



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
21 世纪电力系统及其自动化规划教材

电力系统工程基础

韩学山 张文 主编



TM7/52

2008

普通高等教育“十一五”国家级规划教材
21 世纪电力系统及其自动化规划教材

电力系统工程基础

主编 韩学山 张 文

参编 车仁飞 李清泉 王 勇

主审 刘玉田 谭震宇

机械工业出版社

本书为普通高等教育“十一五”国家规划教材。本书分5篇系统篇、高压篇、设备篇、保护篇和控制篇，共16章。系统篇主要讨论电力系统及其组成，电磁、机电物理过程，电力系统潮流、短路、稳定等概念及其解算方法；高压篇主要介绍传输线的波过程，介质特性，雷电、操作过电压的形成及保护；设备篇分析电力系统中各设备耐受电、热、动限制的能力及设计、运行中应该遵循的原则；保护篇介绍电力系统运行中异常行为的发现和差异性寻求，以及各类保护的原理；控制篇统筹电力系统运行电压、频率的控制及可靠性、安全性、经济性协调的基本概念，以及电力系统实施自动化、电能质量等基本知识。

本书可作为高等学校“电气工程及其自动化”及“电力工程与管理”专业的教学用书，也可供电气工程技术人員参考。

本书配有电子课件，欢迎选用作教材的老师索取。

索取邮箱：Edmond Yan@sina.com

Edmond Yan@hotmail.com

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统工程基础/韩学山，张文主编. —北京：机械工业出版社，2008.1

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 21世纪电力系统及其自动化规划教材

ISBN 978-7-111-22832-5

I. 电... II. ①韩... ②张... III. 电力系统—电力工程—高等学校—教材 IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 177664 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 责任校对：申春香

封面设计：王伟光 责任印制：杨 曦

北京机工印刷厂印刷 (北京双新装订有限公司装订)

2008 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 20.75 印张 · 515 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-22832-5

定价：32.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换
销售服务热线电话：(010) 68326294

购书热线电话：(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话：(010) 88379725

封面无防伪标均为盗版

前 言

《电力系统工程基础》是为宽口径的“电气工程及其自动化”及“电力工程与管理”专业编写的一部专业基础教材，相应课程是在学习电路、电机学、电子技术等基础知识后的一门大型专业平台课。

本书的基本内容可叙述如下：一是学习电力系统分析的理论基础，此部分力求回答“等效的电力网络是如何形成的”，“雷电、操作过电压是如何形成的”，“电磁、机电物理过程是怎样的”，“电力系统潮流的概念及如何解算”，“设备的热效应、动效应、电弧等是如何产生的”等基本问题；二是领会电力系统中各设备耐受电、热、动限制的能力及设计、运行中应该遵循的原则，此部分力求回答“正常状况下电器设备应该遵循什么原则”，“非正常状况下又该遵循什么原则”等基本问题；三是建立电力系统设计、运行、控制及保护决策的整体概念，此部分力求回答电力系统设计及运行调度、控制中的基本问题，如正常电力系统的频率特性、电压特性及调度的准则，电力系统运行中异常行为的发现及差异性寻求及各类保护的原理，统筹电力系统运行可靠性、安全性、经济性的基本思想，以及电力系统实施自动化运行的基本认识。

总之，本书力图将电力系统的理论分析，电力系统受主观、客观影响的性能分析，电力系统设计、运行中的工程分析融为一体，完全是一种新的尝试。

全书分5篇：系统篇、高压篇、设备篇、保护篇和控制篇，共16章。其中第1~5章由车仁飞编写，第6~8章由李清泉编写，第9~11章由王勇编写，第12~14章由张文编写，第15、16章由韩学山编写。韩学山教授、张文副教授担任主编，对本书进行全面统筹和修改。

刘玉田教授、谭震宇教授担任主审，对本书进行了全面仔细的审阅，并提出许多宝贵的意见，在此谨表示衷心的感谢！

本书在编写过程中得到了兄弟院校的大力支持和帮助，参阅了相关书籍和文献，在此谨表示衷心的感谢！

由于编写时间仓促，错误和不足之处在所难免，恳切希望使用此书的读者提出意见。

编 者

目 录

前言

系 统 篇

第 1 章 绪论	1	3.3 电力系统潮流的计算机算法	42
1.1 电力系统的形成和发展	1	思考题	59
1.2 电力系统的组成	2	第 4 章 电力系统短路及非全相	
1.3 中国电力系统的概况	3	运行分析	60
1.4 交流系统的中性点运行方式	4	4.1 由无限大容量电源供电的三相	
1.5 高压直流输电的基本概念	4	短路的分析与计算	60
1.6 电力系统工程基础的内容	6	4.2 同步发电机三相短路分析	63
思考题	6	4.3 电力系统不对称故障的分析与	
第 2 章 电力系统各元件的数学模型	7	计算	66
2.1 同步发电机的数学模型	7	思考题	81
2.2 变压器的数学模型	9	第 5 章 简单电力系统静态与暂态	
2.3 电力线路的数学模型	16	稳定分析	82
2.4 电力负荷的数学模型	24	5.1 电力系统稳定性的基本概念	82
思考题	24	5.2 电力系统静态稳定	83
第 3 章 电力系统潮流分析	25	5.3 电力系统暂态稳定	86
3.1 电力网络等效电路	25	思考题	94
3.2 简单电力系统潮流的分析方法	34		

高 压 篇

第 6 章 传输线的波过程	95	第 7 章 高电压绝缘与试验	103
6.1 引言	95	7.1 气体放电的基本理论	103
6.2 单相均匀无损线路上的波过程	95	7.2 电介质的击穿特性	112
6.3 波动方程解的物理意义——前行		7.3 电气设备的试验	122
波和反行波	97	思考题	136
6.4 波的折射和反射	98	第 8 章 电力系统过电压及保护	137
6.5 集中参数等效电路	100	8.1 雷电过电压及防雷保护	137
6.6 通过串联电感或并联电容时的波		8.2 内部过电压	142
过程	100	8.3 工频电压升高	149
思考题	102	思考题	157

设 备 篇

第 9 章 高压电器的原理	158	10.2 电气主接线的基本形式	214
9.1 电力开关的开断及电弧现象	158	思考题	222
9.2 高压断路器	162	第 11 章 高压电器的选择	223
9.3 隔离开关	178	11.1 概述	223
9.4 其他开关电器	182	11.2 导体的发热	225
9.5 互感器	187	11.3 导体短路电动力	228
9.6 SF ₆ 全封闭组合电器	208	11.4 导体、绝缘子和套管的选择	229
思考题	212	11.5 高压断路器、隔离开关的选择	232
第 10 章 电气主接线及其特点	213	11.6 高压互感器的选择	233
10.1 对电气主接线的基本要求	213	思考题	237

保 护 篇

第 12 章 继电保护的基本原理	238	保护	245
12.1 故障与不正常状态及其后果	238	13.2 相间短路的方向性电流保护	256
12.2 继电保护的作用	238	13.3 电网的接地保护	259
12.3 继电保护的基本原理及保护装置 的组成	239	13.4 电网的距离保护	262
12.4 对电力系统继电保护的基本要求	241	思考题	265
12.5 继电保护技术的发展概况	243	第 14 章 其他元件的继电保护	267
思考题	244	14.1 变压器的故障类型、不正常运行 状态及其相应的保护方式	267
第 13 章 输电线路的继电保护	245	14.2 变压器的纵差动保护	268
13.1 单侧电源网络相间短路的电流		思考题	274

控 制 篇

第 15 章 电力系统的运行与控制	275	可靠性	310
15.1 电力系统运行的安全性	275	16.1 电能质量标准	310
15.2 电力系统的有功与频率控制	277	16.2 电力系统可靠性及其评估	314
15.3 电力系统的电压控制	284	16.3 电网区域间的传输能力及其评估	318
15.4 电力系统的优化调度	293	16.4 可靠性及其技术经济评价	320
15.5 电力系统运行的自动化	304	思考题	324
思考题	309	参考文献	325
第 16 章 电力系统电能质量与可			

系 统 篇

第 1 章 绪 论

1.1 电力系统的形成和发展

1831 年法拉第发现了电磁感应定律之后,很快出现了最原始的交流发电机、直流发电机和直流电动机,奇妙的电能生产与使用出现在人们面前。尽管当时是几百伏特的低压直流电,不可能大范围内进行电能的传输与使用,但毕竟开辟了人类发展的新纪元。

1882 年,法国的 M·德普勒将位于米斯巴赫煤矿的蒸汽机驱动的发电机发出的电能输送到了 57km 外的慕尼黑,并用以驱动水泵,此时电压提升到直流千伏级,输送功率达 1.5kW 左右。这个输电系统虽然规模很小,却是世界上第一个电力系统。

随着生产的发展,对传输功率和输送距离提出了更高的要求,特别是为了提高输电效率,需要采用更高的输电电压,以便减少线路流过的电流,从而降低线路电阻中的损耗,但是从用电设备来说为了安全又不得不采用较低的电压,而直流输电当时却不能满足这种要求。改变这一状况是 1885 年实现的变压器制造技术,开始了单相交流输电。1891 年又实现了三相变压器和三相异步电动机的制造技术,开始了三相交流输电。同年,在法兰克福举行的国际电工技术展览会上,德国的奥斯卡·冯·密勒向人们展现了始于劳芬镇止于法兰克福、输电线路全长 178 km 的电力系统。设在劳芬镇的水轮发电机组,视在功率 230kV·A,电压为 95V,转速为 150r/min;升压变压器将机组端电压升高至 25000V,采用直径为 4mm 的铜线输送功率;在法兰克福,采用两台降压变压器将电压降至 112V,其中一台变压器供电给白炽灯,另一台给异步电动机以驱动一台功率为 75W 的水泵。显然,这已是近代电力系统的雏形,它的建成标志着电力系统发展取得了重大突破。随后,三相交流制的优越性很快显示出来,使运用三相交流制的发电厂迅速发展,而直流制由于技术条件限制不久便被淘汰。再稍后,汽轮发电机组又取代了以蒸汽机为原动机的发电机组,发电厂之间出现了并列运行,输电电压、输送距离和输送功率不断增大。

如今,电力系统不仅在输电电压、输送距离和输送功率等方面有了千百倍的增长,而且在电源构成、负荷成分等方面也有很大变化。系统中不仅有燃烧煤、石油、天然气等利用化学能的火电厂,利用水能的水电厂,利用核能的核电厂,也有利用太阳能、风能、潮汐能、地下热能等的若干发电厂。在负荷成分方面,不仅有电动机、电灯,还有占相当比重的电热、整流装置以及现代电器等。电力系统在其运行管理上也实现了高度自动化,不仅组成电力系统的各环节都配备有数字化的测量、保护、控制装置,而且配有用以管理全系统运行的数字计算机系统,具有持续不断监视、控制电力系统的功能。

当前世界上输电线路的输电电压已超过 1000kV，输送距离已超过 1000km，输送功率已超过 5000MW。为彻底解决同步发电机并列运行的稳定性问题，进一步提高输送能力，电力电子技术的诞生使直流输电又重新被启用。但今日的直流输电，输电电压已超过 $\pm 600\text{kV}$ ，输送距离已超过 1000km，输送功率已超过 3000MW。

1.2 电力系统的组成

构成电力系统有 4 个最基本的要素，即发电厂、输电网、配电网和用户，图 1-1 给出了相应的示意图。

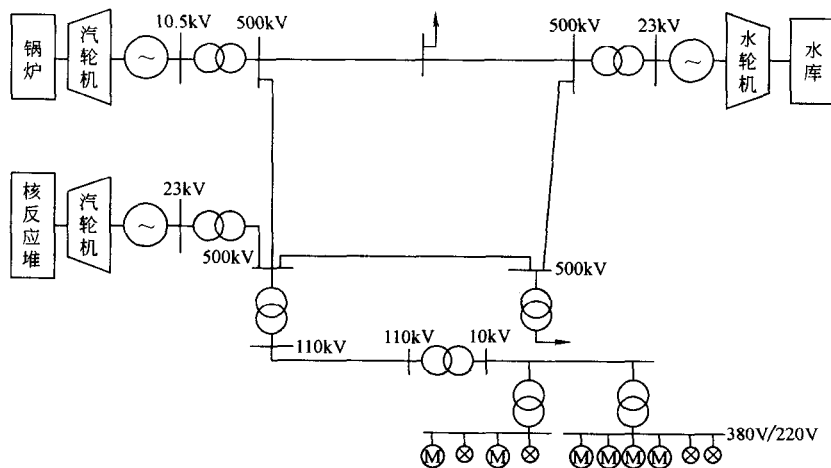


图 1-1 电力系统示意图

所谓发电厂就是把其他形式的能转变为电能的工厂。如今在电力系统中运行的发电厂主要是：以煤、石油和天然气等作为燃料驱动的火电厂；以水能驱动的水电厂；以核能驱动的核电厂。另外就是利用可再生能源驱动的发电厂，如风能、太阳能、地热和潮汐能等驱动的发电厂。再就是目前兴起的分布式发电技术（DG），即微型发电技术，此技术的兴起，对生态平衡、环境保护、资源的优化配置有着重要的价值，也许这是一次对发电技术的挑战和电力系统的又一次革命性的变化。

所谓输电网就是将无法就地使用的电能通过变压器升高电压的形式向负荷中心传输。不同类型的发电厂通过升高电压并入不同层次的网络，如 110kV、220kV、330kV、500kV、750kV、1000 kV 的输电网，达到所有发电机并列运行的目的。输电网的构成视需要输送功率的大小以及输送距离的远近，有不同的电压等级，因此输电网中变压器不仅有升压的作用，也有联络的作用。在发电厂远离负荷中心而且需要集中传输大量功率的情况下，选用高压直流输电更为合适，因此目前许多的输电网是交流与直流混合的。

所谓配电网是将来自输电网络的电能经变压器降压后经过不同的电压等级达到与不同层次负荷连接的目的，如 220kV、110kV、35kV、10kV、6kV、380V/220V 等的配电网。配电网的构成视用户的层次不同而对应不同的电压等级，因此配电网中变压器不仅有降压的

作用，也有联络的作用。

所谓用户即为直接接受电能并加以利用的单位或个人，电力系统的用户十分广泛，如工业、农业、交通运输等国民经济各个部门和日常生活，而用电的电器种类就更多了，如白炽灯、电动机、电热器、整流器和电弧炉等，如今可能我们想做的任何事情与电无关是罕见的。

因此，所谓电力系统就是发电、输电、配电及用电所构成的整体。其实发电厂和用户中包括大量的动力机械，所以电力系统也可称为动力系统。而一般把输电和配电构成的电能转换载体称为电力网。

1.3 中国电力系统的概况

中国的发电资源是丰富的，其中水力资源的蕴藏量达 676GW，居世界首位，其中可利用的资源约为 378GW，主要集中在西南和西北，包括长江、金沙江、澜沧江、怒江和红河的中上游以及黄河的上游；煤的预测量约为 4500Mt，其中 90% 集中在陕西、山西及内蒙；可利用的风力资源分布在东南沿海、新疆、甘肃及东北，约为 160GW。这些为中国电力工业的发展提供了基本保证。

早在 1882 年，上海建立了第一个发电厂，但直到 1949 年，全国的总装机容量仅有 1850MW，年发电量为 $4.3\text{TW} \cdot \text{h}$ 。解放后，全国总装机容量和年发电量的增长迅速，到 2001 年底的装机容量达 338610MW，年发电量完成 $1483.9\text{TW} \cdot \text{h}$ ，分别是 1949 年的 184 倍和 345 倍，自 1996 年起稳居世界第二位。

我国在电力系统的发展规模方面，大体可以分为 5 个阶段：20 世纪 50 年代为城市电网发展阶段，60 年代逐渐形成以省为单位的电力系统（省网），1970 ~ 1990 年为区域电力系统发展阶段，90 年代以后为区域电网之间的互联阶段并将逐步形成全国统一电网。截至 1998 年，全国有 5 个区域电网和 12 个省网。5 个区域电网分别是东北、华北、华东、华中和西北电网，省网包括山东、福建、广东、广西、四川、重庆、云南、贵州、海南、新疆、西藏和台湾。

自从 20 世纪 90 年代开始，我国在电力体制方面进行了重大的改革，实行了电力企业的市场化重组，厂网分开、竞价上网，逐步开放发电侧电力市场，并将逐步向开放输电网管制、售电市场发展，电力市场即将在全国电力行业全面推行，并出现了多元化投资办电的新格局。目前，我国新的电力体制组织机构已经组建完成，全国的电力系统被重新划分为两大电网公司、五家发电公司、两家规划设计集团和四家附业集团，这就彻底打破了原来在计划经济体制下电力工业的垄断模式。在新的电力体制下，各个电力企业之间需要按照市场化的原则运行，各电力企业都需要加强企业的内部管理、提高经济效益，各个投资主体也希望得到较高的投资回报率。

电力工程是 20 世纪对人类影响的最大工程之一。目前无论在电力设备制造的尖端技术、安装、调试、运行维护技术，还是现代化的管理理念，中国都进入了国际前列，中国有资源、有技术、有想象力，并且能够主动最大限度地利用席卷全球的改革思想。不久，一个强大的全国联合电力系统将展现在我们面前。

1.4 交流系统的中性点运行方式

绕组星形联结的变压器或发电机的中性点接地方式，即电力系统的中性点的运行方式，是一个十分复杂的问题，它关系到绝缘水平、通信干扰、接地保护方式、电压等级、系统接线等很多方面。

中性点的运行方式主要分两类，即直接接地和不接地。直接接地系统供电可靠性低，因系统中一相接地时出现了除中性点外的另一个接地点，构成了短路回路，接地相电流很大，为了防止损坏设备，必须迅速切除接地相甚至三相。中性点不接地系统供电可靠性高，但对绝缘水平的要求也高，因这种系统中一相接地时，不构成短路回路，接地相电流不大，不必切除接地相，但这时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，绝缘费用在设备总价格中占相当大的比重，降低绝缘水平带来的经济效益很显著，所以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。反之，在电压等级较低的系统中，一般采用中性点不接地方式提高供电可靠性。在中国，110kV 及以上的系统中性点直接接地，60kV 及以下的系统中性点不接地。在国外，由于通常都采用有备用接线方式，供电可靠性有保障，60kV 及以下的系统中性点往往也直接接地。

隶属于中性点不接地方式的还有中性点经消弧线圈接地，所谓消弧线圈，其实就是电抗线圈。如图 1-2a 所示，由于导线对地有电容，中性点不接地系统中一相接地时，接地点的接地电流属容性电流。而且随着网络的延伸，电流也愈益增大，以致完全有可能使接地点电弧不能自行熄灭而引起弧光接地过电压，甚至发展成严重的系统事故。为了避免上述情况的出现，可在网络中某些中性点处装设消弧线圈，如图 1-2b 所示。由于装设了消弧线圈，构成了另一回路，接地点接地电流中增加了一个感性电流分量，它和容性电流分量相抵消，减少了接地点的电流，使电弧易于自行熄灭，提高了供电可靠性。

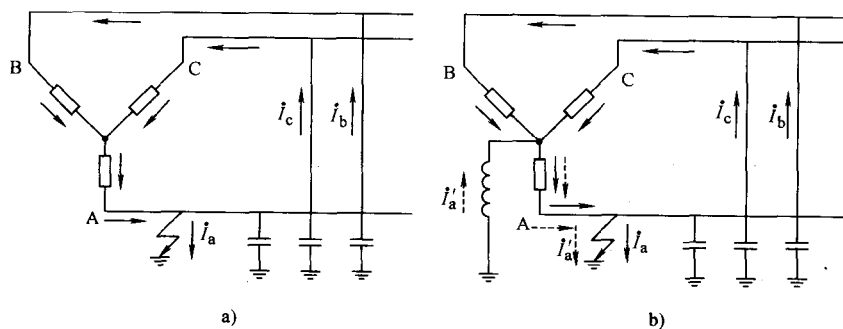


图 1-2 中性点不接地系统

a) 中性点不直接接地 b) 中性点经消弧线圈接地

1.5 高压直流输电的基本概念

电力电子技术的发展，使高压直流输电得以实现和发展。中国葛洲坝至上海的直流输电工程于 1989 年投入运行，这是我国的第一个直流输电工程。至今采用交、直流混合输电已

成为必然趋势。这是因为：①对长距离水下电缆输电，为避免中间落点采用直流要比交流优越；②两个交流系统之间的连接，从保持交流系统相对独立性等因素出发采用直流互联可能更可取；③大容量远距离架空线输电用高压直流替代交流输电可能更经济。

总之，高压直流输电在技术性能上有交流输电无法比拟的优点，当然也有其弱点，在此就不一一叙述（有兴趣者可参阅相关的参考文献），以下仅就其基本的原理进行简述。

直流输电的基本原理如图 1-3 所示，图中包括两个换流站 CS1（交流变直流）和 CS2（直流变交流）以及直流输电线路。两个换流站的直流端分别接在直流线路的两端，而交流端则分别连接到两个交流电力系统 1 和 2。换流站中主要装设有换流器，其作用是实现交流电与直流电的相互转换。换流器由一个或多个换流桥串联或并联组成，目前用于直流输电系统的换流桥均采用三相桥式换流电路，每个桥具有 6 个桥臂。由于桥臂具有可控的单向导通能力，所以又称为阀或阀臂。

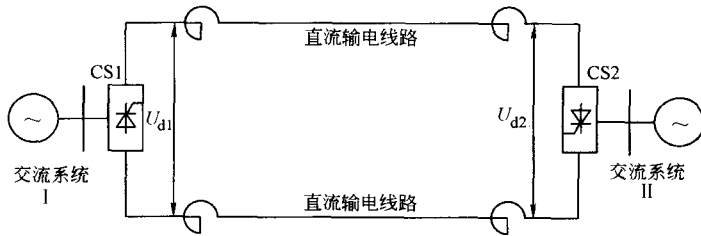


图 1-3 直流输电的基本原理

从交流电力系统 1 向系统 2 输送电能时，换流站 CS1 把送端系统 1 送来的三相交流电流变换成直流电流，通过直流输电线路把直流电流（功率）输送到换流站 CS2，再由 CS2 把直流电流变换成三相交流电流。通常把交流变换成直流称为整流，CS1 也称为整流站；把直流变换成交流称为逆变，CS2 又称为逆变站。

设整流站 CS1 的直流输出电压为 U_{d1} ，逆变站 CS2 的直流输入电压为 U_{d2} ，则从图 1-3 可知直流线路电流为

$$I_d = \frac{U_{d1} - U_{d2}}{R} \quad (1-1)$$

式中， U_{d1} 为整流站 CS1 的直流输出电压； U_{d2} 为整流站 CS2 的直流输入电压； I_d 为直流线路电流； R 为直流线路的电阻。

直流线路与交流线路不同，它只输送有功功率，不输送无功功率。换流站 CS1 送到直流线路的功率和换流站 CS2 从直流线路接受的功率分别为

$$P_{d1} = U_{d1} I_d \quad \text{和} \quad P_{d2} = U_{d2} I_d \quad (1-2)$$

将两者之差，即得直流线路上的损耗功率为

$$P_{d1} - P_{d2} = I_d (U_{d1} - U_{d2}) \quad (1-3)$$

当直流电压 U_{d1} 大于电压 U_{d2} （反之亦然）时，就有电流在电路上流通。只要改变两端直流电压 U_{d1} 和 U_{d2} ，就可以调节电流 I_d ，从而也就改变了直流线路的功率 P_{d1} 或 P_{d2} 。如果需要，也可通过调节保持输送的电流或功率不变。

关于直流输电分析的复杂度主要在于换流站，一旦弄清楚换流站的交流、直流间的解析关系，其功率流的分析要比交流的简单。

1.6 电力系统工程基础的内容

本书涉及电力系统工程的基础内容,大体可叙述如下:一是贯穿基本的电力系统分析的理论基础,此部分力求回答:等效的电力网络是如何形成的?雷电、操作过电压是如何形成的?电磁、机电物理过程是怎样的?电力系统潮流的概念及如何解算?设备的热效应、动效应、电弧等是如何产生的?等基本问题。二是领会电力系统中各设备耐受电、热、动限制的能力及设计、运行中应该遵循的原则,此部分力求回答:正常状况下电器设备应该遵循什么原则?非正常状况下又该遵循什么原则?等基本问题。三是建立电力系统设计、运行、控制及保护决策的整体概念,此部分力求回答:电力系统设计及运行调度、控制中的基本问题,如正常的电力系统频率特性、电压特性及调度的准则;电力系统运行中异常行为的发现及差异性寻求及各类保护的原理;统筹电力系统运行可靠性、安全性、经济性的基本思想,以及电力系统实施自动化运行的基本认识。

总之,本书力图将电力系统的理论分析,电力系统受主观、客观影响的性能分析,电力系统设计、运行中的工程分析融为一体,完全是一种新的尝试。

按传统的分类,本书第2~5章讨论电力系统分析基础的问题,第6~8章讨论高电压分析基础的问题,第9~11章讨论设备的基础问题,第12~14章讨论保护的基础问题,第15~16章讨论运行调度控制与经济的基础问题。

思 考 题

1. 根据发电使用一次能源的不同,发电厂主要有哪几种类型?
2. 我国电力系统的中性点运行方式主要有哪些?各有什么特点?
3. 直流输电与交流输电相比,有什么特点?

第2章 电力系统各元件的数学模型

本章将着重讨论同步发电机、变压器、输电线路和负荷等的等效电路及其数学模型。同时，本章对电力系统各元件的正序、负序和零序参数和模型都进行了说明。

电力系统正常运行时，可近似认为三相电压和三相电流是对称的，即三相相量幅值大小相等，相位相差 120° ，且 a 相超前 b 相 120° ，b 相超前 c 相 120° ，c 相超前 a 相 120° ，此时的三相相量称为正序，如图 2-1a 所示。但在电力系统不对称运行（如发生不对称故障等）时，三相电压和三相电流中除了正序分量外，还将存在负序分量和零序分量。所谓负序分量，是指三相幅值大小相等但相序与正序正好相反的相量，如图 2-1b 所示。所谓零序分量，是指三相幅值和相位都相同的相量，如图 2-1c 所示。

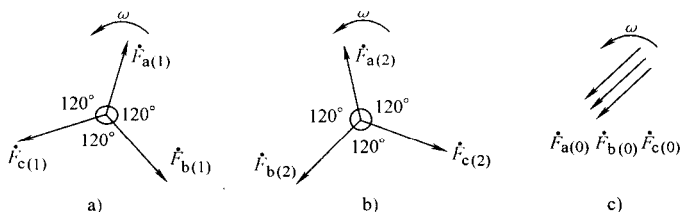


图 2-1 序分量

a) 正序分量 b) 负序分量 c) 零序分量

在电力系统正常运行时，三相电压和电流一般认为是对称的，因此只有正序分量，元件的参数就是正序参数。在电力系统不对称运行时，3 种分量同时存在，第 4 章中会介绍一种分解的方法。

2.1 同步发电机的数学模型

2.1.1 同步发电机稳态运行的数学模型

应用双反应原理得到的凸极式同步发电机电压方程为

$$\dot{U} = -r\dot{I} - jx_d\dot{I}_d - jx_q\dot{I}_q + \dot{E}_q \quad (2-1)$$

式中， $\dot{U}$ 为发电机端电压； $\dot{I}$ 为发电机定子电流； $\dot{I}_d$ 为 $\dot{I}$ 的直轴分量； $\dot{I}_q$ 为 $\dot{I}$ 的交轴分量； x_d 为直轴同步电抗； x_q 为交轴同步电抗； $\dot{E}_q$ 为空载电动势。上述均为相量表示。

若是隐极式同步发电机，有 $x_d = x_q$ ，则发电机电压方程变为

$$\dot{E}_q = \dot{U} + r\dot{I} + jx_d\dot{I} \quad (2-2)$$

上式对应的相量图如图 2-2a 所示。

在式 (2-1) 右端引入 $\pm j\dot{I}_q x_q$ 项, 可得

$$\dot{E}_Q = \dot{U} + r\dot{I} + jx_q\dot{I} \quad (2-3)$$

$$\dot{E}_q = \dot{E}_Q + j(x_d - x_q)\dot{I}_d \quad (2-4)$$

其中, $\dot{E}_Q$ 为定义的虚构电动势, 式 (2-4) 中 $j(x_d - x_q)\dot{I}_d$ 显然是 q 轴方向的量, 因此 $\dot{E}_Q$ 也一定在 q 轴方向上, 而 $\dot{E}_Q$ 可以由 $\dot{U}$ 和 $\dot{I}$ 求得。

式 (2-4) 对应凸极式同步发电机的相量图如图 2-2b 所示。由此, 稳态运行时发电机的等效电路如图 2-3 所示。由上述公式或相量图不难推导同步发电机的有功功率和无功功率方程, 因而可展开各类问题的分析。

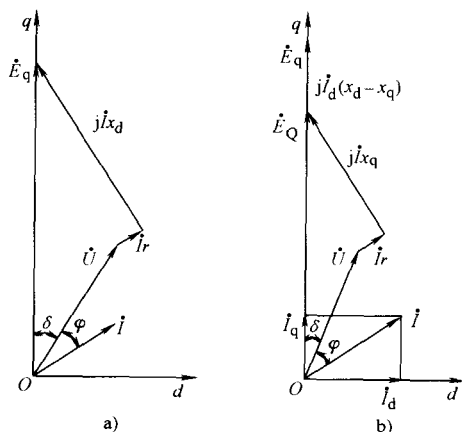


图 2-2 稳态运行时发电机相量图
a) 隐极机 b) 凸极机

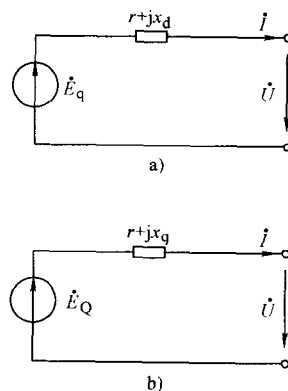


图 2-3 稳态运行时发电机等效电路
a) 隐极机 b) 凸极机

2.1.2 同步发电机负序电抗

理想同步发电机正常运行时, 仅考虑正序参数即可, 如 x_d 、 x_q 、 x_d' 、 x_d'' 、 x_q'' 等均属于正序参数。但在不对称情况下, 还应该与负序、零序参数有关。

同步发电机的负序电抗是指发电机端点的负序电压基频分量与流入定子绕组的负序电流基频分量的比值。也就是说, 发电机的负序电抗是与负序电流产生的逆转子方向同步旋转的负序合成磁通的磁路对应电抗值。由于逆转子旋转的倍频旋转磁场的抵消作用, 定子负序合成磁通只能走漏磁路, 所以负序电抗 x_2 介于 x_d'' 和 x_q'' 之间, 一般取算术平均值, 即

$$x_2 \approx \frac{1}{2}(x_d'' + x_q'') \quad (2-5)$$

2.1.3 同步发电机零序电抗

当定子绕组流过零序电流时, 将产生零序磁场, 对应于零序磁场的零序磁通磁路的电抗即为零序电抗, 用 x_0 表示。因为零序电流三相大小相等、相位相等, 所以产生的零序磁场三相也是完全一样的, 但由于三相绕组空间相差 120° , 所以三相零序磁场合成后为零, 也

就是说零序磁场不能形成定子气隙合成磁场，而只形成各相绕组的漏磁通，所以定子零序电抗即为零序漏抗。但是零序漏抗与正序漏抗不同，这是因为定子每个槽中嵌有相邻两相绕组的导线且绕向相反，而零序电流大小相等相位相同，所以零序漏磁比正序漏磁小，也就是说零序漏抗比正序漏抗小，减小的程度视绕组形式而定，所以零序电抗差别也较大，一般 $x_0 = (0.15 \sim 0.6)x_d''$ 。需要说明的是，在一般分析计算中， x_0 在铭牌参数中给定；另外，由于同步发电机中性点通常是不接地的，即零序电流不能通过发电机，故这时发电机等效零序电抗可视为无穷大。

2.2 变压器的数学模型

静止元件，如变压器、输电线路等，其正序参数同负序参数。但零序却不同，其值与元件的结构、连接方式等密切相关。

2.2.1 变压器正负序参数与等效电路

1. 双绕组变压器的数学模型

变压器短路损耗 P_k 近似等于额定电流流过变压器时高低压绕组中的总铜耗，即

$$P_k \approx 3I_N^2 R_T = 3 \left(\frac{S_N}{\sqrt{3}U_N} \right)^2 R_T = \frac{S_N^2}{U_N^2} R_T \quad (2-6)$$

式中， S_N 为变压器的额定容量 ($V \cdot A$)； U_N 为额定电压 (V)； P_k 为变压器短路损耗 (W)； R_T 为变压器高低压绕组的总电阻 (Ω)。当 S_N 的单位用 $MV \cdot A$ ， U_N 的单位用 kV ， P_k 的单位用 kW ， R_T 的单位仍用 Ω 表示时，由式 (2-6) 可得

$$R_T = \frac{P_k U_N^2}{1000 S_N^2} \quad (2-7)$$

变压器绕组间的漏抗远大于电阻，因而短路电压百分比与变压器电抗有如下近似关系：

$$U_k \% \approx \frac{\sqrt{3} I_N X_T}{U_N} \times 100$$

从而

$$X_T \approx \frac{U_N}{\sqrt{3} I_N} \frac{U_k \%}{100} = \frac{U_k \% U_N^2}{100 S_N} \quad (2-8)$$

式中， S_N 、 U_N 的代表意义与式 (2-7) 相同， $U_k \%$ 为变压器的短路电压百分比， X_T 为变压器的电抗 (Ω)。

变压器励磁支路中的电导对应的是变压器的铁耗 P_{Fe} ，因变压器的铁耗近似与变压器的空载损耗 P_0 相等，因此电导可与空载损耗相对应，其关系是

$$G_T = \frac{P_0}{1000 U_N^2} \quad (2-9)$$

式中， P_0 为变压器的空载损耗 (kW)； U_N 为变压器的额定电压 (kV)； G_T 为变压器的励磁电导 (S)。

变压器励磁支路中的导纳中，电导 G_T 的数值远小于电纳 B_T ，即可近似地认为空载电流

I_0 等于流过 B_T 支路上的电流, 从而有

$$I_0\% = \frac{I_0}{I_N} \times 100 = \frac{U_N B_T}{\sqrt{3} I_N} \times 100 = \frac{U_N^2 B_T}{S_N} \times 100 \quad (2-10)$$

可得

$$B_T = \frac{I_0\% S_N}{100 U_N^2} \quad (2-11)$$

式中, S_N 、 U_N 的代表意义与式 (2-7) 相同, $I_0\%$ 为变压器的空载电流百分比, B_T 为变压器的电纳 (S)。

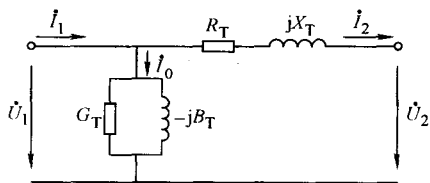


图 2-4 双绕组变压器等效电路

双绕组变压器一般采用如图 2-4 的 Γ 形等效电路。

【例 2-1】 有一台 SFL1-20000/110 型降压变压器向 10kV 网络供电。铭牌上给出的试验数据为: 短路损耗 $P_k = 135\text{kW}$, 短路电压百分数 $U_k\% = 10.5$, 空载损耗 $P_0 = 22\text{kW}$, 空载电流百分数 $I_0\% = 0.8$, $S_N = 20000\text{kV} \cdot \text{A}$, $U_{1N}/U_{2N} = 110/11\text{kV}$ 。求归算到高压侧的变压器参数, 并作等效电路。

解 变压器的串联阻抗为

$$R_T = \frac{P_k U_N^2}{1000 S_N^2} = \frac{135 \times 110^2}{1000 \times 20^2} \Omega = 4.08 \Omega$$

$$X_T = \frac{U_k\% U_N^2}{100 S_N} = \frac{10.5 \times 110^2}{100 \times 20} \Omega = 63.53 \Omega$$

变压器的并联导纳为

$$G_T = \frac{P_0}{1000 U_N^2} = \frac{22}{1000 \times 110^2} \text{S} = 1.82 \times 10^{-6} \text{S}$$

$$B_T = \frac{I_0\% S_N}{100 U_N^2} = \frac{0.8}{100} \times \frac{20}{110^2} \text{S} = 13.22 \times 10^{-6} \text{S}$$

等效电路如图 2-5 所示。

2. 三绕组变压器的数学模型

三绕组变压器等效电路如图 2-6 所示, 励磁导纳的计算方法与双绕组变压器完全相同。由于三绕组变压器各绕组容量可能不同, 其阻抗的计算方法与双绕组有所不同。

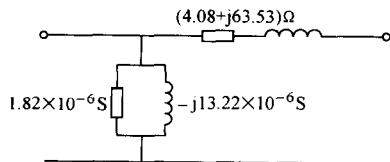


图 2-5 例 2-1 等效电路图

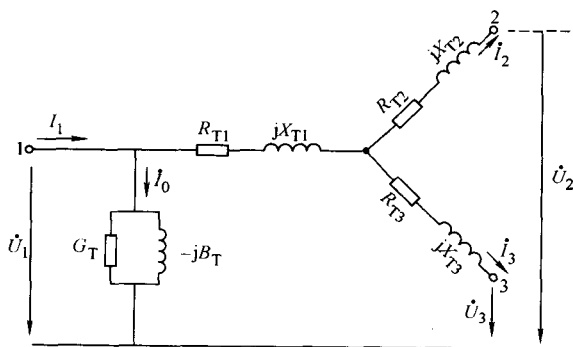


图 2-6 三绕组变压器等效电路

三绕组变压器按 3 个绕组容量的不同有 3 种不同类型。第一种为 100/100/100，即 3 个绕组的容量都等于变压器的额定容量；第二种为 100/100/50，即第 3 绕组的容量仅为变压器额定容量的 50%；第三种为 100/50/100，即第 2 绕组的容量仅为变压器额定容量的 50%。

若变压器属于第一种类型，可由制造厂提供的短路损耗 $P_{k(1-2)}$ 、 $P_{k(2-3)}$ 、 $P_{k(3-1)}$ 直接按下式计算各绕组的短路损耗：

$$\left. \begin{aligned} P_{k1} &= \frac{1}{2}(P_{k(1-2)} + P_{k(3-1)} - P_{k(2-3)}) \\ P_{k2} &= \frac{1}{2}(P_{k(1-2)} + P_{k(2-3)} - P_{k(3-1)}) \\ P_{k3} &= \frac{1}{2}(P_{k(2-3)} + P_{k(3-1)} - P_{k(1-2)}) \end{aligned} \right\} \quad (2-12)$$

然后按照与双绕组变压器相似的公式计算各绕组电阻

$$\left. \begin{aligned} R_{T1} &= \frac{P_{k1} U_N^2}{1000 S_N^2} \\ R_{T2} &= \frac{P_{k2} U_N^2}{1000 S_N^2} \\ R_{T3} &= \frac{P_{k3} U_N^2}{1000 S_N^2} \end{aligned} \right\} \quad (2-13)$$

对于第二类和第三类的三绕组变压器，当两侧绕组容量不相等时，通常给出的短路损耗是容量较小的一侧已经达到其额定电流时的数值。例如，对于额定容量比为 100/100/50 的变压器，提供的 3 个短路损耗分别为 $P'_{k(1-2)}$ 、 $P'_{k(2-3)}$ 、 $P'_{k(3-1)}$ ，则只有 1-2 侧的短路损耗 $P'_{k(1-2)}$ 对应于变压器的额定电流，而 2-3 侧的短路损耗 $P'_{k(2-3)}$ 和 3-1 侧的短路损耗 $P'_{k(3-1)}$ 则对应于 3 侧绕组流过其本身额定电流，而 1 侧或 2 侧绕组只流过其额定电流的一半。由于短路损耗与电流的平方成正比，因此应首先将它们归算到变压器额定容量下的损耗值，即

$$\left. \begin{aligned} P_{k(1-2)} &= P'_{k(1-2)} \\ P_{k(2-3)} &= P'_{k(2-3)} \left(\frac{I_N}{I_N/2} \right)^2 = 4P'_{k(2-3)} \\ P_{k(3-1)} &= P'_{k(3-1)} \left(\frac{I_N}{I_N/2} \right)^2 = 4P'_{k(3-1)} \end{aligned} \right\} \quad (2-14)$$

制造厂对三绕组变压器可能只给出一个短路损耗，即最大短路损耗 $P_{k,\max}$ ，它指的是两个 100% 容量绕组中流过额定电流，另一个 100% 或 50% 容量绕组空载时的损耗。这时电阻的计算公式为

$$\left. \begin{aligned} R_{T(100\%)} &= \frac{1}{2} \times \frac{P_{k,\max} U_N^2}{1000 S_N^2} \\ R_{T(50\%)} &= 2 \times R_{T(100\%)} \end{aligned} \right\} \quad (2-15)$$

三绕组变压器电抗的计算采用各绕组两两之间的短路电压 $U_{k(1-2)}\%$ 、 $U_{k(2-3)}\%$ 、 $U_{k(3-1)}\%$ 来计算。与计算电阻不同，制造厂提供的短路电压总是归算到各绕组中通过变压器额定电流时的数值，所以不需再归算，即