



大功率海上风电 电气装备关键技术

——禾望电气

HOPEWIND ELECTRIC



目录

CONTENTS

1

中国海上风电概况

2

海上风电变流器技术

3

海上风电远程运维技术

4

海上风电无功补偿技术



01

中国海上风电概况

- ◆ 中国海上风电资源分布
- ◆ 海上风电发展趋势——大型化
- ◆ 海上风电发展趋势——远海化

中国海上风电资源分布



中国有18000km海岸线。

海上风电资源主要在

辽宁、江苏、上海、福建、浙江、广东。

5~25m水深、50m高度海上风能约2亿千瓦；

25~50m水深、70m高度海上风能约2亿千瓦；

50~75m水深、70m高度海上风能约5亿千瓦。

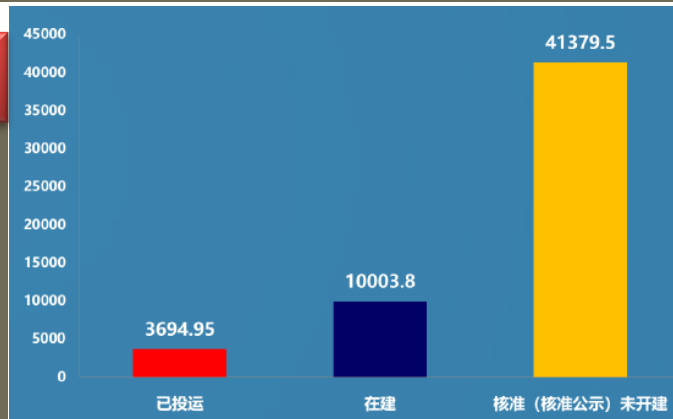
海上风电将迎来飞跃发展

截止2019年3月底：

已投运海上风电项目36个，容量3.7GW，机组1017台。

在建海上风电项目34个，总容量10GW。

已核准（公示）未开建的海上风电项目87个，容量41.4GW。



海上风电发展趋势——大型化

大功率海上风电机组对降低基础设施成本和运维成本有重要意义。



西门子放弃早期开发的4MW海上风电平台，主流海上风电平台覆盖6MW-8MW，最新海上风电平台10MW起步。



VESTAS的V164-10MW是在V164平台研发而来，如今已经可以进行销售。首台商用风机将于2021年安装。



GE销售单机6MW和7MW海上风电，并计划2019年提供12MW样机，2021年实现Haliade-X12MW量产。

海上风电发展趋势——大型化



金风正在进行下一代超
大功率8MW机组开发和
10MW机组预研；

东方电气喜获国内首张
10MW等级海上风力发
电机组设计认证证书；



中国海装启动下一代
10MW级海上风电技术
预研和样机设计



中国海上风电机组发展四个阶段：

1

1) 陆地风电衍生机型2.5MW，3MW居多；

2

2) 中大功率海上机组：4MW级；
上海电气4.0MW，远景能源4.2MW。

3

3) 大功率海上机组：5MW/6MW/7MW
金风6.7MW，湘电5MW，海装5MW，
明阳7MW，运达5MW，东汽5MW。

4

4) 下一代超大功率海上机组：8MW~12MW；
金风8MW，湘电8-11MW，海装8-12MW，
明阳8-12MW，东汽8-12MW。

海上风电发展趋势——远海化



海上风电建设呈现“抢占资源、近海开工、远海观望”的态势。

潮间带及近海资源日渐瓜分殆尽

中国海上风电未来不可避免地走向远海

新挑战

塔
基
建
设

电
能
输
送

无
功
补
偿

远
程
运
维

机
组
抗
震

抗
腐
蚀
性

变
流
器

...



02

海上风电变流器技术

- ◆ 海上风电变流器分类
- ◆ 3300V三电平海上风电变流器
- ◆ 1140V三电平海上风电变流器
- ◆ 690V两电平海上风电变流器
- ◆ 大功率海上风电变流器可靠性研究

海上风电变流器分类



传统风电机组变流器安装塔筒下面，扭缆设计困难，7MW是当前方案的极限

传统风电电机电压为690V

5MW额定电流=5500kW/690V/1.732/0.9=5114A

6MW额定电流=6600kW/690V/1.732/0.9=6136A

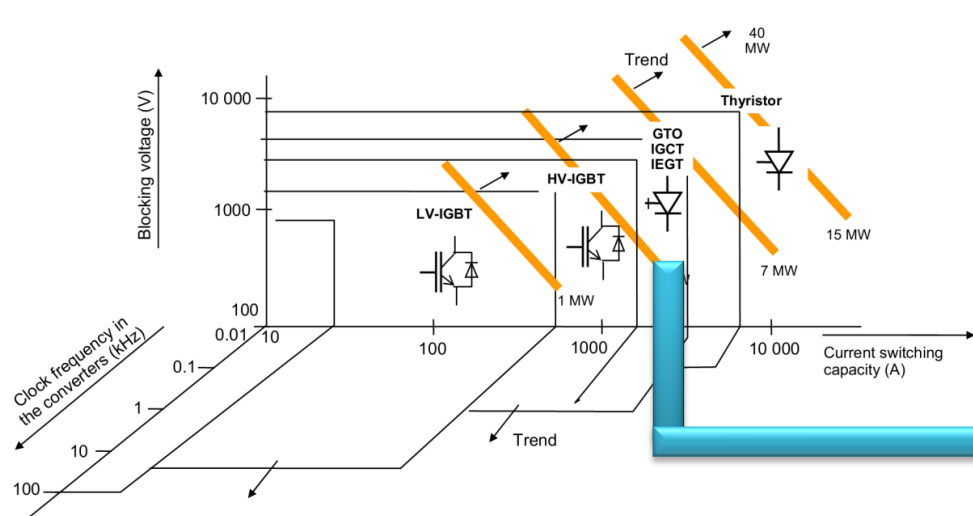
8MW额定电流=6600kW/690V/1.732/0.9=8182A

3300V系统电压：电机安装机舱，变流器，箱变安装在塔筒。
3.3kV电缆输送到塔筒下部。

1140V系统电压：电机安装机舱，变流器，箱变安装在塔筒。
1.14kV电缆输送到塔筒下部。

690V系统电压：电机，变流器，箱变安装在机舱上。
35kV电缆输送到塔筒下部。

3300V三电平海上风电变流器——器件



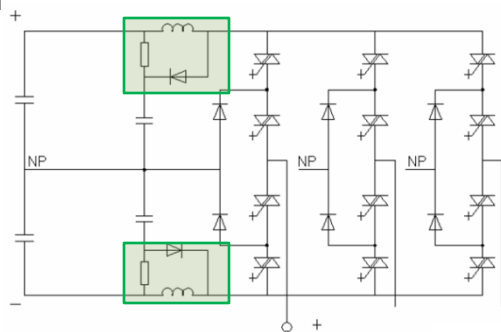
低导通损耗

低开关损耗

- ◆ 1997年ABB在GTO基础上推出了IGCT器件 (integrated gate-commutated thyristor)
- ◆ 相比GTO , IGCT导通损耗低 , 开关速度快 , 更加可靠
- ◆ 应用难度远高于IGBT , 也阻碍了国内的批量应用。

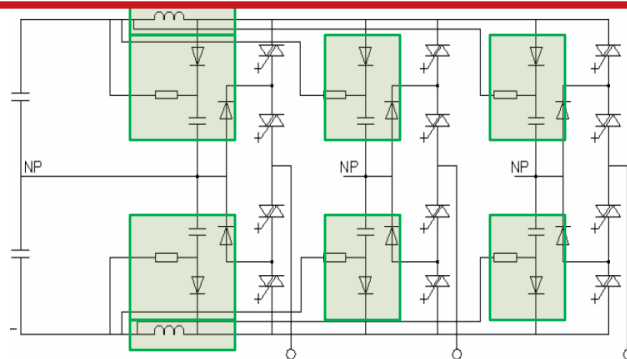
禾望电气是国内首家成功产品化IGCT变流器的企业 , 打破ABB和Siemens的垄断。

3300V三电平海上风电变流器——拓扑



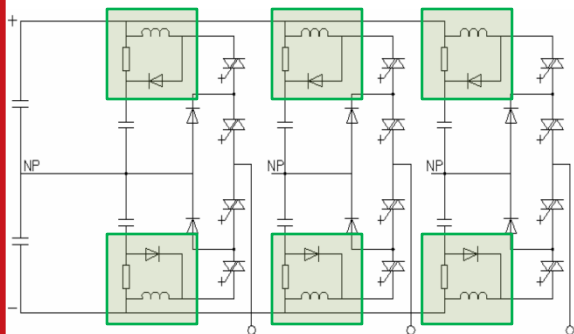
故障概率高，
难度大，ABB
放弃该方案。

三相桥臂共用箝位吸收电路 ABB – ACS1000



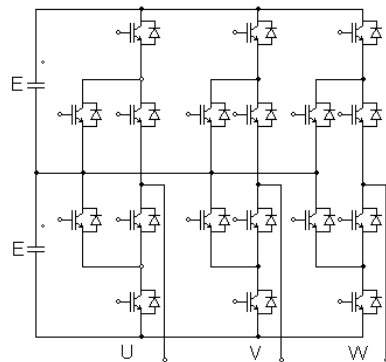
ABB大量使用
该方案，可靠
性在方案1和
方案3之间。

三相桥臂共用di/dt电抗器 ABB – ACS6000



可靠性最
高方案，
使用最广
泛。

三相桥臂独立箝位吸收电路 Siemens – ML2 and S150



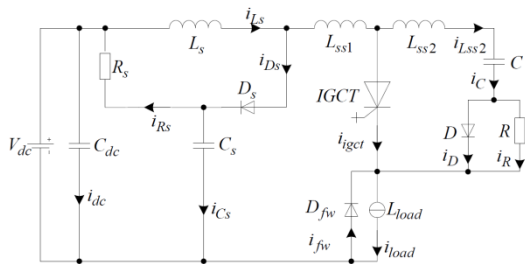
可进一步提升
IGCT利用率，提
升单机容量。

中点主动箝位三电平ANPC ABB-ACS8000

3300V三电平海上风电变流器——拓扑

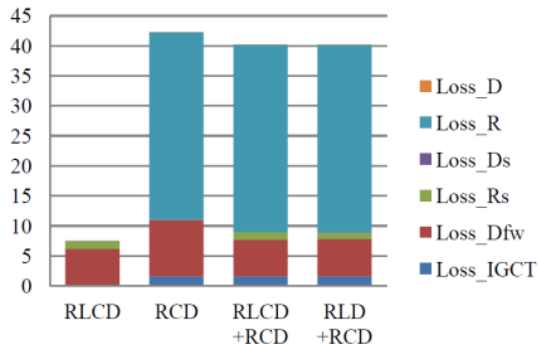
IGCT是变换器的核心器件，约占成本50%，提高IGCT利用率可以有效降低成本。

- ◆ 增加针对IGCT的RCD吸收电路；
- ◆ 大幅度降低IGCT的关断损耗；
- ◆ IGCT开通损耗略有升高；
- ◆ 可提升变换器的系统输出能力约**27%**；
- ◆ 但是变换器整体损耗上升，效率会下降；

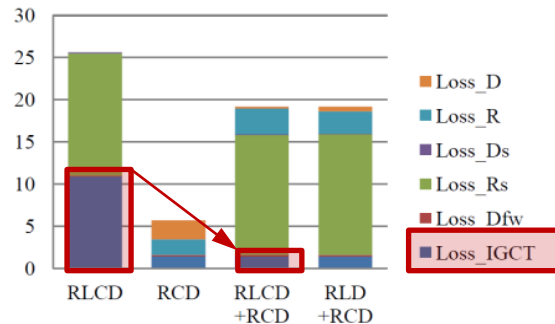


RLCD箝位吸收电路+RCD吸收电路。

开通瞬态过程损耗对比



关断瞬态过程损耗对比



3300V三电平海上风电变流器——模块设计

1

建立精确的器件仿真模型和变流器仿真系统。

2

对器件换流过程进行了大量仿真和实验研究。

3

从理论、仿真、测试出发改进散热器设计；

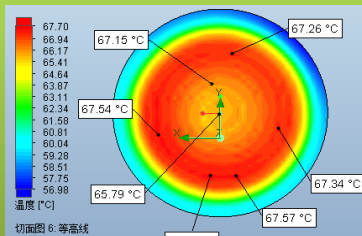
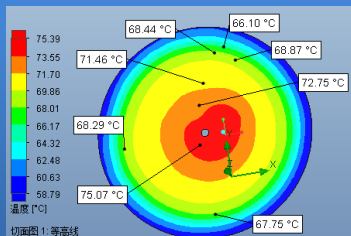
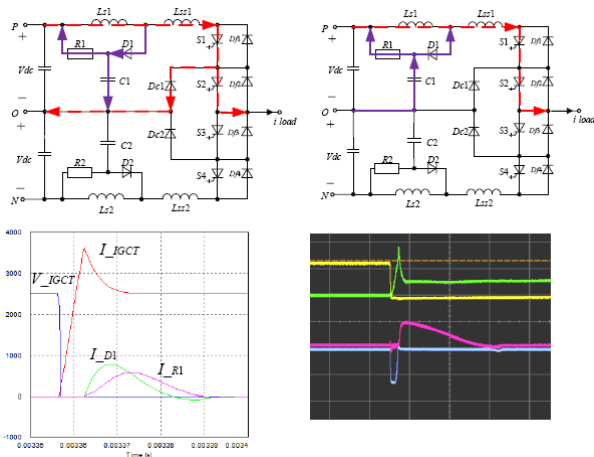
4

从器件、模块多角度进行热设计仿真；

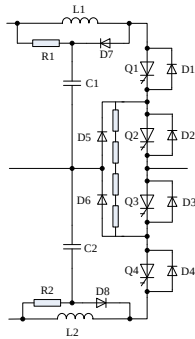
5

从功率密度、性能、可维护性等多维度开展模块设计；

模块设计

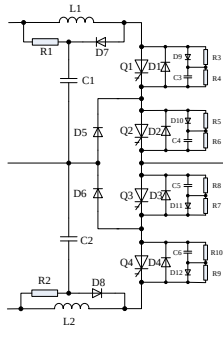


3300V三电平海上风电变流器——模块设计



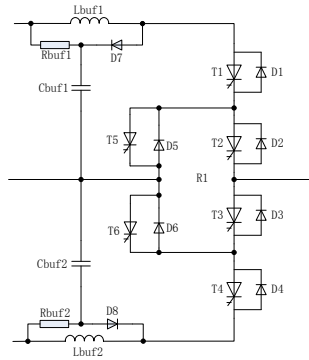
- ◆ 传统三电平拓扑；
- ◆ 传动到10MVA；
- ◆ 风电5MW/7MW

ABB -ACS6000
-PCS6000
Siemens-ML2
-SM150
Ansaldo-Silcovert
10MW



- ◆ NPC+RCD拓扑；
- ◆ 传动到14MVA；
- ◆ 风电8MW/10MW

Ansaldo -Silcovert
12MW



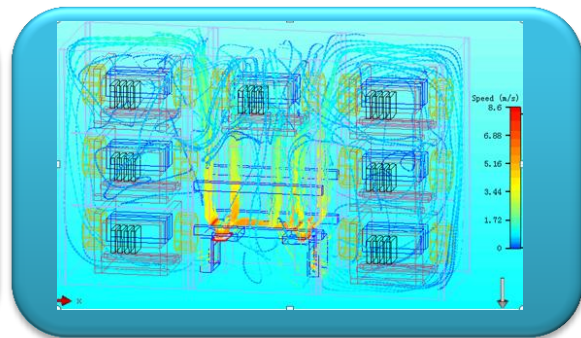
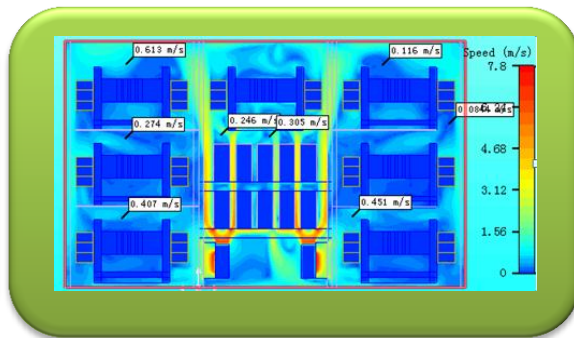
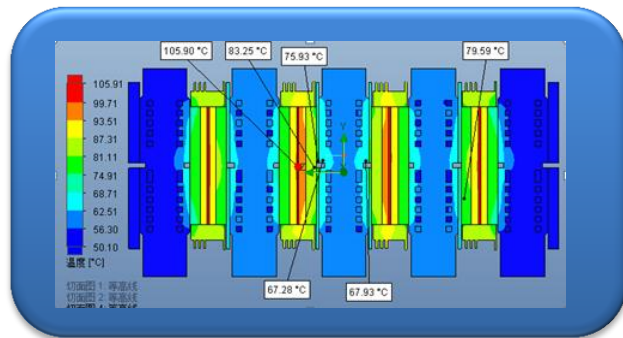
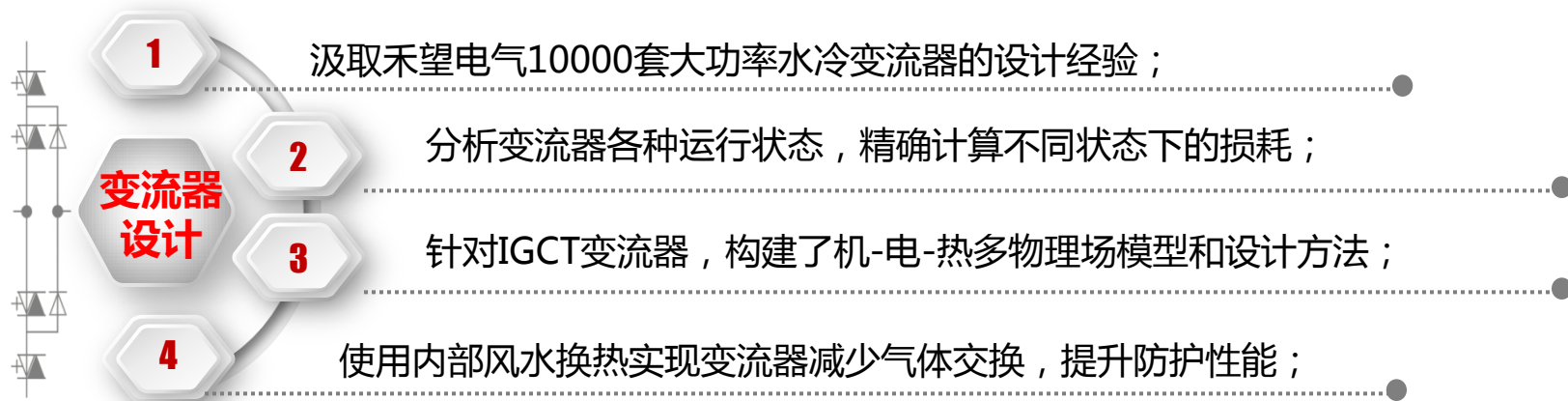
- ◆ ANPC拓扑；
- ◆ 传动到14MVA；
- ◆ 风电8MW/10MW

ABB -ACS8000



- ◆ 重量200kg (对比国外350kg) ；
- ◆ 体积小， 机柜1m宽， 1.2m深， 2.2m高；
- ◆ 维修简单， 20min维护；

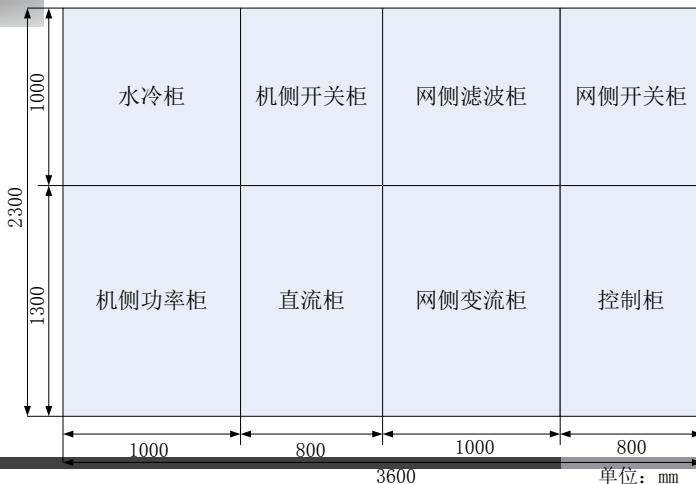
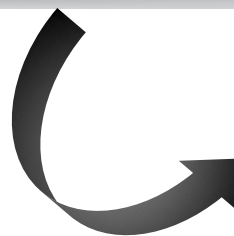
3300V三电平海上风电变流器——整机设计



3300V三电平海上风电变流器——结构方案



5/6/7/8/10MW统一结构设计，轻松安放在5800内径塔筒内部。



3300V三电平海上风电变流器——现场应用



湘电实验室

Zhuzhou, Hunan Province 2016

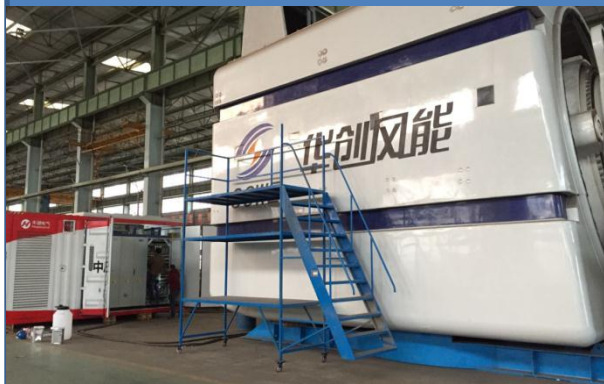
株洲湘潭电机实验室应用



张北风电场

Zhangbei, 2015

张北中压风电变流器应用



华创海上风电

Tsingtao Huachuang, 2017

华创5/7MW风电变流器应用



兴化湾海上风场

Putian, Fujian Province, 2018

5MW海上风电变流器

1140V三电平海上风电变流器

传统风电电机电压为690V

$$5\text{MW额定电流} = 5500\text{kW} / 690\text{V} / 1.732 / 0.9 = 5114\text{A}$$

东汽5MW，明阳5.5MW，海装5MW，太重5MW

$$6\text{MW额定电流} = 6600\text{kW} / 690\text{V} / 1.732 / 0.9 = 6136\text{A}$$

金风6.7MW，明阳6MW，海装6MW

$$7\text{MW额定电流} = 7700\text{kW} / 690\text{V} / 1.732 / 0.9 = 7159\text{A}$$

明阳7.6MW，已经达到该方案的极限

$$8\text{MW额定电流} = 8800\text{kW} / 690\text{V} / 1.732 / 0.9 = 8182\text{A}$$

扭缆问题，8MW以上无法采用变流器塔筒安装方案

变流器机舱安装对震动、安全有较高要求，国内尚不成熟，电机电压提高到1140V时，可以解决8-12MW机组变流器塔筒安装的扭缆问题，且不显著增加系统成本，是海上超大功率机组电气塔筒安装的一个方案。

电机电压为1140V

$$8\text{MW额定电流} = 8800\text{kW} / 1140\text{V} / 1.732 / 0.9 = 4952\text{A}$$

$$10\text{MW额定电流} = 10800\text{kW} / 1140\text{V} / 1.732 / 0.9 = 6078\text{A}$$

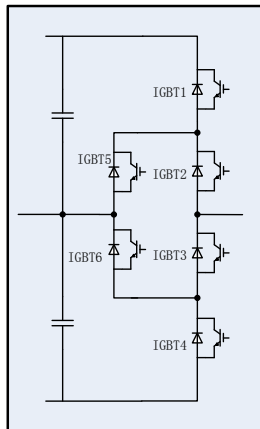
$$12\text{MW额定电流} = 12900\text{kW} / 1140\text{V} / 1.732 / 0.9 = 7259\text{A}$$

$$15\text{MW额定电流} = 16000\text{kW} / 1140\text{V} / 1.732 / 0.9 = 9004\text{A}$$

1140V三电平海上风电变流器

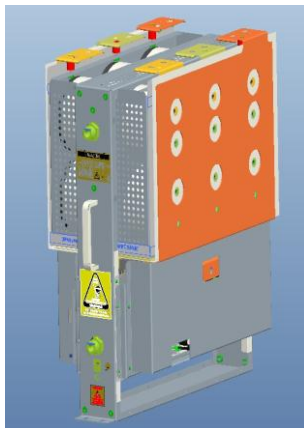


传统低压IGBT模块



功率模组电路

构建I型三电平功率模组，电压1140V



功率模组构建变流器整机

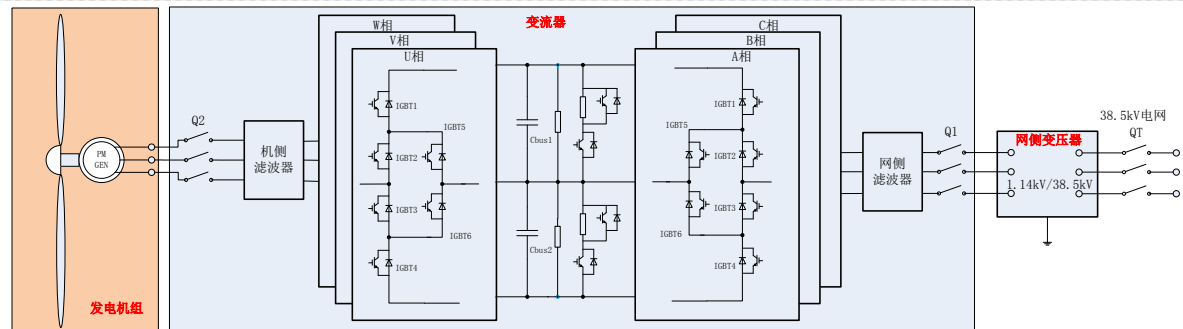
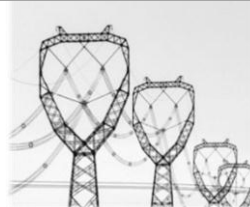
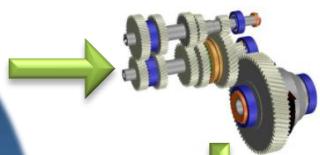
优点：

解决大功率机组扭缆多无法布置的问题；
传统风电变流器的量产器件，成熟供应链；
成本无显著增加，业主和集成商接受度高；

禾望电气提供

3-12MW/1140V三电平海上风电变流器解决方案

1140V三电平海上风电变流器



齿轮箱和发电机置于机舱

三相电缆将电机能量输送到变流器

发电机电压1140V

扭缆数量大幅减少

变流器置于塔筒内部或塔基

解决方案扭缆数量多的问题

690V两电平海上风电变流器

陆上风电

690V双馈：1.5MW/2.2MW/2.5MW

成本低，可利用小时数低，可靠性稍低，不契合海上风电需求

690V全功率：1.5MW/2.2MW/2.5MW/3.3MW

成本较双馈高，可利用小时数高，可靠性较双馈高，契合海上风电需求

海上风电

研制低压690V超大功率风电变流器（4MW以上）；

适应海上高湿高盐雾的特性挑战；

海上风电高可靠性需求挑战；

海上风电对高效率需求挑战；

海上风电机组超长使用寿命需求挑战；

适应海上风电机组对运维的需求。

690V两电平海上风电变流器



器件数量也成比例上升，大容量单机故障率会大幅上升
采用并联技术，提升冗余度
减少故障停机次数。



2.5MW	2.5MW	5MW
3MW	3MW	6MW
3.5MW	+	3.5MW = 7MW
4.0MW		4.0MW = 8MW
4.5MW		4.5MW = 9MW

$$n * 1.5MW = 1.5 \sim 12MW$$

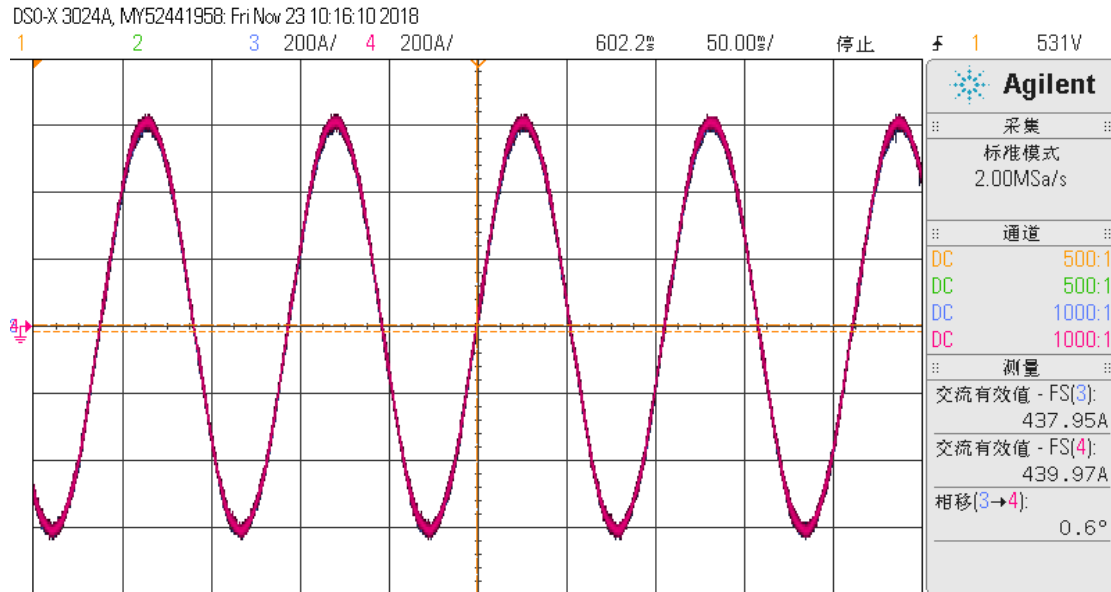
并机均流性能：

先进的并机通讯功能，保障通讯的及时性和可靠性；
良好的均流控制保证1+1=2；

冗余切换性能：

多台变流器无缝切换技术，提升系统整体运行效率；
任意变流器故障不影响其它变流器运行，整机降载运行。

690V两电平海上风电变流器——多机并联技术



良好的并联均流性能实现1+1=2的扩容效果。

690V两电平海上风电变流器——无扰切换技术



风机变流器组

风机主控下发功率命令；

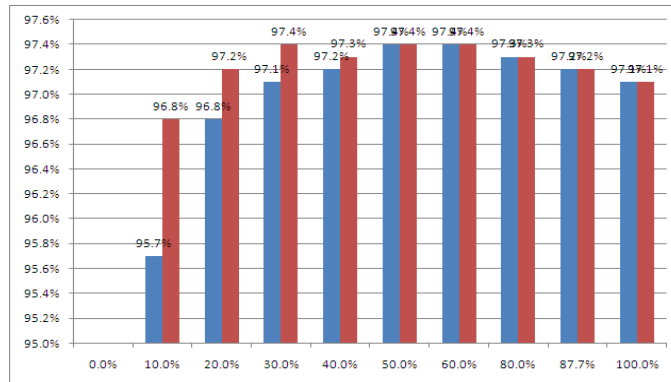
变流器控制器接受功率命令；

确定变流器最佳效率工作方式；

关闭多余变流器组；

变流器工作组进行均流控制；

风速随机性较大，变流器的最高效率点一般在50%-70%负载处，无扰投切技术可以保证变流器始终工作在最高效率点，多余变流器停止工作。

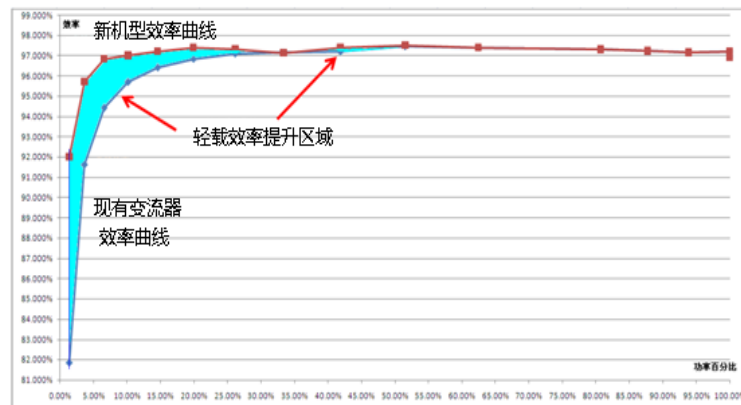


变流器工作组



变流器待机组

无扰切换技术与传统方案对比效率提升



大功率海上风电变流器可靠性研究——防盐雾



对变流器的抗腐蚀性提出更高的要求。

高湿



高盐雾



积累大量的经验，变流器的抗腐蚀性有了更深刻的认识。



大功率海上风电变流器可靠性研究——环境适应性

标准：制定严格的海上风电开发标准，严格执行企业标准要求。



防护等级：变流器全密封，高达IP54
防护等级，主要热量通过水冷，电感发热和杂散发热通过风水换热。

试验：高于行业要求的试验，交变盐雾腐蚀测试环境条件：1周期：40度喷雾2h，40度存储3d；1个循环：3个周期；共4循环。



喷涂材料等级：C4喷涂，C5喷涂，C5-M喷涂，根据不同部位选择不同喷涂，提升自身抗腐蚀能力。

加热除湿：经过10年/数万套变流器验证的加热除湿措施和加热除湿逻辑，持续保持内部变流器内部温度高于外部温度。

高盐雾



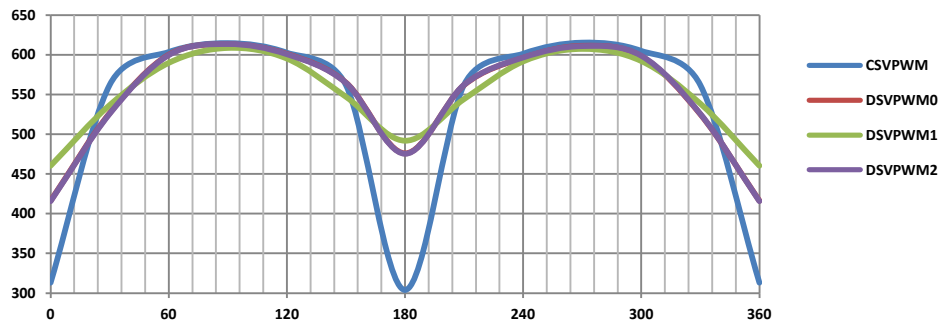
材料：根据部位不同，选择不同材料，304, 316不锈钢，喷涂附铝锌板。

包装：塑封抽真空包装，减小运输和储存阶段的腐蚀。

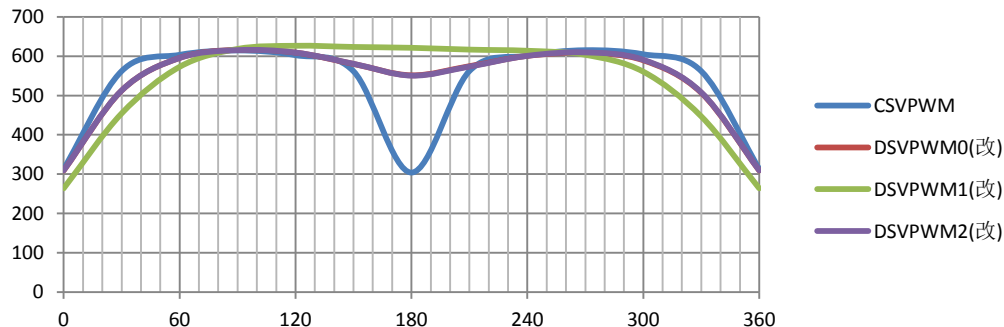
大功率海上风电变流器可靠性研究——提升器件寿命

◆ 通过载波移相技术减小母线纹波电流，提升使用寿命

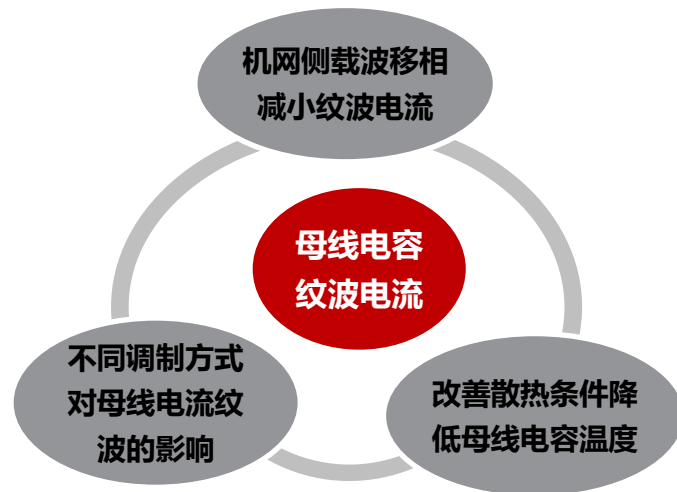
机网侧载波移相与母线电容纹波电流的关系



更改发波方式后机网侧载波移相与母线电容纹波电流的关系



母线电容的寿命是影响变流器寿命的一个关键因素，希望使用先进的控制技术和散热技术，改善母线电容的纹波和散热条件，提升变流器的使用寿命；





03

海上风电远程运维技术

- ◆ 海上风电维护新挑战
- ◆ 远程运维系统

海上风电维护新挑战

气候影响：恶劣天气不可靠近塔筒。

距离影响：远海出海单程时间长。

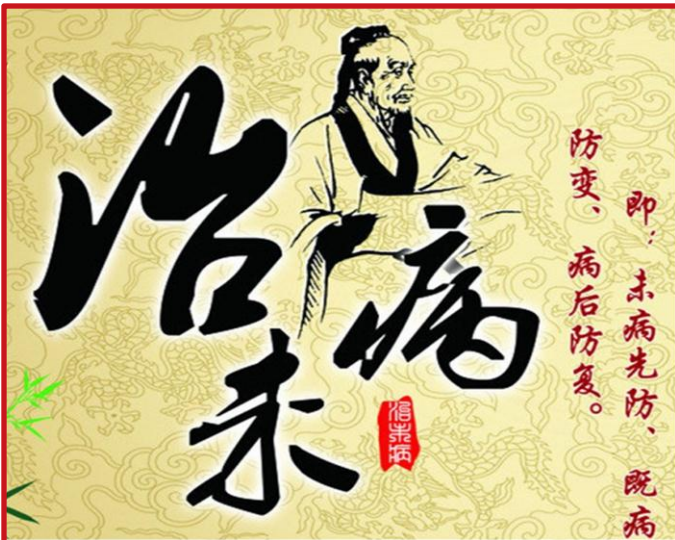
交通工具：运维交通工具成本高。



故障定位：必须快速准确定位故障。

施工难度：海上施工难度远超陆地风电

备品备件：减少备件种类和数量。



◆ 提升运维效率

— 状态监测

实时监测风机运行的大量信息；
利用信号分析、故障预警实现对风机的监控。

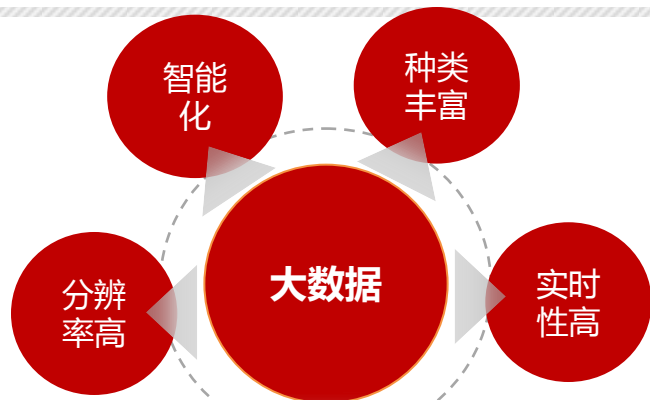
— 定期维护

对风机进行周期性检查和定期的部件更换。

— 故障维护

快速准确定位故障原因、类型和部件；
准备正确备件，快速维护，恢复运行。

远程智能运维系统



1

变流器/逆变器数据种类丰富，涵盖电网、设备本身以及发电机在内的各种运行参数，以及事件告警信息、故障录波信息

2

变流器/逆变器属于高度智能化设备，能够实时采集处理各种数据，且数据分辨率可达到3KHz，甚至更高。

变流器
大数据

软硬件体
系组网

变流厂家
专业技能

远程
智能运维

远程智能运维系统

- 运行数据监控 多层次，高精度，大数据
- 智能故障诊断 专家系统，自动化分析与预测
- 远程运维协同 现场人员与远程专家协同工作
- 生产管理功能 提供报表统计功能与过程管理

降低运维成本，提高利用率，提升收益

实时监控状态

快速定位故障

预知提前检修

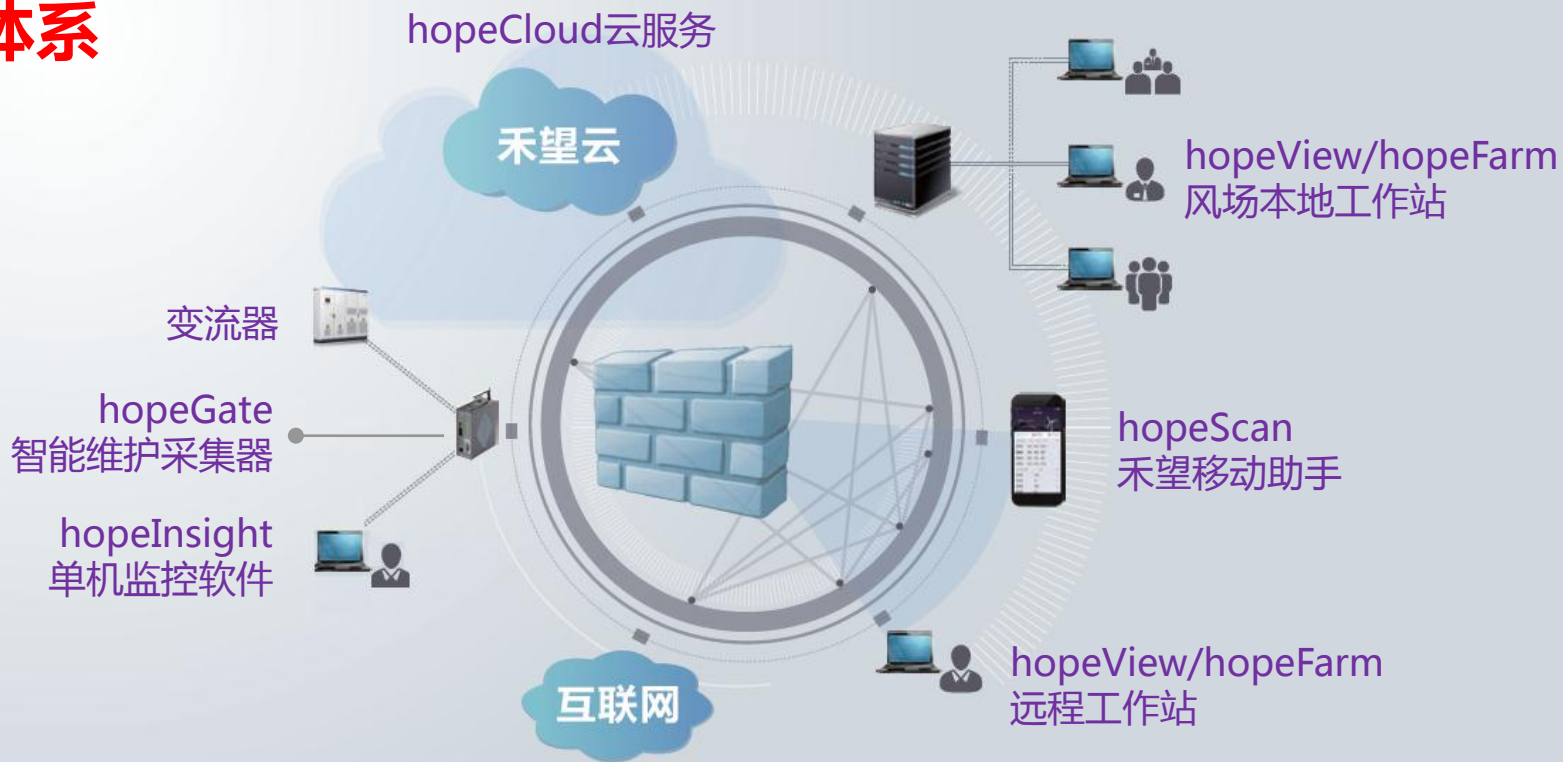
缩短维修周期

降低人工成本

远程监控
智能运维

基于变流器大数据的远程运维系统是未来海上风电运维的重要帮手

产品体系



远程智能运维系统



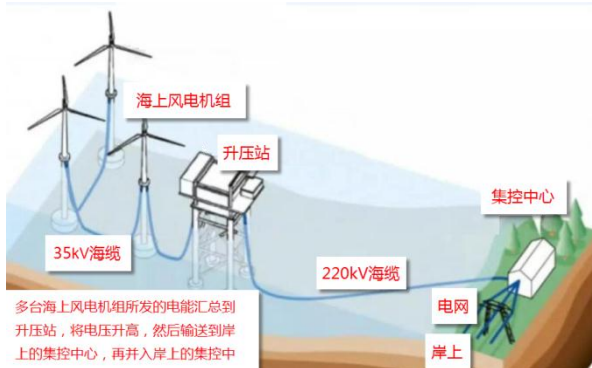


04

海上风电无功补偿技术

- ◆ 海上风电输电新挑战
- ◆ 海上输电无功补偿必要性
- ◆ 海上风电无功补偿装备技术

海上风电输电新挑战——远海输电

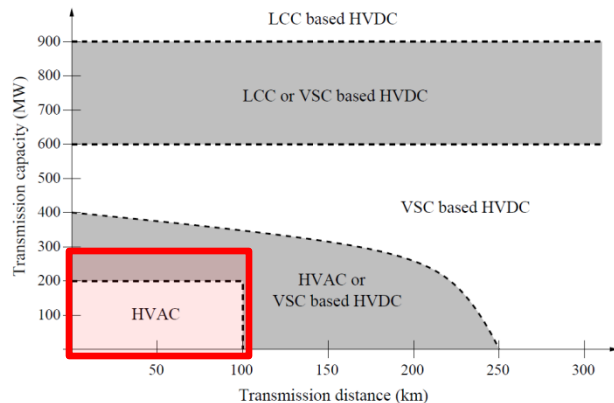


海上风电离岸距离远，大规模的海缆的容性无功对输电造成障碍（电压降低，输电成本高），当前常用的输电方式为多台海上风电机组所发的电能汇总到升压站，升压站将电压升高，输送到岸上的集控中心。

HVAC（高压交流）：小容量近海海上风电输电方式，功率小于200MW，离岸小于100km（当前使用）。

VSC-HVDC（自然换相高压直流）：中等容量海上风电输电方式，功率小于600MW；

LCC-HVDC（线换相高压直流）：大容量海上风电输电方式，功率最大可达1200MW。



海上风电输电无功补偿必要性

以220kV输电为例，三相1000平输电海缆计算（载流1300A）， $C=0.19\mu\text{F}/\text{km}$ 。

最大输送容量为： $S_{\text{cable}} = \sqrt{3} \times U \times I = 495.366\text{MVA}$

1km输送能力 $Q_{\text{cable-1km}} = U_g^2 \times \omega C = 2.8875\text{M var}$

$P_{\text{cable-1km}} = 495.358\text{MW}$

5km输送能力 $Q_{\text{cable-5km}} = Q_{\text{cable-1km}} \times 5 = 14.438\text{M var}$

$P_{\text{cable-5km}} = 495.156\text{MW}$

10km输送能力 $Q_{\text{cable-10km}} = Q_{\text{cable-1km}} \times 10 = 28.875\text{M var}$

$P_{\text{cable-10km}} = 494.524\text{MW}$

50km输送能力 $Q_{\text{cable-50km}} = Q_{\text{cable-1km}} \times 50 = 144.377\text{M var}$

$P_{\text{cable-50km}} = 473.86\text{MW}$

100km输送能力 $Q_{\text{cable-100km}} = Q_{\text{cable-1km}} \times 100 = 288.754\text{M var}$

$P_{\text{cable-100km}} = 402.503\text{MW}$

121.3km输送能力 $Q_{\text{cable-121.3km}} = Q_{\text{cable-1km}} \times 121.3 = 350.26\text{M var}$

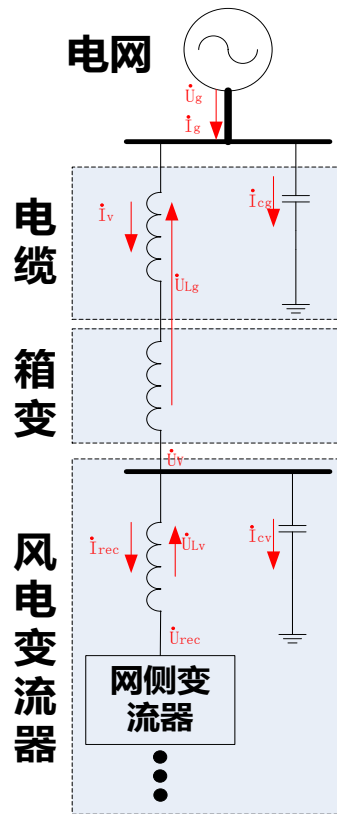
$P_{\text{cable-121.3km}} = 350.295\text{MW}$

150km输送能力 $Q_{\text{cable-150km}} = Q_{\text{cable-1km}} \times 150 = 433.132\text{M var}$

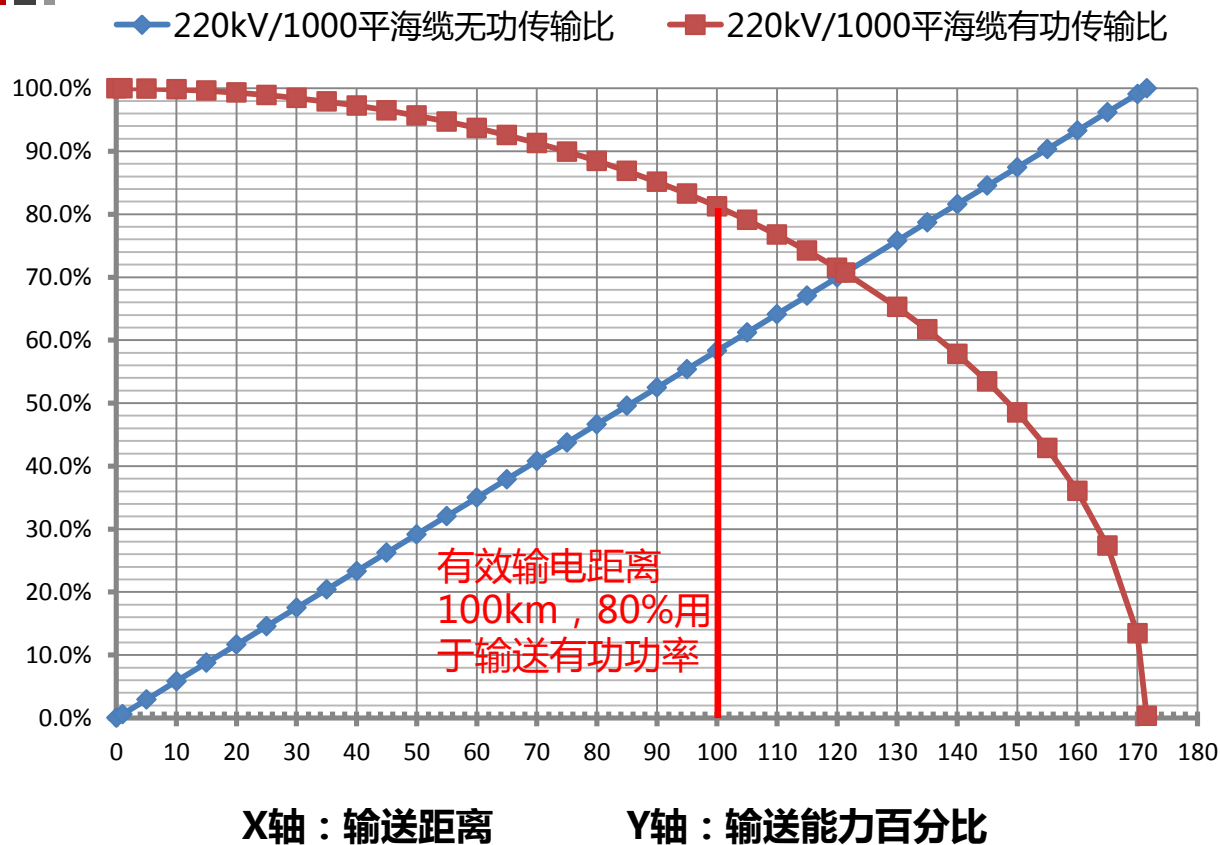
$P_{\text{cable-20km}} = 240.385\text{MW}$

171.55km输送能力 $Q_{\text{cable-171.55km}} = Q_{\text{cable-1km}} \times 171.55 = 495.364\text{M var}$

$P_{\text{cable-171.55km}} = 0\text{MW}$



海上风电输电无功补偿必要性



- ◆ 距离越大，传输有功能力越弱；
- ◆ 理论上超过171.5km，HVAC无法输送50Hz有功；
- ◆ 传输121.3km时，传输的有功和海缆的无功基本相当；
- ◆ 121.3km以后，海缆传输有功能量的能力急剧下降；
- ◆ 220kV/1000平海缆的合理输电距离为100km。

海缆的强容性

使远海海上风电对无功补偿提出更高的要求

海上风电无功补偿装备技术



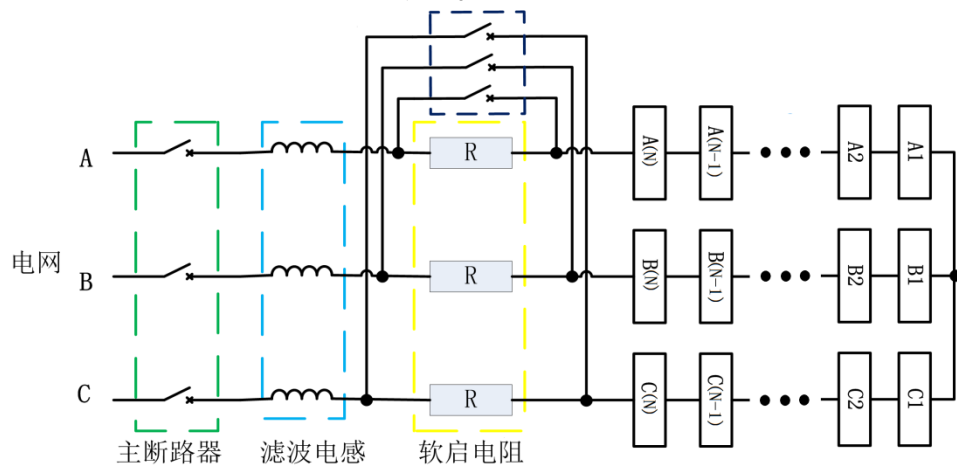
SVC：静态无功补偿装置，由电容器和电抗器组成。
优点：成本低，无功补偿容量大；
缺点：固定无功补偿，连续调节能力差，体积大，不能进行谐波补偿，响应速度相对慢，不能快速响应电网无功支撑；



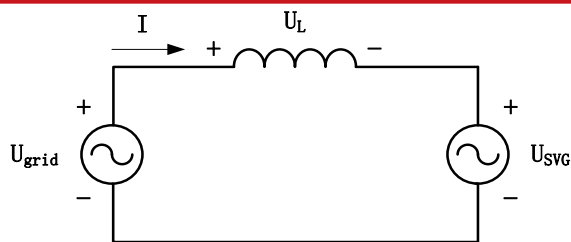
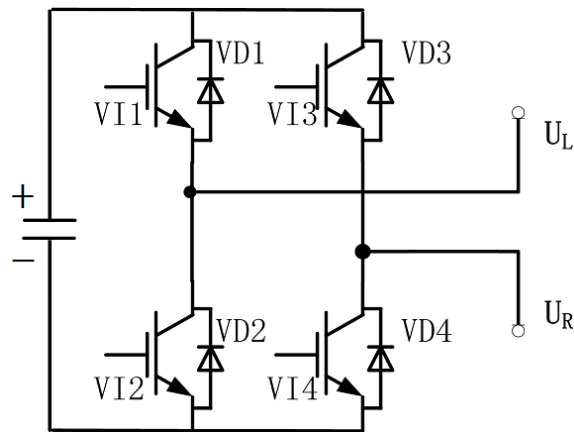
SVG：静态无功发生器，由变压器、滤波器、三相半导体桥和直流电容组成。
优点：响应速度快，可连续调节，高低穿可提供电网无功支撑，可进行谐波补偿；
缺点：成本高，室内安装或集装箱安装；

海上风电无功补偿装备技术——SVG

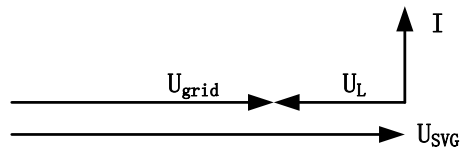
SVG主回路方案



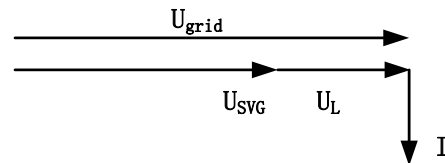
功率模块电路



单相等效电路



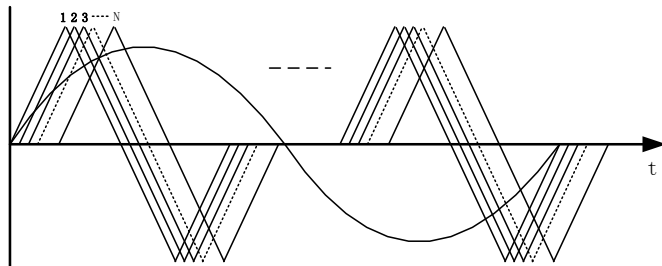
容性运行模式向量图



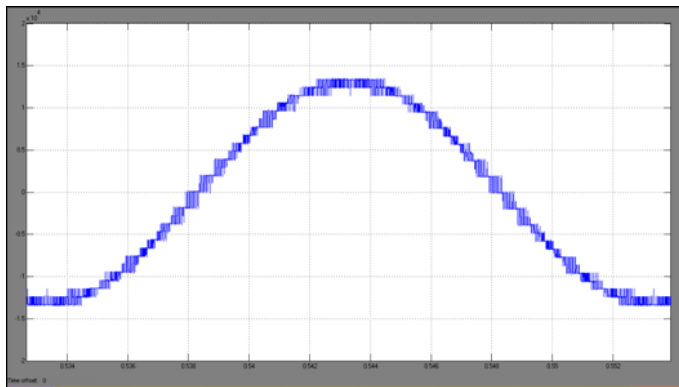
感性运行模式向量图

海上风电无功补偿装备技术——SVG

移相载波技术



输出线电压



高电压穿越

低电压穿越



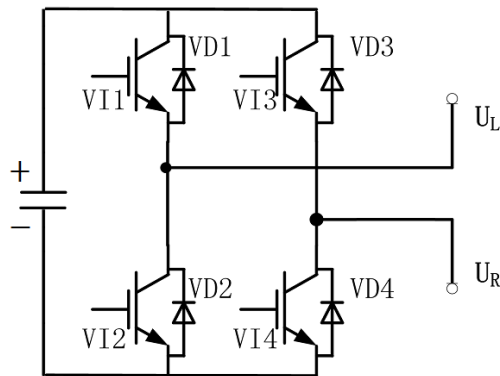
谐波动态补偿

不平衡校正

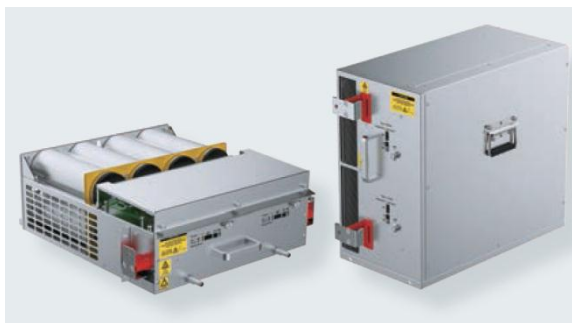
禾望电气SVG：

首家通过电科院高穿和低穿的产品认证；
显著增强电网稳定性，提高电网功率因数；
尤其适合风电场的无功补偿；
解决海上输电难题并提升输电效率。

海上风电无功补偿装备技术——SVG



SVG模块电路



使用低压两电平IGBT模块集成级联功率模块，冷却方式包括风冷和去离子水冷。



使用级联功率模块集成SVG整机，有风冷和水冷两种冷却解决方案。

禾望电气可提供1Mvar-12MVar风冷直挂式和升压式SVG解决方案和7Mvar-36Mvar水冷直挂式SVG解决方案。

海上风电无功补偿装备技术——SVG应用



内蒙古通辽市高力板风电场

时间：2017年6月

禾望SVG完美解决了风电场响应速度快、电网故障穿越需求，国内第一家通过电科院测试SVG高电压穿越发无功、低电压穿越发无功功能的厂家。

青海省光伏电站解决方案

时间：2016年2月

锡铁山镇平均海拔3300米，最高海拔4000米，属于超高原地区。

禾望电气解决电网无功功率波动、高次谐波、电压畸变严重等问题





2019我们共同创造

新的希望&梦想

Let's create new dream and
hope together in 2019



THANK YOU !

抛砖引玉，
请各位专家指正！

—— • 风禾尽起 志望千里 HOPE WITH THE WIND • ——