

目 录

序

前 言

主要字母符号说明

第一章 供电质量的基本概念	1
第一节 概述	1
第二节 正弦波形畸变和谐波	7
第三节 电压波动和闪变	17
第四节 三相电压不平衡	28
第五节 主要干扰性负荷	36
第六节 改善供电质量的意义	38
第二章 半导体变流器的谐波	42
第一节 调光灯的谐波	42
第二节 单相桥式整流电路	46
第三节 三相零式和桥式整流电路	48
第四节 整流器的谐波分析	51
第五节 三相桥式逆变器	64
第六节 脉宽调制的变频器	67
第七节 相控调制的变频器	71
第八节 冲击调制的功率调节器	75
第三章 电弧炉的供电及其干扰	77
第一节 电弧炉的用电特征	77
第二节 电弧炉供电的电路分析	82
第三节 电弧炉闪变的预测	89
第四章 电气化铁路的供电及其干扰	96
第一节 电力机车的用电特征	96

第二节	电气化铁路的供电	103
第三节	负序容量的分析计算	111
第四节	电气化铁路谐波和负序的预测	121
第五章	负荷干扰的限制标准	123
第一节	谐波标准	124
第二节	电压波动和闪变标准	139
第三节	三相电压不平衡标准	151
第六章	测量仪器和测量方法	158
第一节	谐波的测量	158
第二节	电压波动和闪变的测量	174
第三节	三相不平衡的测量	184
第七章	稳态谐波和三相不平衡的补偿	187
第一节	防止并联电容器组对谐波的放大	187
第二节	无源电力滤波器	196
第三节	三相不平衡的补偿	209
第八章	干扰性负荷的动态补偿	216
第一节	概述	216
第二节	有功功率冲击的补偿	218
第三节	TCR 型静止无功补偿器	221
第四节	TSC 型静止无功补偿器	229
第五节	SR 型静止无功补偿器	235
第六节	SVC 的响应时间对补偿效果的影响	243
第七节	三相不平衡的实时补偿原理	245
第八节	SVC 的控制系统	249
第九节	各种型式 SVC 的比较	253
第九章	有源滤波器	256
第一节	瞬时无功电流的补偿	256
第二节	瞬时无功电流的检波方法	260
第三节	三相无功电流的 $\alpha\beta$ 变换算法	264

第四节	三相平衡化的对称分量算法	268
第五节	脉宽调制的功率输出	271
参考文献		276

第四节	三相平衡化的对称分量算法	268
第五节	脉宽调制的功率输出	271
参考文献		276

第一章 供电质量的基本概念

第一节 概 述

一、理想的供电系统

在理想的交流供电系统中,三相交流电压是平衡的,其方均根值和频率都应该是恒量,电压和电流的波形为正弦无畸变。理想供电系统的这些指标应当与用户的负荷特性无关,而用户负荷应设计成在额定电压和频率下具有最佳的运行性能,各个负荷之间互不干扰,功率因数补偿等于1。

首先说明采用平衡的三相正弦波形电压供电的理由。在电路中线性无源元件上电流和电压的关系,不外乎比例($u = Ri$)、微分($u = L \frac{di}{dt}$)和积分($u = \frac{1}{C} \int i dt$)等关系。线性电路分析广泛应用叠加原理,能将简单情况下所得结果综合起来运用到复杂的场合,或把复杂的问题分解成若干个较为简单的问题来分析。与此相应,正弦周期函数在进行加、减、微分和积分等运算时,仍保持正弦函数的特点。对称的三相正弦交流供电系统的优点尤为突出,设三相电压和电流的时间函数分别为

$$\left. \begin{aligned} u_a &= \sqrt{2} U \sin \omega t \\ u_b &= \sqrt{2} U \sin(\omega t - 120^\circ) \\ u_c &= \sqrt{2} U \sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

$$\left. \begin{aligned} i_a &= \sqrt{2} I \sin(\omega t - \varphi) \\ i_b &= \sqrt{2} I \sin(\omega t - \varphi - 120^\circ) \\ i_c &= \sqrt{2} I \sin(\omega t - \varphi + 120^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

上两式中

$$\omega = 2\pi f = 2\pi/T;$$

U ——相电压的方均根值;

I ——相电流的方均根值;

φ ——电流滞后电压的相角;

ω 、 f 、 T ——分别为工频角频率、频率和周期。

各相的瞬时功率分别为

$$\left. \begin{aligned} p_a &= u_a i_a = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi) \\ p_b &= u_b i_b = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi - 120^\circ) \\ p_c &= u_c i_c = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi + 120^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

平衡三相的瞬时总功率恰与其平均功率 P 相等

$$\begin{aligned} p &= p_a + p_b + p_c = u_a i_a + u_b i_b + u_c i_c \\ &= 3UI \cos \varphi = P \end{aligned} \quad (1-4)$$

严格地说,对称的和平衡的三相系统是有不同的定义的。当三相系统的全部正弦波形电动势、电压和电流的大小相同,而且各相之间的相位差又都相等并相差 120° 时,则该系统称

为对称的三相系统。当三相系统总功率的瞬时值为与时间无关的恒量时，则该系统称为平衡的三相系统。

一个不对称的多相系统并不表明它是不平衡的，例如由两个大小相等而相位差为 90° 的电压源组成的不对称二相平衡系统。这个结论有下式为证

$$\begin{aligned}\text{瞬时总功率 } p &= \sqrt{2} U \sin \omega t \cdot \sqrt{2} I \sin(\omega t - \varphi) + \\ &\sqrt{2} U \sin(\omega t - 90^\circ) \cdot \sqrt{2} I \sin(\omega t - 90^\circ - \varphi) = 2UI \cos \varphi = \\ &P, P \text{ 为此二相系统的有功功率或平均功率。}\end{aligned}$$

单相系统可算是不平衡系统的典型例子，它的瞬时总功率为

$$\begin{aligned}p &= \sqrt{2} U \sin \omega t \cdot \sqrt{2} I \sin(\omega t - \varphi) \\ &= UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi)\end{aligned}$$

$$\text{有功功率或平均功率 } P = UI \cos \varphi$$

$p_{\max} = UI (\cos \varphi + 1)$, $p_{\min} = UI (\cos \varphi - 1)$ ，即单相系统的瞬时功率在 $P \cdot \left(1 + \frac{1}{\cos \varphi}\right)$ 和 $P \cdot \left(1 - \frac{1}{\cos \varphi}\right)$ 之间随时间变化。

在大功率的单相负荷直接连接至三相电源时，将导致三相系统的不平衡，这时对于发电、输电和变电等设备的运行都会起到不良影响和危害。当三相系统的电流或电压大小不等或相位差不为 120° 时，则此三相系统的电流或电压是不对称的也是不平衡的。

如上所述，平衡的三相系统总功率是恒定的且与时间无关，而不平衡的三相系统的总功率却是在其平均值的上下脉动。因此将不平衡三相系统变换成平衡的三相系统时，在变

换设备中应该设有能够暂时储积电磁能量的电感线圈和电容器类的电路元件。最简单的例子如图 1-1 (a) 所示的单相电阻负荷 R ，它是不平衡的三相系统。如图 1-1 (b) 所示，在其他两相分别适配电抗为 $j\omega L = j\sqrt{3}R$ 的电感和电抗为 $\frac{1}{j\omega C} = -j\sqrt{3}R$ 的电容，二者产生谐振，则可构成平衡的三相系统。该平衡的三相系统的相量图如图 1-2 所示，电容电流 I_{bc} 超前电压 U_{bc} 90° ，电感电流 I_{ca} 滞后电压 U_{ca} 90° ，电感和电容电流方均根值相等，恰能构成电感和电容谐振的条件。电阻电流 I_{ab} 与电压 U_{ab} 同相，电阻电流的方均根值是电感和电容电流方均根值的 $\sqrt{3}$ 倍。由 $I_a = I_{ab} - I_{ca}$ 、 $I_b = I_{bc} - I_{ab}$ 、和 $I_c = I_{ca} - I_{bc}$ 可以看出此三相电流 I_a 、 I_b 、 I_c 的方均根值相等，其相互相位差 120° 。而经由上述平衡化电路可将不平衡的三相系统变换成平衡的三相系统^[14]。

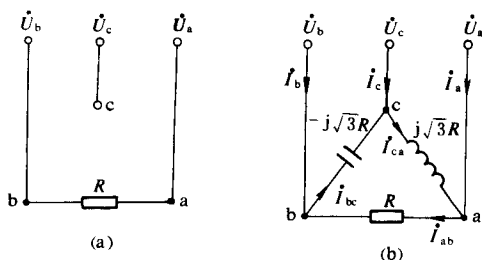


图 1-1 三相平衡化电路

(a) 单相电阻负荷；(b) 平衡化三相系统

在三相交流电机中，三相绕组在空间分布的电角度相差 120° ，而通入的三相电流时间的相位也相差 120° ，则它产生均匀的旋转磁场和转矩。显然用平衡的三相交流供电，在经济

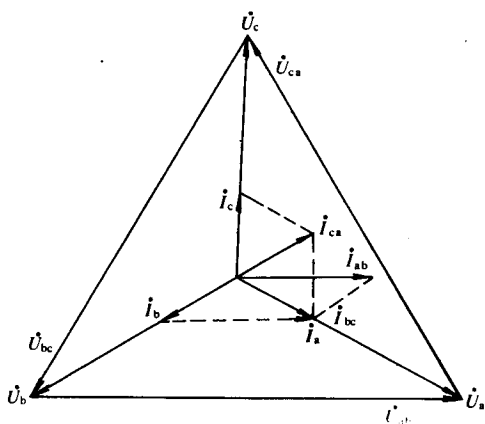


图 1-2 平衡化三相系统的相量图

方面优于互不连接的三相电路，前者用三根导线替代后者用六根导线实现同容量的送电。平衡的三相供电系统还有许多优点，所以它已成为各国广泛采用的供电形式。

另外， $\cos\varphi$ 称为功率因数。习惯上规定当电流滞后电压时，相角差 φ 为正值。三相无功功率 $Q=3UI\sin\varphi$ ，三相视在功率 $S=3UI$ ，功率因数 $\cos\varphi=P/S$ 。

理想的供电系统应使无功功率就地平衡，使线损最小，发挥供电系统的最大容量以降低供电费用。

电力系统在发电机输出端的电压波形通常是十分接近理想正弦波形。供电系统的电流主要决定于用电的负荷。由于在电能输送过程中受到各处各种负荷用电的影响，在用户受电端的电压则会偏离正弦波形而发生畸变。工程上要使供电系统能保持三相平衡的、稳定的正弦波形的供电电压，则要求用户的负荷具有正弦电流和三相平衡分配，并且能以恒定

功率用电,或者要求公共供电点具有极为巨大的短路容量,实际上这些都是难以保证的。

二、用电负荷的干扰

许多电工设备和装置,包括大多数新技术的设备,运行时会对电网产生干扰,降低邻近地区的供电质量,影响其他设备的运行性能。

供电电能质量的衡量指标,除供电电压和频率的偏差外,还有电压正弦波形畸变、三相电压不平衡、电压波动和闪变、电压突然下降和中断以及电网中各种信号电压等。

通常根据以下几点来判断供电质量:

- (1) 在供电点电压和频率接近额定值和稳定的程度;
- (2) 电压和电流偏离正弦波形的程度;
- (3) 三相系统的电流和电压,其三相平衡的程度。

从干扰的角度可将供电系统中的设备分为两类:发生干扰的设备即干扰源,它可能产生干扰电压、电流或电磁场;对干扰敏感的设备即感受器,它感受干扰会降低运行性能。有些设备可能同时属于这两类。

因为许多发生干扰的设备是生产和技术发展的必然结果,例如电力电子设备,大型炼钢电弧炉等,这就需要对发生干扰的设备接入电网的条件作出限制规定,以保证对干扰敏感的设备能得到合宜的供电。

图 1-3 给出用概率表示产生的干扰和对干扰敏感的设备之间的理想兼容关系的示意图^[15]。由公用电网供电的电工设备,在设计时要使设备有足够的兼容能力。当设备要求较高的安全可靠性能时,则其抗干扰阈值,应留有更大的裕度。但为了提高设备的抗干扰阈值,有时要付出较大的技术经济代价,所以实际上多以兼容值作为抗干扰阈值。

另外,电压突然下降或中断等,都是由电网中的短路故障和运行操作事故所引起,对此各国都未制订限制标准,即一般不考虑它的兼容问题。

对于安装冲击性负荷、三相不平衡负荷和整流设备等干扰性负荷,应按国标要求采取技术措施,以保证供电质量和供电系统的安全经济运行。

以下几节将着重讨论有关电能质量的正弦波形畸变、电压波动和闪变、以及三相电压不平衡度等基本概念。

第二节 正弦波形畸变和谐波^[4,12,13]

一、正弦波形畸变的主要原因

如果供电系统中有非线性元件和负荷,即使供电电压为正弦波形,其电流波形也将偏离正弦波形发生畸变。非正弦波形的电流在供电系统中传递,由于沿途电压降使各供电点的电压波形将受其影响而产生不同程度的畸变。大量的、大功率的非线性负荷,是引起供电系统的电流和电压波形产生畸变的主要原因。供电系统的主要非线性负荷有:①含半导体器件的电力电子变流设备;②电弧炉、电弧焊机和日光灯

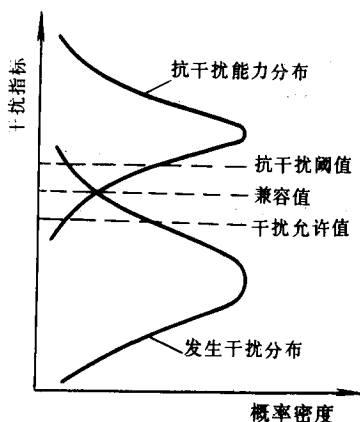


图 1-3 理想兼容关系的示意图

等含电弧特性的设备；③电力变压器、铁心电抗器等含有磁饱和特性的设备。

以图 1-4 所示的最简单的含一个单向晶闸管的电阻电路为例，即使负荷电阻 R_d 为线性电阻，从电源侧来看 $R(t) = \frac{u(t)}{i(t)}$ 已呈等效的非线性元件。设晶闸管的控制角为 α ，在 ωt 从 0 至 2π 的期间内， $0 < \omega t < \alpha$ 和 $\pi < \omega t < 2\pi$ 时 $R(t) = \infty$ ； $\alpha < \omega t < \pi$ 时 $R(t) = R_d$ 。

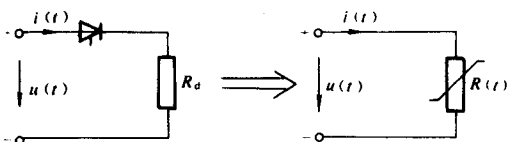


图 1-4 含单向晶闸管的电阻电路

随着工业和节能技术发展，非线性负荷将日益增多，供电系统中波形偏离正弦的畸变程度日趋严重，对电力系统和用电设备将产生严重的影响和危害。

二、谐波的定義和性质

在交流供电系统中，如果电压和电流都是发生畸变的周期性非正弦波形，则可将它们分解成傅立叶级数

$$u(t) = \sum_{h=1}^M \sqrt{2} U_h \sin(h\omega_1 t + \alpha_h) \quad (1-5)$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^M \sqrt{2} I_h \sin(h\omega_1 t + \beta_h) \quad (1-6)$$

上两式中， U_1 和 I_1 (即 $h=1$ 时) 分别为电压和电流的基波分

量（方均根值）；

ω_1 为工频（即基波）的角频率； U_h 和 I_h ($h \neq 1$) 分别为第 h 次谐波电压和电流的方均根值， h 必须是正整数；

电压和电流截取的谐波最高次数 M ，由波形的畸变程度和分析的准确度要求所决定，通常 $M \leq 50$ 。

在国际电工标准中定义：谐波为一周期量的正弦波分量，其频率为基波频率的整倍数。习惯上规定电力系统中的工频为基波频率。

有关谐波性质还需明确下列几个问题：

1. 间谐波和次谐波

有些用电负荷，例如含有铁磁材料的电工设备等，在一定的供电系统条件下会出现工频周期的 3 倍、5 倍甚至非整数倍的周期性电流的波动，根据该电流波动周期分解出的傅立叶级数，便可能得出不是基波整倍数频率的分数谐波 (fractional harmonics) 或称间谐波 (interharmonics)。低于工频的间谐波，通常称之为次谐波 (subharmonics)。

2. 短时间谐波

变压器在空载合闸时，会产生短时的冲击电流（励磁涌流）。由晶闸管控制的粗轧机当钢锭通过轧滚时，以及电力机车、绞车起动时，都会产生短时间的冲击电流。如果将这种短时间的冲击电流按周期函数分解，它将包含短时间的谐波和间谐波电流，称为短时间的谐波电流或快速变化谐波电流。应当注意将短时间的冲击电流与电力系统谐波加以区别。有些国家的规程或标准中提出，若电流脉冲的持续时间不超过 2s 且两个电流脉冲的时间间隔不小于 30s，则对这种暂态分量或短时间的谐波应另作规定。

3. 陷波

换流装置由一相向另一相转换时，在重叠导通的区间 Δt 内，参与换相的两相交流端子被瞬时短路，会导致电压波形出现陷波，又称槽降或换相缺口，如图 1-5 所示。电压陷波的宽度与换相重叠角有关，其深度取决于各供电点的短路阻抗比。对于这种畸变波形，可引入相对偏差来表述。相对偏差

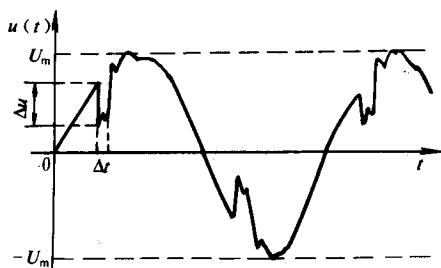


图 1-5 电压波形的陷波

等于电压槽降 Δu 与其基波电压幅值 U_{im} 的百分比 $\frac{\Delta u}{U_{im}} \times 100\%$ 。换流装置一般都经由变压器与电网连接，如果供电系统的短路容量足够大，或变压器阻抗比系统阻抗大很多时，足以抑制电网电压的陷波，对陷波可以不作谐波分析。但如陷波的宽度过大，则会影响换流装置正常工作，应设法限制。陷波的计算和限制可按有关标准规定执行。

三、畸变波形的数字特征量

(一) 畸变波形的方均根值和峰值

周期性电流和电压的瞬时值都随时间而变，在工程实际中常采用方均根值这个数字特征量来衡量电流和电压的大小。以周期电流 $i(t)$ 为例，它的方均根值定义为

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (1-7)$$

方均根值俗称为有效值。

在时域分析中，可将一个周期 T 分成 N 个等时间间隔 $\frac{T}{N}$ ，对 $i(t)$ 作 N 次等间隔采样。设 t_k 时刻的电流采样瞬时值为 i_k ，则此电流的方均根值的算式为

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{k=1}^N i_k^2 \frac{T}{N}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_k^2} \quad (1-8)$$

在频域分析中，将式 (1-6) 代入式 (1-7) 便可得到此电流方均根值的算式

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \cdots + I_h^2 + \cdots} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (1-9)$$

由此可见，非正弦周期性电流的方均根值，等于其各次谐波电流方均根值的平方和的平方根值。

所以，非正弦量的方均根值只和其所含各次谐波的方均根值有关，而与它们的相位无关。电压方均根值有相同的定义和形式

$$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \cdots} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2} \quad (1-10)$$

应当指出，基波和各次谐波，因为它们都是正弦函数，所以它们的峰值和方均根值之间存在 $\sqrt{2}$ 的关系。但是非正弦波形周期量 $i(t)$ ，它的峰值和方均根值 I 之间不存在这样简

单的关系。例如图 1-6 中所示的两个不同的畸变波形, 由于两个波形所含的基波和三次谐波的幅值分别相等, 所以它们的方均根值是相同的; 但是两个波形的基波与三次谐波之间的相位关系不同, 所以它们的峰值却是不同的。

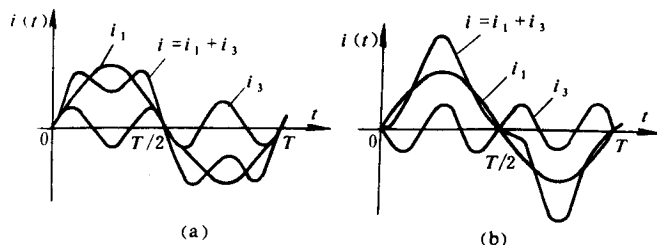


图 1-6 含三次谐波的畸变波形示例

(a) 三次谐波的初相角与基波相同; (b) 三次谐波的初相角与基波相反

为表征波形畸变对绝缘等问题的影响, 引入波峰系数 CF (Crest Factor), 定义为波形的峰值与方均根值或基波的方均根值之比值, 但如用 CF 指示波形畸变的一般特征则有其局限性。正弦波、方波和三角波的波峰系数分别为 1.414、1.000 和 1.732。为确定波峰系数需给定基波和谐波的幅值和相位的信息。如不考虑相位关系, 最大的波峰系数可用下式求得

$$CF = \frac{\sqrt{2}}{U_1} \sum_{h=1} U_h = \sqrt{2} \sum_{h=1} \frac{U_h}{U_1} \quad (1-11)$$

(二) 谐波含有率 (HR)

工程上常要求给出电压或电流畸变波形所含某次谐波的含有率, 以便于监测和采取防治措施。

电压畸变波形的第 h 次谐波电压含有率等于其第 h 次谐

波电压方均根值 U_h 与其基波电压方均根值 U_1 的百分比

$$HRU_h = \frac{U_h}{U_1} \times 100\% \quad (1-12)$$

电流畸变波形的第 h 次谐波电流含有率等于其第 h 次谐波电流方均根值 I_h 与其基波电流方均根值 I_1 的百分比

$$HRI_h = \frac{I_h}{I_1} \times 100\% \quad (1-13)$$

实际工作中对谐波含有率常以幅频特性或称频谱来表示。

(三) 总谐波畸变率 (THD)

，波形畸变的程度，常以其总谐波畸变率来表示，作为衡量电能质量的一个指标。各次谐波含有率的平方和的平方根值称为总谐波畸变率 THD (Total Harmonic Distortion)，简称畸变率 DF (Distortion Factor)。

电压的总谐波畸变率

$$THD_U = \sqrt{\sum_{h=2} \left(100 \frac{U_h}{U_1} \right)^2} \% \quad (1-14)$$

式中 U_1 常用基波电压的方均根值，但有的用额定电压 U_N 代替 U_1 。

许多国家规定低压供电电压的畸变率不得超过 5%，通常将符合这种标准的工业供电的电压波形，近似认为是实际上的正弦波形。

电流的总谐波畸变率则为

$$THD_I = \sqrt{\sum_{h=2} \left(100 \frac{I_h}{I_1} \right)^2} \% \quad (1-15)$$