

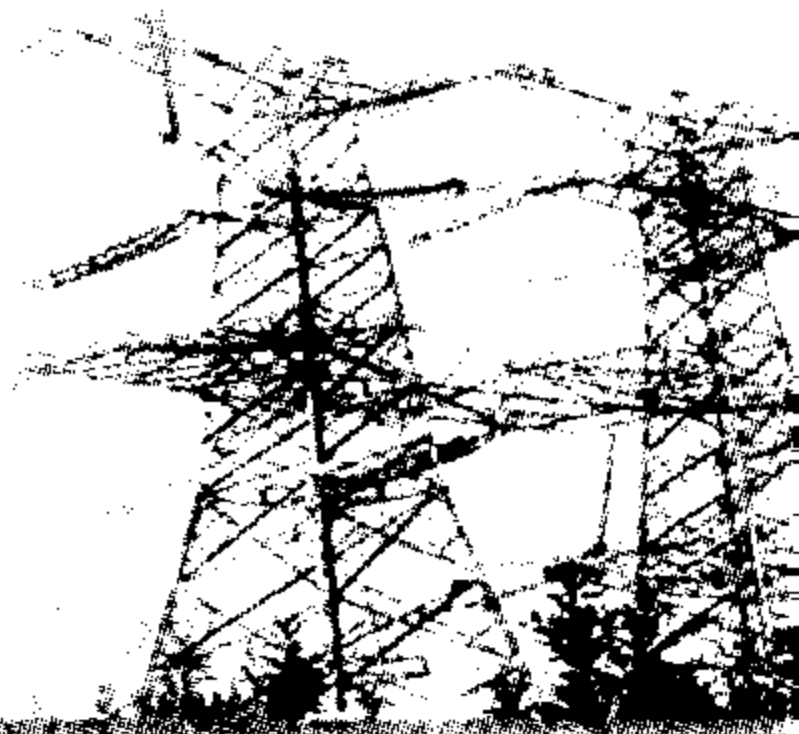
农村电网电压质量 和无功电力管理 培训教材

国家电网公司农电工作部 编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn



前 言

电能作为商品的一种，其产品质量的好坏，关系到千家万户的利益。电压质量作为衡量电能质量的一个指标，受到了供电企业和电力用户的极大关注和重视，一方面供电企业为了电网的安全、可靠和经济运行，需要保证电网的电压质量，而另一方面电力用户也需要供电企业提供符合电压质量标准的电力供应，以满足生产和生活的需要。

随着全面建设小康社会进程的加快，县域经济和小城镇经济的迅猛发展，同时也由于 8.14 美加大停电、意大利大停电和希腊雅典大停电引发原因对我们的警示教育作用，农网的电压无功管理工作，受到了国家电网公司上上下下的高度重视。农网的电压无功管理工作搞不好，农网的分层、分区和就地无功平衡工作没作好，势必会破坏整个电网的无功平衡，引起大量的无功穿越，造成大量的电能损耗和电压质量水平的降低。

为了顺应电力体制改革对电力部门提出的要求，顺应电力市场发展的形势，响应原国家电力公司党组提出的优质服务八项承诺的号召，公司农电工作部以抓电压合格率和供电可靠率为突破口，以创县一流供电企业为旗帜，全面提升县供电企业的生产经营管理水平，先后建立健全了农网电压无功管理工作的组织保障体系、监测体系和统计报表体系，使农网的电压无功管理工作从无到有，并逐步走向规范，但是由于农网的电压无功管理工作起步较晚，管理基础比较薄弱，从事农网电压无功管理工作的专业技术人员的业务素质还比较低，一定程度上制约了农网电压无功管理工作水平的进一步提高。

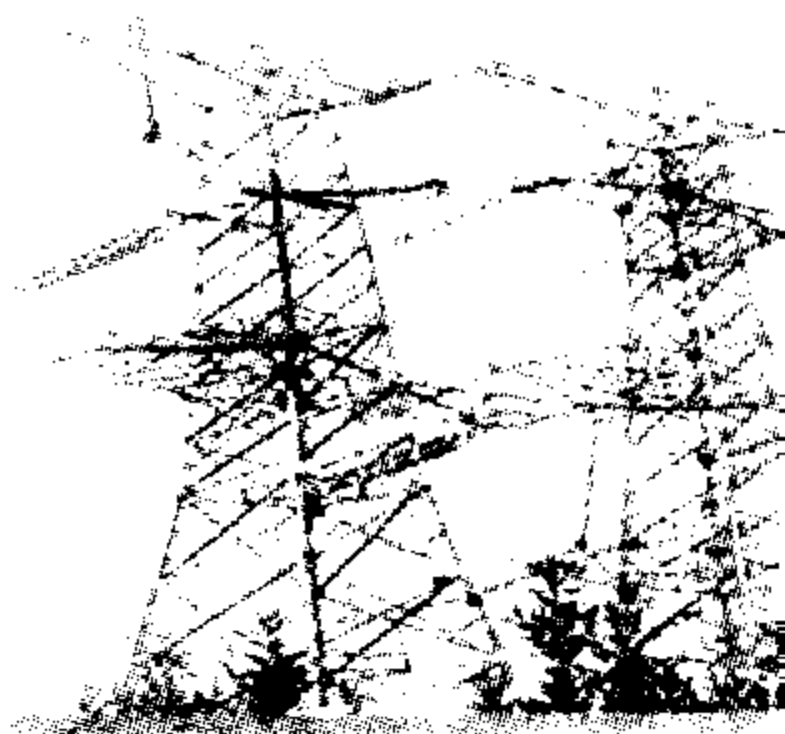
为了尽快培养出一支德才兼备，懂业务，会管理，勇于创新，具有大局意识和协作精神的农网电压无功管理人才队伍；一支崇尚科学，专业理论扎实，技术创新和科技攻关能力强，实践经验丰富，作风严谨的农网电压无功管理工作的技术人才队伍；一支具有

良好的职业道德，爱岗敬业，有一定文化素养，勇于实践，一专多能，技术精湛，作风过硬的农网电压无功管理工作的技能人才队伍。我们组织有关农网电压无功管理方面的专家学者，编写了这本《国家电网公司农网电压无功管理培训教材》，对电压无功的基础知识、谐波、闪变、三相不平衡、电压调整、无功优化、统计监测、生产运行和维护管理等方面的内容，进行了全面的阐述和讲解，以期通过对农网电压无功管理工作的专业技术人员的培训，达到较全面地掌握电压无功管理方面的知识，知道在自己的工作岗位上“如何干，怎么干，向哪个方向努力干”的目的。本书的培训对象主要是针对中专及以上的读者，在培训中授课教师可以根据学员的具体情况适当取舍。

本书的编写得到了辽宁省和江苏省电力公司农电工作部的大力帮助，在此对他们给予的鼎力支持，表示衷心的感谢。由于编写时间仓促和能力所限，书中内容难免存在不尽如意之处，希望广大的专家和读者多提宝贵意见，我们将在教材修订过程中加以改进和提高。

编写者

2004.09.30



目 录

前 言

第一章	电力系统电压和无功基本概念	1
第一节	电压名词术语和电力系统标准电压	1
第二节	电压质量标准	4
第三节	电力系统功率名词术语与基本知识	9
第四节	无功电源及无功负荷	15
第五节	无功、电压与线损之间的关系	18
	思考题	21
第二章	电力网设备参数和潮流计算	22
第一节	线路参数计算和等值电路	22
第二节	变压器参数计算和等值电路	28
第三节	标么值计算和等值电路	37
第四节	开式供电网络潮流计算	42
	思考题	50
第三章	电力系统谐波	51
第一节	基本概念	51
第二节	谐波的危害	54
第三节	主要谐波源	59
第四节	电网谐波的测量仪器和测量方法	66
第五节	减少谐波影响的技术措施	69
	思考题	70
第四章	电压波动和闪变	71
第一节	基本概念	71
第二节	主要波动源	73
第三节	闪变测量仪及测量方法	78

第四节	电压波动和闪变的计算及评估方法	81
第五节	改善电压波动和闪变的技术措施	87
思考题		87
第五章	三相电压不平衡	88
第一节	概述	88
第二节	对称分量及三相不平衡算式	89
第三节	改善三相不平衡的措施	91
思考题		94
第六章	电压调整与偏差控制	96
第一节	电力系统电压调整的特征	96
第二节	电压偏差控制的基本条件	99
第三节	电压调整的原则与方法	100
第四节	电网电压偏差的控制	113
第五节	农网中小水电并网运行的电压控制	118
第六节	电压无功控制方法	120
思考题		130
第七章	农村电网无功功率优化配置	131
第一节	220kV 及以下电网无功规划的基本要求	131
第二节	确定无功补偿容量的基本方法	132
第三节	无功补偿优化配置	142
思考题		153
第八章	农网电压质量和无功电力管理	154
第一节	农网电压无功管理体系	154
第二节	农网电压无功管理	158
第三节	电压监测与统计	170
第四节	电压监测仪管理	192
思考题		203
第九章	无功补偿设备	204
第一节	并联电容器	204
第二节	并联电容器组	213

第三节	其他无功补偿设备	231
思考题		232
第十章	无功补偿装置维护和运行管理	233
第一节	并联电容器运行管理	233
第二节	无功补偿装置维护管理	244
第三节	无功补偿装置安全性评价	257
第四节	案例	260
思考题		270
附录一	电能质量 供电电压允许偏差 (GB/T 12325—2003)	271
附录二	电能质量 电压波动和闪变 (GB 12326—2000)	273
附录三	电能质量 公用电网谐波 (GB/T14549—1993)	291
附录四	电能质量 三相电压允许不平衡度 (GB/T 15543—1995)	300
附录五	电压监测仪订货技术条件 (DL500—1992)	304
附录六	电力系统电压和无功电力技术导则 (试行) (SD325—1989)	324
附录七	国家电网公司农村电网电压质量和 无功电力管理办法	334
附录八	国家电网公司电力系统电压质量和无功电力 管理规定	342
附录九	国家电网公司电力系统无功补偿配置技术 原则	352
附录十	输电线路技术参数	356
附录十一	三相油浸式电力变压器技术参数	361

电力系统电压和无功基本概念

电压和无功是交流电力系统两个重要的运行指标，电压是有功功率输送的保证，无功是有功输送的基础。本章主要介绍电压、功率的定义，电压质量标准，无功电源与无功负荷的区别，无功、电压与线损的关系等方面的内容。

第一节 电压名词术语和电力系统标准电压

一、电压名词术语

1. 电压

电压是衡量电场做功能力的物理量。当电荷在电场力作用下，从一点移动到另一点时，电场力对移动电荷所做的功与电荷量的比值即为该两点间的电压，其法定单位为伏特（V），工程上常用千伏（kV）。

2. 三相交流系统的相电压和线电压

在三相交流系统中，发电机或变压器绕组两端电压称为相电压，而三相导线任两线之间的电压称为线电压。

当三相绕组为星形连接时，在对称三相系统中，线电压等于相电压的 $\sqrt{3}$ 倍。

当三相绕组为三角形连接时，线电压等于相电压。

3. 电力系统标称电压

系统被指定的电压称为标称电压。系统是指在一个共同标称电压下相互连接的导线（线路）和设备的组合。

4. 电气设备额定电压

根据规定的电气设备工作条件，通常由制造厂确定的电气设备电压。作为系统受电器具的电气设备（如电动机、照明灯具等）的额定电压等于其接入系统的标称电压；作为系统电源的电气设备（如发电机、变压器副边绕组等）的额定电压比所连接系统的标称电压高 5% ~ 10%。

变压器的一次侧绕组与系统连接，其额定电压等于系统的标称电压，如果与发电机连接，其额定电压等于发电机的额定电压。对于 10kV 以上的交流发电机额定电压 GB156—1993 另有规定。

5. 电力系统最高电压

当电力系统正常运行时，任何时间、任一点出现的电压最高值称系统最高电压，它不包括系统暂态电压，例如由雷电、系统操作所引起的瞬间电压变化。

6. 设备最高电压

对于 1000V 以上且不至于影响电气设备寿命与功能最高允许运行电压称为设备最高电压。当设备承受电压超过最高电压时，将影响设备性能和功能的正常发挥（如开关电器不能正常灭弧等），降低设备的寿命。

某些电气设备对电压具有灵敏特性（如电容器的损耗、变压器的磁化电流等），当系统运行电压超过电气设备的最高电压，设备不能保证正常运行时，应设置保护装置，或选型时确保设备最高电压大于系统最高电压。

二、交流系统的标准电压

为了便于电气设备的生产制造和安装运行，使电气设备具有互换性，系统标称电压必须设定一定的电压等级标准，称为标准电压。我国国家标准（GB156—1993）对交流、直流系统的标准电压进行了规定，交流系统标称电压的标准如下：

(1) 220 ~ 1000 (1140) V 交流电力系统的标准电压有 220/380V、380/600V 和 1000 (1140) V 三种，斜线上方为相电压，斜线下方为线电压。其中 1140V 仅限用于煤矿井下。

(2) 3kV 及以上三相交流电力系统的标准电压有 3、6、10、(20)、35、66、110、220、500、(750) kV 等 11 种（见表 1-1）。

表 1-1	3kV 及以上交流三相系统的标准标称电压											kV
系统的标准 标称电压	3	6	10	(20)	35	66	110	220	330	500	(750)	—
电气设备的 最高电压	3.6	7.2	12	(24)	40.5	72.5	126 (123)	252 (245)	363	550	(800)	1200

注 (1) 括号中的数值为用户有要求时使用。
(2) 电气设备的额定电压可从表中选取，由产品标准确定。

农网的标准电压有 220/380V、3 ~ 110kV 等 7 种。

三、电压降落与电压损耗

1. 线路的电压降落

线路两端电压的相量差，也即电流在线路阻抗中产生的电压降称为线路的电压降落，它是一个相量，如图 1-1 中的 $\dot{dU}$ 所示。

线路的等值电路如图 1-1 (a) 所示，当线路有功率（电流）通过时，线路两端的电压相量图如图 1-1 (b) 所示。

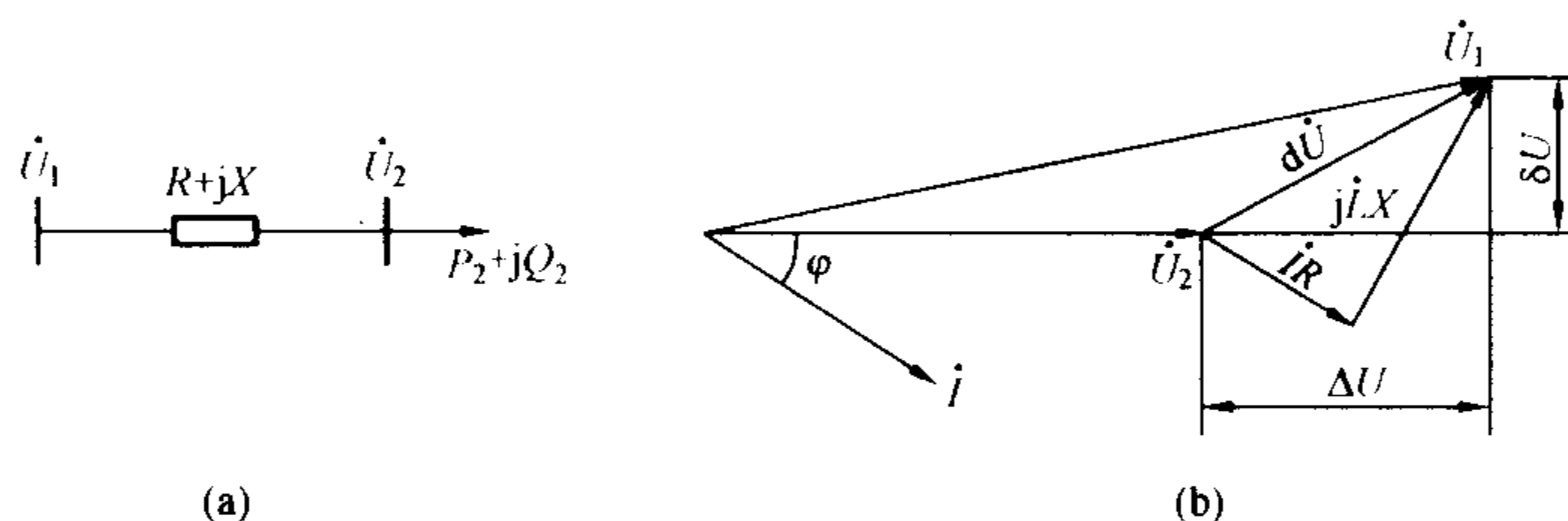


图 1-1 线路的等值电路和电压相量图

(a) 等值电路；(b) 相量图

线路的电压降落，用式 (1-1) 计算

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

式中 $\dot{dU}$ ——线路电压降落；

$\dot{U}_1$ 、 $\dot{U}_2$ ——线路首、末端电压相量；

$\dot{I}$ ——线路中电流；

R 、 X ——线路电阻、电抗。

电压降落 $\dot{dU}$ 在电压 $\dot{U}_2$ 方向的投影 ΔU 称为电压降落纵分量，在 $\dot{U}_2$ 横方向的投影 δU 称为电压降落的横分量，它们可用式 (1-2) 计算

$$\Delta U = \sqrt{3} I_2 (R \cos \varphi + X \sin \varphi) = (P_2 R + Q_2 X) / U_2 \quad (1-2)$$

$$\delta U = \sqrt{3} I_2 (X \cos \varphi - R \sin \varphi) = (P_2 X - Q_2 R) / U_2$$

式中 P_2 、 Q_2 ——通过线路的有功功率、无功功率，kW、kvar；

U_2 ——线路末端电压, kV。

线路首端电压, 可用式 (1-3) 计算

$$U_1 = [(U_2 + \Delta U)^2 + \delta U^2]^{1/2} \quad (1-3)$$

2. 线路的电压损耗

电压损耗指线路或设备 (如变压器) 首末端两点 (或线路上任两点) 间电压的差值, 通常也以系统标称电压的百分数来表示, 用式 (1-4) 计算

$$\Delta U(\%) = (U_1 - U_2)/U_n \times 100 \quad (1-4)$$

式中 U_1 ——线路首端电压, kV;

U_2 ——线路末端电压, kV;

U_n ——系统标称电压, kV。

在配电网计算中, 可以忽略横分量的影响, 近似地把电压降落的纵分量看作电压损耗。此外, 在配电网计算中还可近似地用线路标称电压 U_n 进行计算, 则电压损耗可用式 (1-5) 计算

$$\Delta U = (PR + QX)/U_n \quad (1-5)$$

式中 P 、 Q ——线路有功功率, kW; 无功功率, kvar;

U_n ——线路标称电压, kV;

R 、 X ——线路电阻、电抗, Ω 。

电压损耗的百分数, 可用式 (1-6) 计算

$$\Delta U(\%) = (PR + QX)/U_n^2 \times 10^{-3} \times 100 \quad (1-6)$$

式中 ΔU ——电压损耗百分数。

当线路中从不同点接入多个负荷时, 电压损耗可以逐段叠加。

变压器的电压损耗也可用上式计算, 或直接用变压器名牌数据 (P_R 、 $U_k\%$) 进行计算 (略)。

第二节 电压质量标准

电能质量主要用供电可靠性、频率和电压及其波形畸变率等有关指标来衡量。电能质量中关于电压方面的指标有电压偏差、电压波动与闪变、谐波 (电压波形) 和电压不平衡度。国家标准对上述电压质量指标, 即电压质量标准作了规定, 分述如下。

一、电压偏差

由于线路、变压器阻抗中通过电流时，会产生电压损耗，所以电网中各点的电压是不相同的。电压偏差就是指在系统正常运行而负荷缓慢变化时，系统任一点的实际电压与系统标称电压的差值，通常以系统标称电压的百分数来表示，可用式（1-7）计算

$$\text{电压偏差}(\%) = (\text{某点实测电压} - \text{标称电压}) / \text{标称电压} \times 100 \quad (1-7)$$

1. 电压偏差对电气设备及对电力系统运行的影响

一般情况下，电气设备在额定电压下工作，是比较适合的工作状况，使用寿命也比较长。但实际上，系统电压有或大或小的偏差。电压偏差对电气设备的工作状况、性能、效率和寿命都有一定的影响。

（1）对照明设备的影响。照明设备中白炽灯对电压偏移的影响最为敏感。电压升高时，发光效率大大提高，但寿命也大大缩短。如电压比额定压升高 5%，其寿命缩短约 40%。电压降低时，白炽灯寿命可以提高，但发光效率大大降低，使光通量减少。如电压降低 5%，白炽灯光通量降低 18%。

对于日光灯而言，灯管的寿命与通过灯管的工作电流有关，通过灯管的工作电流增加，则寿命降低。电压升高 5%，由于镇流器饱和使灯管电流较大增加，灯管寿命降低约 20%。外加电压降低灯管寿命有所提高，但电压低于 78% 的额定电压时，由于灯丝预热温度过低，灯丝发射物质发生飞溅会使灯管寿命降低。此外，电压降低会使日光灯的光通量降低，低温时会使日光灯起动困难。

（2）对异步电动机的影响。当机端电压降低时，电动机的转矩及起动转矩与电压平方成比例地下降，例如电压降低 10%，转矩降到额定值的 81%，电动机滑差略有降低；在负荷较重时电动机的总损耗增加，电动机输出功率稍微减小；电动机吸收的无功功率明显下降（但当电压低于某临界电压时，无功负荷又开始增加）；电动机的电流增加（线绕式转子的转子电流也增加），使铁芯、绕组温升增加，若机端电压长期处于 $0.9U_n$ 以下，可能因绕组绝缘老化而降低电动机的寿命，甚至烧坏绕组使电机损坏。当机端电压升高时，上述变化有些逆转，但电动机的电流因磁路饱和，励磁电流

迅速增加（无功功率以电压高次方增加）使电机电流增加，铁芯、绕组温升增加。电压正偏差过大时，也会降低电动机的寿命，甚至造成电机损坏。

(3) 对变压器、互感器的影响。当电压升高时，对变压器、互感器的影响主要有两方面。一是励磁电流增加，使铁芯中磁感应强度 B 增加，导致铁损增加、铁芯温升增加。二是油中和绕组表面电场强度增加，促使油和绕组绝缘老化加速，严重时将导致绝缘老化，降低绝缘寿命。当电压降低时，在传输同样功率条件中，绕组电流增加，绕组损耗与电流平方成比例地增加。

(4) 对并联电容器的影响。电容的无功功率与电压平方成比例，电压降低使其无功功率输出大大降低。电压上升虽然其无功功率提高，但由于电场增强使局部放电加强，使绝缘寿命降低。若长期在 $1.1U_n$ 下工作，其寿命约降至额定寿命的 44%。电容器的爆炸及外壳鼓肚等，就是由于局部放电及绝缘老化积累效应引起的。

(5) 对家用电器的影响。电压降低使电视机色彩变坏、亮度变暗，电压升高使显像管寿命降低。电压升高使电子设备阴极加热电流增加，而降低寿命，阴极电压升高 5%，寿命约缩短一半。电压偏移过大时，使电子计算机和控制设备出现错误结果和误动，等等。

(6) 对电力系统运行的影响。电压负偏差大，电压降低时，对系统运行的影响主要有三个方面：

1) 由于输电线路输送功率的静态稳定功率极限 ($P_M = EU/X$) 与发电机电势 E 成正比，与系统电压 U 成正比，与组合电抗 X 成反比。系统电压越低稳定功率极限越低，功率极限与线路输送功率的差值（即功率储备）越低，容易发生不稳定现象，会造成系统瓦解的重大事故。

2) 当电网缺乏无功功率，电网运行电压低时，可能因电压不稳定造成系统电压崩溃，也会造成大量用户停电或系统瓦解。根据单发电机—单电动机系统的分析，当电压偏低时，系统发出的无功功率小于负荷吸收的功率，而使电压下降，电压下降无功缺额更大，恶性循环而产生电压崩溃。

3) 电压偏低，将使电网有功损耗增加，提高供电成本，不利

于电网经济运行。

2. 电压允许偏差

我国国家标准 GB12325—1990《电能质量 供电电压允许偏差》规定了我国的电压允许偏差。该标准既参考了 IEC 标准和其他国家的标准，也考虑了我国电网电压偏差的实际状况，同时还考虑了电压偏差对系统本身和用户的综合利益和可行性。

GB12325—1990 电能质量供电电压、允许偏差的具体规定如下：

(1) 35kV 及以上供电电压正、负偏差的绝对值之和不超过额定电压的 10%。

注：如供电电压上下偏差同号（均为正或负）时，按较大的偏差绝对值为衡量依据。

(2) 10kV 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 $+7\%$ 、 -10% 。

注：①用电设备额定工况的电压允许偏差仍由各自标准规定，例如旋转电机按 GB 755《旋转电机 基本技术要求》规定。

②对电压有特殊要求的用户，供电电压允许偏差由供用电协议确定。

二、谐波

在我国 50Hz 的交流电力系统中，非 50Hz（赫兹）的正弦波叫谐波，谐波电流乘以谐波阻抗得谐波电压。

电力系统中的谐波频率一般为基波频率的整数倍，例如 100Hz、150Hz、200Hz 的正弦波等称为高次谐波，通常把谐波频率与基波频率的比值叫做谐波次数，如上述列举的三个谐波分别叫做 2 次、3 次、4 次谐波。谐波为偶数倍基波频率的正弦波叫做偶次谐波；频率为奇数倍基波频率的正弦波叫做奇次谐波。如果谐波频率不是基波频率的整数倍，而是分数倍，则这种频率的正弦波叫做间谐波或分次谐波，例如 25Hz、75Hz、125Hz 的正弦波等。电力系统中的间谐波含量一般很小，故谐波分析时一般不考虑。

电力系统中的谐波主要来自非线性负荷，例如化工、冶金企业、电气化铁道的晶闸管整流装置、电弧炉、电焊机、电力变压器、家用电器（日光灯、电视机）及其他电气设备（变频器、静补

装置、旋转电机、高频炉、矿石炉等)。这些设备接入电网用电后,向电网注入谐波电流,谐波电流在电网阻抗上产生谐波电压。谐波电压波形叠加在基波上,并施加在所有接在电网中的电气设备端,会引起电气设备局部过热,导致电动机、电容器的损坏,电动机的振动增大,噪音增强,电气设备损耗增加,对电子元件产生干扰,使自动装置误动作、测量仪器误差加大,电视图像失真以及通信质量下降等,因此谐波源是电力系统的“污染源”,是电网一大公害,必须加以控制。

三、电压波动和闪变

在某一段时限内,电压随着负荷波动快速变化而偏离额定值的变化状况称电压波动。

电压波动用相继出现的最大值和最小值之差与系统标称电压 U_n 之比,用百分数表示,用式 (1-8) 计算

$$d(\%) = (U_{\max} - U_{\min}) / U_n \times 100 \quad (1-8)$$

式中 d ——电压波动值, %;

$U_{\max}$ ——电压波动最大值 (方均根值或有效值), kV;

$U_{\min}$ ——电压波动最小值 (方均根值或有效值), kV。

电压波动一般是由冲击性负荷 (如电弧炉、轧钢机、大电机启动等) 引起的电压突然下降和冲击过后电压迅速恢复的现象,称为电压闪变,会造成电机振动和转速不均匀,影响某些生产和工艺。会引起灯光照度不稳定而造成人眼视觉不舒服,通常用短时间闪变值 P_{st} 和长时间闪变值 P_{lt} 表示。

四、三相不平衡度

由于技术和经济上原因,电力系统 (电网) 都采用三相三线制供电。若三相电压 (或电流) 大小相等,相位依次 (A、B、C) 领先 120° (即 $2\pi/3$), 称为三相平衡 (或对称), 否则为不平衡 (或不平衡)。平衡系统的三相电压表达式为

$$\begin{cases} u_a = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \phi) \\ u_b = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \phi - 120^\circ) \\ u_c = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \phi + 120^\circ) \end{cases} \quad (1-9)$$

式中 U ——相电压的方均根值 (有效值), kV;

ϕ ——相电压的初相角；

ω ——工频角频率，Hz。

不平衡的三相系统可以将电压（或电流）用对称分量法分解为正序分量 $U_1(I_1)$ 、负序 $U_2(I_2)$ 和零序分量 $U_0(I_0)$ 。我们把负序分量与正序分量有效值之比称为不平衡度（或不对称度），用符号 ϵ 表示，即

$$\text{电压不平衡度 } \epsilon_U = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% \quad (1-10)$$

$$\text{电流不平衡度 } \epsilon_I = \frac{I_2}{I_1} \times 100\% \quad (1-11)$$

第三节 电力系统功率名词术语与基本知识

一、正弦交流电路功率

1. 正弦交流电路的瞬时功率

在电阻 r 与电感 L 、电容 C 串联或并联的正弦交流电路中，若施加的电压为 $u = \sqrt{2}U\sin\omega t$ ，电流为 $i = \sqrt{2}I\sin(\omega t - \varphi)$ ，则交流电路的瞬时功率为

$$\begin{aligned} p &= dA/dt = u dq/dt = ui \\ &= \sqrt{2}U\sin\omega t \sqrt{2}I\sin(\omega t - \varphi) \\ &= UI[\cos\varphi - \cos(2\omega t - \varphi)] \end{aligned} \quad (1-12)$$

式中 U ——外施电压有效值，V；

I ——电路电流有效值，A；

φ ——电路阻抗角，也叫功率因数角；

A ——输入电路的电能，W；

q ——输入电路的电量，Q。

由式（1-12）可知，交流电路中的功率是以 2 倍频率而变化的，其变化波形如图 1-2 所示。

2. 正弦交流电路的有功功率

交流电路中，一个周期内的功率平均值，称为有功功率，用大写 P 表示，用式（1-13）计算

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{UI}{T} \int_0^T [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)] dt$$

$$= UI \cos \varphi \quad (1-13)$$

式中 P ——有功功率, W;

$\cos \varphi$ ——功率因数。

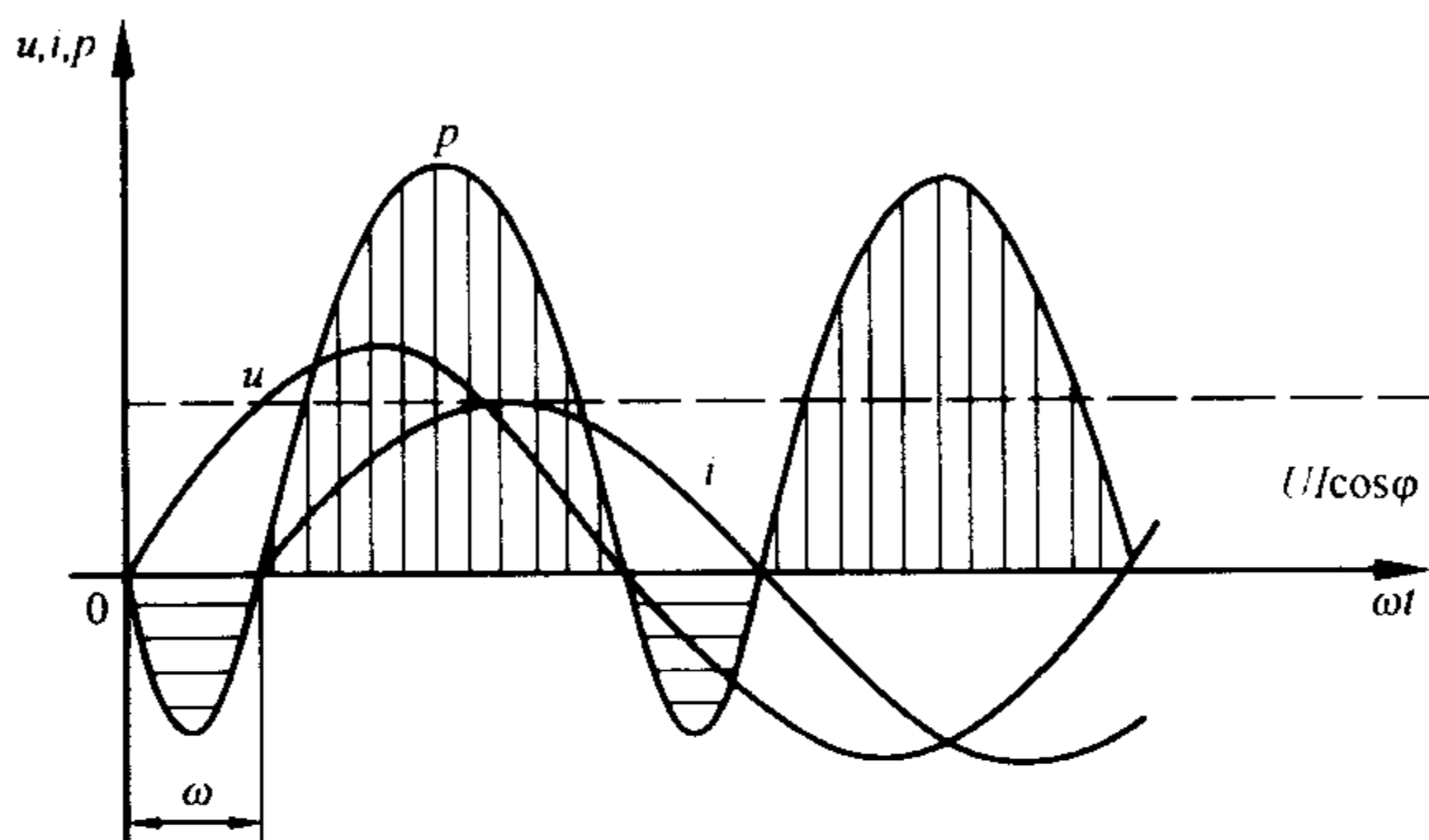


图 1-2 交流电路的瞬时功率

有功功率的大小不仅与电压、电流有关,而且与功率因数 $\cos \varphi$ 有关。

有功功率的物理意义十分明确,它表示一个周期内电能输入电路或电路消耗电能的平均速率。

另外,以 r 、 L 、 C 串联电路为例,可以推出电阻元件内瞬时功率,用式 (1-14) 计算

$$p_r = UI \cos \varphi [1 - \cos(2\omega t - 2\varphi)] \quad (1-14)$$

该功率也以 2 倍频率而变化,它的平均值就是电路中的有功功率。这说明有功功率就是电阻元件消耗的功率。从式 (1-14) 还可以看出,有功功率等于电阻中瞬时功率交变部分的幅值。

3. 正弦电路中的无功功率——感性无功功率和容性无功功率

储能元件电感、电容中的电功率为无功功率,用式 (1-15) 定义

$$Q = UI \sin \varphi \quad (1-15)$$

式中 Q ——无功功率, var;

φ ——功率因数角。

从式 (1-13) 可知, 有功功率等于电路电压 U 与电流有功分量 ($I\cos\varphi$) 的乘积。相应地, 就把电压 U 与电流无功分量 ($I\sin\varphi$) 的乘积定义为无功功率。它与有功功率有相同的量纲。

无功功率与电路储能元件 (电感、电容) 中能量的转换有关。以 r 、 L 、 C 串联电路为例, L 、 C 元件中的瞬时功率可用式 (1-16) 计算

$$p = UI\sin\varphi\sin(2\omega t - 2\varphi) \quad (1-16)$$

储能元件中的瞬时功率也是以 2 倍频率变化的。在一个周期内它的平均功率为零。但储能元件中仍有能量变化, 有电流流过, 所以瞬时功率不为零。只是一周期内它所吸收的能量与放出的能量相等, 反复吸收、放出相同的能量, 而不消耗能量。该瞬时功率用于电场、磁场能量的变化。

从式 (1-16) 可知, 储能元件中瞬时功率的幅值 (最大值) 等于电路中的无功功率 $UI\sin\varphi$ 。

由以上分析可得出结论: ①无功功率不消耗能量, 仅用于电源与储能元件间电磁场能量的转换; ②无功功率等于电源与储能元件中能量转换的最大速率。应当说明, 在非正弦电路中, 即系统存在谐波时, 由于不同频率谐波的电压、电流也构成无功功率, 所以无功功率不再等于储能元件电磁能量转换的最大速率。

在电感性元件 (异步电动机、电感线圈、绕组) 中的无功功率称为感性无功功率。感性无功功率从物理上讲是由滞后于电压 90° 的感性电流引起的, 所以感性无功功率也叫滞后无功功率。在电力系统的用户中以感性元件居大多数。所以又把感性无功功率称为无功负荷, 而且规定感性无功功率为正。无功负荷就是从电力系统吸收感性无功功率的负荷。

在容性元件 (电容器) 中的无功功率称为容性无功功率, 容性无功功率从物理上讲是由领先于电压 90° 的电流引起的。由于把从系统吸收感性无功功率看成系统的无功负荷, 所以把从系统吸收容性无功功率看成无功电源。从系统吸收容性无功功率就等于发出同容量的感性无功功率。由于感性无功功率为正, 所以容性无功功率为负 (见图 1-3)。