

WUGONG GONGLU YU DIANLIXITONG YUNXING

无功功率 与电力系统运行

王正风 编著

胡晓飞 陈 实 主审



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

WU GONG GONG SUYU DIAN LI XITONG YUNXING

无功功率 与电力系统运行

王正风 编著

胡晓飞 陈 实 主审



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书主要介绍电力系统无功功率对电力系统运行的影响及相关应用方面的知识。全书共分9章进行阐述,分别为电力系统无功功率;无功功率与电压运行管理;无功功率与电力系统经济运行;电力系统数学模型;无功功率与电力系统静态电压稳定;无功功率与电力系统静态功角稳定;无功功率与电力系统暂态功角稳定;无功功率与电力系统动态电压稳定和广域测量系统在电网安全运行中的应用。

本书的读者对象主要为从事电气工程、电力系统运行管理人员及相关技术人员,同时也可以作为电气工程专业和电力系统专业的本科生、研究生以及相关专业的教师学习和工作参考书。

图书在版编目(CIP)数据

无功功率与电力系统运行/王正风编著. —北京:中国电力出版社, 2009

ISBN 978-7-5083-8281-4

I. 无… II. 王… III. 无功功率-电力系统运行 IV. TM761

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第208084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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2009年4月第一版 2009年4月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 14.25印张 318千字

印数0001—3000册 定价25.00元

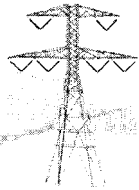
敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

序

无功功率与电力系统运行



电力工业是国民经济发展的重要支柱产业，电网企业担负着资源优化配置、保障国民经济快速发展和促进人民生活水平提高的重要经济责任和社会责任。我国经济社会的快速发展推动了电网与电网企业的蓬勃发展，当今的电力工业已成为世界上自动化水平最高的工业之一。

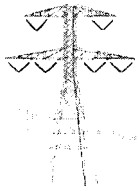
从电力系统诞生的那一天开始，人们用电形式主要表现为对有功功率的消耗，因此人们主要关注有功功率的研究，并取得了瞩目的成绩。但对无功功率的研究却起步较晚：电力工业起步的同时，人们仅关注无功功率与电力系统电压运行的关系；直至 20 世纪 60 年代，人们才开始研究无功功率与电力系统经济运行的关系；至 20 世纪 70 年代，世界上一些国家发生了电压崩溃事故，造成了巨大的经济损失和社会影响，人们才开始研究无功功率与电力系统电压稳定的关系。然而事实上，无功功率不仅对电力系统的电压质量、电力系统的经济运行和电压稳定具有重要影响，还对电力系统的静态功角稳定和暂态功角稳定具有重要的影响。

本书总结了国内外最新的研究进展，系统地论述了无功功率与电力系统运行的关系。内容主要包括无功功率与电压运行管理；无功功率与电力系统经济运行；无功功率与电力系统静态电压稳定；无功功率与电力系统静态功角稳定；无功功率与电力系统暂态功角稳定和无功功率与电力系统动态电压稳定性；此外本书还对目前电力系统的三项前沿技术之一——广域测量技术在国内电力系统中的应用进行了介绍。

本书作者是一位从事电网企业一线工作的年青学者，既有博学的理论知识，又有具体的实践经验。相信本书的出版能对无功功率与电力系统运行的研究做出有益的探索，并能够为电网运行的专业技术人员和从事电力系统相关研究人员提供一定的指导。

韩 磊

2008 年 10 月



前 言

无功功率与电力系统运行

电力系统无功功率是电力系统能量的两种表现形式之一，虽然无功功率不消耗功率，但无功功率是用来建立和维持磁场，完成电磁能量的相互转换，从而完成电力系统能量传输的必要条件。长期以来，人们根据电力系统的特性，一般将无功功率与电力系统电压特性和电压稳定联系在一起。事实上，无功功率还对电力系统的经济运行和功角稳定具有重要影响。深入研究无功功率对电力系统运行的影响具有重要意义。

本书首先介绍了无功功率的基本概念，接着在系统地分析无功功率与电力系统电压运行、无功功率与电力系统经济运行、无功功率与系统静态电压稳定以及无功功率与动态电压稳定的基础上，进一步论述了电力系统无功优化存在的问题、电力系统经济运行理论的融合与发展、发电机不同模型代表的物理含义及物理过程、电力系统暂态电压安全的预防控制优化、无功功率对电力系统静态功角稳定影响、无功功率对系统暂态功角稳定的影响以及静态电压稳定与静态功角稳定的判据比较等。此外，本书还对目前电力系统的三项前沿技术之一——广域测量技术在国内电力系统中的应用进行了介绍。

本书在阐述的过程中，兼顾了理论和实践；在数学推导过程中，阐述了其揭示的物理意义，使读者易学易懂。本书在编写过程中，吸收了国内外近些年有关电力系统无功功率和电力系统运行的最新成果，同时也包含了笔者近十年来对无功功率和电力系统运行的研究成果。

本书内容丰富，可供电气工程、电力系统运行管理人员及相关技术人员参考，同时也可以作为电气工程专业和电力系统专业本科生和研究生的学习参考资料，也可作为电力工程专业教师的教学参考书。

本书在编写过程中，得到了安徽省电力调度通信中心胡晓飞主任、陈实副主任、黄太贵副主任的支持和帮助，他们不仅参与编写而且还审阅了相关内容；汪永华教授为本书提出了很多有益的建议；国家电网公司技术专家李端超高级工程师、《电力系统自动化》杂志张雅琼硕士和安徽省电力调度通信中心董瑞工程师提供了无私支持和帮助，本书吸收了他们的部分研究成果。此外，徐伟博士、刘强博士也参加了本书的编写工作和校正工作，在此表示感谢。

感谢上海中山医院夏慧玲硕士在本书编写过程中给予的长期支持。

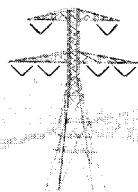
限于编者水平，因此本书不完善、不正确的地方在所难免，如有缺点和不足之处，恳请读者给予批评指正。

编 者

2009年1月

目 录

无功功率与电力系统运行



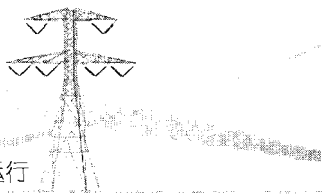
序

前言

第 1 章 电力系统无功功率	1
1.1 无功功率的基本概念	1
1.2 无功功率对电力系统的影响	2
1.3 正弦电路的无功功率理论	3
1.4 电力系统无功电源	9
1.5 电力系统的无功负荷	26
1.6 无功功率平衡	32
参考文献	33
第 2 章 无功功率与电压运行管理	34
2.1 电力系统无功功率传输	34
2.2 电力系统无功电压管理	36
2.3 电网无功电压标准	41
2.4 发电机无功电压调整	44
2.5 调整变压器变比调压	46
2.6 采用无功补偿设备调压	48
2.7 组合调压	51
2.8 无功电压的自动控制	52
参考文献	63
第 3 章 无功功率与电力系统经济运行	64
3.1 电力系统经济运行	64
3.2 电力系统中无功功率的最优分布	66
3.3 开式网无功负荷的最优补偿容量及约束补偿容量	69
3.4 电力系统无功功率优化——闭式网	74
3.5 电力系统经济运行理论的融合与发展	81
3.6 等耗量微增率与电力市场统一边际电价的联系	86
参考文献	88
第 4 章 电力系统数学模型	90
4.1 概述	90
4.2 同步发电机数学模型	91

4.3	发电机励磁系统模型	97
4.4	原动机模型	102
4.5	负荷模型	105
4.6	电力网络的数学模型	111
	参考文献	111
第 5 章	无功功率与静态电压稳定性	112
5.1	概述	112
5.2	电力系统静态电压稳定	114
5.3	静态电压稳定分析方法 ($P-U$ 曲线分析)	117
5.4	电压稳定性 ($U-Q$ 曲线分析)	119
5.5	潮流多解法	121
5.6	连续潮流法	129
5.7	奇异值分析	135
5.8	灵敏度分析法	137
5.9	静态电压稳定控制	140
	参考文献	142
第 6 章	无功功率与系统静态功角稳定性	144
6.1	电力系统静态功角稳定性	144
6.2	发电机无功功率对系统静态功角稳定性的影响分析	146
6.3	无功补偿设备对系统静态功角稳定性的影响分析	150
6.4	静态电压稳定与静态功角稳定的判据比较分析	154
	参考文献	161
第 7 章	无功功率与系统暂态功角稳定性	163
7.1	电力系统暂态功角稳定性	163
7.2	暂态功角稳定分析方法	165
7.3	暂态功角稳定理论证明——等面积法则	166
7.4	暂态功角稳定分析方法——扩展等面积法则	170
7.5	发电机无功功率对暂态功角稳定性的影响分析——基于等面积法则证明	174
7.6	发电机无功功率对暂态功角稳定性的影响分析——基于 EEAC 理论证明	178
7.7	无功补偿设备对暂态功角稳定性的影响分析	182
	参考文献	185
第 8 章	无功功率与动态电压稳定性	187
8.1	概述	187
8.2	电力系统暂态电压稳定的时域仿真	189
8.3	电力系统暂态电压稳定	190
8.4	中长期电压稳定	193

8.5 暂态电压稳定控制	194
参考文献	200
第9章 广域测量系统在电网安全运行中的应用	202
9.1 电网广域测量系统	202
9.2 广域测量系统用于系统功角稳定监测	209
9.3 广域测量系统在电压稳定分析中的应用	217
参考文献	219



电力系统无功功率

1.1 无功功率的基本概念

电力系统由发电、输电、配电和供电系统构成，是一个多种能量交换的系统。有功功率和无功功率是维持电力系统运行的两种能量重要的表达形式。

火电厂是依靠锅炉中燃烧的煤产生的热能推动汽轮机转化成机械能，汽轮机则利用其机械能推动发电机高速旋转，从而将机械能转化成电能。水电厂是依靠水电站中的水的势能推动水轮机，从而将势能转化成机械能，水轮机再传动发电机，将机械能转化为电能。而这些电能将通过电网的传输，即经过输电和供电提供给用户，用户则将电能转化为其他形式的能量，例如电动机的传动将电能转化成机械能、电弧炉将电能转化为热能、照明设备将电能转化为光能等。电力系统有功功率即表达为将电能转化为其他形式的能量的过程。

在电力系统传输有功功率的过程中需要无功功率的支持，用于在电气设备中建立和维持磁场，完成电磁能量的相互转换。无功功率不对外做功，但它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。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。诸如变压器、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。因此研究无功功率具有重要的理论意义和实践意义，主要表现如下。

(1) 无功功率与系统运行电压问题。电力系统的电压水平高低是电力系统能否正常可靠运行的重要指标，也是电能质量的主要指标之一，而电压水平的高低直接取决于无功功率是否充足、无功配置是否合理以及无功潮流分布是否合理等。

(2) 无功功率与电力系统经济运行的问题。由于电网中无功潮流的流动将在线路和变压器等相关输变电设备上造成有功损耗，从而影响到电力系统的经济运行。因此，无功功率的优化可以提高电力系统运行的经济性，从而提高输电效率。

(3) 无功功率与电力系统静态电压稳定问题。电力系统的电压稳定问题同电力系统的无功功率密切相关，系统中无功功率的不足是导致电力系统电压稳定失稳的重要原因。随着近年来国内外电压失稳事件的屡有发生，无功功率对电力系统静态电压稳定问题的影响已经成为电力系统的重要研究方向之一。

(4) 无功功率与电力系统静态功角稳定的问题。电力系统的静态功角稳定是电力系统运行必须满足的基本条件之一。在电网实际运行中，要求电力系统必须具有较高的静态功角稳定储备，而发电机无功出力的多少、无功功率传输的多少、无功功率负荷的大小对电

力系统的静态功角稳定都有影响。因此,研究系统静态功角稳定问题需要研究无功功率。

(5) 无功功率与电力系统暂态功角稳定问题。无功功率不仅对电力系统电压稳定问题有重要的影响,还对电力系统暂态功角稳定具有影响,适当调节发电机组的无功出力可以提高电力系统暂态功角稳定性和输电能力。

(6) 无功功率与电力系统动态电压稳定问题。无功功率不仅对电力系统的静态电压稳定问题具有重要影响,同样也对电力系统的动态电压稳定具有重要影响。发电机励磁系统的无功动态特性、电动机的无功动态特性以及负荷的动态电压特性等都对电力系统动态电压稳定具有重要影响,深入研究无功功率对电力系统动态电压稳定问题的影响,可以有效地提高电力系统运行可靠性,防止电力系统电压失稳事故的发生。

在正弦电路中,无功功率的概念具有清楚的物理意义,无功功率是电压、电流幅值以及电压和电流之间夹角正弦的乘积。无功功率表示有能量交换,但不消耗功率。

1.2 无功功率对电力系统的影响

无功功率虽然不直接消耗有功功率,但无功功率的交换将引起发电和输电设备上的电压降落和电能损失,影响系统电能质量,从而对发电、供电、配电3个方面都会产生不良影响。

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,同时维持系统电压水平,一般需要输送一定量的无功功率。输送无功功率将造成有功功率损耗。当有功功率一定时,输送的无功功率越大,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,可以传输的有功功率越大。

2. 无功功率对电压的影响

(1) 无功功率对电压水平的影响。电力系统的电压水平和无功功率密切相关,电力系统电压的高低可直接反映电网无功功率的平衡状况。若系统的无功电源比较充足,系统就有较高质量的电压运行水平。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,其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要。否则,电压

就会偏离额定值。

当电力网有能力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。

3. 无功功率对网损的影响

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传输的大小，故无功功率通常不宜大量传输。

4. 无功功率对电力系统电压稳定的影响

电力系统由于其本身具有的特性，如在高压电网中，由于线路的电抗远大于电阻，因此电网的电压主要与无功功率相关；此外，从国内外发生的电压失稳事故来看，电压稳定问题，包括静态电压稳定和动态电压稳定问题，均和电力系统的无功功率密切相关。因此无功功率对电力系统的电压稳定具有重要的影响。深入分析电力系统的无功特性，特别是电力系统负荷的动态无功特性，是深入研究电力系统电压稳定问题的前提和基础。在这方面国内外已经取得了一定的研究成果。

5. 无功功率对电力系统功角稳定的影响

长期以来，人们对无功功率与系统功角稳定的研究不太深入，但事实上，无功功率对电力系统的功角问题具有一定的影响。诸如，发电机组进相运行时，其静态功角稳定性下降；在发电机组遭受较大扰动时，利用励磁系统的强励性能提高电力系统暂态功角稳定性；临界群的发电机组进相运行时，系统的暂态功角稳定性下降等。由于无功功率仅需要适当调节发电机组励磁系统的励磁电流，而无须附加费用，因此在电网实际运行中，应该及时合理地调节发电机组无功出力以及合理地配置无功补偿设备，以提高电力系统的静态功角稳定性和暂态功角稳定性，从而提高电力系统的输电能力。

1.3 正弦电路的无功功率理论

1.3.1 单相正弦电路的无功功率和功率因数

经典无功功率理论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

$$\begin{cases} u = \sqrt{2}U\sin\omega t \\ i = \sqrt{2}I\sin(\omega t - \varphi) \end{cases} \quad (1-1)$$

式中： U 表示电压 u 的有效值； I 表示电流 i 的有效值； φ 表示电压 u 与电流 i 之间的相位差。

电路的瞬时功率 p 为

$$p = ui \quad (1-2)$$

瞬时功率 p 在一个周期内的平均功率 P 为

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

式(1-3)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; i_p 表示和电压同相位的电流分量; i_q 表示和电压相位相差 90° 的电流分量。

电路的无功功率定义为

$$Q = UI \sin\varphi \tag{1-4}$$

可以看出, Q 就是式(1-3)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(1-3)中可以看出, 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(1-4)可知, 当电流的相位滞后电压时, Q 为正, Q 是消耗在感性负荷上的无功功率; 当电流的相位超前电压时, Q 为负, Q 是消耗在容性负荷上的无功功率。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, 其额定电压还和铁芯尺寸及铁芯损耗有关。在工程上, 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 , 定义为

$$S = UI \tag{1-5}$$

功率因数定义为有功功率与视在功率的比值, 即

$$\cos\varphi = P/S \tag{1-6}$$

由式(1-5)和式(1-6)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。因此, 在单相正弦电路中, 功率因数具有明确的物理意义, 它就是电压和电流之间的相角差的余弦值。

由式(1-3)~式(1-5)可得 S 、 P 、 Q 满足如下关系

$$S^2 = P^2 + Q^2 \tag{1-7}$$

由于视在功率只是电压和电流有效值的乘积, 因此它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, 无功功率表示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, 而且通常只有在储能元件中才会有这种能量交换。

1.3.2 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。这样三相正弦电路的总视在功率可定义为

$$S = \sqrt{(\sum P)^2 + (\sum Q)^2} \quad (1-8)$$

式中： $\sum P$ 表示为三相正弦电路的总有功功率； $\sum Q$ 表示为三相正弦电路的总无功功率； S 表示三相正弦电路的总视在功率。

三相功率因数可以定义为

$$\cos\varphi = \frac{\sum P}{S} \quad (1-9)$$

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（1-8）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。

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。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。

从上述无功功率定义可以进一步得出无功功率的以下几个属性：

- (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，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。

1.3.3 感性无功功率与磁场储能

如 1.3.2 小节所述，只有存在储能元件时才会有无功功率交换，而在电力系统中的储能元件通常为电感和电容。因此首先分析电感线圈产生的无功功率交换。

如果一个电感线圈接在直流电路中，由于电流和磁通都恒定不变，所以在线圈中不产生自感电动势。此时仅有线圈中的电阻起作用，由于线圈中电阻是很小的，所以实际上这一个回路构成了短路。

但若以一个交流电压加在线圈 L 的两端，则线圈中将产生一个自感电动势，这个自感电动势正好与所加的交流电压大小相等，方向相反。图 1-1 表示一个电感电路，图中箭头表示电源电压 u 、电流 i 与自感电动势 e_L 的正方向。

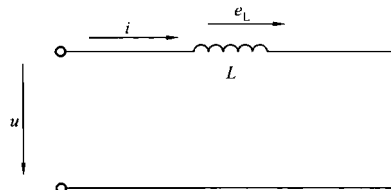


图 1-1 交流电感电路

L 是线性电感，交流电流的瞬时值为

$$i = I_m \sin\omega t \quad (1-10)$$

根据电磁感应定律可以得到自感电动势为

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = -L \frac{d(I_m \sin\omega t)}{dt} = \omega L I_m \sin(\omega t - 90^\circ) = E_m \sin(\omega t - 90^\circ) \quad (1-11)$$

由于电感线圈的电阻很小，可以忽略不计，因此线圈中只有自感电动势 e_L ，也就是说 e_L 与 u 的大小相等、方向相反，而且这个关系适用在任意时刻，它的数学关系可表示如下

$$u = e_L \quad (1-12)$$

将式 (1-12) 代入式 (1-11) 得

$$u = L \frac{di}{dt} = L \frac{d}{dt}(I_m \sin \omega t) = \omega L I_m \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (1-13)$$

以 $u_m = \omega L I_m$ 代入式 (1-13) 得

$$u = u_m \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (1-14)$$

因此也可以写成 $u = \omega L I$ ，由于感抗

$$x_L = \omega L = 2\pi f L \quad (1-15)$$

感抗 x_L 单位为欧姆，它的大小与电感 L 和频率 f 成正比。在交流电感电路中电压电流的关系由 x_L 所决定，即

$$u = x_L i \quad (1-16)$$

而 x_L 是由电感大小（单位是亨）所决定，通常电网中工频固定为 50Hz，因此电感 L 越大感抗也越大，相应流过回路中的电流也就越小。

由式 (1-11) 及式 (1-12) 可以看出，自感电动势滞后电流相位 90° ；而外加电压 u 则超前电流相位 90° 。这是因为外加电压是电流对时间的一次微分，而自感电动势与外加电压正好方向相反，二者相位相差 180° 。

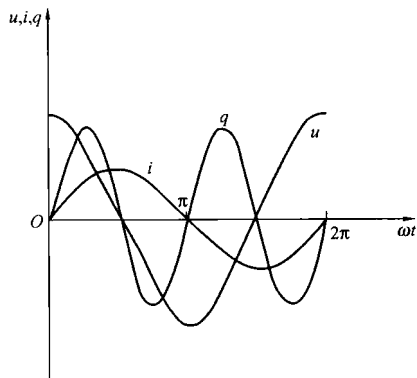


图 1-2 交流电感电路波形图

该线路的电压、自感电动势、电流以及无功功率曲线如图 1-2 所示。该线路电压、自感电动势及电流的相量关系如图 1-3 所示。

在电感电路中，瞬时功率是无功功率。可用瞬时电流与瞬时电压的乘积，因此可用符号 q_L 表示

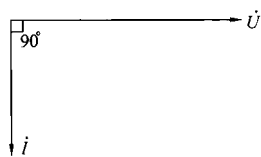


图 1-3 交流电感电路相量图

$$\begin{aligned} q_L &= ui = U_m I_m \sin(\omega t + 90^\circ) \sin \omega t = U_m I_m \sin \omega t \cos \omega t \\ &= \frac{1}{2} U_m I_m \sin 2\omega t = UI \sin 2\omega t \end{aligned} \quad (1-17)$$

由式 (1-17) 可见， q_L 是正弦函数，并且它的频率是电压或电流频率变化的 2 倍。

感性无功功率的物理意义是：由于电感线圈是贮藏磁场能量的元件，当电感线圈加上交流电压之后，相应的磁场能量也随着变化，当电压增大，电压及磁场能量也就相应加强，此时线圈的磁场就将外电源供给的能量以磁场能量形式贮藏起来；当电流减小和磁场能量减弱时，线圈把磁场能量释放并输回到外面电路中。

从图 1-2 感性无功功率波形图 q_L 曲线可以看到，当外加电压 u 与电流 i 同方向时

(都为正值或都为负值), 无功功率为正, 此时线圈吸收能量, 电感是一个负载; 当施加电压 u 与电流相反方向时 (一个为正值, 另一个为负值), 无功功率为负, 此时线圈释放能量, 电感变成一个无功电源。由于电感线圈中电阻是忽略不计的, 因此电路中没有能量损耗, 输入电感线圈的能量又全部输回电路中, 图中瞬时功率 q_L 的正值半周的面积与负值半周的面积完全相等。所以交流电感电路中平均功率为零, 可用式 (1-18) 表示。

$$\begin{aligned} Q_L &= \frac{1}{T} \int_0^T q_L dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T UI \sin \omega t 2 dt \\ &= 0 \end{aligned} \quad (1-18)$$

式 (1-18) 表示交流电感电路不消耗功率, 电路中仅是电源能量与磁场能量之间的相互转换。瞬间功率最大值为

$$Q_L = UI = I^2 X_L \quad (1-19)$$

式中: Q_L 表示线圈的容量, 即无功功率, 单位为千乏 (kvar) 或乏 (var)。

由于感性无功功率是线圈以磁场储能的方式在电流一个周波之间贮藏, 二次全部释放出去, 因此贮藏在磁场中全部能量为

$$A = \int_0^I Li di = \frac{1}{2} LI^2 \quad (1-20)$$

磁场能量 A 的单位为焦耳 (J), 从式 (1-20) 中可以看出, 电感量越大, 通过电感的电流越大, 其所贮能量也越大。

1.3.4 容性无功功率与电场储能

同样地, 若将一个电容器接在直流电路接通充电, 电容器没有电流流过。换句话说讲, 这一个电容回路实际上相当于是断开的。

但当一个交流电压加在电容器的两端时, 实验证明电路中就会有持续的交流电流通过。图 1-4 表示一个交流电容电路。

图中箭头表示电源电压 u 和电流 i 的正方向。C 是线性电容, 交流电压 u 瞬时值为

$$u = U_m \sin \omega t \quad (1-21)$$

同样, 电容器上累积的电荷是电流 i 对时间 t 的积分, 也就是说电流 i 与电容中电荷 q 的关系是电荷对时间的一次微分, 即

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (1-22)$$

由于电荷 $q = Cu$, 代入式 (1-22), 可得

$$\begin{aligned} i &= \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt} = C \frac{d}{dt} (U_m \sin \omega t) \\ &= \omega C U_m \sin(\omega t + 90^\circ) = I_m \sin(\omega t + 90^\circ) \end{aligned} \quad (1-23)$$

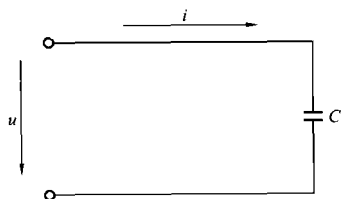


图 1-4 交流电容回路

上式 $I_m = \omega C U_m$ ，因此式 (1-23) 可以写成

$$\frac{U_m}{I_m} = \frac{U}{I} = \frac{1}{\omega C} = x_c \quad (1-24)$$

式中： x_c 表示容抗，单位是欧姆，也可以用频率表示，即

$$x_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (1-25)$$

在电力系统中频率 f 是固定的，在正常运行时，其变化很小。因此容抗 x_c 的大小完全取决于电容量的大小，电容量越大则容抗越小，比较瞬时电压 u 与瞬时电流 i 可以看出，电流相位超前电压相位 90° 。其物理意义可理解为先有充电使电容器上积累电荷，才引起电容器上电压升高；先有放电使电容器上释放电荷，电容器上电压才会下降。这二者是一次微分关系，见式 (1-23)，因此其相角差为 90° 。

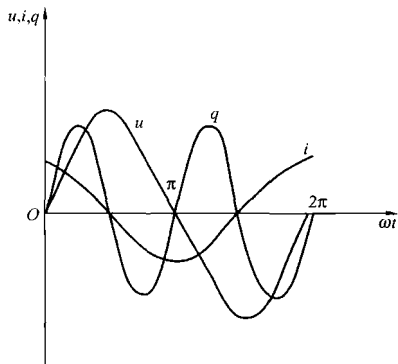


图 1-5 交流电容电路波形图

图 1-5 表示交流电容电路的电压、电流、无功功率波形曲线，图 1-6 表示电压与电流的相量图。



图 1-6 交流电容电路相量图

与电感电路和电容电路比较，不难看出感性电流方向与容性电流方向正好相反；同样容性电抗与感性电抗比较，二者也正好相反，而且能起到相互抵消的作用。容性功率与感性功率也是正好相反，因此在电力系统中往往采用容性功率来补偿感性功率，当容性功率过剩时也采用感性功率补偿容性功率。

由于瞬时功率是瞬时电流与瞬时电压的乘积，在电容电路中瞬时功率为

$$\begin{aligned} q_c &= ui = U_m I_m \sin(\omega t + 90^\circ) \sin \omega t = U_m I_m \sin \omega t \cos \omega t \\ &= \frac{1}{2} U_m I_m \sin 2\omega t = UI \sin 2\omega t \end{aligned} \quad (1-26)$$

式 (1-26) 的波形如图 1-5 中 q_c 正弦曲线所示。从图中可以看到它的变化规律，它的频率与感性无功功率一样是电压与电流频率的 2 倍。

从物理概念可以这样解释容性无功功率：由于电容器是贮藏电场能量的元件，当电容器上加上交流电压之后，电压交变时，相应的电场能量也随着变化。当电压增大，电流及电场能量也相应增大，此时电容器的电场就将外电源供给的能量以电场能量形式贮藏起来；当电压减小电场强度降低时，电容器把电场能量释放并输回到外面电路中。

从图 1-5 电容性无功功率波形图 q_c 曲线上可以看到，当外加电压 u 与电流 i 同方向时（都是正值或都是负值时），外电源把能量输入电场，此时电容器为吸收能量的负载，

瞬时功率为正。当电压 u 减小，外加电压 u 与电流 i 反方向时（一个为正值，另一个是负值），电场能量输回给外电源，此时电容器相当于一个无功电源，瞬时功率为负。

由于感性电路电流滞后电压相位 90° ，而容性电路电流超前电压相位 90° ，因此容性无功功率与感性无功功率正好相差 180° 。也就是说在容性电抗等于感性电抗的电路中，有 $X_L = X_C$ ，此时 $Q_L = Q_C$ ，二者正好抵消，电路中没有无功功率，电抗为 0。

由于电容电路中电阻略去不计，因此没有能量损失。由于瞬时无功功率正、负半波完全相等，因此其平均值为零，可以用式 (1-27) 表示，即

$$Q_C = \frac{1}{T} \int_0^T q_c dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI \sin 2\omega t dt = 0 \quad (1-27)$$

式 (1-27) 表示交流电容电路不消耗功率，电路仅是电源能量与电场能量之间往复转换。

瞬间功率最大值为

$$Q_C = UI = I^2 X_C \quad (1-28)$$

式中： Q_C 表示电容器的容量，也是它的无功功率，其单位是千乏或乏。

由上所述：容性无功功率是电容器以电场储能的方式在外加电压一个周波之间二次储能，二次释放出去，因此贮藏在电场中的全部能量为

$$A = \int_0^U C u du = \frac{1}{2} CU^2 \quad (1-29)$$

式中： A 的单位是焦耳 J； C 的单位是法拉，F； U 的单位是伏特，V。

1.4 电力系统无功电源

在电力系统中，无功电源主要是同步发电机、同步调相机、并联电容器、串联电容器、静止无功补偿器和高压输电线路等。

1.4.1 同步发电机

同步发电机既是电力系统的有功电源，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。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。同步发电机供给无功功率的能力，不仅与短路比大小有关，还与同时担负的有功负载大小有关，其最大无功功率出力受转子温升条件的限制。

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，通常在系统低谷运行时，发电机进相运行是调节系统电压的手段之一。

同步发电机为了满足调相调压、无功备用和经济运行的需要，发电机无功出力一般不满载。随着电力系统容量的增加，大机组、远距离、超高压送电的比重增大，发电机无功容量的利用率会进一步降低，其运行功率因数会进一步提高。

1. 发电机的励磁电流与无功出力的关系

发电机空载运行的相量图如图 1-7 所示。