

文章编号:1671-6833(2013)04-0055-04

变电站电压无功模糊控制器的设计

赵国生, 董艳艳

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 控制好电压和无功并且使其在合格范围内运行具有重要的意义. 基于传统九分区的电压无功综合控制存在投切震荡现象, 而变电站电压无功模糊控制可以避免这些问题. 依据变电站电压无功模糊控制策略设计一个变电站电压无功模糊控制器, 并对该模糊控制器进行 MATLAB 仿真, 通过数据分析可以证明设计的模糊控制器能够减少变压器分接头和并联电容器的调节次数, 增加变电站设备的使用寿命.

关键词: 模糊控制; 电压无功调节; 九分区

中图分类号: TP311 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2013.04.013

0 前言

随着人们生活水平不断提高, 用户对电能质量的要求越来越高. 电压和无功是衡量电能质量的两个重要指标, 因此如何控制好电压和无功并且使其在合格范围内运行具有重要的意义. 目前国内大多数变电站对电压无功控制还主要采用基于传统九分区的电压无功综合控制策略, 由于基于九分区的变电站电压无功综合控制策略容易出现超调和投切振荡现象, 这些问题造成了变压器的分接头和并联电容器的投切次数过多, 从而影响变压器的分接头和并联电容器的使用寿命. 因此如何更好地控制变压器的分接头和电容器的调节次数, 并且使电压和无功达到合格要求非常重要. 为了更好地对电压无功进行调节和减少变压器分接头和并联电容器的调节次数, 笔者根据变电站电压无功模糊控制的基本理论设计出一个模糊控制器来控制变压器分接头和并联电容器的投切.

1 变电站电压无功调节的基本原理

变电站电压无功调节的主要目标是在无功基本平衡和电压质量合格的条件下, 尽量减少变压器分接头和并联电容器的调节次数. 变电站电压无功综合控制系统通常取主变低压侧母线电压 U_2 和主变高压侧注入无功功率 Q_1 作为电压和无

功的考察标准. 现以一个简单的电力系统接线图为例来说明, 图 1 中是一台 110 kV 双绕组变压器通过一条线路接入上一级电源^[1].

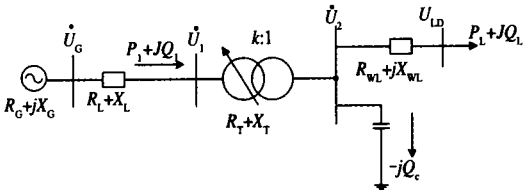


图 1 电力系统接线图

Fig. 1 Power system wiring diagram

图中: U_G 、 $R_G + jX_G$ 分别为电源电压与电源阻抗, $R_L + jX_L$ 为输电线路阻抗, P_1 、 Q_1 为主变压器高压侧有功功率与无功功率, U_1 、 $R_T + jX_T$ 分别为主变压器高压侧电压及变压器阻抗, k 为变压器变比, U_2 、 $R_{WL} + jX_{WL}$ 分别为主变压器低压侧电压及变压器出线阻抗, $-jQ_C$ 为并联电容器发出的无功功率, U_{LD} 为负荷端电压, $P_L + jQ_L$ 为用户负荷复数功率.

在自然功率因数角不变的情况下, 主变器低压侧的电压可以近似为

$$U_2 = (0.95 \sim 1.05) U_{LDN} + \frac{R_{WL} \cos \varphi + X_{WL} \sin \varphi}{U_{LDN}} S_{Li} \quad (1)$$

在忽略变电站出线的损耗的情况下, 系统的

收稿日期:2013-02-13; 修订日期:2013-06-18
基金项目:河南省自然科学基金资助项目(102300410066)
作者简介:赵国生(1965-),男,河南南阳人,郑州大学副教授,博士,主要从事电力电子及电力有源滤波技术的研究, zgs410@zzu.edu.cn.

功率损耗为

$$\Delta S \approx \frac{P_L^2 + (Q_L - Q_C)^2}{U_2^2} \left[\left(\frac{R_C + R_L}{k^2} + R_T \right) + j \left(\frac{X_C + X_L}{k^2} + X_T \right) \right]. \quad (2)$$

由于电压无功调控的目标是让用户端电压在合格的范围内,并且使系统的网损达到最小. 根据公式(1)可知如果使电压达到合格范围,不仅需要调节变压器分接头,还需要对负荷的视在功率进行逆调压调整. 在满足变压器低压侧电压 U_2 合格的前提下,如果想使系统网损最小,根据式(2)可知,必须使 $|Q_L - Q_C|$ 的值最小,因此需要在变电站装设并联电容器进行无功调节. 一般来说变电站实现电压无功调控的目标都是通过这两种方法来实现,即:改变有载调压变压器的变比 k 和投切装设在变压器低压侧母线上的并联电容器.

传统九分区的变电站电压无功控制策略的基本原理如图 2 所示.

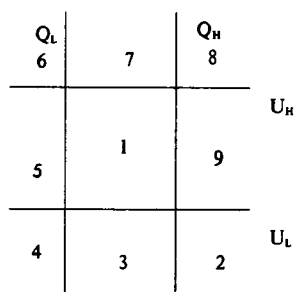


图 2 九分区控制图

Fig.2 Nine-zone control chart

九分区控制方法是:①当电压越上限时,上调分接头档位,使电压降低;②当电压越下限时,下调分接头档位,使电压升高;③当无功越上限时,投入并联电容,使无功功率减小,但同时能使电压升高;④当无功越下限时,切除并联电容,使无功功率增大,但同时能使电压降低. 由于这种方法过于简单,很容易造成反复调节,从而影响设备使用寿命,因而需要找到一种更加精确的调节方法,避免出现反复调节.

2 变电站电压无功模糊控制器的设计过程

模糊控制器是一个通过模仿人类经验的控制器,控制效果主要是由模糊控制规则和模糊变量的隶属度函数组建的是否合理决定的,对于控制器输入和输出之间不需要知道其数学依存关系,也不需要建立数学模型. 图 3 是一个直接采用变电站低压侧母线上的电压和高压侧母线上的无功功率作为输入的模糊控制系统,该模糊控制系统

的基本组成结构如图 3 中所示.

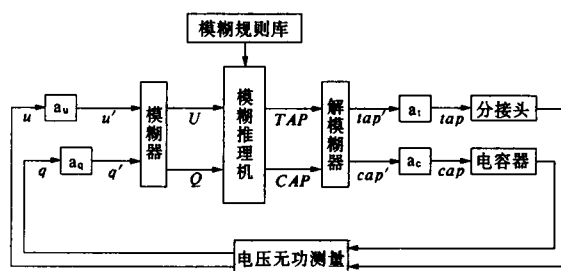


图 3 模糊控制系统结构

Fig.3 The structure of fuzzy control system

2.1 确定模糊化的输入和输出参数

采用变压器低压侧母线电压 u 和高压侧无功功率 q 作为输入变量,然后通过模糊器把电压 u 和无功功率 q 精确输入变量映射成模糊输入变量 U, Q . 对模糊语言变量 U 和 Q 的模糊词集都定义为 $\{NB, NS, Z, PS, PB\}$, 各符号的含义为: NB (负大)、 NS (负小)、 Z (正常)、 PS (正小)、 PB (正大). 采用变压器分接头和并联电容器的调节量为输出变量, TAP, CAP 分别为输出变量 tap, cap 相对应的模糊输出变量, TAP, CAP 的模糊词集定义为 $\{N, Z, P\}$, 其中 N, Z, P 分别表示下调 1 档分接头 (切除 1 组电容器)、不动作、上调 1 档分接头 (投入 1 组电容器).

2.2 确定输入和输出隶属函数曲线

由于模糊子集 (模糊语言值) 都是通过隶属度函数来描述的,所以隶属度函数也可以被称为模糊语言值的语义规则,隶属度函数表达出了输入量与模糊语言值的关系. 隶属度函数可以有多种表达方式如正态分布法、梯形法或三角形法等,但最终表达的意思都是一样的,因为隶属度函数都是设计者根据自己的经验和想要的控制效果设计出来的^[2],目的都是为了使电压和无功功率在合格的范围内运行并减少变压器的分接头和并联电容器的调节次数.

首先设置输入 U 的隶属度函数. 假设母线的电压为 10 kV, 根据《电能质量供电电压允许偏差》可以知道正常运行时 10 kV 母线电压允许偏差为 $\pm 7\%$, 因为故障时允许的最大偏差范围为 $\pm 15\%$, 则可以设电压 U 的论域为 $[8.5, 11.5]$ kV. 根据按恒定值设置电压上下限值的基本原则,可以知道电压的上下限分别为 10.7 kV, 9.3 kV. 如果投切一组电容引起的电压最大变化量为 0.2 kV, 则可以按照下列方式设置 U 的模糊子集所处的基本范围. 由于设置的 U 的模糊词集为 $\{NB,$

$NS,Z,PS,PB\}$,则可以设置 NB 为电压越下限时
的模糊子集, NS 为电压合格但偏下限时
的模糊子集, Z 为电压合格时的模糊子集, PS 为电压合格但偏上限时的模糊子集, PB 为电压越上限时的模糊子集, NS,PS 所处区域的范围为投切一组并
联电容器引起的电压最大变化量. 根据所设定各
个值的大致范围,可以设置出 U 的隶属度函数,
所设置 U 的隶属度函数如图 4,隶属度函数的纵
坐标为隶属度,横坐标为电压的论域.

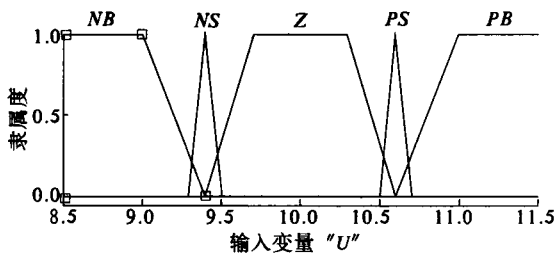


图 4 电压隶属度函数
Fig.4 Voltage membership function

其次设置输入 Q 的隶属度函数. 假设 10 kV
母线上的并联电容器每一组的额定容量为 2 400
kvar,如果有 4 组电容器,则 3 组电容器的总容量
就为 7 200 kvar,则可以设置 Q 的论域为 $[-7.2,$
 $7.2]$ Mvar. 根据按恒定值设置无功功率上下限
值的基本原则,无功功率的上限值 $Q_H = (1.3 \sim 1.5)$
 Q_{c0} ,无功功率的下限值 $Q_L = (-0.5 \sim 0) Q_{c0}$, Q_{c0}
为一组并联电容器的额定容量,则可以取无功功
率的上下限值为 0 Mvar 和 3.6 Mvar. 如果投切一
组并联电容器引起的无功功率最大变化量为 3
Mvar,则可以按照下列方式设置 Q 的模糊子集所
处的基本范围. 由于我们设置的 Q 的模糊词集为
 $\{NB,NS,Z,PS,PB\}$,则可以设置 NB 为无功功率
越下限时模糊子集, NS 为无功功率基本合格但
偏下限时模糊子集, Z 为无功功率合格时的模
糊子集, PS 为无功功率基本合格但偏上限时的
模糊子集, PB 为无功功率越上限时的模糊子集. 根
据所设定各个值的大致范围,可以设置出 Q 的隶
属度函数,所设置 Q 的隶属度函数如图 5,隶属度
函数的纵坐标为隶属度,横坐标为无功功率的
论域.

最后设置输出 TAP 和 CAP 隶属度函数. 由于
变压器的分接头是一档一档调节而电容器是以组
为单位一组一组进行投切,所以可以定义 tap 和
 cap 的基本论域都取 $-1 \sim +1$, TAP 和 CAP 的模
糊论域都为 $-1 \sim +1$. 我们设置输出隶属度函数
为三角形,则输出的隶属度函数如图 6,隶属度函

数的纵坐标为隶属度,横坐标为 TAP 或 CAP 的
论域.

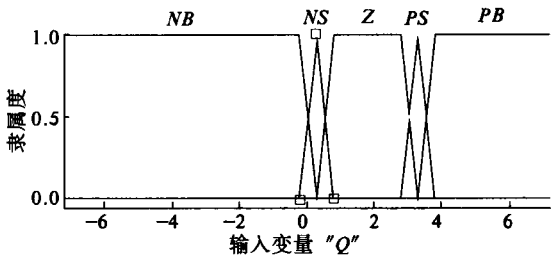


图 5 无功隶属度函数
Fig.5 reactive power membership function

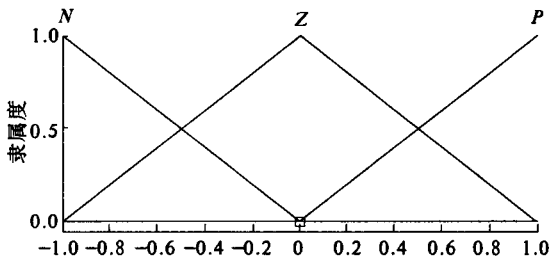


图 6 $TAP(CAP)$ 的隶属度函数
Fig.6 $TAP(CAP)$ membership function

2.3 组建模糊控制规则

模糊控制规则的提取可以根据专家和现场操
作人员经验来获取,也可以根据一定的数学模型
判据获取,例如可以依据九区图、十三区域和十七
区域图等进行 IF - THEN 规则的提取^[3],每一
条模糊控制规则的设计与隶属度函数的设计一样都
带有设计者浓厚的主观经验性. 模糊控制规则的
组建是否合理也决定了这个模糊控制器控制效果
的好坏,所以模糊控制规则的设定非常重要. 根据
笔者所设置的输入和输出的隶属度函数将电压无
功平面划分成 25 个区域,因此可以提取出一个具
有 25 条规则的模糊控制规则表如表 1 所示.

表 1 模糊控制规则表
Tab.1 Fuzzy control rule

项目	NB	NS	Z	PS	PB
PB	P/N	P/N	P/Z	P/Z	P/Z
PS	Z/N	Z/N	Z/Z	Z/Z	Z/Z
Z	Z/N	Z/Z	Z/Z	Z/Z	Z/P
NS	Z/Z	Z/Z	Z/Z	Z/P	Z/P
NB	N/Z	N/Z	N/Z	N/P	N/P

3 电压无功模糊控制器的 MATLAB 仿真

运用 MATLAB 的 Fuzzy Logic Tool Box 的 GUI
工具建立模糊推理系统 FIS,Fuzzy Logic Tool Box

有 5 个主要的 GUI 工具,即 FIS 编辑器、隶属度函数编辑器、模糊规则编辑器、模糊规则观察器和输出曲面观察器. 在 FIS 编辑器中设置所需要的各个参数,模糊推理机采用最小推理机,其他的参数都可以根据实际情况进行选择,将所设置的隶属度函数输入到隶属度函数编辑器中,将所设置的模糊控制 IF-THEN 规则输入到模糊规则编辑器,形成一个模糊控制器. 通过输出曲面观察器可以观察输出控制变量 TAP 和 CAP 的输出曲面,如图 7、图 8 所示的三维曲面图,可以在图中看到全部的映射. 通过在规则观察器的 input 项手工输入电压和无功值,就可以获得解模糊后的清晰值 tap' 、 cap' ,由于文中所设的输出比例因子为 1,因此对解模糊后的清晰值经过取整的处理后,就可以得到相应的实际输出控制量.

利用 MATLAB 电力仿真模块集 Sim Power Systems Blockset 组建电网模型,进行变电站的 Simulink 仿真时,可将 FIS 变量结构导入 Simulink 之中,对设计的模糊控制器的控制效果进行验证. 本文中所采用的变电站电压无功模糊控制策略比传统的九分区策略更加有优势,因为文中所采用的控制策略减少了出现振荡动作的现象,从而减少了变压器的分接头和并联电容器的动作次数. 例如:当 $U = PS, Q = PB$ 时,电压合格但偏上限,无功功率越上限,模糊控制采用分接头和电容器均不动作,而九分区控制则采用的是投电容,但投电容会导致电压越上线,从而造成出现振荡动作的现象^[4-6].

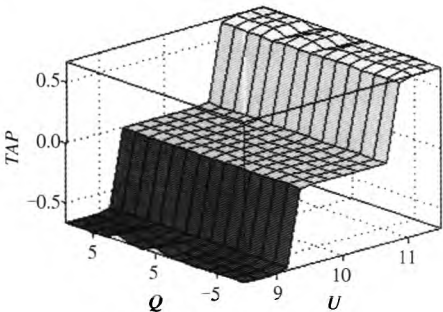


图 7 TAP 输出曲面
Fig.7 TAP output surface

结合某一变电站的日负荷曲线,我们通过对比传统的九分区控制策略与文中采用的模糊控制策略的电容投切与分接头调节的次数进行了仿真验证,所得到的对应于不同电压与无功值下的仿真结果如表 2 所示,表中的输出量 tap 的值 1 表示上调 1 档分接头,0 表示不动作,-1 表示下调 1 档分接头;输出量 cap 的值 1 表示投入一组补偿

电容器组,0 表示不动作,-1 表示切除一组补偿电容器组. 通过对表 2 的结果可以看出,文中采用的模糊控制方法与九分区控制策略相比可以明显地减少了调节次数.

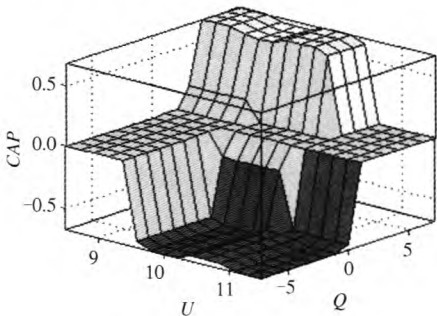


图 8 CAP 输出曲面
Fig.8 CAP output surface

表 2 仿真数据对比表
Tab. 2 Comparison of simulation data

u/kV	q/Mvar	模糊控制		九分区控制	
		tap	cap	tap	cap
10.91	2.32	1	0	1	0
10.77	3.86	1	0	1	1
10.58	3.14	0	0	0	0
10.53	3.75	0	0	0	1
10.73	-1.21	1	-1	1	-1
9.45	-0.08	0	0	0	-1

虽然变电站电压无功模糊控制策略减少分接头和电容器的动作次数,但模糊控制器的设计带有浓厚的主观性,如果想要使模糊控制的效果更好,就必须对控制器中的隶属度函数和模糊 IF-THEN 规则进行不断修改,而这项工作的工程量很大,这也是电压无功模糊控制策略的不足之处.

4 结论

笔者采用变电站电压无功模糊控制策略,利用模糊控制策略的基本理论设计出一个模糊控制器,并对模糊控制器进行 MATLAB 仿真,仿真结果证明模糊控制策略比传统的九分区控制策略有优势,能够减少变压器的分接头和并联电容器的调节次数. 变电站电压无功模糊控制策略通过减少变压器分接头和并联电容器的调节次数,可以增加变电站设备的使用寿命,但目前的模糊控制器的控制规则还需要进一步地完善.

参考文献:

[1] 李升. 变电站电压无功控制理论与设计[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009, 43-67.

(下转第 63 页)

Research and Realization of the Nonlinear Control Method Based on Active Power Filter

MU Kun¹, MU Xiao-bin², WANG Jie³

(1. Department of Computer Science and Engineering, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China; 2. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In view of the nonlinear mathematical model of the active power filter (APF) inverter, passivity - based control (PBC) with the function of forecasting current is adopted to control the inverter, and it can make the inverter possess excellent dynamic and static characteristics. First, we establish the Euler-Lagrange (EL) model of inverter, and we also prove that this inverter is strictly passive. Based on passivity of the inverter, we can redistribute the system energy to optimize the controller. The controller can make the reactive current of system to track the harmonic current of load, and active current can make the voltage of DC-link track the reference value fast. Simulation and prototype results show that the proposed control method is practicable and the compensation effect is obvious.

Key words: active power filter; forecasting current; harmonic current; nonlinear control passivity-based control

(上接第 58 页)

[2] 段海峰,李兴源,宋永华.一种基于模糊逻辑的电压无功控制策略[J].电力系统自动化,1997,21(6):23-26.

[3] 陈远华,秦荃华,杨晓红.基于模糊边界无功调节判据的电压无功综合控制[J].中国电力,2002,35(10):50-53.

[4] 胡国亮,陈久康.用 MATLAB 进行模糊控制器的设

计和仿真[J].基础自动化,2000,7(1):15-20.

[5] 杨丽徙,冯越,李桂红.大型工业企业配电网电压无功控制的研究[J].郑州大学学报:工学版,2009,30(4):108-111.

[6] 王克文,赵晓铎,刘晓峰.基于单纯形法思想的城市高压电网非线性无功优化[J].郑州大学学报:工学版,2010,31(5):95-98.

Substation Voltage and Reactive Power Fuzzy Controller Design

ZHAO Guo-sheng, DONG Yan-yan

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Since the voltage and reactive power are two key factors of the power quality evaluation, how to control the voltage and reactive power and making it within an acceptable range operation are of great significance. Voltage and reactive power control based on the traditional nine partitions exists oscillation question in switch operation, however, the fuzzy control method that the substation voltage and reactive power control can avoid these problems. A substation voltage and reactive power fuzzy controller is proposed in the paper according to fuzzy control strategy, and the MATLAB simulation are made on the fuzzy controller, the analysis results prove that the fuzzy controller designed in this paper can reduce the regulation numbers of transformer taps and shunt capacitors, meanwhile increase the service life of the substation equipment.

Key words: fuzzy control; voltage and reactive power; nine partitions