

# 基于 DSP的新型低频减载装置的研究

裴健, 栾兆文

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 开发了一种以 TMS320C32 DSP为核心设计的新型低频减载装置,介绍了该装置的工作原理、硬件结构及软件设计。该装置能根据系统频率下降速率自动加速切负荷,缩短动作延时,有利于系统安全稳定运行。硬件系统结构简单,性能可靠;软件系统功能强大,充分考虑现场实际,人机界面友好。

关键词: DSP; 频率; 频率变化率; 低频减载

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)09-0066-04

## 0 引言

频率是衡量电能质量的重要参数之一,对用户来说,频率在额定值下运行是最有利的。系统低频运行对大多数用户及电力系统自身的运行都有很多危害,频率过低或频率崩溃往往又是造成大范围停电事故的主要原因之一。国内外电网多年运行经验表明:在电网内装设自动低频减载装置是防止系统崩溃、避免长时间大面积停电和最重要用户灾害性停电而采取的一项基本且有效的反事故技术措施。

在大型电力系统中,系统接线复杂,难以事先预见各种事故的发展变化。在这种情况下,采用轮数不多的减负荷措施,往往很难奏效。增加动作轮数和缩小各轮之间的级差成为电力系统运行部门的现实要求,这必将使常规的低频减负荷装置趋于复杂,在精度上也由于无法满足现场要求而难以实现。

高性能数字信号处理器(DSP)具有全新的哈佛总线结构、专门的硬件乘法器以及广泛采用流水线操作等特点,为研发高精度、误差小的数字式低频减载装置提供了可能。本文针对电力系统频率异常特性,采用 TI公司的 TMS320C32实现该装置,并已研制出样机。

## 1 新型低频减载装置的工作原理

### 1.1 频率和频率变化率的软件测量

本装置通过软件测频,方法如下:

设电压信号为:

$$u(t) = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

采样后的电压信号为:

$$u(n) = \sqrt{2}U \sin(\omega \cdot nT_s + \varphi) \quad (2)$$

其中:  $T_s$ 为采样周期,  $u(n)$ 为电压信号第  $n$ 点的采

样值。另设:

$$Y_n = u^2(n-1) - u(n) \cdot u(n-2) \quad (3)$$

将式(2)代入式(3),可得

$$Y_n = 2U^2 \sin^2(\omega T_s) \quad (4)$$

对式(4)取两种不同的采样周期  $T_{s1}$ 、 $T_{s2}$ ,即采样频率不同,则有

$$Y_{n1} = 2U^2 \sin^2(\omega T_{s1}) \quad (5)$$

$$Y_{n2} = 2U^2 \sin^2(\omega T_{s2}) \quad (6)$$

设  $\omega = 2\pi f_e(1+m)$ ,  $T_{s1} = 1/(N_1 f_e)$ ,  $T_{s2} = 1/(N_2 f_e)$ ,式中  $m$ 为系统频率对额定基频 50 Hz的偏移量,  $N_1$ 、 $N_2$ 分别是一个工频周期内对应于采样周期  $T_{s1}$ 、 $T_{s2}$ 的采样点数。

从式(5)、(6)我们可得

$$\frac{Y_{n1}}{Y_{n2}} = \frac{\sin^2[2\pi(1+m)/N_1]}{\sin^2[2\pi(1+m)/N_2]} \quad (7)$$

取  $N_2 = 2N_1$ ,则有

$$\frac{Y_{n1}}{Y_{n2}} = 4 - 4\sin^2[\pi(1+m)/N_1] \quad (8)$$

由式(8)推得

$$\sin^2[\pi(1+m)/N_1] = \frac{4Y_{n2} - Y_{n1}}{4Y_{n2}} \quad (9)$$

将  $\sin^2[\pi(1+m)/N_1]$ 按泰勒级数展开,且略去高阶无穷小量,则

$$\sin^2[\pi(1+m)/N_1] \approx \sin^2(\pi/N_1) + \sin(2\pi/N_1) \cdot (\pi/N_1) \cdot m \quad (10)$$

将式(10)代入式(9),则有

$$m = \frac{4\cos^2(\pi/N_1) \cdot Y_{n2} - Y_{n1}}{(4\pi/N_1) \cdot \sin(2\pi/N_1) \cdot Y_{n2}} \quad (11)$$

本装置中,每个工频周期采样 64个点,在一周内取相差两个样点间隔的 32个采样点就可组成另一组采样数据,即有  $N_1 = 32$ ,  $N_2 = 64$ 。

将  $N_1$ 、 $N_2$ 的数值代入式(11),即有

$$m = \frac{\sqrt{3}(3Y_{n2} - Y_{n1})}{Y_{n2}} = \frac{(3Y_{n2} - Y_{n1})}{Y_{n2}} \times 0.55132889 \quad (12)$$

电力系统的实际频率

$$f = f_e (1 + m) = 50 (1 + m) \quad (13)$$

电力系统的频率变化率

$$\frac{df}{dt} = \frac{f - f_{(t-0.02)}}{0.02} \quad (14)$$

综上所述,使用该软件测频方法时,首先将电压采样值代入式(3)中分别计算出一个工频周期采样32个点和采样64个点的  $Y_{n1}$ 、 $Y_{n2}$  值。其次,利用式(12)算出频率偏移量  $m$ ,再由式(13)即可求出电力系统的实际频率值,最后由式(14)求出频率变化率  $df/dt$ 。

由于以上分析只是对纯正弦情况而言,当有高次谐波时可以对采集的数字量进行数字滤波(如全周傅氏滤波),然后再利用上述方法进行频率的测量。

### 1.2 频率下降事故的辨别方法

本装置采用“基本轮+紧急轮+特殊轮”的低频减载模式。基本轮动作轮级、各轮动作频率特别是首轮动作频率,按常见的功率缺额方式确定。紧急轮定义为按照  $df/dt$  大小加速切负荷构成的轮次。在基本轮第一轮启动时加速切基本轮第二轮的定义为紧急第一轮,基本轮第一轮启动时加速切基本轮第二、第三轮的定义为紧急第二轮,依次类推。特殊轮的动作频率应不低于基本轮第一轮的起动频率,并采取一定的延时,待系统频率比较稳定时动作,使频率恢复到允许的限值以上。

#### 1) 频率缓慢下降时的判别式

- $f < f_{qd}$ 、 $t > t_{qd}$  低频启动
- $f < f_{dz1}$ 、 $t > t_{dz1}$  基本轮第一轮动作
- $f < f_{dz2}$ 、 $t > t_{dz2}$  基本轮第二轮动作
- $f < f_{dz3}$ 、 $t > t_{dz3}$  基本轮第三轮动作
- $f < f_{dz4}$ 、 $t > t_{dz4}$  基本轮第四轮动作

#### 2) 有功缺额大、频率下降较快时的判别式

- $f < f_{qd}$ 、 $t > t_{qd}$  低频启动
- $f < f_{dz1}$ 、 $t > t_{dz1}$  基本轮第一轮动作
- $df/dt < (df/dt)_{dz1}$  基本轮第一轮动作
- $(df/dt)_{dz1} < df/dt < (df/dt)_{dz2}$  紧急第一轮动作(切基本轮第一轮,同时加速切第二轮)
- $(df/dt)_{dz2} < df/dt < (df/dt)_{dz3}$  紧急第二轮动作(切基本轮第一轮,同时加速切第二、三轮)

#### 3) 恢复频率过低、频率悬停时的判别式

- $f < f_{qd}$ 、 $t > t_{qd}$  低频启动
- $f < f_{ts}$ 、 $t > t_{ts}$  特殊轮动作

其中,  $f_{qd}$ 、 $t_{qd}$  为该装置的低频启动定值和延时定值,  $f_{dzi}$ 、 $t_{dzi}$  为基本轮第  $i$  轮的动作定值和延时定值,  $(df/dt)_{dz1}$ 、 $(df/dt)_{dz2}$  为紧急第一轮和紧急第二轮的动作定值,  $(df/dt)_{dz3}$  为滑差闭锁定值。

### 1.3 防止装置误动作的闭锁措施

1) 低电压闭锁 可以防止母线附近发生短路故障时或输入信号为零时出现的误动作。其判别式为:

$$U < k_1 U_N, k_1 = 0.1 \sim 0.6$$

不进行低频判断,闭锁出口。

2) 低电流闭锁 主要是为了防止负荷反馈引起的误动作。其判别式为:

$$I < I_{th \cdot min} / k_2, k_2 = 1.2 \sim 1.3$$

$I_{th \cdot min}$  为该装置投入时的最小负荷电流。

不进行低频判断,闭锁出口。

3) 频率滑差闭锁 当电力系统容量不大,系统中有很大冲击性负荷时,系统频率将瞬时下降,可能引起低频减载装置误动作,错误地断开负荷。频率滑差闭锁可以有效地防止装置误动作。其判别式为:

$$df/dt > (df/dt)_{dz3}$$

不进行低频判断,闭锁出口。

## 2 低频减载装置的硬件结构

该装置由采样计算功能模块和管理功能模块两部分组成,如图1所示。

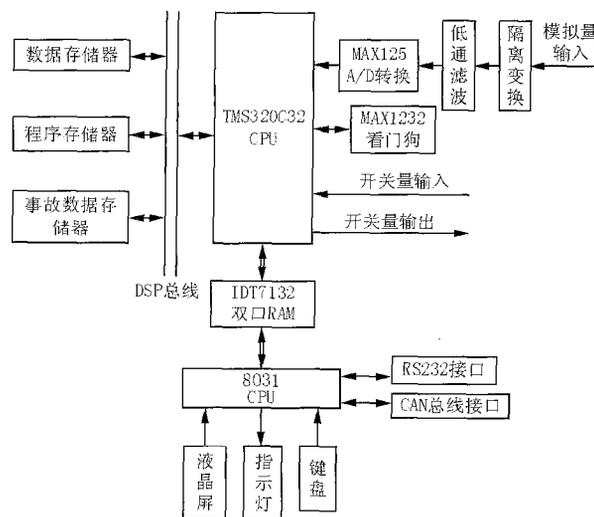


图1 低频减载装置的硬件结构图

Fig 1 Hardware structure of UFLS

## 2.1 采样计算功能模块

1) 采样单元 由三部分组成:模拟量输入变换部分、模拟低通滤波部分、A/D变换部分。模拟量交流电压信号经过 PT变换为二次信号。低通滤波单元由一个一阶有源低通滤波器和 RC低通滤波电路组成。它可有效地滤掉二次信号中的高次谐波,并能很好地和负载隔离。A/D转换器使用 MAX125。MAX125是一片高速度、复用输入通道的 14位 A/D转换器。

2) CPU单元 采样计算 CPU是本装置的核心,主要完成模拟量的采集、算法、低频事故判别、故障判断、数据记录。CPU采用数字信号处理器 TMS320C32,该产品是一种非常通用的 32位浮点处理器,能工作于 30 MIPS/60 MFLOPS,占用的电路板面积小,性价比高,而且以浮点处理,算法编程也比较容易。这些特点使它很适用于高分辨率、高采集率以及高速计算的场合。

3) 开关量输入输出单元 开关量输入由开关量的辅助接点取得,经过光电隔离和驱动后,送入 DSP。可输入 4路开关量,分辨率小于 1ms。输出开关量信号经过锁存、光电隔离后,控制继电器。用继电器控制断路器、信号等。

## 2.2 管理功能模块

管理 CPU采用 8031单片机,设有 RS232串行接口和 CAN总线接口。硬件时钟采用 DS12887芯片。液晶屏为 128 ×64点显示器。该模块通过 DT7132双口 RAM和采样计算 CPU通信。管理功能模块完成装置的定值整定,数据上传,液晶显示。装置运行时,管理功能模块通过循环查询采集计算功能模块将实时采集的数据通过液晶屏显示,并将状态数据上传至后台机。管理功能模块可以通过 CAN总线接口组网,还可通过 RS232接口连接后台机。

## 3 低频减载装置的软件设计

该装置软件由主程序、采样中断程序和计算判断中断程序构成。流程图如图 2所示。

1) 主程序 主程序先对中断、定时器、各种变量进行初始化。然后调用一个子程序,先判断管理单元 8031有没有请求。如没有,跳出子程序;如有,判断命令字,看需要什么数据,根据通信规约,向双口 RAM写入信息。管理单元 8031到双口 RAM中取数据。循环执行该子程序。

2) 采样中断程序 采样中断程序使用 DSP 0号定时器,通过设置相应的寄存器,使装置达到每隔一

定的延时进行一次采样,达到每周期采样 64点的要求。

3) 计算判断中断程序 该程序采用软件 DMA中断,即对采样计数,采样数达到定值发生中断。利用前述测频方法计算频率及频率变化率。根据计算结果,结合低频事故判据判断事故类型,动作于切负荷或发信号。

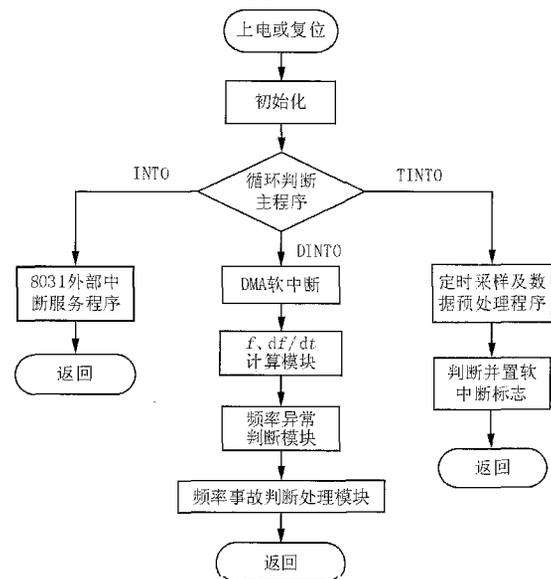


图 2 低频减载装置的程序设计流程图

Fig 2 Flow chart of UHLS program design

## 4 装置特点

1) 引入紧急轮概念,使低频减载形成“基本轮+紧急轮+特殊轮”的新模式,以达到防止系统频率严重下降的目的。

2) 多层硬件结构体系设计。先进的数字信号处理器(DSP)及多CPU并行处理技术,保证系统具有强大的数据处理能力、灵活的功能可扩充性及可配置能力。

3) 14位高精度 A/D、模拟通道高速同步控制采样技术、模拟量通道的自动校正技术等保证系统数据采集、处理的精度和准确性。

4) 既可通过 RS232串口进行数据外传,又可通过 CAN总线组网,联网后可实现对多台装置运行状态的集中监测。

5) 配有液晶屏显示,采用菜单式工作方式。具有丰富直观的数据分析处理能力,键盘操作简单、方便。

6) 自检及自恢复功能。具备软件和硬件

WATCH - DOG,受到干扰时,都能使系统复位,避免死机。

## 5 低频减载装置的检测

该装置在进行动模试验时,接入 8路负荷量,使每个出口控制的负荷减少。这样,使所切除的负荷与实际功率缺额更加接近。

经试验表明:该装置不拒动,不误动,测量准确,动作可靠。动态试验时,将输入信号的频率按一定速率下降,装置按整定值正确切除负荷,数据显示准确。进行相应的电磁干扰等试验,装置不误动,运行正常。进行绝缘、热性能、湿热、震动等各种试验,结果符合国家相关标准。

## 6 结论

本文介绍了基于高性能数字信号处理器 TMS320C32的新型低频减载装置。DSP器件的高速处理能力与可靠性,使得它很适用于高分辨率、高采集率以及高速计算的场合。该装置能准确快速地测量频率及其变化率,判断出系统内功率缺额的大小,因而能实现事故时快速切负荷,并且使切除的负荷量与功率缺额值接近,能很快抑制系统频率的下降,确保电网的安全及对重要用户的供电质量,对电力系统的安全稳定运行发挥重要作用。

## 参考文献:

[1] 杨冠城. 电力系统自动装置原理 [M]. 北京:中国电力

出版社, 1995.

YANG Guan-cheng Electric Power System Automechanism Theory [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.

[2] 罗士萍. 微机保护实现原理及装置 [M]. 北京:中国电力出版社, 2001.

LUO Shi-ping Microcomputer Protection Implementation Theory and Device [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.

[3] TI Company. TMS320C3X User's Guide [EB/OL]. <http://www.ti.com>.

[4] Shih L J, Lee W J, Gu J C, et al Application of df/dt in Power System Protection and Its Implementation in Microcontroller Based Intelligent Load Shedding Relay [A]. Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference 1991. 11-17.

[5] 秦明亮,杨秀朝. 减少低频减载过切的措施研究 [J]. 电网技术, 2002, 26(3): 83-86

Q N Ming-liang, YANG Xiu-chao Measures to Reduce Over-shedding Caused by Under-frequency Load Shedding Project [J]. Power System Technology, 2002, 26(3): 83-86

收稿日期: 2004-08-04

作者简介:

裴健 (1978 - ),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统新型低频减载方案设计; E-mail: pjian@163.com

栾兆文 (1960 - ),男,教授,从事电力系统运行与控制方面的研究工作。

## Study of the new UFLS device based on DSP

PEI Jian, LUAN Zhao-wen

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** A new under-frequency load shedding (UFLS) device based on TMS320C32 DSP is developed. The operation principle, hardware structure and software design are introduced. In order to reduce the time-delay of load-shedding, the device can shed load quickly according to the frequency decaying rate, which is good to the stable and secure operation of power system. The hardware system is simple and reliable. The software system has a powerful function and good man-machine interface.

**Key words:** DSP; frequency; frequency decaying rate; under frequency load shedding (UFLS)

(上接第 30页 continued from page 30)

**Abstract:** To ensure the accuracy of power system modeling and reliability of stabilization analysis, it is essential to test the parameters of generator excitation system. An improved genetic algorithm is applied to the parameters identification of the nonlinear generator excitation system. Combining the global optimal search of GA with the local optimal search of BP network based on Gradient method, the parameters evaluation of excitation system can be identified quickly and accurately. The effectiveness of the proposed approach is demonstrated via experiments by applying it to a generator excitation system. The improved GA has the advantages of fast computation, high precision and better robustness, and has provided a new way for parameters identification of nonlinear generator excitation system.

**Key words:** generator excitation system; nonlinear parameters identification; genetic algorithm; Gradient method