

国内图书分类号：TM769

学校代码：10079

国际图书分类号：621.3

密级：公开

专业硕士学位论文

基于节能减排的火电厂变频技术应用研究

硕 士 研 究 生： 李兆丰
导 师： 张海波教授
企 业 导 师： 沈军
申 请 学 位： 工程硕士
专 业 领 域： 电气工程
培 养 方 式： 在职
所 在 学 院： 电气与电子工程学院
答 辩 日 期： 2015年6月
授 予 学 位 单 位： 华北电力大学

Classified Index: TM769

U.D.C: 621.3



Thesis for the Master Degree

**Study on the Application of Frequency Conversion
Technology in Thermal Power Plant Based on Energy
Saving and Emission Reduction**

Candidate:	Li Zhaofeng
Supervisor:	Pro.Zhang Haibo
School:	School of Electrical and Electronic Engineering
Date of Defence:	June,2015
Degree-Conferring-Institution:	North China Electric Power University

华北电力大学硕士学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《基于节能减排的火电厂变频技术应用研究》，是本人在导师指导下，在华北电力大学攻读硕士学位期间独立进行研究工作所取得的成果。据本人所知，论文中除已注明部分外不包含他人已发表或撰写过的研究成果。对本文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。本声明的法律结果将完全由本人承担。

作者签名：李兆丰

日期：2015年6月5日

华北电力大学硕士学位论文使用授权书

《基于节能减排的火电厂变频技术应用研究》系本人在华北电力大学攻读硕士学位期间在导师指导下完成的硕士学位论文。本论文的研究成果归华北电力大学所有，本论文的研究内容不得以其它单位的名义发表。本人完全了解华北电力大学关于保存、使用学位论文的规定，同意学校保留并向有关部门送交论文的复印件和电子版本，允许论文被查阅和借阅，学校可以为存在馆际合作关系的兄弟高校用户提供文献传递服务和交换服务。本人授权华北电力大学，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文，可以公布论文的全部或部分内容。

本学位论文属于（请在以下相应方框内打“√”）：

保密□，在 年解密后适用本授权书

不保密

作者签名：李兆丰

日期：2015年6月5日

导师签名：张海峰

日期：2015年6月5日

摘 要

首钢京唐公司能源与环境部热电厂位于唐山曹妃甸地区，电厂在冬季来临时，不光要承担供电的任务，还要承担起部分厂区供热任务。但是当下煤炭市场变化莫测，煤炭供应商提供的煤炭质量参差不齐，有些偏离标准较多，会造成磨煤机负荷波动较大，低负荷运行时严重影响磨煤机效率，造成电能浪费。

对磨煤机的电动机进行变频改造可以有效改善磨煤机效率，而且提高磨煤机转速可以有效短时提升磨煤机的出力。运行中的负荷波动往往会导致磨煤机频繁启停，而磨煤机的电动机一般是高压异步电动机，此种电机的启动电流达额定电流的5~7倍，电机启动电流会对定子线圈造成冲击，造成过热，影响电机寿命，而采用变频技术启停电动机时能显著降低启动电流，实现电机平滑启动，可以有效的解决这种问题，延长了电机寿命，减少了企业的成本和工人的检修工作量。

发电企业的持续发展，特别是在厂网分家改革后，火电厂的降低煤耗和厂用电率的压力巨大，而发展高压变频技术为节能减排和节能降耗的工作提供了有利条件，并且可以在短期内收回投资。

关键词：高压变频技术，磨煤机，节能减排

Abstract

The thermal power plant of the Energy and Environment Department in Shougang jingtang company is located in Caofeidian district of Tangshan city . This plant does not only bear the task of power supply, but also most part of the heating task in winter. Because of the current coal market fluctuation, quality of the coal supplied is uneven, and some have large scale deviation from the standard parameter designed, which will result in load fluctuations of the coal mills and thus low load operation conditions which severely decreases the efficiency of the coal mill, whilst causing the waste of energy.

Innovation of frequency conversion on the high-voltage motor of the coal mill can effectively improve the efficiency of coal grinding machine, and the frequency convertor can effectively enhance the short-term capacity of mill through increasing rotate speed of the motor. The load fluctuation in operation often leads to frequent starts and stops the of the coal mill, while the motor of the mill is generally high voltage asynchronous motor with a starting current of 5~7 times the motor rated current of the motor. The impact of the high starting current brings the effect of motor stator coil overheating which severely reduces engine's service life. Using of the frequency conversion technology can significantly reduce the starting current of the motor , and make a smoothly start which can effectively solve this kind of problem, prolongs the service life of the motor, reduce maintenance workload and cost of labor.

The sustainable development of power generation enterprises, is facing a huge pressure to reduce coal consumption and to lower the auxiliary power ratio of the thermal power plant, especially after the reform of separation of the management of power plant from that of power grids. The development of high voltage frequency conversion technology provides favorable conditions for energy saving, emission reduction and energy conservation, as well as a short-term recovery of the investment cost.

Keywords: High voltage frequency conversion technology, Coal mill, Energy saving and emission reduction

目 录

摘要	I
Abstract.....	II
第 1 章 绪论	1
1.1 选题背景和意义	1
1.2 高压变频技术的国内外研究情况	2
1.3 本文主要工作	3
第 2 章 发电厂磨煤机工艺特点和节能分析	4
2.1 发电厂概况	4
2.1.1 火力发电厂工艺流程	4
2.1.2 首钢发电厂概况	5
2.2 制粉磨煤系统	7
2.2.1 磨煤机技术数据	7
2.2.2 工作原理	7
2.3 磨煤机运行特性	9
2.3.1 磨煤机运行性能调整	9
2.3.2 中速磨煤机出力计算	10
2.3.3 中速磨煤机的功率计算	11
2.4 磨煤机能耗分析	11
2.4.1 磨煤机能耗效率分析	11
2.4.2 磨煤机电动机能耗分析	12
2.4.3 磨煤机的经济运行调整	15
2.5 本章小结	18
第 3 章 电动机变频调速原理	19
3.1 异步机调速方案	19
3.2 变频调速	20
3.3 高压变频技术方案	20
3.4 本章小结	26
第 4 章 首钢电厂磨煤机改造方案及效益分析	28
4.1 变频器简介	28
4.2 变频器调速原理及构成	29
4.2.1 功率元件原理介绍	29

4.2.2 旁路系统原理介绍	33
4.3 变频器功能	34
4.3.1 基本功能及参数	34
4.3.2 变频器和本厂 DCS 接口	36
4.3.3 变频器与高压柜电源接口	36
4.3.4 变频器的系统保护功能	37
4.4 故障定位及清除	37
4.4.1 界面显示常见故障	38
4.4.2 主控系统故障	38
4.5 改造后的效益分析	38
4.5.1 磨煤机的经济运行分析	39
4.5.2 工频状态下的耗电量计算	41
4.5.3 变频状态下的年耗电量计算	41
4.5.4 磨煤机变频改造的间接效益	42
4.6 本章小结	44
第 5 章 总结	45
参考文献	46
在学期间发表的学术论文和参加的科研情况	49
致谢	50
作者简介	51

第 1 章 绪论

1.1 选题背景和意义

近年来我国 GDP 不断攀升新高，但与此同时我国经济发展的能源消耗比例居高不下，远远落后于世界发达国家水平。2013 年，世界上污染最严重的 10 个城市有 7 个在中国，日渐严重的“雾霾”促使人们重新审视环境保护和工业发展这对矛盾，科学发展观的可持续发展战略迫切要求我们在工业发展中将节能减排、环境保护放在重要位置。

对于火力发电厂，降耗节能的重要考核指标就是发电厂的煤耗和发电厂厂用电率，这两个指标直接显示火力发电厂的能耗损率和经济运行水平，以及发电厂的发电成本。所以，发电厂为了能够通过“竞价上网”来提高竞争力，降低火力发电厂的煤耗和厂用电率不仅是一个有效手段，而且是发电企业单位发展和生存的必备条件。

火力发电厂配备有很多辅机设备，而辅机系统在设计之初就在容量上有一定的裕量，再加上发电机组经常会调节负荷，尤其是会在低负荷时段带上 50%~60% 的负荷，因此这就必然会导致辅机经常运行于低负荷工况，辅机系统低负荷运行时往往效率偏低，电耗上升，从而降低整个发电机组的运行经济性，特别是煤耗率和热耗率会相应提高，这样就会造成能源浪费。因此，在保证机组正常变负荷运行的情况下，如何降低机组辅机能耗就成为一个重要的课题。

变频调速技术是环保和节能技术中最近逐渐发展起来的一项技术，在各种家用电器，工业生产以及一些交通运输场合的应用都很广泛。其中我国电力拖动的主要研究以及发展方向是直流电动机调速技术中的变频调速技术，对于交流电机调速则研究较少，但是在经济效益方面，交流调速电机技术具有很大的吸引力，因此对交流调速电机的研究也越来越多。

现在唐山的电力企业发展迅速，同时“竞价上网”和“厂网分家”等政策的推出也极大程度的推进了电力企业的改革进程。而我国的北方地区的发电厂，在冬天运行时，不但要提供电力供应，与此同时还要确保供暖，这种情况下热电厂不得不增大出力，热电厂的磨煤机基本上会在供暖期满负荷运行，而在煤炭市场多变的情况下，热电厂又对煤炭质量要求较高，所以热电厂的煤炭很难满足标准，劣质煤缩短了磨煤机的检修周期，增加了经济成本。而在供暖期结束后，由于负荷降低，部分的磨煤机又要低负荷运行或转为备用，效率低下。但是如果热电厂采用高压变频技术调整磨煤机转速实现出力调节，能有效提升磨煤机运行效率、降低电耗率。通

过变频调节，在供暖期一台磨煤机的出力会至少增加 10%，且变频调速装置能大大改善异步电动机过高启动电流对电机的冲击，降低维护成本并延长设备寿命。

所以，实现节能以及降低发电厂煤耗率和厂用电率的最有效的措施之一，就是对发电厂的制粉系统设备进行高压变频技术改造。对火力发电厂的辅助机械设备的变频技术改造，以及变频技术的推广和应用对国家的节能减排工作具有重要和长远的意义。

1.2 高压变频技术的国内外研究情况

目前，变频调速技术在不断提高，制造工艺不断进步，在各个领域被不断采用。目前，使用电动机的各个发达国家的各种行业中，都使用到了变频器。高压变频技术在国外发达国家的现状归纳如下：

- (1) 技术的发展起步早，并有一个庞大的产业规模。
- (2) 目前，超过 20000kW 的特大功率变频器已经投入生产。
- (3) 已制定了健全的变频调速产品技术标准。
- (4) 变频器的相关产业和配套行业已经基本发展成熟。

(5) 随着近几年大电流变压器和高电压制造技术的快速发展，高电压、大功率变频器产品制造及使用已经实现。

- (6) 变频器已逐步走向本地化，国际化。

(7) 不断进步的新技术的和与日俱进的新工艺，已经广泛和快速地应用到了各大变频器制造厂商中。

受利于改革开放政策和我国经济的迅猛发展，国内越来越多的企业开始投身于变频调速技术，如今，我国的高压大功率变频器制造企业约有二十家左右，许多厂家的尖端变压器是直接从先进国家进口的，在国内的运行状况良好，很好地服务于我们的日常生活和工业生产。很多国内的合资企业具备生产国际上领先的变频器的能力，我国的厂家应用软件方面自己开发，设备使用合资企业和国外进口的先进设备，用来生产自主设计制造的成套装置，这些装置已达到先进水平，在应用和研究变频调速技术的国内外同行中得到了很大认可，也为很多国内外重大工程项目提供了一流的电气传动控制系统，成绩显著。

目前，我国变频器相关技术突飞猛进的进步，国产高压变频器在功能和理论上与进口变频器已可以不相上下，但因受限于相关的工艺技术，使得国内与国外的一些尖端产品相比差距很大，主要体现在：

- (1) 国内市场正逐渐的被先进国家的厂家所占领，并且日渐本土化。

(2) 我国企业变频器整机技术的落后不足以用国内企业研发能力和规模化生产的不断进步来弥补，现在只能在技术要求方面勉强满足相关产品，价格低廉。

- (3) 国内高压变频器的相关技术标准还有待国家的规范。
- (4) 高压变频器相配套的国内行业的发展还不够。
- (5) 生产和销售规模小，产品的稳定性能和工艺水平不高。
- (6) 关键器件国内还不能生产，变频器生产厂家在未来很长的一段时间内需要进口。

国内企业正在逐日减小和国外企业的技术差距，我国的各行各业也正在采用自主知识产权的产品。具有故障再恢复及瞬间失电再恢复等功能的变频器已被国内企业研制出。部分厂家已经开发出四象限运行的高压变频器。总之，不能否认国内外高压变频器技术之间存在差距，但二者基本处于同一代技术层面，而且国内产品从高压变频器的性价比角度来说比国外产品的稍占优势。

1.3 本文主要工作

(1) 阐述了磨煤机的工作原理及其在首钢发电厂中的运行情况，介绍磨煤机的运行效率特性以及磨煤机电机的效率特性，进而深入分析磨煤机和电动机的节能降耗的途径。

(2) 对首钢发电厂磨煤机高压变频节能改造进行了分析，同时阐述了磨煤机的高压变频调速原理，提出了磨煤机通过变频调节实现节能的基本理论。

(3) 介绍了首钢发电厂应用的变频调速产品原理及功能概述，并简要介绍了变频器与现场的控制及接口方式。

(4) 对变频改造后的磨煤机进行节能分析计算，并阐述了磨煤机变频改造的其他附加效益。

第 2 章 发电厂磨煤机工艺特点和节能分析

2.1 发电厂概况

2.1.1 火力发电厂工艺流程

首钢曹妃甸自备电厂安装 2×300MW 汽轮发电机组。发电厂生产过程如图 2-1 所示。

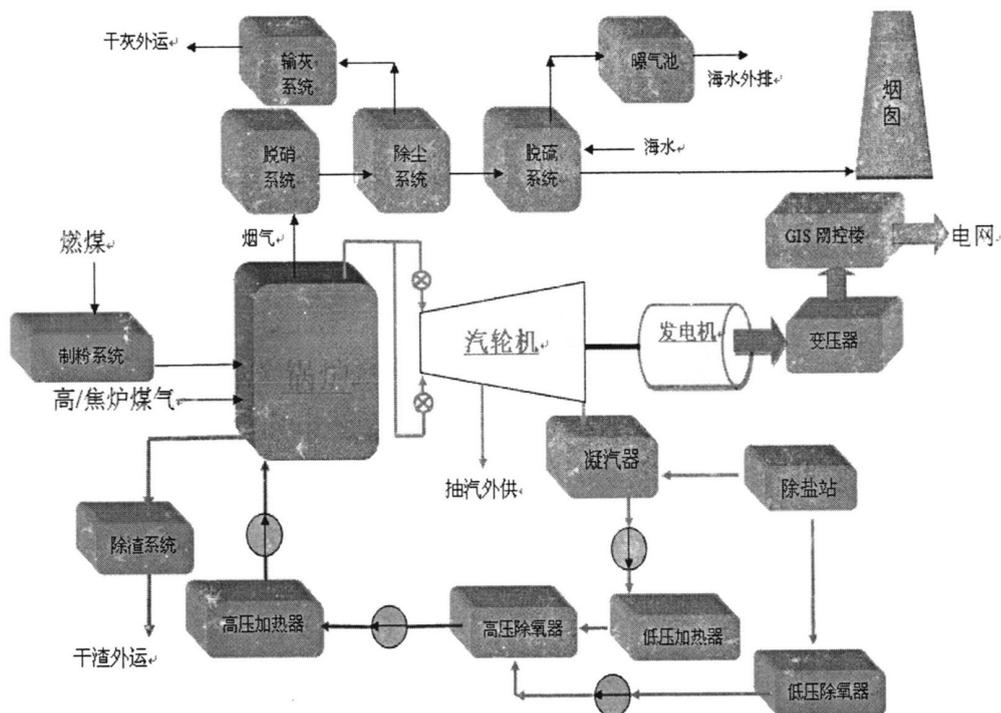


图 2-1 火力发电厂生产过程

热电厂工艺流程复杂，如图 2-1，汽轮机系统主要辅机设备包括电动给水泵、凝结水泵、真空泵等大容量电动机设备。电动给水泵向锅炉供给除盐水，凝结水泵将凝结的水排到凝汽器，循环水泵则负责向汽轮机凝汽器输送开式冷却水。锅炉辅机包括引风机、送风机、磨煤机、一次风机等大容量高压电机。这些设备的工作环境要求各不相同，像给水泵的输送压力要求在几个至几十 MPa，而引风机则要输送

100—200℃的高温烟气。因此，发电厂的工况是非常复杂的，所以对高压变频器的要求也比较高。下表是主要高压电机的参数。

表 2-1 现场主要高压电机参数

两台 300MW 机组部分高 压电机序号	设备名称	电机型号	额定功率	额定电 压	额定 电流	额定转速	数量
1	凝结泵电机	YKKC500-4	1000KW	6000V	115.1A	1500 转/分	4 台 2 用 2 备
2	一次风机电 机	YFKK560-4	1250KW	6000V	138.6A	1482 转/分	4
3	送风机电机	YKK450-4	630KW	6000V	70.5A	1490 转/分	4
4	引风机电机	YKK900-6	4900KW	6000V	552A	995 转/分	4

2.1.2 首钢发电厂概况

根据首钢曹妃甸钢铁厂负荷需求以及变电容量要求的总体规划，到 2014 年首钢京唐钢铁厂的负荷水平为 1148MW。根据钢铁厂建设的总体规划要求，钢铁厂一期工程的供电设施已建设 2 个 220kV 变电所，即铁钢变电所和轧钢变电站，每个变电所容量为 4×240MVA；已建设 11 个 110kV 变电所，包括 1#~3# 110kV 变电所和高炉、制氧、热轧 2 个和冷轧 4 个变电所；已建设 4 个电站，包括本发电厂 2×300MW 机组，CDQ 余热发电 2×25MW，TRT 余压发电 2×32MW，以及 CCPP 煤气发电 2×150MW 机组。

根据电力平衡结果，首钢曹妃甸钢铁厂在负荷达到 1148MW 时，根据钢铁厂内部电源的开机变化，在 2014 年钢铁厂需从电网受电 235~1148MW。当钢铁厂所有机组满发的情况下，钢铁厂需从系统受电 235MW；在钢铁厂 1×300MW 机组停运的情况下，需从系统受电 505MW；在钢铁厂 1×300MW 和 1×150MW 机组停运的情况下需从系统受电 640MW；若钢铁厂发电机组全部停运，则 1148MW 负荷需全部由系统承担。

根据首钢 2×300MW 电厂接入系统设计方案，电厂的接入系统采用方案如图 2-2 所示，自备电厂每台机组均通过发电机~变压器组接到电厂内的 110kV 的两段母线上，每段母线均采用双母线接线，再从每段母线出双回电缆线路接到铁钢和轧钢变电站，在轧钢和铁钢 220kV 变电站的 110kV 侧并网，此外电厂每段母线还为首钢的一部分 110kV 负荷站提供电源。

表 2-2 首钢京唐曹妃甸钢铁厂电力平衡表 (单位: MW)

序号	项目	2010 年	备注
一	最高供电负荷	1148	
二	可用装机容量		
1	其中: 煤气混烧	2×300	
2	CCPP	2×150	
3	压差发电	2×32	
4	CDQ	2×25	
三	机组实际出力		
1	机组满发	912.6	厂用 10%
2	1×300MW 机组停运	642.6	
3	1×300MW+1×150MW 机组停运	507.6	
4	机组全停	0	
四	电力盈亏		
1	机组满发	-235.4	
2	1×300MW 机组停运	-505.4	
3	1×300MW+1×150MW 机组停运	-640.4	
4	机组全停	-1148	

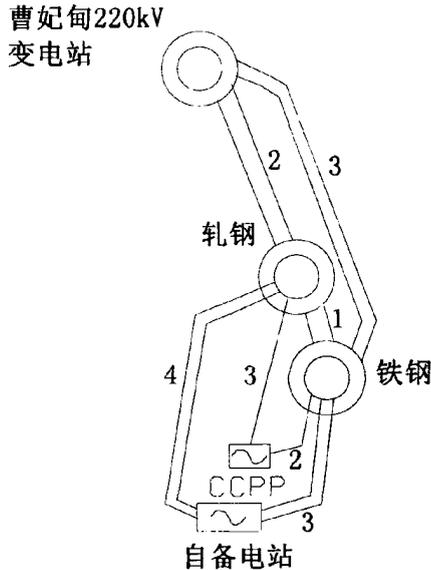


图 2-2 首钢电厂接入方案

其中:

- (1) 每台 300MW 机组接入的母线采用双母线。
- (2) 电厂 110kV 新建电气设备短路电流水平按不小于 40kA 选择。
- (3) 本工程自备电厂机组的出力, 在不投油助燃的情况下, 不应小于 60%的

调节能力。

(4) 电厂机组额定负荷时应具备 0.85 (滞相) ~0.95 (进相) 的调节能力。

首钢发电厂位于河北省东北部, 唐山市滦南县境内渤海湾北部曹妃甸岛。渤海湾海域辽阔, 水量充沛, 电厂采用海水作为冷却水源。自备电厂为 $2 \times 300\text{MW}$ 火电机组, 锅炉由哈尔滨锅炉厂有限责任公司制造, 型号为 HG-1025/17.5-MQ42, 锅炉型式为亚临界参数、自然循环、一次中间再热、单炉膛、四角切圆燃烧方式、固态排渣、露天布置、全钢构架锅炉。设计燃料为烟煤, 锅炉以最大连续负荷 (即 BMCR 工况), 即机组电负荷 340.32MW 工况运行时, 锅炉的最大连续蒸发量为 1025t/h ; 机组电负荷为 300MW (即 TRL 工况) 时, 锅炉的额定蒸发量为 960t/h 。因电厂位置紧邻渤海湾曹妃甸海域, 首钢电厂凝汽器冷却水直接采用海水直流冷却供水系统, 回水直排入海, 其它所需淡水全部采用海水淡化水。这样较内陆的电厂节约大量水资源。

2.2 制粉磨煤系统

2.2.1 磨煤机技术数据

首钢发电厂每台机组配置 5 台磨煤机, 两台机组共配置 10 台磨煤机。设计煤种及相关参数如下:

(1) 煤种范围

煤种烟煤, 部分贫煤和部分褐煤

发热量	16~31MJ/kg
表面水份	<18%
可磨性系数	HGI=40~80(哈氏)
可燃质挥发份	16~40%
原煤颗粒	0~40mm

(2) 磨煤机参数如表 2-3 所示。

2.2.2 工作原理

首钢发电厂所用的 ZGM95 磨煤机是一种中速辊盘式磨煤机, 其碾磨部分是由转动的磨环和三个沿磨环滚动的固定且可自转的磨辊组成 (见图 2-3)。

一次风无法吹起的难以粉碎且较重的石子煤、铁块、铁矿等经由喷嘴环进入一次风室。然后由刮板刮入排渣箱, 由人工 (或自动排渣装置) 定期清理, 清除渣料的过程也可在磨运行期间进行 (见图 2-4)。

表 2-3 磨煤机参数

项 目	单 位	设计参数	备 注	
磨煤机	磨煤机转速	rpm	26.4	
	磨盘旋转方向		顺时针(俯视)	
	最大通风阻力	kPa	≤5.74	
	磨一次风量	kg/s	16.45	
	磨煤单耗	kWh/t	6-10 (100%磨出力)	
	生产厂家		北京电力设备总厂	
	型号		YMPS500-6型	
磨煤机电机	额定功率	kW	380	
	额定电压	V	6000	
	额定电流	A	51.6	
	额定转速	rpm	989	
	环境温度	℃	40	
	功率因数		0.77	
	绝缘等级		F	

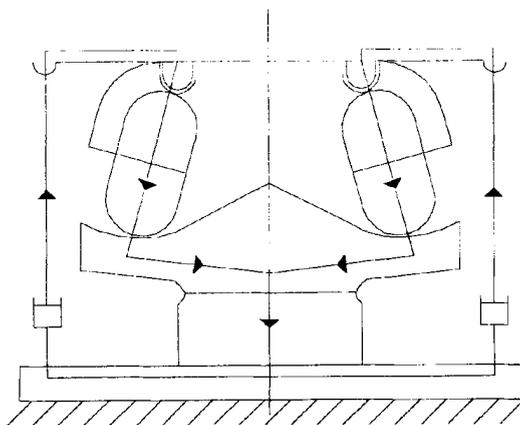


图 2-3 磨煤机加载系统受力状态示意图

ZGM95N 型磨煤机通过立式伞齿轮行星齿轮减速机传递磨盘力矩，整体采用鼠笼型异步电动机拖动。减速机同时承受上部重量以及碾磨加载力所致的水平与垂直负荷。磨煤机传动盘处、拉杆关节轴承处以及磨辊处为了防止煤粉向外泄露，需要设计密封风系统。密封风系统包含密封风机等设备，通常一台磨煤机配有一台密封风机，也可设计一台密封风机由几台磨煤机共用。

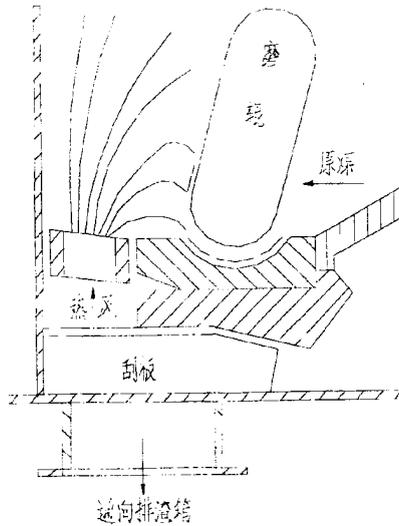


图 2-4 磨煤机的“沸腾区”

2.3 磨煤机运行特性

2.3.1 磨煤机运行性能调整

制粉系统中有许多转动机械，从经济运行的角度出发，希望系统以最小的能耗来制备足够数量的合格煤粉。为了衡量系统运行的经济型，常用到以下指标。

(1) 制粉系统的出力

决定制粉系统出力大小的因素有三个方面的：

- 1) 磨煤机的碾磨能力，即磨煤机单位时间能磨制多少细度合格的煤粉。
- 2) 磨煤机的通风量（一次风），即这些风是否有能力将磨耗的煤粉全部带出磨煤机；
- 3) 磨煤机的干燥条件，即在单位时间内，磨煤机入口的干燥剂一次风是否能够将磨耗的煤粉全部干燥到所要求的程度。

运行中，在能耗一定的前提下，制粉系统的出力越大，则经济型越高。

(2) 制粉单耗

制粉单耗是指磨煤机输出单位数量的合格煤粉的耗电量，即制备 1t 煤粉所消耗电能，用 $\text{kW} \cdot \text{h/t}$ 表示。

磨煤机出力及磨辊加载特性曲线（见图 2-5）

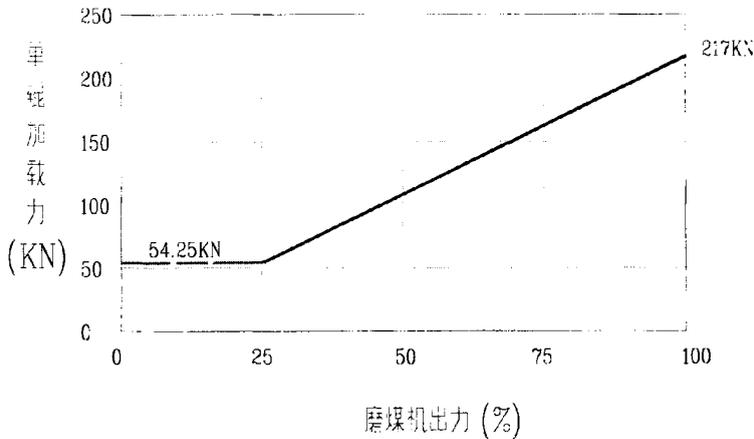


图 2-5 磨煤机出力-磨煤机加载力曲线

2.3.2 中速磨煤机出力计算

制粉系统的正确选择和使用应根据所用燃料、锅炉类型、磨煤机型号等许多因素有关，对磨煤机的磨煤出力和功率计算同样重要。本文以 E 型中速磨煤机为例。

磨煤出力是指对于给定的燃料，磨煤机所能磨出达到一定煤粉质量要求的煤粉量，可以分为磨煤出力和干燥出力两种。干燥出力是指在磨煤过程中磨煤系统每小时能将多少煤由最初应用基水分 W_y 干燥到最终水分 W_m (煤粉水分)，干燥出力决定于磨煤系统的干燥条件。而磨煤机运行时的实际出力，既受磨煤条件限制，也受干燥条件限制，应是磨煤出力和干燥出力两者之中的较小者。

表 2-2 给出了部分 E 型磨煤机的规格参数，其中磨煤机铭牌出力是在 $k_{km}^{Hg} = 50$ (或可磨性系数 $k_{km} = 1.06$ 、 $W^y \leq 10\%$ 、原煤颗粒尺寸全部不大于 19.05mm 且煤粉细度 $R_{75} = 30$ 的条件下的结果。实际运行中，煤的可磨性、水分、颗粒尺寸及磨煤细度等不完全符合上述条件，故实际磨煤出力 B_m ，按下式计算：

$$B_m = \frac{1.15 \times 10^{-3} k_{km}^g}{\sqrt{\ln \frac{100}{R_{90}}}} \cdot \rho \cdot Z \cdot d_{gq}^2 \cdot V \quad (2-1)$$

式中， ρ 为煤粉堆积密度 (kg/m^3)

Z 为磨辊数量

d_{gq} 为钢磨辊直径 m;

V 为磨辊的圆周速度(m/s)

2.3.3 中速磨煤机的功率计算

E 型中速磨煤机所消耗的总功率包括空载功率和磨煤功率 N 。两部分，即 $N=N_k+N_m$ 。空载功率 N_k ：

$$N_k = \frac{1.5 \times 10^{-5} \cdot P \cdot Z \cdot v}{\eta_{sd} \cdot \eta_{dj}} \quad (2-2)$$

式中： Z 代表磨辊数量(只)

P 代表每个磨辊上所受压紧力 (N) ($P=5880+39.2G-1470k_{km}$)

V 代表磨辊圆周速度

G 代表单个磨辊重量(kg)

η_{sd} 代表电动机与磨煤机间传动效率，一般取 0.9

η_{dj} 代表电动机效率，一般取 0.92

磨煤功率 N_m ：

$$N_k = \frac{6 \times 10^{-5} (P + 9.8G) \cdot Z \cdot v}{\eta_{sd} \cdot \eta_{dj}} \quad (2-3)$$

所以，总功率 N 的计算公式为：

$$N = N_k + N_m = \frac{6 \times 10^{-5} (1.25P + 9.8G) \cdot Z \cdot v}{\eta_{sd} \cdot \eta_{dj}} \quad (2-4)$$

单位磨煤耗电量 E_m 为：

$$E_m = \frac{N}{B_m} = 6 \times 10^{-5} \frac{(1.25P + 9.8G) \cdot Z \cdot v}{B_m \cdot \eta_{sd} \cdot \eta_{dj}} \quad (2-5)$$

对于 MPS 中速磨和平盘中速磨的出力计算和功率计算方法和公式可参考相关的设计手册数据，这里不再一一列出。

2.4 磨煤机能耗分析

2.4.1 磨煤机能耗效率分析

由磨煤机出力计算公式，可以看出原煤的可磨性、水分、颗粒尺寸及磨煤细度要求都直接影响着磨煤机的出力。磨煤机所消耗的总功率包括空载功率和磨煤功率两部分，空载功率为没有做有效功的功率，是损耗部分，而磨煤功率就是有效作功功率。由功率计算公式可知，空载功率与磨煤机钢球的质量、数量和磨球圆周速度成正比，而与传动效率和电机效率成反比。要提高磨煤机的效率，需要减少空载功率在总功率中的比重，如式(2-6)所示为空载功率所占比重。

$$\eta_1 = \frac{P}{4 \times (1.25P + 9.8G)} = \frac{5880 - 1470k_{km} + 39.2G}{4 \times (7350 - 1837.5k_m + 58.8G)} \quad (2-6)$$

对于磨煤机，磨辊质量是确定的，由式(2-6)可知其效率取决于煤的特性，这与采用可磨性好的煤有利于提高效率、节省电能是相符的。

2.4.2 磨煤机电动机能耗分析

参考式(2-3)~(2-5)可得，提高磨煤机的输出功率和磨煤机传动效率这两项数据可直接达到提高磨煤系统效率的目的。因此可以通过对磨煤机的传动环节进行改造，来提高电能转化为磨煤机械能的效率。另外，因为电动机是磨煤机的驱动机械，也是能量转换、传递的关键环节，所以可从提高电动机效率方向着手来降低电动机损耗功率，从而提高磨煤机的工作效率。如图 2-6 所示为异步电机其 T 形等效电路。

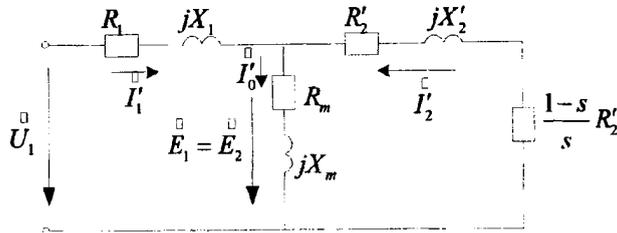


图 2.6 异步电动机的 T 形等效电路

当异步电动机处于转速 n 、转差率为 s 稳定运行工况下，异步电动机的电源输入功率 P_1 为：

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (2-7)$$

定子铜耗：

$$P_{Cu1} = m_1 I_1^2 R_1 \quad (2-8)$$

正常运行工况下，电机接近同步转速运行，转子电流频率约为 0.5Hz-2Hz 低值，故转子铁耗可忽略，只计算定子铁耗为：

$$P_{Fe} = m_1 I_0^2 R_m \quad (2-9)$$

异步电动机到转子的传递功率为：

$$P_{em} = P_1 - P_{Cu1} - P_{Fe} = m_1 I_2'^2 \frac{R_2'}{s} \quad (2-10)$$

转子铜耗:

$$P_{Cu2} = m_1 I_2'^2 R_2' = s P_{em} \quad (2-11)$$

异步电机电功率转换而来的总机械功率:

$$P_M = P_{em} - p_{Cu2} = m_1 I_2'^2 \frac{(1-s)R_2'}{s} = (1-s)P_{em} \quad (2-12)$$

机械损耗和附加损耗之和称为空载损耗, 扣除空载损耗后转轴输出的机械功率为:

$$P_2 = P_M - p_0 \quad (2-13)$$

电动机效率是输出机械功率与输入电功率之比:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma p}{P_1} \quad (2-14)$$

在小型笼型感应电动机中, 满载时的杂散损耗 $p\Delta$ 可达输出功率的 1%-3%, 在大型感应电动机中, $p\Delta$ 可取输入功率的 5%, $p\Delta$ 的大小与槽配合、槽开口、气隙大小和制造工艺等因素有关。

综上所述可得出, 电动机的损耗主要由铜耗、铁耗、空载损耗组成。如图 2-7 所示为异步电动机工作特性曲线, 该曲线表明了异步电机在额定电压、额定频率电源供电情况下电机转速 n 、效率 η 、功率因数 $\cos\phi$ 、定子电流 I_1 、输出转矩 T_2 、输出功率 P_2 的特性关系:

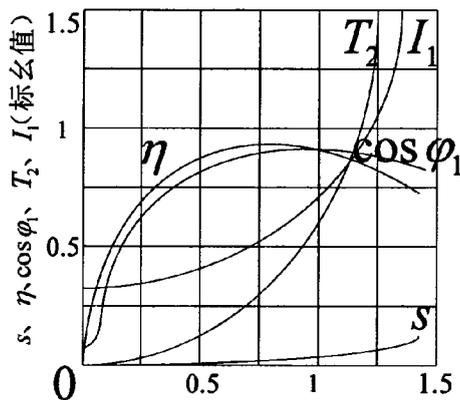


图 2-7 异步电动机工作特性曲线

由图可知, 效率 η 与输出的功率的关系曲线为开始随输出功率呈急剧上升趋势,

达到顶点后缓慢下降。电机处于其额定工作点运行时其处于高效率工作状态。而作为拖动器的电动机输出功率需要根据其所带负荷调整，往往使电动机处于低负荷工况时效率低下，而磨煤机的工况需经常随发电厂供电负荷变化而变化，并不是一成不变地地作于额定负荷工况下。当电机启动时，其定子电流能达到额定电流的 5~7 倍，过高的启动冲击电流无论对电动机自身还是对电网都会造成不良的影响。所以电动机具备较大节能空间，很有必要分析其节能途径。

感应电动机的效率曲线如图，与其他电机类似，电动机的最大效率通常发生在 0.8-1.1PN 这一范围，额定效率 η_n ，约在 0.76-0.94 之间容量越大， η_n 一般就越高，在原有运行方式下，当磨煤机低负荷运行时，电动机其实在较低效率下运行，造成大量损耗。

根据电机学原理，可知电动机电磁转矩 T_e 方程为

$$T_e = \frac{P_\Omega}{\Omega} = \frac{P_e}{\Omega_s} \quad (2-15)$$

考虑到电磁功率

$$P_e = m_1 E_2' I_2' \cos \psi_2, E_2' = \sqrt{2} \pi f_1 N_1 k_{w1} \Phi_m, I_2' = \frac{m_2 k_{w2} N_2}{m_1 k_{w1} N_1} I_2 \quad (2-16)$$

$$\Omega_s = 2\pi f_1 / p \quad (2-17)$$

带入上式，有：

$$T_e = \frac{P_e p}{2\pi f_1 \cos \varphi_2} \quad (2-18)$$

由上式可得，电磁转矩恒定时，电磁功率与频率 Ω 成正比，故当磨煤机维持加载力运行时，可通过调节频率实现磨煤机出力的调节。

从上述能耗分析可得出，磨煤机电机可从机械本身和外部供电电源两方面来研究节能途径。不难推断，选择性能优良的电机或对电动机进行改造可以有效降低损耗。在电机设计制造阶段，可从减少电机绕组电阻、减少风阻摩擦、提升磁路导磁性能等几个途径降低损耗。但是在当今情况下，通过改进电机设计以达到提高电机节能的效果的仍有赖于电机制造工艺的提升，且不适合应用于现有电机设备改造。从另一方面考虑，可以通过为电机提供适合的外部电源，以适应电机负荷的变化，从而达到节能的目的，如提供变频电源。采用变频器平滑启动电动机，使得电动机在较小的启动电流下实现平滑启动，有利于保护电动机本体和电网安全运行。另外，

高压变频器的变频调速技术具有提高功率因数、软启动、节能等多方面功能。因此，对磨煤机电机实施高压变频调速装置改造，能够提高电机机械特性，改善磨煤机调节性能，从而降低空载功率，提高磨煤机效率，提升磨煤机制粉出力水平，实现节省大量的电能节约。

2.4.3 磨煤机的经济运行调整

中速磨煤机磨制煤粉所需要的研磨力由磨辊的自重和施加于磨辊的机械压力（称加载）形成，且以后者为主。磨煤机加载的方式主要分为弹簧加载和液压加载两种。弹簧加载方式靠改变弹簧初始压缩长度定初始加载力，运行中加载力则随着给煤量的增加而增大。加载力与给煤量的对应关系是自动生成的，且与初载和煤的难磨程度成比例，如图 2-8 所示。

图中加载力磨煤机单耗最低时对应的磨煤加载力（A 点），A 点的加载力 H 为最佳效率加载力点。此时对应的磨煤机出力 Q ，即为磨煤机的经济负荷。磨辊的加载力根据磨煤机出力大小，自动进行调整，如图 2-9 的加载力曲线。当磨煤机低负载运行时电单耗上升，而且磨损加重缩短磨辊寿命。

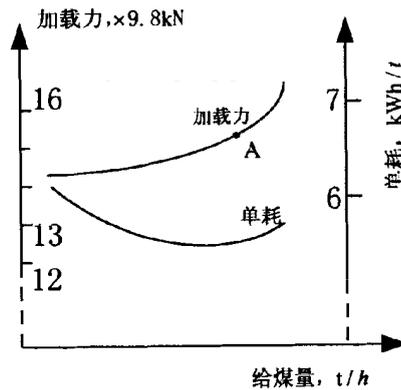


图 2-8 加载力，单耗与给煤量的对应关系

根据实际运行经验，在发电机正常运行工况下五台磨煤机全部满出力运行的可能性很低，至少有一台磨煤机不能满负荷运行，且往往低于 85% 的高效率运行状态。此时电单耗偏高，磨损严重。

根据磨煤机加载力曲线可得知，除了磨煤机最小出力部分，加载力与磨煤机出力成线性关系。即磨煤机的特性曲线（H-Q 曲线）：当转速恒定时，磨辊加载力与磨煤机出力的关系特性：

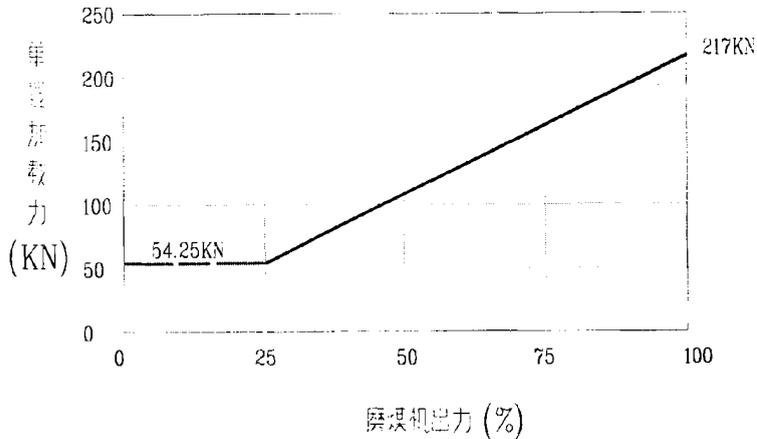


图 2-9 磨辊加载力与磨煤机出力的关系特性图

因磨辊每转的出力 Q_r ，与 Q 有如下关系 $Q_r = Q / (60 * n)$ ，在加载力恒定工况下，靠给煤机控制一定的原煤层厚度不变，有 $H = 60 * k * n * Q_r$ ，因加载力 H 与转速 n 无数学关系，即可得出当某一转速工况时，加载力与磨煤机每转出力为成正比关系，所以 $H = k' * Q_r$ 。

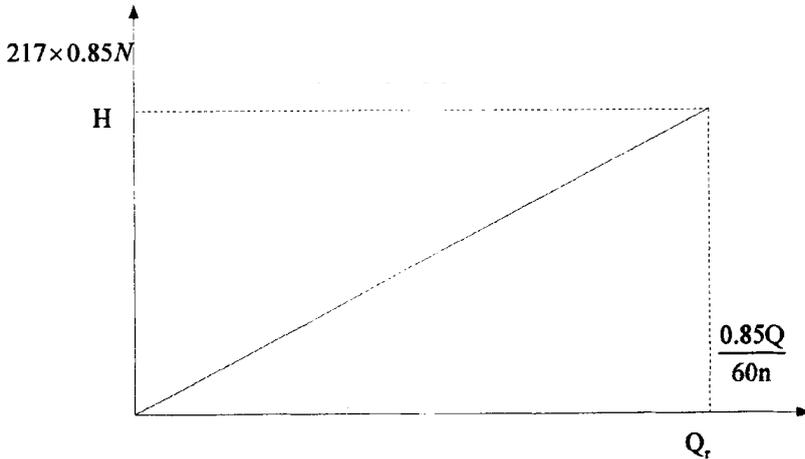


图 2-10 磨煤机每转出力与加载力关系曲线

故根据此式，可以实现磨煤机出力的恒加载力变频调节。

磨煤机变频运行出力超过 85% 时，如图所示，转速为磨煤机额定转速运行。当冬季机组抽汽时，磨煤机出力将大大增加，磨煤机将满载运行，按照磨煤机工频运行方式，此时磨煤机将不得不放弃经济运行工况，提高加载力而提高出力。

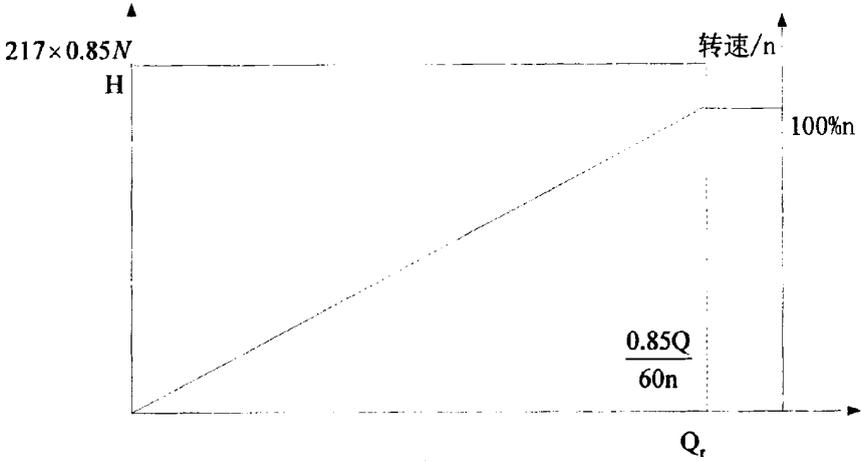


图 2-11 加载力、转速、出力关系曲线

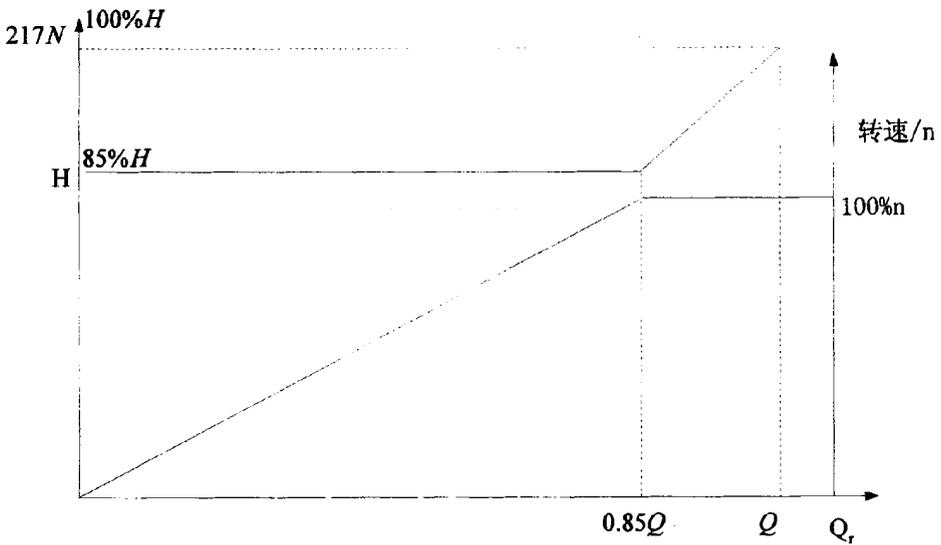


图 2-12 最佳加载力 H 点以后的运行工况曲线

实际生产中如因煤质差或者紧急调峰等原因，有可能需要磨煤机短时超额定出力运行，此时，加载力受限不能继续上升，因磨煤机电机都有一定的设计容量裕度，故可通过变频提速而满足短时负荷需求，但是此时磨煤机处于超出设计出力工况运行，同时处于超速运行状态，因此上述工况不宜长时间超负荷运行，但是仍使磨煤机具备了短时超负荷的灵活调节能力。

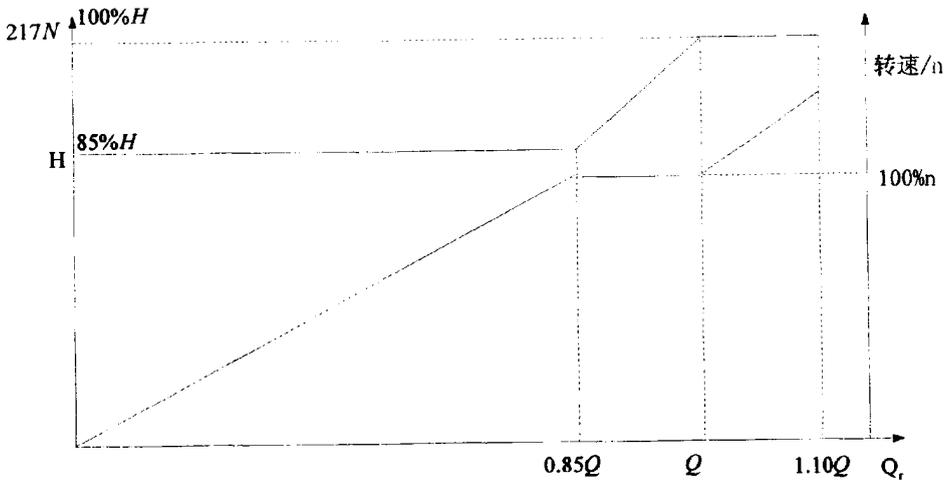


图 2-13 磨煤机超额出力运行曲线

2.5 本章小结

本章首先介绍了首钢京唐钢铁厂的负荷需求和电厂的接入方式，对首钢发电厂概况进行了介绍。其次结合制粉磨煤系统，详细阐述了磨煤机的运行原理，以及磨煤机的运行调整特性，还有磨煤机的变频改造的必要性，提出了磨煤机变频调速的节能理论。通过本章内容可以得出结论，根据电动机带动的磨煤机负载特点，对磨煤机进行变频技术改造，将会有显著的节能效果。

第 3 章 电动机变频调速原理

随着近年交流电机变频调速方法的增多, 需要根据现有电动机设备情况选择一种合适的变频调速方法。本章节将介绍几种常见的变频调速方案, 并从其中选择一种最适合本厂的调速方式。

3.1 异步机调速方案

根据电机学可知, 感应电机转速为

$$n = \frac{60f(1-s)}{p} \quad (3-1)$$

其中: n 代表三相电机转子转速

f 代表三相电机输入电源的交流频率

p 代表三相电机的极对数

s 代表异步电机转差率

通过式 (3-1) 可知, 可通过改变电机频率 f 、电机极对数 p 和电机转差率 s 等改变电机转速。

(1) 电源频率 f

改变输入交流电源的电流频率 f 是用途最广泛的变频调速, 如图 3-1 所示, 原理将在 3.2 节详细介绍。

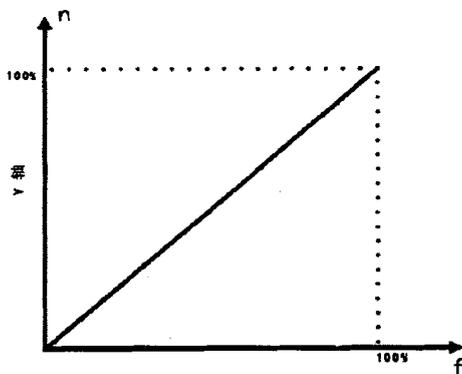


图 3-1 转速频率关系

(2) 电机极对数 p

电动机定子磁极旋转形成电机内磁场, 由于极对数的不同, 电气转速和机械转速的比值即极对数 p , 改变极对数 p 可直接改变电气转速实现不连续调速, 故这种方法不适合热电厂磨煤机的连续调速。

(3) 电机转差率 s

电机转差率调速包括电压调速、转子串电阻调速和转子附加电动势调速等。各调速方案特点如表 3-1 所示。

表 3-1 转差率调速对比

	分类	特点
转差率调速方案	电压调速	适用于小容量电机
	转子串电阻调速	适用于绕线转子调速
	转子附加电动势调速	实现平滑调速

3.2 变频调速

随着电力电子技术的发展，尤其是高效率高性能的大功率器件技术的成熟，变频调速方案在性能上的进步以及硬件方面成本的节约使得变频调速方案得到广泛应用。

交流电机电源频率 f 满足下式

$$n = 60f / p \quad (3-2)$$

由式 (3-2) 可以看出，交流电机电源频率 f 变化时，其转子转速 n 会发生同比例的相应变化，进而可通过平滑的改变电源频率实现异步电机转速的平滑调节。

根据公式 $U_1 = 4.44f_1 w_1 k_w \Phi_m$ 可知，当异步电动机正常运行时， U_1 不变，磁通 Φ_m 与频率 f_1 成反比关系， f 升高， Φ_m 则下降。由转矩公式可得出此时电机允许的出力矩将降低从而将影响电机功率输出。因此为了维持电动机转矩恒定，应同时调节频率和电压，即令 U_1 与 f_1 近似成正比例调节，也就是实现电动机的恒转矩调速，这对实际生产中的恒转矩负载非常适用。

另外，异步电动机变频调速属于转差率基本不变，而同步转速和电动机运行需要的理想转速同步变化条件下的调速。因此变频调速的调速精度、功率因数和效率都较高，且容易实现闭环自动控制。

3.3 高压变频技术方案

我首钢发电厂磨煤机电压为 6kV，属于高压电机，因而本厂的磨煤机变频改造属于为高压变频技术应用。本节将介绍实际常用的高压变频方式的原理及优缺点，以分析适用于首钢发电厂磨煤机的变频方式。常用的高压变频器分类包括交-直-交型、电流型、电压型、交-交型等类型。本节主要对交直交变频器、电流型变频器、电压型变频器和无谐波高压变频器的原理及应用特点进行介绍。

(1) 交直交变频器工作原理是：交流电源的电流先后经整流器、逆变器后成为直流电，控制回路的功能是分别控制整流器和逆变器的开通截止以及宽度，进而

控制输出电源的频率和幅值。交直交变频器构成图如图 3-2 所示。

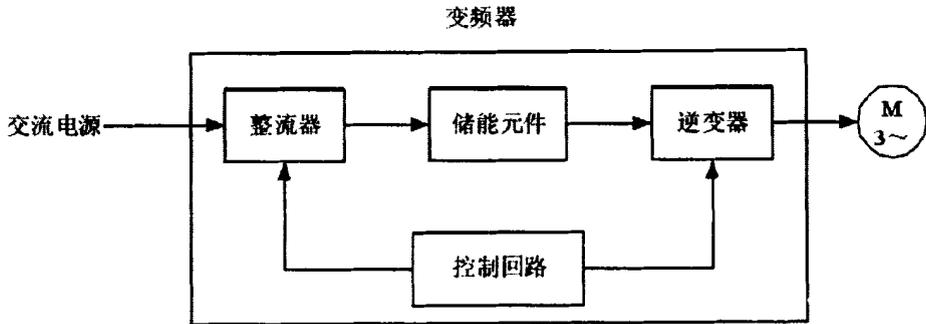


图 3-2 交直交变频器

通过图 3-2 可以看出，交直交变频器属于开环无反馈类型的变频器，此类变频器对于变频的速度及精度控制的程度不足以满足实际生产需求，因而需通过增加相应的反馈信号实现闭环控制。一般选取电机侧信号作为变频器的反馈信号，实现闭环控制，如图 3-3 所示。

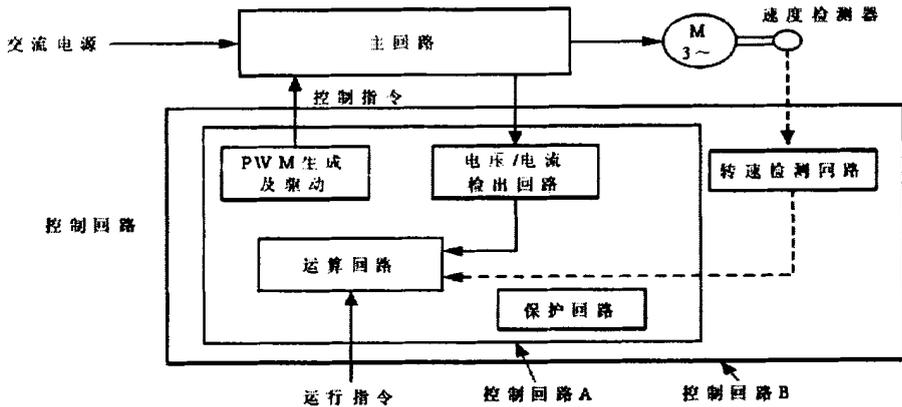


图 3-3 交直交变频器闭环控制

其优缺点及适用环境如表 3-2 所示。

以下就交直变频器的各部分进行介绍。

1) 主回路

主回路包括整流器、滤波回路、逆变器及储能元件。

其中，整流器采用如图 3-4 所示的二极管回路，电源为直流源。

滤波回路是由电抗器和电容器串联形成的滤波回路，形成能够抑制高倍频率电压的回路。

表 3-2 交-交高压变频器优缺点

	优点	缺点
交-交变频器	<ol style="list-style-type: none"> 1. 可用于驱动同步电机和异步电机 2. 可保持较大的转矩 3. 动态过载能力强 4. 可在四个象限中运行 5. 功率因数最大可达 1 6. 低速性能优越 7. 硬件装置性能良好 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 电动机功率因数受转子转速影响较大，转速大时导致功率因数偏高 2. 输出频率不连续，为电源频率的 1/n 3. 由于机械原因导致最大转速受限 4. 网侧存在不可消除的谐波
使用场合	转速较低的设备	

逆变器的作用是将经整流器整流的直流电逆变成供电机使用的交流电，通过控制关断导通功率开关实现输出电源频率和幅值的改变。

储能元件即图 3-4 中所示的制动单元，是由大电容器构成，将多余的能量储存在电容器中，进而升高直流电压，最终实现电机的电气制动。

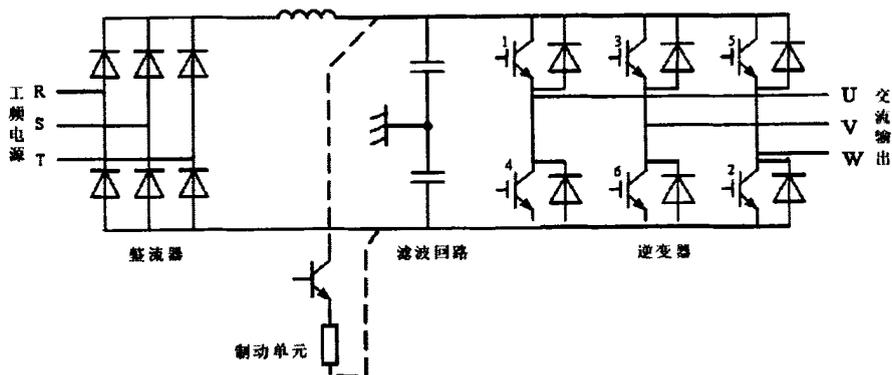


图 3-4 交直交整流器主回路构造

2) 控制回路

控制回路包括：运算回路、检测回路、驱动回路、保护回路。其中运算回路通过将外部机械信号转换为可识别的电气信号；检测回路检测主回路的电气量和机械量；驱动回路驱动功率器导通开断；保护回路功能是保护主回路避免因过流或过压损坏。

(2) GTO 电流源型高压变频器

GTO 电流源型高压变频器使用范围较广，目前多用于异步电机调速使用，功

率分布范围在 1.5GW~10GW 之间，电压范围在 1.5kV~6kV 之间，输出频率最高可至 220Hz，其主电路结构图、电压电流波形图如图 3-5、3-6 所示。

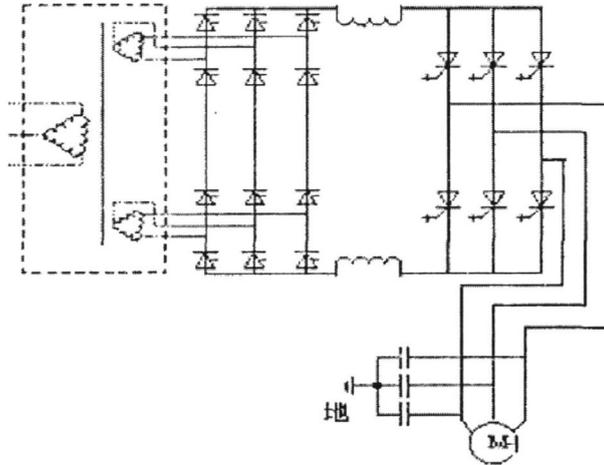


图 3-5 GTO 电流源型变频器主电路结构

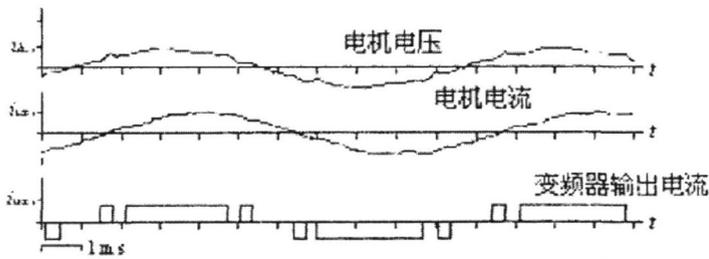


图 3-6 GTO 电流源型变频器的电压、电流波形

GTO 电流源型优缺点如表 3-3 所示。

表 3-3 GTO 电流源型优缺点及适用范围

	优点	缺点
GTO 电流源型高压变频器	<ol style="list-style-type: none"> 1. PWM 选择恰当时，可以得到理想的转矩脉波 2. 电源频率调节范围大（最大可到 220Hz） 3. 装置本身低损耗 4. 四象限运行 5. 具有较高动态性能 6. 具有高硬件可靠性 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 运行环境需强磁场 2. 产生较大输入电流谐波 3. 易产生共模电压 4. 易受电压波动影响 5. 安装调试复杂

(3) 三电平电压源型高压变频器

三电平电压源型高压变频器通常采用 HV-IGBT 或 IGBT 的三电平电压源型高压变频器，电路主结构图分别如 3-7 至 3-8 所示。

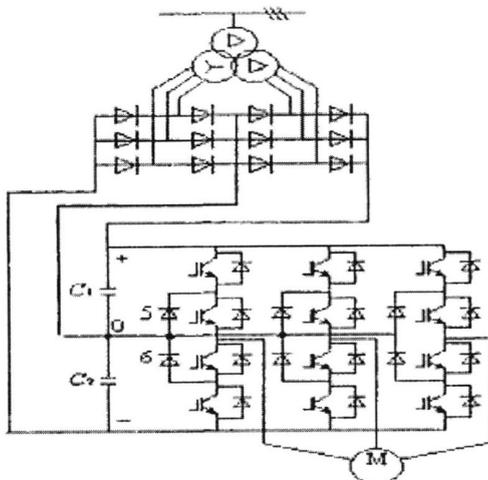


图 3-7 HV-IGBT 三电平电压源型高压变频器主电路

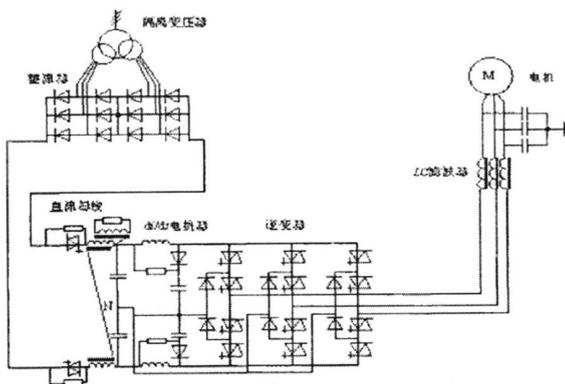


图 3-8 IGBT 三电平电压源型高压变频器主电路结构

三电平电压源型高压变频器优缺点如表 3-4 所示。

表 3-4 三电平电压源型高压变频器优缺点及适用范围

	优点	缺点
三电平电压源型高压变频器	<ol style="list-style-type: none"> 1. 电源频率范围大，效率高 2. 良好的过载能力及动态性能 3. 噪音低 4. 可靠性高，减少了熔断器装置数量 	<ol style="list-style-type: none"> 1. 不能四象限运行 2. 需进行滤波处理 3. 需配合复杂的电子电路使用
使用场合		风机水泵、挤压机等

(4) 无谐波高压变频器

无谐波高压变频器有效解决了半导体无法耐压的难题。其特点在于脉动力矩大大降低，功率因数可维持较高水平，电压波动小，几乎无谐波干扰，功率范围较大，可承受电压最大可达 10kV。

从硬件外形和运行性能的角度考虑，无谐波电压器具备以下优点：外形设计简单、占地面积小、重量轻、易操作，运行可靠性高，功率因数可维持在 0.95 之上，省去变压器的辅助，无滤波器，使用范围较广，无间断连续运行，模块化结构，易于维护，实现全机数控，进而实现高效运行。其电路结构图如图 3-9 所示。

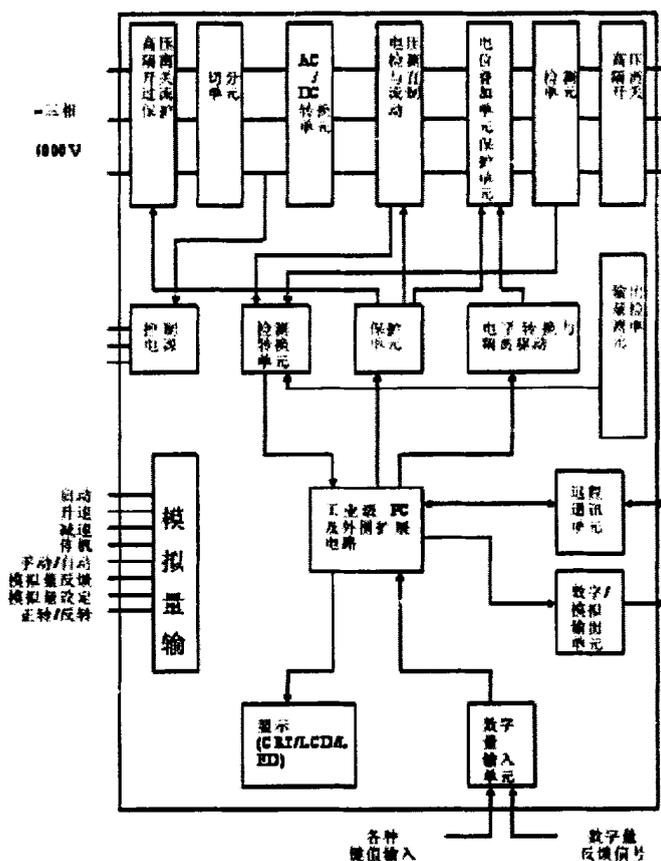


图 3-9 无谐波高压变频器电路结构

无谐波高压变频器的运行特性具体如下：

- 1) 可长时间欠容量运行，并仿真设备间的电磁干扰，在没有滤波装置的情况下也可以输出理想的正弦波，可实现软启动，启动电流较小，不会对电网产生冲击效应，并且保护相应的硬件设备，延长使用寿命。
- 2) 变频装置频率可连续调节，也可间断调节，具有跳跃功能，调试时可空载

或低载调试。抗外界电网干扰能力强，具自诊断修复功能，安全性能高。

3) 谐波分量极小，在无补偿装置的情况下即可实现较高的功率因数。

4) 输出的正弦波电压波形完美，省去滤波器装置，因而噪音污染极低，工作人员有较好的工作环境。

高压变频技术发展起步较晚，不能像低压变频技术那样全面。不能一概而论的划清高压变频设备的优劣，应根据不同的使用场合选择适用的变频装置。

3.4 本章小结

本章根据异步机调速原理介绍了异步机的几种调速方案，并围绕变频调速深入的进行了原理分析，最后就常用变频方案（交直交变频器、电流源型变频器、电压源型变频器、无谐波高压变频器）的变频器结构、工作原理进行了逐一介绍。

此页不缺内容

第 4 章 首钢电厂磨煤机改造方案及效益分析

首钢电厂发电机组磨煤机由我厂厂用电气系统的 6kV 高压工作段供电。根据我厂实际工作情况，发电机组磨煤机变频改造后需要实现以下功能：需具备软启动能力，降低启动电流；较强的抗干扰能力；在机组发电负荷较大时，改造后的磨煤机需能够相应方便地实现提升制粉输出功率；不能产生谐波干扰；实现节能目标。根据上述要求，我厂采用利德华福高压变频器对 1#号发电机组 D、E 磨煤机进行变频改造。

4.1 变频器简介

本厂采用的利德华福高压变频器具有以下特点：

- 1) 基于多电平技术，不需要外界滤波器即可输出正弦波形，输出转矩波动小；
- 2) 可靠性高，采用了大功率的 IGBT 元件，出现故障后，维修简单方便；
- 3) 人机互动性强，工作人员可手动设定机器启动时间等；
- 4) 在实现节能减排的同时可降低机组磨损；
- 5) 内置 UPS 在断电情况下可维持机组运行 30 分钟。

该变频装置采用多个功率元件串联组成的多电平拓扑结构，不需变压器配合即可实现直接高压变换，运行所需的高压交流电源由多个交流电源串联组成。电网源首先经主变压器隔离移相，移相后的电源输出为功率单元供电，每个独立功率单元均为单相交-直-交电压型的逆变器，单元采用串联星形接法，形成三相变频电源拖动电动机运行，如图 4-1 拓扑结构所示。通过串联不同的单元级数，可实现变频器不同电压等级输出如 3kV、6kV、10kV。主变压器采用移相整流方式，输入电压电流谐波小且输入功率因数能达到 0.95 以上。符合 GB/T 14549-93 和 IEEE519-1992 对电压谐波和电流谐波失真标准要求。无需配置任何功因补偿和谐波抑制装置，网侧功率因数能达到 0.95 以上。变频器输出采用多重化 PWM 采样技术，在不加装输出滤波器的情况下输出近似标准的正弦波。因此，变频器能够保证具有小谐波损耗和小转矩脉动的电源输出，并且降低输出电源的噪声至优良程度，另外，输出电源对电动机的附加应力的损害能够忽略不计， dv/dt 和共模电压也能维持在较低水平。电路原理如图 4-2。

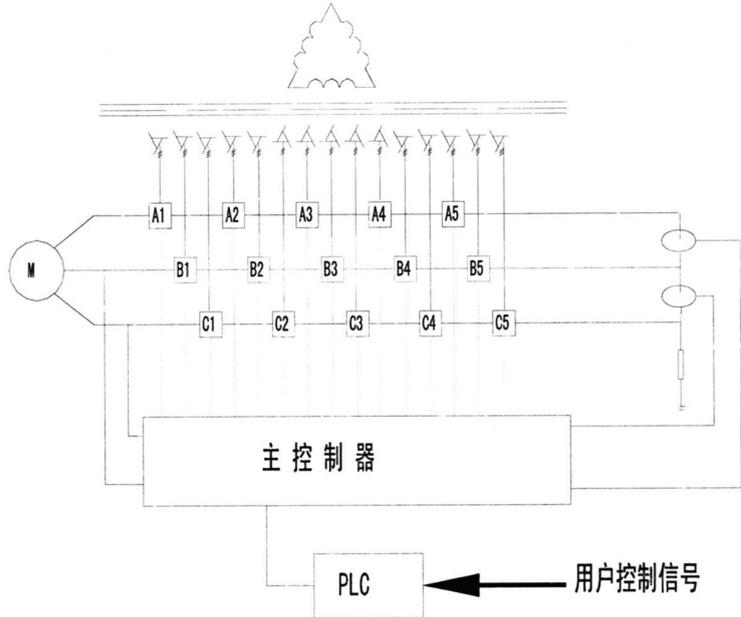


图 4-1 变频器拓扑结构图

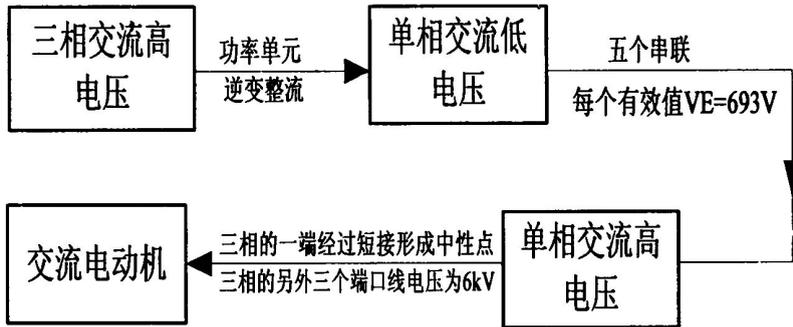


图 4-2 电路原理示意图

4.2 变频器调速原理及构成

4.2.1 功率元件原理介绍

本厂改造所用的无谐波高压变频器主要有整流变压器、功率单元和控制单元组成，结合电厂实际使用情况，还会配置具有旁路功能的旁路系统。

下图所示为 HARSVERT 高压变频调速系统，采用了直接“高-高”变换形式。

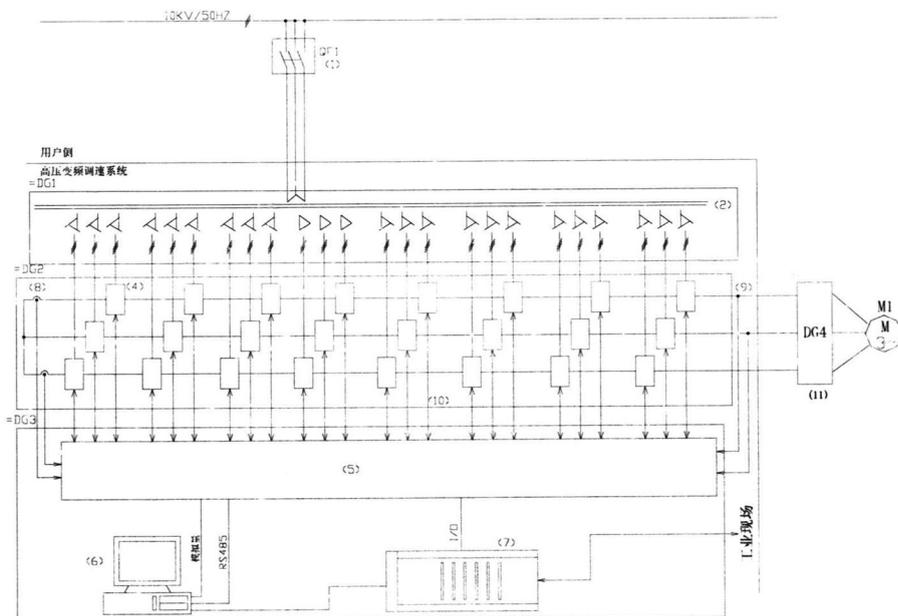


图 4-3 变频器系统结构图

每个功率单元结构是完全一致的，这种一致性的设计目的在于实现独立功率单元完全互换，其示意图如图 4-4 所示。

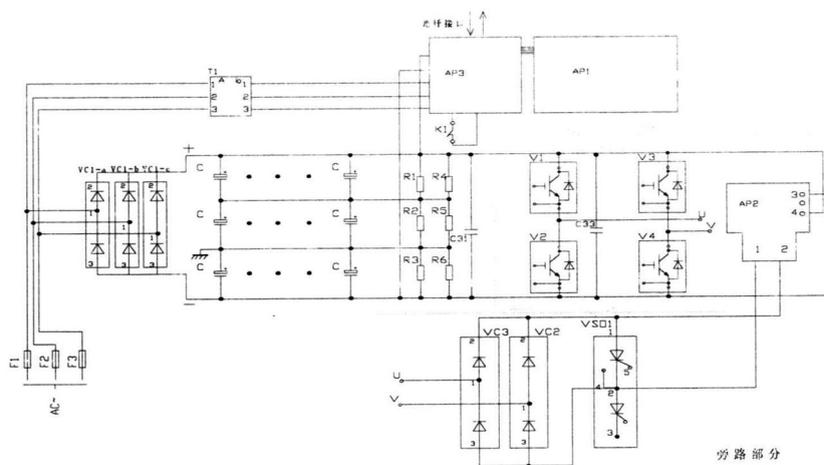


图 4-4 变频器功率单元结构图

如图 4-5 所示为功率单元供电的移相变压器、输入侧的电压、电流检测元件、CT、PT、以及温度检测器件温控器等装置，这些装置主要安装集成于变压器柜。

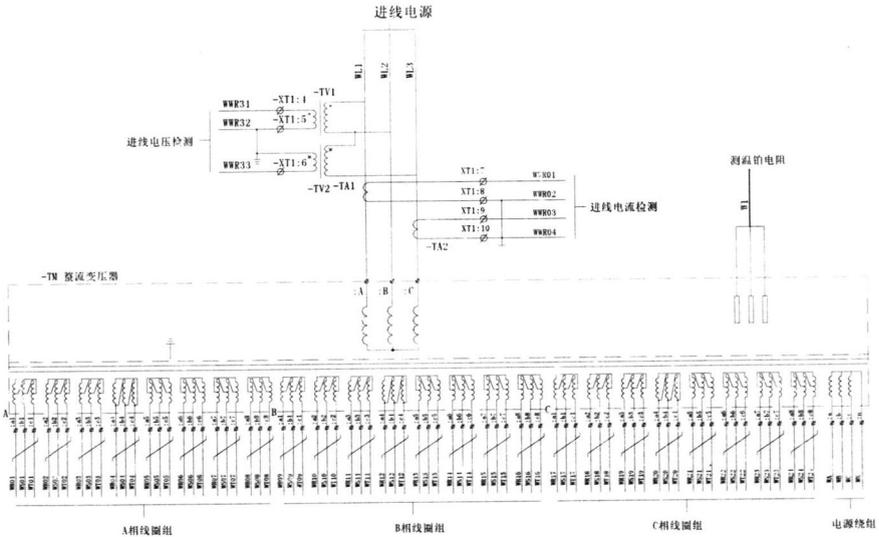


图 4-5 变压器柜示意图

功率柜主要完成对功率单元的组合，重组每个单元的 PWM 波形后，输出高质量的 PWM 波形，如图 4-6:

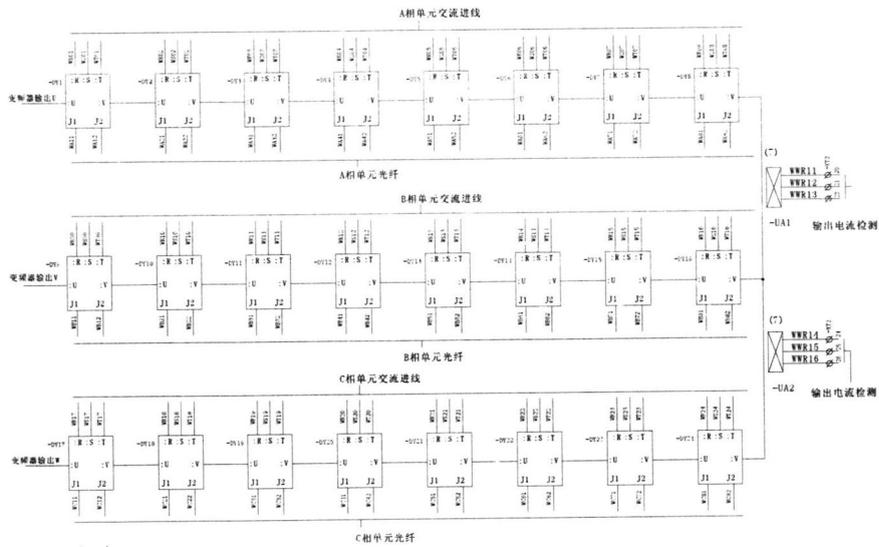


图 4-6 功率柜结构图

如图 4-7，转矩脉动的定量分析如下：

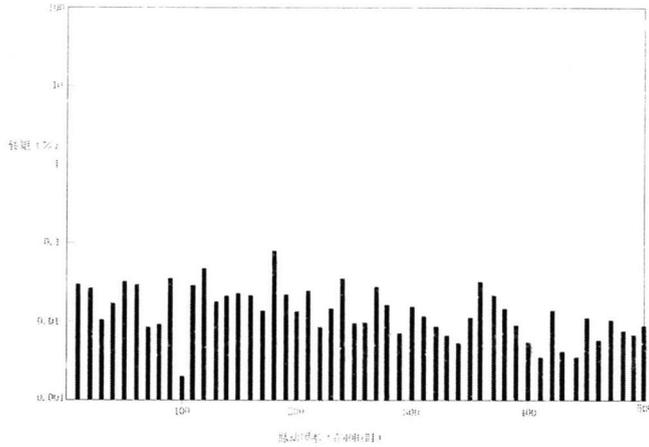


图 4-7 转矩脉动定量分析图

控制柜包括控制器等装置结构，控制器具有优良成熟的算法，以控制电动机达到优良运行性能。人机界面为嵌入式，实现远程监控和网络化控制。控制器包括一台用于处理柜体内开关信号逻辑、现场各种操作信号以及状态信号协调内置 PLC，如 RS485/DCS/Modbus/以太网/Profibus 等，还能够根据用户需要通过扩展控制开关量，从而增强系统灵活性。控制器结构为 VME 标准箱体结构，控制单元板采用 CPLD、FPGA 等表面焊接技术和大规模集成电路，系统具有较高可靠性。功率单元与控制器间采用光纤通讯，低压部分和高压部分完全实现可靠隔离，系统具有很高安全性，并且具有较好的抗电磁干扰性能。采用 I-7033 型温度传感器可以随时监控高压变频器各个部位温度。控制器通讯原理如图 4-8 所示：

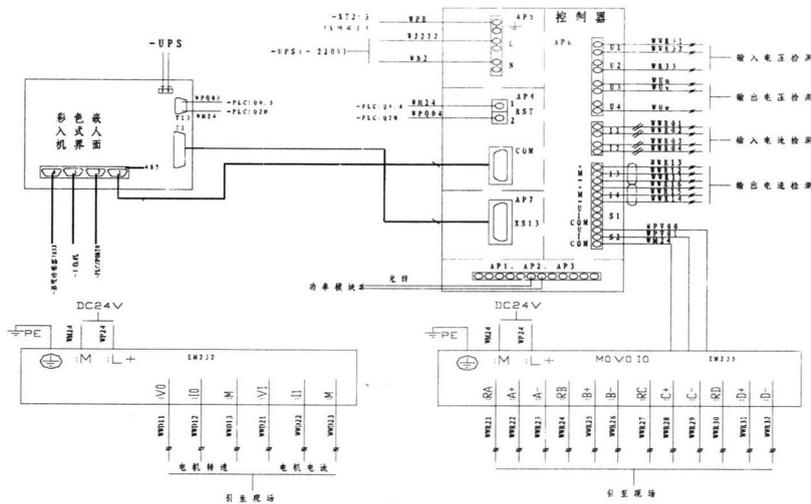


图 4-8 控制器通讯原理图

4.2.2 旁路系统原理介绍

变频改造后的 D、E 磨煤机需装设旁路装置，依据现场实际工况，当机组变频器无法正常工作，需工作人员手动切换或自动切换到工频方式下运行。对于磨煤机负荷来说，手动切换方案为较好的切换方案，自动切换方案存在事故扩大风险。手动一拖一方案，如下图：



图 4-9 手动一拖一方案图

基本原理：此方案是手动旁路的典型方案。原理是由 3 个高压隔离开关和电动机 M、高压开关 QF 组成，如图 4-10。根据控制要求，QS42、QS43 必须存在机械逻辑互锁，即不能同时闭合状态。变频运行时，QS41 和 QS42 处于闭合状态，QS43 处于断开状态。工频运行时，QS43 为闭合状态，QS41、QS42 为断开状态。磨煤机电动机 M、高压断路器 QF 设备为现场原有。

根据我厂现场运行情况，对 D、E 两台磨煤机采用手动一拖二方案，方案如下图所示：

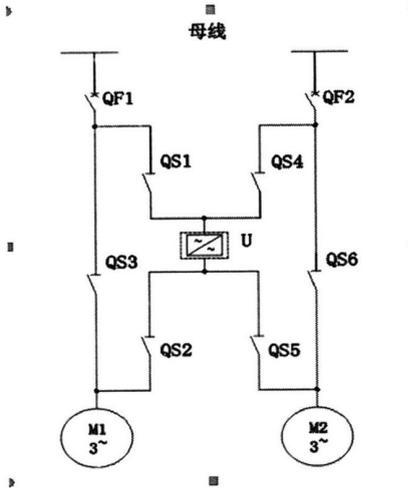


图 4-10 手动一拖二方案

一拖二设计方案的基本原理如下：由 6 个高压隔离开关 QS1-QS6 组成。其中 QS2、QS3、QS5、QS6 装有机电互锁；QS2、QS5、QS4、QS1 有电气互锁。两路电源同时供电时，M1 在变频工作状态，M2 在工频工作状态时，QS3、QS4、QS5 分闸，QS2、QS1、QS6 合闸；M2 在变频工作状态，M1 在工频工作状态时，QS2、QS1、QS6 分闸，QS4、QS5、QS3 合闸。变频器需要检修时，QS3、QS6 可处于任意状态，其余隔离开关都处在分闸状态，两台磨煤机可同时工频运行。当一路断路器检修时，可以通过改变隔离开关状态令任一磨煤机变频运行。

一拖二的工作特点：正常情况下，允许有一台磨煤机工作在变频状态，另一台磨煤机工作在工频状态，也可以两台都在工频状态。

4.3 变频器功能

4.3.1 基本功能及参数

(1) 变频器控制方式：本地控制方式利用变频器操作柜控制按钮由人工就地操作变频器的运行、停止及工况。远方控制方式由本厂 DSC 系统远程遥控。

(2) 故障记录查询：改造后的变频器具有功能查找定位功能，当系统出现故障点时，通过操作界面清晰的反映故障点的具体位置，方便工作人员快速的处理。

(3) 多硬件接口：变频器机柜具有多个数字信号、模拟信号输入输出的接口，方便不同运行工况下的切换。

(4) 故障切除：变频器可实现自诊断、报警、切除故障等功能。变频器对内部任何一个单元的故障或异常都具有报警功能。如，功率元件某相故障时，变频器会自动报警为进相缺相；单元过热时，同样会自动报警；当电力电子器件过热过流受损时将报处驱动故障。如上所述功率元件故障，将使变频器保护装置自动启动，严重时导致变频器旁路元件出发，进而变频器停止工作，操作人员手动切换磨煤机进入工频运行情况。当变频机与主机之间信号传输受阻时，具体表现为功率元件接不到信号或主机接不到信号，变频机停机，触发旁路器件。

(5) 系统报警及故障定位切除由 PLC 板完成，其工作方式如表 4-1 所示。

表 4-1 系统报警及故障处理方式

序号	故障名称	故障描述	处理方式
1	电源故障	电源电压不稳	高压闭合下报警
2	风扇故障	风扇电源空开跳	高压闭合下报警
3	门开故障	机组柜门打开	高压闭合下报警
4	温度过高	变压器温超 130°	高压闭合下延时报警
5	模拟信号断	模拟信号值过低	高压闭合下报警
6	通信故障	通信终断	高压闭合下报警

另外,变频装置还设有、变频器异常运行、旁路故障、电机过载、变频器失电、过流、非全相运行等保护。

(6) 高压变频器参数如表 4-2 所示

表 4-2 高压变频器参数

序号	规范	参数	备注
1	使用标准	Q/CP BLH003-2007	
2	型式及型号	HARSVERT-A06/585	
3	供货商及产地	北京利德华福电气技术有限公司	
4	安装地点	室内	
5	技术方案	多级模块串联,交直交、高高方式	
6	对电动机要求	普通鼠笼式异步电机	
7	额定输入电压/允许变化范围	6kV±10%	
8	变压器调压范围	+5%	
9	系统输出电压	0~6KV	
10	系统输出电流	额定电流	
11	逆变侧最高输出电压	6kV	
12	额定输入频率/允许变化范围	50Hz±10%	
13	额定容量	6750kVA	
14	输入侧功率因数	>0.95 (20%负载以上)	
15	对电网电压波动的敏感性	-35%—+15%	
16	控制方式	多级正弦 PWM 控制	
17	变频器效率	>0.96	
18	动力电源	3 相 4 线 380V, 容量由风机数量决定	供变频散热风机使用, 由用户提供
19	控制电源	一路交流 220V, 一路直流 220V, 容量 不小于 3kVA, 供变频器控制系统使用。	由用户提供
20	电网侧变换器型式及元件	30 脉冲, 二极管三相全桥	
21	电机侧逆变器型式及元件	IGBT 逆变桥 串连	
22	电隔离部分是否采用光纤电缆	采用安捷伦光纤连接	
23	冷却方式	强迫风冷	
24	标准控制连接	硬连接	
25	过程控制方式	开环	
26	操作界面	中文人机界面	
27	防护等级	IP30	
28	柜体摆放方式	并列安装(变频器与旁路柜)	
29	柜体色	HARSVERT 三代标准色	
30	进出线形式	上进出线或下进出线	

4.3.2 变频器和本厂 DCS 接口

(1) 变频器需要输出 6 路开关量提供给 DCS:

- 1) 变频器待机状态: 表明变频器处于待命状态, 具备启动条件。
- 2) 变频器运行状态: 表明变频器在运行状态。
- 3) 变频器控制状态: 节点闭合表示变频器为远程控制; 节点断开表示变频器为就地变频器控制。
- 4) 变频器轻故障: 表明变频器发生轻故障, 仅发出报警。
- 5) 变频器重故障: 表明变频器发生重故障, 变频器将立即切断电源、关断输出。
- 6) 工频旁路运行: 表明电动机此时处于工频旁路运行状态。

以上所列所有数字量均采用无源接点输出, 且定义为接点闭合状态时有效。如无特别注明, 接点容量均为交流 220V、3A/直流 24V, 1A。

(2) 变频器需提供给 DCS 2 路模拟量:

- 1) 变频器的输出转速
- 2) 变频器的输出电动机电流

变频器能够提供由自身供电的带负载能力均为 250Ω 的两路 4~20mA DC 的电流输出。

(3) DCS 提供给变频器 1 路模拟量:

- 1) 变频器的转速设定值

转速由现场 DCS 系统输出, DCS 提供 1 路 DC4-20mA 二线制电流信号, 且带载能力不低于 250Ω 。DC 4-20mA 对应转速的最低和最高限值呈线性关系。

2) DCS 提供给变频器控制器的 2 路开关量:

(a) 电动机启动指令: 无源接点, 3 秒脉冲闭合时有效, 变频器拖动电动机开始启动运行。

(b) 电动机停机指令: 无源接点, 3 秒脉冲闭合时有效, 变频器拖动电动机正常停机。

4.3.3 变频器与高压柜电源接口

(1) 变频器给高压电源柜的 2 路信号:

- 1) 高压断路器紧急断开: 变频器重故障出现时, 自动分断高压断路器, 闭点有效。
- 2) 高压断路器合闸允许: 表明变频器自检已通过, 或者系统处在工频运行状态, 具备高压电源上电条件, 接点闭合时有效。

以上所述数字量用无源干接点输出，且接点闭合时有效。如无特别说明，接点容量全部为直流 220V/3A。

(2) 高压断路器柜提供给变频器 1 路状态信号：

高压断路器分闸：高压开关处于断开位时，辅助节点为闭合位置的信号点。

4.3.4 变频器的系统保护功能

(1) 输入回路浪涌保护。

(2) 功率单元熔断器保护。

(3) 变频装置过电流，过电压，欠电压，变频器缺相，过载，电机过载、变频器过热等保护功能。

1) 过载保护：电动机额定电流的 1.2 倍，10 分钟内允许 1 分钟过载时间，超时限则保护动作。

2) 过压保护。变频器装置检测各个功率模块直流母线电压，当超过额定电压的 1.15 倍时变频器保护动作。本保护实际上等同于包括了电网电压正向波动保护。

3) 过流保护：变频器的输出电流超过电动机额定电流的 1.5 倍，延时 3 秒保护动作；额定电流达到 2 倍，延时 10 微秒保护动作。

4) 欠压保护。变频器装置检测各个功率模块直流母线电压，当低于欠压保护值触发变频器保护动作。本保护相当于包含了电网电压负向波动保护。

5) 超温保护。包括 2 重保护：一是变频调速装置柜体环境温度超温报警；二是整流变压器和电力电子功率器件等发热元件超温（变压器 130℃、功率器件 80℃），触发保护动作。

6) 缺相保护。在每个功率模块上设置有缺相保护。如果变频器输入侧缺相监测系统发出报警信号，则触发保护动作；另外当功率模块保险熔芯熔断缺相时，变频器仅发出报警信号而并不触发保护。

7) 光纤线路故障保护。如果控制器与功率模块间的光纤连接故障，变频器发出报警信号并触发保护。

变频装置还设有隔离变压器超温保护，另外，在躲过激磁涌流前提下，变频器上口高压电源柜须设置速断保护（8-10 倍额定电流）。

4.4 故障定位及清除

变频器系统的硬件组成十分复杂，可能出现的故障种类也很繁多，故必须设定合理的措施手段进行故障处理。对变频系统可能发生的故障类型进行统计，列出主控系统故障和其他常见故障如下。

4.4.1 界面显示常见故障

(1) 电源故障。界面显示：电源掉。可能的原因分析：电源空开跳、电源失电。相应的解决方案：空开合闸、测量输入电源，确认是否失电

(2) 风机故障。界面显示：风机故障。可能的原因分析：机组过热，过热保护动作；风机电源空气开关跳闸；风机装置本身损坏导致保护动作。相应解决方案：过热保护复位；风机电源空气开关合闸；更换风机装置。

(3) 充电失败故障。人机界面显示：充电失败。可能原因分析：充电电源空气开关断开；充电时间不足。相关解决方案：充电电源空气开关合闸。

(4) 功率单元柜温度过高。人机界面显示：单元柜温度过高。可能原因：单元柜滤网堵塞；运行环境温度过高。可采取更换柜体滤网、降低环境温度等措施。

(5) 模拟信号断线故障。报警信息：模拟信号断线。可能原因分析：模拟信号量值低于 4mA。解决方案：检查调整模拟信号输出。

(6) 高压断路器位置异常。报警信息：高压断路器位置异常。原因分析：高压断路器位置信号失去。可通过检查高压断路器位置节点输出解决。

(7) 主回路故障。报警信息：主回路故障。可能原因：高压电源检测信号故障；高压主电源失电。解决方案：检查更换高压电检测回路；恢复高压主回路供电。

4.4.2 主控系统故障

故障按程度分为轻、重故障，按照故障发生地点分为单元故障和系统故障。轻故障，指不影响变频器正常工作，仅仅是出现了异常情况；重故障则是指在变频器运行过程中出现的导致变频器无法正常运行，需停机处理的故障。

(1) 单元过电压故障

可能的原因分析有单元输入电压过高、直流母线充电、控制板卡监测出故障等。对此，可通过如下方案解决，如检查单元输入电压、检查变频器降速时间设置，检查单元波形是否有不正常现象等。

(2) 系统通讯故障

可能原因分析有本单元光纤故障、本单元失电、本单元通信异常等。可通过检查光纤状态、检查单元带电状态等措施排查解决。

4.5 改造后的效益分析

磨煤机系统采用工频运行方式时调节出力时，磨煤机长期工作在电动机功率的效率低点运行，不论工况如何变化，电机均要运行在较高额定转速，导致大量的损耗，包括磨煤机本身运行特性的效率损耗和电动机运行特性的效率损耗，从而造成能量的极大浪费。

如果电动机采用变频器进行变频调节，可直接通过改变频率来调节电动机的转速，进而满足不同负荷工况需求。通过转速调节，能使磨煤机始终保持在近似最佳效率的工况下运行，实现磨煤机能耗的大幅降低，从本角度出发，变频调速的节能效果是比较显著的。变频调速方式线性度很好，同时调速范围宽，变频器本身拖动电动机的效率能达 0.96 以上，且损耗很低，因而不管磨煤机轻载还是满载时都有较高效率。

4.5.1 磨煤机的经济运行分析

根据我厂实际运行经验经试验测定的我厂单台磨煤机加载力、单耗、磨煤机出力关系曲线如下图。

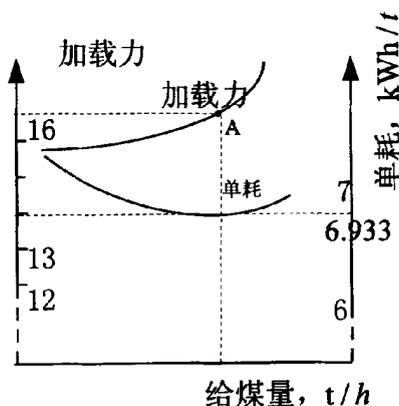


图 4-12 加载力、单耗与给煤量的对应关系

从图中可以得出，当磨煤机工作在最优加载力 A 点时，能够实现最佳单耗运行工况，即最佳节能工况。此时根据试验值最低单耗最低能低至 6.933kwh/t。故通过变频调速可实现最佳加载力运行方式，将带来电能节约。

目前我厂的各个批次煤质情况不一，热值波动情况较大，图 4-13 是我厂 2015 年 2 月各个批次内蒙动力煤的热值波动情况，从中我们不难看出，平均热值为 21.10MJ/Kg，最低热值达到 18.8MJ/Kg，最高热值达到 24.23MJ/Kg，波动幅度达到 25.735%。热值波动直接影响到了负荷稳定，直接导致磨煤机出力波动，即使在发电负荷稳定的运行工况下，磨煤机很难维持在最佳出力状态下运行。

图 4-14 为我厂 2#机组 2014 年 12 月份磨煤机系统电单耗曲线，其中平均值为 8.547kWh/t，最高值为 10.403kWh/t，最低值为 7.20kWh/t，结合最低试验单耗值为 6.933 kWh/t，如能通过磨煤机变频运行使得磨煤机均能够在经济工况下运行，剔除煤质波动影响，实际运行电耗可按照 7.1 kWh/t 计算，可降低电耗 16.934%。

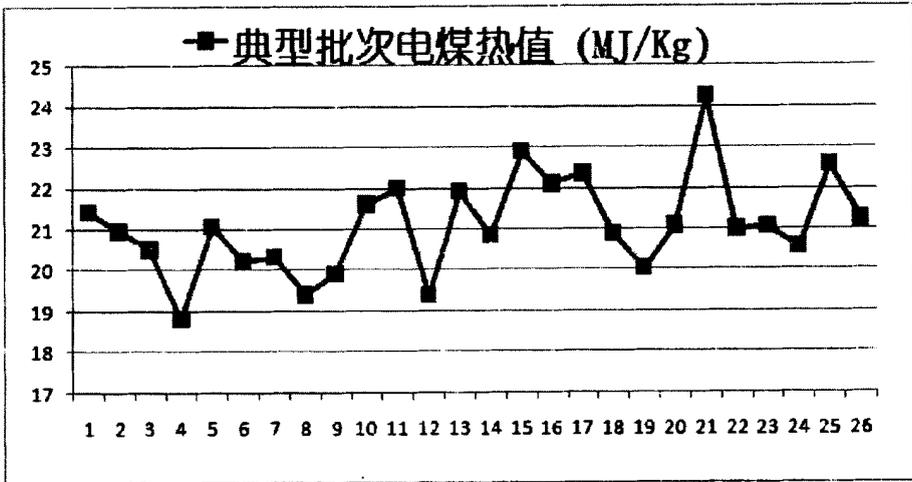


图 4-13 典型批次电煤热值 (Mj/Kg)

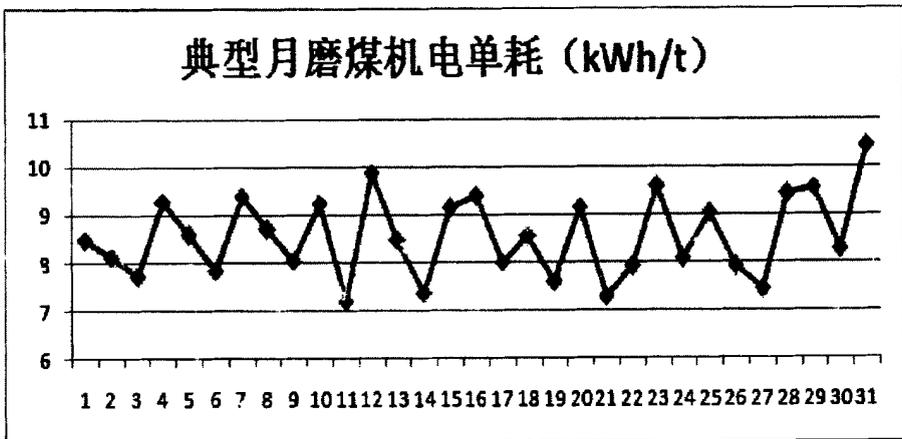


图 4-14 典型月磨煤机电单耗 (kWh/t)

按照该月磨煤机耗电量计算，磨煤机耗电量 61.6026 万 kWh，节电量为：

$$61.603 \times 16.934\% = 10.432 \text{ 万 kWh} \quad (4-5)$$

按照我厂实际上网电价 0.3394 元/kWh，计算，月经济效益为：

$$10.432 \times 0.3394 = 3.541 \text{ 万元} \quad (4-6)$$

每年除去计划检修时间，发电时间按照 12 个月计算，年经济效益为：

$$3.541 \times 12 = 42.792 \text{ 万元} \quad (4-7)$$

按照 5 台磨煤机平均计算，每台磨煤机节电效益可达：

$$42.792 \div 5 = 8.5 \text{ 万元} \quad (4-8)$$

4.5.2 工频状态下的耗电量计算

综合上述数据，结合实际运行参数情况，工频状态下磨煤机现场实际运行参数如表 4-3 所示，现场统计了磨煤机的运行工况、运行时间等大量数据经分析处理，选取了典型的工况进行节能计算：

表 4-3 工频下磨煤机实际运行参数

负荷率 (%)	50%以下	50%-80%	80%以上
运行时间比 (占全年,全年运行时间按 7200 小时计算)	20%	70%	10%
对应运行时间(小时/年)	1440	5040	720
电网实际电压 (kV)	6.3	6.3	6.3
电机运行电流平均值 (A)	17.56	29.86	39.87
功率因数	0.8	0.8	0.8

结合表 4-7 计算工频下磨煤机的总耗电量，电机耗电功率计算公式及累计年耗电量公式分别如式(4-9)、(4-10)所示。

$$P_d = \sqrt{3} \times U \times I \times \cos\varphi \quad (4-9)$$

$$C_d = T \times \sum (P_d \times \delta) \quad (4-10)$$

上式中， P_d ：电动机功率； C_d ：年耗电量值； U ：变频器网侧输入电压； I ：变频器网侧输入电流； $\cos\varphi$ ：功率因数； T ：年运行小时； δ ：负荷工况运行时间所占百分比。

计算所得结果如下表所示。

表 4-4 磨煤机工频运行年耗电量计算

磨煤机负载工况	磨煤机工频运行功率 $P_d(\text{kW})$	电耗 (kWh)
50%以下负荷	153.25	220675
50%-80%负荷	260.63	1313579
80%以上负荷	348.05	250597
总耗电量		1784852

4.5.3 变频状态下的年耗电量计算

变频状态下磨煤机现场实际运行参数如表 4-5 所示。

表 4-5 变频下磨煤机实际运行参数

负荷率 (%)	50%以下	50%-80%	80%以上
运行时间比 (占全年, 全年运行时间按 7200 小时计算)	20%	70%	10%
对应运行时间(小时/年)	1440	5040	720
电网实际电压 (kV)	6.3	6.3	6.3
电机实际运行电流 (A)	11.39	20.73	31
功率因数	0.95	0.95	0.95

结合表 4-5 计算工频下磨煤机的总耗电量, 计算结果如表 4-6 所示。

表 4-6 磨煤机变频运行年耗电量

磨煤机负载工况	磨煤机工频运行功率 Pd(kW)	电耗 (kWh)
50%以下负荷	118.12	170093.9
50%-80%负荷	214.89	1083030
80%以上负荷	321.40	231405.2
总耗电量		1484529

综上, 年节约总电量为 $1784852-1484529=300323.2\text{kWh}$, 按照我厂上网电价 0.3394元/kWh 计算, 年节能效益为 $300323.2\text{kWh}\times 0.3394\text{元/kWh}=10.19\text{万元}$ 。

实际计算数据与前面的理论分析数据基本吻合。由此可见, 经过变频改造后的磨煤机给首钢电厂带来了较为明显的经济效益, 同时变频改造后的磨煤机出力较为灵活, 变化范围大, 在我厂参与调峰或磨煤机出现短时检修的情况时, 能够保证总机组出力, 同时在冬季供暖期, 也能够保证用电、抽汽量需求。

4.5.4 磨煤机变频改造的间接效益

首钢发电厂每台发电机组配置有 A、B、C、D、E 5 台磨煤机, 将其中一台磨煤机改为变频调速机组, 如此便可当负荷大幅度波动需总机组出力较高时, 通过四台磨煤机满负荷运行实现, 当机组总出力下降时, 可通过调节一台变频调速机组实现总出力的下降同时保证高效率低负载运行, 实现节能减排。除此之外, 磨煤机变频改造创造诸多间接效益。

(1) 增加磨煤机出力

冬期供热期间, 需要额外提供供热抽汽, 当电煤热值不能保证时, 每吨劣质煤产生主蒸汽量为 3.5t , 抽汽工况下按照每 3t/MWh 的汽耗率计算, 一台 300MW 的发电机额定负荷工况下蒸汽量需求为 $3\times 300=900\text{t/h}$, 换算成给煤量即 $900\div 3.5=257.1\text{t/h}$ 。5 台磨煤机全部投运, 则每台磨煤机出力为 $257.1\div 5=51.4\text{t/h}$, 而我厂磨煤机的保证出力为 51.5t/h 。根据现场实际运行情况以及磨煤机运行经验, 如已

运行的磨煤机的达到 80%负载率时,第二、三台磨煤机相继投入运行,则 $51.5 \times 5 \times 0.8 = 206 \text{t/h}$, $206 \div 257.1 = 0.801$, 即当带 80%的发电机负荷即 240MW 时,5 台磨煤机就已经全部投入运行。加之煤质较差工况下,磨煤机因部件易损而导致故障率上升,停磨将大幅影响发电机负荷和发电量,假设 1 台磨煤机故障停机检修,那么即便剩余 4 台磨煤机按最大出力计,有 $51.5 \times 4 = 206 \text{t/h}$, $206 \div 257.1 = 0.801$,也只能带 80.1%的负荷。因此,增加磨煤机出力变得尤为重要。在磨煤机处理不足时,在磨煤机的可承受限度内,通过变频超速运行将磨煤机转速提高至额定转速的 110%,根据相关文献同类型磨煤机组能超速 15%额定转速安全运行。通过变频调整,至少能实现单台磨煤机增加 10%给煤出力,大大提升了发电负荷的调整灵活性,增加了发电量,从而创造经济效益。

(2) 实现锅炉无助然点火

当锅炉均配备高能点火装置,实际上具备了锅炉无助然点火能力,但由于锅炉磨煤机最低出力限制,最低出力为 13 吨,在机组启动时,受锅炉升温速率的限制,锅炉无法实现无助然点火,必须通过投助燃燃料助然点火。国内大部分机组用重油作为助燃燃料,机组启动一次仅助燃用油就需花费约 10 万元的费用。我厂用焦炉煤气点火,一次点火用焦炉煤气 8 小时消耗焦炉煤气 80km^3 ,按照 $408 \text{元}/\text{km}^3$ 计算,需花费约 32640 元。按照本文理论及方案加装变频器技术改造后,实现了磨煤机变频运行,可突破台磨煤机最低出力限制,降低磨煤机出力,合理调整燃料量,得以能够严格按照锅炉温升曲线实现锅炉无助燃燃料点火。节省的助燃燃料费用将为电厂创造出重大的经济效益,而磨煤机变频改造为进步实现锅炉无助然点火创造了有利条件(根据相关文献资料,国内已有电厂实现无油点火)。

(3) 降低检修成本

根据我厂目前的磨煤机检修现状,单台磨煤机单个磨辊辊套的补焊费用为 0.8 万元/个次,补焊周期基本为 0.5 年,更换辊套的周期为 3 年,新辊套更换费用为 6.7 万元/个,相当于但台磨煤机辊套费用支出每年为 $(0.8 \times 3 \times 5 + 6.7 \times 3) / 3 = 10.7$ 万元,可见费用较为可观。在工频运行的负载调整方式下,磨煤机低负载运行时,因原煤厚度过薄,大大加快了磨辊滚套的磨损。而恒加载力变频运行时,通过控制给煤量基本保证了磨辊与磨盘间一定的原煤厚度,通过降低转速,而使辊套磨损得以缓解,除此之外,同时降低了磨煤机的低负荷振动,大大降低磨煤机噪音污染。

综上所述,磨煤机实现变频调速,除通过节电创造经济效益之外,还有诸多优势:大大降低了大功率电动机启动冲击力矩损坏电机的程度。电动机和磨煤机检修周期得以延长,从而降低检修维护工作量。改善了磨煤机的运行参数,运行效率得以提高。功率因数大幅度提高,降低了无功补偿装置投资。实现了空载平滑启动,降低了启动峰值电流和持续时间,减缓了由于较大电动力矩造成对电机的机械冲击

及因大启动电流造成的绝缘老化，延长设备寿命。

4.6 本章小结

本章首先介绍了首钢热电厂进行变频改造所采用的变频器型号，后围绕该变频器的主要元件进行了原理介绍，并逐次介绍了变频器的主要功能及多种情况下的故障定位清除原理，最后分析并计算了变频改造后的电厂效益，证明了首钢电厂的变频改造能够为本厂带来一定的经济效益。

第5章 总结

本文结合首钢发电厂的实际运行情况,讨论了高压变频技术应用于火力发电厂磨煤机改造的意义及相关方案,阐述了变频技术对国家节能减排工作的重要意义。本文从实际工况入手,先后介绍了发电厂实际工作过程中的节能切入点以及相应的高压变频方案。具体工作总结如下:

(1) 首先分别从电厂结构、制粉磨煤系统及发电厂磨煤机电机几个角度进行了分析介绍,并系统地介绍了磨煤机运行调整理论,在此基础上对磨煤机的变频改造方案进行了分析。

(2) 结合异步机的调速原理分析了调极对数、调转差率、调频等几种方案实现异步机调速,并重点针对变频调速进行了原理分析,结合首钢电厂提出了变频改造的方案。

(3) 在变频改造方案的基础上分析了首钢电厂所应用的变频器的结构及原理,结合本厂机组的实际情况阐述了变频改造中与现场设备的安装、接口方式,基于变频器的功能针对部分故障进行讨论,分析了其定位清除故障的能力。最后计算给出了磨煤机实现变频改造给首钢电厂产生的经济效益。

参考文献

- [1] 周渝慧. 智能电网—21 世纪国际能源新战略. 北京: 清华大学出版社, 北京交通大学出版社, 2009,10:1-5
- [2] 竺伟, 陈伯时. 高压变频调速技术[J]. 电工技术杂志, 1999 (3): 26~28
- [3] 吴海, 杜博学. 变频控制技术在发电厂炉膛压力调节系统的应用. 科技资讯, 2008,23
- [4] 苏彦民等. 交流调速系统的控制策略[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994
- [5] 魏红友, 杨海燕. 电厂锅炉鼓风、引风机变频控制系统方案. 广东科技, 2008,3:122-122
- [6] 向立清. 变频调速在电厂中的节能应用. 中国高新技术企业. 2009,1: 57-59
- [7] 戚立民, 王志新, 任伟东, 武海. 高压变频器在热电厂的应用. 2006,2: 19-20
- [8] 胡崇岳. 现代交流调速技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998
- [9] 贾贵玺, 张陈堂. 高压变频调速技术的应用及其研究[J]. 电气传动, 1999, 24 (4): 14~17
- [10] Jain A K. Fundamentals of Digital Image Processing. N.J: Prentice-Hall. 1989
- [11] Ballard D H, Brown C M. Computer Vision. Englewood Cliffs N.J : Prentice-Hall
- [12] M. Kaufhod. Electrical Stress and Failure Mechanism of the Winding Insulation in PWM-Inverter-Fed Low-Voltage Induction Motors [G]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47 (2) : 396~402
- [13] Parker J R. Algorithms For Image Processing and Computer Vision. John Wiley and Sons, 1997
- [14] Yifang Tang. Analysis of Steep-Fronted Voltage Distribution and Turn Insulation Failure in Inverter-Fed Form-Wound AC Motor [G]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 34 (5): 1088~1096
- [15] The Math Works Inc. Image Processing Toolbox User's Guide, Version 2, 1997
- [16] HuMK. Visual Pattern Recognition by Moment Invariants. IRE Transactions on Information Theory, 1962, IT-8: 179 —187
- [17] D.A. Rendusara, P.N. Enjeti. An improved inverter output filter configuration reduces common and differential modes dv/dt at the motor terminals in PWM drive systems [G]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 13(6): 1135~1143
- [18] 范锡普. 发电厂电气部分. 北京: 中国电力出版社, 1995, 1~84

- [19]朱能飞.电气监控在 DCS 中的应用.电力自动化设备,1999,19(6):75~76
- [20]夏德海.现场总线技术.北京:中国电力出版社,2003,302~304
- [21]李子连.现场总线技术在电厂应用综论.北京:中国电力出版社,2002,3~81
- [22]王洋,王宁会,赵志斌.基于 CAN 总线的火电厂静电除尘器监控系统设计与应用.电力系统自动化,2002,26(23):48~50
- [23]洪宪平.大型火电厂厂级网络总体设计和应用.电力系统自动化,2000,24(20):41~44
- [24]薛葵.发电厂电气监控系统.电力系统装备,2002(1):72~73
- [25]蒙宁海.火电厂厂用电系统监控方案的探讨.广西电力,2003,26(2):44~47
- [26]郭长友.发电厂厂用电保护与录波监控系统的研究:[硕士学位论文].济南:山东大学电气工程系,2002
- [27]范辉,路学谦.电气监控系统纳入 DCS 的几点体会.电力自动化设备,2001,21(3):52~54
- [28]高鹏,安涛,寇怀成.Protel99 入门与提高.北京:人民邮电出版社,2002,1~393
- [29]张举.微机型继电保护设备原理与运行.天津:天津科学技术出版社,1996,1~79
- [30]陈德树.计算机继电保护原理与技术.北京:水利电力出版社,1992,131~153
- [31]张国江,张鹏翔,刘炳旭.用于中小型发电厂的数据采集系统—总体结构及功能概述.电力自动化设备,2000,20(2):37~40
- [32]赵松,尹传平,林孝康.局域网技术与发展.电力系统自动化,2001,(9):68-72
- [33]张劲松.火力发电厂 6kV 电气自动化系统方案的探讨.自动化仪表,2000,21(11):43~55
- [34]曲延滨,王建平,周庆明.基于 CAN 总线和 DSP 的变电站监控系统.电力系统自动化,2003,27(12):86~89
- [35]Xiaoyang Tong,Guangchun Zhang,Siyi Zou,Guangning Wu.The design and realization of multiple DSP distribution insulation on-line monitor system based on CAN bus. Electric Power Automation,2003,27(1):57~60
- [36]MPC555/556 USER'S MANUAL. Motorola Revised,15 October 2000 ADS8364 Data Sheet U.S.A. Texas Instruments, JUNE 2002
- [37]刘书明,聂丽斌,余爱民.ADS8364 的原理及应用.国外电子元器件,2002,(10):43~45

- [38]殷骏.无功自动调控装置在 AVC 系统中的应用. 华东电力, 第 33 卷第 9 期, 2005 年 9 月
- [39]印江, 冯江涛编著.电厂分散控制系统. 中国电力出版社 2006
- [40]李端超, 陈实等.安徽电网自动电压控制(AVC)系统设计与实现.电力系统自动化.第 28 卷第 8 期, 2004 年 4 月 25 日
- [41]张继芬, 危剑鸣等.电网自动电压控制在大型火电厂的设计与实现.电力设计
- [42]袁季修.电力系统安全稳定控制.北京: 中国电力出版社.1996
- [43]方朝雄, 林玉琳, 苏毅.福建电网自动电压控制系统技术实现探讨.福建电力与电工, 第 22 卷第 4 期, 2002 年 12 月
- [44]邓秋娥.通用可视化软件平台线路保护系统的研究.华北电力大学硕士论文
- [45]张红跃.基于图形化编程技术的中压线路保护装置的研制.华北电力大学硕士论文
- [46]倪林林.可编程序高速控制器—PHS 功能块语言.水利电力部电力科学研究院系统所.1986, 9
- [47]郭福帅.基于 IEC61131-3 标准的可编程控制器研究与实现.大连理工大学硕士论文
- [48]葛益军.基于 IEC61131-3 的编程系统的研究.浙江大学硕士学位论文
- [49]新华工程公司.XDPS 标准功能块手册和利时的功能块手册
- [50]Prabha Kundur. Power System Stability and Control(电力系统稳定与控制). 北京: 中国电力出版社, 2002
- [51]金以慧.过程控制.北京.清华大学出版社.1993
- [52]Ziegler J.G,Nichols NB.Optimum settings for automatic controllers. Transaction of ASME,1942,64:759~768
- [53]刘金琨著.先进 PID 控制 MATLAB 仿真.北京-电子工业出版社. 2004
- [54]Kofahl R.Self-tuning of PID controllers based on process parameter estimation. Journal A. 1986(3): 302~308
- [55]Christian Diedrich,Rent Simon,Matthias Redl. Engineering of Distributed Control Systems.2000 IEEE.ISIE2000,Cholula,Puebla,Mexico
- [56]刘志超, 丁建明等. 基于以太网的分布式发电厂电气控制系统的实现电力系统自动化. 2004 年 4 月 25 日. 第 28 卷第 8 期
- [57]PLE 简介. 北京四方继保自动化股份有限公司
- [58]京唐热电厂#3、#4 机组自动电压控制(AVC)技术方案

在学期间发表的学术论文和参加的科研情况

(一) 发表的学术论文

- [1] 李兆丰. 火电机组引风机变频调速与小汽机调速经济分析[J]. 企业家天地, 2014, 第 8 期
- [2] 李兆丰. ABB Unitrol 5000 发电机励磁系统应用中的故障分析[J]. 城市建设理论研究, 2012, 第 34 期

致 谢

本文是在张海波与沈军老师的精心指导与亲切关怀下完成的。张海波老师在工作中仔细认真的科学态度，丰富的工作经验，给了我许多指导性的帮助，使我顺利完成工作。在研究生学习期间，沈军老师耐心细致地指导学习，在论文完成期间，沈军老师给予了大量的工程实践方面的指导，提供了多方面的参考学习资料，使我的论文得以顺利完成。

本课题的研究工作还得到了电力工程系许多老师的大力支持，在此对帮助过我的各位老师表示深深的感谢！

感谢在百忙之中评阅论文和参加答辩的各位专家、教授！

作者简介

李兆丰(1984-),男,华北电力大学(北京)工程硕士研究生,电气工程师,现任首钢京唐公司能源与环境部热电分厂电气专业工程师,从事发电厂电气技术管理工作。

(1) 个人简历:

1984年10月11日出生于河北省大城县。

2003年7月考入燕山大学电气工程学院电气工程及其自动化专业,2007年7月本科毕业并获得工学学士学位。

2011年5月—2015年6月在华北电力大学电气与电子工程院电气工程学科学习。

(2) 获奖情况:

2011年5月,获得2010年度首钢系统“达标创优”竞赛“首钢优秀团员”。

2013年4月,获得首钢京唐公司2013年“降本增效做贡献”劳动竞赛“先进个人”。

2014年8月,获得首钢京唐公司2014年“精细化管理上水平,扭亏增效立新功”劳动竞赛“先进个人”。

(3) 工作经历:

2007年7月-2008年6月,于北京首钢超群电力有限公司,任职电气专业员。

2008年6月-2009年8月,于首钢京唐公司2×300MW自备电站建设项目部,任职电气工程师。

2009年9月至今,于首钢京唐公司能源与环境部热电分厂,任职电气专业工程师。