



李永东

清华大学教授，博士生导师，先进电能变换与电气化交通团队负责人，清华大学新概念技术汽车研究院副院长。IEEE IAS Beijing Chapter Chair, IET and CES Fellow，中国电工技术学会会士兼电力电子分会副理事长，中国电源学会常务理事兼电气化交通专委会主任，中国自动化学会电气自动化专委会副主任，俄罗斯工程院外籍院士和俄罗斯自然科学院外籍院士。

历添新岁月，春满旧山河。

随着电力电子技术、电机及控制技术、计算机技术的发展，以电力电子变频电源控制的交流电机传动系统早已成为电气传动的主流。发展电气传动用变频电源产业与技术，对我国重大工程装备、高端/智能制造、电气化交通和国防建设的发展具有重要的战略意义。

回望过去，电力电子和电机变频领域经历了无数变革与创新，从家用电器到电动汽车和高铁，再到智慧城市，每一项技术突破都见证了行业的共同成长与努力。感谢这个时代，给予我们如此广阔的舞台去施展才华；感谢这个领域，让我们有机会为人类社会的进步贡献力量。

同时，电气化交通在国家能源安全和国防建设上具有重要的战略意义，第二次电子革命及其在陆海空天潜领域中都有着广阔的应用，如能源革命和智能网联为汽车产业创新发展注入了新动力。

新的一年，我们面临的挑战与机遇并存。随着可再生能源的大力发展和智能电网的建设，电力电子技术将扮演更加重要的角色。让我们携手共进，以开放的心态和创新的思维，迎接每一个挑战，抓住每一个机遇。

在这辞旧迎新的时刻，向关心支持行业发展的专家、企业家和业内人士致以最诚挚的问候、最衷心的感谢和最美好的祝愿！祝福《变频器世界》杂志越办越好！为我国电力电子技术和变频产业的发展再立新功！

第二次能源和电子革命 及其在陆海空天潜领域中的应用

清华大学教授，新概念汽车研究院副院长
中国电源学会电气化交通专委会主任 李永东

编者按：

值此新年，回望过去，电力电子领域经历了无数变革与创新，从家用电器到轨道交通，从陆上储能到海上发电，每一项技术突破都见证了行业的共同成长与努力。第二次能源和电子革命及其在陆海空天潜领域中都有着优异的应用。

以国产化、轻量化、高效能为导向，以新型宽禁带半导体材料、永磁同步高速电机、高能效电传动系统为支撑，高速安全、绿色高效、节能环保依然是轨道交通行业发展的主要目标；能源革命和智能网联为汽车产业创新发展注入了新动力；大力推进和发展我国船舶海工装备的先进制造、智能制造的关键技术，大力推进制造工艺、制造质量的提升，形成我国先进的船舶电气装备的制造能力。

在此背景下，清华大学电机系李永东教授的报告《第二次能源和电子革命及其在陆海空天潜领域中的应用》重磅出炉。本报告着重阐述第二次能源 / 电力和电子革命的现状与发展趋势，站在创新高度解读了第二次能源和电子革命，特别是在陆海空天潜和电驱动领域中的应用以及可持续发展，提出了我国电力电子功率变换和变频产业技术发展的新需求和新使命。

李永东现任清华大学电机系教授，博士生导师，先进电能变换与电气化交通团队负责人，清华大学新概念技术汽车研究院副院长。IEEE IAS Beijing Chapter Chair, IET and CES Fellow，中国电工技术学会会士兼电力电子分会副理事长，中国电源学会常务理事兼电气化交通专委会主任，中国自动化学会电气自动化专委会副主任，荣获俄罗斯自然科学院外籍院士及俄罗斯工程院外籍院士。他长期致力于高性能、大容量交流电机控制系统和应用；交流电机矢量控制和直接转矩控制理论及其数字化实现；高压大容量变换器及其在节能、高铁牵引和船舶推进等电气化交通系统中的应用。

报告分三期（2024 年 1 期、2 期和 3 期）先后刊登本刊特约《变频器世界》编委会主任李永东教授的文章。敬请期待！

【中图分类号】TM921

【文献标识码】B

【文章编号】1561-0330(2024)01-0087-11

目录

- 1 第一次能源/电力和电子革命回顾
- 2 第二次能源/电力和电子革命现状与趋势
- 3 在陆上能源和电驱动领域中的应用
- 4 在海/潜能源和电驱动领域中的应用
- 5 在空/天能源和电驱动领域中的应用
- 6 结论和展望

1 第一次能源 / 电力和电子革命回顾

1.1 第一次能源 / 电力革命回顾

砸在牛顿头上的苹果，让人类在科学的道路上
迅跑：英国完成以蒸汽机为代表的第一次工业革命，
应用于交通和制造，形成日不落帝国。

19 世纪末，英国、法国、德国、美国完成了
以发电机为代表的第二次产业革命，即电力能源革
命，形成了欧美国家在全世界的霸权地位。

其代表人物是法拉第、伏特、安培、欧姆、麦
克斯韦尔、爱迪生、特斯拉 ...



伟大的发明家、企业家爱迪生发明
或者说改进了电灯，并发明了直流
供电系统，创办了 GE 公司，带来
了照明和用电的一场革命！



“旷世奇才”特斯拉有自己想法，发
明了更适合长距离输送的交流电和交
流发电机。

1.2 第一次电子革命回顾

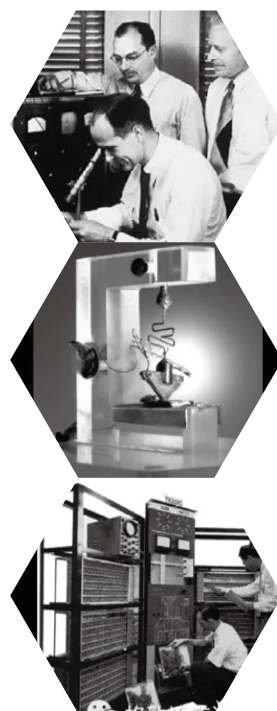
▪ 1905 年 德福雷斯特制成电子三极管，具有放大作用 → 无线电收音机（06 年）
电视机（39 年）纷纷出现。

▪ 1947 年 12 月 23 号，贝尔实验室的肖克莱、巴丁和布拉坦经过十几年的努力
终于研制成功第一支晶体二极管，体积大大缩小！

▪ 1950 年肖克莱等人又发明了晶体三极管！并于 1956 年获得 Nobel Prize！

▪ 随后的微电子（VLSI）技术产生了计算机，实现了人类的第三次产业革命。

其佼佼者是一批大学都没上完的天才：Bill Gates、Jobs、Dell、杨致远等，及微软、
IBM、HP、Yahoo、Google、Facebook 等一批信息产业高科技公司。



1.3 结语及存在的问题

19 世纪是蒸汽时代，20 世纪是电气及内燃机时代，21 世纪进入信息时代！

作为第三次产业革命信息时代重要标志的计算机是大规模集成电路（VLSIC——第一次电子革命）的产物。但是集成电路本身是弱电，不能直接驱动和控制第二次产业革命电气时代的主力——电机及各种电力能源设备。

电气及内燃机时代产生的问题：大量的煤炭用于发电，或者没有经过深加工就被烧掉，不但热利用率很低，还造成对环境的严重污染。此外，汽车发动机废气排放也是造成城市空气污染的主要原因之一，造成全球性的温室效应。

最后，化石燃料面临短缺和枯竭，全球石油储量只够使用 30~50 年，我国剩余的开采量只有世界人均的 1/10。



2 第二次能源 / 电力和电子革命现状与趋势

2.1 第二次电子革命历史和趋势

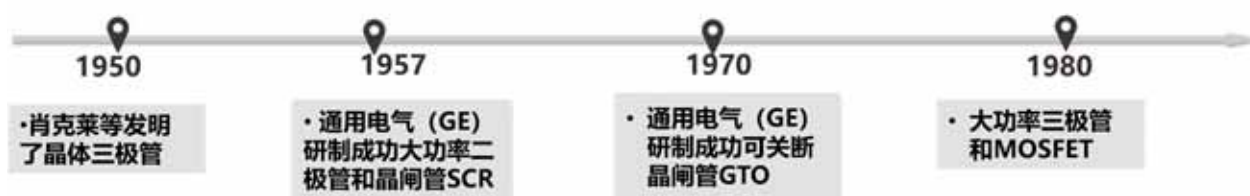
- 1950 年肖克莱等人发明了晶体三极管！并于 1956 年获得 Nobel Prize！
- 1955 年通用电气（GE）研制成功高压大容量硅整流二极管（SR），并在此基础上发明了晶闸管（Thyristor，也叫 SCR），打开了第二次电子革命处理电能的大门。
- 1970 年代初期，通用电气（GE）又研制成功可关断晶闸管 GTO。
- 1980 年代大功率三极管和 MOSFET 进入实用，进入了现代电力电子时代。



(1) 12 kV, 1500A High Voltage Thyristor (Powerex)



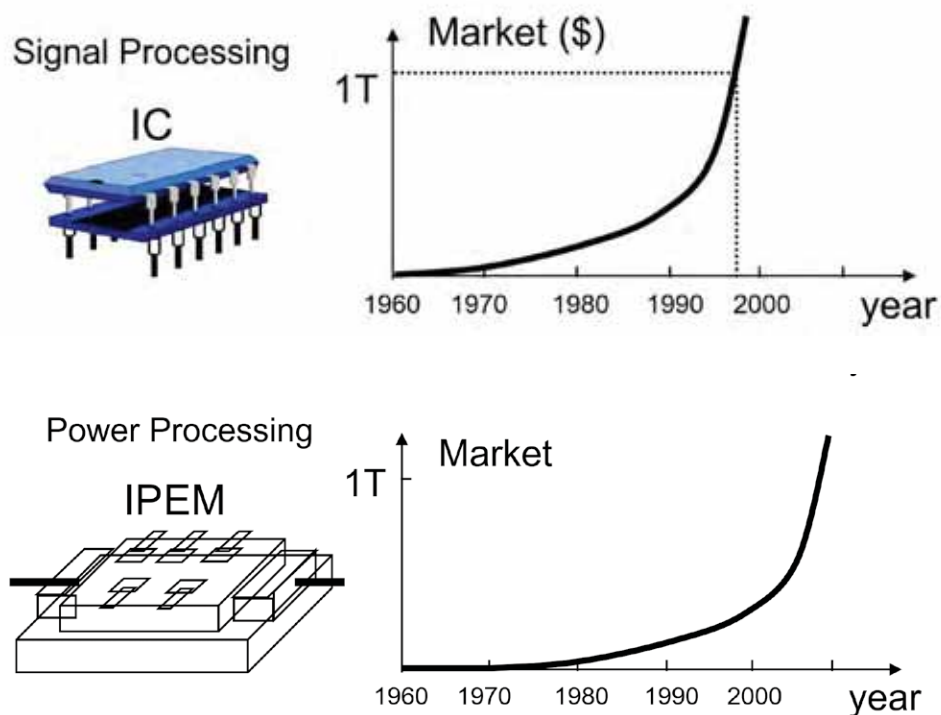
(2) 3.3kV HVIPM (Powerex / Mitsubishi)



- 1980 年 Baliga 发明了绝缘栅晶体管 IGBT ！并获 Newell 大奖和美国工程院院士。
- 1990 年，ABB 公司研制成功门极换流晶闸管 IGCT，并用于直流输电。
- 1995 年，CREE 公司研制成功商业化碳化硅 SiC MOSFET，成为第三代（WBG：宽禁带）半导体器件的标志，可用于高压、高频电力电子电能变换器中。
- 2010 年，Lido 等发明了氮化镓 GaN，开启了第二次电子革命的超高频大门。



第一次电子革命是微纳电子技术→信息处理，带来信息（IT）产业大爆炸（摩尔定律）；
第二次电子革命是电力电子技术→能量处理，实现能源生产消费革命和传统产业的改造。



2.2 第二次能源 / 电力革命现状与应用

第二次电子革命的核心技术电力电子是能量处理技术，实现了电力能源的第二次革命（新能源和发输用电的节能）和传统产业的改造。

在新型电力系统发输电中，电力电子技术可用于水力和风力发电的变速恒频励磁系统、直流输电（HVDC）、无功补偿（SVC、SVG、STATCOM）、储能调峰（抽水蓄能、制储用氢、超导储能）中，大大提高系统的稳定性和传输能力。

例如，抽水蓄能电站具有调峰、调频、调压、系统备用等多种功能，在相当长时间内是新型电力系统的主要调节电源，也是实现“双碳”目标的重要手段。我国目前抽蓄总装机容量仅占总发电装机的 1.5%，规模严重滞后于新型电力系统需求。

此外，化学储能技术目前相对比较成熟，已经进入大规模应用阶段！

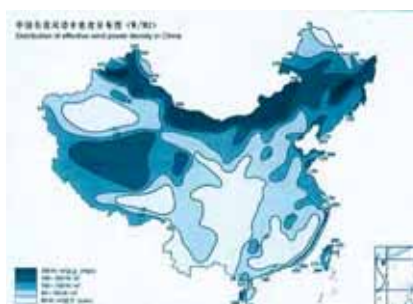


②

如全球风能的资源是巨大的，每年高达 53 万亿千瓦小时，是水能资源的 10 倍！是 2020 年全球电力需求的两倍！此外，风能还是一种清洁的、可再生的能源！

此外，全球太阳能市场呈指数级增长。2022 年，全球太阳能发电量达到 1 TW，我国太阳能发电量将达到 54.9 GW。到 2025 年，全球太阳能装机容量将增加一倍以上，达到 2.3 TW。

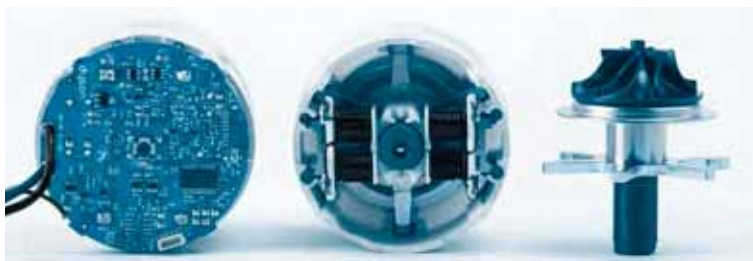
目前，在新能源基础上发展起来分布式发电和微电网也在迅速推进。



第二次电子革命的核心技术电力电子是能量处理技术，实现了电力能源的第二次革命（新能源和发输用电的节能）和传统产业的改造。

我国能源生产总值居于世界前茅，但是单位产值能耗太大，节能方面差距很大。我国发电量的 60% ~ 70% 用于推动电动机做功，其中 90% 的电机是交流电机，大部分为 400 ~ 40000kW，3 ~ 10kV 的大功率高压交流电动机。由于采用直接恒速拖动，每年造成大量的能源浪费。

占工业用电 30% 以上的各种风机、泵类负载，工况变化较大，如采用交流调速技术实现变速运行，节能效果明显。以平均节电 20% 计算，对全国来说年节电 600 亿度，同时可以相应减少 2000 万吨发电用煤，50 万吨二氧化硫和 1200 万吨二氧化碳的排放，是双碳目标的重要手段。改造完毕形成的产业市场容量达 2000 亿元。



第二次电子革命的核心技术电力电子是能量处理技术，实现了电力能源的第二次革命（新能源和发输用电的节能）和传统产业的改造。

电力电子变频系统还是国家重大工程高端装备的核心部件，广泛应用于国防、能源、交通、冶金、化工、机械制造中，如：大型冷 / 热连轧机传动、工矿企业风机 / 泵负载和提升机、西气东输大型压缩机、南水北调大型扬水泵、国防风洞试验机、核电站给水泵等驱动系统中。

变频电源还可用于家电压缩机驱动，形成变频空调、变频冰箱、变频洗衣机、变频吸尘器等，“变频家电”走进千家万户。

2.3 结语:无所不在的应用

(1) 第二次电子革命的核心是电力电子技术，和第一次电子革命主要是信息处理不同，它是一种能量或功率处理技术，可实现能源生产消费第二次革命。

(2) 电力电子技术具有的弱电控制强电的特征，可大大促进传统产业的改造。如智能制造、自动化生产线车间广泛采用工业机器人、数控机床，其核心部件就是电力电子交流伺服变频器。变频器还可用于冶金、矿山、石化等行业。

(3) 电力电子技术不光本身是高技术，如第三代半导体器件的研发，还是很多高技术的支撑技术，如计算机、个人通讯和程控交换机中的开关电源、航空 / 航天电源、电气化交通（高铁 / EV / 船舶）就是电力电子技术的典型应用。



3 在陆上能源和电驱动领域中的应用

3.1 在陆上能源领域中的应用:柔性输电系统

新型电力系统的特点是双高：高比例新能源和高比例电力电子设备。在新型电力系统输配电中，高压大容量电力电子技术可用于高压直流输电（HVDC）、无功补偿（SVC、SVG）等装置。



我国能源资源与电力负荷需求呈逆向分布。全国约 2/3 的水电资源集中在西南地区，80% 以上的陆地风能资源和太阳能资源集中在西部、北部地区，而 70% 以上的电力消费集中在东中南部地区，能源基地距离负荷中心 1000~4000 千米。

高压输电的最大特点就是可以长距离、大容量、低损耗地输送电力。高压直流输电（HVDC）是以高压直流方式实现电能传输，在送端将三相交流电通过换流站整流变成直流电，然后通过直流输电线路送往另一个换流站逆变为三相交流电，再送入受端交流电网使用。



在新型电力系统输配电中，高压大容量电力电子技术可用于高压直流输电（HVDC）、无功补偿（SVC、SVG：用于实现电网电压的降落补偿和稳定控制，防止电网崩溃的重大事故）。

针对我国能源资源特点，国家提出了“西电东送”发展战略。特高压直流输电技术作为目前世界上电压等级最高、输送容量最大、送电距离最远、技术水平最先进的输电技术，可将经济输电距离由 1000 千米延伸至 2000 千米以上，是解决我国能源资源与电力负荷逆向分布问题、实施国家“西电东送”战略的核心技术。



依托自主创新，我国成功研发了特高压直流输电技术，使“以电代煤、以电代油、张北的风，点亮北京的灯”成为我国能源和电力发展的新特点，为我国经济社会高质量发展提供了坚强动力。

3.2 在陆上能源领域中的应用:抽水蓄能系统

储能系统包括:化学储能、飞轮储能、压缩空气储能、超导储能,超级电容储能、抽水蓄能等。

大型蓄能系统具有调峰、调频、调压、系统备用等多种功能,未来是新型电力系统的主要调节电源,也是实现“双碳”目标的重要手段。

目前,化学储能技术目前比较成熟,已经进入大规模应用阶段!正在开发的是中高压大容量储能系统。



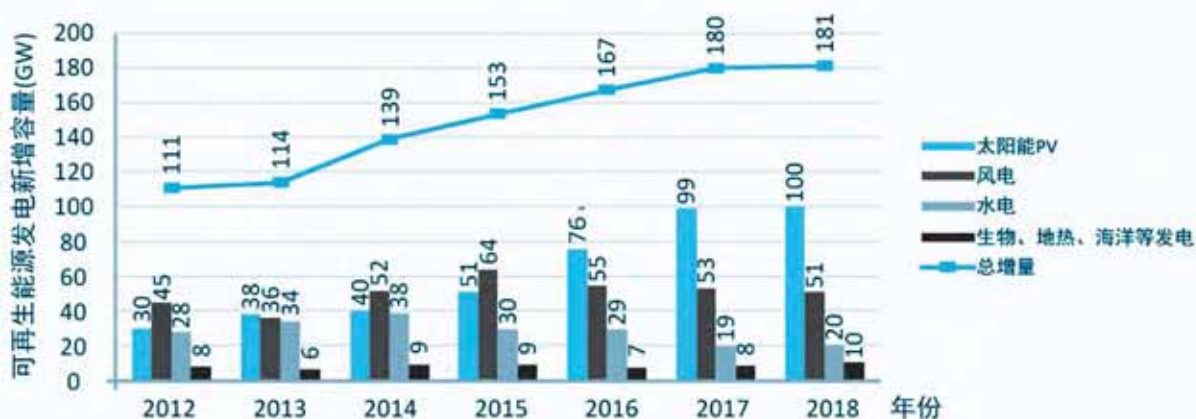
抽水蓄能电站也相对比较成熟,具有调峰、调频、调压、系统备用等多种功能,在相当长时间内是新型电力系统的主要调节电源,也是实现“双碳”目标的重要手段。我国目前抽蓄总装机容量仅占总发电装机的1.5%,规模严重滞后于新型电力系统需求。

3.3 在陆上能源领域中的应用:风力发电系统

可再生能源主要包括风能、太阳能、水能、地热能、生物质能、海洋能等能源形式。其中全球风能的资源是巨大的,每年高达53万亿千瓦时,是水能资源的10倍!是2020年全球电力需求的两倍!

风力发电被认为是技术最成熟、最具大规模开发条件和商业化发展前景的可再生能源技术形式,其发电最低成本已明显低于化石能源、核能、燃气、太阳能等多种主要能源形式。

近十年间,全球范围内风力发电的装机容量以年均14%左右的速度增长,平均每年新增装机容量约43GW。



至 2020 年，全球风电发电量将可能超过 2157TWh，达到全球电力需求的 9%；至 2030 年，全球风电发电量将可能达到 5546TWh，占全球电力需求的 18% ~ 20%；至 2050 年，全球风电发电量将可能达到 15258TWh，占全球电力需求的 36%~41%。

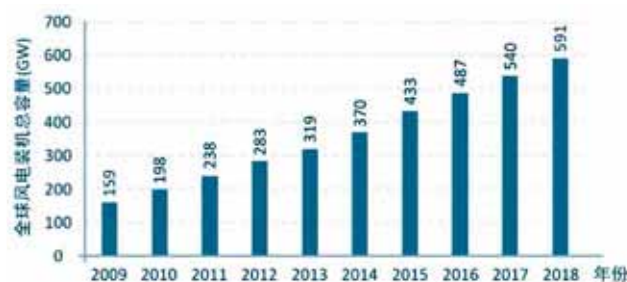
我国可再生能源储量巨大、发展迅速、产业空间巨大。2018 年，中国可再生能源领域共投入 912 亿美元（其中超过一半的资金投入到了风力发电领域），节约标准煤约 6000 万吨，减少二氧化碳排放量超过 1.5 亿吨，减少二氧化硫排放量超过 450 万吨，减少氮氧化物排放量超过 225 万吨，并提供超过 400 万个就业岗位，带来良好的经济、环境和社会效益。

3.3 风力发电系统:走向海洋

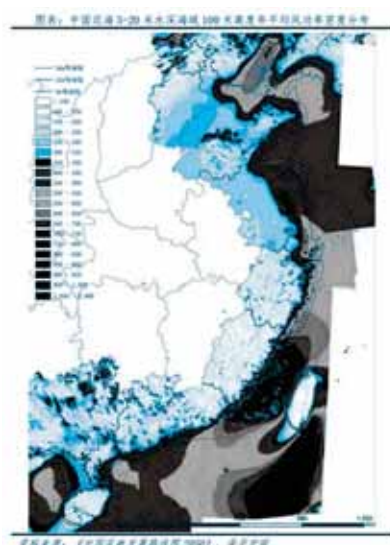
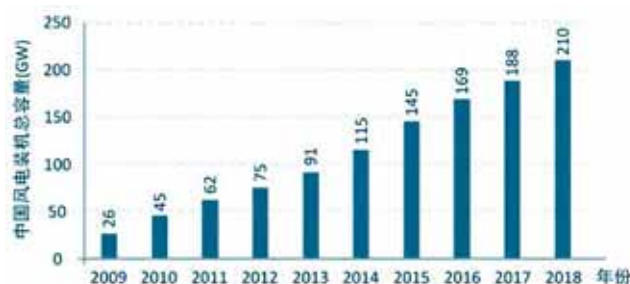
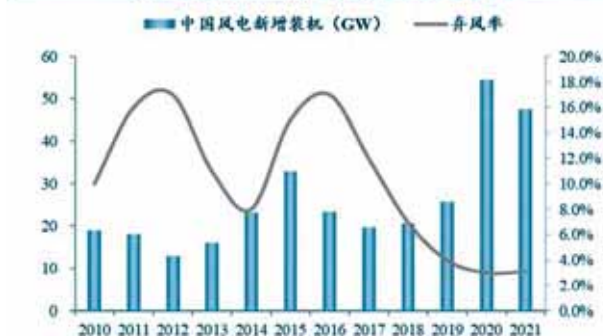
随着风力发电容量的增加以及成本的降低，风机单机容量向更大方向发展，海上风电将获得更大的发展空间，大大拓展海洋资源利用。

海上风电具有储量巨大、风能传播稳定、不占用土地资源、不消耗水资源、发电利用小时数高、生态环境影响小等特点，相比于陆地风电，海上风电更具连续性。

尤其是近海风场的出力效率更高，且靠近传统负荷中心，利于电网消纳，避免长距离输电等一系列问题，这使得海上风电受到各国的广泛关注，大规模海上风电系统已经成为未来风电发展的一个重要趋势。



图表：全国风电新增装机容量高增伴随弃风率显著下降

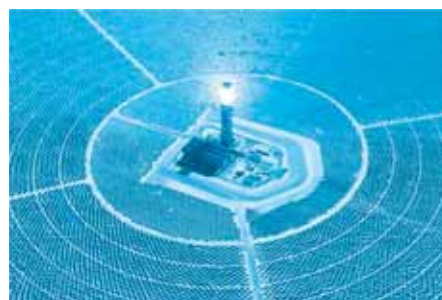
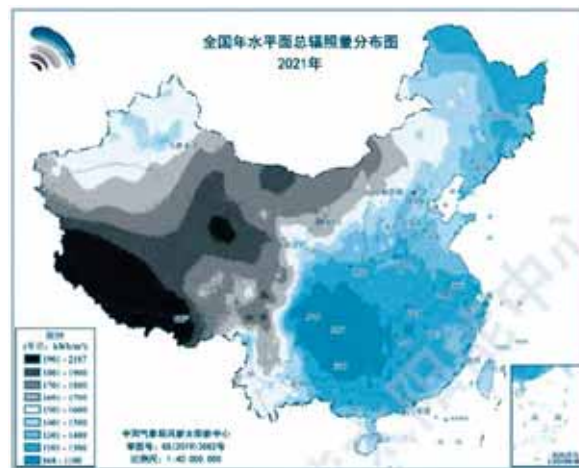


3.4 在陆上能源领域中的应用:光伏发电系统

光伏发电是太阳能光伏发电系统的简称，是一种利用太阳电池半导体材料的光伏效应，将太阳光辐射能直接转换为电能的发电系统，有独立运行和并网运行两种方式。全球太阳能市场呈指数级增长。

光伏还可分为两类，一种是集中式，如大型西北地面光伏发电系统；另一种是分布式，如工商企业、工厂、居民屋顶光伏发电系统。

2022 年，全球太阳能发电量达到 1 TW，我国太阳能发电量将达到 54.9 GW。到 2025 年，全球太阳能装机容量将达到 2.3 TW。



3.4 走向海洋:海上光伏发电

海上漂浮式光伏系统也成为研究和开发热点，全球漂浮式光伏装机容量将从 2021 年 3GW 增长到 2025 年 10GW，年增长率约为 35%。

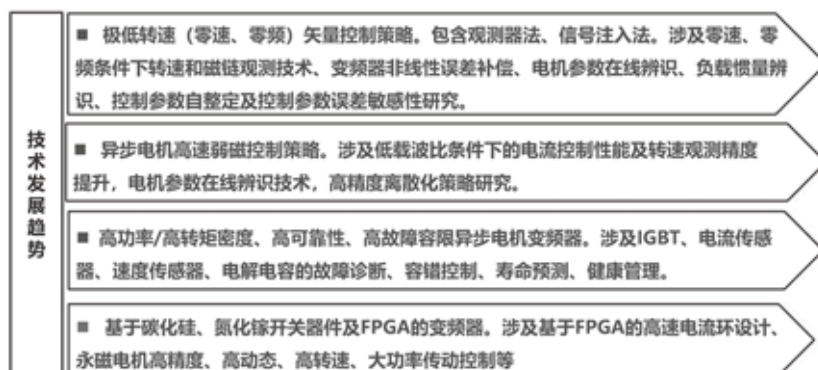
我国“十四五”可再生能源发展规划：将积极推进海上光伏等可再生能源设施的建设，其中海上漂浮式光伏发电具有重要的发展价值。

针对近海漂浮式光伏系统安全、可靠、经济运行三大挑战，我们目前的研究聚焦在解决系统应力表征与疲劳寿命机理科学问题，突破机械互联、高效变换、智能运维、系统集成等关键技术，建成兆瓦级验证平台，助力海上光伏产业发展，并实现国际引领。



上述 1-4 节所有的应用都需要电能或功率变换系统（PCS，简称 Converter，将来会变成能量路由器：Energy Router）。

3.5 变频电驱动产业技术发展趋势

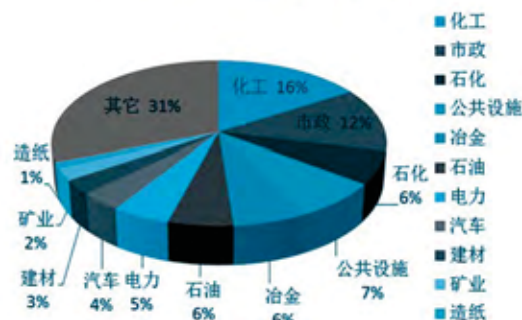


3.5.1 工业及通用变频系统国内外发展现状

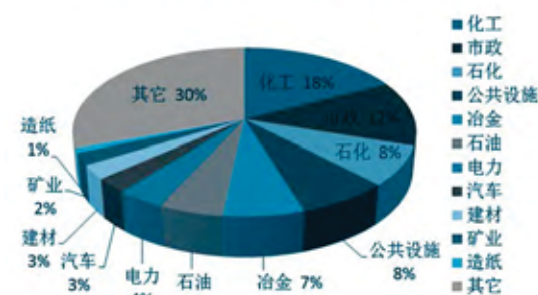
过去几年我国变频器市场规模整体处于震荡周期，2019 年中国各种变频器市场规模达 495 亿元，同比 2018 年增长 4.7%，延续了市场规模逐年增长的态势。

虽然我国经济整体保持平稳、稳中有进的发展态势，但 2020 年以来，由于新冠疫情的发生，外部环境趋紧，国内实体经济发展面临前所未有的困难，局部性和区域性问题凸显、债务和金融风险隐忧累积等问题，整体工业经济运行趋缓，进而影响工业及通用低压变频器的需求，市场趋于平缓。

2018年中国低压变频器项目细分市场份额



2019年中国低压变频器项目细分市场份额



3.5.2 工业及通用变频系统未来发展趋势

高精度控制技术：采用矢量控制技术，通过建立交流电机数学模型，准确观测电机磁链矢量，对电流矢量进行闭环控制，进一步完成磁链和转速闭环控制，实现轧钢等高性能传动。

大功率和高频率技术：发新型中压大功率变频器拓扑，将提高变频器输出电压至 3.3-6.6 kV。

绿色降耗型技术：采用低功耗电力电子器件、降低开关频率和优化开关策略、优化缓冲回路参数。

高可靠、智能型技术：优化散热、绝缘和电磁兼容空间，参数自动识别、控制器 PID 参数自整定。



(待续)