



# The Present Situation and Prospect of the Application of Frequency Conversion Technology in the Starting of Heavy Load Motors

Li Xianming

Beijing Guchuan Rice Industry Co., Ltd., R & D and Manufacturing Division, Beijing, China

**Email address:**

apocalypse@sina.com

**To cite this article:**

Li Xianming. The Present Situation and Prospect of the Application of Frequency Conversion Technology in the Starting of Heavy Load Motors. *Asia-Pacific Journal of Energy and Power Engineering*. Vol. 2, No. 1, 2020, pp. 1-4.

**Received:** July 21, 2019; **Accepted:** February 19, 2020; **Published:** April 23, 2020

**Abstract:** Normal starting will have a great impact on the power grid and the equipment, and thyristor startup will reduce the torque. This is a common problem in industrial production. This article introduces the application of variable frequency technology in the startup of high-power motors. And the derivation shows that the three frequency conversion technologies have the advantages of high total power and low harmonic components compared to the traditional single-phase frequency conversion. Based on this, the discrete frequency conversion technology is demonstrated. The calculation shows that the discrete frequency conversion technology can reduce the starting current. It has the advantages of shock without loss of torque. At the same time, this paper also shows through calculation that it is impossible to achieve safe speed regulation only by adjusting the frequency. It must cooperate with voltage control. Frequency conversion technology can better solve the control problem, and achieve stepless speed regulation and automatic servo. Is of great significance. On the basis of these calculations, this article also looks forward to the application of future frequency conversion technology.

**Keywords:** Frequency Converter, Frequency Conversion Technology, Motor, AC

---

## 变频技术在重负荷电动机启动中应用的现状及展望

李先明

北京古船米业有限公司，研发制造事业部，北京，中国

**邮箱**

apocalypse@sina.com

**摘要:** 电动机的常压启动会对电网及设备本身造成很大冲击，而晶闸管启动则会降低扭矩，这是工业生产中常见的问题，本文介绍了变频技术在大功率电动机启动中的应用，通过计算和推导说明了三相变频技术相对于传统单相变频具有总功率高、谐波分量低的优势，并在此基础上论证了离散变频技术，通过计算证明了离散变频技术即可降低启动电流冲击，又不会损失扭矩的优点，同时本文还通过计算说明单纯调节频率无法实现安全调速，必须配合电压的控制，变频技术可以较好的解决控制问题，对与实现无极调速和自动伺服具有重要意义。在理论计算的基础之上，本文还对未来变频技术的应用做了展望。

**关键词:** 变频器，变频技术，电动机，交流电

---

## 1. 研究背景及研究意义

三相交流电动机具有结构简单、运行可靠、没有污染等一系列优点，在生产过程中作为原动机去拖动各种生产机械。然而，电动机的启动特性却是一个长期困扰使用者的困难问题。这是因为电动机在恒压下直接启动，其启动电流约为额定电流的4-7倍[1]，其转速要在很短时间内从零升至额定转速，这会在启动过程中产生冲击，加速电动机的损耗，同时在启动瞬间强大电流的冲击下，还将引起电网电压降低，影响到电网以及其它设备的正常运转。

基于晶闸管调压原理的常规软启动器，虽具有电压可连续调节、省去换档硬开关、减少启动设备体积等优点，但也存在降低启动扭矩的局限[2,3,4]，因此其应用受到了限制，常限于轻载启动的应用场合。对于需重载或满载启动的设备，采用这样的启动方式，不但达不到减小启动电流的目的，反而会增加软启动器的晶闸管负担，因此研究一种适用重载启动的启动方式是一个极具价值课题。变频技术可较好的解决这些问题。

## 2. 变频器的工作原理

交—交变频器实际上是一组反并联的整流电路组成的，每组反并联的整流电路构成一组的变频器，对三相的变频器来说，就需要三组这样的整流电路。在控制上，使三组的整流电路相互相差120°角度。这样改变正组和反组整流器切换速度，就改变了输出频率。改变整流器控制角 $\alpha$ ，就改变了输出电压的大小，即保持V/F不变，因此可保证恒力矩启动，所以变频器变频启动对重载电动机来讲是最好的启动设备。其具体原理如图1所示。

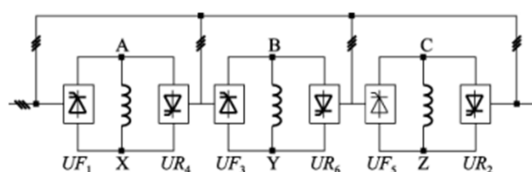


图1 变频器原理图。



图2 变频器改造方案。

## 3. 单相变频和三相变频

在交流电路中电流 $I_t$ 和电压 $U_t$ 一般存在相位差，所以 $t$ 时刻的功率 $P_t=U_t I_t$ 也随时间变化，其中 $t$ 时刻的功率 $P_t$ 称为瞬时功率；

设： $I_t=I_0 \cos \omega t$ ， $U_t=U_0 \cos (\omega t+\varphi)$

则 $P_t=U_0 I_0 \cos \omega t \cos (\omega t+\varphi)=\frac{1}{2} U_0 I_0 [\cos \varphi+\frac{1}{2} \cos (2 \omega t+\varphi)]$

瞬时功率在一个周期内的平均值称为平均功率，它是电流实际输出的功率，

$$P=\frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt=\frac{1}{2} U_0 I_0 \cos \varphi=U_e I_e \cos \varphi$$

其中 $I_0$ 、 $U_0$ 为电流最大值， $I_t$ 、 $U_t$ 为 $t$ 时刻的电流、电压， $\omega$ 为发电机的角速度， $\varphi$ 是与负载有关的常数，与时间无关。 $U_e$ 、 $I_e$ 为电流的有效值， $U_e=\frac{1}{\sqrt{2}} U_0$ ， $I_e=\frac{1}{\sqrt{2}} I_0$ 。

三相交流电可看作有三个频率、振幅完全相同的三个单相交流电构成，由于三相发电机的设计结构，三组交流电的相位互相差120°，其波形如下。

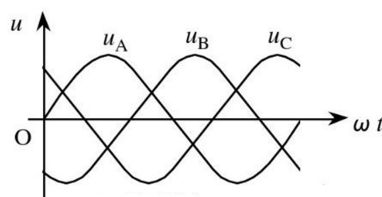


图3 三相交流电波形图。

三组电压的表达式分别为： $U_A=\sqrt{2} U_0 \sin \omega t$ ， $U_B=\sqrt{2} U_0 \sin (\omega t-120^\circ)$ ， $U_C=\sqrt{2} U_0 \sin (\omega t+120^\circ)$ ，电流也具有类似的关系。

以对称负载为例，他的总功率等于各相功率的总和，即 $P=P_A+P_B+P_C$ 。

$$P_A=U_A I_A=\sqrt{2} U_p \sin \omega t \times \sqrt{2} I_p \sin (\omega t-\varphi)=U_p I_p [\cos \varphi-\cos (2 \omega t-\varphi)]$$

$$P_B=U_B I_B=\sqrt{2} U_p \sin (\omega t-120^\circ) \times \sqrt{2} I_p \sin (\omega t-120^\circ-\varphi)=U_p I_p [\cos \varphi-\cos (2 \omega t+120^\circ-\varphi)]$$

$$P_C=U_C I_C=\sqrt{2} U_p \sin (\omega t+120^\circ) \times \sqrt{2} I_p \sin (\omega t+120^\circ-\varphi)=U_p I_p [\cos \varphi-\cos (2 \omega t-120^\circ-\varphi)]$$

即 $P=P_A+P_B+P_C=3 U_p I_p \cos \varphi$ ，其中 $U_p$ 、 $I_p$ 为相电压、相电流，此规律对于三角接法和星型接法都适用。[5]

对称三相电路的瞬时功率是一个常量，其值等于有功功率。这是对称三相电路的一个优越性能，这一性能称为“瞬时功率平衡”。[5]此外，三相交流电的谐波分量少，这是由于三相交流电是三个交流电的组合，某些谐波分量互相抵消，这使总谐波大量减少。[6,7]这是三相交流电的又一个重大优势。

由此可以看出，三相交流电的总功率高于单相交流电，其谐波分量对电路影响也较少，应用于变频电路，三相交流电也将优于单相交流电。

## 4. 离散变频技术

异步电动机离散变频启动过程是利用调节晶闸管的触发序列，逐渐减小分频数、提高频段频率，最后达到从离散变频启动方式切换到工频电源运行方式的目的[8,9,10]。

离散变频启动是通过采用 $n$ 个工频周期组合为一个交流电周期，选择在其正负半周期分别只让工频电压的正负

半波导通的方式，来实现 $n$ 分频，在这种启动过程中，新频率是对原有电源分频而得，即新频率是工频电源的一系列子频率，而不是连续的变频启动过程，故称之为离散变频技术。

采用离散变频软启动方法，在保留常规晶闸管调压软启动器结构的情况下，利用晶闸管的通断实现变压变频，其具体原理如下。

在实际运用中，离散变频软启动通常采用 $3n+1$ 分频来启动电动机。正常启动时，电动机的转差率 $S=1$ ，此时转矩为：

$$T_{st} = \frac{m_1}{\Omega_s} \frac{U_1^2 R_2}{(R_1 + cR_2)^2 + (X_{1\sigma} + cX_{2\sigma}')^2} \quad (1)$$

其中， $m_1$ 为相数， $\Omega_s$ 为同步角速度， $R_1$ ， $R_2'$ 和 $X_{1\sigma}$ ， $X_{2\sigma}'$ 分别为定、转子相绕组电阻和漏感抗。

对于 $n$ 分频， $\Omega_s$ ， $X_{1\sigma}$ ， $X_{2\sigma}'$ 均为原工频对应参数的 $1/n$ 。设 $n$ 分频下输出电压的基波幅值为 $\alpha_n U_m$ ，则 $n$ 分频下电动机的启动转矩为

$$T_{st}' = \frac{n^3 m_1}{\Omega_s} \frac{\alpha_n^2 U_m^2 R_2}{(R_1 + cR_2)^2 n^2 + (X_{1\sigma} + cX_{2\sigma}')^2} \quad (2)$$

设 $\Gamma$ 型等效电路中，定转子漏抗与电阻的比值为 $\lambda$ ，即

$$\lambda = \frac{X_{1\sigma} + cX_{2\sigma}'}{R_1 + cR_2} \quad (3)$$

则， $n$ 分频下电动机的启动转矩为

$$T_{st}' = \alpha_n^2 n^3 \frac{\lambda^2 + 1}{\lambda^2 + n^2} T_{st} \quad (4)$$

即使用 $n$ 分频下，启动转矩是正常启动下的 $\alpha_n^2 n^3 \frac{\lambda^2 + 1}{\lambda^2 + n^2}$ 倍。因此由(1)、(2)、(3)式可知，采用离散变频软启动技术，不仅可以降低启动电流，还克服了常规软启动方法启动转矩不足的局限，对于重负荷电动机来说具有重要意义，这是离散变频技术的一个显著优点。

## 5. 变频调速

电网的交流电使恒压恒频的[11-12]，工业生产中很多场合需要对电动机进行无级调速（如风机和空压机等），根据交流电动机原理可知，交流电动机转速与频率有关，其具体原理如下，

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} \quad (5)$$

其中 $f_1$ 为电动机定子绕组供电频率， $p$ 为旋转磁场的极对数， $n_1$ 为定子同步旋转磁场同步转速。

$n_1$ 与 $n$ 的关系为 $n=n_1(1-S)$ ，其中 $S$ 为转差率，由于交流电动机的转子跟随磁场同步旋转，因此理论上调节频率 $f_1$ 就可以实现对电动机的无级控制。但现实中，转速还会受到电压的影响，根据交流电机电压方程

$$U_1 \approx E_1 = 4.44f_1 K_1 N_1 \Phi \quad (6)$$

其中 $U_1$ 为定子相电压， $E_1$ 为定子相电动势， $N_1$ 为定子相绕组总匝数， $K_1$ 为基波绕组系数， $\Phi$ 为每极气隙磁通量。

对于特定的电动机， $K_1 N_1$ 为常数，在电压不变的条件下，根据式(6)，改变频率，则电动机磁通量必会改变，如将频率 $f_1$ 增加，则会引起磁通量 $\Phi$ 下降，交流电机的扭矩公式为：

$$T = C_T \Phi I_a$$

其中 $C_T$ 为转矩常数， $\Phi$ 为每极主磁通， $I_a$ 为电枢电流。

因此增加频率 $f_1$ 虽然会使速度增加，但会导致扭矩下降，对于恒定负载电动机来说，不但不会使转速增加，而且会发生堵转现象（即电机转速被负载锁定在一个特定值无法提升）[13]。

相反如果减少频率 $f_1$ ，则磁通量 $\Phi$ 会增强，由于电动机铁磁材料的磁化曲线为非线性，所以在设计电动机的时候为了建立更强的磁场，其工频下的设计状态已经接近磁饱和[14-16]，此时在增加磁通量会引起励磁电流急剧增强，进而缩短电动机使用寿命甚至烧坏电动机。

由上述讨论可见，单纯改变频率不能进行正常调速，需同时改变定子的供电电压，通过电压和频率的配合才能实现安全调速，但是这样不但会使控制系统非常复杂，还会增加协调的难度，使维护成本增加。

通过前面的讨论我们可知，将三组变频器并联，使三组的整流电路相互相差 $120^\circ$ 角度。这样改变正组和反组整流器切换速度，就改变了输出频率。改变整流器控制角 $\alpha$ ，就改变了输出电压的大小，这样可以大大简化控制。容易实现对电机转速的自动伺服。

综上所述，采用交交变频启动，不但可以实现重载电动机的软启软停，还能在一定程度上简化控制，易于实现无级调速和自动伺服转速。

## 6. 总结及展望

- (1) 重负荷电动机的启动会对自身和电网造成冲击，影响生产的安全，基于晶闸管的软启动技术，存在降低扭矩的问题，因此应用受到了局限，变频启动技术可以较好的解决这些问题。
- (2) 变频技术分为单相变频技术和三相变频技术，经过计算，三相交流电的总功率高于单相交流电，谐波分量也较少，且由于工业生产中常用的电源为三相交流电，所以三相变频技术的应用更为广泛。
- (3) 离散变频是通过将工频进行分频来实现的，离散变频软启动结合了传统晶闸管软启动器和变频器的优点，可以在不增加成本的前提下可有效减少启动电流，提高启动扭矩。在工业生产中具有良好的应用前景。
- (4) 交流电动机转速与频率有关，但单纯改变频率不能实现调速，需配合电压调整才能实现无级调速，使用三组变频器并联可方便的实现对频率和电压的控制，对于实现无极调速与自动伺服具有重要意义。
- (5) 作为一项发展中的新技术，异步电动机离散变频软启动研究需要做的工作仍有很多，未来可从以下方

面进行研究，一是建立基于变频控制的异步电机软启动控制系统整体动态仿真模型，分析不同因素的影响，二是可以研发基于变频软启动的软件，使控制进一步实现自动化。

## 参考文献

- [1] 顾绳谷.电机及拖动基础[M].北京:机械工业出版社, 2004.1。
- [2] 徐甫荣. 采用分级交—交变频方法的高转矩软起动器的研制[J].电源技术应用, 2005, 8(2):14-19。
- [3] 赵涛.三相异步电动机软启动与调压节能技术的研究[D].天津: 天津理工大学, 2017。
- [4] 贾芳云, 王大为.浅议三相异步电动机节能软启动技术[J].能源与节能, 2011 (6) : 36-37; 94。
- [5] 邱勇进.电工基础[M].北京:化学工业出版社, 2016.9。
- [6] 陈伟, 阿不力米提·力提甫.异步电动机用交—交变频技术实现重载启动[J].工业计量2011年第S2期131-134。
- [7] 李文志.异步电动机复杂不对称运行下空间矢量建模及能耗分析[D].邯郸: 华北电力大学, 2014。
- [8] 严焱, 王宏华.异步电动机离散变频软启动技术的发展[J].机械制造与自动化, 2012, 41(6):196-199。
- [9] 胡红明.异步电动机软起动器的研究[D], 武汉:华中科技大学, 2010。
- [10] 马跃贤.三相异步电机离散变频软起动的关键技术研究是实现[D], 天津:天津大学, 2007。
- [11] 党元.浅谈工厂供配电设计的技术要点[J].时代农机, 2018, 45(7): 241-242。
- [12] 姚锡禄.工厂供电[M].北京: 电子工业出版社, 2013.3。
- [13] 吕偿李林李彦霞.三相异步电机测试技术与方法[J].河南科技, 2019, 658(23): 133-136。
- [14] 爱德华·休斯.电工学[M].北京:机械工业出版社, 2017.10。
- [15] 王兆安.电力电子技术[M].北京:机械工业出版社, 2004.2。
- [16] 王宏华.异步电动机软启动技术的发展与现状[J].机械制造与自动化, 2011, (3):1-5。