

大功率晶体管正弦电流型交流变频宽调速驱动系统*

郭庆鼎 朱英涛 孙荣斌 姜传广

(沈阳机电学院)

〔摘要〕 采用大功率晶体管开关作为中小功率变换装置驱动交流电动机，可以获得优良的控制性能。为进一步节省电能，提高输出转矩，对交流电动机来说，应该采用正弦电流源的控制形式。本文较详细地介绍了在电动机绕组这类感性负载中，利用大功率晶体管开关产生正弦电流源的原理以及本系统的主要环节。

一 前 言

在进给系统中，目前受到重视并比较流行的系统，是功率步进电机驱动系统和直流宽调速力矩电机驱动系统。它们都有各自的优点。为了克服直流宽调速力矩电机驱动系统和功率步进驱动系统的缺点，都希望研究交流伺服驱动系统。

我国学者在直流步进电机的基础上，通过对电机运行理论的深入研究，于1973年首次明确提出了转场式交流步进电机的新概念。本文作者们根据转场式交流步进电机的概念，采用三相正弦电流波的供电形式，把电压源PWM逆变器，电流控制型逆变器和转场式交流步进驱动系统三方面的技术特点结合在一起，研制出了一种大功率晶体管正弦电流控制型变频宽调速电源，用于驱动低速同步电动机或异步电动机。本文介绍的是驱动低速同步电动机，这种驱动系统不但能在很宽的速度范围内进行平滑无级调速，也可以用于位置控制，并且由于输出具有低速大力矩的特点，可以直接拖动负载而省去机械齿轮减速系统。

二 控制方案

在控制同步型或异步型交流电动机的速度时，必须有一个可变频电源。变频电源通常有ac—ac和ac—dc—ac两种变流方式。由于宽调速范围的需要，采用了ac—dc—ac变流方式。

大家知道，电压源PWM逆变器的输出是

一系列幅值恒定而宽度可变的电压脉冲，电压脉冲宽度的分布可按正弦规律调制，依靠电机绕组电感的作用获得幅值最大的电流基波分量，从而得到近似的正弦电流波。电压源PWM逆变器的一个很大优点就是以几乎为1的功率因数由交流电源吸收功率。

通常，电流控制型逆变器的输出为宽度 120° 的方波电流，分别含有20~15%的五次和七次谐波电流。这些谐波电流便产生了幅值很大的转矩脉动，因而很难适应驱动系统在低速下平稳运行的要求，并以滞后的功率因数由交流侧吸收功率。电流型逆变器与电压型相比较，主回路简单，便于实现四象限运行，易于停止定位，可以承受负载侧的短路，调速范围宽，动静态性能优良，因而受到人们的重视。

交流步进电机拖动系统克服了目前流行的直流步进电机拖动系统所存在的一系列缺点，由于采用了交流阶梯波供电，使直流步进电机的电磁铁相吸的工作方式转变到转场式工作方式，大大地提高了电机的效率，并适于定位控制。但由于驱动电流的阶梯波性质，在低速下仍然存在着显著的步进感，难以用于精确定位。

我们综合了上述三种系统的特点，提出了一种电压脉冲调制——正弦电流源控制型变频

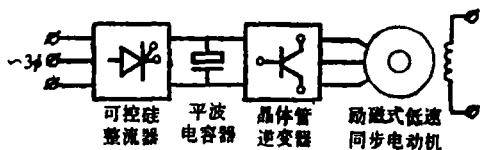


图1 主电路结构图

* 收到本文的时间是1983年12月15日。

宽调速电源的控制方案，其主回路的结构如图1所示。

从可控硅整流器及滤波电容环节来看，图1的主回路犹如一个电压源控制型逆变器的输入侧；从晶体管逆变器输出恒定的交流正弦电流这一点来看，又类似于电流控制型逆变器，但省去了直流回路中的电抗器，依靠电流负反馈回路实现恒流；在等宽的进给脉冲作用下，电机磁场轴线匀步转动。按给定的进给脉冲数确定预定的位置，改变进给脉冲的速率便可进行调速，从这一点来看，则又是一个交流步进系统。所不同的是把阶梯波供电的交流步进系统中的大步距的离散磁场，通过供电电流的正弦化而进一步密集压缩了离散间隔，向连续旋转磁场更逼近了，因而我们所研究的变频电源具有上述三种控制型式的优点。

必须指出，选取电机电流作为被控变量比选电压更有好处。因为电机绕组并不能简单地等效于一个线性元件，施正弦电压于电机绕组（普通交流电机直接接电网就是如此），并不能在电机绕组中获得同电压波形一样的正弦电流，而电流这个变量对电机系统的性能具有更直接的意义。然而电机绕组中电流为正弦波，在以往的技术中却很少见，文献[5]中针对二相永磁步进电机对各种供电波形进行了详细的理论分析，认为正弦电流型供电形式在电机出力等方面最好，称为“最佳控制形式”，但同时又认为由于产生这种最佳控制十分困难而很难应用，只好采用其它控制方式。但实践证明，可以采用比较简单的方法实现正弦电流源这一最佳控制形式，并把这种技术推广到一般工业交流电机的控制系统中。

为了在广阔的频率范围内在电机绕组中都能获得良好的三相正弦电流波形，在ac—dc变换中采用了可控硅整流器，它的直流输出电压作为本系统中的一个辅助受控变量。

受控变量电流有二个参数需要控制，一是电流的频率，改变它调节电机的速度；另一个是电流的幅值，改变它以改变电机的输出力矩。所以本系统的控制思想是，通过三相正弦

电流的频率控制回路控制电机的速度，通过对可控硅整流器输出直流电压幅值的控制，以满足对转矩和改善波形的需要。整个控制系统如图2所示。

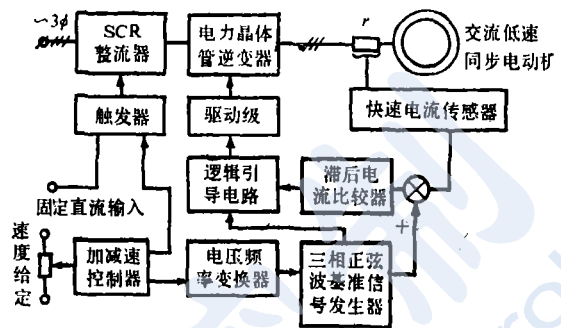


图2 控制系统原理图

该系统的大致工作原理如下：

三相正弦波发生器所输出的三相正弦信号作为电机绕组电流的指令，随时与检测出来的电流进行连续比较，其差值通过滞后电流比较器放大后，与指令信号结合在一起共同决定逻辑引导电路的工作状态，准确地把脉冲分配到有关的基极驱动级，使大功率晶体管动作，将绕组电流维持在指令值上。因为指令按三相正弦规律变化，三相绕组电流也将追随指令按同样的规律变化。为了能在各种频率下绕组电流都能较好地复现指令，因而需要调节可控硅整流器的输出电压。当给定速度较高时，V—f变换器输出的脉冲频率也较高，电流指令的频率也随之提高而使电机在较高的速度下运行，这时就要可控硅整流器能输出较高的电压，以增强实际绕组电流跟随指令信号的能力，改善电流波形的正弦性，提高电机的输出力矩。

三 变频电源系统的组成及其工作原理

驱动低速同步电动机的变频电源系统主要由可控硅整流器、大功率晶体管正弦电流型高频逆变器、三相正弦波参考信号发生器、滞后电流比较器、快速电流传感器、电压频率变换器、晶体管基极驱动级、加减速控制器以及保护

电路等环节组成。

该电源采用数字控制方式，通过三相正弦波基准信号控制逆变器。低速同步电动机每相绕组按指令脉冲通电，每一个脉冲对应于一个小的转角 $\Delta\theta$ ，各相电流对应于指令呈正弦波型。因而在电机气隙内产生连续旋转磁场。根据指令脉冲的数目即可控制电机转子的转角，改变指令脉冲的频率即可改变电机的速度。

这个电源系统主要有二个控制回路。一个是可控硅整流器输出电压的幅值控制。另一个是电流频率控制回路，二者具有适当的数学关系，在一定的范围内通常是随着频率的增长，整流器的输出电压也相应提高，但在频率低于 10 Hz 以下时，应保持整流器有足够高的输出电压，否则将降低电机绕组电流追随指令的能力，波形变坏，逆变器可能产生较大的不稳定性。

频率控制回路是一个电流负反馈回路。电流指令是三相正弦波信号，线性快速电流传感器检测出的绕组电流作为负反馈信号与指令比较，借助于大功率晶体管及其驱动级的高速响应能力，使电机绕组电流适应指令而呈现正弦波型，这就以相当的精确性近似地实现在电机绕组内产生正弦波的要求。

下面就电源系统的主要环节及其原理作扼要说明。

1. 大功率晶体管逆变器产生正弦电流的原理

逆变器的作用是将可控硅整流器输出的直流电压变成频率可调的交流电流送入电机绕组，并能准确复现电流指令的正弦波形。在以往的技术中，三相桥式电路只能输出电压或电流方波（或阶梯波），在这里却获得了正弦电流波。为了便于了解三相桥式电路的逆变器产生正弦电流波的原理，下面以单相全桥电路的逆变器为例加以详细说明。

在电机绕组中产生正弦电流的原理如图 3 所示。

由低值电流取样电阻 r 检测到的电流信号通过快速电流传感器后，连续地与正弦参考信

号进行比较。当实际电流偏离参考信号时，电力晶体管便产生动作，以减小这种偏差，使绕组中的负载电流自动适应正弦参考信号，于是在负载中便得到了正弦波电流。

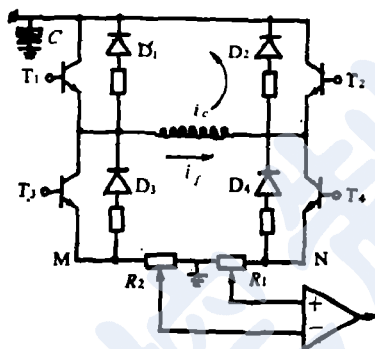


图 3 单相逆变器电路

下面，我们较详细地分析在数字合成正弦波一个节拍之内，调制逆变器的直流输入电压产生正弦电流的过程。

如果在正弦参考信号的一个周期内，将其离散为等间隔的 48 个节拍，即低速同步电动机作步进运动时，其步进精度相对于基波电流来说，为 $360^\circ/48 = 7.5^\circ$ （如转子齿数为 50，则对应的机械角为 $7.5/50 = 0.15^\circ$ ），在这一拍之内，由于使用了快速电流传感系统，电力晶体管可动作数十次。滞后电流比较器的动作电平愈低，电力晶体管开关的次数就愈高，绕组电流就愈接近于参考信号。

当检测出来的绕组实际电流小于参考信号时，滞后电流比较器将电流差值信号电压放大，由逻辑引导电路把相应的信号分配到电力晶体管（例如电力晶体管 T_1 和 T_4 参见图 2），使之饱和导通。于是把幅值恒定的电压方波加到等效于 $L-R$ 负载的电机绕组上，电流以某一初始值 I_0 开始按指数规律上升

$$i_c(t) = \frac{E}{R_1} + (I_0 - \frac{E}{R_1}) \exp(-\frac{t}{\tau_1}) \quad (1)$$

式中 R_1 为充电回路总电阻， $\tau_1 = L/R_1$ 为时间常数（ L 为绕组总电感）。

当电流达到 I_R （第三拍参考信号）时，

电力晶体管并不动作。当达到 t_1 时, 充电电流

$$i_c(t_1) = I_{R3} + \Delta I = I_1 \quad (2)$$

此时电力晶体管打开, 电流经由 T_4 和 D_3

续流放电, 放电亦按指数规律进行:

$$i_f(t) = I_1 \exp(-t/\tau_2) \quad (3)$$

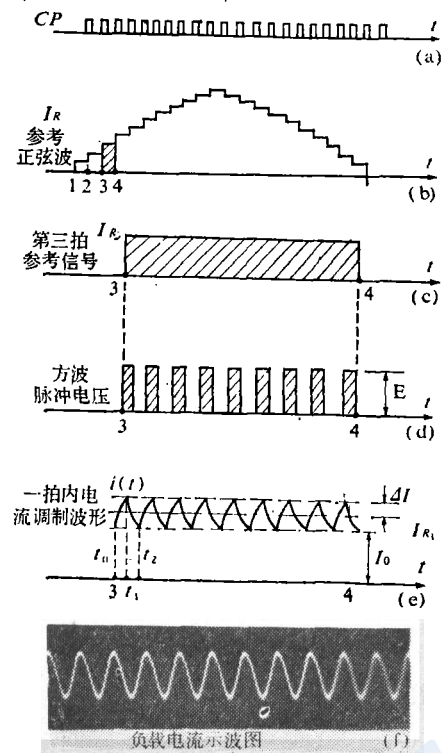


图4 在一拍内负载电流的调制过程

式中 $\tau_2 = L/R_2$ 为放电回路时间常数 (R_2 为放电回路的总电阻)。当到达 t_2 时, 放电电流为

$$i_f(t_2) = I_2 = I_{R3} - \Delta I \quad (4)$$

在 t_2 时, 又重使电力晶体管 T_4 导通, 以增加负载电流。

显然, 在一拍之内, 例如图4所示的第三拍内, 参考信号 I_{R3} 为恒定不变, 也就是要求在第三拍内负载电流恒定不变。但实际上负载电流围绕参考信号 I_{R3} 附近波动, 波动的范围为 $2\Delta I$, 如果调节滞后电流比较器的动作电平, 则可以把 $2\Delta I$ 压缩到很小的范围, 以致于可以认为负载电流同参考信号基本上一样。在一拍的部分时间里所拍摄的电调调整过程示波图如图4(e)所示。对于其他各拍中电流重现参考信号的过程完全与此相同。在正弦波的正半周内, 电力晶体管 T_1 斩波, T_4 一直闭合导

通, 在正弦波的负载半波时, T_2 斩波, T_3 一直闭合, 这样就可以在负载中得到完整的正弦波, 如图4(f)所示。

2. 三相正弦波参考信号发生器

为了在交流电机绕组中获得正弦电流, 按照负反馈原理, 必须提供一个正弦信号作为控制依据。

现代交流变频调速装置对三相正弦波参考信号发生器的要求主要有:

- ①能平滑地改变输出信号的幅值;
- ②能均匀地改变正弦波输出信号的频率;
- ③能在任意时刻改变正弦波输出信号的相序;
- ④在三相正弦系统中, 各相输出信号要锁定在互差 120° 的相位上;
- ⑤在要求精确定位的系统中, 如果决定正弦波频率的时钟脉冲停止进给, 输出信号的电压幅值应保持在时钟停止时所具有的数值上, 而当时钟重新输入时, 输出信号的幅值应自停止时所具有的数值开始变化;
- ⑥输出信号的谐波失真应尽可能小。

采用数字电路组成的48个节拍发生器所产生的波形如图5所示。

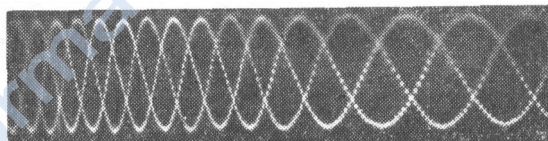


图5 正弦参数信号—电流指令

改变v-f变换器的输出频率, 也就改变了正弦波指令的频率。为了简单, 它的幅值控制和相序控制在此就不作介绍了。

3. 线性快速电流传感器

上面介绍的正弦电流控制型逆变器, 实质上是一个电流瞬时值控制系统, 就电流环来说也是一个电流随动系统, 它能精细控制正弦电流的幅值、频率、相位和波形等参数。这除了因为大功率晶体管比可控硅具有高得多的动态响应能力之外, 还因在本系统中采用了线性快速电流传感器。

在可控硅电动机系统中的电流检测大都采

用电流互感器, 由于可控硅的滞后作用和电流互感器的电磁惯性影响, 实际上只能对主回路电流在一段时间间隔上实现平均值调节, 很难得到正弦度良好的交流电流。我们采用了图6所示的电路与系统的其他环节相配合, 在主回路中得到了良好的正弦波形。

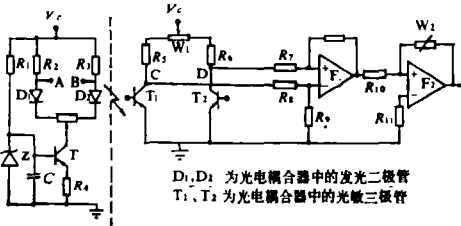


图6 线性快速电流传感器电路

这种电流传感器主要是由串入电机绕组的低值取样电阻 (0.07Ω , 实际上是一段导线)、光电隔离器差动级和二级运算放大器所组成。这样可以对主回路电流实现快速无失真的取样, 然后放大到所需要的电平。为了得到快速响应, 运算放大器中的校正电容的数值应尽可能小些。光电隔离器工作在线性区, 在线性特性传递信号的同时, 把主回路和控制回路在电气上进行隔离, 接成差动形式可以减小温漂的影响。这种电流传感器输出响应的总延迟在数十微秒以内。对目前这种应用来说, 与交流电

(上接11页)

$$K(m^2 I - A_{i+1}^2) + (m^2 I - A_{i+1}^2)^T K - KBR^{-1}B^T K = 0 \quad (3.5)$$

的最大解 K_{i+1}^* , 验证其是否为零阵, 若 $K_{i+1}^* \neq 0$, 继续进行第3步的运算, 直至算到某一步 $K_i^* = 0$ 。

5) 设进行 k 次运算后得到 $K_{i+1}^* = 0$, 说明 $A_k - BR^{-1}B^T P_k$ 的特征根都已位于区域 F 上, 令 $Q = Q_0 + \sum_{i=1}^k r_i K_i^*$, $P = \sum_{i=0}^k P_i$, Q 即为所选择的加权阵。显然 $Q \geq Q_0 \geq 0$ 。以 $(R \ Q)$ 为加权阵的二次型指标 (3.2) 所对应的最优闭环系统为 $(A - BR^{-1}B^T P, B)$, 其系数阵 $A - BR^{-1} \cdot B^T P$ 的特征根全都位于区域 F 上, 即区域 G 的内部。

流互感器构成的电流传感器所具有的毫秒级延迟相比较, 算是很快了。

为了节省篇幅, 系统中的其它环节, 如晶体管的基极驱动电路, 逻辑引导电路, 加减速控制电路等在此从略。

四 结 论

这种新型变频电源系统综合了电压源 PWM 逆变器, 电流控制型逆变器以及交流步进拖动的特点, 适于作为速度控制和位置控制。电路稍加改变后, 这种变频电源也可以驱动一般交流异步电动机。

参 考 文 献

- (1) 刘宗富, 交流步进拖动的步进电机, 东北工学院学报, 1978, 4。
- (2) 刘宗富, 交流步进拖动的晶体管电源, 东北工学院学报, 1978, 4。
- (3) 孙裕译, 步进电机的控制形式, 数控技术通讯, 1978, 2。
- (4) Rasappa G., Paianiappan and Joseph Vihayathil, A Control Strategy for Reference Wave Adaptive Current Generation, IEEE, Vol. IECI-27, No. 2, May 1980, pp. 92-96.

由上述证明过程可以看出, 所有要求 $(A \ C)$ 能观的条件都可削弱为 $(A \ C)$ 能检测, 但在实际应用中, 能观性条件往往比能检性条件容易检验, 一旦检验出 $(A \ C)$ 是能观的, $(A \ C)$ 自然就是能检测的了。

参 考 文 献

- (1) N. Kawasaki & E. Shimemura, A Method of Deciding Weighting Matrices in an LQ-problem to Locate all Poles, Preprints of IFAC 8th Triennial World Congress, 1981, Vol. IV, Session 18, pp. 54-59.
- (2) Willems J. C., Least Squares Stationary Optimal Control and the Algebraic Riccati Equation, IEEE, Trans. Autom. Control, AC-16, 1971, pp. 621-634.

eigenvalues was proposed, and some corresponding algorithms were developed. In this paper, this design idea and Seheim's algorithm which is easy to be implemented on a computer are introduced, and some further improvements on the algorithm are presented.

By the improved algorithm the closed-loop eigenvalues can be put closer to the expected values than those from Seheim's, and it is simpler as well. As an application example, the optimal pole assignment method and the normal one are used to design a longitudinal stabilization system of a helicopter respectively, and the two design methods are compared by digital simulation. (p.12)

The Design of Dynamic Compensators for Dominance Improvement

Bao Yuanlu Pang Guozhong Li Sifu

This paper deals with the design of dynamic compensator $K(s) = K^{(-\alpha)} s^{-\alpha} + \dots + K^{(0)} + K^{(1)} s + \dots + K^{(\beta)} s^{\beta}$ which reduce open loop interaction in a m -input/ m -output multivariable system. Up to now a $(\alpha + \beta + 1)m \times (\alpha + \beta + 1)m$ eigenvalue/vector problem had to be solved for pseudodiagonalisation. In this paper an improved algorithm which reduces this problem to a 2×2 eigenvalue/vector problem is presented. Two examples designed interactively by computer are included to illustrate the effectiveness of the procedure. (p.17)

An Application of Allocation-coordination Method for Large Scale Population Systems

Wang Huanchen

Abstract

In this paper the application of Goal-Allocation and Coordination Method of the Large Scale Systems Theory to large scale population systems is discussed. The mathematical expressions and their brief discussions are given. (p.22)

A Power Transistor Based Speed Control System

Guo Qingding et al.

When medium and small power convertors of power transistors are used to drive AC and DC motors, it is possible to have good control performance. In order to save more energy and increase torque output, the control strategy of sine-wave current source should be used for the AC motors.

In this paper, the principle for generating sine-wave current by power transistors with inductive load such as motor windings is described in detail. The main components of this system are described too. (p.26)