

 IEEE WILEY


IEEE终身会士20多年工业设计经验的结晶
内含7个典型的无源滤波器设计实例

无源滤波器

Power System Harmonics and
Passive Filter Designs

设计

[美] J.C.达斯 (J.C. Das) 著
于海波 等译

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

清华大学出版社

清华大学出版社

无源滤波器设计

[美] J. C. 达斯 (J. C. Das) 著

于海波 刘佳 李贺龙 王春雨 林繁涛 译

图书在版编目(CIP)数据

无源滤波器设计 / [美] J. C. 达斯 (J. C. Das) 著 ; 于海波等译. -- 北京 : 机械工业出版社, 2012.11

ISBN 978-7-111-33192-6

I. ①无... II. ①达... ②于... III. ①无源滤波器—设计 IV. ①TN713.02

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第201024号

机械工业出版社(北京)有限责任公司(北京) (邮政编码: 100070)

责任编辑: 刘星 封面设计: 陈博
文字编辑: 李贺龙 校对: 于海波
责任印制: 陈明

北京机械工业出版社

北京市西城区

百万庄大街

200001

机械工业出版社

地址: 北京市西城区百万庄大街24号 邮编: 100070

电话: 010-88379813 传真: 010-88379814

网址: www.mechpub.com.cn 电子邮箱: mechpub@163.com

发行: 010-68326294 邮购: 010-68326296

近年来,电力电容器组在电力系统中的大量使用,使得电能质量问题备受关注。如何有效减少系统中的谐波,合理设计谐波滤波器是广大学者关心的问题。

本书从电容器组入手,介绍了电力系统及各组件建模、谐波在电力系统中渗透的影响、无源滤波器的设计和典型应用,还介绍了太阳能和风力发电等新能源应用与各种谐波的关系。

本书适合高等院校电力系统专业师生阅读,并可以供电力研究、设计、生产、运行等专业技术人员参考,也可以作为电力系统谐波的自学教材。

Copyright © 2015 by The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Power System Harmonics and Passive Filter Designs, ISBN 978 - 1 - 118 - 86162 - 2, by J. C. Das, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder. Copies of this book sold without a Wiley sticker on the cover are unauthorized and illegal.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社出版,未经出版者书面允许,本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。

版权所有,翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2015-4805号。

图书在版编目(CIP)数据

无源滤波器设计/(美)J. C. 达斯(J. C. Das)著;于海波等译. —北京:机械工业出版社,2019.11

书名原文:Power System Harmonics and Passive Filter Designs
ISBN 978-7-111-63719-6

I. ①无… II. ①J…②于… III. ①无源滤波器-设计
IV. ①TN713.02

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第201024号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:刘星宁 责任编辑:朱林

责任校对:陈越 封面设计:马精明

责任印制:郜敏

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2020年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·17.5印张·477千字

标准书号:ISBN 978-7-111-63719-6

定价:99.00元

电话服务

网络服务

客服电话:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

010-88379833

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-68326294

金书网:www.golden-book.com

封底无防伪标均为盗版

机工教育服务网:www.cmpedu.com

关于作者

J.C. Das是美国电力系统研究公司的负责人和顾问，也是IEEE终身会士，IET（英国）会士和IEI（印度）终身会士，并在国内外撰写或合作撰写了大约65篇技术论文。他为客户发布了200余份电力系统研究报告，用于解决和分析公用事业和工业电力系统中的问题。他撰写了3本书，其中包括Wiley-IEEE出版社出版的《弧闪故障危害与治理》一书。J.C. Das拥有美国佐治亚州和俄克拉荷马州的注册专业工程师、英国特许工程师、欧盟的欧洲工程师认证，同时还是CIGRE、欧洲工程师联合会以及其他技术协会和组织的成员。

关于本书

电力系统谐波是一个经久不衰的研究课题，本书力求呈现谐波治理方面的前沿技术和进展。随着电力系统中非线性负载数量的不断增长，许多电力系统专业人士致力于谐波治理及其实际应用的研究。

本书从电容器组入手，介绍了电力系统及各组件建模、谐波在电力系统中渗透的影响、无源滤波器的设计和典型应用，还介绍了太阳能和风力发电等新能源应用与各种谐波的关系。

目前，电力系统谐波及针对其有害影响的防治已成为一个快速发展的话题，本书在现阶段和未来都会为读者提供可靠的参考。

作者在编写本书时认为读者已具有本科层次的知识，各章节的重要内容具有很强的关联性。本书可作为高等院校电力系统专业本科生和研究生的教材，也可作为电力研究、设计、生产、运行等专业技术人员的参考书。

译 者 序

随着电力系统中非线性负载的增加,谐波问题日益严重,电网中的电压和电流波形畸变会使变压器过载和断路器误动作等。对于电能计量来说,谐波的入侵会对电能计量装置的准确度等产生影响。国际上电气工程领域内的权威学术性组织 IEEE 和 IEC 均对谐波限值做出了相应规定。由此可见,电力系统中的谐波问题已经引起广泛重视。

本书条理清晰、内容深入,详细地介绍了电力系统中谐波入侵以及无源滤波器设计等内容,显著特点是提供了很多说明性的实例研究和插图,能帮助读者快速有效理解所述内容。

本书第1章由于海波翻译,第2章和第3章由刘佳翻译,第4章由李贺龙翻译,第5章由王春雨翻译,第6章由林繁涛翻译。全书由于海波统稿。由于本书内容丰富,涉及的专业面相当广,限于译者水平,翻译不妥或错误之处在所难免,恳请读者指正。

盛媛媛和王兴媛在本书的翻译过程中提供了大量帮助,在此表示感谢。

本书由2015年度中国电力科学研究院专著出版基金资助。

译者

原 书 序

本书主要介绍电力系统谐波和无源滤波器设计等内容，包含电力系统中的谐波侵入、无源滤波器设计和典型案例，这些案例涵盖了多种新能源（例如光伏发电和风力发电）的应用。

以下是章节目录的概要。

第1章介绍了并联电容器组的构成、接地及保护，是无源滤波器设计的重要组成部分。通常，谐波滤波器故障的发生是由于并联电容器组单元的选型不恰当，以及忽略了保护和开关的瞬变特性。对进行滤波器设计的读者来说，本章显得尤为重要。

谐波分析的下一步是基于电力系统组成部分及系统自身特性的研究进行精确建模，这些内容将会在第2章和第3章进行详细描述。这两章是谐波分析的重要支撑。第2章中所述的输电线路、变压器、负载、电缆、电动机、发电机、换流器的建模以及第3章中介绍的工业用电、配电、输电和高压直流输电的系统建模，是对谐波感兴趣的读者应该清楚掌握的知识。

掌握了前面的内容后，第4章研究谐波的侵入。除了时域和频域的方法，本章还涵盖了最新的概率建模方面的内容。

谐波滤波器设计是谐波研究的最后一个环节，第5章是详细介绍无源滤波器的。本章结合一些新技术如遗传算法和粒子群理论，介绍了在行业中常用的几乎所有类型的无源滤波器。

最后，第6章介绍了大量谐波分析和无源滤波器设计的实例，包括电弧炉、输电系统、光伏电站和风电场等。如果读者有充分的建模工具和软件就可以再现这些实例，这也是一个很好的学习方法。

综上，这本书内容丰富，适用于研究谐波的初学者及提高者。实际上，本书也可作为谐波无源滤波器设计标准参考书。书中很多例子以及实际系统的仿真可以加强读者的理解，并且每个章节都用相关图例进行了说明。

Jean Mahseredjian 博士

IEEE 会士、蒙特利尔大学工学院电气工程教授

原 书 前 言

电力系统谐波是一个经久不衰的研究课题，本书力求呈现谐波治理方面的前沿技术和进展。随着电力系统中非线性负载数量的不断增长，许多电力系统专业人士致力于谐波治理及其实际应用的研究。

本书从电容器组入手，介绍了电力系统的组成建模以及无源滤波器的设计等内容。本书可作为谐波治理方面的参考和应用指导。

初学者需要对谐波形成一个清晰的基础认知，高水平的读者可通过仿真探索提高兴趣，建议读者以严谨批判的眼光阅读本书。本书中众多实际研究场景、案例和图表力争客观易懂。很多高校甚至在研究生教育阶段中都未开设谐波课程。作者在编写本书时认为读者已具有本科层次的知识，各章节的重要内容具有很强的关联性。本书可作为本科生和研究生的高级教科书，亦可作为继续教育的教材和辅助资料。

谐波的影响会远距离传播，而且其对电力系统组成部分的影响是动态和不断发展的。这些影响可以被现有的研究手段分析。

继电保护被称作“艺术和科学”，在作者看来无源滤波器设计和谐波抑制技术亦是，这是因为其包含了太多的主观性。除了采用蒙特卡洛这类高级研究工具之外，现有计算机技术需要不断地迭代以平衡一系列相互冲突的需求。

本书的读者在进行滤波器的实际设计时需要先理解谐波的特性、电力系统组成部分的建模和滤波器的特征。第6章介绍了无源滤波器的应用设计及其在光伏发电和风力发电系统中的案例研究，读者可以通过模拟再现这些结果以理解复杂的迭代分析过程。

本书引用了CRC出版社出版的《电力系统分析：短路负载潮流和谐波》中的部分内容。在此，作者向该出版社的授权使用表达诚挚的谢意！

J. C. Das

作者简介

J. C. Das 是佐治亚州斯涅乐电力系统研究公司的负责人和顾问。他曾长期担任 AMEC 公司电力系统分析部门的负责人，在公用事业、工业设施、水力发电和核能方面具有丰富的经验。他是电力系统研究，包括短路、潮流、谐波、稳定、电弧闪光、接地、开关瞬态和继电保护方面的专家，还开设了电力系统继续教育课程，并且是约 65 本国内和国际出版物的作者或合著者。他是以下几本图书的作者：

- 《弧闪故障危害与治理》，IEEE 出版社，2012 年。
- 《电气系统暂态：分析识别及减弱方法》，McGraw-Hill 出版社，2010 年。
- 《电力系统分析：短路负载潮流和谐波》（第 2 版），CRC 出版社，2011 年。

这些图书提供了大量的知识，共 2400 多页，并得到业界的一致好评。他擅长的领域包括电力系统暂态分析、EMTP 仿真、谐波、电能质量、继电保护等。他发表了近 200 篇关于电力系统的研究报告。

谐波分析方面，Das 先生设计了一些工业用大型谐波无源滤波器，这些滤波器已经成功运行超过 18 年。

Das 先生是美国电气电子工程师学会（IEEE）终身会士，IEEE 工业应用和 IEEE 电力工程学会会员，英国工程技术学会（IET）会士，印度工程师学会（IEI）终身会士，欧洲工程师联合会（法国）会员，以及国际大电网会议（法国）会员。他是佐治亚州、俄克拉荷马州、英国和欧洲的注册教授级高级工程师。2005 年获得 IEEE 纸浆和造纸工业的工程功勋奖。

他拥有俄克拉荷马州塔尔萨大学电气工程硕士学位及印度管盘山大学高等数学专业学士和硕士学位。

目 录

译者序

原书序

原书前言

作者简介

第1章 并联电容器组的应用 1

1.1 并联电容器组 1	
1.1.1 提高功率因数 1	
1.1.2 支撑电压 1	
1.1.3 提升有功功率支撑能力 4	
1.1.4 电容器的应用 4	
1.2 并联电容器的安装地点 4	
1.3 电容器的额定值 5	
1.3.1 测试 5	
1.3.2 放电电阻 6	
1.3.3 不平衡 6	
1.3.4 短时过电压承受力 6	
1.3.5 暂态过电流承受力 7	
1.4 并联电容器组设计 9	
1.4.1 500kV 电容器组的组成 10	
1.5 熔断器 11	
1.5.1 外置式熔断器 12	
1.5.2 冲出式熔断器 13	
1.5.3 内置式熔断器 14	
1.5.4 无熔断器 15	
1.6 电容器组的联结方法 18	
1.6.1 接地和不接地电容器组 19	
1.6.2 接地电网设计 19	
1.7 不平衡检测 19	
1.7.1 熔断器故障导致的失谐 20	
1.8 电容器组的失稳效应 22	
1.9 电容器组的开关暂态 22	
1.10 开关暂态的控制 24	
1.10.1 电阻开关 25	
1.10.2 同步切换或同步运行 26	
1.11 带电机的开关电容器组 26	

1.12 开关设备 28	
1.12.1 电流互感器二次侧的高电压 32	
1.13 开关控制 33	
参考文献 35	

第2章 电力系统组件谐波分析的建模 ... 37

2.1 输电线路 37	
2.1.1 ABCD 常数 37	
2.1.2 根据线路长度建模 38	
2.1.3 长线路模型 39	
2.1.4 线路常数的计算 41	
2.1.5 接地线的三相系统 44	
2.1.6 导体组 45	
2.1.7 卡森方程 46	
2.1.8 卡森方程的近似 48	
2.1.9 OH 线路电容 49	
2.1.10 OH 线路的 EMTP 模型 53	
2.1.11 谐波的影响 56	
2.1.12 带谐波的输电线路方程 56	
2.2 电缆 60	
2.2.1 电缆常数 61	
2.2.2 电缆电容 61	
2.3 OH 线路和电缆的零序阻抗 63	
2.3.1 电缆屏蔽接地 63	
2.4 滤波电抗器 64	
2.5 变压器 64	
2.5.1 频率相关模型 65	
2.5.2 三绕组变压器 66	
2.5.3 四绕组变压器 67	
2.5.4 变压器序列网络 69	
2.5.5 矩阵方程 69	
2.6 感应电动机 74	

2.7 同步发电机	76	第4章 谐波传播	114
2.8 负载模型	77	4.1 谐波分析方法	114
2.8.1 PQ和CIGRE负载模型的 研究结果	78	4.2 频域分析	115
2.9 系统阻抗	78	4.3 频域扫描	116
2.10 三相模型	80	4.4 电压扫描	116
2.11 非特征谐波	81	4.5 谐波分析方法	117
2.12 换流器	82	4.5.1 注入电流方法	117
参考文献	83	4.5.2 前推回代方法	118
第3章 系统的谐波建模	85	4.5.3 牛顿-拉夫逊迭代方法	119
3.1 电力系统	85	4.5.4 三相谐波潮流方法	122
3.1.1 谐波考量因素	86	4.6 时域分析	122
3.1.2 电力系统的高效设计	86	4.7 敏感度方法	123
3.2 网络建模范围	87	4.8 不平衡交流系统和高压直流 输电线路	124
3.3 负载和发电设备的影响	88	4.9 混合频率和时域概念	125
3.4 短路、基频和负载潮流计算	91	4.10 概率论	127
3.5 工业系统	94	4.11 计算机程序	131
3.6 配电系统	95	4.12 大型工业系统谐波分析	131
3.6.1 辐射型系统	96	4.12.1 研究目标	131
3.6.2 并联或环形系统	96	4.12.2 谐波发射模型	136
3.6.3 电网或电网系统	97	4.12.3 谐波传播-案例1	138
3.6.4 一次配电系统	98	4.12.4 谐波传播-案例2	140
3.6.5 配电系统谐波分析	99	4.12.5 谐波传播-案例3	144
3.7 输电系统	100	4.13 长输电线路	150
3.7.1 弗兰梯效应	101	4.14 34.5kV UG 电缆	158
3.7.2 线路自然功率	103	4.15 5 母线输电系统	160
3.7.3 输电线路电压	103	参考文献	165
3.8 传输线路补偿	103	第5章 无源滤波器	167
3.8.1 Z_0 补偿	103	5.1 滤波器种类	167
3.8.2 线路长度补偿	104	5.1.1 并联和串联滤波器	170
3.8.3 线路分段补偿	104	5.1.2 谐波滤波器的位置	170
3.8.4 反射因数	106	5.2 单调谐滤波器	170
3.9 商业建筑物	107	5.2.1 调谐频率	173
3.10 居民负载	107	5.2.2 最小滤波器	173
3.11 HVDC 输电	108	5.2.3 转移谐振频率	173
3.11.1 HVDC 照明	108	5.2.4 滤波元件的偏差影响	175
3.11.2 HVDC 结构和运行模式	108	5.2.5 迭代设计要求	175
3.11.3 直流滤波器	110	5.2.6 并联滤波器中的一个运行 中断	175
参考文献	113		

5.2.7 变化负载下的运行	175	5.16 无源滤波器的限制	201
5.2.8 并联滤波器组之间无功功率的 分配	176	5.17 滤波器的设计流程	201
5.2.9 电容器损耗	176	5.18 滤波器元件	202
5.3 谐波滤波器失谐和不平衡	176	5.18.1 滤波电抗器	202
5.4 单调谐滤波器之间的关系	176	5.18.2 滤波电阻	204
5.5 因数 Q 的选择	178	5.19 谐波滤波器故障	205
5.6 双调谐滤波器	178	参考文献	206
5.7 带通滤波器	180	第 6 章 无源滤波器的设计实例	208
5.8 阻尼滤波器	181	6.1 实例 1: 6 脉波载荷的小型配电 系统	208
5.8.1 二阶高通滤波器	182	6.2 实例 2: 针对电弧炉的滤波器设计 ..	215
5.9 C 类滤波器	185	6.3 实例 3: 两个 8000hp ID 风机驱动装置的 滤波器设计	225
5.10 零序陷波器	187	6.4 实例 4: 双调谐滤波器在三绕组变压器 上的应用	235
5.11 串联低通滤波器	188	6.5 实例 5: 光伏太阳能发电装置	239
5.12 滤波器的传递函数	189	6.5.1 计及谐波分析的太阳能发电 装置	241
5.13 滤波器设计优化技术	193	6.6 实例 6: 远距离谐波的影响	248
5.13.1 内点惩罚函数法	193	6.7 实例 7: 风电场	253
5.13.2 内点法和变量	194	6.7.1 谐波分析的模型	257
5.13.3 Karmarker 内点法	194		
5.13.4 Barrier 函数法	195		
5.14 滤波器设计的遗传算法	196		
5.14.1 粒子群优化 (PSO) 算法	197		
5.15 HVDC - DC 滤波器	199		

第 1 章 并联电容器组的应用

1.1 并联电容器组

电容器组是一个术语，它代表一个完整的组件，可以由多个串联和并联的电力电容器组、单个电容器熔断器或一组熔断器、避雷器，互锁接地开关，继电器，中性不平衡保护装置，初级开关等组成。它可以是操作现场的组件集合，也可以是一个或多个工厂组装的设备。

功率电容器可串联或并联连接到电路中。串联电容器用于高压（HV）输电线路的串联补偿，以提高功率传输能力。滤波器中也可以使用串联电容器（见第 5 章）。

并联电容器可应用于电气系统，在单个应用中可以执行多项任务。

1.1.1 提高功率因数

功率因数的提高可以通过感应电动机切换，或由配备负载开关的变电站提供，或者连接到中低压等级的母线来实现，功率因数提高的同时也降低了系统损耗。

$$\text{功率损耗}(\%) = 100 \left(\frac{\text{原始功率因数}}{\text{提高后的功率因数}} \right)^2 \quad (1.1)$$

$$\text{损耗降低}(\%) = 100 \left[1 - \left(\frac{\text{原始功率因数}}{\text{提高后的功率因数}} \right)^2 \right] \quad (1.2)$$

如果功率因数由滞后 0.8 提高至整数，那么系统会减少 36% 的功率损耗。式 (1.2) 适用于滞后的功率因数。如 1.11 节所述，通过电容器提高感应电动机功率因数的方式具有一定的局限性。

供电公司对用户的低功率因数运行有一定的惩罚措施。对低功率因数可能有不同的收费标准，但费用是基于设备容量加上固定或灵活变动的能源消耗费用产生的。谐波滤波器可实现谐波抑制和功率因数提高的双重目标。

用于提高功率因数的设备成本与节能成本相平衡，许多程序提供了改善功率因数的最优水平：

$$PF = \sqrt{1 - \left(\frac{C}{S} \right)^2} \quad (1.3)$$

式中， C 是每 kvar 电容器组的成本； S 是每 kvar 系统设备的成本； PF 是最优功率因数。

假设一个 1000kW 的负载：

- 将功率因数由 0.7 提高至 0.8 所需功率为 270kvar；
- 将功率因数由 0.8 提高至 0.9 所需功率为 366kvar；
- 将功率因数由 0.9 提高至 1.0 所需功率为 484kvar。

将功率因数提高至 0.95 以上并不经济，也并不常用。

1.1.2 支撑电压

并联电容器可以为母线提供电压支撑，从而防止电压大幅度骤降或联络线故障。基本计算过

程如下：

考虑一条呈感性主联络线的潮流分布（见图 1.1）。负载需求用 $P + jQ$ 所示，串联导纳 $Y_{sr} = g_{sr} + jb_{sr}$ ， $Z = R_{sr} + jX_{sr}$ 。源母线（无穷大母线）的潮流方程如下：

$$P + jQ = V_r e^{-j\theta} [(V_s - V_r e^{j\theta}) [(g_{sr} V_r + j b_{sr} \theta) + V_r^2] g_{sr} + V_s V_r b_{sr} \sin\theta] + j [(V_s V_r \cos\theta - V_r^2) b_{sr} - V_s V_r g_{sr} \sin\theta] \quad (1.4)$$

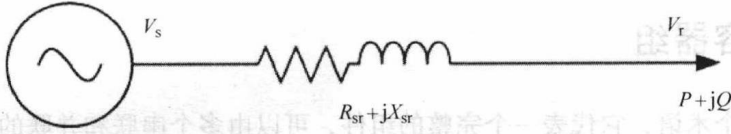


图 1.1 短传输线上的潮流

如果忽略电阻，则

$$P \doteq V_s V_r b_{sr} \sin\theta \quad (1.5)$$

$$Q \doteq (V_s V_r \cos\theta - V_r^2) b_{sr} \quad (1.6)$$

如果末端负载改变了 $\Delta P + \Delta Q$ ，则

$$\Delta P = (V_s b_{sr} \sin\theta) \Delta V + (V_s V_r b_{sr} \cos\theta) \Delta\theta \quad (1.7)$$

$$\Delta Q = (V_s \cos\theta - 2V_r) b_{sr} \Delta V - (V_s V_r b_{sr} \sin\theta) \Delta\theta \quad (1.8)$$

式中， ΔV 是电压 V_r 的标量差； $\Delta\theta$ 是角度差。如果忽略式 (1.4) 的电阻和 θ ，系统的动态电压方程如下：

$$V_r^4 + V_r^2(2QX_{sr} - V_s^2) + X_{sr}^2(P^2 + Q^2) = 0 \quad (1.9)$$

式 (1.6) 中的 θ 影响很小：

$$\frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{V_s - 2V_r}{X_{sr}} \quad (1.10)$$

如果末端发生线路连接器的三相短路，末端短路电流可表示为

$$I_r = \frac{V_s}{X_{sr}} \quad (1.11)$$

假定电阻远小于电抗，空载时 $V_r = V_s$ ，那么

$$\frac{\partial Q}{\partial V} = -\frac{V_r}{X_{sr}} = -\frac{V_s}{X_{sr}} \quad (1.12)$$

因此

$$\left| \frac{\partial Q}{\partial V} \right| = \text{短路电流} \quad (1.13)$$

或者，我们可以说

$$\frac{\Delta V_s}{V} \approx \frac{\Delta V_r}{V} = \frac{\Delta Q}{S_{sc}} \quad (1.14)$$

式中， S_{sc} 是系统的短路容量。这意味着电压调节等于无功功率的变化量与短路容量之比。显然，末端电压降落会导致短路容量减少，或系统电抗增加。可靠性越高的系统越能支撑末端电压。

例 1.1：如图 1.2 所示的系统，母线 C 有两个电源：一个从 400kV 母线 A 获得电能，另一个通过传输线连接到 230kV 的母线 B。这些母线与 230kV 母线 C 并列运行。母线 A 和 B 维持在额

⊖ 原书为 $Y_{sr} = g_{sr} + b_{sr}$ ，有误。——译者注

⊖ 原书为 ΔV_r ，有误。——译者注

定电压。母线 C 的特定负载需求导致电压降落了 6.47%。母线 C 的短路电流有效值为 8.3kA。那么母线 C 的无功补偿应为多大才可以将电压补偿到其额定电压？

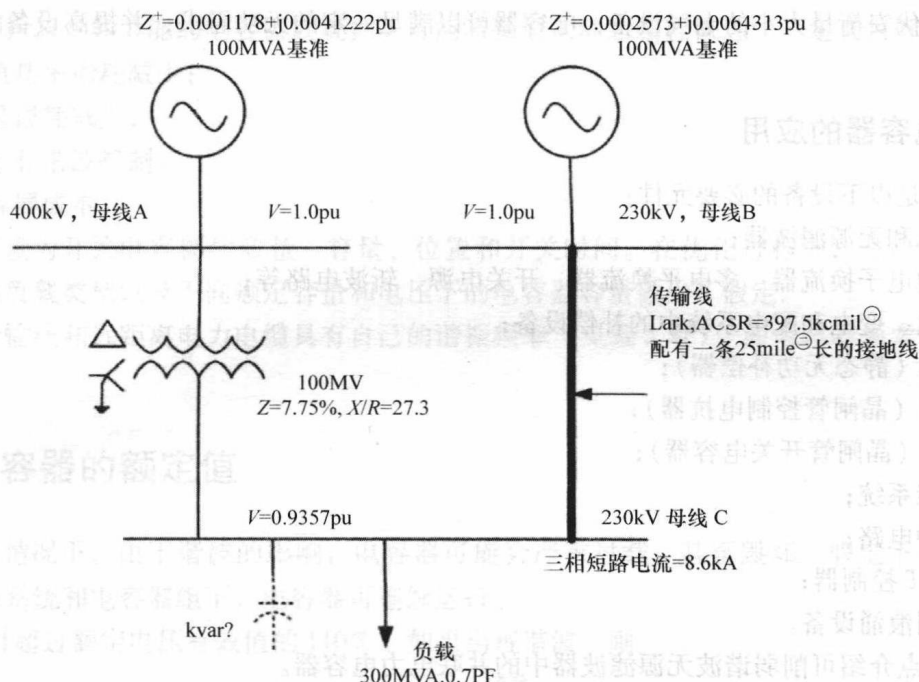


图 1.2 阐释电力系统中的无功补偿原理 (例 1.1)

近似的求解结果如式 (1.14) 所示, 它还可以写为

$$\Delta V \approx \frac{I_c}{I_{sc}} = \frac{Q_c}{S_c} \tag{1.15}$$

式中, ΔV 是每单位电压上升; I_c 是电容电流; I_{sc} 是短路电流; Q_c 是电容器的三相无功容量; S_c 是系统短路容量。母线 C 的电压标幺值为 0.9, 也就是说, 电压降落了 23kV。因此, 需要 213.5Mvar 的无功补偿。

当系统空载时, 由于空载系统和传输线的法拉第效应 (见第 2 章), 母线 C 的电压会升高至 230kV 以上。式 (1.15) 中大致忽略了电阻。不同负载下的电力系统电压调节器是运行过程中的主要考虑因数之一。需要采用 ULTC、SVC、STATCOM 等设备来解决电压骤降、骤升的问题。在电力系统中, 负载潮流计算提出了无功补偿的方法。

电压骤升可用下式近似地表示:

$$\Delta V \approx \frac{C_{kvar} (\% Z_t)}{T_{kVA}} \tag{1.16}$$

式中, C_{kvar} 是电容器的容量 (kvar); $\% Z_t$ 是变压器的阻抗值 (%); T_{kVA} 是变压器容量 (kVA)。如果 1Mvar 电容器组在阻抗值为 5.5%, 1.0MVA 变压器在二次侧投入使用, 电压将上升 5.5%。这里忽略了开关暂态, 是稳态电压上升。

相反地, 大型电容器组的开关过电压同样会带来隐患, 因此, 应将这样的过电压情况限制到安全水平。在一个系统中, 一些电容器可能会长期投入运行, 而其他电容器则可以使用电压、电流、功率因数或 kvar 开关进行控制。

⊖ 1kcmil (半圆密耳) = 0.507mm²。

⊖ 1mile = 1609.344m。

1.1.3 提升有功功率支撑能力

作为以伏安衡量大小的电气设备，电容器可以满足一定的无功需求，并提高设备的有功功率支撑能力。

1.1.4 电容器的应用

电容器是以下设备的必要元件：

- 有源和无源滤波器；
- 电力电子换流器、多电平换流器、开关电源、斩波电路等；
- 输电、变电和配电系统中的补偿设备；
- SVC（静态无功补偿器）；
- TCR（晶闸管控制电抗器）；
- TSC（晶闸管开关电容器）；
- 储能系统；
- 缓冲电路；
- FACT 控制器；
- 抑制浪涌设备。

这里重点介绍可削弱谐波无源滤波器中的并联电力电容器。

1.2 并联电容器的安装地点

在工商业配电系统中，由于没有非线性负载，并联电容器的安装地点要求较宽松：

- 低压变电站；
- 低压或中压开关电动机；
- 配电系统的中高压母线；
- 多电压水平。

由于工业电力系统中的杂散电容较小，自然谐振频率远高于负载产生的谐波。因此，谐振会发生在远高于非线性负载所产生谐波的频率处。随着电力电子设备的快速普及，无谐波环境是不存在的，因此需要有标准对谐波加以规范。荧光灯、家用电器和计算机及复印机、常用的开关电源、充电器和不停电电源系统都可产生谐波。

电容器可以安装在工厂或产生显著谐波的负载附近。由于这样的安装方式受谐振频率限制，除电容器可用于滤除谐波外，其他情况应避免采用。

当变电系统中的电容器安装在靠近或远离产生谐波的负载时，应该对通过内联系统传播的谐波进行研究。公共馈线系统为线性负载供电，也可以为非线性负载供电，并会对谐波失真变得敏感。

对此，有两种解决方法：

- 一种方法是从无功功率的角度放置电容器，然后研究其谐波效应。
- 第二种方法是同时考虑基频电压、无功功率和谐波效应。由于系统中含有谐波产生负载的用户，导致不含谐波产生负载的用户系统易受谐波污染影响。

配电系统中，寻求电容器的最优安装位置是较复杂的算法^[1,2]。两条主要原则是电压分布和系统损耗。修正电压分布需要在馈线末端放置电容器，当关注减少损耗时，电容器需要放置在靠

近负载中心的地方。为了检测消费者侧的电压和向电网反馈用电信息，可采用基于智能电能表的自动化装置^[2]。

基于损耗减少和节能的电容器放置算法可能需要引入动态编程概念^[3]。定义目标函数如下：

- 峰值功率损耗减少；
- 能量损耗减少；
- 电压谐波控制；
- 电容器成本。

待求变量为开关电容器的数量、容量、位置和开关时间。在优化过程中，对馈线的负载情况、馈线的负载类型以及不同额定容量和电压下的电容器容量做出了假定。

高压传输线和远距离电力电缆具有自己的谐振频率（见第2章），而电容器通常变成合适的滤波器。

1.3 电容器的额定值

在谐振情况下，由于谐波的影响，电容器可能会严重过载，甚至毁坏。假定下述不等式成立，在应急系统和电容器组下，电容器可连续运行。

- 不可超过额定电压有效值的110%。如果出现谐波，则

$$V_{\text{rms}} \leq 1.1 = \left[\sum_{h=1}^{h=h_{\text{max}}} V_h^2 \right]^{1/2} \quad (1.17)$$

- 考虑谐波但暂态除外的情况下，波峰电压不可超过额定电压有效值的 $1.2 \times \sqrt{2}$ 倍：

$$V_{\text{波峰}} \leq 1.2 \times \sqrt{2} \sum_{h=1}^{h=h_{\text{max}}} V_h \quad (1.18)$$

- 考虑基波和谐波电流，电流有效值不可超过额定容量和额定电压下电流标么值的135%：

$$I_{\text{rms}} \leq 1.35 = \left[\sum_{h=1}^{h=h_{\text{max}}} I_h^2 \right]^{1/2} \quad (1.19)$$

- 考虑谐波，负载无功功率不可超过额定无功功率标么值的135%：

$$\text{kvar}_{\text{pu}} \leq 1.35 = \left[\sum_{h=1}^{h=h_{\text{max}}} (V_h I_h) \right] \quad (1.20)$$

IEEE 18 标准中，额定无功功率限制在135%以内是基于稳态热力学实验基频下电介质的热效应得出的。电介质损耗可表示为

$$L_{\text{电介质}} = fCV^2 \quad (1.21)$$

式中， f 是额定频率； C 是额定电容。

电容应按照 UL 810 - 2008^[6]的要求制作，并按 UL 列举的设备规范进行维护。不在 UL 列举的设备规范内的电容器应额外配备限流熔断器或采用 UL 中列举的保护设备。

1.3.1 测试

IEEE 18^[5]中，室内电容器的内部绝缘终端测试应在有效值为3kV（电容器额定电压不大于300V）或5kV（电容器额定电压在301~1199V之间）的电压水平下持续10s。端对端测试应在额定电压有效值2倍（交流测试）或额定电压有效值4.3倍（直流测试）的电压水平下持续10s。