

关键词：次同步谐振，柔性交流输电系统，静止同步无功补偿器，超导磁储能

ABSTRACT

The series capacitor compensation, which is an important measure as the improvement of the transmission line's transmission ability, has been more and more emphasized in power network planning in our country. But after the series capacitor compensation is used in the extra-high voltage long distance transmission system, sub-synchronous resonance(SSR) will occur. SSR is a very dangerous state which may occur in power system operation. When the electric resonance frequency approximatively adds one of the inherent surge frequency of synchronous generator axis. The coupling surge of electric-machine system will occur, the serious accident is the synchronous generator axis will be twist off and the grave economy loss will be result in. Therefore, the research on the SSR which is produced by the series capacitor compensation and countermeasures to prevent its electric-machine resonance is one of an important subjects in the safe and stable operation of power system.

Flexible AC Transmission System (FACTS) will be widely used in power system, it is one of the burgeoning subjects of power system in recent years. As the fast and flexible adjustment ability of FACTS equipment, many application fields of power system have pay more attention to it, and it provides useful tools to restrain SSR.

The basic principle of SSR of synchronous generator is analyzed in this paper firstly. And making Mathematical models of SSR, Using simulation software MATLAB/SIMULINK to make models which basis on analysis of Mathematical Modeling.

In terms of hierarchical structure, the paper specified base the operating principle of STATCOM and SMES, and building their mathematical model. Using simulation software MATLAB/SIMULINK to make models which basis on analysis of Mathematical Modeling. It contains the circuit improve, building main circuit of large capacity STATCOM with multiple configuration.

Using the controller of indirect current control test and verify that, using STATCOM can gain the ends of reactive compensation and the synchronous generator axis will never augmentation .

In the end, the paper targeted the first IEEE SSR benchmark model, research a method of damping SSR of power system using STATCOM and SMES. This method base on the method of complex torque coefficient. Referring to the basic idea of the method of complex torque coefficient, the expression about the electric complex torque coefficient and mechanical one was derived, also the control strategy to damp the SSR was proposed as well as PI controller was designed. The simulation results showed the validity and correctness of this method.

Key words :Sub-synchronous resonance, Flexible AC Transmission System, Static Synchronous Compensator(STATCOM), superconducting magnetic energy storage(SMES)

西南交通大学

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权西南交通大学可以将本论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复印手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

1. 保密 ，在 年解密后适用本授权书；
2. 不保密 ，使用本授权书。

（请在以上方框内打“√”）

学位论文作者签名：刘燕

日期：2009.6.2

指导老师签名：唐和涛

日期：2009.6.3

西南交通大学学位论文创新性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是在导师指导下独立进行研究工作所得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

刘燕
2008.6.4.

第一章 绪论

1.1 课题背景及研究意义

近年来我国社会主义市场经济日趋深化,国民经济的发展日益迅速,随着用电负荷的迅速增长,我国电网的输送容量也在不断的增大,输电距离不断加长。但是远距离输电系统由于其线路长,损耗大,输送功率往往大大低于其极限水平,为了增加远距离高压输电系统的传输容量,电力网络的串联电容补偿是一项非常经济而有效的常用措施。但是当电力系统中串联入电容补偿的输电系统时,处于平衡状态下的系统受到扰动后,电力网络与汽轮发电机组之间可能以系统的一个或数个低于同步频率的自然频率交换数量相当可观的能量,此类现象称为次同步谐振^[1](sub-synchronous resonance,缩写为 SSR)。在次同步谐振状态下,发电机内会产生次同步的旋转磁场,它与同步旋转磁场相互作用,产生差频振荡转矩,有可能在机械与电气系统之间发生谐振,损坏发电机的轴系统。1970年12月和1971年10月,美国的MOHAVE火电站接连发生了两起次同步谐振^[2],造成发电机大轴损坏,由此引发了对于次同步谐振世界性的研究热潮。次同步谐振相对于低频振荡而言,发生的几率较小,但次同步谐振对于电力系统的危害极大。因此,电力系统的学者对于抑制次同步谐振的研究始终没有停止。如何提高线路的传输效率和系统的稳定就成为了一个日趋迫切的课题。

灵活交流输电系统^[3](Flexible AC Transmission System,简称 FACTS),是现代电力系统中具有变革性的前沿课题之一。FACTS的概念是由美国电力科学院(EPRI)的N.G.Hingorani博士于1986年首先提出的。在1997年IEEE的FACTS工作组在冬季会议上将FACTS定义为:装有电力电子型或其他静止型控制器以加强和增大电力传输能力的交流输电系统^{[4][5][6]}。

近年来 FACTS 技术的发展势头良好,这主要取决于其良好的背景条件。

(1) FACTS 技术的产生是解决输电网运行和发展中各种困难的客

观需要。

(2) HVDC 的重新崛起和广泛应用客观上给 HVAC 带来压力,从而也促使 FACTS 技术的诞生和发展。

(3) 电力电子等技术的发展为 FACTS 奠定了坚实的基础。

(4) FACTS 是在归纳已有的 FACTS 技术产品的研制和运行的基础上自然形成的概念。

FACTS 设备根据安装形式可分为并联型,串联型和串并联混合型。并联型的代表有静止同步无功补偿器 STATCOM,静止无功补偿器 SVC 等^[7];串联型的代表有晶闸管控制的可控串联补偿器 TCSC;混合型的代表有统一潮流控制器 UPFC 等。不同的 FACTS 设备在电网中能控制的参数是不同的,由于电网中的电压,电流,阻抗,有功和无功功率等因素都是紧密相连的,每一种控制器往往有多种好处,而且,控制器既可以开环运行也可以闭环运行,以达到多重效果。

FACTS 与传统的解决方法的根本区别在于:FACTS 是基于高速大容量电力电子技术的,因而具有更快的响应速度,更好的可控性和更强的控制能力,主要表现在^[8]:

- (1) 更快的响应速度
- (2) 更频繁的控制。
- (3) 连续控制能力。
- (4) 更综合和更灵活的控制归纳。
- (5) 有功补偿能力。
- (6) 能克服传统解决方法的局限性。

总之,FACTS 技术使得对大型互联电网的控制能够更加快速,频繁,连续,综合,灵活,在电力系统的许多领域得到了重视,为抑制 SSR 提供了有力的工具。对 FACTS 控制器的研究使其在发挥其他功能的同时发挥抑制系统次同步谐振的功能,是一种经济的策略方案。因此研究 FACTS 原件抑制系统次同步谐振不仅具有理论意义,而且具有经济实用的价值^[9]。

1.2 研究现状

1.2.1 次同步谐振的研究现状

1970 年和 1971 年美国 Mohave 电站连续两次因 SSR 造成大轴断裂,这一典型扭振事故引起了国际学术界和电力工程界的严重关注,从此掀起了 SSR 研究的热潮。国际电气电子工程师协会(IEEE)于 1973 年专门成立了一个次同步谐振专题组(SSR Working Group),最初是组织、协调有关 SSR 研究工作的,随着研究的深入,SSR 专题组关心的内容已经拓宽到扭振研究的多个方面。SSR 专题组多次召开有关扭振问题的专题学术会议^[10, 11, 12],向电力工程界颁布和推荐有关定义和术语^[13],先后提出两个基准分析模型^[14, 15],并于 1992 年提出次同步扭振研究的指南性报告^[16],这些工作有力推动了扭振研究的发展。SSR 专题组还陆续收集发表在 IEEE 的汇刊和会议等国际知名的学术期刊和会议上发表的有关扭振研究的技术论文,分类编成参考书目报告^[17]在 IEEE 汇刊上发表,至 1997 年先后做了四次补充^[18, 19, 20, 21],共收录论文近 400 篇,这从一个侧面反映了扭振研究的成果和进展情况。本文主要从次同步谐振的分析方法和特性规律以及抑制措施角度进行研究。

1.2.2 FACTS 技术发展现状

现今 FACTS 在世界上,尤其是工业发达国家有了较广泛的应用。目前,FACTS 抑制 SSR 的性能得到了比较广泛而深入的研究,NGH 阻尼器就是一种专门为了抑制 SSR 而设计的 FACTS 元件,可控移相器(TCPS)抑制 SSR 的性能也已经获得了一定的研究,在抑制次同步谐振中研究最多的 FACTS 元件是可控串联补偿器(TCSC)。自 1991 年以来,美国已经相继安装了 3 套 TCSC,其抑制次同步谐振的能力经过了实践检验。

FACTS 在中国的发展,从总体上说,要滞后于发达国家。我国对 SVC 的研究与应用始于 70 年代末,至今已积累了较多的 SVC 运行经验,其制造技术也已相当成熟。目前我国大陆在 500 kV 系统中运行的进口 SVC 有 6

台,在钢铁企业中也有较多的应用。作为原电力部重大科技攻关项目,由河南省电力局和清华大学共同研制的 20 Mvar STATCOM 已于 2000 年 6 月 27 日在洛阳成功进行了鉴定,使我国成为世界上第 4 个拥有大容量 STATCOM 的国家,将成为中国 FACTS 研究应用领域的一个重要里程碑。

SMES(超导磁蓄能)是超导技术在电力系统中非常有前景的一种应用。它是以超导技术和现代电力电子技术相结合构成的一种 FACTS 装置^[22]。由于它可以提高电网的稳定性,改善电网电能质量而成为近几年的研究热点^{[23][24][25][26][27]}。SMES 是一种将能量以电磁能的形式储存在超导线圈中的一种快速高效的储能装置,当超导磁体通过电力电子变换器与交流电网相连接时,就可以改变其输出电流的大小和相位,从而得到一个大小方向均可调的有功,无功源。

SMES 作为 FACTS 的一员,具有如下的优点:

1. 转换效率高;
2. 相应速度快;
3. 运行灵活;
4. 其他,如系统寿命长,不受地点限制,维护方便等。

因此,由于 FACTS 技术的发展,可以考虑如何加强对次同步谐振的抑制作用。

但是由于国内长期没有串补工程,因而对于次同步谐振问题还处于原理性的研究阶段,尤其对于防止次同步谐振的措施尚没有进行深入研究。

1.3 常用次同步谐振的分析方法

在 SSR 分析中,常用的方法分三大类:频域分析法,特征值分析法和时域分析法。^[28,29]

(1) 频域分析法

次同步谐振的频域分析法包括频率扫描法和复转矩系数法。

(a) 频率扫描法:

是一种近似的线性方法。具体分析时,需要研究的相关系统用正序网来模拟;除待研究的发电机之外的网络中的其他发电机用次暂态电抗等值

电路来模拟；待研究的发电机用感应发电机等值电路来模拟，如图虚线所示部分，其中的电阻和电感随频率而变化。该方法主要适用于大型系统，一般可减少计算工作量及时间。

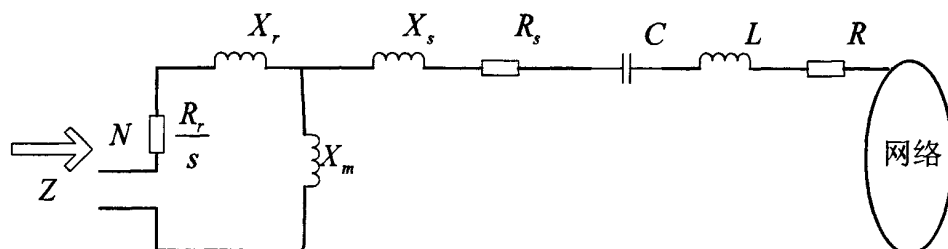


图 1-1 频率扫描等值电路示意图

频率扫描法针对某一特定的频率，计算从待研究的发电机转子后向系统侧看进去的等值阻抗，即从图 1-2 的端口 N 向系统侧看进去的等值阻抗，通常称该等值阻抗为 SSR 等值阻抗；通过频率扫描，可以分别得到等值阻抗的实部（即 SSR 等值电阻）和虚部（即 SSR 等值电抗）随频率而变化的曲线，根据这两条曲线可以对次同步谐振的三个方面的问题（即感应发电机效应、扭转相互作用和暂态扭矩放大作用）作出初步的估计。

频率扫描法也许是确定是否存在感应发电机效应的最好方法。如果 SSR 等值电抗等于零或接近于零所对应的频率点上的 SSR 等值电阻小于零，则可以确认存在感应发电机效应。而等值电阻负值的大小则决定着电气振荡发散的速度。该电气振荡并不意味着会引起轴系的负阻尼振荡，但对电气设备而言，可能是不能容忍的。

扭转相互作用可以使轴系中的弱阻尼扭振模态失稳，而对应频率下的 SSR 等值阻抗的大小直接与该扭振模态的负阻尼相关，其估计公式为：

$$D_m = \left(\frac{f_0}{2f_m} - \frac{1}{2} \right) \times \frac{R}{R^2 + X^2} \quad (1-1)$$

式中 R 和 X 分别为 SSR 等值电阻和 SSR 等值电抗。

频率扫描法也可用来确定是否存在暂态扭矩放大作用。如果 SSR 等值电抗达到极小值的频率点与机组轴系扭振固有频率接近互补，就有可能存在暂态扭矩放大作用。在这种情况下，就应该用电磁暂态仿真类软件作进一步的研究。同样，如果 SSR 等值电抗达到极小值的频率点与机组轴

系扭振固有频率的互补值相差大于 3Hz, 则可以排除暂态扭矩放大作用。

注意到频率扫描法分析过程只考虑电气系统, 没有涉及机械系统。

(b)复转矩系数法

复转矩系数 (Complex Torque Coefficients) 法主要通过比较发电机电气复转矩系数和机械复转矩系数来判断系统是否会发生次同步谐振, 文献 [30, 31, 32] 均对复转矩系数法进行了相关研究

复转矩系数法分析的具体过程为: 对研究系统中的某一台发电机转子的相对角度 δ 施加一个频率为 $h < f_0$ 的强 $h < f_0$ 制小值振荡 $\Delta\delta$, 然后通过计算得到该发电机电气系统和机械系统的响应——电气复转矩 \dot{T}_e 和机械复转矩 \dot{T}_m , 分别定义电气复转矩系数:

$$\dot{K}_e(jh) = \frac{\dot{T}_e}{\Delta\delta} = K_e(h) + jhD_e(h) \quad (1-2)$$

机械复转矩系数:

$$\dot{K}_m(jh) = \frac{\dot{T}_m}{\Delta\delta} = K_m(h) + jhD_m(h) \quad (1-3)$$

式中 K_e 和 D_e 分别为电气弹簧系数和电气阻尼系数, K_m 和 D_m 分别为机械弹簧系数和机械阻尼系数。

通过比较电气和机械的复转矩系数 (包括弹簧系数和阻尼系数), 就能分析系统在频率为 h 时的振荡特性: 当 $K_m + K_e \rightarrow 0$ 时, 系统处于临界状态, 如果此时 $D_m + D_e < 0$, 则对应的次同步扭振模态是不稳定的。

可以看出, 复转矩系数法能够涉及到机械系统和电气系统的相互影响, 考虑的因素较频率扫频法更全面一些

(2)特征值分析法

特征值分析法是分析系统在小扰动下的稳定性的最为经典的方法, 特征值分析法是通过建立系统在平衡工况点的小扰动线性化模型, 计算出线性化系统的各个特征值、特征向量及相关因子等信息。其中每一对共轭特征值的模值对应系统的一个固有频率, 其实部表征该固有频率的振荡模态的阻尼特性, 而特征向量则反映轴系各质量块的相对振幅和相位关系 (即振型)。

特征值分析法的优点是可以得到上述大量有用信息, 容易分析对策实施前后的特征值变化情况, 与线性控制理论相结合还可用于设计控制器以抑制次同步谐振, 除了暂态扭矩放大作用之外, 其它的次同步谐振问题均

可进行分析。缺点是对系统的描述只用正序网络，而且求特征值的矩阵阶数高，难以适应多机系统的情况。

(3)时域分析法

时域仿真法将电力系统各元件间的拓扑关系形成全系统模型，这是一组联立的微分方程组和代数方程组，然后以稳态工况或潮流解为初值，求扰动下的数值解，即逐步求得系统状态量和代数量随时间的变化曲线，并根据发电机转子摇摆曲线来判别系统在大扰动下能否保持同步运行，即暂态稳定性^[33]。

1.4 常用控制次同步谐振的措施：

(1)串联电容器的控制和电压整定

所有串联电容器都有电压限制保护，可以防止在事故情况下电容器两端的电压太高，这种保护同时也可以限制电网和汽轮发电机组之间以次同步谐振方式交换的能量，也就是限制了次同步频率的轴扭矩，这种办法的副作用是，如果不采用其他保证重投成功的措施，它将使电容器重投率降低，影响系统的稳定性能。

(2)继电保护及检测设备

继电保护措施的目的是为了 avoid 扭振事故扩大以至损坏轴系，其装置主要有扭振继电器、电枢电流继电器等。继电保护装置动作将引起切机，因此应用时要充分考虑切机对电网的影响。

● 扭振继电器

扭振继电器 (Torsional Motion Relay) 的作用是，当检测到汽轮发电机组大轴的机械应力过大时将机组与电网解列。扭振继电器的输入与转子转速成正比，信号来自装在机组轴系两端的齿形轮上的传感器，通过按机组轴系固有频率调谐的窄带滤波器进行信号分离，并处理转换为扭矩信号后，与扭矩给定值进行比较，如超出给定值则保护装置作用于切机。扭振继电器主要用来防止扭振相互作用，而对感应发电机效应没有可靠的保护作用。在 Navajo 发电厂，有一次当附加励磁阻尼器控制失误时，扭振继电器曾保护过一台机组免遭逐步增大的扭矩振荡的损害^[34]。

● 电枢电流继电器

电枢电流继电器 (Armature Current Relay) 对汽轮发电机组的保护作用是, 当出现持续的次同步振荡时, 切除发电机, 使其不受感应发电机效应和扭振相互作用的影响。电枢电流继电器对电枢的次同步频率电流很敏感, 可分级整定。对较小启动电流, 要求有较长延时, 以免不必要的切机; 对较大启动电流, 要求速动, 以免过多损伤机组。南加利福尼亚爱迪生公司曾研制出一种称之为 TEX 的电枢电流继电器, 从 1973 年至 1979 年已在美国西部的 12 台机组上安装。分析评价结果清楚地表明, TEX 继电器本可以及早地使 Mohave 发电厂的机组跳闸, 从而避免两次 SSR 事故。

但是次同步谐振继电器不能用于抵御来自暂态扭矩的威胁。感应发电机作用未涉及机械扭矩问题, 因而也不能保护。而且他不能提供对暂态扭矩的保护。它主要是防止感应发电机作用和扭转互作用对发电机组的威胁。继电器保护的优点是简单。

(3)轴扭转监视器

SSR 问题引起的轴系扭振损坏具有隐蔽性和潜伏性, 没有专门仪器难以及时察觉。扭振监测装置则可对汽轮发电机组进行连续的监测, 以估计由电气干扰或谐振造成的大轴扭振的严重程度。这种装置不能保护机组不受次同步电流振荡的影响。目前扭振监测装置主要有扭振监测仪和扭应力分析仪两类^[35]。

● 扭振监测仪

扭振监测仪 (Torsional Monitor) 检测转子转速变化, 并通过模拟电路转换为大轴的振荡扭矩信号, 因任何电气扰动而使大轴扭矩接近或超过材料疲劳极限时, 检测数据将被记录, 然后可由制造厂进行分析, 以估计大轴疲劳寿命的损耗。第一台扭振监测仪安装在 Navajo 发电厂。扭振监测仪的优点在于简单易用、价格低廉, 便于广泛装设; 缺点则是功能有限。

● 扭应力分析仪

扭应力分析仪 (Torsional Stress Analyzer, 缩写为 TSA) 是一类复杂、昂贵的扭振监测分析装置, 功能非常齐全, 可以连续监测和评价各种电气扰动对大轴的扭转疲劳寿命的影响, 为进一步了解被监测机组与电力系统之间的相互影响提供资料, 以及为大型汽轮发电机组提供预防性维修措施^[36]。TSA 输入多种与轴系扭振有关的信号, 包括转速偏差信号、汽缸蒸汽压力、发电机机端电压和电流等, 然后用复杂的计算程序或模拟电路计

算轴系扭振响应,得到有关截面的扭矩、扭应力和扭应变。高性能的 TSA 另外还有轴系疲劳寿命损耗的计算和统计功能,有大容量的数据、档案存储系统,甚至配以远程计算机,统计一个大区域内的各种扭振信息。

原联邦德国 Wilbel Shave 发电厂一台 770MW 机组的 TSA 在运行监测中发现轴系疲劳寿命损耗增大较快,当时系统无任何特殊操作,故曾怀疑 TSA 误动,后来证实是晶闸管控制的 16.8MVA 锅炉给水泵电动机引起频率为 15.75Hz 的振荡^[37]。国内在 20 世纪 80 年代中期开始扭振监测研究。东南大学研制的第一台微机扭振监测仪于 1989 年初通过中电联组织的鉴定^[38];同一时期,上海成套所和清华大学分别研制出多种类型的扭振监测仪和扭振诊断装置^[39, 40];华北电力大学在元宝山 300MW 机组上研制安装的扭应力监测装置,成功监测和记录了甩负荷以及快关汽门等多种工况下的轴系扭应力^[41, 42],对保证快关汽门的成功投运发挥了重要作用。

(4) 多种滤波器

● 静止阻塞滤波器

静止阻塞滤波器 (Static Blocking Filter) 由若干个并联谐振回路串联而成,如图 1-2 所示,它们串联在升压变压器的中性点或出线端,每相一个,其中不同的并联谐振回路分别阻塞不同的次同步频率电流。实质上,静止阻塞滤波器的作用就是在临界次同步谐振频率下将机组和系统隔开。静止阻塞滤波器可以抑制扭振相互作用和暂态扭矩作用。装在 Navajo 发电厂的静止阻塞滤波器,于 1976 年 4 月完成试验后至 1979 年一直运行。

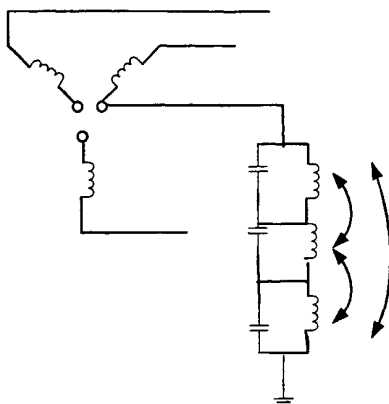


图 1-2 静止阻塞滤波器

● 旁路阻尼滤波器

旁路阻尼滤波器 (Bypass Damping Filter) 由并联的电抗和电容器及

与其串联的一个阻尼电阻器组成，如图 1-3 所示，它和每相的电容器并联，作用是作为一个感抗旁路或电阻旁路来通过电网中的次同步频率电流。这种滤波器对抵消感应发电机效应特别有效。

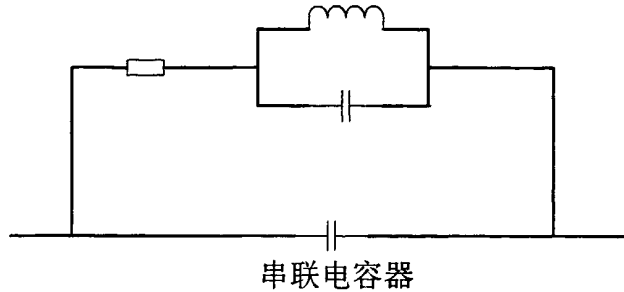
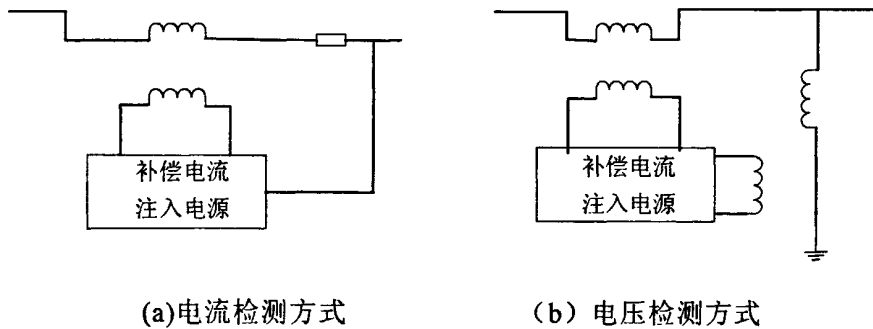


图 1-3 旁路阻尼滤波器

● 动态滤波器

动态滤波器（Dynamic Filter）的工作原理如图 1-4 所示，当系统中出现由发电机转子摇摆而感生的次同步频率电势、电流时，动态滤波器将产生一个与上述电流相位相反的补偿电流以抵消前者，可有效地防止因扭振相互作用而引起的自激。



(a) 电流检测方式

(b) 电压检测方式

图 1-4 动态滤波器

由于上述滤波器价格都较昂贵，而且有时甚至难以采用，例如，阻塞滤波器需有安装场地，动态滤波器需有独立电源等，不宜在我国电力系统中推荐采用。

(5) 阻尼控制

● 动态稳定器

所谓动态稳定器实际上是由可控硅控制的可控电抗器。它接于被保护的发电机和升压变压器中间，控制器的输入信号为转子速度，它能在所设计的次同步频率范围内，提供足够的发电机定子电流，以抵消来自输电系

统的次同步互作用的电流。他不能对感应发电机作用及暂态扭矩作用提供保护。在美国墨西哥州北部的 San Juan 发电厂，已有两台机组安装了动态稳定器。

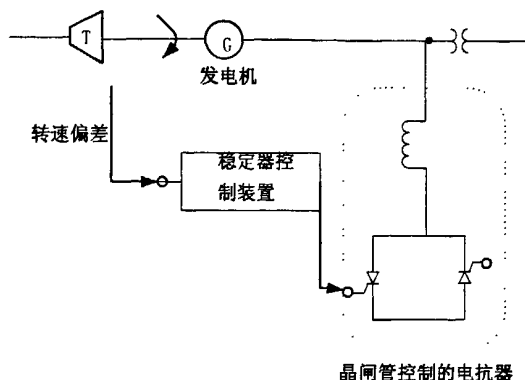


图 1-5 动态稳定器

● NGH 阻尼器

NGH 阻尼器就是一种专门为抑制 SSR 而设计的 FACTS 元件^[43]，就是通过控制晶闸管的开通，消除串联电容器上的直流电压偏置从而抑制次同步谐振。NGH 的策略比较简单，容易实现，但是 NGH 在一些串联补偿度下，不能阻尼所有的模态振荡^{[44][45][46]}。

● 可控串联补偿器 (TCSC)

可控制串联补偿器 (TCSC) 是 1986 年提出的用来用来快速调节网络阻抗。它有电容器和晶体管控制电抗器并联组成。他与 NGH SSR 阻尼器之间在电感的电阻性损耗方面有着明显的相似性。都是由串联电容器和与之并联的晶闸管控制电感器加电阻器支路构成的，不过前者是以晶闸管控制电阻器为主，而 TCSC 则是以晶闸管控制电抗器为主^[47]。TCSC 的工作过程中，为了获得期望的阻抗，在每半个周期末附近区域会导通 TCR 支路使得电容电压反向。因此，利用这种同步的反向干扰电容器对次同步频率电流分量的自然响应，从而达到抑制次同步谐振。是目前最常用于抑制次同步谐振的 FACTS 元件^{[48][49][50][51]}。

1.5 课题研究目标

本课题的研究目标是通过学习次同步谐振的产生机理及其抑制原理，

FACTS 技术的相关知识, 对 FACTS 的控制器进行研究, 建立 SSR 以及 FACTS 控制器的数学模型, 在此基础上对 FACTS 技术对次同步谐振的抑制作用进行探索, 对典型的抑制模型进行具体的仿真研究并对仿真结果进行一定的分析。

1.6 本文主要工作

本文从抑制串补输电系统的次同步谐振 (SSR) 问题, 阻尼发电机轴系间的扭矩的研究目标出发, 主要分析了应用 STATCOM 以及 SMES 装置抑制电力系统次同步谐振的方法。论文的主要内容包括以下几个方面:

第一章为绪论, 总体介绍了研究课题的学术背景及理论与实际意义, 国内外现状及文献综述, 本论文主要所做的工作。

第二章对电力系统次同步谐振的产生机理、基本原理进行分析, 并在此基础上建立次同步谐振的统一机电模型, 在数学建模的基础上用 MATLAB/SIMULINK 软件建立起发电机六轴系的仿真模型。

第三章对 STATCOM 的工作原理进行研究并建立了其数学模型。通过对其电路结构进行改善, 建立了 STATCOM 的四重化模型, 并采用电流间接控制法验证了应用 STATCOM 设计电力系统的无功补偿方案, 在达到无功补偿目的的同时不会造成发电机轴系间扭矩的增大。

第四章详细介绍了 SMES 的概念以及发展概况, 研究了 SMES 的结构、工作原理并建立其数学模型。并在 MATLAB/SIMULINK 软件下建立了其仿真模型将超导磁储能系统 (SMES) 引入带有串补电容的电力系统中, 分析其对次同步谐振所产生的作用。

第五章采用扫频复转矩判别法的思想对电力系统次同步谐振的电气阻尼系数的定量关系式进行分析, 推导出了带有 STATCOM 以及 SMES 装置的系统电气复转矩系数, 以此为基础设计出利用 STATCOM 以及 SMES 器件阻尼电力系统次同步谐振 (SSR) 的 PI 控制器。通过 MATLAB/SIMULINK 仿真软件为平台, 进行仿真研究。所得到仿真结果验证了 STATCOM 以及 SMES 通过此控制策略均可以有效的阻尼次同步谐振。

第二章 发电机次同步谐振分析

2.1 电力系统次同步谐振的产生机理

图 2-1 为一个简单的串联补偿输电系统的示意图。如果没有串联补偿电容，在一般的实用计算中，线路输送功率为：

$$P = \frac{U_1 U_2}{X_L} \sin \delta = P_m \sin \delta \quad (2-1)$$

式中： U_1 、 U_2 ——线路首末端电压

X_L ——线路电抗

δ ——线路首末端电压相角差，即功角

P_m ——线路极限输送功率，即线路静态稳定极限

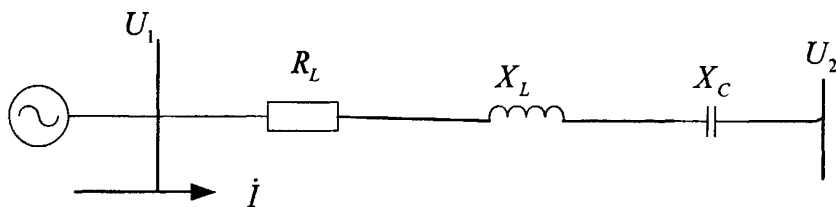


图 2-1 串联补偿输电系统示意图

可见，如果能降低输电线路的电抗，就能提高稳定极限和传输功率。在高压远距离输电线路中，串联补偿电容器的作用相当于缩短线路的电气距离，从而提高线路的稳定极限和传输容量。串联容抗为 X_C 的电容器后，线路的输送功率为：

$$P = \frac{U_1 - U_2}{X_L - X_C} \sin \delta \quad (2-2)$$

在同一功角 δ 下，增加的输送功率倍数为

$$\frac{X_L}{X_L - X_C} = \frac{1}{1 - K_C} \quad (2-3)$$

式中 $K_C = \frac{X_C}{X_L}$ 称为串补度。

实际上，串联电容器的主要作用是通过降低线路电抗，以降低线路的

电压降以及减少两端电压相角差,从而提高了输电线路静态稳定及动态稳定的裕度,为大功率传输创造了有利条件。

2.2 次同步谐振的基本原理

早在 20 世纪 30 年代,人们就发现发电机在容性负载或经由串联电容补偿的线路接入系统时,会在一定条件下引起自激,但在当时,这种现象被认为是一种单纯的电气谐振问题。由于谐振时,对于谐振频率而言,发电机相当于一台异步机,且处于异步状态,提供振荡时的能量消耗,故称之为“异步发电机效应”。直到 1970 年和 1971 年,美国 Mohave 电站由于串补电容引起发电机大轴的两次扭振破坏,人们才通过研究揭示了“机电扭振互作用”(electromechanic torsional interaction)的存在,即电气系统中的 LC 谐振在一定条件下会激发发电机轴系的扭振不稳定,从而造成大轴的扭振破坏。进一步的研究表明,在系统进行操作或有故障发生时,在一定条件下,还可以激发电态过程中的强烈扭振,此时即使发电机跳闸,轴系也可能由于衰减极慢的扭振而引起疲劳损伤,影响寿命,这一现象称为“暂态力矩放大”作用。“异步发电机效应”、“机电扭振互作用”、“暂态力矩放大”即为 SSR 的三大内容。

2.2.1 感应发电机效应

当图 2-1 所示串联补偿输电系统受到扰动时,会产生 f_{er} 频率分量的谐振电流,此谐振电流流过发电机三相电枢绕组,形成正反两个方向的旋转磁场。正向旋转磁场与转子主磁场同方向旋转,但比转子的同步速度慢,其行为过程相当于一感应(异步)发电机,两者相互作用便产生次同步转矩,其频率为转子平均转速对应的同步频率与电气谐振频率之差($f_0 - f_{er}$)。而反向旋转的磁场,则在转子中产生高于同步转速的转子电流以及高于同步转速的超同步转矩。

发电机转子以同步转速旋转,流入电枢端部的次同步频率电流所遇到的发电机电阻为 R_r/s (R_r 和 s 分别为转子电阻和滑差),此时该滑差为负。发电机对次同步频率电流的阻抗,因转子电阻和负滑差的作用,会包含负

电阻分量。当次同步频率接近同步频率时，滑差的绝对值变小，负电阻变大。当负电阻绝对值大于回路电阻时，回路就产生自激，形成感应发电机效应，它会使系统次同步电压和电流增加，并有可能达到损坏发电机以及其他电力系统设备的程度。

2.2.2 扭转相互作用

发电机组转子以某个次同步扭转模态频率（即轴系某一固有频率） f_m 振荡，引起电枢电压次同步频率分量（频率为 $f_0 - f_m$ ）及超同步频率分量（频率为 $f_0 + f_m$ ）。当机械系统振荡引起的电枢电压次同步频率分量的频率接近电气谐振频率 f_{er} 时，次同步电流所产生的发电机电磁转矩会维持转子扭转模态振荡。如果次同步扭矩分量在相位上和转子速度偏差相一致，而且此扭矩等于或超过旋转系统的固有阻尼转矩，系统就成为自激的。这种汽轮发电机机械系统与串联电容补偿的电气网络间的相互作用称为扭转相互作用。

2.2.3 暂态扭矩放大作用

当有串联补偿的电力系统发生故障后又将故障消除时，串联电容器组储存大量的能量，以频率与汽轮发电机组轴系某个扭振固有频率互补的次同步电流通过发电机释放所发生的现象。即扰动造成的电磁转矩以 $f_0 - f_{er}$ 的频率振荡，且此频率接近轴系的某个固有频率 f_m 时会产生增长速度很快的轴扭矩，这是由于电气和机械固有频率谐振引起的，此称之为暂态扭矩放大作用。

2.3 次同步谐振机理分析

假设在某一稳定运行情况下，机组轴系上受到一个微小的扰动，使得电机转子块产生一个绝对角位移增量，即为

$$\Delta\theta = A \sin \omega_m t \quad (2-4)$$

此式中， ω_m 为轴系某一自然扭振频率的标么值，相应的角速度增量为

$$\Delta\omega = A \cos \omega_m t \quad (2-5)$$

此扰动在发电机定子电压、电流和电磁转矩中引起变化。我们假设忽略定子回路的电磁转矩过程和电子电阻。在这种情况下，发电机电压平衡方程中的发电机定子电压方程用标么值表示为：

$$\left. \begin{aligned} u_d &= -\omega\psi_q \\ u_q &= \omega\psi_d \end{aligned} \right\} \quad (2-6)$$

令

$$\left. \begin{aligned} u_d &= u_{d0} + \Delta u_d, u_q = u_{q0} + \Delta u_q \\ \psi_d &= \psi_{d0} + \Delta \psi_d, \psi_q = \psi_{q0} + \Delta \psi_q \\ \omega &= \omega_0 + \Delta \omega = 1 + \Delta \omega \end{aligned} \right\} \quad (2-7)$$

式中带下标 0 的为稳态运行情况下的量，因此有

$$u_{d0} = -\psi_{q0}, u_{q0} = \psi_{d0} \quad (2-8)$$

将式 2-7, 2-8 带入 2-6 有

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_d &= -\Delta \psi_q - \psi_{q0} \Delta \omega \\ \Delta u_q &= \Delta \psi_d - \psi_{d0} \Delta \omega \end{aligned} \right\} \quad (2-9)$$

应用 PARK 变换的逆变换可以将 u_{dq} 转换为 u_{abc} 。以 a 相为例，(简单起见，认为 $t=0$ 时 d 轴与 a 相绕组磁轴重合)

$$u_a = u_{a0} + \Delta u_a = \cos(u_{d0} + \Delta u_d) - \sin \theta (u_{q0} + \Delta u_q) \quad (2-10)$$

其中， $\cos \theta = \cos(\theta_0 + \Delta \theta) = \cos(t + \Delta \theta) \approx \cos t - \Delta \theta \sin t$

$$\sin \theta = \sin(\theta_0 + \Delta \theta) = \sin(t + \Delta \theta) \approx \sin t + \Delta \theta \cos t$$

将式 2-8 和 2-9 代入式 2-10，可得 a 相电压的增量为

$$\begin{aligned} \Delta u_a &= (\psi_{q0} \sin t - \psi_{d0} \cos t) - (\psi_{q0} \cos t + \psi_{d0} \sin t) \Delta \omega \\ &\quad - (\Delta \psi_q \cos t + \Delta \psi_d \sin t) \end{aligned} \quad (2-11)$$

考虑到现在所关心的是定子电压、电流因 $\Delta \theta$ 和 $\Delta \omega$ 而产生的变化，故略去上式中不直接与 $\Delta \theta$ 和 $\Delta \omega$ 有关的最后一项，然后将式 2-4 和式 2-5 代入，经推导后可得

$$\begin{aligned} \Delta u_a &= \sqrt{\psi_{q0}^2 + \psi_{d0}^2} \left\{ A/2(1 - \omega_m) \sin[(1 - \omega_m)t + \alpha] \right. \\ &\quad \left. - A/2(1 + \omega_m) \sin[(1 + \omega_m)t + \alpha] \right\} \end{aligned} \quad (2-12)$$

其中， $\alpha = \arctg(\psi_{q0}/\psi_{d0})$

相应地， Δu_b 和 Δu_c 可在式 2-12 中将 α 分别换成 $\alpha - 2\pi/3$ 和 $\alpha + 2\pi/3$ 而得。式 2-12 表明，当轴系机械运动中出现频率为 ω_m 的振荡分量时，在发电机定子中将引起次同步频率 $(1 - \omega_m)$ 和超同步频率 $(1 + \omega_m)$ 的电压分量。

如果输电线路采用串联电容补偿,而且定子回路中的电感和电容的谐振频率正好是 $(1-\omega_m)$,则定子回路中的频率为 $(1-\omega_m)$ 的电流分量与式 2-12 中的频率为 $(1-\omega_m)$ 的电压分量相位相同,即这一电流分量可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \Delta i_a &= \Delta I \sin[(1-\omega_m)t + \alpha] \\ \Delta i_b &= \Delta I \sin[(1-\omega_m)t + \alpha - 2\pi/3] \\ \Delta i_c &= \Delta I \sin[(1-\omega_m)t + \alpha + 2\pi/3] \end{aligned} \right\} \quad (2-13)$$

其中

$$\Delta I = \sqrt{\psi_{q0}^2 + \psi_{d0}^2} \times A / 2 \times (1 - \omega_m) / R$$

式中 R 为定子回路的电阻。不难看出,式 2-13 中的三相电流在空间将形成转速为 $(1-\omega_m)$ 的旋转磁场。为了求得由它所引起的电磁转矩,先应用 Park 变换导出对应于式 2-13 中三相电流分量的 d 、 q 分量,即

$$\begin{aligned} \Delta i_d &= -\Delta I \sin(\omega_m t - \alpha) \\ \Delta i_q &= -\Delta I \cos(\omega_m t - \alpha) \end{aligned}$$

然后应用发电机电磁转矩关系式 $T_e = \psi_d \cdot i_q - \psi_q \cdot i_d$ 可以得出

$$\Delta T_e = \psi_{d0} \Delta i_q - \psi_{q0} \Delta i_d = -\sqrt{\psi_{q0}^2 + \psi_{d0}^2} \Delta I \cos \omega_m t \quad (2-14)$$

将 ΔI 和式 2-5 代入式 2-14,得

$$\Delta T_e = -\sqrt{\psi_{q0}^2 + \psi_{d0}^2} \times \frac{1 - \omega_m}{2\omega_m} \times \frac{\Delta \omega}{R} \quad (2-15)$$

由于发电机电磁转矩的规定正方向与转子的旋转方向相反,因此式 2-15 表明,由式 2-13 中电流所产生的转矩实际上为与扰动 $\Delta \omega$ 同相位的驱动转矩,或者说,它对轴系中频率为 ω_m 的振荡分量产生负阻尼转矩,从而使这一振荡分量趋于增大。

这样,当定子回路的电磁振荡频率 ω_e 与轴系的某一自然扭振频率 ω_m 互补,即 $\omega_e = 1 - \omega_m$ 时,或者当 ω_e 与 ω_m 之和为同步频率时,发电机转子频率为 ω_m 的振荡分量在定子绕组中所引起的次同步频率 $(1 - \omega_m)$ 分量电流将对这一振荡分量产生负阻尼作用,从而形成机械与电气间的相互激

励。如果这种激励能抵消或超过机械和电磁振荡中的各种阻尼和电阻中的功率消耗，则振荡便得以维持或甚至发散。这便是具有串联电容补偿的电力系统发生次同步谐振的机理。

2.4 同步谐振的统一机电模型

在低频振荡研究中，发电机大轴是作为一个刚性体来进行研究的，其本质是各个发电机大轴作为刚性体在同步旋转的同时，若存在扰动，则转子间会发生相互间的摇摆，这种摇摆的频率很低，且引起功率摇摆。

在次同步谐振中，发电机大轴被看成是若干个弹性连接的集中块，次同步谐振的物理本质是受扰轴系中的各质块在同步旋转的同时，还会发生相对的扭转振荡。若系统对此扭振是负阻尼的，则发电机这轴系可能造成持续的，甚至增强的扭振，以致引起轴系的疲劳损坏。

图 2-2 所示为多质块弹性轴系，IEEE 轴系模型为 6 质量块体系：HP—高压汽缸，IP—中压汽缸，LPA 与 LPB—低压汽缸 A、B，GEN—发电机，EX—励磁机。

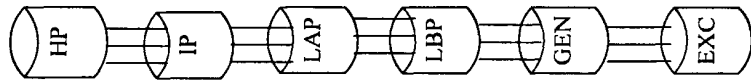


图 2-2 发电机六轴系模型

其中第 x 个质块的受力分析如下：

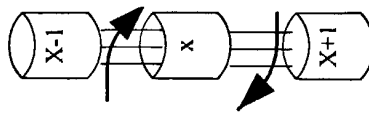


图 2-3 轴系间受力

则 X 质块的运动增量方程为：

$$M_x \Delta \dot{\omega} = \Delta T_x - D_x \Delta \omega_x + K_{x-1,x} (\Delta \delta_{x-1} - \Delta \delta_x) - K_{x,x+1} (\Delta \delta_x - \Delta \delta_{x+1}) \quad (2-16)$$

式中： ΔT_x --轴系外部施加于 X 质块上的力矩， $\Delta T_x = \Delta T_{mx} - \Delta T_{ex}$ 为机械力矩与电磁力矩之差， D_x --阻尼力矩系数， M_x --质块 X 的惯性时间常数， ω_x --质块 X 的转速， δ_x --质块 X 的转子角。

N 个质块的弹性轴系，转矩平衡方程为：

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \begin{bmatrix} M_1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & \ddots & \\ & & & M_N \end{bmatrix} p^2 + \begin{bmatrix} D_1 & & & \\ & \ddots & & \\ & & \ddots & \\ & & & D_N \end{bmatrix} p + \begin{bmatrix} K_{12} & -K_{21} & & \\ -K_{12} & K_{12} + K_{23} & \ddots & \\ \vdots & \ddots & -K_{N-1,N} & \\ \vdots & -K_{N-1,N} & K_{N-1,N} & \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} \Delta\delta_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta\delta_N \end{bmatrix} \\
 & = \begin{bmatrix} \Delta T_{m1} \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta T_{mN} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Delta T_{e1} \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta T_{eN} \end{bmatrix} \quad (2-17)
 \end{aligned}$$

可以简记为: $(MP^2 + DP + K)\Delta\delta = \Delta T_m - \Delta T_e = \Delta T$ (2-18)

式中: M 、 D 、 K 、 ΔT_m 、 ΔT_e 、 ΔT 均为矩阵, M 、 D 为对角矩阵, K 为三角对角矩阵。

建立次同步谐振的数学模型。次同步谐振的数学模型应该包括汽轮机、发电机和励磁机的质量弹簧系统、同步发电机和励磁系统、具有串联电容补偿的输电线。

可以得到六轴系汽轮发电机的轴系方程为:

$$\left. \begin{aligned}
 M_1 \frac{d\omega_1}{dt} &= T_{m1} - D_{11}\omega_1 - D_{12}(\omega_1 - \omega_2) - K_{12}(\delta_1 - \delta_2) \\
 M_2 \frac{d\omega_2}{dt} &= T_{M2} - D_{22}\omega_2 + D_{12}(\omega_1 - \omega_2) - D_{23}(\omega_2 - \omega_3) \\
 &\quad + K_{12}(\delta_1 - \delta_2) - K_{23}(\delta_2 - \delta_3) \\
 T_3 \frac{d\omega_3}{dt} &= T_{m3} - D_{33}\omega_3 + D_{23}(\omega_2 - \omega_3) - D_{34}(\omega_3 - \omega_4) \\
 &\quad + K_{23}(\delta_2 - \delta_3) - K_{34}(\delta_3 - \delta_4) \\
 T_4 \frac{d\omega_4}{dt} &= T_{m4} - D_{44}\omega_4 + D_{34}(\omega_3 - \omega_4) - D_{45}(\omega_4 - \omega_5) \\
 &\quad + K_{34}(\delta_3 - \delta_4) - K_{45}(\delta_4 - \delta_5) \\
 T_5 \frac{d\omega_5}{dt} &= -T_e + D_{55}\omega_5 + D_{45}(\omega_4 - \omega_5) - D_{56}(\omega_5 - \omega_6) \\
 &\quad + K_{45}(\delta_4 - \delta_5) - K_{56}(\delta_5 - \delta_6) \\
 T_6 \frac{d\omega_6}{dt} &= -T_{ex} - D_{66}\omega_6 + D_{56}(\omega_5 - \omega_6) + K_{56}(\delta_5 - \delta_6) \\
 \frac{d\delta_x}{dt} &= \omega_x - 1, \quad x = 1, 2, \dots, 6
 \end{aligned} \right\} \quad (2-19)$$

在式中用自阻尼系数 D_{xx} 来反应质量块本身的阻尼作用，用互阻尼系数 $D_{x,x+1}$ 反应连接两质量块的轴材料内部的粘滞效应所产生的阻尼作用。用 $K_{x,x+1}$ 表示质量块 x 和 $x+1$ 间的扭转弹性系数（刚度系数）， T_x 对于各个汽缸为相应的机械转矩 T_{mx} ，对于发电机和励磁机则分别为相应的电磁转矩 $-T_e$ 和 $-T_{ex}$ 。 ω_5 和 δ_5 分别是发电机转子的转速和角度。将上述方程线性化，可以得到方程组：

$$\left. \begin{aligned} T_x p \Delta \omega_x &= \Delta T_x - D_{xx} \Delta \omega_x + D_{x-1,x} (\Delta \omega_{x-1} - \Delta \omega_x) - D_{x,x+1} (\Delta \omega_x - \Delta \omega_{x+1}) \\ &\quad + K_{x-1,x} (\Delta \delta_{x-1} - \Delta \delta_x) - K_{x,x+1} (\Delta \delta_x - \Delta \delta_{x+1}) \\ p \Delta \delta_x &= \Delta \omega_x \quad x=1,2,\dots,6 \end{aligned} \right\} (2-20)$$

p 为微分算子 d/dt ， $K_{01} = K_{67} = 0$ ， $D_{01} = D_{67} = 0$ 。质量块 5 为发电机转子，并且省略去励磁机转矩，即 $\Delta \delta_5 = \Delta \delta$ ， $\Delta \omega_5 = \Delta \omega$ ， $\Delta T_5 = -\Delta T_e$ ， $\Delta T_6 = 0$ 。

励磁系统模型

励磁系统向发电机提供励磁功率，起着调节电压，保持发电机端电压或枢纽点电压恒定的作用，并可以控制并联运行发电机的无功功率分配。本论文设励磁系统模型为一阶即：

$$\frac{\Delta E_f}{-\Delta u_t} = \frac{K_E}{1 + T_E p} \quad (2-21)$$

E_f 为励磁系统输出的励磁电压， u_t 为发电机端电压，

$u_t = \sqrt{u_{d0}^2 + u_{q0}^2}$ ，即：

$$\Delta u_t = \frac{1}{u_{t0}} (u_{d0} \Delta u_d + u_{q0} \Delta u_q) = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E_q' \quad (2-22)$$

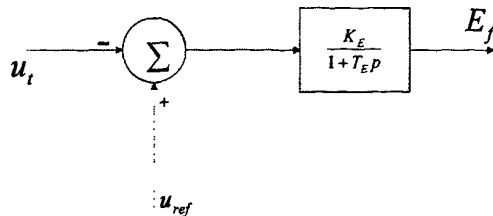


图 2-4 励磁系统传递函数

汽轮机和调速器方程：

$$\left. \begin{aligned} (1+T_{CH} \times S)\Delta T_H &= F_{HP} \times g \\ (1+T_{RH} \times S)\Delta T_I &= \frac{F_{IP}}{F_{HP}} \Delta T_H \end{aligned} \right\} \quad (2-23)$$

$$\left. \begin{aligned} (1+T_{CO} \times S)\Delta T_{LA} &= \frac{F_{LA}}{F_{IP}} \Delta T_I \\ \Delta T_{LB} &= \left(\frac{F_{LB}}{F_{LA}}\right)\Delta T_{LA} \end{aligned} \right\} \quad (2-24)$$

式中， T_{CH}, T_{RH}, T_{CO} 分别是在高压汽缸前面的汽室中，在高压、中压汽缸之间的再热器中以及在中压、低压汽缸之间的跨接管中由于气流引起的时间常数。汽轮机的总输出转矩 ΔT_m 由四个汽轮机转矩组成，即

$$\Delta T_H + \Delta T_I + \Delta T_{LA} + \Delta T_{LB} = \Delta T_m \quad (2-25)$$

所有的汽轮机转矩都是成正比的，每个汽缸承担其中的一部分，且这些部分的总和为 1，即有： $F_H + F_I + F_{LA} + F_{LB} = 1$ (2-26)

g 是调速器的开度。对于调速器方程可以写成：

$$\left. \begin{aligned} (1+S \times T_{SR}) \times a &= K_G (\Delta \omega + U_G) \\ (1+S \times T_{SM}) \times g &= a \end{aligned} \right\} \quad (2-27)$$

其中，定义 $\Delta \omega = \omega_{ref} - \omega_m$ ， a 为速度继电器的位置， U_G 为附加的调速控制量， T_{SR}, T_{SM} 是调速器的时间常数，调速器放大系数 K_G 是速度调节的倒数，通常情况下在满负荷到无负荷的变化范围内定在 4%~5% 范围内。

2.5 发电机六轴系的仿真模型建立：

本文仿真采用 MATLAB/SIMULINK 软件，MATLAB/SIMULINK 是美国 Math Works 公司 80 年代推出的一种数值型计算软件，它集科学计算、自动控制、信号处理、神经网络和图像处理等功能于一体，具有编程效率高、图形功能强等优点。近年来，它已经发展成为适合多学科、多种工作平台的功能强大的大型仿真软件。

MATLAB 提供的动态系统仿真工具 SIMULINK 用来对动态系统进行

建模、仿真和分析，支持连续时间、离散时间及两者混合的线性·非线性系统，也支持多变量、多速率的系统，具有模块化、可重载、可视化、可封装和图形化编程等特点，大大提高了系统仿真的效率和可靠性。SIMULINK 提供了丰富的模型库供仿真使用，其中包括了专门用于电力系统各学科进行仿真的电力系统工具箱(Power System Block, 以下简称 PSB) PSB 的功能非常强大，可以用于电路、电力电子系统、电机系统、电力传输等过程的仿真，提供了一种类似电路建模的方式进行模型绘制，在仿真前自动将其变化成状态方程描述的系统形式，然后在 SIMULINK 下进行仿真分析。PSB 含有丰富的元件模型，包括电力系统网络元件、电机、电力电子器件、控制和测量环节以及三相元件库等^[52]。

随着 Math Works 公司不断推出 MATLAB 新版本，SIMULINK 仿真库也越来越完备，在本文的研究中，使用的是，MATLAB 的最新版本 MATLAB7.01。

根据系统的数学表达式分析得到系统的部分仿真结构示意图如下所示，在 SIMULINK 仿真模块库中含有发电机、变压器、线路以及电容器的 SIMULINK 仿真模块，根据前面介绍的书写表达式可以建立轴系中的六个质量块的 SIMULINK 仿真模块如下图 2-5~2-10 所示,将着六个质量块的仿真模块联系在一起就可以构成整个轴系的 SIMULINK 仿真模块，如图 2-11 所示,在图中含有根据汽轮发电机的调速器方程列出的 SIMULINK 仿真模块。

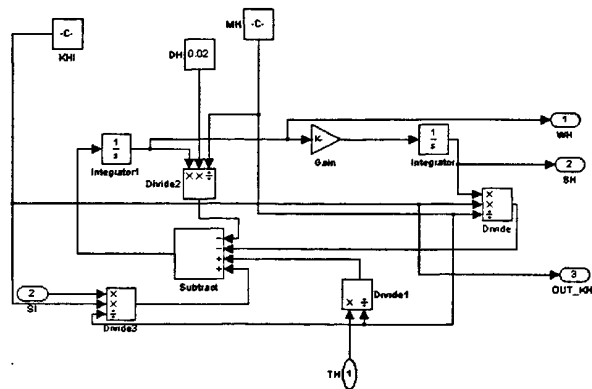


图 2-5 高压缸轴系的 simulink 仿真模型

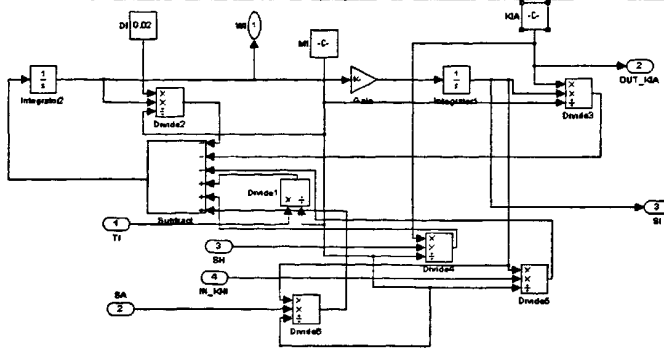


图 2-6 中压缸轴系的 simulink 仿真模型

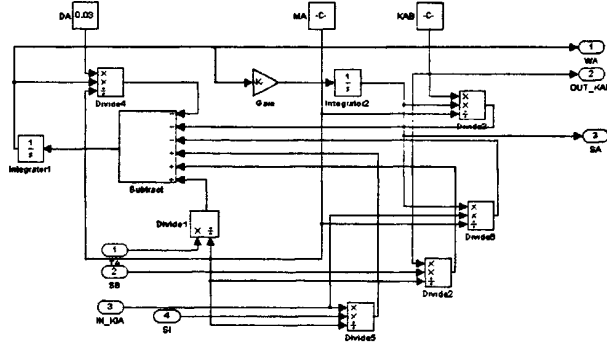


图 2-7 低压缸 A 轴系的 simulink 仿真模型

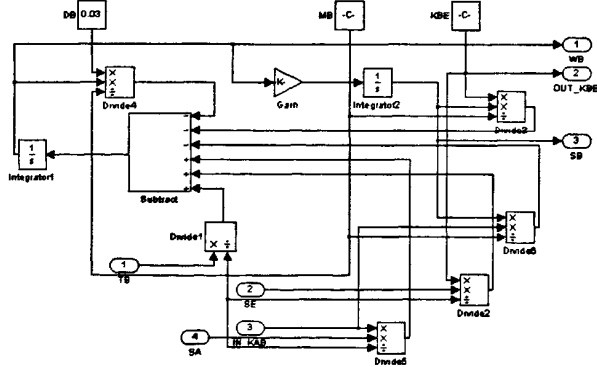


图 2-8 低压缸 B 轴系的 simulink 仿真模型

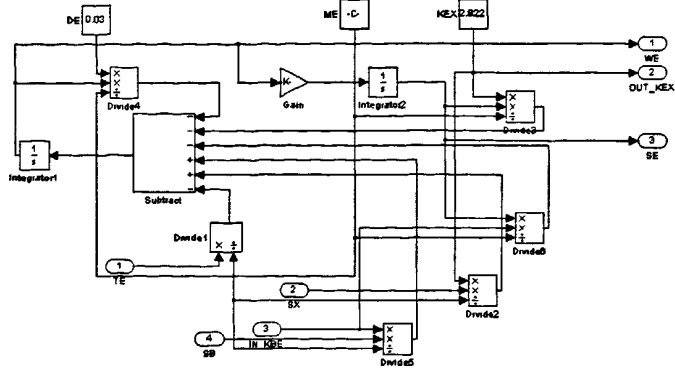


图 2-9 发电机轴系的 simulink 仿真模型

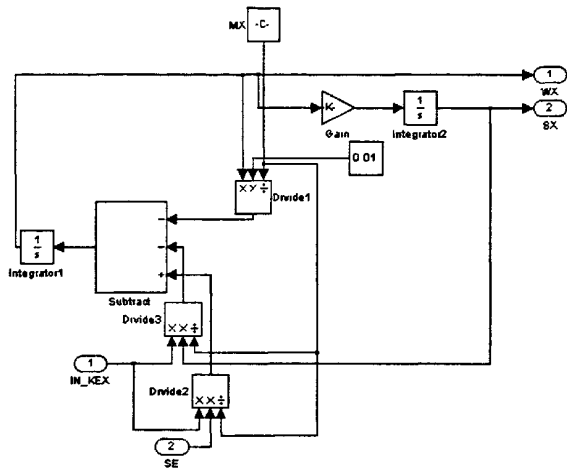


图 2-10 励磁系统的 simulink 仿真模型

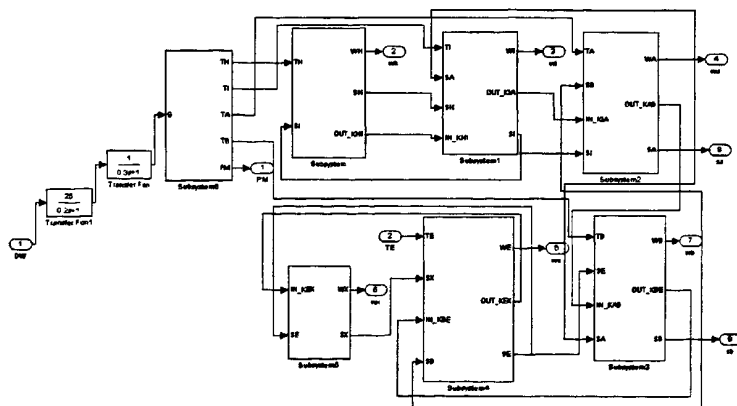


图 2-11 汽轮发电机组的六轴系仿真模型

2.6 小节

本章主要对电力系统次同步谐振的产生机理，基本原理进行分析，在此基础上建立次同步谐振的统一机电模型，并在数学建模的基础上用 MATLAB/SIMULINK 软件建立起发电机六轴系的仿真模型。

第三章 STATCOM 的工作原理及数学模型

3.1 概述

静止同步无功补偿器 (STATCOM), 国内曾将其称为新型静止无功发生器 (Advanced Static VAR Generator) 简称为 ASVG。其概念自 20 世纪 80 年代一经提出立刻得到了各大电器制造公司的广泛关注, 纷纷投入巨大的资金和人力进行开发, 但是由于当时的电力电子技术发展的限制一直没有正式的样机投入运行, 20 世纪 90 年代高压大功率可关断器件的迅速发展从物质上为作为电力系统一次回路设备的大功率 STATCOM 的开发提供了可能, 1992 年日本三菱公司研制出了世界第一台 $\pm 80M \text{ var}$ 的工业装置在日本的犬山投入商业运行, 开创了基于同步变流器装置的 FACTS 技术的新纪元, 我国清华大学和河南省电力局合作研制的 $\pm 20M \text{ var}$ STATCOM 也于 1998 年投入运行。

3.2 结构

STATCOM 的结构可分为两种: 即电压型桥式电路和电流型桥式电路结构。

其结构图如图 3-1 所示:

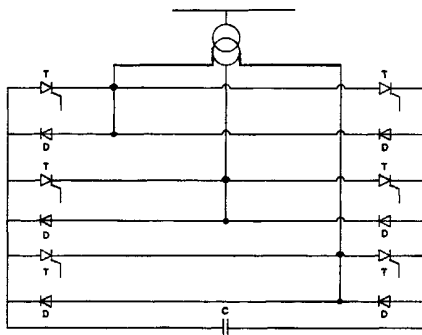


图 3-1 STATCOM 电路结构示意图

对于电压型桥式电路来说, 其直流侧以电容作为储能原件, 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，滤除波纹的作用；对于电流型桥式电路，其直流侧以电感作为储能原件，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，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的危害比较大，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桥式电路作为动态无功补偿装置。

3.3 工作原理

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，或者直接控制其交流侧电流，就可以使该电路吸收或者发出满足要求的无功电流，实现动态无功补偿的目的。

STATCOM 与系统等效连接图如图 3-2 所示：

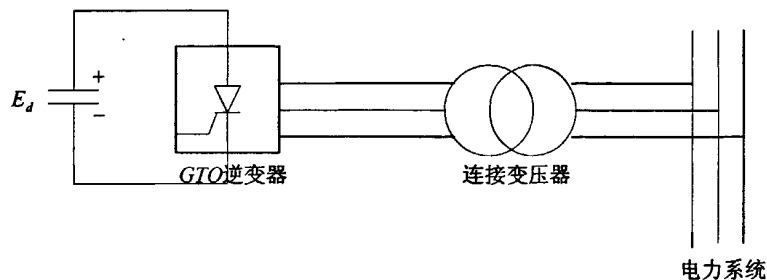


图 3-2 STATCOM 与系统等效连接图

STATCOM 的工作原理可以用如图 3-3 所示的单相等效电路说明。设电网电压和 STATCOM 输出的交流电压分别用 \dot{U}_s 和 \dot{U}_i 表示，则连接电抗 X 上的电压 \dot{U}_L 即为 \dot{U}_s 和 \dot{U}_i 的向量差，而连接电抗的电流是可以由其电压来控制的，这个电流就是 STATCOM 从电网吸收的电流 \dot{i} 。因此，改变 STATCOM 交流侧输出电压 \dot{U}_i 的幅值及其相对于系统电压 \dot{U}_s 的相位，就可以改变连接电抗上的电压，从而控制 STATCOM 从电网吸收电流的相位和幅值，也就控制了 STATCOM 吸收无功功率的性质和大小。

图 3-3a 所示的等效电路中，将连接电抗器视为纯电感，没有考虑其损耗及变流器的损耗，因此不必考虑从电网吸收有功功率。在这种情况下，

只需使 \dot{U}_l 与 \dot{U}_s 同相, 仅改变 \dot{U}_l 的幅值大小即可控制 STATCOM 从电网吸收的电流 i 是超前还是滞后 90° , 并且能控制该电流的大小。如图 2-3b 所示, 当 \dot{U}_l 大于 \dot{U}_s 时, 电流超前系统电压 90° , STATCOM 从系统吸收容性无功功率; 当 \dot{U}_l 小于 \dot{U}_s 时, 电流滞后系统电压 90° , STATCOM 从系统吸收感性无功功率。

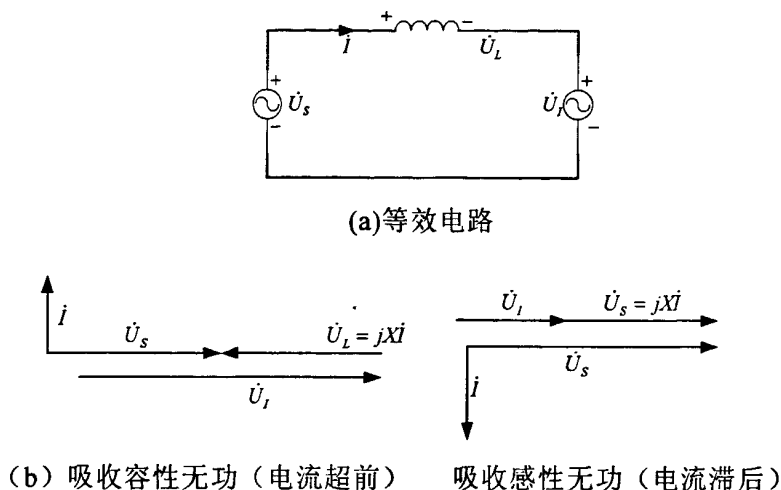


图 3-3 STATCOM 等效电路及向量图

考虑到连接电抗器的损耗和变流器本身的损耗(如管压降、线性电阻等), 并将总的损耗集中作为连接电抗器的电阻考虑, 则 STATCOM 实际主电路图如图 3-5 所示, 等效电路如图 3-5a 所示, 则吸收容性无功与吸收感性无功时的向量图如图 3-5b 所示。在这种情况下, 变流器电压 \dot{U}_l 与 i 仍相差 90° , 因为变流器无需有功功率。而电网电压 \dot{U}_s 与电流 i 的相差不再是 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 i 中有一定的有功分量。这个 δ 角也就是变流器电压 \dot{U}_l 与电网电压 \dot{U}_s 的相位差。改变这个相位差, 并且改变 \dot{U}_l 幅值, 则产生的电流 i 的相位和大小也随之改变, STATCOM 从电网吸收的无功功率也就因此得到调节。

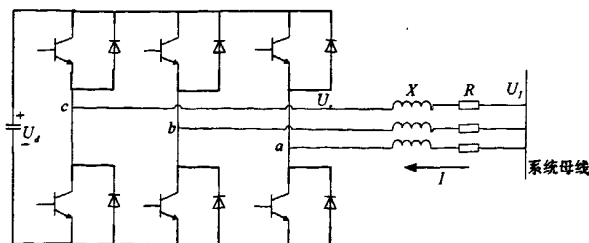


图 3-4 STATCOM 实际主电路结构

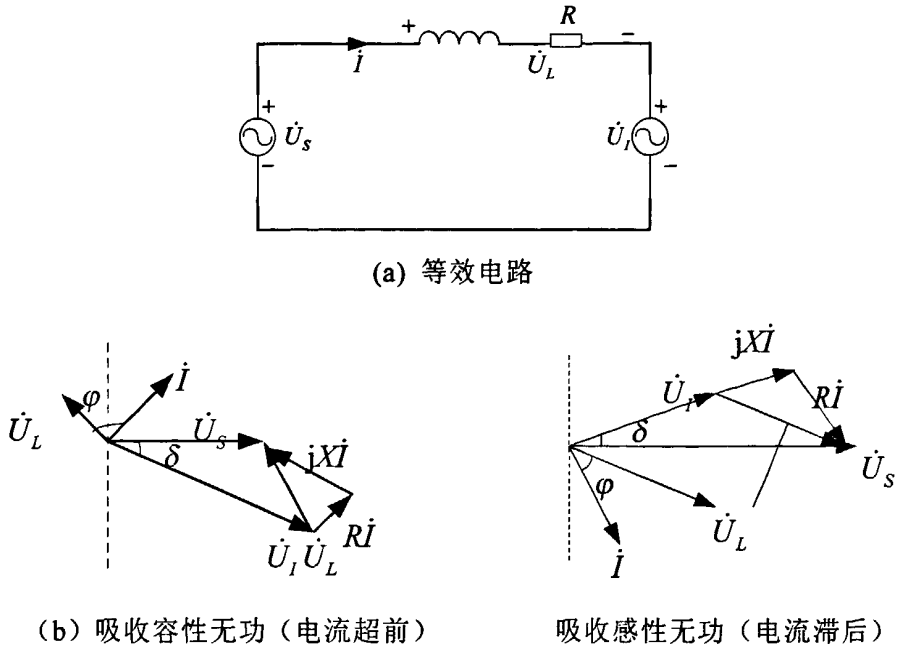


图 3-5 STATCOM 等效电路及向量图

STATCOM 的数学模型

静止同步补偿器 STATCOM 的实际主电路结构如图 3-5 所示。在建立 STATCOM 的稳态数学模型之前，先作如下假设：

(1) 将 STATCOM 中的连接变压器看作理想变压器，GTO 逆变器看作理想的开关元件，将各种损耗(主要为 GTO 开关损耗及变压器损耗)以及变压器漏抗用等值参数表示，并置于 STATCOM 外部；

(2) 由于 STATCOM 装置输出电压由多个单相桥输出电压叠加而成，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；

(3) A, B, C 三相电路参数完全对称；

(4) STATCOM 所有损耗用等值串联电阻 R 表示，变压器的漏抗及连接电感用等值串联感抗 X 表示；

(5) 逆变器输出电压与直流侧电容电压成正比，为三相正序系统，有效值为 U_j ；

(6) 系统为三相基波正序系统，电压有效值为 U_s ；

(7) \dot{U}_s 与 \dot{U}_j 相位差为 δ ，以 \dot{U}_s 超前 \dot{U}_j 为正，且记连接电抗器阻抗

$$\text{角 } \alpha = \arctan \frac{R}{X};$$

则简化后的 STATCOM 等效电路图如图 3-5a 所示，向量图如图 3-5b 所

示。

以吸收容性无功为例，则电网电压有效值 U_s 、逆变器输出电压有效值 U_I 和感抗电压有效值 U_L 构成三角关系，可得如下关系式

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

可以算出：

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

由 GTO 得门极控制交流侧的输出电压方波的波宽记为 θ ，由傅里叶分解可以得到交流侧输出的基波电压幅值即为

$$U_I = KU_C \sin \frac{\theta}{2} \quad (3-4)$$

式中： K 为与逆变器的结构有关的常数； U_C 为电容器的直流电压。

由图 3-5b 可知，系统的输出电流 I 与电网电压 U_s 的夹角为 $90^\circ - \delta$ ，其有功分量 I_p 与电网电压 U_s 同相，其无功分量 I_Q 与 U_s 正交，据此可推导出稳态时 STATCOM 从电网吸收的无功电流和有功电流有效值分别为：

$$I_Q = I \sin(90^\circ - \delta) = \frac{U_L}{\sqrt{X^2 + R^2}} \sin(90^\circ - \delta) \quad (3-5)$$

$$I_p = I \cos(90^\circ - \delta) = \frac{U_L}{\sqrt{X^2 + R^2}} \cos(90^\circ - \delta) \quad (3-6)$$

将式 3-2 带入 3-3 3-4 可得

$$I_p = \frac{U_s}{R} \sin^2 \delta \quad (3-7)$$

$$I_Q = \frac{U_s}{2R} \sin 2\delta \quad (3-8)$$

STATCOM 交流侧输出电压为：

$$U_I = \frac{U_s}{\cos \alpha} \cos(\alpha - \delta) \quad (3-9)$$

从而可以得到系统在稳态时的有功功率和无功功率为

$$Q = 3U_s I_Q = \frac{3U_s^2}{2R} \sin 2\delta \quad (3-10)$$

$$P = 3U_s I_p = \frac{3U_s^2}{2R} \sin^2 \delta \quad (3-11)$$

$$U_c = \frac{U_s \cos(\alpha - \delta)}{K \cos \alpha \sin \frac{\theta}{2}} \quad (3-12)$$

因此若保证脉宽 θ 不变只调整相位角 δ 则即可改变 STATCOM 向系统输入的无功功率, 同时电容器电压也将随之改变, 若同时调整 θ 和 δ 则可以使电容电压保持常数而只调整无功功率。

连接变压器将逆变器输出的电压变换到与系统电压的等级相同, 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的过大的电流。

整个 STATCOM 装置相当于一个电压大小可以控制的电压源, 设 STATCOM 装置产生的电压为 \dot{U}_l , 系统电压为 \dot{U}_s , 连接电抗为 X , 则 STATCOM 装置吸收的电流为:

$$j = \frac{\dot{U}_s - \dot{U}_l}{jX} \quad (3-13)$$

因此 STATCOM 装置吸收的视在功率为:

$$S = \dot{U}_s \hat{j} = \dot{U}_s \frac{\hat{\dot{U}}_s - \hat{\dot{U}}_l}{-jX} \quad (3-14)$$

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}_l 与系统电压 \dot{U}_s 相位相同, 因此 STATCOM 装置吸收的无功功率为:

$$Q = \text{Im}(S) = \text{Im} \left(\dot{U}_s \frac{\hat{\dot{U}}_s - \hat{\dot{U}}_l}{-jX} \right) = \frac{U_s - U_l}{X} U_s \quad (3-15)$$

当控制 STATCOM 装置产生的电压小于系统电压即 $U_l < U_s$ 时, STATCOM 装置吸收的无功功率 $Q > 0$, 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 $U_l > U_s$ 时, STATCOM 装置吸收的无功功率 $Q < 0$, 此时 STATCOM 装置相当于电容。由于 STATCOM 装置产生的电压 \dot{U}_l 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的由正到负快速的调节。

3.4 电路结构的改善

由于单个变流器的输出波形是一系列的方波，因此含有较多成分的谐波，假设一个多个变流器结构，将他们串联或并联起来，使他们在各自的输出波形上相差一定的角度，那么我们最终得到的波形将是接近于正弦波的阶梯波形，这是由于各变流器输出的波形相互叠加的结果，这就是变流器的多重化技术。另外，利用多重化技术，还可以增大 STATCOM 的装置容量，从而对系统的稳定性发挥重要的作用。不论是电压型还是电流型的变流器都可以实现多重化，其中电压型的要选择串联连接，而电流型的变流器要选择并联连接。下图是四个电压型变流器四重化的简单示意图：

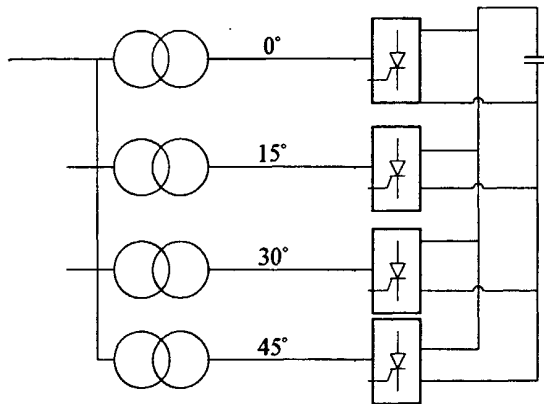


图 3-6 STATCOM 四重化主电路图

四个变流器各相输出电压在相位上依次相差 15° ，经串联/并联后接入交流电力网。各变流器的相位关系可以在触发环节进行控制。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 3-7 所示：

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 相波形，他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。此时得到的电压波形是接近正弦波的阶梯波形。理论上认为，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，一般采用四重化的变流器较多。

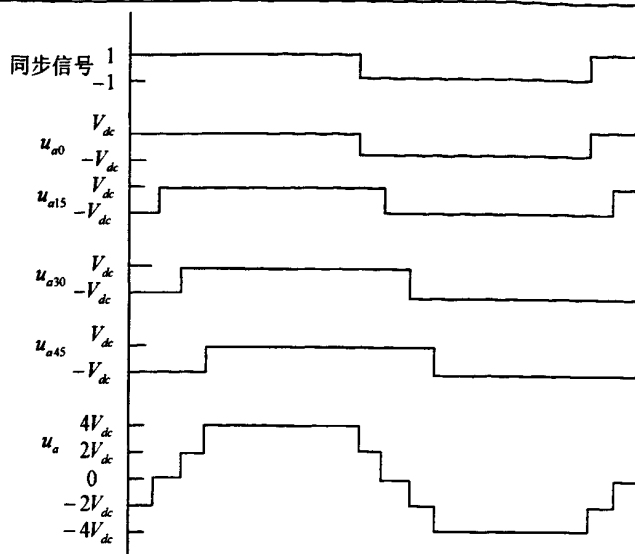


图 3-7 四重化 STATCOM 电压波形图

本文的 STATCOM 主电路采用电压型变流器四重化技术, 下图所示为该四重化 48 脉冲变流器组的模型结构图:

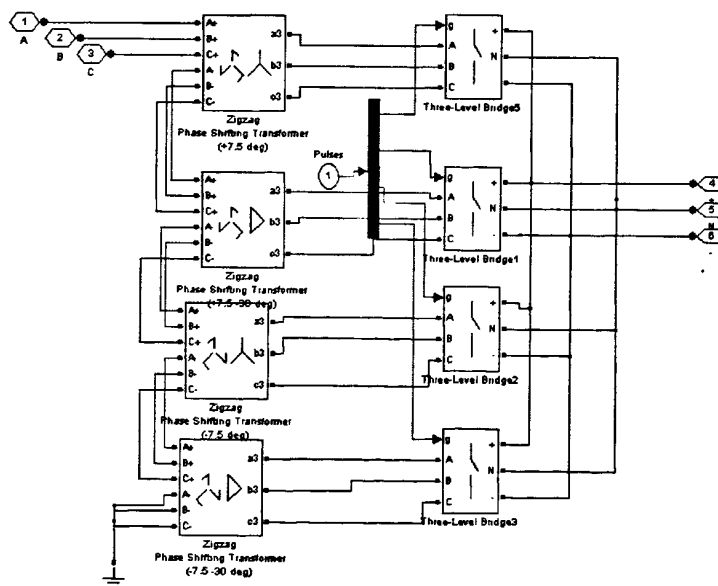


图 3-8 48 脉冲变流器模型结构图

图 3-8 中, 四个三电平变流器的 (+、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。四个变流器的触发脉冲由触发脉冲发生器提供。

3.5 电流间接控制算法

电流间接控制算法是一种常用的控制算法，再采用电流间接控制策略时，其工作原理是根据负荷无功功率的大小，实时调节补偿角 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的完全补偿，从而使系统的功率因数维持再 1 的附近。

触发脉冲发生器的结构组成：

触发脉冲发生器结构组成如图 3-9 所示。由图可以看出，该触发脉冲发生器由四个子系统组成，分别控制四个变流器。他们在触发相位上依次相差 15° 。系统电压经过三相锁相环 (Phase Locked Loop), 获得当前的 A 相系统电压的相位值 ωt ，然后将该 ωt 值依次减去 $(0, 15, 30, 45) * \pi/180$ 作为四个控制子系统的参考相位值。由计算单元得出的补偿角 (即 STATCOM 交流侧电压与电网电压之间的相位差 δ) δ 也作为参数送入到四个控制子系统中。每个子系统控制一个变流器的三个开关器件的触发。由图 3-10 可以看出，每一相都有四个开关器件，所以每个子系统每次应该产生 12 个触发脉冲，而整个脉冲发生器则是 48 个脉冲。

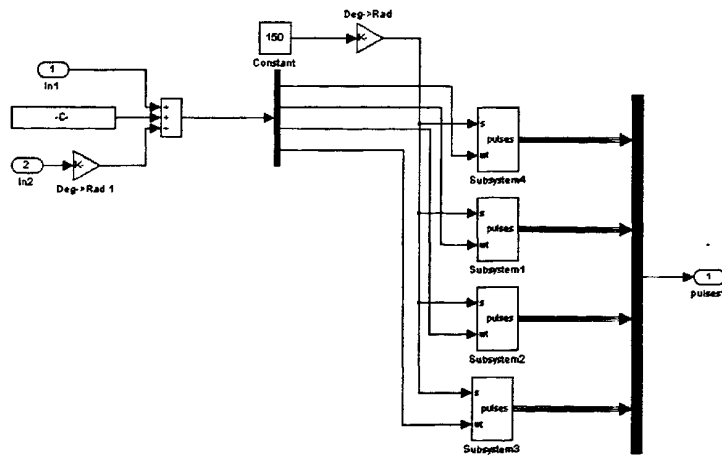


图 3-9 触发脉冲发生器模型结构图

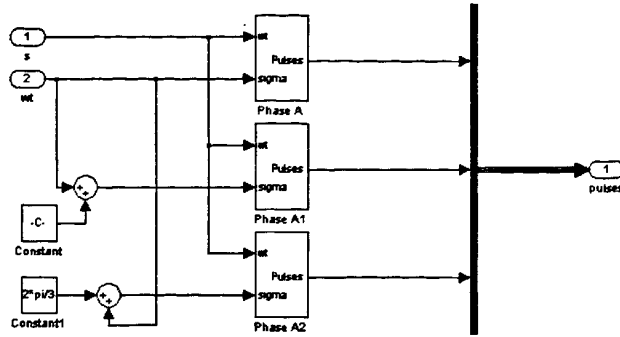


图 3-10 三相触发脉冲

下图所示的是触发脉冲发生器的每个控制子系统的单相脉冲发生电路：

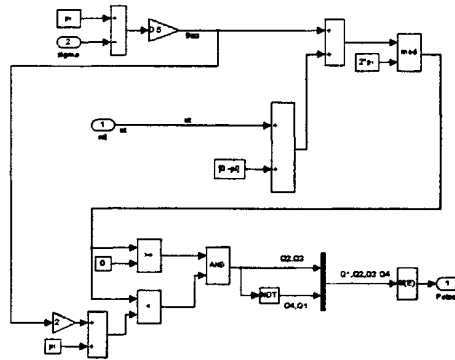


图 3-11 单相触发脉冲发生电路

该电路将产生变流器单相电路上下桥臂所需的四个触发脉冲。其中 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 分别表示图 3-8 所示的变流器单相电路的四个开关器件的触发信号。输入参数 σ 是上桥臂每个周期的导通角，设定 σ 为固定的 150°

应用电流间接控制的算例仿真：

我们在第一章介绍了发电机六轴系的数学模型，应用 IEEE 分析次同步谐振的第一标准模型但不引入串联补偿电容如图 3-12 所示，可以得到如下的仿真结果：

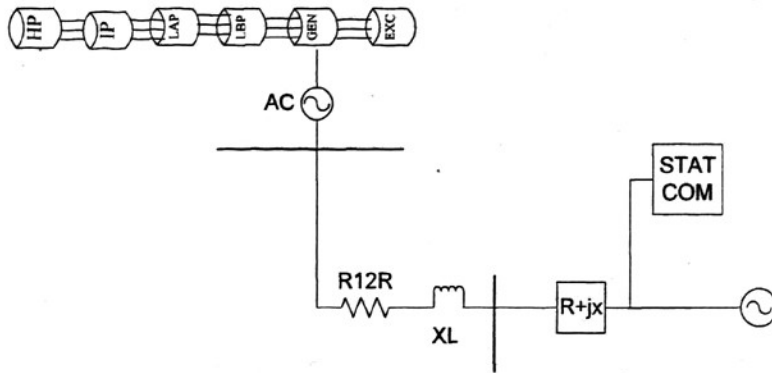


图 3-12 联入 STATCOM 的仿真模型

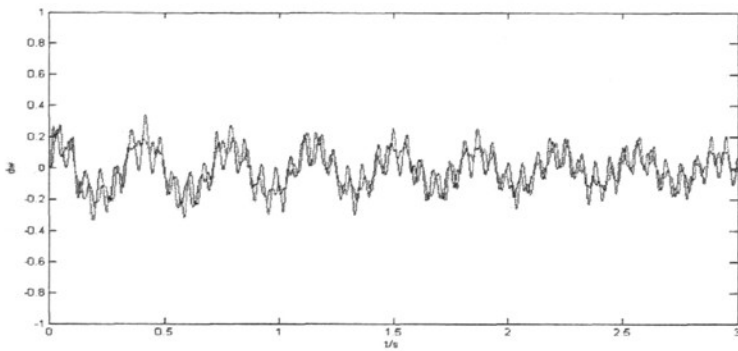


图 3-13 没有联入 STATCOM 时的发电机轴系间扭矩

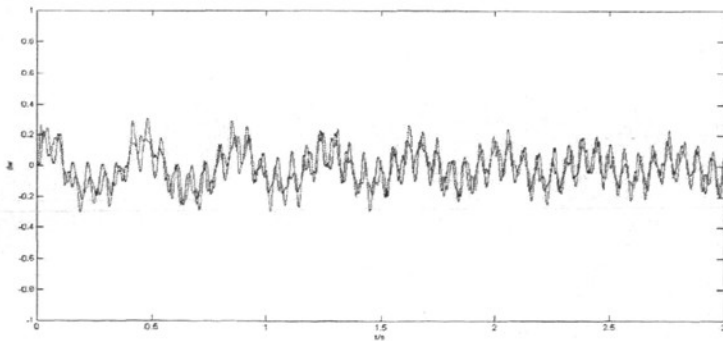


图 3-14 采用电流间接控制的 STATCOM 发电机轴系间扭矩

通过与第四章我们所得到的含有 55% 串联补偿电容的发电机轴系间扭矩相比较, 我们可以发现在联入 STATCOM 后, 发电机轴系间的扭矩并没有明显的增大, 并不会因此而引起轴系间因扭矩过大而造成的轴系损坏。且从下图中我们可以看到, 在并入 STATCOM 后, 系统的 A 项电压的标幺值接近与 1, 由此看出, 应用 STATCOM 进行无功功率的补偿可以

稳定电压，且不存在如串联电容所造成的潜在威胁。

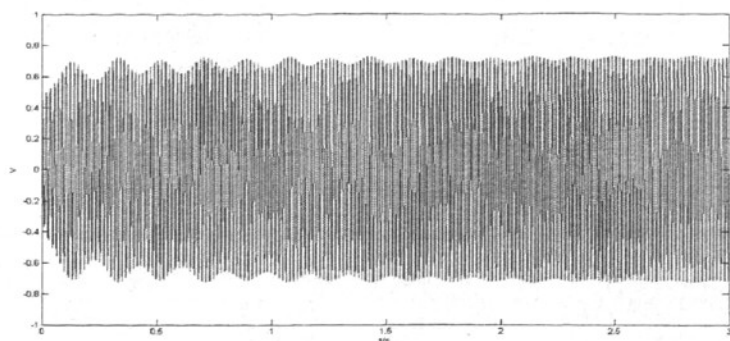


图 3-15 没有联入 STATCOM 时的 A 相电压

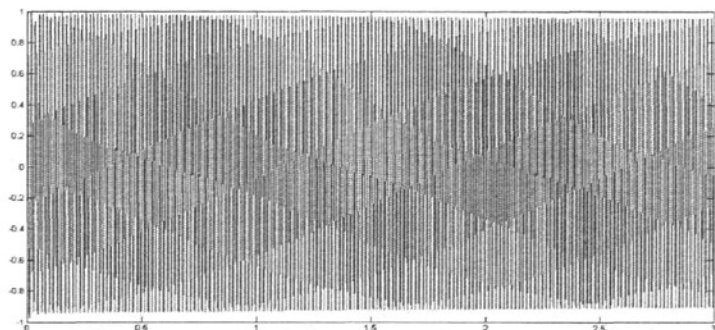


图 3-16 联入 STATCOM 后的 A 相电压

3.6 小结

本章研究了 STATCOM 的工作原理及数学模型。STATCOM 是一种可控的无功功率电源，它完全依赖电力电子的手段来改变电压变流器中的电压和电流，以发出和吸收所需的无功功率。本章建立了 STATCOM 的四重化模型，利用电流间接控制的方法实现了在引入 STATCOM 后发电机轴系间扭矩的不增大即不会造成轴系间扭矩损坏，同时可以提供系统所需的无功补偿的方案。

第四章 SMES 原理及结构分析

4.1 概述

SMES(超导磁储能、superconducting magnetic energy storage)的概念诞生于 20 世纪 70 年代初^[54]石油危机时期,由于 SMES 装置向电网吸收和释放能量都是直接的,无须像电能 \leftrightarrow 化学能 \leftrightarrow 机械能这样的能量交换,因此是一种高效、快速的储能装置,而且还能非常迅速的与电网进行能量交换,影响速度一般是毫秒数量,在电力系统中具有广泛的应用。同电池,飞轮等其他储能方式相比,SMES 装置还具有重复率高,无环境污染及安全可靠等特点。

如果储能线圈是由常规导线绕制而成,那么线圈所储存的磁能将以此热的方式损耗在导线的电阻上。由于超导体的直流电阻为 0,其电流密度仅受临界值的限制,可以比普通铜导线高两个数量级,所以超导线圈具有很高的储能密度且其储存的能量可以永久不衰减,直到需要释放时为止。

自 1911 年发现低温超导现象以来,人们便认识到其作为潜在储能装置的有点,1969 年法国科学家 FERRIER 提出利用超导作为平衡电力负荷的设想,而超导磁储能是目前超导研究的热点。其利用超导体的低损耗和快速相应来储存能量,并通过现代电力电子变流器与电网相连接,达到调节电网峰谷,提高电网稳定性的作用。

4.1.1 国外 SMES 技术的发展:

由于 SMES 具有某些其他装置无法替代的优良特性,近几十年来,一直是发达国家研究的热点。

(1) 美国 SMES 研究的情况

在 Wisconsin 大学 Boom 和 Peterson 带领下,美国于 1971 年,发明了一个由超导电感线圈和三相 AC/DC 格里茨桥路组成的电能储存系统,并对格里茨桥在能量储存单元与电力系统相互影响中的作用进行了详细的分析和研究。他们发现装置的快速相应特性对于抑制电力系统振荡非常有

效。

1972 年, 洛斯阿拉莫斯实验室 (LASL) 开始就 SMES 的经济可行性展开研究。1974 年第一台并网运行的 SMES 在 LASL 进行了测试。

1976 年到 1982 年, LASL 和 BPA (Bonneville Power Administration) 合作建成了 30MJ/10MV 的 SMES, 该系统成功地抑制了从太平洋西北地区到南加利福尼亚州 1500KM 的双回交流 500KV 输电线路的低频 0.35HZ 自发功率振荡。

80 年代初, 5 GW.h 和 1 GW.h 的 SMES 也开始了可行性分析和设计。

80 年代后期, SDI(Strategic Defense Initiative) 启动了 SMES—ETM(engineering test model)计划, 开展了方案论证、工程设计和器件研制, 目的是为了储能调峰和战略备用电源开发开辟了新的研究领域。

(2) 日本 SMES 的研究情况

1985 年, 九州大学设计出了一台 100KJ 的 SMES, 用于研究直流电网中 SMES 的应用和系统稳定性。

1986 年, 日本成立了超导储能研究会, 它的任务是实现超导储能的实际应用为日本超导储能技术的独立发展做出贡献。

1991 年九州电力公司将一台 30KJ 的超导储能系统连接到一台 60KW 的水利发电机上, 进行了改善发电机稳定性的实验, 并取得了较好的实验结果; 而且, 九州电力公司和九州大学合作, 开展了 36MJ 的 SMES 试验, 并正在设计建造一台 1260MJ/500MW 的多功能 SMES。九州电力公司最近在其所属的 Ariuragawa 水电站进行了超导储能用于系统稳定的一系列现场试验, 表明单机系统可由其发电机容量 10%--50%的超导储能装置进行稳定控制。

进入 90 年代, 日本的神户制钢所、东芝公司、日立公司、富士电力公司、中部电力公司等也都进行了 SMES 的相关设计和试验。东京电力公司与日立公司进行合作, 对 275kv 系统进行了含 1MJ 的 SMES 的全面系统动模试验。

(3) 俄罗斯 SMES 的研究情况

1988 年前苏联建成的超导托卡马克 T-15 超导磁体, 储能达 370MJ—769MJ.90 年代以来, 俄罗斯国家实验室建成了 12MJ 的 smes, 并进行了储能 100MJ/电感 8H/电流 5KA/最强磁场 5.4T 的 SMES 设计。用于

研究、储能达 900MJ 的 SMES 也已建造完成。

4.1.2 我国 SMES 技术的发展

我国从 60 年代起就开始了低温超导的研究工作，到 80 年代中期，在高能加速器、超导磁流体发电，磁分离，核聚变，磁共振成像，磁悬浮列车和超导强磁场等方面开展了大量的工作，并在超导材料、超导磁体和低温技术方面奠定了一定的基础，也培养了一批科研队伍。中国科学院电工研究所由于在超导磁体，低温技术及变流器方面有多年的技术积累，在低温超导储能技术研究上处于国内领先水平。1995 年以来电工所在自然科学基金的支持下，研制成功我国第一台 25KJ/5KW 超导储能试验样机，样机型号为 LTS- μ SMES,300A/220V。2002 年电工所在国际上首次提出了超导限流—储能系统的原理，将 SMES 系统与限流器有机的结合起来，开辟了小型 SMES 系统新的应用途径。清华大学也研制成功超导储能试验样机。

4.2 超导储能系统的结构及原理

4.2.1 超导储能系统的机构

超导储能系统 (SMES) 是利用超导线圈处于超导态时电阻为 0 的特性，将电网中的电能储存在其中，当需要时再将其储存的能量送回电网的电力设备。它可以在一个复杂的电力系统中运行，起到改善电力系统稳定和提高经济运行等作用。由于 SMES 系统不经过其他形式的能量转换，理论上可以长期无损耗地储存能量，同时超导线圈通过电力电子变流器与电网连接，响应速度可以达毫秒级，因此世界各发达国家都相继开展了这方面的研究工作。

SMES 的组成结构如图所示：

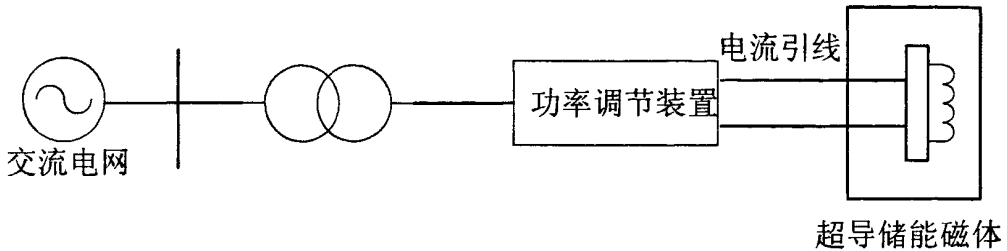


图 4-1 SMES 系统基本结构框图

1、 超导线圈一般分为低温超导线圈和高温超导线圈两类。一般的低温超导线圈是指当线圈的温度处于 23.2K 一下可以转变为超导态的超导线圈。由于线材的临界温度过低，制冷设备的成本较高，低温超导技术的市场化研究一直没有过大的发展，直到 80 年代低交流损耗的极细丝复合多芯 NbTi 高温超导材料研制成功以后，超导电力应用的研究才进入空前活跃的阶段，由于高温超导(HTS)设备可以在液氮温度 (77K) 运行，与低温超导设备相比（液氮温度 4.2K ），不仅运行成本大大降低，而且磁—热稳定性也大大提高。

2、 变流器是超导线圈与电网的接口，由于超导储能线圈是 DC 或准 DC 装置，而其充放电通常又是通过 AC 电网来完成，因此，就需要一种成为功率调节系统（power conditioning system 缩写为 PCS）的装置来连接 DC 超导线圈和 AC 电网。PCS 可采用标准的静止 AC/DC 双向变换器，它根据电力系统的运行要求，在 DC 超导线圈和 AC 电网之间来回反复传递功率，以达到负载调节或稳定调节的目的，它是 SMES 装置的重要组成部分。从电路拓扑上 PCS 可以分为两类：其一是四象限电压型变流器外加一个二象限斩波器；其二为一个四象限电流型变流器。由于超导线圈本身是一个电流源，采用电流型变流器作为超导储能系统的功率调节系统更为方便，但是由于电网接口的设计问题是电流型 PSC 一直没有完善解决的问题。

3、 控制策略是控制 SMES 系统快速向电网放出或吸收有功功率的主控器。为了能与电网良好的匹配，根据不同的控制目标使得 SMES 系统更好的改善电力系统的性能必须相应的设计出不同的控制策略。根据控制设计的方法不同，可将 SMES 的控制策略分为两类：一是基于系统内部和外部特征的控制方式，例如 PID 控制，局部线性化和自适应非线性控制；其二是综合控制方式，包括模糊控制，神经网络控制，遗传控制等。

4.2.2 超导磁储能变流器 (PCS) 的发展概况

由于 PCS 具有双向变换功能, SMES 装置能够用于调节负载变化、抑制低频振荡、改善瞬态稳定性、降低传输损耗。用于抑制低频振荡、改善瞬态稳定性和降低传输损耗的 SEMS 装置, 其容量比较小、反应比较快; 但是用于调节负载变化的 SMES 系统, 容量则很大, 且反应相对较慢, 同时它必须能够控制功率流的方向和大小, 能够独立控制有功功率和无功功率, 能在超大电流下高效、可靠地运行。

早期的 SMES 装置中, 常采用 12 脉冲晶闸管 (SCR) 变换器构成 PCS, 但是这种 SCR 变换器不能提供独立的有功功率和无功功率, 并且当触发角增加时会产生大量的无功功率使系统的规模增大到 MVA 级, 为了解决这个问题 H.Peterson 等人在 Bonneville Power Administration 的 30MJ SMES 系统上提出并实验了采用内部不对称触发控制的 2 个 6 脉冲桥串联构成的 12 脉冲 SCR 变换器, 以得到独立的有功功率和无功功率控制, 但是这种方法有一个固有的缺点: 系统会产生大量的谐波且不能在较宽范围内改善功率因数。

80 年代中期, 大功率可关断晶闸管 (GTO) 的研制成功, 得以开发出了几类采用 GTO 制作开关器件的 PCS, 这些系统能够在具有超前触发角的容性范围内控制无功功率, 并能够运行在脉宽调制 (PWM) 工作模式下。但是问题是 GTO 关断时储存在变压器漏感中的能量会产生过电压; 因此 T.Ise 等人先后提出了用辅助电路来解决这个问题。尽管如此, 这些系统也不一定能显著的改善系统的无功功率状况和完善地独立控制有功功率和无功功率。

90 年代初期, R.H.Lassester 和 S.G.Jalali 为 ETM (engineering testmodel) 提出了以下 2 种组合式 PCS: 1、采用电流源变换器, 用两个串联连接的 6 脉冲 GTO 桥, 有功功率和无功功率的控制可通过桥的不对称触发进行。但是它会导致无功功率需求的窄范围控制和产生过量谐波。2、由 DC/DC 斩波器供电的电压源变换器, DC/DC 斩波器的工作负载决定变换器的 DC 电流, 变换器的控制触发角决定输出电压的相角。这个系统提供了独立的有功功率和无功功率的宽度范围控制, 但是斩波器中的大型线圈电流的高频率的开关增加了开关损耗, 因而降低了系统的效率。

后来,ByungM.Han 和 George G.Karady 提出了一种用 12 脉冲 GTO 变换器和带 SCR 抽头变压器组成的系统。触发角和抽头比的调整可以控制功率流的方向和大小,独立控制有功功率和无功功率。该系统设计的最大储能为 5.5GW.h,最小储能为 0.5GW.h,可用能量为 5GW.h。

4.3 PCS 的类型

就目前情况看,不管 SMES 的具体实现方案如何,PCS 均由 2 种典型电路构成,即电流源型 PCS (CSC) 和电压源型 PCS(VSC)。

(1) 电流源型 PCS

图 4-2 为电流源型 PCS 的基本电路拓扑,它主要由电流源型变压器构成。

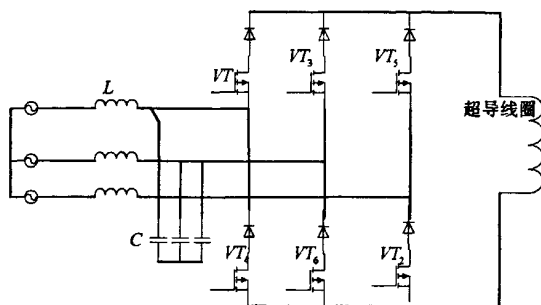


图 4-2 SMES 用电流型变流器主电路拓扑

(2) 电压源型 PCS

图 4-3 为电压型 PCS 的基本电路拓扑,它主要由电压源型变流器构成。

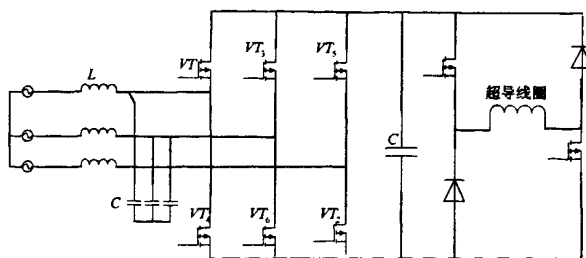


图 4-3 SMES 用电压型变流器主电路拓扑

图中开关器件均为绝缘栅型门控晶体管 IGBT。如果采用 IGBT 或门极可关断晶闸管 GTO 等自关断器件,则 CSC 和 VSC 均可使有功功率和无功功率在电网和 SMES 线圈之间双向流动,并且相互独立可控。为了减小 SMES 系统对电网造成的谐波污染,SMES 的 AC/DC 功率调节器的开

关策略一般都采用脉宽调制 (PWM) 技术。

4.3.1.电压型变流器

电压型变流器的单相等值电路示意图如下所示：

其中 R 包括开关损耗、超导磁体损耗和网侧变压器的损耗， L 是交流侧的总电抗。 U_s 是网侧电源电压， U_i 是变流器交流侧出口电压。

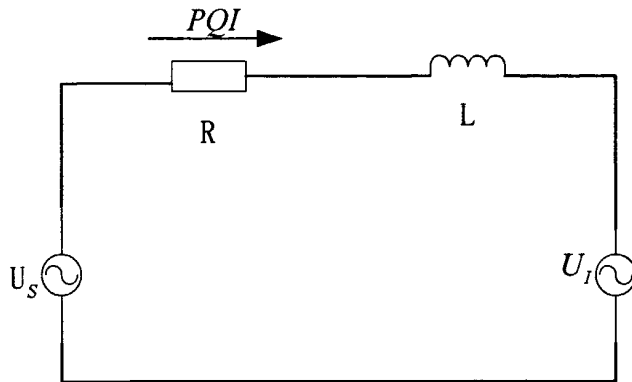


图 4-4 VSC 等值电路

电压型变流器的 P 、 Q 控制原理：

$$\dot{I} = (P - jQ) \div \dot{U}_s$$

$$\dot{U}_i = \dot{U}_s - \dot{I}(R + jX)$$

$$i_q = P \div \dot{U}_s$$

$$i_d = (-Q) \div \dot{U}_s$$

因此如果能对 i_q 、 i_d 进行同时独立地控制，就可以实现对 PQ 的独立控制。

为了更大的得到容量以及尽可能的减少谐波，多重化是有效途径，下图中给出了一种变流器的主电路图，是由两个三相变流桥并联而成的。在图 4-5 中通过移相变压器将 4 个单元在交流侧串联，组成一个是原来变流器 4 倍容量的变流器，4 个 6 脉波变流器和移相变压器构成了两个 12 脉波的组合，通过调节 GTO 的触发角，使得两个 12 脉波变流器相角差 15 度，从而产生准 24 脉波的交流侧电压，与标准 24 脉波变流器相比，这种方法免去了价格昂贵的特种变压器。

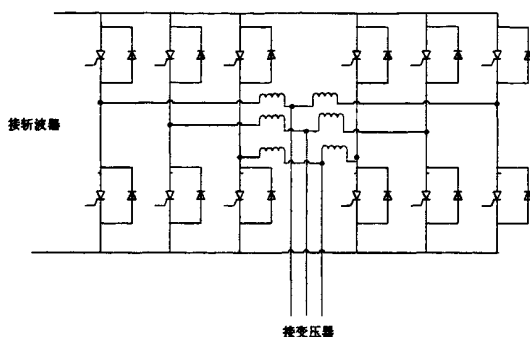


图 4-5 25MVA SMES PCS 的 VSC 部分

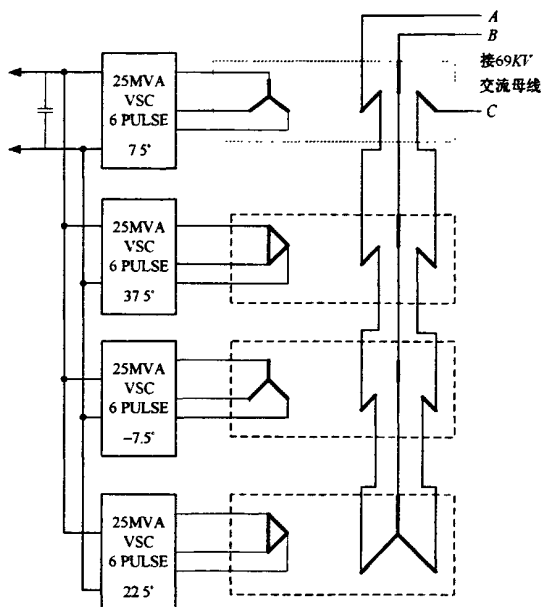


图 4-6 四个 25MVA VSC 通过变压器串联成 100MVA 变流器

现在研究中还流行一种模块化 SMES 的设计思想,这种设计思想也采用电压型变流器加斩波器的结构。但是在其设计中使用了三个独立的超导线圈,对应的三套斩波器和电压型变流器在直流侧和直流电容并联。如图 4-7 所示。这种方案的优点是,在某一个线圈失超时,其能量可以被转移到另一个线圈,而不象通常的失超保护那样将能量全部消耗在一个放磁电阻上,若失超线圈需要输出功率为 P_q ,另一个正常工作的线圈需要处理系统的指令给定的功率为 P_{sm} 则保护动作后此线圈需要处理的功率为 $P_q + P_{sm}$ 。失超时的能量转移不会影响正常工作的线圈与电网的能量交换。

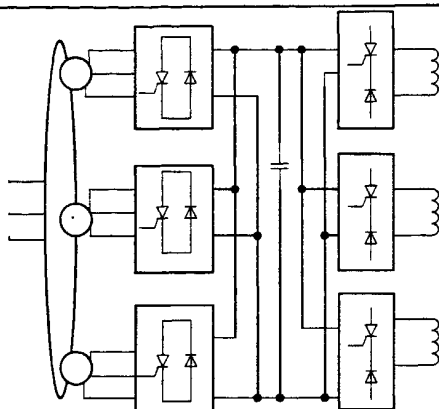


图 4-7 三模块的电压型 SMES 结构

4.3.2 电流型 PCS

电流调节器实际上是一个两象限斩波器，它是电压型 PCS 其中的一部分。直流斩波器连接在超导线圈和直流电容之间，从而实现电流和电压的相互转换。二象限斩波器最基本的结构由两个开关器件(如 IGBT)和两个大功率二极管组成。如图 4-8 所示，它能工作在两个象限，不论换流器工作在整流还是逆变状态，都能确保电流在超导线圈中流动方向不变，并保证超导线圈有闭合的通路。根据电网的实际需要调节两个开关器件的导通和关断对超导线圈中的电流进行斩波。下面由它为代表介绍电流调节器的工作原理。

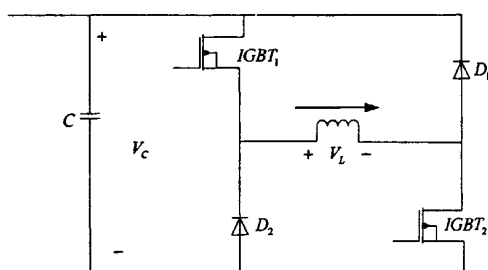


图 4-8 二象限斩波器基本原理图

4.3.2.1 电流调节器工作模式介绍

电流调节器主要由 Bang-Bang 模式、放电模式、充电模式、充放电模

式四种基本的工作方式构成:

(1) Bang-Bang 模式

此时, IGBT1 和 IGBT2 同时导通或关断。当 IGBT1 和 IGBT2 导通时, 超导线圈上的电压 V_L 等于电容上的电压 V_C , 线圈充电储能增加; 当 IGBT1 和 IGBT2 同时关断时, 二极管 D1 和 D2 导通, 这时 $V_L = -V_C$, 线圈放电储能减少。这种模式下线圈电压不断在 V_C 和 $-V_C$ 间变化, 交流损耗大。

(2) 放电模式

此时, IGBT2 始终保持在关断状态, IGBT1 每个周期 T 内导通时间为 d, 时间 d 内超导线圈通过 IGBT1 和 D1 短接, 线圈上的电压很小, 为 IGBT1 和 D1 的导通管压降; 在时间 T-d 内, IGBT1 关断, 线圈通过 D1 和 D2 放电; 这种模式下线圈每周期只在 T-d 内承受电压 $-V_C$, 交流损耗比在 Bang-Bang 模式下的小; 其中 IGBT1 和 IGBT2 的角色可以互换。

(3) 即充电模式

此时, IGBT2 始终保持在导通状态, IGBT1 每个周期内不断地导通和关断。仍设 IGBT1 每个周期导通时间为 d, 这时线圈通过 IGBT1 和 IGBT2 充电; 当 IGBT1 关断时, 线圈通过 IGBT2 和 D2 短接, 线圈上的电压仅为 IGBT2 和 D2 的导通管压降。交流损耗又有所减小。

(4) 充放电模式

充放电模式实际上是以上三种模式的综合。

设 k 为三态信号, 用来控制 IGBT1 和 IGBT2 的开关状态, k=1 时, IGBT1 和 IGBT2 同时关断, 线圈通过斩波器放电; k=0 时, IGBT1 和 IGBT2 之一必须开通另一个必须关断, 线圈经改斩波器提供的闭合回路续流; 当 k=-1 时 IGBT1 和 IGBT2 同时导通, 线圈经斩波器充电。

4.3.2.2 拓扑结构

作为超导储能系统中的储能元件, 超导磁体的充放电技术在整个系统中显得尤为重要。当电网中负载波动变化时, 超导磁体需要完成充放电之间的快速双向转换, 为系统提供电能质量补偿。目前, 国外常采用超导磁体充放电设备各一套的方案, 根据超导储能系统的工作特点, 本文介绍了一种适合超导磁体充放电的电流调节器电路拓扑, 具体电路拓扑结构如图

4-9 所示。

该电路拓扑主要由电压型变换单元(T5, T6, T7, T8),隔离式高频变压器单元(Tr) 和电流型变换单元 (T1, T2)三部分构成。该电路结构不仅可以给磁体充电,而且可以根据系统的需要,把超导磁体中储存的电能量释放出去,方便快速的实现超导磁体充放电的高频双向转换,从而实现超导储能系统的稳定运行。充电时,首先电压型变换单元对直流输入电压进行逆变,然后通过高频变压器隔离降压,最后通过电流型变换单元进行整流,给超导磁体充电;放电过程与之相反。

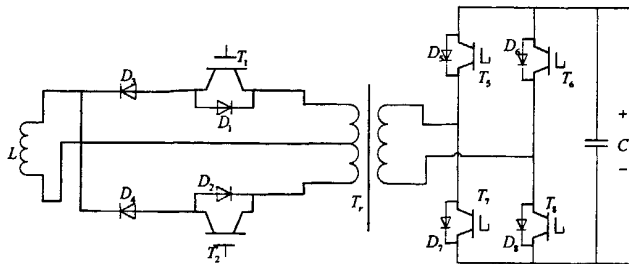


图 4-9 高频双向电流调节器

在超导储能系统中,电流调节器一边与电压型换流器相连,连接到电网;另一边与超导磁体相连。超导磁体作为主要的储能环节,一般在低电压、大电流下进行工作,而电网通过电压型换流器的输出一般为高电压、小电流,因此,需要一套电力电子装置进行超导磁体和电压型换流器之间的变换,完成整个系统的高频双向补偿。

前面介绍的几种斩波器都有各自的优点,但是特点比较单一,仍有许多不足之处。结合它们的优点,电流调节器电路拓扑作了有关改进,对超导储能系统而言,它具有以下优点:

(1)电流型变换单元电流大但电压低,电压型变换单元电流和电压对于开关容量来说都电流调节器装置容易满足要求。

(2)采用高频电力电子器件,可以提高开关频率,电容器的容量,缩小了变压器单元中变压器的体积,从而大大减小了电压型变换单元从而提高了功率密度和系统性能。

(3)电路结构简单,易于根据需要进行串并联,从而可以根据超导储能系统的容量进行拓展,方便的实现高电压、大电流工作。而且中间带有高频变压器,在直流超导磁体和电网之间进行了电气隔离,图 4-10 是电流调节器的串联结构电路拓扑。电流调节器也有自己的缺点,系统中可控

功率器件较多，因此同步控制相对比较复杂，需要在后面的设计中加以考虑。

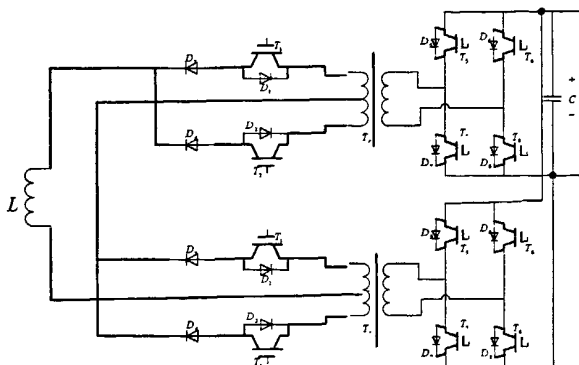


图 4-10 电流调节器串联主电路拓扑

4.3.2.3 电流调节器的应用领域

电流调节器是一种用于超导磁体充放电的电力电子装置，在整个超导电力应用领域具有很大的前景，它不仅是超导储能系统必不可少的一部分，根据需要可以进一步应用到超导限流---储能系统，作为系统中的偏置电源。图 4-11 和图 4-12 分别是电流调节器在超导储能系统和桥路型超导限流---储能系统中应用的示意图。

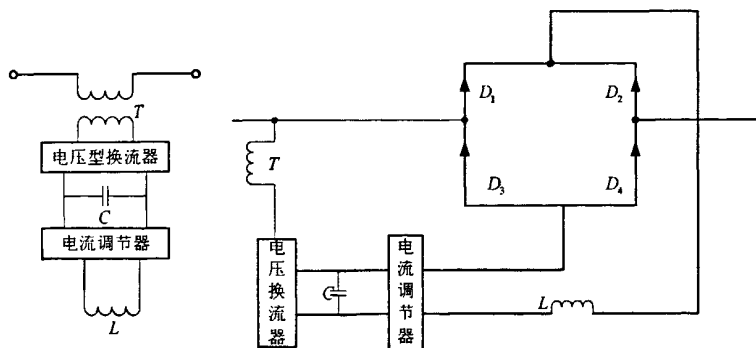


图 4-11 超导储能系统 图 4-12 桥路型超导限流储能系统

4.4 含有 SMES 的串补电力系统分析

对于 SMES 抑制电力系统次同步谐振的分析仍然基于 IEEE 的第一标

准模型。

本文研究所用的SMES装置为12脉冲典型逆变器，其基本结构如图4-13所示。此装置主要由2个6脉冲三相逆变器、一个Y-Δ/YY连接变压器和超导电感组成。为了使SMES的有功功率 P_{sm} 和无功功率 Q_{sm} 在四象限内分别独立可控，变流器通常使用有自关断能力的GTO。这样，在控制变流器的触发角为 α_1 和 α_2 时，SMES的有功功率和无功功率分别为^[53]。

$$P_{sm} = V_{sm0} I_{sm} (\cos \alpha_1 + \cos \alpha_2)$$

$$Q_{sm} = V_{sm0} I_{sm} (\sin \alpha_1 + \sin \alpha_2)$$

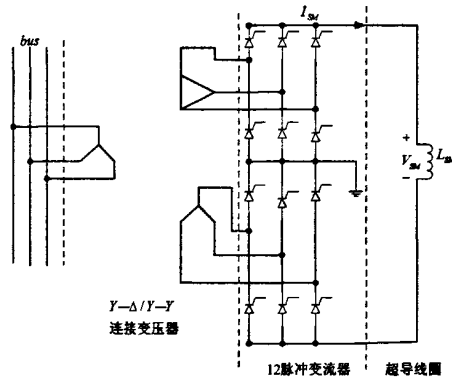


图 4-13 SMES 装置的基本结构图

所建立的 MATLAB/SIMULINK 仿真模型如图 4-14 所示

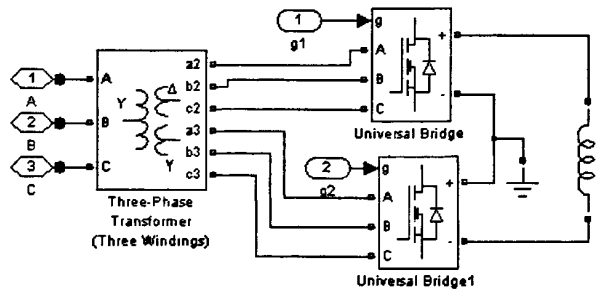


图 4-14 SMES 仿真图

4.5 小结

本章详细介绍了 SMES 的概念以及发展概况，研究了 SMES 的结构、

工作原理并建立其数学模型。由于 PCS 具有双向变换功能, SMES 装置能够用于调节负载变化、抑制低频振荡、改善瞬态稳定性、降低传输损耗。因此可以尝试将 SMES 用于抑制电力系统的次同步谐振 (SSR) 的研究。并在 MATLAB/SIMULINK 软件下建立了其仿真模型。

第五章 控制算法分析及 MATLAB/SIMULINK 仿真

我们在前文中分析了全系统线性化数学模型后得到, 机械部分和电气部分的线性化方程之间, 除了其中的发电机转子角度的关系式 $\Delta\delta = \Delta\delta_s$ 和电磁转矩的关系式 $\Delta T_e = -\Delta T_s$ 相互联系外, 其它变量之间再无其它的联系。基于这样的特点, 再考虑到系统的次同步谐振频率与轴系间的自然扭振频率互补, 我们可以将扫频—复转矩系数判别法用来分析和阻尼电力系统的次同步谐振。

5.1 扫频复转矩系数法

扫频复转矩系数判别法是一种用于电力系统次同步谐振的分析方法, 它是 Canay 于 1982 年提出的。其基本的思想是: 令发电机的转子角 $\Delta\delta$ 再轴系的自然扭振频率附近作等幅振荡, 分别求出机械部分和电气部分的转矩对该振荡的响应 (表现为复转矩系数), 从而得到发电机的电气复转矩系数 $K_E(j\lambda)$ 和机械复转矩系数 $K_M(j\lambda)$, 如下式所示:

$$\begin{aligned}\Delta T_E &= K_E(j\lambda)\Delta\delta \\ &= [K_e(\lambda) + j\lambda D_e(\lambda)]\Delta\delta\end{aligned}\quad (5-1)$$

$$\begin{aligned}\Delta T_M &= K_M(j\lambda)\Delta\delta \\ &= [K_m(\lambda) + j\lambda D_m(\lambda)]\Delta\delta\end{aligned}\quad (5-2)$$

进一步, 通过在次同步频率范围内对机械和电气复转矩系数进行频率扫描, 在机械和电气弹性系数之和为零的频率下, 根据机械和电气阻尼系数之和的正负来判断 $\Delta\delta$ 的振荡是否被阻尼, 从而判别系统是否发生次同步谐振。若机械部分的正阻尼足以抵偿电气部分的负阻尼从而使总的阻尼系数大于零, 则系统将不会发生次同步谐振, 反之则系统将发生次同步谐振。我们可以将不发生次同步谐振的条件总结为:

$$[D_e(\lambda) + D_m(\lambda)]_{K_e(\lambda) + K_m(\lambda) = 0} > 0 \quad (5-3)$$

5.1.1 机械复转矩系数

在六质量块的发电机转子轴系模型中,如果忽略汽轮机和调速器影响的前提下,将全系统线性化并消去机械部分的其余变量^[55],可得:

$$K_M(p)\Delta\delta = -\Delta T_e \quad (5-4)$$

其中

$$K_M(p) = M_5(p) - K_{4,5}A_5(p) - \frac{K_{5,6}^2}{M_6(p)} \quad (5-5)$$

为机械负转矩系数。其中各系数定义为:

$$M_i(p) = T_i p^2 + D_i p + (K_{i-1,i} + K_{i,i+1}) \quad (5-6)$$

$$i = 1, 2, \dots, 6$$

$$K_{0,1} = K_{6,7} = 0$$

对于式 5-5 中的系数 $A_5(p)$,可以令 $A_1(p) = 0$ 为初值,利用下式计算得到:

$$A_i(p) = \frac{K_{i-1,i}}{M_{i-1}(p) - K_{i-2,i+1}A_{i-1}(p)} \quad (5-7)$$

$$i = 2, \dots, 5$$

5.1.2 电气复转矩系数

在 2-14 中,运行处的电流和磁链是已知的,由发电机的方程中的磁链方程式可得到 d 轴与 q 轴的磁链方程式:

$$\psi_d = -X_1 i_d + X_{ad}(-i_d + i_f + i_D) \quad (5-8)$$

$$\psi_q = -X_1 i_q + X_{aq}(-i_d + i_Q) \quad (5-9)$$

将上式 5-8、5-9 进行线性化处理,并考虑到绕组中电流、磁通的暂态变化,进行拉普拉斯变化得到:

$$\Delta\psi_d = G(p)\Delta u_f - X_d(p)\Delta i_d \quad (5-10)$$

$$\Delta\psi_q = -X_q(p)\Delta i_q \quad (5-11)$$

其中,

$$X_d(p) = X_d - \frac{B(p)}{A(p)}$$

$$X_q(p) = X_q - \frac{pX_{aq}^2}{pX_Q + r_Q}$$

$$G(p) = \frac{(pX_{D1} + r_D)X_{ad}}{A(p)}$$

$$A(p) = p^2(X_D X_f - X_{ad}^2) + p(X_D r_f + X_f r_D) + r_D r_f$$

$$B(p) = p^2(X_D X_f - 2X_{ad})X_{ad}^2 + p(r_D + r_f)X_{ad}^2$$

将式子 5-10、5-11 代入 2-14 可得：

$$\Delta T_e = [-\psi_{q0} - i_{q0} X_d(p)] \Delta i_d + [\psi_{d0} - i_{d0} X_q(p)] \Delta i_q + G(p) i_{q0} \Delta u_f \quad (5-12)$$

其中， $\psi_{d0} = -X_d i_{d0} + X_{ad}(i_{f0} + i_{D0})$ ， $\psi_{q0} = -X_q i_{q0}$

因此只要再得到 Δi_d ， Δi_q 与 $\Delta \delta$ 之间的关系并代入上式就可以得到电气的复转矩系数。

在本文中我们将柔性交流器件看成是一个相角和幅值均可变的电流源，并根据其并联输出电流所具有的可控性，在 dq 坐标下，可以设计电力电子器件并联输出的电流 I_S 与发电机定子电流之间满足以下关系：

$$\begin{cases} i_{sd} = k_1 i_d \\ i_{sq} = k_2 i_q \end{cases} \quad (5-13)$$

其中 i_{sd} ， i_{sq} 为 I_S 的 dq 分量， k_1 ， k_2 是控制因子，通过控制 k_1 ， k_2 就可以改变 i_{sd} ， i_{sq} ，从而控制 I_S 的幅值和相角。

对 5-13 式线性化，并进行拉普拉斯变换为

$$\begin{cases} \Delta i_{sd} = \Delta k_1 i_{d0} \\ \Delta i_{sq} = \Delta k_2 i_{q0} \end{cases} \quad (5-14)$$

$$\begin{cases} \Delta i_d = \Delta i_d - \Delta k_1 i_{d0} \\ \Delta i_q = \Delta i_q - \Delta k_2 i_{q0} \end{cases} \quad (5-15)$$

对图 2-1 中的带串联电容补偿的电力系统，对外电路方程进行 dq 坐标

变换及其线性化，可得

$$\begin{cases} \Delta u_d - \Delta u_{cd} = (R_L + pX_L)\Delta i_{id} - X_L\Delta i_{iq} - X_L i_{q0}\Delta\omega \\ \Delta u_q - \Delta u_{cq} = (R_L + pX_L)\Delta i_{iq} - X_L\Delta i_{id} - X_L i_{d0}\Delta\omega \end{cases} \quad (5-16)$$

其中 $R_L = R_r + R$, $X_L = X_r + X$

对串联电容进行进一步计算，可得：

$$p(u_c - u_s) = X_c i_l \quad (5-17)$$

对上式，同样可以进行 dq 变换并线性化，然后再与线性化后的同步发电机运算电抗形式的磁链方程，电压方程一起代入 5-16 式，消去中间变量可得

$$\begin{bmatrix} \Delta i_d \\ \Delta i_q \end{bmatrix} = Z^{-1} \left(A\Delta\delta + B \begin{bmatrix} \Delta k_1 i_{d0} \\ \Delta k_2 i_{q0} \end{bmatrix} \right) \quad (5-18)$$

$$\text{其中 } Z = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} \\ B_{21} & B_{22} \end{bmatrix} \quad A = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix}$$

各矩阵元素的定义为：

$$Z_{11} = X_L p^2 + (R_L + R_a)p - X_L + X_C + (p^2 - 1)X_d(p)$$

$$Z_{12} = -2X_L p - (R_L + R_a) - 2pX_q(p)$$

$$Z_{21} = 2X_L p + (R_L + R_a) + 2pX_d(p)$$

$$Z_{22} = X_L p^2 + (R_L + R_a)p - X_L + X_C + (p^2 - 1)X_q(p)$$

$$A_1 = (X_L i_{q0} - \phi_{q0})p^2 + (X_L i_{d0} - u_{cq0} - \phi_{d0})p - u_{sd0}$$

$$A_2 = (-X_L i_{d0} + \phi_{d0})p^2 + (X_L i_{q0} + u_{cd0} - \phi_{q0})p - u_{sq0}$$

$$B_{11} = B_{22} = X_L p^2 + R_L p - X_L + X_C$$

$$B_{21} = -B_{12} = 2X_L p + R_L$$

且对于电磁力矩方程进行线性化处理得：

$$\Delta T_e = \phi_{d0}\Delta i_q + i_{q0}\Delta\phi_d - \phi_{q0}\Delta i_d - i_{d0}\Delta\phi_q \quad (5-19)$$

忽略励磁电压的变化，将运算电抗形式的磁链方程线性化后代入上式，可得

$$\Delta T_e = (-i_{q0}X_d(p) - \phi_{q0})\Delta i_d + (i_{d0}X_q(p) + \phi_{d0})\Delta i_q \quad (5-20)$$

可以看出, 在含有 STATCOM 的系统中, 外电路的电流增量 Δi_d , Δi_q 均是 $\Delta \delta$ 和控制因子 Δk_1 , Δk_2 的函数, 因此可以通过控制 Δk_1 , Δk_2 来控制电流增量 Δi_d , Δi_q , 从而使全系统的电气和机械阻尼系数之和大于零, 达到阻尼 SSR 的目的。

因此控制器的设计是针对 Δk_1 , Δk_2 设计的, 当电力系统发生次同步谐振时, 发电机的转速呈现振荡性的变化, 轴系的特征量将可反映次同步谐振的程度和趋势, 因此我们选取发电机转子转速偏差 $\Delta \omega$ 作为反馈信号。

文中我们采用的是 PI 控制方式, 输入信号为发电机转速偏差 $\Delta \omega$, PI 控制器的输出为控制因子 Δk_1 , Δk_2 。即:

$$\begin{bmatrix} \Delta k_1 \\ \Delta k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{P_1}{1+T_1 \cdot p} \\ \frac{P_2}{1+T_2 \cdot p} \end{bmatrix} \Delta \omega \quad (5-21)$$

在满足判据方程式的条件下, 可以得到 P_1 , P_2 , T_1 , T_2 , 从而得到 STATCOM 和 SMES 控制器, 根据 IEEE 提供的第一标准模型的结构和参数, 联立方程, 经过计算可以得到 PI 控制器的具体参数如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta k_1 \\ \Delta k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{8}{1+0.01p} \\ \frac{-8}{1+0.01p} \end{bmatrix} \Delta \omega \quad (5-22)$$

5.2 模型建立及其仿真研究

图 5-1、5-2 是基于 MATLAB/SIMULINK 所建立的 IEEE 抑制电力系统次同步谐振的第一基准模型, 分别引入 STATCOM 与 SMES 器件进行仿真研究:

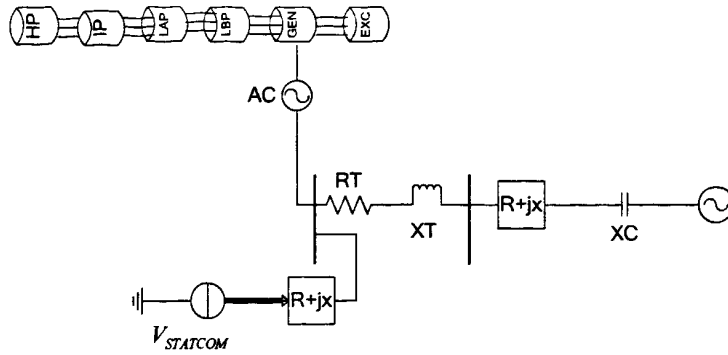


图 5-1 引入 STATCOM 的 IEEE 第一基准模型

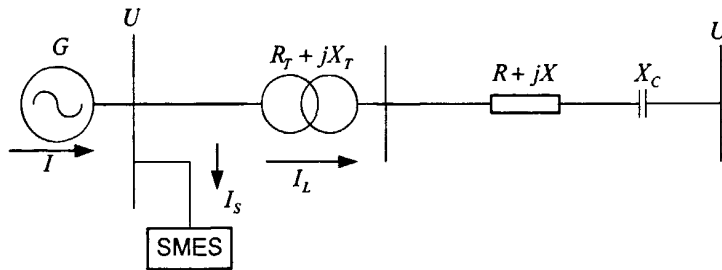


图 5-2 引入 SMES 的 IEEE 第一基准模型

对图 5-1，关于 STATCOM 的结构和工作原理数学模型在第三章中已经有所介绍，其可以表示为一个并联在系统中的受控源，幅值和相角由其的控制器决定，因此我们就可以在系统中应用 STATCOM 的这种灵活性，利用其并联输出电流 I_s 改变整个系统的电气复转矩系数中的电气阻尼系数使得其符合全系统中的电气阻尼系数与机械阻尼系数之和大于零，从而达到阻尼次同步谐振的目的。

IEEE 次同步谐振的第一标准模型中的具体参数参见附录所示。

通过仿真实验我们可以得到，当系统采用 55% 串联电容补偿时，发生次同步谐振，原动机低压段 A 与低压段 B 轴系间的扭矩 T_3 以及低压段 B 与发电机轴系间的扭矩 T_2 如图 5-3 所示：

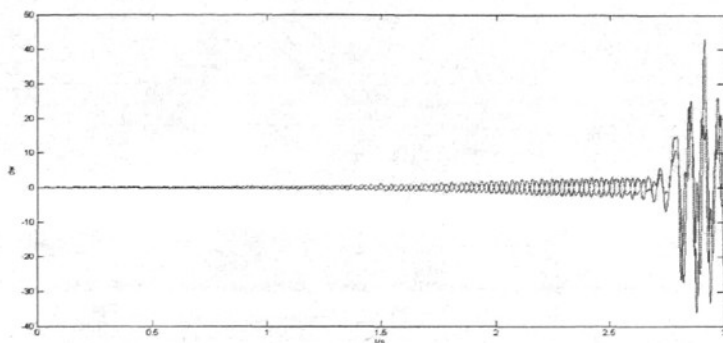


图 5-3 发生次同步谐振的低压缸 A 和低压缸 B 之间
以及低压段 B 与发电机轴系间的扭矩 (P.U)

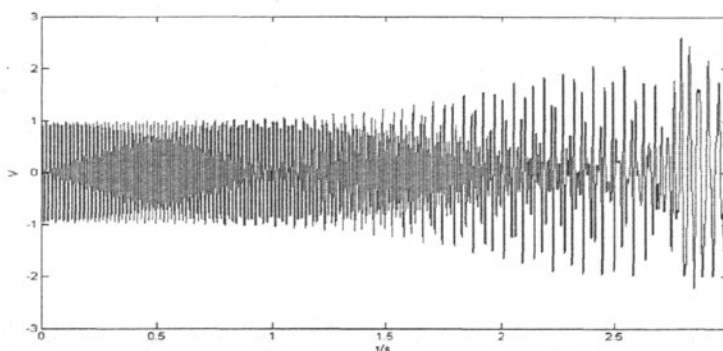


图 5-4 发生 SSR 的系统 A 相电压

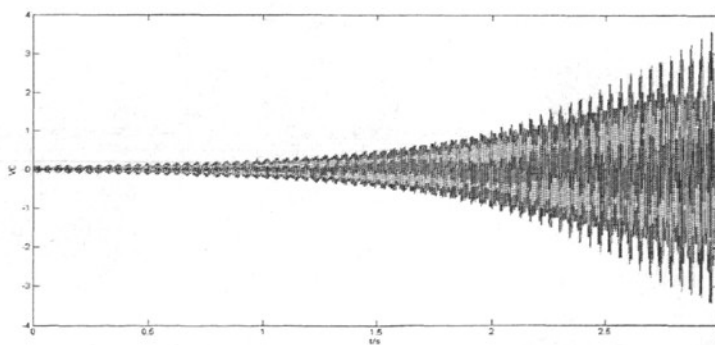


图 5-5 发生 SSR 的系统电容器两端电压

由图 5-3 我们可以看出轴系之间的扭矩较大, 且有明显的发散振荡迹象, 说明此时发电机发生了次同步谐振现象, 这正是采用古典串补而引发的问题。在图 5-4 中表示出了系统发生次同步谐振时线路 A 相的电压 (标

么值), 从图中可以看出, 当系统发生次同步谐振时, 线路上的电压幅值逐步增大, 且图 5-5 所示电容器两端的电压也呈快速放大趋势。根据这些仿真曲线说明次同步谐振对发电机有很严重的破坏作用, 这也是我们研究抑制次同步谐振的意义所在。

而当系统采用 STATCOM 方案后系统的运行状况, 如图 5-6~5-8 所示:

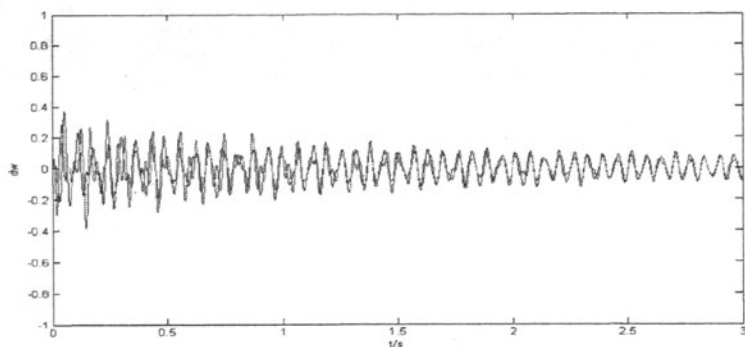


图 5-6 有 STATCOM 低压缸 A 和低压缸 B 之间
以及低压段 B 与发电机轴系间的扭矩(P.U)

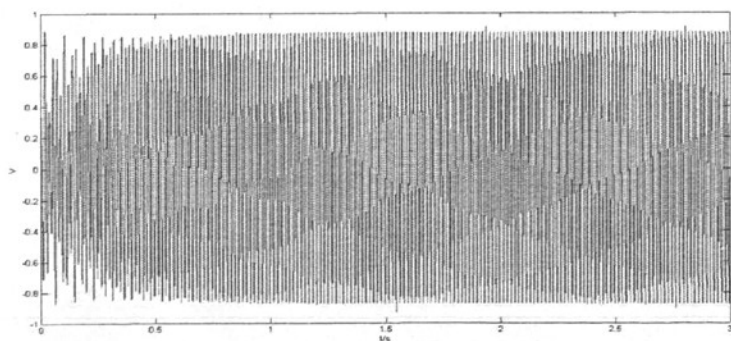


图 5-7 含有 STATCOM 的系统 A 相电压(P.U)

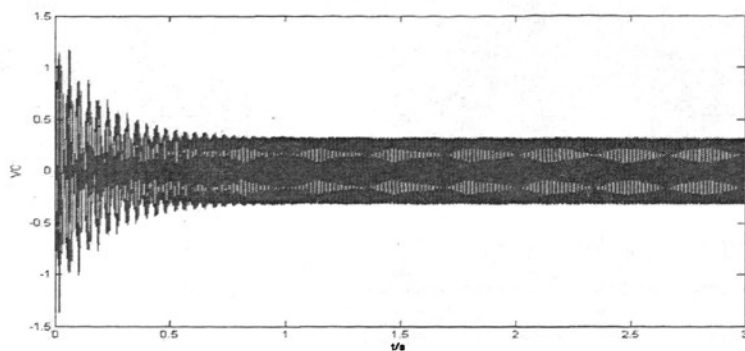


图 5-8 有 STATCOM 电容器两端电压

通过对 SMES 器件抑制电力系统次同步谐振的仿真研究我们可以得到, 当系统同样采用 55% 串联电容补偿时, 发生次同步谐振, 原动机低压段 A 与低压段 B 轴系间的扭矩 T_3 以及低压段 B 与发电机轴系间的扭矩 T_2 如图 5-8 所示。

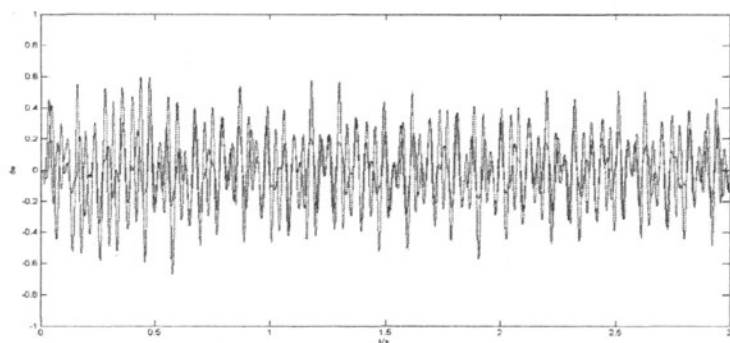
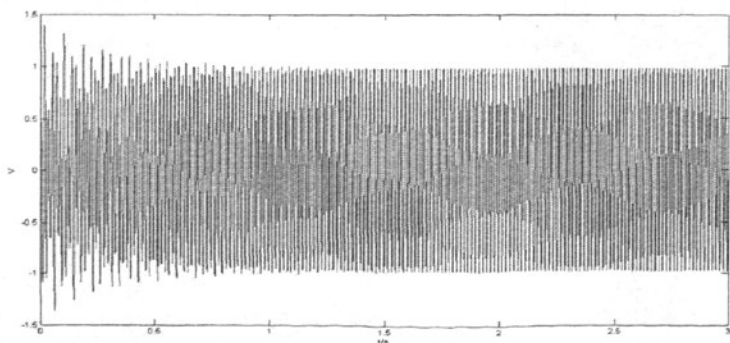
图 5-9 有 smes 低压缸 A 和低压缸 B 之间
以及低压段 B 与发电机轴系间的扭矩 (P.U)

图 5-10 含有 smes 的系统 A 相电压(P.U)

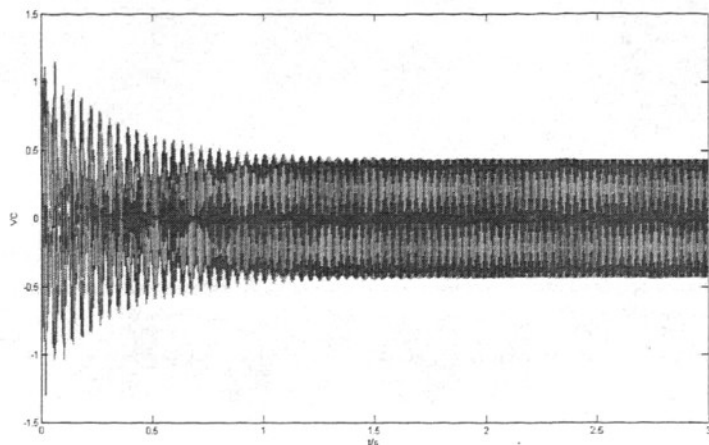


图 5-11 含有 smes 的系统电容器两端电压

从图 5-7、5-10 可以看出,与图 5-4 的对应曲线相比较,在采取 STATCOM、SMES 器件阻尼次同步谐振的控制策略后,线路 A 相电压由原来的不稳定变成稳定;从图 5-6、5-9 可以看出,与图 5-3 的对应曲线相比较发电机轴系间的扭矩由原来的振荡且发散的状态变成的稳定运行,这说明系统采用了 STATCOM 和 SMES 方案后,次同步谐振现象得到了很好的抑制,减少了发生轴系扭矩事故的机率。这些仿真验证了阻尼次同步谐振控制策略的有效性。

在图 5-5 与图 5-8、5-11 比较了采取 STATCOM、SMES 阻尼次同步谐振的控制策略前后线路电容上的电压变化情况。在采取阻尼次同步谐振的控制策略前,电容电压逐步增大,当采取阻尼次同步谐振的控制策略后,电容电压趋于稳定,再一次验证了阻尼次同步谐振的控制策略的有效性。

5.3 小结

本章研究扫频-复转矩系数法的基本思想,推导出了分析电力系统次同步谐振的电气和机械阻尼系数的定量关系,并设计出利用 STATCOM 以及 SMES 阻尼次同步谐振(SSR)的 PI 控制器。建立了 IEEE 第一标准模型,并分别引入 STATCOM、SMES。所设计的控制器通过仿真结果得到了验证,表明 STATCOM 以及 SMES 通过此控制策略均可以有效的阻尼次同步谐振。

结论与展望

本文将抑制串补输电系统的次同步谐振（SSR）问题，阻尼发电机轴系间的扭矩为研究目标。

首先，本文对电力系统次同步谐振的产生机理，基本原理进行分析，在此基础上建立次同步谐振的统一机电模型，并在数学建模的基础上用 MATLAB/SIMULINK 软件建立起发电机六轴系的仿真模型。

其次本文对 STATCOM 的工作原理进行研究并建立了其数学模型。通过对其电路结构进行改善，建立了 STATCOM 的四重化模型，并采用电流间接控制法验证了应用 STATCOM 设计电力系统的无功补偿方案，在达到无功补偿目的的同时不会造成发电机轴系间扭矩的增大。

此外本文详细介绍了 SMES 的概念以及发展概况，研究了 SMES 的结构、工作原理并建立其数学模型。并在 MATLAB/SIMULINK 软件下建立了其仿真模型将超导磁储能系统（SMES）引入带有串补电容的电力系统中，分析其对次同步谐振所产生的作用。

最后本文采用扫频复转矩判别法的思想对电力系统次同步谐振的电气阻尼系数的定量关系式进行分析，以 IEEE 第一基准模型系统为研究对象，推导出了带有 STATCOM 以及 SMES 装置的系统电气复转矩系数，以此为基础设计出利用 STATCOM 以及 SMES 器件阻尼电力系统次同步谐振（SSR）的 PI 控制器。采用基于 MATLAB/SIMULINK 时域仿真验证所设计的 STATCOM、SMES 装置控制器对阻尼电力系统次同步谐振（SSR）的可行性。

通过对算例仿真分析，我们可以看出采用 STATCOM 以及 SMES 方案进行电力系统的无功补偿，即可以稳定电力系统的电压，提高电压的峰值，而且还可以对电力系统发电机轴系之间的扭振现象有很好的抑制作用，阻尼次同步谐振现象的产生。对于不同的运行工况和需要解决的问题，STATCOM 以及 SMES 方案的控制策略可以根据需要作一些变化。

综上所述，应用 STATCOM 以及 SMES 装置设计控制策略进行电力系统次同步谐振的抑制是有效的、可行的。

由于时间限制，本文所作工作还有待完善，需进一步开展的工作如下：

1. 研究分别引入 STATCOM 与 SMES 的 IEEE 次同步谐振的第一标准模型，分别分析其抑制特性，比较其优缺点。

2. 研究将 STATCOM 与 SMES 引入 IEEE 次同步谐振的第一标准模型的不同位置，将产生的次同步谐振的抑制效果，并进行对比分析。

附录

本文中 IEEE 研究次同步谐振的第一标准模型的系统参数

A1: 轴系惯性和刚度常量

$$M_5 = M_H = 0.185794, \quad K_{45} = K_{HI} = 19.303, \quad D_H = 0.02,$$

$$M_4 = M_I = 0.3111778, \quad K_{34} = K_{IA} = 34.929, \quad D_I = 0.02,$$

$$M_3 = M_A = 1.717340, \quad K_{23} = K_{AB} = 52.038, \quad D_A = 0.03,$$

$$M_2 = M_B = 1.768430, \quad K_{12} = K_{BG} = 70.858, \quad D_B = 0.03,$$

$$M_I = M_G = 1.736990, \quad K_{61} = K_{GX} = 2.822, \quad D_G = 0.03,$$

$$M_6 = M_X = 0.068433, \quad D_X = 0.01$$

A2 输电线路

$$R_L = 0.02, \quad X_L = 0.56$$

A3 汽轮发电机

$$X_d = 1.790, \quad X'_d = 0.169, \quad X''_d = 0.135, \quad X_q = 1.710, \quad X'_q = 0.228,$$

$$X''_q = 0.200, \quad T'_{d0} = 4.300, \quad T''_{d0} = 0.032, \quad T'_{q0} = 0.850, \quad T''_{q0} = 0.050,$$

$$X_1 = 0.130, \quad R_a = 0.001$$

A4 励磁调节器

$$K_E = 50, \quad T_E = 0.002, \quad T_A = 0.01$$

A5 变压器参数

$$R_T = 0.0035, \quad X_T = 0.14, \quad S_T = 920MVA, \quad K_T = 26/520KV$$

A6 汽轮发电机转矩和调速参数

$$F_H = 0.3, \quad F_I = 0.26, \quad F_{LA} = 0.22, \quad F_{LB} = 0.22, \quad T_{CH} = 0.3, \quad T_{RH} = 7.0,$$

$$T_{CO} = 0.2, \quad K_G = 25, \quad T_{SR} = 0.2, \quad T_{SM} = 0.3$$

致 谢

在求学的道路上，我不断感受到师长、家人、同学和朋友的关怀及帮助，让我安心于学业，充满信心和勇气面对挑战，战胜挫折，是我一生最宝贵的财富和经历，我将永远珍藏。

本论文是在导师康积涛教授的悉心指导下完成的。导师严谨的治学态度、渊博的知识、无私的奉献精神使我深受启迪。攻读硕士期间，康老师为我创造了良好的学术环境，提供了交流的平台，无论在学习、生活上，都给予了我无微不至的关怀与帮助。导师的谆谆教导当铭记于心，不敢有丝毫懈怠。在此向康老师致以最诚挚的敬意！也感谢其他（她）朋友对我的支持与关心！

感谢含辛茹苦的父母，谢谢你们对我的养育之恩，你们是我坚强的后盾！

参考文献

- [1] 钟胜, 与超高压输电线路加串补装置有关的系统问题及其解决方案[J], 电网技术, 2004, VOL.28, NO.6:26-29.
- [2] 曹路, 陈衍, 可控串联补偿抑制次同步谐振的机理[J], 电力系统自动化, 2001, VOL.25, NO.4: 25-30.
- [3] 赵贺, 电力电子学在电力系统中的应用—灵活交流输电系统[M], 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [4] Lse.T` et al, simultaneous active and reactive power control of superconducting magnetic energy storage using GTO converters, IEEE Tran. on power delivery,1986,PWRD-1:143-150.
- [5] Rabbani.M.G et al ,Multi-mode wide rang sub synchronous resonance stabilization using superconducting magnetic energy storage unit, Electrical Power and Energy System,1999,21:45-53.
- [6] Patil.K.V et al , Application of STATCOM for damping oscillation in series compensated AC system . IEEE Tran.on Energy Conversions, 1998, VOL.13, NO.3:237-243
- [7] 何大愚, 柔性交流输电的定义, 机遇及局限性[J], 电网技术, 1996, NO.20, 18-24.
- [8] 中国电工技术学会, 电工高新技术丛书(第5分册)[M],北京: 机械工业出版社, 2001
- [9] 高俊, 丁洪发, 典型 FACTS 元件抑制次同步谐振研究综述[J], 电力自动化设备, 2001, VOL21, NO.5:45-50.
- [10]IEEE PES Publications, 76CH1066-0-PWR. Analysis and Control of Subsynchronous Resonance. IEEE Power Engineering Society 1976 Winter Meeting.
- [11]IEEE PES Publications,81TH0086-9-PWR.Symposium on Counter measures for Subsynchronous Resonance. IEEE Power Engineering Society 1981 Summer Meeting.
- [12]IEEE PES Publications , 79TH0059-6-PWR.State-of-the-art Symposium ---Turbine Generator Shaft Torsionals. IEEE Power Engineering Society 1979 Winter Meeting.

-
- [13]IEEE Committee Report. Terms, Definitions and Symbols for Subsynchronous Oscillations . IEEE Trans.on PAS.1985, PAS -10 4 (6):1326~1334
- [14]IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. First Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance .IEEE Trans.PAS. 1977, PAS-96(5):1565~1572
- [15] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group. Second Benchmark Model for Computer Simulation of Subsynchronous Resonance. IEEE Trans. PAS. 1985, PAS — 104(5): 1057~1066.
- [16] IEEE Committee Report . Reader's Guide to Subsynchronous Resonance. IEEE Trans. on PWRs. 1992, 7(1): 150~157.
- [17]IEEE Committee Report. A Bibliography for the Study of Subsynchronous Resonance Between Rotating Machines and Power Systems. IEEE Trans. PAS. 1976. PAS — 95(1): 216~218.
- [18]IEEE Committee Report. First Supplement to a Bibliography for the Study of Subsynchronous Resonance Between Rotating Machines and Power Systems. IEEE Trans_ PAS.1979.PAS — 98(6);1872~1875
- [19]IEEE Committee Report. Second Supplement to a Bibliography for the Study of Subsynchronous Resonance Between Rotating Machines and Power Systems. IEEE Trans. PAS. 1985, PAS — 104(2): 321~327.
- [20]IEEE Committee Report. Third Supplement to a Bibliography for the Study of Subsynchronous Resonance Between Rotating.
- [21] IEEE Committee Report. Fourth Supplement to a Bibliography for the Study of Subsynchronous Resonance Between Rotating Machines and Power Systems. IEEE Trans. on PWRs. 1997, 12(3): 1276~1282.
- [22]余江, 增建平, SEMS 在电力系统中的应用, 电力自动化设备 2000.7,VOL.20, NO.3 1006-6047.
- [23]彭晓涛, 程时杰, 王少荣, 等. 非线性PID控制器在超导磁储能装置中的应用研究[J]. 电网技术, 2005, 29(5): 37-42.
- [24]李君, 徐德鸿, 郑家伟, 等. 超导储能系统用多模块电流型变流器载波轮换均流方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 106-111.
- [25]周双喜, 吴畏, 吴俊玲, 等. 超导储能装置用于改善暂态电压稳定性
-

- 的研究[J]. 电网技术, 2004, 28(4): 1-5.
- [26]彭晓涛, 程时杰, 王少荣, 等. 一种新型电流源型变流器PWM控制策略及其在超导磁储能装置中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2006, 60-66.
- [27]王付胜, 刘小宁, 王磊. 基于数字信号处理器与复杂可编程逻辑器件的三相电流源型超导储能不间断电源及其控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 66-70.
- [28]陈陈, 杨煌. 几种次同步振荡分析方法和工具的阐述[J]. 电网技术, 1998, 22(8): 10~13
- [29]徐政, 罗惠群, 祝瑞金. 电力系统次同步振荡问题的分析方法概述[J]. 电网技术, 1999, 23(6): 36~39
- [30]徐政. 复转矩系数法的适用性分析及其时域仿真实现[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 1~4.
- [31]倪以信, 王艳春, 陈寿孙, 等. 多机系统 HVDC 的轴系扭振的扫频—复数力矩系数分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 1991, 3(2): 44~55
- [32]李吉芳. 复转矩系数法应用于多机电力系统的修正[J]. 继电器, 2004, 32(8): 5~7
- [33]倪以信等, 动态电力系统的理论和分析[J], 清华大学出版社. 2002.5
- [34]杜极生. 国内外关于扭振监测装置的研究综述[J]. 汽轮机技术. 1991, 33(5): 16~19
- [35]J. Stein, H. Fick. The Torsional Stress Analyzer for Continuously Monitoring Turbine-Generators. IEEE Trans. on PAS. 1980, PAS — 99(2): 703~710.
- [36]J. Stein, H. Fick.. The Torsional Stress Analyzer for Continuously Monitoring Turbine-Generators. IEEE Trans. on PAS. 1980, PAS — 99(2): 703~710.
- [37]A. Lambrecht. Evaluate of Torsional Impact of Accumulated Failure Combine on Turbine Generators Shafts as a Basis of Design Guidelines. CIGRE 1984 Session, Report 11 — 06
- [38]许楚镇, 张恒涛. 汽轮发电机组轴系扭振事故剖析和技术开发展望. 动力工程[J]. 1990, 10(2): 9~14.
- [39]倪以信, 王艳春, 张宝霖. 汽轮发电机轴系扭振的机理研究[M]. 清华大学学报. 1992, 32(1): 1~8
-

-
- [40]任福春, 杨昆, 宋之平.大型汽轮发电机组轴系扭振耦合问题[J].华北电力大学学报.1996, 23(3): 30~35.
- [41]陈环, 戴克建, 杨昆.汽轮发电机汽门快关时序对系统暂态稳定及轴系扭振的影响[J].华北电力学院学报.1994, (1): 26~33
- [42]杨昆, 田涛, 吕跃刚等.元宝山电厂 300MW 机组扭振试验及在线监测 [J], 中国电力.1997, 30(5): 38~40
- [43]Hingorani NG.Anew scheme for subsynchronous resonance damping of torsional oscillations and transient torque :Part I [J].IEEE Trans .on PAS, 1981 , NO4:1825-1855.
- [44]赵学强, NGH 次同步谐振阻尼方案的研究及仿真分析[J], 华东电力, 1998, NO.12:7-11.
- [45]赵学强, NGH 次同步谐振阻尼方案的研究及其改进措施的研究[J], 电力系统自动化, 1999, VOL.23,NO.12:29-34.
- [46]Hedin.R.A ,SSR characteristics of alternative types of series compensation schemes , IEEE Trans.on Powersystems, 1995, VOL.10, NO.2:845-852
- [47]谢小荣 姜齐荣, 柔性交流输电系统的原理与应用[M], 清华大学出版社。
- [48]J.F.Hauer et al , Modulation and SSRtests performed on the BPA500KV thyristor controlled series capacitor unit at Slat substation ,IEEE Tran.on Powersystems, 1996,VOL.11,NO.2:801-806.
- [49]H.A.Othman et al , Analytical modeling of thyristor-contrlled eries capacitors for SSR studies ,IEEE Tran.on Powersystems, 1996, VOL. 1:119-127.
- [50]唐勇等, 可控串联电容次同步谐振现象的动态模拟研究, 电网技术[J], 1998, VOL.22,NO.11:22-26.
- [51]孙大伟, 扬起, 500KV 串补系统次同步谐振问题的分析计算[J], 哈尔滨电工学报, 1991, VOL.14, NO.2:119-118.
- [52]陈桂明, 张明照, 戚红雨, 等.应用 MATLAB 建模与仿真[M].北京:科学出版社, 2001.
- [53]S.NAGAYA, H.HIRANO, K.SHIKIMACHI, S.HANAI, J.INAGAKI, K.MARUYAMA"Development of MJ-class HTS SMES for Bridging
-

instantaneous Voltage dips", IEEE4D-p35

- [54]Rabbani M G, Devotta J B X, Elangovan S1 Application of simultaneous active and reactive power modulation of SMES unit under unequal α 2mode for power system stabilization [J] 1 IEEE Transl on Power Systems , 1999 , 14 (2) : 547~5521

- [55]夏道止 电力系统分析[M] 北京: 水利电力出版社, 1995

攻读硕士学位期间发表的论文

- [1] 刘燕, 康积涛 何宗奎, 袁业升, 李晨霞, 含有 STATCOM 抑制电力系统次同步谐振的研究[J], 继电器, 2008, Vol.36 No.20.
 - [2] 刘燕, 康积涛 应用 STATCOM 改善发电机阻尼的研究[J], 电力牵引与变流技术, 2008, (06) 46-49.
 - [3] 刘燕, 康积涛 次同步谐振抑制方法综述[J], 水利电力机械, 2007, Vol. 29No. 10.
 - [4] 袁业升, 康积涛, 刘燕, 何宗奎, Profibus 现场总线在沥青混凝土搅拌站中的应用[J], 微计算机信息, (已录用).
-