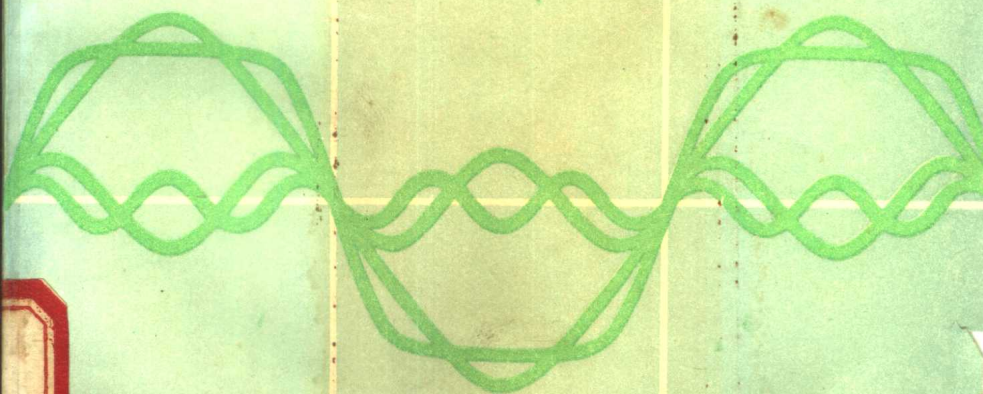


电力系统谐波

吴竞昌 孙树勤 等 编著
宋文南 曲 涛



水利电力出版社

电力系统谐波

吴竞昌 孙树勤 等 编著
宋文南 曲 涛

水利电力出版社

电力系统谐波

吴克昌 孙树勤 宋文南 曲涛等 编著

*

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 32开本 11.375印张 250千字

1988年11月第一版 1988年11月北京第一次印刷

印数0001—2980册 平装定价4.40元

ISBN 7-120-00390-9/TM·98

内 容 提 要

本书是论述有关电力系统谐波问题的专业书，内容共分九章，分别论述了电力系统谐波的基本概念和原理、主要的谐波源、谐波对各种电气设备和通信线路的危害和影响、谐波潮流的计算、谐波的测量、电气铁道负荷产生的负序和谐波、并联补偿电容器与谐波的相互影响、滤波器参数的选择、国内外限制谐波的标准、限制谐波的措施以及对谐波的管理和监测等。本书可供从事电力系统工作的工程技术人员和从事工业企业用电管理的技术人员参考。还可作为大专院校和专业培训的教材和参考用书。

目 录

绪论	1
参考文献	10
第一章 畸变波形的分析方法	11
第一节 谐波的基本概念	11
第二节 非正弦电路的电压和电流	24
第三节 非正弦电路的功率和功率因数	31
第四节 畸变波形的频域分析	42
第五节 非正弦周期信号的采样和频谱分析	61
第六节 畸变波形的时域分析	81
参考文献	90
第二章 电力系统的谐波源	92
第一节 发电机	93
第二节 变压器	96
第三节 换流装置	101
参考文献	122
第三章 谐波对一些电气设备的影响和危害	123
第一节 谐波对电机和电器的影响	123
第二节 谐波对通信的干扰和影响	133
第三节 谐波功率损失	137
第四节 谐波对常用仪表的影响	138
第五节 谐波对继电保护和自动装置的影响	150
参考文献	158
第四章 电网谐波潮流计算	160
第一节 电网的潮流计算	160
第二节 电力系统各元件等值电路的谐波参数	171

第三节	谐波潮流的计算	179
第四节	谐波潮流简化算法	185
第五节	不对称谐波潮流的计算	189
参考文献		195
第五章	畸变波形下各种电量的测量方法及装置	197
第一节	畸变波形下测量的特点	197
第二节	畸变波形下的测量方法和装置	198
第三节	对电压互感器与电流互感器的要求	222
第四节	谐波阻抗的测量	228
参考文献		236
第六章	电气铁道的不对称负荷	238
第一节	电气铁道的供电系统	238
第二节	电力机车的电气特性及产生的谐波电流	241
第三节	电气铁道供电系统输入电力系统的谐波	257
第四节	电气铁道基波负序分量对电力系统的危害及抑制方法	267
参考文献		270
第七章	谐波与并联电容器的相互影响	271
第一节	电容器对系统谐波阻抗的影响	272
第二节	电容器对谐波电流的放大作用	274
第三节	电容器组的电压和电流	282
第四节	电容器组的谐波过载能力	289
第八章	交流滤波装置及其参数的选择	296
第一节	滤波装置的结构及接线方式	296
第二节	滤波装置参数选择的条件	298
第三节	单调谐滤波器	301
第四节	高通滤波器	305
第五节	系统等值谐波阻抗对滤波器参数选择的影响	310
第六节	滤波装置参数的选择方法	318

参考文献	328
第九章 谐波的限制措施及标准	329
第一节 国外限制电力系统谐波的标准	329
第二节 我国限制电力系统谐波的暂行规定	334
第三节 家用和低压电器的谐波限制标准	340
第四节 谐波的限制措施	344
第五节 非线性用电设备接入电网的审定	351
第六节 供电系统谐波的管理和测量	353
参考文献	356

15-2019

绪 论

在一个理想的电力系统中，电能是以单一恒定的工业频率（50Hz或60Hz）和规定的电压水平向用户供电。对电能质量也是用频率和电压来衡量。但是在实际的电力系统运行中，由于负荷的变化，电力系统的频率和电压是不能保持恒定不变的，因此，各国对电能质量都是用频率和电压的允许偏差值加以衡量并作出规定。但是仅用这两个指标来表征电能的质量是很不完善的。波形畸变和三相交流电力系统中三相电压或电流的不平衡也是影响电能质量的重要因素。这两个问题在过去由于还未对电力系统产生十分严重的影响，因此没有引起电力和用电部门的重视，但是近年来，由于电力电子技术的发展以及它们在各个工业部门和用电设备上的广泛应用，包括大功率单相整流在电气化铁道上的应用，它们对电力系统各项电力设备以及用户和通讯线路的有害影响已经是十分严重，因而不得不认真对待和考虑了。

电力系统波形畸变并不是一个新的问题，早在1920～1930年间，在德国就已提出静态整流器产生的波形畸变问题，到50～60年代由于高压直流输电技术的发展，对换流器谐波问题的研究有大量文章发表。近年来更由于大容量电力整流、换流设备以及电子设备在各工业部门和电力系统控制中的广泛应用，世界各国都对谐波问题给予十分重视和关心，多次召开了国际性的学术讨论会，不少国家已制定了对电力系统谐波和用电设备谐波的国家标准或电力部门的规定。国际电工委员会（IEC）和国际大电网会议都相继组成了专门

的工作组，开展了这方面的工作，并正在制定包括各项电力和用电设备以及家用电器在内的谐波标准。

在我国近年来由于电气铁道的大量发展以及化工、冶金、钢铁、有色金属、煤炭和交通等工业部门大量引进了国外设备和应用了电力整流和换流技术，谐波问题在有些电力系统中已经日趋严重，对电力系统和用电设备已产生了严重危害和影响，必须认真加以研究和采取相应的限制及管理措施。

一、谐波的含义和性质

国际上公认的谐波含义为：“谐波是一个周期电气量的正弦波分量，其频率为基波频率的整倍数”。由于谐波的频率是基波频率的整数倍数，我们也常称它为高次谐波。

在国际电工标准中（IEC555-2，1982），在国际大电网会议（CIGRE）的文献中（工作组报告36-05）对谐波也都有明确的定义。“谐波分量为周期量的傅立叶级数中大于1的 n 次分量”（见IEV101-04-39），对谐波次数 n 的定义则为：“以谐波频率和基波频率之比表达的整数”（见IEV101-04-40）。IEEE标准中（见IEEE标准519~1981）定义为：“谐波为一周期波或量的正弦波分量，其频率为基波频率的整倍数”。

以上定义明确了有关谐波性质的下列几个问题：

（1）谐波次数 n 必须是个正整数。例如，我国电力系统的额定频率为50Hz，则其基波为50Hz，二次谐波为100Hz，三次谐波为150Hz；有些国家电力系统的额定频率为60Hz，则其基波为60Hz，二次谐波为120Hz，三次谐波为180Hz。 n 不能为非整数，因此也不能有非整数谐波，至于分数次波则其英文原文为另一字 subharmonics 或 fractional-

harmonics, 在研究铁磁谐振等现象中, 有时会出现为基波频率 $1/2$ 、 $1/3$ 、 $1/5$ 等低次波(分母为正整数, 分子为 1)。这类现象由于其性质不同, 不属于本书中所论及的谐波范围。

(2) 谐波和暂态现象必须加以区别。为了区分谐波和暂态现象, 根据傅立叶级数的基本理论, 被变换的波形必须是周期性的和不变的。虽然实际上很难完全作到, 因为电力系统负荷是变动的, 而负荷的变动会影响系统中谐波含量, 但在实际分析中只要被分析的现象或情况持续一段适当的时间, 就可以应用傅立叶变换。因此, 需要区分清楚什么是谐波现象(波形保持不变)和什么是暂态现象(其每周的波形都发生变化)。

此外根据国际大电网会议工作组的意见, 图0-1所示的波形畸变虽然也是周期性的, 但不属于谐波范畴。这种波形畸变仅在正弦波一周期的极小部分上发生陷波(notch)。这种波形畸变陷波, 一般以基波峰值 U_{1m} 的百分数来表示, 其畸变偏差百分值 δ_u^* , 用下式计算:

$$\delta_u^* = 100 \frac{\Delta u}{U_{1m}} \%$$

式中 Δu ——畸变偏差值。

对畸变偏差百分值 δ_u^* 的最大允许值要加以限制。

在大电网会议工作组36-05的报告中指出, 这种畸变虽然也可用一系列的谐波分量表示, 但不作为谐波现象考虑, 而只作为一种暂态现象。

为了对暂态现象和谐波加以区别, 工作组一致同意在计算电压(或电流)畸变率时, 采用谐波电压(或电流)的平均有效值或平均总畸变率, 其时间区间 Δt 取 $3s$, 即取 3δ 中的测量或计算的平均有效值或平均值, 以电压为例, 即

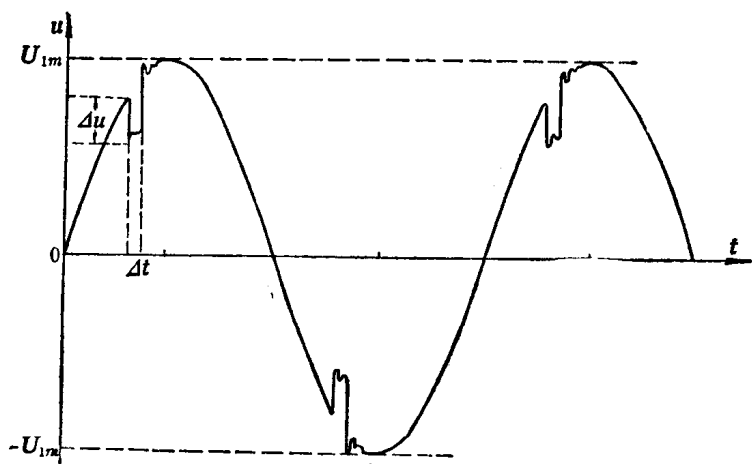


图 0-1 被通信信号或其他信号造成的畸变波形图

$$U_n = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m U_{nk}^2}$$

$$D_u = 100 \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \left(\frac{U_{nk}}{U_{1k}} \right)^2} \%$$

式中 m —— Δt 分成的区间数；

U_n ——第 n 次谐波电压的3s平均有效值；

D_u ——电压总畸变率的3s平均值(%)；

U_{1k} ——第 k 个区间测出的基波电压有效值；

U_{nk} ——第 k 个区间测出的第 n 次谐波电压有效值。

(3) 短时间谐波 (short Duration harmonics) 和暂态现象中的谐波分量。有一些国家的规定或标准中提到了短时间谐波问题。这是指晶闸管控制的轧钢机等设备工作时产生的短时间的突发电流脉冲 (burst)。这种突发的脉冲

包含着暂态分量及谐波分量。如果这类电流脉冲及其引起的电压畸变是间断性质的 (Intermittent)，也就是说电流脉冲的持续时间不超过2s，且二个电流脉冲之间的时间间隔不小于30s，则这种暂态分量和谐波分量是允许的。关键的问题是防止对其他电力设备，例如对电力电容器造成的损坏和对电子设备的干扰。如果在供电点的基波电压不超过额定供电电压的106%，应当不会发生损坏的危险。对于这类用电设备，控制的因素常常不是电流脉冲而是在其生产过程中造成的电压波动所引起的闪变 (flicker)。为了使闪变减小到可以容许的限度，供电点处的短路电流必须保持在一定水平或是装设电压波动补偿装置并附带谐波滤波器。

有关高次谐波的基本概念和分析方法将在第一章中详细论述。

二、波形畸变现象的产生

除了特殊情况外，波形畸变现象的产生主要是由于大容量电力和用电整流或换流设备，以及其他非线性负荷造成的。这些电力或用电设备从电力系统中吸收的畸变电流可以分解为基波和一系列的谐波电流分量。其谐波电流值实际上和50Hz基波电压值和供电网的阻抗几乎无关。因此，对大多数谐波源视为恒流源，它们与50Hz基波不同，后者一般是恒压源。

现代电力系统中发电机和变压器在正常稳态运行条件下，它们本身不会造成电力网中电压或电流的较大畸变，虽然在暂态扰动时（例如系统发生短路故障时、切合空载线路或空投变压器等时）以及超出其正常工作条件时（例如变压器运行在其额定工作电压以上时）将可能增大其产生的谐波含量。

系统中主要的谐波源是各种整流设备、交直流换流设备、电子电压调整设备 (Electronic voltage regulating device)、电弧炉、感应炉、现代工业设施为节能和控制使用的各种电力电子设备、非线性负荷以及多种家用电器和照明设备等。电气铁道机车采用的大容量单相整流供电设施,除了产生大量谐波电流外,还对三相交流供电系统产生不平衡负荷和负序电流、电压。这些负荷都使电力系统的电压和电流产生畸变,并对电力设备和广大用户设备及通信线路产生危害或干扰影响。

有关各种谐波源和整流、换流设备的分析将在第二章中加以阐述;有关电气铁道单相整流负荷的问题将在第六章中介绍,由于其产生的负序分量对电力系统及用电设备的危害性很大,因此在本章中还对负序分量的危害性给予简要的介绍。

三、研究谐波问题的重要意义

对自然环境的污染问题早已引起世界各国的重视并且都制定了相应的环境保护法,对各污染源排放的污染量加以限制并进行监测和管理。

在电力系统中,各种谐波源产生的谐波也对电力系统造成污染,影响到整个电力系统的电气环境,包括系统本身和广大用户,而且其污染影响的范围和距离很远,可能比一个工厂对大气环境的污染距离还要远,范围还要大。

谐波污染对电力系统的危害归纳起来主要有:

(1) 对旋转电机(发电机和电动机)产生附加功率损耗和发热,并可能引起振动。

(2) 对无功补偿电容器组引起谐振或谐波电流的放大;从而导致电容器因过负荷或过电压而损坏;对电力电缆

也会造成电缆的过负荷或过电压击穿。国内外都有这方面的深刻教训。

(3) 增加变压器和电网的损耗。当发生谐振或放大现象时, 损耗可达到相当大的程度。

(4) 对继电保护、自动控制装置和计算机产生干扰和造成误动作。尤其是一些衰减时间较长的暂态过程, 如变压器合闸涌流中的谐波分量, 由于其幅值和含量都很大, 更容易引起继电保护的误动作。

(5) 造成电能计量的误差。一方面是增加电度表本身的误差, 另一方面是谐波源负荷从系统中吸收基波功率而向系统送出谐波功率。这样受害的用户既从系统中吸收基波功率, 又从谐波源吸收无用的谐波功率, 其后果是谐波源负荷用户少付电费, 而受害的用户多付电费。

(6) 谐波电流在高压架空线路上的流动除增加线损外, 还将对相邻通讯线路产生干扰影响。

有关谐波对电气设备的影响及危害将在第三章中详细分析。

四、对谐波的管理和监测

在我国某些电力系统中, 上述一些危害, 如无功补偿电容器组的谐波电流放大和谐振、变压器保护误动跳闸、继电保护装置的误动作、电动机因过热而损坏等已经多次发生, 而且谐波和负序电流产生的综合危害曾引起大容量发电机的跳闸, 因此, 不论从保证电力系统的安全经济运行或是从保证用户设备和人身的安全来看, 对谐波污染造成的危害影响加以限制都是极为迫切需要的。电力部门有必要对电力系统谐波畸变允许值和谐波源注入供电点的谐波电流值作出规定, 对谐波源和供电点电压或电流的谐波含量或畸变值进行

监测，对新接入的谐波源负荷进行必要的验算和管理，以保证电能的质量、电力系统和广大用户设备的安全运行和正常工作；另一方面，电力用户为了保证自身设备的安全和正常运行，也应当把自己的用电设备产生的谐波畸变保持在规定的限度以下。

在用户负荷的管理工作中，很重要的一项工作就是对谐波源负荷的管理和监测。正如环境保护法对污染源的管理一样，对环境的污染必须由产生污染的工厂采取措施，使放出的污染量在标准规定值以下。对电力系统的污染也必须由产生谐波污染的用户采取措施（如装设滤波器等），将其设备产生的谐波限制在规定值以下。因此，除了要求现有的谐波源用户采取措施外，对新接入系统的大谐波源负荷必须经供电部门进行验算，确定其允许值和是否需要采取措施。供电部门在确定新接入用户的谐波含量和畸变允许值时，除考虑系统中原有的谐波含量外，还应留有适当裕度，为今后接入系统的新用户考虑。有关电力系统谐波潮流的计算、谐波滤波器参数的选择和对谐波的管理、监测和谐波标准等将分别在第四章、第五章、第八章和第九章中加以论述和介绍。

电力系统谐波问题虽然不是一个新的问题，但对许多电力技术工作者来说还是一个不太熟悉的问题。由于谐波问题的出现对原有的一些电工原理的概念，如无功功率和功率因数等都需要重新确定其含义。为了引起各方面对电力系统谐波问题及管理工作的重视，提高和普及这方面的技术，开展有关我国电力系统谐波的研究工作，水利电力部已根据国家经委批准的“全国供用电规则”在1984年制定和颁发了《电力系统谐波管理暂行规定》，同时邀请了一些专家和教授编写了讲义，并在1986年举办了第一期短期研究班。参加讲义

编写和讲课的有：清华大学唐统一教授、肖达川教授和孙树勤教授、天津大学宋文南教授、华中工学院任元教授、水利电力部生产司曲涛高级工程师、华北电管局周达身高级工程师、河北省电力局卢本平高级工程师、西北电力试验研究所张直平高级工程师、电力科学研究院何丰仁高级工程师、山西省电力局吕润余工程师。为了满足今后培训人员和工作的需要，水利电力部生产司又组织了本书编写组。编写组的同志参考了国内外有关文献，选择其中已为国内外所公认的、比较成熟的、通用的并为一般电力科学技术人员易于掌握的材料加以系统地整理，编写成本书。

本书的各章节编写者为：绪论，水电部生产司吴竞昌高级工程师；第一章，清华大学孙树勤教授；第二章和第四章，天津大学宋文南教授；第三章，西北电力试验研究所张直平高级工程师；第三章第四节和第五章，清华大学唐统一教授；第五章第四节清华大学肖达川教授；第六章，山西省电力试验研究所吕润余工程师；第七章，河北省电力局卢本平高级工程师；第八章，电力科学研究院供用电所林海雪工程师；第九章，水利电力部生产司曲涛高级工程师。全书由吴竞昌、孙树勤、宋文南、曲涛四同志修改补充和统稿。

本书概括了电力系统谐波的基本原理、谐波的产生、谐波的危害影响、谐波的潮流计算、谐波的测量、谐波的管理、限制措施和有关谐波的标准，但对有关直流输电的谐波问题未作专门讨论。由于这是国内第一本论述电力系统谐波的书，目前国外这类书也极少，而且电力系统谐波这一领域内尚有许多问题，特别是暂态过程中的谐波问题，尚在研究和探讨之中，因此，不完善的地方在所难免，还请读者鉴谅。希望本书能满足目前从事电力系统工作的科学技术人员

以及从事工业企业用电的电力技术人员的需要。同时本书也可供大专院校学习和讲授电力系统谐波问题的参考和作为专业培训班的教材。

最后,在编写本书过程中使用和参考了大量文献和技术资料,在此,向这些作者致谢,本书作者要特别感谢任元教授、周达身高级工程师、何丰仁高级工程师、李平之工程师等对编写本书给予的支持和帮助。清华大学陈寿孙教授对本书进行了审稿,对书稿提出许多宝贵意见,谨此致谢。

参 考 文 献

- [1] Harmonics, Characteristic Parameters, Methods of Study, Estimates of Existing Values in Network, WG36-05, Electra, No.77 1982。
- [2] Special Problems Encountered in the Study of Harmonic Distortion, WG36-05, Electra, 1982。
- [3] J.Arrilaga, D.A.Bradly, P.S.Bodger, Power System Harmonics, John Wiley and Sons Ltd., 1985。
- [4] British Electricity Board, Engineering Recommendation G-5/3, Sept. 1976。
- [5] ANSI/IEEE std 519.1981, IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Converter, 1981。