

普通高等教育“十一五”规划教材  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



SHUDIAN XIANLU YUNXING WEIHU  
LILUN YU JISHU

# 输电线路运行维护 理论与技术

陈景彦 白俊峰 主 编  
张嘉伟 赵 强 副主编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十一五”规划教材  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUIHUA JIAOCAI



SHUDIAN XIANLU YUNXING WEIHU  
LILUN YU JISHU

# 输电线路运行维护 理论与技术

主 编 陈景彦 白俊峰  
副主编 张嘉伟 赵 强  
编 写 毕春丽 陈建华  
主 审 刘树堂



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

Electrical Engineering

## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”规划教材。

本书由浅入深,由理论到实践,全面、系统地介绍了输电线路运行维护这一知识体系。全书分为三篇,共14章。第一篇为电力系统基础知识,包括线路电气基础知识、供配电网网络的等值电路、导线和电缆的力学计算;第二篇为线路运行,包括输电线路雷击跳闸与防治、外力、输电线路的鸟害与防治、输电线路覆冰分析与防治、污闪、输电线路风偏网络与防治;第三篇为线路维护,包括线路检修概述、高压架空线路的巡视、架空输电线路检修及抢修、带电作业。本书符合现行各电压等级架空线路、绝缘架空线路和电缆线路的设计规程、运行规程、施工验收规范等一系列规程、规范。

本书可作为高等学校相关专业课程的教材,也可供从事输电线路设计、运行、检修等有关工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

输电线路运行维护理论与技术/陈景彦,白俊峰主编. —北京:中国电力出版社,2009

普通高等教育“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5083-9447-3

I. 输… II. ①陈…②白… III. ①输电线路—电力系统运行—高等学校—教材②输电线路—维护—高等学校—教材  
IV. TM726

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 167472 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2009年10月第一版 2009年10月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 16印张 383千字

定价 25.60元

## 敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失  
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

# 前 言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神，加强教材建设，确保教材质量，中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校，满足学科发展和人才培养的需求，坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

20世纪90年代开始，随着我国经济的高速发展，用电需求每年呈现15%以上的增长，同时社会对电能的质量要求也进一步提高。因而，为了适应社会发展的需要，使得输电网的建设能够跟上电源建设的步伐和要求，全国的输电网正在蓬勃发展着。输电线路的安全与输电质量的优劣直接关系到国民经济的发展，影响到人民的生活水平。所以，输电线路的运行与维护技术需要不断地发展和创新。

为了在输配电线路运行与检修的技术方面与世界接轨，我国的各大电网公司都在积极吸引高端人才。与此同时，高校在线路运行与维护方面的本、专科甚至是研究生课程也需要不断地提高教师素质、加深教材深度，以期形成从理论到实践、由浅入深、从低压线路到高压线路、从线路的安全运行到紧急故障的维修和排除等方面的全面、系统的知识体系。这也是本书编写的主要特点。

全书分为三篇，共14章。第一篇从线路运行时整个电力系统的状态、导线与电缆的运行状态、绝缘子的运行状态等方面，详细阐述了输电线路各个部件在运行过程中的电气与力学特性，同时包括电力系统的基础知识介绍及继电保护知识的扩充。第二篇分析了我国输电线路发生较多、影响较大的故障起因及影响因素，提出了一系列有针对性的防治措施。第三篇从巡视和检查线路的各种电气、力学故障方面以及各种事故的预防与紧急抢修工作等，全面分析了线路巡检过程中的各种情况和准则。

本书由东北电力大学陈景彦、白俊峰主编，广州大学刘树堂主审。第一篇由陈景彦、张嘉伟编写，第二篇由白俊峰、赵强、陈建华编写，第三篇由陈景彦、白俊峰、毕春丽编写。全书由陈景彦统稿。在本书编写过程中，编者参考了部分专家、学者的专著和研究成果，在此表示衷心的感谢！

编者衷心期望我国学术界与工程界继续携手在输电线运行与维护技术领域跨进世界先进行列。由于编者水平有限，书中难免存在疏漏之处，诚盼读者指正。

编者

2009年9月于东北电力大学

## 目 录

## 前言

## 第一篇 电力系统基础知识

<b>第 1 章 线路电气基础知识</b> .....	1
1.1 电力生产常识 .....	1
1.2 电力系统中性点运行方式及其特点 .....	6
1.3 继电保护的概述 .....	8
1.4 电力系统继电保护的基本要求.....	10
1.5 继电保护装置分类.....	11
<b>第 2 章 供配电网的等值电路</b> .....	13
2.1 供配电线路的等值电路和电气参数.....	13
2.2 变压器的等值电路和参数计算.....	16
2.3 电抗器的参数计算和等值电路.....	19
2.4 电网的电压降落、电压损耗和电压偏移.....	20
2.5 电网的功率损耗和电能损耗.....	22
<b>第 3 章 导线和电缆的力学计算</b> .....	25
3.1 有关导线运行的一些计算.....	25
3.2 输电线路的电晕计算.....	27
3.3 绝缘子基础知识.....	32
3.4 输电线路对绝缘子的技术要求.....	39
3.5 电力线路绝缘子的选择.....	44
3.6 绝缘子机械强度的安全系数计算.....	45

## 第二篇 线路运行

<b>第 4 章 输电线路雷击跳闸与防治</b> .....	47
4.1 雷电及其参数.....	47
4.2 输电线路雷击跳闸故障分析.....	53
4.3 雷击跳闸故障的判别.....	56
4.4 雷击跳闸的防治措施.....	58
<b>第 5 章 外力</b> .....	75
5.1 输电线路外力破坏故障现状.....	75
5.2 输电线路外力破坏故障分析.....	76

5.3	外力破坏故障的防治措施	78
<b>第6章</b>	<b>输电线路的鸟害与防治</b>	<b>80</b>
6.1	鸟害故障调查	80
6.2	鸟害故障的类型和形成原因	80
6.3	鸟害故障发生的规律	83
6.4	防治鸟害故障的措施和对策	84
<b>第7章</b>	<b>输电线路覆冰分析与防治</b>	<b>88</b>
7.1	输电线路覆冰事故统计	88
7.2	覆冰形成机理分析	88
7.3	输电线路冰害故障类型和特点	92
7.4	输电线路防覆冰故障措施	96
<b>第8章</b>	<b>污闪</b>	<b>101</b>
8.1	绝缘子污闪事故特点	102
8.2	绝缘子积污特性	103
8.3	绝缘设备污闪特性	107
8.4	污闪防治对策及措施	114
8.5	输电线路防污闪研究	121
<b>第9章</b>	<b>输电线路风偏闪络与防治</b>	<b>123</b>
9.1	输电线路风偏闪络调查统计	123
9.2	风偏闪络规律及特点	124
9.3	风偏闪络原因分析	125
9.4	导线—杆塔空气间隙电气强度	126
9.5	关于风偏角的设计	127
9.6	湿(大雨)状态下空气间隙电气强度的影响	129

### 第三篇 线路维护

<b>第10章</b>	<b>线路检修概述</b>	<b>131</b>
10.1	线路巡视与管理的基本措施	131
10.2	线路维护准则	132
10.3	线路维护的一些基本要求	133
10.4	停电检修作业时保证安全的技术措施	135
<b>第11章</b>	<b>高压架空线路的巡视</b>	<b>136</b>
11.1	维护线路的各种巡视	136
11.2	架空输电线路巡视的主要内容	141
<b>第12章</b>	<b>架空输电线路运行中的测试</b>	<b>150</b>
12.1	架空线路限距和弧垂的测试	150
12.2	导线、地线的振动测量	155
12.3	导线连接器的测试	157

12.4	绝缘子的测试	160
12.5	绝缘子等值附盐密度测量	164
12.6	雷电流幅值及接地电阻测试	170
<b>第 13 章</b>	<b>架空输电线路检修及抢修</b>	<b>174</b>
13.1	概述	174
13.2	检修周期及安全技术	176
13.3	导线、避雷线的检修	179
13.4	拉线、叉梁和横担的更换	187
13.5	绝缘子、金具的更换	191
13.6	接地装置检修	191
13.7	杆塔检修	193
13.8	基础检修	202
<b>第 14 章</b>	<b>带电作业</b>	<b>203</b>
14.1	带电作业的安全距离和绝缘工具的长度	203
14.2	带电作业方法	205
14.3	带电作业工具	210
14.4	带电作业的安全要求	216
14.5	触电急救措施	218
<b>附录一</b>	<b>常用架空线的规格</b>	<b>224</b>
<b>附录二</b>	<b>《架空输电线路运行规程》</b>	<b>225</b>
<b>附录三</b>	<b>习题参考答案</b>	<b>240</b>
	<b>参考文献</b>	<b>245</b>

# 第一篇 电力系统基础知识

## 第1章 线路电气基础知识

### 1.1 电力生产常识

#### 1.1.1 电力系统和电力网

##### 一、电力系统及组成

发电厂生产电能，变电所、电力线路输送、分配电能，电动机、电炉、家用电器等用电设备消费电能。由发电、输电、变电、配电、用电设备及相应的辅助系统组成的电能生产、输送、分配、使用的统一整体称为电力系统。也可这样描述，电力系统是由电源、电力网（以下简称电网）以及用户组成的整体。

##### 二、电力系统的额定电压

所谓额定电压，就是发电机、变压器和电气设备等在正常运行时具有最大经济效益时的电压。国家规定了标准电压等级系列，有利于电器制造业的生产标准化和系列化，有利于设计的标准化和选型，有利于电器的互相连接和更换，有利于备件的生产与维修等。

电力系统的额定电压是线路上的平均电压，按照用电设备的额定电压来规定。因此，它与用电设备的额定电压等值。

为了使电气设备的生产实现标准化和系列化，发电机、变压器及各种电气设备都规定有额定电压。我国规定的电气设备额定电压见表 1-1。

表 1-1 电气设备的额定电压

受电设备额定电压/V	额定端电压（线电压）/V		
	发电机	变压器	
		一次绕组 <sup>①</sup>	二次绕组 <sup>②</sup>
220	230	220	230
380	400	380	400
3000	3150	3000 及 3150	3150 及 3300
6000	6300	6000 及 6300	6300 及 6600
10 000	10 500	10 000 及 10 500	10 500 及 11 000
35 000		35 000	38 500
60 000		60 000	66 000
110 000		110 000	121 000
220 000		220 000	242 000
330 000		330 000	363 000

①变压器一次绕组栏内 3150、6300、1050V 电压适用于和发电机端直接连接的升压变压器及降压变压器。

②变压器二次绕组栏内 3300、6600、1100V 电压适用于短路电压值在 7.5% 以上的降压变压器。



在电力线路中有两方面因素导致各点电压不是恒定的：一方面是电能经线路、变压器传输时，会产生电压损耗；另一方面由于负荷的变化，电压损耗也随之变化。因此，在运行中只能使所有用电设备的运行电压尽量接近额定电压，这需要采取许多措施，其中对用电设备、发电机、线路和变压器等设备的运行电压做了特殊的规定：

- (1) 规定了用电设备允许运行的电压偏移值。
- (2) 电力线路的电压损耗不超过 10%。
- (3) 带直配负荷的发电机额定电压比线路额定电压高 5%。

(4) 输入电能的变压器一次绕组相当于用电设备，因此，一次绕组的额定电压应等于用电设备的额定电压。但当变压器直接与发电机连接时（即升压变压器），其一次侧额定电压就应与发电机额定电压相等。变压器二次侧额定电压是空载时的电压，从发电机（即供电端）角度来看，二次侧额定电压应比线路额定电压高 5%，再加上变压器本身电压损耗 5%，所以二次侧额定电压要比线路额定电压高 10%。

### 三、联合电力系统及优越性

把几个地区性电力系统通过输电线路连接起来，组成的更大电力系统称为联合电力系统。联合电力系统的特点是装机容量大，为系统内安装经济性好的大机组创造条件。联合电力系统内的多种发电形式，优势互补，也能合理利用资源，提高运行经济性。联合电力系统还能减少个别机组故障的影响，提高供电的可靠性和电能质量。利用东西部地区的时差、南北地区季节差和负荷的不同性质，可以错开高峰负荷出现的时间，并且可以错开检修时间，提高设备利用率。

### 四、电力系统的功率平衡

交流电的瞬时功率不是一个恒定值，功率在一个周期内的平均值叫做有功功率，又叫平均功率。它是指在电路中电阻部分所消耗的功率，以字母  $P$  表示，单位为 W（瓦特）。

作为特殊商品的电能其生产、输送、分配和使用同时进行，不能大量储存，即发出的和消耗的有功功率、无功功率时时刻刻都处于平衡中，这时系统的电压、频率保持稳定。如果电力系统中有功功率不平衡将引起频率波动。供大于求时将引起系统频率上升，供不应求时将引起系统频率下降。无功功率不平衡将引起电压抖动，供大于求时电压上升，供不应求时电压下降。

### 五、电力系统中发电机的并列运行

为了保证电能质量，且做到经济、稳定运行，希望电力系统内所有发电机都并列运行。系统的容量越大，每个用户用电所占的比例就越低，它们的投入或切除对系统频率和电压的影响也就越小。所以，大电网对每个用户用电设备来说，相当于无穷大，其具体表现是电压、频率基本恒定，内阻抗趋于零。发电厂中同步发电机均装有同期装置，检查发电机与电网的相序、频率、电压相量相同时，将发电机并入电网。

### 六、电能质量

衡量电能质量的两个主要指标是频率、电压的变化。频率变化是电网稳定运行的指标。频率降低，电机转数下降，它所带动的机器和机械生产效率就会降低。我国和世界大多数国家电力系统标称频率为 50Hz，美国和日本的部分地区为 60Hz。一般规定电力系统频率偏差允许值为 0.2Hz，当系统容量较大时，偏差值可放宽到  $-0.5 \sim +0.5$ Hz。实际运行中，我国各跨省电力系统频率都保持在  $-0.1 \sim +0.1$ Hz 的范围内，这点在电网质量中最有保障。

电压变化是衡量负荷吞吐能力的指标。电压变化过大，将造成系统中的电气设备额定电压偏移过大，运行特性劣化，可使照明灯光变暗，设备启动困难，耗损增加。

为了保证用电设备的正常运行，在综合考虑了设备制造和电网建设的经济合理性后，对各类用户设备规定了如下的允许偏差值，此值为工业企业供配电系统设计提供了依据。

电压偏差计算式为

$$\text{电压偏差}(\%) = (\text{实际电压} - \text{额定电压}) / \text{额定电压} \times 100\%$$

电力系统在正常运行条件下，用户受电端供电电压的允许偏差为：

- (1) 35kV 及以上高压供电和对电压质量有特殊要求的用户为额定电压的 $-5\% \sim +5\%$ ；
- (2) 10kV 及以下高压供电和低压电力用户为额定电压的 $-7\% \sim +7\%$ ；
- (3) 低压照明用户为额定电压的 $-10\% \sim +5\%$ 。

此外，衡量电能质量的还有电压波动和闪变、公用电网谐波限值及三相电压不平衡度等指标。电压波动和闪变是指在系统中存在着大量的整流设备，如电弧炉、电弧焊机、晶闸管控制的电动机等冲击负荷对附近用户的照明和生产过程产生的不良影响。公用电网谐波限值见表 1-2。对于三相电压的不平衡度要求为：公共连接点正常电压不平衡度允许值为 $2\%$ ，短时不得超过 $4\%$ 。

表 1-2 公用电网谐波电压限值

用户供电电压/kV	电压总谐波畸变率/%	各次谐波电压含有率/%	
		奇次	偶次
0.38	5	4	2
6 或 10	4	3.2	1.6
35 或 66	3	2.4	1.2
110	2	1.6	0.8

### 1.1.2 电网不正常情况运行

电网不正常情况运行主要有电压崩溃、频率崩溃、设备过负荷、非同步运行、次同步谐振、低频振荡、自励磁、同步发电机短时失磁异步运行等，对供电影响较大。

### 1.1.3 电网类型及变电所

#### 一、电网的组成

由输配电线路和变电所组成的电网其任务是输送和分配电能，是电力系统的一个重要组成部分，是发电厂和用户之间不可缺少的中间环节。

#### 二、电网的分类

电网按电网结构方式的不同分为开式电网和闭式电网；按供电范围的不同分为地方电网和区域电网；按电压等级高低，可分成低压、高压、超高压和特高压电网等。

(1) 开式电网和闭式电网。凡是用户只能从单方向得到电能的电网称为开式电网。开式电网的优点是接线简单、运行方便、造价低；缺点是可靠性差，如线路故障或检修都会造成部分用户停电。凡是用户可以从两个及以上方向同时得到电能的电网称为闭式电网（见图 1-1）。配电线路接成环网，用户的电源可从两条线路上得到，每个配电用户处有三个环网开关，两个接在两端线路上，一个接用户变压器；另外还可将三个环网开关和配电变压器放在一个箱子中，做成箱式变电所，现在这种用电方式已在我国城区得到广泛应用。闭式电网

的优点是安装方便、外形美观、检修方便、供电可靠，缺点是造价高、经济性差。

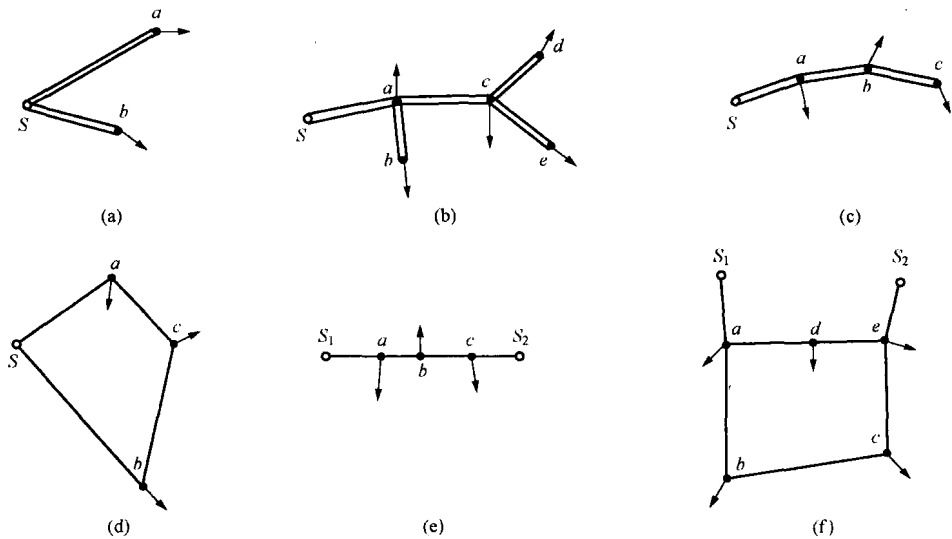


图 1-1 闭式电网

(a) 双回路放射式供电网；(b) 双回路干线式供电网；(c) 链式供电网；  
(d) 环式供电网；(e) 两端供电网；(f) 两端供电环网

(2) 地方电网和区域电网。地方电网一般指运行电压在 110kV 或 63kV 以下，送电距离较近，容量较小的电网。区域电网一般指运行电压在 110kV 或 63kV 以上、送电距离较远、容量较大、供电范围较广的电网。

(3) 低压、高压、超高压和特高压电网。电压等级在 1kV 以下的电网，称为低压电网；电压等级在 1~330kV 之间的电网，称为高压电网；电压等级在 330~1000kV 之间的电网称为超高压电网；1000kV 及以上的电网称为特高压电网。目前我国常用输配电线路的电压等级为 6、10、35、110、220、330、500、750kV。

### 三、输电线路

输电线路是连接发电厂与变电所（站）的传送电能的电力线路。

输电线路按传播电流种类分为交流输电线路和直流输电线路；按架设方式分为架空输电线路和电力电缆输电线路。

(1) 架空交流输电线路。架空输电线路的主要组件包括基础、杆塔、导线、绝缘子、金具、防雷保护设备（包括架空避雷线、避雷器等）及接地装置。输电线路的附属设备有绝缘地线、载波通信等。

(2) 直流输电线路。最简单的直流输电系统包括两个换流站和直流线路。换流站的直流端分别接直流线路的两端，交流端分别接两个交流系统。换流站装有换流器，实现交流和直流间的变换。

从电力系统 I 向电力系统 II 输电时，换流站 I 把电力系统 I（送电端）送来的三相交流电流变换成直流，通过直流线路送到换流站 II，再把直流电流变换成三相交流电流送入电力系统 II。由交流电变换成直流电和由直流电变换成交流电分别称为整流和逆变。高压直流输电主要适用于远距离大功率输电，如海底电缆输电，可实现不同额定频率或相同额定频率异

步运行的交流系统之间的联络以及用于地下电缆向用电密度高的城市供电。

直流输电的优点是：①输送功率相同时，其线路造价低、线损较小、运行费用较低；②两端交流电力系统不需要同步运行，输电距离不受电力系统同步稳定性的限制；③线路的电流、功率易于调节、控制。其缺点是直流输电线路使用的换流设备造价高、投资大、目前尚无成熟技术。

(3) 电力电缆输电线路。电力电缆输电线路又分为地下电缆线路和架空绝缘线路。它由电缆、电缆附件及线路构筑物 3 部分组成。电缆是线路的主体，用来传输和分配电能；电缆附件（如电缆头、电抗器等）起连接电缆、绝缘和密封保护作用；线路构筑物（如引入管、电缆杆、电缆井及电缆进线室等）用来支持电缆和安装电缆。在国际上已普遍采用架空绝缘线路，近年来国内也已在 10kV 以下低压线路上使用。在人口密集的居民区街道、工厂内部的线路走廊，以及比较狭窄的地段使用绝缘导线，通过实际运行证明其优点很多、线路故障机会明显减少。

#### 四、变电所及类型

变电所的主要作用是变换电压，另外还有集中、分配、控制电力流向和调整电压的作用。发电厂的发电机和用户的电气设备的额定电压都较低，为了把电能送到较远地区，减少输送过程中的损耗。发电厂内的升压变压器把电压升高，而后经输电线路把电力输送到用电地区的降压变电所，用户使用的电能一般都要经过数次降压。

变电所按规模、构造形式、在系统中作用和值班方式有四种分类方式。

(1) 按变电所规模分类。变电所的规模一般用电压等级、变压器容量和出线回路数来表示。电压等级通常用变压器高压侧额定电压来表示，如 35、110、220、330、500kV 变电所。变压器容量用几台变压器和每台变压器的额定容量来表示。所以，主变压器的总容量就是该变电所的容量。各级电压出线回路数，通常指由各级电压母线向外出线的回路数。

(2) 按变电所构造分类。变电所分为室外、室内、地下和箱式等多种。

1) 室外式：将仪表、继电器、直流电源及配电开关柜等辅助设备安装在室内，变压器、断路器等主要设备均安置在室外。这种变电所特点是占地面积大、建筑面积小。

2) 室内式：主要电气设备均置于室内。这种变电所占面积小、建筑面积大；在城市居民密集和土地狭窄地区或海岸、盐湖、化工厂及空气污秽地区较适用。

3) 地下变电所：顾名思义，这种变电所建在地下。为将电力输送到城市中心，在人口和工业高度集中的大城市、建筑物密集区，常采用地下变电所。

4) 箱式变电所：可以标准化生产、工厂组装，安装简单，操作、维修也方便，一般在环网供电的配电线路的配电点。

(3) 按变电所在系统中作用分类。变电所分为枢纽（区域）变电所、地区（地方）变电所和用户变电所。

1) 枢纽变电所是系统中的重要变电所。这种变电所有两个以上电源的汇集、分配和交换。穿越功率大，形成电力交换中心，但并不直接向用户供电，只是高压向中压供电，通常采用自耦和三绕组变压器。

2) 地区变电所是供给一个地区用电的变电所。这种变电所多属于受电变电所，没有或很少有穿越功率，通常采用三绕组变压器，即高压受电、中压转供电、低压直配电，接线方

式则根据其用电负荷性质和供电范围而定。

3) 用户变电所也是终端变电所,是从系统中引入高压电源,经变换后将低压电源直接供给用户。这种变电所接线简单、供电范围小,变压器通常采用双绕组。

(4) 按变电所值班方式分类。变电所可分为有人值班和无人值班变电所。

### 五、变电所设备

变电所的设备分为一次设备和二次设备。一次设备主要有变压器、开关电器、母线、绝缘子、电缆、消弧线圈、电抗器、互感器、避雷器和接地装置等,其作用是直接汇集、传输、分配电能。变电所的二次设备有测量仪表、监察装置、信号装置、继电保护、自动装置、操作控制装置和直流电源等,其作用是对一次设备进行测量、监察、保护、操作和控制。

## 1.2 电力系统中性点运行方式及其特点

电力系统的中性点接地是一种工作接地。它具有以下的特点:

- (1) 保证系统在正常及故障情况下具有适当的运行条件;
- (2) 保证电气设备绝缘所需的工作条件;
- (3) 保证继电保护、自动装置和过电压保护装置的正确动作。

### 1.2.1 中性点接地方式分类

电力系统中性点接地方式有两大类:一类是中性点直接接地或经过低阻抗接地,称为大接地电流系统或有效接地系统;另一类是中性点不接地,经过消弧线圈或高阻抗接地,称为小接地电流系统。其中采用最广泛的是中性点不接地、中性点经过消弧线圈接地和中性点直接接地3种方式。

#### 一、中性点不接地系统

当中性点不接地的系统中发生一相接地时,接在相间电压上的受电器的供电并未遭到破坏,它们可以继续运行,但是这种电网长期在一相接地的状态下运行,也是不能允许的,因为这时非故障相电压升高,绝缘薄弱点很可能被击穿,而引起两相接地短路,将严重地损坏电气设备。所以,在中性点不接地电网中,必须设专门的监察装置,以便使运行人员及时发现一相接地故障,从而切除电网中的故障部分。在中性点不接地系统中,当接地的电容电流较大时,在接地处引起的电弧就很难自行熄灭。在接地处还可能出现所谓间隙电弧,即周期地熄灭与重燃的电弧。由于电网是一个具有电感和电容的振荡回路,间歇电弧将引起相对地的过电压,其数值可达2.5~3倍线路相电压。这种过电压会传输到与接地点有直接电连接的整个电网上,更容易引起另一相对地击穿,而形成两相接地短路。在电压为3~10kV的电网中,一相接地时的电容电流不允许大于30A,否则电弧不能自行熄灭。在20~60kV电压级的电网中,间歇电弧所引起的过电压数值更大,对于设备绝缘更为危险,而且由于电压较高,电弧更难自行熄灭。因此,在这些电网中,规定一相接地电流不得大于10A。

中性点不接地系统的优点是当线路不太长时发生单相接地可继续运行,而不需跳闸(一般不超过2h)。其缺点是最大长期工作电压与过电压均较高,存在电弧接地过电压的危险;过电压保护装置的费用较大,对整个系统的绝缘水平要求比较高,较难实现灵敏而有选择的

接地保护。

## 二、中性点经消弧线圈接地系统

当一相接地电容电流超过了上述的允许值时，可以用中性点经消弧线圈接地的方法来解法，该系统即称为中性点经消弧线圈接地系统。

消弧线圈主要由带气隙的铁芯和套在铁芯上的绕组组成，它们被放在充满变压器油的油箱内。绕组的电阻很小，电抗很大。消弧线圈的电感可通过改变接入绕组的匝数加以调节。显然，在正常的运行状态下，由于系统中性点的电压三相不对称电压数值很小，所以通过消弧线圈的电流也很小。采用过补偿方式，即使系统的电容电流突然的减少（如某回线路切除）也不会引起谐振，而是离谐振点更远。

在中性点经消弧线圈接地的系统中，一相接地和中性点不接地系统一样，故障相对地电压为零，非故障相对地电压升高至 $\sqrt{3}$ 倍，三相线电压仍然保持对称并且大小不变，所以也允许暂时运行，但不得超过2h。消弧线圈的作用对瞬时性接地系统故障尤为重要，因为它使接地处的电流大大减小，电弧可能自动熄灭；接地电流小，还可减轻对附近弱电线路的影响。

在中性点经消弧线圈接地的系统中，各相对地绝缘和中性点不接地系统一样，也必须按线电压设计。

## 三、中性点直接接地系统

中性点的电位在电网的任何工作状态下均保持为零。当在这种系统中发生一相接地时，这一相直接经过接地点和接地的中性点短路，一相接地短路电流的数值最大，因而应立即使用继电保护动作，将故障部分切除。

中性点直接接地或经过电抗器接地系统，在发生一相接地故障时，故障的输电线路被切断，因而使用户的供电中断。运行经验表明，在1000V以上的电网中，大多数的一相接地故障，尤其是架空输电线路的一相接地故障，大都具有瞬时的性质，在故障部分切除以后，接地处的绝缘可能迅速恢复，而输电线路可以立即恢复工作。目前在中性点直接接地的电网内，为了提高供电可靠性，均装设自动重合闸装置，在系统一相接地线路切除后，立即自动重合，再试送一次，如为瞬时故障，送电即可恢复。

中性点直接接地的主要优点是在发生一相接地故障时非故障相对地电压不会增高，因而各相对地绝缘即可按相对地电压考虑；电网的电压愈高，经济效果愈大；比较容易实现有选择性的接地保护，由于接地电流较大，继电保护一般都能迅速而准确地切除故障线路，且保护装置简单、工作可靠。

### 1.2.2 中性点接地方式选择

电力系统中的各级电压，应该采取哪一种中性点接地方式，是一个综合性的技术经济比较问题。根据我国情况，系统接地方式规定如下。

(1) 对于6~10kV的系统，由于设备绝缘水平按线电压考虑对于设备造价影响不大，为了提高供电可靠性，一般均采用中性点不接地或经消弧线圈接地的方式。

(2) 对于110kV及以上的系统，主要考虑降低设备绝缘水平，简化继电保护装置，一般均采用中性点直接接地的方式。同时采用输电线路全线架设避雷线和装设自动重合闸装置等措施，以提高供电可靠性。

(3) 20~60kV的系统是一种中间情况，一般一相接地时的电容电流不很大，网络不很

复杂，设备绝缘水平的提高或降低对于造价影响不很显著，所以一般均采用中性点经消弧线圈接地方式。

## 1.3 继电保护的概述

### 1.3.1 概述

运行中的电力系统，由于冰雪、大风、雷击、倒塔，内部过电压或运行人员误操作等，都可能导致故障及不正常运行状态的出现。

各种短路故障是电力系统最常见同时也是最危险的故障，常见故障类型有单相接地短路、两相接地短路、两相短路、三相短路和各种断线故障等。

短路可能造成的危害有如下几点：

- (1) 短路点会流过很大的短路电流并产生电弧，从而烧坏甚至烧毁故障设备；
- (2) 短路电流通过故障设备和非故障设备时，由于发热及电动力的作用，使设备损坏或使用寿命缩短；
- (3) 电力系统中大部分地区的电压下降，破坏用户的正常工作；
- (4) 破坏电力系统各发电厂之间并列运行的稳定性，使事故扩大，甚至使整个系统瓦解。

最常见的不正常工作状态是过负荷。长时间过负荷会使载流部分和绝缘材料的温度升高，加速绝缘的老化和设备的损坏。

电力系统事故是指整个系统或其中一部分的正常工作遭到破坏，导致对用户少送电或使电能质量变坏，甚至造成人身伤亡和电气设备损坏。故障和不正常工作状态都可能在电力系统中引起事故。事故发生的原因，大部分都是由于设备缺陷，设计和安装的错误，检修质量不高或运行维护不当而引起的，少数是由于自然灾害造成的。因此，只要正确地进行设计、制造与安装，加强对设备的维护和检修，就有可能把事故消灭在发生之前，防患于未然。

当系统中有设备发生故障时，可在极短时间内影响到整个系统，必须迅速而有选择性地切除故障设备，以保证无故障部分正常运行，尽可能地缩小故障影响范围。为保证设备的安全及系统的稳定，切除故障的时间甚至要求短到百分之几秒，这样短的时间靠人工切除是不可能的，只能借助于安装在每一设备上的具有保护作用的自动装置——继电保护装置。

继电保护装置，就是能迅速反应电力系统中电气设备发生故障或不正常工作状态（如过负荷、过电压），并动作于断路器的传动机构断开故障线路或发出信号的一种自动装置。其基本任务如下：

- (1) 对故障特征量进行提取、分析，自动、迅速、有选择性地切除故障设备从电力系统中切除，保证无故障部分迅速恢复正常运行且使有故障部分不继续遭受破坏；
- (2) 对于电气元件的不正常工作状态发出信号，警示工作人员及时处理。

### 1.3.2 继电保护的基本原理及构成

#### 一、基本原理

以图 1-2 所示单侧电源辐射电网为例，在正常运行时流过每条线路的均是负荷电流  $I_L$ ，各变电所母线上的电压  $\dot{U}_A$ 、 $\dot{U}_B$ 、 $\dot{U}_C$  都在额定电压  $\pm 5\% \sim \pm 10\%$  的范围内变化。此时线路始

端母线电压与通过该线路电流的比值所反应的测量阻抗  $Z_K$ ，即为该线路的负荷阻抗  $Z_L$ ，其数值较大。例如线路 AB 首端的测量阻抗  $Z_{K1}$ ，即为与流过线路 AB 的负荷电流相应的负荷阻抗  $Z_{L1}$ ，即

$$Z_{K1} = \frac{\dot{U}_A}{\dot{I}_{L1}} = Z_{L1}$$

同理，线路 BC 首端的测量阻抗  $Z_{K2}$ ，即为与流过线路 BC 的负荷电流相应的负荷阻抗  $Z_{L2}$ ，即

$$Z_{K2} = \frac{\dot{U}_B}{\dot{I}_{L2}} = Z_{L2}$$

当图 1-2 (b) 所示线路上的 f 点发生三相短路时，线路 AB、BC 上将流过短路电流  $I_f$ 。短路点的电压  $U_f$  下降到零。母线 AB 上的电压则降低为残压  $\dot{U}_{rA}$ 、 $\dot{U}_{rB}$ ，其值分别为

$$\dot{U}_{rA} = \dot{I}_f(Z_{AB} + Z_f), \quad \dot{U}_{rB} = \dot{I}_f Z_f$$

此时，线路始端测量阻抗将减少为由始端母线到短路点的线路阻抗，即

$$Z_{KA} = \frac{\dot{U}_{rA}}{\dot{I}_f} = Z_{AB} + Z_f$$

$$Z_{KB} = \frac{\dot{U}_{rB}}{\dot{I}_f} = Z_f$$

综上所述，当系统发生短路时，线路中的电流由负荷电流上升为短路电流，电压由额定电压下降为残余电压，测量阻抗由负荷阻抗降低为由母线到故障点的线路阻抗。因此，利用正常运行与故障时这些特征量的变化，便可以构成各种不同原理的继电保护。

过电流保护是指反应故障时电流上升而动作的保护。低电压保护是指反应故障时电压下降而动作的保护。距离保护（阻抗保护）是指反应故障时测量阻抗降低而动作的保护。此外，还可利用内部故障和外部故障时被保护元件两侧电流相位和功率方向的差别，构成各种差动原理的保护，如纵联差动保护、相差高频保护、方向高频保护等。

按照上述原理构成的保护，其特征量可以反应各相的电流和电压（如相电流、相电压等），也可以只反应其中一个对称分量（如负序、零序）的电流和电压，构成相应的负序和零序保护。除了上述以电气量的变化为特征量而构成的保护外，在电力系统中还有一些以非电气量的变化为特征量而构成的保护。例如变压器的气体保护，就是反应油箱内部故障时所产生的气体或油流而动作的一种非电量保护。

## 二、组成

继电保护装置由测量部分、逻辑部分和执行部分组成（见图 1-3）。测量部分测量被保护设备输入的物理量（如电流、电压等），并与整定值进行比较，根据比较结果给出的是“是”、“非”、“大于”、“不大于”，等于“0”

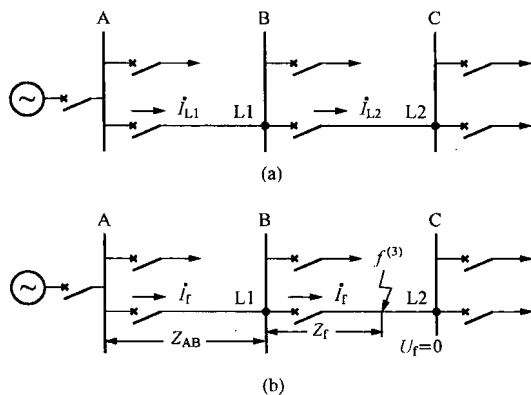


图 1-2 单侧电源辐射电网  
(a) 正常进行；(b) 三相短路时



或“1”等逻辑信号，来决定保护是否应启动。逻辑部分根据测量部分各输出量的大小、性质、输出的逻辑状态、出现的顺序或其组合，来判断保护装置是否动作和如何动作，并传递给执行部分。执行部分则根据逻辑部分传送的信号，执行最终任务，发出动作信号或动作。



图 1-3 继电保护装置原理框图

## 1.4 电力系统继电保护的基本要求

继电保护装置必须满足四个基本要求，即选择性、速动性、灵敏性和可靠性。

### 一、选择性

选择性是指当系统发生故障时，保护装置仅将故障设备从系统中切除，使停电范围尽量缩小，保证系统中非故障部分仍能继续运行。例如图 1-4 中，当 f1 点发生短路时，应由保护 1 和 2 分别跳开断路器 1QF 和 2QF，将故障线路 L1 切除，此时变电所 B 仍可由另一条无故障的线路 L4 继续供电。当 f2 点发生短路时，应由距故障点最近的保护 5 动作，使 5QF 跳闸，保证变电所 A 和 B 正常供电。由此可见，继电保护有选择性动作可将停电范围限制到最小。

当 f3 点发生故障时，按选择性的要求，应由保护 6 动作，跳开 6QF，切除故障线路 L3。如果此时保护 6 或断路器 6QF 拒绝动作，则应由保护 5 动作，使 5QF 跳闸，切除故障线路。保护的这种动作虽然切除了部分

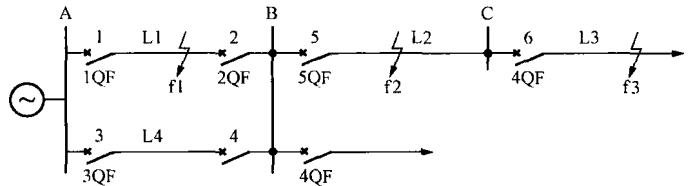


图 1-4 选择性示意图

非故障线路，但在保护和开关拒动的情况下，还是尽可能地限制了故障的发展，缩小了停电范围，因而也认为是有选择性的。此时称保护 5 为保护 6 的后备保护。由于按这种方式构成的后备保护是在远处实现的，因此又称为远后备保护。保护装置的选择性是保证对用户安全供电的最基本条件之一，是研制和设计保护时要首先慎重考虑的问题。

### 二、速动性

速动性是指在电力系统发生故障时，继电保护装置尽可能快速地动作并将故障切除，减少用户在电压降低的条件下运行的时间，避免故障电流及其引起的电弧损坏设备，保证系统的并列稳定运行。动作迅速并有选择性的保护装置，结构复杂、价格昂贵。在保证系统及设备安全的条件下，允许保护装置的动作带有延时。从故障发生到断路器跳闸灭弧的时间，称为故障切除时间，它等于继电保护装置动作时间与断路器跳闸时间之和。所以，快速消除故障，除了保护装置动作要快外，还要求采用快速断路器。现代高压电网中快速保护装置的最小动作时间可达 0.01s，断路器的最小动作时间为 0.05~0.068s。系统结构决定故障极限切除时间。

### 三、灵敏性

灵敏性是指保护装置对在其保护范围内发生的故障和不正常运行状态的反应能力。要求