

下一代的电网——智能电网

裴 玮 齐智平

1. 电力与文明

自人类进入文明社会以来，电的发明是人类最伟大的发明之一。1831年，法拉第发现了电磁感应。1864年，麦克斯韦用纯数学的方法将全部电磁现象规律归结表述为两组方程，以优美的数学组合方式表达了电磁场的存在。1888年，特斯拉发明了交流多相电力传输系统，标志着现代电网雏形的形成，掀起并推动了第二次工业革命的浪潮，在短短一百年的时间内，使人类的生活发生了天翻地覆的变化。

一百多年后的今天，现代电网已经成为世界上最大的人造系统，覆盖了几乎所有有人的地区。电力在我们的生活中已经是如此的平常与熟悉，以至于我们可能并没有意识到，电力已经成为主导世界文明与科技发展方向的强大动力，已经主宰了我们的生活。我们生活的几乎所有方面都已经与电力交融在一起无法分离，甚至可以说电网在我们世界里的延伸就是文明的延伸。



图1 从太空鸟瞰地球的夜晚

最简单直观的证明就是从太空鸟瞰地球的夜晚，我们可以看到越亮的地方往往也是经济与文明越发达的地方。

2. 电网再次面对挑战

电力尽管是我们社会文明的重要驱动能源，但是它是二次能源，它并不能凭空产生，它从煤炭、天然气、水力等一次能源转换而来，通过送电线路、变电所、配电所和配电线路联结成网，送到千家万户。而在这一系列转换和输送过程中，大量的能源被浪费，煤炭等中所蕴含的能量最后被我们真正使用的在一些情况下甚至不足4%。同时我

国的发电比重以火电为主，而火力发电厂又主要以燃煤为主，在发电过程中大量温室气体和污染物排放到地球的大气中。长年累月的 SO_2 等污染物排放，直接通过植物的叶面吸收，很短的时间内就可以引起植被大面积的枯死，并诱发雾霾等恶劣天气频发。

随着电网变成了一个巨大的网络，各类事故也开始频发，近年来臭名昭著的停电事故包括：美国8.14大停电、欧洲11.4大停电、巴西11.10大停电、印度7.30大停电、我国2008年南方冰雪灾害大停电，等等。这些事故波及的时间

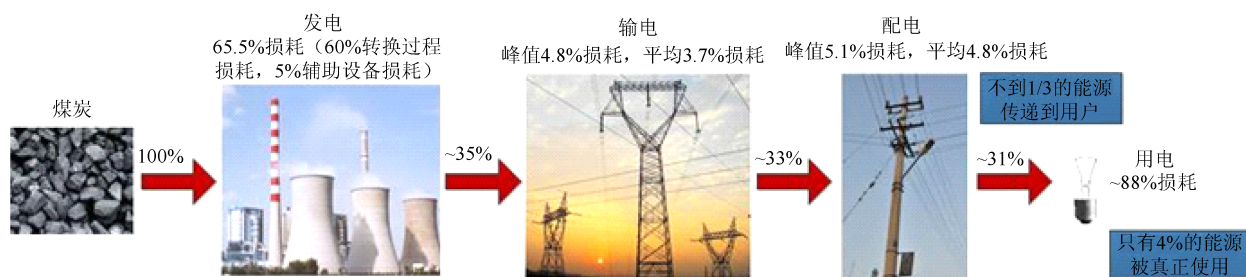


图2 电力生产与转换过程的损耗

长、人口多、地区广、损失大。

比如从 2003 年 8 月 14 日起,美国中西部、东北部及加拿大安大略省遭受了长达 4 天至 1 星期的大面积停电事件,造成美国俄亥俄、密歇根、宾西法尼亚、佛蒙特、马萨诸塞、康涅狄格、新泽西以及加拿大安大略等地区约 61800 MW 的负荷损失,影响到约 5000 万人口,停电范围 9300 多平方英里,经济损失每天达 300 亿美元。再比如 2006 年 11 月 4 日,西欧多国发生造成了波及 1000 万人口、时间长达 2 小时的大面积严重停电事故,事故波及法国和德国人口最密集的地区,以及比利时、意大利、西班牙、奥地利的多个重要城市,德国著名的鲁尔工业区以及工业重镇科隆一度瘫痪,数十个城市陷入一片黑暗。

这些事故往往是由一些非常微小的事件触发的,美国 8.14 大停电仅仅是夏日空调负荷增加,导致俄亥俄与克里夫兰的联络线 345 kV 线路重载后,下垂过大碰到夏天里疯长的树,随后一系列事故和人员不正确处置触发了长达 8 分钟

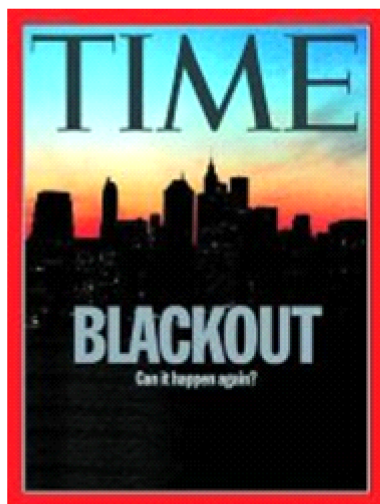
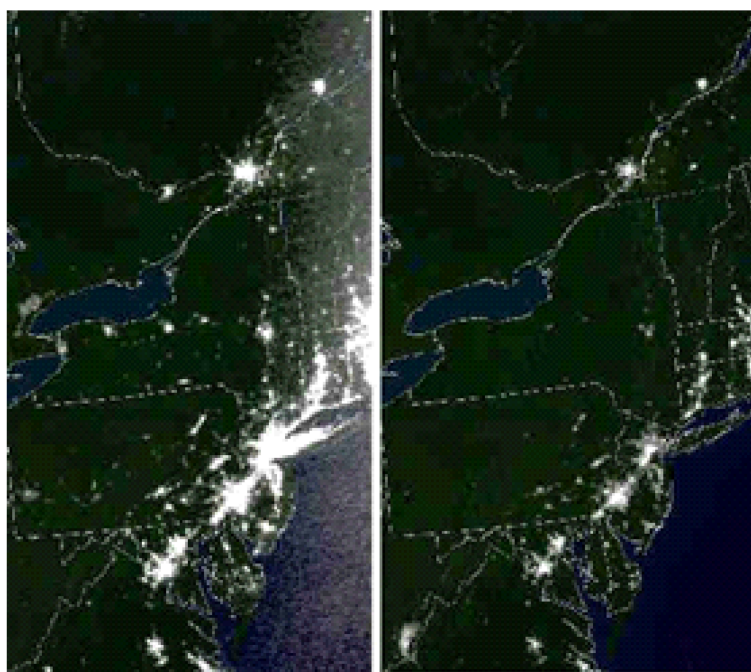


图3 登上《时代周刊》的 8.14 大停电



(a) 停电前 (b) 停电后
图4 美加大停电前后夜间光亮卫星图对比

之久的雪崩式系统解列,原本联成一张的电网分崩离析,形成大停电。而欧洲 11.4 大停电事故起因仅仅是因为要让一艘名为“挪威珍珠”号的客轮通过埃姆斯河进入北海,而停运科勒佛德 (Conneforde) 至迪勒 (Diele) 双回 380 kV 线路,导致连锁反应发生,事故迅速扩展,同样导致电网分崩离析。

从这些事故来看,如果无应对措施任其发展,或应对措施实施过程中不能准确地实时监控和分析系统安全稳定状况,正确处理事故,我们看似强壮的互联大电网在小概率事件以及灾害发生时,也会发生诸如系统崩溃的灾难性后果。

综合这些因素,世界各国都意识到能源、资源和环境已成为制约现代经济社会持续快速发展的瓶颈。面对日渐严峻的资源环境问题、剧烈波动的能源价格、快速攀

升的用电负荷以及更优质的用户服务质量要求,电网作为全社会重要的能源输送和配给网络,面对着社会可持续发展的重大需求和挑战。建设更加安全、可靠、环保、经济的电力系统已经成为全世界电力行业的共同目标。而我们现在的电网还是第二次世界大战后形成的以大机组、超高压、互联大电网为特征的规模化电网,这一代电网严重依赖于化石能源,电网从发电到输电到电表都基于 20 世纪的技术,电网安全风险难以降低,不是可持续发展的电网模式。

下一代的未来智能电网就是在这背景下提出的,它是这一代电网在新能源革命下的传承和发展,支持大规模新能源电力,大幅降低电网安全风险,并广泛融合信息通信技术,是未来可持续发展的能源体系的重要组成部分,是电网

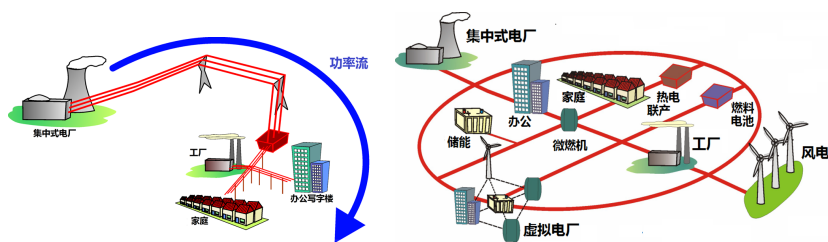


图5 从今天的电网到未来智能电网

发展可持续化、智能化的阶段。

3. 什么是智能电网？

通过与信息化、智能化等技术相结合所发展出的未来智能电网，它有原来一堆死气沉沉的机器网络变成了一个拥有智慧的“智能人”。

它拥有明亮的眼睛——遍布电网各个角落的传感器及网络：眼观六路、耳听八方。通过安装传感器以接近实时地监控电网，对电网的运行状态和设备的健康状态进行连续的在线评估，并采取预防性的控制手段，使电网与设备运行在最佳状态。同时这双眼睛能够及时发现、快速诊断和消除故障隐患，确定设备的最佳检修时机，优化安排检修模式。

它拥有智慧的大脑——通过实时分析、调度与决策中心，采用人工神经网络、专家系统、数据挖掘、人工智能等最新的信息技术构成大脑回路，分辨信息，甄别故障，自动处理。在没有或少量人工干预下，能够快速隔离故障、自我恢复，避免大面积停电的发生，实现从“调度员人工决策”到“系统智能化自动决策控制”的转变。

它拥有灵敏的神经——高速、双向、实时、集成的通信系统。如同人类的神经系统，将内、外环境的各种信息，通过周围神经传递到脑和脊髓的各级中枢进行整合。通

信的高可靠性与高带宽，保证支持智能电网各类数据和指令上传下发的巨量数据流，并形成“即插即用”的环境，使电网设备之间能够进行网络通信；统一的技术标准，实现设备和设备之间、设备和系统之间、系统和系统之间的互操作功能。

它拥有强健的骨骼——高可靠性的电网结构和输配电设备，如同人类的骨骼，决定了系统的抗冲击能力。坚强的网架结构是智能电网发展的基础，通过加强区域间互联、建设分布式电源等手段，将能够有效地抵御自然灾害、战争、人为误操作、设备老化等导致的大规模停电事故。同时广泛应用电力电子、超导、大容量储能等先进的设备，将进一步扩充输配电系统的性能，提升网络的潮流控制能力，降低网络损耗。

它拥有健康的核心——更加绿色的能源，包括太阳能、风能、地热能、氢能和生物质能等，代替现在燃煤火电厂。智能电网通过将可再生能源安全输送、纳入调度甚至参与系统调节，达到安全高效利用可再生能源的目的，将能够大大减少污染物和温室气体排放。

它拥有灵活的四肢——提供更加多元化、人性化的服务，能够更加适应客户的自主选择需要，适

应如电动车等新类型的用户，并为其提供服务。智能电网能够更加适应高度市场化的电力交易的需要，在现在的业务模式下，用户只是被动地接受供电，而随着电动汽车和分布式能源的大规模发展，用户的用电模式和行为将会发生巨大变化，也提供了用户主动响应的能力。用户可以响应分时电价或激励措施而改变消费方式，从而在电力市场价格较高或系统可靠性受到威胁时减少用电量，实现系统安全、削峰填谷和节能减排。同时供电公司也可以在系统可靠性受到威胁等情况下，切断用户的智能电器等设备以减少负荷需求，确保系统稳定运行。

4. 智能电网将悄然走入生活

智能电网技术正在飞速发展，建设也在紧锣密鼓地进行，可以预见在不远的将来，智能电网将逐渐走入我们的生活，我们今天就或许可以依照智能电网发展的技术和建设的目标，畅想一下我们未来的智能电网生活。

绿色的电网——通过智能电网，我们的生活变得越来越低碳。智能电网强大的输送能力和资源配置能力，实现大规模可再生能源的跨区域、远距离、高效率、大容量输送，我们在自己家里就能用上来自于甘肃、内蒙古、新疆等西北部有“陆上三峡”之称的风电。同时我们自己家里的屋顶就可以安装光伏发电，自己发电自己使用，不足部分从电网购买，若有多余电能还可以出售给电网。我们利用电动汽车出行，零排放、无噪声，不论我们的电动汽车停在哪里充电，电网

都能自动识别，并把账单寄给我们。雾霾天气逐渐远离我们的城市，我们的天空重新回到蓝色。

互动的电网——智能电表就像我们的用电管家，通过它，我们能够随时随地控制家里电器工作和休息，并且分门别类地告诉我们家里每个电器的用电明细，查询哪个电器用的电量多、哪个电器最节能，清晰掌握我们电量使用情况。同时我们家里的电价会根据一天中不同时刻动态更新，比如用电高峰时段，电价会自动上扬，智能电表将会帮助我们提出最优的用电计划，制定合理的节能方案，引导我们在日常生活中节约能源，提高环保意识。

自愈的电网——智能电网通过进行连续不断的在线自我评估以预测电网可能出现的问题，发现已经存在的或正在发展的问题，并立

即采取措施加以控制或纠正，构筑起自己的免疫系统和防线。当电网受到故障扰动、攻击或是自然灾害时，智能电网能够自动甄别故障类型和等级，定位故障地点，并采取必要措施防止故障扩散，并能够通过启动备用电厂等手段自我恢复。同时电网技术人员能够清晰地了解电网运行状况，在必要时候介入控制。在长时间故障和灾害情况下，我们能够通过建设在用户侧的分布式能源形成独立的微型电网，保障通信、金融等关键部门运转，维持社会稳定，并指挥抢险救灾。

这些仅仅是未来智能电网生活的冰山一角，在未来信息化带化、智能化、物联网、云计算等新兴技术的催生下，一个绿色、互动、高效、坚强的电网即将展现在我们眼前，为我们的社会提供更加便捷、

安全、优质的能源供给。

5. 智能电网发展任重道远

智能电网能够实现电网运行的可靠、安全、经济、高效、环境友好和使用安全，全方位地支持和促进全国范围的资源优化配置以及新型能源发展方式和新型电能利用方式的进步，由此还能带动以IT为特点的其他相关产业和服务业的大发展，它将是一个必然的发展趋势。同时智能电网是一个庞大的系统工程，它不仅需要电力行业中装备制造、建设、发电、运营、科研等几乎所有专业单位的参与，也需要多行业、多学科、多领域的交叉，更需要政府主导和政策支持，这说明智能电网的发展和建设将会是前沿技术不断应用和集成，电网运行方式不断变革的长期过程。

（北京中国科学院电工研究所 100190）

（上接 30 页）德国大学合作，研制成小型高温超导磁悬浮车试验装置。采用地面初级同步直线电机牵引，地面永磁轨道与车载高温超导块磁悬浮形式。

2000 年，西南交通大学研制成载人高温超导磁悬浮车，采用地面初级异步电动机牵引，地面永磁轨道，车载高温超导块磁悬浮形式。

总的来看，世界各国高温超导磁悬浮车的研究基本上还停留在磁悬浮原理的研究上，距离实际运

行车辆的研制还有很长的一段路要走。

九、结束语

将车辆悬浮在轨道上运行是人类的梦想，经过半个世纪的努力，这一梦想初步实现了。磁悬浮列车开始于德国、日本，他们有功于人类，但中国人让高速磁悬浮车驶出实验室，驶向社会大众，同样功不可没。

人类的追求永不停止，汽车、

火车不是人类出行的永恒，磁悬浮列车同样也不会是交通工具的终结，现在他们相辅相成，将来也会共同发展。

（北京中国科学院电工研究所 100190）

