

ABB 评 论

ABB 集团技术刊物

www.abb.com/abbrevreview

3 / 2009

智能电网

应对气候变化挑战

第 6 页

控制电网的解决方案

第 33 页

ABB 高压套管走过百年历程

第 66 页

ABB



人类正在寻求一种平衡二氧化碳排放及可持续发展的生活方式，电网在其中发挥着至关重要的作用。虽然风能和太阳能的重要性日益凸显，但这要求电网必须找到一种能适应上述能源发电不连续和不可预测的馈电方式，同时还要将这些遥远地区的丰富能源输送出去。

本期《ABB 评论》将介绍一些有效、可靠安全的供电技术，以保证日落之后的明日世界依旧灯火通明。



构建明天的电网

人们现在对楼宇中每个房间的众多电源插座和电灯习以为常。电网有别于其他人造服务不仅在于其广泛的覆盖性(无线通信可能除外),而且还在于极高的可获得性。我们希望电灯在需要时就能点亮,从电网运营商的角度来看,这就意味着电力供应必须紧随客户需求。

电网的功能正经历一场根本性的变革。风能、太阳能等可替代能源使用的增加是变革的一大原因。由于这些能源的供应不连续,也很难进行预测,且大多远离主要用电区域,当地原有的电网基础设施非常薄弱,无法承担新增输电量,加之用户更加注意选择用电的来源,因此大家都希望能够实现远距离输电。

未来的电网通常是指“智能电网”。实现这一变革的关键技术得益于电力电子和自动化领域所取得的进步。未来电网中,发电和用电之间不再是单向关系,而是在能源储存或供应设备的帮助下实现了双向互动,从而确保发电和输电基础设施更符合生态要求,更具经济效益。本期《ABB 评论》将专题介绍智能电网,但这只是其中的一部分。本期所介绍的许多技术都直接或间接地与该专题有关。

如果电网需要应对更大潮流,那么首先就必须采用一些技术加强电网的稳定性。除了电网本身具备输电容量,ABB 的轻型高压直流(HVDC Light[®])技术提高了现有输电走廊的稳定性和可控性,并通过传输高于安装标称的电力,增加整体传输能力。

未来电网的一个重要指标是大幅提高可控性,这通过采用大量的测量和监控设备以及相应的执行器加以实现。例如,电网可以在故障发生时进行局部自愈,减轻对电网的干扰。更长期来看,这些设备可以监控各项设施,有助于制订维护计划。在突发情况下(如暴风雨后),这些设备可以精确找到受损设备所在,准确调配维修人员,从而大大缩短了恢复正常运行所需时间。但是,由于必须要处理大量的输入数据,这给控制系统提出挑战,同时“数据海啸”会引发丢失信息的风险。同测量一样重要的是,需要有一个策略处理这些结果,并在尽可能低的层次上把数据转换成信息。本期《ABB 评论》中有几篇文章将针对这些问题进行探讨。

此外,涉及能源问题的文章重点关注了液化天然气(LNG)从码头输送到分配管网的供应管理问题。另外,还阐述了制订电机能效标准的重要性,让客户拥有更多的透明信息,以评估设备的生命周期成本和碳排放量。

本期杂志还介绍了 ABB 在套管制造领域的百年历程,以及如何发展成处理更高电压的产品。

我相信,本期《ABB 评论》将会为您开启今天和未来能源供应方面的新视野,并阐述了 ABB 在更有效、可靠、安全的电力输送方面的承诺。

希望大家喜欢这份刊物!

唐维诗
首席技术官
ABB 集团

ABB 评论 3/2009

智能电网

能源与环境

6

挑战与机遇并存

积极应对气候变化挑战。

11

控制天然气流量

ABB 的 SCADA 和系统 800xA 为天然气输送提供解决方案。

33

更高效的智能电网

高效输电需要高效的电网管理。

38

获取信息 而非数据

随着各地测量装置的增加导致“数据海啸”，ABB 采取有效策略保持控制室处于有效控制之中。

45

智能电网管理

智慧的工作：
配电网运行中心提高了应对复杂难题的能力。

输配电

17

恢复信心

当风暴中断供电，采用协调的战略恢复供电。

23

发展输电技术意义重大

轻型高压直流：连接不同能源产生的电力。

27

电力平衡

“轻型”方案如何满足巨大的输电需求？轻型高压直流改善了电网稳定性。

能效与标准

50

统一标准

用标准提高标准：全球化标准使电机能效更易于比较。

56

OPC 统一构架体系

连接发挥的作用：ABB 定义了 OPC UA 互联互通标准，在工业自动化领域发挥了重要作用。

62

安全的数据转换

如何更好地了解你的子系统？一种简单安全为子系统集成输入工程数据的方法已经产生。

永远的开拓先锋

66

高压套管

电气化意味着高压设备通常需要应力控制。

《ABB评论》回顾了100多年来高压套管的发展。

6



17



23



62



挑战与机遇并存

如何应对气候变化挑战

Anders H. Nordstrom

正所谓“黑云压城城欲摧”，气候变化的影响已经非常严重，但真正的威胁也许会降临到后几代人身上。几十年来，科学家一直在收集这方面证据，直到最近，社会才毫不犹豫地采取行动。今天，几乎每个人都在谈论气候变化问题，全世界各国政府正在采取措施，以遏制温室气体的排放量。然而，人们所面临的挑战是巨大的：世界就像是一艘巨型油轮正在撞向礁石，迫切需要快速地转向，但任务艰巨。

缓解气候变化是一项长期的任务，将对工业与社会生产和使用能源与电力的方式产生重大改变。作为其中的一员，ABB一直通过广泛的产品、系统和服务，帮助客户更有效地使用能源，降低对环境的影响。它制订了一个减少能源使用的滚动目标，即每两年每个生产单位能耗降低5%。

众所周知，世界气候正在变暖。气象学家指出，全球的地表温度上世纪平均增加了 $0.74 \pm 0.18^\circ\text{C}$ ($1.33 \pm 0.32^\circ\text{F}$)。与此同时，大气中的二氧化碳 (CO_2) 浓度已经从工业革命之前的280 ppm上升到今天的近390 ppm，这一指标远超过去65万年来自然界大气层中的 CO_2 浓度。二氧化碳浓度的增加主要源于化石燃料燃烧这一人类活动，现每年以2 ppm的速度继续增加。

政府间气候变化专业委员会 (IPCC)¹⁾ 指出，地表温度上升主要源于二十世纪中叶温室气体浓度的增加。这一结论基于全世界科学家几百次在不同原理基础上的研究。

气候演变及预测

自然界以不同的方式记录了自身的气候演变，科学家则开发了各种方法研究和解释这些数据。例如，历史上的温度可以根据树木的年轮宽度和珊瑚的生长速度来推断，而宝贵的气候数据则隐藏在北极与南极的冰盖层内。此外，通过研究深藏于冰层深处气泡中的空气成分，也可确定某一特定时间内的二氧化碳浓度。总之，通过测量冰层中氧的不同同位素之比，就能确定上述时期

的平均温度。采用质谱仪可以非常准确地测量出这一比例，甚至可解决季节性的气候变化问题。直至目前，根据对冰芯的研究，已揭示了几十万年的气候演变及相关信息。

从十九世纪中叶起，一直使用仪器记录的温度确定全球的平均地表温度。1958年开始定期测量夏威夷上空大气层的二氧化碳浓度，根据目前累积的资料表明，二氧化碳浓度一直呈现上升趋势和季节性变化的特点 (见图1)。

气象学家观察到，地球平均地表温度上世纪增加了 0.74°C ，而大气层中的二氧化碳浓度几乎已上升到390 ppm。

目前，采用先进的计算机模型可以预测未来的气候变化。这些模型试图尽可能涵盖相关的物理过程，并将大气和海洋的一般环流模型与那些陆地和海洋上的冰层模型相结合。然后，将这样的模型应用于大量不同的排放情形中，IPCC于是预测出本世纪末的全球平均地表温度将上升 $1.1^\circ\text{C} \sim 6.4^\circ\text{C}$ 。

缓解挑战

为减少气候变化所带来的风险，欧盟 (EU) 及其它国家长期以来一直主张将全球气温的增加保持在 2°C 以下 (相对于工业革命前的水平)。这需要将大气层中的温室气体浓度稳定在450 ppm以下的 CO_2 当量水平²⁾。

从目前全球排放的趋势看，要达到450 ppm的目标是一个挑战。国际能源署 (IEA) 预测，在可预见的未来，如果一切业务活动照旧进行，则与能源相关的温室气体排放量将会大幅上升：到2030年，全球一次能源需求将比现在提高45%，80%的混合能源仍将基于化石燃料。在增加的能源消费中，97%将来自非经合组织国家。IEA发出警告，这将对气候造成严重的、无法挽回的破坏。

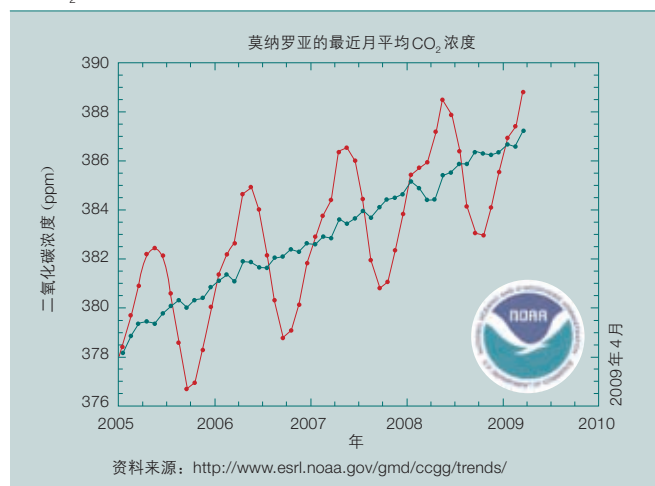
确保全球足够的能源供给，满足日益增加的需求，同时又不产生过量的温室气体，这确实是一个巨大的挑战。

脚注：

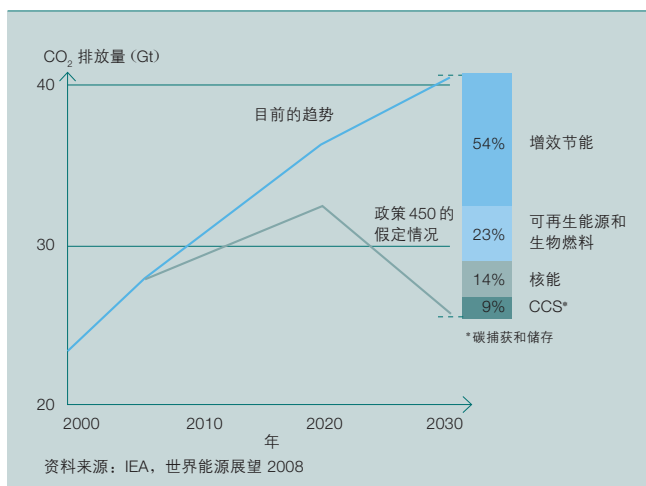
¹⁾ 主要国家的科学院都表示支持IPCC的成果和结论。

²⁾ 如果将其它五种人为的温室气体也包括在内，那么今天的二氧化碳当量水平已经达到了445 ppm。但大气层中细颗粒和对流层中的臭氧可以大幅抵消这一额外的加热效应，使二氧化碳的有效浓度将至387 ppm。

1 CO_2 浓度继续增加



2 国际能源署统计的排放量情况



能源与环境

麦肯锡公司找到了一种减少温室气体排放的可能性，到2030年可减少排放70%，并使温度的增加小于2℃。

IEA 为达到 450 ppm 的稳定目标制定了一项战略，并分析了这一情况。这一战略要求强有力的协作行动，以遏制日益增加的温室气体排放量。它依赖于成功的国际气候谈判，所有国家，尤其是主要排放国，应该信守承诺，削减他们的排放量。按照 IEA 的说法，即使经合组织国家的排放量降低到零，他们自身也无法达到 450 ppm 的目标。

根据这一情况，一次能源需求预计到 2030 年将增长 22%，其中 67% 的混合能源将来自于化石燃料³⁾。与业务保持不变的情况相比，与能源相关的 CO₂ 排放量将削减 37%，其中高达 54% 的节约来自于增效节能措施，而可再生能源和生物燃料将占 23%。采用碳捕获和储存 (CCS) 方式和利用核能也是削减排放量的重要手段 (见图 2)。

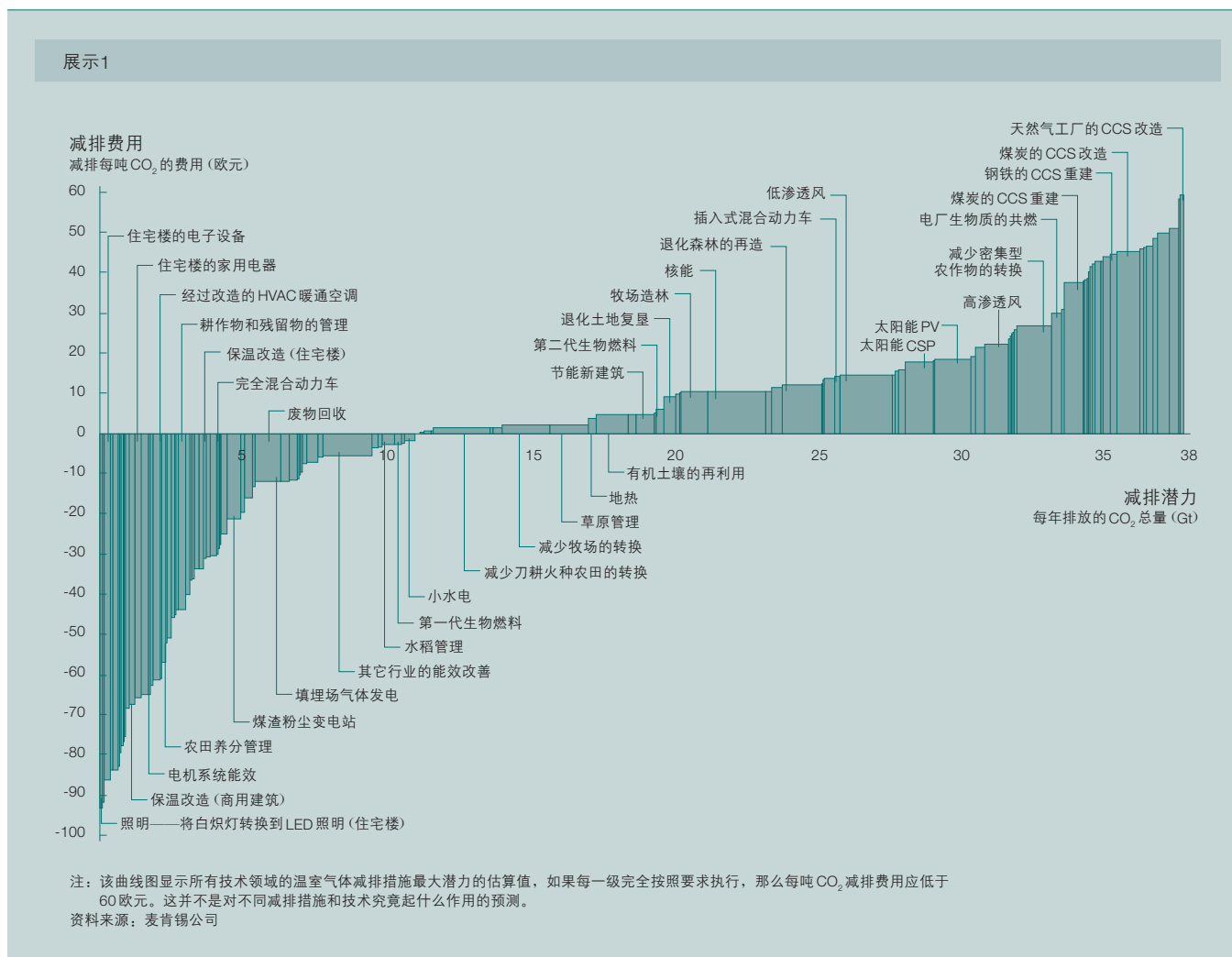
改造能源系统需要大量投资：据 IEA 估计，到 2030 年，其所需的平均费用将达世界年 GDP 的 0.55%。同时，提高能效可降低运营成本和能源费用。

麦肯锡公司在全世界 21 个不同地区对 10 个不同行业的 200 多个技术项目所涵盖的所有相关排放源（不只与能源相关）的减排可能性及费用进行了深入研究。该公司找到了一种减少温室气体排放的可能性。到 2030 年，与业务保持不变相比，排放量将会降低 70%，温度增加则小于 2℃。但实现这些可能性面临巨大的挑战，因为取得成功需要抓住几乎所有的减排机遇。麦肯锡发现，减排行动延误 10 年，将不可能使温度升高限制在 2℃ 以下。

脚注：

³⁾ 即使在这种情况下，化石燃料的主导作用仍将保持一段相当长的时间。

图 3 麦肯锡公司的全球温室气体 (GHG) 减排费用曲线 v2.0



到2030年，每年的减排费用估计约为全球GDP预测值的1%。据IEA估算，未来节能的收益可补偿大部分前期的投资（见图3）。

增效节能

许多国家经过上世纪七十年代的石油危机，能源效率大幅提高。今天，发达国家单位GDP能耗要比1973年减少30%。这是生产率提高，以及产品能效更高更智能的结果。

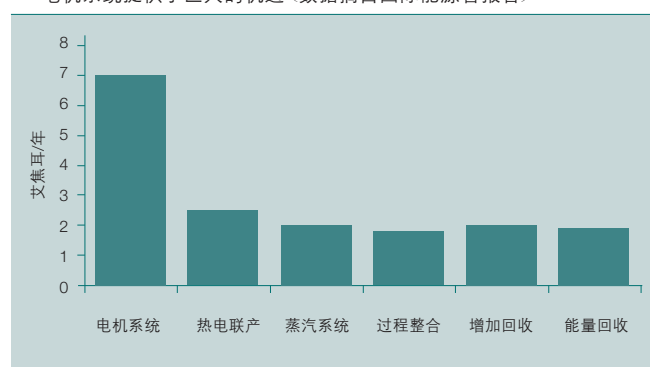
上世纪九十年代，由于能源价格比较低廉和稳定，以及能耗大幅降低，增效节能改善程度放缓。凡是能耗费用占公司费用比例很小，优化生产流程和产品性能几乎被忽略不计。

今天，增效节能成为许多议事日程的优先事项，其在缓解气候变化方面所起的关键作用也得到世界的公认。

节能潜力涉及社会的方方面面：在电力部门，机会主要在于发电与耗电之间的连接链中。提供更好的保温措施，控制采暖和制冷，就可以削减商用建筑和住宅楼内的能源使用量。改善汽车燃油效率也可以取得可观的节能效果。

工业领域中也可以产生这样可观的节能效果。IEA报告显示，几乎三分之一的世界能耗和36%的二氧化碳排放量由制造业产生。过去25年，工业能源的使用量大幅上升，其中80%的能耗增加发生在中国。IEA认为，如果使用业经检验的最好技术⁵⁾，制造业每年可节能约25至37 EJ⁴⁾（艾焦耳）。这相当于减少目前全球二氧化碳排放量的7%至12%。

4 制造业的节能潜力：
电机系统提供了巨大的机遇（数据摘自国际能源署报告）



欧盟是联合国制订气候变化管理条例的支持者，一段时间来，它一直执行气候政策和相关的规章制度。

在制造业，电机系统提供了最大的节能机会。优化电机系统可以每年节能6至8艾焦耳，这相当于全世界核电生产总量的四分之一（见图4）。通过变频器调控电机速度和采用适当电机保护缩减电机尺寸，这些高效电机的使用是实现节能的主要手段。

谈判和气候政策

今年，世界各国政府正忙于筹备今年12月在哥本哈根召开的联合国气候变化大会（COP-15）。按照两年前COP-13会议上所确立的巴厘岛行动计划，各国政府想雄心勃勃地缔结一项全球公约，以便到2012年取代京都议定书。

COP-15会议需要解决的关键问题包括：

- 发达国家必须承诺的减排量，以及如何提供这方面经费资助。
- 发展中国家，特别是中国和印度所应采取的合理减排行动。
- 达成大气层中的温室气体浓度稳定

在450 ppm的二氧化碳当量或更低目标的共识的可能性。

COP-15会议的成功与否取决于在这些问题上能否找到大家可接受的妥协方案并达成协议。各个国家和地区都一直在采取行动，执行相关的政策和规章制度，以控制排放量。

欧盟是联合国制订气候变化管理条例的支持者，一段时间来，它一直执行气候政策和相关的规章制度。欧盟采取的主要工具是总量管制与排放交易EU ETS，将欧盟的绝对上限设置为全部排放量的50%。欧盟的12,000家企业和电站都应承担该系统中的义务。欧盟的20/20/20计划确立了2020年的目标，其中包括：

- 二氧化碳排放量在九十年代水平上再削减20%。如果全球能够达成一项协议，那么这一数字还可增至30%。
- 将可再生能源在混合能源的比例增至20%。
- 通过采取有效的措施，将一次能源的使用量削减20%。

美国政府表示，它的目标是达成哥本哈根协议，其中包括具有约束力的承诺，以减少排放。美国政府新能源计划的目标如下：

- 到2020年，将排放量削减到九十年代的水平，到2050年，将排放量削减80%。
- 到2015年，道路上行驶的插入式混合动力汽车达到100万辆。

脚注：

⁴⁾ 1艾焦耳 (EJ) = 10¹⁸ 焦耳

⁵⁾ 能源效率增加18%至26%。

能源与环境

- 到2012年，保证有10%的电力来自可再生能源；到2025年，这一数字将增至25%。
- 在经济领域引入总量限制与排放交易计划。

中国坚持京都议定书的“普遍而承担不同义务”原则，即发达国家应带头削减温室气体的排放量，并为发展中国家提供经济援助和技术支持。不过，中国有意达成哥本哈根协议。两年前，中国推出了应对气候变化的国家计划，其中包括到2010年，单位GDP能耗降低20%的宏伟目标。到2020年，中国也准备将可再生能源的使用量提高一倍。另一项雄心勃勃的计划是削减中国最大1,000家企业的能源使用量。

ABB的贡献

缓解气候变化是一项长期的任务，要对工业与社会生产和使用能源与电力的方式产生重大的改变。实现这一计划需要改变消费模式，以及大规模开发和应用新技术。

ABB制订了一个减少能源使用的滚动目标，即每两年每个生产单位能耗降低5%。2008年，ABB产量增加了20%，而总能耗仍保持相对不变。这是因为整个ABB集团推行了

增效节能计划。典型的措施包括采取更好的气候控制、采用更有效的照明，并在工厂和办公室内安装高能效生产设备。这使其在全世界范围内取得了令人瞩目的成果：例如过去五年，ABB中国单位耗电量降低了55%。

2008年，安装在世界各地的ABB低压变频器预计节约了大约170太瓦时的电力，可满足欧盟4,200万家庭的年用电量。

ABB将展开能源审计，并对23个生产基地制订相关的增效节能改进计划，这23个基地的能耗均超过集团总能耗的1%。

此外，ABB广泛的产品、系统和服务帮助客户更有效地使用能源和降低对环境的影响。例如，先进的信息技术系统可以控制与优化工业流程、电网和建筑物，实现节能减排目标。

采用高压直流技术(HVDC)、轻型高压直流技术(HVDC Light®)和柔性交流输电技术(FACTS)加强电力系统的相互连接，以及更加平均的

负荷分配、一次能源的有效使用和电力质量的不断提高，从而节约了大量资金，降低了二氧化碳排放量。另外，也能将可再生能源大规模接入电网。

ABB的高效电机和变频器为大幅减排作出了贡献。2008年，安装在世界各地的ABB的低压传动节约了大约170太瓦时的电力，可满足欧盟4,200万家庭的年用电量，并可使全球二氧化碳年排放量削减约1.4亿吨。

应对气候变化是ABB面临的巨大机遇和挑战：ABB必须继续坚持“用电力和效率创造美好世界”，以现有的技术和新技术，为客户提供服务，满足日益增长的节能需求和缓解气候变化。



Anders H. Nordstrom

ABB可持续发展部

瑞典索伦蒂纳

anders.h.nordstrom@se.abb.com

控制天然气流量

ABB 的 SCADA 和系统 800xA 改善了液化天然气 (LNG) 输送系统的运行与管理

冯志美 王飞 毕晓星

中国许多新建液化天然气 (LNG) 项目已经竣工，目前运行十分顺利，液化天然气的进口量因此也不断增加。液化天然气的国际贸易一般以长期照付不议合同为基础，即使买方不需要，也必须付款。这就是说，接收站的进口量和储存能力直接受下游客户的影响。合同规定的

运输计划决定了从上游输出站到接收站低温储罐中的液化天然气输送量。通过对供求链的深入分析，已经设计出一套流程控制系统，可以确保储存设施能够接收按计划输送的所有液化天然气。这通过控制液化天然气接收站与输气干线之间的天然气输送量得以实现。利用信息

处理和自动化控制技术，可防止判断失误，并能有效和安全地协调接收站液化天然气接收量与天然气输送量保持一致，并联合调度下游用户的天然气配送。



中国东南部的福建液化天然气项目是国内企业独立管理、建设、运营和维护的第一个项目。从2009年2月起，印度尼西亚东固天然气田开始为这个项目供应天然气。当前进口量为每年260万吨液化天然气，计划到2012年达到每年500万吨。该项目包括一个接收站和360公里输气管线，这条管线经过福建东南部的福州、莆田、泉州、厦门和漳州等沿海城市，为这五座城市的天然气公司和三家燃气电厂供应天然气。液化天然气一般采用专用运输船从产地的输出站运到

接收站，在接收站转换成气体，通过输气管线分配给最终用户。天然气主要成分是甲烷(CH_4)。天然气在常压下冷却至 -162°C 时成为液体。液化后天然气的体积减少为原来的六百分之一，更易于远距离运输、储存和使用。因此，液化天然气成为天然气海上运输的主要方式¹⁾。

今天，通过完整的生产、运输和配送设施，可以维持天然气对发电厂和销售网络的稳定供应。福建液化天然气项目建立了包括液化天然气生产、储存、运输、接收和再气化

的完整过程(见图1)。

通过完整的生产、运输和配送设施，可以维持天然气对发电厂和销售网络的稳定供应。

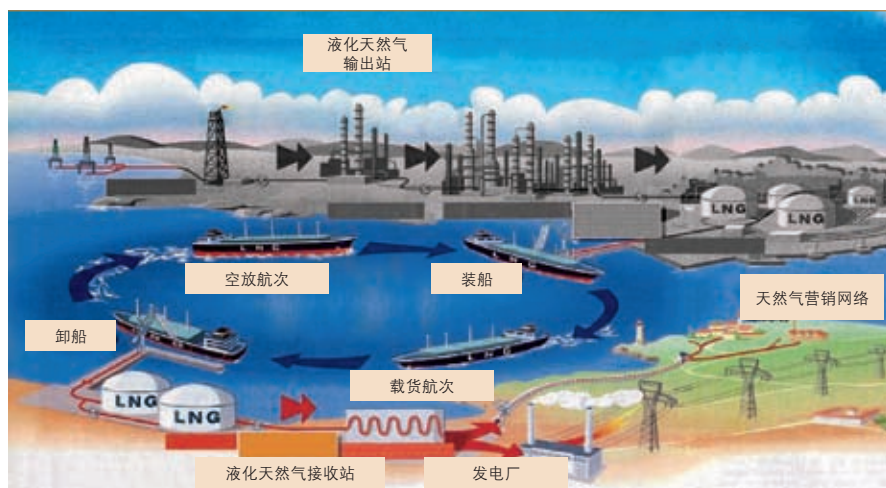
液化天然气接收站

液化天然气接收站一般由卸船、储存、再气化(出口)、蒸气处理和尾气燃烧(排空)等5个流程子系统组成(见图2)。

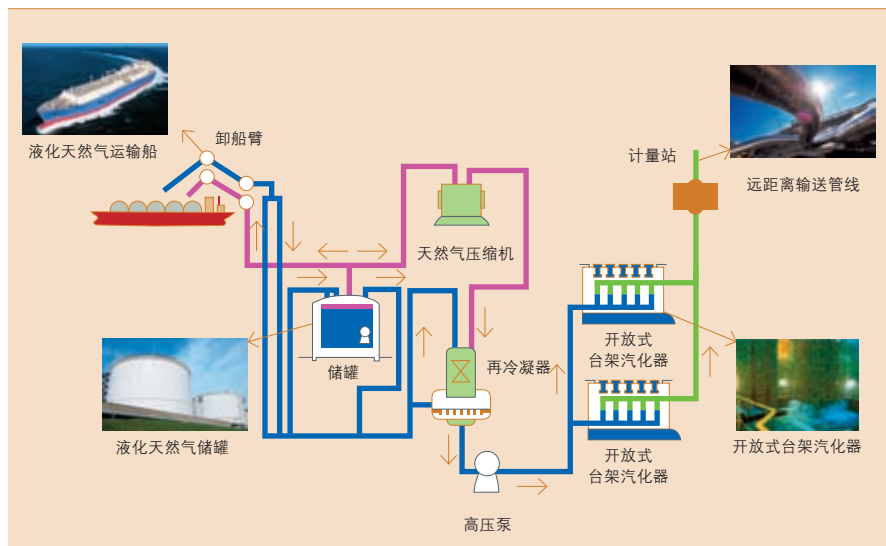
液化天然气的卸船和储存

在液化天然气运输船停靠码头后，通过码头上的卸船臂，将运输船上的输出管线与陆地上的卸船管线连接。然后，用泵将运输船储罐中的液化天然气传送到岸上接收站的储罐内。在这个过程中，运输船储罐内的气压会逐步降低，为了保持压力，要把陆地储罐里的气体通过回气管和输气臂，再送回到运输船储罐。在不卸载液化天然气期间，利用陆上储罐输送泵把液化天然气送入卸船管线中以保持其低温状态。这些液化天然气可通过隔热管返回储罐中。

1 液化天然气产业链系统



2 液化天然气接收站处理系统



液化天然气的再气化和输出

通过储罐输送泵加压之后，储罐内的部分液化天然气进入再冷凝器，一定量的蒸气也被液化。使用高压泵对来自再冷凝器和储罐低压泵的混合液化天然气进行加压，并使其进入汽化器。在通过输送管线输送给最终用户之前，要用计量仪表计量天然气体积。为了保证储罐输送泵

脚注：

¹⁾ 请参阅《ABB评论》2009年第一期第74页“液化天然气运输船推进系统”。

和高压输出泵的正常运行，需要在所有泵出口处安装回流管。利用回流管调节流量补偿液化天然气运输能力的变化，这样，即使输出停止，也能保证系统处于低温状态。

液化天然气的蒸汽处理和放空

蒸汽处理系统用于保证液化天然气储罐在一定压力范围内正常运行。在储罐内，压力变送器监测压力值，确保储罐压力不会过高或过低。当压力过高或过低时，蒸汽处理系统采取适当措施，控制储罐内的气体压力。为了防止液化天然气储罐出现真空，工艺流程中提供一个真空气体补给系统。

ABB 的 SCADA 系统采用开放式、可兼容的以及普遍使用的标准通信协议，所以可与多种类型的 DCS 控制器进行信息交换。

输气干线

输气干线由配有支线的输气管线、阀门站和调压站组成。阀门站用于切断管线，提供无人监测和远程控制，而在天然气经过过滤、计量、加热和调压后，调压站将天然气输送到下游最终用户，如城市天然气站和发电厂（见图 3）。

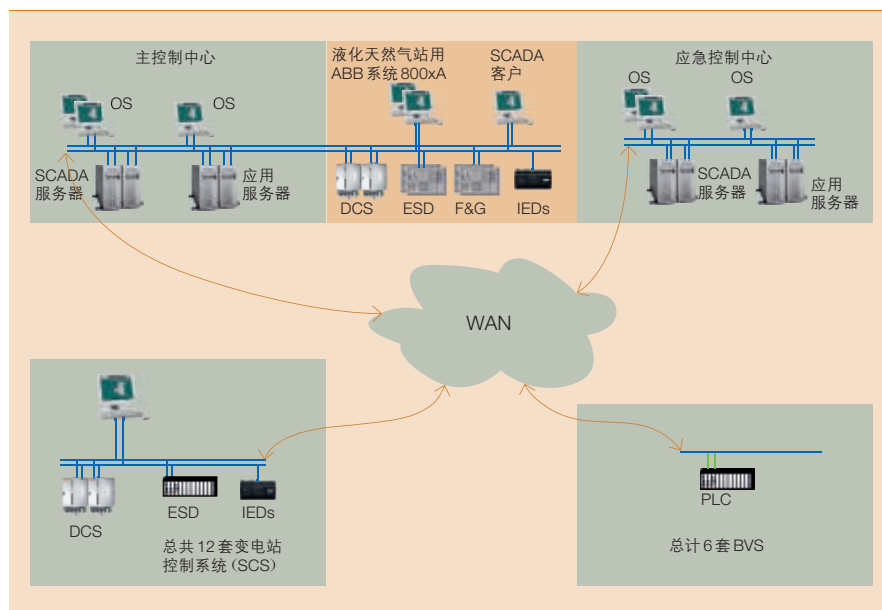
液化天然气控制系统

由于福建液化天然气项目涉及众多的工艺流程，其中包括监控和数据采集系统（SCADA）（见 资料库 1）、应急关闭（ESD）系统（见 资料库 2）、火灾和天然气（F&G）监测系统（见 资料库 3）和集散控制系统（DCS）（见 资料库 4），

因此需要当地运行的控制系统和远程监控系统。集成这些多功能系统是该项目技术方面最具挑战性的难题。

为了控制接收站内泵的运转方向，要在接收站 DCS 系统中内置联合调度控制逻辑。作为整体设计的一部分，首先要确保 DCS 与 SCADA 之间的通信顺畅。目前，DCS 系统

图 3 福建液化天然气项目自控系统结构图



资料库 1 监控和数据采集（SCADA）Vantage 系统

SCADA Vantage 系统有助于提高管线服务和加压站利用效率，加速了周转，提高了功能。液化天然气可从产地以最短时间和最低成本运输至用气地。ABB 提供的解决方案让运行成本保持最低。

特点：

- 冗余和开放式结构
- 面向对象的实时数据库
- 集成化历史纪录服务器
- 集成化管线模型和先进的流程图表
- 从单节点设备到多种服务器系统的扩展性
- 在总系统和应用中采用了直观的配置工具
- 通信协议支持 OPC 和行业标准，如 IEC 870 5 101/104 和 DNP3.0
- 可以对管线站点控制自动化解决方案进行简单集成

SCADA Vantage 系统可为液化天然气储存和供应等特殊行业提供控制和数据采集。它具备开放式兼容性，用途广泛，从单节点模式上的设施到多服务器系统等各种场合均可应用。

另外，流程以客户/服务器原则和具有冗余功能的面向对象系统为基础。通过可配置的授权系统，提供安全保障，防止未经授权的人员登录系统。系统通信联络使用 ODBC、COM、OPC 和 OLE 标准协议（有关更加详细的情况，请参阅本期《ABB 评论》第 56 页《OPC 统一构架体系》）。除了这些先进特点之外，它还具备冗余配置的前端通信功能，如果通信中断，可使用远程设备完成自动切换。

能源与环境

与 DSC 控制器之间的内部通信协议大部分是独立开发的，经常出现不兼容现象。然而，ABB 的 SCADA 系统采用开放式、可兼容的以及普遍使用的标准通信协议，所以可与多类型的 DCS 控制器进行信息交换。将 SCADA 系统与 DCS 系统进行

资料库2 紧急关闭 (ESD) 系统的主要设计功能

- 1. 通过 ESD 按钮，可触发手工应急停机，关闭各装置的处理设备。
- 2. 应急停机通过系统自动检测仪表触发，输入信号使用表决方式保证报警或停机信号的有效性。
- 3. 应急停机重新设定：联锁触发条件在手工确认并重新设定后，系统可恢复到正常状态，确保生产安全。
- 4. 联锁旁路：ESD 系统还提供一个维护旁路和运行越权按钮，在不影响正常生产的情况下，该按钮对设备进行在线测试；在开始启动处理系统时，信号旁路即被切断；当旁路回路容许开关处于许可位置时，在 EDS 界面上即可进行旁路运行。

资料库3 火灾与天然气监测 (F&G) 系统的主要设计功能

- 1. 收集并显示可燃气体和火灾检测器的工作状态
- 2. 检测液化天然气的泄漏，在监测到的非正常状态时发出可视报警
- 3. 收集并显示消防设备和辅助设施工作状态
- 4. 执行应急切断逻辑并显示应急切断的报警信号
- 5. 连接消防设备
- 6. 向 ESD 输出紧急停止信号

集成并非易事，而要集成不同制造商提供的控制系统更加困难。福建液化天然气项目采用 ABB 的扩展自动化系统 800xA 监控液化天然气接收站的控制系统，并采用 ABB 的 SCADA Vantage 监视输气管线的控制系统（见 资料库5）。这就是说，通过使用系统 800xA 平台，可整合接收站 DCS、ESD 及 F&G 系统。系统 800xA 可使用多种通信协议，使系统 800xA 软件可与接收站的第三方设备无缝交换数据，而用于输气管线的 SCADA Vantage 软件可同时监测中央控制系统和站点控制系统。

接收站控制系统

就控制范围而言，接收站自动化系统分为中央控制系统和码头控制系统。这些控制系统均包含 DCS、ESD 系统和 F&G 监测系统。中央控制系统控制的资产包括码头设备之外的所有装置，即储罐、压缩机、

再冷凝器和用海水进行加热的开放式台架汽化器 (ORV) 等。

DCS 是用于监测和控制液化天然气接收站工艺流程的主要自动化系统。除此之外，系统由下列两个独立部分组成：用于关闭接收站的 ESD 系统和用于探测火灾和液化天然气及天然气泄漏的 F&G 监测系统。ESD 系统使用安全完整性等级 3 (SIL3) 的 ABB 安全控制系统。当流程扰动威胁人员安全、环境或设备，或者造成重大经济损失时，ESD 系统启动相应互锁保护装置，防止危险或事故进一步升级。所用的 F&G 系统是符合 SIL3 的 ABB 火灾和气体控制系统。该系统探测火灾和液化天然气及其它有害气体泄漏，发出报警，按照需要激活灭火系统，采取措施隔离生产设备。

输气管线控制系统

ABB 的 SCADA Vantage 用于监测和

资料库4 集散控制系统 (DCS) 的主要设计特点

- 1. 实时监测压力、液位、温度和流量等生产流程中的参数
 - 2. 动态显示接收站的生产流程、主要工艺参数和设备的运行状态
 - 3. 对异常运行状态发出报警，打印报警记录，存储重要参数
 - 4. 容许在线调整和修改流程控制参数，在阀门和泵等设备上执行远程控制作业
 - 5. 监测液化天然气的卸船、储存和气化以及天然气的输出和计量
 - 6. 与下列系统保持实时通信，完成整个接收站生产信息的集中管理：
- 液化天然气储罐数据采集系统
 - 蒸气 (BOG) 压缩机
 - 储罐内置泵和高压泵的振动监测
 - 输出管线 SCADA 控制系统
 - 码头停靠系统
 - 船与陆地通信系统
 - PMS 系统
 - 天然气分析仪
 - 运输船装载控制系统
 - 电解氯系统
 - 海水系统
 - 贸易计量系统
 - ESD 系统
 - F&G 系统

控制输气管线，其构成主要包括首选和备用调度控制中心、用于调压站的若干站点控制系统以及远程控制阀门站等。每个调压站和阀门站都有一个控制中心，它通过主通信线路和备用通信线路，进行数据交换，以保证通过 SCADA 系统的数据通信安全可靠。SCADA 系统支持多种通信协议，如 MODBUS TCP/IP、OPC 和 IEC104²⁾ 等。

综合调度系统

SCADA 系统为调压站执行数据采集和控制任务，并远程控制输气管线

的阀门站。除了 DCS 提供的数据之外，这个系统还获取接收站主要流程参数，如储罐内液化天然气的液位以及汽车发运的输出量等。这种数据采用诸如 OPC 或 MODBUS TCP/IP 等标准协议进行通信传输。因此可将 DCS 看成 SCADA 系统中的调压站，可实时监控接收站的生产运作，并通过网站服务器使用户监视接收站和输气管线的生产和运行状态。同时，通过网站服务器，SCADA 系统还能为下游用户收集每日、每周、每月和每年的天然气供气计划以及为上游液化天然气

运输船收集运输计划。这些数据连同记录每个调压站输出量的数据一起，都传输给 DCS 系统。凭借防火墙的保护，授权用户可使用互联网登录网站服务器，提交和修改天然气申报计划。根据储罐液位、液化天然气运输计划以及下游用户的天然气供气计划，DCS 的联合调度功能将预测天然气输送和分配量。

脚注：

²⁾ MODBUS 协议是一种报文发送结构，Modicon 公司 1979 年开发，用于智能装置之间建立主从（客户）服务器的通信。TCP/IP：传输控制协议/互联网协议。OPC：用于流程控制的 OLE。

资料库 5 ABB 的控制系统（系统 800xA）的技术特性

ABB 的系统 800xA 提供功能强大的控制系统，具有简单、可视、外观优雅的人与系统界面。提供灵活的分布式工程环境，用于工程设计、控制策略配置、流程图设计、信息管理、资源优化以及现场设备的集成等。

流程图功能设计

系统 800xA 的流程图设计可让工程师继续发挥工程师作用，而不是变成计算机程序员。流程图自动生成，使项目变得简单而实用。由于流程图设计以功能为基础，因此不必深入了解控制器和输入输出装置，就可完成设计工作。另外，系统 800xA 还支持在线监测和校验功能。

工艺过程的可视化

利用系统 800xA 综合数据库中预先确定的元素和符号，用户可方便地定制互动流程图。该系统还支持来自第三方的位图、照片、图片元素等。

现场总线的管理

现场总线管理主要由 HART（可寻址远程传感器总线）通信协议、Foundation 和

Profibus 现场总线组成，它还能给工程技术人员提供一种方便的现场总线设计工具。这种工具可以整合网络拓扑与现场元素，如设备参数、应用程序规划、试运行及详细诊断报告。

批次数据管理

系统 800xA 的批次数据管理利用 Microsoft Excel 和 Excel ADD-INS，可自动输入外部数据，如信号列表、标签名称或文件，也可随时输出系统数据以进行验证和修正。

报告生成及分发

系统 800xA 支持灵活的多种报告功能，报告格式十分常见，便于使用。这不仅完全满足工厂和文献的要求，而且还可作为用户决策和规划的强有力工具，其性能可不断进行改进。

完美的数据转换

由用户确定的数据结构和运行方式可提供功能强大可重复使用的算法和程序，以此为基础，用户可将原始数据转换为信息，如 KPI（关键性能指标）、原材料性质和完善的控制支持。数据结构还可以将外部数据整合进入系统。

安全存储和历史数据的存取

容错分布式数据结构可保证数据存储的可靠性和可用性。用户对这些数据的存取权利十分有限。同时，这些数据可离线存储。电子数据满足企业需求，为决策提供可靠依据。

集成化管理和配置

嵌入历史数据处理功能的设计用于系统内部的配置和管理。这可对单点修改进行管理，而不会由于多重数据库的不一致，需要另外对项目进行复制，从而消除了这种风险。

保证连续批次生产、稳定产品质量和生产周期

系统 800xA 的批次管理提供了无与伦比的管理、批次控制和程序控制功能，符合行业技术规范、安全性和可靠性的要求。为了应对不断增长的对产品的要求，它可提供快速和可控响应，同时降低运行成本，减少停产事故，因此赢得长期的市场竞争力。

然后，它将根据接收站的进口压力、输气管线的输出量以及输气管线的存气量，调度和控制接收站的出口量(见图4)。

在综合调度的控制逻辑中，DCS 控制器首先要确定出口压力是否在最小和最大工作压力范围内。如果工作压力过高(大约是最大工作压力的90%)，系统减少出口量。如果超过最大工作压力，ESD 系统将执行紧急关闭操作。但如果工作压力过低(大约是最小工作压力的110%)，系统将增加出口。如果低于最小工作压力，ESD 系统将执行增加出口操作，并发出报警信号。

DCS 控制器将立即计算出接收站输出量与各调压站总输出量之间的差异。它可以估算输气管线中的存气量。考虑前两小时天然气供气计划，可以确定现有输出量加上管线中的存气量是否可以满足未来两小时的需求。如果预测需求超过预计的输出量，DCS 控制器将增加天然气输出量。

当系统确定是否执行增加或减少输出量操作时，系统首先根据天然气供气计划，检查前两小时里，天然气消耗量是否出现过重大波动。如果波动在一套高压泵最大输出量范围之内，只需启动或关闭这些高压泵即可。如果变化大于这组高压泵的最大输出量，根据波动幅度，可能需要启动或关闭两组高压泵或者甚至需要三组高压泵。在执行增加或减少输出量操作时，还需要相应调整如低压泵和海水泵等其他流程设备的运行，使之适应于改变后的输出量。电机控制中心(MCC)包括

控制高低压泵和海水泵，当其不能满足控制逻辑要求时，DCS 控制器将自动发出报警信号，提示操作人员切换至手工处理模式。

ABB 的 SCADA 和系统 800xA 提高了生产调度的工作效率，避免运行中出现判断错误，协调液化天然气接收站与输气管线之间的联合调度控制。

根据液化天然气运输船运输计划，集成调度系统可以判断到下一次液化天然气运输船卸船之前，液化天然气裕量是否能够满足输气管线的计划输出量。如果液化天然气裕量不能满足要求，系统发出报警信号，提醒操作人员，与下游用户谈判，调整天然气用量。另外，系统还要判断储罐是否有足够的空间，能容纳从运输船上卸载的液化天然气。如果储罐中的空间不够，系统也会发出报警信号，提醒操作人员，与下游用户商量调整天然气供气计划或通过其他方式(如罐车运输)增加供气量，以便在储罐中腾出适当空间，接收按计划到货的液化天然气。

控制系统

资料库5 表示控制系统的结构。主控制中心与接收站控制系统和调压站控制中心进行通信联络。调压站控制中心监控若干调压站和阀门站。这样的设计确保服务器、控制器以及网络均有冗余，以便保证系统安全性。

优化

福建液化天然气项目投入运行以来

已经成功接收了第一船液化天然气。优化的控制解决方案每月可为液化天然气供应节省数百万美元。天然气已经运输到莆田、惠安、泉州、宏路供应站，下游用户已经用上了福建液化天然气项目提供的天然气。

福建液化天然气项目充分利用自动化控制和信息处理技术优势，集成了各种不同、但又相互关联的生产流程控制系统，因而能够有效综合调度供应给最终用户的液化天然气。ABB 的 SCADA 和系统 800xA 提高了生产调度的工作效率，避免运行中出现判断错误，协调液化天然气接收站与输气管线之间的综合调度，因此全面提高了企业的生产、运行和管理综合能力。

冯志美

ABB 过程自动化业务
中国北京
zhimei.feng@cn.abb.com

王飞

毕晓星
中国海洋石油总公司福建液化天然气公司
中国福建
wangfei@cnooc.com.cn
bixx@cnooc.com.cn

延伸阅读：

Yudong, W. (2007). *The principle and process for natural gas conditioning*. China Petrochemical Press.
Kuichang, G. (2008). *The application and safety of liquefied natural gas (LNG)*. China Petrochemical Press.
ABB System 800xA Technical Manual
ABB SCADA Version Technical Manual

恢复信心

基于控制中心和现场的馈电线路供电恢复

James Stoupis, 王振远, 杨 芳, Vaibhav Donde, Fahrudin Mekic, William Peterson

恶劣抑或不甚恶劣的天气条件都有可能对电力公司的输配电系统造成破坏。恢复供电的速度和效率主要取决于输配电公司决策支持系统的类型和所用工具。

恢复电力供应的传统程序（即故障呼叫系统和人员派遣）可能需要数小时才能完成。最近几年，电力公司已经配备了带通信功能的自动馈电线开关装置，如具有智能电子装置（IEDs）的自动重合开关和断路器用于保护和控制电网，这样可以缩短断电持续时间和改善系统的可靠性。智能电子装置所提供的信息易于系统进行故障位置的自动识别和故障隔离。但自动恢复供电则完全是另一回事。

ABB 开发出两种互补的恢复供电控制方案，实际上就是自检和自我修复配电网解决方案。

输配电

电力公司传统上使用故障呼叫系统来检测断电事故，当遇到断电时，用户发出报告。然后，配电控制中心派遣维修人员到现场检测故障位置后，再执行各种开关操作方案，采取故障隔离和恢复供电。根据用户报告断电事故以及维修人员确定故障点的速度快慢，这一过程可能要花费几个小时才能完成。

多年来，由于对电力公司的要求不断提高，许多配电网开始减少被动性（传统方式），加强主动性或动态适应性。

现在，识别和隔离故障相对容易。但自动恢复供电仍是一项颇具挑战性的难题。

可自行思考的电网

对有些电力公司而言，智能电网是指能够自动预测系统受到的扰动并加以恢复，可有效提高电网可靠性和效率的电力系统。为了在配电系统层次上实现智能电网，已在系统计量、保护和控制领域，使用了各种自动控制技术。在这些技术范围内，自动恢复供电也是智能电网修复的重要部分。

为了更加接近智能电网概念，近年来，电力公司安装了不少馈电线开关装置用于保护和控制电网，如配备智能电子装置（IEDs）的自动重合开关和断路器。智能电子装置的自动化功能（如测量、监测、控制和通信功能）使自动故障识别、故障隔离和恢复供电等变得可行。

智能电子装置的数据传回变电站计算机或控制中心，根据这些信息，

可实现故障位置自动识别和隔离。这样就缩短了断电时间，提高了系统可靠性。

现在，虽然识别和隔离故障相对容易，但自动恢复供电仍是一项颇具挑战性的工作。为了解决这个问题，开展了许多研究工作，包括运行约束条件、负荷均衡和其他大家关心的实际问题。

ABB 自身也开展了大量研究工作，并开发出两种互补的恢复供电控制方案：基于现场的方案和基于控制中心的方案。为了实现反馈恢复供电，两种方案都进行了恢复供电开关操作分析（RSA），即负荷正常的断电区域通过边界连接开关装置从接壤的电源恢复供电。基于现场的方案使用变电站计算机 COM600 进行 RSA 分析，而基于控制中心的方案则使用 Network Manager-DMS 断电管理系统进行分析。

ABB 开发出两种互补的恢复供电控制方案：基于现场的方案和基于控制中心的方案，这两种方案都进行恢复供电开关操作分析，以实现反馈恢复供电。

基于现场的方案

在基于现场的方案中，变电站计算机 COM600 拥有 RSA 引擎，用于与馈线智能电子装置进行通信。它同时也起着柔性可编程逻辑控制器（SoftPLC）的作用，根据 RSA 引擎产生的恢复供电开关顺序，给智能电子装置下达指令。

COM600 计算机中的 RSA 引擎有一个包括主要馈线部件的简单配电网

模型：如配电变电站变压器的电源、开关装置（即将电网分成若干段的开关）、负荷开关、断路器和自动重合开关及负荷等。它使用一种基于网络跟踪的算法，寻找有效的恢复供电电网，该电网满足下列要求：

- 网络是放射状的。
- 对任何电网部件没有电流超限。
- 对任何电网节点没有电压超限。

所以，恢复开关操作顺序根据故障前的电网状态生成，而不是根据预先编制的规则以通常的离线方式生成。

在基于现场的方案中，恢复开关操作顺序根据故障前的电网状态生成，而不是根据预先编制的规则以通常的离线方式生成。

潜在反馈电源的容量或许有限，有的情况下，要实现一个可行的恢复供电解决方案，可能需要多重反馈电源。在本文中，如果一个电源能够通过单一路径给停止供电服务的负荷区域恢复供电，此种恢复称作“单一路径恢复”。否则，停止供电服务的负荷区域必须分成两个或更多的负荷区域加以反馈供电，被称作“多路径恢复”。万一反馈电源容量或馈线部件负荷能力不够，“单一路径恢复”和“多路径恢复”都有可能甩负荷运行。

RSA 引擎算法从搜索反馈隔离开关开始，这种搜索在以跳闸断路器（自动重合开关）作为根基的故障前网络树状结构上展开，顺树干向下延伸，找到有故障电流通过的最下游开关。这个开关被称作“前馈隔离开关”。然后，继续向下搜索到下游

第一层开关——被称作“后馈隔离开关”。之后，算法采取多种递归步骤，包括：

- 通过跟踪，识别任何多路连接的负荷节点（也称为“T型节点”）。
- 确定通过单一电源能否实现单一路径恢复。如果不能，则算法将继续搜索电网中的其他开关，实现多路径恢复。

在多路径恢复情况下，算法尽量确定最好的重新配置。在某些情况下，为了恢复所有可能不受影响的负荷，必须将电网分成两个子电网，将一个或多个正常开启的连线开关移动到其他开关设备的位置。在另外情况下，即使已经移动了多个连线开关的位置，也不能完全恢复所有不受影响的负荷。

典型 RSA 引擎搜索结果如图 1 和图 2 所示。在图 1a 中，使用了单路径全面恢复，T 型节点 L3 上的故障必须开启前馈隔离开关（R3）和两个后馈隔离开关（R6 和 R10）进行隔离¹⁾。反馈电源（S3 和 S4）都有足够容量，在其相应恢复路径上承担停止供电服务的负荷，为了实现恢复，每个连接开关（R9 和 R12）都可关闭。

脚注：

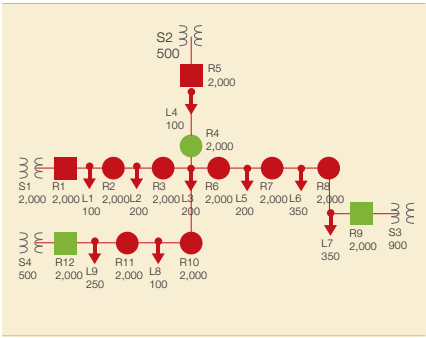
- ¹⁾ 一般，馈线断路器不用作馈线开关，在本例中，它们被用作馈线开关，仅仅是为了说明概念。
- ²⁾ 在这种情况下，不需要前馈修复。

恢复后的线路布局如图 1b 所示。图 2a 显示了多路径全面恢复的一个案例，其中，位于负荷节点 L1 的故障必须通过前馈隔离开关（R1）和后馈隔离开关（R2）进行隔离²⁾。在这个案例中，没有任何反馈电源（S2 至 S5）能完全承担故障隔离后的所有不受影响的负荷。因此，通过打开 R13，算法规则将网络分成两部分，通过关闭 R8 和 R11（来自 S3 和 S4），恢复了停止供电服务的负荷。恢复供电后的线路布局如图 2b 所示。

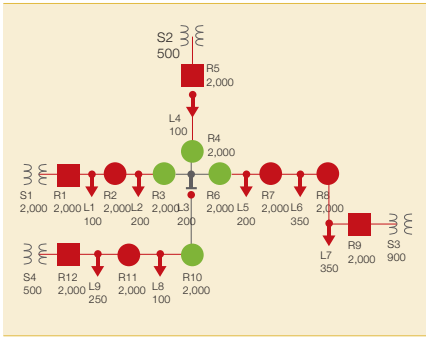
通过采用包括 3 个电源、5 个开关和 3 个负荷的配电演示系统（见图 3），验证了基于现场方案的运行。通过利用 COM600 计算机中的算法控制 5 个智能电子装置，该演示说明了如何实现单一路径和多重路径的恢复。例如，由于电源 S2 和 S3 的给定电源容量均不足于恢复负荷 L1 和 L3 之和，负荷 L1 上的一个故障使 R3 打开，随之，拆分了由 L2、R3 和 L3 组成的停止供电服务网络（见图 3b）。R4 和 R5 两个连接开关闭合，

1 单一路径恢复案例

a 正常布局

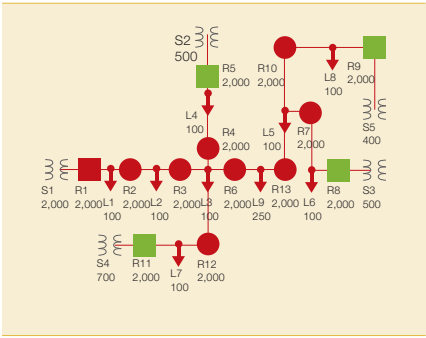


b 恢复后布局

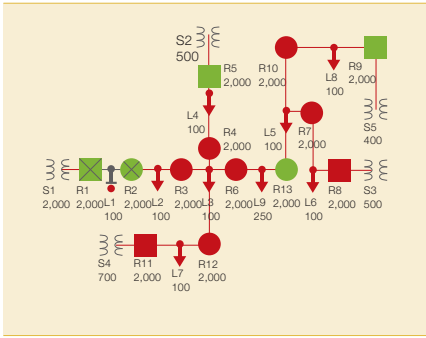


2 多路径完全恢复案例

a 正常布局



b 恢复后布局

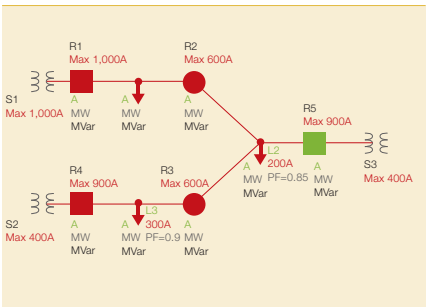


3 演示电路

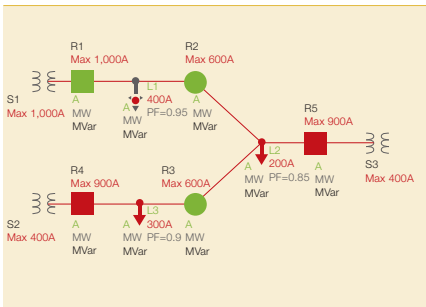
a 物理电路



b 正常运行



c 恢复后运行



输配电

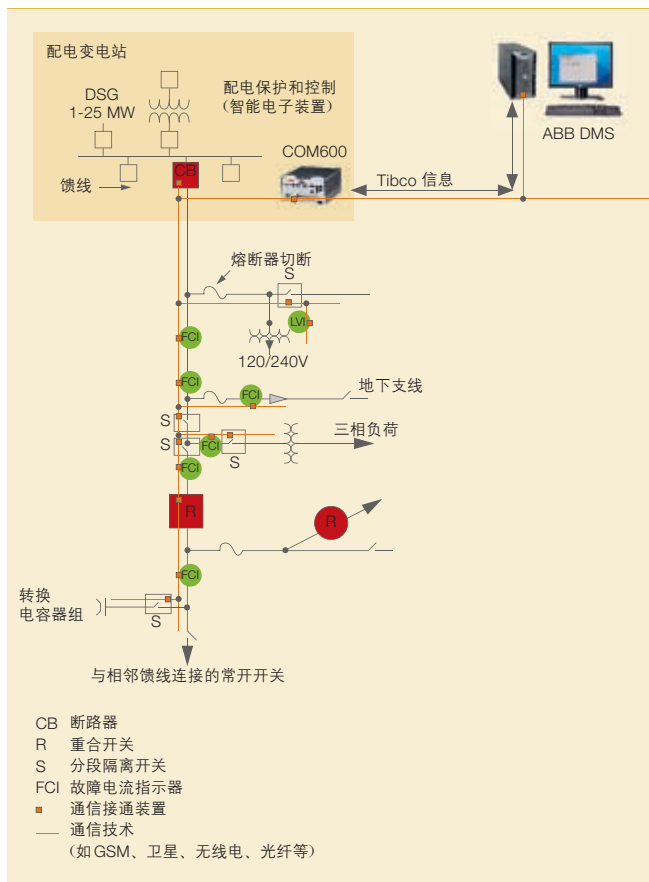
恢复断电负荷的电力（见图 3c）。

Network Manager-DMS 是 ABB 的停电管理和故障呼叫系统，包含用于整个电力公司配电系统的网络模型。

基于控制中心的方案

在基于控制中心的方案里，变电站计算机 COM600 可以作为网关，将现场智能电子装置数据返回给控制中心的停电管理系统，反过来，亦可将控制中心的控制指令传输给现场智能电子装置。计算机 COM600 首先使用行业许可协议，如 IEC 61850、DNP3 和 Modbus，从每个馈线智能电子装置获得必要数据，然后分析这些数据，以检测系统内是否发生故障。如果出现故障，计算机 COM600 通过专有方法，使用实时报文系统，将此信息传输给上游 Network Manager-DMS。当 Network Manager-DMS 接收数据时，随即加以分析，

4 用于集成化馈线自动化和 DMS 的高级层次结构



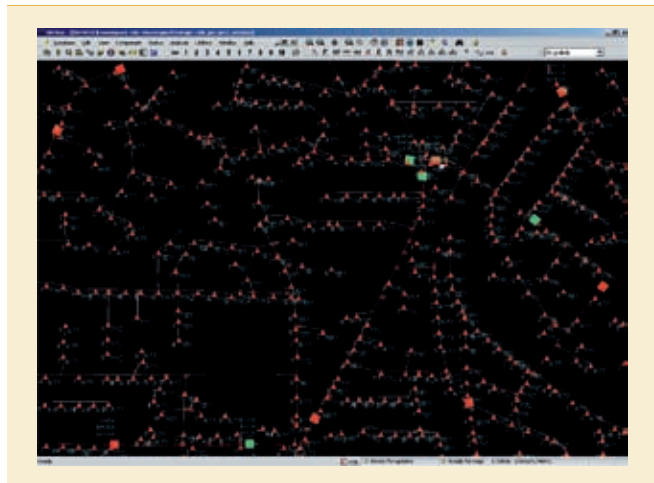
方式取决于控制中心 DMS 应用软件的预先设定。该方案的高级系统结构如图 4 所示。

Network Manager-DMS 是 ABB 的停电管理和故障呼叫系统。它包含的网络模型一般存储在一个甲骨文 (Oracle) 的数据库内，可用于整个电力公司的配电系统，包括所有路径的变电站部件一直到住宅服务变压器。图 5 所示为典型住宅配电系统控制中心操作人员界面，系统模型存储在 Network Manager-DMS 中。实线代表架空配电线路，虚线表示地下配电线路。方框表示重合闸或开关，红色方框表示常闭装置，绿色方框表示常开装置（即潜在恢复路径），红色三角代表服务

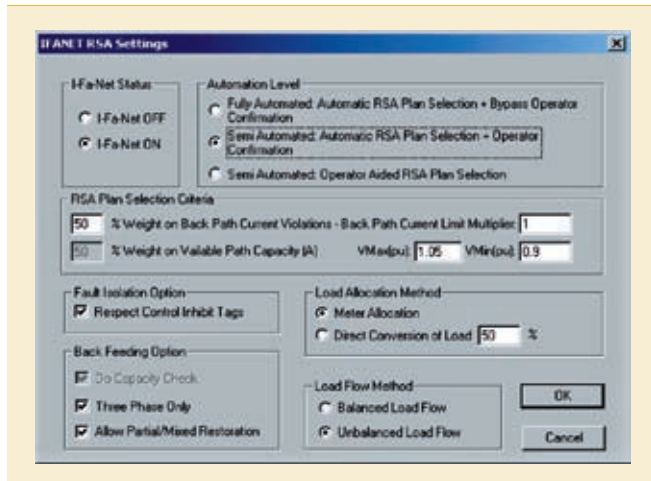
变压器。以确定故障位置，随后运行 RSA，确定应该采取的适当隔离和恢复开关措施。然后，Network Manager-DMS 向计算机 COM600 下达开关控制指令，指令的下达可自动进行，也可经操作人员授权后执行，具体

以往，当客户断电时，他们给电力公司的自动应答系统打电话，自动应答系统将停电数据录入 Network Manager-DMS，然后显示在操作员

5 Network Manager-DMS 的操作人员界面 (OrMap)



6 基于控制中心恢复的操作人员设定界面



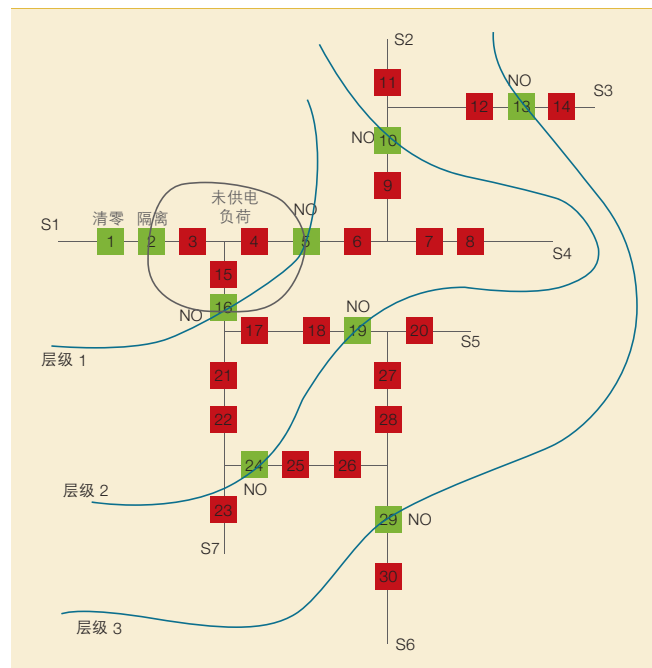
界面上。如果更多电话打进来, Network Manager-DMS 试图确定停电原因, 如某个变压器或其他部件发生故障, 现场某个开关装置或熔断器起动运行。操作人员便利用界面和 Network Manager-DMS 的 RSA 输出, 派遣人员控制开关运行, 以帮助馈线的隔离和恢复。

采用基于控制中心的综合恢复方案，COM600 计算机将根据智能电子装置检测的网络事件，查找断电情况，并自动通知 Network Manager-DMS。当 Network Manager-DMS 接收到该通知时，它将运行有关断电区域的 RSA，生成恢复供电方案，这种方案也称作恢复供电开关操作计划 (RSP)。在进行 RSA 分析之后，是否将 RSP 立即发送给 COM600 计算机执行，由操作人员选择的参数确定。操作员界面应用软件容许三种类型的恢复控制 (见图 6)：

- 完全自动化的控制，操作人员不介入RSP执行过程
- 根据操作人员点击确认执行RSP
- 操作人员辅助下的RSP选择和执行

RSA 需依据详细的网络模型进行不平衡潮流分析,以防止恢复后电网电流和电压超限。RSA 综合了网络拓扑树状跟踪和通用算法,使其能应对网络负荷轻重情况。如果网络负荷轻,则单一路径恢复就足够了。如果网络负荷重,则需要多路径恢复以及采用多层 RSA。

7 多路径恢复开关操作分析 (RSA) 概念



8 基于控制中心恢复演示器的连线图

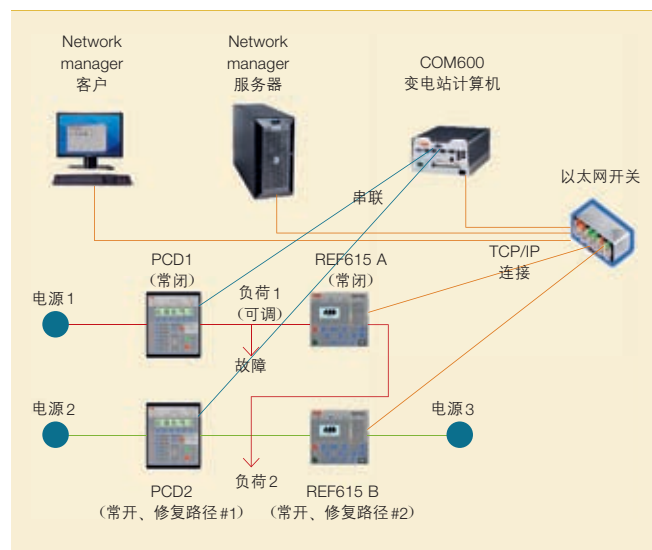


图 7 对多层 RSA 概念作出了解释，其中，绿色方块代表馈线开关或故障清除/隔离开关。连接没有负荷区域的馈线开关称为恢复馈线开关的第一层。层级按顺序进行命名（如第二层，第三层等）。在大负荷条件下，仅仅闭合第一层恢复开关还不能满足电力要求。因此，需

传输给第二层和第三层之间。ABB 使用基于遗传算法的通用方法解决了这个问题。

ABB 已经在试验室研发并验证了基于控制中心的方案,建造了一个演示模型(见图 8)。配置 Network Manager-DMS 服务器用来储存一个范例网络模型,并配置 Network Manager-DMS 客户笔记本电脑可存取和显示这个模型。这些电脑与 COM600 变电站计算机和两台 REF615 配电智能电子装置一起,通过以太网开关利用 TCP/IP 互相通信。两台 PCD 重合闸控制器采用 Modbus 协议与 COM600 计算机串联进行通信。

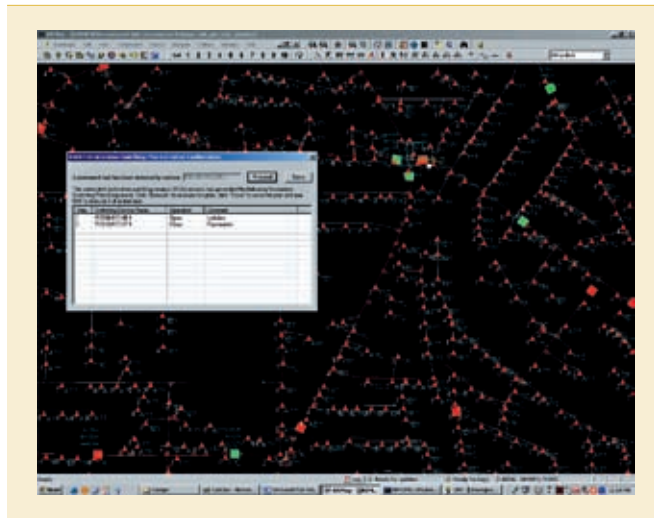
图 8 显示，负荷 1 是可调负荷——由调光开关控制的灯泡，通过遥控调光。负荷 2 是一个固定负荷——没有配备调光开关的灯泡。按动调光开关遥控按钮，可在负荷 1 上模拟一个故障，通过开关设定负荷水平（灯泡照明度）从半负荷增加到满负荷。这个动作会造成一个

故障，强迫PCD1经过一个重合顺序进入锁定状态：其过电流检测设定值在故障前负荷水平（设定值为半负荷）与故障负荷水平（设定值为满负荷）之间。

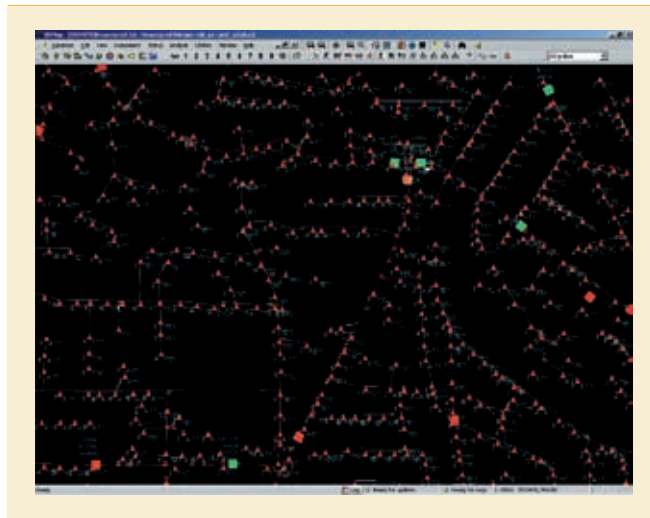
切断PCD1时,该动作触发COM600故障检测功能。当检测出故障时,Network Manager-DMS 接到通知,

输配电

9 用于半自动 RSA 的 NM-DMS 操作人员界面 (OrMap) 屏幕



10 恢复后的 NM-DMS 操作人员界面 (OrMap) 屏幕



RSA 自动运行，确定所有恢复路径。由 RSA 设定值确定隔离和恢复措施是否为全自动化，还是需要操作人员点击确认的半自动化，或需要操作人员选择恢复路径的半自动化。前两种情况下，最佳恢复路由由 RSA 自动确定。后一种情况，则通过分析 RSA 输出数据，如允许容量、负载水平和潮流超限数据，由操作人员手动选择最佳路径。图 9 和图 10 所示为 Network Manager-DMS 操作人员界面，通过操作人员点击确认，实现半自动隔离和恢复。

这种演示器曾多次在 2009 年召开的

各种会议上展示过，包括配电技术 (DistribuTech)、ABB 自动化与电力世界 (见图 11) 和 FERC 博览会日等。

ABB 正积极开发智能电网技术，特别在配电自动化、馈电自动化和配电控制应用领域。

自我修复的配电网

ABB 正积极开发智能电网技术，特别在配电自动化、馈电自动化和配电控制应用领域。基于现场和基于控制中心的恢复供电控制方案仅仅是

这些开发工作的两个例子。这些技术提供自检和自我修复的配电网解决方案，极大缩短了客户的停电时间，提高了服务可靠性。

11 2009 年在奥兰多举行的 ABB 自动化与电力世界上展示的演示器



James Stoupis

王振远

杨芳

Vaibhav Donde

ABB 研究中心

美国北卡罗来纳州罗利

james.stoupis@us.abb.com

zhenyuan.wang@us.abb.com

fang.yang@us.abb.com

vaibhav.d.donde@us.abb.com

Fahrudin Mekic

ABB 中压产品业务

美国宾夕法尼亚州艾伦镇

fahrudin.mekic@us.abb.com

William Peterson

ABB 电力系统网络管理

美国北卡罗来纳州罗利

william.peterson@us.abb.com

参考文献:

- [1] Wang, Z., et al. (July 2009). A deterministic analysis method for back-feed power restoration of distribution networks. IEEE General Meeting, Calgary, Alberta.

发展输电技术意义重大

轻型高压直流 (HVDC Light®) 输电容量可达 1,100 MW

Björn Jacobson, Marc Jeroense

我们对电力的需求似乎没有止境，预计未来 40 年需求量将是现在的两倍。如此巨大的电力需求，导致电力生产和输送对环境产生了不良影响。在新增发电中，来自偏远地区的可再生资源发电所占份额越来越大。九十年代中期以来，ABB 一直致力于新型的轻型高压直流 (HVDC Light®) 系统开发，旨在提供一种新型输电技术，以克服现有输电系统的一些固有缺陷。HVDC Light 系统使用坚固耐用、易于安装的聚合电缆，可以实现陆上远距离直流输电。HVDC Light 换流器强化了输电网的性能，提高了黑启动能力。



输配电

随着城市化进程的加速，城市里已经没有什么地方可以架设新的电线。此外，随着风能、太阳能和水电等可持续发展能源的发展，电网将承载更多的压力，而这些电力大多来自偏远地区，那里的电网通常比较薄弱。目前可再生能源的开发应用日益增加，人们将其看作是一个处理CO₂排放问题的解决方案。新的气候保护和电力交易兴起，必然导致对输电系统产生新的需求。HVDC Light® 技术为增强现行电网提供了新的解决方案。

大容量电力输送

HDVC 远距离输送电力时损耗很低，通常应用于海底电缆或高压远距离输电。二十世纪三十年代以来，ABB 一直处于该领域的开发前沿，书写了很多HVDC项目的成功记录，从1954年哥特兰岛 (Gotland) 首台12脉冲换流站投入商业运营，到今天中国正在进行的大规模输电系统建设，该线路额定功率高达6,400 MW，输送距离达2,000公里，将中国西部大型水电站的电能输送到华东和华南地区 (见图1)。

电力转换

由于电厂产生的是交流电，向用户

提供的也是交流电，因此需要在高压直流输电两端进行转换，先把交流电转换成直流电 (使用整流器)，再把直流电转换成交流电 (使用逆变器)。在电流转换过程中，传统的HVDC系统使用晶闸管，HVDC Light系统使用晶体管。

轻型高压直流 (HVDC Light)

ABB 是唯一拥有10多年丰富运营经验的电压源换流器 VSC (voltage-source converter) 输电系统的供应商。1997年，世界上第一个HVDC Light 10 kV 试验性输电系统项目在赫尔斯扬 (Hällsjön-Grängesberg) 建成。此后陆续建成许多换流站，并在客户的管理下成功的连续运行。

VSC 输电系统可与非常薄弱的电网，甚至没有额外电源的电网相连。它通过注入或吸收系统所需的无功功率来稳定电压，可同时和独立控制连接点的潮流和电压。在典型高压直流 (使用晶闸管换流器而不是晶体管) 中，系统本身不能独立控制有功功率和电网电压，需要额外添加设备。此外，使用 VSC 输电系统，无需改变电压极性就能使电能流动反向，这在传统高压直流输电系统中

是不可能的。电能反向是通过改变电流方向来实现的。这种特性非常有用，因为在电缆系统中改变极性可能导致很高的电场应力。

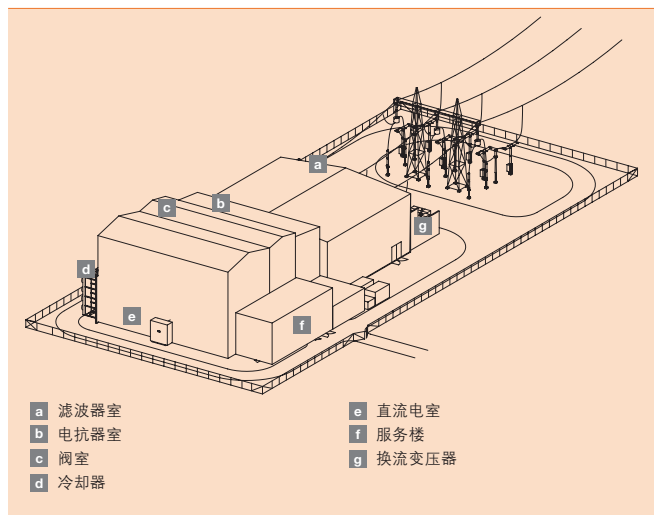
ABB是唯一拥有10多年丰富运营经验的电压源换流器 (VSC) 输电系统的供应商。

HVDC Light 输电电缆是基本的成对双极配置，其中一条是正极，另一条是负极。电缆在运行过程中，两根电缆中的电流方向相反，这样就基本消除了电缆的整体磁场，这也是HVDC Light技术的另一个优势。通过对换流器、IGBTs (绝缘栅双极晶体管) 和HVDC Light 电缆系统之间的相互配合，VSC 输电系统可以使整个风力涡轮发电场产生同步电压，现在还能提供高压 (400 kV 或 500 kV AC) 输电线路的替代方案。过去的设计理念主要是用来提高HVDC Light 的电压等级，现在也开始将其应用于提高现行输电线路的电压等级 (见图2)。根据Cigré¹⁾ 的建议，在ABB和第三方实验室进行

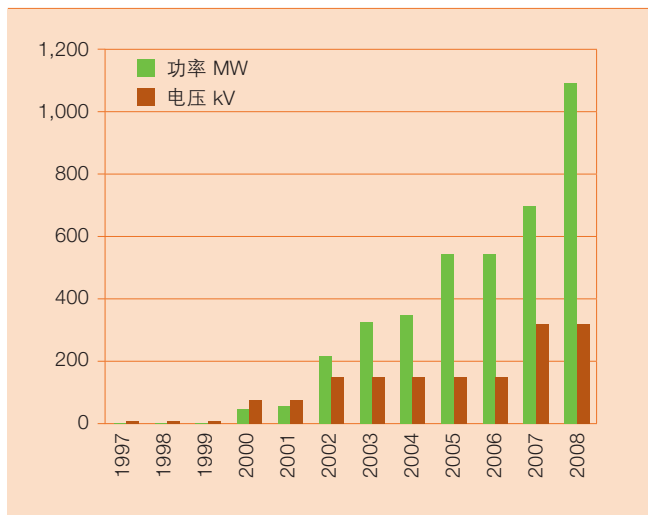
脚注：

¹⁾ Cigré 是一家非政府组织，成立于1921年，主要为电力系统的规划和运营提供指导。

1 1,100 MW 换流站：占地面积 160m×70m。



2 提高HVDC电压的发展史



了严格的测试，包括样机测试，高压绝缘试验、组件测试，同时还测试了专门建造的特高压开关电路上的关键部件，然后在现场对每一个组件进行满负荷测试，从而验证了测算、模拟和操作试验均符合相关要求。事实上，已经安装的超过1,500公里的HVDC Light 输电电缆和29个换流器(或22换流站)中的28,000多个IGBTs运行非常成功，ABB的HVDC Light 技术已经赢得了高效、可靠输电系统的美誉(见资料库)。

专用晶体管

ABB生产用于HVDC Light的所有IGBTs(绝缘栅双极晶体管)。正常运行时，最大IGBT的最大关断电流可达4,000 A，在短路情况下可经受18 kA 电流(见图3)。加上安全余量，这一限值转换成直流电容量约为1,800A。

控制系统

MACH2™ 控制系统计算机化后，运行速度快。内部控制回路的循环周期是100微秒。系统可以跟踪和记录换流器及其附属设备的工作状态，防止发生电流或电压的过载。还能对内部阀电流和直流电压进行快速调节。阀保护电路最快反应时间不超过10微秒。

MACH2的主要功能是功率和电压控制。但也可以利用频率控制和无功功率控制实现对系统的控制。控制有功功率的方法是其设定在某个等级，或利用电网频率决定所需的功率

(称为自动模式)。同样，无功功率也可以设定，或者作为电网电压的函数进行相应的变化(称为电压控制模式)。

根据不同的需要，可提供不同类型的阻尼功能，比如电网和发电机之间的次同步扭振阻尼。HVDC Light有助于抑制这类振荡，从而保护发电机免受潜在的、有害振动的影响。

MACH2™控制系统可以跟踪和记录换流器及其附属设备的工作状态，防止发生电流或电压的过载。

轻型高压直流新的发展潜力

由于配置了HVDC Light 和挤出

聚合电缆，不仅扩大了传统HVDC 电缆互联市场(比如远距离海底电缆连接)，还开拓了新的市场机会。包括海上应用，即把陆地电网电力输送到油井平台，以及输送海上风电场发出的电力。由于HVDC Light 电缆没有交变磁场和外电场，因此可埋入地下。采用HVDC Light 技术的新型输电系统颇具吸引力，埋在地下比较隐蔽，安装迅速又减少干扰，这都有助于加快人们的认可过程，缩短了项目实施时间。电缆系统尺寸小，安装程序简单，每公里接点少。此外，地下电缆持久耐用，使安装和维护经济实用。在HVDC Light 输电系统中，主要成本在于转换设备。与交流输电线路不同，其输送容量不因输送距离的增加而降低。因此，HVDC Light 系统输电距离越远越具成本效益。当然，各地情况不一样，但是已研究的案例说明与容量相当的、200公里以上的架空线路相比，HVDC Light 的成本更具吸引力。

挤出电缆与整体浸渍电缆

整体浸渍(MI)纸绝缘电缆也可用于HVDC Light 系统，比如Valhall工程。聚合电缆和整体浸渍电缆都可以用作海底电缆，但整体浸渍电缆目前是极高电压(400到500 kV DC)输电的首选。聚合电缆更适合陆地使用，特点是快速、容易拼接和安装(见图4)。

电缆和架空线路

电缆并不能满足所有施工需要，如山区，挖掘机和施工卡车很难进入。特定

资料库 HVDC Light 和静态无功伏安(Volt-Amps-reactive, VAR)补偿器(SVC)的丰富安装经验。

项目	换流器数量	投产年份
1 Hällsjön	2	1997
2 Hagfors (SVC)	1	1999
3 Gotland	2	1999
4 Directlink	6	2000
5 Tjæreborg	2	2002
6 Eagle Pass	2	2000
7 Moselstahlwerke (SVC)	1	2000
8 Cross Sound Cable	2	2002
9 Murraylink	2	2002
10 Polarit (SVC)	1	2002
11 Evron (SVC)	1	2003
12 Troll A	4	2005
13 Holly (SVC)	1	2004
14 Estlink	2	2006
15 Ameristeel (SVC)	1	2006
16 ZPSS (SVC)	1	2006
17 Mesnay (SVC)	1	2008
18 BorWin 1 (Nord E.ON 1)	2	2009
19 Martham (SVC)	1	2009
20 Liepajas (SVC)	1	2009
21 Siam Yamato (SVC)	1	2009
22 Caprivi Link	2	2010
23 Valhall	2	2010
24 Liepajas Metalurgs (SVC)	1	2010
25 Danieli – GHC2 (SVC)	1	2011
26 Danieli – UNI Steel (SVC)	1	2011
27 EWIP	2	2012

项目1~18已经安装；项目19~23已经订货正在生产，尚未调试。

输配电

3 IGBT 阀：换流器的核心



情况下，架空线成本非常低。在这种情况下，HVDC Light 技术可以使用架空线路，比如纳米比亚 Caprivi 电网项目，架空线跨越 970 公里的崎岖山地，预计于 2009 年早些时候开始运行。使用 HVDC 架空线时，每根线的电力容量都高于相应的 AC 线路，特别是远距离输电，即可用较少的输电线就可以输送所要求的电量，这样会省去更多审批麻烦。甚至可以把架空线和电缆结合使用。由于架空线路暴露在大气中，所以电缆也必须用电涌

避雷器和电子防护设备来保护其免受闪电过电压危害。

ABB 的 HVDC Light 技术，配备大功率 IGBTs 和高技术电缆，现在的输电容量已达 1,100 MW。

交流电不适合远距离大容量电缆传送无论是超高压、高压、中压还是低压交流电振荡频率都为每秒 50 或 60 次 (50/60 Hz 电源频率)。每个周波，交流电电缆被充放电至系统电压。充电电流随电缆的长度增加而升高。电缆达到一定长度时，充电电流非常巨大，以致无法输送有功功率。当然，在出现这种情况之前，交流电缆就已不再具备经济价值。使用电压越高，问题就越严重，从而限制交流电缆的长度和功率。这对短距离输电非常有用，但不适用于远距离大容量输电。而直流电缆没有相应的充电电流。直流电缆中的所有电流都可利用。

HVDC Light 输电技术已经成熟

使用 ABB 大功率 IGBTs 和先进的高技术电缆系统，HVDC Light 技术业已成熟，已成为全世界输电系统中不可或缺的重要部分。术语

“轻型”仅指其使用方便，不会有任何强度上的不足。大量的现场安装经验证明，该技术成熟可靠。

ABB 工程师不断拓宽该技术的使用范围。电压、电流、功率、占地面积和效率等关键技术参数不断改进提高。从长远来看，可以设想在交流电网上覆设直流电网，既可以增加输电容量，又不会损害稳定性，也不需要更多的架空线路。直流电网还有许多问题需要解决，尤其是直流电流断路问题。不过，直流电网仍是最好的解决方案，它可以汇集和配送来自太阳能、风能和水电等可持续能源，以及减少 CO₂ 排放。另外，一些关键部件比如 IGBTs、电缆系统和控制系统的软件也仍需不断改进。

功率变化

HVDC Light 已成为输电发展史上的里程碑，目前输送功率可达 1,100 MW。采用地下直流电缆，实现远距离电力输送，成为新输电系统的选择方案。这项技术也带来了新的市场机会，比如，加强现有输电网，为海上设施这种孤立的站点提供电力，以及把可持续能源从偏远的地区输送到人们生活和工作的地方。

4 用于 HVDC Light 的挤出聚合电缆



- a 铝导体
- b 聚合物电阻
- c 绝缘聚合物
- d 外部聚合物电阻
- e 护套
- f 防潮层
- g 机械保护层

Björn Jacobson

ABB 电力系统业务

瑞典卢德维卡

bjorn.jacobson@se.abb.com

Marc Jeroense

ABB 电力系统业务

瑞典卡尔斯克鲁纳

marc.jeroense@se.abb.com

电力平衡

装备了轻型高压直流（HVDC Light®）的智能电网

潘久平, Reynaldo Nuqui, Bertil Berggren, Stefan Thorburn, Björn Jacobson

A man in a dark suit is balancing on a high-voltage power line. He is lying on his back, with his arms and legs spread out to maintain balance. The power line is supported by a tall metal tower. The background is a clear blue sky with some clouds. The image is used as a metaphor for balancing power in a smart grid.

你是否对走钢丝杂技演员在纤细的钢缆上如何保持平衡感到好奇？这些艺术家不仅必须保持自身平衡，还必须考虑到他们在钢索上走动造成的运动。对付这种状况的一个办法就是要走的非常缓慢，使绳索的晃动保持在一定的范围内。更好的办法是杂技演员需要考虑所有实际发生的运动，并利用或反作用于这些运动，使这些运动处于掌控之中，从而允许更多更快的动作。杂技演员反应越灵活，就越能全面利用系统的总体动态性能。

乍看起来，这或许与电网运行没有多少共同之处。不过，电网也会出现不少重大的稳定性问题。传统的解决方法是让负荷低于设定水平，避免出现不稳定风险。电力市场的开放以及可再生能源的增长使得电力传输距离越来越远，进而要求强化网络的可控性。ABB 开发的轻型高压直流（HVDC Light®）技术，不但可以提高电网传输能力，还可以主动抑制振荡，提高稳定性。

输配电

传统上，多数电网都将发电厂的电力传输给附近的客户。因此，发电厂都位于主要城市周边，而电网基础设施也大致如此。如今，越来越多的电力生产位于比较偏远的地方，输电距离越来越远。这种变化源于多重需求：首先是可再生能源利用的不断增长，而这些能源生产往往位于遥远的地方；其次是电力市场开放度增加，人们更愿意使用增量成本最低的发电设施。于是，高压电网越来越多地用于远距离电力传输，运行部门也在寻求各种办法减少远距离电力传输的各种障碍。

高压电网的使用越来越超出最初设计条件，有些输电回路不得不传输更多电力，运行比以往更接近于极限。对于可再生能源，由于其供电的不连续性和某种程度上的不可预测性，因此面临更加严峻的挑战。因此，必须努力满足这些需求的

新技术，使电网保持可控性和稳定性。

这意味着，在电网中，由物理定律确定的“自然”电力潮流正日益为经济驱动力所左右。除可靠性规范外，未来输电基础设施的发展还需考虑环境强制性要求和节能的要求。

在局域电网中，使用先进的 HVDC Light 系统，可大大强化智能电网的运行，凭借其固有的可控性，大幅提高电网运行的安全性和效率。

输电基础设施的不足

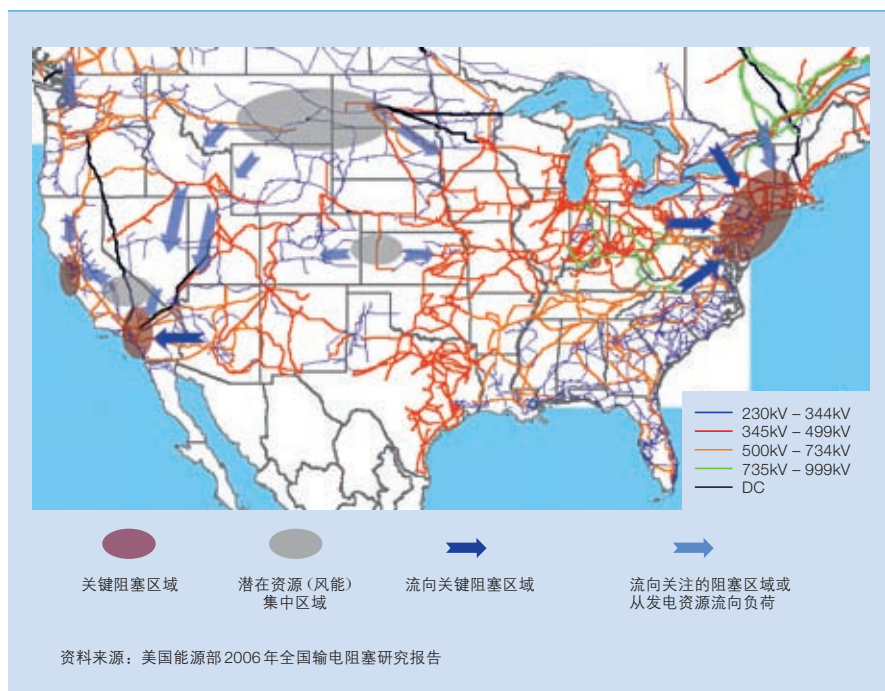
由于输电阻塞不断增加，电网不能充分保证相邻能源市场间经济有效的电力交换，或者无法保证发电资源的优化利用。输电阻塞是指关键输电线路实际或计划调度电力潮流受到容量或安全措施的限制而达不到理想水平。由于这些制约因素

限制了从最理想的发电资源获得电力，并提供给负荷中心，电网运营部门只能使用更加昂贵或低效的发电资源。

另外，越来越多大规模可再生能源需要接入电网。由于这种不连续电源使用的增加，加之这些电源所在地区的输电系统薄弱，给电网安全管理带来了新的挑战。现在，特别是在欧洲，容量高达数千兆瓦的海上风电场正处于早期规划阶段，这就需要安全可靠的办法将电力传输到陆地。在美国，实现风能的大规模应用和 2025 年风能满足全国 20% 电力供应的目标，输电是公认的最大单一障碍（见图 1）。因此，升级陈旧的输电系统是未来能源可持续发展的关键。

如今，越来越多的电力生产位于比较偏远的地方，输电距离越来越远。

1 在美国，输电线路阻塞被认为是大规模发展风能的障碍。



可靠和经济的输电扩容方案

通过增加常规交流输电线路的方法提高供电能力，对于网状、重负荷的交流电网来说，已成为一个挑战。增加输电容量受到许多限制，其一是不能影响环境，而这常常使架空线扩容方案无法实现。此外，交流电网扩容不论是采取架空线方式还是地下电缆方式都要受制于下列因素，即电压或暂态不稳定问题、短路电流水平增加的风险、电网的响应性以及电网并行潮流的问题等。另一个限制因素是在市区建设新输电线路的路权成本问题。

脚注：

¹⁾ HVDC Light® 是 ABB 使用电压源换流器的高压直流输电系统的产品名称。

此外，为了有效管理潮流模式的变化和适应不连续的发电资源，提高了电网运行的可控性要求（见图 2）。自 1997 年问世以来，HVDC Light¹⁾ 已逐渐成为提高输电能力、可靠接入大规模可再生能源，以及满足严格的环境和技术要求的一种颇具吸引力的解决方案。

轻型高压直流技术 (HVDC Light)

HVDC Light 技术基于采用绝缘栅双极晶体管 (IGBT) 的电压源换流器 (VSC) [1]。换流器采用高频脉宽调制 (PWM) 开关模式，因此，可同时迅速的分别控制有功功率和无功功率。HVDC Light 系统可经地下和 underwater 电缆远距离传输电力，

对环境有许多好处，包括“无形”的输电线、自然或静态电磁场、使用无油电缆以及换流站占地少等特点。HVDC Light 的功率范围也已得到迅速提高（见图 3）。采用对称单极电缆输电方案，上限已达 1,200 MVA。如果采用双极架空线方案，功率范围可增加到 2,400 MVA [2]。HVDC Light 另一个显著特点是：改变电流方向就可以改变功率输送方向，而不是通过改变直流电压极性来实现，这样建造一个多终端 HVDC Light 系统就较为容易。这些终端可连接同一交流电网不同点或不同的交流电网。这种多终端 HVDC Light 系统可以呈辐射状、环型或网状布局（见图 4）。

提高智能化电网运行

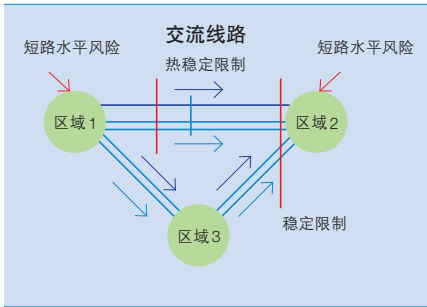
HVDC Light 非常适用于网状交流电网。它的固有特性包括：可以灵活控制电力潮流以及能够对周围交流电网提供动态电压支持。这些功能加上先进的控制策略，可以极大地强化智能化电网运行，改进电网的稳态和动态性能 [3]。

加强局域电网互联

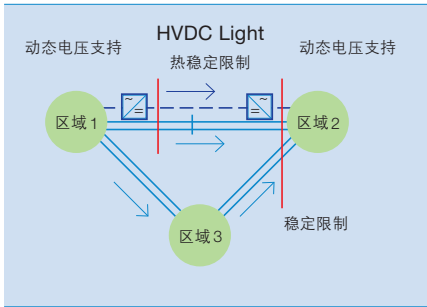
在正常运行条件下，HVDC Light 的潮流水平根据经济性和系统的安全性进行调节。另外，HVDC Light 潮流可实时调度。电力潮流的这种高度可控性允许电网运行部门使用

2 HVDC Light 提高了电网可控性。

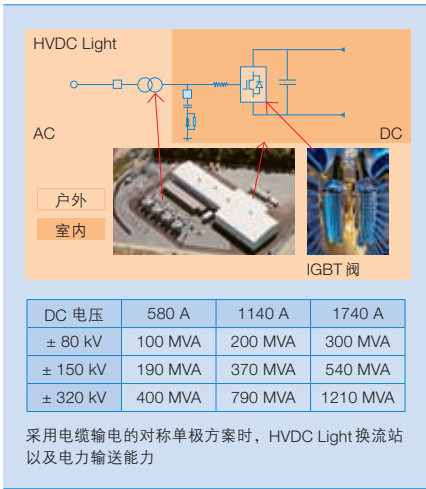
a 在区域 1 和 2 之间架设交流线路解决了部分紧张状况，但没有完全解决经过区域 3 的线路超载问题。



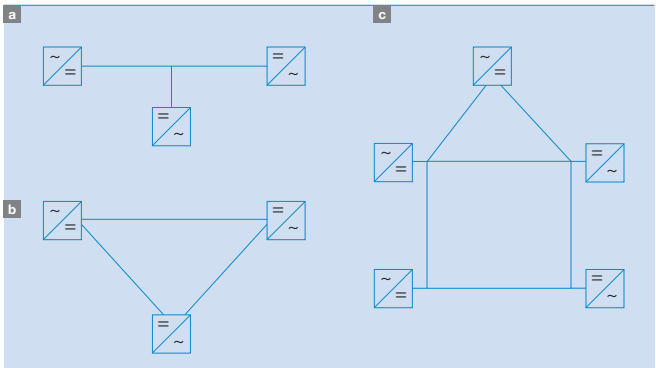
b 直流线路潮流的可控性使其能够承载所需负荷，缓解其他线路的负担。



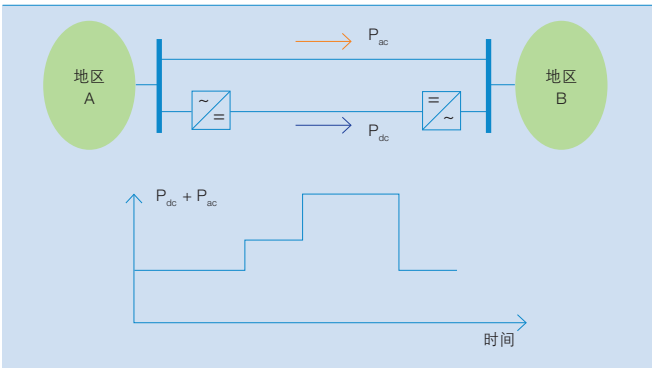
3 采用电缆输电的对称单极方案时，HVDC Light 换流站以及电力输送能力



4 多终端 HVDC Light 系统的灵活配置：a 辐射状；b 环状和 c 网状。



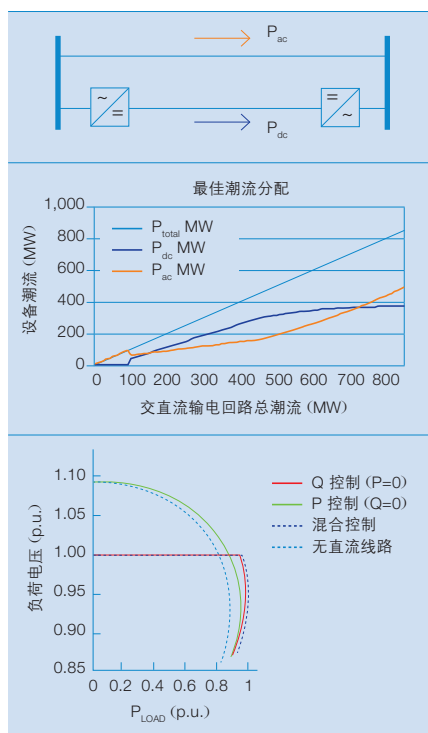
5 HVDC Light 严格控制潮流的能力意味着区域电网潮流可根据合同规定进行管理，增加了系统稳定性。



输配电

更加经济和更少污染的发电资源，实现双赢并执行有效的输电阻塞管理策略。另外，也可把 HVDC Light 系统像商用发电一样，作为商业输电设施运行。HVDC Light 系统根据合同规定精确控制电力潮流，简化了电力输送的计价、记账和防止非理想潮流分布（见图 5）。

6 HVDC Light 与交流线平行可控制由此形成的交直流混合输电回路，优化输电效率与输电回路容量利用。



改进输电走廊的总体利用

在许多情况下，由于电压或暂态稳定性的原因，交流输电线路的容量不能得到充分利用。将 HVDC Light 与交流线路并联运行，不仅可以增加输电走廊的输电能力，而且增加的传输能力还会超过 HVDC Light 系统的额定值。这是由于它能对平行交流输电线路的阻尼进行有效控制，并对其动态电压给予有效支持 [4]。另外，为了尽量减少交直流混合输电走廊的能源损耗，可在相当输电范围内执行最佳功率分配原则。根据交直流混合走廊的运行状态，HVDC Light 系统的优先控制重点也从尽量减少损耗，转为实现电力传输的最大化。这种适应性控制策略可以实现输电效率与输电容量利用之间的最佳平衡（见图 6）。

如果严重扰动威胁到系统暂态稳定性，HVDC Light 可通过功率快速调节功能维持电网的同步运行。

海上风力发电场的并网

HVDC Light 可有效利用远距离陆上或海底电缆，将大规模海上风电场与输电网连接（见图 8）。海上风电场

经 HVDC Light 输电线路并网的主要特点如下：

- HVDC Light 可以完全符合电网规范要求。
- 风力发电机的设计不必满足电网规范要求，其优化设计可集中在成本、效率和鲁棒性等方面。
- HVDC Light 系统可将风电场与交流电网分开。交流电网的故障不会造成风力发电机的负担或干扰，风电场的故障也不会影响交流电网。
- HVDC Light 提供电压和频率控制，可模拟所需的惯量，以提高交流电网的稳定性。

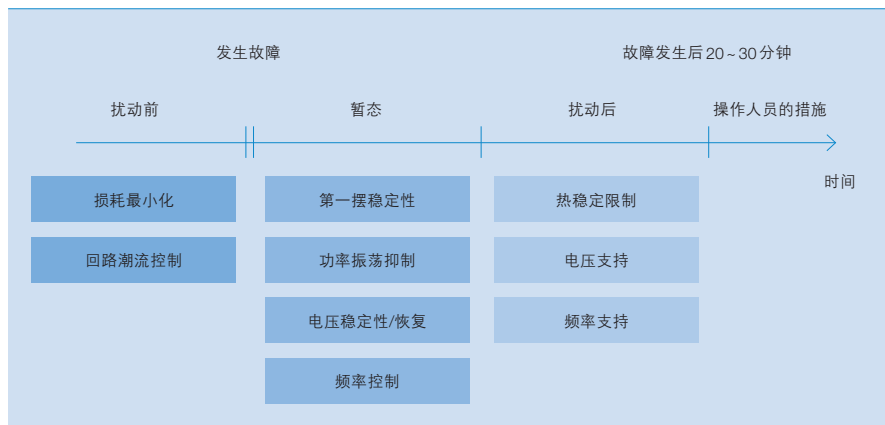
剧烈扰动时的性能

装备 HVDC Light 系统的输电网可有效改善电网在遇到剧烈扰动时的总体性能。HVDC Light 可执行一系列先进的应用控制功能，应对不同的暂态问题和干扰后问题（见图 7）。

第一摆稳定性

如果剧烈扰动威胁到系统暂态稳定性，HVDC Light 可通过功率快速提高或降低控制功能维持电网的同步运行。故障发生期间，通过 HVDC Light 功率即时反向，可提供足够制动功率，限制发电机转子加速。通过控制 HVDC Light 换流器，在消除

7 具有先进的控制功能是 HVDC Light 的特点。



8 HVDC Light 可实现海上大型风电场最佳并网。



故障之后，提供辅助无功功率和电压支持，可提高暂态稳定性。

抑制功率振荡

HVDC Light 可以通过对有功功率和无功功率的调节，可有效抑制机电振荡。有功功率潮流测量的反馈信号，可用于驱动辅助振荡控制方案。或者，利用类似换流站 SVC²⁾ 的特性把调制电压信号注入到换流器电压控制回路中，从而起到抑制振荡的作用。从逻辑上说，P 和 Q 可同时进行调制，以实现有效抑制。HVDC Light 可抑制局部和区域间的振荡模式（见图 9）。

电压稳定性和电压支持

HVDC Light 系统可采用多种方式提高电压稳定性。在故障期间和故障之后，让换流器作为 SVC 或 STATCOM³⁾ 运行，可提高动态电压稳定性，使电压变化最小化。这有助于故障后的系统恢复，减少对敏感负荷的影响。HVDC Light 可为暂态和长期电压不稳定机理提供

抗干扰能力。无功功率的快速调节可为暂态电压稳定性提供动态无功支持。在长期不稳定情况下，变压器分接开关和发电机励磁系统响应会起作用。通过渐进式 P 和 Q 调节，包括在终端站减少有功功率传输，增加无功功率容量，HVDC Light 就能协助防止电压崩溃（见图 10）。

HVDC Light 系统可采用多种方式提高电压稳定性。

频率控制和支持

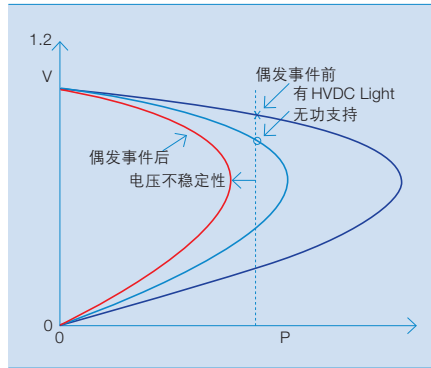
如果整流器和逆变器被连接到两个不同步的电力系统上，一个系统可以使用调制功能协助稳定另外一个系统的频率。在这种控制模式下，HVDC Light 系统可以增加或减少功率定值，其增减幅度与频率偏差成正比。与此相似，频率支持还可用于在系统崩溃以后，加速孤岛系统的恢复。HVDC Light 可提供对所需后备有功功率的支持，协助相邻孤岛的频率控制。同时，对于其他孤岛，它还起着额外负荷的

作用，使其发电机能够及时启动。在系统出现大扰动期间，HVDC Light 的频率控制和支持功能可与现有低频自动甩负荷装置协调与配合，以阻止频率衰减。

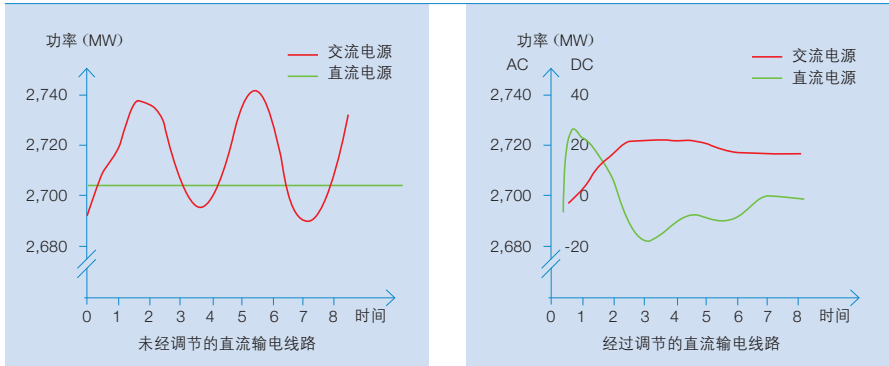
黑启动功能

HVDC Light 可协助黑启动或支持电网恢复。主要特点是启动时间快，不需要电网短路容量，能够以 SVC 模式控制电压以及在恢复期间支持频率稳定等。一般而言，发电厂在连接负荷之前，必须先增加蒸汽生产，这就是冷态负荷启动现象⁴⁾。利用远程电源和 HVDC Light 专用控制功能，电网恢复过程可以

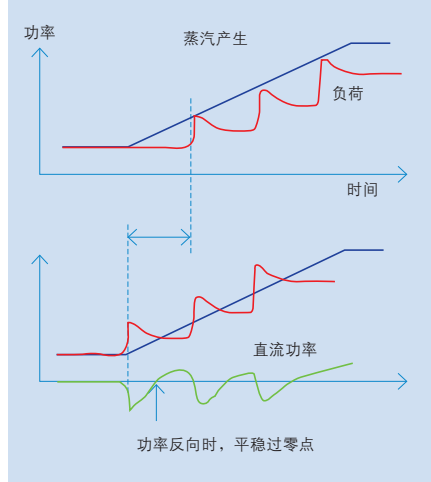
10 HVDC Light 的无功功率调节能力有助于维持扰动故障后的电压稳定性。



9 停电故障后，HVDC Light 支持电网恢复的过程。



11 停电故障后，HVDC Light 支持电网恢复的过程

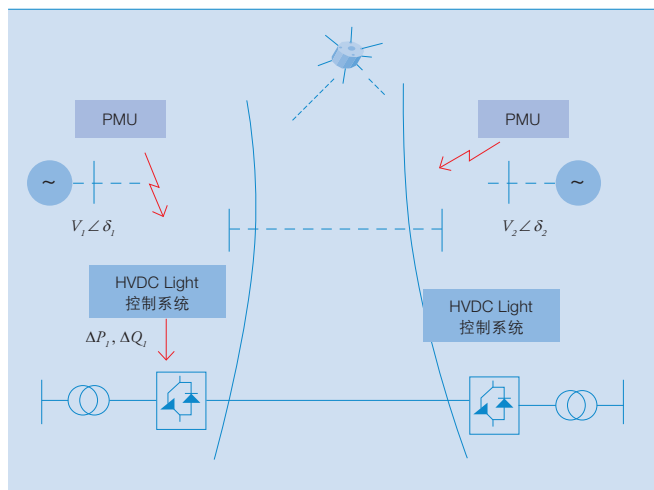


脚注：

²⁾ SVC 是静止无功补偿器的英文字头缩写，这种设备一般由可控硅开关电容器和谐波过滤器组成，用于注入或吸收无功功率，以提高电压稳定性。
³⁾ STATCOM 是静止同步补偿器，功能上与无功补偿器相似，但以电压源换流器为基础。
⁴⁾ 冷态负荷启动是在停电延长一段时间后，恢复供电时产生的现象，这时的负荷经常会比停电之前大得多。这是由设备相关（电容器涌流、变压器的励磁电流等）和负荷相关（停滞机械设备和工艺过程的再启动等）的综合因素所造成。

输配电

12 HVDC Light与广域监测和广域控制系统(WAMS/WACS)配合使用,可进一步提高系统稳定性和输电效率。



得到极大改善,大大缓解冷态负荷启动现象(见图11)。在电网恢复过程中,速度和鲁棒性非常宝贵,因为停电的后果及成本随着停电时间延长而大幅增加。

进一步改进性能

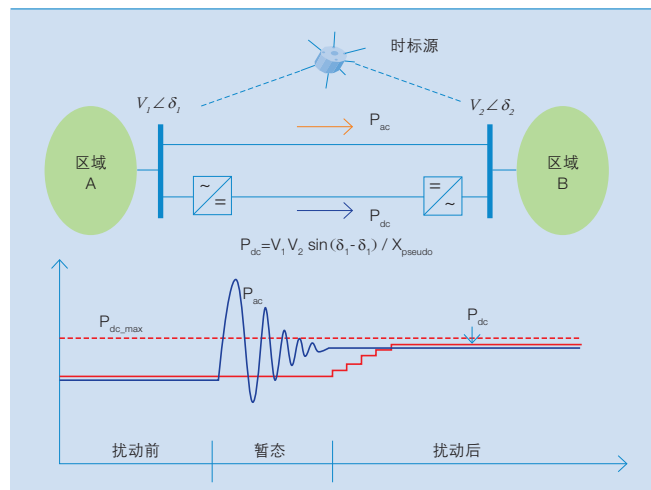
使用遥测, HVDC Light系统可以有效启动单项或多项控制功能,以提高输电能力和应对诸如功率振荡等问题。此种远程电网信息来自广域测量系统(WAMS)。WAMS是智能电网的测量平台,由相量测量单元组成,分散部署于系统中。相量数据汇集器收集GPS时间同步的电压和电流相量测量值,及频率和二进制信号,并进行调整。广域控制系统(WACS)利用这些广域测量信号,为电力系统设备提供辅助控制。WAMS/WACS的应用范围从监控(如状态估计和电压安全监测)到

广域控制,如功率振荡抑制。可以预见的是,把WAMS/WACS功能与HVDC Light系统的控制功能相结合,电网的性能可以得到进一步提高(见图12)。

模拟交流输电特性

某些情况下, HVDC Light可以模拟交流线路潮流对偶发事故的响应。理想的交流输电特性容许HVDC Light在扰动后自动增加电力传输到最大额定值或者自动减少电力传输,以缓解相邻交流线路上可能出现的过载(见图13)。嵌入电网的HVDC Light系统可作为准交流线路自行控制,而不需要系统运行人员经常性的调度决策。这种控制模式适用于不要求集中调度的情况。直流输电的功率设定值可在电网短期运行计划中根据所需的电力传输强度确定。

13 扰动后, HVDC Light模拟交流输电特性。这种模式有利于缓解相邻交流线路上可能出现的过载。



未来的智能输电网

可以预见的是,将来的输电网基础设施将朝着交直流混合电网结构的方向发展。特别是HVDC Light的使用和广域测量及控制系统将极大地改善电网的智能化运行。

潘久平

Reynaldo Nuqui

ABB 研究中心

美国北卡罗来纳州罗利

jiuping.pan@us.abb.com

reynaldo.nuqui@us.abb.com

Bertil Berggren

Stefan Thorburn

ABB 研究中心

瑞典维斯特拉斯

bertil.berggren@se.abb.com

stefan.thorburn@se.abb.com

Björn Jacobson

ABB 电力系统部

瑞典卢德维卡

bjorn.jacobson@se.abb.com

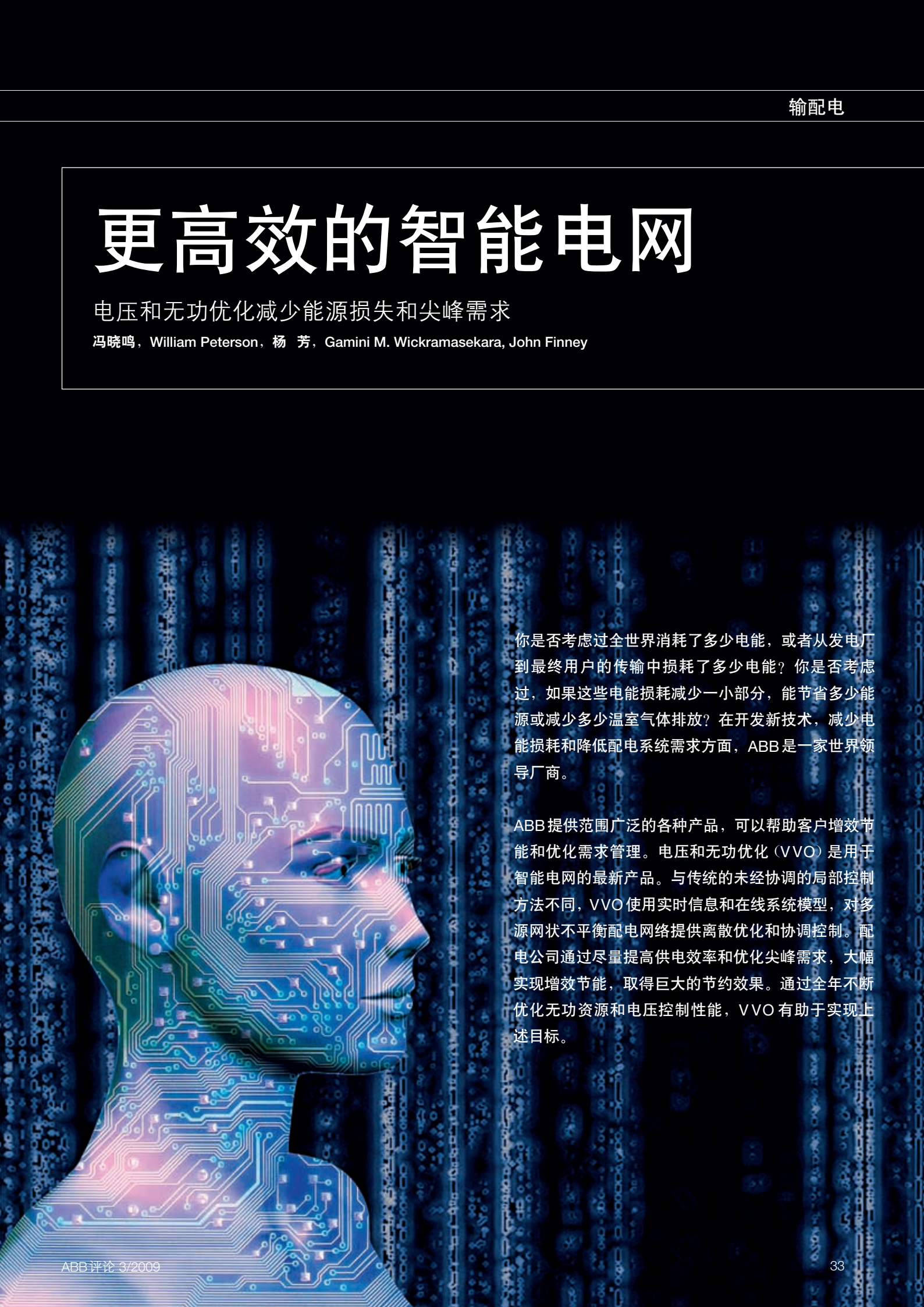
参考文献:

- [1] It's time to connect – Technical description of HVDC Light® technology, ABB Power Technologies AB 2008. (<http://www.abb.com/hvdc>).
- [2] Asplund, G. (2008, June). Electric Transmission System in Change, Key Notes, IEEE Power Electronics Specialists Conference, Rhodes, Greece,
- [3] Pan, J., Nuqui, R., Srivastava, K., Jonsson, T., Holmberg, P., Hafnert, Y. J. (2008, November). AC Grid with Embedded VSC-HVDC for Secure and Efficient Power Delivery, IEEE Energy 2030, Atlanta, US.
- [4] Johansson, S. G., Asplund, G., Jansson, E., Rudervall, R. (2004). Power System Stability Benefits with VSC DC-Transmission Systems, CIGRE Conference, Paris, France.

更高效的智能电网

电压和无功优化减少能源损失和尖峰需求

冯晓鸣, William Peterson, 杨 芳, Gamini M. Wickramasekara, John Finney



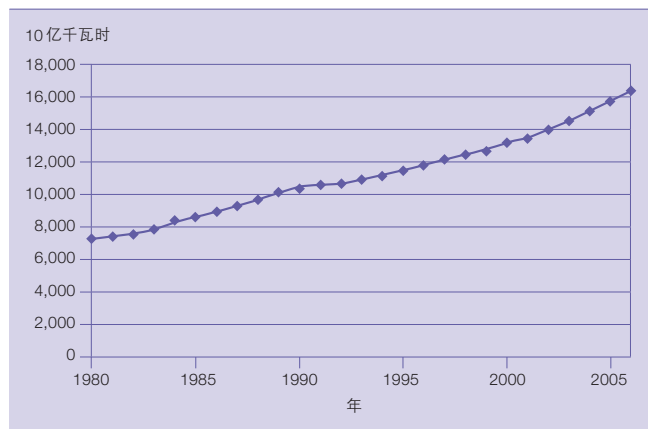
你是否考虑过全世界消耗了多少电能，或者从发电厂到最终用户的传输中损耗了多少电能？你是否考虑过，如果这些电能损耗减少一小部分，能节省多少能源或减少多少温室气体排放？在开发新技术，减少电能损耗和降低配电系统需求方面，ABB是一家世界领导厂商。

ABB提供范围广泛的各种产品，可以帮助客户增效节能和优化需求管理。电压和无功优化（VVO）是用于智能电网的最新产品。与传统的未经协调的局部控制方法不同，VVO使用实时信息和在线系统模型，对多源网状不平衡配电网络提供离散优化和协调控制。配电公司通过尽量提高供电效率和优化尖峰需求，大幅实现增效节能，取得巨大的节约效果。通过全年不断优化无功资源和电压控制性能，VVO有助于实现上述目标。

输配电

世界对电能需求巨大，每年耗电数万亿千瓦时，随着更多国家实现工业化，这一数字还会继续攀升。从1980至2006年，世界电力消耗每年增长3.1%¹⁾，预计到2030年，世界电力消耗将达333,000亿千瓦时²⁾(见图1)，几乎是2008年(167,900亿千瓦时)两倍[1]。

1 世界电力消耗(10亿千瓦时)



垫式变压器、低压配电线路及电表。电力公司配电系统拥有数百个变电站和成千上万个部件，统一由配电管理系统(DMS)进行管理。

配电系统中发生的损耗大多是电流通过导体时产生电阻损耗³⁾(见资料库1)。

对配电网中的任何导体而言，流经的电流可分为两部分：

有功电流和无功电流(见资料库2)。

无功功率补偿装置用于减少或消除电流中的无功成分，减少电流，从而降低能源损耗。根据系统中负荷类型及组合方式，馈线⁵⁾电压分布⁴⁾也能影响电流分配，因此也会影响功率损耗，但影响是间接的，且程度较小。

电压和无功控制装置

电压控制装置通常安装在变电站和

电能损耗

当前，发电厂生产的电能大约10%损失在输配电环节中。电能损耗中约40%发生在配电网中(见图2)。仅2006年，总损耗和配电损耗分别为16,380亿千瓦时和6,550亿千瓦时。因此，配电损耗仅减少10%，每年就可节电650亿千瓦时。这比750万瑞士人2008年总耗电量还多，相当于燃煤电厂排放3,900万吨CO₂[1]。

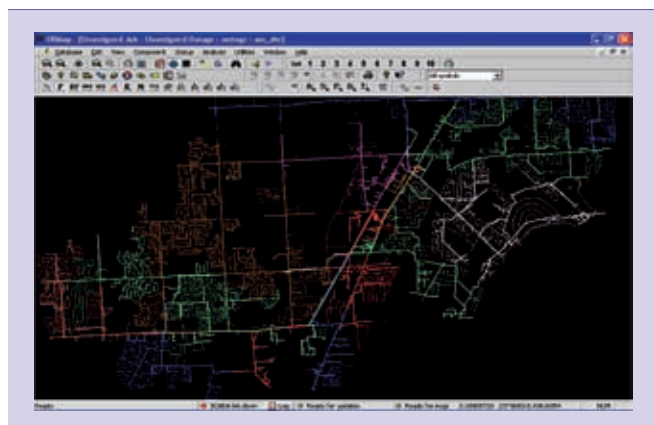
随着电力需求的增长，必须建设新电厂以满足最高尖峰负荷，并留出一定余量应对不可预见的事件。系统中的尖峰负荷通常持续的时间不到5%(每年仅几百小时)。就是说，

在尖峰负荷时段，才需要某些发电厂，相对而言，它们的潜能很少得到利用。通过主动管理配电系统的需求，以及需求响应和VVO，可以降低整个电网上的尖峰需求。这样可以省去配电、输电和发电系统方面的巨额开支。即使尖峰需求降低不多，也会带来巨大的经济效益。例如，2008年美国的尖峰负荷需求为790 GW。尖峰需求每降低1%，就可少建一个7,900 MW的发电厂(见图3)。

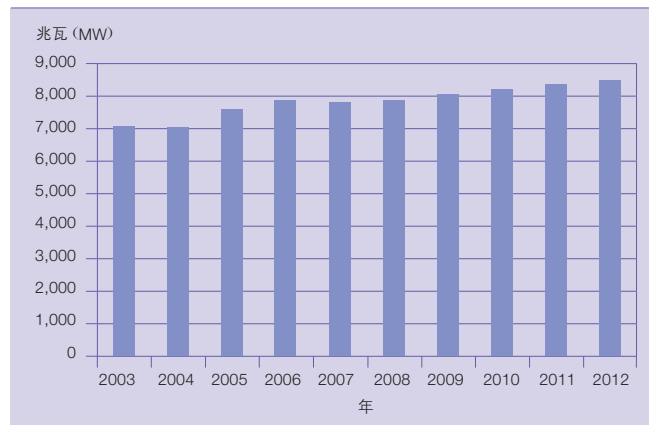
配电系统损耗

配电网将电力从变电站输送至消费者。配电网包括中压(50 kV以下)电力线、变电站变压器、杆架式或

2 配电网管理系统(DMS)中的配电系统概况



3 美国年度尖峰需求减少1%



脚注：

¹⁾ 美国能源信息管理局，2006年国际能源年报

²⁾ 美国能源信息管理局，1990~2030年世界净发电量

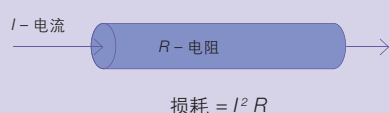
³⁾ 由于元件电阻的作用，电流通过元件时会产生电压降

馈线上。变电站变压器可配备抽头转换开关，根据馈线负载状况，调整变电站馈线电压。具有分压抽头转换开关的特殊变压器称之为稳压器，安装在馈线的各个位置上，在馈线的特定点位提供电压微调功能。

无功补偿装置，即电容器组，用于减少通过配电网的无功潮流。

资料库1 能源损耗

能源损耗由导体内的电阻造成，损耗与电阻和电流平方乘积成正比。因此，通过降低电阻或电流大小，或者既降低电阻，也降低电流大小，就可以减少损耗。导体电阻取决于制造导体所用材料的电阻率、截面面积和长度等，在现有配电网中，其中任何一项都不太容易改变。但消除配电网中无功电流，可以减少电流的大小。



电容器组可安装在变电站或者馈线上。

配电损耗仅减少 10 %，就可节电 650 亿千瓦时。

传统控制电压和无功优化 (VVO)

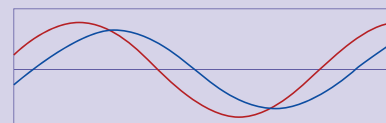
传统的电压和无功控制装置根据当地所获取的电压或电流测量值进行调节。在配备多种稳压和无功补偿装置的馈线上，每一装置独立控制，不考虑其它控制装置的作用。这种做法经常在局部区域内产生明显的控制作用，但在更广阔的层面上效果并不理想。

理想的情况是信息应该为所有的电压和无功控制装置共享。通过全面评估控制策略，使各项措施产生的结果能与最佳控制目标一致。变电站自动化系统或配电管理系统可以实现这一目标。这种方法普遍称之为集成化 VVO。过去几年，由于加速采用了变电站自动化 (SA) 和馈线自动化 (FA) 技术，以及广泛应用了先进的计量基础设施 (AMI)，

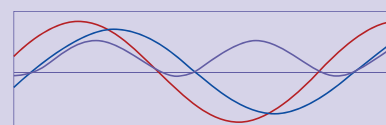
通过提供必要的传感器和执行器，以及现场与配电系统控制中心可靠的双向通信功能，从而为实现集中控制方法奠定了基础。直到最近，成功开发一项关键技术，可以充分利用先进的传感、通信和远程执行功能，不断优化电压和无功功率。在这之前，不能建立大型复杂供电系统模型是阻碍 VVO 技术发展的

资料库2 有功和无功功率

一般而言，交流电路上的电压和电流波形是正弦波。在“理想线路”中二者完全同步。但现实中，二者之间在时间上经常存在滞后。这种时间滞后由附加设备（以及线路本身）的电容和电感性质造成。

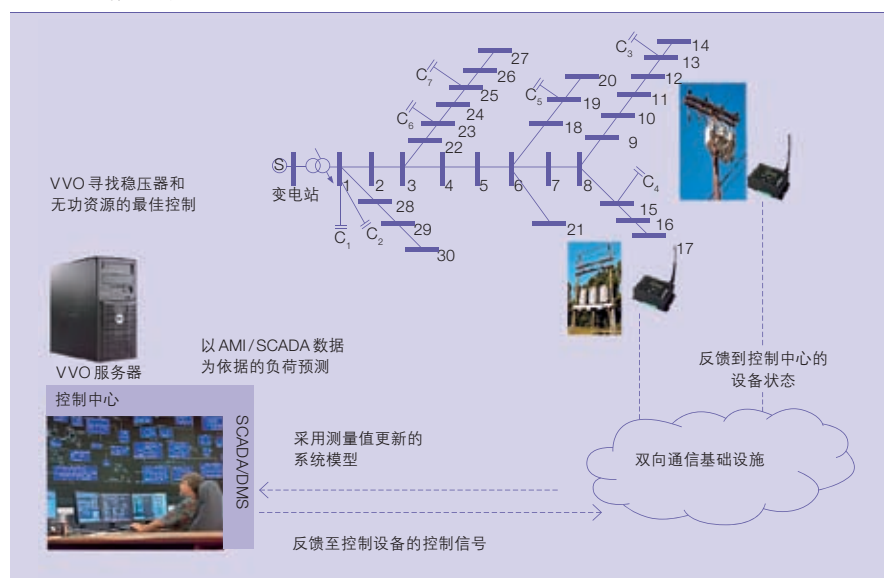


任何时间的瞬间功率是瞬间电流和电压的乘积。该功率平均值小于没有时间滞后的功率值（对相同的电压和电流大小而言）。事实上，电力甚至会短暂地朝“错误”方向流动。



曲线间的时间滞后越大，输送的电能就越少。因此，这种滞后（表示为相位角）应该尽量减少。单位时间输送的平均电能称作有效功率（以 W 为测量单位），无功功率（以 VAr 为测量单位）是对线路上流动，但不能有效利用的另一种额外功率的度量。

4 VVO 工作示意图



脚注：

⁴⁾ 电压分布指整个电网上不同位置或节点上的电压大小。

⁵⁾ 用于将电力从变电站分配给消费者或更小变电站的任何中压线路。

输配电

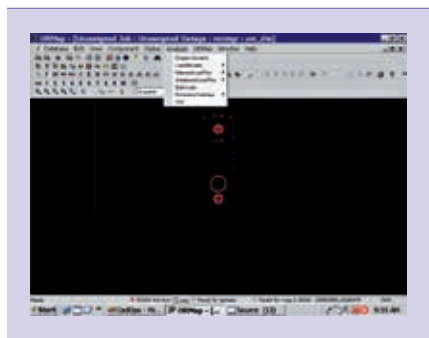
原因，并且其解决方案在质量、稳健性和速度方面的性能也不令人满意。

VVO 如何工作？

VVO 是一种先进的应用软件，可在配电系统或变电站自动化系统的控制中心定期进行，或应操作人员需求而运行。结合双向通信基础设施和电容器组和调压变压器的遥控功能，VVO 利用实时信息优化配电系统的供电效率（见图 4）。

VVO 可尽量减少网状、多相、多源、不平衡配电系统⁷⁾中的功率损耗、需求和电压/电流超限⁶⁾。VVO 可用的控制变量是切换电容器和调压变压器抽头转换开关的控制设定值。

5 VVO 原型的屏幕截图



6 VVO 与先前方法的对比

先前方法	ABB 的 VVO 功能
等价单相的模型	多相位、不平衡模型
平衡负荷	不平衡负荷
单一电源	多电源
放射状系统	网状系统
联动控制	非联动控制
理论系统规模	真实供电系统规模
离线性能	在线性能
直接推断法	理论性优化

VVO 的主要优点

对于配电系统运营商而言，VVO 的主要优点如下：

- 提高了能源效率，降低了温室气体排放。
- 减少尖峰需求以及降低供电公司的尖峰需求成本。

VVO 的一般问题定义

VVO 要解决的问题可表现为如下形式：

受制于各种工程约束条件，VVO 必须实现能源损耗+MW 负荷+电压超限+电流超限加权总和的最小化：

- 电力潮流方程（多相、多源、不平衡、网状系统）
- 电压约束（相位与零线或相位与相位）
- 电流约束（电缆、架空导线、变压器、零线、接地电阻）
- 分压抽头转换约束（运行范围）
- 并联电容器变换约束（运行范围）

优化控制变量包括：

- 可开关并联设备（联动或非联动⁸⁾）
- 变压器/稳压器的可控分压抽头（联动或非联动）
- 分布式发电

技术难题

实质上，VVO 是一个综合性优化问题，具有如下特点：

- 整数决策（控制）变量——电容器组开关状态和调节变压器分压抽头位置都是整数变量。
- 非线性目标是决策变量的隐函数——能源损耗或尖峰负荷是控制变量的隐函数。
- 高阶非线性约束——在多相系统模型中有数以千计的电力潮流方程。
- 非凸目标和解集。

- 高阶搜索空间——非联动控制使控制变量数达到电容器组开关数和调节变压器数的二倍或三倍。

解决过优化问题的任何人都会告诉你，混合整数非线性、非凸（MINLP-NC）问题是最难解决的问题（参阅《ABB 评论》2009 年第一期第 54 页《真正的最好》）。

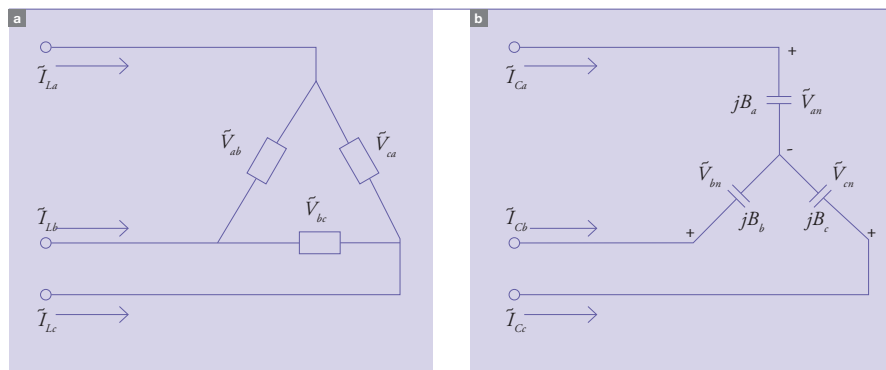
VVO 提高能源效率，减少温室气体排放；降低尖峰需求，从而降低供电公司的尖峰需求成本。

开发解决大型问题的有效优化算法是主要难题。由于评估一个特定控制解决方案的电损与需求（一次函数评估）需要一定的计算量（即 CPU 时间），所以在寻找最佳解决方案时，对于能够达到同一目标，所需函数评估次数较少的算法要比需要函数评估次数较多的算法效率高。使用 VVO 时，一次函数评估涉及到解一组非线性方程、不平衡潮流、数千个状态变量。VVO 问题的非线性、非凸综合性质加上高阶性（大量状态变量），因而使得 VVO 成为行业内的长期难点。过去十年，许多研究机构开始重点尝试元启发式（meta-heuristic）算法（如遗传算法、模拟退火、粒子群优化等），以避免建模复杂性。在解决小规模问题以及不需要在线性能的离线应用方面，元启发式算法具有有限的学术价值。

下一代 ABB VVO

2008 年，ABB 开发出新一代 VVO，能够以在线应用速度优化超大型

7 三角形连接负荷 a 和星形连接电容器组 b



复杂配电网。这是一种创新性解决方法，可建立配电系统的设备系统和连接的详细精确模型。它采用先进的混合整数优化算法，快速从数百万，甚至数亿个运行可能性中识别最佳电压和无功运行策略。

新一代VVO原型已经开发出来，可直接与ABB的DMS集成。在实验室的实际供电系统的配电网模型试验中效果非常好。控制优化方案的质量和速度稳健性都能满足或超过在线应用的设计标准（见图5）。

ABB 2008年开发出新一代VVO，能够以在线应用速度优化超大型复杂配电网。

试验系统中，每个电路有1,600至7,800节点和1,600至8,100支路。优化降低了损耗，损耗降幅为2.5%至67%⁹⁾，需求降低幅为1.4%至5.8%¹⁰⁾。

下列表格扼要说明ABB的VVO技术与先前其他方法的主要区别（见图6）。

为准确建立配电网运行模型，需要使用详细的网络模型。基于三相的

模型¹¹⁾可表现出每个网络元件。负荷或电容器组采用三角（见图7a）或星形连接（见图7b）。

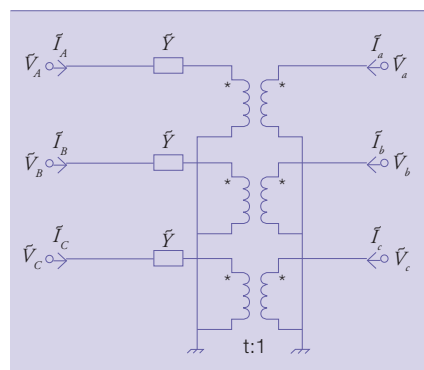
变压器可采用各种三角/星形连接，超前或滞后的二次侧接线，有或无接地电阻，具有初级或次级调节功能（见图8）。

电压和无功控制可为联动或非联动。这种方法可适用于放射状网络或网状网络，配备一个电源或多个电源。对每一相均实施电压控制，采用相与地或相与相之间的电压，具体视负荷连接类型而定。

逐步发展的智能技术

随着对先进传感器网络、智能计量基础设施以及遥控功能的加速采用，

8 星形连接的变压器模型



对类似VVO那样可优化配电系统运行的智能应用软件的需要，也在不断增长。新一代VVO技术的开发展示了ABB服务客户的智能电网技术实力。

冯晓鸣

杨芳

ABB研究中心

美国北卡罗来纳州罗利

xiaoming.feng@us.abb.com

fang.yang@us.abb.com

William Peterson

Gamini Wickramasekara

John Finney

ABB电力系统业务

美国北卡罗来纳州罗利

william.peterson@us.abb.com

gamini.m.wickramasekara@us.abb.com

john.d.finney@us.abb.com

脚注：

⁹⁾ 电压/电流超限指超过正常运行范围的不良偏移，例如电流超过某类导体类型的最大安全极限，或者电压超过对消费者不安全的极限，或者达不到最终用户正常运行所需的最低限度。

⁷⁾ 配电系统模型具备下列特点：网状网络（环形、在几个节点之间配备多条路径）、多相（清晰建立A、B、C各相的模型，而不是建成一个单相的模型）、多源（负荷可从多个电源获取电力供应）、不平衡（非对称结构，如单相馈线，和/或非对称负载，即每相上负载不相等）。

⁸⁾ 联动控制是指多相统一操作，非联动控制是指每相独立操作。

⁹⁾ 损耗降低数量取决于系统可控电压和无功资源、系统负载状况以及初始控制策略。

¹⁰⁾ 需求减少的数量取决于影响损耗减少的因素以及负荷模型。对100%恒定功率负荷而言，需求减少只能通过损耗降低获得。

¹¹⁾ 精确元件模型包括全部现有相的信息。

参考文献：

[1] CIA Online Factbook. Retrieved June 2009 from <http://www.cia.gov/library/publication/the-world-factbook/>

输配电

获取信息 而非数据

智能电网的实时自动化配电事件检测和通报

Mirrasoul J. Mousavi, Vaibhav D Donde, James Stoupis, John J. McGowan, 唐 乐

知识就是力量——古老的格言给我们以启示。当然，要能够指挥或控制任何系统，准确而及时的认识目前状态至关重要。要控制一个复杂系统需要大量数据，电网控制室显示的众多测量数据恰好说明这个事实。

然而，对于不断增加的需求和期望值，如何改进这一控制系统呢？

通常认为，需要更多的数据，即应该有更多的测量设备收集更多的测量值（包括配电馈线和通向用户的“线路末端”线缆），并传送到控制室。因此，为筹划智能电网以保障未来电力供应所投入的很多努力最终都集中于智能测量设备。

然而，这只是问题的一个方面。没有适当的策略处理和评估这些数据，

就会导致“数据海啸”。控制室将会淹没于各种测量数值，区分相关与无关数据就会非常困难。答案是获取信息，而不是数据。优良的信息就是把正确信息在合适的时间传送到正确的地方。只有实现这一点，知识才能真正确保电力可靠、安全的传送。

电力系统的保护、控制和监测需要作出众多的决策。这些决策的周期长短不一，从为保护系统而瞬间跳开线路或馈线，到监测出早期故障的数月后发出报警等。系统操作人员通常是最终的人为决策者，他们仍然受益于来自电力系统各种形式的信息。在自动化技术开始渗透的领域里，如变电站自动化系统，他们参与直接决策的情况逐渐减少。全行业都朝着智能电网的方向发展，这要求自动化覆盖到配电馈线及最终用户的线路末端。最终目标是使电力系统的保护、控制和监测能闭环运行，从而实现自愈电网，而自愈正是人们不懈追求的智能电网特征之一。本文将探讨实现这一宏伟目标的相关技术，研究如何为配电馈线上的事件和异常情况提供实时和自动的响应。

智能电网

智能电网需要三个基本要素：数据、信息/智能和通信。数据要素由传感器和传感器系统提供，包括馈线和开关控制器上的智能电子设备（IEDs）。智能要素由数字处理器提供，数字处理器根据指令，应用算法对数据进行运算。最后，通信要素将智能要素的结果以正确格式，在正确的时间，传送给正确的人员或设备。事实上，这三种要素正是当前控制和自动化系统的组成模块。但它们都需要极大地加强功能、性能和覆盖范围（直到线路末端并包括最终用户）。更为重要的是，它们都需要将智能引入每个系统

和设备，从本地的人机界面到宽带IP或光纤网络（见图1）。

智能电网需要三个基本要素：数据、信息/智能和通信。

自动化技术和IED在输配电系统中的拓展，为获取更多数据铺平了道路，从而也改善了决策过程。但缺乏应用工具和自动数据分析器（即智能算法）阻碍了数据的有效利用。

智能电网的前景不能仅依赖持续不断的电力系统数字化或通信基础设施扩容。任何智能系统的核心都必须要有个“大脑”，处理所收到的数据。仅添加传感和测量点并不能解决问题，反而造成数据泛滥。

这就需要提取出藏身于原始测量值中的信息。基于这种信息的决策无须局限在一个集中位置或仅由人力做出。要做出决策，需要在整个系统中收集优质信息。这意味着尽量使任务实现自动化，以腾出人力从事无法自动化和不应自动化的任务。操作人员过度承受不必要的数据负担，反而会浪费多数相关信息，结果无法作出最佳决策。

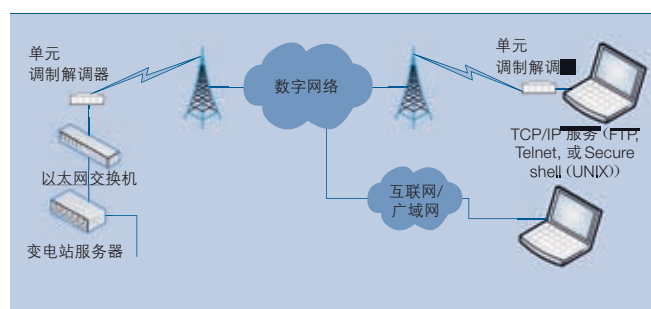
然而，发展智能电网意味着需要更多的传感器和测量点，使我们观察到直至线路末端的每个元件（见图2）。因此必须收集和处理越来越多的数据。目前电力公司已充满着现有系统收集的大量数据。要增加新数据点（见图3）而又不造成“数据海啸”，就必须优化数据—信息转换过程中的每个步骤。这就是说，能在较低层次上进行转换的不必到较高层次上转换。系统操作人员希望避免人工处理这些额外数据。

对于配电运行来说，需要更加简单和优化的运行和维护，这是以安装在电网上的各种IED上收集到的数据为基础。人们还希望能自动进行任务分析，并把原始数据自动转换成指导性信息，据此电力公司的调度人员及职员可做出决策。过去，来自IED的记录时常需要培训专家进行手工分析。但数据的手工分析工作量太大，加上电力公司人员老化，因此通过计算机执行任务，而少用或根本不用人力的重要性尤为凸显。更为重要的是，

1 传感器和通信必须延伸至馈电线路，获取有关系统状态的信息。



2 通信基础设施使智能电网成为可能。



输配电

实时提供这种信息可以改善可靠性，减少客户停电的时间，为电力公司创造巨大的附加值。

智能层级

智能电网需要解决方案和分析工具，以保证电力公司能接收到正确的信息，并在合适的时间分配给合适的人员。由于电力公司面临预算和人员缩减的问题，因此，迫切需要将自动事件分析功能集成到电力系统。

“把数据转换成指导性信息”是总主题。这个过程可在电力系统的多个层次上进行，参见图 4。

- 0 级位于馈线级，数据-信息的转换过程通常通过馈线 IED（如开关控制器和独立监视器）嵌入智能实现。
- 1 级位于变电站单元级，包括应用于每个独立变电站 IED 上的应用程序和算法。
- 2 级位于变电站系统级，包括应用程序和算法，用于通过变电站计算机或主工作站从多个 IED 提取信息。
- 3 级位于企业级，包括数据仓库/历史数据，配备控制室应用程序和算法，可用于电力公司集合级。

3 改造罗氏线圈传感器



由于当前的保护和监测措施局限于主线路事件，绝大多数馈线支路事件没有向运行小组报告。

当然，还可以增加一个 4 级，汇集和处理来自多家电力公司的数据或信息，实现地区性或全国性的更大范围的智能。

随着数据/信息从现场设备进入图 4 右侧，原始数据与信息的比例减少。换句话说，通过每个步骤上的嵌入式智能，获取越来越多的信息，以避免在下一更高层级出现数据剧增。

配电问题

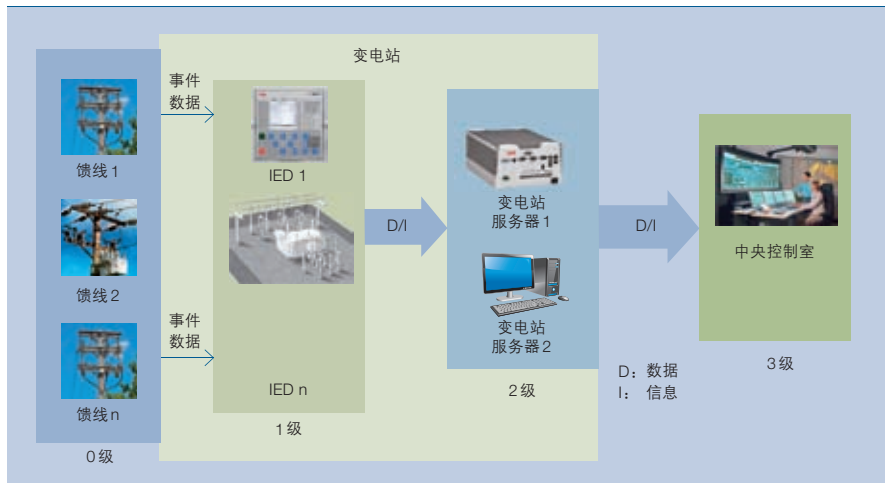
由于历史上采用自动化技术滞后，配电运行需要自动化嵌入智能的问题比电网上其它任何地方都突出。配电企业比任何时候都更加希望少花钱，多办事，系统自动化是实现这个目标的有效途径。通过保护继电器和 IED，现有结构和系统提供了大量来自关键元件的数据。电力公司在向传统变电站和馈线自动化

的发展过程中产生了大量数据，但相应的提取信息能力却没有获得应有的重视。具体而言，数字故障录波、目标纪录、趋势、负荷分布、电能质量、事件顺序和事件数据（如支线故障、设备故障）等分析数据没有得到必要的重视，特别是因为变电站自动化被认为是保护工程师的业务领域。另外，由于当前的保护和监测措施局限于主线路事件，绝大多数馈线支路事件没有向运行小组报告。在许多情况下，电力公司必须依靠用户呼叫才能确定和找到馈线干路和支路上的故障区域。要分析这些区域里馈线事件数据，需要使用实用的工具。有的电力公司已经从传统的变电站自动化发展到收集更加综合的运行、设备故障和事件数据。随着这些附加数据的出现，需要专用的分析工具以实现智能电网的自动化。

ABB 解决方案

配电馈线，无论是架空还是地下，都会出现故障、早期异常、暂态事件和暂态过程。对各种类型的事件（有的是灾难性的）进行客观分析和比对，可让电力公司主动解决馈线

4 智能电网数据处理的智能层级



事件，而不仅仅是被动地做出反应。为达到目的，合理的初始步骤是强化 IED 和变电站服务器，包括最重要的事件分析功能。该解决方案可以实现事件数据转换成指导性信息，利用这些信息，系统运行人员和调度人员可主动采取措施。

从馈线级实时智能中获益的方面包括停电检测、确认、通报和人员派遣。

主动解决馈线问题，尽快对停电和馈线故障做出响应，和预防性维护的发展趋势，都为推广智能电网做出巨大贡献。目前的资产维护计划以预先拟定计划为基础，不考虑馈线事件等具体运行状况。通过上述的附加分析，智能电网的运行和维护部门将能做出快速响应，派遣正确人员，评估风险，主动解决馈线问题。相应地，计划部门也可获得更好的信息，开展馈线升级和改造项目。

图 4 表示智能事件检测和分析算法可以位于监控体系的不同层次。馈线 IED 包含各种算法，利用本地数据可检测电力系统的异常状态，确定异常情况（如故障）。依据它们的本地分析，可采取适当措施（如跳开相应的断路器或开关）或者将故障/事件信息传送给下一更高层级（可以是某个变电站的计算机）（见图 5）。这从根本上减少了传送到变电站或控制中心 DMS 的数据量，并且有利于减少所需的通信带宽。

另一方法是将故障/事件检测功能置于变电站计算机。其优点是更好

地观测馈线级别的系统行为（采用常规保护和控制 IED 无法获得的信息）。这种信息有助于采取措施更精确地解决问题。

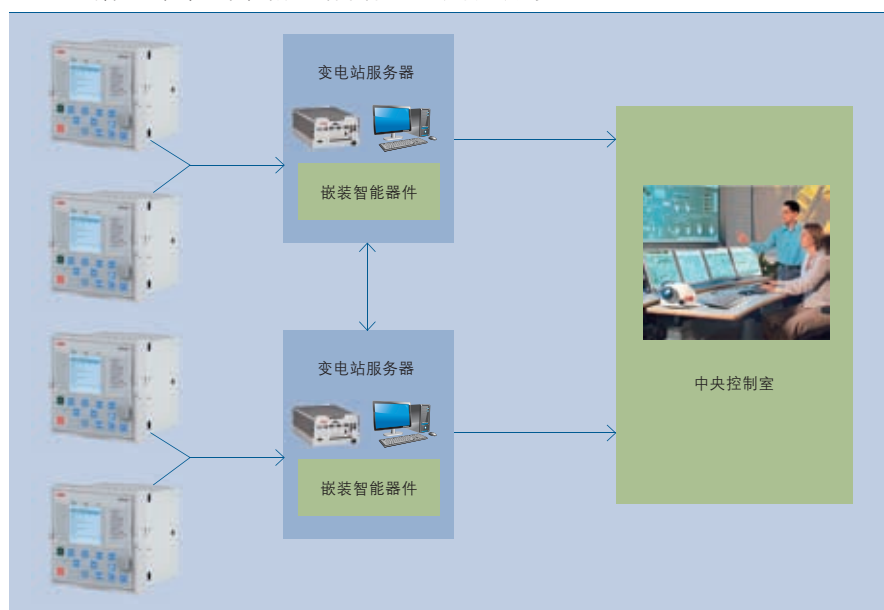
按照这个思路，事件检测功能可放在 DMS 级别。这些解决方案各有自己的优点和不足。用户需要仔细评估这些方案，从所选择的设计中

获取最大效益。所选解决方案可根据复杂程度、可扩展性、成本、通信方案和用户偏好进行调整。

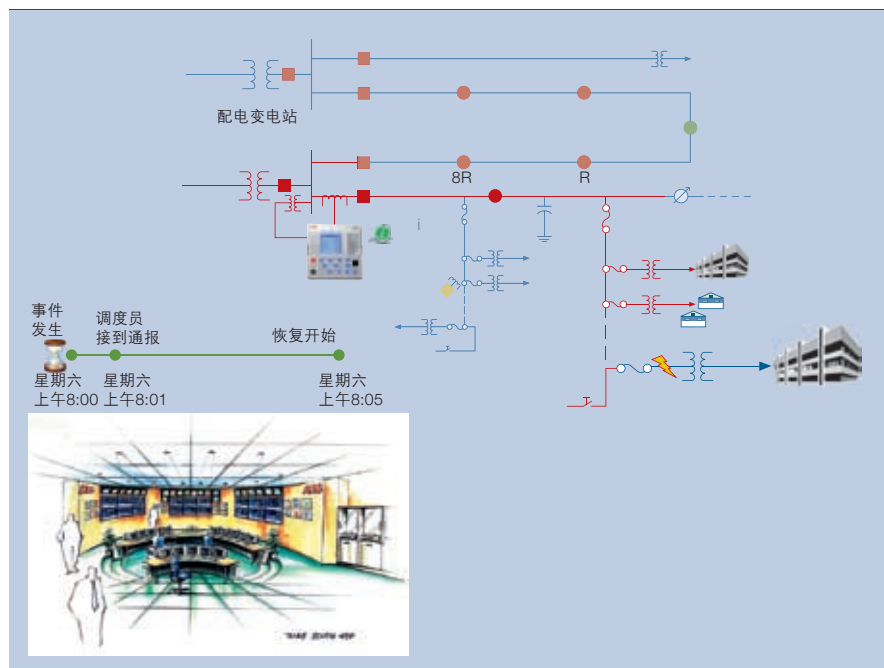
优越性

从馈线级实时智能可获益的方面包括停电检测、确认、通报和人员派遣。配电馈线上的故障以及因此引发的停电造成收入损失，以及

5 嵌入式智能可在本地采取措施或者报告给下一更高级别的层级。



6 通过实时事件检测和通报可以减少停电时间。



输配电

对客户满意度和可靠性带来负面影响，这类事件严重影响客户的总停电时间，并最终影响电力公司的绩效。例如，某些级别的馈线故障导致变电站断路器无法运行，因此，不会生成 SCADA（监控和数据采集系统）事件报告。于是，电力公司只能依靠客户呼叫，向其通报影响客户楼宇的持续停电事故。如果采用了合适的技术（见图 6），这类被动响应情况就不会发生。

这项技术有助于检测可能发展成全面故障的那些早期故障。

实时及自动化事件分析/检测和通报减少了对停电做出反应所需的时间，在客户呼叫充斥呼叫中心之前，可预先通报持续的停电故障事件，从而保证电力公司在收到停电报告之前，能提前解决问题，或者完全避免停电事故发生，这种智能电网功能可减少客户的总停电时间，减轻对电力公司绩效和生产率的不利影响。另外，可以改进电力公司对停电呼叫的预案，提供有效工具确认事故性质。特别是，这项技术可应用于地下馈线电缆，能向电力公司通报馈线上被保护设备（一般为熔断器）清除的电缆故障。更为重要的是，它有助于检测可能发展成全面故障的那些早期故障，从而降低更换电缆的年度维护支出。这是通过检测瞬时性地下故障频发这一直接证据实现的。

从经济角度考虑，将这种智能与传统智能置于同一地方，如变电站或智能开关，而不特别放置在馈线上，颇具优越性。能够在变电站了解到直至“线路末端”的事件，提供了成本效益非常高的监测方案。

馈线事件案例

地下电缆的某些早期故障源于水汽侵入接头处造成的间歇性自熄弧 [1]。由于水汽压力的作用，这些故障可以自行迅速消除，因而并不会启动保护设备，所以，这些事件被称为自消除事件。由于地下电缆通常是电力公司的一项重大资产，所以，为实现故障的主动管理和预防性维护，监测和确认这些故障的监测和确认十分关键。采用嵌入式智能来持续监测和进行自动数据分析，对于实现这一智能电网功能至关重要。

图 7 所示为发生于电力公司馈线上的一个早期故障案例。故障峰值电流为 1,287 A，持续时间为 0.22 周波，没有造成任何停电事故或熔断器动作。所以，停电管理数据没有相应纪录。随后的监测记录下另外 140 次类似的早期故障，直至九个月后发生灾难性故障，造成 65 A 熔断器断开。这一最终事故的电流和电压情况如图 8 所示，图中显示出峰值故障电流约为 5,000 A。在第一次事故与灾难性故障之间，发生了多起类似故障，电流峰值在 1,000 A 与 3,000 A 之间，正负两个极性都有。

图 7 早期故障案例（电流与时间），这是一个可自消除故障，未造成停电事故。

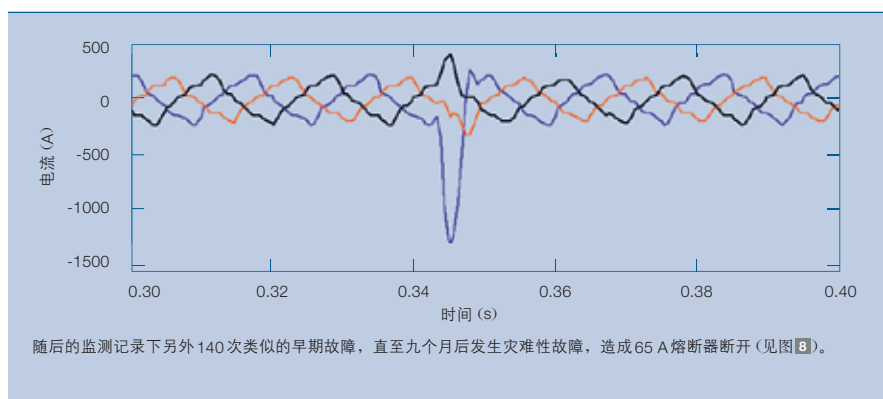
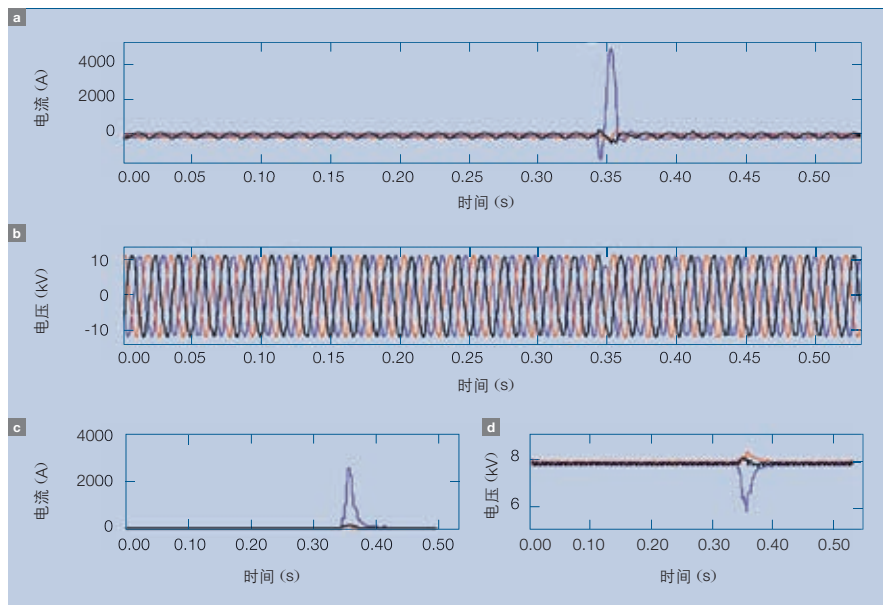


图 8 图 7 之后的灾难性故障的情况，显示了三相电流 a 和电压 b，电流相量分析 c 和电压相量分析 d。



这些事件都没有在停电数据中留下任何痕迹，也没有造成客户停电。

随后进行的趋势分析和量化过程揭示出故障电流峰值向最终故障的渐进性发展（见图 9）。在监测阶段结束时，电流峰值几乎增至初始数值的 3 倍。这种观察表明，反复发生的早期故障每出现一次，电缆接头的整体性能就进一步降低。

这种实时馈线智能可提高现有传感器设施的价值，且易于更新。它发掘了那些由数字保护系统记录

下来，但没有被利用的变电站数据的潜力。通过这种方式，可提供“始终在线”的监测能力。另外它还表明，对于那些反复发生的早期故障，并逐渐发展成重大故障的馈线特殊故障，收集相关特征并进行预测也是可行的。

同时，也可分析其他类型的馈线事件，其中永久性地下电缆故障最值得注意。

图 10 所示为发生在馈线支路上的电缆故障，该故障由 40 A 熔断器清除。

图中显示了电流（见图 10a）和电压（见图 10b）的原始数据波形以及相量幅值图（见图 10c 10d）。电流图显示了短于一周波的电流尖峰。使用嵌入式智能和自动分析，检测到这一事件，并得到电力公司数据确认。

此外，此种处理还可检测到相邻馈电线上的故障。图 11 所示为与被监测馈线相邻的馈线地下电缆发生的故障。该图显示了电压下降及其对电流波形的影响。

图 9 导致图 8 中所示故障的故障电流趋势

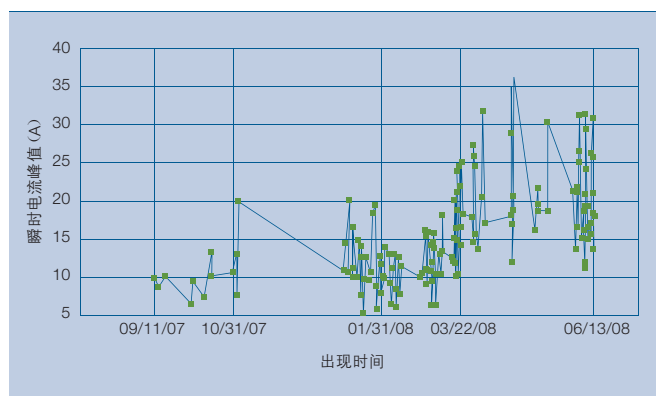
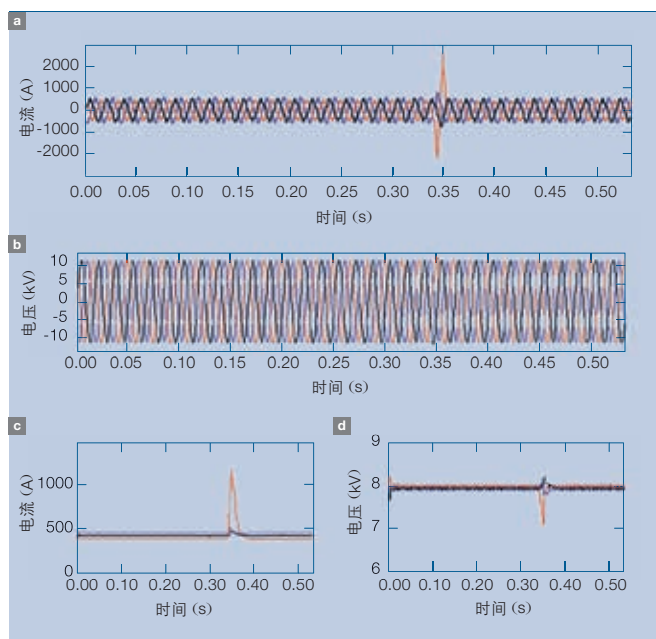
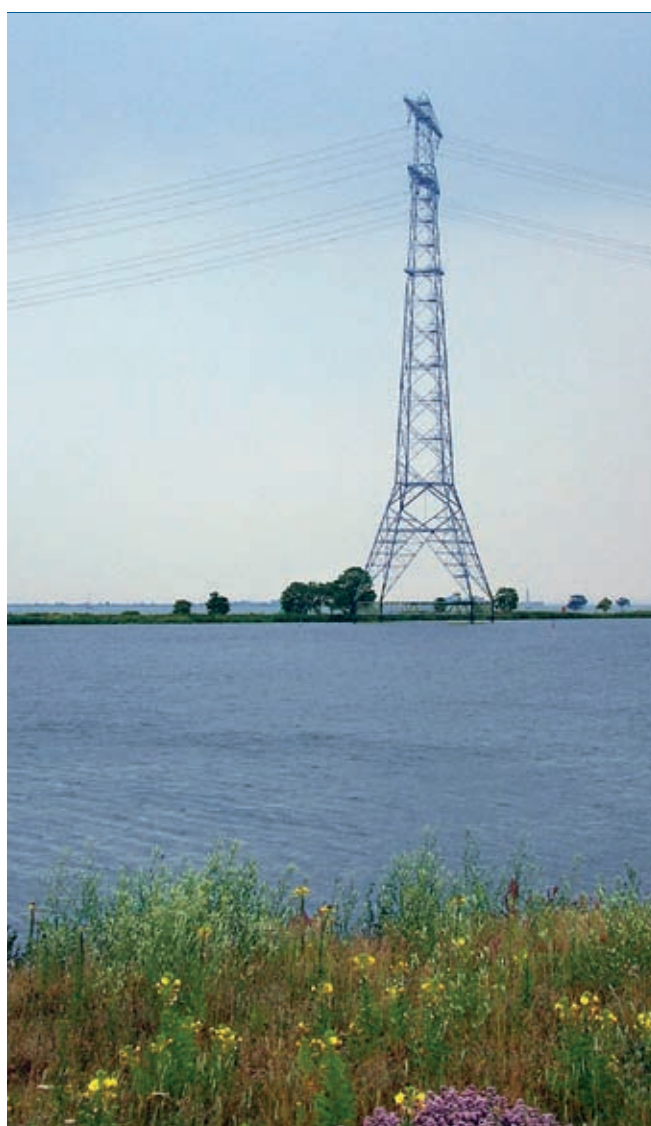


图 10 地下电缆故障的波形图 a-b 和相量幅值图 c-d

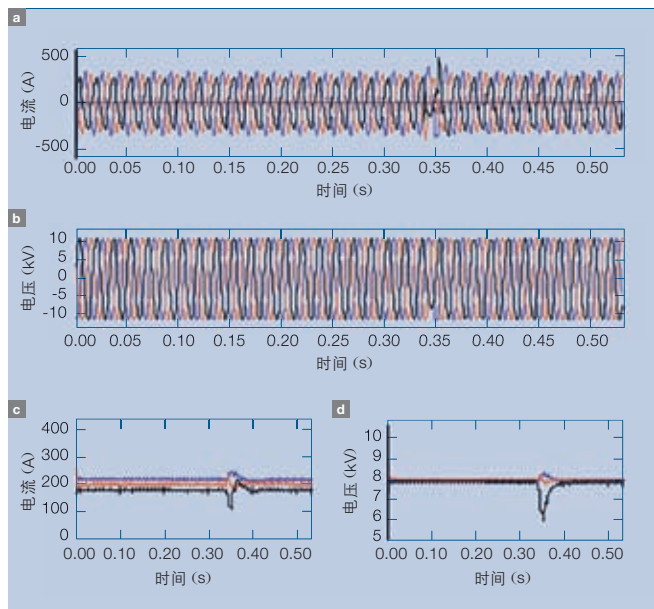


输电系统事件通过输电网进行传播，也会对配电网造成影响。

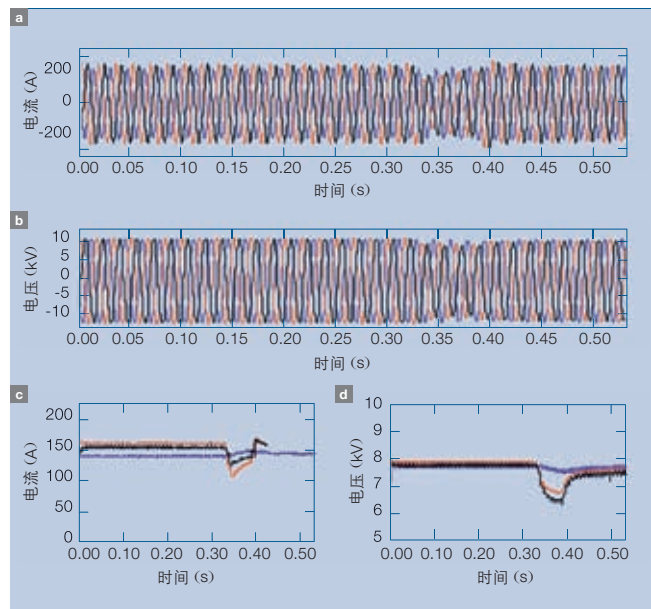


输配电

11 相邻馈线地下电缆故障的电流 **a** 和电压 **b** 波形以及相应电流 **c** 和电压 **d** 相量幅值图



12 上游输电系统故障的电流 **a** 和电压 **b** 波形以及相应的电流 **c** 和电压 **d** 相量幅值图



最后，还可在配电级观测和分析某些输电系统和发电系统的事件。发生在上游输电系统的一个故障如图12所示。该图显示了发生于多个相别上的电流和电压下降。

变化。需要各种通信手段，强化各个智能层级的保护、控制和自动化，以便处理电力公司的数据，并智能地，自信地，及时地采取相应措施。

至关重要。将这些功能整合到配电网的运行中，将会有效地帮助电网比以往更加高效、可靠、坚强和智能。

通向智能电网之路

通向智能电网的道路就是实现百年历史电网的现代化，从而满足或超过数字社会需求，并促进客户的参与。通过从最终用户到传统电厂及可再生电厂的各个部分提供或强化数据采集、管理、输送、解析以及自动化系统，可部分实现智能电网。这一现代化过程的关键领域是配电网及末端线路，与其原有设计和目的相比，这部分正经历根本

配电网实时自动化事件检测以及近实时的通报是实现保护、控制和监测闭环运行这一最终目标的前提。实现这样一种未来愿景依赖于获取有用原始数据，配置毫无瑕疵的智能系统，通过可靠的通信基础设施，为适当的控制决策提供指导性信息。尽管部署于电网中的大量传感器可提供更多的数据，但要真正实现二十一世纪的电网目标，及时和高效地提取核心信息内容

Mirrasoul J. Mousavi

Vaibhav D Donde

James Stoupis

唐 乐

ABB 研究中心

美国北卡罗来纳州罗利

mirrasoul.j.mousavi@us.abb.com

vaibhav.d.donde@us.abb.com

james.stoupis@us.abb.com

le.tang@us.abb.com

John J. McGowan

ABB 配电自动化业务

美国宾夕法尼亚州艾伦镇

john.j.mcgowan@us.abb.com

参考文献：

[1] Moghe, R. M., Mousavi, J., Stoupis, J., McGowan, J. (2009, March 15~18). "Field investigation and analysis of incipient faults leading to a catastrophic failure in an underground distribution feeder," in Proc. of Power Systems Conference and Exposition (PSCE), Seattle, Washington.

致谢：

本文作者衷心感谢 Dennis Stephens 领导下的 Xcel 能源公司电力事业创新小组，以及运行和工程设计人员对本研发项目的不断支持。并要感谢 ABB 的 Mickey Foster 在本项目进行过程中所做的无数努力。

智能电网管理

管理未来配电网的创新型运行中心

Tim Taylor, Marina Ohrn



传统电网由运行中心精心管理，以确保在需求出现峰值和低谷时依然保持充足的电力供应。每个区域的电网都有一个运行中心，执行和协调各种功能，包括系统监测、控制、人员管理和调度。它通常被视为电力系统的“大脑”，负责控制电网运行。

随着配电系统逐渐演变成智能配电网，控制这些电网的运行中心也在发生变化，承担起管理电网的新任务。在这些控制中心运行的独立IT系统经过无缝通信，可提供集成化的监视和管理系统。更加先进的应用程序和分析软件提供更为复杂的分析和自动化运行。运行中心的控制系统不仅使电网更加智能化，而且还可以向负责运行、维修和计划的决策人员提供支持。尽管挑战日益严峻，这种集成化运行中心有助于配电单位实现他们的目标。

输配电

过去，用于配电网的传统监视和控制技术含量相对较低，常常用墙板显示系统状态。上面贴满了各种便条、按钉和临时变更通知，以此方式监视既困难又不灵活。配电线路的纸质地图经常以手工方式添加注解，用来指导系统的维护工作，但却存在过期的风险。纸面开关指令用于计划、执行和跟踪系统的开关情况。停电呼叫电话由运行人员接听，但向客户提供的相关停电信息非常少。停电纸质标签常常用来跟踪客户的停电情况。与现场人员的通信联系通过无线电进行。这些人员必须将他们的位置提供给运行中心，开关动作的通信联系、标签的布置以及其他操作都要口头传递。

这并不表示配电运行长期停滞不前。随着技术发展和业务需求发生改变，许多配电运行中心也发生了

变化。许多监控和数据采集系统（SCADA）已经从输电系统延伸到监控中压（MV）馈线断路器。某些情况下，SCADA 还可进一步延伸，从中压馈线断路器，一直扩展到诸如重合开关、开关和电容器开关等设备。

可持续的环境和限制碳排放的措施使人们对发展智能电网更感兴趣。

以计算机为基础，利用连接模型和图形化用户界面的现代停电管理系统（OMSs）已经变得更为普遍。OMS 一般包括诸如故障呼叫处理、停电分析及预测、人员管理及可靠性报告等功能。在有些配电公司，一套 OMS 可同时用于数百家用户。它综合了有关客户、系统状态和资源（如人员）等信息。

状态

尽管取得了进步，但仍需解决一些基本问题。表格中提供了一些案例，探讨了配电单位运行过程中的独立（未整合）IT 系统、不完整的实时系统状态以及缺乏先进的系统应用程序所造成的结果（见图 1）。

一个变化的案例

过去几年，得益于外界的推动，智能电网技术的发展和推广应用速度加快了，这些外力包括社会和政府、以及配电单位的业务环境和技术。

在许多国家，立法和监管措施一直以电网的现代化为目标。可持续的环境和限制碳排放的措施使人们对发展智能电网更感兴趣。在基础设施和燃料费用方面，新增发电和输电成本不断增加，成为影响技术发展的因素。此外，还有一些推动开发和采用智能电网技术的力量，如公众的关注，他们希望使用更多的可再生能源，缓解气候变化；另外，电力公司和政府号召大家努力改善分布式发电和需求响应。不过，从商业观点出发，配电单位希望智能电网能帮助他们维持或改善可靠性，增加资产利用率，应对老化的基础设施并降低由于工作人员退休导致的知识损失的影响。

在许多国家，立法和监管措施一直以电网的现代化为目标。

技术也是智能电网发展的巨大推动力。过去十年，通信技术有了长足发展。今天，配电公司可以选择许多不同的解决方案。现在，通信能以

1 现行的管理智能电网的配电运行中心不足之处

	独立的 IT 系统	不完整的实时系统状态	不先进的应用程序
例子	 非集成化系统用于： ■ 客户信息系统 ■ 地理信息系统 ■ 故障呼叫 ■ 人员管理 ■ 开关顺序管理 ■ AMI ■ SCADA ■ 流动劳动力管理 ■ 作业管理	 缺乏： ■ 设备负荷信息 ■ 开关、稳压器分接开关、电容器组等的状态 ■ 系统瞬时故障的定位 ■ 分布式资源状态 ■ 客户需求/负荷	 应用程序的不足： ■ 故障定位 ■ 复位开关状态分析 ■ 电压/无功控制 ■ 配电状态估计
结果	■ 作业流程效率低下 ■ 数据的重复和/或不准确 ■ 停电时间延长 ■ 可能不符合作业流程，可能存在安全隐患	■ 设备利用率低下 ■ 客户很难将分布式能源并网 ■ 不了解馈电线自动化运行的情况	■ 停电时间延长 ■ 职工工时利用率低 ■ 不能通过尖峰时刻的电压控制，减少客户需求 ■ 系统损耗较高 ■ 客户对电压超范围的投诉增多

配电公司自有专用网络（如 SCADA 无线电网络），或第三方的基础设施（如全球移动通信系统，或 GSM，通信提供商网络）为基础。根据各种因素，如所要求的可用率和带宽等，配电单位可选择适当的技术。不管如何选择，在配电网中，附加的双向通信的使用肯定会增加。

在馈电线上配备传感、数据处理、控制和通信功能的配电设备数量越来越多。自动化系统应用更加普遍，包括家用网络也配备了智能装置和设备。这种技术的部署将取决于互操作性标准的制定和统一。在美国和欧洲，此种标准的制定相当普遍。

自动化系统应用更加普遍，包括家用网络也配备了智能装置和设备。

智能电网的系统集成

ABB 是世界智能电网开发领域的领导厂商，公司投入大量时间和资源建立能够控制智能电网的运行中心系统。系统集成的三个重要领域包括配电管理系统 (DMS) 与 SCADA 的集成、先进计量体系 (AMI) 与 DMS 的集成以及来自变电站网关数据的集成。

在集成配电层面的 SCADA 与 DMS 应用，ABB 一直处于领先地位。随着智能电网的发展，促使越来越多的配电公司在配电系统上附加安装 SCADA，ABB 将继续改进他们的整合工作。现在已集成的功能包括把 SCADA 的状态 / 模拟点数据传输给 DMS、把 DMS 的监视控制和手动

撤销指令传送给 SCADA；集成化用户界面可运行于两系统之间的同一 PC 操作控制平台；集成化的用户可单一登录。

SCADA 与 DMS 集成的优点包括：

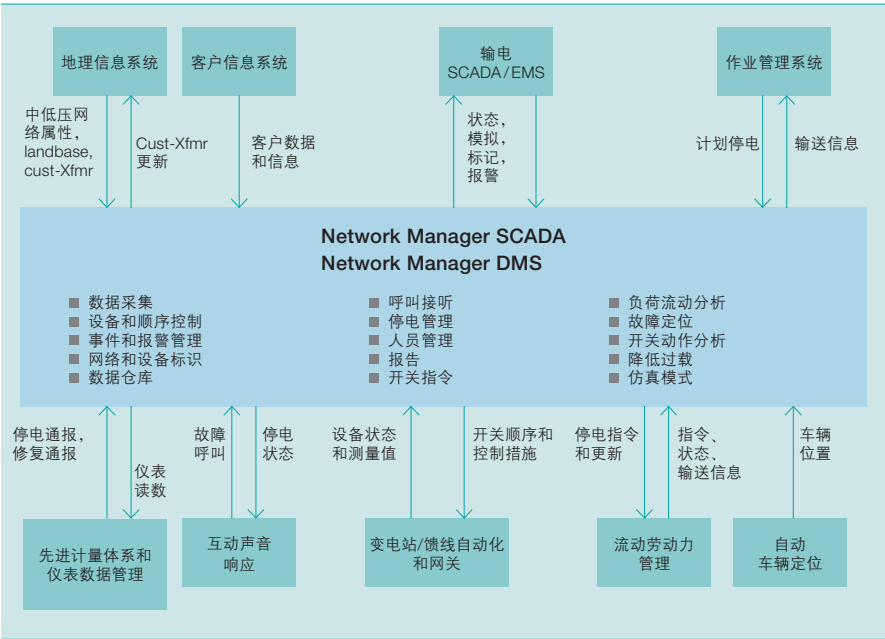
■ 通过 DMS 应用软件与配电 SCADA

的紧密结合，改善了运行状况

■ 采用一种系统可以提高操作人员的效率，不再需要运行带有不同数据的多种系统

■ 对变电站和线路运行进行综合安全分析，检查某个区域里影响其他区域运行的标记

2 智能配电网运行中心的系统集成



3 先进应用软件的功能和优点

DMS 应用软件	功能	优点
不平衡潮流分析	在线或离线采用仿真模式确定整个配电系统各相的线电流和节点电压	■ 改善对系统的观测 ■ 提高资产利用率 ■ 改善偶发事件规划
负荷分配和状态估计	在网络上智能化分配远程计量或历史测量值，根据实时状态，计算出预计潮流、电压和超限	■ 改善潮流和状态估计的计算 ■ 改善对设备过载和电压超限的报告
故障定位	确定系统中可能出现故障的位置	■ 改善管理停电事故的人员效率 ■ 降低客户平均断电时间指数 (CAIDI) 和系统平均断电时间指数 (SAIDI)
故障恢复开关动作分析	评估隔离和故障恢复开关动作方案	■ 提高断电期间操作员效率 ■ 提高可靠性
配电电压/无功控制	监测和控制线路电容器、稳压器和负荷分接头开关 (LTCs)，减少尖峰负荷和系统损耗	■ 降低系统尖峰时的客户需求 ■ 降低系统损耗 ■ 改善电压分布
线路卸载	计算和分析负荷传输方案，包括降低过载	■ 减少热模式故障 ■ 由于减少了过载，延长了设备寿命 ■ 提高资产利用率
远程开关和故障恢复	考虑网络运行状态，自动重新配置馈线	■ 降低 CAIDI 和 SAIDI ■ 降低系统损耗

输配电

- 在一个系统范围内，简化了登录和授权管理
- 对 DMS、OMS 和配电 SCADA 统一的系统支持

AMI 系统的安装正迅速增加，ABB 正在开发让配电部门将 AMI 数据用于运行目的的方法。现已开发出 AMI/MDM（仪表数据管理）与 SCADA/DMS 的接口，用于查询仪表状态、通报停电和故障恢复。其好处包括缩短用户停电时间和更加有效地利用现场资源。目前，正在探索其他 AMI 数据在 DMS 中的使用，如间歇性需求数据和电压超限等。这将带来更多好处，如增加对系统负荷的了解和使整个系统中具有更好的电压分布等。

另外，许多单位在其系统上增加变电站自动化和网关的数量。这样

可增加智能电子装置（IEDs）数据接口，智能电子装置一般安装在变电站和配电系统中，其中许多都具备通信功能。智能电子装置包括智能化更高的重合器控制、开关控制以及稳压器控制等。将这些系统与 DMS 集成可在变电站/馈线层级上实现分散化局部控制，进而通过 DMS 在系统层级上实现系统优化。将 SCADA 和 DMS 与其他系统相集成可提供对智能电网进行管理的集成化运行中心（见图 2）。

在集成配电层面的 SCADA 与 DMS 应用方面，ABB 一直处于领先地位。

先进的网络应用

采用自己的网络管理™（Network Manager™）平台，ABB 在配电行业先进配电系统管理应用软件开发

领域已处于领先地位。先进的应用软件使用了网络模型，同时可以监测网络运行状态，从而为优化网络运行提供相关建议。如图表所示，先进应用软件可为配电单位提供解决方案，应对当今面临的许多挑战（见图 3）。

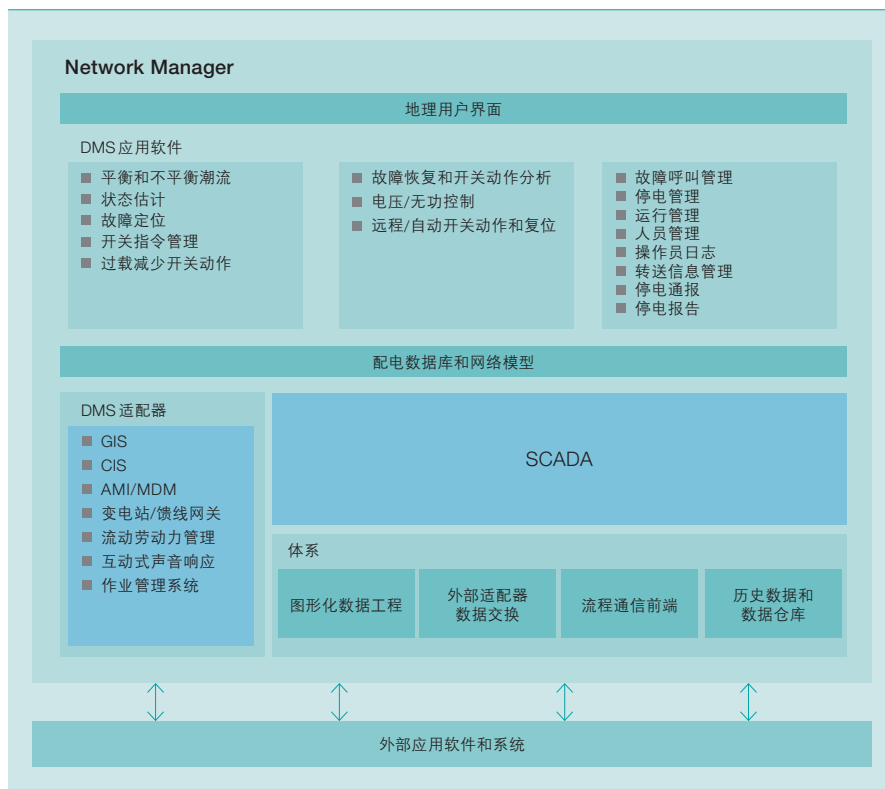
在许多情况下，配电单位愿意将操作人员保留在决策回路之中，以便操作人员监控系统。但随着智能电网的发展，人们希望尽量减少人为干预，而倾向于采用闭环或自动化的方法。将来，系统的自动化程度将是每个配电单位的一项业务决策内容。

智能电网运行中心

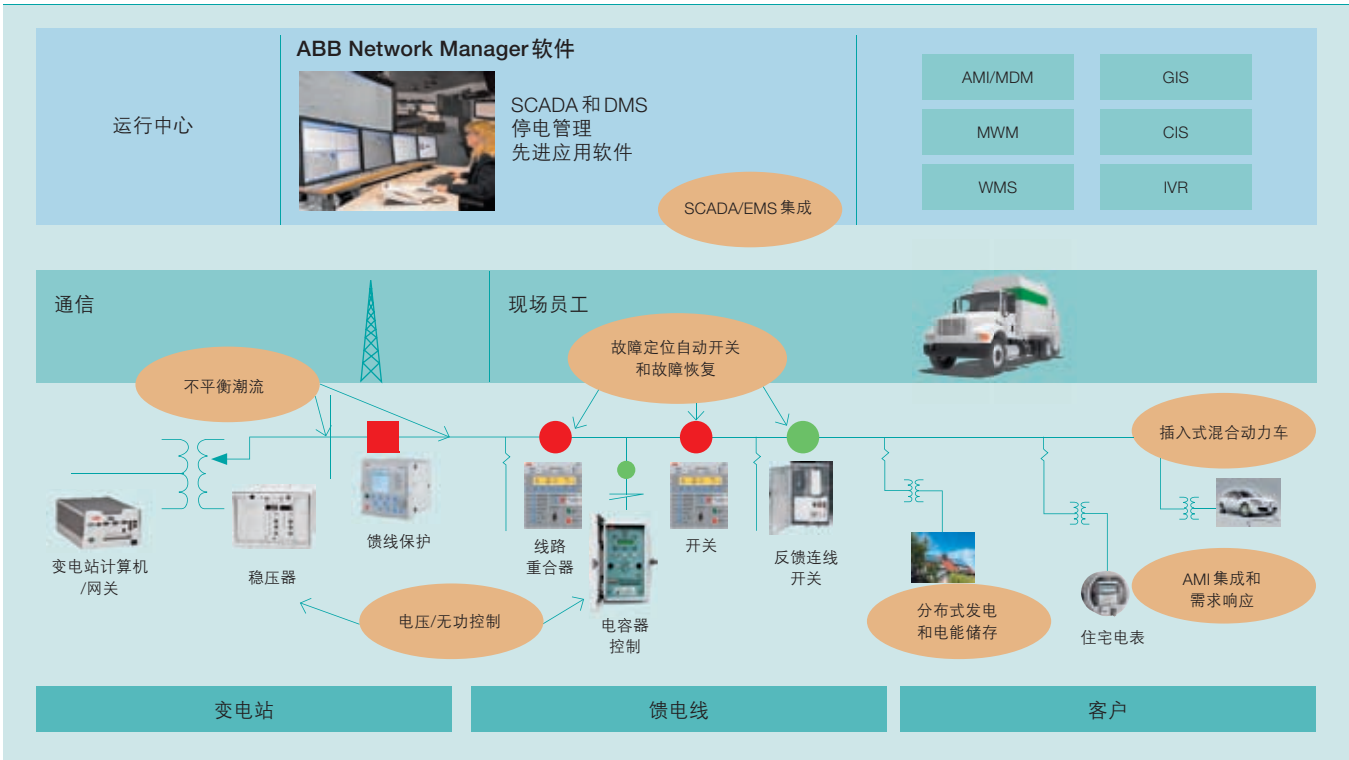
完全集成化的配电运行中心结构如图 4 所示。DMS 应用软件可优化管理配电系统，涉及设备负荷、效率、电压控制、作业管理、停电管理和可靠性。DMS 应用软件利用配电数据库和电网连接模型。网络模型创建时，曾使用来自地理信息系统（GIS）的数据，然后使用增加的更新程序从 GIS 上进行定期更新。

集成化配电控制系统的一个关键部分，是对配电系统运行所使用的不同 IT 系统加以集成，包括作为数据收集和系统控制关键单元的 SCADA 系统。配电公司扩展 SCADA 系统是发展趋势，使其通过配电变电站，进入馈电线，更好地观测及控制配电系统的情况。与其他系统的接口包括 AMI 和 MDM 系统、变电站/馈电线网关以及数据集中器。数据在现场设备与集成化运行中心之间传输的结构因配电单位而各不相同。即使是一家供电公司，也可能有

4 完全集成化配电运行中心的结构



5 监控智能电网的集成化配电运行中心



几种方法。无论方法如何，这类数据对加强运行状态的观测十分关键。

未来的运行中心

集成化运行中心将是智能配电网的关键部分。ABB 不断增强运行中心的功能，满足配电单位的技术和业务要求。使用集成化配电运行中心的智能配电网远景图如图 5 所示。

一般来说，配电系统的运行将变得更加复杂。额外增加的分布式发电量和电能存储量将会影响潮流在系统中的大小和方向，并随时发生变化。不管由供电商还是由用户控制的需求响应，都会对潮流和电压分布造成影响。另外，在配电系统设备添加智能的趋势有增无减，如智能电子装置 (IEDs)、变电站计算机和网关、传感器以及先进仪表等。在这些设备中，有的将会增加局部

控制动作，这将增加配电系统运行的复杂程度。

即使分散智能与控制不断增加，集成化运行中心仍将是集中监视和协调整个系统的一种手段。在集成化控制系统中，将所有数据和信息都传输给中央系统不切实际，甚至也不需要。反之，为了确保系统的优化运行，集成化配电运行中心中的系统只收集和接受到的某些特殊数据和信息。

应对挑战

智能配电网需要创新型运行中心进行有效的系统管理。ABB 致力于定义和开发用于智能配电网的集成化运行中心，包括对现有系统的先进集成和开发新的应用软件。智能电网运行将提供配电系统的全面情况，包括系统状态和监视、控制、停电响应、计划作业、最优设备负荷、

改进对分布式发电与电能储存和需求响应资源的控制等。集成化配电运行中心将帮助配电公司履行他们的使命，实现客户、业主、职工和社会的目标。

Tim Taylor

ABB 电力系统业务
美国北卡罗来纳州罗利
tim.taylor@us.abb.com

Marina Ohrn

ABB 电力系统业务
瑞士苏黎世
marina.ohrn@ch.abb.com

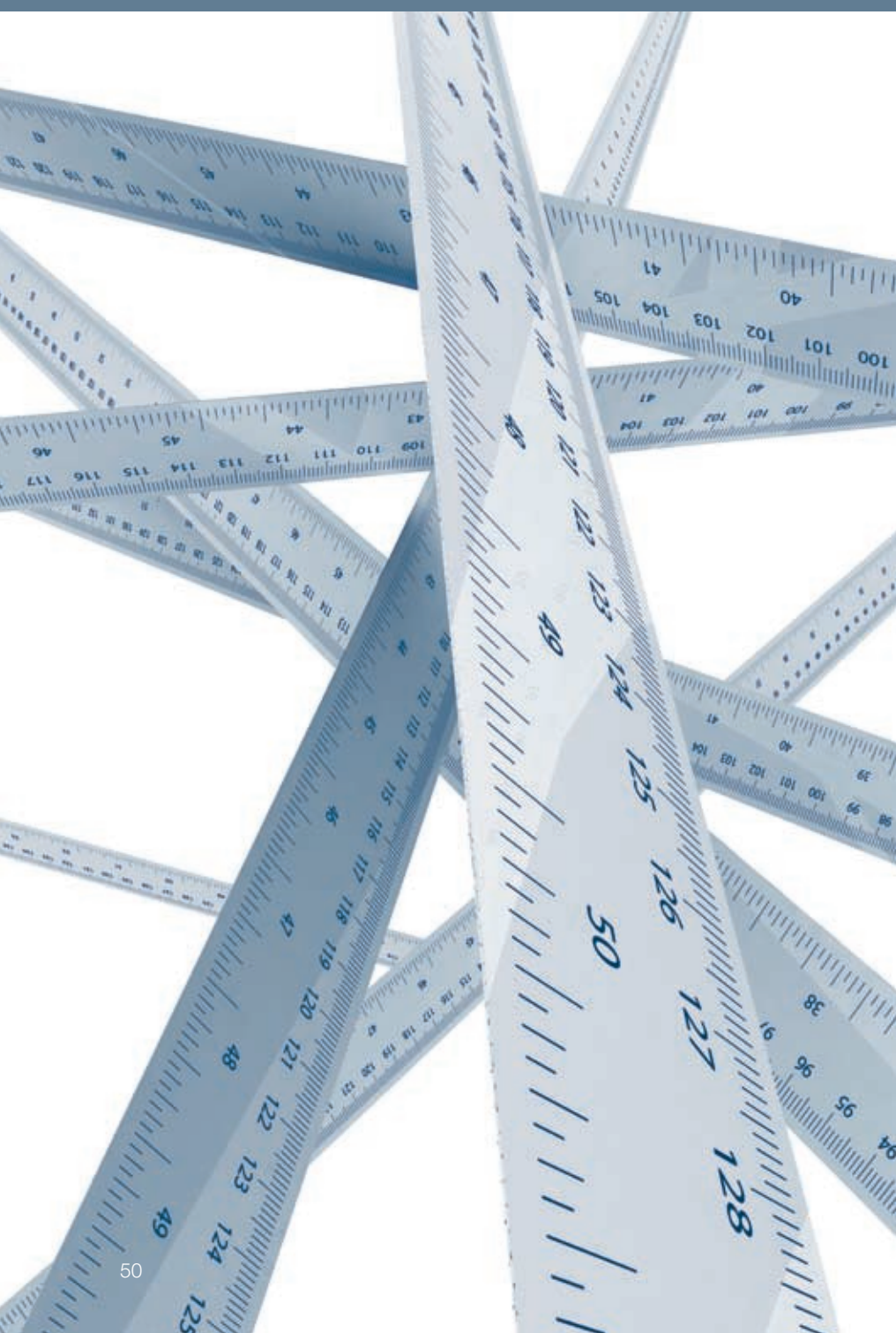
参考文献:

- [1] Sen, A., Ohrn, M. Convergence in the control room: Integrating transmission, distribution and outage management systems. *ABB Review* 4/2005, 30-32.

统一标准

确定全球能效节能标准

Janusz Maruszczyk, Michel Lhenry, Mikko Helinko, Zbigniew Korendo



能效节能已成为当今工业产品和工业系统的重要特征。然而由于存在多种不同的标准，直接比较这些标准的能效节能绩效指标非常困难。无论产品在哪里生产，市场全球化要求对同类产品的设备能效进行比较。统一标准和基本法规是能效节能技术成功推广的先决条件。

在多个领域（包括电机），标准化的推广已经统一了能效节能要求、测试方法和认证方案。今天，所有制定标准的主要机构以及政府间机构根据产品和系统的能源使用，致力于确定一个相似认可资质的通用框架。这是一项非常重要的事业，目前才刚刚开始。

从技术和法律来看，电子技术市场非常复杂。每一个电气设备的应用、安全及与其它设备的兼容性，都必须符合各种要求。这些要求可能包括国家、地区或行业内实行的规章、规程或标准，通常还包括一些额外的间接要求。

标准通过不同方式阐述一个特殊设备的能源效率。根据标准的规定测量能源损耗值是确定设备能效的典型过程。然后，将结果（能源损耗或计算出的增效节能数据）与能效指标（标称损耗或能效值）进行比较，确定设备是否满足最低增效节能绩效标准（MEPS）或其他规定。如果设备符合某个国家的 MEPS 要求，就可进入其市场。如果满足自愿性质的能效标识方案标准，也可粘贴标识，认定为增效节能产品。

标准明确了增效节能的定义，确定了试验和测量能源使用的方法，同时融入了 MEPS 或自愿性质能效标识方案的各种要求。若这些标准在各国或各行业间没有达成一致，就会产生各种问题。电机行业成功地统一了标准，就是一个非常好的例子。

电机标准的一致性

据估计，世界电力的 40% 被电机以多种应用方式消耗。电机效率的提高取决于电机中所有损耗的整体减少：

- 定子绕组损耗 (P_s)
- 铁芯损耗 (P_{fe})
- 转子损耗 (P_r)
- 摩擦和风摩耗 (P_{fw})
- 额外负载损耗 (P_{LL})

多年来，世界上有两大标准确定这些损耗：

■ IEC 60034-2

■ IEEE 112 方法 B (或 IEEE 112-B)

IEC 60034-2 主要用于欧洲、印度和中国，之前，澳大利亚和新西兰也使用该标准。IEEE 112-B 用于北美和一些使用 60 Hz 电源的国家。大约在 2000 年，澳大利亚和新西兰采用一种类似于 IEEE 112-B 的方法，但 IEC 60034-2 在这些国家可能仍能使用。加拿大采用了一种等效的标准（CSA C390）。

标准明确了增效节能的定义，确定了测试和测量能源使用的方法，同时融入了 MEPS 或自愿性质的能效标识方案的各种要求。

IEEE 112-B 标准解决了现行的 IEC 60034-2 标准中的温度问题，从而可以计算固定温度下定子绕组和转子损耗。此外，该标准还确定了测定额外负载损耗的方法，避免了 IEC 60034-2 标准中的固定容差问题。另外，多相电机效率形成了两个主要

的测定效率的方法：IEC 和 IEEE 112-B (见图 1)。

欧盟按照 IEC 60034-2 的方法测定效率。欧洲电机和电力电子制造商委员会 (CEMEP) 签署的自愿性协议为电机规定了三种可能的效率等级：

EFF3 低效电机

EFF2 改进效率电机

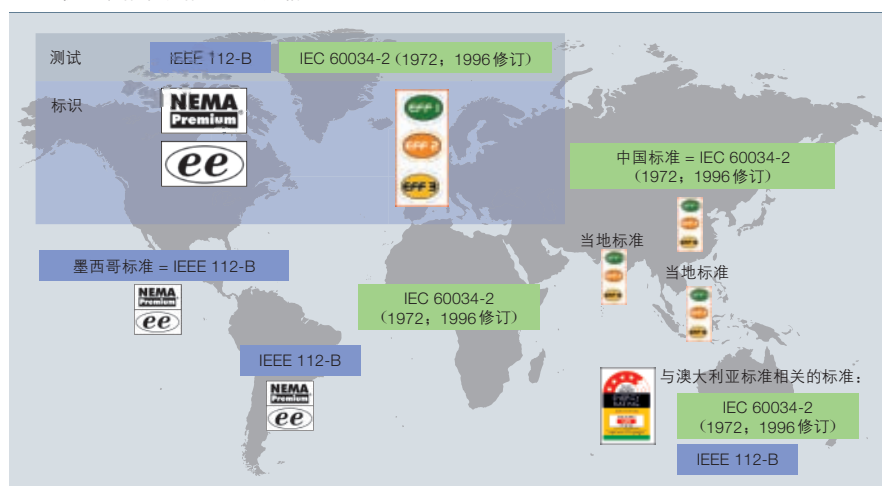
EFF1 高效电机

协议还规定制造商应在产品铭牌和样品数据表上标明效率等级，便于用户选择和识别最适合的电机。

美国按照 IEEE-112 标准测定效率。IEEE 112-B 测试方法要求在电网频率为 50 或 60 Hz 的状态下直接测量所有损耗。能源政策法案 (EPA 1992) 确定了在美国生产或使用的所有电机的 MEPS。之后，NEMA 提出了一个以 IEEE 112-B 为基础的自愿认证计划：即 NEMA 高效电机计划。对于强制性和自愿性两种要求而言，测量结果都会与 NEMA MG1 标准规定的特定效率指标相比较。

此外，美国在化工、石油和冶金行业使用的工业标准 IEEE 841 用于长时间运行的重型电机。

1 电机能效标准和标识：历史情况



能效与标准

在其他国家，各种解决方案都改编自欧盟或美国方法，有的与 IEC 60034-2 或 IEEE 112-B 一致，有的与其相似。

例如，巴西采用一种以 IEEE 112-B 为基础的测试方法，但现行的 MEPS 不同于美国使用的标准。在印度，效率等级与 CEMEP 一致，但测试方法以当地标准为准，而不是 IEC 标准。中国采用了 MEPS 政策，GB18613-2006 规定了中小型三相异步电机的最低增效节能要求和等级。但在测试方面，中国采用了类似 IEC 60034-2 的当地标准 GB/T 1032。此外，中国还有一些行业标准（如所谓 Y 系列电机）。对这类电机，虽然主流标准并没作出规定，但在中国市场上却得到广泛认可，可以做为参考标准。

不同测试方法和标识方案会导致电机效率的可比性问题。此外，各种经济体使用的术语也是个问题。“高效电机”一词在不同市场或国家可能会有不同含义。在某个国家认为是高效电机，在技术更先进的国家却不能达到最低效率水平。所有这些因素都阻碍增效节能电机在全球的推广应用。

朝等效化方向努力

因此，各方努力朝着标准一致性发展，以摆脱过多的现行标准。根据德国国家委员会 DKE K311 提出的工作项目建议，IEC TC 2（旋转电气机械技术委员会）2006 年设立一个工作小组（WG 31），旨在确定三相感应电机的增效节能等级。

专业的提议是另一个促进一致化进程的有效方法，即众所周知的电机系统增效节能标准（SEEEM）。它于 2006 年制订，WG 31 也将该建议纳入考虑范围。

在一个国家被认为是高效电机，或许在技术更先进的国家不能达到最低能效水平。

2006 年，WG 31 的第一次会议在德国法兰克福召开。2007 年 5 月，第二次会议在美国华盛顿特区召开。大家认识到，仅仅有分类标准并不能解决所有问题，还应考虑电机高效运行的方法及其应用。2007 年 5 月，建立增效节能指南的建议提交给在意大利米兰召开的 IEC TC 2 会议，会议批准了该项目，并以 IEC TS 60034-31 的名义启动。

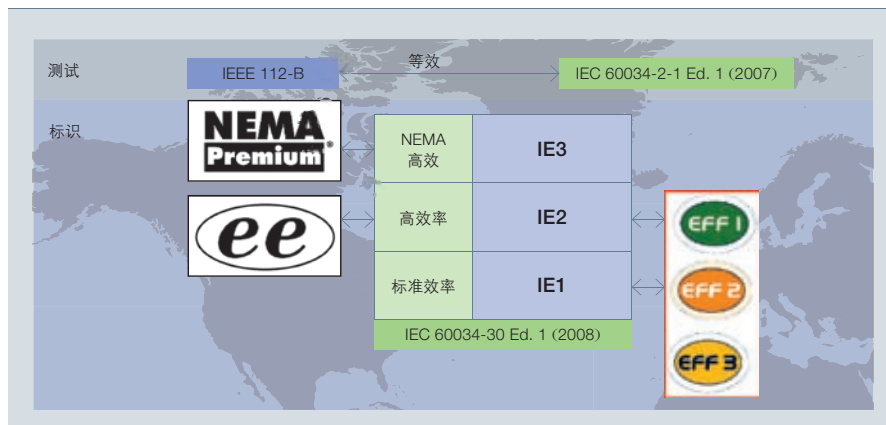
同时，IEC TC 2 开始修改已执行几十年的 IEC 60034-2 标准。修改工作始于 1996 年，当时欧洲电工技术标准化委员会（CENELEC）接到欧洲委员会的强制性要求 M244，CENELEC 将制定一个新试验标准的任务交给了 IEC。当时的意图是准备一个类似 IEEE 112-B 的新 IEC 标准。1997 年 9 月，第一次 IEC SC2G 的 WG2 会议在法兰克福召开，IEC 工作小组的一位成员提交了 IEEE 112-B 测试方法，但第一次提议没有被采纳。（顺便提一下，第 2 工作小组以后变成 IEC TC 2 的 WG 28。）经过多年的讨论后，该测试方法写进了 IEC 61972 标准。后来，这种测试方法包含在新版的 IEC 60034-2 标准（见图 2）。从此，IEC 61972 被撤销。

IEC 第 2 技术委员会旋转电机小组（WG 28 和 WG 31）又制定下列标准：IEC 60034-2-1（2007）：标准包括能效测试方法（与 IEEE 112-B 一致，但仍有细微的区别）。

IEC 60034-30（2008）：规定了新能效等级 IE1、IE2 和 IE3，在 60 Hz 上与巴西的规定（IE1）一致，并与美国现行的封闭式电机（IE2 的 EPA 和 IE3 的 NEMA 高效电机计划）规定一致，如 IP44、IP55，以及根据 EU-CEMEP（EFF1, EFF2）为基础的 IE2 和 IE1。50 Hz 的 IE3 等级从 IE2 衍生而来，功率损耗约低 15%。这项标准不包括根据 IEC 60034-25 设计的电机（即专门为变频供电设计的电机），也不包括安装在设备（如泵或风机）上的电机。

另外，IEC 目前正在制定下列标准：IEC TS 60034-31：增效节能电机的选择和应用指南，包括变速应用

图 2 世界各国的能效等级（2009）



(计划2010年4月颁布,第二份草稿大约2009年4月与公众见面)。

IEC 60034-2-3: 变频器供电电机测试标准(计划2011年7月颁布)。

与此同时,美国能源部要求从2010年12月19日开始,NEMA 高效电机计划将成为美国电机最低能效性能标准。为了获得该证书,制造商必须在认可的实验室测试其产品。其他规则(即IEEE 112-B作为测试标准和NEMA MG1作为能效等级标准)保持不变。

欧盟国家情况有点不同:制造商应符合标准。第三方认证不是强制性的,但政府机构将不时进行市场审查。如果某一设备不能满足所要求的(和公告的)能效等级,将责成制造商以成本价格从市场上撤回产品。

欧盟成员国代表组成的生态设计管理委员会(Ecodesign Regulatory Committee)根据欧盟委员会的一项建议,投票通过一项新法规——电机生态设计要求。新法规规定了输出功率在0.75 kW和375 kW之间的异步电机增效节能等级。EN/IEC 60034-30标准规定的IE2能效等级将从2011年6月31日开始成为强制标准;标称功率(P_N) 7.5至375 kW电机的IE3能效等级将从2015年开始成为强制标准;标称功率0.75至375 kW电机的IE3能效等级将从2017年成为强制性标准。如果由变频器

图 3 IEC 60034-30 规定的各种IE 能效等级的实施蓝图

能效水平	IEC 60034-30 能效等级	按照测试标准 IEC 60034-2-1 (2007) 的不确定性	拥有绩效标准法规的国家
NEMA 高效	IE3	低不确定性	美国 (2011) 欧洲 (2015/2017 ¹⁾)
高效率	IE2	低不确定性	美国 加拿大 墨西哥 澳大利亚 新西兰 巴西 (2009) 中国 (2011) 欧洲 (2011 ¹⁾) 瑞士 (预计 2012)
标准效率	IE1	中等不确定性	中国 巴西 哥斯达黎加 以色列 台湾 瑞士 (预计 2010)

没有数据显示特殊MEPS法规已经生效。IEC 60034-2-1 包括若干不同的不确定性测试方法,对IE1而言,中低不确定性测试方法是可接受的;而对IE2和IE3而言,要求低不确定性。

¹⁾ 欧盟能效水平执行计划

- 2011年6月16日以后,所有功率为0.75 kW至375 kW的电机必须满足IE2能效等级。
- 从2015年1月1日起,标称功率(P_N)为7.5至375 kW的电机的效率不能低于IE3能效水平,或者必须满足IE2等级,而且必须配备变频器(VSD)。
- 从2017年1月1日起,标称功率(P_N)为0.75至375 kW的电机效率不能低于IE3等级,或者必须满足IE2的要求,而且必须配备变频器。

驱动,则IE2等级的电机可取代IE3等级的电机。欧盟2009年7月22日采纳了这条法规。法规范围与IEC 60034-30标准稍有不同(如包括变频器运行的电机)。图3显示了

资料库1 标准化之前,增效节能领域内的IEC 情况

- 清晰、合理及连贯的“能效”定义
- 用于能效评估和评级的测试和测量方法定义
- 用于标准产品和商品的能效水平(等级)定义
- 只在重大节约潜力的领域开始标准化工作;重点是“节能潜力巨大的领域”
- 权威机构将确定强制性限值

资料来源:2008年11月在圣保罗举行的IEC研讨会

60034-30标准规定的不同IE能效等级的预想实施蓝图,以及各国的最低增效节能标准。

IEC TC 2的第31工作小组目前正在制定新的IEC TS 60034-31标准。目前已经公布了草案,其中提议了超效电机计划或IE4等级的定义。与EN/IEC 60034-30标准中的IE1、IE2和IE3一样,IE4能效等级并不限于三相鼠笼式感应电机。IE4拟用于所有类型的电机,特别是变频器供电电机(鼠笼感应式和其他类型,如永磁同步电机)。目前,市场上没有符合这种能效等级水平的电机。这恰好说明,标准化工作决定技术和产品的发展方向。

标准化案例

标准和标识出现于增效节能政策支持的所有领域,特别是特定产品(如电机)或应用。标准有如下功能:

- 能效的定义(IEC 60034-2-1)。
- 规定测定能效(IEC 60034-2-1)的试验过程。
- 为各种自愿性质的能效标识和证书(EN/IEC 60034-30, NEMA MG1)制定最低要求的能效指标和要求。
- 确定达到高能效需要符合的维护条件(ANSI/EASA AR100, EASA/AEMT)。
- 说明特殊行业或部门的规则和要求(IEEE 841)。
- 推动技术和产品出现更多增效节能解决方案(IE4, IEC TS 60034-31)。

能效与标准

资料库2 缩略词

AFNOR	法国国家标准化组织
CEMEP	欧洲电机和电力电子制造商委员会
CEN	欧洲标准化委员会
CENELEC	欧洲电工技术标准化委员会
EMSA	电机系统附件
EPAct	能源政策法案
IEA	国际能源署
IEC	国际电工技术委员会
ISO	国际标准化组织
MEPS	最低增效节能绩效标准 (也称最低能源绩效标准或最低能效标准)
NEMA	国家电气制造商协会
SEEEM	电机系统增效节能标准

资料库3 ABB 电机和新能效标准及标识

- ABB 保证其产品完全符合新要求。
- ABB 供应全系列的 IE2 等级电机以及 IE3 等级高效电机。
- 功率为 0.75 至 375 kW 的电机系列，包括防火电机 Ex d、防尘电机 Ex tD 和无电火花电机 Ex nA 等均按照 IEC/EN 60034-30 标准在标识上注明。
- 根据 EN/IEC 60034-2-1 标准并按照该标准中规定的低不确定性方法确定能效数值。

国际能源署 (IEA) 2008 年 3 月公布了关于能效电气终端使用设备的 4E 执行协议。作为 4E 的一部分，电机系统附录 (EMSA) 的重点在于电机系统的能效。它不仅从产品角度而且还从电机角度提出了增效节能问题，因为电机作为更广泛系统的一部分，自身具有增效节能的潜力。EMSA 正在建设全球电机系统网，为标准和技术的创新发展提供信息。虽然系统性方法能够提供最大的优越性，但难于标准化，这就是为什么过去的标准化工作主要是解决设备的能效标准问题。

关注增效节能

最近几年，电气的增效节能问题已被国际电工技术委员会认定为关键和优先的领域之一。IEC 标准化管理委员会 (IEC-SMB) 成立了战略小组 (SG 1)——增效节能和可再生资源，该小组与 ISO 的同类机构 ISO/TMB/SAG EE 1 (增效节能战略咨询小组) 紧密合作。IEC-SMB SG 1 已就增效节能的相关问题为 IEC 技术委员会确定了一套建议 (见 资料库1)。在获得 IEC-SMB 同意之后，这些意见指明了 IEC 在这个领域的未来工作方向。

确立增效节能相关的通用术语和定义是 SG 1 确定的主要要求之一。目前，在标准制定和立法方面，有不少动议和活动，例如 ISO/CSC/STRAT、CEN/CENELEC 能源管理论坛 (SFEM)、现有 IEC 标准和立法，所有这些都以不同方式参照了基本术语 (例如增效节能、能源绩效)。因此，在不同背景和应用情况下，它们的解释也各不相同。在 SG 1 的建议下，ISO 开始制定一个新标准，为所有与增效节能有关的组织

确定基本术语。法国国家标准化组织 (AFNOR) 将协调这项工作，估计三年左右内完成。

SG 1 建议进一步将产品和工艺的标准化作为重点，增效节能收益最为重要，即应用于耗电量很大的产品和装置，如灯和照明设备、旋转电机、采暖和制冷应用、发电和输电、电力变压器以及消费类电子产品等。

SG 1 提出的另外一个优先领域，是制定某一产品实际应用中的最佳匹配标准和良好的工艺指南、考虑增效节能评判标准的系统设计指南、复杂系统和工厂自动化 (例如电厂、电气火车等)、配电网的功率损耗指南。SG 1 还建议更多地关注电能储存系统的标准化，特别涉及可再生能源的配发电环境。

这种方法摆脱了传统的只关注设备，不考虑它们在较大系统和流程环境中运行的做法。设计阶段就应考虑系统层面上的增效节能，包括应用环境、寿命，维护以及与其它系统零部件的相互作用等。

电力的增效节能问题已被国际电工技术委员会认定为优先领域之一。

与 IEC 一样，国际标准化组织非常重视各个领域的增效节能。除了共同制订增效节能领域的基本术语标准外，ISO 技术委员会还致力于能源绩效、能耗，不同设备的能效，运输方法以及建筑方面的计算、比对和标识的标准化方法。在这个领域，ISO 13602 标准的制订 (技术能源

系统TC 203制定)正在进行之中,这个标准的原则之一是不同能源可以相互比较。

另外一个崭新的标准化领域是能源管理体系。即将发布的ISO 50001标准中做了特别的说明。ISO 50001标准最终版本预计将于2010年完稿(该文件的草案文稿已完成)。预计该标准将对能源相关问题产生影响,类似于ISO 9001(质量管理)和ISO 14001(环境管理)。ISO 50001没有引入所要求的能效等级,而是提出持续改进车间或工厂总体增效节能的要求。这项新标准将鼓励公司开发全面的,系统层面的增效节能管理方法,包括能效测量、监测和工艺控制优化等。建筑系统是一个典型例子(据说,它占能源使用总量的30%左右)。新的ISO标准对智能建筑进行了全面的分析,从设计要求和可替代能源的使用到控制和管理系统。确定整个系统的能源效率

体现了不同的挑战,并且要形成一套方法论,而不是实验室对单个电机进行评判。评估系统层面的增效节能是强制实行节约能源政策的一个重要组成部分。

标准化可决定技术和产品发展的方向。

推动变革

与IEA的增效节能观点一致,国际标准在该领域作为变革的推动者,扮演着重要的角色,因为国际标准包含了术语、测试方法、分类和管理业务等,因此要建立一个通用的执行框架。另外,根据世界各地技术、工业和经济专家达成的共识,形成了最新的技术发展知识。

从世界能源理事会和IEA的角度看,标准是实践中实现全球战略最重要的手段之一。标准促进政府间和行业参与人员之间的合作。这一点

特别重要,因为多数解决方案(包括可再生能源)必须在大范围内执行,才能达到预期效果。

对多数电气设备而言,当地标准如果与国际标准一致,会产生下列效果:

- 测试费用最小化,特别对致力于在全球市场生产电气设备的单位而言,更是如此
- 更容易比较同一设备在各地区和经济系统中的能效和能耗
- 促进更高能效设备的生产
- 有利于知识转让,促进立法过程中的标准执行

标准不仅定义了能效,还提供了评估能效的方法。标准描述了更为广泛的观点:如何管理一个系统中的能源,如何监测、鉴别和验证某项具体措施的节能效果。此种方法只是增效节能市场的一部分,在这个市场中,提高能效和节能可以像电力和天然气一样进行交易。



Janusz Maruszczyk

Zbigniew Korendo

ABB 研究中心标准办公室

波兰克拉科夫

janusz.maruszczyk@pl.abb.com

zbigniew.korendo@pl.abb.com

Michel Lhenry

ABB 自动化产品业务

法国蒙吕埃勒

michel.lhenry@fr.abb.com

Mikko Helinko

ABB 自动化产品业务

芬兰瓦沙萨

mikko.helinko@fi.abb.com

延伸阅读:

http://www.iso.org/iso/hot_topics/hot_topics_energy.htm

<http://www.standardsinfo.net/info/livelink/fetch/2000/148478/13547330/outcome.html>

<http://www.iea.org/Textbase/work/2009/standards/Thies.pdf>

http://www.iea.org/Textbase/Papers/2008/cd_energy_efficiency_policy/7-Energy%20utilities/7-Standards.pdf

<http://www.motorsummit.ch/>

<http://www.seeem.org/news.php>

<http://www.nema.org/gov/energy/efficiency/premium/>

<http://www.motorsystems.org/>



OPC 统一构架体系

自动化系统中通信和信息建模的未来标准

Wolfgang Mahnke, Stefan-Helmut Leitner

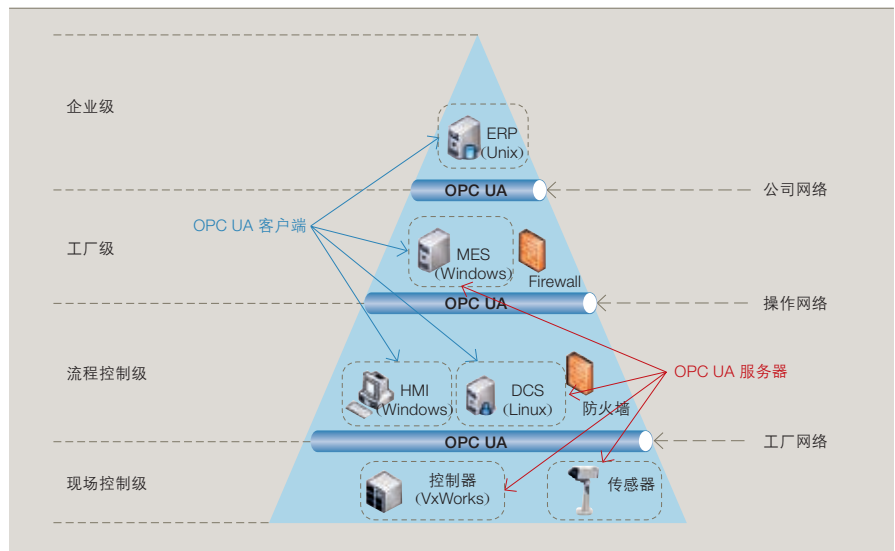
OPC 统一构架体系 (OPC UA) 是现代工业自动化技术中互联互通新的技术标准，具有丰富的信息建模功能，可代替现有的 OPC 规范。OPC UA 为今后 10 年甚至更远的将来的互操作性提供了一个框架 (已在 IEC 62541 标准中颁布)。

ABB 在创建 OPC UA 中发挥了重要作用，并确保新的标准符合过程自动化领域的要求。经过几年的努力，该标准的主要内容于 2009 年 2 月发布，并且，支持 OPC UA 的第一批 ABB 产品也已上市。

OPC 是一整套用于系统间互联互通的行业标准，它为不同供应商不同产品间的通信提供了共用接口（见 资料库 1）。目前 22,000 多种产品由 3,200 多家供应商供货。过程控制系统必须通过共用通信平台，与所有这些产品进行沟通、数据访问或数据存取。传统的 OPC 可为数据存取（DA）、历史数据存取（HDA）以及报警和事件（A&E）提供标准规范。这些 OPC 规范广泛应用于自动化工业领域。传统的 OPC 建筑基于老化的 Microsoft-COM/DCOM 技术基础¹⁾，然后据此开发了被称为 OPC UA（统一构架体系）这一全新的 OPC 基金会规范。这些规范由 30 多家自动化系统供应商历经五年共同开发。OPC UA 旨在保持传统 OPC 的所有功能，同时将 Microsoft-COM/DCOM 技术转化成现代化的 Web 网络服务技术。网络服务技术使 OPC UA 成为独立平台，因而可应用于今天传统 OPC 已不再使用的各种场合。OPC UA 可以与制造执行系统²⁾（MES）和企业资源计划（ERP）系统³⁾无缝连接，不但可以利用 Java 软件在 Unix/Linux 操作系统上运行，而且也可以在具有实时操作系统功能的控制器和智能装置上运行。当然，这要求 OPC UA 能够与早期 OPC 规范兼容。如今传统的 OPC 已能在 Windows 环境下运行，因此，不排除 OPC UA 在基于 Windows 环境中的使用——以符合微软 Windows 通信基础框架⁴⁾，利用网络服务进行通信（见图 1）。

OPC UA 必须实现和完善传统 OPC 的非功能性要求，例如提供适合于自动化系统稳定、可靠、高性能的通信功能。通过向 OPC XML-DA⁵⁾（OPC 基金会第一次尝试提供以 XML 为基础的网络服务）学习，设计 OPC UA 旨在支持适用于高性能数据交换

1 OPC UA 应用于金字塔式的自动化体系中



资料库 1 OPC

1996 年，自动化行业开发了用于工艺控制的 OPC OLE* 标准规范，采用这一规范将使不同制造商的控制设备之间，实现工厂数据的实时通信。于是创建了 OPC 基金会，以维护这些标准，此后引进了一系列标准规范（如 OPC 的数据存取）。今天，OPC 基金会宣称，OPC UA 不再是流程控制的 OLE 缩写，而是 Open Connectivity Unified Architecture（开放式联通统一构架体系）的缩写。

¹⁾ 对象链接和嵌入（OLE）标准规范允许从其它程序获得数据进行视频显示，而主程序本身通常不能自己生成（例如，将饼图“嵌入”文本文件之中）。用于生成嵌入式图表文件中的数据可以变化，“链接”这一数据，就可以使这一图表在嵌入式文件中得到更新。

资料库 2 元模型和信息模型

元模型用来描述模型的模型。SQL（结构化查询语言）数据库用于定义表格的概念、以目标导向编程语言定义等级和目标的概念，并以 IEC 61131-3 语言定义任务、功能块、程序等的概念。在 OPC UA 中，元模型用于定义目标、它们的类型、变量及数据类型等的概念。

信息模型是基于元模型创建的模型，用于确定特定的语义（意义）。在 OPC UA 中，主要通过确定特定类型的目标和变量来完成，也可通过具有特定语义（例如服务器地址空间中的输入点）的特定目标和变量确定。例如，用于分析仪设备的信息模型，可在 OPC UA 元模型基础上，通过规定特定的类型的分析仪来确定。OPC UA 服务器可以使用这类信息，代表来自分析仪装置的数据。

脚注：

¹⁾ 元件对象模型（COM）由微软于 1993 年引进，它允许元件软件在不同的应用领域间通信。分布式元件对象模型（DCOM）也由微软引进，即使当其分布在一个网络上，也允许软件元件进行通信。

²⁾ 制造执行系统（MES）用于管理和监控车间流程的运行。

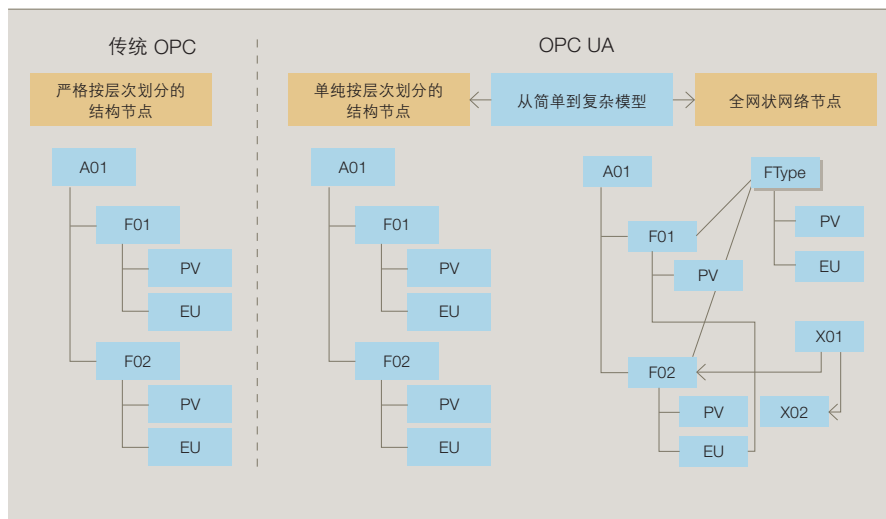
³⁾ 企业资源规划（ERP）是全公司的计算机软件系统，用于管理和协调来自共享数据库业务的所有资源、信息和功能。

⁴⁾ Windows 通信基础（WCF）是一个编程框架，用于创建相互通信的应用程序。

⁵⁾ OPC XML-DA 建筑在现有的 OPC DA 标准基础上，通过互联网将多个供应商的互操作性和连接性传送给工厂的信息系统。

能效与标准

2 OPC 与 OPC UA 模型对照实例



的二进制编码。为了提供可靠的通信，OPC UA 设有能够处理问题的内置结构，例如处理丢失的信息。OPC UA 还设有内置安全系统，凡是工厂数据必须通过办公室网络存取，这一安全方面的环境要求已凸显其越来越重要的意义。

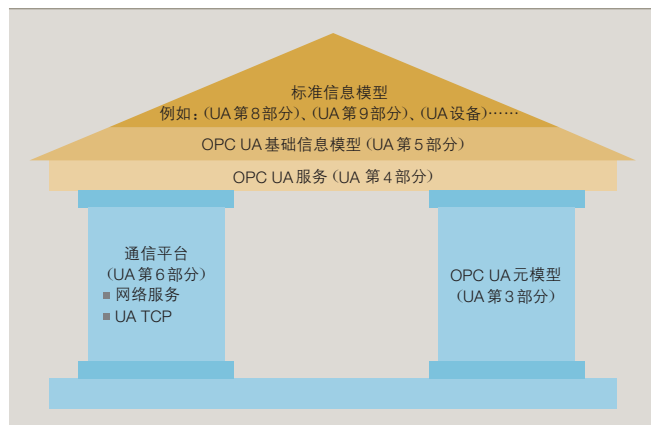
从长远来看，当使用不同供应商产品进行系统集成时，OPC UA 可以大幅降低工程成本。

OPC UA 为传统的 OPC 带来了不同的规范，给系统提供单一的输入点，以便当前的数据存取、报警和事件处理，并同时获得这两者的历史情况。与传统的 OPC 相反，OPC UA 可提供单一的小型通用服务配置，以便存取所有的信息。

传统的 OPC 具有一个非常简单的元模型（见资料库²⁾），并以一个简单的阶梯形式提供标签说明。OPC UA 利用目标导向技术提供丰富的信息模型（见图 2）。利用 OPC UA，不仅可以提供测量值及其工程单元，

而且还可以识别获得该测量值所使用的温度传感器的独特型号。这个信息对典型的传统 OPC 使用很有帮助，因为操作员工作站所显示的同样图形，即软件的组成和配置，可用于同类型的每一个装置，并可操作整个系统。此外，这一信息也可用于更为广泛的领域，例如 MES 和 ERP 系统，帮助整合数据，而不必交换可提供标签语义的标签列表。OPC UA 在确定和使用丰富的信息模型时具有很强的灵活性，但不要求它们的实际应用。如同今天的 OPC DA 服务器那样，一套 OPC UA 服务器仍然可以显示一个简单的信息模型，同时提供更多的信息。

3 OPC UA 的支柱



与传统 OPC 相比，OPC UA 的主要优点在于能为信息建模，同时可以简化许多附加的操作。OPC UA 确立了一套简单的基本类型，它们可通过信息模型（既可以是应用模型和特定的供应商模型，也可以是标准化模型）延伸扩展。这一概念就是 OPC UA 规定如何进行数据交换，同时，由标准信息模型规定交换何种信息。

基于 OPC 统一架构体系，对信息建模的浓厚兴趣已经成为创建标准化信息模型的动力。共用的现场设备可以使用一个标准化的信息模型，以实现即插即用的多供应商互操作功能[1]。该模型最初由现场设备集成 (FDI) 确定，现已被分析仪设备集成 (ADI) 集团进一步细化[2]，并确定了特定的分析仪设备。2008 年 10 月，PLCopen^⑥ 组织成立了工作组，他们致力于采用 IEC 61131-3 语言的 OPC UA 信息模型。标准信息模型的使用将互操作性提高到一个新的水平，它不但允许各种操作间的数据交换，而且还可使模型互动操作。从长远目标来看，当使用不同供应商产品进行系统集成时，这种技术可以大幅降低工程成本。

OPC UA 在几个方向上的比例设置非常合理。它允许 OPC UA 应用程序

以非常有限的硬件资源在嵌入式设备上运行，也可以像主机那样，在功能很强的机器上运行。通常情况下，服务器在不同的环境中运行将不会提供相同的信息。嵌入式设备的服务器似乎不可能提供长期的历史

脚注：

^⑥ PLCopen 是一个独立于供应商和产品的世界性协会。其使命是要成为解决与控制编程相关的课题，支持国际标准在这一领域内使用的领导性协会。

数据，只能支持少数的客户端，而其它服务器则可能提供几年有价值的历史记录，并支持数以千计的客户端。OPC UA 在信息建模方面也具有扩展性。一台服务器可提供任何模型，包括从非常简单的、类似于传统的 OPC 模型，到高度复杂的模型，它能够在给定的数据上提供高度复杂的元数据。客户端只需忽略这项额外的信息，并对这一数据提供简单的观点，或使用服务器提供的元数据即可。

OPC UA 确定了支持互操作性的两大支柱：即通信基础设施和 OPC UA 元模型（见图 3）。通信基础设施确定如何交换信息，而元模型则确定交换什么样的信息。

OPC UA 独立于通信平台，详细说明不同平台上运行的抽象服务 [3]，并以元模型 [4] 为基础，确定适当的服务参数。OPC UA 基础信息模型 [5] 向服务器的地址空间提供基础

类型和输入点。在基础信息模型之上可构建特定的供应商或标准信息模型。OPC UA 已经为数据的存取 [6]、报警和状态 [7]、程序 [8]、历史数据 [9] 以及聚集函数 [10] 确定了几个标准信息模型。它还在服务器上提供可支持多信息模型的结构。有关信息模型的数据可通过服务器读取，这样有助于只有服务器信息的客户端能够存取所有的信息。当然，了解特定信息模型的客户端，可以利用这些知识对其进行进一步优化。

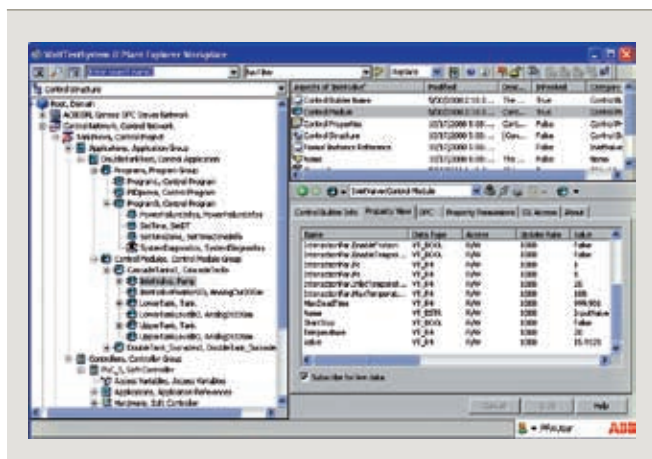
OPC UA 并不直接与传统 OPC 兼容，因为它使用了不同的数据通信技术。为满足这一要求，OPC 基金会不但为 OPC UA 通信联络提供软件平台（在 ANSI C⁸⁾、.NET⁹⁾ 和 Java 中的堆栈⁷⁾），而且还作为包装商和代理人，既为 OPC UA 客户端现有的服务器提供包装服务，也为传统的 OPC 客户登录 OPC UA 服务器提供代理服务器¹⁰⁾。

ABB 的 OPC UA

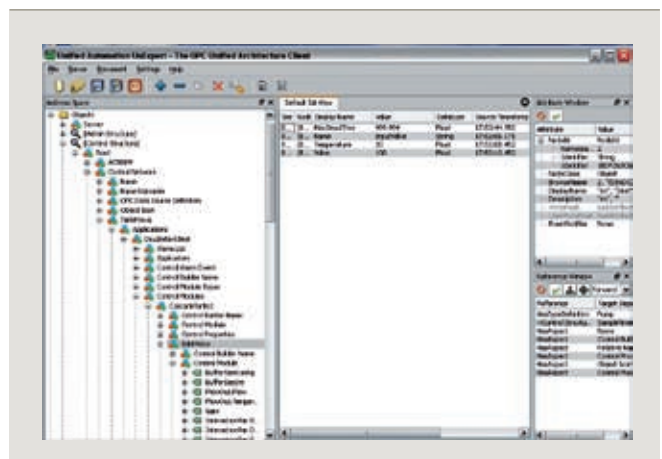
ABB 参与了大量的 OPC UA 创建工作。OPC 基金会创立的 OPC UA 工作小组中包括 ABB 雇员。在这段时间里，ABB 成员已编辑了 8 个已公布标准中的 3 个（即地址空间模型、信息模型和安全模型）。这些雇员对软件的构架体系有着丰富的专业知识，并与有关专家建立了广泛的联系，同时在相关设计和技术方面提供了决策支持。这些设计和技术是创建安全、可靠和高性能的 OPC UA 标准所需的。ABB 确保 OPC UA 信息建模概念能很好地适应扩展自动化系统 (Extended Automation System) 800xA 创建的强大纵横目标模型 (Aspect Object Model)。ABB 研究中心提供了这样的映射概念：即把第三方 OPC UA 服务器集成到 800xA 系统之中，将其作为 OPC UA 的客户端，并将 800xA 系统作为 OPC UA 服务器，集成到第三方的 OPC UA 客户端（见图 4）。基础模型的操作结果证明：OPC UA 理念可以轻易地应用于 800xA 系统。

4 800xA 系统的典型屏幕截图

a 800xA 系统现场视图 (工厂浏览器)



b 采用 OPC UA 通用客户端的 800xA 系统视图



脚注：

⁷⁾ 通信堆栈是执行整个计算机网络通信协议的软件。

⁸⁾ ANSI C 是美国标准学会的标准 C 编程语言。通过为软件开发商创建一个标准，该代码是便携式的，采用 C 语言编写（即只需付出极少的努力，就可以使其适应新环境）。

⁹⁾ Microsoft.NET 框架是一个软件框架，带有几个微软 Windows 操作系统，凡是为 Windows 平台创建的大多数新的应用都可使用这些操作系统。

¹⁰⁾ 代理服务器作为一个媒介工具，可满足从其它服务器寻求资源的客户要求。

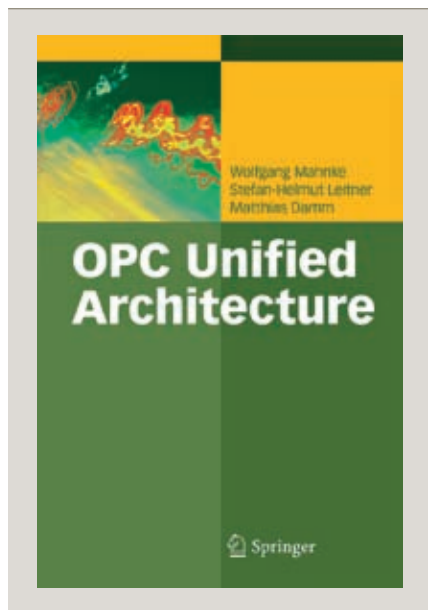
¹¹⁾ ABB 员工都可与本文作者联系，以便获得培训或访问 ABB 共享点服务器的机会。

能效与标准

ABB 坚定地支持 OPC UA，承诺提供必要的资源，确保足够的培训课程，有关 OPC UA 概念的介绍内容已准备就绪。为便于 ABB 内部使用，还提供以 C++ 为基础的第三方 OPC UA 软件开发工具包 (SDK)。然后，通过共享点服务器，提供最新消息，不断更新工具包，让全世界的 ABB OPC UA 团体都了解相关信息^[11]。

ABB 也参与了 OPC 基金会早期的采纳者计划，帮助开发了以 ANSI C 为基础的 OPC UA 堆栈，开发安全模块

5 作者写了一本有关 OPC UA 构架体系的书 (OPC Unified Architecture)，进一步探讨了一些高级课题。



并参加代码审核。堆栈的便携式设计促使 ABB 开发了与 VxWorks 软件连接的端口，目前流行的实时操作系统像 AC800M 那样，在多种 ABB 控制器和机器人控制器 (IRC5) 上运行。此外，OPC 基金会还提供堆栈端口，使其与 Linux 和 Windows 操作系统连接。

规范开发结束后，ABB 参与了 OPC 基金会组织互操作性车间的工作，确保 ABB 的 OPC UA 应用软件互操作性与第三方执行软件相适应，包括 ICONICS、西门子、Beckhoff、Kepware 和 OSIsoft 的软件。

ABB 坚定地支持 OPC UA，承诺提供必要的资源，确保足够的培训课程，OPC UA 概念的介绍内容已准备就绪。

在现场设备 (FDI) 和分析仪设备 (ADI) 的 OPC UA 基础上，ABB 参与了标准信息模型的开发。此外，ABB 也是 PLCopen 组织成员，为 IEC 61131-3 标准语言定义了一个以 OPC UA 为基础的信息模型。

在内部展示和培训，以及 ABB 参加的 OPC UA 开发会议和其它活动中，

都强调了 ABB 在 OPC UA 开发中所起的领导作用及其作为技术领导厂商的重要角色。ABB 决定提供 OPC UA 概念的易读版本，并对高级主题展开进一步探讨，作者在其第一本 OPC UA 书籍中进行了详细论述^[11] (见图 5)。

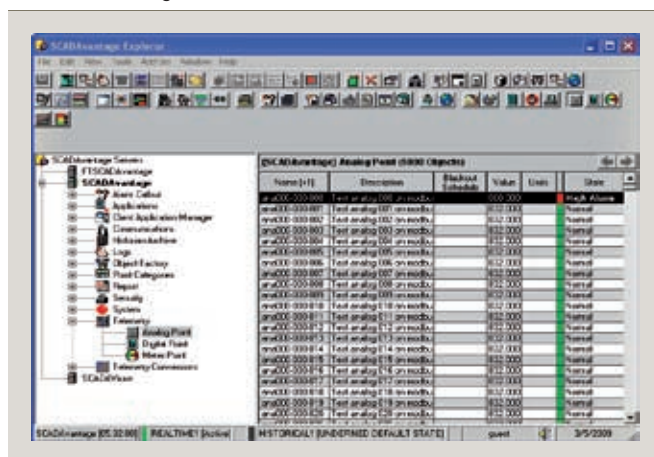
OPC UA 产品

最近，ABB 正在评估 OPC UA 在某些 ABB 产品中的应用情况。其他情况已经评估完毕，OPC UA 兼容产品正在开发。在这些早期产品中，SCADA Vantage™ 将于 2010 年发布，而流程分析技术 PAT 2.0 已作为支持 OPC UA 的第一批 ABB 产品上市。

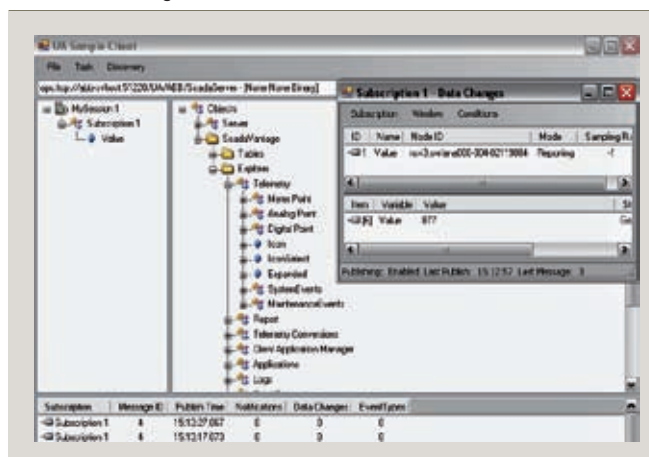
SCADA Vantage

ABB 的 Industrial™ SCADA Vantage 是监控与数据采集系统 (简称 SCADA)，通常用于石油和天然气工业 (见图 6)，所提供的信息包括各种实例和类型、最新数据、报警和事件以及沿革。同样的信息可由一台 OPC UA 服务器 (见图 7) 自身公布。因此，SCADA Vantage 数据以标准的方式公布，可被第三方使用，也可以集成到以 OPC UA 为客户端的其它 ABB 产品中。带有 OPC UA 服务器的 SCADA Vantage 发布时间预计在

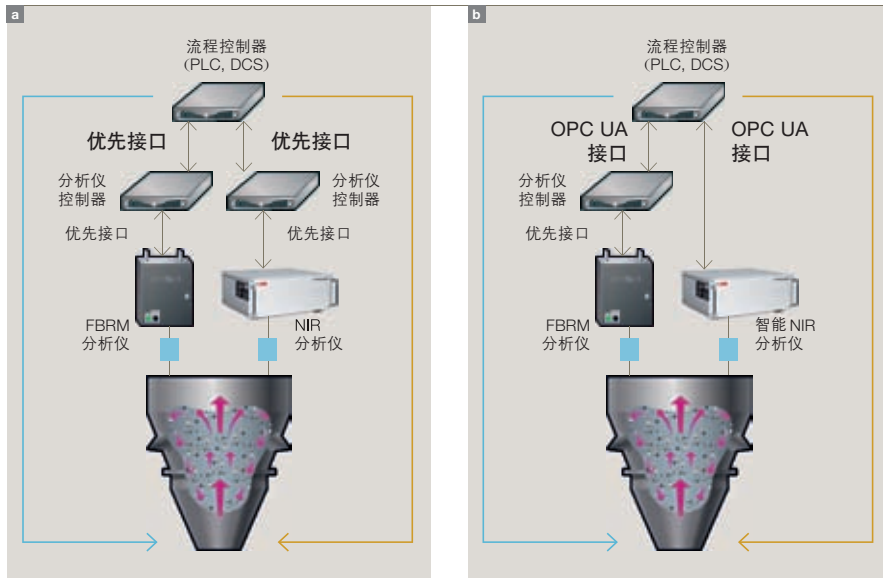
6 SCADA Vantage 现场浏览器



7 SCADA Vantage 的 OPC UA 视图



8 OPC UA 既可采用分析仪控制器 **a**，提供给每个分析仪的优先接口，也可采用支持 OPC UA 的全部分析仪设备的 OPC UA **b**，帮助 xPAT 集成分析仪。



2010年。以后的版本也将有 OPC UA 客户端，让 OPC UA 服务器集成到 SCADA Vantage 中。

流程分析技术

ABB 的 Industrial^{IT} eXtended PAT 于 2007 年发布，该软件促进了分析测量技术与制造流程的集成，得到 OPC UA 支持的主要升级版于 2009 年一季度发布。OPC UA 为流程分析设备提供标准化的连接方式。凭借强大的集成能力和功能，xPAT 软件设计在生命科学工业领域贯穿整个药品的生命周期，包括从药物的

发明到开发，一直到生产，帮助客户提高质量。

流程分析技术 PAT 2.0 版已作为支持 OPC UA 的第一批 ABB 产品上市。

与分析仪集成时，ABB 的 xPAT 采用了 OPC UA 服务器（见图 8），它既可以安装在分析仪控制器上，也可以直接安装在分析仪装置上，这就不需要增加额外的硬件。如采用 ADI 信息模型，它不但可以使数据

的通信方式标准化，还可以了解什么数据在进行交换。

其他供货商

由其他供货商提供的第一批产品在该标准发布之前已经上市。这些产品包括使用 OPC UA 进行内部通信的 ICONICS、HMI/SCADA 系统和 GENESIS 64，以及 Beckhoff 的 Twin-Cat 系统和 Kepware 的 KEPServerEx 系统，这两种产品都在控制器上运行，另外还包括西门子的 SIMATIC NET。这一领域竞争激烈，他们都承诺在 2009 年推出第一批 OPC UA 产品，其中包括艾默生、霍尼韦尔、Wonderware 和横河公司。

SCADA Vantage 数据以标准化方式公布，允许第三方使用，并可集成到拥有 OPC UA 客户端的 ABB 其它产品中。

前景展望

OPC UA 采用现代化的、可靠、安全的高性能技术替代传统的 OPC，基于 OPC UA 的标准信息模型将自动化系统的互操作性提高到新水平。依靠 OPC 基金会提供的封装器和代理服务，可确保现有的 OPC 产品在 OPC UA 环境中工作。

参考文献：

- [1] OPC Foundation: Devices, Draft Version 0.75, Dec. 2008
- [2] OPC Foundation: Analyzer Devices, Draft Version 0.30.00, Dec. 2008
- [3] OPC Foundation: UA Spec. Part 4 – Services, Version 1.01, Feb. 2009
- [4] OPC Foundation: UA Spec. Part 3 – Address Space Model, Version 1.01, Feb. 2009
- [5] OPC Foundation: UA Spec. Part 5 – Information Model, Version 1.01, Feb. 2009
- [6] OPC Foundation: UA Spec. Part 8 – Data Access, Version 1.01, Feb. 2009
- [7] OPC Foundation: UA Spec. Part 9 – Alarms and Conditions, DRAFT Version 0.93q, Nov. 2007
- [8] OPC Foundation: UA Spec. Part 10 – Programs, Version 1.00, Jan. 2007
- [9] OPC Foundation: UA Spec. Part 11 – Historical Access, Version 1.00, Jan. 2007
- [10] OPC Foundation: UA Spec. Part 13 – Aggregates, RC Version 1.0, July 2008
- [11] Mahnke, W., Leitner, S.-H., Damm, M. (2009). OPC Unified Architecture. Springer Verlag.

延伸阅读：

- OPC Foundation: UA Spec. Part 6 – Concepts, Version 1.00, Feb. 2009
 OPC Foundation: UA Spec. Part 7 – Profiles, Version 1.00 Feb. 2009

Wolfgang Mahnke

Stefan-Helmut Leitner

ABB 研究中心

德国拉登堡

wolfgang.mahnke@de.abb.com

stefan.leitner@de.abb.com

安全的数据转换

子系统集成中工厂工程设计所面临的成本效益挑战

Peter Erning, Kurt Langer, Hartmut Rüdele, Dirk Schulz

语言翻译并非易事。翻译不当容易产生误会，甚至会造成交流完全中断。类似情况也会发生在自动控制系统中，甚至更严重。因为制造商使用的标准各不相同，子系统集成时需要工程数据的转换，以实现与集散控制系统（DCS）的通信。

现在使用的集散控制系统，比如流程控制或发电厂的系统，复杂程度很高而且经常由不同供应商的子系统集成而成。为优化集成，子系统的工程数据必须适用整个控制系统。因而，所面临的挑战在于把这些数据转换成能被控制系统理解的格式。虽然人工转换也有可能，但劳动强度过大，且容易出错。ABB 提出，可将子系统工程数据自动转换到 ABB 的 800xA 自动化系统中。现已开发出具有这种功能的原型，可用于自动集成 MNS iS 低压开关设备和 IEC 61850 变电站自动控制系统。

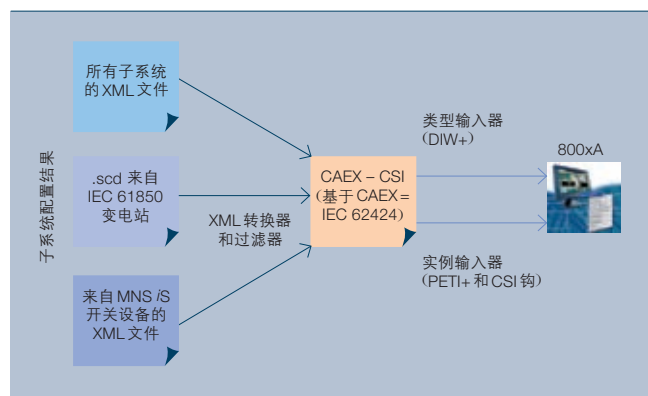


早期用于过程自动化的集散控制系统 (DCS) 由同一个供应商提供相同类型的解决方案。这些供应商可提供几乎所有系统组件，并使用他们自己专用的工程工具完成整个项目。多年后，过程自动化结构种类也变得越来越。随着微电子技术的迅猛发展，控制技术和先进的功能已使工业车间现场控制成为可能。

提供灵活的软件工具是目前面临的挑战，把之前子系统的全部工程数据自动导入到 DCS 中，减少手工工作量。

对于自动化系统来说，这意味着现在要把全部子系统集成到 DCS 中。因此，这就要求不同供应商的、不同体系结构的子系统间能进行通讯，并且作为一个 DCS 而进行工作。比如，一个子系统的工程数据必须在整个 DCS 中各个部分都能读取。要实现这一目标，主控制系统必须能够访问子系统的工程体系结构。

1 集成系统概念



本文讨论子系统的主要共性如下：它们既独立于 DCS，同时又具有特殊工艺流程。比如，智能现场设备的现场总线网络、低-中-高压开关设备系统、工艺流程的机械和设备。

提供灵活的软件工具是目前面临的挑战，把之前子系统的全部工程数据自动导入到 DCS 中，减少手工工作量。为此，ABB 启动了一个研发项目，可以自动将 ABB 的 MNS / S¹⁾ 低压开关设备系统和基于 IEC 61850 的变电站²⁾的工程数据导入到 ABB 的 800xA 自动化平台。

问题描述和范围

工厂工程项目通常涉及不同的合作伙伴和供应商。其工程流程的复杂性

和相应的工程难度取决于多种因素：车间类型、项目工程在生命周期中所处的阶段、系统体系结构，供货范围、产品特性、工具和文件（以纸质、计算机可读格式，以及不同公司独立团队采取的其它方式），数据存储和车间子系统之间的信息交换。

对于车间自动控制部分，可以把一个控制系统视为一个传统 DCS 和其它子系统的组合，这些子系统呈现出 DCS 的某些特点，如他们的结构体系、仪器仪表、控制、通信和工程工具等。现场总线系统，低-中-高压 (LV、MV、HV) 开关设备系统和特殊流程的机械设备都是这样的自动控制系统。

本文重点讨论能将 DCS 所需子系统中全部工程数据自动录入的适当方法，避免以后人工录入子系统工具中的数据。

脚注：

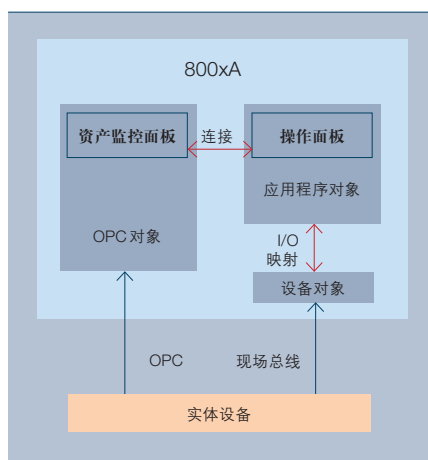
¹⁾ MNS / S 是 ABB 低压开关设备平台。MNS 表示模块化低压开关设备。

²⁾ IEC 61850 是变电站通讯和集成的现代标准。



能效与标准

■ 系统 800xA 中的对象模型



资料库 客户和 ABB 内部利益

所述概念和方案拥有如下优点：

- 手工进行子系统集成工作量大幅减少，只需配置输入器软件工具和增加对象类型。其余的工作，因为对象实例可自动生成，所以与子系统大小无关。这就大大减少了工程时间，同时改善了质量。
- 该做法能通过输入工具分清子系统供应商和 DCS 供应商之间的职责。
- 子系统提供者无需考虑系统 800xA 方面的特殊界面和未来变化。所有整合任务都可以模式化为 XML 文件 (CAEX-CSI)，并由子系统专用转换器生成。
- DCS 供应商负责系统 800xA 方面的共用输入器工具，同时，如果遇到变化，也能保证恰当地处理信息二次上传。
- 这种做法为现行和将来的协议做准备 (PROFIBUS、Profinet IO、IEC 61850、OPC 等)。
- 规定不同交货时间表，工程工作流程效果会更好 (参见“发展前景”段落)。

这里所说的“子系统”指任何具有以下特点的系统：

1. 子系统内的工程数据以计算机可读格式存在。
2. 子系统提供至少一种开放式通信界面。

手工可以完成工程数据集成，但出错率高，浪费人力。因此开发专用系统集成工具是一个有效的改进方法。无论如何，这些工具必须包括所集成系统和 DCS 的专业知识 (这里的 DCS 指 ABB 系统 800xA 扩展自动控制系统)。

中间文件的体系与每个子系统无关，这样可从 DCS 中分离出子系统。

因此，人们强烈渴望建立一种能把外部工程数据输入到系统 800xA 中去的通用做法。这样，基于子系统专用工程文件中所包含的数据，输入机制能在 800xA 中自动创建并配置对象。该机制必须为对象提供多条通信路径 (如现场总线、OPC³⁾)，同时仍为用户提供一种通用界面。系统 800xA 具有面向对象的结构。为充分利用这一优势，这应该在子系统输入的配置中有所体现。由于子系统通常规定了具体项目的对象类型，因而在系统 800xA 中也必须生成这种对象类型，并提供定制的图形界面。这项制作过程应在对象类型层面上完成，而不是在实例层面上做。此外，该集成概念应该提供一种通用方法，而不是对每个子系统提供单独的集成工具 (后者维护成本很高)。输入机制还要考虑初始数据的变更，因此需要提供二次上传

数据功能 (如智能变更管理)。最后，为了尽量减少额外维护，来自系统 800xA 的现有工具应尽可能实现重复利用。

解决方案

为应对这些挑战，现已开发出一种通用的输入方法。图 1 所示为该方法的整体布局。先将子系统专用数据文件转换成中间文件，然后将该文件输入到现有输入工具中，在系统 800xA DCS 中生成并配置出相应的对象。使用与子系统无关的中间文件可以实现子系统的分离 (即从 DCS 知识领域分离出子系统的知识领域)。

这种方法取决于几个软件组件的相互作用。首先，转换器必须能转换子系统特有信息。所有信息以专用 XML 文件格式存储在 DCS 中，并能为 DCS 提取，可转换成中间格式。该信息包含监控数据、位置信息和文件数据。需要指出的是，工程数据不一定要符合面向对象范型。因此有必要分析每个对象以及成组相同对象特性，并确定相应的类型和实例树。

整个方法的核心是中间数据格式 (CAEX-CSI)⁴⁾。中间文件的体系独立于每个子系统，从而实现子系统从 DCS 中分离。该文件包含了对所用设备的定义和子系统类型以及实例

脚注：

³⁾ OPC 是微软公司开发的标准，用于不同厂商提供的控制设备之间的实时通信。如今，OPC 已正式命名，不再作为首字母缩写词。它最初代表用于流程控制的 OLE。OLE 代表对象连接和嵌入系统，文件嵌入和连接技术也由微软开发，参见本期《ABB 评论》第 56 页“OPC 统一构架体系”

⁴⁾ CAEX：计算机辅助工程电子交换，用于车间信息的中间数据交换格式，由 IEC 62424 定义。CAEX-CSI 代表 CAEX 综合设备和子系统集成 (研发项目名称)。

层面的信息。类型的信息可直接存储于中间文件。为了减少转换工作量，也可以结合相应设备说明文件详细说明（如用于PROFIBUS装置的GSD⁵⁾文件）。

中间文件的信息输入分两步完成，第一步，分析类型信息，在系统800xA中生成相应的类型。输入类型确定之后，可以手工修改新建的类型（例如，创建图形界面）。第二步，解析实例信息，在DCS中生成设备层面信息，将设备对象实体化并加以配置。

一般而言，每个装置都有一种以上实例（见图2）：用于恢复原始过程数据的设备对象和在操作员面板上处理和显示数据的应用对象。如果存在其它的通信路径（例如OPC），还会有装备资产监视器的第三个实例。这些对象间的相互连接也由实例输入器自动完成。

成功案例

用于两类子系统（ABB新型低压开关设备系统MNS iS和基于IEC 61850的高中压系统）的功能样机已开发成功。这种情况下，基于XML的系统说明文件可从专有子系统工程工具中获得。MNS iS和IEC 61850的第一款转换器也已完成。

用于两类子系统（ABB新型低压开关设备系统MNS iS和基于IEC 61850的高中压系统）的功能样机已开发成功。

CAEX-CSI数据输入器包括以下原型组件：

- 用于对象类型输入的DIW（设备输入向导）是ABB一款拓展了功能的产品（见图1，原型“DIW+”）。
- PETI（流程工程工具整合）是ABB现有产品，能够从CAEX输入实例，一旦发生改变，可对信息二次

上传进行适当的处理。下一版PETI将满足CSI的其他要求（见图1，“PETI+”）。

- 特殊方位系统（“CSI钩”）可确保每个对象获得一个工作的OPC连接，并正确连接到对象专用面板。

转换和输入工作流程由一个轻量框架应用程序提供支持。图3描述了MNS iS框架应用程序，它连接上层的组件并引导用户完成每个整合步骤。

发展前景

除了将现有的输入器原型进一步开发成产品以外，另一个重点是关注整个工程流程。在车间项目进度表中，决定采用各子系统会迟于DCS工程进展，这种情况并不少见。因此，必须加以利用从车间工程工具中所获取的更多数据（如来源于Innotec公司的Comos或来源于Intergraph公司的SmartPlant），并合并来自子系统的数据（见图4）。

图3 工程数据集成工作流程

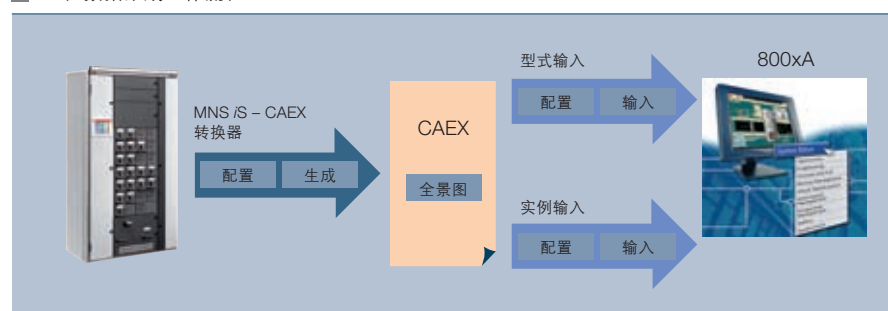
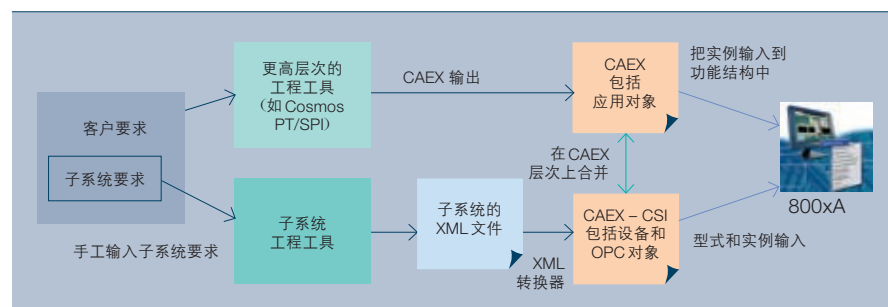


图4 CAEX简化合并工程数据多种路径



本文最初以“子系统集成——车间工程成本效益挑战”的标题刊登在©atp international 1/2008 (Oldenbourg Industrieverlag GmbH)。现改编用于《ABB评论》。

Peter Erning

Kurt Langer

Hartmut Rüdele

Dirk Schulz

ABB研究中心

德国拉登堡

peter.erning@de.abb.com

kurt.langer@de.abb.com

hartmut.ruede@de.abb.com

dirk.schulz@de.abb.com

脚注：

⁵⁾ GSD：Geräte-Stamm-Daten（设备主控数据），是PROFIBUS的描述文件。



高压套管

100 年来的技术进步

Lars Jonsson, Rutger Johansson

可靠性永远是能源市场的核心需求之一。在电力变压器特定的使用寿命中就有这样一个有关可靠性的实例，它往往需要保持50年以上的功能。对于高压套管而言，这一核心需求非常重要，因为它是所有电网的关键元件，旨在防止与地面之间产生闪络。

虽然许多电力行业人士仍只将套管看作是空心的陶瓷元件，用作导体的保护罩，但它所执行的任务并不寻常，涉及到先进的生产和设计技术，使用寿命超过了应用要求。

完善的计算和设计工具、经过改进的材料和生产技术、以及广泛的专业知识是ABB瑞典公司在开发生产高压套管方面100多年积累的成果。作为世界上最大的套管供应商——ABB的旗舰工厂位于瑞典卢德维卡，配有最先进的生产线，以满足可靠性和电压等级日益提高的需求。

套管通过接地外壳为输送高压电流的导线绝缘。在不产生闪络的情况下，安全地完成这项任务是工厂面临的一大挑战，因为与相连接的设备规模相比，套管的尺寸很小。在整个生命周期，就这一领域的套管性能而言，控制其应力（即电压、电流和热机械应力）对保持正确尺寸极为重要。

高压电容器套管

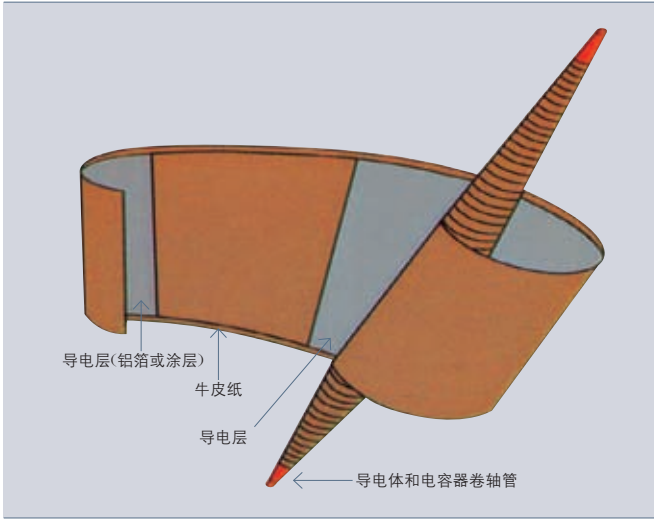
电容器套管通过插入柱形的铝制浮动式屏蔽罩控制电应力。屏蔽罩所在的电容器芯可降低电场梯度，使电场沿着绝缘子的长度方向分布，使其在电容器芯中呈现径向和轴向分布（见图 1）。屏蔽罩处于同轴位置上，以确保外部闪络与内部击穿强度（即电容器芯的耐电强度）之间的最佳平衡。

二十世纪初期，套管采用干式绝缘，由酚醛塑料（树脂涂层）纸和铝箔制成，其边缘与电容器芯和陶瓷绝缘体粘合在一起。

多年来，电容器套管始终保持相同的基本设计形式。导体采用特殊的电容纸封包，而金属电极则巧妙地封装在这一纸包内。这些用来控制套管的电场。除了用电容纸，其柱体采用变压器级的矿物油或环氧树脂浸渍，以进一步提高耐电性能。因此，套管实际上是一种封闭装置，完全与应用环境隔离。

矿物油浸渍纸（OIP）和树脂浸渍纸（RIP）是高压电容器生产中使用的两项主要技术。RIP 技术在为更好地

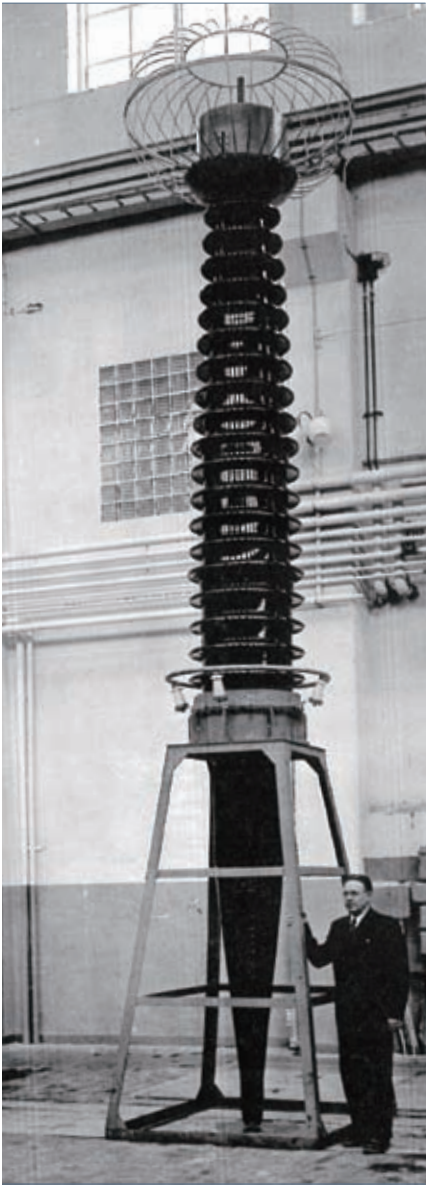
1 电容器芯示意图



提高整体性能指标作出了重要贡献。电容器芯的设计则有所不同，采用可固化的环氧树脂真空浸渍，然后形成一个结实耐用的单元，无需矿物油（见图 2）。

这两个系统的设计和制造具有长寿命和无故障的性能特点，确保了较低的局部放电，当它远高于额定电压时，具有足够的空间散热，以防过热。

五十年代的 400 kV 交流套管



其外层的绝缘既可采用陶瓷材料，也可采用聚合物。陶瓷绝缘体的使用已有悠久的历史，今后还将使用多年。然而，在可预见的未来，它们的作用很可能会逐渐削弱，因为工业界正在寻求性能经过改进的绝缘体，以降低整体成本和提高安全性、增强抗震能力和防污染性能、以及降低绝缘体的重量。

控制电压、热电流和机械应力，使套管保持合理的尺寸至关重要。

为了尽可能满足更多的要求，套管系统的配置和生产，其系统电压高达 1,100 kV AC 和 800 kV DC 的水平，在试验时甚至更高。在卢德维卡工厂开发生产的最大套管是长度为 15 米的 1800 kV 交流变压器套管。工厂的生产并不局限于电压等级或套管尺寸，而是适应市场需求，今天使用的最高电压等级为 1,100 kV AC 和 800 kV DC。

高压套管的历史回顾

二十世纪初，套管采用干式绝缘，由酚醛塑料（树脂涂层）纸和铝箔

永远的开拓先锋

制成，其边缘与电容器芯和陶瓷绝缘体粘合在一起，这些产品可承载高达190 kV的电压。

上世纪三十年代，电压提高到220 kV，导电层改用石墨材料。今天，一些制造商仍在使用石墨材料（如半导体层）。电容器芯与外层绝缘体之间的空间充满油，并与变压器相通。

上世纪六十年代，高压油浸套管已成为主导技术，即使今天，其市场份额仍超过80%。

上世纪四十年代，电压上升到400 kV，此时已开始使用油浸电容器芯，并封装在油和陶瓷绝缘的封套内。

但早期的套管局部放电现象严重，其介质损耗因数（ $\tan \delta$ ）随着系统电压的升高而增加。虽然这对低电压而言已经足够，但却只给提高电压应用范围留下很少的空间。六十年代初，电压升高到756 kV，这项过时的技术被OIP系统取代。

于是，ABB向加拿大魁北克省水电站提供了第一套705 kV套管。

那时，油浸套管已成为主导技术（今天依然如此，其市场占有率超过百分之八十）。OIP套管继续发展，而树脂粘结的套管则已停产。所谓干式套管，常常指RIP套管，这种产品已推向市场，其市场份额不断增加。

七十年代开始研发600 kV的高压直流套管，而且，试验装置所需的1,800 kV交流高压套管也着手研制。尽管这两套系统都采用油绝缘，但在设计方面有很大区别。

RIP套管的研发始于六十年代，ABB瑞士的姊妹工厂在1989年生产出420 kV套管，并于1996年生产出525 kV套管。干式技术的重新启用源于强大的现代化计算工具及材料和生产技术进步。

最近（2006年）的研发成果是高压直流变压器和800 kV直流穿墙套管，

它们已经通过短期和长期的测试验证。在直流应力作用下，随着时间的推延，材料的特性会发生变化，因此在新产品投入使用前，直流设计需要通过长期的试验得到验证。根据设计和生产流程中的经验，以及计算工具开发获得的成果，已将诸如离子迁移和依赖于时间的电荷分布等机制考虑在内。作为开发800 kV直流套管所获知识的合理延续，下一步将可能研发1000 kV直流套管。

为高达1,100 kV交流和800 kV直流的系统电压配置和生产的套管。

2007年，ABB为中国设计了高达1100 kV的交流套管，其长期建立起来的交流电网电压等级已经从800 kV增加到1,000 kV（见图3）。这一设计获益于七十年代研发1,800 kV套管时的经验。

为适应日益升高的电压和复杂的应用，开发套管需要丰富的经验和

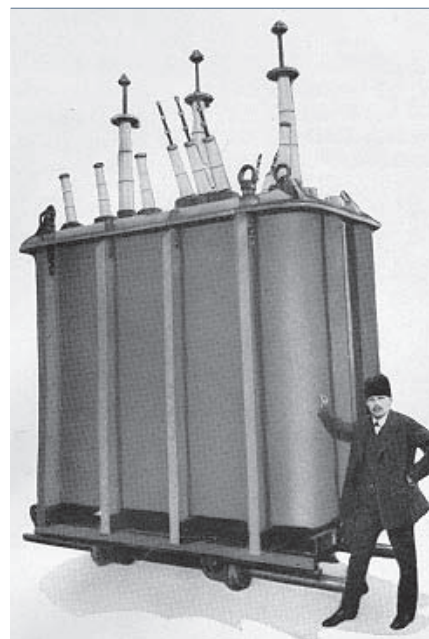
2 RIP套管的浸渍车间



3 1,100 kV交流套管的安装（2008年）



上世纪初的变压器



知识，以及远高于额定电压的试验设备。今天，ABB的设施均可满足所有要求。

技术挑战

在这样复杂的设备中，技术挑战是内在的主要问题。设备的最高电压通常受到物理尺寸限制（即较长的距离具有较高的耐电能力）。此外，在高电压等级下，会出现另一个复杂问题，即绝缘体发热。在低电压情况下，经过适当处理的套管，其绝缘体的损耗可忽略不计，但在高电压条件下，它们将发挥举足轻重的作用。

大约 60 °C 时，绝缘材料的损耗因数最低，然后随着温度的升高而逐步增加。产生的热量必须通过绝缘体和套管的表面散发出去。因此，对每个套管而言，都存在一个极限，如果超过这一极限，将会导致散热能力不足，因而无法控制温度上升。这种现象被称为热失控现象，最终会导致套管的击穿。

2007 年，ABB 为中国设计了高达 1,100 kV 的交流套管，其长期建立起来的交流电网电压等级已经从 800 kV 增加到 1,000 kV。

散热极限即热稳定性。套管要求在最高电压等级下能保持充分的热稳定性，同时还要考虑由负荷电流产生的电阻损耗以及前面所述的电容损耗。因此，套管最大允许电流和电压产生的绝缘体损耗，必须进行合并鉴定和分别鉴定。设计合理的套管，绝缘体损耗和额定电流并不是关键，低损耗的要求对使用寿命不会产生太大的影响。

RIP 技术比 OIP 技术面临更大的挑战。因为真空条件下浸油是一个相对比较直接和宽泛的流程，从这个意义上来说，套管内的所有零件外部都充满油，并在整个生命周期都保持为液体状态。因此，必须以高度的注意力并采用最新的设计工具开发和生产无孔隙产品。

为了充分模拟这一特定的生产过程，有必要将相关的数学公式纳入到理论模型之中，因为放热反应、热化学收缩和空气循环都在这一过程发生。基于模拟的模型可提供因果分析，如果没有这一分析，不正确的固化效应、高温梯度、局部过热、高应变和高应力（造成裂缝）及收缩现象就可能会发生。除了生产

装有卢德维卡套管的 Konti Skan II 变压器。Konti Skan 是丹麦与瑞典之间的高压直流输电线路。



800 kV 直流换流变压器（2008 年）



新型特高压试验设备（2009年）



流程的数字化模拟之外，还要重点关注选择适当的材料、确定 RIP 材料，以优化生产，同时还需要考虑现场的生产能力。

ABB 处于优化生产流程的前沿，其可靠性和质量达到了前所未有的高水平。

OIP 和 RIP 套管都属于复杂产品，与全球现有的其它产品相比，这两种产品无论在生产设备上，还在研发上都需要高投资。随着电压和电流的不断升高，其复杂性也大幅提升。但正是这些挑战，推动 ABB 为客户提供不断优化的最新套管。

确保质量

几十年来，套管生产持续发展，产量极其客观。当然，这并不意味着已经走到了尽头。

ABB 处于优化生产流程的前沿，其可靠性和质量达到了前所未有的高水平。这显然体现在最关键的生产步骤中，例如在电容器芯的绕线过程中，采用最先进的机械控制绕线过程和均压屏蔽罩插入件，或者在其干燥和浸油过程中，由计算机和经验丰富的团队，进行监测和控制。

过去几年，另一个领域也出现快速的发展，就是通过实施新技术，进行统计流程控制和流程限值的自动检查。

全球性的报告网络已建立起来，它要求 ABB 的所有业务单元向其报告 24 小时内发生的所有重大事件。这为各种事件的分类提供了良好的基础。然后召开跨部门会议，审核和确定这一信息的优先次序，并在

设计和生产中相继采取正确的或预防性的行动。

ABB 在套管生产和开发方面具有非常重要地位，其工厂分布在巴西、中国、印度、俄罗斯、南非、瑞士、美国，特别在瑞典的生产研发更为重要。

Lars Jonsson
Rutger Johansson
 ABB 电力产品业务
 瑞典卢德维卡
 lars.y.jonsson@se.abb.com
 rutger.johansson@se.abb.com

延伸阅读：

Holaus, W., Stucki, F. 断路器创新：特高压开关设备服务中国电网。《ABB 评论》4/2008, 20~24。

Heinemann, L., Besold, F. 结构紧凑 性能可靠：几十年的受益：52 kV 至 1,100 kV 的气体绝缘组合电器 (GIS)。《ABB 评论》1/2009, 92~98。

编委会

唐维诗
ABB 集团首席技术官

Clarissa Haller
ABB 集团企业传播负责人

Ron Popper
ABB 集团可持续发展事务负责人

Axel Kuhr
ABB 集团客户负责人

Friedrich Pinnekamp
ABB 集团企业战略副总裁

Andreas Moglestue
《ABB 评论》主编
andreas.moglestue@ch.abb.com

出版人

《ABB 评论》由 ABB 集团 R&D 和 Technology 出版。

ABB Asea Brown Boveri Ltd.
ABB Review/REV
瑞士苏黎世 CH-8050

《ABB 评论》每年出版四期，以英文、法文、德文、西班牙文、中文和俄文出版。
《ABB 评论》免费提供给对 ABB 技术及其目标感兴趣的人士。欲免费订阅《ABB 评论》，请与您最近的 ABB 办事处联系，或者上网订阅：

www.abb.com/abbreview

部分印刷或复印需经认可。
再版需经出版人书面同意。

出版人和版权 © 2009
ABB Asea Brown Boveri Ltd.
瑞士苏黎世

印刷
Vorarlberger Verlagsanstalt GmbH
AT-6850 Dornbirn/奥地利

排版
DAVILLA Werbeagentur GmbH
AT-6900 Bregenz/奥地利

声明

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方面的咨询和建议，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。

本刊已翻译成中文，所有文档应以英文版本为准。

ISSN: 1013-3119

www.abb.com/abbreview

2009 年第四期预览



崇尚创新

取得一种前所未有的全新成果着实令人向往。在 ABB，如果一个新的想法能够为客户或者为社会带来真正的利益，这种兴奋感会更强。ABB 研究中心以及遍布全球各业务部门的科学家和工程师正在持续不断地进行创新活动，其中许多创新将会确定未来的产品及其用途。

《ABB 评论》每年第四期都专门介绍本年度的最佳创新成果。挑选这些成果并不容易，最后刊登出来的成果也只是其中的部分代表。

这些技术创新中有一项成果如上图所示。Busch-priOn® 控制板是 ABB 集团成员企业 Busch-Jaeger 开发的房间智能控制概念的一部分。该控制板发光环设计时尚，感觉就像未来的设计，但其作用远不止第一眼所见。颜色在这里随着相关条件（如与控制要求有关）而变化，它使多功能的界面直观而易懂。这一概念由于其在沟通交流设计方面的创新，获得了国际著名的“红点设计奖”。



将城市能耗降低 30 % ?

作为增效节能解决方案的领先供应商，ABB 的楼宇智能化电力控制系统，ABB 的过程工业全方位能源管理系统，ABB 的高压直流输电系统等，都可以帮助大幅度实现节能减排的目标。当人人都在谈论能源价格，电力短缺和气候变化之时，ABB 已经行动多时了。欲了解更多，请登录 www.abb.com/energyefficiency

当然能实现。

用电力与效率
创造美好世界™

