

中國科學院物理研究所
Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences



超导基础理论和实验技术讲座

National Lab for Superconductivity Lecture Series

【第93期】

超导技术在未来电网中的应用

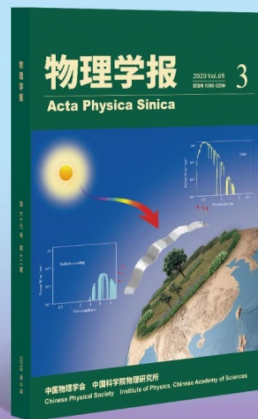
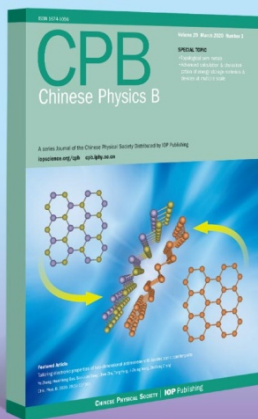
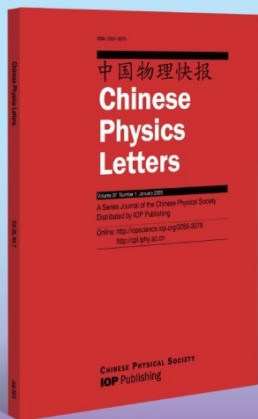


肖立业

中国科学院电工研究所

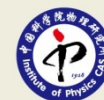
主办 中科院物理所超导国家重点实验室、学术服务部
协办 《物理学报》 | CPL | CPB | 《物理》

与中国物理学同行



欢迎关注 欢迎投稿

- ▶ CPL, CPB 和《物理学报》被SCI收录, “中国科技期刊卓越行动计划”入选期刊。
- ▶ CPL的 Express Letters 栏目对标 PRL, 质量高, 发表快, 国际推广。接收邮件投稿:
zhaiz@iphy.ac.cn
- ▶ CPB和《物理学报》刊登中英文物理学优秀原创成果, 物理学前沿研究领域专题与综述。
- ▶ 《物理》是国内权威物理类中文科普期刊, 集学科大家之力, 为读者精心奉献高品质作品。



绕组线设计制造专家

Winding Wire Design And Manufacturing Experts



- 特高压输变电装备绕组线、高速动车组牵引变压器绕组线
- 超导磁体用超导绕组线缆系列产品

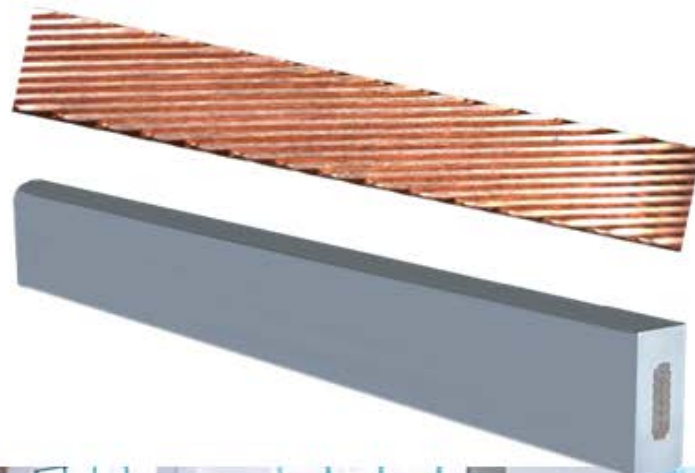
地址：江苏省无锡市锡山区东港镇勤工路22号

电话：0510-85212266

www.toly.com.cn

绕组线设计制造专家

Winding Wire Design And Manufacturing Experts





中國科學院物理研究所

Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences



超导基础理论和实验技术讲座

National Lab for Superconductivity Lecture Series

【第93期】

超导技术在未来电网中的应用



肖立业 研究员，历任中科院电工所副所长、所长，现任应用超导重点实验室主任，在超导电工技术领域取得了多项重要研究成果，其带领团队研制的世界首座高温超导变电站被两院院士评为2011年度我国十大科技进展之一。

主办 中科院物理所超导国家重点实验室、学术服务部

协办 《物理学报》 | CPL | CPB | 《物理》

超导基础理论和实验技术系列讲座

超导技术在未来电网中的应用

肖立业

中国科学院电工研究所

2020年9月2日

主要内容

- 清洁能源革命；
- 未来电网面临的挑战；
- 超导技术的潜在应用；

清洁能源革命

- ❑ 化石能源：资源有限、环境污染、碳排放造成气候变化，不可持续；
- ❑ 从化石能源主导向可再生能源（太阳能、风能等）主导转变，建成可持续发展的能源体系；



清洁能源革命的可行性与前景

- 可再生能源：太阳能、风能、水电、生物质、地热等；
- 可再生能源总量远大于人类所需

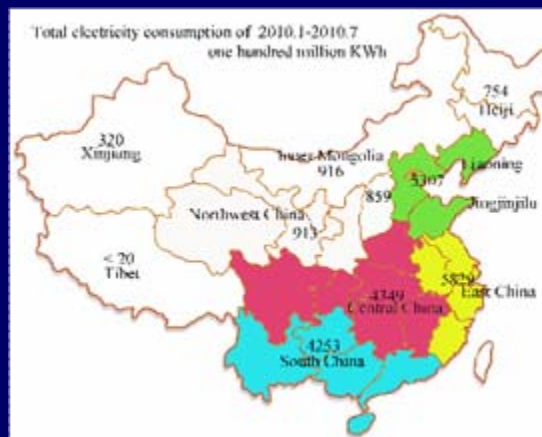
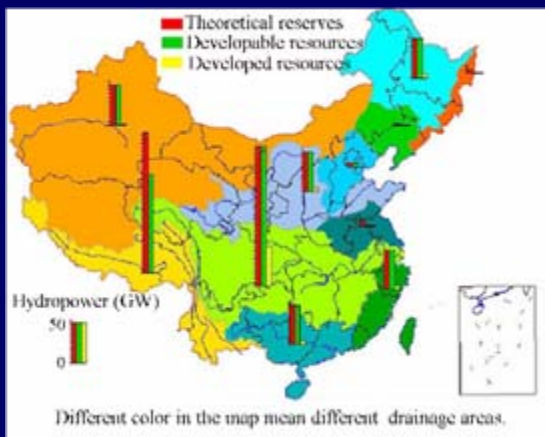
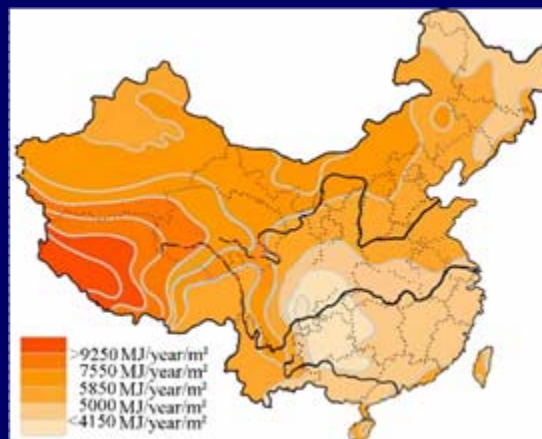
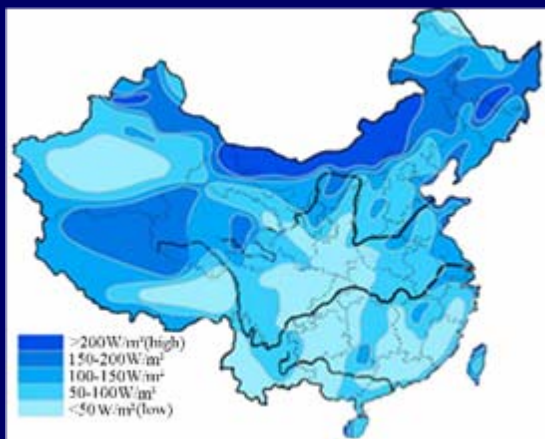


$$\frac{7.2 \times 10^{10} \text{ kW}}{1.3 \times 10^{10} \text{ kW}} = 5.5$$



$$\frac{3.0 \times 10^{24} \text{ joule/a}}{3.0 \times 10^{20} \text{ joule/a}} = 10,000$$

我国是可再生能源资源丰富的国家

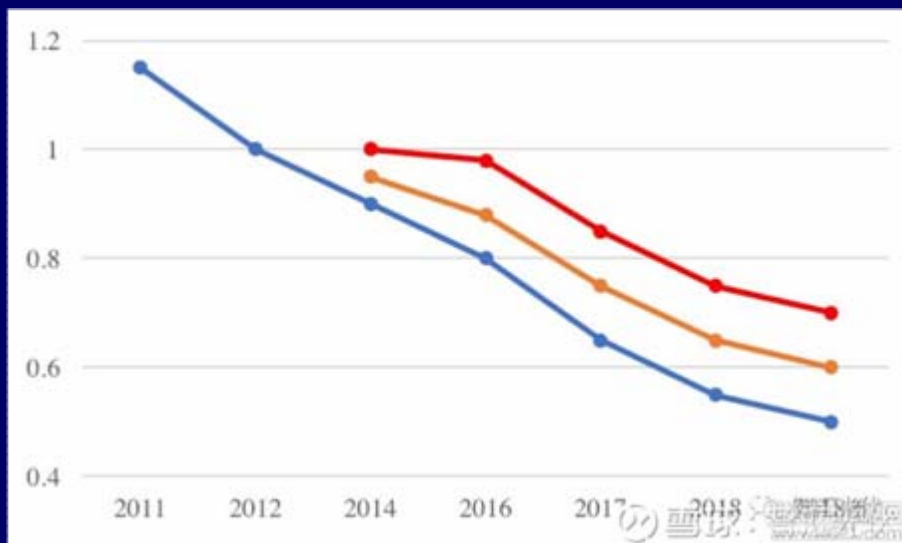


在我国西北部地区划出10万平方公里的戈壁，全部安装光伏电池板，就可满足我国目前全部能源需求。

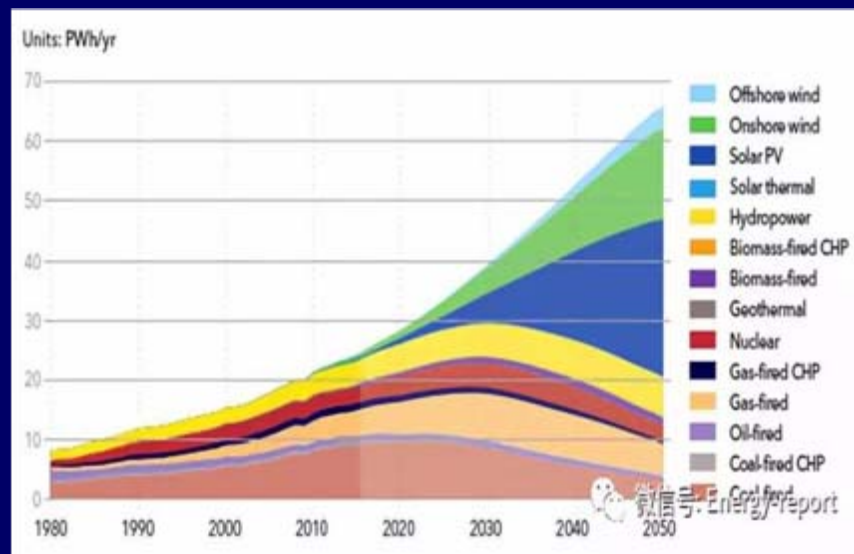
□ 可再生能源已经进入飞速的发展阶段

- 1、欧洲：德国、英国（苏格兰）、丹麦等；
- 2、中国：可再生能源总量增加最快，但占能源消耗比重小；
- 3、美国：总量仅次于中国；
- 4、印度、日本等；

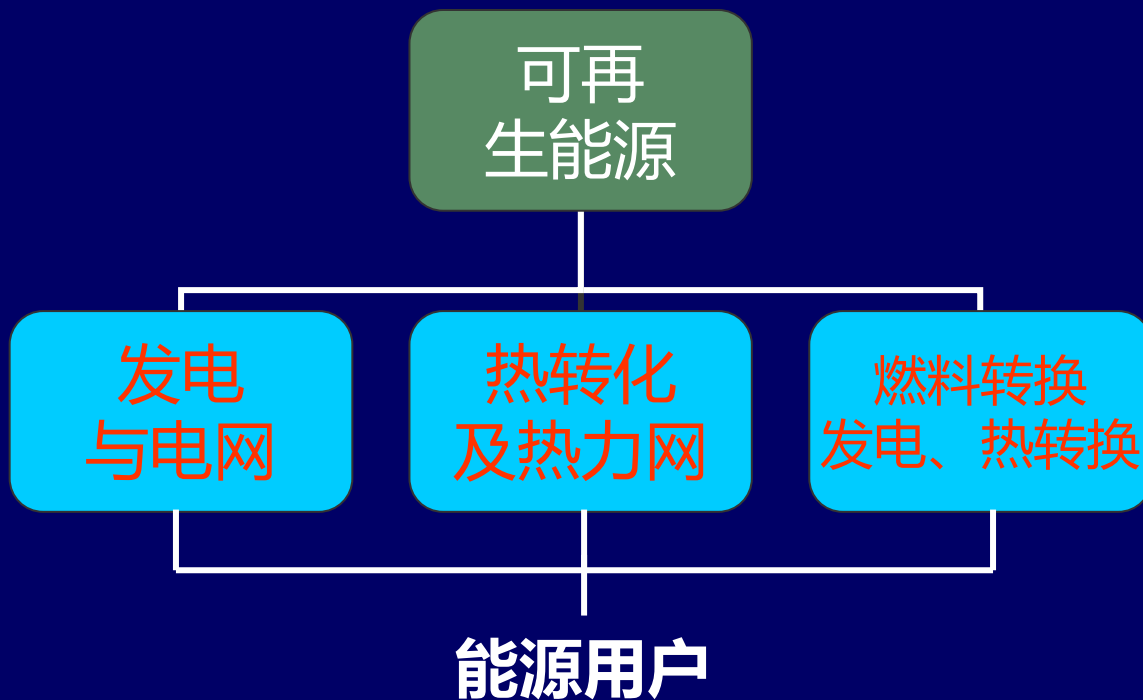
光伏电价显著下降



2050年可再生能源主导



可再生能源利用

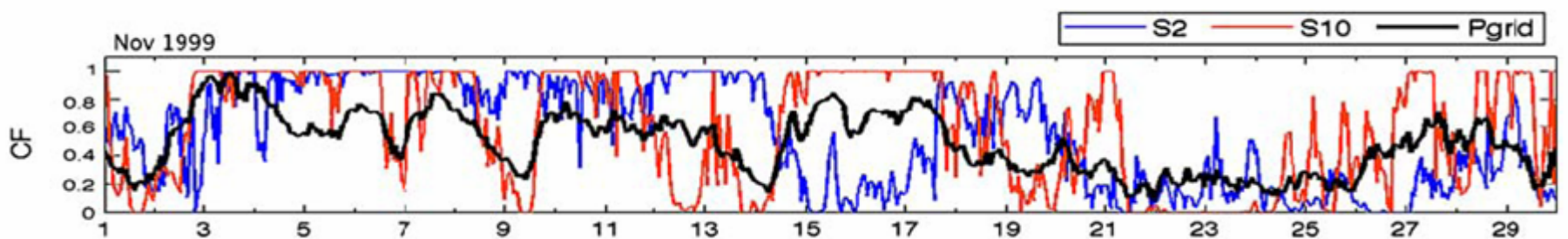


目标：构造一个以可再生能源电力为主的高效清洁能源供应系统、实现能源革命，满足人类能源需求。

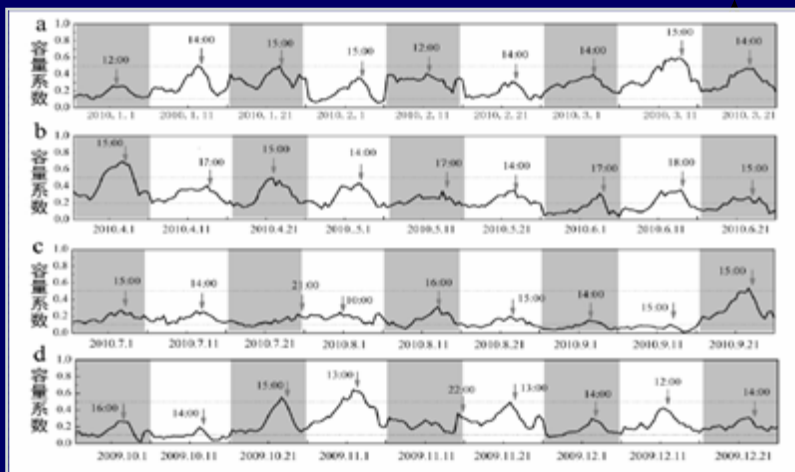
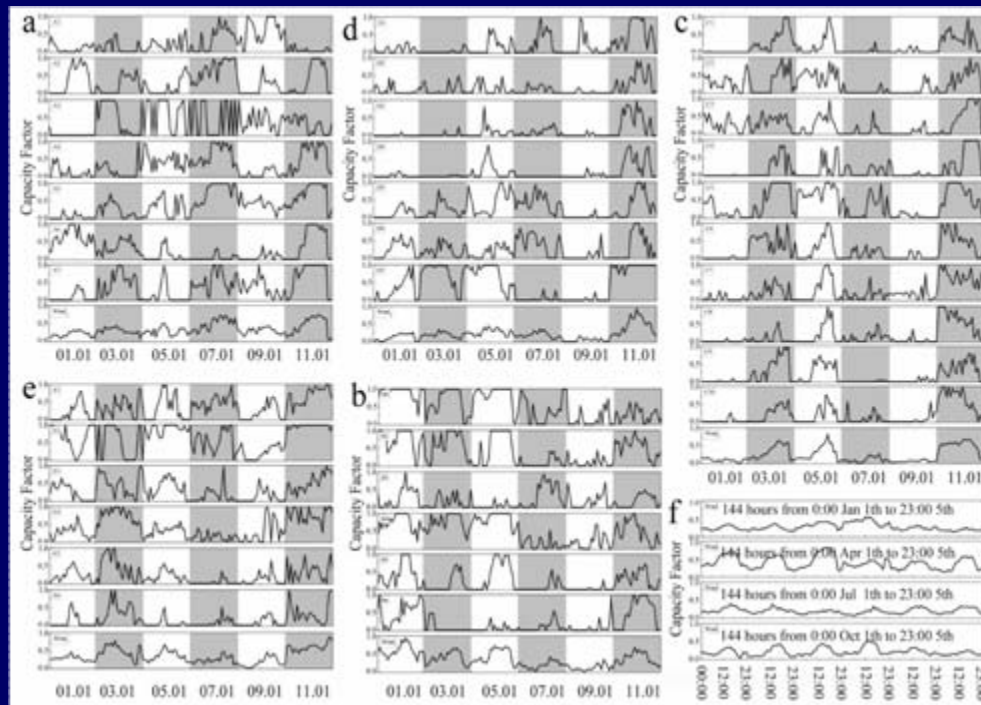
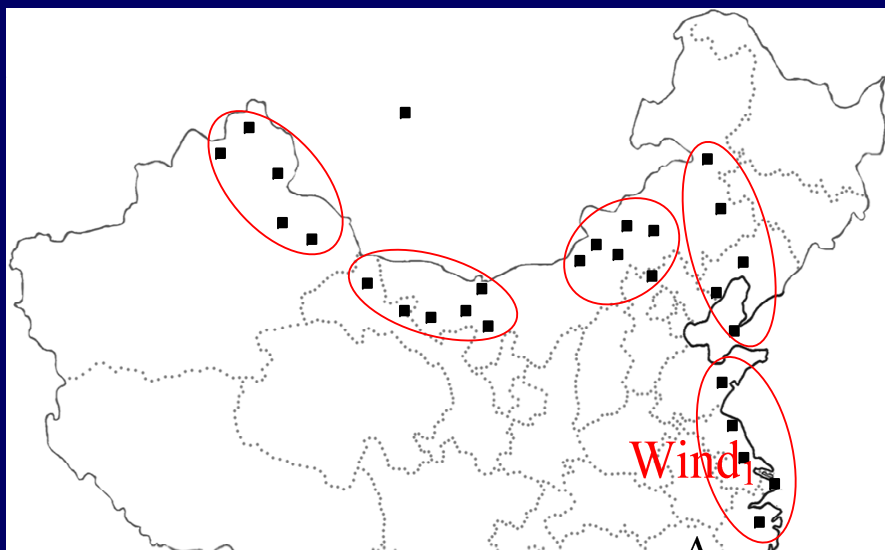
可再生能源发电对未来电网的影响

可再生能源区别于化石能源的主要特征

- ➔ 受天气的影响，不可调度（间歇性、波动性）；
- ➔ 分散性，但负荷密集区却缺少能源；
- ➔ 一般不能通过交通工具输送（生物质除外）；
- ➔ 资源多样性（光、风、地热、水力、海洋能）；
- ➔ 发电方式差异较大（例如，光伏无机组惯性）；
- ➔ 无法储存（生物质除外，水力可短时储存）；
- ➔ 资源具有时空互补性；
- ➔ 主要利用方式是发电。



我国广域风能时空互补性调查研究



较单个站点，广域风能时空互补后，功率满发或为零的情况减少，总输出功率波动明显减缓。

所有区域互补后，广域风能输出功率呈现“昼高夜低”的波动特性，发电功率峰值出现在下午15:00左右，与负荷波动曲线呈一定相似性。在夏季，其功率与华东电网负荷的相关系数达0.601。

中国大陆北部

Wind₅

E₂

E₃

我国广域风能时空互补性调查研究

站点	平均值	标准差	1分钟最大波动率	10分钟最大波动率	站点	平均值	标准差	1分钟内大波动率	10分钟最大波动率
A1	0.019	0.035	16.2%	70.5%	D1	0.012	0.021	14.7%	75.4%
A2	0.024	0.044	15.6%	90.8%	D2	0.013	0.022	12.9%	65.5%
A3	0.016	0.029	17.1%	85.7%	D3	0.011	0.019	12.1%	59.5%
A4	0.023	0.041	14.9%	77.4%	D4	0.005	0.011	18.7%	100%
A5	0.023	0.051	15.6%	87.6%	D5	0.009	0.014	10.2%	50.1%
Wind ₁	0.013	0.018	9.1%	31.2%	Wind ₁	0.006	0.008	4.5%	23.1%
B1	0.005	0.009	14.8%	62.4%	E1	0.007	0.014	16.3%	61.8%
B2	0.006	0.011	13.6%	78.4%	E2	0.006	0.009	10.6%	67.4%
B3	0.011	0.022	19.6%	88.5%	E3	0.006	0.009	12.3%	57.0%
B4	0.014	0.025	15.6%	78.8%	E4	0.019	0.031	18.6%	68.7%
B5	0.015	0.026	18.2%	87.6%	E5	0.023	0.037	18.4%	63.7%
B6	0.014	0.024	15.4%	79.1%	Wind ₂	0.007	0.010	5.1%	22.2%
Wind ₂	0.006	0.008	5.2%	23.5%	区域互补	0.003	0.005	2.3%	9.63%
C1	0.015	0.026	17.6%	83.6%					
C2	0.014	0.022	13.7%	74.7%					
C3	0.010	0.019	17.7%	83.3%					
C4	0.011	0.021	18.6%	81.2%					
C5	0.010	0.021	19.6%	92.5%					
C6	0.013	0.023	14.4%	76.5%					
Wind ₃	0.006	0.009	5.3%	24.0%					

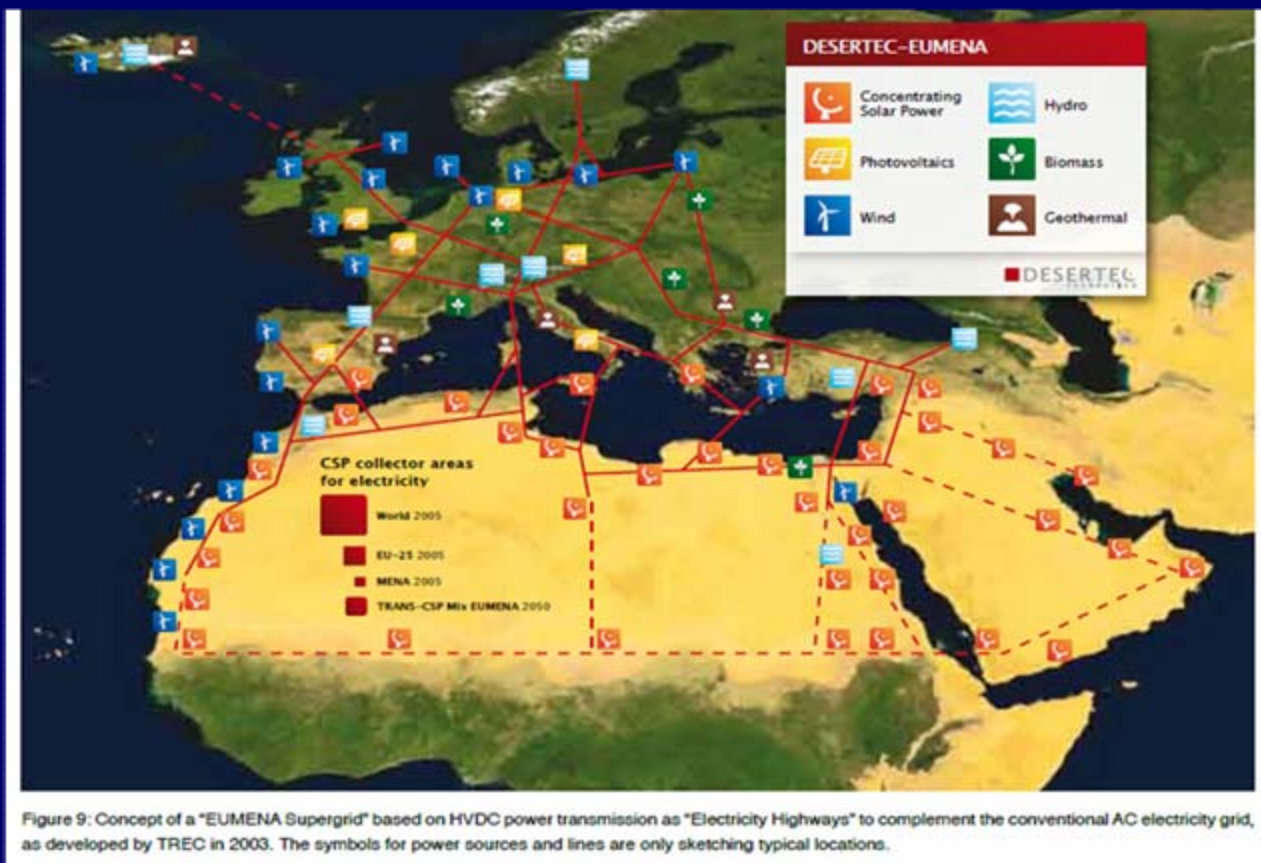
我国现行风电并网规定
1分钟波动率不超过7.5%，10分钟波动率不超过25%

各区域内风能互补后，其1分钟时间尺度输出功率波动率相比单个站点，下降48.8% 74.7%，10分钟尺度风电功率波动率下降56.6% 69.1%，已满足或非常接近国家电网对接入风电波动率的要求。

广域风能时空互补后，无需配置储能或者配置很少容量的储能便能满足现行我国风电并网要求。

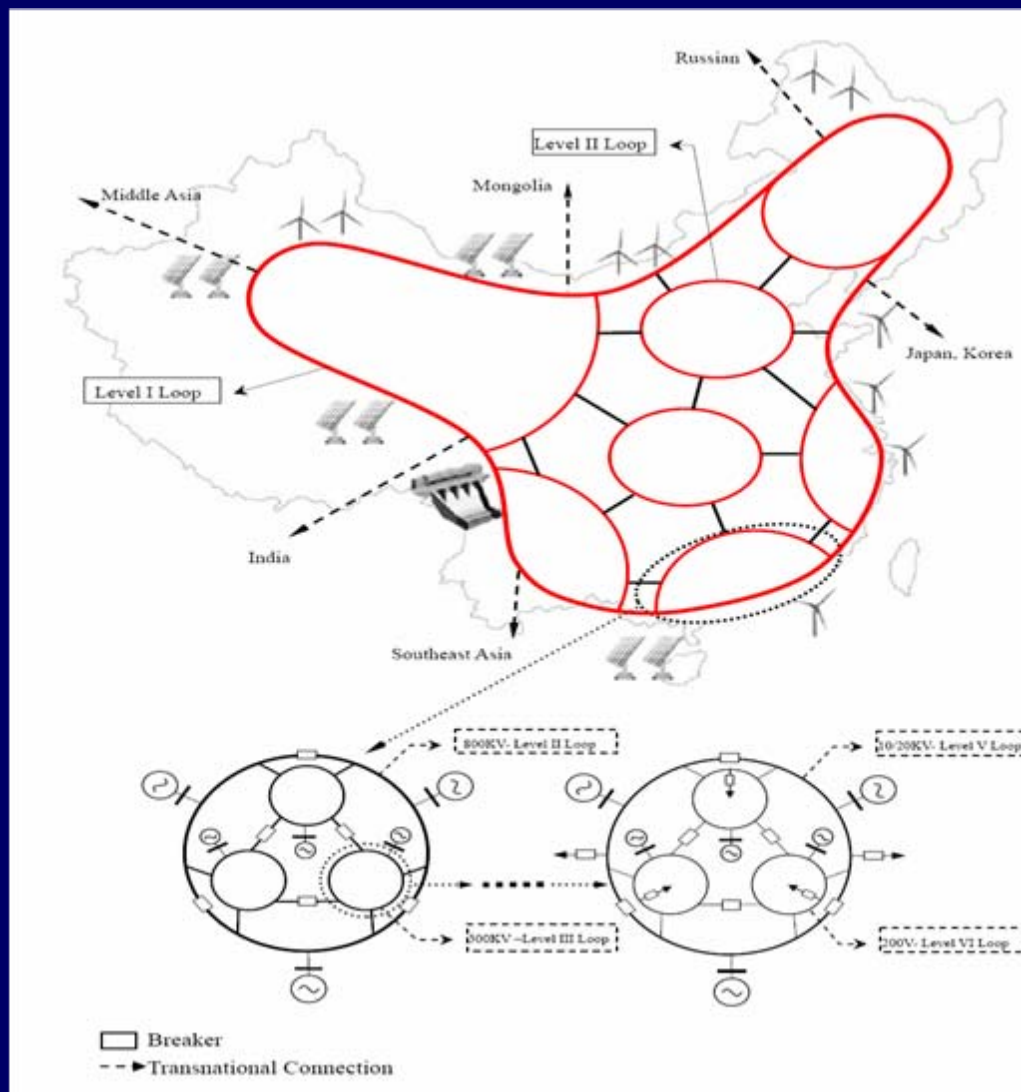
电网容量向超大容量方向发展

——大容量远距离输电技术需求



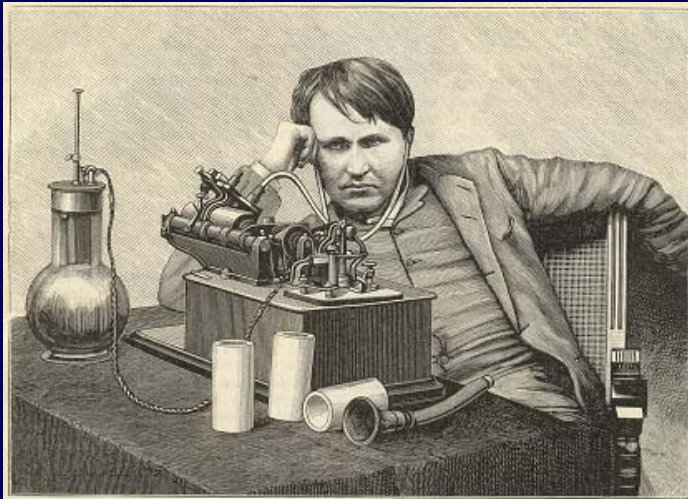
欧洲超级电网：2050年，直流电网联接欧洲-地中海国家-中东

我国未来广域电网的构造

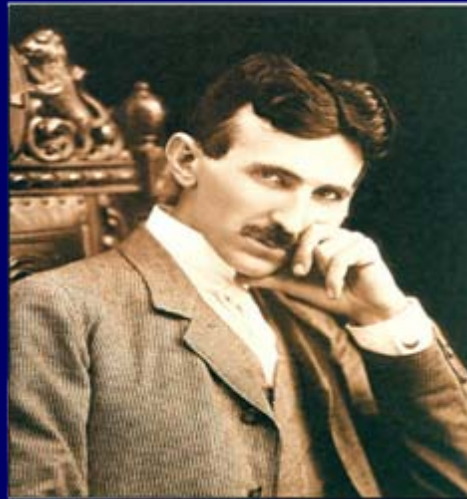


电网运行模式—直流化趋势

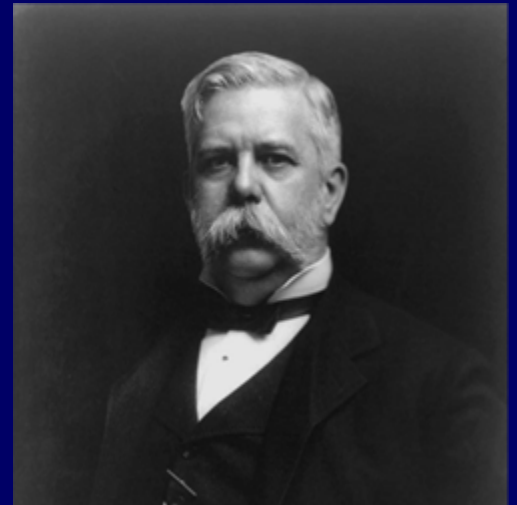
- ➔ **1879年**，爱迪生发明了直流发电机，并提出了直流供电系统；
- ➔ **1887年**，特斯拉发明交流电，奠定现代电网的基础；
- ➔ **未来趋势**：电网直流化或交直流混合电网。



Thomas Edison



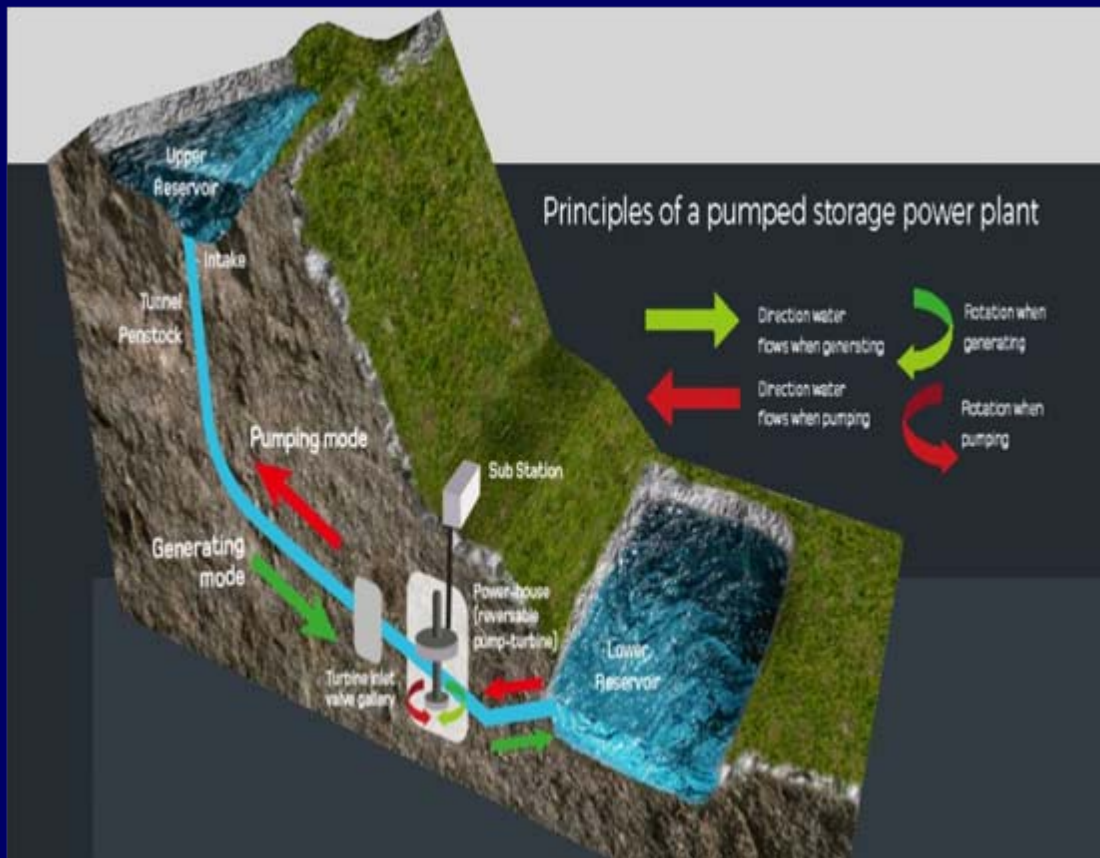
Nikola Tesla



George Westinghouse

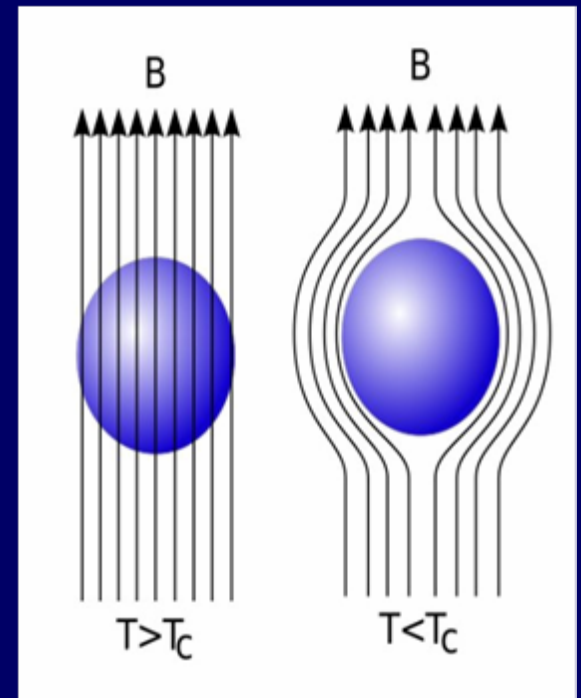
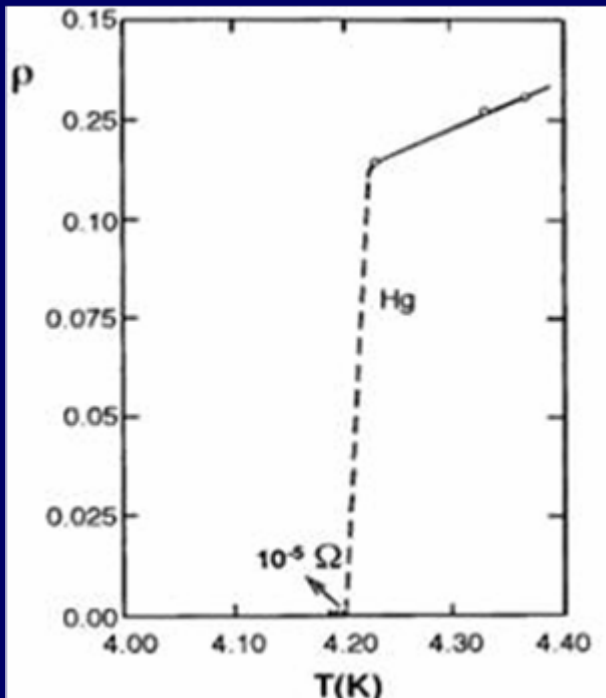
各种电力储能技术需求更加紧迫

当前：抽水储能，1MW~1000MW级/4~8h

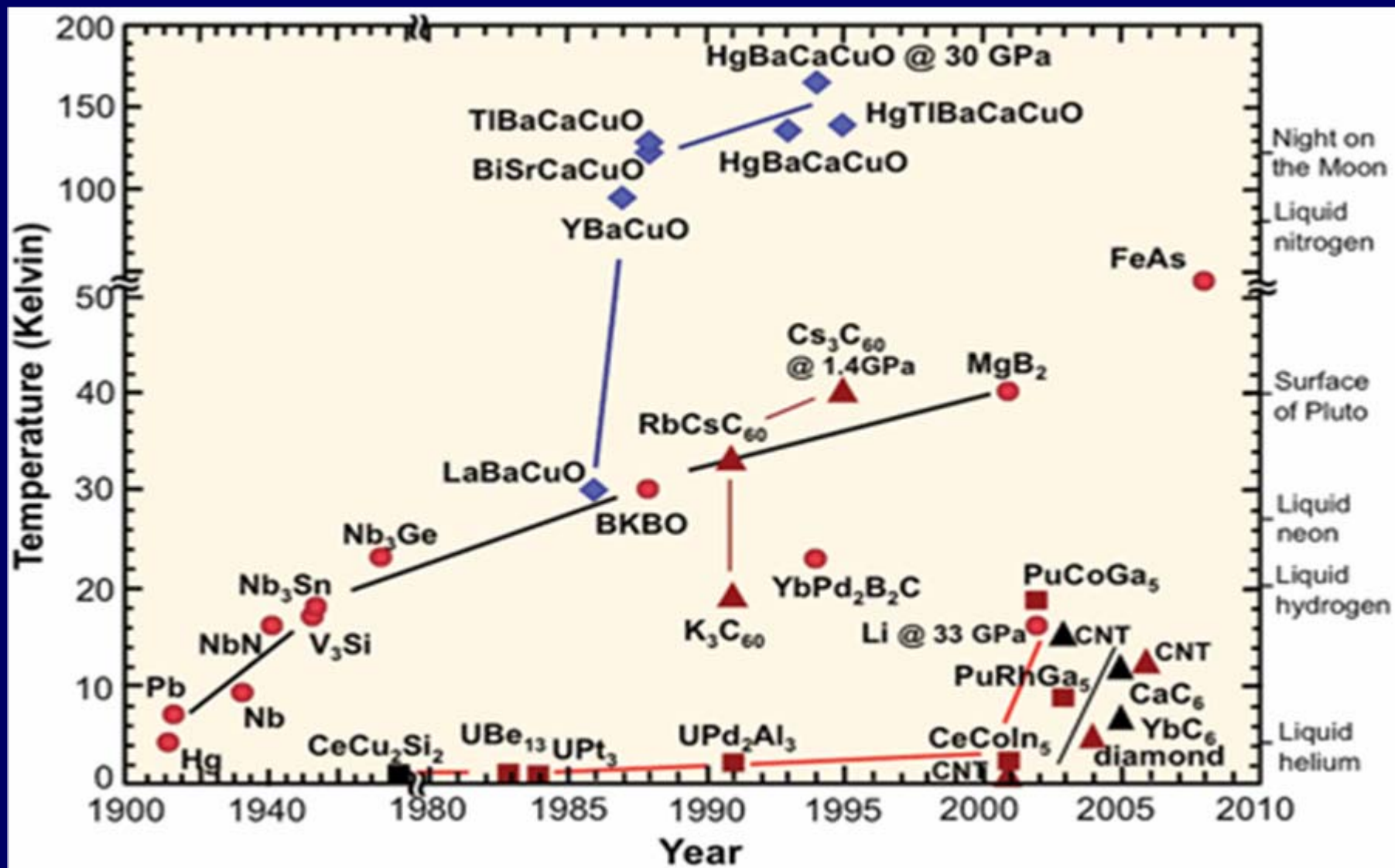


超导体的电工学特性

零电阻高密度载流能力、超导态-正常态转变特性、完全抗磁性。



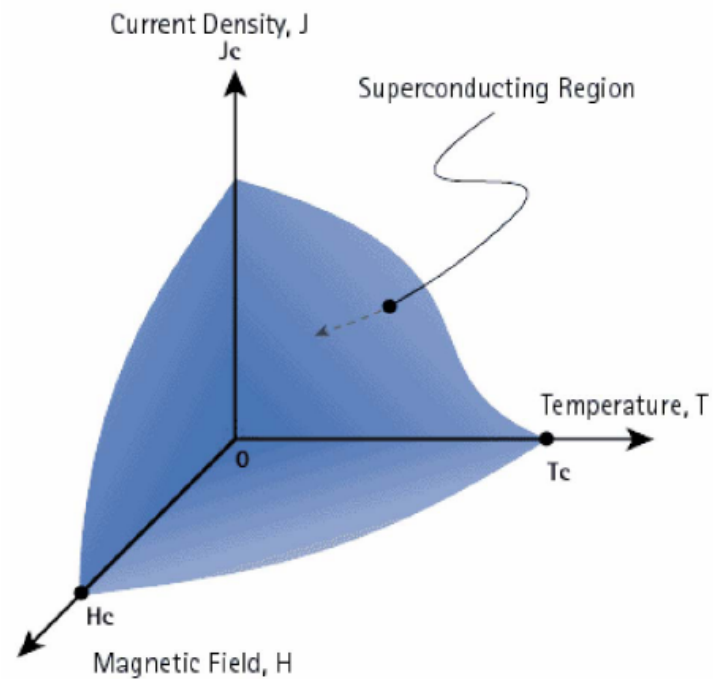
超导材料的发展



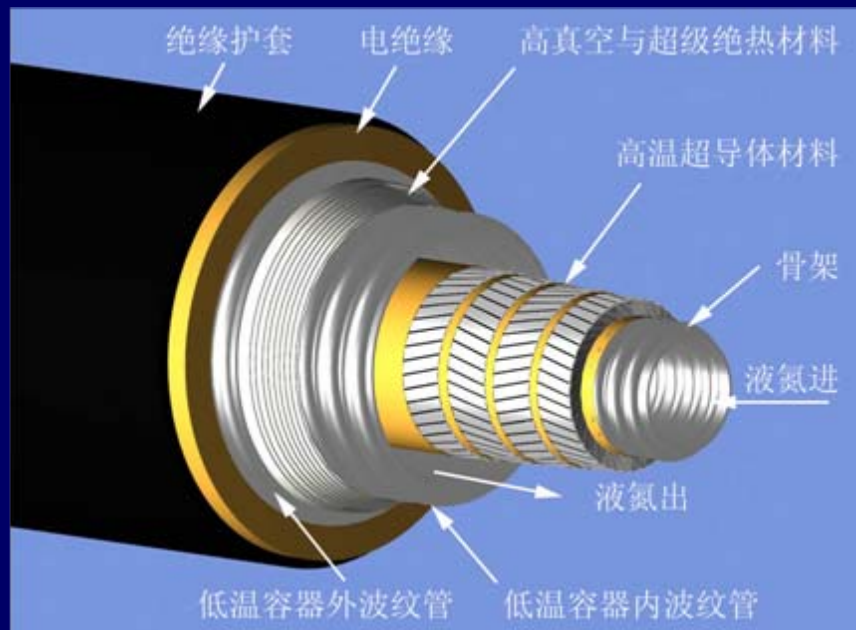
实用化超导材料

- NbTi
- Nb₃Sn (Al, Ge)
- MgB₂
- Fe-based
- Bi-2223
- Bi-2212
- YBCO

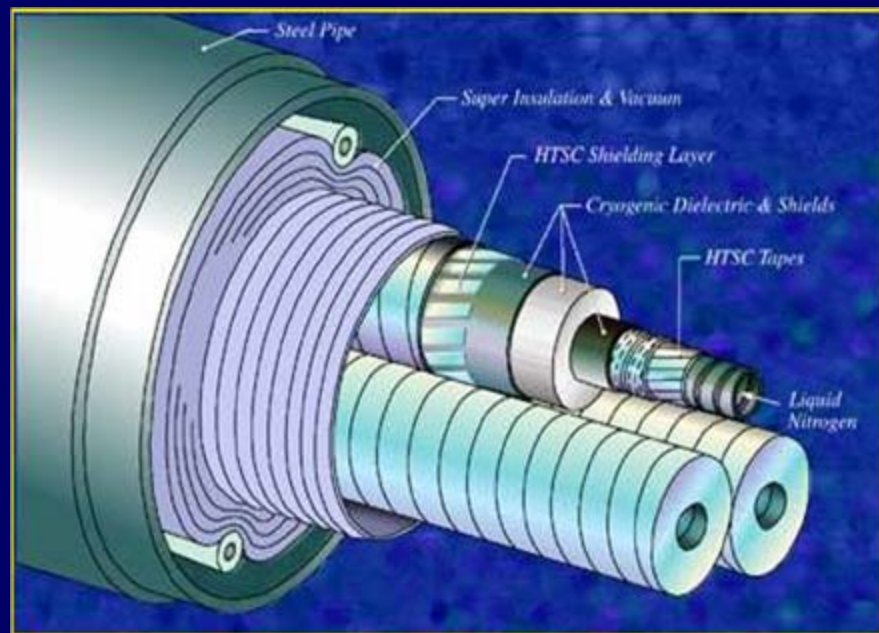
实用超导体三个重要参数



超导输电技术









单相结构



三相结构

Why Superconducting DC Cable?

To obtain, in a single technology, the:	EHV AC	HVDC	DC cable		HTS DC
Massive power transmission capability of EHV ac and HVDC					
Cost advantages of HV dc over EHV ac					
Multiple interconnection capability of ac					
Unobtrusiveness & high reliability of underground dc cables					
System control features of dc systems					
Minimal right of way of underground cables					

Cost & Loss Comparison: 5 GW, 1500 Mile Transmission Line

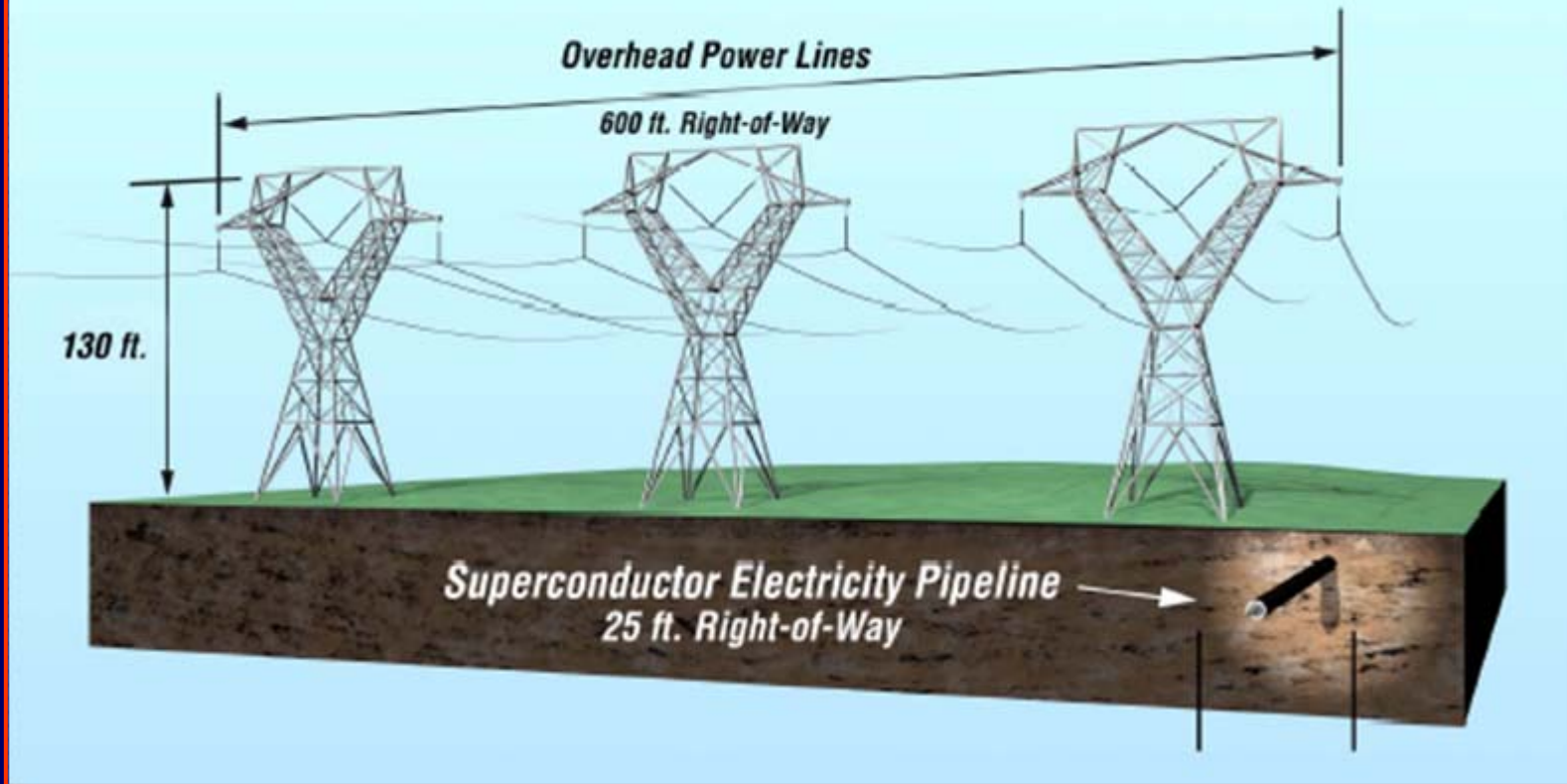
	AC 765 kV	HVDC +/- 800 kV	HTS DC @ \$50/kA-m wire cost (\$20/kA-m would halve costs):		
			100 kV dc	200 kV dc	400 kV dc
Station cost, \$M (incl. compensa.)	2300	940	750	750	750
Line cost, \$M/mi (wire only)	5.2	3.6	14.5 (9.6)	9.8 (4.8)	7.4 (2.4)
Line cost, \$M (\$/kW-km)	7,800 (\$0.62)	5,400 (\$0.43)	22,000 (\$1.70/kW-km)	15,000 (\$1.20/kW-km)	11,000 (\$0.90/kW-km)
TOTAL	10,000	6,300	23,000	15,000	12,000
Losses at full load	13.3% (665MW)	12.7% (635MW)	5.0% (250MW)	5.0% (250MW)	5.0% (250MW)
Capitalized cost of losses, \$M	1000	950	380	380	380

765 line: 2 single ckt, 6 bundle Drake; substation losses @ 1.7%. 800 kV Bipolar line: 6 bundle Drake; converter losses @1.5%. HTS DC line: losses assume 1 cold W per meter with 12 W per W refrigeration & 3% for VS converters.

AC and HVDC costs based on ABB costs (IEEE PSCE 2006) for 3000 MW, 750-mile line, escalated @ 2.5% per year. HTS DC line costs per EPRI 1020458, Appendix C. Cost of losses capitalized @\$1500/kW using 10% interest rate [ABB].

超导直流输电技术

1,000 mile, 5,000 Megawatt Power Equivalents

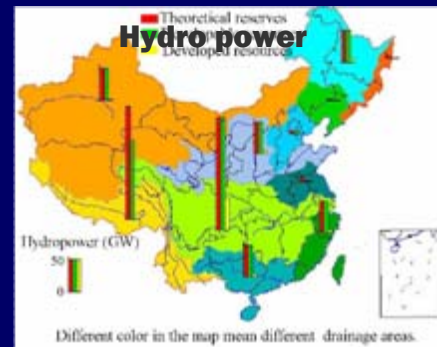
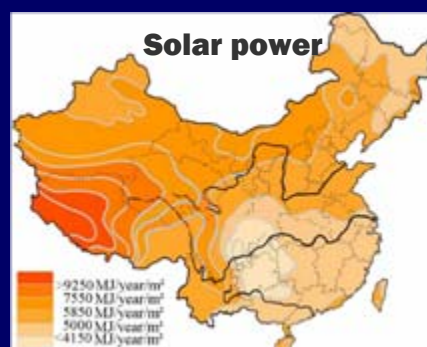
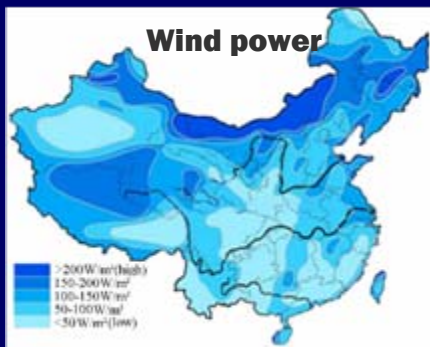


HTS DC Power Cable

- High power transmission capacity;
- Low transmission losses;
- Compact;

中国：可再生能源电力的输送

—预计2050年：西电东送的规模将超过6亿千瓦！



国际超导直流输电技术进展

研究开发单位	主要技术参数	研发状况
日本中部大学	直流200 m、 $\pm 10\text{kV}/40\text{MW}$	2011年完成试验
韩国电力公司、LS电缆等	直流500 m、 $\pm 80\text{kV}/500\text{MW}$	2014年投入示范运行
俄罗斯圣彼得堡电力公司	直流2500 m、 $\pm 20\text{kV}/2\text{kA}$	2019年投入示范运行
日本千代田化工建设、住友电工等	直流500 m、1.5 $\text{kA}/100\text{MVA}$	2015年投入示范运行



电工所—超导直流输电技术

- 360m/10kA超导直流输电并网示范工程；
- 传输电流世界最大；
- 首条并网示范运行的直流超导电缆（2013年）。



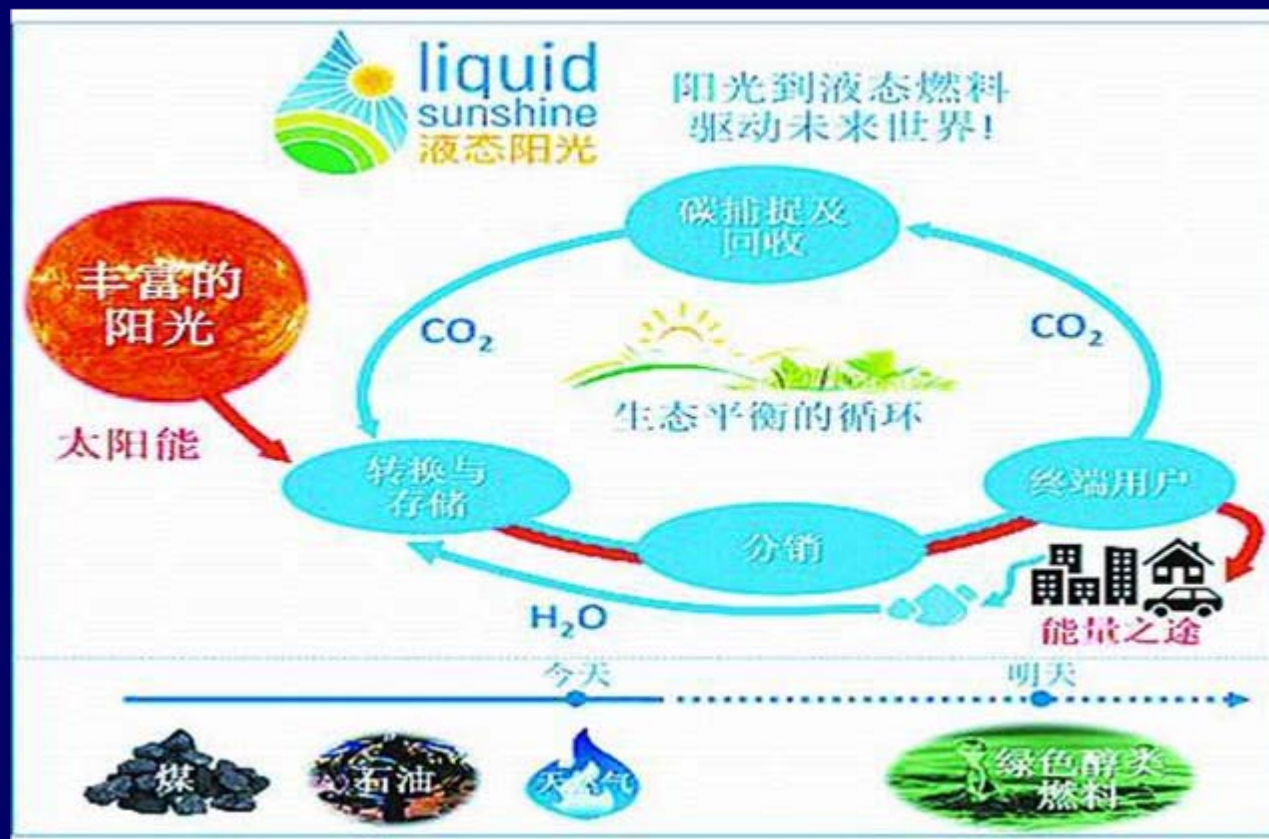
中国：西电东送、西气东输



输气管路与输电通道走向大致一致，是否可以混输？

可再生能源向燃料的转化

- C或者 $\text{CO}_2 + \text{H}_2$ (或者 H_2O) : 制甲醇、甲烷等 ;
- 制氢 : 电解、光解、热化学 ;



LNG: 90-110 K

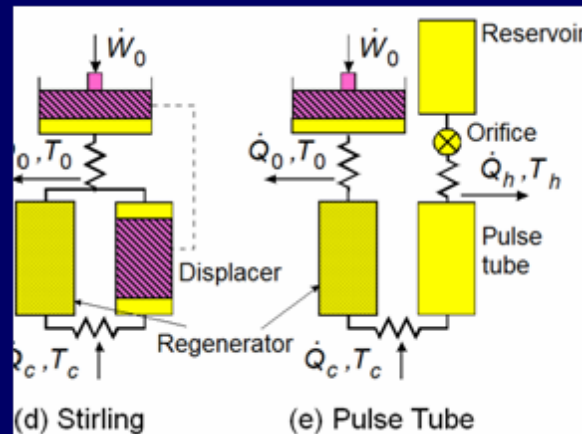
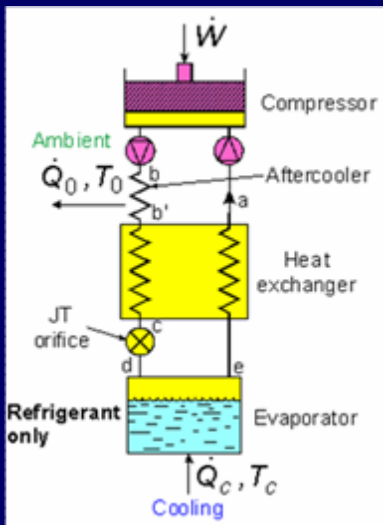
甲醇: 176-338K

LNG-based hybrid coolant for BSSCO Energy Pipeline@85-100K

With high carbon enriched fractions of liquefied natural gas (LNG) as coolant, the energy pipeline can be operated at 85-100K:

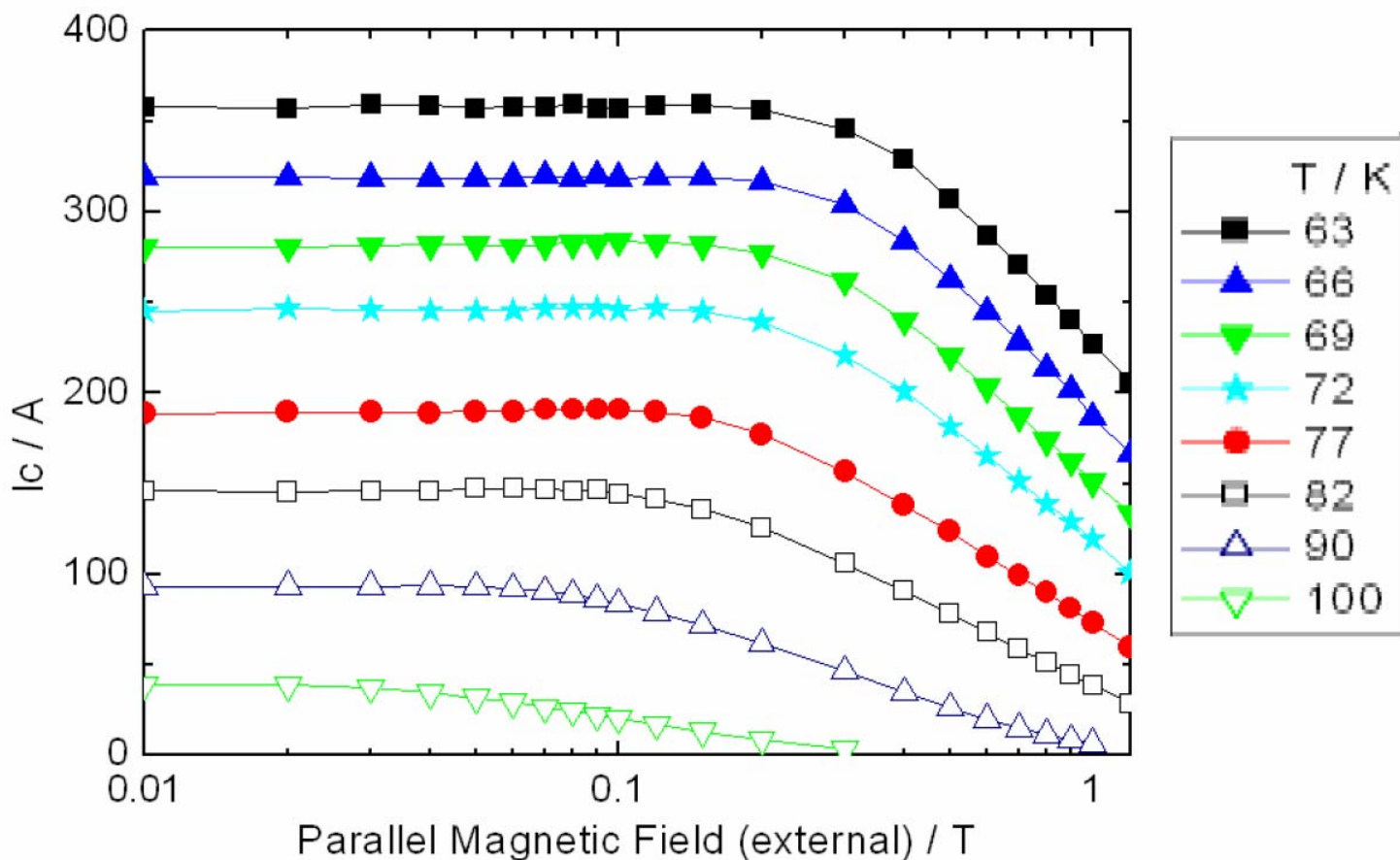
By using conventional LNG as the main component, the C2+ component are used to realize the cooling liquid of 85-100 K.

- **Composition:** LGN plus C2+ (C2+) components such as ethane etc.
- **Pressure:** 0.1~1.0 MPa
- **Temperature:** 85~100 K



Development of the compensating refrigerator for hybrid coolant energy pipeline.

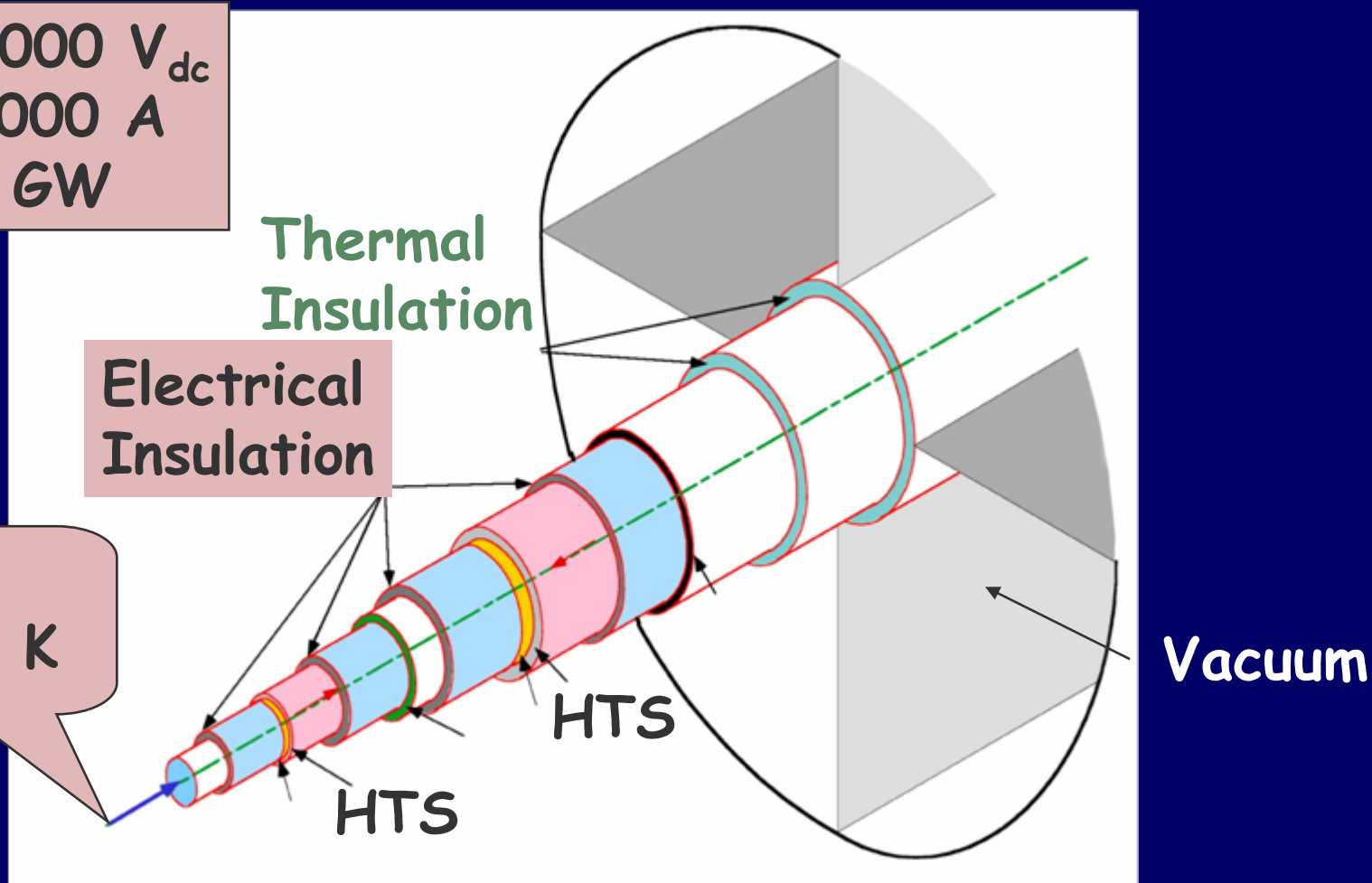
Ic-T Properties of Bi2223 Wires (DI-BSCCO)



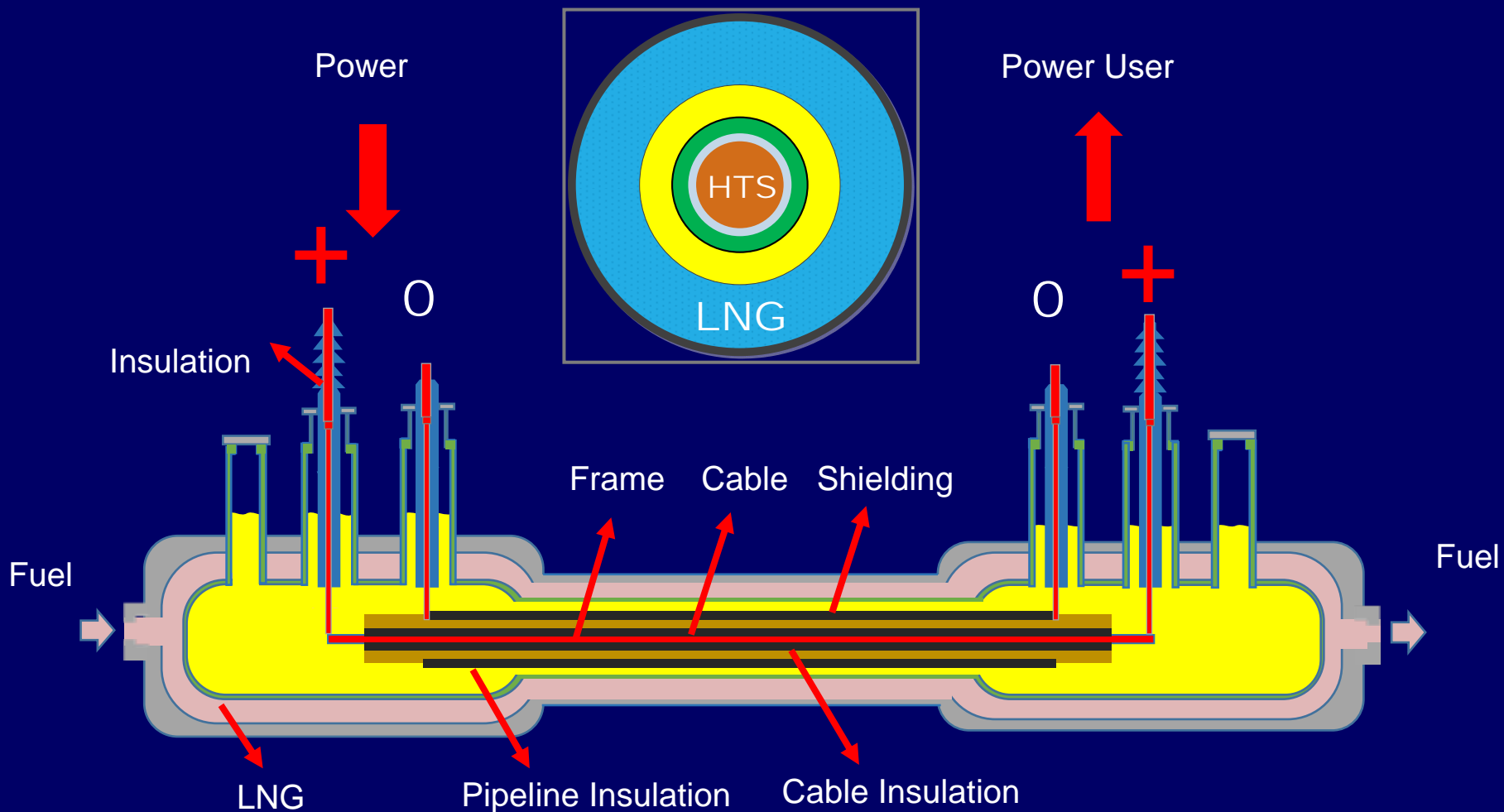
This Picture is supplied by Dr. K. Sato from SEI

超导能源管道（输电-输气一体化）

$\pm 50,000 \text{ V}_{\text{dc}}$
100,000 A
10 GW



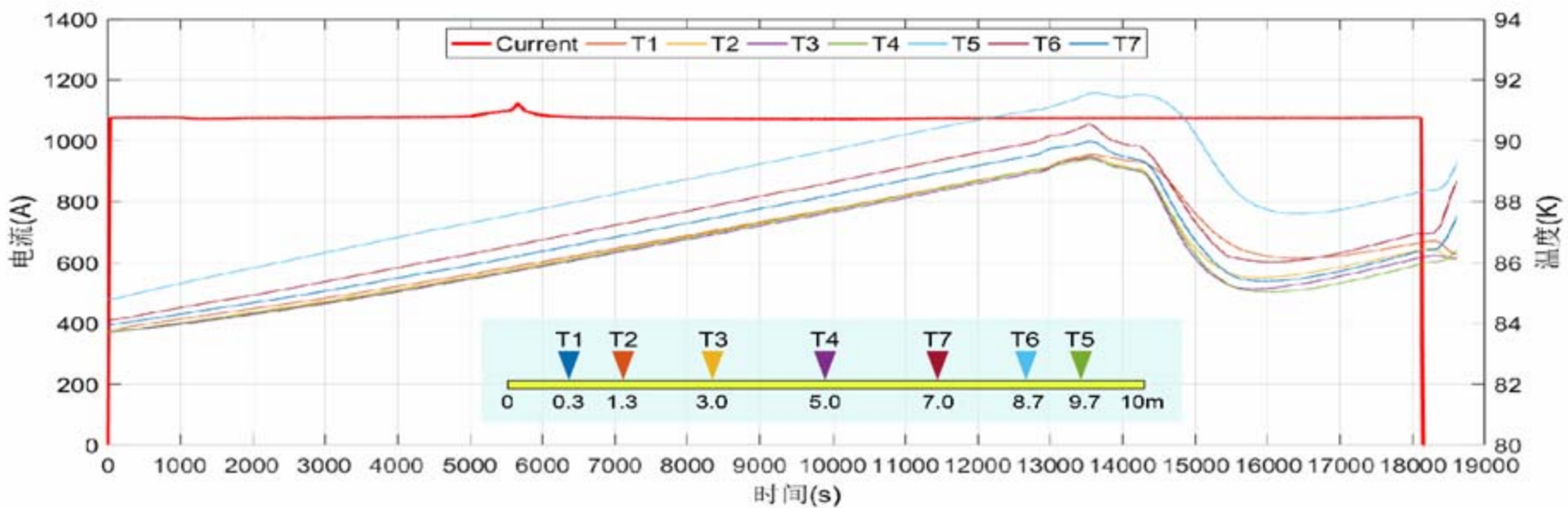
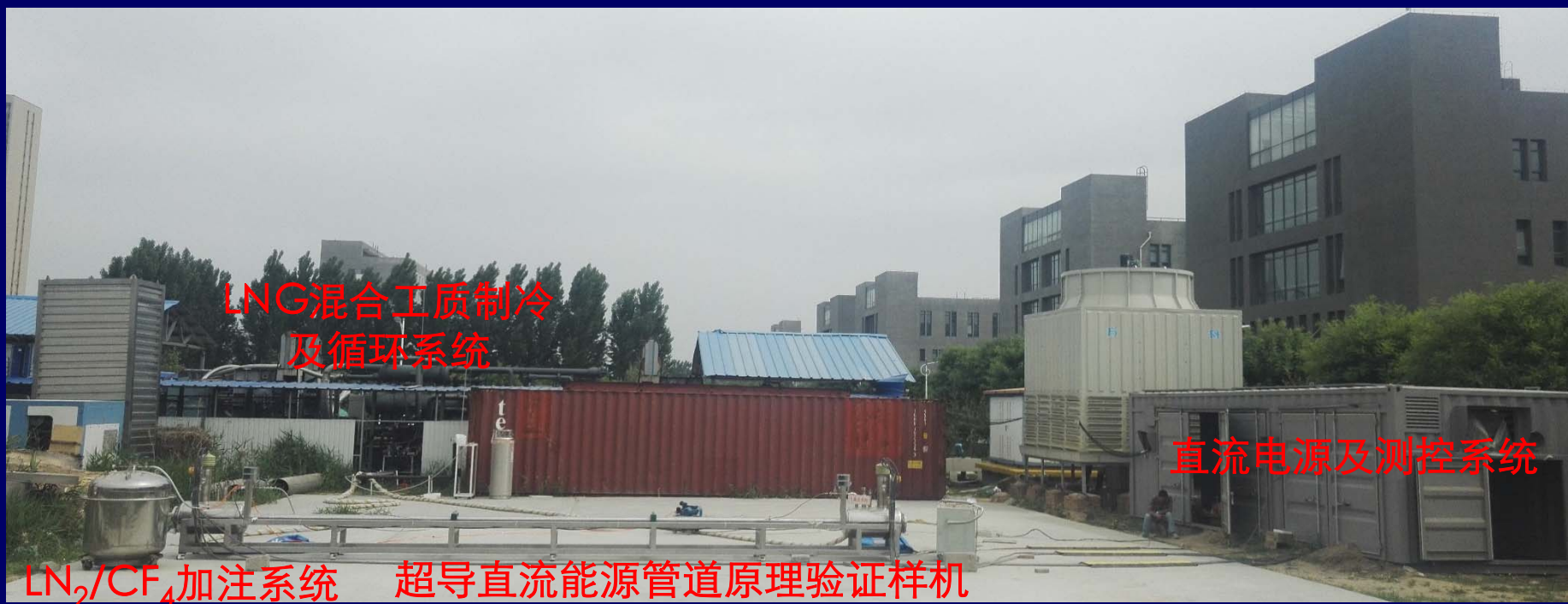
一种能源输送管道的结构



10m/10kV Superconducting Energy Pipeline

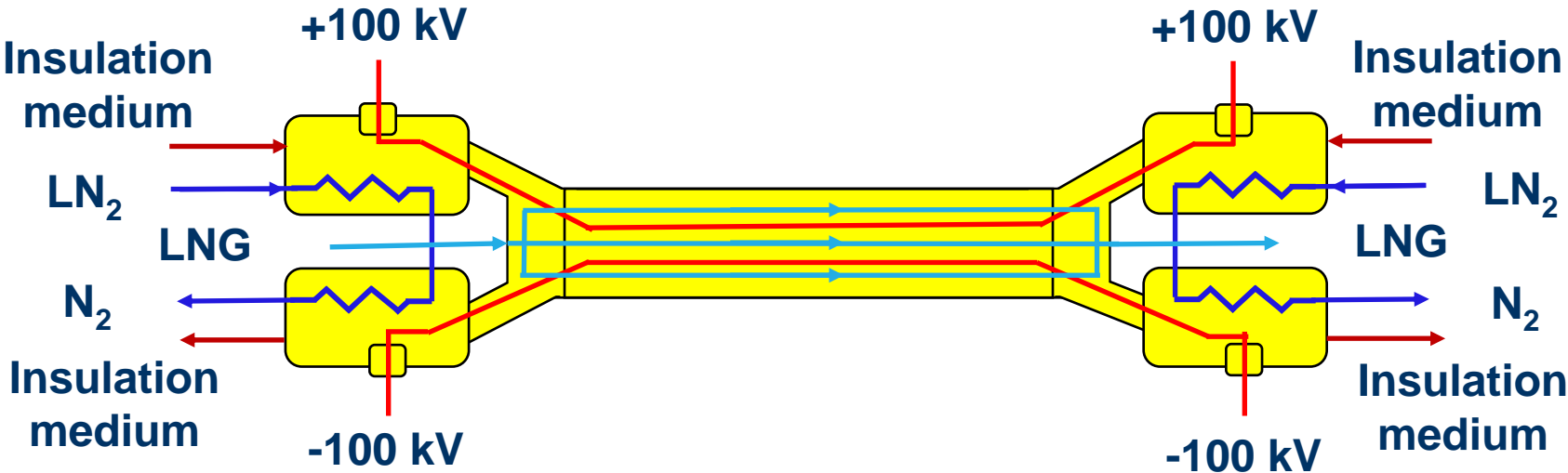
10kV/1kA超导能源管道原理试验



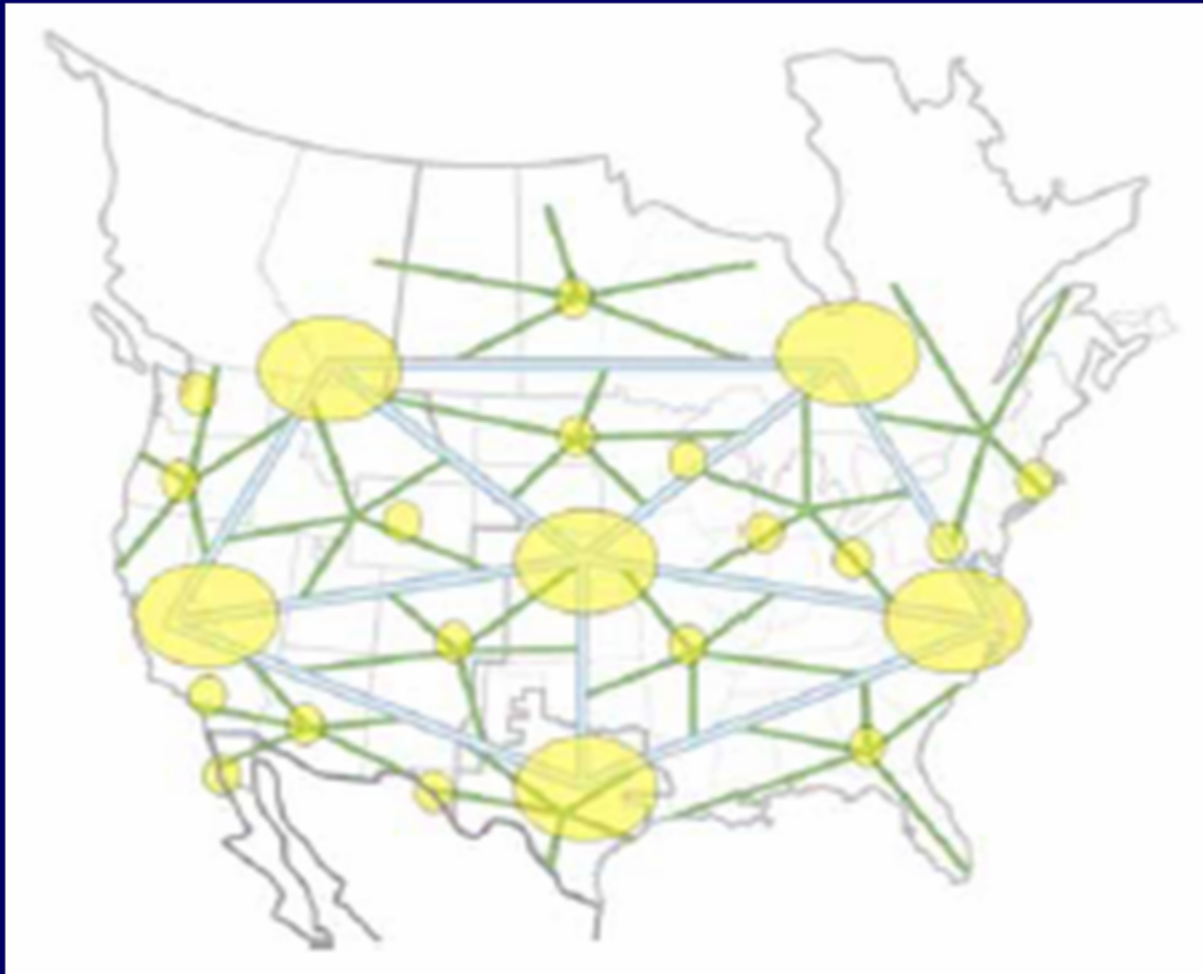


85-92K、5h、1050A 通流实验

30m, $\pm 100\text{kV}/1\text{kA}$ Energy Pipeline



美国输电-输氢能源网构想：MgB₂ + LH₂



美国能源部 – Grid2030美国电网远景

超导限流器—短路故障限制保护电网安全

短路电流日益增加，对我国电网安全稳定运行造成日益严重影响

- 1、造成切机切负荷，甚至造成电网大停电
- 2、降低设备使用寿命，甚至损害或破坏
- 3、电网解列运行，降低供电可靠性

短路电流： $I_f = U/Z_s$

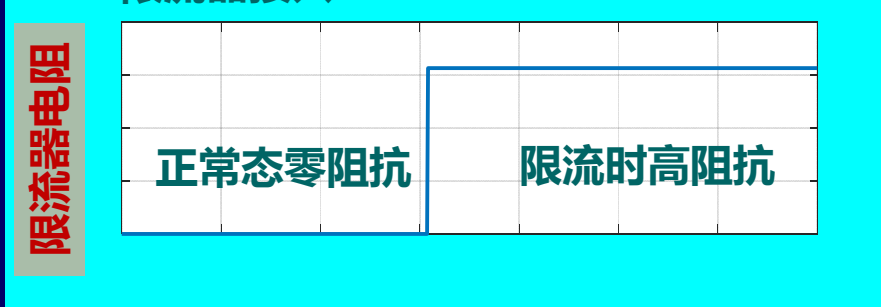
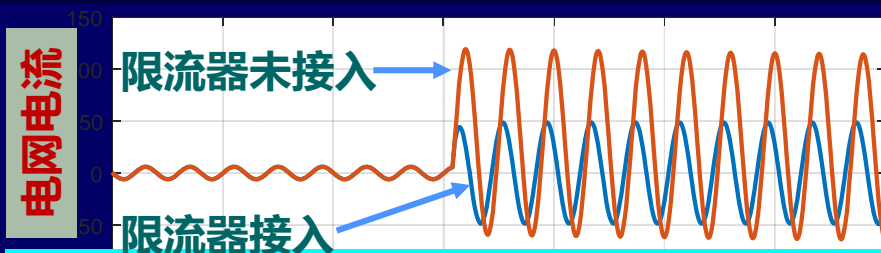
$$1/Z_s = 1/Z_1 + 1/Z_2 + \dots + 1/Z_n$$

短路电流限制： $I_f = U/(Z_s + Z_{FCL})$

传统解决方案：串入电抗或高阻抗变压器；电网解列运行。缺点：损耗大、响应慢...

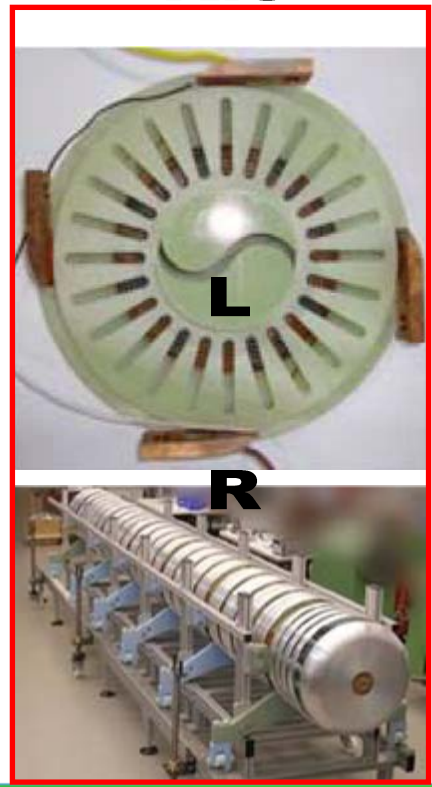
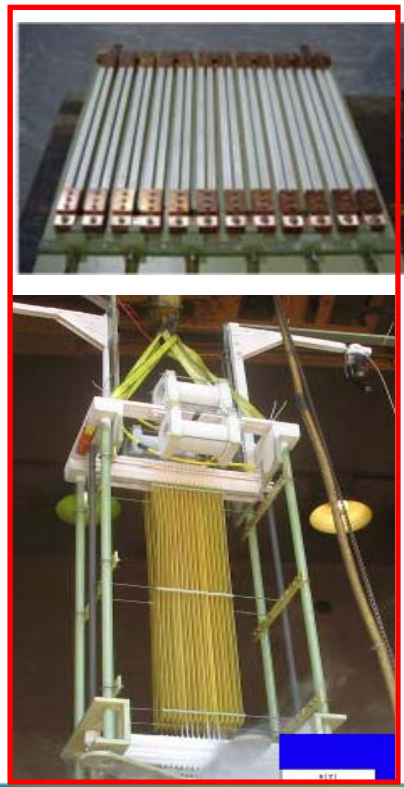
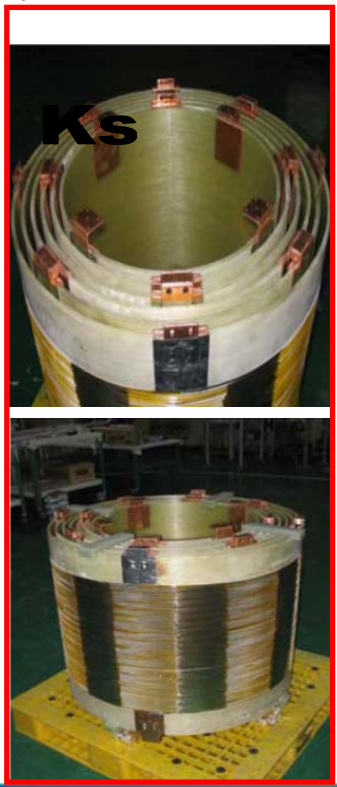
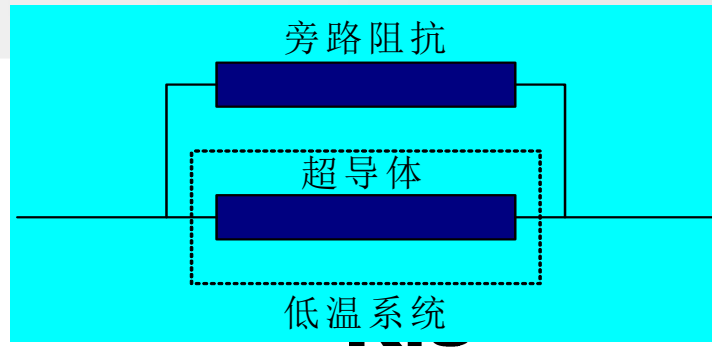
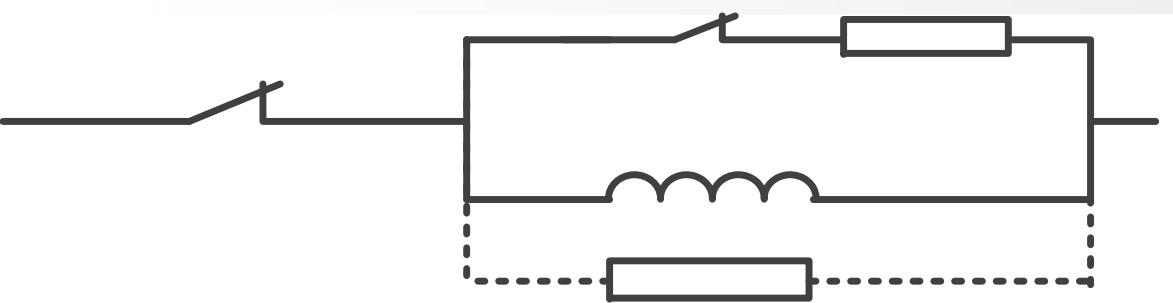


限流器解决方案

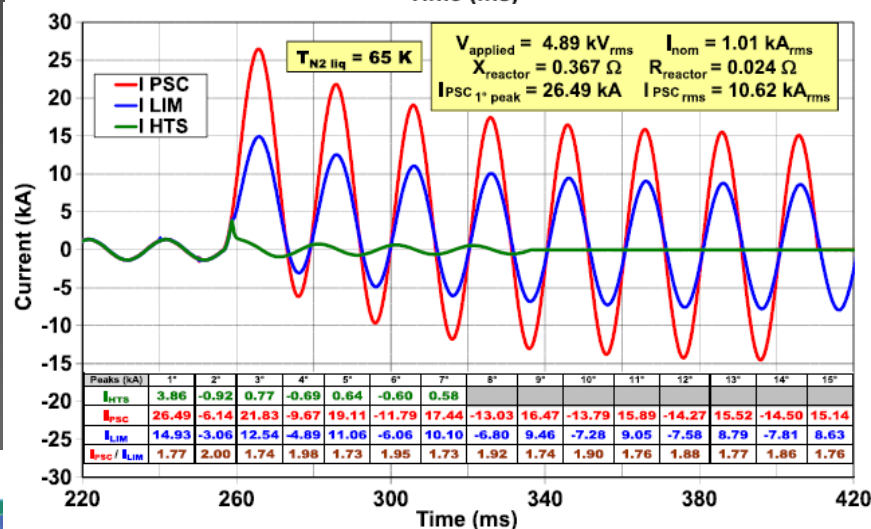
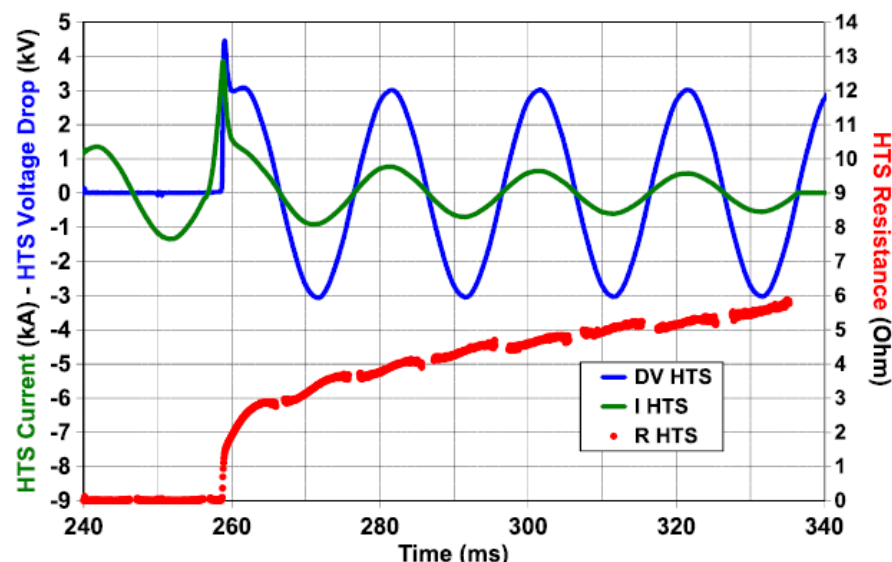
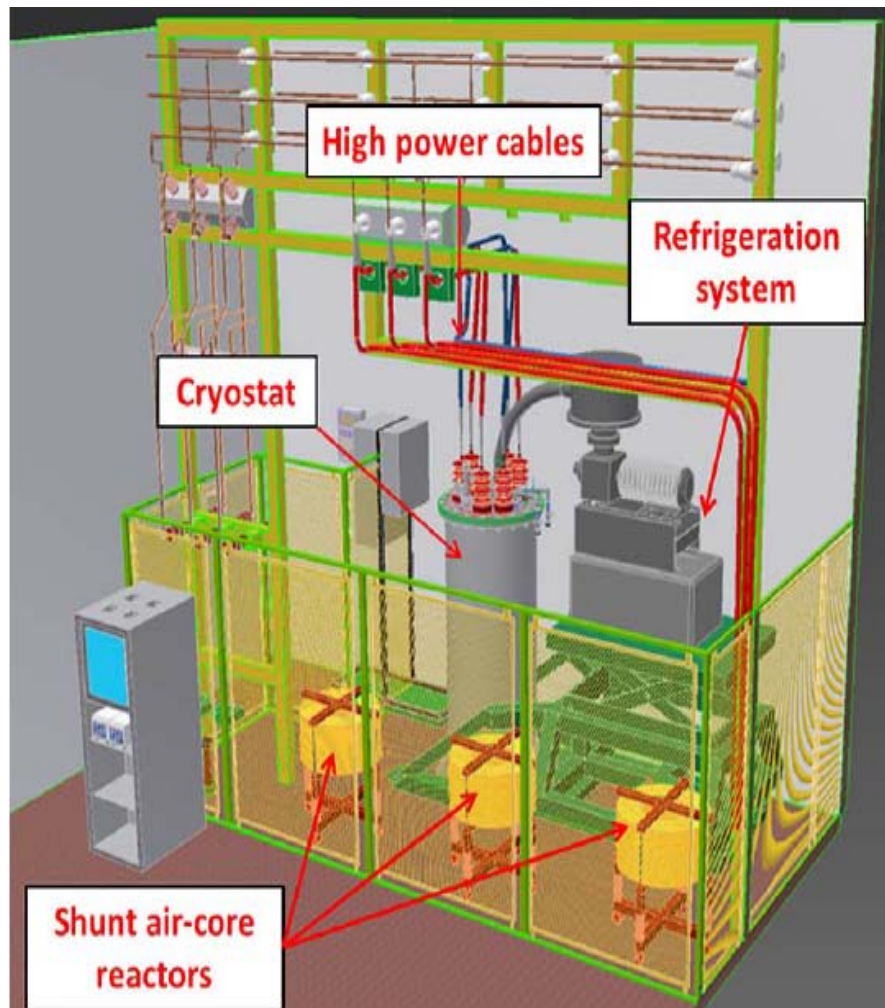


2003年8月14日，美国加州大停电，每天损失都在250亿以上

交流电阻型高温超导限流器



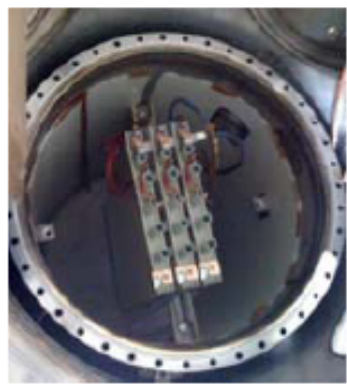
交流电阻型高温超导限流器



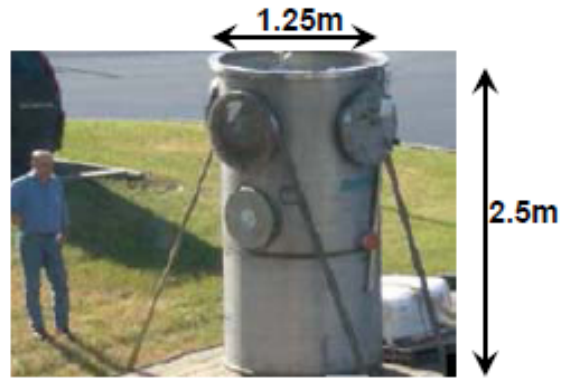
交流电阻型高温超导限流器进展

美国SuperPower公司—直线矩阵式电阻型SFCL

A Distribution SCFL 11-15kV phase, 800-2KA_{rms} load current will limit ~65-75% when assembled with 3 SFCL modules



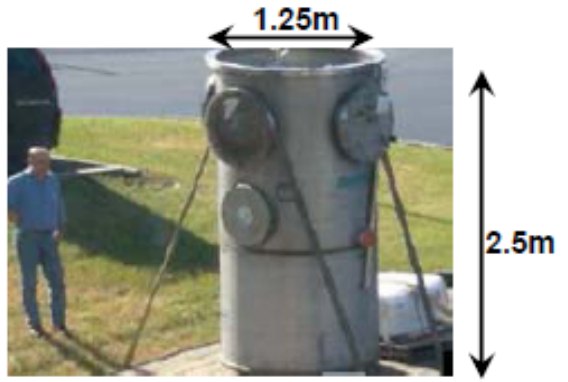
Distribution SCFL 15kV phase illustration



A Transmission SCFL 138kV phase, 1700A_{rms} load, 40kA prospective will limit ~65-75% if assembled with 14 SFCL modules

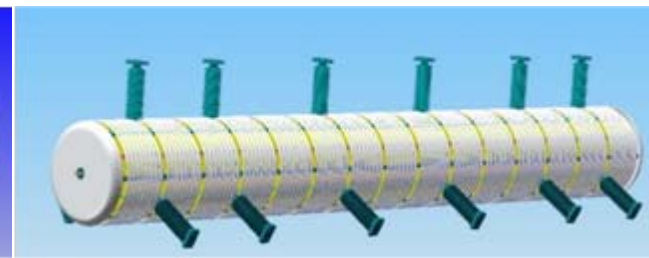
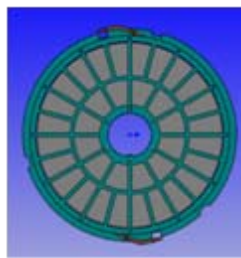
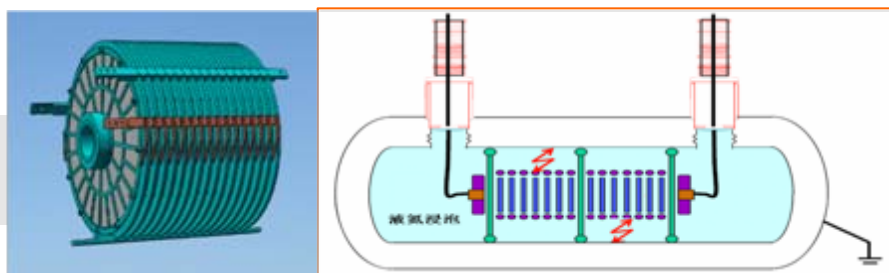
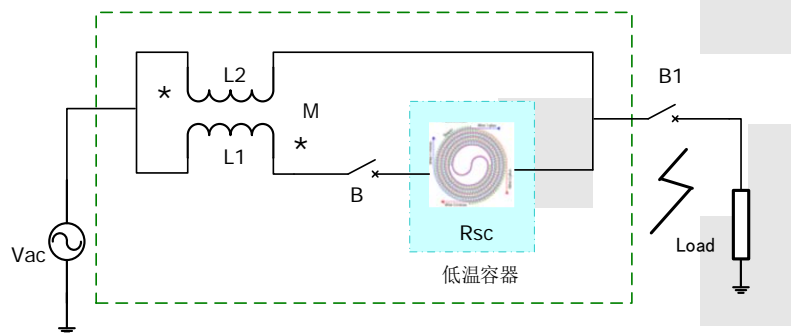


Transmission SCFL 138kV phase illustration

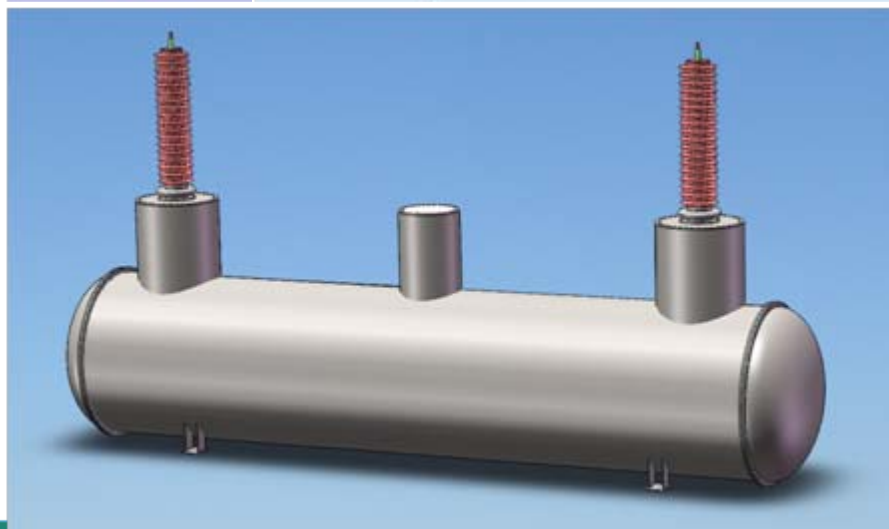


交流电阻型高温超导限流器进展

电工所—双带并绕式电阻型SFCL的设计及关键技术



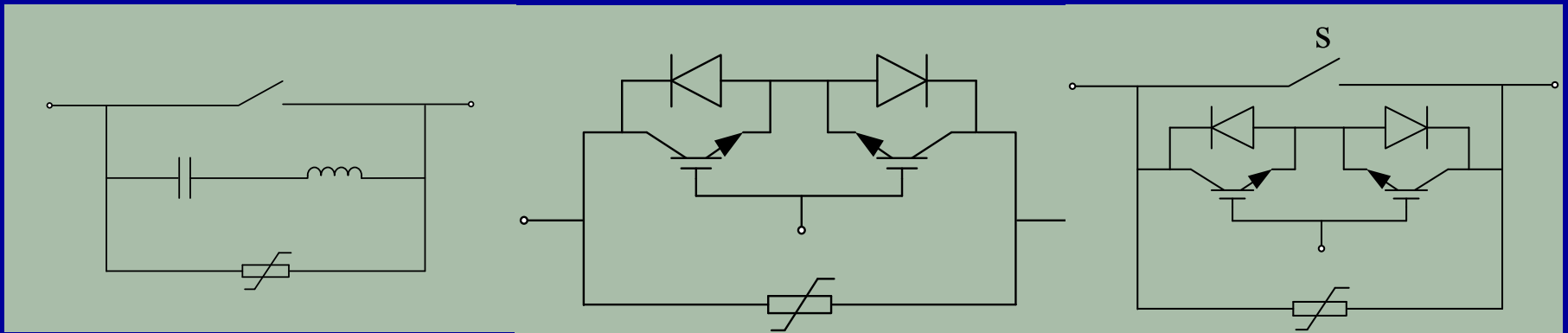
项目	参数
额定电压	220 kV
额定电流	1.5 kA
无限流器器时的短路电流	63 kA
限流阻抗	2.74-3 Ω
超导限流单元的限流电阻	18 Ω (40-60ms)
YBCO带材用量	11 km
限流子单元数	128
低温容器	\varnothing 2.5 m/11 m



直流电阻型超导限流器

开发高压大容量直流断路器一直是难题，因为：

- 直流没有过零点；
- 线路及平波电抗的储能（10-30MJ级）在开断时如何吸收？
- 开断速度要求足够快（ms量级），以防止故障电流急剧上升。



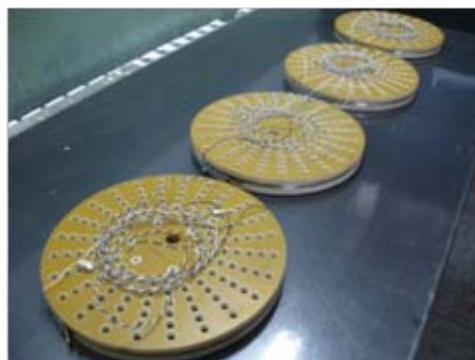
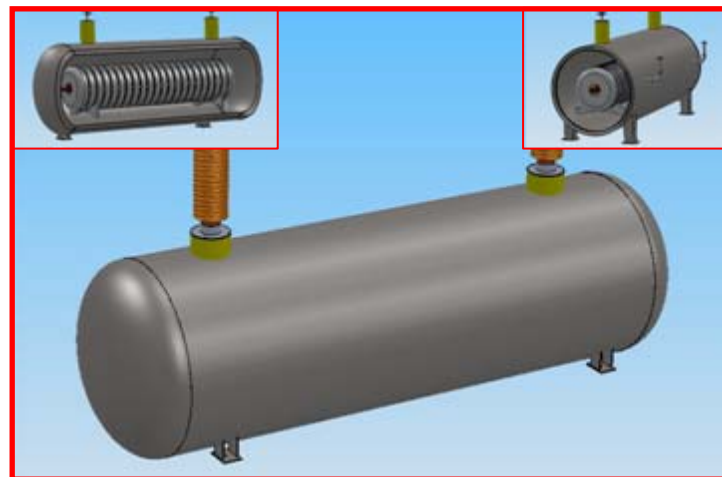
Mechanical

Solid-State

Hybrid

直流电阻型超导限流器

- 响应快；
- 电阻吸收线路能量；
- 正常态对线路无影响。

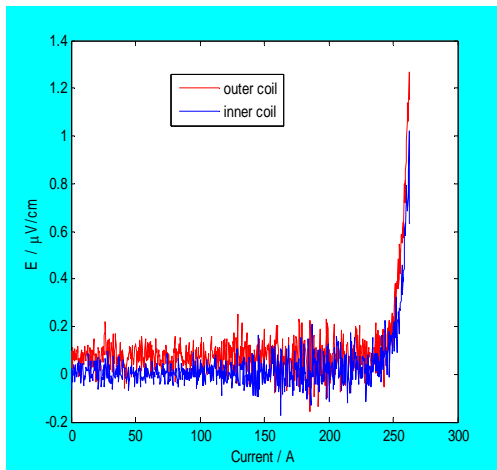


Test of A DC FCL module -10kV/400A

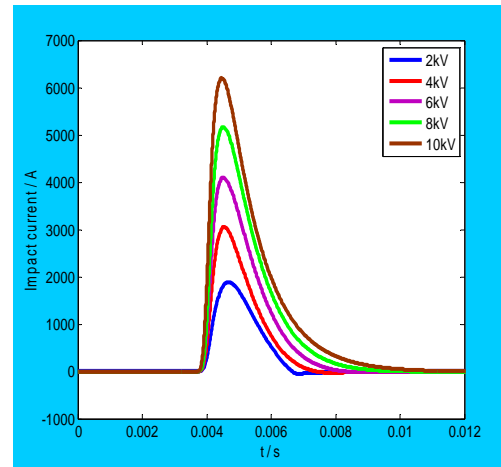
- The 10kV/400A-2 Ω FC-SFCL module is designed and manufactured. The critical current is about 500A, and the short-circuit current could be limited from 12kA to 6kA ;
- When the dc impact voltage is 10kV, the maximum resistance is about 0.8 Ω when recovery time is set at 300ms and impact current is 2.2kA~5.5 times of the rated current.



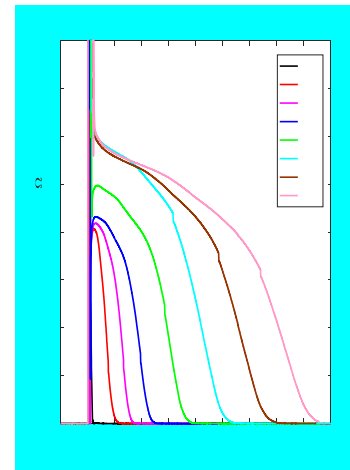
DC FCL module



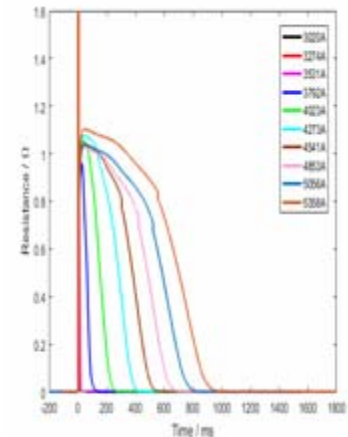
The critical current test results



The impact current test results

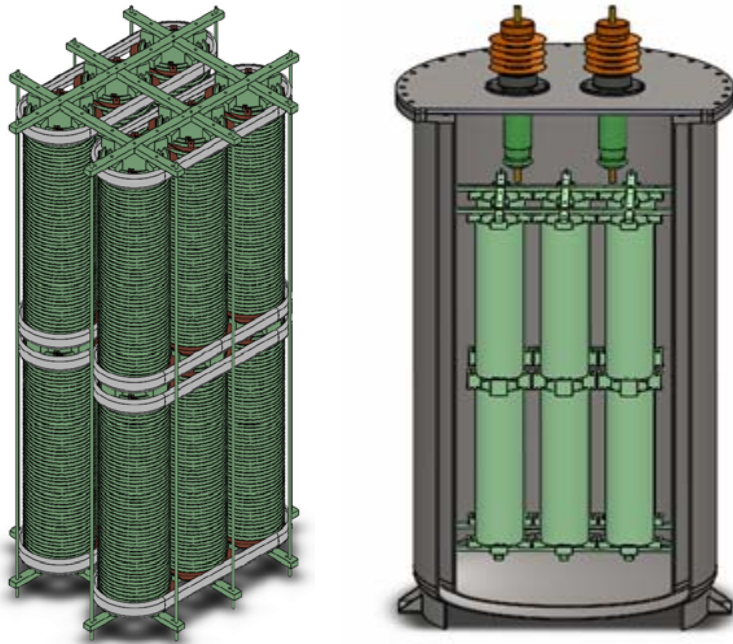


The resistance test results (10ms, 5ms)



Design of a 40kV/2kA DC Fault Current Limiter

- The Current Limiter consists of 6X4 modules, the design is listed at the table.



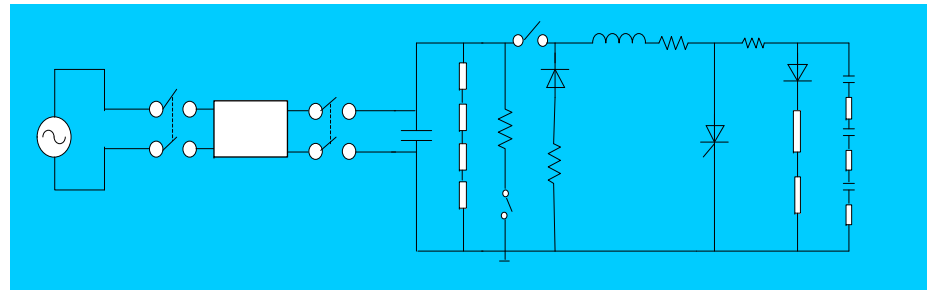
Number of Modules	6X4
Height/mm	1600
Outer Diameter/mm	800
Length of YBCO Tape/m	800
Operation Temp./K	65-77
Pressure at the Dewar	1 atm
Rated Voltage/kV	40
Critical Current/A	1200@77K; 2500@65K
Rated Current/A	2000@65K

40kV/2kA DC Fault Current Limiter

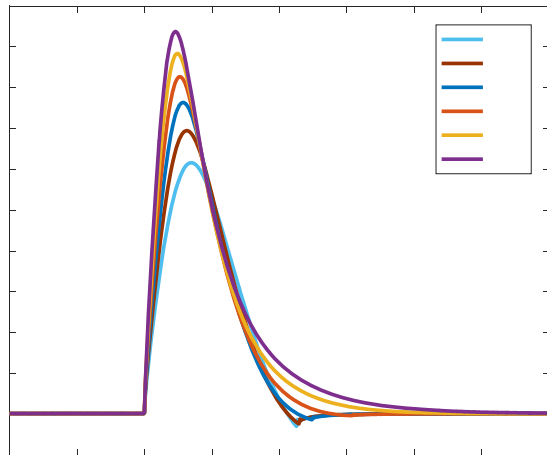
Fabrication of the Fault Current Limiter



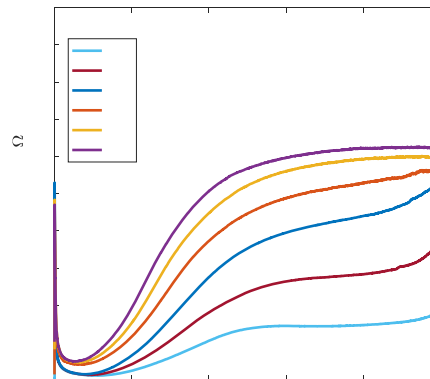
Test of the Fault Current Limiter



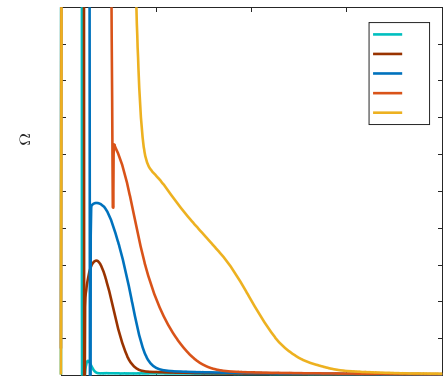
Circuit of the test facility



Impact Current



R-T during current impact



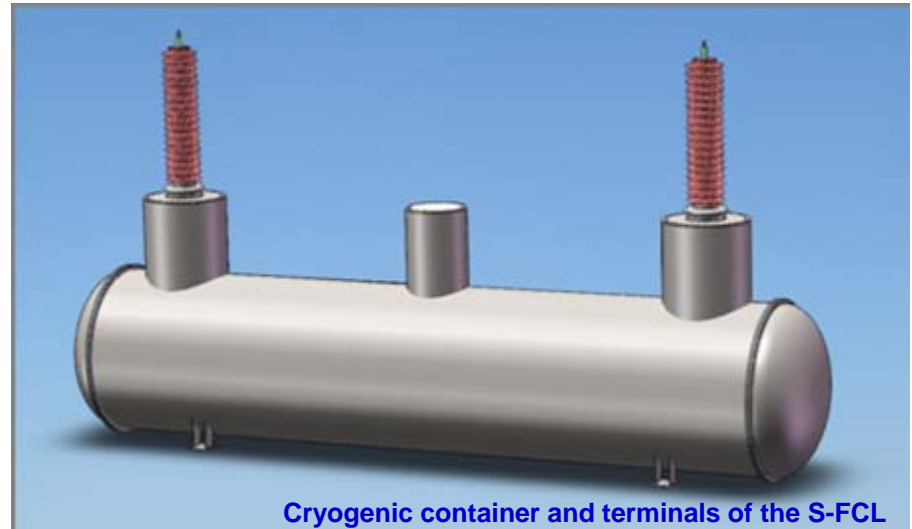
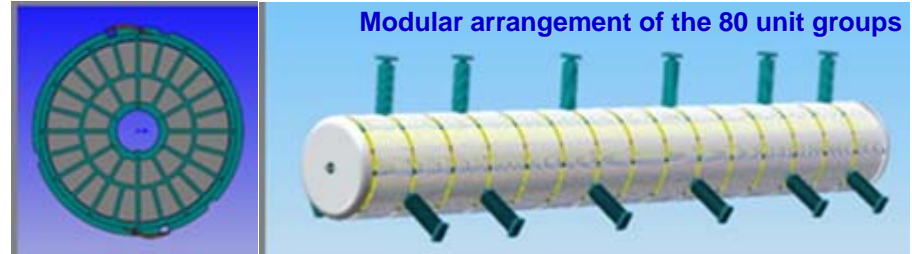
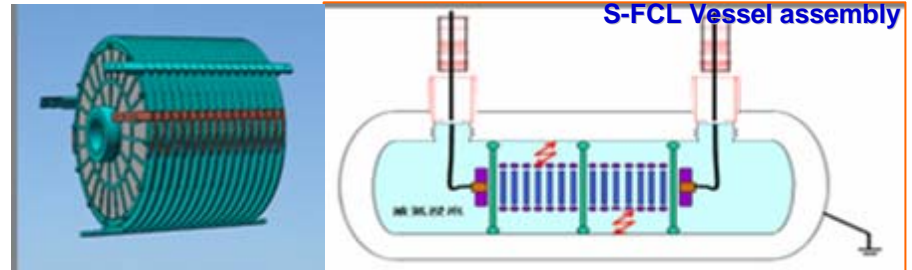
Quench Recovery

IEE-CAS: Design of a 200 kV/1.5kA DC Resistive FCL

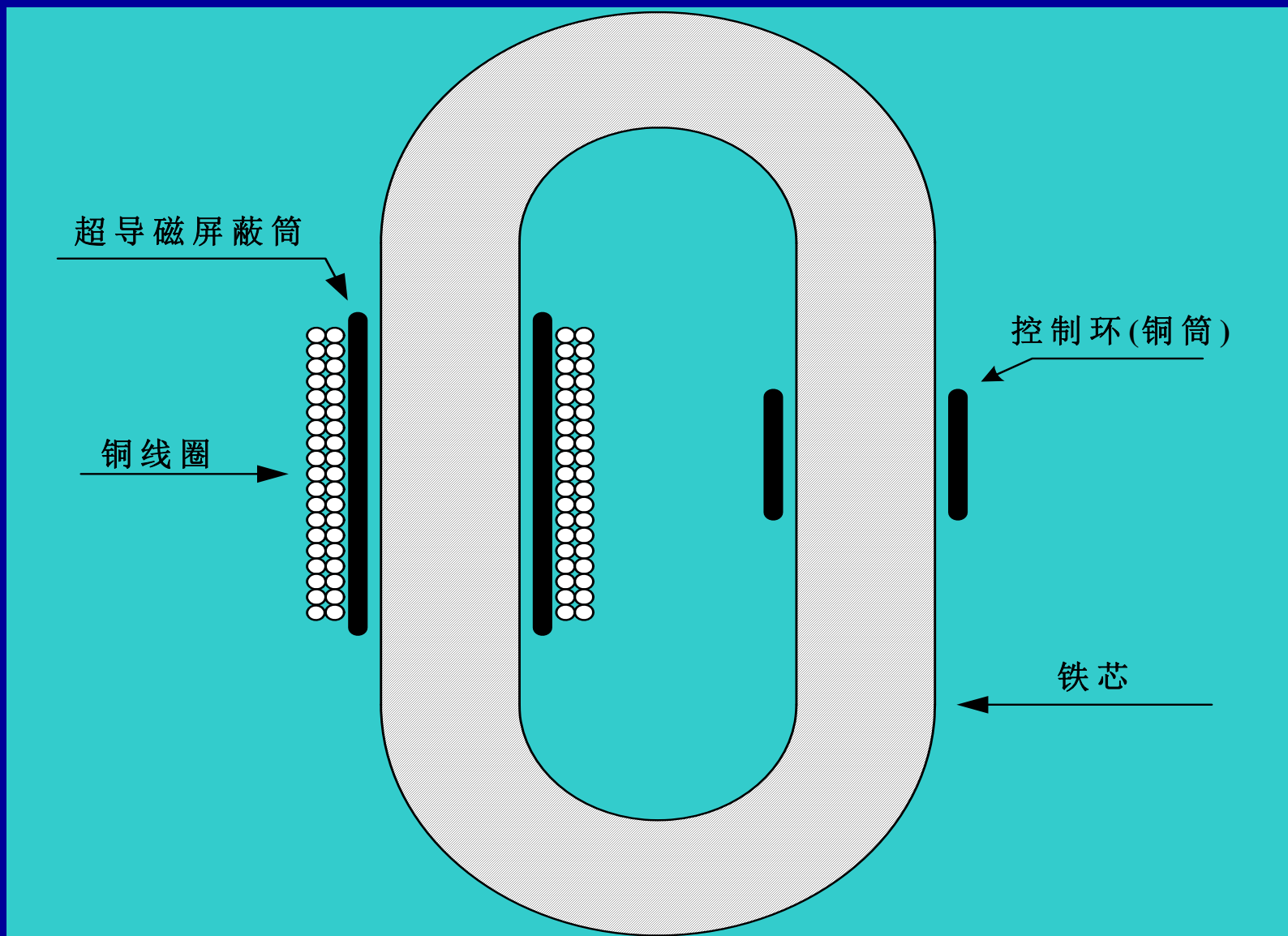
Design of a current-limiting Unit in non-inductive coil type.

Items	Value
Length of YBCO Tape (m)	54
ID (mm)	200
OD (mm)	870
Interturn Gap (mm)	5
Resistance (Ω)	1.28 Ω @100K 2.98 Ω @300K
N Value (0.1-1 μ V/cm)	38.6
Rated Voltage (kV)	3.0
Break-Down Voltage (kV)	15.0
Rated Current (A)	200.0
Peak current (A, with duration of 100ms)	900.0
Safety Temperature Limit (K)	300.0

For a 200 kV/1.5kA DC Resistive FCL, 8 units are connected in parallel to form an unit-group, and 80 unit-group are connected to achieve 12 ohm of resistance at 100K, reducing the fault current to about 16kA.

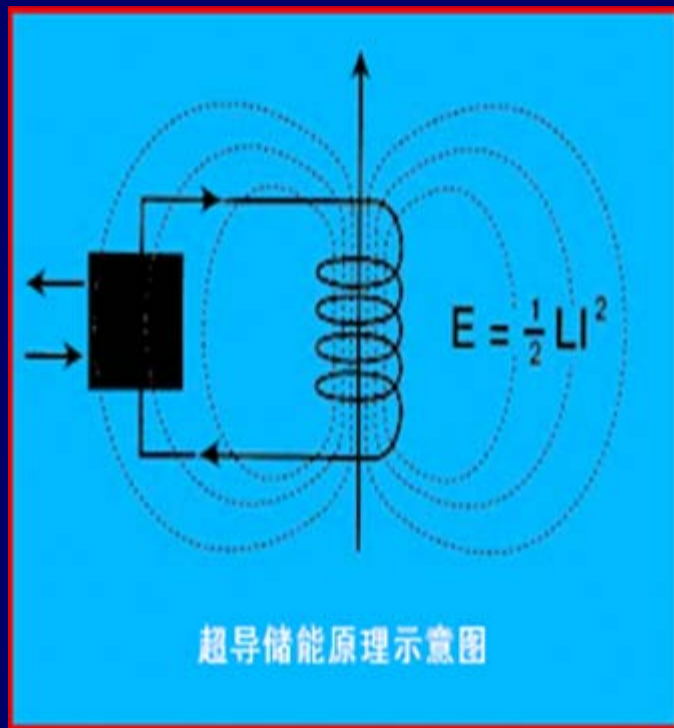
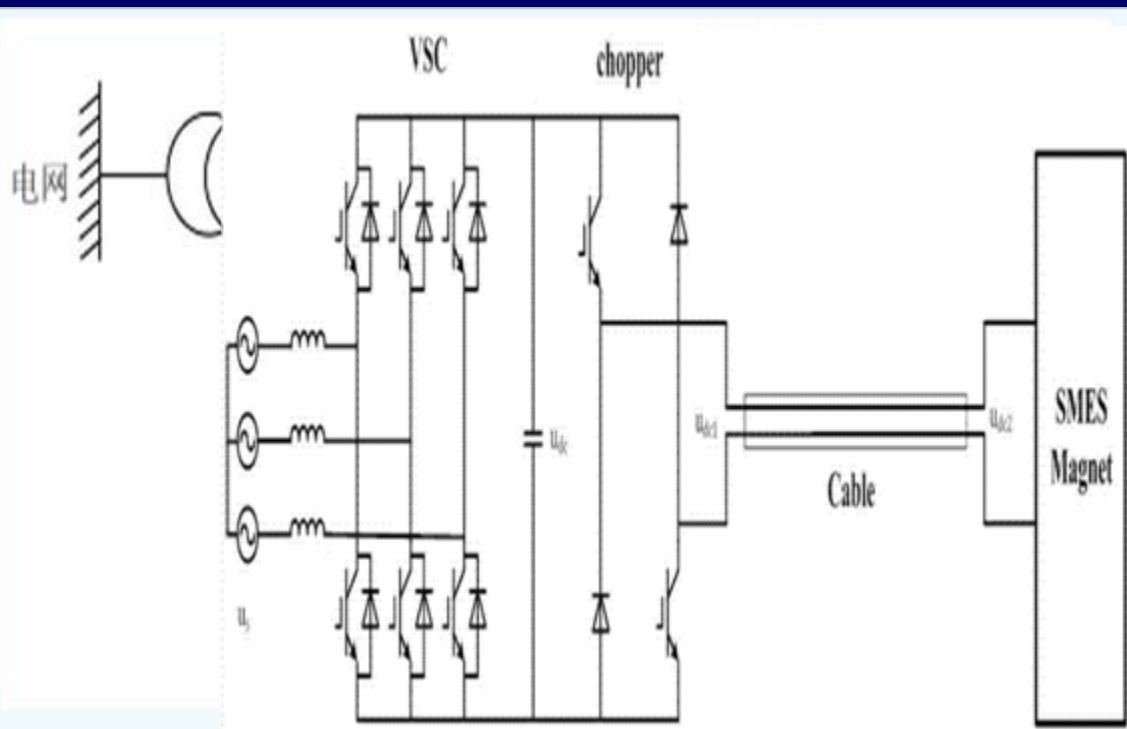


电抗型超导限流器



基于超导电性的电力储能技术

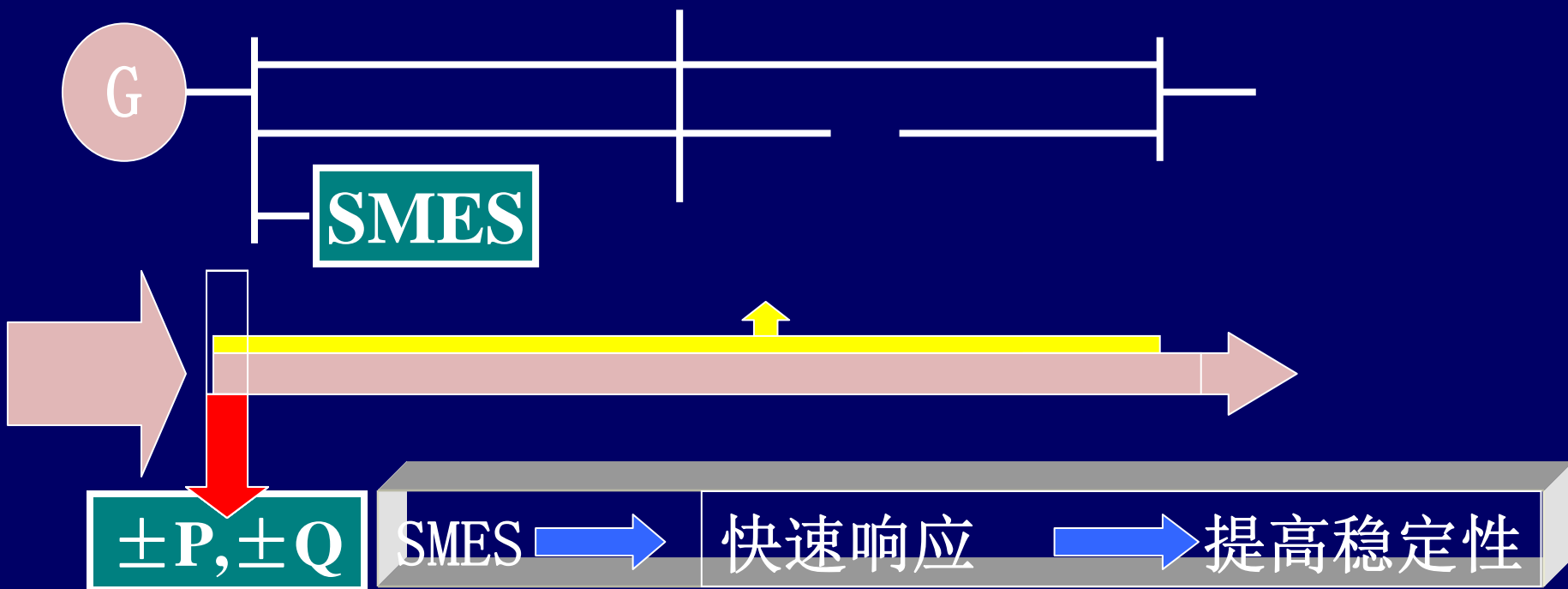
超导磁储能—SMES



- ➔ 能量形式保持不变；
- ➔ 响应速度快；
- ➔ 响应功率高；

超导磁储能系统

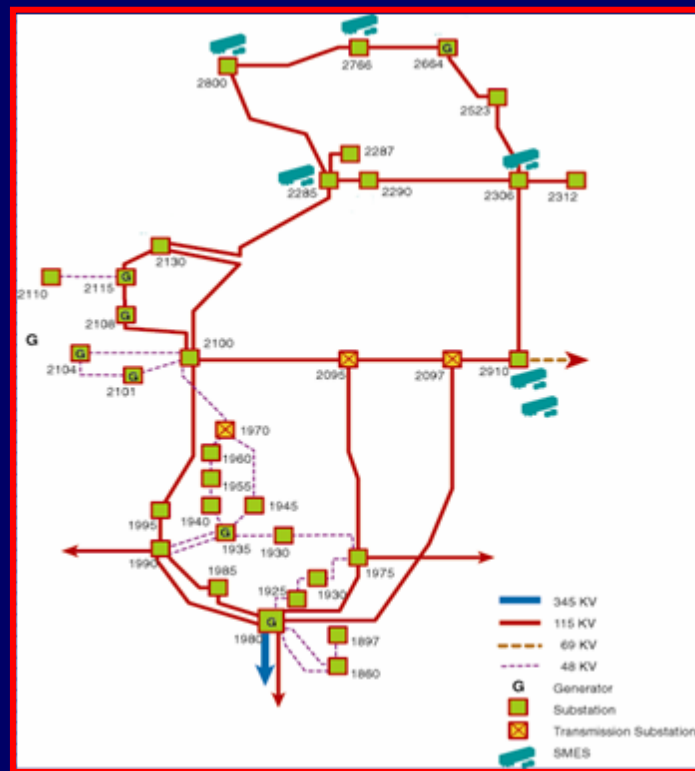
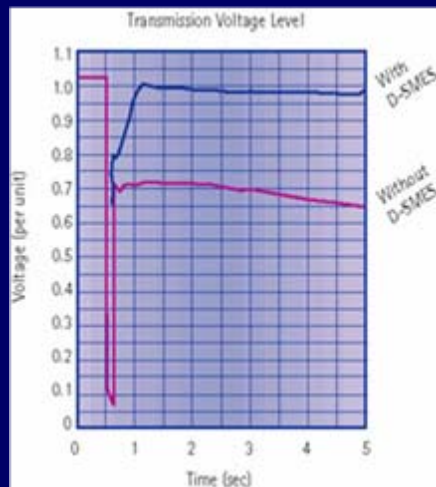
- ➔ 调节系统的功率；
- ➔ 消除电网的低频功率振荡；
- ➔ 改善电网的稳定性；



本图由唐跃进博士提供

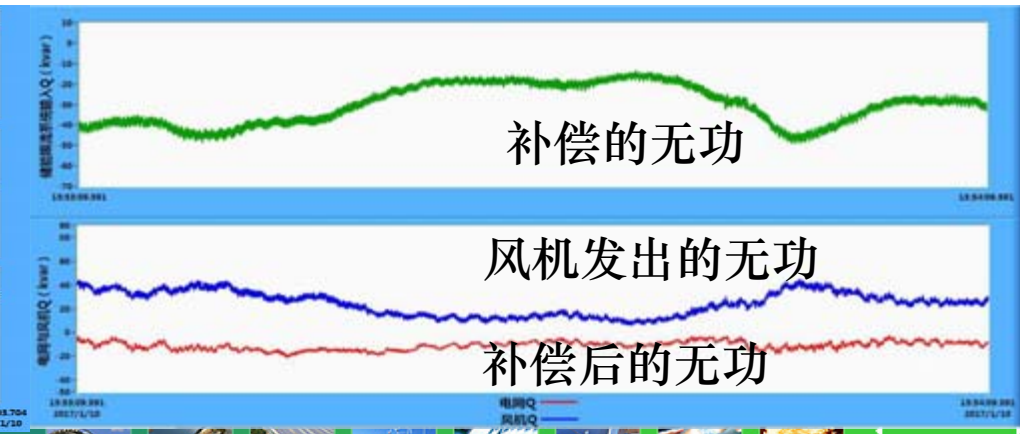
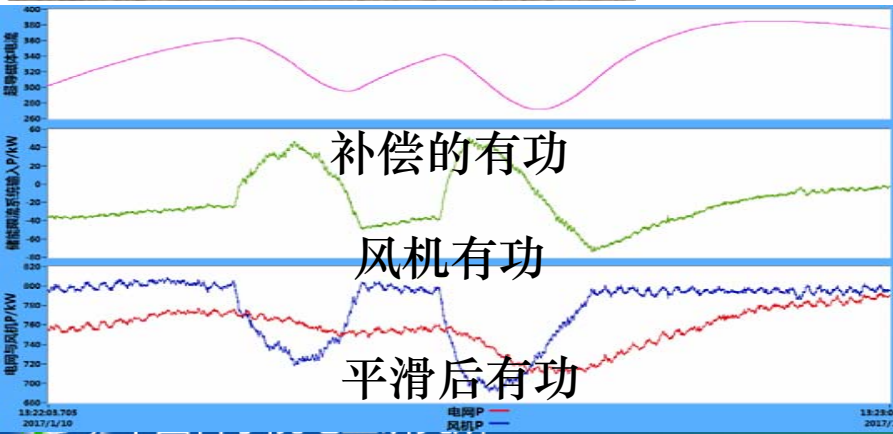
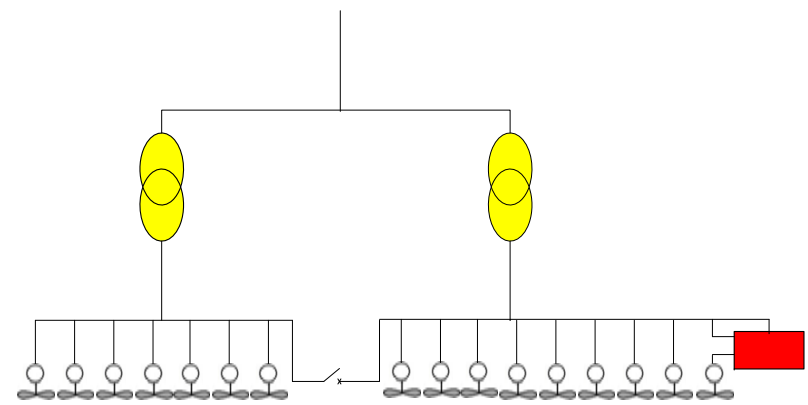
SMES的应用

- 小型SMES已商品化，用户包括美国军方、半导体厂、芯片制造厂等；
- 6台3MJ/8MVA小型SMES安装在威斯康星州公用电力北方环型输电网；
- 8台3MJ/8MW D-SMES在田纳西州TVA电管局500kV输电网。

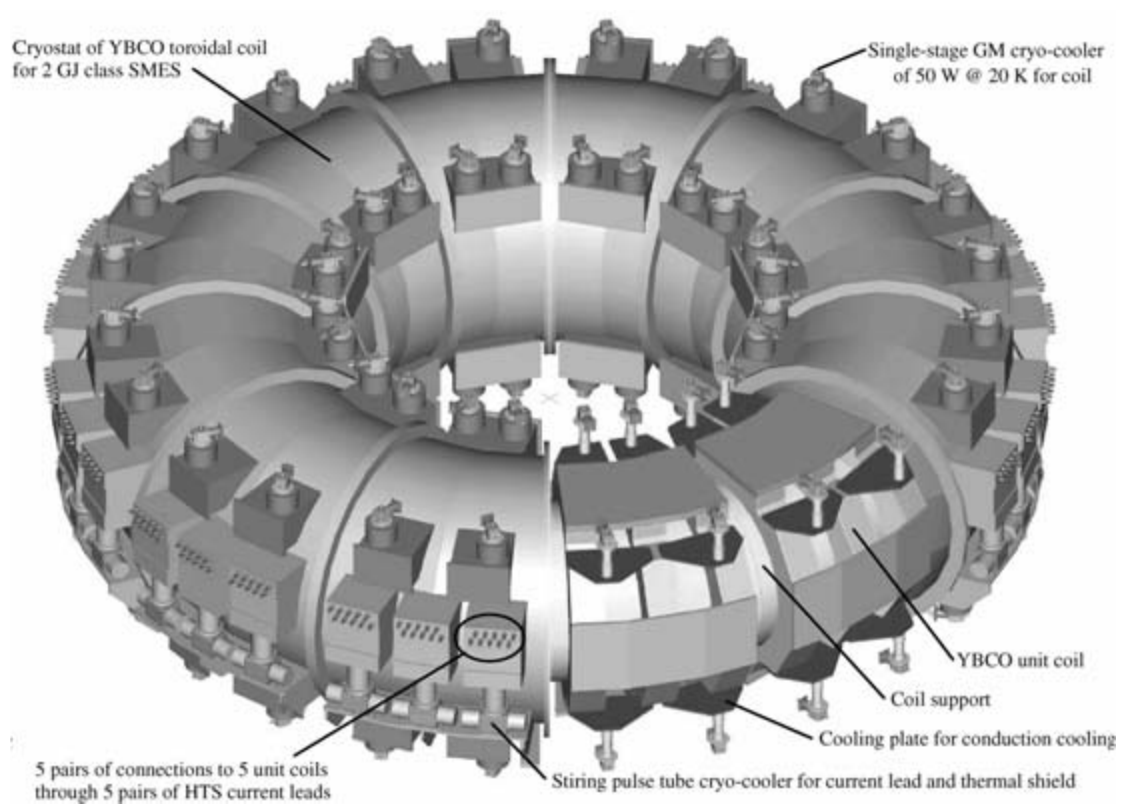


电工所/西电：超导限流-储能装置（在风电场并网试验）

■ 超导储能线圈：**BSCCO**超导线圈位于组合绕组中部，**YBCO**超导线圈位于组合绕组端部，以提高线圈综合性能。



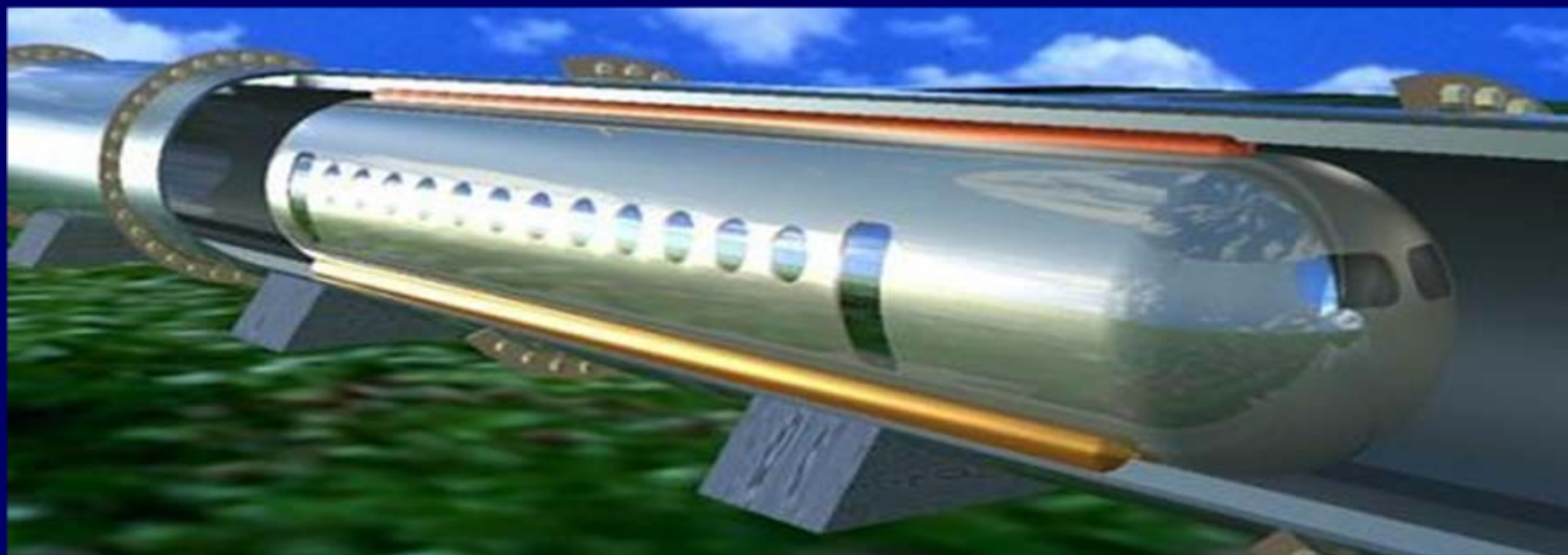
日本：2GJ超导储能系统概念设计



2GJ超导储能系统的环形线圈概念设计

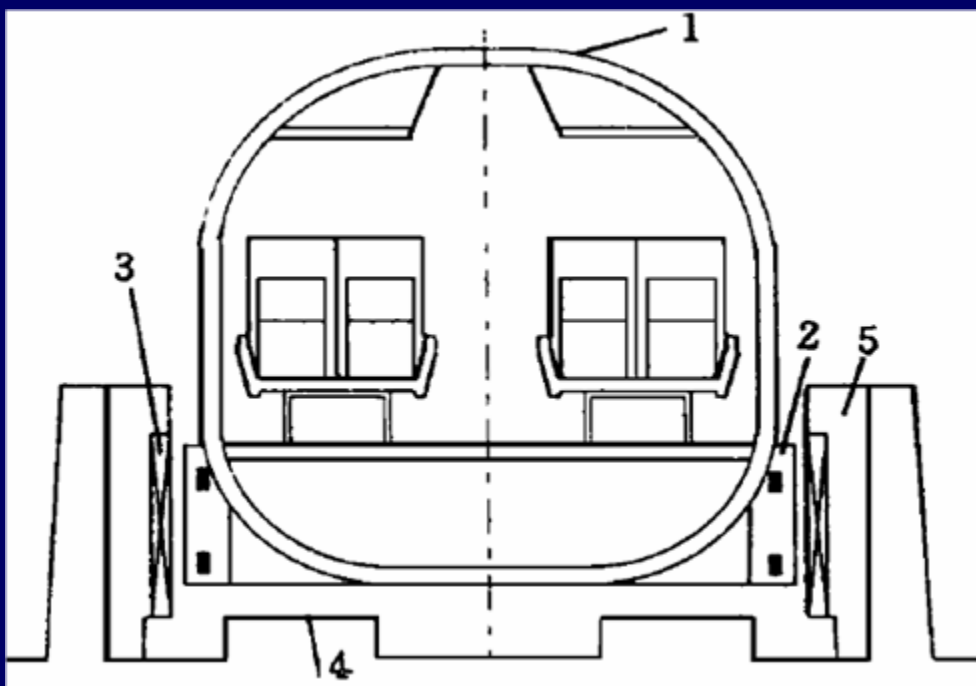
真空管道超导磁悬浮储能

- ➔ **电力储能量**：可以实现规模化、容量几乎不受限制；
- ➔ **物理储能**：环保无二次污染；
- ➔ **功率调节**：灵活、调节范围大；
- ➔ **建造地点的选择**：限制少；



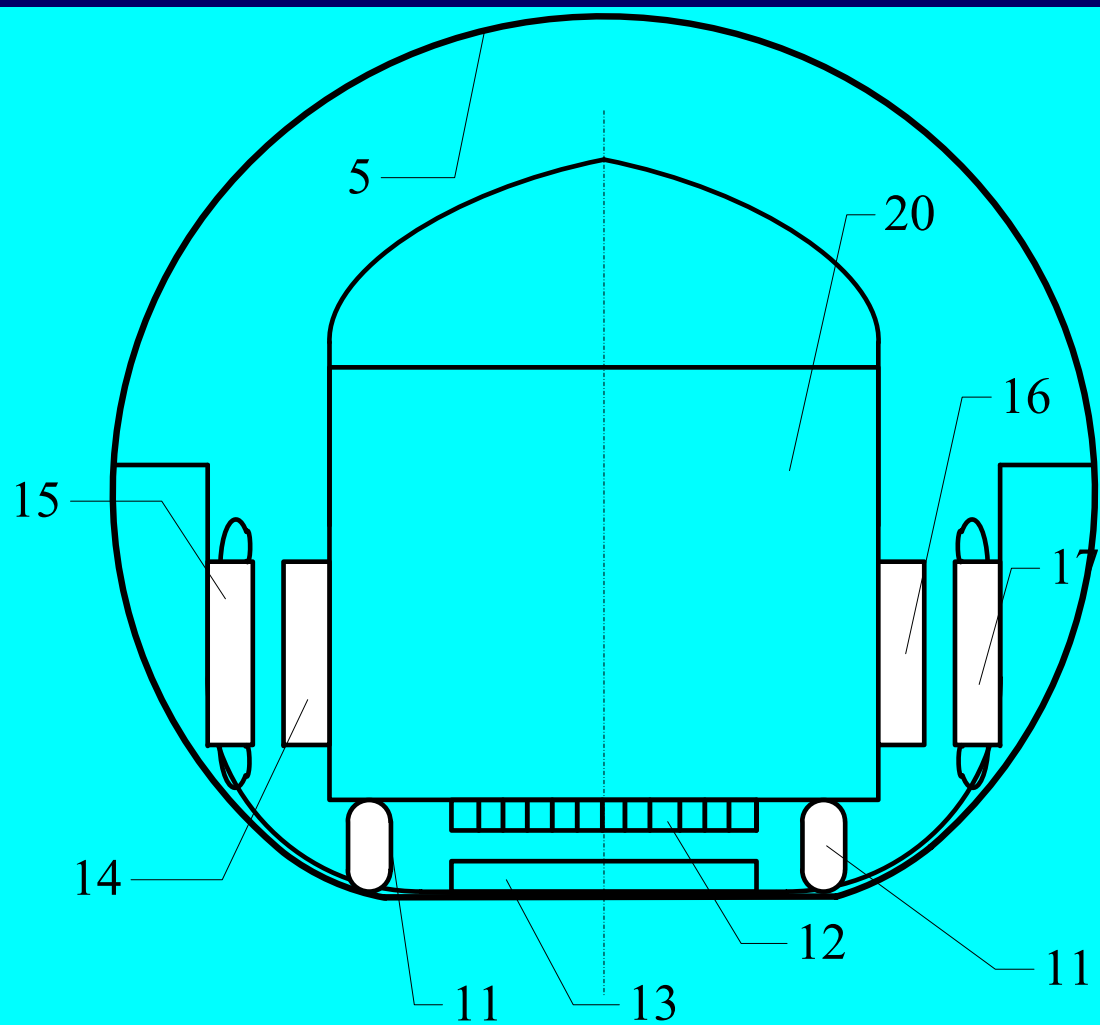
方案一：日本EDS方案+真空管道

储能速度：0~2000km/h~600m/s



1-车体，2-超导磁体，3-磁浮、导向、驱动线圈，
4-地面支撑轨道，5-侧墙

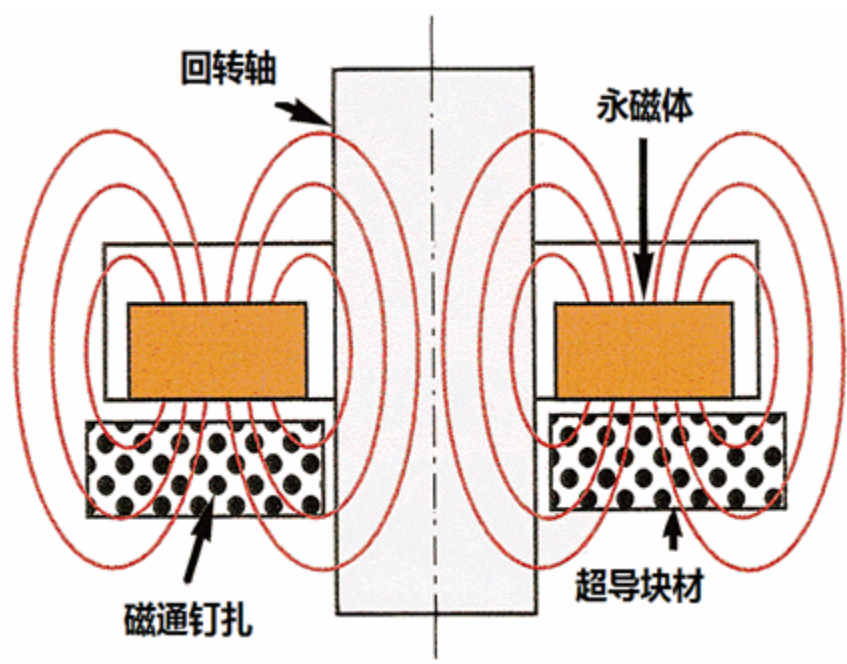
方案二：永磁+HTS+真空管道



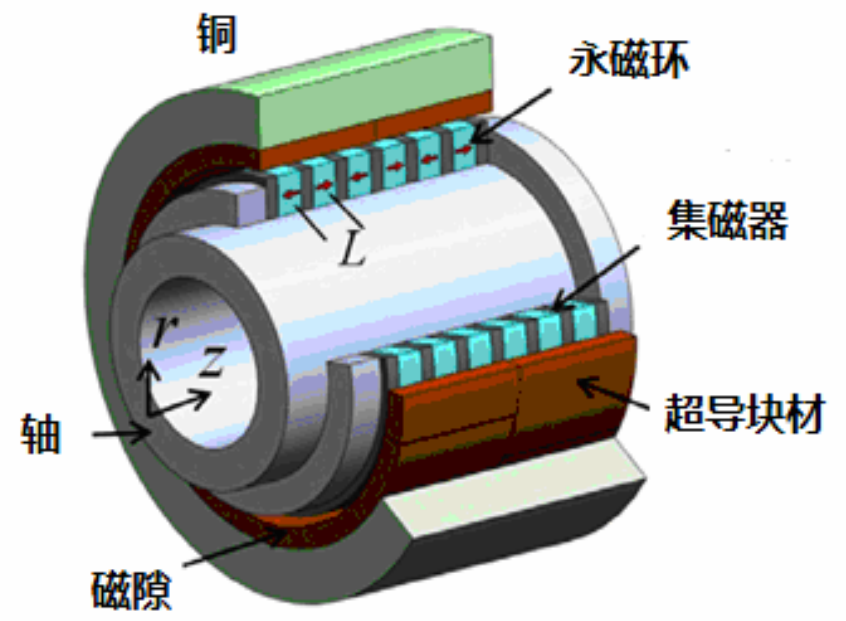
12-13-14-16: 永磁体

15-17: 超导体

超导磁悬浮轴承与飞轮储能



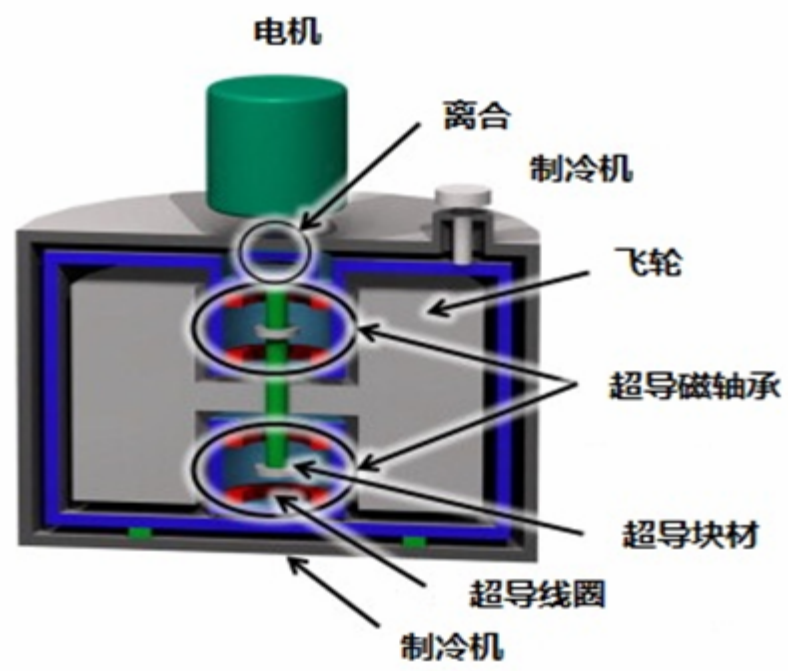
轴向型超导磁轴承



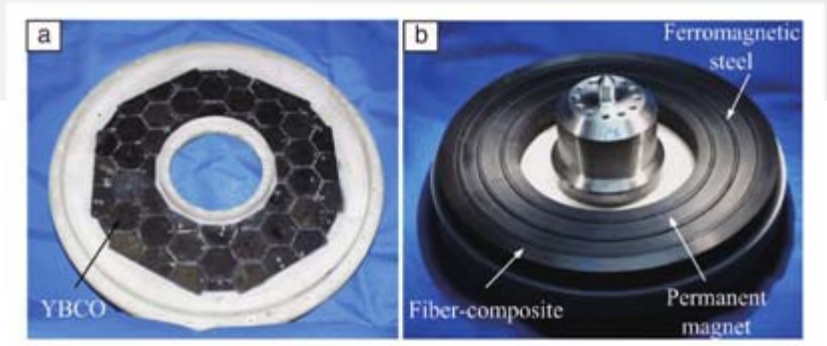
径向型超导磁轴承



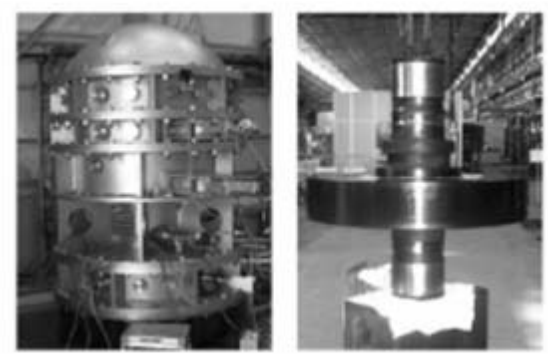
超导飞轮储能系统



超导飞轮储能系统主要由高转速高储能密度的飞轮、无源自稳定的超导轴承系统、电机、电力电子装置以及低温冷却设备部分组成。



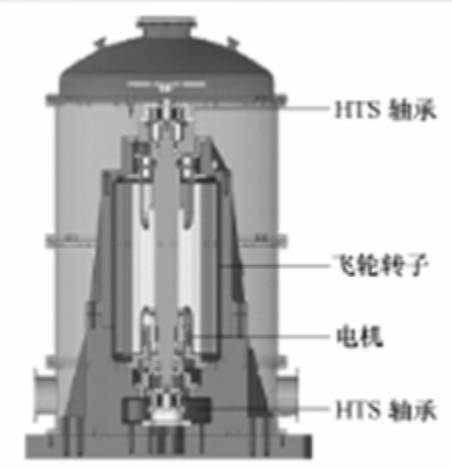
美国波音5kW.h/100kW 高温超导飞轮储能系统结构



日本ISTEC 10kW.h/1400kW 高温超导飞轮储能系统及其飞轮转子



超导飞轮储能系统



韩国KEPRI 10kW.h级高温超导飞轮储能系统结构

德国ATZ 5kW.h/250kW 高温超导飞轮储能系统



(a) 电工所系统



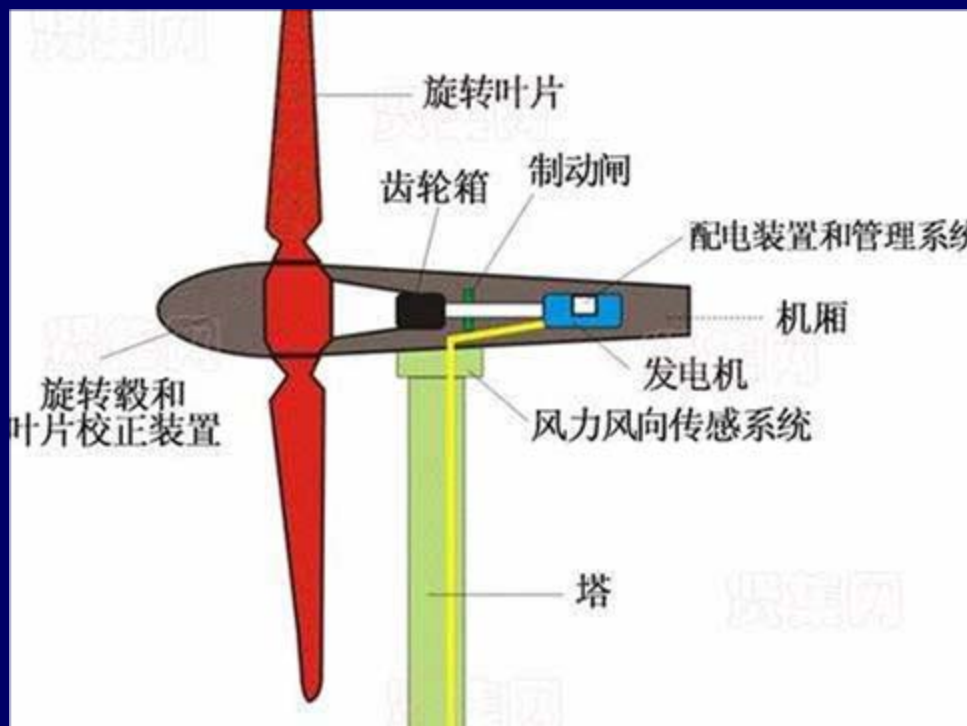
(b) 西南交大系统

西南交通大学和中科院研制出高温超导飞轮储能系统

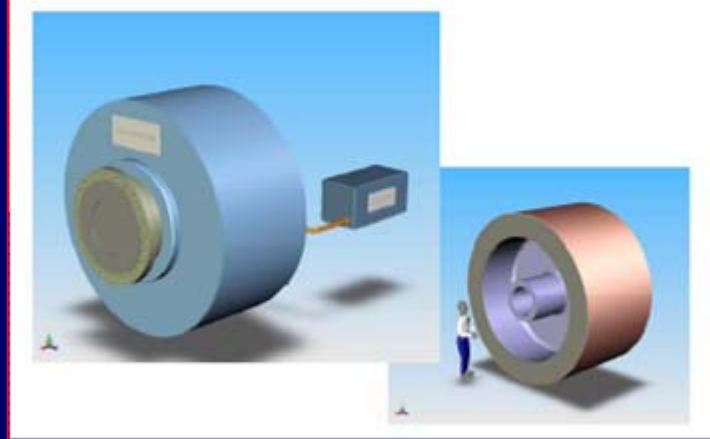
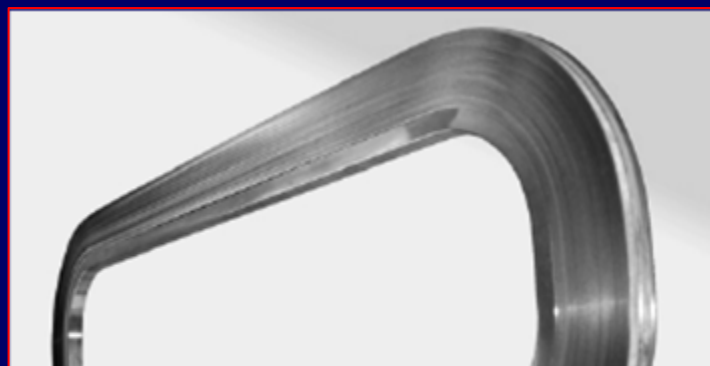


用于风力发电的超导发电机

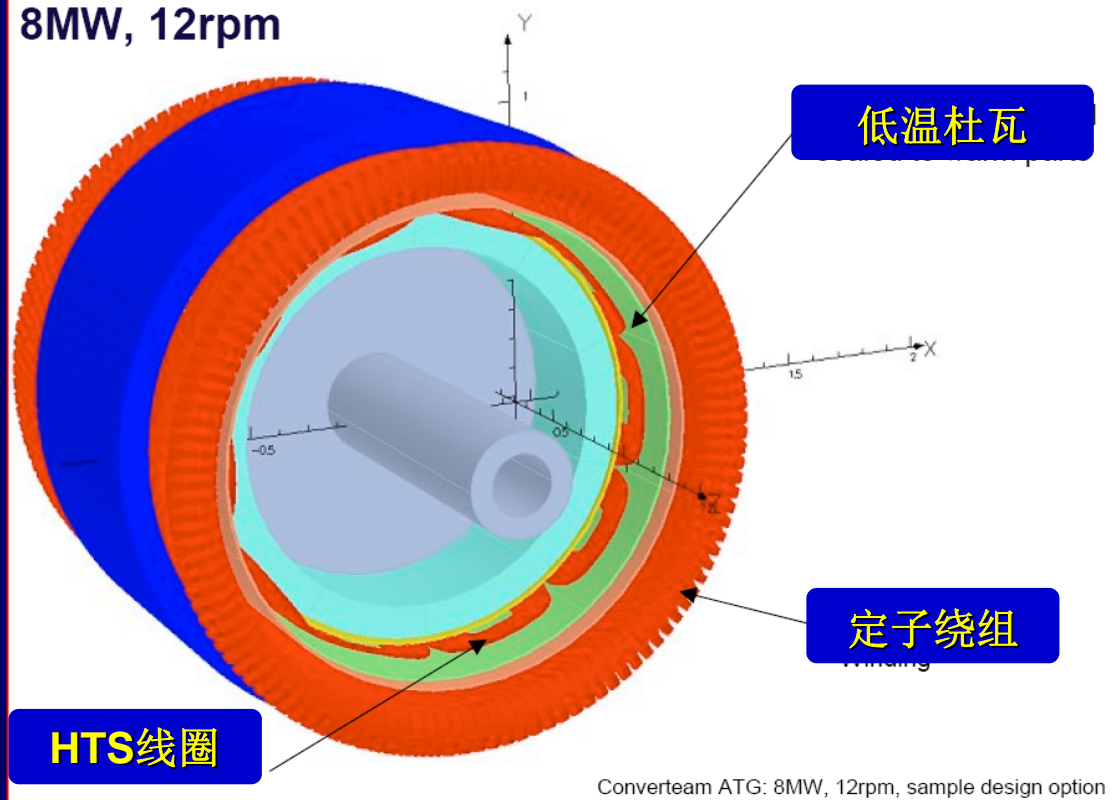
➔ 风力发电趋势：大型陆上或海上风电机组；



超导风力发电机结构示意图



8MW, 12rpm

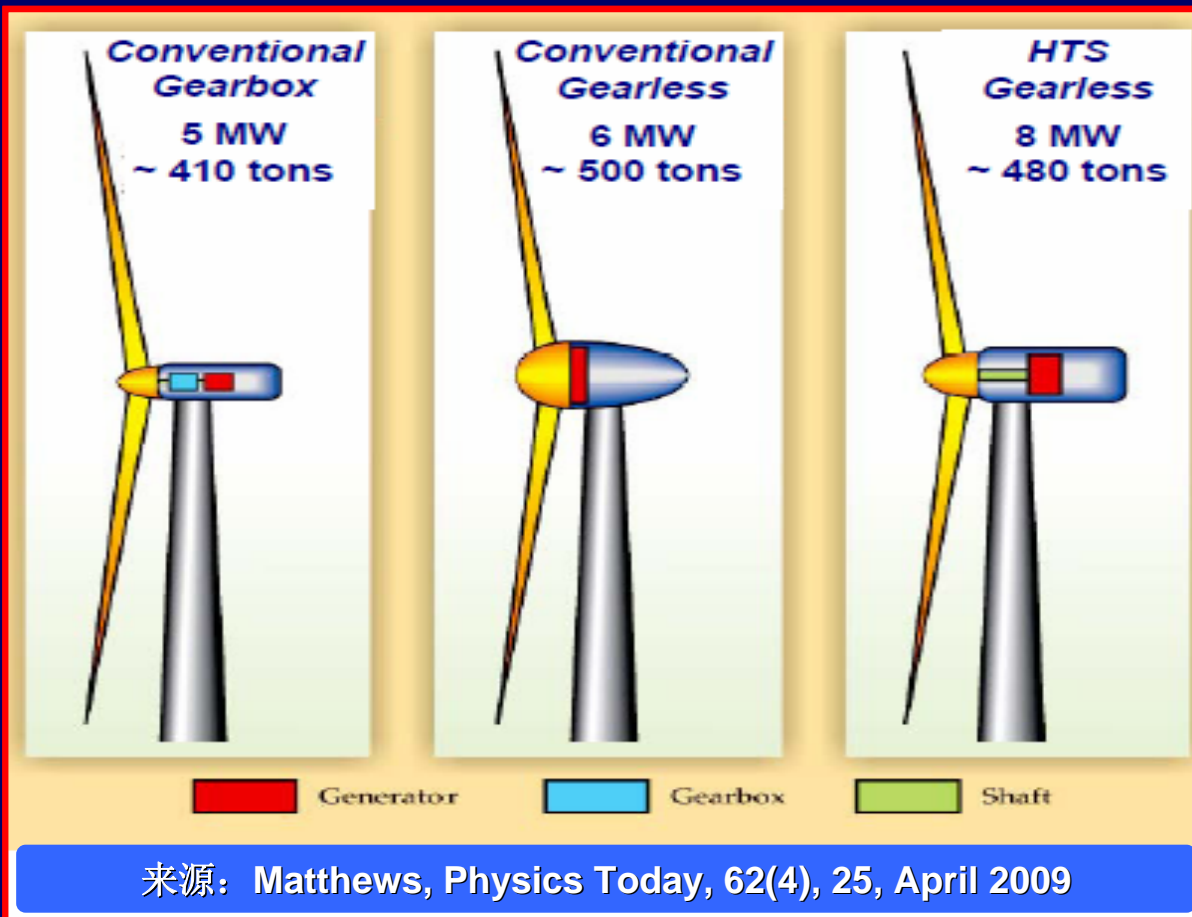


■ 英国Convertteam公司：8MW/12rpm 超导直驱风力发电机；

超导风力发电机

高温超导风力发电机

降低重量、提高效率，……



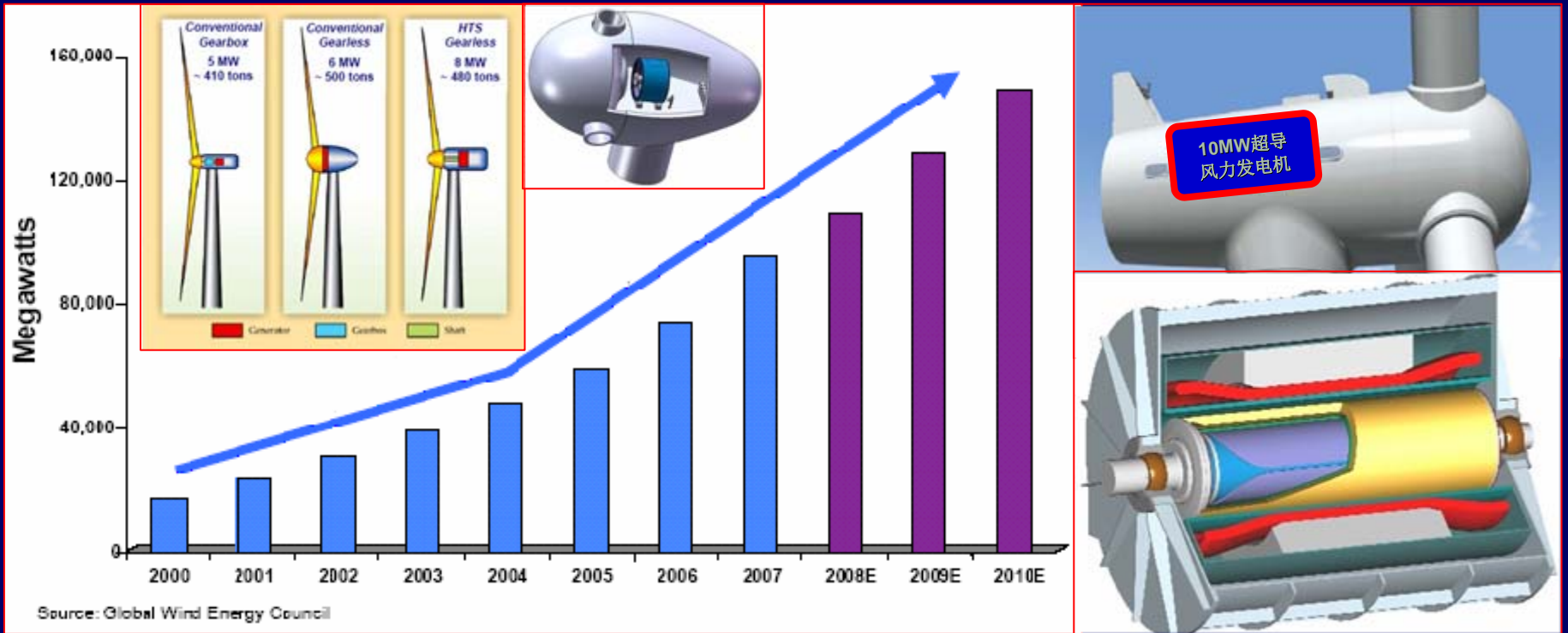
高温超导风力发电机

- 高温超导体的载流密度是Cu的约**100**倍；
- 大容量超导风力发电机电机的重量可减少；
- 超导发电机效率可在现有电机基础上提高**0.5%~1.0%**。

来源: Matthews, Physics Today, 62(4), 25, April 2009

超导风力发电机

美国AMSC公司：10MW超导风力发电机



- 美国超导公司（AMSC）；
- 正在进行10MW（12rpm）高温超导风力发电机的经济评估和验证；
- 可以将其重量由常规发电机的300t降至120t；
- 于2014年完成设计。

Our ambitions



Superconductivity has matured sufficiently that we can follow an ambitious plan:

- Design, develop and manufacture a full-scale multi-megawatt superconducting wind generator
- Install this superconducting drive train on an existing modern wind turbine in Thyborøn, Denmark, replace existing PM generator (3 MW Class, 14 rpm, 128 m rotor)
- Prove that a superconducting drive train is lighter, smaller and cost-competitive.
- Start Date: 2015-03-01
End Date: 2019-04-30

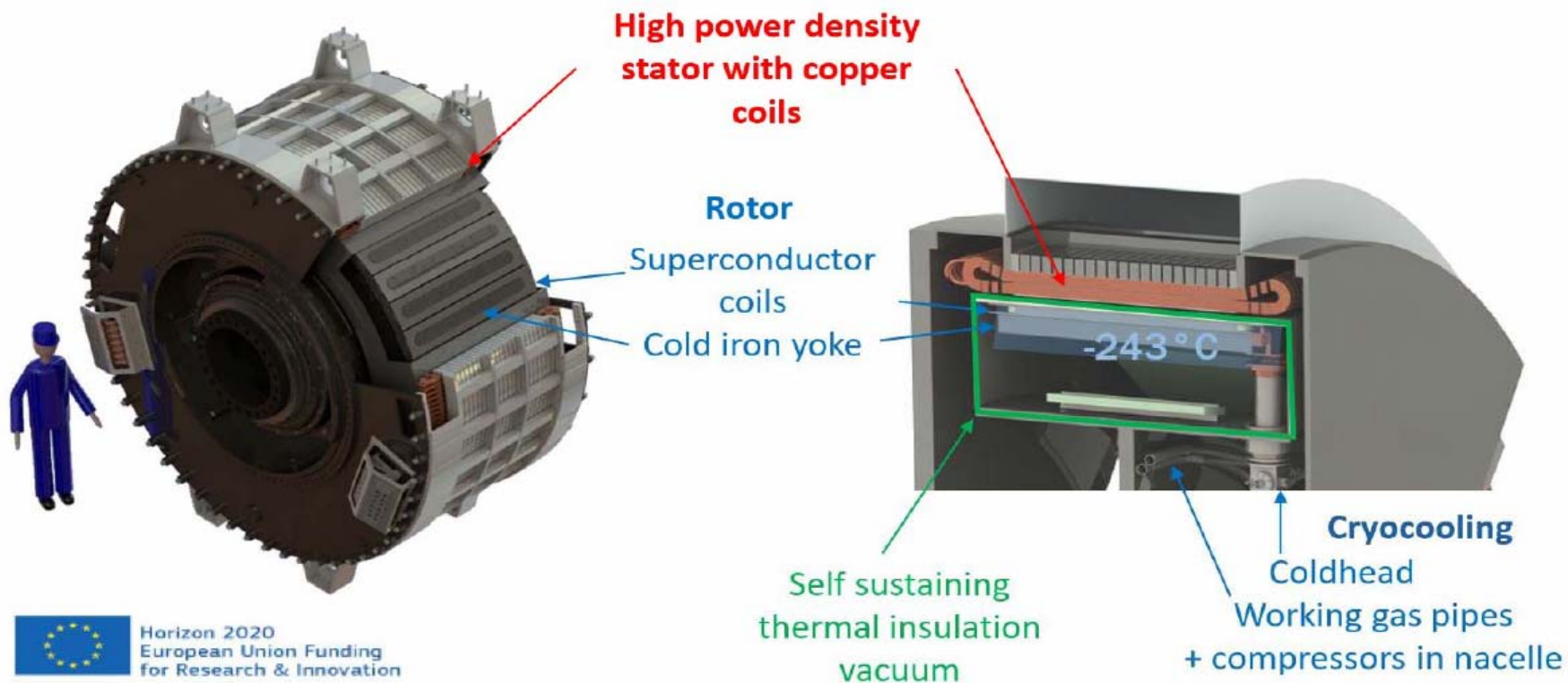


UNIVERSITY OF TWENTE.



Horizon 2020
European Union Funding
for Research & Innovation

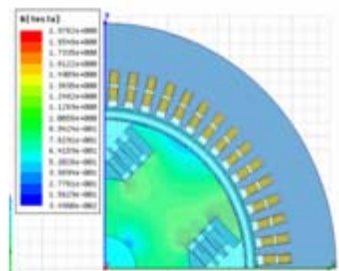
Elements of the EcoSwing superconductive generator



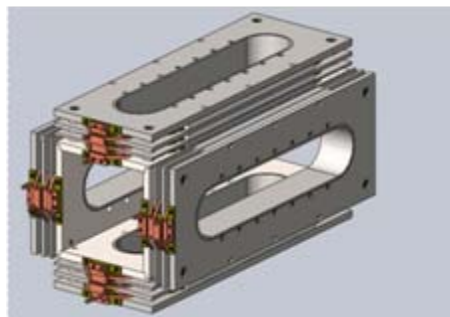
Horizon 2020
European Union Funding
for Research & Innovation

500kW/1500rpm高温超导发电机（上海电气、电工所）

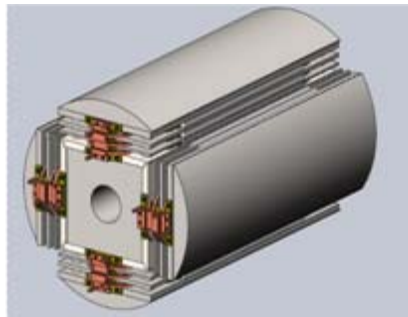
总体参数及结构



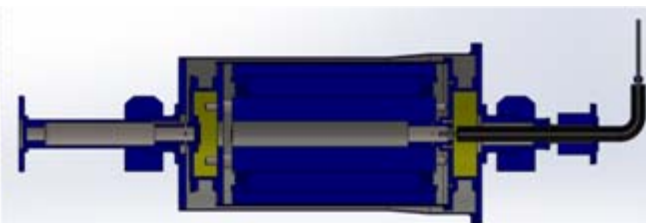
磁场分布



YBCO 励磁绕组

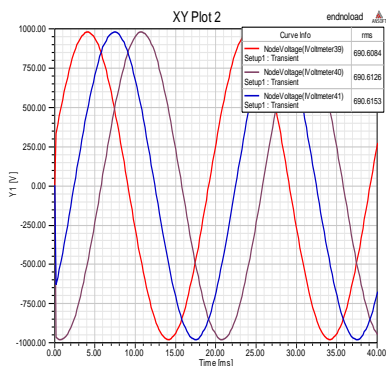


高温超导发电机转子

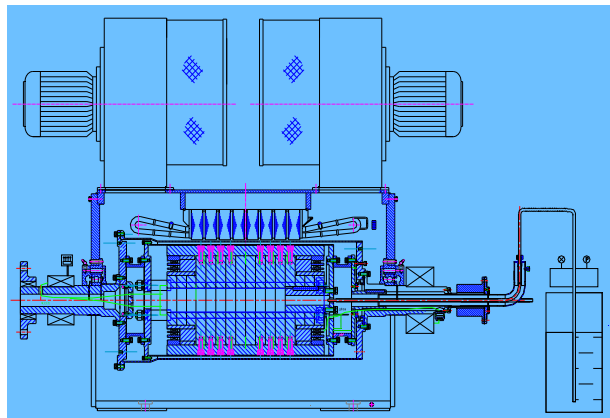


转子的低温系统

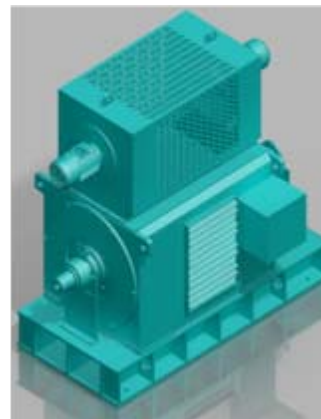
高温超导发电机的参数



输出电压



高温超导发电机的总体结构



参量	参数
额定输出功率	500 kW
极数	4
额定输出电压	690 V
额定励磁电流	30 A
额定负载时效率	96.33%
超导励磁绕组运行温区	77 K
超导电机振动	1.6 mm/s
超导电机的噪声	99 dB



500kW/1500rpm高温超导发电机



2017年3月28日→基于国产YBCO超导材料高温超导发电机通过测试。



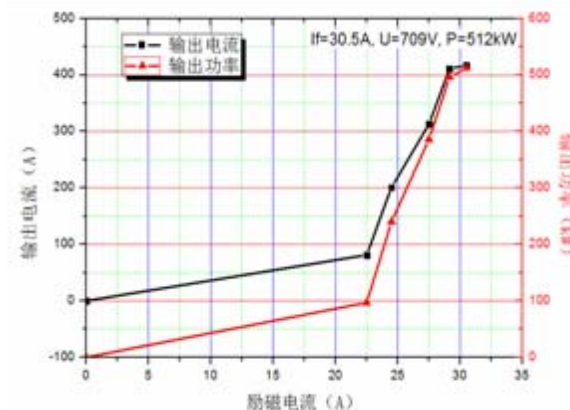
YBCO跑道线圈



超导转子系统



定子



额定负载特性曲线



500kW高温超导发电机系统

- 基于国产YBCO超导材料高温超导发电机；
- 500kW高温超导发电机为4极绕线式转子超导同步发电机；
- 转子绕组为YBCO高温超导带材绕制而成的跑道线圈结构；
- 低温杜瓦为旋转薄壁杜瓦，包括旋转动密封，冷却补偿以及磁屏蔽；
- 电流引线包括同磁极、磁极间和温区过渡三段式电流引线；
- 定子为常规铜绕组，冷却方式为强迫风冷。

日本：全球超导直流电网愿景



[From Dr. Koichi Kitazawa]

衷心感谢!