

东北大学
硕士学位论文
大型电动鼓风机变频启动系统主电路的分析
姓名：李杨
申请学位级别：硕士
专业：控制理论与控制工程
指导教师：顾树生
2000. 2. 1

摘 要

本文对大型高炉的电动鼓风机变频启动系统进行了比较详细的理论和实例分析。首先,简要介绍了高炉鼓风机的一般构成情况、国内外现状及其发展趋势;其次,论述了采用同步电动机进行拖动的必要性;然后,从理论上详细分析了大型同步电动机变频启动系统的主电路;最后,着重解剖了首钢公司现有的两套典型的变频启动系统的具体情况。

通过本文对变频启动系统的分析,使作者更深入地了解了高炉鼓风机变频启动的全过程和软启动装置的原理、结构以及控制逻辑;从而为更好地理解 and 掌握变频调速技术,更有效地为生产实践服务创造了条件;同时也为首钢公司今后在这这方面的发展提供了理论依据。

关键词: 高炉鼓风机 同步电动机 变频器 启动 晶闸管 主电路 逆变器 换流 无换向器电动机

Abstract

The article elaborates the theory and analysis of practise about variable-frequency starting system for blast furnace blower. First of all, we give the information of the general composure of blast furnace blower, the currency indoors and offdoors and the tendency for development; Second, we discuss it is necessary to apply synchromous motoer; Third, we make a elaborate analysis on the power section of variable-frequency starting system from the point of theory; And last, we try our best to analysis two temporery system of ShouGang Corporation.

According to the analysis of the system in detail, we deeply understand the whole process of soft start, the theory, the instructure, and the logic of controlling; which supplies the convienencs for us to understand and apply the technology of adjustable-speed ac drive system, and then we can creat more effective curcumstuition for practising; which also supples a rationale for the furture development of ShouGang Corporation.

Keyword: Blast Furnace Blower, Synchronous Motor, Frequency Converter, Starting, Silicon Controlled Rectifier, Power Section, Inverter, Commutation, Electronic commutator Motor

第一章 绪 论

高炉冶炼要求高炉鼓风的供应必须是长期、连续、均匀和稳定的，因此，根据这一要求来选择采用高炉鼓风机和原动机及其相应的配套设备就显得很重要。

1 — 1 选题的意义

高炉鼓风机组是钢铁企业中炼铁生产的关键设备（过去均为冶金部的部控设备），其特点是构成庞大，设备精密，造价昂贵（目前一台中型机组的项目建设费用约需 1.5 亿元人民币），整个机组是一个涉及机械、液压、电气、控制、计算机、仪表等多学科、多专业的极其复杂的系统。

本人自 1988 年毕业以来，在首钢总公司动力厂从事高炉鼓风机方面的工作十一年，选择这一题目的目的是想借此难得的学习机会，对这十余年的工作做一个比较系统的理论总结，同时也能对国内、外的现状和发展动态进行深入的了解，为今后首钢公司在这方面的发展和提高提供一些有参考价值的意见。

1 — 2 高炉鼓风机组

高炉鼓风机组是一个比较庞大、复杂的系统，主要包括：高炉鼓风机、原动机、传动装置和外围辅助系统。其特点是高温、高压、大流量、高速度、大功率和高度自动化等。

1 — 2 • 1 高炉鼓风机组的主工艺流程

高炉鼓风机组的主工艺流程：见图：图 1.2.1

1、高炉鼓风机：



图 1.2.1

其作用是：将空气过滤器送入的较为纯净的空气，通过加压形成具有一定压力和流量的高炉鼓风，并根据高炉炉况的需要进行风压和风量的调节。

高炉鼓风机的结构和型式较多，目前比较常用的是全静叶可调式轴流鼓风机。

2、原动机：

其作用是：拖动高炉鼓风机运动，为其提供机械能。

原动机的结构和型式较多，目前比较常用的是同步电动机或变转速热力原动机驱动。在使用同步电动机驱动时，一般要有相应的励磁装置，并采用变频软启动方式（静止变频起动装置）。随着目前高炉大型化所要求的大容量鼓风机以及电气自动化技术的不断进步，用同步电动机作为原动机驱动高炉鼓风机，并采用变频调速技术进行启动和负荷调节将是一种研究和发展方向。

3、传动装置：

其作用是：将高炉鼓风机与原动机联接起来，使原动机的机械能传递至高炉鼓风机。它的配置形式有两种：

- (1). 直联式：原动机和鼓风机直接联接传动，中间用联轴器。
- (2). 间接式：原动机和鼓风机通过变转速传动装置（例如：增速器、减速器、液力耦合器等）进行间接联接传动，在变转速传动装置的两侧用联轴器。

传动装置的结构和型式较多，根据主工艺的要求不同可以选择不同的形式，目前比较常用的是六级以上精度的硬齿面渐开线变速器，联轴器则常用半挠性的膜片式联轴器。

4、外围辅助系统:

(1). 空气过滤器:

其作用是: 将一部分大气汇集起来, 并进行除尘过滤, 以保护鼓风机的动、静叶片, 延长其使用寿命。

空气过滤器的结构和型式较多, 目前比较常用的是强制反吹的布袋式除尘器。

(2). 防喘装置:

其作用是: 对鼓风机的运行工况进行保护。

防喘装置的结构和型式较多, 目前比较常用的是液压蝶阀防喘装置。但是电动双座阀防喘装置将是一种研究和发展方向。

(3). 送风装置:

其作用是: 将高炉鼓风机生产出来的高炉鼓风安全地送出系统, 主要包括: 逆止阀、主送风阀、高炉配风阀和管路系统。

送风装置的结构和型式较多, 目前比较常用的是:

- a. 逆止阀常用气动助推+重锤式。电动助推+重锤式将是一种研究和发展方向。
- b. 主送风阀常用电动金属硬密封蝶阀。
- c. 高炉配风阀常用电动金属硬密封蝶阀。
- d. 管路系统常用普碳钢卷焊管和不锈钢多波纹补偿器。

(4). 变配电系统:

其作用是: 为高炉鼓风机组提供电能, 主要分成高压系统和低压系统。

变配电系统应根据主工艺的不同要求进行合理配置。

(5). 供水系统:

其作用是: 为高炉鼓风机组提供冷却用水, 主要分成闭式系统和开式系统两种。

供水系统应根据主工艺的不同要求进行合理配置。

(6). 供油系统:

其作用是: 为高炉鼓风机组提供润滑和液压动力, 由此可以分成润滑油系统和动力油系统。

供油系统应根据主工艺的不同要求进行合理配置。

(7). 控制系统:

其作用是: 为高炉鼓风机组的正常运行提供监视、保护和调节等系统控制手段。

控制系统应根据主工艺的不同要求进行合理配置。目前比较常用的是计算机集散控制系统。

(8). 计器仪表系统:

其作用是: 为高炉鼓风机组的正常运行提供监视、保护和调节的手段。

仪表系统应根据主工艺的不同要求进行合理配置。目前比较常用的是III型仪表和智能化仪表, 后者将是一种发展方向。

(9). 保护系统:

其作用是: 为高炉鼓风机组的正常运行提供保护, 避免各种严重故障的发生。

(10). 其它:

例如: 盘车装置、顶轴装置、起重设备、消防系统等等。

1 — 2 • 2 高炉鼓风机的基本类型

高炉鼓风机是能将一部分大气汇集起来，并通过加压提高空气压力形成具有一定风压和风量的高炉鼓风，再将其输送至高炉的一种动力机械。常采用高速旋转的透平机械。从能量观点来看，高炉鼓风机是把原动机的能量转变为气体能量的一种机械。

按照鼓风机的结构形式一般可以分成两大类：

1、容积式（间断流式）：

主要包括往复式（活塞式）和回转式。

2、速度式（连续流式）：

主要包括喷射式和透平式。

透平式则又包括：离心式（径流式）、轴流式和混流式。

轴流式则又包括：静叶可调式和静叶固定式。

静叶可调式又包括：全静叶可调式和部分静叶可调式。

1 — 2 • 3 高炉鼓风机的比较和选择

容积式鼓风机的介质输送不连续，气压也有脉动；流量较小（单机排量在 $500\text{M}^3/\text{min}$ 以下）；效率低（一般多变效率在65%以下）；运转时有振动；易损件多，维修量大，因此，一般只用在 50M^3 以下炉容的小型高炉。而速度式设备则相反，可以连续地输送，气压稳定；流量较大（单机流量可达 $10000\text{NM}^3/\text{min}$ 以上）。因此可以用于大、中型高炉，这样速度式设备逐渐成为了主流。

在速度式鼓风机中，喷射式的功率和流量都很难做得很大，因此，高炉鼓风机一般均采用速度式中的透平式鼓风机。

在透平式鼓风机中，离心式流量相对较小且效率低，而混流

式鼓风机的技术又较为复杂，制造困难且成本较高，因此，在中型以上的高炉（炉容1000M³以上的高炉，需要风量为3000M³/min以上）中，则一般采用相对流量较大且整机效率较高的轴流式鼓风机。

在大、中型轴流式鼓风机中，由于多采用电动机驱动，而且主机多为恒转速运行，因此，使用效率较高的全静叶可调式鼓风机者居多。

由此可见，目前国内、外大型高炉配用全静叶可调的轴流式鼓风机的比较多。但是由于离心式鼓风机的性能曲线比较平缓，而轴流式的效率又较高，因此，同时采用这两种形式的复合式鼓风机，其性能将是最好的，故研究全静叶可调的复合式鼓风机应该是今后的一个重要研究和发展方向。

1-2·4 高炉鼓风机的特点

高炉鼓风机具有如下特点：

一、对于高炉炼铁工艺而言，要求冷风的供应要长期、连续、均匀和稳定，因此，高炉鼓风机实际需要控制的参数有两个，即风压和风量（在理论上，还可控制风温，但由于冷风需热风炉加热后变成热风才可使用，因此风温则由热风炉控制而鼓风机无需控制这一参数）。

高炉鼓风机的风量Q、风压P、轴功率N与转速n的关系：

- 1、风机风量与转速的一次方成正比： $Q_1/Q_2=n_1/n_2$ ；
- 2、风机风压与转速的二次方成正比： $P_1/P_2=(n_1/n_2)^2$ ；
- 3、风机轴功率与转速的三次方成正比： $N_1/N_2=(n_1/n_2)^3$ ；

对于不采用特殊调节手段的高炉鼓风机而言（即动、静叶不可调的风机），鉴于风机的转速与风量、风压、轴功率有直接关系，因此控制风机的转速就显得十分重要。

二、高炉鼓风机的出力（鼓风机的风量和风压的总称）还受到外部条件的影响：

1、入口影响：

主要是指气象条件（大气温度、大气压力和空气湿度等）对风机造成的影响。

2、出口影响：

主要是指与高炉鼓风机相连接的外部管路系统对风机造成的影响，这种影响多数是由高炉炉况发生变化而导致的。

3、环境影响：

主要是指高炉鼓风机本体以外的，与其密切相关的参数变化所造成的影响，例如：环境温度、油系统、冷却系统等等。

以上三种影响，对于驱动高炉鼓风机的原动机而言，实际上都可以归结为原动机负载变化所造成的影响。在相同转速和输入功率下，在这些情况时的负载变化将导致高炉鼓风机出口风量和风压的变化。为了满足高炉炼铁工艺的长期、连续、均匀和稳定的供风要求，高炉鼓风机就必须进行风压和风量控制，即其要有足够的稳定调节范围。

三、因为只有在轴颈处线速度达到 1.2m/min 以上时，轴承内才能形成具有一定厚度的油膜，为轴颈和轴承合金提供保护。因此为了防止大型机组在启动时，因重量而破坏轴承合金，均要在主机

启动前（实际是在盘车器启动之前）和主机停机之前，启动顶轴油泵（或称抬轴油泵），在轴承中强制形成油膜。这样的工艺使主机的启动力矩减小。

四、高炉鼓风机在启动前和停机后，均要进行盘车，即用其主机的一个外挂驱动装置—盘车器使整个机组以一个低转速运转一定的时间（一般用一个数千瓦的低压交流电动机驱动）。

盘车的作用：

- 1、大型透平机械的转子都比较重，惯性也就比较大，因此主机启动前进行盘车可以改善启动条件，即减小启动力矩。
- 2、在启动前建立润滑油膜，以避免轴颈与轴承的直接摩擦，从而避免启动时导致轴承接触面的破坏。
- 3、解决主轴的冷弯（转子的静置变形）或热弯（转子热态下的不均匀冷却变形）等变形问题。
- 4、通过盘车可以检查轴承的润滑情况以及主机动、静部分是否有接触和磨擦。

高炉鼓风机的启动都是从盘车转速开始，这样的工艺使启动更容易，主机转速升至盘车转速以上后，盘车器会自动脱开。

五、高炉鼓风机在启动前，可以通过其正常运行时所使用的调节方法，将其负荷调整至最小状态，以达到空载启动的目的，这会使高炉鼓风机的启动更容易。具体地讲，在大、中型高炉上采用全静叶可调式轴流鼓风机时，一般是通过将静叶角度减小至一个最小角度，同时全开防喘阀的方法，使启动负荷降至额定负荷的20-25%以下，这样原动机的启动功率就会大大下降，使启动方法

和装置都更容易实现。

六、高炉鼓风机对拖动系统的要求：

1、在正常情况下，高炉鼓风机一般处于长年连续运行状态，启动和停机次数都较少。

2、大、中型高炉鼓风机的轴功率都比较大，一般为10—60MW，故其原动机的容量也就较大。

3、机械特性：

对于变转速高炉鼓风机而言，其属于风机和泵类负载（即转矩与转速的平方成正比；功率与转速的立方成正比）。

4、负载：

(1). 高炉鼓风机一般处于连续运行状态，故为连续性负载。

(2). 高炉鼓风机需要根据高炉工况进行调节，故负荷大小常有变动，故为变动性负载。

(3). 高炉鼓风机的负荷与运动方向有关，故为反应(抗)性负载。

5、大型高炉鼓风机的转子不但重量大，而且直径也较大，即其飞轮力矩(GD^2)较大。虽然可以空载启动，但仍有一定的启动转矩。

6、高炉鼓风机对升、降速时间无特殊要求。

7、加载和卸载：

为了满足高炉鼓风机的调节功能，其可以自动加载和卸载。在鼓风机的保护系统动作时，会自动卸载（负荷将突变）。

8、高炉鼓风机停机时，无论是正常停机还是故障停机，主机均为自由停机，无需制动力矩。

9、在高炉鼓风机组中，无论是风机还是电机都存在固有的机械

振动频率，因此在变转速（启动或调速）过程中，其稳定运行区域必须要避开系统的机械共振范围（一般要求避开各阶共振转速的 $\pm 10\%$ ）。

1 — 3 高炉鼓风机的拖动方式

高炉鼓风机的拖动方式主要有以下两大类：

一、热力原动机：

1、蒸汽轮机：

(1). 按转速划分，可以分为发电式汽轮机（转速恒定）和工业汽轮机（变转速）。由于鼓风机运行有工况调节的需要，故多采用工业汽轮机拖动。

(2). 按热力过程划分，可以分为凝汽式、抽汽式和背压式等型式的汽轮机。由于鼓风机运行有工况稳定的要求，故多采用凝汽式汽轮机拖动。

由此可见，凡采用汽轮机驱动的，一般是采用凝汽式工业汽轮机驱动，其优点是可以达到稳定地连续调节转速的目的；缺点是辅助配套系统较为复杂。

2、燃气轮机：

除一般意义上的燃气轮机之外，还包括一些能量回收装置，例如：TRT等透平膨胀机。

优点：装置轻，体积小；燃料适应性强；节省水、电、油等动力消耗；起动快；自动化程度高；主体设备简单，易维护。

缺点：技术复杂；有公害（污染空气，有噪声）。

3、内燃机：

功率较小，应用范围较小，目前只用于小型设备的驱动上。

由此可见，在使用热力原动机驱动方面，目前从技术的成熟程度、功率要求和原燃料的可获得性来看，汽轮机都是最适合的原动机。但是从企业竞争、技术进步和降低冶金产品的整体成本来看，人们开始日益重视能量的回收和再利用以及环境保护，因此采用可利用冶金企业二次能源的燃气轮机将成为一种新的发展趋势和研究方向。

二、电动机驱动：

1、直流电动机：

主要包括：他励式、并励式、串励式和复励式直流电动机。

直流电动机的调速性能较好，但由于直流电动机的容量、转速和电压主都受到机械换向器的限制，故应用范围较小，目前只偶尔用于小功率机组上。

2、交流电动机：

主要包括：异步电动机（感应电机）和同步电动机。

(1). 异步电动机：

主要包括：鼠笼式异步电动机和绕线式异步电动机。

由于功率因数滞后，特性较差，一般用于中、小型机组上。

(2). 同步电动机：

主要包括：普通同步电动机、无换向器电动机和开关磁阻电动机。

由于运行稳定、可靠且功率因数可调，故具有改善电网功率因数的作用。因此大功率机组为改善电网情况，多采用同步电动机。

机。

由此可见，在使用电动机驱动方面，考虑到容量和功率因数的问题，一般中、小型机组采用异步电动机驱动，而大、中型机组则采用同步电动机驱动。

1—4 高炉鼓风机拖动方式的比较和选择

1—4·1 选择电动机驱动的原因

热力原动机可以直接将热能转换成机械能驱动高炉鼓风机，不必像电动机那样先由热电厂将热能转变成电能，然后再将电能转化成机械能驱动高炉鼓风机，因此，热力原动机驱动的效率较高，但这只是在相同功率情况下的比较。

实际上，由于高炉鼓风机的轴功率一般在 10-60MW，这个数值虽然不算太小，但与大型发电厂内的热力发电机组（一般容量为200—600MW）相比，驱动高炉鼓风机的热力原动机的容量要小得多，因此，其热效率也就较低；然而大型热力发电机组的热效率却较高，从宏观上看使用电动机的效率仍很高。据统计，发电厂与鼓风机站的综合热效率一般为32.4%，而中压汽动鼓风机站的热效率一般仅有25%，可见采用电动机驱动鼓风机的综合效率要高出7%以上。此外，热力原动机的辅助配套系统（例如：原燃料系统、动力系统和冷却水系统等）复杂，占地面积大，造价也较高；而电动机则相反，系统和结构均较简单，占地面积小，总图布置也方便，建设速度快，运行可靠，维护方便，价格便宜；因此，大型鼓风机组多采用电动机驱动。据资料显示，目前世界上共有22座炉容在4000M³以上的大型高炉，其中采用汽动鼓风机

的只有 4 座，而采用电动鼓风机的却有 18 座，所以，大型高炉鼓风机采用电动机拖动是一种较好的选择。

由此可见，在高炉鼓风机的驱动中，小型机组多用异步电动机；大、中型机组则存在同步电动机和凝汽式工业汽轮机并存的情况，但其主流仍是采用同步电动机。

1—4·2 选择交流电动机驱动的原因

比较直流电动机与交流电动机的主要特点：

一、直流电动机的特点：

1、直流电动机的优点：

- (1). 调速范围广，且易于平滑调节；
- (2). 起动、制动和过载转矩大；
- (3). 直流电动机的主磁通与电枢电流产生的磁通在空间上的分布是固定的，而且可以对它们进行独立的控制，它具有优良的静、动态转矩控制特性。
- (4). 由于易于控制，因此，其运行的可靠性较高。
- (5). 调速时的能量损耗较小。

2、直流电动机的缺点：

- (1). 具有机械换向器，其寿命较短，经常需要维护。
- (2). 由于存在机械换向器，因此，结构较复杂，故造价较昂贵。
- (3). 由于电刷和换向器间易产生火花，使其应用受到很大限制。
- (4). 直流电动机的容量、电压和转速也受到换向器换向能力和机械强度的限制。直流电动机的最大转速与功率之积为 $10^6 \text{kw} \cdot \text{r/min}$ ，因此其容量受到限制，不能做得很大，目前极

限容量也不过10MW左右。

- (5). 直流电动机是由转子传递能量的，所以容量较大时，其转子的冷却就成为了问题，其冷却能耗也较大，这对于能源紧张的未来而言，不能不是一个被淘汰的重要原因。

二、交流电动机的特点：

1、交流电动机的优点：

- (1). 无机械换向器结构，并具有结实而简单的转子结构。
- (2). 允许在高速下可靠地运行，无需特别维护。
- (3). 由于结构简单，故价格较低。
- (4). 具有较高的功率 / 重量比，即相同功率下，具有较小的重量和体积。
- (5). 结构性限制较少，故交流电动机的容量、电压和转速都可以做得较高。
- (6). 结构性限制较少，故环境适应性较强。
- (7). 交流电动机是由定子传递能量的，所以散热条件较好，冷却能耗也就较小。

2、交流电动机的缺点：

- (1). 交流电动机是一个高度非线性、多变量交互作用的复杂控制对象，因此，交流调速技术和维护水平都要求较高。
- (2). 大功率交流电动机的启动较为困难。
- (3). 对电网的影响：

当采用晶闸管交一直一交变频调速装置时，若其输入部分采用的是可控整流，则其对电网的影响与可控整流的直流调速

系统相同，即输入功率因数低、输入电流中存在5、7、11、13等高次谐波。

由此可见，直流电动机具有良好的调速性能，但其容量小，结构复杂，因此不能适应高炉鼓风机 10-60MW功率的要求，很少用于驱动高炉鼓风机。交流电动机可以很容易地做成大容量，而且其结构和维护均很简单；此外，随着电力电子技术的发展，高品质、大容量的交流变频电源的可获得性大大提高，所以在大型、中型高炉鼓风机的拖动方面，交流电动机比直流电动机更优越，故多采用交流电动机拖动。随着电力电子技术的发展，采用具有直流电动机优点的大容量交流电动机驱动高炉鼓风机成为了一种发展趋势。

1 - 4 · 3 选择同步电动机驱动的原因

比较同步电动机与异步电动机的主要特点：

一、异步电动机的特点：

1、异步电动机的优点：

- (1). 结构简单，制造容易，坚固耐用，价格低廉；
- (2). 调速时，控制系统相对简单；
- (3). 可以应用于恶劣的环境中。

2、异步电动机的缺点：

- (1). 永远在滞后的功率因数下运行；
- (2). 功率因数较差，故效率也较低；
- (3). 运行的稳定性相对差一些。

二、同步电动机的特点：

1、同步电动机的优点：

(1). 功率因数可调（可用于同步补偿）：

异步电动机的定子磁场是从定子侧供电产生的，而转子磁场则是靠感应产生的，因此其电流永远落后于电压，即功率因数是滞后的；同步电动机则不同，它通常是在转子侧靠直流磁场励磁（或永久磁铁），故其可以通过控制励磁来调节功率因数（超前、滞后或者为1）。

在运行时，同步电动机可以作为同步补偿机使用，它不仅不会使电网的功率因数降低，而且能够专门向电网发出容性的无功功率，相反地改善电网的功率因数，这一点特别是在电网中接有大量感性负载时就更有意义。

(2). 转速可保持同步：

因为同步电动机转子的转速 n 决定于定子绕组里交流电势的频率 f 和电动机的极对数，即 $n=60f/p$ ，所以，当电动机的极对数 p 确定以后，则同步电动机的转速 n 与电源频率 f 之间严格保持同步关系。其特点是转速稳定，不会因负载变化而略有波动，其运行更可靠。

(3). 效率较高。

(4). 对变频器的要求较简单：

同步电动机可以在领先的功率因数下运行，这样晶闸管变频器就可以采用简单的负载换流方式工作，从而大大简化了变频器的结构，降低了成本。

2、同步电动机的缺点：

- (1). 存在直流励磁系统, 需要对其进行控制 (控制功率因数)。
- (2). 重载时存在振荡和失步的危险。

过去, 由于大型同步电动机的起动有很大难度, 故其应用不广, 近年来随着大功率变流技术和控制技术的发展和进步, 起动问题已基本解决 (但起动设备的长期闲置仍是一个问题)。

由此可见, 由于一般在电网的负载中, 异步电动机较多, 它们所需要落后的无功功率对电网来说是一个沉重的负担, 这既增加了输电过程的损耗, 也妨碍了有功功率的输出。因此, 对于高炉鼓风机驱动这样较大的单机容量 (10-60MW), 从电网功率因数和电动机效率两方面考虑, 最好还是采用同步电动机拖动。

1-5 高炉鼓风机组在国内、外的发展及其研究方向

随着现代化大生产的发展, 炼铁高炉的炉容也在不断地向着大型化发展。高炉规模的不断扩大和冶炼技术的不断更新, 就要求高炉鼓风机也不断地向大容量 (大功率、大流量)、高效率、高速度、高压比、高自动化程度的方向发展, 因此, 目前逐渐从离心式鼓风机过渡到了轴流式鼓风机; 从静叶固定式逐渐发展到静叶可调式; 从热力透平驱动逐渐发展到同步电动机驱动。

一、国外的发展:

1853 年法国科学家都纳尔 (Tournaire) 提出了轴流式鼓风机的概念。

1884 年英国科学家 C. A. 帕森斯 (Parsons) 制造了第一台实验用轴流式鼓风机 (固定叶片型式), 风量: 85M³/min, 风压: 0.012MPa, 19 级叶片, 转速: 4000rpm, 功率: 180KW, 多变效率:

60% , 采用异步电动机拖动。

1949年瑞士爱舍尔-威斯公司制造了第一台工业用鼓风机, 风量: 1200-1800M³/min, 风压: 0.079MPa, 功率: 3900KW, 转速: 5200rpm, 采用异步电动机拖动。

1960年瑞士BBC 公司制造了第一台静叶可调式轴流鼓风机, 采用工业汽轮机拖动。

1965年以后静叶可调式轴流鼓风机成为世界各国高炉普遍使用的主要机型, 但由工业汽轮机拖动者居多, 七十年代以后由同步电动机拖动者越来越多。

1972年日本川崎重工公司为世界上最大的高炉—新日本制铁公司的炉容为4197M³的高炉制造了世界上最大的静叶可调式轴流鼓风机, 风量: 10000NM³/min, 风压: 0.657MPa, 转速为: 3600 rpm, 功率: 60MW, 同步电动机拖动, 变频启动。

二、国内的发展:

1960年上海汽轮机厂生产了中国的第一台静叶固定式轴流鼓风机(型号为K3250), 风量: 3250M³/min, 风压: 0.35MPa, 转速: 3000rpm, 功率: 12MW, 凝汽式工业汽轮机拖动。

1980年中国首次引进了瑞士苏尔寿公司的全静叶可调式轴流鼓风机(型号AV100-19), 风量: 7000NM³/min, 风压: 0.5MPa, 转速: 3000rpm, 功率: 36.14MW, 同步电动机拖动, 变频启动。
注: 冶金部当时为鞍山钢铁公司引进, 后转入首都钢铁公司。

1983年中国为国内目前最大的高炉(上海宝山钢铁公司的炉容为4063M³的高炉)引进了日本三井造船株式会社生产的部分静

叶可调式轴流鼓风机，这也是目前国内最大的轴流式鼓风机，其风量：8800NM³/min，风压：0.51MPa，转速：3000rpm，功率：48MW，同步电动机拖动，变频启动。

1985年以后静叶可调式轴流鼓风机成为中国大、中型高炉普遍使用的主要机型，但由工业汽轮机拖动者居多，九十年代以后由同步电动机拖动者越来越多。

1988年陕西鼓风机厂为唐山钢铁公司生产了中国第一台全静叶可调式轴流鼓风机（型号为AV56-13），风量：2250NM³/min，风压：0.35MPa，转速：6309rpm，功率：11.1MW，凝汽式工业汽轮机拖动。

1999年陕西鼓风机厂为首都钢铁公司生产了中国最大的全静叶可调式轴流鼓风机（型号为AV100-17），风量：7000NM³/min，风压：0.43MPa，转速：3000rpm，功率：36.14MW，同步电动机拖动，变频启动。

综上所述，目前在国内、外，与大型高炉配套的多是全静叶可调式轴流鼓风机，其相应的驱动方式为同步电动机或凝汽式工业汽轮机。在采用同步电动机驱动时，为了避免对电网造成的冲击，多采用变频启动方式。在国内、外，现在使用的大、中型高炉鼓风机的轴功率一般应在10-60MW之间。

三、研究和发展方向：

1、从目前的研究和发展情况来看，今后高炉鼓风机本身将按三个阶段递进发展：

(1). 静叶部分可调的轴流式鼓风机，这主要是为了在降低制造成

本的同时，不致使效率下降太大，即性价比比较合理。

(2). 发展全静叶可调的复合式鼓风机，这样不但效率较高，而且鼓风机的性能曲线较为平缓，运行更加稳定。

(3). 发展动叶可调的轴流式鼓风机，大大提高效率，节能降耗。

2、从高炉鼓风机拖动设备的发展来看，今后主要有三个研究和
发展方向：

(1). 采用恒转速的同步电动机：

在高炉鼓风机的启动过程中，采用变频启动；在正常运行时则采用恒转速运行，静叶调整负荷。

(2). 采用可全程调速的同步电动机：

在高炉鼓风机的正常运行过程中，进行转速调节就可以解决变频启动系统在完成启动工作后的闲置问题，大大提高设备的使用率；此外，更重要的是可以使轴流式鼓风机不再采用复杂的静叶可调技术，从而大大降低其制造成本，节约投资。

(3). 采用可变转速的燃气轮机拖动：

可以利用冶金企业中的二次能源—高炉煤气作为能源，进行能源的回收，并可以由此解决高炉煤气的环保问题。

第二章 同步电动机

电气传动就是以电动机的转矩和转速为被控制量，按生产机械的工艺要求对电动机进行控制的自动化系统。根据在完成电能—机械能的转换过程中所采用的执行部件一直流电动机或交流电动机的不同，工程上通常把电气传动分为直流电气传动和交流电气传动两大类。交流电气传动又由同步电动机传动和异步电动机传动两大部分组成。

在不调速的电气传动领域，交流电动机占据了主要地位。由于大量使用三相异步电动机，这就造成交流电网的功率因数普遍偏低。自七十年代以后，随着电力电子学、微电子技术和现代电机控制理论的发展，同步电动机的调速技术日趋成熟。

在现代高炉冶炼技术中，为了驱动大型高炉鼓风机（全静叶可调式轴流鼓风机），广泛地采用了有着许多突出优点的同步电动机。

2—1 同步电动机的原理及其基本类型

一、同步电动机的原理：

同步电动机的转子转速 n 与定子电流的频率 f 满足方程式：

$n=60*f/p$ ，其中： p 为同步电动机的极对数。

可见在极对数一定时，同步电动机的转速严格与电源频率保持一致，即使同步电动机的负载改变，其转速也不会发生变化。

同步电动机的工作原理：当同步电动机的定子三相对称绕组接到三相对称电源上时，就会产生三相合成旋转磁动势，简称电枢磁动势 F_a ，它是以同步转速旋转的；在转子的励磁绕组中通入

直流励磁电流，则由它就产生了励磁磁动势 F_0 ，由于励磁电流是直流，所以励磁磁动势 F_0 相对于转子而言是静止的，但转子本身是以同步转速旋转着的，可见 F_0 相对于定子也是以同步转速旋转着；因此，在同步电动机的主磁路上一共有两个磁动势，即电枢磁动势 F_a 和励磁磁动势 F_0 ，两者相互作用产生电磁转矩，并都以同步转速旋转。

根据同步电动机电磁转矩公式：

$$T = |\vec{F_0} \times \vec{F_a}| = F_0 * F_a * \sin \theta \quad , \quad \text{其中：} \theta \text{ 为 } F_a \text{ 和 } F_0 \text{ 的夹角。}$$

只要 $0^\circ < \theta < 180^\circ$ ，同步电动机就能产生电磁转矩 T ，拖动负载旋转。在同步电动机中，定子的作用主要是通过励磁在电机气隙中建立磁场，而定子电流则是电能转变成机械能（转矩）的主要能源，因此控制三相定子电流的频率、幅值和相位就可以完全控制同步电动机的输出转矩，从而控制转速。

二、同步电动机的基本类型：

根据视角不同，同步电动机可经分成不同的类型。

- 1、按照工作原理划分有：普通同步电动机、无换向器电动机和磁阻电动机。
- 2、按照转子形式划分有：凸极式和隐极式。
- 3、按照结构形式划分有：立式和卧式。
- 4、按照通风方式划分有：开启式、防护式以及封闭式（循环通风）。
- 5、按照冷却方式划分有：空冷、氢冷、水冷和混合冷却。

由此可见，根据高炉鼓风机的特点，一般选择普通同步电动

机进行正常运行；采用无换向器电动机的工作形式进行变频软启动；一般大容量、高转速同步电动机的转子形式则采用隐极式，这样气隙均匀，漏感较小，运行稳定；安装则采取卧式；并采用全封闭空冷方式运行。

2-2 同步电动机的励磁

同步电动机的励磁磁极设在转子上，为集中绕组，需要通入直流电才能产生固定的磁场。

2-2-1 同步电动机励磁的基本方式

同步电动机按其转子励磁方式可以分成：直流励磁式（有刷和无刷）、永久磁铁式和反应式（开关磁阻）同步电动机。

1、有刷励磁同步电动机：

有刷励磁同步电动机的励磁系统如图：图2.2.1A

同步电动机的转子直流励磁电流是由静止励磁装置通过集电环和电刷送到绕组中。这种励磁方式由于存在电刷和集电环，就增加了检修维护的工作量，限制了其使用环境和容量，因此，其使用受到一定限制。

2、无刷励磁同步电动机：

无刷励磁同步电动机的励磁系统如图：图2.2.1B

在同步电动机的主轴上安装一台交流发电机，作为其励磁电源。具体来说，它是将交流发电机所发出的交流电经过固定在同一主轴上的整流器变换成直流电供给同步电动机的励磁绕组。其励磁电流的调节可以通过控制交流励磁机定子上的励磁绕组来实现。这样同步电动机就无需集电环和电刷装置，使结构更简单，

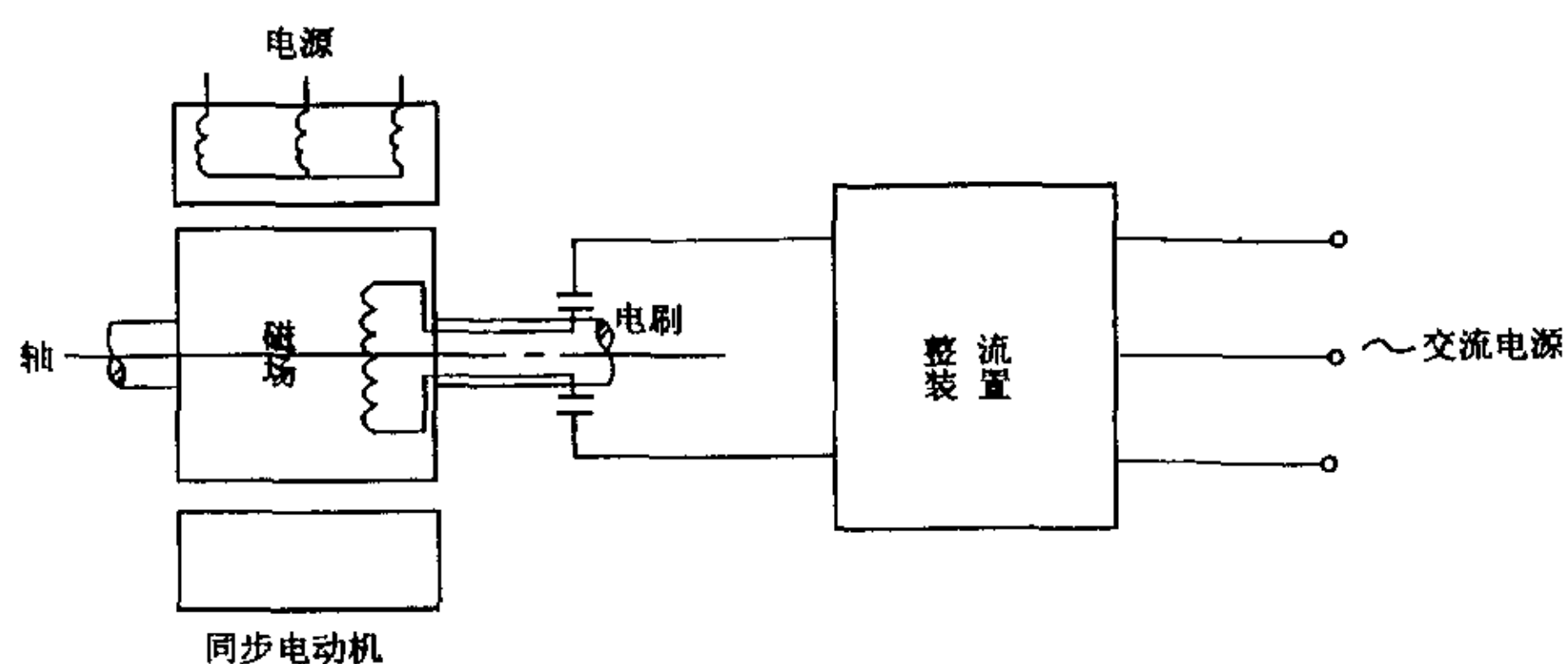


图2.2.1A

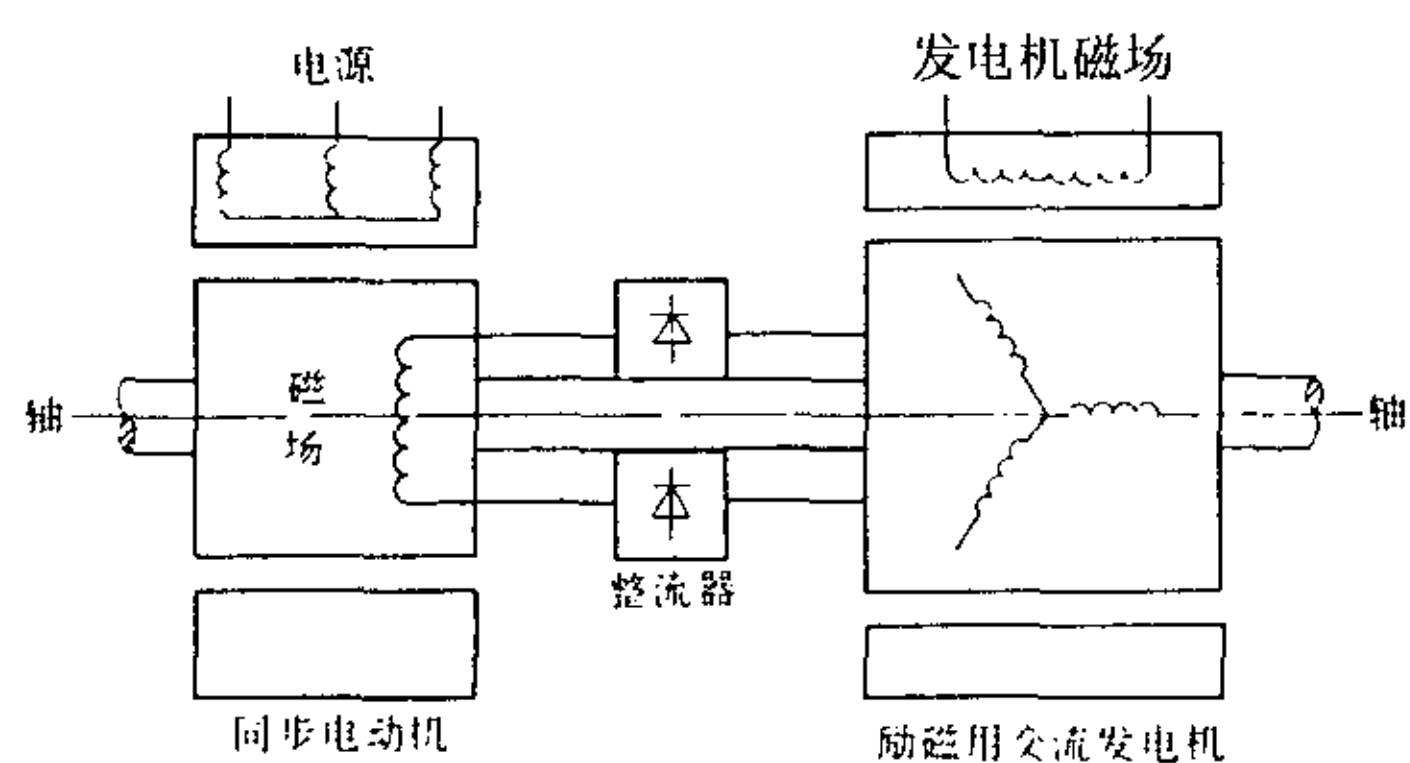


图2.2.1B

可靠性更高。这种无刷励磁同步电动机的应用场合更为广泛，容量也可以做得更大。

3、永久磁铁励磁同步电动机：

在此种同步电动机上，其转子采用稀土永磁材料做成永久磁铁，其转子磁场可视为恒定。它是一种真正的无刷励磁同步电动机。其永磁材料如：钐钴合金（SmCo）、钕铁硼合金（NdFeB）

等。这种同步电动机的体积和重量都大为减小，结构简单，维护方便，运行可靠，且效率较高，但其造价昂贵，目前只应用于小容量范围。

4、开关磁阻同步电动机：

它是由反应式步进电动机发展起来的，突破了传统电动机的结构模式和原理。磁阻电机的转子为实心铁心，无励磁绕组或永磁材料，转子没有任何磁场，完全靠定子励磁（象异步电动机那样），藉凸极磁阻的变化（气隙磁阻不对称）产生同步的反应转矩进行工作。这种同步电动机结构简单、坚固而又便宜，可靠性高，但低速时转矩脉动较大。目前其制造容量较小（目前单机最大容量为200KW）。

由此可见，在以上四种励磁方式的同步电动机中，永磁式和反应式同步电动机的容量有限，而且励磁不可改变，所以均不能用于高炉鼓风机的驱动。有刷励磁同步电动机的维护量较大，不能满足高炉鼓风机长期、连续运行的要求，故也不适用。从功率因数可调、减少维护量和大容量的要求来看，只有无刷励磁同步电动机是最好的选择。与有刷励磁方式相比，无刷励磁方式可以避免大容量电动机在高速运行中的一些问题，例如转子整流子换向火花引起的故障与安全问题，碳刷长期磨损带来的维护问题等等。但在同步电动机启动过程中的低速阶段，仍有一些场合使用有刷励磁方式。

2—2·2 同步电动机励磁的调节

驱动高炉鼓风机的同步电动机一般采用带有励磁机的型式，

因此可以通过控制其励磁机的定子来控制同步电动机的励磁。具体来说，通过控制励磁可以调节同步电动机的功率因数。根据同步电动机的运行原理，同步电动机在电网电压 U 、频率 f 和负载电流 I_a 保持不变的情况下，利用调节励磁电流 I_f 可以改变功率因数。由于驱动高炉鼓风机的同步电动机容量较大（一般大约为10—60MW），在电网中占有举足轻重的作用，因此若它的功率因数可以调为超前，则就可以对电网中相当大容量的感性负载予以补偿，从而大大提高电网的质量，增加电功的有效部分，减少线路中的无功损耗。

2—3 同步电动机的起动方案

同步电动机的一个重要缺点就是在恒频恒压的交流电源下起动困难，但是随着电力电子技术和控制技术的发展，同步电动机的起动问题已经被解决。同步电动机的各种起动方式如下：

一、辅助动力机起动方法：

用一台小型动力机（可以是电动机，也可以是其他热力原动机），把同步电动机拖到同步转速后，经过整步再并入电网来完成整个起动过程。

这种方法需要的设备多，并且操作也复杂，只用于同步电动机使用的早期。

二、异步起动方法：

在同步电动机的转子极靴上装上起动绕组（阻尼绕组），像异步电动机自起动一样起动（同步电动机的异步起动）。具体来说，就是首先让同步电动机异步起动，然后使转速达到亚同步转

速（95-98%的同步转速），然后给同步电动机的励磁绕组中通入励磁电流，使它被牵入同步转速，完成同步电动机的整个异步起动过程。

同步电动机在进行异步启动时，其启动电流会达到额定电流的 5-7 倍，因此，当同步电动机的容量较小时，其启动电流对电网影响还不大；而当大功率同步电动机异步启动时会对电网造成很大的冲击。因此这种方法不能用于大容量同步电动机。

三、变频起动：

通过一个静止启动装置—变频器来改变同步电动机启动电源的频率和电压，使同步电动机在整个启动升速过程中，定子的旋转磁场始终与转子转速保持同步，最终通过并网装置将同步电动机并入电网。此外，在变频起动中，必然建立起转速和电流的闭环控制，这样就避免了振荡或失步的产生。由于变频器只用于同步电动机的启动，而鼓风机在启动时，又可以降至最小负荷，因此，其容量只需为同步电动机额定功率的20-25%即可。

由此可见，对于大型高炉鼓风机配套的同步电动机（额定功率一般为 10-60MW）来说，在以上三种启动方式中，辅助动力机方法已过时，而异步启动方法会对电网造成冲击，因此变频启动方法既可减少启动电流，避免对电网的冲击；又是最为稳定、可靠的同步电动机启动方法。

2 — 4 同步电动机的调速

用可调转速的同步电动机驱动高炉鼓风机是一个比较理想的方案。但是，目前由于电力电子技术的局限，电力电子器件的功

率尚难满足大型高炉鼓风机轴功率（10-60MW）的要求，因此，使用同步电动机驱动时，全程调速仅是一个研究方向，并未实际应用。目前同步电动机的变频调速技术只被应用于大、中型高炉鼓风机的变频启动（软启动）上。

2-4-1 同步电动机变频调速原理

众所周知，交流电动机的转速为： $n=60f(1-s)/p$

其中： n -交流电动机转子的转速；

f -交流电动机定子的供电频率；

s -转差率；

p -极对数。

因此，对于异步电动机而言，可以通过改变定子供电频率 f 、转差率 s 和极对数 p 来进行调速；而对同步电动机而言， $s=0$ ，故在极对数不变的情况下，只能通过改变定子供电频率 f 来进行调速。（变极对数调速只能是有级调速，不能适应鼓风机连续、均匀、稳定的要求，故一般不预以考虑。）

2-4-2 同步电动机变频调速的基本类型

按控制频率的方式来分，同步电动机调速有他控式变频调速和自控式变频调速两类，后者也称为无换向器电动机调速。

当同步电动机定子电压频率由一个外部频率发生器进行控制时称为他控方式。可见他控式变频装置的控制是独立的，实际上变频装置的输出频率是由系统外部的速度给定信号决定的。

当同步电动机的定子电压频率是由与其转子位置有关的脉冲信号来控制时，称为自控方式。可见自控式的变频装置不是独立

的，实际上变频装置的输出频率是由系统内部对自身的检测信号决定的。

对同步电动机的以上两种变频调速方式相比较，可以发现自控式更为优越，这是因为这种控制方式从其原理上就能从根本上消除同步电动机的振荡和失步隐患，这主要得益于该系统组成了电源频率自动跟踪转子位置的闭环控制系统，同步电动机的定子旋转磁场转速与转子转速可以始终保持同步，不会由于负载冲击等原因造成失步现象。

2-5 同步电动机启动的逻辑过程

以电网频率为50HZ，二重化交一直一交电流型变频器为例，同步电动机的启动全过程如下（ f 为频率， n 为转速）：

1、启动准备（启动条件）： $f=0\text{HZ}$ （ $n=0\text{rpm}$ ）

$f=0\text{HZ}$ ：风机具备启动条件；同步电动机具备启动条件；辅助系统具备启动条件。

2、启动电动盘车： $f=0-X\text{HZ}$ （ $n=0-60X\text{rpm}$ ）

注：通常 X 值与具体工艺有关，一般盘车转速低于100rpm，故 $X < 1.6\text{HZ}$ 。

$f=0-X\text{HZ}$ ：启动电动盘车，盘车转速为60X。

3、变频器工作： $f=X-50\text{HZ}$ （ $n=60X-3000\text{rpm}$ ）

$f=X\text{HZ}$ ：启动变频器；投入励磁系统；闭合变频器的输入、输出开关，断开同步电动机的主开关。

$f=X-5\text{HZ}$ ： $f < 5\text{HZ}$ 时，同步电动机加速，启动系统的逆变器以电流断续换流方式工作。

$f=5-50\text{Hz}$: $f \geq 5\text{Hz}$ 时, 同步电动机加速, 启动系统的逆变器以负载反电势换流方式工作。

$f \geq Y\text{Hz}$ (Y 为亚同步状态的相应频率, 与具体工艺有关, 一般取 $60Y$ 为95-98% 的额定转速) 时, 投入并网装置, 并进行整步微调。

注: 需根据具体工艺来确定有无同步电动机的启动励磁和变频器的启动旁路开关, 以及是否存在六脉冲和十二脉冲的切换。

4、变频器退出运行(同步电动机并网): $f=50\text{Hz}$ ($n=3000\text{rpm}$)

$f=50\text{Hz}$: 满足并网条件后, 投入同步电动机的主(并网)开关; 同时断开变频器的输入、输出开关。

2—6 同步电动机的转子检测

同步电动机变频调速系统一般采用自控式运行, 其主回路如图: 图2.6

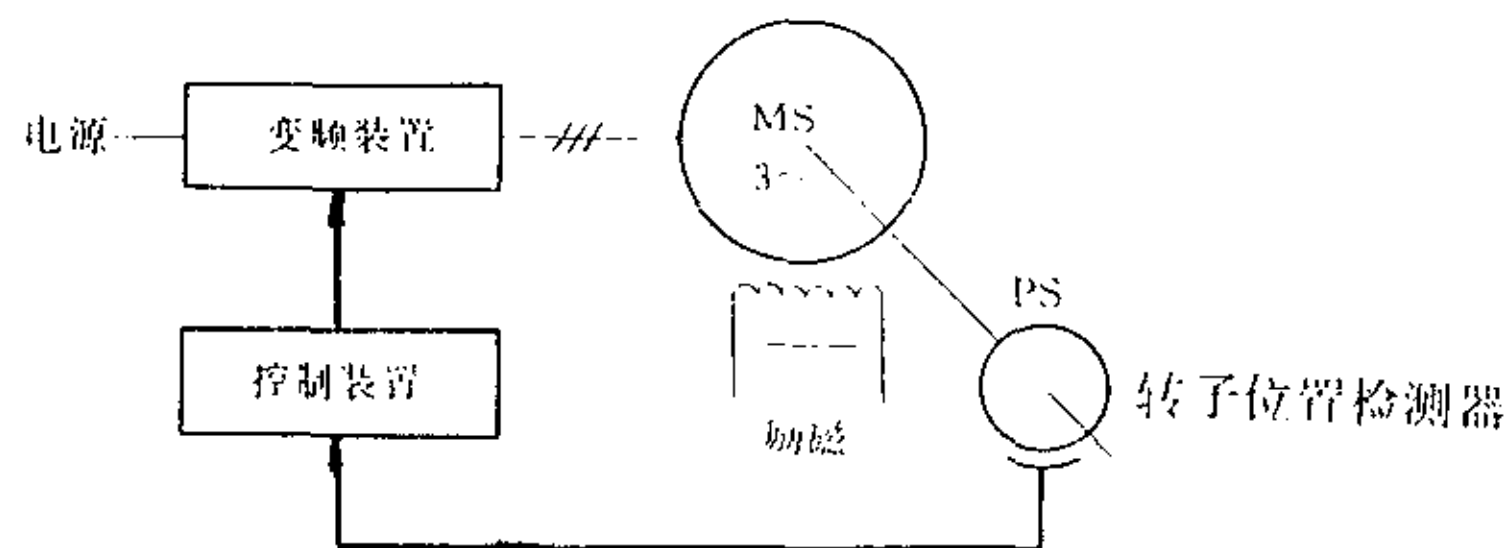


图2.6

如上图所示，自控式同步电动机变频调速系统是由同步电动机、变频器、转子位置检测器和控制装置组成。因此，对同步电动机转子位置（或磁场）的检测和初始定位是非常重要的。只有检测出转子实际空间位置后，控制系统才能决定变频器的通电方式、控制模式以及输出电流的频率和相位，以保证同步电动机的正常工作。准确、可靠的转子位置检测装置是自控式同步电动机调速系统运行的必要条件。

同步电动机的转子检测主要包括两个方面的内容，即检测同步电动机的转子速度和转子初始相位。

转子位置检测器一般都做成无接触式，有多种不同的型式。常用的主要有两大类，即直接式和间接式。

一、直接式：

通过直接安装各种检测元件，来辨识转子位置。主要有以下三种不同的型式：

1、电磁式：

通过与转子同轴旋转的凹凸圆盘结构来改变检测元件的电磁关系，从而达到检测转子位置的目的。电磁式检测方法又可分为差动变压器式和接近开关式两种。

2、磁敏式：

通过磁敏元件来反映转子位置，送出一组位置信号。它要求和同步电动机转子同轴相联的检测器转子为永磁结构，并与同步电动机的极对数相同；在检测器定子上安装磁敏元件。目前用于位置检测的磁敏元件很多，如霍尔元件，磁敏电阻，磁敏二极管

和晶体管等。

3、光电式：

通过光电元件对带有槽口（或栅）的旋转圆盘的位置进行通断变化，产生一系列反映转子位置的脉冲信号。光电式转子位置检测方法又可分为简单光电式、绝对式光电编码和增量式光电码盘三种。

二、间接式：

通过同步电动机电枢绕组的感应电动势（或电压）间接检测出转子位置的方法。与直接法不同，间接法只需用传感器检测出同步电动机的定子电压（有时还用到电流），通过同步电动机理论，找出对应关系，通过计算来进行转子位置的辨识。间接式方法又可分成两种，即端电压检测法和电压模型法。

1、端电压检测法：

利用每相端电压在一个周期内两次过零点来检测转子的真实空间位置的方法。此方法多用于负载换相同步电动机调速系统。

2、电压模型法：

通过模型计算出有关磁场（转子、定子或气隙磁通）的大小和方位，间接地获得旋转转子的位置。此方法多用于正弦波变频电源供电的同步电动机矢量控制系统。

根据检测同步电动机转子位置所采用的方法的不同，自控式变频同步电动机调速系统可以分成两种类型，即一是采用直接式转子位置检测方法的就称为有转子位置传感器的自控式变频同步电动机调速系统；二是采用间接式转子位置检测方法的，从表面

上看并无转子位置传感器，故就称为无转子位置传感器的自控式变频同步电动机调速系统。

第三章 同步电动机的晶闸管变流装置

交流电动机调速的方法有多种，但对于同步电动机而言，一般只能采用变频调速方案。电力电子器件和微机控制技术是现代交流调速的两项技术支柱，随着这两项技术的发展，大功率的同步电动机的调速也逐步发展起来。

由于目前电力电子器件的功率限制，尚不能对拖动高炉鼓风机的同步电动机（10-60MW）进行全程的变频调速，但同步电动机的变频起动技术已经成功地被广泛应用，这样就实现了高炉鼓风机对电网的无冲击启动。

交流电动机调速就是要将恒压、恒频的交流电源（CVCF）通过变流装置（VVVF）进行变压变频后供给交流电动机，并通过控制器对变频器进行控制，从而达到控制交流电动机转速的目的。

交流调速系统的一般结构：见图：图3.0

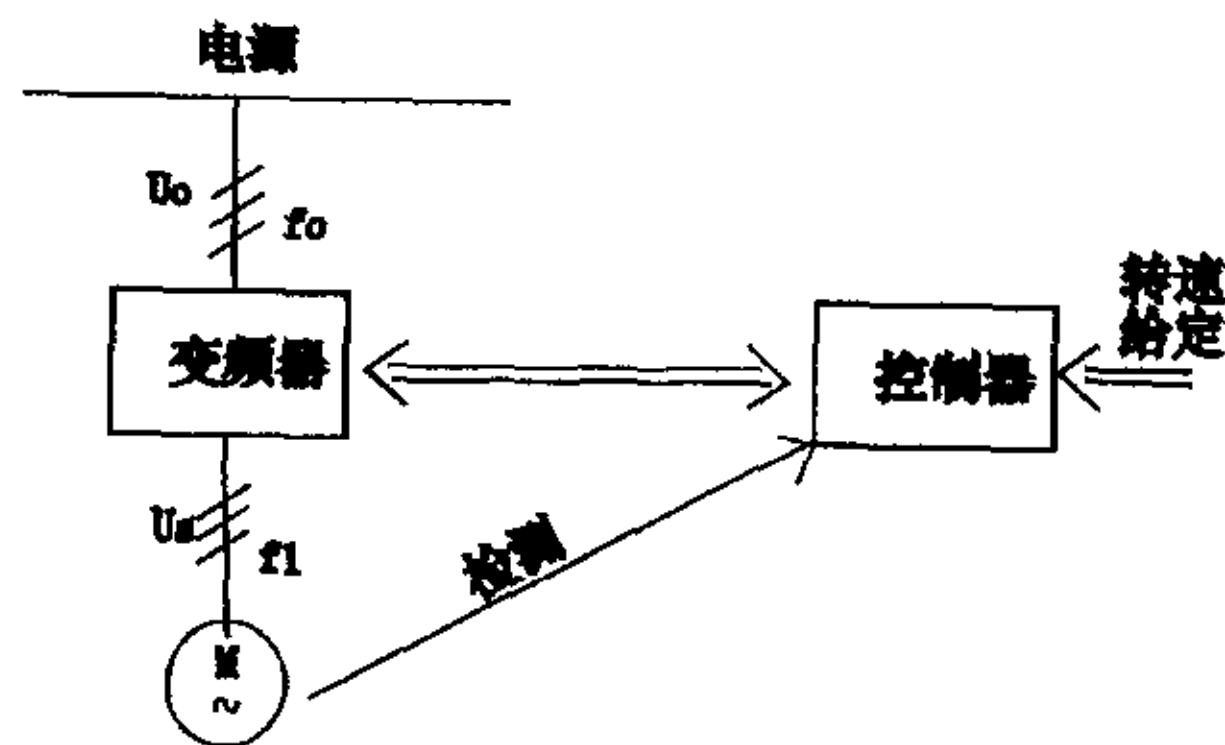


图3.0

如图所示，交流调速系统一般是由电源（恒压、恒频），变频器，控制器和交流电动机构成。进行交流调速的关键设备就是静止式电力电子变流装置—变频器。

3—1 变频器

变频器即指无源逆变电路，它是将工频交流电能变换为所需频率的交流电能，供负载使用而不反馈到交流电网。

3—1·1 变频器的基本类型

一、按工作方式划分：

从工作方式上看，变流装置（VVVF）可以分为静止式和旋转式两大类。

1、旋转式变频器是指用复杂的电磁元件和旋转变流发电机组作为可变频率电源，供给交流电动机。

2、静止式变频器是指用静止的电力电子半导体器件作为功率开关，通过对开关的控制来为交流电动机提供可变频率的电源。

二、按能量变换形式划分：

按能量变换形式的不同，即从结构上看有无中间直流环节，静止式变压变频装置又可分为间接式和直接式两种结构型式。

1、间接式（交—直—交型）：

间接式变压变频装置是先将恒压恒频的交流电通过整流器变成直流电，再经过逆变器将直流电变换成可控电压和频率的交流电。因此，又称为交—直—交变压变频装置，或有中间直流环节的变压变频装置。见图：图3.1.1A

对于交—直—交变频器，若按其功能结构的不同划分，其组

成为：顺变器，中间滤波环节，逆变器。

(1). 整流器：

在交一直一交变频器中，它的作用是将恒压恒频的交流电变换成为可调压或不可调压的直流电，并作为逆变器的直流供电电源。它又称为顺变器，或电源侧变流器。

(2). 逆变器：

在交一直一交变频器中，它的作用是将直流电变换成为可调频率（或同时又可调电压）的交流电，并作为负载的交流供电电源。它是变频器主电路的核心。又称为电机侧变流器。

(3). 中间滤波环节：

在交一直一交变频器中，它的作用是对顺变器整流后产生的直流电的电压或电流进行滤波，将脉动的直流电变成平稳的直流电。中间滤波环节一般是由电容器或电抗器组成。

对于交一直一交式变频器，若按其变压变频的控制方式不同进行划分，有a, b, c三种型式，见图：图3.1.1B

a. 可控整流器调压，六拍逆变器调频；

b. 不控整流，斩波器调压，六拍逆变器调频；

c. 不控整流，脉宽调制（PWM）逆变器调压调频（必需以高开关频率的自关断器件作为物质基础）；

2、直接式（交—交型）：

直接式变压变频装置是将恒压恒频的交流电，不经过中间直流环节，一次直接地变换成可控电压和频率的交流电。因此，又称为交—交变压变频装置，或周波变换器。见图：图3.1.1C

三、按无功能量的处理方式划分：

在交流变频调速系统中，交流电源和负载之间会有无功功率流动，故必须设置贮能元件，以缓冲无功能量。因此，由于静止式变压变频装置中的贮能元件的不同，变频器又可以分为电压源型和电流源型两种。这主要是从逆变器的供电电源的性质上来看的。

对于交—直—交变压变频装置而言，以上两类变频器的主要区别就在于其中间直流环节采用何种滤波器。见图：图3.1.1D

(1). 电压型：

当在中间直流环节上选用电容作为贮能元件进行滤波时，其直流电压的波形比较平直，在理想情况下是一个内阻抗为零的恒压源，输出交流电压是矩形波，属于电压强制方式，这类变频器称为电压源型交—直—交变频器。

(2). 电流型：

当在中间直流环节上选用电感作为贮能元件进行滤波时，其直流电流的波形比较平直，因而电源内阻抗很大，对于负载来说基本上是一个恒流源，输出交流电流是矩形波，属于电流强制方式，这类变频器称为电流源型交—直—交变频器。

3—1•2 各类变频器的比较和选择

1、旋转式与静止式变频器：

旋转式变频器由于结构复杂，设备多，体积大，效率低，费用高，安装复杂，运行和维护不便等原因，主要应用于交流调速的早期，现在基本上已经不再使用了。

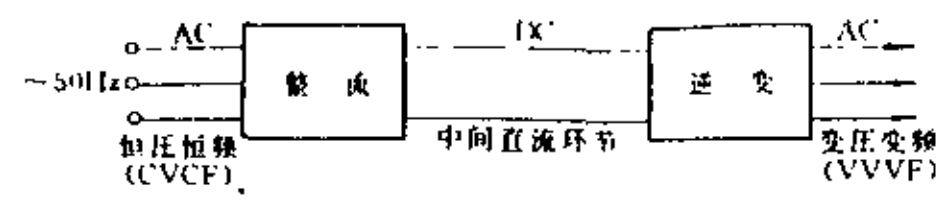
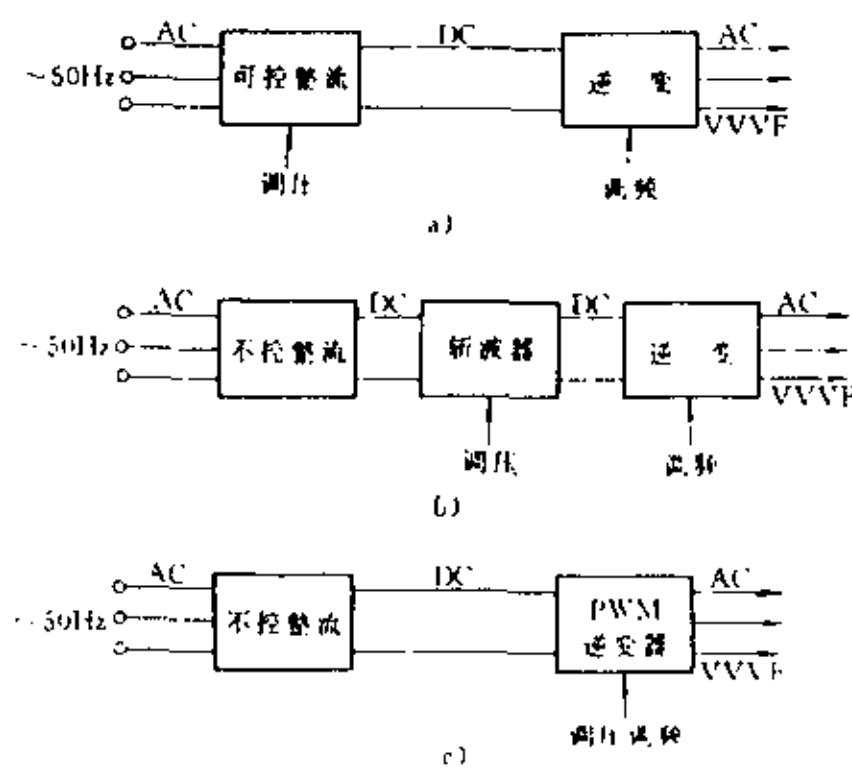


图3.1.1A



- a) 可控整流器调压、六拍逆变器调压
b) 不可控整流、斩波器调压、六拍逆变器调压
c) 不可控整流、PWM逆变器调压调压

图3.1.1B

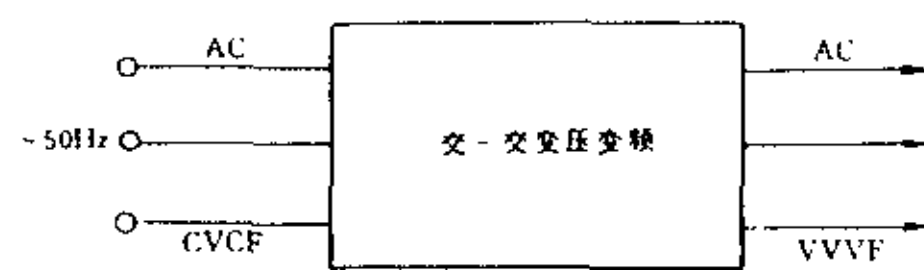
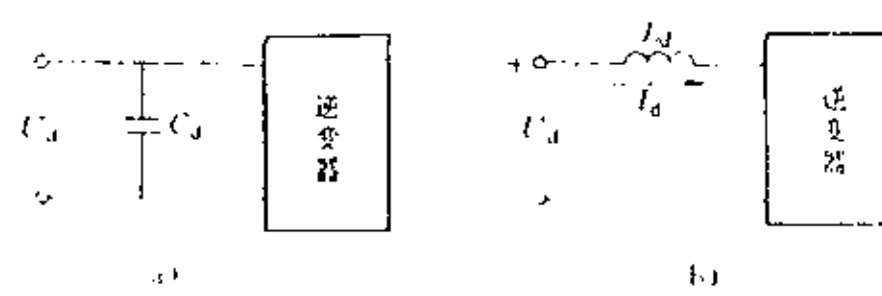


图 3.1.1C



a) 电压型 b) 电流型

图3.1.1D

静止式电力电子变流装置的发明，逐步克服了旋转式变频器的缺点，满足了变频调速系统对于减少设备，缩小体积，降低成本，提高效率，消除噪声等方面的要求。

随着微机控制技术、电力电子半导体器件和自动控制技术的发展，特别是矢量控制技术发明后，静止式变频器越来越显示出其优越性，现在在工程实际使用中，已经无一例外地采用静止式电力电子变流装置进行变频调速。

2、静止式变频器中的交一直一交型与交—交型：

交一直一交型与交—交型在以下方面存在区别：

(1). 换能方式：

交—交型是一次直接换能，因此，损耗较小，效率较高。

(2). 调频范围：

由于交—交型变频器的输入电压电流的畸变随着输出频率的提高而增大，因此其输出的最高频率受电网频率的限制，即低于电网频率（最高频率为电源频率的 $1/3-1/2$ ）。但同步电动机的变频启动最终是要与电网并联，即要达到工频，因此，高炉鼓风机的驱动工艺就要求采用交一直一交型变频器。

(3). 元件数量：

交一直一交型变频器元件数量相对较少，利用率较高。

3、交一直—交式变频器中的电流源型与电压源型：

电流源型与电压源型交一直—交变频器在以下几个方面存在区别：

(1). 四象限运行能力（线路结构）：

电流型逆变器具有内在的四象限运行能力，能量可以回馈到电网，不需要任何附加的功率电路元件；电压型逆变器为了能向电网回馈功率，则需要一个电网换流式逆变器与整流器反并联连接。

(2). 可靠性（保护性能）：

电流型逆变器对换流失败不敏感，负载瞬时短路以及晶闸管误触发等都是允许的，这是因为其存在着大的平波电抗器和快速电流调节器，所以限流能力比较强（能有效地抑制故障电流的上升率），故其运行可靠性较高；电压型逆变器的换流失败则会导致严重的短路故障，可靠性相对差一些。

(3). 大容量的要求：

高炉鼓风机的功率大约为10-60MW，要求同步电动机的容量较大，因此若采用电压型则需要较大的电容，这实现起来比较困难；而若采用电流型，则大电感的制造相对较容易。所以对于大功率场合多采用电流型变频器。

(4). 成本（功率器件的选择）：

电流型逆变器对功率器件的关断时间没有特殊要求，因此可以使用廉价的普通晶闸管，这种器件的工作也安全可靠；电压型逆变器则要求功率器件的关断时间要短，所以必须使用价格较高的快速晶闸管。

综上所述，根据高炉鼓风机及其驱动者一大容量、高转速同步电动机的特点，同步电动机的启动用变频器应采用静止式电力电子变流装置，这种变频器的型式一般为交一直一交式电流型。

3-1-3 交一直一交式变频器中的整流器

整流器是变频器主电路的重要组成部分，它主要包括整流电路和触发电路两部分。整流电路就是整流器的主电路，它的作用就是通过导通或关断功率器件（按照一定规律）使交流电变换成直流电，从而为逆变器提供直流电源。触发电路则是整流器的附属电路，它的作用就是保证功率器件在适当的时候可靠导通或关断（对于半控型器件则只存在导通）。

一、整流器的基本类型：

按照整流电路的不同形式可以分成不同的基本类型：

- 1、按其控制方式的不同划分：可控（全控与半控）和不控；
- 2、按相数的不同划分：单相和多相；
- 3、按接线方式的不同划分：零式和桥式（半波和全波）；

目前在交一直一交式变频器中，整流器一般采用三相桥式可控整流电路。

二、三相桥式相控整流器：

1、三相桥式相控整流电路的基本结构及原理：

三相桥式相控整流电路是由六个晶闸管组成，它实质上是由一组共阴极和一组共阳极晶闸管（每组各三个）所组成的两个三相半波整流电路串联而成，对这两组晶闸管同时进行控制且控制角 α 完全相同，共阴极的一组在正半周导通；共阳极的一组在负半周导通。在任一时刻，整流电路中都有两个不在同一个桥臂上的晶闸管导通，每个晶闸管均导通 120° ，每隔 60° 就有一个晶闸管触发换流。

2、整流电压：

三相桥式整流电路的输出整流电压的波形实际为线电压的一部分，输出的整流电压在一个周期内脉动六次，脉动频率为： $6 \times 50\text{HZ} = 300\text{HZ}$ 。

3、对触发脉冲的要求：

对于三相桥式相控整流电路，需要共阴极组一个晶闸管与共阳极组一个晶闸管同时导通才能形成回路。为了保证在合闸后两个串联的晶闸管能同时导通，或者电流断续后能再次导通，必须对两组中应该导通的一对晶闸管同时有触发脉冲。为了达到这个目的，可以采取两种办法：一种是使每个触发脉冲的宽度都大于 60° （必须小于 120° ），一般取 80° – 100° ，称为宽脉冲触发；另一种是用双窄脉冲，在触发某一号晶闸管时，同时给前一号晶闸管补发一个脉冲，使共阴极组和共阳极组的两个应导通的晶闸管上都有触发脉冲。这相当于两个窄脉冲等效代替大于 60° 的宽脉冲。因此，用双脉冲触发，在一个周期内对每个晶闸管需要连续触发两次，而两次脉冲的中间间隔为 60° 。

在实际应用中，以上两种触发方式各有利弊：

- (1). 用宽脉冲触发时，由于脉冲数量减少，故线路较简单；但功率消耗较大；漏感较大，导致脉冲前沿不够陡峭，这对晶闸管的串、并联不利。
- (2). 用双窄脉冲触发时，触发电路比较复杂；但功率消耗较小。

综上所述，在大功率晶闸管相控整流器中，多采用双窄脉冲触发方式工作。

4、功率因数：

在三相桥式相控整流电路中，输入到整流电路的是正弦交流电压，但流过的交流电流却不是正弦波，而且控制角 α 影响其电流相对于电压的相位。由分析可知：对于三相桥式相控整流电路接有大电感负载时，其功率因数为： $\cos \psi \approx \cos (\alpha + \mu / 2)$ ，其中： μ 为换流重叠角。由此可见，相控整流电路的功率因数主要决定于控制角 α ， α 越大，即调节范围越深，则功率因数也就越低。因此，相控整流电路在大的控制角工作是不利的，这是相控整流电路的一大缺点。

3-1-4 交一直一交式变频器中的逆变器

逆变器是变频器主电路的核心部分，它的作用就是使功率器件按照一定规律导通或关断，从而使负载获得交流电。

一、逆变器的基本类型：

按照逆变电路的不同形式可以分成不同的基本类型：

- 1、按相数的不同划分：单相和多相；
- 2、按接线方式的不同划分：零式和桥式（半波和全波）；
- 3、按导通角的不同划分： 120° 导电型和 180° 导电型；

在交一直一交变频器的三相桥式逆变电路中，按照功率器件的导通持续时间的不同（脉冲信号的波形不同），常常可以分成两种不同的基本工作方式，即 120° 导电型和 180° 导电型。

(1). 120° 导电型：

见图：图3.1.4A

(2). 180° 导电型：

见图：图3.1.4B

综上所述，目前在交一直一交式变频器中，逆变器一般采用三相桥式逆变电路， 120° 导电型，如图：图3.1.4C。

二、逆变器的换流：

按照三相桥式逆变器的工作规律，任何瞬间逆变器的每相桥臂上只能有一只功率器件导通，而另一只关断。

逆变器的换流（换相）过程就是指将某一只功率器件中的电流转换到另一只功率器件中去，当由前一只功率器件导通换为后一只功率器件导通时，前者必须可靠关断。

在逆变器中，对换流过程的控制及其工作的可靠性是整个逆变器能否正常工作的关键。

在变频器中，功率器件的换流有以下几种常用的方法：

1、电网电压换流：

利用交流电网电压自动过零并变负的性能来换流。这种换流方法简单，无需附加换流回路，主要用于由交流电网供电的电路中，如晶闸管相控整流器或晶闸管交—交变频器。

2、负载谐振式换流：

当负载呈容性时，即具有负载电流超前电压的特性时，可以利用负载本身进行换流，这种换流方法多应用于直流供电的电路中。如无换向器电动机中的负载反电势换流（自然换相法）。

3、强迫换流：

利用专门的换流电路，使功率器件在任何需要的时刻关断，从而达到变频器换流的目的。这种换流的特点是换流回路与负载

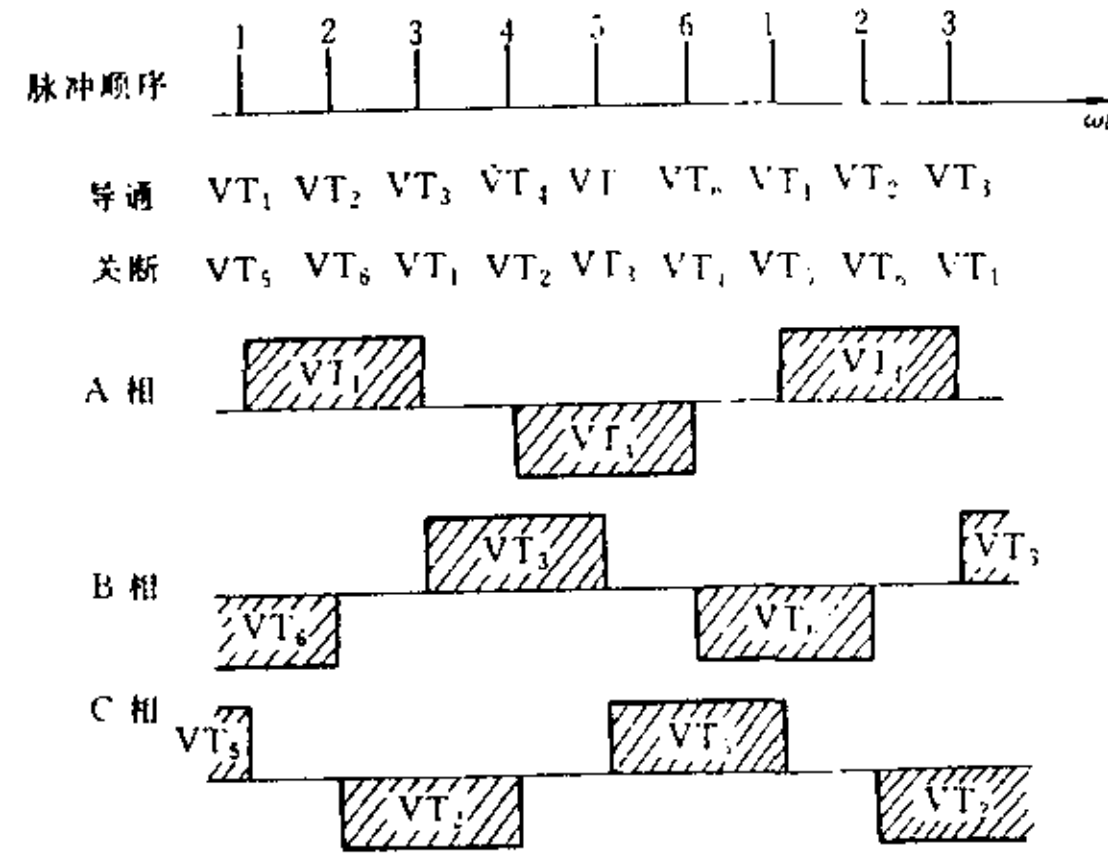


图3. 1. 4A

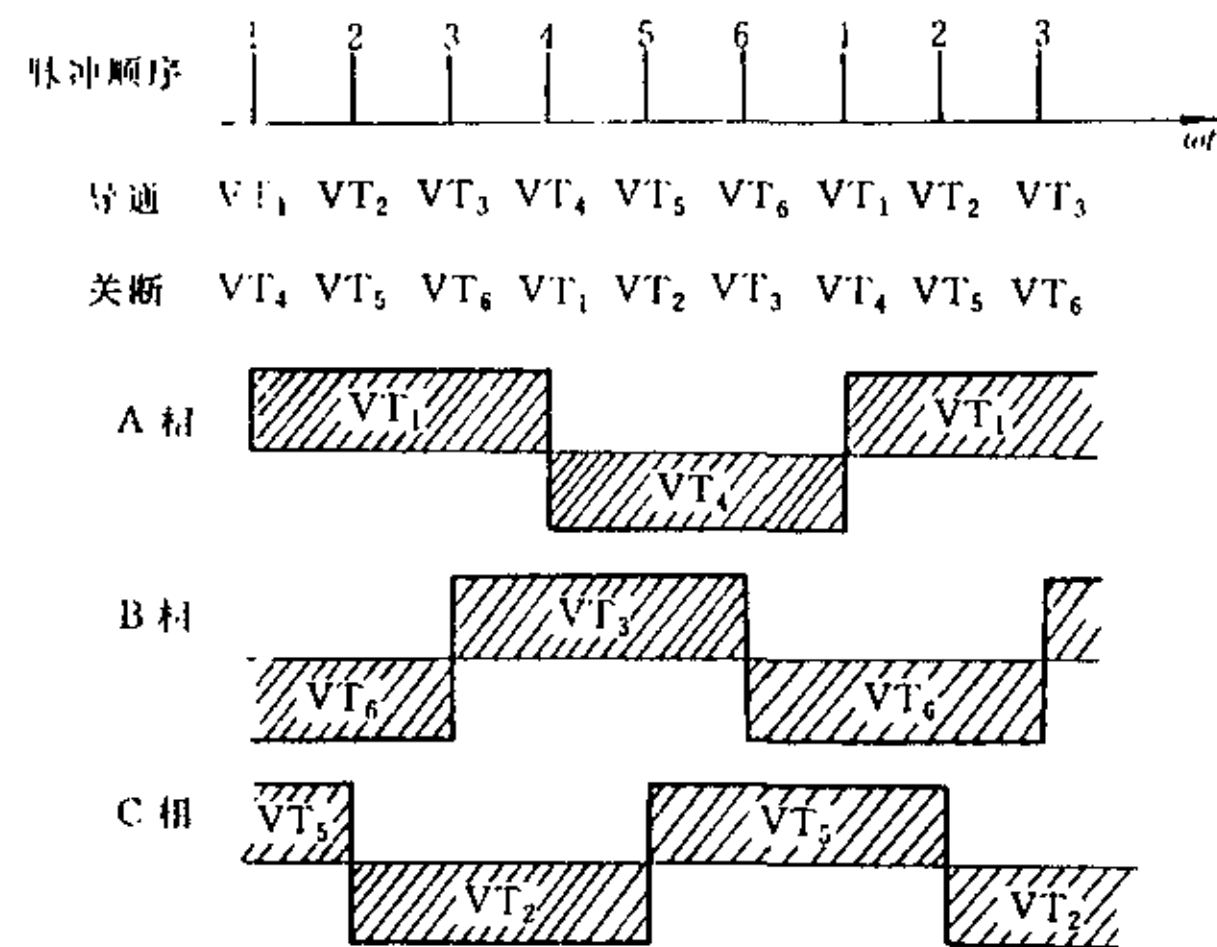


图3. 1. 4B

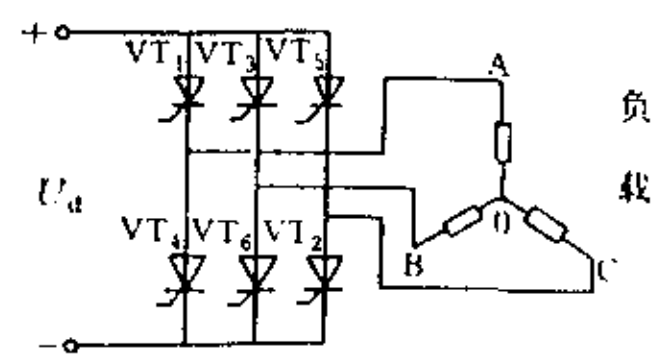


图3. 1. 4C

分开，换流作用是利用外接的储能元件的能量，产生一个短暂的换流脉冲，使原来导通的功率器件的电流下降到零再承受一段时间的反压而关断。

在强迫换流中，对半控型功率器件进行有效关断的方法有两种：

- (1). 使通过功率器件的电流小于其维持电流，从而将其关断。如电流断续换相法。
- (2). 通过对功率器件施加反向电压，从而将其关断。这种方法的换相电路多采用储能元件。

此外，在变频器中，若采用全控型电力电子器件，就可以采用自换流方式，即可以利用其门极、基极或栅极的驱动信号进行换流，而无需附加换流回路。如使用GTO，GTR，MOSFET，IGBT等功率器件的变频器换流。

综上所述，以上三种换流方法：电网电压换流，负载谐振式换流和强迫换流一般都用于半控型功率器件构成的变频器；而自换流则用于全控型功率器件构成的变频器。

三、逆变器的比较和选择：

在无换向器电机中，用晶闸管逆变器来完成一般直流电机中换向器的功能，即要用晶闸管完成电机绕组之间的换流。在无换向器电机中，其换流方式可以选用各种强迫换流方法，也可以选用电网电压或电机本身的反电势进行自然换流。由于采用强迫换流往往使线路复杂和设备费用增加，因此很少采用；而电网电压换流也不方便，故现在无换向器电机一般都是利用电机的反电势

自然换流。

但是，电动机在低速和起动时，由于转速很低，反电势很小甚至没有。在这种情况下，利用反电势换流是不可能的。解决这一问题的办法有两种，即采用交—交变频器，从而利用电网电压换流；或采用所谓的电流断续换流法。显然，无换向器电机采用电流断续换流是最简便的。

综上所述，对于采用半控型功率器件的无换向器电动机，在低速和起动时（一般在额定转速的 10%以下），逆变器采用电流断续换流；当电动机进入高速（一般在额定转速的 10%以上）状态，就改用反电势自然换流。但是由于采用全控型功率器件的自换流具有简单、易于控制的优点，所以它必然是一种发展方向。

3—2 电力半导体器件

3—2·1 电力半导体器件的基本类型

变频器的核心器件是电力半导体开关器件，它又称为电力电子器件，是现代交流调速的物质基础。它们都是静止的电子型器件，具有体积小、重量轻、功耗低、效率高、响应快等特点。

电力半导体器件的基本类型有两大类，即不可控器件和可控器件。

一、不可控器件：

主要指整流二极管：

- 1、普通整流二极管；
- 2、快速恢复整流二极管；
- 3、肖特基整流二极管；

二、可控器件：

可控器件又分为半控型器件和全控型器件两种：

1、半控型（非自关断器件）：

半控型器件的开通可控，而关断不可控。

(1). 普通晶闸管：

又称普通晶闸管（SCR-Silicon Controlled Rectifier）；

(2). 快速晶闸管；

(3). 逆导晶闸管（RCT）；

(4). 双向晶闸管（TRIAC）；

2、全控型（自关断器件）：

(1). 晶体管：

a. 双极功率晶体管：

又称为功率晶体管、达林顿晶体管或巨型晶体管
（GTR-Giant Transistor）；

b. 功率场效应晶体管（MOSFET）；

c. 绝缘门极晶体管：

又称为绝缘门极晶闸管或绝缘栅双极晶体管
（IGBT-Isolated Gate Bipolar Transistor）；

d. 静电感应晶体管（SIT）；

(2). 晶闸管：

a. 门极可关断晶闸管（GTO-Gate Turn-Off thyristor）；

b. 场控晶闸管；

c. 静电感应晶闸管（SITH）；

3-2-2 普通晶闸管

在半控型电力电子器件中，最常用的就是普通晶体闸流管，简称普通晶闸管，又称为可控硅整流器件（Silicon Controlled Rectifier—SCR）。“半控”的概念主要是因为普通晶闸管可以被控制导通，而不能用门极控制关断。

晶闸管有三个引线端子，即阳极A、阴极K和门极G；并有三个PN结。晶闸管的结构如图：图3.2.2

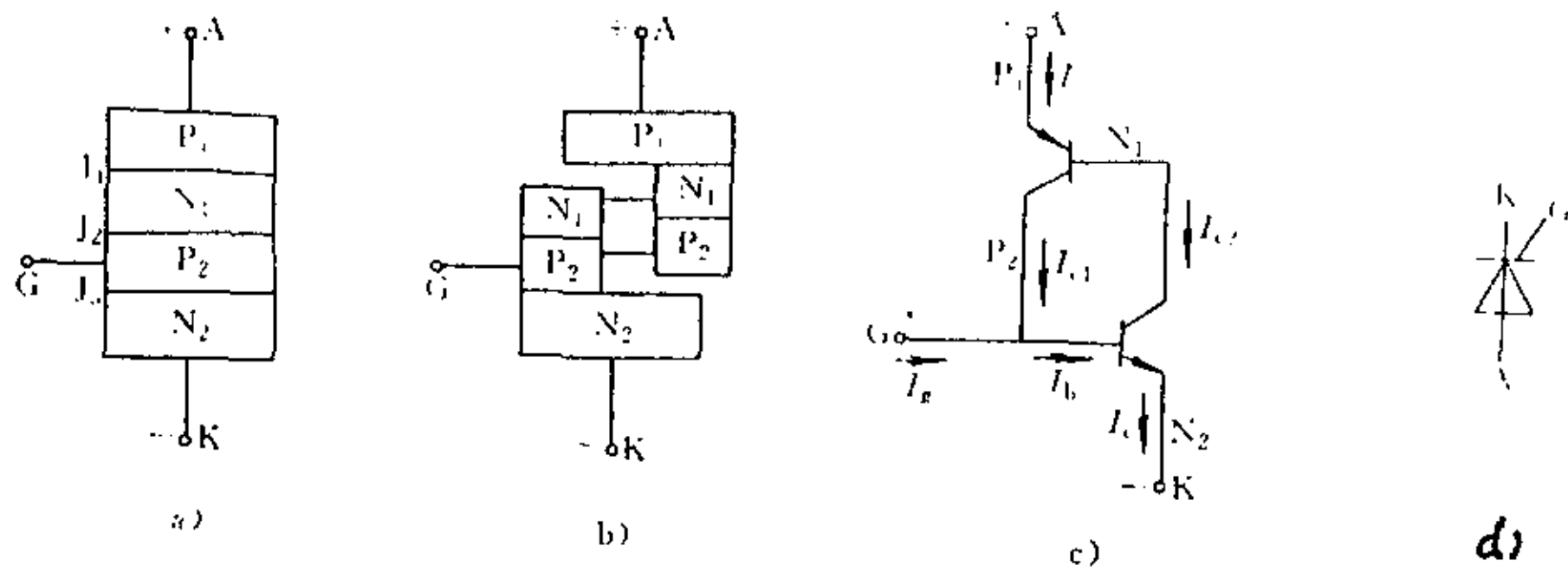


图3.2.2

晶闸管的工作原理：

不管阳极承受正向电压，还是承受反向电压，晶闸管内至少有一个PN结反向偏置。因此，晶闸管在正反两个方向上都具有阻断能力。

若只在阳极和阴极之间加上正向电压，器件中不会有电流流过；但如果同时在门极和阴极之间也加上正向电压，使得一定的电流流过门极（这一小电流称为触发电流），这样则会导致有电流从阳极流向阴极，即晶闸管导通。此外，晶闸管一旦导通，即

使门极电流中断，阳极和阴极间的电流仍能继续导通。只有阴、阳极之间存在零偏置或负偏置时，才能将晶闸管关断。这也就是说，门极可以控制其导通时刻，但不能控制其关断。

由于晶闸管耐压高、电流大、抗冲击能力强，所以即使在全控型功率器件飞速发展的今天，它仍具有很强的生命力。

3-3 同步电动机的自控式变频调速

自控式变频调速的特点是同步电动机的定子电压频率是由与其转子位置有关的脉冲信号来控制的。因此，逆变器的频率唯一地与被控同步电动机的速度联系起来，逆变器供电电流频率和电动机的转速始终保持同步，这就不会产生振荡和失步现象。

由变频器和同步电动机可以构成一个变频调速系统，如图：

图3.3

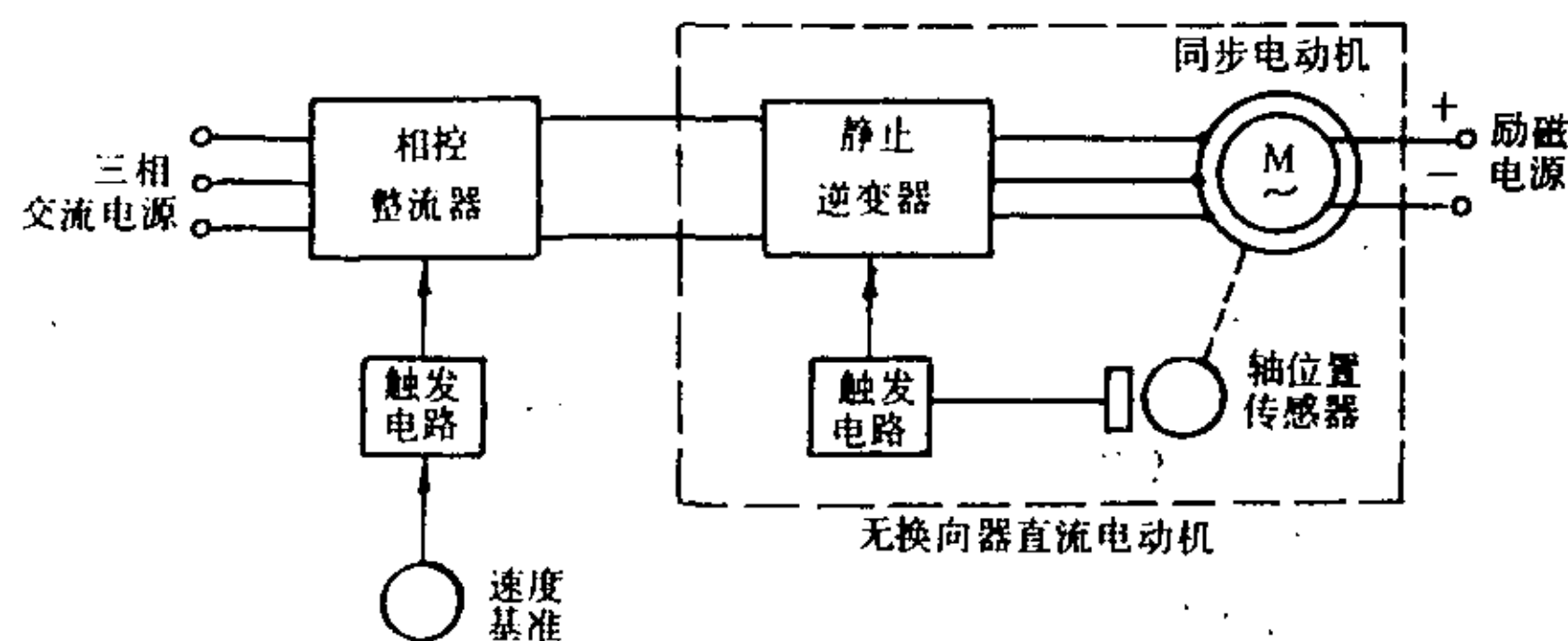


图3.3

如图所示，同步电动机的自控式变频调速系统可以看作是相控整流器供电的无换向器直流电动机调速系统。可见自控式变频

同步电动机与直流电动机有着相似的调速性能。

3-3-1 同步电动机采用自控式变频调速方法的原因

高炉大型化带来能源的节约与效率的提高,使高炉利用系数提高,焦比降低,而高炉大型化伴随着高压操作技术的应用,需要与此相匹配的大型高压轴流鼓风机,以提高操作效率。当今高炉鼓风机正在采用大容量同步电动机拖动以取代过去的热力透平机械。由于同步电动机容量巨大(10-60MW),用于控制同步电动机转速的变频起动装置中的功率器件比较现实的是晶闸管。晶闸管是无自关断能力的半控型电力电子器件。在一般的直流-交流的晶闸管逆变器中,为保证晶闸管可靠换流都要采用强迫换流,但这种方法需要一套特设的换流电路,因而使逆变器线路变得很复杂,设备费用增加,装置体积也庞大,损耗也增加。但如同步电动机采用自控式变频方法,由于逆变器负载是一台自己能产生反电动势的电动机,就可直接利用电机本身的反电动势来使晶闸管换流,这就可以省去专门的换流电路,即所谓“电动势自然换流”,它不同于一般意义上的晶闸管交-直-交电流型逆变器,可以省去强迫换相电容和串联二极管等器件,这是同步电动机自控方式(直流无换向器电机)方案的突出优点。晶闸管变频起动装置通过调节相控整流器输出的直流电压和自控式逆变方式,可以使同步电动机始终在同步状态下近于线性的起动加速。当电动机起动到额定转速,就可以在同步状态下并入电网,因而对系统电网不存在冲击。晶闸管变频起动装置是静止起动装置,设备安装简便,不需要特别的机械基础,安装面积小,维护检修方便。

3-3-2 无换向器直流电动机

直流电动机的励磁磁场和电枢磁场在空间上都是固定的，转矩是由两者的相互作用产生的。馈给电枢的交流功率是经过换向器和电刷由输入端直流电源获得的，可以把换向器和电刷看成是一个对机械轴敏感的机械逆变器。因此，直流电动机可以看作是一台励磁磁场固定但带多相绕组的电枢旋转的交流同步电动机。在自控方式下的同步电动机与其有些相似，但是，同步电动机的定子磁场和电枢磁场在空间上都是旋转的，转矩也是由两者的相互作用产生的。电枢磁场仍由励磁电源供电，而定子磁场则由相控整流器提供直流电源，定子磁场的旋转频率则由一个轴位置控制的电子逆变器进行控制，它相当于直流电动机的机械换向器。这种轴控的半导体开关要保证开关频率比例于转子速度，并保持电枢磁场在空间上与主磁场正交。同步电动机的速度比例于输入到逆变器或电子换向器的直流电压，正像直流电动机的速度比例于供给到换向器电刷上的直流电压一样。

用电子式换向器取代直流电机中的机械换向器和电刷的优点是显而易见的，因此，自控变频方式的同步电动机又称为电子换向电动机（ECM）或无换向器电机（采用交—直—交变频器时称直流无换向器电机，而采用交—交变频器时，称为交流无换器电机）。与直流电动机相似，在电子换向器中，“片段”数量的减少，会引起输出转矩的脉动。

3-3-3 无换向器直流电动机的调速

高炉鼓风机的变频启动装置是一个典型的自控式变频调速系

统，同步电动机的转子检测主要是两个内容，即速度和位置。这两个量送入调速系统，使之成为整流侧的速度控制系统和逆变侧的频率控制系统，具体地说就是速度闭环控制着整流器的控制角 α ；而位置闭环控制着逆变器的逆变角 γ 。对于自控式变频调速系统，从整流侧看，它相当于无换向器直流电动机调速。

无换向器电动机相当于有三个换向片的直流电动机，只不过换向是由晶闸管来进行的。因结构上的限制，电枢绕组及变频器静止不动，而磁极旋转。

根据运动的相对性，对于直流电动机而言，可以认为转子和换向器在空间位置上不动，而定子和电刷则向相反的方向运动。由于同步电动机的定子电流是直接由转子转速控制的；而其定子电流频率及其旋转磁场是由转子位置检测器控制的，因此电动机的速度升高或降低时，位置检测器输出信号的频率也随之升高或降低，这样就可以保持其与励磁磁场的相对位置始终不变，所以这种电动机是不会有失步的问题。这就是自控式同步电动机的特点。

一般来讲，对于调速系统的起动过程，应使系统在最大电流受限制的约束条件下，实现“最短时间控制”或者“时间最优控制”，充分发挥电动机的过载能力，使起动过程尽可能最快。理想的起动过程如图：图3.3.3A

如图所示，它要求在整个起动过程中一直保持电流为一恒定最大值，这个最大值受电动机的限制，而在电动机起动至给定转速时电流立即降下来，使转矩与负载相平衡，从而转入稳速运行状态。这就是说，希望起动过程中的电流接近于理想的矩形电流

波形。因此采用带有从属电流环的调速系统，即转速、电流串级调节的双闭环调速系统。如图：图3.3.3B

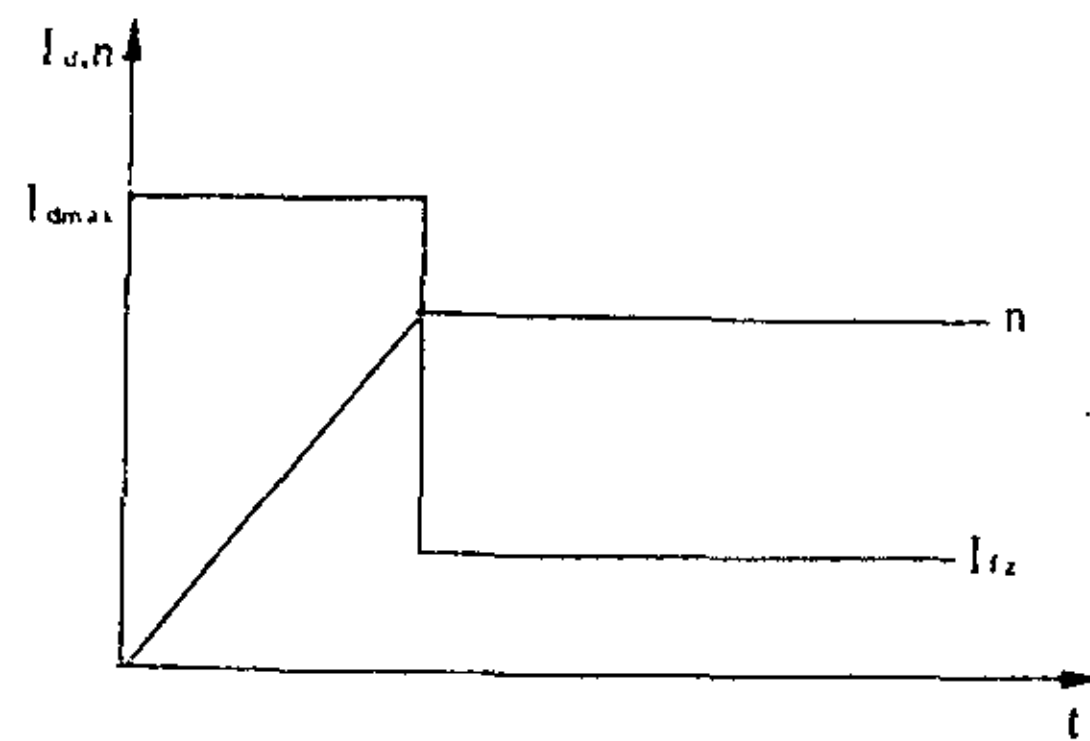
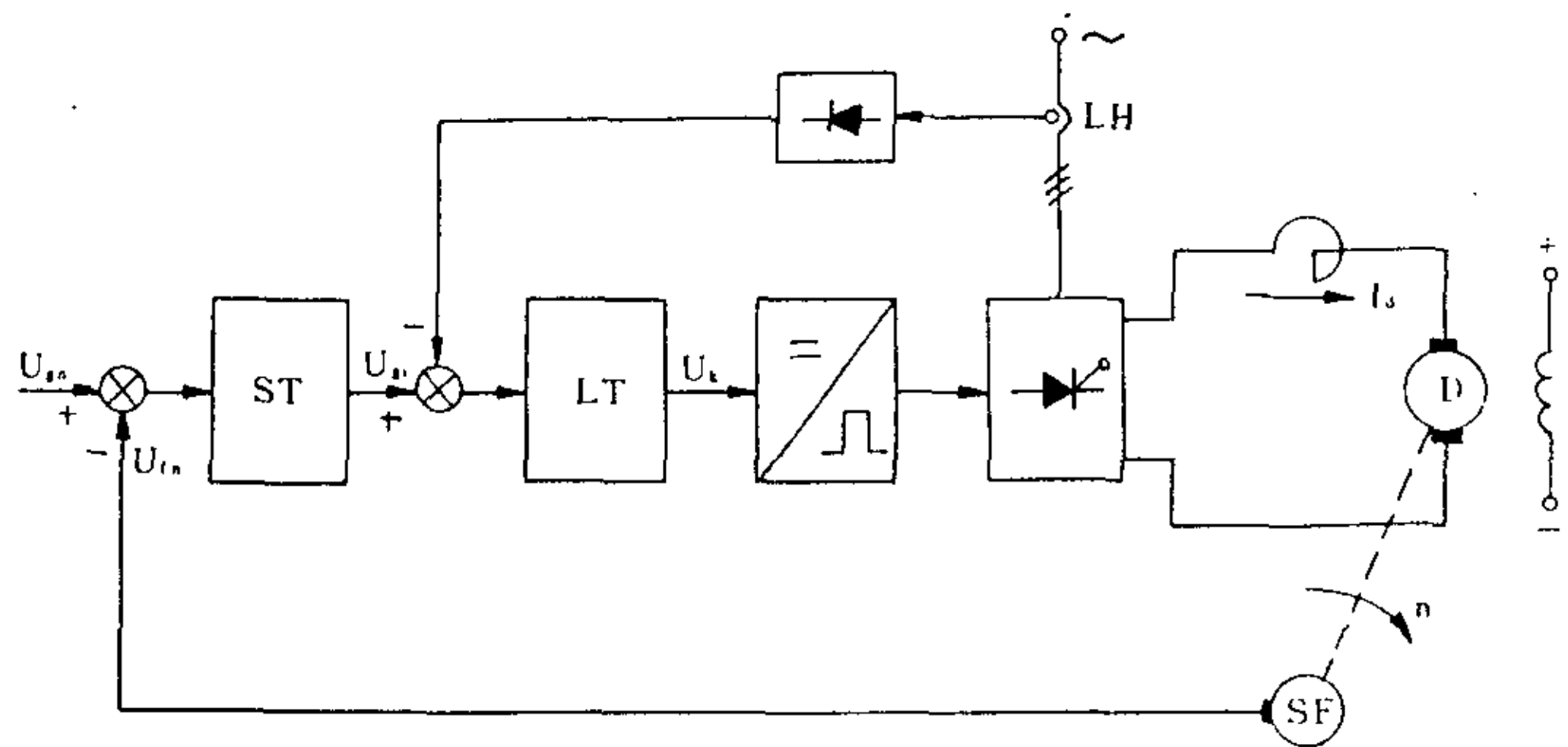


图3.3.3A



ST—转速调节器；LT—电流调节器；SF—测速
LH—交流电流互感器； U_{gn} 、 U_{fn} —转速给定和反馈电压； U_{gn} 、 U_{fn} —电流给定和反馈电压

图3.3.3B

如图所示，ST和LT都是PI调节器，分别为速度调节器和电流调节器。双闭环调速系统的动态过程分成三个阶段，如图3.3.3C

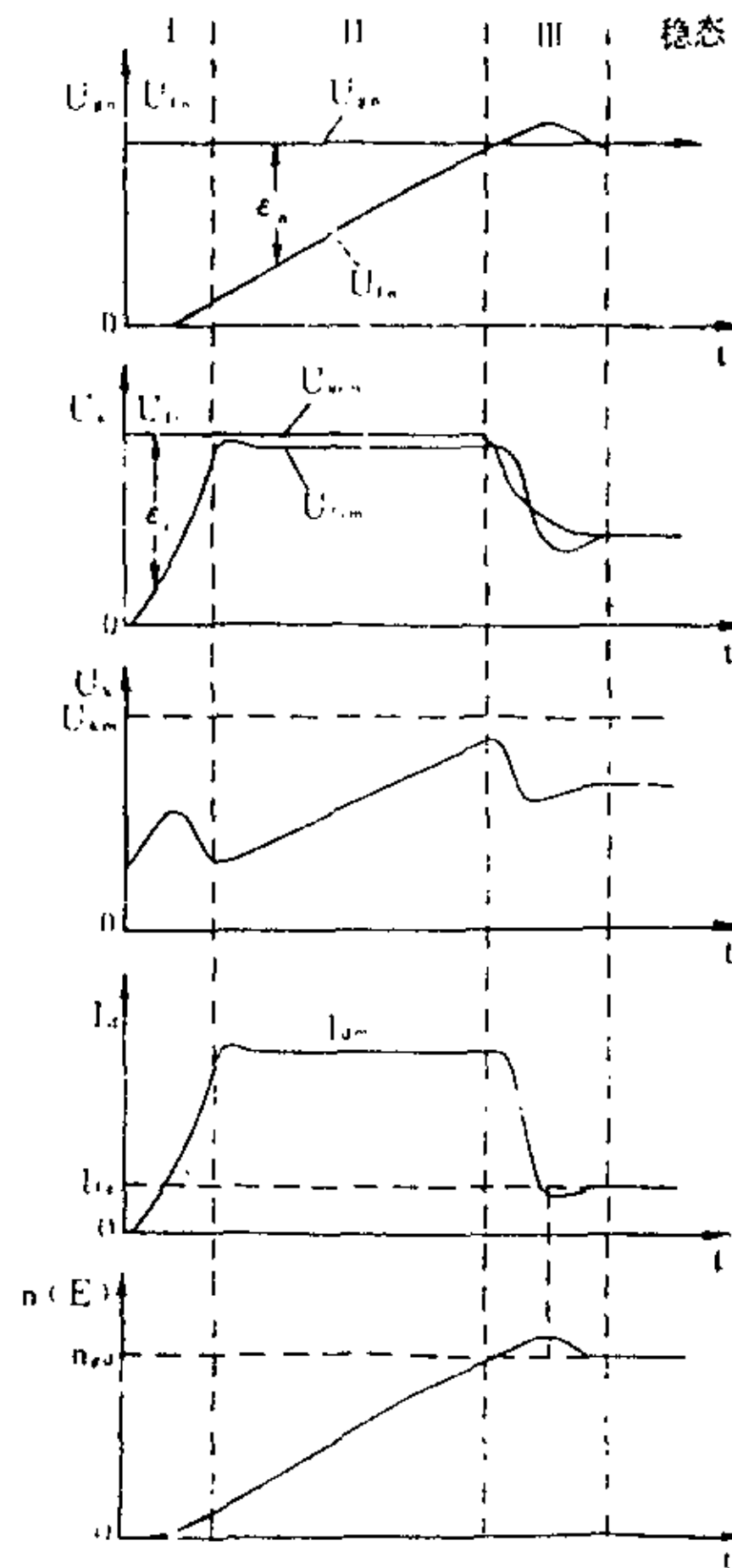


图3.3.3C

第 I 阶段是电流上升阶段：当电动机起动时，突加速度给定信号后，速度反馈信号较小，故转速调节器ST的输出很快达到限

幅值，它又是电流环的给定，其值与电动机最大容许电流相应，使电流调节器的输出迅速上升，从而控制晶闸管整流电压也迅速上升，电枢电流达到最大值 I_{dmax} 。

第II阶段是恒流升速阶段：这是起动过程的主要阶段，在此期间ST一直维持饱和，转速环相当于开环。在恒值电流给定下，LT的调节作用使电枢电流也维持为恒值 I_{dmax} ，则电动机的加速度恒定转速按线性规律上升。

第III阶段是转速调节阶段：这一阶段从电动机转速上升到给定值开始，由于ST的给定输入小于反馈输入，它开始退出饱和，因此电流环的给定开始下降，电枢电流也就下降至 I_f 。在这一阶段中，ST和LT同时发挥作用，由于转速环是外环，ST处于主导地位电流调节在内环，LT处于从属地位。系统最终在转速环的作用下使转速稳定在给定转速。

3-4 晶闸管直流无换向器电动机的转矩

晶闸管自控式同步电动机调速系统一般称为晶闸管直流无换向器电动机。其同步电动机的定子绕组是三相的，给它供电的晶闸管逆变器通常采用三相桥式接法，如图：图3.4A

若同步电动机的定子绕组接法为Y形，则两相（例如AB相）绕组中通过一持续的直流电流，则产生电磁转矩：

$$T_{ab} = F_1 * F_2 * \sin \theta$$

其中： T_{ab} —AB相绕组的转矩；

F_1 —定子AB相绕组的磁势；

F_2 —转子磁势；

θ - AB相磁势 F_1 与转子磁势 F_2 的夹角;

由上式可见, 在 F_1 和 F_2 大小一定时, 转矩 T_{ab} 与相位角 θ 成正弦关系, 见图: 图3. 4B。

实际上, 在无换向器电机中, 每相绕组通过的不是持续的直流电流, 每相绕组只通电 $1/3$ 周期, 即 120° 电角度, 而实际上每次导通的绕组为两相 (例如AB相), 它只通电 $1/6$ 周期, 即 60° 。因此, 同步电动机的电磁转矩如图: 图3. 4C, 所以, 每次导通时线电压与转子磁场作用下所产生的转矩也只是正弦转矩曲线上相当于 $1/6$ 周期长的一段, 且这一段曲线与绕组开始通电时的转子相对位置有关。如图3. 4C所示, 显然 $\theta = 60^\circ$ 时触发晶闸管导通AB相是最有利的 (从产生转矩的角度来看)。因为在这种情况下, 在AB相绕组通电的 60° 时间里, 载流导体正好处在比较强的磁场中, 所以它所产生的转矩平均值最大, 而脉动又最小。习惯上把这个位置称作晶闸管触发相位的基准点, 定义为空载换流超前角 $\gamma_0 = 0^\circ$ 。电动机三相绕组轮流通电所产生的总转矩, 如图3. 4C所示。如果晶闸管触发时间提前或延后都将导致转矩脉动的增加和转矩平均值的减少。在三相桥式接法的逆变器中, 当 $\gamma_0 = 60^\circ$ 时, 如图3. 4C所示, 将有一点电动机的瞬时转矩为零, 这会在电动机起动时出现死点。因此, 对于三相桥式接法的逆变器而言, γ_0 应在 $0-60^\circ$ 之间。

由此可见, 从发挥同步电动机产生转矩的作用上看, 晶闸管自控式变频同步电动机调速系统中, 逆变器应选用三相桥式接法, 这要比半波接法的转矩平均值更大些, 而脉动则更小些, 而且选

择 $\gamma = 0$ 时应尽量使之为零（或接近于零）。

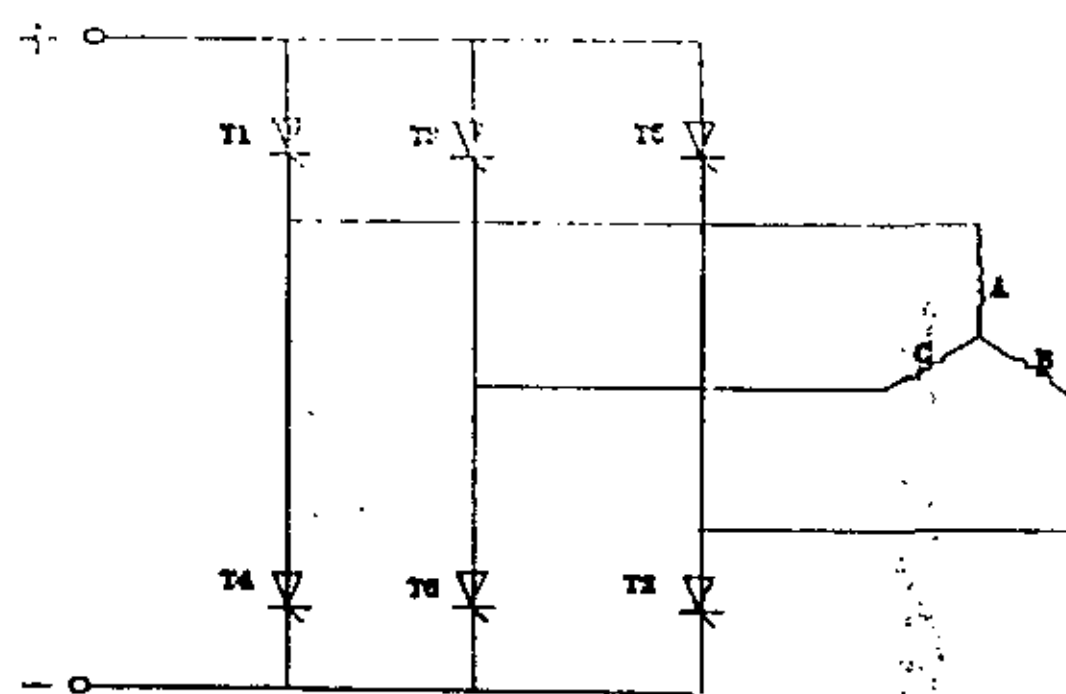


图3.4A

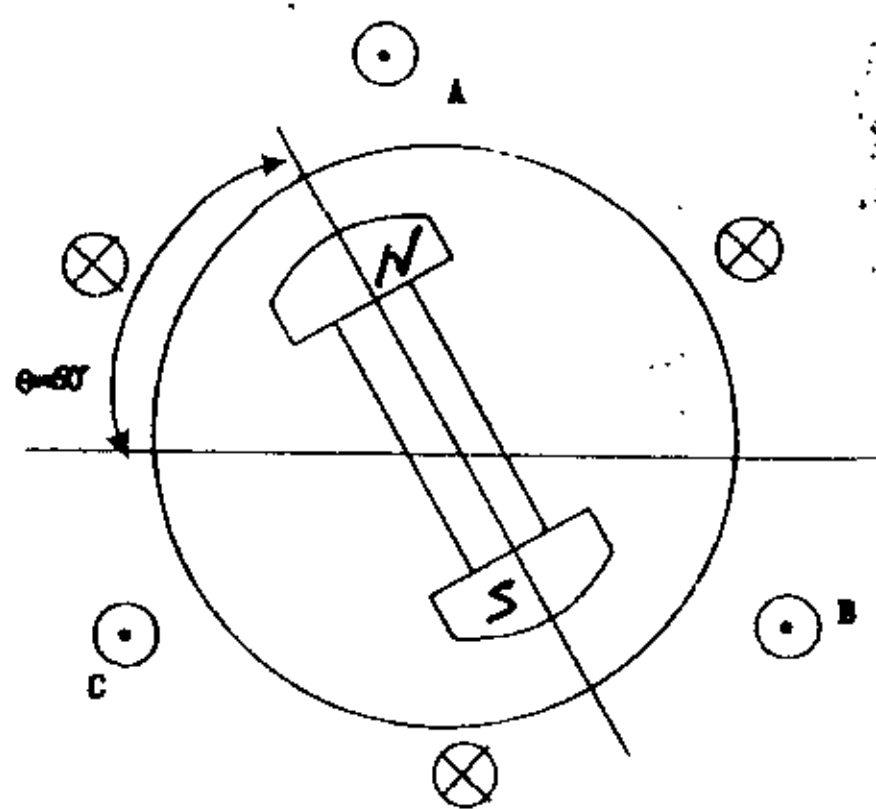


图3.4B

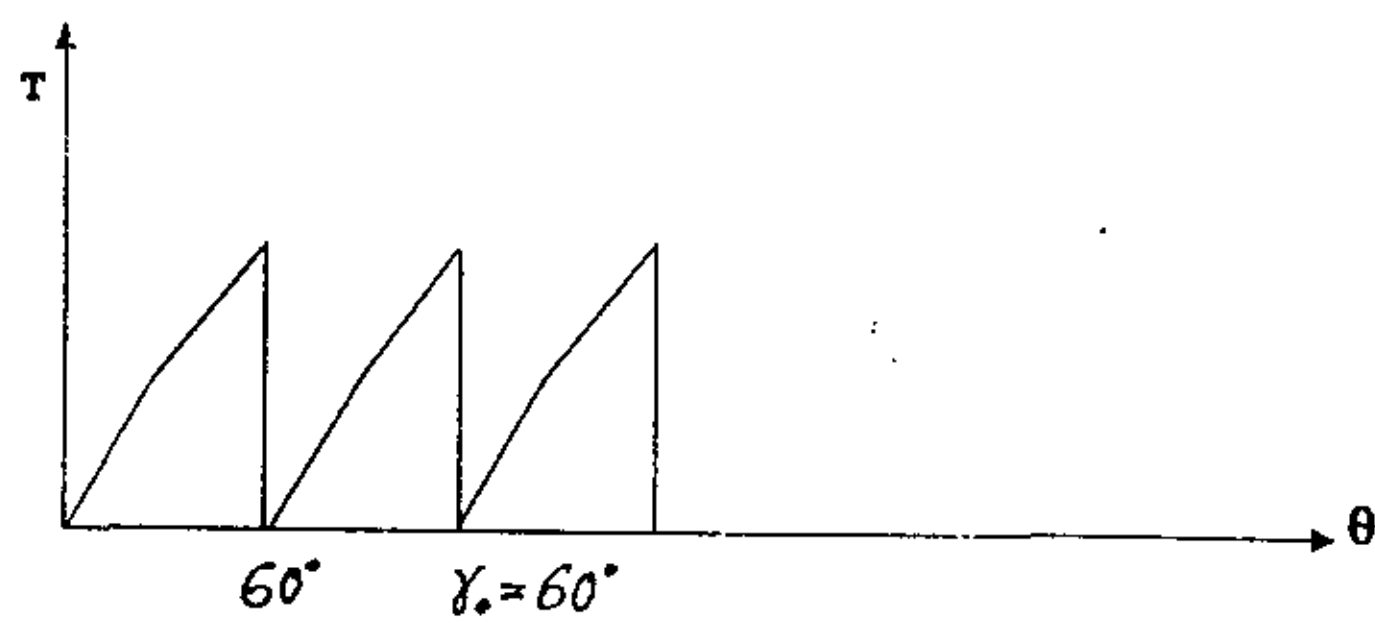
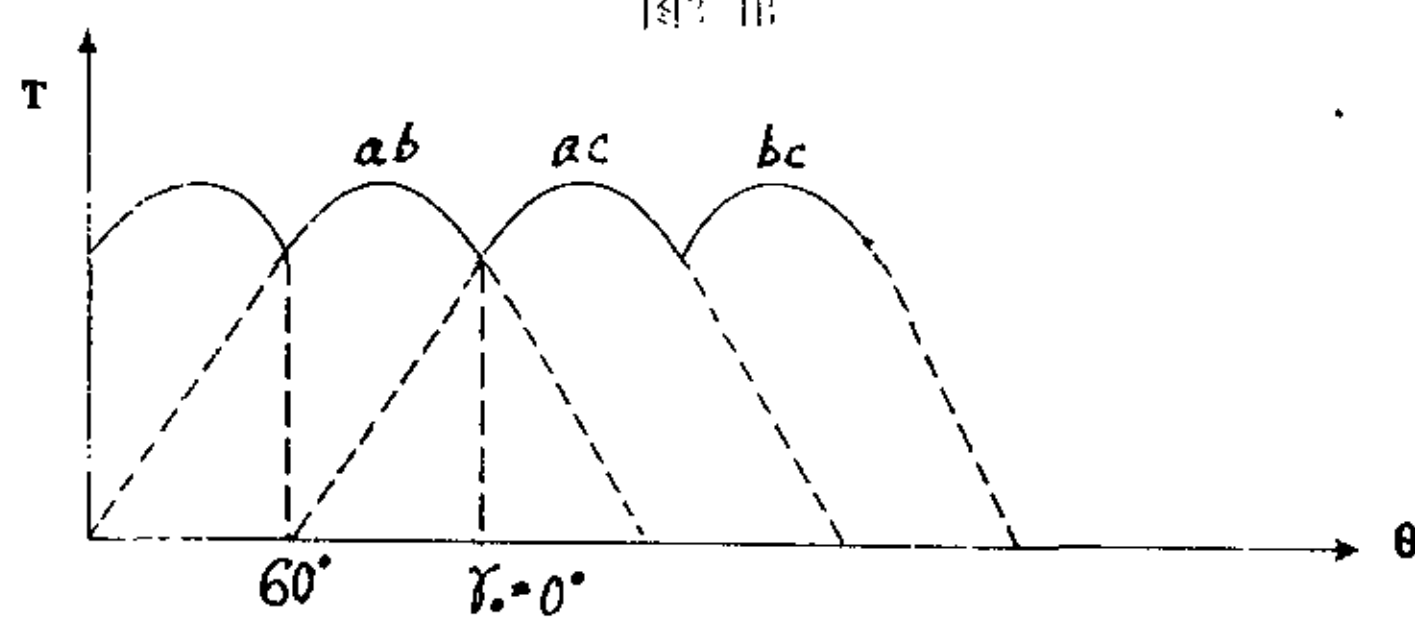


图3.4C

3 — 5 晶闸管直流无换向器电动机的逆变器换流

所谓晶闸管逆变器的换流就是把一个晶闸管中的电流转移到另一个晶闸管中去。晶闸管的换流过程主要分成两部分，即一只晶闸管的导通和另一只晶闸管的关断。众所周知，晶闸管是半控器件，其导通是很容易实现的（只需在其控制极上加一个高电平即可），而在其导通以后就失去了自关断能力，因此，晶闸管的关断则成为换流中的关键问题。晶闸管的关断有两种方法：一是在主回路中加进大的阻抗（或断开主回路），使电流小于晶闸管的维持电流，从而使其关断；二是在晶闸管的阴、阳极间施加反向电压，从而使其关断，即所谓强迫换流。

在强迫换流中，所施加的反向电压时间 t_0 应大于晶闸管的关断时间 t_q ，即为了保证晶闸管的可靠关断必须满足 $t_0 \geq 2 \cdot t_q$ 。晶闸管的关断时间 t_q 与许多因素有关，如温度、负载大小、重加电压变化率等。一般国产晶闸管的典型 t_q 值为：

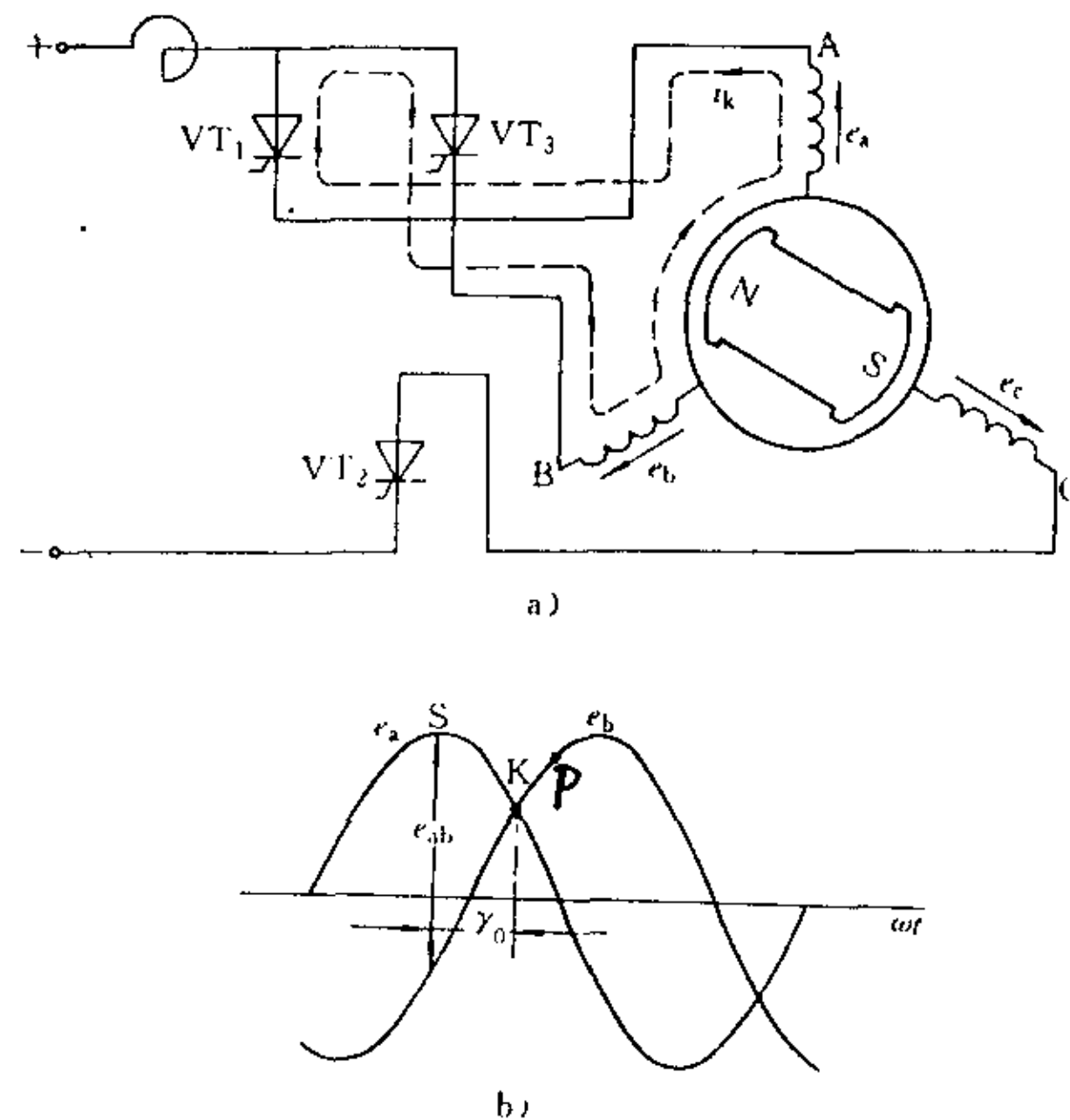
快速晶闸管 $t_q=15-40\mu s$ ，普通晶闸管 $t_q=60-200\mu s$ 。

3 — 5 • 1 无换向器电动机的电动势自然换流

在直流—交流逆变器中，为保证晶闸管的可靠换流一般都采用强迫换流，这种方法可以选择在任何时刻触发换相，但需要有一套特设的换流电路，因而使逆变器线路变得很复杂，装置体积也很庞大，设备费用随之大大增加。在晶闸管直流无换向器电动机中，由于同步电动机定子绕组存在有励磁磁场感应所产生的电动势，而直接利用这个反电势来使逆变器的晶闸管进行换流，就可以省去专门的换流电路，即所谓“电动势自然换流”，这就是

无换向器电机的最突出优点。

以三相桥式接法的逆变器为例进行分析，如图：图3.5.1



a) A、B 相间换相回路 b) 电动势波形

图3.5.1

假设换流前晶闸管T1和T2导通，即a相和c相两相导电。若要将电流从A相转移到B相，即使电动机从A、C导电变成B、C导电，这一过程的换流情况如下：若电动机A相和B相绕组中的电动势分别为 E_a 和 E_b ，要将电流从A相转移到B相，就应触发晶闸管T3而关断T1，其条件是反电势 $E_a > E_b$ ，即换流时刻应比 E_a 、 E_b 两相电动势波形交点K适当提前一个换流超前角 γ_0 ，如上图中的点 S，在该点 $E_a > E_b$ 。若在此时由转子位置检测器所产生的触发信号使T3

导通，T1则受反压而关断，这便实现了T1到T3的换流。相反，若换流不发生在点S，而是滞后于点K的点P时刻（即 γ_0 为负），这时由于 $E_a < E_b$ ，T3就不能导通，无法实现T1到T3的换流。显然，为了可靠换流，触发就必须发生在点K和点S之间，而且 γ_0 角越大，则被关断的晶闸管承受的反向电压越大，持续时间也越长，其关断也就越可靠。

综上所述，在晶闸管直流无换向器电动机中，从实现可靠换流的角度看，应尽量使换流超前角 γ_0 大些。

3-5-2 无换向器电动机的电流断续换流

采用电动势自然换流，可以不必增加辅助设备，因而比较经济。但在电动机起动和低速运行时，电动机的电动势很小，不足以保证安全换流。因此，还必须设法解决低速时的换流问题。

解决无换向器电动机在低速时晶闸管换流问题的常用方法是电流断续换流法。这种方法的工作原理是：每当晶闸管需要换流的时刻，就设法使逆变器的输入直流电流下降到零，使所有晶闸管都暂时关断。然后，再给换流后应该导通的晶闸管加上脉冲。在断流之后重新通电时，电流将根据触发信号流入新导通的晶闸管，从而实现了从一相到另一相的换流。

通常采用的最经济的断流方法是封锁电源，或让电源侧整流器也进入逆变状态，使通过电动机绕组的电流迅速衰减，以达到在短时间内断流的目的。触发新导通的晶闸管时，再让电源恢复工作。

在交—直—交变频器的电路中，为了抑制电流波纹，在直流

回路中，通常都接有平波电抗器，它对电流断续换流是非常不利的，因此，为了加速电流断续过程，必须在电抗器两端并接一个续流晶闸管T0，见图：图3.5.2

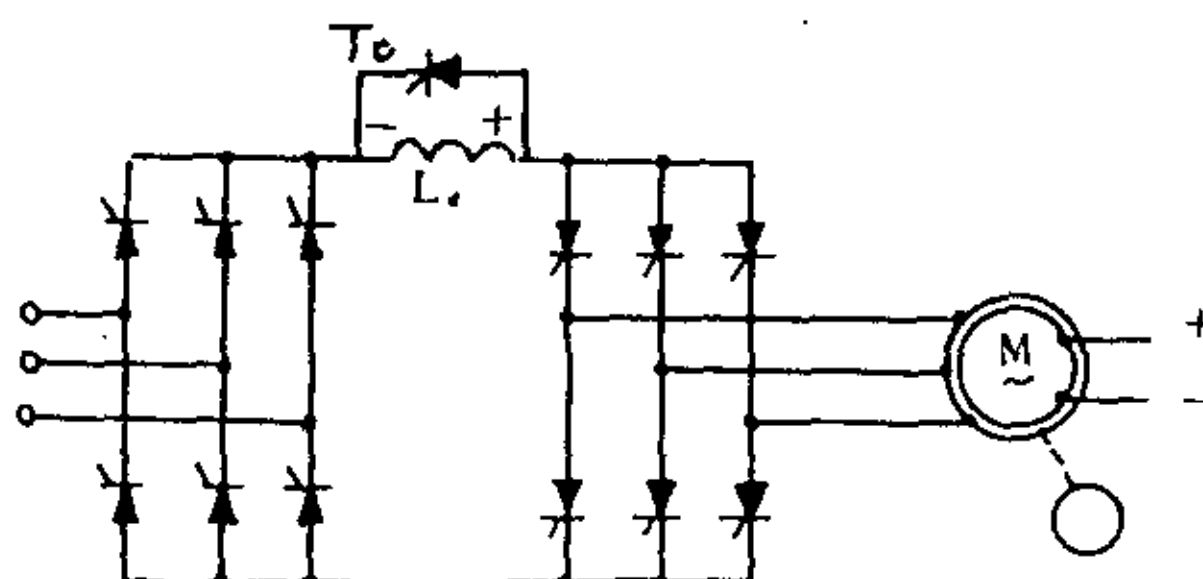


图3.5.2

如图所示，当回路电流衰减时，电抗器两端电压极性为右正左负，这时触发T0使它导通，电流经T0续流，延缓了电抗器中贮能的释放，以便不会因释放而影响逆变器的断流。只要电源侧的封锁一解除，直流电流开始增长时，电抗器两端电压极性反向，续流晶闸管立即承受反压而自动关断，不会影响电抗器正常工作时的滤波功能。

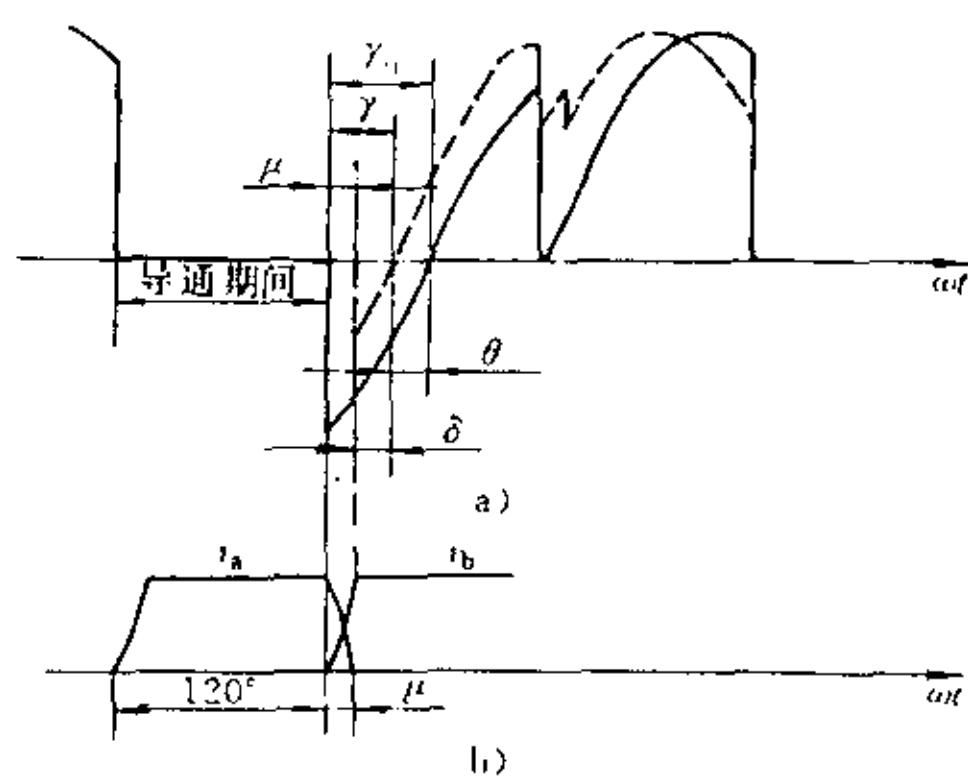
无换向器电动机在低速运行时，逆变器采用电流断续换流，晶闸管的换流超前角 γ_0 对换流已不起决定性作用，为了增大电动机转矩的平均值，减小转矩脉动，一般选取 $\gamma_0 = 0^\circ$ 。

无换向器电动机的电流断续换流方法会使电动机产生较大的转矩脉动，但在大部分驱动场合都不要求在低速时有一个平滑的转矩，因此，这种方法被大量地用于电动机变频起动的低速区。

3-6 晶闸管直流无换向器电动机换流超前角的选择

对于无换向器电动机，从电动机的转矩要求来看，其转矩应平均值尽量大而脉动尽量小，因此，就要求换流超前角尽量小，即选择 γ_0 为零或接近零。

但从逆变器换流的要求来看，其换流时应使被关断的晶闸管所承受的反向电压尽量大；持续的时间尽量长，这样关断才更可靠。此外，考虑到电动机承受负载时（参见图：图3.6），一方面由于两相换流重叠角 μ 的增大，要占去一些时间；另一方面由于电枢反应的影响，电动机端电压的相位将提前，使带负载时的实际换相角 $\gamma < \gamma_0$ ，这样也需要占去一些时间。因此，在选择换流超前角时，要考虑扣除上述因素，并需留有一定的余地，即选择 γ_0 应尽量大。



a) 晶闸管 VT_1 两端电压波形 b) 相电流波形

图3.6

综上所述，分别从转矩角度和换流角度来看，选择换流超前角 γ_0 时，两者的要求是互相矛盾的。因此，换流超前角 γ_0 的选择要有一个最佳值。三相半波逆变器一般选择 $\gamma_0=0-30^\circ$ ；三相桥式逆变器一般选择 $\gamma_0=0-60^\circ$ 。

晶闸管直流无换向器电动机逆变器换流的逻辑过程：

当同步电动机在低速运行时（一般在 10% 的电动机额定转速以下），逆变器采用电流断续换流，晶闸管的换流超前角一般取 $\gamma_0=0^\circ$ 。当同步电动机在高速运行时（在 10%-100% 的额定转速时），逆变器采用电动势自然换流，三相桥式接法的逆变器，一般取 $\gamma_0=60^\circ$ 。在上述两种换流方式进行切换时，可以用速度检测器和 γ_0 角逻辑控制器自动进行。这时要注意，在切换 γ_0 时必须使断流脉冲信号延时封锁而瞬时解封，以免出现换流失败。

在直流—交流逆变器中，采用普通晶闸管这种半控型器件，换流问题始终是一个麻烦。近来越来越多地改用有自关断能力的功率器件（如 GTO, GTR 和 IGBT），换流问题自然就不存在了，电机也可以始终运行在 $\gamma_0=0^\circ$ ，以提高转矩的平均值，同时减少转矩脉动，这可显著地简化系统。即便有时也提前触发，那主要是为了控制功率因数的需要而已。

在选定了换流超前角 γ_0 之后，电动机的过载能力就要受到限制。过载能力不强这是晶闸管自控变频同步电动机调速系统的一个主要缺点，一般只有 1.5—2 倍，有时甚至只有 1.25 倍。过载能力不强的原因就是换相造成的。利用电动势自然换相时，要求在换相结束而且原来导通的晶闸管电流下降到零以后，管子两端

仍继续维持一段反压，其时间应大于晶闸管的关断时间。晶闸管上施加反压的时间是靠换流超前角来保证的。三相桥式的空载换流超前角 γ_0 通常是控制在 60° ，这是在转子位置检测器上整定好的。

第四章 同步电动机变频起动系统的主电路

同步电动机变频起动系统的主电路就是指同步电动机及其起动时提供调压调频电源的电力变换电路，如图：图4.0。

如图所示，系统的主电路是由高压开关、变压器、变频器、同步电动机、转子检测装置等主要部分构成。

1、高压开关：

主要是三个高压开关，即同步电动机的并网开关、变频器的网侧输入开关和变频器的机侧输出开关。一般采用六氟化硫开关或真空开关。

2、变压器：

根据系统主电路的工艺情况而定，有些方案有，有些方案则无。若按高一低一高方案，则变压器主要有两台，即变频器输入侧的降压变压器和输出侧的升压变压器。若采用二重化技术则每台变压器均用三绕组形式。

3、变频器：

根据工艺情况而定，可以选择多种形式，高炉鼓风机的变频起动装置常常选用交一直一交电流型晶闸管变频器，它主要由整流器、中间直流滤波环节和逆变器构成。

4、同步电动机：

一般选用带有励磁机的同步电动机，这种型式的优点是在正常工作时，可以做到无刷励磁。

5、转子检测装置：

转子的检测主要包括两个方面的内容，即检测同步电动机转

子的速度和转子的初始相位。

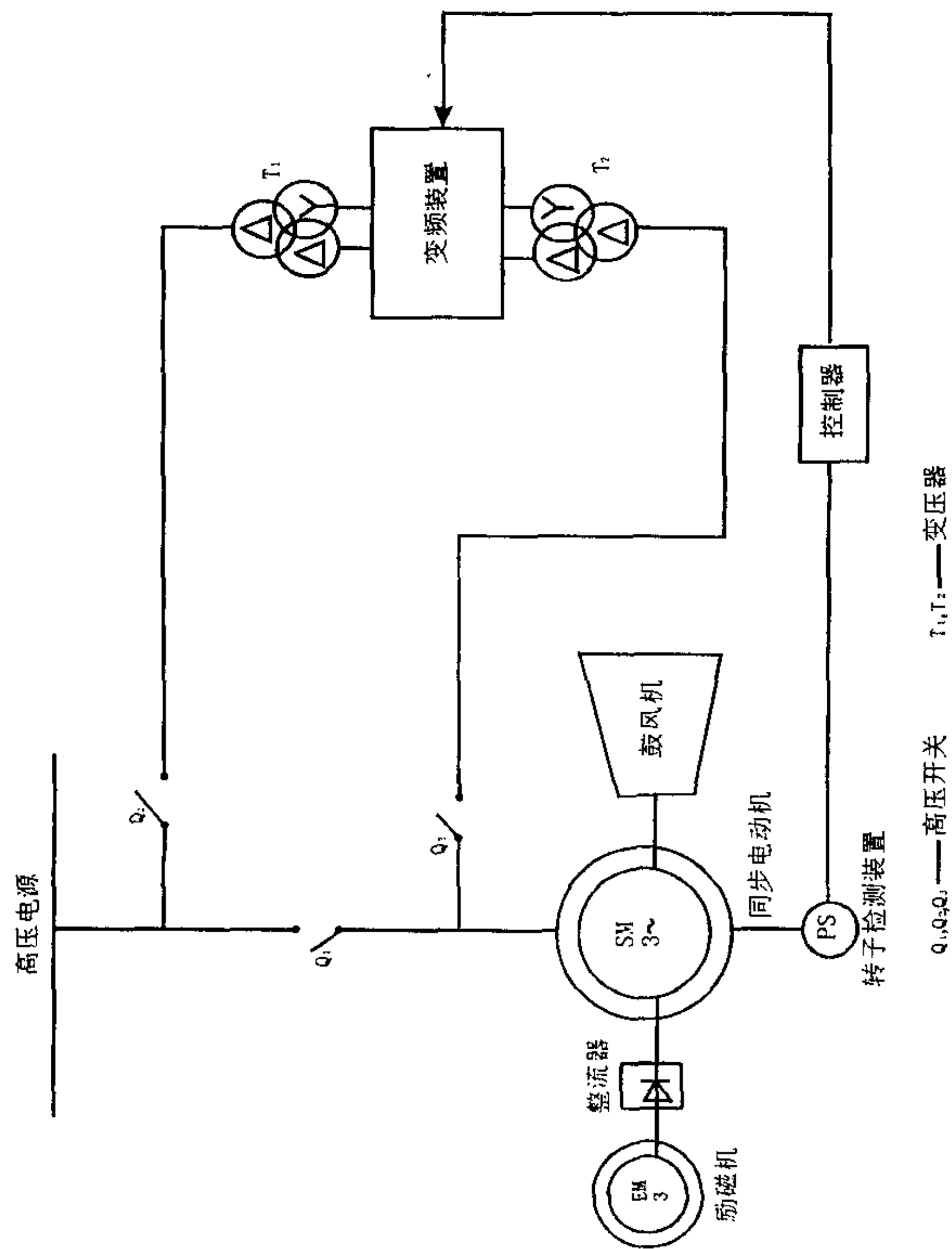


图4.0

4-1 同步电动机变频调速系统主电路的技术方案

一般大型高炉鼓风机的轴功率均在 10-60MW 左右，因此，其拖动电动机均选用高电压、大容量的同步电动机。电动机的供电电源的电压等级一般为 3kV、6kV 或 10kV，所以，其软启动用的变频器一般为功率约为 2-18MW，电压为 380V-10kV。可见电源对变频器的容量要求较大，对电压的要求则较宽。为了解决现有的电力半导体器件与变频器容量、电压要求的矛盾，多年来形成了一些变频调速系统的主电路技术方案。按照电压的高低我们把变频调速系统的主电路技术方案划分成以下几种基本类型：

1、直接高压方式（高一高方式）：

直接高压方式是指在变频调速系统中，采用高压变频器，它直接对高压电源进行变频变压后直接输出给高压电动机，在系统中无需使用降压和升压变压器，这是一种高压变频调速系统。直接高压方式又被称为高一高方式。

日本明电舍（GTO 串联逆变器）和俄罗斯（SCR 水冷）均有此类技术。

2、间接高压方式（高一低一高方式）：

间接高压方式是指在变频调速系统中，采用低压变频器，它不能直接对高压电源和高压电动机进行工作，因此，需要在变频器的输入侧加一个降压变压器，在变频器的输出侧加一个升压变压器，从而构成高压变频调速系统。这实质上仍是低压的变频系统，只不过从电源和电机两端来看是一个高压变频系统。间接高压方式又称为高一低一高方式。

德国西门子和英国西枝来克的高压变频技术均是以此为主。

3、其他方式：

根据电源和电动机的情况，还可以采用直接低压方式、高一低或低一高等方式。

综上所述，目前大型高炉鼓风机的拖动一般采用高压大功率同步电动机（3kV/6kV/10kV，10-60MW），但由于电力电子器件受到其耐压和功率的限制，尚达不到这一水平，因此，变频调速系统多用于变频启动；而变频器则多采用低压变频器，即主电路采用高一低一高方式，其基本功率器件一般则采用普通晶闸管。但是随着电力电子技术的发展，功率器件的耐压和功率也逐渐增加，效率较高的高压变频器越来越受到重视，所以主电路采用高一高方式逐步成为了一种发展趋势；此外，进行全程变频调速也逐渐成为了一种研究方向。

4-2 高一低一高变频方案的特点

一、高一低一高方式的优点：

1、整个系统比较容易实现：

由于可以采用低压变频器，这就不必为某个系统专门设计、制造专用的变频器，而完全可以选用某种技术比较成熟的通用变频器。例如根据变频器的电压（380-1000V）选型，再通过降压和升压变压器实现高压电动机（3KV/6KV/10KV）变频调速任务。

2、由于可以采用低压通用变频器，因此，变频器中的电力电子器件的耐压就可以较低，这使功率器件的选型和变频器的实现都较容易。

3、由于变频调速的主体—变频器比较容易实现，因此，系统的结构简单，故造价就较低。

4、由于存在变压器，因此可以很容易地采用多重化技术，使电动机转矩平均值较大而脉动较小，并减少谐波。例如输入变压器可以采用三个绕组，其中两个副边绕组相差 30° 电角度，这就可以实现12脉冲的工作方式，从而满足转矩和谐波的要求。

二、高一低一高方式需要解决的问题：

1、由于存在降压 / 升压变压器，因此，系统的损耗较大，效率也较低，同时可靠性下降。

2、由于采用的是低压变频器，因此，其电流就较大，故损耗也就较大。

3、由于采用的是低压变频器，因此，在容量较大时，变频器的电流就较大，这就导致效率较低、可靠性下降、设备结构复杂、制造困难、体积和占地面积也较大。

4、由于变频器输出含有高次谐波及直流分量，因此，输出（升压）变压器工作时存在谐波发热等问题，使损耗增加；在低频区工作时，则存在着能量传输困难的问题，这些都导致输出变压器的制造较为困难。

综上所述，由于电力电子器件的限制和可以方便地应用多重化技术，在过去的变频调速系统中，多采用高一低一高方案。

4—3 高一高变频方案的特点

一、高一高方式的优点：

1、由于不存在降压 / 升压变压器，因此，系统的损耗较小，效

率和可靠性也较高。

2、由于采用的是高压变频器，因此，其容量可以做得较大。

3、由于不存在变压器，因此，系统的结构紧凑、体积和占地面积也较小。

二、高一高方式需要解决的问题：

1、由于采用的是高压变频器，因此，对于高压大功率变频器而言，电力电子器件的耐压和功率要求均较高。

2、在系统的电压、容量较大时，为了解决目前的电力电子器件的电压和功率限制的问题，就要采用功率器件的串、并联，这就导致了要解决均压和均流等技术问题。

3、由于系统全部为高压，因此，高压变频器触发电路的隔离就成为问题，现在一般采用光触发或光线传输技术。

4、仍存在谐波，需装谐波滤波器。

综上所述，由于电力电子器件和谐波治理技术的发展，现在的变频调速系统越来越多地应用高一高方案。

4-4 交一直一交电流型变频器的多重化技术

对于基本型（即一重化）交一直一交电流型变频器而言，其逆变电路都是每周期换相六次，故又称为三相六脉波逆变器，虽然它也有许多优点，但其最大的问题就是电流高次谐波的影响，这是由于其电流波形为矩形波，所以必然产生一系列 $(6k \pm 1)$ 次谐波，特别是幅值较大的5次和7次谐波成分，这就会使电动机转矩产生脉动，其脉动频率为 $6kf$ （ k 为整数， f 为电动机的定子频率）。特别是电动机在低速运行时，有可能发生机械共振现

象，导致生产机械的破坏。电流的高次谐波还会引起附加损耗，导致电机效率下降，温升提高，从而电机发热而出力减少。因此必须设法消除或减少其较低次谐波，改善变频器的输出波形。

为了克服基本型存在的上述缺点，提高电机转矩的稳定性，降低或消除低频谐波分量，提高转矩脉动的频率，近年来逐渐采用了多重化技术，即将基本型逆变器输出的矩形波，按一定的相位差叠加起来，使其谐波分量相互抵消，从而改善其性能。

对于电流型逆变器而言，经常采用的多重化方法就是将 n 个基本型逆变器联接起来，并使其控制触发的脉冲相位彼此错开 $\theta = 60^\circ / n$ 电角度，从而构成 n 重化叠加的输出电流波形。输出电流可以彼此直接叠加，或通过变压器耦合后叠加。这样输出的电流波形多种多样，因此对众多方案谐波规律的认识，谐波特性的比较以及选择最佳参数获得较好的谐波特性，是多重化技术的基本问题之一。

变频器的多重化技术不但可以消除谐波，改善输出波形，而且还可以扩大变频器的输出容量，便于变频调速系统实现大容量化。

4-4-1 多重化技术的基本类型

一、按其输出形式划分有：直接输出型和变压器耦合输出型。

1、直接输出型：

直接输出型是指逆变器多重化联接后的输出直接与电动机相联，中间没有其他环节。见图：图4.4.1A。

2、变压器耦合输出型：

变压器耦合输出型是指多重化逆变器的输出经过变压器后，再与电动机相联，即存在中间环节一变压器。见图：图4.4.1B

二、按直流电源的供电方式划分有：独立直流电源型和公共直流电源型。

1、独立直流电源型：

独立直流电源型是指在多重化的变频器中，各组逆变器均拥有自己独立的直流电源，即各组逆变器的直流电源是由各自整流器独立地分别进行控制（各组逆变器的输入直流电压不等）。见图：图4.4.1C。

2、公共直流电源型：

公共直流电源型是指在多重化的变频器中，各组逆变器共用一个公共的直流电源，即各组逆变器的直流电源是由同一组整流器进行控制的（各组逆变器的输入直流电压相等）。请参见图：图4.4.1D。

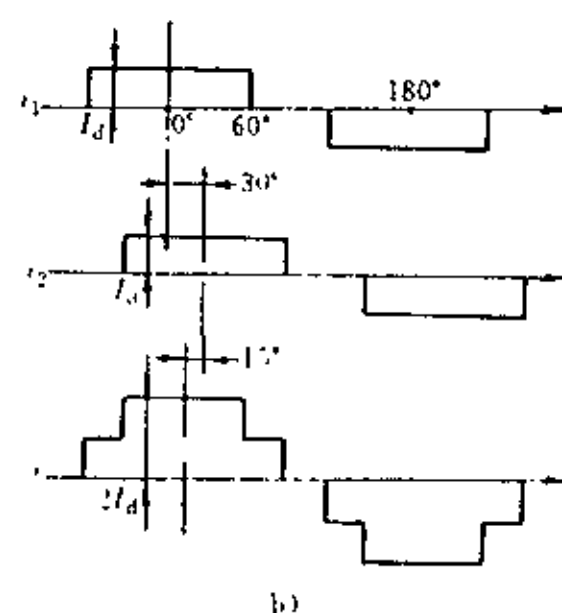
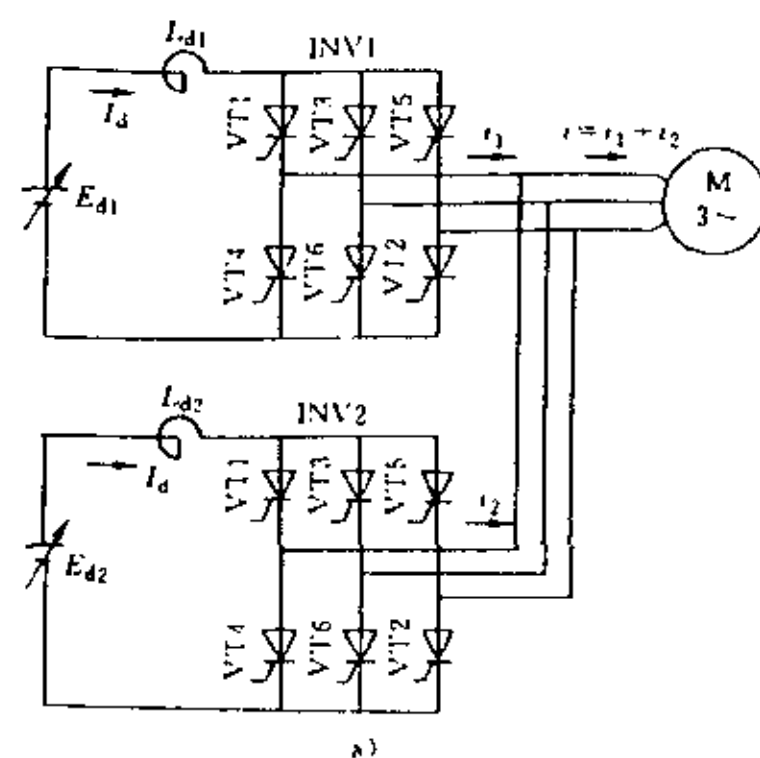
三、按逆变器联接的组数划分有：基本型（即一重化）和 n 重化（ n 为1、2、3、4等）。

1、基本型：

基本型是指未联接之前的原型变频器，又称之为—重化。见图：图4.4.1E。

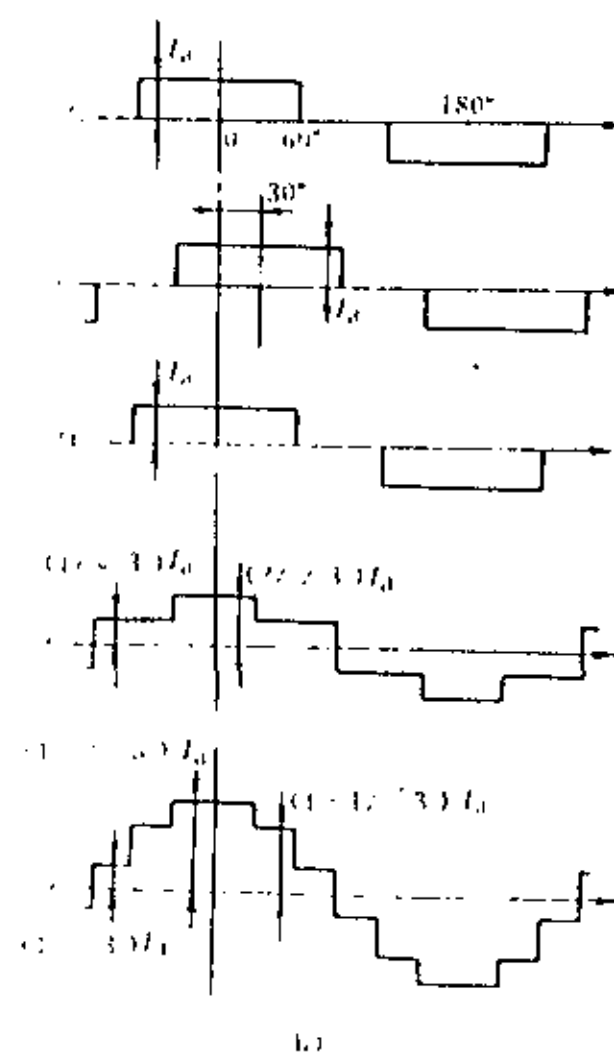
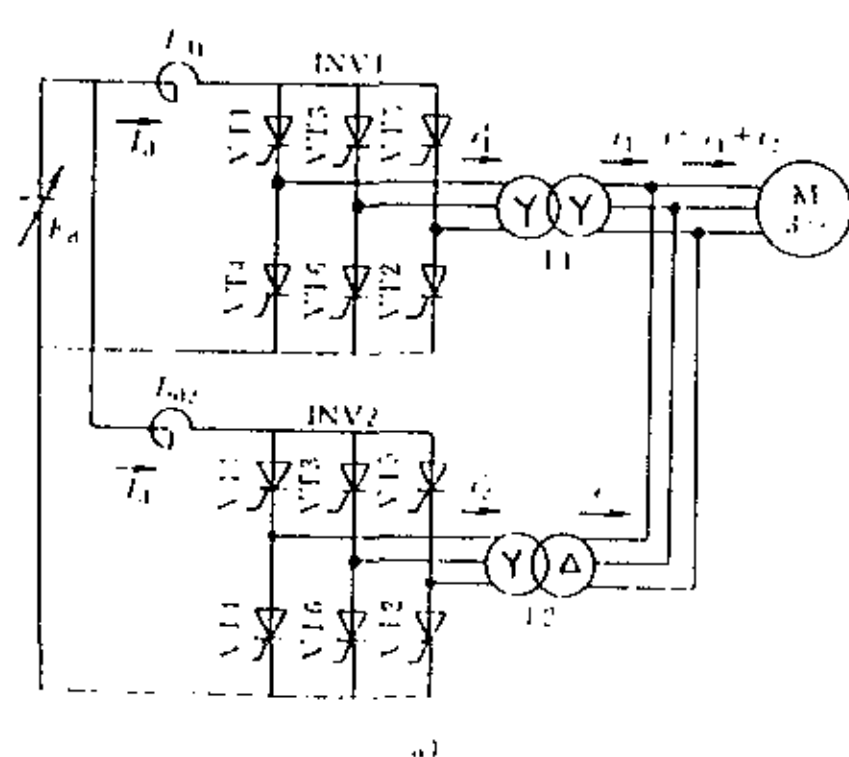
2、 n 重化：

n 重化是指 n 组基本型逆变器联接以后形成的 n 重变频器，一般是指二重化，三重化和四重化，即两组、三组和四组基本型逆变器的联接。见图：图4.4.1C。



a) 主电路 b) 输出电流波形

图4.4.1A



a) 主电路 b) 输出电流波形

图4.4.1B

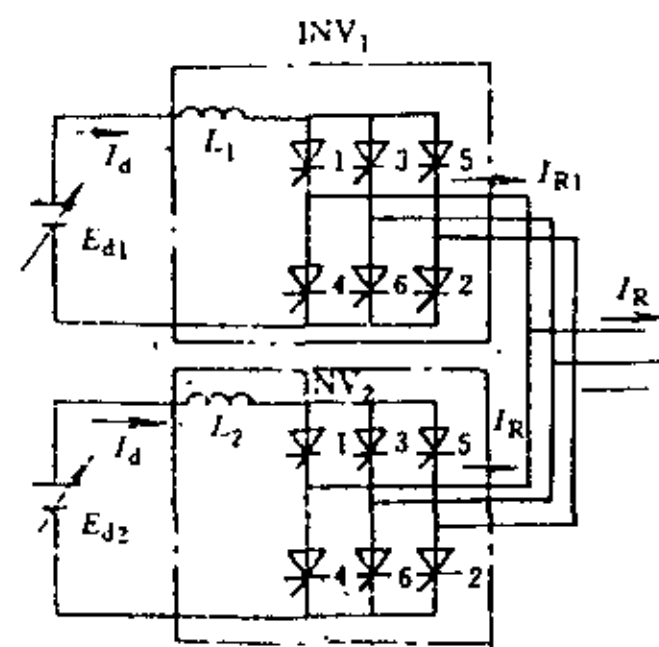


图4.4.1C

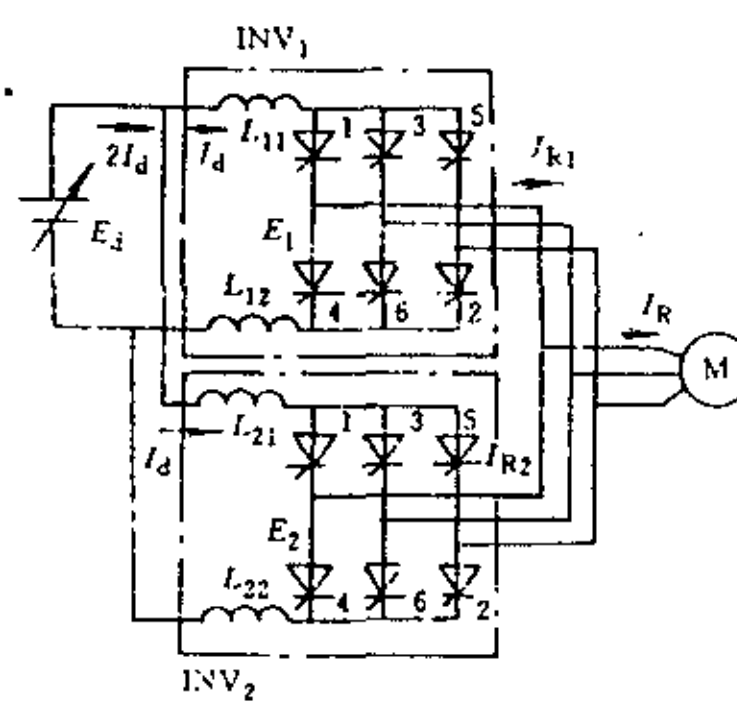


图4.4.1D

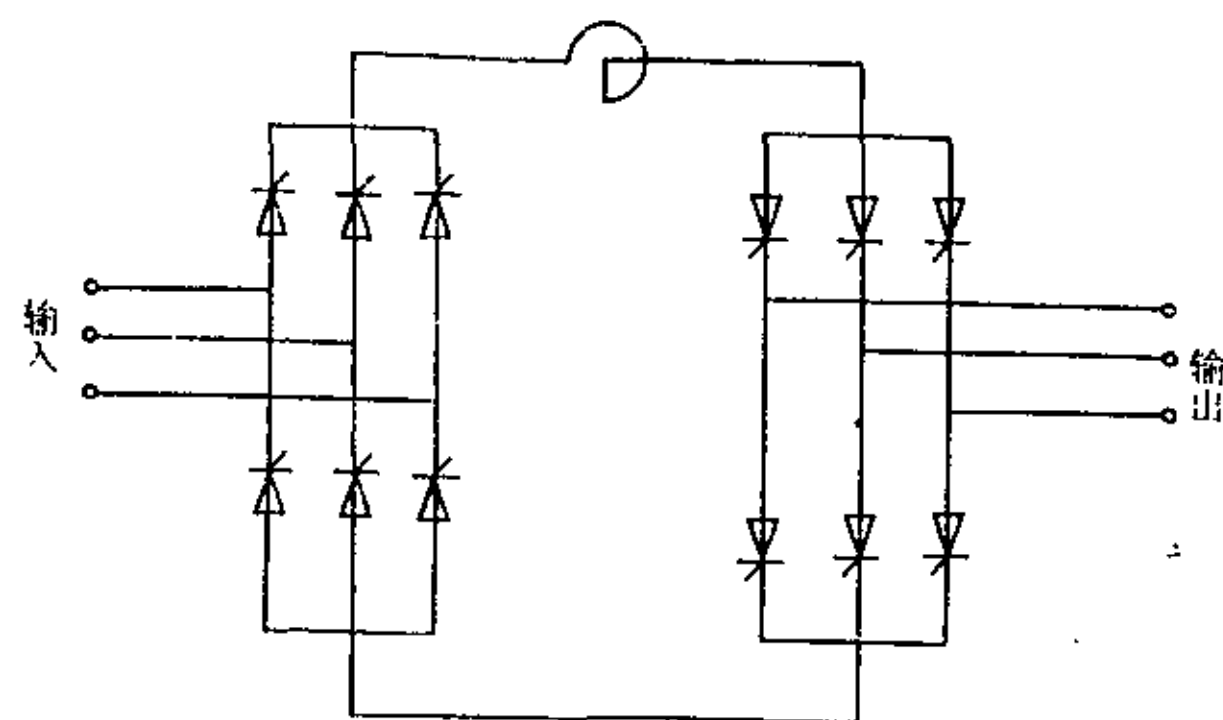


图4.4.1E

四、对于二重化的变频器而言则可以划分为：并联、直接串联和交叉串联等型式。它们各有优缺点，例如：并联方式就需要保证两个三相绕组中流过相同的电流；而对于交叉串联方式而言，其对地电位则较低，只是直接串联方式的一半。

4-4-2 各种类型多重化技术的选择与比较

电流型逆变器的多重化技术主要解决两个方面的问题，一是逆变器输出电流的谐波问题；二是扩大逆变器输出容量的问题。其中前者是主要问题。转矩脉动与电流谐波的关系是这样的：转矩的第 n 次谐波是由电流的第 $(n \pm 1)$ 次谐波产生的，例如6次转矩脉动就是5次及7次谐波电流产生的；转矩脉动成分的幅值是与谐波电流的幅值成正比。所以多重化技术可以通过提高电流谐波次数而提高转矩脉动的频率；也可以通过多重化技术减少电流幅值，从而降低转矩脉动的幅值。这两方面都可以提高电动机的转矩的稳定性。

1、直接输出型和变压器耦合输出型：

表4.1.2A 直接输出型多重（电流型）变频器的谐波含量

谐波 次数	基本型 (6脉波)	二重化 (12脉波)	三重化 (18脉波)
基波	100	100	100
5 次	20	5.3	4.4
7 次	14.3	3.8	2.6
11次	9.1	9.1	1.7
13次	7.7	7.7	1.7
17次	5.9	1.6	5.9
19次	5.6	1.5	5.6
23次	4.4	4.4	1.0
25次	4.0	4.0	0.7

注：谐波含量为谐波有效值对基波有效值之比（%）。

表4. 1. 2B 变压器耦合输出型多重（电流型）变频器的谐波含量

谐波 次数	基本型 (6脉波)	二重化 (12脉波)	三重化 (18脉波)
基波	100	100	100
5 次	20	0	0
7 次	14.3	0	0
11次	9.1	9.1	0
13次	7.7	7.7	0
17次	5.9	0	5.9
19次	5.6	0	5.6
23次	4.4	4.4	0
25次	4.0	4.0	0

注：谐波含量为谐波有效值对基波有效值之比（%）。

由表4. 1. 2A和表4. 1. 2B比较可以看出：

- (1). 采用直接输出型和变压器耦合输出型时，基本型（一重化）的谐波含量相同。
- (2). 采用直接输出型和变压器耦合输出型时，随着多重度增加，则谐波含量呈周期性变化。
- (3). 变压器耦合型与直接输出型比较，随着多重度的增加，前者

谐波含量的衰减速度要快于后者。

(4). 对于直接输出型, 随着多重度的增加, 各次谐波含量已被大大削减, 但却不能完全消除某一次谐波。

(5). 在变压器耦合输出型中, 多重化可以消去特定的高次谐波, 从而消减转矩脉动, 提高转矩脉动频率。例如二重化时, 原来的 $(6k \pm 1)$ 次谐波中, 凡 k =奇数次的谐波均被完全消除, 如 5 次和 7 次谐波; 仅含 $(12k \pm 1)$ 次谐波, 剩下的最低次谐波为 11 次和 13 次。

综上所述, 变压器耦合输出型对系统可以起到缓冲作用; 使输出比较平滑; 降低变频器电压; 并且可以起到与高压系统隔离的作用。从技术经济比较的观点来看, 在工程上采用二重化的变压器耦合输出型变频器就完全可以达到一般的传动要求。这是因为其谐波已被消去一半, 由这些谐波引起的脉动转矩随之消失, 只留下 12 倍于定子频率的脉动转矩。

2、独立直流电源型和公共直流电源型:

(1). 独立直流电源型:

优点: 独立直流电源型多重化方式的结构简单, 保护方便, 能独立进行电流控制, 易使电流平衡, 这使逆变器的控制简单。

缺点: 主回路结构相对复杂, 整流器的元件数量相对较多。

(2). 公共直流电源型:

优点: 公共直流电源型的主回路简单, 整流器的元件数量较少;

缺点: a. 公共直流电源型的直流电抗器的数量增加;

b. 逆变器的控制复杂: 公共直流电源型的各组逆变器的输

入直流电压若不相同，则导致有的逆变器工作而有的不工作，使电流分配不均，从而损坏晶闸管。为了保证输入直流电压相等就要适当控制逆变器的触发脉冲，使各组晶闸管的导通时间不同，这就使逆变器的控制较复杂。

综上所述，为了保护晶闸管和简化控制，在大功率变频调速系统中，一般均采用独立直流电源型变频器。

3、基本型（一重化）和 n 重化（ n 为 1、2、3、4 等）：

随着多重度的增加，变频器的容量会扩大；换相能量也会下降；输出电流波形更逼近正弦波，从而使谐波成分减少，所以负载电动机转矩脉动减少。但是多重度的增加会使系统结构和控制均复杂，成本升高。因此，从技术经济角度来看，在工程上采用二重化即可达到一般的变频调速系统的要求。

4-4-3 交一直一交电流型变频器多重化技术的优点

- 1、输出电流波形不再是 120° 矩形波，而是更接近于正弦波的阶梯波，低阶的高次谐波电流成分小，所以负载电动机产生的转矩脉动小，而且多重化连接数越多，改善转矩脉动的效果越好。
- 2、在使用电流型逆变器的多重化连接以后，由于转矩的脉动频率增高，因而可以避开通常的机械传动系统的固有频率。
- 3、由于高次谐波电流成分小，提高了负载电动机的运行效率。
- 4、采用多重化变频器可减少换流功率。在三相时，换相功率为 $6fLi^2$ ， n 重化时，换相功率则为 $6fLi^2/n$ 。换相功率与多重度 n 成反比，这表明换流装置的容量可相对减少。
- 5、由于每次换相能量减小，所以可以选用电容量小、耐压低的

换相电容器，主晶闸管的耐压等级也可相应降低，因此是比较经济的。

6、对于大、中容量逆变器仅用一只主晶闸管作为逆变器的一个桥臂，往往不能满足逆变器输出电流值的要求，这时若简单地把多只晶闸管并联以求大容量化，那么每次换相都得承受较大的无功能量，因而换相回路是极不经济的，故多采用多重化技术解决之。

7、多重化技术可以减小变频器对电网所产生的谐波分量，保证联接在同一电网上的其它电器设备的正常工作。例如：二重化就可以消除变频器的5, 7, 17, 19等次谐波分量。

8、从节能节电的观点来看，多重化电流型变频器最适用于风机和泵类机械负载的流量控制。

9、由于输出电流波形的改善，因此扩大了运行范围。

4—5 交一直—交式晶闸管变频器的功率单元结构

电动高炉鼓风机的变频起动系统通常采用交一直—交式晶闸管变频器，它是由整流器、逆变器、直流环节以及附属装置等构成，它们主要完成两个任务，即调压和调频。其中调频工作一般是由逆变器来完成；而晶闸管变频器的调压工作则是由相控整流器来完成。

在变频器中，无论是逆变器还是整流器都是由功率器件构成的，在目前使用的高炉鼓风机变频启动用交一直—交变频器中，功率器件大都采用晶闸管。

高炉鼓风机的变频启动装置的功率较大（2-18MW），因此其

变频器要求的电压较高，电流也较大，而目前单个晶闸管的额定电流和电压尚不能满足要求，这就要求必须把晶闸管串联或并联起来构成功率单元来使用。此外，由于晶闸管的过载能力较差，为了保证其正常工作，使用时还必须注意加以保护，这主要是指过压和过流保护。

4-5-1 晶闸管的串联

当晶闸管的额定正向阻断电压和反向峰值电压小于实际要求值时，则必须采用串联。几个功率器件串联构成的功率单元称为阀串（即一个桥臂）。同一阀串上的各晶闸管必须同时导通和关断，否则后导通或关断的元件将承受过高的电压而损坏。这就要求同一阀串上的各晶闸管的参数一致，其差异越小越好，而且其门极触发功率要一致，要保证触发脉冲前沿陡度的一致性和同时性。但是由于差异肯定是存在的，例如：反向漏电流，结电容，反向恢复时间以及正向压降常常不同，这就使元件的分压不均，甚至可使晶闸管击穿。因此在串联时，必须考虑均压问题，采取均压措施。

均压措施包括：动态均压和静态均压。如图：图4.5.1A。

(1). 静态均压是指晶闸管处于阻断状态下承受工频电压或直流电压时的晶闸管元件之间的均压，在这种情况下，电压波形前沿时间较长，采用并联电阻的方法进行均压。

按均压最恶劣的情况下考虑，静态均压电阻为 R_0 ，它远小于阻断状态下晶闸管的等效内阻，它强制旁路了绝大部分漏电流。

$$R_0 = U_m [(1 - (nK - 1) / (n - 1))] / \Delta I_m$$

其中： U_m -单个晶闸管承受的最高工作电压；

n -构成阀串的晶闸管数目；

K -均压系数， $K=U_{AV}/U_m$ （其中 U_{AV} 为阀串内各晶闸管的平均电压）；

ΔI_m -阀串内各晶闸管的最大漏电流偏差；

静态均压电阻的功耗按公式： $P_{R0}=U_m^2/R_0$ 计算。

(2). 动态均压是指同一桥臂中的各晶闸管开通和关断过程中的均压，即过渡过程中的均压。如图：图4.5.1B。

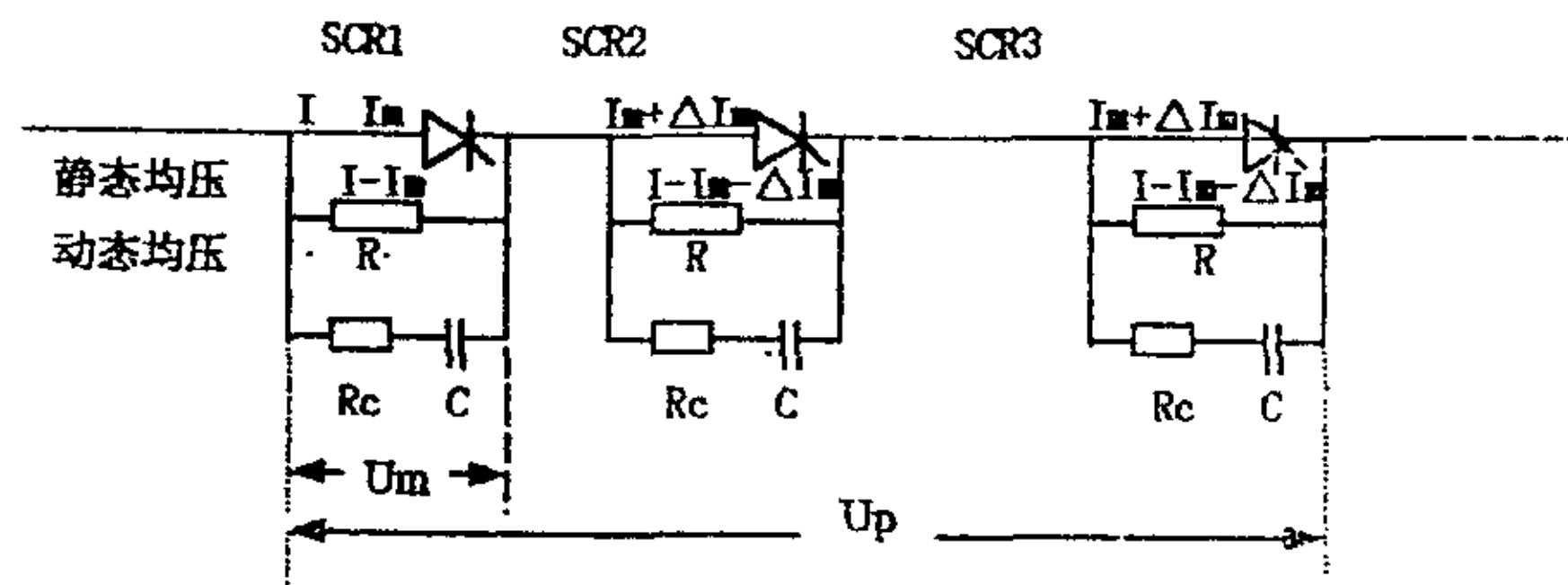


图4.5.1A

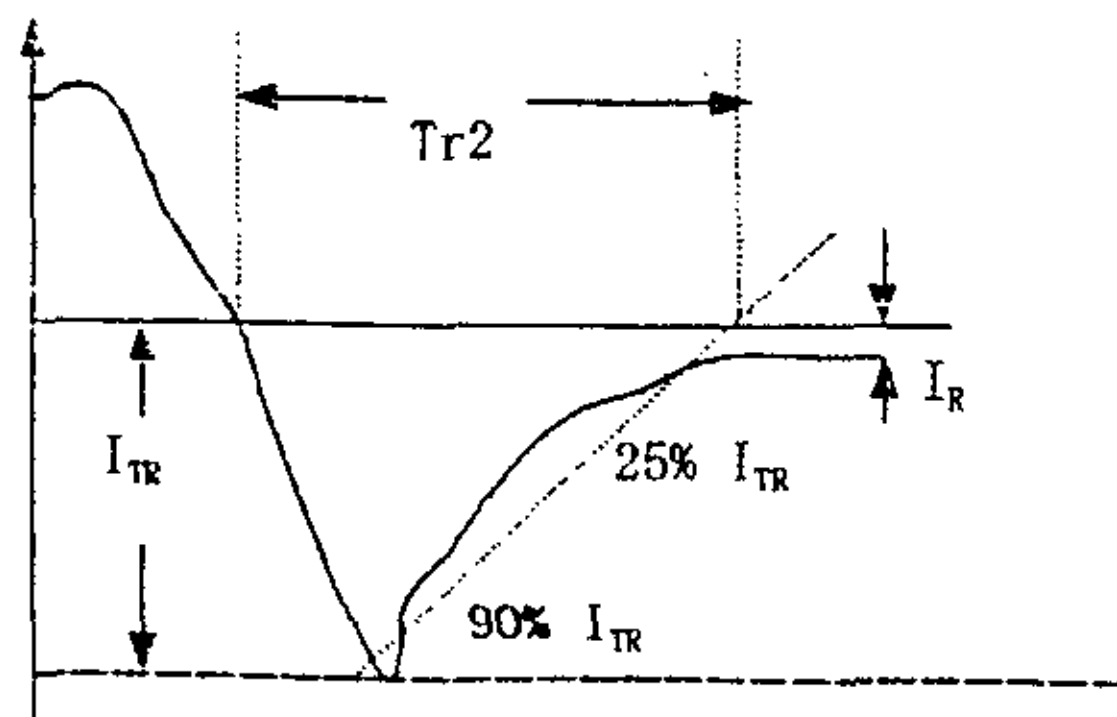


图4.5.1B

如图所示,当晶闸管关断时,其电流正向过零并不立即恢复其阻断特性,由于反向恢复电荷的存在,在晶闸管中形成一个反向恢复电流 I_{TR} ,反向恢复电荷 Q_r 由公式: $Q_r = I_{TR} \cdot T_{r2} / 1.28$ 决定(其中 T_{r2} 为晶闸管的反向阻断恢复时间),反向恢复电荷决定了阀串中每个晶闸管所承受的阻断电压值。反向恢复电荷是晶闸管关断过程中电压分配不均的主要原因,动态均压采用与晶闸管并联阻容来解决。

由于阀串内各晶闸管导通过程所需要的均压电容要比关断过程中所需要的小,因此在选择均压电容 C_1 时主要考虑关断时的均压需要,而串联晶闸管关断时电压分配不均主要是由于反向恢复电荷的差异 ΔQ_i 造成的。

$$\text{动态均压电容为: } C_1 = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \Delta Q_i}{[(1/K)-1]} U_p$$

其中: ΔQ_i —阀串内各晶闸管反向恢复电荷偏差;

U_p —阀串的总电压;

动态均压电阻主要作用是限制均压电容 C_1 在晶闸管开通时的放电电流及 di/dt ,同时它对 dv/dt 也有一定影响,其值很难理论推导,可以用以下经验公式选取:

$$R_1 = 0.8 U_1 / [(di/dt)_{tr}]$$

其中: U_1 —晶闸管导通前端电压, $U_1 = (\sqrt{2} U_p K_1) / (K \cdot n)$ (其中电网波动系数 $K_1 = 1.1$);

di/dt —系统出现的电流上升率;

t_r —晶闸管开通中的上升时间；

电阻 R_1 的功率一般按下式计算：

$$P_{R1} = (C_1 * U_c^2 * f) / 2 \quad \text{其中 } U_c \text{ 为电容最高工作电压。}$$

功率器件串联时，必须降低电压的额定值使用，其串联后的总电压为： $U_p = 0.9 * n * (PRV)$ （伏）（其中 PRV 为晶闸管额定工作反向峰值电压）。

4—5·2 晶闸管的并联

当晶闸管的额定正向平均电流小于负载电流时，则必须采用晶闸管的并联，以满足电流的需要。

在并联支路上，若存在电流分配不均，就可能使个别元件因承受较大电流而损坏，因此需采用均流技术。电流分配不均是由很多因素造成的，主要是受主回路电流的影响和元件正向特性不一致的影响。元件正向特性是指元件的正向压降和元件的导通时间。

1、主回路对并联晶闸管电流分配的影响：

由于晶闸管内阻很小，并联晶闸管各回路的阻抗又不相同，因此，各支路电流分配也不平衡。当负载电流很大时，各并联支路的电阻和自感必须相等，互感也应尽量相等。

2、正向压降对并联晶闸管电流分配的影响：

晶闸管的正向压降等于与正向电流无关的恒定压降与内阻压降之和。一般来讲，晶闸管的正向压降的分散性较大，因此导致并联晶闸管的正向电流分配不均。

3、导通时间：

由于晶闸管的触发特性不同，因此导通时间小的元件就会先导通，导通后阳极电压立即降低，未导通的元件就难以触发，于是电流分配不均。

为了解决均流问题，一般要求各支路上的功率器件参数尽量一致；还应采用前沿陡、宽度足够大和脉冲幅度大的触发脉冲。此外，一般采取的均流措施有：串联均流电阻；串联均流电感。

1、串联电阻均流电路：

在小容量系统中，采用串联均流电阻的办法，如图4.5.2A

其公式为： $R = (3-4) * U_F / I_F$ (Ω)

其中： U_F -元件正向平均压降；

I_F -元件正向平均电流；

2、串联电抗器均流电路：

在大容量系统中，采用串联均流电感的办法，如图4.5.2B。

其公式为： $L = (\Delta U * T) / (2 * \Delta I)$ (μH)

其中： L -电感，一般为10-100 μH ；

ΔU -并联各元件的压降差（伏）；

ΔI -并联各元件的电流差（安）；

T -电流的周期（秒）；

功率器件并联时，必须降低电流额定值使用，其并联后的总平均电流为： $I_p = 0.8 * n * (I_{SCR})$ (安)

其中： n -并联的元件数；

I_{SCR} -元件额定正向平均电流（安）；

3、采用平衡电抗器的均流电路：

在中、小容量系统中，多采用平衡电抗器的均流电路，如图：

图4.5.2C。

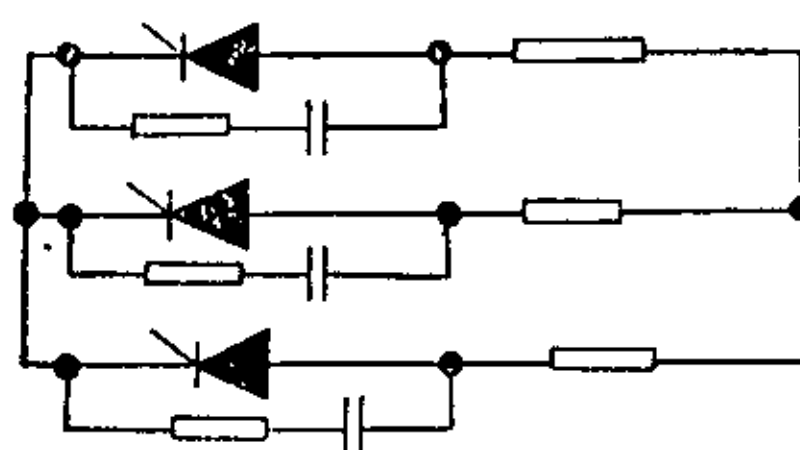


图4.5.2A

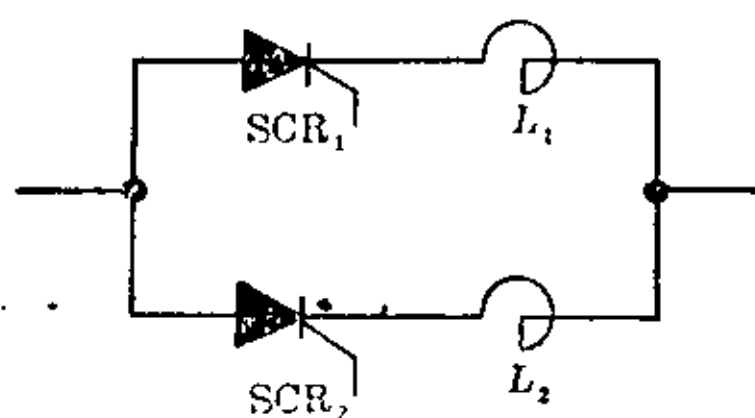


图4.5.2B

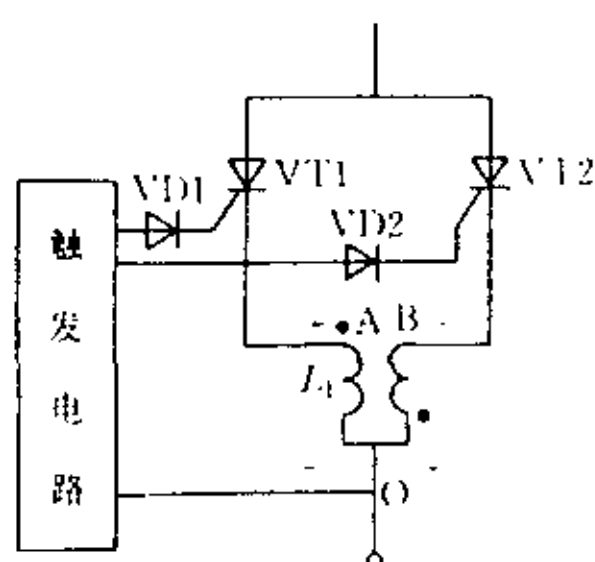


图4.5.2C

如图所示，平衡电抗器的作用有两个方面：一是它可以通过电感线圈的紧耦合使各晶闸管的导通时间趋于同步；二是其电感作用可以抑制其电流上升率，从而能够保证电流分配较均衡。

4—5·3 晶闸管的串并联

在高电压、大电流的装置中，由于受到目前晶闸管制造水平的限制，为了满足容量要求就需要既串联又并联，构成功率单元代替单个晶闸管工作。串并联的方法有两种，即链式接法（先串后并）或网式接法（先并后串）。这两种方法各有优劣，但实践表明，先串后并的链式接法更优越些：

- 1、由于各元件的正向特性被平均化，故能改善均流状况。
- 2、若因某一元件特性恶化，造成其他元件过电压，仅对串联的该列元件有影响。
- 3、链式接法中，各控制极回路需用隔离变压器隔开，可以把串联支路中各元件控制电路作成抽屉式装置，更换方便，比网式接法易于处理。
- 4、可以多备一条串联支路，作为备品备用（任何一条支路出故障可以立即撤换，较为省事）。

第五章 首钢电动鼓风机的变频起动装置

首钢公司现有高炉鼓风机共计七台，其中工业汽轮机拖动的高炉鼓风机共四台，同步电动机拖动的高炉鼓风机共三台。三台电动鼓风机的编号分别为4号、5号和6号风机。三台电动风机的鼓风机型式均为全静叶可调式轴流鼓风机，并无一例外地采用同步电动机拖动，均使用变频软起动。三台电动风机共有变频起动装置两套，其中4号风机使用一套，由瑞士BBC公司生产；5号和6号风机共同使用一套，由德国西门子（SIEMENS）公司生产。

5-1 瑞士BBC公司生产的变频启动系统

瑞士BBC公司生产的变频起动系统隶属于4号风机，其作用是对驱动高炉鼓风机的同步电动机进行变频软启动。原生产厂家的原设计是由该变频启动装置起动4号和5号风机，但由于首钢公司的总体工艺布局发生变动，即将4号和5号风机分开安装，因此该变频启动装置仅起动4号风机。

4号电动风机变频起动系统的主电路如图：图5.1

5-1.1 鼓风机组的主要设备

一、高炉鼓风机（Blast Furnace Blower）：

型号：AV100-19（系列号：EZ60575）

型式：全静叶可调式轴流鼓风机

成套制造厂：瑞士苏尔寿（SULZER）公司

出厂年限：1980年

介质：空气

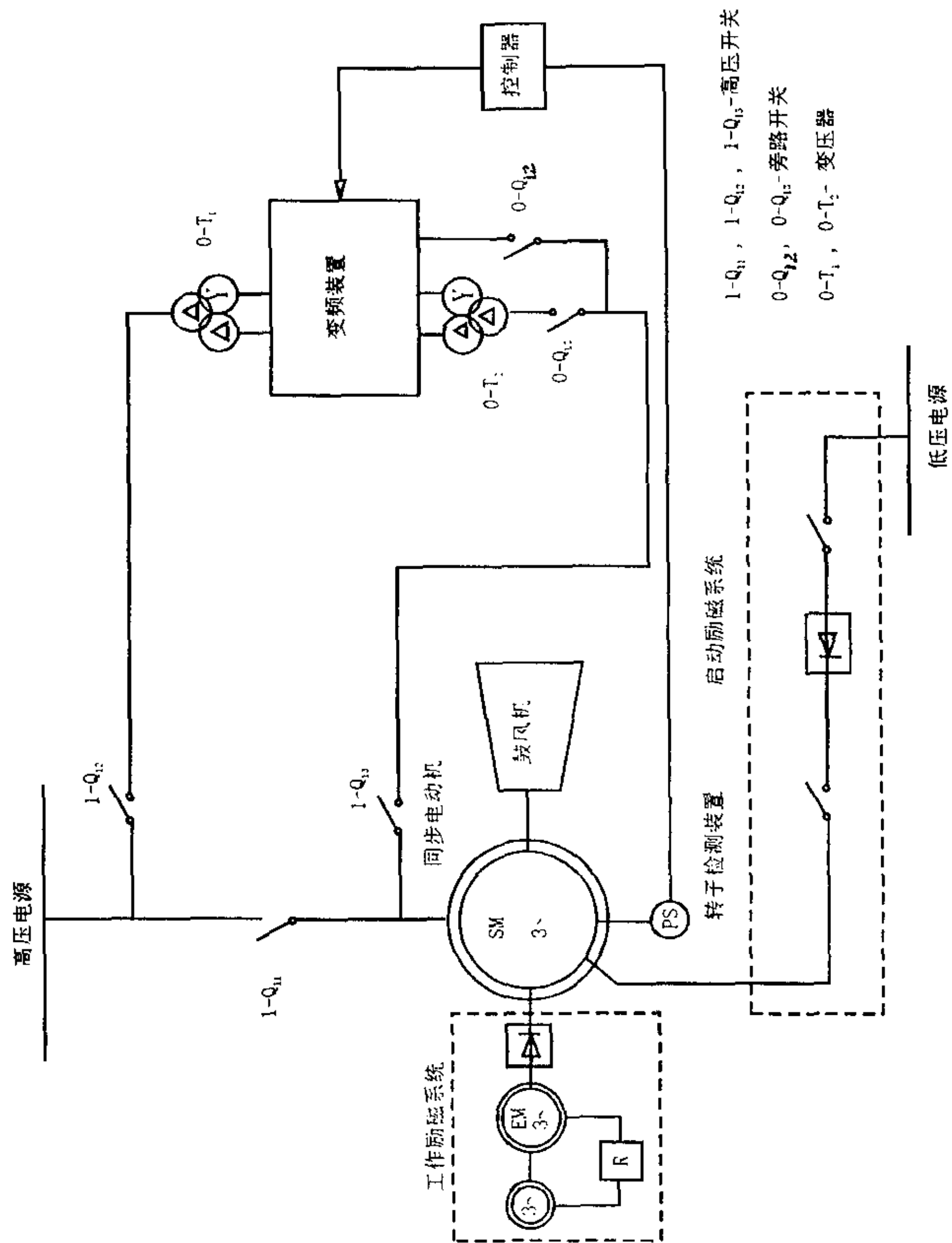


图 5.1

鼓风机出力：风量：7560NM³/min（状态：760mmHg，0℃），风
压：0.53MPa，出口风温：256℃

鼓风机最大轴功率：34MW

传动方式：直联驱动

叶片级数：动叶：19级，静叶：20级

转速：工作转速：3000rpm；盘车转速：68rpm；鼓风机的临界转
速：一阶为1550rpm，二阶为4500rpm

静叶角度：运行角度：42-79°；启动角度：14°

转子直径：1000mm（不包括叶片）

转子重量：34吨

二、同步电动机（Synchronous Motor）：

型号：WX16L-044LLT

型式：隐极式同步电动机

成套制造厂：瑞士BBC公司

出厂年限：1980年

额定功率：36.14MW（最大允许出力：45MW）

转速：工作转速：3000rpm；临界转速：一阶为2100rpm，二阶为
4000rpm

额定电流：2393A

额定电压：10.5KV±5%

额定频率：50HZ±1%

额定功率因数：0.85

定子和转子绝缘等级：F级

防护：IP44（全封闭，内装热交换器）

极数：2

相数：3

定子绕组接线方式：Y

额定励磁电压：200V

额定励磁电流：981A

冷却方式：强制空冷（全封闭，主轴两端各有一个轴流式风扇，
空—水换热）

转子重量：13.36吨

三、励磁装置（Excitation Equipment）：

制造厂：瑞士BBC公司

生产日期：1980年

同步电动机励磁装置的作用就是为同步电动机的工作提供励磁，它主要包括：主（工作）励磁系统和启动励磁系统。

1、主（工作）励磁系统（Main Excitation System）：

工作励磁系统的作用是在同步电动机正常运行时为其提供可调节的工作励磁，该机采用的是无刷励磁方式。

(1). 永磁发电机（又称付励磁机）：

永磁发电机的作用是在旋转过程中发电再通过励磁调节装置向三相励磁发电机提供电源。

型号：WPE35-9-4R20

额定功率：7.2KVA

额定电压：380V

额定电流: 10.9A

额定频率: 100HZ

额定转速: 3000rpm

相数: 3

极数: 4

冷却方式: 强制空冷 (全封闭, 空-水换热)

(2). 励磁调节装置 (Excitation Regulator):

励磁调节装置采用的是自动电压调整器 (AVR), 它是静止式整流装置, 其作用是将永磁发电机产生的交流电整流成直流电供给三相励磁机的定子, 并通过调节直流电压来控制三相励磁发电机的输出, 从而间接调整同步电动机的励磁。

(3). 三相励磁发电机 (Three-phase excitation machine):

三相励磁发电机的作用是产生交流电, 并通过旋转整流器的变流向同步电动机提供励磁电源。

型号: WBT74/208-30AISL

额定功率: 241KW

额定电压: 220V

额定电流: 1095A

短时输出 (10秒): 509KW, 320V, 1590A

额定转速: 3000rpm

相数: 3

极数: 4

冷却方式: 强制空冷 (全封闭, 空-水换热)

(4). 旋转整流器:

旋转整流器位于与同步电动机同轴的三相励磁发电机的主轴上, 采用24只旋转二极管组成桥式整流器, 其作用是将三相励磁发电机所产生的交流电整流成直流电, 从而通过轴心母线向同步电动机提供励磁。

2、启动励磁系统 (Starting Excitation Equipment) :

启动励磁系统的作用就是在同步电动机起动的低速区 (一般为亚同步转速以下), 不足以产生工作励磁, 故由外部低压电源经变换, 并通过电刷和提刷装置为同步电动机提供励磁, 该机采用的是有刷励磁方式。

(1). 启动励磁装置:

启动励磁装置是一套静止式整流装置, 其作用是将低压电源的交流电 (380VAC) 转换成直流电, 从而向同步电动机提供启动励磁, 励磁电流为 $I_f=530A$ 。

(2). 电刷和提刷装置:

电刷和提刷装置的作用就是在同步电动机起动的低速区, 提刷装置放下, 通过电刷将启动励磁送入同步电动机; 在同步电动机起动的高速区, 工作励磁投入后, 通过提起电刷使启动励磁退出运行。

四、变频器 (SFC—Static Frequency Converter) :

型号:

型式: 交—直—交电流型 (Current-Source DC Link Converter)

制造厂: 瑞士BBC公司

出厂年限：1980年

额定功率：7MW

功率器件单元：每个单元由两串、两并晶闸管组成

平波电抗： $L_d=3\text{mH}$

续流晶闸管单元：由四个晶闸管串联组成

额定电压：1865V AC

额定电流：1635A

频率范围：0-50.5HZ

变频器内部旁路开关0-Q14：

五、并网装置 (Paralleling Device)：

六、变频变压器 (Transformer for Frequency Converter)：

变频变压器共有两台，即输入变压器 (Input Transformer) 0-T1和输出变压器 (Output Transformer) 0-T2，均为三绕组形式。

型号：TP6300

制造厂：瑞士BBC公司

生产日期：1980年

额定频率：50HZ

一次：额定电压：10.5KV，额定电流：687.9A，接法： Δ ，

额定容量：12.51MVA

二次：额定电压：2X1.7KV，额定电流：2X1062A，接法： Δ ，Y，

额定容量：2X6.255MVA

七、高压开关 (Circuit Breaker)：

制造厂：瑞士BBC公司

生产日期：1980年

1、同步电动机主（并网）开关1-Q11：

六氟化硫高压开关

电压：10.5KV

电流：2500A

容量：750MVA

2、变频系统输入开关1-Q12：

六氟化硫高压开关

电压：10.5KV

电流：2500A

容量：750MVA

3、变频系统输出开关1-Q13：

高压真空开关

电压：10.5KV

电流：1250A

容量：750MVA

4、变频器启动旁路开关0-Q14：

电流：1000A

5、输出变压器启动旁路开关0-Q13、0-Q15：

电流：1250A

容量：750MVA

八、同步电动机转子检测装置：

同步电动机转子检测装置采用了电磁式测量装置，按照其作用主要分为监测和控制两部分：

- (1). 转子速度的测量采用涡流式传感器，其作用是监测显示；
- (2). 转子速度和相位的测量采用接近开关，其作用是参与控制；

5-1-2 BBC变频器的主电路

变频器的主电路图：图5.1.2A

变频器的晶闸管功率单元结构图：图5.1.2B

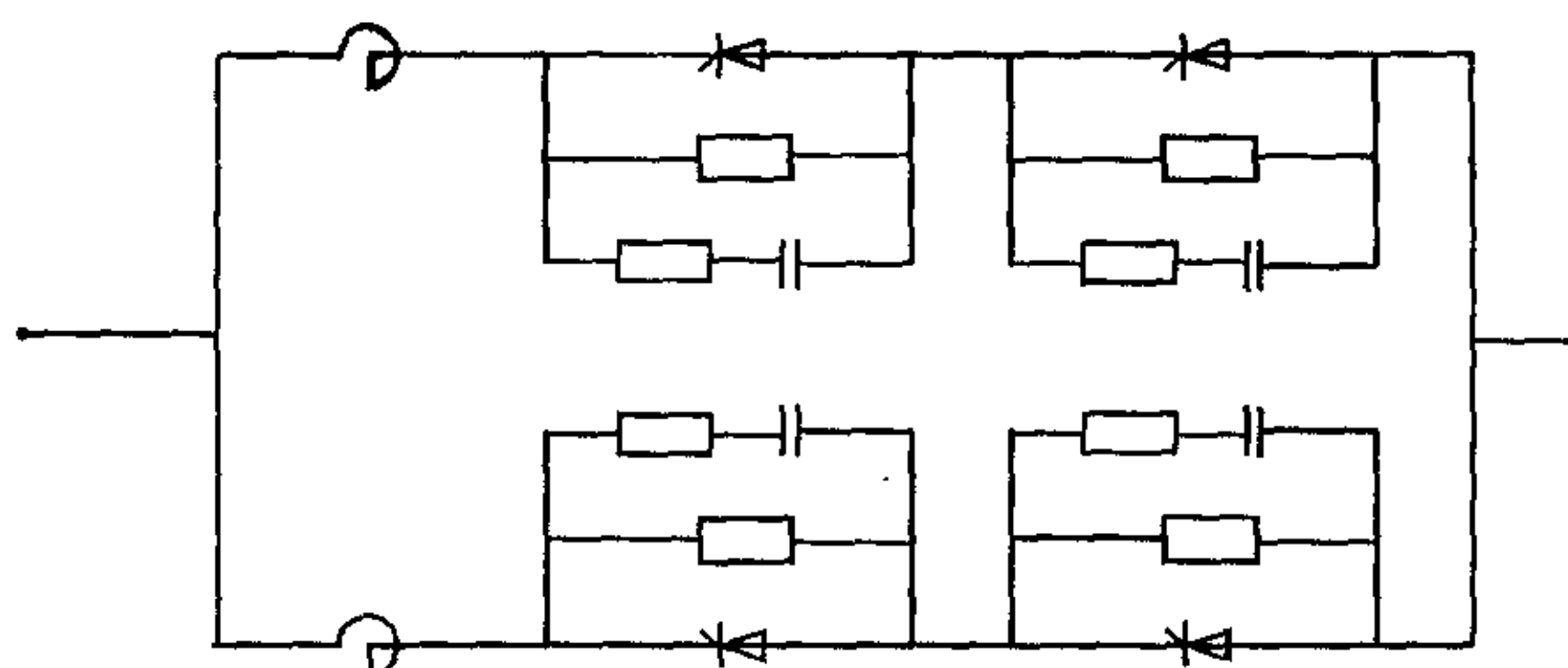


图5.1.2B

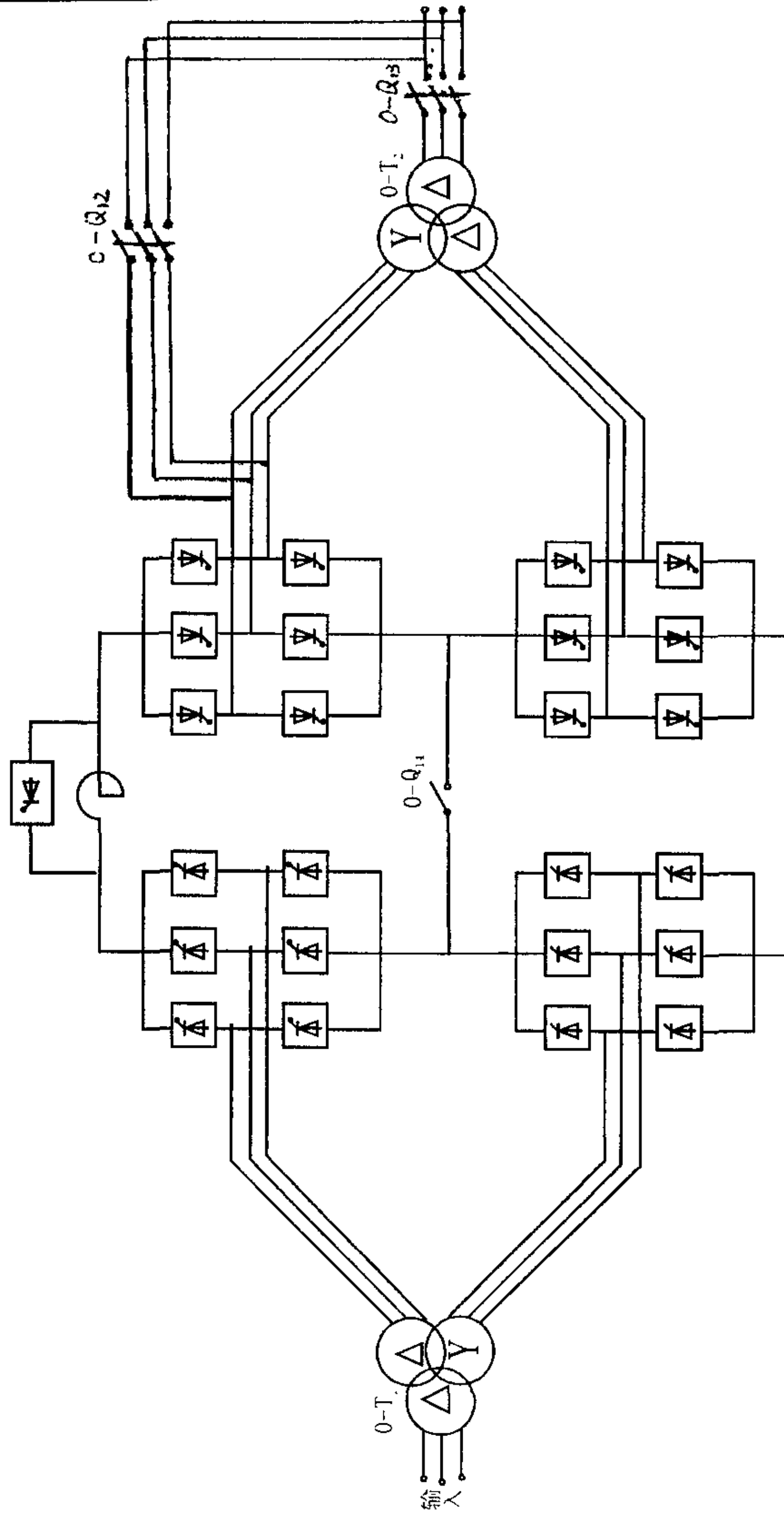


图 5.1.1.2A

5 — 1 • 3 BBC变频启动系统的实际起动过程

同步电动机变频启动的逻辑过程如下：

1、起动准备（启动条件）： $f=0\text{Hz}$ （0rpm）

$f=0\text{Hz}$ ：风机具备启动条件；同步电动机具备启动条件；辅助系统具备启动条件。

2、启动电动盘车： $f=0-1.13\text{Hz}$ （0-68rpm）

$f=0-1.13\text{Hz}$ ：启动电动盘车，盘车转速为68rpm。

3、变频器工作： $f=1.13-50\text{Hz}$ （68-3000rpm）

$f=1.13\text{Hz}$ ：启动变频器；投入启动励磁；闭合变频器输入、输出开关，即1-Q12 和1-Q13，断开同步电动机的主开关1-Q11；0-Q14、0-Q12闭合，0-Q15、0-Q13 断开（作用是使一组整流—逆变装置SRN1-SRM1工作，而另一组SRN2-SRM2不工作，同时，输出变压器0-T2也不工作）。

$f=1.13-5\text{Hz}$ ： $f < 5\text{Hz}$ 时，同步电动机加速，启动系统以六脉冲方式工作，逆变器采用电流断续换流。

$f=5-50\text{Hz}$ ： $f \geq 5\text{Hz}$ 时，同步电动机加速，启动系统以十二脉冲方式工作，逆变器采用负载反电势换流。

此时，开关0-Q14、0-Q12断开，0-Q15、0-Q13闭合，（其作用是使两组整流—逆变装置都工作，同时，输出变压器0-T2也投入工作）。

$f \geq 47.5\text{Hz}$ 时，投入主（工作）励磁；停止启动励磁；投入并网装置，并进行整步微调。

4、变频器退出运行（同步电动机并网）： $f=50\text{Hz}$ （3000rpm）

$f=50\text{Hz}$ ：满足并网条件后，投入同步电动机主（并网）开关1-Q11；同时断开变频器输入、输出开关，即1-Q12和1-Q13。

5-1-4 BBC变频启动系统的控制逻辑

在BBC变频启动系统中，变频器、并网装置和工作励磁的控制均是利用电子模拟程序控制系统来完成的。

1、整流器的控制逻辑：

在整个启动过程中，整流器（SRN）都处于整流状态。该调速系统是由一个电流环和一个速度环组成的双闭环调节系统，由速度调节器控制电流调节器。控制的具体过程如下：由转子速度检测器检测出转子的实际速度 N_x ， N_x 经过变换后成为标准信号，由 $N_x + \delta$ 后得到 N_y ， N_y 再经变换后变成新的速度给定信号 N_w ，产生 $\Delta N = N_w - N_x$ ， ΔN 经变换为 ΔI 去驱动串级连接的电流调节器，这一电流控制量再与电流环反馈电流的实际值相比较，其差值为 Δi ，去调节整流器的控制角 α ，从而调节整流器的输出电流 I_d ，进而达到控制转速的目的。

2、逆变器的控制逻辑：

在整个启动过程中，逆变器（SRM）都处于逆变状态。该调速系统的逆变控制是由两个阶段组成，即电流断续换流和反电势自然换流。这是因为在同步电动机起动的低速区（0—5Hz），不能产生足够大的反电势，故必须采用电流断续换流；而在同步电动机起动的高速区（5—50Hz）时就可以采用反电势自然换流。其

具体过程如下：

(1). 电流断续换流：

- a. 封锁整流器触发脉冲，使整流器晶闸管自然关断，此时整流器无输出电流。
- b. 触发续流晶闸管 VT0，将电抗器储存的能量暂时保存，加速断流过程（在整流器的封锁解除后VT0可自然关断）。
- c. 逆变器输入电流下降至零，逆变器所有晶闸管均关断。
- d. 解除整流器触发脉冲，同时按触发顺序要求给逆变器应导通的晶闸管加上触发脉冲，从而实现电流换相。

(2). 反电势自然换流：

由转子位置检测器检测出转子的实际相位，再经脉冲分配以后，控制逆变器的晶闸管的触发导通，而换相频率则由转子速度决定。这一调节的全过程是逆变器换相频率不断上升，逐渐接近50HZ，转子不断加速，逐渐接近额定转速3000rpm的过程。

3、励磁系统的控制逻辑：

同步电动机励磁装置的作用就是为同步电动机提供励磁，并对其进行调节。

同步电动机起动过程中，在亚同步速度（95% 的额定转速，即47.5HZ）以下时，其励磁由起动励磁系统提供，励磁电流基本恒定，实际是以有刷励磁方式工作；在达到亚同步速度以后，其励磁由工作励磁系统提供，在工作励磁投入 1.5秒后，启动励磁退出，切换平滑且稳定。工作励磁是由在其同轴上的励磁系统供给，由自动电压调整器进行励磁调节，实际是以无刷励磁方式工

作。

工作励磁投入后，速度继续上升至额定转速，励磁与变频相配合参与调节，此时励磁电流的微调是按电压调节原则进行，以便为并网创造条件。在正常工作时，励磁调节装置是根据电网电压和负载的变化，自动调节主励磁机的励磁，从而通过主励磁机间接调节同步电动机的励磁，控制同步电动机的稳定运行，并达到所要求的功率因数。

4、并网控制逻辑 (Paralleling Device Control)：

同步电动机达到亚同步速度后，并网同期装置投入。并网装置的作用是通过微调变频器输出电压的频率和幅值，使之与电网达到同期状态，并顺利地将同步电动机切换到电网上运行。具体来说就是并网装置根据电网电压和同步电动机的端电压两者频率上的差值 Δf ，产生一个附加的转速微调信号，自动地调整整流器的输出直流电压的高低，对同步电动机转速做微调，以使两者的频率差值减小到零；与此同时，励磁系统则由自动电压平衡单元控制同步电动机的转子励磁电流，以使同步电动机端电压和电网电压平衡；此外，还需等待相位一致。当达到以下条件时：

- (1). 电网电压频率与变频器的输出电压频率达到 $\Delta f < 1/4\text{Hz}$ ；
- (2). 电网电压幅值与变频器的输出电压幅值达到 $\Delta U < 5\%U_N$ ；
- (3). 电网电压相位与变频器输出电压的相位角达到 $\Delta S_r \approx 0^\circ$ ；

并网同期装置发出并网命令，此时合上同步电动机的并网开关，断开变频器的输入和输出开关，变频器退出运行，整个起动过程结束。

5、系统控制逻辑：

逻辑控制也采用的是电子模拟装置，它包括一些工艺系统的逻辑控制，例如：主风机系统、同步电动机及其保护；六脉波和十二脉波的切换；变流器的换流；励磁系统的切换；功率因数调节；并网装置的切换；高压开关的切换等。

5—1·5 BBC变频起动系统的特点

BBC变频起动系统如图5.1.2A所示，具有如下特点：

- 1、采用了间接高压（高一低一高）的整体技术方案。
- 2、采用了多重化技术。在实际中使用了二重化技术，其中采用了独立直流电源型；变压器耦合输出（变压器为三绕组），采用了六脉冲和十二脉冲切换的工作方式；两变频器串联联接。
- 3、采用了交—直—交电流型变频器。
- 4、采用的调压调频方法为：整流器（SRN）采用了相控整流器进行调压，逆变器（SRM）采用自控式进行调频。
- 5、变频器的结构为三相桥式，采用普通晶闸管（SCR）作为基本功率器件。其功率单元的结构为两串、两并，单元采用了均压和均流技术，整个变频器共有九十六只晶闸管。
- 6、采用了有位置传感器的自控式变频同步电动机调速系统。同步电动机转子的检测装置采用了电磁式：
 - (1). 转子速度的测量采用涡流式传感器，其作用是监测显示。
 - (2). 转子速度和相位的测量采用接近开关，其作用是参与控制。

未采用同一装置进行转子速度和相位测量的原因是因为两者的作用不同，前者主要监测转速变化，而后者则是控制转速变化

和逆变器换流。此外，在低速时对速度测量而言，前者比后者测量精度更高些。

7、励磁装置分为启动励磁和工作励磁。在启动过程中，采用了有刷和无刷励磁相结合的工作方式；在正常工作时则采用了无刷励磁的工作方式。

8、对功率因数进行调节。

9、整流器的换流采用了相控方式，由转速、电流双闭环控制整流器控制角 α 。

10、逆变器的换流：

(1). 采用电流断续换流和负载反电势换流相结合的方式。其中电流断续换流是通过触发续流晶闸管来实现的。

(2). 逆变器换流时采用 120° 导电型。

(3). 电流断续换流时 $\gamma_0 = 0^\circ$ ；负载反电势换流时 $\gamma_0 = 60^\circ$ 。

11、变频启动系统的控制装置是由电子模拟元件构成。

12、消除了5、7，17、19等高次谐波，减小了大型电机启动时对电网的影响。

13、启动时间较短，全部启动过程历时约4分钟。

5-2 德国西门子（SIEMENS）公司生产的变频启动系统

德国SIEMENS 公司生产的变频启动系统是5号和6号风机的公共系统，其作用是依次对驱动5号和6号高炉鼓风机的两台同步电动机分别进行变频启动。

在原厂家的原设计中，5号风机和4号风机为同一组设备，共用一套启动设备（变频器和启动励磁），但在首钢公司实际安

装时，改变了原设计方案，将 5 号风机和 4 号风机分开安装，而将 5 号风机和 6 号风机改为同一组设备，共用了一套变频启动装置，所以在对 5 号风机进行安装时，其相应的设备进行了一些改动。

5 号和 6 号风机变频起动系统的主电路如图：图 5.2

5-2-1 鼓风机组的主要设备

一、高炉鼓风机 (Blast Furnace Blower) :

两台高炉鼓风机分别为 5 号风机和 6 号风机：

1、5 号风机：

与 4 号风机完全相同（系列号：EZ60576）。

2、6 号风机：

型号：AV80-14（产品编号：0934010）

型式：全静叶可调式轴流鼓风机

成套制造厂：中国陕西鼓风机厂

瑞士爱雪维斯—苏尔寿（SBF-SULZER）公司

出厂年限：1993 年

介质：空气

鼓风机出力：风量：5271NM³/min（状态：760mmHg，0℃），风

压：0.45MPa，出口风温：219℃

鼓风机最大轴功率：24.3MW

传动方式：间接传动（中间增速器变转速：3000rpm/4115rpm）

叶片级数：动叶：14 级，静叶：15 级

转速：工作转速：4115rpm；鼓风机盘车转速：25rpm；临界转速

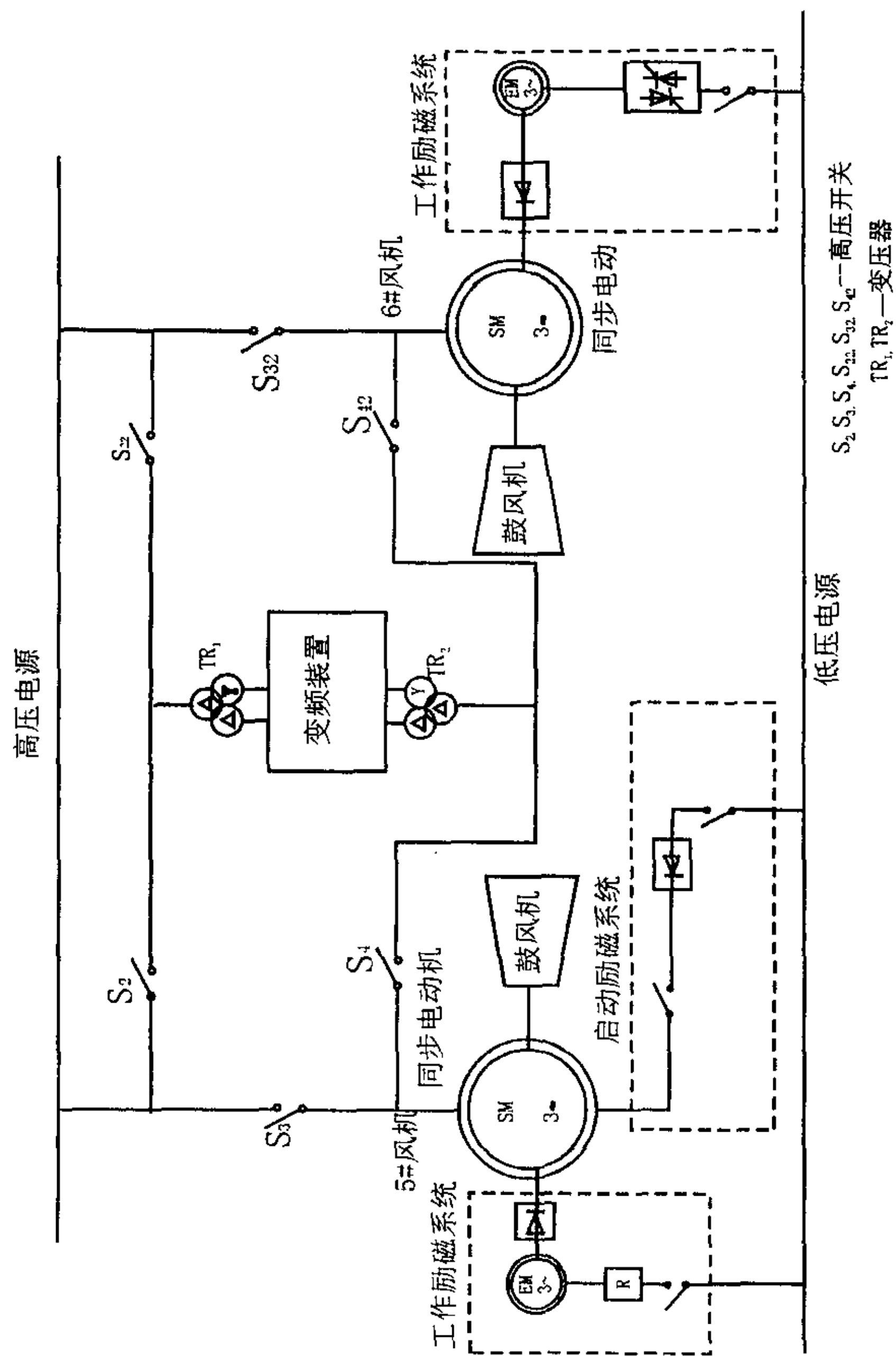


图5.2

为：一阶为1900rpm，二阶为5400rpm

静叶角度：运行角度：28-70°；启动角度：14°

转子直径：800mm（不包括叶片）

转子重量：16.65吨

二、同步电动机（Synchronous Motor）：

两台高炉鼓风机的驱动电机分别为5号和6号风机主电机：

1、5号风机主电机：

与4号风机主电机完全相同。

2、6号风机主电机：

型号：IDM3854-8DE01-Z

型式：隐极式同步电动机

成套制造厂：德国西门子（SIEMENS）公司

出厂年限：1992年

额定功率：36.14MW

转速：工作转速：3000rpm；主电机盘车转速：18rpm；临界转速

为：一阶为2100rpm，二阶为4000rpm

额定电流：2379A

额定电压：10.5KV±5%

额定频率：50HZ±1%

额定功率因数：0.85

定子和转子绝缘等级：F级

防护：IP54N（全封闭，内装热交换器）

极数：2

相数： 3

定子绕组接线方式： Y

额定励磁电压： 142V

额定励磁电流： 620A

冷却方式： 强制空冷（全封闭，主轴两端各有一个轴流式风扇，
空—水换热）

转子重量： 15吨

三、励磁装置 (Excitation Equipment)：

5 号风机和 6 号风机两台同步电动机的励磁装置各不相同，
其情况如下：

1、5 号风机同步电动机的励磁装置：

5 号风机与 4 号风机励磁装置的原设备相同，但因它们分开
安装，故 5 号风机的励磁装置在安装时进行了一些改动。

制造厂： 瑞士BBC公司。

生产日期： 1980年

如图所示，5 号风机的励磁装置与 4 号风机大体相同，只是
其永磁发电机未投入使用。该励磁装置仍分为：主（工作）励磁
系统和启动励磁系统。其中代替永磁发电机向自动电压调整器提
供交流电的是电网上的低压电源（380VAC），其余部分均相同。

2、6 号风机同步电动机的励磁装置：

制造厂： 德国西门子（SIEMENS）公司

生产日期： 1992年

如图所示，6 号风机的励磁装置与 4 号和 5 号风机不同，它

只有一个工作励磁系统，没有启动励磁部分，其主要分成：

(1). 励磁调节装置 (Excitation Regulator) :

励磁调节装置是一个静止式双向可控硅变流装置，其作用是将外部低压电源（380VAC）的恒压交流电变换成电压可调的交流电供给三相励磁发电机，并通过调节交流电压来控制三相励磁发电机的输出，从而间接调整同步电动机的励磁。

(2). 三相励磁发电机 (Three-phase excitation machine) :

三相励磁发电机的作用是通过旋转整流器将交流电转换成直流电，从而向同步电动机提供励磁。因供三相励磁发电机定子的是交流电，故其相当于一个旋转的变压器，所以在同步电动机启动（低速）时仍可提供满足需要的励磁电流，这样就不再需要启动励磁系统。

型号：IJG2417-IDW02-E

额定功率：119KW

额定电压：183V

额定电流：650A

额定转速：3000rpm

定子转子绝缘等级：F级

防护等级：IP54

相数：3

极数：4

(3). 旋转整流器：

旋转整流器位于与同步电动机同轴的三相励磁发电机的主轴

上, 采用六只旋转二极管组成三相桥式整流器, 其作用是将三相励磁发电机产生的交流电整流成直流电, 从而通过轴心母线向同步电动机提供励磁。

四、变频器 (SFC—Static Frequency Converter) :

型号: SIMOVERTER S

型式: 交—直—交电流型 (Current-Source DC Link Converter)

制造厂: 德国西门子 (SIEMENS) 公司

出厂年限: 1992年

额定功率: 9MW

功率器件单元: 每个单元由两个串联晶闸管组成

平波电抗器: 双线圈, $2 \times 2.6\text{mH}$

五、并网装置 (Numerical Paralleling Device) :

型号: 7VE51

六、变频变压器 (Transformer for Frequency Converter) :

变频变压器共有两台, 即输入变压器 (Input Transformer) TR1和输出变压器 (Output Transformer) TR2, 均为三绕组形式。

制造厂: 德国西门子 (SIEMENS) 公司

生产日期: 1992年

1、输入变压器TR1:

型号: TGEJ6641M

额定频率: 50HZ

一次: 额定电压: 10.5KV, 额定电流: 660A, 接法: Δ ,

额定容量: 12MVA

二次：额定电压：2X2.1KV，额定电流：2X1650A，接法： Δ ，Y，
额定容量：2X6MVA

2、输出变压器TR2：

型号：TGEJ6641M

额定频率：0-50HZ

一次：额定电压：2X2KV，额定电流：2X1732A，接法： Δ ，Y，
额定容量：2X6MVA

二次：额定电压：10.5KV，额定电流：660A，接法： Δ ，
额定容量：12MVA

七、高压开关（Circuit Breaker）：

1、5号风机的高压开关：

与4号风机的高压开关基本相同，只是没有变频器和输出变压器的启动旁路开关。

2、6号风机的高压开关：

制造厂：瑞士ABB公司

生产日期：1992年

(1). 同步电动机主（并网）开关S32：

六氟化硫高压开关

电压：10.5KV

电流：2000A

容量：750MVA

(2). 变频器输入开关S22：

六氟化硫高压开关

电压：10.5KV

电流：2000A

容量：750MVA

(3). 变频器输出开关S42:

高压真空开关

电压：12KV

电流：2500A

容量：750MVA

八、同步电动机转子检测装置:

两台同步电动机转子的检测均采用了间接方式，即无转子位置传感器。在该系统中转子的检测采用电压模型法，即检测同步电动机的定子电压和电流，对其在数学模型中进行速度和相位计算，以取代转子检测装置。此外，5号风机的电机侧有一个涡流传感器测量速度来进行仪表显示；而6号风机在电机侧没有用于显示的速度测量装置，只是在风机侧有一个用于仪表显示的涡流传感器速度测量装置。

5-2-2 SIEMENS变频器的主电路

变频器的主电路图：图5.2.2A

变频器的晶闸管功率单元结构图：图5.2.2B

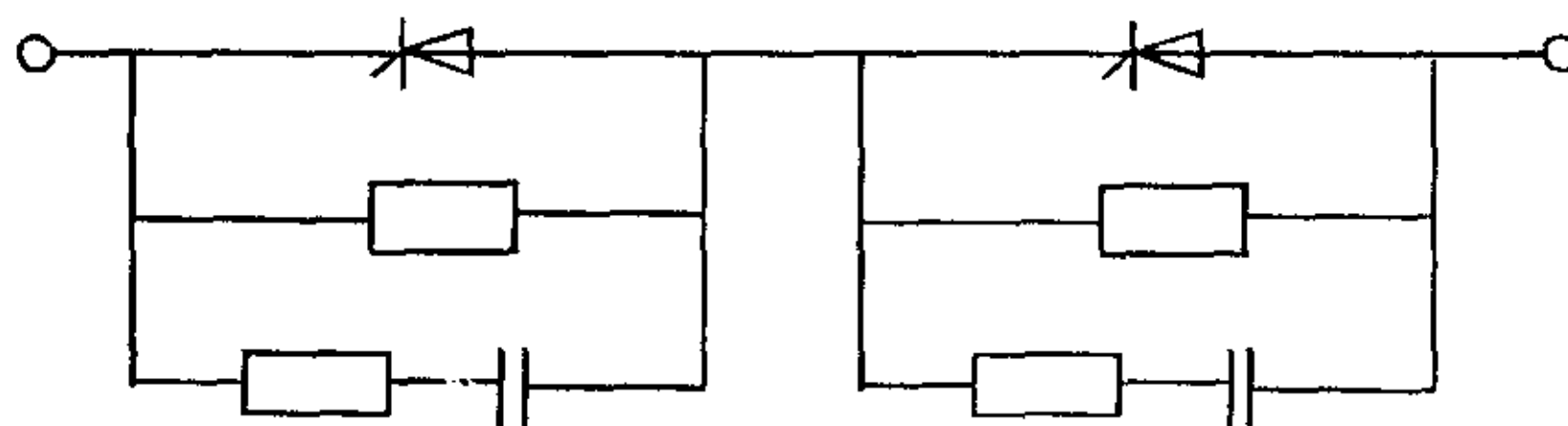


图5.2.2B

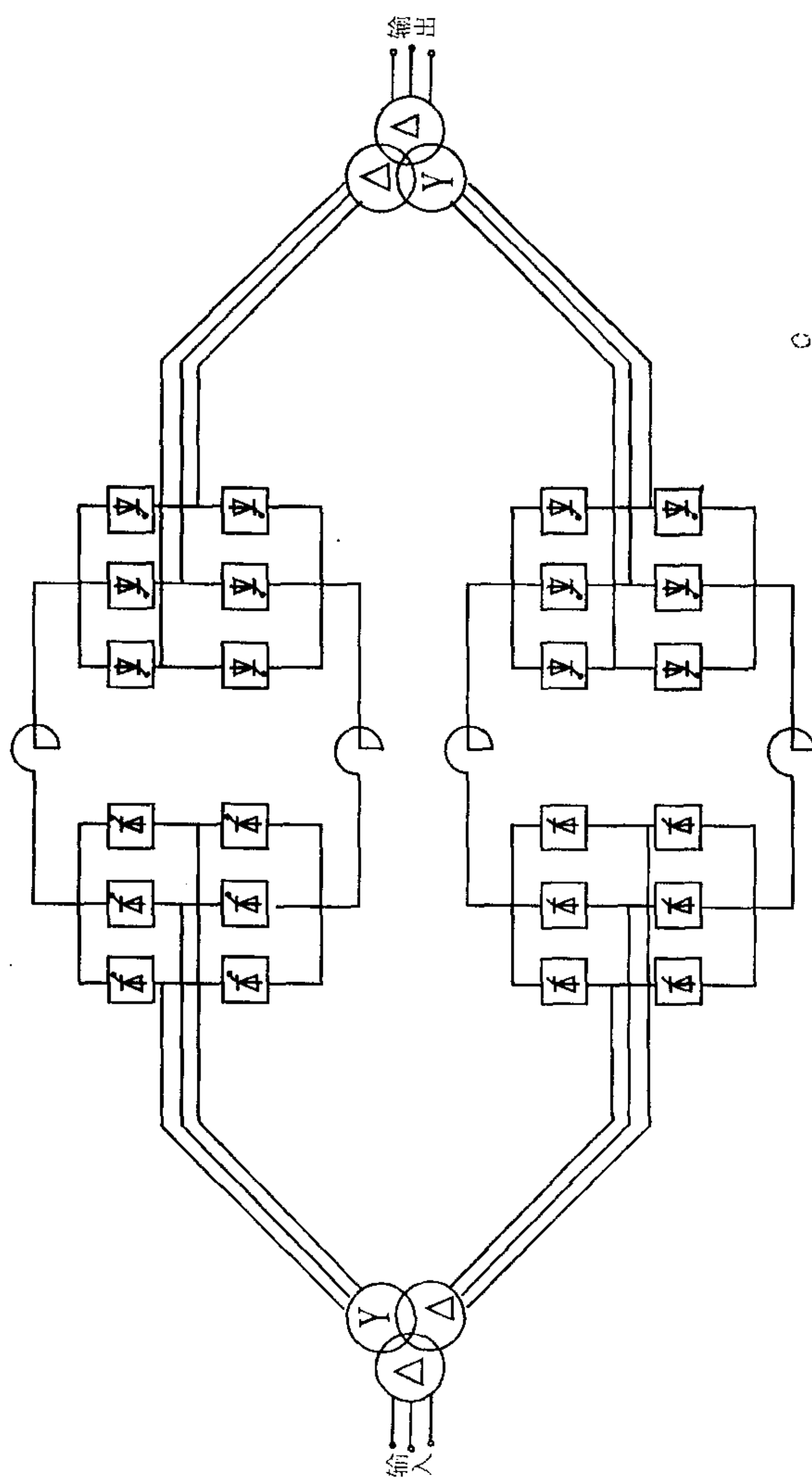


图 5.2.2A

5 — 2 • 3 SIEMENS变频启动系统的实际启动过程

5 号和 6 号风机的同步电动机变频启动逻辑过程如下:

1、5 号风机的实际启动过程:

(1). 启动准备 (启动条件): $f=0\text{Hz}$ (0rpm)

$f=0\text{Hz}$: 风机具备启动条件; 同步电动机具备启动条件; 辅助系统具备启动条件。

(2). 启动电动盘车: $f=0-1.13\text{Hz}$ (0-68rpm)

$f=0-1.13\text{Hz}$: 启动电动盘车, 盘车转速为68rpm。

(3). 变频器工作: $f=1.13-50\text{Hz}$ (68-3000rpm)

$f=1.13\text{Hz}$: 启动变频器; 投入启动励磁; 闭合变频器输入、输出开关, 即S2和S4; 断开同步电动机主开关S3。

$f=1.13-5\text{Hz}$: $f < 5\text{Hz}$ 时, 同步电动机加速, 启动系统以十二脉冲方式工作, 逆变器采用电流断续换流。

$f=5-50\text{Hz}$: $f \geq 5\text{Hz}$ 时, 同步电动机加速, 启动系统以十二脉冲方式工作, 逆变器采用负载反电势换流。

$f \geq 47.5\text{Hz}$ 时, 投入主 (工作) 励磁; 停止启动励磁。

$f \geq 49\text{Hz}$ 时, 投入并网装置, 进行整步微调。

(4). 变频器退出运行 (同步电动机并网): $f=50\text{Hz}$ (3000rpm)

$f=50\text{Hz}$: 满足并网条件后, 投入同步电动机的并网开关S3; 同时断开变频器的输入、输出开关, 即S2和S4。

2、6 号风机的实际启动过程:

(1). 启动准备 (启动条件): $f=0\text{Hz}$ (0rpm)

$f=0\text{Hz}$: 风机具备启动条件; 同步电动机具备启动条件; 辅助系统具备启动条件。

(2). 启动电动盘车: $f=0-0.3\text{Hz}$ ($0-18\text{rpm}$)

$f=0-0.3\text{Hz}$: 启动电动盘车, 主电机的盘车转速为 18rpm 。

(3). 变频器工作: $f=0.3-50\text{Hz}$ ($18-3000\text{rpm}$)

$f=0.3\text{Hz}$: 启动变频器; 投入工作励磁; 闭合变频器输入、输出开关, 即 $S22$ 和 $S42$; 断开同步电动机的主开关 $S32$ 。

$f=0.3-5\text{Hz}$: $f < 5\text{Hz}$ 时, 同步电动机加速, 启动系统以十二脉冲方式工作, 逆变器采用电流断续换流。

$f=5-50\text{Hz}$: $f \geq 5\text{Hz}$ 时, 同步电动机加速, 启动系统以十二脉冲方式工作, 逆变器采用负载反电势换流。

$f \geq 49\text{Hz}$ 时, 投入并网装置, 进行整步微调。

(4). 变频器退出运行 (同步电动机并网): $f=50\text{Hz}$ (3000rpm)

$f=50\text{Hz}$: 满足并网条件后, 投入同步电动机并网开关 $S32$; 同时断开变频器输入、输出开关, 即 $S22$ 和 $S42$ 。

5-2-4 SIEMENS变频启动系统的控制逻辑

在SIEMENS 变频启动系统中, 变频器、并网装置和工作励磁均是由全数字式计算机控制系统SIMADYN D 来控制, 只是这些工作是由不同的SD来完成。SD装置是由电源模块、功能模块和接口模块等组合而成, 它可以根据工艺系统的需要, 由多个不同的功能模块组成不同的SD来完成工艺所要求的各种功能。在本系统中共有三个SD, 即控制变频器和并网装置的SD、控制5号风机励磁

的SD和控制6号风机励磁的SD。

一、整流器的控制逻辑：

SIEMENS变频器的整流器控制逻辑与BBC变频器的基本相同，只是该整流器并不是总处于整流状态，在逆变器断续换流时整流器被推入逆变状态（整流器控制角 $\alpha = 135^\circ$ ），以使电流迅速下降到零。

二、逆变器的控制逻辑：

SIEMENS变频器的逆变器控制逻辑与BBC变频器的基本相同，只是在该逆变器断续换流时，不是靠触发续流晶闸管，而是将整流器推入逆变状态，以使电流迅速下降到零。

三、励磁系统的控制逻辑：

5、6号风机的同步电动机励磁系统分别是由两个SD来控制的。它们的控制逻辑与4号风机的控制逻辑大同小异。

1、5号风机励磁控制逻辑：

5号风机励磁控制逻辑与4号风机的基本相同，只是用低压电源代替了永磁发电机。

2、6号风机励磁控制逻辑：

6号风机励磁控制逻辑与5号风机的基本相同，只是它没有启动励磁系统，只有一个工作励磁系统，因此无论是起动过程还是正常工作阶段，它都是以无刷励磁方式运行，故不存在两个励磁系统的切换问题。它是通过控制双向晶闸管的延迟角，从而控制其输出电压来间接控制三相励磁发电机的输出。

四、并网控制逻辑（Synchronization Control）：

SIEMENS并网装置的控制是由变频器的SD 来完成的。它的控制逻辑与BBC的基本一致，只是它是在98%的额定转速下投入运行的。

五、系统控制逻辑：

系统控制采用的是全数字式计算机控制系统，它的控制逻辑与BBC的基本相同，只是没有六脉波与十二脉波的切换问题。

5 — 2 • 5 SIEMENS变频起动系统的特点

SIEMENS变频起动系统如图5. 2. 2A所示，具有如下特点：

- 1、采用了间接高压（高一低一高）的整体技术方案。
- 2、采用了多重化技术。在实际中使用了二重化技术，其中采用了独立直流电源型；变压器耦合输出（变压器为三绕组），采用了十二脉冲工作方式；两变频器并联联接。
- 3、采用了交—直—交电流型变频器。
- 4、采用的调压调频方法为：整流器（SRN）采用了相控整流器进行调压，逆变器（SRM）采用自控式进行调频。
- 5、变频器的结构为三相桥式，采用普通晶闸管（SCR）作为基本功率器件。其功率单元的结构为两个晶闸管串联，单元采用了均压技术，整个变频器共有四十八只晶闸管。
- 6、同步电动机转子的检测采用了间接方式，即无转子位置传感器。在该系统中转子的检测采用电压模型法，即检测同步电动机的定子电压和电流，对其在数学模型中进行速度和相位计算，以取代转速检测装置。
- 7、在启动过程中，5号风机采用了有刷和无刷励磁相结合的工

作方式；而 6 号风机则采用了无刷励磁的工作方式，即取消了启动励磁。在正常工作时，5 号和 6 号风机均为无刷励磁的工作方式。因此 6 号风机的励磁方式是完全的无刷励磁工作方式。5、6 号风机的同步电动机励磁系统均是由 SD 控制的。它们的控制逻辑与 4 号风机的控制逻辑大同小异。

8、对功率因数进行调节。

9、整流器的换流采用了相控方式，由转速、电流双闭环控制整流器控制角 α 。

10、逆变器的换流：

(1). 采用电流断续换流和负载反电势换流相结合的方式。其中电流断续换流是通过将整流器推入逆变状态的方法来实现的。

(2). 逆变器换流时采用 120° 导电型。

(3). 电流断续换流时 $\gamma_0 = 0^\circ$ ；负载反电势换流时 $\gamma_0 = 70^\circ$ 。

11、变频启动系统的控制方式是全数字式计算机控制系统(SD)。

12、消除了 5、7，17、19 等高次谐波，减小了大型电机启动时对电网的影响。

13、启动时间较短，全部启动过程历时约 4 分钟。

5-2-6 SIEMENS 变频器晶闸管的容量校核

SIEMENS 变频器选用的晶闸管参数为 3500V/2200A，现对其进行容量校核：

一、网侧变流器晶闸管的选择：

1、晶闸管元件的耐压：

$$U_{VT} \geq 2.3 * K_{u1} * U / \sqrt{3}$$

其中： K_{u1} -元件电压计算系数，三相桥式取2.45。

$$U_{VT}=2.3*2.45*2100/\sqrt{3}=6832 \text{ V}$$

功率单元为两个晶闸管串联，故每一晶闸管的额定电压为：

$6832/2=3416 \text{ V}$ ，所以选用耐压为3500V的晶闸管。

2、晶闸管元件的电流：

$$I_{VT} \geq (1 \sim 2) * K_{c1} * K_c * I_{dn}$$

其中： K_{c1} -元件电流计算系数，三相桥式取0.367；

K_c -电流过载系数，取1.5；

I_{dn} -直流回路电流， $1200*1732/660=3149 \text{ A}$ ；

$$I_{VT} = (1 \sim 2) * 0.367 * 1.5 * 3149 = (1 \sim 2) * 1734 \text{ A} \\ = 1734 \sim 3467 \text{ A}$$

所以，选用额定电流为2200A的晶闸管。

由此可见，网侧变流器晶闸管所选用的参数为3500V/2200A。

二、电机侧变流器晶闸管的选择：

经计算，选用与网侧相同的元件。

综上所述，SIEMENS变频器所选用的晶闸管是合理的。

5—3 BBC公司和SIEMENS公司生产的变频启动系统的比较

现将这两个系统进行比较，其情况如下：

一、两个变频启动系统的相同点：

- 1、两个变频启动系统的用途相同。
- 2、控制思想及原则相同。
- 3、整体技术方案相同：高一低一高方式。
- 4、均采用了多重化技术，即都使用了二重化技术（从技术经济

性比较的角度来看，二重化是最好的），其中均采用了独立直流电源型；变压器耦合输出（变压器均为三绕组形式）。

5、变频器型式相同：交—直—交流型。

6、调压调频方法相同：整流器（SRN）均采用了相控整流器进行调压，逆变器（SRM）均采用自控式进行调频。

7、变频器的结构相同：三相桥式。基本功率器件也相同：普通晶闸管。其功率单元均采用了晶闸管串联结构。

8、4号、5号和6号风机的起动过程和正常工作时，同步电动机的励磁均采用了无刷励磁的工作方式。它们均是通过控制三相励磁发电机的定子磁场来达到间接控制同步电动机励磁的目的。

9、功率因数的调节方式相同。

10、整流器的换流方式相同：相控整流，由转速、电流双闭环控制整流器控制角 α 。

11、逆变器的换流方式相同：电流断续和负载反电势换流相结合，其中电流断续换流时， $\gamma_0=0^\circ$ ；均采用了 120° 导电型。

12、均消除了5、7，17、19等高次谐波，减小了大型电机启动时对电网的影响。

13、启动时间均较短，全部启动过程历时约4分钟。

二、两个变频启动系统的不同点：

1、虽然两者都采用了多重化技术，但又有所不同。BBC的变频启动系统采用了六脉冲和十二脉冲相结合的起动方式，两组变频器采用的是串联连接；而SIEMENS则只使用了十二脉冲的起动方式，两组变频器采用的是并联连接。

2、虽然两者的结构相似，采用的基本功率器件也相同，但是其功率单元的结构有所不同，BBC 的变频器功率单元是由两串、两并四个晶闸管组成，采用了均压和均流技术；而SIEMENS 则只使用了两个串联的晶闸管组成功率单元，只采用了均压技术。因此后者比前者的基本功率器件数量减少了一半，而基本功率器件的容量则大大升高。

3、从BBC和SIEMENS的变频启动系统中晶闸管的单管耐压和平均电流来看，两者基本功率器件主要参数指标相差不大。但是由于当时电力电子半导体器件的制造水平的限制，单管不能达到这种高压、大容量变频器的需要，因此它们就通过不同的组织结构来实现需要。具体来说，两者都是通过两串来达到系统对功率单元的耐压要求。至于容量要求，则各有不同，BBC 系统是通过功率单元中晶闸管的并联来实现的，两个变频器采用串联连接；而在SIEMENS 系统中，没有采用晶闸管并联，而是靠两个变频器的并联来实现的。

4、两者采用的同步电动机转子检测方法不同，BBC 变频启动系统采用的是直接式检测方法，即有转子位置传感器（电磁式）；而SIEMENS 的则是间接式检测方法，即无转子位置传感器（电压模型法）。这种无转子位置传感器控制技术不需要检测硬件，也免去了传感器带来的环境适应性、安装、维护等麻烦，提高了系统的可靠性，降低了成本，在技术领域上，也上升了一个新的档次。它的关键在于在线获取速度信息，在保证较高控制精度的同时，还要满足实时控制的要求。

5、4号、5号和6号风机的同步电动机励磁方式虽然相似，但也有所不同。4号和5号风机的励磁均分为启动励磁和工作励磁两个系统；而6号风机只有一个工作励磁系统，而没有启动励磁系统。在起动过程中，4号和5号风机均为无刷和有刷励磁相结合的方式；而6号风机则为无刷励磁方式。在正常工作时，三者均采用无刷励磁方式运行，只是控制励磁的方法不尽相同，具体地说，4、5号风机都是通过自动电压调整器来控制三相励磁发电机的输出，所不同的是前者是控制永磁发电机的输出，后者是直接控制低压电源；6号风机则是通过双向硅来控制三相励磁发电机的输出。此外，4号风机励磁的优点是与外部电网无关，只要主机转动就会有励磁；5号和6号风机的优点是结构更简单，其可靠性更高，但与电网有关，这一点在6号风机上尤其明显。鉴于高炉鼓风机组是一个极其复杂的系统，只要低压电源出现故障，就会导致主机立刻停机（励磁以外的其他辅助系统也会导致停机），因此相比较而言6号风机的结构最可取，它是真正意义上的无刷励磁运行方式。

6、虽然两者的逆变器换流方式相似，但也有一些不同。在电流断续换流时，其换流实现方式不同，BBC的变频器采用的是触发续流晶闸管来实现的，而SIEMENS则是采用将整流器推入逆变状态来实现的。在负载反电势换流时，其提前换流角不同，BBC采用的是 $\gamma_0=60^\circ$ ，而SIEMENS则采用的是 $\gamma_0=70^\circ$ 。

7、两个变频启动系统的控制方式不同，BBC变频启动系统的控制装置为电子模拟系统；而SIEMENS则采用的是全数字式计算机

控制系统。

综上所述，从以上用途相同的两个变频启动系统来看，无论是其控制思想，还是其具体结构都没有原则性的区别。但两者生产年代不同，BBC的变频启动系统诞生于八十年代初，而SIEMENS则生产于九十年代初，两者相距十余年，因此它们在硬件和软件水平上都有差异，后者比前者要先进：后者器件较少，系统结构简单，控制水平高。但所有这一切只是一些改良，而没有原则性的不同。就其整体而言，随着现代各种技术的发展，在高炉鼓风机的驱动方面应有突破性的技术进展。

结 束 语

随着现代科技的进步，炼铁高炉不断地大型化，因此高炉鼓风机组的典型配置如下：

高炉鼓风机：大型静叶可调轴流式鼓风机；

原动机：同步电动机（功率为10-60MW）；

运行方式：起动：变频起动；正常运行：恒速，调整静叶。

由此可见，采用静叶可调技术的原因是主机在正常运行时无法改变转速。这就导致了鼓风机制造技术的相对复杂和成本的大幅度上升；而变频软启动设备却在完成起动工作之后长期闲置，利用率低下。作者认为：所有这一切主要是受到电力电子器件的制约，在可以预见的将来我们完全可以将变频调速技术应用于高炉鼓风机运行的全过程。

多年来的运行实践证明，高炉鼓风机系统是一个长年连续运行的设备，因此其运行的可靠性是系统稳定的生命；事实告诉我们设备的简化则是运行可靠性的关键，因此作者认为今后我国的高炉鼓风机系统应具有如下特点：

- 1、高炉鼓风机：叶片固定的复合式鼓风机（高效、宽工况）；
- 2、原动机：无启动励磁系统的无刷励磁同步电动机；
- 3、高炉鼓风机组采用全程的变频调速；
- 4、变频调速系统：无速度传感器的自控式变频调速系统；
- 5、变频调速的主电路：采用高一高技术方案；
- 6、变频器：采用交—直—交电流型；
- 7、变频器功率器件：采用自关断型功率器件；

8、高炉鼓风机系统的控制：计算机控制；

9、高炉鼓风机系统配备自动故障诊断系统。

作者认为：只有达到这样的装备水平，才能使我们的设备成本和运行成本下降，可靠性增加；从而真正通过技术手段使我们的冶金产品的能耗降低，质量上升，价格下降。这样，我们才有可能与国际接轨，使我国的冶金行业真正走出困境。

作者认为：这样的装备水平，既使在国际上，作为高炉鼓风机系统也是一流的；而且这一目标经过我们的共同努力，我国现有的技术水平也是完全可以达到的。

参 考 文 献

- [1] 吕文灿: 《轴流式压缩机》
机械工业出版社 1980.9
- [2] 李发海 王岩: 《电机与拖动基础》(第二版)
清华大学出版社 1994.6
- [3] 李发海 陈汤铭 郑逢时 张麟征 朱东起:
《电机学》(第二版) 科学出版社 1991.8
- [4] 陈伯时: 《电力拖动自动控制系统》(第二版)
机械工业出版社 1991.4
- [5] 李志民 张遇杰: 《同步电动机调速系统》
机械工业出版社 1996.8
- [6] 陈伯时 陈敏逊: 《交流调速系统》
机械工业出版社 1998.5
- [7] 佟纯厚: 《近代交流调速》(第二版)
冶金工业出版社 1992.5
- [8] 李鹤轩 钱利民: 《电力电子技术与运动控制系统》
福建科学技术出版社 1992.12
- [9] 余孟尝: 《模拟、数字及电力电子技术》
机械工业出版社 1999.6
- [10] 胡崇岳: 《现代交流调速技术》
人民邮电出版社 1998.10
- [11] 吴安顺: 《最新实用交流调速系统》
机械工业出版社 1998.6

- [12]黄立培 张学:《变频器应用技术及电动机调速》
机械工业出版社 1998. 7
- [13]王鉴光:《电机控制系统》
机械工业出版社 1994. 8
- [14]喻士林等:《电气传动自动化技术手册》
机械工业出版社 1992. 9
- [15]王信义等:《机电一体化技术手册》
机械工业出版社 1994. 2
- [16]三菱电机株式会社:《变频调速器使用手册》
兵器工业出版社 1992. 2
- [17]SULZER:"ANSHAN, CHINA, BLAST FURNACE BLOWER", 1979
- [18]BBC:"Static Frequency Converter For Blast Furnace
Blower", 1980
- [19]SIEMENS:"Soft Starter For Blast Furnace Blower", 1992

致 谢

二年半的工程硕士研究生班的学习与工作即将结束，回顾自己走过的每一步，无不凝聚着亲人、师长、同学和朋友的关爱与扶植，使我深深地感到：自己不但在学识上有了长足的进步，而且在个人修养上也受益良多。

首先要感谢我的导师顾树生教授，顾老师深厚的科学修养和严谨的治学态度使我终生难忘。

同时要感谢我的副导师张鹏远高级工程师，张老师的博学多才和耐心细致是我人生道路上的楷模。

还要感谢我的师兄弟王建东和李新同学，使我的学习生涯中充满了理解、支持和友情。

再次深深地感谢所有曾经关心、支持和帮助过我的亲人、师长和学友们。

李杨

2000年春于北京 首钢