

21世纪电力系统及其自动化规划教材

普通高等教育“十二五”规划教材

# 变电站电气

## 一次设计

◎ 许珉 主编

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



21 世纪电力系统及其自动化规划教材  
普通高等教育“十二五”规划教材

# 变电站电气一次设计

主编 许 珉

参编 孔 斌 王明东 王 军 赵国生  
邱国欣 程子霞 程 显



机械工业出版社

本书着重讲述了变电站电气一次设计的有关基本理论和设计方法。主要内容有：无功补偿与中性点接地方式；防雷及接地设计；短路电流计算；电气主接线设计；主要电气设备的选择计算方法；配电装置与总平面布置设计。本书兼顾课程设计、毕业设计和工程实际设计的需要，结合变电站初步设计方案与多个变电站丰富的初步设计图样，详细介绍了变电站电气一次部分的设计方法。本书重点突出，有大量计算实例，便于自学，实用性强。书后附有常用电气设备的技术参数和毕业（课程）设计题目。

本书为普通高等学校电气工程及其自动化及相关专业本科的毕业设计和课程设计实践环节的教学参考书，也可作为函授和高职高专的毕业设计和课程设计实践环节的教学参考书，也可供从事发电厂和变电站的电气设计、施工、运行、管理等相关工作的工程技术人员参考。

## 图书在版编目（CIP）数据

变电站电气一次设计/许珉主编. —北京：机械工业出版社，2015.6

21世纪电力系统及其自动化规划教材 普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-50011-7

I. ①变… II. ①许… III. ①变电所—一次系统—系统设计—高等学校—教材  
IV. ①TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2015）第 081311 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：贡克勤 责任编辑：贡克勤

版式设计：霍永明 责任校对：陈越

封面设计：张静 责任印制：刘岚

涿州市京南印刷厂印刷

2015 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 13.75 印张 · 1 插页 · 343 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-50011-7

定价：29.80 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线：010-88379833

机工官网：[www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线：010-88379649

机工官博：[weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

教育服务网：[www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

封面防伪标均为盗版

金书网：[www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)



# 前 言

本书是为高等教育本科电气工程及其自动化专业的发电厂电气主系统课程设计和变电站设计类毕业设计而编写的，是该专业的实践教学用书。本书有以下特点：

1) 主要阐述变电站电气一次系统的基本理论，详细介绍变电站电气一次部分的设计方法。内容深度为变电工程电气一次部分的初步设计，以满足本科学生课程设计、变电站设计类毕业设计和实习的需要，也可作为函授和高职高专相关专业的课程设计和变电站设计类毕业设计的参考书。

2) 内容紧跟电力系统的新技术和新发展，介绍了六氟化硫全封闭组合电器（GIS）设备的选择方法和屋内 GIS 型配电装置。

3) 为了满足发电厂电气主系统课程设计和变电站设计类毕业设计培养学生工程制图能力的需要，使学生得到全面训练，编入了不同类型变电站较完整的电气一次部分的初步设计图样，供学生在设计画图时参考。

4) 为使教材更实用，易于自学，书中有许多计算实例，包括短路电流计算、防雷保护计算、主变压器选择及设备选择等，并在附录中提供了毕业设计（课程设计）任务书及常用电气设备的技术参数。

本书由许珉任主编并对全书进行统稿。本书共八章。其中，第一章由许珉编写，第二章由王明东和王军编写，第三章由孔斌和邱国欣编写，第四章由王明东和邱国欣编写，第五章由王军、程子霞和程显编写，第六章由孔斌、赵国生和王军编写，第七章由赵国生、王明东和程显编写，第八章由邱国欣、王军、孔斌和程子霞编写，附录 A、附录 B 和附录 C 由程子霞、程显和赵国生编写。

本书编写过程中参阅了书末所列有关参考文献，以及国家标准、电力行业技术规范规范、有关企业的典型设计和有关设计单位的工程图样与电气设备生产厂家的技术资料等，在此，一并表示衷心的感谢。

限于作者水平，书中错误及不妥之处在所难免，恳请读者和同行批评指正。

作 者

# 目 录

## 前言

|                                  |    |                                  |     |
|----------------------------------|----|----------------------------------|-----|
| <b>第一章 绪论</b> .....              | 1  | 第三节 变电站主变压器的选择                   | 84  |
| 第一节 设计依据 .....                   | 1  | 第四节 变电站限制短路电流的方法                 | 88  |
| 第二节 电气一次设计的基本要求 .....            | 2  | 第五节 电气主接线设计 .....                | 89  |
| 第三节 电气一次初步设计内容深度 .....           | 3  | <b>第六章 电气设备选择</b> .....          | 100 |
| <b>第二章 无功补偿与中性点接地方式</b> .....    | 7  | 第一节 电气设备选择的一般条件 .....            | 100 |
| 第一节 概述 .....                     | 7  | 第二节 导体与电缆的选择 .....               | 102 |
| 第二节 无功补偿方式与补偿装置 .....            | 8  | 第三节 支柱绝缘子与穿墙套管的选择 .....          | 113 |
| 第三节 无功补偿装置的选择 .....              | 13 | 第四节 高压断路器与隔离开关的选择 .....          | 116 |
| 第四节 中性点接地方式 .....                | 19 | 第五节 高压熔断器的选择 .....               | 120 |
| <b>第三章 防雷及接地设计</b> .....         | 21 | 第六节 互感器的选择 .....                 | 121 |
| 第一节 雷电放电和防雷保护装置 .....            | 21 | 第七节 六氟化硫全封闭式组合电器的<br>选择 .....    | 126 |
| 第二节 架空输电线路防雷设计 .....             | 26 | <b>第七章 配电装置与总平面布置设计</b> ..       | 128 |
| 第三节 发电厂、变电站防雷设计 .....            | 29 | 第一节 概述 .....                     | 128 |
| 第四节 防雷接地设计 .....                 | 41 | 第二节 成套配电装置 .....                 | 131 |
| 第五节 防雷设计实例 .....                 | 47 | 第三节 屋内配电装置 .....                 | 136 |
| <b>第四章 短路电流计算</b> .....          | 52 | 第四节 屋外配电装置 .....                 | 146 |
| 第一节 概述 .....                     | 52 | 第五节 变压器与配电装置的连接 .....            | 155 |
| 第二节 标幺制 .....                    | 54 | 第六节 变电站电气总平面布置 .....             | 158 |
| 第三节 电力系统各元器件的等效电路和<br>电抗参数 ..... | 56 | <b>第八章 典型设计举例</b> .....          | 165 |
| 第四节 电力网络等效电路及其化简 .....           | 58 | 第一节 农村电网 110kV 变电站典型<br>设计 ..... | 165 |
| 第五节 电力系统三相短路的实用计算 .....          | 63 | 第二节 城区 110kV 变电站典型设计 .....       | 177 |
| 第六节 限制短路电流的措施 .....              | 67 | <b>附录</b> .....                  | 189 |
| 第七节 短路电流计算实例 .....               | 70 | 附录 A 常用电气设备的技术参数 .....           | 189 |
| <b>第五章 电气主接线</b> .....           | 77 | 附录 B 毕业(课程)设计任务书 1 .....         | 207 |
| 第一节 对电气主接线的基本要求 .....            | 77 | 附录 C 毕业(课程)设计任务书 2 .....         | 210 |
| 第二节 变电站电气主接线的基本接线<br>形式 .....    | 78 | <b>参考文献</b> .....                | 214 |

# 第一章 绪 论

变电站设计一般包括站址选择和站区布置、电气部分及土建部分三大部分。设计程序分为可行性研究、初步设计和施工图设计三个阶段。可行性研究阶段是对上级批准建设的已规划的输变电工程项目进行可行性研究，提出可行性研究报告。主要内容为变电站站址选择和变电工程设想。变电站站址选择原则上应提出两个或两个以上可行的站址方案，主要包括：站址区域概况、站址的拆迁赔偿情况、出线条件、站址水文气象条件、水文地质及水源条件、站址工程地质条件、进站道路和交通运输、站址环境、站用电源、通信干扰、施工条件和站址方案技术经济比较等。变电站工程设想主要包括变电站变电容量、各级电压出线回路数、无功补偿及其他装置情况等，如电气主接线及主要电气设备选择、电气布置、电气二次、站区总体规划和总布置、建筑规模及结构设想、供排水系统、采暖通风和空气调节系统等。可行性研究阶段还应提供有关图样和必要的协议。初步设计阶段根据上级下达的可行性研究报告审查意见和可行性研究阶段确定的规模进行初步设计，主要包括：电力系统、电气部分、二次系统、土建部分、消防部分、环境保护、水土保持、节能减排、劳动安全卫生、主要设备材料清册和概算部分。施工图设计阶段根据上级审查批准的初步设计，进行满足订货和细部施工要求的施工图设计。

## 第一节 设计依据

国家标准和行业技术规程规范是设计的依据，必须严格遵守。与变电工程设计相关的主要设计国家标准和电力行业技术规程规范如下：

- GB 50059—2011 35 ~ 110kV 变电站设计规范
- GB 50060—2008 3 ~ 110kV 高压配电装置设计规范
- GB 12348—2008 工业企业厂界噪声排放标准
- GB 14285—2006 继电保护和安全自动装置技术规程
- GB/T 13729—2002 远动终端设备
- GB 50034—2013 建筑照明设计标准
- GB 50217—2007 电力工程电缆设计规范
- GB 50227—2008 并联电容器装置设计规范
- GB 50229—2006 火力发电厂与变电站设计防火规范
- GB 50260—2013 电力设施抗震设计规范
- GB 50011—2010 建筑抗震设计规范
- GB 50016—2006 建筑设计防火规范
- GB 50019—2011 民用建筑采暖通风与空气调节设计规范
- DL/T 5218—2012 220kV ~ 500kV 变电站设计技术规程
- DL/T 5103—2012 35kV ~ 220kV 无人值班变电站设计技术规程



- DL/T 620—1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合  
DL/T 621—1997 交流电气装置的接地  
DL/T 630—1997 交流采样远动终端技术条件  
DL/T 634—1997 远动设备及系统 第5部分 传输规约 第101篇 基本远动任务配套标准  
DL 548—1994 电力系统通信站防雷运行管理规程  
DL/T 5002—2005 地区电网调度自动化设计技术规程  
DL/T 5056—2007 变电站总布置设计技术规程  
DL/T 5155—2002 220kV ~ 500kV 变电站所用电设计技术规程  
NDGJ 8—1989 火力发电厂、变电站二次接线设计技术规定

## 第二节 电气一次设计的基本要求

### 一、主变压器

1) 主变压器的台数和容量,应根据地区供电条件、负荷性质、用电容量和运行方式等条件综合考虑确定。

2) 在有一、二级负荷的变电站中,宜装设两台主变压器,当技术经济比较合理时,可装设两台以上主变压器。当变电站可由中、低压侧电力网取得足够容量的备用电源时,可装设一台主变压器。

3) 装有两台及以上主变压器的变电站,当断开一台时,其余主变压器的容量不应小于60%的全部负荷,并应保证用户的一、二级负荷。

4) 具有三种电压的变电站,如通过主变压器各侧绕组的功率均达到该变压器容量的15%以上,主变压器宜采用三绕组变压器。

5) 电力潮流变化大和电压偏移大的变电站,如经计算普通变压器不能满足电力系统和用户对电压质量的要求时,应采用有载调压变压器。

### 二、电气主接线

1) 变电站的主接线,应根据变电站在电力网中的地位、出线回路数、设备特点及负荷性质等条件确定,并应满足供电可靠、运行灵活、操作检修方便、节约投资和便于扩建等要求。

2) 当能满足运行要求时,变电站高压侧宜采用断路器较少或不用断路器的接线。

3) 35 ~ 110kV 线路为两回及以下时,宜采用桥形、线路变压器组或线路分支接线。超过两回时,宜采用扩大桥形、单母线或分段单母线的接线。35 ~ 63kV 线路为8回及以上时,也可采用双母线接线。110kV 线路为6回及以上时,宜采用双母线接线。

4) 在采用单母线、分段单母线或双母线的35 ~ 110kV 主接线中,当不允许停电检修断路器时,可设置旁路设施。当有旁路母线时,首先宜采用分段断路器或母联断路器兼作旁路断路器的接线。当110kV 线路为6回及以上,35 ~ 63kV 线路为8回及以上时,可装设专用的旁路断路器。主变压器35 ~ 110kV 回路中的断路器,有条件时也可接入旁路母线。采用SF<sub>6</sub> 断路器的主接线不宜设旁路设施。

5) 当变电站装有两台主变压器时, 6~10kV 侧宜采用分段单母线。线路为 12 回及以上时, 也可采用双母线。不允许停电检修断路器时, 可设置旁路设施。6~35kV 配电装置采用手车式高压开关柜时, 不宜设置旁路设施。

6) 当需限制变电站 6~10kV 线路的短路电流时, 可采用下列措施之一:

- ① 变压器分列运行;
- ② 采用高阻抗变压器;
- ③ 在变压器回路中装设电抗器。

7) 接在母线上的避雷器和电压互感器, 可合用一组隔离开关。对接在变压器引出线上的避雷器, 不宜装设隔离开关。

### 三、所用电源和操作电源

1) 在有两台及以上主变压器的变电站中, 宜装设两台容量相同可互为备用的站用变压器。如能从变电站外引入一个可靠的低压备用站用电源时, 也可装设一台站用变压器。当 35kV 变电站只有一回电源进线及一台主变压器时, 可在电源进线断路器之前装设一台站用变压器。

2) 变电站的直流母线, 宜采用单母线或分段单母线的接线。采用分段单母线时, 蓄电池应能切换至任一母线。

3) 重要变电站的操作直流电源, 宜采用一组 110V 或 220V 固定铅酸蓄电池组或镉镍蓄电池组。作为充电、浮充电用的硅整流装置宜合用一套。其他变电站的操作电源, 宜采用成套的小容量镉镍蓄电池装置或电容储能装置。

## 第三节 电气一次初步设计内容深度

### 一、电气主接线

1) 简述变电站本期、远期建设规模 [包括主变压器容量和台数、出线回路数及其名称, 无功补偿装置的容量、台(组)数]。对改扩建工程应分别说明工程规划规模、已建情况和本期建设规模。

2) 电气主接线方案应与通用设计及“两型一化”变电站建设设计导则一致。说明选用的通用设计方案, 未采用时应说明理由。

3) 论述电气主接线方案(包括各级电压母线、近期接线、分期建设方式及过渡方案等)。

4) 说明各级电压中性点接地方式(包括变压器中性点的接地方式及设备)。

### 二、短路电流及主要设备选择

1) 说明短路电流计算的依据和条件(包括计算接线、运行方式及系统容量等), 并列短路电流计算结果。

2) 说明导体和主要电气设备的选择原则和依据, 包括变电站自然条件、环境状况、污秽等级、地震烈度等。

3) 说明通用设备应用情况, 未采用时应说明理由。



4) 说明导体和主要电气设备的选择结果(包括选型及主要技术规范)。改、扩建工程应校验原设备。

当采用金属封闭气体绝缘组合电器(GIS和HGIS等)设备时,应论述其必要性。

5) 当采用智能一次设备时,应论述其必要性并进行方案论证。对电子式互感器,应分析技术经济合理性,根据工程特点及运行的需求,提出设备状态检测范围与参量,并提出各传感测量装置的安装方式。必要时进行专题论述。

6) 结合工程实际情况,提出新技术、新设备、新材料的应用。应因地制宜推广采用节能降耗、节约环保的新产品。

### 三、绝缘配合及过电压保护

1) 论述过电压保护措施,说明避雷器选型及其配置情况。

2) 提出变电站电气设备外绝缘的爬电比距和绝缘子串的型式和片数选择。

### 四、电气总平面布置及配电装置

1) 说明各级电压出线走廊规划、站区自然环境因素等对电气总布置的影响。

2) 电气总平面方案设计应与通用设计及“两型一化”变电站建设设计导则一致,并说明选用通用设计的方案及适应性依据,未采用通用设计时应说明理由。

3) 说明电气总平面布置方案。

4) 说明各级配电装置型式选择、间隔配置及远近期结合的合理性。

5) 根据变电站所在地区地震烈度要求,说明电气设备的抗震措施。

### 五、站用电及照明

1) 说明站用工作/备用电源的引接及站用电接线方案。

2) 说明站用负荷计算及站用变压器选择结果。

3) 简要说明站用配电装置的布置及设备选型。

4) 说明工作照明、事故照明、检修电源和消防电源等的供电方式,并说明主要场所的照明及其控制方式。当选用清洁能源为照明电源时,应说明供电方式,论证其必要性及经济合理性。

### 六、防雷接地

1) 说明变电站的防直击雷保护方式。

2) 提供变电站土壤电阻率和腐蚀性情况,说明接地材料选择、接地装置设计技术原则及接触电位差和跨步电位差计算结果,需要采取的降阻、防腐、隔离措施方案及其方案间的技术经济比较。说明二次设备对接地的要求。

### 七、电气部分图样

#### 1. 图样编制

电气专业图样可由各工程视具体情况确定,编制时可参考以下项目:

1) 电气主接线图,包括各比较方案。

- 2) 电气总平面布置图, 比例为 1:100 ~ 1:500, 包括各比较方案。
- 3) 各级电压配电装置平断面图, 比例为 1:50 ~ 1:500, 包括各比较方案。
- 4) 站用电接线图。
- 5) 全站直击雷保护范围图推荐总平面方案, 比例为 1:200 ~ 1:500。

## 2. 图样深度要求

1) 电气主接线图应表示主变压器与各级电压母线的连接, 表示各级电压的电气接线方式及设备配置情况, 表示中性点接地方式及补偿设备, 并标注图中设备和导体的型号及其主要技术规范。各级电压出线回路应标注名称, 应绘出远景接线示意图 (一般可在图样右上角表示); 对工程的原有部分、本期及预留扩建应加以区分。

2) 电气总平面布置图应标明主要电气设备、站区建(构)筑物、电缆隧(沟)道及道路等的布置, 应表示出各级电压配电装置(户外)的间隔配置及进出线排列; 母线和出线宜标注相序; 布置图应标明方位、标注位置尺寸, 并附必要的说明及图例。

3) 各级电压配电装置平断面图。

① 应表示出配电装置的布置(包括设备、构架、母线等各设施的安装布置, 以及导线引接方式)。平面图应表示进出线排列及间隔配置; 表示出通道、走廊等设施, 并标注布置尺寸及母线和进出线相序(当电气总平面图能清楚表示时, 此图可省略)。

② 屋内配电装置宜绘制配置接线。

③ 断面图应按不同类型间隔出图, 并表明设备安装位置、尺寸、标高、导线引接方式、电气距离校验等(常规配电装置可只出代表性断面), 且宜有本间隔的接线示意图。

4) 站用电接线图应表示出站用工作电源的引接方式; 应表示出站用母线的接线方式, 标注开关柜型号、回路名称、主要设备及元器件规范等。

5) 全站直击雷保护范围图应表示出需要进行保护的电气设备、建构筑物的平面布置, 并标注其高度; 应表示接闪杆(线)的布置位置, 并标注其高度; 应绘出对不同保护高度的保护范围。宜将保护范围计算结果列表于图样中。

## 八、计算项目及其深度要求

### 1. 计算项目

电气部分计算项目可视具体工程需要增减。计算书底稿不列入设计文件, 一般只引述计算条件和计算结果, 但必须存档妥善保存, 以备查用。计算项目如下:

- 1) 短路电流计算及主要设备选择。
- 2) 站用电负荷及站用变压器选择。
- 3) 导体的电气及力学计算(工程需要时进行)。
- 4) 配电装置的电气校核计算(工程需要时进行)。
- 5) 接地计算。
- 6) 防雷保护范围计算。

### 2. 计算书深度

1) 短路电流计算及主要设备选择说明短路电流计算的依据和条件(包括计算接线、运行方式及系统容量等), 并列短路电流计算结果。对导体和电器的动稳定、热稳定以及电器的开断电流应进行选择计算和校验。本项计算的说明书应包括: 短路电流计算阻抗图、短

路电流计算结果表。

2) 站用电负荷及站用变压器选择应进行站用电负荷统计和计算, 并编制负荷计算及站用变压器容量选择表。

3) 应进行导体的电气及力学计算。

4) 配电装置的电气校核计算根据工程具体情况, 对配电装置间隔宽度、架构的高度及宽度、母线最大弧垂以及各种状态的电气净距进行校验。

5) 接地计算应计算接地电阻、接地装置截面积、接触电位差、跨步电位差。

6) 防雷保护范围计算的结果列入防雷保护范围图。



## 第二章 无功补偿与中性点接地方式

无功功率补偿，简称无功补偿，在电力系统中起着重要的作用。合理设计无功补偿装置，可以最大限度地减少无功功率的传输，减少变压器及输电线路的损耗，提高电网的功率因数、供电效率和电能质量，改善供电环境。本章主要介绍无功补偿方式以及无功补偿装置的设计和选择。

### 第一节 概 述

#### 一、无功功率与无功补偿

无功功率的前提是在交流电路中。当交流电流流过纯电阻负载时，电能全部转换成热能，相对应的功率称为有功功率；而在流过纯容性或者纯感性负载时，电流是用于建立电场或磁场，进行能量交换的，是电气设备做功的必备条件。这种情况下，电能与其他形式的能只是进行周期性转换，能量并没有消耗。与此电流相对应的功率称为无功功率。实际负载很少是纯容性负载或者纯感性负载，一般都是混合性负载，这样，当交流电流在流过它们时，既产生有功功率也产生无功功率。

有功功率的物理意义十分明确，它表示一个周期内电能输入电路或电路消耗电能的平均速率，也即平均单位时间输入电路或电路消耗的电能。有功功率是电源提供给负载，负载以其他能量形式消耗掉，不再返还的，可以说有功功率是单向流动的。无功功率则没有像有功功率那样明确的物理意义，其在半个周期内，电能会转变成磁能或场能等形式，但在后半个周期内，这些能量会转变回电能并反送回电网，因此从整个周期来看，设备没有从电网中吸收任何电能，只是不断地进行能量交换。无功功率也是负载所必需的，不能说无功功率是无用之功，没有这部分功率，就不能建立感应磁场，电动机、变压器等设备就不能运转。与有功功率不同的是，无功负载并不消耗能量，而是与电源交换能量，所以说无功功率是双向流动的。

电流在电感元件中做功时，电流滞后于电压 $90^\circ$ ，而在电容元件中做功时，电流超前电压 $90^\circ$ 。在电感电容并联电路中，电感电流与电容电流方向相反，如果在感性电路中装设电容元件，使两者的电流相互抵消，使电流相量与电压相量之间的夹角减小，就可以减小线路中的有功功率损耗，提高供电设备的供电能力。这就是无功补偿。

#### 二、无功补偿的意义

电力系统中的用电设备大部分为感性负荷，它们在运行时除了从电源取用有功功率外，还取用相当数量的无功功率。对于某些冲击性负荷（如轧机、电弧炉等），取用的无功功率比正常值可能增大 $5\sim 6$ 倍。在视在功率一定的情况下，无功功率的增大会使供电系统的功率因数降低，从而增大网络中的功率损耗和电压损失，降低设备的供电能力，增大电能成本。因

此, 必须通过装设无功补偿装置来减小线路中的功率损耗, 提高供电系统的功率因数。

1) 无功补偿可以减少电网中无功功率的成分, 提高功率因数, 增强电源设备的供电能力, 降低电能成本。电源的供电能力(容量)是以视在功率  $S$  来表示的。由  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$  可知, 无功补偿使得无功功率  $Q$  减小, 在  $S$  不变的情况下增加了有功功率  $P$  所占的比例, 使功率因数增大, 因而使同样容量的电源设备所能提供的有功功率增加, 从而使电源能够充分发挥供电能力, 降低电能成本。

2) 无功补偿可以减少发、供电设备的设计容量, 减少投资。例如, 装设无功补偿装置使功率因数  $\cos\varphi$  由 0.8 增加到 0.95 时, 装 1kvar 电容器可节省设备容量 0.52kW。因此, 对新建、改建工程, 应充分考虑无功补偿, 以便减少设计容量, 从而减少投资。

3) 无功补偿可以降低线路功率损耗和电压损失。以一回线路为例, 设该线路每相导线的电阻为  $R$ , 线路额定电压为  $U_N$ , 线电流为  $I$ , 则该线路中的功率损耗为

$$\Delta P = 3I^2R = 3 \left( \frac{S}{\sqrt{3}U_N} \right)^2 R = \left( \frac{P^2}{U_N^2} + \frac{Q^2}{U_N^2} \right) R \quad (2-1)$$

式(2-1)的后一项表示由于输送无功功率而引起的有功损耗, 当负荷需用的有功功率  $P$  一定时, 无功功率  $Q$  越小, 则线路中的功率损耗就越小。线路中的电压损失为

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U_N} \quad (2-2)$$

由式(2-2)可见, 当有功功率  $P$  一定时, 无功功率  $Q$  越小, 则线路中的电压损失就越小, 电压质量越好。

由上述可见, 无功补偿能够增加电网中有功功率的输送比例, 提高功率因数, 减少电源设计容量, 减少投资, 降低线损, 这些都直接决定和影响电力企业的经济效益。因此, 规划、实施无功补偿势在必行。

## 第二节 无功补偿方式与补偿装置

为了降低无功功率损耗, 提高功率因数, 通常可以采用两种方法: 一种是提高自然功率因数; 另一种是通过无功补偿来提高功率因数。提高自然功率因数是指设法降低用电设备本身所需的无功功率。该方法主要从合理选择和使用电气设备以及改善它们的运行方式等方面着手, 不需要附加任何补偿设备, 是提高功率因数的首选方法。但是, 仅仅依靠提高自然功率因数往往达不到要求的功率因数数值, 必须采用无功补偿使功率因数达到期望值。

### 一、无功补偿方式

电力系统无功补偿主要有集中补偿、线路补偿、就地补偿等方式。

#### 1. 集中补偿

针对电网的无功功率平衡情况, 在发电厂或变电站进行集中补偿, 主要目的是平衡电网的无功功率, 改善电网的功率因数, 提高系统终端变电站的母线电压, 补偿变电站主变压器和高压输电线路的无功损耗。集中补偿装置一般装设在变电站 10 (6) kV 母线上, 因此具有管理容易、维护方便等优点。

#### 2. 线路补偿

线路无功补偿一般是通过在线路上安装电容器实现。线路补偿点不宜过多; 控制方式应



从简，一般不采用分组投切控制；补偿容量也不宜过大，避免出现过补偿现象；保护也要从简，可采用熔断器和避雷器作为过电流和过电压保护。线路补偿方式主要提供线路和公用变压器需要的无功功率，该种方式具有投资小、回收快、便于管理和维护等优点，适用于功率因数低、负荷重的长线路。缺点是，存在适应能力差、重载情况下补偿不足等问题。

### 3. 就地补偿

就地补偿可分为随机补偿、随器补偿和跟踪补偿三种方式：

1) 随机补偿是将低压电容器组与电动机并接，通过控制、保护装置与电动机同时投切的一种无功补偿方式。县级配电网中有很大大一部分的无功功率消耗在电动机上，因此，搞好电动机的无功补偿，使其无功功率就地平衡，既能减少配电线路的损耗，同时还可以提高电动机的出力。采用随机补偿方式，当用电设备运行时，无功补偿装置投入，当用电设备停运时，补偿装置退出。该方式具有投资少、占地少、安装容易、配置方便灵活、维护简单、事故率低的特点，适用于补偿电动机的无功消耗，可较好地限制配电网的无功峰荷。年运行小时数在 1000h 以上的电动机采用随机补偿较其他补偿方式更为经济。

2) 配电变压器在轻载或空载时的无功负荷主要是变压器的空载励磁无功，可以通过将低压电容器经低压熔断器接在配电变压器二次侧进行补偿，这种方式称为随器补偿。随器补偿方式接线简单，维护管理方便，能有效地补偿配电变压器的空载无功，使该部分无功就地平衡，从而提高配电变压器的利用率，降低无功网损，提高用户的功率因数。但由于配电变压器数量多、安装地点分散，因此补偿投资较大，运行维护工作量大。

3) 跟踪补偿是以无功补偿投切装置作为控制保护装置，将低压电容器组补偿在用户配电变压器低压侧的补偿方式。这种补偿方式，部分相当于随器补偿的作用，主要适用于 100kV·A 及以上的专用配电变压器用户。跟踪补偿的优点是可以较好地跟踪无功负荷的变化，运行方式灵活，补偿效果好，但是费用高，且自动投切装置较随机或随器补偿的控制保护装置复杂，如果有任一元器件损坏，就可导致电容器不能投切。跟踪补偿方式主要适用于大容量大负荷的配电变压器。

## 二、无功补偿装置的种类与特点

电力系统常采用并联电容器、同步电动机、静止补偿器、串联电容器、并联电抗器等装置实现无功补偿。

### 1. 并联电容器

电力系统中的用电设备大部分为感性负荷，它们在运行时从电源取用的无功功率为滞后（负值）功率，即

$$Q_L = \sqrt{3}UI\sin(-\varphi) = -\sqrt{3}UI\sin\varphi \quad (2-3)$$

由于静电电容器需要的无功功率为超前（正值）功率，即

$$Q_C = \sqrt{3}UI\sin\varphi \quad (2-4)$$

因此，如果用一组静电电容器和感性负载并联，并适当选择电容值，可以使  $Q_C = -Q_L$ ，系统中所需的无功功率  $Q_C + Q_L = 0$ ，则用电设备不再从电源取用无功功率，功率因数达到最佳值 ( $\cos\varphi = 1$ )。基于此原理，对于功率因数达不到规定值的电力用户，可以采用并联静电电容器的方法进行人工无功补偿。

电容器每单位容量的投资费用较小且与总容量的大小无关，运行时功率损耗也较小，约



为额定容量的 0.3% ~ 0.5%。电容器没有旋转部件，维护也较方便。此外，它还具有故障时影响范围小的优点。因此，静电电容器在 220kV 及以下电压级变电站被广泛地用来补偿无功功率。

但是，电容器补偿方式也有不足之处。大家知道，静电电容器供给的无功功率  $Q_c$  与所在节点的电压  $U$  的二次方成正比，即

$$Q_c = \frac{U^2}{X_c} \quad (2-5)$$

式中  $X_c$ ——静电电容器的容抗， $X_c = 1/(\omega C)$ 。

由式 (2-5) 可见，节点电压下降时，电容器供给的无功功率将减少。因此，当系统发生故障或由于其他原因使得节点电压下降时，电容器无功输出的减少将导致电压继续下降。换言之，静电电容器的无功功率调节性能较差。另外，电容器只能进行有级调节而不能随着感性无功功率的变化而进行无级调节，这也是电容器补偿的一个缺点。

目前，我国已大量生产性能良好的新型并联电容器用以补偿无功功率，型号分为 BW（烷基苯浸渍纸介质）、BWF（烷基苯浸渍膜绒复合介质）和 BGF（硅油浸渍复合介质）三种，常用的并联电容器技术数据见附录 A。

## 2. 同步电动机

同步电动机是转子转速与定子旋转磁场的转速相同的交流电动机。与感应（异步）电动机相比，同步电动机具有几个突出的优点：

- 1) 可以过励磁方式运行，功率因数超前，可向系统供给感性无功功率，提高功率因数，起到无功电源的作用。
- 2) 可以采用低速电动机（极对数越多，转速越低）直接与生产机械耦合，省去了减速器。
- 3) 电网频率不变时，同步电动机转速恒定，与负荷性质无关，所以生产率高。
- 4) 电动机转矩受电压波动的影响较小（同步电动机转矩与电网电压成正比，而异步电动机转矩与电网电压的二次方成正比）。
- 5) 同步电动机采用强行励磁时，可以提高电力系统的稳定性。

同步电动机的这些优点使得其适用于工业企业的大型通风机、空压机、水泵等运转速度恒定的生产装置。

同步电动机的补偿能力，习惯上用其输出无功功率与其额定容量的比值来表示，即

$$q(\%) = \frac{Q_{cd}}{S_e} \times 100 \quad (2-6)$$

式中  $Q_{cd}$ ——同步电动机的输出无功功率（kvar）；

$S_e$ ——同步电动机的额定容量（kV·A）。

同步电动机的补偿能力（ $q\%$ ）与同步电动机的负载率、励磁电流、额定功率因数等有关。在励磁电流恒定情况下，当负载率减小时，同步电动机的无功功率输出可相对地提高。

如果同步电动机轴上不带机械负荷，只是空载运行专门用来补偿无功功率，则这种同步电动机称为同步调相机。同步调相机向电网提供可无级连续调节的容性和感性无功功率，维持电网电压，并可以通过强行励磁快速补偿容性无功功率，提高电网的稳定性。可以无级地平滑调节无功功率是同步调相机的优点，但由于其是一种旋转机械，在运行时需要有专门人

员进行维护管理，有功功率损耗较大，在满负荷时约为额定容量的 1.5% ~ 5%，且容量越小，百分值越大，而且小容量的同步电动机单位容量投资费用也较大，因此该补偿方式仅宜于大容量集中使用，不能普及。另外，同步调相机响应速度较慢，难以适应动态无功补偿的要求。20 世纪 70 年代以来，这种无功补偿装置已逐渐被静止动态无功补偿装置所取代。

### 3. 静止补偿器

采用接触器等有触点开关对静电电容器进行投切，习惯上称为静态补偿装置。这种开关动作时间较长，再考虑电容器的放电时间，故电容器投切间隔较长，且开关触点容易烧损。同步调相机尽管响应速度（200 ~ 500ms）比静电电容器快，但仍然不能适应负载经常急剧变化的大型生产机械的响应速度要求（响应时间最好不大于 10ms）。采用晶闸管作为电容器开关，可以将反应速度提高到毫秒级，也就是可以跟踪负载的变化，实现同步补偿。这种快速补偿装置称作动态补偿装置，因其没有接触器动作，也没有旋转元件，所以又称为静止无功补偿器（Static Var Compensator, SVC），常用的 SVC 装置有晶闸管投切电容器（Thyristor Switching Capacitor, TSC）、可控电抗器（Thyristor Controlled Reactor, TCR）等。

动态无功补偿的优点是反应快，补偿效果好，特别适用于负载波动剧烈的场合。价格高，可靠性不够好，自身耗能大则是这种补偿方式的不足，在负载比较稳定的场合没有优势。

### 4. 并联电抗器

并联电抗器补偿设备能向电网提供可以阶梯调节的感性无功功率，补偿电网的剩余容性无功功率，保证电压稳定在允许范围内。并联于 330kV 及以上超高压线路上的电抗器，可以补偿输电线路的充电功率，以降低工频过电压水平，并有减少潜供电流的功能，便于系统并网，提高送电可靠性。

### 5. 串联电容器

110kV 及以下电压等级的电网设置串联电容器的目的是减小线路压降，降低受端电压波动，提高供电电压，改善闭式电网的潮流分布，减少有功损耗；220kV 及以上电压等级的电网设置串联电容器的目的是增强系统稳定性，提高输电能力。

## 三、补偿装置与电力系统的连接

无功补偿装置一般设置于发电厂、变（配）电站或换流站中，大部分连接在这些厂站的母线上，少数并联或串联在线路上。

### 1. 并联电容器、调相机和静止补偿器

这三种装置直接连接或者通过变压器并接于需要补偿无功的变（配）电站、换流站的母线上，如图 2-1 所示，其中并联电容器按三角形或星形联结。另外，在发电厂中有时也将发电机按调相机运行；并联电容器也可连接于 110kV 电压母线。

### 2. 并联电抗器

并联电抗器补偿设备一般连接在大型发电厂或重要变电站的 63kV 以下电压母线上。在发电厂中，常接在联络变压器的低压侧；在变电站中，常接在主变压器的低压侧。

超高压并联电抗器一般并接在需要控制工频过电压幅值的线路中间或末端，常设置于线路中间开闭站或末端变电站中。

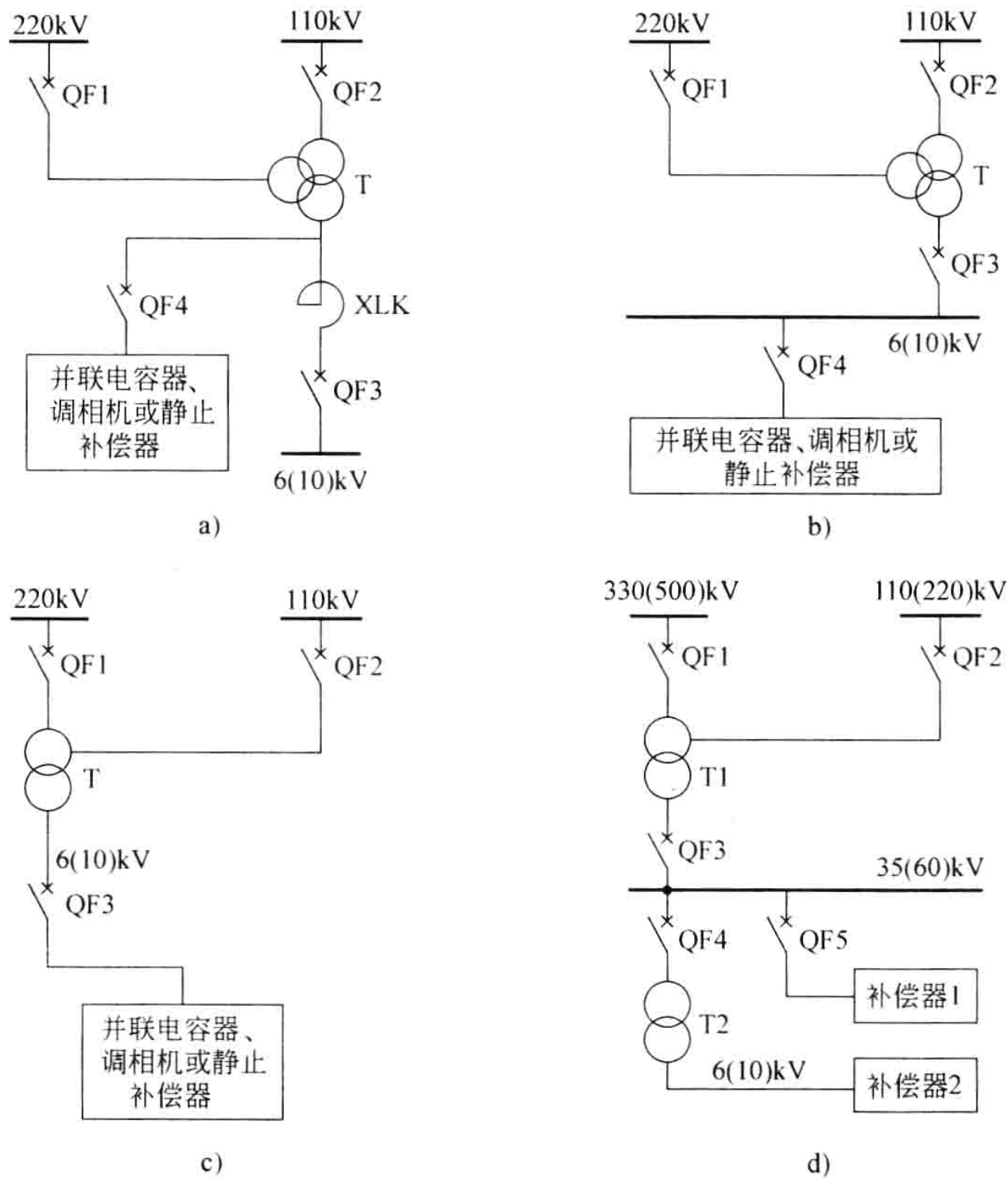


图 2-1 并联电容器、调相机和静止补偿器与系统的连接

- a) 接于主变压器和限流电抗器之间
- b) 直接接于 6 (10) kV 母线
- c) 与变压器组成单元式连接
- d) 分别接于不同电压级母线

### 3. 串联电容器

对于 110kV 及以下电压等级的电网，当线路有分支线时，串联电容器均装设在线路末端的变电站；当线路上有多个复合分支时，将串联电容器装设在一半线路压降点附近的变电站中。

在 220kV 及以上电压等级的电网中，一般将串联电容装设在线路中间的开关站或变电站中；当没有中间开关站或变电站时，才将串联电容器装设置在末端变电站中。

某些情况下，串联补偿电容器和超高压并联电抗器可以同时设置于同一个变电站或开关站中，它们与电力系统的连接如图 2-2 所示。

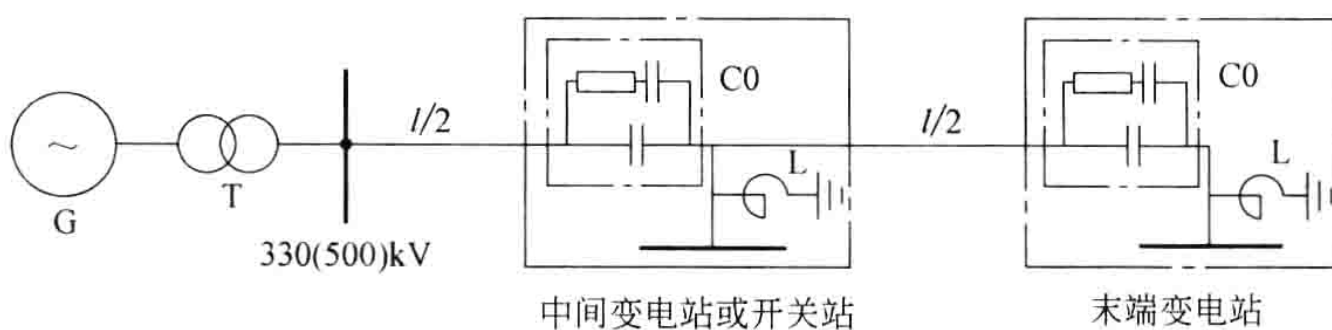


图 2-2 串补电容器和超高压并联电抗器与电力系统的连接

$l$ —线路长度  $C_0$ —串联补偿装置  $L$ —超高压并联电抗器