



高等学校电子与电气工程
及自动化专业“十二五”规划教材

电力系统分析

哈恒旭 张新慧 何柏娜 编著

E. & E. E. & E.



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校电子与电气工程及其自动化专业“十二五”规划教材

电力系统分析

哈恒旭 何柏娜 张新慧 编著



西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书是面向普通高等学校电气工程及其自动化专业的一门专业基础课教材,主要介绍了电力系统分析和计算的基本理论和方法。

全书共八章,内容分别为电力系统分析基础、电力网的数学模型、同步发电机模型、电力系统潮流分析与计算、电力系统频率和电压的调整与控制、电力系统三相对称故障分析、电力系统不对称故障分析以及电力系统稳定性分析。

本书可满足普通类高校电气工程及其自动化专业学生宽口径的培养需要,也可供从事电力系统规划、设计、运行和研究的广大工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统分析/哈恒旭,何柏娜,张新慧编著. —西安:西安电子科技大学出版社,2012.5

高等学校电子与电气工程及其自动化专业“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5606-2697-0

I. ①电… II. ①哈… ②何… III. ①电力系统—系统分析—高等学校—教材 IV. ①TM711

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 232635 号

策 划 毛红兵

责任编辑 曹媛媛 毛红兵

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com

电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 西安文化彩印厂

版 次 2012年5月第1版 2012年5月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 15

字 数 353千字

印 数 1~3000册

定 价 26.00元

ISBN 978-7-5606-2697-0/TM·0081

XDUP 2989001-1

* * * 如有印装问题可调换 * * *

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

“电力系统分析”是电气工程及其自动化专业的一门专业基础课，在电气工程及其自动化领域中占有重要的地位和作用。“电力系统分析”既具有专业课的特征，其研究对象为电力系统，又具有基础课的特征，其主要内容为电力系统的稳态和暂态计算与分析方法。

为了适应普通非重点本科院校电气工程及其自动化专业学生学习的要求，使得他们既能够掌握电力系统的专业知识，又能够在电力系统分析和计算方面有一定深度的认识，同时能够了解和把握电力系统新技术，作者根据多年对电力系统教学的积累及科研经验，在阅读了大量电力系统书籍和文献的基础上编写了本书。

第一章为电力系统分析基础，主要阐述了电力系统的发展历史和电力系统的基本概念、结构以及现代电力系统的运行特点及要求，并介绍了“电力系统分析”课程的主要内容。第二章为电力网的数学模型，首先建立了输电线路的原始分布参数模型，并利用安培环流定律、高斯通量定律建立了线路正序参数与线路材料、几何尺寸和结构之间的关系；接着根据电磁理论建立了变压器的等效模型，分析了变压器参数与试验参数的关系；之后介绍了电力系统标幺制的概念以及基准值的选择方法；最后分析了描述电网的节点导纳方程和节点阻抗方程的物理意义，以及利用追加支路法形成节点阻抗矩阵的方法。第三章为同步发电机模型，首先建立了同步发电机各个绕组的原始电路和磁路方程，分析了绕组间自感和互感参数的特点，利用 Park 变换将发电机定子绕组等效为与转子同步旋转的 dq 绕组，并建立了其等效电路，然后介绍了同步发电机的电机参数和电机参数模型，最后分析了发电机稳态和准稳态机端电压相量方程以及同步发电机的转子运动方程。第四章为电力系统潮流分析与计算，首先分析了潮流计算的本质，根据节点电压方程得到了电力系统的节点功率方程，并根据电力系统节点的属性建立了潮流计算方程，然后介绍了利用数值计算方法求解潮流方程的高斯—赛德尔迭代法和牛顿—拉夫逊迭代法，以及简化计算的 PQ 解耦法，最后介绍了辐射型网络和环网的手动潮流估算方法。第五章为电力系统频率和电压的调整与控制，首先介绍了系统与有功功率平衡的关系，分析了各个元件的有功功率频率特性，并介绍了一次、二次、三次调频的基本原理，然后介绍了无功功率平衡与电压的关系，分析了各个元件的无功电压特性、电力系统的调压方法、电力系统无功功率补偿方法以及电力系统的自动电压控制的基本原理 (AVC)。第六章为电力系统三相对称故障分析，分析了无穷大电源系统三相短路后的冲击电流、最大电流有效值与故障后稳态分量的关系，并利用三要素法分析了同步发电机端三相短路的暂态电流特征，介绍了三相短路的实用计算方法。第七章为电力系统不对称故障分析，首先介绍了对称分量法的基本原理以及利用对称分量法分析不对称故障的基本思想，其次分析了同步发电机、输电线路、电力变压器、负荷等元件的三个序的等效电路和参数，以及电力系统各序网络的形成，之后介绍了各种不对称故障的分析方法，最后分析了过渡电阻变化导致电压相量端点的变化轨迹，以及复杂系统发生复合不对称故障的分析方法。第八章为电力系统稳定性分析，首先

介绍了稳定性分析的基本概念、分析方法，其次分析了电力系统的稳定性分析模型，包括励磁调节系统模型、调速系统模型、负荷模型、经典模型、单机无穷大系统模型等，之后介绍了单机无穷大系统的静态稳定性和暂态稳定性的分析和计算方法，最后介绍了电力系统电压稳定性的基本概念和机理。

本书内容既具有一定的广度，也具有一定的深度，深入浅出，通俗易懂。书中对主要公式作了详细的推导和说明，即使对电机学、电路学、电磁场等基础学科不是很熟悉，也可以读懂本书的内容。

编著者

2011年7月

目 录

第一章 电力系统分析基础	1
1.1 电力系统概述	1
1.1.1 电力系统的发展历史	1
1.1.2 电力系统的结构	2
1.1.3 电力系统的额定电压和频率	4
1.1.4 表征电力系统的参数	5
1.1.5 电力系统中性点接地方式	5
1.2 现代电力系统的运行特点及要求	7
1.2.1 现代电力系统的运行特点	7
1.2.2 现代电力系统的特征	7
1.2.3 现代电力系统的运行要求	8
1.2.4 现代电力系统的运行状态与控制	9
1.3 “电力系统分析”课程的主要内容	10
第二章 电力网的数学模型	12
2.1 输电线路的分布参数	12
2.1.1 线路的电感参数	13
2.1.2 线路的电容参数	18
2.1.3 导线的电阻	22
2.1.4 线路的电导	22
2.2 输电线路的等值计算模型	23
2.2.1 线路的电报方程	23
2.2.2 线路相量微分方程的解	24
2.2.3 线路的等值计算电路	25
2.3 变压器等值电路及其参数	26
2.3.1 双绕组变压器	26
2.3.2 三绕组变压器的模型和参数	30
2.3.3 自耦变压器	33
2.3.4 变压器等值电路中理想变比的处理	34
2.4 标幺制	35
2.4.1 标幺制概述	35
2.4.2 多电压等级下基准值的选择	37
2.5 电网的数学模型	39
2.5.1 节点导纳矩阵及其物理意义	39
2.5.2 追加支路法形成节点导纳矩阵	41
2.5.3 节点阻抗矩阵的物理意义	42

2.5.4 追加支路法形成节点阻抗矩阵	43
第三章 同步发电机模型	46
3.1 同步发电机的原始模型	46
3.1.1 同步发电机的原始方程	46
3.1.2 同步发电机的电感参数	48
3.2 同步发电机原始方程的 Park 变换	51
3.2.1 Park 变换的基本原理	51
3.2.2 Park 变换后同步发电机的电路方程	53
3.2.3 Park 变换后同步发电机的磁链方程	54
3.3 同步发电机的标幺制方程及其等效电路	55
3.3.1 基准值的选择	55
3.3.2 电路方程的标幺制表示	56
3.3.3 磁链方程的标幺制表示	56
3.3.4 同步发电机的电路模型	57
3.4 同步发电机的电机参数模型	59
3.4.1 基本假设	60
3.4.2 电机参数的定义	61
3.4.3 电机参数表示的同步发电机方程	65
3.4.4 同步发电机的简化模型	68
3.5 同步发电机稳态和准稳态机端电压相量方程	69
3.5.1 用空载电势表示的同步发电机端电压相量方程	69
3.5.2 用暂态电势表示的同步发电机端电压相量方程	70
3.5.3 用次暂态电势表示的同步发电机端电压相量方程	71
3.6 转子运动方程	72
3.6.1 概述	72
3.6.2 标幺制表示的转子运动方程	73
3.6.3 电角度方程(功角方程)	73
第四章 电力系统潮流分析与计算	74
4.1 潮流计算方程——节点功率方程	74
4.1.1 支路潮流	74
4.1.2 节点功率方程	75
4.1.3 小结	78
4.2 高斯—赛德尔迭代法	79
4.2.1 基本原理	79
4.2.2 电力系统潮流计算的高斯—赛德尔迭代法	80
4.3 牛顿—拉夫逊法	82
4.3.1 牛顿—拉夫逊法的基本原理	82
4.3.2 基于直角坐标的牛顿—拉夫逊法	84
4.3.3 基于极坐标的牛顿—拉夫逊法	86
4.4 PQ 解耦法	87
4.5 潮流计算的手工计算方法	89

4.5.1	简单支路的潮流分布和电压降落	89
4.5.2	辐射形网络的手工潮流计算方法	91
4.5.3	环网的手工潮流计算方法	94
第五章	电力系统频率和电压的调整与控制	96
5.1	电力系统的有功功率平衡和频率调整	96
5.1.1	负荷的频率特性	97
5.1.2	发电机组的频率特性	98
5.1.3	电力系统频率调整	100
5.2	电力系统的无功功率和电压调整	106
5.2.1	同步发电机和无功补偿设备的无功功率—电压特性	106
5.2.2	负荷的无功功率——电压特性	109
5.2.3	电力系统无功功率平衡和电压调整	110
第六章	电力系统三相对称故障分析	118
6.1	电力系统故障概述	118
6.1.1	短路的概念及类型	118
6.1.2	短路发生的原因与危害	119
6.1.3	短路故障分析的内容与目的	119
6.2	简单无穷大电源系统的三相短路的暂态过程分析	120
6.2.1	简单无穷大电源供电系统的短路暂态电流	120
6.2.2	暂态过程分析	121
6.2.3	短路冲击电流	122
6.2.4	短路电流有效值	123
6.3	同步发电机机端发生三相短路时的暂态过程分析	123
6.3.1	简单一阶动态电路	123
6.3.2	同步发电机机端三相短路电流的暂态分析	124
6.4	三相短路的实用计算	135
6.4.1	工程中实用短路计算的假设条件	136
6.4.2	起始次暂态短路电流和冲击电流的计算	136
6.4.3	短路电流计算曲线的制订及其应用	138
6.4.4	短路电流周期分量的近似计算	139
6.4.5	复杂网络的三相短路的计算方法	139
第七章	电力系统不对称故障分析	145
7.1	对称分量法的基本原理	146
7.1.1	三相平衡系统的解耦	147
7.1.2	对称分量法的物理意义	148
7.1.3	利用对称分量法分析不对称故障	149
7.2	电力系统的负序和零序网络及参数	150
7.2.1	同步发电机的负序和零序参数	151
7.2.2	输电线路的负序和零序参数	152

7.2.3	电力变压器的负序和零序等效电路及参数	158
7.2.4	综合负荷的等值电路和序阻抗	164
7.2.5	电力系统各序网络的形成	165
7.3	简单电力系统的不对称故障分析	167
7.3.1	简单不对称短路故障的分析	167
7.3.2	经过渡电阻的不对称短路分析	174
7.3.3	经过渡电阻不对称短路的故障端口电压的相量图分析	178
7.3.4	简单双端电源系统母线处(非故障点)的电压电流分析	181
7.3.5	正序等效定则	183
7.3.6	不对称断线(非全相运行)分析	184
7.4	复杂电力系统的不对称故障分析	185
7.4.1	不对称短路的分析与计算	186
7.4.2	复杂电网的不对称断线分析	191
7.4.3	复杂电网的复故障分析	193
第八章	电力系统稳定性分析	197
8.1	非线性系统的稳定性	199
8.1.1	系统动态模型	199
8.1.2	系统的静态稳定性	200
8.1.3	系统的暂态稳定性	200
8.1.4	数值积分法	202
8.2	电力系统稳定性的基本概念和模型	204
8.2.1	电力系统稳定性的基本概念	204
8.2.2	电力系统稳定性分析模型	205
8.3	电力系统的静态稳定性分析	217
8.3.1	单机无穷大系统的静态稳定性机理	217
8.3.2	小扰动法分析电力系统静态稳定性	219
8.4	电力系统的暂态稳定性分析	220
8.4.1	单机无穷大系统暂态稳定性机理	220
8.4.2	等面积法则	222
8.4.3	摇摆曲线的数值计算	223
8.4.4	电力系统暂态稳定性分析的直接法	224
8.5	电力系统的电压稳定性	227
8.5.1	单负荷无穷大系统模型	228
8.5.2	异步电动机的电磁功率	228
8.5.3	变压器有载调压作用的影响	230
8.5.4	电压稳定性机理	230
参考文献		232

第一章 电力系统分析基础

本章主要讲述了电力系统的发展简史，电力系统的基本概念、表征电力系统的基本参数、电力系统的结构等。电力系统的基本运行特征是电能不能大量储存，电力系统暂态响应时间短，电力系统运行安全要求高等。根据这些特点，电力系统的运行要求包含四个层次：正常、安全、经济性和高质量。为了达到这些运行特点和要求，需要对电力系统的状态实施实时的监视和控制。本章还论述了“电力系统分析”这门课在电力系统工程领域的地位和作用，以及这门课所讲授的主要内容。

1.1 电力系统概述

1.1.1 电力系统的发展历史

电力系统是在电工学的基础上发展而来的。在电工学日益发展成熟的 19 世纪末期，雅克比发明了第一台实用电动机，随后西门子发明了第一台实用的自激式发电机，爱迪生发明了白炽灯，电力系统在此基础上诞生了。

1. 早期直流输电阶段

第一个商业化的完整的电力系统是由托马斯·爱迪生(Thomas Edison)于 1882 年 9 月在纽约城的皮埃尔大街站建成的一个直流输电系统，包括发电机、电缆、负荷、熔断丝、电表等(即包含发电、输电、用电、保护和测量等环节)。这个直流输电系统由一台蒸汽机拖动的直流发电机供给 1.5 km 范围内的 59 个白炽灯用户。到 1886 年直流输电系统的不足就充分显示出来了，直流输电在当时的电压下无法输送更远的距离。为了提高输电距离，减少输电损耗，长距离的直流输电必须采用高电压，而这样的高电压无论是发电机还是用户都无法接受，因此必须采用适当的技术对电压进行变换。

2. 高压交流输电阶段

L. Gaulard 和 J. D. Gibbs 分别开发出了变压器和交流输电技术。George Westing House (西屋)取得了交流输电技术在美国的应用权。1886 年，西屋的助手 William Stanley 发明了商业用的电力变压器，并由此组建了第一个交流配电系统。1888 年，Nikola Tesla 进入西屋电气公司，开始研究交流电，并持有交流电动机、变压器和交流输电系统的多项专利。

1889 年，北美洲的第一个单相交流输电系统在维拉穆特瀑布(Willamette Falls)和波特兰(Portland)之间建成并投入运行，引发了电力发展史上著名的“交直流大战”。主张直

流输电的爱迪生和主张交流输电的西屋之间发生了激烈的争论。直到1888年,俄国勃罗沃尔斯基发明了效率更高的三相异步电机和三相输电技术以后,三相交流输电才逐步取代直流电。1895年,尼亚加拉大瀑布(Niagara Falls)水力交流发电站建立,并成功地将电力输送到35 km以外的布法罗(Buffalo),这是当时直流输电不可能做到的。从此,电力系统进入了高压交流输电的阶段。在“交直流大战”中,交流输电胜利的主要原因在于交流系统的电压水平可以灵活地转换,另一原因就是交流电动机比直流电动机的成本更低,效率更高。

3. 超(特)高压交流输电阶段

进入20世纪,为了满足电力工业的发展,将电力输送到更远的距离,使输电效率更高,电力系统的输电电压水平也越来越高。1936年,美国建成鲍尔德水闸水电站到洛杉矶的287 kV输电线路(长430 km,输送容量250 MW~300 MW,双回线路)的投运标志着电力系统超高压输电时代的到来。20世纪50年代,随着大型水电站的开发和大型火电厂的兴建,超高压输电技术迅速发展。

1952年,瑞典首先建成一条330 kV超高压输电线路,长954 km。1954年,美国首条354 kV输电线路投运。1956年,苏联古比雪夫水电站至莫斯科400 kV双回超高压输电线路投入运行,南北线路各长815 km和890 km,共输电1.15 GW。1959年,该双回线进行升压,世界上首条500 kV超高压线路出现。1965年,加拿大建成735 kV超高压线路。1969年,美国又把输电电压等级提高到765 kV。1981年,苏联开工兴建自车里雅宾斯克至库斯坦奈的1150 kV特高压输电线路,并于1985年投入运行,这是目前世界上已运行的最高交流输电线路,标志着电力系统进入特高压输电时代。

4. 超(特)高压交直流混合输电阶段(现代电力系统)

随着汞弧阀的出现,高压直流输电(HVDC)在超远距离输电方面更为经济,而且HVDC可以实现非同步并网,对电力系统的稳定性有一定的好处。第一条商业用的100 kV直流输电(HVDC)线路于1954年在瑞典建成,它通过96 km的海底电缆将瑞典本土与格特兰岛(Gotland)互联起来。特别是晶闸管的发展,使得HVDC变得更加有吸引力。第一条采用晶闸管的HVDC系统于1972年在加拿大投运,这为魁北克省和新布伦瑞克省之间提供非同步互联。从此,电力系统进入了交直流混联的时代。

电力系统从诞生到现在经历了四个重要阶段,进入了特高压、大电网、交直流混联的时代,现代电力系统是具有电源多样化、多电压等级、极端复杂的互联大系统。

1.1.2 电力系统的结构

电力系统是由发电、变电、输电、配电和用电等设备连接组成的一个复杂的多层次的电力网络,包括发电厂、电力网和负荷三大部分,如图1-1所示。

发电厂的作用是将其他形式的能量转化为电能。在目前的电力系统中,主要的发电厂是以煤、石油和天然气为燃料的火力发电厂,利用水力发电的水力发电厂,利用核能发电的核电站等。进入21世纪,现代电力系统中的电源呈现出了多样化趋势,如风力发电、太阳能发电、热能发电、潮汐能发电、生物质能发电等多种发电形式。

电力网的作用是将发电厂发出的电能输送给各个负荷。根据不同功能,电力网划分为输电网、次输电网和配电网。输电网(Transmission Power System)连接系统中的主要发电

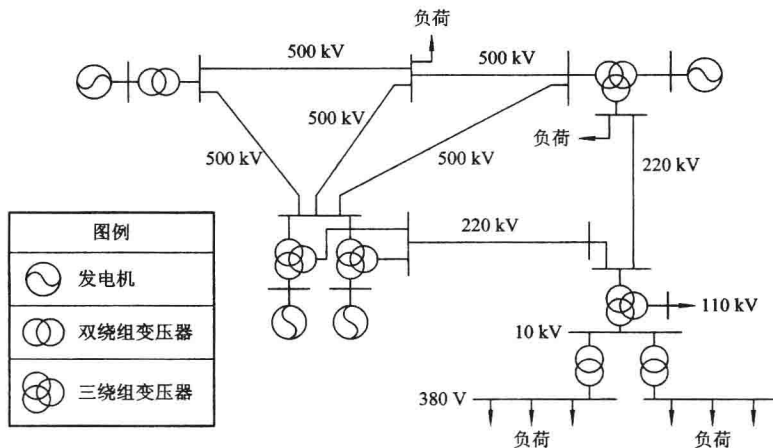


图 1-1 典型电力系统接线图

厂和主要的负荷中心，它形成整个系统的主干网(Bulk Power System)，且运行于最高电压水平，通常为 220 kV 及以上电压等级。次输电网(Sub-transmission Power System)则是将电力从输电变电站输送到配电变电站，通常较大的工业负荷用户也直接由次输电系统直接供电。配电网(Distributed Power System)则是电力送往用户的最后一级，将电力分配到每一个用户，因此称为配电网。不同大小的电厂连接的网络不同，主力大电厂通常通过变压器升压后直接连在输电网，较大电厂则通常连接在次输电网中，靠近负荷的小发电厂则直接连接到配电网中。因此小型的发电厂，诸如风力发电、太阳能发电等由于发电容量很小，通常直接连接在配电网中，这些形式的发电也称为分布式发电或分散式发电。

我国电力系统的划分只有输电网和配电网两部分，负责远距离输送电能的称为输电网，通常为 220 kV 及以上网络，次输电网和配电网统称为配电网。因此，我国电力系统中配电网通常又分为高压配电网、中压配电网和低压配电网。高压配电网通常是 35 kV 及以上电压等级形成的环形网络；而中压配电网通常为 10 kV 等级形成的辐射型网络，城市中压配电网通常为了保证供电可靠性而采用环形网络结构，但是开环运行。对于具有较高供电可靠性要求的负荷，有可能采用自母线环网，即网络环接于同一个 10 kV 母线，这主要是为了避免电磁环网。所谓电磁环网，就是两个不同电压等级的电网环接在一起。电磁环网的弊端是显而易见的，当高压线路断开时，潮流将转移至低压线路，从而在低压线路产生较大的电流。我国配电网的典型结构如图 1-2 所示。

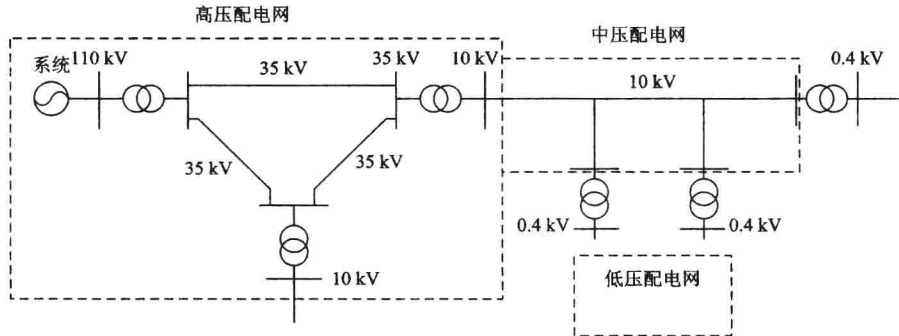


图 1-2 我国配电网的典型结构

1.1.3 电力系统的额定电压和频率

众所周知,电力系统的频率是与发电机转子的转速成正比例关系的,发电机转子的电角速度就是电网的角频率。因此正常运行的电力系统要求所有的发电机都必须按照同一个转速旋转,即同步运行。这个同步运行的角速度即为电网的频率。

电力系统中的电力设备都是按照指定的电压和频率来设计的,在这个指定的电压和频率下,电气设备具有最佳的运行性能和经济效果,这个电压和频率称为额定电压和额定频率。为了在电力系统中实现电力设备的兼容性,各国都制定了电力系统的标准额定电压和额定频率。我国的额定频率为 50 Hz,欧美地区和日本电力系统额定频率为 60 Hz。我国制定的三相交流 3 kV 及以上电压等级的额定电压如表 1-1 所示。

表 1-1 3 kV 及以上等级的额定电压

受电设备与系统额定线电压/kV	供电设备额定线电压/kV	变压器额定线电压/kV	
		一次绕组	二次绕组
3	3.15	3/3.15	3.15/3.3
6	6.3	6/6.3	6.3/6.6
10	10.5	10/10.5	10.5/11
	15.75	15.75	
	23	23	
35		35	38.5
110		110	121
220		220	242
330		330	345/363
500		500	525/550
750		750	788/825

我国电力系统 3 kV 及以上的电压等级包括: 3 kV、6 kV、10 kV、35 kV、110 kV、220 kV、330 kV、500 kV 和 750 kV。电压等级指的是电力系统的额定线电压。110 kV 及以下称为高压(High Voltage, HV), 220~750 kV 称为超高压(Extra High Voltage, EHV), 1000 kV 以上称为特高压(Ultra High Voltage, UHV)。

在同一个电压等级下,电力设备的额定电压不尽相同,这是因为电力系统在传输电能的时候有电压损耗。为了使得电力系统的所有电力设备都能在额定电压下运行,各个电气设备的额定电压需要有一个配合的问题。配合的原则是:送电设备的额定电压要比系统额定电压高 5%~10%,受电设备的额定电压应与系统额定电压一致。

发电机的额定电压要比系统的额定电压高 5%。变压器的一次绕组相当于用电设备,因此与系统电压一致,如果变压器直接连接发电机,则与发电机的额定电压相同。二次绕组相当于送电设备,因此要比系统额定电压高 10%,但如果直接与用户相连或者其短路电

压小于 7% (意味着其漏抗较小, 电压损耗较低), 则比系统额定电压高 5%。

另外, 为了电力系统调压的需要, 很多变压器的高压侧具有分抽头。同一电压等级下, 即使分抽头的百分比相同, 但由于升压变压器和降压变压器的额定电压不同, 其分抽头的电压也不同。对于升压变压器, 其高压侧为二次侧, 相当于送电设备, 其主抽头的额定电压 U_N 比系统额定电压高 10%, 而降压变压器其高压侧在一次侧, 相当于用电设备, 其主抽头额定电压 U_N 与系统额定电压相同。以 220 kV 等级为例, 系统额定电压为 220 kV, 升压变压器高压侧主抽头额定电压为 242 kV, 降压变压器高压侧的额定电压为 220 kV。

1.1.4 表征电力系统的参数

表征电力系统的规模和大小的参数主要有总装机容量、年发电量、最大负荷、最高电压等级等。

电力系统总装机容量指系统中实际安装的发电机的额定功率的总和, 既包括正在运行的发电机, 也包括停止运行的发电机, 其单位为千瓦(kW)、兆瓦(MW)和吉瓦(GW)。

电力系统年发电量指系统中所有发电机组全年实际发出电能的总和, 其单位为兆瓦·时(MW·h)、吉瓦·时(GW·h)和太瓦·时(TW·h)。

年最大负荷指电力系统总有功负荷在一年以内的最大值, 用 kW、MW 或 GW 表示。年发电量与年最大负荷之比称为最大负荷利用小时数。

最高电压等级指电力系统中最高电压等级电力线路的额定电压, 用 kV 计。

1.1.5 电力系统中性点接地方式

电力系统的中性点接地方式有两大类: 一类是中性点直接接地, 另一类是中性点不接地或者经过大的阻抗接地。前者称为大电流接地系统, 后者称为小电流接地系统或中性点不直接接地系统。

根据三相电路理论可知, 三相系统电源对称且参数平衡的情况下, 全系统的电气量才是对称的。所谓对称, 是指三相电气量大小相等, 相位相差 120° ; 参数平衡是指系统的自阻抗和自导纳相等, 三相互阻抗和互导纳也相等。只有在这种情况下, 全系统的电气量才是对称的, 三相系统才可以用“单相法”来分析。(为什么? 请读者自己思考。)

在三相对称平衡的情况下, 中性点接地与否不会影响系统的运行状况, 因为此时中性点的电位为零。

如图 1-3 所示, 对于中性点不接地系统, 三个电源 E_A 、 E_B 、 E_C 均为对称电源。忽略系统的阻抗, 根据 KVL 定律有

$$\begin{cases} \dot{E}_A + \dot{U}_N = \dot{U}_A \\ \dot{E}_B + \dot{U}_N = \dot{U}_B \\ \dot{E}_C + \dot{U}_N = \dot{U}_C \end{cases} \quad (1-1)$$

在三相对称平衡的情况下, 三相电源对称, 三相电压也对称。将式(1-1)中三个式子相加, 可知

$$3\dot{U}_N = 0 \quad (1-2)$$

可见, 在正常三相对称运行的情况下, 中性点接地与不接地没有任何影响。

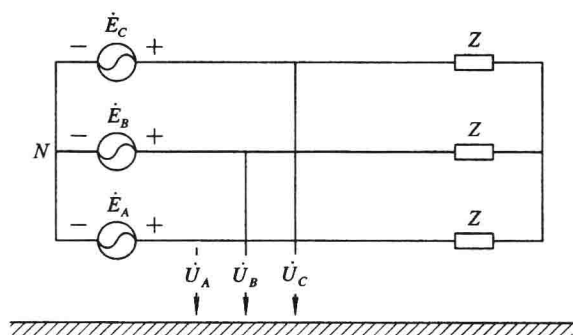


图 1-3 中性点不接地三相系统

假设 A 相发生短路接地，则 A 相的对地电压为零，此时中性点的电压

$$\dot{U}_N = -\dot{E}_A \quad (1-3)$$

则根据式(1-1)可知，A 相接地短路后的三相电压为：

$$\begin{cases} \dot{U}_A = 0 \\ \dot{U}_B = \dot{E}_B + \dot{U}_N = \dot{E}_B - \dot{E}_A \\ \dot{U}_C = \dot{E}_C + \dot{U}_N = \dot{E}_C - \dot{E}_A \end{cases} \quad (1-4)$$

根据公式(1-1)可以得到中性点的电压 $U_N = -U_A$ ，B 相的对地电压是 B 相对 A 相的电压，C 相的对地电压则是 C 相对 A 相的电压。A 相短路后三相电压相量图如图 1-4 所示。

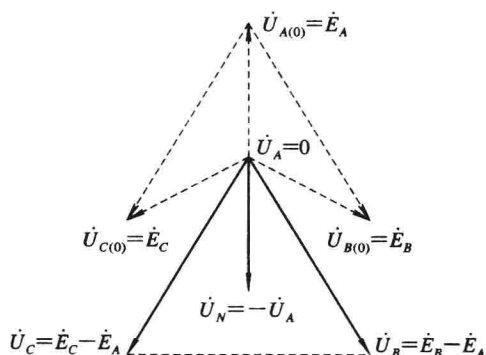


图 1-4 中性点不接地系统 A 相接地时电压相量图

由此可见，对于中性点不接地系统，当发生单相接地短路时，虽然相电压不对称，但线电压依然对称，且由于没有构成短路回路，短路电流也很小。因此中性点不接地系统在进行单相短路后不必立即跳闸，允许继续运行 1~2 个小时。但由于非故障相电压变为原来的 $\sqrt{3}$ 倍，因此对绝缘是不利的。

由于实际系统中三相对地电容(线路具有分布电容，母线具有杂散电容)的作用，单相短路时会产生电容性短路电流，对于短路后电弧的熄灭不利。为了快速熄灭短路电弧使得系统恢复正常，通常在中性点连接消弧线圈，使得电容性的短路电流得到补偿，或者中性点连接一个大电阻，减少电容电流的幅值。

虽然小电流接地系统发生单相短路后可以不必立即跳闸，能够在一定程度上提高电力

系统的可靠性, 但非故障相电压升高到原来的 $\sqrt{3}$ 倍, 不利于电气设备的绝缘, 因此小电流接地系统广泛应用于 60 kV 及以下配电系统中。在 110 kV 及以上输电系统中, 由于电压等级较高, 非故障相过电压将使得绝缘承受更高的电压, 因此在输电网中通常采用中性点直接接地方式。由于中性点直接接地在发生单相接地短路时, 会产生很大的短路电流, 因此, 又称为大电流接地系统。

1.2 现代电力系统的运行特点及要求

1.2.1 现代电力系统的运行特点

电力系统是生产、输送、分配和使用电能的所有电力设备连接而成的系统, 电能是电力系统的产品。与普通意义上的商品相比, 电力系统具有如下特点:

(1) 电能不能大量储存。电能的生产、输送、分配和使用必须是同步进行的。也就是说, 发电设备在某个时刻生产的总电能必须严格地和这个时刻负荷消耗和输送损耗的总电能相等。正是因为这个特点, 一旦电力系统发出的电能和消耗的电能不匹配, 轻则导致电力系统的运行指标, 例如电压、频率将发生变化, 导致电力系统不能正常安全地运行, 重则导致电力系统的崩溃和瓦解。

电力系统在正常运行时, 只有一个运行频率, 即电力系统中所有的发电机必须都保持同步运行, 这就要求所有的发电机转子上的电磁转矩和机械转矩相平衡。一旦这个平衡被打破, 发电机的转速或者重新进入一个新的平衡, 或者不能进入平衡状态, 将导致电力系统的剧烈振荡, 失去同步。然而, 电力系统的负荷是随机变化的, 因此需要对电力系统的发电进行合理的安排和调度, 并利用自动控制装置, 实时跟踪负荷的变化, 保持系统的功率平衡。同时, 在电力系统受到大的扰动, 例如发生短路故障的情况下, 需要及时切除故障, 并及时实施控制, 保证电力系统功率的平衡。

(2) 电力系统的暂态过程十分迅速。所谓暂态过程, 就是从一个状态转换到另外一个状态的过渡过程。在电力系统中, 一旦发生扰动, 例如开关操作、雷电冲击、短路等, 电力系统将从一个状态转换到另一个状态。这个暂态过程的时间非常短, 电气暂态过程只有数毫秒的时间, 从发生故障到系统失去稳定的机电暂态时间也不过只有几秒, 因事故导致系统全面崩溃瓦解的过程也只有数分钟。这就要求电力系统的保护与控制装置具有足够快的反应速度。

(3) 电力系统的运行参数必须在规定范围内。电力系统的运行是同步的, 即整个电网只有一个额定频率, 这就意味着电力系统中的所有同步发电机的转速都必须运行在额定频率附近, 一旦频率降低, 电力系统就进入不正常状态, 甚至有可能失去同步运行。电力系统各个节点的电压也是有要求的, 不仅仅有电能质量的要求, 而且还有系统正常运行的要求, 一旦某点的电压降低, 就会导致整个电网的电压崩溃。

1.2.2 现代电力系统的特征

电力系统经过一个多世纪的发展, 特别是随着科学技术的不断进步, 电力系统本身也

发生了巨大的变化，主要表现在如下几个方面：

(1) 现代电力系统已经进入大系统、特/超高压、远距离、交直流混联的大区域互联的新阶段。为了提高供电可靠性和经济性，电力系统的结构越来越复杂，从简单的树枝结构的辐射型网络发展到多电源供电的环形网络，从小区域网发展到大区域网的互联。输电电压等级也越来越高，最高电压等级从 330 kV 发展到现在的 750 kV，甚至 1000 kV。输电形式也从单一的交流输电发展为交直流混联，超高压远距离直流输电已经成为区域电网之间的联络线。

(2) 社会经济的发展促使现代电力系统经营和管理手段发生了重大变革，电力市场将取代传统的经营方式。传统的电力系统的经营和管理方式为计划经济和计划管理，发电、输电和配电由电力部门统一管理，发电和配电由电力调度机构统一调配。这种计划管理体系在特定的时期提高了电力系统的运行经济性，但随着市场经济体系的不断完善和发展，传统的计划调度模式已经不适应电力系统的发展。为了适应在市场经济模式下，整合电力系统的资源，电力市场成为目前世界各国研究的重要课题之一，由市场来调控电力系统的经济运行已势在必行。

(3) 发电形式的多样化。随着科学技术的不断进步，电力系统中的发电形式也呈现出多样化的局面。传统的发电形式是水力发电和火力发电。随着核物理技术的发展，核能的民用技术不断完善，利用核能的发电厂在世界各国得到了比较广泛的应用。进入 21 世纪以来，燃气轮机发电技术、风力发电技术、太阳能发电技术、生物质能发电技术等无污染的高效清洁能源发电成为世界各国研究的重要内容。

(4) 高度集成的电力系统综合自动化系统。随着计算机技术、通信技术、信息技术的发展，电力系统自动化从传统的分散自动控制装置发展为分层分布式的高度集成的综合自动化系统，将监视、测量、控制、保护以及管理功能集成在综合自动化系统中。从基层的变电站、电厂的综合自动化，到各个级别的调度自动化系统，电力系统基本实现了变电站无人职守，实现了从调度中心直接监视和控制电力系统的“遥信”、“遥调”、“遥控”和“遥测”的“四遥”功能。

1.2.3 现代电力系统的运行要求

根据电能不能大规模储存以及电力系统运行的特殊性，对电力系统的运行要求可以概括为正常、安全、经济和质量四个方面的内容。

所谓正常，就是指电力系统的运行参数在允许的范围之内。这就要求电力系统中发电机发出的功率和负荷消耗的功率相平衡，一旦功率不平衡，电力系统的运行参数就会发生变化。如果运行参数发生了改变后，仍然不能使功率平衡，电力系统就会失去稳定性，从而导致整个系统的瓦解和崩溃。电力系统的这一特征，要求电力系统必须处于正常运行状态。

在正常运行的基础上还要保证安全。所谓安全，就是电力系统的抗扰动能力，是指在合理的假想事故下，电力系统仍然处于正常状态。这就要求电力系统在运行时必须考虑一定的安全裕度，保证电力系统在受到故障等扰动时，仍然保持正常运行。根据电力系统的安全稳定运行导则，电力系统必须满足 $N-1$ 原则，即系统即使有一条线路故障断开后，系统仍然正常运行。