

# 基于模糊控制的工厂无功补偿控制策略研究\*

刘冬 张振国

(上海理工大学光电信息与计算机工程学院 上海 200093)

**摘要:** 针对传统九区图控制法存在的“投切震荡”和“操作频繁”等问题,结合模糊控制理论设计了一个改进的基于模糊控制的工厂低压无功补偿控制器。该模糊控制器采用两输入单输出结构,以电压偏差和无功偏差为控制量,以无功功率补偿量为被控制量,选用三角形隶属度函数。为了验证该模糊控制器的可行性,在 MATLAB 中建立了基于该控制器的无功功率补偿模型。仿真结果表明该设计的模糊控制器是可行的,解决了投切震荡等问题,提高了系统准确性,从而改善电网质量。

**关键词:** 无功补偿;九区图;模糊控制;MATLAB

**中图分类号:** TP273.4; TN349 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8020

## Control strategy research of reactive power compensation in factory based on fuzzy logic control

Liu Dong Zhang Zhenguo

(School of Optoelectronic Information and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 20093)

**Abstract:** In this study, a improved controller, aiming at “swing of plug-in and take-away of capacitor” and “operating frequently” of the traditional nine-zone control method and combining the fuzzy control theory, based on fuzzy control is designed which fits for low-voltage reactive power compensation of factories. This fuzzy controller adopts two-input and single-output structure, with voltage deviation and reactive power deviation as the control variables. The reactive power compensation is the controlled variable, and the triangular membership function is selected. In order to verify the feasibility of this fuzzy controller, a reactive power compensation model based on this controller is established. The simulation results show that the proposed fuzzy controller is feasible, which solves the problem of switching vibration, improves the accuracy of the system and improves the quality of the power grid.

**Keywords:** reactive power compensation; nine-zone digram; fuzzy control; MATLAB

## 1 引言

随着国家经济水平的不断提高,我国工业发展突飞猛进,因此用电量也不断激增。在工业企业中,大量阻感性负载的存在必然会产生一定的无功功率,这增加了设备容量以及输电线路损耗,从而导致用电效率下降,直接影响自动化设备的正常运行,因此无功功率补偿对于工业用户显得尤为必要<sup>[1]</sup>。

目前,国内应用最广泛的无功补偿方式是晶闸管投切电容器组(TSC)<sup>[2-3]</sup>,其比较成熟且经典的控制策略是九区图控制策略。本研究分析了该控制策略原理,并且针对其弊端提出一种基于模糊控制的改进方法。通过 MATLAB/Simulink 进行仿真,验证其可行性和优越性。

## 2 传统九区图控制方法

### 2.1 传统九区图控制原理

图1为传统九区图的控制原理。显然只有9区域是用户希望系统能实现的电压与无功功率同时满足要求的区域,其他8个区域都需要根据系统的实际运行情况进行无功补偿,使其进入9区域。传统九区图控制法原理就是通过调节有载调压变压器分接头和投切电容器组,使系统运行于理想的9区域。

### 2.2 传统九区图控制缺陷

传统九区图控制方法忽略了实际操作中电压与无功之间的耦合性。以A点为例,传统的控制策略是先改变变压器分接头升压,若分接头已经到了上限位置,而系统仍处于

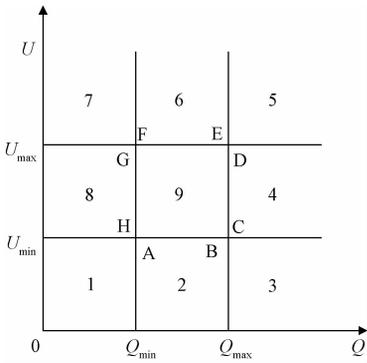


图 1 传统九区图控制原理

电压下限区域,此时应投入电容器组来使电压上升,但是这样就会导致无功下降,因此系统可能进入 1 区或 8 区。当进入 1 区域时,又要切电容器组才可能进入 9 区域。当进入 8 区域时,按照传统控制方法应该切电容器组,这样虽然可以增加无功,但同时也会使电压降低,系统又回到 2 区域,即在 A 和 H 之间形成了“投切震荡”,同样的情况还可能发生在 B-C、D-E 和 G-F 之间。

### 3 基于模糊控制的新九区图控制法

#### 3.1 模糊控制理论

模糊控制是以专门处理具有“模糊性”的问题模糊数学为基础理论的控制方法<sup>[4-5]</sup>。模糊控制对于被控对象的要求不使具体明确的,它主要通过模拟人的思维特点来进行模糊推理和决策过程。这种方法用于 TSC 无功补偿装置电容器组的无级投切以及投切容量不确定的问题再合适不过。

模糊控制策略的应用具有多样性,出于经济方面的考虑,本研究在传统九区图控制法的理论上,选用电压和无功偏差作为控制量输入模糊控制器,输出电容器组投切动作的方式来设计模糊控制器。

#### 3.2 模糊控制器设计<sup>[6]</sup>

##### 3.2.1 控制目标

工厂用户进行无功补偿的目的是为了满足国家要用电求,即改善电压质量,并将功率因数和无功率控制在一个范围内。用数学表达式表示即为:

$$\begin{cases} U_{\min} \leq U \leq U_{\max} \\ \cos\varphi_{\min} \leq \cos\varphi \leq 1 \\ Q_{\min} \leq Q \leq Q_{\max} \\ \text{Min}\{L_1(U-U_0)^2 + L_2(Q_f + Q_c - Q_0)^2 + \\ L_3(\cos\varphi - \cos\varphi_0)^2\} \end{cases}$$

式中:  $U$  为负荷点电压;

$U_0$  为设定电压值;

$Q_f$  为负荷无功功率;

$Q_c$  为电容器组提供的无功功率;

$Q_0$  为设定无功功率;

$\cos\varphi$  为实际功率因数;

$\cos\varphi_0$  为设定功率因数;

$L_1, L_2, L_3$  为电压、无功和功率因数的权系数。

##### 3.2.2 控制量和被控制量的确定

模糊控制系统框图如图 2 所示,该系统是由两个控制量——电压偏差  $eu$  和无功功率偏差  $eq$ , 和一个被控制量——无功功率补偿量  $ec$  组成。将  $eu, eq, ec$  量化为 13 个等级,即可将其论域表示为  $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ ; 设定模糊子集为  $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$ 。

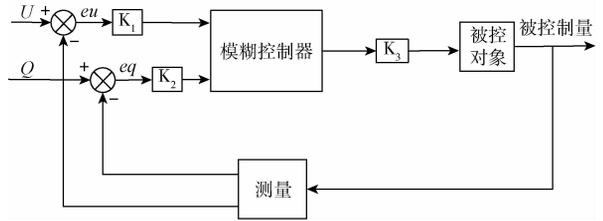


图 2 模糊控制系统框图

##### 3.2.3 隶属度函数的确定

隶属度函数主要是用来完成模糊化这一步,合适的隶属度函数可以对输入变量进行合理的模糊化。本研究采用三角形隶属度函数,图 3 为控制量的隶属度函数,为了方便实现,本研究对电压偏差  $eu$  和无功功率偏差  $eq$  选用相同的隶属度函数。图 4 为被控制量无功功率补偿量  $ec$  的隶属度函数。

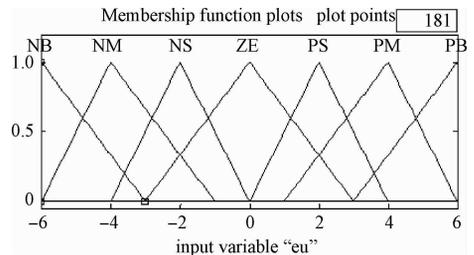


图 3 控制量的隶属函数

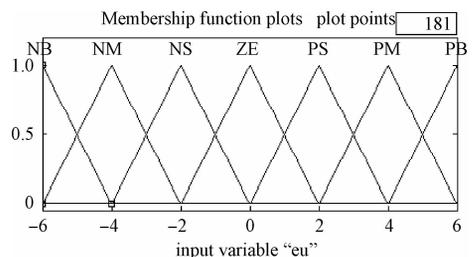


图 4 被控制量的隶属函数

##### 3.2.4 模糊控制规则设计

模糊控制规则可以表示为如下模糊语言的形式:

IF  $X_1$  is NB AND  $X_2$  is NB THEN Y is NM

结合实际工作经验,本研究设计具体的模糊控制规则

如表1所示。

表1 模糊控制规则表

ec \ eq	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
ec \ NB				PS		PS	PM
ec \ NM	NM			ZE		PM	PB
ec \ NS	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PM
ec \ ZE	NM			NS		PS	PM
ec \ PS							PS
ec \ PM	NB						PS
ec \ PB					ZE		PS

图5为根据上述控制规则的电容器组控制量的输出曲面图。

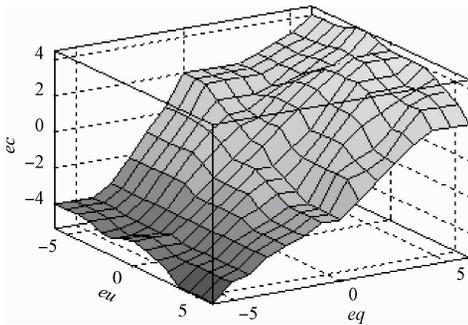


图5 电容器组控制量输出曲面图

### 4 TSC 动态无功补偿 MATLAB 仿真

#### 4.1 仿真模型的实现方法

采用 MATLAB/Simulink 中的仿真模块,测量电压和无功功率的数值,并将每次测量结果和设定值做差,然后将电压和无功功率的偏差量作为控制量输入到模糊控制器中,经过模糊判决后,控制电容器组的投切。

##### 4.1.1 量化因子的选取

量化因子的确定需要针对具体的对象,本研究是对工厂的供电系统进行仿真,母线电压为 10 kV,±15% 是国家标准允许的最大偏差<sup>[7]</sup>。而测量位置在二次侧,二次侧标准电压为 400 V,则允许的电压偏差为[-60,+60]V,由于本系统设计采用的模糊论域的范围为[-6,+6],因此量化因子  $K_1=0.1$ 。工业用电允许功率因数最低为 0.8,工厂希望功率因数达到 0.9 以上,本设计允许偏差在[-0.1,+0.1],因此量化因子  $K_2=3$ 。被控制量只有 ec 一个,因此量化因子  $K_3=1$ <sup>[8]</sup>。

##### 4.1.2 补偿电容器组容量和负荷设置

系统选用二进制编码的方式对电容器进行编码,因此选用的电容器容量为 12、24、48、96 kVar<sup>[9]</sup>;该工厂初始负荷设定为(10+j150) kVA,并且设置了一个 0.06 s 时的(6+j100) kVA 的负荷切出系统来模拟现实生活中的仪器关闭或故障,以此来测试本研究中模糊控制器的性能。

#### 4.2 仿真模型和仿真结果

建立的仿真模型图如图6所示<sup>[10-12]</sup>,仿真结果如图7~10所示。

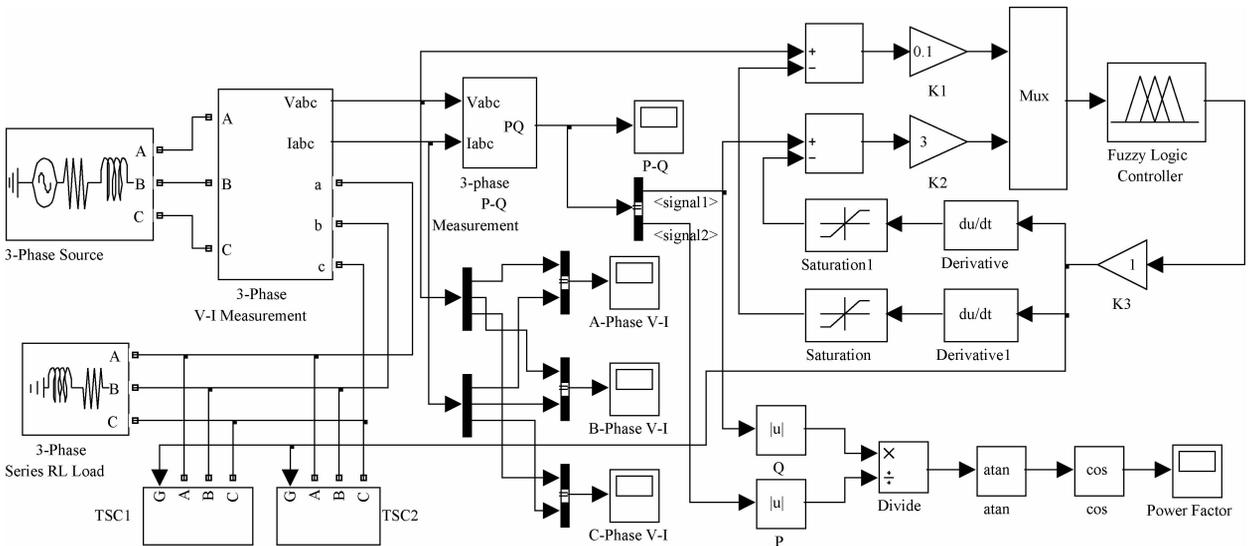


图6 仿真模型图

图7为单相电流电压的波形示意图,从图中可以看出 0.06 s 时,由于负载切除造成了电压和电流的波动,但随着电容器组的动作,电压电流的波形经过一个周期的调整

从畸变的波形恢复到正弦波形,并且保持电压电流相位几乎一致。

图8为系统功率因数的波形示意图,从图中可以看出

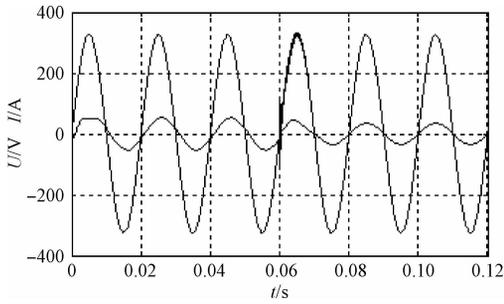


图7 单相电流电压波形示意图

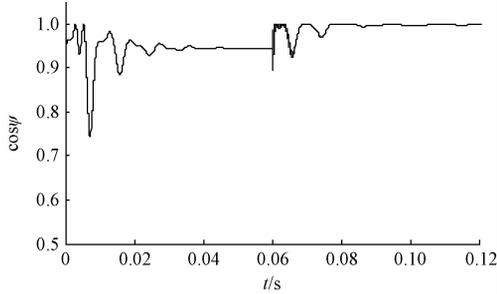


图8 功率因数波形示意图

0.06 s时,由于负载变化引起系统功率因数的波动,但随着电容器组的动作,经过一个周期的调整后功率因数补偿到几乎等于1。

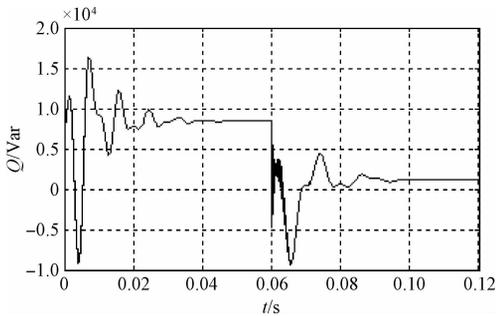


图9 无功功率波形示意图

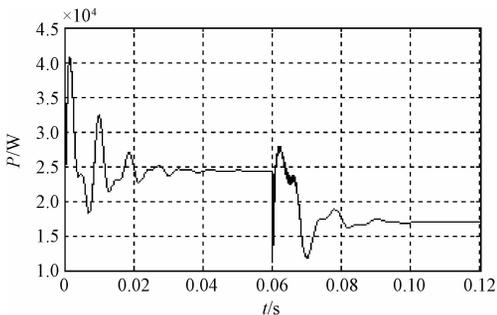


图10 有功功率波形示意图

图9和图10是系统的有功和无功功率,从图中可以看出在0.06 s时,由于负载的变化引起的明显波动都随着电容器组的动作,很快达到了新的平衡,并保证系统不出现过

补偿,验证了该改进型九区图模糊控制的可行性和优越性。

## 5 结 论

本研究针对传统九区图控制存在的缺陷,提出了一种新的基于模糊控制的九区图控之方法。并通过MATLAB/Simulink进行了仿真,从仿真结果可知,该模糊控制器对系统的无功功率补偿符合工厂用户要求,可广泛应用于工厂低压无功补偿领域。但是,在实际应用中,提高响应速度、电容器组容量分配等问题需要进一步解决。

## 参考文献

- [1] 王兆安,杨君,刘进军,等.谐波抑制和无功功率补偿[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [2] 吕二争.基于模糊控制 TSC 型无功补偿的研究[D]. 江门:五邑大学,2014.
- [3] 侯文清,张波.基于 DSP 的电能质量检测与无功补偿综合测控装置[J].仪器仪表学报,2007,28(1):120-126.
- [4] MANSOUR I, ABDESLAM D O, WIRA P, et al. Fuzzy logic control of a SVC to improve the transient stability of ac power systems [C]. Industrial Electronics, 2009. IECON '09. Conference of IEEE. IEEE Xplore, 2009;3240-3245.
- [5] 刘晓邦,车玥玮.基于模糊控制的智能循迹绘迹系统设计[J].电子测量技术,2011,34(2):57-61.
- [6] 贾森,王新华,龚华军,等.基于模糊 PID 的直升机增稳控制系统设计与实现[J].电子测量技术,2015,38(11):70-73.
- [7] 国家电网公司. GB133-国家电网公司电力系统电压质量和无功电力管理规定[S].北京,国家电网公司,2009.
- [8] 徐娟,陈时桢,何烱剑,等.基于模糊 PID 的平衡头自适应控制策略研究[J].电子测量与仪器学报,2016,30(6):895-902.
- [9] 季玉琦,耿光飞.变电站并联补偿容量不等分组方法[J].电力系统自动化,2015,39(3):90-94.
- [10] 章华涛,吴常铖.带触觉的肌电假手握力模糊控制方法[J].仪器仪表学报,2013,34(7):1559-1565.
- [11] 冯超,陈双叶.基于模糊控制的 PAC 控制器设计[J].国外电子测量技术,2016,35(7):47-51.
- [12] 艾永乐,王伟,王玉栋,等.基于 SVG 混合补偿的单晶炉功率因数提高[J].电子测量技术,2016,39(2):46-50.

## 作者简介

刘冬,1991年出生,硕士在读,研究方向为电力电子与电力传动。

E-mail:joanne1227@126.com