

第一分册

电力系统电压

中国电力出版社

内 容 提 要

本书是电能质量技术丛书第一分册。

全书共分七章,主要内容有电力系统电压概述、电压偏差的国家标准、电压偏差超标的危害、电力系统电压调整、电力系统的无功潮流优化、电压和无功电力的运行管理。最后附有三个有关电压和无功电力的技术导则、管理法规以及调整电费办法的附录。

本书写得有理、有据,深入浅出,说明问题清楚,可供电力科研、设计部门,电厂和供用电部门的管理人员、技术人员以及工人阅读,也可作为大专院校和专业培训的教材及参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统电压/马维新编著. -北京:中国电力出版社,1998
(电能质量技术丛书;第1分册)
ISBN 7-80125-580-1

I. 电… II. 马… III. 电力系统-电压 N. TM714.2

中国版本图书馆CIP数据核字(97)第27371号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 邮政编码100044)

北京市梨园彩印厂印刷

各地新华书店经售

*

1998年4月第一版 1998年4月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 32开本 5.625印张 123千字

印数0001-3080册 定价6.50元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

序 言

近年来我国电力工业已得到了很大发展。1995 年底, 全国发电机总装机容量达 21700 万 kW, 居世界第三位; 电能质量在电压、频率方面也有很大改善。前几年我曾经参加了天津地区电网电压的调研工作, 当时由于电网运行电压很低, 产生了很多问题。例如: 一家工厂有一台功率比较大的设备, 其电动机因电压低起动不起来, 为了起动这台设备, 必须把全厂其他负荷都停下来, 待其起动后再逐渐恢复其他负荷; 另有一家钢铁厂, 由于电压低经常烧毁电动机, 大约平均一天烧一台, 为此该钢铁厂成立了一个专门的电机修理班。像这样的例子还有不少。理论和实践证明, 低电压运行是由于电网严重缺乏无功补偿设备造成的。一些电力部门及其用户没有充分认识到无功补偿设备对维持电网正常运行电压的重要性。有些运行人员在这种情况下为了提高供电电压, 盲目采取了改变变压器分接头的办法, 结果导致电网电压水平更低。随着这些年电力技术的发展现在电网电压水平有了较大提高, 但仍存在一些问题, 而且还出现了一些新问题。总之, 我国电网电压质量与世界先进水平比较, 还有不小的差距, 这些问题需要我们认真研究解决。

本书是电能质量技术丛书的第一分册, 主要介绍电网电压偏差指标和国家标准, 执行国家标准的意义以及有关电压调整、电压和无功管理方面的一些内容。

林海雪高级工程师(教授级)为本书的写作提供了许多资料, 周双喜教授对本书仔细审阅并提出许多宝贵意见。在

此一并表示深切的谢意。

由于本人的水平和经验所限，加之时间比较匆促，书中错误和不足之处，欢迎读者批评指正。来信请寄北京清华大学电机系，邮编 100084。

编著者

1996 年 12 月

丛 书 前 言

随着我国国民经济的蓬勃发展、电力网负荷急剧加大,特别是冲击性、非线性负荷容量的不断增长,使得电网发生电压波形畸变、电压波动、闪变和三相不平衡等电能质量问题。这些项的数字特征量和标准是评定电能质量的重要指标,也是电力技术工作者选用补偿方法、装置和技术措施的依据。

编写一套电能质量技术丛书,是许多供用电工作者的愿望,经孙树勤教授推荐,得到中国电力出版社的支持,由电能质量系列国家标准的主要起草人林海雪高级工程师(教授级)作为本丛书主编。针对业已制订的五项电能质量国家标准,丛书也分为五个分册。丛书主编和各分册的作者皆多年从事该问题的研究,从所掌握大量国内外的文献资料、参加实践所积累的丰富经验以及指导科研所获得的成果中,概括出处理该问题的脉络而编辑成书。电能质量的重要性与日俱增,所以当前编写这套丛书显得特别及时有用。

这套丛书的各分册相互联系,而每一分册又能独立成书并都有其独到之处,丛书的编著具有较高的学术水平和实用价值。限于篇幅仅以第四分册为例,说明本丛书的这一特点。该分册以大量观察者对闪变反应所形成的单位闪变曲线为出发点,进而用自动控制理论的传递函数来表达此曲线,以此作为基础探讨闪变的检测和预估方法,指导检测仪器的研究和开发,阐述闪变标准的制订和采取补偿措施等,使全书形成一个能提供给读者从头至尾阅读的独立分册。

研究电能质量并制订标准的目的是作为管理和补偿的判

据。首先需要找出负荷的变动量及其对电能质量的影响，然后采取对策。但补偿方法繁多，丛书作者通过系统论述对各种方法进行比较，找出内在联系，结合以实验为基础所作的假定，力求对负荷补偿问题总结出一些具有指导意义的原则。负荷补偿是一个复杂的、内容多样化的问题，特别是以三相系统为主要无功补偿对象的情况，不但牵涉到电压波动、闪变、谐波、频率变动，而且增加了三相不平衡这一因素。为求经济有效，从实用的角度出发，目前负荷补偿的指导原则是采用工程处理方式，即对三相作综合考虑。假定三相为简单对称，即电源电压为三相对称的正弦波，利用坐标变换，例如将不平衡三相电流变换到 d, q, o 坐标系中，其中电流的 d 轴直流分量反映三相基波有功功率。在总电流中排除此电流分量后，余下的电流、结合各次谐波电流都作为被补偿对象统筹处理。显然在此领域中尚有大量研究和实践问题有待进一步深入探讨。

丛书的取材和编写就是按上述思路而安排的。在叙述上力求条理清楚，深入浅出并且益以实例，以便于读者接受和应用。丛书所论述的问题不但会引起我国电力部门和有关科研部门的重视，而且在供电资源丰富的工业国家也将这一问题提到日程表内，显然必将继续发展。丛书对此问题系统、深入地总结了近年来的研究和实践成果，相信它将有益于从事这一领域的科技工作者开展工作。

唐统一

1996 年 12 月

主要符号表

d	扰动变量	Q_M	高峰负荷时的无功功率
E	发电机电动势	$Q_{\max}$	无功功率上限
I	电流	ΔQ	无功功率损耗, 无功增量
I	节点注入电流向量	r, R	电阻
I_N	额定电流	r_n	励磁回路等值电阻
K_s	同步力矩系数	R	由节点阻抗矩阵 Z 元素实部组成的矩阵
L	拉格朗日函数	S	复功率, $S = P + jQ$
n	转速	s	异步电动机转差, $s = \frac{n_1 - n}{n}$, n_1 为同步转速, n 为异步电机转速
P	发电机电功率, 有功功率	s_M	对应异步电机最大力矩 T_M 的转差
P_{Gi}	i 节点发电机发出的有功功率	S_d, S_o	灵敏度矩阵
P_{Li}	i 节点负荷吸收的有功功率	t	时间
P_i	i 节点注入有功功率	T	力矩
P_M	静态稳定极限功率	$T_M, T_{\max}$	电机的最大力矩
ΔP	有功功率损耗, 有功功率增量	T_N	电机的额定力矩
Q	无功功率	T_{st}	电机的起动力矩
Q_{Gi}	i 节点无功电源发出的无功功率	u	控制变量
Q_{Li}	i 节点负荷吸收的无功功率	U	电压
Q_i	i 节点注入无功功率	U	节点电压向量
Q_m	低谷负荷时的无功功率	U_N	标称电压
$Q_{\min}$	无功功率下限	$U_{L\min}$	最小负荷时的电压
		$U_{\min}$	电压下限

$U_{l,max}$	最大负荷时的电压
U_{max}	电压上限
$d\dot{U}$	电压降落
δU	电压降落的横分量
ΔU	电压降落的纵分量, 电压 损耗
x	状态变量, 电抗
X	电抗
X_C	电容容抗
X_L	电感感抗
X_d	同步电机 d 轴同步电抗

X_q	同步电机 q 轴同步电抗
X_m	励磁电抗
X	由节点阻抗矩阵 Z 元素 虚部组成的矩阵
Z	节点阻抗矩阵
δ	功角, 发电机电动势与系 统电压之间的相角差
λ	拉格朗日乘子
τ_{max}	最大负荷损耗小时
φ	功率因数角

目 录

丛书前言

序言

主要符号表

第一章 概述	1
第一节 电能质量	1
第二节 电压损耗与电压偏差	3
第三节 电压水平与无功功率平衡	5
第四节 电压偏差大的危害	9
第五节 专用术语	9
第二章 电压偏差的国家标准	11
第一节 国家标准 GB12325—90	11
第二节 制订《标准》的主要依据	12
第三节 关于《标准》的一些说明	17
第三章 电压偏差超标的危害	23
第一节 电压偏差对用电设备的影响	23
第二节 电压偏差对电力系统稳定和经济运 行的影响	35
第四章 电力系统电压调整	48
第一节 中枢点电压管理	48
第二节 发电机调压	52
第三节 变压器调压	54
第四节 改变电力网无功功率分布	64

第五节	改变电力网参数	82
第六节	各种调压方法的比较和应用	86
第七节	电网的综合调压和调压的灵敏度分析	89
第八节	电力系统无功功率和电压的自动控制	96
第九节	变电站无功功率和电压综合控制装置	99
第五章	电力系统的无功潮流优化	102
第一节	电力系统无功电源的最优分布	103
第二节	电力系统无功负荷的最优补偿	115
第三节	优化技术的应用	121
第六章	电力系统的电压监测	128
第一节	电压监测仪表的基本要求	128
第二节	典型的电压监测仪表介绍	131
第七章	电压和无功电力的运行管理	134
第一节	管理的目标和方法	134
第二节	电压偏差的统计考核	135
第三节	无功功率补偿设备的运行和管理	137
附录 I	中华人民共和国能源部标准电力系统电 压和无功电力技术导则 (试行)	140
附录 II	电力系统电压质量和无功电力管理规定 (试行)	154
附录 III	功率因数调整电费办法	163
参考文献		168

第一章 概 述

第一节 电 能 质 量

现代生产和现代生活离不开电力。电力部门不仅要满足用户对电力数量不断增长的需要，而且也要满足对电能质量上的要求。如同其他产品一样，电能也是有质量优劣之分的。电能质量主要包括以下几项内容。

(1) 频率。我国电网交流电的额定频率是 50Hz，这和世界上大部分国家的规定是一致的，也有一部分国家电网频率采用 60Hz。

(2) 电压。国家标准 GB156—93《标准电压》对电力系统标称电压、电气设备额定电压和电气设备最高电压作了规定。

220~1000V 的电力系统标称电压及电气设备的额定电压为 220/380V、380/660V 和 1000V。

3kV 及以上的交流三相系统的标称电压及电气设备的最高电压见表 1-1。

表 1-1 标 称 电 压 kV

系统的标称电压	电气设备的 最高电压	系统的标称电压	电气设备的 最高电压
3	3.6	10	12
6	7.2	(20)	(24)

续表

系统的标称电压	电气设备的 最高电压	系统的标称电压	电气设备的 最高电压
35	40.5	330	363
66	72.5	500	550
110	126 (123)	(750)	(800)
220	252 (245)		1200

表 1-1 中括号中数值为用户有要求时使用。

电气设备的额定电压可从表 1-1 中选取，由产品标准确定。

电压偏差是指电力系统电压缓慢变化时，实际电压与系统标称电压之差。

严格地讲，电压质量的含义包括对缓慢变化的电压偏差的要求及对电压波动和闪变的要求，后者是快速的电压变动，由大型电弧炉或其他冲击负荷引起。本分册仅涉及前者。

(3) 波形。电力系统交流电的波形应是正弦波。

(4) 对于三相系统来说，还要求三相对称。

电网运行中的频率、电压可能与额定值有差别，波形也会发生畸变。我们把实际值与额定值之差称作偏差，偏差可以用有名值（如 Hz、V）来表示，也可用对额定值的百分数来表示。波形畸变可以用谐波来定量描述。

超出一定范围的频率或电压的偏差或波形的畸变，都会对电力用户以及电网的安全、经济运行等带来不良的影响。因此，电网运行中要将这些参数的偏差限制在允许的范围之内，这样才能保证电能质量。

我国已经制订了电能质量各项主要指标的国家标准。应

该让广大电力用户和电力工作者知道这些国家标准，认识执行这些标准的重要性。

第二节 电压损耗与电压偏差

当线路传输功率时，电流将在线路阻抗上产生电压损耗，下面来分析这个问题。用图 1-1 (a) 的等值电路代表输电线，并暂时不考虑线路分布电容的影响。

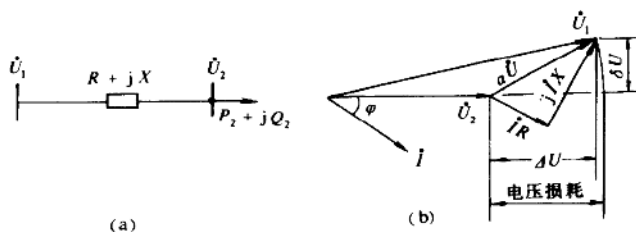


图 1-1 线路等值电路和相量图

(a) 等值电路；(b) 相量图

从图 1-1 (b) 相量图中可知，输电线路首端线电压 $\dot{U}_1$ 和末端线电压 $\dot{U}_2$ 之间存在下列关系

$$\dot{U}_1 - \dot{U}_2 = d\dot{U} = \sqrt{3} \dot{I} (R + jX) \quad (1-1)$$

式中 $\dot{U}_1$ 、 $\dot{U}_2$ 相量差 $d\dot{U}$ 称作线路的电压降落，实质上它是电流在线路阻抗上的电压降。取 $d\dot{U}$ 在 $\dot{U}_2$ 方向上的投影 ΔU 及 $\dot{U}_2$ 垂直方向上的投影 δU ，分别称为电压降落的纵分量及横分量。从相量图上可知

$$\Delta U = \sqrt{3} I (R \cos \varphi + X \sin \varphi) \quad (1-2)$$

$$\delta U = \sqrt{3} I (X \cos \varphi - R \sin \varphi) \quad (1-3)$$

若电流 I 用线路末端的功率 S_2 和电压 U_2 表示，即

$$I = \frac{S_2}{\sqrt{3} U_2} \quad (1-4)$$

将式 (1-4) 代入式 (1-2) 和式 (1-3)，则可得

$$\Delta U = \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} \quad (1-5)$$

$$\delta U = \frac{P_2 X - Q_2 R}{U_2} \quad (1-6)$$

以 $\dot{U}_2$ 作为坐标参考轴时

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \Delta U + j\delta U \quad (1-7)$$

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U)^2 + (\delta U)^2} \quad (1-8)$$

上面介绍的是电压降落的计算，实际上人们更关心的是线路两端电压有效值之差，也就是线路的电压损耗。当 $\dot{U}_1$ 、 $\dot{U}_2$ 间的相角差比较小时，可以忽略电压降落横分量对电压损耗的影响，把电压降落纵分量近似看作电压损耗，即

$$U_1 \approx U_2 + \frac{P_2 R + Q_2 X}{U_2} \quad (1-9)$$

从式 (1-9) 可见，电压损耗由两部分组成，即

$$\Delta U = \frac{P_2 R}{U_2} + \frac{Q_2 X}{U_2} \quad (1-10)$$

一般说来，在超高压电网中，因输电线的导线截面较大， $X \gg R$ ，所以无功功率 Q_2 对电压损耗的影响很大，有功功率 P_2 对电压损耗的影响要小得多。在变压器等值电路中，一般串联电抗的数值也要比电阻大得多，无功功率也是造成电压

损耗的主要因素。

从以上分析可见，在电网线路、变压器上产生的电压损耗与以下因素有关。一方面是与电网元件的参数有关，因为在电网各点由于电压损耗不同，所以它们实际的运行电压或电压偏差是不同的；另一方面电压损耗的大小还决定于线路或变压器传输的功率，由于传输功率随着时间是不断变化的，因此即使在电网的同一节点上，它的电压损耗或电压偏差也是随着时间在不断变化的。在统计电网电压或电压偏差范围时，要注意它们在空间上的分布和随时间而变化（实质上是随负荷大小而变化）的特点。

第三节 电压水平与无功功率平衡

电压与无功功率关系密切，上一节已指出，在许多情况下无功功率是造成电压损耗的主要因素。这一节将分析电网电压水平与无功功率平衡之间的关系。

一、负荷的电压静态特性

负荷的电压静态特性是指电压缓慢变化时负荷功率的变化特性，即负荷的功率与其端电压的关系。

负荷的基本类型有照明负荷、电热负荷、整流负荷以及异步电动机和同步电动机等负荷。因为负荷的组成是复杂的，很难用分析计算的方法得到负荷的电压特性，而往往是通过实测或者根据经验估计。但对于上述每种负荷成分，我们可以分析它们的电压特性，只有掌握了这些基本负荷的特性，才能理解综合负荷的特性。

首先介绍负荷的有功功率电压静态特性。一般来说，同步电动机的有功负荷与电压无关；异步电动机的有功负荷基

本上与电压无关；照明负荷中白炽灯吸收的有功功率近似地与端电压的 1.6 次方成正比，而荧光灯消耗的有功功率基本上不随电压变化；电热、电炉、整流负荷的有功消耗大致与电压的平方成正比；输电线路的功率损耗在输送功率不变的情况下，近似与电压的平方成反比。

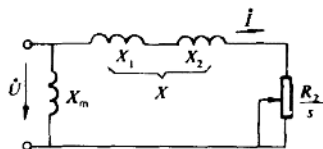


图 1-2 异步电动机等值电路

在介绍负荷的无功功率电压静态特性中，将较为详细地介绍异步电动机的无功电压特性，这是因为异步电动机占电网负荷的很大部分，而且是电网主要的无功负荷。

图 1-2 是异步电动机的等值电路，图中 X_1 为定子漏抗， X_2 为转子漏抗， R_2 为转子电阻， X_m 为励磁电抗， s 为转差。电动机从电网吸收的无功功率为

$$Q = \frac{U^2}{X_m} + I^2(X_1 + X_2) \quad (1-11)$$

式 (1-11) 中各量皆用标么值。其中：第一项为励磁无功功率损耗，其数值随电压的升高急剧增加；第二项为定子和转子绕组漏抗上的无功功率损耗，电压升高时由于转差 s 减小使电流下降而使其有所降低。图 1-3 为异步电动机的无功功率、电压静态特性。从图 1-3 可见，在

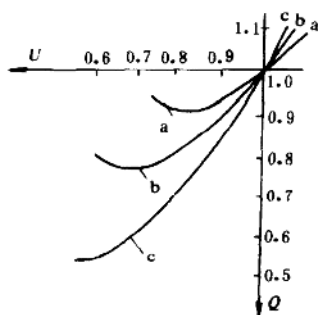


图 1-3 异步电动机无功功率电压静态特性
a—100%满负荷；b—75%满负荷；
c—50%满负荷

额定工作点附近异步电动机吸收的无功功率是随端电压的降低而明显下降，这是因为励磁电抗的无功功率消耗占主要部分，但电压下降到一定程度，电压的下降不再使异步机吸收的无功功率下降，反而使其有所增加，这是因为此时漏电抗的无功功率消耗占了主要部分，而磁路已经不饱和，励磁电抗上无功功率损耗的降低已没有以前显著。另外，无功功率的电压特性和异步电动机的负荷率（实际有功功率与额定有功功率之比）有很大的关系，负荷率高时，漏抗中的无功功率损耗在电动机总的无功功率中占的比例要高一些。

图 1-4 为某一综合负荷电压静态特性，异步电动机占总负荷 70%，图中有功功率电压特性比较平缓，而无功功率电压特性很陡。

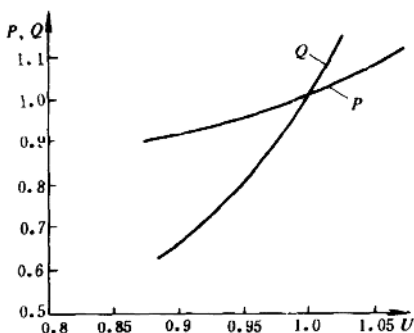


图 1-4 综合负荷电压静态特性

二、无功功率平衡

无功功率平衡是指在电网运行的每一时刻，所有无功电源发出的无功功率要等于所有负荷所消耗的无功功率和系统中各环节上无功功率损耗之和。无功电源包括发电机、调相机、静止无功补偿器、并联电容器等。系统中无功功率损耗