

电力系统

无功功率控制

Reactive Power Control in Electric Systems

T.J.E. 米勒主编 胡国根译

水利电力出

电力系统无功功率控制

Reactive Power Control in
Electric Systems

T.J.E.米勒主编 胡国根译 何仰赞校

水利电力出版社

内 容 提 要

本书共十一章，论述了配电和输电系统的无功补偿及其静态控制，动态性能，补偿和控制原则，以及包括静止补偿、串联补偿、调相机在内的各种无功补偿装置的配置、运行和控制。此外，书中还介绍了谐波源及其危害、滤波装置，以及无功的匹配协调等。

本书适用于从事电力系统规划、设计、运行和控制等方面工作的工程技术人员，也可供高等院校电力专业师生参考。

Edited by Timothy

J.E. Miller

Reactive Power Control in Electric Systems

John Wiley & Sons 1982年第一版

电力系统无功功率控制

T.J.E.米勒 主编

胡国根 译 何仰赞 校

*

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 14.25印张 311千字

1990年1月第一版 1990年1月北京第一次印刷

印数0001—5160册

ISBN 7-120-00778-5/TM·212

定价 7.60元

序

无功功率是交流电力系统设计和运行中的一个重要因素，这一看法由来已久。人们发现，因为网络元件的阻抗主要是电抗性的，为了传输有功功率，就要求送电端和受电端的电压之间有相角差（这在相当宽的范围内是可以实现的），而为了传输无功功率，则要求这两端的电压之间有一幅值差（这只能在很窄的范围内实现），当然这种看法是非常一般的、非常粗略的。

为什么要输送无功功率呢？这难道是由理论家虚构的、最好是予以忽视的困难概念吗？答案是：不仅大多数网络元件需要消耗无功功率，而且大多数用户的负荷也需要消耗无功功率，这些无功功率必须从网络中某个地方获得。如果不能很容易地传输的话，就必须在需要消耗无功功率的地方产生。

当然这一说法对有功功率也是对的。不过传输有功功率的限制远没有象传输无功功率那么严重，而发电机安装地点（以及发电机尺寸）不恰当所带来的损失却是非常严重的。尽管如此，两者的差别仅仅是数量上的。

当讨论电力传输时，必须考虑电气距离，认识到这一点是很重要的。例如，一个变压器的电抗可能等于50英里输电线的电抗。因此，在美国当考虑平均输电距离仅为百英里数量级时，很显然要完全不输送无功功率，实际上是不可能的，除非在同一电压级中无功功率的生产恰好和需要一样多。这就部分地解释了一个似乎很奇怪的事实：在同一网络

中，常会看到在配电网中使用电容器并联补偿，而在输电网络中则使用并联电抗器。

在有功功率和无功功率传输中，存在一个基本的、重要的相互关系。前面曾指出，传输有功功率需要电压之间的相位偏移，但电压幅值对送电端和受电端却是同样重要的，它不仅对功率的传输是必不可少的，而且必需适当，以保证负荷的需要而又不致击穿设备。因此必须控制电网中各枢纽点的电压，必要时加以支持或限制。而这种控制在很大程度上能够由供给或消耗这些点的无功功率来实现。

关于无功功率的这些概念，虽然很早以前就为人们所认识，但至少有以下两种原因，使这些概念近来日益显得重要。第一要求最大限度地利用传输能力的压力越来越大。第二较新型的静止可控无功功率补偿器的发展。多年以前，人们就用同步调相机来保证电压水平和改善功率传输能力。当时电力系统的发展程度已经证明，这样做是合理的。与此同时，在配电线路中也开始安装并联电容器以改善电压分布，减少线路负荷和线损（因为改善了功率因数）。并联电容器的迅速发展及其经济性使它们几乎取代了输电系统中的同步调相机。人们发现，把可投切电容器和同步调相机比较，在达到实际上相同的调节效果的条件下，电容器的费用要少得多。现在有迹象表明，趋势可能已经转变，可控无功电源又开始返回到采用静止装置的形式。然而从经济观点来看，确定固定电容器（和电抗器）能补偿多少无功、多少应该由可投切电容器补偿，多少应该是快速连续控制的（例如当系统受到干扰时），仍然是电力系统工程师的任务。当然如果需要同步发电机供给无功的话，那末他们本身应该发出多少无功，也仍然是个问题。

至此讨论了把无功功率输入电力系统或从系统吸收无功的问题。但是，在序言一开始就曾指出，串联在网络中的元件自身如输电线和变压器的漏抗就要消耗无功功率。所以增加输电系统的传输能力、减少配电网电压降的直接办法，是用串联电容器的容抗来部分地补偿串联感抗。通常，这是着眼于减少净电抗，而不是供给无功功率。串联电容器碰到了许多运行问题，所以现在已少用于配电网中。但是在许多场合仍然是增加输电线路传输能力的最好办法。它也用来平衡网络各支路的线路负荷。关于这一点，需要注意的是在环形网络中应用串联电容器必须协调，以便维持或得到恰当的线路负荷分布，而在网络中某一点使用并联电容器（或其他调压手段）则总是有利的。

本书包括无功功率控制和补偿的理论与实践方面的内容，并有一章详细论述谐波。毫无疑问，无功功率控制这一课题的重要性与日俱增，所以当前本书显得特别有用。作者们都是职业电力工程师，合起来已有好几十年无功功率技术方面的经验。

C. 康科迪亚

1982年于佛罗里达州威尼斯市

$$S = P + jQ$$

↓
I

↓
I

↓
IR

前 言

无功功率控制

全世界大约30%的主要能源被用来产生电能。几乎所有的电能都是以50Hz或60Hz的交变电流来传输和分配的。当前，设计出实际效益最高、安全性最高、可靠性最高的电力系统，并使之运行在这些状态下，比过去任何时候都显得重要。这些要求正在推动交流输电技术的广泛进展。本书旨在对交流输电的一些重要理论和实践发展作一介绍。

因为无功功率控制非常重要，也因为处理的题材非常广泛以及处理这些题材的方法很有用，所以本书将会引起广大电气、电子和控制工程师的兴趣。电力工业和其他工业、厂矿中的运行工程师们，从本书中可找到一些重要设备的运行理论与结构说明，这些设备在解决功率因数校正、电压控制和稳定、相平衡和谐波处理诸方面的问题中都是非常有用的。在大学里，本书应成为研究生甚至本科生电力系统课程的理想基础教材，其中若干章节已为威斯康新大学所采用^①。本书也应成为通用电气工程课程的理想基础教材。

无功功率控制是本书的主题，由于一系列原因，其重要性与日俱增，现简述如下。第一，由于燃料价格上涨，提高电力系统运行效率的要求日益迫切。对于给定的有功功率分布，使无功潮流最小，就可减少系统中的损耗，这一原则已应用到整个电力系统中：对单一的电感性负荷，采用简单的

① 加拿大多伦多大学的研究生课程也选用了本书的若干章节——译者。

功率因数校正电容器；对用计算机控制的大型互联网络，则用第十一章中介绍的复杂的计算方法。第二，输电网络的扩展已经受到限制，这一般是由于利率很高，在某些特殊情况下是难于得到输电线路的通行权。因此，在许多场合通过老线路传输的功率已经增加，这就要求运用无功功率控制措施去恢复稳定贮备。第三，水力资源的开发已经到了这样的程度，不得不在遥远的、条件恶劣的地区，如Hudson湾以及非洲、南美的山区去寻找发电站的建设场地。在远距离输电方面，尽管在并行地发展直流输电技术，但在许多场合仍然采用交流输电。交流输电中的稳定问题及电压控制问题，也可看作就是无功功率控制问题。解决无功功率控制问题有许多办法，例如使用固定并联电抗器和电容器，串联电容器，同步调相机和现代静止补偿器等。第四，由于使用电子设备日益增多（特别是计算机和彩色电视接收机），也由于连续过程工业的增长，对供电质量的要求越来越高。上述负荷对电压下降和频率下降是很忌讳的，至于供电中断，其危害性极大，代价是非常高的。控制无功功率是保证供电质量的基本方法，尤其是防止电压扰动的有效措施，而电压干扰则是电力系统中最常见的干扰。某些工业负荷，例如电弧炉、轧钢厂、矿井提升机和拉索挖掘机所需要的大量而且快速变化的有功和无功功率，会对电源产生不良影响，常常需要采用静止无功功率补偿器作为电压稳定设备，对此进行补偿。第五，直流输电系统的研究和应用表明，要求在换流器的交流侧进行无功控制，以便稳定电压和帮助换流器换流。

本书对交流电力工程的所有这些方面都从理论和实践的角度进行了讨论。第一章到第三章叙述交流输电的理论。从功率因数校正这种简单的情况开始，直到详细论述响应速度

特快的静止补偿器的设计和应用原理。第二章讨论了高压远距离输电的原理。第三章讨论交流电力系统的重要概念——动态特性及无功功率控制的作用。在第二章中特别强调了解决补偿问题的统一方法，讨论了三种基本补偿技术——分段法，波阻抗补偿和线路长度补偿，并将它们进行了比较。第一章也是用统一的方法去处理负荷的无功控制或无功补偿的。先是按照其功率因数校正属性，然后按照其电压稳定属性，最后把它当作一组能稳定电压、校正功率因数和进行相平衡的序网络成功地对补偿网络进行了描述。分析时采用电压、电流的相量和瞬时值。

第四章详细介绍和描述了近代无功功率补偿器的原理。这里所谓近代无功功率补偿器是指可控硅控制电抗器、可控硅投切电容器和饱和电抗器。本书对各种控制概念给予特别的注意并详细讨论了可控硅投切电容器中的开关现象。

第五章和第六章进一步对现代静止补偿器进行了描述。第五章介绍了大功率交流可控硅控制器及相关的系统，而第六章则对一个近代补偿器装置进行了全面的叙述，既详细说明了控制系统，又介绍了性能试验。

第七章介绍串联电容器。次同步共振（SSR）问题的解决，使用金属氧化物变阻器之后串联电容器实际上可瞬时重新接入，这两点都有助于串联电容器恢复其地位——作为增进长输电线稳定性和功率传输能力的非常有效而且经济的手段。变阻器和控制SSR的方法均在第七章中加以讨论。

第八章论述同步调相机。由于这种设备仍然保持其重要性，所以放在本书中。作为旋转机器，同步调相机在无功功率控制理论中有一种自然的和重要的地位。最近有几台同步调相机的容量已经做得很大，技术上也很先进。快速反应激

磁系统和新控制策略稳步地提高了调相机的运行性能。

关于电弧炉的无功控制，在第九章中有详细的论述。这是若干最具有挑战性的负荷补偿问题之一，它既要求补偿器有很大的补偿容量，又要求它响应迅速，以便将闪烁减小到最低限度。第九章研究了各种无功功率控制方法的响应极限，对一般的读者将是有益的。该章也清楚地说明对炼钢负荷进行补偿的好处，并以实例证明，由于采用了电压和无功功率控制，负荷的运行性能常常显著地得到改进。即便是为了别的目的（如减少闪烁）而采用这些补偿，也能得到相同的效果。

无功功率控制这一课题与谐波有密切关系，因为需要无功功率补偿和控制常常是和负荷有关的，而负荷也就是谐波源。在一本论述无功功率控制的专著中，谐波为什么具有重要意义呢？因为无功补偿几乎总是影响到电力系统的谐振频率，至少是局部地影响到电力系统的谐振频率。所以电容器、电抗器、补偿器的配置应当避免谐波共振的发生，这一点是很重要的。第十章讨论了这些问题并用实例来说明滤波器。

最后一章——第十一章讨论一个新的课题，即无功功率配合，并叙述了大型互连网络中无功功率协同控制的许多方法。有几种最优状况是可以利用计算机分析和控制来确定并加以保持的，其中之一是系统损耗最小。这个很有希望的新课题有待于读者日后进一步研究。

本书不打算建立一些任何特殊设备都可利用的一成不变的规律，对解释本书材料所引起的不利后果，作者们概不负责。所有各章都是每位作者出于个人的观点写成的，并不代表任何制造公司或研究机构的意见。

T. J. E. 米勒

1982年10月于纽约

目 录

序

前言

| | |
|---|----|
| 第一章 负荷补偿理论 | 1 |
| 1.1 引言：补偿的必要性 | 2 |
| 1.2 负荷补偿的目的 | 3 |
| 1.3 理想补偿器 | 6 |
| 1.4 实际考虑 | 7 |
| 1.4.1 要求补偿的负荷 | 7 |
| 1.4.2 供电质量的验收标准 | 9 |
| 1.4.3 负荷补偿器的技术条件 | 10 |
| 1.5 补偿的基本理论：单相系统中的功率 因数校正和电压调整 | 11 |
| 1.5.1 功率因数及其校正 | 12 |
| 1.5.2 电压调整 | 16 |
| 1.6 近似的无功功率特性 | 22 |
| 1.6.1 电感负荷变化时的电压调整 | 22 |
| 1.6.2 功率因数改善 | 25 |
| 1.6.3 无功功率的偏置 | 27 |
| 1.7 例 | 28 |
| 1.7.1 求获得恒定电压的补偿 | 29 |
| 1.7.2 求获得单位功率因数的补偿 | 32 |
| 1.8 作为电压调整器的负荷补偿器 | 32 |
| 1.9 不对称负荷的相平衡和功率因数校正 | 37 |
| 1.9.1 理想补偿导纳网络 | 38 |

| | |
|--|-----------|
| 1.9.2 用对称分量法分析负荷补偿 | 44 |
| 1.10 小结 | 54 |
| 附录 | 54 |
| 参考文献 | 58 |
| 第二章 输电系统中稳态无功功率控制理论 | 59 |
| 2.1 引言 | 61 |
| 2.1.1 历史背景 | 61 |
| 2.1.2 交流功率传输的基本要求 | 62 |
| 2.1.3 影响稳定性和电压控制的工程因素 | 66 |
| 2.2 无补偿的输电线路 | 67 |
| 2.2.1 电气参数 | 67 |
| 2.2.2 输电线路的基本方程式 | 69 |
| 2.2.3 波阻抗和自然负荷 | 70 |
| 2.2.4 无补偿线路的开路运行 | 73 |
| 2.2.5 无补偿线路的带负荷运行: 线路长度、 负荷功率、功率因数对电压和无功功率的影响 | 79 |
| 2.2.6 无补偿线路的带负荷运行: 最大功率和稳定性研究 | 86 |
| 2.3 有补偿的输电线路 | 96 |
| 2.3.1 补偿类型: 等效 Z_0 , 等效 θ 和分段补偿 | 96 |
| 2.3.2 无源和有源补偿器 | 98 |
| 2.3.3 均匀分布的固定补偿 | 101 |
| 2.3.4 均匀分布可调节并联补偿 | 111 |
| 2.4 无源并联补偿 | 115 |
| 2.4.1 用并联电抗器控制开路电压 | 115 |
| 2.4.2 用可投切并联补偿控制电压 | 121 |
| 2.4.3 中点并联电抗器或电容器 | 122 |
| 2.5 串联补偿 | 129 |

限制因素

| | |
|--|-----|
| 2.5.1 串联补偿的目的及其实践上的限制因素 | 129 |
| 2.5.2 在输电线中点安装串联电容器 和并联电抗器的对称线路 | 130 |
| 2.5.3 串联补偿线路的实例 | 136 |
| 2.6 分段补偿(动态并联补偿) | 141 |
| 2.6.1 基本概念 | 141 |
| 2.6.2 中点补偿器的动态运行 | 144 |
| 2.6.3 输电线路分段补偿实例 | 149 |
| 参考文献 | 151 |

第三章 输电系统的无功功率补偿 和动态运行性能

| | |
|-----------------------------|-----|
| 3.1 引言 | 152 |
| 3.1.1 电力系统的动态特性 | 152 |
| 3.1.2 对可调节无功补偿的要求 | 153 |
| 3.2 四个特征时段 | 154 |
| 3.2.1 暂态时段 | 157 |
| 3.2.2 第一次摇摆时段和暂态稳定性 | 160 |
| 3.2.3 振荡时段 | 163 |
| 3.2.4 补偿与系统动态特性 | 165 |
| 3.3 无源并联补偿 | 165 |
| 3.3.1 暂态时段 | 166 |
| 3.3.2 第一次摇摆时段 | 169 |
| 3.3.3 振荡时段 | 171 |
| 3.3.4 无源并联补偿小结 | 171 |
| 3.4 静止补偿器 | 171 |
| 3.4.1 暂态时段 | 172 |
| 3.4.2 第一次摇摆时段 | 186 |
| 3.4.3 静止并联补偿对暂态稳定性的影响 | 189 |
| 3.4.4 振荡时段 | 200 |

| | | |
|------------|--------------------------------------|------------|
| 3.4.5 | 用静止补偿防止电压不稳定 | 203 |
| 3.4.6 | 补偿器动态运行性能小结 | 205 |
| 3.5 | 同步调相机 | 208 |
| 3.5.1 | 暂态时段 | 209 |
| 3.5.2 | 第一次摇摆和振荡时段 | 211 |
| 3.6 | 串联电容器补偿 | 211 |
| 3.6.1 | 暂态时段 | 212 |
| 3.6.2 | 第一次摇摆和暂态稳定性 | 212 |
| 3.6.3 | 振荡时段 | 215 |
| 3.7 | 小结 | 216 |
| | 参考文献 | 217 |
| 第四章 | 静止补偿器的原理 | 218 |
| 4.1 | 补偿器的应用 | 218 |
| 4.1.1 | 静止补偿器的性质 | 218 |
| 4.1.2 | 补偿器的主要型式 | 220 |
| 4.2 | 可控硅控制电抗器(TCR) 及和TCR有关的其他补偿器 | 222 |
| 4.2.1 | 运行原理 | 222 |
| 4.2.2 | 基频电压/电流特性 | 225 |
| 4.2.3 | 谐波 | 227 |
| 4.2.4 | 可控硅控制变压器(TCT) | 231 |
| 4.2.5 | 带并联电容器的TCR | 231 |
| 4.2.6 | 控制策略 | 235 |
| 4.2.7 | TCR补偿器的其他运行性能 | 242 |
| 4.3 | 可控硅投切电容器 | 245 |
| 4.3.1 | 运行原理 | 245 |
| 4.3.2 | 操作过渡过程和无过渡过 程操作的概念 | 247 |

| | | |
|------------|----------------------------|------------|
| 4.3.3 | 电压/电流特性 | 255 |
| 4.4 | 饱和电抗器型补偿器 | 257 |
| 4.4.1 | 运行原理 | 258 |
| 4.4.2 | 电压/电流特性 | 261 |
| 4.5 | 小结 | 263 |
| 4.6 | 进一步的要求与发展 | 266 |
| 第五章 | 可控硅控制器的设计 | 267 |
| 5.1 | 可控硅 | 267 |
| 5.2 | 作为开关的可控硅额定值 | 268 |
| 5.3 | 关于热过程的一些考虑 | 271 |
| 5.4 | 可控硅控制器介绍 | 272 |
| 5.4.1 | 一般介绍 | 272 |
| 5.4.2 | R-C减振器电路 | 275 |
| 5.4.3 | 开通能量 | 277 |
| 5.4.4 | 过电压保护 | 279 |
| 5.4.5 | 运行过程中可控硅 控制器损耗的变化 | 280 |
| 5.5 | 冷却系统 | 281 |
| 5.5.1 | 一次过滤空气系统 | 281 |
| 5.5.2 | 一次过滤空气系统的一些改变 | 283 |
| 5.5.3 | 再循环空气系统 | 283 |
| 5.5.4 | 液冷系统 | 284 |
| 5.5.5 | 关于冷却系统的综合评论 | 284 |
| 5.6 | 可控硅控制器一例 | 284 |
| | 参考文献 | 286 |
| 第六章 | 现代静止补偿器一例 | 287 |
| 6.1 | 引言 | 287 |
| 6.2 | 基本结构 | 237 |

| | | |
|------------|--------------|------------|
| 6.3 | 主要元件的说明 | 290 |
| 6.4 | 可控硅控制器的控制系统 | 296 |
| 6.5 | 性能试验 | 299 |
| 第七章 | 串联电容器 | 302 |
| 7.1 | 引言 | 302 |
| 7.2 | 历史 | 303 |
| 7.3 | 通用设备的设计 | 305 |
| 7.3.1 | 电容器 | 305 |
| 7.3.2 | 熔断器 | 307 |
| 7.3.3 | 补偿需考虑的因素 | 307 |
| 7.3.4 | 实际布置 | 308 |
| 7.4 | 保护装置 | 309 |
| 7.5 | 串联电容器重新接入的方案 | 317 |
| 7.6 | 非线性电阻保护装置 | 318 |
| 7.7 | 串联电容器的共振效应 | 323 |
| 7.8 | 小结 | 327 |
| | 参考文献 | 327 |
| 第八章 | 同步调相机 | 328 |
| 8.1 | 引言 | 328 |
| 8.2 | 同步调相机的设计特点 | 329 |
| 8.3 | 基本电气特性 | 332 |
| 8.3.1 | 电机常数 | 332 |
| 8.3.2 | 相量图 | 333 |
| 8.3.3 | V形曲线 | 335 |
| 8.3.4 | 简化等值电路及等效容量 | 336 |
| 8.4 | 调相机的运行 | 337 |
| 8.4.1 | 电力系统的电压控制 | 338 |
| 8.4.2 | 事故无功电源 | 338 |

| | | |
|------------|-------------------------------|------------|
| 8.4.3 | 暂态摆动最小化 | 341 |
| 8.4.4 | 调相机在高压直流输电中的应用 | 344 |
| 8.5 | 起动方法 | 347 |
| 8.5.1 | 用起动电动机起动 | 347 |
| 8.5.2 | 降压起动 | 349 |
| 8.5.3 | 静止起动 | 350 |
| 8.6 | 调相机站的设计依据 | 352 |
| 8.6.1 | 基本布置(单线图) | 352 |
| 8.6.2 | 控制和保护 | 354 |
| 8.6.3 | 辅助系统 | 354 |
| 8.7 | 小结 | 355 |
| | 参考文献 | 356 |
| 第九章 | 无功补偿与电弧炉 | 357 |
| 9.1 | 引言 | 357 |
| 9.2 | 作为电负荷的电弧炉 | 358 |
| 9.2.1 | 炼钢厂中的电弧炉 | 358 |
| 9.2.2 | 电弧炉对供电的要求 | 358 |
| 9.3 | 闪烁及其补偿原则 | 365 |
| 9.3.1 | 闪烁问题的一般性质 | 365 |
| 9.3.2 | 闪烁补偿对策 | 370 |
| 9.3.3 | 补偿器的类型 | 375 |
| 9.4 | 可控硅控制补偿器 | 376 |
| 9.4.1 | 补偿器无功功率和可控硅 控制角之间的关系 | 377 |
| 9.4.2 | 无功功率需求的确定 | 383 |
| 9.4.3 | 用TCR补偿器得到的 闪烁补偿结果举例 | 385 |
| 9.5 | 饱和电抗器型补偿器 | 385 |