

# 磁阀式可控电抗器的响应时间研究\*

朱青山, 方瑞明

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 简要介绍了磁阀式可控电抗器(MCR)的结构和工作原理,通过对磁饱和技术进行分析,指出了影响磁阀式可控电抗器响应时间的直接因素,并据此提出了提高响应速度的方法以及这些方法的优劣性和可行性。

**关键词:** 磁阀式可控电抗器;响应时间;磁饱和

中图分类号: TM472

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2012)07-0023-03

## Study on the response time of magnetic valve controllable reactor

Zhu Qingshan, Fang Ruiming

(School of Information Science & Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** This paper briefly introduces the working principle and the structure of magnetically controlled reactor (MCR). Through analysis of magnetic saturation, it points out the direct element of the effect to MCR response time, and proposes methods to improve the response speed and analyses their advantages, disadvantages and feasibilities.

**Key words:** MCR; response time; magnetic saturation

磁阀式可控电抗器 MCR (Magnetically Controlled Reactor) 型动态无功补偿装置(SVC)作为近年来受到广泛关注的动态无功补偿装置,具有可靠性高、寿命长、维护简单、适用电压范围广、产生谐波小和成本较低等显著优点<sup>[1-2]</sup>,很好地克服了晶闸管控制电抗器(TCR)型动态无功补偿装置的诸多缺点。作为 MCR 型 SVC 的核心部分,磁阀式可控电抗器本身的性能很大程度上决定了整个动态无功补偿装置的性能<sup>[3]</sup>,相比于 TCR 的直接控制晶闸管导通角调节电抗器容量的技术,磁阀式可控电抗器采用的是磁饱和控制技术控制电抗器容量的变化,受磁饱和响应时间的影响,整个动态无功补偿装置的响应时间就成为了一个不可忽视的问题。

### 1 磁阀式可控电抗器的电路分析

#### 1.1 结构原理和等效电路

图 1 为 MCR 的结构原理图,关于 MCR 的结构原理,参考文献[4]和[5]中都有详细说明。

在 MCR 工作过程中,只有小截面段铁芯处于磁饱

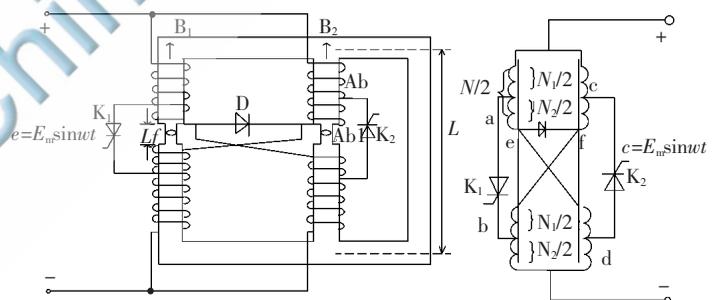


图 1 MCR 结构原理图

和状态,其余段均处于未饱和的线性状态,轮流触发导通晶闸管 $K_1$ 和 $K_2$ ,产生直流控制电流,控制铁芯的饱和程度,从而达到控制电抗器容量的目的。

#### 1.2 响应时间

磁阀式可控电抗器的响应时间指的是电抗器容量从空载变化到额定值时所需的调节时间。可控电抗器的响应时间由下式确定<sup>[6]</sup>:

$$n = \frac{1-\delta}{2\delta} \quad (1)$$

其中, $n$ 为可控电抗器容量从空载到额定值的工频周期数, $\delta$ 为抽头比。可以看出 $n$ 与 $\delta$ 近似成反比。

\* 基金项目:福建省高等学校新世纪优秀人才支持计划项目(闽教科(2010)24号);厦门市科技计划项目(3502Z20093026)

### 1.3 有功损耗

由于磁阀式可控电抗器的品质因数在 100 以上,因此其绕组电阻值相对来说很小。大量的计算和实测数据表明,磁阀式可控电抗器的有功损耗与无功功率的比值只与其抽头比  $\delta$  有关:

$$\frac{P}{Q} = \frac{4\delta}{(1-\delta)\pi} \quad (2)$$

其中,无功功率  $Q$  为电抗器额定功率。可以看出  $P$  和  $\delta$  近似成正比。

## 2 提高响应时间

由式(1)可以看出,可控电抗器的响应时间和抽头比  $\delta$  近似成反比关系,但并不意味着将抽头比增加得越大越好。一方面,根据式(2),抽头比  $\delta$  的增加会引起有功损耗的增加,使电抗器的发热加剧,影响系统稳定运行;另一方面,增加抽头比会使晶闸管  $K_1$  和  $K_2$  所承受的电压增大,需重新选用大功率的晶闸管,造成成本增加。因此,实际中一般选取  $\delta$  在 0.015~0.05 的范围内,可以计算出可控电抗器的响应时间约为 9.5~33 个工频周期。图 2 为磁阀式可控电抗器从空载到额定值的电流仿真波形图,其中  $\delta$  取 0.05。从图 2 可以看出,电流过渡过程约经 10 个周期完成,与理论分析相吻合。

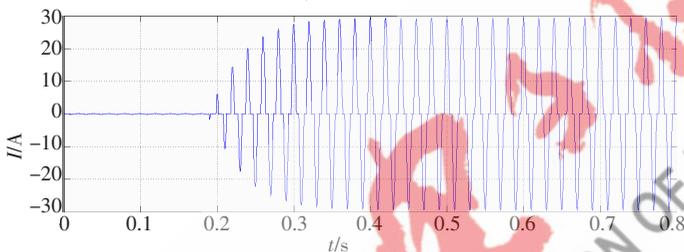


图 2 额定电压下 MCR 从空载到额定值的电流仿真波形图

但是,在某些应用中(如抑制冲击负荷引起的电压闪变和波动、自动调谐消弧线圈等)要求动补装置具有很快的响应速度,要在几个甚至 1 个工频周期内达到额定工作状态。而磁阀式可控电抗器的最快响应时间为 10 个工频周期,难以达到控制要求,因此必须缩短响应时间。

## 3 缩短响应时间的方法

### 3.1 增加直流控制电压

磁阀式可控电抗器的响应时间虽然与  $\delta$  成反比,但实际上影响响应时间的直接因素是铁芯饱和度(或铁芯磁导率  $\mu$ )达到定值的时间,即控制回路直流电流达到定值的时间。可控电抗器容量随着磁感应强度直流分量的增减而增减,控制回路中直流电流越大,铁芯中磁感应强度的直流分量到达定值的时间就越短,可控电抗器的响应时间就越短。而在控制回路中增加直流电流最直接的方法就是增加直流控制电压。

#### 3.1.1 增大抽头比来增加直流控制电压

显然,磁阀式可控电抗器在空载时相当于自耦变压器,增加抽头比就可以增加控制电压。当然,增加抽头比会导致电抗器有功损耗的增加,然而通过控制晶闸管的导通时间可以有效地减少有功损耗。

假设抽头比  $\delta$  变为额定值的 2 倍时,在晶闸管完全导通的情况下让电抗器磁饱和度迅速达到所需饱和度,再将晶闸管的导通角由  $0^\circ$  增大到  $90^\circ$ ,根据有功功率公式:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T UI \quad (3)$$

$U$  变为原来的 2 倍,由于磁阻增大  $I$  保持不变,积分时间由  $0 \rightarrow \pi$  变为  $\frac{\pi}{2} \rightarrow \pi$ ,  $T$  不变,因此有功损耗  $P$  不变。

由此可知,在增加抽头比的同时减少晶闸管导通的时间可以提高响应时间,也能保证有功损耗不增加,但这对电抗器的控制精度提出了更高的要求。抽头比增加得越高,导通时间就越短,对控制精度要求就越高。

#### 3.1.2 添加外部直流控制电压源

在不改变抽头比的情况下,通过添加外部直流电压源来提高控制电压,如在晶闸管上直接串联电压源,这样外部直流电压源和自耦控制电压共同为控制回路提供直流控制电压,且同开同断,控制较为方便。但这不仅增加了外部电压源,使结构更加复杂,而且加大的电抗器的有功损耗也需要通过减少晶闸管导通时间来减小。图 3 为在 2 倍额定控制电压下,磁阀式可控电抗器的响应仿真波形图,通过和图 2 比较可以看出,响应时间缩短了约 4~5 个工频周期。

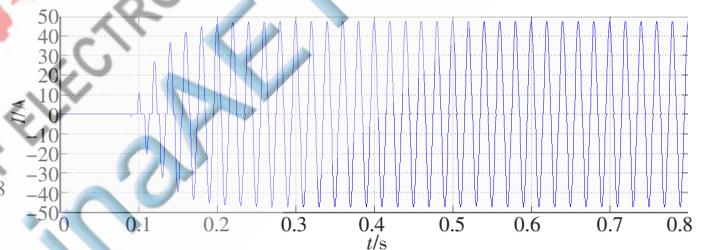


图 3 2 倍额定电压下 MCR 从空载到额定值的电流仿真波形图

### 3.2 利用充电电容放电提高响应速度

利用带有初始电压的电容器  $C$  对可控电抗器的控制回路进行放电的方式来提高响应速度。放电电容器和可控电抗器构成 LC 振荡电路,图 4 为理想化的 RLC 振荡回路,设电容器初始电压为  $U_0$ ,初始电流  $i_0=0$ ,  $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 。

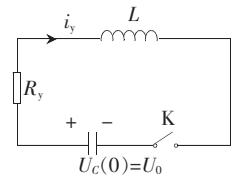


图 4 RLC 振荡电路

当开关  $K$  闭合后,得出如下回路方程:

$$U_C + U_R + U_L = 0,$$

设电抗器  $L$  为线性电感,有:

$$LC \frac{d^2 U_C}{dt^2} + RC \frac{dU_C}{dt} + U_C = 0$$

$$\begin{cases} u_C(t) = \frac{\omega}{\omega_1} U_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\omega_1 t + \beta) \\ \text{解得: } u_L(t) = -\frac{\omega}{\omega_1} U_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \sin(\omega_1 t - \beta) \\ i(t) = \frac{1}{\omega_1 L} U_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \sin \omega_1 t \end{cases} \quad (4)$$

其中,  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ ,  $\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{LC} - (\frac{R}{2L})^2}$ ,  $\tau = \frac{R}{2L}$ ,  $\beta = \arctan(\tau\omega_1)$ 。

并且由  $Ni(t) = Hl = \frac{B(t)}{\mu_0}l$ ,  $L = \frac{N^2A\mu_0}{l}$  得出:

$$B(t) = \frac{U_0}{\omega_1 NA} e^{-\frac{t}{\tau}} \sin\omega_1 t \quad (5)$$

可以看出,  $B(t)$  是按指数规律衰减的振荡波,  $B(t)$  仿真波形图如图 5 所示。选择适当的电容参数和初始电压  $U_0$ , 可以调整振荡频率和幅值, 使  $B(t)$  在一个甚至半个工频周期内迅速达到所需值, 使电抗器迅速响应。然而由于  $B(t)$  是振荡衰减的, 需要直流电压源在  $B(t)$  衰减到所需值时立即提供所需电压来维持励磁效果, 否则  $B(t)$  将衰减至 0, 达不到激励效果。

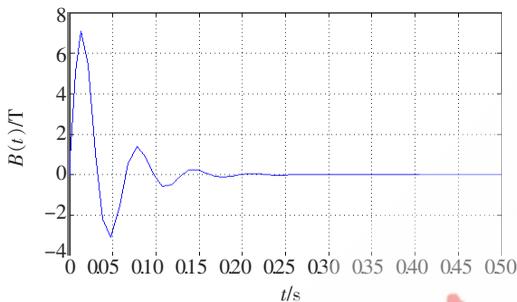


图 5  $B(t)$  的仿真波形图

采用图 6(a) 所示的带二极管的电路图, 可以达到持续励磁的效果。其中  $U_0 > E_y$ , 当开关 K 闭合时, 带有初始电压的电容器 C 对 L 放电, 达到快速励磁效果, 当  $U_c$  衰减到所需值  $E_y$  时, 二极管  $D_1$  导通,  $D_2$  关断, 由  $E_y$  维持励磁。图 6(b) 为在充电电容器放电的作用下磁阀式可控电抗器从空载到额定的电流仿真波形图, 此时  $U_0 \approx 3E_y$ , 可见, 达到额定值的时间缩短到了 2 个周期左右, 再进行参数调整可使响应时间进一步缩短。

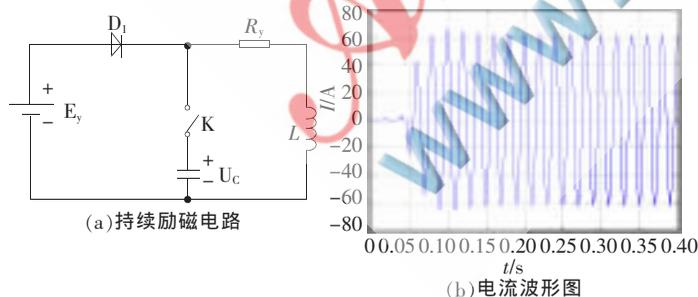


图 6 持续励磁电路图及应用于 MCR 的电流波形图

但是, 利用电容放电提高响应速度存在着明显的缺点: (1) 充电电容器和可控电抗器控制绕组的连接问题; (2) 充电电容器的初始电压要很大, 如何充电的问题; (3) 充电电容器放电只适合电抗器一开始的响应, 在负载无功功率变化过程中的动态响应时间不能够靠电容器放电来提高; (4) 外加直流电源、晶闸管等使线路和

控制变得更加复杂。因此, 目前来看, 该方法并不能应用于实际电抗器当中。

### 3.3 外加直流励磁绕组

外加直流励磁绕组即在响应时间段加入直流励磁绕组来缩短响应时间, 这和增加直流控制电压来缩短响应时间的方法在原理上是类

似的。可控电抗器的复励式结构如图 7 所示, 其中, 直流励磁绕组产生的磁通可在两铁芯内闭合, 无需第 3 个铁芯构成闭合回路。直流励磁控制系统一方面在  $K_1$  和  $K_2$  导通时产生相同方向的助磁, 另一方面, 当  $K_1$  和  $K_2$  的导通角调整时也要产生相应的助磁或去磁, 要求直流励磁控制电路能够及时地通断, 能对励磁程度和方向进行快速地调整和改变, 这对检测回路和控制回路都有很高的要求。此外, 由于外加了直流励磁绕组, 使得电抗器的结构更加复杂。

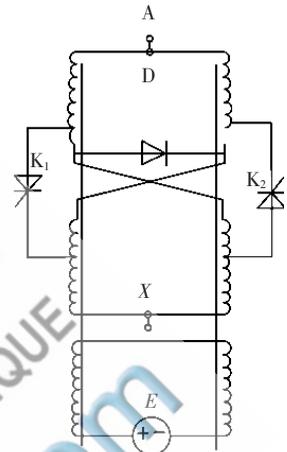


图 7 可控电抗器的复励式结构

磁阀式可控电抗器在动态无功补偿领域中起到了越来越重要的作用, 然而在有些需要快速无功补偿的场合, 磁阀式可控电抗器的响应时间是制约其应用的主要因素。本文根据影响磁阀式可控电抗器响应时间的直接因素, 提出了几种提高响应速度的方法, 并通过仿真探讨了这些方法的优劣性和可行性。

### 参考文献

- [1] 任丕德, 刘发友, 周胜军. 动态无功补偿技术的应用现状[J]. 电网技术, 2004, 28(23): 81-83.
- [2] KARYMOV R R, EBADIAN M. Comparison of MCR and TCR from harmonics point of view[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2007(29): 191-198.
- [3] 杨高, 李争光, 刘金旭. 基于 Matlab 的磁控电抗器的建模与仿真[J]. 湖北工业大学学报, 2011, 26(1): 70-73.
- [4] 尹忠东, 刘虹, 陈柏超, 等. 磁阀式可控电抗器的研究[J]. 变压器, 1998, 35(7): 1-4.
- [5] 陈柏超, 陈维贤. 磁阀式可控电抗器的数学模型及特性[J]. 武汉水利电力大学学报, 1995, 28(3): 294-298.
- [6] 陈柏超. 新型可控饱和电抗器的理论及应用[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1999.

(收稿日期: 2011-11-15)

### 作者简介:

朱青山, 男, 1987 年生, 硕士研究生, 主要研究方向: 电工程理论与新技术。