

提升创新能力 加快科学发展

——2009年成都市科学技术年会优秀论文集

TISHENG CHUANGXIN NENGLI JIAKUAI KEXUE FAZHAN

——2009NIAN CHENGDUSHI

KEXUE JISHU NIANHUI YOUXIU LUNWENJI

成都市科学技术协会 主编



电子科技大学出版社

提升创新能力 加快科学发展

——2009年成都市科学技术年会优秀论文集

TISHENG CHUANGXIN NENGLI JIAKUAI KEXUE FAZHAN

—2009NIAN CHENGDU SHI

KEXUE JISHU NIANHUI YOUNG LU XWENJI

成都市科学技术协会 主编



电子科技大学出版社



图书在版编目 (CIP) 数据

提升创新能力 加快科学发展: 2009 年成都市科学技术
术年会优秀论文集 / 成都市科学技术协会主编. —成都: 电子
科技大学出版社, 2010. 1

ISBN 978-7-5647-0436-0

I. 提… II. 成… III. 科学技术—学术会议—中国—文
集 IV. N53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 009270 号

提升创新能力 加快科学发展

——2009年成都市科学技术年会优秀论文集

成都市科学技术协会 主编

出 版: 电子科技大学出版社 (成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦 邮编: 610051)

策划编辑: 徐 红

责任编辑: 徐 红

主 页: www.uestcp.com.cn

电子邮箱: uestcp@uestcp.com.cn

发 行: 新华书店经销

印 刷: 成都蜀通印务有限责任公司

成品尺寸: 170mm×230mm 印张 12.75 字数 249 千字

版 次: 2010 年 1 月第一版

印 次: 2010 年 1 月第一次印刷

书 号: ISBN 978-7-5647-0436-0

定 价: 28.00 元

■ 版权所有 侵权必究 ■

◆ 本社发行部电话: 028-83202463; 本社邮购电话: 028-83208003。

◆ 本书如有缺页、破损、装订错误, 请寄回印刷厂调换。

序

为了深入贯彻落实科学发展观，全力推进城乡综合配套改革试验区建设，由成都市人民政府主办，成都市科学技术协会、成都市科学技术局、成都市社会科学界联合会、中国科学院成都分院承办的“2009年成都市科学技术年会”于2009年8月28日到9月30日在成都市召开。

在本届科学技术年会期间，成都市有关单位、大专院校、科研院所，市级学会、企事业科协、区（市）县科协围绕统筹城乡科学发展总体战略，突出“提升创新能力，加快科学发展”主题，举办了17个学术分会场活动、14个重点学术活动及22项科普活动，交流学术论文1500多篇，举办科普报告、科技知识培训班200多场，全方位提升了成都的城市品位和文明程度。

在此，我们在交流的论文中选出了33篇汇编成集，一方面供大家相互借鉴、相互启迪，另一方面更希望能借此方式进一步促进成都市科技创新和学科发展，以此推动成都市一年一度的科学技术年会的举办，使之成为传播科技知识、光大科学精神的盛会！

2009年成都市科学技术年会组委会

2009年12月

目 录

建设坚强的智能风力发电网	吴加林 1
变频技术在设备改造中的应用	陈宇宁 6
关于泵站改造中电气设计的几个关键问题的论述	刘 星 15
电子工业企业节能降耗工作交流与探讨	王宇明 21
降低企业综合能耗的实践	周维祥 25
成都地区铸造业发展概况综述及建议	刘益洲 31
IGBT 直接串联高压变频器分析	吴加林 33
国内高压大功率变频器的技术与进步	崔 杨 39
系统工程的典范 可持续发展的奇迹——中国都江堰与法国罗纳河的启示	陈永武 45
发展绿色混凝土 走进建材建筑业发展的新时代	范峥嵘 59
关于灾后农村生态环境建设的一些建议	段益生 63
节能减排“三全”行动	闫廷满 67
金堂县丘区农业机械化发展的探索	彭世选 78
四川省生物经济基础、现状和发展路径研究	李后卿 84
四川公众生物科学素养及生物经济发展的调查与分析研究	杨国军 88
关于提高房屋抵抗地震破坏能力的建议——汶川大地震的反思	林 颖 98
汶川地震后应当注意的三个问题	洪时中 101
我国核电现状及其发展前景	刘绍孔 105
关于推进武侯区科技产业跨越式发展的对策建议	成都市武侯区老科技工作者协会 107
新能源与节能技术概论	张晋宾 周四维 116
灾后生态家园重建与人居环境艺术研究	刘玉成 125
关于灾后四川高技术产业布局的思考	杨振中 130
四川灾后重建中几个值得注意的问题	曾祥基 熊之林 李祚炳 135
四川地区 131 例慢性乙肝病毒携带者肝活检病理分析	张 鸿 刘大风 高峰 张人凤 金 鸿 刘亚玲 王 林 142

复治后耐多药结核病治疗分析	付 毅 陈洪德 吴桂辉	147
甲型 H ₁ N ₁ 流感院前转运临床路径探讨毛碧容 袁家天 陈仕晓 王 丽 田 浩 辛 隽		152
初治菌阳肺结核合并糖尿病 67 例不同降糖疗法临床分析岳 冀 李 熙 李 曦 周小飞 何钟宓 兰 华 田 明 雷 蓉		157
中医药治疗肺结核的现状 & 展望	李继科	161
慢性乙肝病毒携带者肝脏病理与病毒学指标的相关性分析刘大凤 王 林 刘亚玲 陈 红 高 峰 张 鸿 黄 勃		166
中国内地首例输入性甲型 H ₁ N ₁ 流感诊治经过及文献复习刘亚玲 陈 红 何盛华 曾义岚 温贤敏 吴 俭		175
成都市高校学生结核病防治信息获取途径效果分析田 明 潘 蓉 付 莉 陈 怡		180
中国内地首例甲型 H ₁ N ₁ 流感病人 115 例密切接触者医学观察分析王 林 林如平 秦小荣 黎举红 曹文萍 刘大凤		185
四川地震灾区结核病 56 例救治体会	吴桂辉 陈雪融 付 毅 肖 军 陈 蕾 岳 冀 唐晓燕 段荫乔 王佑娟	191

建设坚强的智能风力发电网

吴加林

(佳灵电气制造有限公司)

尽管去年发生了金融危机，但风力发电的建设在中国却仍然如火如荼，呈现出前所未有的繁荣景象。无论投资者、决策者，还是经营者心中都隐含着不小的担忧，国产风电行业缺乏自主知识产权和核心技术，投资高、收益低、风险高、可靠性低、有效运行时间不长、电能质量不稳定因素的影响，并网及长距离传输困难等因素，制约了风电建设的发展。问题的严重性不仅如此，国外还对我们进行封锁，而我们非常崇拜的技术真就那么先进完善吗？我们就引进国外技术生产建设的国内风电现状进行简单的探讨。

一、现行风力发电系统存在的主要问题

(一) 系统整体效率低

传统风电场整体发电运行效率低，输出功率的有效时间每年只有 2000 多小时，不到全年 8760 小时的 30%，即便在这么短的有效时间里，真正能发挥功率的时候也不到 10%，其余时间发电机的效率大部分在 35% 左右。据有关部门对现行风电场调查统计的概率如图 1 所示。目前国内引进的机型主要为双馈和永磁直驱。双馈齿轮箱就吃掉 10%，转速范围窄，在低于额定转速 1/5 时就不能并网发电，小风不能发电，甚至反过来靠电网拖着转，齿轮箱在冬天还要靠电加热。永磁直驱的传动效率比双馈有所提高但仍存在启动阻力矩较大，不能真正做到微风发电，控制和调节过程中仍可能出现倒拖的问题，所以现行的风电系统整体效率极低。

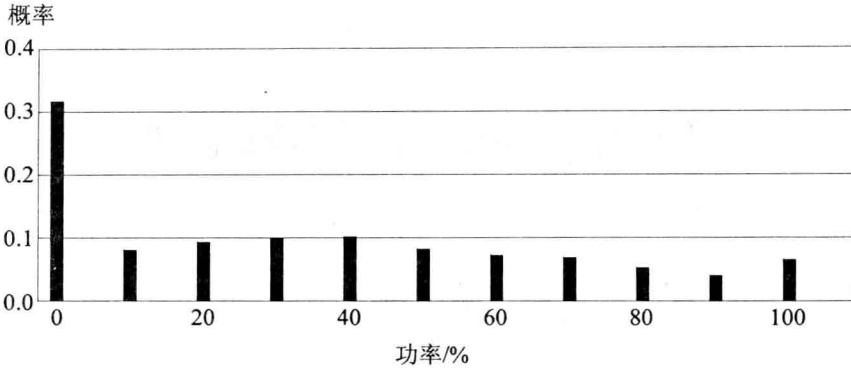


图1 某风电场输出功率的概率分布图

(二) 无功消耗大、系统稳定性差

目前大功率并网性机组，不管是双馈或直驱，采用 690 伏电压，每台机组带一套变流器，后面再挂一个箱式变压器。发电功率很小或不发电时，变流器、变压器常年挂网运行，使整个风电场需要实时补偿大量无功能量。由于风力的不稳定特性，使风力发电机会频繁的投入和退出，风力发电场的输电网是一个有限的小电网，某一机组的进退都会严重影响电压的波动，而电网却又不允许电压出现较大的波动，于是只有加大变流器的无功补偿和电压稳定能力，这无疑又加大了变流器的成本和有功的消耗，即使这样仍然满足不了并网的无功需要。所以各风电场毫无例外地还要配备高压动态无功补偿装置，所以现行的这种风力发电网是低效、脆弱及极不可靠的系统。

(三) 输电损耗大、海上远距离交流传输更困难

单机功率越来越大，传输距离越来越远，传输的损耗更为显著。海上风力发电并网后向陆地远距离交流输电过程中存在因输电电缆内部的屏蔽层和电线之间的电容效应，通过导体和电缆屏蔽层的电流大大增加，使线损及无功损耗非常大，无法实现远距离高压交流输送电能。另外，由于变化的风力负载导致传输线上的电压波动，直接影响就近的电力用户。中国风能资源的 70% 在近海，离陆地愈远，风能愈好，而海上风力发电机的发电时间可比陆地发电时间增加 1000~2000 小时，所以海上风电的高效传输是决定海上风电发展的重大关键技术。

(四) 成本高昂、系统复杂、维护困难、可靠性差

每台风力发电机都要配一套四象限的变流器，其控制要求很高，如果再配上容易损坏的效率不高的升速箱，价格不菲，而一旦出现故障，将付出很高的费用。实际上我们还是用常规传统的电网观念来建设现代风力发电网。风力发电分布范围广，

大多在交通不便的地方，而海上风力发电维护费用就更高，这就必然要求风力发电系统应该简单可靠、免维护、高效率、低成本。

（五）风电与大电网的连接还没准备好

由于风电的比例过去都很小，电网规划与建设都没有特别注意是很正常的。现有电网设计是以传统电力输送为主，大多没有考虑风电上网的情况，而且电网是专网专用，用现有的电网接纳风电，在风电高速发展并占到越来越大的比例时，矛盾就尤为突出；由于风电的不稳定，不受控，风力发电区与用户区相隔遥远，远程大容量稳定传输有很多问题需要解决。

二、建设坚强的智能风力发电网

（一）高效的坚强的智能风力发电网技术

引进使我们学会了走路，但创新才能使我们超越。既然现行风力发电存在如此众多问题，再如此投入巨资着实令人担忧，但能否迅速改变这种局面，建设一种有别于传统风力发电机系统，其技术先进，效率高、成本低、可靠性高、投资少的风力发电机技术呢？成都佳灵电气制造有限公司经过十多年的潜心研究，推出的新方案可以大幅降低系统成本，输出电能质量稳定，解决风电目前长距离海上输送存在的技术瓶颈和高质量并网的难题，在现有装机条件下大量增加发电输出量，可对电力主网提供无功补偿，取消传统风电场的无功补偿设备和大量的箱变设备，实现低、高风速条件下都能高效、稳定发电运行。

所谓坚强的智能风力发电网是一种新型高压直流集中逆变隔离型直驱风力发电系统，具有四大特征，即高效传动、单向并网、高压直流、集中逆变。

该系统解决了现有双馈或直驱风力发电两种方案的共同缺点，即风电场需要补偿大量无功能量，并大量地消耗有功能量，电网电压波动，出现闪变的缺点。

该系统成本降低、可靠性提高、发电量增大、自身损耗减小，与现在的两种方案相比有明显进步。实现海上远距离安全高效传输，有利于大小风电场，特别是海上风电场的并网。

本方案采用高压直流输电，直流侧无无功补偿，发电系统不存在倒流。高压直流远距离输电，线损小、系统极其稳定，特别是该系统的投资成本大幅减少，对 100 兆瓦级风电场，至少可多发电 20%，还可节约投资 1 亿元以上。

（二）坚强的智能风力发电网系统构成原理及特点简述

1. 坚强的智能风力发电网系统构成原理

坚强的智能风力发电网系统构成原理，如图 2 所示。

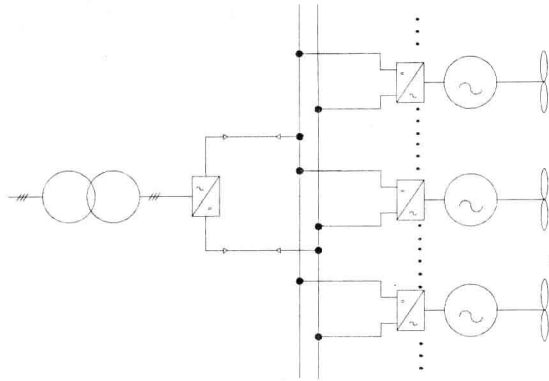


图2 坚强的风力发电网系统图

2. 坚强的智能风力发电网系统特点

(1) 高效传动。甩掉齿轮箱，扩大风速利用范围是实现高效传动的关键。本人认为直驱同步发电机与永磁直驱同步发电机都可应用于未来的风电场，而直驱同步发电机比永磁直驱同步发电机可能更胜一筹。因永磁同步发电机内部有永磁体，其启动阻力矩较同步发电机大，在微风时桨叶启动困难，有效发电时间被大大缩短，不但不发电，还消耗电能。而直驱同步发电机启动阻力矩非常小，在低风速时，桨叶启动容易并且可以调整励磁电流使输出电压符合高压直流传输功率。即使在风力小时，也不会出现倒拖，让电网提供无功能量，消耗有功能量，而增加损耗。直驱同步电机也可取消滑环，采用无刷励磁，这样就与永磁直驱发电机几乎同样坚固，但减少了启动阻力矩，真正的实现微风也能发电，同时通过调节励磁就可调节输出功率、输出电压，这对降低成本，提高效率及安全可靠性具有重大意义。

(2) 单向并网。单向并网彻底消除了有功倒流、无功不稳定、闪变等问题并使并网操作不再需要。交流电并网三要素电压、频率、相位必须同时达到一致才能并网，低风速时很难做到这一点，在风力发电机不断的投入和切出中浪费了很多的发电机会。在本方案提出的新系统中，直驱同步发电机的输出经过整流器整流后，变成高压直流电，其输出整流二极管因单向导通性能，在发电机输出电压不足时具有和直流母线隔离的作用，在不发电时不存在能量倒流问题，供电系统不需提供无功能量，发电机随时挂在网上，有风就发，风大多发，风小少发，只要控制在系统允许的发电功率范围内即可。这当然就不存在并网操作了，同时多发电自然是显而易见的。

(3) 高压直流。功率更大、距离更远、环境更复杂的高压直流输电是风力发电的最佳传输模式。把每个独立发电机输出的电能直接变成高压直流电，然后汇在一起构成直流输电系统，可以克服传统海上风力发电并网后向陆地远距离交流输电过

程中，因输电电缆内部的屏蔽层和导体之间的电容效应、导体和电缆屏蔽层间形成大量的漏电流使线损及无功损耗非常大，无法实现远距离高压交流输送电能的难题。这种集中直流高压传输方式彻底消除了无功和并网问题，提高了电网传输的可靠性，减少了输电系统的能耗。根据传输的功率和距离，目前可优选的电压等级有 20kV~180kV。

(4) 集中逆变。风电场与电网连接的枢纽是有功无功的平衡所在、坚不坚强的要害之地，把集中的高压直流电进行远距离高压直传输，在到达并网点后经过变流器变成交流，并通过隔离变压器送到主电网输送电能。采用这种集中逆变方式较传统分散逆变而言既安全又方便，而且更大的好处是能量的转换效率和投入产出率比极高。逆变器不仅将直流电转换成交流电，同时根据电网的需求提供刚好合适的无功功率，稳定了电能输出，有效地解决了风电上网接入瓶颈问题。佳灵电气十多年来一直致力于 IGBT 直接串联技术的研究与推广，特别是在风力发电变流器、风力发电机试验站、电能优化、电网智能化以及电能的存储技术等方面取得了大量成功的经验，为集中逆变的大规模产业化的实现提供了良机。

以新技术为基准，建设坚强的智能风力发电网可以大幅度降低系统成本；减少无功损耗；稳定输出电能质量；解决长距离海上输电存在的技术瓶颈和高质量并网的难题；在现有装机条件下大量增加发电输出量，还对电力主网提供无功补偿；取消传统风电场的无功补偿设备和大量的箱变设备，实现低、高风速条件下的高效、稳定发电运行，解决风力发电和接入控制技术。该新技术的使用，将推动风电能源事业的飞跃式发展，使中国成为先进的新型风电技术的引领者。

变频技术在设备改造中的应用

陈宇宁

(成都电冶厂)

一、概述

成都电冶厂海绵铜处理工序中采用 SGZ1000-N 型三足式全自动下部卸料离心机, 进行海绵铜固液分离, 该设备由主机、辅机及转鼓等组成。传动系统情况如图 1 所示。

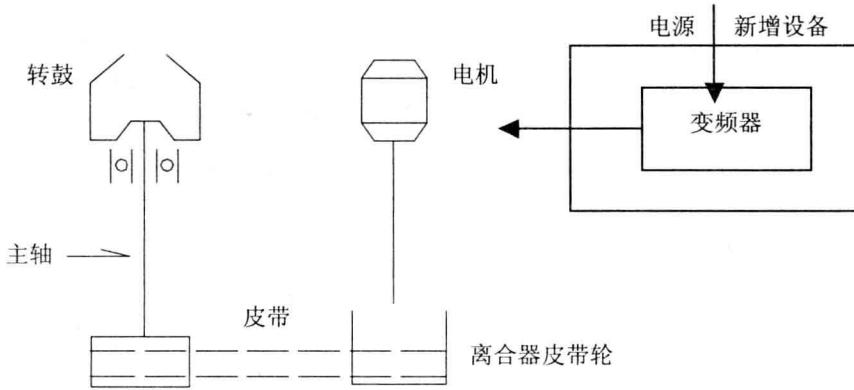


图 1 传动系统情况

由于该离心机是通用设备, 它的主机是 Y160L-4 型交流电动机, 其转速保持在 1460r/min, 因此不可避免地带来下述问题: (1) 不能根据我厂工艺流程调节合适的转速, 物料的固液分离不能达到理想的效果。(2) 因为成都电冶厂的物料组成较为特殊, 以至离心机在启动和运行中振动很大, 设备使用寿命大大缩短。为此我们采用变频器对离心机的电动机进行控制, 设备的使用寿命延长了 12 倍, 提高金属回收率 1 倍左右, 仅一年节约的镍金属就价值 45 万元。该项改造很好地解决了原来设备存在的问题, 提高了生产效率和经济效益。

二、变频器的原理及相关设备的选用

(一) 变频器的基本原理

变频器的基本原理是用一种特定的方式对变频器中的晶闸管开关进行简单的导通和关断，直接把输入的电压波形“大致”调制成所需频率的大致交流波形，如图 2 所示。

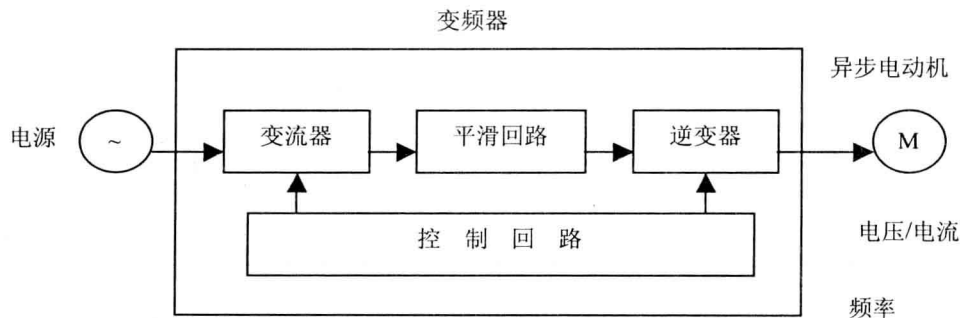


图 2 变频器的基本构成

变频器大体有 4 种控制方式：V/F 控制，转差频率控制，矢量控制，直接转矩控制。成都电冶厂采用 V/F 控制。

什么是 V/F 控制？它是在改变频率的同时控制变频器的输出电压，使电动机的磁通保持一定，在较宽的调速范围内，电动机的效率、功率因数不下降。因为是控制电压与频率的比，所以称为 V/f 控制。

为什么控制 f 就能够调整转速呢？异步电动机的同步转速由电源频率和电动机极对数决定，在改变频率时，电动机的同步转速随着改变，当电动机负载运行时，电动机转子转速略低于电动机的同步转速，即存在滑差。滑差的大小和电动机的负载大小有关。公式如下：

$$N=60f/P(1-s)$$

N : 电机转速

P : 极对数

f : 频率

s : 转差率

既然改变 f 就能够调整电动机的转速，那么保持 V/f 恒定控制有何意义？它与电动机正常运行又有什么关系呢？从图 3 和公式，我们可知这其中的联系。

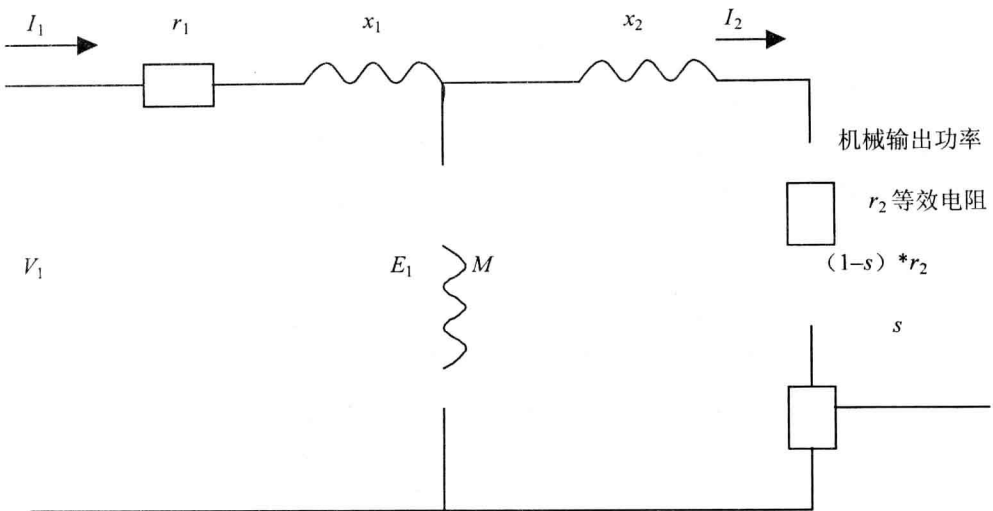


图3 异步电动机的 T 形等效电路

电动机定子的感应电动势的关系为：

$$E_1 = 4.44 K_{w1} \phi f_1 W_1 \quad (1)$$

E_1 ：定子感应电动势

K_{w1} ：电动机绕组系数

ϕ ：每极磁通

f_1 ：电源频率

W_1 ：电动机绕组匝数

电动机端电压和感应电动势的关系为：

$$V_1 = E_1 + (r_1 + jx_1) I_1 \quad (2)$$

V_1 ：定子相电压

r_1 ：定子电阻

x_1 ：定子漏抗

I_1 ：定子电流

在电动机额定运行情况下，电动机定子电阻和漏抗的电压降较小，电动机的端电压和电动势近似相等。由（1）可见，当电动机电源频率变化时，若电动机电压不随着改变，那么电动机的磁通将会出现饱和或欠励磁。例如当电动机的频率 f 降低时，若继续保持电动机的端电压不变，即继续保持电动机的感应电动势 E 不变，那么，由公式（1）可知，电动机的磁通 ϕ 将增大。由于电动机设计时电动机的磁通常处于接近饱和值，磁通的进一步增大将导致电动机出现饱和。磁通出现饱和后将会

造成电动机流过很大的励磁电流，增加电动机的铜损耗和电动机的铁损耗。而当电动机出现欠励磁时，将会影响电动机的输出转矩。因此，在改变电动机频率时应应对电动机的电压或电动势进行控制，以维持电动机的磁通恒定。显然，若在电动机变频控制时，能保持 E/f 为恒定，可以维持磁通恒定。

由于电动机的电动势检测比较困难，考虑到在电动机正常运转时电动机的电压和电动势近似相等，由公式 (2) 可知，通过控制 V/f 比一定以保持磁通恒定。所以变频器可实现软启动，使电动机逐渐加速，减少了设备启动时的振动。运行时为了在电动机中保持恒定的磁通量，按照频率来调节外加电压的幅值，这就要求电压和频率的比值为一常数。但对实际电动机来说保持“气隙”电压和频率之比为常数，就需要以大于这一比例的数值来调节外加电压，以补偿定子电流在绕组串联阻抗上产生的电压降。由于该离心机在实际运行中的工作频率较高，一般在 $30\sim 40\text{Hz}$ 之间，因此电压降实际只占电动机额定电压的很小部分。负载变化引起外加电压幅值所需做的小量调节对电动机运行的实际影响不大，所以负荷在该段频率调节时的转矩性能较好，故 V/f 曲线如图 4 所示。

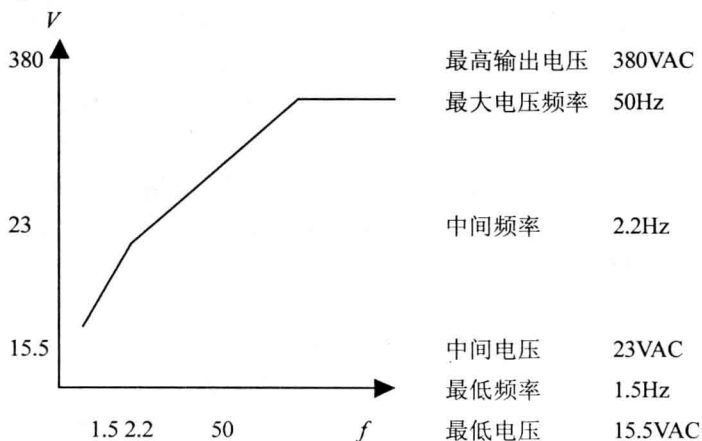


图 4

这样通过变频器对设备工作速度的调节，使离心机达到平稳的工作状态，延长了设备的使用寿命，而且使离心机的运转速度能够调节到物料固液分离的最佳状态，经济效益十分明显。

(二) 变频器选型

变频器选型需注意电压等级和最大适用电动机容量两参数。电压等级是根据使用单位的实际用电电压确定，如变频器电压等级选得过低会减少设备使用寿命，使变频器自动保护功能动作，导致设备不能正常运行；如变频器的电压等级选得过高，

相当于减少了变频器所带负荷的容量，很不经济，成都电冶厂电网电压长期运行在440~448V之间，所以我们选用440V电压等级的变频器。

设备厂家在选用电动机时，一般都考虑了短时过载等非常情况，留有一定的余量，因此变频器的容量只需与电动机的额定容量相匹配即可。

在使用过程中，如果电动机实际负荷过小，存在大马拉小车的情况。从经济学的角度考虑，可以按照实际运行时的电流大小，选择变频器的容量。

但此时需要注意，如果电动机长期运行在总负荷容量的30%以下的时候，电动机的电抗随电动机的容量而不同，即使负荷相同，电动机容量越大其脉动电流值也越大，也就是说这时只考虑电动机电流是不够的，还需要考虑脉动电流的影响，负荷越轻，这部分的影响就越大。需放大变频器的容量，才能解决这方面的问题。

(1) 离心机负荷的特殊性。由于离心类负荷惯性较大，一旦在运行中降低速度，电动机的动能就会转化为电能，该电能反馈回变频器，造成变频器内部直流高压侧电压过高，引起变频器保护功能动作，设备停止工作。这样一来，既无法实现在运行中对离心机进行调速的要求，又会对变频器造成伤害，缩短变频器的使用寿命。所以需要采用适当措施将这部分能量消耗掉或回馈到电网，一般有电阻制动、直流制动、PWM整流等方式。成都电冶厂采用了电阻制动的方式。

电阻制动是在直流侧安装制动电阻，当电容电压升到一定数值时，控制制动电阻支路上的开关元件导通，从电动机回馈到直流侧的能量消耗在制动电阻上，避免电容电压进一步升高。制动电阻的选择包括电阻的阻值和电阻的容量，前者决定制动时流过电阻的电流，后者决定电阻容许的发热量。由于制动电阻通常工作在断续工作制，电阻容量的选择应考虑工作时间。在选择制动电阻的阻值和容量时要对系统的制动能量进行仔细的校核。

制动单元在系统中的连接位置，如图5所示。

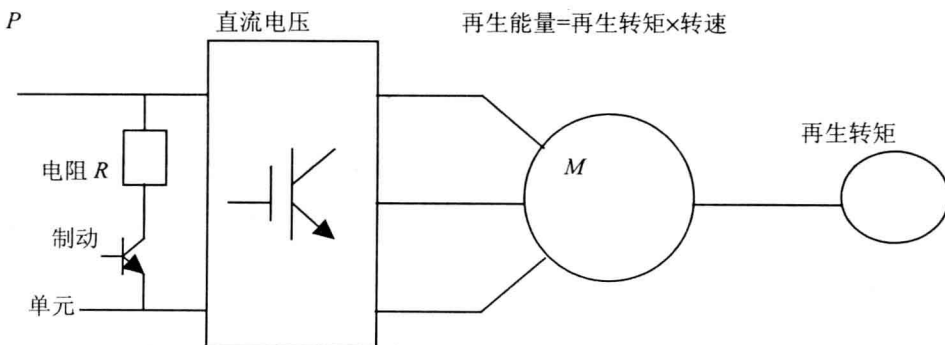


图 5

N

放电电阻的选择:

电动机的轴输入功率为:

$$P_{1M}=0.105 * T_{1M} * N_{1M}$$

电动机的输出功率为:

$$P_{1NV}=0.105 * T_{1M} * N_{1M} * \eta_{1M}$$

变频器内部能量为:

$$P_{DC}=0.105 * T_{1M} * N_{1M} * \eta_{1M} * \eta_{1NV}$$

P_{1M} : 轴输入功率,

P_{1NV} : 输出功率

P_{DC} : 变频器内部能量, 反馈的能量经过整流, 变为储存在变频器直流侧大功率电容两侧的直流功率。

T_{1M} : 电动机转矩

N_{1M} : 电动机转速

η_{1M} : 电动机效率

η_{1NV} : 变频器效率

放电电阻的值

$$R = \frac{V_{DC}^2 / P_{DC}}{0.105 * T_{1M} * N_{1M} * \eta_{1M} * \eta_{1NV}}$$

对于 440 等级的 V_{DC} 约为 770V。

电阻值的余量系数, 考虑到连线分布, 电阻器本身阻值的分散性以及电阻的温度分散性等因素, 在选定电阻值时要留有余量, 一般情况选 1.2 倍。选用阻值=计算值/1.2。

(2) 放电电流值。放电电流的电流值应小于变频器的额定电流值, 因此有 $I_P = V_{DC} / \text{选定阻值}$, 小于变频器的额定输出电流值。余量系数, 当考虑到过负荷的情况下, 需要留一些余量。当然要求的可靠性越高, 余量应该越大, 通常为 1.2~2 倍。

(3) 制动单元的工作原理。当电动机以发电机状态运行, 产生再生能量, 使变频器内直流中间环节的直流电压升高; 直流电压达到使制动单元开的状态; 再生制动单元的功率开关导通, 电流流过制动电阻; 制动电阻放出热量, 吸收了再生能量, 电机的转速降低, 直流侧的电压变低。直流侧的电压降低使制动单元的功率开关关断, 这时没有电流流过制动电阻。如果负荷未停将继续累积能量, 直流电压再次升