

稳频稳压电源 稳定性分析 系统设计 整流电路

265-268

稳频稳压电源的稳定性分析与设计

湘潭工学院信息与电气工程系 吴新开 (湘潭 411201) TM44

TM910.2

摘要: 系统地介绍稳频稳压(CVCF)电源的构成原理,分析 CVCF 的频率稳定性、相位稳定性及幅值稳定度的影响因素,并介绍 CVCF 的系统设计方法。

关键词: CVCF 频率稳定性 幅值稳定性 相位稳定性 系统设计

Analysis and Design on the Stability of CVCF

Abstract: This paper introduces the structure and the principle of CVCF. It analyses systematically factors which affect the frequency stability and the scope stability and the phase stability of CVCF, and expounds static and dynamic design methods.

Keywords: CVCF Frequency stability Scope stability Phase stability System design

交流稳频电源,由于其幅值和频率稳定度高,波形失真小,输出功率大,在电子、机电行业,特别是在精密加工机械、半导体加工设备的制造、交流仪器仪表的调校、磁性材料的测量等测试系统中,作为激励源或信息源得到广泛的应用,也可以取代传统的电动机-发电机机组,在航天航空航海和精密加工等行业得到应用。

1 工作原理

交流稳频电源根据其工作方式可分为波形控制式和逆变器式。波形控制式是将信号源输出的正弦波信号作为基准,采用线性放大器进行功率放大,通过耦合度高的线性变压器与负载相连。这种稳频电源波形失真小、稳定度高。逆变器式与波形控制式的主电路结构基本相同,只是采用开关式逆变器取代线性放大器,通过正弦波脉冲宽度调制技术 (SPWM),使主电路中的电力电子器件工作于超音频范围的开关状态,输出正弦波脉宽调制波,然后再通过滤波电路还原成正弦波,这种稳频电源效率高,无噪声。但由于工作在开关状态,有一定的开关干扰,波形失真程度较大,其应用范围受到一定的限制。目前,一般多采用波形控制式稳频电源作为测试激励源,采用逆变器式作为大功率驱动电源。

根据输出交流电源的相数,稳频电源可分为单相式、两相正交式和三相对称式。单一输出量的稳频稳压源由于各相间的相移恒定,因此不需要移相调节电路。当输出物理量既要求有电压回路,还要求有电流回路,且电压与电流的相位差要求既能调节又能稳定

以适应不同负载时,则相应的稳频稳压/稳流电源应包括电压和电流输出回路。其结构如图 1 所示。

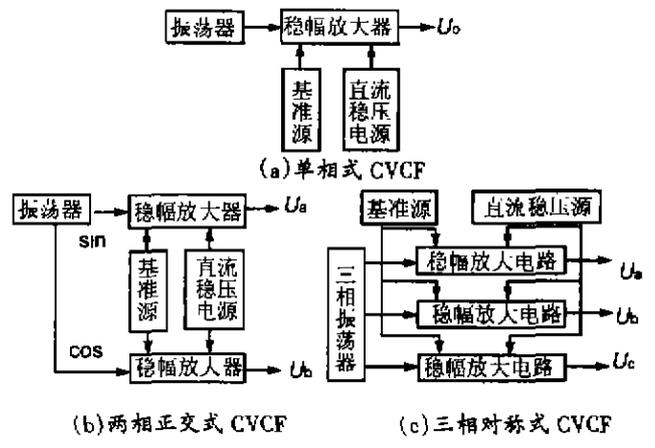


图 1 CVCF 原理框图

稳频稳压电源的稳幅原理取决于图 2 所示的稳幅放大电路。其中精密整流电路将稳频稳压源输出的交流电压取样,经整流变换为幅值与输出的交流量成正比的直流电压 U_i 。稳幅放大电路将此 U_i 作为幅值反馈电压,并与基准源 U_j 相比较,取其偏差量 $U_j - U_i$ 进行积分放大,以改变可变增益放大器的增益。当频率稳定、幅值也稳定的信号源输出的正弦波通过可变增益放大器时,由于其增益取决于偏差量,故使输入到功率放大器的信号幅值改变,从而自动调节其输出的幅值。如由于某一原因使稳压源的输出幅值 U_i 下降时,则经过精密整流后的幅值反馈电压 U_i 也降低,使比较器的偏差量增大,经积分放大后,使可变增益放大器的增益提高,从而使功率放大器的输入信号增大,稳频稳压源的输出幅值 U_i 增大,以达到幅

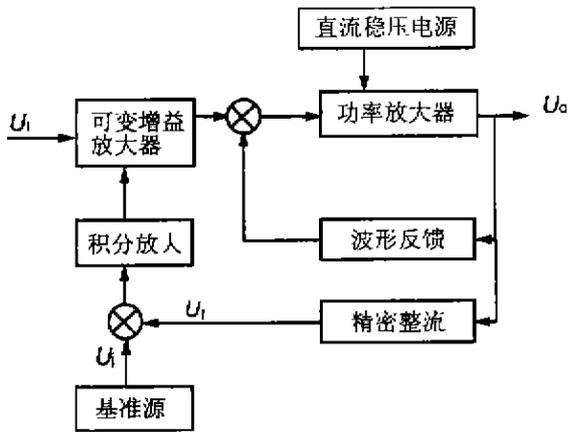


图2 稳幅原理框图

值稳定的目的。

波形反馈环是将稳频稳压源的输出量取样后，以负反馈的形式反馈到功率放大器的输入端，使功率放大器的净输入信号为输入信号与反馈信号的偏差。通过这一较强的负反馈以减小功率放大器的非线性失真，使稳频稳压源的输出波形尽量接近信号源的输出波形。

2 CVCF 的稳定度分析

2.1 CVCF 的频率稳定度分析

CVCF 的频率稳定度在很大程度上取决于振荡器，因此，设计一个符合要求的振荡器是 CVCF 的关键之一。

首先，对任一振荡器在不考虑电阻 R 时，其振荡频率可用一般表达式表示：

$$f = 1/2\pi \sqrt{LC}$$

如果由于外界条件使 L 和 C 分别变化了 ΔL 和 ΔC ，则频率的偏移量为

$$\begin{aligned} \Delta f &= \frac{df}{dC} \Delta C + \frac{df}{dL} \Delta L \\ &= -(f \Delta C / C + f \Delta L / L) / 2 \end{aligned}$$

频率的相对变化量为

$$\Delta f / f = -(\Delta C / C + \Delta L / L) / 2 \quad (1)$$

电感的变化量 ΔL 取决于温度和湿度的变化以及机械振动等因素，电容的变化量 ΔC 除与湿度和温度的变化有关外，还与电路的杂散分布电容、负载电容、元件的老化失效等因素有关。

其次，振荡回路的有功负载将影响谐振回路的品质因数 Q ，从而影响振荡频率的稳定度。一般来说， Q 值越高，频率稳定度越好，反之频率稳定度越差。而谐振回路的品质因数 Q 为：

$$Q = \omega_0 L / R = 1 / (\omega_0 RC) \quad (2)$$

可见，振荡回路的有功负载— R 的变化，将影响 Q

值，继而影响频率稳定度，而谐振回路的有功负载 R 往往取决于导线的电阻、高频集肤效应、磁心的磁滞、涡流损耗及负载电阻等因素。

再次，电路元件的内部相移也将影响频率稳定度。如晶体管由于结电容的存在，以及少数载流子在基区内的扩散时间的影响，使集电极电流总要滞后于基极输入电压的变化，即它们之间存在一个相移角 φ ，对这一附加相移 φ 在振荡器中不可能考虑，因而使总相移增大。另外这一相移 φ 还随电源电压和温度的变化而变化，这些都可能使谐振电路的频率产生偏离。

2.2 CVCF 的幅值稳定度分析

若将功率放大器，驱动电路和波形反馈电路所构成的闭环看成是 CVCF 的波形环节，则 CVCF 的稳幅放大电路是一个单闭环系统。

对于稳幅放大电路，其静态结构如图 3 所示： K_1 为波形环节的增益， α 为精密整流系数， u_n 为给定基准电压， K_2 为可变增益放大器的增益，所以系统的静特性方程为：

$$u_o = K_1 u_n u_i / (1 + \alpha K_1 u_i) \quad (3)$$

当 $1 + \alpha K_1 u_i \gg 1$ 时，有 $u_o \approx u_n / \alpha$

CVCF 就是采用改变给定基准电压的方法来实现输出幅度调节的，所以给定基准电压和精密整流电路的稳定性，将直接影响 CVCF 输出幅值的稳定度。

单闭环控制系统的电压调整率框图如图 4 所示。该闭环系统中，积分放大器的传递函数为 $K_2 / T_0 s$ 。在 u_n 不变时，精密整流反馈系数为 α ，则反馈系统的基本方程是

$$\Delta u_n / u_n = K_1 (\Delta u_i / u_i - \alpha K_2 \Delta u_o / T_0 s u_n)$$

经整理后，得

$$\Delta u_n / u_n = (K_1 \Delta u_i / u_i) / (1 + \alpha K_1 K_2 / T_0 s) \quad (4)$$

因为 $1 + \alpha K_1 K_2 / T_0 s \gg 1$ ，则有 CVCF 的幅值稳定电路的输出幅值稳定度和瞬态响应的动态近似表达式 $\Delta u_o / u_o \approx T_0 s \Delta u_i / \alpha K_2 u_i$ 。

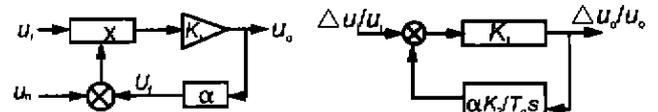


图3 单闭环系统静态结构图

图4 电压调整率框图

2.3 CVCF 的相移稳定度分析

CVCF 中常采用图 5 所示的有源移相电路。图中

$$U_+ = (1 / j\omega C) U_i / (R_2 + 1 / j\omega C)$$

$$U_- = (U_i R_1 + U_o R_1) / (R_1 + R_1)$$

因为 $U_+ = U_-$ ，所以

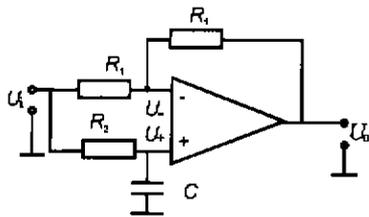


图5 有源滤波电路

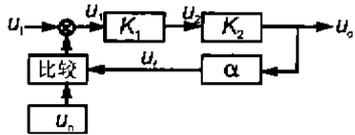


图6 闭环系统结构图

$$\begin{aligned} & (U_i R_1 + U_o R_1) / (R_1 + R_1) \\ & = (1 / j\omega C) U_i / (R_2 + 1 / j\omega C) \end{aligned}$$

经整理得:

$$K = \frac{U_o}{U_i} = \frac{\sqrt{R_1^2 + (\omega C R_2 R_1)^2}}{\sqrt{R_2^2 + (\omega C R_1 R_2)^2}} e^{-j\varphi} \quad (5)$$

其中 $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 = \text{tg}^{-1} \omega C R_2 R_1 / R_1 + \text{tg}^{-1} \omega C R_2$

若取 $R_1 = R_2 = R_f = R$, 则得 $K = 1$

$$\varphi = 2 \text{tg}^{-1} \omega C R$$

$$\Delta \varphi = 2(\omega R \Delta C + \omega C \Delta R) / [1 + (\omega C R)^2]$$

所以

$$\frac{\Delta \varphi}{\varphi} = \frac{\omega C R}{[1 + (\omega C R)^2] \text{tg}^{-1} \omega C R} \left(\frac{\Delta C}{C} + \frac{\Delta R}{R} \right) \quad (6)$$

可见, 相移角 φ 的稳定度受移相电路中的电容 C 和电阻 R 变化的共同作用, 它们都受环境因素的影响, 同时, 电容 C 的失效, 容量减小以及由于集成电路老化致使内部半导体元件的结电容变化等因素, 对相移的长期稳定度和短期稳定度指标的影响很大。

3 CVCF 的系统设计方法

CVCF 在设计前, 必须明确该系统所要求的技术指标, 根据这些指标进行系统的静态和动态设计, 从而明确各单元电路应达到的主要技术指标, 合理地分析并选择各单元电路的类型, 然后进行参数计算, 确定电路参数。还要根据电路工作特点, 合理设计各种保护电路。

3.1 静态设计

就幅值稳定系统来说, CVCF 幅值闭环系统框图如图 6 所示。其中

比较环节 $\Delta u = u_n - u_i$

乘法输出 $u_1 = \Delta u u_n = u_n (u_n - u_i)$

放大器 $u_2 = K_1 u_1 = K_1 (u_n - u_i) u_n$

功率放大 $u_o = K_2 u_2 = K_1 K_2 (u_n - u_i) u_n$

反馈电路 $u_f = \alpha u_o$

所以, 静特征方程为: $u_o = K u_n u_i / (1 + \alpha K u_i)$ (7)

式中 $K = K_1 K_2$ 。其静态结构图如图 7 所示, 根据静态特性方程和系统的技术指标要求, 可以确定各单元电路的技术指标。如系统的幅值稳定度指标 $\Delta u_o / u_o$ 明确后, 即可根据特征方程求出给定基准电压 u_n 的稳定度指标 $\Delta u_n / u_n$ 为:

$$\Delta u_n / u_n = (\alpha K_1 K_2 u_i + 1) \Delta u_o / K_1 K_2 u_i u_n \quad (8)$$

当 $\alpha K_1 K_2 u_i + 1 \gg 1$ 时, 有 $\Delta u_n / u_n = \alpha \Delta u_o / u_o$

依此类推可以确定其余各单元电路的技术要求。

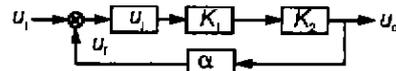


图7 静态结构图

3.2 动态设计

静态设计并没有考虑各单元电路的延时。事实上, 各单元电路均可能存在延时, 它们将影响系统的动态性能, 并可能引起系统振荡。

在幅值闭环系统中, 延时最大的是功率放大器, 当考虑驱动电路在内的总延时为 T_s 时, 则功率放大器的传递函数为:

$$K_2 / (1 + T_s s) \quad (9)$$

积分乘法器的传递函数为:

$$u_i (1 + T_s s) / T_s \quad (10)$$

反馈电路因有滤波环节, 其传递函数为 $\alpha / (1 + T_s s)$ 当忽略小时间常数时, 则得系统的动态结构, 如图 8 所示。

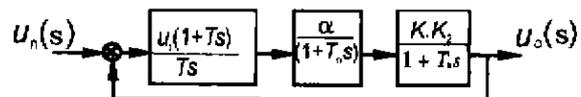


图8 动态结构图

当作系统分析设计时, 令 $T = T_s$, 选择积分乘法器传递函数为 $u_i (1 + T_s s) / T_s$, 则校正后的系统开环传递函数为

$$K' / s (T_s s + 1) = \alpha K_1 K_2 u_i / T_s (T_s s + 1) \quad (11)$$

所以 $K' = \alpha K_1 K_2 u_i / T_s$ 。因为 $T_{ss} + 1 \approx T_{ss}$, 选择积分乘法器的传递函数为 $u_i (1 + T_s s) / T_s$, 则校正的开环传递函数为:

$$K' (1 + T_s) / s^2 (T_s s + 1) \quad (12)$$

根据系统最终校正即可确定系统开环放大倍数。

3.3 保护设计

CVCF 的输出功率一般为数百到数千瓦, 使得通过功率器件的电流很大。在实际设计中, 常采用多只功率器件并联使用。在并联过程中, 除了要考虑均流

措施外,还要考虑留有充足的电流储备。除此之外,还要考虑器件的过电流保护,过电压保护, di/dt 限制保护和 du/dt 限制保护等。

对于 CVCF 来说,上述保护的接口问题需要注意,由于 CVCF 实际上是一个交一直一交电流变换器,中间经历了整流和逆变两个过程。当逆变过程中某一器件损坏而出现过大电流时,势必引起稳压过程中出现过电流,造成整流稳压器件损坏,继而引起电网过电流。为了提高系统的可靠性,防止事故扩大,在 CVCF 设计中,常将各种保护作用于整流稳压电路,一旦逆变部分出现故障,立即自动关断主电路的直流稳压电源,并提供各种报警信号。

参考文献

- 1 戈卢别夫 n. B. 著,赵一强译,静止变流器设计,北京,国防工业出版社,1985。
- 2 陈伯时,电力拖动自动控制系统,北京,机械工业出版社,1992。
- 3 吴新开, CVCF 幅值稳定性分析,湘潭矿业学院学报, Vol. 12, No. 1, 76~80。

作者简介



吴新开 男 副教授, 1956 年 7 月生, 1982 年 1 月毕业于湖南大学工业电气自动化专业, 一直从事电力电子和运动控制的教学和科研工作, 自 1986 年开始从事 CVCF 的开发与研究, 发表论文 20 余篇。

来稿日期:1999. 10. 25

定稿日期:1999. 12. 11

(上接第 257 页)

不受供电条件、山高和道路的限制,可以按照电磁传播的特点来选取最佳站址,减少中继站的建设数目。同时,可降低天线铁塔的高度。天线铁塔的建设费用几乎与其高度的平方成正比,从而又大大节省了投资。

(6) 对通信广播设备不产生交流干扰

太阳能电池组件可以用适当的串并联方式组合成所需电压及电流的太阳能电池方阵,通过太阳能电池放电控制器直接给蓄电池充电,以满足电信设备的功率要求,不需要交流供电的整流变换设备,也没有电力线路引入的外部噪声,因此不会对设备产生交流干扰。

(7) 不需要建设公路,保护自然景观

靠硅太阳能电池电源系统供电的微波中继站,使用过程中不需要供应燃料,建站时可以由人背负设备上山或用直升飞机运输,无需专门修筑公路,同时保护了自然景观,这在风景区是十分重要的。

(8) 建设周期短,系统可搬迁

一般微波中继站要求把大型抛物面天线架在铁塔上,并建造混凝土结构的机房,故建设周期长,不易搬迁。

低功耗微波中继设备体积小、重量轻、工作环境温度范围较大。若采用太阳能电池电源系统,就可用简单的组装式机房代替混凝土结构的机房,甚至可以利用铁塔中间的空隙建造简易的铁皮机房。太阳能电池方阵可架设在机房顶上,或利用铁塔架设。天线铁塔高度降低后,可采用简易构件式结构,在 2~3 天内即可建成。整个中继站系统建成时间短,建成后可以搬迁,具有较大的灵活性。

(9) 无污染,运行费用低

太阳能电池电源系统无燃料消耗、无运动磨损部件、无污染、无噪声,系统运行仅靠取之不尽、用之不竭的太阳能资源,故而运行费用大大降低。据国内有关电信部门统计结果表明,油机电源站运行 4 年的费用即可购置一套硅太阳能电池电源系统并运行 30 年。

(10) 系统维护简单,可以无人值守

硅太阳能电池电源系统维护量极小,每年仅需对蓄电池做少量维护(若采用免维护蓄电池可免去此项工作),灰尘大、干旱的地方,不定期地清洁太阳能电池组件的采光面,去除组件表面的灰尘即可。系统充放电控制、给设备供电均自动进行,因此完全可以做到无人值守,尤其适用于环境恶劣的台站。

正因为硅太阳能电池电源系统具有如上一些优点,所以近年来已逐步在通信和广播电视领域中得到推广应用,并有着广阔的发展前景。

作者简介

褚景文 男 1946 年生,南京邮电学院毕业,现任云南半导体器件厂(国内太阳能电池专业生产厂)副厂长,长期从事通信用硅太阳能电池电源系统的设计及应用工作。

史胜达 男 1949 年生,成都电子科技大学微波电真空器件专业毕业,高级工程师,现为云南半导体器件厂副总工程师。

杨树明 男 1969 年生,云南大学应用物理专业毕业,工程师,现在云南半导体器件厂从事硅太阳能电池电源系统设计及推广工作。

收稿日期:2000. 1. 14

定稿日期:2000. 4. 5