

## 提高能源 利用效率

能源 2015- 趋势和动力

第 6 页

特高压输电

第 22 页

绿荫

第 62 页

电动机的效率

第 81 页



## 提高能源利用效率—另一种可替代的能源

对于当今社会的经济生活而言,能源就像血液一样。整个社会从原材料的开采,产品制造,运输和最终的消费,都离不开可以预见的连续不断的能源供应。能源供给的任何威胁都会危及当地乃至全球的经济繁荣。随着经济的发展,全球的能源需求还在增长,特别是瞬息万变的经济活动对全球能源增长也起到了推波助澜的作用。

面对这样的情况,所有人都不得不认真思考一个问题:我们未来的能源来自何方?单纯依靠传统的能源肯定不能解决问题。一方面,由于人为因素造成的全球天气变化在加剧,相应的限制措施必将反映在未来的全球能源政策中。另一方面,对一次能源的获取正逐渐演变成某种带政治目的的“战争链条的一环”,不同的利益集团为了更加安全便利的获得能源而不择手段。不断减少的石油储存也不容忽视。

为了应对这样的局面,人们自然而然地想到必须开发新的能源-不论是传统能源的某种变种或是可再生能源。未来社会解决能源供给的理想技术,譬如氢能和核聚变,已经崭露头角,但是这些技术要达到实用的水平尚需很长时间。因此要解决迫在眉睫的能源需求,我们还是必须在核能、化石燃料和可再生能源之间进行选择。

各国政府以及非政府组织、工业界、研究机构和能源消费者们都在迎接这一共同的挑战。新的一次能源被不断的探明;煤炭的利用方式正在发生改变;二氧化碳的削减得到正确评价和鼓励;核能的利用在全球复苏;新的生物燃料得到开发;风能和海洋能得到利用;各种鼓励新能源开发和利用的税收和市场准入政策得到实施,等等。

同时大多数人都都认为,单凭以上的某一种措施是远远不够的,还得靠这些措施的综合利用。但是,以上这些措施要收到实效,都需要一个较长的时间,要想依靠这些措施马上改观全球能源供需的格局是不现实的。那么,有没有一种途径可以很快解决问题,同时又是经济可行的呢?

幸运的是,我们可以肯定地回答:这“另一种可替代的能源”就是提高能源的利用效率。

同开发利用其他新的可替代能源一样,完成同样的工作却消耗更少的能源,也能达到全球能源平衡的效果。当我们采用这两种不同的方法时,我们发现基于现有能源利用方式的改进会带来更高的能源利用效率-它不需要额外的费用,所付出的投资可以通过各种经济措施得到回收。节省能源从能源的开采环节就已经开始了。以油田为例,对整个开采

过程进行精心的控制,不但可以节省能源,而且还可以更快地收回投资。能源从它的开采地到加工地的高效的运输也为节省能源提供了机会-譬如使用更高效的输油管道和大型油轮。在这个能源消费的链条中,目前尚未考虑并加以利用的节省能源的潜力是如此的巨大,它不但可以给我们带来生态环境的效益,而且还会带来巨大的经济效益-这正是各种节能措施很快得以实施的关键动力。

在热能转化成机械能的卡诺循环中,能量的转换效率存在一个理论上的极限。燃气轮机技术、热电联合循环技术以及先进控制技术的研究和利用都不可能超越这一极限,但可以使各种设备接近这种理想的工作状态。输电和配电都不可避免地伴随着网络损耗,但高压直流输电(HVDC-High Voltage DC)和柔性交流输电(FACTS-Flexible AC Transmission System)却能够减少这种损耗。全世界的电能主要是消耗在电动机上的。针对不同的应用场合,采用变频调速技术驱动的电动机可以节能70%以上。因为一台电动机在其整个使用寿命内的总耗费要比变频调速驱动装置初期的投入高出2个数量级。因此,从经济上来讲这种节能的说法是有根据的。

提高能源利用效率的需求是如此地强烈和紧迫,ABB也正承担起这一历史使命。通过我们在工业自动化和发电领域的几乎所有的产品和服务,ABB帮助他的客户更有效地管理和使用能源。

在本期的ABB评论中,我们介绍了各种各样的可以大幅提高能源利用效率的产品和技术。你将会惊喜地发现,在能源这个“果园”里,提高能源利用效率是“挂得最低的果实”,可以通过引入现有的成熟技术马上将这一“果实”收入囊中,并且可以很快地收回投资。

我们希望您通过阅读本期的ABB评论,可以得到许多有关节能的新思路:为了您自身的利益,也为了一个更加美好的世界。

感谢您的阅读!

Peter Terwiesch  
首席技术官  
ABB公司

当今的工业界(当然也是全社会共同)面临的两个最重要的目标就是,经济上的成功和对环境的责任-这两个目标往往又是相互矛盾的。然而当我们谈论能源时,不论是电力还是燃料,不论是在勘探、发电、输电还是在用电的各个环节,节省资源就意味着省钱!本期的ABB评论将重点展示ABB的技术是如何帮助客户通过提高能源的利用效率来提高竞争力的。



# ABB 评论 2/2007 提高能源利用效率

www.abb.com/abbreview



## 2015 年的世界

### 6 趋势和动力

ABB 评论概括了世界未来发展的趋势和动力

### 11 从 2015 年回首现在

一份来自 ABB 的分析报告，描述了未来世界发展的四种可能

## 高效的电力网

### 14 高效的电力

电网如何将更多的电力传输更远的距离，并不断的提高电网的可靠性和电能利用效率

### 22 特高压输电

在特高压输电领域最新的技术进展

### 28 减轻输电阻塞

当电磁环流威胁电网的运行时,FACTS 装置可以打开电磁环路,增大输送容量

### 33 利用风力发电

当你想使用清洁的风能时,风却停了下来,你该怎么办?

### 39 海水淡化厂的优化运行

优化混合式海水淡化和发电厂的运行,不仅可以节省成本,而且还保护环境

### 44 OPTIMAX® 产品家族

优化环境和经济性能

## 工业生产中的高能效

### 45 同行中的领先者

彻底改变! ABB 的 800xA 自动化生产系统是如何将一个大型造纸厂转变成一个现代化工厂的

### 49 高效的轧钢生产线

节省时间和减少浪费是对 ABB 先进的轧钢优化控制系统恰如其分的评价

### 53 能量的优化管理

如何减少系统的能源需求,而不降低产量? ABB 的知识管理系统和专家优化系统给出了答案

### 58 更高的产能,更少的污染

高兴地去没人愿意去的地方:一种新型喷漆机器人减少了工人在污染区域的工作

## 可替代能源

### 62 绿荫

能源不可能从树上长出来 - 或许又可以? 一系列的短文介绍 ABB 的产品用于生物燃料的生产

### 69 来自海上的清洁电能

越来越多的风力发电机组安装到海上,但这并不意味着它们深不可测 - 幸亏有了 ABB 的监视和控制系统

## 节能产品

### 73 通过提高驱动器效率节约能源

没有哪个产品能像变频驱动那样节省这么多的能源

### 81 电动机的效率

高效的电动机能够在它的整个寿命周期内节省大量的能源

## 永远的先驱者

### 85 ABB 的涡轮增压器发展历史和里程碑

涡轮增压器的发展历程,一部成功的发展史



# 2015 年的世界——趋势和动力

Friedrich Pinnekamp



在全球化趋势日趋明显的当今世界，各种影响因素的一些微小的变化都会对整个社会的发展带来巨大的影响。在政治格局瞬息万变，经济飞速发展，技术日新月异的今天，要预测未来是一件相当不容易的事情。但毋庸置疑，未来世界能源的发展是整个社会发展的支柱之一，必须进行合理的规划。各国的公共事业部门都必须对他们的发电、输电和配电基础设施建设作出合理的长期投资规划，可替代能源解决方案的提供商们也正在寻求一个合理的决策平台，而各大工业巨头和他们的供货商们也都想弄清楚市场和技术未来的走向。

由于流行性瘟疫、恐怖袭击和技术上的突破等突发事件对世界的变化起到了相当大的影响，而这些事件本身是无法预测的，所以从这个意义上讲，对未来的预测也是模糊不清的。

在一个有限的时段内，基于已发生的和正在显现的各种变化趋势的外推式的预测看来更加合理一些，因为这些变化趋势总是受到一些主要因素的推动，分析这些推动因素就可以得到一些更有意义的预测。

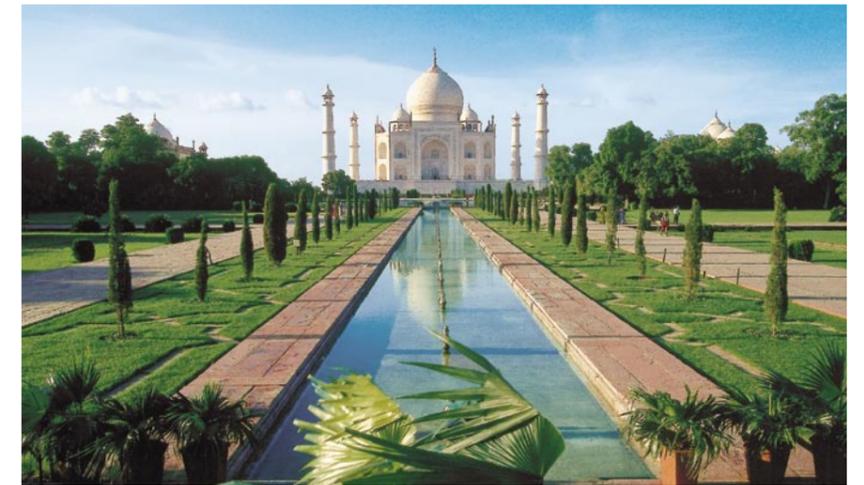
ABB 详细研究了六种主要的变化趋势，它们对未来人类的需求和工业发展的需要都有着巨大的影响。它们是：

- 全球社会的变革
- 全球化趋势
- 能源工业的重组
- 对主要能源的关注
- 对电能的需求
- 环境要求

在未来十年里，将有近 2 亿人移居到世界各大都市，对贫困的人来说，这种都市移民是他们摆脱贫困，过上更富裕生活的传统方式

## 全球社会正处于急剧变革之中

呈指数增长的人口数量，死亡率和出生率的下降，青年人和老年人在人口比例上的失衡，大多数南半球国家的长期贫困，都市化进程和超大城市的出现，国内和国际性的大量移民，在一些文化里宗教势力影响力的提升，而在另一些文化中出现的宗教分裂主义倾向，全球性的数字化和 IT 变革的影响 - 所有这些因素都推动着社会和个人发生急剧的变化。

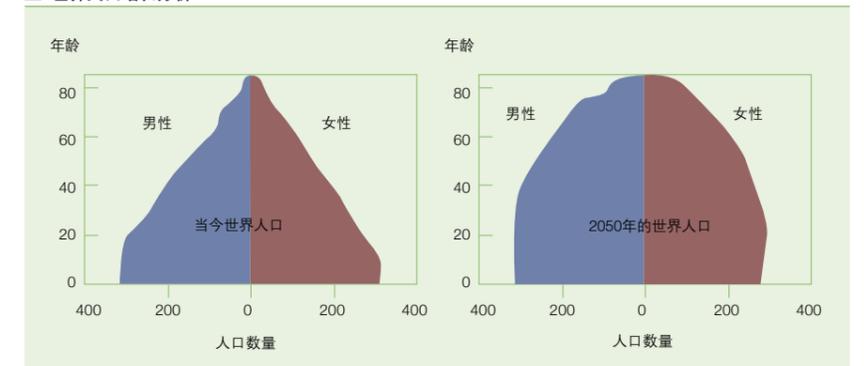


随着当今世界人口突破 65 亿并以每年 7500 万人的速度递增，社会内部和不同国家之间的人口在年龄结构、价值观念和依存关系等方面的变化，正成为推动我们这个社会发生深刻变革的主要动力。

在当今日趋成熟的经济社会中，出生率的下降和人类寿命的延长都使得人口问题进一步恶化。随着时间的推移，由此带来的老龄化问题可能会使年轻一代和老一代之间的紧张关系进一步加剧■。

虽然联合国的一些雄心勃勃的脱贫计划得以实施，但欠发达地区的贫困状况依然非常严重。由于贫困和不

■ 世界人口增长分析



公正所引发的地区冲突频发，导致了一些地区社会和政治的不安定。

在未来的十年里，将有近 2 亿人移居到大都市，使得这些都市人口总数在 2015 年达到 6 亿。对贫困人口来说，这种大规模的都市移民是他们摆脱贫困，过上更富裕生活的传统方式。

城市里的居民，还有移居到发达国家的移民，他们都对互联网、TV、移动电话和固定电话这些国际通讯平台的服务有着更大的需求。

因此在 s 这些地区，同样的技术得到了更广泛的传播，使更多的人得到了受教育的机会。在一些成熟的经济体中，



当高等教育得到普及, 这些国家将从发展中国家当中异军突起。在这些国家, 接受过良好训练的工程师的数量剧增。而在西方国家, 像电气工程师这样的传统专业的工程师正在减少, 从而导致技能熟练的工程师严重匮乏。

化趋势对人类社会的影响是多方面的, 这种贸易、资金、理念和人员的大流动给经济和社会带来变革的内在机制是相当复杂的。

采用新技术的国家和集团带来最大化的利益。发展中国家和西方发达国家的这两股高科技脑力资源的不断成长和融合, 发展中国家中从事与计算机相关工作的人群的扩大, 和国际型集团公司在全球布局它的高科技研发事业的努力, 都推动了新技术在全球范围内的普及。信息和通讯技术 (ICT, Information and Communication Technology) 的发展成为了全球一体化进程的重要推动力, 它方便了人们的思想、建议和数据进行跨越国界的高速交流。它使国际化公司的运作跨越了不同的时区, 从而获得了本地公司无法比拟的优势。

据估计, 从 2005 年到 2015 年, 世界经济将增长 40%, 人均收入将增长 25%。世界上的大多数国家将达到空前的繁荣, 而在原来的一些相对贫穷的国家中也将第一次出现一定规模的中产阶级人口。

随着中国、印度和其他发展中国家不断融入世界经济, 成千上万的适龄劳动者将加入到这个全球一体化的劳动力市场中来。生产、贸易、雇佣和工资关系的一些现存的模式将发生改变。

随着中国、印度和其他发展中国家不断融入世界经济, 成千上万的适龄劳动者将加入到这个全球一体化的劳动力市场中来。

### 全球化趋势

新的技术进步、新的经济关系和形形色色的行为主体的国内和国际政策都推动了全球化进程, 这些行为主体包括各国政府、国际组织、公司、媒体、劳动部门和市民团体等。全球

全球化趋势将给那些能够创造和

### 能源工业的重组持续不断

全球的能源工业正处在不断的重组过程中。市场的自由化和规制缓和, 市场合并与重组, 批发式的能源交易

模式的推广应用, 电力和天然气的商品化, 正在从根本上改变能源贸易的本质特征。石油天然气巨头们在可再生能源利用上的巨额投资, 特高压输电和电能储存的实用化技术的发展, 再加上政府有的放矢的政策性导向, 所有这一切都对处于各个层次的能源工业企业产生了巨大的影响图 2。

影响世界能源工业格局的一个非常重要的因素, 就是电力市场和天然气市场的自由化和私有化。尽管从这些市场出现到现在已经过去了 25 年, 但我们仍然对市场的自由化和私有化能给我们带来的影响缺乏清醒的认识。市场的自由化开辟了电力批发交易的新时代。但并非所有的欧洲国家都以同样的步调在推进市场的自由化进程, 这就意味着从电力的集中调度到电力交易的模式, 在电力交易管理与市场运营等方面都还存在着诸多差异。我们的最终目标就是建立一个交易市场, 在这个市场上天然气和电力作为商品, 能够以灵活多样的和富有创意的产品和服务的形式进行自由交易。

推动能源工业重组的另一个重要因素是, 为了筹措足够的投资加强能源基础设施的建设, 以满足全球性的能源需求的增长。对已报废设备的更新换代, 在需求增长的地方扩大能源的供给, 以及清洁能源系统的投产, 都需要投资。

各国的政治家们通过政府补贴和税收政策来推动工业企业的重组, 并通过相关的法律法规, 鼓励企业开发和利用可再生能源, 增强环境意识, 并鼓励节省能源。

但是, 小规模的可再生能源发电在短期内还不足以对当前世界能源工业的格局产生重大的影响。

另一个推动企业重组的因素是电力供电可靠性的缺乏, 2003 年世界范围内大的停电事故频发就说明了这一点。供电的安全性牵涉的因素很多, 譬如在市场经济条件下的安全供电, 还有其他技术、环境、社会和文化等各方面因素, 它甚至于被提高到了军事战略重要性的高度, 所有这些都增加了企业重组的复杂性。

### 世界主要能源的未来

几乎所有对未来能源构成的预测都认为, 在本世纪前二十年, 世界对主要能源的需求将持续增长。这可以被认为是过去发展趋势的一个合理的外推, 而世界的能源消费正在显著地倾向于一些新兴的经济发展中国家, 比如中国和印度。

一些主要能源比如石油、煤炭、天然气和铀能够维持到 2020 年, 甚至更久。据国际能源理事会 (IEA, International Energy Agency) 的估计, 在未来的 30 年里, 为了满足即将到来的能源需求高峰, 需要多达 16 万亿美元的投资。而这其中的 60% 将用于新建发电厂、高压输电线和配电网。<sup>1)</sup>

在过去, 主要能源消费与国内生产总值的关系十分密切, 但随着在一些领域不断引入和采用能提高能源利用效率的新技术, 这种密切的关系将变得越来越弱。当然毋庸置疑, 在未来的 20 年里, 随着全球经济的逐步递增, 对能源的需求会不断的增加。

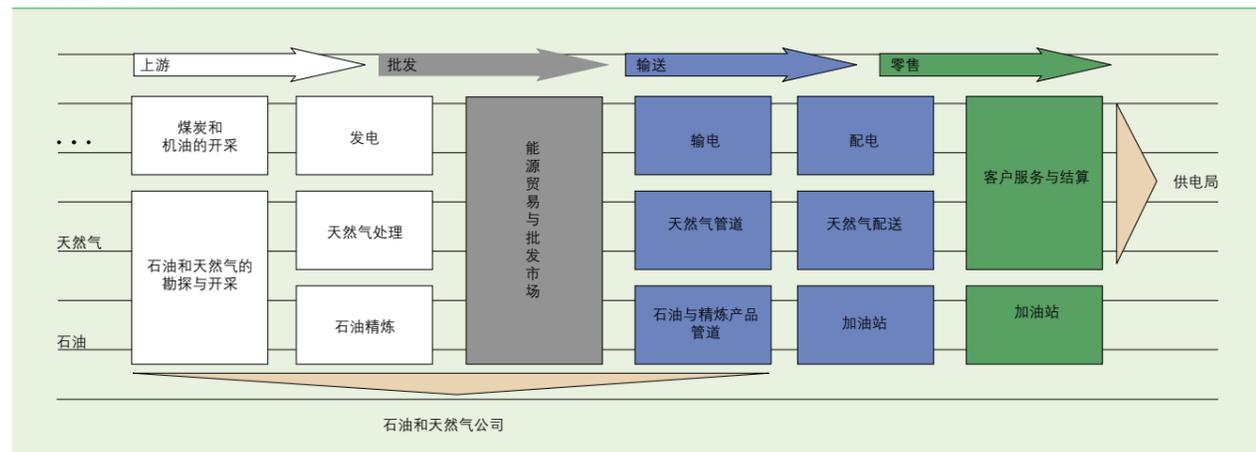
尽管世界所需能源的 30% 还需要不断的勘探与发现, 但在未来的 20 年里, 占世界能源消耗 38% 的石油仍然是占主导地位的能源。天然气是发电的一种重要的资源, 占总发电量的 30%, 因为它排放的二氧化碳含量较低, 使它成为减少温室气体排放的一种非常有吸引力的选择。

除了西欧以外的几乎所有国家的煤炭消耗量都在不断地增长。其中, 中国和印度的煤炭消耗增长最快, 他们同样都有着丰富的煤炭储量。这两个国家的煤炭消耗量的增长占世界总增量的 72%。

在经历了一段时间的停滞之后, 核能很可能在发达国家再度变得普及起来。其他的主要能源像风能、海洋能、地热能和太阳能都将成为能源供给的



2 能源工业的生产链



脚注:  
<sup>1)</sup> 参见 ABB 评论 2004 年第 4 期

组成部分,但在未来的 15 到 20 年内它们还不足以对能源供给的结构产生重大的影响。许多可能填补未来能源供给不足的可替代能源新技术尚处于研发阶段,在一个时期内还达不到经济实用的要求。节省能源,特别是在运输环节上,能够显著提高石油的可利用率。各种生物燃料的使用也将降低在这一环节上对石油的依赖。

## 新的商业机会的出现总是伴随着未来主要能源的不确定性的风险

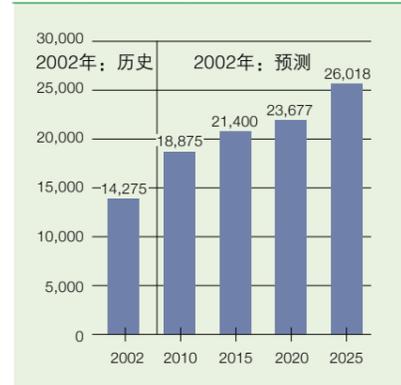
归纳起来,未来主要能源的不确定因素包括:

- 由于政治原因所带来的对获得能源的限制
- 未来开采能源的经济实用技术的限制
- 能以一个可以接收的价格充分替代传统能源的可替代能源的限制
- 为避免对环境带来不良影响和高昂的治理费用而对化石燃料的使用限制

## 电能需求的变化

随着电力需求的不断增长,而且这种增长主要发生在发展中国家,电能的利用从发电到输电再到配电等各个环节上的地区之间的差异是显而易见的。

3 世界净电力消费,单位:百万度,2002-2025。来源:国际能源理事会 IEA



经济发达地区的陈旧的电力基础设施正在受到挑战,而新型的经济地区发展的供电基础设施需要扩建,他们对环保技术的需求以及缓解全球能源供应紧张局面的需求更加迫切(图 3)。

虽然多种多样的可再生能源的利用在短期内还不能改变世界能源供给的格局,但是在那些推进可再生能源利用的国家还必须面对供电网的可靠性问题。世界上许多地区的输电和配电网的运行都越来越接近它们的安全稳定的极限,而在亚洲的一些经济快速增长地区,虽然也正在新建大量的输电线路,但仍然满足不了飞速增长的电力需求。

所有国家都共同面临的最重要的任务就是,如何更新旧的电力网,或者建设新的电力网,来保证可靠的供电。这是一项极富挑战性的工作。

面对这样的挑战,中国和印度都在远离负荷中心而靠近主要能源开采的地方修建新的发电厂,这就需要建设能输送大量电能的新的长大输电线路。

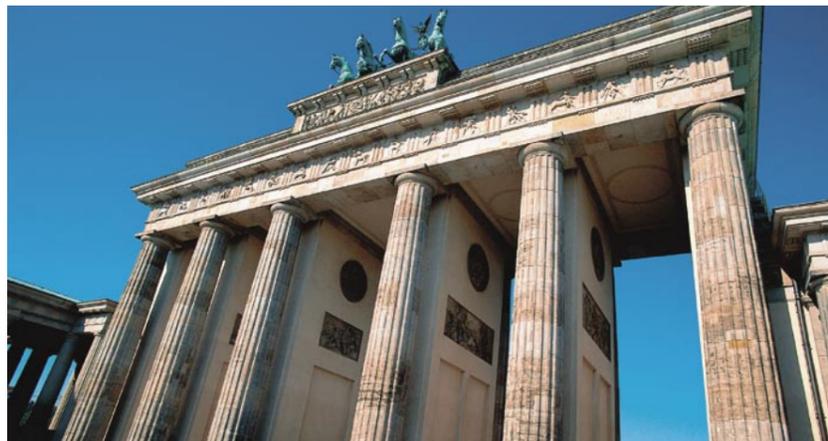
现在许多电力公司都将供电的可靠性作为他们工作的头等大事,因为供

电可靠性低造成大面积停电事故对整个社会带来的损失和负面影响实在是太大了。据统计,发生在美国的停电事故所造成的直接损失和间接损失高达数百亿美元,这都是因为对输电线和配电网长年投入不足,沿用过时的技术和欠妥当的电网调度方式所造成的。

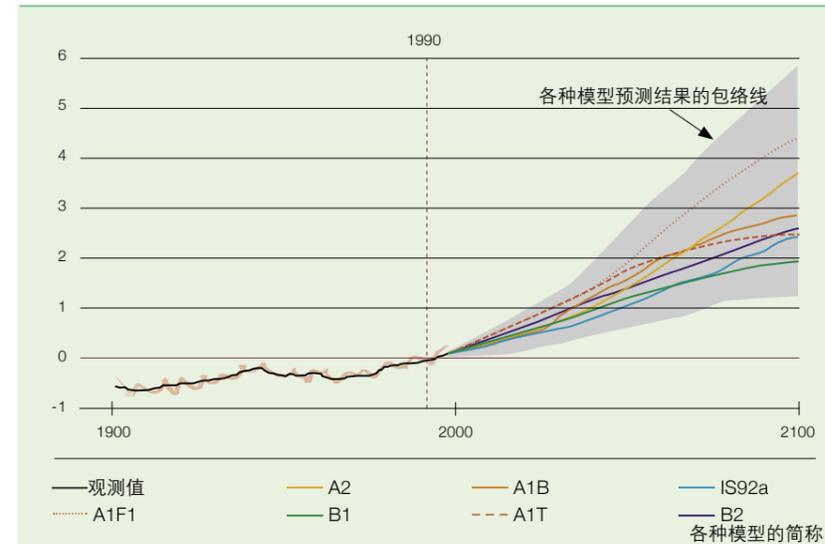
环保和供电安全的要求驱使电力部门不断地降低电网的损耗。现代高压输电线和低压配电网的网损率一般为 6%~7%。这个网损中的 70% 是发生在配电网中,它比输电线和更低电压等级网络中的网损要大得多。

不光是电力公司对降低网损非常热心,节省电能对工业企业、商业企业和居民家庭等终端用户也有着直接的影响。由此激发了对高效节能的电动机、驱动器和家用电器的巨大需求。

技术进步为电网调度提供了新的途径。静止无功补偿器和储能技术的发展实现了各种可再生能源发电厂的并网运行。大功率电力电子技术使电网潮流的控制成为可能,新型柔性交流输电设备 (FACTS, Flexible AC Transmission Systems) 更改善了电网的可控性。



4 基于各种模型的全球温度变化预测  
来源:剑桥大学出版社,2006



节能和提高能源利用效率新技术的应用得到普及。各种低损耗、高效节能的功率半导体器件减少了电网的损耗。通过使用先进技术的电动机和基于电力电子技术的变频调速器可以持续地降低能耗。

由于信息和通讯技术的发展,推动了“智能化”和“自愈合”电力网络的研发,进一步提高了供电的可靠性。

## 环境保护已成为商业因素之一

尽管有关环境变化的程度和影响到底有多大的争论还在继续,但现在大家都认识到,我们不得不面对并设法解决像温室气体排放、天气变化和自然资源减少等问题图 4。

当今世界最紧迫的话题,就是温室气体浓度的不断增加,它在很大程度上已经对我们的环境构成了潜在的威胁。各种能减少温室气体排放的技术变得越来越重要,由此催生了一些新的商业机会。这些机会来源于为发电和工业生产企业提供零排放或低排放技术,或是通过引入高效电动机和

变频调速等设备,提高工业生产过程中的能源利用效率。

新的商业机会的出现也伴随着未来主要能源的不确定性的风险。这都可使可再生能源发电技术和在运输行业采用可替代生物燃料技术的研发力度得到加强。近年来,各种各样的化石燃料的燃烧技术得以迅猛发展,它也被应用于石油、天然气和煤炭,而且也被应用到汽车发动机上。

当然,新技术的发展总是取决于它们所用的费用和所带来的利益之间的折中与权衡,使用新技术可以减免税收,减少排放,降低燃料消耗和延长设备的寿命。

人们对核能利用重拾信心可能会减缓各种可再生能源发电的普及速度。但是,在对清洁能源利用的限制和保持经济高速增长之间保持平衡是非常难把握的,特别是对那些新兴的经济高速增长国家,犹是如此。

## Friedrich Pinnekamp

ABB 集团公司研究院  
苏黎世, 瑞士  
Friedrich.pinnekamp@ch.abb.com

## 从 2015 年回首现在

一份来自 ABB 的分析报告

Friedrich Pinnekamp

本研究报告是在大量的集团外专家、评论家、政治家和科学机构的研究人员的专访、文字评论和个别讨论的基础上完成的。

大多数的权威人士都认为,对国民经济的深度调查更有助于我们了解全球社会。他们还坚信,随着新兴的经济高速增长地区和经济发达地区的不断发展,他们之间的差距将进一步减小。

ABB 详细研究了这些经济发展的迹象,并在为未来可能出现的几种经济发展的前景作准备。虽然未来世界经济发展方向的不确定因素有很多,但是有一个变化趋势最值得我们关注 - 那就是提高能源利用效率。

在未来全球化和更加开放的社会里,所有的人都能够自由自在地利用各种能源,而主要能源的普遍短缺和共同的环境问题迫使我们不得不关注能源的高效利用。如果世界上出现资源保护主义倾向,就会使我们能源的安全供给失去保障,因而必须杜绝能源的超额消耗。

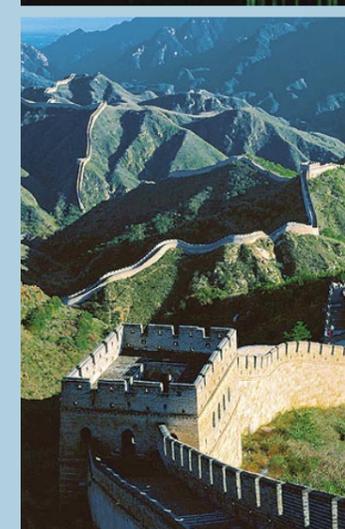
当新兴的发展中国家经济发展进一步加速,就会出现资源短缺现象而阻碍他们的经济增长。而处于停滞的经济发达国家也不得不被迫减少他们高额的能源消耗。

总之,在未来的十年里,提高能源利用效率是发展的主题。

## 从 2015 年回首现在：一份来自 ABB 的分析报告

在下面给出的第一种经济发展前景预测里，假定以购买力为标志的经济增长率从5%变为过去的3%

	开放性的全球化社会	经济发达地区更富有竞争力	新兴经济体变得更加强大	退回到保护主义
<b>经济增长</b>	在过去的十年里，全球绝大多数地区得到繁荣发展。存在地区性的贸易繁荣（比如欧盟），但它们的出现不是贸易保护主义，而是更好地融入全球一体化经济	经济发达的工业化国家持续了十年的强劲发展，使它能够保持高水准生活和国际竞争力的平衡。世界经济的发展速度没有达到早先的预计，因此也没有出现全球性的经济繁荣。	在经历了本世纪初的改革失败之后，经济发达地区正努力地跟上经济异常活跃国家的发展步伐，他们主要是位于亚洲的中国、印度和南朝鲜。而在某种意义上讲，中东地区因其拥有大量受过良好教育而廉价的劳动力而极具发展潜力	世界经济持续十年停滞不前，甚至有些地方还出现了经济倒退的迹象。全球贸易的发展速度显著放缓，经济发展主要靠国内市场的拉动。西方经济受到亚洲经济发展减速的影响，而亚洲经济已不能保持它过去的高增长率。国家之间变得闭关自守，各自寻求自给自足
<b>世界的特征</b>	随着货物、劳动力、技术和金融的自由流动，世界经济更加全球化。世界贸易组织WTO达成协议以保护多边贸易，跨国公司的出现如雨后春笋。	经济发达国家从他们的强势出口和受保障的全球市场中获利，而新兴的经济发展中国家加强贸易保护主义使他们免受国外的冲击	全球一体化推动了新兴的经济体完全融入全球大市场。WTO贸易协定充分发挥作用，有效地推动了多国间的国际贸易。跨国公司因地制宜地制订本地化的发展战略，以充分利用各个地区的不同优势	亚洲受到社会动荡不安、环境问题的挑战和经济过热等因素的困扰。WTO不能为持续发展的国际贸易提供保障。失望的政府退回到贸易保护主义，导致了生活水平的下降，甚至包括经济发达国家。人员、劳动力、知识和技术的流动受到限制
<b>各国社会的特点</b>	各国社会通过灵活多样的劳动力政策融入全球一体化市场，世界大多数人口都有接受教育和使用电力的自由 – 这两者是经济繁荣的基础	强劲的经济发展使经济发达国家能够通过吸引年轻而受过良好教育的劳动力移民来减轻老龄化社会的压力	由于发展中国家的条件大为改善，技术移民的速度明显放缓。在这些国家生活水平显著提高，也推动了全球性的消费	世界上还有大量的人口用不上电，并且在这些国家由于财政困难，投资环境恶劣，这种状况一时很难改变。在这些封闭的社会里，信息的交换受到限制
<b>能源市场</b>	石油和天然气价格的稳步提升使提高能源利用效率成为全球当务之急，越来越多的可替代能源的利用达到了实用化水平，原有的一些对石油和天然气的野蛮开采和不经济利用的作法得到重视和反思	居高不下的能源价格短期内难以改变，可替代能源发电的作用日趋明显。能源市场的自由化还在持续。在主要能源储量持续减少的背景下，为保障能源供给的安全，他们将与主要的能源出口国签订更多的双边协议。	能源的需求超出了十年前的规划。为满足这种对主要能源的巨大需求，如何提高能源利用效率，开发包括核能在内的可替代能源成为首要议题。各国政府四处签署双边能源协议，以确保有限能源的安全供给	全球性的经济发展停滞导致能源的需求没有像十年前预计得那样大。虽然对主要能源的需求仍然迫切，但由于保护主义和自给自足的能源政策占优，将提高能源效率的措施、开发可替代能源、和核能利用等按从高到低的优先顺序区别对待。试图通过长期双边协议保障主要能源的安全供给的困难越来越大，因为能源输出国拉帮结派，试图操纵提高价格。为争夺能源而发生战争的风险在加大。
<b>电力网</b>	庞大的电力网覆盖了全世界，绝大多数农村地区也得到供电。电力企业的重组与合并告一段落，电能的价格由供电企业掌控	经济发达国家陈旧的输配电基础设施得以更新换代，这进一步提升了他们的竞争能力。而发展中国家新建电网的数量却低于预期	经济发达地区陈旧的电力设施和网络只有部分得到更新，而大量的资金被投向新兴的发展中国家以建设新的供电基础设施，来解决那里的电力供需不平衡的矛盾。	为了避免十年前的大规模停电事故的重演，经济发达国家只是一味地给供电基础设施加压，使它们运行于极限状态，而没有将主要资金投入电力网建设。虽然规划了许多电力网互连的项目，但只有少数项目上马。经济发展中国家虽然也新建了一些电力网，但却远低于原来的计划
<b>环境</b>	天气变化、贫富两极分化和环境的健康得到了越来越多人的前所未有的关注。世界各国的政府领导人和大人都紧紧抓住提高能源利用效率和全球气候变暖这些主题不放，并积蓄各方力量加以解决。	在大多数经济发达国家之间建立了减少二氧化碳排量的贸易框架。用于交通运输的燃料正逐步被非石油能源所替代（这主要是在经济发达国家得到推进）	新兴的经济发展中国家环境意识不断增强，成功地推行了一系列必要的法规来控制污染。在这一过程中，最新技术的应用起到了重要的作用。核能利用在全世界的推广，可再生能源的利用，和能源利用效率的提高，大大缓解了能源短缺的威胁	由于国际合作机制遭到破坏，改善气候变化的国际活动和二氧化碳减排贸易停顿。各国采取行动时总是优先关心本地区的空气质量而不是国际性的热点问题。可替代燃料缓慢地进入经济发达国家的市场。
<b>技术</b>	现代化电力网的建设为新技术的采用提供了机遇和动力，它们包括特高压直流输电、特高压交流输电、限流器、大容量断路器和超导装置。能量存储新技术推动了可再生能源发电的应用。	经济发达国家持续的经济增长刺激了公共事业和各工业领域研发经费的增长，并超出了预期	新兴的经济发展中国家似乎永不满足的能源需求促使他们采用最先端的技术，以获得更大的发电量和输电量。再加上在这些新工厂里采用了最新的提高能源利用效率的设备，使这些年轻的新兴经济体获得了超越其竞争对手的更大的优势。	在能源工业企业，只有少量的新技术被引入到发电、输电和节能等方面。



# 高效的电力

输电和配电技术是提高电能利用效率的关键  
 Enrique Santacana Tammy Zucco Xiaoming Feng  
 Jiuping Pan Mirrasoul Mousavi Le Tang

开放的电力市场的理想是使消费者能够购买到最便宜、更高效和污染最小的发电厂的电能。而现实并非如此。由于电网的输送容量有限，往往使高效的电厂不能满功率运行，迫使消费者只能购买效率不高但较近的发电厂的电能。

这个问题的解决还有赖于建设新的输电走廊，并通过采用新技术更好、更有效地利用现有的输电网络。ABB 评论对此作了一个全面的总结。

发电厂发出来的电能要通过一个互联的输配电网输送给数百乃至数千英里外的终端用户图 1-1-1。在这个电力网中，包含了输电杆塔、输电线/电缆、变压器、断路器、电容器/电抗器、HVDC/FACTS 设备，和监测、保护以及控制设备。一般来讲，负责将电能从发电厂远距离输送到人口聚居地附近的变电站，运行电压等级较高的部分，称为输电网。而配电网则负责将电能从变电站配送给近距离的终端用户，电压等级较低，一般也不互联运行。输配电网 (T&D, Transmission and Distribution System) 的设计原则是，在满足负荷需求和系统各种约束条件的前提下，保证电能传输的可靠性、安全性和经济性。

近年来发生的停电事故再次向世人证明了各国的输配电网缺乏足够的可靠性和最优化运行的能力。

输配电网的运行可提供三个层次的服务图 1-1-2。

第一个层次的服务只提供最低程度的网络互联，和正常运行条件下的电能传输。这是对输配电网最基本的要求。如果连这个要求都不能满足，就会危及当地经济的健康发展。

第二个层次的服务，要求即使在某些设备出现故障的条件下，输配电网也能够向终端用户安全而可靠地供电。这就要求在发电厂和终端用户之间存在多条输电通道，整个输配电网具有较高程度的冗余。

第三个也是最高层次的服务，要求输配电网实现地理分布的最优化，

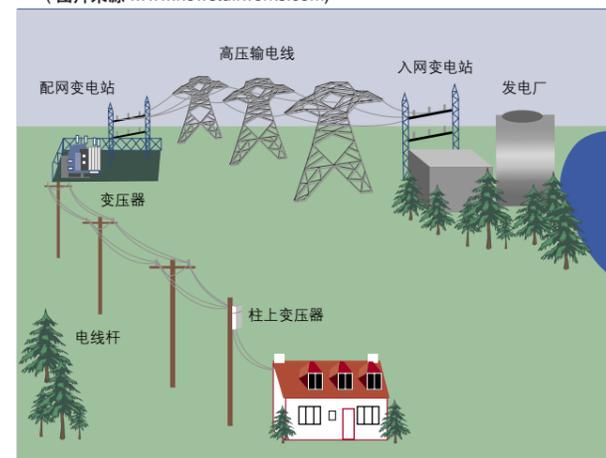
以及通过多种发电形式相互协调，达到社会效益的最大化。这其中包括，通过各类发电厂的联合经济运行，减少引起全球气候变暖的温室气体的排放，和通过电力市场的能量交易，最大限度地提高经济性，来满足用户的电能需求。这种最优化的经济运行离开了输配电网充足的输配配能力是无法实现的，它远远高于第二层次的要求。

遗憾的是，当今世界上绝大多数输配电网只能达到第二层次的要求，有些达到了第三层次的部分要求。近年来发生的停电事故 编者按 再次向世人证明了各国的输配电网缺乏足够的可靠性和最优化运行的能力。

正如下一节所述，一个建造合理的输配电网也能够提高能源的利用效率。

输配电网的传输容量不足会阻碍能源利用效率的提高：一个来自北美的例子

1 联接发电厂和终端用户的输配电网 (图片来源: www.howstuffworks.com)



充足的输配电容量是电力系统经济运行的基本的先决条件，它使电力系统可以通过各种发电厂的联合优化运行和减少网络损耗来提高能源利用效率。由于对电网扩建和现代化改造

编者按 近年来大的停电事故

北美	2003年8月14日
伦敦	2003年8月28日
丹麦/瑞典	2003年9月23日
意大利	2003年9月28日
希腊	2004年7月12日
澳大利亚	2005年3月14日
莫斯科	2005年5月25日
欧洲	2006年11月4日
澳大利亚的维多利亚	2007年1月17日
南非	2007年1月18日
哥伦比亚	2007年4月26日

的投入严重不足，导致目前美国的输配电网基础设施没有能力开展这些优化运行的措施图 1-1-3。

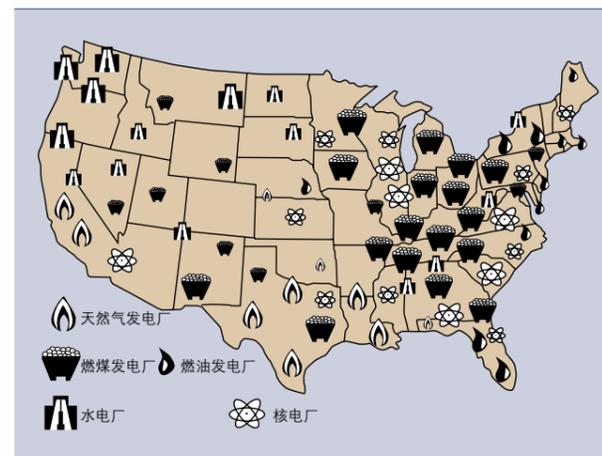
## 美国电网的输电阻塞

当必须减小输电线或电气设备的潮流，以保证电网的潮流水平不超过设备的物理容量极限或系统安全稳定运行所带来的限制时，这就称为发生了输电阻塞。购电商们总是寻求购买最便宜的电能，

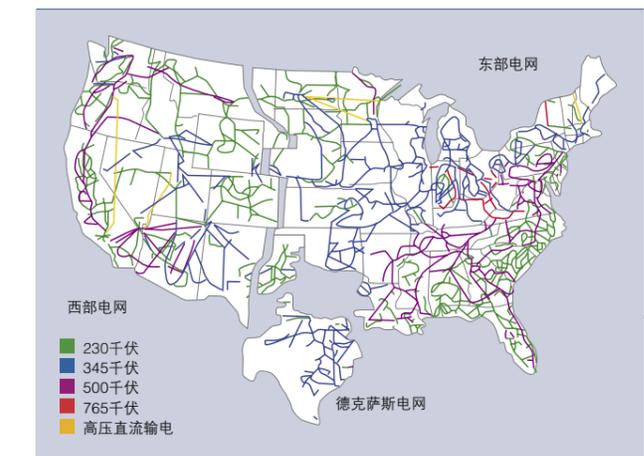
而这些廉价的电能必须通过输配电网才能到达负荷中心。当受到输电容量的限制，这些廉价电能不能被从用户最希望的发电厂输送到负荷中心的话，系统调度员就必须找到另一种替代的方案，用高价的或来自效率不高的发电厂的电能来满足用户的需求。2003 年曾对美国的六家独立系统运营商 1) 做过一个调查，他们是新英格兰、纽约、PJM2)、中西部电网、德克萨斯电网和加利福尼亚电网 [1]。调查表明，从

脚注：  
 1) ISO: 独立系统运营商 (Independent System Operator)  
 2) PJM: 宾夕法尼亚、新泽西、马里兰的互联电网  
 3) RTO: 区域输电组织 (Regional Transmission Organization)

2 美国的发电厂分布图 (资料来源: 美国能源部)



3 美国的输电网 (资料来源: 美国能源部)



高效的电力网

高效的电力网

1999年到2002年的4年间,这六家独立系统运营商的输电阻塞费用总和高达48亿美元。从区域输电组织RTO3)监管的电力市场得到的公开数据也表明,输电阻塞费用也在逐年递增。最近一份关于2001到2005纽约和PJM电力市场输电阻塞的研究报告指出,纽约电力市场每年输电阻塞费用高达10亿美元,而PJM则要超过20亿美元[2]。输电阻塞还会导致经常性地削减负荷图4。当用电负荷非常大而当地的发电量有限时,系统调度员就不得不在一些地区采取削减负荷的措施,以保障整个电网的可靠运行。

在采用架空输电线远距离传送大容量电能的情况下,高压直流输电(HVDC)的输电效率要更高一些。在同样的电压等级下,高压直流输电系统的输电容量是交流系统的2至5倍。

输电网的电能损耗

将电能从发电厂传输到负荷的过程中总是会有损耗。这些损耗使总的电力负荷增大,也增大了额外的发电量,造成能源的浪费。总的来说,输电网的损耗占电力系统总发电量的6%到7.5%[3]。其中,输电网的损耗占3.5%,而配电网的损耗占4.5%。网络损耗随电网拓扑结构、发电厂的位置、发电量的大小、负荷的位置与负荷大小的不同而不同。特别是,大运行方式下或重载线路的网络损耗要比平均或小运行方式下的损耗大得多。这是因为对输电系统的大多数设备而言,损耗与线路上流过的潮流功率的平方

成正比。输电网的年平均损耗估计超过210亿美元(以2005年的美国全国平均零售电价和总网损计算[3])。

近年来,美国电力网的损耗呈逐年增长的趋势,这主要是因为电力交易的增加和输电网的运行效率偏低图5。

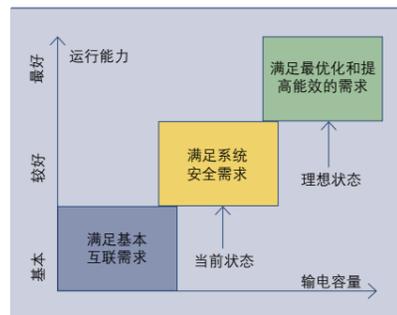
提高输配电网运行效率的新技术

提高输配电网运行效率的新技术可以分成以下三类:

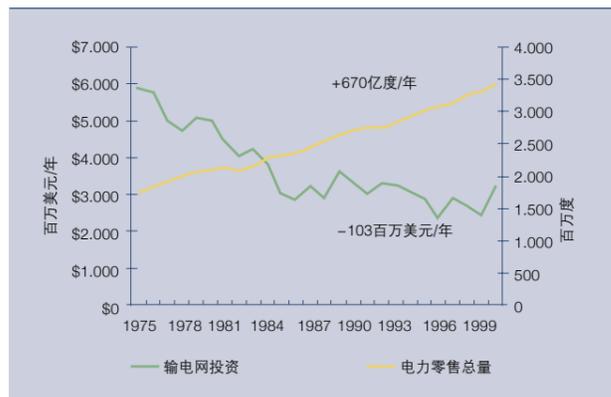
- 提高输电容量的新技术,以优化利用发电资源
- 输电网的优化设计与运行新技术,以降低总网损
- 提高电气设备效率的新的工业标准

提高输电容量,以优化利用发电

4 输配电网提供的三个层次的服务



5 输配电网的投资落后于电力需求的增长



资源

有三种主要技术可用于提高输电容量:建设新的交流或直流输电线路,升级现有的线路,和使现有线路的运行逼近它们的热稳定极限。

建设新的输电线路

在建设新的输电线路时,有两种技术可供选择:高压交流输电线路(HVAC)和高压直流输电线路(HVDC)。对高压交流输电线路HVAC而言,热稳定极限通常限制了线路的输电容量,如230千伏线路的400MW,345千伏线路的1100MW,500千伏线路的2300MW,和765千伏线路的7000MW。除了热稳定限制以外,交流输电系统的输电容量还要受到电压约束、系统稳定约束和系统运行约束条件的限制。正是由于这些因素,长大HVAC线路的实际输电容量通常要低于上述值。

高压直流输电线路(HVDC)

当采用架空输电线路,远距离(比如超过600-1000公里)大容量传输电能时,高压直流输电线路(HVDC)的效率会更高一些图6。在同样的电压等级下,HVDC系统的输电容量是交流线路的2到5倍图7。HVDC系统比交流线路对环境更友好,因为它占地面积小4)。HVDC被广泛应用于交流系统的互联,当受到系统稳定性的限制或两个系统的额定频率不同,交流互联不合适的场合,HVDC得到应用。另外,HVDC还被应用

脚注:  
 4) 参见 "Light and invisible, Underground transmission with HVDC Light", Dag Ravemark, Bo Norma, ABB 评论, 2005, 第4期, 25-29页;  
 5) IGBT: 集成门双极晶体管, 一种电力电子开关器件

于超过50公里的水下电缆的场合。在这种情况下,由于交流输电电缆的分布电容太大,使用HVAC显然是不切合实际的(不然,在线路中间需要建设补偿站)。最近,高压直流输电系统采用了基于IGBT5)的紧凑型电压源变流器,从而改善了交流系统的供电质量。该技术采用了结构紧凑的交流站和地下电缆输电线路-以减小对环境的影响。这项被称为“轻型HVDC(HVDC Light™)”的新技术,为改善交流系统的供电质量提供了可能,它还能够实现有功功率和无功功率的快速和独立的控制,系统紧急的功率支援,和黑匣子启动功能。

HVDC的效率

HVDC系统的损耗包括线路损耗和交流到直流的换流器损耗。换流器中的损耗约为传输功率的1.0%到1.5%。这比交流线路的损耗要小,交流线路的损耗是导线电阻和电流的函数。由于直流线路不传输无功功率,所以直流输电线的损耗要小于交流输电线。一般来说,当传输的功率相同时,HVDC输电系统的总损耗要小于交流系统图7。

建新线路的障碍

建设一条交流或直流输电线路的一个主要障碍就是关于建设费用分摊的分歧。输电线路通常要穿越一些地区,而这些地区的利益如何得到保障是个问题。是全社会来分摊建设费用,还是直接由受益者来出资兴建呢?这仍是一个在政治和社会上引起争议的问题。

即使新建线路得到财政支持,项目的审批和征地仍是一个长期的、复杂的过程,许多电力公司为此耗费了数年的时间。等到项目最终得到批准,那时系统的需求可能已经发生了变化,对原设计方案必须重新加以研究。

升级现有的线路

有三种方法可以提高现有线路的输电容量:提高电压等级,增加导线截面积和(或)每相的分裂导线数,和采用耐高温线材。当线路的电压等级得到提高,传输同样的功率时,电流将减小。例如,将230千伏线路的电压等级提高到下一个等级345千伏,线路的传输容量将从400MW提高到1100MW。

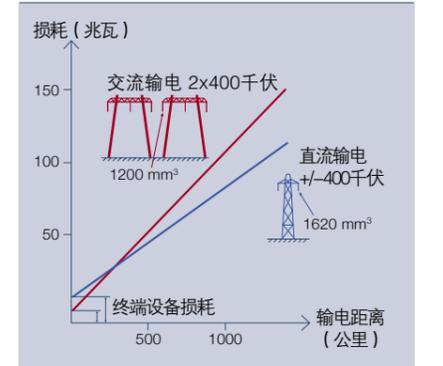
采用耐高温线材的输电线传输的电流是普通线材输电线的2到3倍,而它的截面直

径与普通导线相同,不会增加杆塔等支撑结构的负担采用分裂导线

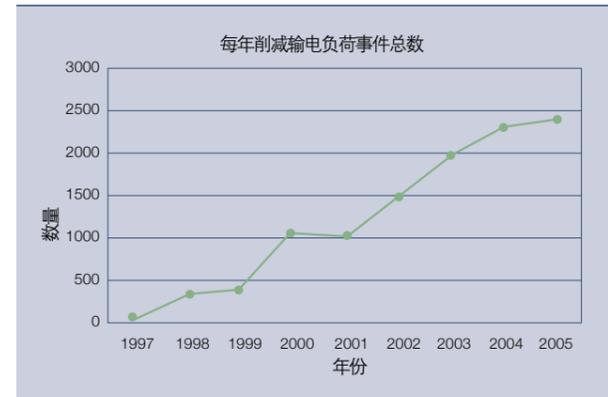
因为导线的电阻近似地与导线截面积呈反比,增加导线截面积或增加并联导线将增大导线的载流量。例如,一条230千伏输电线可以通过增加新的、截面积更大的分裂导线,使其输电容量从400MW提高到1100MW。

最近耐高温线材技术的进步,为减轻中短距离输电线的热稳定极限的限制提供了一条有效的途径。采用耐高温线材的输电线传输的电流是普通线材输电线(例如,铝包钢增强型导线-ACSR)的2到3倍,而它的截面直径与普通导线相同,不会增加杆塔等支撑结构的负担。

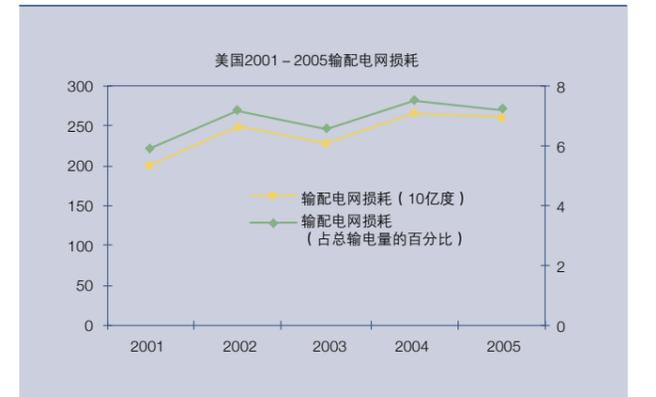
7 远距离的高压直流输电比高压交流输电的损耗更小



6 削减输电负荷事件逐年递增 (资料来源:NERC)



8 美国2001-2005输电网损耗(资料来源:EIA)



9 HVDC 换流站 :HVDC 系统在远距离大容量输电和其他场合得到越来越多的应用



10 FACTS 设备提高了交流输电的容量及其稳定性



对于以上两种方案(提高电压等级和采用分裂导线),都只是在原有线路上进行改造,不需要新的征地。但是由于新导线重量加大或增加绝缘距离的要求,输电杆塔需要加固或重建。变电站的主要设备,如变压器和断路器,可能也需要更换。

是建设新线路,还是现有线路升级?

是建设新线路,还是在现有线路的基础上进行改造,这已经不是一个单纯由技术就可以决策的问题了。如前所述,在美国建设新的输电线路项目的审批需要数年的时间,还不一定能够获得批准。但是,最近美国能源部 DOE<sup>9)</sup> 颁布了两项法规草案,将全国电力输电走廊的建设列为 2005 能源政策行动

纲要<sup>7)</sup>(EPACT 2005)的一部分。它主要是为了简化项目审批的手续,加快输电严重阻塞地区的主干输电线路的建设。

现有输电容量的充分利用

在许多情况下,由于电压约束、稳定性约束和系统运行约束的限制,输电线路的运行容量远低于线路的热稳定极限。现在,多项技术达到了实用化水平并得到了实际应用,它们提高了输电容量的利用程度。当发生“并联支路潮流”或“环路潮流”问题时,调相器(PAR,Phase-Angle Regulator)常被用来消除支路的热稳定限制。串联电容补偿也是另一种远距离高压交流输电线路常用的提高输电容量的方法。现在人们利用大功率电力电子技术开发了一系列设备,统称为柔性交流输电设备(FACTS,Flexible AC Transmission System),它们可以使我们更好地利用输电线、电缆和变压器等相关设备的容量图<sup>11)</sup>。其中最简单的一种,就是由晶闸管控制的电容和电抗的组合电路,也称为静止无功补偿器(SVC),它被广泛地应用于电网的中枢节点上,以提供快速的无功补偿。另一种得到广泛应用的设备是晶闸管控制串联电容器(TCSC,Thyristor controlled Series

Capacitor),它既能提供无功补偿,也能抑制系统的振荡。还有一种比较复杂得电力电子设备叫做静止同步补偿器(STATCOM,Static Synchronous Compensator),它能够根据系统电压的变化发出或吸收无功功率。最为复杂的设备是统一潮流控制器(UPFC,Unified Power Flow Controller),它能够同时调节流过线路的有功和无功功率,提供快速电压支撑和潮流控制。据估计,FACTS 设备的推广应用,可以将现在受电压约束和稳定约束限制的线路最大输电容量提供 20% 到 40%。

新建和运行无约束的输电网络所带来的潜在利益

降低电能的价格

无约束的输电网络可以将高效节能的发电机组与负荷紧密地联系在一起,从而提高了电力市场的整体效益。无约束的输电网络给我们提供了一个潜在的好处,使我们可以充分利用各地区天气变化和时区的差异所带来的

脚注:  
<sup>9)</sup> DOE: 美国能源部  
<sup>7)</sup> EPACT: 国家能源政策行动纲要  
<sup>11)</sup> 参见“Grid flexible, FACTS: novel means for enhancing power flow”, Rolf Grubbaum, Johan Ulleryd, ABB 评论,2005 年,第 4 期,21-24 页

地区负荷特性的差异。结果,高效发电机组满负荷运行的时间加长,而不经济电源的利用时间减少。

输配电网的损耗随网络结构的变化、发电厂的位置和出力、负荷的位置和大小而变化。

提高系统的可靠性

无约束输配电网能显著提高整个系统的可靠性。假定系统的备用容量一定,当某个区域电网发生灾难性的多重故障时,如多台发电机组和输电线路同时跳闸,无约束网络能够从邻近的电网调配足够的电力,提供紧急支援。

促进减少排放和发电燃料的多样化

无约束电网给我们提供了采用低污染发电,和在远离主要人口中心的可再生能源发电的机会。发电燃料的多样化也有助于主要依靠国内燃料的国家能源安全目标的实现。还能够帮助我们保持区域性的发电资源多样性的平衡,这样一旦某种资源发生暂时性的短缺也不会引起严重的社会问题。

在变压器绕组中用超导材料替代铜,可以显著地减少电能损耗

通过优化系统设计和运行可以减少输配电网的损耗

以下是一些得到广泛共识的降低输配电网损耗的技术,在输配电网的设计和运行中广泛采用这些技术,可以提高电网的效率。

- 增大载流量 - 用截面积更大的导线替换现有导线,或增加导线并联的回数
- 提高电压等级 - 提高一部分输电和

配电线路的电压等级

- 通过无功补偿优化电压的运行 - 在系统中合适的地点安装无功电源,使线路传输的无功功率最小
- 在主要电源点和负荷中心之间直接架设高压直流输电线路
- 调节各相负荷的平衡 - 改善配电网中各相电流的平衡
- 当环境温度达到或接近液氮温度时,超导线材的电阻为零。目前还处于研发阶段的高温超导体 (HTS,High Temperature

Superconductor) 能传输的电能是普通铜质线材的 3 到 5 倍。当环境和空间条件允许使用架空输电线时,高温超导输电线可用来替代传统的架空输电线或电缆。即使算上用于超导材料冷却的消耗,采用高温超导线材的输电网的损耗也要远小于普通的架空输电线和电缆。一个高温超导线材的主要供货商宣称,与普通线材的 5% 到 8% 的电网损耗相比,采用高温超导线材的电网损耗仅为 0.5%。而且,如果用超导线材替代传统变压器绕组中的铜导线,还可以进一步降低网损。以一个 100MW 变压器为例,超导线圈变压器的总损耗(包括线损,铁耗和线圈冷却消耗)一般是普通变压器的 65% 到 70%。

另外一些值得关注的能提高输电网效率的技术包括:

- 更多的采用地下配电网 - 这可以节省 80% 的配电损耗
- 直流配电网
- 微型电网,可以取消远距离输电线路

脚注:  
<sup>9)</sup> 以假定的 2005 年美国的全国平均零售电价为依据  
<sup>10)</sup> 1 夸特 = 1015BTU(英国热量单位) = 2.931x10<sup>11</sup> 千瓦时 = 1.055x10<sup>18</sup> 焦耳

- 智能化、自动化的电网设计
- 实时在线的电网控制系统
- 通过智能抄表系统实现负荷侧管理
- 能量储存装置的应用

据估算,通过降低输配电网损耗,可直接提高的电网能源利用效率约占总电量的 1%。这就意味着,每年可节省 30 亿美元<sup>10)</sup>。

提高电气设备的效率

提高输配电网效率的另一项关键技术,就是提高电气设备的效率。这是正在推进的改善能源需求侧管理,提高能源供给的安全性,减缓气候变化的计划的一部分。

变压器

配电网损耗占整个输配电网损耗的相当大的一部分图<sup>11)</sup>。一项对西北太平洋输配电网进行的研究表明,配网变压器的损耗占整个网损的比例超过 30%,而高压入网变压器的损耗仅占 2%<sup>[4]</sup>。由于配网变压器数量多,使用寿命长,它的改进具有巨大的节能潜力。从节能的观点来看,变压器的效率哪怕只提高 1% 的十分之一,也会节省大量的电能,因为大多数变压器长期处于运行状态。

11 可以通过合理选择绕组的线材和几何尺寸来降低变压器的损耗



11 配电变压器消耗的电能占输配电网总损耗的相当大的部分。新材料的使用可以减少这部分损耗





基于现有的实用技术,高效节能的变压器的损耗至少可以节省 15%。

通常在评价变压器的损耗时,要考虑两种类型的损耗:铁芯损耗和线圈损耗。铁芯损耗通常是指变压器的空载损耗,不论负荷大小如何,它们都会发生,因为需要在变压器的铁芯中建立磁场。如果一台变压器每天都运行 24 小时,那么这部分损耗将是变压器整个使用寿命周期(通常为 20 到 30 年)中最基本的损耗。另一方面,线圈损耗发生在变压器的绕组中,并随负荷的大小而变化图 13。因此它又被称为负荷损耗。

变压器的空载损耗可以通过采用铁磁材料或优化几何尺寸来减少。增加铁芯截面积,或减小每一匝的电压,都可以降低铁芯的磁通密度,进而降低铁芯损耗。减小导线的截面积,可以缩短磁通路径,也可以减小空载损耗。在采取这些措施时,我们必须注意,它们可能导致变压器负荷损耗的增加。降低负荷损耗可以有多种方法,比如

采用高导通率的线材,扩大导线截面积,或用铜导线来替代铝导线。采用低损耗的绕组相当于缩短了绕组导线的长度。更小的铁芯截面积和更少的匝数,都可以减少线圈损耗。特别是,超导变压器的线圈损耗最小。

从以上的分析可见,减少空载损耗可能导致负荷损耗的增加,反之亦然。因此,降低变压器的损耗是一个优化的过程,它涉及物理、技术和经济等各方面因素,还要对变压器整个使用寿命周期进行经济分析。在大多数情况下,变压器的设计都要考虑到铁芯/绕组的材料、设计、以及卖方如何评价变压器的业主总费用(TCO,Total Cost of Ownership)等各方面因素后,得到一个折中的方案。所谓业主总费用,不但要包含购买变压器的初期投入,而且要计及运行损耗等变压器整个使用寿命周期内的各种损耗。

电力企业在购买变压器时,一般会对它的业主总费用进行评价。而其他工业和商业企业通常只会直截了当地支付损耗费用了事,对业主总损耗的评价并不热心,这主要是因为他们们的购买程序不同,而且变压器的使用寿命也相对较短。

在许多情况下,由于电压约束、系统稳定约束以及系统运行约束等的限制,输电线路的运行负荷远低于它们的热稳定极限。

目前在许多电力市场里,由于政府的政策导向、主观能动性和市场力的作用,变压器的能效正在逐步提高。1992 年的美国能源行动纲要要求美国能源部提交一份关于改进配电变压器能效的

成本-效益分析报告。这项由 Oak Ridge 国家实验室完成的研究表明,提高变压器的能效在技术上是完全可行的,而且从 2000 年到 2030 年,这项措施可以节能高达 3.6 到 13.7 夸特<sup>10</sup>(1 夸特相当于 2.931x10<sup>11</sup> 千瓦时)[5]。1995 年,环境保护理事会(EPA,Environment Protection Agency)联合各大电力公司共同发起了一项节能之星变压器计划,以推广和支持高效节能的变压器。这项计划吸引了公众对提高能效,减少温室气体排放行动的关注。

最近,世界各地都在密切关注高效节能的配电变压器的应用图 14。加拿大、墨西哥、加利福尼亚州、马萨诸塞州、纽约、明尼苏达州、佛罗里达州、威斯康星州和俄勒冈州都在推行提高能效的计划。这些计划也得到了北美提高能效联盟(CEE,Consortium for Energy Efficiency)的支持与推动。北美提高能效联盟是一个非盈利组织,旨在推进高效节能的产品和服务。

虽然到目前为止还没有一个强制性的能源效率的标准,但对配电变压器能效的评价却有好几个工业标准。例如,全国电气制造商协会(NEMA,National Electrical Manufacturers Association)的标准 TP-1、2、3 就自发的被许多变压器制造商采用,用来确定能源利用效率,和测量配电变压器的能耗。NEMA TP-3 提供了高效节能变压器的指南。IEEE 标准 PC57.12.33 也为配电变压器损耗评价提供了指导。目前该标准尚处于草案阶段,但它比 NEMA TP-1 要更加详细。

美国能源部能效与可再生能源办公室最近公布了一项规则制订建议通知(NOPR,Notice of Proposed Rule

Making),其中对油浸变压器和中压干式变压器设定了最低能效标准。估计这项规定将对目前生产的 50% 到 60% 的配电网变压器产生影响。这些变压器一般采用最便宜和最容易到手的 M4、M5 和 M6 型的钢片。而按照新的提高能效的规定要求,必须采用 M2 和 M3 型的晶粒取向硅钢片。同时,该规定也对高效铁芯材料提出了更高的要求,因为干式变压器的铁芯大多是采用非晶粒取向硅钢片制造的。结果,高效变压器的最终价格和原材料的供给在规定的实施阶段都将面临挑战。将来,美国能源部最终会强制推行高效节能变压器,但是该规定何时生效,现阶段尚不明朗。按照美国能源部的规定,NEMA 的标准将会以某种形式被采用,它虽然

图 13 变压器原理图  
(资料来源:Precision Graphics)

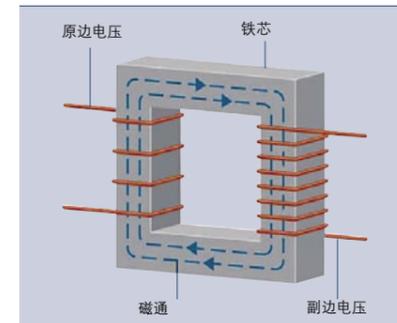


图 14 一个接线柱位置的三相变压器



发生在北美乃至 IEC 市场,但它却是全球范围内提高能效努力的一部分。

### 未来之路

以上介绍的这些技术可以单独使用,也可以组合起来使用,以提高电力系统的效率。全世界的节能潜力是巨大的。单以美国为例,通过降低输电网的损耗而节省的电能将超过总输电量的 1%,市场价值在 30 亿美元左右。而通过增强输配电网,降低输电阻塞成本,也可以节省数十亿美元。

另外,增大输配电网的输电能力,还可以优化发电的投资组合,开发利用清洁的可再生能源,减少化石燃料的消耗。

有美国各大电力公司和输供电公司共同参加的商业圆桌会议能源特别工作组输配电小组提出了如下的未来路线图计划:

无约束输配电网的运行将节能高效的发电机组和终端负荷紧密地联系在一起,从而提高了电力市场的效率。

- 需要有足够的投资来增强电网的输电能力和可控制能力,以保证发电

鸣谢:

在此,作者要特别感谢商业圆桌会议,在它的惠允下,文中使用了由能源特别工作组输配电小组提出的路线图计划的材料。由 ABB 公司领导的本工作小组,由美国各大电力公司和输配电设备供应商共同参加。本文所发表的观点不一定得到了商业圆桌会议的认同。

参考文献:

- [1] Dyer, J., U.S. Department of Energy Transmission Bottleneck Project Report, 2003;
- [2] Why Are Electricity Prices Increasing? A Report Prepared by The Brattle Group for Edison ElectricInstitute (EEI), 2006
- [3] Energy Information Administrator (www.eia.doe.gov)
- [4] Hammons, T. J., Kennedy, B., Lorand, R., Thigpen, S., McConnell, B. W., Rouse S., Prevost, T. A., Pruess, C., Dade, S. J., Ramanan, V. R., and Baldwin, T. L., "Future trends in energy-efficiency transformers", IEEE Power Engineering Review, pp.5-16, July 1998;
- [5] http://www.cta.ornl.gov/cta/publications/Reports/ORNL-6847.pdf, retrieved April 2007

资源的最优调度和利用;

- 基于先进技术和实践经验的优化的网络设计和运行方式,是节能的先决条件
- 需要制订高效节能的电气设备的工业标准,以降低损耗

今天,能显著提高世界输配电网能效的技术已经达到了实用化阶段。这些技术的推广应用,不光需要平衡长远利益和现实成本,还需要电力部门日积月累的不断探索、政策环境的推动和全社会的支持。ABB 的先进技术、最佳设计和实际运行经验,将在提高世界电力系统的运行效率中扮演重要的角色。

Enrique Santacana

ABB 公司,电力技术产品部  
诺沃克,康涅狄格州,美国  
Enrique.santacana@us.abb.com

Tammy Zucco

战略市场部  
电力产品和电力系统分部  
罗利,北卡罗莱那州,美国  
Tammy.l.zucco@us.abb.com

Xiaoming Feng  
Jiuping Pan  
Mirrasoul J. Mousavi  
Le Tang

ABB 公司,公司研究部  
罗利,北卡罗莱那州,美国  
Xiaoming.feng@us.abb.com  
Jiuping.pan@us.abb.com  
Mirrasoul.j.mousavi@us.abb.com  
Le.tang@us.abb.com

# 特高压输电

远距离大容量输电的新选择 -800 千伏高压直流输电 (HVDC) 和 1000 千伏高压交流输电 (HVAC)  
Gunnar Asplund

当前，不但全球能源消耗稳步增长，而且电源离负荷中心的距离也越来越远。远距离大容量输电变得越来越重要。

石油往往是通过超级油轮，而天然气是通过专用管道来实现远距离运输。用于发电的煤炭则主要是采用铁路运输的方式，持续增长的运量需要大量投资来加强铁路网的建设。因此，在煤炭

产地实现就地发电，再将电能输送到用电负荷的方式更经济一些。各种形式的可再生能源发电，如水力发电、风力发电和太阳能发电，都与电厂的地理位置有关，它们都不可能取代远距离输电。

远距离输电注定将扮演越来越重要的角色。在本文中，ABB 评论归纳了远距离大容量输电领域的最新技术发展。



自从电力输送出现以来，交流输电在电网中就一直占主导地位。它的优势在于，可以使用变压器提高电压等级，以实现电能的经济传输。交流发电机的直流发电机发出来的电能其电压等级相对较低。如果就在这个电压等级下远距离输送电能，电能损耗会很大，因此不能这样做。

利用交流输电技术还可以将不同地区的发电厂和负荷联成网络，以实现用户的灵活可靠的供电。在交流输电网发展的早期，主要关心的是供电的可靠性：因为发电厂离负荷相对而言比较近，远距离大容量输电的问题尚不突出。

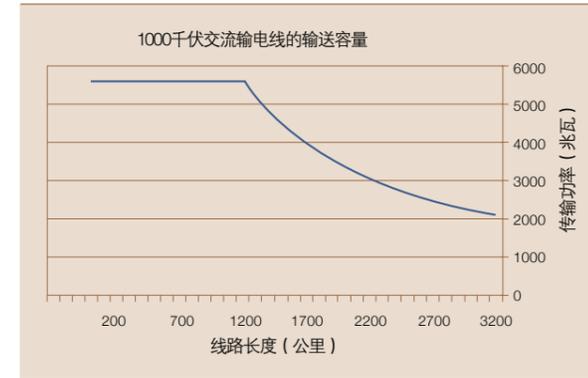
为了利用交流输电的优点输送大容量的电能，一种典型的作法是采用线路的串联补偿。对于将电能从一个地点传输到另一个地点的场合，串联补偿应用得很好，但是在复杂电网中，线路上的潮流往往是不可预测的，从而限制了串联补偿的应用。

随着交流输电的发展，电压等级越来越高。当传输的电能不大时，仍然可以采用低压网络。一般来说，电压等级翻一倍，输电容量将翻四倍。因此在大多数国家，对电网的评价就是看它较高和更高的电压等级的网络层次有多少。

经济合作发展组织 (OECD) 的大多数成员国的电能消耗量几乎呈指数增长，直到十九世纪七十年代初的石油危机。由于这场危机的影响，使建设更高电压等级如 800、1000、甚至 1200 千伏的计划

ABB 评论 2/2007

■ 交流输电线的输送容量随着线路长度的增加而减少：该图是一条 1000 千伏交流输电线的输送容量随线路长度变化的趋势，该线路的最大补偿度为 70%，两端电压相角差为 30°



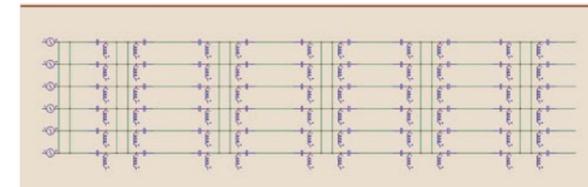
受阻。

三十年以前，电网的输电容量大体上是和负荷平衡的。随着用电量的增长，这种情况发生了变化。发电厂出现在一些新的地区：例如，风力发电厂通常坐落在电力系统较薄弱的地方。同时，对发电企业的规制缓和也使电力交易增加，导致更大的电能传输更远的距离。这些都对电网提出了更高的要求。

在大多数国家，对电网的评价就是看它较高和更高的电压等级的网络层次有多少。

发展中国家所面临的形势是大不相同的。这同经济合作发展组织成员国在五十年代面临的形势相似。但是，这些国家现在的发展速度更快，尤其是中国和印度。在过去的三十年里，输电技术得到了长足的发展，因此没必要再

■ 六回并行的输电线，并分成六段，配置有串联和并联补偿。不论哪一个元件出现故障，这些线路都会正常运行



去套用经济合作发展组织成员国的那些发展模式。

在这些发展中国家，新建的电网都是采用交流输电技术，就像其他国家一样。而且在有些场合，交流输电也被用来远距离传输电能。

## 远距离的交流输电

建设一条远距离输电线路的首要要求就是系统的稳定性

和能抵御像雷击这样事故的能力。在设计上必须满足 (N-1) 准则<sup>1)</sup>。这就意味着，为保证交流系统的稳定性，系统允许失去的最大电力应等于最大容量发电机组的出力，或是容量最大的输电线的输电容量。如果只通过单回线将一个发电厂的全部电力远距离输送到一个电力系统中，那么这个系统就必须能够经受得住失去这一电源的考验。如果传输的电能更大一些，就必须每 300 至 400 公里，采用并行的多回输电线，以提高输电的可靠性。

交流输电线越短，它的传输容量就越大。它的传输容量取决于电压等级和导线的热稳定极限。输电线越长，电抗越大，传输容量就越小。一条输电线传输的有功功率的公式是：  

$$P = \frac{U_1 \cdot U_2 \cdot \sin(\delta)}{X}$$
 式中，P 是有功功率，U1 和 U2 分别是线路两端的电压，是线路两端的相角差，X 是线路电抗。

脚注：

<sup>1)</sup> (N-1) 设计准则就是，当系统中有 i 个元件同时发生故障时，系统都能够承受，并正常工作。当这一准则应用于电力系统的设计时，N 表示系统中主要元件（如发电机、变电站、输电线路等）的个数，i 表示不导致电力系统失去稳定的同时发生故障的元件个数。

### 高效的电力网

### 高效的电力网

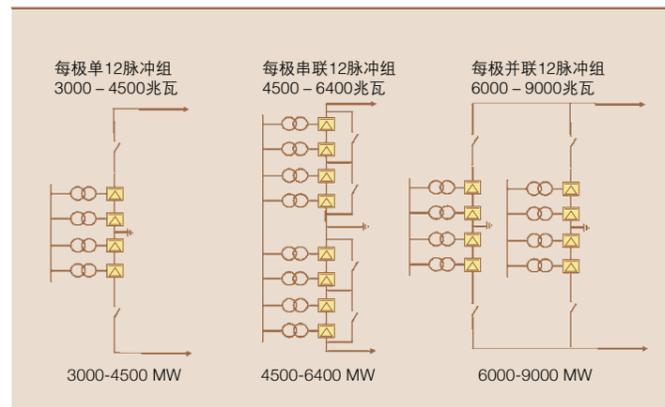
随着线路长度的增加，线路的电抗也在增加。如果维持线路传输的功率不变，相角差就必须增大。最大可能增大到 300 左右，继续增大就可能系统不稳定。克服这个问题最好的办法就是通过串联补偿减少线路电抗。线路补偿度可以增大至 70%，都不会引起太大的问题。当然，补偿度越高，系统的稳定性越差图 1。

当线路的负荷过轻，小于浪涌电抗负荷 (SIL, Surge Impedance Loading) 时，线路将发出无功功率。如果不加并联电抗补偿，线路电压就会很大。如果线路负荷大于浪涌电抗负荷，线路将消耗无功功率，导致节点电压降得很低。从可靠性的角度来说，应该将交流输电线分成一段一段的图 2，每一段都配上串联和并联补偿，并且将段与段之间互联起来，以保证在任何时候线路都能正常运行。

#### 技术上的挑战

对 1000 千伏和 1200 千伏的特高压输电线路，已经进行了好几次实验，甚至短时的商业运行，但到目前为止，都还没有正式投入商业运行<sup>2)</sup>。建设

3 800 千伏高压直流输电线路整流器的几种结构



的设备仍处于研发阶段。

### 800 千伏高压直流输电

#### 系统方面

直流输电系统是通过整流器将交流电变成直流，通过双极线路传输直流，最后在末端通过逆变器将直

这样的线路面临许多技术上的挑战，需要开发许多新的设备，包括变压器，断路器，避雷器，并联电抗器，串联电容器，电流和电压互感器，接地刀闸等。

在线路的控制和保护方面，也有不少特殊的要求。譬如，当发生单相接地短路时，如何清除故障而不断开三相断路器，就是一个挑战。问题在于非故障相将产生很大的容性电流，流入故障点。解决问题的关键就是利用可调电抗器，最大限度地减小这些感应电流。

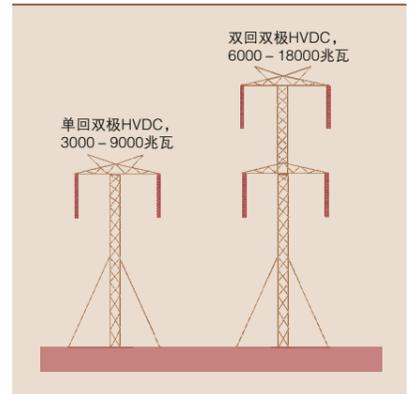
目前，800 千伏交流输电系统已经商业化运行，所有设备也都达到了实用化的要求。而 1000 千伏特高压输电

流电变成交流电。

三十年以前，电网的输电容量大体上是和负荷平衡的。随着用电量的增长，这种情况发生了变化。

从系统的观点来看，直流输电是一种简单的远距离输电的技术。整流站和逆变站都可以对电压和电流进行快速控制，因此特别适合潮流控制。送电端和受电端之间如果只有直流线路，它们的相角差并不重要。实际上，由于直流没有相位，与频率无关，因此通过直流线路实现互联的交流系统之间甚至可以异步运行。

4 采用 800 千伏 HVDC，在一个输电走廊里传输 18000 兆瓦的电力是可能的。



脚注：

<sup>2)</sup> 一条联接俄罗斯和哈萨克斯坦的 1200 千伏特高压交流输电线路从 1989 年至 1996 年曾投入商业运行。但后来由于前苏联的解体，该输电线路停运。

5 800 千伏高压直流输电系统在投入商业运行之前，必须要进行严格的设备实验。这些照片显示是在瑞典的 Ludvika 进行的变压器、变压器套管和换流阀体套管 (XX 页的标题图片) 实验的情景



如果在直流输电线上或整流器里发生故障，送电端的频率将升高，而受电端的频率将下降 - 除非非故障极线路具有足够的过负荷能力，而且有并行的直流线路来应付功率的不平衡。如果是永久性故障，就必须切除发电机，以维持送端系统的频率稳定。但如果交流输电线和直流输电线并列运行的话，那将出现问题。特别是当交流输电线的负荷率远低于直流输电线时 - 当两端的相角差过大时，这些线路可以被切除。

#### 系统结构

对 800 千伏高压直流输电系统而言，有好几种整流器的结构可以利用图 3。同时，几种可能的输电线的结构如图 4 所示。

#### 技术上的挑战

目前 HVDC 系统的最高电压是 600 千伏。20 年前建成投产的伊泰普电站，就是采用了双极 +/-600 千伏的高压直流输电线路，将 6300 兆瓦的电力传输到 800 公里以外。而 800 千伏的高压直流输电系统，还需要开发变压器、变压器套管、穿壁套管、晶闸管阀体、避雷器、分压器、直流滤波电容和绝缘支柱。

#### 技术的进步

ABB 公司对这些设备的研发已经持续了数年，所有 800 千伏直流输电系统所必须的设备都已经设计、制造和实验。下面讨论几个例子：

#### 原型变压器

已经制造出一种简化的原型变压器，其中包括了 800 千伏整流变压器的所有绝缘细节图 5。这种原型变压器的初步实验包括：

- 直流耐压 1250 千伏
  - 交流耐压 900 千伏
- 实验得到圆满成功。

#### 变压器套管

已经制造出一种最多可供 6 脉冲阀组使用的变压器套管图 6。该套管通过了各种型式和方法的实验，包括：

- 直流耐压 1450 千伏
- 交流耐压 1050 千伏

#### 穿壁套管

穿壁套管的设计与制造是基于最近 500 千伏系统的成功经验。除了电气的要求之外，18 米长的穿壁套管 (XX 页的标题图片) 在机械制造上都是一个挑战。最终，各种型式的电气和机械实验都获得了成功。通过计算，也

验证了它的抗震性能。800 千伏穿壁套管的设计和制造已经完成，并被安装到 800 千伏的实验系统中，进行了以下实验：

- 直流耐压 1250 千伏
- 交流耐压 910 千伏

对发电企业的规制缓和使电力交易增加，导致更大的电能传输更远的距离。这些都对电力网提出了更高的要求。

#### 长期实验站

为了最终展示这些技术的可行性，ABB 建成了一个长期实验站并投入运行。在这里，所有的设备都在 855 千伏的高压下至少运行了半年以上。

#### 实验站的设计

在这个能输送 6000 兆瓦、800 千伏高压直流输电实验站的设计过程中，非常重要的一点就是，当一个重要设备发生故障时，只损失一部分的电力。图 7 和图 8 显示的高压直流换流站具有四个换流模块。它可以按以下方式中的一种运行：

- 两个极分别包含两个串联阀组
- 两个极分别包含两个并联阀组

6 位于 Ludvika 的 STRI 的 800 千伏耐压实验



编者按 1 一条交直流混合输电线路，当直流线路故障退出时，仍能保持稳定的能力：场景 1，交流线路的回数更多时图 16

		并行的 500 千伏交流输电线的回数									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
故障退出的直流输电线的回数	1	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes
	2	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes
	3	no	yes								
	4	no	no	no	no	yes	yes	yes	yes	yes	yes
	5	no	no	no	no	no	no	yes	yes	yes	yes
	6	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no
	7	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no
	8	no	no	no	no	no	no	no	no	no	no

### 高效的电力网

### 高效的电力网

#### 成功的实验

在所有的研发和实验取得成功的基础上,现在我们可以宣布,该 800 千伏直流站已经具备了投入商业运行的条件。

#### 交流输电和直流输电的比较

##### 工程造价

输电容量为 12000 兆瓦,传输距离 2000 公里的交流和直流输电线路的工程造价如图 9 所示。由图可见,800 千伏直流输电线路造价最低,而且线路损耗最小

##### 交流输电的优势和劣势

交流输电最大的优势就是它的灵活性,它沿线的发电厂和负荷都可以与之相连。当输电线穿越人口密集区域,或者发电厂分散在输电线沿线的各个

地区时,这个优势就显得特别重要。

交流输电的劣势之一,就是它的造价。像上述这样的交流输电线是非常昂贵的,因为沿线还需要建设完备的供电网络。

交流输电的另一个劣势,就是需要征地,以建设供电走廊。因为交流输电不能充分利用线路的热容量极限,特别是对长输电线,因此需要建设并行的多回线路,需要更多的征地。

##### 直流输电的优势和劣势

直流输电的一个主要的优势在于它的造价较低,特别是远距离大容量输电的场合。

第二个优势就是它的线路损耗较低。一个 2000 公里的直流输电线路的

总损耗在 5% 左右。第三个优势是,输电线回数较少,占地面积小。如前所述,若需要传输 12000 兆瓦电力,当采用 800 千伏的直流输电,只需要两回线路;而当采用 800 千伏的交流输电时,需要八回输电线。

直流输电的主要劣势在于,它实现的是点到点的电能传输,如果要在中途建设接入变电站,则造价昂贵(虽然在技术上是可行的,而且已经实现)。

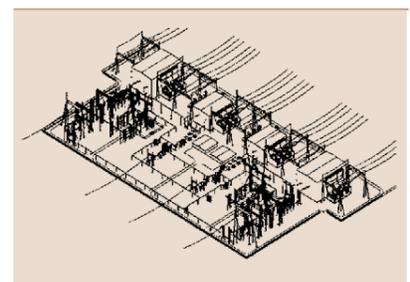
交流输电最大的优势就是它的灵活性,它沿线的发电厂和负荷都可以与之相连。当输电线穿越人口密集区域,或者发电厂分散在输电线沿线的各个地区时,这个优势就显得特别重要。

#### 交直流联合输电

如上所述,直流输电的主要缺点就是沿线建设接入变电站的高昂费用。但是在很多情况下,如果我们能将造价较低的大容量直流输电线路和电压等级不太高的交流输电线路并联起来,实现联合运行,就能够提供造价既低,又灵活方便,可以向沿线的用户供电的最佳解决方案。

当然,交直流混合输电也存在一些技术上的问题。譬如,在很多情况下,直流输电线路发生故障时,也会导

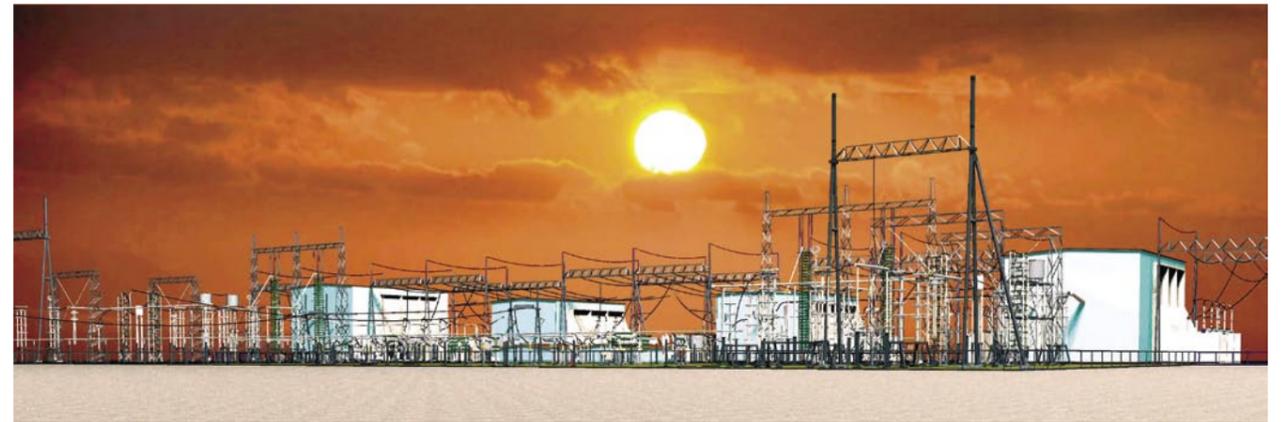
8 一个 HVDC 的整流站,双极运行,每一极都由两个串联的换流模块组成



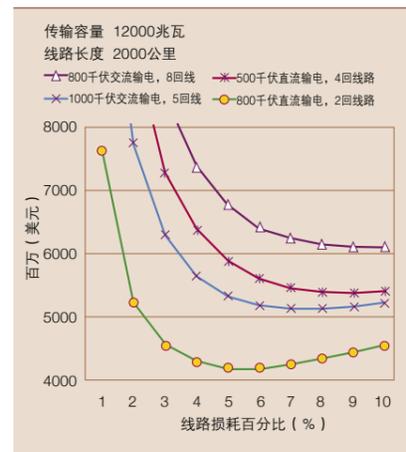
7 一个由四个换流模块组成的 HVDC 整流站 - 可以选择一种组合方式将某一个元件故障的影响降低到最小程度



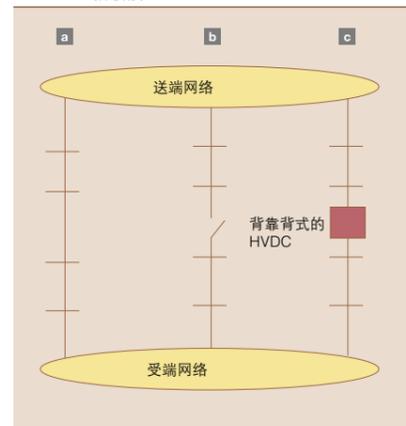
9 所示的双极运行的整流站的效果图 8



10 不同输电方式下变电站(或整流站)和输电线的费用相对于线路损耗的函数



11 用交直流混合输电实现两个网络互联的三种选择。a 交流输电线的回数较多,承担了大部分的输电容量,以此支援直流输电线路; b 两个交流网络完全分开; c 两个交流网络之间通过背靠背的 HVDC 相联接



致交流输电线路跳闸,因为两端的相角差太大。这个问题可以通过图 11 所示的几种方法来解决图 11。

#### 方案 1

如图 11 所示,使用非常强大的多回交流输电线,它们经受得住直流线路上的大多数故障,而不至于断开两端的网络。

为了说明这种运行方式,假设 HVDC 线路双极运行,输电容量 12000 兆瓦,输电距离 2000 公里,每一极都有四组整流模块组成。假设一个或多个整流模块发生故障时,HVDC 线路可以短时过负荷 50% 运行。而且假设有一组 500 千伏的交流输电线与直流线路并联运行,它们可以输送 HVDC 的故障线路所不能传输的功率 图 10。

该表格表示了当直流线路因故障退出运行后,系统仍能保持动态稳定性的能力。每一条直流线路能传输 1500 兆瓦的功率。这个结果与交流输电线路故障前的负荷有关。此处假设交流线路故障前的负荷占中传输容量的 34%。

#### 方案 2

如图 11 所示,两个电网异步运行,

每一边的输电线都向沿线的近一半负荷供电。在这种情况下,由于两个系统是异步运行的,所以不存在稳定性问题。

#### 方案 3

如图 11 所示,它与 11 类似,但通过背靠背的 HVDC 将两个系统联接起来,以增强供电的灵活性,而且也不需要实现两个系统的同步。更准确地说,这种背靠背的模式叫做电压源换流器,也称为轻型直流输电系统(HVDC Light)。它不但可以稳定电压,还可以提高交流输电线的传输功率。

#### 结论

为了实现远距离(超过 500-1000 公里)大容量的输电,800 千伏的直流输电系统通常是造价最低的选择。直流输电最大的缺陷是沿线的接入变电站造价昂贵。在这种情况下,交直流混合输电可能是造价最低而又灵活方便的解决方案,它由直流输电线路传输大量的功率,而由交流输电线路向沿线的负荷供电。在人口密集的地区,建设 1000 千伏的交流输电网络覆盖现有的 400 千伏或 500 千伏电网是合适的。

Gunnar Asplund  
ABB 电力技术部,电力系统 DC 分部  
Ludvika, 瑞典  
gunnar.asplund@se.abb.com

# 减轻输电阻塞

FACTS- 减轻输电阻塞的关键

Rolf Grunbaum, Peter Lundberg, Goran Stromberg, Bertil Berggren



就像打开开关电灯就会亮起，现代工业给我们带来的丰富多彩的物资和服务，人们似乎对可靠而不间断的供电已经习以为常，认为这是理所当然的事。ABB 并不这样认为 - 该公司提供了一整套的产品和技术，来保证和改进电网的完整性和供电的连续性。

当今社会对电网的要求正在发生改变。传统的从发电厂到最近的大城市的输电方式正在被更复杂的供电方式所取代。随着用电负荷的增长和电力交易的增加，更多的电能需要远距离的传输。随着可再生能源的利用，电网的压力越来越大，因为很多这样的电厂都是坐落在偏远的地

区，而那些地区的电网又相对较弱。新的输电走廊的大规模建设往往不是最佳的选择，因为要综合考虑环境、占地、审批和造价等因素。一个解决方案就是充分利用现有的输电线路，同时不降低系统的供电可靠性。来自 ABB 的技术使这一切变为可能！

输电阻塞这一概念的定义是，流过一个潮流传输断面的功率是有一定限制的，或者说人们希望通过某一断面传输更多的功率。这种动机是因为这一断面两边的电能生产成本的差异 - 这种价格上的差异在当今规制缓和的电力市场中是透明的。换言之，至少某一边的用户可以从购买另一边的便宜电能而获到好处。但是，在这个交易成交之前，还必须看一看输电网能否完成这个交易。

消除输电阻塞的传统作法是，新增输电容量（例如增加新的架空线路）。虽然这种方法仍然可行，但却变得越来越复杂，因为常常会遭到公众的反对。新建输电走廊，或者扩建现有线路的项目的审批越来越困难和旷日持久。

一个可以延时甚至避免这种投资的办法，就是充分利用现有线路，使它更加灵活和可控。这可以通过在输电线路中安装柔性交流输电 (FACTS, Flexible AC Transmission System) 这样的控制设备，以及各种先进的信号采集系统来实现。虽然从整体上来说，这个概念已经得到了广泛的认可，但是在如何实现上还存在着很多挑战，值得我们关注。

## 利用 FACTS 装置，减轻输电阻塞

一般来说，对不同的解决方案都需要进行认真地研究 - 而最终方案的选择则取决于物理上的限制。但不管怎么说，考察这些解决方案的实际运行环境是完全一样的，而且它们的控制策略也都大体相同。一般地，FACTS 装置校正控制的原理与图 1 所示类似。

消除输电阻塞的传统作法是，新增输电容量（例如增

加新的架空线路)。虽然这种方法仍然可行，但却变得越来越复杂，因为常常会遭到公众的反对。

## 一个故障处理过程的详细分析

在超过 99% 的运行时间里，控制系统的目标是使损耗最小，并对相邻线路的环路潮流进行控制。当线路发生故障时，控制目标马上变成使线路的电压、电流不超过设备的物理极限。当故障清除之后，随之而来的是系统的暂态过程。在这个暂态过程中，包括了第一周波摇摆的功角稳定问题；功率振荡的抑制 (POD, Power Oscillation Damping) 问题；电压稳定与恢复问题；以及频率控制问题等。为了成功地平息故障，要求 FACTS 装置的控制速度足够快。

10 到 20 秒之后，系统暂态过程结束，故障后阶段开始，这时系统较慢的变化过程值得注意。此时的控制目标是针对这些慢变化过程的，包括不超过线路的热稳定极限、电压支持（防止电压崩溃）和频率支持。

20 到 30 分钟之后，系统运行人员就已经掌控了系统的状况，并采取了正确的措施来稳定系统的状态，即使

设备再次发生故障，也不会导致停运这样的严重后果。

FACTS 设备一般都采用校正控制策略，它能提高故障前稳态系统的运行效率，并能强有力地维持系统的安全稳定。而当系统发生严重故障时，它也能运行人员赢得尽可能多的宝贵时间。

不同的 FACTS 设备，实现图 1 所示各个阶段的控制目标的方法不尽相同。FACTS 设备通常可分成串联补偿和并联补偿两大类。

## SVC 和 STATCOM

静止无功补偿器 (SVC, Static Var Compensators) 和静止补偿器 (STATCOM, Static Compensators) 都是并联接入电网的关键节点上。这两种设备都是利用电力电子器件，动态地控制发出或吸收的无功功率。通过无功功率的调节达到控制系统电压的目的。另外，它们还可以短期和长期的电压支持，并且在暂态过程中还能抑制系统的功率振荡 [1]。

经典的 FACTS 设备，静止无功补偿器 SVC 的主要功能，如文献 [2] 所述。

图 1 校正控制的控制目标 - 正确地设定系统在不同阶段的控制目标的优先顺序，是控制故障，预防停电的关键



## 高效的电力网

## 高效的电力网

STATCOM 图 2 是在电力电子技术中的电压源换流器概念的基础上提出来的。ABB 生产的 STATCOM, 被称为 SVC Light, 采用了 IGBT 器件。这种换流器具有以下特点:

- 发生严重故障时提供强有力的电压支持
- 平衡非对称和快速变化的负荷
- 抑制功率振荡
- 谐波电流的有源滤波

SVC Light 的详细介绍可参见文献 [3] 和 [4], 其中介绍了很多例子, 显示了它的优良性能。

在超过 99% 的运行时间里, 控制系统的目标是使损耗最小, 并对相邻线路的环路潮流进行控制。

## 带能量储存的 STATCOM

SVC Light 的一个可选的增强型是由串联电池组成的能量储存模块 (图 3) [5]。所储存的能量的大小取决于性能与造价的优化。在典型工况下, 一般要求它的放电时间, 也就是发出最大有功时的运行时间, 为 15 到 30 分钟。能量储存模块也能使 STATCOM 在一段时间内发出或消耗有功功率。

电压源换流器 (VSC, Voltage Source Converter) 采用了多个 IGBT 器件的串联形式, 因此具有较高的性能和较大的功率。在对负荷进行供电的同时, 必须对电池的充电进行控制。它应用的一个典型例子, 就是与像风力发电机组这样的发电量起伏变化的可再生能源发电设备联合运行。能量储存模块所具有的调节负荷的能力, 使这些发电机组能够按照调度中心的调度命令, 按计划发出有功功率, 并在

2 静止补偿器 (STATCOM, Static Compensator) 通过发出或吸收无功功率, 实现电压的动态控制



运行条件的限制范围内发出或吸收无功功率。

这样, 可再生能源发电机组通过和带有能量储存模块的 STATCOM 的联合运行, 使我们像利用普通的发电厂一样, 使用这些原本断断续续的电源 [1]。

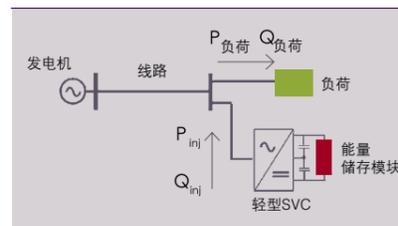
在电力系统中使用这些设备的另一个好处, 就是紧急状态下的黑启动, 或是利用现有的频率和电压控制实现网络的重构。利用 STATCOM 能同时调节有功功率和无功功率的特点, 能够更好地抑制系统的功率振荡。这就使系统传输的功率更大, 在一定程度上缓解了输电阻塞。

从原理上讲, 带有能量储存模块的 STATCOM 装置能够改变一个给定的潮流流过一个阻塞断面的时间 (假设该装置是安装在输电走廊的受电端)。在不发生阻塞时将电能储存起来,

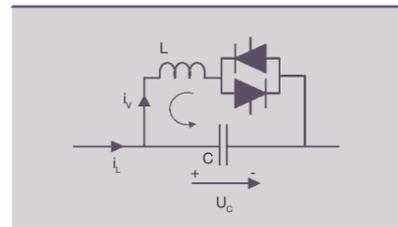
脚注:

<sup>1)</sup> 像风力发电这样的间歇性的电源通常需要常规发电厂预留一部分容量作为旋转备用。而这些能量储存的措施使这部分旋转备用容量得以充分的利用。

3 带有轻型 SVC 的动态能量储存模块



4 晶闸管控制串联补偿器 (TCSC, Thyristor Controlled Series Compensation)-TCSC 允许改变串联补偿度



5 用于抑制系统功率振荡的 TCSC 设备



当发生阻塞时, 通过电池放电将先前储存的电能释放出来, 以减少通过阻塞断面的潮流。当然, 从整个电力网的角度来看, 为了达到消除阻塞的目的, 所需要的能量储存模块的容量太大, 不太现实。但对个别用户, 这可能是一个经济实用的方案 - 特别是针对用户关心的电能质量问题。

带有能量储存模块的 STATCOM 装置的另一个用途是用于系统的有功 - 频率控制, 特别是当它安装在潮流阻塞断面的受电侧。这种网络结构还可以缩小系统传输容量和电力交易需求之间的差距。

## 晶闸管控制串联补偿器 (TCSC, Thyristor Controlled Series Compensation)

其他一些 FACTS 装置虽然没有能量储存模块, 但也能调节系统的有功潮流。比如, 串联补偿装置就能应用于这一目的。

TCSC 图 4 通常被应用于网络中的功率传输的瓶颈处, 在这些线路上的功率传输极限通常取决于系统的功率振荡极限。特别是当系统的联络线较弱, 当发生功率振荡时系统易解裂成两大发电机群的情况, TCSC 就显得非常有效。它通常由固定的串联补偿环节和一个晶闸管控制单元组成。后者主要被用来阻尼系统的振荡。它可以根据线路的工作状态精确调节阻尼, 因此可以提高线路的功率传输极限 [6]。

TCSC 控制的基本原则是, 在电容器两端的电压过零前向晶闸管导通。这将给电容器提供附加的电流, 而使它的视在电抗增大, 通常将增大到它正常电抗的 3 倍。这个被称为“起

(boosting) 的过程, 减轻了系统的振荡。与固定式串联补偿相反, TCSC 在工频以下的频率段呈感性, 因此不会和附近的汽轮发电机组相互作用而发生次同步谐振 (SSR, Sub-Synchronous Resonance)。

近来, TCSC 能调节稳态时线路上的有功潮流的功能越来越受到重视, 特别是在发生了一系列重大的停电事故之后。虽然具有高起动能力的 TCSC 能够控制系统的潮流, 但通常更好的作法是将电容支路分解成晶闸管开闭的电容器的串联组合电路, 称为晶闸管开闭串联电容器 (TSSC, Thyristor-Switched Series Capacitor), 如图 6 的右边所示。

提到潮流控制, 人们很自然地将 TSSC 和移相变压器 (PST, Phase Shifting Transformer) 进行比较。对于克服线路热稳定极限的限制, PST 是比较合适的, 但它对于改善系统的暂态特性来说速度太慢。而且, PST 将恶化系统短期和长期的电压特性, 降低系统的功角稳定性。

另一方面, TSSC 对于改善系统暂

态品质非常迅速, 还能够对系统的电压提供短期和长期的支持。但是, PST 既能增大也能减小线路潮流, 而 TSSC 只能增大线路潮流。而且作为 TSSC 的主要控制规律, 其电抗一般都控制在它连接的线路电抗的 60% 左右。因此, 如果要求对线路的潮流功率进行大范围的调节 (取决于网络的拓扑结构), TSSC 往往是不够的。

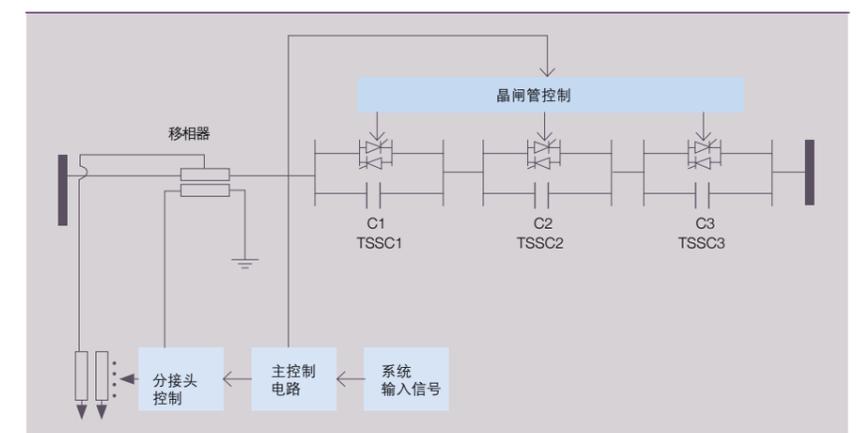
## 动态潮流 (Dynaflo) 控制器

为了减轻阻塞, 实现多目标控制, ABB 正在研发一种被称为“动态潮流” (Dynaflo) 的潮流控制器。它是由一个移相器 (PST) 和多级协调控制 TSSC 单元的串联组成的 (图 6)。

做到各个系统的运行人员职责分明, 对于成功地实现系统的协调控制是非常有利的。

线路潮流的控制功能由 PST 和 TSSC 共同承担, 它由一个小容量的 PST 和 TSSC 串联组成。Dynaflo 集成了 PST 和 TSSC 的优点。它能在故障前的稳态实现线损最小和 (或) 环路潮流控制, 在故障的暂态过程中提高

6 Dynaflo 系统的结构图 - 它是由一个移相器 (PST) 和多级协调控制 TSSC 单元的串联组成的



系统第一周波摇摆稳定性, 阻尼系统的功率振荡, 和(或)改善电压品质, 而在故障后提供电压支持, 和(或)减轻线路热稳定极限的限制。控制系统和必要的控制信号可以根据安装地点的潮流瓶颈的控制要求进行适当的调整。高性能的通讯和采集系统是实现上述功能的必要前提。

Dynaflow 的典型应用是大城市的供电网络线。人口高度密集的大型城市的有功和无功负荷都很大, 而电源又相对较远。这通常导致给城市供电的联络线负荷太重, 缺乏足够的动态无功电源。

一个典型的严重扰动就是在联络线上发生故障, 导致该故障线路永久跳闸。假设功率不均匀的分布在余下的线路上, 而装有 Dynaflow 装置的线路需要承担更大的负荷, 以使其他的并联线路不发生负荷, 那么控制目标应设置如下:

- 在故障前的稳态, 重点是使系统的有功损耗最小。通常是由调度中心根据最优潮流计算的结果来设置控制点;
- 在故障发生后的瞬间, 所有的 TSSC 的电容器单元都要立即投入, 以对电压的恢复提供支持。这对于那些电动机负荷(比如空调负荷)占相当比例的城市而言越发显得重要。如果没有电压的支撑, 这些负荷的电动机将逐渐减速, 从而消耗更大的无功功率; 而这又反过来导致局部的电压崩溃和雪崩式的停电事故。
- 一旦电压得到恢复, 控制目标就转向克服线路热稳定极限的限制。通过 PST 和 TSSC 共同的调节作用, 可以避免 Dynaflow 安装线路或其邻近的并联线路上发生过负荷。如果所

发生的故障非常严重, 过负荷无法完全避免, 那么就使所有的并联线路均匀的过负荷运行, 这可以给运行人员争取到足够的时间采取补救措施。

#### WAMS 和 WACS

考虑并联线路负荷状态的动态潮流协调控制通常需要远程测量技术。广域测量系统(WAMS, Wide Area Measurement Systems)最新的技术进展, 加上通讯技术和 FACTS 技术的综合应用, 使广域控制(WACS, Wide Area Control Systems)成为可能。在一些并联线路上安装的多个动态潮流控制系统需要进行协调控制, 以达到减轻阻塞的共同目标。

为了减轻阻塞, 实现多目标控制, ABB 正在研发一种被称为“动态潮流”(Dynaflow)的潮流控制器。

#### 相关的研究课题

显而易见, 这些潮流控制系统所能实现的调节能力毕竟是有限的。这些限制使潮流传输断面上的功率传输极限达到了一个新的水平。从系统运行规划的角度来说, 更重要的是开发更加有效的安全评估工具, 以充分利用这些潮流控制系统的功能。

从以往的运行经验来看, 瓶颈往往发生在不同电网之间的潮流传输断面上。做到各个系统的运行人员职责分明, 对于成功地实现系统的协调控制是非常有利的。

#### 结论

FACTS 家族包含了一系列的控制装置, 它们可以减轻潮流阻塞, 提高现有电网的效率。到底选择哪一种

FACTS 装置取决于潮流瓶颈的性质。对于不同的潮流瓶颈, 往往有不同的对策。本文介绍了带有能量存储模块的 STATCOM、TCSC 和 Dynaflow 等三种方式, 以减轻潮流阻塞。

在很多场合, 协调控制的应用得益于针对不同潮流瓶颈问题而特殊设计的先进的通讯和控制系统的功能。

对于运行规划来说, 能充分利用这些潮流控制系统能力的有效的安全评估工具是非常重要的。特别是在处理不同电网之间的潮流传输断面上的阻塞问题时, 就显得尤为重要。

Rolf Grunbaum  
Peter Lundberg  
Goran Stromberg  
ABB 电力技术部  
Vasteras, 瑞典  
rolf.grunbaum@se.abb.com  
peter.lundberg@se.abb.com  
goran.stromberg@se.abb.com

Bertil Berggren  
ABB 公司研究院  
Vasteras, 瑞典  
bertil.berggren@se.abb.com

#### 参考文献

- [1] Mathur, R.M, Varma, R.K, Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems, IEEE Press, 2002, ISBN 0-471-20643-1
- [2] Hingorani, N.G., Gyugyi, L., Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems, IEEE Press, 1999. ISBN 0-7803-3455-8
- [3] Larsson, T., Ratering-Schnitzler, B., SVC-Light: A Utility's aid to restructuring its grid, IEEE PES Winter Meeting, Singapore, January 2000
- [4] Grunbaum, R., et al, FACTS: Powerful means for dynamic load balancing and voltage support of AC traction feeders, IEEE Power Tech., Porto, Portugal, September 10-13, 2001
- [5] Svensson, J., Jones, P., Halvarsson, P., Improved Power System Stability and Reliability using Innovative Energy Storage Technologies, In Proc. IEE ACDC 2006, London, U.K., pp. 220-224
- [6] Gama, C., Angquist, L., Ingstrom, G., Noroozian, M., Commissioning and Operative Experience of TCSC for damping power oscillations in Brazilian North-South Interconnection, In Proc. CIGRE Session 2000, Paris, France, 2000, pp. 14-104

# 利用风力发电

风力发电已成为改变电力供应结构的一个范例  
Jochen Kreusel

正当人类面临日益严重的温室效应和未来能源短缺的时候, 能源供应市场也在悄然发生着变化。像风力发电这样的可替代能源的市场份额正在持续快速的增加。但正如常言所说的那样, “风是令人捉摸不定的”。换句话说, 当风停下来时, 发电也就停止了。虽然天气变化无常, 但电力用户可不愿意经常发生停电。这就需要一定的备用发电容量来弥补风力发电的波动起伏, 使最终的电力用户几乎察觉不到。

挑战还不仅仅是这些。火力发电厂在选址时, 往往是从输电网的角度来考虑如何方便输电 - 结果是它们大多靠近大城市的负荷中心。但风力发电厂只有建在风能资源丰富的地方, 此时输电网必须满足风电厂的要求, 而不是反过来。

可见, 未来的供电系统必须要能够灵活地应对这种非计划性的发电厂和高品质的供电质量之间的矛盾。

## 高效的电力网

## 高效的电力网

在现代工业化的社会里,电力供应的一个主要优势就是,电能能够以一个标准的品质在任何时间和任何地点方便地使用。自从20世纪初电力系统出现以来,它就是一个以电力消耗为中心的系统结构。系统的规划和建设都是围绕着负荷中心进行的(最初的电力系统都是分散的和本地化的),在大多数国家占主导地位的火力发电厂都是按照它们各自的运行模式来满足电力负荷的需要。

为平衡起伏波动的电力负荷所需要的电能,主要由火力发电厂的备用容量来高效地提供(比如燃油电厂)。但是这一基本原则在过去15年里遇到的问题越来越大,主要有两大原因:

- 从上世纪90年代开始在世界大多数国家推行的电力供应市场的自由化,打破了电力供应本地化的原则。而竞价上网又不能保证所有不同的电厂都能发电,这对电厂而言并非是一个有利的政策;
- 越来越明显的温室气体排放所引起的气候变化,和主要燃料储量的持续

短缺,使可再生能源的利用越来越受到人们的关注。继从电力供应之初就得到利用的水力发电之后,风能已经成为世界上第二大可再生能源。

在过去的15年里,世界上的风力发电得到了异常迅猛的发展。

风能和太阳能是最理想的可持续能源:与所有其他可再生能源相比,它们清洁、可长期使用、并且具有巨大的增长潜力。但是,它们的开发利用却与当今以负荷为中心的系统运行模式大相径庭。因为不论是风能还是太阳能,它们都不能在发电侧大量储存,所以,未来的电力系统必须比现在的电力系统更加灵活。它们必须要能够调和这种发电侧的不可预测性和不稳定性,与负荷侧对高供电品质和可靠供电的要求之间的矛盾。

### 电力供应基本结构的变化

从上世纪90年代以来,在电力供应上出现了两大重要的变化趋势。第

一大趋势就是世界范围内发生的电力供应市场的自由化趋势。它使得发电、大宗电力的批发市场和能源市场,与配电市场和系统运营完全分开。结果是,新建电厂的规划不再与电网扩建的规划同步协调。而且,系统运营商必须遵守发电厂的发电合同和负荷供电的约定条款。只有当发生了危机系统稳定的事故时,他才有决定权。最后,系统运营商对独立发电厂的发电机组的信息也是知之甚少。

第二大变化趋势是,努力提高能源利用效率,减少非可再生能源的运输。在这一方面,热电联产的分布式发电和可再生能源发电扮演了核心的角色。而后者毫无疑问是持续满足全球长期能源需求的最重要的因素之一。因此,它们在很多国家的能源政策中都占有重要的地位,得到了持续强有利的发展。

在过去的15年里,世界上的风力发电得到了异常迅猛的发展<sup>1)</sup>。它的独特优势体现在巨大的可利用风能储量(至少在沿海地区)和远低于其他可再生能源的发电费用。以前风力发电一直没有得到充分的利用,是因为它的经济效益还不够大。但现在很多国家都在大力推行风力发电,截至2006年底,全世界的风力发电装机容量超过了74000兆瓦。单独在德国,风力发电的装机容量增长得最快,到目前为止已经超过了20000兆瓦图1(德国2005/2006年冬季全国电力负荷高

脚注:  
<sup>1)</sup> 参见本期XX页的“来自海上的清洁电力”

峰为77000兆瓦)。结果,2006年德国全年的风力发电量为305亿度,占总发电量的5.1%。

这两种发展趋势有一个共同点,除了发电量起伏波动以外,就是电力系统的调度人员不得更多地面面对这种非计划性的发电过程。

在水力发电之后,风力发电已经成为世界第二大可再生能源发电。

### 这种非计划性的发电装机占到相当比例后的结果

风力发电的一个基本特征就是,它是由地域决定的-可利用风能储量丰富的地区往往远离负荷中心-并且它还是多变的。

不管是哪种类型的可再生能源发电,其发电厂址的选择都是由可利用的一次能源的储量决定的-特别是当新建电网的费用与厂址的选择无关时。在德国,大多数的风力发电厂集中在北部地区图2。而这些地区的电网基础设施非常薄弱,不能传输这么大的发电量。因此首先必须扩建电力网。在德国,除了20000兆瓦的陆上风力发电装机以外,加上近海的风电厂,总风电装机达到30000兆瓦左右。图3显示了未来风电装机容量增长的预测。德国能效署<sup>2)</sup>的一项关于风力发电装

脚注:  
<sup>2)</sup> DENA:Deutsche Energie Agentur(德语),德国能效署

机容量增长对德国电网影响的研究表明,截至2015年,还需新增的输电线路超过800公里[1]。

但是,风电装机比例的增大不仅需要新建输电网络,而且对电网中的其他发电机组也提出了新的要求。首先,风电的装机容量必须要慎重考虑:普通风场条件下的陆基风力发电厂的可用率只能达到它们装机容量的10%到15%。而海上风电场的可用率则可以达到50%左右。为平衡风电机组出力的波动,必须建设所谓的“后备电厂”:它们都是备用(非风力的)电厂。

由于这些后备电厂的支持,在风电装机容量迅速增长的电网中,在初期其发电装机容量不会引起任何供电的问题。但是,还必须保证系统的短期和中期备用容量。原则上讲,就像其他的电力系统一样,发电和用电必须随时随地保持平衡。在所有的发电系统中,有

一部分所谓的调峰负荷,是由只发部分额定容量的调峰机组供电的,这些机组可以快速增加或减小出力,而不引起系统明显的变化[编者按]。因为这些调峰机组需要安装附加的控制设备,而且它们的装机容量得不到充分利用,所以调峰负荷段的大小应越小越好。这一负荷

### 编者按:电力系统必须的备用容量

秒级备用容量:是系统在数秒钟内就可以获得的发电容量。它通常是由那些只发出部分额定容量的发电机组提供的,而且它的出力能够简单的增加或减少。秒级备用容量主要是用来进行频率控制。

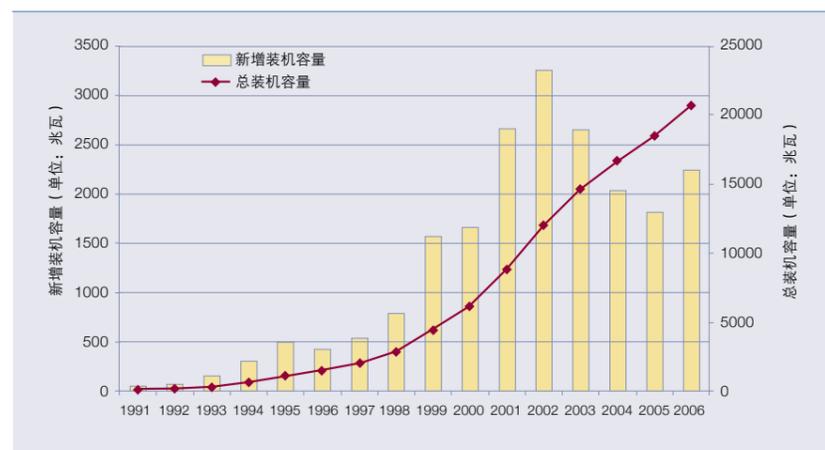
分钟级备用容量(也称为热备用或旋转备用):是下一个级别的备用容量。针对非计划性的发电出力、输电线故障或负荷扰动等,首先都用秒级备用容量进行调节。为了空出这部分备用容量以应对新的扰动,通常要求在数分钟内将这部分出力转移到其他发电机上(例如,UCTE的运行规则要求,在15分钟内由分钟级备用容量来替代秒级备用容量)。分钟级备用容量通常是由储能电厂、燃气电厂(当初它的建设就是为了这一目的)或没有满负荷运行的火电厂来提供。

小时级备用容量(也称为冷备用):是下一个级别的备用容量。它通常是由专为此目的兴建的发电厂来提供。

2) 德国的 Mecklenburg-Vorpommern 地区:当地的人口稀少,工业也不发达,所以电力网比较薄弱



1) 德国风力发电装机容量的增长(资料来源: Bundesverband Windenergie e. V.)



段的大小取决于系统中不可预测的负荷波动的幅值；它是由负荷本身和最大发电机组（不论它在任何时候发生故障，系统都有能力弥补）的装机容量决定的。在一个电力系统中，比如欧洲的UCTE3)系统，对调峰负荷段的大小和调峰机组必须达到的出力变化率都有明确的要求。

### 在很多情况下，海上集中的大规模风力发电厂需要永久性大容量的输电线路

如果在一个电力系统中，风电厂的出力在很短时间从几乎满负荷之间波动的话（如德国北部或丹麦的电网），它比一个单纯由火力发电厂组成的电力系统需要更大的备用容量。因为在一个单纯由火力发电厂组成的电力系统中，最大的发电机组的出力最多也仅占峰荷的百分之几，而且其负荷本身是可知的，也是可预测的。而在德国北部电网运行初期，采用改进后的方法来预测风电机组的出力，结果表明系统所需的平均分钟级备用容量为风电总装机容量的25%[2]。

在这样一个背景下，UCTE不得不调整对系统调峰负荷的要求。这一点也得到了德国能效署对电网的调查研究报告的证实[1]。根据这一研究报告，如果在强风条件下德国北部电网发生一个短路，它所需要的备用容量要超过UCTE预先设定的系统旋转备用容量。

2006年11月4日发生的大停电事故表明，欧洲电网内的非计划性发电装机容量已经对整个电力系统的运行产生了严重的影响。UCTE针对该事故的报告[4]显示，UCTE电网首先解列成三个异步运行的电气孤岛，故障后的记录还表明，德国北部的风力发电厂在没有与系统运行人员协调的情况下自动与系统解列。虽然在这个特定的事故中，这一行动起到了稳定系统的作用（因为风电机组所在的地区频率偏高，也就是发电量过剩），但在其他事故中，它的效果可能相反。其次，报告还指出，分布式发电使系统在故障后的恢复困难重重，因为在这样一个系统中，系统运行人员对那些分布式的发电机组的状态不甚了解，而且他也做不了什么决定。这些都表明，系统对调度管理的基础

本要求已经发生了根本的变化，而相应的工具却没有跟上。

### 未来电力系统设计的技术要求

#### 输电网络的新选择

可再生发电的比例越来越大，以及供电商业模式的变化，赋予了输电网络不同的任务，它已经不能像过去那样，仅仅完成发电和用电的就地平衡。大容量输电和无功功率平衡的任务比常规电网更加繁重。这就要求电网进行一些改进。

首先，可以考虑新建输电线路。但是，新建输电线路既耗时而且实现起来困难。因此提高现有输电线路和输电走廊的利用率成为了一个可选方案。另外，线路运行电压、线路的交叉互联或现有三相输电线的运行温度都可以提高<sup>4)</sup>。

### 风能和太阳能是最理想的可持续能源：与所有其他可再生能源相比，它们清洁、可长期使用、并且具有巨大的增长潜力。

特别是在很多情况下，海上集中的大规模风力发电厂需要永久性大容量的输电线路。这种情况在德国已经是可以预见的。那么现在的问题，是应该加强现有的为其他备用目的建设的400千伏线路呢，还是应该新建一个网络来完成这一输电任务呢。新建一个更高电压

脚注：  
<sup>3)</sup> UCTE: 欧盟输电系统运营商联盟  
<sup>4)</sup> 参见本期XX页的“高效的电力”

等级的三相输电网络，或采用高压直流输电线路的方案，都是可以想象的。后者容许传输的功率更大，占地更省，而且没有无功功率的消耗。如果采用自换相IGBT的HVDC换流器，它除了能够完成功率传输之外，还能为当地的电网提供快速而连续的无功支持图<sup>4)</sup>。这一方案对那些有大型风力发电机组的地区是非常有吸引力的 - 如上所述，这些地区的电网往往比较薄弱。ABB从1997年以来，就采用被称之为HVDC LightTM的技术承建了很多项目，总输电容量达1100兆瓦。

这种自换相的HVDC系统能够实现现在PQ相平面上任一点的快速移动，特别是零点图<sup>4)</sup>，而且它不需要无功功率，使得这项技术特别适合于联接规划中的海上风电厂。在建设方面，它不需要在海岸边建立联络线，而是通过HVDC输电线路将风电厂直接联接到电网的枢纽节点上，从而构成真正意义上的大容量输电网。

#### 更加透明的系统运行管理

可再生能源电厂所发出的起伏波动的电力会导致网络潮流多变，这也对输电网提出了更高的要求。这就需要先进的广域监控系统[5]的帮助，它能向系统的运行管理人员提供电网实时状态的详细信息。分布式的相量测量设备能够记录高时间分辨率的电流和电压相量，系统管理人员还能看到经全系统GPS对时同步的实时系统状态的高分辨率的图像图<sup>4)</sup>。这些高品质的实时信息的应用，从邻近电网的包含能影响系统潮流的移相变压器、FACTS

或HVDC线路 - 到系统临界状态的连续监测和辨识电网中失去同步的局部。在2006年11月4日的大停电事故中，整个UCTE电网解列成了三个子网络，而这种网络的解列起初并没有被控制中心检测到。一般来说，随着电网负荷的加重，再次发生像2006年11月4日那样的严重事故的几率也增大。因此，电网控制中心需要更多更详细的实时信息，这点非常重要。

### 未来电力系统的特点之一，就是可再生能源发电所占的比例相当大，它们都是分布式的，发电出力由外界自然条件决定，并常常受到高度发达的电力交易的影响。

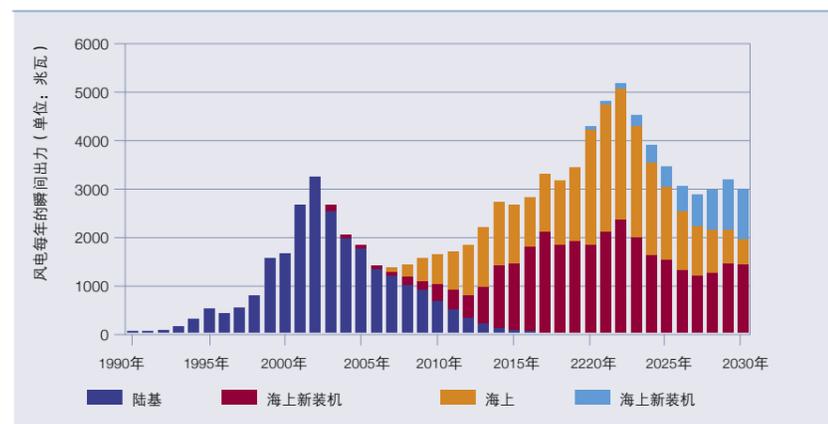
#### 火力发电厂面临的挑战

风电装机容量逐渐增大，对独立发电商的控制系统的提出了更高的要求。这就要涉及到一级和分钟级备用<sup>编者按</sup>等二级备用容量的使用，特别是当燃煤机组作为系统的调峰机组使用的场合。现有的火力发电厂配备的现代化的仪表和控制系统具有很大的改进余地，稍加改进即可实现调峰控制。正如ABB

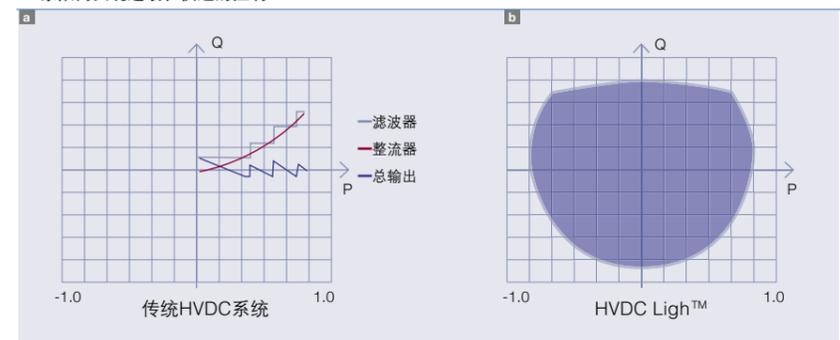
提供的MODAN和MODAKOND一样，基于模型支持和先进优化运行策略的火电机组锅炉和汽轮机的控制系统，能使机组平稳运行，减轻了运行人员的劳动强度，减少了一些附加的系统要求。在系统故障期间，提供秒级备用容量显得非常重要，此时系统的效率可提高百分之0.48。这个效率的提高主要归功于将汽轮机的故障减少到最小，以提供系统调峰所要求的机组出力变化率。通过这些改进，其结果明显高于UCTE现行的规定。因此，在可再生发电容量占相当比例，系统其余部分不稳定运行几率较大的系统中，这项技术就显得很重要。

由于风力发电具有不确定性，所以提供分钟级备用容量就非常重要。现有电厂设备的升级改造对提高系统的运行可靠性是必要的，但同样也给电厂运行人员提供了一个重要的商业机会 - 在自由化的电力市场中备用容量是一种高质量的高价产品。现有电厂的仪表和控制系统改进的余地相当大。例如，通过对锅炉、汽轮机及其控制系统的技术改造，可以使火力发电机组的出力变化率从每分钟2兆瓦

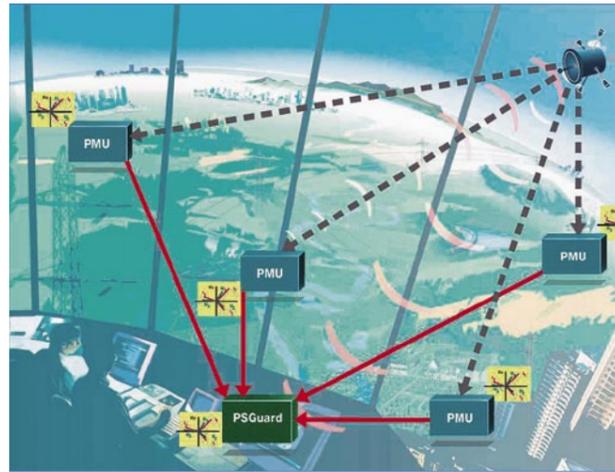
3 德国风力发电装机容量将持续增长 (资料来源: http://www.deutsche-windindustrie.de)



4 传统的HVDC系统 a) 和自换相HVDC LightTM b) 的PQ相平面 - HVDC LightTM能在PQ相平面的四个象限内实现连续和快速的控制



配有相位同步测量单元 (PMU, Phasor Measuring Units) 的广域监控系统 [ 5 ]



提高到每分钟 50 兆瓦, 控制精度从  $\pm 5\%$  提高到  $\pm 0.5\%$ 。从此, 该电厂就可以参与到电力市场的一级和二级备用容量市场的交易, 并从中获利。

随着风电装机容量逐渐增大, 对独立发电商的控制系統提出了更高的要求。

## 展望

未来电力系统的特点之一, 就是可再生能源发电所占的比例相当大, 它们都是分布式的, 发电出力由外界自然条件决定, 并常常受到高度发达的电力交易的影响。这就对传统的发电机组和输电网络提出了更高的要求, 这是因为发电厂的建设受到地域限制, 发电资源 (比如风力) 是不稳定的和难以预测的, 系统运行人员难以获得分布式发电机组的详细的实时状态信息, 而且系统的运行还要受到电力交易合同的约束。在系统运行方面, 不受系统运行人员控制的非计划性发电机组的增加是一个重要因素。在过去, 系

统的负荷都有它自身的特点, 系统的管理正是利用了负荷的这种特点, 并用它来指导系统的运行。而在将来, 这种非计划性的发电过程所占比例越来越大, 必须加以考虑, 并协调它们的运行。只有这样, 作为未来工业社会支柱之一的供电系统, 才能够安全、可靠而经济地运行。

为了实现这一目标, 各种技术解决方案应运而生。传统火力发电厂控制系统的升级改造、输电网络的扩容, 以及采集系统实时状态的先进信息系统等, 就是这样的代表。而在未来的

## 参考文献

- [1] Deutsche Energie-Agentur: Energiewirtschaftliche Planung für die Netzintegration von Windenergie in Deutschland an Land und Offshore bis zum Jahr 2020 (dena-Netzstudie). Deutsche Energie-Agentur, Cologne, 2004
- [2] Dany, G. Systemtechnische Weiterungen der Netzintegration von Windkraftwerken. Aachener Beiträge zur Energieversorgung (Band 92): Jahresbericht 2003 des Instituts für Elektrische Anlagen und Energiewirtschaft der RWTH Aachen in Verbindung mit der Forschungsgesellschaft Energie an der RWTH Aachen e.V., pp. 105-107, Aachen, 2003
- [3] Dany, G., Haubrich, H. J., Biermann, D., Krabs, M., Machate, R. D., Sierig, J., Wert der Windenergieeinspeisung, Energiewirtschaftliche Tagesfragen, Vol. 50 (2000), issue 1/2, pp. 48-52
- [4] Union for the co-ordination of transmission of electricity (UCTE), System disturbance on 4 November 2006 – final report, UCTE Brussels, 30th January 2007
- [5] Bertsch, J., Carnal, C., Suranyi, A., The big picture, Detecting power system instabilities and optimizing asset utilization with InformIT Wide Area Monitoring PSG 850, ABB Review 4/2003, pp. 32-36

风能是一种可自由利用但变幻无常的可再生能源



主要挑战是, 在对供电系统的特性深入了解的基础上, 正确选择合适的技术方案, 并在合适的时间将它们应用到实际的供电系统中, 以实现最终的目标。

Jochen Kreusel  
电力市场和电力技术分部  
ABB 集团  
曼海姆, 德国  
jochen.kreusel@de.abb.com

# 海水淡化厂的优化运行

混合海水淡化厂的在线优化

Goetz-D. Wolff, Stefan Lauxtermann, Ramesh Kumar



中东地区的快速发展带动了像电力和水处理等基础设施的发展。混合型海水淡化厂由于其高度的灵活性, 在水处理和发电等方面扮演了重要的角色。然而, 燃料价格的持续攀升和燃料储存的需要, 要求发电和水处理系统尽可能在最优化的状态下运行。这种优化的潜力来源于各种各样的运行操作, 也来源于短期和长期的运行计划。

本文介绍了一个海水淡化和发电厂采用 ABB 的各种在线和离线优化软件包, 实现经济优化运行的新尝试。通过在阿拉伯联合酋长国 Fujairah 的海水淡化及发电厂 (FWPP) 的成功应用, ABB 充分展示了这些软件包的卓越性能。

为满足中东地区日益增长的电力和淡水需求, 海水淡化厂扮演了重要的作用。特别是这些在建的大量的混合海水淡化厂具有高度的灵活性, 可以满足不同层次对电力和淡水的需要。但是, 这些海水淡化厂的系统结构都很复杂, 在一个混合海水淡化厂中至少采用了两种以上不同的海水淡化工艺。当然, 这种复杂结构也为系统的优化运行提供了用武之地。

其中的一个海水淡化厂坐落在阿曼海湾 Fujairah 城以北 20 公里。随着该厂的私有化, 巨大的成本压力使 Fujairah 的运行人员想方设法优化系统运行, 以减少成本开支。2005 年, Fujairah 海水淡化及发电厂 (FWPP, Fujairah Water and Power Plant) 采用了 ABB 的优化软件包 (该产品属于 OPTIMAX 产品家族<sup>1)</sup>)。下面分别介绍该系统的性能监视和优化运行的各项功能。

## Fujairah 海水淡化及发电厂

在发电方面, 该厂装有 4 台通用电气公司的 106 兆瓦 PG9171E 型燃气发电机组 (GT), 并配有热力回收蒸汽发生器 (HRSGs, Heat Recovery Steam Generators), 另外还装有 2 台西门子的 NG90/90 型 119 兆瓦汽轮发电机 (ST) 图 1。在海水淡化方面, 该厂

脚注:

<sup>1)</sup> OPTIMAX 的详细介绍请参见本期评论的 44 页。

高效的电力网

高效的电力网

装有 5 台多级蒸馏过滤器 (MSF, Multi-Stage Flash Distillers), 每台每天生产淡水 1250 万加仑, 另外还装有一台两级逆渗透淡水机 (RO, Reverse Osmosis), 每天生产淡水 3750 万加仑。加在一起, 该厂具有 660 兆瓦的发电装机容量, 和每天将近 1 亿加仑 46°C 淡水的生产能力。热力回收蒸气发生器 HRSG 将高压蒸气输入到常规加热器。多级蒸馏过滤器 MSF 使用的低压蒸气或取自汽轮机的出口, 或从通过减压站将高压蒸气减压而得到。

优化项目

系统总的运行费用包括燃料费, 化学药品, 备品备件, 以及 GT、ST、MSF 和 RO 的维护。其中的 90% 是燃料费。除了其他的一些成本消耗以外, 燃料费用是迄今为止发电及海水淡化厂最大的费用。因此, 节能降耗的关键是优化燃料的消耗, 下面这些工具都是为了这一目标而设计的:

- 负荷计划: 用于前日规划和在线优化
- 混合优化: 使在线优化运行和规划成为可能

过程优化: 包括

- MSF 优化运行
- RO 优化运行
- 燃料泵优化运行 (自动化控制参数的重新工程化)

这些工具除了能优化燃料消耗以外, 还能改进全厂的设备维护和工作流程, 提高工作效率。

除了其他的一些成本消耗以外, 燃料费用是迄今为止发电及海水淡化厂最大的费用。因此, 优化燃料的消耗成为节能降耗的关键。

系统结构

Fujairah 模块化的优化控制系统的结构详见图 2。实时数据由西门子的 Teleperm XP 和一个 OPC 服务器、西门子的 Win CC 和通用电气的 Mark V 系统负责采集。这些实时数据首先被存储在 ABB 的 PGIM (Power Generation Information Manager, 以前称为 PlantConnect) 实时数据库中, 然后作为系统的公共数据源, 提供给所有的优化运行工具和其他应用程序。PGIM 也是一个全厂信息管理系统 (PIMS, Plant Information Management System), 通过人机界面 (HIS, Human System Interface) 运行人员可以看到系统的图像、变化趋势和状态报告。在该系统中还集成了一个被称为“技术计算器”的工具, 可以计算 GT 的效率等系统的性能指标。

ABB 提供的 PowerCycle 软件, 是一个基于模型的计算工具, 它可以精确仿真当环境条件变化和不同的稳态运行条件下电厂的热力动态过程。在 Fujairah, PowerCycle 的模型被用于:

- 数据验证: 它校验在线测量的结果, 以避免测量出错;
- MSF 优化: 对一个给定的负荷, 由它给出 MSF 的最优运行点
- 燃料需求模型:

PowerCycle 按照系统的设计, 计算所需的燃料, 而它的设定已通过性能测试得到了验证。

其他工具包括:

- PowerFit: 计算优化的生产计划。这一软件主要用于前日计划的制订
- BoilerLife: 确定锅炉主要部件的寿命

优化运行方案

在 Fujairah 实现的优化运行方案

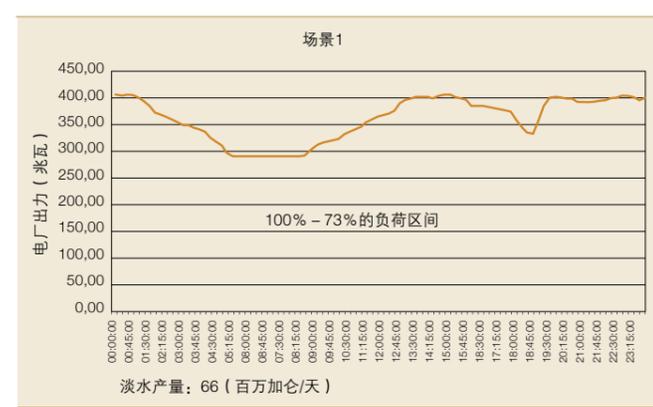
包括:

- 负荷计划
- 混合优化
- MSF 优化
- 过程优化
- 工作流程优化

负荷计划

全厂的供电和供水负荷每天当中都在变化。特别是湿度和温度变化很大的地区, 这些都影响供电和供水负荷的变化。图 3 是 FWPP 的日供电负荷曲线, 可见电厂的出力在总装机容量的 50% 到 80% 之间变化。负荷变化 20% 是很正常的。当负荷变化超过 150 兆瓦时, 它相当于一台 GT 发电机组最大容量的 1.5 倍。

3 Fujairah 海水淡化及发电厂 (FWPP) 的日电力负荷曲线



- GT 和 ST 的最佳优化组合
- ST 和旁路的蒸气流的最佳优化组合
- MSF 和 RO 的最佳优化组合
- 充分利用储水箱的容量
- 恰当的的设备组合能使全厂的优化运行保持一到数天的时间。优化运行软件包由四部分组成:
- 图形用户界面 (GUI)
- 协调 GUI、优化计算器和数据库的软件内核

- 优化计算器 CPLEX: 它基于混合整数线性规划法, 寻求全局最小值。
- Oracle 数据库: 存储所有的组态信息和结果
- 所有主要生产计划可以用表格或图形的方式显示。

每天的供水量是预先设定的。如果将饮用水箱的储水容量考虑在内, 则容许水厂的负荷有一定的变化。

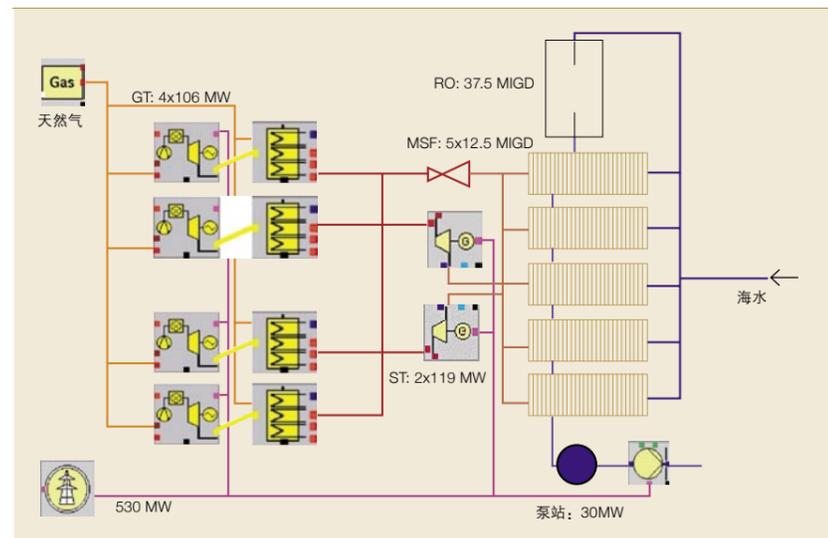
负荷计划系统的目标是寻找全厂设备运行的一种优化组合方案, 以满足特定的供电和供水的要求。换句话说, 系统在供电和供水公司做出的负荷预测的基础上, 综合考虑系统结构、燃料价格、可变的维护费用、化学药品的费用、环境条件和运行模式等因素, 制订全厂的优化运行计划, 计算全厂和每一个设备的性能指标。最后得到一个特定的由 GT、ST、RO、MSF 组合的优化运行方案, 以达到预设的成本目标。实际上, 优化运行得到的利益主要来源于:

在 Fujairah 电厂, 通过特定的负荷和环境条件的测试表明, 采用优化运行软件后, 系统总的燃料费用平均节省了 2.7%。当系统运行于小负荷模式时, 系统的燃料费用最大可节省 6% 或更多。

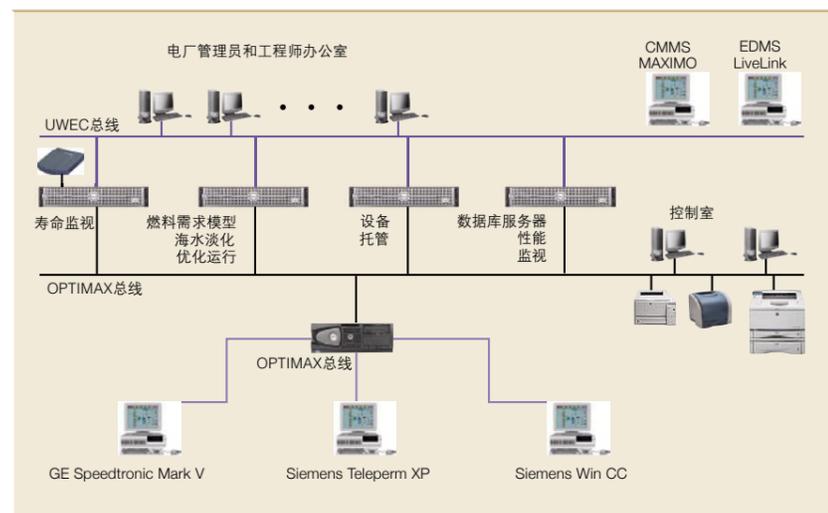
混合优化

Fujairah 淡水厂采用了 MSF 和 RO 两种海水淡化设备, 生产标准品质的饮用水。而这两种设备所生产的水质是不一样的: MSF 生产的水只是

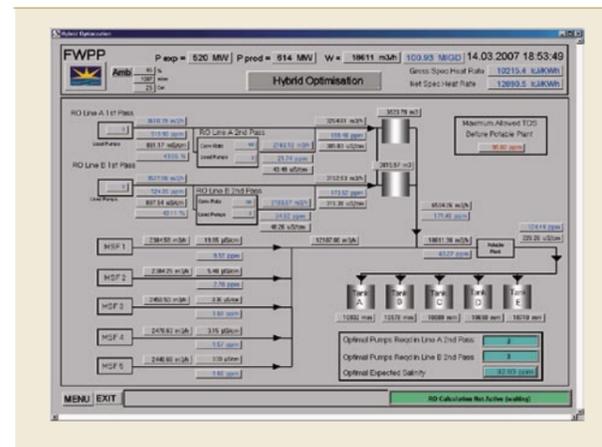
1 Fujairah 的全厂系统结构



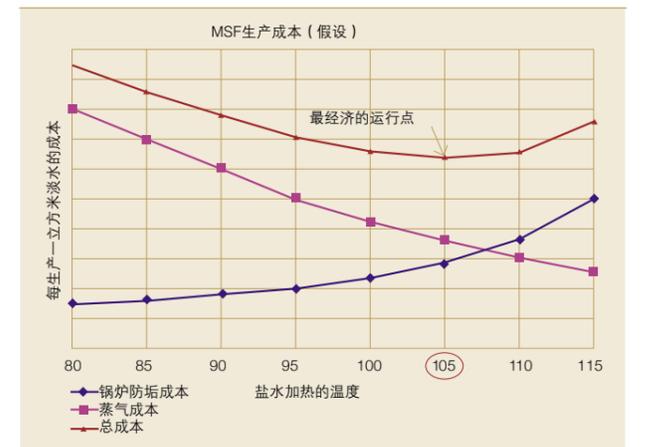
2 优化控制系统的结构



4 混合优化



5 MSF 的费用最小原则



去除了海水中的矿物质,而 RO 生产的水是高品质的。因此用这两种设备生产的混合饮用水仍然是矿物质水,并能达到健康主管部门所规定的饮用水最佳矿物质含量标准。

Fujairah 的 RO 逆渗透型淡水器是由 Degremont<sup>2)</sup> 生产的。它包含两条生产线,每条生产线又包含两个过滤器。第一级过滤器输出淡水的含盐量为 500ppm,而第二级过滤器的输出为 15ppm。有一部分水绕过了第二级过滤器,直接与它的输出混合。在实施优化运行之前,RO 生产的淡水含盐量为 80-100ppm。

优化的目标是找到第二级过滤箱<sup>3)</sup>的最小个数,以保证全厂生产的水质满足要求。这样可以减少:

- 第二级过滤箱水泵的耗电量,每减少一个水泵可减少耗电 0.5 兆瓦
- 第二级过滤箱的维护成本
- 水厂的化学药品的成本

另外,减少第二级过滤箱的个数还可以增加 RO 设备的淡水产量,因为每通过一个过滤箱将减少大约 10% 的产水量。

RO 设备的优化目标是寻找第二级过滤箱<sup>3)</sup>的最小个数,以保证全厂生产的水质满足要求。

图 4 所示的界面被用于在线的混合优化。在这个实例中,可以取消两个二级过滤箱,而在标准的生产工艺中,每两个一级过滤箱就需要配置一个二级过滤箱(比例为 1:2)。除此之外,还可以利用一个离线工具来建模仿真不同的工况。在 Fujairah 实施的这种混合优化

方案可节省总燃料成本的 0.6%。

### MSF 优化

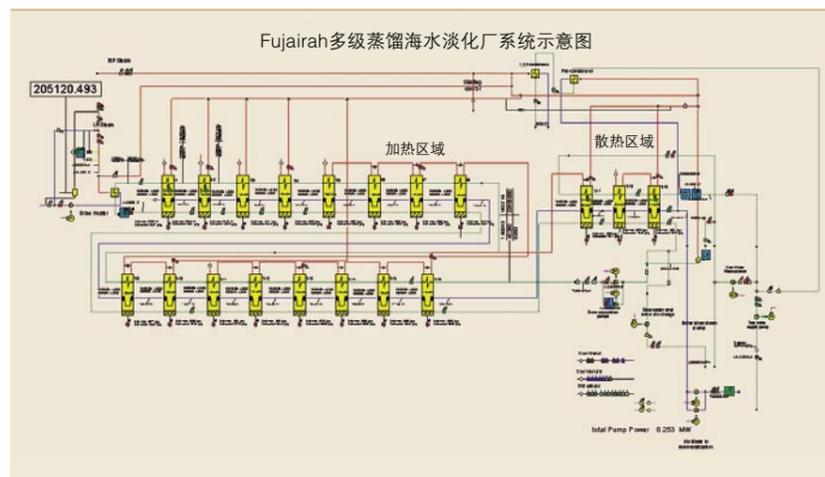
MSF 设备的主要运行成本是输入的蒸汽、化学添加剂和设备的耗电量。MSF 优化控制器的任务是,计算一些控制设定值,在保持产水量不变的前提下,使这些费用之和最小。图 5 是随盐水加热温度(TBT,Top Brine Temperature)变化的典型的成本曲线。

随着盐水加热温度 TBT 的升高,若出水量保持不变的话,性能指标率(PR,Performance Ratio)得以提高,因此,生产每立方蒸馏水的蒸汽成本下降。而化学添加剂(比如,锅炉防垢剂)的成本上升了,因为在高温下它的投放比例也增大了。优化控制器计算下列参数的最优值,这些值在一个给定的负荷条件下可以有不同的组合方式:

- 盐水温度
- 盐水循环流量
- 海水拒绝温度(仅冬天使用)
- 海水拒绝流量
- 辅助流量

另外,还可以使用一个过程仿真软件,对 MSF 进行详细的建模和仿真。在图 6 所示的 MSF 生产线模型中,将计算得到的上述参数的最优运行点,

图 6 多机蒸馏过滤器 MSF 的模型



和其他的一些设备如盐水加热器和水泵结合在一起。优化软件计算得到的这些参数的最佳值将帮助运行人员进行 MSF 的控制。

在该项目中,同时提供了在线和离线的优化工具软件。在线优化工具根据给定的淡水产量每十分钟进行一次优化计算,而离线优化工具可用于制订生产计划。

在各种运行工况下,使用 MSF 优化运行工具可节省 MSF 生产成本的 1.78%。

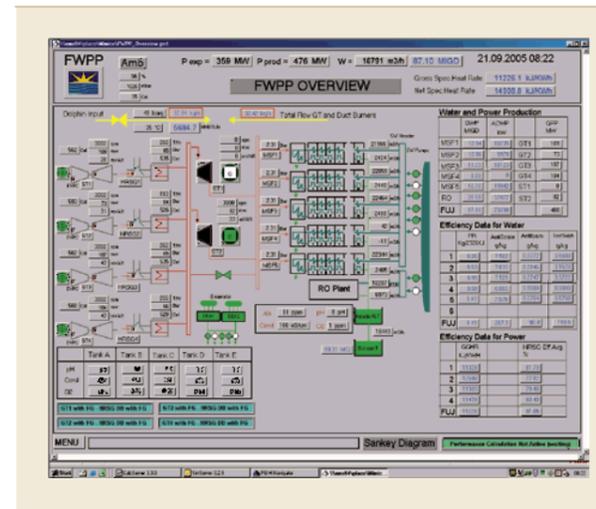
在 Fujairah 实施的这种混合优化方案可节省总燃料成本的 0.6%。

### 过程优化

监视不同生产区域的性能,及时发现生产效率异常降低的设备,是非常重要的图 7。下一节将介绍性能指标计算的原则,并给出了一个发现与设计不符的异常参数的例子。

在 FWPP,对所有的主要设备都要计算性能指标,这些设备包括 GT 发电机组、HRSG、ST 发电机组、给水泵、MSF 淡水生产厂区、海水的取水泵、RO 淡水生产厂区 and 高压泵站等。

图 7 FWPP 的生产流程总览图



优化控制系统的画面以及相应的变化趋势图 8 可以帮助运行人员的工程师们来分析全厂或者某一个局部的性能指标。通过比较实际的和期望的性能指标使分析变得简单而有效。例如有一次,性能监视和优化控制系统检测出 HRSG 的性能下降。进一步的调查发现出问题出在燃料泵扇。更准确地说,只有当天然气燃烧器出口的温度超过某一特定值时,燃料泵扇才启动。在 FWPP 这一值为 800oC,而系统设计规程却规定这一值为 840 oC。这 40 oC 的设定温度差使燃料泵扇频繁启动,从而导致锅炉效率下降 1.7%。

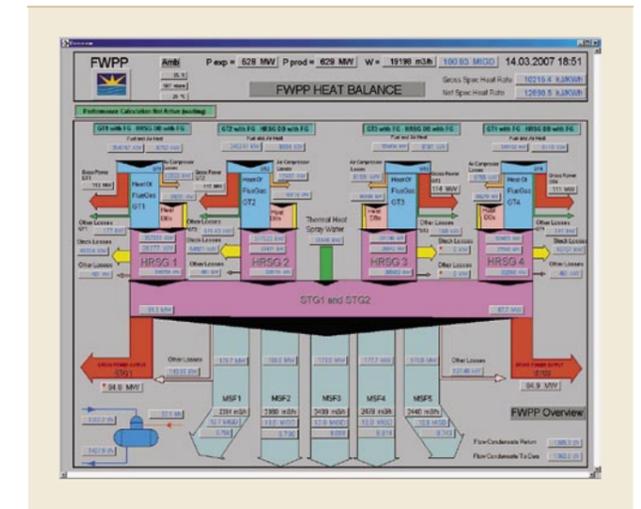
在实际运行的过程中,燃料泵扇的启动温度被设成了 700oC(系统的实际温度很少降到这一温度以下),所以燃料泵扇一旦启动就永远也停不下来了。在使用了这套优化运行的软件之后,系统的运行情况可到了改观,从优化系统投运以来,整个系统的效率得到了提高。

### 工作流程优化

除了生产过程和系统运行得到了优化,工作流程也得到了优化。它们包括:

- 自动创建系统日志和各种报告,它们

图 8 计算热流的热力平衡图



记录系统的运行时间,避免了人工记录的差错

- 自动实现各子系统之间的数据交换,例如由计算机处理的维修管理系统(CMMS,Computerized Maintenance Management System)

在 FWPP 系统每天都要自动生成 100 多份日志和报告,平均每天节省 18 小时的工作时间。ABB 采用微软的 Excel 开发了各种灵活方便的工具软件,可以很方便地自定义各种不同格式的用户报告。

所有这些系统的优化运行的结果,使 Fujairah 的总的燃油消耗节省了 4%,而且对工作流程的优化还会进一步节能降耗。

### 结论

ABB 的性能监视和优化运行系统在 Fujairah 海水淡化及发电厂的成功应用,再一次证实了先进的优化技术在电厂应用的有效性。实际上,这里应用的所有优化运行的技术也能应用于非混合式结构的海水淡化和发电厂。

所有这些系统优化运行的结果,

使 Fujairah 的总燃油消耗节省了 4%,而且对工作流程的优化还会进一步节能降耗。在该厂所取得的节能降耗的效果也表明,其他混合式和非混合式海水淡化及发电厂同样存在着巨大的节能潜力。

Goetz-D. Wolff  
Stefan Lauxtermann  
ABB 集团  
Minden, 德国  
goetz.d.wolff@de.abb.com  
stefan.lauxtermann@de.abb.com

Ramesh Kumar  
ABB 集团  
Abu Dhabi, 阿联酋  
ramesh.kumar@uae.abb.com

### 参考文献:

- [1] Ludwig Heinz, Stummeyer Karen, FICHTNER, Potabilisation – Nachbehandlung von Destillat und Permeat aus Meerwasserentsalzungsanlagen, May 2004
- [2] Glade Heike, Meyer Jan-Helge, Will Stefan, Strategies for optimization of the Reverse Osmosis Plant in Fujairah, June 2005
- [3] Water Quality Regulation of UAE, Revision 2, January 2004
- [4] On technical and market aspects of water desalination, Nils Huesgen, December 2002

脚注:

<sup>2)</sup> <http://www.degremont.ca>(2007 年三月)

<sup>3)</sup> 过滤箱是指一组用于逆渗透脱盐的隔膜,它们可以独立地打开或闭合。

# OPTIMAX® 产品家族

改进运行和环境性能  
Marc Antoine

工业过程高效运行的关键在于降低燃料的费用，减少耗材。工厂是高能耗企业，因此哪怕是节能几个百分点都可能带来显著的效果。答案就是采用先进的故障诊断和优化技术。

ABB 开发的软件工具包功能繁多，如系统性能的监视与预测，设备诊断与早期报警，传感器校验和预防性维修等。

## 运行性能的最优化

ABB 的 OPTIMAX® 运行软件是专为那些拥有多种发电资产的公司降低能耗或节省发电成本而开发的。这些公司可能是单纯的发电公司，也可能是提供电力和其他形式的能源。有了这个工具，就可以轻松地回答诸如是否应该购入或出售电力或燃料，何时起停机组，如何延长设备寿命，或延迟设备的预防性维修等问题。

## 维修费用的最小化

作为一种可变成本，维修费用是仅次于燃料费用的第二大成本。优化设备运行的关键常常需要了解设备的准确、实时和有可操作性的信息。基于可靠的信息采取行动与获得第一手资料同等的重要。正确的决策和采取果断的行动对系统的运行性能、供电的安全性、设备的寿命、电能质量、员工的健康与安全都有着直接的影响。

## 设备运行前的准备和有计划的状态检修对减少设备的故障时间越来越重要。

OPTIMAX® 的基于计算机的维修管理系统 (CMMS, Computerized Maintenance Management System) 就是为了使电厂设备的可用性、质量和安全性达到并维持在一个高水平上。它可以被应用于现有电厂的运行，但被应用与设备的检查与维护则更加见效。对工业用户来讲，这将意味着资产回报率的提高，

也是提高股东价值的关键动力。

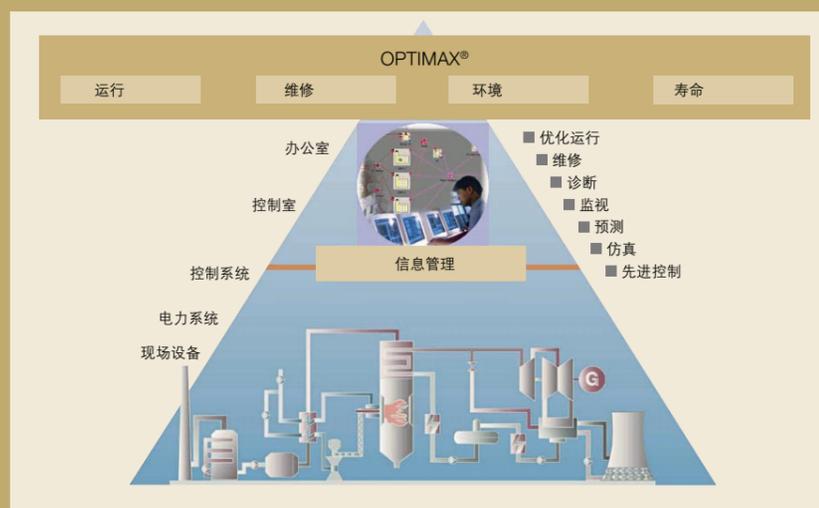
## 减少污染排放和浪费

减少污染的排放越来越重要，而且相关的环境标准也越来越严格。现在，温室气体的排放量已经成为一个可测量的经济指标，运行人员自发地要降低这些排放量。OPTIMAX® 的环保产品可以通过监视锅炉中的火焰质量、测量炭粉流量和灰尘中的碳含量，通过先进的过程控制 (APC, Advanced Process Control) 来优化燃烧过程，缩短锅炉的启动时间和提高效率等措施，来减少排放。

## 延长设备寿命

从经济学的观点来看，电厂的管理者总是在提高系统性能与降低风险和故障时间之间，来平衡他们用于新设备的投资。利用 OPTIMAX® 家族中设备寿命优化的产品，可以安排不同发电设备最经济的运行方式，在销售收入和寿命成本之间进行平衡。另外，这一产品还可以将温室气体排放的成本考虑在内，例如更加严格的二氧化碳排放要求使那些技术落后的电厂的经济性下降。这些决策支持工具的优势，就是可以将电厂的设备折旧模型考虑在内，在收益和维修费用之间进行平衡，找到一种最优运行策略，特别是当电厂的运行受到环境标准的限制的时候。

Marc Antoine  
ABB 瑞士公司，电力系统部  
Baden, 瑞士  
marc.antoine@ch.abb.com



# 同行中的领先者

世界最大的纸浆生产厂采用了 ABB 的 800xA 先进自动化控制系统  
Lena Sjodin

年产 50 万吨纸浆 - 包括 42 万吨牛皮纸浆和 8 万吨 CTMP 纸浆 (化学热磨机械纸浆) - 瑞典 SCA 公司位于 Ostrand 的纸浆厂位列欧洲最大纸浆生产厂的前列。该厂一年到头每天 24 小时运转，将来自瑞典北部森林的木材加工成漂白牛皮纸浆和化学热磨纸浆，它们将被用于杂志纸、餐巾纸、卫生纸和包装纸等日常用品的生产。为了将工厂生产的稳定性和效率保持在最高的水平，需要一套灵活可靠的控制系统。而 ABB 的 800xA 工业控制系统正好满足了这些要求，这也正是为什么会选择它来帮助 SCA，将这一欧洲最大的纸浆厂变成世界最现代化的纸浆厂的原因。



## 工业生产中的高能效

## 工业生产中的高能效

在经历了两年的建设和总投资 16 亿美元之后,SCA 公司<sup>1)</sup>在瑞典的一项大规模的工业投资项目的建设已经完成。它就是位于瑞典北部 Ostrand 的世界上最现代化的纸浆生产厂(见下图)。于 2006 年 10 月投产的热回收锅炉和新的污水处理系统都采用了 ABB 的先进工业自动化控制系统 800xA<sup>2)</sup> - 该系统将图形化的控制功能设计和先进的仿真接口融为一体。

对新的集成化控制系统的要求是,是发电和纸浆生产设备以最有利的方式结合在一起,联合运行。

## 集成化控制系统的选型

当公司决策购置一套新的回收锅炉的同时,也决定要配套上马一套集成化控制系统。但实际上集成控制系统的选型早在一年前就开始了。对新的控制系统最重要的要求就是,它必须使发电和纸浆生产 - 以前它们的控制系统的分开的 - 以最有利的方式结合在一起,联合运行。这样不仅能够克服由于部门分割而造成的产品质量的问题,而且在两个系统之间要保持信息交换的畅通既耗时也消耗资源。

为购买新的控制系统的准备工作始于 2003 年。当时在自动控制部门的内部组织了一个工程师小组,他们花了 4 个月时间,进行了多项研究,最后提出了新控制系统的式样书。据 Ostrand 自动控制部门的领导,Alf Eriksson 先生回忆说,“在整个准备过程中,得到

了很多来自其他部门的建议和公司的的大力支持。为了对不同的供货商提供的方案进行比较,我们给了它们一个假想的系统流程框图,来看看他们到底能给我们提供什么技术方案。在随后的两周里我们对所有的提案进行研究”。当 2004 年 8 月决定购买一套热回收锅炉时,公司已经准备选择 ABB 的工业控制系统 800xA 了。“时机恰到好处”,Alf Eriksson 说。图 1 是基于 800xA 的集成控制系统框图。

“由同一个系统对所有的设备进行控制,确实给我们提供了对整个系统的集成控制能力”,Alf Eriksson 补充到,他现在已经集集成控制部门的经理。“随着时间的推移,这种集成控制的劣势将日益明显。当然现在我们看到了它的优势,它使我们可以很方便地在生产和维修模式之间进行切换,还使发电和纸浆生产两个子系统之间地信息交换更加自然。”

## “绿色”发电

新的回收式锅炉是一个联合循环

燃烧蒸汽锅炉。它的燃料是牛皮纸浆机使用过的化学物品和废弃的木材。当木削作为燃料在锅炉里燃烧时,那些废弃的化学物品得到了利用。该锅炉产生的蒸汽压力达 105 帕,

该系统由 9 个操作员站和 7 个 AC 800M 处理站组成,完成热回收锅炉和水处理系统的控制,还包含一个控制仿真机。

蒸汽温度达 515 度,高于其他的锅炉。这种新式锅炉和汽轮机使它的发电量达到了目前单台生物燃料发电机组的两倍,每年达 5 亿度电。从而使整个 Ostrand 纸浆厂对外部电力的需求急剧下降。即使是按现在每年生产 42 万吨纸浆来计算,该纸浆厂也为电网贡献了大量的“绿色”电能。等到将来新锅炉的生产能力达到满负荷的 80 万吨时,这种贡献还会更大。

## 仿真是更好的理解系统行为的关键

Ostrand 纸浆厂联合控制中心图 2

SCA 位于瑞典北部 Ostrand 的纸浆厂 (照片提供: Michael Berggren)



脚注:

<sup>1)</sup> <http://www.scatisue.com/about/corphystry>, 2007 年 3 月

<sup>2)</sup> 更多信息请参考 [www.abb.com.controlsystems](http://www.abb.com.controlsystems), 2007 年 3 月

的工作环境非常舒适,它的现代化控制平台只要稍加改进就可以满足系统未来的需要。800xA 系统是一个开放式的灵活方便的系统,擅长处理多个过程的联合控制问题,其安全性能也非常突出。

ABB 的这套系统由 9 个操作员站和 7 个 AC 800M 处理站组成,完成热回收锅炉和水处理系统的控制图 1。另外,还包含一个锅炉的控制系统仿真机,它由两个操作员站和一个小型的培训系统组成。仿真机是基于热回收式锅炉的数学模型而设计的,它是一个燃烧和化学反应的复杂过程。在仿真机中预存了一些典型事件,如水箱泄漏、停电、干燥问题和炉子漏气等。这些事件可以通过一系列的所谓“快照”(Snapshot)组合在一起,每一幅“快照”都代表了锅炉的一种

不同的运行状态。

控制系统的总体目标,就是使运行人员能够随时随地快速获取想要的信息,即使是临时的运行人员也可以理解这些信息的含义。

“ABB 的仿真机是世界上最棒的”,Alf Eriksson 说。“它使我们可以让我们在锅炉投入实际使用之前进行模拟运行。现在我们可以在一个近乎逼真的控制系统上进行培训。如果我们在实际控制系统中作了某些修改,我们可以很方便的将它们移植到仿真机中,供我们在培训中长期使用”。

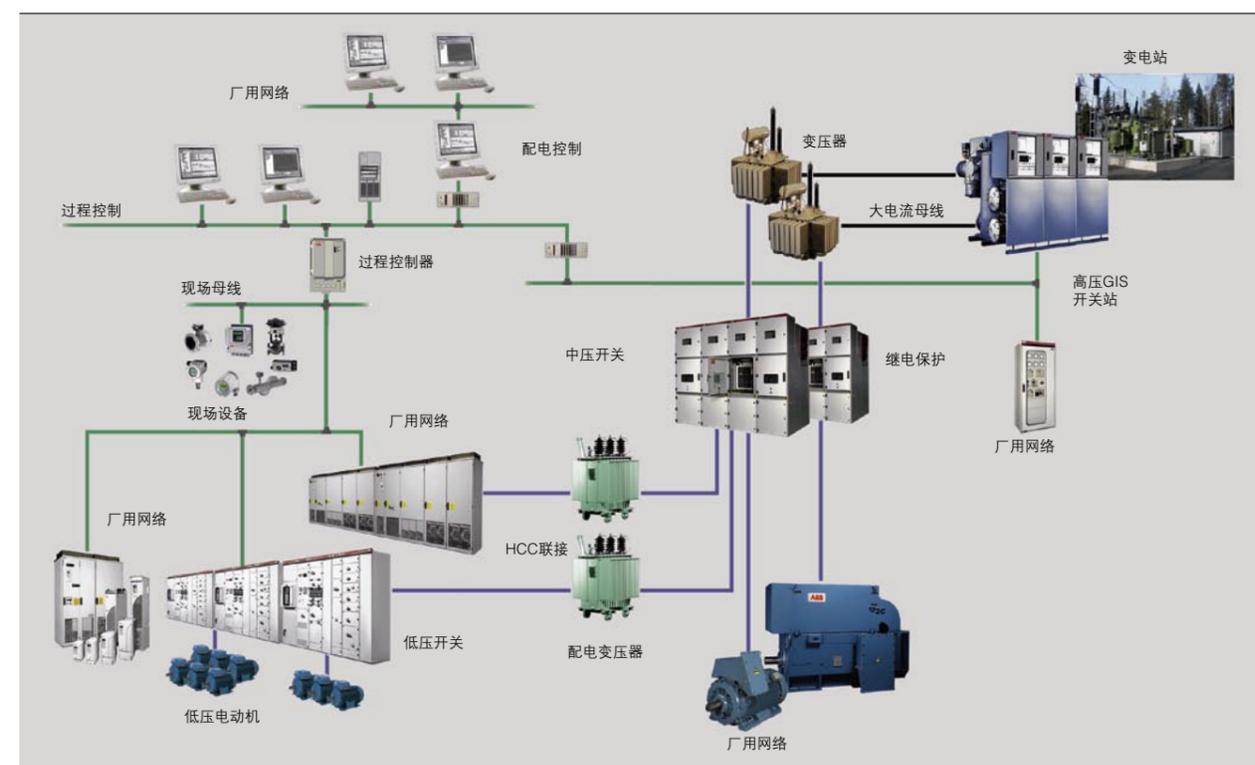
旧的工作方式已经被新的思维方式所取代

Ostrand 纸浆厂有一套传统的生

产流程,这些已经被引入到新的系统。Ostrand 的标准规约被应用到 ABB 的 800xA 系统。旧的工作方式中的一些基本思想和方法已经被新的思维方式和不同的处理方式所取代。控制系统的总体目标,就是使运行人员能够随时随地快速获取想要的信息,即使是临时的运行人员也可以理解这些信息的含义。为了达到这个目标,ABB 的基于图形的模块设计是一个非常有用的工具,而在瑞典 Ostrand 是第一个使用这个工具的用户。用图形的方式,而不是文字的方式,来表示每一个功能模块的信息,能加深我们对实际的工业过程的理解。一个个的图形模块就像一些解说员,它们将计算机程序翻译成我们更加熟悉的东西。

“通过使用图形模块设计工具,你

1 用电系统的典型结构



2 瑞典 Ostrand 纸浆厂的中央控制室 (图片提供 :Michael Berggren)



可以很容易地将你的应用程序翻译成一种通用的语言”,Alf Eriksson 解释道,“譬如,它可以给你一张很有用的系统总揽图,还可以帮助你发现故障”。

Ostrand 的标准规约被应用到 ABB 的 800xA 系统。旧的工作方式中的一些基本思想和方法已经被新的思维方式和不同的处理方式所取代。

#### 现场总线是必须配备的

SCA 的另一个重要的准则就是新的控制系统必须能方便的与各种数据总线接口,而且能处理预防性维修所带来的大量的数据。

该纸浆厂很长时间里是采用先进切换互联 ASI(Advanced Switching Interconnect) 的 Profibus 现场总线,因此为污水处理系统找到一个能兼容现有总线的新的控制系统显得非常重要。而对新的热回收式锅炉而言,所有的变频器和将近 90% 的开关柜是通过 Profibus 总线控制的。从切断阀门到报警系统,几乎所有的数字信号都是由

ASI 总线控制的。而模拟信号也被连接到现场的接线柜中。

“我们使用了大量的 HART- 输入/输出接口,并且已经开始研发新的应用程序,来管理 ABB 的 800xA 所提供的大量数据,它使我们比现在能更准确地预测和把握维修的需要”,Alf Eriksson 说。

#### 开发系统的潜力以满足客户的需求

与 ABB 公司技术服务部门的密切联系和周到的技术服务协议,是促成投资 800xA 系统的决定性因素。ABB 的技术人员从系统开发到正式投运始终在纸浆厂的现场,帮助我们最大限度的开发系统的潜力来满足用户的需求,并优化整个系统的运行。

“这些技术人员对我们和对项目的帮助极大”,Alf Eriksson 说,“我们在这一过程中学到了很多,而且我也相信,由于我们对系统的功能和实现方案所进行的严格审查,ABB 从该项目中也获得了很多经验”。

两个旧的控制系统的已经使用了快

3 Ostrand 纸浆厂的控制器 (图片提供 :Michael Berggren)



20 年了,这一次新旧系统的切换非常顺利,一是因为技术的提升过程很平滑,二是因为运行和维护人员在接触新系统前有一个模拟培训的过程。

“通过使用图形模块设计工具,你可以很容易地将你的应用程序翻译成一种通用的语言”,Alf Eriksson 解释道。

“这并不是说初期的挑战不大,但我们使用新系统的时间越长,就越体会到它的优越性。我们并没有急于求成,而是按部就班地进行改进。我们所有参与该项目的工作人员都留下了非常深刻的印象。他们相互帮助,值得称赞。虽然我们也付出了艰巨的劳动,但最终还是达到了我们的产量和质量的目标。”

Lena Sjodin  
新闻记者  
Sundsvall, 瑞典  
lena@plan2.nu



## 高效的轧钢 生产线

长型板材热轧流水线耗能的在线最小化控制  
Anders Daneryd, Mats G. Olsson, Rickard Lindkvist

一个轧钢机操作人员的一天并非人们想象中的那样简单。实际上他是在一个非常嘈杂的环境中,随时应对生产线上出现的各种不稳定问题,这是非常花时间的。这种不稳定的运行可能会导致停机、产量降低、或由于脱离预定的轨道而在钢板表面频繁产生凹凸不平的现象。

为保持生产线的稳定运行,基本上是靠个人的经验来操作的。是否能正确地设置当前流水线控制系统的最佳参数,就代表了他们专业水平的高低。当轧钢机在运转的过程中,如果你还在采用试错的方式,不断调整参数以修正生产线精度的话,必然会造成宝贵的原材料和能源的浪费。为了给操作人员提供帮助,避免不必要的浪费,ABB 开发了先进的轧钢生产线优化控制软件包。

产品变更 (PrC), 一般是指工艺流程从以某一种原材料生产特定尺寸产品的稳定的流水线配置,变换到以另一种原材料生产另一种尺寸产品的流水线配置的过程,并要求停机时间最短,废品最少。通常一条流水线上能生产的不同规格的产品数量也是不同的。如果产品变更的过程控制不好,就会导致流水线停产数小时,而一个成功的产品变更几分钟内就能完成。

ABB 的研究人员克服了重重困难,为生产线运行人员研制了一种在线控制软件,它能反复地再现产品变更的过程,并使生产线中断运行的时间最短。该软件是在先进的轧钢机生产线模型、优化算法、系统仿真和统计方法的基础上研制成功的,它能指导运行人员设定生产线优化运行的参数,并控制生产线稳定运行,提高产品精度。

### 工业生产中的高能效

### 工业生产中的高能效

#### 用于最优、仿真和校准的轧钢机模型

通过控制线材的成型和轧辊负荷的分布,充分利用轧辊上凹槽,和控制生产线的生产量,我们可以对轧钢机生产线进行建模、仿真,优化控制生产线的运行速度和能耗,提高轧钢机的可用率和产量。自适应成型模型(ADM™,Adaptive Dimension Models)软件工具给轧钢机运行人员—通过一个使用方便的人机界面 HMI- 提供了一个使用方便的参数设定的建议。使用这个软件工具,复杂计算不需要一分钟就能完成,而在实际中,许多复杂计算不超过 10 秒就完成了。

通过位于控制台旁边的辅助 PC 就可以使用这个工具图 1,而控制台上主要还有 ABB 的卷轧机控制系统(RMC™,Rolling Mill Controlling)和架间成型控制控制系统(IDC™,Interstand Dimension Control)的显示界面。

#### 用于控制卷轧机稳定性的架间成型控制系统

为了减小棒材和线材首尾长度的公差,也为了提高卷轧机的产品质量、产量和可用率,研究人员提出了 IDC(架间成型控制,Interstand

Dimension Control)的概念。有了 IDC 控制还可以实现产品尺寸的快速变更。IDC 代表了卷轧机的正常运行状态,它能保证卷轧机正常启动,并改进生产流程。

IDC 关键部件是完成线材长度在线测量的 U-gauge™ 图 2。来自驱动系统和 U-gauge 的在线信息被及时地传送到 ADM 软件工具中图 3。除了这些数据之外,还有一些由操作人员选择的用于仿真和优化运行的设定参数,共同组成了 ADM 的输入。而它的输出可以在几秒中内,以调整清单、表格和图的形式得到。

#### 稳定的卷轧生产是指,整个流水线的生产速度一定,轧辊架之间的牵引力和压缩力最小。

这种配以高速算法的控制方案可以在短时间内完成大量交互式的流程最优化任务。一旦确定参数设置能满足运行要求,操作人员可以将这组参数作为一种新的卷轧控制方案 RMC 存储起来,以便将来直接调用。总之,ADM 软件工具只需要很少的配置,就可以得到有用的结果了。

#### 卷轧机的最大化和最小化控制

稳定的卷轧生产是指,整个流水线的生产速度一定,轧辊架之间的牵引力和压缩力最小。为了保持生产线的稳定运行,而且还要保证最终的产品能满足精度要求,这对操作人员的能力是一个挑战。ADM 工具软件能帮助操作人员完全掌控卷轧机当前的运行状态,还能为下一个产品的优化生产做好准备。有了这一有力工具的帮助,不但生产线的稳定运行和产品尺寸的质量得到了保证,而且原来运行人员达不到的一些重要的生产指标也能达到了。ADM 优化控制模块的核心是,对我们所关注的主要生产指标进行最大化或最小化控

#### 编者按:什么引起工件脱轨

流水线上的生产流量不匹配,即前一对轧辊的输出速度大于下一对轧辊的输入速度时,将导致工件脱轨。脱轨的潜在原因是缺乏对流水线各种参数之间关系的深入理解,比如说轧辊间距、电动机转速和架间压力等,是如何影响工件脱轨和生产流程的。

如果卷轧机频繁地变更所生产的产品,实行小批量的生产,那么每天都有可能发生几起这样事故。

制,同时保证其他的产品指标在允许的范围之内图 4。

#### 能量消耗的最小化

对操作人员而言,使生产线的能耗最低也是优化运行的一个重要方面,但同时要设定棒材宽度、截面积、生产速度、轧辊间传递压力、轧辊间距和电动机转速的上下限值。对最终线材的长度尺寸和生产速度的分析通常是自动完成的,不需要操作人员的干预。只要将我们关注的产品主要性能指标反馈给系统,ADM 优化控制器就可以求解这一非线性的最小化问题,计算出卷轧生产线最优的能耗值或电量值图 5,同时给出优化控制参数(如轧辊间距和缩减量)对产品的宽度、截面积、张力等的影响。过程控制参数之间的复杂依存关系通过统一的卷轧机模型来分析,在这一模型中考虑了生产流量、工件展度、轧辊间传递张力、力矩和耗电量等各方面因素。对板材宽度和截面积的控制,也就是所谓的“轧辊利用率控制”,不仅可以减少轧辊的磨损,而且还可以通过控制板材不充满轧辊之间的空隙而避免板材受到损坏。用户偶尔手动设置一些控制参数,导致其他的参数超出了允许的变化范围。但通过利用 ADM 的诊断程序,可以得到这些设定参数允许值的一些建议。

#### 一个卷轧机的应用实例

在一个普通的 PC 机上,只要十秒钟就可以对十组设定参数进行分析计算。对一个实际的卷轧机生产计划进行的优化计算表明,该流水线至少可以节能 10% 以上。图 6 中,能耗曲线的起点(第 0 次计算)对应于当前实际的卷轧机控制参数,而随着迭代的进行,ADM 优化程序收敛于一组最优的参数设定,而此时的系统能耗比初始值减少了 10%。这对一个连续运行的

卷轧机生产线而言,意味着节省大量的生产成本。另外,ADM 优化程序还在 30 秒钟之内完成了 20 组参数的性能计算。

#### 其他的优化目标包括:

- 生产速度的最大化:根据操作人员的经验和知识,对电动机的最大出力、转矩和转速重新设定
- 特定控制参数与预设参数值的匹配,又称为负荷水平控制
- 特定板材宽度和截面积与预设控制参数值的匹配

接下来,当然是以轧辊利用率控制为优化运行的主要控制目标。在 ADM 增强版中,包含了控制目标和参数约束设定、与热动力学和微结构特性相关的过程控制参数优化等功能。

#### ADM 工具软件可以对板材宽度、截面积和生产速度等进行快速计算,还可以进行灵敏度分析。

#### 机架间张力模型

在所有的最优化参数设定中,机

架间张力及其设定是非常重要的,它可以保证工件没有压缩变形的前提下,整个生产线的稳定运行。张力建模的一个重要方面,就是要建立张力与板材尺寸之间的关系,特别是变形和轧辊间区域,同时整个模型还要模拟生产线的连续运行。这不仅在其他建模方法中是不可能的,而且这个模型还为所谓的“连续卷轧”的一致性分析铺平了道路,在“连续卷轧”中板材尺寸受到相对较大的轧辊间张力的控制。

#### 模型的调整

对流水线上当前生产的产品和对下一个即将生产的产品,都可以进行优化运行。对目前正在生产的产品,可以通过在线驱动控制系统和 U-gauge 测量模块来调整优化运行的模型,以保证产品的精度。只要流水线的各种条件相似,上一个产品的校准模型仍然可以使用。由 ADM 工具的逻辑控制自动完成模型的最佳调整。我们都知道,卷轧机的动力模型在很大程度上得益于这种模型的调整,它的作用最终反映在产品的精度上,而精度由决定了生产线的能耗。

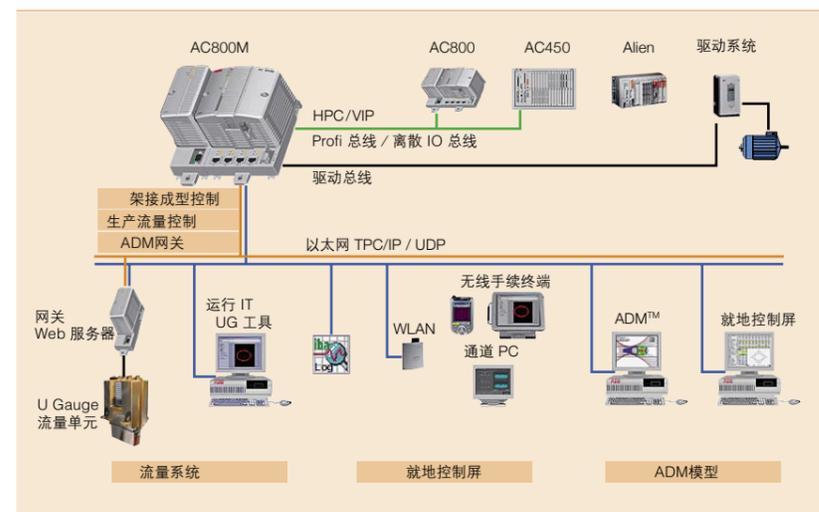
1 控制和监视生产设备的操作人员控制平台



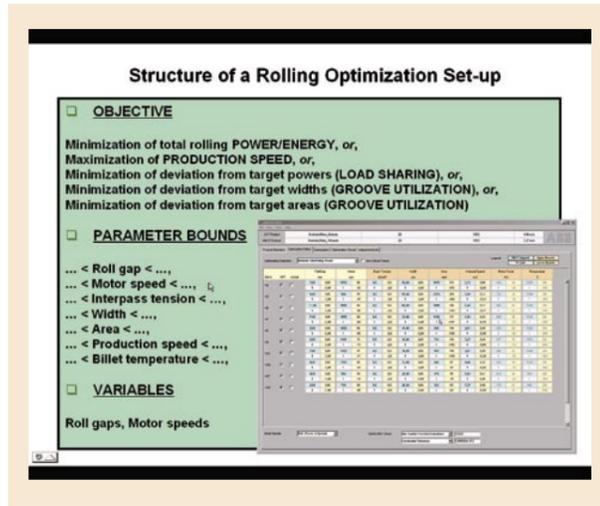
2 用于在线测量产品尺寸的 U-gauge 模块



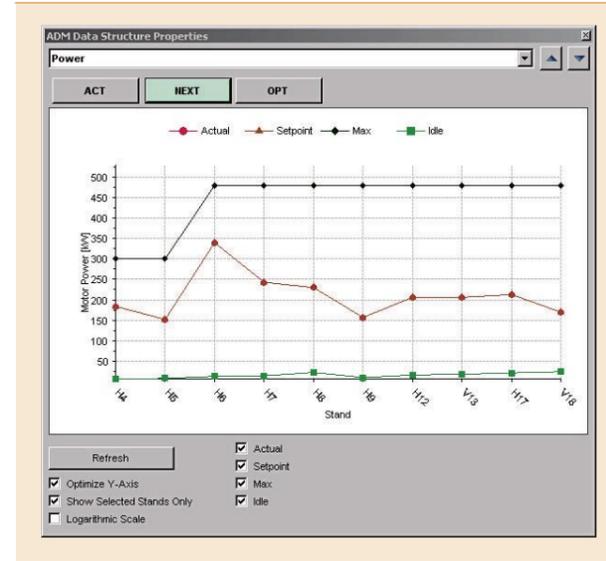
3 架间成型控制系统的组成。ADM 工具软件运行在一个专用 PC 机上,它与系统的通信总线相连



4 非线性优化任务的设置界面，包括优化目标的选择，参数的约束条件，和主要的优化变量。还包括相应的 ADM 参数输入窗口



5 流水线用电量的计算曲线

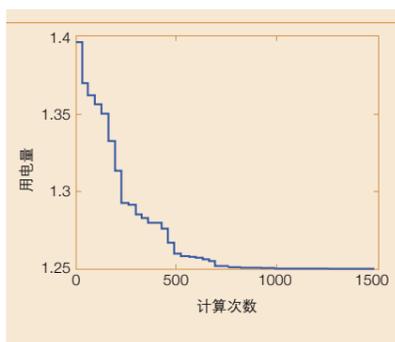


用于灵敏度分析的快速仿真

ADM 工具的另一个重要的特点就是它有仿真功能，它可以对板材宽度、截面积、生产速度和轧辊间张力进行快速计算。输入的过程控制参数包括轧辊间距和电动机转速，以及轧辊状态。这一特点对分析优化运行中参数的微小变化和扰动的效果是非常有用的 - 这就是所谓“灵敏度分析”。对十组参数进行的一次优化仿真计算耗时零点几秒，而对二十组参数进行优化仿真计算则需要一秒多的时间。

对不确定性材料和生产条件的统计分析

5 瑞典一家生产直径 20 毫米线材的 10 轧辊 (中间和结尾部分) 卷轧生产线总用电量的最小化曲线



假设生产线第一次使用一种特性不明的新材料，操作人员为了弄清楚生产线不稳定运行的安全边界，他可能会启动 ADM 工具的另一个仿真程序“统计评价程序”，它可以评价机架间张力超过允许值的程度。该程序采用了蒙特卡罗算法，在生产线模型中也采用了这种算法。其计算结果是在某组控制参数和过程参数下生产线稳定运行的概率。实际上，前面讨论过的板材、轧辊和电动机参数的计算结果都是表示成它们的上下限之间的一个可信度区间值，而不是由确定性仿真计算得到的某一个值。这种方法也改进了对生产线耗能预测的精度，因为它对于原材料的变形特性非常敏感。

ADM- 热轧生产线的标准

实践证明,ADM 工具为轧钢生产线的一线工人建立了新的生产标准。它清晰方便的人机界面、鲁棒性和高度的精确性，都是 ADM 优化运行、仿真和模型调整逻辑控制的基石。它也是一个很好的培训平台，能够将现场轧钢工人的控制经验和很多不同的流水线产品变更的实践有机的结合在一起。

朝着在线优化运行的方向努力

各种优化技术的不断改进，使在线优化计算能够在一到两秒钟内完成。一个完全自动化的在线优化运行工具即将问世，有了它就再也没必要进行试验运行了。准确的说，在一个多机轧辊的流水线上，只要板材的前端进入到前两个轧辊，整条生产线的优化运行设置和模型调整的工作就自动完成了。

Anders Daneryd

Rickard Lindkvist  
ABB 公司研究部  
Västerås, 瑞典  
anders.daneryd@se.abb.com  
rickard.lindkvist@se.abb.com

Mats G Olsson

ABB 自动化技术部  
Västerås, 瑞典  
mats.g.olsson@se.abb.com

# 能量的优化管理

水泥生产中的能量管理

Matthias Bolliger, Eduardo Gallestey, Gabriela Crosley, Michelle Kiener

由于水泥生产消耗大量的热能和电能，在整个世界范围内它的生产成本在不断增加。所以，近年来提出了通过使用更高效的设备和替代燃料以及减少原料的需求来降低成本。上述改变带来了各种限制，但也必须设法确保产品的质量和生产率。寻求满足动态变量约束的最佳运行点有赖于各种价格燃料的优化组合和适时地购入电能，并不断地减少系统对这些资源的需求。本文介绍了一些解决方案和工具可以帮助我们到达这些目标。



## 工业生产中的高效率

## 工业生产中的高效率

要优化一个水泥生产厂的总体性能,就需要制订全厂的自动化控制策略。减少各个环节的能源需求必须与寻求全厂的优化运行点相协调,以满足产量和质量的要求,还必须满足环境排放的限制。帮助水泥生产商实现这些运行目标是 ABB 的知识管理系统 (KM, Knowledge Management)。KM 能够帮助专家优化器 (EO, Expert Optimizer) 收集各种信息和数据,用于生产过程的建模,以便寻找全厂在任何时间的最优运行方式。

**减少各个环节的能源需求必须与寻求全厂的优化运行点相协调,以满足产量和质量的要求。**

### 变速驱动器 - 一种电力节能器

在水泥生产过程中,大型风机将风吹过石灰窑、分解炉、磨粉机、过滤器直至排气烟囱。许多小的风机将风送到冷却机,来冷却石灰窑输出的热的熟料图 1。所有这些气流都必须进行调整和控制,因为大气环境、生产条件和通风条件都对这些气流强度

有着很大的影响。所采用的控制方法是决定运行成本的一个主要因素。例如,采用固定转速的电动机驱动其效率最低,而采用变速驱动 (VSD, Variable Speed Driver) 其效率最高。进一步讲,如果将两者进行比较,变速驱动的节能最大可达 70%,当然这一数值与系统要求的风速有关。

控制气流的风机对电能的不同需求见图 2。风机的负荷特性呈二次曲线,在正常运行条件下它输出的风量为额定风量的 90%,由图可见在这种工况下采用 VSD 可节能 20%。现在新建水泥厂的大型风机都安装了变速驱动装置。但是,更换风机仍然有很大的节能空间,特别是冷却机。

### 窑壁冷却机的优化运行方案 - 多重驱动

每生产一顿的热熟料并冷却它,大约需要消耗 10% 的电能。因此必须认真选择冷却机的驱动系统。一个备选方案是多重驱动,通常也称为“冷却系统的优化驱动方案”。它充分利用了 VSD 的所有优势,并回避了 - 从

经济学的观点来看 - 单重驱动的弊病。与单重驱动系统 (它有自己的整流器、直流侧母线和逆变器) 不同,多重驱动系统通过一个“集中式的”整流单元产生直流电压,并给一个公用的直流母线供电,而每一台逆变器都各自独立地与直流母线相连图 3。在多重驱动系统中,单重驱动系统的所有优点都得以保留。而每台逆变器的功率却不一定相同。相反,在一个多重驱动系统中,可以包含多种不同功率大小的逆变驱动单元。

- 这种多重驱动系统的好处在于:
- 减少联接电缆: 多重驱动共用一个电源入口;
  - 减少了多级电动机之间刹闸减速的能耗,有些窑壁冷却机需要这样的系统结构;
  - 减少占地面积
  - 省去了单重驱动、阻尼器和在线备用电动机所需要的低压均衡电路;
  - 减少了谐波,降低了成本: 采用一个整体的有源滤波器,或 12 脉冲换流器
  - 保留了单重 VSD 所有的优点

### 基于知识管理系统 (KM) 的能量监视

知识管理系统 (KM) 通过基于 Web 的报表、趋势图和监控画面,提供了一整套全厂监控的解决方案和各种先进工具,它可以方便地实现监控系统

的互联、生产组织、生产的分布式管理、质量控制和能量信息的管理。所有的与生产过程相关的关键性能指标 (KPI, Key Performance Indicators) 计算并显示在一个总体画面上。此外,如果运行人员希望使产量最大化,同时使各种替代燃料的使用量也最大化, KM 系统就提供各种信息进行性能分析,告诉你哪些是可能的,而哪些是不可能的。

KM 系统还可以通过 ABB 的 InformIT 应用程序进行扩展,以满足各生产厂家的特殊需求。它可以进行生产过程信息的监视并生成报表。该系统可以提供与生产过程相关的各种功能来简化水泥生产的管理:

- 生产跟踪与报表生成
- 过程操作的监视与报表生成
- 原料库存管理
- 耗能与排放报表

有了 KM 系统,我们就可以很方便地辨识过程控制参数对产品质量、产量、能量消耗和污染排放的影响程度。它能综合各种生产数据、生产过程的多样性、能量指数以及实时的产品质量数据,生成有关系统运行和产品的全面的报表和趋势图。有了这些高质量的报表和趋势图,就可以使我们更好地利用电能、设备、库存和产能。

**基于 LINKman 最优控制系统,专家优化系统 (EO) 就可以将基于规则的控制与神经网络、模糊控制和模型预测控制 (MPC) 等现代工具相结合。**

企业资源规划系统 (ERP, Enterprise Resource Planning) (比如 SAP) 所具有的系统互联功能是非常重要的,它将来自现场的生产数据提升到企业管理的层次。在此, KM 系统扮演了一个信息提供商的角色,它在实时控制系统、生产现场和 ERP 系统之间实现信息的交换。

生产成本是由能源消耗量所决定的。不同的生产区域消耗的能量不同, KM 跟踪生产线的原料输入量和产量,计算能量的消耗图 4。

基于在正确的时间,正确的地点,以正确的形式所获得的信息, KM 将做出有利的决策,帮助我们实现生产过程的优化和提高产量的目标。

### 通过专家优化系统 (EO) 实现热能的节省

水泥生产是一个复杂又耗能的生过程。在该生产过程中的关键步骤是,在石灰窑中将原料 ( $\text{CaCO}_3$ , 粘土和

/ 或铁矿石) 变成水泥熟料 (一种合成水泥矿物质)。在典型的生产过程中,在原材料进入石灰窑之前,石灰窑的废气被用来预热原材料。接下来,在石灰窑的燃烧室原料被进一步加热到 1500°C,使原料部分融化,发生化学反应,变成水泥熟料。接着,再加入少许石膏 ( $\text{CaSO}_4$ ), 混合均匀,磨磨成粉,就成了水泥产品。

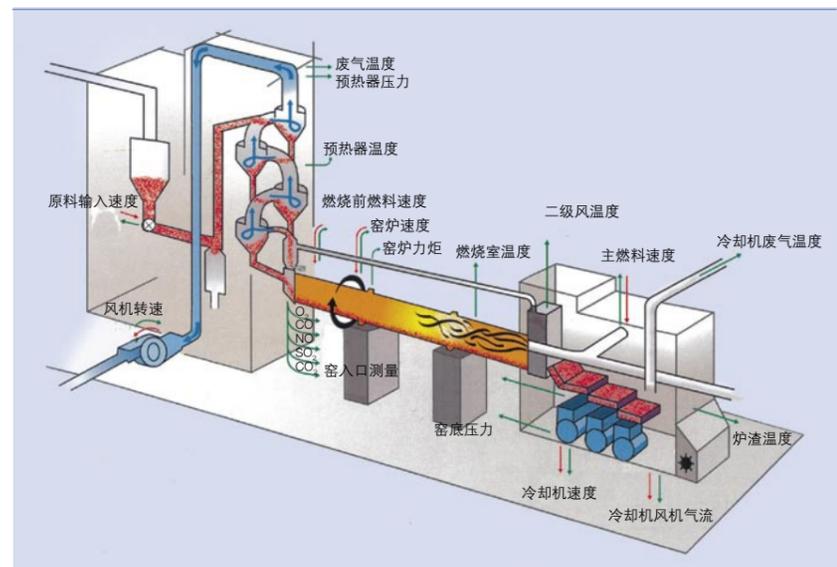
生产水泥的石灰窑的控制通常需要有经验的操作人员,他根据设备的运行状况不断地调整由控制器设定的参数。这个工作劳动量很大,而且由于系统的响应复杂、设备延时和各种变量之间错综复杂的关系,使这一工作变得十分困难。

其结果往往是,操作人员在石灰窑的控制中采取保守的做法,将燃烧温度设置得高于最佳温度,从而导致不必要的高能耗。

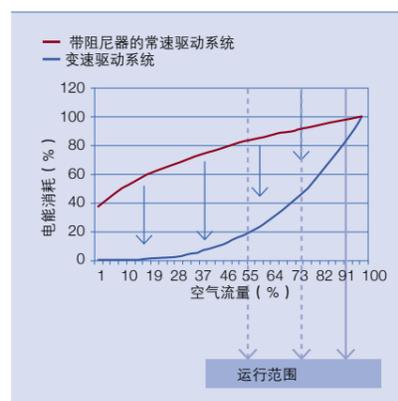
EO 是著名的、备受业界好评的 LINKman 优化控制系统的延续。它将基于规则的控制与神经网络、模糊控制和模型预测控制 (MPC) 等现代工具

脚注:  
1) 根据燃烧室温度 (BZT, Burning Zone Temperature) 可以预测产品的质量。如果 BZT 太低,水泥熟料可能燃烧得不充分,而 BZT 太高,又可能造成过燃烧。

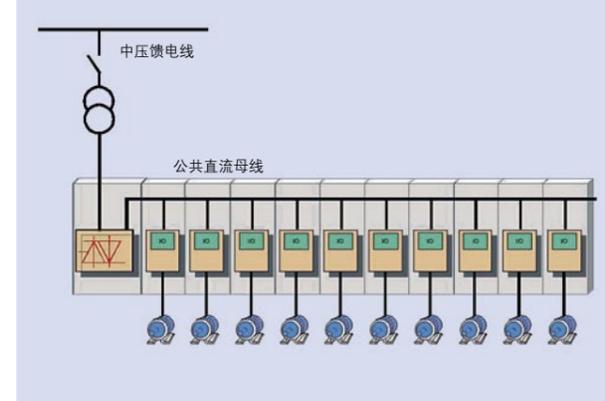
1 一个典型的石灰窑,它包括从原料的预热、煅烧窑、窑壁冷却机,到熟料出炉的全过程。在该图上也详细地表明了专家优化系统 (EO) 的输入和输出信号



2 带阻尼器的常速驱动和变速驱动的耗电特性



3 多重驱动系统构成图



4 总体能量报告 - 包括热能和电能 - 并显示有能量指示器



## 工业生产中的高效率

## 工业生产中的高效率

相结合 **编者按**。EO 通过不断的监视石灰窑的状态和设定合适的工艺流程，改进了石灰窑的控制。该系统的输入输出信号如图 5 所示。

石灰窑的正常稳定运行，不断可以减少能耗，提高产量，还可以提高水泥的质量。但是，石灰窑的优化运行要求在稳定燃烧的前提下，将燃烧室的温度控制在最低水平。这一状态很难长期保持，原因有三：

### ■ 原料配比的变化

### ■ 石灰窑运行的复杂性

### ■ 石灰窑状态变化的延时很长（例如，改变设定的控制参数到它们起到效果的延时）

然而，先进的 EO 石灰窑控制系统却能够优化它的运行，确保高质量的产品，降低燃烧室温度，进而降低能耗成本。该控制系统通过应用专家的知识规则和不断的调整控制参数（每三到四分钟调整一次），来达到优化运行的目的。

如今，可靠的生产设备和经实践证明了的成熟的技术措施，可以保证能源的有效利用，同时也不会降低产品的质量和产量。

现在，由 EO 系统控制的石灰窑的运行时间已超过了它的总运行时间的 80%。根据 EO 系统投运前后对原料石灰和氮氧化物 (NO<sub>x</sub>) 排放量监测数据的计算表明，每一台石灰窑的节能都达到了 8% 以上。

### 石灰窑燃料的混合优化

有时，我们需要一个工具对石灰窑用到的常规燃料和替代燃料进行优化管理。为了满足这种需求，EO 系统最近增加了一个“替代燃料优化管理”模块，使石灰窑运行的经济性达到了一个新的高度。

该模块利用信息管理系统所收集到的各方面的数据（设备、生产、市场和实验室），在线计算成本最低的燃料配比方案，以满足生产过程和企业经营的需要。这些需要是多方面的，但其中最重要的需要来自于：

### ■ 热力平衡

### ■ 氧气的过度使用

### ■ 水泥熟料的化学成分

### ■ 可挥发物的浓缩

### ■ 污染排放的限制 (SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> 等)

### ■ 执行装置最大、最小和速度变化的限制

### ■ 燃料消耗上的运行限制

### ■ 将前置煅烧室和石灰窑内的燃烧过程分开

### ■ 不惜代价必须遵循的合同（与客户或供货商签订的）

这种优化算法的基础是 EO 系统中专为石灰窑开发的数学模型，它被用来实现（模型预测）控制图 6。该模型能够估算冷却机、火焰、燃烧室的状态、尾气和预热器温度、石灰窑的能量需求、污染排放和挥发物的程度，等。该优化算法可以处理一些硬性和非硬性的限制条件，从而增强了系统优化运行的鲁棒性和可靠性。

每个 15-30 分钟的采样间隔，输入数据都会被刷新，计算新的燃料配比方案，并输出给 EO 的控制策略模块执行。在两次采样间隔之间，由 EO 的控制策略模块来保证生产过程的稳定和达到最高的性能指标。特别是，该控制策略模块可以通过改变燃料配比、废弃物含量和原料的配比，增强经济优化的功能，使生产满足环境、合同和各项技术上的限制。

### 电能的管理

### 编者按：模型预测控制 (MPC, Model Predictive Control) (择至 ABB 评论 2004 年第二期, 13-19 页)

有好几种方法可以获得系统的最优控制解。求解带输入输出约束的控制问题最优解的一种广为采用的方法是模型预测控制法 (MPC, Model Predictive Control)。MPC 是基于水平后推的思想，也就是说根据系统短期或中期的预测值来确定系统未来的最优控制。每当得到系统一个新的测量信息，就计算出一系列新的控制量以替代旧的控制量。每一次得到的控制序列都是为了优化系统的性能指标，并确保系统的响应不越限。

水泥生产线每天都是 24 小时连续运转，空余的或备用的生产能力非常有限。绝大多数设备都是连续运行，只有在白天当原料供应不足时才会空闲。所以可节省的电能也是非常有限，而且主要集中在水泥磨粉生产区。这个区域的生产计划的制订，比如何时生产某种规格的水泥，用哪台磨粉机进行生产，多半是按照运行人员的经验，按照启发式的原则手工制订的。然而，面对大量的磨粉机、多种规格的水泥型号、大量的成品水泥仓桶，再加上复杂的运行条件和合同规定，使这一问题变得很复杂。运行人员制订的生产计划往往离最优计划相去甚远。下面介绍如何基于 MPC 技术来制订最优的生产计划。

### 一个典型的磨粉机生产不同规格水泥产品的生产计划

如图 7 所示，该计划能够实现电能的有效管理。根据与客户签订的合同以及对不同时段电价的预测，该算法能够得到全厂磨粉机优化运行的一个参考计划，其中规定了每台磨粉机生产何种规格的水泥，何时生产等。此时系统的优化模型，是将总的生产成本视为电能消耗量与低规格水泥（磨粉机从生产一种规格的水泥切换到另一种规格水泥的过程中所生产的水泥）总量的函数。充分利用电价较低的时段进行生产就可以降低电费成本，当然还必须保证不超过最大的合同电量。对磨粉机的切换次数采用罚函数，可以减少低规格水泥的产量。

除了水泥仓桶的容量和磨粉机的可用率等物理条件的限制以外，还必

图 5 典型的石灰窑模型 - 输入和输出

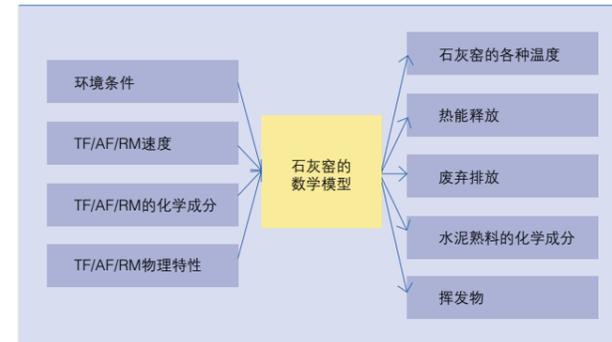
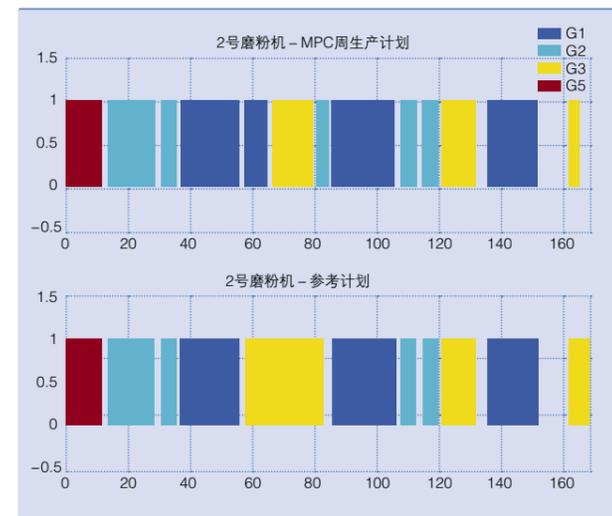


图 6 典型的磨粉机生产不同规格水泥的生产计划



须考虑的限制有：

### ■ 传送延时：改变一台磨粉机所生产的水泥型号可能会带来一些延时，在此期间磨粉机生产的新型号的水泥将被传送到另一个仓桶；

### ■ 满足优先的生产顺序：作为输入信息，优化算法要求对每一种水泥的销售价格进行预测。如果不能给出预测价格，优化算法就会按照预先设定的优先顺序安排生产计划；

### ■ 运输系统：是用传送带，还是用铲斗升降机或是鼓风机将成品水泥从磨粉机运送到仓桶，也是必须考虑的一个因素。比如三台磨粉机却只有两条独立的输送通道。当然，如果多台磨粉机生产同一规格的水泥，那么它们就可以共用一个输送通道。另外，一个输送通道一次只能给一个仓

桶送货，而一个仓桶一次也只能接收一个输送通道的水泥。

### 总结

综上所述，能量管理系统设计生产过程优化的方方面面，它可以减少电能和热能的消耗，减少昂贵能源的使用，并采用多种燃料搭配使用等方法，以降低成本。如今，可靠的生产设备和经实践证明了的成熟的技术措施，可以保证能源的有效利用，同时也不会降低产品的质量和产量。本文介绍的一整套切实可行的整体解决方案 - 变速驱动 VSD, 专家优化系统 EO 和知识管理系统 KM- 就是一个实现全厂自动化优化运行的完美例子。由于能源价格的持续波动（总体呈上升趋势），这套优化运行控制设备的投资回报周期是比较理想的。它还可以减少排放，起到保护生态环境的作用。因此可以说，这套系统提高了各项生产指标，达到了所有预定的目标。

Matthias Bolliger  
Eduardo Gallestey  
Gabriela Crosley  
Michelle Kiener  
ABB 自动控制技术部  
Baden, 瑞士  
matthias.bolliger@ch.abb.com  
eduardo.gallestey@ch.abb.com  
gabriela.crosley@ch.abb.com  
michelle.kiener@ch.abb.com



# 更高的产能 更少的污染

ABB 喷漆系统中的能源与生产力  
Hubert Labourdette

在工业生产中喷漆处理是较为复杂的过程，然而这正是 ABB 公司技术领先的领域之一。多年来，喷漆系统为工业喷漆制定了一系列解决方案，提高了整体的生产力及质量。汽车及其他工业客户通过使用这一系统解决了汽车、手机、轮机以及起重机表面喷漆的问题。

由于油漆中含有对人体健康及环境有害的有机溶剂，所以对于公司来说，在减少排放及降低运营成本，和优化产品等方面存在着很大的压力。于是合理的解决方法及服务是当前需要解决的问题。而关键问题就是喷涂车间，ABB 成功地开发了与节能相结合的空气循环系统。本文将详细介绍这一技术。

喷漆是一项比较复杂的工业处理过程，同时还面临着更多要求。如：

- 如果要达到一流的喷漆质量，那么需要在较高的空气质量环境中进行喷涂，也就是说，喷涂车间内需要有合适的温度，空气流速，湿度以及无尘；
- 浪费很少或者根本没有：ABB 喷漆机器人喷头可以节约油漆和有机溶剂；
- 工作人员应该避免接触有机溶剂，以保证他们的身体健康；
- 需要节能：能源成本占到了喷漆处理成本的 25% 到 30%；
- 要符合环保要求：有机物质挥发处理方法 (VOC, Volatile Organic Component) 以及节能问题得到了解决，使有机溶剂漆得以利用。

ABB 的自动喷漆系统 [1] 由于能节省涂漆而倍受业界称道，现在绝大部分的汽车制造商已经安装了这一系统。于 2006 发布的新一代的喷漆机器人图 1，能完全自动化地完成所有的喷漆过程，大幅地减少了工人在污染严重区域的工作量。

## 喷涂车间的优化

喷涂车间的生产过程如图 2 所示。空气处理部分 (1) 将外部的新鲜空气进行处理并且控制温度，湿度及粉尘含量。这样空气就以一个垂直恒定的速度到达喷涂室 (2) 的顶部。在喷涂操作的过程中，它不断地补充溶剂和油漆 (3)。在文丘里容器中完成洗涤的过程，水以及喷漆废料被送到废物处理罐中处理 (5)，混在空气中的有机挥发溶剂通过烟囱排到外面去 (6)。

这种处理方法需要大量

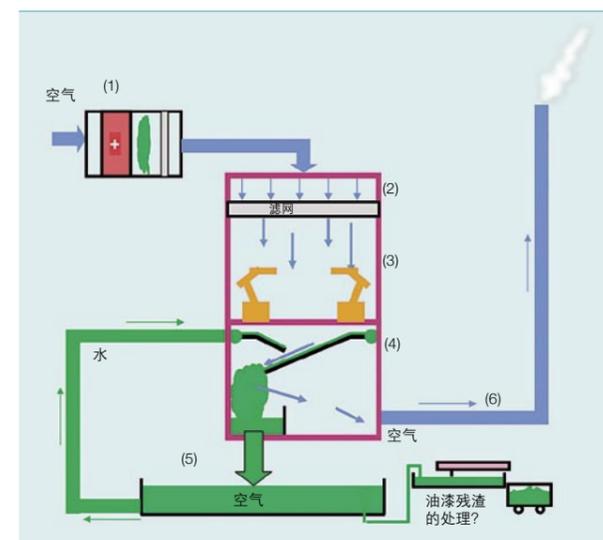
的能源，成本很高，因为它要处理大量的室外空气（有时达到每小时上千万立方米）。此外，空气和溶剂的混合物也不能直接排放到室外，这不符合环保的要求。这就是喷涂车间需要优化的原因。

## ABB 的解决方案

1 新一代的喷漆机器人



2 喷漆车间的处理过程



为同时解决这些问题，ABB 结合当前最先进的节能工艺，研制出喷涂车间的一种空气再循环系统。这个解决方案综合了空气循环，溶剂处理以及节能，并且全都符合环保要求。但目前它只适用于实现了喷漆完全自动化的场合。自从 ABB 推出喷漆机器人之后，就在喷涂车间得到了广泛应用。

ABB 结合当前最先进的节能工艺，研制出喷涂车间的一种空气再循环系统。这个解决方案综合了空气循环，溶剂处理以及节能，并且全都符合环保要求。

## 空气的再循环处理

喷涂车间内的空气再循环过程如图 3 所示。在经过清洗处理后 (4)，污染过的气体没有排放到外面，而是 90% 的空气在 (8) 中经过滤后，用于车间内空气的再循环。这个循环系统不仅实现了空气的再利用，而且一部分有机溶剂得到浓缩回收，另一部分溶剂挥发物经燃烧排出室外。需要监视溶剂的浓缩过程，其浓度需要保持在安全范围内。10% 的空气流经特定的风管输送到再生热氧化器 (RTO)(7)。为了补充这部分空气，需要从外部新引入一小部分气流 (1)。

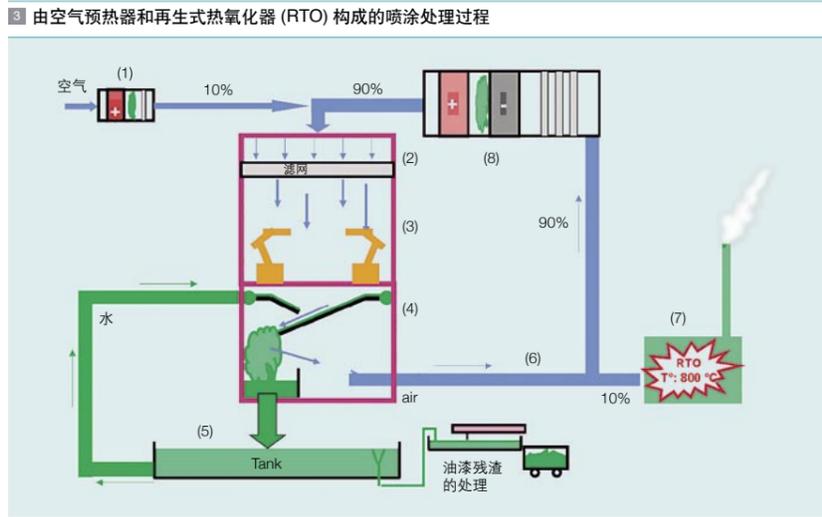
这个处理过程非常稳定，几乎不受外部条件的影响。但它需要一个非常高效的洗涤过程 (4) 以及特殊的粉尘过滤器。

再生式热氧化器 (RTO, Regenerative Thermal Oxidizer)

工业生产中的高效率

工业生产中的高效率

有机溶剂在再生氧化的过程中，燃烧温度高达800℃。经过再循环处理，空气中的挥发性溶剂浓度达到了饱和。它们经过一个温度高达780℃的高温陶瓷室(图4)，进入燃烧室。在这一温度下气体发生自燃，能够充分除去溶剂。这种去除了溶剂成分的835℃气体被送入第二陶瓷室，将它降温到60℃之后，排入大气。



除了起始阶段，这个系统耗能接近于零，而且热效能接近于95%。

定期翻转气流的方向可以提高陶瓷室的温度。除了起始阶段，这个系统耗能接近于零，而且热效能接近于95%。这一加工过程符合几乎所有国家的环保标准。

高到19℃。为了达到更好的喷漆效果，空气通过风机可以再升高2℃。在干燥时，收集到的所有水份注入到清洗设备中。这种处理使得水份在整个过程中形成了一个闭环系统，达到了明显的节水效果。与传统的处理过程相

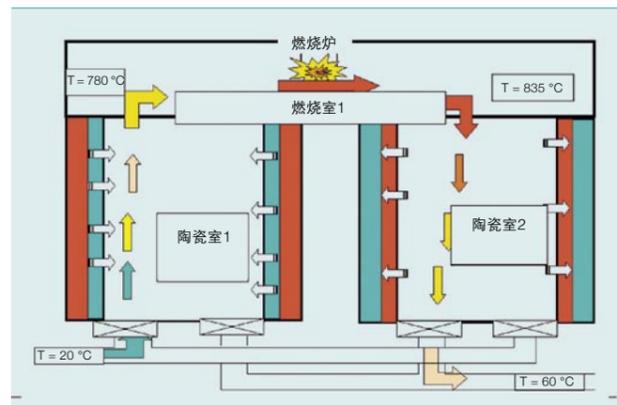
比，系统排除的气流中含有大量的空气和水份，因此必须在入清洗设备中补充新鲜的水份。

在干燥时，收集到的所有水份注入到清洗设备中。这种处理使得水份在整个过程中形成了一个闭环系统，达到了明显的节水效果。

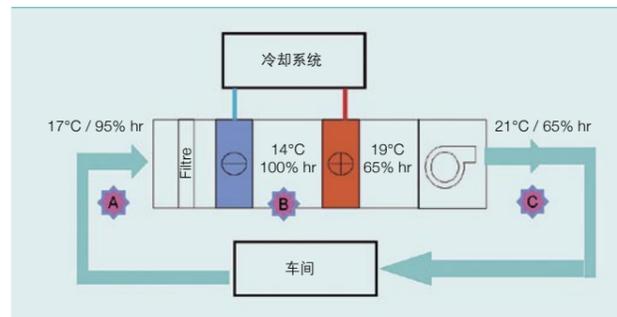
节能和节水

上文中提到的挥发溶剂的处理并不需要额外的能量。另外一个可以显著节能的地方，就是对外部空气的利用(1)图3。与传统的处理过程相比，ABB降低了新鲜空气的使用量，因此能源消耗节省了10倍！然而，这需要安装新设备(8)图3。图5详细说明了空气循环利用的过程。整套设备的设计理念就是节能。在经过清洗步骤后(A)，空气湿度很高，因此不能直接进入喷涂车间(C)，而需要经过压缩机进行干燥。

4 空气循环室

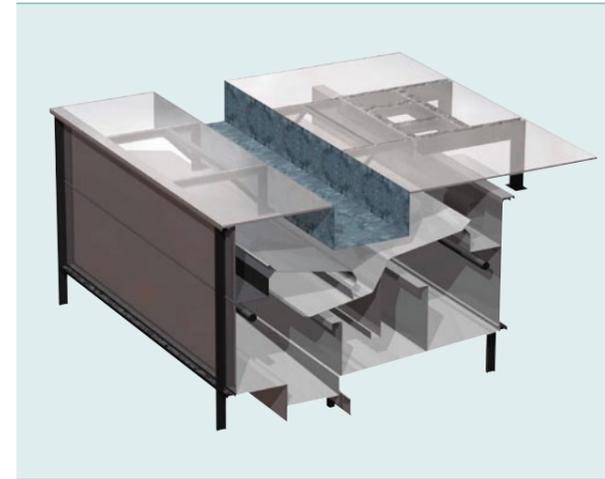


5 空气加热及冷却系统

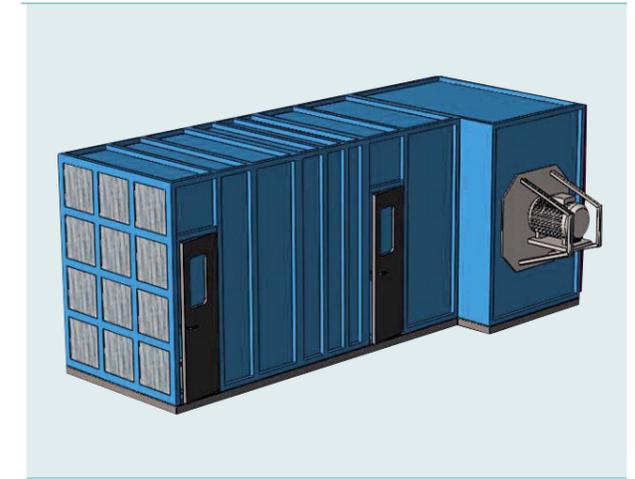


在进行除尘后，气温降低到14℃(B)来除去空气中的水份，之后气温就会升

6 简洁可移动式空气净化设备



7 简洁可移动式空气处理单元以及冷却装置



启动和试运行等，企业需要停产两到三周(如暑假及圣诞节期间)。为了顺利实现技术改造，ABB成功地实行了设备的模块化设计和安装，见图6和图7。

该系统几乎所有的设备都是ABB旗下各公司的产品(PLC, 驱动器, 仪器等), 这些产品也体现了ABB公司总体的业务组合。所有的产品都可以在喷漆车间附近进行临时的组装，一旦旧设备停下来，就可以马上将旧的设备一部分一部分地替换成新的设备。

客户的利益

这一系统表现出稳定的全天候运转的能力，这样使得性能有了显著的提高。安装方式非常简洁，需要更少的占地空间，而且完全符合环保标准。与现在的喷漆生产线相比，可以节能接近30%。这就意味着喷漆处理每年总的成本可降低9%。

ABB的工程师们在全世界各地安装了大量喷漆生产线，具有丰富的经验，这些宝贵的工程经验使客户受益。这些经验对完成整个系统的安装

和调试是非常必要的。另外，ABB的喷漆机器人完全替代人工完成整个喷漆过程，极大提高了生产的自动化水平。ABB公司在这一领域中处于世界领先地位。

与现在的喷漆生产线相比可以节能接近30%。这就意味着，喷漆处理每年总的成本可降低9%。

另外一个优势是节省油漆

这个循环系统实现了完全由机器人完成的喷漆过程，因此可以做到更进一步的节省，比如减少油漆的用量(成本降低)，也相应的减少对环境的影响。装有ABB油漆喷头的机器人可以提高喷涂效率(油漆的实际用量除以油漆的总用量)。另外，一套成熟的监控系统实时监控着整个喷涂过程的相关参数以及车辆的喷涂模式。

如今，在喷漆的过程中要求使用机器人，不仅因为它能节省油漆，而且能使操作人员避免直接接触危险的化学物质(正如本文标题)。

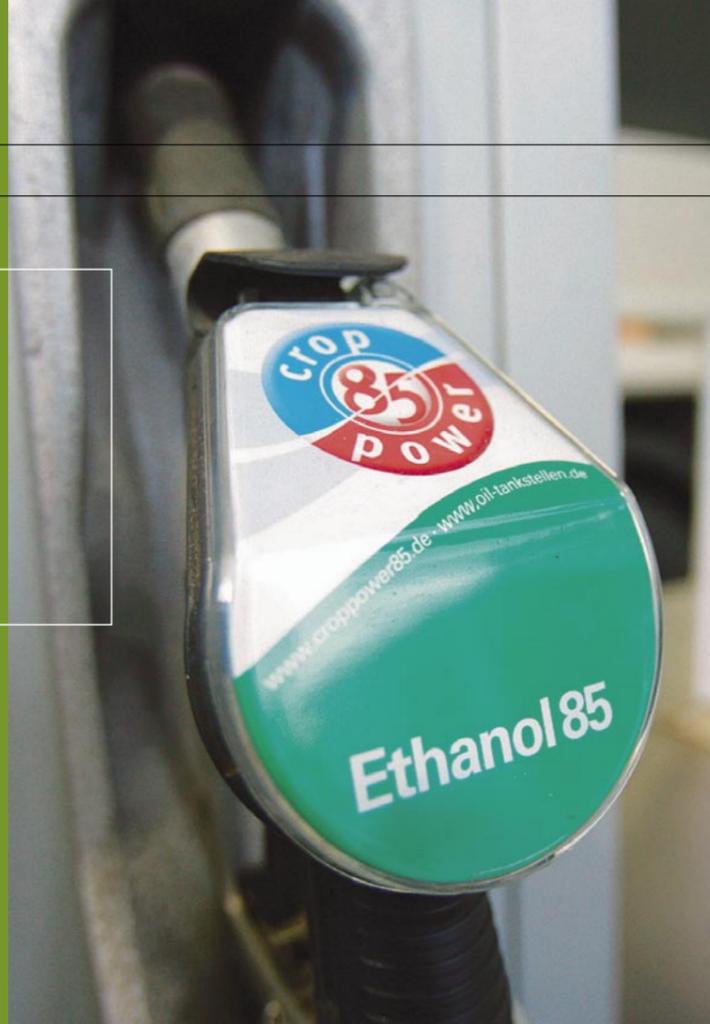
来自ABB的这套独特的喷漆系统，既提高了生产力，节省了能源，也减少了污染。

Hubert Labourdette  
Global Lead Center for Paint Process Automation  
Saint Ouen l' Aumône, 法国  
hubert.labourdette@fr.abb.com

参考书目  
[1] Yoshida, Osamu, "More colors, less waste – ABB Cartridge Paint System: Cutting costs and reducing environmental impact", ABB 评论, 2006年, 第一期, 43-46页

# 绿荫

开发可持续发展的并且在经济上可行的绿色生物能源的梦想已经越来越接近现实了。政府对这一巨大的转变给予了支持和鼓励。2007年2月15日欧盟规定，截止到2020年，所有的汽车必须使用混有10%的乙醇汽油或甲醇柴油。这两种原料的生产过程是不同的，乙醇通过发酵产生酒精，甲醇是通过气化过程产生，这种清洁的混合气体可用作加工生物柴油。



目前，巴西通过从甘蔗中提取乙醇，已经达到了欧盟设定的2020年的目标。实际上早在1925年就提取出了乙醇，但直到1975年通过引进一个大型项目，才使乙醇含量达到了20%到25%。目前这个国家拥有313个乙醇厂，而且考虑到要出口，还有89个厂正在规划之中。使用棕榈油或黄豆为原料的生物柴油的发展也很快。现有10家工厂，接下来会有更多的工厂加入到这一行列中来。

美国大规模的利用玉米和小麦来生产乙醇，根据欧洲的实验，他们利用谷物，甜菜以及草，树枝，树根以及树桩中的植物纤维来生产乙醇，并且获得了很好的经济效益。生产乙醇过程中产生的废料可用于生产生物柴油中的甲醇。瑞典的纸浆和造纸厂目前成功的将污水气化得到了生物柴油。另外

一种用作汽车燃料的绿色能源是沼气，它可以作为巴士和小型卡车的燃料。

生产这些燃料的原材料是有地区差异的，然而它们是否能可持续，环保，并且在经济上可行？有关的争论还在继续，当我们做了严格的分析后，确实出现了很多疑问。例如，几年前荷兰政府就决定用进口棕榈油制造生物燃料。从表面上看，这看起来是非常可行而环保的。但最近的一项研究表明，随着原材料用量的增加，东南亚被烧毁的大规模热带雨林产生了大量的二氧化碳，取而代之的是需要更多肥料的棕榈树。从全球来看，荷兰的做法显得似乎不再那么环保了。看来判断是否真的环保，必须要对整个的产业链进行分析后才能得到结论。

许多生物燃料技术的快速发展，

是因为得到了政府的支持。但从长远来看，这些技术能否得到持续的发展，还要看它是否能获得经济效益。

为了保证真正意义上实现环保和经济上的可行性，这些技术在各个方面都应该是可持续的，并且要能减少二氧化碳的排放量。目前有些技术还不能严格地达标，但是其中有些是可达标的。正是这些在激烈的竞争中脱颖而出的新技术将为我们创造梦想中的绿色未来。

## 从废弃物中得到的沼气

2006年年底，瑞典建成了两个沼气设施。波兰斯和哥德堡两个城市都用工业废料产生的沼气作为卡车，巴士及其他车辆的能源。这正是他们倡导的防止全球变暖的环保措施。为了减少二氧化碳的排放，以及推行环保汽车，还推出了在瑞典的一些大城市等城市免费停车等一系列措施。沼气已经迅速发展成传统能源的替代品。

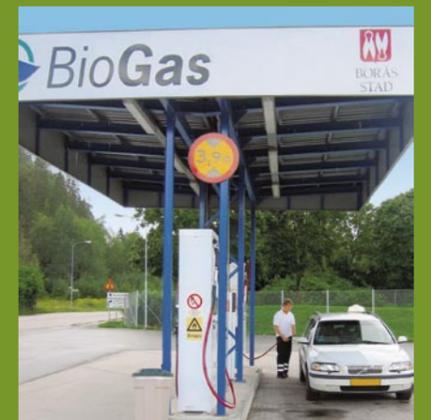
这两个设施都是由瑞典南部的一家私人公司 Läckby Water 提供的。这个公司的设备是由滚筒滤网，热交换器，过滤器，除沙器和洗沙器组成的。它们根据所用原材料的不同配比，组合在一起来完成特定的处理过程。产生的沼气通过 Coaab 技术进行过滤处

理，只有0.1%的沼气排放到大气中（其他方法排放2-4%）。这样除了能减少温室气体的排放量，还可以使更多的能量转化为可用的沼气。

波兰斯和哥德堡的设备如果全部投入生产的话，每年可以生产电量25GWh和60GWh。

ABB在上述两个设施中负责提供自动控制设备和电机，驱动器，开关等电气设备。通过参与这两个项目，ABB的工程师积累了沼气生产的经验和知识，所开发的模块化设备可以在以后类似的项目中得到重复利用。目前瑞典在车辆利用生物沼气方面处理世界领先地位，因此这些实际工程经验和知识也都是最前沿的。

波兰斯和哥德堡的设备如果全部投入生产的话，每年可以生产电量25GWh和60GWh。哥德堡具有世界最大的沼气生产能力。生物材料分解产生的气体通过净化得到了车辆用的生物沼气。此举每年可减少二氧化碳

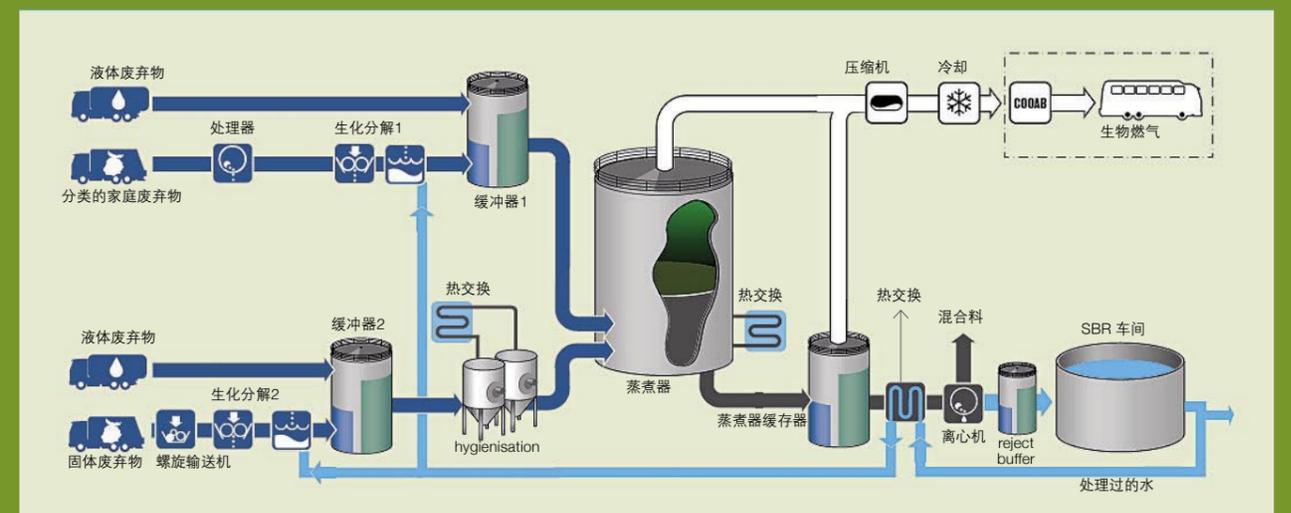


的排放20,000吨以上。

Läckby water 向全世界68个国家的4000个项目提供成套设备。由于受到减免税收政策的鼓励，以生物沼气的汽车在2005年一年增加了50%以上。这为Läckby water和ABB创造了更大的商机。据估计到2020年为止，瑞典提供的这些设备的生产将会为在过去的五年中丢掉工作的60000人创造就业机会。可见这种变化在环境和政治上都有重要意义。

Nils Leffler  
nils.leffler@ch.abb.com

第二代沼气池



## 乙醇：在王室的倡导下生产

在泰国，生物能源将作为汽油和天然气的替代品。目前重点在于有效地使用廉价有机物。事实上，泰国生产燃料乙醇工业（混合乙醇和汽油）起源于1985年普密蓬阿杜德陛下的皇家工程。这一项目是从甘蔗中提取乙醇。后来，国有企业和私营企业都发现了乙醇生产的潜力，也都积极地投入到这一领域的发展和探索中。

在泰国目前有八大授权的乙醇生产企业。其中有 ABB 的客户 - 泰国农业能源股份有限公司。工厂位于丹攀阿布省，这一工厂每天可以从蜜糖中提取 150000 公升乙醇。乙醇浓度达到 99.5%，用 10% 的乙醇与汽油混合，即得到所谓的乙醇汽油，就是汽车燃料的替代产品。

正是在泰国农业能源股份有限公司取得的成功，为 ABB 赢得了另外一个项目，同样是提供生产绿色能源的设备。（还是在泰国）

2004 年当泰国农业能源有限公司开展这一项目时，法国授权商和承包商 Maguin 希望 ABB 帮助解决控制及电力系统的问题。经过与用户的多轮谈判，最后 ABB 决定为所有 380v



电机提供电机控制单元 (MCC, Motor Control Center), 控制乙醇生产过程的自动控制系统, 并提供现场监督和调试服务。ABB 提供的产品和服务包括概念性设计, 详细工程设计, 控制软件开发, MCC 以及控制面板的设计与生产, FAT1, SAT2) 和总体调试。该工厂于 2005 年第一个季度开始投产。

整个自动化控制系统包括两个 ABB 操作员站, 一个 AC800M 控制单元, 以及有 450 个 I/O 信号的 S800。ABB 最新的自动化技术, IndustrialIT 800XA 系统是一个集成化控制系统, 它可以提高工厂的生产能力。通过收集关键的过程数据, 经过处理就可以在操作员站上显示报警列表, 过程画面, 控制面板及趋势图等界面。操作员可以在熟悉的 Window XP 环境中高效地完成各种控制操作。例如, 操作员通过控制画面可以启停电机。反馈信号表明了电机的状态, 并且可以同时显示多个面板。操作员可以识别报警的根本原因: 趋势图界面分析设备的当前状态是非常有帮助的。而且这些工具利用实时数据和历史数据, 对操作员深入调查报警的原因和进行故障定位都是非常有用的, 它还能随时制作成 Excel 表格进行分类整理。

除了以上的用户界面, 还显示一些其他的信息, 如曲线和系统框架图。这一综合的运行环境减少了决策和采取措施之间的时间。通过这些实时信息, 维护人员可以尽早地发现现场的设备、电机或控制系统本身的一些问题, 及早采取对策, 以降低维护成本。

正是在泰国农业能源股份有限公司取得的成功, 为 ABB 赢得了另外一个项目, 同样是提供生产绿色能源的设备 (还是在泰国)。从蜜糖中提取乙醇, 它与法国 Magin 公司的生产过程非常类似。该厂于 2006 年 11 月试运行成功, 投入生产。

随着 ABB 公司的 800xA 自动控制系统和电机控制单元在泰国农业能源公司和石化绿色能源公司的成功应用, 目前它们都能高效地生产大量的乙醇。这减少了泰国的石油进口, 并获得很好的经济利益。同时提倡使用这种替代能源对环境更加友好, 也正符合国王建设美好泰国的意愿。

Suchada Tangcharoensrisakul  
suchada.tangcharoensrisakul@th.abb.com

脚注

<sup>1)</sup> FAT: 工厂验收测试

<sup>2)</sup> SAT: 现场验收测试

## 从乙醇副产品得到的绿色汽油

小苏 (Little Sioux) 玉米处理设备, 是爱荷华州马库斯 (美国) 的一家乙醇生产厂, 它在生产过程中添加了一个油提取单元, 取得了很好的经济效益。这个系统从生产乙醇的副产品中提取玉米油。这些产品主要用于生产低价饲料。现在, 小苏玉米处理设备将这些玉米油转变为更高级的动物饲料或燃料。这样的提取过程减少了原材料的浪费, 提高了经济效益。

GS-Cleantech 公司制造的这套提取设备, 被称为玉米油提取设备 (COES, Corn Oil Extraction System)。COES 是一个全自动化的系统, 它可以很方便地添加到任何乙醇生产线中, 而不会中断原生产线的运行。COES 全部采用了 ABB 的产品, 包括一个全微机化的有 800 个串联控制器和 PLC 单元的控制系统 800HMI, ACS800 变频驱动器, 低压产品以及仪表等 (如压力



传感器)。

乙醇加工过程的副产品干酒精是价值 3.5 到 5 美分 / 磅。而从这些副产品中提取的油转化为生物柴油后价值 30 到 36 美分 / 磅。

COES 中采用的控制系统 800 是一个遵循工业标准的开放性的系统, 它可以和其他自动化市场上的产品结合在一起运行。

ABB 的集成控制系统帮助小苏的设备回收玉米油, 不然它们就被浪费掉了。

在该系统中, ABB 的 MS 手动电机保护器与 A-Line 电流接触器相结合, 为操作电机和保护电机免于故障提供了方便、可靠的途径。操作员在使用这些产品的时候, 可以减少停机造成的损失。

ABB 发挥其专长和在业界无以匹敌的实力, 提供各种采用 FOUNDATION、PROFIBUS 以及 HART 现场总线技术的产品, 从而使 ABB 的仪器设备符合国际标准。

在小苏, 控制室内的 ABB 800xA 工作站, 与现场的两个非冗余的 AC800M 设备相连。通过两个远程的 ABB 控制面板, 使操作员即可以在室内控制又可以在现场控制, 增加了灵活性。这套 ABB 的控制系统控制脱水器以及萃取过程。

萃取系统是由一个特殊的预处理系统、油分离设备及存储系统组成的。原料从脱水器进入到预处理系统, 然后再到高速离心机, 在那使油和副产品分离开来。然后油就进入存储罐中供进一步的提纯。ABB 的远程 PLC 控制着整个系统, 并确保纯净的玉米油最后灌入到运输挂车中。

GS-Cleantech 公司以工程技术以及商品化技术的研发为主, 通过这些技术能够改善环境并使他们的顾客受益。作为公司投资环保的一部分, 目前正着眼于开发更有效的利用自然资源的新技术。

小苏是安装了 COES 系统的三家生产厂家中的一家, 其他几家还在建设之中。提高乙醇生产的经济效益是一个关键的目标, 它需要一些新的思路将废物变成有用的产品, 只有这样才能实现可持续发展。

小苏的目标就是从玉米中提取更多的燃料和更多有价值的产品。ABB 的集成控制系统帮助小苏的设备回收玉米油, 不然它们就被浪费掉了。现在, 玉米油这种产品不仅可行, 而且很受欢迎。GS-Cleantech 和 ABB 的合作

Conni Hinkel  
conni.hinkel@us.abb.com

## 生物气体以及合成燃料

生物燃料, 化学物质以及可再生能源发电都是将来能源可持续发展中的主力。在许多大量使用汽油的国家, 如瑞典, 他们使用先进的生物转化技术减少了汽油的使用量, 同时也缓解了因燃料燃烧的气体而产生的温室效应。

使他们的客户受益, 然而最大的受益者是我们的环境。

2004年年底, 欧盟发起了研究使用清洁的氢合成气 (CHRISGAS) 的项目, 主要是利用瑞典南部热带雨林地区 Värnamo 城镇的植物生产燃料。原有的实验厂是由一家瑞典的电力公司 Sydkraft AB 建于 1990 年代, 后来关闭了。现在在 Växjö 大学的主持下重新启用, 研究生产汽车用的热化学燃料。为此于 2003 年新组建了一个非营利性的公司, Växjö Värnamo 气化研究中心 (VVBGC), 利用项目初期投资对原有生产设备进行更新改造, 研究和生产新型汽车燃料。在欧盟的框架计划 61) 和瑞典能源部的主要赞助下, 该项被称为 CHRISGAS 的研究计划, 作为一个瑞典和欧洲的风险研究计划, 于 2004 年 9 月 1 日正式展开。

### 主要目标

CHRISGAS 项目的研究目标, 就是研发和优化富氢合成气体的生产过程, 并节省能源的消耗, 降低成本。这种气体可以进一步加工成为商品氢气, 或者加工成液体燃料, 如二甲醚 (二甲基醚), 甲醇或 F-T 柴油。



目前的重点是, 到 2009 年要研究出一种从可再生的原材料生产汽车燃料半成品的经济有效的生产流程 - 一种由生物原料经蒸汽 / 氧气的气化作用生成的富含氢的清洁能源。

CHRISGAS 项目的研究目标, 就是研发和优化富氢合成气体的生产过程, 并节省能源的消耗, 降低成本。

紧接着, 就是通过加热蒸汽的清洁作用, 清除合成气体中的微粒成分, 去除焦油和轻烃等, 进一步提高氢气含量。目前已经达到了两个经济指标: 每小时生产合成氢气 3500Nm<sup>3</sup>/hour, 累计运行时间达到 2000 小时。

### 生产过程

生产步骤如图 1 所示。生产的核心就是一个低压蒸汽 / 氧气吹气炉 1c, 它通常运行在 10-15 个大气压、950 至 1000 °C 的条件下。为了减少燃料添加剂中惰性气体的消耗, 新开发了活塞送料系统, 它可将系统的性能提高两个数量级。生物燃料投入的最大速度是 4 吨 / 小时, 主要是树根和树枝。合成气体的冷却是在蒸气发生器的下游 1d。而这一部分系统的最佳运行温度还是一个需要研究的课题, 必须经过反复测试后才能确定。

脚注:

<sup>1)</sup> 欧盟的框架计划主要是资助欧盟各研究领域的研究项目和新技术开发。FP6 是这一框架下的第六个研究计划。

<sup>2)</sup> Nm<sup>3</sup> 单位表示在标准大气压等正常情况下的一立方米的气体。

经过蒸汽转化炉 1c 催化或加热, 第一阶段经过化学作用转化为氢碳化合物 (主要是甲烷), 并生成氢气和一氧化碳。如何确定这两种成分的最佳配比, 以提高合成气体的产量, 是目前重要的研究任务之一。为进一步增加合成气体中的氢气含量, 进行产品的升级, 在进行了冷却处理后, 还需要经过水 - 气转换器和加氢反应器 1h。这一阶段所需要的最佳温度还正在研究之中。

相关的技术问题还有, 如何将生产过程从实验室规模扩大到接近实际的生产规模, 如何使过滤器在高温下正常工作, 以及如何找到产量最高的系统运行点。但是, 除了以上这些技术难题之外, 最大的问题还是: “生物原材料是否能代替天然气生产出符合质量要求的合成气体, 并通过进一步的处理生产生物柴油, 并且能推向市场呢?”

为了使得某些处理过程能够随时进行调整, 进行测试以及做出快速的调整, 新设备必须有很好的灵活性。为了满足这些需要, 厂长 Ola Augustsson 先生选择了一种新的控制系统, 可以在需要的时候帮助他灵活地改变系统。

最终的目标是将合成氢气转化成为成本合适的汽车燃料。

### ABB 的控制系统

通过对各种系统进行评估之后, 他们选择了 ABB 的 800F 系统, 包括 DigiVis 操作员站。在该系统中, 包括了与现有传感器、执行机构之间的通讯线路以及它们之间的耦合线路。该系统还具有安全停机的功能, 一旦在试验中发生了故障, 可以利用这一功能安全地关闭系统。这个系统的安装以及调试是在 2006 年夏天完成的。“ABB 很好的完成了这项

工作”, Ola Augustsson 说。“由于旧设备所带来的各种限制, 使得这项工作没有那么容易完成。现在可以说, 我们有了一个操作方便并且灵活的控制系統, 帮助我们完成预定的研究计划”。该工厂在 2006 年末进行了测试, 并取得了理想的效果。新的测试在 2007 年还会进一步进行。

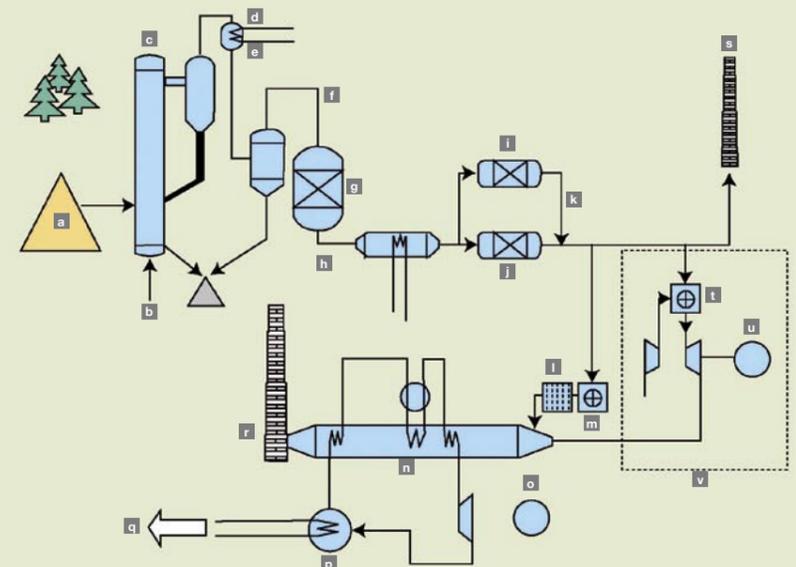
### 展望

我们最终的目标就是将合成氢气转化成为成本合适的汽车燃料。这个目标的最终实现还需要几年的时间。然而现在我们已经能够理解并且很好地控制这一转化过程, 只要产生的合成氢气品质好, 产量高, 由它生产汽车燃料已经不是什么难题了。但只有当原本已被废弃的 värnamo 工厂开始利用树根和树枝生产商品柴油时, 那才称得上是对减少温室气体排放对气候的影响做出了重大的贡献。

Niclas Erkenstal  
nicla.erkenstal@se.abb.com

1 乙醇的生产原理

乙醇的生产是农作物通过发酵, 将淀粉转化成糖, 再转化成酒精的过程。通过蒸馏, 可以得到 95% 纯度的酒精。



- a 生物燃料
- b 蒸汽 + 氧气
- c 气体发生器
- d 气冷
- e 高温气体过滤器
- f 蒸汽 + 氧气
- g 转化炉
- h 气冷
- i 水煤气变换
- j 氢发生器
- k 合成氢气
- l 冷却管
- m 燃烧器
- n 热回收式锅炉
- o 汽轮机
- p 冷凝器
- q 空冷
- r 烟道
- s 火焰
- t 燃烧器
- u 燃气轮机
- v 旁路系统

## 绿色的燃料添加剂

在德国的萨克森-安哈特地区的赛特滋建立糖厂 11 年以后, Südzucker AG 公司于 2006 年在该地区建设了一个具有里程碑意义的乙醇生产厂。用来制造生物乙醇的主要成分是小麦, 然而 Südzucker 还可以利用糖生产过程中的副产品, 以及在赛特滋盛产的各种农作物。新厂每年可以生产 260,000 立方米的生物乙醇。这大约需要消耗 100,000 公顷的耕地生产的 700,000 吨粮食。

生物乙醇可用作燃料添加剂, 生产环保的发动机燃料。这种产品可以从谷物, 玉米, 薯类, 甜菜, 甘蔗或植物纤维, 如草, 木材等中提取出来。生物乙醇主要是酒精, 它是经过发酵, 脱水、蒸馏以及脱水等过程得到的。

目前的汽油标准允许添加高达 5% 的生物酒精。2007 年 2 月 15 日, 欧盟建议到 2020 年这个标准需要提高到 10%。

欧盟正在推广使用生物燃料及其他可再生燃料, 以实现欧盟改善气候变化的承诺。

该标准还允许添加 15% 的乙基叔丁基醚类 (ETBE)- 一种辛烷改进产品, 它可以通过乙醇转化而来。这两种产品都是优良的汽油添加剂, 并且都是环保产品。

欧盟正在推广使用生物燃料及其

### 编者按: ABB 的贡献

这项工程 ABB 提供的设备及技术:

- 工厂的生产控制系统, 由 14 个 AC 800F 控制器, 7 个操作员控制和监测单元, 以及两个工程师站组成。它将近有 16,000 个 I/O (输入/输出), 分布在 S800 模块的 100 多个远程 I/O 单元中。
- 电机控制中心单元 (MCC) 控制着整套设备, 包括外部及内部的照明设备。
- 火警系统和 IT 数据网络。
- 完成从系统设计, 组装, 配置以及调试的全过程

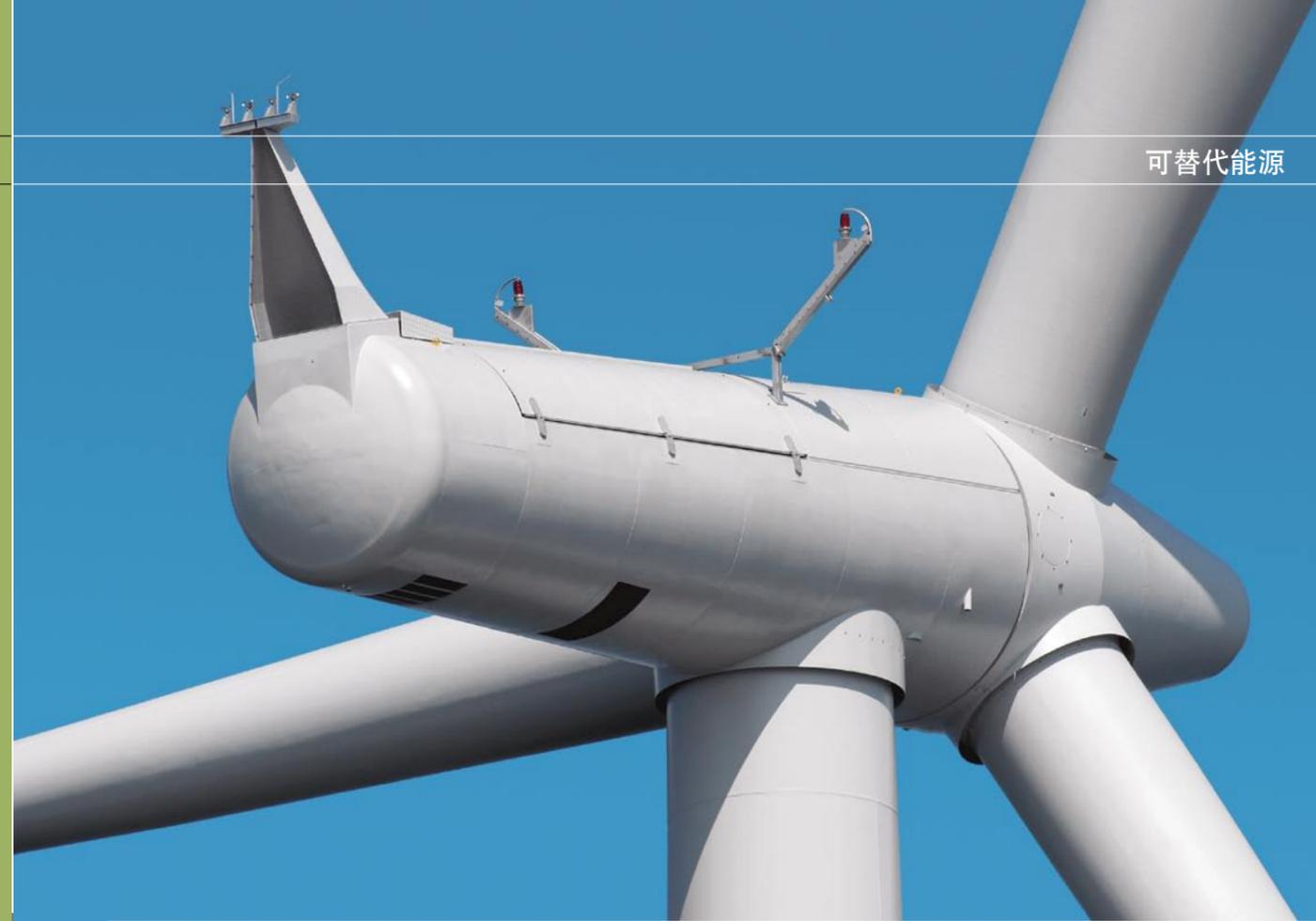
他可再生燃料, 以实现欧盟改善气候变化的承诺, 并且从可再生能源中找到环保、安全的燃料。

ABB 自 2004 年 3 月下旬开始就加入到 Südzucker 项目中, 并由它设在莱比锡的事业部负责。这也是 ABB 第一个大型的 Profibus-PA 项目: 在 Südzucker 大约有 1,000 台 Profibus 现场总线的装置。在赛特滋, ABB 的自动化专家使用新的可视化屏幕和 IndustrialIT800xA 操作员接口, 实现与 AC 800F 控制器的互联。

ABB 为这个工厂提供了尖端的技术。在这么短时间内完成这个项目, 这本身就是一个很大的挑战。通过所有参与到该项目的 ABB 工作人员的密切配合, 这个挑战如今变成了现实。该工厂在 2006 年底完成调试, 在 2007 年初正式投入了运行 - 这是 ABB 公司对环保所做出的又一贡献。

编辑部报告  
ABB 评论

1 Südzucker 新的生物乙醇工厂每年可以生产 160,000 立方米 (260,000,000 升) 的清洁燃料添加剂。



## 来自海上的清洁电能

海上的大型风电场替代了海岸上的新型发电站  
Eskil Sorensen, Finn Nielsen

丹麦的电力需求有五分之一是依靠风力发电, 这使得丹麦成为世界风力发电的先进国家。过去, 新型风电场都建在陆地上, 而如今越来越多的风电场都建在海上。目前, 两个装机容量相当于一个中型发电站的大型海上风电场几乎承担了丹麦电力需求的百分之四, 占丹麦全国风力发电量的 25%。ABB 公司是这些风电场电力设备的重要供货商——包括提供传输设备, 发电机以及中低压电气产品和 SCADA1) 系统。

可替代能源

可替代能源

目前，在全球气候变暖的严峻形势下，风能的利用倍受关注，而且在减少CO2排放中发挥越来越重要的作用。丹麦是风力发电机的主要生产国，世界上最大的两家公司——西门子风力发电公司（以前名为 Bonus Energy）和世界上最大的风力发电机生产商 Vestas Wind A/S 公司都在丹麦。这为其它生产商迫切进入该领域创造了一种氛围；因此他们纷纷都在丹麦建立研发基地。于是在该地区形成了一个风力发电机生产的供货商网络。这种专业知识和制造技术的集中使生产的风力发电机的容量越来越大：目前风机叶片的翼展到达了60米，纵向塔高接近120米。这些进展也引起了学术界极大的研究兴趣，周边的一些大学也纷纷开设风力发电的课程和技术培训，并成立了像 Riso 风能研究中心这样的专门的风力发电研究机构。

风力发电的历史

丹麦的 ABB 公司就是这诸多生产厂家和研究机构中的一员，在过去的25年里，他们积累了风力发电的丰富经验。ABB 的电缆、变压器、发电机和电动机就是他们提供给风机制造商

的一部分。因此，当丹麦的制造商向加利福尼亚或西班牙出口大量的风电场系统时，其中很多设备都是由 ABB 公司生产的。实际上，风能发电设备给 ABB 丹麦分公司带来了巨大的经济效益。

丹麦是风力发电机的主要生产国，世界上两大风电发电公司都位于丹麦。

仅仅几年前，世界上50%的风力发电机组都是由丹麦的公司生产。而今，又有几家生产商也进入了这个市场，如美国的通用电气公司和印度的 Suzlon 公司。风力发电已经成为全球商业竞争的重要领域：其中丹麦的生产商占有这一市场30%的份额。在过去的几年中，这一市场份额每年都增长近20%，相当于丹麦国内风能产业的增长速度。实际上，这一领域也是整个丹麦工业中增长最快的一部分，产值从前10年的50万美元增长到了今天的40亿美元（据丹麦风能协会）。这就意味着丹麦风能产业仍然需要大量的雇员。今天丹麦有21,000人从事这一领域的工作，要想找到新的专业

技术人员已很困难。

丹麦风能产业的发展始于70年代的石油危机。当初，当地的工匠们生产了一些小型风力发电机。到了80年代，风力发电机的制造技术向着专业化和企业联合化的方向发展，其中具有里程碑的标志是55kW风力发电机组。正是由于这些早期的努力，才有了今天新一代的产品。如今，风力发电机的功率已经达到过去的50倍。市场上的风力发电机功率可达到2MW甚至3MW。目前，投入使用的商业风力发电机组的最大功率可达到3.6MW，而更大功率的机组正在研发当中。

海上作业的风力发电机

为什么电力企业要克服很多困难，在海面上建设大型风电场，这里有很多原因。一个原因是，由于风力发电机的高度和翼展宽度在不断增加，所以很难找到合适的位置来建设这些高塔，特别是在丹麦这种人口密集的国家。在居住的场所附近，人们所能接

脚注：  
1) SCADA: 监控与数据采集系统，一种大规模分布式的监测和控制系统

1 Nysted 风电场由 72 个风力发电机组成，每台风力发电机的最大装机容量为 2.3MW



受的风力发电机的数量也是有限的，就给风电场的发展带来了困难。

另一个原因是，海面上的风要强劲些，这样就能发出更多的电能 - 一般情况下海基风力发电机要比陆地的多发电50%。

不利的因素是，因为必须给这些高塔建底座，所以在海上建设风电场的成本较高。同时，海水中含盐量高也要求塔的底座必须采用抗腐蚀材料。高塔表面还必须经过特殊的喷漆处理。发电设备也要求放在湿度低于50%的室内。另外，维修成本更高，因为维修人员不得不乘直升机往返。供电部门正在通过不断增加发电量来填补建设海上风电场花费的高额成本。

在丹麦，已建成的风电场累计装机3100MW，相当于五个大型陆基发电厂的装机容量，而且每年减少排放CO2四百万吨。

Nysted 海上风电场

早在2002和2003年，丹麦国会就决定建设两座大型的海上风力发电厂。这些风电场加起来几乎可以满足丹麦4%的电力需求。ABB公司为这两座风电场提供必要的电气设备。Nysted的海上风电场在2003年通过了调试并投入商业运行。在当时，它是世界上规模最大的海上风电场图。72台风力发电机组最大可发电165.6MW；其规模相当于一个中型发电厂。每台风力发电机组通过33kV的电缆将它产生的电能送到集控中心图。在这里电能通过变压器升高电压等级，并通过132kV电缆传送到陆地上。这个风电场可以满足15万户家庭的用电需求。

每年可减少CO2排放量达50万吨，相当于丹麦全国CO2总排放量的1%。这对于减少温室气体的排放作出了重要的贡献。在丹麦，已建成的风电场累计装机3100MW，相当于五个大型陆基发电厂的装机容量，而且每年减少排放CO2四百万吨。Nysted海上

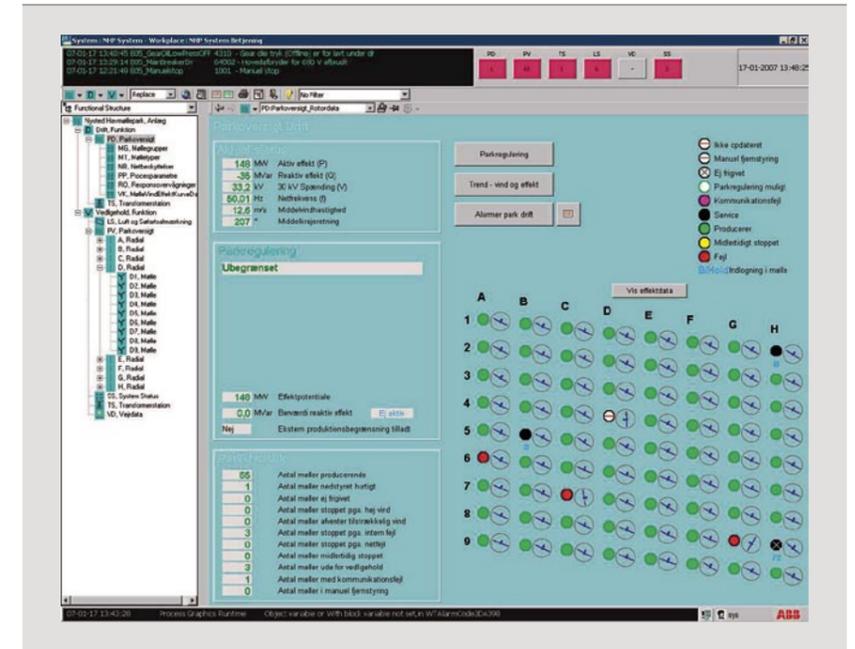
风电场计划每年发电50万MWh。这个目标已经高于实际需求。

更多的海上风电场正在筹建当中。丹麦政府最近宣布建设两座新型的海上风电场，预计在2009和2010

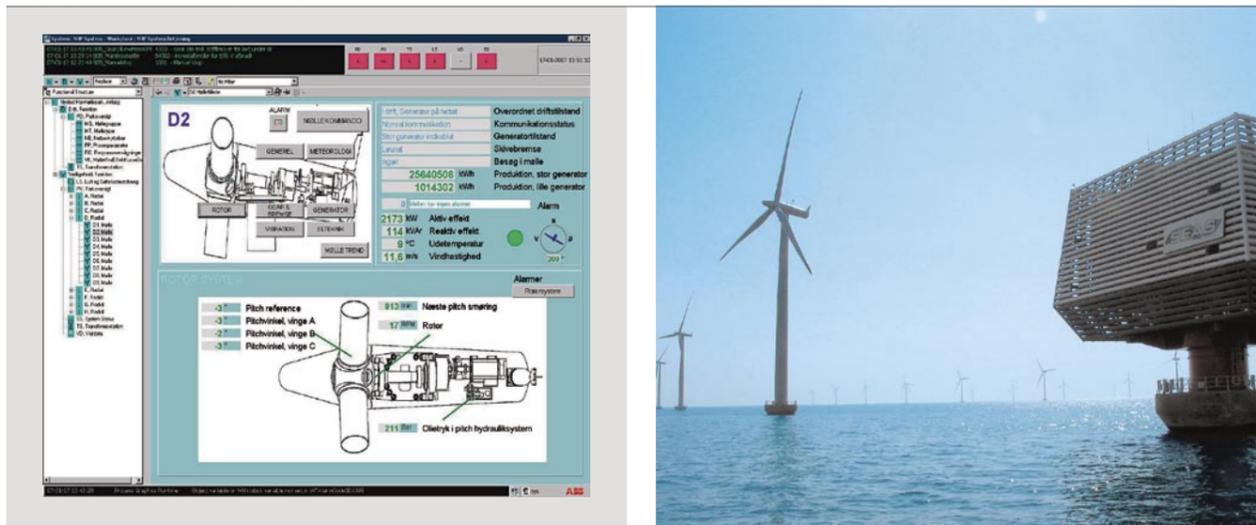
2 风电场 72 台风力发电机的集中变压器



3 操作人员可以总览 72 台风力发电机的状态信息



查看某一台风力发电机组详细的状态信息



年投入使用。

已经确定由 DONG 能源 A/S 公司负责建设位于好望角的风电场。DONG 能源 A/S 和 E.ON 瑞典 AB 联合中标建设位于 Rødsand 的风电场。ABB 公司已经得到了一个设备的订单，更多的订单还在洽谈之中。

### 海上风电场

Nysted 海上风电场的 72 台风力发电机组需要 SCADA 系统进行控制和监视。目前使用的是由 ABB 公司提供的带有内部冗余功能的 800xA 系统，该

#### 编者按：Nysted 海上风电场

- 72 台风力发电机，每台 2.3MW
- 最大发电量：165.6MW
- 发电：约 50 万 MWh，相当于 15 万居民的用电量
- 风力发电机组是由 Bonus Energy 公司，也就是现在的西门子风力发电公司提供的
- 风力发电机组塔高 69 米；叶片翼展 40 米
- 风电场于 2003 年投入运行
- 风电场的所有者是：DONG Energy A/S 公司和 E.ON 瑞典 AB 公司

系统运行稳定，可用率高。此外，ABB 还向风电场提供了 72 台变压器和发电机，以及 45 千米的 33kV 海底电缆，从陆地到海上长度达 10 到 14 公里。另外，陆上电缆将来自海上的电能传送到电力网上，这些设备也均由 ABB 提供。

在风力发电占有较高份额的丹麦，我们已经看到风力发电产生的电能已经超出了实际的电力需求。

SCADA 系统能够集中控制由多台风力发电机组成的风电场，就像控制一个陆基发电厂一样。显然，风力发电机的发电量和风力有关；然而，总的发电量是可以控制的。如果电力网要求 100MW 的电能，SCADA 系统便调节发电设备以满足这个需求。操作人员很容易介入风电场的电能生产，通过 SCADA 系统可以计算出需要投入或停运多少台风力发电机以平衡供需。全部 72 台风力发电机的当前运行状态都可以显示给操作员，如图 2 所示。从这个系统总览图上，操作员可以读出每一个风力发电机的运行状态的详

细信息图 2。风电场的出现可以减少电网对传统发电厂的依赖。随着风力发电容量的增加，还会出现限制这些清洁能源来防止电网的过负荷。事实上，在风力发电占有较高份额的丹麦，我们看到风力发电产生的电能已经超出了实际的电力需求。当然，在其它国家随着太阳能发电<sup>2)</sup>或风力发电的普及，将来也会遇到同样的问题。

Eskil Sørensen  
新闻记者  
丹麦，欧登塞  
es@journalist.dk

Finn Nielsen  
ABB 丹麦研发中心  
丹麦，Skovlunde  
finn.r.nielsen@dk.abb.com

# 通过提高驱动器效率节约能源

Per Wikstroem, Jukka Tolvanen, Akseli Savolainen, Peter Barbosa

现代制造业对资源都是有依赖性的，能源逐渐成为最重要的基础。长期以来，能源被当成一种资源。不断上涨的能源价格和过量排放的温室气体使科研人员重新审视能源的利用。

在一些部门，节约能源的潜力不大，而却在提高能源利用效率方面取得了很大突破。在某些情况下，实现一次能源节约的前景似乎不太光明。然而有些技术却可以节省大量的能源。其中，首当其冲的就是提高驱动器的效率 - 从表面上看 - 它的功率既不大，电压等级也不高。它不会发出很大的噪音、产生过高的温度或进行复杂的动作。通常它都放置在一个小盒子中，在介绍系统的整个运行过程时通常被人忽略。然而，它却可以减少 42% 的能源消耗，而且如果在世界上广泛使用，它所节约的能源相当于西班牙整个国家的电能消耗。这种装置就是驱动器。

道理很简单：过去，带动泵运转的电动机一直是满功率运行，而且它的输出控制是由开关来控制。而驱动器通过直接控制输给电动机的电能来调节设备运转，所以可以实现精确的控制，减少电动机运行带来的损耗。下面讲述了几个提高驱动器效率来减少能耗的例子，从中我们来看看驱动器技术能做什么，它的应用带来了哪些变化。

## 缺乏系统化的标准

对能源利用效率缺乏系统化的标准，导致 90% 的电动泵的安装容量不合适——导致了能源的浪费。

你可能会说：“我们对任何事情都设立了标准”。唉，世界并没那么简单，在能源利用效率方面就很不规范。本文的作者在 ACEEE<sup>1)</sup> 的研讨会上发言，提醒人们关注能源利用效率的标准缺乏的问题。尽管对抽水泵的设计已经出台了标准<sup>2)</sup>，对诸

如设计水头<sup>3)</sup>、效率和净正的抽水水头<sup>4)</sup>等水力数据也有明文规定，但在设计整个系统时，却找不到合适的标准，因此很难得到正确的结论。打个比方，这就像一个人买了一台载重三吨的卡车用来购物，这就是一个能源浪费的典型例子——即使这辆卡车的效率很高。

在 ACEEE 的研讨会上，我们对某

大型化学制品企业和它的两大主要的工程承包商最近所完成的几个工程项目进行了分析。分析的重点在于系统选择的抽水泵容量是否与实际需要相匹配。结果表明：90% 的抽水泵容量都不匹配。这就是缺乏能源利用效率标准的很好的证据。如果在这个企业中 90% 的电动泵容量与实际不匹配，那么可想而知世界上还有多少企业存在这种情况呢？

脚注：

<sup>1)</sup> 2005 年 7 月 20 日由水力学会的 Robert Asdal, 节约能源联盟的 Vestal Tutterow 和 Lawrence 伯克利国家实验室的 Aimee Kckane 三位共同发起的工业能源利用效率 ACEEE 夏季研讨会

<sup>2)</sup> 例如，夏威夷群岛组织 HI, 美国石油组织 API, 美国国家标准化组织 ANSI, 国际标准化组织 ISO

<sup>3)</sup> 设计水头是指抽水泵提升单位重量的液体所消耗的机械能。它在数字上等于在无摩擦的系统中抽水泵提升单位重量液体的高度。

<sup>4)</sup> NPSH: 净正的抽水水头

节能产品

节能产品

1 说明了系统设计工程师面临的问题。当设计一个系统时,系统的某些性能特性还不确定(如系统摩擦,管道的截面积变化,和管路中垂直转弯的数量等)。所有这些因素都带来的一

定的风险,使系统预期的运行状态得不到满足。有三种基本的方法来应对这些不断变化的运行条件:

■ 如果变化的状态是持久性的,为了匹配负荷,水泵或者鼓风机的型号应该

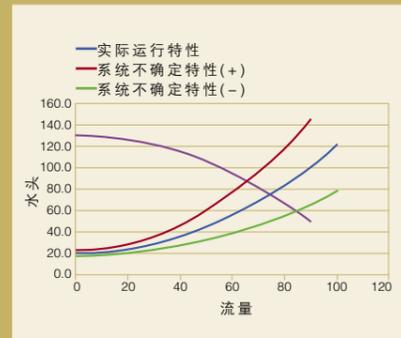
变化。

■ 水泵或者鼓风机的速度为可调的。

■ 可以增加一些节流设备(例如真空管,节气闸或导流片)。这种方式并不节能。

电能费用是一台水泵或风机马达在其整个寿命周期成本占绝大部分图 2。因此,能耗应该放在设备优化的首位。

1 在设计系统时,必须要考虑水泵运行特性中的不确定因素。



2 一个水泵或风机马达的能源消耗成本占其总成本的绝大部分



系统型号如何严重偏大

通过举例,ABB 评论将说明系统设计过程中如何导致型号偏大,如何通过变速驱动器来节能。

尽管系统的分析和设计都非常仔细,但许多系统还是不能实现优化运行。原因之一就是有些系统在设计时所选择的设备型号太大了,导致运行和投资成本过高。为了说明这个原因,下面以一个加工企业中鼓风机选型为例。

在这个例子中,假设实际运行中要达到 100 个流量单位,需要 4000 个单位的气压 3a。

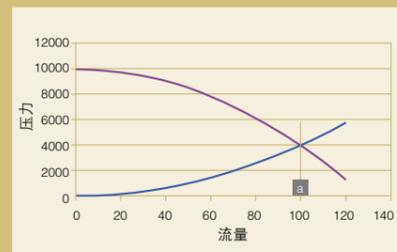
考虑到最大流量时系统的安全性,

设计工程师被告知鼓风机的设计流量为 110 个流量单位 4b。就假设系统的特性曲线而言,要求这个鼓风机的最大容量(黄色虚线)可达 110 个流量单位和 5000 个单位的气压。

除了极少数的突发情况,系统的实际需要往往达不到 100% 的设计流量。

当鼓风机的容量确定了以后,设计工程师就要评估这 110 流量单位所引起的总气压降 5c。由于很难预见设备管网中垂直拐角的数量(很可能鼓

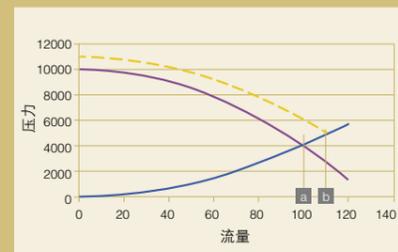
3 寻找风机的最佳工作点:蓝线表示压降,紫色表示鼓风机特性



风机的安装为了绕过其它设备还要增加拐角),所以气压降的设计值 5d 要留出 10% 的余度。而且管道的横截面也是不确定的。横截面越小,气压降得越大。因此气压降得设计值留出 10% 的余度并非没有道理。

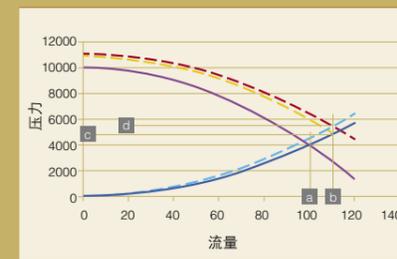
这样,最终我们得到了什么样的设计要求呢?流量:110 单位,压力:5500 单位 6e。如果原来的假设是合理的,那么这个鼓风机的选型显然过大。在 100 单位流量下,为克服阻尼还要求增加额外压降必须高于 2800 个单位(6f 减去 6g)。

4 风机型号(a点)增加 10% 的余量(b点)



这只相当于合理总压降的 70%。然而,除了极少数的突发情况,系统的实际需要往往达不到 100% 的设计流量。假设大多数情况下,需要 80% 的设计流量;那么另外需要 6000 单位的阻尼损耗 6h 减去 6i。这相当于合理总

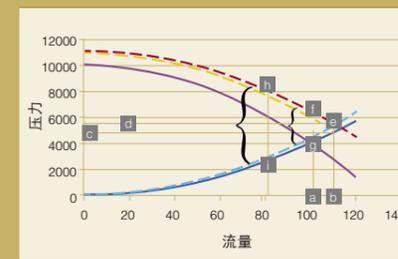
5 气压降也相应升高 10%(d 点)



压降的 150%。

在这个例子中,实际情况比图中说明的情况更糟糕。这一附加的因素是,当选择某个型号的鼓风机时,往往是从产品标准系列中去选择。这会导

6 最终安装的设备型号严重偏大



致最终选择的型号比实际需要的更大。

这个例子中恰当的选型应为:100 × 4000=400,000 功率单位。而案例中却要求鼓风机至少为 605,000 功率单位(为最佳功率的 150%)。用节流控制纠正过量的功率会造成能量的极大浪费。在 80% 流量单位时会造成 480,000 功率单位(为最佳功率的 120%)额外的损耗。用变频调速器来控制鼓风机,以代替节流阀,可节省大量的能耗。

用中压驱动装置节约能量

144 座燃煤发电厂<sup>5)</sup>年发电量为 227TWh,相当于西班牙全年的耗电量。通过采取中压驱动可以挖掘节约能耗的巨大潜能。

今天,提高能源利用效率已深入人心。这是经过了很长时间才提升到目前的水平。Al Gore 的电影,《难以忽视的真相》唤醒了很多人,也产生了许多类似 AIT 的新名词。一些人可

7 中压驱动 ACS6000- 这样的装置在实现京都议定书中的节能目标上扮演了重要的角色



能因为不下雪而与滑雪度假无缘;这样的事例也许会引起人们对全球气候变暖的关注。

在《京都议定书》中,欧盟的 15 个成员国承诺从 2008 到 2012 年,将比 1990 年减排 8% 的温室气体。到 2004 年,他们只完成了 0.9% 的减排任务,按照目前的趋势,到 2010 年他们的减排指标只能达到 0.6%。这样的结果使得成功的希望变得非常渺茫。

中宣称,全球能源趋势为:“从 2004 年到 2030 年,全球主要能源需求预计将增加 53%—平均年递增 1.6 个百分点。这些增加的能源需求 70% 来源于发展中国家。”所以,减排的目标怎样才能达到呢?

幸运的是,在一些区域节约能源的潜力还大大存在。在编者按 1 中列举了一些成功的节能范例。

通过加权平均,这些节能项目共节省能源达 42%。其中,三分之一到

编者按 1 在不同的工业领域,可选择使用不同的驱动设备达到节能的要求

公司	行业	应用设备	装机容量 [kW]	已证实可节能 [kWh]	节能百分比 %
Peña Colorada	采矿	粉碎车间的鼓风机	1250	2' 423' 750	35%
中国台湾钢铁集团	金属	升压泵	672	3' 030' 720	61%
Cruz Azul 墨西哥	水泥	窑烘炉鼓风机 1+2	1470	5' 309' 640	54%
Repsol YPF 阿根廷	石油化学制品	吹风机 (蒸汽轮机替代品)	3000	7' 560' 000	43%
中国大庆塑料加工厂	石油化学制品	搅拌机	1300	2' 600' 000	31%

## 节能产品

四分之三的电动机用于驱动泵,鼓风机或压缩机运转。在这些设备中,可调速对系统的优化运行是必要,以更好的适应所驱动的设备。[编者按2](#) 仅就中压电动机和驱动器的节能效果,做出了一个大致的评价。

欧盟 15 国的一致目标是通过采用变速驱动,每年节能 45TWh。这个数字相当于 30 个燃煤发电厂<sup>5)</sup>的年发电量,或相当于罗马尼亚 2000 年的全国的总耗电量。然而,这个目标是包括了低压和中压电动机的节能份额的,而我们的

计算仅考虑了中压电动机!低压电动机的累计容量接近中压电动机的 10 倍。

### 三分之一到四分之三的电动机是用于驱动泵,鼓风机或压缩机运转。这些设备用于驱动是非常理想的。

从本文的分析可以得到这样的令人鼓舞的结论:仅考虑中压电动机的节能潜力就达到 45,000kWh 图 7,可见京都议定书中各成员国 45TWh 的节能目标是完全能够达到。

脚注:  
<sup>5)</sup> 假设一个发电厂平均年发电量为 350MW,年运行 4500 小时

安装中压电动机 (国际评估标准规定电动机寿命为 20 年)	500,000	Pcs
用于单位平方扭矩负荷的电动机 (最小)	333,000	Pcs
用于单位平方扭矩负荷的电动机装机容量每台 MV 电动机平均功率为 1500kW)	500,000,000	kW
小于 4% 的 MV 电动机有频率转换,保持最小化运行状态	300,000	Pcs
假设在上述例子中同等数量级的发电机仅有 30% 有节能潜力	90,000	Pcs
90,000 台电动机的耗能※	569	TWh
假设在上述例子中同等数量级的发电机	227	TWh
仅有 40% 有节能潜力		
欧盟 15 个成员国共同分担可节能 20%	45	TWh

※假设 :2/3 的电动机每年运转 7500 个小时,1/3 的电动机每年运转 1850 个小时。平均负荷为额定功率的 75%。

## 优化泵的转速来节能

Lappeenranta 科技大学和芬兰造纸厂的一项研究表明,使用节流控制后的水泵与装有优化控制的变速驱动器相比,所消耗的能量高出三倍之多。

据芬兰 Lappeenranta 科技大学 (LUT) 研究,对并联运行的多台水泵采用基于变速驱动器的水泵控制器,可节能 70%。在流量有很大波动时,其节能量能达到最大。通过计算机仿真和实验室设备的实际测试都得出这一结论。

该项目由芬兰 Lappeenranta 科技大学能源和环境技术系承担。它得出了在三种不同水流控制方式下四

种设备能耗的具体数量。这个仿真用 Matlab v6.1 和 Simulink 软件实现,之后用实际设备的测量证实了仿真结果。被比较的控制方式包括节流控制,标准水泵控制和最优化水泵控制。

节流控制:一台水泵实行节流控制,其它水泵采用开关控制。

标准的水泵控制:一台水泵由变速驱动器 (VSD) 控制,其它水泵采用开关控制。

在最优化水泵控制中,每台水泵都自带 VSD 设备,甚至要求水流在所

有水泵间进行分配。这样,它们的转速都是相同的。这种情况不同于标准模型中水泵由开关控制的优化方式。最优化水泵控制技术已由 ABB 公司申请专利。

首先仿真的工业案例是现实生活中应用新控制技术的工业水泵的典型情况。这个例子来自芬兰造纸厂,这里使用 Ahlstrom APP22-65 型离心水泵用于脱盐设备的化学水处理部分。水泵的能量分析以仿真为基础。在这个案例中,缺乏背景信息就很难描出系统曲线。

控制方式	能源消耗		水流 (m3)	能量 (J/m3)
	(J/24 h)	(%)		
节流控制	177 114	0.0	2254	78.58
标准的水泵控制	102 786	-42	2257	45.54
最优化水泵控制	57 050	-68	2256	25.29

## 节能产品

基于简化系统模型和运行曲线的仿真结果表明,在这个例子中,节流控制比其它控制方式消耗了更多的能量。到目前为止,最优化水泵控制是能量利用效率最高的方式。标准控制方式和最优化水泵控制方式的差别高达

45%,而节流控制方式与最优水泵控制方式相比,能耗高出将近两倍多[编者按3](#)。

## 西班牙马略卡岛的废水处理系统

陆地上的废水处理厂和旧式的水站都要求技术的现代化,并消除异味。智能水泵控制系统可以节能 20%。

西班牙帕尔马·马略卡岛的 EMAYA SA 供水及废水处理系统最近上马了一个新项目,目的在于改进其废水泵站。西班牙首府的马略卡假日群岛居住着 380,000 居民。它的废水存放于一系列水池中,废水从一个水池快速流入另一个水池中,最终到达废水处理厂。改进泵站之前,废水被储存在塔中。现在这个废水储存塔已被 15,000 公升的地下蓄水池取代—这

[6](#) 最不起眼的建筑—位于帕尔马·马卡略岛的废水处理系统的储水器,为度假者和居民提供了舒适的生活环境。



样大部分游客和居民就不会意识到它的存在,如图 8。

四台驱动设备和水泵使得泵站的安全系数极高。如果一个水泵发生意外,其它的水泵会立即接管它的工作。

在泵站中安装了四台 60kW 的潜水泵。每个水泵都装有 ABB 公司开发的用于工业驱动的智能水泵控制 (IPC) 软件。EMAYA 的工业工程师 Lorenzo Mestre 说:“这个泵站很陈旧,同时还有异味产生。简单的说,当地的环境需要改善”。四台驱动设备和水泵使得泵站的安全系数极高。甚至在高峰时段,仅仅两个水泵就能将水池中的水抽空,在轻负荷时一个水泵就能应对。如果需要话,两台水泵常常处于备用状态。这样,如果一个水泵发生意外,其它的水泵会立即接管它的工作。泵站还配备了一组柴油发电机,以备停电时能保持持续的供电。

### 智能水泵控制系统的节能效果

IPC 软件系统大大提高了水泵系统的能源利用效率。与传统的污水控制水泵相比,IPC 很容易达到节能 20% 的标准。IPC 还包括许多其它的为水泵系统专门设计的特性。泵站优化控

制功能平衡所有水泵长期工作的运行时间。四台水泵都处于运行状态 (每次两台),根据事先预定的维修计划,是所有的水泵都能同时工作。

软件的防阻塞功能可以使驱动器对水泵进行预防性的维护。当启用这个功能后,高速旋转的水泵会按照用户设定的清洁程序实施倒转或停止运转。这样有效的防止了阻塞,可使水泵维修次数减少。与标准系统相比,IPC 可使驱动器更加密切地监视电动机的温度,进而提高整个系统的稳定性。

### 人性化的系统设计

系统只采用了 ABB 的驱动设备和水泵,无需引入另外的配线和复杂部件。ABB 和操作面板制造商 Cobelsa SA 合作,共同 EMAYA 打造使用方便和灵活的系统。在设计本系统时,Cobelsa 公司考虑采到了安装的细节,同时为客户提供工程上的支持。在系统的安装调试阶段,ABB 公司也提供了帮助。

## ABB 为 UPM 公司的 Shotton 造纸厂提供绿色的变频驱动

造纸商 UPM 位于英国 Shotton 的造纸厂全部是利用回收的废纸而不是木材，来生产纸品。ABB 的变频驱动器为该厂所有的电动机提供驱动。

日前，一个名为“100% Shotton”的项目启动了，这个项目包括新建一个新型再生光纤工厂、污泥厂和两套造纸设备的改造。

在这个项目中，ABB 的驱动设备主要用于驱动水泵—使水泵的运转速度与生产速度相匹配图 9。另外，驱动设备还用于定量给料泵，以保证给纸浆中精确添加化学制剂。在这个过程中一些传送装置也使用 ABB 的变速驱动设备。

这些驱动设备还协助完成一些控

制过程，同时调节车间的原料输入以保证准确的压力和温度状态。驱动设备也使得生产率的控制变得更加容易。另外，它们还通过减少能量需求来达到节能的目的。

该项目自动化管理的经理 Ray von der Fecht 说：“ABB 是一个受人尊敬的公司，它在造纸业非常闻名，所以我们选择 ABB 的变速驱动设备。同时，我们了解他们的产品和技术团队。总之，ABB 提供的产品物超所值。”

项目的执行阶段非常顺利，驱动设备和自动化系统均按计划投入生产。

9 UPM 公司位于 Shotton(英国)的再生纸生产厂使用的 ABB 驱动器-ABB 驱动器可以根据生产速度调节电动机泵的转速，达到节能的目的



“新系统的启动就像打开开关灯就亮了一样顺利”，Von der Fecht 说。

UPM 对驱动设备中一项重要的评价标准就是可维护性。驱动设备必须能够在发生故障时快速更换，同时也必须容易移动。驱动设备的数据控制卡可以互换也是一种优势，通常当驱动器发生故障时，运行人员可以简单的更换关键部件来恢复系统运行。

设备型式紧凑也是其中的一项要求，因为这样可以节省空间、提高效率、降低热耗，以及降低冷却成本。ABB 公司的驱动设备都具备这些功能。还有一个特点就是使用了 Profibus 现场总线——一种造纸设备广泛采用的通信标准。这些设备还具备输入阻塞模块以减少进入电网的谐波，还有输出滤波装置以减少电动机线圈上的电压波动。

高可靠性是设备最重要的标准。Von der Fecht 说：“我们在使用 ABB 设备方面有很好的经验。他们的确非常可靠，完全能够满足我们的需要。”

## 低能耗生产化肥

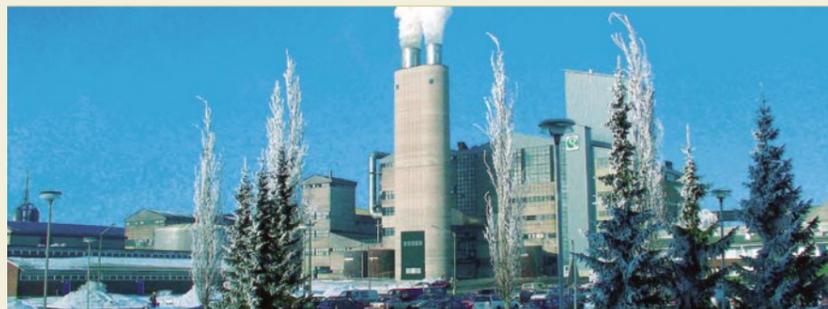
芬兰 Kemira 的 GrwoHow 化肥加工厂对 5 台风机进行了技术改造，每年节省电能 4000MWh。在这个项目中使用了 ABB 的电动机和驱动器来代替目前使用的电动机和机械化水流控制系统。设备改造所节省的电能完全补偿了设备的投资！

在芬兰，Kemira GrowHow Oy 是欧洲主要的化肥和动物饲料磷酸盐的

生产厂家之一图 10。2005 年净销售额为 12.6 亿欧元，公司拥有 2,700 名员工，产品销往整个欧洲。

在芬兰西南部海岸的 Uusikau-

10 芬兰 Kemira GrowHow 公司位于 Uusikaupunki 的化肥生产厂。该工厂使用的 ABB 驱动设备每年可节约电能 4000MWh



punki, Kemira GrowHow 有两条化肥生产线和两套硝酸生产设备。2005 年，该项目开始对其中一条化肥生产线上的风机设备进行升级改造。通过对工厂的综合能量分析，Kemira GrowHow

委托了能量服务公司 (ESCO, Energy Service Company) Inesco Oy，重点研究化肥加工厂中的与空气和天然气相关的节能潜力。

新型的电动机和驱动器每年可节能高达 4000MWh，相当于每年节省 150,000 欧元，或者减少 CO<sub>2</sub> 的排放 2800 吨。

### 用驱动器进行精确转速控制

和其它化学品工厂的加工过程类似，化肥生产线上使用的风机数量很多<sup>11</sup>，主要用来运送天然气，烟气和空气。Inesco 公司检测了 9 台功率从 132-630kW 的风机，挑选了其中的 5 台进行详细研究。被研究的 5 台风机直接由电源供电，并保持全速运转。用进口导向叶片控制气流的速率。这些导向叶片已接近其使用寿命了，而更换一台风机的叶片需要花费数万欧元。

面对数额巨大的投资，并参考了 Inesco 公司提供的有关能源利用效率的研究报告，Kemira GrowHow 决定选择对这 5 台风机采用交流驱动设备和新型电动机以代替老式的机械气流控制系统。新型的电动机和驱动器由 ABB 公司提供，这些设备可以根据实际的气流要求控制电动机转速。

### 节能取得显著成效

“由于安装了 ABB 公司的新型电动机和驱动器，我们每年可节约的电能高达 4000MWh。”该厂的自动化车间主任 Jari Lintula 说。根据当地工业用户的电价计算，相当于每年节省 150,000 欧

元，或者相当于少排放 2800 吨的 CO<sub>2</sub>。

这个项目另外一个重大意义在于提高了系统的功率因素。这解决了给这些风机的电动机供电的一个变压器的过热问题。

### 切合实际的预测

设备升级计划是在预定的工厂停工期间进行的，这样可以减少对生产的干扰。它只需要工人少量的配合。Jari Lintula 强调预期的节能目标已经达到：

“新型的电动机和驱动设备自动记录了数千小时的运行日志，所以我们可以很清楚的了解它的运行情况。预期的节能目标证实是非常切合实际的。实际上我们对其计算的准确性感到非常吃惊。这类风机设备上使用的驱动器的节能预测值是非常可靠。这种节能的效果是非常真实的一绝对不是厂家为了推销自己的产品才夸大的宣传口号。”

同时，他还认为从控制工程师的角度来讲，在化学加工过程中使用交流驱动设备避免了很多麻烦。除了可靠的过程控制，他还着力强调了提高

能源利用效率的重要性：

“我们正在积极寻找节约能源的机会—我确信我们还可以在其他方面很好的应用交流驱动技术。”

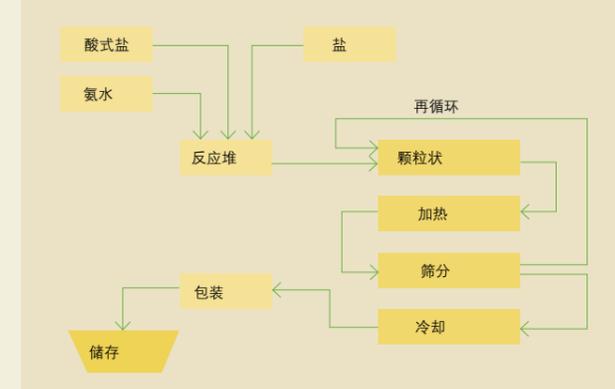
### 高效的 ESCO 能源服务模式

从各种可选方案中，Kemira GrowHow 选择了以 ESCO 为基础的升级方案，并选择了 Inesco 公司作为它的 ESCO 合作伙伴。ESCO 公司专为它的客户提供能源领域的项目咨询、项目实施和经济评估，以提高客户生产设备的能源利用效率，降低维护费用。

在芬兰，Inesco 公司是能源咨询行业的领先者，它已为高能耗的造纸业、冶金和化学制品工业的多家公司成功地实施了 ESCO 计划。

在这个案例中，对于 Kemira GrowHow 而言，采用 ESCO 模式最主要的优势在于它将大部分的改造工程、采购以及相关工作都外包给了 Inesco。ESCO 协议的另一个优势在于，风机改造项目的投资由该项目自身节约的能耗进行补偿。在协议执行的头三年期间，Kemira GrowHow 只需付给 Inesco 服务费，这相当于节约的能耗成本的 80%。在协议执行完成后，所有升级的设备和节约的能耗都归 Kemira GrowHow 所有。

11 化肥的生产过程 (Kemira GrowHow 公司惠允)



Kemira GrowHow 公司更多详情请访问：[www.kemira-grow-how.com](http://www.kemira-grow-how.com)。Inesco 公司更多详情请访问：[www.inesco.fi](http://www.inesco.fi)。

脚注：  
<sup>11</sup> 功率因数是有功功率和视在功率的比值。功率因数越高，功率损耗越低。

## 大学通过锅炉的更新改造为社会节省了数百万美元

一个放射控制项目每年可节约 746,000kWh 电能和数百万 BTUs 的燃料。该项目的投资费用在不到一年的时间就全部得到回收。

位于美国 Austin 的德克萨斯州州立大学 UTA, 是德克萨斯州大学群中最著名的大学。学院常住 50,000 名学生, 校园面积达 424 英亩 [170 公顷], 毗邻 Austin 市区。大学的供热和供电是由 HalC. Weaver 发电厂通过锅炉和燃气轮机提供的, 另外该厂还向周围约 200 个校园建筑提供电力、蒸汽、冷气、纯净水和压缩空气。

### 通过锅炉的更新改造节约能源

在该发电厂为满足当地对空气质量和电厂排放要求所进行的技术改造

变频驱动器可精确控制气流。这使在锅炉动力通风系统中实现优化燃烧控制成为可能



#### 编者按 驱动设备和 ABB

ABB 是世界上最大的电力驱动设备制造商。通过与各供货商的密切合作, ABB 各类工业生产和应用领域提供能源利用效率高的电力驱动设备和驱动系统。生产的产品包括从 180W-100MW(1/4-135,000 马力) 的交流和直流变速驱动设备, 各种特殊用途的驱动系统以满足不同用户的需求。除了提供这些产品之外, ABB 还提供一条龙服务以保证用户的投资得到最高的回报。

想得到更多关于提高能源利用效率的信息请发送邮件到 energy@fi.abb.com( 低压驱动 ) 或 mdrives@ch.abb.com( 中压驱动 )。

过程中, UTA 得到了意想不到的收获 - 每年可节能 500,000 美元。这是在对一台 150,000lb[68 吨] 的锅炉进行技术改造, 安装使用了名为 Compu-NOxTM 的系统后获得的。它能控制氮氧化物的排放 (简称 NOx), 而这种气体会引发酸雨和其它的环境污染问题。在改造之前, 仅 3 号锅炉每年就排放 151.7 吨 [137 吨] 氮氧化物。改造后, 排放量降到每年 21.0 吨 [19 吨]。

UTA 的投资回报周期不到 12 个月。在未来的几年, 新系统还将不断的带来节能的效益。

Compu-NOx 是位于内华达州拉斯维加斯的奔驰气体工程公司发明的燃料控制技术专利。UTA 能源利用和管理系主任 Juan M. Ontiveros 说: “开始时, 锅炉改造的目标是减少 NOx 气体的排放, 这就要求通过提高燃料利用率达到排放少量的废气而产生大量能量的目的。这样一部分锅炉就可以成为备用, 每年可以省去几十万资金。”

奔驰气体工程公司总经理 Robert Benz 说: “第一台锅炉改造时, 目标是每年节省 500,000 美元, 但是由于燃料价格的不断增长, 当大学完成三号锅炉的改造时, 每年可多节省 100 万美元。”

### 变频驱动器帮助进行燃烧气体的流量控制

为了精确地控制气体流量, 奔驰

气体工程公司的 Compu-NOx 控制平台使用了变频驱动技术 (VFD) 来驱动风机图 2, 而不是采取抑制气流的方式。该公司解释说: “Compu-NOx 控制系统为了进行燃料控制, 利用了风机转速和风机的气流量成绝对线性关系的原理。”

通过使用 ABB 的驱动设备, 精确控制气流大小, 极大地提高了燃料利用率, 降低了废气排放。在不增加新的燃烧器的前提下, 3 号锅炉 NOx 的排放量从 175ppm 减少到 25ppm。由于采用了 ABB 的 ACS800 交流驱动设备, 预计每年节省电能 746,000kWh, 节约燃料 320,000 百万 BTUs[338,000GJ]。

UTA 的投资回报周期不到 12 个月。在未来的几年, 该系统还将通过废气的循环再利用和对风机的变频驱动控制不断的带来节能的效益。

Per Wikstroem  
ABB 瑞士股份有限公司  
Turgi, 瑞士  
per.wikstroem@ch.abb.com

Jukka Tolvananen  
Akseli Savolainen  
ABB Oy, 驱动器公司  
赫尔辛基, 芬兰  
jukka.tolvananen@fi.abb.com  
akseli.savolainen@fi.abb.com

Peter Barbosa  
ABB 研发中心  
Baden-Dättwil, 瑞士  
peter.barbosa@ch.abb.com

#### 致谢

ABB 评论对下列作者提供的帮助表示感谢: Steve Ruddle, ABB 驻联合国代表 (ABB 为 UPM 公司的 Shotton 造纸厂提供绿色的变频驱动), 和 Ken J. Graber, ABB 驻美国代表 (大学通过锅炉的更新改造为社会节省了数百万美元)。

# 电动机的效率

聚焦电动机运行的全生命周期内的优化  
Roelof Timmer, Mikko Helinko, Ritva Eskola



高效率电动机可以极大地节约能源消耗。然而, 当考虑电动机整个运行生命周期内的优化时, 除了效率外, 还有许多其他必需考虑的重要因素: 包括产品在各种场合的适应性, 适当的产品级别, 轴承和绕组的可靠性等。ABB 生产的高质量电动机不仅仅具有很高的效率, 同时还具有很高可靠性和适应性。

高效率电动机可以带来显著的实惠，比如可以帮助降低能源消耗，减少二氧化碳的排放量。在欧洲，欧盟能效分级框架导入的焦点就是能源的效率。该框架将电动机按效率水平分为 EFF1-EFF3 三个等级，EFF1 是最高级。该框架的采用成功地减少了市场上的低效率电动机。而 EFF1 等级不仅被看作是效率的标志，而且也被看作是质量的通用标准。现在，该框架正在研究统一的效率测试方法，使不同厂家生产的电动机可以方便地进行比较。

M3BP 型电动机



摩擦损耗都可归类与空载损耗，因为不论负载大小这两种损耗都将保持不变。负载损耗，它随负载的变化而变化，它们是定子铜耗，转子损耗和负载杂散损耗<sup>[编者按]</sup>。所有电动机的损耗在很大程度上受到设计方案和结构方案的影响，也就是说电动机在设计 and 制造各个环节上的品质将会极大地影响电动机的各项损耗。

长期以来，ABB 一直是高效率电动机的倡导者，而且从一开始就把生产高标准，有普遍适应性的且价格并不高的高效率电动机作为企业的生产标准。所以，当 EU 的框架出台时，所有 ABB 的电动机都达到了最高的两个效率等级，实际上 EFF1 电动机就来自于 ABB 的标准产品范畴。

世界上的许多地方，政府都在推行鼓励工业界采用高效电动机的方案。这使得一些电动机生产商关注于提高他们电动机的效率，而没有考虑其他方面的运行性能。

铁耗是铁磁材料磁化过程中由于存在磁阻抗而产生的损耗。设计人员可以通过采用优质钢片以及加长铁芯长度，通过降低磁通密度来减少铁耗。

电动机的可靠性同样是设备制造商们在生产时必需考虑的一个重要因素。如果他们的电动机在运行时出现问题，该设备制造商的设备将被认为是不可靠的。

设计和制造具有良好起动和运行性能的可靠的电动机，不仅仅是需要考虑效率和损耗，还有在轴承、槽和风扇设计，温升，震动和噪音等多种因素之间进行细致的平衡。只有准确地平衡各种因素，才能生产出真正高效率、高可靠性，可长期运行，同时又重量适宜的高质量电动机。ABB 不仅仅局限于电动机的效率本身，更追求整个电动机寿命周期内的利益最大化和损耗最小化的长期途径。这种长期途径除了强调效率的重要性以外，同时也强调可靠性和可适应性的重要性。

从设计上保障高效率

ABB 认为，生产高效率的电动机，同时又能将整个寿命周期内的成本降到最低的关键，是保证设计和制造的每一个环节都达到最高的品质要求。

电动机的效率是通过衡量能量转换为有用功的多少来确定的。而能量损耗是以热量的形式散失掉的。所以，为了提高电动机的效率，必须降低这些损耗。

电动机的损耗可以分成五大类。其中的两类损耗 - 铁芯损耗和通风与摩

通风和摩擦损耗是由于风阻和轴承摩擦而引起的损耗。高质量的电动机可以通过改善轴承设计和润滑的选择，以及改善通风和风扇设计来降低这部分损耗。风扇必须足够大以保证理想的通风，但也不能太大，因为太大了又会降低效率并增加噪音。ABB 电动机产品的风扇叶片的大小及其倾斜度是在不同的模型之间进行最优化设计而得到的结果。

至于随负载变化的负载损耗，定子的铜耗（又称 I<sup>2</sup>R 损耗）是电流流过定子绕组时在定子绕组电阻上产生的损耗，降低这部分损耗主要是通过定子槽型的优化设计。定子叠片应该采

编者按 1 ABB 的 M3BP 型电动机的损耗分布

空载损耗	铁芯损耗	18%
	通风和摩擦损耗	10%
负载损耗	定子铜耗	34%
	转子损耗	24%
	负载杂散耗	14%

能量是电动机寿命周期中最大的成本，且随着能源价格的上涨，能源成本和效率问题已经成为中心议题。在

用低损耗的硅钢片，并且应该做到尽量薄且均衡，以获得最大的磁通密度。同时定子叠片必须排列整齐以保证定子槽的整齐。当然，定子叠片越薄，其制造成本也就越高，而且精确的排列要求更高水平的专业化生产技术。

转子的损耗是因为转子电流和铁芯损耗而产生的。对于高效率的电动机，加大鼠笼条和端环尺寸以降低转子电阻，可以降低这部分损耗。杂散损耗是负载电流引起的漏磁通所带来的损耗，改善槽型可以降低这部分损耗。

低温升意味着更好的可靠性

偶尔运行或者并非重要场合使用的电动机并没有特殊的可靠性要求。在这些场合，虽然电动机故障是件麻烦事，但是故障的后果并不一定十分严重。然而，在一些工业生产过程中，电动机的高可靠性则显得尤为重要。对于一些连续运行的生产过程，比如石油天然气加工厂的冷却设备和造纸厂的驱动设备等，任何计划外的停机都将带来巨大的损失，必须不惜代价加以避免。因为哪怕是几分钟的停转所带来的损失甚至可以同购买一台新的电动机一样昂贵。

可靠性是设备制造商们必须让他们的产品具备的另一个重要性能。如果运行中的电动机出现故障，该制造商的设备将被认为是不可靠的，使他的声誉大受影响。

ABB 的可靠性设计方案和它的效率设计方案是一样的：高质量构成可靠性的基础，特别是所使用材料的质量。平均来说材料成本占到了一台电动机总成本的 55%。因为材料成本超过了总成本的一半，某些生产厂家为大幅降低成本而节约材料，进而影响

到产品的可靠性则是常有的事。

电动机故障的两个最常见的原因是轴承和绕组，因此这两个部件在决定电动机的整机可靠性方面起到了关键的作用。就轴承和绕组而言，电动机内部的温升对于这两个部件的寿命起着最大的决定作用。高质量，高效率的电动机满载时的温升通常在 60℃ 到 80℃ 的范围内，但低质量的电动机温升可能超过 100℃。只有那些专为高温升而设计的，采用了特殊绝缘材料的电动机才能承受更高的温升。

据估计，电动机所消耗的电力占整个工业用电的 65%，而为了发出电动机所用的这部分电力，每年要产生 3700 万吨的二氧化碳。

为了达到最高的可靠性，非常重要的一点是采用高质量的轴承<sup>[编者按 2]</sup>。设计者有必要根据实际的应用场景和负载来选用适当的轴承，并给出与实际应用场景和环境条件相吻合的润滑方案。因为润滑油在高温下会老化，所以必须保证温度不能太高。从理论上讲，运行温升每降低 15 度，轴承润滑油的使用寿命可延长一倍。

电动机内部的温升同样会影响到绕组的寿命。因为铜绕组的绝缘会因为过高的温升而老化。电动机运行时，温度每上升 10 度，绕组的使用寿命就会减少一半。正是因为这个原因，大部分电动机是按 F 级绝缘（155℃）制造，但是按 B 级（130℃）设计和运行。温升问题是电动机性能方面的一个备受关注的研究课题<sup>[编者按 3]</sup>。

影响绕组可靠性的另一个因素是

用于衡量绕组完整性的耐压等级。通常绕组都具有 1200 伏的耐压。但是如果绕组必须承受更高的脉冲电压的话，电动机的设计耐压可以到达 1400 伏或以上，如某些变速电动机图<sup>[4]</sup>。

还有一点必须记住，随着环境的不同，对电动机可靠性的要求也会不同。例如，在油田或天然气田的应用场合，安全是生产者们考虑的首要因素。在这些地方，电动机常常在非常恶劣的环境下工作，比如灰尘，潮湿等，还需要承受极端的高温或低温。ABB

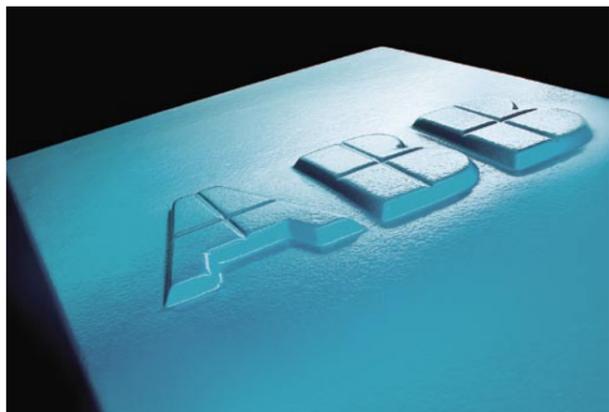
编者按 2 轴承检验用清单

- 为了保障最佳可靠性，选用的轴承需要满足下列要求：
- 生产厂家是可靠的
  - 按效率和速度进行了适当的分级
  - 具有与运行温度相适应的内部清洗功能
  - 采用了与运行温度相适宜的润滑油
  - 如果具有可维护的结构，其润滑油可不断补充（否则采用密封轴承更合适）

■ 优良绕组的特点



- 一个好的绕组应该包括：
- 与绕组配套的好的满槽率
  - 小的悬垂
  - 高质量的铜线
  - 高质量的嵌线
  - 高质量的槽绝缘，注入系统和相间绝缘系统。



公司在提供传统工业应用的电动机以及特殊环境应用的电动机方面积累了大量的经验。这些经验被应用到高品质电动机的开发和生产上,从而使得 ABB 公司制造的电动机不仅能符合官方要求和安全规范,同时又能使得电动机在其整个寿命周期内都能高效且可靠地运行。

### 高质量的电动机运行得更好

作为现代工业心脏的电动机,在降低能源消耗和二氧化碳排放量等方面扮演着重要的角色。据估计,电动

机消耗的电量占整个工业用电的 65%,而为了发出驱动电动机的这部分电力,每年要产生 3700 万吨的二氧化碳。由于这一数字如此之巨大,即使每一台电动机的效率哪怕提高一点点,也可以在全球范围内产生相当显著的效果。

高效率电动机的购买者还可以得到经济上的利益。虽然高效率电动机比普通电动机价格高 5% 到 7%(大型机)或 15% 到 20%(小型机),但是这部分投资很快可以通过降低能源消耗而得到补偿。一台电动机在其整个寿

命周期中的能源耗费可以达到其价格的 100 倍。

效率只是衡量电动机运行性能的一个指标,而能源费用也只是电动机整个使用过程中的多项成本中的一项而已。在某些应用场合,可靠性 - 维护费用以及因为低劣的可靠性造成的停工损失 - 可能更加显著。ABB 凭借丰富的经验和专业性,可以在优化启动和运行性能之间,在效率、重量、温升、噪音和震动这些复杂的关系之间找到最佳的平衡。ABB 一直致力于生产高品质的产品,寻求降低电动机在整个寿命周期内的费用,以确保所生产的电动机能提供全方位的优良性能。

#### 编者按 3 进一步提高电动机效率的三种途径

##### 避免重绕绕组

绕组重绕通常会降低电动机效率。一台 30kW 的电动机重绕后其效率将下降 1%,而对于更小型的电动机则可能下降 2%。高质量电动机由于重绕而引起的效率下降幅度比低质量电动机小很多。

##### 避免选择超过实际需要的大容量电动机

因为众多的理由,企业常常选择了一些超过实际需要的大容量电动机。工业现场的测试表明,他们的电动机平均工作在额定负载的 50%-60%。电动机非满载运行有许多的缺点,其中之一就是它的效率低(部分负载效率)。用一台小型的高效电动机代替低负载运行的大型电动机可以显著的提高整个系统的效率。

##### 采用变速驱动 (VSDs, Variable Speed Driver system) 进行速度控制

如果整个驱动系统的效率不高,单独采用高效率电动机是没有意义的\*)。比如,在许多水泵或鼓风机的场合,流量的控制是靠阀门调节来实现的。需要低速时却仍然满速运行,这是非常浪费的。变速驱动系统 (VSDs, Variable Speed Driver system) 可提供优化速度和精确控制,从而可大大节约能源消耗。芬兰 Lappeenranta 大学进行的一项研究表明,采用并行泵装置的驱动系统可以节能 70% 以上。ABB 除了供应电动机以外,同时也是 VSDs 的主要供应者。

\*) 参照本 ABB 评论 XX 页的“通过提高驱动效率节约能源”

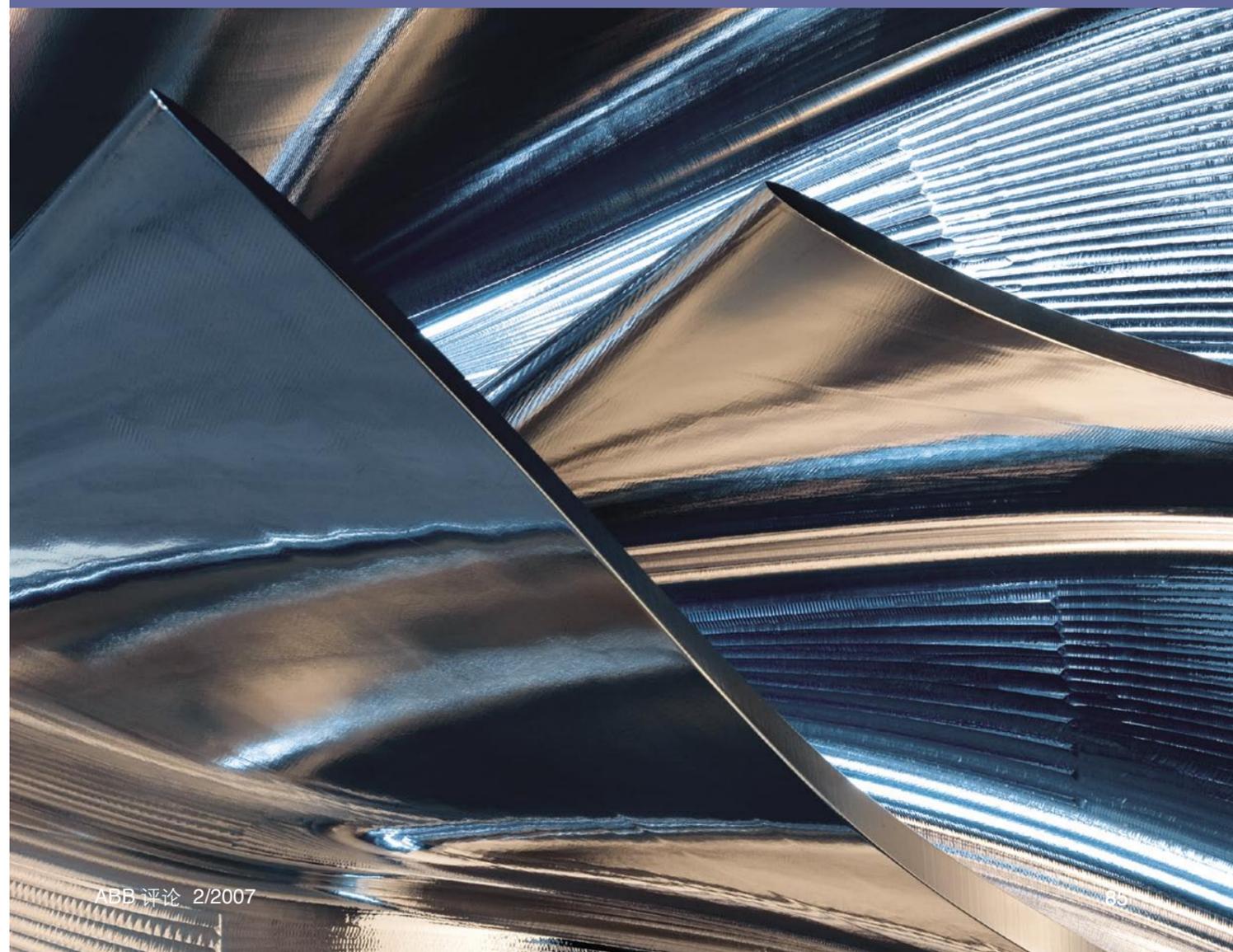
Roelof Timmer  
ABB Oy, 自动化技术部  
赫尔辛基, 芬兰  
roelof.timmer@fi.abb.com

Mikko Helinko  
Ritva Eskola  
ABB Oy, 电动机生产部  
Vaasa, 芬兰  
mikko.helinko@fi.abb.com  
ritva.eskola@fi.abb.com

# ABB 的涡轮增压器 发展历史和里程碑

Malcolm Summers

在我们这个世界上到处可见 ABB 的燃气涡轮增压器 - 从浩瀚的大海到喜马拉雅山的山峰,从冰天雪地的北极圈到炎热的澳大利亚内地。在一个世纪以前,一个富有创意的思想催生了一项高科技产品,它的有效性和可靠性令世人刮目相看。



## 永远的先驱者

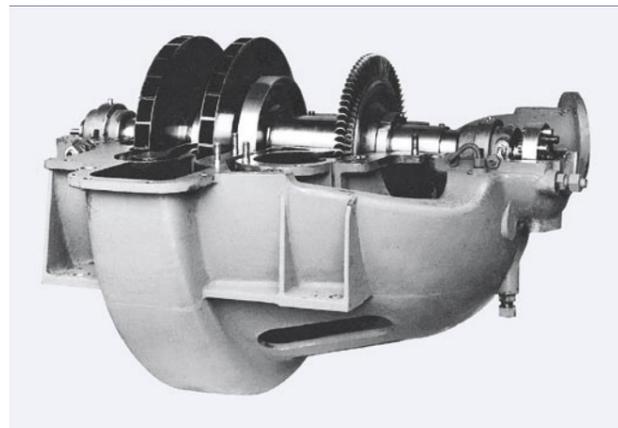
## 永远的先驱者

就像以前和现在的其他发明一样，燃气涡轮增压器在它 1905 年被提出来的初期发展缓慢。在那一年的专利文档中，瑞士工程师 Alfred Buechi 图 1 提出了一种“高增压的复合式发动机”，它是由柴油发电机、轴向压缩机和轴向涡轮组装在一根轴上构成的。就当 Buechi 还在为他的发明继续努力的同时，其他的发明家也在机械式增压器上取得了进展。但也有与 Buechi 志趣相投的竞争者。到 1920 年底，小型燃气涡轮增压器已经在法国和美国被用在飞机上。然而大型涡轮增压器还没有达到经济实用的程度。

1 Alfred Buechi. 他在 1905 年的发明专利被公认为是燃气涡轮增压器的诞生。



2 世界上第一台大型柴油发动机的涡轮增压器，1924 年交付使用



## 过去的进展

事情在 1923 年发生了转机，当时在德国四冲程柴油发动机的低压增压试验获得成功。因此，ABB 公司的两个最早发起公司之一的 Brown Boveri 公司决定，利用他在生产涡轮和压缩机方面的经验和优势，开始生产涡轮增压器。

从 1945 年至 1960 年，世界上商用涡轮增压机的功率翻倍了，并取得了最终的突破。

同年，瑞士的机车与机器制造厂 (SLM, Swiss Locomotive and Machines Works) 对一个两冲程发动机进行试验，它需要改进燃料的燃烧，提高发动机的输出功率。Brown Boveri 建议采用燃气涡轮增压器并接入扫气泵，SLM 采纳了这个建议，购买了一台增压机。1924 年 6 月，世界第一台大型燃气涡轮增压器在 Brown Boveri 的 Baden 工厂下线图 2。

海运企业对涡轮增压器也非常感兴趣。一年之前的 1923 年，德国的 Vulkan 造船厂订购了两艘大型客轮，每艘都由两台带涡轮增压器的 10 缸 4 冲程柴油发动机驱动。这些涡轮增压

器是由 Buechi 设计并监制的。这两艘客轮于 1926 年首航，开创了航运史上使用涡轮增压器的历史。

## “Buechi 企业联合体”

1925 年 Buechi 以他本人的名义完成了一项新专利，为他本人赢得了世界性的荣誉。那就是低压增压的技术细节和所带来的优势，这是人们期待已久的。次年，一个名为“Buechi 企业联合体”的公司成立了，Buechi 负责工程技术和客户关系，Brown Boveri 负责提供涡轮增压器，SLM 负责提供柴油发动机，供测试和试运行。

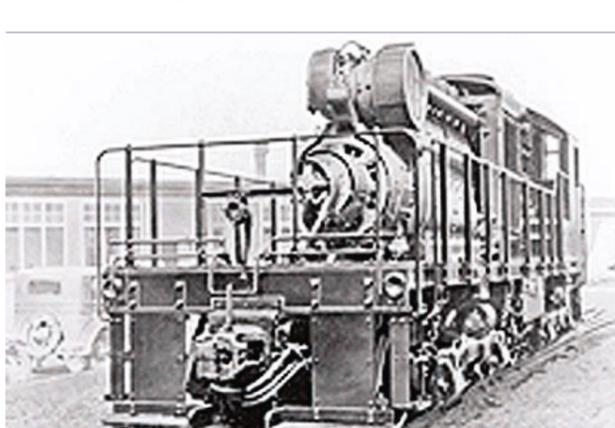
1927 年，大型改进涡轮增压器 VT592 提供给 SLM 进行第二次试验运行。测试结果令人鼓舞。为推动它的应用，Buechi 企业联合体和主要的发动机制造商之间签订了技术版权保护协议。随后，在柴油发电机的电力机车上使用涡轮增压器，并进行了首次试验运行图 3。同时，在柴油发电厂的经济运行中，也推荐使用了增压器。

1932 年，公布了涡轮增压器的技术标准。按照压缩机直径从 110 毫米到 750 毫米，涡轮增压器被分成了 9 个等

脚注：

1) 该企业联合体于 1941 年解散。

3 上世纪 30 年代后期的 ALCO8 缸，900 马力发动机，由 Brown Boveri 的涡轮增压器提供增压（此处使用的增压器为 VTx350）



级。标准中采用了模块化和标准化的方式，使该标准能适用于更多的发动机。标准中还包含了外部滚动轴承的设计等，使产品的技术服务未雨绸缪。

## VTR..0 系列涡轮增压器问世

从 1940 年 Brown Boveri 开始研发新系列的涡轮增压器。新系列被命名为 VTR，它是由开放辐流式压缩机（记为 R）、轻型转子、可灵活配置的外部滚筒式轴承和自润滑系统组成。部件的标准化设计使大规模生产成为可能。1945 年 VTR..0 系列产品正式投放市场，是 BBC/ABB 涡轮增压器发展史上的里程碑。它的压缩机效率达到 75%，压缩比为 2，它是该系列后续产品的初代产品。VTR..0 标志着一个新时代的开始图 4。

## 涡轮增压技术高歌猛进

从 1945 年至 1960 年，世界上商用涡轮增压机的功率翻倍了，并取得了最终的突破。在该阶段，推进压力缓慢但稳步地增长。原型 VTR 涡轮增压器既可以与低压压缩机也可以与高压压缩机配套使用，但后者受到流速的限制。在那之后几年，压缩机的发展克服了这

种限制，使满负荷时的压缩比达到 3。

1925 年 Buechi 以他本人的名义完成了一项新专利，为他本人赢得了世界性的荣誉。那就是低压增压的技术细节和所带来的优势，这是人们期待已久的。

上世纪 50 年代涡轮增压器技术的持续发展，为下一个奇迹的出现奠定了基础。1952 年 10 月，18000 吨的 Dorthe Maersk 油轮下水首航。这艘由丹麦 A.P.Moller 造船厂建造的大型油轮，是第一艘由带涡轮增压器的两冲程柴油发动机 (B&W, 6 汽缸) 提供动力。两台侧置的涡轮增压器将发动机的出力从 5530 马力提供到 8000 马力。Dorthe Maersk 是两冲程涡轮增压器在海运中应用的第一个里程碑。

在该阶段，与主要的发动机制造商之间进行了几次重要的合作，再次显示了发动机制造商和涡轮增压器提供商之间合作的重要性。这种合作推动了相关技术的发展，以及如何充分利用脉冲运行中尾气的能量，特别是

尾气管路的设计。

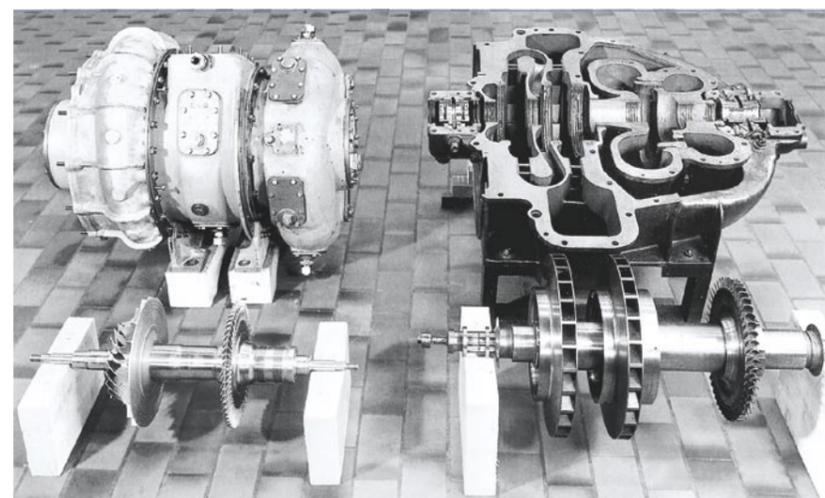
从 1955 起，Brown Boveri 签署了一系列重要的技术转让协议。其中最重要的一个是：1958 年将该技术转让给日本的 Ishikawajima-Harima 重工 (IHI)，用于生产 BBC/ABB 的涡轮增压器。IHI 还从 Sulzer 获得了柴油发动机的技术，其产品遍布整个亚洲，这样也确立了 ABB 的涡轮增压器在这一区域的市场主导地位。

在这一时期造船业达到了鼎盛时期，原油价格较低，燃料成本变得不那么重要，使柴油发动机制造业得到飞速发展。在这一时期，VTR..0 也达到了它的鼎盛时期，涡轮增压器的总效率达到了 56% 左右。配有 BBC/ABB 涡轮增压器的柴油发动机的功率和效率也屡创记录。

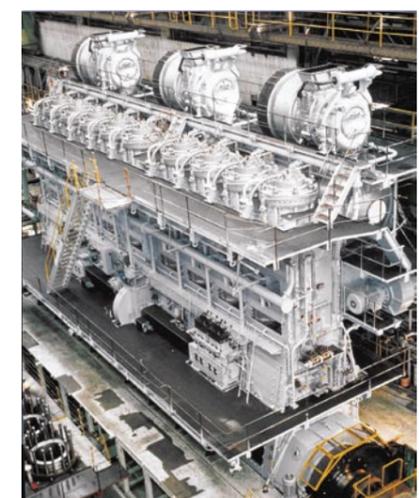
## VTR..1 系列产品登场

上世纪 50 到 60 年代，高效率、高压缩比和高气流速度的新型压缩机技术取得进展。轴承设计得到改进，其组装工艺得到加强。1970 年，引入了更高气流速度的压缩机，其燃气出

4 1924 年至 1945 年涡轮增压器技术的进展。与同型号的发动机相配套时，左侧的更小型化的 VTR320 比早期的 VTR402 的推进压力更大。



5 Sulzer 32400 马力，9 RLA90 型两冲程柴油发动机，配有 3 台 VTR714 型涡轮增压器，由日本东京 IHI 公司制造



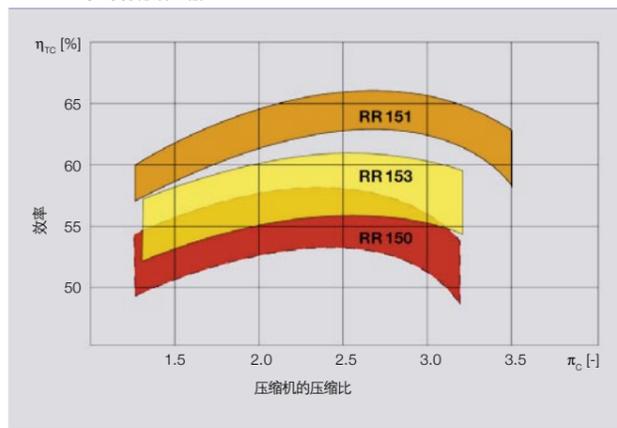
永远的先驱者

永远的先驱者

口的气室也变大了。发动机的进气口也得到重新设计。

1971年,所有这些改进都集中体现在一个新系列机型-VTR..1上。从那时开始,Brown Boveri 能够为各种用途的发动机配套提供涡轮增压器,效率达到60%。在那之前,增压器的效率在稳步提高但增速缓慢,而在这一新系列上效率首次得到大幅提高。

6 与混流式发动机和叶片后斜的压缩机配套的RR..1系列涡轮增压器



大的贡献,应用范围从船用紧急动力到非高速汽车。它专为出力为500到1800kW的发动机配套使用,它也在欧洲和美国为燃气发动机配套使用的小型涡轮增压器赢得了市场的信任。

与此同时,VTR..4的技术改进仍在持续,最具代表性的是1989年问世的VTR..4E,其最高效率高达75%,和1991年问世的VTR..4P,它的压缩比超过了4。

VTR..4系列产品的性能进一步提高

直到上世纪70年代中期,VTR..1系列产品都保持了VTR当初的设计理念。而一种由全新设计的部件组成的新型涡轮增压器也在酝酿之中。1978年,在完成了原型机的试验运行之后,VTR..4被正式投放市场。这种新型涡轮增压器摆脱了第一代VTR的限制,使效率大幅度提高了5%或更多,并且压缩机的最大压缩比达到了4。VTR..4的使用,使大型柴油发动机的整机满负荷热效率由原来的38-40%提高到了44-46%图5,在这方面VTR..4功不可没。

1980年问世的VTC..4系列产品中得到实现。这进一步打开了增压器的美国市场,并先后在印度和中国的柴油机车得到成功的应用。根据变化了的市场需求,还研发了VTR..4的非冷却型版本。

另一个突破是1985年问世的RR..1系列产品图6。RR..1主要配套于高速四冲程发动机,它的问世为小型涡轮增压器建立了新的能效标准。而在这一领域,Brown Boveri早在1968年就生产了RR150型产品,一直以来市场占有率很高。

VTR..4系列涡轮增压器的所有零部件都需要进一步小型化,这一点在

在随后的几年里,RR..1为高速发动机在各个领域的推广应用做出了很

新一代涡轮增压器 TPS/TPL 的登场

1989年,ASEA和BBC合并组建了ABB公司,ABB新成立了涡轮发动机系统有限公司来接管涡轮增压器的业务。不单是公司的名称发生了变化,同时涡轮增压器的发展也面临着一些变化:在上世纪90年代中期进行的市场调查表明,在应用的各个主要领域,涡轮增压器都面临着更新换代的需要。发动机制造业的格局依然明朗,只有少数研发能力强、富有创造力的大公司正在开发新一代的柴油和燃气发动机。而这些发动机都需要效率高、压缩比高和气流速度快的涡轮增压器与之配套。

从上世纪90年代初,作为VTR、

VTC和RR系列的换代产品,ABB开始研发新一代体积小、性能高的涡轮增压器。新一代产品,TPS和TPL,完全是基于全新的理念来开发的。

TPS系列产品问世

自从第一代RR涡轮增压器于1968年面世以来,高速和中速柴油发动机和燃气发动机市场发生了很大的变化。因此,ABB决定研发四种型号的新一代小型大容量涡轮增压器系列产品,以适应这一市场未来的需求。首先开发了两种压缩机,其压缩比高达4.5,最大效率超过84%。

90年代中期,柴油和燃气发动机市场的发展,导致了可变涡轮尺寸(VTG,Variable Turbo Geometry)的新型TPS产品的面世。这种“可调节”的涡轮增压器被认为是一种理想的产品,它不仅适合于越来越普及的单管尾气系统的柴油发动机,而且也适用于需要精确控制空气燃料比的燃气发动机,这种控制也被称为“调节”。

TPL系列产品问世

TPL系列涡轮增压器是专为输出功率2500kW以上的大型柴油和燃气发动机设计的。在这一产品家族中,ABB的工程师设计了一种新型轴流式发动机、一种创新性的轴承装配

方式和新的两级离心式压缩机。

TPL系列产品中最先问世的是TPL..-A。这款专为2500kW到12500kW的四冲程柴油和燃气发动机设计的涡轮增压器自从它1996年问世以来,迅速获得了成功。它的五种型号的产品满足了从船用主动力和辅助动力,到柴油和燃气发电机的各种用途的需要。

三年之后,ABB又发表了它TPL..B系列中的第一款涡轮增压器产品。这款产品是专为5000kW到25000kW(每台增压器所带的发动机功率)的大型两冲程船用柴油发动机而设计的,它们专为大型远洋轮船提供动力图7。

涡轮增压器和发动机效率的持续提高,主要得益于ABB和主要的发动机制造商之间的紧密合作。

当初,四种型号的涡轮增压器被认为已经可以满足市场中中期发展的需要。但后来,仍然决定研发第五种型号的更加强劲的涡轮增压器(TPL91),以满足船舶制造商建造“后巴拿马”级别的巨型集装箱货船的需要。ABB的工程师们再次面临新的挑战:为100000马力的柴油发动机提供配套的涡轮增压器,而且体积要小。通过设

计一个新的更短的转子、一个常压发动机及其分压器,达到了预定的目标。由于采用了整体油箱,使发动机的安装也变得容易图8。

用于铁路牵引市场的新型涡轮增压器

以TPL为原型,ABB在2002年研发了新型的铁路牵引机车发动机用的涡轮增压器TPR系列产品。为满足铁路牵引市场牵引力大,可靠性高,更好的环境性能的需求,TPR采用了一个整体高效的涡轮,改进了燃气单进气口的套管和独一无二的机座固定的方案。

压缩比的标准再次被提高

当今发动机的发展趋势是提高输出功率,同时也面临着减少排放的压力。因此,大多数先进的发动机都采用的所谓的“米勒循环”<sup>2)</sup>压缩技术。为适应这一发展趋势和未来的变化,ABB研发了TPS..-F系列产品图9。该系列的三种型号的产品能为500至3300kW发动机配套,它的铝合金压缩机转轮结构使满负荷情况下的最大压

脚注:  
2) “米勒循环”是米勒过程中的基本规律,指可以通过适当调节进气阀的时间,使有效的压缩冲程比膨胀冲程短。如果保持发动机输出功率和工作压力不变,这将减少汽缸充气、降低汽缸的压力和温度,从而减少发动机的排放量。

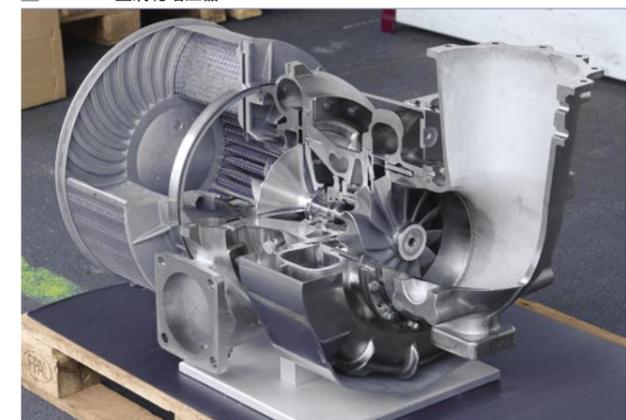
7 集装箱船是ABB大型涡轮增压器的一个重要市场。



8 TPL91-B型涡轮增压器的组装



9 TPS..-F型涡轮增压器



## 永远的先驱者

10 为先进的四冲程发动机设计的 TPL76...-C 型涡轮增压器



缩比高达 5.2。

TPS...F 也是 ABB 的第一款采用再循环技术的涡轮增压器 - 在它的压缩机转轮周围留有通气槽, 这改善了气流场的分布, 提高了气体涌流的压力。这个通气槽在实际效果上还扩大了转轮轮辐的宽度, 但并没有降低压缩机的效率。

### 用于先进的四冲程发动机的涡轮增压器

在新千年到来之际, 四冲程发动机的输出功率继续提高, 同时排放大幅减少。因此 ABB 决定利用 TPL 的模块化设计平台, 通过一些部件的重新设计和引入新技术, 开发了 TPL...-C 系列产品, 以满足这一市场的未来需要。

#### 编者按 涡轮增压器是如何工作的

内燃型发动机的原始输出功率是由充入汽缸的空气和燃料的流量以及发动机的转速决定的。涡轮增压器向发动机提供高压空气, 导致更多的空气充入汽缸以供燃烧。

在涡轮增压器中, 从发动机流出的近 6000C 的尾气以很高的速度流向涡轮机的叶片, 推动同轴上的压缩机的转轮。当压缩机转轮旋转时, 它通过一个消音空气过滤器吸入尾气, 压缩空气, 并通过一个后置冷却器将压缩空气送入空气接收器, 从那里再次送入发动机的汽缸。

求图 11。

TPL...-C 系列产品是专为 3000 到 10000kW (单台涡轮增压器配套的发动机出力) 的四冲程柴油和燃气发动机而设计的。它有两个不同的涡轮: 一个既能用于准常压也能用于脉冲增压系统, 而另一个专用于准常压系统。压缩机的另一项技术革新是它可以进行空气的冷却。这样就扩大了铝合金转轮的应用范围, 为那些需要非常高的压缩比、采用了钛金属叶轮的用户提供了一个经济实用的替代方案。

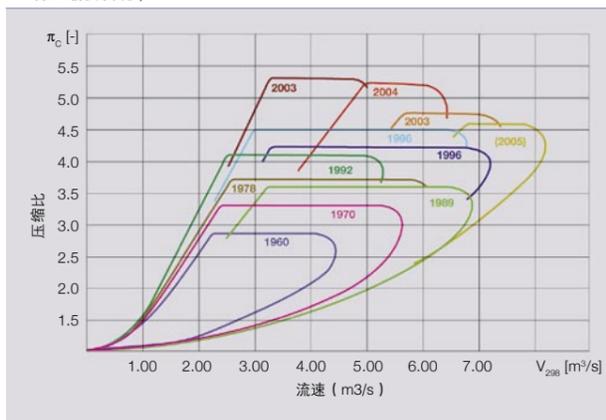
### 一个多世纪来的技术进步

从 Buechi1905 年的专利至今 100 多年过去了, 现在涡轮增压器已经成为了柴油和燃气发动机不可缺少的重要部件。在这么长的历史发展过程中, ABB 在研究与开发上的不断投入带来了产品在技术和设计上的飞跃进步 - 图 11 总结了 ABB 的涡轮增压器产品紧跟时代变化的步伐, 不断推陈出新, 使产品性能不断提高的历史进程。

当今发动机的发展趋势是提高输出功率, 同时也面临着减少排放的压力。

涡轮增压器和发动机效率的持续

11 从 1960 年至今 ABB 涡轮增压器的压缩性能的发展历程 (满负荷工况, 铝制压缩机转轮)



稳步的提高, 得益于 ABB 和重要发动机制造商之间的密切合作。正是这种合作为我们设定了共同的目标, 通过大家的共同努力, 千方百计地提高整个“涡轮增压系统”的效率, 而不仅仅是提高涡轮增压器的效率。

继曾经辉煌一时的 VTR 和 RR 系列产品之后, ABB 公司又推出了更加先进的 TPS 和 TPL 系列产品。随着市场对推进压力和效率要求的不断提高, 未来的涡轮增压器不但能减少发动机的废气排放量, 而且要有最高的性能指标, 并且无故障运行时间更长。

Malcolm Summers  
ABB 涡轮系统有限公司  
Baden, 瑞士  
malcolm.summers@ch.abb.com

#### 脚注:

<sup>3)</sup> 关于 BBC/ABB 涡轮增压器的完整的发展历程, 请参见涡轮机杂志 (Turbo Magazine) 的百年纪念特刊, 2005 年第二期, 由 ABB 涡轮机系统有限公司出版。

#### 编委会

Peter Terwiesch  
ABB 研发中心首席技术执行官

Clarissa Haller  
企业宣传

Ron Popper  
技术支持

Friedrich Pinnekamp  
ABB 集团研发中心

Nils Leffler  
主编  
nils.leffler@ch.abb.com

出版社  
ABB Schweiz AG Corporate Research  
ABB Review/REV  
CH-5405 Baden-Dättwil  
Switzerland  
ABB 评论每年出版四次, 主要语言是英语, 法语, 德语, 西班牙语, 汉语和俄语。部分出版或复制出版要得到许可。完全的出版需要得到出版者的书面许可。ABB 评论对于那些对 ABB 的技术感兴趣的人是免费提供的。为免费阅读方便, 请就近联系 ABB 的代表或出版社。

出版商以及版权 ©2007  
ABB Ltd. Zurich/Switzerland

印刷  
Vorarlberger Verlagsanstalt GmbH  
AT-6850 Dornbirn/ Austria

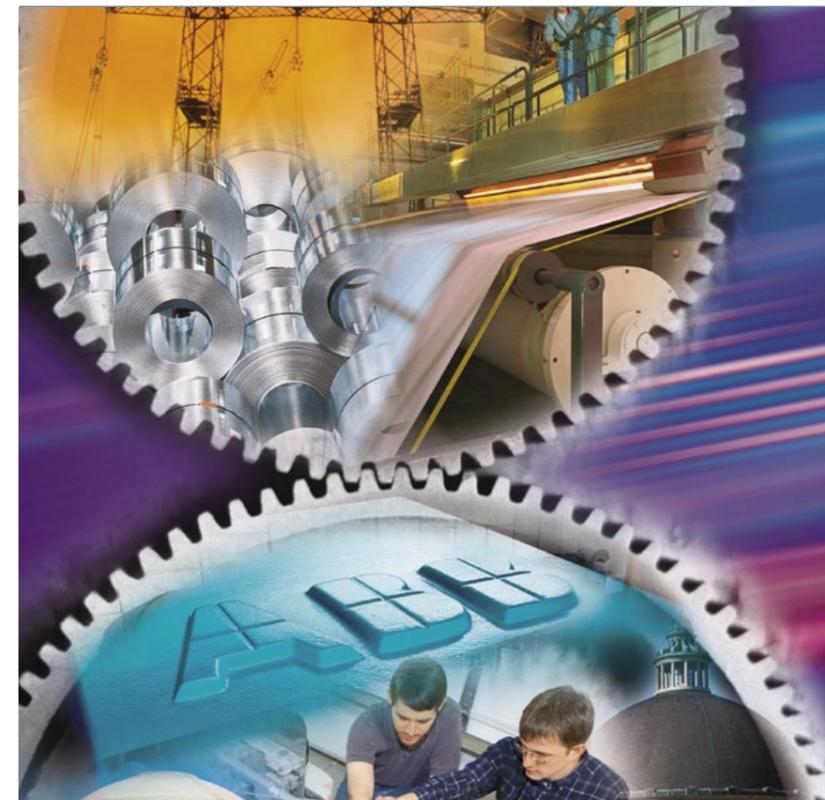
版面设计  
DAVILLA Werbeagentur GmbH  
AT-6900 Bregenz/ Austria

免责条款  
所载资料只反映了作者的看法, 仅供参考。读者不应该在未征得专业意见的前提下照搬行事。在此我们声明, 作者不提供任何技术的咨询和建议, 也不就具体的事实或问题承担任何责任。对文中有关内容的准确性以及所表达的观点, ABB 公司不做任何担保、保证以及承诺。

ISSN: 1013-3119

www.abb.com/abbreview

## Preview 3/2007



### 合作带来成效

ABB 的很多重要的发明创造都是与它的用户共同努力的结果。在合作初期, 本公司就与这些用户签署战略合作协议, 由用户帮助我们提出产品的要求, 并测试新开发的样机。在相互信任的基础上进行的这种合作, 惠及整个工业界。与零部件供应商达成的合作伙伴关系也同等重要, 因为这样不但使各供应商更关注加强它们的技术优势, 更能使大家为一个共同的目标相互协作。

在研发领域, ABB 与世界上 50 多

所著名院校进行着合作, 包括麻省理工大学、卡内基梅隆大学和中国的清华大学。这种合作关系鼓励着世上最富创造力的年轻人加入研发的行列, 使 ABB 的新产品层出不穷。

下一期的 ABB 评论除了介绍 ABB 在各个领域所进行的成功合作的事例之外, 还要介绍 ABB 公司在工业研发上与合作伙伴进行合作的一些基本原则。

Nils Leffler 先生从 2003 年起就担任 ABB 评论的主编, 现在他要离开本杂志的编委会了, 本期评论是他主编的最后一期杂志。在他的领导下, 本杂志拓宽了现代化的视野, 杂志的内容也从面向某商业领域的结构转向覆盖 ABB 所有的商业领域。这种对杂志的重新定位, 使本杂志的读者群稳步增长, 现在已经达到了每一季刊 60000 份的发行量。他为杂志质量的提高作出了巨大的贡献, 其中的很多文章被世界很多国家的行业杂志所转载。

从 2007 年第三期评论开始, Friedrich Pinnekamp 将替代他担任本杂志的主编。

Cut 100 million  
tons of CO<sub>2</sub>  
and it's amazing  
what you save.



© 2005–2007 ABB

Advanced power and automation technologies that reduce emissions  
and help protect the environment. Visit us at [www.abb.com](http://www.abb.com)

Power and productivity  
for a better world™

