

ABSTRACT

Reactive power imbalance will result in voltage sag and the damage of electro-equipment. The power system voltage will collapse and the stability accident will be happened if aggravation. TSC is a widely used reactive compensation method. It has advantages of simple configuration and low cost. STATCOM has ascendant dynamic feature. Combine the both devices, on the premise of meet the necessary of dynamic properties. If let TSC replace part capacitance of STATCOM, the cost will be reduced.

The thesis introduces the fundamental structure and principle of TSC and STATCOM, establish the mathematical model and analyze the stability of STATCOM, and discuss the methods to reject self harmonic. Secondly, the control strategy is confirmed after analyze the characteristic of TSC and STATCOM. The control target of TSC is reactive power, and the control target of STATCOM is voltage. The most reactive power is compensated by TSC, STATCOM compensate the part of dynamic change. When design the control method of TSC+STATCOM, arm at the defect of nine-zone controlling method of TSC, the fuzzy control is adopted. Proceed from the principle of STATCOM, current remoteness control method is adopted after reasoning from the mathematical model.

The TSC+STATCOM are researched in the MATLAB/SIMULINK environment. The fuzzy logic toolbox is used to design the fuzzy control system of TSC, the result of simulation verified the validity of the control algorithm, also can increase the stability of system and reduce the action times of capacitor. The simulation model of TSC+STATCOM is established by using SIMULINK, through analyzed the simulation waveform diagram, the result indicates that TSC+STATCOM reactive compensation can meet the demands of increase the reactive factor, reject self harmonic and stabilize the system voltage, and show the reactive compensation method has great application value.

KEY WORDS Var compensation, Thyristor switched capacitor, Fuzzy control, Static synchronous compensation

原创性声明

本人声明，所呈交的学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了论文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得中南大学或其他单位的学位或证书而使用过的材料。与我共同工作的同志对本研究所作的贡献均已在论文中作了明确的说明。

作者签名： 严青平 日期： 2009 年 5 月 25 日

学位论文版权使用授权书

本人了解中南大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文并根据国家或湖南省有关部门规定送交学位论文，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以采用复印、缩印或其它手段保存学位论文。同时授权中国科学技术信息研究所将本学位论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并通过网络向社会公众提供信息服务。

作者签名： 严青平 导师签名： 龙建中 日期： 2009 年 5 月 27 日

第一章 绪论

1.1 论文选题的背景及意义

电力系统中的无功功率^[1]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，在电源和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升降和电能损失^[2]。

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、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，会引起有功功率损耗，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^[3-5]。

(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。

(2) 无功功率对电压的影响

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。

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 $+5\% \sim -10\%$ 的额定电压。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,必须确保各输电线路的母线电压稳定在允许的偏差范围内。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。

因此,无功补偿对电力系统十分重要,研究无功补偿有着重要的现实意义。

TSC 和 STATCOM 都是属于并联无功补偿方式^[6],在实际应用中,为降低整体成本,在满足特定补偿要求下,可将 STATCOM 与 TSC 组合起来,构成综合并联无功补偿。将 STATCOM 与 TSC 组合起来应用,在运行和性能上可以获得重大的优越性:

- (1) TSC 的成本较 STATCOM 低,但后者的动态性能更好,在满足所需动态性能的前提下,将部分容量的 STATCOM 用 TSC 取代,从而在整体上降低成本。
- (2) 获得较好的动态响应速度,STATCOM 能在 TSC 投运前快速提供容性输出。
- (3) 大大降低谐波含量,STATCOM 可通过适当设计和控制使得输出谐波很小。
- (4) 优化控制、降低损耗,STATCOM 能连续控制输出,通过与 TSC 配合,产生和吸收感性无功,实现最优化运行,降低整体损耗。

1.2 国内外研究现状

从电力系统的诞生开始,并联补偿技术就开始在电力系统中应用,同步调相机可以看作是最早的并联补偿装置^[7-9]。它是专门用来产生无功功率的同步电机。在过励磁和欠励磁的情况下,可以分别发出不同大小的容性和感性无功功率。在很长一段时间内,同步调相机在电力系统无功补偿中一度发挥主要作用。然而,由于它是旋转电机,运行维护复杂,响应速度较慢,随着负荷中心地区对环境要

求的提高,旋转设备带来的噪声等问题使居民越来越不满意。目前有些国家甚至已经不再使用同步调相机。

电力系统发电、输电、配电与用电必须同时完成,系统始终要处于动态的平衡状态,电力系统瞬时的不平衡可能导致安全稳定问题,因此要求并联补偿装置具有快速的响应,如达到周波级的响应速度,才能用于处理系统的问题。由于机械投切装置惯性大,动作时间在秒级,满足不了电力系统对快速性的要求,而随着大功率电力电子技术的发展,采用高压大容量快速的电子开关代替机械开关已经成为趋势。因此在 20 世纪 70 年代,出现了一系列的晶闸管投切的并联补偿装置和晶闸管控制的并联补偿装置,使电力系统的并联补偿进入了一个新的阶段。

TSC (Thyristor Switched Capacitor) 型 SVC (Static Var Compensator) 由电容器和双向导通晶闸管组成^[10],其装置图如图 1-1 (a) 所示。这里的晶闸管仅起开关的作用,TSC 只能提供容性电流,将多组 TSC 并联使用,根据容量需要逐个投入可以获得近似连续的容抗。TSC 虽然不会产生谐波且损耗较小,但它对于冲击性负荷引起的电压闪变不能进行很好的抑制。FC+TCR (Fixed Capacitor+Thyristor Controlled Reactor) 型 SVC 由 TCR 和若干组不可控电容器并联而成,图 1-1 (b) 为其装置图。其中,电容器为固定连接,TCR 支路采用触发延迟控制,形成连续可控的感性电流,TCR 的容量大于 FC 的容量,以保证既能输出容性无功功率也能输出感性无功功率。FC+TCR 型 SVC 虽响应速度快,但由于 TCR 在工作中产生的感性无功电流会被固定电容中的容性无功电流平衡,所以容易造成器件和容量的浪费,造成很大经济损失。TSC+TCR 型 SVC 一般使用 n 组电容器和一组晶闸管相控电抗器,图 1-1 (c) 为其装置图。它的无功输出可在容性和感性范围内调节,在电力系统大扰动期间或扰动过后,因其电容器和电抗器可分别切除和投入,因此可将瞬间过电压降到最低。

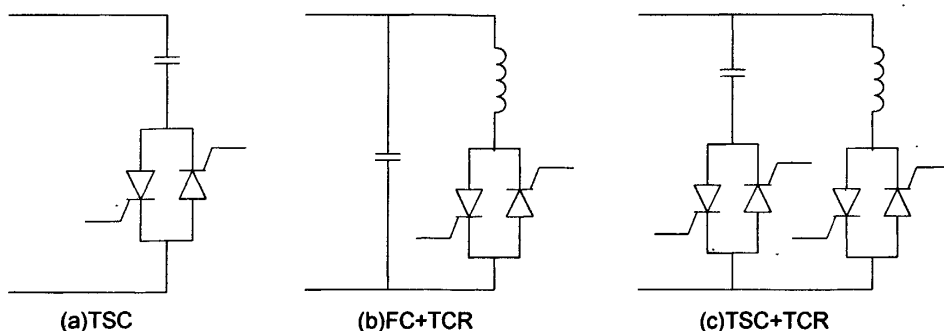


图 1-1 SVC 装置图

由于基于晶闸管的静止无功补偿装置具有优良的性能^[12],所以,近 10 年以

来,在世界范围内其市场一直在迅速而稳定的增长,已占据了静止无功补偿装置的主导地位。晶闸管投切的或控制的并联补偿装置彻底改变了机械投切装置或旋转装置速度慢的缺点,控制速度快,维护简单,成本较低,因此在电力系统中获得了大量的应用。但这些并联补偿装置本身也存在的问题,如晶闸管控制的装置只能以斩波方式工作,因此会产生较大的谐波^[1],其次这些装置并联接入电力系统后会改变系统的阻抗特性,过多安装这些设备可能导致系统振荡,而且正是由于这些设备还保留了阻抗型装置的一些特性,因此在系统电压偏低或偏高时,阻抗型装置的缺点(如电压低时电流也减小,导致补偿容量与电压平方成正比下降)影响了并联补偿装置的补偿效果。由于晶闸管的关断不能控制,因此开关频率低,对配电系统电能质量补偿能力弱。

随着高压大容量可关断器件,如 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)、GTO (Gate Turn-off Thyristor)、IGCT (Integrated Gate Commutated Thyristor) 器件的发展,20 世纪 80 年代出现了基于可关断器件的电压源或电流源变流器的并联补偿装置,这种并联补偿装置的特性完全脱离了阻抗型装置的特性,成为完全可控的电压源或电流源,使得并联补偿装置的性能得到较大的提升。由于可关断器件工作频率较高,变流器输出的谐波小,变流器工作范围大,输出电流独立于电压,因此在系统电压低时这种补偿装置具有很好的特性。而且基于变流器的并联补偿装置不需要大体积的电力电容器与电力电抗器,体积小,调节速度快,根据电力系统需要灵活配置。基于变流器并联补偿装置的典型代表是静止同步补偿器 (STATCOM, Static Synchronous Compensation) 装置^[13-14],如图 1-2 所示。20 世纪 90 年代以来,基于变流器的并联补偿装置在输电系统和配电系统中获得了越来越广泛的应用。它在电网中吸收和发送无功,使传输容量更接近热稳极限,调节电压,以及抑制电压闪变提高系统的暂态稳定水平,而在配电网中主要起补偿交流负载所需的无功分量,维持节点电压稳定,以及补偿可能出现的谐波这些作用。

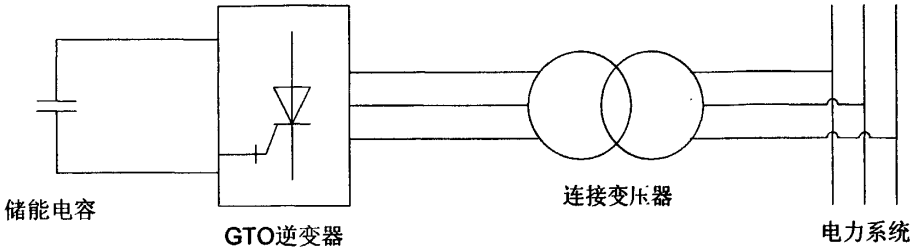


图 1-2 STATCOM 装置图

图 1-3 描述了无功补偿装置的发展情况概括。

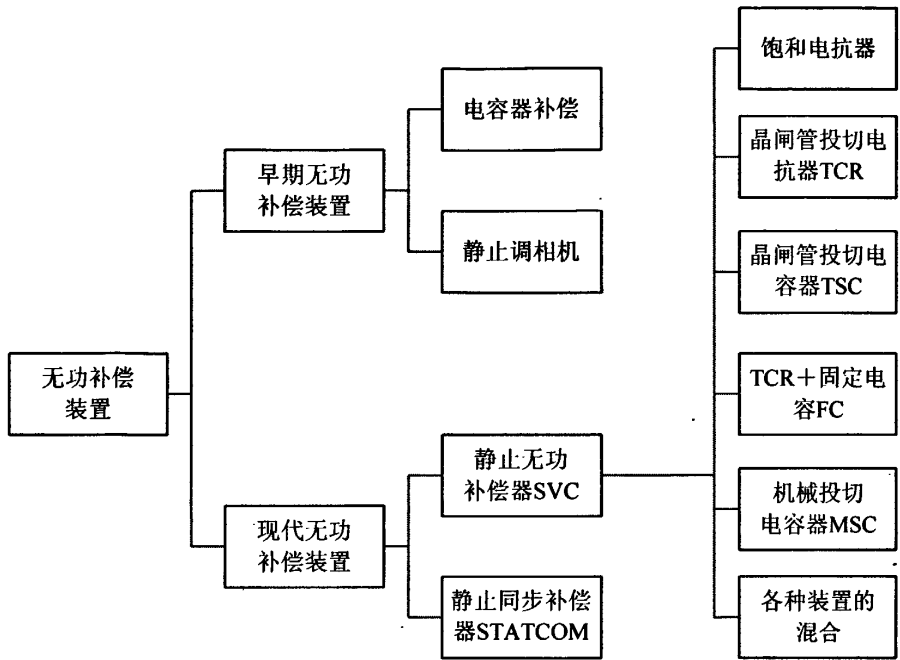


图 1-3 无功补偿装置发展框图

各种分立式的无功补偿装置有各自的特点和优势，在实际系统中，为了满足并联无功补偿各方面的要求，通常将它们结合起来使用。目前主要的组合方式有下面几种：

- (1) 固定电容+晶闸管控制电抗器型 (FC+TCR)，实际应用中，常用一个滤波网络来取代单纯的电容支路，能对 TCR 产生的谐波分量起着滤波的作用。
- (2) 晶闸管投切电容+晶闸管控制电抗型 (TSC+TCR)，由于 TCR 工作中产生的感性无功电流需要固定电容中的容性无功电流来平衡，因此需要实现输出从额定感性无功到容性无功的调节时，TCR 的容量则是额定容量的 2 倍，从而导致器件和容量上的浪费。TSC+TCR 型可以克服上述缺点。
- (3) 机械式投切电容+晶闸管控制电抗器型 (MSC+TCR)，在一些要求不高、电容器投切不频繁的应用场合，可以采用机械式开关代替 TSC 支路的晶闸管，有利于降低成本和损耗。
- (4) STATCOM+SVC，STATCOM 的容性和感性无功容量的可控范围对称，但实际应用中，对感性和容性无功容量的需求是不同的，因此将 STATCOM 与其它无功补偿设备结合起来可以解决这个问题，并降低整体成本。

1.3 论文的主要研究内容及章节安排

本文重点研究了 TSC 及 STATCOM 这两种无功补偿方式, 针对 TSC 的传统控制法——九区图控制法进行分析, 指出其缺陷, 研究了基于模糊控制的 TSC 型动态无功补偿控制器。该模糊控制器采用了二输入单输出的结构, 通过 MATLAB 建立了模糊控制系统的仿真模型, 仿真结果验证了该算法的有效性, 增加了系统的稳定性, 减少电容器动作的次数。对 STATCOM 主要研究了其主电路结构及工作原理, 并建立了 STATCOM 的动态数学模型, 其控制策略采用了电流的间接控制。通过 SIMULINK 建立了三电平四重化结构的 STATCOM 仿真模型, 仿真结果验证了 STATCOM 在无功补偿、稳定系统电压及消除自身谐波方面所起的重要作用。

论文的章节安排如下:

第一章论述了无功补偿的研究背景及意义; 介绍了无功补偿在国内外的研究发展现状; 最后, 提出了本论文的研究内容及论文总体框架。

第二章介绍了 TSC 及 STATCOM 这两种无功补偿方式的基本结构及原理。建立了 STATCOM 的数学模型, 讨论了其谐波消除技术的应用, 最后介绍了瞬时无功功率理论。

第三章重点研究了 TSC+STATCOM 的控制策略问题。其整体控制策略是: TSC 以无功功率为主要控制目标, 而 STATCOM 以电压为主要控制目标; 大部分无功功率由 TSC 补偿, STATCOM 主要补偿动态变化部分。具体设计 TSC+STATCOM 的控制方法时, 对 TSC 从传统的九区图控制法出发, 针对其缺点所在, 采用了模糊控制的控制方法; 对 STATCOM 从其工作原理出发, 进行数学模型的推理后, 采用了电流的间接控制策略。

第四章在 MATLAB/SIMULINK 环境下对 TSC+STATCOM 无功补偿进行了仿真研究。运用模糊逻辑工具箱对 TSC 的模糊推理系统进行了设计, 用两个随机函数代替模糊控制器的两个输入变量, 仿真结果显示了该模糊控制器的合理性。通过 SIMULINK 建立了 TSC+STATCOM 的仿真模型, 对仿真波形图进行了分析, 结果表明 TSC+STATCOM 无功补偿在提高功率因数、抑制自身谐波含量、稳定系统电压等方面均能满足要求。

第五章是结论与展望, 总结了全文的主要工作、收获和下一步工作的展望。

第二章 TSC 及 STATCOM 的基本结构和原理

2.1 TSC 的基本结构及原理

2.1.1 基本原理

单相的 TSC 的基本结构如图 2-1 所示, 它由电容器、双向导通晶闸管(或反并联晶闸管)和阻抗值很小的限流电抗器组成。限流电抗器的主要作用是限制晶闸管阀由于误操作引起的浪涌电流, 而这种误操作往往是由于误控制导致电容器在不适当的时机进行投入引起的。同时, 限流电抗器与电容器通过参数搭配可以避免与交流系统电抗在某些特定频率上发生谐振。TSC 有两个工作状态, 即投入和断开状态。投入状态下, 双向晶闸管(或反并联晶闸管)导通, 电容器(组)起作用, TSC 发出容性无功功率; 断开状态下, 双向晶闸管(或反并联晶闸管)阻断, TSC 支路不起作用, 不输出无功功率。在工程实际中, 一般将电容器分成几组, 每组都可由晶闸管投切。这样可根据电网的无功需求投切这些电容器, TSC 实际上就是断续可调的发出容性无功功率的动态无功补偿器^[15-16]。

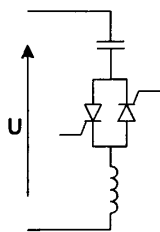


图 2-1 TSC 单相结构简图

2.1.2 投入时刻的选取

选取投切时刻总的原则是: TSC 投入电容的时刻, 也就是晶闸管开通的时刻, 必须是电源电压与电容器预先充电电压相等的时刻。因为根据电容器的特性, 当加在电容上的电压有阶跃变化时(若电容器投入的时刻电源电压与电容器充电电压不相等就会发生这样的情况), 将产生一冲击电流, 很可能破坏晶闸管或给电源带来高频振荡等不利影响。

一般来讲, 希望电容器预先充电电压为电源电压峰值, 而且将晶闸管的触发相位也固定在电源电压的峰值点。因为根据电容器的特性方程:

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} \quad (2-1)$$

如果在导通前电容器充电电压也等于电源电压峰值，则在电源峰值点投入电容时，由于在这一点电源电压的变化率（时间导数）为零，因此，电流 i_c 即为零，随后电源电压（也即电容电压）的变化率才按正弦规律上升，电流 i_c 即按正弦规律上升。这样，整个投入过程不但不会产生冲击电流，而且电流也没有阶跃变化，这就是所谓的理想投入时刻。

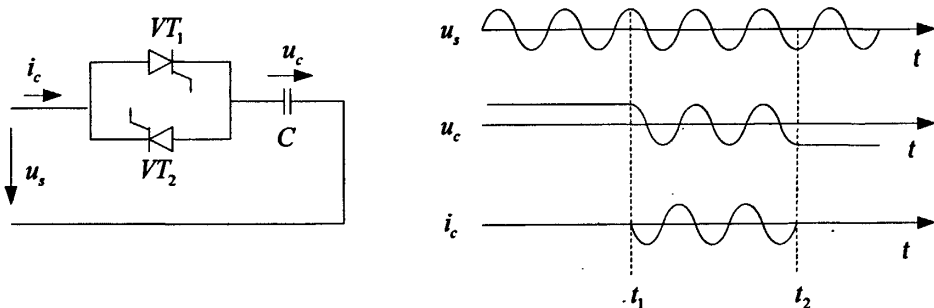


图 2-2 TSC 理想投切时刻原理

如图 2-2 所示，设电源电压为 u_s ，在本次导通开始以前，电容器的端电压 u_c 已通过上次导通时段最后导通的晶闸管 VT_1 充电至电源电压 u_s 的峰值，且极性为正。本次导通开始时刻取为 u_s 和 u_c 相等的时刻 t_1 ，给 VT_2 以触发脉冲而使之开通，电容电流 i_c 开始导通。以后每半个周波发出触发脉冲轮流给 VT_1 和 VT_2 。直到需要切除这条电容支路时，如在 t_2 时刻，停止发脉冲， i_c 为零，则 VT_2 关断， VT_1 因未获触发而不导通，电容器电压保持为 VT_2 导通结束时的电源电压负峰值，为下次投切电容器做了准备。

2.2 STATCOM 的基本结构及原理

2.2.1 STATCOM 的基本结构

简单的说，STATCOM 的基本原理就是将自换相桥式电路通过电抗器或者直接并联在电网上，适当地调节桥式电路交流侧输出电压的相位和幅值，或者直接控制交流侧电流，就可以使电路吸收或发出满足要求的无功电流，实现动态无功补偿的目的。

STATCOM 的基本电路结构^[17]分为两种：电压型桥式电路结构和电流型桥式电路结构。图 2-3 为 STATCOM 电路基本结构图，直流侧分别采用的是电容和电感这两种不同的储能元件。

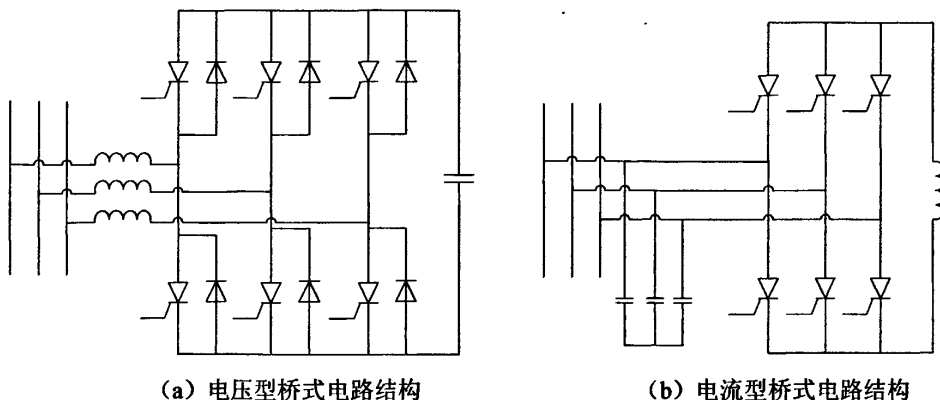


图 2-3 STATCOM 电路基本结构

对于电压型桥式电路，其直流侧以电容作为储能元件，将直流电压逆变为交流电压，通过串联电抗并入电网，其中串联电抗起到阻尼过电流、滤除纹波的作用；对于电流型桥式电路，其直流侧以电感作为储能元件，将直流电流逆变为交流电流送入电网，并联于交流侧的电容可以吸收换相产生的过电压。我们知道，在平衡的三相系统中，三相瞬时功率的和是一定的，在任何时刻都等于三相总的有功功率。因此总的看来，在三相系统的电源和负载之间没有无功功率的往返，各相的无功能量是在三相之间来回往返的。而 STATCOM 正是将三相的无功功率统一来进行处理的，所以理论上说，STATCOM 的桥式变流电路的直流侧可以不设无功储能元件。但实际上由于谐波的存在，使得总体看来，电源和 STATCOM 之间会有少许无功能量的往返。所以，为维持 STATCOM 的正常工作，其直流侧仍需一定大小的电容或电感作为储能元件，但所需储能元件的容量远比 STATCOM 所能提供的无功容量要小。而对传统的 SVC 装置，其所需储能元件的容量至少要等于其所提供的无功功率的容量。因此，STATCOM 中储能元件的体积和成本比同容量的 SVC 要小的多。在实际运行中，由于电流型桥式电路效率比较低，而且发生短路故障时危害比较大，所以迄今投入使用的 STATCOM 大都采用电压型桥式电路，因此 STATCOM 往往专指采用自换相的电压型桥式电路作为动态无功补偿的装置。

2.2.2 STATCOM 的基本原理

图 2-4 为 STATCOM 的原理示意图，其中直流侧为储能电容，为 STATCOM 提供直流电压支撑，逆变器通常由多个逆变桥串联或并联而成，其主要功能是将直流电压变换为交流电压，而交流电压的大小、频率和相位可以通过控制逆变器中可关断器件（如 GTO、IGBT、IGCT 等）的驱动脉冲进行控制。连接变压器将逆变器输出的电压变换到系统电压，从而使 STATCOM 装置可以并联到电力系统中。连接变压器本身的漏抗可以用于限制电流，防止逆变器故障或系统故障时

产生过大的电流。整个 STATCOM 装置相当于一个电压大小可调的电压源。设 STATCOM 装置产生的归算到系统侧的空载相电压为 $\dot{U}_1$, 系统相电压为 $\dot{U}_s$, 连接电抗为 X (将连接电抗视为纯电感), 则 STATCOM 装置输出的电流为:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_s}{jX} \quad (2-2)$$

因此, STATCOM 装置输出的单相视在功率为:

$$S = \dot{U}_s \hat{I} = \dot{U}_s \frac{\hat{U}_1 - \hat{U}_s}{-jX} \quad (2-3)$$

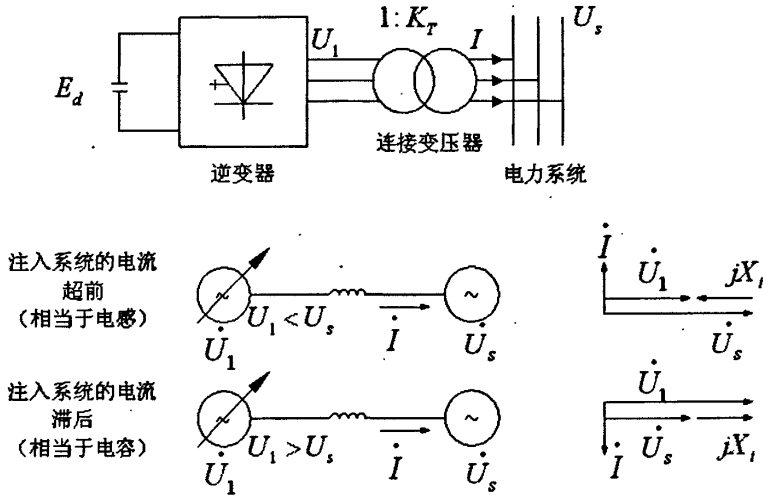


图 2-4 STATCOM 装置调节无功原理示意图

通常情况下, STATCOM 装置只吸收很小的有功功率或不吸收有功功率, 因此其产生的电压 $\dot{U}_1$ 与系统电压 $\dot{U}_s$ 相位相同, 因此 STATCOM 装置输出的单相无功功率为:

$$Q = \text{Im}(S) = \text{Im}(\dot{U}_s \frac{\hat{U}_1 - \hat{U}_s}{-jX}) = \frac{U_1 - U_s}{X} U_s \quad (2-4)$$

当 $\dot{U}_1$ 小于 $\dot{U}_s$ 时, 电流 $\dot{I}$ 超前电压 90° , STATCOM 吸收容性的无功功率; 当 $\dot{U}_1$ 大于 $\dot{U}_s$ 时, 电流 $\dot{I}$ 滞后电压 90° , STATCOM 吸收感性的无功功率。

考虑到连接电抗器的损耗和变流器本身的损耗 (如管压降、线路电阻等), 在这种情况下, 变流器电压 $\dot{U}_1$ 与电流 $\dot{I}$ 仍相差 90° , 因变流器不需提供有功能量。而电网电压 $\dot{U}_s$ 与电流 $\dot{I}$ 的相差则不再是 90° , 而是比 90° 小了 δ 角, 因此电网提供了有功功率来补充电路中的损耗, 也就是说相对于电网电压来讲, 电流 $\dot{I}$ 中有一定的有功分量。这个 δ 角是变流器电压 $\dot{U}_1$ 和电网电压 $\dot{U}_s$ 的相位差, 并且改变 $\dot{U}_1$,

的幅值, 则产生的电流 i 的大小也就随之改变, STATCOM 从电网吸收的无功功率也就得到调节。

因此, 当控制 STATCOM 装置产生的电压小于系统电压即 $U_i < U_s$ 时, STATCOM 装置向系统输出的无功功率 $Q < 0$, 此时 STATCOM 装置相当于电感; 当控制 STATCOM 装置产生的电压大于系统电压即 $U_i > U_s$ 时, STATCOM 装置向系统输出的无功功率 $Q > 0$, 此时 STATCOM 装置相当于电容。由于 STATCOM 装置产生的电压 U_i 的大小可以连续快速的控制, 因此 STATCOM 吸收的无功功率可以连续地由正到负进行快速调节。

2.3 STATCOM 数学模型的建立

如果没有精确的数学模型, 要对 STATCOM 进行深入了解是非常困难的, 因而要设计出优越的控制器也是很难的。对于一个物理对象的建模方法大致可以分为两种: 输入—输出建模法和拓扑结构建模法。一般的拓扑结构建模法建立的微分方程, 分别求解, 建立装置的数学模型是非常复杂的, 特别是当开关器件数量很多时, 拓扑结构急剧上升, 按照拓扑结构来分析非常困难。实际研究中, 我们更关心的是装置的输入—输出特性, 为此我们要建立输入—输出特性的数学模型, 而对装置中某个开关器件某时刻的电流, 并不是很关心, 只要保证该电流不超过开关器件允许的电流, 不会导致装置异常或故障就可以了。为此我们采用输入—输出的建模方法来建立 STATCOM 的数学模型, 这种数学模型对于 STATCOM 装置用于电力系统无功补偿控制已经足够精确了^[18]。

图 2-5 为 STATCOM 装置原理接线图, 为建立数学模型, 先做如下假设:

(1) 将 STATCOM 装置中各种损耗及电阻包括开关器件 (如 GTO、二极管) 的导通电阻用等效电阻表示, 如图中 R , 变压器漏电感及线路电感用等效电感表示, 如图中 L ;

(2) 由于 STATCOM 装置输出电压由多个单相桥叠加而成, 谐波含量低, 因此只考虑 STATCOM 输出电压的基波分量而忽略谐波分量。

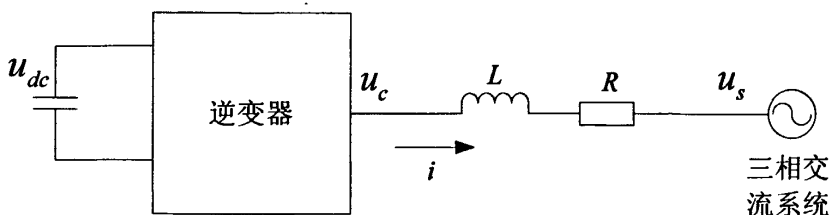


图 2-5 STATCOM 装置原理接线图

基于上面的假设及单相桥输出电压的表达式可以得到 STATCOM 装置变流器总的输出电压为:

$$\begin{cases} u_{ca} = Ku_{dc} \sin(\omega t - \delta) \\ u_{cb} = Ku_{dc} \sin(\omega t - 2\pi/3 - \delta) \\ u_{cc} = Ku_{dc} \sin(\omega t + 2\pi/3 - \delta) \end{cases} \quad (2-5)$$

其中 K 为比例系数, δ 为 STATCOM 输出电压与系统电压的夹角, 为可控量。而系统三相电压为:

$$\begin{cases} u_{sa} = \sqrt{2}u_s \sin \omega t \\ u_{sb} = \sqrt{2}u_s \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ u_{sc} = \sqrt{2}u_s \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (2-6)$$

根据 STATCOM 装置的原理图, 可以列出 STATCOM 装置的 abc 三相动态方程:

$$\begin{cases} L \frac{di_a(t)}{dt} = u_{ca}(t) - u_{sa}(t) - Ri_a(t) \\ L \frac{di_b(t)}{dt} = u_{cb}(t) - u_{sb}(t) - Ri_b(t) \\ L \frac{di_c(t)}{dt} = u_{cc}(t) - u_{sc}(t) - Ri_c(t) \end{cases} \quad (2-7)$$

将 (2-5) 和 (2-6) 代入 (2-7) 得:

$$\begin{cases} L \frac{di_a(t)}{dt} = Ku_{dc} \sin(\omega t - \delta) - \sqrt{2}u_s \sin \omega t - Ri_a(t) \\ L \frac{di_b(t)}{dt} = Ku_{dc} \sin(\omega t - 2\pi/3 - \delta) - \sqrt{2}u_s \sin(\omega t - 2\pi/3) - Ri_b(t) \\ L \frac{di_c(t)}{dt} = Ku_{dc} \sin(\omega t + 2\pi/3 - \delta) - \sqrt{2}u_s \sin(\omega t + 2\pi/3) - Ri_c(t) \end{cases} \quad (2-8)$$

而直流侧电容电压的动态方程可以由能量关系得到:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} Cu_{dc}^2(t) \right) = -[u_{ca}(t)i_a(t) + u_{cb}(t)i_b(t) + u_{cc}(t)i_c(t)] \quad (2-9)$$

将 (2-5) 代入 (2-9) 化简可得:

$$\frac{du_{dc}(t)}{dt} = \frac{-K}{C} [i_a(t) \sin(\omega t - \delta) + i_b(t) \sin(\omega t - 2\pi/3 - \delta) + i_c(t) \sin(\omega t + 2\pi/3 - \delta)] \quad (2-10)$$

因此 STATCOM 的数学模型为:

$$\begin{cases} L \frac{di_a(t)}{dt} = Ku_{dc} \sin(\omega t - \delta) - \sqrt{2}u_s \sin \omega t - Ri_a(t) \\ L \frac{di_b(t)}{dt} = Ku_{dc} \sin(\omega t - 2\pi/3 - \delta) - \sqrt{2}u_s \sin(\omega t - 2\pi/3) - Ri_b(t) \\ L \frac{di_c(t)}{dt} = Ku_{dc} \sin(\omega t + 2\pi/3 - \delta) - \sqrt{2}u_s \sin(\omega t + 2\pi/3) - Ri_c(t) \\ \frac{du_{dc}(t)}{dt} = \frac{-K}{C} [i_a(t) \sin(\omega t - \delta) + i_b(t) \sin(\omega t - 2\pi/3 - \delta) + i_c(t) \sin(\omega t + 2\pi/3 - \delta)] \end{cases} \quad (2-11)$$

可以看出, 数学模型包含四个未知数和四个方程, 只要已知 STATCOM 装置的电流和直流电压的初始值, 通过解微分方程即可求出各个变量随时间变化的规律。但上述数学模型为时变系数的微分方程, 理论分析比较困难, 为此我们利用电力系统中常用的经典派克变换 (也称 $dq0$ 变换, 为线性变换矩阵), 将时变微分方程变换为常系数微分方程。经典派克变换的矩阵为:

$$C = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ -\sin \omega t & -\sin(\omega t - 2\pi/3) & -\sin(\omega t + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (2-12)$$

将 abc 三相电流进行 $dq0$ 变换, 即令:

$$\begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \\ i_0(t) \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

对前述数学模型 (2-11) 进行变换得到 STATCOM 装置在 $dq0$ 坐标下的数学模型:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ u_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega & 0 & -\frac{K}{L} \sin \delta \\ -\omega & -\frac{R}{L} & 0 & -\frac{K}{L} \cos \delta \\ 0 & 0 & -\frac{R}{L} & 0 \\ \frac{3K}{2C} \sin \delta & \frac{3K}{2C} \cos \delta & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \\ u_{dc} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{2}u_s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

由于 STATCOM 装置为三相三线制系统, 三相电流之和为零, 所以上述方程中 i_0 始终为零, 因此可以将该方程去掉, 得到 STATCOM 的数学模型为:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ u_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega & -\frac{K}{L} \sin \delta \\ -\omega & -\frac{R}{L} & -\frac{K}{L} \cos \delta \\ \frac{3K}{2C} \sin \delta & \frac{3K}{2C} \cos \delta & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ u_{dc} \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{2}u_s \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2-15)$$

其中, ω 为 $dq0$ 坐标系下的旋转角频率, 与三相系统电压角频率相同; K 为逆变器调制比; R 、 L 分别为 STATCOM 装置的等值电阻和电感; C 为 STATCOM 直流侧电容值; δ 为 STATCOM 装置的输出电压与系统电压间的相角差; u_s 为系统电压; u_{dc} 为直流电容电压。

从式 (2-15) 可以看出, STATCOM 装置的动态模型主要包括五个参数 (R 、 L 、 C 、 K 、 ω) 和一个控制量 δ 。改变 δ 角即可控制 STATCOM 装置产生电压的大小, 从而控制 STATCOM 装置产生的无功功率的大小和性质。

2.4 STATCOM 稳定性分析

STATCOM 装置是否能够稳定运行, 是我们首先需要明确的。由式 (2-15) 可见, 当控制角 δ 为固定数值, K 为常数时, 微分方程为线性微分方程, 其稳定性主要取决于系数矩阵的特征根的情况, 如果所有特征根的实部均为负, 则 STATCOM 装置可以稳定运行, 否则 STATCOM 装置不能稳定运行。式 (2-15) 的系数矩阵为:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & \omega & -\frac{K}{L}\sin\delta \\ -\omega & -\frac{R}{L} & -\frac{K}{L}\cos\delta \\ \frac{3K}{2C}\sin\delta & \frac{3K}{2C}\cos\delta & 0 \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

其特征方程为:

$$|\lambda E - A| = 0 \quad (2-17)$$

将 (2-16) 代入 (2-17) 得到:

$$\lambda^3 + \frac{2R}{L}\lambda^2 + \left(\frac{R^2}{L^2} + \frac{3K^2}{2LC} + \omega^2\right)\lambda + \frac{3K^2R}{2L^2C} = 0 \quad (2-18)$$

上式为一元三次方程, 利用求根公式可以求出三个根, 根据根的实部情况可以判断微分方程的稳定性。由于求根公式比较复杂, 因此我们应用控制理论中的劳斯判据来判断方程所有的根是否均具有负实部。

对于方程 (2-18), 有:

$$a_3 = 1 > 0, a_2 = \frac{2R}{L} > 0, a_1 = \frac{R^2}{L^2} + \frac{3K^2}{2LC} + \omega^2 > 0, a_0 = \frac{3K^2R}{2L^2C} > 0$$

且

$$\begin{vmatrix} a_2 & a_0 \\ a_3 & a_1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{2R}{L} & \frac{3K^2 R}{2L^2 C} \\ 1 & \frac{R^2}{L^2} + \frac{3K^2}{2LC} + \omega^2 \end{vmatrix} = \frac{2R^3}{L^3} + \frac{3K^2 R}{2L^2 C} + \frac{2R\omega^2}{L} > 0 \quad (2-19)$$

由劳斯判据可知, 方程 (2-18) 的所有根均具有负实部, 因此微分方程 (2-15) 对任意固定的 δ 角和常数 K 都是稳定的, 即 STATCOM 装置是稳定的, 因此给定控制角后, STATCOM 装置可以稳定运行。

2.5 STATCOM 谐波消除技术

STATCOM 在进行无功功率补偿的时候, 其交流侧输出的是幅值等于直流侧电容电压的方波序列, 而不是正弦波的交流电压, 因此, 不可避免的会产生谐波分量。传统的做法是附加滤波器进行滤波, 但这会大大增加设备成本。对于采用了电力电子逆变技术的无功补偿方法, 我们可以通过适当的控制技术来消除输出电压和输出电流中的谐波成分, 主要可以从电路结构和脉冲触发方式两个方面来进行优化^[19-20]。

2.5.1 改善电路结构

1、多重化技术

由于单个变流器的输出波形是一系列的方波, 因此含有较多谐波成分。如果我们设计多个变流器, 将它们并联或串联连接, 使它们各自的输出波形在相位上相差一定的角度, 那么我们最终得到的将是接近正弦波的阶梯波形, 这是由于各变流器输出波形相互叠加的结果, 这就是变流器的多重化技术^[21]。另外, 利用多重化的方法, 还可以增大 STATCOM 的装置容量, 从而对系统的稳定发挥重要作用。电压型和电流型的变流器都可以实现多重化, 其中电压型要串联连接, 电流型要并联连接。图 2-6 是四个电压型变流器四重化的简单示意图。

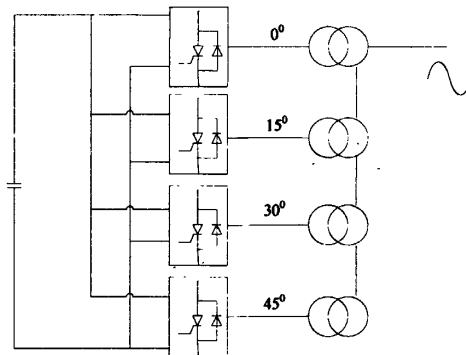


图 2-6 STATCOM 四重化主电路图

四个变流器各相输出电压在相位上依次相差 15° ，经串联后接入交流电力网。各变流器的相位关系可以在触发脉冲产生环节进行控制。其中各变流器 A 相电压波形和最终得到的 A 相电压波形如图 2-7 所示。

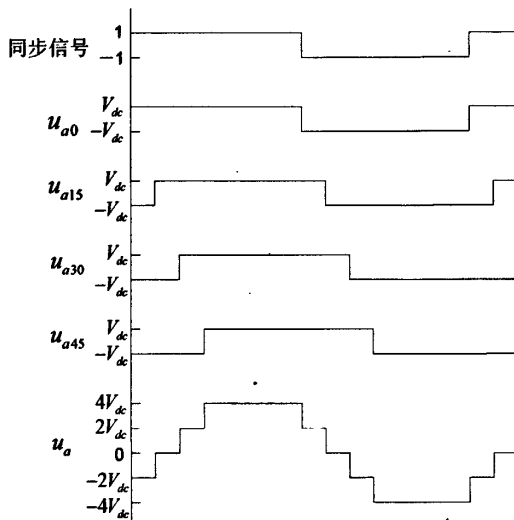


图 2-7 四重化 STATCOM 电压波形图

图中， U_{a0} 、 U_{a15} 、 U_{a30} 、 U_{a45} 分别表示 0° 、 15° 、 30° 、 45° 逆变器交流侧的 A 相电压波形，它们在相位上依次相差 15° ， U_a 是四个逆变器的连接变压器在次级绕组串联之后，得到的总的 A 相电压波形（其中 V_{dc} 是直流侧电容的电压）。由图中可以看出，此时得到的电压波形是接近正弦波的阶梯波形。理论上说，多重化的级数越多，谐波消除的效果就越好，但是由于主回路的相互作用，以及控制电路、输出变压器连接复杂化等原因，实际上采用的多重化的级数并不是很高。

2、多电平技术

STATCOM 通常采用的都是两电平（2-level）的变流器，其交流侧输出电压只有 $\pm V_{dc}$ 两个电平，所以谐波成分较多；而且随着输电线路电压水平的越来越高，对 GTO 等开关器件的耐压水平提出了较高的要求。虽然多重化方法可以解决这些问题，但是多重化的级数越多，所需的变流器就越多，主电路也会越复杂，从而造成供电企业成本的增加。

多电平技术正是充分利用 STATCOM 的主电路结构，通过多电平的变流器，采用特定触发方式，降低输出电压和输出电流的谐波成分，改善供电质量，同时降低装置的电压等级。目前通常有三种类型的多电平结构：快速电容器型变流器、级连型变流器和箝位二极管型变流器。其中由于箝位二极管型变流器由于结构简单而且易于控制所以应用比较普遍。图 2-8 是一个 5 电平的箝位二极管型多电平变流器的单相电路图。

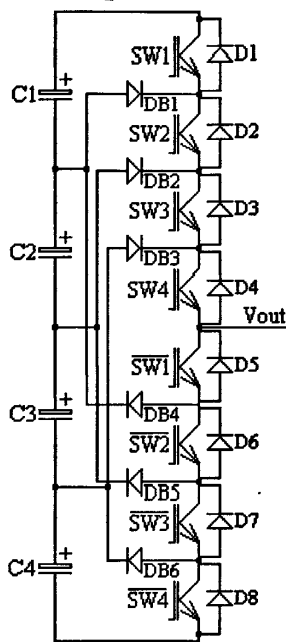


图 2-8 五电平箝位二极管型变流器

图中， $C1\sim C4$ 是直流侧的四个电容， $DB1\sim DB6$ 是箝位二极管， $SW1\sim SW4$ 和 $\overline{SW1}\sim\overline{SW4}$ 是单相上下两个桥臂的开关型器件，其中 $\overline{SW1}\sim\overline{SW4}$ 和 $SW1\sim SW4$ 的触发相位是互补的。假定每个电容有相同的电压 E ，则当依次按照表 2-1 的触发方式触发桥臂各开关时，在交流侧将产 0、 $\pm E$ 、 $\pm 2E$ 五个电平。

表 2-1 五电平箝位二极管型变流器触发方式

	SW1	SW2	SW3	SW4	Vout
mode 1	on	on	on	on	$2E$
mode 2	off	on	on	on	E
mode 3	off	off	on	on	0
mode 4	off	off	off	on	$-E$
mode 5	off	off	off	off	$-2E$

变流器交流侧的电压波形如图 2-9 所示。

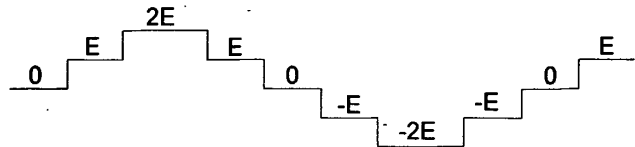


图 2-9 五电平箝位二极管型变流器相电压波形

从图 2-9 可以看出, 利用多电平技术, 也可以得到接近于正弦波的阶梯波形。从理论上说, 我们可以不断增加电平的次数来使输出的电压阶梯增多, 从而达到增大容量和抑制谐波的双重目的。但实际应用中每增加一个电平就意味着每个桥臂要增加一对箝位二极管从而使电路变得复杂, 而且多电平变流器的正常工作需维持各直流电容的电压相等, 这导致控制上的困难, 所以目前达到实用水平的仅是三电平。图 2-10 为三电平箝位二极管型变流器的单相电路图。

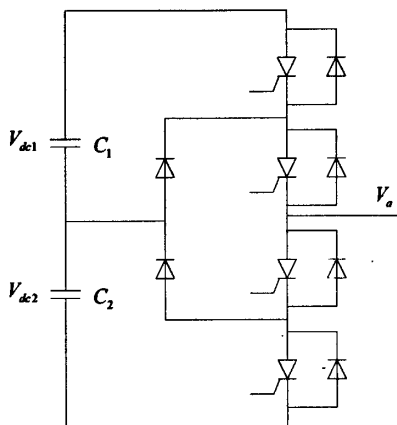


图 2-10 三电平箝位二极管型变流器

其交流侧输出电压可以在 0 、 $\pm V_{dc}$ (令 $V_{dc1} = V_{dc2} = V_{dc}$) 三个电平中变化, 因此可以对电压波形进行脉宽调节, 不像两电平变流器中, 线电压的脉宽为固定的 120° 。而且由于 0 电平的存在, 使得多电平变流器不会出现两电平变流器容易出现的上下桥臂短路的情况(两电平变流器通常在上下桥臂的触发脉冲中间加入死区, 以免短路)。通常情况下, 可以将三电平变流器进行适当的多重化连接, 充分利用各自的优点, 在更好的消除谐波的同时, 也进一步增加了装置的容量, 目前国内外的 STATCOM 研制大都基于这种方式。

2.5.2 优化脉冲触发方式

1、特定谐波消除脉宽调制 (SHE-PWM) 技术

特定谐波消除技术的工作原理就是在指令电压波形(也就是我们期望获得的 STATCOM 交流侧电压波形)的特定位置设置缺口, 通过控制各桥臂开关器件的触发顺序, 恰当地控制变流器脉宽调制电压的波形, 通过脉宽平均法把变流器输出的方波电压转换成等效的正弦波, 以消除某些特定次数的谐波。不过此方法必须采用多电平(一般为三电平)变流器, 因为只有这样才能实现脉冲的宽度调节。

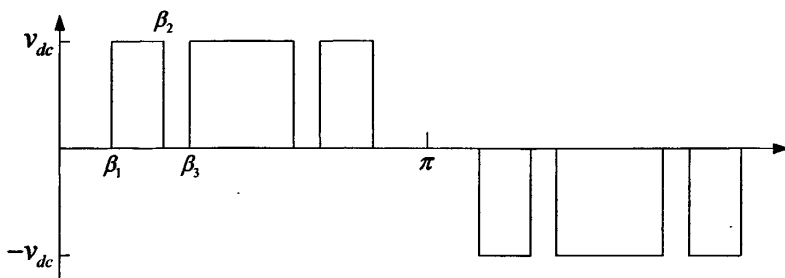


图 2-11 采用 SHE-PWM 技术的 STATCOM 输出电压波形

图 2-11 是采用了特定谐波消除技术的相电压三脉冲 PWM 波形，其中脉冲的幅度等于直流侧电容电压。由于相电压波形具有 1/4 周期对称性，适当选取时间轴，使相电压函数为奇函数，对其进行 Fourier 分解时余弦分量 a_n 和直流分量 a_0 均为 0，正弦分量为：

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} v_x \sin(n\omega t) d(\omega t) = \frac{4}{n\pi} v_{dc} [\cos(n\beta_1) - \cos(n\beta_2) + \cos(n\beta_3)] \quad (2-20)$$

如果驱动脉冲是由 m 个脉冲组成的，则 b_n 的通式可以表示为：

$$b_n = \frac{4v_{dc}}{n\pi} \sum_{i=1}^m (-1)^{i-1} \cos(\beta_i) \quad (2-21)$$

因此，如果希望消除相电压上的 n 次谐波，只需令 $b_n=0$ 即可。如果希望消除多个谐波分量，只需设定适当的缺口数，然后联立方程求解，得到一组 β 值，确定每个周期内脉冲的个数及相对位置，即可消除预定的谐波分量。

2、正弦脉宽调制（SPWM）技术

正弦脉宽调制技术的工作原理就是将我们想要得到的 STATCOM 交流侧的三相电压波形作为调制波，与三角波（称为载波）相交后得到一组矩形脉冲。然后再利用这组矩形脉冲触发变流器的各开关器件，则在变流器的交流侧可以获得脉冲宽度按正弦规律变化又和正弦波等效的矩形脉冲，其幅值等于变流器直流侧电容的电压。

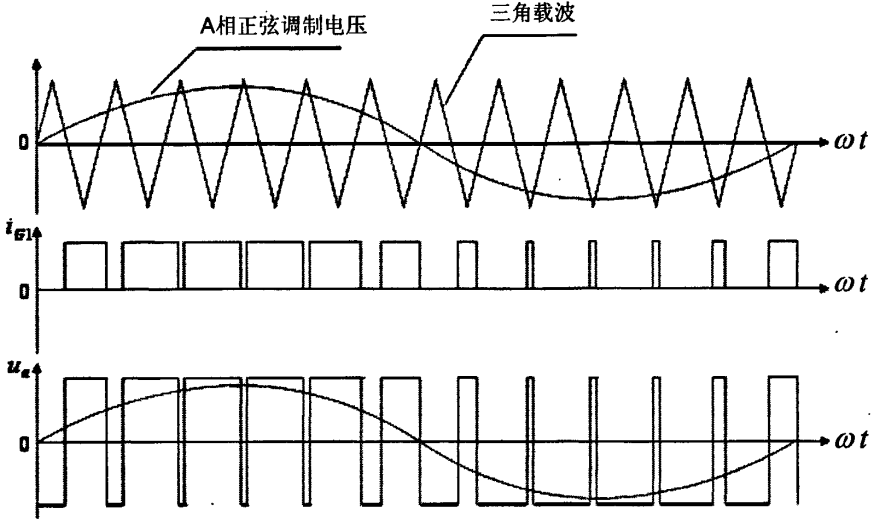


图 2-12 STATCOM A 相 SPWM 波形

图 2-12 所示的是 STATCOM 采用 SPWM 技术产生的单相电压波形图。图中，由 A 相正弦调制电压与三角载波的交点确定触发脉冲的相位和宽度，其中， i_{G1} 是变流器的 A 相上桥臂的触发脉冲波形（调制电压大于载波电压的区域），下桥臂的触发脉冲波形正好与其互补（调制电压小于载波电压的区域），则在 STATCOM 交流侧可以获得等效于正弦波的一组 A 相电压脉冲波形 u_a 。

2.6 瞬时无功功率理论及其在 STATCOM 中的应用

静止同步补偿器 STATCOM 对电量变化的实时检测有很高的要求，检测技术的快速、准确及灵活性直接影响到静止同步补偿装置的跟踪补偿特性。传统的电力系统的交流电流和电压的有效值、有功功率、无功功率的概念都是建立在工频周期的基础上的。例如对于单相交流电路，设其电压和电流分别为：

$$\begin{cases} u(t) = \sqrt{2}U \cos t \\ i(t) = \sqrt{2}I \cos(\omega t - \phi) \end{cases} \quad (2-22)$$

将 $i(t)$ 分解为 $i_p(t) + i_q(t)$ ，其中 $i_p(t)$ 为与 $u(t)$ 同相的分量，称之为有功电流分量， $i_q(t)$ 为与 $u(t)$ 相差 90° 的分量，称之为无功电流分量，则：

$$\begin{cases} i_p(t) = \sqrt{2}I \cos \phi \cos \omega t \\ i_q(t) = \sqrt{2}I \sin \phi \sin \omega t \end{cases} \quad (2-23)$$

定义其有功功率为电压与相应电流有功分量乘积在一周期内的平均值，即：

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i_p(t) dt \quad (2-24)$$

定义其无功功率为电压与相应电流无功分量乘积在一周期内的最大值，即：

$$Q = \max_{0 \leq t \leq T} u(t) i_q(t) \quad (2-25)$$

其中， $T = \frac{2\pi}{\omega}$ 为其周期。

对于三相交流电路，定义其有功功率为三个单相电路有功功率之和，无功功率为其三个单相电路无功功率之和。

从上述有功功率、无功功率的定义可以看出，它们只能表征一周期内功率变化的情况。而对于时间常数小于一周期的 STATCOM 装置，采用上述功率定义无法准确地描述装置在一个时间常数的时间（对于 50Hz 的系统为 20ms）内有功功率和无功功率的变化。

2.6.1 瞬时无功功率理论

设三相电路各相电压和电流的瞬时值分别为 u_a 、 u_b 、 u_c 和 i_a 、 i_b 、 i_c 分别经 α - β 变换，可得到：

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = C_{32} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2-26)$$

式中

$$C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \quad (2-27)$$

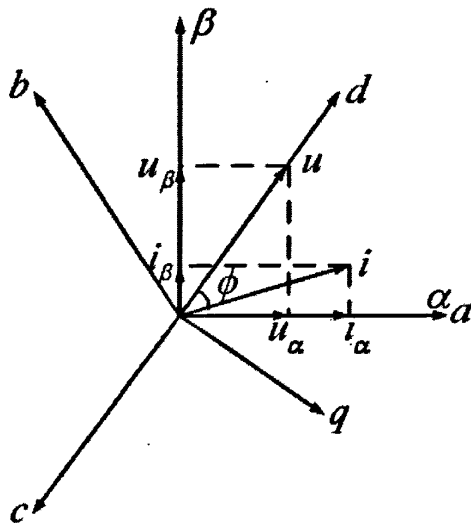


图 2-13 矢量图

在图 2-13 中, 旋转电压矢量 u 和旋转电流矢量 i 的相位分别为 ϕ_e 、 ϕ_i , 旋转电压矢量 u 和旋转电流矢量 i 的模为 U 、 I 。

$$\begin{cases} u_\alpha = U \cos \phi_e \\ i_\alpha = I \cos \phi_i \\ u_\beta = U \sin \phi_e \\ i_\beta = I \sin \phi_i \end{cases} \quad (2-28)$$

选取两相正交的旋转坐标系 d - q 的 d 轴与矢量 u 重合, q 轴滞后 d 轴 90° , 如矢量图所示, 电流 i 在 d 轴上的投影分量 i_d 是有功电流, 在 q 轴上的投影分量 i_q 是无功电流。

$$\begin{cases} i_d = I \cos \phi = I \cos(\phi_e - \phi_i) = i_\alpha \cos \omega t + i_\beta \sin \omega t \\ i_q = I \sin \phi = I \sin(\phi_e - \phi_i) = i_\alpha \sin \omega t - i_\beta \cos \omega t \end{cases} \quad (2-29)$$

上两式可简化为

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ \sin \omega t & -\cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = C_{pq} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2-30)$$

式中, $C_{pq} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ \sin \omega t & -\cos \omega t \end{bmatrix}$ 是两相静止 α - β 变量到两相旋转 d - q 变量的转换矩阵。

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ \sin \omega t & \sin(\omega t - 2\pi/3) & \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2-31)$$

设三相系统电流为正弦电流, 其幅值为 I_m , 则

$$\begin{cases} i_a = I_m \cos(\omega t - \phi) \\ i_b = I_m \cos(\omega t - \phi - 2\pi/3) \\ i_c = I_m \cos(\omega t - \phi + 2\pi/3) \end{cases} \quad (2-32)$$

三相静止 a 、 b 、 c 坐标到两相静止 α - β 坐标为

$$\begin{cases} i_\alpha = \sqrt{\frac{3}{2}} I_m \cos(\omega t - \phi) = I \cos(\omega t - \phi) \\ i_\beta = \sqrt{\frac{3}{2}} I_m \sin(\omega t - \phi) = I \sin(\omega t - \phi) \end{cases} \quad (2-33)$$

电流空间旋转矢量 $I = \sqrt{3/2} I_m$, 为相电流幅值的 $\sqrt{3/2}$ 倍, 所以得到的有功和无功电流为:

$$\begin{cases} i_d = \sqrt{\frac{3}{2}} I_m \cos \phi = I \cos \phi \\ i_q = \sqrt{\frac{3}{2}} I_m \sin \phi = I \sin \phi \end{cases} \quad (2-34)$$

值得注意的是, 这里计算有功电流和无功电流只需同一时刻三相三线制系统的三相电压和电流的值, 而传统的有功电流定义和无功电流定义却需要一个周期的值才能计算出来。因此采用这种计算方法可以大大节省功率的计算时间。

定义: 三相电路瞬时无功功率 q 和瞬时有功功率 p 为:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = u \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (2-35)$$

将上式整理后可得:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \\ u_\beta & -u_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2-36)$$

则有:

$$q = u_\beta i_\alpha - u_\alpha i_\beta \quad (2-37)$$

2.6.2 瞬时无功功率理论在 STATCOM 中的应用

三相电路的瞬时无功功率理论^[22-23]自上世纪 80 年代提出以来, 在许多方面得到成功应用。该理论突破了传统的以平均值为基础的功率定义, 系统地定义了瞬时无功功率、瞬时有功功率等瞬时功率量。以此为基础, 应用到静止同步补偿器 STATCOM 的研究中, 检测瞬时无功功率与无功电流。

在 STATCOM 中, 首先需要测量系统需要补偿的无功功率量, 应用以上介绍的瞬时无功功率理论, 测量所得三相电压和三相电流, 可得到无功功率为:

$$q = \frac{1}{\sqrt{3}} [(u_b - u_c)i_a + (u_c - u_a)i_b + (u_a - u_b)i_c] \quad (2-38)$$

2.7 小结

本章介绍了 TSC 及 STATCOM 的基本结构和原理, 重点对 STATCOM 的工作原理进行了详细的描述, 并建立了 STATCOM 的动态数学模型, 应用劳斯-赫尔韦兹判据对其稳定性进行分析, 表明 STATCOM 装置可以稳定运行。

研究了 STATCOM 自身谐波消除技术, 采用多电平多重化的主电路结构或者优化脉冲触发方式均可以有效的消除 STATCOM 自身的谐波。本章最后介绍了瞬时无功功率理论及其应用。

第三章 TSC+STATCOM 控制策略的研究

3.1 TSC+STATCOM 整体控制策略

对于 TSC, 由其基本结构和原理可知, 两个反并联晶闸管只是起将电容器并入电网或从电网断开的作用, 串联的小电感只是用来抑制电容投入电网时可能造成的冲击电流, 在工程实际中一般将电容器分成组, 每组都可由晶闸管投切, 因而可根据电网的无功需求投切电容器, TSC 实际上就是断续可调的发出无功功率的动态无功补偿装置。TSC 虽然不能连续补偿无功, 且只能输出容性无功, 但凭借其成本低, 运行时不产生谐波, 自身能耗小等优点, 近 10 年以来, 在世界范围内其市场一直在迅速而稳定的增长。其主要缺点是对配电系统电能质量补偿能力弱。

STATCOM 是由三相逆变器和并联电容器构成的, 其输出的三相交流电压与所接电网电压的三相电压同步。连接变压器通过的电流等于零或呈容性或呈感性, 取决于一、二次电压的幅值, 因此整个装置的无功功率的大小或极性都由通过它的电流来调整, 从而调整输电线路的无功功率, 动态地使电压保持在一定范围之内, 以利于提高电力系统稳定。STATCOM 不仅可校正稳态运行电压, 还可以在故障后恢复期间高速稳定电压, 这点对提高电力系统暂态稳定十分重要, 因此, STATCOM 对电网电压的控制能力很强。

综合考虑 TSC 及 STATCOM 的特点后, 对 TSC+STATCOM 采用的整体控制策略是: TSC 以无功功率为主要控制目标, 而 STATCOM 以电压为主要控制目标; 大部分无功功率由 TSC 补偿, STATCOM 主要补偿动态变化部分。

3.2 TSC 的控制策略

3.2.1 九区图法控制原理

对 TSC 的控制策略^[24-26], 传统的方式是采用九区图法。九区图控制法^[27-28]是将电压和无功的区域结合起来, 组成一个平面, 在该平面内分为 9 个区域。分别为: 电压无功合格区, 电压越上限、无功越上限, 电压越上限、无功合格, 电压越上限、无功越下限, 电压合格、无功越下限, 电压合格、无功越上限, 电压越下限、无功越下限, 电压越下限、无功合格, 电压越下限、无功越上限 9 个区域。每个分区有不同的控制规则, 以这样的策略来控制电压和无功。

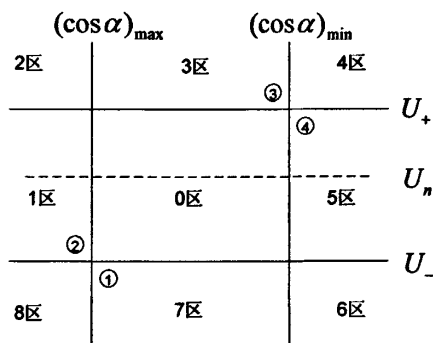


图 3-1 九区图控制法原理图

九区图控制法原理图如图 3-1 所示, U_+ 和 U_- 是电压偏差的上、下限值, U_n 是标准电压值, $\cos \alpha$ 下限是功率因数偏差下限值 (无功上限值), $\cos \alpha$ 上限是功率因数偏差上限值 (无功下限值), 图 3-1 中纵坐标是电压, 电压偏差的上、下限由变电站的运行要求决定; 无功功率的上、下限值则由补偿电容器的容量以及电网是否要求该站向电网输送无功功率来决定。根据控制要求划分, 各个区的常规控制策略如下:

0 区: 电压合格, 无功功率合格, 不操作。

1 区: 电压合格, 无功越下限 (过补偿)。发切除电容的指令。若电容已切完, 无功仍然越下限, 停发切电容指令, 发降压指令。

2 区: 电压越上限, 无功越下限 (过补偿)。先发切除电容指令, 到无功补偿合适时, 若电压还高, 转发降压指令。

3 区: 电压越上限, 无功合格。发降压指令, 直到电压降低至合格为止。

4 区: 电压越上限, 功率因数越下限 (无功越上限)。先发降压指令, 待电压降至合格后, 再发投电容器组指令, 直到电容器合适为止。若电容器已投完, 无功仍然越上限值, 则停发投电容器指令。

5 区: 电压合格、功率因数越下限 (无功越上限)。发投电容器组指令, 投入电容器组直至无功补偿合适为止。若电容投完, 则停发投电容指令, 发升压指令。

6 区: 电压越下限、功率因数越下限 (无功越上限)。发投电容器组指令, 投入电容器组直至无功补偿合适为止。若电容投完, 则停发投电容指令。

7 区: 电压越下限、无功合格。发升压指令, 直到电压升至合格为止。

8 区: 电压越下限、无功越下限 (过补偿)。先发升压指令, 待电压升至合格后, 再发切电容指令, 切至无功补偿合适为止, 若电容已切完, 无功仍越下限值, 也自动停发切电容指令。

3.2.2 九区图法的缺点

九区图控制原理存在的问题主要是: 控制策略是基于固定的电压无功上下限

而未考虑无功调节对电压的影响及其相互协调的关系;用于运算分析的信息有分散性、随机性的特点,造成了控制策略的盲目和不确定性,实际表现为设备频繁调节。

如图 3-1 所示,当系统运行于第 7 区的运行点①时,无功合格、电压偏低,这时应该是调节变压器分接头,使电压升高。可是电压和无功是相互影响的,电压升高,功率因数会变大,这时运行点有可能进入 1 区在②点运行。1 区电压合格、无功越下限,应该切电容,如果这时已经没有电容器可切除则降低电压,这样的策略又会影响电网中的无功功率,有可能使运行点回到①点。因此造成升压→降压→升压→降压……这样的操作指令,使运行点在 1 区和 7 区之间来回振荡,反之也是同样。

这样的情况在运行点③点和④点之间也会存在,具体是如果运行点在 3 区的③点,这时应该执行的操作是降低电压,这样会导致电网中无功功率升高,运行点有可能进入 5 区在④点运行。这时根据 5 区的策略应该投电容器,如果没有电容器可以投入的话应该升高电压。因此造成了降压→升压→降压→升压的操作指令,使运行点在 3 区和 5 区之间来回震荡,反之也是同样。

以九区图为控制策略的装置在实际运行中,其缺点主要表现在当电网(变电站)在某些运行区域(九区图中的区域)时,会增加电容器的动作次数,提高检修频率,影响电器设备的使用寿命。

3.2.3 基于模糊控制的 TSC 控制策略

针对九区图控制法的缺点,本文研究了一种基于模糊控制的控制策略^[29-33],其主要思想是将电压和无功(或功率因数)相对于标准值的偏差作为模糊推理器的输入,进行模糊推理,输出的是电容器的投切动作,在设计控制规则时以无功偏差为主要考虑方面。

(1) 确定系统的控制量、被控量及模糊控制器的结构

考虑控制调节的目标是:电压在合格的范围内,无功基本保持平衡,尽量减少调节次数。选电压和无功的偏差作为模糊控制器的输入量,即选择一阶控制模型。

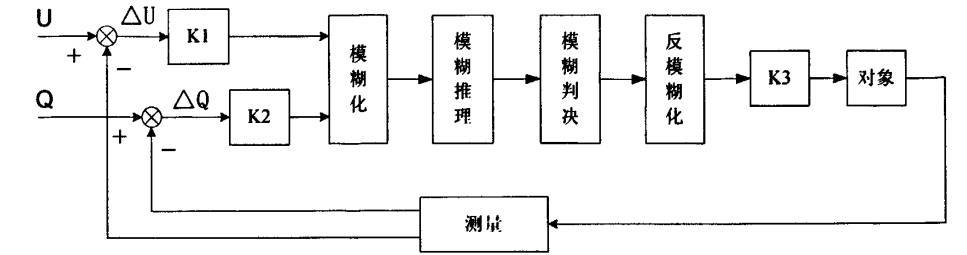


图 3-2 模糊控制器结构图

本文采用的模糊控制器的结构如图 3-2 所示, 选择电压偏差 ΔU 及无功偏差 ΔQ 作为模糊控制器的输入变量, 选择无功功率的补偿量 ΔC 作为模糊控制器的输出变量, 从而构成 2 输入单输出的模糊控制系统。

(2) 输入、输出变量模糊化

将 ΔU 、 ΔQ 、 ΔC 的变化范围设定为 $[-6, +6]$ 区间连续变化量, 使之离散化, 构成含 13 个整数元素的离散集合:

$$\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$$

在实际中, ΔU 、 ΔQ 、 ΔC 输入量的变化范围在 $[a, b]$ 、 $[c, d]$ 、 $[e, f]$ 之间, 则比例因子为 $K1=12/(b-a)$, $K2=12/(d-c)$, $K3=12/(f-e)$ 。模糊量的语言定义为: {负大 (NB), 负中 (NM), 负小 (NS), 零 (ZO), 正小 (PS), 正中 (PM), 正大 (PB) }

隶属度函数的选择主要是完成模糊化这部分工作, 选择适当的隶属度函数, 可以对模糊输入量进行合理的模糊化, 从而转变成为模糊向量。对于模糊变量进行赋值有多种形式, 在实际应用中主要有梯形、三角形。在工程应用中多用三角形法, 本文选用了三角形法:

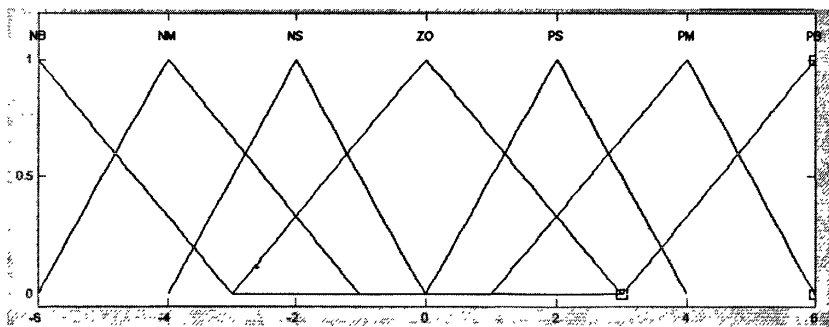


图 3-3 ΔU 隶属度函数

图 3-3 是模糊输入变量 ΔU (电压偏差) 的隶属函数。

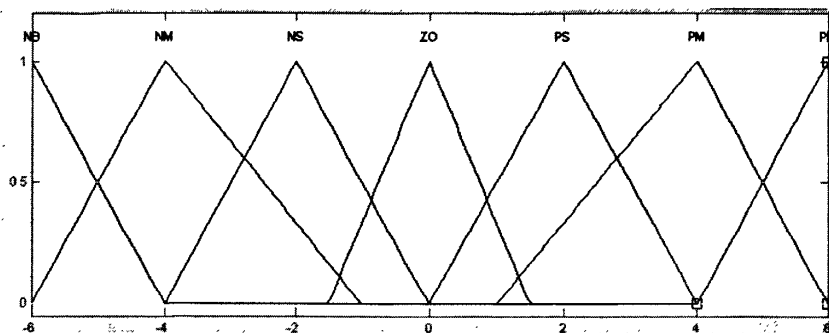


图 3-4 ΔQ 隶属度函数

图 3-4 是模糊输入变量 ΔQ （无功偏差）的隶属函数。

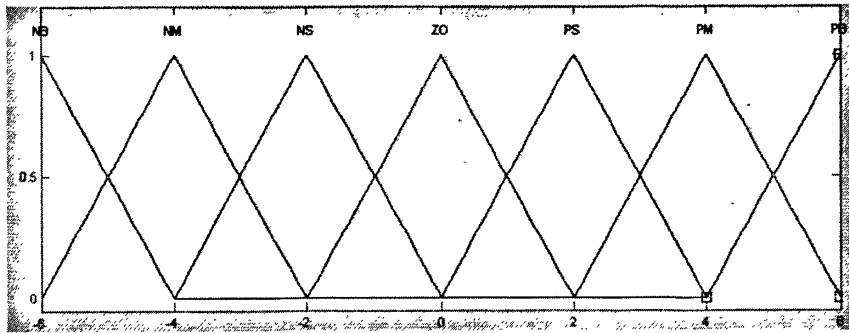


图 3-5 ΔC 隶属度函数

图 3-5 是模糊输出变量 ΔC （电容器组的控制量）的隶属函数。

(3) 模糊控制规则

建立用模糊语言归纳的控制策略，并据此建立状态作用表，按照操作经验，给出无功控制器的模糊控制规则。

模糊控制规则可以用如下模糊语句的形式来描述：

IF X_1 is NB AND X_2 is NB THEN Y is NM

结合实际工作人员的经验，可以得到模糊控制器的控制规则表，制定该规则表时以无功偏差为主要考虑对象，因为有 STATCOM 装置的存在，所以无功偏差为负小和正小时，制定规则时输出为零，具体如表 3-1 所示。

表 3-1 模糊控制器控制规则表

Y X2 X1	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NM	NM	ZO	ZO	ZO	PS	PM
NM	NM	NM	ZO	ZO	ZO	PS	PM
NS	NB	NM	ZO	ZO	ZO	PS	PB
ZO	NM	NM	ZO	ZO	ZO	PM	PM
PS	NB	NM	ZO	ZO	ZO	PM	PM
PM	NB	NM	ZO	ZO	ZO	PS	PM
PB	NB	NM	ZO	ZO	ZO	PS	PS

（其中 X_1 为 ΔU ， X_2 为 ΔQ ， Y 为 ΔC ）

(4) 模糊推理

确定了模糊推理系统的模糊输入变量, 输入变量的隶属度函数和控制规则, 就可以对模糊推理系统进行模糊推理。本文采用 Mamdani 推理法。Mamdani 推理法是一种在模糊控制中普遍使用的方法, 在本质上是一种合成推理方法。Mamdani 模糊蕴含关系 $A \rightarrow B$ 用 A 和 B 的直积表示, 即有: $A \rightarrow B = A \times B$, 即 $R(u, v) = A(u) \wedge B(v)$ 。

推理算法采用模糊取式推理方法:

已知模糊蕴含关系 $A \rightarrow B$ 的关系矩阵, 对给定的 A' , $A' \in U$, 则可推得结论 $B' \in V$, 且 B' 为:

$$B' = \sup_{u \in U} \{A'(u) \wedge (A(u) \wedge B(u))\}$$

(5) 解模糊

在得到模糊关系矩阵之后, 将输入变量的向量和关系矩阵运算, 可以得到输出量的模糊子集。将输出量的向量通过非模糊的方法, 可以计算出输出量模糊论域中的一个值, 建立控制表。本文采用了重力中心法对被控量进行解模糊。其计算方法为:

$$y(\varepsilon) = \frac{\int \mu_B(y) y dy}{\int \mu_B(y) dy}$$

3.3 STATCOM 的控制策略

STATCOM 装置的控制系统^[34-35]是 STATCOM 装置的核心之一, 它通过产生并控制驱动开关器件的脉冲来控制装置的运行, 完成 STATCOM 装置需要完成的各种任务。对 STATCOM 装置的控制系统有如下的要求:

(1) 控制速度快: 由于 STATCOM 装置本身的响应速度在几十毫秒级, 因此对控制系统的快速性提出了很高的要求, 通常要求控制系统本身的反应时间在 1ms 以下。

(2) 高精度的控制脉冲: 采用电压源逆变器结构的 STATCOM 装置, 连接电抗 (或等值电抗) 较小, 驱动脉冲产生一个小的角度误差可能导致 STATCOM 装置出现过电流, 同时由于 STATCOM 装置的损耗很小 (大型 STATCOM 装置的效率都要求在 96% 以上), 因此等效电阻 R 很小, 根据 STATCOM 装置稳态无功的公式, 控制角度很小的偏差将导致 STATCOM 装置无功功率很大的变化, 因此也要求控制脉冲具有很高的精度, 通常要求 STATCOM 装置的驱动脉冲误差小于 0.1° 电角度 (对于 50Hz 的系统, 20ms 对应 360° 电角度), 即相当于 $5.5 \mu s$ 。

(3) 多功能、多目标控制: STATCOM 装置响应速度快, 可以快速平滑地

从容性到感性调节无功功率,因此对维持系统电压,改善电力系统动态特性,阻尼电力系统振荡,提高电力系统静态稳定性、暂态稳定性具有良好的应用前景。为充分发挥 STATCOM 装置的潜力,STATCOM 装置的控制系统必须具有多种功能和目标,如调节无功功率、稳定系统电压、阻尼系统振荡等,因此要求 STATCOM 装置的控制系统必须是具有完成多种功能和目标的控制系统。

控制策略的选择应根据补偿器要实现的功能和应用场合,以决定采用开环控制、闭环控制或者两者相结合的控制策略,使得控制器能适应电力系统参数的变化,充分发挥装置的控制效果。STATCOM 外闭环调节器输出的控制信号则被视为补偿器应产生的无功电流的参考值。正是在如何调节无功电流环节上,形成了多种多样的控制方法。

在控制策略上,STATCOM 和传统的 SVC 有所不同,在 SVC 中,由外闭环调节器输出的控制信号用作 SVC 等效电纳的参考值,以此信号来控制 SVC 调节到所需要的等效电纳;而在 STATCOM 中,由开环或外闭环调节器输出的控制信号则被视为补偿器应该产生的无功电流(或无功功率)的参考值。正是在如何由无功电流(或无功功率)参考值调节 STATCOM 真正产生所需要的无功电流(或无功功率)这个环节上,形成了 STATCOM 多种多样的具体控制方法,主要可以分为电流的间接控制和电流的直接控制两种方法^[36]。

3.3.1 电流的间接控制基本原理

所谓电流的间接控制,就是按照 STATCOM 的工作原理,将 STATCOM 看作一个交流电压源,通过对 STATCOM 变流器所产生的交流侧电压基波的相位和幅值的控制,来间接控制 STATCOM 的交流侧电流。

图 3-6 为 STATCOM 单相等效电路图,其中变压器及线路损耗用 r 等值表示,图中 U_s 为 STATCOM 接入点处系统电压, U_I 为 STATCOM 交流侧电压。

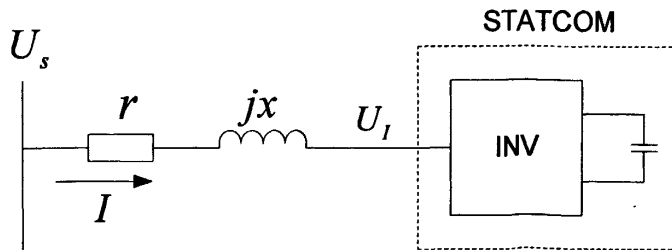


图 3-6 STATCOM 等效电路

STATCOM 有两种工作状况:即容性工况和感性工况,如图 3-7 所示。图中, δ 为 U_s 和 U_I 之间的相位差,以 U_s 滞后 U_I 为正, ϕ 为等效电抗器的阻抗角, U_L 为等效电抗器的两端电压。

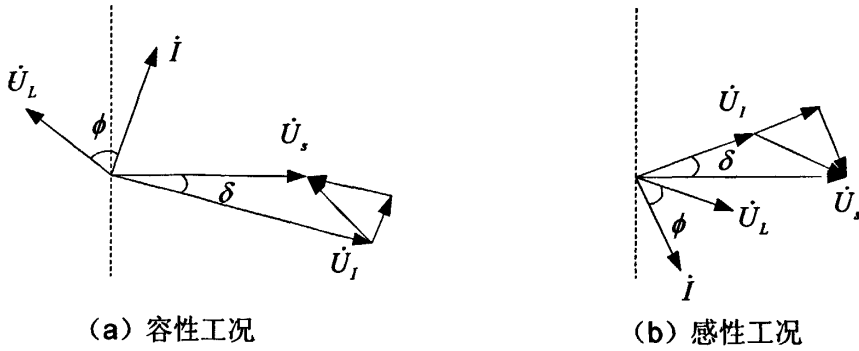


图 3-7 STATCOM 相量图

当 U_L 滞后于 U_s 时 ($\delta < 0$), STATCOM 工作于容性工况, 此时电流 I 超前于系统电压 U_s , STATCOM 从系统吸收容性无功功率, 为系统提供无功支撑; 当 U_L 超前于 U_s 时 ($\delta > 0$), STATCOM 工作于感性工况, 此时电流 I 滞后于系统电压 U_s , STATCOM 从系统吸收感性无功功率。

分析图 3-7 所示的 STATCOM 工作相量图, 以容性工况为例来进行说明。由图可以得到以下三角关系式:

$$\frac{U_L}{\sin \delta} = \frac{U_s}{\sin(90^\circ + \phi)} = \frac{U_I}{\sin(90^\circ + \phi - \delta)} \quad (3-1)$$

其中 δ 是 U_L 滞后 U_s 的角度, 由此可以得到等效电抗器两端电压为:

$$U_L = \frac{U_s \sin \delta}{\cos \phi} \quad (3-2)$$

因此可以推导出稳态时 STATCOM 从电网中吸收的容性无功电流和有功电流的有效值分别为: (变压器及线路损耗的等效阻值为 $r + jx$)

$$I_Q = \frac{U_L}{\sqrt{r^2 + x^2}} \sin(90^\circ - \delta) = \frac{U_s}{2r} \sin 2\delta \quad (3-3)$$

$$I_P = \frac{U_L}{\sqrt{r^2 + x^2}} \cos(90^\circ - \delta) = \frac{U_s}{2r} (1 - \cos 2\delta) \quad (3-4)$$

可以证明, 在感性工况下, STATCOM 从电网中吸收的电流同样满足式 (3-3) 和 (3-4), 不过此时吸收的是感性电流, δ 的值是 U_L 超前 U_s 的角度。

另外, 由式 (3-1) 可以得到:

$$U_I = \frac{U_s \cos(\delta - \phi)}{\cos \phi} \quad (3-5)$$

可见, 在稳态下 δ 的值与 STATCOM 交流侧基波电压的幅值大小也是一一

对应的。图 3-8 为 I_Q 、 I_P 及 U_I 与 δ 的关系曲线：

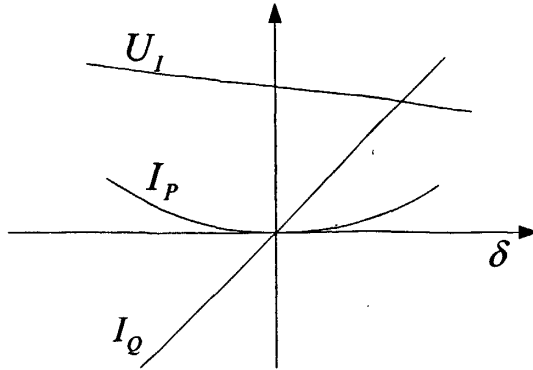


图 3-8 I_Q 、 I_P 及 U_I 与 δ 关系图

由图可以看出：当 δ 在绝对值较小的范围内变化时， δ 与 I_Q 接近线性的正比关系。而 STATCOM 输出的无功功率为：

$$Q = \frac{3U_s^2}{2r} \sin 2\delta \quad (3-6)$$

由于 STATCOM 的等效电阻 r 的值很小，而 U_s 的值很大，由式 (3-6) 可知， δ 值很小的变化都会引起 STATCOM 很大的无功输出。因此 STATCOM 在实际的运行中， δ 都是在绝对值很小的范围内变化。所以可以通过控制 δ 来在较大范围内控制 STATCOM 输出的无功电流。

通过以上分析，我们可以得到最简单的电流间接控制方法：即将我们想要补偿的无功电流的参考值 I_{ref} 作为指令值，通过公式 (3-3) 变换得到 δ 的值，然后用 δ 来控制 STATCOM 变流器的触发脉冲，使 STATCOM 交流侧输出的电流值跟随参考值动态变化。其示意图和相关波形如图 3-9 所示。

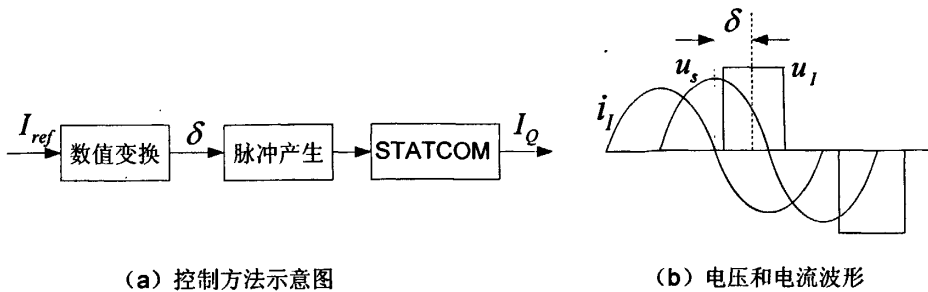


图 3-9 简单的电流间接控制方法示意图

在波形图中, U_s 为 STATCOM 接入点处系统的相电压, U_i 为 STATCOM 变流器桥式电路经触发后在交流侧形成的相电压, 其幅度等于直流侧电容电压的值, 而 i_i 则是 STATCOM 吸收电流中的基波分量。

3.3.2 电流间接控制策略的研究

该 STATCOM 主要用于电压调整, 通过调节变流器电压的相位和幅值来维持电压稳定。控制系统采用系统电压的闭环控制, 由电压调节器形成无功电流的参考值, 图 3-10 为无功电流控制框图。

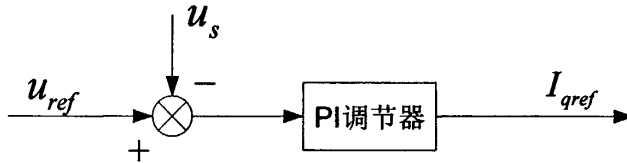


图 3-10 无功电流控制图

在 STATCOM 的直流侧是一个储能电容 C。理论上讲, STATCOM 的变流电路的直流侧可以不设储能元件(或很小容量的储能元件)。但实际上, 考虑到变流电路吸收的电流并不只含基波, 其谐波的存在也多少会造成总体看来有少许无功能量在电源和 STATCOM 之间往返。所以, 为了维持逆变器的正常工作, 其直流侧仍需要一定容量的电容器作为储能元件, 但所需储能元件的容量远比 STATCOM 所能提供的无功容量要小。同时, 此电容器还用于抑制直流侧的电压波动。在此, 采用直流电压的反馈控制, 直流电压调节器的输出作为有功电流的参考值, 图 3-11 为有功电流控制框图。

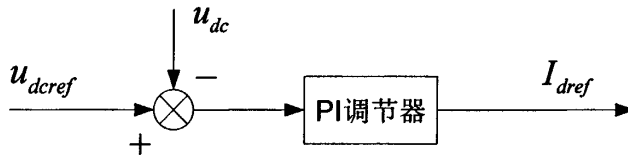


图 3-11 有功电流控制图

图 3-12 为 STATCOM 通过电抗器连接到母线的示意图。

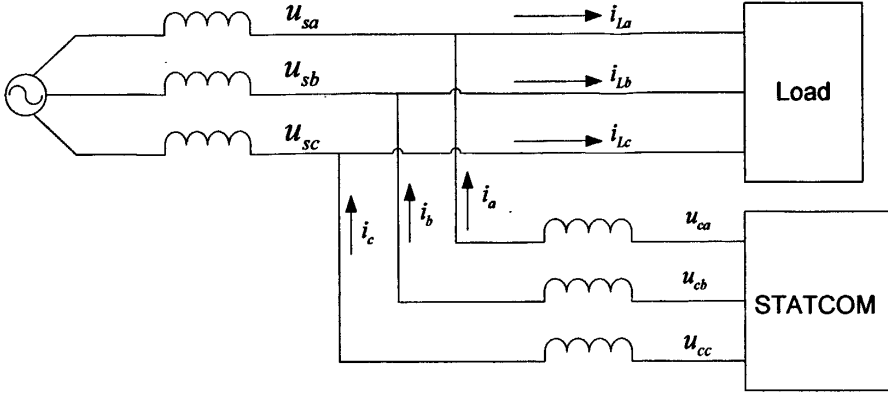


图 3-12 STATCOM 与系统连接示意图

图 3-12 中我们令

$$\begin{cases} u_{sa} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_s \sin \omega t \\ u_{sb} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_s \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ u_{sc} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_s \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \end{cases} \quad (3-7)$$

其中 U_s 为三相线电压的有效值。将 STATCOM 的总损耗用 R 表示可以得到：

$$\begin{bmatrix} u_{ca} \\ u_{cb} \\ u_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Ri_a \\ Ri_b \\ Ri_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L \frac{di_a}{dt} \\ L \frac{di_b}{dt} \\ L \frac{di_c}{dt} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

应用瞬时无功理论，将上式两边同时左乘 C_{32} ，有

$$\begin{bmatrix} u_{c\alpha} \\ u_{c\beta} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

其中 $C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$

将式 (3-9) 两边同时左乘 C_{pq} ，化为 $d-q$ 坐标。

$$\begin{bmatrix} U_{cd} - U_{sd} \\ U_{cq} - U_{sq} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \omega L \begin{bmatrix} -I_q \\ I_d \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

其中系统电压的有功和无功分量由公式 (3-7) 经过变换得到 $\begin{bmatrix} U_{sd} \\ U_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_s \\ 0 \end{bmatrix}$

因此，式 (3-10) 变换为：

$$\begin{bmatrix} U_{cd} - U_s \\ U_{cq} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \omega L \begin{bmatrix} -I_q \\ I_d \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

其中, $C_{pq} = \begin{bmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{bmatrix}$, STATCOM 吸收的瞬时有功功率和补偿的瞬时无功功率分别为: $P_c = U_s I_d$, $Q_c = U_s I_q$ 。

因此, I_d 和 I_q 分别定义为 STATCOM 输出总电流的有功分量和无功分量, 可以为正也可以为负。有功功率流进 STATCOM 时 I_d 为正, 流出为负; 当 I_q 为正时, STATCOM 产生超前无功功率, 为负时产生滞后无功功率。

由公式 (3-11) 可知, 为了使 STATCOM 产生期望的有功电流 I_{dref} 和无功电流 I_{qref} , U_{cdref} 和 U_{cqref} 的参考输出应为:

$$\begin{bmatrix} U_{cdref} \\ U_{cqref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_s - \omega L I_{qref} + L \frac{d}{dt} I_{dref} + R I_{dref} \\ \omega L I_{dref} + L \frac{d}{dt} I_{qref} + R I_{qref} \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

由式 (3-12) 可以得到控制方框图如图 3-13 所示。由此可得 $U_c = \sqrt{U_{cdref}^2 + U_{cqref}^2}$, $\delta = \arctan(U_{cqref} / U_{cdref})$ 。

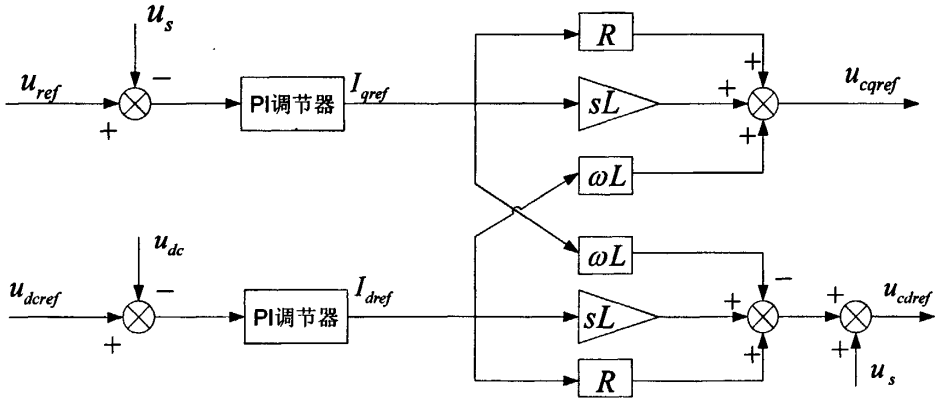


图 3-13 控制方框图

根据瞬时无功理论的有关定义, U_c 就是 STATCOM 输出的三相电压在 $d-q$ 坐标系下的合成矢量的幅值。 δ 为 $d-q$ 坐标系下 U_c 与 d 轴的相移角, 同时也是 STATCOM 与电网对应相电压的相移角。

3.4 小结

本章对 TSC+STATCOM 的控制策略进行了研究。在分析各自的特点后。提出整体控制策略：TSC 以无功功率为主要控制目标，而 STATCOM 以电压为主要控制目标；大部分无功功率由 TSC 补偿，STATCOM 主要补偿动态变化部分。具体设计 TSC+STATCOM 的控制方法时，对 TSC 从传统的九区图控制法出发，针对其缺点，研究了一种基于模糊控制的控制策略，该控制器采用二输入单输出的结构，以无功功率平衡为主要控制目标。对 STATCOM 的控制策略，以维持节点电压为主要控制目标，采用了电流的间接控制法，其基本思想是根据 STATCOM 的工作原理，将 STATCOM 看作一个交流电压源，通过对 STATCOM 变流器所产生的交流侧电压基波的相位和幅值的控制，来间接控制 STATCOM 的交流侧电流。

第四章 基于 MATLAB/SIMULINK 的仿真研究

4.1 TSC 模糊控制系统的仿真研究

4.1.1 MATLAB 模糊推理系统设计

(1) MATLAB 中模糊推理系统的建立

在 MATLAB 中建立一个模糊控制系统^[37-39]是很方便的,只需要调用关键的几个函数(需要按照要求填写相应的参数),建立模糊推理系统的步骤如下所示:

- 1、建立一个空的(新的)模糊推理系统,并为其命名;
- 2、添加输入、输出变量,在本文中模糊推理系统是双输入单输出的系统;
- 3、给输入、输出量指定模糊变量,并为模糊变量添加模糊隶属度函数;
- 4、设计模糊推理规则,并将其添加进模糊推理系统。

这样就建立了一个完整的模糊推理系统,但是这时候还没有对这个系统进行推理运算,因而并不能得到输出量的模糊向量,更无法得到控制表。

(2) MATLAB 中模糊推理系统的使用

建立模糊推理系统的目的就是可以方便的观察和修改调整该系统,在 MATLAB 中对于模糊推理系统的观察提供了丰富的功能,在这里主要用到的是绘制隶属度函数、绘制系统输出曲面、绘制模糊推理系统结构等;对于模糊推理系统的推理运算只需要使用 `evalfis` 函数就可以计算模糊推理系统输出,该函数返回了丰富的数字信息,其中不仅包括最终的推理结果,而且含有很多计算的中间结果。最重要的就是计算模糊推理系统的输出,使用 MATLAB 进行辅助设计要得到的也就是模糊推理系统的输出,通过计算模糊推理系统的输出得到系统的响应表,即控制表,不过,这也只是理论计算。在使用时需要做大量的实验,来调整控制表使得控制效果达到最佳。模糊控制器的具体实现程序见附录一。

从程序里可以看出,首先建立了一个模糊推理系统 `tscfis`;随后添加了 3 个变量(2 输入 1 输出),分别为:电压偏差 `Eu`(编号为输入 1)、无功功率偏差 `Eq`(编号为输入 2)、电容器组 `Cq`(编号为输出 1);再分别向各个变量添加隶属度函数,每个模糊变量的隶属度函数被默认的赋给了编号;最后向模糊推理系统添加控制规则,控制规则是按照模糊变量的隶属度函数的编号来写的,每条控制规则为矩阵的一行,每行 5 个元素,前 3 个元素分别表示的输入、输出变化量的隶属函数编号,第四个量决定模糊操作符的类型是 `or` 或 `and` (1 是 `and`, 2 是 `or`),第五个量为该条规则的权重(0~1)。

4.1.2 SIMULINK 仿真

使用 MATLAB 中的 Simulink 进行仿真。Simulink 是 Mathworks 公司为 Matlab 提供的控制系统模型输入与仿真工具,利用该软件,可以利用鼠标器在模型窗口上画出所需的控制系统模型,然后 Simulink 提供的各种仿真功能来对系统进行仿真或线性化分析,使得一个复杂系统的输入变得简单、直观。交互式的模型输入与仿真环境 Simulink 工具箱是 Matlab 软件的扩展,主要用于动态系统的仿真。它的 Windows 中提供了建立系统模型所需的大部分类型方块。用户只需用鼠标器选择所需模块在模型窗口上“画出”模型(双击任何模块,即可打开该功能块来完成参数的设定),然后用鼠标器将它们连接起来,就可以构成一个系统的框图描述,亦即得出系统的 Simulink 描述。建立起系统模型后,用户可通过选择仿真菜单(simulation menu),设置仿真控制参数,启动仿真过程,然后通过输出(scope 示波器)观察系统的仿真结果。

进入 Matlab 环境后,可以通过主窗口工具条上的 New Simulink Model 按钮来新建 1 个模型并打开相应的模型库,也可以通过键入 simulink 命令实现。然后,利用鼠标找出模型库中与设计的系统模型相对应的模块,如信号源、输出、传递函数、各种线性、非线性环节、子系统等,拖到新模型窗口中,用线连接起来,得到如图 4-1 所示的系统模型图。用两个随机信号(Random Number)来模拟模糊控制器的两个输入变量:电压偏差 ΔU 及无功偏差 ΔQ ,其输出为电容器组的投切数量^[40-42]。

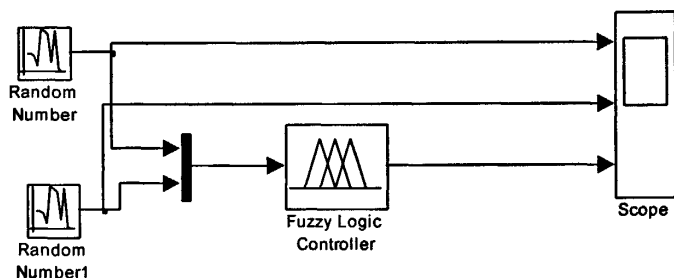


图 4-1 模糊控制仿真系统图

图 4-1 模糊控制模块位于 MATLAB 的 WORK 工作目录下,名为 tscfis,通过示波器可以观查输出的情况。

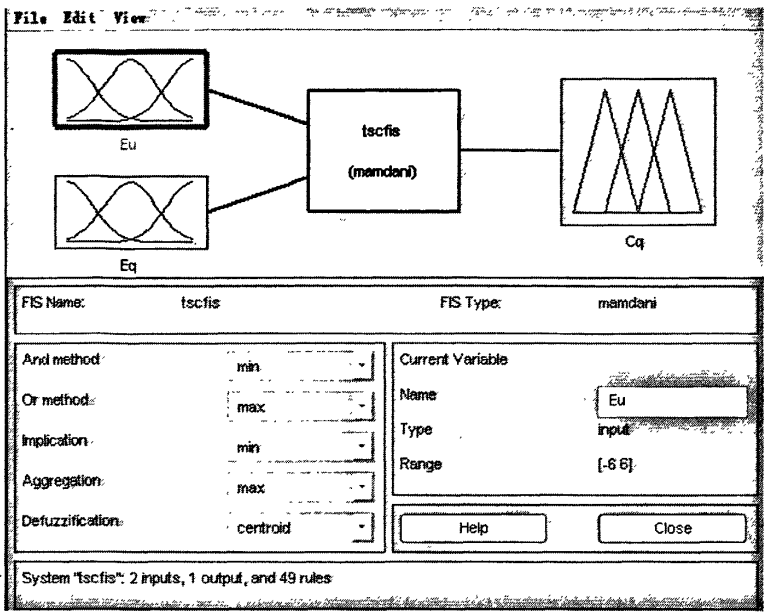


图 4-2 模糊控制器设计对话框

图 4-2 所示为图 4-1 中模糊控制模块设计的具体过程。本文采用电压偏差，无功功率偏差作为输入，输出为电容器的投切量。推理过程采用 Mamdani 推理法，模糊化过程采用三角型函数，解模糊采用 centroid（面积中心法）。通过仿真获得波形图如图 4-3 所示。

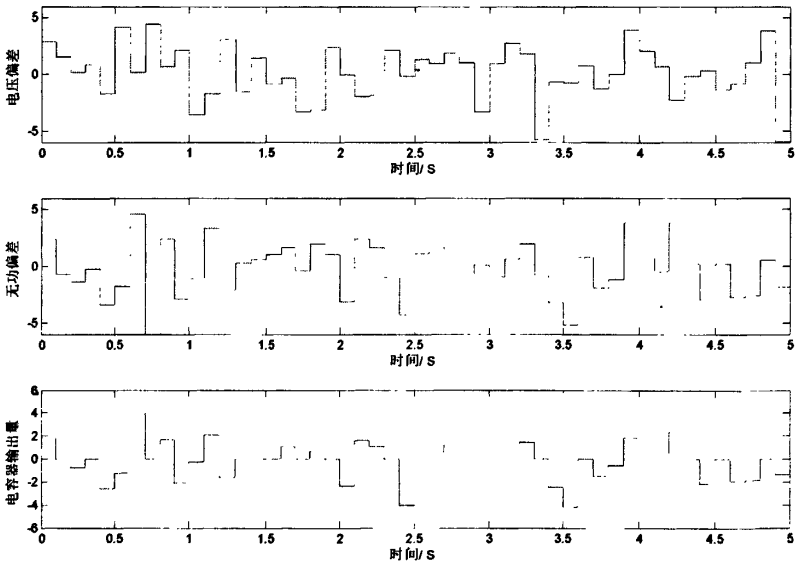


图 4-3 仿真波形图

图 4-3 中, 最上面的波形表示的是输入变量电压偏差, 第二个波形是输入变量无功偏差, 最下面的波形是输出变量无功功率的补偿量, 即投切电容器组的量。分析如下:

当 $t=0.3\sim0.4$ 秒左右时, 电压偏差是正小, 无功偏差为零, 电容器组投切量为 0。因为这种情况基本属于电压、无功合格区, 所以电容器组不动作。

当 $t=0.6\sim0.7$ 秒左右时, 电压偏差为零, 无功偏差为正大, 投电容器组的量为正大。因为无功偏差为正大, 即需要补偿大量的感性无功, 通过投电容器组, 可以补偿感性无功, 提高电网的功率因数。

当 $t=3.2\sim3.3$ 秒左右时, 电压偏差是正中, 无功偏差是正大, 投电容器量是正中的, 因为无功偏差是正大的, 通过投电容器可以降低电网无功, 但考虑到电网电压偏差为正中, 所以投电容器量没有选择是最大的。

当 $t=3.5\sim3.6$ 秒左右时, 电压偏差负小, 无功偏差负大, 切电容器组的量为负大。因为无功偏差是负大的, 通过切电容器可使无功变大, 在无功偏差与电压偏差相比时, 本控制策略更偏重于对无功的补偿。

通过上面的分析可以看出, 该模糊控制器是合理的。在考虑电压与无功这两方面时偏重于无功偏差。

4.2 TSC+STATCOM 的仿真研究

4.2.1 TSC 仿真模型的建立

图4-4所示为在SIMULINK环境下建立的TSC仿真模型, 对TSC采用的分组方式为等容方式, 共分3组, 图中的3组Subsystem模块为反并联晶闸管的封装模块。

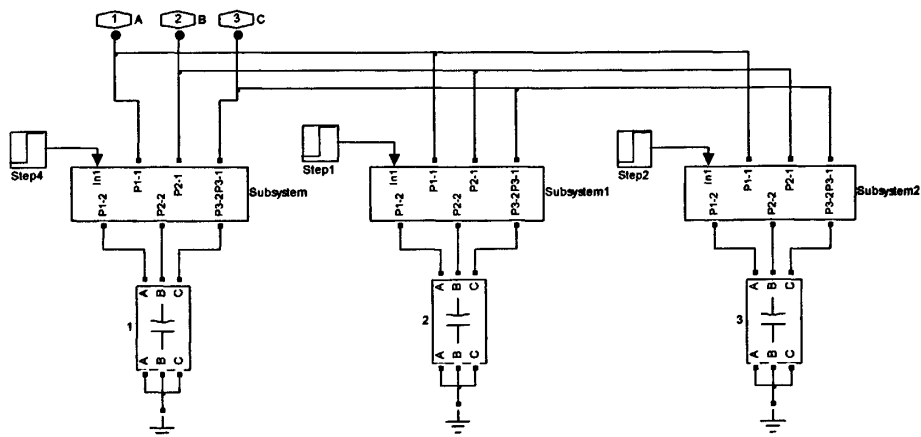


图 4-4 TSC 仿真模型结构图

4.2.2 STATCOM 仿真模型的建立

从对象广度和时间尺度上来看, STATCOM 的建模与控制主要分为器件级和系统级两个层次^[43-44]。器件级层次主要研究 STATCOM 的电路拓扑结构和脉冲控制方法, 考虑精确到微秒级的电力电子器件的开通与关断; 系统级层次主要从电力系统的潮流与稳定等宏观角度来探讨 STATCOM 的运行, 研究 STATCOM 对电力系统的作用, 如维持节点电压和抑制电压闪变、阻尼系统振荡以及提高系统暂态稳定性等, 其仿真步长可为毫秒级^[45-47]。

1、STATCOM 的器件级仿真模型

STATCOM 采用三电平四重化结构模型, 每个三电平逆变器直流侧都由两个电容器组成, 图 4-5 为 STATCOM 仿真结构图。

图中, 四个三电平逆变器的 (+、N、-) 三个输入端分别并联后外接直流侧电容器, 交流输出端经曲折变压器后按相进行串联连接, 并入交流电网。四个逆变器的触发脉冲由触发脉冲发生器提供, 该触发脉冲发生器由四个子系统组成, 分别控制四个逆变器。它们在触发相位上依次相差 15° 。系统电压经过三相锁相环获得当前的 A 相电压的相位值, 然后将该值依次减去 $(0, 15, 30, 45) * \pi / 180$ 作为四个逆变器的参考相位值。由其结构可知, 每一相有四个开关器件, 所以每个逆变器需要 12 个触发脉冲, 而整个 STATCOM 装置就需要 48 个触发脉冲。

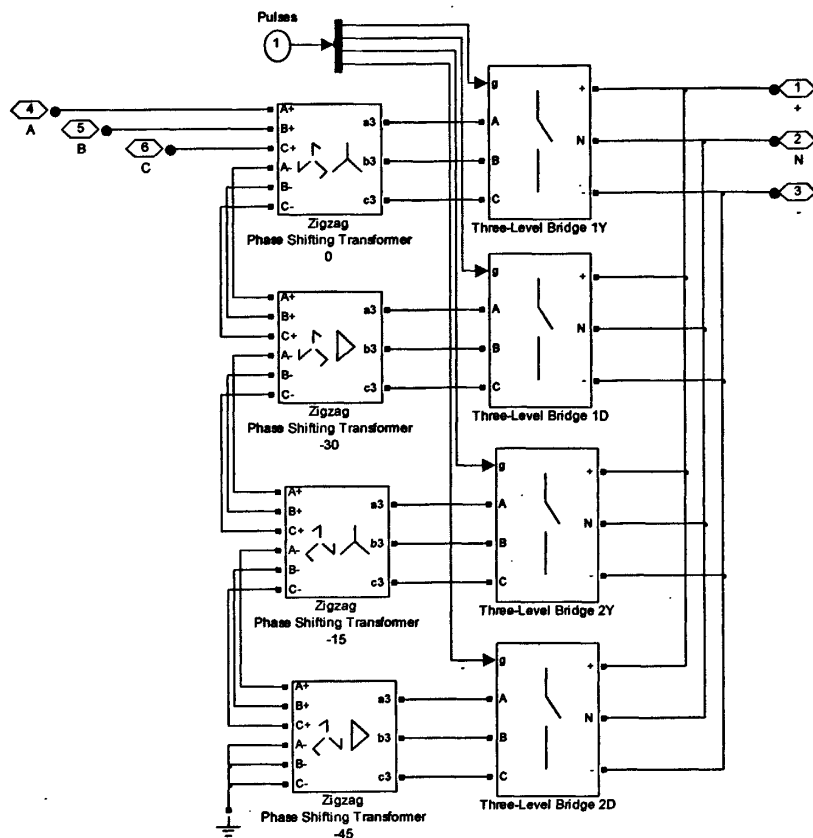


图 4-5 STATCOM 器件级仿真模型结构图

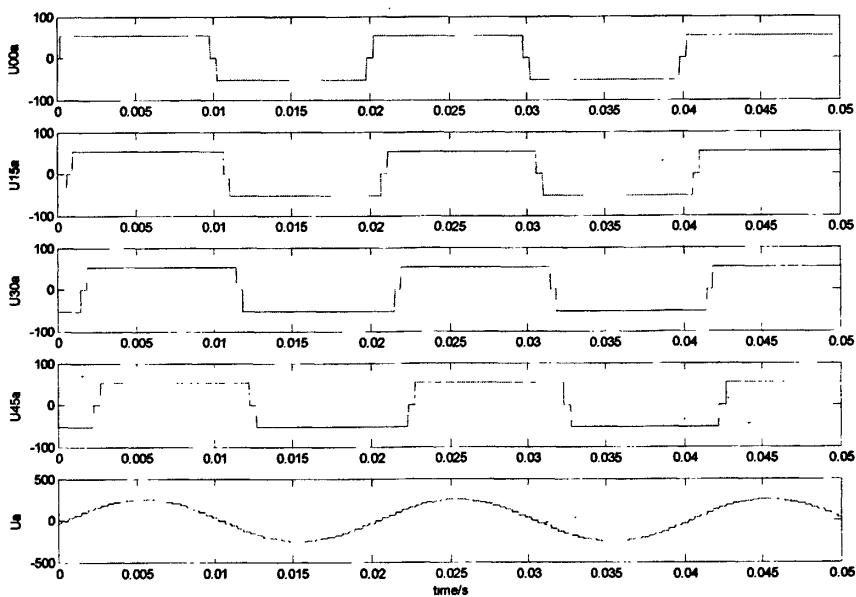


图 4-6 STATCOM 各逆变器输出电压与总输出线电压

图 4-6 是用 MATLAB 仿真得到的 STATCOM 各逆变器输出电压与总输出线电压。从图中可以看出 STATCOM 装置总的输出电压几乎接近正弦波，而且电压等级成倍提高，与理论分析相吻合。

2、STATCOM 的系统级仿真模型

实际的 STATCOM 装置是由许多子系统构成的，通过上述对 STATCOM 器件级仿真模型的建立过程可以看出，完全地将 STATCOM 所有子系统的物理模型都建立起来是比较复杂的，而且在研究 STATCOM 对系统动态特性的影响时，即研究 STATCOM 的系统级仿真时，不用按实际的 STATCOM 接线来建模，此时可根据 STATCOM 的数学模型来建立 STATCOM 的仿真模块，也就是按照数学建模方法来建立 STATCOM 的系统级仿真模型。

下面根据本文第二章所推导的 STATCOM 动态数学模型采用数学建模方法来建立 STATCOM 的系统级仿真模型。

STATCOM 的动态数学模型如式 (4-1) 所示：

$$\begin{cases} L \frac{di_a(t)}{dt} = Ku_{dc} \sin(\omega t - \delta) - \sqrt{2}u_s \sin \omega t - Ri_a(t) \\ L \frac{di_b(t)}{dt} = Ku_{dc} \sin(\omega t - 2\pi/3 - \delta) - \sqrt{2}u_s \sin(\omega t - 2\pi/3) - Ri_b(t) \\ L \frac{di_c(t)}{dt} = Ku_{dc} \sin(\omega t + 2\pi/3 - \delta) - \sqrt{2}u_s \sin(\omega t + 2\pi/3) - Ri_c(t) \\ \frac{du_{dc}(t)}{dt} = \frac{-K}{C} [i_a(t) \sin(\omega t - \delta) + i_b(t) \sin(\omega t - 2\pi/3 - \delta) + i_c(t) \sin(\omega t + 2\pi/3 - \delta)] \end{cases} \quad (4-1)$$

式中： ω 为 $dq0$ 坐标系下的旋转角频率，与三相系统电压角频率相同； K 为逆变器调制比； R 、 L 分别为 STATCOM 的等值电阻和电感； C 为 STATCOM 直流侧电容值； δ 为 STATCOM 输出电压与系统电压的相角差； U_s 为系统电压瞬时有效值； U_{dc} 为直流电容电压。

上述数学模型是采用输入输出建模方法建立的，建模过程中只考虑 STATCOM 装置的主要特性如输入输出特性等，而对装置中具体某个开关器件的特性不予考虑。

根据上述 STATCOM 的动态数学模型，利用 SIMULINK 中的 S-函数编写数学模型的内部算法，然后再应用 SIMULINK 的封装功能产生一个与 S-函数文件相对应的对话框和模块图标，如此便能建立一个能与 SIMULINK 模块库中的其它模型一起使用的新模块。相应的 S-Function 程序见附录二。

该模块的输入为系统电压的瞬时有效值 U_s 和 STATCOM 输出电压与系统电压间的相角差 δ ，输出为 STATCOM 的三相电流。需要说明的是，利用 SIMULINK

中的 S-函数构建的仿真模型不能直接与电力系统模块库 SimPowerSystems 中的元件模型同时使用,必须在仿真模型后连接相应的控制电流源模块,该仿真模型才能转变为电力系统模块库 SimPowerSystems 中的元件模型。根据这种方法建立的 STATCOM 仿真模型,在 MATLAB 中表现为一个可控的电流源元件^[48-49]。这样,STATCOM 的系统级仿真模型就建立起来了。

4.2.3 TSC+STATCOM 仿真主接线图

当 STATCOM 采用电流间接控制策略时,其工作原理就是根据负荷无功功率(无功电流)的大小,实时调整补偿角 δ ,间接控制 STATCOM 交流侧的电压和输出电流,实现对接入点处负荷的无功功率(无功电流)的补偿。

图 4-7 所示为 TSC+STATCOM 的 SIMULINK 仿真主接线图。从模块库中选取三相电源模型代替电力主系统,设线电压有效值为 $220\sqrt{3}$ V,频率为 50Hz,恒定负荷的视在功率 $S = 9000 + j12000$,在固定负荷处并联一个 $S = 1000 + j9000$ 的负荷,该负荷与三相断路器串联后接入电网,模仿电力系统中的冲击性负荷,STATCOM 模型采用三电平技术,直流侧由两个电容器组成。

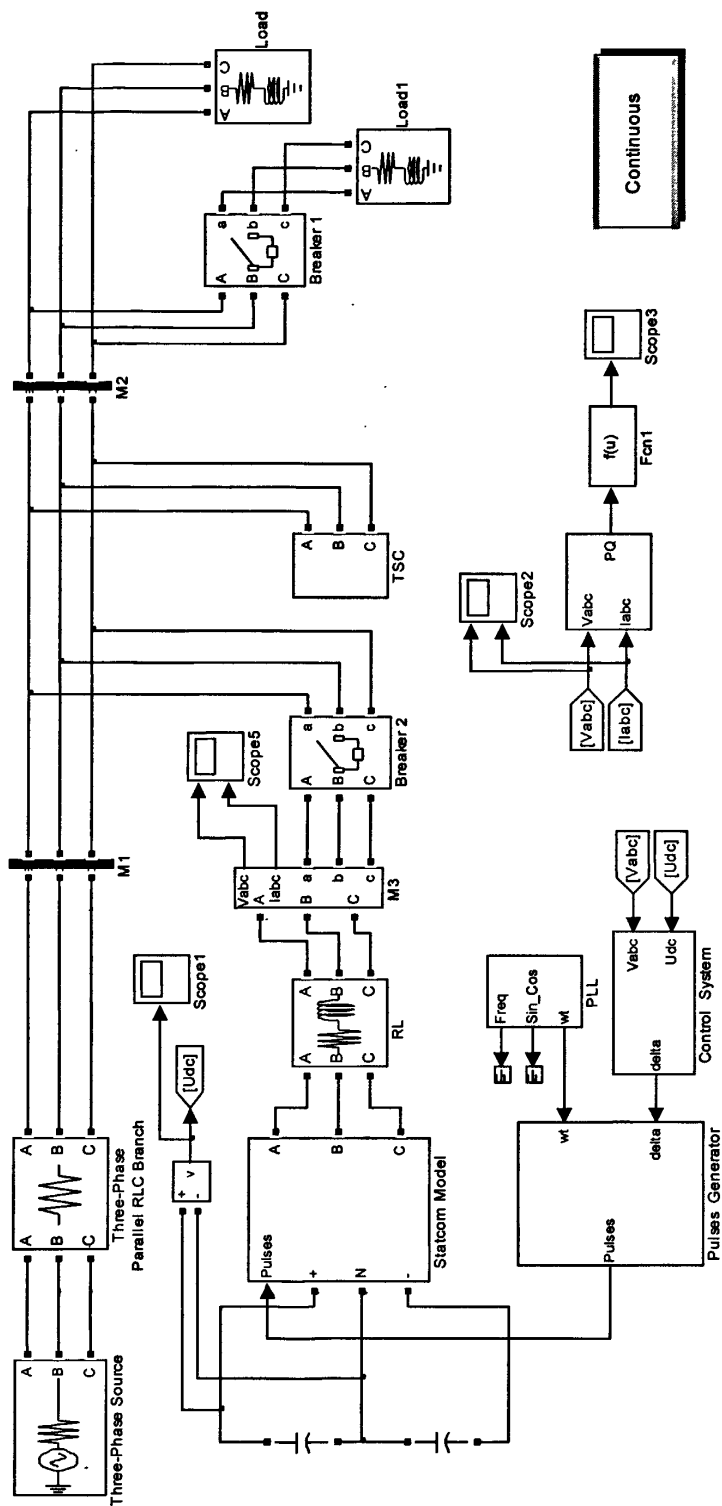


图 4-7 TSC+STATCOM 仿真主接线图

图 4-7 中 STATCOM 的控制模块的具体接线如图 4-8 所示。其中的输入信号 V_{abc} 为系统三相瞬时相电压， U_{dc} 为 STATCOM 直流侧电容两端的电压；输出信号为 STATCOM 的控制角 δ ；Fcn1 函数表示的是节点电压瞬时有有效值的快速计算，即： $U_i = \sqrt{U_a^2 + U_b^2 + U_c^2} / \sqrt{3}$ ，Fcn2 函数实现的功能由式 $\delta = \arctan(U_{cqref} / U_{cdref})$ 实现； U_{ref} 为系统参考电压， U_{dcref} 为直流侧参考电压。

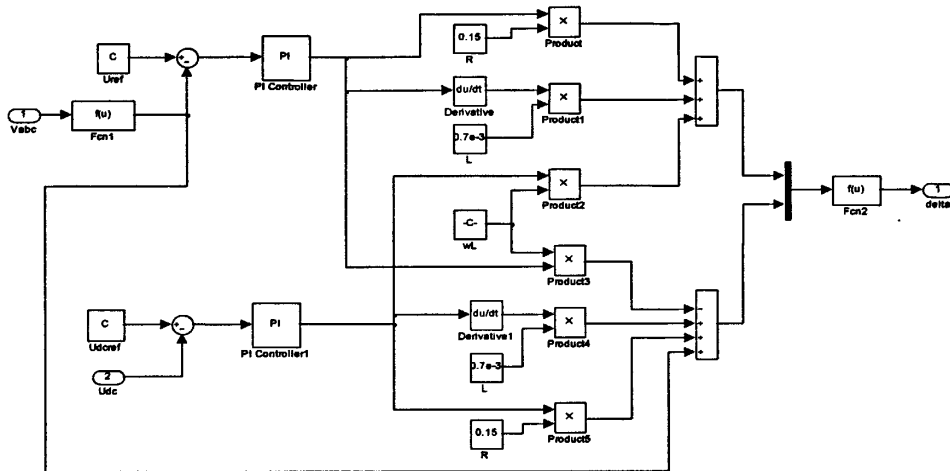


图 4-8 基于 MATLAB 的 STATCOM 电流间接 PI 控制仿真图

4.2.4 仿真波形分析

(1) 对系统功率因数的影响

首先对冲击性负荷未并入的情况进行仿真。根据负荷的视在功率 $S = 9000 + j12000$ 可知，在 TSC+STATCOM 未投入补偿时，系统的功率因数较低。当 TSC+STATCOM 投入后，系统的功率因数变化曲线如图 4-9 所示。

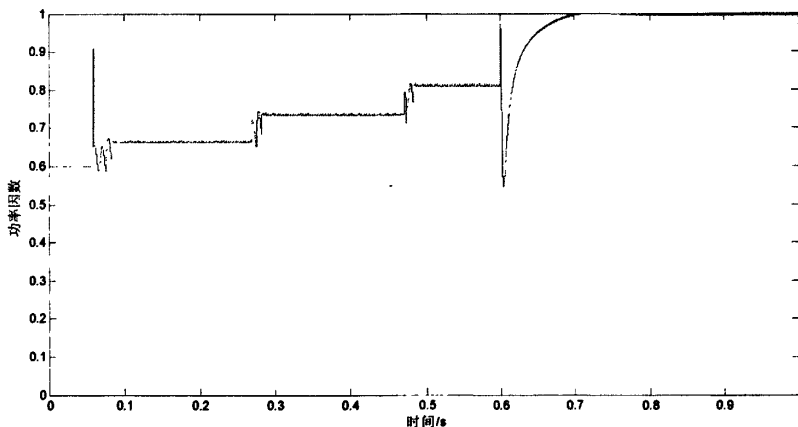


图 4-9 TSC+STATCOM 投入后系统功率因数变化曲线

由变化曲线图可以看出, 在时间 $t=0.06\text{s}$ 时, 投入一组 TSC, 在时间 $t=0.26\text{s}$ 及 $t=0.46\text{s}$ 时, 分别投入另外两组 TSC, 系统的功率因数得到了有效的提高, 而且是有级的调节。在时间 $t=0.6\text{s}$ 时投入 STATCOM, 经过几个周期的短暂振荡后, 最终系统功率因数维持在 1 附近, 而且其调节是连续的。

从该仿真曲线可以明显的看出, TSC+STATCOM 方式的无功补偿, 由 TSC 补偿一部分无功功率后, 剩余部分由 STATCOM 来补偿。因为 TSC 的补偿是有级的调节, 而 STATCOM 可以连续调节, 所以当无功功率变化不是很大时, 可由 STATCOM 完成调节。这样, 在满足用户性能要求的前提下, TSC 的加入可以使装置整体成本下降。

(2) 总谐波畸变率 (THD) 分析

利用 MATLAB 电力系统工具箱中的 POWERGUI 模块的 FFT Analysis 功能, 对相应的波形进行 FFT 分析。TSC+STATCOM 并入系统前, 系统的单相电流波形及其 THD 值如图 4-10 所示, 在该图中, Fundamental Frequency 取 50Hz , Max Frequency 取 3000Hz 。即用 FFT 分析时, 只分析到 60 次谐波, 由图 4-10 可看出, 接近 60 次谐波的幅值已经很小了, 对总谐波畸变率 (THD) 的影响可忽略不计。TSC+STATCOM 投运前系统电流的 THD 值为 0.01% 。

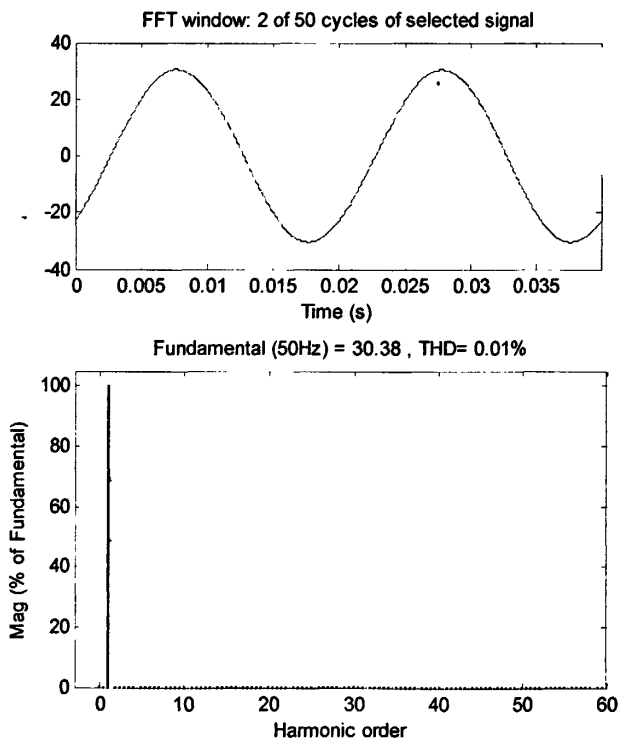


图 4-10 TSC+STATCOM 投运前系统电流及其谐波分析

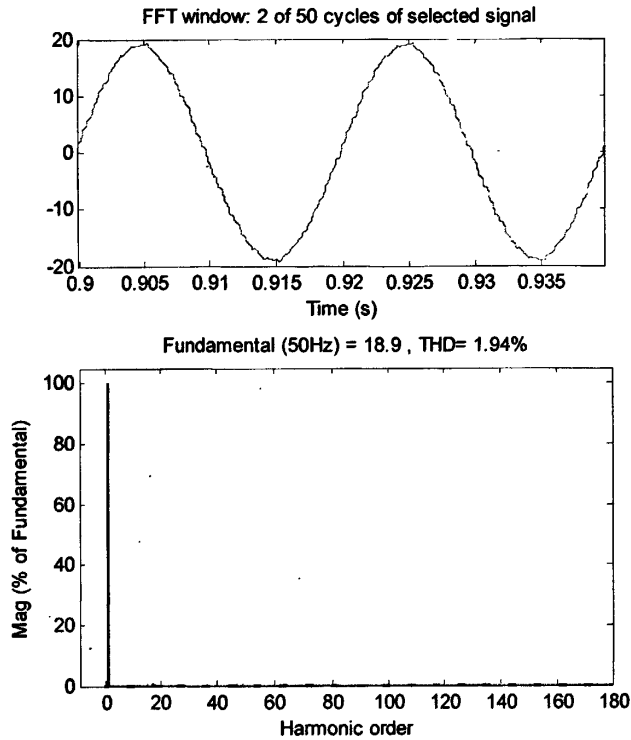


图 4-11 TSC+STATCOM 投运后系统电流及其谐波分析

TSC+STATCOM 投运后，系统的单相电流波形及其 THD 值如图 4-11 所示。由于此时，电流畸变较大，因此用 FFT 工具分析时，Max Frequency 取 9000，即谐波分析到 180 次。由图 4-11 可以看出，TSC+STATCOM 投运后，系统的电流 THD 值为 1.94%，该值在可接受范围内（不超过 5%）。

由 TSC 及 STATCOM 的工作原理可知，TSC 支路并不会产生谐波，谐波主要是由 STATCOM 支路产生，由于 STATCOM 的主电路结构采用了三电平四重化结构，从而有效的抑制了自身谐波的产生。

（3）系统电压与电流波形分析

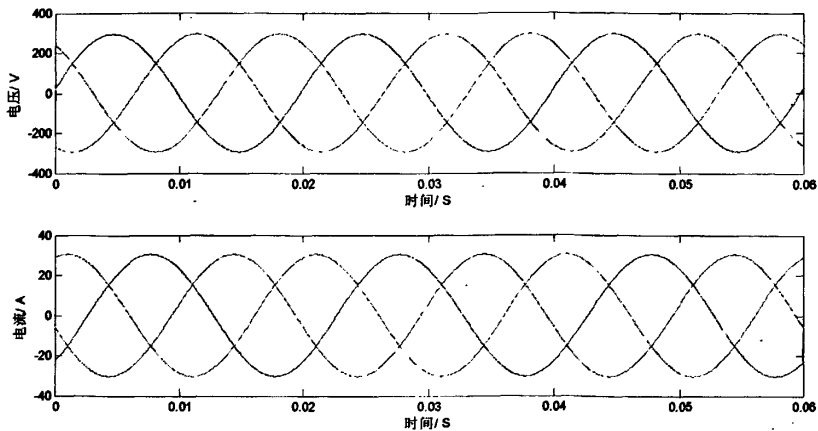


图 4-12 TSC+STATCOM 投运前系统电压、电流波形

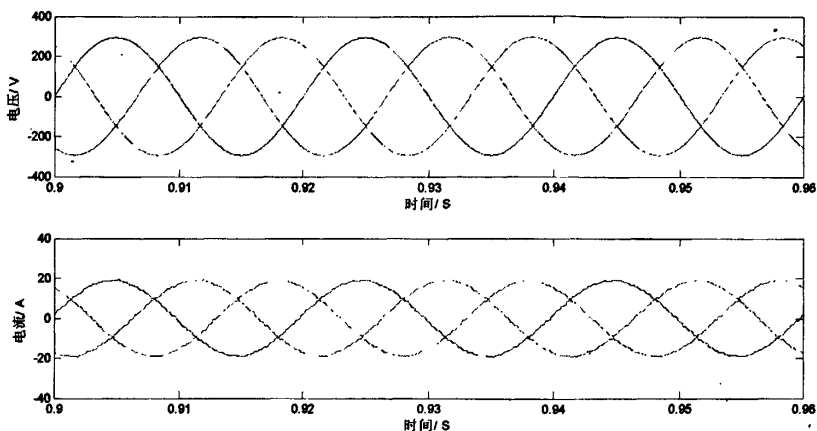


图 4-13 TSC+STATCOM 投运后系统电压、电流波形

图 4-12 和 4-13 给出了 TSC+STATCOM 投运前、后系统的电压、电流波形。从图中可以看出，在 TSC+STATCOM 进行补偿前，系统电流滞后系统电压较为明显，为感性状态，其电流幅值大小为 30.4A；补偿后，系统电流的相位与系统电压的相位已趋于一致，其电流幅值大小为 19.3A，由此可以看出，系统中的无功电流（或无功功率）已经得到有效的补偿。

（4）直流侧电容电压波形分析

STATCOM 在投入运行的起始时刻，系统要经历几个周期的振荡过程，这主要是因为 STATCOM 并入系统时，要吸收大量的有功功率对变流器直流侧电容进行充电。当电容电压稳定后，STATCOM 即进入稳定工作状态。（可以对直流侧电容进行预充电后再并网运行，能在仿真初始时刻使 STATCOM 进入稳定状态，从而减少对系统的冲击。）下图所示的即是 STATCOM 直流侧电容电压的充电过程曲线图。

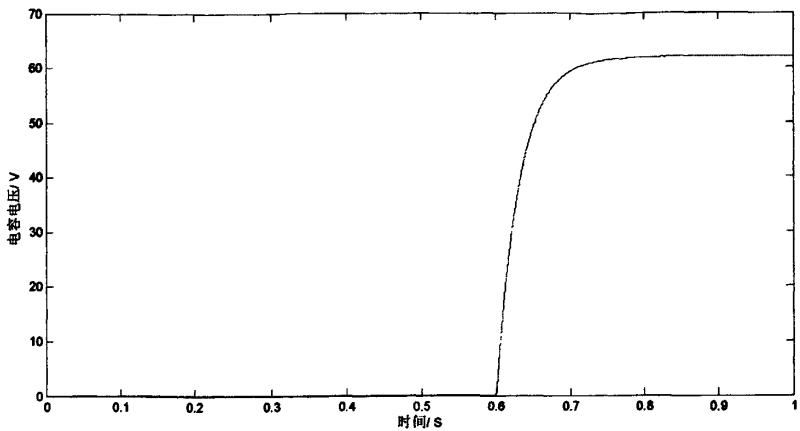


图 4-14 STATCOM 直流侧电容电压波形

图 4-14 所示为 STATCOM 直流侧其中一个电容的充电过程曲线图，其两个电容的充电过程完全相同。 $t=0.6\text{s}$ 时，STATCOM 投入运行，从图中可以看出，经过几个周期后，电容电压稳定在 61.9V 左右，而两个电容两端总电压是其两倍。可见，利用三电平技术，在降低谐波的同时，也使每个电容承受的直流电压大大降低。

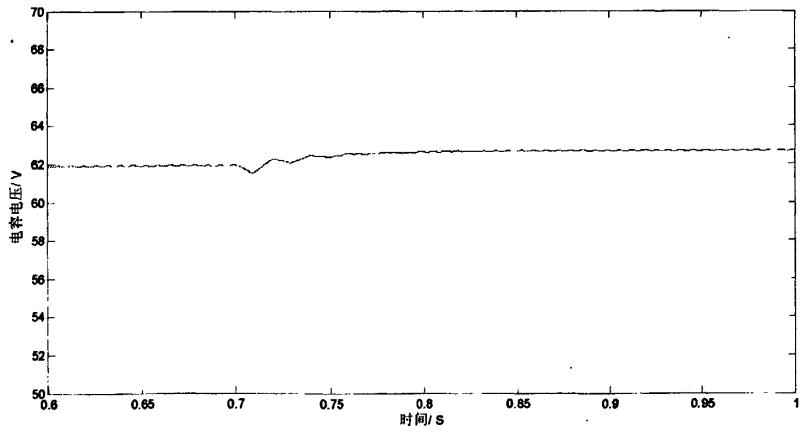


图 4-15 并入冲击性负荷后 STATCOM 直流侧电容电压波形

图 4-15 是当时间 $t=0.7\text{s}$ 时，对系统并入冲击性负荷后 STATCOM 直流侧电容电压波形。由该图可以看出，当系统并入冲击性负荷后，直流侧电容电压会有一定幅度的增加。这是因为当系统负荷增加时，STATCOM 交流侧的相电压随补偿角 δ 的增大而增大，而对于变流器而言，其某一相的上桥臂和下桥臂每个周期

的导通角 σ 是固定的,这就要求变流器直流侧的电平值应该有所增加。所以 STATCOM 会从电网吸收一定的有功功率对直流电容进行充电。

(5) 对系统电压稳定的影响

在 $t=0.05\text{s}$ 时, 并入一个冲击性负荷, TSC+STATCOM 装置未投运时的系统电压波形如图 4-16 所示。

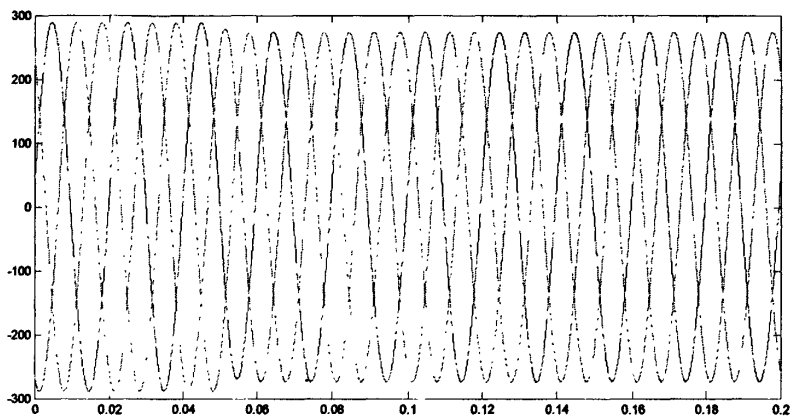


图 4-16 TSC+STATCOM 未投运并入冲击性负荷后系统电压波形

先将 TSC+STATCOM 装置并入系统后, 在 $t=0.7\text{s}$ 时并入一个冲击性负荷, 系统电压波形如图 4-17 所示。

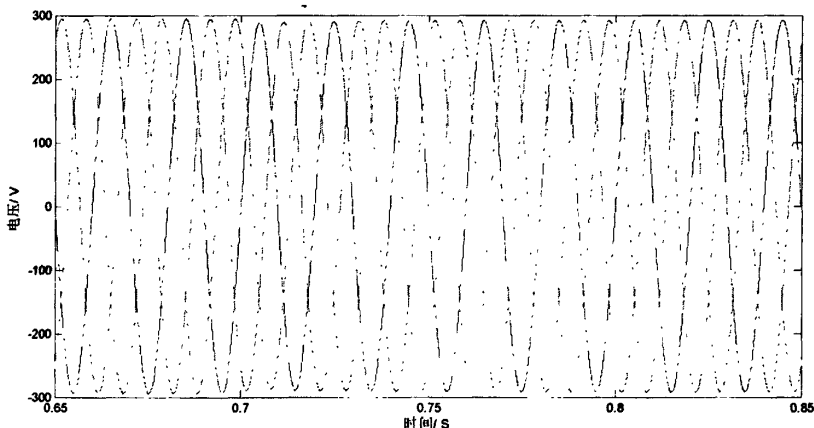


图 4-17 TSC+STATCOM 已投运并入冲击性负荷后系统电压波形

由图 4-16 和 4-17 可以看出, TSC+STATCOM 未投入运行时, 并入冲击性负荷后, 系统电压有明显的下降; 而 TSC+TATCOM 投入运行后, 并入冲击性负荷

后，系统电压并未明显下降。由此可见，TSC+STATCOM 在稳定系统电压上起了不小的作用。

4.3 小结

本章在 MATLAB/SIMULINK 环境下对 TSC+STATCOM 无功补偿进行了仿真研究。运用模糊逻辑工具箱对 TSC 的模糊推理系统进行了设计，用两个随机函数代替模糊控制器的两个输入变量电压偏差 ΔU 及无功偏差 ΔQ ，简化了仿真模型，仿真结果显示了该模糊控制器的合理性。通过 SIMULINK 建立了 TSC+STATCOM 的仿真模型，对仿真波形图进行了分析，结果表明 TSC+STATCOM 无功补偿在提高功率因数、抑制自身谐波含量、稳定系统电压等方面均能满足要求。

第五章 结论与展望

5.1 结论

TSC 是目前广泛使用的无功补偿方式,它实际上就是断续可调的发出无功功率的动态无功补偿装置,具有结构简单、费用较低、运行时不产生谐波、自身能耗小等优点,其主要缺点是调节无功是有级的,动态调节性能不够好。STATCOM 是最近发展的新型的无功补偿装置,它将自换相桥式电路通过变压器或者电抗器直接并联在电网上,适当地调节桥式电路交流侧输出电压的相位和幅值,或者直接控制交流侧电流,就可以使电路吸收或发出满足要求的无功电流,实现动态无功补偿的目的,具有优越的动态性能。如果将两者结合起来,在满足所需动态性能的前提下,将部分容量的 STATCOM 用 TSC 取代,能在整体上降低成本,具有较大的应用价值。

本文对 TSC+STATCOM 无功补偿方式进行了深入的研究,得到以下结论:

1、分析了无功补偿对电力系统的影响以及在电力系统中所能起到的作用,论述了无功补偿装置的发展状况,主要对 TSC 及 STATCOM 的基本工作原理进行了研究,并建立了 STATCOM 的数学模型,讨论了其抑制自身谐波的方法。

2、在分析 TSC 和 STATCOM 各自的特点后,确定了 TSC+STATCOM 的整体控制策略: TSC 以无功功率为主要控制目标,而 STATCOM 则以电压为主要控制目标;大部分无功功率由 TSC 补偿,STATCOM 主要补偿动态变化部分。具体设计 TSC+STATCOM 的控制方法时,对 TSC 从传统的九区图控制法出发,针对其缺点所在,采用了模糊控制的控制方法;对 STATCOM 从其工作原理出发,进行数学模型的推理后,采用了电流的间接控制。

3、用模糊逻辑工具箱对 TSC 模糊控制系统进行了设计,用两个随机函数代替模糊控制器的两个输入变量电压偏差 ΔU 及无功偏差 ΔQ ,简化了仿真模型,仿真结果验证了该控制算法的有效性,能增加系统的稳定性,减少电容器动作的次数。

4、在 MATLAB/SIMULINK 环境下对 TSC+STATCOM 进行了仿真研究。通过 SIMULINK 建立了 TSC+STATCOM 的仿真模型,对仿真波形图进行了分析,结果表明 TSC+STATCOM 无功补偿在提高功率因数、抑制自身谐波含量、稳定系统电压等方面均能满足要求,显示出该无功补偿方式具有较大的实用价值。

5.2 展望

1、对 TSC 的研究中为简化分析，并没有考虑非等容的电容器分组情况，将该情况考虑进去，能更加优化 TSC 的补偿效果，而且，该装置在抗干扰方面需要有深入的研究。

2、静止同步补偿器 (STATCOM) 是一个涉及到电力系统、电力电子、自动控制、信号处理等多学科的非常复杂的系统，还有许多工作需要做进一步研究。其控制策略，根据 STATCOM 的特点，可考虑多目标的控制策略，使 STATCOM 装置针对电力系统各种控制目标进行合理的调节，使之运行在更加优化的状态。

3、未对 TSC 和 STATCOM 补偿时相互间的影响作深入的研究。

随着电力电子技术（包括器件制造技术、主电路拓扑技术、脉冲调制技术）及自动控制技术、计算机技术、微电子技术及能量存储技术的发展，21 世纪的电力系统将是传统的电力系统与各种 FACTS 技术装置一起构成的复杂的、高度安全可靠的、经济高效的、高度可控的，能为人类提供优质电能的现代化电力系统。而基于电力电子的并联补偿技术必将在其中起到非常重要的作用，并联补偿技术也将朝着结构更加简单、控制更加灵活、响应速度更快、功能更加齐全的方向发展。

参考文献

- [1] 何利铿, 丘国跃. 电力系统无功功率补偿与有功功率控制. 重庆: 重庆大学出版社, 1995
- [2] 袁佳歆, 陈柏超. 利用配电网静止无功补偿器改善配电网电能质量的方法. 电网技术, 2004, 28 (19): 81-84
- [3] 张炜. 电力系统分析. 北京: 中国水利电力出版社, 1999
- [4] 米勒. 电力系统无功功率控制. 北京: 水利电力出版社, 1990
- [5] 肖湘宁. 电能质量分析与控制. 北京: 中国电力出版社, 2004
- [6] 谢小荣, 姜齐荣. 柔性交流输电系统的原理与应用. 北京: 清华大学出版社, 2006
- [7] 张刘春, 韩如成. 无功补偿装置的现状和发展趋势. 太原重型机械学院学报, 2004, 25 (1): 30-33, 39
- [8] 苑舜, 韩水. 配电网无功优化及无功补偿装置. 北京: 中国电力出版社, 2003
- [9] 戴晓亮. 无功补偿技术在配电网中的应用. 电网技术, 1999, 23 (6): 11-14
- [10] 何一浩, 王树民. TSC 动态无功补偿技术述评. 中国电力, 2004, 37 (10): 22-26
- [11] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿. 北京: 机械工业出版社, 1998
- [12] 谷永刚, 肖国春, 裴云庆, 等. 晶闸管投切电容器 (TSC) 技术的研究现状与发展. 电力电子技术, 2003, 37 (2): 85-88
- [13] 罗承廉, 纪勇, 刘遵义. 静止同步补偿器 (STATCOM) 的原理与实现. 中国电力出版社, 2005
- [14] Sun J, Czarkowski D, Zabar Z. Voltage flicker mitigation using PWM-based distribution STATCOM. 2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2002, 1: 616-621
- [15] 姜齐荣, 谢小荣, 陈建业. 电力系统无功补偿——结构、原理、控制与应用. 北京: 机械工业出版社, 2004
- [16] 李民族, 唐晓玲. 新型电容无功补偿方法及其接线. 电网技术, 2004, 28 (16): 64-68
- [17] 沈斐, 王娅岚, 等. 大容量 STATCOM 主电路结构的分析和比较. 电力系统自动化, 2003, 27 (8): 59-65
- [18] Shen D, Lehn P W. Modeling, Analysis and Control of a Current Source

- Inverter-Based STATCOM. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17 (1): 248-253
- [19] 吴启涛, 王建曷. 新型低谐波静止无功补偿器及其应用. 电力系统自动化, 2003, 27 (9): 58-61
- [20] Julio G. Mayordomo, Mohamed Izzeddine, Rafael Asensi. Load and voltage balancing in harmonic power flows by means of static Var compensator. IEEE Transactions on power delivery, 2002, 17 (3): 1-3
- [21] 刘文华, 姜齐荣, 梁旭, 等. 士 20Mvar STATCOM 总体设计. 电力系统自动化, 2000, 24 (23): 14-18
- [22] Akagi H, Kanazawa Y, Nabase A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy compensators. IEEE Transaction on Industry Applications. 1984, 20 (3): 625-630
- [23] 孙士乾, 叶受读. PARK 变换与瞬时无功功率. 浙江大学学报 (自然科学版), 1994, 28 (5): 570-576
- [24] Hsu Y Y, Lu F C. A combined artificial neural network-fuzzy dynamic programming approach to reactive power/voltage control in a distribution substation. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 13 (4): 1256-1271
- [25] Lee K Y, Bai X M, Park Y M. Optimization method for reactive power planning by using a modified simple genetic algorithm. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10 (4): 1843-1850
- [26] 关维国, 李光林. 一种基于低压配电网的 TSC 智能无功补偿装置. 辽宁工学院学报, 2003, 23 (2): 7-8
- [27] 李升. 基于九区图的变电站电压无功控制策略研究. 青海电力, 2005, 24 (2): 1-4
- [28] 戴宪滨. 基于九区图的变电站电压无功控制策略的改进. 沈阳工程学院学报 (自然科学版), 2005, 1 (4): 44-45
- [29] 钱晶. 基于模糊控制的变电站电压与无功综合控制: [硕士学位论文]. 成都: 四川大学, 2005
- [30] 海涛, 徐嫣, 骆武宁, 等. 基于模糊控制的电容器投切控制算法. 广西大学学报 (自然科学版), 2005, 30 (3): 259-262
- [31] 杨标, 李升, 陈红亮. 变电站电压无功基本模糊控制器设计. 山东冶金, 2004, 26 (6): 51-54
- [32] 马瑞军, 程林, 郭一杰, 等. 运用模糊控制理论的并联电容器投切方式. 华北电力大学学报, 1998, 25 (3): 24-28
- [33] 江均, 邹有明, 吴君, 等. 基于变电站电压与无功综合调节的模糊控制研究. 煤矿机械, 2005, (5): 42-44

- [34] Pranesh Rao, M. L. Crow, Zhiping Yang. STATCOM control for power system voltage control applications. IEEE Trans On Power Delivery, 2000, 15 (4): 1311-1317
- [35] 郭锐. 配电网 STATCOM 分析与控制研究: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏大学, 2006
- [36] 唐杰. 配电网静止同步补偿器 (D-STATCOM) 的理论与技术研究: [博士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2007
- [37] 李士勇. 模糊控制, 神经控制和智能控制论. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000
- [38] 黄锋, 谢运祥, 黄敏俊. 智能 TSC 低压动态无功补偿控制器设计. 电气传动自动化, 2007, 29 (3): 54-56
- [39] 刘晓阳, 齐宏伟, 于洋, 等. 智能型动态无功补偿控制器的设计. 沈阳理工大学学报, 2007, 26 (2): 62-66
- [40] 胡国亮, 陈久康. 用 MATLAB 进行模糊控制器的设计和仿真. 基础自动化, 2000, 7 (1): 15-20
- [41] 闻新, 周露, 李东江, 等. MATLAB 模糊逻辑工具箱的分析与应用. 北京: 科学出版社, 2001
- [42] 楼顺天, 胡昌华, 张伟. 基于 MATLAB 的系统分析与设计——模糊系统. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001
- [43] 李峰. 多机电力系统中静止同步补偿器 STATCOM 的系统模型仿真及应用研究: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2006
- [44] 英雨. 静止无功发生器 (STATCOM) 在电力系统稳定中应用的仿真研究: [硕士学位论文]. 北京: 清华大学, 2000
- [45] 孙元章, 赵枚, 黎雄, 等. STATCOM 控制的电力系统稳定分析. 电力系统自动化, 2001, 25 (11): 1-5
- [46] 栗春, 马晓军. 用 STATCOM 改善系统电压调节特性的动模实验. 中国电机工程学报, 1999, 19 (9): 46-49
- [47] 孙元章, 王志芳. 静止无功补偿器对电压稳定性的影响. 中国电机工程学报, 1997, 17 (6): 373-376
- [48] 汤亚芳, 施怀瑾, 杨赢. 基于 MATLAB 的电力系统新型元件的仿真建模及分析. 贵州工业大学学报 (自然科学版), 2001, 30 (3): 46-49
- [49] 刘兴杰, 田建设, 丁波, 等. 应用 Matlab 进行电力系统分析和动态仿真. 电力自动化设备, 2004, 24 (3): 43-46

附录

附录一：TSC 模糊控制器的 MATLAB 实现程序

[System]

Name='tscfis'

Type='mamdani'

Version=2.0

NumInputs=2

NumOutputs=1

NumRules=49

AndMethod='min'

OrMethod='max'

ImpMethod='min'

AggMethod='max'

DefuzzMethod='centroid'

[Input1]

Name='Eu'

Range=[-6 6]

NumMFs=7

MF1='NB': 'trimf', [-6 -6 -3]

MF2='NM': 'trimf', [-6 -4 -1]

MF3='NS': 'trimf', [-4 -2 0]

MF4='ZO': 'trimf', [-3 0 3]

MF5='PS': 'trimf', [0 2 4]

MF6='PM': 'trimf', [1 4 6]

MF7='PB': 'trimf', [3 6 6]

[Input2]

Name='Eq'

Range=[-6 6]

NumMFs=7

MF1='NB': 'trimf', [-6 -6 -4]

MF2='NM': 'trimf', [-6 -4 -1]

MF3='NS':trimf,[-4 -2 0]

MF4='ZO':trimf,[-1.5 0 1.5]

MF5='PS':trimf,[0 2 4]

MF6='PM':trimf,[1 4 6]

MF7='PB':trimf,[4 6 6]

[Output1]

Name='Cq'

Range=[-6 6]

NumMFs=7

MF1='NB':trimf,[-6 -6 -4]

MF2='NM':trimf,[-6 -4 -2]

MF3='NS':trimf,[-4 -2 0]

MF4='ZO':trimf,[-2 0 2]

MF5='PS':trimf,[0 2 4]

MF6='PM':trimf,[2 4 6]

MF7='PB':trimf,[4 6 6]

[Rules]

1 1, 2 (1) : 1

1 2, 2 (1) : 1

1 3, 4 (1) : 1

1 4, 4 (1) : 1

1 5, 4 (1) : 1

1 6, 5 (1) : 1

1 7, 6 (1) : 1

2 1, 2 (1) : 1

2 2, 2 (1) : 1

2 3, 4 (1) : 1

2 4, 4 (1) : 1

2 5, 4 (1) : 1

2 6, 5 (1) : 1

2 7, 6 (1) : 1

3 1, 1 (1) : 1

3 2, 2 (1) : 1

3 3, 4 (1) : 1
3 4, 4 (1) : 1
3 5, 4 (1) : 1
3 6, 5 (1) : 1
3 7, 7 (1) : 1
4 1, 2 (1) : 1
4 2, 2 (1) : 1
4 3, 4 (1) : 1
4 4, 4 (1) : 1
4 5, 4 (1) : 1
4 6, 6 (1) : 1
4 7, 6 (1) : 1
5 1, 1 (1) : 1
5 2, 2 (1) : 1
5 3, 4 (1) : 1
5 4, 4 (1) : 1
5 5, 4 (1) : 1
5 6, 6 (1) : 1
5 7, 6 (1) : 1
6 1, 1 (1) : 1
6 2, 2 (1) : 1
6 3, 4 (1) : 1
6 4, 4 (1) : 1
6 5, 4 (1) : 1
6 6, 5 (1) : 1
6 7, 6 (1) : 1
7 1, 1 (1) : 1
7 2, 2 (1) : 1
7 3, 4 (1) : 1
7 4, 4 (1) : 1
7 5, 4 (1) : 1
7 6, 5 (1) : 1
7 7, 5 (1) : 1

附录二：STATCOM 数学模型的 S-Function 程序

```

function [sys,x0,str,ts] = statcom (t,x,u,flag,R,L,C,K,I)
% R  等效电阻
% L  等效电感
% C  直流侧电容
% K  逆变器调制比
% W  dq0 坐标下旋转角频率
% I  初始状态电流, [Ia Ib Ic Idc]
switch flag,
    case 0,
        [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes (I) ;
    case 1,
        sys=mdlDerivatives (t,x,u,R,L,C,K) ;
    case 2,
        sys=mdlUpdate (t,x,u) ;
    case 3,
        sys=mdlOutputs (t,x,u) ;
    case 9,
        sys=mdlTerminate (t,x,u) ;
    otherwise
        error (['Unhandled flag = ',num2str (flag) ]) ;
end
function [sys,x0,str,ts]=mdlInitializeSizes (I)
sizes = simsizes;
sizes.NumContStates  = 4;
sizes.NumDiscStates  = 0;
sizes.NumOutputs     = 4;
sizes.NumInputs      = 3;
sizes.DirFeedthrough = 0;
sizes.NumSampleTimes = 1;
sys = simsizes (sizes) ;
x0  = I;
str = [];
ts  = [0 0];
function sys=mdlDerivatives (t,x,u,R,L,C,K)

```

```

dx(1)=K*x(4)*sin(u(3)-u(1))/L-sqrt(2)*u(2)*sin(u(3))/L-R*x(1)/L;
dx(2)=K*x(4)*sin(u(3)-2*pi/3-u(1))/L-sqrt(2)*u(2)*sin(u(3)-2*pi/3)/L-R*x(2)/L;
dx(3)=K*x(4)*sin(u(3)+2*pi/3-u(1))/L-sqrt(2)*u(2)*sin(u(3)+2*pi/3)/L-R*x(3)/
L;
dx(4)=-K/C*(x(1)*sin(u(3)-u(1))+x(2)*sin(u(3)-2*pi/3-u(1))+x(3)*sin(u(3)+2*pi
/3-u(1)));
sys =dx;
function sys=mdlUpdate(t,x,u)
sys = [];
function sys=mdlOutputs(t,x,u)
sys =x;
function sys=mdlTerminate(t,x,u)
sys = [];

```

致谢

本文是在导师危韧勇教授的悉心关怀指导下完成的。危老师多次询问研究进程，并为我指点迷津，帮助我开拓研究思路。危老师严谨而求实的治学态度，广博精深的学术知识，踏实而细致的工作作风，让我在学习的过程中受益匪浅，我的每一点进步都离不开导师的关怀和帮助。

感谢危韧勇教授、黄挚雄教授、李志勇副教授等对我的教育培养。他们细心指导我的学习与研究，值此论文脱稿之际，谨向各位老师致以诚挚的谢意。

在此，我还要感谢在一起愉快的度过研究生生活的电气工程研究所的各位同门，特别感谢陈思范、汤杰、潘前华、甘率、刘杰、张俊等，正是由于你们的帮助和支持，我才能克服一个一个的困难和疑惑，直至本文的顺利完成。

感谢我的父母，因为你们的辛苦我才能走到了今天，是你们的支持使我完成了学业。感谢我的爱人谢慧珊，你为我们的家庭付出了很多，你的关爱与支持是我前进的动力。感谢我的儿子严智博，你的出世为我带来了别样的欢乐。

最后再次深深感谢所有关心和帮助过我的师长、同学、朋友和亲人！谢谢你们！

严春平

2009年4月于长沙

攻读硕士学位期间参加科研及完成论文情况

1. 参加科研情况

[1] 参加信息科学与工程学院学术年会，发表论文《基于模糊控制的 TSC 无功补偿系统的研究》

2. 发表论文情况

[1] 严春平, 危韧勇. 基于模糊控制的 TSC 无功补偿系统的研究. 微计算机信息. (已录用)