

文章编号:1671-251X(2014)01-0067-05 DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2014.01.018

陈兮,周凤星,徐浩.基于磁阀式可控电抗器的无功控制系统[J].工矿自动化,2014,40(1):67-71.

## 基于磁阀式可控电抗器的无功控制系统

陈兮, 周凤星, 徐浩

(武汉科技大学 冶金自动化与检测技术教育部工程研究中心, 湖北 武汉 430081)

**摘要:**为了改善电网无功功率不平衡导致的电网电压巨大波动、功率因数低落等问题,设计了一种基于磁阀式可控电抗器的无功控制系统。该系统采用多变量控制策略,通过控制电抗器的输出感性无功,实现功率因数控制、母线无功功率和母线电压的连续调整。试验结果表明,多变量控制策略能有效应用于系统目标参数控制,达到了预期的效果。

**关键词:**磁控电抗器;无功功率;直流励磁;多变量控制;MCR

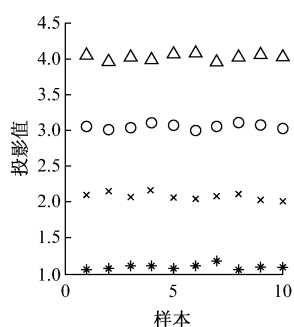
**中图分类号:**TD612 **文献标志码:**A **网络出版时间:**2013-12-31 09:35

**网络出版地址:**<http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13272/j.issn.1671-251x.2014.01.018.html>

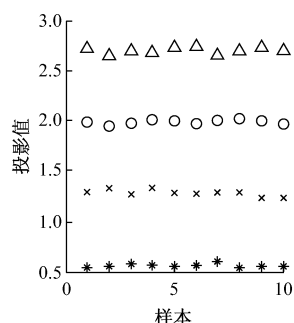
收稿日期:2013-05-17;修回日期:2013-09-12。

基金项目:国家自然科学基金项目(61174106);武汉科技大学大学生科技创新专项基金项目(11ZRA175)。

作者简介:陈兮(1987—),男,湖北大冶人,硕士研究生,主要研究方向为电能质量、变频技术,E-mail:sapf\_tech@163.com。



(a) 24个指标



(b) 6个指标

\* — 正常; x — 滚动体损伤; o — 内圈损伤; Δ — 外圈损伤

图3 24个指标与6个指标的样本投影值对比

### 5 结语

低维投影能够反映原高维数据的某些特征,以

轴承故障诊断为应用背景,提出了一种基于投影的特征选择方法。该方法利用遗传算法找到最能反映样本分类特性的投影方向,并利用此方向剔除与投影值无关的特征指标。仿真结果表明,将该方法用于轴承故障诊断问题中,能够有效降低特征指标空间的维数,简化高维数据的分类,提高了分类的效率及准确率。

### 参考文献:

- [1] RUBINI R, MENEGHETTI U. Application of the envelope and wavelet transform analysis for the diagnosis of incipient faults in ball bearings [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2001, 15 (2): 287-302.
- [2] KOHAVI R, JOHN G H. Wrappers for feature subset selection[J]. Artificial Intelligence, 1997, 97 (1-2): 273-324.
- [3] HUBER R, DUTRA L V. Feature selection for ERS-1/2 InSAR classification: high dimensionality case [C]//Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, Seattle, 1998:1605-1607.
- [4] 倪长健. 免疫进化算法研究及其在水问题中的应用 [D]. 成都:四川大学,2003.

## Reactive power control system based on magnetically controlled reactor

CHEN Xi, ZHOU Fengxing, XU Hao

(Engineering Research Center for Metallurgical and Automation and Measurement Technology, Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

**Abstract:** In order to solve problems of fluctuation of voltage and low power factor caused by imbalance of reactive power of power grid, a kind of reactive power control system based on magnetically controlled reactor was designed. The system uses multi-variable control strategy, and can accomplish regulation of power factor, reactive power as well as voltage of busbar by controlling output reactive power of magnetically controlled reactor. The experiment result proves that the multi-variable control strategy can be applied to target parameter control effectively, and achieves expectant effect.

**Key words:** magnetically controlled reactor; reactive power; DC excitation; multi-variable control; MCR

## 0 引言

无功电源和有功电源一样,是保证电力系统电能质量、提高传输效率和安全运行不可缺少的部分,无功功率不平衡会导致电网电压巨大波动、功率因数低落,严重时会导致用电设备损坏,出现系统电压崩溃,破坏电网系统的安全稳定运行<sup>[1-3]</sup>。因此,对工矿、冶金企业电网采取合理的补偿措施,实现工矿、冶金电网无功功率平衡,会给企业带来巨大的经济效益。

本文设计了基于磁阀式可控电抗器(Magnetically Controlled Reactor, MCR)的无功控制系统。该系统根据电网的具体需求,采用不同的控制方式,可实现对 MCR 输出的感性无功功率的连续调节。该无功控制系统依据设计的特定要求,提供 5 种工作模式(点控模式、功率因数模式、无功功率模式、电压模式和强制模式),能满足多种需求的应用场合。同时 MCR 的低成本、高可靠性、易维护性使得整个系统具有很好的发展前景<sup>[4-5]</sup>。

## 1 系统结构和工作原理

基于磁阀式可控电抗器的无功控制系统的整体结构如图 1 所示。工作原理:电压和电流互感器分别同时采集母线的电压和电流信号,并送至电能监测保护设备 SEL-751,SEL-751 可以快速计算出母线中的无功功率、功率因数,再通过设置 SEL-751 输出端子的工作模式,可以将无功功率、功率因数和母线电压信号以模拟电压的形式输出。PLC 根据触摸屏设置的工作模式,读入 SEL-751 送出的无功功率、功率因数和母线电压信号。然后在设定模式下 PLC 根据当前输入的反馈信号,运行相应的程

序,计算控制电压的值,再通过 PLC 输出控制电压至触发板,最后,由触发板控制 MCR 励磁电路,以实现 MCR 输出的感性无功功率的连续调节。

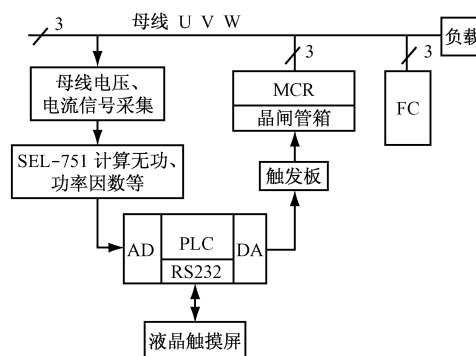


图 1 MCR 无功控制系统结构

## 2 系统主要模块简介

## 2.1 MCR

MCR 是通过直流电流控制磁阀的饱和度来平滑调整电抗器的电感量。根据励磁方式的不同, MCR 可分为他激直流励磁和自耦直流励磁 2 种基本类型<sup>[6]</sup>。自耦直流励磁电抗器工作绕组和励磁绕组组合为一个,励磁电路简单,易于控制<sup>[7]</sup>。本系统使用的是自耦直流励磁电抗器。MCR 原理如图 2 所示。

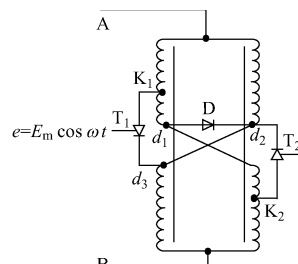
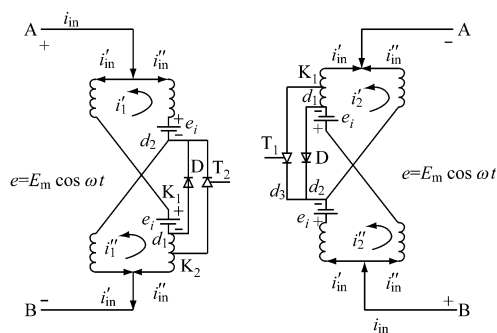


图 2 MCR 原理

直流励磁 MCR 等效电路如图 3 所示。当 AB 间电势  $e > 0$  时,晶闸管  $T_1$  承受正向电压,晶闸管  $T_2$  承受反向电压,若此时触发  $T_1$  导通,其等效电路如图 3(a)所示。 $T_1$  导通后破坏了原先 MCR 上分布对称的绕组,使得上(下)半铁芯上左右两边绕组匝数不等,上(下)半铁芯右边匝数大于左边,这样就在 MCR 本体内部形成了上下独立的 2 个回路(图 3(a)),且 2 个回路中的电流区别于工作电流  $i_{in}$  ( $i_{in}$  为 MCR 输出的无功电流), $i'_1$  与  $i''_1$  均逆时针方向只在 MCR 内部流动,从而实现了对 MCR 的励磁。

同理,当 AB 间电势  $e < 0$  时,晶闸管  $T_1$  承受反向电压,晶闸管  $T_2$  承受正向电压,若此时触发  $T_2$  导通,其等效电路如图 3(b)所示。从图 3 可以看出,在 MCR 内部流动的励磁电流  $i'_2$  和  $i''_2$  方向均为逆时针,与图 3(a)中的励磁电流方向一致,即在整个电源周期内,励磁电流方向保持不变,也就实现了对 MCR 的直流励磁<sup>[8-9]</sup>。



(a)  $T_1$  导通 (b)  $T_2$  导通  
图 3 直流励磁 MCR 等效电路

系统中 MCR 按照三角形方式连接到 380 V 母线,晶闸管  $T_1$  和  $T_2$  两端感应出的交流电压有效值  $U_{rms} = 38.5$  V。励磁电压与触发角的关系为

$$U_d = U_p \sqrt{\frac{1}{2} - \frac{\alpha}{2\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{4\pi}} \quad (1)$$

式中: $U_d$  为等效直流励磁电压值; $U_p$  为自耦励磁电压的峰值; $\alpha$  为晶闸管的触发角。

而对于 MCR 的阻抗一定时,触发角  $\alpha$  越小, $U_d$  越大,励磁等效直流电流  $I_d$  也就越大,MCR 饱和度越大。又由于铁芯的磁导率  $\mu$  不是常值,在铁芯饱和时磁导率  $\mu$  会随着磁场强度  $H$  的增大而减小<sup>[10]</sup>。含磁芯电感的电感值为

$$L = \mu AN^2 / \delta \quad (2)$$

式中: $\mu$  为铁磁材料的磁导率; $A$  为铁芯的截面积; $N$  为绕线的匝数; $\delta$  为磁路的气隙长度。

一定条件下,由式(2)可知,电感量与磁导率成正比。 $\mu$  减小,使得电感值  $L$  减小。又知 MCR 输出

的无功功率  $Q_L = U^2 / \omega L$  ( $U$  为 MCR 两端电压有效值, $\omega$  为母线电压的角频率)。电感值减小,其输出的无功功率  $Q_L$  增大。因此,只要合理控制晶闸管  $T_1$  和  $T_2$  的触发角,就可以使 MCR 按照要求输出所需的感性无功功率。

## 2.2 触摸屏与 PLC

### 2.2.1 触摸屏

由于系统有 5 种工作模式,根据控制参数输入的要求,选择 eView 作为触摸屏,eView 为本系统提供了一个良好的人机界面。

触摸屏主界面如图 4 所示,主界面有 5 种模式可选择,点击屏幕左侧的模式选择按钮,会出现弹出窗口,再输入相应模式的序号,点击确定后,进入对应模式的控制界面。



图 4 触摸屏主界面

### 2.2.2 PLC

PLC 是整个系统的核心控制器,其运行速度影响系统的响应速度,编程方法直接决定核心算法实现的难易程度。试验中选取基恩士 PLC,该 PLC 可以将 60 000 步的梯形图程序在 1 ms 内执行完毕;其最大的优势是可以采用脚本进行编程,这使得控制算法可以像 C 语言一样编写,大大减小了控制算法在 PLC 中实现的难度。

## 3 控制策略与具体实现

为了提高本系统的响应速度,采用多变量控制策略,即同时采样多个不同变量的反馈信号,由多个信号共同作出决策,对同一目标量进行控制,以期达到最佳的控制效果。

### 3.1 拟合控制曲线

只有最优的控制策略才能够实现系统的快速准确控制。为了实现这一目标,必须准确掌握 MCR 本体的输出特性。运用系统辨识的试验法建模,即人为地对控制对象施加某种测试信号,并记录其输出响应,然后利用这些输入输出数据确定系统的结构和模型参数<sup>[11-12]</sup>。先测得控制电压与 MCR 输出感性无功功率值之间的对应关系(图 5),再作出

MCR 的控制曲线。根据所得曲线的特点,对曲线进行分段后,运用最小二乘拟合的方法得出 MCR 的控制曲线。

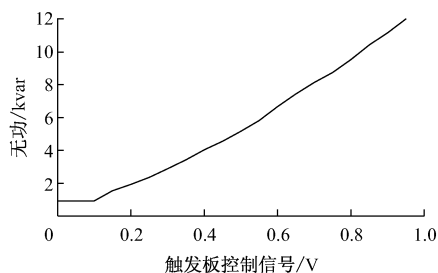


图 5 MCR 控制曲线

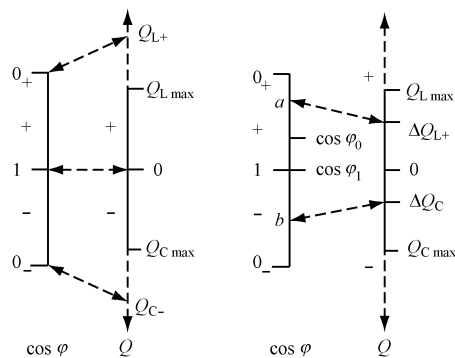
### 3.2 多变量控制具体实现

现以功率因数控制为例说明多变量控制策略的具体实现,试验中需同时采集母线的无功功率信号和功率因数 2 路反馈信号。

功率因数与无功功率映射关系如图 6(a)所示,其中  $\cos \varphi$  轴表示母线的功率因数, $Q$  轴表示母线的无功功率。 $\cos \varphi$  轴由  $0_+$ 、 $1$  和  $0_-$  分为 3 个区间段,  $(1, 0_+)$  表示  $0 < \cos \varphi < 1$ , 即为欠补状态;  $(1, 0_-)$  表示  $0 < -\cos \varphi < 1$ , 即为过补状态。 $Q$  轴上设定有 3 个关键值点,  $Q_{Lmax}$ 、 $Q_{Cmax}$  和  $0$ 。 $Q_{Lmax}$  为负载的最大感性无功功率值; $Q_{Cmax}$  与  $Q_{Lmax}$  对应,是实现完全补偿的最大容性无功功率值; $0$  为完全补偿点。 $Q$  轴和  $\cos \varphi$  轴存在如下映射关系: $Q$  轴的正半轴映射于  $\cos \varphi$  轴的正半轴, $Q$  轴的负半轴映射于  $\cos \varphi$  轴的负半轴; $Q$  轴的  $0$  点对应  $\cos \varphi$  轴的  $1$ ;假定有功功率最大值为有限值,则  $Q$  轴上存在  $Q_{L+}$  点对应于  $\cos \varphi$  轴  $0_+$ ,  $Q_{C-}$  点对应于  $\cos \varphi$  轴  $0_-$ 。

假定要求母线的功率因数  $\cos \varphi$  保持在  $[\cos \varphi_0, \cos \varphi_1]$  内,如图 6(b)所示。若当负载发生变化时,控制器还未开始调整,则此时母线的功率因数存在 3 种可能:仍在设定范围内;在  $a$  点处;在  $b$  点处。显然后 2 种情况需要控制器动作。如果在  $a$  点,功率因数大于  $0$ ,则可以映射到  $Q$  轴的一点,  $\Delta Q_L > 0$ ;同理,在  $b$  点,母线发生过补,  $\Delta Q_C < 0$ 。

图 5 曲线  $(0.1, 0.95)$  段线性拟合,其斜率为  $k$ , 定义  $k = \Delta Q_{MCR} / \Delta V$ 。当母线无功功率  $Q = \Delta Q_L$  时,则要求 MCR 减少输出的感性无功功率,令  $\Delta Q_{MCR} = \Delta Q_L$ ,可得控制电压的调整量  $\Delta V = \Delta Q_L / k$ ,故输出控制电压值  $V'_0 = V_0 - \Delta V + V_b$  ( $V'_0$  为调整后的控制电压; $V_0$  为调整前控制电压; $V_b$  为偏置电压。当  $\cos \varphi_1 = 1$  时,  $V_b = 0$ , 当  $\cos \varphi_1 < 1$  时,  $V_b > 0$ );当母线无功功率  $Q = \Delta Q_C$  时,母线出现过补,此时需要增大 MCR 输出的感性无功功率,取



(a)  $\cos \varphi$  和  $Q$  映射关系 (b) 无功补偿时  $\cos \varphi$  和  $Q$  映射关系

图 6 功率因数与无功功率映射关系

$\Delta Q_{MCR} = -\Delta Q_C$ , 调整量  $\Delta V = -\Delta Q_C / k$ , 输出控制电压值  $V'_0 = V_0 + \Delta V + V_b$ 。

从理论的角度看,上述方法能够使得 MCR 的动作一步完成。试验中为了避免在调整过程中 MCR 输出无功功率不平稳,只有当母线功率因数偏离设定范围较大时才自启动上述控制方式;若功率因数偏离设定范围较小时,直接利用反馈的功率因数信号来调整功率因数。

### 4 试验结果与分析

试验中 MCR 的总容量为 11.4 kvar。对 5 种模式分别进行试验,结果见表 1。

表 1 点控模式试验结果

设定值/kvar	实际值/kvar	偏差/kvar	偏差率/%
4.00	4.07	0.07	1.70
6.50	6.60	0.10	1.50
9.40	9.30	-0.10	-1.10
11.40	11.43	0.03	0.30

(1) 点控模式,要求 MCR 按照用户的设定值输出相应的感性无功功率。由表 1 可知,最大偏差率为 1.7%。试验结果表明,点控模式可以准确地控制 MCR 实现容量范围内任意数值的感性无功功率输出。

(2) 功率因数模式,图 7 为功率因数模式时的控制电压调整曲线。如图 7 中  $0$  时刻,初始功率因数为 0.84,不在期望的  $[0.90, 0.95]$  范围内。从图 7 可明显看到,控制电压经过 2 次调整后,使得 MCR 输出无功功率减小,母线无功功率也随之减小,在小于 0.4 s 的时间内将功率因数调整到目标范围,最终实现了功率因数控制。

(3) 无功功率模式,要求三相总无功功率可由用户任意设定。图 8 为三相总的无功功率曲线,试

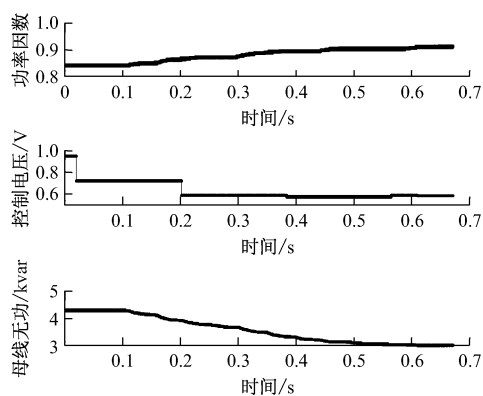


图 7 功率因数模式的控制电压调整曲线

验设定了 8 组值(分别为 1、2、3、4、5、6.5、7 kvar),即图 8 中的“台阶”曲线,每一级“台阶”均表示一个设定值。从图 8 中可以看到,每级“台阶”处的无功功率值都能较稳定地保持在设定值左右。

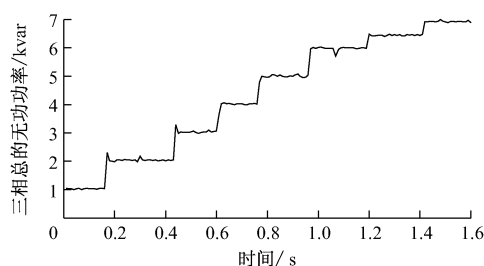


图 8 三相总的无功功率曲线

(4) 电压模式,要求母线电压在一定范围能任意控制。试验中母线电压(有效值)最小为 178.7 V,通过电力电容进行容性无功补偿,可以将母线电压上升到 230 V。图 9 记录了 3 组(要求设定母线电压分别为 200、210、220 V)波形,可以看出,未投入电容时,母线电压为最小,即 178.7 V。投入电容后,MCR 迅速自动调整输出的感性无功功率来平衡电容的容性无功功率,避免了因投入电容造成无功过补而过电压。投入电容后电压出现陡

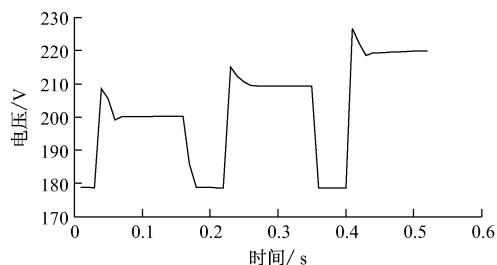


图 9 母线电压曲线

升,出现尖刺,但很快被抑制,MCR 在控制系统的调整下,使母线电压维持在设定值上下。

(5) 强制模式,即要求 MCR 能最小输出或最大输出而不失控。在程序中设定了控制电压阈值,防止 MCR 励磁电压超过额定值,造成励磁电流过大而损坏 MCR。

## 5 结语

针对 MCR 在改善电能质量方面的应用,开发了一种基于 MCR 的无功控制系统。试验结果表明,通过控制 MCR 输出的感性无功,可较好地实现功率因数控制、母线无功功率和母线电压调整,满足特定需求下的电能质量控制。

## 参考文献:

- [1] 栗时平,刘桂英.静止无功功率补偿技术[M].北京:中国电力出版社,2006:1-5.
- [2] 罗安.电网谐波治理和无功补偿技术及装备[M].北京:中国电力出版社,2006:12-14.
- [3] 陆安定.功率因数与无功补偿[M].上海:上海科学普及出版社,2004:27-31.
- [4] 王宝安,金丽莉,罗亚桥,等.基于磁控电抗器的动态无功补偿装置[J].电力自动化设备,2010,30(4):97-100.
- [5] 史欢,黄晓胜,曾文君,等.磁控电抗器的动态无功补偿装置[J].中国电力,2011,44(1):32-36.
- [6] 田翠华,陈柏超.磁控电抗器在 750 V 系统中的应用[J].电工技术学报,2005,20(1):31-37.
- [7] 姚尧,陈柏超,田翠华.磁控电抗器在右江 500 kV 线路中的应用[J].高电压技术,2008,34(5):984-988.
- [8] 陈柏超.新型可控饱和电抗器理论及应用[M].武汉:武汉水利电力大学出版社,1999:44-45.
- [9] 杨高,李争光,刘金旭.基于 matlab 的磁控电抗器建模与仿真[J].湖北工业大学学报,2011,26(1):70-73.
- [10] 赵修科.开关电源中的磁性元件[M].南京:南京航空航天大学出版社,2004:43.
- [11] 庞中华,崔红.系统辨识和自适应控制 MATLAB 仿真[M].北京:北京航空航天大学出版社,2009:11.
- [12] 韩正之,陈彭年,陈树中.自适应控制[M].北京:清华大学出版社,2011:1-5.