

# 基于相控投切技术的无功补偿装置<sup>①</sup>

汪玉凤<sup>1</sup>, 王静<sup>1</sup>, 许晓禹<sup>1</sup>, 费翔<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(辽宁工程技术大学 电气与控制工程学院, 葫芦岛 125105)

<sup>2</sup>(辽宁工程技术大学 矿业技术学院, 葫芦岛 125105)

**摘要:** 为了减小煤矿电网在无功补偿时随机投切电容器组给电网带来的涌流及过电压, 设计了一套以具有发展前景的“软开关”技术即相控技术为根基的无功补偿装置, 采用寿命长、成本低的带有永磁机构的真空接触器作为投切开关, 该机构较传统的弹簧机构和电磁机构动作分散性小, 为满足动作时间高度一致, 对真空接触器动作时间的分散性进行有效补偿, 并采用模块化的思想理念建立系统整体结构, 采取适当的控制策略完成预期位置投切. 最后本系统进行了仿真, 并在某矿 6kV 电网中进行了实验测试, 仿真和实验结果都表明本系统能有效的补偿系统无功, 有一定的应用价值.

**关键词:** 相控技术; 永磁机构; 真空接触器; 无功补偿; 控制策略

## Reactive Power Compensation Device Based on Phase-Controlled Switching Technology

WANG Yu-Feng<sup>1</sup>, WANG Jing<sup>1</sup>, Xu Xiao-Yu<sup>1</sup>, Fei Xiang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(Faculty of Electrical and Engineering Control, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

<sup>2</sup>(Faculty of Mining and Technology, Liaoning Technical University, Huludao 125105, China)

**Abstract:** In order to reduce inrush current and over-voltage which caused by random switch capacitors during reactive power compensation in coal mine power network, this paper designs a kind of reactive power compensation device based on promising “soft switch” technology that is phase-controlled switching technology, takes long life, low cost vacuum contactors with permanent magnetic actuator as switching, this actuator has little action time dispersion than traditional spring actuator and electromagnetic actuator, in order to meet action time high degree of consistency, this paper compensates vacuum contactors action time dispersion, uses modular ideas to design reactive power compensation system structure diagram, together with the appropriate control strategy, completion the capacitor bank switching at a predetermined phase. finally this system makes experiment test in certain mine coal 6KV power network, experiment results show that phase-controlled switching technology of reactive power compensation effect is unmatched by traditional others methods, practice proved that this system has a certain value.

**Key words:** phase-controlled technology; permanent magnetic actuator; vacuum contactors; reactive power compensation; control strategy

煤矿电网中非线性负荷的大量存在对电能质量的污染严重影响了煤矿企业的生产效率和产业安全<sup>[1]</sup>, 有效的补偿无功功率, 提高电能质量是煤矿各企业的燃眉之急, 至此无功补偿装置就变得尤为重要. 目前, 机械投切电容器组(MSC)是我国煤矿电网应用较多的无功补偿装置<sup>[2,3]</sup>, 但其动态跟踪效果不好, 且在投切过程中会产生过电压和过电流, 对电网造成冲击的

二次污染. 相控投切技术应用到电容器组投切能够大大减小投切时暂态过电压及涌流, 根据所查资料, 迄今为止相控投切技术大多应用在高压和超高压领域, 而本文提出的基于相控投切电容器组的无功补偿装置正好填补了相控技术在中低压领域应用的空白, 并采用集众多优点于一身的带有永磁机构的真空接触器作为投切开关, 不仅降低了系统的应用成本, 还避免了

① 收稿时间:2012-06-05;收到修改稿时间:2012-07-13

分合闸时机械脱扣、锁扣系统所造成的不利因素，为煤矿安全稳定生产提供了可靠的保证。

### 1 相控投切关键技术分析

相控投切技术是有效抑制电力系统操作过程产生的过电压和涌流现象及提高电能质量的关键技术，其核心就是控制开关在参考电压电流信号在最佳相角处闭合或关断<sup>[4,5]</sup>，即在电压零点处闭合，在电流零点处关断，其投切原理在文献[6]中已有叙述，故本文不再赘述。

#### 1.1 相控投切电容器组的控制策略

投切电容器组的控制策略应根据具体的接线方式来制定，本文以星形中性点不接地的接线方式为例制定吻合的控制策略。为避免随机分合闸导致首合两相之间电压偏差过大的问题，本文采用首合两相分开操作的控制策略，即以 A 相相位为参考信号，A0 为参考点，首相合闸在 C 点，在 C 相和 B 相相位相等时即 B 点进行 B 相断路器合闸，在随后的 A 相自身过零点处进行 A 相断路器关合。切除时，在一相电流为零时先进行切除，延时 1/4 周期后其他两相电流同时衰减到零时切除另两相电容器，投切时序图如图 1 所示。

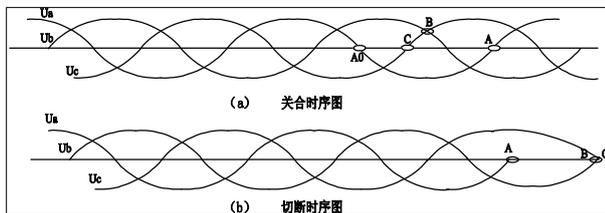


图 1 相控投切策略图

#### 1.2 永磁机构真空开关动作时间分散性补偿

本文的一大特色是采用了带有永磁机构的真空接触器作为电容器组的投切开关，而真空接触器动作时间的分散性是束缚相控技术进一步发展的一大瓶颈<sup>[7,8]</sup>，为了更好的完成在预定相位分合闸，本文用神经网络算法对其分散性进行有效补偿。

真空接触器动作时间受多方面因素的影响，其中以环境温度和电压为主，其动作时间的分散性可通过补偿进行解决。若通过实验数据则只能用有限数量的温度值得到不同电容器电压所对应的合闸时间，故本文对环境温度和电压进行拟合，利用 MATLAB 神经网络工具箱得出温度和电压的拟合曲

线，从而对合闸时间的分散性进行有效补偿。

环境温度和电压的拟合曲线需求出某一确定的环境温度 T 所对应的特性曲线。

把不同的温度  $T_n$  (n=1,2,...i) 下得到的 t-U 特性用一维多项方程式表示<sup>[5]</sup>，则有：

环境温度为  $T_1$  时：

$$t(T_1) = \beta_{01} + \beta_{11}U + \beta_{21}U^2 + \beta_{31}U^3 + \beta_{41}U^4 + \dots$$

环境温度为  $T_2$  时：

$$t(T_2) = \beta_{02} + \beta_{12}U + \beta_{22}U^2 + \beta_{32}U^3 + \beta_{42}U^4 + \dots$$

环境温度为  $T_n$  时：

$$t(T_n) = \beta_{0n} + \beta_{1n}U + \beta_{2n}U^2 + \beta_{3n}U^3 + \beta_{4n}U^4 + \dots \quad (1)$$

式中  $t(T_1)$ 、 $t(T_2)$ ... $t(T_n)$  为不同的环境温度下，真空接触器动作时间与电压的特性关系。

将测得的实验数据带入式中，即将不同的电压与其合闸时间带入式中，则有：

$$t_1(T_1) = \beta_{01} + \beta_{11}U_1 + \beta_{21}U_1^2 + \beta_{31}U_1^3 + \beta_{41}U_1^4 \dots$$

$$t_2(T_2) = \beta_{02} + \beta_{12}U_2 + \beta_{22}U_2^2 + \beta_{32}U_2^3 + \beta_{42}U_2^4 \dots \quad (2)$$

⋮

$$t_n(T_n) = \beta_{0n} + \beta_{1n}U_n + \beta_{2n}U_n^2 + \beta_{3n}U_n^3 + \beta_{4n}U_n^4 \dots$$

由式(2)即可求出不同的温度下对应的系数  $\beta$ ，由于系数  $\beta$  与温度 T 成非线性关系，

故可将  $\beta$  用一维多项方程式表示，

$$\beta_0 = A_0 + B_0T + C_0T^2 + D_0T^3 + E_0T^4$$

$$\beta_1 = A_1 + B_1T + C_1T^2 + D_1T^3 + E_1T^4$$

$$\beta_2 = A_2 + B_2T + C_2T^2 + D_2T^3 + E_2T^4$$

$$\beta_3 = A_3 + B_3T + C_3T^2 + D_3T^3 + E_3T^4$$

$$\beta_4 = A_4 + B_4T + C_4T^2 + D_4T^3 + E_4T^4$$

(3)

将式(2)带入式(3)中，便得到不同的温度下对应的系数，则有：

环境温度为  $T_1$  时：

$$\beta_{01} = A_0 + B_0T_1 + C_0T_1^2 + D_0T_1^3 + E_0T_1^4$$

环境温度为  $T_2$  时：

$$\beta_{02} = A_0 + B_0T_2 + C_0T_2^2 + D_0T_2^3 + E_0T_2^4$$

环境温度为  $T_n$  时：

$$\beta_{0n} = A_0 + B_0T_n + C_0T_n^2 + D_0T_n^3 + E_0T_n^4 \quad (4)$$

由式(4)便可求出  $A_0$ 、 $B_0$ 、 $C_0$ 、 $D_0$ 、 $E_0$ ，同理便可求出其他的系数，这样就确定了式(3)。

当温度已知时，将其带入式(3)中，求出温度系数  $E_0$ ，从而确定在温度  $T$  下对应的  $t-U$  特性一维多项式，即：

$$t(T) = \beta_0 + \beta_1 U + \beta_2 U^2 + \beta_3 U^3 + \beta_4 U^4 \quad (5)$$

式(4)所得的值是在不同温度计算出的合闸时间与控制电压的值，故将由于温度因素引起的接触器动作时间分散性进行了补偿。

将式(1)采用二次三项式，式(2)采用三次四项式，计算出温度系数与温度的关系为：

$$\begin{aligned} \beta_0 &= 457.63 + 10.088T + 0.61152T^2 - 0.0259T^3 \\ \beta_1 &= -4.773 - 0.1214T - 0.007419T^2 + 0.0003128T^3 \\ \beta_2 &= 0.0136 + 0.000363T + 0.00002266T^2 - 0.000000949T^3 \end{aligned} \quad (6)$$

则有：

$$t(T) = \beta_0 + \beta_1 U + \beta_2 U^2 \quad (7)$$

将不同的温度和控制电压带入，便可求出开关动作时间。

最后利用 MATLAB 神经网络工具箱 (Neural Network Toolbox)提供的 BP 网络有关函数，进行训练

测试，得到拟合曲线如图 2 所示。

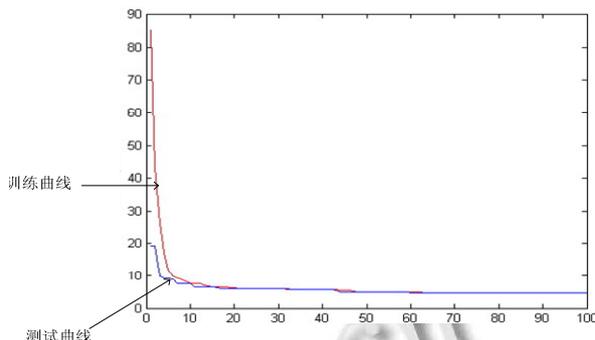


图 2 神经网络训练拟合曲线

根据拟合曲线可对动作时间进行整定，便可补偿由于环境温度和电压导致的真空开关动作时间分散性。

## 2 相控投切补偿装置整体结构

本文采用模块化的思想理念，在煤矿现有的机械投切电容器组的基础上进行改进，针对 6kv 电网设计出相控投切无功补偿系统的整体结构图，如图 3 所示。

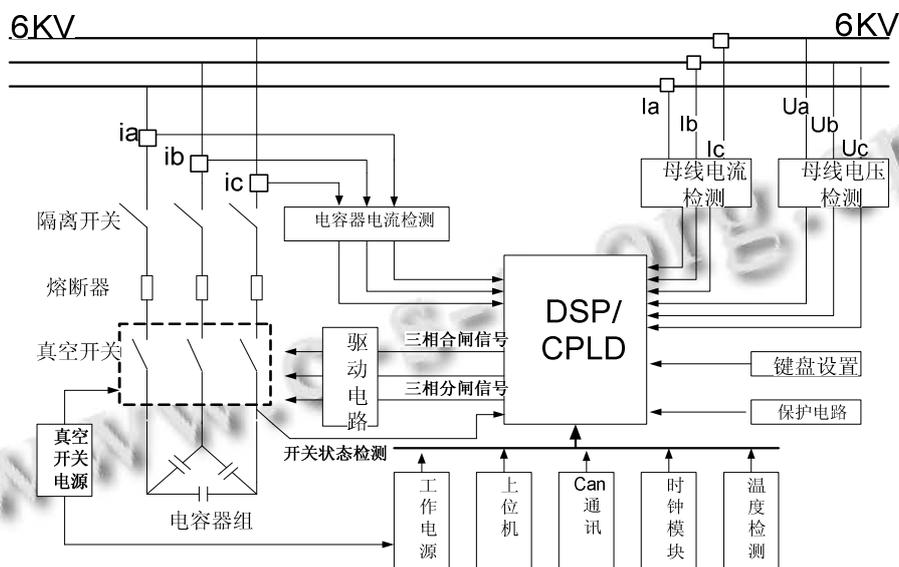


图 3 系统整体结构

系统中主要包括主控模块、检测模块、驱动模块、电源模块、保护模块、通讯模块以及执行单元。通过主控模块采集煤矿电网参数，检测模块计算出信号过零点及系统中需要补偿的无功容量，产生投入和切除控制信号，再通过通讯模块把运行参数传给上位机，

上位机根据实时情况进行远程遥控。其中主控模块由 DSP 最小系统组成，检测模块以具有 8 通道 14 位转换精度的 MAX125 作为采样电路的核心，通讯模块采用 CAN 总线进行与上位机的数据传输，CAN 总线能在极其恶劣的煤矿井下环境无失误的数据传输，为系统远

程遥控提供了可靠的保证。

### 3 仿真分析

#### 3.1 软件设计

本系统设计了阻感负载的参数，电流相位滞后电压  $45^\circ$ ，功率因数为 0.707，本系统目的是给系统进行容性功率补偿，将功率因数提高到 0.9 以上。主程序和投切控制流程图如图 4 和 5 所示。

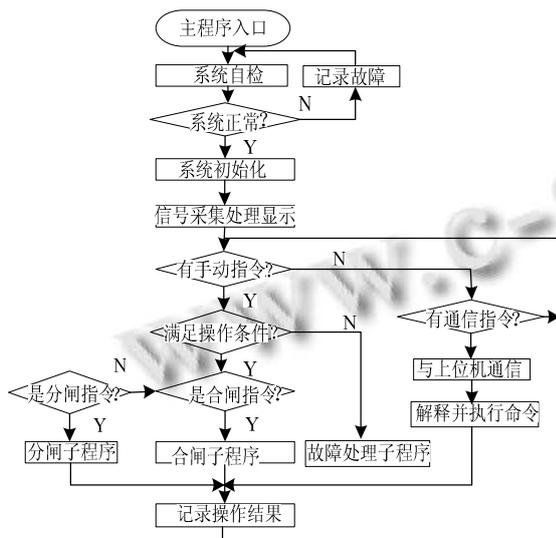


图 4 主程序流程图

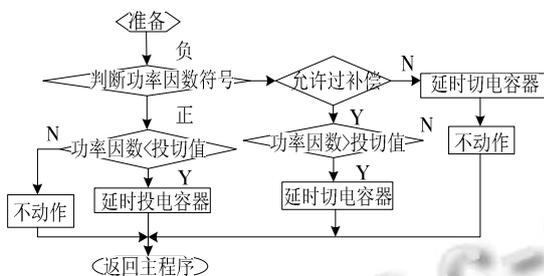


图 5 投切控制流程图

#### 3.2 仿真结果

本文设计的方案采集了电网的电压和电容器组回路中的电流波形，在电压信号过零点处投入，电流信号过零点处切除，用时间触发器进行信号过零点投切，再根据本文提出的三相电容器组的投切控制策略进行投切，有效解决这一问题，实验结果如图 6 和 7 所示。

从图 6 可看出，在投切电容器组的过程中电网电压发生了瞬间波动，这是电流冲击所引起的。投切电容器组的瞬间过电流冲击大概为正常工作电流的 1.1 倍左右，大大减少了对电网电流冲击的污染。如图 7

所示，在系统未投切电容器组时，系统的功率因数为 0.70，在 0.02S 时对电容器组进行合闸，功率因数提高到 0.92 以上，有效的实现了无功功率的补偿。

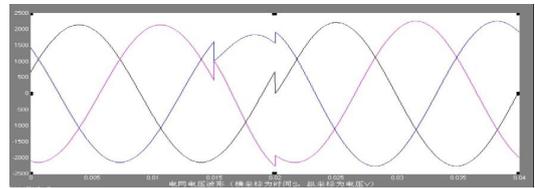


图 6 相控投切时电网电压波形

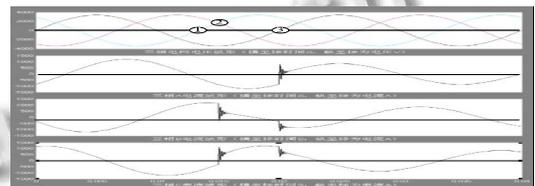


图 7 相控投切电网的电流波形

### 4 实验测试

本系统在进行仿真之后，达到了理想的效果，故将该装置投入到某矿 6kv 电网中进行现场测试，电压比为 6/0.78Kv，总容量为 5400KVA。

本文采用电容器不等容量分组方式将电容器分为 6 组，每组容量设为 6.5Mvar、5.4 Mvar、3.2 Mvar、2.1 Mvar、1.8 Mvar、1.4 Mvar，本系统对该矿的 A 相电压进行了测试，实验测试结果如图 8 所示。

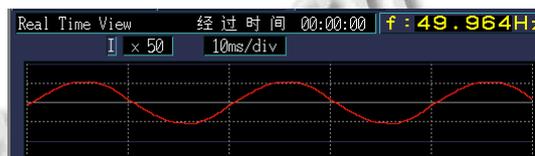


图 8 A 相电压波形

由图中可以看出，该装置补偿的效果较为理想，功率因数提高到 0.95 以上，且避免了对电网冲击的二次污染。因此本装置从实际应用角度来说具有一定的价值。

### 5 结论

针对煤矿电网的实际情况以及传统无功补偿设备的弊端，本文提出基于相控投切技术的无功补偿装置，通过量身定制相控投切技术的控制策略以及解决束缚相控技术深度发展的瓶颈的两大问题，采用模块化思想理念建立系统整体结构图，成功的进行了无功功率

(下转第 195 页)

48, 1, 14, 5, 9}.

(4) 求平均间距  $d_m$

$d_m = (9+70+31+30+19+4+5+12+27+7+5+2+4+3+48+1+14+5+9)/(20-1) \approx 16.05$ .

(5) 生成集合 D

结果为: {9}.

(6) 生成集合 R'

结果为: {417, 408}.

(7) 得到语言特征主成分

结果为: i, e.

## 5 结语

距离法求语言特征主成分的算法已经软件化, 是汉语方言地理信息系统(系潘悟云先生主持的教育部哲学社会科学重大课题攻关项目——汉语方言地理信息系统平台建设的成果)的一个重要的功能软件模块. 他在计算音系特征主成分及词汇义项主成分上得到了语言学研究者的普遍认可.

## 参考文献

1 Dasgupta S, Papadimitriou C, Vazirani U. 算法概论. 北京:

清华大学出版社,2008.

2 陆致极.汉语方言数量研究探索.北京:语文出版社,1992.

3 Hyvarinen A, Karhunen J, Oja E.独立成分分析.北京:电子工业出版社,2007.

4 赖国毅,陈超.SPSS 17.0 中文版常用功能与应用实例精讲.北京:电子工业出版社,2010.

5 马逢时,吴诚鸥,蔡霞.基于 MINITAB 的现代实用统计.北京:中国人民大学出版社,2009.

6 宗成庆.统计自然语言处理.北京:清华大学出版社, 2011. 77-90.

7 林海明,张文霖.主成分分析与因子分析的异同和 SPSS 软件--兼与刘玉玫、卢纹岱等同志商榷.统计研究,2005,(3):65-69.

8 严慧,金忠,杨静宇.最小化相关性的二维主成分分析.模式识别与人工智能,2010,(1).

9 李靖华,郭耀煌.主成分分析用于多指标评价的方法研究——主成分评价.管理工程学报,2002,16(1).

10 郑伟.吴语太湖片果摄的演化模式与历史层次.语言科学, 2009,(4).

11 吴波.江淮官话语音研究[博士学位论文].上海:复旦大学, 2007.

12 钱乃荣.当代吴语研究.上海:上海教育出版社,1992.

(上接第 181 页)

的补偿, 仿真结果也证明了该装置对无功补偿的有效性和可靠性, 通过现场测试结果证明了本文提出的基于相控投切无功补偿装置的应用价值.

## 参考文献

1 朱晓清.基于 DSP 无功补偿控制器的研究.哈尔滨理工大学,2009.

2 丁富华.真空开关的选相控制及其应用研究.大连理工大学, 2006.

3 张庆杰,袁海文.配永磁机构的真空断路器同步分合闸控制系统设计与实现.电力自动化设备,2010.

4 方春恩,王佳颖,邹积岩.并联电容器组同步关合最佳目标相位的确定.电工技术学报,2006,21(1):24-27.

5 王奔,杨明,罗文.高压动态无功补偿智能选相投切控制器.四川省科学城久信科技有限公司,2011,2.

6 丁富华,段雄鹰,邹积岩.基于同步真空断路器的智能无功补偿装置.中国电机工程学报,2005,25(6).

7 方彦.基于永磁机构的智能选相真空断路器的研究和应用.天津大学,2005,6.

8 汪玉凤,刘芳芳,薛建清.MSC 动态无功补偿选相投切控制器的研究.电力电子技术,2011,45.