

大功率串联补偿 中频发生器

沪 东 造 船 厂
工人技术革新委员会中频组



上海人民出版社

大功率串联补偿中频发生器

沪东造船厂工人技术革新委员会中频组

3k505/24

上海人民出版社

大功率串联补偿中频发生器

沪东造船厂工人技术革新委员会中频组

上海人民出版社出版

(上海绍兴路5号)

新华书店上海发行所发行 上海市印刷三厂印刷

开本 787×1092 1/32 印张 1.25 字数 24,000

1971年6月第1版 1971年6月第1次印刷

书号: 15·4·148 定价: 0.09元

毛主席语录

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

外国有的，我们要有，外国没有的，我们也要有。

备战、备荒、为人民。

在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

中国应当对于人类有较大的贡献。

目 录

一、60 阡中频逆变器的诞生	1
二、中频发生器的基本原理.....	2
三、两种逆变器电路的比较.....	3
四、串联补偿中频发生器主电路.....	7
五、串联逆变器的控制电路.....	10
六、串联逆变器电路的保护.....	17
七、硅元件的冷却.....	22
八、中频变压器的结构.....	24
九、60 阡串联逆变器电路原理图介绍	25
十、对可控硅元件、电容器及仪表的要求	31
十一、关于可控硅中频发生器型谱的建议.....	32
十二、结束语.....	34

09493

一、60 瓩中频逆变器的诞生

伟大领袖毛主席亲自发动和领导的伟大的无产阶级文化大革命，彻底粉碎了叛徒、内奸、工贼刘少奇复辟资本主义的罪恶阴谋，深刻地揭露和批判了刘少奇在工业战线上所推行的“洋奴哲学”、“爬行主义”等修正主义路线，毛主席的无产阶级革命路线空前广泛地深入人心。无产阶级文化大革命的强大推动力，掀起了全国工农业生产的新高潮，也推动了技术革新和技术革命群众运动的蓬勃开展。我厂轮机车间工人、革命技术人员和革命干部组成了三结合小组，在兄弟单位配合和支持下，高举党的“九大”团结胜利的旗帜，在伟大领袖毛主席的“备战、备荒、为人民”的战略方针指引下，坚持“独立自主、自力更生”的方针，怀着为毛主席争光、为社会主义祖国争光的雄心壮志，在我厂发电机组中频弯管的基础上，制造出第一台 60 瓩中频逆变器，使用于感应加热的弯管机床上，闯出了一条用半导体中频逆变器代替发电机组式中频电源的新路。半导体中频逆变器比较发电机组的优点是：体积小、成本低、制造易、耗电省、无噪声、维修方便，符合战备需要，有很大推广价值。在这一基础上，还可以制造出更大功率如几百瓩到几千瓩的中频逆变器电源。60 瓩中频逆变器的诞生，使电子技术与动力工程相结合，为我国电子工业的发展增添了新的内容，所有这一切，都是在毛主席光辉哲学思想的指引下所取得的。我们要遵循毛主席关于“人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进”的教导，不断地完善和发展这一新技术。

二、中频发生器的基本原理

把导体放入交变的电磁场中，导体将产生感应电流而发热，一般说来，交变电磁场的频率越高，感应加热的效率越高；但当频率更高时，由于感应电流的集肤效应，功率将首先集中在导体（即工件）的表面。工件加热带的宽度则取决于感应圈的形状及其与工件所处的相对位置。根据上述原理，就可以利用中频电流加热被弯的铁管、肋骨，熔炼有色金属，或用作真空冶炼以及作各种工件的退火、淬火、熔化焊接及锻造等。我厂的第一台 60 吨中频逆变器首先用于弯管机床上。

半导体中频发生器的基本原理见图 1。

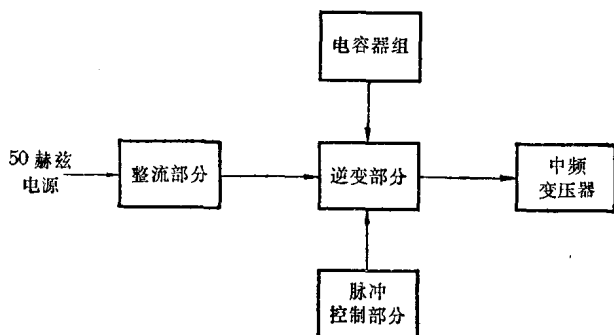


图 1 中频发生器基本原理方块图

整流部分的作用：是将三相 50 赫兹交流电网整流为所需幅值的直流电源，加到逆变器两端上。

逆变部分主要由四路可控硅 (SCR) 组成，其作用是将直流电源变换为所需频率的交流电源（见图 2）。

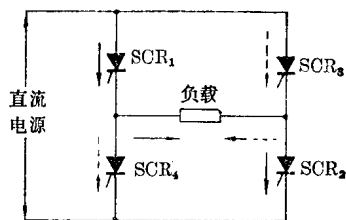


图2 逆变器基本原理图

其工作过程如下：

设前半周期， SCR_1 和 SCR_2 受脉冲控制部分来的信号触发而导通，则此时负载上电流方向如图2上实线所示，若隔半个周期， SCR_3 和 SCR_4 受脉冲控制部分来的信号触发工作，此时 SCR_1 和 SCR_2 截止，而 SCR_3 和 SCR_4 导通，负载上电流反向，如图2上虚线所示。再隔半个周期， SCR_1 和 SCR_2 又触发工作，而 SCR_3 和 SCR_4 则截止，负载电流又换向，如此循环变成中频交流输出。负载上交流电的频率取决于控制部分触发脉冲的频率，也即触发脉冲的频率决定了中频的频率。为了使负载上电流的换向能顺利地进行，借助电容器组的储能作用，使对角线上两组可控硅元件能交替地截止和导通，以输出中频。

中频变压器是使负载阻抗与电源要求阻抗相匹配，输出预计的中频功率用。

脉冲控制部分作用是产生触发可控硅所需的一定频率的脉冲信号。

三、两种逆变器电路的比较

中频逆变器按换向元件连接的方法不同，可分为串联逆

变器和并联逆变器, 两种逆变器电路的基本原理图见图 3、图 4 所示。

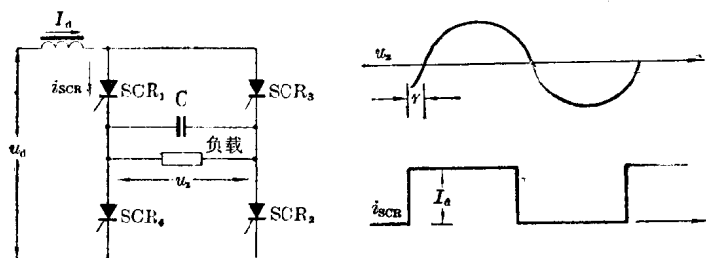


图 3 并联逆变器基本原理图

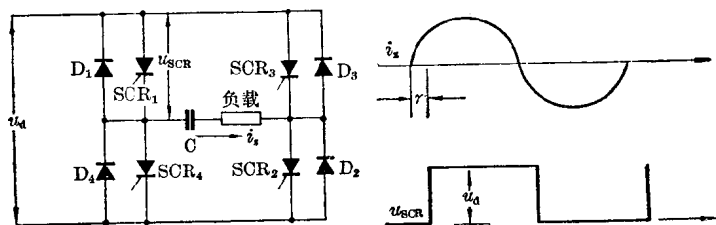


图 4 串联逆变器基本原理图

上图 i_{SCR} 为流过 SCR 的电流

u_{SCR} 为 SCR 两端的电压

i_z 为流过负载上的电流

u_z 为负载两端上的电压

U_d 为直流电源电压

I_d 为直流电源平均电流

γ 为截止角, 即对角线上输出端中频电压滞后于电流的相位差

并联逆变器, 当直流回路限流电感很大时, 负载电压波形为正弦波, SCR 上电流波形为方波, 换向是在电容器上电压

反向以前进行。

串联逆变器,当直流电源电压稳定时,负载电流波形为正弦波,SCR上电压波形为方波,换向是在可控硅元件上电流值过零以后进行。

并联逆变器,由于要求输出电流为方波和由于负载上并联有换向电容器,所以前面须接一只较大电感的电抗器,将直流电源与逆变部分隔开。

串联逆变器要求输出电压为方波,须使直流电压稳定,故直流端接有很大的滤波电容。此外,负载上串联的换向电容器 C 上可能充上相当高的电压,而在SCR截止期间,此电压将直接加在SCR上,使输出电压变为阶梯波,同时还造成SCR的过电压;因此,需将此能量向电源端反馈,与SCR反向并接了整流二极管。

逆变器电路根据换向电容(C),电路的电感值(L),和电阻值(R),可算出其固有的频率 f_0 ,其值按下式而定。

$$f_{P0} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{L^2}} \quad (\text{并联时})$$

$$f_{z0} \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \quad (\text{串联时})$$

通常,在感应加热时, $\frac{1}{LC} \gg \frac{R^2}{L^2}$, 因此,

$$f_{P0} = f_{z0} = f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

L 为串联逆变电路的负载电感及电路其他电感值之和或并联逆变电路负载上串联的电感值(亨)

C 为逆变电路的换向电容器(法)

R 为负载电阻值(欧)

对并联逆变器,其工作频率 f 应高于 f_0 一个适当的数

值,才能稳定正常地工作。对串联逆变器,其工作频率 f 应低于 f_0 ,才能稳定正常地工作。这就是说,无论是并联或串联逆变器,都要求经过补偿后的负载是容性的。即输出电流超前于输出电压。

当 f 接近于 f_0 时,此时 $\cos \phi$ 接近于1,但是,电路的正常逆变(换向)的条件也就有可能受到破坏。这就是说,当 $\cos \phi \approx 1$ 时,电路的截止角 γ (见图3、图4)变得很小,此时SCR的反向恢复时间得不到保证,因而使得导通的SCR还来不及完全截止,而另一路SCR又已被触发,从而造成电路的直通短路,这一点必须注意。

把这两种逆变器电路比较一下:

并联逆变器的优缺点是:

(1) 由于其中间电路串接有相当大的限流电抗器,以及整流部分也采用可控硅调压系统,这样,当逆变部分电路短路或过载时,可以快速切断电源,保护可控硅元件免受损坏。但因要求限流电感值大,体积也大,这对于大功率逆变器是不经济的。此外,并联逆变器的切断或输出功率调节不能通过逆变器SCR控制极进行,这就要求其整流部分是可控的。

(2) 负载参数变化时,在自激工作状态下,电路的工作情况比较稳定。

(3) 逆变器对SCR的 $\frac{dv}{dt}$ 值要求不高。但对 $\frac{di}{dt}$ 值,则应注意在线路上采取措施使其限制在一定范围。

对于大功率逆变器,如果用串联逆变器可以有更多的优点,其原因是:

(1) 串联逆变器其整流部分可不用可控硅整流器,这样可以省去一套可控硅元件及其控制系统。

(2) 由于在中间电路省去一只相当大的电抗器, 体积和重量减轻, 这对大功率逆变器来说显得尤为突出。

(3) 效率相当高, 可达 90% 以上。

(4) 由于对串联逆变器的自激线路随着电子技术的发展日趋完善, 即使负载参数变化较大, 电路也能较稳定地工作。

(5) 串联逆变器对 SCR 的 $\frac{di}{dt}$ 要求不高, 这对保护大功率 SCR 元件是重要的。其 $\frac{dv}{dt}$ 值虽较高, 但容易采取措施限制在允许范围内。

(6) 它可以自激工作, 也可以他激工作, 脉冲控制部分比较机动灵活。其输出功率调节, 可以调节触发脉冲的频率(他激式), 也可以调节截止角的大小(自激式)。

(7) 启动比较容易, 并可以免去一套较大的启动装置。

(8) 负载电路的切断方法简单, 只要断开脉冲控制电路的信号就可以。但并联逆变器采用这种方法就会造成逆变器上下桥臂可控硅元件的直通, 引起短路。

四、串联补偿中频发生器主电路

逆变器的主电路, 可以为串联式, 也可为并联式。两种逆变器的具体线路结构又可以分为多种线路。对于大功率中频发生器, 选用串联补偿式可能优点较大, 而且往往选用桥式串联逆变器。其主电路的典型线路见图 5。

逆变器的负载常为电感性负载, 因此负载包括电感和电阻两个部分。

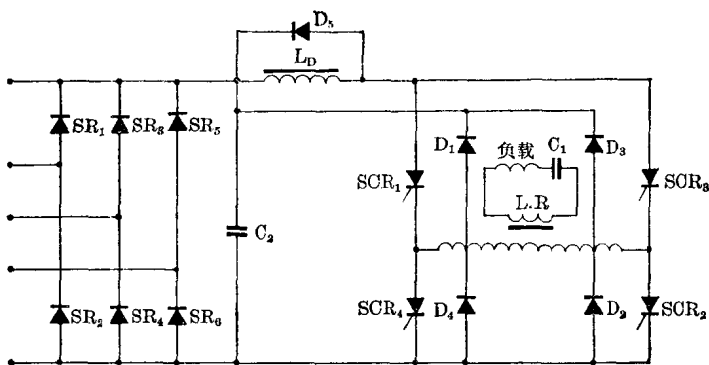


图5 串联补偿中频发生器主电路典型原理图

负载上消耗的有功功率 $P = \frac{u^2}{R} \cos^2 \gamma$

u 为逆变器对角线上有效电压(伏)

R 为变压器次级负载电阻反映到初级的等效电阻(欧)

$\cos \gamma$ 为功率因数

而
$$u = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot K \cdot u_d$$

u_d 为直流电源电压(伏)

K 为系数, 可取 $1 \sim 1.6$ 之间

K 值与反馈电压比及逆变电路的截止角有关。

反馈电压比即反馈时对角线上电压与直流电源电压之比。此比值越大, K 值就大; 电路的截止角越大, 则 K 值也相应增大。

电路换向电容 C_1 的选择与负载电路的 Q 值有关, 对串联逆变器, 换向电容是补偿负载电感及线路上电感的无功电压分量。电容器的总容量 $P_C \geq Q P_R$ (千伏安)。

Q 为电路的品质因数, $Q = \frac{\omega L}{R}$

P_R 为负载上消耗的有功功率(瓩)

L 为负载电感(亨)

R 为负载电阻(欧)

ω 为工作角频率

钢管感应加热时, 在 1000 赫兹时的 Q 值约为 1.5~2.0, 但熔炼有色金属时, Q 值可能高达 10 以上。

电容器的电容值 $C_1 \leq \frac{1}{\omega^2 L}$ (法)。

逆变器 SCR 正向电压的耐压值要高些, 其反向耐压值可低些。

$$u_{\text{正向}} = \frac{\text{SCR 换流截止时对角线上电压} + \text{直流电源电压}}{2}$$

$$u_{\text{反向}} = \frac{\text{SCR 换流截止时对角线上电压} - \text{直流电源电压}}{2}$$

中间回路的电抗器 L_D 主要是防止逆变器短路时, 对 SCR 的 $\frac{di}{dt}$ 有个限制, 使快速熔断器能及时烧断或短路保护装置来得及动作, 从而达到有效地保护 SCR。电抗器两端反并联有滑轮二极管, 是使电抗器中电流在正常工作时得到平滑, 从而消除对逆变电路的不良影响。

三相桥式整流电路中, 每臂 SR 所需电流平均值 I_{SR} ,

$$I_{SR} = 0.368 I_d$$

I_d 为输出直流电流的平均值(安)

滤波电容器的电容量要有足够大, 使得在逆变器 SCR 截止期间反馈电流流入时, 电压不致过分升高。其升高的电压值

$$\Delta U_d = \frac{\int_0^{t_0} i_{\text{反}} dt}{C_2} \text{ (伏)}$$

$i_{\text{反}}$ 为反馈电流瞬时值(安)

t_0 为 SCR 换向过程中截止角的时间(微秒)

C_2 为滤波电容的电容值(微法)

C_2 上流有相当大的中频电流, 选用时及安装时要防止电容器引出线端及电容器本身的过分发热。

电路中, SCR 旁边的 RC 保护元件仍然是需要的, 以吸取瞬时的浪涌电压。但反馈二极管及整流部分二极管旁的 RC 保护元件可以省去。

输出功率的调节靠改变 $\cos \phi$ 来实现, 也即调节逆变器电路的截止角来实现, 此截止角的时间由脉冲控制部分来的脉冲触发时间所决定。

五、串联逆变器的控制电路

串联逆变器的控制, 可以为他激式, 也可为自激式。

他激式控制, 触发脉冲的频率由外加频率发生器所决定;

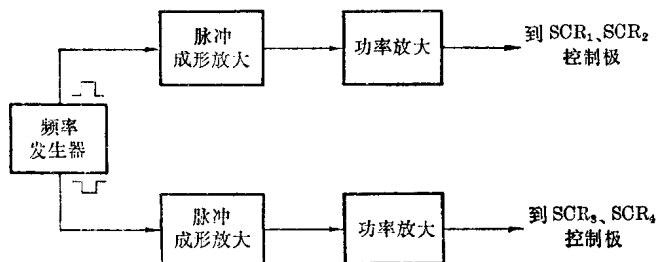
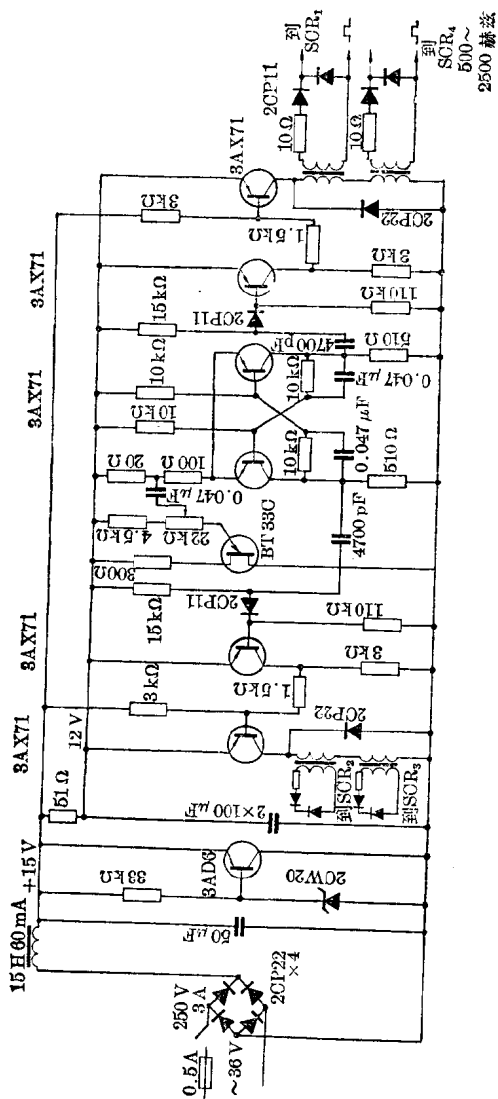


图 6 他激式控制电路方块图



而自激式控制,其频率主要受主电路固有频率所控制。控制电路除了完成触发 SCR 的任务之外,它还起着调节输出功率的作用。

他激式控制电路比较简单,有一个频率发生器,产生一定频率的相位差为 180° 的两路脉冲信号,然后将此脉冲加以成形和放大,变成一定宽度的矩形脉冲输出,以此交替地去触发逆变器的两路 SCR,使两路 SCR 轮流地导通和截止(图 6)。其原理举例见图 7。

他激式控制电路工作的缺点是:

(1) 逆变器工作开始时必须低频启动。因为在第一个周波时,主电路的固有频率受中间电路电抗器电感的影响,使得这时的固有频率 f_0 较低,因此触发信号的频率必须更低些。

(2) 工作时负载参数的变化将使主电路的固有频率变化,如果 f_0 降低而使 $f \geq f_0$,则逆变器的工作条件就被破坏。如果 f_0 上升,则输出功率就相应地降低下去。可见,若电路负载参数在工作时变化相当大,他激式控制电路是不宜采用的。

为了克服上述缺点,脉冲控制电路应采用自激式,自激式的方法可有多种。

(一) 利用正弦波产生自激信号,其原理方块图见图 8。

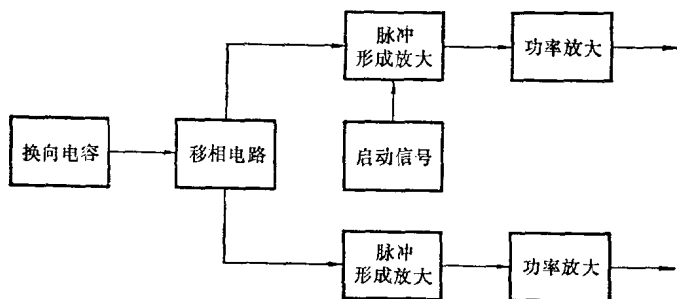


图 8 用正弦波产生自激信号的方块图