

# 用于压电作动器的无源可控电抗器

狄思思,李苏楠,李华峰

(南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室,江苏 南京 210016)

**摘 要:**为实现压电作动器动态无功补偿的目的,该文提出了一种基于变压器的无源可控电抗器的新方案。通过对变压器 T 型等效电路的端口等效阻抗方程分析可知,当变压器负载阻抗变化时,变压器的等效并联感抗会发生变化,从而实现变压器一次侧阻抗可调。增加变压器原副边电感值,可增加变压器的等效并联电阻,从而减小可控电抗器损耗。理论和实验结果证明此新方案的正确性。

**关键词:**无源电抗器;可控电抗器;变压器损耗;无功补偿;压电作动器

**中图分类号:**TM47

**文献标识码:**A

## Passive Controllable Reactor for Piezoelectric Actuator

DI Sisi, LI Sunan, LI Huafeng

(State Key Lab. of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** To achieve the purpose of dynamic reactive power compensation for piezoelectric actuator, a new-project of passive controllable reactor based on transformer is proposed in this paper. According to the port's equivalent impedance equations of the transformer's T-type equivalent circuit, the equivalent parallel inductance of the transformer will change when the load impedance alters. Therefore, the equivalent impedance of primary winding of the transformer is adjustable. The transformer's equivalent parallel resistance is enlarged by increasing the inductance of the primary winding and secondary winding. Thus the loss of controllable reactor decreases. The validity of the project is proved by the theory and experiment results.

**Key words:** passive reactor; controllable reactor; transformer loss; reactive power compensation; piezoelectric actuator

### 0 引言

压电作动器具有输入电压低,变形大,输出力大,响应快,位移可重复性好及体积效率高等优点<sup>[1-2]</sup>,已被广泛应用于超声电机<sup>[3]</sup>、超声换能器及振动控制等领域。

为提高容性压电作动器阻抗特性的驱动器效率,需并联电感进行无功补偿<sup>[4-5]</sup>。由于压电作动器的容抗随负载、驱动频率和温度等变化较大,固定电感无法随着外界条件的变化而变化,限制了其对压电作动器的动态无功补偿效率。因此,若能使电感随着环境变化而变化,则有望提高压电作动器的工作效率。

现有的可控电抗器大致可分为如下几种方案:

1) 节电抗器抽头<sup>[6]</sup>。

2) 调节电抗器气隙<sup>[7]</sup>。

3) TCR(晶闸管控制电抗器)<sup>[8-9]</sup>。

4) 磁通可控的可控电抗器<sup>[10-11]</sup>。

方案 1) 成本很低,调节方便,但电感量无法连续调节;方案 2) 可以实现连续调节,结构也简单,但响应慢,噪声也很大;方案 3) 采用晶闸管调触角的方式改变电感量,因此必然产生谐波污染;方案 4) 原理上产生谐波,但结构较复杂,可靠性稍低,成本较高,无法适应压电作动器的高频及变频场合。

综上所述,本文提出了一种基于变压器的无源可控电抗器的新方案。通过调节变压器二次侧负载,使变压器的等效并联感抗发生变化,实现了变压器一次侧阻抗可调,从而应用于压电作动器的动态无功补偿。

收稿日期:2016-05-24

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)基金资助项目(2015CB057503)

作者简介:狄思思(1989-),女,江苏南京人,博士生,主要从事无模型控制、超声电机驱动控制及智能算法等的研究。通信作者:李华峰(1974-)男,教授,博士,主要从事超声电机、人工肌肉等新型作动器及其驱动控制系统、精密驱动技术及功率变换技术的研究。  
E-mail:lihuaf@nuaa.edu.cn。

## 1 无源可控电抗器原理

为方便计算,负载可变变压器(见图1)稳态运行时简化的T型电路如图2所示。

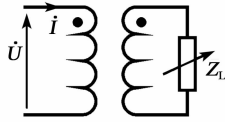


图1 负载可变变压器模型

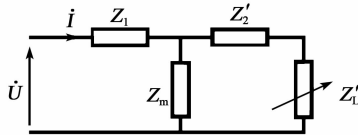


图2 负载可变电抗器T型等效电路

此时的端口等效阻抗值为

$$Z_{eq} = Z_1 + \frac{Z_m \cdot (Z'_2 + Z'_L)}{Z_m + Z'_2 + Z'_L} \quad (1)$$

式中: $Z_1$ 为原边阻抗; $Z_m$ 为励磁阻抗; $Z'_2$ 为折合到原边的副边阻抗; $Z'_L$ 为折合到原边的负载阻抗。

由于这里 $Z_1$ 和 $Z'_2$ 相对于 $Z_m$ 和 $Z'_L$ 很小,可忽略。根据串、并联阻抗性质,当 $Z_m \gg Z'_L$ 时,电路等效阻抗近似为 $Z'_L$ ;当 $Z_m \ll Z'_L$ 时,电路等效阻抗近似为 $Z_m$ 。因此,负载阻抗变化时,电路端口的阻抗 $Z_{eq}$ 在 $(Z'_L, Z_m)$ 间变化。

图2的等效电路参数如图3所示。图中, $r_1$ 为原边铜损, $x_1$ 为原边漏抗, $r_m$ 为励磁电阻, $x_m$ 为励磁感抗, $r'_2$ 为折合到原边的副边铜损, $x'_2$ 为折合到原边的副边漏抗, $R'$ 为折合到原边的负载电阻。

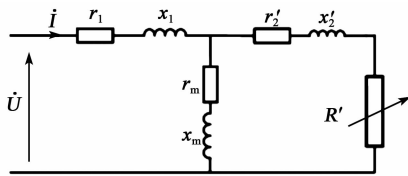


图3 T型等效电路详细参数

为简化分析过程,将图3的等效电路分别表示为串、并联等效电路,如图4所示。

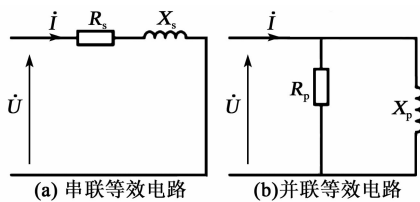


图4 等效变化电路

串联等效电阻及感抗为

$$R_s = r_1 + [(r'_2 r_m + R' r_m - x'_2 x_m) \cdot$$

$$(r'_2 + R' + r_m) + (x'_2 r_m + r'_2 x_m + R' x_m) \cdot (x_m + x'_2)] / [(r'_2 + R' + r_m)^2 + (x_m + x'_2)^2] \quad (2)$$

$$X_s = x_1 + (R'^2 x_m + 2R' r'_2 x_m + r'^2_2 x_m + r^2_m x'_2 + x'^2_2 x_m + x'_2 x^2_m) / [(r'_2 + R' + r_m)^2 + (x_m + x'_2)^2] \quad (3)$$

并联等效电阻及感抗为

$$\begin{cases} R_p = R_s + \frac{X_s^2}{R_s} \\ X_p = X_s + \frac{R_s^2}{X_s} \end{cases} \quad (4)$$

由式(2)、(3)可知,串、并联等效电阻和感抗均与负载电阻存在复杂的非线性关系。由此,通过调节负载电阻来调节并联等效感抗大小,实现感抗的无源控制。

## 2 实验结果及分析

为了验证上述无源可控电抗器的设计思路,在变压器副端串联电位器,分别通过理论计算和实验测量获得不同变比下的变压器并联等效电感随负载电阻变化的情况。对比理论和实验结果,分析本方案的可行性。表1为变比不同的变压器T型等效电路的固定参数。

表1 变压器T型等效电路参数

参 数	变 比	
	16 : 1	24 : 1
$r_1 / \Omega$	14.83	31.98
$x_1 / \Omega$	26.70	51.33
$r_m / \Omega$	6.77	118.53
$x_m / \Omega$	709.81	2 714.52
$r'_2 / \Omega$	14.83	31.98
$x'_2 / \Omega$	26.70	51.33

由表1可知,不断改变串联电位器的电阻值,参考式(2)~(4)分别计算出变比16:1和24:1下并联等效电路的阻抗。同时,按照需求搭建无源可控电抗器的硬件电路,不断调节副边串联电位器的电阻值,测量相应负载阻抗下的并联等效电感。对比理论和实验数据所得结果如图5所示。由图可知,理论计算和实验测量结果的数值基本吻合,变化趋势一致:当折合到原边的负载阻抗与励磁阻抗比 $(Z'_L/Z_m)$ 较大时,并联等效电感变化不明显;当 $Z'_L/Z_m < 2$ 时,两种变比下的等效电感均开始随着阻抗比的减小而减小; $Z'_L/Z_m \approx 1$ 时,等效电感降低。由此可知,调节负载电阻可改变可控电抗器并

联等效电感值,该趋势线也为后续调节的有效阻抗比提供参考。

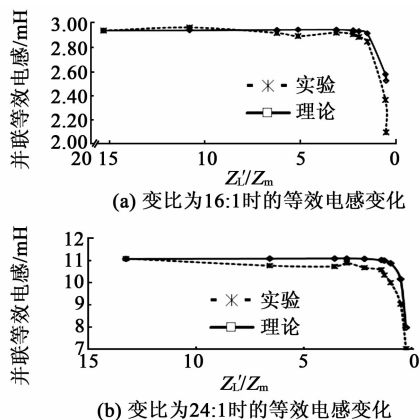


图5 不同变比下并联等效电感随负载阻抗的变化情况

为最终验证可控电抗器对压电作动器的无功补偿效果(见图6),将可控电抗器与压电作动器并联,并施加 40 kHz 交流电(超声电机通常在频率约 40 kHz 的电压下工作)。调节电位器阻值,同时测量变压器原边电压和电流相位差变化情况,如图7所示。由图可看出,随着可调电位器阻抗减小,负载阻抗和励磁阻抗的比值逐渐落入图5中能使等效电感显著变化的有效区域,电流和电压的相位差明显减小,最终可达  $0^\circ$ ,即成功实现了对压电作动器的无功补偿。

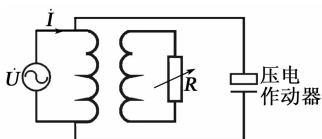


图6 可控电抗器与压电作动器并联图

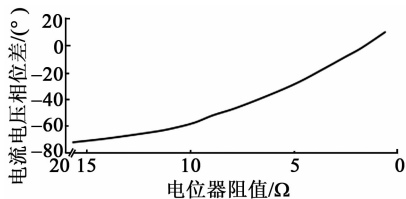


图7 变压器原边电压电流相位差

### 3 优化设计

无源可控电抗器在调节并联等效电感的同时,也使并联等效电阻降低。以 16:1 的变压器为例,当阻抗比逐渐降低至有效调节区域时,并联等效电阻显著降低(见图8),从而导致电流增大,变压器损耗增加,因此,有必要对该无源可控电抗器进行优化

设计以减小损耗。

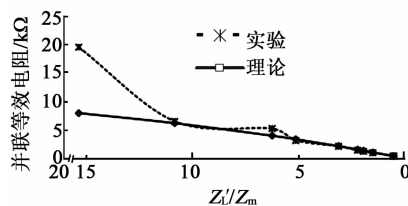


图8 变比为 16:1 时的并联等效电阻随阻抗变化情况

#### 3.1 副边阻抗设计

由以上分析可知, $Z'_L/Z_m=1$  时,端口并联等效电感变化明显。假设  $Z'_L=Z_m$ ,由于  $r_m$  相对于  $x_m$  很小可忽略,且  $r'_2$  并入  $R'$  可得

$$x'^2_2 + R'^2 = x_m^2 \quad (5)$$

改变  $x'_2$  与  $R'$  的比例关系,观察  $R_p$  变化趋势,其结果如表2所示。

表2  $Z'_L=Z_m$  时的并联等效电阻值

	$R_p$
$R'=x_m; x'_2=0$	$x_m$
$R'=x'_2=\frac{x_m}{\sqrt{2}}$	$\sqrt{2} \cdot x_m$
$R'=0; x'_2=x_m$	$\frac{x_m^2}{4r_1+r_m}$

由表2可知,随着变压器副边阻抗中电阻成分的减少, $R_p$  增加,即损耗减小。

选择一组实验所测变压器参数代入式(4),在式(5)的约束条件下,计算并联等效电阻变化情况。如图9所示,随着变压器副边阻抗中电阻成分减少, $R_p$  增加,与表2结果相符。

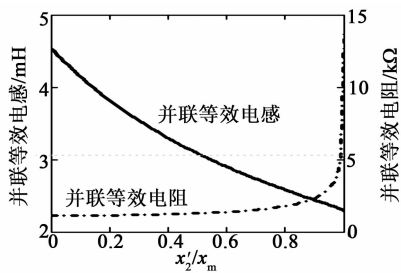


图9 并联等效电阻随副边电感变化图

根据上述分析结果进行实验。在变压器副边串联 1 个 0.1 mH 的电感,观察串联电感前、后的并联等效电阻值变化,实验结果如图10所示。此外,增加串联电感值,并联等效电阻值变化如图11所示。由图可看出,随着副边电感的增加, $R_p$  增加。实验与理论一致。

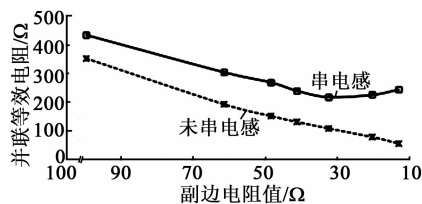


图 10 副边串联电感前、后的并联等效电阻值变化图

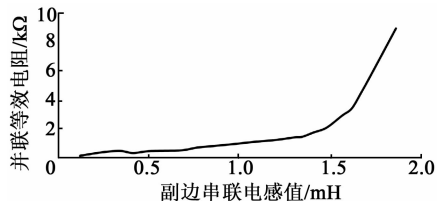


图 11 副边串联电感增大时并联等效电阻值变化图

### 3.2 原边阻抗设计

由式(2)、(3)可知,在其他参数确定的情况下, $R_s$ 与 $X_s$ 分别与 $r_1$ 、 $x_1$ 成正比关系。由式(4)可知,增加 $X_s$ 并使 $R_s$ 减小, $R_p$ 增加。因此,将原边电感增加并减小铜损,可控电抗器损耗减小。

根据上述理论分析进行实验,在变压器原边串联1个0.3 mH的电感,观察串联电感前、后的 $R_p$ 变化,实验结果如图12所示。此外,增加串联电感值, $R_p$ 变化如图13所示。由图可看出,原边电感增大,并联等效电阻增加。实验与理论一致。

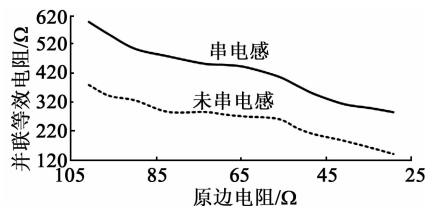


图 12 原边串联电感前、后的并联等效电阻值变化图

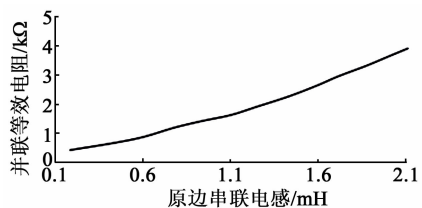


图 13 串联电感增大时并联等效电阻值变化图

## 4 结束语

本文提出了一种基于变压器的无源可控电抗器的新方案。通过改变变压器负载电阻值,实现了变压器一次侧阻抗可调,达到了压电作动器无功补偿的目的。对原边和副边阻抗优化设计,增加变压器并联等效电阻值,从而减小可控电抗器的损耗。该方案结构简单,控制方便。

## 参考文献:

- [1] 温建明. 新型惯性压电叠堆驱动机构的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2006.
- [2] JANG M J, CHEV C L, LEE J R. Modeling and control of a piezoelectric actuator driven system with asymmetric hysteresis [J]. Fraklin Inst, 2009, 346: 17-32.
- [3] KIRN J, LEE J H. Self-moving cell linear motor using piezoelectric stack actuators [J]. Smart Materials and Structures, 2005, 14( 5): 934-940
- [4] 兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [5] DANESHPOOY A, GOLE A M. Frequency response of the thyristor controlled series capacitor [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2001, 16(1): 53-58.
- [6] 江秀臣 李锋 傅正财, 等. 调匝式消弧线圈自动调谐装置[J]. 高压电器, 1997(1): 53-56.
- [7] 尹克宁, 杨辛华, 樊建堂. 连续调节电抗值的新型消弧线圈[J]. 变压器, 1994(3): 5-6.
- [8] MU Longhua, WANG Chonglin, MENG Qinghai. Thyristor controlled reactor and its effect on distribution network [A]. Power electronics and drive systems, 2001 [C] // S. l. : Proceedings, 2001 4th IEEE International Conference, 2001, 1: 214-217.
- [9] 龙小平, 叶一麟. 连续可调消弧线圈[J]. 电网技术, 1997, 21(2): 53-56.
- [10] 李达义, 陈乔夫, 贾正春. 基于磁通可控的可调电抗器新原理[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 116-120.
- [11] 盛建科, 陈乔夫, 熊娅俐, 等. 基于磁通可控的新型自动调谐消弧线圈[J]. 电工技术学报, 2005, 20(2): 88-93.