

# 新型的供电方式——开关稳压电源

许昌继电器研究所 陈尚志

## 一 概 述

在电力系统继电保护行业中，其保护装置的供电方式一直是比较落后的，传统的方式是直流高压直接经电阻降压和稳压管稳压供给保护装置，如图一，这种办法不仅功耗大，发热严重，而且可靠性差，直流高压有可能直接危及保护装置本身。



图一

开关式稳压电源是国际上六十年代出现的一种新颖电源。在国外电力系统继电保护行业中，近几年来较多地采用了逆变稳压电源，开关式稳压电源还很少见到。南京电力仪表厂前几年为500kV线路保护装置试制了逆变稳压电源（没有脱离传统的串联调整的稳压方式）。本文讨论的是为我所最新研制的500kV线路保护装置供电的开关式稳压电源。

开关电源是一种崭新的电源形式，开关电源通常指相对于串联调整稳压电源的串联线性调整元件工作在开关状态。在一些文献资料中把开关电源称为“断续式稳压电源”。

开关稳压电源和传统的串联调整稳压电源（包括逆变稳压电源）相比，具有体积小，重量轻，效率高，不易输出过电压，输出电压保持时间长，稳压范围宽，成本低，可靠性高等许多优点。现将开关电源和我所制造的相同容量的串联稳压电源FWY—2A之主要经济技术指标列于表一，以便比较。

连续式串联稳压电源输出的直流电压是稳定不变的，但调整管上的电压是变化的。由于负载电流流经调整管，因此作为控制用的调整管损耗很大，发热很严重。所以也限制了它的电压调整范围。

开关式稳压电源是依靠开关器件的工作状态来稳定输出电压的。开关器件从理论上讲，不消耗功率，因此效率很高，开关器件一般为晶体三极管，以开关方式工作，即脉冲宽度基本不变而占空系数可变，靠调节占空系数来达到调整稳定输出电压的目的。

开关电源多数采用电网电压输入直接整流，所得直流高压，一般以20kHz以上的开关频率进行调制，然后经高频变压器降压，再整流滤波成为稳定的直流电压输出。

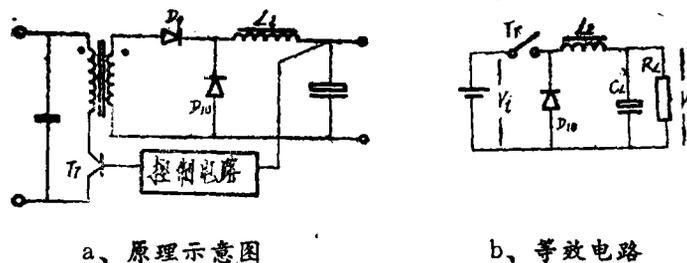
表一 开关电源和串联调整稳压电源的比较

型号 名称	FWY—2 A 串联调整稳压电源	FKY—20 开关电源	备 注
项 目			
效 率	33%	71%	
重 量	8.5Kg	1.41Kg	不带外壳
外形尺寸 mm	330×135×270	264×80×166	
主 变 压 器	III 40	GU—36	
散热器尺寸 mm	235×103×46	60×30×40	
工 作 频 率	50Hz	22kHz	
功 率 管 数	2	1	
整 流 管 数	4	2	
允许最低输入 电 压	170V	140V	
纹 波	小	大	

在电力系统继电保护设备中，都是以直流220V或110V作为输入电压的，在国内，开关稳压电源在电力系统继电保护设备方面的应用只是刚刚开始，有待于在今后运行中不断地总结经验，改进提高。

### 二 调宽式开关稳压电源的工作原理

叙述工作原理的示意图见图二。



图二 开关电源原理图

图二中a，为简化框图，b是为了说明工作原理方便而抽象出来的等效电路图。图

中:

- |               |                  |
|---------------|------------------|
| $T_r$ ——控制开关管 | $D_{10}$ ——续流二极管 |
| $L_2$ ——储能电感  | $C_L$ ——滤波电容     |
| $R_L$ ——负载电阻  | $V_i$ ——输入电压     |
| $V_o$ ——输出电压  |                  |

开关稳压电源在工作时,只要控制开关 $T_r$ 导通和截止的时间比例就可以调整输出电压的大小达到稳压的目的,也就是说,如果开关管 $T_r$ 开—关的频率一定的,调整导通时间的宽度,即可以得到所需要的输出电压,所以又称它为脉冲调宽式开关稳压电源。

从图二可知,当开关 $T_r$ 接通时,输入电压 $V_i$ 给储能电感 $L_2$ 和电容 $C_L$ 充电,同时给负载 $R_L$ 提供电流。 $L_2$ 在 $T_r$ 接通时间 $t_{on}$ 内储存能量,当 $T_r$ 断开时,这时 $L_2$ 中储存的能量沿 $R_L$ 和续流二极管 $D_{10}$ 的途径释放,以维持负载 $R_L$ 上电流的连续性,所以称 $D_{10}$ 为续流二极管。在 $T_r$ 断开 $t_{off}$ 时间内电感 $L_2$ 一直释放能量。

为了讨论和计算的方便,首先作如下假设:

1 开关 $T_r$ 是理想的,即 $T_r$ 导通和截止时不需要时间,导通时电压降为零。截止时电流为零。

2 电感 $L_2$ 足够大,通过 $L_2$ 的电流是连续的,在整个工作周期内电感是一个常数(磁心不饱和)并且在电感上的电压降保持不变。

3 续流二极管也看作是理想的,忽略导通,截止和反向恢复时间。

4 只对稳态过程进行分析。

引入这些假设,虽然会给计算带来误差,但最后只要作一些适当的修正,是可以满足要求的。

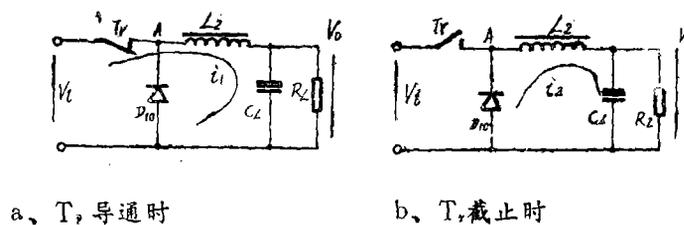
下面就开关电源的稳态过程作一分析。

如开关 $T_r$ 在 $t_0-t_1$ (见图四)期间导通,在 $t_1-t_2$ 期间截止,以后周期性地开和关,其重复周期为 $T$

$$T = t_2 - t_0 = 1/f$$

设 $T_r$ 导通时间为 $\delta T$ ,且 $\delta T = t_1 - t_0$ ,截止时间为 $(1-\delta)T = t_2 - t_1$ 。 $\delta$ 为小于1的控制系数,其值 $\delta = T_{通}/T$ ,所以也称 $\delta$ 为工作系数。

二种工作状态如图三所示。设负载 $R_L$ 上的电压为 $V_o$ ,负载功率 $P_o = V_o^2/R_L$ ,负载电流 $I_o = V_o/R_L$ 。



图三、二种工作状态

1. 各期间的工作状态。

①  $t_0 - t_1$ : 为  $T$  导通期间

当开关  $T$  导通时, 电感两端加有电压  $V_i - V_o$ , 这时续流二极管  $D_{10}$  处于反向偏置。因而开路, 输入电压  $V_i$  经  $L_2$  向  $R_L$  和  $C_L$  流过一锯齿波上升电流 (见图四), 并对  $R_L$  提供功率, 另一方面, 此电流以磁能形式储藏在电感  $L_2$  中, 故又称储能电感。其数学表达式如下:

$$\begin{aligned} \frac{di_1}{dt} &= \frac{(V_i - V_o)}{L}, \\ i_1 &= \int_{t_0}^t \left( \frac{V_i - V_o}{L} \right) dt + I_{10} \\ &= \frac{V_i - V_o}{L} (t - t_0) + I_{10} \end{aligned}$$

式中:  $I_{10}$  为  $t_0$  时的电流, 即起始时的电流。

在  $t = t_1$  时, 电流达到最大值:

$$\begin{aligned} I_{11} &= \left( \frac{V_i - V_o}{L} \right) (t_1 - t_0) + I_{10} \\ &= \frac{V_i - V_o}{L} \times \delta T + I_{10} \end{aligned}$$

这时电感  $L_2$  中储藏磁能也达到最大:

$$W_{t1} = \frac{1}{2} L I_{11}^2$$

②  $t_1 - t_2$ ,  $T_r$  截止期间

$t_1$  时, 开关  $T$  断开。由于电感  $L_2$  中的电流不能突变。它必须由原来的电流值和电流方向为起始值, 进行新的变化。因此续流二极管  $D_{10}$  导通, 使  $L_2$  中的电流继续维持下去, 这时, 储存在  $L_2$  中的磁能释放出来, 形成减少的锯齿波电流  $i_2$ , 流向  $R_L$  和  $C_L$  维持在  $T_r$  截止期间, 对负载  $R_L$  继续提供功率。

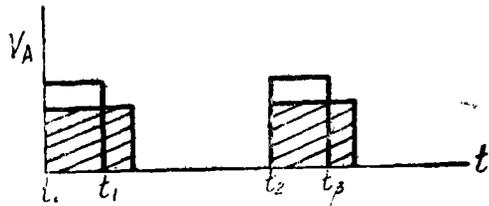
这期间, 电感  $L_2$  两端加有电压  $V_o$ , 所以有:

$$\begin{aligned} \frac{di_2}{dt} &= -\frac{V_o}{L} \\ i_2 &= \int_{t_1}^t \left( -\frac{V_o}{L} \right) dt + I_{11} \\ &= -\frac{V_o}{L} (t - t_1) + I_{11} \end{aligned}$$

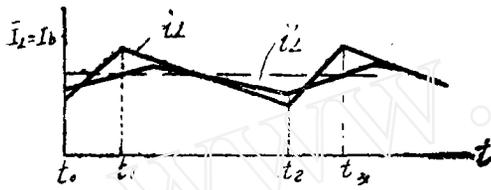
在  $t = t_2$  时, 电流达到最小值, 磁能也为最小值。

$$\begin{aligned} I_{12} &= -\frac{V_o}{L} (t_2 - t_1) + I_{11} \\ &= -\frac{V_o}{L} (1 - \delta) T + I_{11} \end{aligned}$$

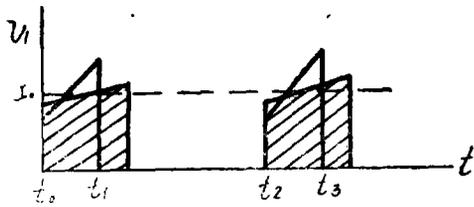
$$W_{t2} = \frac{1}{2} L I_{12}^2$$



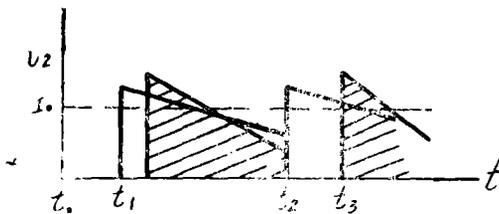
a, A点电压



b, L<sub>2</sub>中的电流



c, 流过T的电流



d, 流过D<sub>10</sub>的电流

图四 各处电压电流波形

图中带斜线的阴影区为输入电压  $V_i$  较低而输出负载较重时的波形。

## 2. 工作系数 $\delta$ 的确定。

$\delta$  是一个很重要的参数,  $\delta_{max}$  应有一个严格的限制, 否则电路难以正常工作, 而且容易损坏元件。

$$V_o = \delta V_i = T_{通}/T \times V_i; \delta = V_o/V_i$$

由此可见, 只要控制开关  $T$  的导通时间和开关周期的比例, 就可以改变输出电压  $V_o$  大小。

鉴于电力系统保护用电源——即开关稳压电源的输入源, 在电力系统正常情况下, 负载很轻, 因此电压较高, 而在事故状态下, 负载突然加重, 因此电压跌落幅度较大。电力系统保护用电源的波动范围为正10%, 负15%。

另一方面, 从开关电源的负载——继电保护装置的特性看, 在电网正常运行时, 负载很轻, 在电网事故情况下, 负载突然加重。由此可见, 在电网事故发生瞬间, 作为开关稳压电源的输入电压突然下跌, 而输入负载突然加重, 从而要求开关稳压电源具有较宽的稳压范围和良好的稳压性能, 以适应输入、输出两个突然变化的要求。

考虑安全系数, 定开关电源的输入电压为最低时 ( $V_{\lambda} = V_N (1 - 20\%) = 176V$ , (电源设计时取输入电压为150V) 和输出负载满载时的最大工作系数  $\delta_{max} =$

0.42。

那么输入电压最高时的工作系数:

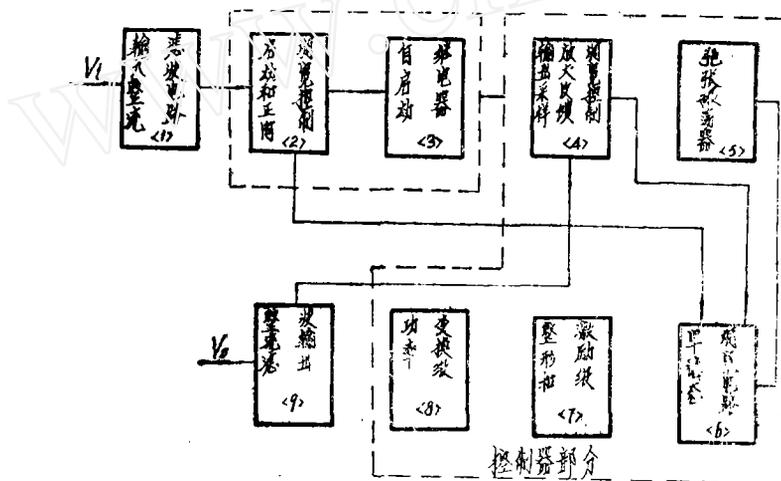
$$\begin{aligned} \delta_{min} &= \frac{V_{i_{min}}}{V_{i_{max}}} \times \delta_{max} \\ &= \frac{140}{1.15 \times 220} \times 0.42 \end{aligned}$$

= 0.233

(注：实际上，输入电压最高，同时负载又是最轻时的工作系数比0.233还小)

### 三、调宽式开关稳压电源方案的实现：

如上所述，由于电力系统继电保护行业对电源的特殊要求，要求电源具有很宽的调压范围，具有适应两个突然变化的能力，为此采用了输出采样放大，反馈调宽和输入电压采样正向调宽相结合的综合型调宽方式，反向和正向调宽都采用了抗干扰性能较好的光电耦合传输技术，达到了预期的效果。



图五 方框图

同时还采用了特殊的，低功耗的自启动电路。整机方框见图五所示。图中：

(1) 输入整流滤波电路，在继电保护设备中应用时，由直流220V直接输入，不需要整流，整流器是为应用市电220V50Hz电源作为输入时而设的。

(2) 启动和正向调宽控制电路，实现启动时的工作脉冲宽度由窄变宽的软启动功能，使之在启动时不会对负载电路产生冲击过电压。正常运行时，随着输入电压的变化而改变工作脉冲的宽度，以达到输出稳压的目的。

(3) 自启动继电器，继电器在释放情况下，处于自启动状态，随着输出电压的建立，继电器经延时吸合，断启动电路，完成了自启动过程，输入电压的波动经光电耦合器件传输给单稳态调宽电路。

(4) 输出采样放大反馈调宽控制电路，采用了典型的误差放大器，将输出电压的变化量采样放大，将误差信号变为光信号，耦合给单稳态调宽电路，以稳定输出电压。

(5) 弛张振荡器，这是一种最基本的单结晶体管脉冲产生电路，它是由一个单结晶体管和Rc充放电回路组成。它作为单稳态调宽电路的输入同步脉冲。

(6) 单稳态调宽电路。

(7) 整形和激励级, 为了不影响单稳态调宽电路的工作稳定性, 提高负载能力, 所以在激励级前加一级隔离整形电路, 激励级电路必须与功率变换级电路隔离, 一般都采用脉冲变压器进行隔离, 这一级的设计原则是既不要过激也不能欠激。过激, 则功率晶体管导通时在基区积累过多的电荷, 影响开关波形及速度的提高, 并导致管耗增加, 如欠激, 则激励不足, 使功率晶体管导通不充分, 工作在放大区, 同样也产生很大的功耗。

(8) 功率变换级, 由高压功率晶体管, 高频变压器及其波形修正网络等组成, 这是本电源最为关键的部分, 它既转换功率, 又执行稳压调整的功能, 对功率晶体管的参数及高频变压器的制作工艺都应有很严格的要求。

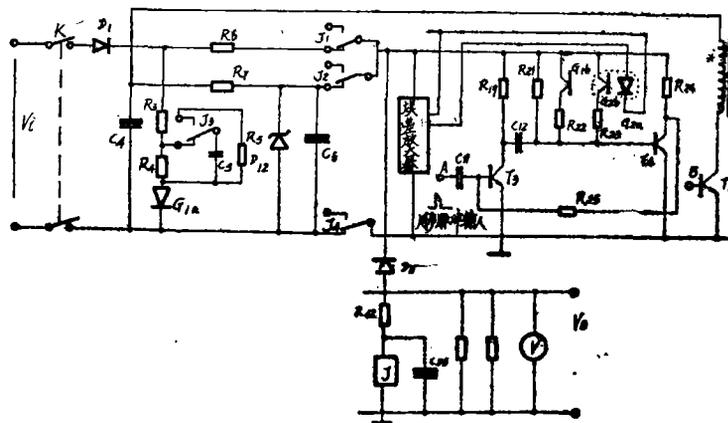
(9) 整流滤波输出电路。

开关稳压电源的系统原理图见图六。

在电源控制器电路由输出电压反馈供电, 启动时, 由启动电路供给, 一旦启动成功, 便建立闭环运行, 为减轻启动时启动电源的负担, 更有利于启动, 输出电压经二极管  $D_2$  供给控制器电源。同时,  $D_2$  又使启动电流不依赖于输出负载电流的变化。由于构成了闭环运行, 一旦发生过负荷或输出短路等情况时, 闭环链就脱扣, 控制器电路失去了供电, 电源也就停止工作。所以此电源不必加过流或短路保护。

图五方框图中除了(2)和(6)以外, 为一般电子线路或开关稳压电源中较为常见的电路形式。这里不作详细介绍。(2)和(6)两部分构成本电源启动, 调宽控制的核心。也为本电源特点之所在。这里作一较为详细的叙述。

启动和调宽控制原理如图七所示:



图七 启动和调宽控制原理

如前所述, 本电源调宽控制的信号传输元件采用光电耦合器件, 在讨论启动和调宽控制原理之前先简略地介绍一下光电耦合器件。光电耦合器由发光源和受光器两部分组成, 如  $G_{2a}$  和  $G_{2b}$ , 把发光源和受光器组装在同一个密闭的管壳内, 连接发光源的管脚作为输入端, 连接受光器的管脚作为输出端。在输入端加电信号, 发光源发光, 受光器

在光照后,由于光敏效应产生了光电流,由输出端引出,这样就实现了以“光”为介质的电信号传输,而器件的输入和输出两端在电气上都是绝缘的。

### 1. 启动电路.

前面已经说过,本机控制电路工作电源是采用输出电压反馈供电的办法,因此电源在未建立输出电压前需要有启动电路以供给控制电路的工作电源,当输出电压建立起来之后,反馈供给控制电路,然后允许切断启动回路。完成了一次启动过程。

启动电路具有以下功能:

①在电路启动期间,实现对控制电路的供电。由图七可见, $R_6$ 和 $R_7$ 在启动时是并联的,在开关K未闭合前,自启动继电器处于释放状态——即自启动状态。当开关K闭合时,输入直流220V经 $D_1$ , $R_6 // R_7$ 给控制电路供电,由于 $D_2$ 处在反向偏置,在启动时,输入直流220V不直接向开关稳压电源的负载供电,因此对启动有利。

这里,为什么要采用 $R_6$ 、 $R_7$ 并联的方式供电呢?我们知道,控制回路的工作电流还是比较大的,在 $R_6 // R_7$ 上电压的降落为200V左右。因此在启动时, $R_6 // R_7$ 上的功耗很大,发热比较严重。但在启动成功之后,自启动继电器J吸合。继电器常闭接点断开,接点 $J_1$ 向上,从而切断了 $R_6$ 的通路。这里电阻 $R_7 \gg R_6$ ,主要提供启动电流的回路被切断了。开关稳压电源正常运行时输入电压经 $R_7$ 对 $C_0$ 充电,取稳压管 $D_{12}$ 的稳压值接近于开关电源的输出电压,维持启动电路电压的正确性。 $C_0$ 上的充电电压有助于下一次的启动。

②实现输入电压变化时的正向调宽控制。

如前所述,作为电力系统继电保护设备中应用之电源,输入电压变化范围大,输出负载变化范围也大。所以本电源中设计了反映输入电压变化的正向调宽电路作为辅助控制。它由 $R_3$ 、 $R_4$ 和光电耦合管的发光部分 $G_{1a}$ 组成。当输入电压变化时,流过发光器 $G_{1a}$ 的电流随之而变化,光照强度也随之而变化,通过光线耦合到单稳态调宽电路决定单稳脉冲宽度的 $R_c$ 充放电回路中, $G_{1b}$ 受光后,其光电流随输入电压的波动而变化,改变 $R_c$ 时间常数。

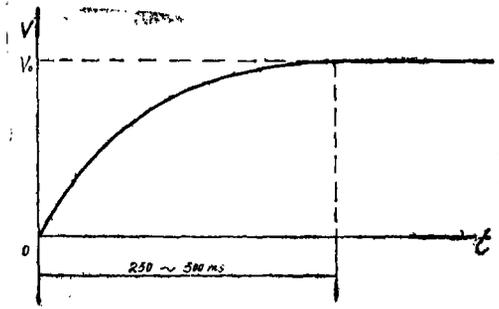
③实现软启动。

所谓软启动,就是说开关电源在建立输出电压的过程中,电压是逐渐上升的,而不是突然上升的,避免电压过冲而对负载的冲击影响。

为此,要求电源在启动过程中,控制脉冲系列的脉冲工作宽度(即工作系数 $\delta$ )逐渐由窄变宽( $\delta$ 由小变大)的控制过程。图七中 $C_0$ 、 $R_4$ 就起到了这个作用。

当开关K闭合时,输入电压经 $D_1$ 、 $R_3$ 对 $C_0$ 充电,而 $R_4 \gg R_3$ ,在启动时, $C_0$ 和 $R_4$ 是并联的,由此可见, $C_0$ 的充电电流完成了软启动的任务。 $C_0$ 的充电电流使发光器 $G_{1a}$ 的光照增强,在K闭合瞬间为最大,此后渐渐减小。 $G_{1b}$ ——受光器的光电流由大变小,工作系数 $\delta$ 由小变大。

顺便指出,启动时,脉冲宽度的变窄,相当于启动时频率的升高,降附了高频变压器启动时磁通密度,从而增加了启动可靠性,本电源的软启动特性见图八所示。



图八 软启动特性

$G_{1b}$ 、 $R_{2b}$ 为一路， $G_{2b}$ 、 $R_{2b}$ 为第三路。随着 $C_{12}$ 充电电位的上升，一旦达到 $T_4$ 的导通阈值时， $T_4$ 就立即导通， $T_3$ 就中断了提供基极电流的通路而截止，变成了稳定状态。即所谓单稳态电路。

从以上的分析可知，同步振荡器的脉冲周期不能小于单稳态触发器的固有输出单稳脉冲宽度。否则就不能正常工作。我们知道利用单结晶体管构成的多谐振荡器的频率，易受温度等因素的影响，将在一定的范围之内变化。因此振荡器脉冲周期的最小值应大于单稳脉冲宽度的二倍以上，单稳态触发器才能正常工作。

本机中，考虑到功率晶体管和激励级晶体管的安全性，要求单稳脉冲宽度小于最小振荡器脉冲周期的0.42倍。

$$\text{即 } T_{DW} < 0.42 T_{min} = \delta_{max} T_{min}$$

式中： $T_{DW}$ ——单脉冲宽度

$\delta_{max}$ ——最大工作系数

$T_{min}$ ——为振荡器最高振荡频率的脉冲周期。

应当指出，最大单稳脉冲宽度 $\delta_{max} T$ 发生在输入电压为下限，负载为最重的情况下。而 $\delta_{min} T$ 则发生在输入电压为上限，而负载为最轻的情况下。假设输出负载为恒定，则符合下列关系式：

$$\frac{\delta_{min}}{\delta_{max}} = \frac{V_{i_{max}}}{V_{i_{min}}}$$

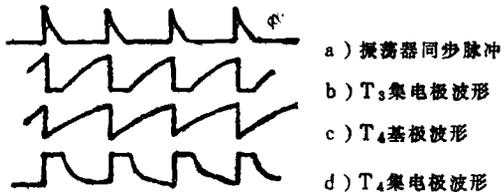
$$\text{或： } \delta_{min} \cdot V_{i_{max}} = \delta_{max} \cdot V_{i_{min}}$$

各主要逻辑点的工作波形见图九：

$C_{12}$ 的三个充电回路及其作用：

①  $R_{21}$ ：固定的充电回路，调整充电回路的比例关系。

②  $G_{2b}$ 和 $R_{2b}$ 支路，这是主控制充电回路。充电电阻的大小，由误差放大器控制，



图九 电压波形

也即由输出电压负反馈控制。当输出电压增加时,误差采样值也增加,经差分放大,发光源 $G_{2a}$ 的电流增加,发光强度增加,受光器 $G_{2s}$ 的光电流增加,相当于该支路的电阻减少,充电加速,单稳宽度变窄,输出电压下降,以保持输出电压不变,反之亦然。

该支路对单稳脉冲宽度起主导控制作用。

③ $G_{1b}$ 和 $R_{24}$ 支路,输入电压变化的辅助调宽控制及软启动回路。

为了启动的可靠性,使自启动继电器延时吸合,加 $R_{42}$ 和 $C_{25}$ 充电延时回路。避免在启动过程中继电器抖动和反复多次启动的状态。

#### 四、问题讨论:

噪声和射频干扰是开关电源常见的问题,特别是射频干扰,它不仅影响开关电源本身,而且还会干扰邻近的其它电子设备。

噪声和射频干扰是反映在稳压电源输出端不规则的毛刺和杂乱纹波。其频谱可以从零到辐射频率。

这些干扰是由非线性元件,如功率晶体管,整流二极管,储能器件等在逆变翻转时产生的,由于频率较高,它能以电磁能的形式直接向空间辐射。为了抑制这些干扰,除了在结构工艺,布线,元器件选择,屏蔽等方面采取必要的措施以外,改善控制功率晶体管的转换波形也是十分有效的,由于利用了磁性变压器作为传输功率的器件,因此,开关脉冲的波形越好,即前沿,后沿越陡,则输出电压中的纹波峰——峰值就越大,反之越小,不过,开关脉冲的波形又影响了功率晶体管的功率消耗,对功率晶体管开关损耗的要求和对输出电压中纹波峰——峰值的要求是矛盾的。可以根据不同的需要处理。

另外,由于本产品采用了功耗较小的启动电路及自启动方式,一旦由于某种原因,(元器件损坏或输出外电路短接等)而自启动不能成功时,电阻 $R_0$ 的发热将比较严重, $R_0$ 为 $2\text{K}\Omega$ 、 $12\text{W}$ ,在启动时 $R_0$ 上的实际功耗为 $W_{R_0}$ 。当输入电压和输出电压都为额定值时:

$$W_{R_0} = \frac{(220 - 24)^2}{2000} = 19.2\text{W}$$

如果电路工作正常,启动时间很短(约 $600\text{ms}$ )对 $R_0$ 来说,短暂的过载,不会产生过热现象,但因故障,自启动不能成功时,即会处于常启动状态, $R_0$ 发热将比较严重。

#### 五、结束语:

开关稳压电源在电力系统继电保护设备方面的应用,在国内还是首次,可能会有这样或那样的问题,有待于今后的运行中取得经验,不断地改进提高。