

Fundamentals and Applications
of Controllable Saturated Reactors

可控饱和电抗器 原理、设计与应用

蔡宣三 高越农 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

可控饱和电抗器 原理、设计与应用

蔡宣三 高越农 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书论述了可控饱和电抗器的基本原理和理论分析方法。内容包括：铁心的磁化过程理论及磁特性、带铁心的非线性电路理论分析、单相和三相可控饱和电抗器的线路、结构、稳态和瞬态分析、工程优化设计等；可控饱和电抗器的工程应用实例，如自动稳压、稳流、交流电动机软起动、电力系统短路故障限流、高频脉冲自动电压调节等。附录介绍了理想磁放大器的理论。

本书可作为高等工科院校教师、高年级学生、研究生的教学参考用书，也可供工厂、研究所科技人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

可控饱和电抗器原理、设计与应用 / 蔡宣三, 高越农
著. —北京: 中国水利水电出版社, 2008

ISBN 978-7-5084-5019-3

I. 可… II. ①蔡…②高… III. ①可控性—饱和电抗器—
理论分析②可控性—饱和电抗器—应用 IV. TM474

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 152265 号

书 名	可控饱和电抗器原理、设计与应用
作 者	蔡宣三 高越农 著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市地矿印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16 开本 15.75 印张 373 千字
版 次	2008 年 1 月第 1 版 2008 年 1 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	42.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

饱和电抗器是一个带铁心的非线性电路，有直流和交流绕组。利用直流激磁控制铁心的饱和程度，从而控制、改变交流绕组电感（感抗）值，称为磁控饱和电抗器（Magnetically Controlled Saturated Reactor）或可控饱和电抗器（Controllable Saturated Reactor），简称饱和电抗器（Saturated Reactor）。

铁磁非线性现象大约在 100 年以前即已为人们所了解和应用。1916 年左右，国外文献中出现基于饱和电抗器原理的“磁放大器”专业名词，但直到非线性铁磁理论发展和出现高性能磁性材料以后，饱和电抗器的技术和应用才有较大的进展。基于铁磁非线性现象的饱和电抗器这一门科学技术发展的最初阶段，主要是在工业中用作大功率控制元件（如控制和调节灯光、炉温、异步机转速、同步发电机励磁等）。20 世纪 40 年代以后，应用饱和电抗器作为放大元件有了迅速发展，这是因为工业自动控制系统发展较快，加上第二次世界大战时期，战机、运输机以及舰艇上的电力系统和控制系统，都要求提供更高质量、更为可靠的磁放大器和可控饱和电抗器；而且高质量的铁磁材料和高质量的硅二极管的生产工艺水平又有了很大提高。高质量的铁心材料与半导体特性的配合，可广泛地解决生产中迫切需要的各种控制、放大设备。

饱和电抗器的性能改善与新材料、新元件、新工艺的发展有密切的关系。饱和电抗器与晶体管、伺服电机、交流电磁铁等元件相互联系和相互作用，也是人们关注的一个问题。由于生产的需要，饱和电抗器的理论在 20 世纪 50 年代，有较为广泛、深入的研究，形成一套完整的理想磁放大器理论。饱和电抗器用作磁放大器的主要缺点是：快速性差、体积、重量大，限制了它在小功率快速系统中的应用。

饱和电抗器的优点是：稳定、可靠、可连续平滑调节功率、控制灵活、成本较低、寿命较长、维护管理简便等。因此，近年来，大功率饱和电抗器在工业中得到广泛应用，如高熔电弧电源（热风洞电源），功率可达 100MW 以上；利用饱和电抗器的恒流特性可以构成用于热物理实验的理想等离子体电源，雷达、通信、计算机系统的大功率自动稳压装置，化学、电解工业中

大电流自动稳流装置等。

在电力系统中,饱和电抗器可用作无功功率补偿装置,限制操作过电压、减小线路的空载及轻载损耗,提高电力系统的输电能量、稳定性和电网可靠性。超大规模的电网容量越来越大,导致故障短路电流也急剧增加,需要在系统中设置短路故障电流控制器(Short Circuit Fault Current Controller,简称SFCC)。SFCC有许多优点,受到国际电力工业界的重视,尤其是应用超导饱和电抗器将饱和电抗器的直流控制绕组做成高温超导绕组,限制短路电流称为超导型短路故障限流装置(Superconductivity Fault Current Limiter,简称SFCL)。

近年来,各先进国家对应用饱和电抗器的SFCL开展了前期研发工作,超导饱和电抗技术在电力系统中的应用正处于起步阶段。

近年来,人们研究各种降压或限流起动交流电动机的软起动控制方式。大功率可控饱和电抗器限流软起动装置可应用于低压及高压交流电动机,功率达10MW以上,有许多优点,备受人们的青睐。

饱和电抗器的另一个应用范畴是,在高频小功率脉冲状态下工作,用作多路直流输出的高频开关稳压电源的后级输出电压自动调节。开关工作频率可达100kHz,功率一般为100W,称为饱和电抗器式后级电压调节器(Magamp Post Regulator),可应用于通信、网络系统等分布式直流电源系统中。

本书由清华大学教授蔡宣三和武汉科技大学教授高越农合著。在清华大学铅印讲义《饱和电抗器的原理与设计》一书的基础上全面修改、补充、增订而成。讲义已经使用了多年,受到广大读者的欢迎,包括有关高校师生、工厂工程技术人员及相关专业的公司开发部门设计、研发工程师等,该讲义曾多次被有关单位翻印或复印。鉴于当前市场上同类书籍缺少,而许多攻读博士或硕士学位的研究生以及设计、研发、运行工程技术人员迫切需要这类参考书,中国水利水电出版社考虑广大读者的需求,与著者商定合作出版此书。为此,在修订清华大学铅印讲义时,增加了20世纪80~90年代以来著者在三相饱和电抗器的理论分析、设计和应用等方面以及新领域中可控饱和电抗器的应用开发所取得的研究成果并对饱和电抗器的某些现代应用分章作了扼要介绍,力图在书内反映21世纪大功率可控饱和电抗器应用的发展前景,同时又兼顾了高层次科研、开发人员必须掌握的基本原理和分析、设计方法。

本书共分13章,包括饱和电抗器的原理(以及理论分析、设计)和应用两大部分。其中:第1章介绍单相饱和电抗器基本原理;第2章讨论铁心磁化过程理论;第3、第4、第5章系统论述单相饱和电抗器电路稳态和动态分析

的理论；第6、第7章简要介绍单相饱和电抗器典型结构及其设计；第8章介绍三相饱和电抗器的原理、设计、稳态和动态理论分析；第9章对饱和电抗器在大功率稳压、稳流装置及无功功率补偿装置中的应用作了扼要介绍；第10章论述饱和电抗器的工程优化设计方法；第11章介绍了大功率饱和电抗器用作交流电动机限流软起动装置的最新研发成果；第12章专门介绍当前正在研发的高温超导饱和电抗器短路电流故障限流器；第13章论述特殊条件下应用的高频小功率脉冲饱和电抗器后级电压调节器及其所用高频磁性材料等；附录给出理想磁放大器理论。

本书由蔡宣三主编，第11、第12章由高越农执笔，其余各章均由蔡宣三执笔。

北京英纳超导公司总经理信赢博士对本书的撰写、整理和修改，给予许多帮助和支持；天津先导设备公司李月英女士和北京英纳超导公司李欢欢女士分别协助检索和提供第11、第12章的国内外参考文献；北京交通大学张永博士提供了短路故障限流装置的有关资料；北京水利水电科学研究院主任高工田秋生合作完成了第8.3节的撰写工作，特此表示衷心的感谢。

本书责任编辑、中国水利水电出版社编辑林京女士、张秀娟女士对本书的编辑和出版做了大量工作，本书著者借此机会谨表谢意。

著者

2007年7月

目 录

前言

1 可控饱和电抗器基本原理	1
1.1 概述	1
1.2 饱和电抗器	3
1.3 单相饱和电抗器控制绕组中的偶次谐波	6
1.4 单相饱和电抗器工作绕组中的谐波电势	10
2 铁心材料及其磁化过程	11
2.1 概述	11
2.2 铁心材料及其磁特性参数	11
2.3 冷轧硅钢片	13
2.4 铁心在交变磁场作用下的磁特性	14
2.5 直流与交流磁场作用下的铁心磁特性	17
2.6 铁心磁特性参数测定	19
2.7 伏秒积分	22
3 单相饱和电抗器的工作原理	24
3.1 概述	24
3.2 单相饱和电抗器的原理分析	24
3.3 安匝平衡定律	31
3.4 几种特殊的饱和电抗器	33
3.5 饱和电抗器特性的位移	34
3.6 图解分析法计算饱和电抗器的静特性	35
3.7 单相饱和电抗器的动态分析	37
4 饱和电抗器的输出反馈	44
4.1 概述	44
4.2 外反馈饱和电抗器的参数	45
4.3 外反馈饱和电抗器的静特性	48
4.4 影响外反馈饱和电抗器特性的主要因素	52
5 自饱和电抗器	54
5.1 概述	54
5.2 自饱和电抗器的工作原理	56

5.3	去磁曲线及其测试	61
5.4	自饱和电抗器的特性与参数	66
5.5	自饱和电抗器静特性分析	69
5.6	自饱和电抗器动态分析	72
5.7	自饱和式直流互感器	73
6	饱和电抗器的结构	76
6.1	铁心材料的选择	76
6.2	铁心结构与尺寸的选择	77
6.3	单相饱和电抗器的结构	81
6.4	三相饱和电抗器的结构	83
7	单相饱和电抗器的计算	89
7.1	线性化计算方法	89
7.2	计算举例	95
7.3	用磁化曲线和典型特性计算饱和电抗器	98
7.4	用相似法计算饱和电抗器	101
8	三相可控饱和电抗器	104
8.1	概述	104
8.2	三相扼流饱和电抗器及其稳态分析	105
8.3	三相扼流饱和电抗器动态分析	109
8.4	三相扼流饱和电抗器的电磁计算	117
8.5	三相自饱和电抗器及其稳态分析	119
8.6	自饱和电抗器的电磁计算	127
9	可控饱和电抗器在自动调节装置中的应用	136
9.1	自动稳压装置	136
9.2	无功功率自动调节装置	141
9.3	自动稳流装置	144
10	饱和电抗器的优化设计	151
10.1	概述	151
10.2	优化设计的数学模型	152
10.3	多目标优化问题	155
10.4	优化设计数学模型举例	157
10.5	工程优化设计的算法	158
10.6	炉温控制系统饱和电抗器的优化设计	160
11	饱和电抗器在交流电动机软起动装置中的应用	168
11.1	概述	168

11.2	磁控软起动装置工作原理	169
11.3	软起动用饱和电抗器结构及特点	170
11.4	饱和电抗器双铁心 (N_s 串联) 交流磁特性模型	174
11.5	饱和电抗器的准饱和	178
11.6	饱和电抗器电流波形和软起动过程仿真	179
11.7	磁控软起动装置的电流谐波	181
11.8	磁控软起动饱和电抗器的惯性	183
11.9	磁控软起动用三相饱和电抗器设计	185
11.10	交流绕组电流对于直流绕组的反作用	186
12	饱和电抗器在电力系统超导故障限流器中的应用	189
12.1	概述	189
12.2	超导故障限流器 SFCL	190
12.3	SFCL 的主要技术指标	191
12.4	SR—SFCL 的工作原理	192
12.5	SR—SFCL 饱和电抗器的结构	195
12.6	SR—SFCL 饱和电抗器的正常通流态	196
12.7	SR—SFCL 饱和电抗器的故障限流态	198
12.8	SR—SFCL 饱和电抗器交流铁心柱的截面积	201
12.9	SR—SFCL 饱和电抗器直流回路的相关问题	201
12.10	SR—SFCL 饱和电抗器的设计	203
13	高频脉冲小功率饱和电抗器的应用	206
13.1	概述	206
13.2	几个基本概念	206
13.3	高频饱和电抗器的磁性材料	208
13.4	高频 SR 型电压调节器的工作原理	211
附录	理想磁放大器理论	215
1	理想磁放大器概述	215
2	R_s 为任意值时理想磁放大器稳态分析	218
3	自然磁化与强制磁化状态的理想磁放大器	224
4	理想磁放大器动态分析	227
5	工作绕组并联时的理想磁放大器	232
6	电阻—电感负载时理想磁放大器动态分析	234
	参考文献	239

1 可控饱和和电抗器基本原理

1.1 概 述

借助于磁饱和现象，利用直流激磁作用改变铁心磁状态工作及磁特性，从而改变交流绕组的电抗值，这种元件称为磁控饱和电抗器，或可控饱和电抗器，简称饱和电抗器。

在分析铁心受到交流和直流同时激磁作用的物理过程以前，先简单地回顾一下铁心仅有交流激磁作用时的特点。

如图 1.1 所示为一个带环形铁心的交流电路，环形铁心上的绕组是均匀分布的，如图 1.1 (a) 所示，漏感很小。以后为了方便，将绕组集中在一起，而忽略漏感画成等值电路，如图 1.1 (b) 所示。铁心上绕有线圈（绕组），它的两端接交流电源 [电压 $u(t) = U_m \sin \omega t$]。若铁心尺寸（截面积 S_c 及平均长度 l_c ）及绕组参数（如匝数 N 及电阻 r 等）为一定，则在电源电压幅值及频率一定时，绕组内有激磁电流流通；而且铁心的磁状态工作点沿一定的动态磁回线变化，如图 1.2 所示。这时，铁心中磁感应强度 B 及磁场强度 H 仅有交流分量，绕组感抗是一定的，它的大小决定于铁心材料的磁特性参数（如磁导率 μ ）。要改变铁心的磁状态，从而改变绕组的感抗值及激磁电流大小，则需要改变磁路中的空隙（假如有的话），或者改变电源电压的大小。

如图 1.1 所示带铁心电路是一种非线性电抗器。当交流电源电压增高到一定程度时，铁心中 B 和 H 呈现非线性磁饱和现象：这时， H 增大很多时， B 的变化不大。有的文献将图 1.1 非线性电抗器称为饱和电抗器（Saturated Reactor）或自饱和电抗器（Self-Saturated Reactor），与本书所述的饱和电抗器或自饱和电抗器的原理、结构和应用完全不同。

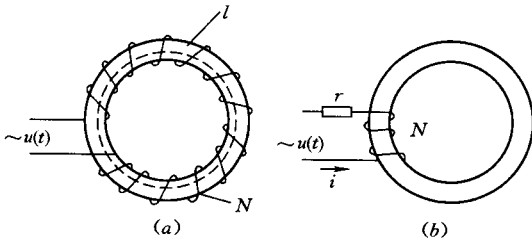


图 1.1 带环形铁心的交流电路

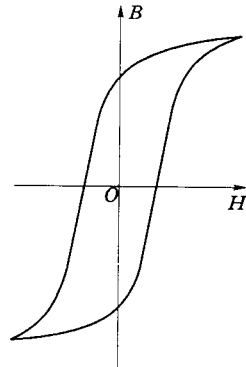


图 1.2 交流激磁时铁心的磁回线

B 的单位为 T， H 的单位为 A/m， μ 的单位为 H/m。

现若将图 1.1 的铁心的一部分用一块永久磁铁代替，如图 1.3 (a) 所示，则这时铁心中不仅有交流激磁作用，而且有永久磁铁产生的直流激磁作用。显然，随着永久磁铁所在位置的改变，直流激磁作用强度也是不同的。当永久磁铁露在铁心外面 [如图 1.3 (a) 中虚线所示]，则铁心所受直流激磁作用较弱；反之永久磁铁全部位于铁心内 (如实线所示)，则直流激磁作用较强。

如果在铁心上不仅有交流激磁绕组 N_g ，而且还有直流激磁绕组 N_k ，如图 1.3 (b) 所示，则改变直流回路内电流 i_k ，也就改变了直流激磁作用的强度。

显然，铁心同时受到交流和直流激磁作用时，铁心的磁感应强度及磁场强度中既有交流分量也有直流分量，随着直流激磁作用的改变，即铁心中磁感应强度 (或磁场强度) 的直流与交流分量相对大小发生变化，铁心的磁化过程特性也跟着变化，呈局部回线形状，如图 1.4 实线所示，这样在交流激磁大小一定时，改变直流激磁大小，就必然会改变交流回路参数 (如绕组感抗、电流大小及波形等)。

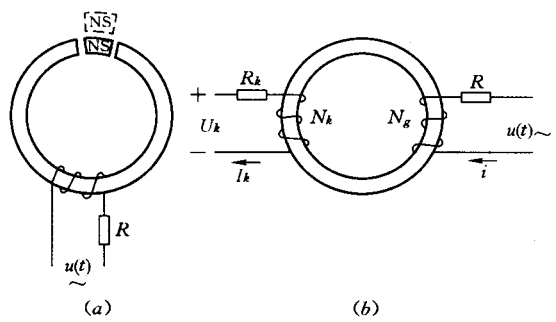


图 1.3 有直流和交流激磁的铁心
(a) 直流激磁源为永久磁铁；
(b) 利用直流激磁绕组

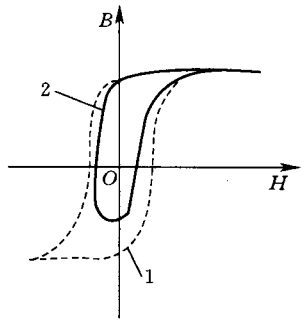


图 1.4 有直流和交流激磁时的铁心磁特性
1—直流激磁为 0 (仅有交流激磁)；
2—直流激磁一定

可控饱和电抗器的工作原理就是利用直流回路中电流值的改变 (即直流激磁作用的改变) 和通过铁心磁特性和磁状态工作点的变化控制和改变交流绕组的感抗值和交流回路的参数。如图 1.5 所示交流绕组电感随直流激磁电流 I_k 增大而减小的特性 $L = f(I_k)$ 。

利用铁心在交流和直流同时激磁时的特点和现象，可以构成具有不同技术特性参数和用途的元件、装置。如磁性无触点按钮及行程开关、磁控饱和电抗器、可控的整流电源、磁放大器及调制器、直流互感器等。在这些元件中，可控饱和电抗器是最基本的元件，一方面在工业生产中应用最广泛；另一方面，它的原理和特性具有典型性。

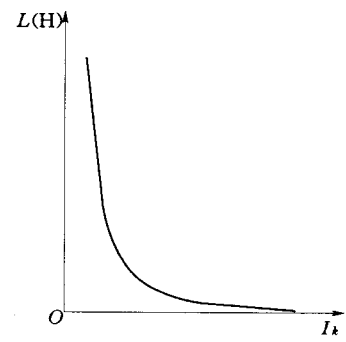


图 1.5 交流绕组电感 $L = f(I_k)$

可控饱和电抗器的交流绕组是一个可控的非线性扼流 (Choke) 线圈，直流控制电流为零时，饱和电抗器铁心处于不饱和状态，交流绕组电流很小，即工作于完全扼流状态。故又称为扼流式饱和电抗器。

本章简要介绍可控饱和电抗器 (以下简称饱和电抗

器)的原理、特性参数等一般概念。概括地叙述铁心有交流和直流激磁时的特征及主要问题。

1.2 饱和电抗器

1.2.1 不可控的非线性电抗器

如图 1.1 所示带铁心的交流电路,实际上它是一个电感线圈(称为扼流圈),是不可控的非线性电抗器。交流电源电压一定时,交流绕组的感抗值 X 是一定的,它决定于式 (1.1)

$$X = \omega L = \omega \mu N^2 \frac{S_c}{l_c} \quad (1.1)$$

式中: $\omega = 2\pi f$ 为角频率; S_c 为铁心截面积, m^2 ; l_c 为磁路平均长度, m ; μ 为磁导率, H/m ; N 为绕组匝数。

显然,电抗器铁心的几何尺寸和绕组参数一定时,电抗值 X 仅与铁心磁导率有关。如图 1.6 所示与铁心磁化曲线 $B = f(H)$ 对应的磁导率曲线 $\mu = f(H)$ 是非线性曲线。一定激磁条件下, B 和 H 是一定的, μ 也不变;只有改变激磁电流大小,才能改变磁状态工作点,从而改变 μ 的大小,即改变了 X 的大小。铁心越饱和,则磁导率越小,非线性电抗器的电抗值也越小。电源电压不变时,电抗值是不变的,因此这种情况下的非线性电抗器是不可控的。

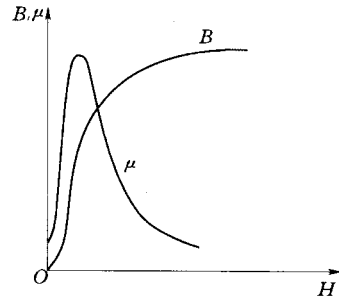


图 1.6 铁心的交流磁化曲线 $B = f(H)$ 及磁导率曲线 $\mu = f(H)$

1.2.2 可控饱和电抗器的原理

如图 1.3 (b) 所示一个具有附加直流激磁的带铁心交流电路,称为饱和电抗器。直流激磁起控制作用,因此直流绕组又称控制绕组。交流绕组与工作负载连接,因此,交流绕组又称工作绕组。假设直流回路中串联很大的阻抗,即该回路内交流侧感应电势的作用很弱,可以忽略。现在来分析饱和电抗器的特点,设交流电压固定不变。用脚注符号 k 表示控制回路参数,如控制电流 I_k 、控制绕组 N_k 等。用脚注符号 g 表示工作回路参数。

当直流激磁电流为零时,交流绕组感抗值最大,绕组内电流最小,这时相当于变压器空载运行。这种情况下的工作状态与如图 1.1 所示线路相同。设铁心中磁感应为正弦变化的,则忽略铁损时,铁心在一周期内磁状态工作点的变化如图 1.7 (a) 所示。如果磁感应幅值较小,则 B 及 H 的变化仅在磁特性的线性范围以内。

当直流激磁电流一定时,则铁心中磁感应既有直流分量,又有交流分量。为简便计,先只取交流分量中的基波部分,磁状态工作点变化如图 1.7 (b) 所示,由于交流与直流激磁的叠加作用,铁心工作于磁特性的饱和段,因此交流磁场强度增大(由于非线性磁性影响, H 是非正弦的)。铁心的等值磁导率下降。图 1.8 及图 1.9 分别表示在不同直流

控制磁场强度时磁导率曲线 $\mu = f(B)$ ，及对应的 $\mu = f(H_k)$ 。 H_k 越大，铁心越饱和， μ 越小。无论直流激磁电流方向如何，这种变化规律是相同的。

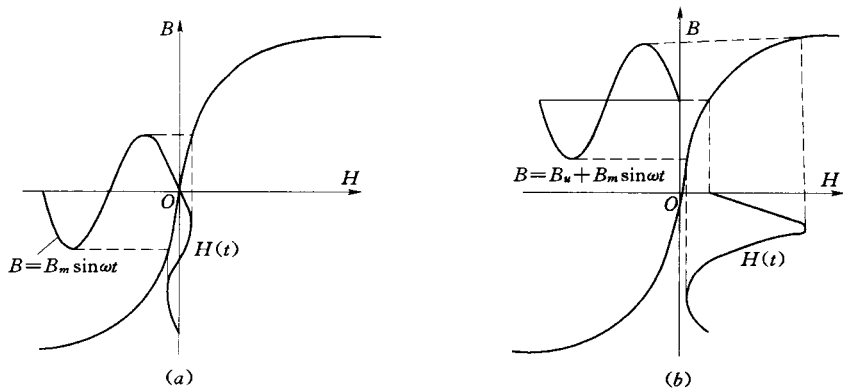


图 1.7 铁心磁状态变化示意图
(a) 仅有交流激磁；(b) 有直流及交流激磁

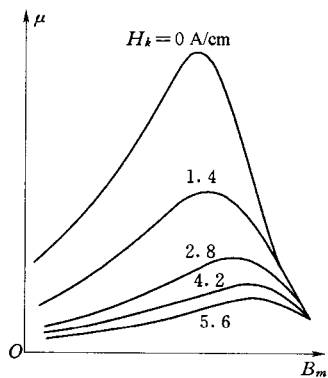


图 1.8 不同 H_k 时 $\mu = f(B_m)$ 曲线

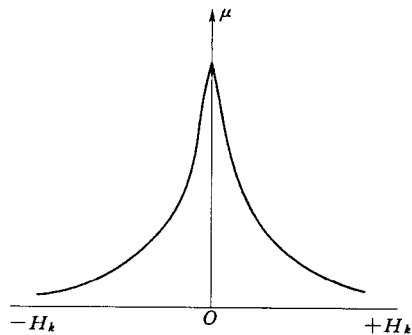


图 1.9 $\mu = f(\pm H_k)$

由式 (1.1) 可见，交流绕组感抗值 X 与 μ 有关，因此 X 随直流控制电流 I_k 而变， H_k 越大，则 X 越小。

饱和电抗器的交流绕组的作用类似一个“闸门”，当直流激磁电流为零时，交流绕组的感抗大，交流电流小，相当于“闸门”关闭；当增大直流激磁电流时，铁心饱和，交流绕组的感抗小，交流电流增大，相当于“闸门”打开。因此饱和电抗器的交流绕组也称为闸门绕组 (gate winding)。

1.2.3 单相饱和电抗器线路与结构

如图 1.3 (b) 所示的环形单铁心线路结构实际较少应用，因为在直流回路内感应有交流电势，为减弱其影响，必须在直流回路内串接高阻抗。实际的单相饱和电抗器是由两个如图 1.3 (b) 所示的单元组成。交流绕组 N_g 可以串联，也可以并联连接 (如图 1.10 所示，铁心画成矩形)。每个铁心上可以有一个 (或更多的) 直流绕组 N_k ，为了减弱直流回路中的交流感应电势作用，常常要将交流绕组顺极性串接或并接，直流绕组反极性串接

(或者将直流绕组串联顺接，而将交流绕组反接)。

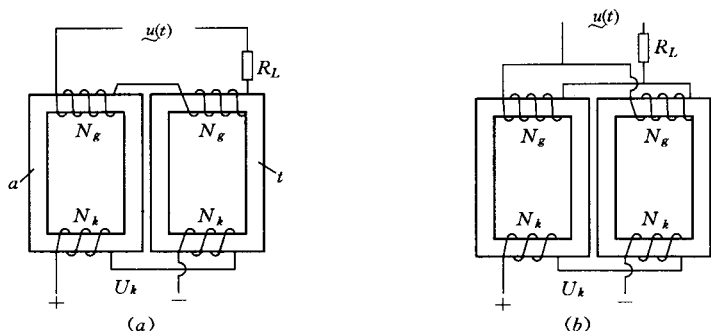


图 1.10 饱和电抗器接线方式
(a) 工作绕组串联; (b) 工作绕组并联

如图 1.11 所示单相饱和电抗器的另一种结构形式，每个铁心上绕有工作绕组，而控制绕组则共绕在两个铁心上。图 1.11 (a)、(b) 中工作绕组可以串联顺接，也可以并联顺接。因为在直流绕组的铁心柱中，两交流磁通方向相反，因而在 N_k 中感应电势最小。

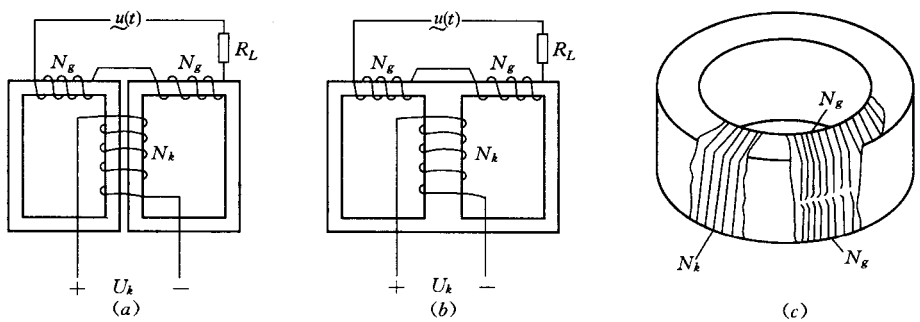


图 1.11 控制绕组共绕的饱和电抗器结构示意图
(a) 两柱铁心; (b) 三柱铁心; (c) 环形铁心

图 1.11 (b) 与图 1.11 (a) 的差别只是将两个矩形（即两铁心柱）的铁心换成一个三柱铁心的结构，其他则相同。但是由于图 1.11 (b) 的铁心中柱基本上没有交流磁通，磁滞现象将较显著。例如，当控制电流由小逐渐增大时所测得的特性与控制电流由大逐渐减小时所测得的结果可能不重合。

图 1.11 (c) 为环形铁心结构，这时每个铁心上各绕一个工作绕组以后，再叠在一起共绕一个直流控制绕组。但这种情况下，工作绕组必须串联反接，才能使控制绕组中感应电势最小。图 1.11 (c) 适用于小功率饱和电抗器。

饱和电抗器还有其他的结构形式，详见第 6 章。

1.2.4 饱和电抗器的应用

如图 1.12 所示一个利用饱和电抗器调节灯光亮度用的简单磁性调光器原理线路

图。改变直流激磁电流大小，可以改变电抗器的感抗，因而改变了灯端电压，于是灯的亮度也就有了改变，这种调光器可以应用于剧院、机场等作为远距离灯光调节和控制设备。

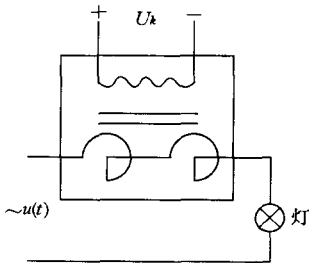


图 1.12 饱和电抗器用作磁性调光器原理性线路图

按同样原理可以用饱和电抗器作为电炉及电热装置的温度调节器中的执行元件，它在塑料、半导体等制造工业中是不可缺少的。

饱和电抗器可以用以启动电机或调节异步机或直流机的速度，也可以用作交流电压和无功功率的自动调节元件或作为静止的稳压电源和无功功率调节器中的主要元件。

可见，饱和电抗器的用途是十分广泛的，它可以作为自动调节系统的执行元件，应用饱和电抗器控制大功率装置（几百瓦到几千瓦，甚至几十千瓦至几百千瓦），可以减少控制功率，并且可以实现远距离控制。此外，饱和电抗器工作可靠，控制和调节灵活方便，在工业自动化发展中起重要作用。

饱和电抗器常和其他元件组合在一起应用，例如，将饱和电抗器与变压器组合成为可控变压器或可控电流互感器应用在同步机励磁装置中。将饱和电抗器与半导体整流器组合成可控整流电源用于充电、电镀、电焊、电解以及等离子电源等，或需要得到陡降外特性的其他大功率电源。

饱和电抗器作为放大器使用时，称为磁放大器。

1.3 单相饱和电抗器控制绕组中的偶次谐波

1.3.1 偶次谐波感应电势分析

将单相饱和电抗器（图 1.10）用图 1.13 所示原理图表示，设图 1.13（a）、（b）中每个饱和电抗器的两个铁心分别为 a 和 b ，绕组的同极性端用符号“·”表示。

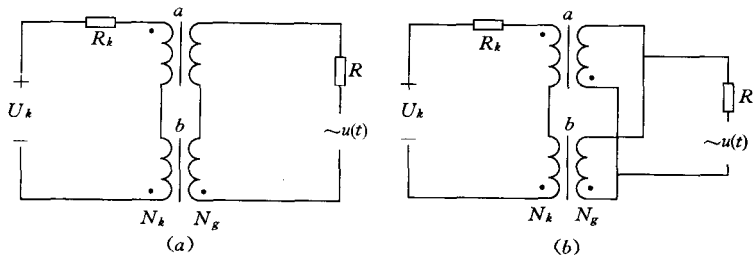


图 1.13 饱和电抗器原理图

先分析图 1.13（a）的情况，这时控制绕组串联反接，而工作绕组串联顺接。由于铁心同时受到交流和直流激磁作用，工作在磁饱和区域，即使交流激磁分量是正弦的，铁心

中磁感应的波形也是非正弦的，若忽略磁滞影响，则铁心中 B 及 H 的波形将如图 1.14 所示。

每个饱和电抗器的两个铁心 a 及 b 所受总的激磁磁场强度分别为

$$H_a = H_k + H_m \sin \omega t \quad (1.2)$$

$$H_b = -H_k + H_m \sin \omega t \quad (1.3)$$

式中： H_k 为直流控制磁场强度。

铁心 a 中 H_k 为正，磁工作点在第一象限的磁化曲线上变化，铁心 b 中 H_k 为负，磁工作点在第三象限的磁化曲线上变化。

因此铁心 a 及 b 中磁感应 B_a 及 B_b 波形如图 1.14 所示，两者都是非正弦的（图 1.14 只画出第一象限磁化曲线）。

这样控制绕组中总的感应电势应当是每个铁心上控制绕组感应电势之差。

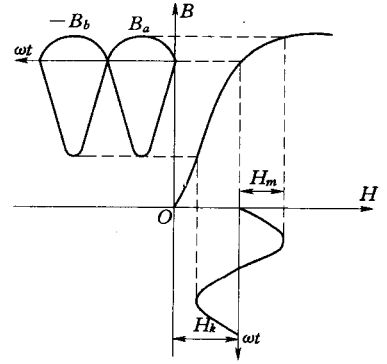


图 1.14 用图解法确定饱和电抗器铁心中的磁感应波形

$$e_k = e_{ka} - e_{kb} = \omega N_k S_c \left(\frac{dB_a}{d\theta} - \frac{dB_b}{d\theta} \right) \quad (1.4)$$

$$\theta = \omega t$$

e_{ka} 及 e_{kb} 为非正弦，既包括基波分量，也包括高次谐波分量。

由图 1.14 可见， B_a 及 B_b 满足下列关系

$$\left. \begin{aligned} B_a(\omega t) &= -B_b(\omega t + \pi) \\ B_b(\omega t) &= -B_a(\omega t + \pi) \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

将磁感应强度分解成各次谐波，则得

$$\begin{aligned} B_a(\omega t) &= B_0 + B_1 \sin(\omega t - \varphi_1) + B_2 \sin(2\omega t - \varphi_2) \\ &\quad + B_3 \sin(3\omega t - \varphi_3) + \dots \end{aligned} \quad (1.6)$$

由式 (1.6) 可知

$$\begin{aligned} B_b(\omega t) &= -B_a(\omega t + \pi) \\ &= -B_0 - B_1 \sin(\omega t + \pi - \varphi_1) - B_2 \sin(2\omega t + 2\pi - \varphi_2) \\ &\quad - B_3 \sin(3\omega t + 3\pi - \varphi_3) - \dots \\ &= -B_0 + B_1 \sin(\omega t - \varphi_1) - B_2 \sin(2\omega t - \varphi_2) \\ &\quad + B_3 \sin(3\omega t - \varphi_3) - \dots \end{aligned} \quad (1.7)$$

由此可见，任一瞬间 t ，铁心 a 及 b 的磁感应强度奇次谐波分量同向，而偶次谐波分量反向。各控制绕组的交流感应电势应为

$$\begin{aligned} e_{ka}(\omega t) &= \omega N_k S_c [B_1 \cos(\omega t - \varphi_1) \\ &\quad + 2B_2 \cos(2\omega t - \varphi_2) + 3B_3 \cos(3\omega t - \varphi_3) + \dots] \\ e_{kb}(\omega t) &= \omega N_k S_c [B_1 \cos(\omega t - \varphi_1) \\ &\quad - 2B_2 \cos(2\omega t - \varphi_2) + 3B_3 \cos(3\omega t - \varphi_3) - \dots] \end{aligned}$$

如果串联反接，则直流回路侧总的感应电势为

$$e_k = \omega N_k S_c [4B_2 \cos(2\omega t - \varphi_2) + 8B_4 \cos(4\omega t - \varphi_2) + \dots] \quad (1.8)$$

由此可知, 交流绕组串联顺接, 直流绕组串联反接时, 奇次谐波抵消, 只剩下偶次谐波分量, 因而感应电势被削弱了, 其中 2 倍频率的交流分量是最主要的。

利用这一特点可以做 2 倍频器, 在铁心中除了控制绕组及工作绕组外, 再绕输出绕组, 将两铁心上的输出绕组串联反接, 则可以输出 2 倍频率的电压。

当工作绕组并联时, 如图 1.13 (b) 所示, 由于偶次谐波感应电势在并联绕组间形成的短路回路中产生的电流可以自由流通, 控制回路两端的谐波感应电势比工作绕组串联的情况下要小得多。这是工作绕组并联时饱和电抗器的主要优点。

按照同样原理, 如果在饱和电抗器上设置一个短路回路 (包括两个铁心), 则控制绕组两端的偶次谐波感应电势可以减小很多。

1.3.2 自然磁化及强制磁化状态

控制回路中偶次谐波感应电势的存在将使铁心受到一个附加激磁作用, 这样可能使饱和电抗器的特性及工作状态发生畸变。为了限制控制回路中偶次谐波感应电势 e_k 产生的电流, 可以在控制回路内串入高阻抗。控制回路内总电流可以用式 (1.9) 表示

$$i_k = \frac{U_k + e_k}{R_k} \quad (1.9)$$

式中: U_k 为直流控制电压; e_k 为交流感应电势, 当忽略高次谐波时, 可写成 $e_k = E_{km} \sin(2\omega t + \varphi)$; R_k 为控制回路总电阻。

R_k 越大, 则为了产生同样电流, U_k 也要增大。在一定条件下可得 $U_k \gg e_k$, 这时控制回路内几乎只有直流电流流通

$$i_k \approx I_k = U_k / R_k$$

这种工作状态称为强制磁化状态, 即强制饱和电抗器铁心在直流控制电压作用下磁化, 相当于直流控制电源是具有高内阻的恒流源。

相反, 如果控制回路中不串入附加阻抗, 控制绕组本身的电阻也极小 (例如 $r_k \ll R'$, $R' = R \frac{N_k^2}{N_g^2}$ 为工作回路电阻折合到控制回路的数值)。则由式 (1.9) 可知, 只要加一个极小的控制电压 U_k 就可以产生足够的电流 i_k 。而偶次谐波电势 e_k 产生的电流占相当大的成分。这时由于控制回路电阻极小, 交流电流可以在控制回路中自由地 (不受阻碍地) 流通, 这种工作状态称为自然磁化状态。

如果铁心上还有其他直流 (控制) 绕组, 则这些绕组的接线应该和第一个控制绕组相同。例如, 工作绕组串联顺接, 则所有直流控制绕组均应串联反接, 否则在这些绕组内就要感应出基波交流电势。如果在第一个控制绕组中串联高阻抗, 而其他控制绕组电阻值却很小, 则这时仍属于自然磁化状态, 因为偶次谐波电流仍可以不受限制地在直流绕组内流通, 使铁心受到附加激磁作用。

饱和电抗器的实际工作状态介于自然磁化与强制磁化之间。

1.3.3 消除偶次谐波感应电势影响的主要方法

单相饱和电抗器控制绕组中偶次谐波感应电势的存在, 一方面使铁心工作点发生变化