

# 变电站无功电压综合调节的模糊控制研究

吴 侗, 李医民

(江苏大学理学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要:** 研究了一种通过补偿电容器组和有载调压的主变压器相配合进行联合控制系统无功电压的方法。在推导出大型变电站的二次母线装设可投切的补偿电容器组和有载调压的主变压器相配合进行联合控制的模型基础上, 提出了一种模糊控制方法。该系统将电压偏差和功率因数偏差作为模糊输入变量进行模糊化, 经过模糊推理, 并通过解模糊化运算给出控制信号作用于有载调压变压器和电容器组。结合实际电站系统参数对该系统进行仿真试验, 仿真结果表明该控制系统稳定可靠, 控制效果好。

**关键词:** 模糊控制; 有载调压; 无功电压控制; 变电站

**中图分类号:** TM761 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)18-0027-04

## 0 引言

电网中电压是衡量电能质量的重要指标, 各种电气设备都是设计在额定电压下运行。通常在电力系统中枢纽变电站和终端变电站的二次母线上都装设有可投切的补偿电容器组, 与有载调压的主变压器相配合进行联合控制, 可以满足整个系统无功负荷和网络的无功损耗的需要, 同时又可以电压进行调节, 对提高功率因数和保证母线的电压水平是一种经济的方法, 因此得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。

目前多数变电站中, 对无功电压双参数调节主要靠人工进行控制, 这样往往难以做到准确判断调节决策和达到及时调节的目的。另外国内外 10 kV 变电站无功电压综合控制中也有采用一些其它的方法如: “九区图”综合控制方法<sup>[2]</sup>, 由于该法在相邻控制区域的边界区在某些情况下存在动作频繁的问题, 容易造成设备故障, 减少设备寿命, 甚至引起系统振荡; 专家系统和线性规划相结合的方法<sup>[3]</sup>也同样存在难以满足闭锁条件下实时性的要求。为解决这些问题, 本文提出一种基于模糊控制的电压无功联合调节策略, 对无功电压数学模型进行控制, 更好地保持电压在合格范围内并维持无功功率平衡。

## 1 无功电压控制的数学模型

变电站无功电压控制, 是在满足给定的进线功率因数 ( $\cos \phi$ ) 和二次母线电压 ( $U_2$ ) 的情况下, 调节补偿电容器组的容量和有载调压变压器的分接头位置。

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (60234010)

$\cos \phi$  的大小按瞬时功率因数考虑人为规定。要求维护用户端电压在  $(0.95 \sim 1.05) U_{De}$  范围内, 对变压器的二次母线电压  $U_2$  的计算, 如图 1 所示。对单一用户,  $U_2$  应满足下式

$$U_2 = (0.95 \sim 1.05) U_{De} + \frac{P_D r_1 + Q_D X_1}{U_{De}} \quad (1)$$

式中:  $U_{De}$  为用户端母线电压的额定值;  $P_D$  和  $Q_D$  分别为单一用户的有功功率和无功功率;  $r_1 + jX_1$  分别为单一用户线路的电阻和电抗。

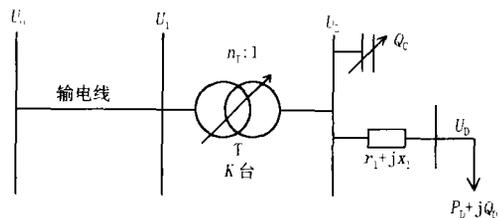


图 1  $U_2$  计算电路

Fig 1 Calculation circuit of  $U_2$

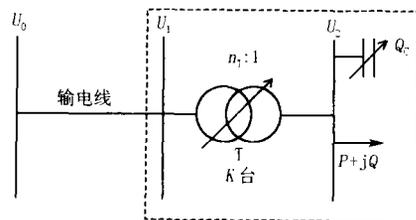


图 2 接线原理图

Fig 2 A system model

图 2 是变电站的接线原理图。该变电站通过输电线路与无穷大母线  $U_0$  相接, 输电线路长度为  $L$ , 阻抗为  $R_L + jX_L$ , 其等效电路为图 3。

图 3 中:  $P$  为出线的有功功率;  $Q$  为出线的无功

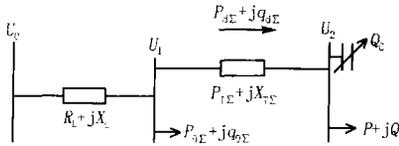


图 3 等效电路图

Fig 3 Equivalent circuit

功率;  $Q_c$  为补偿容量;  $R_{T\Sigma}$  为主变压器的等效阻抗 ( $K$  台), 其损耗为  $P_{d\Sigma}$ ;  $X_{T\Sigma}$  主变压器的等效电抗 ( $K$  台), 其损耗为  $q_{d\Sigma}$ ;  $P_{0\Sigma}$  为主变压器的空载有功损耗 ( $K$  台);  $q_{0\Sigma}$  为主变压器的空载无功损耗 ( $K$  台);  $n_T$  为变压器的变比。

考虑电容器组的有功损耗式  $P_c = K_c Q_c$ , 式中,  $K_c$  为补偿装置的功率损耗系数 (一般取  $K_c = 0.004$  kW/kvar)。并把参数归算到低压侧, 由图 3 得到电压损耗方程

$$U_0/n_T - U_2 = \frac{(P + P_c) \frac{R_{T\Sigma}}{n_T^2} + (Q - Q_c) \frac{X_{T\Sigma}}{n_T^2}}{U_2} + \frac{(P + P_c + P_{d\Sigma} + P_{0\Sigma}) R_L + (Q - Q_c + q_{d\Sigma} + q_{0\Sigma}) X_L}{n_T^2 U_2^2 + (P + P_c) R_{T\Sigma} + (Q - Q_c) X_{T\Sigma}} \quad (2)$$

进线 (母线) 的功率因数方程为

$$\cos = \frac{P + P_c + P_{d\Sigma} + P_{0\Sigma}}{\sqrt{(P + P_c + P_{d\Sigma} + P_{0\Sigma})^2 + (Q - Q_c + q_{d\Sigma} + q_{0\Sigma})^2}} \quad (3)$$

考虑负荷的无功电压静特性, 有功负荷  $P$ 、无功负荷  $Q$  与母线电压  $U_2$  的关系为<sup>[4]</sup>  $P = P_0 U_2$ ,  $Q = Q_0 U_2$ 。式中  $P_0$ ,  $Q_0$  分别是  $U_2$  在额定电压下, 负荷的有功功率、负荷的无功功率;  $\alpha$ 、 $\beta$  分别是有功功率指数、无功功率指数。

电容器组  $Q_c$  的出力是与安装点的实际电压有关<sup>[5]</sup>, 则  $Q_c = Q_{c0} U_2$ , 式中:  $Q_{c0}$  是电容器组在额定电压下的补偿容量, 即电容器的铭牌容量;  $\gamma$  是补偿容量指数 (一般  $\gamma = 2$ )。

将上述参数分别代入式 (2)、(3), 得到

$$U_0/n_T - U_2 = \frac{(P_0 U_2 + K_c Q_{c0} U_2) \frac{R_{T\Sigma}}{n_T^2} + (Q_0 U_2 - Q_{c0} U_2) \frac{X_{T\Sigma}}{n_T^2}}{U_2} + \frac{(P_0 U_2 + K_c Q_{c0} U_2 + P_{d\Sigma} + P_{0\Sigma}) R_L + (Q_0 U_2 - Q_{c0} U_2 + q_{d\Sigma} + q_{0\Sigma}) X_L}{n_T^2 U_2^2 + (P_0 U_2 + K_c Q_{c0} U_2) R_{T\Sigma} + (Q_0 U_2 - Q_{c0} U_2) X_{T\Sigma}} \quad (4)$$

$$\cos = \frac{(P_0 U_2 + K_c Q_{c0} U_2 + P_{d\Sigma} + P_{0\Sigma})}{\sqrt{(P_0 U_2 + K_c Q_{c0} U_2 + P_{d\Sigma} + P_{0\Sigma})^2 + (Q_0 U_2 - Q_{c0} U_2 + q_{d\Sigma} + q_{0\Sigma})^2}} = 0 \quad (5)$$

即无功电压控制模型。

## 2 模糊控制器设计

对无功电压模型的电压和功率因数的上下限边界进行模糊化处理, 模糊控制器的输入量为电压偏差和功率因数偏差, 输出量为变比和补偿电容值。以双回 110 kV 的线路向某变电所供电为例进行模糊控制器试验。

导线采用 LGJ - 185, 水平排列, 线间距离 4 m, 线路长 100 km, 变电所装设 SFZL1 - 31500/110 的有载调压变压器, 额定电压为  $110 \pm 3 \times 2.5\% / 6.3$  kV。

已知  $U_0 = 115$  kV; 线路  $\gamma_0 = 0.17$  /km,  $x_0 = 0.394$  /km, 双回路;

主变压器: 空载损耗  $P_0 = 29.6$  kW, 空载电流  $I_0\% = 0.7$ , 短路损耗  $P_d = 196.9$  kW, 短路阻抗电压  $U_d\% = 10.5$  (每台), 两台并列运行。

负荷: 额定值  $P_0 = 40$  MW,  $Q_0 = 30$  Mvar,  $\alpha = 2$ ,  $\beta = 2$ 。

电容器: 采用 YGM6.3 - 100 - 1 移相电容器, 每相 3 个电容器接成三角形, 共 20 组,  $\gamma = 2$ 。

采用标么值计算, 取基准容量  $S_B = 100$  MVA, 基准电压  $U_B$  为元件所在处线路的平均额定电压。则

$$R_L = \frac{1}{2} \gamma_0 L \frac{S_B}{U^2} = 0.0643 \quad X_L = \frac{1}{2} x_0 L \frac{S_B}{U_B^2} = 0.1345$$

$$R_{T\Sigma} = \frac{S_B}{S_N^2} P_d \frac{1}{K} = 0.0096 \quad X_{T\Sigma} = \frac{U_d\%}{100} \frac{S_B}{S_N} \frac{1}{K} = 0.1667$$

负荷:  $P = P_0 U_2$   $Q = Q_0 U_2$

主变压器损耗:  $P_{0\Sigma} = K P_0 = 0.000592$

$$q_{0\Sigma} = K \frac{I_0\%}{100} S_N = 0.00441$$

$$P_{d\Sigma} = \frac{(P + K_c Q_c)^2 + (Q - Q_c)^2}{U_2^2} \frac{R_{T\Sigma}}{n_T^2}$$

$$q_{d\Sigma} = \frac{(P + K_c Q_c)^2 + (Q - Q_c)^2}{U_2^2} \frac{X_{T\Sigma}}{n_T^2}$$

式中:  $n_T$  为 [0.925, 1.075],  $Q_{c0}$  为 [0, 0.18]。

变电站母线允许的最大电压偏差  $\pm 10\%$ , 电压偏差的基本论域为  $U_c = [-0.1, +0.1]$ 。功率因数偏差的基本论域为  $[-0.25, +0.25]$ 。

作用于变压器的变比  $n_T$  基本论域为 [0.925, 1.075]。作用于电容器组的输出量  $Q_{c0}$  基本论域为 [0, 0.18]。

定义模糊输入变量  $X_1, X_2$  和模糊输出变量  $Y_1, Y_2$  的模糊论域  $[-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, +1,$

+2, +3, +4, +5, +6], 对应得模糊子集为  $[NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB]$ 。选择三角形隶属度函数对论域进行模糊化。

电压偏差的量化因子  $K_u = 12/0.2 = 60$ ; 功率因数偏差的量化因子  $K = 12/0.5 = 24$ 。

模糊推理如表 1 所示。

表 1 模糊规则控制表

Tab 1 Table of fuzzy control rule

$X_1$	$X_2$						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB
	PB	PM	PS	ZE	NS	NB	NB
NM	PM	PS	PM	PM	PM	PM	PM
	PB	PM	PS	ZE	NS	NB	NB
NS	PS	PS	PS	PS	PS	PS	PS
	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE
	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
PS	ZE	ZE	NS	NS	NS	NS	NS
	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NS
PM	NM	NM	NM	NM	NS	NS	NM
	PB	PM	PS	ZE	NS	NM	NB
PB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NM
	PB	PB	PM	ZE	ZE	NM	NB

表 1 中:分子为  $U_1$  对应于变比的模糊输出量, 分母为  $U_2$  对应于电容器的模糊输出量。

采用极小 - 极大法推理和加权平均法解模糊, 从模糊子集中得出精确的控制量作用于控制模型, 控制变压器的变比和电容器组的投切, 应用 Matlab 的 Simulink 和模糊工具箱对系统进行建模仿真。控制前、后的电压标么值与功率因数变化如图 4、5、6、7 所示, 仿真结果表明, 控制效果良好。

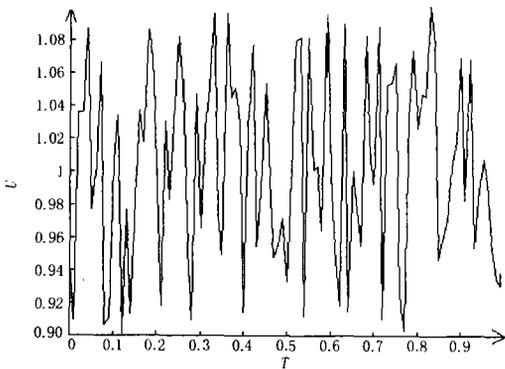


图 4 调节前电压

Fig 4 Voltage before adjustment

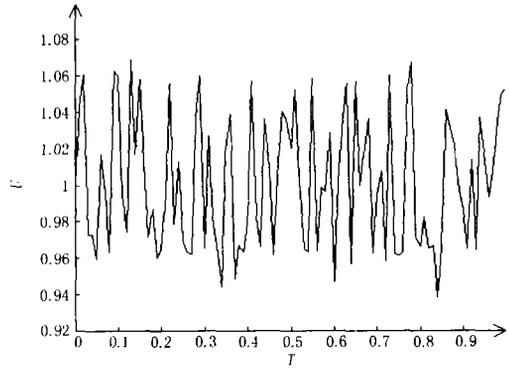


图 5 调节后电压

Fig 5 Voltage after adjustment

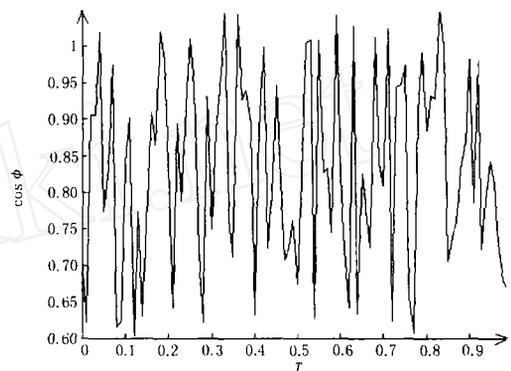


图 6 调节前功率因数

Fig 6 Power factor before adjustment

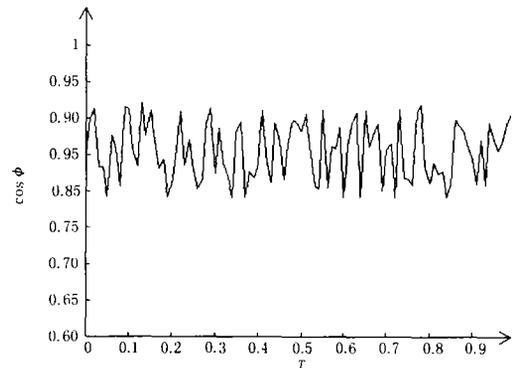


图 7 调节后功率因数

Fig 7 Power factor after adjustment

能提高电压质量, 降低网络损耗, 改善功率因数, 而且还具有以下特点: 可以避免投切振荡; 根据实际情况修改论域和隶属度函数, 补偿精度高, 鲁棒性好; 对系统变化不敏感, 抗干扰性好, 也有很好的控制效果和稳定性。

参考文献:

[1] 熊信银, 张步涵. 电力系统工程基础 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002

3 结语

模糊控制在变电站电压无功调节的应用中不仅

- X DNG Xin-yin, ZHANG Bu-han Power System Foundation Engineering [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002
- [2] 邵文权. 变电站电压无功综合控制技术综述 [J]. 西北电力技术, 2005.
- SHAO Wen-quan Transformer Substation Voltage and Reactive Power Combination Control Outline [J]. Northwest of China Power Technology, 2005.
- [3] Bie Z H. Integration of Algorithmic and Heuristic Techniques for Transition-optimised Voltage and Reactive Power Control [J]. IEEE Proceedings on Gener, Transm and Distrib, 2006.
- [4] 陈珩. 电力系统稳态分析 (第二版) [M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- CHEN Heng Power System Steady State Analysis, Second Edition [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1995.
- [5] 除玉琦. 工厂电气设备经济运行 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1988.
- CHU Yu-qi Plant Electric Facility Economical Operation [M]. Beijing: China Machine Press, 1998
- [6] 孙增圻. 智能控制理论与技术 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- SUN Zeng-qi Intelligent Control Theory and Technology [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [7] 李国勇. 智能控制及其 MATLAB 实现 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
- LI Guo-yong Intelligent Control and MATLAB Realization [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.

收稿日期: 2006-04-19; 修回日期: 2006-05-29

作者简介:

吴 侗 (1975 - ), 男, 硕士研究生, 研究方向为模糊控制, 电力系统运行监测与控制; E-mail: wutl001@163.com

李医民 (1963 - ), 男, 副教授, 研究方向为生物数学、模糊控制、容错控制。

### Fuzzy control study of comprehensive adjustment for substation reactive voltage

WU Tong, LI Yin in

(Science College, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** This paper presents a fuzzy control method based on the combination control of the compensator capacitor banks and the load tap changer (OLTC) main transformer furnished in large-scale electric substation. It establishes the model with reactive power and voltage parameters based on the combination control of the compensator capacitor banks and the OLTC main transformer furnished in large-scale electric substation to test the fuzzy control system. In the control system, the change of voltage and power-factor are fuzzified as the input variable and the OLTC and the capacitor banks are controlled by the output signal which is calculated after fuzzy inference and defuzzifying. The result proves its stability and validity by simulation which combined with the realized substation parameters.

This project is supported by Key Project of National Natural Science Foundation of China (No. 60234010).

**Key words:** fuzzy control; OLTC; reactive power and voltage control; substation

(上接第 11 页 continued from page 11)

### Realization of selecting 2 from 3 logic in DC pole protection system for Lingbao back-to-back HVDC transmission project

CAI Zi-liang<sup>1</sup>, LU Min<sup>2</sup>, LI Tian-feng<sup>2</sup>

(1. Xuchang University, Xuchang 461000, China; 2. XJ DC Transmission Dept, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** HVDC system must fulfil these requirements of speediness, selectivity, and reliability as AC protection system, Lingbao back-to-back HVDC project DC protection system adopts logic concept about selecting 2 from 3, it is different from AC protection system in China. The logic about selecting 2 from 3 and the implement way are introduced. Without the techniques support from Siemens, this paper realizes the auto converse function of run state and test state, which can block signal output in the state of test automatically. Lingbao back-to-back HVDC project has now been test run, so the DC pole protection system has been tested and proved usefully in practice. The result indicates that the logic about selecting 2 from 3 and the implement way are designed successfully.

**Key words:** DC transmission; DC pole protection system; selecting 2 from 3