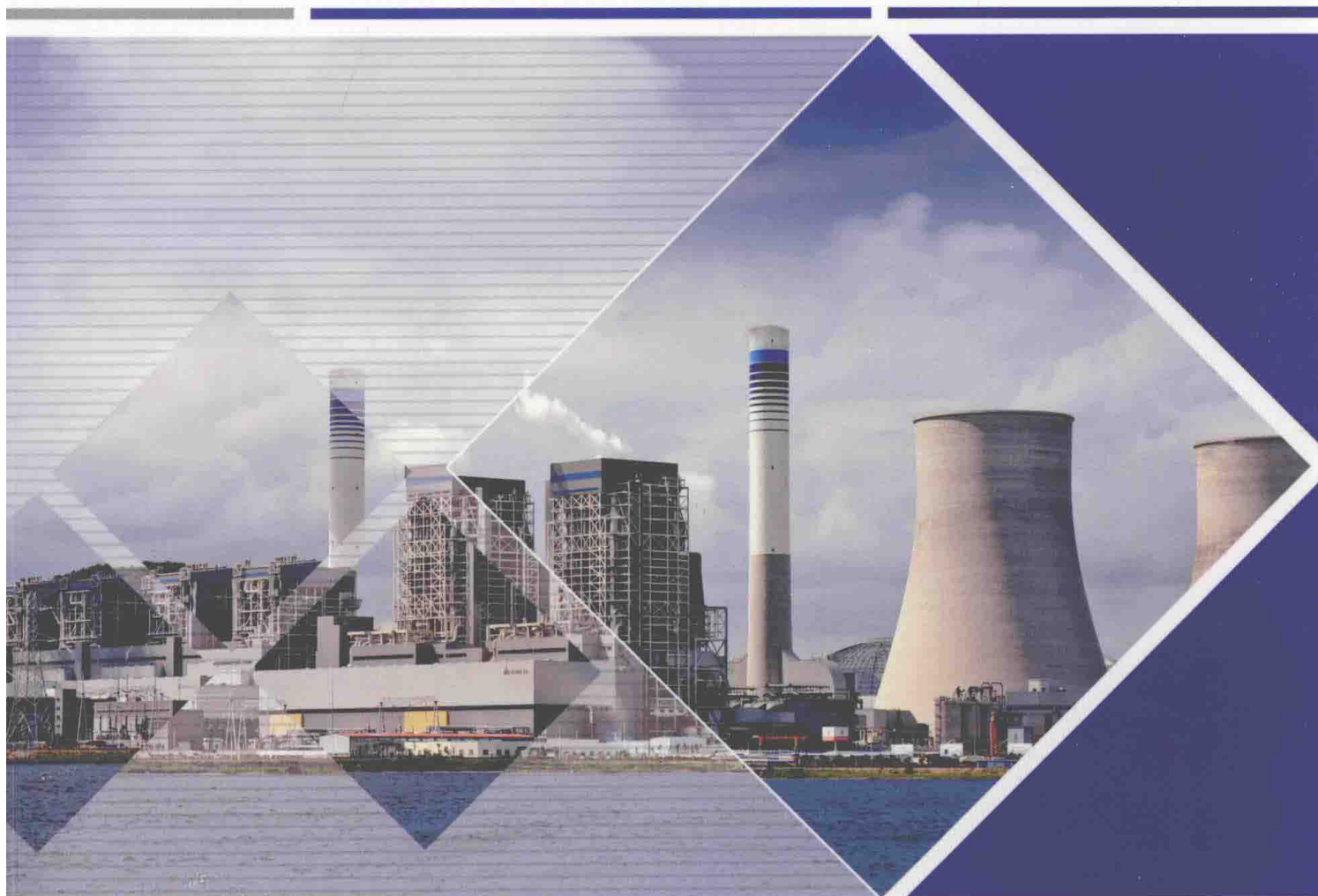


DAXING HUODIANCHANG DIANQI SHEBEI JI YUNXING JISHU

大型火电厂 电气设备及运行技术

胡志光 武宏波 胡 静 编 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

DAXING HUODIANCHANG DIANQI SHEBEI JI YUNXING JISHU

大型火电厂 电气设备及运行技术

胡志光 武宏波 胡静 编 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书以 1000MW 发电机组为例详尽介绍了大型火电厂一、二次电气设备的基本原理、结构类型、性能特点、技术参数、接线方式、运行维护、常见故障处理以及与火电厂运行紧密相关的电力系统专业知识。全书共分八章，内容包括电力系统的运行技术、火电厂电气主接线及厂用电、汽轮发电机及运行技术、电力变压器及运行技术、厂用电动机及运行技术、火电厂高压配电设备、火电厂的继电保护、火电厂电气设备的控制与信号。本书内容全面，突出先进性和实用性，既可以作为火电厂电气运行人员的培训教材，亦可供大专院校师生和从事火电厂相关专业工作的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

大型火电厂电气设备及运行技术/胡志光, 武宏波, 胡静编著. —北京: 中国电力出版社, 2018. 8
ISBN 978-7-5198-2079-4

I. ①大… II. ①胡…②武…③胡… III. ①火电厂—电气设备—运行 IV. ①TM621.27

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 108282 号

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 徐 超 (010-63412386)

责任校对: 闫秀英

装帧设计: 赵姗姗

责任印制: 石 雷

印 刷: 北京雁林吉兆印刷有限公司

版 次: 2018 年 8 月第一版

印 次: 2018 年 8 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 25

字 数: 561 千字

印 数: 0001—2000 册

定 价: 108.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换



前言

Preface

为适应大型火电厂快速发展的需要，进一步提高火电厂技术人员的运行维护水平，保障火电厂的安全、可靠、高效、经济运行，作者为电气运行人员编写了《大型火电厂电气设备及运行技术》一书。本书以 1000MW 发电机组为例，详尽介绍了大型火电厂一、二次电气设备的基本原理、结构类型、性能特点、技术参数、接线方式、运行维护、常见故障处理以及与火电厂运行紧密相关的电力系统专业知识。全书共分八章，内容包括电力系统的运行技术、火电厂电气主接线及厂用电、汽轮发电机及运行技术、电力变压器及运行技术、厂用电动机及运行技术、火电厂高压配电设备、火电厂的继电保护、火电厂电气设备的控制与信号。本书努力全面反映大型火电厂电气部分的新技术、新设备、新工艺、新材料和新经验，突出实用性和先进性。本着理论联系实际的原则，书中简化电气设备选型、设计和计算内容，重点介绍大型火电厂电气设备的结构原理、技术参数、运行特性、运行调整、运行维护和故障处理等内容。力求将大型火电厂的电气主接线、厂用电接线、一次电气设备、二次电气设备、发电机的运行、变压器的运行、电动机的运行和电力系统的运行融为一体，在理解电气设备工作原理的同时，全面反映火电厂电气设备的运行技术。作者在写作中，做到了术语准确、文字精练、插图简明、内容全面、通俗易懂。《大型火电厂电气设备及运行技术》既可以作为火电厂电气运行人员的培训教材，亦可供大专院校师生和从事火电厂相关专业工作的工程技术人员参考。

本书的第一、三、七、八章由华北电力大学胡志光编著，第四、六章由国网经济技术研究院有限公司武宏波编著，第二、五章由国网能源研究院有限公司胡静编著。本书在编著过程中曾得到中国电力出版社徐超编辑的大力支持，在此一并表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免出现漏误之处，恳请读者不吝指正。

作者

2017年12月



目录

Contents

前言

第一章 电力系统的运行技术	1
第一节 电力系统概述	1
第二节 电力系统有功功率平衡和频率调整	12
第三节 电力系统无功功率平衡和电压调整	19
第四节 电力系统运行的稳定性	26
第五节 电力系统中性点的接地方式	33
第二章 火电厂电气主接线及厂用电	41
第一节 火电厂的电气主接线	41
第二节 火电厂电气设备的倒闸操作	49
第三节 火电厂的厂用电	53
第四节 火电厂的直流电源	63
第五节 火电厂的交流不停电电源	74
第六节 火电厂的交流事故保安电源	78
第三章 汽轮发电机及运行技术	87
第一节 汽轮发电机的基本知识	87
第二节 汽轮发电机的励磁系统	96
第三节 汽轮发电机的运行特性	102
第四节 汽轮发电机的启、停操作和运行监视	105
第五节 汽轮发电机的正常运行与调整	110
第六节 汽轮发电机的进相运行	115
第七节 汽轮发电机的异常运行和事故处理	120
第四章 电力变压器及运行技术	130
第一节 电力变压器的基本知识	130
第二节 电力变压器的结构及特点	138
第三节 电力变压器的运行分析	157
第四节 电力变压器的运行方式	164
第五节 电力变压器的运行维护	171

第五章 厂用电动机及运行技术	179
第一节 三相异步电动机的基本知识	179
第二节 三相异步电动机的启动和自启动	188
第三节 三相异步电动机的调速方法	195
第四节 三相异步电动机的控制	201
第五节 三相异步电动机的运行维护	210
第六章 火电厂高压配电设备	218
第一节 绝缘子、母线、电缆和架空线	218
第二节 隔离开关、熔断器和负荷开关	229
第三节 高压断路器	236
第四节 互感器、滤过器和过滤器	249
第五节 过电压保护设备	263
第六节 接地装置	272
第七章 火电厂的继电保护	278
第一节 继电保护的基本知识	278
第二节 发电机的继电保护	292
第三节 变压器的继电保护	314
第四节 电动机的继电保护	323
第五节 输电线路的高频保护	326
第八章 火电厂电气设备的控制与信号	333
第一节 断路器的控制	333
第二节 隔离开关的防误闭锁	341
第三节 信号装置	347
第四节 监察装置和闪光装置	352
第五节 厂用电源快切装置	356
第六节 自动准同期装置	365
附录 大型火电厂电气设备外形和结构彩图	373
参考文献	394

电力系统的运行技术

第一节 电力系统概述

一、电力系统的组成及其优越性

1. 电力系统的组成

发电机将机械能转化为电能，通过变压器、电力线路将电能输送、分配给电动机、电炉、电灯等用电设备，这些用电设备将电能转化为机械能、热能、光能等。这些生产、输送、分配、消耗电能的发电机、变压器、电力线路、各种用电设备联系在一起组成的统一整体就叫做电力系统，如图 1-1 所示。

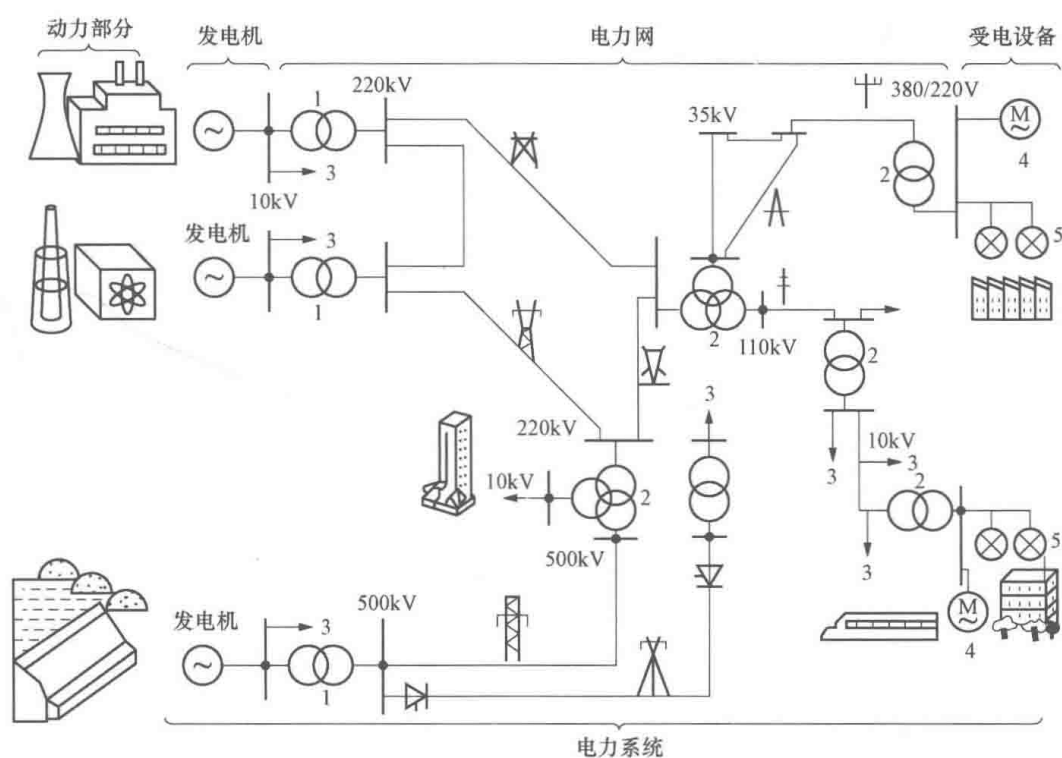


图 1-1 电力系统和电力网络示意图

1—升压变压器；2—降压变压器；3—负荷；4—电动机；5—电灯

与电力系统相关联的还有“动力系统”和“电力网络”。“动力系统”是由电力系统



和“动力部分”组成的整体，其中“动力部分”包括火力火电厂的锅炉、汽轮机、热力网和用热设备，水力发电厂的水库、水轮机以及核电厂的核反应堆等。“电力网络”是由升降压变压器和各種不同电压等级的电力线路所组成的网络，也称电力网或电网，是电力系统的重要组成部分。主要承担输送电能任务的电网称为输电网，其电压较高。其中110~220kV的输电网称为高压输电网，330~750kV的输电网称为超高压输电网，直流±800kV和交流1000kV及以上的输电网称为特高压输电网。主要承担分配电能任务的电网称为配电网，其电压较低。其中3~35kV的配电网称为高压配电网，380/220V的配电网称为低压配电网。

将两个或两个以上的小型电力系统用电网连接起来并列运行，即可组成地区性电力系统；将若干个地区性电力系统用电网连接起来，即可组成区域性电力系统；将若干个区域性电力系统用电网连接起来，就可形成跨省（区）甚至跨国界的电力系统。

2. 大电力系统的优越性

(1) 提高供电可靠性和电能质量。因为大电力系统中备用发电机组较多，容量也比较大，个别机组发生故障对系统影响较小，从而提高了供电可靠性。此外，当电力系统容量较大时，个别负荷变动，即使是较大的冲击负荷，也不会造成系统电压和频率的明显变化，故可增强抵抗事故能力，提高电网安全水平，改善电能质量。

(2) 可减少系统的装机容量，提高设备利用率。大电力系统往往占有很大的地域，因为存在时差和季差，各小系统中最大负荷出现的时间就不同，综合起来的最大负荷，也将小于各小系统最大负荷相加的总和。因此，大电力系统中总的装机容量可以减少。同时，备用容量也可以减少。如果装机容量一定，则可提高设备的利用率，增加供电量。

(3) 便于安装大机组，降低造价。在100万~1000万kW电力系统中，最经济的单机容量为系统总容量的6%~10%。可见，系统容量越大，越便于安装大机组。而大机组每千瓦设备的投资、生产每千瓦时电能的燃料消耗厂用电率和维修费用都比小机组的少。从而可节约投资、降低煤耗、降低运行费用、提高劳动生产率、加快电力建设速度。

(4) 合理利用各种资源，提高运行的经济性。水电厂发电易受季节影响，在夏秋丰水期水量过剩、在冬春枯水期水量短缺。水电厂容量占的比例较大的系统，将造成枯水期缺电、丰水期弃水的后果。将水电比例较大的系统与火电比例较大的系统连接起来并列运行，丰水期水电厂多发电，火电厂少发电并适当安排检修；枯水期火电厂多发电，水电厂少发电并安排检修。这样既能充分利用水利资源，又能减少燃料消耗，从而降低电能成本，提高运行的经济性。

二、电力系统的特点及对其的要求

1. 电力系统的特点

(1) 电能的生产和消费具有同时性。电力系统中电能的生产和消费每时每刻都保持着平衡关系，即发电厂任何时刻生产的电能都等于该时刻所有用电设备消耗电能之和。

在电力系统中发电、输电、变电、配电和用电的任何一个环节的电气设备发生故障，都会影响电能的生产和供应。因此，必须通过优化和调整等手段，使这种平衡关系维持在正常范围之内。

(2) 电磁变化过程十分迅速。电以光速传播，运行中改变系统的运行状态也是在极短的时间内完成的，系统故障失去稳定的过程也非常短暂。因此，正常运行或故障处理所进行的一系列操作和调整仅靠人工不能达到满意的效果，甚至不能达到预期的目的，必须利用各种自动装置来完成这些任务。

(3) 电力系统和国民经济各部门之间有密切的关系。现代工业、农业、交通运输等部门都以电为动力进行生产。电能以其便于输送、便于集中管理、便于转换、便于自动控制、使用方便和利用率高等显著优点而得到广泛应用，电能在国民经济的发展和提高人民生活水平方面发挥着越来越重要的作用。因此，电力系统也应不断发展壮大，并留有足够的备用容量满足社会发展的需要。

(4) 电力系统的地区性特点较强。由于电力系统的电源结构与资源分布情况和特点有关，负荷结构却与工业布局、城市规划、电气化水平有关，输电线路的电压等级、线路配置等则与电源与负荷间的距离、负荷的集中程度等有关。因此，应根据本地区的特点规划、建设和发展电力系统。

2. 对电力系统的要求

(1) 最大限度地满足用户的用电需要，为国民经济各个部门提供充足的电力。首先应按照电力先行的原则，做好电力系统的发展规划，确保电力工业的建设优先于其他工业部门。其次，还要加强现有电力设备的运行维护，以防止事故发生。

(2) 保证供电的可靠性。运行经验证明，电力系统中的大事故，往往是由小事故引起的；整体性事故往往是由局部性事故发展扩大而造成的。因此要经常对每一处发电、输电、变电、配电和用电设备进行监视、维护，并进行定期的预防性试验和检修，使设备处于完好的运行状态。严格执行规章制度，不断提高运行人员的运行维护水平，采用技术先进、性能可靠和自动化程度高的电气设备，扩大系统容量和改善环境条件等地都是提高供电可靠性的重要手段。

(3) 保证良好的电能质量。电能质量是指电压、频率、波形三个技术指标，其中电压和频率是最重要的指标。用电设备是按在额定电压条件下工作设计的，因此实际供电电压过高或过低都会使设备的运行技术经济指标下降，甚至不能工作。我国规定的电气设备允许电压偏移一般不超过额定电压的 $\pm 5\%$ 。频率的变化同样影响电气设备的正常工作，并且对电力系统本身也有严重危害。我国规定电力系统的标准频率是 50Hz ，对于 300万 kW 以上的系统，允许偏差不得超过 $\pm 0.2\text{Hz}$ ； 300万 kW 及以下的系统，允许偏差不得超过 $\pm 0.5\text{Hz}$ 。另外，电能质量标准中还要求电压波形为正弦波。这是由于某些用电设备，如热轧机、电弧炉、电焊机、晶闸管控制的电动机、电解整流装置等，向电网输出高次谐波电流，会影响电源电压波形，使正弦波发生畸变，严重时会使继电保护装置、自动控制装置和计算机监控系统等发生误动作。因此，任一高次谐波的瞬时值不得超过同相基波电压瞬时值的 5% 。

(4) 保证电力系统运行的经济性。提高电力系统运行的经济性，就是使电力系统在运行中做到最大限度地降低燃料消耗，降低厂用电率和网损率。电能的生产规模很大，消耗的能源在国民经济能源总消耗中占的比重很大。因此，采取合理利用能源、降低发电成本、使负荷在各发电厂之间合理分配、使发电机组实现优化组合等措施，均会带来经济效益。

三、电力系统的电压等级

如图 1-2 所示为电力系统电压分层结构示意图。超高压 500kV 主要用于大功率、远距离输送和跨省联络线，并正在逐步形成跨省互联的网络；高压 220kV 主要形成大电网主干网架；110kV 用于中、小系统的主干线，也用于大电力系统的二次网络；城市配电网目前主要采用 10、35kV 电压等级。随着城市电力需求的增长，配电网的电压升高，将形成 110kV 配电网。这种划分不是绝对的，要根据具体情况，经过论证分析后决定。

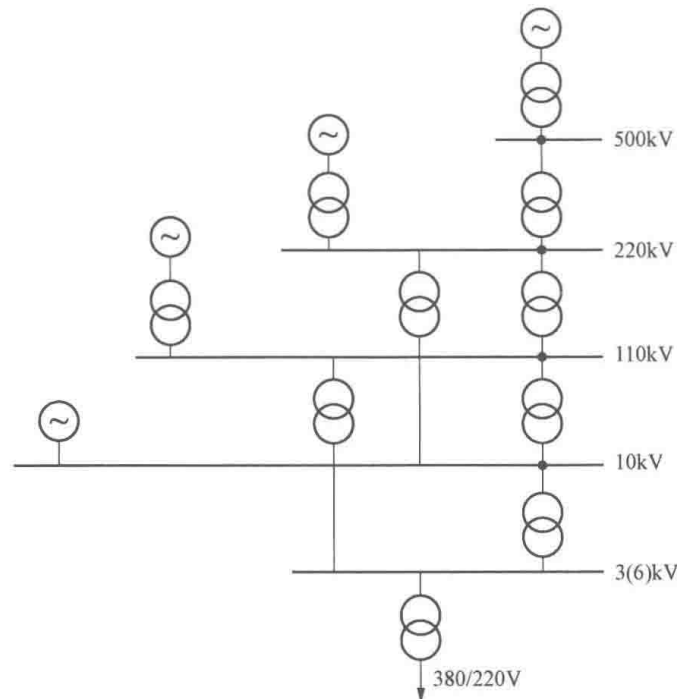


图 1-2 电力系统电压分层结构示意图

电力系统基本结构形态的接线大致可以分为无备用和有备用的两种类型。无备用接线的用户只有一个电源，主要优点是简单、经济、运行方便，缺点是供电可靠性差。有备用接线的用户有两个和两个以上的电源对其供电，其优点是供电可靠，但缺点是运行操作和继电保护复杂，投资费用也较大。

如图 1-3 所示为电力网各部分电压分布示意图。因为三相输送功率 S 和线电压 U 、线电流 I 之间的关系为 $S = \sqrt{3}UI$ 。输送功率一定时，输电线路电压愈高，传输电流愈小，导线截面愈小，投资愈小。但电压愈高，杆塔、变压器、断路器等绝缘的投资也愈大。综合考虑这些因素，对应一定的输送功率和输送距离，有一合理的线路电压。但从

设备制造角度考虑，为保证生产的系列性，又不任任意确定线路电压。考虑上述原因并根据我国实际情况，同时参考国外的标准，确定了我国电力系统的标称电压等级（即GB156—1993《标准电压》），3kV及以上的交流三相系统的标称电压值及电气设备的最高电压值见表1-1。

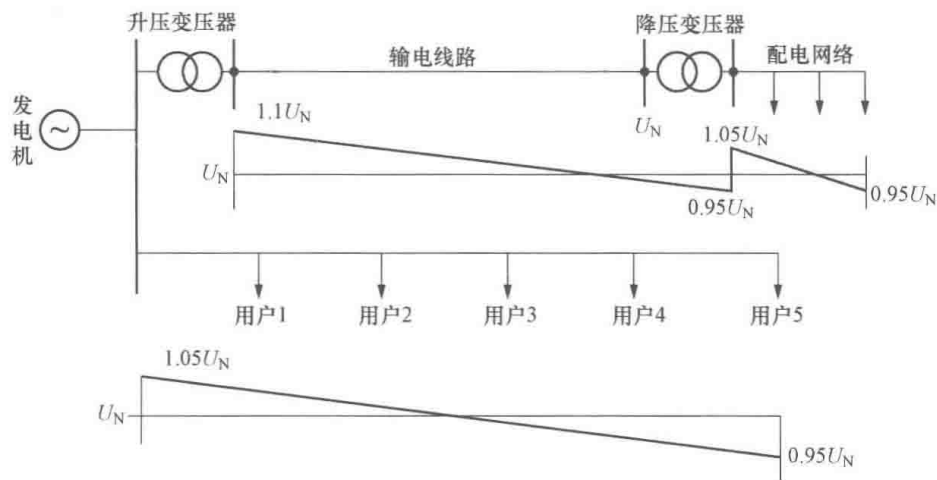


图1-3 电力网各部分电压分布示意图

从表1-1可知，该标准将以前的电力系统（电力网）额定电压改称电力系统标称电压，并且将20kV列入国家标准，同时规定了电气设备的最高电压值，即电气设备正常运行时工作电压不能超过最高电压。

该标准中同时规定了发电机的额定电压值，见表1-2。

系统的标称电压	电气设备的最高电压
3	3.6
6	7.2
10	12
(20)	(24)
35	40.5
66	70.5
110	126 (123)
220	252 (245)
330	363
500	550
(750)	(800)
1000	12000

注 1. 括号中的数值为用户有要求时使用。
2. 电气设备的额定电压可从表中选取，由产品标准确定。

交流发电机额定电压	直流发电机额定电压
115	115
230	230
400	460
690	—
3150	—
6300	—
10500	—
13800	—
15750	—
18000	—
20000	—
22000	—
24000	—
26000	—

注 与发电机出线端配套的电气设备额定电压，可采用发电机的额定电压，在产品标准中具体规定。



从表 1-2 可知, 该标准中电气设备仍用额定电压表示, 交流发电机的额定电压不与电网标称电压配套, 而是随着容量的增大而升高。目前我国大容量发电机有较快发展。

从新的国家标准电压中可知, 变压器的额定电压与标准相同, 分一次绕组和二次绕组额定电压。

变压器一次绕组的额定电压有以下几种情况:

对于升压变压器, 与发电机额定电压相同, 即 3.15、6.3、10.5、13.8、15.75、18、20、22、24、26kV。

对于降压变压器, 一次绕组的额定电压与相连线路的标称电压相同, 即 3、6、10、35、66、110、220、330、500、750、1000kV。但是, 对于发电厂厂用高压变压器, 一次绕组的额定电压与发电机的额定电压相同。

关于变压器二次绕组的额定电压, 首先看确定变压器二次绕组额定电压的理由。在额定运行时, 变压器二次侧额定电压应较线路高出 5%, 但又因变压器二次侧额定电压规定为空载时的电压, 而在额定电流负载下, 变压器内部的电压降约 5%, 为使正常运行时变压器二次侧电压较线路标称电压高出 5%, 故规定一般大中容量变压器二次侧额定电压应较相连线路标称电压高出 10%, 只有短路电压百分数较小 ($U_k < 7\%$) 的小容量变压器, 或二次侧直接与用电设备相连的变压器 (如厂用变压器), 其二次侧额定电压才较线路标称电压高出 5%。

因此, 变压器二次绕组的额定电压较相连线路标称电压高出 5% 的为: 3.15、6.3、10.5kV。在城市电网中, 由于送电距离较近, 多选此种额定电压。

变压器二次绕组的额定电压较相连线路标称电压高出 10% 的为: 3.3、6.6、11、38.5、121、242、363、550kV。

各种电压等级目前在我国的使用情况如下:

(1) 380/220V 为一般用户生产、生活和照明等使用的电压。

(2) 3、6kV 为发电厂和大中型企业高压厂用配电网电压, 10kV 用于中小城镇配电网电压和大型火电厂高压厂用配电网电压。

(3) 35、66kV 为大城市、大工业企业内部的配电网和农村输电网电压。

(4) 110kV 为用于中、小电力系统主干输电线电压。

(5) 220、330kV 为用于大电力系统主网网架电压。

(6) 500、750、1000kV 为用于系统之间联络线及大电网主网架电压。

各级电压等级电网的输电能力见表 1-3。

表 1-3 各级电压电网的输电能力

标称电压 (kV)	经济输送容量 (MW)	输送距离 (km)
0.38	0.1 以下	0.6 以下
3	0.1~1.0	1~3
6	0.1~1.2	4~15

续表

标称电压 (kV)	经济输送容量 (MW)	输送距离 (km)
10	0.2~2.0	6~20
35	2.0~10	20~50
66	6.0~30	30~80
110	10~50	50~150
220	100~500	100~300
330	200~1000	200~600
500	1000~1500	200~850
750	2000~2500	500~1000
1000	2500~4000	500~1500

四、电力系统的负荷

1. 电力系统的负荷分类

电力系统的负荷是指电力系统中所有用电设备消耗功率的总和，它们又分为动力负荷、综合用电负荷、供电负荷和发电负荷。

(1) 动力负荷是包括异步电动机、电热炉、整流设备及照明等的负荷。

(2) 电力系统的综合用电负荷是指工业、农业、交通运输、市政生活等各方面消耗功率之和。

(3) 电力系统的供电负荷是指电力系统的综合用电负荷加上网损后的负荷。

(4) 电力系统的发电负荷是指供电负荷再加上发电厂厂用电负荷，即发电机应发出的功率。

2. 负荷曲线

负荷曲线是指某一段时间内负荷随时间变化的曲线。负荷曲线可按以下三种特征分类：

(1) 按负荷性质分为有功负荷曲线和无功负荷曲线。

(2) 按时间长短分为日负荷曲线和年负荷曲线。

(3) 按计量地点分为个别用户、电力线路、变电所、发电厂及整个电力系统的负荷曲线。

将上述三种特征分类结合起来，可以确立以下几种特定的负荷曲线：

(1) 日负荷曲线。图 1-4 (a) 表示某一地区电网的日负荷曲线，是该系统在一天 24h 内负荷变化的情况，图中 P 表示有功功率， Q 表示无功功率。

为了便于绘制和计算，日负荷曲线常绘制成阶梯形，见图 1-4 (b)。图中 P_{\max} 表示一天内的最大负荷， P_{\min} 表示一天内的最小负荷。把一天内各小时的负荷加起来再除以 24，则可得日平均负荷，记作 P_{av} 。

在电力系统的负荷曲线上，平均负荷 P_{av} 以上的负荷称为尖峰负荷或峰荷；最小负

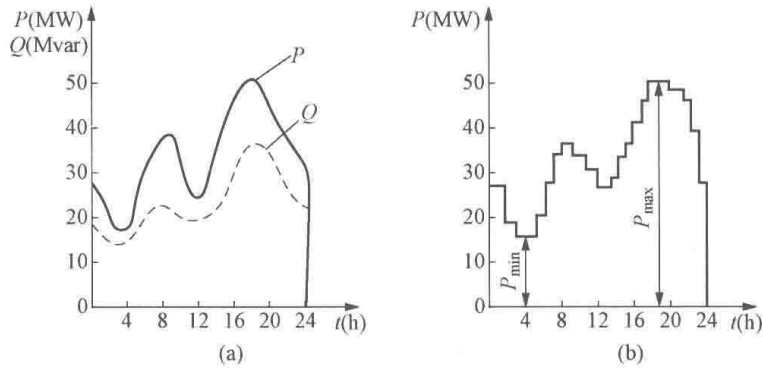


图 1-4 日负荷曲线

(a) 有功及无功日负荷曲线；(b) 阶梯形有功日负荷曲线

荷 P_{\min} 以下的负荷称为基本负荷或基荷；基荷与峰荷之间的部分称为腰荷。通常，表示负荷曲线特征的系数为日负荷率 δ

$$\delta(\text{日负荷率}) = \frac{P_{\text{av}}}{P_{\text{max}}} \times 100\% \quad (1-1)$$

日负荷率愈高，电能成本愈低，因此应努力提高日负荷率。我国日负荷率约为 85%~90%。日负荷曲线除了表示负荷在一日内各时间的变化外，还表示用户在一日内消耗的电能 W_d

$$W_d = \sum_{i=1}^{24} P_i \cdot \Delta t_i \quad (1-2)$$

或

$$W_d = \int_0^{24} P \cdot dt \quad (1-3)$$

很明显，这就是有功日负荷曲线与横轴所包围的面积。

(2) 年最大负荷曲线。把一年 12 个月中的最大负荷逐月画出，连成曲线，可得年最大负荷曲线，表示一年内电网最大负荷的变化规律。图 1-5 所示为某电力系统的年最大负荷曲线从图中可以看出，该系统夏秋季的最大负荷较小，可安排在该季节检修机组。

(3) 年持续负荷曲线。年持续负荷曲线是根据一年中负荷的大小及持续时间顺序排列组成的曲线，如图 1-6 所示。利用年持续负荷曲线，可以计算全年中电网所输送的或用户所使用的电能，即全年用电量 W_a 。

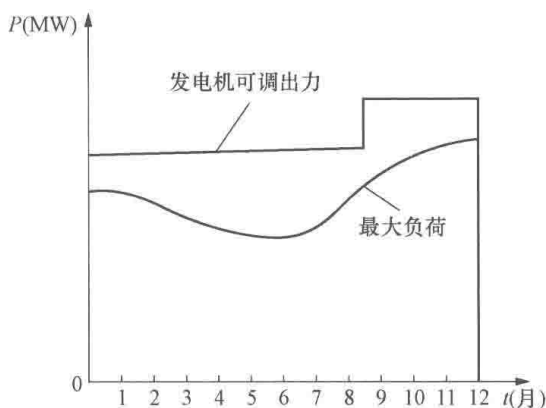


图 1-5 年最大负荷曲线

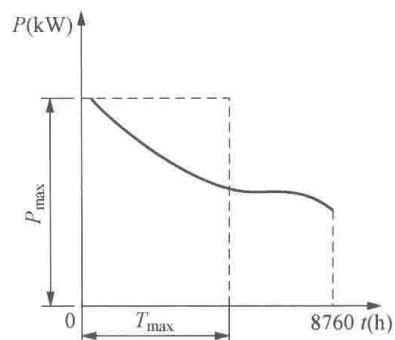


图 1-6 年持续负荷曲线

$$W_a = \sum_{i=1}^{8760} P_i \cdot \Delta t_i \quad (1-4)$$

或
$$W_a = \int_0^{8760} P \cdot dt \quad (1-5)$$

显然，年用电量的数值就是年持续负荷曲线与横轴 0 到 8760h 范围内所包围的面积。此外，年用电量也可以用年最大负荷 P_{\max} 与最大负荷利用小时数 T_{\max} 的乘积表示。

五、电力系统短路的基本概念

1. 短路的类型

电力系统的短路是指相与相或相与地（对中性点直接接地系统）之间通过如电弧等较小阻抗的非正常连接。三相系统中短路的基本类型及相应的代表符号为：三相短路—— $k^{(3)}$ ，故障率为 5%；两相短路—— $k^{(2)}$ ，故障率为 4%；单相接地短路—— $k^{(1)}$ ，故障率为 83%；两相接地短路—— $k^{(1,1)}$ ，故障率为 8%。其中三相短路属于对称短路（短路符号可省去），而其余的三种都属于不对称短路。如图 1-7 所示为各种短路的示意图。各种短路故障时和各参量可在其代表符号的右上角加一相应的短路符号表示。如单相短路电流 $I_k^{(1)}$ 、两相短路电压 $U_k^{(2)}$ 、三相短路功率 $S_k^{(3)}$ 等。

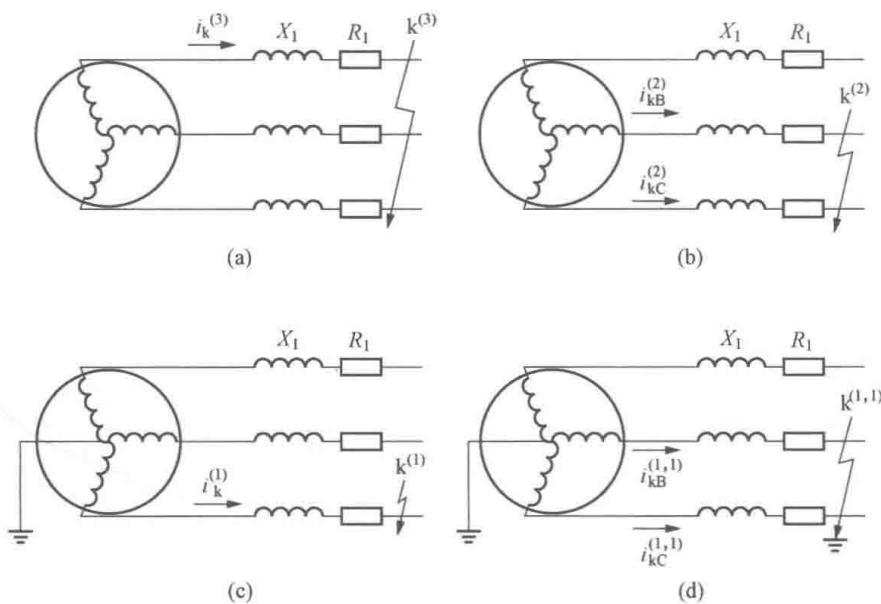


图 1-7 短路的基本类型

(a) 三相短路；(b) 两相短路；(c) 单相接地短路；(d) 两相接地短路

2. 短路的原因

电力系统发生短路的主要原因是载流部分的绝缘破坏，一般可分为下列几种情况：

- (1) 载流部分过热使绝缘破坏，绝缘材料陈旧老化、污秽或发生机械损伤等。
- (2) 未发现或未及时发现设备缺陷。
- (3) 输电线路断线或倒杆，使导线接地或相碰。
- (4) 工作人员误操作。



(5) 系统遭受某种过电压冲击, 致使某些性能变劣的绝缘部件被击穿。

(6) 动物跨接到裸露导体上, 或遭受刮风、下雨、雾露、冰雹、地震、雷击等自然灾害。

3. 短路电流波形

短路时的全电流是由周期分量 i_{kz} 和非周期分量 i_{kf} 组成。当电流过零瞬间发生短路时, 会使短路全电流最大, 其波形如图 1-8 所示。图中 i_k 为短路时全电流的瞬时值, i_{sh} 为短路冲击电流幅值, I_∞ 为稳态短路电流有效值, I'' 为非周期分量的起始值, $I'' = \sqrt{2} I_\infty$ 。当计算出由电源端到短路点的总阻抗 $|Z_{k\Sigma}|$ 后, 短路电流 I_∞ 、 i_{sh} 按下式计算:

$$I_\infty = \frac{U_{pj}}{\sqrt{3} |Z_{k\Sigma}|} \text{ (kA)} \quad (1-6)$$

$$i_{sh} = 2.55 I_\infty \text{ (kA)} \quad (1-7)$$

式中 U_{pj} ——网络的平均线电压, kV;

$|Z_{k\Sigma}|$ ——短路回路总阻抗, Ω 。

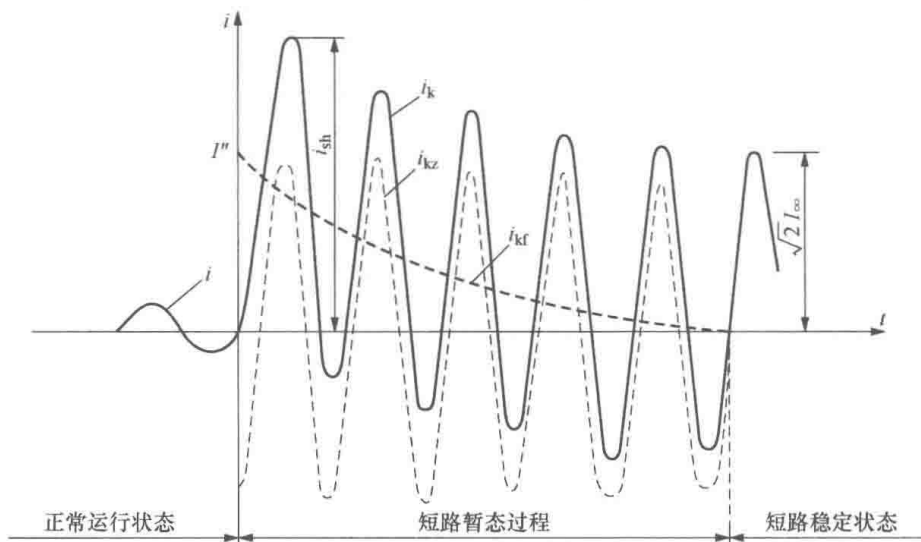


图 1-8 短路电流波形

4. 短路的危害

短路对电力系统造成的危害主要有以下几方面:

(1) 短路电流很大, 可能达到该回路额定电流的几倍到几十倍, 某些场合短路电流值可达几万甚至几十万安培。当巨大的短路电流经过导体时, 将使导体严重发热, 造成导体熔化和绝缘损坏。短路时往往有电弧产生, 高温电弧不仅可能烧坏故障元件本身, 也可能烧坏周围的设备。

(2) 巨大的短路冲击电流将产生很大的电动力作用于导体, 可能使导体变形或绝缘部件损坏。

如图 1-9 所示为两根平行导体间的电动力, 其力的大小可用下式计算

$$F = 2 \times 10^{-7} \frac{L}{a} i_1 \times i_2 K \quad (1-8)$$

式中 L ——两导体的长度, m;
 a ——两导体中心距离, m;
 i_1 、 i_2 ——为两导体中电流, A;
 K ——导线截面形状修正系数, 对于圆形和正方形截面导体, $K \approx 1$ 。

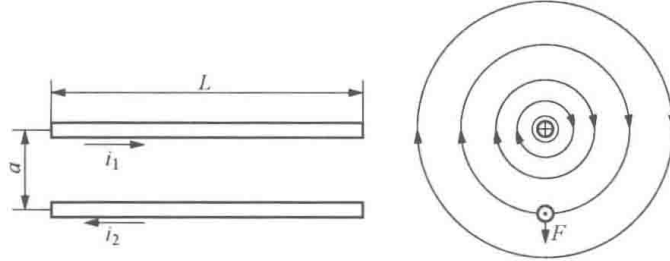


图 1-9 两平行细长载流导体间的电力

(3) 由于短路电流基本是感性电流, 它将产生较强的去磁性电枢反应, 使发电机端电压下降。同时短路电流流过线路、电抗器等元件时还会增大它们的电压损失, 因此短路所造成的另一个后果就是使电网电压降低, 愈靠近短路点处电压降低愈多。当供电地区的电压降低到额定电压的 60% 左右而又不能立即切除故障时, 就可能引起电压崩溃, 造成大面积停电。

(4) 短路时由于系统中功率分布的突然变化和电网电压的降低, 可能导致并列运行的同步发电机组之间稳定性被破坏。

(5) 巨大的短路电流将在周围空间产生很强的电磁场, 尤其是不对称短路所产生的不平衡交变磁场, 会对周围的通信网络、信号系统、晶闸管触发系统及控制系统产生干扰。

5. 减少短路危害的措施

(1) 防止短路的发生。通过提高电气设备的绝缘水平、限制各种过电压对电气设备的侵袭、加大绝缘距离、采用电缆供电或封闭母线供电、加强对绝缘部件的运行维护和减少误操作等措施, 尽可能降低发生短路的概率。

(2) 限制短路电流。例如在发电厂内采用分裂电抗器或分裂绕组变压器 (在短路时可增加回路电抗), 在短路电流较大的母线引出线上安装限流电抗器, 对大容量的机组采用单元制的发电机-变压器组接线方式, 在发电厂内将并列运行的母线解列, 在电力网中采用开环运行方式以及在电网间用直流联络线等, 可将短路电流限制在允许范围内。

(3) 正确选择电气设备。所选择的电气设备除满足正常的工作条件外, 还应保证在规定的短路条件下满足动稳定性 (承受短路电流机械效应的能力) 和热稳定性 (承受短路电流发热效应的能力) 的要求。

(4) 快速切除故障。在短路故障发生时, 由继电保护装置有选择性地尽快切除故障, 使短路造成的损失减小到最小。