

电子式连续可调电抗器的控制特性

同向前, 薛钧义

(西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 应用磁畴理论分析了基于交直流绕组正交磁化原理的可调电抗器的调控机理, 在直流控制绕组通入一定的直流电流, 可以降低电抗器铁芯的交流磁导率, 进而改变交流绕组的电感量。通过对试验电抗器的实验数据分析处理, 证明了理论分析的正确性, 并建立了电感量随直流控制电流的变化关系。通过测试, 分析了影响电感量调节范围的因素及电抗器在调节范围内的线性特性。

关键词: 可调电抗器; 控制特性; 正交磁化

中图分类号: TM 761; TM 47

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)01-0025-03

0 引言

交流可调电抗器在电力系统自动化装置中具有广泛的应用, 在某些应用场合, 还希望电抗器的电感量能够在线连续自动可调。用于电网无功功率补偿的可控并联电抗器^[1]和晶闸管控制电抗器 TCR (Thyristor Controlled Reactor) 就是两个典型代表, 但是, 它们都具有一定的非线性特性, 而且仅适用于基波无功功率的调节。

文献[2]提出一种基于铁芯正交磁化原理的可调电抗器结构, 采用电子控制方式, 通过调节控制绕组的直流电流连续平滑快速地调节电抗器的电感量, 而且电抗器具有良好的线性特性, 并应用于新型高压直流输电 HVDC (High Voltage Direct Current transmission) 装置的交流调谐滤波器中。本文应用磁畴理论分析了电抗器的调控原理, 设计制作了电抗器的实验模型, 通过对实验数据的分析处理, 探讨了电感量的控制关系、电感量调节范围及影响电感量调节范围的因素。

1 可调电抗器的结构与调控原理

交流连续可调电抗器的电磁结构如图 1 所示。铁芯采用管状结构, 由硅钢片卷绕而成。沿管状铁芯内外绕有直流控制绕组, 沿管状铁芯外围绕有交流主绕组, 交直流绕组及其所对应的交直流磁通相互正交。因此, 交直流磁通互不影响, 直流电流不会影响电抗器的线性特性。此

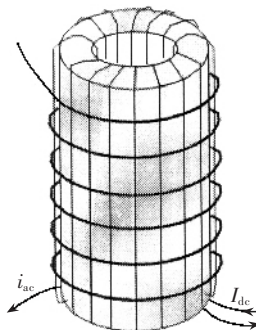


图 1 可调电抗器的结构

Fig.1 Structure of tunable reactor

外, 直流磁路为闭合的铁芯结构, 产生较强的直流控制磁场所需直流功率较小。

根据磁畴理论, 当磁性材料受到外磁场的作用时, 所有磁畴会向有利于外磁场方向磁化的方面发展。与外磁场同向的正向磁畴会得到拓宽, 反向磁畴会压缩, 其他方向的磁畴也会向着外磁场方向移动或转向, 从而使材料得以磁化。材料的磁导率在很大程度上取决于磁畴壁移和转向的难易程度。

如图 2 所示, 硅钢片属于立方晶系的多晶体材料, 其磁畴基本上只有两类^[3]: 一类是占据体积较大的主畴; 另一类是占

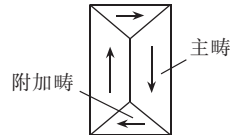


图 2 硅钢片的磁畴结构

Fig.2 Magnetic domain structure in silicon steel sheet

据体积较小的附加畴。主畴的形状多为片形畴, 其畴壁是 180° 畴壁, 附加畴的形状比较多样, 其畴壁多是 90° 的。

原则上讲, 硅钢片的磁性取决于这些磁畴结构的变化。在常规应用(变压器、电抗器等)中, 硅钢片仅承受单一方向(通常是主畴方向, 也是易磁化方向)的外磁场应力, 随着外磁场的加强, 同向主畴的体积逐步扩张, 该方向的磁化程度提高。由于易磁化方向的磁畴扩张容易, 磁导率较高。

当给硅钢片施加一个横向外加直流磁场时, 由于横向磁场与主磁畴正交, 而与附加磁畴同向, 因而附加畴得到加强, 抑制了主畴的扩张能力, 使得主畴方向的材料磁导率下降。横向直流磁场越强, 则纵向磁导率越低。从能量的角度讲, 横向直流磁场的存在提高了硅钢片铁芯的各向异性, 从而抑制了硅钢片的磁导率。

就可调电抗器而言, 在无横向直流磁场时, 铁芯的磁导率最高, 电感量也最大。随着直流磁场的增强, 铁芯在交流磁场方向的磁导率下降, 因而电抗器的电感量随之减小。

2 电抗器的控制特性

理论分析表明,交流连续可调电抗器的电感量受到正交的直流磁化电流的控制,直流控制电流越大,铁芯磁导率越低,电抗器电感量越小。为了验证这种控制关系,并进一步建立电感量与直流控制电流之间的数学关系,设计并制作了一个模型电抗器,结构如图 1 所示。模型电抗器的铁芯采用普通硅钢片,铁芯高度为 15 cm,内径为 6.4 cm,外径为 10 cm,交流主绕组为 225 匝,直流控制绕组为 110 匝。

2.1 试验电路

图 3 为电抗器控制特性的试验电路。

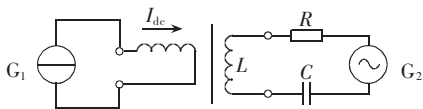


图 3 可调电抗器的试验电路

Fig.3 Test circuit of tunable reactor

图中, L 为实验用可调电抗器, C 为测试用谐振电容器, R 为限流电阻, G_1 为可调直流电流源, G_2 为频率可调的正弦电压源。试验中,电容 C 为已知参数,电感 L 为待测参数。

2.2 试验方法

测试方法采用谐振法,即调节正弦电压源的输出频率,使得 LC 发生完全谐振,则电感量可以按下式求出:

$$L = 1 / [(2\pi f_r)^2 C] \quad (1)$$

首先,调节直流电流源,使得电抗器直流绕组的直流控制电流 I_{dc} 为某一设定值;其次,调节正弦电压源的输出频率 f ,用示波器观察电压源输出电压和电抗器交流绕组电流的波形,直至电流与电压同相位(或电压与电流的李沙育图形呈现一条直线),说明电感与电容发生完全谐振,记录此时的直流控制电流 I_{dc} 和谐振频率 f_r ;利用式(1)可以求出与 I_{dc} 所对应的电抗器的电感量 L 。

2.3 试验结果

取不同的电容值,可以得到多组试验结果。除由于谐振频率不同导致电感量有所差别外,直流电流对电感量的控制特性是一致的。图 4 为可调电抗器的电感量随直流控制电流的变化关系曲线。试验结果表明,直流控制电流对电抗器的电感量具有一

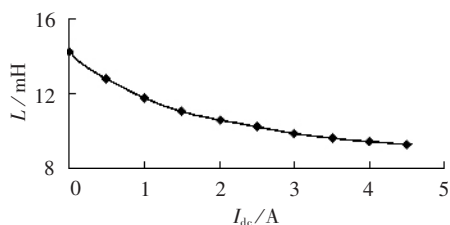


图 4 电感量跟随直流控制电流的变化关系

Fig.4 Variation of inductance with DC control current

定的调控作用,随着直流控制电流的增大,电抗器的电感量逐步减小,这与理论分析相符合。但是,电感量与直流控制电流之间呈非线性关系,随着直流控制电流的进一步增大,电抗器电感量的相对变化量逐渐减小,即直流电流的调控能力逐步下降。

2.4 静态数学模型

由图 4 可以看出,电抗器的电感量随着直流控制电流的增大呈指数规律下降。电感量 L 与直流控制电流 I_{dc} 的关系可用下式表述:

$$L = L_0 - \Delta L_{\max} (1 - e^{-k I_{dc}}) \quad (2)$$

式中 L_0 为电抗器在无直流控制作用时的电感量,即 $I_{dc} = 0$ 时的电感量; ΔL_{\max} 为直流控制作用下电感量的最大增量,即当 I_{dc} 足够大时的电感量相对于 L_0 的变化量; k 为指数因子。

针对试验模型电抗器,当电抗器应用于中心频率为 250 Hz 的电路时,由表 1 可知, $L_0 = 14.08$ mH, $\Delta L_{\max} > 4.75$ mH。采用最小方差的数据拟合方法,通过搜索比较,得到当指数因子 $k = 0.61$ 和电感增量 $\Delta L_{\max} = 5.00$ mH 时,均方误差最小,即

$$L = 14.08 - 5.00 (1 - e^{-0.61 I_{dc}}) \quad (3)$$

表 1 列出了数学模型计算数值与实测数值的比较,误差 (ε) 均小于 $\pm 1\%$,表明了数学模型的准确性和合理性。

表 1 数学模型的准确性检验

Tab.1 Verification of mathematical model

I_{dc} / A	L' / mH	L / mH	$\varepsilon / \%$
0.0	14.08	14.08	0.0
0.5	12.77	12.77	0.0
1.0	11.72	11.80	0.68
1.5	11.07	11.08	0.09
2.0	10.63	10.56	-0.66
2.5	10.23	10.17	-0.59
3.0	9.91	9.88	-0.30
3.5	9.69	9.67	-0.21
4.0	9.47	9.52	0.53
4.5	9.33	9.40	0.75

注: L' , L 分别为实测和计算电感。

3 影响电感量调节范围的因素

电抗器具有较大的电感量调节范围对实际应用而言是至关重要的。在此,电抗器调节范围 dL 定义为:在直流控制电流调节范围内,电抗器电感的最大增量相对于无直流控制作用时的电感量的百分数,即

$$dL = \frac{\Delta L_{\max}}{L_0} \times 100\% \quad (4)$$

从表 1 可以看出,模型电抗器的电感量调节范围达到 30% 以上。多个不同材料和结构的电抗器的实验结果表明,这种电抗器的电感调节范围与电抗器铁芯的材料和外形结构有关。试验结果还表明,电抗器交流绕组的工作频率对调节范围也有明显影响,交流工作频率越高,调节范围越大。表 2 所示为

模型电抗器电感量在不同工作频率 f 下的调节范围 dL ,表 3 为另一试验电抗器电感量在不同工作频率 f 下的调节范围 dL 。

表 2 模型电抗器在不同工作频率下电感调节范围
Tab.2 Tunable ranges of inductance of a test reactor at different working frequencies

f / Hz	$dL / \%$	f / Hz	$dL / \%$
250	33.7	650	42.9
300	34.9	900	44.2

表 3 试验电抗器在不同工作频率下电感调节范围
Tab.3 Tunable ranges of inductance of another test reactor at different working frequencies

f / Hz	$dL / \%$	f / Hz	$dL / \%$
50	6.2	200	12.6
100	8.8	250	13.6
150	11.4		

4 电抗器的线性特性

在滤波器应用中,要求电抗器要具有良好的线性特性。如果电抗器是线性的,则在正弦电压作用下,电抗器中电流也为正弦波,否则电流波形会有畸变,电流中将包含有由电抗器非线性所引起的高次谐波。

目前,已在某些方面得到应用的可调电抗器,如阀控电抗器和 TCR,都具有一定的非线性特征。对于图 1 所示可调电抗器结构,由于交流绕组与直流控制绕组正交,理论上讲,直流控制电流不会影响电抗器的线性特性,实际测试结果也证明了这一点。

在交流绕组施加一个正弦电压信号,测得在不同直流控制电流下电抗器交流绕组电流的频谱如图 5 所示(图中 h_{TMD} 为谐波含量; n 为谐波次数)。

由图 5 可以看出,电抗器交流电流的频谱与直流控制电流的大小无关,即直流控制电流并不影响这类可调电抗器的线性特性。

5 结论

基于正交磁化原理的可调电抗器具有电感量能够在线电子式连续调节的特点,通过调节直流绕组的直流控制电流,可以快速平稳地调节交流绕组的电感量。实验结果表明,这类电抗器的电感量随着

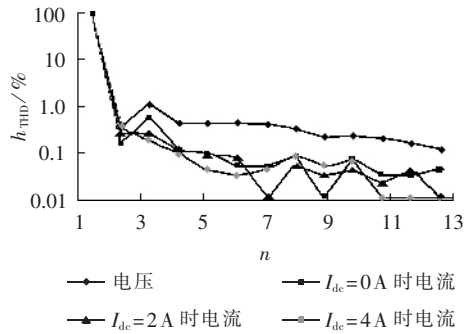


图 5 不同直流控制电流下电抗器电流的频谱
Fig.5 Spectrum of reactor current at different control currents

直流控制电流的增加而减小,且电感量与直流控制电流的调控关系呈指数规律衰减,电抗器交流绕组的线性特性不受直流控制电流的影响。但是,这类电抗器的电感量的调节范围是有限的,不适用于电网无功功率的调节,特别适合于要求电感量连续自动可调、但调节范围又不大的场合,譬如自动调谐滤波器和自动消弧线圈等。

参考文献:

- [1] 田铭兴,励庆孚. 变压器式可控电抗器的谐波分析和功率级数计算[J]. 中国电机工程学报,2003,23(8):168-171. TIAN Ming-xing,LI Qing-fu. Harmonic current and power-step number of controllable shunting reactors of transformer type [J]. **Proceedings of the CSEE**,2003,23(8):168-171.
- [2] LESCALE V F. Modern HVDC:State of the art and development trends [A]. **PowerCon'98:International Conference on Power Systems Technology**[C]. Beijing,China:IEEE,1998. 446-450.
- [3] O'HANDLEY R C. Modern magnetic materials principle and applications[M]. [s.l.]:John Wiley & Sons,Inc.,2000. (责任编辑:柏英武)

作者简介:

同向前(1961-),男,陕西户县人,博士研究生,研究方向为电能质量及其控制(E-mail:lstong@mail.xaut.edu.cn);薛钧义(1937-),男,江苏江阴人,教授,博士研究生导师,研究方向为计算机控制和配电网自动化。

Control characteristics of electronic continuously tunable reactor

TONG Xiang-qian,XUE Jun-yi

(Xi'an Jiaotong University,Xi'an 710049,China)

Abstract: Based on magnetic domain theory,the inductance of tunable reactor can be adjusted continuously by injecting DC current into the control winding which is orthogonal with the AC winding. DC control current can lower the permeability of magnetic core and change the inductance of AC winding. The experimental data analysis of a test reactor verifies the theoretical analysis. The mathematic model that reflects the inductance variation with DC control current is established. The linear characteristics and factors,which influence the variable range of inductance,are also investigated.

Key words: tunable reactor; control characteristic; orthogonal magnetizing