

基于瞬时无功功率理论的矿山供电无功补偿器的设计

针对矿山供电系统中无功分量数值大、谐波含量高的问题，设计了一种基于瞬时无功功率理论的无功补偿器。该装置采用无功功率控制方案，研究了一种改进的瞬时无功功率检测方法。与传统的功率因数控制方案相比较，该装置的检测电路及算法简单，系统能更加准确、实时地检测出电网谐波及无功电流，并且具有更好的跟踪性能，避免了无功补偿时的轻载振荡。实验结果证明，无论是在轻载还是在满载的情况下，补偿后的功率因数都有了很大的提高。

王化冰 翟卫青/平顶山学院电气信息工程学院



王化冰/副教授

在矿山供电系统中，无功分量数值大、谐波含量高，大量的无功功率将降低系统的功率因数，增大线路电压损失和电能损失，因此必须进行无功补偿^[1]。

快速准确地实现无功参数的检测是进行高效准确无功补偿的前提和基础。传统方法所测得的信号含有较多的谐波成分，这将带来较大的检测误差，从而影响补偿的准确度。通常还要对这些谐波进行滤波，这样会造成时延，从而影响系统的快速性。

瞬时无功功率理论作为一种有效检测谐波和无功电流的方法，在有源滤波和无功补偿领域得到了广泛的应用。本文所研究的基于瞬时无功功率检测的无功补偿器，对提高矿山供电系统的功率因数、供电质量和降低损耗有重要的应用价值^[2]。

2013年度河南省科技重点攻关计划项目
(132102210440)。

基于瞬时无功功率理论的无功电流检测

1. 无功功率作为无功补偿器的投切判据

投切判据是电力系统无功补偿的一个重要决定性因素。传统方法是功率因数作为投切的判据，在系统负载较轻时，常会发生轻载振荡，从而给系统的稳定运行和安全使用带来一定的影响。将无功功率的大小作为无功补偿器投切判断的依据，首先测量得到电网中的参数，然后计算出无功功率的大小，最后再计算出应该投入到电网中的电容器容量^[3]。将无功功率作为判断依据的这种方式，具有响应速度快、系统的无功功率补偿充分以及电容器的使用寿命长等优点。

2. 基于瞬时无功功率理论检测无功功率的基本思路

矿山供电系统中，由于无功分量数值大、谐波含量高，因此传统的无功功率概念在电网电流的波形发生畸变的情况下无法使用。而瞬时无功功率理论研究的是瞬时电量，因此无须测量一个周期的数据即可得到实时的结果^[4]。由于瞬时无功功率理论是基于坐标变换实现的，因此其检测无功功率的基本思路可以用图1中 $\alpha-\beta$ 坐标系的电压、电流矢量来说明。

1) 将三相电路的电压 u_a 、 u_b 和 u_c 以及三相电流 i_a 、 i_b 和 i_c 经过坐标变换，变换在 $\alpha-\beta$ 平面中，得到 u_α 、 u_β 、 i_α 和 i_β 。该变换的过程如下

关键词/Keywords

瞬时无功功率理论 ·
无功功率控制 ·
无功补偿 ·
投切判据 ·
锁相环 ·
坐标变换 ·

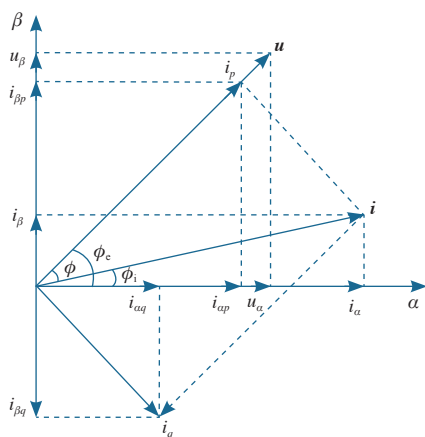


图1 α-β坐标系中电压、电流矢量

$$\begin{pmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{pmatrix} = C_{32} \begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = C_{32} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \quad (3)$$

经过式(1)~式(3)的变换后,利用矢量合成原理,将矢量 u_α 、 u_β 、 i_α 和 i_β 分别合成为旋转矢量 u 和 i ^[5]。

2) 将合成得到的矢量电流 i 和矢量电压 u 在其法线上面的投影分别定义成有功电流 i_p 和无功电流 i_q 。则

$$i_p = i \cos \varphi \quad (4)$$

$$i_q = i \sin \varphi \quad (5)$$

由式(4)、式(5)可以得到如下的结果:电压矢量 u 的模与有功电流 i_p 的乘积为三相电路瞬时有功功率 p ;电压矢量 u 的模与无功电流 i_q 的乘积为三相电路瞬时无功功率 q 。

3) α 、 β 相的瞬时有功电流和瞬时无功电流为 i_{ap} 、 i_{aq} 、 $i_{\beta p}$ 和 $i_{\beta q}$,它们分别是有功电流 i_p 和无功电流 i_q 在 α - β 轴上的投影。根据式(6)可以计算出两相坐标系下的有功电流和无功电流,即

$$\begin{pmatrix} i_p \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} \quad (6)$$

4) 瞬时有功电流 i_{ap} 、 i_{bp} 和 i_{cp} 以及对应的瞬时无功电流 i_{aq} 、 i_{bq} 和 i_{cq} 可通过对 i_{ap} 、 i_{aq} 、 $i_{\beta p}$ 和 $i_{\beta q}$ 进行反变换,即将其重新变换到a、b和c三相坐标系中求出。反变换的过程如下

$$\begin{pmatrix} i_{ap} \\ i_{bp} \\ i_{cp} \end{pmatrix} = C_{23} \begin{pmatrix} i_{ap} \\ i_{\beta p} \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} i_{aq} \\ i_{bq} \\ i_{cq} \end{pmatrix} = C_{23} \begin{pmatrix} i_{aq} \\ i_{\beta q} \end{pmatrix} \quad (8)$$

式中,矩阵 $C_{23} = C_{32}^T$ 。

由于仅需要检测无功功率,因此可以利用式

(9) 计算得出

$$\begin{pmatrix} i_{aq} \\ i_{\beta q} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ i_q \end{pmatrix} \quad (9)$$

5) 计算三相无功电流,即

$$\begin{pmatrix} i_{aq} \\ i_{bq} \\ i_{cq} \end{pmatrix} = C_{23} \begin{pmatrix} i_{aq} \\ i_{\beta q} \end{pmatrix} \quad (10)$$

由式(10)中的三相瞬时无功电流可求出电网中的瞬时无功功率。然后根据计算出的无功功率,结合投切控制方法,对电网投切电容进行运算和判断^[6]。

3. 改进的无功电流检测的实现

根据上述瞬时无功功率理论检测无功功率的思路,可得出无功电流检测实现的原理框图,如图2所示。

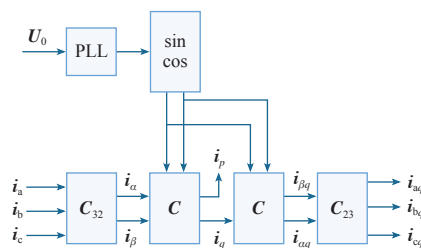


图2 α-β瞬时无功功率检测框图

依据瞬时无功功率理论,通过对上述框图进行编程运算可以获得瞬时无功电流,从而为无功功率的补偿提供依据。PLL为锁相环,用于产生同步的正弦和余弦信号^[7]。其中的矩阵 C 为

$$C = \begin{pmatrix} \sin \omega t & -\cos \omega t \\ -\cos \omega t & -\sin \omega t \end{pmatrix} \quad (11)$$

系统方案的设计

1. 系统总体框图

图3为系统总体框图。其主要由检测单元、控制单元和执行单元等部分组成。

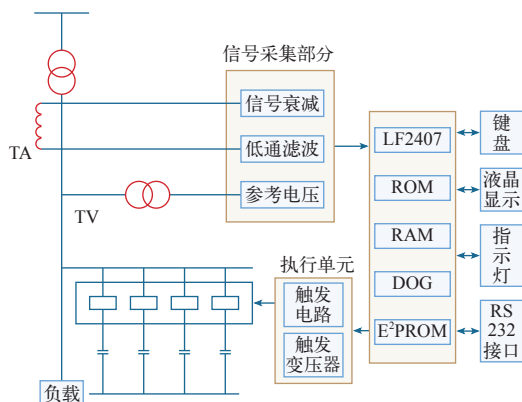


图3 系统总体框图

系统在运行过程中，检测单元对检测到的三相电压和三相电流进行处理，并传送给控制单元；控制单元主要由可编程序微处理器加上外围电路构成，控制单元依据前面方法对接收到的信号进行运算和处理，从而得到当前电网实时的无功功率，然后根据投切判据发出控制信号；执行单元接收到控制信号后，由触发电路控制晶闸管，进而控制电容器的投入或切除。由于是配电网无功补偿系统，补偿电容器组的容量可以根据之前测算的数据来进行分组确定^[8-10]。

系统根据需要可显示功率因数、系统电压、负载电流和无功功率等值。并可实时在线设置过电压值、欠电压值、延时值、投入门限和切除门限等参数。

2. 系统的硬件设计

为了实现系统应具有的功能，研究并设计了较为完整的控制电路及其外围设备的硬件电路。主要有以下几个方面的设计：

1) 控制器的选择。考虑到无功测量的准确性和实时性，本系统采用TI公司的TMS320LF2407作为主控制器。其具有数字滤波和傅里叶变换等运

算能力，同时又具有低成本、低功耗和高性能的处理能力。

2) 模拟信号输入处理单元的设计。此模块包括电压电流信号形成回路、低通滤波回路（ALF）、基准电压（VBASE）形成回路、同步方波形成回路和模数转换器。

3) LF2407DSP系统单元的设计。该模块包括LF2407DSP电路、存储器（SRAM）电路、电源保护电路、上电复位电路和串行实时时钟电路。

4) 执行单元的设计。主要有晶闸管触发电路和驱动电路的设计。

5) 显示及通信电路设计。本系统采用液晶显示测量结果，并由键盘输入命令，液晶显示和键盘都是由F2407的通用I/O口扩展。图4为通信接口电路。

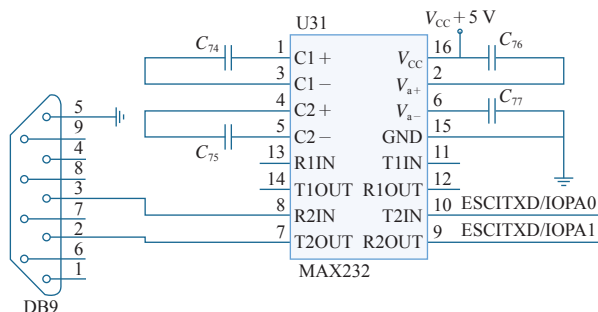


图4 RS 232通信接口电路

3. 系统的软件设计

系统的软件设计采用模块化思想，首先将每一个功能子模块按照一个统一的接口标准设计成一个子程序或者是子函数，然后在运行时调用每一个子程序。系统的软件程序主要包括初始化、无功功率检测、参数计算、显示和控制输出等子程序。主程序流程如图5所示。

4. 系统的可靠性、抗干扰性设计

为了克服DSP这种高频器件与工频电网信号之间的干扰，主要采取了以下的硬件和软件抗干扰措施：①在硬件方面，系统采用模拟信号与数字信号分别布线的方法，以减小模拟信号与数字信号的干扰，设置“看门狗”电路来进行硬件复位，对输入信号进行模拟滤波，避免产生“频率混叠”现象；②在软件方面，系统采用程序自检

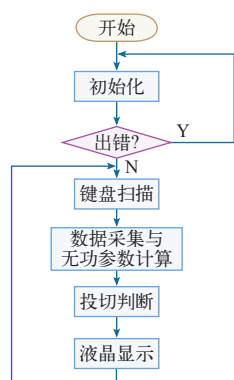


图5 主程序流程

措施,使用软件陷阱等。

实验结果

该系统对一台 $P_N=37\text{ kW}$, $U_N=380\text{ V}$, $I_N=72\text{ A}$, $\lambda=0.86$, $\eta=90.8\%$, 型号为Y250M-6的电动机进行无功补偿实验。在电动机轻载运行时,补偿前:电流 $I=33.35\text{ A}$,功率因数 $\lambda=0.56$;补偿后:电流 $I=18.16\text{ A}$,功率因数 $\lambda=0.96$ 。在电动机满载运行时,补偿前:电流 $I=73.12\text{ A}$,功率因数 $\lambda=0.86$;补偿后:电流 $I=70.04\text{ A}$,功率因数 $\lambda=0.99$ 。通过比较可得,无论电动机轻载运行还是满载运行,在进行无功自动补偿后,功率因数比补偿前都有了很大的提高。

结束语

针对矿山供电系统中无功分量数值大、谐波含量高的特点,本文设计了一种基于瞬时无功功率理论的矿山供电无功补偿器。该无功补偿器采用将无功功率作为无功补偿投切的判断依据,并采用一种改进的实时无功电流检测方法。该无功补偿器能够快速准确地测量并动态控制,能够解决传统无功测量中的延时和轻载振荡问题,真正意义上实现了无功功率的实时准确测量和补偿,

可以显著改善电网的功率因数,提升电压质量,达到最优的补偿效果。

参考文献

- [1] 翁海霞,赵建国,孙树敏.瞬时无功理论在快速动态无功补偿装置中的应用[J].电力自动化设备,2012,32(1):116-118.
- [2] 王继东,刘琨,高彦静.基于瞬时无功功率理论的电压波动检测和闪变计算[J].电力系统保护与控制,2012,40(2):145-148.
- [3] 陈国民,郭殿林,高明全.基于无功功率理论的有源电力滤波器仿真研究[J].煤矿机械,2011,32(3):89-91.
- [4] 李占友,潘蕾.基于瞬时无功功率理论的电网谐波电流检测方法仿真研究[J].电气传动,2008,27(7):83-86.
- [5] 王子绩,孟鑫,张彦兵,等.基于瞬时无功功率理论的新型谐波检测法[J].电测与仪表,2012(10):9-12.
- [6] 公茂法,张旭,朱义凯.一种改进型 i_p-i_q 谐波检测法[J].工矿自动化,2013,39(1):70-73.
- [7] 刘翔,张爱玲.一种基于TMS320F2812的软件锁相环实现方法[J].电力电子技术,2010,44(8):60-61.
- [8] 马建广,徐贤,万秋兰.无功补偿电容器分组方案的探讨[J].电力自动化设备,2004,24(6):91-92.
- [9] 白利军,王振翀,庄园,等.煤层气开采用游梁式抽水机静止无功发生器设计[J].煤炭科学技术,2014,42(11):77-80.
- [10] 孙玉文,赵辉程.智能无功装置的研究[J].科学技术与工程,2007,7(24):6322-6327.

(收稿日期:2015-02-05) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告