

变电工程课程设计指导

主 编 王立舒

副主编 赵文忠 任艳杰 倪晶

主 审 王金海

东北农业大学

前 言

《变电工程课程设计指导》一书在编写过程中，总结吸收了各院校教学和教学改革的有益经验。紧紧围绕农村电网，从课程设计的基本要求和基本方法出发，面向农业电气化与自动化专业学生，进行理论与实践相结合的课程设计，着重讲解了设计的整个过程。针对同学们设计过程中产生的问题，重点介绍了不同电压等级的设计实例，使同学们对于课程设计的内容有了一个初步的了解。使学生通过学习变电工程课程设计的内容和流程，即掌握了理论知识，又能将其应用到实践当中。从而为农业电气化的专业人才培养打下坚实的基础。

本书共分七章，王立舒编写前言、第一章至第三章，赵文忠编写第四章至第七章，任艳杰编写第八章。最后由王立舒负责全书统稿。倪晶、赵玉林、房俊龙等老师也对本书的编写提出了很多宝贵意见和建议。本书最后由哈尔滨第二电业局王金海高工负责审稿。

由于编者的经验和水平有限，书中错误和不妥之处仍在所难免，恳请使用本教材的师生和广大读者批评指正。

编者

2015 年 11 月

绪论 课程设计的基本知识

一、 课程设计目的、内容和要求

（一）课程设计目的

通过课程设计的实践达到如下目的：

- 1、巩固“变电工程设计”和“电力系统分析”课程的相关理论知识；
- 2、学习和掌握变电站电气部分设计的基本方法和基本计算；
- 3、培养学生独立分析和解决问题的能力及实际工程设计的基本技能。

（二）课程设计的内容和要求

1、课程设计的内容

（1）对原始资料的分析：

1）本工程情况：变电站类型及设计容量，单机容量及台数，运行方式，最大负荷利用小时数等。

2）电力系统情况：电力系统近期及远景发展规划（本期工程建成后5~10年），变电站在电力系统中的位置和作用，本期和远景与系统连接方式，各级电压中性点接地方式等。

3）负荷情况：负荷性质及其地理位置，输电电压等级、出线回数及输送容量等。

4）环境条件：当地气温、湿度、覆冰、污秽、地质、水文、海拔高度及地震等。

5）设备制造情况：各种电器的性能、制造能力和供应情况。

（2）电气主接线的方案比较与确定：包括主变压器台数及容量的选择、各级电压接线方式（本期及远景）以及分期过渡接线等设计。

（3）短路电流计算：包括确定主接线的运行方式，绘制等值网络图，计算各短路计算点的短路电流（主要为三相短路电流）。

（4）选择主要电器设备：包括主变压器、站用变压器、断路器、隔离开关、互感器、避雷器、绝缘子、导线和电缆等，并汇总电器设备表。

（5）屋内、外配电装置的布置：根据变电站的类型和地理位置，初步拟定变压器、开关站及厂内电器设备的布置方案。

（6）绘制工程设计图纸：电气主接线单线图、站用电接线图和配电装置布置图。

（7）编制电气一次设备概算表。

（8）编写设计说明书：设计说明书包括设计任务书、所采用的基本资料和原始数据、方案选择论证、主要计算方法和成果。

2、对课程设计的要求

课程设计根据设计任务书以及国家的有关政策和各专业的设计技术规程、规定进行。

（三）设计答辩

设计答辩是教师对学生设计的考核方式之一。考核内容包括全部设计，同时还要求学生具有下列知识：

1、对所设计的变电站的特点、以及它在电力系统中的地位、作用和运行方式等应有清晰的概念。

- 2、熟悉所采用的电气主接线图，掌握各种运行方式的倒闸操作程序。
- 3、熟悉所选用电器设备的工作原理和性能，及其运行使用中应注意的事项。

二、 课程设计任务书的一般形式

由于实际情况的不同，任务书的形式也有所差异，现给出的是一般形式的任务书，仅供参考。

“变电工程设计” 课程设计任务书

题 目：

学生姓名：_____

设计时间：_____

指导教师：_____

一、原始资料

1、变电站的建设规模

- (1) 类型；
- (2) 最终容量、机组的型式和台数，利用小时数（小时/年）；
- (3) 第一期工程主变压器容量和台数。

2、电力系统与本站连接情况

- (1) 变电站在电力系统中的地位和作用；
- (2) 变电站连入系统的电压等级及出线回数；
- (3) 电力系统总装机容量、短路容量或归算后的标么电抗；
- (4) 变电站在系统中所处地理位置、供电范围示意图。

二、设计任务

- 1、电气主接线的设计；
- 2、站用电及近区用电设计；
- 3、短路电流计算；
- 4、主要电器设备选择；
- 5、屋内外配电装置的布置；
- 6、编制概算。

三、课程设计报告撰写

课程设计报告的内容包括：

设计说明书（含计算书）、概算表；图纸 2 张。

四、设计时间及其分配

总计 2 周。时间分配根据每学期教学安排确定。

三、设计程序

电力设计部门承接设计任务，主要以上一级电力部门或计委的计划任务书作为依据。按规定，只有接到计划任务书以后，设计部门才能开始设计。投资较多、工程技术较大的项目要由国家电力公司甚至国家计委下达设计任务书，投资较小的项目则由地方电力部门或计划部门下达计划任务书。

设计部门接到计划任务书以后就开始组织设计，首先是搜集必要的原始资料，同时要和供电部门商定有关的原则问题。搜集资料应当包括以下几个内容：

1. 地质、气象资料：(1) 土质；(2) 地形；(3) 水文；(4) 气温、气压；(5) 风向、风速；(6) 冻结深度；(7) 降雨量；(8) 雷电活动情况。
2. 电力系统的资料：(1) 电源的分布；(2) 附近系统的接线；(3) 系统的电压等级；(4) 系统的容量；(5) 网络的参数；(6) 中性点的接地方式；(7) 电源的数目；(8) 进线方向。
3. 负荷资料：(1) 新建变的供电负荷类型及供电半径；(2) 近期 5~10 年发展负荷的资料；(3) 负荷的总容量；(4) 进出线电压等级及进出线数目。
4. 对扩建变电站还必须了解原有的设计，运行安装及设备情况。

在了解以上资料的基础上，要进行所址选择，变电站的所址应符合下列要求：(1) 接近负荷中心；

- (2) 不占或少占农田；
- (3) 便于各级电压线路的引入和引出，架空线走廊与所址同时确定；
- (4) 交通运输方便，工程量小；
- (5) 具有适宜的地质条件（例如避开断层、滑陷区、溶洞地带等），如果所址选在有矿藏的地区，应征得有关部门的同意，避开有危岩和易发生滚石的场所；
- (6) 尽量不设在空气污秽地区，否则应采取防污措施或设在污源的上风侧；(7) 变电站的所址标高宜在 50 年一遇的高水位之上，否则应有防护设施；(8) 所址不应为积水淹没，山区变电站的防洪设施应满足泄洪要求；
- (9) 具有生产和生活用水的可靠水源；
- (10) 适当考虑职工生活上的方便；
- (11) 确定所址时应考虑对邻近设施的影响。

在许多情况下设计任务书已经规定了变电站的位置、类型、系统供电方式，供电电压以至主变压器容量等。在些情况下设计人员还要求必须深入现场会同供电部门一起进行实地调查并一起讨论确定一些原则问题。

- (1) 按选所条件审定变电站所址是否合理；
- (2) 变电站的供电电压是否合理，是否符合网络发展规划；
- (3) 变压器容量及进出线数目；
- (4) 变电站扩建的可能性，分期建设的年限；
- (5) 运行上有哪些要求；
- (6) 设备的选择以及货源的方向。

在确定以上这些问题的基础上，按规定，设计分两个阶段进行，设计的第一阶段叫做初步设计，第二阶段叫做施工图设计，只有当初步设计经过规定的上一级部门批准以后，才能着手进行施

工设计。

四、初步设计的内容

初步设计的主要任务是确定方案，并为订货提供数据。按规定，只有当初步设计被批准以后才能向供应部门提出订货要求。电力设备的订货是通过订货会议或招标的形式进行的，举办订货会议或招标的条件之一是应具有被批准了的初步设计。

由于初步设计只解决方案问题，所以也就不要求做得很详细，主要是通过初步设计证明所提方案是可行的，即占地面积少、投资少、便于运行检修和施工。

一个变电站的初步设计大致包括以下几部分内容：

1. 说明书

要用简明的文字说明设计的依据，建设的必要性及规模，占地面积和建筑面积的大小，主接线方案的特点，短路电流大小及选用设备情况，所用电、直流系统配电装置，通信系统及保护方面的新技术等。

2. 计算书

一般包括以下几部分

(1) 短路电流计算及电气设备选择。

(2) 配电装置尺寸的确定和校验。

(3) 架构受力的计算。

(4) 直流设备及通信系统的选择。

上列四项中，第一项是每一个变电站设计都不可缺少的，其它三项则根据具体情况确定是否要有这些内容。例如基本上是参考典型设计的配电装置，则不需论证尺寸，如果提出的是一种新颖布置，又因无过去的设计可借鉴，就要求对配电装置的尺寸进行论证。

3. 图纸

(1) 主接线图

这是最重要的一张图纸，是所有其它图纸的依据。主接线图除了要表明各种电气设备有相互联系以外，还应表明设备的规范，防侵入电波及感应雷的措施，中性点接地方式，电压互感器及电流互感器的配置等。

主接线图应反映本期工程和远景的区别，一般用实线表示本期工程，用虚线表示远景工程。

(2) 总平面布置接线图

总平面布置接线图上应清晰表明各种电气设备的相互距离，其中包括纵向尺寸和横向尺寸两种，纵向尺寸反映从围墙起经各种设备、道路、变压器、室内配电装置、出线构架，直到另一围墙为止的距离。横向尺寸表达各并列间隔内部以及间隔和间隔之间的距离等。

总平面布置接线图只能在各种间隔尺寸确定以后才能着手绘图，这是与主接线图不同之点。总平面布置接线图虽然要在断面图初步给出以后才能着手绘制，但断面图却要在总平面布置以后按照间隔的排列顺序，接线确定的基础上才能形成。

总平面布置接线图的图纸比例应该合适，比例过大，图纸幅面小，图画不清晰，细节问题不能表达清楚，这就要用更多的局部平面图来补充，结果反而增加了工作量。比例一般是户外配电装置部分应该由总平面表达清楚，不应再用局部平面补充。通常用的比例是 M1: 100 或 M1: 200。

(3) 断面图。

根据主接线和总平面布置方式的不同，应有相应的断面图，一般包括出线间隔、进线（即变

压器回路)间隔、母联间隔、分段间隔、电压互感器及避雷器间隔、所用电源间隔等。

通过断面图主要明确布置方案能否成立,对运行、检修是否方便,安装是否有困难。断面图中一定要把设备的定位尺寸注清楚,一般用纵向尺寸和安装高度来表达。隔离开关和断路器的操作机构在设备的哪一侧也要在断面图中表示出来,这就要求在绘投影图时把操作机构的投影表达清楚。

(4) 主控制室及 10kV 配电装置平面布置图。

由于总平面图的比例不能选的过小,这就不能把主控制室及 10KV 配电装置表达清楚,需要用更小比例图纸来补充。

(5) 主要设备材料汇总表。

这是给设备定货招标直接提供依据的一份资料,它是根据主接线图及其它图纸制定出来的,要求主要设备准确,没有遗漏。

4. 工程概算

一般由概算人员完成,要对工程的费用有个近似估计。

五、施工设计的内容

初步设计经上级审核批准后可以着手进行施工设计。因此,施工设计应以初步设计为依据,但并不是说初步设计所确定的方案就一点也不能更改。恰巧相反,在施工设计阶段,往往是因为情况有变化,认识有了提高,对初步设计做些局部的方案修改,使设计更加合理和完善。

施工设计是施工的依据,重点要表达施工情况,因为通过审核都要有些修改,所以初步设计中的图纸在施工设计阶段还要重新绘出,并要达到施工设计的要求,详细注明尺寸和所用设备、材料。除了这些图纸以外,还应有设备安装图,它是各种设备安装的依据。在施工中如遇到非定型产品时,只能通过各级加工的办法解决,要绘制设备加工图。

由于施工设计的图纸较多,应分几卷。如 110kV 变电站包括:总的部分,110kV 配电装置部分、35kV 配电装置部分、10kV 配电装置部分、主变安装部分、防雷接地部分、电缆敷设部分等。

在初步设计中不讨论防直击雷保护和接地网部分,因为二者都不影响方案,在施工设计中才讨论这两个问题,并绘出相应的图纸。

变电站如果要装设补偿电容器时,初步设计中只在主接线图中表示其连接关系,并在总平面布置接线图中留一安装位置,这一部分的具体施工图也在施工设计阶段解决。

如果说初步设计只要求提出主要设备和材料汇总表,在施工设计阶段就要求提出全部设备材料清单,一般在每张图纸上都应附有设备材料表,在每一个部分应有该部分的设备材料汇总表,在总的部分应有设备总表。

施工设计也有说明书,主要说明经过施工设计,对初步设计所提方案又有哪些修改。在计算书中,如果短路电流和设备选择方面没有变化,在施工设计就不出计算书,只对防雷保护和接地网设计与计算两部分提出计算书。

六、变电站设计要求

(1) 设计要符合各项技术经济政策。

(2) 设计要做到节约用地,不占良田,少占农田,技术先进,经济合理,安全可靠,确保质量。

(3) 要积极推广和采用经生产实践证明是行之有效的新技术、新设备,并尽量采用标准化

构件和系列产品。

（4）设计要考虑到发展的可能性，其规模应按 5~10 年远景来规划。为节省一次投资，可根据实际负荷增长的需要分期建设。

第一章 导体和电气设备的选择与校验

一、选择设计的一般规定

导体和电器的选择设计，同样必须执行国家的有关技术经济政策，并应做到技术先进、经济合理、安全可靠、运行方便和适当的留有发展余地，以满足电力系统安全经济运行的需要。

根据颁发的设计规程，对于导体和电器选择设计的规定简述如下：

（一）一般原则

- 1) 应满足正常运行、检修、短路和过电压情况下的要求，并考虑远景发展的需要；
- 2) 应按当地环境条件校核；
- 3) 应力求技术先进和经济合理；
- 4) 选择导体时应尽量减少品种；
- 5) 扩建工程应尽量使新老电器型号一致；
- 6) 选用的新产品，均应具有可靠的试验数据，并经正式鉴定合格。

（二）有关的几项规定

导体和电器应按正常运行情况选择，按短路条件验算其动、热稳定，并按环境条件校核电器的基本使用条件。在正常运行条件下，各回路的持续工作电流，应按长期工作情况计算。验算导体和电器时，应按短路电流的有关规定计算。

二、导体和电器选择技术和设计计算

（一）断路器

断路器型式的选择，除需满足各项技术条件和环境条件外，还应考虑便于安装调试和运行维护，并经技术经济比较后才能确定。根据当前我国生产制造情况，电压 6~220kV 的电网一般选用少油断路器；电压 110~330kV 的电网，当少油断路器技术条件不能满足要求时，可选择六氟化硫或空气断路器；大容量机组采用封闭母线时，如果需要装设断路器，易选用发电机专用断路器。

断路器选择的具体技术条件简述如下：

（1）电压： U_g （电网工作电压） $\leq U_n$ 。

（2）电流： $I_{g.\max}$ （最大持续工作电流） $\leq I_n$ 。

由于高压开断电器没有连续过载的能力，在选择其额定电流时，应满足各种可能运行方式下回路持续工作电流的要求，即取最大持续工作电流 $I_{g.\max}$ 。

断路器使用的环境温度高于设备最高允许环境温度，即高于+40℃（但不高于+60℃）时环境温度每增高 1℃，建议减少额定电流 I_n 的 1.8%；当使用的环境温度低于+40℃时，环境温度每降低 1℃，建议增加额定电流的 0.5%，但其最大过负荷不得超过 20% I_n 。

（3）开断电流（或开断容量）：

$$I_{d.t} \leq I_{kd} \text{ (或 } S_{d.t} \leq S_{kd} \text{)}$$

式中

$I_{d.t}$ ——断路器实际开断时间 t 秒的短路电流周期分量;

$S_{d.t}$ ——断路器 t 秒的开断容量;

I_{kd} ——断路器的额定开断电流

S_{kd} ——断路器额定开断容量。

高压断路器是根据其主要技术参数来选择的。即根据：①额定电压；②额定电流；③装置种类；④构造型式；⑤开断电流（或断流容量）⑥热稳定和动稳定等。下面叙述具体选择的方法。

1. 按额定电压选择

断路器的额定电压应等于或大于其所在电网的额定电压，即

$$U_e \geq U_w$$

式中 U_e ——断路器的额定电压;

U_w ——断路器所在电网的额定电压。

2. 按额定电流选择

断路器的额定电流应等于或大于它所在线路的最大长期工作电流，即

$$I_e \geq I_{g.zd}$$

式中 I_e ——断路器的额定电流;

$I_{g.zd}$ ——最大长期工作电流，要计及过负荷及线路最大输送能力，按表 6-1 计算。

当断路器实际使用的环境温度 θ 不同于计算环境温度时，其允许电流不等于额定电流，应按电气工程设计手册给出的公式修正。

$$I_{e\theta} = I_e \sqrt{\frac{\theta_y - \theta}{\theta_y - \theta_0}} = K_\theta I_e$$

式中 K_θ ——修正系数;

θ_y ——电气设备正常发热允许最高温度。

3. 按装置种类选择

装置种类是指断路器装设的场所。装在屋内的选用屋外型，装在屋外的选用屋外型。当屋外

配电装置处于严重污秽地区或积雪覆冰严重地区，应采用高一级电压的断路器。

4. 按构造型式选择

高压断路器的构造型式很多，但各有不同的特点。农村变电站过去常采用少油断路器和多油断路器。随着农村模式变电站的建立，新型的六氟化硫断路器、真空断路器已被农村变电站采用。

5. 按额定开断电流选择

断路器除满足正常工作条件外，还要求它能可靠地切断最大短路电流。一般用额定开断电流来表示断路器开断短路电流的能力。按额定开断电流选择断路器时，必须满足这样的条件，就是在给定的电网电压下，高压断路器的开断电流不应小于高压断路器的灭弧触头开始分离电路内的短路电流有效值，即

$$I_{ekd} \geq I_{dt}$$

式中 I_{ekd} —断路器的额定开断电流，kA；

I_{dt} —断路器灭弧触头开始分开瞬间的短路电流有效值，kA。

断路器的开断计算时间，是从短路瞬间开始到断路器灭弧触头分离的时间，其中包括继电保护动作的时间 t_b 和断路器固有分闸时间 t_g 之和，即

$$t_{kd} = t_b + t_g \quad (s)$$

继电保护动作时间应考虑快速保护所能达到的最小时间，这样计算开断电流才具有最大值。固有分闸时间是随断路器的类型不同而有差异。对于快速动作的断路器其固有分闸时间不大于0.04s，对于非快速动作的断路器为0.1~0.15s。

短路电流 I_{dt} 的计算可分为以下几种情况：

(1) 当 $t_{kd} < 0.1s$ 时， I_{dt} 取短路电流的全电流，即

$$I_{dt} = \sqrt{I_z^2 + \left(\sqrt{2} I'' e^{-\frac{t_{kd}}{T_a}} \right)^2}$$

式中 t_{kd} —断路器的开断计算时间，s；

I_z —断路器开断瞬间短路电流周期分量有效值，可近似取 $I_z = I''$ ，kA；

T_a —短路电流非周期分量的衰减时间常数，s。

6. 动稳定: $i_{ch} \leq i_{\max}$

i_{ch} —三相短路电流冲击值;

i_{max} —断路器极限通过电流峰值。

7. 热稳定: $I_{\infty}^2 t_{dz} \leq I_t^2 t$

I_{∞} —稳态三相短路电流;

t_{dz} —短路电流发热等值时间 (又称假想时间);

I_t —断路器 t 秒热稳定电流。

(二) 负荷开关和隔离开关

负荷开关型式的选择, 其技术条件与断路器相同, 并可酌情从简。

隔离开关按构造型式、安装地点、额定电压和额定电流来选择, 按短路电流校验热稳定和动稳定。选择的具体方法和断路器相同。

(三) 高压熔断器

熔断器是最简单的保护电器, 它用来保护电气设备免受过载和短路电流损坏。高压熔断器的选择条件为: 额定电压、额定电流、装置种类、构造型式、开断电流 (极限断路容量)、保护的选择性等。

1. 按额定电压选择

1) 对非限流的高压熔断器

必须使熔断器的额定电压等于或者大于所在电网的额定电压, 即

$$U_e \geq U_w$$

式中 U_e —熔断器的额定电压;

U_w —熔断器所在电网的额定电压。

2) 对限流的高压熔断器

必须使熔断器的额定电压等于所在电网的额定电压, 即

$$U_e = U_w$$

不能用在高于或低于其额定电压的电网中。其原因是: 这种熔断器是限流的, 熔件熔断时产生过电压。如果熔断器用在低于其额定电压的电网中, 过电压可能达到 3.5—4 倍电网相电压, 将使电网产生电晕, 甚至损坏电网中的其它电气设备; 如果熔断器用在高于其额定电压的电网中, 则熔断器产生的过电压将引起电弧重燃, 并无法熄灭, 使熔断器烧坏; 若用在与其额定电压相等的电网中, 过电压仅为 2—2.5 倍电网相电压, 仅比设备的线电压稍高一些, 所以没有以上两种危险。

2. 按额定电流选择

$$I_{e.rq} \geq I_{e.rj} \geq I_{g.zd}$$

式中 $I_{e.rq}$ —熔断器的额定电流, A;

$I_{e.rj}$ —熔件的额定电流, A;

$I_{g.zd}$ —电路的最大长期工作电流, A。

(四) 限流电抗器

应按下列技术条件选择:

1. 电压: $U_e \geq U_w$

2. 电流: $I_e \geq I_{g.zd}$

3. 动稳定: $i_{ch} \leq i_{dw}$

i_{ch} —电抗器后面三相短路电流冲击值; (分裂电抗器应分别按单臂流过 i_{ch} 和两臂同时流过

反向 i_{ch} 进行校验。)

i_{dw} —电抗器的动稳定电流。

4. 热稳定: $I_{\infty}^2 t_{dz} \leq I_t^2 t$

(五) 电压互感器

电压互感器的选择和配置应按下列条件:

1. 型式: 电压互感器的型式应根据使用条件选择。

6~20kV 屋内配电装置, 一般采用油浸绝缘结构, 也可采用树脂浇注绝缘结构的电压互感器。

35~110kV 配电装置, 一般采用油浸绝缘结构的电压互感器。

220kV 及以上配电装置, 当容量和准确度等级满足要求时, 一般采用电容式电压互感器。

在需要检查和监视一次回路单相接地时, 应选用三相五柱式电压互感器或具有第三绕组的单相电压互感器组。

2. 一次电压 U_1 : $1.1U_n > U_1 > 0.9U_n$

U_n 为电压互感器额定一次线电压, 1.1 和 0.9 是允许的一次电压的波动范围, 即为 $\pm 10\%U_n$ 。

3. 二次电压: 电压互感器二次电压, 应根据使用情况, 按表 ? ? ? 选用所需二次额定电压 U_{2n} 。

表 2-1 电压互感器二次额定电压选择表

绕组	主二次绕组		附加二次绕组	
高压侧接入方式	接于线电压上	接于相电压上	用于中性点直接接地系统中	用于中性点不接地或经消弧线全接地系统中
二次额定电压 (V)	100	$100/\sqrt{3}$	100	100/3

4. 准确等级: 电压互感器应在哪一准确等级下工作, 需根据接入的测量仪表、继电器和自动装置等设备确定准确等级。

常用的测量仪表的类型、用途和对准确等级的要求, 规定如下:

用于发电机、变压器、调相机、厂用(或所用)馈线、出线等回路中的电度表, 供所有计算电费的电度表, 其准确等级要求为 0.5 级。

供运行监视估算电能的电度表、功率表和电压继电器等, 其准确等级要求一般为 1 级。

用于估计被测数值的表计, 如电压表等, 其准确等级要求较低, 一般为 3 级即可。

在电压互感器二次回路, 同一回路接有几种不同形式和用途的表计时, 应按要求准确等级高的仪表, 确定为电压互感器工作的最高准确度等级。

(六) 电流互感器

电流互感器的选择和配置应按下列条件。

1. 型式: 电流互感器的型式应根据使用环境条件和产品情况选择。对于 6~20kV 屋内配电装置, 可采用瓷绝缘结构或树脂浇注绝缘结构的电流互感器。对于 35kV 及以上配电装置, 一般采用油浸瓷箱式绝缘结构的独立式电流互感器。有条件时, 应尽量采用套管式电流互感器。

2. 一次回路电压: $U_g \leq U_n$

U_g —— 电流互感器安装处一次回路工作电压;

U_n —— 电流互感器额定电压。

3. 一次回路电流: $I_{g.\max} \leq I_{1n}$

$I_{g.\max}$ —— 电流互感器安装处的一次回路最大工作电流;

I_{1n} —— 电流互感器原边额定电流。

当电流互感器使用地点环境温度不等于+40℃时, 应对 I_{1n} 进行修正。修正的方法与断路器 I_n 的修正方法相同。

4. 准确等级: 电流互感器准确等级的确定与电压互感器相同, 需先知电流互感器二次回路所接测量仪表的类型及对准确等级的要求, 并按准确等级要求最高的表计来选择。

常用测量表计对准确等级的要求, 见电压互感器的有关内容。

(七) 支柱绝缘子及穿墙套管

1. 支柱绝缘子应按下列条件选择:

(1) 型式: 用于屋内时, 一般采用联合胶装的多棱式支柱绝缘子。用于屋外时, 一般采用棒式支柱绝缘子。在需要倒装时, 宜用悬挂式支柱绝缘子。当屋外有污秽或冰雪时, 3~20kV 支柱绝缘子一般应采用高一级电压的产品。

$$(2) \text{ 电压: } U_g \leq U_n$$

U_g 为绝缘子安装地点的工作电压。

$$(3) \text{ 动稳定: } F_{\max} \leq 0.6F_y \text{ (N)}$$

F_y ——绝缘子抗弯破坏负荷 (N);

F_{\max} ——短路时作用在绝缘子上的最大力。当三相母线布置在同一平面时, 中间相母线受的电力最大, 其值可由下式计算

$$F_{\max} = 1.73K \frac{L}{a} i_{ch}^2 \times 10^{-7} \text{ (N)}$$

式中 a ——母线相间距离 (m);

L ——绝缘子间的跨距 (m), 当绝缘子两边跨距不相等时, 取相邻两跨距的平均值;

K ——绝缘子受力折算系数。

由于绝缘子抗弯破坏负荷是作用在绝缘子帽上, 而电力则作用在母线中间, 二者力臂不等。为了使力臂相等, 故需增大电力, 其值为

$$K = \frac{H}{H_1}$$

$$H = H_1 + b + \frac{h}{2}$$

上式中 H ——从绝缘子底部到母线水平中心线的高度;

H_1 ——绝缘子高度 (mm);

b ——母线下部至绝缘子帽的距离, 矩形母线立放为 18mm, 矩形母线平放和槽形母线为 12mm;

h ——母线的总高度。

对于 1~2 条母线平放时, $K \approx 1$ 。

对于悬式绝缘子, 不需校验动稳定。

2. 穿墙套管应安下列条件选择:

(1) 型式: 一般采用铝导体穿墙套管。对于母线型穿墙套管, 应校核窗口允许穿过的母线尺寸。

$$(2) \text{ 电压: } U_g \leq U_n$$

(3) 电流: $I_{g.\max} \leq I_n$

$I_{g.\max}$ ——穿墙套管安装处最大持续工作电流。

I_n ——穿墙套管的额定电流, 当环境温度不等于 40℃时, I_n 应进行修正, 方法与断路器相同。

(4) 热稳定: $I_{\infty}^2 t_{dz} \leq I_t^2 t$

(5) 动稳定: $F_{\max} \leq 0.6F_y$ (N)

$$\begin{aligned} F_{\max} &= 1.73 \times \frac{1}{2} \frac{L_1 + L_2}{a} i_{ch}^2 \times 10^{-7} \\ &= 0.865 \frac{L_1 + L_2}{a} i_{ch}^2 \times 10^{-7} \text{ (N)} \end{aligned}$$

式中 L_1 ——套管本身长度 (m);

L_2 ——套管端部至最近一个支柱绝缘子间的距离 (m)。

第二章 短路电流计算及主变选择

一、短路种类和标么制

(一) 发生短路的原因和短路的定义

产生短路的主要原因是电气设备载流部分的绝缘损坏。绝缘损坏的原因多因设备过电压、直接遭受雷击、绝缘材料陈旧、绝缘缺陷未及时发现和消除。此为，如输电线路断电、线路倒杆也能造成短路事故。所谓短路是指相与相之间通过电弧或其他较小的阻抗的一种非正常连接，在中性点直接接地系统中或三相四线制系统中，还指单相和多相接地。

(二) 短路的种类

三相系统中短路的基本类型有：三相短路、两相短路、单相接地短路和两相接地短路。三相短路是对称短路，此时三相电流和电压同正常情况一样，即仍然是对称的。只是线路中电流增大、电压降低而已，而电流和电压间的相位差一般也较正常工作时为大。除了三相短路外、其他类型的短路皆不是对称短路，此时三相所处的情况不同，各相电流、电压数值不等，期间相角也不相同。

运行经验表明：在中性点直接接地的系统中，最常见的短路是单相短路，约占短路故障的 65%~70%；两相短路约占 10%~15%；两相接地短路约占 10%~20%；三相短路约占 5%。在短路过程中，短路电流是变化的，其变化情况决定与系统容量的大小、短路点距电源的远近、系统内发电机是否有调压装置等因素。

根据短路电流的变化情况通常把电力系统分为无限容量系统和有限容量系统两大类。所谓无限容量系统是指容量为无限大的系统，在该系统中，当发生短路时，母线电压维持不变，短路电流的周期分量不衰减。当然，容量为无限大的系统实际上是不存在的，但在实际工作中，通常把电源部分阻抗不超过短路电路总阻抗的 5% 甚至是 10%，或者以供电电源总容量为基准的短路阻抗标么制大于 3 时，则认为该系统为无限容量系统。对不满足上述条件的系统皆按有限容量的系统处理。

为了校验和选择电气设备和载流导体，以及为了继电保护的整定计算，常用下述短路电流值：

I_{ch} ——短路电流的冲击值，即短路电流最大瞬时值；

I_{ch} ——短路电流最大有效值，即第一周期短路电流有效值；

I'' ——超瞬变或次暂态短路电流的有效值，即第一周期短路电流周期分量有效值；

$I_{0.2}$ ——短路后 0.2 秒的短路电流周期分量有效值；

I_{∞} ——稳态短路电流有效值；

S'' ——超瞬变或次暂态短路容量；

$S_{0.2}$ ——短路后 0.2 秒的短路容量；

S_{∞} ——稳态短路电流容量；

(三) 标么制

在计算短路电流时，各电气量如电流、电压、功率、阻抗等数值，可以用有名值表示，也可以用标么制表示。有名值多用于 1000V 以下的低压网络，标么制则广泛用于高压网络。

标么制是一种相对单位制，电路参数的标么制为其有名值与基准值之比。

（四）有名单位制

用有名单位制计算短路电路的总阻抗时，必须把各元件阻抗的相对值换算成欧姆值，并把短路电路内通过变压器互联的各电压级元件的欧姆值，都归算到短路点所在级平均额定电压下的欧姆值。

二、变电站主变压器的选择

在各级电压等级的变电站中，使用着各种电气设备，诸如变压器、断路器、隔离开关、电抗器、电压和电流互感器、母线、调相机等，这些设备的任务是保证变电站安全、可靠的供电，因为选择电气设备时，必须考虑及电力系统在正常运行和故障状态下的工作情况。所谓电气设备的选择，则是根据各种电气设备在系统中所处的地位和所完成的任务来确定他们的形式和参数。电气设备选择的总原则是在保证安全、可靠工作的前提下，适当的留有裕度，力求在经济上进行节约。下面重点介绍一下主变压器的选择。

SDJ₂—88 规程中关于变电站主变压器选择的规定

1. 变压器容量和台数的选择，应根据《电力系统设计技术规程》SDJ161—85 有关规定和审批的电力系统规划设计决定进行。凡装有两台（组）及以上主变压器的变电站，其中一台（组）事故停运后，其余主变压器的容量应保证该所全部负荷的 70%，在计及过负荷能力后的允许时间内，应保证用户的一级和二级负荷。如变电站有其他能源保证在变压器停运后用户的一级负荷，则可装设一台主变压器。
2. 与电力系统连接的 220~330kV 变压器，若不受运输条件的限制，应选用三相变压器。500kV 主变压器选用三相或单相。应根据变电站在系统那个中的地位、作用、可靠性要求和制造条件、运输条件等，经技术经济比较确定。当选用单相变压器组时，可根据系统和设备情况确定是否装备用相；此时，也可根据变压器参数、运输条件和系统情况，在一个地区设置一个备用相。
3. 根据电力负荷发展及潮流变化，结合系统短路电流、系统稳定、系统继电保护、对通信线路的危险影响、调相调压和设备制造等具体条件允许时，应采用自耦变压器。当自耦变压器第三绕组接有无功补偿设备时，应根据无功功率潮流，校核公用绕组的容量。
4. 220~330kV 具有三种电压的变电站中，如通过主变压器各侧绕组的功率均达到该变压器额定容量的 15%以上，或者第三绕组需要装设无功补偿设备时，均采用三绕组变压器。对深入市区的城市电力网变电站，结合城市供电规划，为简化变压器层次和接线，也可采用三绕组变压器。

5. 主变压器调压方式的选择,应符合《电力系统设计技术规程》SDJ161 的有关技术规定,500kV 变压器采用有载调压时,应经过技术经济论证。

(一) 主变压器的一般选择

1. 主变压器台数的确定

为保证供电的可靠性,为避免一台主变故障或检修时影响供电,变电站一般装设两台主变压器,但一般不超过两台变压器。当只有一个电源或变电站的一级负荷另有备用电源保证供电时,可装设一台主变压器。

对于大型超高压枢纽变电站,装设两台大型变压器,当一台发生故障时,要切断大量负荷是很困难的。因此,对大型枢纽变电站,根据工程具体情况,应安装 2~4 台主变压器。这种装设方法可以提高变电站的供电可靠性,变压器的单台容量以及安装的总容量皆可有所节约,且可根据负荷的实际增长的进程,分期逐台装设变压器,而不致积压资金。

当变电站装设两台及以上的主变时,每台容量的选择应按照其中任意一台停运时,其余变压器容量至少能保证所供的一级负荷成为变电站全部负荷的 60%~75%。通常一次变电站采用 75%,二次变电站采用 60%。

2. 变压器形式的选用

变电站的主变压器一般采用三相变压器,如因制造和运输条件限制,在 220kV 的枢纽变电站中,一般采用单相变压器组。当装设一组单相变压器时,应考虑装设备用相。当主变压器超过一组,且各组容量满足全所负荷的 75% 要求时,可不装备用相。

变电站中的主变压器在系统有调压要求时,一般采用有载调压变压器。有载调压变压器可以带负载调压,有利于变压器的经济运行。因此,在新设计的变电站中,大都采用这种形式的变压器。

与两个中心点直接接地系统连接的变压器,除低压负荷较大或与高中压间潮流不定外,一般采用自耦变压器,但仍需做技术经济比较。

3. 三绕组变压器的选择

具有三种电压的变电站,例如 220、110、35kV,一般采用三绕组变压器。关于三绕组变压器的组抗拒和分接头的选择,现说明如下:

(1) 三绕变压器的最大阻抗放在高、中侧还是高、底侧以及中低侧,其短路容量对高压系统稳定、继电保护、供电的电压水平以及电压的调整都有很大的影响,必须全面综合考虑这些因素。

(2) 三绕组变压器再制造上有两种基本组合方式:

1) 升压结构。这种结构绕组的排列为铁心一中压一低压一高压绕组,故高、中压间阻抗最大。

2) 降压结构。其绕组排列为铁心一底压一中压一高压绕组,故高、底压间阻抗最大。

升压结构的三绕组变压器一般适用于装设在发电厂,而降压结构的三绕组变压器适用于向中压母线供电为主向低压母线供电为辅的降压变电站。当变电站向降压母线供电为主、向中压母线供电为辅时,也可选用升压结构。

(3) 双绕组和三绕组变压器的变比和分接头可按制造标准选择,即变压器低压侧的线间电压为受电

设备额定电压的 105%，高、中压侧为 110%，并带有 $\pm 2 \times 2.5\%$ 的分接头。若正常运行时，高、低压同时向中压供电则高压绕组的端电压为受电设备额定电压 100%。

4. 主变容量的选择

(1) 为了正确的选出变压器的额定容量，要绘制变电站的年及日负荷曲线，并从该曲线得出变电站的年及日最高负荷和平均负荷。

(2) 主变容量的确定应根据电力系统 5~10 年的发展规划进行选择，因此，为了确定合理的变压器容量，必须尽可能把 5~10 年的负荷发展规划做得正确。

(3) 变压器的最大负荷按下式确定为

$$P_M \geq K_0 \Sigma P$$

式中 P_M ——变电站最大负荷；

K_0 ——负荷同时系数；

ΣP ——按负荷等级统计的综合用电负荷；

(4) 如果变压器的容量按条件 $Se \geq \Sigma P_M$ 选出，那么，当曲线的尖峰负荷只占很短时间（0.5~1h）时，则变压器长时间工作的欠载状态下，从而增大了变压器的安装容量。在多数情况下，把变压器的额定容量选择到接近于较长连接运行时间的最大负荷值较为有利，同时考虑充分利用变压器在正常情况下的过负荷能力。变压器得过负荷能力，取决于昼夜负荷曲线的负荷系数，以及昼夜和年温度变化特点，并取决于变压器的冷却方式。

(5) 从年度损失和投资方面来讲，变压器过负荷运行小时数越大则越经济。原苏联在选择单台变压器变电站的额定容量时，计及变压器的经常性过负荷。根据对多数终端、分支和企业变电站的统计，表明变压器的容量按 $Se = (0.75 \sim 0.8) P_M$ 选择较为合理。此时，以变压器的正常过负荷能力来承担变压器所遭受的短时高峰负荷（连续运行时间不宜超过 1h），过负荷以不缩短变压器的寿命为限。因为变压器为具有高可靠性和低事故率的元件，可允许在网络故障状态下有较大的过负荷，其寿命并不怎么缩短。

(6) 对于两台变压器的变电站变压器的额定容量可按下式确定为

$$Se = 0.7 P_M$$

即按 70% 的全部负荷选择，因此变电站的总安装容量为

$$\Sigma Se = 2 \times (0.7 P_M) = 1.4 P_M$$

当一台变压器停运时，可保证对 70% 负荷的供电，考虑变压器事故过负荷能力为 40%，则可保证 98% 负荷供电。

若取 $Se = 0.6 P_M$ ，则当一台变压器停运时，可保证对 60% 的负荷供电，考虑变压器事故过负荷能力为 40%，可保证对 84% 负荷的供电。由于一般变电站中，大约有 25% 的非重要负荷，在事故状态下可以切除，因此，采用 $Se = 0.6 P_M$ ，对变电站来说保证重要负荷来说也是可行的。

(7) 前些年我国对安装两台主变的变电站，通常按 $Se = 0.6P_N$ 选择每台主变容量。但是，现在的先进国家、诸如俄罗斯、日本、加拿大等国，规定当一台主变停运时，保证全部负荷的 70%、83%、75%。为提高供电可靠性，在 1989 年我国能源部所颁发的 SDJ2-88 标准中，规定当一台主变停运时，其余主变容量应保证该所全部负荷的 70%，这样，再将变压器得过负荷能力考虑进去，大致可以满足全部负荷的要求。

(二) 自耦变压器的应用

在大型降压变电站中，普通三绕组变压器的应用较为有限。当主网电压为 110~220kV，中压网络为 35kV 时，由于他们的中点采用不同的接地方式，才采用普通的三绕组变压器。当中压为 110kV 及以上的电压时，降压变压器和联络变压器多采用自耦变压器，而自耦变压器的高、中压绕组有直接电气联系，故有巨大的经济优越性。

1. 变比和效益系数

自耦变压器与普通变压器的区别是普通变压器一、二次绕组只有磁的耦合，而自耦变压器高、中压绕组间存在着直接电的联系，所以电流分布也不一样。AO 为一次绕组 N_1 ，AB 为串联绕组 N_2 ，BO 为公共绕组 N_3 ，且

$$N_1 = N_2 + N_3, \quad I_2 = I_1 + I_3$$

$$U_2 = \frac{N_2}{N_1} U_1 = \frac{I_3}{I_1 + I_3} U_1, \quad NI_1 = NI_2$$

式中， $K_{1-2} = N_2/N_1$ 为自耦变压器变比。于是

$$I_1 = \frac{I_2 N_1}{N_2} = \frac{I_2}{K_{1-2}}$$

$$I_3 = I_2 - I_1 = I_2 - \frac{I_2}{K_{1-2}} = I_2 \left(1 - \frac{1}{K_{1-2}}\right)$$

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 = U_2 (I_1 + I_3) = U_2 \left[\frac{I_2}{K_{1-2}} + I_2 \left(1 - \frac{1}{K_{1-2}}\right) \right]$$

$$= \frac{U_2 I_2}{K_{1-2}} + U_2 I_2 \left(1 - \frac{1}{K_{1-2}}\right)$$

通过自耦变压器的功率有两部分组成：

(1) $U_2 I_1 = \frac{U_2 I_2}{K_{1-2}}$ 表示通过串联绕组 AB 由一次侧传送到二次侧的功率；

(2) $U_2 I_3 = U_2 I_2 \left(1 - \frac{1}{K_{1-2}}\right)$ 表示通过公共绕组 BO 由一次侧传送到二次侧的功率；

(3) $U_1 I_1 = U_2 I_2$ 称为自耦变压器的额定容量，也称通过容量；

(4) $U_2 I_3$ 称为本身容量，亦及电磁变换容量。

自耦变压器的尺寸、材料消耗，就是由本身容量确定的。本身容量等于额定容量乘以效益系数

$\left(1 - \frac{1}{K_{1-2}}\right)$ 。效益系数越小，用自耦变压器越优越。

220/110KV 普通变压器与自耦变压器比较：

自耦变压器二次侧输出功率为 $110 \times 20 = 2200$ (kVA)

串联绕组 AB 功率为 $110 \times 10 = 1100$ (kVA)

公共绕组 B0 功率为 $110 \times 10 = 1100$ (kVA)

故电磁变换功率只有 1100kVA 输出功率却为 2200kVA 额外的功率 1100kVA 不是经过电磁变换而是经过电路直接传送的。自耦变压器虽然省略了普通变压器的二次绕组,但仍传输同样的功率。

对于所给数据,效益系数为 0.5,通过电磁变换功率仅为额定容量的一半,另一半的功率是有电的联系直接传送的,这就降低了材料的消耗,节约投资,降低了阻抗,增加了系统稳定性且降低了损耗。220/110/10kV 的自耦变压器和普通三绕组变压器比较,自耦变压器总重量仅为普通变压器的 60%,成本为 70%,损耗为 35%,节约效果显著。

2. 关于合理选择自耦变压器的运行方式

自耦变压器常见的运行方式有如下几种:

(1) 主要潮流为高压侧至中压侧。对这种变压器应首先选择降压结构的变压器,其传输容量可达变压器的额定容量。但尚需结合电力系统的短路电流、通信干扰、继电保护、电压调整等具体条件进行技术经济比较。对升压结构的变压器,当低压绕组停运时,由于高、中压绕组之间漏磁增加,则高、中压绕组的互通容量要小于其额定容量,对大容量自耦变压器,其最大传输容量可能限制到 70%~80%。

(2) 潮流传至中、低压侧。如果潮流由高压侧传至中、低压侧或由中、低压侧传至高压侧。则自耦变压器的传输容量关系可由下式确定:

$$P_2^2 + P_3^2 + 2P_2P_3\cos(\varphi_3 - \varphi_2) = 1$$

P_2, P_3 —功率有高压侧传至中、低压侧的百分数;

(3) 潮流由高、低压侧传送中压侧。此时自耦变压器由高、低压侧向中压侧送电或由中压侧向高、低压侧送电。其通过容量可由下式确定为

$$P_1^2 + \left(\frac{P_3}{K_b}\right)^2 + 2\frac{P_1P_3}{K_b}\cos(\varphi_3 - \varphi_1) = 1$$

式中 P_1, P_3 —高、低压侧传至中压侧的功率百分比;

K_b —效益系数;

当低压侧向中压侧传输功率达到电磁容量时,高压侧就不能像中压侧送电。如果低压侧向中压侧的供电容量低于电磁容量时,高压侧尚能向中压侧补充部分容量,并且补充的容量可以大于电磁容量与由低压侧传输到中压侧的功率之差。当低压侧接有调相机且低压侧无负荷或负荷很小时,出现高、低压侧同时向中压侧供电,由于公共绕组的全部或大部分容量可能被低压侧向中压侧输入功率所占有,是高压侧不能在向中压侧输送功率。选择自耦变压器应该考虑到这一点。

当低压侧负荷大于自耦变压器的电磁容量或经常出现由中压侧向高、低压侧同时送电时,变电站不宜采用自耦变压器。

(4) 传输功率不超过低压绕组容量的运行方式。自耦变压器最大传输功率均不得超过自耦变压器低压绕组的额定容量。通过低压绕组的容量不能超过其电磁容量，即自耦变压器额定容量的 K_0 倍， K_0 为效益系数。因为低压绕组一般是按等于或小于电磁容量设计的。

(三) 主变方案的比较

当所选变压器台数和容量不同时，应进行方案比较，以确定最后方案。比较中应计算下列各项。

1. 电能损耗的计算

令 ΔA 为年电能损耗，双绕组变压器采用下式计算为

$$\Delta A = \Sigma \left[n(\Delta P_0 + \lambda \Delta Q_0) + \frac{1}{n} (\Delta P_K + \lambda \Delta Q_K) \left(\frac{S}{S_N} \right)^2 \right] t$$

式中 n —相同变压器台数；

S_n —每台变压器的额定容量，kVA；

S — n 台变压器负担的总负荷，kVA；

t —对应负荷 S 使用的小时数；

$\Delta P_0, \Delta Q_0$ —每台变压器的空载有功损耗，KW；无功损耗，kVar；

$\Delta P_K, \Delta Q_K$ —每台变压器的短路有功损耗，KW；无功损耗，kVar；

λ —无功经济当量，系统中变压器取 0.1~0.15；

ΔA —电能损耗， $kW \cdot h$ ；

三绕组变压器容量比为100/100/100、100/100/66.6、100/100/50 者，可采用下式计算为

$$\Delta A = \Sigma \left[n(\Delta P_0 + \lambda \Delta Q_0) + \frac{1}{2n} (\Delta P_K + \lambda \Delta Q_K) \left(\frac{S_1^2}{S_n^2} + \frac{S_2^2}{S_n^2} + \frac{S_3^2}{S_n S_{3n}} \right) \right] t (kW \cdot h)$$

式中 S_1, S_2, S_3 — n 台变压器第一、二、三侧所负担的总负荷，kVA；

S_{3n} —第三台绕组的额定容量，kVA；

假设第三台绕组等效电阻 R_3 与容量成反比，即 $R_3 = \frac{S_n}{S_{3n}} R_1$ ， R_1 为第一绕组的等效电阻。当容量

比为100/100时，第一、二绕组损耗相等，个为1/2，即 $R_1 = R_2$ 。

当容量比为100/66.6/66.6时，能量损耗按下式计算为

$$\Delta A = \Sigma \left[n(\Delta P_0 + \lambda \Delta Q_0) + \frac{1}{1.83n} (\Delta P_K + \lambda \Delta Q_K) \left(\frac{S_1^2}{S_n^2} + \frac{S_2^2}{S_n^2} + \frac{S_3^2}{S_n S_{3n}} \right) \right] t$$

式中 S_{2n} 、 S_{3n} —第二、三绕组的额定容量，kVA。

假定第二、三绕组的电阻 R_2 、 R_3 为折算后的等效值，均与容量成反比。而且额定损耗是以第二绕组带 $2/3$ 的负荷，第三绕组带 $1/3$ 负荷下计算的。设 R_1 为额定损耗下原方绕组的等效电阻，

则额定损耗总电阻为

$$R_1 \times 1 + \left(\frac{2}{3}\right)^2 \left(\frac{3}{2} R_1\right) + \left(\frac{1}{3}\right)^2 \left(\frac{3}{2} R_1\right) = 1.83 R_1$$

如容量比为 $100/50/50$ ，则上式中的 1.83 应改为 2 ， $S_{2n} = S_{3n}$ ，公式仍可应用。

2. 计算综合造价和运行费

(1) 综合造价 P 为

$$P = \left(1 + \frac{\alpha}{100}\right) I$$

式中 I —主体设备投资，包括变压器、开关设备、母线、配电装置及明显的增修桥梁、公路和拆迁费用；

α —不明显的附加费的比例系数，如基础加工、电缆沟道开挖费用等，220kV 取 70，110kV 取 90。

(2) 年运行费。年运行费包括电能损耗价值以及检修、维护、拆旧费等。年运行费可用下式计算为

$$C = \beta \Delta A + C_1 + C_2$$

式中 ΔA —电能损失；

β —每千瓦小时平均售价，我国各大系统取 0.18 元每千瓦小时；

C_1 —检修维护费，取 $(0.022 \sim 0.042) P$ ；

C_2 —拆旧费，取 $0.058P$ ；

3. 确定方案

在确定方案时，过去采用的是抵偿年限法，这种方法的算法是用抵偿年限 T 来确定方案的优劣，即抵偿年限为

$$T = \frac{P_1 - P_2}{C_1 - C_2}$$

如果 T 小于 5~8 年，则采用综合造价高的第一方案。上式 P_1 、 P_2 为第一、第二方案的造价， C_1 、 C_2 为第一、第二方案的年运行费。但因为补偿年限法是一种静态的方法，而且在多种方案进行比较时，往往会产生矛盾的结论，故在方案比较中近来已改用下述方法：

(1) 现价法。这种方法的要点是对有相同生产能力的多种方案，在资本回收年限相同的情况下，以总费用的现价最低为最佳方案。采用这种方法时，需要将每年投入的年运行费折合成现价，即若方案的造价为 P 元，则方案的总造价为

$$XJ = P + C \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n}$$

式中 n —资本回收年限；
 i —年利率；总年金最小

(2) 年金法。这种方法的要点是将具有生产能力的各种方案以投资的总年金最小为最优方案。即

$$XJ = P \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} + C$$

式中 XJ —年金；
 n —回收年限；
 i —年利率；

(3) 最小年费用法。这种方法是把逐年的投资和运行费都折合成年金，其所用公式是

$$M = Z \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right]$$

$$N = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \left[\sum_{t=1}^n N_t \frac{1}{(1+i)^t} \right]$$

二、变压器最佳容量确定

(一) 问题的提出

正确的选择变压器最佳容量和考核现有变压器的运行状态是电力网降损节能的重要措施之一。而变压器的容量选择和变压器运行状态的考核是与众多因素有关的一个技术经济课题，诸如负荷状态、负荷性质、变压器价格、地区电价、最大负荷年损失小时数、负荷增长速度、变压器过载能力等，对变压器的最佳容量确定和对现有变压器运行状态的考核均有一定影响。目前，为了提高供电质量、降低网络损耗，各设计部门都在探求确定变压器最佳容量的新方法。本节目的在于建立一种考虑各种因素的影响选择变压器最佳容量的方法，依照这种方法也可来考核已投运的变压器的负荷状态。

1. 效益公式

设 C_b 为每台变压器的价格； ΔP_0 和 ΔP_s 为变压器的空载和短路有功损耗； ΔQ_0 和 ΔQ_s 为变压器的空载和短路无功损耗； τ 为最大负荷损失小时数； C_b 和 C_s 为空载和短路损失单价； R 为变压器价格投资的回收系数； λ 为无功经济当量。

今假定容量为 S_{e2} 、 S_{e1} 两台变压器，且 $S_{e2} > S_{e1}$ ；变压器 2 的运行状态比变压器 1 的运行状态为佳。根据这些已知数据和假定条件，我们来确定变压器的经济容量问题。

1) 变压器 1、2 在 S 负荷下有功和无功损失

设两台变压器其所带负荷为 S ，则变压器 1、2 的有、无功损失为

$$\Delta P_1 = \Delta P_{01} + \Delta P_{s1} \left(\frac{S}{S_{e1}} \right)^2$$

$$\Delta P_2 = \Delta P_{02} + \Delta P_{s2} \left(\frac{S}{S_{e2}} \right)^2$$

$$\Delta Q_1 = \Delta Q_{01} + \Delta Q_{s1} \left(\frac{S}{S_{e1}} \right)^2$$

$$\Delta Q_2 = \Delta Q_{02} + \Delta Q_{s2} \left(\frac{S}{S_{e2}} \right)^2$$

变压器 1 和 2 在 S 负荷下的总损失为

$$\Delta S_1 = \Delta P_1 + \lambda \Delta Q_1 = \Delta P_{01} + \Delta P_{s1} \left(\frac{S}{S_{e1}} \right)^2 + \lambda \left[\Delta Q_{01} + \Delta Q_{s1} \left(\frac{S}{S_{e1}} \right)^2 \right]$$

$$\Delta S_2 = \Delta P_2 + \lambda \Delta Q_2 = \Delta P_{02} + \Delta P_{s2} \left(\frac{S}{S_{e2}} \right)^2 + \lambda \left[\Delta Q_{02} + \Delta Q_{s2} \left(\frac{S}{S_{e2}} \right)^2 \right]$$

如因负荷增加，变压器 1 已失去最佳运行状态，今欲更换容量为大的变压器 2，而且所获得的运行状态比第一台变压器为佳，这是，因增加变压器的容量所花费的投资和因运行状态改善所得的收益之间应满足下述关系

$$\Delta m = -[(\Delta P_{02} - \Delta P_{01}) + \lambda(\Delta Q_{02} - \Delta Q_{01})]T_0 C_0$$

$$+ \left\{ \left[\Delta P_{s1} \left(\frac{S}{S_{e1}} \right)^2 - \Delta P_{s2} \left(\frac{S}{S_{e2}} \right)^2 \right] + \lambda \left[\Delta Q_{s1} \left(\frac{S}{S_{e1}} \right)^2 - \Delta Q_{s2} \left(\frac{S}{S_{e2}} \right)^2 \right] \right\} \tau C_s - R(C_{b2} - C_{b1})$$

式中 T_0 —变压器空载运行时间，如不考虑变压器检修时间，则认为 T_0 为常数，且 $T_0 = 8760h$ ，如考虑变压器检修， T_0 应另行计算。

当不考虑功率因数影响时， λ 亦可认为是常数。 Δm 则是所要求的变压器效益公式。

2. 效益公式的讨论

$$-[(\Delta P_{02} - \Delta P_{01}) + \lambda(\Delta Q_{02} - \Delta Q_{01})]T_0 C_0$$

是因变压器容量增加而增加空载损耗的电价，从经济观点来看它是一个消耗量，因此，前面冠以负号。

$$+ \left\{ \left[\Delta P_{S1} \left(\frac{S}{S_{e1}} \right)^2 - \Delta P_{S2} \left(\frac{S}{S_{e2}} \right)^2 \right] + \lambda \left[\Delta Q_{S1} \left(\frac{S}{S_{e1}} \right)^2 - \Delta Q_{S2} \left(\frac{S}{S_{e2}} \right)^2 \right] \right\} \tau C_s$$

是因变压器容量增加而获得运行状态的改善所节省负荷损失的电价，从经济观点来看，它是一个收益量，故其前冠以正号。

$$-R(C_{b2} - C_{b1})$$

是因变压器容量增加，每年所增加的投资额，从经济观点来看，它是一个消耗量，故其前冠以负号。

可见 Δm 有下列三种情况

$$\Delta m > 0$$

$$\Delta m < 0$$

$$\Delta m = 0$$

第一种情况 $\Delta m > 0$ ，表明因容量增加，由负载损失节约所得的收益，更够补常因更换大容量变压器所增加的空载损失费用和辅助投资费用。

第二种情况 $\Delta m < 0$ ，与上种情况相反，说明更大容量的变压器是不合理的。

第三种情况 $\Delta m = 0$ ，说明更大容量的变压器因负荷损失节约所得的收益刚好能抵偿因空载损失增加和辅助投资所消耗的费用。在这种情况下，不论以变压器 1 运行，还是以变压器 2 运行，在经济上是没有区别的。

(二) 临界容量的确定

能保证 $\Delta m = 0$ 的负荷容量称为临界容量，并设临界容量 $S = S_{EQ}$ ，如此，令 $\Delta m = 0$ ， $S = S_{EQ}$ 解出 S_{EQ} 得

$$S_{EQ} = \sqrt{\frac{[(\Delta P_{02} - \Delta P_{01}) + \lambda(\Delta Q_{02} - \Delta Q_{01})]T_0 C_0 + R(C_{b2} - C_{b1})}{\left[\left(\frac{\Delta P_{S1}}{S_{e1}^2} - \frac{\Delta P_{S2}}{S_{e2}^2} \right) + \lambda \left(\frac{\Delta Q_{S1}}{S_{e1}^2} - \frac{\Delta Q_{S2}}{S_{e2}^2} \right) \right] \tau C_s}}$$

S_{EQ} 所确定的数值就是这条经济分界线。

四、计算容量的确定

在选择变压器的容量时，通常要考虑规划年度内的负荷。当负荷逐年增加的情况下，如果使用诺谟图，必须求出在规划年度内的计算负荷。所为计算负荷 S_c 是一个等效容量，在该容量下，在规划年度内所得的总经济效益应该等于各年中所投入的不同负荷所得的效益之和。

假定第一年传送的最大容量为 S_1 ，第二年传送的最大容量为 S_2 ，为了说明方便，仅考虑第二年，以后将其推广至 n 年。

在计算各年投入不同负荷时所得到的经济效益，应注意下列几点：

- (1) 输送能量所获得的效益与电流平方成正比，因此，当电压恒定时则与容量平方成正比；
- (2) 各年所传送的容量是不同的，而且各年负荷所投入的时间也不相同，因此，各年所传送的负荷在总的经济效益中所起的作用则不会相同。今引入 I 为符合不同时投入的投资拆和系数，于是有

$$S_C^2(1+I)^2 = I(1+I)S_1^2 + (1+I)S_2^2$$

或

$$S_C^2 = \frac{IS_1^2}{(1+I)} + \frac{IS_2^2}{(1+I)^2} + \frac{S_3^2}{(1+I)^2}$$

$I(1+I)S_1^2$ 为第一年所投入的负荷 S_1 在第二年末的获利； $(1+I)S_2^2$ 为第二年所投入的负荷 S_2

在第二年末的获利；而左部 $S_C^2(1+I)^2$ 为每年投入计算负荷 S_C 在第二年末的获利。

(3) 将公式推广至 n 年，则有

$$S_C^2 = \frac{IS_1^2}{(1+I)} + \frac{IS_2^2}{(1+I)^2} + \frac{S_3^2}{(1+I)^3} + \dots + \frac{IS_n^2}{(1+I)^n} + \frac{IS_n^2}{(1+I)^n}$$

如此，可以写出

$$S_C = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{IS_i^2}{(1+I)^i} + \frac{IS_n^2}{(1+I)^i}}$$

其中 $i=1,2,3,\dots,n$ 。

(4) 倘若负荷是以恒速增加的，则第 $i+1$ 年负荷与第 i 年负荷将具有下述关系

$$S_{i+1} = (1+\omega)S_i$$

其中 $i=1,2,3,\dots,n-1$ ； ω 为负荷增加速度。

于是，可展成下式

$$\begin{aligned} S_C^2 &= \frac{IS_1^2}{(1+I)} + \frac{I}{(1+I)^2} [(1+\omega)^2 S_1^2] + \frac{I}{(1+I)^3} [(1+\omega)^4 S_1^2] \\ &+ \dots + \frac{IS_1^2}{(1+I)^n} (1+\omega)^{2n-2} + \frac{S_1^2}{(1+I)^n} (1+\omega)^{2n-2} \end{aligned}$$

设 $G = \frac{(1+\omega)^2}{(1+I)}$ ，则上式改写为

$$S_C^2 = \frac{IS_1^2}{(1+I)} \left[1 + G + G^2 + \dots + G^{n-1} - 1 + \frac{G^{n-1}}{I} \right]$$

利用等比级数，则

$$S_C^2 = S_1^2 \frac{1}{1+I} \left[\frac{1-G^n}{1-G} + \frac{G^{n-1}}{I} \right] = S_1^2 \frac{1}{1+I} \left[\frac{1 - \frac{(1+\omega)^{2n}}{(1+I)^n}}{1 - \frac{(1+\omega)^2}{(1+I)}} + \frac{\frac{(1+\omega)^{2n-2}}{(1+I)^{n-1}}}{I} \right]$$

考虑到 $1+\omega \approx 1+I$ ，则

$$S_C^2 = S_1^2 \left[\frac{I(1+\omega)^n - 1}{(1+I)\omega} + \frac{(1+\omega)^{n-1}}{1+I} \right]$$

$$S_C = \rho S_1$$

$$\rho = \sqrt{\frac{I \left[\frac{I(1+\omega)^n - 1}{(1+I)\omega} \right] + \frac{(1+\omega)^{n-1}}{1+I}}{1}}$$

由上式可知，计算容量 S_C ，在特定的初始容量下，将是 ρ 的函数。而 ρ 在特定的 ω 和 I 之下，将是年限 N 的函数。

第三章 变电站设计实例

1. 35kV 变电站设计 (A)

1.1 设计的目的和意义

本次课程设计是以《35kV 安家输变电工程初步设计审核意见》和五常电业局提供的负荷资料及相关要求为设计依据,以加强电网的网架结构,提高该地区的供电质量、减少电能损失,满足该地区负荷增长的需要为目的而开发设计的 35kV 小型化变电站设计。以往 35kV 常规变电站设计二次回路采用直流操作,变压器高、低压侧均采用断路器,保护设置复杂,设备安装、调试、维护工作量大,10kV 选用开关柜户内布置,需建设 10kV 配电室,土建施工周期长,已不能适应农网建设周期短、资金紧的需要以及农村变电站用电的一些特点。结合以上变电站的设计特点,本次设计的 35kV 小型化变电站满足以下要求:①小容量、密布点、短半径;②主接线简单、供电安全可靠;③布置合理、绿化完善;④设备选择以提高供电可靠性、经济运行水平和自动化水平为前提;⑤与调度自动化相结合,并考虑到无人值班。其电气二次部分选用的分层分布式综合自动化系统设计。就是依赖目前高速发展的微型计算机技术,将变电站中的控制、保护、测量、中央信号各类自动化装置以及打印报表、故障录波等功能集中于一个微机网,完成调度端遥测、遥信、遥控三遥功能,以达到保证电网安全、经济、可靠运行为目的,把我国农网建设与管理工作提高到一个新水平。

1.2 变电站的类型及地质条件分析

1.2.1 变电站的类型

该变电站为 35kV 小型化变电站,35kV、10kV 配电装置均采用屋外半高型布置,35kV 侧采用单母线主接线,一回进线、两台主变。10kV 采用单母线分段接线,最终出线六回,要求供给学校、城郊加工企业、工厂及居民用电等,全部为三类负荷。并且根据主接线及运行方式的要求,本所选用分层分布式综合自动化系统。主变压器及线路控屏、电度表屏、直流屏、电池屏、交流屏均布置在主控室内。

1.2.2 变电站的地质条件分析

1. 地理位置分析

变电站所址位于五常市安家镇南郊,地势平坦、进出线走廊便于架空线路的引入和引出,因此配电装置的布置不必考虑特殊方式。所址的标高海拔 450m,经调查没有被洪水浸淹的历史,不必选用高海拔的电气设备。所址位于负荷中心,交通便利、通讯畅通。有铁路和公路经过变电站附近,不必过多考虑设备的运输问题。

2. 气象条件的选择

该地区夏季最高气温在+35℃,冬季最低气温为-38℃,年平均气温为+16℃,电气设备均可正常工作;最大风速为 2.0m/s,夏秋季节不受强风影响,所以不必考虑架空线路的机械强度及对屋外配电装置的影响;该地区全年只有短暂的霜冻(不足 2 天)和结冰现象(不足 1 天),覆冰厚度仅为 2mm,因此不必考虑覆冰问题;无冻土情况发生,接地装置地下部分不必过深即可保证可

靠接地；地震强度很小，不必设置防震保护，可以采用半高型或高型布置；土壤电阻率为 $100\Omega\cdot\text{m}$ ，可考虑采用构架式避雷针；年雷暴日数为 33.7 天，防雷装置的选取应加以考虑；附近虽然有化工厂，但对本所影响不大，由于绝缘子表面的湿润过程和气象条件密切相关，而当地四季存在溶雪溶冰、毛毛雨、雨加雪、凝露等对污秽绝缘子极为不利的气象条件，突发性的污秽与湿润可能同时建立，为防止污闪，所以对绝缘子串和变电设备外绝缘的影响应予以考虑。（以上分析均参照《高压配电装置设计技术规程》）

1.3 变电站的设计特点

与以往 35kV 常规变电站设计相比，其设计特点主要体现在以下几方面：

1. 变电站一次设备的主变压器采用 SZ9 型双绕组有载调压电力变压器，有载分接开关选用带远动接口，能实现带负荷自动调压，减少了停电时间。该变压器具有低损耗、低噪音、抗突发短路能力强等优点，同时具备“遥信、遥测、遥调、遥控”的四遥功能，可通过计算机远程控制，实现变电站无人值班化。并且 35kV 侧采用专为小型化变电站设计的进口户外高压隔离负荷开关和带缺相发信号的新型户外交流高压跌落式快速熔断器配合进行保护，完全可在主变满载情况下进行分合操作，具有较高的可靠性，不会造成变压器的损坏。

2. 所区 35kV、10kV 侧配电装置采用户外型配电装置，并采用户外环网柜控制电路。10kV 采用 ZHW2-12 型户外交流高压金属封闭环网开关设备，该设备作为环网供电或终端供电的开关设备，可开断负荷电流，并通过熔断器切断短路电流，特别适用于免维护，自动化程度高的电网。采用户外环网柜替代国内常规的开闭所，可以大大减少出线电缆和占地面积，降低造价，提高供电可靠性，同时也降低了线损。其设备结构特点为：结构紧凑，体积小，占地面积少，机械、电气闭锁功能完备（满足“五防要求”），简单可靠，能有效防止各种误操作，从而克服了 35kV 常规变电站 10kV 开关柜户内布置，土建施工周期长，占地面积多，资金投入大的缺点。

3. 在防雷保护方面：35kV、10kV 侧选用南京无线电厂生产的 Y5WZ 型氧化锌避雷器。其特点是采用通流能力强的氧化锌非线性电阻片叠加组装，氧化锌电阻片通流容量大，保护残压低，电压响应迅速，此外由于采用硅橡胶做外套，从根本上消除了瓷套式避雷器可能存在的外瓷套爆裂现象，并提高了防潮、耐污、抗老化性能、同时缩小体积，减轻重量，免于维修，该产品聚集了有机外套和氧化锌电阻片的全部优点，是新型的过电压保护电器。而避雷针的设计则采用北京博超世纪软件公司开发设计的防雷工程设计软件进行设计。该软件解决传统防雷算法的三个难题：

（1）能够计算任意多根、不等高、不对称布置的避雷针的保护范围；（2）能够同步计算一根避雷针在多个不同标高的保护半径；（3）能同步计算任意多根避雷针在任意标高的联合保护范围和 BX（两针间在被保护物高度的水平面上保护范围的一侧最小宽度）值。设计方法采用滚球法算法，根据避雷针和保护对象高度自动确定保护半径。布置避雷针时，直接看到避雷针在多个高度的保护范围，动态可视化布置方式使避雷针的保护效果一目了然。

2 负荷统计及计算

2.1 负荷统计表

本变电站负荷主要以居民用电和工厂用电为主，同时还能满足一般的学校用电和加工企业用电的需要，全部为三类负荷，35kV 侧进线一回，10kV 侧采用单母线分段接线，6 回出线。负荷统计如表 2-1 所示。

表 2-1 负荷统计表

回路 序号	回路 名称	用户类型	负荷容量 (KVA)	需用 系数	变压器 台数	线 长 (KM)	供电 回路	负荷 级别
1	安家南部线	居民用电	800	0.8	18	18	1	3
		学校用电	700	0.65				
2	安家镇外线	居民用电	700	0.75	16	15	1	3
		饮料厂	600	0.6				
3	安家镇内线	化工厂	700	0.8	12	12	1	3
		乳品厂	600	0.65				
4	民乐甲线	居民用电	800	0.8	18	15	1	3
		污水处理厂	600	0.6				
5	民乐乙线	制药厂	700	0.8	12	14	1	3
		食品加工厂	600	0.75				
6	民乐联合线	纺织厂	600	0.65	14	16	1	3
		饲料厂	500	0.7				

2.2 负荷计算

变电站主接线设计是根据计算负荷选择主变压器的容量的。负荷调查统计出的变电站供电范围内的所有用电设备的额定容量总和要比实际变动负荷大，因为用电设备实际负荷一般小于其额定容量，而且各种用电设备并非同时运行。用考虑这些因素所计算出来的负荷，代替实际变动负荷，称为计算负荷。

本设计为小型化变电站，负荷计算采用需用系数法。其优点是：公式简单，计算方便，对于不同性质的供电用户的需用系数值是经过几十年的统计积累，数值比较完整和准确，为供电设计创造了很好的条件。由于各供电区域电性质相差不大，考虑功率因数相同，则视在功率可表示为有功功率。

采用需用系数法求各用户的计算负荷：

$$S_{jsi} = K_t \cdot S_{ei} \quad (2-1)$$

式中 S_{jsi} —各用户的计算负荷，kVA；

S_{ei} —各用电设备额定容量，kVA。

每条出线路的负荷：

第一供电区： $S_{js1} = 0.8 \times 800 + 0.65 \times 700 = 1095$ (kVA)

第二供电区： $S_{js2} = 0.75 \times 700 + 0.6 \times 600 = 885$ (kVA)

第三供电区： $S_{js3} = 0.8 \times 700 + 0.65 \times 600 = 950$ (kVA)

第四供电区： $S_{js4} = 0.8 \times 800 + 0.6 \times 600 = 1000$ (kVA)

第五供电区： $S_{js5} = 0.8 \times 700 + 0.75 \times 600 = 1010$ (kVA)

第六供电区： $S_{js6} = 0.65 \times 600 + 0.7 \times 500 = 740$ (kVA)

变电站设计当年的计算负荷可由式 (2-2) 计算

$$S_{js} = K_t \sum_{i=1}^6 S_{jsi} (1 + X\%) \quad (2-2)$$

式中 K_t —同时系数，一般取 0.85–0.9，这里取 0.9；

$X\%$ —线损率，高低压网络的综合线损率在 8%–12%，这里取 10%。

$$\begin{aligned} S_{js} &= K_t (S_{js1} + S_{js2} + S_{js3} + S_{js4} + S_{js5} + S_{js6}) \times (1 + X\%) \\ &= 0.9 \times (1095 + 885 + 950 + 1000 + 1010 + 740) \times (1 + 0.1) \\ &= 5623.2 \text{ (kVA)} \end{aligned}$$

计算负荷增长后的变电站最大计算负荷为

$$S_{jszd} = S_{js} e^{m \times n} \quad (2-3)$$

式中 n — 年数，取 8 年；

m — 年平均增长率，取 7%；

S_{jszd} — n 年后的最大计算负荷。

$$S_{jszd} = 5623.2 \times e^{8 \times 0.07} = 9844.38 \text{ (kVA)}$$

3 主变的选择和主接线的设计

3.1 主变台数的确定和容量的选择

变压器容量的选择至关重要，容量选择小了，不满足负荷增长的要求。容量选择大了，变压器空载损耗大，起不到降低损耗、同网同价的要求。但是，随着我国工业和农业的迅速发展和人民物质生活的提高，能源问题日益尖锐，节电问题日趋重要，目前国内外一些文献都提出，在某些情况下，把变压器容量适当选大些，其所增加的投资将从它节约的电能损耗费用中很快补偿回来。这样既缓解了电网供电的紧张情况，又达到了经济运行的目的。在 35kV 变电站中，考虑到不受运输条件的限制，一般选用三相变压器，因为三相变压器运行时是最经济，最可靠的。由于电力负荷季节性不强，且变电站均为三类负荷，变压器在运行时其电源侧受电电压有可能偏离额定值，这时变压器二次侧的负载所承受的电压有可能偏高或偏低，这对用电设备的正常工作十分不利，所以采用两台有载调压变压器，以便使变压器调压后不仅可稳定供电电压，还可控制电力潮流调节负荷分配。当一台主变压器运行时，可保证 60% 的负荷供电，考虑变压器的事后负荷能力为 40%，所以供电的保证率为 84%。为简化电压等级或减少重复降压容量采用双绕组变压器。由于变压器绕组的连接方式必须和系统电压相位一致，否则不能并列进行，所以变压器绕组的连线方式选 Y 型连接。

装设两台主变压器的变电站，根据我国变电压器运行的实践经验，并参考经验，每台主变的额定容量：

$$S_e \geq 0.6S_{iszd} \quad (3-1)$$

即: $S_e \geq 0.6 \times 9844.38 = 5906.628 (\text{kVA})$

主变压器采用双绕组有载调压电力变压器，根据中国水利水电出版社《电气设备实用手册》，可选择 SZ9-6300/35 型有载调压变压器，该变压器具有低损耗、低噪音、抗突发短路能力强、外形美观等优点，同时具备“遥信、遥测、遥调、遥控”的四遥功能，可通过机算远程控制，实现变电站无人值班化。其技术数据如表 3-1 所示。

表 3-1 SZ9-6300/35 变压器技术参数

额定容量 (kVA)	电 压 组 合 (kV)			联结组 标号	空载损 耗(kW)	负载损 耗(kW)	空载电 流 (%)	短路阻 抗 (%)	重量 (kg)
	高压	分接 (%)	低压						
6300	35	±	10.5	Y, d11	7.0	39.0	0.85	7.5	12300
	38.5	3×2.5							

3.2 主接线方案比较与设计

3.2.1 主接线的设计原则

变电站的主接线是电力系统按接线组成中的一个重要组成部分，主接线的确定对电力系统的安全、稳定、灵活、经济运行以及变电站电气设备的选择，配电装置的布置，继电保护和控制方法的拟订将会产生直接影响。

3.2.2 主接线的基本要求

- (1) 可靠性：是指主接线能可靠的工作，以保证用户的不间断供电。
- (2) 灵活性：其运行及动作是否灵活。
- (3) 经济性：是指投资省，占地面积小，能量损失小。

3.2.3 选择主接线的形式

主接线是根据发电厂或变电站的设计任务书，原始资料以及设计要求和原则来进行设计的，在保证满足技术要求条件下，力求经济性。现初步选择两个方案进行经济计算，采用静态比较法进行经济比较，确定出最佳主接线方案。

方案 1：采用单母线主接线

单母线主接线其特点是整个配电装置只有一组母线，每个电源和引线都经过开关电器接到同一组母线上，出线不超过三回。其优点为接线简单、清晰，采用的电气设备少，比较经济，操作方便且便于扩建。其主要缺点是母线和隔离开关检修时或发生故障时必须断开全部电源使整个配电装置停电。这种接线的可靠性和灵活性都比较差，主要用于一般负荷和供电可靠性要求不太高的小容量发电厂和变电站中。接线方式如图 3-1 所示。

方案 2：采用单母线分段接线

为克服一般单母线接线存在的缺点，提高它的供电可靠性和灵活性，可以把单母线分成几段，在每段单母线之间装设两个隔离开关。每段母线上均接有电源和出线回路，便成为单母线分段接线。其特点是当母线发生故障或检修时停电局限在一段母线上，非正常段母线保持正常供电。对重要用户可以从两段母线上取得电源。这样，当任意一段母线发生故障或检修时，对重要用户不停止供电。其主要缺点是：(1) 检修任意一出线路断路器时，该出线必须停电；(2) 任何一段母线发生故障或检修时，必须断开并联接在该段上的电源，故减少了发电量和供电量，并使单独用该段母线供电的用户停电。接线方式如图 3-2 所示。

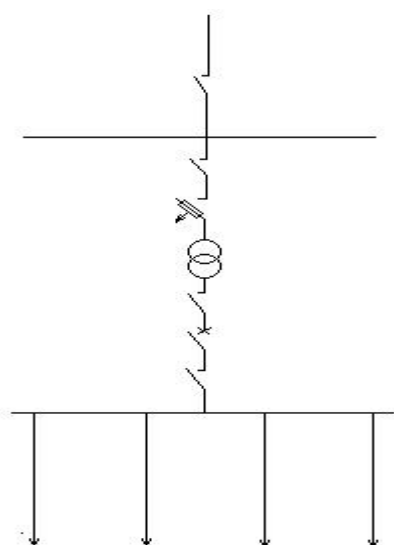


图 3-1 单母线主接线

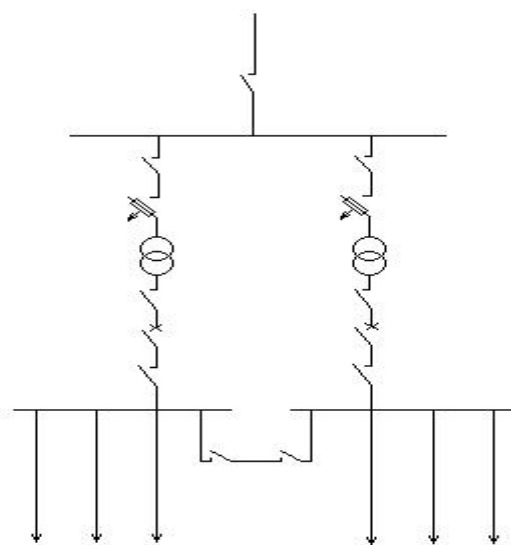


图 3-2 单母线分段接线

根据上述两种方案的比较，结合所设计的 35kV 小型化变电站的负载情况，可采用单母线分段接线，其本身既保留了单母线的简单、经济、方便等优点，又克服了它的一些缺点，使可靠性和灵活性有所提高。

35kV 侧采用跌落式高压熔断器和高压负荷隔离开关相结合的接线方式，作为变压器的短路保护和实现合分工作电流，10kV 侧采用隔离开关和断路器配合保护。

4 短路计算

4.1 短路计算的目的

在供电系统中，出现次数比较多的严重故障就是短路，所谓短路是指供电系统中不等电位的导体在电气上被短接。产生短路的主要原因，由于电气设备载流部分绝缘损坏所造成。而绝缘损坏主要是因为绝缘老化、过电压、机械性损伤等引起。人为误操作及鸟兽跨越裸导体等也能引起短路。发生短路时，由于系统中总阻抗大大减少，因而短路电流可能达到很大数值（几万安至十几万安）。这样大的电流所产生的热效应和机械效应会使电气设备受到破坏；同时短路点的电压降到零，短路点附近的电压也相应地显著降低，使此处的供电系统受到严重影响或被迫中断；若在变电站附近发生短路，还可能使整个电力系统运行解列，引起严重后果。所以在选择、校验电气设备时，为了保证在正常运行和故障运行时都能安全可靠地工作，同时力求节约投资，需考虑短路电流的大小；在选择继电保护方式以及进行继电保护整定计算中需要以短路电流为依据；选择接地装置的设计中也要以短路电流为依据；设计户外装置时，要根据短路电流确定及校验导线的相间距离以及他们相对地面的安全距离。

4.2 各元件电抗标么值计算

取 $S_B = 100\text{MVA}$ ， $U_B = U_{av}$ ，系统电源电势标么值为 1，系统电抗标么值最大运行方式

$X_{\min} = 0.04$ ，最小运行方式 $X_{\max} = 0.06$ ，导线每公里的电抗为 0.4Ω 。主变的等效阻抗 X_T 的标么值为：

(1) 当系统处于最小运行方式下，即一台主变单独运行时

$$X_{T1} = X_{T\text{单}}^* = \frac{U_S \%}{100} \times \frac{S_B}{S_N} = \frac{7.5}{100} \times \frac{100 \times 10^6}{6300 \times 10^3} = 1.19$$

(2) 当系统处于最大运行方式下，即两台主变并行运行时

$$X_{T\text{并}}^* = \frac{1}{2} X_{T\text{单}}^* = \frac{1}{2} X^* = 0.595$$

高压侧电源进线的阻抗标么值为：

$$X_0 = 0.4 \times L \times \frac{S_B}{U_B^2} = 0.4 \times 18 \times \frac{100}{37^2} = 0.584$$

低压侧各出线的阻抗标么值为：

$$X_1 = \frac{XL_1 \cdot S_B}{U_n^2} = \frac{0.4 \times 18 \times 100}{10.5^2} = 6.531$$

$$X_2 = \frac{XL_2 \cdot S_B}{U_n^2} = \frac{0.4 \times 15 \times 100}{10.5^2} = 6.442$$

$$X_3 = \frac{XL_3 \cdot S_B}{U_n^2} = \frac{0.4 \times 12 \times 100}{10.5^2} = 4.354$$

$$X_4 = \frac{XL_4 \cdot S_B}{U_n^2} = \frac{0.4 \times 15 \times 100}{10.5^2} = 6.442$$

$$X_5 = \frac{XL_5 \cdot S_B}{U_n^2} = \frac{0.4 \times 14 \times 100}{10.5^2} = 5.079$$

$$X_6 = \frac{XL_6 \cdot S_B}{U_n^2} = \frac{0.4 \times 16 \times 100}{10.5^2} = 5.805$$

4.3 短路点的选择

根据保护整定值的计算和经验，各短路点的选择如图 4-1 所示。

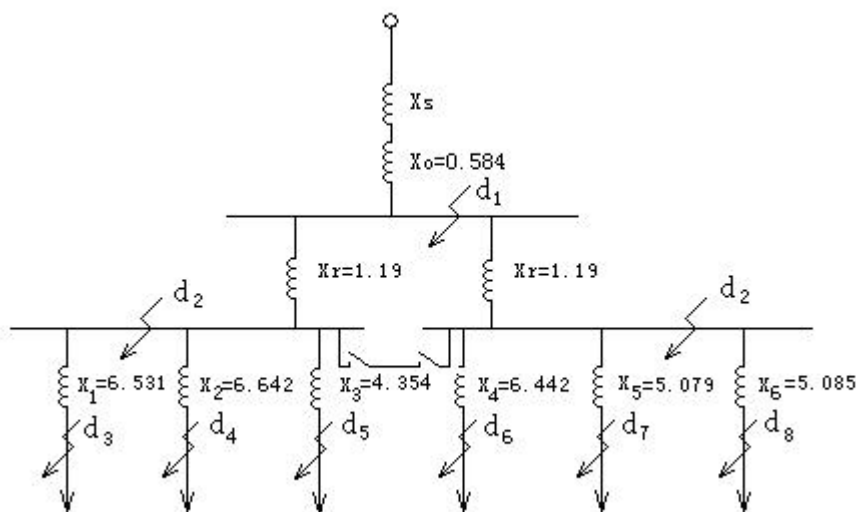


图 4-1 短路点确定图

4.4 各点短路电流的计算

d_1 点发生短路时：

最大运行方式下（两台主变并列运行时）各点的短路电流

$$I_{d1\max} = \frac{E''}{X_{\min} + X_0} = \frac{1}{0.04 + 0.584} = 1.6(kA)$$

$$I_{d1}^{(3)} = \frac{I_{d1\max} \cdot S_B}{\sqrt{3}U_{av}} = \frac{1.6 \times 100}{\sqrt{3} \times 37} = 2.5(kA)$$

$$I_{d1}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{d1}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 2.5 = 2.165(kA)$$

$$i_{ch} = \sqrt{2} K_{ch} I_{d1}^{(3)} = \sqrt{2} \times 1.8 \times 2.5 = 6.375(kA)$$

$$I_{ch} = I_{d1}^{(3)} \sqrt{1 + 2(K_{ch} - 1)^2} = 2.5 \times 1.51 = 3.78(kA)$$

$$S_d = \frac{S_B}{X_{js}^*} = \frac{S_B}{X_{\min} + X_0} = \frac{100}{0.04 + 0.584} = 160.26(MVA)$$

最小运行方式下（变压器是解裂的，只有一台投入运行）各点的短路电流

$$I_{d1\min} = \frac{E''}{X_{\max} + X_0} = \frac{1}{0.06 + 0.584} = 1.55(kA)$$

$$I_{d1}^{(3)} = \frac{I_{d1\min} \cdot S_B}{\sqrt{3}U_{av}} = \frac{1.55 \times 100}{\sqrt{3} \times 37} = 2.42(kA)$$

$$I_{d1}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{d1}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 2.42 = 2.09(kA)$$

$$i_{ch} = \sqrt{2} K_{ch} I_{d1}^{(3)} = \sqrt{2} \times 1.8 \times 2.42 = 6.17(kA)$$

$$I_{ch} = I_{d1}^{(3)} \sqrt{1 + 2(K_{ch} - 1)^2} = 2.42 \times 1.51 = 3.65(kA)$$

$$S_d = \frac{S_B}{X_{js}^*} = \frac{S_B}{X_{\max} + X_0} = \frac{100}{0.06 + 0.584} = 155.28(MVA)$$

d₂点发生短路时:

最大运行方式下（两台主变并列运行时）各点的短路电流

$$I_{d2\max} = \frac{E''}{X_{\min} + X_0 + X_{T1}/2} = \frac{1}{0.04 + 0.584 + 1.19/2} = 0.82(kA)$$

$$I_{d2}^{(3)} = \frac{I_{d2\max} \cdot S_B}{\sqrt{3}U_{av}} = \frac{0.82 \times 100}{\sqrt{3} \times 10.5} = 4.51(kA)$$

$$I_{d2}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{d2}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 4.51 = 3.91(kA)$$

$$i_{ch} = \sqrt{2} K_{ch} I_{d2}^{(3)} = \sqrt{2} \times 1.8 \times 4.51 = 11.48(kA)$$

$$I_{ch} = I_{d2}^{(3)} \sqrt{1 + 2(K_{ch} - 1)} = 4.51 \times 1.51 = 6.81(kA)$$

$$S_d = \frac{S_B}{X_{js}^*} = \frac{S_B}{X_{\min} + X_0 + X_{T1} / 2} = \frac{100}{0.04 + 0.584 + 1.19 / 2} = 82.03(MVA)$$

最小运行方式下（变压器是解裂的，只有一台投入运行）各点的短路电流

$$I_{d2\min} = \frac{E''}{X_{\max} + X_0 + X_{T1}} = \frac{1}{0.06 + 0.584 + 1.19} = 0.55(kA)$$

$$I_{d2}^{(3)} = \frac{I_{d2\min} \cdot S_B}{\sqrt{3} U_{av}} = \frac{0.55 \times 100}{\sqrt{3} \times 10.5} = 3.02(kA)$$

$$I_{d2}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{d2}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 3.02 = 2.62(kA)$$

$$i_{ch} = \sqrt{2} K_{ch} I_{d2}^{(3)} = \sqrt{2} \times 1.8 \times 3.02 = 7.69(kA)$$

$$I_{ch} = I_{d2}^{(3)} \sqrt{1 + 2(K_{ch} - 1)^2} = 3.02 \times 1.51 = 4.56(kA)$$

$$S_d = \frac{S_B}{X_{js}^*} = \frac{S_B}{X_{\max} + X_0 + X_{T1}} = \frac{100}{0.06 + 0.584 + 1.19} = 54.53(MVA)$$

各短路点短路电流如表 4-1 所示。

表 4-1 短路电流统计表（电流单位 kA）

短 路 点	最大运行方式					最小运行方式				
	$I_d^{(3)}$	$I_d^{(2)}$	i_{ch}	I_{ch}	$S_{d(MVA)}$	$I_d^{(3)}$	$I_d^{(2)}$	i_{ch}	I_{ch}	$S_{d(MVA)}$
d ₁	2.5	2.165	6.375	3.78	160.26	2.42	2.09	6.17	3.65	155.28
d ₂	4.51	3.91	11.48	6.81	82.03	3.02	2.62	7.69	4.56	54.53
d ₃	0.71	0.61	1.81	1.07	12.9	0.66	0.57	1.68	0.99	11.95
d ₄	0.72	0.62	1.83	1.09	13.05	0.67	0.58	1.71	1.01	12.08
d ₅	0.99	0.86	2.52	1.49	17.94	0.89	0.77	2.27	1.34	16.16
d ₆	0.72	0.62	1.83	1.09	13.05	0.67	0.58	1.71	1.01	12.08
d ₇	0.87	0.75	2.21	1.31	15.88	0.8	0.69	2.04	1.21	14.47
d ₈	0.78	0.68	1.99	1.18	14.24	0.72	0.62	1.83	1.09	13.09

5 电气设备的选择及校验

电气设备的选择及校验是变电站设计的重要内容之一，本设计电气设备的选择从我国实际情况出发，根据设计规程要求进行，力求做到了技术先进、安全可靠、运行灵活方便、留有适当的余度的要求。并在选择后按设备的额定电压，额定电流，短路时动稳定和热稳定等方面对所选的设备进行了校验。

变电站内各种主要电气设备的选择如表 5-1 所示。

表 5-1 主设备清单

序号	设备名称	规格或型号	单位	数量	备注
1	主变压器	SZ9-6300/35	台	2	35kV 侧
2	跌落式熔断器	RW ₅ -35/200~800	组	2	35kV 侧
3	熔断器	RW ₃ -10	组	2	电压互感器侧
4	熔断器	RW ₅ -35	组	2	所用变侧
5	断路器	ZW ₃₂ -12/1250-25	组	2	10kV 侧
6	断路器	ZW ₃₂ -12/630-20	组	6	10kV 出线侧
7	隔离开关	GFW1-35	组	1	35kV 侧
8	隔离开关	GW ₃₂ -12/1250	组	4	10kV 侧
9	电力电容器	BFM11/ $\sqrt{3}$ -200-1W	组	3	10kV 出线侧
10	电流互感器	LFZJ-10	台	2	10kV 侧
11	电压互感器	JSZK2-10	台	2	10kV 侧
12	避雷器	Y5WZ-41/131	组	1	35kV 母线侧
13	避雷器	Y5W-12.7/45	组	2	电压互感器侧
14	避雷器	Y5W-12.7/45	组	2	电容器侧
15	避雷器	Y5W-12.7/45	组	6	10kV 出线侧
17	穿墙套管	CWLB2-10/1000	个		
18	绝缘子	XP-4C	片	4	35kV 侧
19	绝缘子	ZS-10/4	串		10kV 侧屋内外
20	钢芯铝绞线	LGJ-160mm ²	米		35kV 侧母线
21	钢芯铝绞线	LGJ-120mm ²	米		10kV 出线侧
22	组合导线	2×LGJQ-360mm ²	米		10kV 侧母线

变电站内各种主要电气设备的校验要求如表 5-2 所示。

表 5-2 电气设备的校验要求表

序号	设备名称	额定电压 kV	额定电流 A	额定容量 kVA	额定开断电流	短路热稳定	短路动稳定
1	断路器	√	√	√		√	√
2	隔离开关	√	√			√	√
3	电压互感器	√	√			√	√
4	电压互感器	√		√			
5	熔断器	√	√		√		
6	电力电容器	√		√			
7	避雷器	√					
8	绝缘子	√				√	
9	穿墙套管	√	√			√	√

注 表中“√”表示校验要求项目

5.1 母线的选择及校验

5.1.1 母线材料和截面形状的选择

母线的材料有铜、铝和钢。目前，农村发电厂和变电站以及大、中型发电厂、变电站的配电装置中的母线，广泛采用铝母线，这是因为铜贵重，我国储量又少；而铝储量较多，具有价格低、重量轻、加工方便等特点。因此，选用铝母线要比铜母线经济。

农村发电厂和变电站配电装置中的母线截面目前采用矩形、圆形和圆形绞线等。选择母线截面形状的原则是：肌肤效应系数尽量低；散热好；机械强度高；连接方便；安装简单。

结合本变电站为全户外敞开式布置的结构和特点，10kV 低压侧主要选择矩形截面母线，因为同样截面的矩形母线周长比圆形母线的周长要长，散热面积大，冷却条件好；由于肌肤效应的影响，矩形母线的电阻比圆形的小。在 35kV 高压侧一般采用钢芯铝绞线。钢芯铝绞线的耐张性能比单股母线好，在允许电流相同的条件下，钢芯铝绞线的直径比单股母线直径大，其表面附近的电场强度小于单股母线。从而使变电站的屋外配电装置结构和布置简单，投资少。

5.1.2 35kV 侧母线截面积的选择及校验

若一台变压器停止工作，想满足整个负荷的需求，则另一台变压器工作在过负荷状态，由于

$S_B \geq 0.6S_{jzd}$ ，所以只需一台过负荷为原来的 $1/0.6=1.67$ 倍，即 $S_{jzd}=1.67S_B$ ，通过高压侧母线的最大长期工作电流：

$$I_{gzd} = 1.67 \times \frac{1.05 \times S_e}{\sqrt{3} \times U_e} = 1.67 \times \frac{1.05 \times 6300}{\sqrt{3} \times 35} = 182.23 \text{A}$$

1. 按经济电流密度选择母线截面

$$S_j = \frac{I_{gzd}}{J} \quad (5-1)$$

式中 S_j —经济截面， m^2 ；

J —经济电流密度， A/m^2 。

由于母线置于户外，考虑集肤效应和散热，最大负荷利用小时数取为 $3000 \sim 5000 \text{h/a}$ ，按经济电流密度选择母线截面

查表选择 $J = 1.15 \times 10^6 \text{A}/\text{m}^2$

$$\therefore S_j = \frac{182.23}{1.15 \times 10^6} = 158.46 \text{mm}^2$$

查单条矩形母线的截面流量表 选择截面积 $40 \times 4 \text{mm}^2$ 的 LGJ 型室外钢芯铝绞线，其 25°C

时最大允许持续电流 $I_{y\theta} = 456 \text{A}$

取 $\theta = 35^\circ\text{C}$ ， $\theta_0 = 25^\circ\text{C}$ 时，温度修正系数为：

$$K_\theta = \sqrt{\frac{\theta_y - \theta}{\theta - \theta_0}} = \sqrt{\frac{70 - 35}{70 - 25}} = 0.882$$

则实际环境温度为 35°C 时的母线允许电流：

$$I_{y\theta} = 0.882 \times 456 = 402.192 (\text{A})$$

大于其长期最大工作电流（ 182.23A ），满足长期工作时的发热条件。

2. 校验

短路计算时间 $t = t_b + t_g + t_{hu} = 1.5 + 0.06 + 0.04 = 1.6 \text{s}$ 。因 $I'' = I_\infty$ ，所以 $\beta'' = \frac{I''}{I_\infty} = 1$ ，

经查《短路电流周期分量等值时间曲线》表得， $t_z = 1.3 \text{s}$ 。因 $t > 1 \text{s}$ ，所以 $t_{fz} = 0$ 。

故 $t_{dz} = t_z = 1.3 \text{s}$

母线正常运行时的最高温度为：

$$\theta_c = \theta + (\theta_y - \theta) \cdot \left(\frac{I_{gzd}}{I_{y\theta}} \right)^2 = 35 + (70 - 35) \times \left(\frac{182.23}{402.192} \right)^2 = 42.19^\circ\text{C}$$

查表知 $C = 97 \times 10^6$ ，按热稳定条件所需最小母线截面为

$$S_{zx} = \frac{I_\infty}{C} \cdot \sqrt{t_{dz} \cdot K_j} \quad (5-2)$$

式中 C —热稳定系数；

K_j —集肤效应系数（取 1）。

$$S_{zx} = \frac{I_\infty}{C} \cdot \sqrt{t_{dz} \cdot K_j} = \frac{2.5 \times 10^3}{97 \times 10^6} \times \sqrt{1.3 \times 1} = 29.39 \text{mm}^2$$

小于所选母线的截面积，满足热稳定要求，因所选母线为绞线，故不需动稳定校验。所以高压 35kV 线可选为 LGJ-160mm²型的钢芯铝绞线。

5.1.3 35kV 侧进线母线截面积的选择及校验

因其最大长期工作电流及各相参数均与 35kV 侧母线截面积的选择及校验基本相同，因此选择及校验过程同 35kV 侧，故选 LGJ-160mm²型的钢芯铝绞线。

5.1.4 10kV 侧母线截面的选择及校验

按通过低压侧母线的最大长期工作电流

$$I_{gzd} = 1.67 \cdot \frac{1.05 \cdot S_e}{\sqrt{3} \cdot U_e} = 1.67 \times \frac{1.05 \times 6300}{\sqrt{3} \times 10} = 637.82 \text{A}$$

1. 按经济电流密度选择母线截面

根据公式（5-1）取变压器最大负荷利用小时数 $h = 3000$ 小时，查表选择 $J = 1.15 \times 10^6 \text{A/m}^2$

$$\therefore S_j = \frac{637.82}{1.15 \times 10^6} = 554.63 \text{mm}^2$$

经查表选用 2×LGJQ-360mm² 型组合导线，其 25℃时最大允许持续电流 $I_y = 826 \text{A}$

则实际环境温度为 35℃时的母线允许电流

$$I_{y\theta} = 0.882 \times 826 = 728.53 (\text{A})$$

大于其长期最大负荷电流（637.82A），满足长期工作时的发热条件。

2. 校验

热稳定性校验

短路计算时间 $t = t_b + t_g + t_{hu} = 1 + 0.06 + 0.04 = 1.1 \text{s}$ 。因 $I'' = I_\infty$ ，所以 $\beta'' = \frac{I''}{I_\infty} = 1$ ，

经查表得 $t_z = 0.9s$ 。因 $t > 1s$ ，所以 $t_{fz} = 0$ ，故 $t_{dz} = t_z = 0.9s$

母线正常运行时的最高温度为：

$$\theta_c = \theta + (\theta_y - \theta) \cdot \left(\frac{I_{gzd}}{I_{y\theta}} \right)^2 = 35 + (70 - 35) \times \left(\frac{637.82}{970.2} \right)^2 = 49.98^\circ\text{C}$$

查表知 $C = 95 \times 10^6$ ，按热稳定条件所需最小母线截面为

$$S_{zx} = \frac{I_\infty}{C} \cdot \sqrt{t_{dz} \cdot K_j} = \frac{4.51 \times 10^3}{95 \times 10^6} \times \sqrt{0.9 \times 1} = 45.04 \text{mm}^2$$

小于所选母线的截面积，故满足热稳定要求。

5.1.5 10kV 侧出线截面积的选择及校验

在六回出线中，以最大负荷的一条出线为出线截面选择的计算依据，其它线路则一定能满足。由于六回出线的负荷相差不大，故不会造成太大的浪费，并且出线路负荷要求考虑今后 8 年的增长，其增长率为 7%。

$$S_{jszd} = 0.9 \times (1+8\%) \times 1095 \times e^{8 \times 7\%} = 1863.31(\text{kVA})$$

按通过 10kV 侧出线的最大长期工作电流

$$I_{gzd} = \frac{1.05 \times S_{jszd}}{\sqrt{3} \cdot U_e} = \frac{1.05 \times 1868.31}{\sqrt{3} \times 10} = 113.26 \text{A}$$

1. 按经济电流密度选择母线截面

根据公式 (4-1) 取变压器最大负荷利用小时数 $h = 3000$ 小时，查表选择 $J = 1.15 \times 10^6 \text{A/m}^2$

$$\therefore S_j = \frac{113.26}{1.15 \times 10^6} = 98.48 \text{mm}^2$$

经计算选择 LGJ-120mm² 型钢芯铝绞线，其 25℃ 时最大允许持续电流 $I_y = 347 \text{A}$

则实际环境温度为 35℃ 时的出线允许电流

$$I_{y\theta} = 0.882 \times 347 = 306.054(\text{A})$$

大于其长期最大负荷电流 (113.26A)，满足长期工作时的发热条件。

2. 校验

短路计算时间 $t = t_b + t_g + t_{hu} = 0.5 + 0.05 + 0.02 = 0.57s$ 。因 $I'' = I_\infty$ ，所以

$\beta'' = \frac{I''}{I_\infty} = 1$ ，经查表得 $t_z = 0.5s$ 。因 $t < 1s$ ，所以 $t_{fz} = 0.05 \cdot \beta'' = 0.05s$ ，故

$t_{dz} = t_z + t_{fz} = 0.55s$

母线正常运行时的最高温度

$$\theta_c = \theta + (\theta_y - \theta) \cdot \left(\frac{I_{gzd}}{I_{y\theta}} \right)^2 = 35 + (70 - 35) \times \left(\frac{113.26}{306.054} \right)^2 = 39.79^\circ C$$

查表知 $C = 99 \times 10^6$ ，按热稳定条件所需最小母线截面为

$$S_{zx} = \frac{I_\infty}{C} \cdot \sqrt{t_{dz} \cdot K_j} = \frac{0.71 \times 10^3}{99 \times 10^6} \times \sqrt{0.55 \times 1} = 5.32 mm^2$$

小于所选母线的截面积，故满足热稳定要求，因所选母线为绞线，故不需动稳定校验。

5.2 断路器的选择

5.2.1 10kV 侧断路器的选择及校验

1. 断路器的选择

按构造形式、装置种类、额定电压、额定电流、和额定开断电流选择断路器。又据 $U_e \geq U_W = 10kV, I_{gzd} = 637.82 A, I_{ekd} = 16kA \geq I_{dt} = I'' = 4.51kA$ ，查《电力工程设计手册》选择 ZW₃₂-12/1250-25 型断路器。其技术参数见表 5-3。

表 5-3 ZW₃₂-12/1250-20 型断路器参数

型号	额定电压 (kV)	额定电流 (A)	额定开断电流 I_{ekd} (kA)	极限通过电流峰值 i_j (kA)	固有分闸时间 t_g (s)	4s 热稳定电流有效值 I_r (kA)
ZW ₃₂ -12/1250-25	12	1250	25	40	≤0.05	25

2. 校验

(1) 热稳定性校验:

短路电流的热脉冲:

$$I_\infty^2 \cdot t_{dz} = 4.51^2 \times 0.9 = 18.3 < I_r^2 \cdot t = 25^2 \times 4 = 2500 (kA^2 \cdot s)$$

因此满足热稳定性要求。

(2) 动稳定性校验

极限通过电流 $i_j = 40 > i_{ch} = 11.48(\text{kA})$

故动稳定性也满足要求。
经计算满足热稳定性及动稳定性要求，因此所选 ZW₃₂-12/630-20 型断路器满足要求。

5.2.2 10kV 出线侧断路器的选择及校验

1. 断路器的选择

按构造形式、装置种类、额定电压、额定电流、和额定开断电流选择断路器。

以最大负荷的一条出线路进行选择，又据 $U_e \geq U_W = 10\text{kV}$, $I_{gzd} = 113.26\text{A}$, $I_{ekd} \geq I_{dt} = I'' = 0.71(\text{kA})$ ，查《电力工程设计手册》选择 ZW₃₂-12/630-20 真空型路器。其技术参数见表 5-4。

表 5-4 ZW₃₂-12/630-20 型断路器参数

型号	额定 电压 (kV)	额定 电压 (kV)	额定 电流 (A)	额定开断 电流 I _{ekd} (kA)	极限通过电 流峰值 i _j (kA)	固有分闸 时间 t _g (s)	4s 热稳定电 流有效值 I _r (kA)
ZW ₃₂ -12/630-20	12	12	630	20	40	≤0.05	20

2. 校验

(1) 热稳定性校验

短路电流的热脉冲：

$$I_{\infty}^2 \cdot t_{dz} = 0.71^2 \times 0.55 = 0.39 < I_r^2 \cdot t = 20^2 \times 4 = 1600(\text{kA}^2 \cdot \text{s})$$

因此满足热稳定性要求。

(2) 动稳定性校验

极限通过电流 $i_j = 40 > i_{ch} = 1.81(\text{kA})$

故动稳定性也满足要求。
经计算满足热稳定性及动稳定性要求，因此所选 ZW₃₂-12/630-20 型断路器满足要求。

5.3 隔离开关的选择及校验

5.3.1 35kV 侧隔离开关的选择及校验

1. 隔离开关的选择

根据地点和机构选择户外式隔离开关，由 $U_e \geq U_W = 35\text{kV}$, $I_{gzd} = 182.23\text{ kA}$, $I_{ekd} \geq$

$I_{dt} = I'' = 2.5\text{kA}$ ，经查《电力工程设计手册》选择 GFW1—35 型户外隔离负荷开关。GFW1-35 系列

35kV 户外高压隔离负荷开关是专为小型化变电站设计的新产品，与熔断器配合可替代断路器，用于容量为 630kVA 及以下变电站主变压器的保护和变电站 35kV 进出线的保护，也可作为 35kV 线路支线及分段保护用。35kV 户外隔离负荷开关采用水平旋转结构，动作灵活，可靠。具有明显的断开点；既可切合负荷电流，又能作为隔离开关使用，能开断和关合 200A 以下的负荷电流；操动机构采用二级快速机构，可以手动操作，也可电动分合；可就地控制，也可实现远方遥控，操作速度不受人为因素的影响，操作电源为交流 220V。主变压器瓦斯浓度升高，缺相运行等故障均可以用隔离负荷开关在一定时间内自动切断，提高了主变压器的可靠性。其技术参数见表 5-5。

表 5-5 GFW1-35 型户外隔离负荷开关参数

型号	额定电压 (kV)	额定电流 (A)	最大开断电流 (kA)	极限通过电流峰值 (kA)	4 秒热稳定电流 (kA)
GFW1-35	35	200	8	8	3.15

2. 校验

(1) 热稳定性校验

短路电流的热脉冲：

$$I_{\infty}^2 \cdot t_{dz} = 2.5^2 \times 1.3 = 8.125 < I_r^2 \cdot t = 3.15^2 \times 4 = 39.69(\text{kA}^2 \cdot \text{s})$$

因此满足热稳定性要求。

(2) 动稳定性校验

$$\text{极限通过电流 } i_j = 8 > i_{ch} = 6.375(\text{kA})$$

故动稳定性也满足要求。

经计算满足热稳定性及动稳定性要求，因此所选 GFW1-35 型隔离开关满足要求。

5.3.2 10kV 侧隔离开关的选择及校验

1. 隔离开关的选择

根据地点和机构选择户外式隔离开关，由 $U_e \geq U_w = 10\text{kV}$ ， $I_{gzd} = 637.82\text{ A}$ ， $I_{ekd} \geq$

$I_{dt} = I'' = 4.51\text{kA}$ ，查《电力工程设计手册》选择 GW32-12/1250 型隔离开关。其技术参数见表 5-6。

表 5-6 GW32-12/1250 型隔离开关参数

型号	额定电压 (kV)	额定电流 (A)	极限通过电流 峰值 (kA)	5s 热稳定电流 (kA)
GW32-12/1250	12	1250	70	16

2. 校验

(1) 热稳定性校验

短路电流的热脉冲:

$$I_{\infty}^2 \cdot t_{dz} = 4.51^2 \times 0.9 = 18.3 < I_r^2 \cdot t = 16^2 \times 5 = 1280 (\text{kA}^2 \cdot \text{s})$$

因此满足热稳定性要求。

(2) 动稳定性校验

$$\text{极限通过电流 } i_j = 70 > i_{ch} = 11.48 (\text{kA})$$

故动稳定性也满足要求。

经计算满足热稳定性及动稳定性要求，因此所选 GW₃₂-12/1250 型隔离开关满足要求。

5.3.3 10kV 出线侧隔离开关的选择及校验

1. 隔离开关的选择

根据地点和机构选择户外式隔离开关，由 $U_e \geq U_W = 10\text{kV}$, $I_{gzd} = 113.26\text{A}$, $I_{ekd} \geq$

$I_{dt} = I'' = 0.71 (\text{kA})$ ，查《电力工程设计手册》选择 GW₃₂-12/630 型隔离开关。其技术参数见表 5-7。

表 5-7 GW₃₂-12/630 型隔离开关参数

型号	额定电压 (kV)	额定电流 (A)	极限通过电流 峰值 (kA)	5s 热稳定电流 (kA)
GW ₃₂ -12/630	12	630	70	16

2. 校验

(1) 热稳定性校验

短路电流的热脉冲:

$$I_{\infty}^2 \cdot t_{dz} = 4.51^2 \times 0.9 = 18.3 < I_r^2 \cdot t = 16^2 \times 5 = 1280 (\text{kA}^2 \cdot \text{s})$$

因此满足热稳定性要求。

(2) 动稳定性校验

$$\text{极限通过电流 } i_j = 70 > i_{ch} = 11.48 (\text{kA})$$

故动稳定性也满足要求。

经计算满足热稳定性及动稳定性要求，因此所选 GW₃₂-12/630 型隔离开关满足要求。

5.3.4 10kV 侧母线分段隔离开关的选择

因其与 10kV 出线侧母线隔离开关的选择基本相同，因此选择及校验过程同 10kV 出线侧，故选 GW₃₂-12/630 型隔离开关。

5.3.5 35kV 进线侧隔离开关的选择及校验

1. 隔离开关的选择

根据地点和机构选择户外式隔离开关，由 $U_e \geq U_W = 35\text{kV}$, $I_{gzd} = 182.23 \text{ kA}$, $I_{ekd} \geq I_{dt} = I'' = 2.5\text{kA}$ ，经查《电力工程设计手册》选择 GW5-35W 型户外隔离负荷开关。其技术参数见表 5-8。

表 5-8 GW5-35W 型户外隔离负荷开关参数

型号	额定电压 (kV)	额定电流 (A)	最大开断电流 (kA)	极限通过电流峰值 (kA)	5 秒热稳定电流 (kA)
GW5-35W	35	630	50	50	20

2. 校验

(1) 热稳定性校验

短路电流的热脉冲：

$$I_{\infty}^2 \cdot t_{dz} = 2.5^2 \times 1.3 = 8.125 < I_r^2 \cdot t = 20^2 \times 5 = 2000(\text{kA}^2 \cdot \text{s})$$

因此满足热稳定性要求。

(2) 动稳定性校验

极限通过电流 $i_j = 50 > i_{ch} = 6.375(\text{kA})$

故动稳定性也满足要求。

经计算满足热稳定性及动稳定性要求，因此所选 GW5-35W 型隔离开关满足要求。

5.4 电流互感器的选择及校验

5.4.1 10kV 侧电流互感器的选择及校验

1. 电流互感器的选择

根据电压等级和电流互感器安装处的最大按长期工作电流选择

$U_e \geq U_W = 10\text{kV}$, $I_e \geq I_{gzd} = 637.82\text{A}$ ；经查《电力工程设计手册》选择 LFZJ-10 型电流互感器。其技术参数见表 5-9。

表 5-9 LFZJ-10 型电流互感器参数

型号	额定电压	准确度	额定电流比	2s 热稳定电流倍数	1s 动稳定电流倍数
----	------	-----	-------	------------	------------

(kV)					
LFZJ-10	10	0.5	800/5	31.5	80

$$\text{温度校正系数 } K_{\theta} = \sqrt{\frac{70-35}{70-40}} = 1.08$$

$$\text{则 } I_{ley} = K_{\theta} \times I_{1e} = 1.08 \times 800 = 864(A)$$

2. 校验
- (1) 热稳定性校验

$$\text{根据 } (I_{ley} \cdot K_r)^2 \cdot t = (0.864 \times 31.5)^2 \times 2 = 1481.42 > I_{\infty}^2 \cdot t_{dz} = 18.3(kA^2 \cdot s)$$

- (2) 动稳定性校验
- ① 内部动稳定校验

$$\sqrt{2} \cdot I_{ley} \cdot K_d = \sqrt{2} \times 0.864 \times 80 = 97.74 > i_{ch} = 11.48(kA)$$

- ② 外部动稳定校验

$$K_1 \cdot K_2 \cdot K_d \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1e} = 0.79 \times 1 \times 80 \times \sqrt{2} \times 0.864 = 77.21 > i_{ch} = 11.48(kA)$$

经计算满足热稳定及内、外动稳定性要求，所选 LFZJ-10 型电流互感器满足要求。

5.4.2 10kV 出线侧电流互感器的选择及校验

1. 电流互感器的选择
- 根据电压等级和电流互感器安装处的最大按长期工作电流选择

$$U_e \geq U_w = 10kV, I_e \geq I_{gzd} = 113.26A$$

经查《电力工程设计手册》选择 LDCQ-10 型电流互感器。其技术参数见表 5-10。

表 5-10 LDCQ-10 型电流互感器参数

型号	额定电压 (kV)	准确度	额定电流比	1s 热稳定电流倍数	1s 动稳定电流 倍数
LDCQ-10	10	0.5	400/5	80	200

$$\text{温度校正系数 } K_{\theta} = \sqrt{\frac{70-35}{70-40}} = 1.08$$

$$\text{则 } I_{ley} = K_{\theta} \times I_{1e} = 1.08 \times 400 = 432(A)$$

2. 校验

(1) 热稳定性校验

根据 $(I_{ley} \cdot K_r)^2 \cdot t = (0.432 \times 80)^2 \times 1 = 1194.39 > I_\infty^2 \cdot t_{dz} = 0.39(\text{kA}^2 \cdot \text{s})$

满足热稳定要求

(2) 动稳定性校验

① 内部动稳定校验

$\sqrt{2} \cdot I_{ley} \cdot K_d = \sqrt{2} \times 0.432 \times 200 = 122.17 > i_{ch} = 1.81(\text{kA})$

② 外部动稳定校验

$K_1 \cdot K_2 \cdot K_d \cdot \sqrt{2} \cdot I_{le} = 0.79 \times 1 \times 200 \times \sqrt{2} \times 0.432 = 96.51 > i_{ch} = 1.81(\text{kA})$ 经计算满足热

稳定及内、外动稳定要求，因此所选 LDCQ-10 型电流互感器满足要求。

5.5 电压互感器的选择及校验

5.5.1 电压互感器的选择及校验

电压互感器是二次回路中供测量和保护用的电压源，通过它能正确反映系统电压的运行状况，其作用：一是将一次侧的高电压改变成二次侧的低电压，使测量仪表和保护装置标准化，小型化，并便于监视，安装和维护；二是使低压二次回路与高压一次系统隔离，保证了工作人员的安全，由于电压互感器主要用于计量，而上一级变电站已装设，所以本所 35kV 侧不装设电压互感器，只在 10kV 侧装设电压互感器，从而减少造价。

1. 电压互感器的选择

根据该电压互感器的用途、装设地点及额定电压，经查《电力工程设计手册》选择 JSZK2-10 型干式户外电压互感器。其技术参数见表 5-11。

表 5-11 JSZK2-10 型电压互感器参数

型号	额定电压 (kV)		准确级次及相应额定二次负荷 (VA)			最大容量 (VA)
	原线圈	副线圈	0.5 级	1 级	3 级	
JSZK2-10	10	0.1	50	100	150	300

测量仪表的技术数据见表 5-12。

表 5-12 测量仪表的技术参数

仪表名称	仪表型号	每线圈消耗功率 (VA)	$\cos \varphi$
------	------	--------------	----------------

有功功率表	1D ₁ —W	0.75	1
无功功率表	1D ₁ —Var	0.75	1
有功电度表	DS ₁	1.5	0.38
频率表	1D ₁ —Hz	2	1
电压表	1T ₁ —V	5	1

电压互感器和测量仪表的三线接线图如图 5-1 所示。

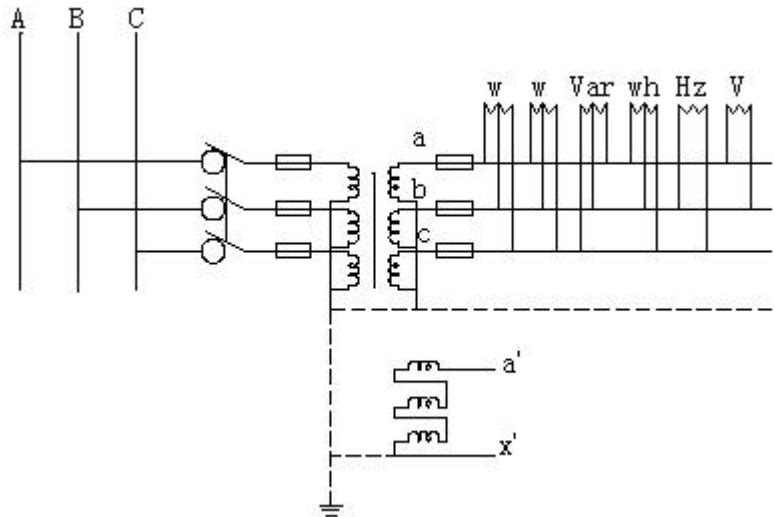


图 5-1 三线接线图

2. 校验

在电压互感器接线布局中，由于接入了电度表，所以电压互感器的准确度等级选 0.5 级，在 0.5 级以下工作的电压互感器的额定容量 $S_e=50\text{VA}$

按二次负荷选择电压互感器应作如下计算：

首先计算各相负荷，然后取最大一相负荷与一相额定容量相比较。（利用变电工程教材中第三种接线方式进行计算）

$$P_{ab} = 2 \times 0.75 + 0.75 + 1.5 \times 0.38 + 5 = 7.82(\text{W})$$

$$Q_{ab} = 1.5 \times \sqrt{1 - 0.38^2} = 1.39(\text{var})$$

$$S_{ab} = \sqrt{P_{ab}^2 + Q_{ab}^2} = 7.94(\text{VA})$$

$$\cos \varphi_{ab} = \frac{P_{ab}}{S_{ab}} = 0.985; \quad \varphi_{ab} = 9^\circ 58'$$

$$P_{bc} = 2 \times 0.75 + 0.75 + 1.5 \times 0.38 + 2 = 4.82(\text{W})$$

$$Q_{bc} = 1.5 \times \sqrt{1 - 0.38^2} = 1.39(\text{var})$$

$$S_{bc} = \sqrt{P_{ab}^2 + Q_{ab}^2} = 5.02(\text{VA})$$

$$\cos \varphi_{bc} = \frac{P_{ab}}{S_{ab}} = 0.960; \quad \varphi_{bc} = 16^\circ 13'$$

A 相负荷为:

$$P_A = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot S_{ab} \cdot \cos(\varphi_{ab} - 30^\circ) = \frac{7.94}{\sqrt{3}} \times \cos(9^\circ 58' - 30^\circ) = 4.3(\text{W})$$

$$Q_A = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot S_{ab} \cdot \sin(\varphi_{ab} - 30^\circ) = \frac{7.94}{\sqrt{3}} \times \sin(9^\circ 58' - 30^\circ) = -1.57(\text{var})$$

B 相负荷为:

$$P_B = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot [S_{ab} \cdot \cos(\varphi_{ab} + 30^\circ) + S_{bc} \cdot \cos(\varphi_{bc} - 30^\circ)] = 6.48(\text{W})$$

$$Q_B = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot [S_{ab} \cdot \sin(\varphi_{ab} + 30^\circ) + S_{bc} \cdot \sin(\varphi_{bc} - 30^\circ)] = 2.06(\text{var})$$

经计算可知 B 相负荷最大, 其值为 $S_b = \sqrt{P_B^2 + Q_B^2} = 6.799\text{VA}$

0.5 级的 JSZK2-10 型电压互感器的一相额定容量为 $50/3=16.7$ (VA), 此值大于它的最大一相负荷 S_b , 因此满足要求。

5.5.2 保护电压互感器的熔断器的选择及校验

1. 熔断器的选择

对于保护电压互感器的熔断器, 只按额定电压及断流容量选择即可

经计算查《电力工程设计手册》选择 RW₃-10 型户外跌落式三相熔断器。其技术参数见表 5-13

表 5-13 RW₃-10 型户外跌落式三相熔断器参数

型号	额定电压 (kV)	额定电流 (A)	额定开断容量 (MVA)
RW ₃ -10	10	200	200

2. 校验

$$I_{gzd} = 1.05 \times \frac{50 \times 10^{-3}}{\sqrt{3} \times 10} = 3.03\text{mA}$$

$$I_{erj} = 1.5 \times I_{gzd} = 1.5 \times 3.03 = 4.545\text{mA}$$

计算短路容量，短路电流应采用次暂态电流有效值 I'' ，故三相短路容量为：

$$S_d = \sqrt{3} U_p I'' = \sqrt{3} \times 10.5 \times 1.52 \times 4.51 = 124.66 \text{MVA}$$

因：

$$I_{erq} = 200 \text{A} > I_{erj} = 4.545 \text{mA} > I_{gzd} = 3.03 \text{mA}$$
$$S_{ekd} = 200 \text{MVA} > S_d = 124.66 \text{MVA}$$

经计算满足要求，故选 RW₃-10 型户外跌落式三相熔断器。

5.5.3 隔离开关的选择及校验

根据以上计算数据，选择 GW₂₂-12/630 型隔离开关一定能满足要求。

5.6 绝缘子和穿墙套管的选择及校验

发电厂和变电站常用的绝缘子有支柱绝缘子、套管绝缘子和悬式绝缘子。支柱绝缘子用于支持和固定母线，并使母线与地绝缘；套管绝缘子主要用于母线穿过墙壁或楼板，使母线之间、母线与地之间绝缘；悬式绝缘子主要用于固定屋外配电装置中的软母线。

5.6.1 35kV 侧绝缘子的选择及校验

1. 绝缘子的选择

按额定电压和安装地点选择，查《电力工程设计手册》选择 XP-4C 型绝缘子，其技术参数见表 5-14。

表 5-14 XP-4C 型绝缘子参数

型号	泄漏距离 cm	工频试验电压 (KV)			50%全波击穿 闪络电压 (KV)	机械负荷	
		干	湿	击穿		1 小时	破坏
XP-4C	200	60	30	70	100	3000	4000

2. 悬式绝缘子片数的选择

一般情况下的单位泄漏距离为 1.6cm/kV，所以应选绝缘子的片数为

$$n \geq \frac{\lambda \cdot U_e}{L_0} = \frac{1.6 \times 35}{200} = 2.8 \text{ 片}$$

式中：λ——泄漏比距；

L_0 ——每片绝缘子的泄漏距离；初选 3 片。

3. 按大气过电压作用下不闪络选择：

一般来说，只要满足承受内部过电压作用的要求，同时接地电阻值也满足规程要求，则在大气过电压作用下将不致引起绝缘子串的逆闪络。按以上条件选择的绝缘子串片数，考虑到绝缘子老化需增加一片，对于耐张绝缘子串，因承受较大的拉力，容易损坏，又需此悬式绝缘子串再增加一片，所以选 4 片绝缘子。

5.6.2 10kV 侧绝缘子的选择及校验

1. 屋外绝缘子的选择

(1) 绝缘子的选择

按额定电压和安装地点选择，经查《电力工程设计手册》选择 ZS-10/4 型支柱棒型绝缘子。其技术参数见表 5-15。

表 5-15 ZS-10/4 型支柱棒型绝缘子参数

型号	额定电压 (kV)	机械破坏负荷 (kN)	总高(mm)	上附件安装尺寸			下附件安装尺寸		
				孔径	孔数	中心距	孔径	孔数	中心距
ZS-10/4	10	4	210	M8	2	36	Φ12	2	130

(2) 校验

动稳定校验

$$F_{zd} = 1.73 \times 10^{-7} \cdot \frac{L}{a} \cdot I_{ch}^2 = 1.73 \times 10^{-7} \times 2 \times (11.48 \times 10^3)^2 = 45.6\text{N}$$

绝缘子底部至母线中心线的高 $H_1 = H + 18 + \frac{h}{2} = 210 + 18 + \frac{60}{2} = 258\text{mm}$

绝缘子帽所受的力 $F = F_{zd} \cdot K_z = F_{zd} \cdot \frac{H_1}{H} = 45.6 \times \frac{258}{210} = 56.02\text{N}$

绝缘子的允许负荷 $0.6 \times F_p = 0.6 \times 4000 = 2400 > F = 56.02\text{N}$

经计算满足动稳定要求，故所选 ZS-10/4 型支柱棒型绝缘子满足要求。

2. 屋内绝缘子的选择

(1) 绝缘子的选择

根据安装地和构造类型，经查《电力工程设计手册》选择 ZN-10/4 型支柱绝缘子。其技术参数见表 5-16。

表 5-16 ZN-10/4 型支柱绝缘子参数

型号	额定电压 (kV)	机械破坏负荷 (kN)	总高 H (mm)
ZN-10/4	10	4	120

(2) 校验

动稳定校验

$$F_{zd} = 1.73 \times 10^{-7} \cdot \frac{L}{a} \cdot I_{ch}^2 = 1.73 \times 10^{-7} \times 2 \times (11.48 \times 10^3)^2 = 45.6 \text{N}$$

绝缘子底部至母线中心线的高度 $H_1 = H + 18 + \frac{h}{2} = 120 + 18 + \frac{60}{2} = 168 \text{mm}$

绝缘子帽所受的力 $F = F_{zd} \cdot K_z = F_{zd} \cdot \frac{H_1}{H} = 45.6 \times \frac{168}{120} = 63.84 \text{N}$

绝缘子的允许负荷 $0.6 \cdot F_p = 0.6 \times 4000 = 2400 > F = 63.84 \text{N}$

经计算满足动稳定要求，故所选 ZN-10/4 型支柱绝缘子满足要求。

5. 6. 3 穿墙套管的选择及校验

1. 穿墙套管的选择

按装置种类、构造形式、额定电压及最大长期工作电流，查《电力工程设计手册》选择 CWLB₂-10/600 型穿墙套管。其技术参数见表 5-17。

表 5-17 CWLB₂-10/1000 型穿墙套管参数

型号	额定电压 (kV)	额定电流 (A)	总长 L (mm)	抗弯破坏负 荷 (kN)	5s 短时热电 流 (kA)
CWLB ₂ -10/1000	10	1000	530	7.5	12

$$\text{温度校正系数 } K_{\theta} = \sqrt{\frac{80-35}{80-40}} = 1.06$$

则 $I_{ey} = K_{\theta} \times I_e = 1.06 \times 1000 = 1060 \text{A}$

大于其长期最大长期工作电流。

2. 校验

(1) 热稳定校验

$$I_r^2 \cdot t = 12^2 \times 5 = 720 > I_{\infty}^2 \cdot t = 18.3(\text{kA}^2 \cdot \text{s})$$

(2) 动稳定校验

$$F=1.73\times 10^{-7}\cdot \frac{L_1+L_2}{2a}\cdot I_{ch}^2$$

式中： L_1 —穿墙套管端部至最近一个支柱绝缘子间距离，取 $L_1=1\text{m}$ ；

L_2 —穿墙套管的长度；

a —相间距。

$$F=1.73\times 10^{-7}\cdot \frac{L_1+L_2}{2a}\cdot I_{ch}^2=1.73\times 10^{-7}\times \frac{1+0.53}{2\times 0.25}\times (11.48\times 10^3)^2=69.77\text{N}$$

$$0.6\cdot F_p=0.6\times 7500=4500>F=69.77\text{N}$$

经计算满足热稳定性及动稳定性要求，故所选 CWLB₂-10/1000 型穿墙套管满足要求。

5.7 所用变设备的选择

5.7.1 所用变压器的选择

考虑到变电站主要设备的需要，如蓄电池充电、取暖、照明及有关的继电保护装置的用电等负荷，对于一般情况下应将所用变装设在 35kV 侧，保证检修时所内可正常供电，根据变电站负荷特点，季节性极强，备有一台备用变压器。即使主变检修时，可切换备用变压器，以保证低压母线侧有电，因此将所用变建在 35kV 侧。

所用电负荷统计见表 5-18。

表 5-18 所用电负荷统计表

序号	名称	容量（KW）	负荷类型
1	通信电源	4	经常、连续
2	35kV 操动机构	0.825	断续、短时
3	10kV 操动机构	0.825	断续、短时
4	运动	5	经常、连续
5	电气二次设备室动力	5	断续、短时
6	35kV 配电装置动力	15	断续、短时
小计	动力负荷 P1	25.65	
1	设备箱恒温电源	1.5	经常、连续
小计	恒温箱负荷 P2	1.5	
1	户外配电装置照明	2	经常、连续
2	35kV 配电装置动力	2	经常、连续
小计	照明负荷 P3	4	

所用变压器容量选择根据《变电站所用电设计技术规程》中公式（3-12）

$$\begin{aligned}
 S &= 0.85 \times P_1 + P_2 + 0.8 \times \frac{P_3}{\cos \varphi} \\
 &= 0.85 \times 25.65 + 1.5 + 0.8 \times \frac{4}{0.6} \\
 &= 28.63(kVA)
 \end{aligned}$$

综合以上数据，查《电力工程设计手册》选择 S9-50/35-0.4 型电力变压器作为所用变压器。其技术参数见表 5-19。

表 5-19 S9—50/35-0.4 型变压器技术数据表

额定电压 kV		损耗		阻抗电压	空载电流	额定容量
高	低	空载	短路			
35	0.4	0.25	1.18	6.5%	1.1%	50KVA

5.7.2 保护所用变的熔断器的选择及校验

1. 熔断器的选择

其最大长期工作电流 $I_{gzd} = \frac{1.05 \times 50}{\sqrt{3} \times 35} = 0.866A$

熔件的额定电流为 $I_{erj} = K_b \cdot I_{eb} = 1.5 \times \frac{50}{\sqrt{3} \times 35} = 1.237A$

短路容量 $S_d = \sqrt{3} \cdot U_p \cdot I_{ch} = \sqrt{3} \times 10.5 \times 3.78 = 68.74MVA$

经计算查《电力工程设计手册》选择 RW₅-35 型高压跌落式熔断器。其技术参数见表 5-20。

表 5-20 RW₅-35 型高压跌落式熔断器参数

型号	额定电压 (kV)	额定电流 (A)	额定断流容量 (MVA)	
			上限	下限
RW ₅ -35	35	100	300	60

2. 校验

$$\begin{aligned}
 I_{erq} &= 100A > I_{erj} = 1.237A > I_{gzd} = 0.866A \\
 S_{ekd} &= 300MVA > S_d = 68.74MVA
 \end{aligned}$$

经计算满足要求，选 RW₅-35 型熔断器。

5.7.3 高压隔离开关的选择

根据以上计算数据，查《电力工程设计手册》选择 GW4-35D 型高压隔离开关. 技术数据如表 5-21

表 5-21 GW4-35D 型高压隔离开关技术参数

型号	额定电压	额定电流	极限通过电流	5s 热稳定电流
GW4-35D	35kV	600A	50kA	15.8kA

1. 动稳定校验
极限通过电流

$I_j=50kA>I_{ch}=6.375kA$ 满足动稳定要求。

2. 热稳定校验

短路电流的热脉冲 $I_r^2\times t=15.8^2\times 5=1248>I_\infty^2\times t_{dz}=2.5^2\times 1.3=8.125kA^2s$

满足热稳定要求。

5.8 电力电容器的选择

电力电容器用来提高电网功率因数、减少线损、改善电压质量、提高供电效率。

5.8.1 并联电容器组接线方式的比较

并联电容器组的主接线方式，主要有三角形接线和星型接线。过去并联电容器组采用三角形接线较多，但运行经验证明，三角形接线的电容器组，当任一相击穿时，由电源供给的短路电流较大，实际相当于母线短路。这时虽然故障电容器的熔断器迅速熔断，但如此大的电流即使是瞬间流过电容器也极易使电容器内浸渍剂受热膨胀，迅速汽化，引起爆炸。而且如果不同相的电容器同时发生对地击穿，有时熔断器也失去保护作用。如把电容器改为星形接线，当任一电容器发生极板击穿短路时，短路电流都不会超过电容器组额定电流的三倍。而且不会出现其他两健全相的电容器对故障相的涌放电流，只有来自同相健全的电容器的涌放电流。因此星形接线的电

容器组油箱爆炸事故较少发生。此外，三角形接线电容器组对过电压保护避雷器的运行条件和保护效果也不如星形接线的好。综合考虑本设计采用星形接线。

5.8.2 电容器的选择

按工作电压选择 $U_{zd} \geq U_g = 10\text{kV}$

按工作频率选择 $f_e = 50\text{Hz}$

无功功率的计算

设备补偿前的功率因数为 $\cos \varphi_1 = 0.75$ ，经电容器要求补偿后达到 $\cos \varphi_2 = 0.9$ 。

负荷的有功功率为 $P = S_{js} \cdot \cos \varphi_1 = 9844.38 \times 0.75 = 7383.285\text{kW}$

系统要求补偿的无功功率为

$$Q_c = P(tg \varphi_1 - tg \varphi_2) \quad (5-3)$$

$$\text{式中: } tg \varphi_1 = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_1}}{\cos \varphi_1} = \frac{\sqrt{1 - 0.75^2}}{0.75} = 0.88$$

$$tg \varphi_2 = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_2}}{\cos \varphi_2} = \frac{\sqrt{1 - 0.9^2}}{0.9} = 0.484$$

$$\text{则 } Q_c = P(tg \varphi_1 - tg \varphi_2) = 7383.285 \times (0.88 - 0.484) = 2923.78\text{kvar}$$

本所要求三组电容器组来补偿，补偿 950kvar，采用三相星形接线的电容器

$$Q = w U_{x-x}^2 C_x 10^3 \quad (5-4)$$

式中： C_x —单相等效电容值；

U_{x-x} —线电压；

w —角频率， $w = 2 \pi f$ ， $f = 50\text{Hz}$ 。

$$C_x = \frac{Q}{w U_{x-x}^2 10^3} = \frac{950}{2 \times \pi \times 50 \times 10^2 \times 10^3} = 30.2 \mu\text{F}$$

查《电力工程设计手册》选 BFM11/ $\sqrt{3}$ -200-1W 型电容器组，其技术参数见表 5-22。

表 5-22 BFM11/ $\sqrt{3}$ -200-1W 型电容器参数

型号	额定电压(kV)	额定容量(kVar)	额定电容(μF)
BFM11/ $\sqrt{3}$ -200-1W	10.5	200	15.8

$$n = \frac{C_x}{C_b} = \frac{30.2}{15.8} = 1.91 \approx 2$$

因此，一相只需一个此型号的电容器组，三相则需三个电容器组，总的额定容量为 $Q_e = 200 \times 3 \times 2 = 1200\text{kvar}$ ，而需补偿的为 950kvar ，故所选电容器组满足要求。

5.8.3 断路器、隔离开关、电流互感器的选择

电容器组回路的最大长期工作电流 $I_{gzd} = \frac{S_e}{\sqrt{3} \cdot U_e} = \frac{200 \times 3}{\sqrt{3} \times 10} = 34.64\text{A}$

小于各出线回路中的最大长期工作电流，因此电容器侧断路器、隔离开关、电流互感器所选型号分别为：断路器选用 ZW₃₂-12/630-20 型；隔离开关选用 GW₂₂-12/630 型；电流互感器选用 LDCQ-10 型

5.9 35kV 侧跌落式熔断器的选择和校验

根据地点选择户外式，选择 RW₅-35/200~800 型户外交流高压跌落式熔断器。其技术数据如下：

表 5-23 RW₅-35/200~800 跌落式熔断器技术参数

型号	额定电压(kV)	额定电流(A)	额定断流容量(MVA)	开断负荷电流	开断空载变压器容量
RW ₅ -35/200~800	35	200	上限：900 下限：30	200A	5600kVA

校验：按额定电压选择 $U_e = 35\text{kV} \geq U_w = 35\text{kV}$

$$I_{erq} = K_b \times I_{eb} = \frac{2 \times 6300}{\sqrt{3} \times 37} = 196.62\text{A}$$

$$I_{erq} = 200\text{A}$$

$$I_{gzd} = 182.23\text{A}$$

I_{erq} （熔断器的额定电流） $\geq I_{erj}$ （熔件的额定电流） $\geq I_{gzd}$ （电路最大长期工作电流）

所以所选断路器适合。

6 保护接地装置及防雷保护

电气设备某些部位（如电器或电机的外壳，配电装置的构架等）在正常运行时是不带电的，但在发生故障时就会带电，易造成灼伤和电击等人身事故。严重的灼伤和电击都有致命的危险，电击危险性最大，一般死亡事故多数是由电击造成的。为了限制电气设备故障时作用人体的电压，从而达到限制流过人体的电流保护人员安全的目的，工程上将这些正常工作时不带电而绝缘损坏时有可能带电的部位与大地作良好的电气连接。

电气设备根据接地装置的作用和目的可分：

(1) 工作接地：电力系统正常运行需要将网络的某一点接地，稳定电网对地电位，使对地绝缘降低及有利于实现继电保护措施。

(2) 保护接地：为了人身安全将高压电气设备的金属外壳接地，保护人员的安全。

(3) 防雷接地：是为了减小电流通过接地装置时电位升高。

6.1 保护接地装置

6.1.1 接地的一般要求

(1) 为保证人身安全，所有的电气设备，都应装设接地装置，并将电气设备外壳接地。设计中首先应利用各类自然接地体。

(2) 一般应将各种不同用途和不同电压的电气设备使用一个总的接地装置。接地装置的接地电阻，应满足其中接地电阻最小的电气设备要求。

(3) 电气设备的人工接地体应尽可能在电气设备所在地点附近对地电压分布均匀，一般应采用环形接地体。

(4) 设计接地装置时，应考虑到一年4季中，均能保证接地电阻的要求值。

本变电站接地为户外配电装置及主厂房设保护接地网，接地电阻小于0.5欧姆；独立避雷针设置独立接地网，接地电阻小于10欧姆。

6.1.2 所内应当接地的部分

变电站中电气设备的下列金属部分均需接地：

(1) 变压器、电器、电机和照明器具等的底座和外壳；

(2) 电气设备的传动装置；

- (3) 互感器的二次绕组，继电保护方面另有规定的部分除外；
- (4) 配电屏、保护屏、计量屏、电源屏与控制屏的框架；
- (5) 配电装置的金属构架和钢筋混凝土架构以及靠近带电部分的金属围栏；
- (6) 电力电缆的电缆接头、电缆终端的外壳以及电缆的外皮和钢管电缆的钢管等；
- (7) 电缆的金属外皮
- (8) 避雷器、保护间隙和避雷针的接地端。

6.1.3 接地装置的计算

35kV 为中性点不接地系统，其接地电阻要求之可根据单相接地电容电流来确定。
架空线路长度 $L_j = 18\text{km}$

$$I_{jd} = \frac{U_{1e} \times L_j}{350} = \frac{35 \times 18}{350} = 1.8\text{A}$$

故接地电阻为：

$$R_{jd1} \leq \frac{120}{I_{jd}} = \frac{120}{1.8} = 66.67\Omega$$

10kV 为中性点不接地，其线路长度。

$$L_j = 18 + 15 + 12 + 15 + 14 + 16 = 90\text{km}$$

$$I_{jd} = \frac{U_{1e} \times L_j}{350} = \frac{10 \times 90}{350} = 2.57\text{A}$$

故接地电阻为：

$$R_{jd2} \leq \frac{120}{I_{jd}} = \frac{120}{2.57} = 46.69\Omega$$

在根据 $S_k \geq 0.3R_{cj} + 0.1h$ ($S_k \geq 5$)，取 $R \geq 10\Omega$

所用变 380/220 中性点接地，接地电阻要求值为 4Ω ，其共用接地装置的接地电阻应小于 4Ω 。

计算人工接地电阻 R_{rw}

人工接地网与自然接地体是并联的，并联后总电阻应达到 $R=4\Omega$ ，所以人工接地电阻为

$$R_{rw} = \frac{R_z \cdot R}{R_z - R} = \frac{20 \times 4}{20 - 4} = 5\Omega \text{ (自然接地体的接地电阻 } R_z = 20\Omega \text{)}$$

由于共用一个接地装置，故应取 $R_{rw} = 4\Omega$

计算单根垂直接地体的接地电阻 R_c

土壤电阻率 $\rho = \rho_0 \cdot \Psi$ ，由查表得 $\Psi = 1.5$ ，则 $\rho = 90 \times 1.5 = 135 \Omega \cdot m$ 。由于土壤电阻率不高，故人工接地装置以垂直接地体为主，上端用规格为 $4 \times 10 \text{mm}$ 扁钢连接，构成环路式接地装置。钢管上端埋入土中深度为 0.8m 垂直接地采用长 $L=2.5 \text{m}$ ，直径 $d=60 \times 10^{-3} \text{m}$ 的钢管。单根接地体的接地电阻为

$$R_c = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} = \frac{135}{2\pi \times 2.5} \ln \frac{4 \times 2.5}{60 \times 10^{-3}} = 43.97 \Omega$$

计算接地体的根数 n 接地体的根数 n 假设钢管之间的距离 $a=7.5 \text{m}$ ，则 $a/l = 3$ ，根据

$$\frac{R_c}{R_{rw}} = 43.97/4 = 10.99，初选 n=11 根$$

在查表得 $\eta_0=0.74$ 则

$$n = \frac{0.9R_c}{R_{rw}\eta_0} = \frac{0.9 \times 43.97}{4 \times 0.74} = 13.37 \approx 14 \text{ 根}$$

决定选 15 根钢管，验算人工接地电阻，查表得 $\eta_0=0.67$

则

$$R_{rw} = \frac{0.9R_c}{n\eta_0} = \frac{0.9 \times 43.97}{15 \times 0.67} = 3.94 \Omega$$

满足人工接地电阻 $R_{rw}=4\Omega$ 的要求。

校验接地线的热稳定

$$S \geq \frac{I_d}{70 \times 10^6} \sqrt{t} = \frac{2500}{70 \times 10^6} \sqrt{1} = 35.7 \text{ mm}^2$$

它小于采用 $4 \times 10=40 \text{ mm}^2$ 的扁钢，所以采用其接地满足要求。

35kV 配电区每隔 9m 加设一条均压带以便电位分布均匀。均压带采用截面不小于 24mm^2 的扁钢，其埋深为 0.6m 。由于接地电阻的计算引入不少假设条件，所以在现场敷设接地装置以后，必须对接地电阻加以实际测量和核算。如果不满足要求，必须补埋接地体，达到设计要求。

6.2 防雷保护

6.2.1 防雷保护的原因

变电站是电力系统防雷的重要保护部位，如果发生雷击现象，将会造成大面积的停电，因此变电站装设防雷保护措施是非常必要的，并且要求防雷保护措施必须十分可靠。雷电所引起的大气过电压将会对电气设备和变电站的建筑物产生严重的危害，在变电站和高压输电线路中，必须采取有效的防雷措施，以保证电气设备的安全。

变电站设计过程中,要考虑过电压的影响。过电压分外部过电压(大气过电压)和内部过电压。内部过电压一般由开关操作,负荷变化引起的这种过电压多在电器设备选择时予以考虑,而大气过电压由雷电引起,其电压可达到额定电压的百倍,甚至千倍,对人或设备危害极大,所以必须采用保护措施。在防雷保护设计中,应根据雷电活动情况、地形、地质、气象情况以及电网结构和运行方式等,结合运行经验进行全面分析和经济比较,做到技术先进、经济合理、符合电力系统和电力设备安全经济运行的要求。变电站遭受雷击主要来自两方面:(1)雷直击变电站;(2)架空线路的感应雷过电压和直击雷过电压形成的雷电波沿线路侵入变电站。

6.2.2 变电站的直击雷保护

1. 保护对象:

- (1) 35kV 和 10kV 侧配电装置
- (2) 屋外安装的主变及其它电器设备
- (3) 室内装置

2. 保护措施

对于 35kV 及以下的变电站,其绝缘水平较低,必须装设独立的避雷针,并满足不发生反击的要求。

3. 保护原理

避雷针是金属制成,比被保护对象高,并具有良好的接地装置,作用是将雷吸引到自己身上,并安全导入地中,从而保护附近比它矮的设备,建筑免受雷击。

4. 避雷针的保护与选择

(1) 具体要求:

- 1) 避雷针应有接地装置,接地电阻在 10Ω 以下,与主接地网距离应保持 3m 以上,即 $S_d > 3m$,

且要高于构架 5m 以上,即 $S_k > 5m$ 。否则应铺碎石或沥青路面(厚 5~8 cm),以保证人身不受跨步电压的危害。

- 2) 被保护设计距避雷针不能太 , 也不能太近。太近会出现反击现象,太远则保护范围。

- 3) 为了防止电压,避雷针设在人不经常出入的地方。

- 4) 本变电站占地面积 $70 \times 44 = 3080m^2$,需架设独立避雷针,做为直击雷保护。

(2) 避雷针高度的计算和保护范围确定

根据所选各种电气设备的总体布局,共设计 3 根避雷针比较适宜,因 3 根避雷针保护范围比各自的保护范围迭加起来要大。单针时,雷电受针的吸引往往可以被吸引离针较近的地面上。但在 3 针联合保护时,处在 3 针之间的上空,雷电因受避雷针吸引难于击于离针较近的地面上。其计算过程采用北京博超世纪软件公司开发设计的防雷工程设计软件(网络版)进行设计。

该软件解决传统防雷算法的三个难题:(1)能够计算任意多根、不等高、不对称布置的避雷针的保护范围;(2)能够同步计算一根避雷针在多个不同标高的保护半径;(3)能同步计算任意多根避雷针在任意标高的联合保护范围和 BX 值。

设计方法采用滚球法算法,根据避雷针和保护对象高度自动确定保护半径。布置避雷针时,直接看到避雷针在多个高度的保护范围,动态可视化布置方式使避雷针的保护效果一目了然。

其避雷针保护范围计算结果和防雷保护范围图见附图 8 所示

6.2.3 避雷器的选择

根据额定电压来选择避雷器 35kV 母线侧避雷器选用 Y5WZ-41/131 型其技术参数见表 6-1。

表 6-1 Y5WZ-41/131 型避雷器参数

型号	额定电压 (kV)	避雷器额定电 压(kV)	持续运行电 压(kV)	4 μ s 冲击电 流(kA)	雷电冲击残 压(kV)
Y5WZ-41/131	35	41	23.4	40	≤ 131

电压互感器线路用避雷器选用 Y5WZ-12.7/45 型
其技术参数见表 6-2。

表 6-2 Y5WZ-12.7/45 型避雷器参数

型号	额定电压(kV)	避雷器额定 电压(kV)	持续运行电 压(kV)	4 μ s 冲击电 流(kA)	雷电冲击残 压(kV)
Y5W-12.7/45	10	12.7	6.6	40	≤ 45

电容器组保护用避雷器选用 Y5W-12.7/45 型
其技术参数见表 6-3。

表 6-3 Y5WZ-12.7/45 型避雷器参数

型号	额定电压 (kV)	避雷器额定电 压(kV)	持续运行电 压(kV)	4 μ s 冲击电 流(kA)	雷电冲击残 压(kV)
Y5W-12.7/45	10	12.7	6.6	40	≤ 45

10kV 出线侧避雷器选用 Y5WZ-12.7/45 型
其技术参数见表 6-4。

表 6-4 Y5WZ-12.7/45 型避雷器参数

型号	额定电压 (kV)	避雷器额定电 压(kV)	持续运行电 压(kV)	4 μ s 冲击电 流(kA)	雷电冲击残 压(kV)
Y5WZ-12.7/45	10	12.7	6.6	40	≤ 45

6.2.4 变电站侵入波的保护

输电线路出现的大气过电压有两种，一种是雷击于线路上引起的为直击雷过电压，另一种是雷直击线路附近地面，由于电磁感应引起的称为感应过电压。利用阀型避雷器以及与阀型避雷

器相配合的进线保护段作为配电装置时侵入雷电波的保护。

进线保护段的作用在于利用本身的阻抗来限制雷电流幅值和利用本身的电晕衰耗来降低雷电波陡度，并通过进线段上管型避雷器的作用，使之不超过绝缘配合所要求的数值。因此，配电装置对侵入雷电波的保护设计除了考虑在配电装置内装设阀型避雷器的适当地点外，还必须对线路进线段保护措施提出要求。

对于装设避雷线的 35kV 架空电力线路，在变电站的进线段 1~2km 长度内，进行侵入雷电波保护。其保护接线图如图 6-2 所示。

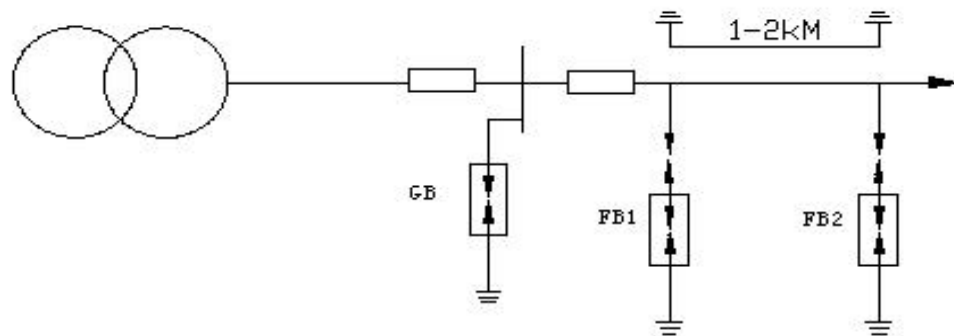


图 6-2 侵入波保护接线图

7 配电装置布置

配电装置是变电站的重要组成部分，配电装置是按主接线要求由开关设备、保护电器、测量仪表、母线和必要的辅助设备等组成。配电装置的整个结构尺寸，是综合考虑设备外形尺寸、检修和运输的安全距离等因素而决定的，它必须满足配电装置安全净距的要求。

对于配电装置选择的一般的要求如下：

(1) 大中型发电厂和变电站中，35kV 及以上的配电装置多采用屋外的配电装置，但对于 110kV~220KV 装置，当有特殊的要求时，或处于严重的污秽地区，经过经济技术比较可采用室内布置。

(2) 配电装置的设计应贯彻国家的建设方针，保证运行可靠，合理选择设备，在布置上力求整齐，清晰，有足够的安全距离。

(3) 便于扩建，检修，操作。

(4) 在保证安全可靠的情况下，布置紧凑，力求节约材料，降低造价。

所区 10kV、35kV 配电装置及主变压器全部采用户外型配电装置。并采用户外环网柜控制电路。10kV 采用 ZHW2-12 型户外交流高压金属封闭环网开关设备，该设备适用于交流 50Hz，额定电压 12kV，电缆进出线的户外配电网中，广泛用于工业园区、居民小区、商业中心。作为环网供电或终端供电的开关设备，可开断负荷电流，并通过熔断器切断短路电流，特别适用于免维护，自动化程度高的电网。采用户外环网柜替代国内常规的开闭所，可以大大减少出线电缆和占地面积，降低造价，提高供电可靠性，同时也降低了线损。设备结构特点为：结构紧凑，体积小，占地面积少，内部采用德国原装进口 SF6 紧凑型环网柜，具有全密封、全绝缘、高可靠、免维护。环网柜中安装了内部故障电弧限制装置，对人身和设备提供了最大程度的保护。SF6 环网柜无需辅助工具即可方便地更换熔断器，在熔断器熔断时发出机械指示信号，机械连锁功能齐备（满足“五防要求”），简单可靠，能有效防止各种误操作。

ZHW2-12 型户外环网柜的技术参数如表 7-1 所示

表 7-1 ZHW2-12 型户外环网柜的技术参数

型号	型式	额定电流 (A)	额定电压 (kA)	额定短路 开断电流 (kVA)	工 频 耐 受电压 (kV)	外形尺寸 (宽×深×高) (mm)
ZHW2-12	固定式	630	12	25	42	1400x900x1630

第三章 变电站设计实例

1. 35kV 变电站设计 (A)

1.1 设计的目的和意义

本次课程设计是以《35kV 安家输变电工程初步设计审核意见》和五常电业局提供的负荷资料及相关要求为设计依据,以加强电网的网架结构,提高该地区的供电质量、减少电能损失,满足该地区负荷增长的需要为目的而开发设计的 35kV 小型化变电站设计。以往 35kV 常规变电站设计二次回路采用直流操作,变压器高、低压侧均采用断路器,保护设置复杂,设备安装、调试、维护工作量大,10kV 选用开关柜户内布置,需建设 10kV 配电室,土建施工周期长,已不能适应农网建设周期短、资金紧的需要以及农村变电站用电的一些特点。结合以上变电站的设计特点,本次设计的 35kV 小型化变电站满足以下要求:①小容量、密布点、短半径;②主接线简单、供电安全可靠;③布置合理、绿化完善;④设备选择以提高供电可靠性、经济运行水平和自动化水平为前提;⑤与调度自动化相结合,并考虑到无人值班。其电气二次部分选用的分层分布式综合自动化系统设计。就是依赖目前高速发展的微型计算机技术,将变电站中的控制、保护、测量、中央信号各类自动化装置以及打印报表、故障录波等功能集中于一个微机网,完成调度端遥测、遥信、遥控三遥功能,以达到保证电网安全、经济、可靠运行为目的,把我国农网建设与管理工作提高到一个新水平。

1.2 变电站的类型及地质条件分析

1.2.1 变电站的类型

该变电站为 35kV 小型化变电站,35kV、10kV 配电装置均采用屋外半高型布置,35kV 侧采用单母线主接线,一回进线、两台主变。10kV 采用单母线分段接线,最终出线六回,要求供给学校、城郊加工企业、工厂及居民用电等,全部为三类负荷。并且根据主接线及运行方式的要求,本所选用分层分布式综合自动化系统。主变压器及线路控屏、电度表屏、直流屏、电池屏、交流屏均布置在主控室内。

1.2.2 变电站的地质条件分析

1. 地理位置分析

变电站所址位于五常市安家镇南郊,地势平坦、进出线走廊便于架空线路的引入和引出,因此配电装置的布置不必考虑特殊方式。所址的标高海拔 450m,经调查没有被洪水浸淹的历史,不必选用高海拔的电气设备。所址位于负荷中心,交通便利、通讯畅通。有铁路和公路经过变电站附近,不必过多考虑设备的运输问题。

2. 气象条件的选择

该地区夏季最高气温在+35℃,冬季最低气温为-38℃,年平均气温为+16℃,电气设备均可正常工作;最大风速为 2.0m/s,夏秋季节不受强风影响,所以不必考虑架空线路的机械强度及对屋外配电装置的影响;该地区全年只有短暂的霜冻(不足 2 天)和结冰现象(不足 1 天),覆冰厚度仅为 2mm,因此不必考虑覆冰问题;无冻土情况发生,接地装置地下部分不必过深即可保证可

靠接地；地震强度很小，不必设置防震保护，可以采用半高型或高型布置；土壤电阻率为 $100\Omega\cdot\text{m}$ ，可考虑采用构架式避雷针；年雷暴日数为 33.7 天，防雷装置的选取应加以考虑；附近虽然有化工厂，但对本所影响不大，由于绝缘子表面的湿润过程和气象条件密切相关，而当地四季存在溶雪溶冰、毛毛雨、雨加雪、凝露等对污秽绝缘子极为不利的气象条件，突发性的污秽与湿润可能同时建立，为防止污闪，所以对绝缘子串和变电设备外绝缘的影响应予以考虑。（以上分析均参照《高压配电装置设计技术规程》）

1.3 变电站的设计特点

与以往 35kV 常规变电站设计相比，其设计特点主要体现在以下几方面：

1. 变电站一次设备的主变压器采用 SZ9 型双绕组有载调压电力变压器，有载分接开关选用带远动接口，能实现带负荷自动调压，减少了停电时间。该变压器具有低损耗、低噪音、抗突发短路能力强等优点，同时具备“遥信、遥测、遥调、遥控”的四遥功能，可通过计算机远程控制，实现变电站无人值班化。并且 35kV 侧采用专为小型化变电站设计的进口户外高压隔离负荷开关和带缺相发信号的新型户外交流高压跌落式快速熔断器配合进行保护，完全可在主变满载情况下进行分合操作，具有较高的可靠性，不会造成变压器的损坏。

2. 所区 35kV、10kV 侧配电装置采用户外型配电装置，并采用户外环网柜控制电路。10kV 采用 ZHW2-12 型户外交流高压金属封闭环网开关设备，该设备作为环网供电或终端供电的开关设备，可开断负荷电流，并通过熔断器切断短路电流，特别适用于免维护，自动化程度高的电网。采用户外环网柜替代国内常规的开闭所，可以大大减少出线电缆和占地面积，降低造价，提高供电可靠性，同时也降低了线损。其设备结构特点为：结构紧凑，体积小，占地面积少，机械、电气闭锁功能完备（满足“五防要求”），简单可靠，能有效防止各种误操作，从而克服了 35kV 常规变电站 10kV 开关柜户内布置，土建施工周期长，占地面积多，资金投入大的缺点。

3. 在防雷保护方面：35kV、10kV 侧选用南京无线电厂生产的 Y5WZ 型氧化锌避雷器。其特点是采用通流能力强的氧化锌非线性电阻片叠加组装，氧化锌电阻片通流容量大，保护残压低，电压响应迅速，此外由于采用硅橡胶做外套，从根本上消除了瓷套式避雷器可能存在的外瓷套爆裂现象，并提高了防潮、耐污、抗老化性能、同时缩小体积，减轻重量，免于维修，该产品聚集了有机外套和氧化锌电阻片的全部优点，是新型的过电压保护电器。而避雷针的设计则采用北京博超世纪软件公司开发设计的防雷工程设计软件进行设计。该软件解决传统防雷算法的三个难题：

（1）能够计算任意多根、不等高、不对称布置的避雷针的保护范围；（2）能够同步计算一根避雷针在多个不同标高的保护半径；（3）能同步计算任意多根避雷针在任意标高的联合保护范围和 BX（两针间在被保护物高度的水平面上保护范围的一侧最小宽度）值。设计方法采用滚球法算法，根据避雷针和保护对象高度自动确定保护半径。布置避雷针时，直接看到避雷针在多个高度的保护范围，动态可视化布置方式使避雷针的保护效果一目了然。

2 负荷统计及计算

2.1 负荷统计表

本变电站负荷主要以居民用电和工厂用电为主，同时还能满足一般的学校用电和加工企业用电的需要，全部为三类负荷，35kV 侧进线一回，10kV 侧采用单母线分段接线，6 回出线。负荷统计如表 2-1 所示。

表 2-1 负荷统计表

回路 序号	回路 名称	用户类型	负荷容量 (KVA)	需用 系数	变压器 台数	线 长 (KM)	供电 回路	负荷 级别
1	安家南部线	居民用电	800	0.8	18	18	1	3
		学校用电	700	0.65				
2	安家镇外线	居民用电	700	0.75	16	15	1	3
		饮料厂	600	0.6				
3	安家镇内线	化工厂	700	0.8	12	12	1	3
		乳品厂	600	0.65				
4	民乐甲线	居民用电	800	0.8	18	15	1	3
		污水处理厂	600	0.6				
5	民乐乙线	制药厂	700	0.8	12	14	1	3
		食品加工厂	600	0.75				
6	民乐联合线	纺织厂	600	0.65	14	16	1	3
		饲料厂	500	0.7				

2.2 负荷计算

变电站主接线设计是根据计算负荷选择主变压器的容量的。负荷调查统计出的变电站供电范围内的所有用电设备的额定容量总和要比实际变动负荷大，因为用电设备实际负荷一般小于其额定容量，而且各种用电设备并非同时运行。用考虑这些因素所计算出来的负荷，代替实际变动负荷，称为计算负荷。

本设计为小型化变电站，负荷计算采用需用系数法。其优点是：公式简单，计算方便，对于不同性质的供电用户的需用系数值是经过几十年的统计积累，数值比较完整和准确，为供电设计创造了很好的条件。由于各供电区域电性质相差不大，考虑功率因数相同，则视在功率可表示为有功功率。

采用需用系数法求各用户的计算负荷：

$$S_{jsi} = K_t \cdot S_{ei} \quad (2-1)$$

式中 S_{jsi} —各用户的计算负荷，kVA；

S_{ei} —各用电设备额定容量，kVA。

每条出线路的负荷：

第一供电区： $S_{js1} = 0.8 \times 800 + 0.65 \times 700 = 1095$ (kVA)

第二供电区： $S_{js2} = 0.75 \times 700 + 0.6 \times 600 = 885$ (kVA)

第三供电区： $S_{js3} = 0.8 \times 700 + 0.65 \times 600 = 950$ (kVA)

第四供电区： $S_{js4} = 0.8 \times 800 + 0.6 \times 600 = 1000$ (kVA)

第五供电区： $S_{js5} = 0.8 \times 700 + 0.75 \times 600 = 1010$ (kVA)

第六供电区： $S_{js6} = 0.65 \times 600 + 0.7 \times 500 = 740$ (kVA)

变电站设计当年的计算负荷可由式 (2-2) 计算

$$S_{js} = K_t \sum_{i=1}^6 S_{jsi} (1 + X\%) \quad (2-2)$$

式中 K_t —同时系数，一般取 0.85–0.9，这里取 0.9；

$X\%$ —线损率，高低压网络的综合线损率在 8%–12%，这里取 10%。

$$\begin{aligned} S_{js} &= K_t (S_{js1} + S_{js2} + S_{js3} + S_{js4} + S_{js5} + S_{js6}) \times (1 + X\%) \\ &= 0.9 \times (1095 + 885 + 950 + 1000 + 1010 + 740) \times (1 + 0.1) \\ &= 5623.2 \text{ (kVA)} \end{aligned}$$

计算负荷增长后的变电站最大计算负荷为

$$S_{jszd} = S_{js} e^{m \times n} \quad (2-3)$$

式中 n — 年数，取 8 年；

m — 年平均增长率，取 7%；

S_{jszd} — n 年后的最大计算负荷。

$$S_{jszd} = 5623.2 \times e^{8 \times 0.07} = 9844.38 \text{ (kVA)}$$

3 主变的选择和主接线的设计

3.1 主变台数的确定和容量的选择

变压器容量的选择至关重要，容量选择小了，不满足负荷增长的要求。容量选择大了，变压器空载损耗大，起不到降低损耗、同网同价的要求。但是，随着我国工业和农业的迅速发展和人民物质生活的提高，能源问题日益尖锐，节电问题日趋重要，目前国内外一些文献都提出，在某些情况下，把变压器容量适当选大些，其所增加的投资将从它节约的电能损耗费用中很快补偿回来。这样既缓解了电网供电的紧张情况，又达到了经济运行的目的。在 35kV 变电站中，考虑到不受运输条件的限制，一般选用三相变压器，因为三相变压器运行时是最经济，最可靠的。由于电力负荷季节性不强，且变电站均为三类负荷，变压器在运行时其电源侧受电电压有可能偏离额定值，这时变压器二次侧的负载所承受的电压有可能偏高或偏低，这对用电设备的正常工作十分不利，所以采用两台有载调压变压器，以便使变压器调压后不仅可稳定供电电压，还可控制电力潮流调节负荷分配。当一台主变压器运行时，可保证 60% 的负荷供电，考虑变压器的事后负荷能力为 40%，所以供电的保证率为 84%。为简化电压等级或减少重复降压容量采用双绕组变压器。由于变压器绕组的连接方式必须和系统电压相位一致，否则不能并列进行，所以变压器绕组的连线方式选 Y 型连接。

装设两台主变压器的变电站，根据我国变电压器运行的实践经验，并参考经验，每台主变的额定容量：

$$S_e \geq 0.6S_{iszd} \quad (3-1)$$

即: $S_e \geq 0.6 \times 9844.38 = 5906.628 (\text{kVA})$

主变压器采用双绕组有载调压电力变压器，根据中国水利水电出版社《电气设备实用手册》，可选择 SZ9-6300/35 型有载调压变压器，该变压器具有低损耗、低噪音、抗突发短路能力强、外形美观等优点，同时具备“遥信、遥测、遥调、遥控”的四遥功能，可通过机算远程控制，实现变电站无人值班化。其技术数据如表 3-1 所示。

表 3-1 SZ9-6300/35 变压器技术参数

额定容量 (kVA)	电 压 组 合 (kV)			联结组 标号	空载损 耗(kW)	负载损 耗(kW)	空载电 流 (%)	短路阻 抗 (%)	重量 (kg)
	高压	分接 (%)	低压						
6300	35	±	10.5	Y, d11	7.0	39.0	0.85	7.5	12300
	38.5	3×2.5							

3.2 主接线方案比较与设计

3.2.1 主接线的设计原则

变电站的主接线是电力系统按接线组成中的一个重要组成部分，主接线的确定对电力系统的安全、稳定、灵活、经济运行以及变电站电气设备的选择，配电装置的布置，继电保护和控制方法的拟订将会产生直接影响。

3.2.2 主接线的基本要求

- (1) 可靠性：是指主接线能可靠的工作，以保证用户的不间断供电。
- (2) 灵活性：其运行及动作是否灵活。
- (3) 经济性：是指投资省，占地面积小，能量损失小。

3.2.3 选择主接线的形式

主接线是根据发电厂或变电站的设计任务书，原始资料以及设计要求和原则来进行设计的，在保证满足技术要求条件下，力求经济性。现初步选择两个方案进行经济计算，采用静态比较法进行经济比较，确定出最佳主接线方案。

方案 1：采用单母线主接线

单母线主接线其特点是整个配电装置只有一组母线，每个电源和引线都经过开关电器接到同一组母线上，出线不超过三回。其优点为接线简单、清晰，采用的电气设备少，比较经济，操作方便且便于扩建。其主要缺点是母线和隔离开关检修时或发生故障时必须断开全部电源使整个配电装置停电。这种接线的可靠性和灵活性都比较差，主要用于一般负荷和供电可靠性要求不太高的小容量发电厂和变电站中。接线方式如图 3-1 所示。

方案 2：采用单母线分段接线

为克服一般单母线接线存在的缺点，提高它的供电可靠性和灵活性，可以把单母线分成几段，在每段单母线之间装设两个隔离开关。每段母线上均接有电源和出线回路，便成为单母线分段接线。其特点是当母线发生故障或检修时停电局限在一段母线上，非正常段母线保持正常供电。对重要用户可以从两段母线上取得电源。这样，当任意一段母线发生故障或检修时，对重要用户不停止供电。其主要缺点是：(1) 检修任意一出线路断路器时，该出线必须停电；(2) 任何一段母线发生故障或检修时，必须断开并联接在该段上的电源，故减少了发电量和供电量，并使单独用该段母线供电的用户停电。接线方式如图 3-2 所示。

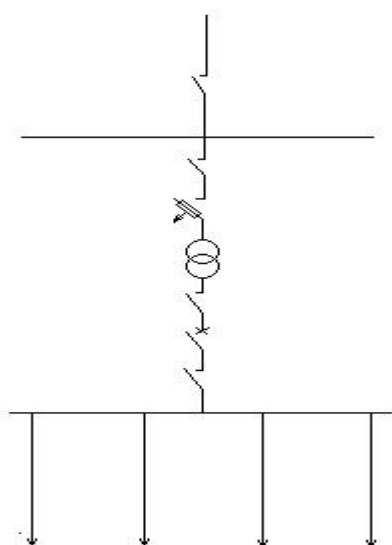


图 3-1 单母线主接线

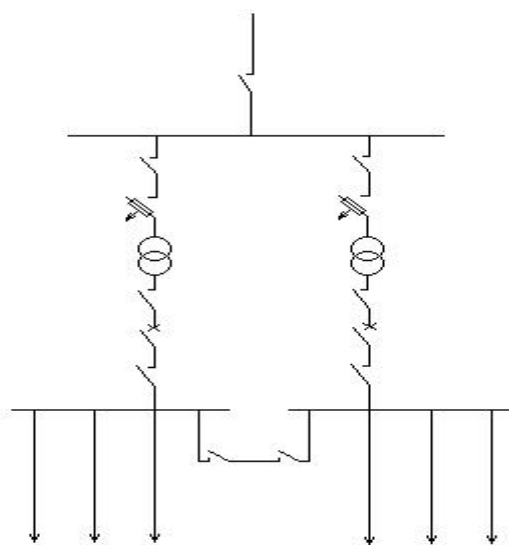


图 3-2 单母线分段接线

根据上述两种方案的比较，结合所设计的 35kV 小型化变电站的负载情况，可采用单母线分段接线，其本身既保留了单母线的简单、经济、方便等优点，又克服了它的一些缺点，使可靠性和灵活性有所提高。

35kV 侧采用跌落式高压熔断器和高压负荷隔离开关相结合的接线方式，作为变压器的短路保护和实现合分工作电流，10kV 侧采用隔离开关和断路器配合保护。

4 短路计算

4.1 短路计算的目的

在供电系统中，出现次数比较多的严重故障就是短路，所谓短路是指供电系统中不等电位的导体在电气上被短接。产生短路的主要原因，由于电气设备载流部分绝缘损坏所造成。而绝缘损坏主要是因为绝缘老化、过电压、机械性损伤等引起。人为误操作及鸟兽跨越裸导体等也能引起短路。发生短路时，由于系统中总阻抗大大减少，因而短路电流可能达到很大数值（几万安至十几万安）。这样大的电流所产生的热效应和机械效应会使电气设备受到破坏；同时短路点的电压降到零，短路点附近的电压也相应地显著降低，使此处的供电系统受到严重影响或被迫中断；若在变电站附近发生短路，还可能使整个电力系统运行解列，引起严重后果。所以在选择、校验电气设备时，为了保证在正常运行和故障运行时都能安全可靠地工作，同时力求节约投资，需考虑短路电流的大小；在选择继电保护方式以及进行继电保护整定计算中需要以短路电流为依据；选择接地装置的设计中也要以短路电流为依据；设计户外装置时，要根据短路电流确定及校验导线的相间距离以及他们相对地面的安全距离。

4.2 各元件电抗标么值计算

取 $S_B = 100\text{MVA}$ ， $U_B = U_{av}$ ，系统电源电势标么值为 1，系统电抗标么值最大运行方式

$X_{\min} = 0.04$ ，最小运行方式 $X_{\max} = 0.06$ ，导线每公里的电抗为 0.4Ω 。主变的等效阻抗 X_T 的标么值为：

(1) 当系统处于最小运行方式下，即一台主变单独运行时

$$X_{T1} = X_{T\text{单}}^* = \frac{U_S \%}{100} \times \frac{S_B}{S_N} = \frac{7.5}{100} \times \frac{100 \times 10^6}{6300 \times 10^3} = 1.19$$

(2) 当系统处于最大运行方式下，即两台主变并行运行时

$$X_{T\text{并}}^* = \frac{1}{2} X_{T\text{单}}^* = \frac{1}{2} X^* = 0.595$$

高压侧电源进线的阻抗标么值为：

$$X_0 = 0.4 \times L \times \frac{S_B}{U_B^2} = 0.4 \times 18 \times \frac{100}{37^2} = 0.584$$

低压侧各出线的阻抗标么值为：

$$X_1 = \frac{XL_1 \cdot S_B}{U_n^2} = \frac{0.4 \times 18 \times 100}{10.5^2} = 6.531$$

$$X_2 = \frac{XL_2 \cdot S_B}{U_n^2} = \frac{0.4 \times 15 \times 100}{10.5^2} = 6.442$$

$$X_3 = \frac{XL_3 \cdot S_B}{U_n^2} = \frac{0.4 \times 12 \times 100}{10.5^2} = 4.354$$

$$X_4 = \frac{XL_4 \cdot S_B}{U_n^2} = \frac{0.4 \times 15 \times 100}{10.5^2} = 6.442$$

$$X_5 = \frac{XL_5 \cdot S_B}{U_n^2} = \frac{0.4 \times 14 \times 100}{10.5^2} = 5.079$$

$$X_6 = \frac{XL_6 \cdot S_B}{U_n^2} = \frac{0.4 \times 16 \times 100}{10.5^2} = 5.805$$

4.3 短路点的选择

根据保护整定值的计算和经验，各短路点的选择如图 4-1 所示。

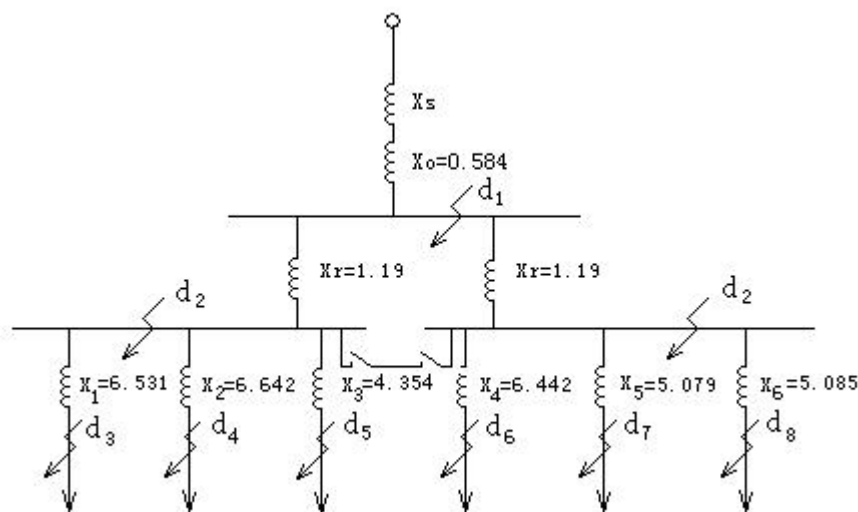


图 4-1 短路点确定图

4.4 各点短路电流的计算

d_1 点发生短路时：

最大运行方式下（两台主变并列运行时）各点的短路电流

$$I_{d1\max} = \frac{E''}{X_{\min} + X_0} = \frac{1}{0.04 + 0.584} = 1.6(kA)$$

$$I_{d1}^{(3)} = \frac{I_{d1\max} \cdot S_B}{\sqrt{3}U_{av}} = \frac{1.6 \times 100}{\sqrt{3} \times 37} = 2.5(kA)$$

$$I_{d1}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{d1}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 2.5 = 2.165(kA)$$

$$i_{ch} = \sqrt{2}K_{ch}I_{d1}^{(3)} = \sqrt{2} \times 1.8 \times 2.5 = 6.375(kA)$$

$$I_{ch} = I_{d1}^{(3)} \sqrt{1 + 2(K_{ch} - 1)^2} = 2.5 \times 1.51 = 3.78(kA)$$

$$S_d = \frac{S_B}{X_{js}^*} = \frac{S_B}{X_{\min} + X_0} = \frac{100}{0.04 + 0.584} = 160.26(MVA)$$

最小运行方式下（变压器是解裂的，只有一台投入运行）各点的短路电流

$$I_{d1\min} = \frac{E''}{X_{\max} + X_0} = \frac{1}{0.06 + 0.584} = 1.55(kA)$$

$$I_{d1}^{(3)} = \frac{I_{d1\min} \cdot S_B}{\sqrt{3}U_{av}} = \frac{1.55 \times 100}{\sqrt{3} \times 37} = 2.42(kA)$$

$$I_{d1}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{d1}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 2.42 = 2.09(kA)$$

$$i_{ch} = \sqrt{2}K_{ch}I_{d1}^{(3)} = \sqrt{2} \times 1.8 \times 2.42 = 6.17(kA)$$

$$I_{ch} = I_{d1}^{(3)} \sqrt{1 + 2(K_{ch} - 1)^2} = 2.42 \times 1.51 = 3.65(kA)$$

$$S_d = \frac{S_B}{X_{js}^*} = \frac{S_B}{X_{\max} + X_0} = \frac{100}{0.06 + 0.584} = 155.28(MVA)$$

d₂点发生短路时:

最大运行方式下（两台主变并列运行时）各点的短路电流

$$I_{d2\max} = \frac{E''}{X_{\min} + X_0 + X_{T1}/2} = \frac{1}{0.04 + 0.584 + 1.19/2} = 0.82(kA)$$

$$I_{d2}^{(3)} = \frac{I_{d2\max} \cdot S_B}{\sqrt{3}U_{av}} = \frac{0.82 \times 100}{\sqrt{3} \times 10.5} = 4.51(kA)$$

$$I_{d2}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{d2}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 4.51 = 3.91(kA)$$

$$i_{ch} = \sqrt{2} K_{ch} I_{d2}^{(3)} = \sqrt{2} \times 1.8 \times 4.51 = 11.48(kA)$$

$$I_{ch} = I_{d2}^{(3)} \sqrt{1 + 2(K_{ch} - 1)} = 4.51 \times 1.51 = 6.81(kA)$$

$$S_d = \frac{S_B}{X_{js}^*} = \frac{S_B}{X_{\min} + X_0 + X_{T1} / 2} = \frac{100}{0.04 + 0.584 + 1.19 / 2} = 82.03(MVA)$$

最小运行方式下（变压器是解裂的，只有一台投入运行）各点的短路电流

$$I_{d2\min} = \frac{E''}{X_{\max} + X_0 + X_{T1}} = \frac{1}{0.06 + 0.584 + 1.19} = 0.55(kA)$$

$$I_{d2}^{(3)} = \frac{I_{d2\min} \cdot S_B}{\sqrt{3} U_{av}} = \frac{0.55 \times 100}{\sqrt{3} \times 10.5} = 3.02(kA)$$

$$I_{d2}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{d2}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 3.02 = 2.62(kA)$$

$$i_{ch} = \sqrt{2} K_{ch} I_{d2}^{(3)} = \sqrt{2} \times 1.8 \times 3.02 = 7.69(kA)$$

$$I_{ch} = I_{d2}^{(3)} \sqrt{1 + 2(K_{ch} - 1)^2} = 3.02 \times 1.51 = 4.56(kA)$$

$$S_d = \frac{S_B}{X_{js}^*} = \frac{S_B}{X_{\max} + X_0 + X_{T1}} = \frac{100}{0.06 + 0.584 + 1.19} = 54.53(MVA)$$

各短路点短路电流如表 4-1 所示。

表 4-1 短路电流统计表（电流单位 kA）

短 路 点	最大运行方式					最小运行方式				
	$I_d^{(3)}$	$I_d^{(2)}$	i_{ch}	I_{ch}	$S_{d(MVA)}$	$I_d^{(3)}$	$I_d^{(2)}$	i_{ch}	I_{ch}	$S_{d(MVA)}$
d ₁	2.5	2.165	6.375	3.78	160.26	2.42	2.09	6.17	3.65	155.28
d ₂	4.51	3.91	11.48	6.81	82.03	3.02	2.62	7.69	4.56	54.53
d ₃	0.71	0.61	1.81	1.07	12.9	0.66	0.57	1.68	0.99	11.95
d ₄	0.72	0.62	1.83	1.09	13.05	0.67	0.58	1.71	1.01	12.08
d ₅	0.99	0.86	2.52	1.49	17.94	0.89	0.77	2.27	1.34	16.16
d ₆	0.72	0.62	1.83	1.09	13.05	0.67	0.58	1.71	1.01	12.08
d ₇	0.87	0.75	2.21	1.31	15.88	0.8	0.69	2.04	1.21	14.47
d ₈	0.78	0.68	1.99	1.18	14.24	0.72	0.62	1.83	1.09	13.09

5 电气设备的选择及校验

电气设备的选择及校验是变电站设计的重要内容之一，本设计电气设备的选择从我国实际情况出发，根据设计规程要求进行，力求做到了技术先进、安全可靠、运行灵活方便、留有适当的余度的要求。并在选择后按设备的额定电压，额定电流，短路时动稳定和热稳定等方面对所选的设备进行了校验。

变电站内各种主要电气设备的选择如表 5-1 所示。

表 5-1 主设备清单

序号	设备名称	规格或型号	单位	数量	备注
1	主变压器	SZ9-6300/35	台	2	35kV 侧
2	跌落式熔断器	RW ₅ -35/200~800	组	2	35kV 侧
3	熔断器	RW ₃ -10	组	2	电压互感器侧
4	熔断器	RW ₅ -35	组	2	所用变侧
5	断路器	ZW ₃₂ -12/1250-25	组	2	10kV 侧
6	断路器	ZW ₃₂ -12/630-20	组	6	10kV 出线侧
7	隔离开关	GFW1-35	组	1	35kV 侧
8	隔离开关	GW ₃₂ -12/1250	组	4	10kV 侧
9	电力电容器	BFM11/ $\sqrt{3}$ -200-1W	组	3	10kV 出线侧
10	电流互感器	LFZJ-10	台	2	10kV 侧
11	电压互感器	JSZK2-10	台	2	10kV 侧
12	避雷器	Y5WZ-41/131	组	1	35kV 母线侧
13	避雷器	Y5W-12.7/45	组	2	电压互感器侧
14	避雷器	Y5W-12.7/45	组	2	电容器侧
15	避雷器	Y5W-12.7/45	组	6	10kV 出线侧
17	穿墙套管	CWLB2-10/1000	个		
18	绝缘子	XP-4C	片	4	35kV 侧
19	绝缘子	ZS-10/4	串		10kV 侧屋内外
20	钢芯铝绞线	LGJ-160mm ²	米		35kV 侧母线
21	钢芯铝绞线	LGJ-120mm ²	米		10kV 出线侧
22	组合导线	2×LGJQ-360mm ²	米		10kV 侧母线

变电站内各种主要电气设备的校验要求如表 5-2 所示。

表 5-2 电气设备的校验要求表

序号	设备名称	额定电压 kV	额定电流 A	额定容量 kVA	额定开断 电流	短路热稳 定	短路动稳 定
1	断路器	√	√	√		√	√
2	隔离开关	√	√			√	√
3	电压互感器	√	√			√	√
4	电压互感器	√		√			
5	熔断器	√	√		√		
6	电力电容器	√		√			
7	避雷器	√					
8	绝缘子	√				√	
9	穿墙套管	√	√			√	√

注 表中“√”表示校验要求项目

5.1 母线的选择及校验

5.1.1 母线材料和截面形状的选择

母线的材料有铜、铝和钢。目前，农村发电厂和变电站以及大、中型发电厂、变电站的配电装置中的母线，广泛采用铝母线，这是因为铜贵重，我国储量又少；而铝储量较多，具有价格低、重量轻、加工方便等特点。因此，选用铝母线要比铜母线经济。

农村发电厂和变电站配电装置中的母线截面目前采用矩形、圆形和圆形绞线等。选择母线截面形状的原则是：肌肤效应系数尽量低；散热好；机械强度高；连接方便；安装简单。

结合本变电站为全户外敞开式布置的结构和特点，10kV 低压侧主要选择矩形截面母线，因为同样截面的矩形母线周长比圆形母线的周长要长，散热面积大，冷却条件好；由于肌肤效应的影响，矩形母线的电阻比圆形的小。在 35kV 高压侧一般采用钢芯铝绞线。钢芯铝绞线的耐张性能比单股母线好，在允许电流相同的条件下，钢芯铝绞线的直径比单股母线直径大，其表面附近的电场强度小于单股母线。从而使变电站的屋外配电装置结构和布置简单，投资少。

5.1.2 35kV 侧母线截面积的选择及校验

若一台变压器停止工作，想满足整个负荷的需求，则另一台变压器工作在过负荷状态，由于 $S_B \geq 0.6S_{jzd}$ ，所以只需一台过负荷为原来的 $1/0.6=1.67$ 倍，即 $S_{jzd}=1.67S_B$ ，通过高压侧母线的最大长期工作电流：

$$I_{gzd} = 1.67 \times \frac{1.05 \times S_e}{\sqrt{3} \times U_e} = 1.67 \times \frac{1.05 \times 6300}{\sqrt{3} \times 35} = 182.23A$$

3. 按经济电流密度选择母线截面

$$S_j = \frac{I_{gzd}}{J} \quad (5-1)$$

式中 S_j —经济截面， m^2 ；

J —经济电流密度， A/m^2 。

由于母线置于户外，考虑集肤效应和散热，最大负荷利用小时数取为 3000~5000h/a，按经济电流密度选择母线截面

查表选择 $J=1.15 \times 10^6 A/m^2$

$$\therefore S_j = \frac{182.23}{1.15 \times 10^6} = 158.46 mm^2$$

查单条矩形母线的截面流量表 选择截面积 $40 \times 4 mm^2$ 的 LGJ 型室外钢芯铝绞线，其 $25^\circ C$

时最大允许持续电流 $I_{y\theta} = 456A$

取 $\theta = 35^\circ C$ ， $\theta_0 = 25^\circ C$ 时，温度修正系数为：

$$K_\theta = \sqrt{\frac{\theta_y - \theta}{\theta - \theta_0}} = \sqrt{\frac{70 - 35}{70 - 25}} = 0.882$$

则实际环境温度为 $35^\circ C$ 时的母线允许电流：

$$I_{y\theta} = 0.882 \times 456 = 402.192(A)$$

大于其长期最大工作电流（182.23A），满足长期工作时的发热条件。

4. 校验

短路计算时间 $t = t_b + t_g + t_{hu} = 1.5 + 0.06 + 0.04 = 1.6s$ 。因 $I'' = I_\infty$ ，所以 $\beta'' = \frac{I''}{I_\infty} = 1$ ，

经查《短路电流周期分量等值时间曲线》表得， $t_z = 1.3s$ 。因 $t > 1s$ ，所以 $t_{fe} = 0$ 。

故 $t_{dz} = t_z = 1.3s$

母线正常运行时的最高温度为:

$$\theta_c = \theta + (\theta_y - \theta) \cdot \left(\frac{I_{gzd}}{I_{y\theta}} \right)^2 = 35 + (70 - 35) \times \left(\frac{182.23}{402.192} \right)^2 = 42.19^\circ\text{C}$$

查表知 $C = 97 \times 10^6$, 按热稳定条件所需最小母线截面为

$$S_{zx} = \frac{I_\infty}{C} \cdot \sqrt{t_{dz} \cdot K_j} \quad (5-2)$$

式中 C —热稳定系数;

K_j —集肤效应系数 (取 1)。

$$S_{zx} = \frac{I_\infty}{C} \cdot \sqrt{t_{dz} \cdot K_j} = \frac{2.5 \times 10^3}{97 \times 10^6} \times \sqrt{1.3 \times 1} = 29.39 \text{mm}^2$$

小于所选母线的截面积, 满足热稳定要求, 因所选母线为绞线, 故不需动稳定校验。所以高压 35kV 线可选为 LGJ-160mm²型的钢芯铝绞线。

5.1.3 35kV 侧进线母线截面积的选择及校验

因其最大长期工作电流及各相参数均与 35kV 侧母线截面积的选择及校验基本相同, 因此选择及校验过程同 35kV 侧, 故选 LGJ-160mm²型的钢芯铝绞线。

5.1.4 10kV 侧母线截面的选择及校验

按通过低压侧母线的最大长期工作电流

$$I_{gzd} = 1.67 \cdot \frac{1.05 \cdot S_e}{\sqrt{3} \cdot U_e} = 1.67 \times \frac{1.05 \times 6300}{\sqrt{3} \times 10} = 637.82 \text{A}$$

3. 按经济电流密度选择母线截面

根据公式 (5-1) 取变压器最大负荷利用小时数 $h = 3000$ 小时, 查表选择 $J = 1.15 \times 10^6 \text{A/m}^2$

$$\therefore S_j = \frac{637.82}{1.15 \times 10^6} = 554.63 \text{mm}^2$$

经查表选用 2×LGJQ-360mm² 型组合导线, 其 25℃时最大允许持续电流 $I_y = 826 \text{A}$

则实际环境温度为 35℃时的母线允许电流

$$I_{y\theta} = 0.882 \times 826 = 728.53 (\text{A})$$

大于其长期最大负荷电流 (637.82A), 满足长期工作时的发热条件。

2. 校验

热稳定性校验

短路计算时间 $t = t_b + t_g + t_{hu} = 1 + 0.06 + 0.04 = 1.1\text{s}$ 。因 $I'' = I_\infty$ ，所以 $\beta'' = \frac{I''}{I_\infty} = 1$ ，

经查表得 $t_z = 0.9\text{s}$ 。因 $t > 1\text{s}$ ，所以 $t_{fz} = 0$ ，故 $t_{dz} = t_z = 0.9\text{s}$

母线正常运行时的最高温度为：

$$\theta_c = \theta + (\theta_y - \theta) \cdot \left(\frac{I_{gzd}}{I_{y\theta}} \right)^2 = 35 + (70 - 35) \times \left(\frac{637.82}{970.2} \right)^2 = 49.98^\circ\text{C}$$

查表知 $C = 95 \times 10^6$ ，按热稳定条件所需最小母线截面为

$$S_{zx} = \frac{I_\infty}{C} \cdot \sqrt{t_{dz} \cdot K_j} = \frac{4.51 \times 10^3}{95 \times 10^6} \times \sqrt{0.9 \times 1} = 45.04\text{mm}^2$$

小于所选母线的截面积，故满足热稳定要求。

5.1.5 10kV 侧出线截面积的选择及校验

在六回出线中，以最大负荷的一条出线为出线截面积选择的计算依据，其它线路则一定能满足。由于六回出线的负荷相差不大，故不会造成太大的浪费，并且出线路负荷要求考虑今后 8 年的增长，其增长率为 7%。

$$S_{jszd} = 0.9 \times (1 + 8\%) \times 1095 \times e^{8 \times 7\%} = 1863.31(\text{kVA})$$

按通过 10kV 侧出线的最大长期工作电流

$$I_{gzd} = \frac{1.05 \times S_{jszd}}{\sqrt{3} \cdot U_e} = \frac{1.05 \times 1868.31}{\sqrt{3} \times 10} = 113.26\text{A}$$

3. 按经济电流密度选择母线截面

根据公式 (4-1) 取变压器最大负荷利用小时数 $h = 3000$ 小时，查表选择 $J = 1.15 \times 10^6 \text{A/m}^2$

$$\therefore S_j = \frac{113.26}{1.15 \times 10^6} = 98.48\text{mm}^2$$

经计算选择 LGJ-120mm² 型钢芯铝绞线，其 25℃ 时最大允许持续电流 $I_y = 347\text{A}$

则实际环境温度为 35℃ 时的出线允许电流

$$I_{y\theta} = 0.882 \times 347 = 306.054(\text{A})$$

大于其长期最大负荷电流（113.26A），满足长期工作时的发热条件。

4. 校验

短路计算时间 $t = t_b + t_g + t_{hu} = 0.5 + 0.05 + 0.02 = 0.57\text{s}$ 。因 $I'' = I_\infty$ ，所以

$\beta'' = \frac{I''}{I_\infty} = 1$ ，经查表得 $t_z = 0.5\text{s}$ 。因 $t < 1\text{s}$ ，所以 $t_{fz} = 0.05 \cdot \beta'' = 0.05\text{s}$ ，故

$$t_{dz} = t_z + t_{fz} = 0.55\text{s}$$

母线正常运行时的最高温度

$$\theta_c = \theta + (\theta_y - \theta) \cdot \left(\frac{I_{gzd}}{I_{y\theta}} \right)^2 = 35 + (70 - 35) \times \left(\frac{113.26}{306.054} \right)^2 = 39.79^\circ\text{C}$$

查表知 $C = 99 \times 10^6$ ，按热稳定条件所需最小母线截面为

$$S_{zx} = \frac{I_\infty}{C} \cdot \sqrt{t_{dz} \cdot K_j} = \frac{0.71 \times 10^3}{99 \times 10^6} \times \sqrt{0.55 \times 1} = 5.32\text{mm}^2$$

小于所选母线的截面积，故满足热稳定要求，因所选母线为绞线，故不需动稳定校验。

5.2 断路器的选择

5.2.1 10kV 侧断路器的选择及校验

1. 断路器的选择

按构造形式、装置种类、额定电压、额定电流、和额定开断电流选择断路器。又据 $U_e \geq U_w = 10\text{kV}$, $I_{gzd} = 637.82\text{A}$, $I_{ekd} = 16\text{kA} \geq I_{dt} = I'' = 4.51\text{kA}$ ，查《电力工程设计手册》选择 ZW₃₂-12/1250-25 型断路器。其技术参数见表 5-3。

表 5-3 ZW₃₂-12/1250-20 型断路器参数

型号	额定电压 (kV)	额定电流 (A)	额定开断电流 I_{ekd} (kA)	极限通过电流峰值 i_j (kA)	固有分闸时间 t_g (s)	4s 热稳定电流有效值 I_r (kA)
ZW ₃₂ -12/1250-25	12	1250	25	40	≤0.05	25

2. 校验

(1) 热稳定性校验:

短路电流的热脉冲:

$$I_{\infty}^2 \cdot t_{dz} = 4.51^2 \times 0.9 = 18.3 < I_r^2 \cdot t = 25^2 \times 4 = 2500 (\text{kA}^2 \cdot \text{s})$$

因此满足热稳定性要求。

(2) 动稳定性校验

$$\text{极限通过电流 } i_j = 40 > i_{ch} = 11.48 (\text{kA})$$

故动稳定性也满足要求。

经计算满足热稳定性及动稳定性要求, 因此所选 ZW₃₂-12/630-20 型断路器满足要求。

5.2.2 10kV 出线侧断路器的选择及校验

1. 断路器的选择

按构造形式、装置种类、额定电压、额定电流、和额定开断电流选择断路器。

以最大负荷的一条出线路进行选择, 又据 $U_e \geq U_W = 10\text{kV}$, $I_{gzd} = 113.26\text{A}$, $I_{ekd} \geq I_{dt} = I'' = 0.71 (\text{kA})$, 查《电力工程设计手册》选择 ZW₃₂-12/630-20 真空型断路器。其技术参数见表 5-4。

表 5-4 ZW₃₂-12/630-20 型断路器参数

型号	额定 电压 (kV)	额定 电压 (kV)	额定 电流 (A)	额定开断 电流 I _{ekd} (kA)	极限通过电 流峰值 i _j (kA)	固有分闸 时间 t _g (s)	4s 热稳定电 流有效值 I _r (kA)
ZW ₃₂ -12/630-20	12	12	630	20	40	≤0.05	20

2. 校验

(1) 热稳定性校验

短路电流的热脉冲:

$$I_{\infty}^2 \cdot t_{dz} = 0.71^2 \times 0.55 = 0.39 < I_r^2 \cdot t = 20^2 \times 4 = 1600 (\text{kA}^2 \cdot \text{s})$$

因此满足热稳定性要求。

(2) 动稳定性校验

$$\text{极限通过电流 } i_j = 40 > i_{ch} = 1.81 (\text{kA})$$

故动稳定性也满足要求。

经计算满足热稳定性及动稳定性要求, 因此所选 ZW₃₂-12/630-20 型断路器满足要求。

5.3 隔离开关的选择及校验

5.3.1 35kV 侧隔离开关的选择及校验

1. 隔离开关的选择

根据地点和机构选择户外式隔离开关，由 $U_e \geq U_W = 35\text{kV}$, $I_{gzd} = 182.23\text{ kA}$, $I_{ekd} \geq$

$I_{dt} = I'' = 2.5\text{kA}$ ，经查《电力工程设计手册》选择 GFW1—35 型户外隔离负荷开关。GFW1-35 系列

35kV 户外高压隔离负荷开关是专为小型化变电站设计的新产品，与熔断器配合可替代断路器，用于容量为 630kVA 及以下变电站主变压器的保护和变电站 35kV 进出线的保护，也可作为 35kV 线路支线及分段保护用。35kV 户外隔离负荷开关采用水平旋转结构，动作灵活，可靠。具有明显的断开点；既可切合负荷电流，又能作为隔离开关使用，能开断和关合 200A 以下的负荷电流；操动机构采用二级快速机构，可以手动操作，也可电动分合；可就地控制，也可实现远方遥控，操作速度不受人为因素的影响，操作电源为交流 220V。主变压器瓦斯浓度升高，缺相运行等故障均可以用隔离负荷开关在一定时间内自动切断，提高了主变压器的可靠性。其技术参数见表 5-5。

表 5-5 GFW1-35 型户外隔离负荷开关参数

型号	额定电压 (kV)	额定电流 (A)	最大开断电流 (kA)	极限通过电流峰值 (kA)	4 秒热稳定电流 (kA)
GFW1-35	35	200	8	8	3.15

2. 校验

(1) 热稳定性校验

短路电流的热脉冲：

$$I_{\infty}^2 \cdot t_{dz} = 2.5^2 \times 1.3 = 8.125 < I_r^2 \cdot t = 3.15^2 \times 4 = 39.69(\text{kA}^2 \cdot \text{s})$$

因此满足热稳定性要求。

(2) 动稳定性校验

$$\text{极限通过电流 } i_j = 8 > i_{ch} = 6.375(\text{kA})$$

故动稳定性也满足要求。

经计算满足热稳定性及动稳定性要求，因此所选 GFW1-35 型隔离开关满足要求。

5.3.2 10kV 侧隔离开关的选择及校验

1. 隔离开关的选择

根据地点和机构选择户外式隔离开关，由 $U_e \geq U_W = 10\text{kV}$, $I_{gzd} = 637.82\text{ A}$, $I_{ekd} \geq I_{dt} = I'' = 4.51\text{kA}$ ，查《电力工程设计手册》选择 GW₃₂-12/1250 型隔离开关。其技术参数见表 5-6。

表 5-6 GW₃₂-12/1250 型隔离开关参数

型号	额定电压 (kV)	额定电流 (A)	极限通过电流 峰值 (kA)	5s 热稳定电流 (kA)
GW ₃₂ -12/1250	12	1250	70	16

4. 校验

(1) 热稳定性校验

短路电流的热脉冲：

$$I_{\infty}^2 \cdot t_{dz} = 4.51^2 \times 0.9 = 18.3 < I_r^2 \cdot t = 16^2 \times 5 = 1280 (\text{kA}^2 \cdot \text{s})$$

因此满足热稳定性要求。

(2) 动稳定性校验

极限通过电流 $i_j = 70 > i_{ch} = 11.48(\text{kA})$

故动稳定性也满足要求。

经计算满足热稳定性及动稳定性要求，因此所选 GW₃₂-12/1250 型隔离开关满足要求。

5.3.3 10kV 出线侧隔离开关的选择及校验

1. 隔离开关的选择

根据地点和机构选择户外式隔离开关，由 $U_e \geq U_W = 10\text{kV}$, $I_{gzd} = 113.26\text{ A}$, $I_{ekd} \geq I_{dt} = I'' = 0.71(\text{kA})$ ，查《电力工程设计手册》选择 GW₃₂-12/630 型隔离开关。其技术参数见表 5-7。

表 5-7 GW₃₂-12/630 型隔离开关参数

型号	额定电压 (kV)	额定电流 (A)	极限通过电流 峰值 (kA)	5s 热稳定电流 (kA)
GW ₃₂ -12/630	12	630	70	16

2. 校验

(1) 热稳定性校验

短路电流的热脉冲：

$$I_{\infty}^2 \cdot t_{dz} = 4.51^2 \times 0.9 = 18.3 < I_r^2 \cdot t = 16^2 \times 5 = 1280 (\text{kA}^2 \cdot \text{s})$$

因此满足热稳定性要求。

(2) 动稳定性校验

极限通过电流 $i_j = 70 > i_{ch} = 11.48(\text{kA})$

故动稳定性也满足要求。

经计算满足热稳定性及动稳定性要求，因此所选 GW₃₂-12/630 型隔离开关满足要求。

5.3.4 10kV 侧母线分段隔离开关的选择

因其与 10kV 出线侧母线隔离开关的选择基本相同，因此选择及校验过程同 10kV 出线侧，故选 GW₃₂-12/630 型隔离开关。

5.3.5 35kV 进线侧隔离开关的选择及校验

1. 隔离开关的选择

根据地点和机构选择户外式隔离开关，由 $U_e \geq U_W = 35\text{kV}$, $I_{gzd} = 182.23 \text{ kA}$, $I_{ekd} \geq$

$I_{dt} = I'' = 2.5\text{kA}$ ，经查《电力工程设计手册》选择 GW5-35W 型户外隔离负荷开关。其技术参数见表 5-8。

表 5-8 GW5-35W 型户外隔离负荷开关参数

型号	额定电压 (kV)	额定电流 (A)	最大开断电流 (kA)	极限通过电流峰值 (kA)	5 秒热稳定电流 (kA)
GW5-35W	35	630	50	50	20

2. 校验

(1) 热稳定性校验

短路电流的热脉冲：

$$I_{\infty}^2 \cdot t_{dz} = 2.5^2 \times 1.3 = 8.125 < I_r^2 \cdot t = 20^2 \times 5 = 2000(\text{kA}^2 \cdot \text{s})$$

因此满足热稳定性要求。

(2) 动稳定性校验

极限通过电流 $i_j = 50 > i_{ch} = 6.375(\text{kA})$

故动稳定性也满足要求。

经计算满足热稳定性及动稳定性要求，因此所选 GW5-35W 型隔离开关满足要求。

5.4 电流互感器的选择及校验

5. 4. 1 10kV 侧电流互感器的选择及校验

1. 电流互感器的选择

根据电压等级和电流互感器安装处的最大按长期工作电流选择

$U_e \geq U_W = 10\text{kV}, I_e \geq I_{gzd} = 637.82\text{A}$; 经查《电力工程设计手册》选择 LFZJ-10 型电流互感器。其技术参数见表 5-9。

表 5-9 LFZJ-10 型电流互感器参数

型号	额定电压 (kV)	准确度	额定电流比	2s 热稳定电流倍数	1s 动稳定电流倍数
LFZJ-10	10	0.5	800/5	31.5	80

温度校正系数 $K_\theta = \sqrt{\frac{70-35}{70-40}} = 1.08$

则 $I_{ley} = K_\theta \times I_{le} = 1.08 \times 800 = 864(A)$

2. 校验

(1) 热稳定性校验

根据 $(I_{ley} \cdot K_r)^2 \cdot t = (0.864 \times 31.5)^2 \times 2 = 1481.42 > I_\infty^2 \cdot t_{dz} = 18.3(\text{kA}^2 \cdot \text{s})$

(2) 动稳定性校验

① 内部动稳定校验

$\sqrt{2} \cdot I_{ley} \cdot K_d = \sqrt{2} \times 0.864 \times 80 = 97.74 > i_{ch} = 11.48(\text{kA})$

② 外部动稳定校验

$K_1 \cdot K_2 \cdot K_d \cdot \sqrt{2} \cdot I_{le} = 0.79 \times 1 \times 80 \times \sqrt{2} \times 0.864 = 77.21 > i_{ch} = 11.48(\text{kA})$ 经计算满足热稳定及内、外动稳定性要求，所选 LFZJ-10 型电流互感器满足要求。

5. 4. 2 10kV 出线侧电流互感器的选择及校验

1. 电流互感器的选择

根据电压等级和电流互感器安装处的最大按长期工作电流选择

$U_e \geq U_W = 10\text{kV}, I_e \geq I_{gzd} = 113.26\text{A}$;经查《电力工程设计手册》选择 LDCQ-10 型电流互感器。其技术参数见表 5-10。

表 5-10 LDCQ-10 型电流互感器参数

型号	额定电压 (kV)	准确度	额定电流比	1s 热稳定电流倍数	1s 动稳定电流 倍数
----	--------------	-----	-------	------------	----------------

LDCQ-10	10	0.5	400/5	80	200
---------	----	-----	-------	----	-----

$$\text{温度校正系数 } K_{\theta} = \sqrt{\frac{70-35}{70-40}} = 1.08$$

$$\text{则 } I_{ley} = K_{\theta} \times I_{le} = 1.08 \times 400 = 432(A)$$

2. 校验
(1) 热稳定性校验

$$\text{根据 } (I_{ley} \cdot K_r)^2 \cdot t = (0.432 \times 80)^2 \times 1 = 1194.39 > I_{\infty}^2 \cdot t_{dz} = 0.39(kA^2 \cdot s)$$

满足热稳定要求

(2) 动稳定性校验
① 内部动稳定校验

$$\sqrt{2} \cdot I_{ley} \cdot K_d = \sqrt{2} \times 0.432 \times 200 = 122.17 > i_{ch} = 1.81(kA)$$

② 外部动稳定校验

$$K_1 \cdot K_2 \cdot K_d \cdot \sqrt{2} \cdot I_{le} = 0.79 \times 1 \times 200 \times \sqrt{2} \times 0.432 = 96.51 > i_{ch} = 1.81(kA) \text{ 经计算满足热}$$

稳定及内、外动稳定要求，因此所选 LDCQ-10 型电流互感器满足要求。

5.5 电压互感器的选择及校验

5.5.1 电压互感器的选择及校验

电压互感器是二次回路中供测量和保护用的电压源，通过它能正确反映系统电压的运行状况，其作用：一是将一次侧的高电压改变成二次侧的低电压，使测量仪表和保护装置标准化，小型化，并便于监视，安装和维护；二是使低压二次回路与高压一次系统隔离，保证了工作人员的安全，由于电压互感器主要用于计量，而上一级变电站已装设，所以本所 35kV 侧不装设电压互感器，只在 10kV 侧装设电压互感器，从而减少造价。

1. 电压互感器的选择

根据该电压互感器的用途、装设地点及额定电压，经查《电力工程设计手册》选择 JSZK2-10 型干式户外电压互感器。其技术参数见表 5-11。

表 5-11 JSZK2-10 型电压互感器参数

型号	额定电压 (kV)		准确级次及相应额定二次负荷 (VA)			最大容量 (VA)
	原线圈	副线圈	0.5 级	1 级	3 级	
JSZK2-10	10	0.1	50	100	150	300

测量仪表的技术数据见表 5-12。

表 5-12 测量仪表的技术参数

仪表名称	仪表型号	每线圈消耗功率 (VA)	cos φ
有功功率表	1D ₁ —W	0.75	1
无功功率表	1D ₁ —Var	0.75	1
有功电度表	DS ₁	1.5	0.38
频率表	1D ₁ —Hz	2	1
电压表	1T ₁ —V	5	1

电压互感器和测量仪表的三线接线图如图 5-1 所示。

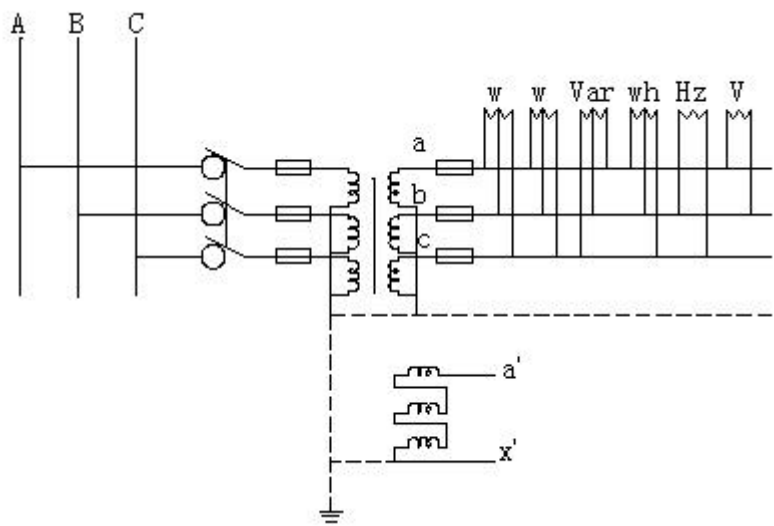


图 5-1 三线接线图

2. 校验

在电压互感器接线布局中，由于接入了电度表，所以电压互感器的准确度等级选 0.5 级，在 0.5 级以下工作的电压互感器的额定容量 $S_e=50VA$

按二次负荷选择电压互感器应作如下计算：

首先计算各相负荷，然后取最大一相负荷与一相额定容量相比较。（利用变电工程教材中第三种接线方式进行计算）

$$P_{ab} = 2 \times 0.75 + 0.75 + 1.5 \times 0.38 + 5 = 7.82(\text{W})$$

$$Q_{ab} = 1.5 \times \sqrt{1 - 0.38^2} = 1.39(\text{var})$$

$$S_{ab} = \sqrt{P_{ab}^2 + Q_{ab}^2} = 7.94(\text{VA})$$

$$\cos \varphi_{ab} = \frac{P_{ab}}{S_{ab}} = 0.985; \quad \varphi_{ab} = 9^\circ 58'$$

$$P_{bc} = 2 \times 0.75 + 0.75 + 1.5 \times 0.38 + 2 = 4.82(\text{W})$$

$$Q_{bc} = 1.5 \times \sqrt{1 - 0.38^2} = 1.39(\text{var})$$

$$S_{bc} = \sqrt{P_{bc}^2 + Q_{bc}^2} = 5.02(\text{VA})$$

$$\cos \varphi_{bc} = \frac{P_{bc}}{S_{bc}} = 0.960; \quad \varphi_{bc} = 16^\circ 13'$$

A 相负荷为:

$$P_A = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot S_{ab} \cdot \cos(\varphi_{ab} - 30^\circ) = \frac{7.94}{\sqrt{3}} \times \cos(9^\circ 58' - 30^\circ) = 4.3(\text{W})$$

$$Q_A = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot S_{ab} \cdot \sin(\varphi_{ab} - 30^\circ) = \frac{7.94}{\sqrt{3}} \times \sin(9^\circ 58' - 30^\circ) = -1.57(\text{var})$$

B 相负荷为:

$$P_B = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot [S_{ab} \cdot \cos(\varphi_{ab} + 30^\circ) + S_{bc} \cdot \cos(\varphi_{bc} - 30^\circ)] = 6.48(\text{W})$$

$$Q_B = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot [S_{ab} \cdot \sin(\varphi_{ab} + 30^\circ) + S_{bc} \cdot \sin(\varphi_{bc} - 30^\circ)] = 2.06(\text{var})$$

经计算可知 B 相负荷最大, 其值为 $S_b = \sqrt{P_B^2 + Q_B^2} = 6.799\text{VA}$

0.5 级的 JSZK2-10 型电压互感器的一相额定容量为 $50/3=16.7$ (VA), 此值大于它的最大一相负荷 S_b , 因此满足要求。

5.5.2 保护电压互感器的熔断器的选择及校验

1. 熔断器的选择

对于保护电压互感器的熔断器, 只按额定电压及断流容量选择即可

经计算查《电力工程设计手册》选择 RW₃-10 型户外跌落式三相熔断器。其技术参数见表 5-13

表 5-13 RW₃-10 型户外跌落式三相熔断器参数

型号	额定电压 (kV)	额定电流 (A)	额定开断容量 (MVA)
RW ₃ -10	10	200	200

2. 校验

$$I_{gzd} = 1.05 \times \frac{50 \times 10^{-3}}{\sqrt{3} \times 10} = 3.03mA$$

$$I_{erj} = 1.5 \times I_{gzd} = 1.5 \times 3.03 = 4.545mA$$

计算短路容量，短路电流应采用次暂态电流有效值 I'' ，故三相短路容量为：

$$S_d = \sqrt{3} U_p I'' = \sqrt{3} \times 10.5 \times 1.52 \times 4.51 = 124.66MVA$$

因：

$$I_{erq} = 200A > I_{erj} = 4.545mA > I_{gzd} = 3.03mA$$

$$S_{ekd} = 200MVA > S_d = 124.66MVA$$

经计算满足要求，故选 RW₃-10 型户外跌落式三相熔断器。

5.5.3 隔离开关的选择及校验

根据以上计算数据，选择 GW₂₂-12/630 型隔离开关一定能满足要求。

5.6 绝缘子和穿墙套管的选择及校验

发电厂和变电站常用的绝缘子有支柱绝缘子、套管绝缘子和悬式绝缘子。支柱绝缘子用于支持和固定母线，并使母线与地绝缘；套管绝缘子主要用于母线穿过墙壁或楼板，使母线之间、母线与地之间绝缘；悬式绝缘子主要用于固定屋外配电装置中的软母线。

5.6.1 35kV 侧绝缘子的选择及校验

1. 绝缘子的选择

按额定电压和安装地点选择，查《电力工程设计手册》选择 XP-4C 型绝缘子，其技术参数见表 5-14。

表 5-14 XP-4C 型绝缘子参数

型号	泄漏距离 cm	工频试验电压 (KV)			50%全波击穿 闪络电压 (KV)	机械负荷	
		干	湿	击穿		1 小时	破坏
XP-4C	200	60	30	70	100	3000	4000

2. 悬式绝缘子片数的选择

一般情况下的单位泄漏距离为 1.6cm/kV，所以应选绝缘子的片数为

$$n \geq \frac{\lambda \cdot U_e}{L_0} = \frac{1.6 \times 35}{200} = 2.8 \text{ 片}$$

式中：λ —— 泄漏比距；
L₀ —— 每片绝缘子的泄漏距离；初选 3 片。

3. 按大气过电压作用下不闪络选择：
一般来说，只要满足承受内部过电压作用的要求，同时接地电阻值也满足规程要求，则在大气过电压作用下将不致引起绝缘子串的逆闪络。按以上条件选择的绝缘子串片数，考虑到绝缘子老化需增加一片，对于耐张绝缘子串，因承受较大的拉力，容易损坏，又需此悬式绝缘子串再增加一片，所以选 4 片绝缘子。

5.6.2 10kV 侧绝缘子的选择及校验

1. 屋外绝缘子的选择
(1) 绝缘子的选择
按额定电压和安装地点选择，经查《电力工程设计手册》选择 ZS-10/4 型支柱棒型绝缘子。其技术参数见表 5-15。

表 5-15 ZS-10/4 型支柱棒型绝缘子参数

型号	额定电压 (kV)	机械破坏负荷 (kN)	总高 (mm)	上附件安装尺寸			下附件安装尺寸		
				孔径	孔数	中心距	孔径	孔数	中心距
ZS-10/4	10	4	210	M8	2	36	Φ12	2	130

(2) 校验
动稳定校验

$$F_{zd} = 1.73 \times 10^{-7} \cdot \frac{L}{a} \cdot I_{ch}^2 = 1.73 \times 10^{-7} \times 2 \times (11.48 \times 10^3)^2 = 45.6 \text{ N}$$

绝缘子底部至母线中心线的高 $H_1 = H + 18 + \frac{h}{2} = 210 + 18 + \frac{60}{2} = 258 \text{ mm}$

绝缘子帽所受的力 $F = F_{zd} \cdot K_z = F_{zd} \cdot \frac{H_1}{H} = 45.6 \times \frac{258}{210} = 56.02 \text{ N}$

绝缘子的允许负荷 $0.6 \times F_p = 0.6 \times 4000 = 2400 > F = 56.02 \text{ N}$

经计算满足动稳定要求，故所选 ZS-10/4 型支柱棒型绝缘子满足要求。

2. 屋内绝缘子的选择
(1) 绝缘子的选择
根据安装地和构造类型，经查《电力工程设计手册》选择 ZN-10/4 型支柱绝缘子。其技术参数见表 5-16。

表 5-16 ZN-10/4 型支柱绝缘子参数

型号	额定电压 (kV)	机械破坏负荷 (kN)	总高 H (mm)
ZN-10/4	10	4	120

(2) 校验
动稳定校验

$$F_{zd} = 1.73 \times 10^{-7} \cdot \frac{L}{a} \cdot I_{ch}^2 = 1.73 \times 10^{-7} \times 2 \times (11.48 \times 10^3)^2 = 45.6 \text{N}$$

绝缘子底部至母线中心线的高度 $H_1 = H + 18 + \frac{h}{2} = 120 + 18 + \frac{60}{2} = 168 \text{mm}$

绝缘子帽所受的力 $F = F_{zd} \cdot K_z = F_{zd} \cdot \frac{H_1}{H} = 45.6 \times \frac{168}{120} = 63.84 \text{N}$

绝缘子的允许负荷 $0.6 \cdot F_p = 0.6 \times 4000 = 2400 > F = 63.84 \text{N}$
经计算满足动稳定要求，故所选 ZN-10/4 型支柱绝缘子满足要求。

5.6.3 穿墙套管的选择及校验

1. 穿墙套管的选择

按装置种类、构造形式、额定电压及最大长期工作电流，查《电力工程设计手册》选择 CWLB₂-10/600 型穿墙套管。其技术参数见表 5-17。

表 5-17 CWLB₂-10/1000 型穿墙套管参数

型号	额定电压 (kV)	额定电流 (A)	总长 L (mm)	抗弯破坏负荷 (kN)	5s 短时热电流 (kA)
CWLB ₂ -10/1000	10	1000	530	7.5	12

温度校正系数 $K_{\theta} = \sqrt{\frac{80-35}{80-40}} = 1.06$

则 $I_{ey} = K_{\theta} \times I_e = 1.06 \times 1000 = 1060 \text{A}$

大于其长期最大长期工作电流。

2. 校验

(1) 热稳定校验

$$I_r^2 \cdot t = 12^2 \times 5 = 720 > I_\infty^2 \cdot t = 18.3(\text{kA}^2 \cdot \text{s})$$

(2) 动稳定校验

$$F = 1.73 \times 10^{-7} \cdot \frac{L_1 + L_2}{2a} \cdot I_{ch}^2$$

式中： L_1 —穿墙套管端部至最近一个支柱绝缘子间距离，取 $L_1=1\text{m}$ ；

L_2 —穿墙套管的长度；

a —相间距。

$$F = 1.73 \times 10^{-7} \cdot \frac{L_1 + L_2}{2a} \cdot I_{ch}^2 = 1.73 \times 10^{-7} \times \frac{1+0.53}{2 \times 0.25} \times (11.48 \times 10^3)^2 = 69.77\text{N}$$

$$0.6 \cdot F_p = 0.6 \times 7500 = 4500 > F = 69.77\text{N}$$

经计算满足热稳定性及动稳定性要求，故所选 CWLB₂-10/1000 型穿墙套管满足要求。

5.7 所用变设备的选择

5.7.1 所用变压器的选择

考虑到变电站主要设备的需要，如蓄电池充电、取暖、照明及有关的继电保护装置的用电等负荷，对于一般情况下应将所用变装设在 35kV 侧，保证检修时所内可正常供电，根据变电站负荷特点，季节性极强，备有一台备用变压器。即使主变检修时，可切换备用变压器，以保证低压母线侧有电，因此将所用变建在 35kV 侧。

所用电负荷统计见表 5-18。

表 5-18 所用电负荷统计表

序号	名称	容量 (KW)	负荷类型
1	通信电源	4	经常、连续
2	35kV 操动机构	0.825	断续、短时
3	10kV 操动机构	0.825	断续、短时
4	运动	5	经常、连续
5	电气二次设备室动力	5	断续、短时
6	35kV 配电装置动力	15	断续、短时
小计	动力负荷 P1	25.65	
1	设备箱恒温电源	1.5	经常、连续
小计	恒温箱负荷 P2	1.5	
1	户外配电装置照明	2	经常、连续
2	35kV 配电装置动力	2	经常、连续
小计	照明负荷 P3	4	

所用变压器容量选择根据《变电站所用电设计技术规程》中公式（3-12）

$$\begin{aligned} S &= 0.85 \times P_1 + P_2 + 0.8 \times \frac{P_3}{\cos \varphi} \\ &= 0.85 \times 25.65 + 1.5 + 0.8 \times \frac{4}{0.6} \\ &= 28.63(kVA) \end{aligned}$$

综合以上数据，查《电力工程设计手册》选择 S9-50/35-0.4 型电力变压器作为所用变压器。其技术参数见表 5-19。

表 5-19 S9—50/35-0.4 型变压器技术数据表

额定电压 KV		损耗		阻抗电压	空载电流	额定容量
高	低	空载	短路			
35	0.4	0.25	1.18	6.5%	1.1%	50KVA

5.7.2 保护所用变的熔断器的选择及校验

1. 熔断器的选择

其最大长期工作电流 $I_{gzd} = \frac{1.05 \times 50}{\sqrt{3} \times 35} = 0.866A$

熔件的额定电流为 $I_{erj} = K_b \cdot I_{eb} = 1.5 \times \frac{50}{\sqrt{3} \times 35} = 1.237A$

短路容量 $S_d = \sqrt{3} \cdot U_p \cdot I_{ch} = \sqrt{3} \times 10.5 \times 3.78 = 68.74MVA$

经计算查《电力工程设计手册》选择 RW₅-35 型高压跌落式熔断器。其技术参数见表 5-20。

表 5-20 RW₅-35 型高压跌落式熔断器参数

型号	额定电压 (kV)	额定电流 (A)	额定断流容量 (MVA)	
			上限	下限
RW ₅ -35	35	100	300	60

2. 校验

$$\begin{aligned} I_{erq} &= 100A > I_{erj} = 1.237A > I_{gzd} = 0.866A \\ S_{ekd} &= 300MVA > S_d = 68.74MVA \end{aligned}$$

经计算满足要求，选 RW₅-35 型熔断器。

5.7.3 高压隔离开关的选择

根据以上计算数据，查《电力工程设计手册》选择 GW4-35D 型高压隔离开关. 技术数据如表 5-21

表 5-21 GW4-35D 型高压隔离开关技术参数

型号	额定电压	额定电流	极限通过电流	5s 热稳定电流
GW4-35D	35kV	600A	50kA	15.8kA

1. 动稳定校验
极限通过电流

$$I_j=50\text{kA}>I_{ch}=6.375\text{kA} \quad \text{满足动稳定要求。}$$

2. 热稳定校验

短路电流的热脉冲 $I_r^2 \times t=15.8^2 \times 5=1248> I_\infty^2 \times t_{dz}=2.5^2 \times 1.3=8.125\text{kA}^2\text{s}$

满足热稳定要求。

5.8 电力电容器的选择

电力电容器用来提高电网功率因数、减少线损、改善电压质量、提高供电效率。

5.8.1 并联电容器组接线方式的比较

并联电容器组的主接线方式，主要有三角形接线和星型接线。过去并联电容器组采用三角形接线较多，但运行经验证明，三角形接线的电容器组，当任一相击穿时，由电源供给的短路电流较大，实际相当于母线短路。这时虽然故障电容器的熔断器迅速熔断，但如此大的电流即使是瞬间流过电容器也极易使电容器内浸渍剂受热膨胀，迅速汽化，引起爆炸。而且如果不同相的电容器同时发生对地击穿，有时熔断器也失去保护作用。如把电容器改为星形接线，当任一电容器发生极板击穿短路时，短路电流都不会超过电容器组额定电流的三倍。而且不会出现其他两健全相的电容器对故障相的涌放电流，只有来自同相健全的电容器的涌放电流。因此星形接线的电容器组油箱爆炸事故较少发生。此外，三角形接线电容器组对过电压保护避雷器的运行条件和保护效果也不如星形接线的好。综合考虑本设计采用星形接线。

5.8.2 电容器的选择

按工作电压选择 $U_{zd} \geq U_g = 10\text{kV}$

按工作频率选择 $f_e = 50\text{Hz}$

无功功率的计算

设备补偿前的功率因数为 $\cos \varphi_1=0.75$ ，经电容器要求补偿后达到 $\cos \varphi_2=0.9$ 。

负荷的有功功率为 $P = S_{js} \cdot \cos \varphi_1 = 9844.38 \times 0.75 = 7383.285\text{kW}$

系统要求补偿的无功功率为

$$Q_c = P(tg\varphi_1 - tg\varphi_2) \quad (5-3)$$

$$\text{式中: } tg\varphi_1 = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_1}}{\cos \varphi_1} = \frac{\sqrt{1 - 0.75^2}}{0.75} = 0.88$$

$$tg\varphi_2 = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_2}}{\cos \varphi_2} = \frac{\sqrt{1 - 0.9^2}}{0.9} = 0.484$$

$$\text{则 } Q_c = P(tg\varphi_1 - tg\varphi_2) = 7383.285 \times (0.88 - 0.484) = 2923.78 \text{ kvar}$$

本所要求三组电容器组来补偿，补偿 950kvar，采用三相星形接线的电容器

$$Q = wU_{x-x}^2 C_x 10^3 \quad (5-4)$$

式中：\$C_x\$—单相等效电容值；

\$U_{x-x}\$—线电压；

\$w\$—角频率，\$w = 2\pi f\$，\$f=50\text{HZ}\$。

$$C_x = \frac{Q}{wU_{x-x}^2 10^3} = \frac{950}{2 \times \pi \times 50 \times 10^2 \times 10^3} = 30.2 \mu\text{F}$$

查《电力工程设计手册》选 BFM11/\$\sqrt{3}\$-200-1W 型电容器组，其技术参数见表 5-22。

表 5-22 BFM11/\$\sqrt{3}\$-200-1W 型电容器参数

型号	额定电压 (kV)	额定容量 (kVar)	额定电容 (\$\mu\$F)
BFM11/\$\sqrt{3}\$-200-1W	10.5	200	15.8

$$n = \frac{C_x}{C_b} = \frac{30.2}{15.8} = 1.91 \approx 2$$

因此，一相只需一个此型号的电容器组，三相则需三个电容器组，总的额定容量为

\$Q_e = 200 \times 3 \times 2 = 1200 \text{ kvar}\$，而需补偿的为 950kvar，故所选电容器组满足要求。

5.8.3 断路器、隔离开关、电流互感器的选择

$$\text{电容器组回路的最大长期工作电流 } I_{gzd} = \frac{S_e}{\sqrt{3} \cdot U_e} = \frac{200 \times 3}{\sqrt{3} \times 10} = 34.64 \text{ A}$$

小于各出线回路中的最大长期工作电流，因此电容器侧断路器、隔离开关、电流互感器所选型号分别为：断路器选用 ZW₃₂-12/630-20 型；隔离开关选用 GW₂₂-12/630 型；电流互感器选用 LDCQ-10 型

5.9 35kV 侧跌落式熔断器的选择和校验

根据地点选择户外式，选择 RW₅-35/200~800 型户外交流高压跌落式熔断器。其技术数据如下：

表 5-23 RW₅-35/200~800 跌落式熔断器技术参数

型号	额定电压 (kV)	额定电流 (A)	额定断流容量 (MVA)	开断负荷 电流	开断空载变压器 容量
RW ₅ -35/200~ 800	35	200	上限：900 下限：30	200A	5600kVA

校验： 按额定电压选择 $U_e=35kV \geq U_w=35kV$

$$I_{erq}=K_b \times I_{eb}=\frac{2 \times 6300}{\sqrt{3} \times 37}=196.62A$$

$$I_{erq}=200A$$

$$I_{gzd}=182.23A$$

$$I_{erq} \text{（熔断器的额定电流）} \geq I_{erj} \text{（熔件的额定电流）} \geq I_{gzd} \text{（电路最大长期工作电流）}$$

所以所选断路器适合。

6 保护接地装置及防雷保护

电气设备某些部位（如电器或电机的外壳，配电装置的构架等）在正常运行时是不带电的，但在发生故障时就会带电，易造成灼伤和电击等人身事故。严重的灼伤和电击都有致命的危险，电击危险性最大，一般死亡事故多数是由电击造成的。为了限制电气设备故障时作用人体的电压，从而达到限制流过人体的电流保护人员安全的目的，工程上将这些正常工作时不带电而绝缘损坏时有可能带电的部位与大地作良好的电气连接。

电气设备根据接地装置的作用和目的可分：

(1) 工作接地：电力系统正常运行需要将网络的某一点接地，稳定电网对地电位，使对地绝缘降低及有利于实现继电保护措施。

(2) 保护接地：为了人身安全将高压电气设备的金属外壳接地，保护人员的安全。

(3) 防雷接地：是为了减小电流通过接地装置时电位升高。

6.1 保护接地装置

6.1.1 接地的一般要求

(1) 为保证人身安全，所有的电气设备，都应装设接地装置，并将电气设备外壳接地。设计中首先应利用各类自然接地体。

(2) 一般应将各种不同用途和不同电压的电气设备使用一个总的接地装置。接地装置的接地电阻，应满足其中接地电阻最小的电气设备要求。

(3) 电气设备的人工接地体应尽可能在电气设备所在地点附近对地电压分布均匀，一般应采用环形接地体。

(4) 设计接地装置时，应考虑到一年 4 季中，均能保证接地电阻的要求值。

本变电站接地为户外配电装置及主厂房设保护接地网，接地电阻小于 0.5 欧姆；独立避雷针设置独立接地网，接地电阻小于 10 欧姆。

6.1.2 所内应当接地的部分

变电站中电气设备的下列金属部分均需接地：

(1) 变压器、电器、电机和照明器具等的底座和外壳；

(2) 电气设备的传动装置；

(3) 互感器的二次绕组，继电保护方面另有规定的部分除外；

(4) 配电屏、保护屏、计量屏、电源屏与控制屏的框架；

- (5) 配电装置的金属构架和钢筋混凝土架构以及靠近带电部分的金属围栏;
- (6) 电力电缆的电缆接头、电缆终端的外壳以及电缆的外皮和钢管电缆的钢管等;
- (7) 电缆的金属外皮
- (8) 避雷器、保护间隙和避雷针的接地端。

6.1.3 接地装置的计算

35kV 为中性点不接地系统, 其接地电阻要求之可根据单相接地电容电流来确定。
架空线路长度 $L_j = 18\text{km}$

$$I_{jd} = \frac{U_{1e} \times L_j}{350} = \frac{35 \times 18}{350} = 1.8\text{A}$$

故接地电阻为:

$$R_{jd1} \leq \frac{120}{I_{jd}} = \frac{120}{1.8} = 66.67\Omega$$

10kV 为中性点不接地, 其线路长度。

$$L_j = 18 + 15 + 12 + 15 + 14 + 16 = 90\text{km}$$

$$I_{jd} = \frac{U_{1e} \times L_j}{350} = \frac{10 \times 90}{350} = 2.57\text{A}$$

故接地电阻为:

$$R_{jd2} \leq \frac{120}{I_{jd}} = \frac{120}{2.57} = 46.69\Omega$$

在根据 $S_k \geq 0.3R_{cj} + 0.1h$ ($S_k \geq 5$), 取 $R \geq 10\Omega$

所用变 380/220 中性点接地, 接地电阻要求值为 4Ω , 其共用接地装置的接地电阻应小于 4Ω 。

计算人工接地电阻 R_{rw}

人工接地网与自然接地体是并联的, 并联后总电阻应达到 $R=4\Omega$, 所以人工接地电阻为

$$R_{rw} = \frac{R_z \cdot R}{R_z - R} = \frac{20 \times 4}{20 - 4} = 5\Omega \text{ (自然接地体的接地电阻 } R_z = 20\Omega \text{)}$$

由于共用一个接地装置, 故应取 $R_{rw} = 4\Omega$

计算单根垂直接地体的接地电阻 R_c

土壤电阻率 $\rho = \rho_0 \cdot \Psi$, 由查表得 $\Psi = 1.5$, 则 $\rho = 90 \times 1.5 = 135\Omega \cdot m$ 。由于土壤电

阻率不高，故人工接地装置以垂直接地体为主，上端用规格为 $4 \times 10\text{mm}$ 扁钢连接，构成环路式接地装置。钢管上端埋入土中深度为 0.8m 垂直接地采用长 $L=2.5\text{m}$ ，直径 $d=60 \times 10^{-3}\text{m}$ 的钢管。单根接地体的接地电阻为

$$R_c = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} = \frac{135}{2\pi \times 2.5} \ln \frac{4 \times 2.5}{60 \times 10^{-3}} = 43.97\Omega$$

计算接地体的根数 n 接地体的根数 n 假设钢管之间的距离 $a=7.5\text{m}$ ，则 $a/l = 3$ ，根据

$$R_c / R_{rw} = 43.97 / 4 = 10.99，初选 n=11 根$$

在查表得 $\eta_0=0.74$ 则

$$n = \frac{0.9R_c}{R_{rw}\eta_0} = \frac{0.9 \times 43.97}{4 \times 0.74} = 13.37 \approx 14 \text{ 根}$$

决定选 15 根钢管，验算人工接地电阻，查表得 $\eta_0=0.67$

$$\text{则 } R_{rw} = \frac{0.9R_c}{n\eta_0} = \frac{0.9 \times 43.97}{15 \times 0.67} = 3.94\Omega$$

满足人工接地电阻 $R_{rw}=4\Omega$ 的要求。

校验接地线的热稳定

$$S \geq \frac{I_d}{70 \times 10^6} \sqrt{t} = \frac{2500}{70 \times 10^6} \sqrt{1} = 35.7 \text{ mm}^2$$

它小于采用 $4 \times 10=40 \text{ mm}^2$ 的扁钢，所以采用其接地满足要求。

35kV 配电区每隔 9m 加设一条均压带以便电位分布均匀。均压带采用截面不小于 24mm^2 的扁钢，其埋深为 0.6m 。由于接地电阻的计算引入不少假设条件，所以在现场敷设接地装置以后，必须对接地电阻加以实际测量和核算。如果不满足要求，必须补埋接地体，达到设计要求。

6.2 防雷保护

6.2.1 防雷保护的原因

变电站是电力系统防雷的重要保护部位，如果发生雷击现象，将会造成大面积的停电，因此变电站装设防雷保护措施是非常必要的，并且要求防雷保护措施必须十分可靠。雷电所引起的大气过电压将会对电气设备和变电站的建筑物产生严重的危害，在变电站和高压输电线路中，必须采取有效的防雷措施，以保证电气设备的安全。

变电站设计过程中,要考虑过电压的影响。过电压分外部过电压(大气过电压)和内部过电压。内部过电压一般由开关操作,负荷变化引起的这种过电压多在电器设备选择时予以考虑,而大气过电压由雷电引起,其电压可达到额定电压的百倍,甚至千倍,对人或设备危害极大,所以必须采用保护措施。在防雷保护设计中,应根据雷电活动情况、地形、地质、气象情况以及电网结构和运行方式等,结合运行经验进行全面分析和经济比较,做到技术先进、经济合理、符合电力系统和电力设备安全经济运行的要求。变电站遭受雷击主要来自两方面:(1)雷直击变电站;(2)架空线路的感应雷过电压和直击雷过电压形成的雷电波沿线路侵入变电站。

6.2.2 变电站的直击雷保护

1. 保护对象:

- (1) 35kV 和 10kV 侧配电装置
- (2) 屋外安装的主变及其它电器设备
- (3) 室内装置

2. 保护措施

对于 35kV 及以下的变电站,其绝缘水平较低,必须装设独立的避雷针,并满足不发生反击的要求。

3. 保护原理

避雷针是金属制成,比被保护对象高,并具有良好的接地装置,作用是将雷吸引到自己身上,并安全导入地中,从而保护附近比它矮的设备,建筑免受雷击。

4. 避雷针的保护与选择

(1) 具体要求:

- 1) 避雷针应有接地装置,接地电阻在 10Ω 以下,与主接地网距离应保持 3m 以上,即 $S_d > 3m$,

且要高于构架 5m 以上,即 $S_k > 5m$ 。否则应铺碎石或沥青路面(厚 5~8 cm),以保证人身不受跨步电压的危害。

- 2) 被保护设计距避雷针不能太 , 也不能太近。太近会出现反击现象,太远则保护范围。

- 3) 为了防止电压,避雷针设在人不经常出入的地方。

- 4) 本变电站占地面积 $70 \times 44 = 3080m^2$,需架设独立避雷针,做为直击雷保护。

(2) 避雷针高度的计算和保护范围确定

根据所选各种电气设备的总体布局,共设计 3 根避雷针比较适宜,因 3 根避雷针保护范围比各自的保护范围迭加起来要大。单针时,雷电受针的吸引往往可以被吸引离针较近的地面上。但在 3 针联合保护时,处在 3 针之间的上空,雷电因受避雷针吸引难于击于离针较近的地面上。其计算过程采用北京博超世纪软件公司开发设计的防雷工程设计软件(网络版)进行设计。

该软件解决传统防雷算法的三个难题:(1)能够计算任意多根、不等高、不对称布置的避雷针的保护范围;(2)能够同步计算一根避雷针在多个不同标高的保护半径;(3)能同步计算任意多根避雷针在任意标高的联合保护范围和 BX 值。

设计方法采用滚球法算法,根据避雷针和保护对象高度自动确定保护半径。布置避雷针时,直接看到避雷针在多个高度的保护范围,动态可视化布置方式使避雷针的保护效果一目了然。

其避雷针保护范围计算结果和防雷保护范围图见附图 8 所示

6.2.3 避雷器的选择

根据额定电压来选择避雷器 35kV 母线侧避雷器选用 Y5WZ-41/131 型其技术参数见表 6-1。

表 6-1 Y5WZ-41/131 型避雷器参数

型号	额定电压 (kV)	避雷器额定电 压 (kV)	持续运行电 压 (kV)	4 μ s 冲击电 流 (kA)	雷电冲击残 压 (kV)
Y5WZ-41/131	35	41	23.4	40	≤ 131

电压互感器线路用避雷器选用 Y5WZ-12.7/45 型
其技术参数见表 6-2。

表 6-2 Y5WZ-12.7/45 型避雷器参数

型号	额定电压(kV)	避雷器额定 电压 (kV)	持续运行电 压 (kV)	4 μ s 冲击电 流 (kA)	雷电冲击残 压 (kV)
Y5W-12.7/45	10	12.7	6.6	40	≤ 45

电容器组保护用避雷器选用 Y5W-12.7/45 型其技术参数见表 6-3。

表 6-3 Y5WZ-12.7/45 型避雷器参数

型号	额定电压 (kV)	避雷器额定电 压 (kV)	持续运行电 压 (kV)	4 μ s 冲击电 流 (kA)	雷电冲击残 压 (kV)
Y5W-12.7/45	10	12.7	6.6	40	≤ 45

10kV 出线侧避雷器选用 Y5WZ-12.7/45 型其技术参数见表 6-4。

表 6-4 Y5WZ-12.7/45 型避雷器参数

型号	额定电压 (kV)	避雷器额定电 压 (kV)	持续运行电 压 (kV)	4 μ s 冲击电 流 (kA)	雷电冲击残 压 (kV)
Y5WZ-12.7/45	10	12.7	6.6	40	≤ 45

6.2.4 变电站侵入波的保护

输电线路出现的大气过电压有两种，一种是雷击于线路上引起的为直击雷过电压，另一种是雷直击线路附近地面，由于电磁感应引起的称为感应过电压。利用阀型避雷器以及与阀型避雷器相配合的进线保护段作为配电装置时侵入雷电波的保护。

进线保护段的作用在于利用本身的阻抗来限制雷电流幅值和利用本身的电晕衰耗来降低雷电

波陡度，并通过进线段上管型避雷器的作用，使之不超过绝缘配合所要求的数值。因此，配电装置对侵入雷电波的保护设计除了考虑在配电装置内装设阀型避雷器的适当地点外，还必须对线路进线段保护措施提出要求。

对于装设避雷线的 35kV 架空电力线路，在变电站的进线段 1~2km 长度内，进行侵入雷电波保护。其保护接线图如图 6-2 所示。

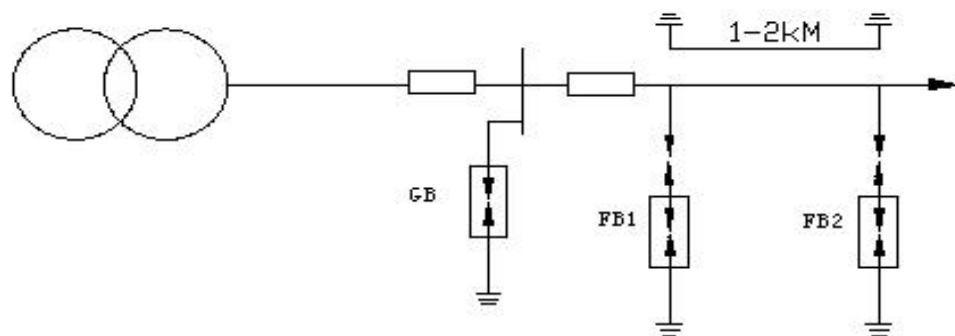


图 6-2 侵入波保护接线图

7 配电装置布置

配电装置是变电站的重要组成部分，配电装置是按主接线要求由开关设备、保护电器、测量仪表、母线和必要的辅助设备等组成。配电装置的整个结构尺寸，是综合考虑设备外形尺寸、检修和运输的安全距离等因素而决定的，它必须满足配电装置安全净距的要求。

对于配电装置选择的一般的要求如下：

(1) 大中型发电厂和变电站中，35kV 及以上的配电装置多采用屋外的配电装置，但对于 110kV~220KV 装置，当有特殊的要求时，或处于严重的污秽地区，经过经济技术比较可采用室内布置。

(2) 配电装置的设计应贯彻国家的建设方针，保证运行可靠，合理选择设备，在布置上力求整齐，清晰，有足够的安全距离。

(3) 便于扩建，检修，操作。

(4) 在保证安全可靠的情况下，布置紧凑，力求节约材料，降低造价。

所区 10kV、35kV 配电装置及主变压器全部采用户外型配电装置。并采用户外环网柜控制电路。10kV 采用 ZHW2-12 型户外交流高压金属封闭环网开关设备，该设备适用于交流 50Hz，额定电压 12kV，电缆进出线的户外配电网中，广泛用于工业园区、居民小区、商业中心。作为环网供电或终端供电的开关设备，可开断负荷电流，并通过熔断器切断短路电流，特别适用于免维护，自动化程度高的电网。采用户外环网柜替代国内常规的开闭所，可以大大减少出线电缆和占地面积，降低造价，提高供电可靠性，同时也降低了线损。设备结构特点为：结构紧凑，体积小，占地面积少，内部采用德国原装进口 SF6 紧凑型环网柜，具有全密封、全绝缘、高可靠、免维护。环网柜中安装了内部故障电弧限制装置，对人身和设备提供了最大程度的保护。SF6 环网柜无需辅助工具即可方便地更换熔断器，在熔断器熔断时发出机械指示信号，机械连锁功能齐备（满足“五防要求”），简单可靠，能有效防止各种误操作。

ZHW2-12 型户外环网柜的技术参数如表 7-1 所示

表 7-1 ZHW2-12 型户外环网柜的技术参数

型号	型式	额定电流 (A)	额定电压 (kA)	额定短路 开断电流 (kVA)	工 频 耐 受电压 (kV)	外形尺寸 (宽×深×高) (mm)
ZHW2-12	固定式	630	12	25	42	1400x900x1630

第四章 35kV 变电站整体设计

本变电站为终端降压变电站，主要为生活用电和农业灌溉用电所设计的，以三类负荷为主，有少量的二类负荷。35kV 侧采用一回进线、主变压器采用两台等容量的 SZ9-4000/35 型有载调压变压器；35kV 母线采用单母线接线方式；主变压器 35kV 侧采用 LW16-35 型 SF6 断路器配合 GN₄-35D 型隔离开关作为保护和控制；10kV 侧采用单母线简易分段接线；出线 6 回；10kV 主进线采用 ZN3-10 型真空断路器、出线采用断路器其保护控制器配合作为控制和保护。10kV 电容器选用集合式 BFM 型并联电容器；电流互感器和电压互感器均选用干式互感器；35kV，10kV 避雷器全部选用氧化锌避雷器；本方案设两只等高避雷针，以满足对雷击防护，接地网由垂直接地体和水平接地体组成复式接地网，主接地网接地电阻 $R \leq 4\Omega$ ；避雷针设独立接地体，它与主接地网地中距离 $L \geq 3m$ ，其接地电阻 $R \leq 10\Omega$ 。二次部分对主变压器装设了瓦斯保护、差动保护、过电流保护和过负荷保护，对 10kV 出线装设速断和过电流保护，对 10kV 电力电容器装设有限过电流保护和过电压保护；中央信号装置采用 ZC-23 型冲击继电器中央复归重复动作的事故信号装置和 ZC-23 型冲击继电器瞬时预告信号装置，断路器控制与信号采用具有防跳装置的灯光监视控制回路；本方案架构采用高层布置，占地 1500 m²。

关键词： 变电站 有载调压 继电保护

1 负荷统计及计算

1.1 负荷统计

本变电站负荷主要以生活用电和农业灌溉为主，有一处二类负荷、单进线，10kV 侧采用单母线分段接线、6 回出线。负荷统计如表 1-1 所示。

表 1-1 负荷统计表

回路 序号	回路 名称	用户类型	容量 (kV. A)	需 用 系 数	变压器 台数	线 长 (km)	供电 回路	负荷 级别
1	第一区	生活用电	700	0.7	20	15	1	3
		商业用电	800	0.5				
		农产品加工	400	0.7				
2	第二区	生活用电	700	0.75	15	20	1	3
		工业用电	700	0.6				
		灌溉用电	600	0.85				
3	第三区	医院用电	200	0.8	2	13	2	2
4	第四区	生活用电	800	0.8	12	13	1	3
		商业用电	900	0.6				
5	第五区	生活用电	600	0.75	10	12	1	3
		灌溉用电	700	0.8				
6	第六区	生活用电	600	0.8	10	16	1	3
		灌溉用电	500	0.85				

1.2 负荷计算

该所负荷计算采用需用系数法，由于各供电区域电性质相差不大，考虑功率因数相同，则视在功率可表示为有功功率。

1. 采用需用系数法求各用户的计算负荷^[4]

$$S_{jsi} = \sum_{i=1}^n K_i S_{ei}$$

式中 S_{jsi} ——各用户的计算负荷 kVA;

K_i ——需用系数, 取 0.85~0.9;

S_{ei} ——各用电设备额定容量 kVA。

2. 每条出线路的负荷

$$S_{js1} = (0.7 \times 700 + 0.5 \times 800 + 0.7 \times 400) \times 0.85 = 994.5(\text{kVA})$$

$$S_{js2} = (0.75 \times 700 + 0.6 \times 700 + 0.85 \times 600) \times 0.8 = 1164(\text{kVA})$$

$$S_{js3} = 0.8 \times 200 = 160(\text{kVA})$$

$$S_{js4} = (0.8 \times 800 + 0.6 \times 900) \times 0.8 = 944(\text{kVA})$$

$$S_{js5} = (0.75 \times 600 + 0.8 \times 700) \times 0.75 = 757.5(\text{kVA})$$

$$S_{js6} = (0.8 \times 600 + 0.85 \times 500) \times 0.7 = 633.5(\text{kVA})$$

1.2.1 全年计算负荷

变电站设计当年的计算负荷由^[1]

$$S_{js} = K_t \sum_{i=1}^6 S_{jsi} (1 + x\%) \quad \text{计算}$$

式中 K_t ——同时系数, 取 0.9;

$x\%$ ——线损率, 高低压网络的综合线损率在 8%~12%, 系统设计时采用 10%。

$$\begin{aligned} S_{js} &= K_t (S_{js1} + S_{js2} + S_{js3} + S_{js4} + S_{js5} + S_{js6}) \times (1 + x\%) \\ &= 0.9 \times (994.5 + 1164 + 160 + 944 + 757.5 + 633.5) \times (1 + 10\%) \\ &= 4606.97(\text{kVA}) \end{aligned}$$

计算负荷增长后的变电站最大计算负荷为

$$S_{jszd} = S_{js} \ell^{m \times n}$$

式中 n ——年数, 取 8 年;

m ——年平均增长率, 取 4%;

S_{jszd} —— n 年后的最大计算负荷。

$$S_{jszd} = 4606.97 \times e^{8 \times 4\%} = 6344.38(\text{kVA})$$

2 主接线设计方案

2.1 主变压器台数的确定和容量的选择

因电力负荷季节性不强，且变电站只有一处二类负荷，其余均为三类负荷，变压器在运行时其电源侧受电电压有可能偏离额定值，这时变压器二次侧的负载所承受的电压有可能偏离或偏低，这对用电设备的正常工作十分不利。所以采用两台有载调压变压器，以使尽可能将变压器调压后不仅可稳定供电电压。还可控制电力潮流调节负荷分配。当一台主变压器运行时，可保证 60% 的负荷供电，考虑变压器的事事故负荷能力为 40%，所以供电的保证率为 85%，在事故运行下可切除其余的三类负荷，保证对重要负荷的供电。考虑到不受运输条件的限制，选用三项变压器。为简化电压等级或减少重复降压容量采用双绕组变压器。由于变压器绕组的连接方式必须和系统电压相位一致，否则不能并列进行，所以变压器绕组的连线方式选 Yd11 型连接。

装设两台主变压器的变电站，根据我国变电压器运行的实践经验，并参考经验，

每台主变的额定容量 $S_e \geq 0.6S_{js.zd}^{[1]}$

即 $S_e \geq 0.6 \times 6344.38 = 3806.63 \text{ (kVA)}$

主变压器采用双绕组有载调压电力变压器，根据电力设计手册^[3]，可选择 SZ9-4000/35 型变压器，其技术数据如表 2-1 所示。

表 2-1 变压器参数

额定电压		高压分接	联结组别	阻抗 电压	空载	短路	空载
高压	低压	头范围			损耗	损耗	电流
35	10.5	$\pm 3 \times 2.5$	Yd11	7.0 (%)	5.4kw	26kw	1.2 (%)

2.2 主接线设计方案的确定

方案 I：35kV 侧采用单元接线，可采用熔断器来保护主变，造价比采用断路器和隔离开关经济，10kV 侧采用单母线接线，在主二侧不设总开关作为保护，而在出线路上采用真空断路器作为保护，但此方案供电可靠性和灵活性差。接线方式如图 2-1 所示

方案 II：35kV 侧采用单元接线，可采用断路器和隔离开关配合作为变压器的过负荷和短路保护，也可采用熔断器来保护主变，虽断路器造价高，但考虑到有二类负荷，为满足可靠性采用断路器和隔离开关配合，采用单母线分段接线方式，当母线故障或检修时，停电局限在一段母线上，非故障段母线可以保证正常供电，当任意一段母线故障或检修时，对重要用户不停止供电。这种接线方式本身简单、经济、方便，同时又克服了一些缺点，使可靠性和灵活性有所提高。综合考虑选择方案 2，接线方式如图 2-2 所示。

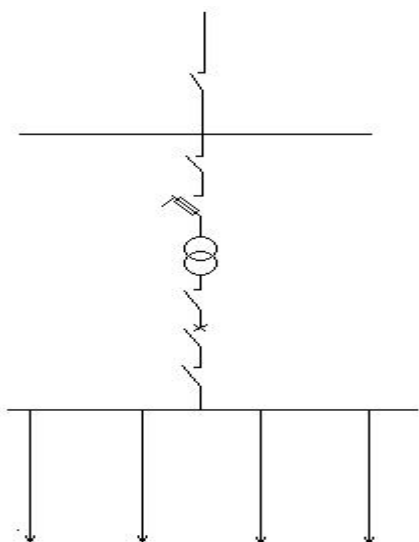


图 2-1 主接线方案一

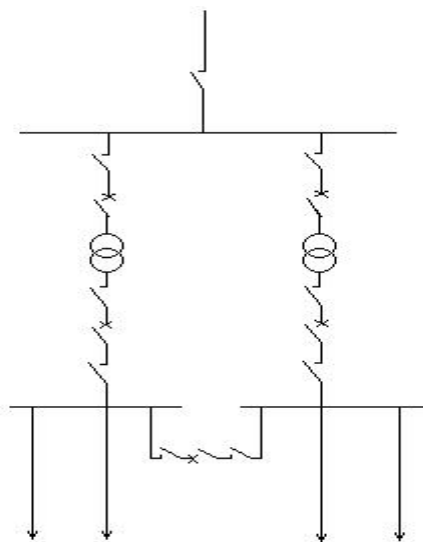


图 2-2 主接线方案二

3 短路计算

3.1 短路计算的目的

- (1) 在选择主接线以及确定主接线是否采用限制短路电流的措施，该变电站容量小，不需采用任何限制短路电流的措施。
- (2) 在选择、校验电气设备时，为了保证在正常运行和故障运行时都能安全可靠地工作，同时力求节约投资，需考虑短路电流的大小。
- (3) 在选择继电保护方式以及进行继电保护整定计算中需要以短路电流为依据。
- (4) 选择接地装置的设计中也要以短路电流为依据。
- (5) 设计户外装置时，要根据短路电流确定及校验导线的相间距离以及他们相对地面的安全距离。

3.2 各元件电抗标么值计算

$S_B = 100\text{MVA}$ ， $U_B = U_{av}$ 系统电源电势标么值为 1，系统电抗标么值最大运行方式 $X_{\min} = 0.04$ ，最小运行方式 $X_{\max} = 0.06$ ，主变的等效阻抗标么值^[2]

$$X_{B1} = \frac{U_s \%}{100} \times \frac{S_B}{S_N} = \frac{7}{100} \times \frac{100 \times 10^6}{4000 \times 10^3} = 1.75$$

高压侧电源进线的阻抗标么值 $X_0 = 0.4 \times 20 \times \frac{100}{37^2} = 0.584$

低压侧各出线的阻抗标么值^[2]

$$X_1 = \frac{XL_1 \cdot S_B}{Un^2} = \frac{0.4 \times 15 \times 100}{10.5^2} = 5.442$$

$$X_2 = \frac{XL_2 \cdot SB}{Un^2} = \frac{0.4 \times 20 \times 100}{10.5^2} = 7.26$$

$$X_{3-1} = \frac{XL_{3-1} \cdot SB}{Un^2} = \frac{0.4 \times 13 \times 100}{10.5^2} = 4.72$$

$$X_{3-2} = \frac{XL_{3-2} \cdot SB}{Un^2} = \frac{0.4 \times 13 \times 100}{10.5^2} = 4.72$$

$$X_4 = \frac{XL_4 \cdot SB}{Un^2} = \frac{0.4 \times 13 \times 100}{10.5^2} = 4.72$$

$$X_5 = \frac{XL_5 \cdot SB}{Un^2} = \frac{0.4 \times 12 \times 100}{10.5^2} = 4.356$$

$$X_6 = \frac{XL_6 \cdot SB}{Un^2} = \frac{0.4 \times 16 \times 100}{10.5^2} = 5.80$$

3.3 短路点的确定

短路点的确定如图 3-1 所示。

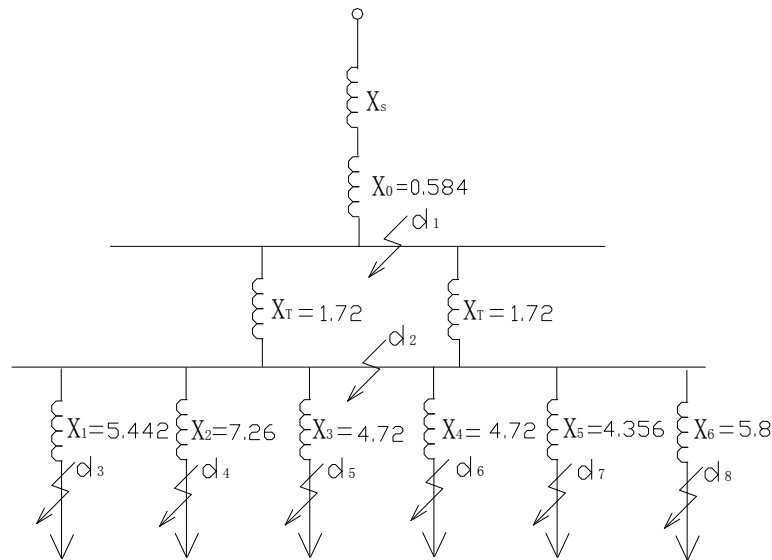


图 3-1 各短路点

各点短路电流计算

d₁ 点发生短路时

最大运行方式各短路电流

$$I_{d1\max}^* = \frac{E''}{X_{\min} + X_0} = \frac{1}{0.04 + 0.584} = 1.6$$

$$I_{d1}^{(3)} = \frac{I_{d1\max}^* \cdot SB}{\sqrt{3}U_{av}} = \frac{1.6 \times 100}{\sqrt{3} \times 37} = 2.5(\text{kA})$$

$$I_{d1}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{d1}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 2.5 = 2.165(\text{kA})$$

$$i_{ch} = \sqrt{2} K_{ch} I_{d1}^{(3)} = \sqrt{2} \times 1.8 \times 2.5 = 2.55 \times 2.5 = 6.375(\text{kA})$$

$$I_{ch} = I_{d1}^{(3)} \sqrt{1 + 2(K_{ch} - 1)^2} = 2.5 \times 1.51 = 3.78(\text{kA})$$

$$S_d = \frac{SB}{X_{js}^*} = \frac{100}{0.04 + 0.584} = 160(\text{MVA})$$

最小运行方式各短路电流

$$I_{d1\min}^* = \frac{E''}{X_{\max} + X_0} = \frac{1}{0.06 + 0.584} = 1.55$$

$$I_{d1}^{(3)} = \frac{I_{d1\min}^* \cdot SB}{\sqrt{3}U_{av}} = \frac{1.55 \times 100}{\sqrt{3} \times 37} = 2.42(\text{kA})$$

$$I_{d1}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{d1}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 2.42 = 2.09(\text{kA})$$

$$i_{ch} = \sqrt{2} K_{ch} I_{d1}^{(3)} = \sqrt{2} \times 1.8 \times 2.42 = 2.55 \times 2.42 = 6.17(\text{kA})$$

$$I_{ch} = I_{d1}^{(3)} \sqrt{1 + 2(K_{ch} - 1)^2} = 2.42 \times 1.51 = 3.65(\text{kA})$$

$$S_d = \frac{SB}{X_{js}^*} = \frac{100}{0.06 + 0.584} = 155(\text{MVA})$$

d₂点发生短路时

最大运行方式各短路电流

$$I_{d2\max}^* = \frac{E''}{X_{\min} + X_0 + X_{B1}/2} = \frac{1}{0.04 + 0.584 + 0.875} = 0.67$$

$$I_{d2}^{(3)} = \frac{I_{d2\max}^* \cdot SB}{\sqrt{3}U_{av}} = \frac{0.67 \times 100}{\sqrt{3} \times 37} = 3.67(\text{kA})$$

$$I_{d2}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{d2}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 3.67 = 3.18(\text{kA})$$

$$i_{ch} = \sqrt{2} K_{ch} I_{d2}^{(3)} = \sqrt{2} \times 1.8 \times 3.67 = 2.55 \times 3.67 = 9.36(\text{kA})$$

$$I_{ch} = I_{d2}^{(3)} \sqrt{1 + 2(K_{ch} - 1)^2} = 3.67 \times 1.51 = 5.54(\text{kA})$$

$$S_d = \frac{SB}{X_{js}^*} = \frac{100}{0.04 + 0.584 + 0.875} = 67(\text{MVA})$$

最小运行方式各短路电流

$$I_{d2\min}^* = \frac{E''}{X_{\max} + X_0 + X_{B1}} = \frac{1}{0.06 + 0.584 + 1.75} = 0.42$$

$$I_{d2}^{(3)} = \frac{I_{d2\min}^* \cdot SB}{\sqrt{3}U_{av}} = \frac{0.42 \times 100}{\sqrt{3} \times 37} = 2.3(\text{kA})$$

$$I_{d2}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{d2}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 2.3 = 1.99(\text{kA})$$

$$i_{ch} = \sqrt{2} K_{ch} I_{d1}^{(3)} = \sqrt{2} \times 1.8 \times 2.3 = 2.55 \times 2.3 = 5.87(\text{kA})$$

$$I_{ch} = I_{d1}^{(3)} \sqrt{1 + 2(K_{ch} - 1)^2} = 2.3 \times 1.51 = 3.473(\text{kA})$$

$$S_d = \frac{SB}{Xjs^*} = \frac{100}{0.06 + 0.584 + 1.75} = 42(MVA)$$

各短路点短路电流如表 3—1 所示。

表 3—1 各短路点短路电流										
短路点	最大运行方式					最小运行方式				
	$I_d^{(3)}$	$I_d^{(2)}$	i_{ch}	I_{ch}	$S_d(MVA)$	$I_d^{(3)}$	$I_d^{(2)}$	i_{ch}	I_{ch}	$S_d(MVA)$
d ₁	2.5	2.165	6.375	3.78	160	2.42	2.09	6.17	3.65	155
d ₂	3.67	3.18	9.36	5.54	67	2.3	1.99	5.87	3.473	42
d ₃	0.79	0.68	2.02	1.2	14.4	0.7	0.61	1.8	1.1	13
d ₄	0.63	0.54	1.6	0.95	11.4	0.57	0.49	1.45	0.86	10
d ₅	0.88	0.76	2.24	1.33	16	0.77	0.67	1.96	1.16	14
d ₆	0.88	0.76	2.24	1.33	16	0.77	0.67	1.96	1.16	14
d ₇	0.94	0.81	2.40	1.42	17	0.81	0.71	2.07	1.22	15
d ₈	0.76	0.66	1.94	1.15	13.70	0.67	0.58	1.71	1.00	12.20

4 电气设备的选择及校验

4.1 母线的选择及校验

4.1.1 母线材料的选择

母线的材料有铜、铝和钢。目前，农村发电厂和变电站以及大、中型发电厂、变电站的配电装置中的母线，广泛采用铝母线，这是因为铜贵重，我国储量又少；而铝储量较多，具有价格低、重量轻、加工方便等特点。因此，选用铝母线要比铜母线经济。

4.1.2 母线截面形状的选择

农村发电厂和变电站配电装置中的母线截面目前采用矩形、圆形和绞线圆形等。选择母线截面形状的原则是：肌肤效应系数尽量低；散热好；机械强度高；连接方便；安装简单。

10kV 侧主要选择矩形截面母线，因为同样截面的矩形母线周长比圆形母线的周长要长，散热面积大，冷却条件好；由于肌肤效应的影响，矩形母线的电阻比圆形的小。

钢芯铝绞线的耐张性能比单股母线好，在允许电流相同的条件下，钢芯铝绞线的直径比单股母线直径大，其表面附近的电场强度小于单股母线。为了使农村发电厂和变电站的屋外配电装置结构和布置简单，投资少，在高压侧一般采用钢芯铝绞线。

4.1.3 35kV 侧母线截面积的选择及校验

若一台变压器停止工作，想满足整个负荷的需要，则另一台变压器必工作在过负荷状态，由于变压器容量按 $S_B \geq 0.6S_{jszd}$ 来选择的，所以只需要一台过负荷为原来的 $\frac{1}{0.6} = 1.67$ 倍，即 $S = 1.67S_B$ 。

按通过高压侧母线的最大长期工作电流^[1]

$$I_{gzd} = 1.67 \cdot \frac{1.05 \cdot S_e}{\sqrt{3} \cdot U_e} = 1.67 \times \frac{1.05 \times 4000}{\sqrt{3} \times 35} = 115.7(\text{A})$$

1) 按经济电流密度选择母线截面^[1]

$$S_j = \frac{I_{gzd}}{J}$$

式中 S_j ——经济截面 m^2

J ——经济电流密度 A/m^2

取变压器最大负荷利用小时数 $h=3000$ 小时，查表^[1]选择 $J=1.15 \times 10^6 \text{A}/\text{m}^2$

$$\therefore S_j = \frac{115.7}{1.15 \times 10^6} = 100.6(\text{mm}^2)$$

经计算选择 LGJ-120 mm^2 型钢芯铝绞线，其 70°C 时最大允许持续电流 $I_y=408(\text{A})$

温度修正系数为^[1]

$$K_{\theta} = \sqrt{\frac{\theta_y - \theta}{\theta_y - \theta_0}} = \sqrt{\frac{70 - 37}{70 - 40}} = 1.049$$

则实际环境温度为 37℃ 时的母线允许电流

$$K_{\theta} I_y = 1.049 \times 408 = 428(\text{A})$$

大于其长期最大负荷电流 (115.7 A)，满足长期工作时的发热条件。

2) 校验热稳定

短路计算时间 $t = t_b + t_g + t_{hu} = 1.5 + 0.06 + 0.04 = 1.6\text{s}$ 。因 $I'' = I_{\infty}$ ，所以

$$\beta'' = \frac{I''}{I_{\infty}} = 1, \text{ 经查表}^{[1]} \text{得 } t_z = 1.3\text{s}。 \text{因 } t > 1\text{s}, \text{ 所以 } t_{fz} = 0,$$

$$\text{故 } t_{dz} = t_z = 1.3\text{s}$$

母线正常运行时的最高温度为

$$\theta_c = \theta + (\theta_y - \theta) \cdot \left(\frac{I_{gzd}}{I_{y\theta}} \right)^2 = 37 + (70 - 37) \times \left(\frac{115.7}{428} \right)^2 = 39.4(^{\circ}\text{C})$$

查表知 $C = 99 \times 10^6$ ，按热稳定条件所需最小母线截面为

$$S_{zx} = \frac{I_{\infty}}{C} \cdot \sqrt{t_{dz} \cdot K_j}$$

式中 C —— 热稳定系数；

K_{θ} —— 集肤效应系数。

$$S_{zx} = \frac{I_{\infty}}{C} \cdot \sqrt{t_{dz} \cdot K_j} = \frac{2.5 \times 10^3}{99 \times 10^6} \times \sqrt{1.3 \times 1} = 28.79(\text{mm}^2)$$

小于所选母线的截面积，满足热稳定要求，因所选母线为绞线，故不需动稳定校验。

4.1.4 10kV 侧母线截面积的选择及校验

按通过低压侧母线的最大长期工作电流

$$I_{gzd} = 1.67 \cdot \frac{1.05 \cdot S_e}{\sqrt{3} \cdot U_e} = 1.67 \times \frac{1.05 \times 4000}{\sqrt{3} \times 10} = 404.97(\text{A})$$

1) 按经济电流密度选择母线截面

$$S_j = \frac{I_{gzd}}{J}$$

取变压器最大负荷利用小时数 $h=3000$ 小时，查表^[1]选择 $J=1.15 \times 10^6 \text{A/m}^2$

$$\therefore S_j = \frac{404.97}{1.15 \times 10^6} = 352.15(\text{mm}^2)$$

经计算选择^[1]LMY-40×5mm² 型铝母线，其 25℃时最大允许持续电流 $I_y = 518(\text{A})$

则实际环境温度为 37℃时的母线允许电流为

温度修正系数为^[1]

$$K_\theta = \sqrt{\frac{\theta_y - \theta}{\theta_y - \theta_0}} = \sqrt{\frac{70 - 37}{70 - 25}} = 0.86$$

$$K_\theta I_y = 0.86 \times 518 = 445.48(\text{A})$$

大于其长期最大负荷电流（404.97 A），满足长期工作时的发热条件。

2) 校验

① 热稳定性校验

短路计算时间 $t = t_b + t_g + t_{hu} = 1 + 0.06 + 0.04 = 1.1\text{s}$ 。因 $I'' = I_\infty$ ，所以

$$\beta'' = \frac{I''}{I_\infty} = 1, \text{ 经查表}^{[4]} \text{得 } t_z = 0.9\text{s}。 \text{ 因 } t > 1\text{s}, \text{ 所以 } t_{fz} = 0,$$

$$\text{故 } t_{dz} = t_z = 0.9\text{s}$$

母线正常运行时的最高温度为

$$\theta_c = \theta + (\theta_y - \theta) \cdot \left(\frac{I_{gzd}}{I_{y\theta}} \right)^2 = 37 + (70 - 37) \times \left(\frac{404.97}{445.48} \right)^2 = 64.3(^\circ\text{C})$$

查表 $C = 89 \times 10^6$ ，按热稳定条件所需最小母线截面为

$$S_{zx} = \frac{I_\infty}{C} \cdot \sqrt{t_{dz} \cdot K_j} = \frac{3.67 \times 10^3}{89 \times 10^6} \times \sqrt{0.9 \times 1} = 33.4(\text{mm}^2)$$

小于所选母线的截面积，故满足热稳定要求。

② 动稳定性校验

10kV 侧截面为矩形的母线水平放置，相间距离 $a=0.25\text{m}$ $L=1.2\text{m}$

短路冲击电流 $i_{ch} = 9.36\text{kA}$

母线所受的电动力
$$F = 1.73 \times 10^{-7} \cdot \frac{L}{a} \cdot i_{ch}^2$$

式中 L ——绝缘子间的跨距;
 a ——相间距。

$$F = 1.73 \times 10^{-7} \cdot \frac{L}{a} \cdot i_{ch}^2 = 72.8(\text{N})$$

母线所受的最大弯矩
$$M = \frac{F \cdot L}{10} = \frac{72.8 \times 1.2}{10} = 8.74(\text{N} \cdot \text{m})$$

截面系数
$$W = \frac{b \cdot h^2}{6} = \frac{5 \times 10^{-3} \times (40 \times 10^{-3})^2}{6} = 1.33 \times 10^{-6}(\text{m}^3)$$

母线最大计算应力为
$$\sigma_{zd} = \frac{M}{W} = \frac{8.74}{1.33 \times 10^{-6}} = 6.57 \times 10^6(\text{Pa})$$

小于铝母线的允许应力 $69 \times 10^6 \text{Pa}$ ，故满足动稳定性要求。

经校验所选母线满足热稳定及动稳定要求。故选择 $\text{LMY-}40 \times 5 \text{mm}^2$ 的铝母线。

4.1.5 10kV 侧出线截面积的选择及校验

在六回出线中，以最大负荷的一条出线路为出线截面积选择的计算依据，其它线路一定能满足。由于六回出线的负荷相差不大，故不会造成太大的浪费，并且出线路负荷要求考虑今后 8 年的增长，其增长率为 4%。^[1]

$$S_{jszd} = 0.9 \times (1 + 10\%) \times 1164 \times e^{8 \times 4\%} = 1586.9(\text{kVA})$$

按通过 10kV 侧出线的最大长期工作电流

$$I_{gzd} = \frac{S_{jszd}}{\sqrt{3} \cdot U_e} = \frac{1586.9}{\sqrt{3} \times 10} = 91.62(\text{A})$$

(1) 按经济电流密度选择母线截面

$$S_j = \frac{I_{gzd}}{J}$$

取变压器最大负荷利用小时数 $h \approx 3000$ 小时，查表选择 $J = 1.15 \times 10^6 \text{A/m}^2$

$$\therefore S_j = \frac{91.62}{1.15 \times 10^6} = 79.67(\text{mm}^2)$$

经计算选择^[1]LGJ-70mm²型钢芯铝绞线，其 70℃时最大允许持续电流 $I_y = 289(\text{A})$ 则实际环境温度 37℃时的出线允许电流^[1]

$$K_\theta I_y = 1.049 \times 289 = 303.16(\text{A})$$

大于其长期最大负荷电流（91.62 A），满足长期工作时的发热条件。

(2) 校验

短路计算时间 $t = t_b + t_g + t_{hu} = 0.5 + 0.05 + 0.02 = 0.57\text{s}$ 。因 $I'' = I_\infty$ ，所以

$\beta'' = \frac{I''}{I_\infty} = 1$ ，经查表^[4]得 $t_z = 0.5\text{s}$ 。因 $t < 1\text{s}$ ，所以 $t_{fz} = 0.05 \cdot \beta'' = 0.05\text{s}$ ，故

$$t_{dz} = t_z + t_{fz} = 0.55\text{s}$$

母线正常运行时的最高温度

$$\theta_c = \theta + (\theta_y - \theta) \cdot \left(\frac{I_{gzd}}{I_{y\theta}} \right)^2 = 37 + (70 - 37) \times \left(\frac{91.62}{303.16} \right)^2 = 40.014(^{\circ}\text{C})$$

查表知 $C = 97 \times 10^6$ ，按热稳定条件所需最小母线截面为

$$S_{zx} = \frac{I_\infty}{C} \cdot \sqrt{t_{dz} \cdot K_j} = \frac{0.63 \times 10^3}{97 \times 10^6} \times \sqrt{0.55 \times 1} = 1.96(\text{mm}^2)$$

小于所选母线的截面积，故满足热稳定要求，因所选母线为绞线，故不需动稳定校验。

4.2 断路器的选择及校验

4.2.1 35kV 侧断路器的选择及校验

(1) 断路器的选择

按构造形式、装置种类、额定电压、额定电流、和额定开断电流选择断路器。据 $U_e \geq U_W = 35\text{kV}$, $I_{gzd} = 115.7\text{A}$ ， $I_{ekd} \geq I_{dt} = I'' = 2.5(\text{kA})$ 查手册^[3]选择 LW16-35 型户外 SF_6 断路器。其技术参数见表 4-1。

表 4-1 LW16-35 型 SF_6 断路器参数

型号	额定电压 (kV)	额定电流 (A)	I_{ekd} (kA)	i_j (kA)	t_g (s)	$I_{r(4s)}$ (kA)
LW16-35	35	1600	25	63	0.06	25

(1) 校验

1) 热稳定性校验

短路电流的热脉冲

$$I_\infty^2 \cdot t_{dz} = 2.5^2 \times 1.3 = 8.125 < I_r^2 \cdot t = 25^2 \times 4 = 2500(\text{kA}^2 \cdot \text{s})$$

因此满足热稳定性要求。

2) 动稳定性校验

极限通过电流 $i_j = 63\text{kA} > i_{ch} = 6.38\text{kV}$

故动稳定性也满足要求。

经计算满足热稳定性及动稳定性要求，因此所选 LW16-35 型 SF_6 断路器满足要求。

4. 2. 2 10kV 侧断路器的选择及校验

(1) 断路器的选择

按构造形式、装置种类、额定电压、额定电流、和额定开断电流选择断路器。据 $U_e \geq U_W = 10\text{kV}, I_{gzd} = 404.97\text{A}$, $I_{ekd} \geq I_{dt} = I'' = 3.67(\text{kA})$, 查手册^[3]选择 ZN3-10 真空型断路器。其技术参数见表 4-2。

表 4-2 ZN3-10 型断路器参数

型号	额定电压 (kV)	额定电流 (A)	I_{ekd} (kA)	i_j (kA)	t_g (s)	$I_{r(4s)}$ (kA)
ZN3-10	10	600	8.7	22	≤ 0.05	8.7

(1) 校验

1) 热稳定性校验

短路电流的热脉冲

$$I_{\infty}^2 \cdot t_{dz} = 3.67^2 \times 0.9 = 12.1 < I_r^2 \cdot t = 8.7^2 \times 4 = 302.76(\text{kA}^2 \cdot \text{s})$$

因此满足热稳定性要求。

2) 动稳定性校验

极限通过电流 $i_j = 22 > i_{ch} = 9.36(\text{kA})$

故动稳定性也满足要求。

经计算满足热稳定性及动稳定性要求，因此所选 ZN3-10 型断路器满足要求。

4. 2. 3 10kV 侧母线分段断路器的选择

因其最大长期工作电流及各相参数均与变压器 10kV 侧基本相同，因此选择及校验过程同 10kV 侧，故选 ZN3-10 型断路器。

4. 2. 4 10kV 出线侧断路器的选择及校验

(1) 断路器的选择

按构造形式、装置种类、额定电压、额定电流、和额定开断电流选择断路器。

以最大负荷的一条出线路进行选择，又据 $U_e \geq U_W = 10\text{kV}, I_{gzd} = 91.62\text{A}$,

$I_{ekd} \geq I_{dt} = I'' = 0.63(\text{kA})$ ，查手册^[3]选择 ZN3-10 真空型断路器。其技术参数见表 4-3。

表 4-3 ZN3-10 型断路器参数

型号	额定电压(kV)	额定电流(A)	$I_{ekd}(\text{kA})$	$i_j(\text{kA})$	$t_g(\text{s})$	$I_{r(4s)}(\text{kA})$
ZN3-10	10	600	8.7	22	≤ 0.05	8.7

(1) 校验

1) 热稳定性校验

短路电流的热脉冲

$$I_{\infty}^2 \cdot t_{dz} = 0.63^2 \times 0.55 = 0.218 < I_r^2 \cdot t = 8.7^2 \times 4 = 302.76(\text{kA}^2 \cdot \text{s})$$

因此满足热稳定性要求。

2) 动稳定性校验

极限通过电流 $i_j = 22 > i_{ch} = 1.6(\text{kA})$

故动稳定性也满足要求。

经计算满足热稳定性及动稳定性要求，因此所选 ZN3-10 型断路器满足要求。

4.3 隔离开关的选择及校验

4.3.1 35kV 侧隔离开关的选择及校验

(1) 隔离开关的选择

根据地点和机构选择户外式隔离开关，由 $U_e \geq U_w = 35\text{kV}$, $I_{gzd} = 115.7\text{A}$,
 $I_{ekd} \geq I_{dt} = I'' = 2.5(\text{kA})$ ，经查手册^[3]选择 GW4-35D 型隔离开关。其技术参数见表 4-4。

表 4-4 GW4-35D 型隔离开关参数

型号	额定电压 (kV)	额定电流 (A)	极限通过电流 峰值 (kA)	4s 热稳定电流 (kA)
GW4-35D	35	600	50	15.8

(1) 校验

1) 热稳定性校验

短路电流的热脉冲

$$I_{\infty}^2 \cdot t_{dz} = 2.5^2 \times 1.3 = 8.125 < I_r^2 \cdot t = 15.8^2 \times 4 = 998.56(\text{kA}^2 \cdot \text{s})$$

因此满足热稳定性要求。

2) 动稳定性校验

极限通过电流 $i_j = 50 > i_{ch} = 3.78(\text{kA})$

故动稳定性也满足要求。

经计算满足热稳定性及动稳定性要求，因此所选 GW2-35 型隔离开关满足要求。

4.3.2 10kV 侧隔离开关的选择及校验

(1) 隔离开关的选择

根据地点和机构选择户内式隔离开关，由 $U_e \geq U_w = 10\text{kV}$, $I_{gzd} = 404.97\text{A}$,
 $I_{ekd} \geq I_{dt} = I'' = 3.67(\text{kA})$ 经查手册^[3]选择 GN6-10T 型隔离开关。其技术参数见表 4-5。

表 4-5 GN6-10T 型隔离开关参数

型号	额定电压 (kV)	额定电流 (A)	极限通过电流 峰值 (kA)	5s 热稳定电流 (kA)
GN6-10T	10	600	52	20

(1) 校验

1) 热稳定性校验

短路电流的热脉冲

$$I_{\infty}^2 \cdot t_{dz} = 3.67^2 \times 0.9 = 12.1 < I_r^2 \cdot t = 20^2 \times 5 = 2000(\text{kA}^2 \cdot \text{s})$$

因此满足热稳定性要求。

2) 动稳定性校验

极限通过电流 $i_j = 52 > i_{ch} = 9.36(\text{kA})$

故动稳定性也满足要求。

经计算满足热稳定及动稳定要求，因此所选 GN6-10T 型隔离开关满足要求。

4.3.3 10kV 侧母线分段隔离开关的选择

因其最大长期工作电流及各相参数均与变压器 10kV 侧基本相同，因此选择及校验过程同 10kV 侧，故选 GN6-10T 型断路器。

4.3.4 10kV 出线侧隔离开关的选择及校验

(1) 隔离开关的选择

根据地点和机构选择，以最大负荷的一条出线路进行选择，由
 $U_e \geq U_w = 10\text{kV}$, $I_{gzd} = 91.62\text{A}$, $I_{ekd} \geq I_{dt} = I'' = 0.63(\text{kA})$ ，经查手册^[3]选择 GN6-10T
型隔离开关。其技术参数见表 4-6。

表 4-6 GN6-10T 型隔离开关参数

型号	额定电压 (kV)	额定电流 (A)	极限通过电流 峰值 (kA)	5s 热稳定电流 (kA)
GN6-10T	10	600	52	20

(2) 校验

3) 热稳定性校验

短路电流的热脉冲

$$I_{\infty}^2 \cdot t_{dz} = 0.63^2 \times 0.55 = 0.218 < I_r^2 \cdot t = 20^2 \times 5 = 2000 (\text{kA}^2 \cdot \text{s})$$

因此满足热稳定性要求。

4) 动稳定性校验

极限通过电流 $i_j = 52 > i_{ch} = 1.6(\text{kA})$

故动稳定性也满足要求。

经计算满足热稳定及动稳定要求，因此所选 GN6-10T 型隔离开关满足要求。

4.4 电流互感器的选择及校验

4.4.1 35kV 侧电流互感器的选择及校验

(1) 电流互感器的选择

根据电压等级和电流互感器安装处的最大按长期工作电流选择

$U_e \geq U_w = 35\text{kV}, I_e \geq I_{gzd} = 115.7\text{A}$ ；经查手册^[3]选择 LCW-35 型电流互感器。其技术参数见表 4-7。

表 4-7 LCW-35 型电流互感器参数

型号	额定电压 (kV)	准确度	额定电流比	1s 热稳定电流 倍数	1s 动稳定电流倍 数
LCW-35	35	0.5	200/5	65	100

温度校正系数 $K_{\theta} = \sqrt{\frac{70-37}{70-40}} = 1.05$

则 $I_{ley} = K_{\theta} \times I_{le} = 1.05 \times 200 = 210(\text{A})$

(2) 校验

1) 热稳定性校验

根据 $(I_{ley} \cdot K_r)^2 \cdot t = (0.21 \times 65)^2 \times 1 = 186.3 > I_{\infty}^2 \cdot t_{dz} = 8.125 (\text{kA}^2 \cdot \text{s})$

满足热稳定要求

2) 动稳定性校验

① 内部动稳定校验

$$\sqrt{2} \cdot I_{ley} \cdot K_d = \sqrt{2} \times 0.21 \times 100 = 29.7 > i_{ch} = 6.38(\text{kA})$$

满足内部动稳定要求

② 外部动稳定校验

由下式校验

$$K_1 \cdot K_2 \cdot K_d \cdot \sqrt{2} \cdot I_{ley} \geq i_{ch}$$

式中 K_1 ——当相间距离 $a \neq 0.4$ 时, $K_1 = \sqrt{\frac{a}{0.4}} = \sqrt{\frac{0.25}{0.4}} = 0.79$;

K_2 ——电流互感器绝缘瓷帽端部至最近一个母线支柱绝子的距离 $L=0.5\text{m}$, $K_2=1$;

K_d ——动稳定倍数。

$$K_1 \cdot K_2 \cdot K_d \cdot \sqrt{2} \cdot I_{ley} = 0.79 \times 1 \times 100 \times \sqrt{2} \times 0.21 = 22.35 > i_{ch} = 6.38(\text{kA})$$

满足外部动稳定要求
经计算满足热稳定及内、外动稳定要求, 因此所选 LCW-35 型电流互感器满足要求。

4. 4. 2 10kV 侧电流互感器的选择及校验

(1) 电流互感器的选择
根据电压等级和电流互感器安装处的最大按长期工作电流选择

$U_e \geq U_w = 10\text{kV}, I_e \geq I_{gzd} = 404.97\text{A}$; 经查手册^[3]选择 LFZ-10 型电流互感器。其技术参数见表 4-8。

表 4-8 LFZ-10 型电流互感器参数

型号	额定电压 (kV)	准确度	额定电流比	1s 热稳定电流 倍数	1s 动稳定电流 倍数
LFZ-10	10	0.5	600/5	120	210

温度校正系数 $K_{\theta} = \sqrt{\frac{70-37}{70-40}} = 1.05$

则 $I_{ley} = K_{\theta} \times I_{le} = 1.05 \times 600 = 630\text{A}$

(2) 校验

1) 热稳定性校验

根据 $(I_{ley} \cdot K_r)^2 \cdot t = (0.63 \times 120)^2 \times 1 = 5715.36 > I_{\infty}^2 \cdot t_{dz} = 12.1(\text{kA}^2 \cdot \text{s})$

2) 动稳定性校验

① 内部动稳定校验

$$\sqrt{2} \cdot I_{ley} \cdot K_d = \sqrt{2} \times 0.63 \times 210 = 187.1 > i_{ch} = 9.36(\text{kA})$$

② 外部动稳定校验

$$K_1 \cdot K_2 \cdot K_d \cdot \sqrt{2} \cdot I_{le} = 0.79 \times 1 \times 210 \times \sqrt{2} \times 0.63 = 147.79 > i_{ch} = 9.36(\text{kA})$$

经计算满足热稳定及内、外动稳定性要求, 所选 LFZ-10 型电流互感器满足要求。

4.4.3 10kV 侧母线分段电流互感器的选择

因其最大长期工作电流及各相参数均与变压器 10kV 侧基本相同,因此选择及校验过程同 10kV 侧, 故选 LFZ-10 型电流互感器。

4.4.4 10kV 出线侧电流互感器的选择及校验

(1) 电流互感器的选择

根据电压等级和电流互感器安装处的最大按长期工作电流选择

$U_e \geq U_w = 10\text{kV}, I_e \geq I_{gzd} = 91.62\text{A}$;经查手册^[3]选择 LFZ1-10 型电流互感器。其技术参数见表 4-9。

表 4-9 LFZ1-10 型电流互感器参数

型号	额定电压 (kV)	准确度	额定电流比	1s 热稳定电流倍数	1s 动稳定电流 倍数
LFZ1-10	10	0.5	100/5	90	160

温度校正系数 $K_\theta = \sqrt{\frac{70-37}{70-40}} = 1.05$

则 $I_{ley} = K_\theta \times I_{le} = 1.05 \times 100 = 105\text{A}$

(2) 校验

1) 热稳定性校验

根据 $(I_{ley} \cdot K_r)^2 \cdot t = (0.105 \times 90)^2 \times 1 = 89.3 > I_\infty^2 \cdot t_{dz} = 0.218(\text{kA}^2 \cdot \text{s})$

满足热稳定要求

2) 动稳定性校验

① 内部动稳定校验

$$\sqrt{2} \cdot I_{ley} \cdot K_d = \sqrt{2} \times 0.105 \times 160 = 23.76 > i_{ch} = 1.6(\text{kA})$$

② 外部动稳定校验

$$K_1 \cdot K_2 \cdot K_d \cdot \sqrt{2} \cdot I_{le} = 0.79 \times 1 \times 160 \times \sqrt{2} \times 0.105 = 18.77 > i_{ch} = 1.6(\text{kA})$$

经计算满足热稳定及内、外动稳定要求, 因此所选 LFZ1-10 型电流互感器满足要求。

4.5 电压互感器的选择及校验

4.5.1 电压互感器的选择及校验

电压互感器是二次回路中供测量和保护用的电压源, 通过它能正确反映系统电压的运行状况, 其作用: 一是将一次侧的高电压改变成二次侧的低电压, 使测量仪表和保护装置标准化, 小型化, 并便

于监视，安装和维护；二是使低压二次回路与高压一次系统隔离，保证了工作人员的安全，由于电压互感器主要用于计量，而上一级变电站已装设，所以本所 35kV 侧不装设电压互感器，只在 10kV 侧装设电压互感器，从而减少造价。

(1) 电压互感器的选择

根据该电压互感器的用途、装设地点及额定电压，经查手册^[3]选择 JDZ6-10 型电压互感器。其技术参数见表 4-10。

表 4-10 JDZ6-10 型电压互感器参数

型号	额定电压(kV)		准确级次及相应额定二次负荷(VA)			最大容量 (VA)
	原线圈	副线圈	0.5 级	1 级	3 级	
JDZ6-10	10	0.1	50	80	200	400

测量仪表的技术数据见表 4-11。

表 4-11 测量仪表的技术参数

仪表名称	仪表型号	每线圈消耗功率(VA)	$\cos \varphi$
有功功率表	1D ₁ —W	0.75	1
无功功率表	1D ₁ —Var	0.75	1
有功电度表	DS ₁	1.5	0.38
频率表	1D ₁ —Hz	2	1
电压表	1T ₁ —V	5	1

电压互感器和测量仪表的三线接线图如图 4-1 所示。

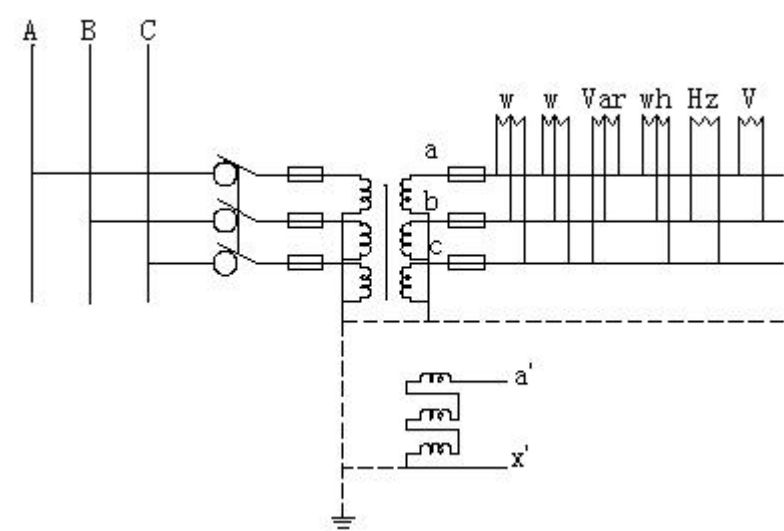


图 4-1 三线接线图

(2) 校验

在电压互感器接线布局中，由于接入了电度表，所以电压互感器的准确度等级选 0.5 级，在 0.5 级以下工作的电压互感器的额定容量 $S_e=50VA$
按二次负荷选择电压互感器应作如下计算：

首先计算各相负荷，然后取最大一相负荷与一相额定容量相比较。（利用变电工程教材^[1]中第三种接线方式进行计算）

$$P_{ab} = 2 \times 0.75 + 0.75 + 1.5 \times 0.38 + 5 = 7.82(\text{W})$$

$$Q_{ab} = 1.5 \times \sqrt{1 - 0.38^2} = 1.39(\text{var})$$

$$S_{ab} = \sqrt{P_{ab}^2 + Q_{ab}^2} = 7.94(\text{VA})$$

$$\cos \varphi_{ab} = \frac{P_{ab}}{S_{ab}} = 0.985; \quad \varphi_{ab} = 9^\circ 58'$$

$$P_{bc} = 2 \times 0.75 + 0.75 + 1.5 \times 0.38 + 2 = 4.82(\text{W})$$

$$Q_{bc} = 1.5 \times \sqrt{1 - 0.38^2} = 1.39(\text{var})$$

$$S_{bc} = \sqrt{P_{ab}^2 + Q_{ab}^2} = 5.02(\text{VA})$$

$$\cos \varphi_{bc} = \frac{P_{ab}}{S_{ab}} = 0.960; \quad \varphi_{bc} = 16^\circ 13'$$

A 相负荷为:

$$P_A = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot S_{ab} \cdot \cos(\varphi_{ab} - 30^\circ) = \frac{7.94}{\sqrt{3}} \times \cos(9^\circ 58' - 30^\circ) = 4.3(\text{W})$$

$$Q_A = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot S_{ab} \cdot \sin(\varphi_{ab} - 30^\circ) = \frac{7.94}{\sqrt{3}} \times \sin(9^\circ 58' - 30^\circ) = -1.57(\text{var})$$

B 相负荷为:

$$P_B = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot [S_{ab} \cdot \cos(\varphi_{ab} + 30^\circ) + S_{bc} \cdot \cos(\varphi_{bc} - 30^\circ)] = 6.48(\text{W})$$

$$Q_B = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot [S_{ab} \cdot \sin(\varphi_{ab} + 30^\circ) + S_{bc} \cdot \sin(\varphi_{bc} - 30^\circ)] = 2.06(\text{var})$$

经计算可知 B 相负荷最大，其值为 $S_b = \sqrt{P_B^2 + Q_B^2} = 6.799\text{VA}$

0.5 级的 JDZ6-10 型电压互感器的一相额定容量为 $50/3=16.7(\text{VA})$ ，此值大于它的最大一相负荷 S_b ，因此满足要求。

4.5.2 保护电压互感器的熔断器的选择及校验

(1) 熔断器的选择

对于保护电压互感器的熔断器，只按额定电压及断流容量选择即可
经计算查手册^[3]选择 RN2-10 型熔断器。其技术参数见表 4-12。

表 4-12 RN2-10 型熔断器参数

型号	额定电压(kV)	额定电流(A)	额定断流容量 (MVA)
----	----------	---------	--------------

RN2-10	10	0.5	1000
--------	----	-----	------

(2) 校验

$$I_{gzd} = 1.05 \times \frac{50 \times 10^{-3}}{\sqrt{3} \times 10} = 3.03mA$$

$$I_{erj} = 1.5 \times I_{gzd} = 1.5 \times 3.03 = 4.545mA$$

因

$$I_{erq} = 500mA > I_{erj} = 4.545mA > I_{gzd} = 3.03mA$$

$$S_{ekd} = 1000MVA > S_d = 67MVA$$

经计算满足要求，故选 RN2-10 形熔断器。

4.5.3 隔离开关的选择及校验

根据以上计算数据，选择 GN6-10T 型隔离开关一定能满足要求。

4.6 绝缘子和穿墙套管的选择及校验

发电厂和变电站常用的绝缘子有支柱绝缘子、套管绝缘子和悬式绝缘子。支柱绝缘子用于支持和固定母线，并使母线与地绝缘；套管绝缘子主要用于母线穿过墙壁或楼板，使母线之间、母线与地之间绝缘；悬式绝缘子主要用于固定屋外配电装置中的软母线。

4.6.1 35kV 侧绝缘子的选择及校验

(1) 绝缘子的选择

按额定电压和安装地点选择；查手册^[9]选择 XP-4C 型绝缘子，其技术参数见表 4-13。

表 4-13 XP-4C 型绝缘子参数

型号	泄漏距离 cm	工频试验电压(kV)			50%全波击穿 闪络电压(kV)	机械负荷	
		干	湿	击穿		1 小时	破坏
XP-4C	200	60	30	70	100	3000	4000

(2) 悬式绝缘子片数的选择

一般情况下的单位泄漏距离为 1.6cm/kV，所以应选绝缘子的片数为^[10]

$$n \geq \frac{\lambda \cdot U_e}{L_0} = \frac{1.6 \times 35}{200} = 2.8 \text{ (片)}$$

式中 λ ——泄漏比距；

L_0 ——每片绝缘子的泄漏距离，初选 3 片。

按大气过电压作用下不闪络选择，一般来说，只要满足承受内部过电压作用的要求，同时接地电阻值也满足规程要求，则在大气过电压作用下将不致引起绝缘子串的逆闪络。按以上条件选择的绝缘子串片数，考虑到绝缘子老化需增加一片，对于耐张绝缘子串，因承受较大的拉力，容易损坏，又需此悬式绝缘子串再增加一片。所以选 4 片绝缘子。

综上选择 XP—4C 型绝缘子。

4. 6. 2 10kV 侧绝缘子的选择及校验

(1) 屋外绝缘子的选择屋外绝缘子的选择

1) 绝缘子的选择

按额定电压和安装地点选择，经查手册^[3]选择 ZS-10/4 型支柱棒型绝缘子。其技术参数见表 4-14。

表 4-14 ZS-10/4 型支柱棒型绝缘子参数

型号	额定电压(kV)	机械破坏负荷(kN)	总高 (mm)
ZS-10/4	10	4	210

2) 校验

动稳定校验

$$F_{zd} = 1.73 \times 10^{-7} \cdot \frac{L}{a} \cdot i_{ch}^2 = 1.73 \times 10^{-7} \times \frac{1.2}{0.5} \times (9.36 \times 10^3)^2 = 36.38(\text{N})$$

绝缘子底部至母线中心线的高 $H_1 = H + 12 + \frac{h}{2} = 210 + 12 + \frac{5}{2} = 224.5(\text{mm})$

绝缘子帽所受的力 $F = F_{zd} \cdot K_z = F_{zd} \cdot \frac{H_1}{H} = 36.38 \times \frac{224.5}{210} = 38.89(\text{N})$

绝缘子的允许负荷 $0.6 \cdot F_p = 0.6 \times 4000\text{N} = 2400 > F = 38.89\text{N}$

经计算满足动稳定要求，故所选 ZS-10/4 型支柱棒型绝缘子满足要求。

(2) 屋内绝缘子的选择

1) 绝缘子的选择

根据安装地和构造类型，经查手册^[3]选择 ZNA-10MM 型支柱绝缘子。其技术参数见表 4-15。

表 4-15 ZNA-MM 型支柱绝缘子参数

型号	额定电压(kV)	机械破坏负荷(kN)	总高 H (mm)
ZNA-10MM	10	3.75	120

2) 校验

动稳定校验

$$F_{zd} = 1.73 \times 10^{-7} \cdot \frac{L}{a} \cdot i_{ch}^2 = 1.73 \times 10^{-7} \times \frac{1.2}{0.25} \times (9.36 \times 10^3)^2 = 72.75(\text{N})$$

绝缘子底部至母线中心线的高度 $H_1 = H + 12 + \frac{h}{2} = 120 + 12 + \frac{5}{2} = 134.5(\text{mm})$

绝缘子帽所受的力 $F = F_{zd} \cdot K_z = F_{zd} \cdot \frac{H_1}{H} = 72.75 \times \frac{134.5}{120} = 81.54(\text{N})$

绝缘子的允许负荷 $0.6 \cdot F_p = 0.6 \times 3750 = 2250\text{N} > F = 81.54\text{N}$

经计算满足动稳定要求，故所选 ZNA-10MM 型支柱绝缘子满足要求。

4.6.3 穿墙套管的选择及校验

(1) 穿墙套管的选择

按装置种类、构造形式、额定电压及最大长期工作电流，查手册^[3]选择 CWLB₂-10/600 型穿墙套管。其技术参数见表 4-16。

表 4-16 CWLB₂-10/600 型穿墙套管参数

型号	额定电压 (kV)	额定电流 (A)	总长 L(mm)	抗弯破坏负 荷(kN)	5s 短时热电 流 (kA)
CWLB ₂ -10/600	10	600	530	7.5	12

温度校正系数 $K_{\theta} = \sqrt{\frac{80-37}{80-40}} = 1.16$

则 $I_{ey} = K_{\theta} \times I_e = 1.16 \times 600 = 693.4\text{A}$

大于其长期最大长期工作电流。

(2) 校验

1) 热稳定校验

$$I_r^2 \cdot t = 12^2 \times 5 = 720 > I_{\infty}^2 \cdot t = 12.1(\text{kA}^2 \cdot \text{s})$$

2) 动稳定校验

$$F = 1.73 \times 10^{-7} \cdot \frac{L_1 + L_2}{2a} \cdot I_{ch}^2$$

式中 L_1 ——穿墙套管端部至最近一个支柱绝缘子间距离，取 $L_1=1\text{m}$ ；

L_2 ——穿墙套管的长度；

a ——相间距。

$$F = 1.73 \times 10^{-7} \cdot \frac{L_1 + L_2}{2a} \cdot I_{ch}^2 = 1.73 \times 10^{-7} \times \frac{1+0.53}{2 \times 0.25} \times (9.36 \times 10^3)^2 = 46.4\text{N}$$

$$0.6 \cdot F_p = 0.6 \times 7500 = 4500 > F = 46.4\text{N}$$

经计算满足热稳定性及动稳定性要求，故所选 CWLB₂-10/600 型穿墙套管满足要求。

4.7 所用变设备的选择

4.7.1 所用变压器的选择

考虑到变电站主要设备的需要，如蓄电池充电、取暖、照明及有关的继电保护装置的用电等负荷，对于一般情况下应将所用变装设在 35kV 侧，便于检修和维护。
所用电负荷统计见表 4-17。

表 4-17 所用电负荷统计表

序号	名称	容量 (KW)	负荷类型
1	通信	4	经常、连续
2	35kV 操动机构	0.825	断续、短时
3	10 kV 操动机构	0.825	断续、短时
4	充电装置	7.5	经常、连续
5	运动	3	经常、连续
6	保护	1	经常、连续
7	电气二次设备室动力	5	断续、短时
8	35kV 配电装置动力	5	断续、短时
9	10 kV 配电装置动力	5	断续、短时
小计	动力负荷 P1	32.15	
	照明负荷 P2	2.5	经常、连续
	其它 P3	2.8	经常、连续

所用变压器容量选择根据《变电站所用电设计技术规程》中公式 (3-12)

$$\begin{aligned} S &= 0.85 \times P_1 + 0.8 \times \frac{P_3}{\cos \varphi} + P_3 \\ &= 0.85 \times 32.15 + 0.8 \times \frac{2.5}{0.6} + 2.8 \\ &= 33.7(\text{kVA}) \end{aligned}$$

综合以上数据，查手册^[3]选择 S9-50/35-0.4 型电力变压器作为所用变压器。
其技术参数见表 4-18。

表 4-18 S9—50/35-0.4 型变压器技术数据表

额定电压 kV		损耗		阻抗电压	空载电流	额定容量
高	低	空载	短路			
35	0.4	0.25	1.18	6.5%	1.1%	50kVA

4. 7. 2 保护所用变的熔断器的选择及校验

(1) 熔断器的选择

其最大长期工作电流 $I_{gzd} = \frac{1.05 \times 50}{\sqrt{3} \times 35} = 0.866(A)$

熔件的额定电流为 $I_{erj} = K_b \cdot I_{eb} = 1.5 \times \frac{50}{\sqrt{3} \times 35} = 1.237(A)$

短路容量 $S_d = \sqrt{3} \cdot U_p \cdot I_{ch} = \sqrt{3} \times 10.5 \times 3.78 = 68.74(MVA)$

经计算查手册^③选择 RW5-35 型高压跌落式熔断器。其技术参数见表 4-19。

(2) 校验

$$I_{erq} = 100A > I_{erj} = 1.237A > I_{gzd} = 0.866A$$

$$S_{ekd} = 300MVA > S_d = 68.74MVA$$

经计算满足要求，选 RW5-35 型熔断器。

表 4-19 RW5-35 型高压跌落式熔断器参数

型号	额定电压(kV)	额定电流(A)	额定断流容量（MVA）	
RW5-35	35	100	上限	下限
			300	60

4. 7. 3 隔离开关的选择

根据以上计算数据，选择 GW4-35D 型隔离开关即能满足要求。

4. 8 电力电容器的选择

电力电容器是用来提高电网功率因数、减少线损、改善电压质量、提高供电效率的电器设备。

4. 8. 1 并联电容器组接线方式的比较

并联电容器组的主接线方式，主要有三角形接线和星型接线。过去并联电容器组采用三角形接线较多，但运行经验证明，三角形接线的电容器组，当任一相击穿时，由电源供给的短路电流较大，实际相当于母线短路。这时虽然故障电容器的熔断器迅速熔断，但如此大的电流即使是瞬间流过电容器也极易使电容器内浸渍剂受热膨胀，迅速汽化，引起爆炸。而且如果不同相的电容器同时发生对地击穿，有时熔断器也失去保护作用。如把电容器改为星形接线，当任一电容器发生极板击穿短路时，短路电流都不会超过电容器组额定电流的三倍。而且不会出现其他两相

的电容器对故障相的涌放电流，只有来自同相的电容器涌放电流。因此星形接线的电容器组油箱爆炸事故较少发生。此外，三角形接线电容器组对过电压保护避雷器的运行条件和保护效果也不如星形接线的好。综合考虑本设计采用星形接线。

4.8.2 电容器的选择

按工作电压选择 $U_{zd} \geq U_g = 10\text{kV}$

按工作频率选择 $f_e = 50\text{Hz}$

(1) 无功功率的计算

设备补偿前的功率因数为 $\cos \varphi_1 = 0.75$ ，要求经电容器补偿后达到 $\cos \varphi_2 = 0.9$ 。

负荷的有功功率为 $P = S_{js} \cdot \cos \varphi_1 = 6344.38 \times 0.75 = 4758.29(\text{kW})$

系统要求补偿的无功功率为

$$Q_c = P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2)$$

$$\text{式中 } \tan \varphi_1 = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_1}}{\cos \varphi_1} = \frac{\sqrt{1 - 0.75^2}}{0.75} = 0.88$$

$$\tan \varphi_2 = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_2}}{\cos \varphi_2} = \frac{\sqrt{1 - 0.9^2}}{0.9} = 0.484$$

$$\text{则 } Q_c = P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) = 4758.29 \times (0.88 - 0.484) = 1884.3(\text{kvar})$$

本所要求两组电容器组来补偿，每组补偿 950kvar，采用三相星形接线的电容器

$$Q = \omega U_{x-x}^2 C_x 10^3$$

式中 C_x ——单相等效电容值;

U_{x-x} ——线电压;

ω ——角频率， $\omega = 2\pi f$ $f=50\text{Hz}$ 。

$$C_x = \frac{Q}{\omega U_{x-x}^2 10^3} = \frac{950}{2 \times \pi \times 50 \times 10^2 \times 10^3} = 30.2(\mu\text{F})$$

初选^[3]BFM11/ $\sqrt{3}$ -200-1W 型电容器组，其技术参数见表 4-20。

表 4-20 BFM11/ $\sqrt{3}$ -200-1W 型 电容器参数

型号	额定电压(kV)	额定容量(kVar)	额定电容(μ F)
BFM11/ $\sqrt{3}$ -200-1W	10.5	200	15.8

$$n = \frac{C_x}{C_b} = \frac{30.2}{15.8} = 1.91 \approx 2(\text{个})$$

因此，一相只需两个此型号的电容器组，三相则需六个电容器组，总的额定容量为 $Q_e = 200 \times 2 \times 3 = 1200\text{kvar}$ ，而需补偿的为 950kVar，故所选电容器组满足要求。

4. 8. 3 保护电容器的熔断器的选择

电力电容器在合闸时产生冲击电流，此时熔断器的熔件不应熔断，保证正常工作。熔件的额定电流应按如下计算：

$$I_{ec} = \frac{S_e}{\sqrt{3} \cdot U_e} = \frac{200}{\sqrt{3} \times 10} = 11.55(\text{A})$$

$$I_{erj} = K_c \cdot I_{ec} = 1.5 \times 11.55 = 17.33(\text{A})$$

其额定电压为 10kV，所以选择^[3] BRN-10 型户内高压熔断器作为电容器的单台保护，其技术参数见表 4-21。

表 4-21 BRN-10 型户内高压熔断器参数

型 号	额定电压 (kV)	开断电流 (A)	额定电流 (A)
BRN-10	10	1000	30

熔断器的额定电流 $I_{erq} > I_{erj}$

故所选熔断器满足要求。

4. 8. 4 断路器、隔离开关、电流互感器的选择

电容器组回路的最大长期工作电流

$$I_{gzd} = \frac{S_e}{\sqrt{3} \cdot U_e} = \frac{200 \times 2 \times 3}{\sqrt{3} \times 10} = 69.28\text{A}$$

小于各出线回路中的最大长期工作电流，因此选型号为：断路器选用 ZN3-10/600 型；隔离开关选用 GN6-10T/600 型；电流互感器选用 LFZ1-10/100/5 型

4. 9 高压开关柜的选择

根据所选设备查^[3]选择 GG—1A 型高压开关柜，其上部放母线和母线隔离开关，三相母线水平

放置，中部放断路器和电流互感器，下部放隔离开关,三部分之间用隔板隔开。其正面左上部为可安装各种仪表和继电器的钢板门；两侧用金属板与相邻回路的电器隔开，以保证工作人员检修维护时的安全和巡视方便。GG—1A 型开关柜的技术参数如表 4-22 示，开关柜安装地点及选择如表 4-23 示

表 4-22 GG—1A 型 开关柜的技术参数

型号	型式	额定电 流 (A)	额定电 压 (KA)	额定短路 开断电流 (kVA)	操动 机构	外形尺寸 宽×深×高 (mm)
GG-1A	固定式靠墙	1250	10	40	CD10 CTB	1200×1200×3200

表 4-23 开关柜安装地点及选择

安装地点	主变出线	10kV 母联	10kV 侧电压互感器及保护	10kV 出线及保护
GG—1A 结线编号	07	11 与 95 配合	50	03

10kV 室内开关柜的安装位置如附图三所示，其具体含义如下述

- 1——#1 电容器
- 2——#1TV 及避雷器
- 3——#1 主变进线
- 4——#1 出线
- 5——#2 出线
- 6——#3 出线
- 7——#分段
- 8——#分段
- 9——#4 出线
- 10——#5 出线
- 11——#6 出线
- 12——#2 主变进线
- 13——#2 TV 及避雷器
- 14——#2 电容器

5 继电保护

继电保护的设计应以合理的运行方式和故障类型作为依据，并应满足速动性、选择性、可靠性和灵敏性四项基本要求。本所主要对变压器、线路、电力电容器进行保护，同时也对其它设备进行保护。这里主要介绍这些主要的保护。

5.1 电力变压器的保护

电力变压器是电力系统中大量使用的重要电气设备，它的故障对供电可靠性和系统的正常运行带来严重后果，同时大容量变压器也是非常贵重的元件。因此，必须根据变压器容量和重要程度装设性能良好、动作可靠的保护。

变压器油箱内部主要易发生的故障包括相间短路、绕组的匝间短路和单相接地短路等。油箱内部故障对变压器来说是非常危险的，高温电弧会烧毁绕组的铁芯，而且会使变压器油绝缘受热分解产生大量气体，引起变压器油箱爆炸的严重后果。变压器油箱外部引线及套管处也可能发生相间短路和接地故障。

变压器的不正常运行状态主要有：由于变压器外部短路或过负荷引起的过电流，以及漏油引起的油面降低和过励磁等。

对变压器的不正常工作状态应采取以下保护：

- (1) 为反应变压器油箱内部各种短路故障和油面降低应装设瓦斯保护。
- (2) 为反应变压器绕组和引出线的相间短路，以及中性点直接接地电网侧绕组和引线接地短路及绕组匝间短路，因流速断保护灵敏度不合格，所以采用纵联差动保护。
- (3) 为反应外部相间短路引起的过电流，应装设过电流保护作为后备保护。
- (4) 为反应过负荷，应装设过负荷保护。

5.1.1 变压器的瓦斯保护

根据《继电保护和安全自动装置技术规程》的规定，对于容量在 0.8MVA 以上的油浸式变压器应装设瓦斯保护。

(1) 原理及接线图

1) 原理：由于短路点电弧的作用，将使变压器油和其它绝缘材料分解，产生气体。气体从油箱经连通管流向油枕，利用气体的数量及流速构成瓦斯保护，它应安装在油箱与油枕之间的连接管道上。

2) 瓦斯保护接原理线图如图 5-1 所示。

(2) 整定

整定：当内部气体为 $250-300\text{cm}^3$ 时，轻瓦斯动作于发生信号；

当内部气体为 $0.7-1.2\text{m/s}$ 时，动作于跳闸。

(3) 瓦斯保护的主要优点

其主要优点是动作迅速、灵敏度高、安装接线简单、能反应油箱内部发生的各种故障。

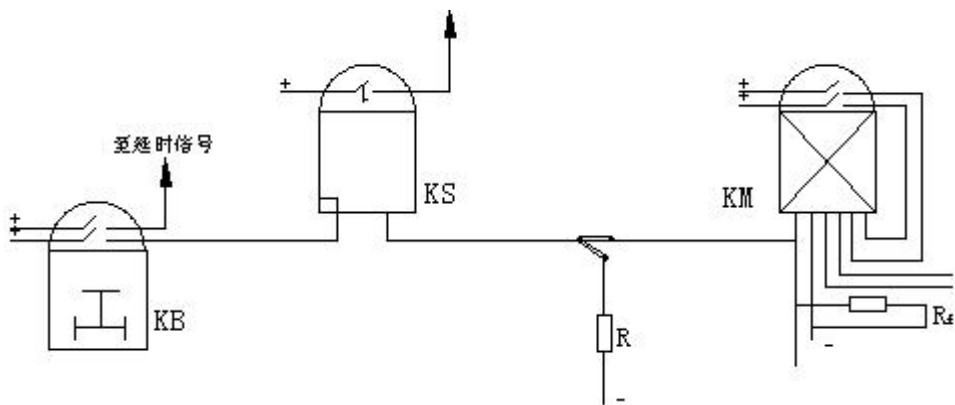


图 5-1 瓦斯保护原理接线图

5.1.2 变压器的差动保护

(1) 原理及接线图

1) 原理：纵差动保护是反应被保护的变压器各端流入和流出电流的相量差。由于变压器高压侧和低压侧的额定电流不同，因此，为了保证纵差动的正确工作，就必须适当选择两侧电流互感器的变比，最好与电压器变比相同，使得在正常运行和外部故障时，两个二次电流相等。在保护范围内故障时，流入差回路的电流为短路点的短路电流的二次值，保护动作。纵差保护动作后，跳开变压器两侧断路器。本设计主变高压侧选用 LCW-35-200/5 型号电流互感器，低压侧选用 LFZJ-10-700/5 型号电流互感器。

2) 纵差动保护原理接线图如图 5-2 所示。

(2) 整定保护的動作電流（利用 BCH-2 型差動继电器构成的变压器差动保护）

1) 确定基本侧。将变压器两侧电流互感器流入差回路的电流中较大的一侧作为基本侧，计算步骤见表 5-1

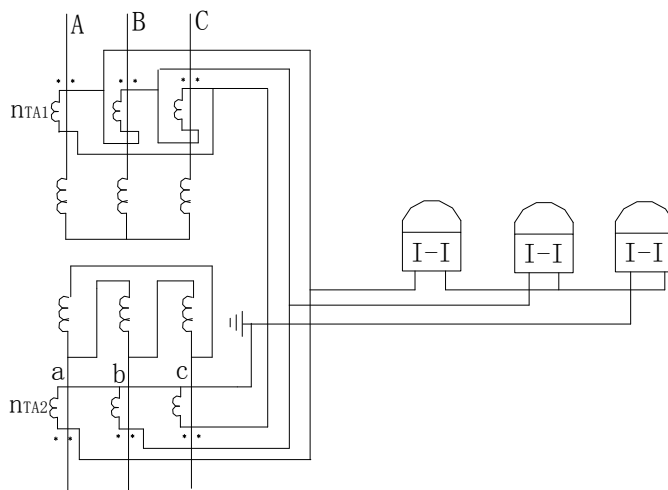


图 5-2 差动保护原理接线图

表 5-1 差回路电流计算

变压器额定电压 (kV)	$U_{e.g}$ (高压) =35	$U_{e.d}$ (低压) =10
变压器额定电流 (A)	$I_{e.g} = \frac{S_e}{\sqrt{3}U_{e.g}} = 65.98$	$I_{e.d} = \frac{S_e}{\sqrt{3}U_{e.d}} = 230.95$
变压器接线方式	Y	Δ
电流互感器接线方式	Δ	Y
电流互感器计算变比 $n_{TA.js}$	$\frac{I_{e.g}}{5} \sqrt{3} = 22.86$	$\frac{I_{e.d}}{5} = 46.19$
电流互感器实际变比 $n_{TA.sj}$	200/5=40	700/5=140
流入差回路电流 (A)	$\frac{I_{e.g}}{n_{TA.sj}} \sqrt{3} = I_g = 2.86$	$\frac{I_{e.d}}{n_{TA.sj}} = I_d = 1.65$
不平衡电流 (A)	0	2.86-1.65=1.21

因 $I_g > I_d$ 所以选高压侧为基准侧

2) 确定差动保护的動作電流

① 躲过变压器的励磁涌流及电流互感器的二次断线

$$I_{dz} = K_K I_{e.t}$$

式中 K_K ——可靠系数, K_K 取 1.3;

$I_{e.t}$ ——变压器基准侧的额定电流。

所以 $I_{dz} = K_K I_{e.t} = 1.3 \times 65.98 = 85.774(\text{A})$

② 躲过外部短路时的最大不平衡电流

$$I_{dz} = K_K I_{bp\text{-max}} = K_K (I_{bp\text{-TA}} + I_{bp\text{-}\Delta u} + I_{bp\text{-}ph})$$

式中 $I_{bp\text{-max}}$ ——最大不平衡电流;

$I_{bp\text{-TA}}$ ——两侧电流互感器电流误差引起的不平衡电流;

$I_{bp\text{-}\Delta u}$ ——变压器调压分接头引起的不平衡电流。

所以
$$I_{dz} = 1.3 \times (0.1 + 0.05 + 0.05) \times \frac{3670}{35/10} = 272.63(\text{A})$$

从以上计算可知，以躲过外部短路最大不平衡电流为计算条件，差动保护的動作电流取为

$$I_{dz} = 272.63 \text{ (A)}$$

3) 计算差动线圈匝数及实际動作电流为

$$I_{dz \cdot J} = K_{jx} \cdot I_{dz} / n_{TA} = \frac{272.63 \times \sqrt{3}}{200/5} = 11.8(\text{A})$$

$$W_{cd \cdot js} = \frac{(AW)_{dz}}{I_{dz \cdot J \cdot js}} = \frac{60 \text{ 安匝}}{I_{dz \cdot J}} = \frac{60}{11.8} = 5.08 \text{ (匝)}$$

差动线圈的实际匝数应向小调整，取 $W_{cd \cdot zd} = 5 \text{ (匝)}$

继电器的实际動作电流为 $I_{dz \cdot J \cdot sj} = 60/5 = 12 \text{ (A)}$

4) 确定 35kV 侧平衡绕组匝数为

$$W_{ph \cdot 35 \cdot js} = \frac{I_{2 \cdot jb} - I_{2 \cdot fj \cdot 35}}{I_{2 \cdot fj \cdot 35}} \times W_{cd \cdot zd} = \frac{2.86 - 1.65}{1.65} \times 5 = 3.67 \text{ (匝)}$$

取实用匝数 $W_{ph \cdot 35 \cdot js} = 4 \text{ (匝)}$

① 计算相对误差 $\Delta f'$ 为

$$\Delta f' = \frac{W_{ph \cdot js} - W_{ph \cdot SJ}}{W_{ph \cdot js} + W_{cd \cdot SJ}} = \frac{3.67 - 4}{3.67 + 5} = -0.038 < 0.05$$

因为相差很小，不需要核算動作电流。

5) 计算流入继电器中电流为

$$I_{j35} = \frac{\sqrt{3}I_d}{n_{i35}} = \frac{\sqrt{3} \times 1990 / (35/10)}{200/5} = 24.62(\text{A})$$

6) 35kV 侧继电器動作电流为

$$I_{dz \cdot 35} = \frac{AW_0}{W_{cd \cdot SJ} + W_{ph \cdot SJ}} = \frac{60}{5 + 4} = 6.67(\text{A})$$

7) 计算最小灵敏系数为

$$K_{n.min} = \frac{I_{j.35}}{I_{dz.35}} = \frac{24.62}{6.67} = 3.69 > 2$$

满足要求

(3) 电流继电器的选择

电流继电器选择 DL—7 型电流继电器

5.1.3 变压器过电流保护

(1) 原理及接线图

- 1) 原理：变压器过电流保护是反应相间短路电流增大而动作的后备保护。
- 2) 过电流保护原理接线图如图 5-3 所示。

(2) 过电流保护的整定计算^[9]

- 1) 按躲开变压器可能出现的最大负荷电流进行整定

$$I_{dz} = \frac{K_K}{K_h} \cdot \frac{n}{n-1} \cdot I_{et}$$

式中 K_K ——可靠系数，取 1.2；

K_h ——返回系数，取 0.85；

n ——并列运行变压器台数。

$$I_{dz} = \frac{K_K}{K_h} \cdot \frac{n}{n-1} \cdot I_{et} = \frac{1.2}{0.85} \times \frac{2}{1} \times \frac{4000}{\sqrt{3} \times 35} = 186.3(\text{A})$$

- 2) 灵敏度的校验

近后备保护 $K_{lm} = \frac{I_{d1\min}^{(2)}}{I_{dz}} = \frac{2165/2}{186.3} = 5.81 \geq 1.5$

远后备保护 $K_{lm} = \frac{I_{d2\min}^{(2)}}{I_{dz}} = \frac{3180/2/(35/10)}{186.3} = 2.44 \geq 1.2$

经校验灵敏度均符合要求

(3) 电流继电器的选择选择

$$I_{dzj} = \frac{186.3}{200/5} = 4.66(\text{A})$$

电流继电器选择 DL—7 型电流继电器

时间继电器选择 DS—30 型时间继电器

信号继电器选择 DX—17 型信号继电器

中间继电器选择 DZ—200 型中间继电器

人为延时是 2.0s，考虑到线路中避雷器的放电时间 0.04~0.06s

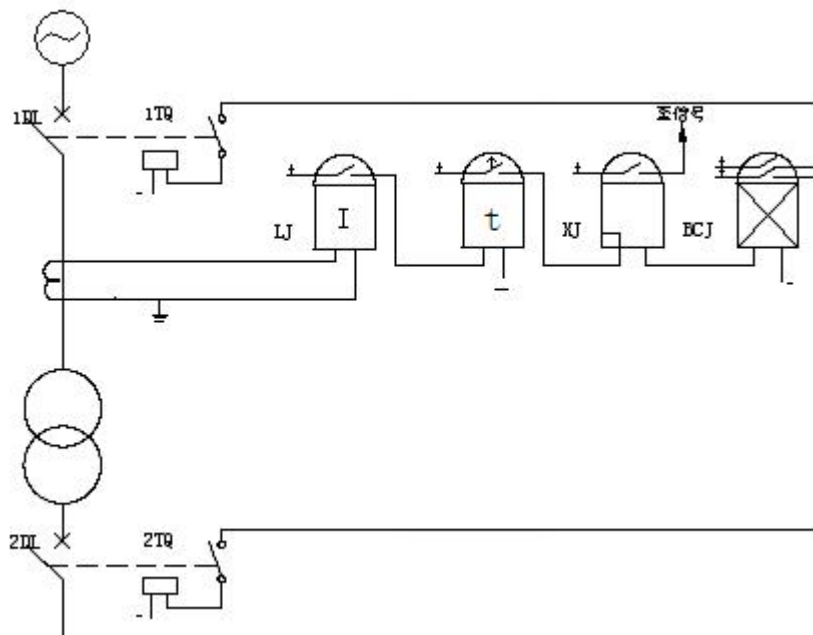


图 5-3 过电流保护原理接线图

5.1.4 变压器的过负荷保护

(1) 原理及接线图

- 1) 原理：变压器可能出现过负荷的情况，因此需装设过负荷保护。过负荷保护装置只采用两个电流继电器接于两相电流回路中，经过较长的延时后发出信号。
- 2) 过负荷保护原理接线图如图 5-4 所示。

(2) 过负荷保护的整定计算^[4]

按躲过变压器的额定电流进行整定

$$I_{dz} = \frac{K_K}{K_h} \cdot I_{et}$$

式中 K_K ——可靠系数，取 1.05；

K_h ——返回系数，取 0.85；

I_{et} ——保护安装侧变压器的额定电流。

$$I_{dz} = \frac{K_K}{K_h} \cdot I_{et} = \frac{1.05}{0.85} \times \frac{4000}{\sqrt{3} \times 35} = 81.5(\text{A})$$

(1) 电流继电器的选择

$$I_{dzj} = \frac{81.5}{600/5} = 2.97(\text{A})$$

电流继电器选择 DL—7 型电流继电器

时间继电器选择 DS—30 型时间继电器

过负荷保护的延时应比变压器过电流保护时限长一个时限阶段，取 2.5s

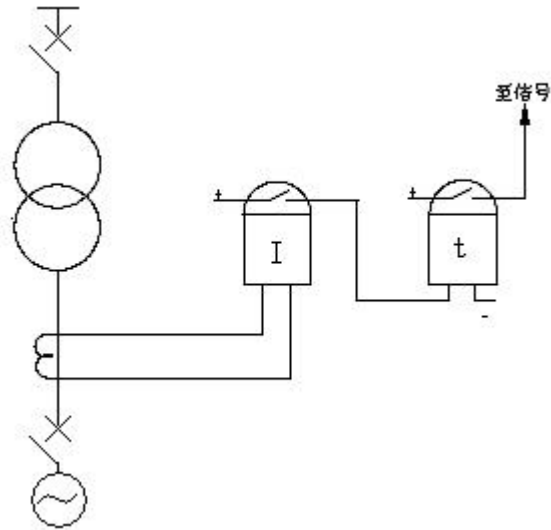


图 5-4 过负荷保护原理接线图

5.2 主变低压侧断路器的保护的配置与整定

本设计装设限时电流速断作为母线的主保护和出线无时限速断保护的后备保护，保护出线的全长；装设定时限过电流保护作为出线主保护拒动的远后备保护，保护出线的全长。

（1） 限时电流速断保护的整定与校验

1) 整定计算

$$I_{dt}'' = K_K I_{dz}'_{下一条} = 1.1 \times 0.948 = 1.043(\text{kA})$$

2) 灵敏度校验

$$K_{lm} = \frac{I_{d2.min}^{(2)}}{I_{dz}''} = \frac{3180/2}{1043} = 1.524 > 1.5$$

满足要求

人为延时是 1.0s，考虑到线路中避雷器的放电时间 0.04~0.06s

（2） 定时限过电流保护的整定与校验

1) 整定计算

$$I_{dt}''' = \frac{K_k''' K_{zq}}{K_{fn}} I_{f \max} = \frac{1.15 \times 1}{0.85} \times 404.97 = 547.9(\text{A})$$

$$K_{lm(远)} = \frac{I_{d,下一条}^{(2)}}{I_{dz}''} = \frac{490}{182.4} = 2.69 > 1.2$$

满足要求

人为延时是 1.5s，考虑到线路中避雷器的放电时间 0.04~0.06s

电流继电器选择 DL—7 型电流继电器

电压继电器选择 DY—30 型电压继电器

5.3 10kV 线路保护

5.3.1 10kV 线路保护的设计原则

(1) 10kV 架空线路和电缆线路应装设相间短路保护。保护装置采用两相式接线，通常装设在 A、C 两相上，以保证当发生不在同一出线上的两点单相接地时有 2/3 机会切除一个故障点。

(2) 10kV 线路保护一般以电流速断保护为主，以过流保护作为后备保护。这就是说保护装置采用的是远后备保护方式。

(3) 10kV 线路在以下情况下必须装设电流速断保护。

对变电站来说，当线路上发生短路，变电站母线电压大量降低时，应装设电流速断保护；许延时切除短路电流时，应装设电流速断保护。

5.3.2 线路保护的方案图

线 路 保 护 方 案 图 如 图 5-6 所 示 。

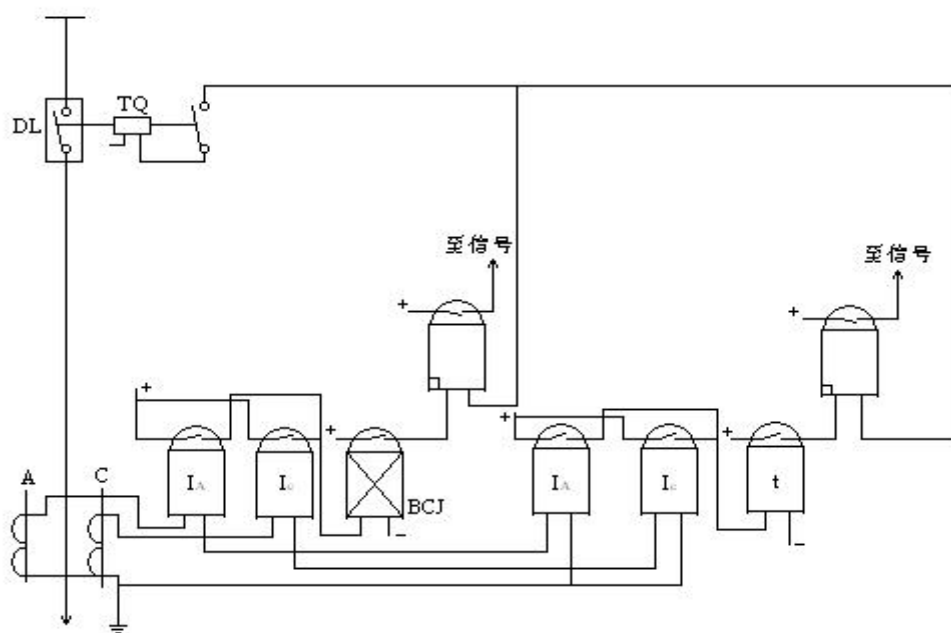


图 5-6 10kV 线路保护接线图

5.3.3 10kV 线路保护设计方案

主保护为瞬时电流速断保护，后备保护为过电流保护。有闪光电源，测量仪表有电度表、电流表，其保护与测量回路如图 5-7 所示，

5.3.4 出线路整定计算

(1) 电流速断保护的整定计算

以出线 1 为例，介绍整定方法。

$$\text{动作电流} \quad I'_{dz} = K'_k \cdot I_{dmsx}^{(3)} = 1.2 \times 0.79 = 0.948(\text{kA})$$

$$I_{dzj} = \frac{I'_{dz}}{n \cdot l_k} \cdot K_{jx} = \frac{0.948}{100/5} \times 1 = 0.049(\text{kA})$$

(其中 K_{jx} 为接线系数，取 1)

$$\text{被保护线路长度} \quad L_{bzx} = \frac{1}{x} \cdot \left(\frac{U_e}{2 \cdot I_{dz}} - X_{zxd} \right)$$

式中 X_{ezd} ——等效电源最大电抗

$$X_{ezd} = (X_{\max} + X_T + X_L) \cdot \frac{10.5^2}{100} = (0.06 + 1.75 + 0.584) \times \frac{10.5^2}{100} = 2.64$$

$$L_{bzx} = \frac{1}{0.4} \times \left(\frac{10}{2 \times 0.948} - 2.64 \right) = 6.6(\text{km})$$

灵敏度校验 $K_{lm1} = \frac{L_{bzx}}{L_{AB}} = \frac{6.6}{15} \times 100\% = 43.9\% \geq 15\%$ 满足整定范围

速断保护的動作時間只取決於繼電器本身固有動作時間，人為延時是零，考慮到線路中避雷器的放電時間 0.04~0.06s

(2) 過電流保護的整定計算

過電流保護的整定計算按躲開在最大負荷時變電站具有最大動作電流的保護裝置的動作電流來進行

$$I_{dz}''' = \frac{K_k \cdot K_{zq}}{K_h} \cdot \frac{S_{js}}{\sqrt{3}U_e} = \frac{1.2 \times 2}{0.85} \times \frac{994.5}{\sqrt{3} \times 10} = 162.125(\text{A})$$

$$I_{dzj}''' = \frac{I_{dz}'''}{n \cdot l_h} \cdot K_{jx} = \frac{162.125}{100/5} \times 1 = 8.11(\text{A})$$

灵敏度校验 $K_{lm} = \frac{I_{d\min}^{(2)}}{I_{dz}'''} = \frac{0.61 \times 10^3}{162.125} = 3.76 > 1.5$ 满足灵敏度要求

動作時限為 0.5s

其餘五條出線路的整定計算方法與此線路相同，因此計算過程不再重複，將整定結果附在表中，見表 5-2。

5-2 10kV 出線路整定計算列表

線路名稱	電流速斷保護的整定		過電流保護的整定	
	整定電流 (kA)	靈敏度係數 (%)	整定電流 (A)	靈敏度係 (%)
線路一	0.948	43.9	162.125	3.76
線路二	0.756	49.67	189.76	2.582
線路三	1.056	40.29	26.08	25.69
線路四	1.056	40.29	153.89	4.354
線路五	1.128	37.35	123.49	5.749
線路六	0.912	44.41	103.274	2.616

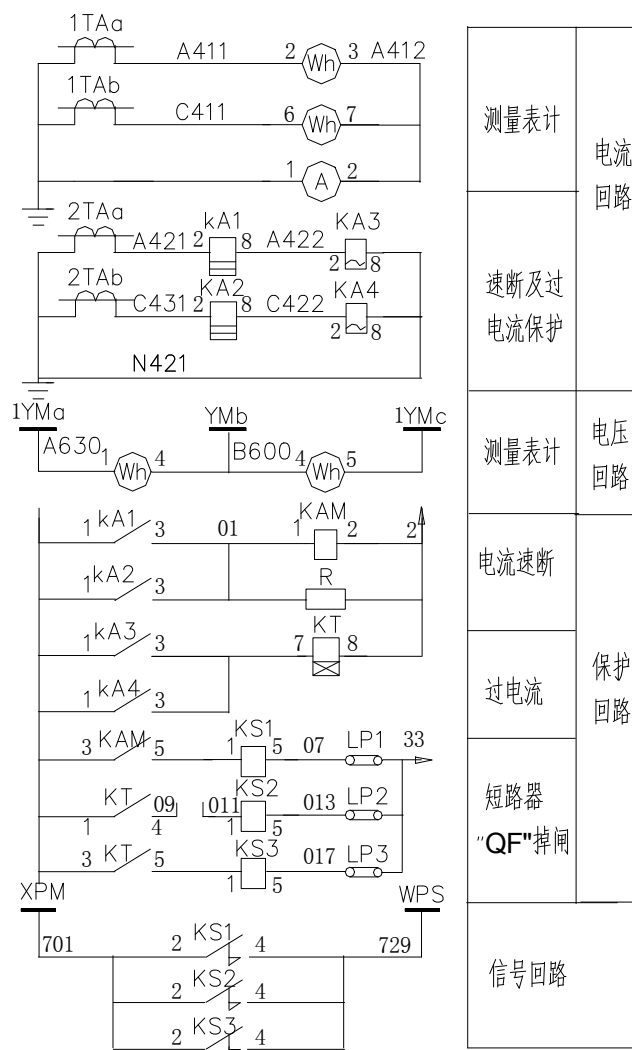


图 5-7 10kV 侧保护与测量回路图

5.4 电力电容器的保护

本所采用集合式并联电容器 BFM 系列进行无功补偿，以提高电网功率因数、减少线损、改善电压质量，充分发挥发电、供电设备的效率，为此要求对电容器进行保护。

5.4.1 保护装置的选择

在电容器的运行中可能会发生故障而引起电容器爆破和火灾事故，故其主要的故障形式有：电容器和短路器之间连接线短路；电容器的内部故障及其引出线上短路及个别电容器的切除引起电压升高等。为了防止电容器爆破及火灾事故，保证安全运行，必须装设相应的保护。

电容器的保护包括内部保护和外部保护两个方面，内部保护作为单台电容器内部击穿时的保护，使电容器内部串联元件未全部击穿之前将其从电源上断开；本设计装设限时过流保护和过压保护作为外部短路故障保护，并作为内部故障的后备保护。内部保护采用熔断器保护单台电容器，其保护接线如图 5-8 所示

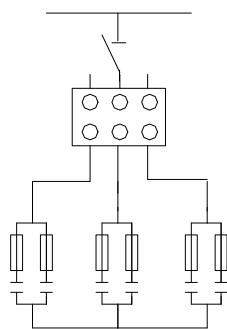


图 5-8 熔断器保护接线图

短路保护用电流互感器与电流继电器和信号继电器来实现。由于多数电容器只允许在不超过 1.05 倍额定电压下长期运行，只能在 1.1 倍额定电压下短期运行（一昼夜），所以过电压保护也必不可少。另一方面，在电容器母线上安装一组避雷器，以泄放操作等原因引起的瞬态过电压。保护电容器中，由于无间隙氧化锌避雷器的性能优于有间隙的碳化硅避雷器，所以多采用无间隙氧化锌避雷器 Y5WZ 系列。为确保断开电容器上存在的电压在 1min 内降至 50V，以保证人身和设备的安全，应在外部并联放电装置。利用电压互感器二次串入灯泡作为放电器。电容器组保护原理接线图如图 5-9 所示。

5.4.2 整定计算

(1) 限时限过电流保护

$$\text{保护装置的动作电流 } I_{dzj} = K_K \cdot \frac{I_{ec}}{n_l} = 2 \times \frac{600 / (\sqrt{3} \times 10)}{100/5} = 3.46(\text{A}), \text{ 取 } 4 \text{ A}$$

$$\text{保护装置一次动作电流 } I_{dz} = I_{dzj} \cdot \frac{n_l}{K_{jx}} = 4 \times \frac{100/5}{1} = 80(\text{A})$$

$$\text{保护装置的灵敏系数 } K_m = \frac{I_{d\min}^{(2)}}{I_{dz}} = \frac{1.99 \times 10^3}{80} = 24.9 > 1.5, \text{ 满足灵敏度要求。}$$

电流继电器选择 DL—7 型电流继电器

时间继电器选择 DS—30 型时间继电器

中间继电器选择 DZ—200 型中间继电器。

动作时限为 0.5

(2) 过电压保护

保护装置动作电流（按母线电压不超过 110% 额定电压值整定）

$$U_{dzj} = 1.1 \cdot U_{e2} = 11(\text{V})$$

保护装置动作于信号或带 3~5 分钟时限动作于跳闸。

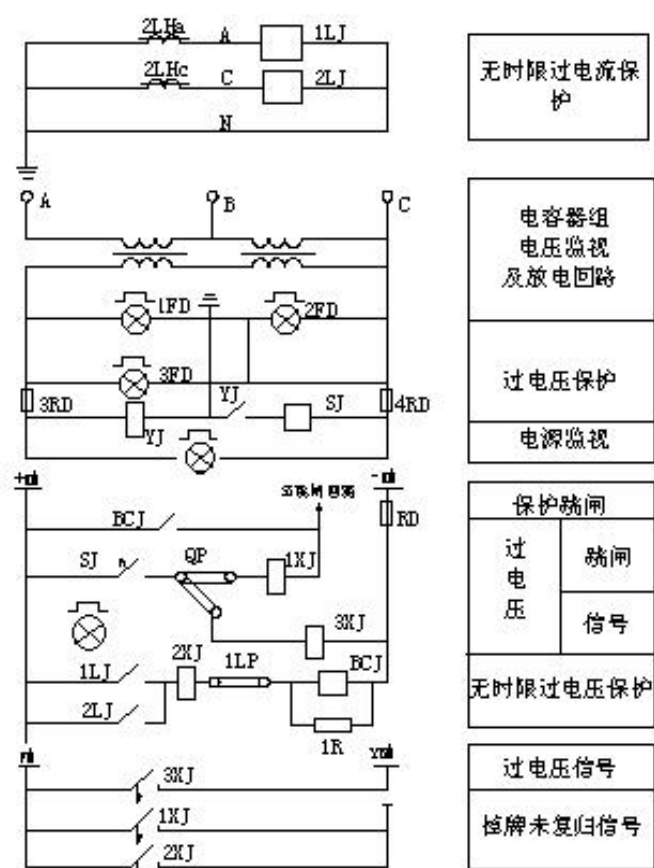


图 5-9 电容器组保护原理接线图

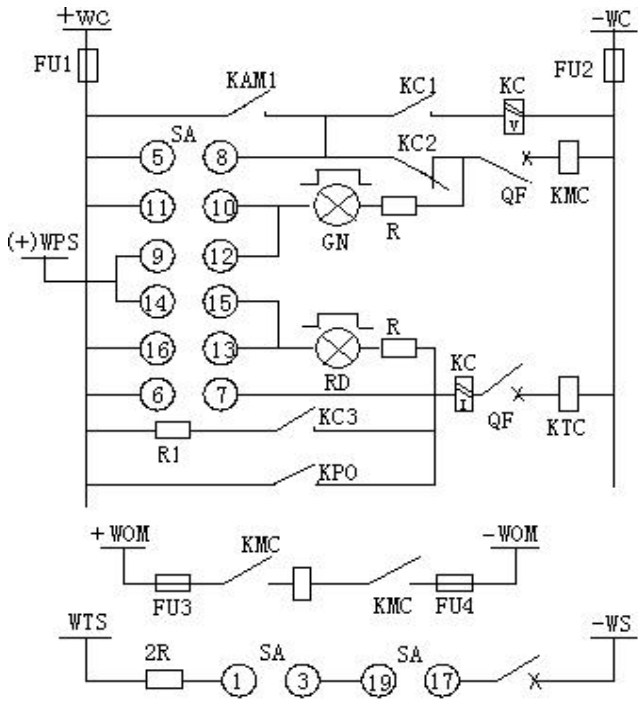
6 二次接线

为了保证变电站的经济、安全运行和操作管理的方便，需要装设一系列辅助电气设备，如监察测量仪表、控制及信号器具、继电保护装置、自动装置、远动装置等，这些设备通常由电流互感器、电压互感器、蓄电池组或所用低压电源供电，表明它们互相连接关系的电路称为二次接线。本部分设计主要针对断路器的控制和信号回路、中央信号装置及直流系统和直流系统的绝缘监察装置的设计。

6.1 断路器的控制和信号回路

断路器的控制回路应能满足如下要求：

- (1) 应能进行手动跳、合闸和由继电保护与自动装置实现自动跳、合闸。并且当跳、合闸操作完成后，应能自动切断跳、合闸脉冲电流；
- (2) 应有防止断路器多次和闸的“跳跃”闭锁装置；
- (3) 应能指示断路器的合闸与跳闸位置状态；自动跳闸或合闸应有明显的信号；
- (4) 应能监视熔断器的工作状态及跳、合闸回路的完整性；
- (5) 控制回路应力求简单可靠，使用电缆芯数目最少。本所采用灯光监视的断路器控制如图6-1所示。



6-1 灯光监视的断路器控制接线图

6.2 中央信号控制

中央信号装置由事故信号与预告信号两部分组成。当断路器发生事故跳闸时，起动事故信号，当发生其它故障及不正常运行情况时（例如绝缘不良、设备过负荷、温度过高等）起动预告信号。每种信号装置都由灯光信号和音响信号两部分组成。灯光信号是为了便于判断发生故障的设备及故障的性质；音响信号是为了唤起值班人员的注意。为了区分是发生了事故还是一般故障，两种信号装置采用不同的音响元件。事故音响信号采用蜂鸣器 FM 发出音响，而预告信号则采用警铃 BJ 发出音响。中央信号装置通常装设在主控室的中央信号屏上。

在本所装设能重复动作且能复归的中央事故信号和预告信号装置。附图六（一）为利用 ZC-23 型冲击继电器构成的能重复动作且能复归的中央事故音响装置接线图。

其原理如下：

当 WTS 小母线与 WS 小母线之间有不对应回路接触时，在脉冲变流器 BL 一次绕组中有电流流过。在一次绕组中感应出脉冲电势使执行元件 KR1 动作。KR1 动作后其常开触点闭合，起动中间继电器 KR2（亦为干簧继电器）KR2 有三对常开触点，其中 KR2 与 KR1 的触点并联，以实现自保持。因为 KR1 继电器在 BL 二次绕组中的脉冲电势消失后即返回，KR2-2 起动蜂鸣器 FM，KR2-3 起动时间继电器 KT，KT 是为了自动解除音响而设，经整定时限后，KT 的延时触点闭合，起动中间继电器 KAM1，KAM1 的常闭触点切断中间继电器 KAM 的线圈回路，使其返回，于是音响停止，整套装置复归至原来状态。

自动解除音响用的时间继电器 KT 及中间继电器 KAM1 是事故信号与预告信号公用的。中间继电器 2KAM 的触点是预告信号回路引来的，按钮 1YA 是供试验蜂鸣器用的。SSR 为音响解除按钮。

附图六（二）为 ZC-23 型冲击继电器构成的能重复动作且能复归的中央瞬时预告信号装置接线图。

其原理如下：

图中 WTS1 和 WTS2 为瞬时预告信号小母线。一般将其布置在中央信号屏和各个控制屏的顶部。而光字牌 HL 则布置在屏的正面。当设备发生故障及不正常运行状态时，相应的保护装置动作，其触点将信号正电源+WS 经光字牌 HL 的灯泡电阻引至预告信号小母线 WTS1 和 WTS2 上，转换开关 SA 平时是在“工作”位置，其触点③④和⑤⑥是连通的，其余触点都是断开的。此时冲击继电器的脉冲变流器 BL 的一次绕组中有电流流过。KR 继电器动作，往后整个装置的动作程序与能重复动作的事故信号装置基本相同。只是用警铃 BL 代替了蜂鸣器 FM，以示区别，除了铃声之外，还通过光字牌发出灯光信号。当光字牌内部的灯泡点亮时，在其玻璃框内可以见到表示故障性质的文字，如“过负荷”、“瓦斯保护动作”等。值班人员听到铃声后，可以根据点亮的光字牌来判断发生故障的设备及故障的类型。

6.3 直流系统

为了供电给控制回路、信号回路、继电保护和自动装置回路以操作电源，在发电厂和大中型变电站中通常都装有蓄电池组。因为蓄电池组是一种独立的电源，它不受交流电源的影响，而当电力系统发生事故时，甚至在全所交流电源全部停电的情况下，仍能保证控制信号。继电保护和自动装置能连续可靠地工作，同时还可以保证事故照明用电。

6.3.1 蓄电池数目的确定

按浮充电方式运行的蓄电池组在浮充电状态下每个蓄电池上的电压约为 2.15 伏（最大变动范围为 2.1~2.2 伏）为了当浮充电整流器发生故障而断开后，仍能保持直流母线上的电压等于额定值起见，也应采用带端电池调整器的连线。蓄电池数目的选择与充电——放电运行方式下相同，要求每个蓄电池上电压约为 1.95 伏，所以 220 伏额定电压的蓄电池组为 $230/1.95 \approx 118$ 个，参加浮充电的蓄电池数目为 $230/2.15 \approx 108$ 个，不参加浮充电运行的蓄电池因自放电得不到补偿而易于老化。因此必须定期地（通常为 0.5~1 个月）对其充电一次，为避免其它蓄电池发生过充电现象，可使充电电流等于负荷电流。

6.3.2 蓄电池直流系统接线图

蓄电池直流系统接线图如图 6-2 所示。

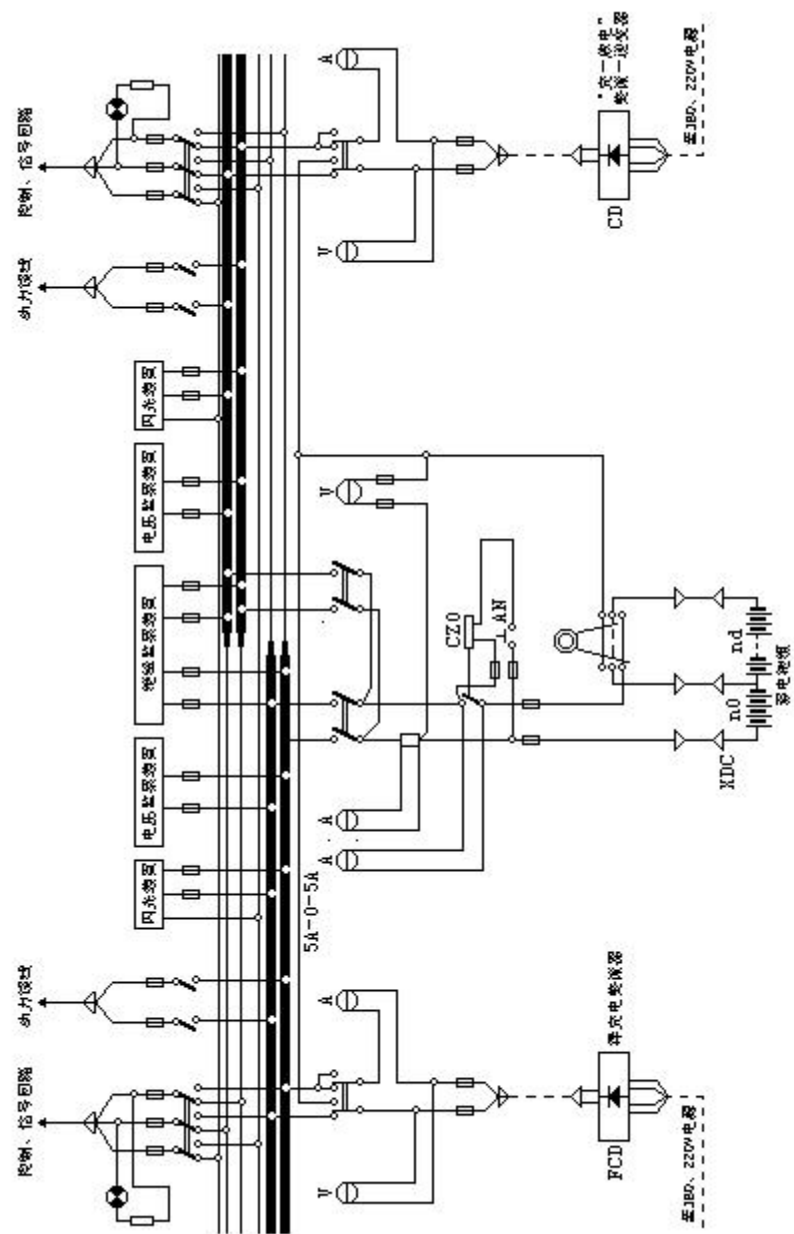


图 6-2 蓄电池直流系统接线图

6.4 绝缘监察装置

变电站的直流系统比较复杂，而且通过电缆线路与屋外配电装置的端子箱、操动机构等相连接。发生接地机会较多。直流系统发生一点接地时，由于没有短路电流流过，熔断器不会熔断，仍能继续运行。但是，这种接地故障必须及早发现，否则当发生另一点短路接地时，有可能引起信号回路、控制回路、继电保护回路和自动装置回路的不正确动作，可见装设经常性的直流系统绝缘监察装置是十分必要的。

直流系统的绝缘监察装置接线图如图 6-3 所示。

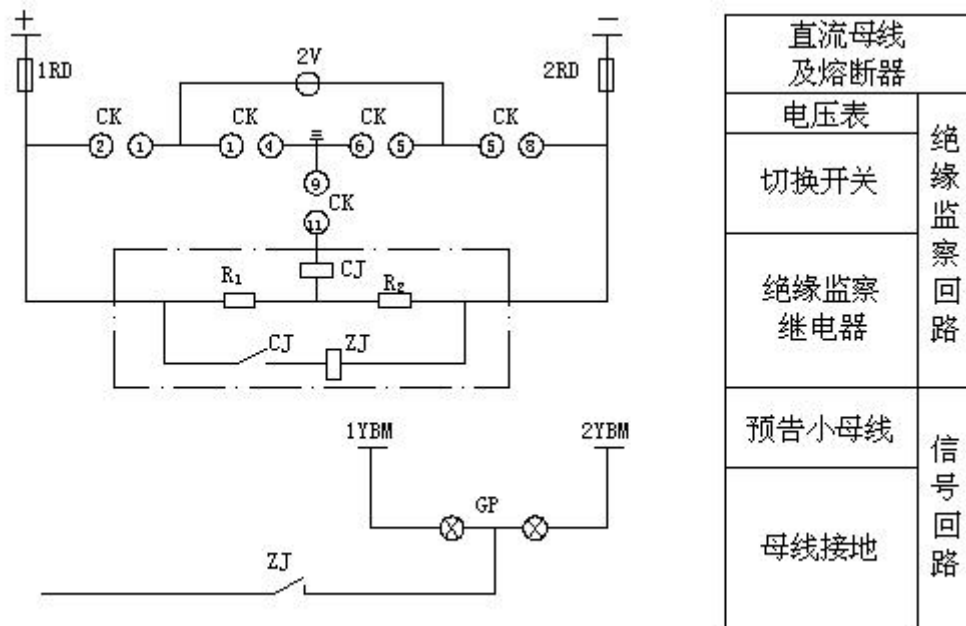


图 6-3 直流系统绝缘监察装置接线图

6.4.1 10kV 母线绝缘监察装置

在变电站的母线上装有绝缘监视装置，其原理是利用单相接地时出现的零序电压，用于小接地电流系统作绝缘监视的电压互感器的变比为 $10000/100/100/3$ ，单相接地时电压互感器开口三角绕组输出 $3U_0$ ，其值为 $100V$ ，若经过渡电阻接地，零序电压较低。绝缘监视采用过电压继电器，其动作电压为 $25\sim30V$ ，继电器动作后发出信号，寻找故障线路是逐条拉开每回出线，故障线路被拉开后，接地信号消失，否则继续寻找。为了减少停电时间，采用自动重合。绝缘监视接线图如图 6-4 所示。

选择 DY-53/60 型电压继电器，最大整定电压为 $60V$ ，返回系数为 0.8

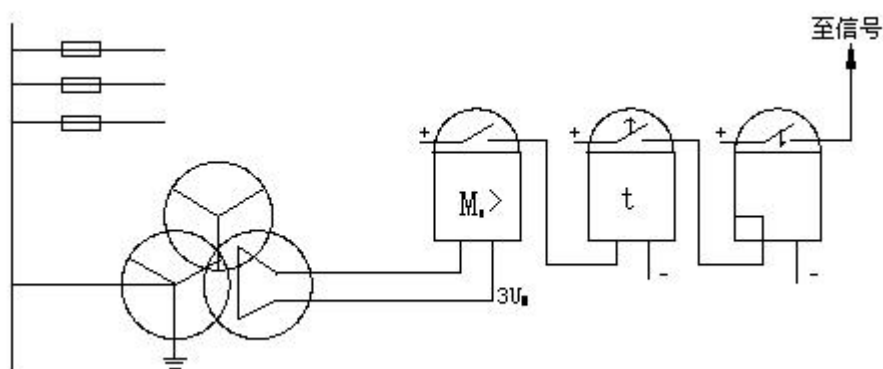


图 6-4 母线绝缘监察装置接线图

7 保护接地装置

1、电气设备某些部位（如电器或电机的外壳，配电装置的构架等）在正常运行时是不带电的，但在发生故障时就会带电，已造成灼伤和电击等人身事故。严重的灼伤和电击都有致命的危险，电击危险性最大，一般死亡事故多数是由电击造成的。为了限制电气设备故障时作用人体的电压，从而达到限制流过人体的电流保护人员安全的目的，工程上将这些正常工作时不带电而绝缘损坏时有可能带电的部位与大地作良好的电气连接。

2、电气设备根据接地装置的作用和目的可分：

- ① 工作接地：电力系统正常运行需要将网络的某一点接地，稳定电网对地电位，使对地绝缘降低及有利于实现继电保护措施。
- ② 保护接地：为了人身安全将高压电气设备的金属外壳接地，保护人员的安全。
- ③ 防雷接地：是为了减小电流通过接地装置时电位升高。

7.1 所内应当接地的部分

变压器、电器、照明设备的底座和外壳；

电气设备传动装置；

(1)互感器的二次绕组，但继电保护方面另有规定者除外；

(2)配电屏与控制台框架；

(3)屋外配电装置的金属和钢筋混凝土架构以及带电部分的金属遮拦。

7.1.1 接地装置的计算

35kV 为中性点不接地系统，其接地电阻可根据单相接地电容电流来确定。

架空线路长度： $L_j = 20\text{km}$

$$I_{jd} = \frac{U_{1e} \times L_j}{350} = \frac{35 \times 20}{350} = 2(\text{A})$$

故接地电阻为：

$$R_{jd1} \leq \frac{120}{I_{jd}} = \frac{120}{2} = 60(\Omega)$$

10kV 为中性点不接地，其线路长度。

$$L_j = 15 + 20 + 13 + 13 + 12 + 16 = 89(\text{km})$$

$$I_{jd} = \frac{U_{1e} \times L_j}{350} = \frac{10 \times 89}{350} = 2.543(\text{A})$$

故接地电阻为：

$$R_{jd2} \leq \frac{120}{I_{jd}} = \frac{120}{2.543} = 47.19(\Omega)$$

在根据 $S_k \geq 0.3R_{cj} + 0.1h$ ($S_k \geq 5$)

取 $R \geq 10\Omega$

所用变 380/220 中性点接地，接地电阻要求值为 4Ω ，其共用接地装置的接地电阻应小于 4Ω 。

故接地电阻应取 $R_d = 4\Omega$

(2) 计算人工接地电阻 R_{rw}

人工接地网与自然接地体是并联的，并联后总电阻应达到 $R=4\Omega$ ，所以人工接地电阻为

$$R_{rw} = \frac{R_z \cdot R}{R_z - R} = \frac{20 \times 4}{20 - 4} = 5(\Omega)$$

(自然接地体的接地电阻 $R_z = 20\Omega$)

由于共用一个接地装置，故应取 $R_{rw} = 4\Omega$

(3) 计算单根垂直接地体的接地电阻 R_c

土壤电阻率 $\rho = \rho_0 \cdot \Psi$ ，由查表得 $\Psi = 1.5$ ，则 $\rho = 90 \times 1.5 = 135\Omega \cdot m$ 。由于土壤电阻率

不高，故人工接地装置以垂直接地体为主，上端用规格为 $4 \times 10\text{mm}$ 扁钢连接，构成环路式接地装置。钢管上端埋入土中深度为 0.8m 垂直接地采用长 $L=2.5\text{m}$ ，直径 $d=60 \times 10^{-3}\text{m}$ 的钢管。单根接地体的接地电阻为

$$R_c = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} = \frac{135}{2\pi \times 2.5} \ln \frac{4 \times 2.5}{60 \times 10^{-3}} = 43.97(\Omega)$$

(4) 计算接地体的根数 n 接地体的根数 n 假设钢管之间的距离 $a=7.5\text{m}$

则 $a/l = 3$ ，根据 $R_c / R_{rw} = 43.97 / 4 = 10.99$ 初选 $n=11$ 根

在查表得 $\eta_0 = 0.74$ 则

$$n = \frac{0.9R_c}{R_{rw}\eta_0} = \frac{0.9 \times 43.97}{4 \times 0.74} = 13.37 \approx 14(\text{根})$$

决定选 15 根钢管，验算人工接地电阻，查表得 $\eta_0 = 0.67$

则

$$R_{rw} = \frac{0.9R_c}{n\eta_0} = \frac{0.9 \times 43.97}{15 \times 0.67} = 3.94 (\Omega)$$

满足人工接地电阻 $R_{rw} = 4 \Omega$ 的要求。

3、校验接地线的热稳定

$$S \geq \frac{I_d}{70 \times 10^6} \sqrt{t} = \frac{2500}{70 \times 10^6} \sqrt{1} = 35.7 (\text{mm}^2)$$

它小于采用 $4 \times 10 = 40 \text{ mm}^2$ 的扁钢，所以采用其接地满足要求。

(5)35kV 配电区每隔 9m 加设一条均压带以便电位分布均匀。均压带采用截面不小于 24 mm^2 的扁钢，埋深为 0.6m。由于接地电阻的计算引入不少假设条件，所以在现场敷设接地装置以后，必须对接地电阻加以实际测量和核算。如果不满足要求，必须补埋接地体，达到设计要求。

接地装置图见附图四。

8 防雷保护

8.1 防雷保护的原因

变电站是电力系统防雷的重要保护部位，如果发生雷击现象，将会造成大面积的停电，因此变电站装设防雷保护措施是非常必要的，并且要求防雷保护措施必须十分可靠。雷电所引起的大气过电压将会对电气设备和变电站的建筑物产生严重的危害，在变电站和高压输电线路中，必须采取有效的防雷措施，以保证电气设备的安全。

变电站设计过程中，要考虑过电压的影响。过电压分外部过电压（大气过电压）和内部过电压。内部过电压一般由开关操作，负荷变化引起的这种过电压多在电器设备选择时予以考虑，而大气过电压由雷电引起，其电压可达到额定电压的百倍，甚至千倍，对人或设备危害极大，所以必须采用保护措施。在防雷保护设计中，应根据雷电活动情况、地形、地质、气象情况以及电网结构和运行方式等，结合运行经验进行全面分析和技术经济比较，做到技术先进、经济合理、符合电力系统和电力设备安全经济运行的要求。变电站遭受雷击主要来自两方面：一，雷直击变电站；二，架空线路的感应雷过电压和直击雷过电压形成的雷电波沿线侵入变电站。

8.2 变电站的直击雷保护

1. 保护对象：

- 1) 35kV 和 10kV 侧配电装置
- 2) 屋外安装的主变及其它电器设备
- 3) 室内装置

2. 保护措施

对于 35kV 及以下的变电站，其绝缘水平较低，必须装设独立的避雷针，并满足不发生反击的要求。

3. 保护原理

避雷针是金属制成，比被保护对象高，并具有良好的接地装置，作用是将雷吸引到自己身上，并安全导入地中，从而保护附近比它矮的设备，建筑免受雷击。

4. 避雷针的保护与选择

(1) 具体要求：

1) BLZ 应有接地装置，接地电阻在 25Ω 以下，与主接地网距离应保持 3m 以上，即 $S_d > 3m$ ，且要高于构架 5m 以上，即 $S_k > 5m$ 。否则应铺碎石或沥青路面（厚 5~8 cm），以保证人身不受跨步电压的危害。

2) 被保护设计距 BLZ 不能太，也不能太近。太近会出现反击现象，太远则保护范围。

3) 为了防止电压，BLZ 设在不经常出入的地方。

4) 本变电站占地面积 $30 \times 50 = 1500m^2$ ，共需架设 2 个等高的 BLZ

(2) BLZ 高度的计算

根据所选各种电气设备的总体布局，共设计两根避雷针比较适宜。安装在变电站的两侧。被保护的最高高度门型框架为 7m，两针之间的距离 D 为 47m，因两根避雷针保护范围比各自的保护范围迭加起来要大。单针时，雷电受针的吸引往往可以被吸引离针较近的地面上。但在两针联合保护时，处在

两针之间的上空，雷电因受两针吸引难于击于离针较近的地面上。

两针保护为下图：

两针外侧的保护范围为：

$\therefore b_x \geq 15\text{m}$ 时才能满足保护范围

$$\therefore b_x = 1.5 \cdot (h_0 - h_x) \geq 15 \quad \text{即} \quad h_0 - h_x \geq 10 \quad (h_x = 7)$$

因此 h_0 至少为 17m $h = h_0 + \frac{D}{7 \cdot P} = 17 + \frac{47}{7} = 23.7(\text{m})$ 式中 P 取 1

故选择避雷针高度为 25m

$$h_0 = h - \frac{D}{7 \cdot P} = 25 - \frac{47}{7} = 18.29(\text{m})$$

$$r_x = (1.5 \cdot h - 2 \cdot h_x) \cdot P = (1.5 \times 25 - 2 \times 7) \times 1 = 23.5(\text{m})$$

$$b_x = 1.5 \cdot (h_0 - h_x) = 1.5 \times (18.29 - 7) = 16.94(\text{m})$$

长度为 $D + 2r_x = 47 + 2 \times 23.5 = 94\text{m} > 50\text{m}$

宽度为 $2b_x = 2 \times 16.94 = 33.88\text{m} > 30\text{m}$

根据以上计算可知，两根避雷针的安装基本保护全所。故选避雷针的高度为 25m。

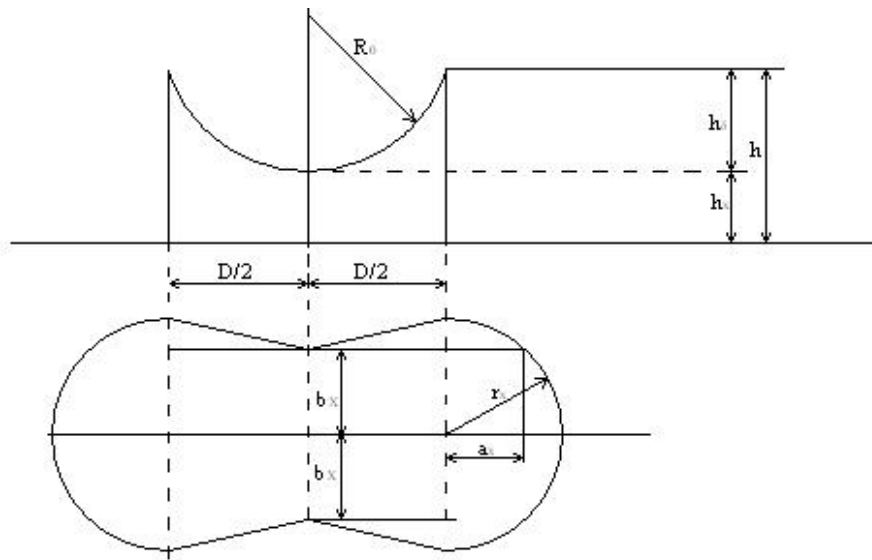


图 8-1 防雷保护图

8.3 避雷器的选择

根据额定电压来选择避雷器

(1)35kV 母线侧避雷器选用 Y5WZ-41/131 型

其技术参数见表 8-1。

表 8-1 Y5WZ-41/131 型避雷器参数

型号	额定电压 (kV)	避雷器额定电 压(kV)	持续运行电 压(kV)	4 μ s 冲击电 流(kA)	雷电冲击残 压(kV)
Y5WZ-41/131	35	41	23.4	40	≤ 131

电压互感器线路用避雷器选用 Y5WZ-12.7/45 型

其技术参数见表 8-2。

表 8-2 Y5WZ-12.7/45 型避雷器参数

型号	额定电压(kV)	避雷器额定 电压(kV)	持续运行电 压(kV)	4 μ s 冲击电 流(kA)	雷电冲击残压 (kV)
Y5W-12.7/45	10	12.7	6.6	40	≤ 45

电容器组保护用避雷器选用 Y5W-12.7/45 型

其技术参数见表 8-3。

表 8-3 Y5WZ-12.7/45 型避雷器参数

型号	额定电压 (kV)	避雷器额定电 压(kV)	持续运行电 压(kV)	4 μ s 冲击电 流(kA)	雷电冲击残 压(kV)
Y5W-12.7/45	10	12.7	6.6	40	≤ 45

10kV 出线侧避雷器选用 Y5WZ-12.7/45 型

其技术参数见表 8-4。

表 8-4 Y5WZ-12.7/45 型避雷器参数

型号	额定电压 (kV)	避雷器额定电 压(kV)	持续运行电 压(kV)	4 μ s 冲击电 流(kA)	雷电冲击残 压(kV)
Y5WZ-12.7/45	10	12.7	6.6	40	≤ 45

8.4 变电站侵入波的保护

输电线路出现的大气过电压有两种，一种是雷击于线路上引起的为直击雷过电压，另一种是雷直击线路附近地面，由于电磁感应引起的称为感应过电压。利用阀型避雷器以及与阀型避雷器相配合的进线保护段作为配电装置时侵入雷电波的保护。

进线保护段的作用在于利用本身的阻抗来限制雷电流幅值和利用本身的电晕衰耗来降低雷电波陡度，并通过进线段上管型避雷器的作用，使之不超过绝缘配合所要求的数值。因此，配电装置对侵入雷电波的保护设计除了考虑在配电装置内装设阀型避雷器的适当地点外，还必须对线路进线段保护措施提出要求。

对未沿全长装设避雷线的 35kV 架空电力线路，在变电站的进线段 1~2km 长度内，进行侵入

雷电波保护。其保护接线图如图 8-2 所示。

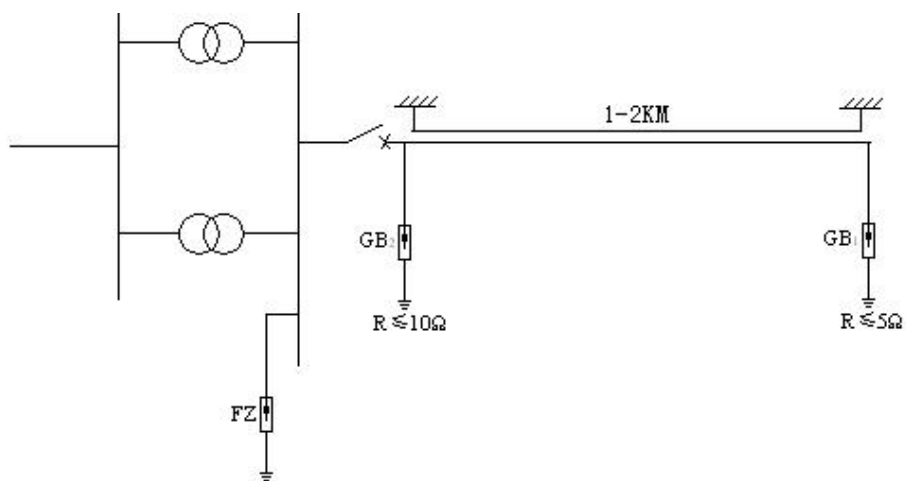


图 8-2 侵入波保护接线图

9 变电站总体布置设计

屋外电气设备全部布置在 450m² 面积的开关场, 10kV 屋内电器设备布置在高压室面积为 150m², 电气主接线的二次设备部分布置也在高压配电室。控制部分及继电保护部分都布置在主控室面积为 60m², 在总面积布置中考虑设备更换和检修的方便, 设置了 3m 宽的回车道。在变电站周围铺设草坪, 全所总占地面积为 1500m²。其总体布置平面图如图 9-1 所示。

所区 35kV 配电装置及主变压器采用露天布置, 10kV 配电装置采用屋内配电装置。根据变电站主厂房对使用功能的要求配置了主控制室、高压室、电容室、检修间及主要生产车间、车库、采暖和生活设施等辅助房间。

电气设备相互之间的距离和布置方式有断面图及平面图反应，其断面图和平面图见附图二和附图三。

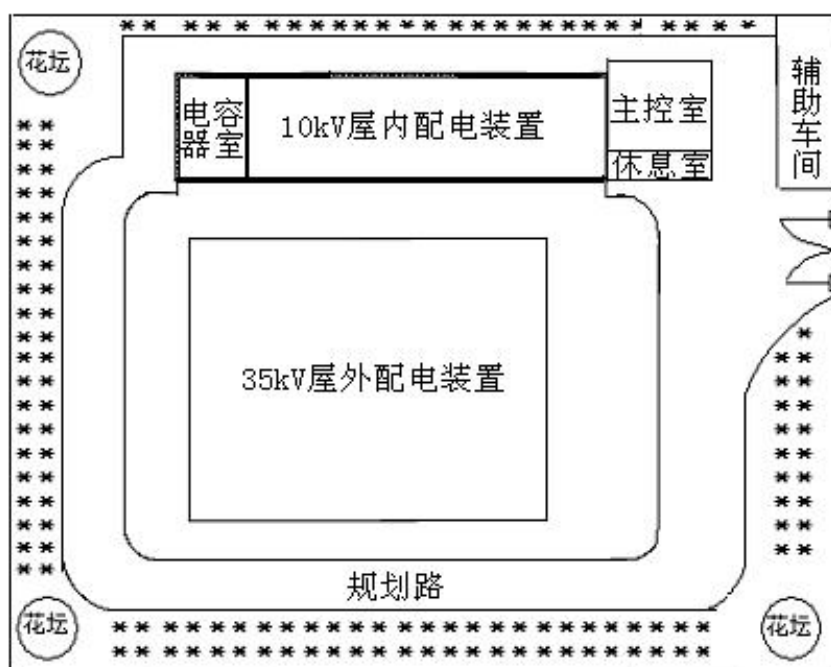


图 9-1 变电站总体布置平面图

10 工程概算

初步预算该变电站电气主设备价格如表 10-1。

表 10-1 电气主设备价格表

设备名称	型号	单价（元）	数量	金额（元）
主变	SZ9-4000/35	418000	2	836000
断路器	LW16-35	99000	9	891000
	ZN3-10	75000	33	2475000
隔离开关	GW4-35D	5460	12	65520
	GN6-10T	3850	66	254100
电流互感器	LCW-35-200/5	8100	10	81000
	LFZ-10-600/5	6000	6	36000
	LFZ1-10-100/5	5000	16	80000
所用变	S9-50/35-0.4	18230	1	18230
熔断器	RW5-35	865	3	2595
	RN2-10	700	6	4200
	BRN-10	900	6	5400
避雷器	Y5WZ-41/131	23000	3	69000
	Y5WZ-12.7/45	4940	22	108680
电压互感器	JDZ6-10	4300	2	8600
电力电容器	BFM-11/ $\sqrt{3}$ -200-1W	30000	6	180000
总计				5115325

结 论

本设计的内容是 35kV 常规变电站电气部分的设计,主要是满足乡镇生活用电和农业灌溉的需要。在查阅了相关资料,并结合当地的实际条件,进行了此次设计,完成了以下设计内容:主变的选择及主接线的设计;短路计算;电气设备的选择及校验;变电站继电保护设计;中央信号系统设计;接地装置及防雷保护设计;变电站平面布置设计

完成的设计图纸如下:①主接线图;②平面布置图;③断面图;④接地装置图;
⑤中央信号展开图;⑥继电保护展开图。

通过本次毕业设计,我不断地完善自己,使自己更进一步的加深了对所学知识的认识和理解。综合运用知识的能力也有了一定的提高,尤其对专业知识有了进一步的深化了解。同时对 Office 软件及 CAD 制图都能够熟练的操作,为我今后的工作奠定了良好的基础。本次设计的 35kV 变电站基本完成了设计任务,通过本次设计我深深地体会到,一个变电站的设计并不单纯是一张图纸,一份说明书而已,它需要解决很多实际复杂的问题,只有将理论和科学与实际相结合,才会显现出强大的力量。在这次设计中,我深深感觉到自己知识的不足和能力的欠缺,需要在以后的工作中进一步提高。这一次设计从选题到起笔,从一稿到定稿,使我对我热爱的未来所从事的事业有了某种清醒的认识。我所学的专业是一个踏踏实实的专业,坚实的理论基础加上塌实的工作作风,相信我一定能成功的。

致谢

在各位指导教师和各位同学的热心帮助下，我圆满地完成了本次设计。这次设计为我今后的工作奠定了良好的基础，同时，使我能够把学到的知识应用到实践当中，也是对我四年来所学专业的一次检验。

在设计过程中得到了来自方方面面的关怀与指导。尤其是指导教师在学习和生活中都给予了很大的帮助，为本次设计的顺利完成耗费了大量的心血，在此表示衷心的感谢。

同时，也对给予我帮助的各位老师表示真诚的感谢。由于本人能力有限，在设计过程中不妥之处在所难免，望广大指导教师给予批评指正。

谢谢！

设计人：

年 月

第五章 设计实例—60kV 变电站设计

1 负荷统计及计算

. 1 1.1 负荷统计列表

负荷统计见表 1-1

表 1-1 负荷统计表

回路 序号	回路 名称	用户类型	常用系数	配电 容量 (kV)	供电 回路	线路长度	备注
1	东城线	居民用电	0.7	800	1	15	二类
		医院	0.6	1000	1		
		商业用电	0.8	700	1		
2	西城线	居民用电	0.8	700	1	18	三类
		商业用电	0.7	900	1		
		食品厂	0.7	950	1		
3	南城线	养殖厂	0.7	600	1	20	三类
		果园用电	0.6	1100	1		
		其它用电	0.6	1000	1		
4	北城线	农业园艺	0.65	700	1	12	三类
		洗煤厂	0.7	800	1		
		商业用电	0.6	900	1		
5	东郊线	居民用电	0.7	850	1	17	三类
		小作坊	0.8	700	1		
		其他用电	0.6	1000	1		
6	西郊线	商贸城	0.75	600	1	23	三类
		居民用电	0.65	900	1		
		其他用电	0.6	1000	1		

1.1.2 负荷计算

采用需用系数法求各用户的计算负荷

$$S_{jsi} = K_m \cdot S_{ei}$$

(1-1)

K_{xi} ——各用户需用系数

S_{ei} ——各用户额定容量

$$S_{js1}=0.7*800+0.6*1000+0.8*700=1720\text{kVA}$$

$$S_{js2}=0.8*700+0.7*900+0.7*950=1855\text{kVA}$$

$$S_{js3}=0.7*600+0.6*1000+0.6*1100=1680\text{kVA}$$

$$S_{js4}=0.65*700+0.7*800+0.6*900=1550\text{kVA}$$

$$S_{js5}=0.7*850+0.8*700+0.6*1000=1755\text{kVA}$$

$$S_{js6}=0.75*600+0.65*900+0.6*1000=1635\text{kVA}$$

$$S_{js.i}=S_{js1}+S_{js2}+S_{js3}+S_{js4}+S_{js5}+S_{js6}=1720+1855+1680+1550+1755+1635=10195\text{kVA}$$

2 主变的选择及主接线的设计

2.2.1 主变台数的选择

根据本变电所负荷中有少量二类负荷的特点，选择两台相等容量的主变压器并列运行。

2.2.2 主变容量的选择

主变压器容量必须满足电网中各种可能的运行方式时的最大负荷的需要，并且要考虑到负荷的发展规划，使所选变压器容量切合实际的需要。

全年计算负荷

$$S_{js} = Kt \sum_{i=1}^8 S_{jsi} (1 + x\%) \quad (2-1)$$

Kt ——同时系数, 0.9

$x\%$ ——线损率, 9%

$$S_{js} = 0.9 * 10195 * (1 + 9\%) = 10001.295 \text{ kVA}$$

最大计算负荷

$$S_{iszd} = S_{js} e^{mn} \quad (2-2)$$

m ——年均负荷增长率, 8%

n ——年数, 5

$$S_{iszd} = 10001.295 * e^{5 * 8\%} = 14920.18 \text{ kVA}$$

2.2.3 主变容量的选择

装设两台等容量主变的变电站, 当一台主变运行时, 可保证 60% 的负荷供电, 所以变压器的额定

容量应满足 60%最大负荷的需要。

$$S_e \geq 0.6 \cdot S_{jszd} = 0.6 \cdot 14920.18 = 8952.11 \text{ kVA}$$

(2-3)

故应取标准容量 $S_e = 10000 \text{ kVA}$

根据以上条件，查手册选择主变的类型为 SF7-10000/63 型三相油浸风冷铜线双绕组无载调压变压器。

表 2-SF7-10000/63 型电力变压器参数

型号	额定容量 (kVA)	额定电压(kV)	损耗(kW)		空载电流(%)	阻抗电压(%)
SF7-10000/63	10000	63	6.3	56.0 16.5	1.1	9.0

2.2.3主接线的设计

1.方案的提出

因变电所只有一处二类负荷，因此对供电可靠性和灵活性要求都不高，所以宜采用单母线简易分段接线。

2.方案的比较

方案一中，当母线故障或检修时，停电局限在一段母线上，非故障段母线可以保证正常供电，当任意一段母线故障或检修时，对重要用户不停止供电。这种接线方式本身简单、经济、方便，同时又克服了一些缺点，使可靠性和灵活性有所提高。方案二中，单母线分段带旁路母线接线的可靠性和灵活性高于单母线分段接线方式，检修出线断路器时，可不停止供电，其可靠性和灵活性更高。但由于本设计中对可靠性及灵活性要求不是很高，并且单母线分段带旁路母线接线操作较繁琐，因此，本设计中选择了单母线分段接线方式。

2.3.1 主接线图

主接线图如图 2-1 所示。

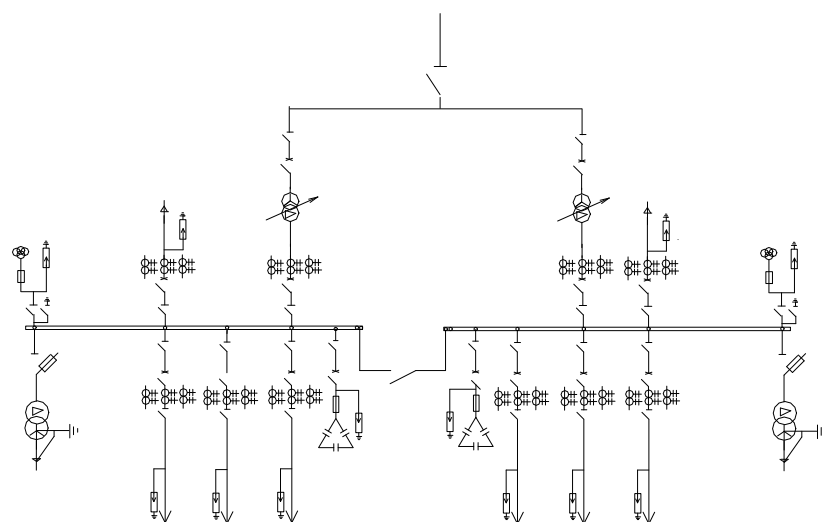


图 2-1 主接线示意图

3.短路电流计算

3.1 短路点的确定

短路点应选在电气主接线上，在最大运行方式下发生短路的短路电流。
短路点的确定如图 3-1 所示。

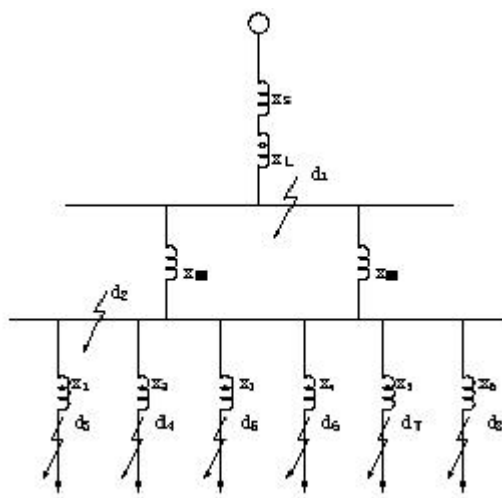


图 3-1 短路点确定

3.2 参数的计算

1.系统阻抗标么

系统最大运行方式下 $X_{min}=0.04$

系统最小运行方式下 $X_{max}=0.06$

2.电源进线阻抗标么值为

$$X_L=0.4 \times 35 \times 100 / 63^2 = 0.35 \quad (3-1)$$

3. 变压器阻抗标么值为

3.2.3.1 当系统处于最小运行方式下时，即一台主变单独运行时

$$X_T = \frac{U_s \%}{100} \times \frac{U_N^2}{S_N} \times \frac{S_B}{U_B^2} \times 10^3 = \frac{9.0}{100} \times \frac{60^2 \times 100}{10000 \times 63^2} \times 10^3 = 0.816$$

(3-2)

3.2.3.2 当系统处于最大运行方式下时，即两台主变并列运行时

$$X_{T\#} = X_T \times 0.5 = 0.82 \times 0.5 = 0.41 \quad (3-3)$$

4. 六条出线阻抗标么值的计算

$$X_1^* = 15 \times 0.4 \times 100 / 10.5^2 = 0.15 \quad (3-4)$$

$$X_2^* = 18 \times 0.4 \times 100 / 10.5^2 = 0.18$$

$$X_3^* = 20 \times 0.4 \times 100 / 10.5^2 = 0.2$$

$$X_4^* = 12 \times 0.4 \times 100 / 10.5^2 = 0.12$$

$$X_5^* = 17 \times 0.4 \times 100 / 10.5^2 = 0.17$$

$$X_6^* = 23 \times 0.4 \times 100 / 10.5^2 = 0.23$$

5. 各支路负荷的电抗标么值

各支路以综合负荷考虑，以额定运行参数为基准，综合负荷的电势和电抗的标么值约 $E''=0.8, X''=0.35$

$$X_{LD1}^* = 0.35 \times 100 \times 10^6 / 1720 \times 10^3 = 20.35 \quad (3-5)$$

$$X_{LD2}^* = 0.35 \times 100 \times 10^6 / 1855 \times 10^3 = 18.87$$

$$X_{LD3}^* = 0.35 \times 100 \times 10^6 / 1680 \times 10^3 = 20.83$$

$$X_{LD4}^* = 0.35 \times 100 \times 10^6 / 1550 \times 10^3 = 22.58$$

$$X_{LD5}^* = 0.35 \times 100 \times 10^6 / 1755 \times 10^3 = 19.94$$

$$X_{LD6}^* = 0.35 \times 100 \times 10^6 / 1635 \times 10^3 = 21.41$$

$$X_{LD7}^* = 1 / (1/X_{LD1}^* + 1/X_{LD2}^* + 1/X_{LD3}^* + 1/X_{LD4}^* + 1/X_{LD5}^* + 1/X_{LD6}^*) = 3.44$$

3.3 短路电流的计算

3.3.1 f_1 点短路

3.3.1.1 最大方式运行时（两台变压器并列运行时）

系统提供的短路电流:

$$I_{dmix}^* = 1/(X_{min} + X_L^*) = 1/(0.04 + 0.35) = 2.56 \quad (3-6)$$

$$I_{dmax} = I_1'' = I^* \times S_B / \sqrt{3} U_{av} = 2.56 \times 100 / 3 \times 63 = 2.35 kA \quad (3-7)$$

负荷提供的短路电流:

$$I_{dLD}^* = 1/(X_{LD}^* + X_{L1}^*) = 1/(0.04 + 0.35) = 2.56 \quad (3-8)$$

$$I_{dLD}^3 = I_{dLDmax}^* \times S_B / \sqrt{3} U_{av} = 0.21 \times 100 / \sqrt{3} \times 63 = 0.19 kA$$

$$\text{短路电流: } I^3 = I_{dmax}^3 + I_{d(1)}^3 = 2.35 + 0.19 = 2.54 kA \quad (3-9)$$

$$I_\infty^2 = \sqrt{3} / 2 \times I_\infty^3 = 2.2 kA \quad (3-10)$$

$$\text{冲击电流 } I_m = 2.55 I_\infty^2 + K_{fm} \sqrt{2} I_{fh} = 2.55 \times 2.35 + \sqrt{2} \times 0.19 = 6.26 kA \quad (3-11)$$

其中: $K_{fm} = 1$

3.1.1.2 最小运行方式下:

系统提供的短路电流:

$$I_{d1min}^* = 1/(X_{max} + X_{L1}^*) = 1/(0.06 + 0.35) = 2.44$$

$$I_{d1min}^3 = I_{d1min}^* \times S_B / \sqrt{3} U_{av} = 2.44 \times 100 / \sqrt{3} \times 63 = 2.24 kA$$

负荷提供的短路电流:

$$I_{dLDmin}^* = 0.8/(X_{LD}^* + X_{T并}) = 0.8/(3.44 + 0.82) = 0.19$$

$$I_{LDmin}^3 = I_{dLDmin}^* \times S_B / \sqrt{3} U_{av} = 0.17 kA$$

$$I_{LDmin}^2 = \sqrt{3} / 2 I_{dLDmin}^3 = 0.15 kA$$

$$\text{短路电流: } I_\infty^3 = I_{d1min}^3 + I_{d1}^3 = 2.24 + 0.17 = 2.41 kA$$

$$I_\infty^2 = \sqrt{3} / 2 I_\infty^3 = 2.09 kA$$

冲击电流:

$$I_m = 2.55 I_\infty^2 + K_{fm} \sqrt{2} I_{fh} = 2.55 \times 2.24 + \sqrt{2} \times 0.17 = 5.95 kA$$

3.3.2 当 f₂ 点短路时

3.3.2.1 最大运行方式下

系统提供的短路电流:

$$I_{d2\max}^* = 1/(X_{\min}^* + X_{L1}^* + X_{T\text{并}}^*) = 1/(0.04 + 0.35 + 0.41) = 1.25$$

$$I_{d2\max}^3 = I_{d2\max}^* \times S_B / \sqrt{3}U_{av} = 0.21kA$$

(3-12)

短路电流:

$$I_{\infty} = I_{d2\max}^3 + I_{dLD\max}^3 = 1.15 + 0.21 = 1.36kA$$

冲击电流:

$$I_m = K_m \sqrt{2}I + K_{fm} \sqrt{2}I_{fh} = 2.55 \times 1.15 + \sqrt{2} \times 0.21 = 3.23kA$$

3.3.2.2 最小方式运行时

系统提供的短路电流:

$$I_{d2\min}^* = 1/(X_{\max}^* + X_L^* + X_{T\text{并}}^*) = 1/(0.06 + 0.35 + 0.82) = 0.81$$

$$I_{d2\min}^3 = I_{d2\min}^* \times S_B / \sqrt{3}U_{av} = 0.74kA$$

$$I_{d2\min}^2 = \sqrt{3}/2 I_{d2\min}^3 = 0.64kA$$

负荷提供的短路电流:

$$I_{dLD\min}^* = 0.8 / X_{LD}^* = 0.8 / 3.44 = 0.23$$

$$I_{dLD\min}^3 = I_{dLD\min}^* \times S_B / \sqrt{3}U_{av} = 0.21kA$$

短路电流:

$$I_{\infty} = I_{d2\min}^3 + I_{dLD\min}^3 = 0.21 + 0.74 = 0.95kA$$

$$I_{\infty}^2 = \sqrt{3}/2 \times 0.95 = 0.82kA$$

冲击电流:

$$I_m^3 = K_m \sqrt{2}I + K_{fm} \sqrt{2}I_{fh} = 2.55 \times 0.74 + \sqrt{2} \times 0.21 = 2.2kA$$

$$I_m^2 = \sqrt{3}/2 I_m^3 = 1.91kA$$

3.3.3 当 f₃ 点短路时

3.3.3.1 最大运行方式下

系统提供的短路电流:

$$I_{d3\max}^* = 1/(X_{\min}^* + X_{LJ}^* + X_{T\text{并}}^* + X_{LD}^*) = 1/(0.04 + 0.35 + 0.41 + 0.15) = 1.05$$

$$I_{d3\max} = I_{d3\max}^* \times S_B / \sqrt{3}U_{av} = 0.96kA$$

(3-13)

系统电流:

$$I_{\infty} = I_{d3\max} = 0.96kA$$

$$I_{d3\max}^2 = \sqrt{3} / 2 I_{d3\max} = 0.83kA$$

冲击电流: $I_m = I_{ch} = 2.55 \times 0.96 = 2.45kA$

3.3.3.2 最小运行方式下

$$I_{d3\min}^* = 1 / (X_{\max}^* + X_{LJ}^* + X_{T\text{单}}^* + X_{LS}^*) = 1 / (0.06 + 0.35 + 0.82 + 0.15) = 0.72$$

$$I_{d3\min}^3 = I_{d3\min}^* \times S_B / \sqrt{3} U_{av} = 0.66kA$$

短路电流: $I_{\infty} = I_{d3\max} = 0.96kA$

$$I_{d3\max}^2 = \sqrt{3} / 2 I_{d3\max} = 0.83kA$$

$$I_{\infty} = I_{d3\max} = 0.96kA$$

$$I_{d3\max}^2 = \sqrt{3} / 2 I_{d3\max} = 0.83kA$$

冲击电流: $I_m^3 = I_{ch} = 2.55 \times 0.66 = 1.68kA$ 其它出线路的短路计算方法同上，其计算结果如表 3-1 所示。

表 3-1 短路计算统计表

短路点	最大运行方式			最小运行方式		
	$I_d^3(kA)$	$I_d^2(kA)$	$I_{ch}(kA)$	$I_d^3(kA)$	$I_d^2(kA)$	$I_{ch}(kA)$
f ₁	2.54	2.2	6.26	2.41	2.09	5.95
f ₂	1.36	1.18	3.23	0.95	0.82	2.2
f ₃	0.96	0.83	2.45	0.66	0.57	1.68
f ₄	0.93	0.81	2.37	0.65	0.56	1.66
f ₅	0.92	0.79	2.35	0.64	0.56	1.63
f ₆	1.00	0.86	2.55	0.68	0.59	1.73
f ₇	0.94	0.82	2.40	0.65	0.57	1.66
f ₈	0.89	0.77	2.27	0.63	0.54	1.61

4 电气设备的选择及校验

4.1 母线的选择及校验

4.1.1 60 千伏侧母线的选择

若一台变压器停止工作, 想满足整个负荷的要求, 则另一台变压器工作在过负荷状态下. 由于 $S_B \geq 0.6 S_{jzd}$, 所以只需一台过负荷为原来的 1.67 倍, 即 $S = 1.67 S_B$, 按通过高压侧母线的最大长期工作电流

$$S_j = \frac{I_{gzd}}{J} \quad (4-1)$$

按经济电流密度选择母线截面

取变压器最大负荷利用小时数=2000—3000 小时, 查表选择 $J = 1.65 \times 10^6 \text{A/m}^2$

$$\therefore S_j = \frac{168.74}{1.65 \times 10^6} = 102.27 \text{mm}^2$$

经计算选择 LGJ-120mm² 型室外钢芯铝绞线, 其 25℃时最大允许持续电流为 347A

4.1.1.1 60 千伏侧母线校验

周围空气实际温度 $\theta = 40^\circ\text{C}$

$$K_\theta = \frac{\sqrt{\theta_y - \theta}}{\sqrt{\theta_y - \theta_0}} = 0.67 \quad (4-2)$$

$$I_{y\theta} = K_\theta \times I_y = 0.67 \times 347 = 231.33 \text{A} \quad (4-3)$$

母线正常运行时的最高温度为

$$\theta_c = \theta + (\theta_y - \theta) \times (I_{gzd}/I_{y\theta})^2 = 40 + (70 - 40)/(168.74/231.33)^2 = 56.58^\circ\text{C} \quad (4-4)$$

短路时间: $t = t_b + t_f + t_g = 1.5 + 0.02 + 0.13 = 1.65 \text{s} > 1 \text{s}$ 。

不考虑短路电流非周期分量的发热, 即不计算 t_z

$\beta = I''/I_\infty = 1$ 从短路电流周期分量等值时间曲线表, 查得周期分量等值时间 $t_z = 1.4 \text{s}$

查表得 $C = 91 \times 10^6$ 按热稳定条件所需最小母线截面为

$$S_{zx} = \frac{I_\infty}{C} \sqrt{t_{dz} \times K_j} = \frac{2.54 \times 10^3}{91 \times 10^6} \sqrt{1.4 \times 1} = 33.64 \text{mm}^2$$

(4-5)

小于所选母线的截面积, 满足热稳定要求, 因所选母线为绞线, 故不需动稳定校验。

4.1.2 10kV 侧母线截面的选择及校验

按通过低压侧母线的最大长期工作电流

$$I_{gzd} = 1.67 \cdot \frac{1.05 \cdot S_e}{\sqrt{3} \cdot U_e} = 1.67 \times \frac{1.05 \times 10000}{\sqrt{3} \times 10} = 1012.41 \text{A}$$

(4-6)

由于低压母线放在室内，考虑集肤效应和散热，选择矩型母线。

按经济电流密度选择母线截面，取变压器最大负荷利用小时数=2000—3000 小时，

$$S_j = \frac{I_{gzd}}{J} = 1012.41 / 1.65 \times 10^6 = 613.58 \text{ mm}^2$$

查表选择 80×8mm² 型矩型母线，其 40℃时最大允许持续电流为 1215A

4.1.2.1 热稳定性校验

短路计算时间 $t_b + t_f + t_g = 1.0 + 0.02 + 0.13 = 1.15 \text{s} > 1 \text{s}$ 。所以，不考虑短路电流分量的影响， $t_{fz} = 0$ 。

经查表得 $t_z = 1 \text{s}$ 。

因为 $I_{\infty}^2 < I_{\infty}^3$ ，所以，按 I_{∞}^3 校验稳定

母线的长期发热温度： $I_{y\theta} = 0.67 \times 1215 = 1069.2 \text{A}$

母线正常运行时的最高温度为：

$$\theta_c = \theta + (\theta_Y - \theta) (T_{gzd} / I_{y\theta})^2 = 66.98^\circ \text{C}$$

查表知， $C = 87 \times 10^6$ 按热稳定条件所需最小母线截面为

$$S_{zx} = \frac{I_{\infty}}{C} \sqrt{t_{dz} \times K_J} = \frac{1.36 \times 10^3}{87 \times 10^6} \sqrt{1 \times 1} = 15.63 \text{ mm}^2$$

小于所选母线截面 80×8mm²，故满足热稳定要求。

4.1.2.2 动稳定性校验

10kV 侧截面为矩形的母线水平放置，相间距离 $a = 0.25 \text{m}$ $L = 1.2 \text{m}$

短路冲击电流 $I_{ch} = 3.23 \text{kA}$

$$\text{母线所受的电动力 } F = 1.73 \times 10^{-7} \times L / a \times I_{ch}^2 = 8.66 \text{N} \quad (4-7)$$

$$\text{母线所受的最大弯矩 } M = FL / 10 = 1.04 \text{N} \cdot \text{m} \quad (4-8)$$

$$\text{截面系数 } W = bh^2 / 6 = 8.53 \times 10^{-6} \quad (4-9)$$

$$\text{母线最大计算应力为 } \sigma_{zd} = M / W = 0.12 \times 10^6 \text{Pa} \quad (4-10)$$

小于铝母线的允许应力 $69 \times 10^6 \text{Pa}$ 故满足动稳定性要求。

经校验所选母线满足热稳定及动稳定要求。

4.2 60kV 侧进线及 10kV 侧出线的选择及校验

4.2.1 60kV 侧进线的选择

其选择同高压侧母线的选择，均选用 LGJ-120mm² 型铝母线

4.2.2 10kV 侧出线截面积的选择及校验

在 6 回出线中，以最大负荷的一条出线路为出线截面积选择的计算依据，其它线路一定能满足。

按通过 10kV 侧出线的最大长期工作电流

$$I_{gzd} = S_{jszd} / \sqrt{3} \times U_c = 0.9 \times 1855 \times (1 + 9\%) \times e^{5 \times 88} / \sqrt{3} \times 10 = 156.74A$$

各出线为架空线路，可选择钢芯铝绞线 LGJ-70, $I_y = 275A$

$$I_{y\theta} = K_\theta \times I_y = 0.67 \times 275 = 184.25A > I_{gzd} = 156.74A$$

所以满足长期工作时的发热条件

4.2.2.1 热稳定校验

短路计算时间: $t_b + t_f + t_g = 0.5 + 0.02 + 0.03 = 0.65S < 1S$,

故考虑短路电流非周期分量的影响

$$\text{当 } t_f = T_a \beta^2 (1 - e^{-2t/T_a})$$

其中 T_a —短路电流非周期分量衰减时间常数，平均值约为 0.05S

当 $T_a = 0.05S$ 和 $t > 1S$ 时，式中的 $e^{-2t/T_a} \approx 0$

所以 $t = 0.7S$ 经查表得 $t_f = 0.65S$ 。 $C = 89 \times 10^6$

母线正常运行时的最高温度 $\theta_c = 61.69^\circ C$

按热稳定条件所需最小母线截面为

$$S_{zx} = 8.4 \text{ mm}^2 < 70 \text{ mm}^2$$

小于所选母线的截面积，故满足热稳定要求，因所选母线为绞线，故不需动稳定校验。

4.3 断路器的选择及校验

4.3.1 60kV 侧断路器的选择及校验

断路器的选择

按构造形式、装置种类、额定电压、额定电流、和额定开断电流选择断路器。

又据 $U_w = 60\text{kV}, I_{gzd} = 168.74\text{A}$ ，查手册选择型断路器。其技术参数见表 4-1。

表 4-1 LW9—63 型 SF₆ 断路器参数

型号	额定电压 (kV)	额定电流 (A)	热稳定电流 (kA)	动稳定电流 (kA)	分闸时间(S)	合闸时间(S)
LW9-63	63	2500	31.5	80	0.03	0.12

4.3.2 校验

4.3.2.1 热稳定性校验：

短路计算时间： $t=t_b+t_f+t_g=1.5+0.12+0.03=1.65\text{S} > 1\text{S}$ ，所以， $t_z=0\text{S}$ 经查表得 $t_z=1.4\text{S}$

短路电流的热脉冲：

$I_f^2t=31.5^2\times4=3969\text{kA}^2.\text{S}$ (4-10)

$I_\infty^2t_{dz}=2.54^2\times1.4=6.65\text{kA}^2.\text{S}$ (4-11)

因此满足热稳定性要求。

4.3.2.2 动稳定性校验

极限通过电流 $I_j=80 > i_{ch}$

故动稳定性也满足要求。

4.3.3 10kV 侧断路器的选择及校验

断路器的选择

按构造形式、装置种类、额定电压、额定电流、和额定开断电流选择断路器，而且放在屋内，所以可选室内真空断路器又据，据 $U_w=10\text{kV}, I_{gzd}=606.24\text{A}$ 查手册选择 LN₂—10 型户内 SF₆ 断路器，其技术参数见表 4-2

表 4-2 LN₂—10 型户内 SF₆ 断路器参数

型号	额定电压 (kV)	额 定 电 流 (A)	热稳定电 流 (kA)	动稳定电 流 (kA)	热稳定 时 间 (S)	合闸时间 (S)	分闸时 间(S)
LN ₂ —10	10	1250	25	63	4	≤0.15S	≤0.06S

4.3.3.1 热稳定性校验：

短路计算时间： $t=t_b+t_f+t_h=1.0+0.1+0.06=1.16\text{S} > 1\text{S}$ 。经查表得 $t_z=0.95\text{S}$ 。短路电流的热脉冲：

$I_f^2t=25^2\times4=2500\text{kA}^2.\text{S}$

$I_\infty^2t_{dz}=1.36^2\times0.95=1.76\text{kA}^2.\text{S}$ 因此满足热稳定性要求。

4.3.3.2 动稳定性校验

极限通过电流 $I_f=63\text{kA} > i_{ch}$
故动稳定性也满足要求。
经计算满足热稳定性及动稳定性要求，因此所选 LN_2-10 型户内 SF_6 断路器型满足要求。

4.3.4 10kV 侧母线分段断路器的选择

因其最大长期工作电流及各相参数均与变压器 10kV 侧基本相同，因此选择及校验过程同 10kV 侧，故选 ZN28-10/1250-25 型断路器。

4.3.5 10kV 出线侧断路器的选择及校验

4.3.5.1 断路器的选择

按构造形式、装置种类、额定电压、额定电流、和额定开断电流选择断路器。而且放在屋内，所以可选屋内式真空断路器。又据 $U_w=10\text{kV}$ ， $I_{g.zd}=156.74\text{A}$ 查手册选择 ZN28-10/630-12.5 型断路器。其技术参数见表 4-3。

表 4-3 ZN28-10/630-12.5 型断路器参数

型号	额定电 压 (kV	额 定 电 流 (A)	热稳定电 流 (kA)	动稳定电 流 (kA)	热稳定 时 间 (S)	合 闸 时 间(S)	分 闸 时 间(S)
ZN28-10/630-12.5	10	630	12.5	31.5	4	≤0.06	≤0.06

4.3.5.2 热稳定校验

对于无穷大电源供电电网，满足额定开断电流的要求。
短路计算时间: $t=t_b+t_r+t_g=0.5+0.06+0.06=0.62\text{S} < 1\text{S}$
 $t_{dz}=0.05\text{S}$ 查表得 $t_z=0.6\text{S}$ 所以 $t_{dz}=0.05+0.6=0.65\text{S}$
热稳定: $I_f^2t=12.5^2\times 4=625\text{kA}^2.\text{S} > I_{\infty}^2t_{dz}=1.36^2\times 0.65=1.2\text{kA}^2.\text{S}$
因此满足热稳定性要求。

4.3.5.3 动稳定性校验

极限通过电流 $I_f=63 > i_{ch}$
故动稳定性也满足要求。
经计算满足热稳定性及动稳定性要求，因此所选 ZN28-10/630-12.5 型断路器满足要求。

4.4 隔离开关的选择及校验

4.4.1 60kV 侧隔离开关的选择及校验

4.4.1.1 隔离开关的选择

根据变压器高压母线侧断路器选择计算的资料，由额定电压 $U_e \geq U_w = 10\text{kV}$, $I_e \geq I_{gzd} = 101.04\text{A}$, 额定开断电流 $I_{ekd} \geq I_{\infty} = 2.54\text{kA}$ 。经查手册选择 GW₈—60GD/600—1000 型隔离开关。其技术参数见表 4-4。

表 4-4 GW₈—60GD/600—1000 型隔离开关参数

型号	额定电压 (kV)	最高工作电压(kV)	额定电流(A)	额定动稳定 电流 (kA)	4s 热稳定电 流 (有效值 kA)
GW ₈ —60GD/600—1000	60	72.5	630	50	8

4.4.1.2 热稳定性校验

$t = t_b + t_f + t_g = 1.5 + 0.12 + 0.03 = 1.65\text{s} > 1\text{s}$ 。查表得 $T_z = 1.4\text{s}$
短路电流的热脉冲 $I_f^2 t = 8^2 \times 4 = 256\text{kA}^2 \cdot \text{s} > I_{\infty}^2 t_{dz} = 2.54^2 \times 1.4 = 6.65\text{kA}^2 \cdot \text{s}$
因此满足热稳定性要求。

4.4.1.3 动稳定性校验

极限通过电流 $i_j > i_{ch}$ 故动稳定性也满足要求。
经计算满足热稳定性及动稳定性要求，因此所选 GW₈—60GD/600—1000 型隔离开关满足要求。

4.4.2 10kV 侧隔离开关的选择及校验

4.4.2.1 隔离开关的选择

根据变压器低压母线侧断路器选择计算的资料，经查手册选择 GN19-10/630-20 型隔离开关。其技术参数见表 4-5。

表 4-5 GN19-10/630-20 型隔离开关参数

型号	额定电压(kV)	额定电流 (A)	动稳定 电流 (kA)	4s 动稳定电流 (kA) 热 稳定电流 (kA)
GN19-10/630-20	10	630	50	20

4.4.2.2 热稳定性校验

$t_z=0.95S$
短路电流的热脉冲：
 $I_r^2t=20^2\times4=1600kA^2.S > I_{\infty}^2t_{dz}=1.76kA^2.S$
因此满足热稳定性要求。

4.4.2.3 动稳定性校验

极限通过电流 $I_r=50kA > I_{ch}=3.23kA$
故动稳定性也满足要求。
经计算满足热稳定及动稳定要求，因此所选 GN19-10/1250-20 型隔离开关满足要求。

4.4.3 10kV 侧母线分段隔离开关的选择

因其最大长期工作电流及各相参数均与变压器 10kV 侧基本相同，因此选择及校验过程同 10kV 侧，故选 GN19-10/630-20 型断路器。

4.4.4 10kV 出线侧隔离开关的选择及校验

4.4.4.1 隔离开关的选择

根据变压器低压母线侧断路器选择计算的资料，据 $U_e \geq U_w=10kV, I_e \geq I_{gzd}=156.74A$ 经查手册选择 GN19-10/400-12.5 型型隔离开关。其技术参数见表 4-6

表 4-6 GN19-10/400-12.5 型隔离开关参数

型号	额定电压(kV)	额定电流(A)	动稳定电流（kA）	4s 热稳定电流（kA）
GN19-10/400-12.5	10	400	31.5	12.5

4.4.4.2 热稳定性校验

短路时间： $t=t_b+t_f+t_g=0.5+0.1+0.06=0.66S < 1S$
所以 $t_{rz}=0.05S$,查表得 $t_z=0.6S$
 $t_{dz}=t_{rz}+t_z=0.65S$
短路电流的热脉冲：
 $I_r^2t=12.5^2\times4=625kA^2.S > I_{\infty}^2t_{dz}=1.76kA^2.S$
因此满足热稳定性要求。

4.4.4.3 动稳定性校验

极限通过电流 $I_j=31.5 > i_{ch}$
故动稳定性也满足要求。
经计算满足热稳定及动稳定要求，因此所选 GN19-10/400-12.5 型隔离开关满足要求。

4.5 电流互感器的选择及校验

4.5.1 60kV 侧电流互感器的选择及校验

4.5.1.1 电流互感器的选择

按最大长期工作电流
 $I_e \geq I_{gxd}=168.74A$
根据 $U_e \geq U_w=60kV$ ，经查手册选择 LCWB5-63 型电流互感器。其技术参数见表 4-7。

表 4-7 LCWB5-63 型电流互感器

型号	额定电压（kV）	额定电流比	1s 热稳定电流倍数	动稳定电流倍数
LCWB5-63	63	200/5	75	150

温度校正系数 $K_\theta = \sqrt{\frac{70-35}{70-40}} = 1.08$ ，所以 $I_{Ley} = K_\theta I_{Le} = 1.08 \times 200 = 216A$

4.5.2 热稳定性校验

$K_r = I_r / I_{Le} = 75$ (4-12)
电流互感器的热稳定通常以 1s 的热稳定倍数表示，因此，校验热稳定应满足下式
 $(I_{Le} K_r)^2 t = (0.216 \times 75)^2 \times 1 = 262.44 kA^2 \cdot S \geq I_\infty^2 t_{dz} = 2.54^2 \times 1.4 = 9.03 kA^2 \cdot S$
式中 K_r —— 电流互感器的热稳定倍数，
 t —— 电流互感器的热稳定时间， $t=1s$

4.5.3 动稳定性校验

4.5.3.1 内部动稳定校验 需满足下式

$$\sqrt{2} I_{Le} K_d \geq i_{ch}$$
 (4-13)

式中 K_d —— 电流互感器的动稳定倍数

$$\sqrt{2} I_{Le} K_d = \sqrt{2} \times 0.2 \times 191 = 54.01 kA^2 \cdot S > I_{ch}^2 = 6.26 kA^2 \cdot S$$

满足内部动稳定要求

4.5.3.2 外部动稳定的校验

$$K_1 = \sqrt{a/0.4} = \sqrt{0.25/0.4} = 0.8$$
$$\sqrt{2}K_1K_2K_dI_{1e} = \sqrt{2} \times 0.8 \times 1 \times 191 \times 0.2 = 43.21kA > I_{ch} = 6.26kA$$
(4-14)

K₂——当 L=0.5m 时，K₂=1.当 L=0.2m 时 K₂=1.15，当 L=0.1m 时 K₂=0.8
满足外部动稳定要求
经计算满足热稳定及内、外动稳定要求，因此所选 LCWB5-63 型电流互感器满足要求。

4.5.4 10kV 侧电流互感器的选择及校验

电流互感器的选择
按最大长期工作电流

$$I_{gsd} = 1.67 \cdot \frac{1.05 \cdot S_e}{\sqrt{3} \cdot U_e} = 1.67 \times \frac{1.05 \times 10000}{\sqrt{3} \times 10} = 1012.38A$$

根据，经查手册选择 LDZBJ-10 环氧树脂浇注型电流互感器。其技术参数见表 4-8。

表 4-8 LDZBJ-10 型电流互感器参数

型号	额定电压 (kV)	额定一 次电流 (A)	额定二 次电流 (A)	准确级 次组合	1S 短时 热稳定 电流 K _r (kA 有 效	额定动 稳定电 流 K _d (kA, 峰值)	额定二次负荷 0.5 级 (VA)
LDZBJ-10	10	1200	5	0.5/D	50	90	90

温度校正系数 $K_p = \sqrt{\frac{70-35}{70-40}} = 1.08$, 所以 $I_{lsy} = K_p I_{le} = 1.08 \times 1200 = 1296A$

4.5.5 热稳定性校验

$$(I_{le}K_r)^2t = (1.2 \times 50)^2 \times 1 = 3.6kA^2.S > I_{\infty}^2t_{dz} = 1.36^2 \times 0.95 = 1.76kA^2.S$$

4.5.6 动稳定性校验

4.5.6.1 内部动稳定校验

$$\sqrt{2}I_{le}K_d = 152.71kA > I_{ch} = 3.23kA$$

4.5.6.2 外部动稳定校验

$$\sqrt{2}K_1K_2K_dI_{1e} = \sqrt{2} \times 0.8 \times 1 \times 90 \times 1.2 = 122.17\text{kA} > I_{ch}=3.23\text{kA}$$

经计算满足热稳定及内、外动稳定性要求，所选 LDZBJ-10 型电流互感器满足要求。

4.5.7 10kV 侧母线分段电流互感器的选择

因其最大长期工作电流及各相参数均与变压器 10kV 侧基本相同，因此选择及校验过程同 10kV 侧，故选 LDZBJ-10 型断路器。

4.5.8 10kV 出线侧电流互感器的选择及校验

同低压侧电流互感器的选择

4.6 电压互感器的选择及校验

4.6.1 电压互感器的选择

电压互感器是二次回路中供测量和保护用的电压源。通过它能正确反映系统电压的运行状况。起作用有二：一是将一次侧的高电压改编成二次侧的低电压，使测量仪表和保护装置标准化，小型化，便于监视安装和维护，二是低压二次回路与高压一次系统隔离，保证了工作人员的安全，由于电压互感器主要用于脊梁，而上一级变电所已装设，所以本变电所 60 千伏侧不装设电压互感器，只在低压侧装设。

根据该电压互感器的用途、装设地点及额定电压，经查手册选择 JDZJ₁-10 型单相三线圈浇注式电压互感器。其技术参数见表 4-9。

表 4-9 JDZJ₁-10 型电压互感器参数

型号	最大容量 (VA)	额定电压比			额定容量		
		原线圈	副线圈	辅助线圈	0.5 级	1 级	3 级
JDZJ ₁ -10	400	10/			50	80	200

测量仪表的技术资料见表 4-10。

表 4-10 测量仪表的技术参数

仪表名称	仪表型号	每线圈消耗功率 (VA)	
有功功率表	1D ₁ — W	0.75	1
无功功率表	1D ₁ — Var	0.75	1
有功电度表	DS ₁	1.5	0.38
频率表	1D ₁ — Hz	2	1
电压表	1T ₁ — V	5	1
功率因数表	1D ₁ —	0.75	1

电压互感器和测量仪表的三线接线图如图 4-1 所示。

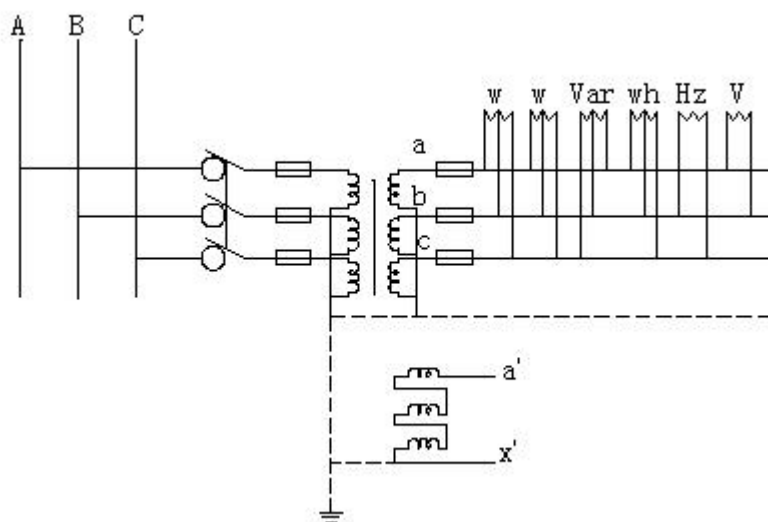


图 4-1 三线接线图

4.6.2 电压互感器校验

在电压互感器接线布局中，由于接入了电度表，所以电压互感器的准确度等级选 0.5 级，在 0.5 级以下工作的电压互感器的额定容量 $S_e=120\text{VA}$

按二次负荷选择电压互感器应作如下计算：

首先计算各相负荷，然后取最大一相负荷与一相额定容量相比较。（利用变电工程教材中第三种接线方式进行计算）

$$P_{bc} = 2 \times 0.75 + 0.75 + 1.5 \times 0.38 + 2 = 4.82(\text{W})$$

$$Q_{ab} = 1.5 \times \sqrt{1 - 0.38^2} = 1.39(\text{var})$$

$$S_{ab} = \sqrt{P_{ab}^2 + Q_{ab}^2} = 5.02(\text{VA})$$

$$\cos \varphi_{ab} = \frac{P_{ab}}{S_{ab}} = 0.960; \quad \varphi_{ab} = 16^\circ 13'$$

$$P_{ab} = 2 \times 0.75 + 0.75 + 1.5 \times 0.38 + 5 = 7.82(\text{W})$$

$$Q_{ab} = 1.5 \times \sqrt{1 - 0.38^2} = 1.39(\text{var})$$

$$S_{ab} = \sqrt{P_{ab}^2 + Q_{ab}^2} = 7.94(\text{VA})$$

$$\cos \varphi_{ab} = \frac{P_{ab}}{S_{ab}} = 0.985; \quad \varphi_{ab} = 9^\circ 58'$$

A 相负荷为:

$$P_A = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot S_{ab} \cdot \cos(\varphi_{ab} - 30^\circ) = \frac{7.94}{\sqrt{3}} \times \cos(9^\circ 58' - 30^\circ) = 4.3(\text{W})$$

$$Q_A = \frac{1}{\sqrt{3}} S_{ab} \times \cos(\varphi_{ab} - 30^\circ) = -1.57\text{var}$$

B 相负荷为:

$$P_B = \frac{1}{\sqrt{3}} [S_{ab} \times \cos(\varphi_{ab} + 30^\circ) + S_{bc} \times \cos(\varphi_{bc} - 30^\circ)] = 6.48\text{W}$$

$$Q_B = \frac{1}{\sqrt{3}} [S_{ab} \cdot \sin(\varphi_{ab} + 30^\circ) + S_{bc} \cdot \sin(\varphi_{bc} - 30^\circ)] = 2.06(\text{var})$$

经计算可知 B 相负荷最大, 其值为

$$S_B = \sqrt{P_B^2 + Q_B^2} = 6.799\text{VA}$$

0.5 级的 JDZJ₁-10 型电压互感器的一相额定容量为 50/3=16.7VA > S_B=6.799VA
因此满足要求。

4.7 绝缘子和穿墙套管的选择及校验

4.7.1 60kV 侧绝缘子的选择及校验

4.7.1.1 绝缘子的选择

按安装地点和额定电压查手册选择 XP-160 型绝缘子，其技术参数见表 4-11。

表 4-11 XP-160 型绝缘子参数

型号	最小公称爬电距离 L(mm)	机电破坏 负荷 (kN)	工频闪络 电压 (kV)		工频击穿 电压 (kV)
XP-160	290	不小于	干	湿	110
		160	75	45	

悬式绝缘子片数的选择

一般情况下的单位泄漏距离为 1.6cm/kV，所以应选绝缘子的片数为[10]

$$\text{片数 } n \geq 1.6U_0/L_0 = 1.6 \times 60 / 290 = 3.31 \quad (4-15)$$

L_0 ——每片绝缘子的泄漏距离

考虑到绝缘子老化及出现故障等情况，应将绝缘子片数加 1，故选择片 5 绝缘子。

∴60kV 每相悬式绝缘子应选 5 片，满足要求。

4.7.2 10kV 侧绝缘子的选择及校验

支柱绝缘子的作用是支持母线并且使之与地绝缘。按额定电压和装设地点，经查手册选择 ZL-10/4 型支柱棒型绝缘子。其技术参数见表 4-12。

表 4-12 ZS-10/4 型支柱棒型绝缘子参数

型号	额定电压(kV)	机械破坏负荷(kN)	瓷件最大公称直径 D(mm)	总高 H(mm)
ZL-10/4	10	4	95	160

4.7.2.1 动稳定校验

母线所受最大电动力：

$$F_{zd} = 1.73 \times 10^{-7} \times L / a \times I_{ch}^2 = 1.73 \times 10^{-7} \times 1.2 / 0.25 \times 3.23^2 \times 10^6 = 8.66N \quad (4-16)$$

绝缘子底部至母线中心线的高：

$$H_1 = H + 12 + h/2 = 160 + 12 + 80/2 = 212 \text{ mm} \quad (4-17)$$

绝缘子帽所受的力：

$$F = F_{zd} \times K_z = 8.66 \times 2112 / 160 = 11.47N \quad (4-18)$$

抗弯破坏负荷：

$$F_p = 400 \times 9.8 = 3920N \quad (4-19)$$

绝缘子的允许负荷：

$$0.6F_p=0.6\times3920=2352\text{N} > F=11.47\text{N} \tag{4-20}$$

经计算满足动稳定要求，故所选 ZL-10/4 型支柱棒型绝缘子满足要求。

4.7.3 穿墙套管的选择及校验

4.7.3.1 穿墙套管的选择

按装置种类、构造形式、额定电压及最大长期工作电流，查手册选择 CWL-10/1500 型户外铝导体穿墙套管。其技术参数见表 4-13。

表 4-13 CWL-10/1500 型户外铝导体穿墙套管参数

型号	额定电压(kV)	额定电流(A)	总长 L(mm)	一端盖间长 L ₁	一端 L ₂	抗弯破坏负荷(kN)	5s 短时热电流 (kA)
CWL-10/1500	10	1500	520	360	158	4	30

穿墙套管在 $\theta=40^{\circ}\text{C}$ 时的允许电流

$$I_{y\theta} = I_e \frac{\sqrt{\theta_y - \theta}}{\sqrt{\theta_y - \theta_0}} = 1500\text{A} > I_{gzd}$$

4.7.3.2 热稳定校验

$$I_r^2t=30^2\times5=4500\text{kA}^2.\text{S} > I_{\infty}^2t_{dz}=1.36^2\times0.95=1.76\text{kA}^2.\text{S}$$

动稳定校验

套管允许的负荷为 $0.6F_p=0.6\times3920=2352\text{kN}$

套管瓷帽所受的力

$$F=1.73\times10^{-7}\times i_{ch}^2\times(L_1+L_2)/2a=1.73\times10^{-7}\times(3.23\times10^3)^2\times(0.36+0.158)/2\times0.25=9.02\text{N} < 0.6F_p$$

经计算满足热稳定性及动稳定性要求，故所选 CWL-10/1500 型穿墙套管满足要求。

4.8 所用变设备的选择

4.8.1 所用变压器的选择

根据设计要求，考虑本变电所为终端变电所，将所用变置于低压 10kV 侧内，在有一台进行检修或故障而另一台主变运行时能够保持所用变正常运行。

查手册选择型 S₉-50/10 电力变压器作为所用变压器，其技术参数见表 4-14

表 4-14 S₉-50/10 型电力变压器参数

型号	额定电压		损耗		阻抗电压(kV)	空载电流 (%)
S ₉ -50/10	高压(kV)	低压(kV)	空载	短路	4	2.2
	10.5	0.4	0.17	0.87		

4.9 电容器的选择

设备补偿前的功率因数为 $\cos\Phi_1=0.75$, 设计要求达到功率因数(无功补偿后)为 $\cos\Phi=0.9$. 采用三相三角形接线的电容器

按工作电压选择 $U_{zd} \geq U_g = 10kV$

按工作频率选择 $f=50HZ$

负荷的有功功率为 $P_1 = S \times \cos\Phi_1 = 14920.18 \times 0.75 = 11190.14kW$

$$P_2 = S \times \cos\Phi_2 = 14920.18 \times 0.9 = 13428.16kW$$

无功功率: $Q_1 = P_1 \times \tan\Phi_1 = 9868.78kvar$

$$Q_2 = P_2 \times \tan\Phi_2 = 6503.53kvar$$

系统要求补偿的无功功率为

$$Q = Q_1 - Q_2 = 9868.78 - 6503.53 = 3365.25kvar$$

三角形接线电容容量

$$Q = 3\omega^2 C \times 10^{-3} = 3.2 \Pi f \times 10^2 \times C_x \times 10^{-3} = 94.2 C_x$$

$$C_x = 35.72\mu F$$

根据电压等级, 标称容量, 标称电容初选 BFF10.5-100-1w 型电容器组, 其技术参数见表 4-15。

表 4-15 BFF10.5-200-1 型电容器参数

型号	额定电压 (kV)	额定容量(kvar)	额定电容(μF)
BFF10.5-100-1w	10.5	200	5.8

$$N = C_x / C_b = 35.72 / 5.8 = 6.16 \approx 7 \text{ 个} \quad (4-21)$$

因此, 电容其每组并联 7 个, 一共需要 21 个电容器组, 每个电容器的标准容量为 200kvar, 39 个电容器的总的容量为 4200kvar 大于需要补偿的功率 $Q=3365.25kvar$ 故所选电容器组满足要求。

4.10 其保护熔断器的选择

4.10.1 其保护低压侧电压互感器用熔断器的选择

对于保护低压电压互感器的熔断器, 只按额定电压及断流容量选择即可

$$\text{三相短路容量 } S_d = \sqrt{3} U_e I_{ch} = \sqrt{3} \times 10 \times 3.23 = 55.94 MVA$$

经计算查手册选择 RN2-10 型户内限流熔断器。其技术参数见表 4-16。

表 4-16 RN2-10 型户内限流熔断器参数

型号	额定电压(kV)	最高电压(kV)	额定电流(A)	额定断流容量 (MVA)
RN2-10	10	11.5	0.5	1000

4.10.2 选择跌落式高压熔断器保护所用变

$$I_{gd} = 1.05 \times I_{eb} = 1.05 \times 50 / \sqrt{3} \times 10.5 = 2.89 A$$

$$\text{熔件的额定电流: } I_{erf} = K_b I_{eb} = 1.5 \times 50 / \sqrt{3} \times 10.5 = 2.89 A$$

三相短路容量： $S_d = \sqrt{3} \times U_p i_{ch} = \sqrt{3} \times 10.5 \times 2.45 = 44.56 \text{MVA}$

选 RN3-10/50 型户内高压限流熔断器，其技术数据如下表 4-17

表 4-17 RN3-10/50 型户内高压限流熔断器

型号	额定电压(kV)	最高电压(kV)	额定电流(A)	额定电流容量(MVA)
RN3-10/50	10	11.5	50	200

4.10.3 保护电力电容器的熔断器选择

电力电容器合闸时产生冲击电流，此时熔件不应该熔断

熔件的额定电流： $I_{ek} = K_{cl} I_e = 1.5 \times 242.49 = 363.74 \text{A}$

$I_e = S_e \times 21 / \sqrt{3} \times U_e = 242.49 \text{A}$

$I_{gzd} = 156.74 \text{A}$

由 $U_w \geq U_e = 10 \text{kV}$ 选择 RN₁-3 型户内高压熔断器，其技术数据如表 4-18

表 4-18 RN₁-3 型户内高压熔断器

型号	额定电压(kV)	最高工作电压(kV)	额定电流(A)	额定开断电流(kA)	最大切断容量 (三相)(MVA)
RN ₁ -3	10	11.5	400	40	≥200

$I_{ej} = 363.74 \text{A} < 400 \text{A}$ 满足额定电流要求

5 保护接地装置

5.1 所内应当接地的部分

- 1)变压器、电器、照明设备的底座和外壳;
- 2)电气设备传动装置;
- 3)互感器的二次绕组,但继电保护方面另有规定者除外;
- 4)配电屏与控制台框架;
- 5)屋外配电装置的金属和钢筋混凝土架构以及带电部分的金属遮拦。

5.2 接地装置的计算

5.2.1 确定接地电阻值(设接地体的接地电阻为 20Ω)

5.2.1.1 60kV 侧经接地体入地的电流为

$$I_{jd} = \frac{U_e \cdot L_j}{350} = 6A \quad (5-1)$$

所以接地电阻的允许值为

$$R_d \leq \frac{100}{I_{jd}} = \frac{100}{6} = 16.67\Omega \quad (5-2)$$

5.2.1.2 10kV 侧经接地体入地的电流为

$$I_{jd} = \frac{U_e \cdot L_j}{350} = 3A$$

所以接地电阻的允许值为

$$R_d \leq \frac{120}{I_{jd}} = \frac{120}{3} = 40\Omega$$

要求当大于 10Ω 时取 10Ω 。站用电 380/220V 中性点接地电阻允许值 $R_d < 4$ 因为共享一个接地装

置,故接地电阻应取 $R_d = 4\Omega$

5.2.2 计算人工接地电阻

人工接地网与自然接地体是并联的，并联后总电阻应达到 $R=4\Omega$ ，所以人工接地电阻为

$$R_{rw} = \frac{R_z \cdot R}{R_z - R} = \frac{20 \times 4}{20 - 4} = 5\Omega \quad (5-3)$$

由于共享一个接地装置，故应取 $R_{rw}=4\Omega$

5.2.3 计算单根垂直接地体的接地电阻

土壤电阻率 $\rho = \rho_0 \cdot \Psi$ ，由查表得 $\Psi = 1.5$ ，则 $\rho = 150\Omega \cdot m$ 。由于土壤电阻率不高，故人工接地装置以垂直接地体为主，上端用规格为 $4 \times 10\text{mm}$ 扁钢连接，构成环路式接地装置。钢管上端埋入土中深度为 0.8m 垂直接地采用长 $L=2.5\text{m}$ ，直径 $d=60 \times 10^{-3}\text{m}$ 的钢管。单根接地体的接

$$\text{地电阻为 } R_c = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot l} \cdot \ln \frac{4l}{d} = 48.85\Omega \quad (5-4)$$

5.2.4 计算接地体的根数 n

假定钢管之间的距离 $a = 7.5\text{m}$ ，则 $a/l = 3$ ，根据 $R_c / R_{rw} = 48.85 / 4 = 12.21$ ，初选 13 根。

经查表得 $\eta_c = 0.69$ ，因此决定选 20 根钢管。

60kV 配电区每隔 9m 加设一条均压带以便电位分布均匀。均压带采用截面不小于 24mm^2 的扁钢，其埋深为 0.6m 。由于接地电阻的计算引入不少假设条件，所以在现场敷设接地装置以后，必须对接地电阻加以实际测量和核算。如果不满足要求，必须补埋接地体，达到设计要求。

6 结论

本次设计的 60kV 常规变电所主要是满足农村乡镇工农业生产及居民日常生活用电的需要。60 千伏侧进线一回，进线长度为 35km，10 千伏出线 6 回，出线采用单母线分段形式，主变压器两台，所用变一台，有一处二类负荷，其余为三类负荷，该变电所位于城镇边缘，系统的基准容量 100MVA,在查阅了相关资料后，结合当地的实际条件，进行了这次设计，并完成了如下设计

6.1 内容

- 1)主变的选择及主接线的设计;
- 2)短路计算;
- 3)电气设备的选择及校验;
- 4)接地装置及防雷保护设计;

6.2 完成的设计图纸如下:

- 1)主接线图;
- 2)平面布置图;
- 3)断面图;

所选的设备均符合变电所的需要,而且都是新型的产品,经济适用,灵活有效.满足要求.

第六章 设计实例—110kV 变电站设计

1 负荷统计及计算

1.1 负荷统计

本变电站为与电力系统相联的地区变电站，具有两个电压等级。10kV 侧有 8 回出线，带有二、三类负荷。考虑到所有负荷中，大部分用户为工业负荷，如停电将造成较大的经济损失，所以供电的可靠性应作为设计的重点。

本变电站建于黑龙江省某县城边缘的工业区附近，以工业负荷为主。所区地势平坦，配电装置的布置不必考虑特殊方式。海拔 25m，不必采用高海拔设备。（根据《高压配电装置设计技术规程》）交通发达，有铁路和高等级公路经过本所附近，不必过多考虑设备的运输问题。

根据实际调查 10kV 侧各用户负荷表 1-1。

表 1-1: 负荷统计表

回 路	用 户	需 用	负 荷	供 电	长 度	备 注
序 号	名 称	类 型	系 数	容 量	回 路	(km)
				(kVA)		
1	中环线	医 院	0.8	500	2	15
		科技开发区	0.7	400		
		电子公司	0.7	500		
2	中东线	机 关	0.8	400	2	12
		钢 厂	0.7	300		
		研究所	0.8	400		
3	中木线	食品加工厂	0.7	400	2	10
		机电公司	0.8	500		
		学 校	0.7	300		
4	中发线	啤酒厂	0.7	400	2	14
		纺织厂	0.8	400		
		饮料厂	0.8	300		
5	中进线	医院	0.7	300	2	13
		学校	0.7	400		
		居民区	0.8	300		
6	中远线	化工厂	0.8	400	2	14
		水泥厂	0.7	500		

		塑料厂	0.7	500			
		医 院	0.7	500			
7	中庆线	机 关	0.8	500	2	12	二 类
		学 校	0.8	400			
		汽车修理厂	0.7	400			
8	中新线	乳品厂	0.8	300	2	12	三 类
		锅炉厂	0.7	500			

1.2 负荷计算

用户负荷采用需用系数法

公式：计算负荷=容量 × 需用系数

$$S_{jsi} = K_{nk} \times S_{ei} \quad (\text{kVA}) \quad (1-1)$$

各回路计算负荷(kVA):

$$S_{js1} = 500 \times 0.8 + 400 \times 0.7 + 500 \times 0.7 = 1030 \text{ kVA}$$

$$S_{js2} = 400 \times 0.8 + 300 \times 0.7 + 400 \times 0.8 = 850 \text{ kVA}$$

$$S_{js3} = 400 \times 0.7 + 500 \times 0.8 + 300 \times 0.7 = 890 \text{ kVA}$$

$$S_{js4} = 400 \times 0.7 + 400 \times 0.8 + 300 \times 0.8 = 840 \text{ kVA}$$

$$S_{js5} = 300 \times 0.7 + 400 \times 0.7 + 300 \times 0.8 = 730 \text{ kVA}$$

$$S_{js6} = 400 \times 0.8 + 500 \times 0.7 + 500 \times 0.7 = 1020 \text{ kVA}$$

$$S_{js7} = 500 \times 0.7 + 500 \times 0.8 + 400 \times 0.8 = 1080 \text{ kVA}$$

$$S_{js8} = 400 \times 0.7 + 300 \times 0.8 + 500 \times 0.7 = 870 \text{ kVA}$$

所用变在 10kV 侧应算为负荷，调查所用负荷为 186.51kVA。

所以 10kV 侧出线总负荷为：

$$S_{JSi} = 1030 + 850 + 890 + 840 + 730 + 1020 + 1080 + 870 + 186.51 = 7496.81 \text{ kVA}$$

10kV 侧变电站最大计算负荷为：

$$S_{js} = K_t \sum_{i=1}^n S_{jsi} (1 + x\%) \tag{1-2}$$

考虑规划年限 5 年的符号负荷增长率 8%

K_t : 同时系数，一般取 0.6~0.9。此处取 0.9

$x\%$: 线损率。此处取 8%

所以 $S_{js}=0.9\times7496.81\times (1+0.08)=6801.106\text{kVA}$

$$S_{jszd} = S_{js} \times e^{mn} = 6801.106 \times e^{5\times8\%} = 9657.57\text{kVA} \tag{1-3}$$

因为 $S_e \geq 0.6S_{jszd} =9657.57\times0.6=5794.54\text{kVA}$ (1-4)

1.3 选择主变

综合 10kV 侧负荷计算结果，而且变压器容量的选择必须满足电网中各种可能的最大运行方式的负荷要求，出线要求提供一种等级的电压，存在双回路供电，所以选择双绕组变压器。本变电站采用经济运行方式，装设两台等容量变压器，当一台主变运行时，可保证 60%的负荷供电，考虑变压器事故过负荷能力为 40%，则可保证对 84%负荷的供电，在事故运行方式下，切除一些三类负荷保证大部分供电。

根据实际情况选择 STZ8—8000/110 型双绕组自然循环风冷有载调压变压器作为主变压器。

有载调压电力变压器是输配电系统中的重要组成部分，适用于电网电压波动较大而用户对电压质量要求较高的场合或负荷中心，在户内、外均可使用。这种变压器的作用是电网电压波动时，不间断地在带负荷运行条件下，通过自动或手动改变变压器高、低压侧线圈的匝数比，保持输出电压的稳定，从而保证供电质量，提高用电设备的工作效能和安全可靠性。查中国水利水电出版社《电气设备实用手册》，其技术数据如 1-2。

表 1-2 数据统计表

空 载 损 耗 (kVA)	负 载 损 耗 (kVA)	空载电流%	阻抗电压%
13.2	50	0.90	10.5

2 变电站主接线

电气主接线的设计应满足供电可靠，接线简单、清晰，操作、检修方便，投资少，年运行费用低等要求。

第一 可靠性：是否能够保证变电站的正常运行并提供高质量电能。检修电气设备时是否影响对重要用户的供电，是否有造成变电站全停的可能性。

第二 灵活性：从运行方面看，是否能以正常方式投入和切除变压器，是否能满足事故运行方式、检修运行方式和其他特殊运行方式，是否能够安全、方便的检修断路器、隔离开关等电气设备而不影响对大部分用户的供电；从扩建角度看，从初期接线到最终接线的改造过程中，设备的改动是否最小。

第三 经济性：是否具有分期建设的可能性，投资及年运行费用是否最低。

现代化的变电站，要求接线电气设备的选择要先进可靠，本变电站有三处二类负荷，要求出线提供 10kV 电压一种电压等级，根据这些要求我选择了双回路供电，因为只需要提供一种电压等级，再根据实际需要，以及考虑各方面的因素，我选择两台双绕组 STZ8—8000/110 型三相自然循环风冷有载调压变压器作为主变压器，10kV 侧母线采用单母线分段。此线路的投入和切除比较方便，而且当线路发生故障时，仅故障线路的断路器断开，不影响其他回路运行。经过分析确定本所的主接线见图 2-1。

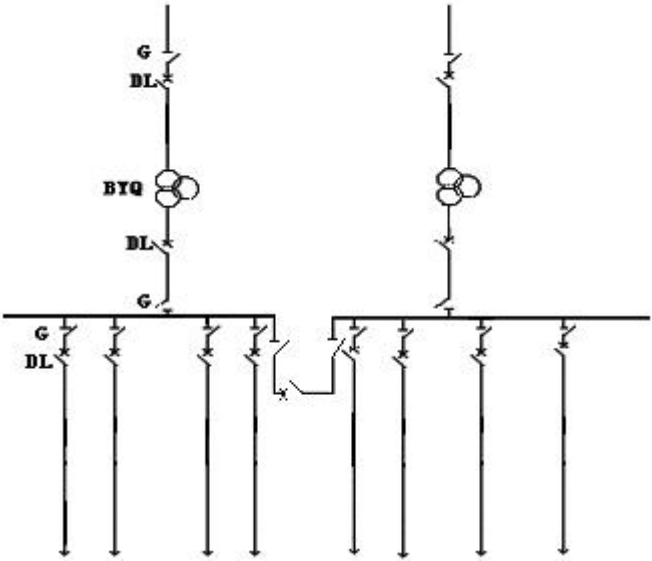


图 2-1 主接线方案

3. 短路电流的计算

进行短路计算的目的是为了以后将要进行的电气设备的选择和校验、确定是否采取限流措施以及继电保护整定。

短路电流的计算方法:根据保护整定值的计算和经验选择短路点,画等效电路,计算出每个电抗元件的电抗标么值,计算各短路点的计算电抗,计算短路电流和冲击电流。

3.1 短路点的选择

根据保护整定的计算和经验,我选择各短路点如图 3-1。

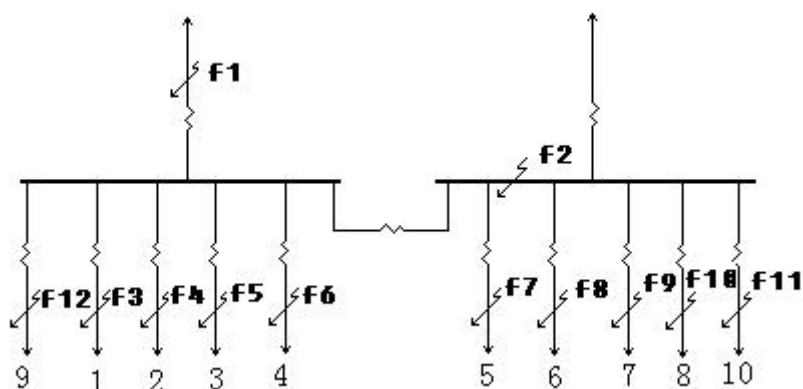


图 3-1 短路点选择图

假设条件和原则(1) 正常工作时,三相系统对称运行;(2) 电力系统中所有电源都在额定负荷下运行;(3) 短路发生在短路电流为最大值的瞬间;(4) 元件的电阻都可忽略不计;(5) 所有计算都为三相短路情况下,并全部考虑为金属性短路;

取 $S_B = 100\text{MVA}$ $V_B = V_{av}$

最大运行状态下,电抗标么值 $X_{\min} = 0.04$ 。

最小运行状态下,电抗标么值 $X_{\max} = 0.06$ 。

主变压器等值电抗: $U_s\% = 10.5$

1) 当系统处于最小运行方式下,即一台主变单独运行时

$$X_{T\text{单}}^* = X_{T1}^* = X_{T2}^* = \frac{U_s\%}{100} \times \frac{S_B}{S_N} = 1.3125 \quad (3-1)$$

2) 当系统处于最大运行方式下,即两台主变并行运行时

$$X_{T\text{并}}^* = \frac{1}{2} X_{T\text{单}}^* = 0.65625 \quad (3-2)$$

所用变(接地变压器)电抗标么值: $U_s\% = 10.5$

$$X_{Tj\text{单}}^* = X_{Tj1}^* = X_{Tj2}^* = \frac{U_{sj}\%}{100} \times \frac{S_B}{S_{NJ}} = 52.5$$

$$X_{TJ并}^* = \frac{1}{2} X_{TJ单}^* = 26.25$$

进线电抗标么值:

进线电抗: 进线两回, 进线长度 40km, 每公里电抗 0.4 欧姆

$$X_L = X_{L1} = X_{L2} = 0.4 \times 40 \times \frac{S_B}{U_B^2} = 0.4 \times 40 \times 100/110^2 = 0.132 \quad (3-3)$$

10kV 侧各出线电抗标么值:

$$X_1 = 15 \times 0.4 \times 100/10.5^2 = 5.445 \quad (3-4)$$

$$X_2 = 12 \times 0.4 \times 100/10.5^2 = 4.356$$

$$X_3 = 10 \times 0.4 \times 100/10.5^2 = 3.63$$

$$X_4 = 14 \times 0.4 \times 100/10.5^2 = 5.08$$

$$X_5 = 13 \times 0.4 \times 100/10.5^2 = 4.719$$

$$X_6 = 14 \times 0.4 \times 100/10.5^2 = 5.08$$

$$X_7 = 12 \times 0.4 \times 100/10.5^2 = 4.356$$

$$X_8 = 13 \times 0.4 \times 100/10.5^2 = 4.719$$

3.2 短路点计算

最大运行方式下(两台主变并列运行时)各点的短路电流

1. 当 f_1 点短路时:

$$I_{d1}^{(3)} = \frac{E''}{X_{\min} + X_L} \cdot \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot V_{av}} = 3.05 \text{kA} \quad (3-5)$$

$$I_{d1}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{d1}^{(3)} = 2.64 \text{kA} \quad (3-6)$$

$$I_{chl} = 2.55 \cdot I_{d1}^{(3)} = 7.78 \text{kA} \quad (3-7)$$

2. 当 f_2 点短路时:

$$I_{d2}^{(3)} = \frac{E''}{X_{\min} + X_L + X_{T\text{并}}} \cdot \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot V_{av}} = 6.9709\text{kA} \quad (3-8)$$

$$I_{d2}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{d2}^{(3)} = 6.0368\text{kA}$$

$$I_{ch2} = 2.55 \cdot I_{d2}^{(3)} = 17.7759\text{kA}$$

3. 当 $f_3 - f_{12}$ 点短路时

短路电流越大对设备的要求越高，因此只计算短路电流最大的支路即可。即选择线路长度最短的一条出线 I_3 计算即可。即 f_5 点短路。

$$I_{d5}^{(3)} = \frac{E''}{X_{\min} + X_L + X_{T\text{并}} + X_3} \cdot \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot V_{av}} = 1.2945\text{kVA} \quad (3-9)$$

$$I_{d5}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{d5}^{(3)} = 1.1211\text{kA}$$

$$I_{ch5} = 2.55 \cdot I_{d5}^{(3)} = 3.301\text{kA}$$

最小运行方式下（变压器是解裂的，只有一台投入运行）各点的短路电流

当 f_1 点短路时

$$I_{d1}^{(3)} = \frac{E''}{X_{\max} + X_L} \cdot \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot V_{av}} = 2.7337\text{kA} \quad (3-10)$$

$$I_{d1}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{d1}^{(3)} = 2.3674\text{kA}$$

$$I_{ch1} = 2.55 \cdot I_{d1}^{(3)} = 6.9709\text{kA}$$

当 f_2 点短路时

$$I_{d2}^{(3)} = \frac{E''}{X_{\max} + X_L + X_{T\text{单}}} \cdot \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot V_{av}} = 3.8376\text{kA} \quad (3-11)$$

$$I_{d2}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{d2}^{(3)} = 3.3234\text{kA}$$

$$I_{ch2} = 2.55 \cdot I_{d2}^{(3)} = 9.7858\text{kA}$$

当 $f_3 - f_{12}$ 点短路时，同理选择线路长度最短的一条出线 I_3 计算即可。即 f_5 点短路。

$$I_{d5}^{(3)} = \frac{E''}{X_{\max} + X_L + X_{T\text{单}} + X_3} \cdot \frac{S_B}{\sqrt{3} \cdot V_{av}} = 1.1245\text{kA} \quad (3-12)$$

$$I_{d5}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{d5}^{(3)} = 0.9738\text{kA}$$

$$I_{ch5} = 2.55 \cdot I_{d5}^{(3)} = 2.8675\text{kA}$$

其它出线路的短路计算方法同上，其计算结果如表 3-1 所示

表 3-1 短路计算数据

短路点	三相短路电流 (kA)		冲击电流 (kA)		两相短路电流 (kA) (最大运行方式)
	最大运行	最小运行	最大运行	最小运行	
	方式	方式	方式	方式	
F_1	3.05	2.7337	7.78	6.9709	2.64
F_2	6.9709	3.8376	17.7759	9.7858	6.0368
F_5	1.2945	1.1245	3.30	2.8675	1.1211

说明: f_1 点短路时流过 110kV 侧断路器的短路电流最大, 此点用于选择 110kV 侧各电气设备;

f_2 点短路时流过 10kV 侧断路器的短路电流最大, 此点用于选择 10kV 进线侧及母线上的各种电气设备; f_5 点短路时流过 10kV 出线侧断路器的短路电流最大, 此点用于选择 10kV 出线侧上的各种电气设备。

4 电气设备的选择和校验

因为本次设计 110kV 配电装置、10kV 配电装置都安置在室外，所以此次选择的电气设备都为室外型。

4.1 导线的选择

导线选择原则：由于圆形钢芯铝绞线的耐张性能好，在允许电流相同时，其直径相对大，其表面附近的电场强度较小，机械强度较大，集肤效应较大；另外，圆形母线消除了电场集中的现象，可以防止电晕的产生，所以高、低压侧均采用圆形钢芯铝绞线。

为降低年运行费用，母线的选择需按经济电流密度选择，并按最大长期工作电流校验。正常条件下所选的母线截面需校验短路时的热稳定；

4.1.1 10kV 侧母线的选择：

若一台变压器停止运行，想满足整个负荷的需要，则一台变压器工作在过负荷状态，由于 $S_b > 0.6 S_{js*zd}$ ，所以只需要一台过负荷为原来的 $1/0.6=1.67$ 倍，即 $S=1.67S_b$ 。由于电压等级高，故选圆形母线，其目的是防止电晕现象。（圆形母线消除了电场集中现象）

(1)按经济电流密度选择母线截面积

查表得：经济电流密度 j 值为 $1.65 \times 10^6 \text{ A/m}^2$

通过低压侧母线的最大长期工作电流

$$I_{gzd} = 1.67 \times \frac{1.05 \times S_e}{\sqrt{3} \times U_e} = 1.67 \times \frac{1.05 \times 8000}{\sqrt{3} \times 10} = 809.9 \text{ A} \quad (4-1)$$

$$\text{经济截面 } S_J = \frac{I_{gzd}}{J} = \frac{809.9}{1.65 \times 10^6} = 490.8 \text{ mm}^2 \quad (4-2)$$

查《电力工程电气设计手册》第一册

选择 LGJJ—500 型钢芯铝绞线， $I_y = 1000 \text{ A}$ 。

$$\text{温度校正系数: } k_\theta = \sqrt{\frac{\theta_y - \theta}{\theta_y - \theta_0}} = \sqrt{\frac{70 - 35}{70 - 25}} = 0.882 \quad (4-3)$$

则实际环境温度为 35℃时，母线允许电流

$$I_{y\theta} = k_\theta \times I_y = 0.882 \times 1000 = 882 \text{ A} > I_{gzd} = 809.9 \text{ A} \quad (4-4)$$

所以满足热稳定条件。

(2)按最小截面法校验母线的热稳定

$$\text{短路时间 } t = t_b + t_{hu} + t_g = 0.1 + 0.04 + 0.06 = 0.2 \text{ s} \quad (4-5)$$

$$\beta'' = \frac{I_{\infty}^{(3)}}{I_{\infty}^{(3)}} = 1 \quad t_{fz} = 0.05\beta'' = 0.05 \times 1 = 0.05 \quad (4-6)$$

查《短路电流周期分量等值时间曲线》得, $t_z = 0.18s$

则母线正常运行时的最高温度

$$\theta_c = \theta + (\theta_y - \theta) \times \left(\frac{I_{gzd}}{I_{y\theta}} \right)^2 = 35 + (70 - 35) \times \left(\frac{809.9}{1000} \right)^2 = 57.96^\circ\text{C} \quad (4-7)$$

由 $\theta_c = 57.96^\circ\text{C}$, 查《不同工作温度下裸导体的C值》得 $C = 121 \times 10^6$, 计算
母线最小截面 ($K_j = 1$)

$$\text{由公式 } S_{zx} = \frac{I_{\infty}}{C} \sqrt{t_{dz} \times K_j} = \frac{6.9709 \times 10^3}{121 \times 10^6} \sqrt{0.23 \times 1} = 24.0 \text{mm}^2 \quad (4-8)$$

因为 $24.0 \text{mm}^2 < 500 \text{mm}^2$, 故满足热稳定要求。

因为所选母线为绞线, 故不需动稳定校验。

4.1.2 110kV 侧进线的选择:

按经济电流密度选择母线截面

最大长期工作电流

$$I_{gzd} = 1.67 \times \frac{1.05 S_e}{\sqrt{3} U_e} = 1.67 \times \frac{1.05 \times 8000}{\sqrt{3} \times 110} = 73.63 \text{ A}$$

查表得: 经济电流密度 j 值为 $1.65 \times 10^6 \text{ A/m}^2$

$$\text{经济截面 } S_J = \frac{I_{gzd}}{J} = \frac{73.63}{1.65 \times 10^6} = 44.62 \text{mm}^2$$

查《电力工程设计手册》第一册

查 $\Theta_0 = 25^\circ\text{C}$ 时母线载流表, 选择截面为 50mm^2 的 LGJ 型室外钢芯铝绞线。 $I_y = 234 \text{ A}$

$$\text{温度修正系数为 } k_\theta = \sqrt{\frac{\theta_y - \theta}{\theta_y - \theta_0}} = \sqrt{\frac{70 - 35}{70 - 25}} = 0.882$$

母线校验:

则实际环境温度为 35°C 时, 母线允许电流

$$I_{y\theta} = k_\theta \times I_y = 0.882 \times 234 = 206.38 \text{ A} > I_{gzd} = 73.63 \text{ A}$$

导线长期发热温度为:

$$\theta_c = \theta + (\theta_y - \theta) \times \left(\frac{I_{gzd}}{I_{y\theta}} \right)^2 = 35 + (70 - 35) \times \left(\frac{73.63}{206.38} \right)^2 = 65.1^\circ\text{C}$$

查表得: $C=98 \times 10^6$

短路时间 $t=t_b+t_f$

t_b : 主保护时间。取 0.06s

t_f : 全分闸时间。包括: t_g : 断路器固有分闸时间。取 0.1s

t_{hu} : 燃弧时间。取 0.04s

故短路时间 $t=0.06+0.1+0.04=0.2<1\text{s}$ 又 $I_{\infty}^{(3)} > I_{\infty}^{(2)}$

所以 $t_{dz}=0.05B''=0.05\text{s}$ ($B''=I''/I^{(3)}_{\infty}=1$)

查表得: $t_{dz}=t_f+t_{dz}=0.2+0.05=0.25\text{s}$

按热稳定条件所需的最小母线截面积为:

$$S_{zx} = \frac{I_{\infty}}{C} \sqrt{t_{dz} \times K_j} = \frac{3.05 \times 10^3}{98 \times 10^6} \sqrt{0.25 \times 1} = 21.15 \text{mm}^2 < 50 \text{mm}^2$$

所以满足热稳定要求。故选择 LGJ—50 型室外钢芯铝绞线。

4.1.3 10kV 侧出线选择:

以 10kV 侧负荷最大的一条支路 I_7 支路进行选择。 $S_N = 1080 \text{kVA}$ 。应以此条线路作为依据选择出线。

(1) 按经济电流密度选择母线截面

最大长期工作电流

$$I_{gzd} = \frac{P}{\sqrt{3}U_e \cos \theta} = \frac{1080}{\sqrt{3} \times 10 \times 0.85} = 73.35 \text{A}$$

经济电流密度 $J = 1.65 \times 10^6 \text{A/m}^2$

$$\text{经济截面 } S_J = \frac{I_{gzd}}{J} = \frac{73.35}{1.6 \times 10^6} = 45.84 \text{mm}^2$$

查《电力工程设计手册》第一册

查 $\Theta_0=25^\circ\text{C}$ 时母线载流表, 选择截面为 50mm^2 的 LGJ 型室外钢芯铝绞线。 $I_y=234\text{A}$

$$\text{温度修正系数 } k_{\theta} = \sqrt{\frac{\theta_y - \theta}{\theta_y - \theta_0}} = \sqrt{\frac{70 - 35}{70 - 25}} = 0.882$$

母线校验:

则实际环境温度为 35℃时，母线允许电流

$$I_{y\theta} = k_{\theta} \times I_y = 0.882 \times 234 = 206.38\text{A} > I_{gzd} = 73.35\text{A}$$

导线长期发热温度为：

$$\theta_c = \theta + (\theta_y - \theta) \times \left(\frac{I_{gzd}}{I_{y\theta}} \right)^2 = 35 + (70 - 35) \times \left(\frac{73.35}{206.38} \right)^2 = 39.4^{\circ}\text{C}$$

查表得： $C=99 \times 10^6$

短路时间 $t=t_b+t_f$

t_b ：主保护时间。取 0.06s

t_f ：全分闸时间。包括： t_g ：断路器固有分闸时间。取 0.1s

t_{hu} ：燃弧时间。取 0.04s

故短路时间 $t=0.06+0.1+0.04=0.2<1\text{s}$ 又 $I_{\infty}^{(3)} > I_{\infty}^{(2)}$

所以 $t_k=0.05B''=0.05\text{s}$ ($B''=I''/I_{\infty}^{(3)}=1$)

查表得 $t_{dz}=0.25\text{s}$

按热稳定条件所需的最小母线截面积为：

$$S_{zx} = \frac{I_{\infty}}{C} \sqrt{t_{dz} \times K_j} = \frac{1.2945 \times 10^3}{99 \times 10^6} \sqrt{0.25 \times 1} = 6.53\text{mm}^2 < 50\text{mm}^2$$

所以满足热稳定要求

所以 1~8 支路均可选用 LGJ—50 型导线。

4.2 隔离开关的选择

隔离开关也称刀闸，是变电站中使用最多的一种高压开关电器。隔离开关的主要用途以保证检修工作的安全，利用它将一次设备的检修部分和其它带电部分构成一定的明显可见的空气绝缘间隔。

4.2.1 110kV 侧进线隔离开关的选择：

选择户外隔离开关，根据额定电压，额定电流：

$$I_e \geq I_{g \cdot zd} = 73.63 \text{ A} \quad U_e \geq U_w \quad I_{ekd} \geq I_{dt} = I_{\infty} = 3.05 \text{ kA}$$

选择 GW5—110G/600~1000 型隔离开关，其技术数据如表 4-1:

表 4-1 GW5—110G/600~1000 型隔离开关技术数据表

型号	额定电压	额定电流	极限电流峰值	热稳定电流峰值
GW5	—			
110G/600~1000	110kV	600A	50kA	16 kA ² s

热稳定校验:

短路时间:

$$t = t_b + t_g + t_h = 0.1 + 0.06 + 0.25 = 0.41 \text{ s} \quad B'' = 1$$

$$t_{jz} = 0.05 B'' = 0.05 \text{ s}$$

查短路电流周期分量等值曲线得 $t_k = 0.3 \text{ s}$

$$\text{所以 } t_{dz} = 0.25 \text{ s} \quad I_{\infty}^2 t_{dz} = (3.05)^2 \times 0.25 < I_r^2 t = 16 \text{ kA}^2 \text{ s} \quad (4-9)$$

满足热稳定要求。

动稳定校验:

$$i_j = 50 \text{ kA} > i_{ch} = 7.78 \text{ kA}$$

满足动稳定要求。

4.2.2 10kV 侧隔离开关的选择:

选择户外隔离开关，根据额定电压，额定电流:

$$I_e \geq I_{g \cdot zd} = 809.9 \text{ A} \quad U_e \geq U_w = 10 \text{ kV} \quad I_{ekd} \geq I_{dt} = I_{\infty} = 6.9709 \text{ kA}$$

选择 GSN2—1000 型的隔离开关，其技术数据如表 4-2:

表 4-2 GSN2—1000 型的隔离开关技术数据表

型	号	额定电压	额定电流	极限电流峰值	热稳定电流峰值
GSN2—1000		10kV	1000A	80kA	26 kA ² s

热稳定校验:

短路时间: $t_{dz} = 0.25 \text{ s}$

$$I_{\infty}^2 t_{dz} = (6.9709)^2 \times 0.25 < I_r^2 t = 26 \text{ kA}^2 \text{ s}$$

满足热稳定要求。

动稳定校验:

$$i_j=80\text{kA}>i_{ch}=18.89\text{kA}$$

满足动稳定要求。

4. 2. 3 分段隔离开关的选择:

分段隔离开关的选择与 10kV 侧隔离开关的选择相同,选择 GSN2—1000 型的隔离开关。

4. 2. 4 10kV 侧出线隔离开关的选择:

以负荷最大的支路 L_7 支路进行选择。

$$I_{gzd}=73.35\text{A}$$

$$\text{根据 } I_e \geq I_{gzd}=73.35\text{A} \quad U_e \geq U_w=10\text{kV} \quad I_{ekd} \geq I_{dt}=I_{\infty}=1.2945\text{kA}$$

选择 GN1—10/200 型的隔离开关, 其技术数据如表 4-3:

表 4-3 GN1—10/200 型的隔离开关技术数据表

型 号	额定电压	额定电流	极限电流峰值	热稳定电流峰值
GN1—10/200	10kV	630A	25kA	$10 \times 5\text{kA}^2\text{s}$

热稳定校验:

短路时间:

$$t=t_b+t_g+t_h=1+0.05+0.1=1.15\text{ s}$$

$$\text{所以 } t_{fz}=0 \quad B''=1$$

查短路电流周期分量等值曲线得 $t_z=1\text{s}$

$$\text{所以 } t_{dz}=t_z+t_{fz}=1\text{s} \quad I_{\infty}^{(3)2}t_{dz}=1.2945^2 \times 1 < I_e^2 t$$

满足热稳定要求。

动稳定校验:

$$i_j=25\text{ kA}>i_{ch}=3.30\text{ kA}$$

满足动稳定要求。所以选择 GN1—10/200 型的隔离开关。

4.3 断路器的选择

断路器选择及校验标准

①按所工作电网的额定电压选择：断路器的额定电压应大于或等于电网的额定电压，即 $U_g \leq U_N$ ；

②按所工作回路的最大长期工作电流选择：断路器的额定电流应大于或等于所工作回路的最大长期工作电流，即 $I_{gld} \leq I_N$

4.3.1 110kV 断路器的选择：

根据安装地点选择为户外三相式 SF₆ 断路器

根据额定电压，额定电流：

$$I_e \geq I_{g*zd}=73.63A \quad U_e \geq U_w \quad I_{ekd} \geq I_{\infty}=3.05 \text{ kA}$$

选择 LW17—126 型 SF₆ 断路器（上海华通开关厂），其技术数据如表 4-4：

表 4-4 LW17—126 型 SF₆ 断路器技术数据表

型 号	额定电压	额定电流	极限电流值	额定断流量	热稳定电流峰值
LW17—126	$U_e=110\text{kV}$	$I_e=1000\text{A}$	$i_j=20\text{kA}$	$I_{ekd}=18.4\text{kA}$	$I^2t=(32) \times 1 \text{ kA}^2\text{s}$

热稳定校验：

短路时间： $t_{dz}=0.25\text{s}$

$$I_{\infty}^2 t_{dz}=3.05^2 \times 0.35 < I_r^2 t$$

满足热稳定要求。

动稳定校验：

$$i_j=20\text{kA} > i_{ch}=7.78\text{kA}$$

满足动稳定要求。

所以选择 LW17—126 型 SF₆ 断路器。

4.3.2 10kV 侧断路器的选择：

根据额定电压，额定电流：

$$I_e \geq I_{g*zd}=809.9A \quad U_e \geq U_w=10\text{kV} \quad I_{ekd} \geq I_{dt}=I_{\infty}=6.9709 \text{ kA}$$

选择 IN10/300 型真空断路器，其技术数据如表 4-5:

表 4-5 IN10/300 型真空断路器技术数据表

型 号	额定电压	额定电流	极限电流值	额定断流量	热稳定电流峰值
IN10/300	$U_e=10\text{kV}$	$I_e=1000\text{A}$	$i_j=44\text{kA}$	$I_{ekd}=50\text{kA}$	$I^2t=17.3^2 \times 4\text{kA}^2\text{s}$

真空断路器有如下特点:

1. 触头开距小，10kV 级的触头开距只有 10mm 左右，所需的操作功率小，动作快。
2. 燃烧时间短，燃烧时间与开断电流大小无关，一般只有半个周波，故称半周波断路器。
3. 触头间隙介质恢复速度快，对于开断近距离故障和开断电容电流性能较好。
4. 体积小，重量轻，便于柱上安装。
5. 能防火防爆。

热稳定校验:

$$t_{dz}=0.25\text{s} \quad I_{\infty}^2 t_{dz}=6.9709^2 \times 0.25 < I^2 t$$

满足热稳定要求。

动稳定校验:

$$i_j=50\text{kA} > i_{ch}=17.7759\text{kA}$$

满足动稳定要求。所以选择 IN10/300 型真空断路器。

4.3.3 10kV 母线分段断路器的选择:

分段断路器的选择与 10kV 侧断路器的选择相同。所以选择 IN10/300 型真空断路器。

4.3.4 10kV 侧出线断路器的选择:

根据地点，结构选择真空断路器。以负荷最大的支路 L_7 支路进行选择。

$$I_{g \cdot zd}=73.35\text{A}$$

$$\text{根据 } I_e \geq I_{g \cdot zd}=73.35\text{A} \quad U_e \geq U_w=10\text{kV} \quad I_{ekd} \geq I_{dt}=I_{\infty}=1.2945\text{kA}$$

选择 ZN10 型真空断路器，其技术数据如表 4-6:

表 4-6 ZN10 型真空断路器技术数据表

型 号	额定电压	额定电流	极限电流值	额定断流量	热稳定电流峰值
ZN10	$U_e=10\text{kV}$	$I_e=1000\text{A}$	$i_j=30\text{kA}$	$I_{ekd}=25\text{kA}$	$I^2t=15^2 \times 4\text{kA}^2\text{s}$

热稳定校验:

短路时间: $t_{dz}=0.25\text{s}$

$$I_{\infty}^2 t_{dz} = 1.2945^2 \times 1 < I_{rt}^2 t$$

满足热稳定要求。

动稳定校验:

$$i_j = 30 \text{ kA} > i_{ch} = 3.30 \text{ kA}$$

满足动稳定要求。

所以 1~8 支路均可选择 ZN10 型真空断路器。

4.4 电容器的选择:

为了提高电力系统的功率因数, 补偿电力系统感性负载的无功功率, 改善电压质量, 降低线路损耗, 需装设无功补偿电容器。另外, 我国供电规则规定: 大用户应安装电容器, 自行补偿功率因数到 0.95 以上; 其他用户的功率因数应在 0.85 以上, 以使供电部门可以充分利用输配电设备来输送有功功率。根据设计要求所要达到的功率因数 (无功补偿后) $\cos \psi_2 = 0.95$, 无功补偿前功率因数 $\cos \psi_1 = 0.85$ 。

负荷的有功功率为:

$$P = \sum S_{10 \text{ kV}} \times \cos \varphi_2 = 7496.81 \times 0.95 = 7121.96 \text{ kW} \quad (4-10)$$

要进行补偿的无功功率为

$$Q = P \times (tg \varphi_1 - tg \varphi_2) = 7121.96 \times (0.6197 - 0.3287) = 2072.49 \text{ kvar} \quad (4-11)$$

电容器的容量为:

$$\text{则电容由公式 } \frac{1}{2} Q = 3 w U^2 C \times 10^{-3}, \quad w = 2 \pi f \quad (4-12)$$

$$\text{得 } C = \frac{\frac{1}{2} Q \times 10^3}{3 w U^2} = \frac{\frac{1}{2} \times 2072.49 \times 10^3}{3 \times 2 \pi \times 50 \times \left(\frac{10}{\sqrt{3}}\right)^2} = 2116.4 \mu\text{F} \quad (4-13)$$

计算结果和实际情况选用可选 TBBK10-2400/100-3 型成套电力电容器装置。

其规格及主要参数如下:

干式, 难燃介质, 三相组, 银锌复合镀膜, 系统电压 10kV, 电力电容组容量 2400kvar 标称电容: 60.5 μf , 标称容量: 100 kW_{ar} 额定电流: 200A
(含配套的避雷器、接地刀闸、放电线圈)

4.5 绝缘子的选择

选择原则:

在电力系统中, 高压绝缘子及套管的用途是将电位不同的导体在机械上相互

连接，而在电气上则相互绝缘。变电站常用的绝缘子有支柱绝缘子、悬式绝缘子和耐张绝缘子。支柱绝缘子用于支持和固定母线，并使母线与地绝缘，需按额定电压选择并校验动稳定；悬式绝缘子主要用于固定屋外配电装置中的软母线，分为盘形悬式瓷绝缘子、防污盘形悬式瓷绝缘子和盘形悬式钢化玻璃绝缘子三种。悬式绝缘子选择项目主要是型号和绝缘子串的片数，需按额定电压和最大长期工作电流选择并校验动稳定和热稳定，而片数的选取按正常工作电压下泄漏距离来确定；

因为本次设计我选择都是软母线,所以根据选择原则我选择的绝缘子都是悬式绝缘子。

4.5.1 高压侧绝缘子的选择:

按装设地点和额定电压选择 X—4.5 型悬式绝缘子（西安电瓷厂），其技术数据如表 4-7。

表 4-7 X—4.5 型悬式绝缘子技术数据表

型 号	泄漏 距离 (mm)	工频试验电压			50%全波冲击 闪络电压 (kV 幅值)	机械故障负荷 kg	
		干	湿	击穿		1 小时	破 坏
X—4.5	290	75kV	45kV	110kV	120	4500	6000

在 110kV 侧按正常工作电压下泄漏距离选择悬式绝缘子的片数，其公式为

$$n = \frac{dU}{s}$$
 其中 n—绝缘子的片数；d—泄漏距离，取 1.6cm/kV；s—每片绝缘子的泄漏距离，取 29cm；U—电网额定电压（kV）。

$$\text{则 110kV 线路: } n_1 = \frac{dU_1}{s} = \frac{1.6 \times 110}{29} = 6.06 \quad (4-14)$$

考虑出现一片故障的情况应加 1 n=6.06+1=7.06 取
 n=8
 所以在 110kV 侧装设 8 片悬式绝缘子。

4.5.2 低压侧绝缘子的选择:

按正常工作电压下泄漏距离选择悬式绝缘子的片数，其公式为：
$$n = \frac{dU}{s}$$

 其中 n—绝缘子的片数；d—泄漏距离，取 1.6cm/kV；s—每片绝缘子的泄漏距离，取 29.53cm；U—电网额定电压（kV）。

$$\text{则 10kV 线路: } n_2 = \frac{dU_2}{s} = \frac{1.6 \times 10}{29.53} = 0.5418$$

所以在 10kV 侧装设 1 片 XWP2—20 棒型悬式绝缘子,10kV 每条出线侧装设 1 片 XWP2—20 棒型悬式绝缘子。

表 4-8 XWP2—20 棒型悬式绝缘子技术数据表

型 号	泄漏	工频试验电压			50％全波冲击	机械故障负荷 kg	
	距离 (mm)	干	湿	击穿	闪络电压 (kV 幅值)	1 小时	破 坏
X WP2 — 20	2953	75kV	45kV	10kV	120	3500	4000

4. 6 熔断器的选择

熔断器串联在电路中使用,当电路中通过过负荷电流时,利用熔体产生的热量使它自身熔断,切断电路,以达到保护的目的。

选择原则:

查《电力工程电气设计手册》,根据地点和构造形式选择熔断器,必须使熔断器的额定电压等于或大于所在电网的额定电压,即: $U_e \geq U_w=10KV$ 高压熔断器熔管的额定电流应大于或等于熔体的额定电流。跌落式熔断器在灭弧时,会喷出大量游离气体,并发出很大响声,故一般只在户外使用。本次设计电器设备都在屋外,所以可以选择跌落式高压熔断器。

4. 6. 1 保护电压互感器用熔断器的选择:

根据额定电压选择: $V_e \geq V_w=10kV$ $S_{ekd} \geq S_d$ (4-15)

同时,必须满足下列条件 $I_{erq} \geq I_{erj} \geq I_{gzd}$ (4-16)

式中 I_{erq} ——熔断器的额定电流

I_{erj} ——熔件的额定电流 $I_{erj} = K_b I_{eb}$ (I_{eb} : 变压器高压侧的额定电流)

按额定开断电流选择 应满足—— $I_{ekd} \geq I_{ch}$ (或 I'') (kA)

I_{ekd} ——熔断器的额定开断电流, kA

i_{ch} ——短路冲击电流的有效值, $i_{ch} = 1.52 I''$, 选择非限流的熔断器用此值

I'' ——次暂态电流有效值, 选择限流的熔断器用此值

则通过熔断器的最大长期工作电流为 $I_{gzd}=73.35\text{A}$

熔件的额定电流为 $I_{erj}=K_b I_{eb}=\frac{1.5\times 1080}{\sqrt{3}\times 10}=93.53\text{A}$ (4-17)

由于限流式高压熔断器的切断短路电流的能力使用额定断流容量来表示的，所以应计算短路容量，短路电流应采用次暂态电流有效值 I'' ，故三相短路容量为

$$S_d=\sqrt{3} U_p I''=\sqrt{3}\times 10\times 1.52\times 1.2945=34.08\text{MVA} \tag{4-18}$$

根据 $U_w=10\text{kV}$ ， $I_{gzd}=73.35\text{A}$ ， $I_{erj}=93.53\text{A}$

决定选用 RN₂—10 型跌落式高压熔断器，其技术数据如表 4-9。

表 4-9 RN₂—10 型熔断器技术数据表

产品型号	额定电压	额定电流范围	最大切断电流	最大切断容量
RN ₂ —10	10kV	0.5kA	50kV	1000MVA

熔断器的校验：

熔件的额定电流规格化可选 $I_{erj}=95\text{A}$ 则 $I_{erj}=500\text{A}>I_{erj}=95\text{A}>I_{gzd}=73.35\text{A}$ 满足额定

电流选择的条件。额定断流容量 $S_{ekd}=1000\text{MVA}\geq S_d$ 满足额定熔断器开断短路电流能力的要求。

4. 6. 2 保护电容器的熔断器的选择：

电容器在工作时合闸会产生非常大的冲击电流，会使熔断器熔断，但此时熔件不应该熔断，它不应该工作。熔件的额定电流应按以下计算：

$$I_{erj}=K_c I_{ec} \quad K_c: \text{系数,取 } 1.3\sim 1.8 \quad I_{ec}: \text{电容器的额定电流: } 200\text{A}$$

$$I_{ec}=S_e/1.732U_e=2400/1.732\times 10=138.56\text{A}$$

$$I_{erj}=1.5\times 200=300\text{A}$$

$$I_{gzd}=73.35\text{A}$$

$$S_d=\sqrt{3} U_p I''=\sqrt{3}\times 10\times 1.52\times 1.2945=34.08\text{MVA}$$

由 $U_e=10\text{kV}$,选择 RN₁—3 型高压熔断器，其技术数据如表 4-10:

表 4-10 RN₁—3 型高压熔断器技术数据表

型号	额定电压 (kV)	额定电流 (A)	断流容量 (三相) MVA	最大切断电流 (kA)
RN ₁ —3	10.5	400	≥ 200	4

熔断器的校验:

熔件的额定电流规格化可选 $I_{erj} = 140A$ 则 $I_{erq} = 400A > I_{erj} = 300A > I_{gzd}$

73.35A 满足额定电流选择的条件。额定断流容量 $S_{ekd} = 200MVA \geq S_d$ 满足额定熔断器开断短路电流能力的要求。

4. 6. 3 所用变压器配套熔断器的选择

通过熔断器的最大长期工作电流 $I_{gzd} = 1.05 \times 200 / (\sqrt{3} \times 10) = 12.125 A$

熔体的额定电流 $I_{ert} = K_b * I_{eb} = 1.5 \times \frac{I_{gzd}}{1.05} = 17.32 A$

三相短路容量 $S_d = \sqrt{3} V_B I_{ch} = \sqrt{3} \times 10.5 \times 1.112 \times 0.771 = 17.62 MVA$

根据 $U_w = 10kV$, $I_{gzd} = 12.125A$, $I_{ert} = 17.32A$, $S_d = 17.62MVA$

决定选择 RW10—35/2 型户外交流高压熔断器, 其技术数据如表 4-11:

表 4-11 RW10—35/2 熔断器技术数据表

型号	额定电压 (kV)	额定电流 (A)	断流容量 (三相) MVA	最大切断电流 (kA)
RW10-35	40.5	200	600	28

熔断器的校验与保护电压互感器的熔断器相同, 具体如下:

熔件的额定电流规格化可选 $I_{erj} = 20A$ 则 $I_{erq} = 200A > I_{erj} = 20A > I_{gzd} = 73.35A$ 满足额定电流

选择的条件。额定断流容量 $S_{ekd} = 600MVA \geq S_d$ 满足额定熔断器开断短路电流能力的要求。

4. 7 电流互感器的选择

电流互感器的作用是将高压设备中的额定大电流变换成 5A 或 1A 的小电流, 以便继电器保护装置或仪表用于测量电流。

4. 7. 1 110kV 侧电流互感器的选择:

根据电流互感器的额定电压不小于安装处的电网额定电压, 即

$$U_e \geq U_w = 110 kV$$

电流互感器的一次额定电流不小于流过它的最大长期工作电流, 即

$$I_{1e} \geq I_{gzd} = 73.63A$$

选择 LQI—110 型环氧树脂浇注绝缘户外用电流互感器，技术数据如表 4-12: 表 4-12

LQI—110 型环氧树脂浇注绝缘户外用电流互感器技术数据表

型 号	额 定 电 流 比 (A)	级次组合	准确级次	动稳定电流峰 值	1s 热稳定电流 有效值
LQI—110	300/5	D1D/0.5	0.5	135kA	75kA

1) 电流互感器的校验

热稳定校验:

$$(I_{le} k_r)^2 t = (0.3 \times 135)^2 \times 1 > I_{\infty}^2 t_{dz} = 3.05^2 \times 0.25 \quad (4-19)$$

所以满足热稳定校验。

动稳定校验:

校验内部动稳定需满足:

$$\sqrt{2} I_{le} K_d \geq i_{ch} \quad (4-20)$$

式中 K_d —— 电流互感器的动稳定倍数, $K_d = \frac{i_j}{\sqrt{2} I_{le}}$

i_{ch} —— 短路冲击电流的幅值, kA

$$\sqrt{2} I_{le} K_d = \sqrt{2} \times 0.3 \times 135 = 57.267 \text{ kA} > i_{ch} = 7.78 \text{ kA}$$

所以满足内部稳定要求。

校验外部动稳定要求需满足:

$$1.414 k_1 k_2 k_d i_e \geq i_{ch} \quad (4-21)$$

$$k_1 = (\alpha / 0.4)^{1/2} = (0.25 / 0.4)^{1/2} = 0.79 \quad \alpha: \text{相间距离} \quad (4-22)$$

电流互感器绝缘帽端部至最近一个母线支柱绝缘子的距离 $L=0.5$,

此时 $L=0.5$, 此时 $k_2=1$ $k_d=135 \text{ kA}$

$$1.414 k_1 k_2 k_d i_e = 0.79 \times 1 \times 75 \times 1.414 \times 0.3 = 17.75 \text{ kA}$$

而 $1.414 k_1 k_2 k_d i_e > i_{ch} = 7.78 \text{ kA}$

所以满足外部稳定要求。

4. 7. 2 10kV 侧电流互感器的选择:

根据电压等级和电流互感器安装处的最大按长期工作电流选择

$$U_e \geq U_W = 10 \text{ kV}, I_e \geq I_{gzd} = 809.9 \text{ A}$$

选择 LRD—80 型电流互感器，技术数据如表 4-13:

表 4-13 LRD—80 型电流互感器技术数据表

型 号	额 定 电 流 比 (A)	级次组合	准确级次	动稳定电流峰 值	1s 热稳定电流 有效值
LRD—80	200/5	0.5/s	0.5	50kA	90kA

热稳定校验:

$$(I_{ley} \cdot K_r)^2 \cdot t = (0.2 \times 50)^2 \times 1 = 100 > I_\infty^2 \cdot t_{dz} = 0.654(\text{kA}^2 \cdot \text{s})$$

所以满足热稳定校验。

动稳定校验:

校验内部动稳定需满足:

内部动稳定校验

$$\sqrt{2} \cdot I_{ley} \cdot K_d = \sqrt{2} \times 0.2 \times 90 = 25.45 > i_{ch} = 17.7759(\text{kA})$$

外部动稳定校验

$$K_1 \cdot K_2 \cdot K_d \cdot \sqrt{2} \cdot I_{le} = 0.79 \times 1 \times 90 \times \sqrt{2} \times 0.2 = 20.1 > i_{ch} = 17.7759(\text{kA})$$

所以满足内部稳定要求。

4. 7. 3 分段母线处电流互感器的选择:

分段母线处与 10kV 侧进线相同，所以选择 LRD—60 型电流互感器。

4. 7. 4 10kV 侧出线电流互感器的选择:

根据电压等级和电流互感器安装处的最大按长期工作电流选择

$$U_e \geq U_w = 10\text{kV}, I_e \geq I_{gzd} = 73.35\text{A}$$

选择 LDJ—10Q 型电流互感器，其技术数据如表 4-14:

表 4-14 LDJ—10Q 型电流互感器技术数据表

型 号	额 定 电 流 比 (A)	级次组合	准确级次	动稳定电流峰 值	1s 热稳定电流 有效值
LDJ—10Q	300/5	0.5	0.5	160kA	75kA

热稳定校验:

$$(I_{ley} \cdot K_r)^2 \cdot t = (0.3 \times 160)^2 \times 1 = 2034 > I_\infty^2 \cdot t_{dz} = 1.3415(\text{kA}^2 \cdot \text{s})$$

所以满足热稳定校验。

动稳定校验:

校验内部动稳定需满足:

$$1.414 I_e K_d > i_{ch} = 2.567 \text{ kA} \quad K_d: \text{电流互感器动稳定倍数}$$

$$\text{而 } 1.414 I_e K_d = 1.414 \times 300 \times 160 = 67.875 \text{ kA} > 2.678 \text{ kA}$$

所以满足内部稳定要求。

校验外部动稳定要求需满足:

$$\sqrt{2} \cdot I_{1ey} \cdot K_d = \sqrt{2} \times 0.3 \times 75 = 31.8 \text{ kA} > i_{ch} = 3.30 (\text{kA}^2 \cdot \text{s})$$

$$k_1 = (a/0.4)^{1/2} = (0.25/0.4)^{1/2} = 0.79 \quad a: \text{相间距离}$$

电流互感器绝缘帽端部至最近一个母线支柱绝缘子的距离 $l=0.5$,

此时 $l=0.5$, 此时 $k_2=1$ $k_d=90$

$$1.414 k_1 k_2 k_d i_e = 0.79 \times 1 \times 160 \times 1.414 \times 0.3 = 53.31 \text{ kA}$$

$$\text{而 } 1.414 k_1 k_2 k_d i_e > i_{ch}$$

所以满足外部稳定要求。

4.8 电压互感器的选择:

电压互感器的任务是将很高的电压准确地变换至二次保护及二次仪表的允许电压,使继电器和仪表既能在低电压情况下工作,又能准确地反映电力系统中高压设备的运行情况。

选择原则

- (1) 型式: 根据具体情况选择结构形式。110kV 配电装置一般采用串级式电磁式电压互感器;
- (2) 按所工作的电网额定电压选择: 要求电压互感器的原边电压满足下列条件: $0.9U_N < U_N < 1.1U_N$ 。 U_N 为互感器额定线电压, 0.9 和 1.1 为允许的电压波动范围, 即 $\pm 10\% U_N$ 。
- (3) 按电压互感器安装地点选择: 户内或户外。
- (4) 按准确等级选择: 电压互感器应在哪一准确级下工作, 需根据接入的测量仪表, 继电器和自动装置等设备的型式、用途及对准确级的要求来确定。供计量电费用的表计所接的电压互感器要求为 0.5 级, 供监视设备运行状态用的表计所接的电压互感器为 1 级, 供非主要表计所接的电压互感器要求为 3 级。

根据互感器的用途, 装设地点及额定电压, 初选户外式 JDZX10—10Q 型单相三线圈电压互感器, 其技术数据如下:

最大容量: 400VA 额定电压比: 10/1.732 (原线圈) 0.1/1.732 (副线圈)
0.1/3 (辅助线圈)

额定容量: 0.5 级 50VA 1 级 80VA 3 级 200VA

由于接入了电度表, 所以电压互感器的准确度等级选 0.5 级。接二次负荷选择电压互感器应作如下总计算:

数据如表 4-15。

表 4-15 数据统计表

仪表名称	仪表型号	每线圈消耗功率 (VA)	$\cos \psi$
有功功率表	1D ₁ —W	0.75	2
无功功率表	1D ₁ —V _{ar}	0.75	1
有功电度表	DS ₁	1.5	0.38
频率表	1D ₁ —H _z	2	1
电压表	1T ₁ —V	5	1

电压互感器和测量仪表的三线接线图如图 4-1 所示。

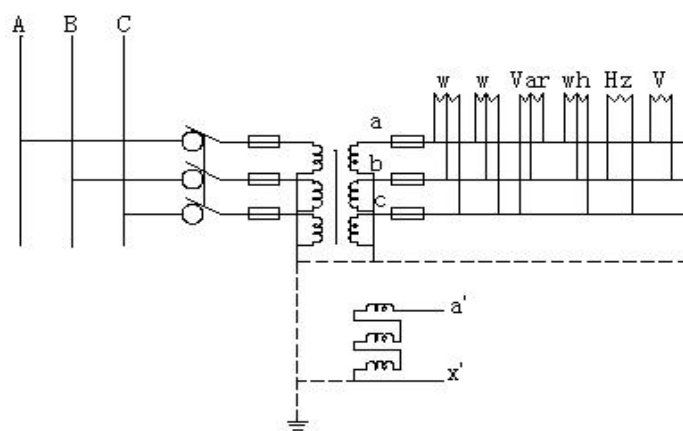


图 4-1 三线接线图

首先计算各相负荷，然后取最大一相负荷与一相额定容量相比较。

$$P_{ab} = 2 \times 0.75 + 0.75 + 1.5 \times 0.38 + 5 = 7.82(\text{W})$$

$$Q_{ab} = 1.5 \times \sqrt{1 - 0.38^2} = 1.39(\text{var})$$

$$S_{ab} = \sqrt{P_{ab}^2 + Q_{ab}^2} = 7.94(\text{VA})$$

$$\cos \varphi_{ab} = \frac{P_{ab}}{S_{ab}} = 0.985; \quad \varphi_{ab} = 9^\circ 58'$$

$$P_{bc} = 2 \times 0.75 + 0.75 + 1.5 \times 0.38 + 2 = 4.82(\text{W})$$

$$Q_{ab} = 1.5 \times \sqrt{1 - 0.38^2} = 1.39(\text{var})$$

$$S_{ab} = \sqrt{P_{ab}^2 + Q_{ab}^2} = 5.02(\text{VA})$$

$$\cos \varphi_{ab} = \frac{P_{ab}}{S_{ab}} = 0.960; \quad \varphi_{ab} = 16^\circ 13'$$

A 相负荷为:

$$P_A = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot S_{ab} \cdot \cos(\varphi_{ab} - 30^\circ) = \frac{7.94}{\sqrt{3}} \times \cos(9^\circ 58' - 30^\circ) = 4.3(\text{W})$$

$$Q_A = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot S_{ab} \cdot \sin(\varphi_{ab} - 30^\circ) = \frac{7.94}{\sqrt{3}} \times \sin(9^\circ 58' - 30^\circ) = -1.57(\text{var})$$

B 相负荷为:

$$P_B = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot [S_{ab} \cdot \cos(\varphi_{ab} + 30^\circ) + S_{bc} \cdot \cos(\varphi_{bc} - 30^\circ)] = 6.48(\text{W})$$

$$Q_B = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot [S_{ab} \cdot \sin(\varphi_{ab} + 30^\circ) + S_{bc} \cdot \sin(\varphi_{bc} - 30^\circ)] = 2.06(\text{var})$$

经计算可知 B 相负荷最大, 其值为 $S_b = \sqrt{P_B^2 + Q_B^2} = 6.799\text{VA}$

0.5 级的 JDZX11—10 型电压互感器一次额定容量为 $90/3=30\text{VA}$, 此值大于它的最大一相负荷

S_B , 因此满足要求。

决定选择 0.5 级的 JDZX12—10 型电压互感器。

4.9 接地（所用）变压器的选择

根据调查所用负荷如表 4-16

表 4-16: 负荷统计表

项 目	容量 kVA
变电站检修间及油处理室动力电源	32.29
照明负荷	54.70
电热负荷	61.72
其它动力负荷	29.80
累计负荷	186.51

根据设计要求本变电站 10 年, 将所用变置于低压 10kV 侧, 在有一台进行检修或故障而另一台主变运行时能够保障所用变正常运行。所以选择两台 DSBC—200/10.5—80/0.4 型变压器作为所用变压器(接地变压器)。

其技术数据如表 4-17:

表 4-17 DSBC—200/10.5—80/0.4 型变压器技术数据表

空载损耗 (kW)	负载损耗 (kW)	空载电流%	阻抗电压%
15.6	76	0.85	6

DS(D)BC—200/10.5—80/0.4 型油浸式接地变压器

额定容量: 23~6500kVA

额定电压: 10~66kV

可带低压额定电压为 0.23~0.4kV 二次绕组

DS(D)BC—200/10.5—80/0.4 型油浸式接地变压器为三相变压器, 用来为无中性点的系统提供一个人为的、可带负载的中性点, 供系统接地。其接地方式有: 直接接地、与消弧线圈或电阻器或接地电抗器组合接地等, 接地变压器可带一个供连续使用的二次绕组, 做为变电站站用电源。此接地变压器优点是损耗低, 噪声低, 性能可靠。本次设计我选择了 DS(D)B 系列油浸式接地变压器与消弧线圈配合使用

4. 10 消弧线圈的选择

与所用变压器配套选择 XDC—150/10 干式消弧线圈, 其技术参数如下:

额定容量 : 55~5500kVA

额定电压: 10kV

调节方式: 无载调谐及有载调谐; 调匝、调容

级 差: 等差、等比 调节级数: 5~32 级

其作用是当电力系统三相线路发生单相接地时, 产生电感电流, 抵消因线路单相接地而产生的电容电流, 从而消除因单相接地所产生的电弧, 避免故障范围的扩大, 以提高供电系统安全性和可靠性。

5. 配电装置布置

配电装置是变电站的重要组成部分。它是按主接线的要求，由关联设备保护、测量电器、母线和必要的辅助设备构成，用来接受和分配电能。配电装置的类型较多，主要有屋外配电装置、屋内配电装置、成套配电装置和SF₆全封闭电器配电装置。大中型变电站中，35kV 及以上的配电装置多采用屋外配电装置，配电装置的设计原则：

1. 运行安全和操作巡视方便；
2. 考虑检修和安装条件；

本变电站占地面积为 70×80m² 配电装置的形式：采用中型布置，便于工作人员地面活动且接线交叉少。110kV、10kV 系统均采用屋外配电装置。根据线路走向和地理条件，110kV 线路由北引进，同主接线相对应。

根据以上的原则和配电装置的形式我设计了配电装置图。见图 5—1。(详图见附表)。

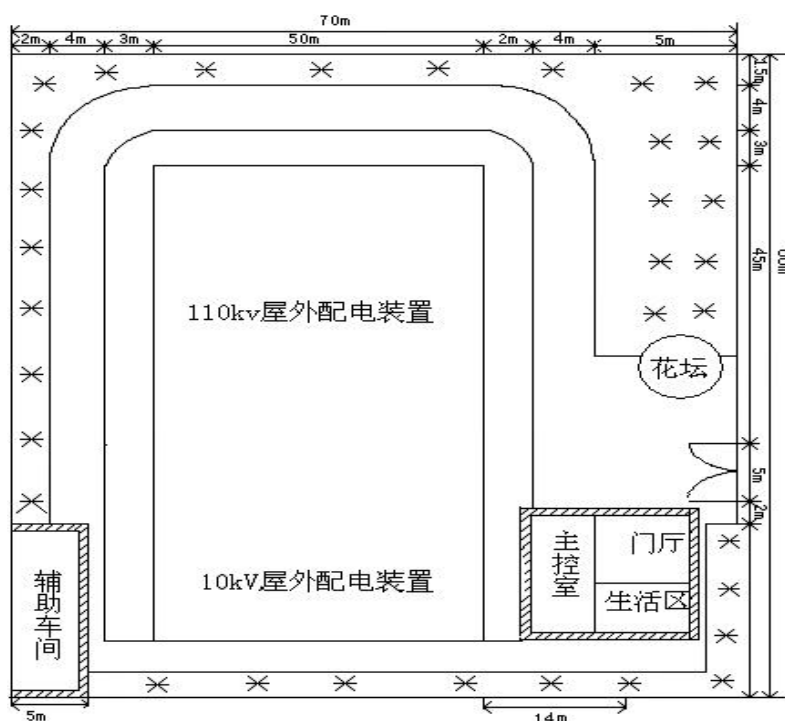


图 5-1 配电装置图

6 接地保护

6.1 保护接地的目的:

电气设备某些部位在正常运行时是不带电的,但在发生故障时就会带电,已造成灼伤和电击等人身事故。为了限制电气设备故障时作用于人体的电压,从而达到限制流过人体的电流,保护人员安全的目的,工程上讲这些正常工作时不带电而绝缘损坏时有可能带电的部位与大地作良好的电气连接,这种接地起到保护人身安全的作用,因此成为保护接地。

6.2 保护接地的原理:

采用保护接地后,其触电对地电压 $U_d = I_d \times R_d$, (6-1) 式中 I_d —单相接地电流, A; R_d

—接地装置的接地电阻, Ω 。若人触电后,通过人体的电流 $I_r = \frac{R_d}{R_d + R_r + R_{jc}} \times I_d$, (6-2)

其中 R_r —人体电阻, Ω ; R_{jc} —人体与机壳、地面的接触电阻, Ω ; R_d —接地装置的接地电阻, Ω 。由此可知,流过人体的电流与人体电阻 R_r 、人体接触电阻 R_{jc} 和接地电阻 R_d 有关。 R_r 与 R_{jc} 的值愈小,通过人体的电流愈大。人体电阻 R_r 与人的皮肤状况、触电面积、触电部位、电流通过的时间、电极间的电压等因素有关。因此只要适当地选择 R_d 就可以使触电时流过人体的电流在安全值以下,达到保证人身安全的目的。

6.3 接触电压和跨步电压:

接地装置是由埋入土中的金属接地体和连接用的接地线所构成的。当电气设备绝缘损坏发生接地时,在距接地体15-20m以外的地方,散流电阻实际上接近于零。接地电位愈低,地面电位的分布愈均匀,则接触电压和跨步电压也愈小。

6.4 小接地短路电流系统:

当发生单相接地短路时,单相接地电流 I_d 较小,继电保护不动作于跳闸切除故障而动作于信号报警。因此,单相接地的时间可能很长,即故障设备上存在的由于接地而产生的高电位时间较长,工作人员接触的机率较大。所以应当限制系统发生接地故障时在接地装置上产生的高电位。

$$110\text{kV 侧: } I_{jd1} = \frac{U_e * L_j}{350} = 22\text{A} \quad (6-3) \quad \text{接地电阻 } R_{jd1} \leq \frac{120}{22} = 5.455 \Omega$$

$$10\text{kV 侧: } I_{jd3} = \frac{U_e * L_j}{350} = 2.114\text{A} \quad \text{接地电阻: } R_{jd3} \leq 56.757 \Omega$$

对于中性点不接地系统, 规定 $R_d \leq 10 \Omega$

6.5 大接地短路电流系统:

在这种系统中接地短路电流大, 在接地体上产生的电位也高, 但继电保护动作切除故障迅速, 电气设备外壳处于危险高电位下的时间短, 人们在此时刻接触带电部位的机率非常小。《电力设备

接地设计规程》规定, 单相接地时, 接地电位不得超过 2000V, 相应的接地电阻为 $R_d = \frac{2000}{I_{jd}} (\Omega)$,

(6-4) 当 $I_{jd} > 4000\text{A}$ 时, 接地电阻在一年内任何季节不应超过 0.5Ω , 即 $R_d \leq 0.5 \Omega$

6.6 计算人工接地电阻:

人工接地体与自然接地体是并联的, 并联后的总电阻应达到 4Ω , 所以人工接地电阻为:

$$R_{rw} = \frac{R_z * R}{R_z - R} = 5.14 \Omega > 1 \Omega, \quad (6-5) \quad \text{对于大接地短路电流系统, 规定人工接地网的接地电阻不应}$$

大于 1Ω , 所以取 $R_{rw} = 1 \Omega$ 。

6.7 人工接地装置的确定:

人工接地体包括水平、垂直两部分, 水平接地体可选扁钢, 垂直接地体可选钢条。垂直接地体的优点是 R_{jd} 随季节的变化小, 缺点是当垂直接地体相距离很近时, 互相的屏蔽作用, 使每个接地体的散流作用很低。

6.7.1 单根垂直接地体的接地电阻的确定:

土壤电阻率 $\rho = \rho_0 * \psi = 100 \times 1.5 = 150 \Omega \cdot \text{m}$, (6-6) 由于土壤电阻率不高, 固人工接地装置采用垂直接地体为主, 上端用规格为 $4 \times 10\text{mm}$ 扁钢连接, 构成环路式接地装置, 钢管上端埋入土中深度为 0.8m , 垂直接地体采用长 $L=2.5\text{m}$, 直径为 $60 \times 10^{-3}\text{m}$ 的钢管。单根接地体的接地电阻为:

$$R_c = \frac{\rho}{2\pi \times l} * \ln \frac{4l}{a} = 48.85 \Omega \quad (6-7)$$

6.7.2 接地体根数的确定:

假定钢管之间的距离 $a=7.5\text{m}$, 则 $a/l=3$, 根据 $R_c / R_w = 48.85$, 初选 $n=60$ 根, 查表得

$$\eta_c = 0.67, \quad n = \frac{0.9R_c}{R_{rw}\eta_c} = 65.62 \approx 66 \text{ 根} \quad (6-8)$$

决定选 70 根钢管, 验算人工接地电阻, 查表取 $\eta_c = 0.63$, 则 $R_{rw} = \frac{0.9R_c}{n * \eta_c} = 0.997 \Omega < 1 \Omega$, 满足

人工接地电阻 $R_{rw} = 1 \Omega$ 的要求。

110kV 配电区每隔 9m 架设一条均压带以使电位分布均匀, 均压带采用截面积不小于 24mm^2 的扁钢, 其埋深为 0.6m 。

由于接地电阻的计算引入不少假设条件, 所以在现场敷设接地装置以后, 必须对接地电阻加以实际测量和核算, 若不满足要求必须补埋接地体, 达到设计要求。

第七章 220kV 变电站设计

1. 前言

1.1 目的及意义

电力是国民经济的重要保证，为现代化生产提供主要动力能源，是我国现代化建设的先行官。它与广大人民群众生产、生活和国民经济发展息息相关。随着经济的快速发展、科技水平的不断进步，对电力的要求也日益提高。因此电力事业的发展和建设，对我国工业和农业生产的迅速发展和人民物质生活水平的日益提高，起到了巨大的作用和深远影响。

1.2 发展概况

目前，随着我国经济建设的大力发展，对电力的需求日益增高。国家对城市和农村电力网结构都进行的大规模的改造，与此相应，作为电力输送枢纽的城乡变电站，也必须进行大跨步地更新换代。我国电力网的现实情况是常规变电站依然存在，小型变电站、微机监测变电站、综合自动化变电站相继出现，并取得迅猛发展。

我国农村乡镇工业大量涌现，用电结构发生根本变化，用电发展速度高于城市，而我国的大部分农村电网薄弱，终端变电站数量少，供电半径长，线路损耗大，使线路末梢的用户电压过低，电能质量差，影响人们正常的生活和生产，导致电价过高，严重束缚了我国农村电力事业的发展。城网、农网改造的主要目的是建设现代化的电力网络，与世界先进电力网接轨。所谓接轨是指向世界先进的电力网指标接轨，这些指标可以提高电力网的供电可靠性，降低线路损耗，改善电压质量，增加电力企业的经济效益。进入 21 世纪后，我国电力仍将以较高的速度和更大的规模发展，电源和电网建设的任务仍很重。

其中 220kV 变电站作为区域枢纽变电站的典型代表之一，承担着工农业和人民生产、生活的供电任务，为了满足社会发展需求，顺应时代潮流检验自己所学专业课程，我的课程设计选择了 220kV 地区变电站的设计。

2. 变电站选址的自然条件及地理条件

本变电站、所址尽量选在负荷中心和城市工业区边缘，既要考虑工业及城市重要负荷的需要，又要考虑到农业生产一般负荷的需要。要满足进出线方便尽量少占农田等要求。。

2.1 自然条件:

最高气温 38.9℃，最低气温-10℃，年平均气温 21.7℃，普通变压器可正常工作，不需考虑特殊的电气设备；年平均风速 2.5m/s，但夏秋季常受台风影响，所以架空线路的机械强度及对屋外配电装置的影响应予以考虑；虽全年多盛行东北偏北风，但强风日数多来自台风季节的东南风，所以变电站应以东南、西北走向为宜；（根据《高压配电装置设计技术规程》第 10 条）全年只有短暂的霜冻和结冰现象，不必考虑覆冰问题；无冻土情况发生，接地装置地下部分不必过深即可保证可靠接地；地震烈度不大，不必设置防震保护，可以考虑采用半高型或高型布置；（根据《高压配电装置设计技术规程》第 11 条）土壤电阻率小于 500Ω.m，可考虑采用构架式避雷针；（根据《电力设备过电压保护设计规程》第 71 条）年雷暴日数为 88.8 天，防雷装置的选取应加以考虑；周围环境较清洁，化工厂对本所影响不大，但年雾日为 18 天，地处沿海地区的盐雾很容易引起污闪，所以对绝缘子串和变电设备外绝缘的影响应予以考虑。（根据《高压配电装置设计技术规程》第 8 条）

2.2 地理位置条件:

本变电站建于城市边缘的工业区附近，以工业用户为主。所区地势平坦，配电装置的布置不必考虑特殊方式。海拔 21.5m，不必采用高海拔设备。交通发达，有铁路和高等级公路经过本所附近，不必过多考虑设备的运输问题。

3. 主变的选择和主接线的确定

安全可靠是电力生产的主要任务，保证供电可靠和电能质量是对主变和主接线的最基本要求。电气主接线方案的确定应在对原始资料充分分析的基础上，综合考虑可靠性、灵活性和经济性等基本要求，并应做到技术先进、供电安全可靠及经济费用合理。

3.1 负荷统计表

线路中 1~5 为 110kV 出线，6~11 为 10kV 出线
负荷统计见表 3-1

表 3-1 负荷统计表

序号	回路名称	需用系数	配电容量 kVA	线长 km	供电回数
1	乐宋甲线	0.80	12000	100	1
		0.70	2000		
		0.75	6000		
2	乐宋乙线	0.70	8000	100	1
		0.70	4000		
		0.75	5000		
3	乐榆甲线	0.70	5000	100	1
		0.75	6000		
		0.70	8000		
4	乐榆乙线	0.75	7000	100	1
		0.70	6000		
		0.60	5000		
5	乐东线	0.80	6000	100	1
		0.80	7000		
		0.75	6000		
6	永胜甲线	0.75	5000		
		0.85	4000	15	1
		0.65	6000		
7	永胜乙线	0.70	6000	12	2
		0.75	8000		
		0.75	7000		
8	丰乐甲线	0.60	6000	10	1
		0.60	3000		
		0.75	4000		
		0.70	4000	13	1

9	丰乐乙线	0.80	7000	12	1
		0.80	3000		
		0.75	5000		
10	丰林甲线	0.60	4000	14	1
		0.70	2000		
		0.70	5000		
11	丰林乙线	0.75	5000		
		0.70	4000		

3.2 主变压器的选择

(1) 各回路的计算负荷, 根据公式 $S_{jsi} = K_{nk} \times S_{ei}$ (1) 得

$$\text{线路 1 } S_{js1} = 8000 \times 0.70 + 6000 \times 0.80 + 7000 \times 0.75 = 15650 \text{ kVA}$$

$$\text{线路 2 } S_{js2} = 8000 \times 0.80 + 6000 \times 0.8 + 12000 \times 0.70 = 19600 \text{ kVA}$$

$$\text{线路 3 } S_{js3} = 7000 \times 0.75 + 5000 \times 0.80 + 6000 \times 0.60 = 12850 \text{ kVA}$$

$$\text{线路 4 } S_{js4} = 7000 \times 0.85 + 5000 \times 0.75 + 4000 \times 0.75 = 12700 \text{ kVA}$$

$$\text{线路 5 } S_{js5} = 6000 \times 0.80 + 7000 \times 0.75 + 7000 \times 0.80 = 15650 \text{ kVA}$$

$$\text{线路 6 } S_{js6} = 7000 \times 0.65 + 6000 \times 0.80 + 6000 \times 0.70 = 13550 \text{ kVA}$$

$$\text{线路 7 } S_{js7} = 6000 \times 0.80 + 7000 \times 0.80 + 6000 \times 0.85 = 15450 \text{ kVA}$$

$$\text{线路 8 } S_{js8} = 6000 \times 0.80 + 2000 \times 0.75 + 3000 \times 0.75 = 8550 \text{ kVA}$$

$$\text{线路 9 } S_{js9} = 5000 \times 0.60 + 6000 \times 0.80 + 4000 \times 0.80 = 11000 \text{ kVA}$$

$$\text{线路 10 } S_{js10} = 5000 \times 0.75 + 4000 \times 0.60 + 2000 \times 0.70 = 7550 \text{ kVA}$$

$$\text{线路 11 } S_{js11} = 5000 \times 0.70 + 5000 \times 0.75 + 4000 \times 0.70 = 10050 \text{ kVA}$$

(2) 变电站最大负荷计算

$$\text{由 } S_{js} = K_t \sum_{i=1}^n S_{jsi} (1 + x\%)$$

K_t ——同时系数, 一般取 0.85—0.90。

$x\%$ ——线损率, 高低压网络的综合线损率为 7%。

$$\text{得 } S_{js} = 0.85 \times 121210 \times (1 + 7\%) = 1296940.7 \text{ kVA}$$

对于本所要考虑 5 年的发展前景, 系统年负荷增长率为 8%, 则 5 年后该变电站的总负荷为

$$S_{jszd} = S_{js} \times e^{mn} = 1296940.7 \times e^{5 \times 8\%} = 193481.73 \text{ kVA}$$

(3) 主变台数的确定

本变电站采用经济运行方式, 装设两台等容量变压器, 当一台主变运行时, 可保证 60% 的负荷供电, 考虑变压器事故过负荷能力为 40%, 则可保证对 84% 负荷的供电, 在事故运行方式下, 切除一些三类负荷保证大部分供电。

(4) 变压器容量的确定

装设两台等容量主变, 每台主变的额定容量为 $S_e \geq 0.6 S_{jszd}$, 即

$$S_e \geq 0.6 \times 193481.73 = 116089.04 \text{ kVA}, \text{ 所以选择 } S_e = 120000 \text{ kVA} \text{ 的变压器。根据实际}$$

情况，采用 220kV 三相三绕组有载调压变压器。

有载调压电力变压器是输配电系统中的重要组成部分，适用于电网电压波动较大而用户对电压质量要求较高的场合或负荷中心，在户内、外均可使用。这种变压器的作用是电网电压波动时，不间断地在带负荷运行条件下，通过自动或手动改变变压器高、低压侧线圈的匝数比，保持输出电压的稳定，从而保证供电质量，提高用电设备的工作效能和安全可靠性。

目前国产的 63000—200000kVA 三相三绕组有载调压电力变压器采用片式散热器来提高冷却效果，减小运行噪音；增加平衡绕组以减小星形—星形连接绕组的零序阻抗，减小二次谐波电压幅值，并稳定中性点电压；通过降低变压器铁芯磁通密度来降低噪音；采用外铁芯变压器（壳式变压器）来增强抗短路能力和降低损耗。

查中国水利水电出版社《电气设备实用手册》，选用 220kV 低损耗三相三绕组 SFPS 系列有载调压变压器，其技术数据见表 3—2。

表 3—2 变压器技术数据

型 号	额定电压 (kV)			连 接 组 标 号	损 耗 (kW)	
	高压	中压	低压		短路	空载
SFPSZ ₇ — 120000/220	220	121	10.5 35 38.5	YN, yn0, d11.	480	144
空载电流 (%)	阻抗电压 (%)					
0.9	高低	高中	中低			
	22-24	12-14	7-9			

3.3 主接线的确定

3.3.1 主接线的设计依据

- (1) 变电站在电力系统中的地位和作用
- (2) 变电站的建设规模
- (3) 大小及重要性
- (4) 系统备用容量的大小

3.3.2 主接线的基本要求

- (1) 可靠性：供电可靠性是电力生产和分配的首要要求。
- (2) 灵活性：主接线应满足在调度，检修及扩建时的灵活性。
- (3) 经济性：主接线必须考虑到投资省、占地面积小、电能损失少的要求。

经过分析确定本所的主接线见图 3-1

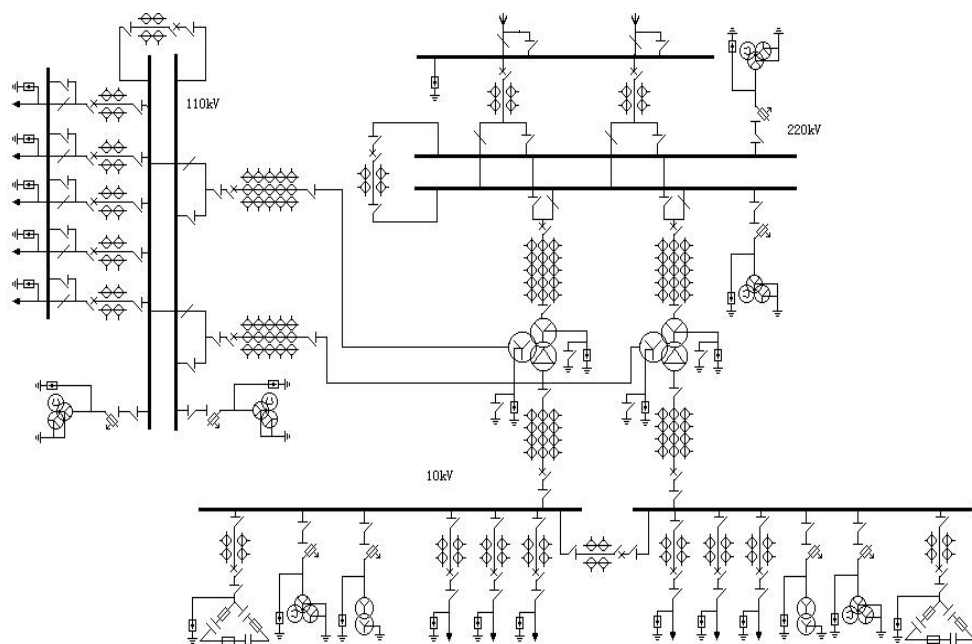


图 3-1 主接线图

4. 短路计算

4.1 短路电流计算目的

- (1) 电气主接线的选择。
- (2) 选择导体和电气设备。
- (3) 选择继电保护装置并进行整定计算。
- (4) 确定中性点接地方式。

4.2 假设条件和原则

- (1) 正常工作时，三相系统对称运行；
- (2) 所有电源的电动势、相位角相同；
- (3) 电力系统中所有电源都在额定负荷下运行；
- (4) 短路发生在短路电流为最大值的瞬间；
- (5) 元件的电阻都可忽略不计；
- (6) 所有计算都为三相短路情况下，并全部考虑为金属性短路；
- (7) 220kV 线路忽略线路阻抗；
- (8) 不考虑短路点的电弧阻抗和变压器的励磁电流；
- (9) 输电线路的电容略去不计。

4.3 系统简化阻抗图

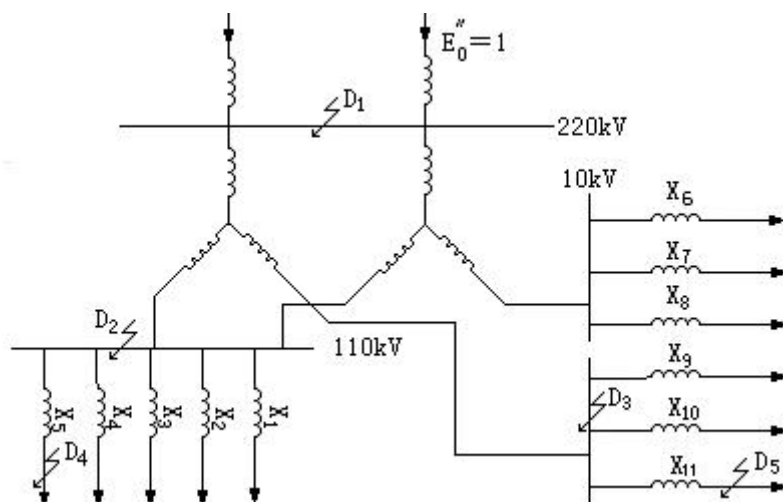


图 4-1 系统阻抗等效电路图

4.4 短路电流的计算方法

- (1) 根据保护整定值的计算和经验选择短路点；
- (2) 画等效电路；
- (3) 计算出每个电抗元件的电抗标么值；
- (4) 计算各短路点的计算电抗；
- (5) 计算短路电流和冲击电流。

4.5 各短路点参数的计算

4.5.1 参数的确定

- (1) 取 $S_B = 100 \text{ MVA}$, $V_B = V_{av}$ 。
- (2) 最大运行状态下，电抗标么值 $X_{\min} = 0.04$ 。
- (3) 最小运行状态下，电抗标么值 $X_{\max} = 0.06$ 。
- (4) 根据手册上提供变电站系统阻抗标么值为 0.4, $S_j = 100 \text{ MVA}$, 计算本变电站的短路电流，并据此选择电气设备。

4.5.2 变压器电抗标么值的计算

三绕组变压器根据公式 $x = \frac{V\%}{100} \times \frac{S_B}{S_N}$ (3) 来计算，由 SFPSZ7-120000/220 技术数据，

选定 $V_{s(1-2)}\% = 13$, $V_{s(1-3)}\% = 23$, $V_{s(2-3)}\% = 8$, 则有

$$V_{s1}\% = \frac{1}{2}[V_{s(1-2)}\% + V_{s(1-3)}\% - V_{s(2-3)}\%] = 14,$$

$$V_{s2}\% = \frac{1}{2}[V_{s(1-2)}\% + V_{s(2-3)}\% - V_{s(1-3)}\%] = -1,$$

$$V_{s3}\% = \frac{1}{2}[V_{s(2-3)}\% + V_{s(1-3)}\% - V_{s(1-2)}\%] = 9,$$

所以有 $x_{T1} = \frac{V_{s1}\%}{100} \times \frac{100}{120} = 0.1167,$

$$x_{T2} = \frac{V_{s2}\%}{100} \times \frac{100}{120} = -0.0083, \quad x_{T3} = \frac{V_{s3}\%}{100} \times \frac{100}{120} = 0.0750.$$

4.5.3 进出线路电抗的计算

(1) 系统进线长度 $L=100\text{km}$, 电抗 $x_0 = 0.4 \times 100 \times \frac{100}{230^2} = 0.074$ 。

(2) 110kV 侧出线 $L_1=100\text{km}$, $x_{1*} = 100 \times 0.4 \times \frac{100}{115^2} = 0.3$

$$L_2=100\text{km}, x_{1*} = 100 \times 0.4 \times \frac{100}{115^2} = 0.3$$

$$L_3=100\text{km}, x_{3*} = 100 \times 0.4 \times \frac{100}{115^2} = 0.3$$

$$L_4=100\text{km}, x_{4*} = 100 \times 0.4 \times \frac{100}{115^2} = 0.3$$

$$L_5=100\text{km}, x_{5*} = 100 \times 0.4 \times \frac{100}{115^2} = 0.3$$

(3) 10kV 侧出线 $L_6=15\text{km}$, $x_{6*} = 12 \times 0.4 \times \frac{100}{10.5^2} = 4.35$

$$L_7=12\text{km}, x_{7*} = 10 \times 0.4 \times \frac{100}{10.5^2} = 3.63$$

$$L_8=10\text{km}, x_{8*} = 13 \times 0.4 \times \frac{100}{10.5^2} = 4.72$$

$$L_9=13\text{km}, x_{9*} = 12 \times 0.4 \times \frac{100}{10.5^2} = 4.35$$

$$L_{10}=12\text{km}, x_{10*} = 14 \times 0.4 \times \frac{100}{10.5^2} = 5.08$$

$$L_{11}=14\text{km}, x_{11*} = 15 \times 0.4 \times \frac{100}{10.5^2} = 5.44$$

4.5.4 最大运行方式下各短路点电流的计算

根据本变电站的特点, 在最大运行方式下, 两台主变并联运行; 在最小运行方式下, 两台变压器只有一台运行。由主接线图及各电气设备上通过的最大短路电流可选择 11 个短路点, 选其中 5 个点进行计算如图 4-2 所示。

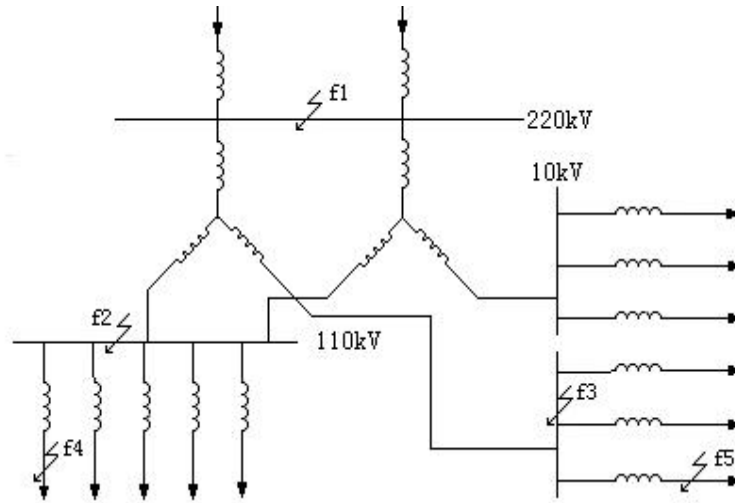


图 4-2 等值电路图

(1) 对 f_1 点
三相短路电流

$$\sum x_1 = x_0$$

$$I_1^{(3)} = \frac{E_0''}{x_0 + x_{\min}} \times \frac{S_B}{\sqrt{3}V_B} = \frac{1}{0.074 + 0.04} \times \frac{100}{\sqrt{3} \times 230} = 2.202 \text{ kA}$$

两相短路电流

$$I_1^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_1^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 2.202 = 1.907 \text{ kA}$$

冲击电流

$$i_{ch1} = 2.55 \times I_1^{(3)} = 2.55 \times 2.202 = 5.615 \text{ kA}$$

(2) 对 f_2 点

$$\sum x_2 = x_0 + x_{T1} + x_{T2} = 0.074 + 0.1167 + (-0.0083) = 0.1824$$

三相短路电流

$$I_2^{(3)} = \frac{E_0''}{\sum x_2 + x_{\min}} \times \frac{S_B}{\sqrt{3}V_B} = \frac{1}{0.1824 + 0.04} \times \frac{100}{\sqrt{3} \times 230} = 1.129 \text{ kA}$$

两相短路电流

$$I_2^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_2^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 1.129 = 0.977 \text{ kA}$$

冲击电流

$$i_{ch2} = 2.55 \times I_2^{(3)} = 2.55 \times 1.129 = 2.879 \text{ kA}$$

(3) 对 f_3 点

$$\sum x_3 = x_0 + x_{T1} + x_{T3} = 0.074 + 0.1167 + 0.0750 = 0.2657$$

三相短路电流

$$I_3^{(3)} = \frac{E_0''}{\sum x_3 + x_{\min}} \times \frac{S_B}{\sqrt{3}V_B} = \frac{1}{0.2657 + 0.04} \times \frac{100}{\sqrt{3} \times 230} = 0.821 \text{ kA}$$

两相短路电流

$$I_3^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_3^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 0.821 = 0.711 \text{ kA}$$

冲击电流

$$i_{ch3} = 2.55 \times I_3^{(3)} = 2.55 \times 0.821 = 2.094 \text{ kA}$$

(4) 对 f_4 点

$$\sum x_4 = x_0 + x_{T1} + x_{T2} + x_{b1} = 0.074 + 0.1167 + (-0.0083) + \frac{0.3}{4} = 0.2574$$

三相短路电流

$$I_4^{(3)} = \frac{E_0''}{\sum x_4 + x_{\min}} \times \frac{S_B}{\sqrt{3}V_B} = \frac{1}{0.2574 + 0.04} \times \frac{100}{\sqrt{3} \times 230} = 0.9736 \text{ kA}$$

两相短路电流

$$I_4^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_4^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 0.9736 = 0.8431 \text{ kA}$$

冲击电流

$$i_{ch4} = 2.55 \times I_4^{(3)} = 2.55 \times 0.9736 = 2.488 \text{ kA}$$

(5) 对 f_5 点

由负荷情况可知, f_5 点出现在线路 7 时, 短路电流最大,

$$\text{则有 } \frac{1}{x_{b2}} = \frac{1}{x_{6*}} + \frac{1}{x_{8*}} + \frac{1}{x_{9*}} + \frac{1}{x_{10*}} + \frac{1}{x_{11*}} = 1.053 \quad \text{即 } x_{b2} = 0.950$$

$$\sum x_5 = x_0 + x_{T1} + x_{T3} + x_{b2} = 0.074 + 0.1167 + 0.0750 + 0.950 = 0.1257$$

三相短路电流

$$I_5^{(3)} = \frac{E_0''}{\sum x_5 + x_{\min}} \times \frac{S_B}{\sqrt{3}V_B} = \frac{1}{0.1257 + 0.04} \times \frac{100}{\sqrt{3} \times 230} = 0.200 \text{ kA}$$

两相短路电流

$$I_5^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_5^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 0.200 = 0.173 \text{ kA}$$

冲击电流

$$i_{ch5} = 2.55 \times I_5^{(3)} = 2.55 \times 0.200 = 0.510 \text{ kA}$$

4.5.5 最小运行方式下各短路点电流的计算

此时 $x_{\max} = 0.06$ ，其他情况与最大运行方式类似。

4.5.6 短路电流计算数据表

短路电流计算数据统计见表（4-1）

表 4-1 短路电流计算数据表（单位 kA）

短路点	最大运行方式			最小运行方式		
	三相短路 电流	两相短路 电流	冲击 电 流	三相短路 电流	两相短路 电流	冲击 电 流
f1	2.202	1.907	5.615	1.873	1.622	4.776
f2	1.129	0.977	2.879	1.036	0.897	2.287
f3	0.821	0.711	2.094	0.771	0.668	1.966
f4	0.9736	0.8431	2.488	0.9645	0.8324	2.117
f5	0.200	0.173	0.510	0.197	0.170	0.502

说明：f1 点短路时流过 220kV 侧断路器的短路电流最大，此点用于选择 220kV 侧各电气设备；f2 点短路时流过 110kV 侧断路器的短路电流最大，此点用于选择 110kV 侧各电气设备；f4 点短路时流过 10kV 侧断路器的短路电流最大，此点用于选择 10kV 侧各电气设备。

5. 导线的选择

导线要满足工作电流、机械强度和电晕要求，其形状选择圆形钢芯铝绞线，因圆形导线载流量大，强度高，有利于提高电晕起始电压和避免微风振动。所以高压和中压侧采用圆形钢芯铝绞线。但低压侧母线装设在屋内，考虑到集肤效应和散热的要求，采用矩形铝母线，水平布置平放，相间距离 $a=0.4\text{m}$ ，跨距 $L=1\text{m}$ 。母线按经济电流密度选择并对导线进行热稳定校验，对矩形母线另加动稳定校验。

5.1 220kV 高压侧母线及主变馈线的选择

(1) 按经济电流密度选择母线截面

最大长期工作电流

$$I_{gzd} = \frac{1.05 S_e}{\sqrt{3} U_e} = \frac{1.05 \times 120000}{\sqrt{3} \times 220} = 330.7 \text{ A}$$

查表得经济电流密度 $J = 0.9 \times 10^6 \text{ A/m}^2$

$$\text{经济截面 } S_J = \frac{I_{gzd}}{J} = \frac{330.7}{0.9 \times 10^6} = 367.4 \text{ mm}^2$$

查《电力工程设计手册》

选用 LGJJ-400 型户外钢芯铝绞线， $I_y = 850 \text{ A}$ 。

$$\text{温度修正系数为 } k_\theta = \sqrt{\frac{\theta_y - \theta}{\theta_y - \theta_0}} = \sqrt{\frac{70 - 38.9}{70 - 25}} = 0.831$$

则实际环境温度为 38.9°C 时，母线允许电流

$$I_{y\theta} = k_\theta \times I_y = 0.831 \times 850 = 706.6 \text{ A} > I_{gzd} = 330.7 \text{ A},$$

满足长期工作时的发热条件。

(2) 按最小截面法校验母线的热稳定

$$\text{短路时间 } t = t_b + t_{hu} + t_g = 0.1 + 0.04 + 0.06 = 0.2 \text{ s}$$

$$\beta'' = \frac{I_\infty^{(3)}}{I_\infty^{(3)}} = 1 \quad t_{fz} = 0.05 \beta'' = 0.05 \times 1 = 0.05$$

查《短路电流周期分量等值时间曲线》得， $t_z = 0.18 \text{ s}$

$$\text{则 } t_{dz} = t_z + t_{fz} = 0.18 + 0.05 = 0.23 \text{ s}$$

母线正常运行时的最高温度

$$\theta_c = \theta + (\theta_y - \theta) \times \left(\frac{I_{gzd}}{I_{y\theta}} \right)^2 = 38.9 + (70 - 38.9) \times \left(\frac{330.7}{706.6} \right)^2 = 45.74^\circ\text{C}$$

由 $\theta_c = 45.74^\circ\text{C}$ ，查《不同工作温度下裸导体的C值》得 $C = 96 \times 10^6$ 计算母线最小截面 ($K_j = 1$)

$$\text{由公式 } S_{zx} = \frac{I_\infty}{C} \sqrt{t_{dz} \times K_j} = \frac{2.202 \times 10^3}{96 \times 10^6} \sqrt{0.23 \times 1} = 11.0 \text{ mm}^2, (4)$$

因 $11.0 \text{ mm}^2 < 400 \text{ mm}^2$ ，故满足热稳定要求。

(3) 按电晕条件校验

由公式 $U_{lj} = 84 \times K \times m_r \times \delta \times r \times \left(1 + \frac{0.301}{\sqrt{\delta r}} \right) \times \lg \frac{a}{r}$ 计算临界电晕电压

查表得，水平布置时 $K = 0.96$ ；多股绞线 $m_r = 0.83 \sim 0.87$ ，选 0.85 ； $\delta = 1.000$ ；导线半径 $r = 1.13 \text{ cm}$ ；相间距离 $a = 400 \text{ mm}$ ，则

$$U_{lj} = 84 \times 0.96 \times 0.85 \times 1 \times 1.13 \times \left(1 + \frac{0.301}{\sqrt{1 \times 1.13}} \right) \times \lg \frac{a}{r} = 253.3 \text{ kV}$$

所以临界电晕电压 $U_{lj} = 253.3 \text{ kV} > \text{工作电压 } U_g = 220 \text{ kV}$ ，满足要求。

5.2 110kV 中压母线及主变馈线的选择

(1) 按经济电流密度选择母线截面

因选用组合导线，按《电力工程设计手册》规定，经济电流密度 $J = 1.2 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ ，最大长期工作电流

$$I_{gzd} = \frac{1.05 S_e}{\sqrt{3} U_e} = \frac{1.05 \times 120000}{\sqrt{3} \times 110} = 661.3 \text{ A}$$

$$\text{经济截面 } S_j = \frac{I_{gzd}}{J} = \frac{661.3}{1.2 \times 10^6} = 551.1 \text{ mm}^2$$

查《电力工程设计手册》

选用 $2 \times \text{LGJQ}-300$ 型组合导线， $I_y = 690 \text{ A}$ 。

温度修正系数为 $k_\theta = 0.831$

则实际环境温度为 38.9°C 时，母线允许电流

$$I_{y\theta} = k_\theta \times I_y = 0.831 \times 690 = 573.4 \text{ A} < I_{gzd} = 661.3 \text{ A},$$

不满足长期工作时的发热条件，故选用 $2 \times \text{LGJQ}-400$ 型组合导线， $I_y = 825 \text{ A}$ ，经济截面 687 mm^2 ，总截面 784 mm^2 。

$$I'_{y\theta} = 0.831 \times 825 = 685.6 \text{ A} > I_{gzd} = 661.3 \text{ A},$$

此时满足长期工作时的发热条件。

(2) 按最小截面法校验母线的热稳定

$$t_{dz} = 0.23s, I_{\infty} = 1.129 \text{ kA}$$

母线正常工作时的最高温度

$$\theta_c = \theta + (\theta_y - \theta) \times \left(\frac{I_{gzd}}{I_{y\theta}} \right)^2 = 38.9 + (70 - 38.9) \times \left(\frac{661.3}{685.6} \right)^2 = 67.8^\circ\text{C}$$

由 $\theta_c = 67.8^\circ\text{C}$ ，查《不同工作温度下裸导体的C值》得 $C = 88 \times 10^6$ 计算母线最小截面 ($K_j = 1$)

$$S_{zx} = \frac{I_{\infty}}{C} \sqrt{t_{dz} \times K_j} = \frac{1.129 \times 10^3}{88 \times 10^6} \sqrt{0.23 \times 1} = 6.2 \text{ mm}^2,$$

因 $6.2 \text{ mm}^2 < 784 \text{ mm}^2$ ，故满足热稳定要求。

5.3 10kV 低压侧母线的选择

(1) 按经济电流密度选择母线截面

考虑变压器变比为 100: 100: 50

最大长期工作电流

$$I_{gzd} = \frac{1.05 \times 0.5 \times S_e}{\sqrt{3} U_e} = \frac{1.05 \times 0.5 \times 120000}{\sqrt{3} \times 10} = 3637.4 \text{ A}$$

经济电流密度 $J = 0.9 \times 10^6 \text{ A/m}^2$

$$\text{经济截面 } S_J = \frac{I_{gzd}}{J} = \frac{3637.4}{0.9 \times 10^6} = 4041.6 \text{ mm}^2$$

查《电力工程设计手册》

选用 4(120×10) mm² 矩形铝母线， $I_y = 4275 \text{ A}$ (平放)。

温度修正系数为 $k_{\theta} = 0.831$

则实际环境温度为 38.9℃时，母线允许电流

$$I_{y\theta} = k_{\theta} \times I_y = 0.831 \times 4275 = 3552.5 \text{ A} < I_{gzd} = 3637.4 \text{ A},$$

不满足长期工作时的发热条件，

故选用 3 (120×10) mm² 矩形铝母线， $I_y = 4780 \text{ A}$ (平放)。

$$I'_{y\theta} = k_{\theta} \times I_y = 0.831 \times 4780 = 3972.2 \text{ A} > I_{gzd} = 3637.4 \text{ A},$$

此时满足长期工作时的发热条件。

(2) 按最小截面法校验母线的热稳定

$$t_{dz} = 0.23s, I_{\infty} = 0.821 \text{ kA}$$

母线正常工作时的最高温度

$$\theta_c = \theta + (\theta_y - \theta) \times \left(\frac{I_{gzd}}{I_{y\theta}} \right)^2 = 38.9 + (70 - 38.9) \times \left(\frac{3637.4}{3972.2} \right)^2 = 65.0^\circ\text{C}$$

由 $\theta_c = 65.0^\circ\text{C}$ ，查《不同工作温度下裸导体的 C 值》得 $C = 89 \times 10^6$ 计算母线最小截面 ($K_j = 1$)

$$S_{zx} = \frac{I_\infty}{C} \sqrt{t_{dz} \times K_j} = \frac{0.821 \times 10^3}{89 \times 10^6} \sqrt{0.23 \times 1} = 4.4 \text{ mm}^2,$$

因 $4.4 \text{ mm}^2 < 3(120 \times 10) \text{ mm}^2$ ，故满足热稳定要求。

(3) 动稳定校验

短路冲击电流 $i_{ch} = 2.094 \text{ kA}$

三相短路最大电动力

$$F = 1.73 \times 10^{-7} \times \frac{L}{a} \times i_{ch}^2 = 1.73 \times 10^{-7} \times \frac{1}{0.4} \times 2.094^2 \times 10^6 = 1.89 \text{ N}$$

母线所受的最大应力

$$F_{zd} = \frac{FL}{10 \times w} = \frac{1.89 \times 1}{10 \times 72 \times 10^{-6}} = 2.63 \times 10^3 \text{ pa} < 69 \times 10^6 \text{ pa}$$

满足动稳定要求。

5.4 220kV 高压侧进线的选择

因与上一级 500kV 变电站相联，进线的最大长期工作电流与 220kV 侧的母线相同，所以选用 LGJJ-400 型钢芯铝绞线。

5.5 110kV 中压侧出线的选择

110kV 侧有五回出线，其中线路 2 为最大的一条负荷， $S_N = 19600 \text{ kVA}$ ，应以此条线路作为依据选择出线。

(1) 按经济电流密度选择母线截面

最大长期工作电流

$$I_{gzd} = \frac{P}{\sqrt{3} U_e \cos \phi} = \frac{19600}{\sqrt{3} \times 110 \times 0.85} = 121.03 \text{ A} \quad (5)$$

经济电流密度 $J = 0.9 \times 10^6 \text{ A/m}^2$

$$\text{经济截面 } S_J = \frac{I_{gzd}}{J} = \frac{121.03}{0.9 \times 10^6} = 134.48 \text{ mm}^2$$

查《电力工程设计手册》

选用 LGJ-150 型户外钢芯铝绞线， $I_y = 478 \text{ A}$ 。

温度修正系数为 $k_\theta = 0.831$

则实际环境温度为 38.9°C 时，母线允许电流

$$I_{y\theta} = k_\theta \times I_y = 0.831 \times 478 = 397.22 \text{ A} > I_{gzd} = 121.03 \text{ A},$$

满足长期工作时的发热条件。

(2) 按最小截面法校验母线的热稳定

$$t_{dz} = 0.23s, I_{\infty} = 0.889 \text{ kA}$$

母线正常工作时的最高温度

$$\theta_c = \theta + (\theta_y - \theta) \times \left(\frac{I_{gzd}}{I_{y\theta}} \right)^2 = 38.9 + (70 - 38.9) \times \left(\frac{121.03}{397.22} \right)^2 = 41.8^{\circ}\text{C}$$

由 $\theta_c = 41.8^{\circ}\text{C}$ ，查《不同工作温度下裸导体的C值》得 $C = 98 \times 10^6$ 计算母线最小截面 ($K_j = 1$)

$$S_{zx} = \frac{I_{\infty}}{C} \sqrt{t_{dz} \times K_j} = \frac{0.9736 \times 10^3}{98 \times 10^6} \sqrt{0.23 \times 1} = 4.8 \text{ mm}^2,$$

因 $4.8 \text{ mm}^2 < 150 \text{ mm}^2$ ，故满足热稳定要求。

5.6 10kV 低压侧出线选择

10kV 侧有六回出线，其中线路 7 为最大的一条负荷， $S_N = 15450 \text{ kVA}$ ，应以此条线路作为依据选择出线。

(1) 按经济电流密度选择母线截面

最大长期工作电流

$$I_{gzd} = \frac{P}{\sqrt{3} U_e \cos \theta} = \frac{15450}{\sqrt{3} \times 10 \times 0.85} = 1049.4 \text{ A}$$

经济电流密度 $J = 1.2 \times 10^6 \text{ A/m}^2$

$$\text{经济截面 } S_J = \frac{I_{gzd}}{J} = \frac{1049.4}{1.2 \times 10^6} = 874.5 \text{ mm}^2$$

查《电力工程设计手册》

选用 $3 \times \text{LGJQ}-400$ 型组合导线， $I_y = 1374 \text{ A}$ 。

温度修正系数为 $k_{\theta} = 0.831$

则实际环境温度为 38.9°C 时，母线允许电流

$$I_{y\theta} = k_{\theta} \times I_y = 0.831 \times 1374 = 1141.8 \text{ A} > I_{gzd} = 1049.4 \text{ A},$$

满足长期工作时的发热条件。

(2) 按最小截面法校验母线的热稳定

$$t_{dz} = 0.23s, I_{\infty} = 0.200 \text{ kA}$$

母线正常工作时的最高温度

$$\theta_c = \theta + (\theta_y - \theta) \times \left(\frac{I_{gzd}}{I_{y\theta}} \right)^2 = 38.9 + (70 - 38.9) \times \left(\frac{1049.4}{1141.8} \right)^2 = 65.2^\circ\text{C}$$

由 $\theta_c = 65.2^\circ\text{C}$ ，查《不同工作温度下裸导体的C值》得 $C = 89 \times 10^6$ 计算母线最小截面 ($K_j = 1$)

$$S_{zx} = \frac{I_\infty}{C} \sqrt{t_{dz} \times K_j} = \frac{0.200 \times 10^3}{89 \times 10^6} \sqrt{0.23 \times 1} = 1.1 \text{ mm}^2,$$

因 $1.1 \text{ mm}^2 < 3 \times 400 \text{ mm}^2$ ，故满足热稳定要求。

5.7 电缆的选择

(1) 选择原则

① 电缆的额定电压应等于或大于所在电网的额定电压，电缆的最高工作电压不得超过其额定电压的 15%；

② 电力电缆采用铝芯，但需要移动或振动剧烈的场所应使用铜芯电缆；

③ 敷设在电缆构筑物的电缆宜选用裸铠装电缆或铝包裸塑料护套电缆；

④ 直埋电缆采用带护层的铠装电缆或铝包裸塑料护套电缆；

⑤ 周围有腐蚀性介质的场所，应视介质的不同分别采用不同的电缆护套，有腐蚀性的土壤一般不采用直埋，否则应采用特殊的防腐层电缆；

⑥ 1kV 以下电缆，截面为 $3 \times 10 \text{ mm}^2$ 及以下采用橡皮绝缘比采用相同截面的纸绝缘电缆经济，但环境温度超过 40°C 时不宜用橡皮绝缘电缆。

(2) 具体选择及校验

本变电站有 6 条 10kV 出线路从出线断路器到架空线路之间用电力电缆连接，长度约为 20m 左右，最大一条负荷为 15450kVA，最大负荷利用小时数为 5000h/year 以上。为便于检修，电缆并列敷设在电缆沟里。根据实际情况选择 $U_e = 10 \text{ kV}$ 的 ZLL-120 型纸绝缘铝包裸钢带铠装电缆。

选择电缆截面：虽然电缆较短，但最大负荷利用小时数在 5000h/year 以上，所以应按经济电流密度选择电缆截面

$$I_{gzd} = \frac{P}{\sqrt{3} U_e \cos \theta} = \frac{15450}{\sqrt{3} \times 10 \times 0.85} = 1049.4 \text{ A}$$

$$S_j = \frac{1049.4}{1.2 \times 10^6} = 874.5 \text{ mm}^2$$

查《电力工程设计手册》确定每条线路选取 4 根 240 mm^2 的电缆，其允许电流 $I_y = 325 \text{ A}$ 。每条电缆线路有四根并列敷设在电缆沟内，发热互有影响，所以允许电流要减少。电缆的中心距离取电缆外径的 2 倍。由《电缆在空气中多根并列敷设时载流量的校正系数表》中查得四根并列敷设时允许电流校正系数 $k_1 = 0.95$ 。由于实际空

气最高温度 $\theta = 38.9^{\circ}\text{C} > \theta_0 = 25^{\circ}\text{C}$ ，所以电缆的允许电流还要减小，长期允许发热温度 $\theta_y = 60^{\circ}\text{C}$ ，查《电缆温度校正系数》得 $k_t = 0.93$ ，则总的校正系数 $k = k_t \times k_1 = 0.93 \times 0.95 = 0.88$ 即一根电缆校正后的允许电流为

$$kI_y = 0.88 \times 325 = 286 \text{ A} > \frac{1}{4} \times 1094.4 = 262.4 \text{ A}，\text{满足长期发热要求。}$$

而由 $t_{dz} = 0.23\text{s}$ ，查得 $C = 95 \times 10^6$ ，则电缆最小截面

$$S_{zx} = \frac{I_{\infty}}{C} \sqrt{t_{dz}} = \frac{0.2 \times 10^3}{95 \times 10^6} \times \sqrt{0.23} = 1.0 \text{ mm}^2 < 240 \text{ mm}^2，\text{满足热稳定要求。}$$

6. 电气设备的选择

6.1 断路器的选择

6.1.1 220kV 进线及变压器高压侧断路器的选择

对于 220kV 的电力网，当系统稳定，要求快速切合故障时，应选用分闸时间不大于 0.04s 的断路器；根据装设地点和构造类型选择户外式少油断路器；由额定电压选择 $U_e \geq U_N = 220\text{kV}$ ；由额定电流选择 $I_e \geq I_{gzd} = 330.7\text{A}$ ；由额定开断电流选择 $I_{ekd} \geq I_{dt} = I'' = I_\infty = 2.202\text{kA}$ 。查《电力工程设计手册》选用 SW₄-220/1000 型户外式少油断路器，其技术数据见表 6-1。

表 6-1 断路器技术数据

型 号	额定电压 kV	额定电流 A	断流容量 MVA	额定断流量 kVA
SW ₄ -220/1000	220	1000	3500	18.4
极限通过电流 kA		热稳定电流 kA		
峰 值	有 效 值	1 秒	5 秒	10 秒
55	32	32	21	14.8

热稳定校验

短路等值时间

$$t_{dz} = 0.23\text{s},$$

短路电流热脉冲

$$I_\infty^2 t_{dz} = (2.202)^2 \times 0.23 = 1.12 < I_r^2 t = 32^2 \times 1 = 1024\text{kA}^2 \cdot \text{s}$$

即满足热稳定要求。

动稳定校验 极限通过电流的幅值

$$i_j = 55\text{kA} > i_{ch} = 5.615\text{kA}$$

故满足动稳定要求。

6.1.2 变压器中压 110kV 侧断路器的选择

由额定电压选择 $U_e \geq U_N = 110\text{kV}$ ；由额定电流选择 $I_e \geq I_{gzd} = 661.3\text{A}$ ；由额定开断电流选择 $I_{ekd} \geq I_{dt} = 1.129\text{kA}$ 。查《电力工程设计手册》选用 SW₄-110/1000 型户外式少油断路器，其技术数据见表 6-2。

表 6-2 断路器技术数据

型 号	额定电压 kV	额定电流 A	断流容量 MVA	额定断流量 kVA
SW ₄ -110/1000	110	1000	3500	18.4
极限通过电流 kA		热稳定电流 kA		
峰 值	有 效 值	1 秒	5 秒	10 秒
55	32	32	21	14.8

热稳定校验

$$I_{\infty}^2 t_{dz} = (1.129)^2 \times 0.23 = 0.29 < I_r^2 t = 1024 \text{ kA}^2 \cdot \text{s}$$

即满足热稳定要求。

动稳定校验

$$i_i = 55 \text{ kA} > i_{ch} = 2.879 \text{ kA}$$

故满足动稳定要求。

6.1.3 变压器低压 10kV 侧断路器的选择

由额定电压选择 $U_e \geq U_N = 10 \text{ kV}$ ；由额定电流选择 $I_e \geq I_{gzd} = 3637.4 \text{ A}$ ；由额定开断电流选择 $I_{ekd} \geq I_{dt} = 0.821 \text{ kA}$ 。查《电力工程设计手册》选用 SN₄-10G/5000 型户内式少油断路器，其技术数据见表 6-3。

表 6-3 断路器技术数据

型 号	额定电压 kV	额定电流 A	断流容量 MVA	额定断流量 kVA
SN ₄ -10G/5000	10	5000	1800	105
极限通过电流 kA		热稳定电流 kA		
峰 值	有 效 值	1 秒	5 秒	10 秒
300	173	173	120	85

热稳定校验

$$I_{\infty}^2 t_{dz} = (0.821)^2 \times 0.23 = 0.16 < I_r^2 t = 173^2 \times 1 = 29929 \text{ kA}^2 \cdot \text{s},$$

即满足热稳定要求。

动稳定校验

$$i_i = 300 \text{ kA} > i_{ch} = 2.094 \text{ kA}$$

故满足动稳定要求。

6.1.4 110kV 侧出线路上断路器的选择

由额定电压选择 $U_e \geq U_N = 110\text{kV}$ ；由额定电流选择 $I_e \geq I_{gzd} = 121.03\text{A}$ ；由额定开断电流选择 $I_{ekd} \geq I_{dt} = 0.889\text{kA}$ 。查《电力工程设计手册》选用 SW₄—110/1000 型户外式少油断路器，其技术数据见表 6—4。

表 6—4 断路器技术数据

型 号	额定电压 kV	额定电流 A	断流容量 MVA	额定断流量 kVA
SW ₄ —110/1000	110	1000	3500	18.4
极限通过电流 kA		热稳定电流 kA		
峰 值	有 效 值	1 秒	5 秒	10 秒
55	32	32	21	18.4

热稳定校验

$$I_{\infty t_{dz}}^2 = (0.889)^2 \times 0.23 = 0.18 < I_r^2 t = 1024\text{kA}^2 \cdot \text{s}$$

即满足热稳定要求。

动稳定校验

$$i_j = 55\text{kA} > i_{ch} = 2.267\text{kA}$$

故满足动稳定要求。

6.1.5 10kV 侧出线路上断路器的选择

由额定电压选择 $U_e \geq U_N = 10\text{kV}$ ；由额定电流选择 $I_e \geq I_{gzd} = 1049.4\text{A}$ ；由额定开断电流选择 $I_{ekd} \geq I_{dt} = 0.200\text{kA}$ 。查《电力工程设计手册》选用 SN₃—10/2000 型户内式少油断路器，其技术数据见表 6—5。

表 6—5 断路器技术数据

型 号	额定电压 kV	额定电流 A	断流容量 MVA	额定断流量 kVA
SN ₃ —10/2000	10	2000	500	29
极限通过电流 kA		热稳定电流 kA		
峰 值	有 效 值	1 秒	5 秒	10 秒
75	43.5	43.5	30	21

热稳定校验

$$I_{\infty t_{dz}}^2 = (0.200)^2 \times 0.23 = 0.01 < I_r^2 t = 43.5^2 \times 1 = 1892.3\text{kA}^2 \cdot \text{s}$$

即满足热稳定要求。

动稳定校验

$$i_j = 75\text{kA} > i_{ch} = 0.510\text{kA}$$

故满足动稳定要求。

6.2 隔离开关的选择

6.2.1 220kV 进线及变压器高压侧隔离开关的选择

由额定电压选择 $U_e \geq U_N = 220\text{kV}$ ；由额定电流选择 $I_e \geq I_{gzd} = 330.7\text{A}$ ，查《电力工程设计手册》选用 GW₄-220/600 型户外式隔离开关，其技术数据见表 6—6。

表 6—6 隔离开关技术数据

型 号	额定电压 kV	额定电流 A	极限通过电流峰值 kA
GW ₄ -220/600	220	600	50
5 秒热稳定电流	操动机构型号		
14	CS14G, CQ ₂ -145		

热稳定校验

$$I_{\infty}^2 t_{dz} = (2.202)^2 \times 0.23 = 1.12 < I_r^2 t = 14^2 \times 5 = 980 \text{kA}^2 \cdot \text{s}$$

即满足热稳定要求。

动稳定校验：

$$i_j = 50\text{kA} > i_{ch} = 5.615\text{kA}$$

故满足动稳定要求。

6.2.2 变压器中压 110kV 侧隔离开关的选择

由额定电压选择 $U_e \geq U_N = 110\text{kV}$ ；由额定电流选择 $I_e \geq I_{gzd} = 661.3\text{A}$ ，查《电力工程设计手册》选用 GW₄-110G/1000 型户外式隔离开关，其技术数据见表 6—7。

表 6—7 隔离开关技术数据

型 号	额定电压 kV	额定电流 A	极限通过电流峰值 kA
GW ₄ -110G/1000	110	1000	80
5 秒热稳定电流	操动机构型号		
21.5	CS14G, CQ ₂ -110		

热稳定校验

$$I_{\infty}^2 t_{dz} = (1.129)^2 \times 0.23 = 0.29 < I_r^2 t = 21.5^2 \times 5 = 2311 \text{kA}^2 \cdot \text{s}$$

即满足热稳定要求。

动稳定校验

$$i_j = 80\text{kA} > i_{ch} = 2.879\text{kA}$$

故满足动稳定要求。

6.2.3 变压器低压 10kV 侧隔离开关的选择

由额定电压选择 $U_e \geq U_N = 10\text{kV}$ ；由额定电流选择 $I_e \geq I_{gzd} = 3637.4\text{A}$ ，查《电力工程设计手册》选用 GN₁₀-10T/4000 型户内式隔离开关，其技术数据见表 6-8。

表 6-8 隔离开关技术数据

型 号	额定电压 kV	额定电流 A	极限通过电流峰值 kV
GN ₁₀ -10T/4000	10	4000	160
5 秒热稳定电流	操动机构型号		
80	CS9 或 CJ2		

热稳定校验

$$I_{\infty}^2 t_{dz} = (0.821)^2 \times 0.23 = 0.16 < I_r^2 t = 160^2 \times 5 = 128000 \text{kA}^2 \cdot \text{s}$$

即满足热稳定要求。

动稳定校验

$$i_j = 80\text{kA} > i_{ch} = 2.094\text{kA}$$

故满足动稳定要求。

6.2.4 110kV 侧出线路上隔离开关的选择

由额定电压选择 $U_e \geq U_N = 110\text{kV}$ ；由额定电流选择 $I_e \geq I_{gzd} = 121.03\text{A}$ ，查《电力工程设计手册》选 GW₄-110/600 型户外式隔离开关，其技术数据见表 6-9。

表 6-9 隔离开关技术数据

型 号	额定电压 kV	额定电流 A	极限通过电流峰值 kA
GW ₄ -110/600	110	600	50
5 秒热稳定电流	操动机构型号		
14	CS14G, CQ2-110		

热稳定校验

$$I_{\infty}^2 t_{dz} = (0.889)^2 \times 0.23 = 0.18 < I_r^2 t = 14^2 \times 5 = 980 \text{kA}^2 \cdot \text{s}$$

即满足热稳定要求。

动稳定校验

$$i_j = 50\text{kA} > i_{ch} = 2.267\text{kA}$$

故满足动稳定要求。

6.2.5 10kV 侧出线路上隔离开关的选择

由额定电压选择 $U_e \geq U_N = 10\text{kV}$ ；由额定电流选择 $I_e \geq I_{gzd} = 1049.4\text{A}$ ，查《电力工程设计手册》选用 GN₂-10/2000 型户内式隔离开关，其技术数据见表 6-10。

表 6-10 隔离开关技术数据

型 号	额定电压 kV	额定电流 A	极限通过电流峰 kV
GN ₂ -10/2000	10	2000	85
10s 热稳定电流	操动机构型号		
36	CS6-2		

热稳定校验

$$I_{\infty}^2 t_{dz} = (0.200)^2 \times 0.23 = 0.01 < I_r^2 t = 36^2 \times 10 = 12960 \text{ kA}^2 \cdot \text{s}$$

即满足热稳定要求。

动稳定校验

$$i_j = 85 \text{ kA} > i_{ch} = 0.510 \text{ kA}$$

故满足动稳定要求。

6.3 电压互感器的选择

6.3.1 选择原则

(1) 按所工作的电网额定电压选择：要求电压互感器的原边电压满足下列条件： $0.9U_N < U_N < 1.1U_N$ 。 U_N 为互感器额定线电压，0.9 和 1.1 为允许的电压波动范围，即 $\pm 10\% U_N$ 。

(2) 按准确等级选择：电压互感器应在哪一准确级下工作，需根据接入的测量仪表，继电器和自动装置等设备的型式、用途及对准确级的要求来确定。供计量电费用的表记所接的电压互感器要求为 0.5 级，供监视设备运行状态用的表记所接的电压互感器为 1 级，供非主要表记所接的电压互感器要求为 3 级。

6.3.2 选择结果

电压互感器的选择结果（见表 6-11）

表 6-11 电压互感器技术数据

安装地点	型 号	最大容量	试验电压 kV		
		VA	高压	低压	
220kV 母线	JCC ₁ -220TH	2000	400	2	
110kV 母线	JCC ₁ -110TH	2000	230	2	
10kV 母线	JSJW-10	960	42		
额定电压 kV			幅线圈容量 VA		
原线圈	幅线圈	辅助线圈	0.5 级	1 级	3 级
200 / √3	0.1 / √3	0.1	—	500	1000
110 / √3	0.1 / √3	0.1 / 3	—	500	1000
10	0.1	0.1 / 3	120	200	480
连接组					

6.4 电流互感器的选择

6.4.1 选择原则

(1) 按准确等级选择：根据所接的测量仪表，继电器和自动装置等设备的形式和用途对准确级的要求来确定电流互感器工作的正确等级。供计量电费用的表计所接的电流互感器要求为 0.5 级；供监视设备运行状态用的表计所接的电流互感器为 1 级；供保护用的电流互感器要求为 3 级。

(2) 按所工作的电网额定电压选择： $U_{ew} \leq U_e$

U_{ew} —电流互感器所在电网的额定电压

U_e —电流互感器一次测的额定电压

(3) 按一次回路电流选择： $I_{gzd} \leq I_{1e}$

I_{gzd} —电流互感器一次回路最大长期工作电流

I_{1e} —电流互感器的一次额定电压

(4) 热稳定校验

电流互感器的热稳定通常以 1 秒的热稳定倍数表示，因此，校验热稳定应满足公式： $(I_{1e} \times k_r)^2 \geq I_{\infty}^2 t_{dz}$ ($KA^2 \cdot s$) (6)

式中 k_r —电流互感器的热稳定倍数， $k_r = \frac{I_r}{I_{1e}}$

t —电流互感器的热稳定时间， $t=1s$ 。

(5) 动稳定校验

短路电流通过电流互感器内部线圈时，在其内部产生电动力，电流互感器能承受这种最大电动力的作用而不产生变形或损坏的能力，称为电流互感器的内部动稳定；短路电流产生的电动力也将作用在电流互感器外部绝缘瓷帽上，电流互感器外部绝缘瓷帽能承受这种最大电动力的作用不致损坏的能力，称为电流互感器的外部动稳定。

其中内部动稳定按公式 $\sqrt{2}I_{1e} \times k_d \geq i_{ch}$ 校验，

外部动稳定按公式 $k_1 k_2 k_d \times \sqrt{2}I_{1e} \geq i_{ch}$ 校验，

式中 k_1 —当相间距离 $a = 0.4m$ 时， $k_1 = 1$ ； $a \neq 0.4m$ 时， $k_1 = \sqrt{\frac{a}{0.4}}$

k_2 —当电流互感器绝缘瓷帽端部至最近一个母线支柱绝缘子的距离 $L = 0.5m$ 时， $k_2 = 1$ ；当 $L = 0.2m$ 时， $k_2 = 1.15$ ，本设计中 $a=0.4m$ ， $L=0.5m$ ，即 $k_1 = 1$ ， $k_2=1$ ，所以内部动稳定和外部动稳定可以同时校验。

6.4.2 选择结果

电流互感器的选择结果（见表 6—12）

表 6—12 电流互感器技术数据

安装地点	型 号	额定电流比 A	准确级数	二次负荷 Ω /0.5 级
220kV 侧	LCWDL-220	400/5	0.5	2
110kV 侧	LCWDL-110	1000/5	0.5	2
10kV 侧	LMZ1-10	4000/5	0.5	2
110kV 侧出线	LQZ-110	600/5	0.5	2
10kV 侧出线	LMZ1-10	2000/5	0.5	1.6
1 秒热稳定倍数	动稳定倍数			
35 (5 秒)	65			
75	135			
—	—			
75	135			
—	—			

6.5 绝缘子的选择

6.5.1 支柱绝缘子的选择

(1) 屋外选用户外棒型支柱绝缘子。此种绝缘子具有结构简单，运行安全，使用寿命长和维护工作量少等优点，与针式支柱绝缘子相比绝缘和耐污效果更好，选择结果及技术数据见表 6—13。

表 6—13 棒型支柱绝缘子技术数据

安 装 地 点	型 号	爬电距离 (mm)	总高 H (mm)
10kV 侧母线	ZS—10/4	230	210
110kV 侧母线	ZSW—110/4	2750	1080
220kV 侧母线	ZSW—220/4	5500	2160

(2) 屋内选用户内联合胶支柱绝缘子，其技术数据见表 6—14。

表 6—14 户内联合胶支柱绝缘子技术数据

型 号	总高 H	瓷件最大公称直径 D
ZL—10/4	160	95

(3) 校验（以 ZSW—10/4 为例）

母线所受最大电力为

$$F_{zd} = 1.73 \times 10^{-7} \times \frac{L}{a} \times i_{ch}^2 = 1.73 \times 10^{-7} \times \frac{1}{0.4} \times (0.51 \times 10^3)^2 = 0.11 \text{ N}$$

绝缘子底部至母线水平中心线的高度为

$$H_1 = H + 12 + \frac{h}{2} = 210 + 12 + \frac{100}{2} = 272 \text{ mm}$$

$$\text{绝缘子帽受力为 } F = F_{zd} \times k_z = 0.11 \times \frac{272}{210} = 0.14 \text{ N}$$

绝缘子允许负荷为 $0.6F_p = 0.6 \times 4000 = 2400 \text{ N} > F = 0.14 \text{ N}$ ，满足动稳定要求。

按此方法校验其他三种型号的支柱绝缘子，均满足动稳定要求。

6.5.2 悬式绝缘子的选择

按正常工作电压下泄漏距离选择悬式绝缘子的片数，其公式为： $n = \frac{dU}{s}$

其中 n—绝缘子的片数；d—泄漏距离，取 1.6cm/kV；s—每片绝缘子的泄漏距离，取 29.53cm；U—电网额定电压（kV）。

$$\text{则 110kV 线路：} n_1 = \frac{dU_1}{s} = \frac{1.6 \times 110}{29.53} = 5.96$$

$$\text{220kV 线路：} n_2 = \frac{dU_2}{s} = \frac{1.6 \times 220}{29.53} = 11.92$$

为确保及防污闪效果，分别选用 7 片和 13 片，其技术数据见表 6—15。

表 6—15 悬式绝缘子技术数据

安装地点	型 号	额定机械负荷 kN	工频闪络电压 kV
110kV 线路	SGX—5/110	5	390
220kV 线路	SGX—4/220	4	720
50%雷电冲击闪络电压 kV		最低人工污秽闪络电压 kV	质量 kg
745		250	18.5
71200		400	32

6.6 避雷器的选择

6.6.1 选择原则

型式：主要考虑被保护物的绝缘水平及经济性。母线上采用 FZ 型阀式避雷器，而变压器侧采用 FCZ 型磁吹阀式避雷器。磁吹避雷器与普通阀式避雷器相比，其主要优点是残压低，按普通阀式阀式避雷器计算的 35—220kV 电器外绝缘的全波冲击试验电压比按磁吹避雷器计算的数值要大 1.21~1.27 倍，因此，若用磁吹避雷器代替普通阀式避雷器则电气设备的外绝缘强度就有 1.21~1.27 倍的裕度。

6.6.2 选择结果

表 6—16 避雷器技术数据

安 装 地 点	型 号	灭 弧 电 压 kV (有效值)	工频放电电压 kV (有效值)	
			不小于	不大于
220kV 母线	FZ-220J	200	448	536
220kV 侧变压器	FCZ-220J	200	340	390

续 6-16 表

110kV 母线	FZ-110J	100	224	268
110kV 侧变压器	FCZ-110J	100	170	195
10kV 侧变压器	FZ-10	12.7	26	31
冲击放电		冲击电流残压波形幅值 kV		
电压幅值 kV		5kA	10kA	
630		664	728	
515		515	570	
310		332	364	
265		265	295	
45		45	50	

6.7 电力电容器的选择

本设计要求达到的功率因数（补偿后） $\cos\varphi_2 = 0.95$ ，实际功率因数（补偿前） $\cos\varphi_1 = 0.85$ ，则负荷的有功功率为

$$P = \sum S_{10KV} \times \cos\varphi_2 = 66800 \times 0.95 = 63640 \text{ kVA}$$

需补偿的无功功率为

$$Q = P \times (tg\varphi_1 - tg\varphi_2) = 63460 \times (0.6197 - 0.3287) = 18469.7 \text{ kVar}$$

则电容由公式 $\frac{1}{2}Q = 3wU^2C \times 10^{-3}$, $w = 2\pi f$ (7) 得

$$C = \frac{\frac{1}{2}Q \times 10^3}{3wU^2} = \frac{\frac{1}{2} \times 18469.7 \times 10^3}{3 \times 2\pi \times 50 \times (\frac{10}{\sqrt{3}})^2} = 294.1\mu\text{F}$$

由计算结果和实际情况选用 BFMH₁₁—20000—3W 型集合式并联电容器，其技术数据见表 6—17。

表 6—17 电力电容器技术数据

型 号	额定电压 kV	额定容量 kVar	额定电容 μ F
BFMH ₁₁ —20000—3 W	11	20000	3×526.2

6.8 所用变压器的选择

(1)本所为地区变电站，总容量为 2×120000kVA，所以应装设两台所用变压器（互为备用）。选用 SZ10 系列有载调压配电变压器。此系列变压器的各项参数与传统 SZ7 系列基本相同，但节能效果相对很好，其技术数据见表 6—18。

表 6—18 所用变技术数据

型号	额定电压 kV		连接 组标 号	损耗 kW		空载电流	阻抗电压
	高压	低 压		短路	空载		
SZ ₁₀ —400/10	10	121	Y, yn0	4.92	0.64	0.95	4

(2)所用变压器配套熔断器的选择

通过熔断器的最大长期工作电流 $I_{gzd} = 1.05 \times 400 / (\sqrt{3} \times 10) = 24.25 \text{ A}$

熔体的额定电流 $I_{ert} = K_b * I_{eb} = 1.5 \times \frac{I_{gzd}}{1.05} = 34.64 \text{ A}$

三相短路容量 $S_d = \sqrt{3}V_B I_{ch} = \sqrt{3} \times 10.5 \times 1.52 \times 0.771 = 21.31 \text{ MVA}$

根据 $U_W = 10 \text{ kV}$, $I_{gzd} = 24.25 \text{ A}$, $I_{ert} = 34.64 \text{ A}$, $S_d = 21.31 \text{ MVA}$

查表选择 RN₃-10/50 型熔断器，其技术数据见表 6—19。

表 6—19 熔断器技术数据

型 号	额定电压 kV	额定电流 A	额定电流容量 MVA	质量 kg
RN ₃ —10/50	10	50	200	6.2

7. 配电装置布置

配电装置是变电站的重要组成部分。它是按主接线的要求，由关联设备保护、测量电器、母线和必要的辅助设备构成，用来接受和分配电能。配电装置的类型较多，主要有屋外配电装置、屋内配电装置、洞内和坝内配电装置、成套配电装置和 SF₆ 全封闭电器配电装置。大中型变电站中，35kV 及以上的配电装置多采用屋外配电装置，当有特殊要求或处于严重污秽地区时，经过经济技术比较，也可采用屋内布置。随着经济发展和技术进步，110—220kV 屋内配电装置已得到发展和不断改进。

配电装置的设计原则：

- (1) 节约用地；
- (2) 运行安全和操作巡视方便；
- (3) 考虑检修和安装条件；
- (4) 节约材料，降低造价；
- (5) 注意设备选型；
- (6) 适应电厂布置的特点；
- (7) 因地制宜，满足污秽地区、地震地区和高海拔地区的特殊要求。

设计结果：

配电装置的形式

220kV 系统采用分相中型单列布置。该布置方式中，所有电器安装于离地面有一定高度的同一平面上，便于工作人员地面活动且接线交叉少。与普通中型布置相比，可以节约用地。110kV 系统采用半高型。10kV 系统采用屋内配电装置。

根据线路走向和地理条件，220kV 线路由北引进，同主接线相对应。110kV 出线向北及向东架空输出。10kV 出线由高压配电室经过电缆引出并架空输出。高压配电室间隔次序为电容器 1 号柜，出线 L₁ 柜，电压互感器 1 号柜，出线 L₂ 柜，出线 L₃ 柜，120000kVA 主受柜，出线 L₄ 柜，所用变 1，出线 L₅ 柜，电压互感器 2 号柜，出线 L₆ 柜，120000kVA 主受柜，电容器 2 号柜，所用变 2，2 个预留柜，共计 16 个高压开关柜。

高压开关柜的选择：主受柜选择 GG1AZ (F) 型，其他开关柜根据 DL 选择 GG—1A (F) 型，开关柜上部放母线和母线隔离开关，三相母线水平放置，中部放 DL 和 CT，下部放隔离开关，三部分之间用隔板隔开。其正面左上部为可安装各种仪表和继电器的钢板门；两侧用金属板与相邻回路的电器隔开，以保证工作人员检修维护时的安全和巡视方便。

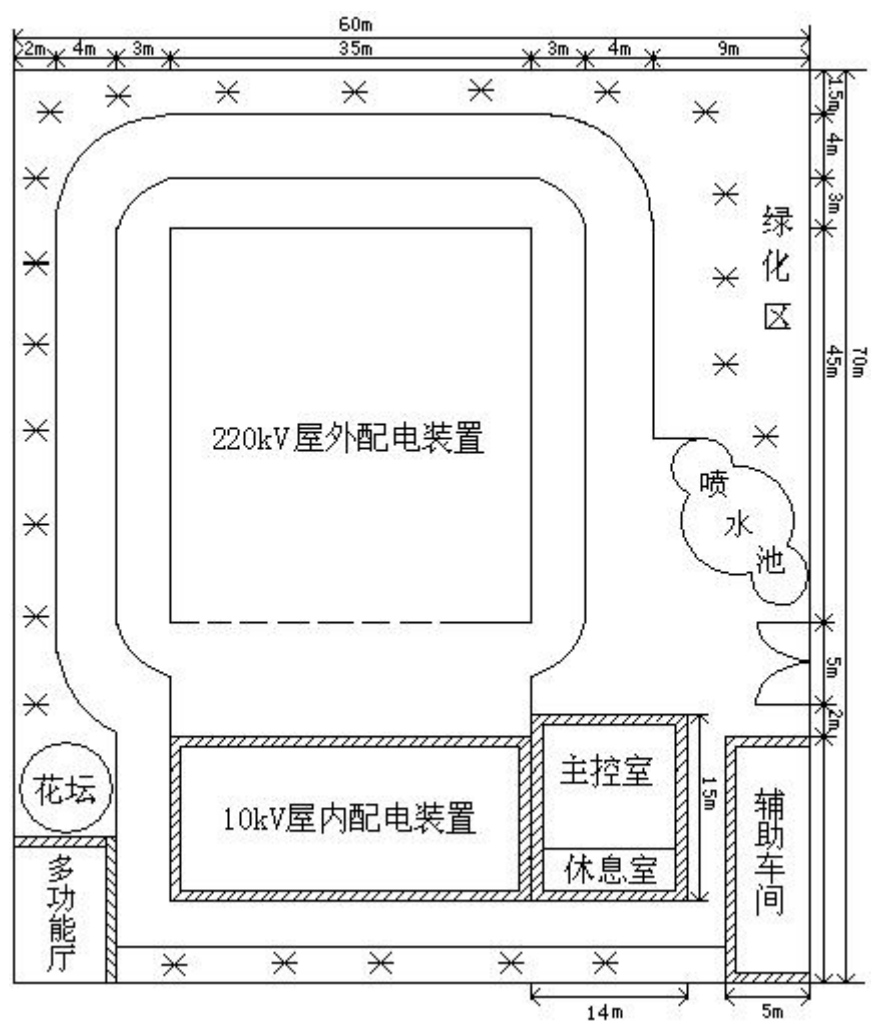


图 7-1 变电站布置图

8. 工程概算

本次变电站设计所用的资金见表 8—1。

表 8—1 工程概算数据表

序号	名称	规格与型号	单位	数量	单价(元)	合计(元)
1	主变	SFPSZ ₇ -120000/220	台	2		
2	所用变	SZ ₁₀ -400/10	台	2	11000	
3	断路器	SW ₄ -220/1000	台	2	600	
		SW ₄ -110/1000	台	1	580	
		SN ₄ -10G/5000	台	11	580	
		SN ₃ -10/2000	台			
4	隔离开关	GW ₄ -220/600	组	14	9500	
		GW ₄ -110G/1000	组	19	2690	
		GN ₁₀ -10T/4000	组	24	2470	
		GW ₄ -110/600	组			
		GN ₂ -10/2000	组			
5	熔断器	RN ₃ -10/50	台	4	85000	
6	电流互感器	LCWDL-220	台	8	2000	
		LCWDL-110	台	14	1500	
		LQZ-110	台		1450	
		LMZ ₁ -10	台			
7	电压互感器	JCC ₁ -220 TH	台	2	12000	
		JCC ₁ -110 TH	台	2	6400	
		JSJW-10	台	2		
8	电容器组	BFMH ₁₁ -20000-3W	组	2	15000	
9	避雷器	FZ-220J	组	5	1800	
		FCZ-220J	组		1300	
		FZ-110J	组	10		
		FCZ-110J	组	12		

		SGX-4/220	片	288	27.60	
		FZ-10	组			
		SGX-5/110	片	6	32.50	
10	绝缘子	ZS-10/4	个			
		ZL-10/4	个			
		CWC-10/2000	个	1	32150	
11	电源屏		面	3	36000	
12	电度表		面	6	60	
13	开关柜					
14	继电器					
15	导线	LGJJ-400	吨			
		2×LGJQ-400	吨			
		3(120×10)	吨			
		LGJ-120	吨			
		3×LGJQ-400	吨			
		ZLL-120	米			
合计						

附录 1

附表 1 设备报表

Attached Tab.1 Equipment Statement

设备名称	220kV 侧	110kV 侧	10kV 侧
主变压器	SFPSZ ₇ -120000/220	— — — —	— — — —
母线	GJJ-400	2×LGJQ-300	3 (120×10) 矩形铜母线
进线	LGJJ-400	— — — —	— — — —
出线	— — — —	LGJ-150	3×LGJQ-400
断路器	LW ₄ -220/1000	LW ₄ -110/1000	SN ₄ -10G/5000
隔离开关	GW ₄ -220/600	GW ₄ -110G/1000	GN ₁₀ -10T/4000
电流互感 器	LCWDL-220	LCWDL-110	LMZ ₁ -10 LMZ ₁ -10
电压互感 器	JCC ₁ -220TH	JCC ₁ -110TH	JSJW-10
避雷器	母线侧 FZ-220J 变压器侧 FCZ-220J	母线侧 FZ-110J 变压器 FCZ-110J	FZ-10
绝缘子	ZSW-220/4	ZSW-110/4	ZSW10/4
所用变	— — — —	— — — —	SZ ₁₀ -400/10
电力电容 器	— — — —	— — — —	BFMH ₁₁ -20000-3W
熔断器型号		所用变侧	
		RN ₄ -10	

第八章 设计实例—500kV 超高压变电站

1 前言

我国很多地区现已形成以 500kV 为骨干的主网，能将电力资源更充分的利用。500kV 超高压变电站的容量大、电压高、出线回路数多，在电力系统中一般都是电力输送的枢纽性变电站。因此兴建 500kV 超高压变电站能够更好的利用资源，实现最大利用。北方的充足能源，也将通过枢纽变电站实现“北电南送”。

1.1 变电站的发展形式

自 1974 年建成了第一条 330kV 输电线路，由甘肃刘家峡水电站厂到陕西关中地区开始，变电站发展迅速。1981 年建成了第一条 500kV 输电线路，由河南姚孟火电厂到武汉，500kV 超高压变电站走入人们的视线。其中，超高压变电站的建设成功，使国内各省电网形成网，华北、东北、华东、华中、南方等电网都已建成 500kV 大容量输电线路和跨省联络线，并将逐步形成跨大区域互联的骨干网络。正在建设中的西北 750kV 输电工程，标志着我国电网输电电压等级由目前最高的 500kV 即将升级为 750kV，实现历史性跨越。在日趋建设的超高压变电站中，超高电压等级 500kV 的变电站占有重要的地位。

1.2 变电站设计的目的及意义

本次毕业设计是以《500kV 群林输变电工程初步设计审核意见》和佳木斯电业局提供的负荷资料及相关要求为设计依据，以加强电网的网架结构，提高该地区的供电质量、减少电能损失，满足该地区负荷增长的需要为目的而开发设计的 500kV 超高压变电站。变电站在设计基础上，力求更加实用化。作为枢纽位置的变电站，具有高度可靠性和灵活性的主接线，将保证 500kV 电网的安全运行，满足各类重要负荷。

1.3 设计变电站简介

1.3.1 变电站的类型及地质条件

该变电站为 500kV 大型枢纽变电站，500kV 采用一个半断路器接线，220kV 采用双母线带旁路接线，10kV 采用单母线分段接线。500kV 配电装置采用 GIS 配电装置。本所选用分层分布式综合自动化系统。主变压器及线路控保屏、电度表屏、直流屏、电池屏、交流屏均布置在主控室内。为有人值班变电站，部分站区设立无人值班室，用计算机进行监控。

变电所所址位于佳木斯市郊区西格木乡群林村北侧，地势平坦、进出线走廊便于架空线路的引入和引出，因此配电装置的布置不必考虑特殊方式。所址的标高海拔 450m，经调查没有被洪水浸淹的历史，不必选用高海拔的电气设备。所址位于负荷中心，交通便利、通讯畅通。有铁路和公路经过变电所附近，不必过多考虑设备的运输问题。旱涝期，附近河流对变电站无影响。该地区夏季最高气温在+32℃，冬季最低气

温为-39℃，年平均气温为+14℃，电气设备均可正常工作；最大风速为 2.0m/s，夏秋季节不受强风影响，所以不必考虑架空线路的机械强度及对屋外配电装置的影响；该地区全年只有短暂的霜冻（不足 2 天）和结冰现象（不足 1 天），覆冰厚度仅为 2mm，因此不必考虑覆冰问题；无冻土情况发生，接地装置地下部分不必过深即可保证可靠接地；地震强度很小，不必设置防震保护，可以采用半高型或高型布置；土壤电阻率为 100 Ω·M，可考虑采用构架式避雷针；年雷暴日数为 33.7 天，防雷装置的选取应加以考虑；附近虽然有化工厂，但对本所影响不大，由于绝缘子表面的湿润过程和气象条件密切相关，而当地四季存在溶雪溶冰、毛毛雨、雨加雪、凝露等对污秽绝缘子极为不利的气象条件，突发性的污秽与湿润可能同时建立，为防止污闪，所以对绝缘子串和变电设备外绝缘的影响应予以考虑。（以上分析均参照《高压配电装置设计技术规程》）

1.3.2 变电站的主要技术特点

表 1-1 变电站主要技术特点

序号	项目名称	技术特点
1	电气接线	500kV：采用一个半断路器接线 220kV：采用双母线带旁路接线 10kV：采用单母线分段接线
2	短路电流	500kV： 50kA 220kV： 50kA 10kV： 40kA
3	主要设备选型	主变压器：三相，油浸式，无励磁调压，自耦变压器 500kV：SF ₆ 双断口瓷柱式断路器 220kV：SF ₆ 单断口瓷柱式断路器 10kV：SF ₆ 瓷柱式断路器
4	配电装置型式	500kV：采用悬吊管母线中型分相断路器三列式布置，间隔宽度取 28m，阻波器采用三相悬挂式 220kV：采用支持式管母，断路器单列布置，单侧架空出线，间隔宽度 13m 10kV：采用支持管母线中型布置，母线与主变压器平行或垂直布置，分支回路断路器配置在母线侧
5	电气二次	变电站设置计算机监控系统，保护设备分散布置在各继电保护小室
6	土建	构架采用圆形钢管，支架采用独立式等径钢管 建筑物采用钢筋混凝土构架结构

2 负荷统计及计算

2.1 负荷统计表

线路中 1~8 为 500kV 出线，9~12 为 220kV 出线，13~15 为 10kV 出线
根据统计负荷如表 2-1 所示。

表 2-1 负荷统计表

回路 序号	回路 名称	负荷容量 (kVA)	需 用 系 数	线 长 (km)	供电 回路
1	群方甲线	71350	0.8	850	1
2	群方乙线	70400	0.75	870	1
3	群兴甲线	58600	0.8	790	1
4	群兴乙线	50400	0.8	750	1
5	群佳甲线	51850	0.8	730	1
6	群佳乙线	56300	0.75	650	1
7	群鹤甲线	40750	0.8	680	1
8	群鹤乙线	42100	0.8	710	1
9	群庆甲线	43300	0.75	530	1
10	群庆乙线	42200	0.8	560	1
11	群七甲线	32300	0.8	570	1
12	群七乙线	37100	0.8	560	1
13	群运线	21700	0.8	480	1

14	群兴线	21500	0.8	460	1
15	群宝线	21000	0.8	460	1

2.2 变电站负荷计算

本设计为 500kV 超高压变电所，负荷计算采用需用系数法。其优点是：公式简单，计算方便，对于不同性质的供电用户的需用系数是经过几十年的统计积累，数值比较完整和准确，为供电设计创造了很好的条件。由于各供电区域电性质相差不大，考虑功率因数相同，则视在功率可表示为有功功率。

采用需用系数法求各用户的计算负荷：

$$S_{jsi} = K_t \cdot S_{ei} \quad (2-1)$$

式中 S_{jsi} —各用户的计算负荷，kVA；

S_{ei} —各用电设备额定容量，kVA。

每条出线路的负荷：

线路 1: $S_{js1} = 0.8 \times 71350 = 57080$ (kVA)

线路 2: $S_{js2} = 0.75 \times 70400 = 52800$ (kVA)

线路 3: $S_{js3} = 0.8 \times 58600 = 46880$ (kVA)

线路 4: $S_{js4} = 0.8 \times 50400 = 40320$ (kVA)

线路 5: $S_{js5} = 0.8 \times 51850 = 41480$ (kVA)

线路 6: $S_{js6} = 0.75 \times 56300 = 42225$ (kVA)

线路 7: $S_{js7} = 0.8 \times 40750 = 32600$ (kVA)

线路 8: $S_{js8} = 0.8 \times 42100 = 33680$ (kVA)

线路 9: $S_{js9} = 0.75 \times 43300 = 32475$ (kVA)

线路 10: $S_{js10} = 0.8 \times 42200 = 33760$ (kVA)

线路 11: $S_{js11} = 0.8 \times 32300 = 25840$ (kVA)

线路 12: $S_{js12} = 0.8 \times 37100 = 29680$ (kVA)

线路 13: $S_{js13} = 0.8 \times 21700 = 17360$ (kVA)

线路 14: $S_{js14} = 0.8 \times 21500 = 17200$ (kVA)

线路 15: $S_{js15} = 0.8 \times 21000 = 16800$ (kVA)

变电所设计当年的计算负荷可由式（2-2）计算

$$S_{js} = K_t \sum_{i=1}^{15} S_{jsi} (1 + X\%)$$

（2-2）

式中 K_t —同时系数，一般取 0.85-0.9，这里取 0.9；

$X\%$ —线损率，高低压网络的综合线损率在 8%-12%，这里取 10%。

$$S_{js} = K_t (S_{js1} + S_{js2} + S_{js3} + S_{js4} + S_{js5} + S_{js6} + S_{js7} + S_{js8} + S_{js9} + S_{js10} + S_{js11} + S_{js12} + S_{js13} + S_{js14} + S_{js15}) \times (1 + X\%)$$

$$= 0.9 \times 520180 \times (1 + 0.1)$$

$$= 514978.2 \text{ (kVA)}$$

计算负荷增长后的变电所最大计算负荷为

$$S_{jszd} = S_{js} e^{m \times n}$$

（2-3）

式中 n — 年数，取 10 年；

m — 年平均增长率，取 7%；

S_{jszd} — n 年后的最大计算负荷。

$$S_{jszd} = 514978.2 \times e^{10 \times 0.07} = 1037363.72 \text{ (kVA)}$$

3 主变的选择及主接线设计

3.1 主变台数的确定及容量的选择

变压器容量的选择至关重要，容量选择小了，不满足负荷增长的要求。容量选择大了，变压器空载损耗大，起不到降低损耗、同网同价的要求。因此，变电所主变压器的容量一般按变电所建成后 5~10 年的规划负荷考虑，并应按照其中一台停用时其余变压器能满足变电所最大负荷 S_{\max} 的 60%~70% 选择，故 500kV 变电所取 70%。在 500kV 及以上的发电厂和变电所中，应按容量、可靠性要求、制造水平、运输条件、负荷和系统情况等，经技术经济比较后确定变压器相数。当一台主变压器运行时，可保证 60% 的负荷供电，考虑变压器事故负荷能力为 40%，所以供电的保证率为 84%。为简化电压等级或减少重复降压容量采用双绕组变压器。由于变压器绕组的连接方式必须和系统电压相位一致，否则不能并列进行，所以变压器绕组的连线方式选 Y 型连接。

装设三台主变压器的变电站，根据我国变电压器运行的实践经验，并参考经验，每台主变的额定容量：

$$S_e \geq 0.7 S_{jszd} \quad (3-1)$$

即： $S_e \geq 0.7 \times 1037363.72 = 726154.604 \text{ (kVA)}$

主变压器可选择 ODFPS-250000/500 单相自耦无励磁调压变压器，三台为一组，主要性能参

数为：额定容量 250/250/80MVA；额定电压 $\frac{525}{\sqrt{3}} / \frac{230 \pm 2 \times 2.5\%}{\sqrt{3}} / 10.5 \text{ kV}$ ；额定电流 3150A；

空载损耗 80KW；负载损耗 445KW。其中绝缘件中的含水量降低到 0.5% 以下。达到了变压器局部放电量国际 IEC 标准。

其技术数据如表 3-1 所示。

表 3-1 ODFPS-250000/500 三相自耦变压器

额定容量 (kVA)	电 压 组 合 (kV)			联结 组标 号	空载 损耗 (kW)	负载 损耗 (kW)	空载 电流 (%)	重量 (t)
250000	高压	分接 (%)	低压	YN, yn0, d11.	80	445	14.57	159
	$\frac{525}{\sqrt{3}}$	$\frac{230 \pm 2 \times 2.5\%}{\sqrt{3}}$	10.5 35 38.5					

3.2 主接线的设计选择

3.2.1 主接线的设计原则

变电所的主接线是电力系统按接线组成中的一个重要组成部分，主接线的确定对电力系统的安全、稳定、灵活、经济运行以及变电所电气设备的选择，配电装置的布置，继电保护和控制方法的拟订将会产生直接影响。

3.2.2 主接线方案的确定

主接线是根据发电厂或变电所的设计任务书，原始资料以及设计要求和原则来进行设计的，在保证满足技术要求条件下，力求经济性。现初步选择两个方案进行经济计算，采用静态比较法进行经济比较，确定出最佳主接线方案。

方案 1：采用 $1\frac{1}{2}$ 断路器主接线

$1\frac{1}{2}$ 断路器主接线其特点是：（1）有高度供电可靠性，每一回路有两台断路器供电，发生母线故障或断路器故障时不会导致出线停电；（2）运行调度灵活。正常运行时两组母线和所有断路器都投入工作，从而形成多环路供电方式；（3）倒闸操作方便。隔离开关一般仅作检修用，避免了将隔离开关作操作作用时的倒闸操作。检修断路器时，不需带旁路的倒闸操作。检修母线时，回路不需要切换。其主要缺点是二次接线复杂。接线方式如图 3-1 所示。

方案 2：采用双母线四分段带旁路母线的接线

双母线四分段带旁路母线接线中有四组工作母线，一组旁路母线；每条引出线通过一台断路器、两组母线隔离开关分别接到工作母线上，并通过一组旁路母线隔离开关与旁路母线连接。其特点是：（1）母线轮流检修时不中断对用户供电；（2）其中一条出线断路器故障时，用旁路断路器带路可保证出线不停电；（3）二次回路接线简单。其中其主要缺点是：（1）母线故障时，导致接在该母线上的所有出线停电；（2）倒闸操作复杂，母线检修和旁路断路器带路时需要进行隔离开关的倒换操作。接线方式如图 3-2 所示。

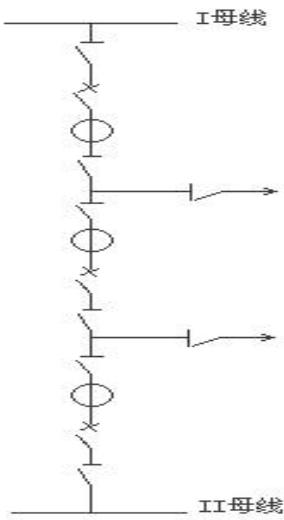


图 3-1 $1\frac{1}{2}$ 断路器的双母线接线

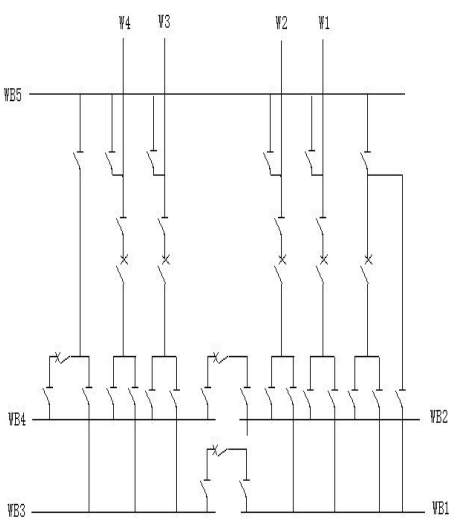


图 3-2 双母线四分段带旁路接线

根据上述两种方案的比较，结合所设计 500kV 超高压变电所的负载情况，可采用 $1\frac{1}{2}$ 断路器接线，可以保证可靠性。

220kV 侧采用双母线带旁路接线，检修方便。

10kV 侧采用单分段接线，用隔离开关和断路器配合保护。

4 短路计算

4.1 短路计算的目的

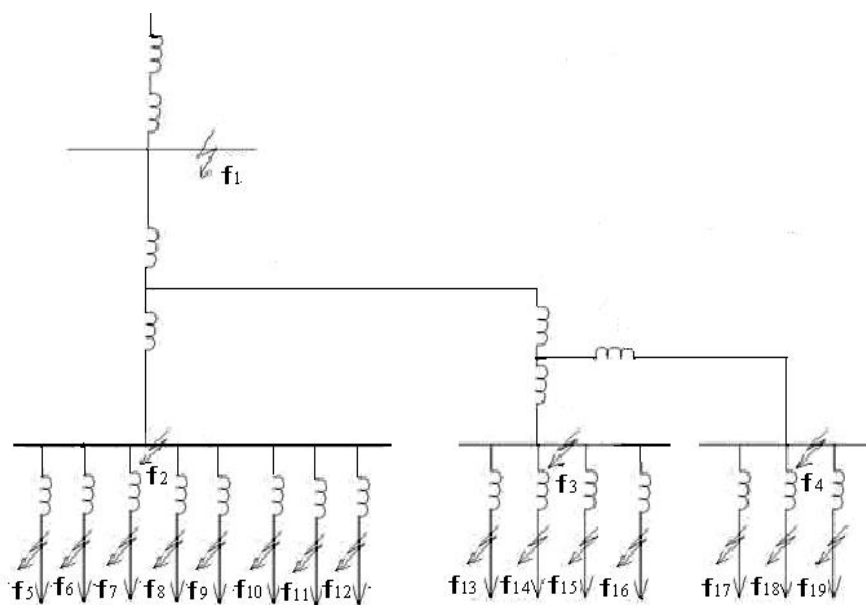
短路是指供电系统中不等电位的导体在电气上被短接。电气设备载流部分绝缘损坏是产生短路的主要原因。发生短路时，由于系统中总阻抗大大减少，因而短路电流可能达到很大数值（几万安至十几万安），故短路电流为主要计算对象。计算的目的是：

- (1) 选择导体和电器设备；
- (2) 电网接线和发电厂、变电所电气主接线的比较、选择；
- (3) 选择继电保护装置和整定计算；
- (4) 验算接地装置的接触电压和跨步电压；
- (5) 为确定送电线路对附近通信电磁危险的影响提供计算资料。

4.2 短路点的确定

根据保护整定的计算和经验，各短路点选择如图 4-1：

图 4-1 短路点选择图



4.3 各点短路电流的计算

f_1 点短路时

$$\begin{aligned} I_{d1\max*} &= \frac{1}{(x_{\max*} + x_{l*})} \\ &= 1 / (0.06 + 0.000128) \\ &= 9.091 \end{aligned}$$

$$I_{d1\max}^{(3)} = I_{d1\max*} \frac{S_B}{\sqrt{3} \times U_B}$$

$$=9.091 \times \frac{100}{\sqrt{3} \times U_B}$$

$$=4.338$$

$$I_{chl} = 2.55 \times I_{d1 \max}^{(3)} = 2.55 \times 4.338 = 11.062 \text{ kA}$$

$$I_{d1 \max}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{\sqrt{3}}{2} I_{d1 \max}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 4.338 = 3.757 \text{ kA}$$

最大运行状态时

f_1 点短路时

$$I_{d1 \max} = \frac{1}{(x_{\max} + x_{f*})}$$

$$= 1 / (0.04 + 0.05)$$

$$= 11.111$$

$$I_{d1 \max}^{(3)} = I_{d1 \max} \frac{S_B}{\sqrt{3} \times U_B}$$

$$= 11.111 \times \frac{100}{\sqrt{3} \times U_B}$$

$$= 5.302$$

$$I_{chl} = 2.55 \times I_{d1 \max}^{(3)} = 2.55 \times 5.302 = 13.520 \text{ kA}$$

$$I_{d1 \max}^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{\sqrt{3}}{2} I_{d1 \max}^{(3)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 5.302 = 4.59$$

以下各点同上得短路计算值如表 4-3

表 4-3: 短路计算结果表

短路点	三相短路电流		冲击电流		二相短路电流	
	最大运行	最小运行	最大运行	最小运行	最大运行	最小运行
	方式	方式	方式	方式	方式	方式
f_1	5.302	4.338	13.520	11.062	4.592	3.757
f_2	16.658	15.706	42.478	40.050	14.426	13.602
f_3	13.257	12.486	36.028	30.240	12.572	11.541

f ₄	13.104	12.024	35.481	28.725	11.412	10.050
f ₅	2.832	2.740	7.385	7.152	2.482	2.342
f ₆	2.941	2.830	7.400	7.217	2.547	2.451
f ₇	2.655	2.405	7.582	7.613	2.724	2.095
f ₈	2.752	2.670	6.988	7.025	2.416	2.387
f ₉	2.845	2.430	7.368	7.511	2.847	2.404
f10	2.903	2.576	7.429	7.627	2.873	2.378
f11	2.470	2.319	7.295	7.407	2.705	2.305
f12	2.668	2.405	7.312	7.217	2.547	2.214
f13	1.748	1.612	4.560	4.890	1.476	1.396
f14	1.761	1.643	4.523	4.757	1.423	1.376
f15	1.689	1.587	4.401	4.650	1.388	1.354
f16	1.675	1.601	4.475	4.678	1.401	1.362
f17	1.120	1.097	3.339	3.249	2.675	1.482
f18	1.225	1.204	3.356	3.285	2.705	1.747
f19	1.174	1.128	3.169	3.085	2.975	1.988

5 电气设备的选择及校验

电气设备的选择及校验是变电所设计的重要内容之一，设计电气设备的选择要从我国实际情况出发，根据设计规程要求进行，力求做到了技术先进、安全可靠、运行灵活方便、留有适当的余度的要求。并在选择后按设备的额定电压，额定电流，短路时动稳定和热稳定等方面对所选的设备进行了校验。

变电站内各种主要电气设备的选择如表 5-1 所示。

表 5-1 主设备清单

序号	设备名称	规格或型号	单位	数量	备注
1	主变压器	ODFPS-250000/500	台	6	
2	管型主导线	6063-150/136	M	36	配补强衬管
4	500kV 高压并联电抗器	DWK3-110	台	3	
5	500kV 隔离开关	SSBIII-AM-550/3150	组	4	
6	断路器	LW15-550	组	6	
7	隔离开关	GW ₁₃ —220/600	组	2	
8	电力电容器	BFM11/ $\sqrt{3}$ -200-1W	组	3	
9	电流互感器	LVQBT-500	台	2	
10	电压互感器	JVQT-500	台	2	
11	避雷器	Y5W-12.7/45	组	1	
12	避雷器	Y5W-12.7/45	组	2	电压互感器侧
13	避雷器	Y5W-12.7/45	组	2	电容器侧
14	避雷器	Y5W-12.7/45	组	6	
15	穿墙套管	CWL2-10/1000	个		
16	绝缘子	XP-4C	片	4	
17	绝缘子	ZS-10/4	串		
18	钢芯铝绞线	LGJQT-1400mm ²	米	5300	跨线
19	钢芯铝绞线	LGJQT-1400mm ²	米	4000	设备引下线
20	组合导线	2×LGJQ-360mm ²	米		

变电站内各种主要电气设备的校验要求如表 5-2 所示。

表 5-2 电气设备的校验要求表

序号	设备名称	额定电压 kV	额定电流 A	额定容量 kVA	额定开断电流	短路热稳定	短路动稳定
1	断路器	√	√	√		√	√
2	隔离开关	√	√			√	√

3	电压互感器	√	√		√	√
4	电压互感器	√		√		
5	熔断器	√	√		√	
6	电力电容器	√		√		
7	避雷器	√				
8	绝缘子	√			√	
9	穿墙套管	√	√		√	√

注 表中“√”表示校验要求项目

5.1 母线的选择及校验

5.1.1 母线材料及形状的选择

母线的材料有铜、铝和钢。由于铝的成本低，除某些特殊场所外，普遍使用铝导体。变电站常用母线形状有矩形、槽型和管型等。矩形截面电流的集肤效应强烈。常被用于容量为 60MVA 及以下的降压变压器的配电装置等。槽型截面母线用于回路正常工作电流 4~8KA 的情况，电流不符合。管型母线具有机械强度好、载流量大、集肤效应小的特点并可用于 8KA 以上的大电流母线。由于 500kV 电压等级的特殊性，因此选择钢芯铝绞线。

5.1.2 500kV 侧母线的选择及校验

(1) 按经济电流密度选择母线截面

最大长期工作电流

$$I_{gzd} = \frac{1.05 S_e}{\sqrt{3} U_e} = \frac{1.05 \times 750000}{\sqrt{3} \times 500} = 910.4 \text{ A}$$

5. 按经济电流密度选择母线截面

$$S_j = \frac{I_{gzd}}{J} \quad (5-1)$$

式中 S_j —经济截面， m^2 ；

J —经济电流密度， A/m^2 。

由于母线置于户外，考虑集肤效应和散热，最大负荷利用小时数取为 3000~5000h/a，按经济电流密度选择母线截面

查表选择 $J=1.15 \times 10^6 \text{ A}/\text{m}^2$

$$\therefore S_j = \frac{910.4}{1.15 \times 10^6} = 791.65 \text{ mm}^2$$

故选择截面积 1400 mm^2 的 LGJQT-1400mm² 型钢芯铝绞线, 其 25℃ 时最大允许持续电流 $I_{y\theta} = 1760 \text{ A}$

取 $\theta = 35^\circ\text{C}$, $\theta_0 = 25^\circ\text{C}$ 时, 温度修正系数为:

$$K_\theta = \sqrt{\frac{\theta_y - \theta}{\theta - \theta_0}} = \sqrt{\frac{70 - 35}{70 - 25}} = 0.882$$

则实际环境温度为 35℃ 时的母线允许电流:

$$I_{y\theta} = 0.882 \times 1760 = 1552.32 (\text{A})$$

大于其长期最大工作电流 (1301.88A), 满足长期工作时的发热条件。

6. 校验

短路计算时间 $t = t_b + t_g + t_{hu} = 2.0 + 0.06 + 0.04 = 2.1 \text{ s}$ 。因 $I'' = I_\infty$, 所以

$\beta'' = \frac{I''}{I_\infty} = 1$, 经查《短路电流周期分量等值时间曲线》表得, $t_z = 1.8 \text{ s}$ 。因 $t > 1 \text{ s}$, 所以

$$t_{fz} = 0。$$

$$\text{故 } t_{dz} = t_z = 1.8 \text{ s}$$

母线正常运行时的最高温度为:

$$\theta_c = \theta + (\theta_y - \theta) \cdot \left(\frac{I_{gzd}}{I_{y\theta}} \right)^2 = 35 + (70 - 35) \times \left(\frac{1301.88}{1552.32} \right)^2 = 59.62^\circ\text{C}$$

查表知 $C = 97 \times 10^6$, 按热稳定条件所需最小母线截面为

$$S_{zx} = \frac{I_\infty}{C} \cdot \sqrt{t_{dz} \cdot K_j} \quad (5-2)$$

式中 C —热稳定系数;

K_j —集肤效应系数 (取 1)。

$$S_{zx} = \frac{I_\infty}{C} \cdot \sqrt{t_{dz} \cdot K_j} = \frac{2.5 \times 10^3}{97 \times 10^6} \times \sqrt{1.8 \times 1} = 34.54 \text{ mm}^2$$

小于所选母线的截面积, 满足热稳定要求, 因所选母线为绞线, 故不需动稳定校验。所以选择截面积 1400 mm^2 的 LGJQT-1400mm² 型钢芯铝绞线。

5.1.3 500kV 侧进线母线的选择及校验

因与发电厂相联, 进线的最大长期工作电流与 500kV 侧的母线相同, 所以选用截面积 1400 mm^2 的 LGJQT-1400mm² 型钢芯铝绞线

5.1.4 220kV 侧母线的选择及校验

(1) 按经济电流密度选择母线截面

考虑变压器变比约为 2: 1: 0.04

最大长期工作电流

$$I_{gzd} = 0.5 \times \frac{1.05 S_e}{\sqrt{3} U_e} = 0.5 \times \frac{1.05 \times 750000}{\sqrt{3} \times 220} = 1034.55 \text{ A}$$

查表得经济电流密度 $J = 1.0 \times 10^6 \text{ A/m}^2$

$$\text{经济截面 } S_J = \frac{I_{gzd}}{J} = \frac{1034.55}{1.0 \times 10^6} = 1034.55 \text{ mm}^2$$

查《电力工程设计手册》，故选择截面积 1400 mm^2 的 LGJQT-1400mm² 型钢芯铝绞线，

其 25℃ 时最大允许持续电流 $I_{y\theta} = 1760 \text{ A}$ 。

$$\text{温度修正系数为 } k_\theta = \sqrt{\frac{\theta_y - \theta}{\theta_y - \theta_0}} = \sqrt{\frac{70 - 38.9}{70 - 25}} = 0.831$$

$$I_{y\theta} = 0.882 \times 1760 = 1552.32 \text{ (A)}$$

大于其长期最大工作电流 (1301.88A)，满足长期工作时的发热条件。

(2) 按最小截面法校验母线的热稳定

$$\text{短路时间 } t = t_b + t_{hu} + t_g = 0.1 + 0.04 + 0.06 = 0.2 \text{ s}$$

$$\beta'' = \frac{I_\infty^{(3)}}{I_\infty^{(3)}} = 1 \quad t_{fz} = 0.05 \beta'' = 0.05 \times 1 = 0.05$$

查《短路电流周期分量等值时间曲线》得， $t_z = 0.18 \text{ s}$

$$\text{则 } t_{dz} = t_z + t_{fz} = 0.18 + 0.05 = 0.23 \text{ s}$$

母线正常运行时的最高温度为：

$$\theta_c = \theta + (\theta_y - \theta) \cdot \left(\frac{I_{gzd}}{I_{y\theta}} \right)^2 = 35 + (70 - 35) \times \left(\frac{1301.88}{1552.32} \right)^2 = 59.62^\circ \text{C}$$

查表知 $C = 97 \times 10^6$ ，按热稳定条件所需最小母线截面为

$$S_{zx} = \frac{I_\infty}{C} \cdot \sqrt{t_{dz} \cdot K_j} \quad (5-2)$$

式中 C—热稳定系数；

Kj—集肤效应系数 (取 1)。

$$S_{zx} = \frac{I_\infty}{C} \cdot \sqrt{t_{dz} \cdot K_j} = \frac{2.5 \times 10^3}{97 \times 10^6} \times \sqrt{1.8 \times 1} = 34.54 \text{ mm}^2$$

小于所选母线的截面积,满足热稳定要求。所以选择截面积 1400 mm^2 的 LGJQT-1400mm

² 型钢芯铝绞线

(3) 按电晕条件校验

由公式 $U_{li} = 84 \times K \times m_r \times \delta \times r \times (1 + \frac{0.301}{\sqrt{\delta r}}) \times \lg \frac{a}{r}$ 计算临界电晕电压

查表得, 水平布置时 $K = 0.96$; 多股绞线 $m_r = 0.83 \sim 0.87$, 选 0.85 ;
 $\delta = 1.000$; 导线半径 $r = 1.13 \text{ cm}$; 相间距离 $a = 400 \text{ mm}$, 则

$$U_{li} = 84 \times 0.96 \times 0.85 \times 1 \times 1.13 \times (1 + \frac{0.301}{\sqrt{1 \times 1.13}}) \times \lg \frac{a}{r} = 253.3 \text{ kV}$$

所以临界电晕电压 $U_{li} = 253.3 \text{ kV} > \text{工作电压 } U_g = 220 \text{ kV}$, 满足要求。

5.1.5 220kV 中压侧出线的选择及校验

220kV 侧有四回出线, 其中线路 9 为最大的一条负荷, $S_N = 43300 \text{ kVA}$, 应以此条线路作为依据选择出线。

(1) 按经济电流密度选择母线截面

最大长期工作电流

$$I_{gzd} = \frac{P}{\sqrt{3} U_e \cos \phi} = \frac{43300}{\sqrt{3} \times 220 \times 0.85} = 133.84 \text{ A}$$

经济电流密度 $J = 0.9 \times 10^6 \text{ A/m}^2$

$$\text{经济截面 } S_J = \frac{I_{gzd}}{J} = \frac{133.84}{0.9 \times 10^6} = 148.71 \text{ mm}^2$$

查《电力工程设计手册》

选用 LGJ-150 型户外钢芯铝绞线, $I_y = 478 \text{ A}$ 。

温度修正系数为 $k_\theta = 0.831$

则实际环境温度为 38.9°C 时, 母线允许电流

$$I_{y\theta} = k_\theta \times I_y = 0.831 \times 478 = 397.22 \text{ A} > I_{gzd} = 133.84 \text{ A},$$

满足长期工作时的发热条件。

(2) 按最小截面法校验母线的热稳定

$$t_{dz} = 0.23 \text{ s}, I_\infty = 0.889 \text{ kA}$$

母线正常工作时的最高温度

$$\theta_c = \theta + (\theta_y - \theta) \times \left(\frac{I_{gzd}}{I_{y\theta}} \right)^2 = 38.9 + (70 - 38.9) \times \left(\frac{133.84}{397.22} \right)^2 = 43.8^\circ\text{C}$$

由 $\theta_c = 43.8^\circ\text{C}$, 查《不同工作温度下裸导体的 C 值》得 $C = 98 \times 10^6$ 计算母线最小截面 ($K_j = 1$)

$$S_{zx} = \frac{I_\infty}{C} \sqrt{t_{dz} \times K_j} = \frac{0.9736 \times 10^3}{98 \times 10^6} \sqrt{0.23 \times 1} = 4.8 \text{ mm}^2,$$

因 $4.8\text{mm}^2 < 150\text{mm}^2$ ，故满足热稳定要求。

5.1.6 10kV 侧母线选择及校验

按通过低压侧母线的最大长期工作电流

$$I_{gzd} = 0.04 \cdot \frac{1.05 \cdot S_e}{\sqrt{3} \cdot U_e} = 0.04 \times \frac{1.05 \times 750000}{\sqrt{3} \times 10} = 1820.81\text{A}$$

(1) 按经济电流密度选择母线截面

根据公式 (5-1) 取变压器因为最大利用小时数: t_{zd} (h/a) $< 3000\text{h/a}$ ，查表选择

$$J = 1.65 \times 10^6 \text{A/m}^2$$

$$S_J = \frac{I_{gzd}}{J} = \frac{1820.81}{1.65 \times 10^6} = 1103.52 \text{mm}^2$$

选用 3 (120×10) 矩形铜母线, $I_y = 4780 \text{A}$ (平放)。

$$I'_{y\theta} = k_\theta \times I_y = 0.831 \times 4780 = 3972.2\text{A} > I_{gzd} = 1820.81\text{A},$$

此时满足长期工作时的发热条件。

(2) 按最小截面法校验母线的热稳定

$$t_{dz} = 0.23\text{s}, I_\infty = 0.821 \text{kA}$$

母线正常工作时的最高温度

$$\theta_c = \theta + (\theta_y - \theta) \times \left(\frac{I_{gzd}}{I_{y\theta}} \right)^2 = 38.9 + (70 - 38.9) \times \left(\frac{1820.81}{3972.2} \right)^2 = 55.0^\circ\text{C}$$

由 $\theta_c = 55.0^\circ\text{C}$ ，查《不同工作温度下裸导体的C值》得 $C = 89 \times 10^6$ 计算母线最小截面 ($K_j = 1$)

$$S_{zx} = \frac{I_\infty}{C} \sqrt{t_{dz} \times K_j} = \frac{0.821 \times 10^3}{89 \times 10^6} \sqrt{0.23 \times 1} = 4.4 \text{mm}^2,$$

因 $4.4\text{mm}^2 < 3(120 \times 10) \text{mm}^2$ ，故满足热稳定要求。

(3) 动稳定校验

$$\text{短路冲击电流 } i_{ch} = 2.094 \text{kA}$$

三相短路最大电动力

$$F = 1.73 \times 10^{-7} \times \frac{L}{a} \times i_{ch} = 1.73 \times 10^{-7} \times \frac{1}{0.4} \times 2.094^2 \times 10^6 = 1.89 \text{N}$$

母线所受的最大应力

$$F_{zd} = \frac{FL}{10 \times w} = \frac{1.89 \times 1}{10 \times 72 \times 10^{-6}} = 2.63 \times 10^3 \text{pa} < 69 \times 10^6 \text{pa}$$

满足动稳定要求。

5.1.7 10kV 低压侧母线的选择及校验

10kV 侧有三回出线，其中线路 13 为最大的一条负荷， $S_N = 21700 \text{ kVA}$ ，应以此条线路作为依据选择出线。

(1) 按经济电流密度选择母线截面

最大长期工作电流

$$I_{gzd} = \frac{P}{\sqrt{3}U_e \cos \theta} = \frac{21700}{\sqrt{3} \times 10 \times 0.85} = 1475.69 \text{ A}$$

经济电流密度 $J = 1.2 \times 10^6 \text{ A/m}^2$

$$\text{经济截面 } S_J = \frac{I_{gzd}}{J} = \frac{1475.69}{1.2 \times 10^6} = 1229.74 \text{ mm}^2$$

查《电力工程设计手册》

选用 $4 \times \text{LGJQ}-400$ 型组合导线， $I_y = 1774 \text{ A}$ 。

温度修正系数为 $k_\theta = 0.881$

则实际环境温度为 38.9°C 时，母线允许电流

$$I_{y\theta} = k_\theta \times I_y = 0.881 \times 1774 = 1562.89 \text{ A} > I_{gzd} = 1475.69 \text{ A}$$

满足长期工作时的发热条件。

(2) 按最小截面积法校验母线的热稳定

$$t_{dz} = 0.23 \text{ s}, I_\infty = 0.200 \text{ kA}$$

母线正常工作时的最高温度

$$\theta_c = \theta + (\theta_y - \theta) \times \left(\frac{I_{gzd}}{I_{y\theta}} \right)^2 = 38.9 + (70 - 38.9) \times \left(\frac{1475.69}{1562.89} \right)^2 = 65.2^\circ\text{C}$$

由 $\theta_c = 65.2^\circ\text{C}$ ，查《不同工作温度下裸导体的 C 值》得 $C = 89 \times 10^6$ 计算母线最小截面 ($K_j = 1$)

$$S_{zx} = \frac{I_\infty}{C} \sqrt{t_{dz} \times K_j} = \frac{0.200 \times 10^3}{89 \times 10^6} \sqrt{0.23 \times 1} = 1.1 \text{ mm}^2$$

因 $1.1 \text{ mm}^2 < 4 \times 400 \text{ mm}^2$ ，故满足热稳定要求。

5.2 断路器的选择及校验

5.2.1 500kV 侧及进线断路器的选择及校验

当系统稳定，要求快速切合故障时，应选用分闸时间不大于 0.04 s 的断路器；根据装设地点和构造类型选择户外式少油断路器；由额定电压选择 $U_e \geq U_N = 500 \text{ kV}$ ；由额定电流选择 $I_e \geq I_{gzd} = 1301.88 \text{ A}$ ；由额定开断电流选择 $I_{ekd} \geq I_{dt} = I'' = I_\infty = 2.202 \text{ kA}$ 。查《电力工程设计手册》选用 LW15-550 型户外式少油断路器，其技术数据见表 6-1。

表 5-1 断路器技术数据

型 号	额定电压 kV	额定电流 A	断流容量 MVA	额定断流量 kVA
LW15-550	550	1000	3500	18.4
极限通过电流 kA			热稳定电流 kA	

峰 值	有 效 值	1 秒	5 秒	10 秒
55	32	32	21	14.8

热稳定校验

短路等值时间 $t_{dz} = 0.23s$,
 短路电流热脉冲

$$I_{\infty}^2 t_{dz} = (2.202)^2 \times 0.23 = 1.12 < I_r^2 t = 32^2 \times 1 = 1024 \text{kA}^2 \cdot \text{s}$$

即满足热稳定要求。

动稳定校验 极限通过电流的幅值

$$i_i = 55\text{kA} > i_{ch} = 5.615\text{kA}$$

故满足动稳定要求。

5.2.2 220kV 侧及出线断路器的选择及校验

由额定电压选择 $U_e \geq U_N = 220\text{kV}$ ；由额定电流选择 $I_e \geq I_{gzd} = 661.3\text{A}$ ；由额定开断电流选择 $I_{ekd} \geq I_{dt} = 1.129\text{kA}$ 。查《电力工程设计手册》选用 SW4—220/1000 型户外式少油断路器，其技术数据见表 5—2。

表 5—2 断路器技术数据

型 号	额定电压 kV	额定电流 A	断流容量 MVA	额定断流量 kVA
SW4-220/1000	220	1000	3500	18.4
极限通过电流 kA		热稳定电流 kA		
峰 值	有 效 值	1 秒	5 秒	10 秒
55	32	32	21	14.8

热稳定校验

$$I_{\infty}^2 t_{dz} = (1.129)^2 \times 0.23 = 0.29 < I_r^2 t = 1024 \text{kA}^2 \cdot \text{s}$$

即满足热稳定要求。

动稳定校验

$$i_i = 55\text{kA} > i_{ch} = 2.879\text{kA}$$

故满足动稳定要求。

5.2.3 10kV 侧及出线断路器的选择及校验

由额定电压选择 $U_e \geq U_N = 10\text{kV}$ ；由额定电流选择 $I_e \geq I_{gzd} = 3637.4\text{A}$ ；由额定开断电流选择 $I_{ekd} \geq I_{dt} = 0.821\text{kA}$ 。查《电力工程设计手册》选用 SN4—10G/5000 型户内式少油断路器，其技术数据见表 6—3。

表 5—3 断路器技术数据

型 号	额定电压 kV	额定电流 A	断流容量 MVA	额定断流量 kVA
SN4-10G/5000	10	5000	1800	105
极限通过电流 kA		热稳定电流 kA		
峰 值	有 效 值	1 秒	5 秒	10 秒
300	173	173	120	85

热稳定校验

$$I_{\infty}^2 t_{dz} = (0.821)^2 \times 0.23 = 0.16 < I_r^2 t = 173^2 \times 1 = 29929 \text{kA}^2 \cdot \text{s} ,$$

即满足热稳定要求。

动稳定校验

$$i_i = 300\text{kA} > i_{ch} = 2.094\text{kA}$$

故满足动稳定要求。

5.3 隔离开关的选择及校验

5.3.1 500kV 侧隔离开关的选择及校验

由额定电压选择 $U_e \geq U_N = 500\text{kV}$ ；由额定电流选择 $I_e \geq I_{gzd} = 910.4\text{A}$ ，查《电力工程设计手册》选用 SSBIII-AM-550/3150 型户外式隔离开关，其技术数据见表 6—6。

表 5—4 隔离开关技术数据

型 号	额定电压 kV	额定电流 A	极限通过电流峰值 kA
SSBIII-AM-550/3150	550	3150	50
5 秒热稳定电流	操动机构型号		
14	CS14G, CQ2-145		

热稳定校验

$$I_{\infty}^2 t_{dz} = (2.202)^2 \times 0.23 = 1.12 < I_r^2 t = 14^2 \times 5 = 980 \text{kA}^2 \cdot \text{s}$$

即满足热稳定要求。

动稳定校验：

$$i_j = 50\text{kA} > i_{ch} = 5.615\text{kA}$$

故满足动稳定要求。

5.3.2 220kV 侧隔离开关的选择及校验

根据上面断路器的选择的相关数据和已知条件，选择屋外 GW₁₃—220/600 型隔离开关。查《电力工程设计手册》得技术特性如表 5—5

表 5—5 GW₁₃—220/600 的技术数据

型号	额 定 电 压	额 定 电 流	极限通过电流 峰值	5s 热 合 闸 稳 定 分 闸时间 电 流	0.06s	0.1s
GW ₁₃ —220/600	220	600	55Ka	29kA	14kA	

$$I_r^2 \times t > I_{\infty}^2 \times t_{dz} = 14^2 > 5.320^2$$

同理：满足热稳定要求

动稳定校验

$$I_j = 55(\text{kA}) > I_{ch} = 13.520(\text{kA})$$

满足动稳定条件

5.4 电流互感器的选择

电流互感器的选择如下表所示：

表 5—6 电流互感器技术数据

安装地点	型 号	额定电流比 A	准确级 数	二次负荷 Ω / 0.5 级
500kV 侧	LVQBT-500	200/5	0.5	2

220kV 侧	LCWDL-220	400/5	0.5	2
10kV 侧	LMZ1-10	4000/5	0.5	2
220kV 侧出线路	LQZ-220	600/5	0.5	2
10kV 侧出线路	LMZ1-10	2000/5	0.5	1.6
1 秒热稳定倍数	动稳定倍数			
35 (5 秒)	65			
75	135			
—	—			
75	135			
—	—			

(1) 按准确等级选择：根据所接的测量仪表，继电器和自动装置等设备的形式和用途对准确级的要求来确定电流互感器工作的正确等级。供计量电费用的表计所接的电流互感器要求为 0.5 级；供监视设备运行状态用的表计所接的电流互感器为 1 级；供保护用的电流互感器要求为 3 级。

(2) 按所工作的电网额定电压选择： $U_{ew} \leq U_e$

U_{ew} —电流互感器所在电网的额定电压

U_e —电流互感器一次测的额定电压

(3) 按一次回路电流选择： $I_{gzd} \leq I_{1e}$

I_{gzd} —电流互感器一次回路最大长期工作电流

I_{1e} —电流互感器的一次额定电压

5.5 电压互感器的选择

电压互感器的选择如下表

表 5—7 电压互感器技术数据

安装地点	型 号	最大容量	试验电压 kV		
		VA	高压	低压	
500kV 母线	JVQT-500	4000	550	2	
220kV 母线	JCC1-220TH	2000	400	2	
10kV 母线	JSJW-10	960	42		
额定电压 kV			幅线圈容量 VA		
原线圈	幅线圈	辅助线圈	0.5 级	1 级	3 级
500 / $\sqrt{3}$	0.2 / $\sqrt{3}$	0.2	—	—	500
200 / $\sqrt{3}$	0.1 / $\sqrt{3}$	0.1	—	500	1000
10	0.1	0.1/3	120	200	480
连接组					
1/1/1—12—12					
1/1/1—12—12					
—					

(1)按所工作的电网额定电压选择：要求电压互感器的原边电压满足下列条

件： $0.9U_N < U_N < 1.1U_N$ 。 U_N 为互感器额定线电压，0.9 和 1.1 为允许的电压波动范围，即 $\pm 10\%U_N$ 。

(2) 按准确等级选择：电压互感器应在哪一准确级下工作，需根据接入的测量仪表，继电器和自动装置等设备的型式、用途及对准确级的要求来确定。供计量电费用的表计所接的电压互感器要求为 0.5 级，供监视设备运行状态用的表计所接的电压互感器为 1 级，供非主要表计所接的电压互感器要求为 3 级。

5.6 绝缘子和穿墙套管的选择

发电厂和变电站常用的绝缘子有支柱绝缘子、套管绝缘子和悬式绝缘子。支柱绝缘子用于支持和固定母线，并使母线与地绝缘；套管绝缘子主要用于母线穿过墙壁或楼板，使母线之间、母线与地之间绝缘；悬式绝缘子主要用于固定屋外配电装置中的软母线。

5.6.1 支柱绝缘子的选择

(1) 屋外选用户外棒型支柱绝缘子。此种绝缘子具有结构简单，运行安全，使用寿命长和维护工作量少等优点，与针式支柱绝缘子相比绝缘和耐污效果更好，选择结果及技术数据见表 5—8。

表 5—8 棒型支柱绝缘子技术数据

安 装 地 点	型 号	爬电距离(mm)	总高 H (mm)
500kV 侧母线	ZSX— 500/4	10000	4530
220kV 侧母线	ZSW— 220/4	5500	2160
10kV 侧母线	ZS—10/4	230	210

(2) 屋内选用户内联合胶支柱绝缘子，其技术数据见表 5—9。

表 5—9 内联合胶支柱绝缘子技术数据

型 号	总高 H	瓷件最大公称直径 D
ZL—10/4	160	95

(3) 校验（以 ZSW—10/4 为例）

母线所受最大电力为

$$F_{zd} = 1.73 \times 10^{-7} \times \frac{L}{a} \times i_{ch}^2 = 1.73 \times 10^{-7} \times \frac{1}{0.4} \times (0.51 \times 10^3)^2 = 0.11 \text{ N}$$

绝缘子底部至母线水平中心线的高度为

$$H_1 = H + 12 + \frac{h}{2} = 210 + 12 + \frac{100}{2} = 272 \text{ mm}$$

$$\text{绝缘子帽受力为 } F = F_{zd} \times k_z = 0.11 \times \frac{272}{210} = 0.14 \text{ N}$$

绝缘子允许负荷为 $0.6F_p = 0.6 \times 4000 = 2400 \text{ N} > F = 0.14 \text{ N}$ ，满足动稳定要求。

按此方法校验其他三种型号的支柱绝缘子，均满足动稳定要求。

5.6.2 悬式绝缘子的选择

按正常工作电压下泄漏距离选择悬式绝缘子的片数，其公式为： $n = \frac{dU}{s}$

其中 n—绝缘子的片数；d—泄漏距离，取 1.6cm/kV；s—每片绝缘子的泄漏距离，取

29.53cm；U—电网额定电压（kV）。

$$\text{则 } 500\text{kV 线路: } n_1 = \frac{dU_1}{s} = \frac{1.6 \times 500}{29.53} = 27.09$$

$$220\text{kV 线路: } n_2 = \frac{dU_2}{s} = \frac{1.6 \times 220}{29.53} = 11.92$$

为确保及防污闪效果，分别选用 18 片和 13 片，其技术数据见表 5—10。

表 5—10 悬式绝缘子技术数据

安装地点	型 号	额定机械负荷 kN	工频闪络电压 kV
500kV 线路	SGX—7/500	7	880
220kV 线路	SGX—4/220	4	720
50% 雷电冲击闪络电压 kV		最低人工污秽闪络电压 kV	质量 kg
82300		750	48
71200		400	32

5.7 所用变压器的选择

考虑到变电所主要设备的需要，如蓄电池充电、取暖、照明及有关的继电保护装置的用电等负荷，因此将所用变建在 10kV 侧。

所用电负荷统计见表 5-11。

表 5-11 所用电负荷统计表

序号	名称	容量（KW）	负荷类型
1	通信电源	4	经常、连续
2	10kV 操动机构	0.825	断续、短时
3	运动	5	经常、连续
4	电气二次设备室动力	5	断续、短时
5	10kV 配电装置动力	15	断续、短时
小计	动力负荷 P1	25.65	
1	设备箱恒温电源	1.5	经常、连续
小计	恒温箱负荷 P2	1.5	
1	户外配电装置照明	2	经常、连续
2	10kV 配电装置动力	2	经常、连续
小计	照明负荷 P3	4	

所用变压器容量选择根据《变电所所用电设计技术规程》中公式（3-12）

$$\begin{aligned}
 S &= 0.85 \times P_1 + P_2 + 0.8 \times \frac{P_3}{\cos \varphi} \\
 &= 0.85 \times 25.65 + 1.5 + 0.8 \times \frac{4}{0.6} \\
 &= 28.63(\text{kVA})
 \end{aligned}$$

综合以上数据，查《电力工程设计手册》选择 S9-50/10-0.4 型电力变压器作为所用变压器。

其技术参数见表 5-12。

表 5-12 S9—50/10-0.4 型变压器技术数据表

额定电压 kV		损耗		阻抗电压	空载电流	额定容量
高	低	空载	短路			
10	0.4	0.25	1.18	6.5%	1.1%	50kVA

5.8 电力电容器的选择

电力电容器是用来提高电网功率因数、减少线损、改善电压质量、提高供电效率的电器设备。

5.8.1 并联电容器组接线方式的比较

并联电容器组的主接线方式，主要有三角形接线和星型接线。过去并联电容器组采用三角形接线较多，但运行经验证明，三角形接线的电容器组，当任一相击穿时，由电源供给的短路电流较大，实际相当于母线短路。这时虽然故障电容器的熔断器迅速熔断，但如此大的电流即使是瞬间流过电容器也极易使电容器内浸渍剂受热膨胀，迅速汽化，引起爆炸。而且如果不同相的电容器同时发生对地击穿，有时熔断器也失去保护作用。如把电容器改为星形接线，当任一台电容器发生极板击穿短路时，短路电流都不会超过电容器组额定电流的三倍。而且不会出现其他两健全相的电容器对故障相的涌放电流，只有来自同相健全的电容器的涌放电流。因此星形接线的电容器组油箱爆炸事故较少发生。此外，三角形接线电容器组对过电压保护避雷器的运行条件和保护效果也不如星形接线的好。综合考虑本设计采用星形接线。

5.8.2 电容器的选择

按工作电压选择 $U_{zd} \geq U_g = 10\text{kV}$

按工作频率选择 $f_e = 50\text{Hz}$

无功功率的计算

设备补偿前的功率因数为 $\cos \varphi_1 = 0.75$ ，经电容器要求补偿后达到 $\cos \varphi_2 = 0.9$ 。

负荷的有功功率为 $P = S_{js} \cdot \cos \varphi_1 = 9844.38 \times 0.75 = 7383.285\text{kW}$

系统要求补偿的无功功率为

$$Q_c = P(\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (5-3)$$

$$\text{式中: } \tan \varphi_1 = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_1}}{\cos \varphi_1} = \frac{\sqrt{1 - 0.75^2}}{0.75} = 0.88$$

$$\tan \varphi_2 = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi_2}}{\cos \varphi_2} = \frac{\sqrt{1 - 0.9^2}}{0.9} = 0.484$$

$$\text{则 } Q_c = P(\lg \varphi_1 - \lg \varphi_2) = 7383.285 \times (0.88 - 0.484) = 2923.78 \text{ kvar}$$

本所要求三组电容器组来补偿，补偿 950kvar，采用三相星形接线的电容器

$$Q = w U_{x-x}^2 C_x 10^3 \quad (5-4)$$

式中： C_x —单相等效电容值；

U_{x-x} —线电压；

w —角频率， $w = 2 \pi f$ ， $f = 50 \text{ Hz}$ 。

$$C_x = \frac{Q}{w U_{x-x}^2 10^3} = \frac{950}{2 \times \pi \times 50 \times 10^2 \times 10^3} = 30.2 \mu\text{F}$$

查《电力工程设计手册》选 BFM11/ $\sqrt{3}$ -200-1W 型电容器组，其技术参数见表 5-13。

表 5-13 BFM11/ $\sqrt{3}$ -200-1W 型电容器参数

型号	额定电压 (kV)	额定容量 (kVar)	额定电容 (μF)
BFM11/ $\sqrt{3}$ -200-1W	10.5	200	15.8

$$n = \frac{C_x}{C_b} = \frac{30.2}{15.8} = 1.91 \approx 2$$

因此，一相只需一个此型号的电容器组，三相则需三个电容器组，总的额定容量为 $Q_e = 200 \times 3 \times 2 = 1200 \text{ kvar}$ ，而需补偿的为 950kvar，故所选电容器组满足要求。

6 防雷设备与接地装置

变电所的雷害主要是雷直击变电所和雷击输电线后产生的雷电波侵入变电所造成设备损坏。对直击雷防护一般采用避雷针或避雷线，而用避雷器限制雷电侵入波的幅值。避雷针、避雷线、避雷器与良好的接地装置联合作用，保护变电所设备免遭伤害。

6.1 避雷针与避雷线

6.1.1 避雷针的结构和保护原理

避雷针由避雷针针头（接闪器）、引流体和接地体三部分组成。

500kV 超高压变电站的避雷针针尖由直径 40~80mm、壁厚为 4~8mm 的三节无缝钢管串接而成。引流体利用变电所门型钢构架（构架避雷针）或独立钢构架（独立避雷针）。避雷针的接地装置除利用变电所的接地网外，还应就地作集中接地，在一般土壤导电较好的条件下，用三根 2.5m 长的 40mm×40mm×4mm 的角钢打入地中并联后与钢构架可靠连接。

避雷针一般明显高于被保护的设备和建筑物，当雷云先导放电临近地面时首先击中避雷针，避雷针的引流体将雷电流安全引入地中，从而保护了某一范围内的设备和建筑物。避雷针的接地装置的作用是减小泄流途径上的电阻值，即降低冲击电压幅值。

6.1.2 避雷线的结构和保护原理

避雷器是变电所保护设备免遭雷电冲击波袭击的设备。当雷电冲击波沿线路传入变电所超过避雷器保护水平时，避雷器首先放电，将雷电压幅值限制在被保护设备雷电冲击水平一下，使电气设备受到保护。

按发展的先后，目前使用的避雷器有五种，即保护间隙、管型避雷器、阀型避雷器、磁吹阀式避雷器和氧化锌避雷器。保护间隙是最简单形式的避雷器；管型避雷器也是一个保护间隙，但它在放电后能自行灭弧；为进一步改善避雷器的放电特性和保护效果，将原来的单个放电间隙分成许多短的串联间隙，同时增加了非线性电阻，发展成为阀型避雷器。而磁吹阀型避雷器因利用了磁吹式火花间隙，间隙的去游离作用增强，提高了灭弧能力，从而改进了它的保护作用。70 年代又出现一种新型避雷器——氧化锌避雷器，它具有无间隙、无续流、残压低等优点。磁吹阀式避雷器和氧化锌避雷器除能限制雷电过电压外，还有限制电力系统内部过电压的能力。目前 500kV 设备用这两种避雷器作过电压保护。

6.2 避雷器的选择

根据额定电压来选择避雷器

10kV 母线侧避雷器选用 Y5W-12.7/45 型

其技术参数见表 6-1。

表 6-1 Y5WZ-12.7/45 型避雷器参数

型号	额定电压 (kV)	避雷器额定 电压 (kV)	持续运行电 压 (kV)	4 μ s 冲击电 流 (kA)	雷电冲击 残压 (kV)
Y5W-12.7/45	10	12.7	6.6	40	≤45

电压互感器线路用避雷器选用 Y5WZ-12.7/45 型

电容器组保护用避雷器选用 Y5W-12.7/45 型

10kV 出线侧避雷器选用 Y5WZ-12.7/45 型

6.3 变电所侵入波的保护

输电线路出现的大气过电压有两种，一种是雷击于线路上引起的为直击雷过电压，另一种是雷直击线路附近地面，由于电磁感应引起的称为感应过电压。利用阀型避雷器以及与阀型避雷器相配合的进线保护段作为配电装置时侵入雷电波的保护。

进线保护段的作用在于利用本身的阻抗来限制雷电流幅值和利用本身的电晕衰耗来降低雷电波陡度，并通过进线段上管型避雷器的作用，使之不超过绝缘配合所要求的数值。因此，配电装置对侵入雷电波的保护设计除了考虑在配电装置内装设阀型避雷器的适当地点外，还必须对线路进线段保护措施提出要求。

对于装设避雷线的 10kV 架空电力线路，在变电所的进线段 1~2km 长度内，进行侵入雷电波保护。其保护接线图如图 6-2 所示。

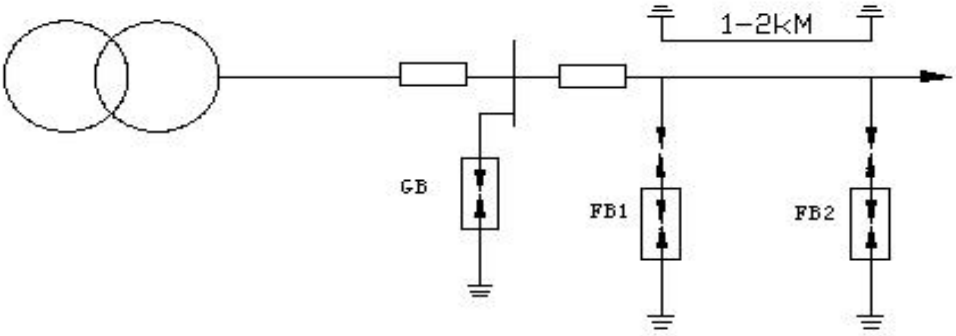


图 6-1 侵入波保护接线图

7 无功补偿装置

在 500kV 超高压电网中，由于电压等级高，输电线路长，其分布电容对无功功率平衡有较大的影响。当传输功率较大时，线路电抗中消耗的无功功率将大于电纳中产生的无功功率，线路为无功负载；而当传输功率较小时，电纳中产生的无功功率大于电抗中的损耗，线路为无功电源。但在实际运行中，按线路最小运行方式配置的补偿度约为 70%的并联电抗器长期是投运的，这对线路传输功率较大时的无功功率平衡是不利的。另一方面，无功功率的产生基本上没有损耗，而无功功率沿电力网的传输却要引起较大的有功功率损耗和电压损耗，故无功功率不宜长距离输送。所以一般在 500kV 枢纽变电站主变压器低压侧安装无功补偿装置，来满足无功功率的就地平衡，使其平衡在系统额定电压运行水平。所以无功补偿在平衡 500kV 电网中无功功率起着非常重要的作用。

无功补偿使 500kV 电网运行在额定电压水平，从而相对地提高了输电线路的静态稳定极限，当系统出现扰动时，对于有补偿能力，且响应速度快的无功补偿装置对系统的静态稳定起着一定的作用，但是当系统出现电压崩溃时，由于无功补偿装置产生的无功功率与连接点电压的平方成正比，无功补偿装置无功功率输出的减少将导致电压继续下降，所以此时须切除无功补偿装置，而依靠发电机组和同步调相机的强励来维持系统的稳定。

在该变电站中，由于其主变压器多具有有载调压功能，故可利用有载调压作为主手段，以无功补偿作为辅助手段来调节主变压器中压侧电压，使其在负荷发生改变时，按照逆调压方式维持在适当的电压水平，以保证负荷侧的电压质量。

7.1 断路器投切无功补偿装置

它是利用断路器来实现电容器、电抗器的投切，特别是对于电容器，由于其投切时的暂态过程比较严重，为限制投入产生的涌流，一般在电容器前面串联一个电抗较小的电抗器，同时此电抗器与电容器组成串联谐振滤波器，以消除系统特征谐波。为防止在切除时断路器重燃，要求断路器有较强的灭弧能力，一般多采用电压等级相对额定电压高的 SF₆或真空断路器。如下图所示

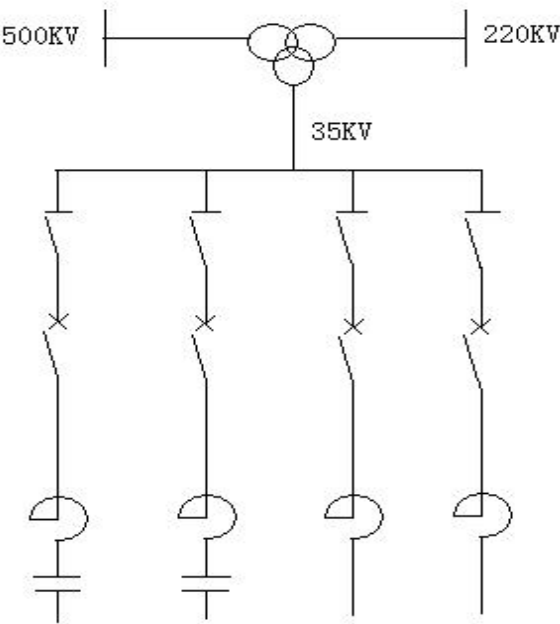


图 7-1 断路器投切无功补偿装置的基本结构

7.2 无功静止补偿装置

无功静止补偿装置是60年代开始发展起来的,我国从80年代初建成500kV超高压电网,从国外成套引进了这种装置。它主要利用可控硅元件同步控制电容器和电抗器,向系统产生或吸收连续可变的无功功率。其响应速度比同步调相机快得多,但是对于维持系统动态稳定方面其性能则不及同步调相机。

它主要由降压联络变压器T,固定电容器组FC,晶闸管投切电容器TSC和晶闸管控制电抗器TCR组成。其中降压联络变压器T的作用是为了满足晶闸管电参数优化的要求,以减少设备费用。固定电容器组FC既可安装在变压器T的高压侧,也可安装在其低压侧,其中串联电抗器的作用与断路器投切无功补偿装置中的串联电抗器相同。晶闸管投切电容器TSC与晶闸管控制电抗器TCR是无功静止补偿装置的主要设备,并决定其性能和运行特性。如下图所示:

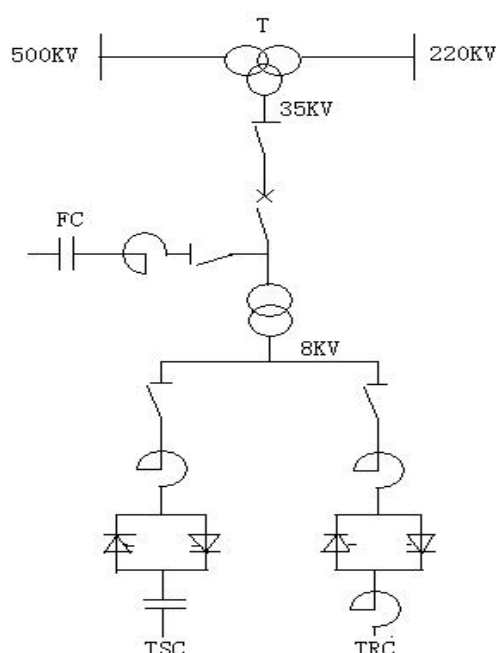


图 7-2 无功静止补偿装置的基本结构

为保证无功补偿装置的正常运行,变电运行人员必须掌握其各种运行方式及运行点控制。

对于断路器投切的无功补偿装置,一般有手动、自动、远动三种方式,并且具有任一无功组别因需要而退出运行的措施。

7.3 配电装置布置

配电装置是变电所的重要组成部分,配电装置是按主接线要求由开关设备、保护电器、测量仪表、母线和必要的辅助设备等组成,用来接受和分配电能的装置。配电装置的整个结构尺寸,是综合考虑设备外形尺寸、检修和运输的安全距离等因素而决定的,它必须满足配电装置安全净距的要求。

配电装置的设计和安装应满足如下基本要求:

- (1) 必须贯彻执行国家基本建设方针和技术经济政策。
- (2) 合理选用设备,在布局上力求整齐、清晰,满足对设备和人身的安全要求,保

- 证运行的可靠性。
- (3) 保证操作维护的方便性。
 - (4) 在保证安全的前提下，采取有效措施减少钢材、木材和水泥的消耗，努力降低造价，节省占地面积。
 - (5) 便于安装和扩建。

所区 10kV 配电装置及主变压器全部采用户外型配电装置。并采用户外环网柜控制电路。10kV 采用 ZHW2-12 型户外交流高压金属封闭环网开关设备，该设备适用于交流 50Hz，额定电压 12kV，电缆进出线的户外配电网中，广泛用于工业园区、居民小区、商业中心。作为环网供电或终端供电的开关设备，可开断负荷电流，并通过熔断器切断短路电流，特别适用于免维护，自动化程度高的电网。采用户外环网柜替代国内常规的开闭所，可以大大减少出线电缆和占地面积，降低造价，提高供电可靠性，同时也降低了线损。设备结构特点为：结构紧凑，体积小，占地面积少，内部采用德国原装进口 SF6 紧凑型环网柜，具有全密封、全绝缘、高可靠、免维护。环网柜中安装了内部故障电弧限制装置，对人身和设备提供了最大程度的保护。SF6 环网柜无需辅助工具即可方便地更换熔断器，在熔断器熔断时发出机械指示信号，机械连锁功能齐备（满足“五防要求”），简单可靠，能有效防止各种误操作。

ZHW2-12 型户外环网柜的技术参数。

表 7-1 ZHW2-12 型户外环网柜的技术参数

型号	型式	额定电流 (A)	额定电压 (kA)	额定短路 开断电流 (kVA)	工 频 耐 受电压 (kV)	外形尺寸 (宽×深×高) (mm)
ZHW2-12	固定式	630	12	25	42	1400x900x1630