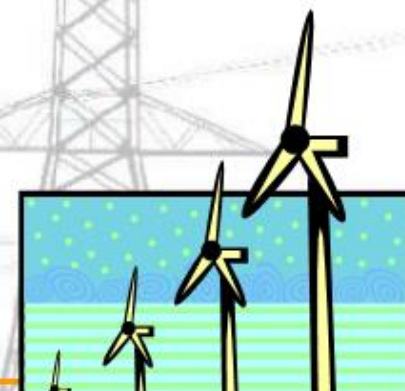




東南大學
Southeast University

电力系统稳态分析

东南大学电气工程学院



第一章 电力系统的基本概念



- ◆ 绪论
- ◆ 第一节 电力系统概述
- ◆ 第二节 电力系统运行应满足的基本要求
- ◆ 第三节 电力系统的接线方式和电压等级

绪论



- ◆ 电力系统学科涉及的理论与技术
- ◆ 电力系统稳态分析课程的地位和内容
- ◆ 电力系统研究工具

电力系统学科涉及的理论与技术



电力系统

→ 技术 输配电、电力系统规划、运行、保护、控制

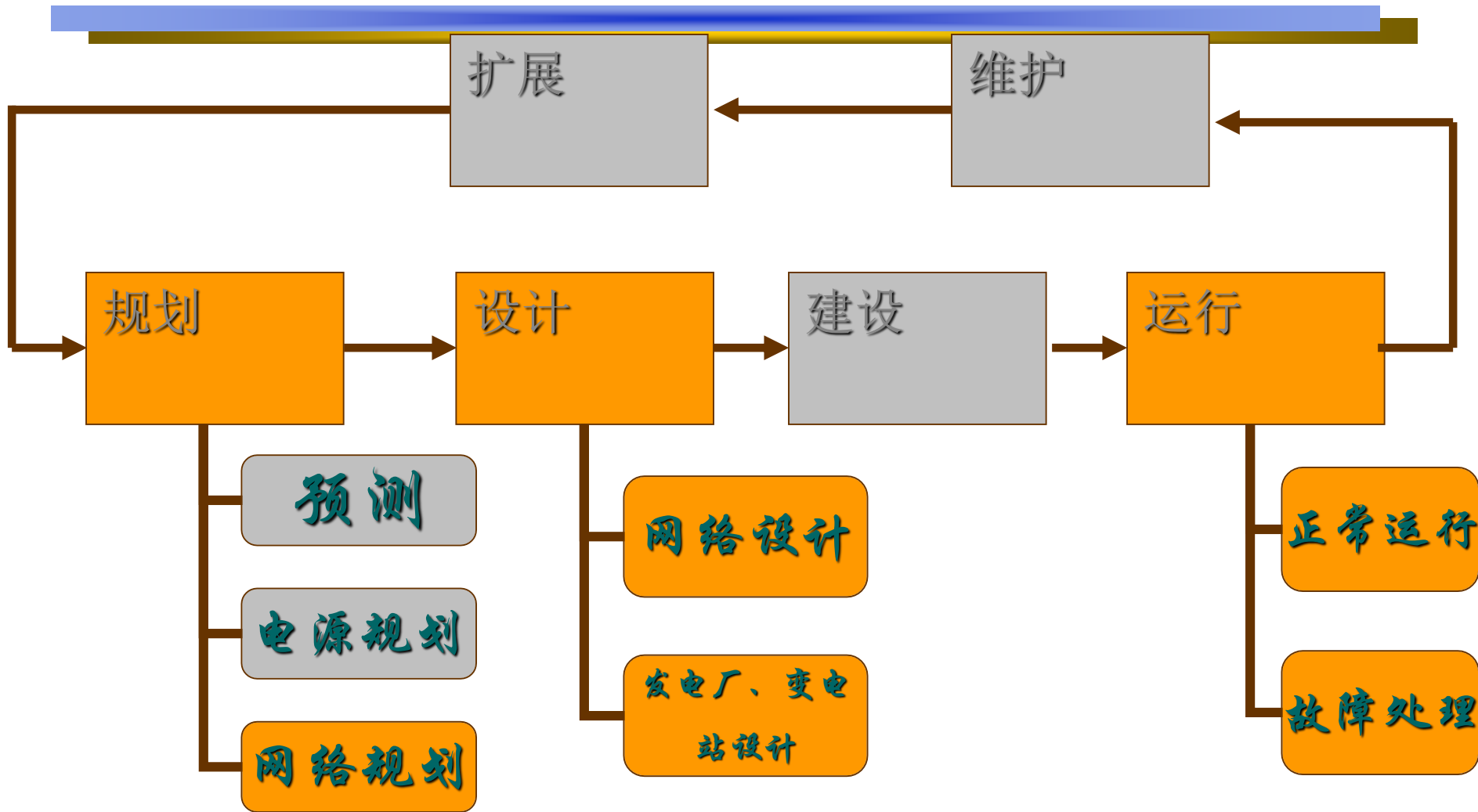
→ 理论 电路 电磁场 电机

→ 支撑
技术 自动化、计算机及网络、电子、动力机械



电力系统技术内涵

- ◆ 输配电技术:输配电技术主要涉及超高压输电线路、远距离交直流输电系统、以及提高输电线路输送能力等方面的问题
- ◆ 电力系统规划: 电力系统规划主要涉及远景负荷预测、电源规划、网络规划、可靠性分析、环境保护、生态平衡等方面的问题。
- ◆ 电力系统运行: 电力系统运行主要涉及稳态运行分析、暂态过程分析、安全性分析、电能质量管理、运行方式优化等方面的内容。
- ◆ 电力系统保护: 电力系统保护主要涉及故障分析、元件保护、线路保护、系统性故障保护和过电压及其防护等方面的问题。
- ◆ 电力系统控制: 主要涉及数据采集、个别变量的调节、电能质量控制、运行优化控制、安全性控制、能量管理系统等方面的问题。





电力系统稳态分析课程的地位和内容

“电力系统及其自动化”学科的专业基础课：

专业基础课是指该课程主要研究对象为电力系统，是后续一系列其它电力系统专业课的基础，该课程起着承前启后的作用。

◆**电力系统稳态**：指系统正常的、相对静止的运行状态。

◆**电力系统暂态**：指电力系统从一种运行状态向另一种状态过渡的过程。

◆二者的本质差别在于：**电力系统稳态**中的运行变量与时间无关，描述其特性的是**代数方程**；**电力系统暂态**中的运行变量与时间有关，描述其特性的是**微分方程**。

电力系统的数学描述



静态系统

$$0 = \Phi(X)$$

电力网络功率流

大规模非线性代数方程组

动态系统

$$\dot{X} = f(X, U(X))$$

汽轮机 发电机 马达群

电力电子装置 可控超导储能装置

高维非线性微分方程组

高维非线性奇异
动态大系统



电力系统稳态分析课程的地位和内容

◆ 电力系统稳态分析课程内容：

- 电力系统的基本概念（第1章）
- 电力系统各元件的特性和数学模型（第2章）
- 电力系统正常运行状况的分析和计算（第3、4章）
- 电力系统的运行调节和优化（第5、6章）



电力系统稳态分析课程的地位和内容

◆ 电力系统暂态过程可分为：

- (1) 波过程：主要与运行操作或雷击时的过电压有关，涉及电流、电压波的传播，这类过程最短暂（ $10^{-6} \sim 10^{-2} \text{s}$ ）。属高电压技术讨论范畴。
- (2) 电磁暂态过程：主要与短路和自励磁有关，涉及电流、电压、功率角随时间的变化,分析过程中假设旋转电机的转速不变。属电力系统暂态分析讨论范畴。
- (3) 机电暂态过程：主要与系统振荡、稳定性的破坏、异步运行等有关，涉及功率、功率角、旋转电机的转速等随时间的变化。属电力系统暂态分析讨论范畴。

电力系统稳态分析课程的地位和内容



- ◆ 三类暂态过程有时是相互关联的。如在雷击造成短路而导致系统稳定性破坏的全过程中，包括了上述三种暂态过程。
- ◆ 按时间尺度分可分为两类：
 - 波过程：持续时间 $10^{-6} \sim 10^{-2} \text{s}$
 - 功率振荡：持续时间 $10^{-2} \text{s} \sim 10 \text{s}$
(含电磁、机电暂态过程)



电力系统研究工具

电力系统研究工具

数学模拟

须明确电力系统及其各元件的数学模型

离线 与实际系统时钟无关。很多商品化软件供选用。

在线 仿真时钟与实际系统时钟1:1的关系。对计算机速度和通讯速度要求高，对模型简化和处理有特殊要求。

物理模拟

用实物模拟，物理构造与仿真对象大小成比例

原理 在相似理论指导下建立的模拟实体

应用 电力系统动态模拟

全数字实时仿真

以计算机为主体，采用数学模型和数值算法对电力系统进行模拟

加拿大Manitoba直流研究中心的RTDS

加拿大魁北克TEQSIM公司的HYPERSIM

中国电力科学研究院的ADPSS

实现大规模电网的实时仿真，并可外接物理装置及数字模型

电力系统仿真



- ◆ 大电网运行的复杂性及其对安全可靠性的极高要求决定了,在实际运行之前,必须对其进行严密科学的分析仿真试验
- ◆ 电力系统分析仿真技术主要包括
 - 物理动态模拟技术——采用全物理的动态模拟装置,由按比例缩小的电力系统元件构成,能够比较精确地反映物理现象
 - 数字仿真技术——建立数学模型,用数学方法求解,是仿真技术的发展方向,可以模拟大规模的电力系统。如: **MatPower**、**Power System Analysis Toolbox**
 - 数模混合式仿真技术——发电机、电动机等旋转设备采用数学模拟方法,变压器、交流输电线路、直流输电换流阀组和控制装置等元件采用物理模型。能比较精确地反映交/直流系统的物理现象。





教材与参考书目:

教材:

- ◆ 《电力系统稳态分析》 陈珩 中国电力出版社

参考书目:

- ◆ 《电能系统基础》 单渊达 中国机械出版社
- ◆ 《电力系统分析》 陈怡等 中国电力出版社
- ◆ 《现代电力系统分析》 王锡凡 科学出版社

考核方式



- ◆ 总评成绩 = 平时成绩 + 实验成绩
+ 期中考试考试成绩 + 期末考试考试成绩
- 平时成绩占10%
- 实验成绩占5%
- 期中考试考试成绩占15%
- 期末考试考试成绩占70%



第一节 电力系统概述

- 1.1 电力系统的发展和形成
- 1.2 现代电力系统
- 1.3 电力系统的基本参量和结线图



1.1 电力系统的发展和形成

1820年奥斯特证实了电流的磁效应



1831年法拉第发现了电磁感应定律，促进电动机和发电机的发明



1882年实现了较高电压的直流输电
远距离、大功率传输困难



1885年实现了单相交流输电，1889年发明了
三相异步电动机、三相变压器和三相交流制



1891年建立了最早的三相交流输电系统

1.1 电力系统的发展和形成



输电技术发展的初期以减少线路损耗为特点，提高电压



针式绝缘子使电压提高到80kV
1906年悬式绝缘子使电压提高到110~120kV
20世纪20年代采用均压环电压可做到220kV



为解决交流输电同步发电机并联运行的稳定性问题，
直流输电又得到应用

±800kV，距离1000km以上，容量3000MW

表 1 交流输电各电压等级首次出现的时间

电压等级/ kV	10	50	110	220	287	380	525	735	1150
首次出现年份	1890	1907	1912	1926	1936	1952	1959	1965	1985



1.1 电力系统的发展和形成

- ◆ 当前世界上输电线路的输电电压已超过**1000kV**，单条线路输送距离已超过**1000km**，输送功率已超过**5000MW**。个别跨国电力系统中发电设备的总容量已超过**400GW**。
- ◆ 直流输电电压已超过**±750kV**，单条线路输送距离已超过**1000km**，输送功率已超过**6000MW**。
- ◆ 电源构成除传统的能源外，可再生能源中的太阳能、风能、生物质能、海洋能、潮汐能、地热能等的开发和利用得到了迅速的发展。
- ◆ 负荷成分除传统的负荷外，有相当比重的电热电炉、整流装置等，尤其是电动汽车在智能电网中既可以作为充电的负荷又可以作为移动的分布式储能单元接入电网，已经突破原有负荷的概念。

中国特高压直流输电示范工程



- ◆ **2010年6月18日**，由中国南方电网有限责任公司组织实施的世界上第一个 **± 800 千伏**直流输电工程——云广特高压直流输电工程正式竣工投产。该工程西起云南省楚雄州，途经广西壮族自治区，东至广东省广州市，输电距离**1373公里**，额定电压 **± 800 千伏**，额定容量**500万千瓦**，由楚雄换流站、穗东换流站、直流线路、两侧接地极和接地极线路五大部分组成。





中国交流特高压试验示范工程

2009年01月16日，国家电网公司晋东南-南阳-荆门**1000**千伏交流特高压试验示范工程正式投运。晋东南-南阳-荆门特高压交流示范工程起于山西晋东南（长治）变电站，经河南南阳开关站，止于湖北荆门变电站，全长**640**千米，两端变电容量各**300**万千伏安。



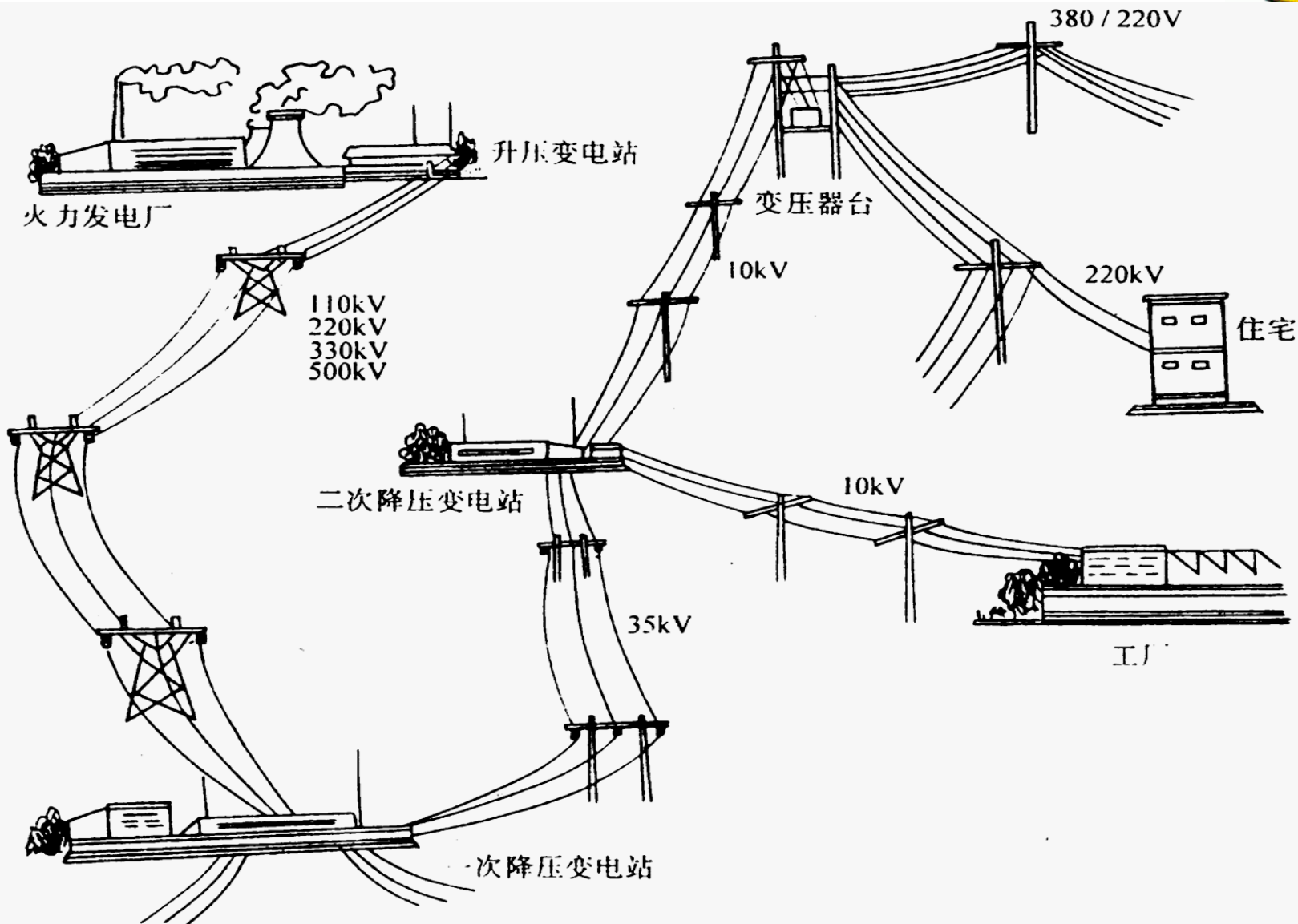


特高压直流输电示范工程

- ◆ **2010年7月8日**，国家电网公司向家坝至上海± **800**千伏特高压直流输电示范工程竣工投产。“向家坝-上海±**800**千伏特高压直流输电示范工程”起点为四川省宜宾县复龙换流站，落点为上海市奉贤换流站，途经**8**个省市，**4**次跨越长江，线路全长 **1907**公里。工程额定电流达到**4000**安培，最大连续输送功率达到**720**万千瓦，是迄今为止，世界上电压等级最高、输送容量最大、送电距离最远特高压直流输电工程。



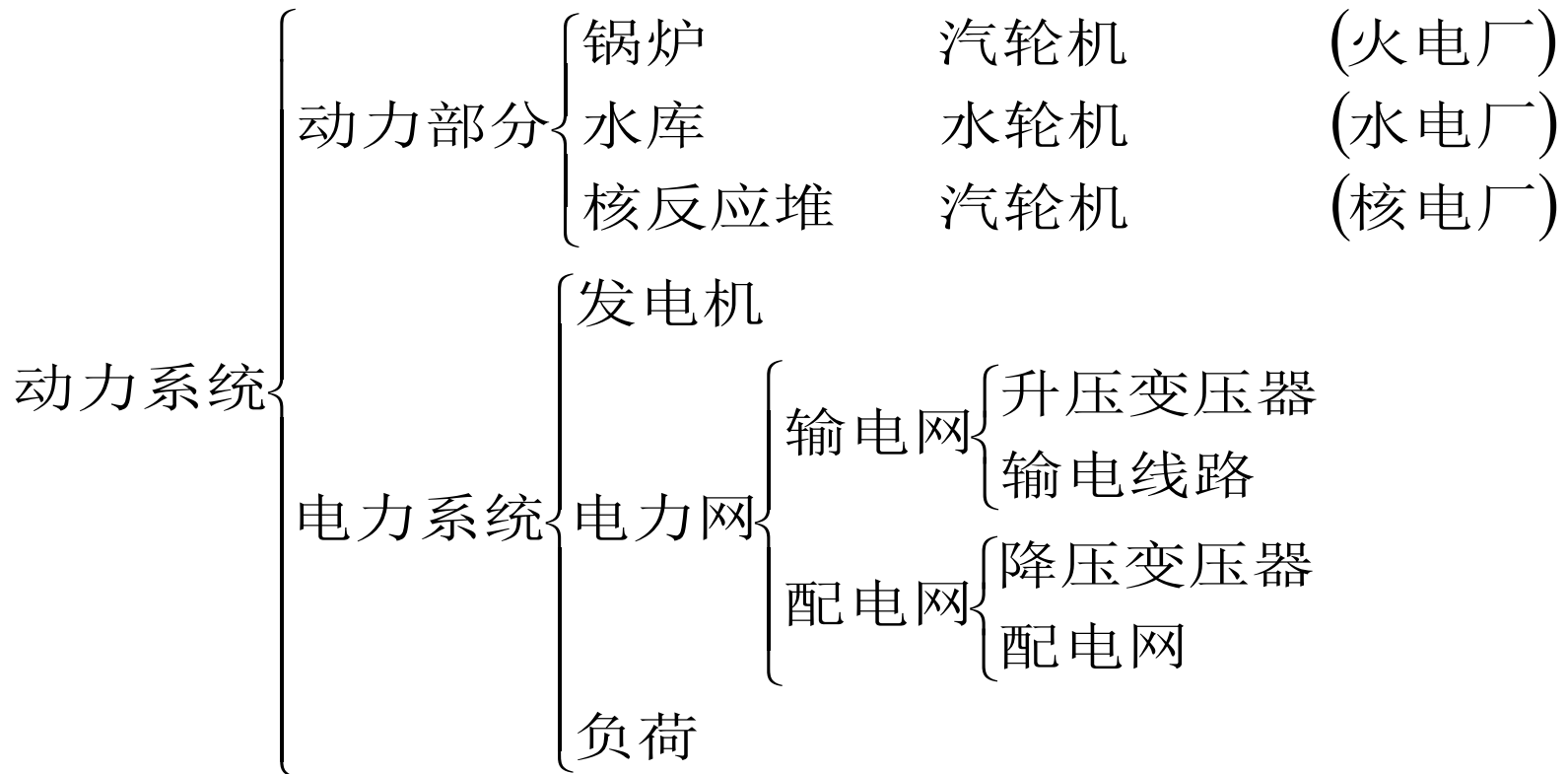
1.2 现代电力系统





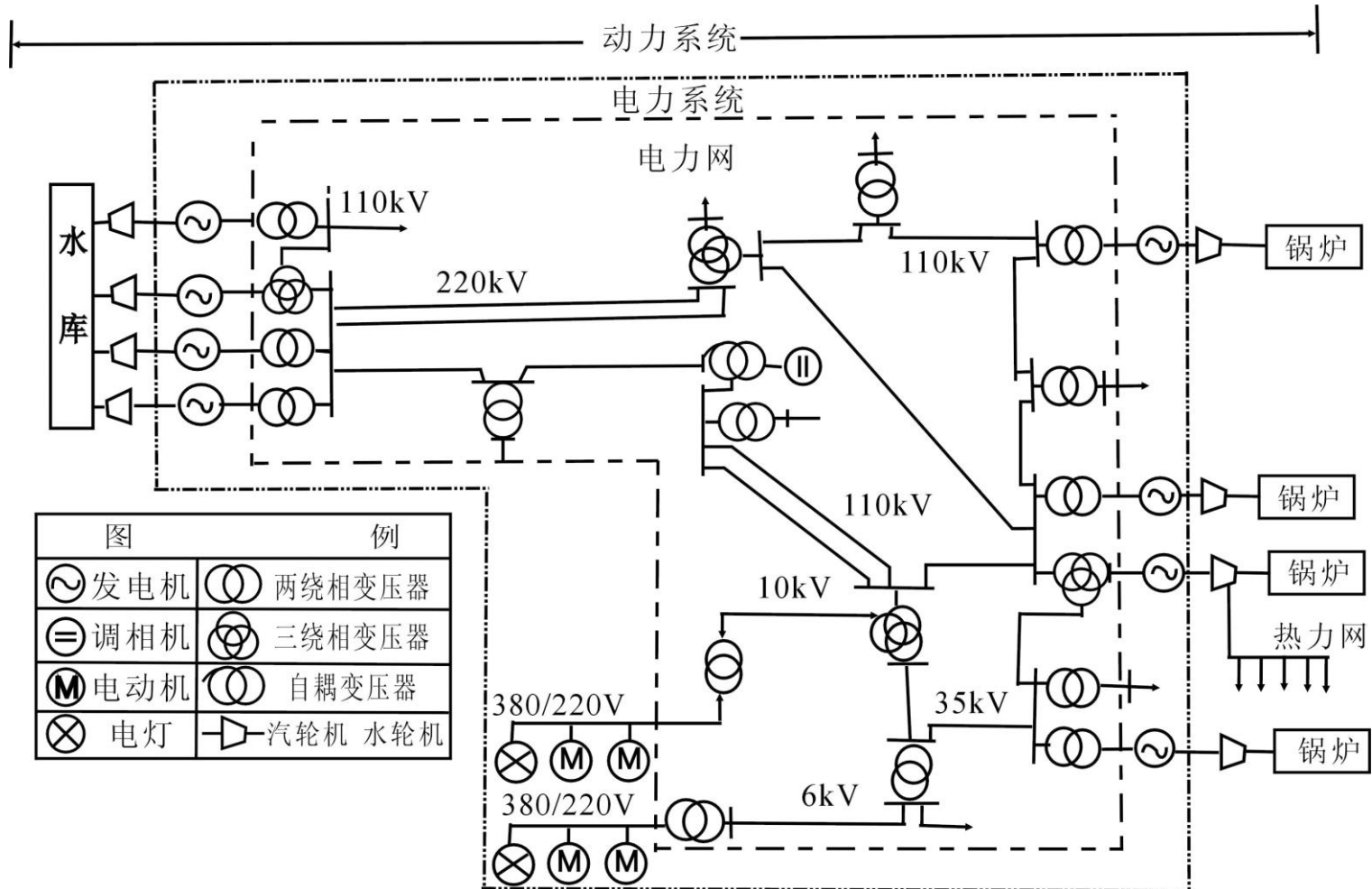
1.2 现代电力系统

- ◆ 传统的电力系统（狭义的电力系统）
- ◆ 电力系统主体与测量、保护、控制装置组成的统一整体





传统的电力系统主体示意图





1.2 现代电力系统

◆ 现代电力系统（广义电力系统）特征

- 大机组、大电网、超高压、交直流联合输电为主体的结构特征
- 含可再生能源形成新型的输、配电网与分布式发电系统拓扑结构
- 电力系统主体运行的高度自动化、数字化和网络化
- 用户智能响应

◆ 由电力系统主体与信息通讯系统、监测和控制系统所组成的一体化系统

风力发电



太阳能发电





1.3电力系统的基本参数和结线图

1. 总装机容量

系统实际安装发电机额定有功功率总和 单位：kW、MW、GW

2. 年发电量

系统所有发电机组全年实际发出电能的总和。kWh、MWh、GWh

3. 最大负荷

指规定时间一天、一月、一年内总有功功率负荷最大值。kW、MW、GW

4. 额定频率

我国所有交流电力系统的额定频率均为50Hz,国外有60Hz或25Hz的系统。

5. 最高电压等级

指该系统中最高电压等级电力线路的额定电压。单位：kV

6. 地理和电气结线图

地理结线图主要显示发电厂、变电所的地理位置，电力线路的路径及它们之间的联结，可获得系统的宏观印象。电气结线图主要显示系统中发电机、变压器、母线、断路器、电力线路等主要电机、电器、线路之间的电气结线，可获得系统的细致了解。

中国区域电网现状

到2010年底

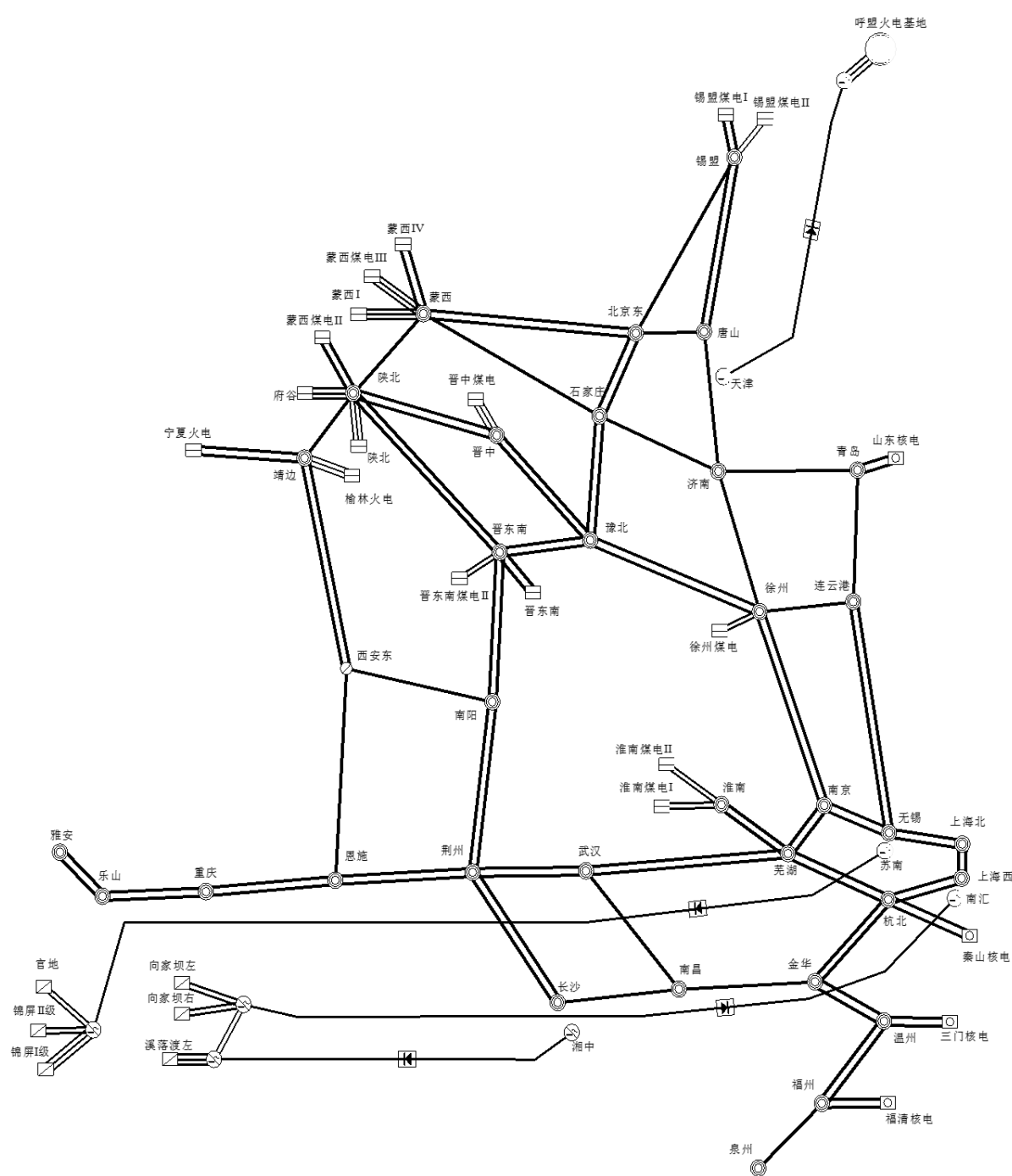
220kV及以上线路:

38.90万公里

到2020年建成特高压交、
直流线路: 9.68万公里



2015 年全国特 高压 电网 结构



1000kV
晋东南-
南阳-荆
门输电线

累计线路长度



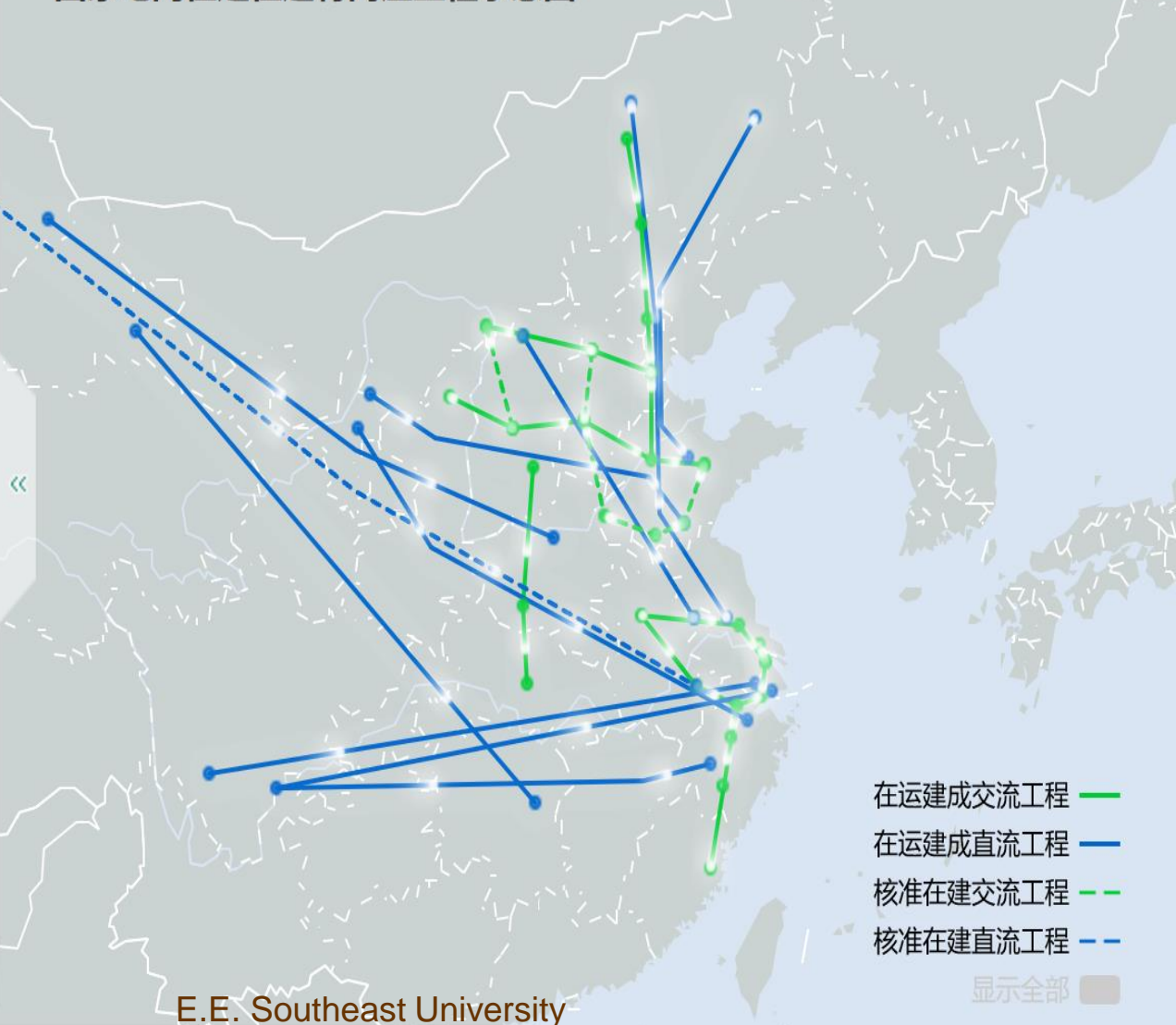
累计变电(换流)容量



累计输送电量



国家电网在建在运特高压工程示意图





江苏特高压电站

- ◆ 江苏省内共有锦苏、淮上、雁淮、锡泰四条特高压线路，“一交三直”的特高压交直流混联电网已经形成，区外来电能够为江苏供给20%的用电负荷。
- ◆ 淮安、泰州、东吴、盱眙四座特高压换流站
- ◆ 盱眙（南京）、泰州、东吴三大特高压交流站

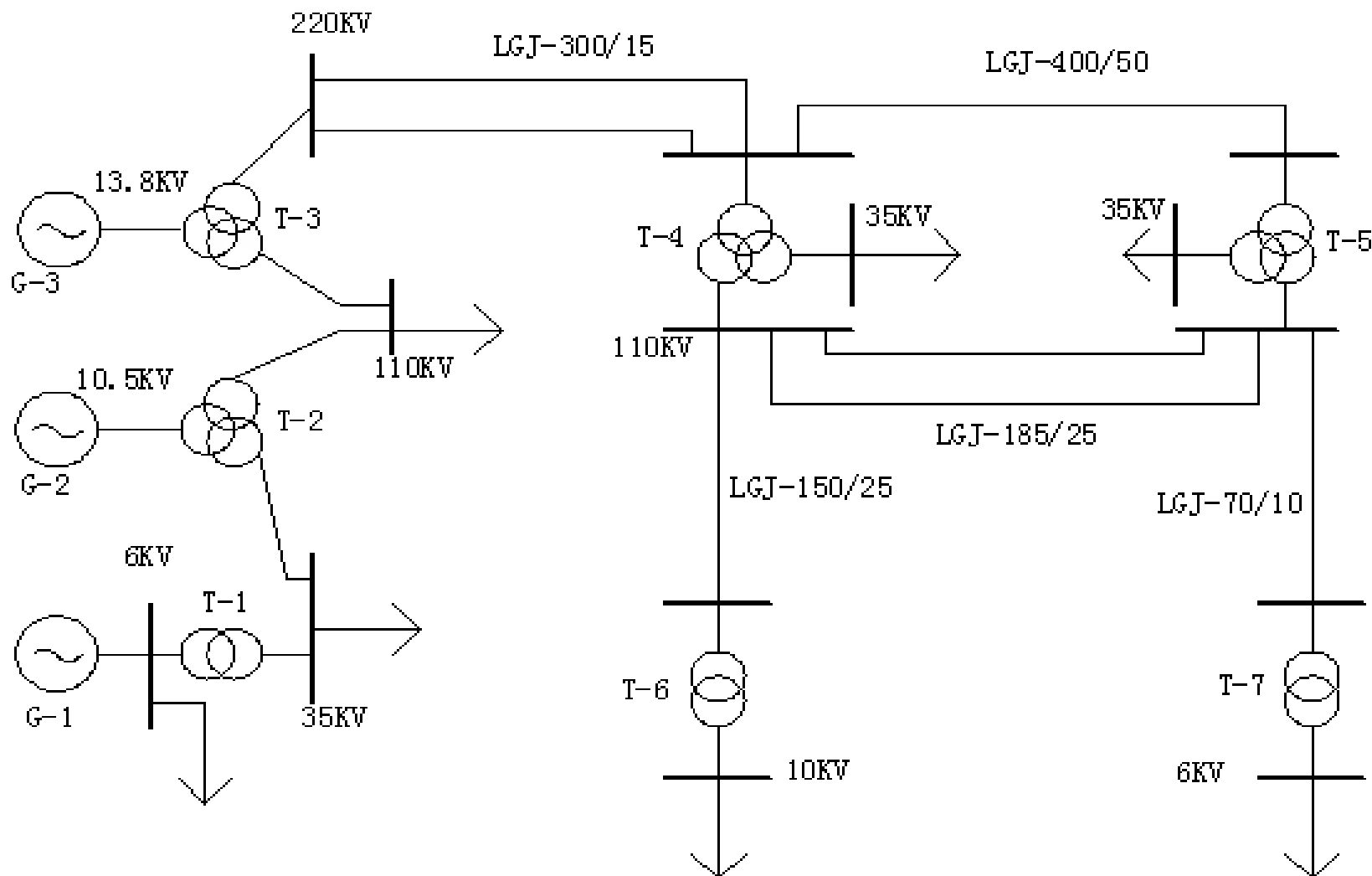
南京特高压交流站



南京特高压换流站



电力系统简化电气结线图



第二节 电力系统运行应满足的基本要求



一、电能生产、输送、消费的特点

- ◆ 重要性（**电能和国民经济各部门及人民生活密切**）：电能在国民经济和人民生活起着极其重要的作用，电能供应的中断或减少将影响国民经济的各个部门，造成巨大的损失。
- ◆ 同时性（**电能不易储存**）：电能的生产、传输、分配和消费实际上是同时进行。所有发电厂任何时刻生产的电能必须与该时刻所有负荷所需的电能与传输分配中损耗的电能之和相平衡。
- ◆ 整体性（**生产、输送、消费环节必须连续**）各环节组成统一整体的电力系统，不可分割。
- ◆ 快速性（**暂态过程十分短暂**）电力系统从一种运行方式转变到另一种运行方式的过渡过程非常快，以秒甚至毫秒计，以至人们来不及作出反应。
- ◆ 严格性（**电能质量**）对电压的高低、频率的偏移及谐波分量都有一定限额。



第二节 电力系统运行应满足的基本要求

◆ 二、对电力系统运行的基本要求

— 保证可靠地持续供电

供电中断将使生产停顿、生活混乱，甚至危及人身和设备安全，给国民经济造成的损失远超过电力系统本身的损失。因此，电力系统运行首先要满足可靠、持续供电的要求。可靠性包括安全性和充裕性。

● 安全性：（持续）

指电力系统承受突然发生的扰动时保持不间断供电的能力，例如突然短路或失去系统元件。在实用中常用正常供电情况下，是否能保持潮流及电压模值在允许的范围以内表示（静态安全分析）。电力系统的安全性表征电力系统短时间内在事故情况下维持持续供电的能力，属电力系统实时运行中要考虑的问题。



第二节 电力系统运行应满足的基本要求

- 充裕性（充足）

指电力系统维持连续供给用户总的电力需求和总的电能量的能力，同时考虑系统元件的计划停运及合理的期望非计划停运。常用向用户长时间不间断持续供电的概率指标表示，如失负荷概率（**LOLP**）、失负荷频率（**LOLF**）、系统期望输送能力（**ETC**）、年电量不足期望（**EENS**）等。可靠性属电力系统规划设计的范畴。

第二节 电力系统运行应满足的基本要求



— 根据对供电可靠性的要求将负荷分为三级

- (1) 一级负荷:

指供电突然中断将造成人员伤亡, 或政治上造成极坏影响, 经济上造成重大损失或引起社会混乱的负荷。

- (2) 二级负荷:

指供电突然中断将造成政治上不好影响, 经济上较大损失或社会生活的正常规律被打乱的负荷。

- (3) 三级负荷:

指有计划停电时不会造成较大影响的负荷。



第二节 电力系统运行应满足的基本要求

- 保证电能的质量（电压、频率和波形）
 - 电压偏移一般不得超过额定电压的 $\pm 5\%$ ；
 - 频率偏移不得超过 $\pm 0.2\text{Hz}$ ；
 - 谐波电压的畸变率（各次谐波有效值平方和的方均根值与基波有效值的百分比）的极限值：**0.38kV为5%、6kV或10kV为4%、35kV或63kV为3%、110kV为1.5%。**

第二节 电力系统运行应满足的基本要求



— 保证系统运行的经济性

- 电能生产的规模很大，消耗的一次能源在国民经济一次能源总消耗中占的比重约为 $1/3$ ，而且电能变换、输送、分配时的损耗绝对值也相当可观。因此降低每一度电所消耗的一次能源和输送分配时的损耗都具有重要意义。为此，要首先采用高效、节能的发、输、配电设备；优化电源配置和电力网络；大力开展电能系统中的经济运行工作；充分利用水电资源，合理调配水、火电厂的出力等。
- **煤耗率**：每生产1千瓦时电能所消耗的标准煤重
- **线损率或网损率**：电力网络中损耗的电能与向电力网络供应的电能的百分比（中国6.4%、日本3.85%、德国4.8%、美国6%）

第二节 电力系统运行应满足的基本要求



— 保证对环境保护

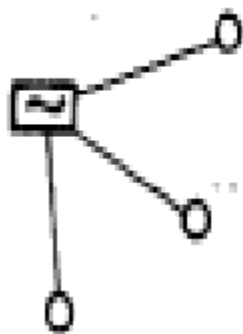
电力工业中的火力发电厂是一个污染源。在运行过程中会产生相当数量的固体与气体废料，造成对大气与水源的严重污染，所以要控制发电厂的排放。对于核电站要控制其放射污染。在输变电设备方面要求考虑输电线对通信及周围环境的影响，如电磁场对人体及周围设备的影响，输电杆塔对绿化地带或自然景观的影响以及变压器噪声对周围环境的影响等等。

第三节 电力系统的结线方式和电压等级



◆ 一、几种典型结线方式的特点

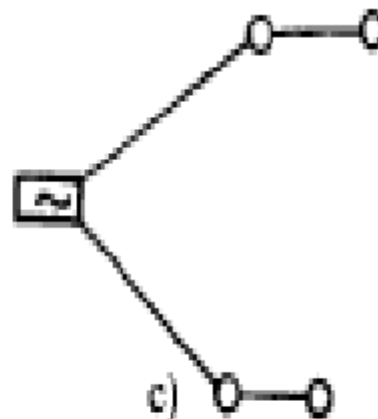
- 无备用接线包括：单回放射式、树干式、链式网络。
- 优点：线路结构简单、经济和运行方便。缺点：供电可靠性差。



a)



b)



c)

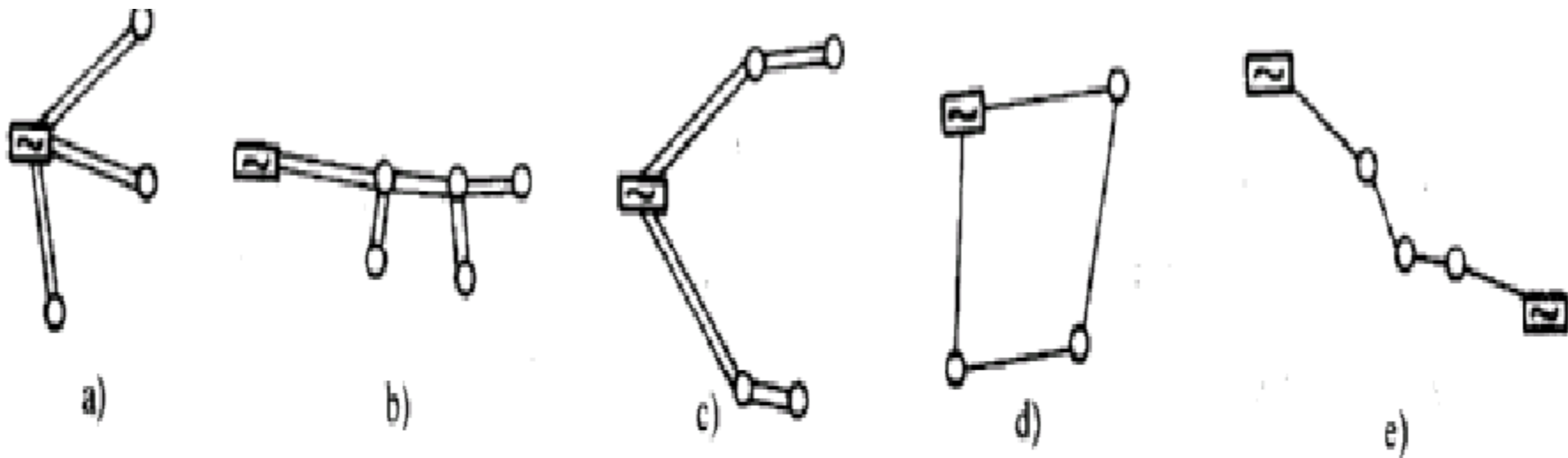
无备用接线方式

第三节 电力系统的结线方式和电压等级



◆ 有备用电源接线

有备用接线方式包括：双回放射式、干线式、链式、环式及两端供电网络。



有备用接线方式

a) 放射式 b) 干线式 c) 链式 d) 环式 e) 两端供电网络

第三节 电力系统的结线方式和电压等级



双回放射式、干线式、链式 网络

- ◆ 优点：供电可靠、电压质量比较高
- ◆ 缺点：设备投资成倍增加

环式网络

- ◆ 优点：供电经济、可靠
- ◆ 缺点：运行调度复杂，线路发生故障切除后，由于功率重新分配，可能导致线路过载或电压质量降低。

第三节 电力系统的结线方式和电压等级



◆ 二、不同电压等级的适用范围

1. 电力系统的额定电压等级

◆ 输送功率与电压的关系：

- 输送功率一定时，电压越高电流越小，导线载流截面越小，投资小；
电压越高，对绝缘要求越高，杆塔、变压器、断路器投资越大；
综合考虑，对应于一定的输送功率和输送距离应有一最合理的线路电压。

国际大电网会议(CIGRE)与国际供电会议(CIRED)的联合工作组对电压选择的建议。认为超高压(220~500)kV以下的电压，其相邻两级电压之比应大于3倍。高压(50~150)kV以下的电压，其相邻两级电压之比应大于5倍，并建议：

- 1)已采用220kV或275kV为主的国家，最好选用500、230kV电压系列。
- 2)已采用330kV或345kV为主的国家，最好选用750、330、110kV电压系列。
- 3)在一个国家内，以选用一种电压系列为宜，以免额定电压不同的电力系统互联时，需要专用的互联变压器。

◆ 选择电力线路电压时，只能选用国家规定的电压等级。

线路额定电压与输送容量、输送距离的关系



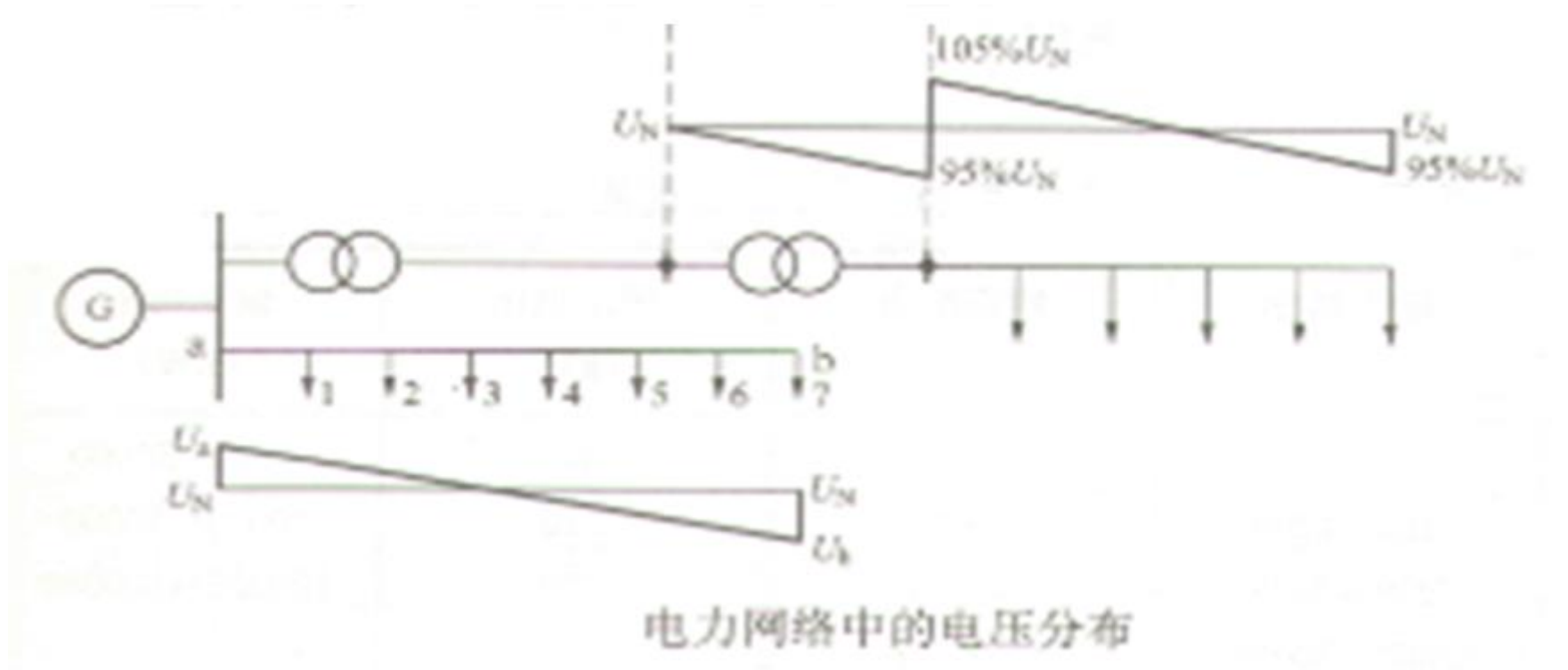
额定电压/ kV	输送容量/ MW	输送距离/ km
10	0.2~2.0	10~20
20	1.0~5.0	15~30
35	2.0~15	20~50
60	3.5~30	30~100
110	10~50	50~150
220	100~500	100~300
330	200~80	200~600
500	1000~1500	150~850
750	2000~2500	500以上



额定电压等级

用电设备额定线电压	交流发电机线电压	变压器线电压	
		一次绕组	二次绕组
3	3.15	3及3.15	3.15及3.3
6	6.3	6及6.3	6.3及6.6
10	10.5	10及10.5	10.5及11
35	15.75	15.75	
(60)	发电机、变压器、 用电设备额定电 压不一致。	35	38.5
110		(60)	(66)
(154)		110	121
220		(154)	(169)
330		220	242
500		330	345及363
	为什么？	500	525及550

线路额定电压与发电机、变压器、用电设备额定电压的关系





线路额定电压与发电机、变压器、用电设备额定电压的关系

发电机接在线路始端，
发电机的额定电压为线
路额定电压的105%。

线路的电压降落一般为10%，用电

设备容许电压偏移一般为 $\pm 5\%$ 。

要求线路始端为额定电压的105%，使末端电压不低于95%。

用电设备应在接近它们的额定电压运行，用电设备的额定电压取与线路额定电压相等。

线路的额定电压是线路的平均电压

末端电压低

电力网络中的电压分布

变压器一次侧接电源，相当于用电设备，变压器一次侧额定电压等于用电设备额定电压，直接和发电机相联的变压器一次侧额定电压应等于发电机额定电压。

变压器二次侧向负荷供电，相当于发电机，二次侧电压应较线路额定电压高5%，计及额定负荷下变压器内部的电压降落约为5%，为使正常运行时变压器二次侧额定电压较线路额定电压高5%，变压器二次侧电压应较线路额定电压高10%。（漏抗很小，二次侧直接与用电设备相联的和电压特别高的变压器，其二次侧额定电压可能较线路额定电压高5%。）



2.不同电压等级的适用范围

- ◆ **110kV**以下的电压等级差应超过三倍，**154、60kV**电压等级不宜推广；
- ◆ **500、330、220kV**多用于大电力系统的主干线；
- ◆ **110kV**既用于中小电力系统的主干线，也用于大电力系统的二次网络；
- ◆ **35kV**既用于大城市或大工业企业内部网络，也广泛用于农村；
- ◆ **10kV**最常用更低一级配电网；
- ◆ **3kV**只限于工业企业内部采用；
- ◆ 负荷中高压电动机的比重很大时才考虑用**6kV**配电方案。

上述划分不是绝对、一成不变的，随着容量的增大，大电力系统的主干线电压提高后，**330、220kV**可能退而为二级电压

。



三、电力系统中性点的运行方式

电力系统的中性点是指发电机、星形联接的变压器的中性点，
电力系统中性点的运行方式是指其中性点的运行方式

直接接地系统（大电流接地系统）：

中性点直接接地系统供电可靠性低，因该系统中一相接地时与中性点接地点构成了短路回路，接地相电流大，必须迅速切除接地相甚至三相。

不接地系统

不接地系统供电可靠性高，但绝缘水平要求高。因该系统一相接地时不构成短路回路，接地相电流不大，但非接地相的对地电压却升高为相电压的 $\sqrt{3}$ 倍。

在电压等级较高的系统中，绝缘费用比重大其带来的经济效益显著，一般采用中性点直接接地方式，而以其他措施提高供电可靠性。

在电压等级较低的系统中，一般采用不接地方式提高供电可靠性。



三、电力系统中性点的运行方式

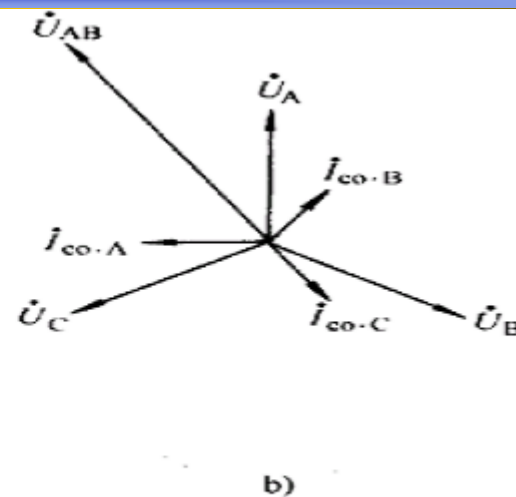
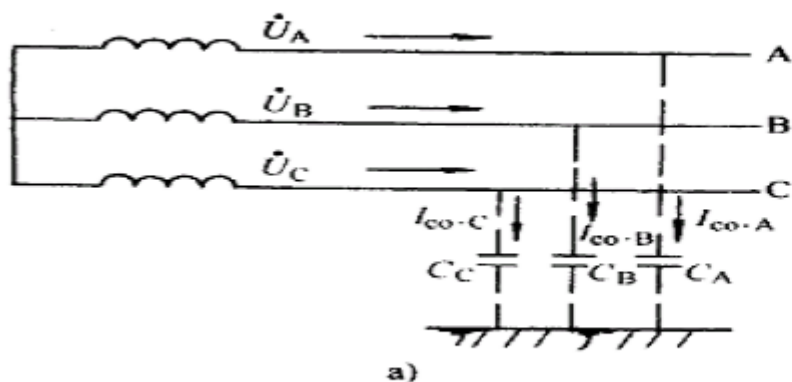
非直接接地系统（小电流接地系统）：

中性点经消弧线圈接地

消弧线圈是带气隙铁芯的线性电感线圈，其电阻很小，感抗很大。其作用：导线对地有电容，中性点不接地系统中一相接地时，接地点接地相电流属容性电流，随网络延伸电流越大，有可能使接地点电弧不能自行熄灭并引起弧光接地过电压。消弧线圈够成了另一接地回路，提供感性电流与容性电流相抵消，以减小接地点电流，使电弧易于熄灭。



三、电力系统中性点的运行方式



中性点不接地系统正常运行

三相对地电压对称并等于相电压

三相对地电容电流对称

中性点与地同电位

三、电力系统中性点的运行方式

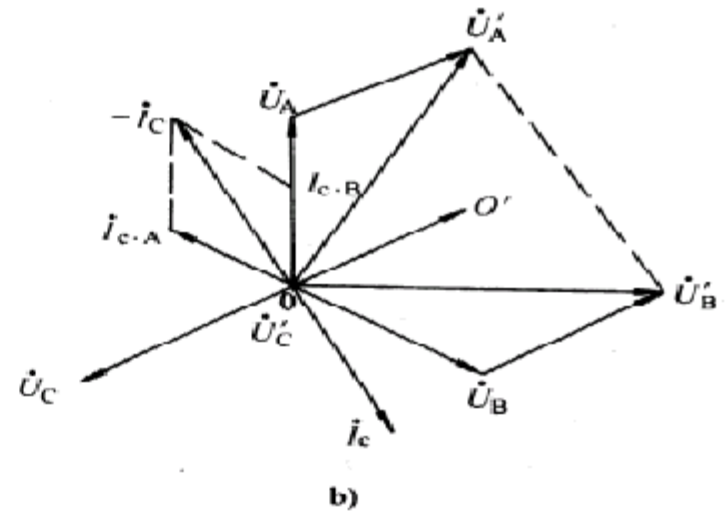
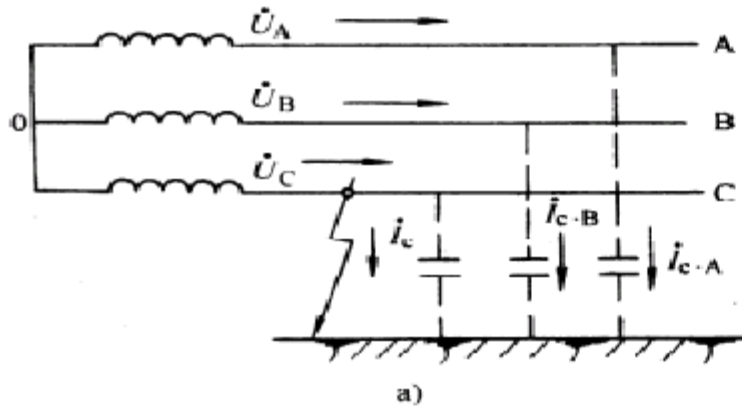
发生一相接地（例C相接地）

—中性点对地电压升高为相电压，如图OO'相量。

—接地相对地电压为0。 $U_C = 0$

—未接地两相对地电压升高为线电压。 $U'_A = U'_B = \sqrt{3}U_A$

—三相相间（线）电压不变。

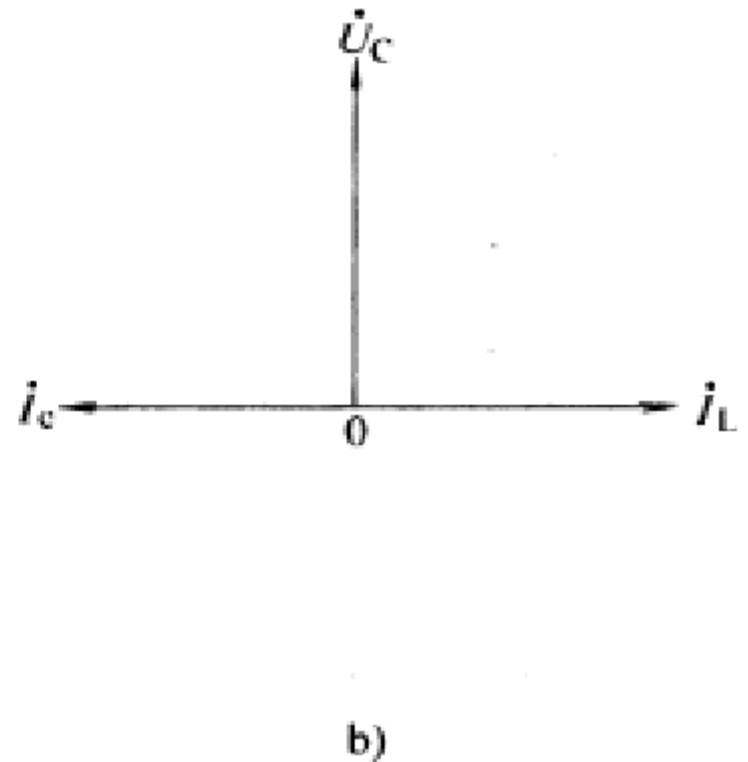
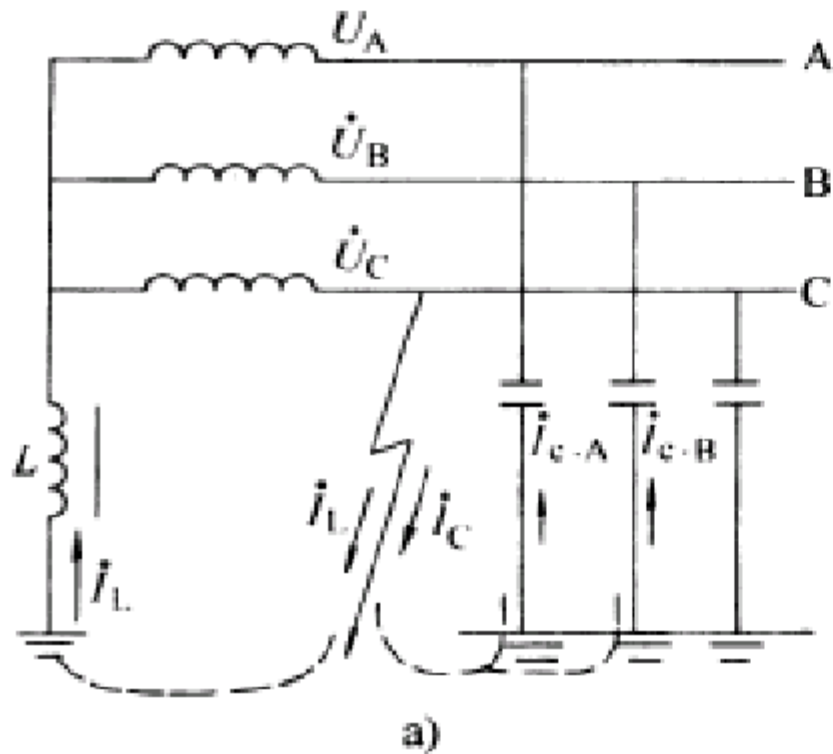


中性点不接地系统一相接地分析



三、电力系统中性点的运行方式

◆ 中性点经消弧线圈接地系统



中性点经消弧线圈接地电力系统



三、电力系统中性点的运行方式

- ◆ 如感性电流等于容性电流，称为全补偿；
- ◆ 如感性电流 $<$ 容性电流，称为欠补偿；
- ◆ 如感性电流 $>$ 容性电流，称为过补偿。
- ◆ 实用中一般采用过补偿。
- ◆ 中性点经非线性电阻接地的方案也是一个有前途的方案。