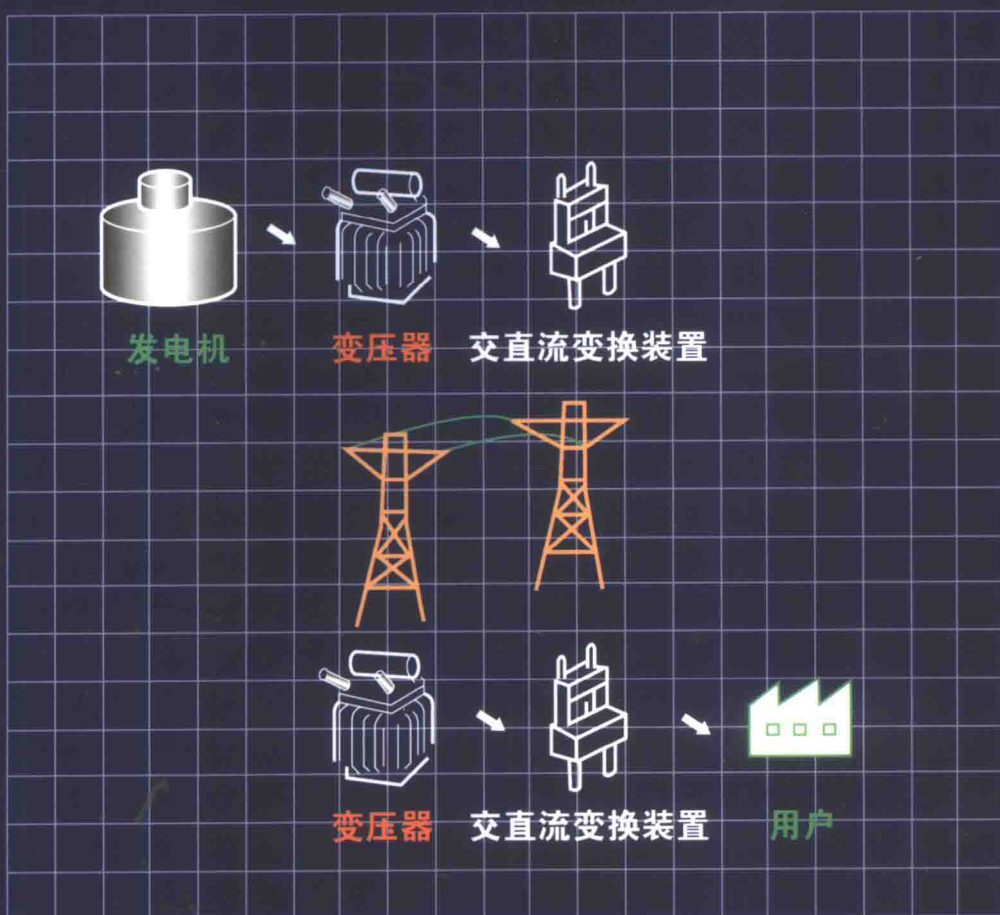


OHM 大学理工系列

电力系统工程

〔日〕大泽靖治 编著





电力系统工程

〔日〕 大泽靖治 编著
张建华 译

科学出版社

北 京

图字:01-2002-2260 号

Original Japanese language edition

Shinsedai Kougaku Series: Denryoku System Kougaku

By Yasuharu Osawa, Noriyuki Kimura, Shunji Kawamoto and Hiroyuki Tanaka

Copyright © 2000

Published by Ohmsha, Ltd.

This Chinese version published by Science Press, Beijing

Under license from Ohmsha, Ltd.

Copyright © 2002

All rights reserved

新世代工学シリーズ

電力システム工学

大澤靖治 オーム社 2001

图书在版编目(CIP)数据

电力系统工程/(日)大泽靖治编著;张建华译. —北京:科学出版社,2003

(OHM 大学理工系列)

ISBN 7-03 010876-0

I. 电… II. ①大…②张… III. 电力系统-理论 IV. TM71

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 070525 号

责任编辑 崔炳哲 樊友民 **责任制作** 魏 谨

责任印制 刘士平 **封面设计** 李 力

科 学 出 版 社 出版

北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社发行 各地新华书店经销

2003 年 2 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2003 年 2 月第一次印刷 印张: 8 1/4

印数: 1—5 000 字数: 115 000

定 价: 16.50 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

丛书序

主编 樱井良文

现在,很多大学正在进行院系调整以及学科、专业的重组,以研究生培养为重点,引入学期制,采用新的课程体系授课,特别是由于学期制教学计划的引入,使得原来分册编写的教材很难在一个学期的教学中消化。因此,各学校对“易教”、“易学”教材的需求越来越迫切。

本系列是面向通信、信息,电子、材料,电力、能源,以及系统、控制等多学科领域的新型教学参考系列。系列中的各册均由活跃在相应学科领域第一线的教授任主编,由年轻有为的学者执笔,内容丰富、精炼,有利于对学科基础的理解。设计版面时着意为学生留出了写笔记的空间,是一种可以兼作笔记,风格别致的教学参考书。

希望肩负新世纪工程技术领域发展重任的青年读者们,通过本教程系列的学习,建立扎实的学科基础,在实践中充分发挥自己的应用能力。

OHM 大学理工系列编辑委员会

主 编

樱井良文 大阪大学名誉教授

副主编

西川祐一 大阪工业大学校长
京都大学名誉教授

编委(按姓氏笔画排)

广濑全孝	产业技术综合研究所 下一代半导体研究中心主任	井口征士	大阪大学教授
木村磐根	大阪工业大学教授 京都大学名誉教授	仁田旦三	东京大学教授
白井良明	大阪大学教授	西原 浩	福井工业大学教授 大阪大学名誉教授
池田克夫	大阪工业大学教授 京都大学名誉教授	滨川圭弘	立命馆大学教授 大阪大学名誉教授

前言

电力系统历史悠久,人们往往会认为作为一个系统,它已很完备,没有特别值得研究的问题,也没有必要增加新的内容。但是,随着电力领域新技术和新的控制方法的产生和发展,人们正致力于将这些新的技术和方法应用于电力系统。例如,采用电力电子设备进行的电力系统调节、模糊理论、神经网络、遗传算法等知识工程方法的应用,超导限流器、超导储能等超导电力设备在电力系统调节中的应用等。电力系统在采用这些新技术的同时不断发展。

日本的供电事业可以说现在正处于一个动荡期,此前的供电由各地区的电力公司垄断,随着供电制度的放宽,首先批准了 IPP (私营独立电力开发商)向电力公司“批发”电力。大约从一年前开始,对大用户的零售也自由了,除原来的电力公司以外,其它企业也逐渐参与到电力事业中来。随之而来,以往电力公司独自运行和调节的电力系统逐渐出现了新课题。例如,新的电力供给企业在发电地点想为特定用户供电时,该使用哪一个电力公司的输电线路送电等问题。

针对上述电力系统的现状,为了更好地采取相应对策,必须努力学习和掌握电力系统的基本特性及运行、控制等基础知识,打好基础是非常重要的。

本书作者对近期已经引入或准备引入到电力系统中的新技术,不予过多说明。各位作者着眼于基础知识,特别是从与电能传输工程(电力传输工程、供电工程)对比的角度,从系统的各个侧面进行了通俗易懂的说明。在第 2 章的电力潮流计算方法中,重点讲述了例题计算,力图使内容变得更易理解。在第 3 章稳定度研究中,从稳定性的基础知识到能量函数法,都进行了易于理解的讲述。第 4 章讲述了频率调整与电压调整,以电力公司多年实际运行、调节、研究电力系统的经验为主,进行了简要的说明。第 5 章介绍可靠度,第 6 章介绍经济运行,其中都列举了一些例子,以利于读者对基础知识的理解。

为更好地理解本书内容,需要有相当于大学二年级程度的数学基础,以及与电力设备及能量传输有关的基础知识。这样,就能够在本书的学习中,很好地掌握电力系统的相关基础知识。如果通过本书的学习,能够对供电有进一步的理解,对电力系统有切身感受的话,我们就甚感欣慰。

最后,对提议出版本书,并对本书的组成及内容提出有益见解的编辑仁田旦三先生(东京大学),以及给与作者鼓励和鞭策,使本书得以出版的欧姆社的各位相关人士致以深深的谢意。

大泽靖治

目 录

第 1 章 电力系统的特征及工程项目	1
1.1 电力系统的定义	1
1.2 电力系统的特征	2
1.3 系统连接的意义	5
1.4 电力系统工程中的问题	7
练习题	8
第 2 章 电力潮流计算方法	9
2.1 回路方程式和功率方程式	9
2.2 电力潮流计算的准备	13
2.2.1 潮流计算的前提条件	14
2.2.2 潮流计算所需的数据	14
2.2.3 输电线的分类及其等效电路	14
2.2.4 用标么值法表示电压、电流、 功率	16
2.3 潮流计算的方法	19
2.4 潮流计算的深入	28
2.4.1 复数电压表示法	28
2.4.2 简易修正方程式	28
2.4.3 分离法	29
2.4.4 稀疏矩阵的处理	29
练习题	30
第 3 章 稳定度研究	31
3.1 稳定度	31
3.1.1 稳定度的分类	32
3.1.2 单机无限大母线系统	33
3.2 静态稳定度	35
3.2.1 摇摆方程式	36
3.2.2 特征值法	39

3.3	暂态稳定度的定义	40
3.3.1	等面积法	40
3.3.2	能量函数法	43
3.4	稳定度的提高	45
3.4.1	电压稳定度	46
3.4.2	提高电压稳定度的措施	47
练习题		49
第4章	频率和电压调整	51
4.1	电力系统的调整目的	51
4.1.1	电力系统的调整目的	51
4.1.2	频率调整和电压调整的基础	52
4.2	频率调整	53
4.2.1	电力系统的频率	53
4.2.2	频率变动的原因	54
4.2.3	频率调整的必要性	55
4.2.4	频率管理的基准	56
4.2.5	频率调整的设计	56
4.2.6	频率调整系统的原理	59
4.3	电压的调整方法	64
4.3.1	电力系统的电压特性	64
4.3.2	电压变动的主要原因	67
4.3.3	电压调整的必要性	68
4.3.4	电压管理的标准	68
4.3.5	电压调整的有关见解	69
4.3.6	电压调整系统的原理	70
练习题		73
第5章	可靠度	75
5.1	可靠度	75
5.2	电力系统的可靠度	78
5.2.1	供电可靠度	79
5.2.2	系统可靠度	80
5.3	可靠度计算	83
5.3.1	串联系统	83
5.3.2	并联系统	85

5.4 可靠度的提高	86
练习题	88
第 6 章 电力系统的经济运行	89
6.1 发电站特性	89
6.1.1 火力发电站的特性	89
6.1.2 水力发电站的特性	90
6.2 输电损失方程式	91
6.3 火力发电的经济运行	92
6.3.1 忽略输电损失的情况	92
6.3.2 考虑输电损失的情况	94
6.4 并联发电机的确定方法	94
6.4.1 按优先顺序确定并联发电机	95
6.4.2 火力发电机的启动停止问题	96
6.5 水力、火力系统的经济运行	96
练习题	100
练习题简答	103
参考文献	117

第 1 章

电力系统的特征 及工程项目

电力系统可以说是人类构筑的系统中最大的系统之一。本章作为全书的开始部分,对电力系统是怎样的一个系统,它的特征、构成,以及电力系统工程中涉及的课题,进行概要介绍。

1.1 电力系统的定义

何为电力系统,它的定义有很多种。例如,可以认为它是“为了实现某种目的,由多个单元设备构成的集合体,通过构成单元设备间的协调和竞争,作为一个集合体来表现各构成元素的固有性质及其它特性与特征。”还可以说,电力系统工程学是借助计算机的作用,将具有这种性质的系统模型,进行适当的分析、规划、设计、应用等的一门技术。

电力系统是以产生、转换、输送电力(电能),并把它分配给用户为目的而组成的系统。更具体地说,电力系统的目的是供给用户这样的电力:①良好的电力质量(电压、频率恒定,高次谐波少的电力),②持续供电,③便宜,④对环境影响小。与发电工程学和输电工程学中所介绍的相同,电力系统的组成部分也有发电机、变压器、输电线、断路器、配电线等。

图 1.1 表示电力系统的基本概貌。发电站有核电站、火力发电厂、水力发电站(包括抽水蓄能电站)、燃气轮机发电站等。输电线大致可分为架空和地埋两种。此外,为了转换输电线电压把电配送到各地,还设有变电站和配电站。还有,在输电线末端通过配电线路(和输电线路一样可分为架空配电线和地埋配电线两种)连接到发动机和发热、照明等各种负荷(用户)上。

在电力系统工程中不仅可按功能把以上所说的电力系统分为发电、输电、变电、配电,还可以按负荷硬件的不同分为发电机、变压器、输电线、断路器、配电线等,也可以作为一个系统来进行规划、运行(调节)、分析等。

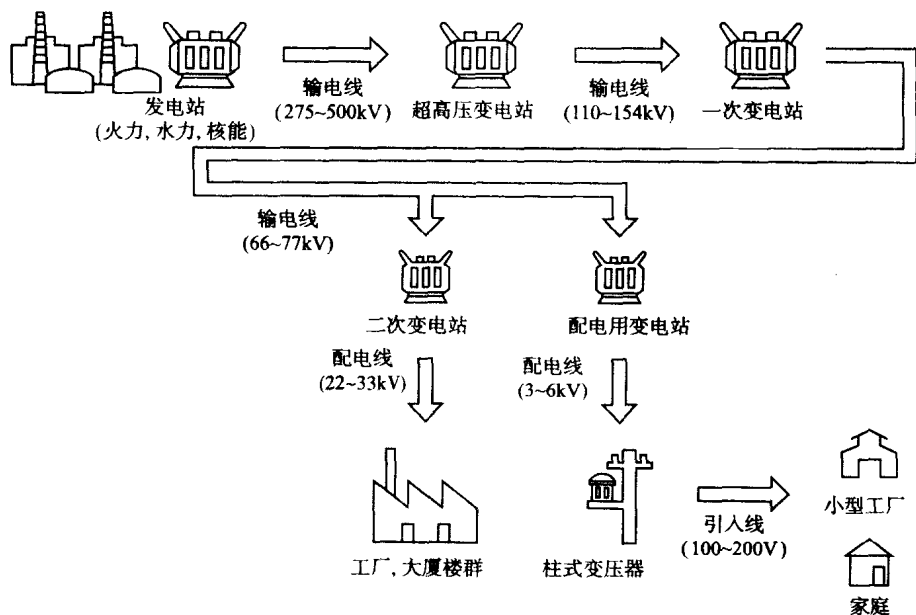


图 1.1 电力系统的构成

1.2 电力系统的特征

电能和化学能、核能等其它形态的能量相比,具有以下特征:

(1) **是二次能量** 电力在自然界不能直接以其可以利用的形式存在,它必须从一次能量(水力、煤、石油、液化天然气(LNG)的化石燃料、核能等)转换而来。这种转换的效率,除了水力发电以外都不太高。

(2) **储存困难** 电能不能以其自身的形式储存,为了储存必须转换成位能(抽水蓄能发电)、动能(飞轮)、化学能(蓄电池)等其它形式。为了储存电能,人们正在进行各种储存方式的研究,但是很难做到储存效率高、成本低。

(3) **安全、清洁,能够很容易地转换为其它各种形态的能量** 由于这种特征,电在当今社会中的需求量越来越大。不只是电的消耗量增

加,在全部能量消耗中电的消耗比率(电力化比率)也在增加。

根据以上电能的特征,电力的供应具有以下特性:

(1) 与煤气及自来水不同,电能储存困难,而且电力供应要调节电力需求(负荷),为满足需求对系统进行干预,这比较困难。因此,从事系统运行的技术人员必须一边维持规定的电压和频率一边调节发电输出使之与负荷相匹配。与此有关的内容在第四章学习。

(2) 由于电力需求正在持续增长,所以电力系统也随之不断扩展。例如,它不像化工厂那样抛弃陈旧的设备,建设一个全新的工厂(设备更新),电力系统是以不断地在原有系统上增加新设备来扩展的。

(3) 可利用的能源不是局限在电力需求的地点附近。通常,水力资源往往存在于距负荷中心(大量需求的地点)很远的地方,输电线路很长。煤矿燃料的产地也远离电力需求地点,这种情况下是先在燃料产地发电再送到需求地点,还是采取什么方法把燃料送到距需求地点近的地方来发电,应当从经济方面和环境方面考虑作出决断。

电力输送的历史和日本的供电现状

最早是采用直流方式进行输电的。例如,爱迪生创立的电灯公司,是从孟洛花园实验室(纽约)发电站的柴油机驱动直流发电机给爱迪生发明的电灯供电的,同时用爱迪生发明的功率表来测量它的用电量。当时的输电线路只是相当于现在配电线路。但是开始水力发电后,需要进行几十公里以上的远距离输电,这就需要进行高压转换。利用变压器很容易进行电压升降的原理,代之以交流输电。现在,1 000 公里以上的架空输电和 50 公里以上的海底电缆输电等超长距离输电中,为了降低建设成本和解决稳定性问题,采用直流输电方法,即把交流转换为直流来进行输电,再在受电地点把直流转换为交流。

日本电力供应事业,全国分十个地区,每一个地区从发电、输电到配电一直由本地区的电力公司垄断经营,这种方式一直持续了四十多年(参见图 1.2)。

日本的电力系统分别由各自相连的东部地区的 50Hz 系统(东京电力、东北电力、北海道电力)和西部地区的 60Hz 系统(中部电力、北陆电力、关西电力、中国电力、四国电力、九州电力)两种频率的子系统组成,两个子系统通过佐久间、新信浓、东清水的三个频率转换站以直流方式相连。此外,本州和北海道及关西和四国之间是采用直流输电方式相连接的。

但是,从1995年开始批准了以对电力公司批发为目的发电事业,私营独立电力开发商(IPP)逐渐参与到发电中来。尤其从2000年开始对大的电力需求用户的零售也自由了。这样,可以从已有的电力公司以外的电力供应公司购电(只是输电线和配电线要使用已有的电力公司的设施,要支付给这些电力公司使用费。)

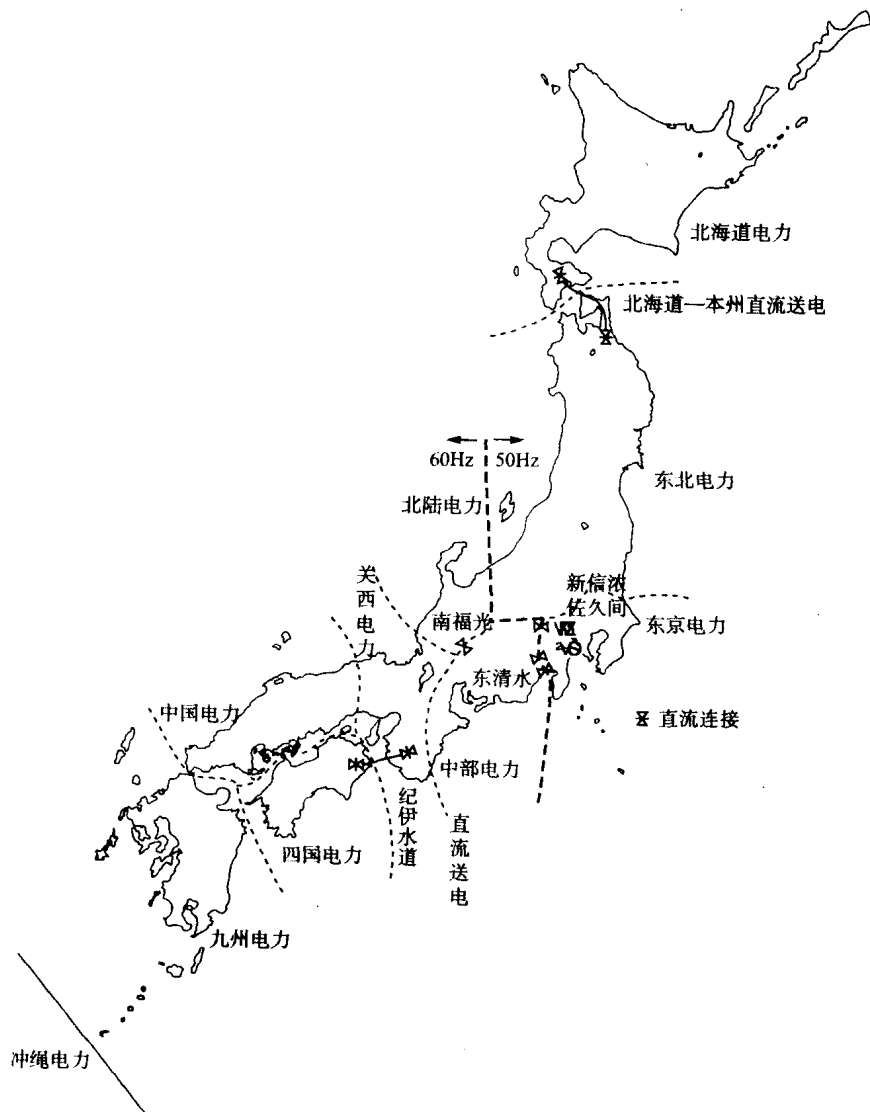


图 1.2 日本的电力系统和直流连接

1.3 系统连接的意义

日本的电力系统,除冲绳以外其它的九个电力系统已全部连接起来。欧洲也进行了系统的跨国连接。系统连接的优点可以概括为提高了供电可靠性与经济性两个方面:

(1) **供电可靠性** 发电站和输电线出现故障时,能够得到其它系统的支援。

(2) **经济性** 负荷的变化可以相互抵消,减少了供电的备用容量,可以按经济规模来采用单机容量大的机组以节约固定资产费用,减少瞬间波动的备用容量,可以大范围地进行负荷经济分配从而节约了燃料消耗费用和运行费用等。

纵观电力网的历史,它是由简单系统(参见图 1.3、图 1.4)、低压连接系统(参见图 1.5)、超高压连接系统(参见图 1.6)阶段性地发展起来的。如果从上述供电的可靠性和经济性方面来看,简单系统中发电机产生的电和负荷的需求必须是一对一平衡的,一旦由于某种原因而导致发电机脱落,或是负荷过大而导致停电事故,必须采取对策。

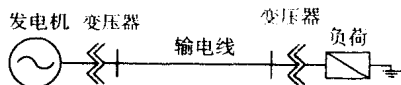


图 1.3 简单系统构成

如果每一个系统都有备用容量(参见图 1.4),那么就会加大设备的投资,导致发电成本的提高。如果在负荷端把各个单一系统连接起来,只需要很小的备用容量就可以满足系统的需要,能够提高常用设备的运行效率。例如,在图 1.5 和图 1.6 的系统 1 中即使负荷过大,如果系统 2 中有富裕容量,通过连接线,可以把 2 号发电机的电输送给负荷 1。

系统这样连接的好处很大,但是如果用低压电连接,连接线上很难流过很大的电功率。现在的电力系统中为了能够把大多数的发电机相互连接,必须在连接线上流过很大的电功率。为此在连接线上的电压采用超高压(275kV, 500kV)可以确保系统的稳定性(在第 3 章详细介绍)。

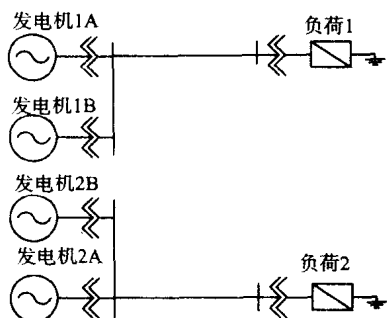


图 1.4 非连接的简单系统具有备用量的情况

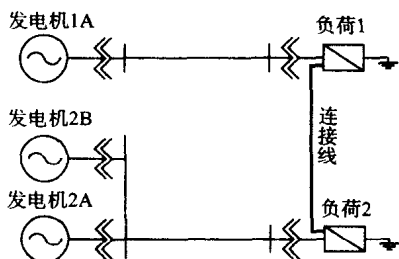


图 1.5 低压连接系统构成(通过连接减少备用量)

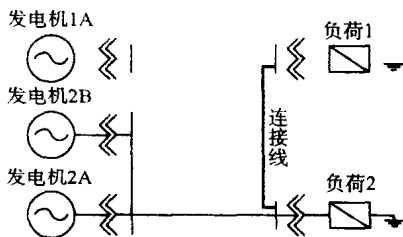


图 1.6 超高压系统连接的系统构成(通过连接减少备用量)

系统连接有优点的同时,也有如下缺点:

- (1) 短路容量(出现短路事故时的故障电流)增大;
- (2) 事故会波及到连接在一起的相邻系统。

由于系统连接产生的短路容量的增大,可以从以下几个方面进行说明。

如果在图 1.7 中的负荷 1 的附近发生三相短路事故(指三相电压都变成零这种事故),流过负荷 1 这一侧的线路事故电流是从发电机 1 和发电机 2 流出电流的总和。作为独立系统时,产生事

故时的电流是从发电机 1 流入,系统连接以后,增加了来自发电机 2 这部分的电流。现在交流断路器的性能只能达 63kA 的切断能力(切断电流的能力),短路容量超过这个值的情况下不能进行系统连接。

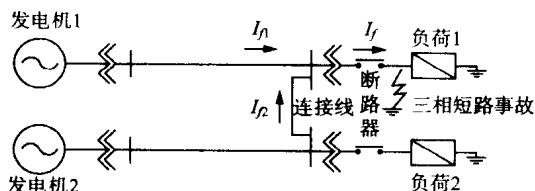


图 1.7 短路容易增大的原理

解决系统连接中产生的短路容量问题,强有力的方法就是不用交流,而用直流连接。直流连接是用可控硅整流器把交流电转换成直流电,最后再用可控硅整流器转换为交流电。可控硅整流器能够非常快速地控制电流,能够比断路器更快地抑制事故电流,这样,使系统的连接不增加短路容量。但是,可控硅整流器本身是电力设备,价格很高,所以它仅用于没有其它方法可以取代的情况。

1.4 电力系统工程中的问题

电力系统如何经济地以足够的可靠度完成前述任务,实现系统本来的目的,是电力系统工程课题。它大致可以分为与系统开发扩展规划有关的各种问题和系统的运行调节问题,以及从底层支撑这些的系统分析三部分(参见图 1.8)。运行和调节有相似之处,但是运行在时间上更强调长期,调节则是以较短时间内的事情和现象为研究对象。



图 1.8 电力系统工程项目分类

与开发扩展规划相关的课题,包括负荷需求预测,供电可靠度,发电设备的扩充和发电规划,电力系统的构成和输配电设备的扩充,电力系统的连接等问题。运行调节包括水力火力发电系统的经济运行,火力发电站的起动和停止,电力系统的连接,频率、电压调节等重要课题。系统分析包括时间域的暂态浪涌分析、高次谐波分析、轴的扭振、暂态稳定性、静态稳定性(长时间内的动特性)、电压稳定性与电力潮流计算等。从时间考虑,并受本书篇幅所限制,我们不可能在这里学习上述的全部内容。

在本书中,主要学习上述课题中其计算方法和分析方法,作为其它领域也适用的问题,主要有供电可靠性、系统的经济运行、起动停止问题、频率电压调节、稳定性分析与电力潮流计算等。

续习题

1. 说明系统连接的优点和缺点。
2. 说明采用直流方式进行系统连接的理由。