性能。

## 第 2 章 工程概况

### 2.1 供电方式

在我国，用电负荷根据重要程度可分为一级负荷、二级负荷和三级负荷。其中一级负荷应由两路独立电源供电，当任何一路电源发生故障中断供电时，另一路应能保证继续供电。在城市轨道交通供电系统中，牵引用电负荷为一级负荷，而动力照明等用电负荷根据实际情况可分为一级、二级或三级负荷。城市轨道交通的外部电源供电方案应根据供电公司线网规划和城市电网的具体情况进行规划设计，而不应局限在某一条线路上。根据实际情况的不同，外部电源方案可分为集中供电方式、分散供电方式和混合供电方式。

现我国大多数城市地铁多采用集中供电方式，而有轨电车一般采用分散供电方式或混合供电方式。

集中供电方式是指在线路的适当站位，根据总容量的要求设置主变电所，由发电厂或城市电网区域变电所以高压（常见的如 110kV）向主变电所供电，经主变电所降压成中压（常见的如 35kV 或 10kV）向各车站变电所供电，结合各车站变电所进线形成中压环网，再由环网供沿线设置的牵引变电所，并降压整流为直流电（如 750V 或 1500V），从而对电动列车供电。另外，各车站机电设备用电需由降压变电所降压为 AC380/220V。为了便于城市轨道交通供电系统的统一管理，城市轨道交通供电系统目前较多地采用集中供电方式。这种供电方式的中压网络电压等级的确定，需要考虑用电容量、供电距离、城市当地电网现状及发展规划等因素。

分散供电方式是指不设置主变电所，而直接由城市电网区域变电所的 35kV 或 10kV 中压供电线路直接向城市轨道交通沿线设置的牵引变电所、降压变电所供电并形成环网。采用这种供电方式的前提是城市电网比较发达，并且在有关车站附近有符合可靠性要求的供电电源，其中压网络的电压等级应与城市电网相一致。分散供电方式可设置电源开闭所，并可与车站变电所合建。

混合供电方式，是以上两种方式的混合，即轨道交通线路的一部分采用集中供电方式，另一部分采用分散供电方式，但一般以集中供电方式为主、分散供电方式作为补充。

集中式供电的优点：

- (1) 可靠性高，便于集中统一调度和集中管理。
- (2) 施工方便，维护容易，电缆敷设径路比较好走。
- (3) 抑制谐波的效果较好。为减少谐波对电网的影响和危害，一是采用较高脉波 (24 脉波) 整流机组，二是选用较高电压 (110kV) 的电源，因为大容量、高电压电网的承

受能力强，同时国标规定的谐波总畸变率和谐波电压含有率比小容量、低电压电网要低得多，而且也有利于今后集中采取高次谐波防治措施。

(4) 计费方便、简单。采用 110kV 电压集中供电方式，运行管理部门与电业部门的电度计费在主变电所设总计量就行，不必在各变电所分别计量。

所以决定采用集中式供电方式

## 2.2 供电电压方式

集中供电方式：城市电网向城市轨道交通的专用主变电所供电，经降压并在沿线结合牵引变电所和降压变电所形成中压环网，向轨道交通各系统供电，分散供电方式：不设主变电所，直接由城市电网区域变电所的中压输电线直接向轨道交通沿线设置的牵引变电所、降压变电所供电并形成环网。由于使用的是集中供电方式，所以使用三级式供电电压方式。在城市轨道交通沿线，根据用电容量和线路长短，建设专用的主变电所。主变电所进线电压一般为 110kV，经降压后变成 35kV 或 10kV，供给牵引变电所与降压变电所。主变电所应有两路独立的进线电源。集中式供电，有利于城市轨道交通供电形成独立体系，便于管理和运营。采用集中式供电的有上海、广州、南京、香港、德黑兰地铁等。

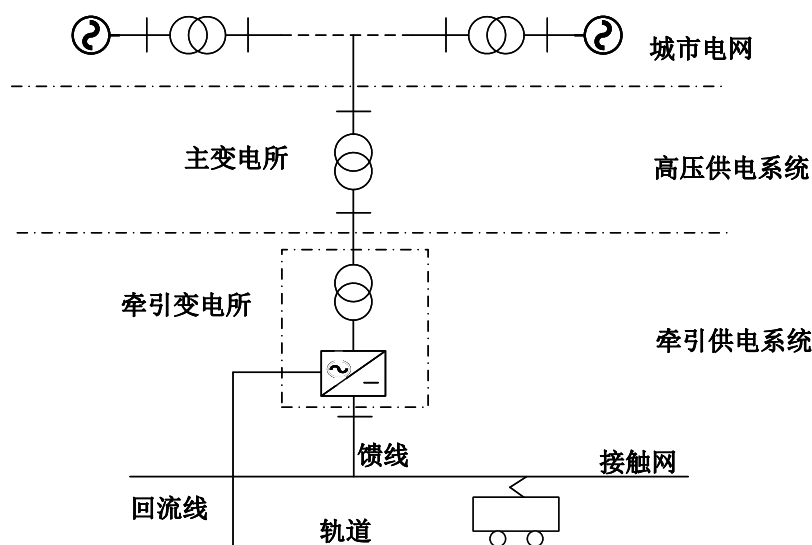


图 2-1 三级式供电

## 2.3 主所数目

地铁主变电所将城市电网的高压 110KV(或 220KV 电能降压后以 35KV 或 10KV 的电压等级分别供给牵引变电所和降压变电所。为保证供电的可靠性，地铁线路通常设置两座或两座以上主变电所。主变电所由两路独立的电源进线供电，内部设置 2 台

相同的主变压器。根据牵引负荷和动力负荷的不同情况，主变压器可采用三相三绕组的有载调压变压器或双绕组的变压器。采用有载调压变压器在电源进线电压波动时二次侧电压维持在正常值范围内。主变电所为地铁线路的总变电所，承担整条地铁线路的电力负荷的用电。

- (1) 可根据负荷计算确定在地铁线路上设置的主变电所数量。
- (2) 每座主变电所设置 2 台主变压器，由城市电网地区变电站引入两路独立的 110KV 专用线路供电，两回路同时运行，互为备用，以保证供电的可靠性和供电质量。进线电源容量应满足远期时其供电区域内正常运行及故障运行情况下的供电要求。
- (3) 低压 35KV 侧采用单母线分段接线，两段母线间设母联断路器，正常运行时母联断路器打开。
- (4) 正常运行时每座主变电所的两路 110KV 电源和 2 台主变压器分列运行。通过 35KV 馈出电缆分别向各自供电区域的负荷和动力照明负荷供电。

## 2.4 牵引供电系统和动力照明系统采用何种方式

通常，城市轨道交通动力照明配电方案总体可分为动力配电和照明配电。动力配电主要为车站各用电系统和用电设备提供电源，包括通风空调系统及设备，给排水系统及设备，FAS/BAS 系统及设备，AFC、通信、外部通信、信号、公安通信等系统及设备，电梯、自动扶梯，安全门系统，卷帘门等；照明配电主要为车站照明、区间照明、场段照明等设备提供电源。所以在整个城市轨道交通项目建设全过程范围内，应在不同阶段对接口进行全面梳理并加强管理，才能保证系统运行的安全性、稳定性、系统性和可靠性。

在满足计量、维修管理要求的情况下，应按照照明负荷与动力负荷分开配电。一、二级负荷与三级负荷分开配电，车站与区间分开配电进行设计。通信系统、信号系统、火灾自动报警系统、电力监控系统、环境与设备监控系统、自动售检票系统等用电设备的配电应自成系统，由 0.4kV 低压开关柜室的一、二级负荷母线直接供电。排烟风机、送排风机、空调机、隧道风机等用电设备由通风空调电控柜供电，冷水机组由变电所供电。除环控设备外的其他动力设备及两端各半个区间动力设备均直接由降压变电所配电。

为确保供电的稳定性，牵引供电系统和动力照明系统应该相互独立供电

## 2.5 主接线形式分析

方案 I: 110kV 采用内桥接线，35kV 采用单母分段带旁路接线，10kV 采用单母分段接线。

方案 II: 110kV 采用单母分段接线，35kV 采用单母分段接线，10kV 采用单母分

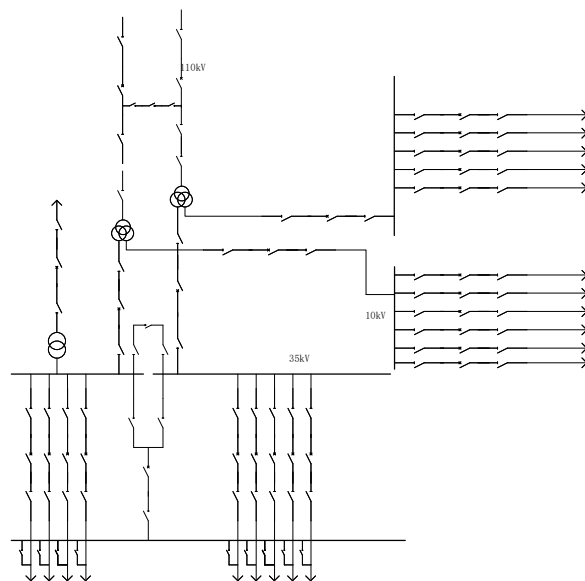


图 2-2 方案 I

段接线。

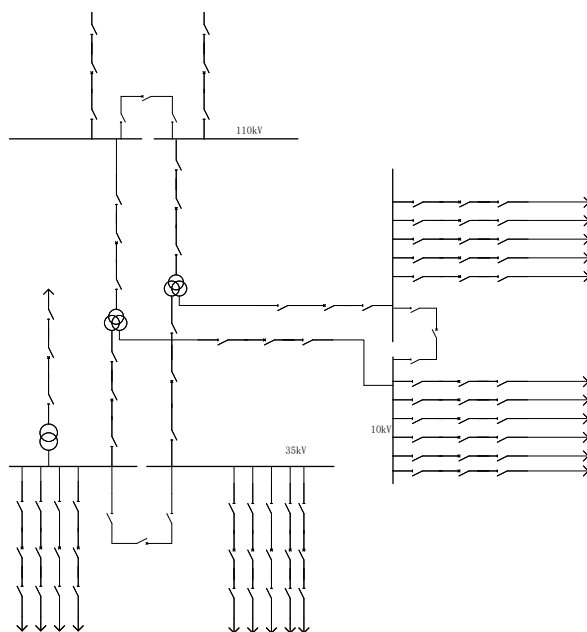


图 2-3 方案 II

### 2.5.1 主接线方案比较分析

根据可靠性、灵活性、经济性对两种方案进行比较。

#### (1) 主接线方案的可靠性比较

110kV 侧：

方案 I：采用内桥接线，当一条线路故障或切除、投入时，不影响变压器运行，不中断供电，并且操作简单；桥连断路器停运时，两回路将解列运行，亦不中断供电。且接

线简单清晰，全部失电的可能性小，但变压器二次配电线及倒闸操作复杂，易出错。

方案 II：采用单母线分段接线，任一台变压器或母线、线路故障或停运时，不影响其它回路的运行；分段断路器停运时，两段母线需解列运行，全部失电的可能稍小一些，不易误操作。

35kA 侧：

方案 I：单母线分段兼旁路接线，检修任一台断路器时，都可用旁路断路器代替；当任一母线故障检修时，旁路断路器可代替该母线，使该母线的出线不致停运。

方案 II：单母线分段接线，检修任一台断路器时，该回路需停运，分段开关停运时，两段母线需解列运行，当一段母线发生故障，分段断路器自动将故障段切除，保证正常段母线不至失电，另一段母线上其他线路需停运。

### (2) 主接线方案的灵活性比较

110kV 侧：

方案 I：操作时，主变压器的切除和投入较复杂，需动作两台断路器，扩建方便。线路的投入和切除比较方便。

方案 II：调度操作时可以灵活地投入和切除线路及变压器，而且便于扩建。

35kV 侧：

方案 I：运行方式较复杂，调度操作复杂，但可以灵活地投入和切除变压器和线路，能满足在事故运行方式、检修方式及特殊运行方式下的调度要求，较易于扩建。

方案 II：运行方式简便，调度操作简单灵活，易于扩建，但当断路器检修时线路要停运，影响供电。

### (3) 主接线方案的经济型比较

	主变压器 (台)	110kV 断路器 (台)	110kV 隔离开关 (组)	35kV 断路器 (台)	35kV 隔离开关 (组)
I	2	3	8	13	35
II	2	5	10	12	33

表 2-1 不同方案所需设备个数

从表2-1中可以看出，方案 I 比方案 II 综合投资少一些。

### (4) 主接线方案的确定

对方案 I、方案 II 进行综合比较，根据它们的可靠性、灵活性和经济性，最终选择了方案一。

## 2.5.2 主变压器接线形式

在 330kV 及以下的变电站中，一般都选用三相式变压器。因为一台三相式变压器较同容量的三台单相式变压器投资小、占地少、损耗小，同时配电装置结构较简单，运行维护较方便。在有三种电压等级的变电站中，如果变压器各侧绕组的通过容量均达到变压器额定容量的 15% 及以上，或低压侧虽然无负荷，但需要在该侧装无功补

偿设备时，宜采用三绕组变压器。我国 110kV 及以上电压，变压器绕组都采用星形接法，35kV 也采用星形接法，其中性点多通过消弧线圈接地。35KV 及以下电压，变压器绕组都采用三角形接法。

## 2.6 牵降混合所主接线分析

### 2.6.1 35KV 交流侧牵引降压混合所主接线

目前常见的接线方式多为以下几类：双母线接线、单母线接线、单母线带旁路母线接线、单母分段接线。

考虑到典型牵引降压混合变电所的主接线对于可靠性、灵活性要求较高，且要考虑一定的经济性，我们选用单母线分段接线作为 35kV 交流测的主接线。

单母线分段接线具有供电可靠性高的优点。当一段母线发生故障，分段断路器自动将故障段切除，保证正常母线不间断供电和不致使重要用户停电。且用断路器将母线分段后，对重要负荷可以从不同段引出两回路，提供双回路供电。调度灵活性高，变压器投切比较方便。当任意电源故障或检修时，可由母联开关替代，避免母线停电。

但值得注意的是，当出线或出线断路器、隔离关故障或检修时，该回路将停止供电。扩建时需要向两个方向均衡扩建，以保证负荷分配的均匀。当出线回路为双回路时，常使母线出线交叉跨越。

单母分段接线

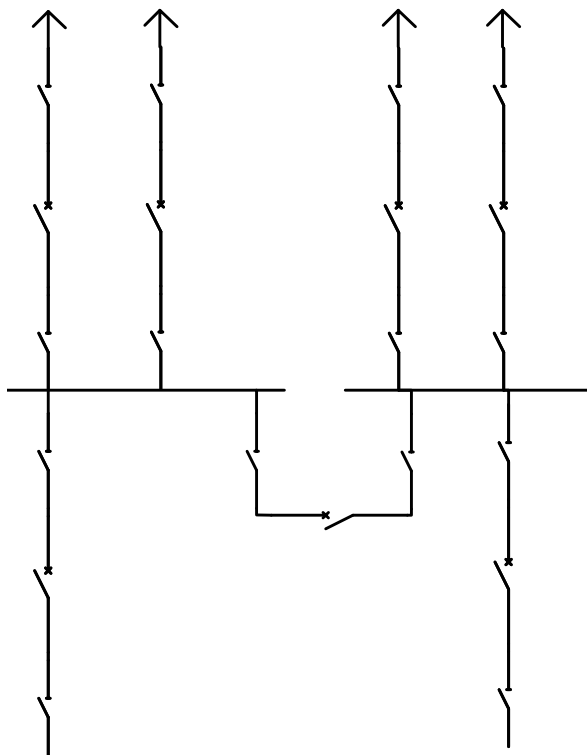


图 2-4 单母线分段接线

优点: 供电可靠性高。当一段母线发生故障, 分段断路器自动将故障段切除, 保证正常母线不间断供电和不致使重要用户停电。且用断路器将母线分段后, 对重要负荷可以从不同段引出两回路, 提供双回路供电。调度灵活性高, 变压器投切比较方便。当任意电源故障或检修时, 可由母联开关替代, 避免母线停电。

缺点: 当出线或出线断路器、隔离开关故障或检修时, 该回路将停止供电。扩建时需要向两个方向均衡扩建, 以保证负荷分配的均匀。当出线回路为双回路时, 常使母线出线交叉跨越。

考虑到该变电所要求供电可靠性比较高, 并且出于经济成本考虑, 所以最终决定选用单母线分段的主接线方式作为 35KV 交流侧的主接线方式。

## 2.6.2 1500V 直流侧牵引降压混合所主接线

根据城轨交通牵引负荷的特点和国内外运营经验, 其牵引变电所主接线的直流部分, 一般采用单母线接线的形式。

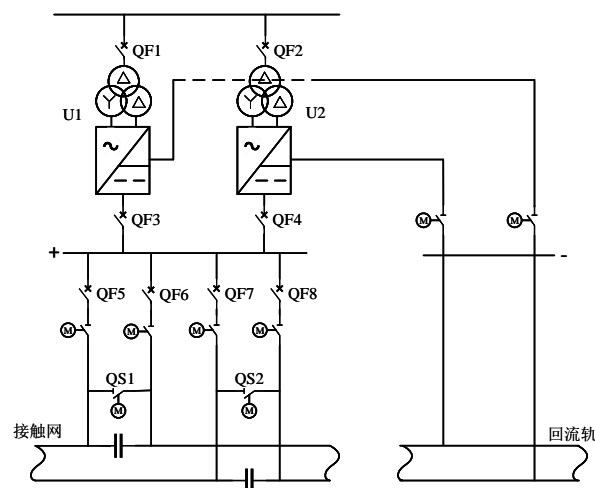


图 2-5 牵引所主接线

直流主接线应重视国内外长期运行的实践经验及可靠性的定性分析。可靠性的衡量标准是运行实践。可靠性的定量分析由于数据及计算方法尚不完善, 计算结果不够准确, 因而目前仅作为参考。该方式是最早被用于城轨交通牵引变电所直流母线的接线方式之一, 用于我国 20 世纪 60 年代中期建造的第一条城轨交通线——北京地铁一号线。由于当时采用的是前苏联的固定式直流设备, 所以采用此种直流主接线方式, 应该说是比较好的选择。该方式在前苏联及东欧一些国家的城轨交通的牵引供电中得到广泛的应用, 实践证明其运行可靠。

运行方式分析:

- (1) 正常状态。在正常状态下, 可通过直流断路器向牵引网提供直流电源。
- (2) 事故状态。事故状态分为断路器故障、牵引网或直流电缆故障、接地故障。



a. 在断路器故障时，采用该方式可通过倒闸作业，退出故障断路器，并投入备用断路器。使用该方式，检修人员可用备用断路器小车替换故障断路器。

b. 牵引网或直流电缆故障。在直流电缆故障时，可使相应馈线的断路器跳闸，通过牵引网越区隔离开关的倒闸作业，由相邻的馈线回路向停电的牵引网提供电源；在牵引网过负荷或短路故障时，可通过相应馈线的断路器经过判断后跳闸，使故障段退出运行。

c. 接地故障。当直流设备发生碰壳故障时（变电所所有直流设备），框架保护装置启动，故障变电所退出运行，由临近变电所实现双边（或单边）供电。

## 2.7 降压所主接线

供电方式问题：

牵引供电系统设计时考虑了双边供电，但单边供电是一种仅在必要情况下采用的临时供电方式，不是制约牵引供电规划的条件。双边供电是城市轨道交通最基本的供电方式，是设计的首要选择，也是运营的首选方案。

### 2.7.1 中压主接线和运行方式

(1) 中压主接线采用单母线分段接线：在牵引系统的中压一侧，我们采用单母线分段的方式，并配置了分段开关。在正常运行时，两个独立的电源同时供电，两段母线并行运行。

(2) 运行方式：

a. 正常运行：在正常情况下，两个独立电源同时供电，两段母线并行运行。

b. 进线电源失效运行：如果其中一个进线电源失效，分段开关会自动切换，使另一个进线电源向本牵引变电所的两段母线供电。当两个进线电源都失效时，通过调度进行倒闸操作，从相邻变电所获取中压电源。

c. 母线故障运行：如果某一段母线发生故障，分段开关将保持关闭，不切换到运行状态。另一段母线将继续供电。在这种情况下，如果有牵引整流机组连接到故障的母线上，它将停止运行，而直流牵引系统将通过内部操作实施大规模的双边供电。当两段母线都出现问题时，本牵引站将停止运行。

### 2.7.2 直流主接线和运行方式

(1) 采用 A 型单母线系统的直流主接线：我们使用两路进线，配备直流断路器，并设置了四路直流馈出线。牵引整流机组的负极使用电动隔离开关。在同一馈电区分段的上下行之间，设有纵向电动隔离开关。

(2) 运行方式：

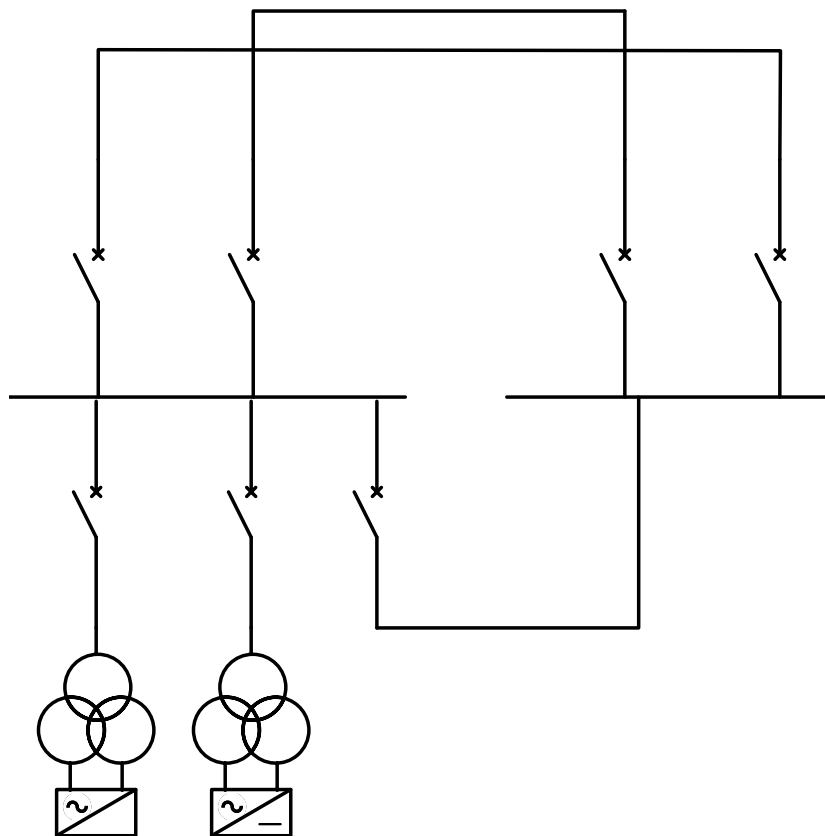


图 2-6 分段单母线

a. 正常运行：在正常运行时，采用 24 脉波整流，两台整流机组并列运行。直流进线开关、馈线开关、上网电动隔离开关都处于闭合状态，纵向电动隔离开关处于断开状态。此变电所与相邻变电所对同一供电区域实施正常的双边供电。

b. 单台整流机组停机：如果整流机组 R1 发生故障，进线开关 1041 跳闸，201 联动跳闸。馈线开关和上网电动隔离开关都处于闭合状态，纵向电动隔离开关处于断开状态。这时采用 12 脉波正常双边供电。

c. 两台整流机组停机：如果整流机组 R1 和 R2 都故障停机，进线开关 1041 和 1042 跳闸，201 和 202 联动跳闸。控制中心会对上报的保护信息进行判断，如果不是直流母线短路或框架保护触发，那么 211、212、213、214 将被合上，纵向中压隔离开关 2113 和 2124 将被断开。

d. 直流母线停机：为应对开关柜直流母线碰壳故障，我们设置了框架泄漏电流保护。当开关柜直流母线发生故障时，框架保护会联动切断所有馈线开关、两台整流机组进线开关以及上下行相邻牵引站的相应馈出开关（这些相邻站的开关可以由人工合闸）。控制中心将远程分闸上网隔离开关，合上纵向电动隔离开关 2113 和 2124，通过纵向隔离开关实施大规模的双进供电。

e. 单台馈线开关停机：当单台馈线开关 211 停机时，211 和其对应的上网电动隔离开关都会断开，相关的纵向电动隔离开关 2113 将被合上。

f. 分段运行两侧上（下）行的两台馈线开关停机：当上行的 211 和 213 停机时，相关的上网隔离开关将被分闸，远程合上纵向电动隔离开关 2113（满足合闸条件），从而实现大规模双边供电。下行的 212、214 及其相关上网隔离开关将保持合闸状态，2124 将被分闸，以维持正常的双边供电状态。

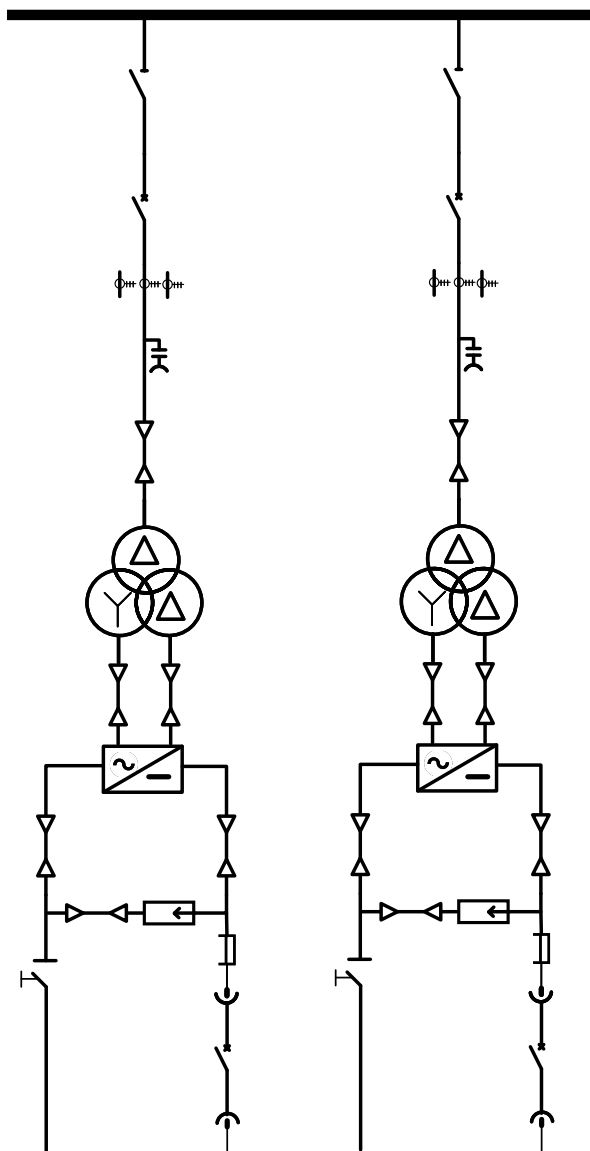


图 2-7 直流主接线

### 2.7.3 降压部分

#### 1. 不同负荷供电要求：

一级负荷需要双路电源供电，这两路电源分别来自降压变电所的两个独立母线段，实现自动切换在负载端。

二级负荷的电源可以从降压变电所的任一母线段获得。当其中一路电源失效时，

母联开关可以手动或自动切换至备用电源。

三级负荷通过分配箱引出单一电源供电，允许随时进行切除。

## 2. 主接线形式：

中压母线采用单母线分段的形式，并配置联络开关。

我们设置了两个独立的进线和两个出线，以确保可靠供电。

两个配电变压器各自连接到中压母线的一个段。

0.4KV 母线也采用单母线分段，同样配备联络开关。

## 第 3 章 主变电所保护配置

### 3.1 110KV 侧环进线保护

进线的主保护，快速切除进线点至主变压器之间的相间短路故障。

#### 3.1.1 过电流保护 I 与 II—跳闸

主变压器过电流保护按躲过最大负荷电流整定，要求电流和时间与相邻线路配合，并满足灵敏系数要求，其整定公式如下：

$$I_{k.act} = \frac{K_{rel} K_{gh} I_{fh}}{K_r n_{TA}}$$

$$K_{sen} = \frac{I_{2k2.min}}{I_{k.act}}$$

上式中， $I_{2k2.min}$  为最小运行方式下，低压侧发生两相短路时，流过高压侧保护装置安装处的稳态电流。

整定时间： $t=2.5s$

作用：跳闸

#### 3.1.2 零序过电流保护 I 与 II—跳闸

主变压器零序过电流保护按躲过外部三相短路最大不平衡电流整定，要求满足相邻线路故障灵敏系数要求，其整定公式如下：

$$I_{k.act} = \frac{K_{rel} \Delta f I_{3k3.max}}{K_r n_{TA}}$$

上式中， $I_{3k3.min}$  为最大运行方式下，低压侧发生三相短路时，流过高压侧保护装置安装处的稳态电流。

整定时间： $t=0.3s$

作用：跳闸

### 3.2 110KV 侧环出线保护

预留环出扩展条件，将来环出回路上时，保护同步实施，环进、出线需均设线路纵差保护。变压器 110KV 侧保护差动保护—跳闸

### 3.2.1 过电流保护（或低压过流）——跳闸

零序过电流保护——跳闸, 重瓦斯保护——跳闸, 有载调压重瓦斯保护——跳闸, 过负荷、轻瓦斯、有载调压轻瓦斯、油位异常、气压释放等保护动作发信号

## 3.3 变压器 35KV 侧保护

差动保护——跳闸 (设独立的 CT 线圈与接地变 CT 线圈——并向高压侧差接。) 主变压器差动保护的最小动作电流按躲过变压器额定负载时的最大不平衡电流整定, 整定值为  $TAPn$  的倍数, 一般整定为  $0.3 \sim 0.5(TAPn)$ ;

双折线比率: 按照相关规程及 SEL 保护配置说明书, 取双折线动作斜率  $SLP1=50$ ,  $SLP2=80\%$ ;

制动电流: 因为  $SLP1$  折线经过原点, 所以该值无需整定, 可通过差动保护最小动作电流和折线斜率来间接进行整定, 即  $IRS0=1$ 。  $ISR1=4$  主要为了防止区外穿越性故障大电流引起的两侧 CT 误差增大造成保护误动。

二次谐波闭锁百分比 ( $PCT2$ ): 在空投变压器时会在变压器电源侧产生很大的激磁涌流, 可能引起差动保护误动。激磁涌流在第一周波产生的二次谐波电流与基波电流之比通常超过  $30\%$ , 因此利用二次谐波电流来识别激磁涌流现象并防止差动保护误动, 一般可整定为  $15\% \sim 20\%$ 。

作用: 跳闸

### 3.3.1 过电流（低压过流）保护——跳闸

35kV 侧公用母线进线的低电压过电流保护按躲过最大负荷电流整定, 要求电流和时间与相邻线路配合, 并满足灵敏度系数要求, 其整定公式如下

$$I_{k.act} = \frac{K_{rel} K_{gh} I_{fh}}{K_r n_{TA}}$$

$$K_{sen} = \frac{I_{1k2.min}}{I_{k.act}}$$

考虑当远端发生故障时不启动保护, 一般将动作电压设为  $0.15 \sim 0.3$  倍的额定电压大小, 电压整定公式如下:

$$U_{act} = \frac{U_{min}}{K_{rel} n_{TV}}$$

整定时间: 与下级低电压过电流保护配合

作用: 低电压时跳闸

### 3.3.2 零序过电流保护—跳闸

35kV 侧公用母线进线的零序电流保护按躲过外部三相短路最大不平衡电流整定，其公式如下：

$$I_{k.act} = \frac{K_{rel} \Delta f I_{3k3.max}}{K_r n_{TA}}$$

若与下级受总零流配合，其计算式为：

$$I_{k.act} = \frac{K_p I_{act1}}{n_{TA}}$$

整定时间：t=2.3+Δt

作用：跳闸

## 3.4 35KV 接地变保护

### 3.4.1 电流速断—跳闸

若接地变压器的速断保护按躲过接地变励磁涌流整定，则取整定值为 7 10 倍的额定电流，其整定公式为：

$$I_{k.act} = \frac{9I_N}{n_{TA}}$$

若接地变压器的速断保护按躲过低压侧单相接地短路整定，则整定公式为：

$$= \frac{K_k \frac{I_{jd}^{(1)}}{3}}{n_{TA}}$$

若接地变压器的速断保护按灵敏系数整定，则整定公式为：

$$I_{k.act} = \frac{I_{1k2.min}}{K_{sen} n_{TA}}$$

上式中， $I_{1k2.min}$  为接地变压器电源侧最小两相短路电流。

作用：联跳主变两侧开关

### 3.4.2 过电流-跳闸

若接地变压器的过电流保护按躲过接地变压器的额定电流整定，则整定公式为：

$$I_{k.act} = \frac{K_{rel} K_{gh} I_{fh}}{K_r n_{TA}}$$

若接地变压器的过电流保护按躲过外部单相接地时流过接地变的最大故障电流整定，则整定公式为：

$$I_{k.act} = \frac{K_k \frac{I_{jd}^{(1)}}{3}}{n_{TA}}$$

作用：联跳主变两侧开关

### 3.5 35KV 所用变保护

#### 3.5.1 过电流保护

按躲过变压器 0.4kV 侧出口三相短路流过高压侧的稳态电流整定。

$$X^* = \frac{U_k \% \times S_j}{100 \times S_n}$$

$$I_{d3}^* = \frac{1}{X_B}$$

0.4kV 侧三相短路电流

$$I_{0.4d3} = I_{d3}^* \times I_{j0.4}$$

折算到高压侧：

$$I_{1k3.max} = \frac{I_{0.4k3max}}{T_{RA}}$$

$$I_{opk} = \frac{K_n I_{1k3max}}{n_{TA}}$$

时间：t=0 秒

#### 3.5.2 零序过电流保护

计算公式如下：

$$I_{opk} = \frac{0.5I}{n_{TA}}$$

时间：t=0.5 秒

#### 3.5.3 反时限过电流保护

反时限过电流保护按躲过变压器的最大负荷电流整定，整定公式为：

$$I_{k.act} = \frac{K_{jb} I_{fh}}{n_{TA}}$$

整定值：0.1A

整定时间：t=0.5s



作用：跳闸

## 第 4 章 牵引降压混合变电所保护配置

### 4.1 35KV 进线保护

35KV 进线选择采用过电流保护，零序过电流保护，以及差动保护，来进行保护配置。

#### 4.1.1 过电流保护

按躲过最大负荷电流整定，满足上下级配合。整定计算公式子如下：

$$I_{opk} = \frac{K_{rel} \times I_{fh}}{K_r \times n_{TA}} K_{sen} = \frac{I_{2k2.min}}{I_{op}}$$

$I_{2k2.min}$  最小运行方式下，被保护线路末端两相短路最小短路电流。

时间：T 逐级配合

动作：跳闸

#### 4.1.2 零序过电流保护

按与下级配合系数整定，因过电流保护与零序过电流采用同一整定时限，故可采用系数整定，以提高保护的灵敏度。按躲过外部三相最大短路电流在电流互感器产生的误差整定。

$$I_{opk} = 0.1 I_{3k3.max} K_{sen} = \frac{I_{d0}}{I_{op}}$$

时间：T 逐级配合

动作：跳闸

#### 4.1.3 差动保护

按躲过电缆线路稳态对地电容电流，

$$I_{diff} \geq \frac{2 \times I_C}{n_{TA}}$$

$I_C = 0.1 U_E L$ , 并大于15%正常进行的额定电流，整定值还需要按照下式考虑，

$$I_{diff} \geq 1.2 \times 0.1 \times (I_{fh} + I_k)$$

$I_{fh}$  — 本供电分区范围除去最大容量变压器的负荷电流

$I_k$  — 本供电分区范围最大容量变压器的励磁涌流; 采用保护装置给定的最小值

时间: 0 秒

动作: 跳闸

## 4.2 35KV 出线保护

对于 35KV 出线保护配置, 也配有过电流, 零序过电流, 差动保护。保护配置整定计算同 35KV 进线保护。

## 4.3 35KV 母联保护

### 4.3.1 延时速断保护

延时速断保护按躲过任一母线段的最大负荷整定, 也可按进线电流整定, 但时间小于进线值。与整流变, 配电变的馈线电流速断和出线的过电流保护的时限配合, 均按 800A, 全线统一。

时间: 0.6 秒

动作: 跳闸

### 4.3.2 零序过电流保护

零序过电流保护均按 200A 整定, 全线统一。

### 4.3.3 后加速过电流保护

后加速过电流保护均按 800A, 全线统一。

整定值: 4A

整定时间:  $t=0.3s$

动作: 跳闸

### 4.3.4 后加速零序过电流保护

后加速零序过电流保护与后加速过电流保护相同, 均按 800A, 全线统一。

整定时间:  $t=0.3s$

作用: 跳闸

## 4.4 整流机组保护

整流机组配有的保护包括：电流速断保护，过电流保护，反时限过电流保护，重负荷，过负荷以及温度保护。

### 4.4.1 电流速断保护

对于电流速断保护，整定如下：

$$I_{op.k} = \frac{8 \times I_{fh}}{n_{TA}} K_{sen} = \frac{I_{1k2.min}}{I_{op}}$$

时间：0 秒

动作：跳闸

### 4.4.2 过电流保护

按躲过 300% 过负荷能力整定。

$$I_{op.k} = \frac{4 \times I_{fh}}{n_{TA}} K_{sen} = \frac{I_{1k2.min}}{I_{op}}$$

时间：300ms

动作：跳闸

### 4.4.3 反时限过电流保护

反时限过电流整定原则，应躲过牵引整流机组的 V1 级负荷特性要求，涵盖重、轻过负荷曲线，选择 IEC Very 类型。

$$I_{op.k} = \frac{K_{rel} \times I_{fh}}{n_{TA}}$$

根据牵引变压器过载曲线求出时间系数时间系数定值，

$$t = \frac{80}{\left(\frac{I}{I_P}\right)^2 - 1} T_p(s)$$

### 4.4.4 零序过电流保护

整定计算如下：

$$I_{op.k} = \frac{K_{rel} I_{fh} \times 0.5}{K_r \times n_{TA}}$$

时间：0 秒

动作：跳闸

#### 4.4.5 重负荷保护

整定计算如下：

$$I_{op.k} = \frac{3 \times I_{fh}}{n_{TA}}$$

时间：T 过负荷曲线 300%，一分钟。

#### 4.4.6 过负荷保护

整定计算如下：

$$I_{op.k} = \frac{1.5 \times K_{rel} \times I_{fh}}{n_{TA}}$$

时间：负荷曲线 150%，两小时。

#### 4.4.7 温度保护

整流变压器，相关部件温度超过整定温度，进线报警。

### 4.5 配电变压器保护

降压所配电变压器保护整定方法与跟随所完全一致，因此对于具体的整定方案此处不多赘述，直接进行整定结果的讨论。

## 4.6 电流速断保护

时间：0 秒

动作：跳闸

#### 4.6.1 反时限过电流保护

动作：跳闸

#### 4.6.2 零序过电流保护

时间：0.25 秒

动作：跳闸

### 4.6.3 温度保护

超温报警温度：140 摄氏度

超温跳闸温度：150 摄氏度

## 4.7 直流 1500V 系统保护

### 4.7.1 1500V 馈线保护

装置包括：DPU96、UR36/UR40、DCR150。其中 DPU96 用在  $I_{max}$  最大电流、 $\Delta I$  电流增量、 $\frac{di}{dt}$  电流上升率、 $I_{DMT}$  定时限过流、热过负荷保护。UR36/UR40 用于大电流脱扣。DCR150 用于双边联跳。

#### 4.7.1.1 $I_{max}$ 最大电流

类似速断保护，小于大电流脱扣，大于电流增量  $\Delta I$  值。

时间：1ms。

返回系数 80%

#### 4.7.1.2 $\Delta I$ 电流增量

大于机车启动电流和接触网过分段的冲击电流。

整定值：4000A

$\Delta I$  报警功能（如果不注明，则是 80% 报警）：60% 报警

时间：延时 1ms

$\Delta I \frac{di}{dt}$  是基于  $\Delta I$ ，为了防止电流增量 ( $\Delta I$ ) 保护受于干扰误动，还附加了延时时间、 $\Delta I \frac{di}{dt}$  持续时间等条件。需具备 3 个条件，详见整定原则。

$\Delta I \frac{di}{dt}$  电流上升率返回延时：1ms

#### 4.7.1.3 $\frac{di}{dt}$ 电流上升率

大于机车启动和接触网过分段冲击产生最大电流变化率，小于线路末端短路时的电流变化率，相当于有两阶段保护。

$\frac{di}{dt}$  整定值：40

$\frac{di}{dt}$  报警：60% 报警

时间：延时 40ms

#### 4.7.1.4 $I_{DMT}$ 定时限过流

类似过电流保护，小于线路末端接触网与接地线发生的最小短路电流，大于车辆启动时的电流和时间，车辆段和末端牵引变电所需适当加大，4000A。

整定值：3000A

#### 4.7.1.5 热过负荷保护

考虑牵引曲线电流上升时间。

整定值：20s

投入：挡位 2

牵引网类型：架空接触网

报警系数：0.9

根据电缆材质定：报警温度：65℃

根据电缆材质定：跳闸温度：75℃

返回温度：30℃

#### 4.7.2 大电流脱扣

为断路器本体自带保护，通过断路器内设置的脱扣器实现跳闸。大于最大负荷下列车正常启动电流，小于近端最大短路电流。主要是近端短路的保护，与机车保护配合，躲过机车断路器的大电流脱扣。

整定值：8000~10000A

##### 4.7.2.1 双边联跳

牵引网双边联跳是作为越区保护的一种重要手段，指当直流馈线开关保护装置检测到本回路馈线出线大电流故障脱扣后，通过保护装置的硬接点向邻所对应直流馈线开关发出跳信号，联跳对应邻所馈线直流开关。

分为双边联跳与大双边联跳。

大双边联跳：如果有一牵引所因故障退出运行，其通过纵向隔离开关进行越区供电，如果出现大双边供电模式，联跳也要转换至大双边联跳模式。馈线保护的设置：宁可误动作，不可不动作

#### 4.7.3 钢轨电位限制

钢轨电位限制装置依据人体耐受电压时间特性曲线 (E50122-1:12.97)，按 3 级保护配合，并与电压型框架保护整定值配合。电压超过 90V 时报警；电压达到 120V，通过接触器无延时永久短路；电压达到 240V（定值可调），动作时限为 0 秒，通过晶闸管快速接地，接触器闭合后斯开，同时接触器闭锁。

#### 4.7.4 负极柜

##### 4.7.4.1 电压型框架保护

电压型框架保护定值和时间要与钢轨电位限制装置相互配合，为确保台上乘客和工作人员的人身安全。电压型框架保护的电压和时间的整定值尺于钢轨电位限制装置动作。

整定值：90V

时间：0.3s

动作：报警

整定值：130V

动作：跳闸

##### 4.7.4.2 电流型框架保护

电流元件灵敏度高，可调整定值，分流 1000A/150mV、定值为 35A~85A，动作时限为 0 秒。

整定值：80A



## 第 5 章 降压所整定计算

本章以降压站为例分析各级保护的整定配合，该站的基本参数如下 (5-1)：

10kV 电力变压的容量为 315kVA，短路阻抗为 4.01%，变压器最大负荷电流为 18.2A，高压侧电流互感器变比为 50：1。

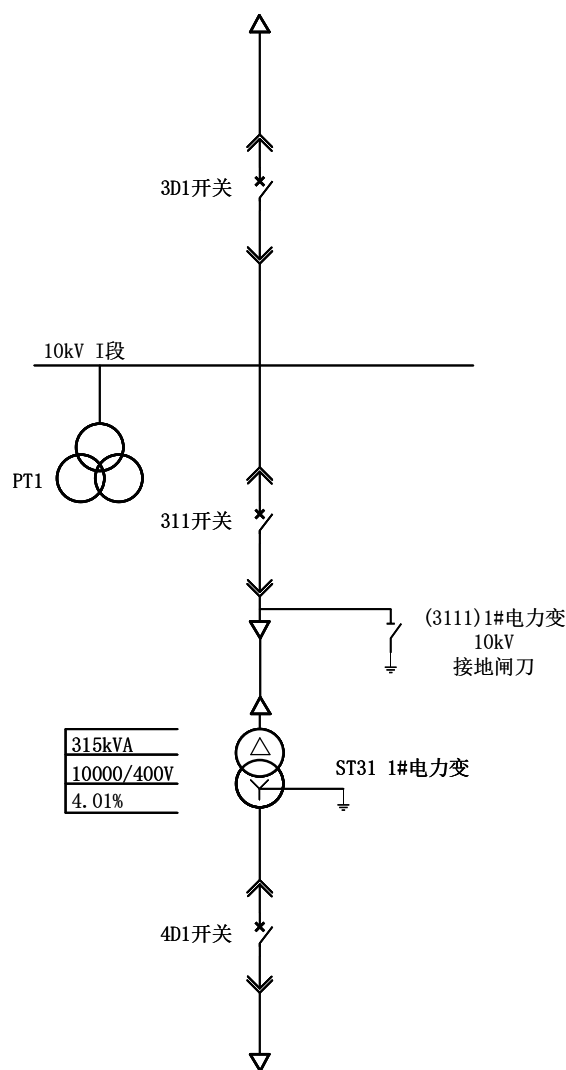


图 5-1 降压所

### 5.1 电力变压器开关整定值计算

选取基准容量  $S_b = 100\text{MVA}$ ，则各基准电压及电流分别为：

$$\text{高压侧: } U_{bI} = 10\text{kV} \text{ 则 } I_{bI} = \frac{S_b}{\sqrt{3}U_{bI}} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 10.5} = 5.5\text{kA}$$

$$\text{低压侧: } U_{bII} = 0.4kV \text{ 则 } I_{bII} = \frac{S_b}{\sqrt{3}U_{bII}} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 0.4} = 114.3kA$$

$$\text{变压器电抗标么值: } X_{*k} = \frac{X_T\%}{100} \times \frac{S_b}{S_{T1}} = \frac{4.01}{100} \times \frac{100}{0.315} = 12.73$$

$$X_{*\Sigma} = 12.73$$

$$\text{短路电流标么值为: } I_{*k} = \frac{1}{12.73} = 0.0786$$

在低压侧发生三相短路时实际短路电流为:

$$I^{(3)} = I_{*k} \times I_{bII} = 0.0786 \times 144.3kA = 11342A$$

### 5.1.1 311 开关保护装置速断保护 ( $I >>$ ) 整定计算

$$I >> = K_{rel} \cdot \frac{I^{(3)}}{n_T} = 1.25 \times \frac{11342}{25} \div 50 = 11.34$$

整定值: 取  $I >> = 11.4(A)$

时间: 0.035s。

### 5.1.2 311 开关保护装置过电流保护 ( $I >$ ) 整定计算:

过电流保护按躲过变压器的最大负荷电流为 18.2A 为原则, 取可靠系数  $K_{rel} = 1.5$ , 过负荷系数  $K_{gh} = 2$ , 于是有:

$$I > = K_{rel} \cdot \frac{K_{gh}I_{TN}}{n_T} = 1.5 \times 2 \times 18.2 \div 50 = 1.092(A)$$

整定值: 取  $I > = 1.1(A)$

时间: 0.4s。

按变压器低压侧发生两相短路时的短路电流来校验灵敏度  $K_{sen}$ , 于是有:

$$K_{sen} = \frac{0.866 \times 11342}{25 \times 1.1 \times 50} = 7.14 > 2 \text{ 满足要求}$$

### 5.1.3 311 开关保护装置反时限过电流保护整定计算:

计算过程如下:

$$I_{set} = K_{rel} \cdot \frac{I_{TN}}{n_T} = 1.25 \times 18.2 \div 50 = 0.455(A)$$

取  $T_p = 0.4$

$$t = \frac{0.14}{\left(\frac{I}{I_{act}}\right)^{0.02} - 1} \cdot T_p = \frac{0.14}{\left(\frac{I}{0.455}\right)^{0.02} - 1} \times 0.4$$

当变压器过负荷 50% 运行时,  $I = (1 + 50\%) \times \frac{I_{TN}}{n_T} = 1.50 \times 18.2 \div 50 = 0.546 (A)$

此时的动作时限为:

$$t = \frac{0.14}{\left(\frac{I}{I_{act}}\right)^{0.02} - 1} \times T_p = \frac{0.14}{\left(\frac{0.546}{0.455}\right)^{0.02} - 1} \times 0.4 = 15.33s$$

即当变压器过负荷 50% 时, 反时限保护将启动, 并在延时 15.3s 后发出报警或者跳闸信号。

## 5.2 与上游 10kV 断路器整定配合

根据降压站 10kV 环网最大负荷电流说明, 10kV 进线开关的最大负荷电流为 50A, 而该开关的定时限过电流定值为  $I > 80A, t > 0.3s$ 。因此, 该开关保护整定值的裕度为  $80/50 = 1.6$ , 故该开关可以可靠躲过系统最大负荷电流。当其作为电力变 311 开关后备保护时, 其灵敏度为

$$t = \frac{0.14}{\left(\frac{I}{I_{act}}\right)^{0.02} - 1} \times T_p = \frac{0.14}{\left(\frac{0.546}{0.455}\right)^{0.02} - 1} \times 0.4 = 15.33s$$

, 因此, 在 311 保护失灵时, 301 作为后备保护能够可靠动作, 切除故障。

在时限的配合上, 301 过电流保护动作时限设定为 0.3s, 而 311 保护的速断时限设定为 0.03s。因此, 在短路故障的情况下, 301 和 311 保护均起动, 但 311 保护保护先动作切除故障点后, 301 保护自动复归, 从而保证保护的选择性。

## 5.3 与下游 400kV 断路器整定值配合

除了与 10kV 进线配合外, 311 开关保护的过电流定值还需要与下游 400V 断路器 401 开关保护定值相配合, 在计算时按躲过后端最大负荷电流为原则, 且取一定的裕度。在实际运用中, 401 开关保护的长时限整定值为 600A, 归算到 10kV 一次侧电流为 24A。因此, 此时 311 过电流保护整定值的裕度为  $55/24 = 2.3 > 2$ , 能可靠躲过最大负荷电流, 保护可靠不动作。

当作为 401 开关的后备保护时, 应该具有足够的灵敏度。401 开关短路电流设置为  $8 \times 600 = 4800A$ , 动作时限为 0.1s, 归算到 10kV 侧 311 处的稳定电流为  $4800/25 = 192A$ 。因此, 在 401 后端发生短路的情况下, 作为 401 开关的后备保护, 其灵敏度为  $K_{sen} = 192/55 = 3.49 > 2$ , 能满足使用要求。如图 5-1 所示。

## 第 6 章 分段母线 (非环网) 继电保护逻辑图分析

现有一分段母线（非环网）的继电保护逻辑图如：

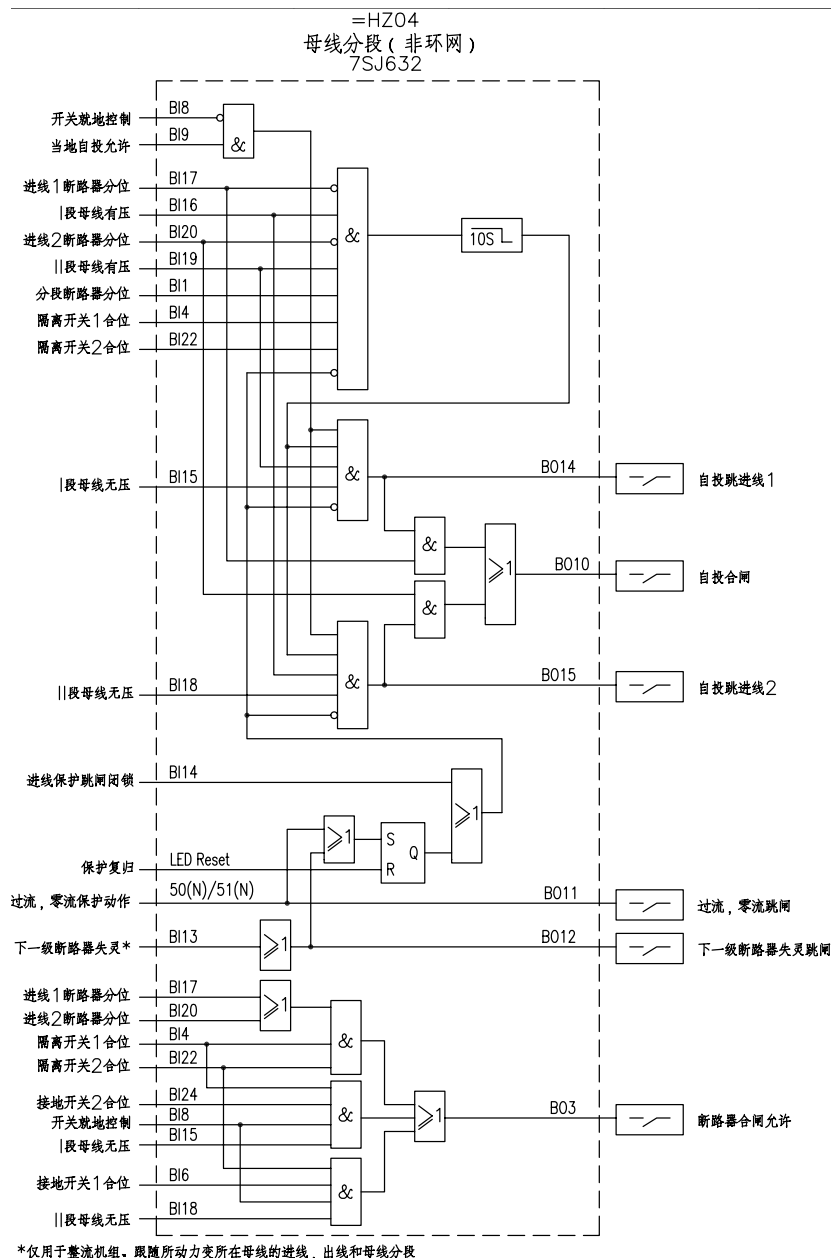


图 6-1 分段母线（非环网）的继电保护逻辑图

由于该图左侧输入相比于右侧输出复杂得多，于是从右侧向左侧反推，找出各种输出所对应的条件即可完成分析。

## 6.1 10s 维持触发

10s 维持触发需要满足的条件如下：

1. 进线 1 断路器处于合位。
2. I 段母线有压。
3. 进线 2 断路器处于合位。
4. I 段母线有压。
5. 分段断路器处于分位。
6. 隔离开关 1 处于合位。
7. 隔离开关 2 处于合位。
8. 进线保护跳闸闭锁且保护复归，过流、零序保护不动作，下一级断路器正常。

## 6.2 自投跳进线 1

若自投跳进线 1 动作，则：

1. I 段母线失压。
2. II 段母线正常有压。
3. 10 秒维持触发处于触发状态。
4. 开关就地控制打至 0 位且当地自投允许打自 1 位。
5. 进线保护跳闸闭锁且保护复归，过流、零序保护不动作，下一级断路器正常。

## 6.3 自投合闸

若自投合闸动作，则有下列两者情况之一或同时发生：

1. 自投跳进线 1 动作且进线 1 断路器处于分位。
2. 进线 2 断路器处于分位且自投跳进线 2 动作。

## 6.4 自投跳进线 2

若自投跳进线 2 动作，则：

1. II 段母线无压。
2. I 段母线有压。
3. 10 秒维持触发处于触发状态。
4. 开关就地控制打至 0 位且当地自投允许打自 1 位。
5. 进线保护跳闸闭锁且保护复归，过流、零序保护不动作，下一级断路器正常。

## 6.5 过滤零流跳闸

若过滤零流跳闸动作，则有：

1. 过流零流保护动作。

## 6.6 下一级断路器失灵跳闸

若下一级断路器失灵 B113 输出动作信号，B102 通过动作信号。

## 6.7 断路器合闸允许

断路器合闸允许需要满足以下条件之一：

1. 进线 1 断路器或进线 2 断路器处于分位且隔离开关 1 和隔离开关 2 均处于合位。
2. 隔离开关 1 处于合闸位且有接地开关 2 处于合位，开关就地控制打至 1 位，I 段母线无压。
3. 隔离开关 2 处于合闸位且有接地开关 1 处于合位，开关就地控制打至 1 位，II 段母线无压。



## 第 7 章 课程优化建议以及自我反思

### 7.1 课程优化建议

1. 提供优秀案例参考：
  - 举例如何整理和分享往届学生出色的课程设计作品：首先，建立一个作品库，收集往届学生的优秀作品，并将它们分类整理。然后，定期举行展示活动，邀请学生们分享他们的经验和思考。这可以激发学生的创造力和学习兴趣。
2. 利用视频讲解提高兴趣：
  - 制作高质量视频教材：请专业的视频制作人员或教育技术专家制作教学视频，确保视频内容有吸引力、易于理解。
  - 制作案例分析视频：为了展示案例分析，可以制作深入的案例解析视频，逐步介绍课程设计的整个过程。
3. 优化课堂安排：
  - 借助在线学习平台：将一部分课程内容转移到在线学习平台，让学生可以自主学习，减少通勤时间的浪费。
  - 创设混合式教学环境：将面对面课程和在线学习相结合，提供更灵活的学习方式，同时确保课堂时间更加高效利用。
4. 加强互动和反馈：
  - 使用在线讨论板：建立在线讨论板，鼓励学生在课程设计过程中提出问题和分享见解。
  - 设计实时互动活动：在课堂上引入实时互动工具，如投票系统或在线问答，以鼓励学生积极参与，并及时获得反馈。
5. 定期评估和调整：
  - 进行学生反馈调查：定期收集学生的反馈，了解他们的需求和建议，以便调整课程设计。
  - 跟踪行业趋势：保持与行业的联系，了解最新的趋势和技术，确保课程内容与行业保持同步。

### 7.2 个人反思

在完成城轨供电系统继电保护课程设计的过程中，我发现自己在几个关键方面存在不足：

- (a) **理论与实践的结合**：虽然我对城市轨道交通供电系统和继电保护有了基本的



理解，但我发现在将理论知识应用于实际案例时仍存在一定难度。有时我发现自己难以清晰地将课本中的概念与实际工程案例相结合，这表明我需要更深入地理解理论和它们的实际应用。

- (b) **继电保护的关键要求：**在我的论文中，虽然我提到了继电保护的四个基本要求：选择性、速动性、灵敏性和可靠性，但在实际的工程设计过程中，我发现自己对这些要求的实际应用和它们之间的潜在矛盾理解不够深入。这表明我在未来的学习中需要更加注重这些要求的实际工程应用。
- (c) **工程概况的理解：**我的论文涉及了电气主接线和牵引供电系统等多个方面的工程概况。我意识到我对这些系统组件的理解还不够全面，尤其是它们如何相互作用和协同工作。这提示我在未来的学习中需要更加深入地研究这些系统的细节和功能。
- (d) **创新与改进：**我认为我的设计还有改进的空间，尤其是在创新方面。我可能没有充分考虑到最新的技术和方法，这意味着我的设计可能不是最有效率的。在未来的工作中，我需要更加积极地寻求创新解决方案。
- (e) **挑战与学习：**在整个课程设计过程中，我面临了多个挑战，尤其是在理解复杂的技术概念和将它们应用于实际设计中。但通过这些挑战，我学到了很多关于继电保护和电力系统的知识，这对我的职业发展非常有价值。我也学会了如何解决问题和应对挑战，这将在我未来的工程工作中发挥重要作用。

总体来说，虽然我在课程设计中取得了一定的进步，但我认识到我在理解、应用和评估城轨供电系统继电保护方面还有很多需要学习和改进的地方。

## 致 谢

在这次课程设计的过程中，我非常感谢杨乃琪老师的指导和帮助。虽然这只是一项课程作业，但杨老师对我的项目仍然给予了极大的关注和指导。

从课题的选择到设计的实施，再到最终的报告撰写，杨老师始终以她丰富的经验和专业的知识给予我宝贵的建议。在我遇到困难和疑惑时，杨老师总是耐心地解答我的问题，她的指导不仅帮助我解决了实际问题，也让我学会了如何更有效地思考和分析问题。

更值得感激的是，杨老师总是能够在忙碌中抽出时间来审查我的工作进展，她的及时反馈和建设性意见极大地提升了我的设计质量。此外，杨老师在课程设计的整个过程中给予了我鼓励和支持，让我对自己的工作更有信心。

最后，我要对杨乃琪老师表达我最深的感谢。正是因为有了杨老师的悉心指导和无私帮助，我的课程设计才能顺利完成。在未来的学习和生活中，我将继续发扬在这次课程设计中学习到的精神和技能。



## 参考文献

- [1] 刘建华. 城市轨道交通牵引供电系统事故应急及安全保障研究[D]. 中国铁道科学研究院, 2021.
- [2] 胡颖. 城市轨道交通供电系统对电网的影响及控制[J]. 建材技术与应用, 2020, 1: 38-41.
- [3] 柴段鲲. 城市轨道交通直流供电系统故障建模与保护仿真系统开发[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [4] 王蛟, 张刚. 城市轨道交通低压配电继电保护整定方法[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(8): 15-19.
- [5] 郑大千. 轨道交通直流牵引系统继电保护研究及仿真软件开发[D]. 浙江大学, 2015.
- [6] 黄树智. 城市轨道交通中压环网继电保护方式研究[D]. 东北大学, 2014.
- [7] 韩冶. 数字化变电站技术在城市轨道交通的应用研究[J]. 电气应用, 2013(12): 45-48.
- [8] 赖隆发. 一种轨道交通保护配置优化探讨[D]. 福州大学, 2013.
- [9] 刘春明, 刘德强, 杨泽平, 等. 地铁 OCC 电力调度仿真培训系统继电保护模块的开发[J]. 机车电传动, 2012(4): 61-63.
- [10] 鲁小兵. 城市轨道交通远端短路电流鉴别研究 [D][D]. 西南交通大学, 2012.
- [11] 余龙. 城市轨道交通中压环网继电保护方案的优化设计[D]. 华南理工大学, 2010.
- [12] 王渤. 多车直流牵引供电系统继电保护研究[J]. 咧. 南京理工大学, 2010.
- [13] Zhu J, Mao C, Liu B, et al. Design and Field Application of DC and Harmonic Suppression System for Neutral Current in 220 kV Substation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 69(8): 7560-7570.
- [14] Li D, Huang J. Design and debugging of subway standby mode hardware circuit based on LCU[C]//Seventh International Conference on Mechatronics and Intelligent Robotics (ICMIR 2023): vol. 12779. 2023: 120-125.
- [15] Li C, Li Z, Li T, et al. Research on relay contact conversion model based on nonlinear least square method[C]//2020 5th International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT). 2020: 89-92.

- [16] Yanquan H, Yong C, Jian X, et al. Research of implementing least squares in digital distance relaying for AC electrified railway[J]. 2004.
- [17] Cho G, Ryu K, Lee H, et al. A study on the distance relay operation characteristics for Korean single track AC electrical railway system[J]. 2016.
- [18] Sun Y, Cao Y, Zhang Y, et al. A novel life prediction method for railway safety relays using degradation parameters[J]. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2018, 10(3): 48-56.