



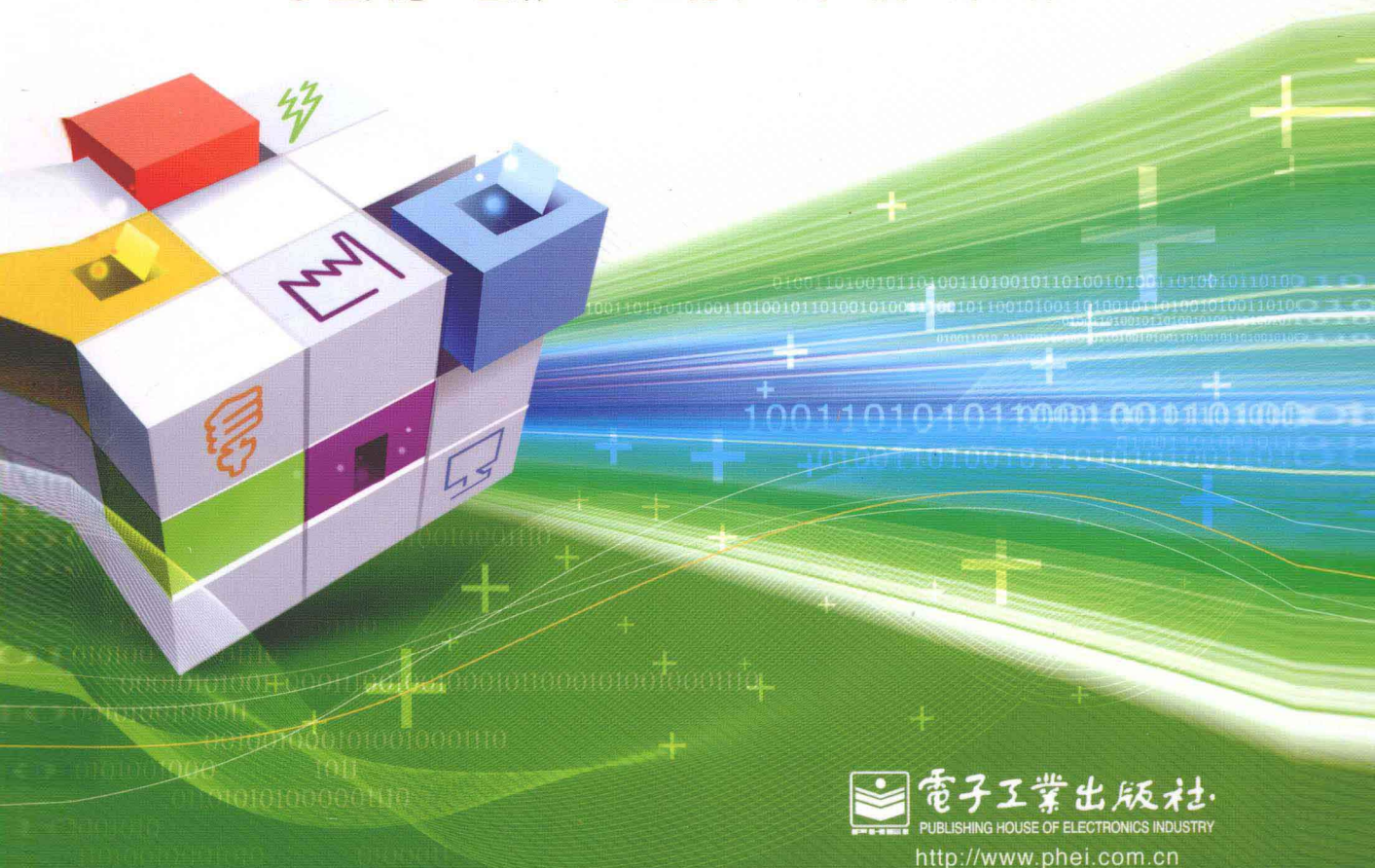
卓越

Schneider
Electric

工程师 教育培养计划系列丛书

电力系统无功补偿 原理与应用

◎ 王大志 主编 ◎ 王克难 刘 震 副主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

卓越工程师教育培养计划系列丛书

电力系统无功补偿原理与应用

王大志 主 编

王克难 刘 震 副主编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书主要说明电力系统无功功率相关理论,无功功率补偿的作用、种类、特点及发展趋势;静止无功补偿器、静止无功发生器和有源电力滤波器;详细介绍施耐德电能无功补偿器 MDG9AD161、MDG9AD162,施耐德 Varplus2 电容器,施耐德 Varlogic 无功功率补偿控制器,列举出针对以上设备的相关实验和工程实例;最后讲述无功功率补偿装置的综合应用。

本书可以作为电气工程及其自动化专业、自动化专业以及其他相关专业和领域的工程技术人员和研究人员的参考用书,也可供上述专业范围的教师和研究生阅读,也可作为施耐德电气中无功功率补偿相关装置安装、运行、维护的指导用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统无功补偿原理与应用 / 王大志主编. —北京: 电子工业出版社, 2013.1

(卓越工程师教育培养计划系列丛书)

ISBN 978-7-121-19063-6

I. ①电… II. ①王… III. ①电力系统—无功补偿 IV. ①TM714.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 283255 号

责任编辑: 刘 凡 特约编辑: 孙志明

印 刷: 北京中新伟业印刷有限公司

装 订: 北京中新伟业印刷有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×980 1/16 印张: 15.5 字数: 347 千字

印 次: 2013 年 1 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 39.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

卓越工程师教育培养计划系列丛书专家委员会

顾 问:

衣雪青 王传臣 杨丽莉 张 焰 王本燕

成 员:

王大志	徐亚敏	陈亚林	朱旭平
高 平	施伟锋	孙培德	薛士龙
徐 静	许少伦	周力尤	李晨炆
李 明			

前 言

关于大学毕业生找工作，我们常常会听到来自企业和大学毕业生的抱怨，在高校学到的知识和培养的能力往往与企业要求存在较大差距。随着我国成为世界核心经济体步伐的加快，企业对就业大学生直接实践能力的要求也日益提高。2010年，为贯彻落实《国家中长期教育改革和发展规划纲要（2010—2020年）》和《国家中长期人才发展规划纲要（2010—2020年）》，教育部启动了“卓越工程师培养计划”，我国高等教育将朝着面向企业、面向世界和面向未来的方向发展。

本书就是在这一背景下，期望一改以往重理论轻实践的问题而编写的。书中将电力系统无功功率补偿理论与施耐德优秀的电气设备及其成功的工程案例相结合，采用了生动的提问与归纳重点等形式，给读者一个全新的风格。本书深入浅出地讲述电力系统无功功率相关理论、无功功率补偿原理及其发展趋势，并介绍了静止无功补偿器(SVC)、静止无功发生器(SVG)和有源电力滤波器(APF)等相关内容；讲述了电力电容器的特点、分类、应用中的配置、保护、检测、运行维护和安装调试等知识和技能；详细介绍了施耐德专门为高校实验室设计的无功功率补偿装置试验平台MDG9AD161和MDG9AD162装置的基本原理及使用方法；重点说明了施耐德工业级产品Varplus电容器及Varlogic无功功率补偿控制器的特性、功能和使用。最后，书中给出了施耐德工业级无功功率补偿装置的相关试验和工程应用实例。读者通过对本书内容的学习，可以在了解电力系统无功功率补偿理论的同时，培养出设计与使用无功功率补偿装置的工程实践能力。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化、自动化等相关专业本科或研究生的教材及教学参考书，也可供广大工程技术人员参考使用。

本书由东北大学王大志教授担任主编，辽宁医学院王克难高级讲师、东北大学刘震副教授担任副主编。郭喜峰、于子淞、韩伟、张海信、陈宇西、江宁、崔潇、史海熙、王化明、冷明志等参与了本书的资料收集、编写、排版等工作。

本书的编写得到了东北大学-施耐德电气联合实验室全体人员和东北大学电力系统与电力传动研究所各位同事的指导及帮助。对本书的出版，施耐德电气（中国）投资有限公司的杨丽莉女士、徐亚敏先生、丛文卓先生、杨晓勇先生给予了多方面的支持与帮助，在此表示最为诚挚的谢意。

由于水平有限，编写时间仓促，书中难免存在错误和不当之处，敬请读者批评指正。

王大志

2012年9月于东北大学

目 录

第 1 章 电力系统无功补偿的基本理论概述	(1)
1.1 无功功率的基本概念	(1)
1.2 电力系统无功补偿的种类和特点	(3)
1.3 电力系统无功补偿的作用	(4)
1.4 电力系统无功补偿的研究概况及发展趋势	(5)
1.4.1 常用的无功补偿装置	(5)
1.4.2 无功补偿技术的发展	(6)
第 2 章 电力系统无功补偿原理	(7)
2.1 电容器无功补偿的基本原理	(7)
2.1.1 补偿容量的计算方法及补偿容量的合理确定	(8)
2.1.2 电力电容器选择及补偿方式	(8)
2.2 静止无功补偿器的基本原理	(9)
2.2.1 晶闸管相控电抗器型 (TCR 型)	(10)
2.2.2 晶闸管投切电容器型 (TSC 型)	(12)
2.2.3 TCR+TSC 混合型	(13)
2.3 静止无功发生器的基本原理	(14)
2.3.1 静止无功发生器的工作原理	(14)
2.3.2 静止无功发生器的工作特性	(16)
2.3.3 静止无功发生器的主要优点	(16)
2.4 有源电力滤波器的基本原理	(17)
2.4.1 有源电力滤波器 (Active Power Filter, APF)	(17)
2.4.2 有源电力滤波器谐波检测原理	(21)
2.4.3 电压型并联 APF 的结构与工作原理	(26)
第 3 章 电力电容器	(28)
3.1 电容器简介	(28)
3.1.1 什么是电容器	(28)
3.1.2 电容器的单位	(29)
3.1.3 电容器的工作原理	(29)
3.1.4 电容器的特点	(32)

3.1.5	电容器的主要特性参数	(33)
3.2	电容器的分类	(34)
3.2.1	电力电容器的分类	(34)
3.2.2	常用电容器	(37)
3.2.3	电容器的选择	(39)
3.3	无功补偿电容器的合理配置	(39)
3.3.1	补偿电容器的容量	(39)
3.3.2	补偿电容器组接线简介	(40)
3.4	电容器的保护	(41)
3.4.1	单台熔丝保护	(41)
3.4.2	过流保护	(42)
3.4.3	零序保护	(42)
3.4.4	相差动保护	(42)
3.4.5	中性线电流平衡保护	(43)
3.5	电容器的检测方法与更换	(44)
3.5.1	固定电容器的检测方法	(44)
3.5.2	电解电容器的检测	(45)
3.5.3	可变电容器的检测	(46)
3.6	电容器的安装与调试	(46)
3.6.1	电容器安装前的检查	(46)
3.6.2	电容器的安装	(46)
3.7	电容器的运行维护	(49)
3.7.1	严格控制电容器的运行电压、电流	(49)
3.7.2	电容器的运行温度	(50)
3.7.3	认真进行电容器的巡视、检查工作	(51)
3.8	电容器在运行中的故障处理	(52)
第4章	施耐德 MDG9AD161 型电能无功补偿装置实验平台	(54)
4.1	MDG9AD161 型实验平台简介	(55)
4.2	MDG9AD161 型电能无功补偿装置实验平台的组成部分	(55)
4.3	MDG9AD161 型实验平台的安装与调试	(56)
4.3.1	实验平台的安装	(56)
4.3.2	实验平台的具体说明	(56)
4.3.3	实验平台设备的使用警告	(60)

4.3.4	实验过程使用的符号	(60)
4.3.5	实验工作环境	(60)
4.4	MDG9AD161 实验平台的运行	(61)
4.5	MDG9AD161 技术数据	(70)
4.5.1	电器数据	(70)
4.5.2	机械数据	(70)
第 5 章	施耐德 MDG9AD162 型电能无功补偿装置实验平台	(72)
5.1	MDG9AD162 型电能无功补偿装置实验平台简介	(72)
5.1.1	无功能量校正设备的功能	(72)
5.1.2	无功能量校正设备的结构	(73)
5.1.3	无功能量校正设备的负载	(73)
5.1.4	无功能量校正设备在使用中的注意事项及使用数据	(73)
5.2	无功功率的补偿	(74)
5.2.1	无功功率的补偿基础	(74)
5.2.2	瞬态现象和扰动	(77)
5.2.3	保护器件的选择	(84)
5.2.4	额外的技术信息	(85)
5.3	法国 C.A 8334 电能质量分析仪产品简介及使用说明	(92)
5.3.1	产品概述	(92)
5.3.2	产品介绍	(93)
5.3.3	产品使用	(95)
5.4	MDG9AD162 设备实验	(96)
5.4.1	实验说明	(96)
5.4.2	对实验设备、功率平衡和功率校正的分析	(97)
5.4.3	验证无功补偿方案	(103)
5.4.4	认识非线性负载	(110)
第 6 章	Varlogic 型无功补偿控制器	(118)
6.1	无功补偿控制器的功能	(118)
6.2	无功补偿控制器的原理	(119)
6.3	无功补偿控制器控制方案简介	(120)
6.3.1	电容器投切控制方式	(121)
6.3.2	无功功率和功率因数复合控制方式	(125)
6.4	Varlogic NR 系列控制器简介	(129)

6.4.1	概述	(129)
6.4.2	安装	(135)
6.4.3	显示模式和启动过程	(138)
6.4.4	菜单操作	(139)
6.4.5	步程序与应用举例	(152)
6.4.6	手动计算响应值及 Varlogic 控制器的高压应用	(157)
6.4.7	术语表	(159)
6.4.8	技术规格	(162)
第 7 章	Varplus ² 系列电容器的介绍及应用	(164)
7.1	Varplus ² 系列电容器产品的特点	(164)
7.1.1	模块化设计	(164)
7.1.2	HQ 保护系统	(165)
7.1.3	外部非金属绝缘外壳	(166)
7.1.4	Varplus ² 系列产品	(166)
7.2	Varplus ² 电容器相关参数	(171)
7.2.1	Varplus ² 技术参数	(171)
7.2.2	Varplus ² 安装尺寸	(172)
7.3	Varplus ² 电容器安装	(173)
7.4	无功功率补偿方案	(175)
7.4.1	无功功率相关介绍	(175)
7.4.2	补偿方式	(176)
7.4.3	标准型无功功率补偿推荐方式	(179)
7.4.4	调谐型无功功率补偿推荐方式	(182)
7.4.5	典型推荐方式的标注方法	(186)
7.4.6	产品型号及标注方式	(187)
7.5	通风系统及要求	(188)
7.5.1	标准型和过谐型	(189)
7.5.2	调谐型	(190)
7.5.3	环境温度为 50℃ 的使用情况	(190)
7.6	保护元器件的选择	(191)
7.6.1	断路器主回路保护	(191)
7.6.2	Gg 型熔断器主回路保护	(192)
7.6.3	Gg 型熔断器支路保护	(193)

第 8 章 无功功率补偿装置综合应用	(194)
8.1 功率因数校正指导	(194)
8.1.1 无功电能管理原理	(194)
8.1.2 无功电能管理的优点	(196)
8.1.3 功率补偿的确定方法	(196)
8.1.4 带调谐电抗器的无功补偿方案	(200)
8.1.5 电容器的额定电压与额定电流的确定	(200)
8.1.6 电力电容器的选择	(201)
8.2 无功功率补偿综合应用实例	(202)
8.2.1 交流电弧炉及其工作原理简介	(203)
8.2.2 施耐德电气无功功率补偿方案	(207)
8.2.3 施耐德电气无功功率补偿产品的安装	(211)
8.2.4 施耐德电气无功功率补偿柜通风系统的要求	(214)
总结	(216)
附录 A VarplusBox 电容器	(217)
A.1 VarplusBox 型电容器介绍	(217)
A.1.1 主要特性	(218)
A.1.2 各种参数	(218)
A.2 VarplusBox HDuty 型电容器	(218)
A.3 VarplusBox Energy 型电容器	(221)
A.4 VarplusBox Harmonic HDuty 型电容器	(223)
A.4.1 运行条件	(224)
A.4.2 额定电压	(224)
A.5 VarplusBox Harmonic Energy 型电容器	(226)
A.5.1 运行条件	(226)
A.5.2 额定电压	(226)
A.6 VarplusBox 尺寸图	(228)

第 1 章

电力系统无功补偿的基本理论概述

本章导读

- 无功功率的基本概念。
- 无功补偿的种类和特点。
- 电力系统无功补偿的作用。
- 电力系统无功补偿的研究概况及发展趋势。

随着我国国民经济的飞速发展，电网规模的逐渐增大，工业电弧炉、轧钢机、电力机车等冲击性负荷在工业应用领域中被大量使用，这些负荷功率因数低，无功变化大且急剧，运行时会造成低压配电网电压的急剧波动，从而恶化电能质量，造成大量线路损耗，而且在系统中注入大量的高次谐波，严重影响系统供电的电能质量，使用户的正常工作的受到不同程度的影响。

1.1 无功功率的基本概念

如图 1-1 所示，发电厂发出的电能经变电站进入负载，负载以电动机为例，有功功率是保持用电设备正常运行所需的电功率，也就是将电能转换为机械能的电功率。无功功率比较抽象，它是用于电路内电场与磁场的交换，并用来在电气设备中建立和维持磁场的电功率。电动机需要建立和维持旋转磁场，使转子转动，从而带动机械运动，电动机的转子磁场就是从电源取得无功功率而建立的。



图 1-1 电网能量交换图

有功功率如图 1-2 所示，总功率为无功功率与有功功率的矢量和。

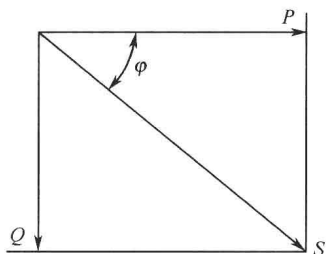


图 1-2 无功功率和有功功率矢量图

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \quad P = S \cdot \cos \varphi, \quad Q = S \cdot \sin \varphi$$

式中， S 为视在功率； P 为有功功率； Q 为无功功率。

无功功率既然不做功，那么它是不是无用功呢？

无功功率绝不是无用功率，其用处很大。电动机需要建立和维持旋转磁场，使转子转动从而带动机械运动，电动机的转子磁场就是从电源取得无功功率建立的。变压器也同样需要无功功率，才能使变压器的一次线圈产生磁场，在二次线圈感应出电压。因此，如果没有无功功率，电动机就不会转动，变压器也不能变压，交流接触器也不会吸合。在电网中，有功无功都要各自保持相对平衡，否则系统的频率电压就无法维持在额定范围内。

研究无功功率具有重要的理论意义和实践意义，主要表现如下几方面^[1]：

(1) 无功功率与系统运行电压的问题。电力系统的电压水平高低不仅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，影响电力系统的经济运行，所以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。近年来国内外电压失稳的事件屡有发生，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的电压稳定问题有重要影响,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,对电力系统的动态电压稳定也具有重要影响。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的可靠性,防止电力系统电压失稳事故的发生。

1.2 电力系统无功补偿的种类和特点

1. 集中补偿

在低压配电所内设置若干组电容器,电容器接在配电母线上,补偿供电范围内的无功功率。

2. 组合就地补偿(分散就地补偿)

电容器接在高压配电装置或动力箱的母线上,对附近的电动机进行补偿。

3. 单独就地补偿

将电容器装于箱内,放置在电动机附近,对其单独补偿。控制式单独就地补偿多用于降压启动等。

4. 智能无功补偿

这种补偿方式在各地低压配电网的公用配变中被广泛引用,它集低压无功补偿、综合配电监测、配电站区的线损计量、电压合格率的考核、谐波监测等多种功能于一身;同时还充分考虑了与配电自动化系统的结合。

5. 具有饱和电抗器的无功补偿装置

饱和电抗器分为自饱和电抗器和可控饱和电抗器两种,相应的无功补偿装置也分为两种。具有自饱和电抗器的无功补偿装置是依靠电抗器自身固有的能力来稳定电压的,它利用铁芯的饱和特性来控制发出或吸收无功功率的大小。可控饱和电抗器通过改变控制绕组中的工作电流来控制铁芯的饱和程度,从而改变工作绕组的感抗,进一步控制无功电流的大小。这类装置组成的静止无功补偿装置属于第一批静止补偿器。

1.3 电力系统无功补偿的作用

无功功率对供电系统和负荷的运行都是十分重要的。电力系统网络元件的阻抗有电感性 and 电容性。为了输送有功功率，就要求送电端和受电端的电压有相位差，这在相当宽的范围内可以实现。而为了输送无功功率，要求两端电压有幅值差，这只能在很窄的范围内实现。不仅大多数网络元件消耗无功功率，大多数负荷也需要消耗无功功率。电力系统中的网络元件和负荷所需要的无功功率必须从网络中某个地方获得。显然，这些无功功率如果都要由发电机提供并经过长距离传送是不合理的，通常也是不可能的。合理的方法应是在需要消耗无功功率的地方产生无功功率，即无功补偿。

1. 提高功率因数，降低设备容量，减少功率损耗

已知公式：

$$S^2 = P^2 + Q^2, \quad S = \sqrt{3}UI$$

而设备元件损耗

$$\Delta P = 3I^2 R$$

同理，要降低 ΔP ，在电力线路末端集中负荷 P 一定时，只有降低 Q 。以变压器为例，在网潮流计算中，变压器有功损耗为

$$\Delta P_B = \Delta P_0 + \Delta P_d (S / S_n)^2$$

式中， ΔP_0 为变压器空载损耗； ΔP_d 为变压器短路损耗； S 为通过变压器的实际容量； S_n 为变压器的额定容量。在实际生产中，要降低 ΔP_B 只有降低 S 。由于 $S = P + jQ$ ，在 P 一定的情况下，通过无功补偿，降低变压器低压侧 Q ，就可以降低 ΔP_B 。一般情况下，在负荷低时，由于运行方式与经济投入存在无法调和的问题，变压器低压侧容性无功往往倒送，此时，要降低变压器无功损耗 ΔQ ，只要对流过变压器的 Q 进行补偿，即应在变压器低压侧补偿感性无功即可满足要求。在负荷高时，变压器低压侧吸取高压电网的容性无功，此时，要降低变压器无功损耗 ΔQ ，只要对变压器低压侧补偿容性无功即可^[2]。

2. 稳定受电端及电网电压，提高供电质量

图 1-3 中， Z 为线路总阻抗； R 为线路总电阻，主要由线路中导线的电阻决定； X 为线路总电抗，主要由线路中导线自感决定； Y 为线路总导纳； G 为线路总电导，主要由线路中导线电晕、绝缘介质损耗决定； B 为线路总电纳，主要由线路中导线排列及导线与大地间距离决定。当装设无功补偿前，网络电压可用下式表达：

$$U_1 = U_2 + (P \cdot R + Q \cdot X) / U_2 \quad (1-1)$$

式中， U_1 为首端电压； U_2 为末端电压； P 为穿越 Z 的有功功率； Q 为穿越 Z 的无功功率。

线路电压变化量为

$$\Delta U = (P \cdot R + Q \cdot X) / U \quad (1-2)$$

装设无功补偿 $Q \cdot X$ 后，电源电压 U_1 不变，变电所母线电压 U_2 变化到 U'_2 ，得出：

$$U_1 = U'_2 + [P \cdot R + (Q - Q \cdot X) \times X] / U'_2 \quad (1-3)$$

式中, R 为电阻; X 为电抗; U_1 为电源电压 (kV); U_2 为变电所母线电压 (kV); U'_2 为投入无功母线电压值 (kV)。

在式 (1-3) 中, 当 P 、 Q 一定且 Q 为感性无功, 补偿无功 $Q \cdot X$ 为容性时, U'_2 将增大; 当补偿无功 $Q \cdot X$ 为感性时, U'_2 将减小。这说明在变电站进行无功补偿时, 对系统电压将会产生影响, 用此方法可调整系统电压。实际电网运行中, 安全是第一位的, 因此, 电网电压是电网降损的约束条件, 电网降损程度往往在很大程度上取决于电网运行的需要。

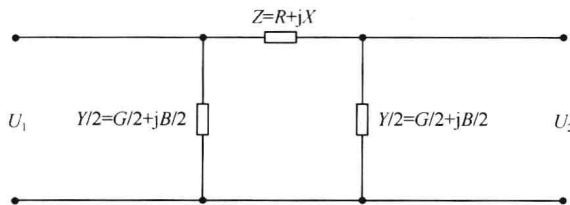


图 1-3 线路π型等值电路图

1.4 电力系统无功补偿的研究概况及发展趋势

1.4.1 常用的无功补偿装置

无功补偿应包含对基波无功功率的补偿和对谐波无功功率的补偿, 后者实际是谐波补偿。传统的无功补偿设备如同步发电机、同步电动机、同步调相机、固定容量的电容器、开关控制的并联电抗器等, 可满足一定范围的无功补偿要求, 但响应速度慢、维护困难、连续可控性差。虽然可控硅型的静止无功补偿器 (Static Var Compensation, SVC) 在电力系统中的应用取得了较好的效果, 但设备占地面积较大, 而且由于它对电网电压的波动表现出恒阻抗特性, 所以在电网电压波动时不能充分发挥其作用^[3]。

目前常用的无功补偿装置如图 1-4 所示。

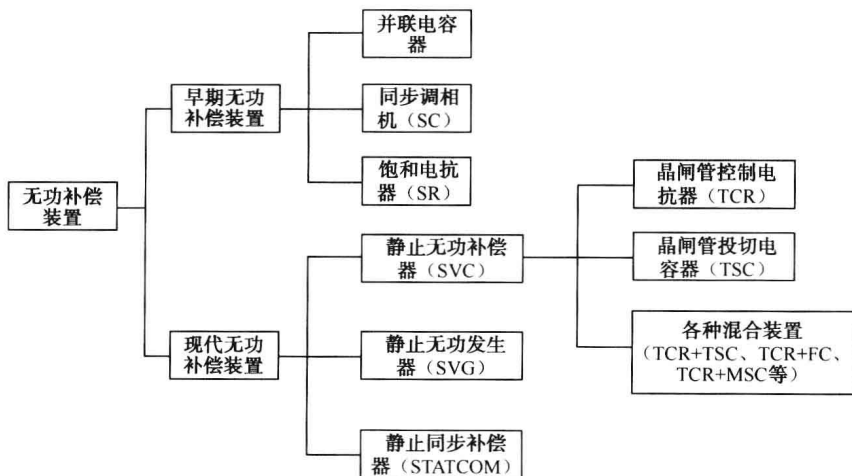


图 1-4 常用无功补偿装置

1.4.2 无功补偿技术的发展

早期电力系统常用的动态无功补偿装置只有调相机，调相机实质上是专门用来产生无功功率的同步电动机，在过励磁或欠励磁的情况下，能够分别发出不同大小的容性或感性无功功率。但是调相机和发电机一样属于旋转设备，有复杂的油、水系统，运行中损耗和噪声都比较大，运行维护复杂，响应速度慢，难以满足快速动态补偿的要求，它也不适用于太大或太小容量的无功功率补偿。随着控制技术的进步，它的控制性能有所改善，在无功补偿领域中至今仍在使用，但在技术上已明显落后。

现在广泛运用的无功补偿装置为并联电容器补偿。这种补偿方式简单、灵活、方便，在具有相同补偿容量的条件下补偿费用要比调相机低很多，因此并联电容器补偿得到了迅速发展，几乎取代了同步调相机，目前我国仍是主要的无功补偿方式。但是和同步调相机相比其只能补偿固定无功，而且当系统中存在谐波时，如果技术措施不当还有可能和系统发生并联谐振，导致谐波放大，致使电容器烧毁，当需要进行动态调节时一般只能采用电容器分组投切方式进行阶跃式调节。电容器和电抗器的接入改变了网络参数，特别是改变了波阻抗和系统母线上的输入阻抗，影响了系统的动态性能。如果要它们纠正短时电压升高或电压下降，则必须将它们迅速投入和切除，使用传统的机械开关装置实际上无法做到这一点。早期投切电容器组所使用的开关主要是真空接触器等机械式开关，投切过程中所承受电压或者电流比较大，如果负荷变化比较频繁，就会使开关频繁动作而大大降低其使用寿命。

后来使用晶闸管做成的无触点开关来进行电容器组（Thyristor Switched Capacitor, TSC）投切，极大地改进了开关的寿命和性能，但仍然无法对无功进行连续补偿。随着技术的发展出现了静止无功补偿器（SVC），早期的静止无功补偿装置是饱和电抗器（Saturated Reactor, SR），它与同步调相机相比，具有静止性的优点，响应速度快，但由于其铁芯需磁化到饱和状态，所以损耗和噪声都很大，而且存在非线性电路的一些特殊问题，又不能分相调节以补偿负荷的不平衡，未能成为静止无功补偿装置的主流。

到了 20 世纪 70 年代，大功率晶闸管应用技术的深入研究，出现了各种利用电力电子器件实现的静止无功补偿装置。现在所提出的无功补偿装置主要包括静止无功补偿器、静止无功发生器、统一潮流控制器等，这些装置都具有动态无功调节的能力，但是基于成本等多方面的原因，这些新型无功补偿装置还无法大量推广。



思考题

1. 什么是无功功率，无功功率有哪些作用？
2. 电力系统无功补偿分为几种类型，各有什么特点？
3. 电力系统无功补偿有什么作用？
4. 目前常用的无功补偿装置有什么？

第 2 章

电力系统无功补偿原理

本章导读

- 电容器无功补偿的基本原理。
- 静止无功补偿器的基本原理。
- 静止无功发生器的基本原理。
- 有源电力滤波器的基本原理。

通过第 1 章的学习，已经对无功补偿有了一个大概的了解，下面将对电力系统无功补偿的基本原理进行阐述。目前广泛采用的无功功率补偿装置有并联电容器、并联电抗器、各种类型的静止无功补偿器（Static Var Compensation, SVC）和静止无功发生器（Static Var Generator, SVG），以及有源电力滤波器（Active Power Filter, APF）等。

2.1 电容器无功补偿的基本原理

在 60kV 及以下的电网中，常安装电力电容器组来进行无功功率补偿，这是一种最实用、最经济的方法。它对提高负荷的功率因素、改善电压质量、减少网损、提高设备利用率及系统电压稳定性等具有十分重要的意义，已在工矿企业、民用建筑的供配电中得到了广泛使用。

电力电容器补偿的优点是有功损耗小，仅为额定容量的 0.4% 左右；无旋转部件，运行、安装维护方便；安装容易，地点可方便增减；个别电容器组损坏，不影响整个电容器组运行。缺点是它只能进行有级调节，不能进行平滑调节；通风不良，运行温度过高时，易发生膨胀爆炸；无功、电压特性不好，对短路稳定性差，切除后有残余电荷^[5]。