



静止无功功率 补偿技术

栗时平 刘桂英 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

静止无功功率补偿技术

栗时平 刘桂英 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书系统介绍了静止无功功率补偿技术的理论、方法、原理、设计、应用及发展。全书共9章,内容包括绪论、无功功率补偿的理论基础、静态无功功率补偿、动态无功功率补偿、静止无功功率补偿器、静止无功功率发生器、统一潮流控制器、有源电力滤波器和静止无功功率补偿中信号检测及瞬时无功功率理论应用等。

本书既适用于从事无功功率问题研究的工程技术人员,也可供电力系统及其自动化、供配电、工业自动化、电力电子技术等的电气工程技术人员阅读,还可以作为大学本科高年级学生和从事电力专业研究的工科研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

静止无功功率补偿技术/粟时平,刘桂英编著. —北京:中国电力出版社,2006

ISBN 7-5083-3766-2

I. 静... II. ①粟... ②刘... III. 电力系统-静止-无功功率-无功补偿 IV. TM714.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第149000号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006年4月第一版 2006年4月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 12.125印张 271千字
印数0001—3000册 定价20.00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)

前言

静止无功功率补偿技术

随着计算机和电力电子技术等学科的飞速发展，静止无功功率补偿技术的理论、方法及实现手段也获得了飞速的发展，并且应用越来越广泛。为了适应这一发展对人才培养的需要，国内外许多高校都开设了静止无功功率补偿技术课程。

静止无功功率补偿技术的内容广泛、理论复杂，广大读者迫切需要一本反映电力系统技术发展需要、理论与实践相结合的静止无功功率补偿技术的书籍。本书正是朝着这一目标所作的努力与尝试。本书力求在系统阐述静止无功功率补偿技术基础理论的同时，结合技术应用的实际需要，更多地反映静止无功功率补偿技术研究的最新技术成果和进展。同时在内容安排上也考虑了如何有利于读者的自学，因此对一些重要内容进行了较为详细的阐述。

本书内容丰富，既包含了经典的静止无功补偿技术，也包含了现代静止无功补偿技术；既注重静止无功补偿技术的成熟理论和方法，也注重静止无功补偿技术的新理论和新方法。通过本书的学习，读者可以了解静止无功补偿技术的主要内容，掌握静止无功补偿技术的基本原理，具备从事静止无功补偿研究和应用的基本知识和能力。

本书给出了重要专业术语基本定义以及需要使用到的理论结论和公式，个别地方为了保持内容连贯性，给出了简要的公式推导，对于繁琐的理论推导和证明一概略去。

本书在编写时参阅了 500 余篇中外文的论文和书籍，同时凝聚了本书作者从事静止无功功率补偿技术研究 15 年来的思考。但是，对于参阅的论文和书籍，本书基于篇幅的考虑未能在参考文献中一一列出，为此向这些论文和书籍的作者表示歉意和感谢。参考文献中主要收录在某一方面有代表意义的中文论文和书籍。

虽然本书作者在两年前就有了编写计划，但是由于教学、学习和科研工作繁重，直到最近才匆匆成稿，书中难免有许多不足之处，对此深表歉意，并欢迎批评修正。

本书定位于理工科的电力专业高年级本科生和研究生以及电力工作者的参考书，也可以作为电力专业高年级本科生选修本课程的教材。

作者在撰写本书和承担长沙理工大学“静止无功功率补偿技术”课程教学的过程中得到了长沙理工大学科技处、研究生院、电气与信息工程学院的关心与支持，在此表示衷心的感谢！本书得到了长沙理工大学的学术著作出版资助，在此深表感谢！

编者

2005 年 11 月

前言

1 绪论	1
1.1 无功功率的基本概念及研究意义	1
1.2 无功功率对电力系统的影响	1
1.3 电力系统无功电源与无功负荷	3
1.4 无功功率补偿	4
2 无功功率补偿的理论基础	6
2.1 正弦电路的无功功率理论	6
2.2 基于频域分析的非正弦电路无功功率理论	8
2.3 基于时域分析的非正弦电路无功功率理论	11
2.4 基于矢量分析的三相电路瞬时无功功率理论	14
2.5 瞬时功率与平均功率之间的关系	19
3 静态无功功率补偿	21
3.1 并联电容器	21
3.2 并联电抗器	43
3.3 串联电容器	51
3.4 串联电抗器	55
4 动态无功功率补偿	58
4.1 基本概念	58
4.2 动态无功功率补偿的主要功能	58
4.3 动态无功功率补偿的原理	59
4.4 动态无功功率补偿的主要类型	63
4.5 柔性交流输电系统与动态静止无功功率补偿	64
5 静止无功功率补偿器	69
5.1 概述	69
5.2 晶闸管可控制电抗器	71
5.3 晶闸管投切电容器	83
5.4 晶闸管投切电容器与晶闸管控制电抗器的配合使用	91
5.5 饱和电抗器	93
6 静止无功功率发生器	99
6.1 概述	99
6.2 静止无功功率发生器的主电路	101

6.3	静止无功功率发生器的基本原理	109
6.4	静止无功功率发生器的工作特性	112
6.5	静止无功功率发生器的控制	113
6.6	其他控制方法简介	122
6.7	静止无功功率发生器的实例	127
7	统一潮流控制器	132
7.1	概述	132
7.2	主电路形式	133
7.3	统一潮流控制器的基本原理	135
7.4	统一潮流控制器的控制	141
8	有源电力滤波器	148
8.1	概述	148
8.2	有源电力滤波器的主电路形式	150
8.3	有源电力滤波器的分类	152
8.4	有源电力滤波器的基本原理	158
8.5	有源电力滤波器的常用控制方法	161
8.6	有源电力滤波器控制技术研究及其进展	163
9	静止无功功率补偿中信号检测及瞬时无功功率理论应用	168
9.1	交流电压和电流有效值检测	168
9.2	正弦电路无功功率和无功电流检测	171
9.3	非正弦电路无功电流和谐波电流检测	174
9.4	瞬时无功功率理论应用实例	178
	参考文献	186

绪 论

1.1 无功功率的基本概念及研究意义

无功功率在电气技术领域是个必不可少的重要物理量。变化的磁场产生变化的电场，变化的电场产生变化的磁场，这正是无功功率交换的规律。因此有磁场空间和电场空间才能存在无功功率产生的空间。在正弦电路中，无功功率的概念有清楚的物理意义，无功功率表示有能量交换，但不消耗功率，其幅值可作为能量交换的量度。传统上无功功率一般采用平均无功功率概念，它是电路中储能元件与电源间交换功率的最大值，也是储能元件与电源间交换能量的一种量度。在非正弦电路中，无功功率的概念却很抽象，并且至今未获得公认的无功功率定义。于是，在非正弦波情况下，有关平均无功功率的定义有两种学派：一种学派是依据 Budeanu 的定义，采用频域分析法；另一种学派是依据 Fryze 的定义，采用时域分析法。近年来，国内外学者又提出了广义平均无功功率、瞬时无功功率以及广义瞬时无功功率的概念。本书 2 将对这些概念进行详细介绍。

近年来，随着我国电力工业的不断发展，大范围的高压输电网络逐渐形成，同时对电网无功功率的要求也日益严格。无功电源如同有功电源一样，是保证电力系统电能质量、降低电网损耗以及保证其安全运行所不可缺少的部分。电网无功功率不平衡将导致系统电压的巨大波动，严重时会导致用电设备的损坏，出现系统电压崩溃和稳定破坏事故。因此无功功率对电力系统是十分重要的，研究无功功率具有重要的现实意义，归纳如下：

(1) 研究无功功率，可以解决现代电力系统中与无功功率相关的一系列技术问题。与无功功率相关的技术问题很多，主要有：①无功功率静态稳定问题；②电容性无功功率引起的发电机自励磁问题；③因潜供电流引起的单相快速自动重合闸电弧不能熄灭问题；④冲击性无功负荷的调节问题；⑤无功功率中的高次谐波公害和闪变问题；⑥跟随馈电系统引起的负荷功率因数的变化与改善问题。

(2) 研究无功功率可以促进节能。无功功率在电网中不断循环，造成很大的浪费。一个 10GW 的电力系统，如果无功功率问题处理得好，每年从这个电网的发电厂、变电所、用户中节约的电能超过 10 亿 kWh，并且可以减少系统中 200 ~ 300MW 容量的输变电设备。

(3) 研究无功功率，掌握它的经济规律。通过统计、理论分析和各项技术措施来达到经济运行的目的。

(4) 研究无功功率，可以保证电能质量，促使电力系统安全运行。

1.2 无功功率对电力系统的影响

电力系统中的无功功率主要用于电路内电场与磁场，并用来在电气设备中建立和维持

磁场，完成电磁能量的相互转换，不对外做功，为系统提供电压支撑，在电源与负荷之间提供电压降落所需的势能。无功功率不直接作为实际消耗之功，但无功功率的交换将引起发电和输电设备上的电压开降和电能损失。

无功功率是交流电力设计和运行中的一个重要因素，不仅大多数网络元件需要消耗无功功率，而且大多数用户负荷也要消耗无功功率。如变压器、大量感应式电动机、气体放电电灯、电风扇、冰箱、空调等设备，它们不仅需要从电力系统中吸收有功功率，同时需要吸收无功功率，以产生这些设备维持正常工作所必须的交变磁场。无功功率不是无用功率，它能为能量的交换、输送、转换创造必要的条件，但大量的无功功率在系统中经高低压供电系统流入设备，会引起有功损耗，造成电压降落，影响电能质量，对发电、供电、配电三方都会产生不良影响。

1.2.1 无功功率对有功功率的影响

输电线路的主要任务是输送有功功率，而为了实现有功功率的传输和电网无功功率的平衡，一般也需要输送一定量的无功功率。输送无功功率时需要消耗有功功率。当有功功率一定时，无功功率越大，则网络中的有功功率损耗就越大。当电力线路的传输能力一定时，传输无功功率越小，则传输有功功率的能力越大。

1.2.2 无功功率对电压的影响

(1) 无功功率平衡水平对电压水平的影响。电力系统中无功功率平衡水平对电压水平有较大的影响。如果发电机有足够的无功功率备用，系统的无功电源比较充足，就能满足较高电压质量下无功功率平衡的需要，系统就有较高质量的运行电压水平。反之，如果无功功率不足，系统只能在较低质量的电压水平下运行。另外，电能在电力网中传输时，要损失掉部分有功功率和无功功率。当无功功率损耗较大时，将引起系统电压大幅度下降，影响系统运行的稳定性、经济性。

(2) 无功功率对电压质量的影响。电力系统是向用户提供电能的网络，因而电能质量是供电部门生产经营活动中的一个重要经济技术指标。电压是电能质量的主要指标之一，电压质量对电力系统稳定运行，降低线路损耗和保证工农业的安全生产有着重要意义。在工农业生产和人民生活中使用的各种用电设备都是按照额定电压来设计制造的。这些设备在额定电压下运行时，才能取得最佳的运行状态。电压超出所规定的范围时，对用电设备将产生不良的后果。

目前大多数国家规定的电压允许变化范围一般为 $+5\% \sim -10\% U_N$ （额定电压）。电力部门为了确保电力系统正常运行时能够提供优质的电压，确保优质的供电服务，必须确保各输配电线路的母线电压稳定在允许的偏差范围之内。电力系统正常运行时，应有充足的无功电源。无功电源的总容量要能满足系统在额定电压下对无功功率的需求。否则，电压就会偏离额定值。

当电力网有能力向负荷供给足够的无功功率时，负荷的电压就能维持在正常的水平上。如果无功电源容量不足，负荷的端电压就会降低。所以，我们要保证电力系统的电压质量，就必须先保证电力系统无功功率的平衡。

1.2.3 无功功率对线损的影响

无功电源的布局、无功功率的传输以及无功功率的管理，直接影响线路的损耗和电力系统的经济运行。当有功功率和无功功率通过网络电阻时，会造成有功功率损耗。当网络结构已定，输送有功功率一定时，总的功率损耗完全决定于无功功率的大小。

1.3 电力系统无功电源与无功负荷

1.3.1 电力系统的无功电源

在电力系统中，无功电源主要是同步发电机、同步调相机以及同步电动机。

(1) 同步发电机。同步发电机是唯一的有功电源，同时又是最基本的无功电源装置。从系统观点来看，它的容量最大，调节也最方便。电力系统中大部分无功功率需求都是由同步发电机提供的。同步发电机在过励磁和欠励磁时可以分别发出或吸收无功功率。即当同步发电机在低功率因数情况下，可以发出无功功率。但是，发电机应严格地按照有功功率—无功功率 ($P-Q$) 极限曲线运行，不得越出曲线范围。同步发电机供给无功功率的能力，不仅与短路比之值有关，还与同时担负的有功负载大小有关，其最大无功功率出力将受转子温升的条件限制。

同步发电机正常运行时，以滞后功率因数运行为主，即向系统提供无功功率。但必要时，也可以减小励磁电流，使功率因数超前，即所谓的“进相运行”，以吸收系统多余的无功功率。

(2) 同步调相机。同步调相机是一种特制的同步电动机，轴上不带机械负载，专门用于补偿无功功率。它能在过励磁运行时，向系统供给感性无功功率，起无功电源的作用；在欠励磁运行时，从系统吸取感性无功功率，起无功负荷的作用。装有自动励磁装置的同步调相机能根据电压平滑地调节输入或输出的无功功率。同步调相机的定子与转子间的空隙比一般同步电动机小得多，轴的结构较简单，强度要求也较低。同步调相机的主要优点是可以无级调节无功功率的数值，但由于它是一种旋转机械，有功功率损耗较大，运行维护复杂，响应速度慢，近来已逐渐退出电网运行，通常只在需要大容量的无功功率补偿设备时才装设同步调相机。

(3) 同步电动机。同步电动机是一种除可将电能转换成机械能外，还可调节其励磁电流产生无功功率的旋转机械，因而也是一种无功电源补偿装置。同步电动机的优点是：①可在功率因数超前的方式下运行，输出无功功率；②当电网频率不变时，电动机的转速恒定，且转速与负载情况有关；③如果采用强行励磁，可提高供电系统的稳定性。但这种电动机的价格较贵，控制设备较复杂，维护也较麻烦。

1.3.2 电力系统的无功负荷

(1) 异步电动机。异步电动机在电力系统运行负荷中占的比重非常大，是电力系统的无功功率消耗大户。所以系统中无功负荷的电压特性主要是由异步电动机来确定的。特别是经辐射性网络供电的工业负荷，如果这些负荷主要是大型感应电动机负荷时，甚至可能引起负荷端的电压连续下降，最后可能扩展到整个电力系统的电压崩溃。出现这种现象的原因在于负荷端无功功率供应不足，系统为满足负荷的无功功率需求而造成电压不稳定。

据有关的统计，在工矿企业所消耗的全部无功功率中，异步电动机的无功功率消耗占了60%~70%；而在异步电动机空载时所消耗的无功功率又占到电动机总无功功率消耗的60%~70%。

(2) 变压器。变压器是电力系统的又一无功功率消耗大户。变压器的无功功率消耗包括励磁消耗和漏抗中的消耗两部分：励磁消耗基本上等于空载损耗电流的百分值，约为1%~2%；绕组漏抗消耗在变压器满载时基本上等于短路电压的百分值，约为10%。因此，在从电源到用户需要经过好几级变压的情形，其无功功率消耗的数值是相当可观的。

无论是双绕组还是三绕组变压器，绕组均有两组参数。电阻与电抗为绕组的纵分量，电导与电纳为绕组的横分量，而消耗系统无功功率的参数是电抗与电纳。电抗中的无功功率消耗是感性无功功率，与负荷有关，随负荷随机变化，变动范围很大。电纳中的无功功率损耗称为励磁损耗，消耗容性无功功率，它与空载电流有关，变动范围很小，对于给定的变压器，励磁损耗是固定不变的。所以变压器无功功率损耗的变化大小主要由负荷的变化来决定。

(3) 电力线路。电力线路有一定的特殊性。由于电力线路存在分布电容，能产生无功功率作为无功功率源，又由于自身串联阻抗的作用，消耗无功功率作为无功功率负荷。无功功率损耗是由电力线路的电抗和电纳造成的。电力网中对于一定电压等级的电力线路，电力线路越长，电力线路参数值越大，无功功率损耗也越大，电力线路上电压降也越大。

一般来说，对于电压等级为35kV及以下的电力线路，其充电功率甚小，电力线路主要是消耗无功功率。但是对于电压等级为110kV及以上的电力线路，其情况较为复杂。当电力线路的传输功率较大时，电力线路中电抗消耗的无功功率将大于电纳中产生的无功功率，则电力线路为无功负荷，消耗无功功率；当电力线路的传输功率较小时，电力线路中电纳产生的无功功率，除了抵消电抗中的无功功率损耗以外，还有剩余，电力线路为无功电源，发出无功功率。

(4) 整流装置。近些年来，国民经济各部门大力推广使用各种新型的电力电子整流装置，它们在减少能量损耗的同时，也带来了诸如功率因数下降、电压波动和闪变、三相不平衡以及谐波干扰等问题，严重危及电力系统的安全经济运行。

(5) 其他用电设备。各种用电设备中，除相对很小的白炽灯照明负载只消耗有功功率外，大多数都要消耗无功功率。因此，无论工业或农业用户都以滞后功率因数运行，其值约为0.6~0.9，其中较大的数值对应于使用大容量同步电动机的场合。

1.4 无功功率补偿

1.4.1 无功功率补偿的作用

电力系统网络中不仅大多数负荷要消耗无功功率，而且大多数网络组件也要消耗无功功率。电力系统中网络组件和负荷需要的无功功率必须从网络中某个地方获得。如果这些所需要的无功功率由发电机提供并经过长距离传送，显然是不合理的，通常也是不可能的；如果这些所需要的无功功率不能及时得到补偿，电力系统的安全运行以及用电设备的安全就会受到影响。因此，无功功率补偿对电力系统有着重要意义，概括起来有：

- (1) 稳定受电端及电网的电压，提高供电质量。
- (2) 提高供用电系统及负载的功率因数，降低设备容量，减小功率损耗。
- (3) 改善系统的稳定性，提高输电能力，并提供一定的系统阻尼。
- (4) 提高发电机有功输出能力。
- (5) 减少线路损失，提高电网的有功传输能力。
- (6) 降低电网的功率损耗，提高变压器的输出功率及运行经济效益。
- (7) 降低设备发热，延长设备寿命，改善设备的利用率。
- (8) 高水平平衡三相的有功功率和无功功率。
- (9) 避免系统电压崩溃和稳定破坏事故，提高运行安全性。

1.4.2 无功功率补偿装置

无功功率补偿装置经过数十年的发展，形成了种类繁多的无功功率补偿装置。根据无功功率补偿装置输出是否能跟踪电力系统无功功率变化来分类，分为静态无功功率补偿和动态无功功率补偿。根据无功功率补偿装置是否拥有运动部件来分类，可以分为运动无功功率补偿装置和静止无功功率补偿装置。根据无功功率补偿装置开始使用的时间，可以分为传统无功功率补偿装置和现代无功功率补偿装置。根据电压等级的不同分类，可以分为低电压无功功率补偿装置和高压无功功率补偿装置。根据装置本身有无自带电源分类，可以分为无源无功功率补偿装置和有源无功功率补偿装置。运动无功功率补偿装置主要是同步调相机，属于传统无功功率补偿装置，也属于有源无功功率补偿装置。静止无功功率补偿装置主要有电力电容器、电力电抗器、静止无功功率补偿器、静止无功功率发生器、统一潮流控制器、有源电力滤波器，其中电力电容器和电力电抗器为传统静止无功功率补偿装置，其他静止无功功率补偿装置属于现代静止无功功率补偿装置。电容器、电抗器与静止无功功率补偿器属于无源无功功率补偿装置，静止无功功率发生器、统一潮流控制器和有源电力滤波器属于有源无功功率补偿装置。传统静止无功功率补偿装置的最大特征是补偿容量不能随负荷无功功率容量的变化而变化，因此又称静态静止无功功率补偿装置，简称静态无功功率补偿装置。现代静止无功功率补偿装置的最大特征是补偿容量能随负荷无功功率容量的变化而变化，因此又称动态静止无功功率补偿装置。每种无功功率补偿装置均可以分为低压无功功率补偿装置与高压无功功率补偿装置。

由于同步调相机是一种旋转机械，有功功率损耗较大，运行维护复杂、响应速度慢，已逐渐退出电网运行，正在被高性能的静止无功功率补偿装置所取代。因此，本书的重点是探讨静止无功功率补偿的技术问题。

无功功率补偿的理论基础

2.1 正弦电路的无功功率理论

2.1.1 单相正弦电路的无功功率和功率因数

经典无功功率及功率因数的概念是建立在线性正弦交流电路基础上的。在正弦交流电路中，负荷是线性的，电路的电压和电流都是正弦波。设电压、电流瞬时值 u 、 i 的表达式分别为

$$\left. \begin{aligned} u &= \sqrt{2} U \sin \omega t \\ i &= \sqrt{2} I \sin (\omega t - \varphi) = \sqrt{2} I \cos \varphi \sin \omega t - \sqrt{2} I \sin \varphi \cos \omega t = i_p + i_q \end{aligned} \right\} \quad (2-1)$$

式中 U ——电压 u 的有效值；
 I ——电流 i 的有效值；
 φ ——电压 u 与电流 i 之间的相位差；
 i_p ——和电压同相位的电流分量；
 i_q ——和电压相位相差 90° 的电流分量。

电流 i 被分解为与电压相位相同的分量 i_p 和与电压相位相差 90° 的分量 i_q ，则 i_p 和 i_q 分别为

$$\left. \begin{aligned} i_p &= \sqrt{2} I \cos \varphi \sin \omega t \\ i_q &= -\sqrt{2} I \sin \varphi \cos \omega t \end{aligned} \right\} \quad (2-2)$$

电路的瞬时功率 p 为

$$p = ui$$

瞬时功率 p 在一个周期内的平均功率 P 为

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T ui dt = \frac{1}{T} \int_0^T (ui_p + ui_q) dt \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} UI \cos \varphi (1 - \cos 2\omega t) d(\omega t) \\ &\quad + \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (-UI \sin \varphi \sin 2\omega t) d(\omega t) \\ &= UI \cos \varphi \end{aligned} \quad (2-3)$$

式 (2-3) 中的 $P = UI \cos \varphi$ 是消耗在电阻元件上的平均功率，常称为有功功率。

电路的无功功率定义为

$$Q = UI \sin \varphi \quad (2-4)$$

可以看出， Q 就是式 (2-3) 中被积函数的第二项 ui_q 的变化幅度。 ui_q 的平均值为零，表示电路有能量交换，但是不消耗功率。 Q 表示了这种能量交换的幅度。在单相电

路中，这种能量交换通常在电源和具有储能元件的负荷之间进行。从式(2-3)中看出，真正的功率消耗是由被积函数的第一项 ui_p 产生的。因此， ui_p 称为正弦电路的瞬时有功功率， ui_q 称为正弦电路的瞬时无功功率， i_p 称为瞬时有功电流分量， i_q 称为瞬时无功电流分量。

由式(2-4)可知，当电流的相位滞后电压时， Q 为正， Q 是消耗在感性负荷的无功功率；当电流的相位超前电压时， Q 为负， Q 是消耗在容性负荷的无功功率。因此通常规定感性无功功率为正，容性无功功率为负。

对于发电机和变压器等电气设备来说，其额定电流与导线的截面积及铜损耗有关，其额定电压和绕组电气绝缘有关，在工作频率一定的情况下，其额定电压还和铁心尺寸及铁心损耗有关。因此工程上，常把电压电流有效值的乘积作为电气设备功率设计极限，这个值也就是电气设备最大可利用容量，称为视在功率 S 。视在功率定义 S 为

$$S = UI \quad (2-5)$$

功率因数定义为有功功率与视在功率的比值。即

$$\lambda = P/S = \cos\varphi \quad (2-6)$$

由式(2-5)和式(2-6)可以看出，在正弦电路中，功率因数由电压和电流之间的相角差决定。在这种情况下，功率因数常用 $\cos\varphi$ 来表示。因此，在单相正弦电路中，功率因数有明确的物理意义，它就是电压和电流之间的相角差的余弦值。

由式(2-3)~式(2-5)可得 S 、 P 、 Q 满足如下关系：

$$S^2 = P^2 + Q^2 \quad (2-7)$$

需要指出的是，视在功率只是电压和电流有效值的乘积，它并不能准确反映能量交换和消耗的强度，并且在一般电路中，视在功率并不遵守能量守恒定律。

在线性交流电路中，当电流和电压均为正弦波时，无功功率是代表负荷与电源之间能量来回交换的一种量度，它是电路中储能元件与电源间交换功率的最大值。无功功率表示有能量交换，但不消耗功率，而且一般只有当有储能元件时才会有这种能量交换。

2.1.2 三相正弦电路的无功功率和功率因数

三相正弦电路的总有功功率定义为各相有功功率之和。三相正弦电路的总无功功率定义为各相无功功率之和。三相正弦电路的总视在功率至今还没有一个统一的定义。定义之一为：若设三相正弦电路的总有功功率为 ΣP ，三相正弦电路的总无功功率为 ΣQ ，那么三相正弦电路的总视在功率定义之一为

$$S = \sqrt{(\Sigma P)^2 + (\Sigma Q)^2} \quad (2-8)$$

由于三相正弦电路的总视在功率至今还没有一个统一的定义，从而导致三相功率因数至今也还没有一个统一的定义，三相功率因数定义之一为

$$\cos\varphi = \frac{\Sigma P}{S} \quad (2-9)$$

在三相对称正弦电路中，各相视在功率、功率因数也均相同。由式(2-8)可知，三相对称正弦电路的总视在功率等于各相视在功率之和，三相对称电路的功率因数等于单相功率因数。因此，三相对称电路的总视在功率和功率因数也有明确物理意义，三相总视在

功率等于各相电压电流有效值的乘积之和，三相功率因数就是等于单相功率因数。但是，在三相不对称电路中，由于各相电压、电流存在不对称，各相的视在功率、功率因数也不相同。由式(2-8)可知，三相不对称正弦电路的总视在功率并不一定等于各相视在功率之和，因此三相不对称电路的功率因数可能不等于任意单相功率因数。因此，三相正弦电路的视在功率和功率因数失去了单相电路的视在功率和功率因数的物理意义。

另外，在三相对称正弦电路中，瞬时功率 p 等于三相平均功率，也就是说瞬时功率 p 等于三相有功功率 P ，这是三相对称正弦电路的一大特点。

从上述无功功率定义可以进一步得出其以下几个属性：

- (1) 无功功率是一物理量，其表达式为 $Q = UI \sin \varphi$ 。
- (2) 无功功率是一个有符号的物理量。
- (3) 系统中无功功率可以被平衡掉，即流入某节点的无功功率等于流出某节点的无功功率。
- (4) 对无功功率进行补偿可以使功率因数等于 1。
- (5) 单相无功功率与有功功率及视在功率满足直角三角形运算关系。
- (6) 三相无功功率与有功功率及相量视在功率满足直角三角形运算关系，而三相无功功率与有功功率及算术视在功率不一定满足直角三角形运算关系。

2.2 基于频域分析的非正弦电路无功功率理论

用频域定义无功功率是由 Budeanu 在 1927 年提出的，其基本思路是将非正弦周期电压电流分解成无数个不同频率的正弦波，然后把正弦情况下的有功功率、无功功率、视在功率和功率因数定义扩展到非正弦情况下。

2.2.1 基于频域分析的单相非正弦电路无功功率和功率因数

在含有谐波的非正弦电路中，有功功率、视在功率和功率因数的定义均与正弦电路相同。有功功率仍然是瞬时功率在一个周期内的平均值。视在功率、功率因数仍然分别由式(2-5)和式(2-6)来定义。有功功率、视在功率这两个量的物理意义也没有发生变化。下面介绍无功功率定义

非正弦周期函数可以用傅里叶级数表示，因此可以设电压、电流分别为

$$u = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} U_n (\sin n\omega t + \varphi_{un}) \quad (2-10)$$

$$i = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n (\sin n\omega t + \varphi_{in}) \quad (2-11)$$

式中 U_n 、 I_n ——第 n 次谐波电压、电流的有效值；

φ_{un} 、 φ_{in} ——第 n 次电压、电流的相位角。

在式(2-10)和式(2-11)中，各不同频率分量都是相互正交的。也就是说上述函数集中的两个不同函数的乘积在一个周期内的积分为零。因此有功功率 P 为

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \cos \varphi_n = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \quad (2-12)$$

式中 P_n ——第 n 次谐波的有功功率；

φ_n ——第 n 次谐波电压与电流的相角差 ($n=1, 2, 3, \dots$)。

由式 (2-12) 可以看出, 非正弦单相电路的有功功率等于同频率电压与电流所产生的有功功率的代数和。

在非正弦电路中, 电压 u 和电流 i 的有效值 U 、 I 分别为

$$U = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2}, I = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}$$

因此非正弦单相电路的视在功率 S 为

$$S = UI = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (2-13)$$

非正弦单相电路的功率因数为

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{\sum P_n}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} = \cos \varphi \quad (2-14)$$

需要说明的是, 式 (2-14) 中的 φ 失去了单相正弦电路中 φ 的物理意义。

含有谐波的非正弦电路中的无功功率定义至今还没有统一。基于频域分析的无功功率定义有两种方法: 一是仿照式 (2-4) 和式 (2-12) 进行无功功率定义, 二是根据式 (2-7) 进行无功功率定义。按方法一定义的无功功率用 Q_B 表示, 按方法二定义的无功功率用 Q_g 表示。仿照式 (2-4) 和式 (2-12), 无功功率 Q_B 定义为同频率电压与电流所产生的无功功率的代数和, 写成公式为

$$Q_B = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n = \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \sin \varphi_n \quad (2-15)$$

式中 Q_n ——第 n 次谐波的无功功率；

φ_n ——第 n 次谐波电压与电流的相角差 ($n=1, 2, 3, \dots$)。

根据式 (2-7), 无功功率 Q_g 定义为

$$Q_g = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2-16)$$

由于在正弦电路中, 通常规定感性无功功率为正, 容性无功功率为负。因此按式 (2-15) 定义的无功功率 Q_B 可能出现一些不合理的现象。因为同一个谐波源中有可能某些次谐波的无功功率为感性无功功率, 而另一些次谐波的无功功率为容性无功功率, 从而出现两者互相抵消的情况, 但是, 实际上, 由于不同频率的电压、电流是相互正交的, 也就是说彼此不相关的, 因此不同频率的无功功率是无法相互补偿的。例如, 当电源和负载之间存在着能量交换, Q_n 为非零时, 而 Q_B 却可能为零, 换言之, 即使 Q_B 为零, 电路中仍有可能存在能量交换。由此可知, Q_B 已经没有度量电源和负载之间能量交换幅度的物理意义了。

根据式 (2-7) 定义的无功功率 Q_g 反映了非正弦电路中能量的流动和交换, 但并不反映能量在负荷中的消耗。在这一点上, 它和正弦电路中无功功率最基本的物理意义是相同的。但是, 这一定义对无功功率的描述很粗糙, 主要表现在它没有区别基波电压电流产

生的无功功率、同频率谐波电压电流产生的无功功率以及不同频率电压电流产生的无功功率。也就是说，无功功率 Q_g 对于谐波源和无功功率的辨识和理解谐波和无功功率的流动缺乏指导意义。另外，无功功率 Q_g 也无助于对谐波和无功功率的监测、管理和收费。

在非正弦单相电路中， $S^2 \neq P^2 + Q_B^2$ ，为此，引入畸变功率 D_B ，使得

$$S^2 = P^2 + Q_B^2 + D_B^2 \quad (2-17)$$

显然， D_B 和 Q_B 不同。 D_B 是由不同频率的电压电流正弦波分量产生的能量交换。需要指出的是，畸变功率 D_B 并没有明确的物理意义，他只是反映电流对电压波形畸变的一个量。

比较式 (2-16) 和式 (2-17)，有

$$Q_g = \sqrt{Q^2 + D_B^2}$$

由此可知， Q_g 包括了基波电压电流产生的无功功率、同频率谐波电压电流产生的无功功率以及不同频率电压电流产生的无功功率，因此通常又称 Q_g 为单相电路的广义无功功率。

在公共电网中，通常电压的波形畸变都很小，而电流的波形畸变则可能很大。因此，不考虑电压畸变，研究电压波形为正弦波、电流波形为非正弦波的情况有很大的实际意义。设正弦电压的有效值为 U ，畸变电流有效值为 I ，其基波电流有效值及与电压相角差分别为 I_1 和 φ_1 ， n 次谐波的有效值为 I_n 。考虑到不同频率的电压电流不产生有功功率，按照上述定义可以得到如下一些表达式

$$P = UI_1 \cos \varphi_1$$

$$Q_B = UI_1 \sin \varphi_1$$

$$P^2 + Q_B^2 = U^2 I_1^2$$

$$S^2 = U^2 I^2 = U^2 I_1^2 + U^2 \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2$$

$$D_B^2 = S^2 - P^2 - Q_B^2 = U^2 \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2$$

在这种情况下， Q_B 和 D_B 都有明确的物理意义。 Q_B 是基波电流所产生的无功功率， D_B 是谐波电流所产生的无功功率。这时功率因数为

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{UI_1 \cos \varphi_1}{UI} = \frac{I_1}{I} \cos \varphi_1 = \gamma \cos \varphi_1 \quad (2-18)$$

式中， γ 称为基波因数，是基波电流有效值和总电流有效值之比，即

$$\gamma = \frac{I_1}{I}$$

$\cos \varphi_1$ 为基波功率因数，也称位移因数。

由式 (2-18) 可以看出，在正弦电压情况下，单相电路的功率因数是由基波电流相移和电流波形畸变两个因素决定的，总电流可以看成由三个电流分量组成，即由基波有功电流分量、基波无功电流分量和谐波电流分量组成。式 (2-18) 在工程上得到广泛应用。通过上述分析进一步可知，引入 D_B 很有意义。

2.2.2 基于频域分析的三相非正弦电路无功功率和功率因数

三相非正弦电路的有功功率、无功功率、视在功率和功率因数的定义与三相正弦电路完全相同。需要说明的是，由于在三相非正弦电路中的单相无功功率存在两种定义，从而使三相非正弦电路中的总视在功率和功率因数也均存在两种不同的表达式。

另外，基于频域的三相非正弦电路的总视在功率和三相功率因数也失去了单相非正弦电路视在功率和功率因数应有的含义。

2.3 基于时域分析的非正弦电路无功功率理论

上面基于频域分析的无功功率定义，是建立在傅里叶基数基础上的。因此在工程应用中需要首先将电压和电流分别进行傅里叶基数分解，这并不是件很容易的工作。实际上，还有一种在时域对无功电流和无功功率进行定义的方法。在时域定义无功功率 Q_F 是由 S. Fryze 在 1932 年提出的，它是一个很出色的思路，它的物理概念是先用一个线性电阻来等值有功电流，而把余下的电流定义为无功电流。在 u 、 i 含有谐波状况下，线性电阻的有功电流分量 i_p 的形状和 u 的形状完全相似，其比例系数为 k ，且在一个周期内的 $u \cdot i_p$ 的平均功率和 $u \cdot i$ 的平均功率相等，从而可以确定唯一的有功电流分量 i_p 的时间函数。而无功电流分量 i_q 是总电流 i 和有功电流 i_p 之差，可以证明 u 和无功电流分量 i_q 正交。又因有功电流 i_p 和电压 u 同形，而电压 u 和无功电流 i_q 正交，所以有功电流分量 i_p 和无功电流分量 i_q 也是正交的，从而可推出电流有效值之间的关系，进而给出无功功率定义。

2.3.1 单相非正弦电路时域无功功率和功率因数

设任意电压 u 和电流 i ，并且将 i 分解为两个完全不相关的独立分量 i_p 、 i_q ，其中 i_p 的波形与 u 完全相同，即

$$i_p = ku \quad (2-19)$$

其中， k 是一比例常数，其取值应使一周期内 i_p 所消耗的平均功率和 i 所消耗的平均功率相等，即

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i_p dt = \frac{k}{T} \int_0^T u^2 dt = kU^2 \quad (2-20)$$

从而求出比例系数为

$$k = P/U^2$$

由此可得

$$i_p = \frac{P}{U^2} u \quad (2-21)$$

定义无功电流为

$$i_q = i - i_p \quad (2-22)$$

由式 (2-20) 可知

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt = \frac{1}{T} \int_0^T u (i_p + i_q) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i_p dt + \frac{1}{T} \int_0^T u i_q dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i_p dt$$

所以可得