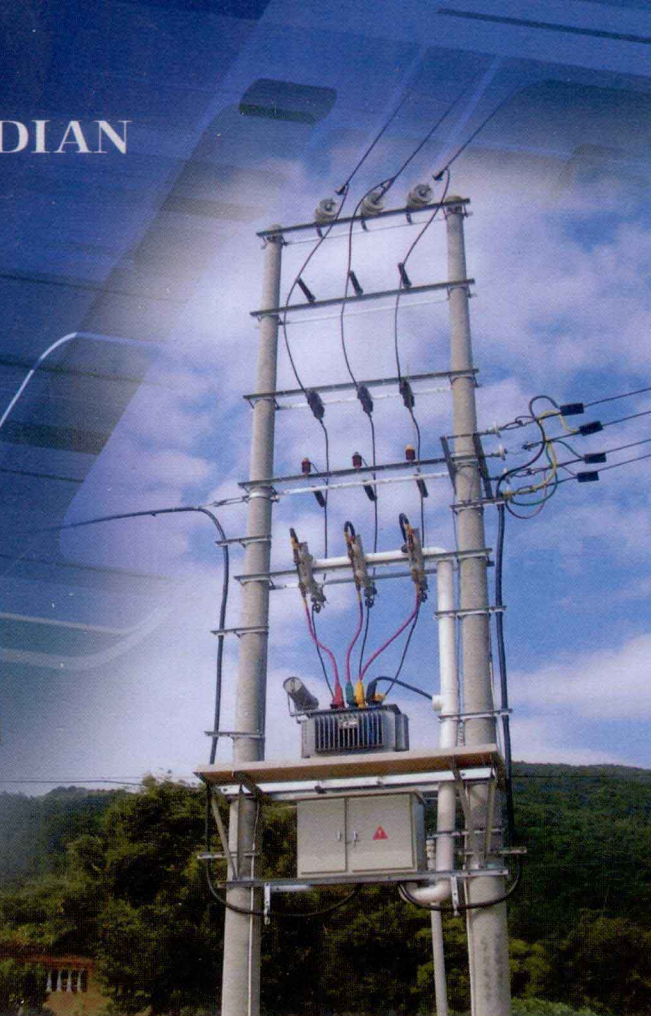


ZHONGDIYA PEIDIAN  
JINENG SHIWU



# 中低压配电

## 技能实务

李天友 林秋金 编著



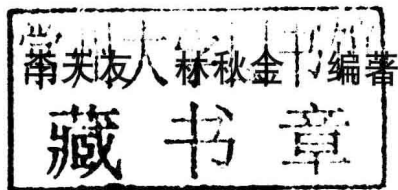
中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

ZHONGDIYA PEIDIAN  
JINENG SHIWU

# 中低压配电

## 技能实务

---



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

随着配电技术的发展和管理的变革,中低压配电从以架空线路为主向绝缘化、电缆化方向发展,网络接线方式从辐射型向环网方式发展,作业方式从停电作业向不停电作业方式转变,由此,配电专业工种也由传统的以配电线路工种为主向电缆、带电作业等工种拓展,而且这些专业工种在配电作业现场是一种继承、发展、融合的关系。本书以配电专业传统技能知识为基础,融入当今配电的新知识、新技术、新设备(仪器)和新技能,介绍配电各专业技能及现场管理知识,具有很强的实用性。

全书共十章,第一章、第二章介绍配电网的基本概念和相关技术基础知识,作为配电技能人员的应知部分。第三章介绍配电技能人员必须具备的基本技能。第四章至第十章系统地介绍架空配电线路、电缆线路、配电装置、防雷与接地、带电作业、配电自动化、配电网运行与监控分别进行介绍,作为配电技能人员的应会部分。

本书可作为电网企业、工矿企业等从事配电施工、运行、检修的技能人员、管理人员的工作参考书和业务培训书,也可供高等职业院校相关专业师生学习参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

中低压配电技能实务/李天友,林秋金编著. —北京:中国电力出版社,2011.11

ISBN 978-7-5123-2403-9

I. ①中… II. ①李…②林… III. ①配电系统—基本知识  
IV. ①TM7

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第244185号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2012年6月第一版 2012年6月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 20.5印张 490千字

印数0001—3000册 定价50.00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

# 自序



屈指算来，自己在电网企业工作已近三十年，从配电线路班的技术员、配电工区的管理者、生产技术部主任到总工程师等，组织实施了配电网的升压（6kV 升为 10kV）改造、特区投资开发区的配电网及配电自动化的规划与建设、配电带电作业的推广应用等，经历了配电网从架空裸导线到绝缘化、电缆化，接线方式从辐射型到环网方式的变化与发展以及配电网技术装备与管理不断提升的过程。多年的配电工作经历，使我深深感受到配电网在应用先进技术装备的同时，必须同步提升运行管理和技能工艺水平，才能真正发挥作用并产生效益。现场有不少此方面的案例，如配电网绝缘化初期因绝缘导线的架设工艺质量问题而多次造成断线、电缆化初期因电缆接头的制作工艺问题而造成爆炸甚至“火烧连营”等。

中低压配电网直接连接用户，是确保供电质量、提升电网运行效益最直接最有效的环节。目前，用户遭受的停电有近 90% 是由于中低压配电系统环节造成的，电网一半以上的电能损耗产生在中低压配电网，配电设备整体运行效率较低，中压配电线路和变压器年平均载荷率仅在 30% 左右。因此，提高电网的供电可靠性和运行效率的落脚点在中低压配电网。此外，现代经济社会对供电质量提出了更高的要求，停电给社会造成的影响也越来越大，短暂的供电中断、电压骤降等供电质量扰动，都可能引起敏感用户的重大经济损失或造成不良的社会影响，配电运行技术管理面临新课题。

近十几年来，本人多次参加国际供电会议（CIRED）并对国外电力企业进行学习考察，深刻感受了国际电力界对配电运行管理及配电技术发展的普遍重视。配电技术面临重要的机遇与挑战，特别是分布式电源的发展，正在给配电网带来深刻的变化。刚刚结束的第 21 届国际供电会议，“配电领域技术和商业驱动力的全球视野”是会议的主题，60 多个国家和地区的 1200 多位专家学者云集德国法兰克福。本人有幸再次参加会议，深入了解国际智能配电网的最新研究动态。不久的将来，呈现在我们面前的配电网，将是一个融合传统和前沿配电工程技术、高级传感和测控技术、

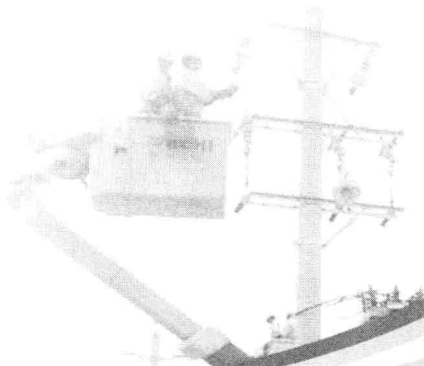
现代计算机与通信技术的更加安全、可靠（自愈）、优质、高效、兼容（支持分布式电源接入）、互动的配电系统。配电网将从传统的供方主导、单向供电、基本依赖人工管理的无源网络向用户参与、潮流双向流动、高度自动化的有源网络方向转变；将能大量接纳分布式的可再生能源发电，推动新能源革命，促进环保与社会可持续发展；将提供更加优质可靠的电能，更好地保障现代社会经济的发展；同时实现配电网的最优运行，达到经济高效。面对配电网发展面临的新形势和配电技术面临的新课题，真感形势喜人、形势逼人！

借着本书的出版，有感而发，谈点配电工作的经历、体会与展望，作为本书的序。



2011.12.11.于鹭岛

# 前 言



2011年是我国“十二五”的开局之年，是全面实施“十二五”电网发展规划的起步之年，又是国家启动第二轮农村电网升级改造的第一年。电网的建设与升级改造，除了应用先进的技术和装备外，还必须同步提高技能工艺和运行管理水平。目前，中低压配电网的运行管理和安装检修工艺水平相对较弱，标准化程度不高，是明显的短板，应给予特别的关注。同时，随着配电技术的发展和组织管理的变革，配电新技术、新设备、新工艺不断涌现；中低压配电网从以架空线路为主向绝缘化、电缆化方向发展；配电专业工种也由传统的以配电线路工为主，向电缆、带电作业、配电自动化等工种拓展。因此本书的编撰以配电专业传统技能知识为基础，介绍配电电缆、配电带电作业、配电自动化、配电运行与监控等当今配电的新知识、新设备和新技能，突出“技能实务”性，力求通俗易懂，贴近实际，便于阅读自学。期待能对配电网运行管理、维护检修和升级改造第一线的工作者有所裨益！

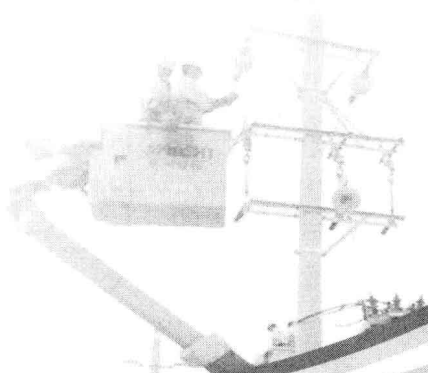
本书在编写过程中得到朱良镞老师、徐丙垠教授的指导；“电缆线路的故障探测”和“配电自动化”章节的编写，承蒙朱启林与张海台高工提供了大量资料，在此表示衷心的感谢！

由于时间仓促再加上作者的水平有限，书中不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正！

编著者

2011年10月

# 目 录



自序  
前言

<b>第一章 概述</b> .....	1
第一节 配电网.....	1
第二节 供电质量.....	4
第三节 电力用户与电力负荷 .....	10
第四节 配电网规划 .....	12
第五节 发展中的配电网 .....	16
<b>第二章 配电技术基础</b> .....	21
第一节 配电网故障分析 .....	21
第二节 配电网接地方式 .....	29
第三节 配电网继电保护 .....	35
第四节 线损与无功补偿 .....	37
<b>第三章 配电基本技能</b> .....	42
第一节 常用工器具 .....	42
第二节 基本技能 .....	55
第三节 配电常见起重作业 .....	68
第四节 配电作业的紧急救护 .....	80
<b>第四章 架空配电线路</b> .....	90
第一节 架空配电线路的构成 .....	90
第二节 架空配电线路的测量.....	117
第三节 架空配电线路的施工.....	120
第四节 架空绝缘导线的应用.....	141
第五节 运行维护与检修.....	143
第六节 常见故障及其预防.....	151

<b>第五章 配电电缆线路</b> .....	154
第一节 电力电缆及敷设方式.....	154
第二节 电缆线路的施工.....	160
第三节 电缆线路的运行维护.....	176
第四节 电缆线路的故障探测.....	180
<b>第六章 配电装置</b> .....	197
第一节 配电变压器.....	197
第二节 柱上开关.....	213
第三节 跌落式熔断器与隔离开关.....	218
第四节 中低压开关柜.....	222
第五节 开闭所与配电所.....	231
第六节 户外箱式配电装置.....	235
第七节 柔性配电设备.....	238
<b>第七章 配电网的防雷与接地</b> .....	242
第一节 常见过电压及其危害.....	242
第二节 避雷器.....	246
第三节 配电网的防雷保护.....	251
第四节 接地与接地装置.....	256
<b>第八章 配电带电作业</b> .....	261
第一节 带电作业基本知识.....	261
第二节 带电作业的工器具与管理.....	266
第三节 绝缘斗臂车与绝缘平台.....	270
第四节 中压配电带电作业.....	273
第五节 低压配电带电作业.....	276
<b>第九章 配电自动化</b> .....	281
第一节 配电自动化系统概述.....	281
第二节 馈线自动化.....	287
第三节 配电自动化终端设备.....	292
第四节 配电自动化的通信.....	298
<b>第十章 配电网运行与监控</b> .....	302
第一节 配电设备运行管理.....	302
第二节 配电网运行监控.....	308
第三节 配电网倒闸操作.....	312
第四节 保供电与应急管理.....	315
<b>参考文献</b> .....	319



## 概 述

本章介绍了电力系统与配电网的基本概念，阐述了配电网的分类以及中低压配电网的特点，使读者对配电网有初步了解；此外，本章还介绍了供电质量、电力用户与电力负荷，并介绍了配电网规划和未来配电网的发展愿景。

## 第一节 配 电 网

## 一、电力系统的定义

电力系统是由发电、输送、分配和消耗电能环节的发电机、变压器、电力线路和电力用户组成的整体，是将一次能源转换成电能并输送和分配到用户的统一系统，其构成示意图如图 1-1 所示。电力系统还包括保证其安全可靠运行的继电保护装置、安全自动装置、调度自动化系统和电力通信等相应的辅助系统（一般称为二次系统），以及通过电或机械的方式联入电力系统中的设备（如发电机的励磁调节器、调速器）。

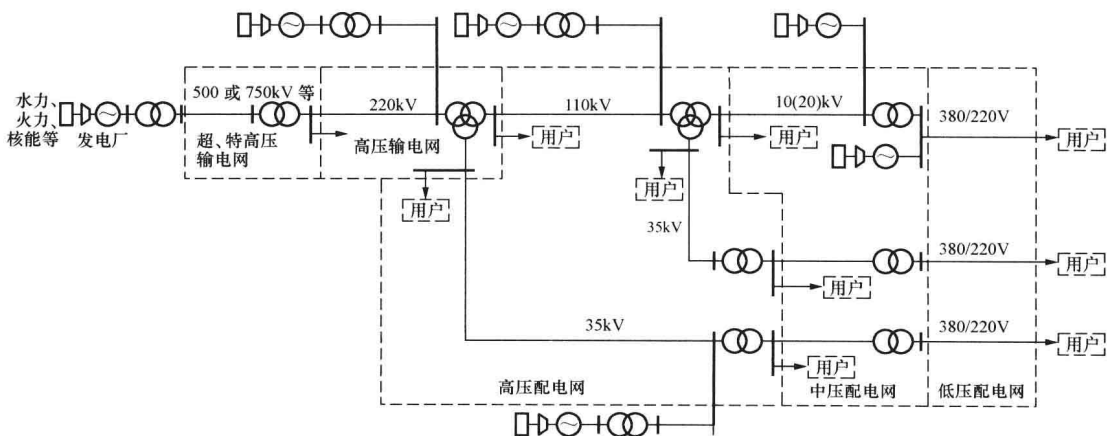


图 1-1 电力系统构成示意图

电力网络是电力系统中输送、变换和分配电能的一部分，包含输电网络和配电网络。输电和配电主要按其各自的性质及其在电力系统中的作用和功能来划分。输电网络一般是电力系统中主要承担电能输送的电压等级较高的电网，是电力系统的主干网络，可以采用直流或

交流电方式实现大容量、长距离输送。输电设施包括输电线路、变电站（或换流站，直流输电方式使用，包括整流站和逆变站）等。配电网是指从输电网或地区发电厂接受电能，通过配电设施就地或逐级分配给各类用户的电力网。配电设施包括配电线路、配电变压器、配电所（站或室）、开闭所等。

电力系统电压等级由国家规定，即为额定电压标准。电力系统中的发电机、变压器、电力线路等电力设备都是按规定的额定电压设计并制造的，以使它们在技术经济上能够合理地匹配。由于历史等方面的原因，世界各国采用的电压等级标准不尽相同。我国通用的电压等级及应用场合如表 1-1 所示。

表 1-1 额定电压等级及应用场合

额定线电压 (kV)	应用场合	说 明
0.38	低压配电网	中小容量动力、电力电子用电设备、照明家电等
3	工业企业内部使用	大、中容量动力及低压用电设备，多数为用户内部电压变换后应用
6	发电机、工矿企业内中压配电网	大容量动力及中压配电网用户，多数为用户内部电压变换后应用
10 (20)	发电机、中压配电网	大容量动力及中压用户
35	高压配电网	部分城市及县电网大量采用
66	高压配电网	我国东北地区使用
110	高压配电网	普遍采用作为城市（或大部分区）供配电网络
220	高压输电网	作为各省或城市供电网架（网络）
330	超高压输电网	我国西北地区作为跨省及省内供电网架
500	超高压输电网	作为全国跨省及省内电网网架
750	超高压输电网	作为我国西北地区跨省及省内电网网架

电力系统的运行管理应满足以下的基本要求：

(1) 供电安全、可靠。用户供电中断，会使生产停顿、生活混乱，甚至危及人身和设备的安全，造成很大经济损失和社会影响。停电给国民经济造成的间接损失，也远大于电力系统少售电造成的直接损失。因此，电力系统运行的首要任务是满足用户对供电安全、可靠的要求。

(2) 供电质量合格。供电电压、频率以及波形符合国家规定，为用户提供合格的电能。

(3) 经济运行。电能生产的规模很大，消耗大量一次能源，在电能生产与输送、分配过程中应力求节约，减小消耗，最大限度地降低电能成本。

(4) 降低对环境的负面影响。在电能生产、输送、分配、消耗过程中，总是会伴生出大量的排放物，如废气、废水、废渣和噪声。因此电力企业应遵照环保要求对“三废”进行无害化处理、抑制噪声，最大限度地降低对环境的负面影响。电力设施的建设要尽量减少对土地的占用，且要做到与周围环境相协调。

## 二、配电网的定义

从输电网（或本地区发电厂）接受电能，就地或逐级向各类用户供给和配送电能的电力网称为配电网。配电网设施主要包括配电线路、变电站、开闭所、配电所（站或室）、断路器

器、负荷开关、配电（杆上）变压器等。配电网设施及其二次保护、监视、测量与控制设备组成的整体称为配电系统。对配电系统的基本要求是供电安全、可靠，电能质量合格，运行维护成本低，电能损耗小，配电设施与周围环境相协调等。

我国的配电网供电范围基本上按行政建制地市级城市和县（市）、乡镇所辖的管理区域划分，仅有少数地区由于行政区划或电网发展过程等原因，存在跨行政区域供、受电情况，但销售电量及收入可以按行政区域分列统计。根据所在地域或服务对象的不同，配电网可划分为城市配电网与农村配电网；根据配电线路的安装方式不同，可分为架空配电网与电缆配电网；而根据电压等级的不同，可分为高压配电网、中压配电网与低压配电网。

### （一）高压配电网

高压配电网是指高压配电线路和相应等级的变配电电气设备系统组成的配电网。高压配电网的功能是从上一级电源接受电能后，可以直接向高压用户供电，也可以通过变压器降压后为下一级中压配电网提供电源。高压配电网电压为 110、66、35kV 三个电压等级，城市配电网一般采用 110kV 作为高压配电电压，东北地区采用 66kV，上海市区、天津、青岛等城市采用 35kV 电压等级。

### （二）中压配电网

中压配电网是指由中压配电线路和变配电电气设备组成的配电网。中压配电网的功能是从输电网或高压配电网接受电能，向中压用户供电，或向各用户小区的配电所（站或室）供电，再经过配电变压器降压后向下一级低压配电网提供电源。

中压配电网主要有 20、10、6kV 三个电压等级。在我国，大多数中压配电网采用 10kV 电压等级，部分负荷密度高的地区采用了 20kV 电压等级，少量工厂用电系统的中压采用 6kV 电压等级。

20kV 电压与 10kV 电压比较，在同等导线截面及电流密度的情况下，输送容量提高 1 倍，在保证相同的电压质量的前提下，其合理送电距离可增加 1 倍；在输送相同的距离和相同功率的前提下，电压损失降低 50%，电能损失降低 75%，可减少变电站配电出线回路数近一半，对负荷密集地区可避免出线过多带来的通道路径等困难，在同一地区可使降压变电站的设置数量减少一半。

### （三）低压配电网

低压配电网是指由低压配电线路及其附属电气设备组成的向用户提供电能的配电网。低压配电网的功能是以中压配电网的配电变压器为电源，将电能通过低压配电线路直接送给用户。低压电源点较多，一台配电变压器就可作为一个低压配电网的电源，供电半径通常不超过几百米。低压配电线路供电容量不大，但分布面广，除一些集中用电的用户外，大量是供给城乡居民生活用电及分散的街道照明用电等。

低压配电网主要采用的三相四线制。我国采用单相 220V、三相 380V 的低压额定电压。

### （四）中低压配电网的特点

中低压配电网即电压在 10（20）kV 及以下的配电网，它直接面向用户，是确保供电质量的关键环节，具有如下特点：

- （1）配电设备遍布城市和农村的大街小巷、村庄，是城乡公共基础设施的组成部分。
- （2）网络结构与设备变动频繁，这主要是受市政建设要求迁杆移线和用户负荷发展的

影响。

(3) 中压配电网一般采用辐射型或环网开环运行的供电方式,分支线路大多采用 T 接。低压配电网则一般采用辐射型的供电方式。

(4) 配电网保护、控制装置的配置相对简单,技术要求也相对低一些,例如允许继电保护装置延时动作切除配电线路末端的故障,而在输电电路上任何一点发生故障时,都要求继电保护装置快速动作。

(5) 用户遭受的停电绝大部分是由于配电系统环节造成的。据有关供电可靠性统计表明,扣除系统容量不足限电因素,因配电系统环节造成的停电,共占总停电事件的 96% 左右,而高电压输变电环节造成的停电占 4% 左右。

(6) 电网一半以上的传输电能损耗发生在中低压配电网。

由此可见,要进一步提高供电质量和电网企业的经济效益,必须在配电系统上下工夫,加强配电系统技术创新与管理工作。

需要特别指出,目前在世界范围内分布式发电技术迅速发展,被称为是改变电力工业未来面貌的革命。大量的小型分布式发电设备直接接入配电网,给配电网的分析计算、设计、保护与控制、运行管理提出了许多新的课题。

## 第二节 供电质量

供电质量是指供电企业满足用户电力需求的质量,包括电能质量和供电可靠性两个方面。电能质量是指供应到用户电能的品质优劣程度,衡量电能质量的主要指标为电网频率和供电电压质量。供电可靠性是指对用户连续供电的可靠程度,直接体现了配电网对用户的供电能力。中低压配电网是保证用户供电质量的最直接、最重要的环节。

### 一、电网频率质量

我国的电力系统的运行频率为 50Hz,理想的频率标称值应当是 50Hz。但是,受发电机运行、电网负荷等因素的影响,常达不到理想频率。频率偏差即系统频率的实际值和标称值之差。我国规定:

(1) 电网容量在 300 万 kW 及以上,频率允许偏差为  $\pm 0.2\text{Hz}$ ;

(2) 电网容量在 300 万 kW 以下,频率允许偏差为  $\pm 0.5\text{Hz}$ 。

电网频率不符合上述标准,频率低或频率高都将给用户和电力生产造成严重危害。当电网频率过低时,会损坏发电设备,降低发电厂出力,容易使电网发生瓦解事故,造成大面积停电;同时会损坏用电设备,使产品质量下降,容易使用户的自动装置误动。当电网频率过高时,线损会成倍增长,导体的表面电流密度随频率增加而增大,用户载流设备的负载能力明显下降。

### 二、供电电压质量

#### 1. 电压允许偏差

一般以电压变动幅度来衡量是否符合标准。GB/T 12325—2008《电能质量 供电电压偏差》规定,允许的偏差如下:

(1) 35kV 及以上供电电压允许偏差为额定电压的  $\pm 10\%$ ;

(2) 10kV (20kV) 及以下三相供电电压允许偏差为额定电压的  $\pm 7\%$ ;

(3) 220V 单相供电电压允许偏差为额定电压的 $-10\% \sim +7\%$ 。

该标准中, 供电电压为供电部门与用户产权分界处的电压或由供用电合同所规定的电能计量点的电压。

## 2. 造成电压偏差的原因及其危害

(1) 配电系统运行方面的原因。配电系统个别元件或单元故障或检修退出运行, 或运行方式改变, 造成配电网功率分布和阻抗的改变, 从而使电压损耗发生变化, 造成用户受电端电压的偏差。

(2) 配电系统规划设计方面的原因。由于规划设计不完善, 造成配电线路供电半径超过允许范围或设备过负荷, 引起电压损耗或电压偏差率超出允许范围。

(3) 用户原因。用户的有功功率、无功功率和功率因数是随时间变化的, 这必然引起负荷电流的变化, 从而使配电网中各点的电压损耗发生变化, 造成用户受电端电压的波动。

还有因上级输电系统的异常运行造成变电所的母线电压偏移, 从而造成用户受电端电压的偏差。

电压偏差超过允许范围时, 对用户用电设备的运行具有很大的影响。由于各种用电设备都是按额定电压来设计的, 所以用电设备都是在额定电压下运行才能取得最佳技术经济效果。偏离额定电压运行, 会导致效率下降, 经济性变差, 当电压偏离过大时, 必然会影响工农业生产、甚至会损坏用电设备。如电压过低时, 用户异步电动机的转差率将增大, 同时电动机绕组中的电流将增大, 引起绕组温升, 使电动机的寿命缩短。还有, 电压过低对照明负荷也有影响, 将使白炽灯发光效率大大降低, 日光灯甚至无法启动。

## 三、公用电网谐波

电力谐波主要是冶金、化工、电气化铁路等换流设备及其他非线性用电设备产生的。随着硅整流及可控硅换流设备的广泛使用和各種非线性负荷的增加, 大量的谐波电流注入电网, 造成电压正弦波形畸变, 使电能质量下降, 给发供电设备及用户用电设备带来严重危害。为保证向各类用户提供质量合格的电能, 必须对各种非线性用电设备注入电网的谐波电流加以限制和管理, 以保证电网和用户用电设备的安全经济运行。

与电网连接并输入两倍于 50Hz 及以上频率电流的设备, 统称谐波源。

谐波电流与电压正弦波形畸变率, 用下式进行计算

$$DFV_n = \sqrt{3} \frac{V_N n I_n}{10S_k} \times 100\% \quad (1-1)$$

式中  $DFV_n$ ——第  $n$  次谐波电压正弦波形畸变率 (相电压有效值) 的百分数;

$V_N$ ——电网的额定线电压, kV;

$S_k$ ——电网连接点的三相短路容量, MVA;

$n$ ——谐波次数 ( $n=2, 3, 4, 5, \dots$ );

$I_n$ ——第  $n$  次谐波电流有效值, 单位 A。

将式 (1-1) 进行变换即可求出第  $n$  次谐波电流值。

GB/T 14549—1993《电能质量 公用电网谐波》规定, 公用电网谐波电压 (相电压) 限值不得超过表 1-2 规定。公共连接点的全部用户向该用户注入的谐波电流分量 (方均根值或有效值) 不应超过表 1-3 规定的允许值。

表 1-2 公用电网谐波电压限值

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

表 1-3 注入公共连接点的谐波电流允许值

供电电压 (kV)	基准短路容量 (MVA)	谐波次数及谐波电流允许值 (有效值, A)											
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0.38	10	78	62	39	62	26	44	19	21	16	28	13	24
6	100	43	34	21	34	14	24	11	11	8.5	16	7.1	13
10	100	26	20	13	20	8.5	15	6.4	6.8	5.1	9.3	4.3	7.9
35	250	15	12	7.7	12	5.1	8.8	3.8	4.1	3.1	5.6	2.6	4.7
66	500	16	13	8.1	13	5.4	9.3	4.1	4.3	3.3	5.9	2.7	5.0
110	750	12	9.6	6.0	9.6	4.0	6.8	3.0	3.2	2.4	4.3	2.0	3.7

供电电压 (kV)	基准短路容量 (MVA)	谐波次数及谐波电流允许值 (有效值, A)											
		14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
0.38	10	11	12	9.7	18	8.6	16	7.8	8.9	7.1	14	6.5	12
6	100	6.1	6.8	5.3	10	4.7	9.0	4.3	4.9	3.9	7.4	3.6	6.8
10	100	3.7	4.1	3.2	6.0	2.8	5.4	2.6	2.9	2.3	4.5	2.1	4.1
35	250	2.2	2.5	1.9	3.6	1.7	3.2	1.5	1.8	1.4	2.7	1.3	2.5
66	500	2.3	2.6	2.0	3.8	1.8	3.4	1.6	1.9	1.5	2.8	1.4	2.6
110	750	1.7	1.9	1.5	2.8	1.3	2.5	1.2	1.4	1.1	2.1	1.0	1.9

#### 四、三相电压不平衡

三相电压不平衡度指三相电力系统中三相不平衡的程度，用电压或电流负序分量与正序分量的均方根值百分比表示。

三相电压不平衡度表达式为

$$\epsilon_U = \frac{U_2}{U_1} \times 100 \quad (\%) \quad (1-2)$$

式中  $U_1$ ——三相电压的正序分量方均根值，V；

$U_2$ ——三相电压的负序分量方均根值，V。

如将式 (1-2) 中的  $U_1$ 、 $U_2$  换为  $I_1$ 、 $I_2$  则为相应的电流不平衡度  $\epsilon_I$  的表达式。

GB/T 15543—2008《电能质量 三相电压不平衡》规定，电压不平衡度限值如下：

(1) 电力系统公共连接点电压不平衡度限值为：电网正常运行时，负序电压不平衡度不超过 2%，短时不得超过 4%；低压系统零序电压限值暂无规定，但各相电压必须满足 GB/T 12325—2008《电能质量 供电电压偏差》的要求。

(2) 接于公共连接点的每个用户引起该点负序电压不平衡度允许值一般为 1.3%，短时不得超过 2.6%。

三相电压不平衡主要是由单相或三相不平衡负荷引起的，因此不平衡度的测量标准衡量点选在电网的公共连接点，以便在保证其他用户正常用电的基础上，给干扰源用户以最大的限值。

## 五、电压波动和电压闪变

电压波动是指由电力系统中具有冲击性功率的负荷（生产运行过程中周期性从电网中取用快速变动功率的负荷，如炼钢电弧炉、轧机、电弧焊机等）引起的公共供电点电压的快速变动。

闪变是指人对灯光照度不稳定造成的视感。

### 1. 电压波动

对于平衡的三相负荷，电压波动  $d$  可由式 (1-3) 计算

$$d \approx \frac{\Delta S_i}{S_{sc}} \times 100\% \quad (1-3)$$

式中  $\Delta S_i$ ——负荷的变化量，kVA；

$S_{sc}$ ——考察点的短路容量，kVA。

已知三相负荷的有功功率和无功功率的变化量分别为  $\Delta P_i$  和  $\Delta Q_i$  时，则用式 (1-4) 计算电压波动

$$d = \frac{R_L \Delta P_i + X_L \Delta Q_i}{U_N^2} \times 100\% \quad (1-4)$$

式中  $R_L$ ——电网阻抗的电阻分量， $\Omega$ ；

$X_L$ ——电抗分量， $\Omega$ ；

$\Delta P_i$ ——有功功率的变化量，kW；

$\Delta Q_i$ ——无功功率的变化量，kvar；

$U_N$ ——额定电压，kV。

对于由某一相间单相负荷变化引起的电压波动，公式为

$$d \approx \sqrt{3} \frac{\Delta S}{S_{sc}} \times 100\% \quad (1-5)$$

式中  $\Delta S$ ——负荷的变化量，kVA；

$S_{sc}$ ——考察点的短路容量，kVA。

GB/T 12326—2008《电能质量 电压波动和闪变》规定，电力系统公共连接点由波动负荷产生的电压波动限值见表 1-4。

表 1-4 电压波动限值

电压变动频度 $r$ (次/h)	$r \leq 1$	$1 < r \leq 10$	$10 < r \leq 100$	$100 < r \leq 1000$
$U_N \leq 35\text{kV}$ 时的 $d\%$	4	3	2	1.25

### 2. 电压闪变

不同类型的电压闪变可有不同的评估方法。一般可用符合标准的闪变仪进行测量，有的可用仿真法、闪变时间分析法进行评估。

电力系统公共连接点，由波动负荷引起的短时闪变值  $P_{st}$  和长时闪变值  $P_{lt}$  应满足表 1-5 的要求。

表 1-5 各级电压下的闪变限值

系统电压等级	$U_N \leq 1\text{kV}$	$1\text{kV} \leq U_N \leq 35\text{kV}$
$P_{st}$	1.0	0.9 (1.0)
$P_{lt}$	0.8	0.7 (0.8)

注  $P_{st}$  和  $P_{lt}$  每次测量周期分别取为 10min 和 2h。

## 六、电压骤降

电压骤降指供电电压的有效值短时间突然下降的事件。目前,国际、国内都还没有统一的电压骤降标准。根据欧洲标准 EN 50160 以及美国国际电气电子工程师协会推荐标准 (IEEE Std 1159—1992),电压骤降的定义为:供电电压有效值突然降至额定电压的 90%~10% (0.9p. u. ~0.1p. u.),然后又恢复至正常电压,且这一过程的持续时间为 10ms~60s。

引起电压骤降的原因主要是电网或用电设备发生短路故障;一些用电设备(如电动机)启动或突然加荷等。与长时间供电中断事故相比,电压骤降有发生频率高、经历时间短、事故原因不易觉察的特点,处理起来也比较困难。

电压骤降会造成计算机系统失灵、自动化控制装置停顿或误动、变频调速器停顿等;引起接触器跳开或低压保护启动,造成电动机、电梯等停顿;引起高温光源(碘钨灯)熄灭,造成公共活动场所失去照明。因此,电压骤降会给工商业带来很大的经济损失,甚至会危害人身及社会安全。

用于评估配电系统电压骤降的一个基本指标是  $SARFI(x)$ ,通过对被评估系统的所有用户在单位时间(一般为 1 年)进行监测,统计各用户感受到电压骤降次数及每一次电压骤降时的电压有效值,从而得出用户平均经受的电压有效值在  $x\%$  以下的电压骤降次数,即

$$SARFI(x) = \frac{\sum N_i}{N_T} \quad (1-6)$$

式中  $x$ ——电压有效值的阈值,取值范围在 90~10 之间;

$N_i$ ——经受电压骤降的用户一年中感受到的电压有效值小于  $x\%$  的电压骤降次数;

$N_T$ ——被评估系统的用户总数。例如用户 1 年中平均经受了 3 次电压有效值低于 70% 的电压骤降,则  $SARFI(70)=3$ 。

$SARFI(x)$  与反映用户平均停电次数的指标  $SARFI$  类似。 $SARFI$  用来评价供电中断(中断时间大于 3min); $SARFI(x)$  将电压骤降发生的频次与幅值下降严重程度统一考虑,能够确切地反映电压骤降的对用电设备的影响。

电压骤降并不是一个新问题,由于以往的绝大多数用电设备对电压的短时突然变化不敏感,该问题没有引起人们的重视。20 世纪 80 年代后,计算机、可编程逻辑控制器、变频调速设备等数字设备应用和工业生产过程自动化程度的提高,对供电质量提出了更高的要求,使问题凸显出来。实际上,目前造成用电设备不正常运行的主要电能质量问题就是电压骤降引起的。据国外统计,用户电能质量问题投诉中,由于电压骤降原因造成的占 80% 以上。因此,电压骤降已成为国际上电能质量研究的首要问题,国际电工委员会 IEC 已着手制定电压骤降的技术标准。

## 七、供电可靠性

### 1. 供电可靠性的定义

供电可靠性是指供电系统对用户持续供电的能力。用户是指供电系统提供电能的对象,按其接入系统的电压等级可分为低压用户、中压用户、高压用户。由于用户接入系统电压等级不同,统计单位也存在差异。

供电可靠性反映了对电能需求的满足程度,是供电系统的规划、设计、基建、施工、设备选型、生产运行、供电服务等方面的质量和管理水平的综合体现,它是一项复杂的系统工



程, 涉及发、输、变、配、用电等各个环节。

### 2. 供电可靠性的评价指标

供电可靠性评价指标, 是用户供电可靠性的具体量化。描述供电可靠性的主要指标有供电可靠率、用户平均停电时间、用户平均停电次数、用户平均停电用户数、故障停电平均持续时间。用户供电可靠性统计评价指标按不同电压等级分别统计, 供电可靠性的数据采集、统计、填报应及时、准确、完整。

(1) 供电可靠率: 在统计期间内, 对用户有效供电时间总小时数与统计期间小时数的比值, 记作 RS-1, 是反映供电系统对用户供电的可靠度的指标。其公式为

$$\text{供电可靠率} = \left(1 - \frac{\text{用户平均停电时间}}{\text{统计期间时间}}\right) \times 100\% \quad (1-7)$$

若不计外部影响, 则记作 RS-2; 不计系统电源不足的影响, 则记作 RS-3。

(2) 用户平均停电时间: 在统计期间内用户的平均停电小时数, 记为 AIHC-1。其公式为

$$\text{用户平均停电时间} = \frac{\sum(\text{每次停电持续时间} \times \text{每次停电用户数})}{\text{总用户数}} \quad (\text{h/户}) \quad (1-8)$$

若不计外部影响, 则记作 AIHC-2; 不计系统电源不足的影响, 记作 AIHC-3。

(3) 用户平均停电次数: 在统计期间内供电用户的平均停电次数, 记作 AITC-1, 是反映供电系统对用户停电频率的指标。其公式为

$$\text{用户平均停电次数} = \frac{\sum \text{每次停电用户数}}{\text{总用户数}} \quad (\text{次/户}) \quad (1-9)$$

若不计外部影响, 则记作 AITC-2; 不计系统电源不足的影响, 则记作 AITC-3。

(4) 用户平均停电用户数: 在统计期间内, 平均每次停电的用户数, 记作 MIC, 是反映了停电的平均停电范围大小的指标, 其公式为

$$\text{平均停电用户数} = \frac{\sum \text{每次停电用户数}}{\text{停电次数}} \quad (\text{户/次}) \quad (1-10)$$

(5) 故障停电平均持续时间: 在统计期间内, 故障停电的每次平均停电小时数, 记作 MID-F, 主要反映了平均每次对故障停电恢复能力的水平, 其公式为

$$\text{故障停电平均持续时间} = \frac{\sum \text{故障停电时间}}{\text{故障停电次数}} \quad (\text{h/次}) \quad (1-11)$$

我国供电可靠性仅以中压用户 (若为公用变压器, 每台计 1 户) 作为统计单位进行统计, 完成的指标值与发达国家相比也有较大差距, 国际上发达国家已将低压用户纳入统计范围。

### 3. 提高供电可靠性的措施

供电可靠性评价指标中, 停电用户数和停电时间是关键因素, 要从规划建设、设备选型、运行维护全过程管理, 不断改进和提高供电可靠性。

(1) 科学规划, 建设坚强的电网。除了上级电源的强有力支撑外, 配网线路应分段合理, 减少线路段户数, 实现可转供电; 采用成熟可靠少维护设备, 提高绝缘化、电缆化、自动化比率, 从网架和装备上为可靠供电奠定物质基础。

(2) 提高维护与抢修质量, 减少故障停电。加强配电线路的巡视维护消缺, 保障配网安全健康水平。提高故障修复的效率, 借助配电自动化、线路短路故障指示器的信息, 大幅度