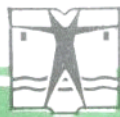


高等学校教材

变电站无功补偿设备的运行与控制

山东工业大学 侯博渊 主编



TM63
H49

351935

高等学校教材

变电站无功补偿设备的运行与控制

山东工业大学 侯博渊 主编



水利电力出版社

(京)新登字115号



高等学校教材
变电站无功补偿设备的运行与控制

山东工业大学 侯博渊 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路8号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 9印张 198千字

1991年9月第一版 1991年9月北京第一次印刷

印数0001—3690册

ISBN7-120-01390-4/TM·387

定价2.45元

内 容 提 要

本书共分六章，第一章概述各种无功补偿设备的特点及比较它们的优缺点；第二、三章专门介绍近年来出现的各种不同类型的静止无功补偿装置并对它们的结构、工作原理、性能、设计、运行等问题作系统的阐述；后三章针对不同类型变电站的特点及从电网的观点讨论无功补偿及其控制问题。

本书系大学电力系统及其自动化专业和相关专业高年级学生的选修教材，也可作为电力系统科技人员及研究生的参考书。

DW08/04



前 言

调度运行人员的主要任务是电压调整及频率调整。本书主要讨论电压调整问题。

70年代初出现的静止无功补偿装置已经引起国内外广泛的重视。它对调整电压、抑制电压闪变、调节负荷功率因数、平衡三相不对称负荷、减少无功在输电线上的传输以及改善电力系统静态和动态稳定性方面有着宽广的前景。

我国自从70年代武汉钢铁公司1.7m轧机工程用比利时生产的直流励磁饱和电抗器和日本生产的电容器组成了静补装置后，静补装置便开始应用，并逐步得到推广。

为了适应这种发展趋势，本书第二、三章详细地介绍了各种不同类型静止补偿装置的结构、工作原理、性能、设计、运行等问题。后三章则针对不同类型变电站的特点及从电网的观点分别讨论了无功补偿及其控制问题。

本书的前三章由山东工业大学侯博渊撰写，后三章由上海交通大学廖培鸿撰写。全书由侯博渊主编。在编写过程中，参考了国内外一些专家、学者发表的文献，引用了有关数据及资料；全稿完成后，由重庆大学秦翼鸿教授进行了仔细地审阅，提出了很多宝贵的建设性意见。在此一并表示衷心的感谢。

由于水平所限，错误在所难免。敬请专家们不吝赐教。

编 者

1989年12月

目 录

前 言	
第一章 绪论	1
第一节 电力系统的无功功率和电压调整	1
第二节 电压调整和几种主要调压措施	1
第三节 静补装置 (SVC) 概述	4
第二章 静补装置的工作原理	6
第一节 静补装置的结构和无功补偿原则	6
第二节 FC-DCMSR型静补装置	7
第三节 FC-TCP型静补装置	22
第四节 FC-SR型静补装置	26
第五节 单通滤波器的设计	29
第六节 高通滤波器的设计	42
第七节 各组并联运行滤波器的协调配合	47
第八节 附属设备	48
第三章 静补装置在电力系统中应用的几个问题	52
第一节 电力系统中的谐波	52
第二节 调相调压问题	53
第三节 系统稳定问题	55
第四节 过电压问题	60
第五节 平衡不对称负荷	65
第六节 损耗问题	67
第四章 工企变电站的无功补偿	70
第一节 概述	70
第二节 无功功率及其补偿	71
第三节 电容器的补偿方式	75
第四节 补偿电容器的自动控制	78
第五节 非正弦电压、电流的无功功率及其补偿	79
第五章 大型变电站的无功补偿	90
第一节 概述	90
第二节 补偿电容器运行中的几个问题	91
第三节 补偿电容器组的保护	99
第四节 大型变电站无功—电压控制	107
第六章 电网无功—电压的控制	116
第一节 概述	116

第二节	无功潮流、电压的安全校正控制	118
第三节	网络拓扑可变的最优无功潮流	127
第四节	电网无功补偿容量最优配置规划	131
参考文献		136

第一章 绪 论

第一节 电力系统的无功功率和电压调整

电力系统的电压调整是调度运行人员的主要任务之一，它同频率调整具有同样的重要性。

负荷的电压静态特性是指在频率恒定时电压与负荷的关系，即 $P=f(U)$ 、 $Q=f(U)$ 的关系。图1-1为某电力系统负荷的电压静态特性曲线。图中负荷比例：

异步电动机=82.5%

同步电动机=1.3%

电热电炉=15%

整流设备=1.2%

由图1-1可见：其中无功负荷与电压之间的变化关系较为重要，因为在电压变化时无功负荷的变化远远大于有功负荷的变化。另一方面，由式 $\Delta U=(PR+QX)/U$ 可见：在线路电抗 $X \gg R$ 的情况下，无功负荷变化引起的电压波动也远较有功负荷为大。

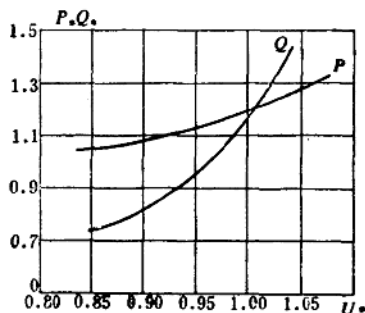


图 1-1 某电力系统的实测负荷电压静态特性曲线

在电力系统中，有功不足将引起频率下降；无功不足将导致电压下降。所以归根结蒂，电压调整问题是无功的补偿与分布问题。无功电源有发电机、调相机、并联电容器或并联电抗器（吸收无功）。近年来出现的静止无功补偿装置SVC或称静止无功系统SVS，简称静补，已经引起国内外广泛的重视。参考文献[1]列出了自1921~1982年的有关文献，其中自1972年起的文献逐年列出，可供检索参考。这些文献指出它对调整电压减少无功在输电线上的传输以及改善电力系统静态和动态稳定性方面有着宽广的前景。

由于常规的无功电源已在其他课程论及，所以本书在第二、三章将重点论述这种新型的静补装置。对其工作原理、性能、设计、运行等问题作系统的阐述。对其它无功电源则仅在本章作些比较和综述。在后三章里将针对不同类型变电站的特点及从电网的观点分别讨论无功补偿及其控制问题。

第二节 电压调整和几种主要调压措施

一、电压调整的方法

电压调整是一个比频率调整更为复杂的问题。因为整个系统每一个节点的电压都不相同，用户对电压的要求也不一样，所以在不同的节点，要采用不同的方法。但总不外乎进行无功补偿或进行无功再分布。具体有：

(1) 用发电机、调相机、并联电容器、并联电抗器或静补进行调压。这属于无功补偿。

(2) 用调压变压器或改变变压器分接头进行调压。这属于重新分布无功。由于这种调压措施本身不产生无功，只能改变无功的分布，因此在整个系统无功不足的情况下不可能用这种办法来提高全系统的电压水平。

(3) 用串联电容补偿进行调压，这属于改变网络参数来达到调压的目的。无功电源基本上是不增加的。它所产生的无功功率用来抵消线路感抗所消耗的无功。这种调压方式通常用在供电电压为35kV及以下的线路上。主要用在负荷波动大，负荷功率因数又很低的配电线路上。它不仅能提高电压而且其调压效果能随负荷的大小而改变。当负荷大时调压效果大，负荷小时调压效果小。因此它特别适用于电弧炉、电气牵引、电焊机等负荷的调压。

二、几种常用的无功补偿调压措施

(1) 发电机除作为有功电源外，还供应一定的无功功率，所以可用它来进行调压。由于发电机要受到定子电流及转子电流的限制，所以它的调压应根据它的P-Q曲线与系统连接的方式和有功负荷的分配等，合理规定发电机自动励磁调节装置的放大倍数。

在水、火电联合电力系统中，通常在丰水期将部分汽轮发电机改为调相机运行以弥补无功出力的不足。在枯水期将水轮发电机改为调相机运行以发挥水电厂的最大调压作用。

发电机在系统低谷负荷时有可能要用进相运行调压，即欠励磁运行。此时发电机向系统发出有功而吸收无功。这是由于随着电力系统的不断发展，大型发电机组日益增多，同时输电线路的电压等级越来越高，输电距离越来越长，加之许多配电网使用了电缆线路，从而引起了电力系统电容电流的增加，增大了无功功率所致。尤其是在节假日、午夜等低负荷情况下，由线路引起的剩余无功功率，就会使系统的电压上升，以致超过容许的范围。过去一般是采用并联电抗器或利用调相机来吸收这部分剩余无功功率，但这样做增加了设备投资。因此早在50年代国外就开始试验研究大容量发电机进相运行调压。近些年我国也较广泛地开展了进相运行的试验研究。实践说明，进相运行是一项切实可行的办法，不需要额外增加设备投资，就可吸收无功功率，进行电压调整。但由于进相运行对系统的静态稳定和端部发热有不良影响，所以运行中对其限制较严，要求在具有自动励磁调节装置时，可容许短时在 $\cos\varphi$ 为0.95~1的进相范围内运行。但为了调压，如果 $\cos\varphi$ 需超出规程的限额以外，就要适当限制其出力以保证运行安全。

在进相运行时，随着发电机电压的降低，厂用电电压也要降低。一般情况下，当发电机电压低于额定值的5%，厂用电电压低于额定值的10%的条件下，应能保证厂用大型电动机的连续运行。需要特别注意的是，在进相运行，厂用电支路又发生故障时，应能保证大型厂用电动机（例如给水泵电动机）的自启动。

(2) 调相机是一种专门设计的无功功率发电机。确切的说，是一种不带机械负载的可以过励磁（经常的运行状态）或欠励磁（较少的运行状态）运行的同步电动机。在系统电压偏低时，过励磁运行供给无功功率而将系统电压调高。在系统电压偏高时，欠励磁运行吸收系统多余的无功而将电压调低。一般，它与静电电容器一样装在枢纽变电站，它比并

联电容器有下列优点：可双向、连续调节；能独立地用调节励磁来调节无功功率；有较大的过负荷能力。缺点是：设备投资高，起动、运行、维修复杂；动态调节响应慢；不适应太大或太小的补偿；只能用于三相平衡的补偿；增加系统短路容量等。因此目前我国电力系统的一些枢纽变电站虽都装有调相机，可以预测它与静补控制系统相比，将来会更倾向于后者。

调相机的铭牌容量是指在过励磁状态时发出无功功率的最大值。调相机欠励磁运行时，由于端部漏磁增大造成的定子铁芯端部过热及受系统运行稳定性的限制，励磁电流不能太小，也就是吸收系统无功功率的最大容量不能很大，一般设计成为输出无功功率最大容量（过励磁）的0.5~0.65倍。

电机在运行中发生失磁故障是屡见不鲜的。在发电机或调相机发生失磁故障时，由于不但不能发出无功功率而且需要吸收系统中的无功功率，所以就加重了电力系统的电压波动。尤其是发电机失磁后引起失步事故，如处理不当还会扩大，甚至影响系统的稳定运行。所以对发电机和调相机考虑装设失磁保护装置是必要的。

目前国内对外大型发电机的失磁失步故障，提供了各种方式的失磁保护装置。例如反应阻抗在Ⅲ、Ⅳ象限变化的保护，反应功率角特性变化的保护，反应方向阻抗变化加低电压闭锁的保护，以及功率方向保护等。这里需要指出：由于调相机的运行特点与发电机不同，其失磁后的运行状态更不一样。所以有必要研究一种适用于调相机的失磁保护接线。因涉及“继电保护”课程，在这里就不介绍了。读者如有兴趣，请参阅参考文献[2]。

调相机的运行方式与发电机不同。发电机由原动机拖动运转，当失磁时，它的电磁转矩将小于原动机的驱动转矩，因而电机被加速，并按原动机的调速特性在新的转矩平衡点作稳定的异步运行。这时仍向系统送出有功功率，但从系统中吸收无功功率。调相机则情况不同，由于它没有原动机，故在正常运行时即从系统中吸收有功功率，以补偿同步运转中的各种有功损失（机械损失，风损及电气损失等），维持同步运行。因为调相机不带外加的机械负荷，只有上述的自身损失，数值不大，一般仅为调相机自身额定容量的2%左右。

调相机在发生失磁故障时，它的凸极静态反应功率能维持上述损失所需要的轴功率而使电机在无励磁电流的情况下维持同步运行。一般调相机的机械损失所形成的制动转矩总共只占最大反应转矩的2%~4%，即功率角 δ 只有 $3.5^\circ \sim 7^\circ$ 。 δ 很小而且变化不大，因此不宜象发电机那样用 δ 作调相机失磁保护的判据。

调相机由滞相运行转向失磁运行，对电网来讲无功功率变化较大，有可能使系统电压波动濒临允许的临界值，如这样，宜将调相机从电网上切除。

由于调相机失磁运行时不会失步，故转子上不发生转差频率的电流，不存在转子过热问题。但定子端部因漏磁的增大而产生局部过热，则应当校验，但一般没有危险。因此，在这种情况下，毋需切机。

分析表明调相机由滞相运行转到失磁运行时，其定子电流的换相过渡时间与调相机所带的无功负荷大小有关并处于纵轴暂态电流时间常数 T_d' 与 T_d 之间，时间很长。

（3）并联电容补偿是目前应用最广的一种调压方式。可永久连接或用断路器连接至

系统某些节点上。当系统无功不足时,补偿装置要尽量装在无功负荷的中心,做到无功功率就地平衡。通常小容量的、分散的、或用户的无功补偿采用电容器;而大容量的、系统中枢点的无功补偿则采用调相机或兼用调相机和电容器。

电容器与调相机相比较,其优点是:投资省;运行经济;结构简单,维护方便;容量可任意选择;适用性强。缺点是:不能连续调节;负荷的调节特性较差,这是由于当无功负荷增大,电容器的补偿容量 $Q_c = u^2 \omega C$,因电压下降而减小,故调压效果下降;对系统中的高次谐波有放大现象(详细分析见第二章第五节),在谐波电流过大时,可能引起爆炸。

并联电容补偿与串联电容补偿相比,在调压方面,串联电容补偿比并联电容补偿的调压性能为好。这是由于与并联补偿相反,串联补偿的容量将随无功负荷的增、减而增减。在降低网损及提高用户的功率因数等方面,并联电容补偿要比串联电容补偿优越得多。因为并联补偿降低了线路上的无功输送容量,而串联电容补偿基本上未改变输电线路上的无功输送容量。此外,串联补偿会产生铁磁谐振和自励磁等许多异常现象。

(4) 并联电抗器调压主要用在超高压(330kV及以上)系统的线路上。将它并联在线路末端或中间,吸收线路上的充电功率,以防止超高压系统长线路在空载充电或轻负荷时的末端电压升高。

第三节 静 补 装 置 (SVC) 概 述

静止无功补偿装置是相对于调相机而言的一种利用电容器和各种类型的电抗器组成的无功补偿(提供可变动的容性和感性无功)装置。它利用先进技术,不依靠断路器(或其它有触点开关)能平滑控制动态无功功率。它的原理接线如图1-2所示。图1-2(a)中的 C 是固定电容器, L 是可调电感,它随着无功负荷的变化自动调节;图1-2(b)中除 L 可调外,还有可调电容 C 。由于本装置的快速响应,所以将它接在配电网上用以抑制冲击负荷(如轧钢机、电弧炉、电焊机等)引起的电压闪变,具有独特的功能。它对调节负荷功率因数,限制无功向系统倒流,减少无功流动引起的损耗,提高电网输送有功的能力,稳定和平衡系统电压,消除流向系统的高次谐波电流,平衡三相负荷,减少配电网对通信线的干

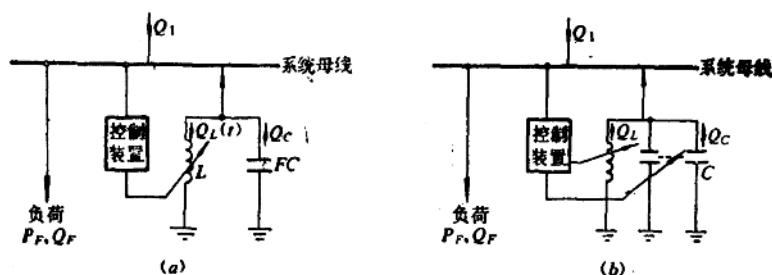


图 1-2 静补装置的原理接线图
(a)FC-TCR型; (b)TSC-TCR型

扰，都有独特的作用。将本装置接在高压输电系统可用以控制长距离输电线用负荷，空载效应等引起的动态过电压，改善系统的暂态稳定，抑制系统的无功功率及电压振荡。

静补是70年代初期发展起来的新技术。国际上几个大的电气公司如瑞士的勃朗·鲍威利公司(BBC)，瑞典的通用电气公司(ASEA)，美国的通用电气公司(GE)及西屋公司，日本的富士公司等均发展了不同类型的静补技术。从提供无功的性质和方式而言，静补装置不外乎由六种方式组合而成，固定容性、固定感性、可变容性、可感性、固定容性+可感性、可变容性+可感性。我们通常所指的静补装置是指后两种装置。对可感性又可分为直流励磁饱和电抗器(DCMSR)、相控阀调节电抗器TCR(或相控阀高阻抗变压器)及自饱和电抗器SR。自从高压可控硅元件问世以来，逐步取代了有触点开关，为实现感性或容性无功的可控调节提供了简便、可靠、灵活的技术。目前国际上几个主要的产品型式有FC-TCR[原理如图1-2(a)所示]，电感的调节也有用可控高阻抗变压器、SR、及直流励磁饱和电抗器的；另一种为TSC-TCR[原理如图1-2(b)所示]。目前相控阀的设计及制造技术已臻成熟，且在世界各地取得了较广泛的运行经验。BBC公司为加拿大劳伦塔台变电站735kV输电系统提供的静补装置是至今世界上最大容量的静补装置，已于1978年投入运行。容量为：容性350Mvar，感性450Mvar，1.7p.u.电压下短时容量为1400Mvar。

我国自70年代武汉钢铁公司1.7m轧机工程进口了比利时的直流励磁饱和电抗器加上日本的电容器组组成的静补装置后，才对可变无功的补偿问题引起了注意。各高等院校及电力部门的有关科研、设计、试验单位对静补装置在系统中的作用进行了不少研究试验工作。并于70年代后期曾试制一台10kV，5000kVA直流励磁饱和电抗器型静补装置。安装在汉口谪家矶变电站。西安电力机械公司已于1980年与瑞士BBC公司签订了技术引进合同，已为大冶钢厂两台50t电弧炉提供了全套静补设备。

TSC-TCR技术是80年代初发展起来的新技术。ASEA首先将其用于电力系统的无功补偿。我国凤凰山变电站为500kV输电线路引进了ASEA的TSC-TCR型静补。设备容量为：容性120Mvar，感性120Mvar。各由两套60Mvar的设备并联组成。此后，又相继在大连、郑州、广州引进了静补成套设备。

本章对各种调压措施作了综述，对静补装置的分类及国内外应用概况作了简单介绍。下章将详细阐述固定电容+可变电感型静补的结构、原理、设计、运行等有关问题。

第二章 静补装置的工作原理

第一节 静补装置的结构和无功补偿原则

在第一章中已对一些类型的静补装置作了简要介绍，它的原理接线已示于图 1-2。一般静补装置由两部分组成，本体和附属设备，本体包括并联电抗器 L 及并联电容器组 C 。主要附属设备指滤波器（在图 1-2 中未画出）和调节器。

本章重点讨论应用较为广泛的“固定电容 (FC) + 可变电感”型静补装置。因可变电感有直流励磁饱和电抗器，相控阀饱和电抗器 TCR 及自饱和电抗器 SR。为便于了解它们各自的工作原理以及一些有关设计、运行方面的特点，故对它们分节阐述。但对主要附属设备，因带有共同性就不分类型而合并起来讨论。对 TSC-TCR 型虽基本原理与 FC-TCR

相同，但在运行上有一些特殊性，将在第三章结合运行上的一些问题再加以讨论。

现在，首先讨论补偿装置的容量问题。

负荷侧的无功需要量常常是变化的。单靠固定无功补偿的方式仍不能稳定母线电压。如果能保证系统中某一些母线处的无功量恒定或恒定接近于零，就能消除掉由负荷无功变化所引起的母线电压波动。一般来说，只要负荷变化速率在 1s 及以上（即由零变化到额定值需要 1s 及以上的时间），频率为每小时数次的情况下，采用调相机就可满足无功补偿的要求。但是当变化速率在 1s 以下，或频率在每小时数十次之多时，采用调相机就很难胜任，而采用静补装置就能解决这一问题。

设原理接线图 1-2(a) 中的 FC 提供固定的容性无功 Q_c ，TCR 将随无功负荷 $Q_p(t)$ 的变化向系统提供可变电感性无功 $\Delta Q_L(t)$ ，使 SVC 输出连续变化的无功功率，从而达到对电网进行补偿，使线路输入变电站母线的无功 Q_1 恒定不变的目的。图 2-1(a) 及 (b) 分别表示了全补偿和欠补偿时无功功率的分布情况。

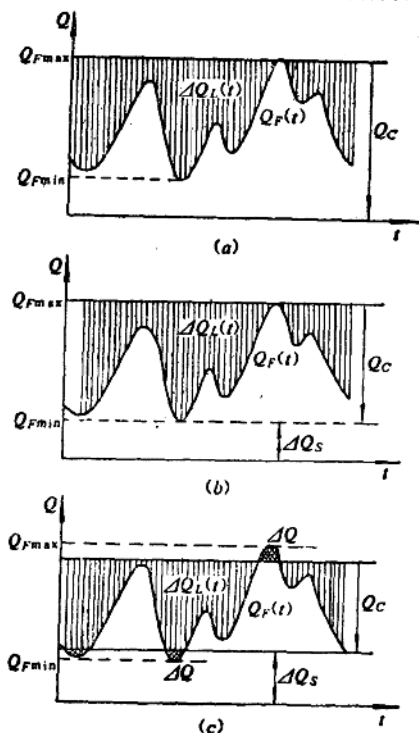


图 2-1 无功补偿相互关系示意图

(a) 全补偿；(b) 欠补偿；(c) 欠补偿，并允许母线有 ΔQ 变动

入变电站母线的无功 Q_1 恒定不变的目的。图 2-1(a) 及 (b) 分别表示了全补偿和欠补偿时无功功率的分布情况。

$$Q_1 = Q_p(t) + \Delta Q_L(t) - Q_c$$

$$= \text{const 或 } 0 \quad (2-1)$$

全补偿时, $Q_1 = 0$, 则由式 (2-1) 得

$$Q_C = Q_F(t) + \Delta Q_L(t)$$

显然, 图2-1(a)的阴影部分应为 $\Delta Q_L(t)$ 。由图可见, 电容器及电抗器的容量分别为

$$Q_C = Q_{F_{\max}} \quad (2-2)$$

$$Q_L = Q_{F_{\max}} - Q_{F_{\min}} \quad (2-3)$$

欠补偿时, 设补偿后系统输入变电站母线的无功 $Q_1 = \Delta Q_s = C$, 则由式 (2-1) 得

$$Q_C = Q_F(t) + \Delta Q_L(t) - \Delta Q_s$$

它们的关系示于图2-1(b)。由图可见, 电抗器的容量仍为式 (2-3), 而电容器的容量为

$$Q_C = Q_{F_{\max}} - \Delta Q_s \quad (2-4)$$

因此, 在欠补偿时可减小静补装置的容量。

上述是理想情况。假设我们允许送入母线的无功有少量变动 ΔQ , 由它来决定闪变指标, 即

$$\text{低谷负荷时} \quad Q_1 = \Delta Q_s - \Delta Q$$

$$\text{高峰负荷时} \quad Q_1 = \Delta Q_s + \Delta Q$$

$$\text{其它负荷时} \quad Q_1 = \Delta Q_s$$

则由式 (2-1) 得

$$\text{低谷负荷时} \quad Q_C = Q_F(t) + \Delta Q_L(t) - \Delta Q_s + \Delta Q$$

$$\text{高峰负荷时} \quad Q_C = Q_F(t) + \Delta Q_L(t) - \Delta Q_s - \Delta Q$$

$$\text{其它负荷时} \quad Q_C = Q_F(t) + \Delta Q_L(t) - \Delta Q_s$$

上列各量间的关系示于图2-1(c)。由图可见, 电容器及电抗器的容量应分别为

$$Q_C = Q_{F_{\max}} - \Delta Q_s - \Delta Q \quad (2-5)$$

$$Q_L = Q_{F_{\max}} - Q_{F_{\min}} - 2\Delta Q \quad (2-6)$$

由此可见, 在欠补偿并允许某些电压闪变时, 可减少静补装置的容量。这是目前通用的补偿方式。根据负载及网络情况, 综合考虑用电指标及经济指标 (包括运行效果及装置成本) 选择合适的静补容量是重要的。

第二节 FC-DCMSR型静补装置

图2-2示出该型静补装置的原理图。直流励磁饱和电抗器实质上是一个大型功率磁放大器。三相饱和电抗器的工作绕组 W_s 并联在电网上, 每相有两个工作绕组串联反接。控制绕组 W_c 三相并联顺接。改变直流励磁电流 I_c 的大小, 就可以改变工作绕组感抗 x_L , 即改变无功功率 ΔQ_L , 从而补偿电网无功功率的冲击。图中与 F_c 串联的电抗系作滤波用。

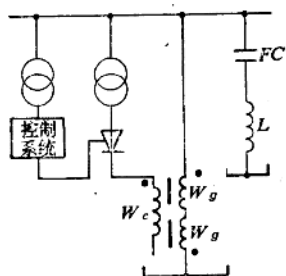


图 2-2 直流励磁饱和和电抗器原理图

工作绕组所以要串联反接，为的是使工作绕组产生的交流磁通在控制绕组中互相抵消，使得控制绕组中不感应电势。这样，在控制绕组中就只有直流分量了。这可从图 2-3 (a) 中清楚地看出， ϕ_i 及 ϕ_{ii} 为由工作绕组电流产生的磁通。根据绕组的连接，其方向如图所示。 ϕ_c 为由控制绕组直流产生的磁通。在实际的结构中，控制绕组与工作绕组系统在同一柱上，如图 2-3 (b) 所示。

一、电抗器的静态特性

电抗器的静态特性可由图 2-4 (a) (b) (c) 来表示。图 2-4 (a) 表示电源电压变化时工作电流 I_g (交流) 与控制电流 I_c (直流) 的关系。图 2-4 (b) 表示电源频率变化时工作电流 I_g 与控制电流 I_c 的关系。图 2-4 (c) 表示在不同的控制电流 I_c 时交流磁场的磁通密度 B_{max} 与磁势 H_{max} 的关系。曲线 0 表示没有控制电流时的情况。因此，这条曲线和一般带有铁芯的电抗线圈的伏安特性一样。如果在控制绕组上加直流励磁，则它的磁化特性曲线形状将作相应的改变 (见曲线 1、2、3)。当工作电流从零开始增加时，磁通密度 B 最初上升较慢；然后，在一个较小的范围内，工作电流的改变使得 B 迅速上升；最后，当工作电流再继续增加

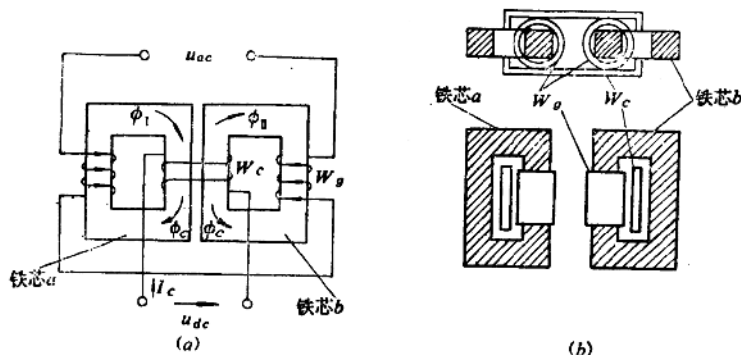


图 2-3 单相直流励磁饱和和电抗器绕组的接线图
(a) 原理图；(b) 实际结构图

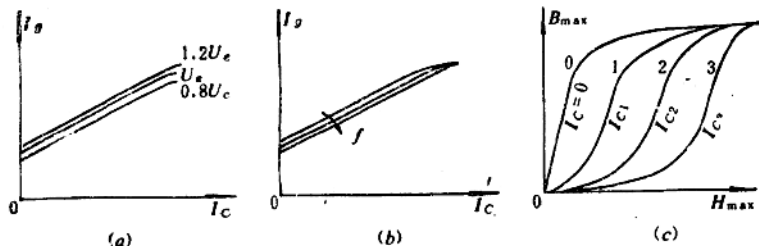


图 2-4 电抗器的静态特性
(a) U_g 变化时的 $I_g = f(I_c)$ 的特性曲线；(b) f 变化时的 $I_g = f(I_c)$ 的特性曲线；(c) I_c 变化时的 $B-H$ 曲线

时, B 又缓慢地上升直至与起始特性曲线 0 重合。此外, 控制电流 (直流磁化电流) 愈大, 特性的陡峭上升部分离开纵轴愈远。图中 $I_{c1} < I_{c2} < I_{c3} \dots$, 而且这些陡峭上升段的斜率没有太大的变化。

顺便指出, 在特性的陡峭段, 工作绕组的磁势 $I_1 W_1$ 和控制绕组的磁势 $I_c W_c$ 近似相等。这个概念将在分析运行状态时在式 (2-11) 及式 (2-13) 中应用。

交直流表示的磁化曲线是设计和分析饱和电抗器的主要依据。这个曲线的形状取决于制造饱和电抗器铁芯的铁磁材料。因此必须在制造中合理地选择材料, 采用严密的工艺, 才能保证良好的特性。

根据直流励磁饱和电抗器的实际运行情况大致可分为三种状态:

(1) 饱和电抗器未加控制信号时的状态, 称为最小状态, 相当于一个空载变压器。在工作绕组仅加交流电压时产生的磁链为 ψ_s , 则

$$\frac{d\psi_s}{dt} = u_{sc} - \mathcal{U}_m \sin \omega t$$

故

$$\psi_s = \frac{U_m}{\omega} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

根据图 2-3(a),

$$\psi_s = \phi_1 W_s + \phi_{11} W_s$$

由于未加控制电压, 控制绕组的磁通 ϕ_c 为

$$\phi_c = \phi_1 - \phi_{11} = 0$$

故

$$\phi_1 = \phi_{11} = \frac{U_m}{2\omega W_s} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (2-7)$$

即两个铁芯中磁通是相同的, 故在控制绕组中不感应电势。要做到这一点, 在工艺上要保证两绕组匝数相等, 两个磁路尺寸相同。

(2) 实际运行的工作状态是当控制绕组所加的控制信号为一较小的任意值时, 铁芯将同时受直流和交流励磁安匝的作用。一周期内铁芯磁化状态将沿局部的不对称磁滞回线变化如图 2-5 所示。当直流励磁为零时, 半周内磁通密度变化为 $2B_s$ (B_s 为磁通密度)。在有直流励磁时, 半周内磁通密度变化量 $\Delta B < 2B_s$ 。而且随着直流励磁分量与交流励磁分量的比值增大, ΔB 变小, 此比值越大, ΔB 越小。这样, 在半周的一段时间内处于饱和状态, 这与仅有交流励磁的情况不同。在这种情况下, 饱和电抗器在半周内可分成两部分考虑:

即 $0 < \omega t < \frac{\pi}{2} - \frac{\beta}{2}$ 铁芯处于不饱和状态, 和 $\frac{\pi}{2} - \frac{\beta}{2} < \omega t < \frac{\pi}{2} + \frac{\beta}{2}$ 铁芯处于饱和状态。其中 β 是由不饱和状态过渡到饱和状态的饱和范围。必须注意, 铁芯 a 与 b 在同一周内的磁状态变化并不是相同的。兹分析如下:

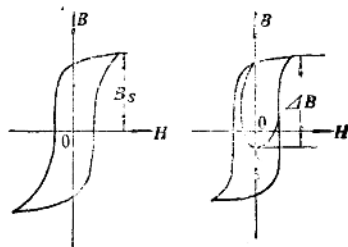


图 2-5 磁滞回线

若直流控制电压 $u_{dc} = U_d$ 从 t_1 开始投入, 此时

$$U_d = -\frac{d(W_c \phi_c)}{dt}$$

故

$$\phi_c = \frac{1}{W_c} \int u_{dc} dt = \frac{U_d}{W_c} t + C$$

由边界条件知: $t=t_1$ 时, $\phi_c = 0$ 。故

$$C = -\frac{U_d}{W_c} t_1$$

则

$$\phi_c = \phi_1 - \phi_{11} = \frac{U_d}{W_c} (t - t_1) \quad (2-8)$$

注意: 上式为一直线, 在稳态时将为无穷大。这是不符合实际情况的。其所以如此, 是因为为了简化分析在求解式 (2-8) 时略去了控制绕组的电阻所致。实际的情况应该是过了- 一定的时间后, 根据所加控制电压的大小及控制绕组的电阻的大小, ϕ_c 达到某一稳态值。

式 (2-8) 的 ϕ_c 会在两个工作绕组中产生方向相反的感应电势。前已指出, 饱和电抗器实质上是一个磁放大器, 但它与磁放大器也有差别, 差别之一是没有负载电阻。由于采用了图2-3的结构, 所以在两个工作绕组中的 ϕ_c , 方向相反但大小相等。于是在每个铁芯中的磁通表达式分别为

$$\left. \begin{aligned} \phi_1 &= \frac{U_m}{2\omega W_s} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) + \frac{1}{2} \phi_c \\ &= \frac{U_m}{2\omega W_s} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) + \frac{1}{2} \frac{U_d}{W_c} (t - t_1) \\ \phi_{11} &= \frac{U_m}{2\omega W_s} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) - \frac{1}{2} \phi_c \\ &= \frac{U_m}{2\omega W_s} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) - \frac{1}{2} \frac{U_d}{W_c} (t - t_1) \end{aligned} \right\} \quad (2-9)$$

ϕ_1 及 ϕ_{11} 的波形以实线示于图2-6。虚线为未加直流励磁时的 ϕ , 根据式 (2-7) 可知此时

$\phi_1 = \phi_{11}$, ϕ_{s+} 、 ϕ_{s-} 分别为铁芯的正、负饱和值。

由图可见, 在控制绕组加上直流电压 U_{dc} 后, ϕ_1 趋向于正饱和, ϕ_{11} 趋向于负饱和。经过一段时间, 它们的顶部分别进入正、负饱和区。这时磁通开始出现在饱和区域内工作。对于这种波形的变化, 可描述如下:

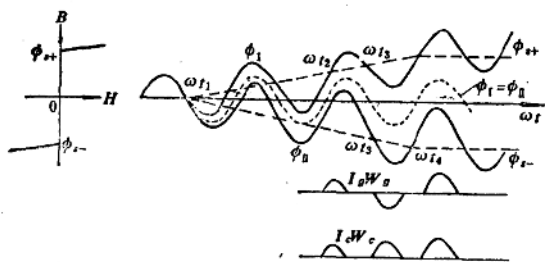


图 2-6 饱和电抗器在直流励磁后交流磁通的过渡过程

第一种情况是在 $\omega t_1 - \omega t_2$ 的间隔内, a 铁芯饱和而 b 铁芯不饱和, 则对 b 铁芯来说, 合成安匝 $\sum IW = 0$, 即

$$-I_c W_c + I_s W_s = 0 \quad (2-10)$$

对 a 铁芯来说, 其合成安匝产生了相应的饱和, 即