

# 直流系统绝缘监测装置的设计和应用

崔实<sup>1</sup>, 聂宏展<sup>1</sup>, 祁德银<sup>2</sup>, 吴满<sup>2</sup>

(1. 东北电力学院电力工程系, 吉林 吉林 132012; 2. 吉林云峰发电厂, 吉林 集安 134200)

摘要: 利用磁调制原理构成直流电流传感器, 并由此设计了直流绝缘在线检测装置。本装置与直流系统完全独立, 不影响直流系统正常工作且直流电流传感器结构简单、分辨率高。由于采用固定偏差设计, 实时检测偏差基准, 提高了装置的抗干扰能力。该装置适用于发电厂与变电站直流系统绝缘的在线检测。

关键词: 磁调制; 直流系统; 固定偏差

中图分类号: TM774 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2002)12-0034-04

## 1 引言

发电厂变电站的直流系统是控制和信号系统、继电保护及自动装置的工作电源。直流系统是否稳定运行直接影响整个电力系统安全运行。以前, 发电厂、变电站要靠人工短时切换直流支路电源逐条线路查找支路接地故障, 不仅费时费力而且极易造成继电保护及其自动装置误动作。基于这种情况, 研究检测直流系统绝缘很有必要。主要的检测原理有<sup>[1-3]</sup>: 电桥平衡原理, 双频探测原理。前者虽被广泛应用, 但该方法不能检测直流正、负母线绝缘同等下降的情况, 即使直流系统绝缘检测装置发出警报, 也无法指示哪条支路有故障。后者是一种较新的直流系统绝缘检测方法, 它虽能检测接地支路绝缘电阻大小, 但当直流系统分布电容过大时, 会影响检测的分辨率, 同时低频注入直流系统, 使其系统电压纹波加大, 有影响直流系统供电质量之嫌。本文利用磁调制原理设计了直流系统在线检测装置。本装置直流传感器结构简单与直流系统完全独立, 不向系统注入任何信号, 不影响直流系统正常工作。由于采用了固定偏差设计, 提高了分辨率和抗干扰能力。

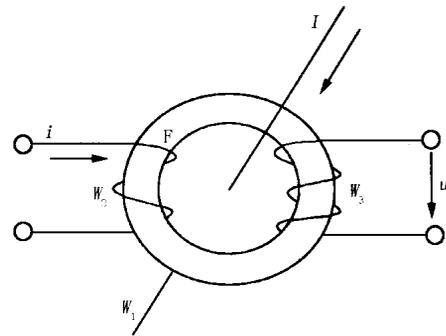
## 2 恒流源激磁下的磁调制器原理

### 2.1 磁调制器

磁调制方式直流传感器的结构如图1所示。

铁芯为钕镨合金, 圆形铁芯导磁系数很高。在交流对称电流源激磁的铁芯中, 加直流偏置磁场, 铁芯交变磁通的对称性被破坏, 磁通正负半波相位也发生变化。相位量的大小和方向可以反映直流偏置电流的大小和方向, 这就是磁调器相位差式基本工作原理。在实际应用中检测绕组  $W_3$  的感应电动势尽量高一些有利抗干扰, 提高检测绕组电动势的方

法是增加  $W_3$  绕组匝数, 增加铁芯截面积, 减少环形铁芯平均长度, 增强铁芯磁导率和交流激磁电流的幅值, 来提高直流传感器的精度。



$W_1$  为直流信号绕组;  $W_2$  为交流激磁绕组;  $W_3$  为检测绕组;  $l$  为环形铁芯的平均长度;  $i$  为激磁电流;  $I$  为直流系统支路电流;  $F$  为高磁导率的环形铁芯。

图1 磁调制器结构示意图

Fig. 1 The structural drawing of magnetic modulator

### 2.2 理想情况

在理想情况下, 设铁芯材料是均匀的, 环形铁芯尺寸内径与外径之比近似等于1, 其铁芯截面积与环形尺寸相比很小, 铁芯磁化均匀, 磁滞损耗为零。在  $W_2$  绕组通以三角波恒定交流  $i$  进行激磁,  $iW_2$  可使其充分饱和, 则铁芯磁化曲线是经过坐标原点、而且对称的三段折线, 如图2(a)所示。理想情况下, 当直流电流  $I=0$  时, 磁场强度为0, 即  $H_0 = IW_1/l = 0$ , 此时,  $W_3$  绕组产生激磁电流频率相同的正、负脉冲序列, 如图2(b)所示。

设  $S = t_u/t_d$ , 由图2可见, 当  $S$  发生变化时,  $t_5 = t_6$  等式关系不变, 只要  $I=0$ , 则  $t_2 = t_4$  等式关系也不变, 仅  $t_1 = t_3$  发生变化, 即  $S$  发生变化, 正、负脉冲宽度发生变化。设  $I=0$  时,  $t = t_1 + t_2 - t_3 - t_4$

$= t_0$ , 即  $S$  一定时,  $t_1$  与  $t_3$  不变,  $I$  发生变化只影响  $t_2$  与  $t_4$  的值,  $I = 0$  时  $t = t_0$ , 调节  $S$  的大小可以调节  $I = 0$  时的  $t_0$  值, 称  $t_0$  为基准值。下面分两种情况分析。

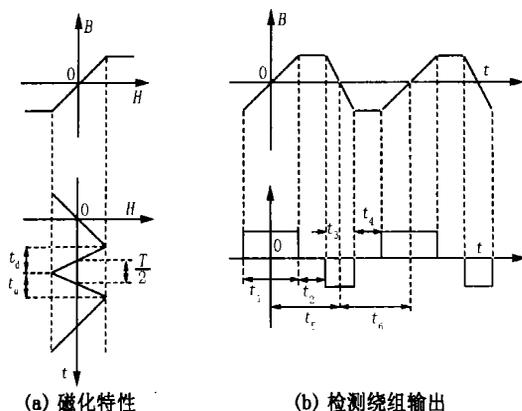


图2 理想情况下铁芯磁化特性及其检测绕组输出  
Fig.2 In the ideal state, iron core magnetizing characteristic and detecting winding output

(1)  $I$  从零减少到  $-I$  时:

$$t_2 = t_2, \text{ 且 } t_2 < t_2 (I = 0)$$

$$t_4 = t_4, \text{ 且 } t_4 > t_4 (I = 0)$$

$$t = t_1 + t_2 - t_3 - t_4, \text{ 且 } t < t_0$$

(2)  $I$  从零增加到  $+I$  时:

$$t_2 = t_2, \text{ 且 } t_2 > t_2 (I = 0)$$

$$t_4 = t_4, \text{ 且 } t_4 > t_4 (I = 0)$$

$$t = t_1 + t_2 - t_3 - t_4, \text{ 且 } t > t_0$$

令  $t = |t - t_0|$ , 且由磁调制式直流电流传感器的原理可得:  $t = IW_1 / I_m \cdot T$  (其中  $I_m$  与  $T$  分别为激磁锯齿波电流的峰值和周期)。由以上分析可见磁调制式直流电流传感器通过检测  $t$  的大小, 可以检测直流信号绕组中  $I$  的大小和方向。

### 2.3 实际情况

在试验中由于磁滞现象的存在, 当在  $W_3$  绕组中通以恒定三角波交流激磁电流  $i$ , 且  $iW_2$  足以使铁芯饱和时, 则实际波形如图3所示。

设: 检测绕组电压  $u$  的正峰值点到负峰值点的时间为  $t_1$ , 负峰值点到下一正峰值点的时间为  $t_2$ , 则  $I = 0 (H_0 = 0)$  时有:  $t = t_2 - t_1 = t_0$ ,  $S > 1$  时  $t_2 > t_1$ ,  $t_0 > 0$ ; 当激磁绕组三角波电流频率恒定且  $S$  不变时  $t_0$  则为定值。当  $S$  发生变化时,  $t_0$  随之改变。所以调节  $S$  可调节  $I = 0$  时  $t_0$  的大小, 称  $t_0$  为基准值。 $S$  一定  $I = 0$  时,  $t = t_0$  同样分如下两种情况:

(1)  $I$  从零减少到  $-I$  时:

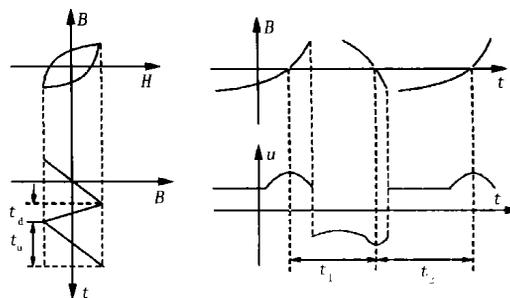


图3 实际铁芯磁化特性及其检测绕组输出  
Fig.3 In the actual state, iron core magnetizing characteristic and detecting winding output

$$t_1 = t_1, \text{ 且 } t_1 < t_1 (I = 0)$$

$$t_4 = t_4, \text{ 且 } t_4 > t_4 (I = 0)$$

(2)  $I$  从零增加到  $+I$  时:

$$t_2 = t_2, \text{ 且 } t_2 > t_2 (I = 0)$$

$$t_4 = t_4, \text{ 且 } t_4 > t_4 (I = 0)$$

同理令  $t = |t - t_0|$ , 由于  $t = T \cdot IW_1 / I_m$ , 所以在  $W_1$ 、 $W_2$ 、 $I_m$  及  $T$  均为定值时, 有  $t \propto |I|$ , 只要检测  $t$  即测量检测绕组电压的峰值位移, 即可得到直流信号绕组中电流的大小。本装置中的交流激磁电源频率  $f = 9 \text{ Hz}$ , 激磁电流幅值  $I_m = 2.6 \text{ mA}$ ,  $T = 111 \text{ ms}$  时, 则  $t = T \cdot IW_1 / I_m = 111 \times 1 \times I / 2.6 = 42 I (\mu\text{s}/\text{mA})$ 。

当  $I = 5 \text{ mA}$ ,  $t = 210 \mu\text{s}$ , 电流每变化  $0.1 \text{ mA}$  时,  $t$  变化  $4.2 \mu\text{s}$ 。AT89C51 单片机时钟频率  $f = 24 \text{ MHz}$ , 可以有效检测出  $0.5 \mu\text{s}$  的时间变化<sup>[4]</sup>, 所以有足够的检测灵敏度, 可满足测量系统的要求。

### 3 硬件设计

本文采用磁调制式直流传感器作为检测单元, 用 AT89C51 单片机构成中央控制单元。具体原理如图4所示。

其中  $A_1$ 、 $A_2$  为磁调制式传感器,  $R$  为平衡电阻, 提供单极接地故障的漏电流回路。激磁源电路首先产生频率为  $9 \text{ Hz}$ 、幅值为  $5 \text{ V}$  的三角波电压, 并将三角波电压源转换为电流源, 作为磁调制式直流传感器的交流激磁电源。装置的输入级采用多路模拟开关<sup>[4]</sup>, 以实现多路巡检。输入滤波电路分为两级, 第一级滤波器兼有抑制检测绕组  $W_3$  电流过大的作用,  $W_3$  绕组的电流过大, 降低其灵敏度, 不利于检测。第二级滤波器滤掉  $50 \text{ Hz}$  的工频干扰, 以保证  $9 \text{ Hz}$  的检测电压信号不衰减。

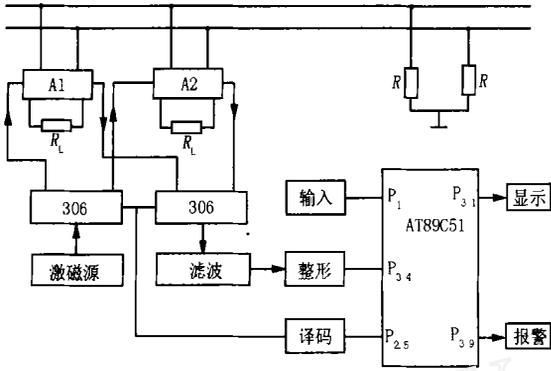


图4 磁调制式直流系统绝缘检测装置原理图

Fig. 4 Elementary diagram of magnetic modulation direct current system insulation detecting apparatus

整形电路包括一个精密整流电路,两个反相器,一个延迟电路及一个过零比较器。由于高速电压比较器(如LM311)使用在高频低内阻的输入信号比较时,输出响应是正常、稳定的。而当输入信号为三角波或低频正弦波以及信号源内阻较高时,则高速电压比较器将在靠近输出电平转换点附近突发谐振。经反复实验此种突发谐振的产生概率还是比较高的,适当引入正反馈可避免突发谐振。本文设计了避免突发振荡电路。如图5所示。通过调整电阻 $R_1$ 、 $R_2$ 或 $R_3$ 来调整正反馈量的大小,以避免突发谐振。

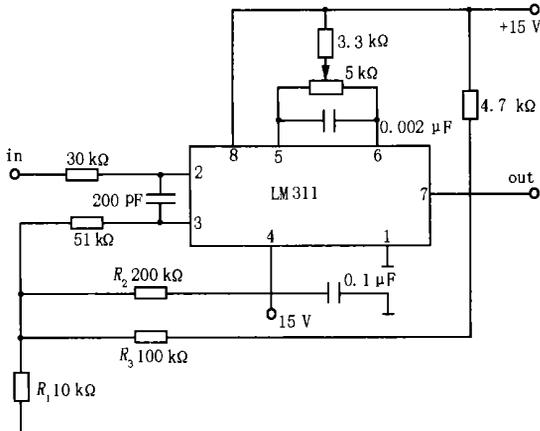


图5 避免突发振荡电路

Fig. 5 Circuit of avoiding burst oscillation

### 4 软件设计

本装置的软件设计中,加入了固定偏差设计,以提高装置的抗干扰能力。理论上系统正常工作, $s$ 一定,则 $t_0$ 为固定的值,但由于存在装置自身的干扰及装置工作环境的干扰,实际上 $t_0$ 为定值是很难

保证的。本文在直流系统无故障时,人为设置一个固定偏差 $t$ ,即检测基准为 $t_0 = t_0 + t$ 。为进一步提高抗干扰能力,在软件中加入对基准值 $t_0$ 的随时检验子程序,以便实时修正由于干扰造成的基准偏移。在实际电子线路中,由于温度对芯片影响,以及电子电路老化等原因,锯齿波周期将发生缓慢变化,若把基准值 $t_0$ 固定,则过一定时间它还会发生一定变化。这样势必影响测量的准确性。 $t = T \cdot IW_1 / I_m$ 从式中可见 $t$ 与基准值无关,只与 $T$ 有关。解决了线路期间变化带来的干扰的影响。

变基准的方法实施:(1)先检测基准值,(2)使用这个基准巡检一周,(3)再检测基准值,(4)使用新的基准值检测一周,(5)重复(3)、(4)。

由于周期 $T$ 可能缓慢变化,所以 $t = T \cdot IW_1 / I_m$ 也可能变化,也就是测量系统对于相同的 $T$ 在不同时期测量到的 $t$ 将不一样。若将装置的阈值设定为定值,装置在报警时将有较大的偏差,为此也要把阈值设为变值。对 $t$ 影响最大的是 $T$ , $W_1$ 为定值, $I_m$ 可看作变化不大,因此把阈值设成随时间周

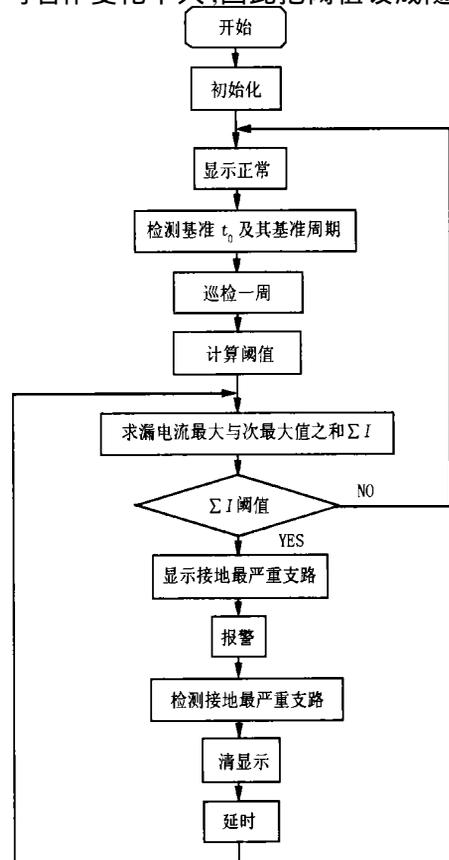


图6 程序框图

Fig. 6 Program flow chart

期变化的量,即可补偿周期的变化。

实施方法:(1)阈值用拨盘输入两位,(2)检测三角波周期,或正脉冲序列周期,还可以检测负脉冲序列周期。通过变基准可以防止三角波上升周期与下降周期变化对  $t$  的影响,通过变阈值可以防止三角波周期缓慢变化对装置报警的影响。程序框图图 6 所示。

## 5 运行评估

磁调制式直流系统绝缘在线检测装置,在不对检测元件提出特别要求的前提下,即可提高一倍的灵敏度。由于在本装置中采用了固定偏差设计,在检测结果中干扰与噪声将被固定偏差一道剔除,从而大大提高了装置的抗干扰能力。该装置在现场安装时,是把直流系统上的各条支路穿过传感器孔,传感器通过通讯电缆连接到主机上。主机全天候在线监测巡检直流系统上的各条支路运行状况,一旦某支路出现故障,主机报警,并打印记录故障状况,以便运行人员及时处理现场故障。另外由于本装置无需向直流系统发送任何检测信号,所以不对直流系

统造成影响,现场实际运行状况良好。

## 参考文献:

- [1] 李继凡,罗过瑜,陶时澎,等.精密电气测量[M].北京:计量出版社,1984.
- [2] 崔实,张连斌.变频在线直流检测系统装置研究[J].华北电力技术,1997,(9):25-28.
- [3] 曾维鲁,向小民.可控非对称式直流系统绝缘检测[J].华北电力技术,1998,(8):55-54.
- [4] 张德龙,赵志英,涂时亮.单片机原理的应用与实验[M].上海复旦大学出版社,1993.

收稿日期: 2002-07-11

作者简介:

崔实(1952-),男,教授级高工,从事电力电子技术及其应用的教学与研究工作;

聂宏展(1960-),男,副教授,从事电力系统自动化的教学与研究工作;

祁德银(1961-),男,工程师,云峰发电厂生技处长,从事电力系统安全运行工作。

## The design and application of DC system insulation monitoring apparatus

CUI Shi<sup>1</sup>, NIE Hong-zhan<sup>1</sup>, QI De-yin<sup>2</sup>, WU Man<sup>2</sup>

(1. Northeast Electric Power Engineering Institute, Jilin 132012, China

2. Jilin Yunfeng Power Plant, Jilin 134200, China)

**Abstract:** The paper presents the DC transducer by magnetic modulation. By this theory, a DC in system sulation monitor is developed which is independent to DC system. The DC transducer is simple in structure but has high discriminability. With strong antidisturbance for fixed deviation design, it is suitable to be applied in power plant and substation.

**Key words:** magnetic modulation; DC system; fixed deviation

(上接第 33 页)

- [6] 张臻.电流互感器有源电子补偿装置的研制[J].山西电力技术,1998,(1):24-27

作者简介:

包军(1968-),男,工学硕士,讲师,主要从事变电运行及电力设备在线检测的教学与研究工作。

收稿日期: 2002-05-15

## The study on high accuracy little current sensor based on zero-flux

BAO Jun, TIAN Jian-hua, ZHANG Xiu-ge

(Zhengzhou Electric Power College, Zhengzhou 450004, China)

**Abstract:** The principle of zero-flux current transformer is analyzed in this paper. A novel method which adopts nanocrystalline core and adaptive dynamic electronic circuit for dynamic-zero-flux of little current sensor is presented.

**Key words:** little current sensor; zero-flux; error