



发挥电气控制优势 提高燃机发电调节灵活性

南瑞继保电气研究院：刘为群

一 背景

二 储能辅助燃机黑启动和调频

三 燃机启动及励磁控制优化

四 燃机自主可控DCS/TCS

五 小结

● 中国能源转型、碳达峰、碳中和、绿色发展

- 2020年9月22日国家主席习近平在第七十五届联合国大会一般性辩论上发表重要讲话，宣布：采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于**2030年前达到峰值**，努力争取**2060年前实现碳中和**。
- 2020年12月12日国家主席习近平在气候雄心峰会上发表题为《继往开来，开启全球应对气候变化新征程》的重要讲话，宣布中国国家自主贡献一系列新举措：**到2030年，风电、太阳能发电总装机容量将达到12亿千瓦以上**。
- 2021年3月15日，习主席主持召开中央财经委员会第九次会议，研究促进平台经济健康发展问题和实现碳达峰、碳中和的基本思路和主要举措：要构建清洁低碳安全高效的能源体系，控制石化能源总量，着力提高应用效能，实施可再生能源替代行动，深化电力体制改革，**构建以新能源为主体的新型电力系统**

● 燃机发电特点：

- 启动快，调节性能好，电网调峰的优秀工具
- 参与电网的一次调频和调压、二次调频和调压
- 低碳、清洁环保

● 未来燃机发电的作用

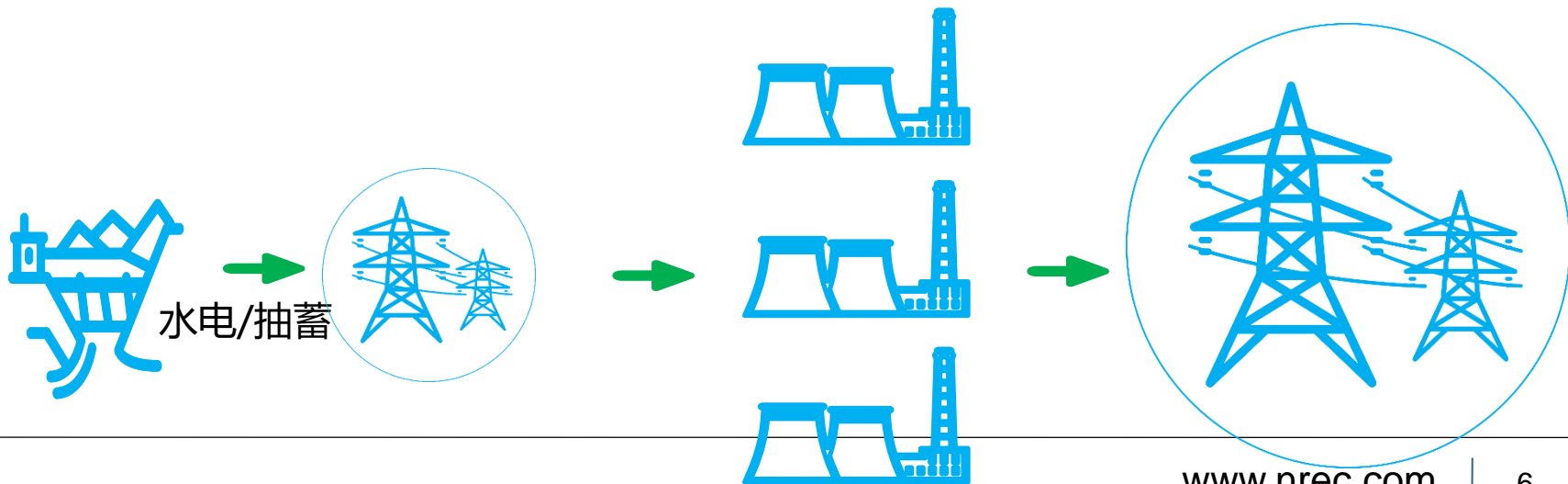
- 碳达峰碳中和过程中、常规电网向新型电网过渡过程中：主要的重要的可调节电源
- 未来新型电力系统中：最后的大容量常规清洁、可调节电源，电网稳定的中坚
 - ✓ 电压源外特性电源、有转动惯量、单体容量大
 - ✓ 调峰、一次调频、AGC二次调频、一次调压、AVC二次调压等性能优秀

燃机发电提升自身灵活性，为新型电力系统构建和运行发挥更大作用

- 一 背景
- 二 储能辅助燃机黑启动和调频
- 三 燃机启动及励磁控制优化
- 四 燃机自主可控DCS/TCS
- 五 小结

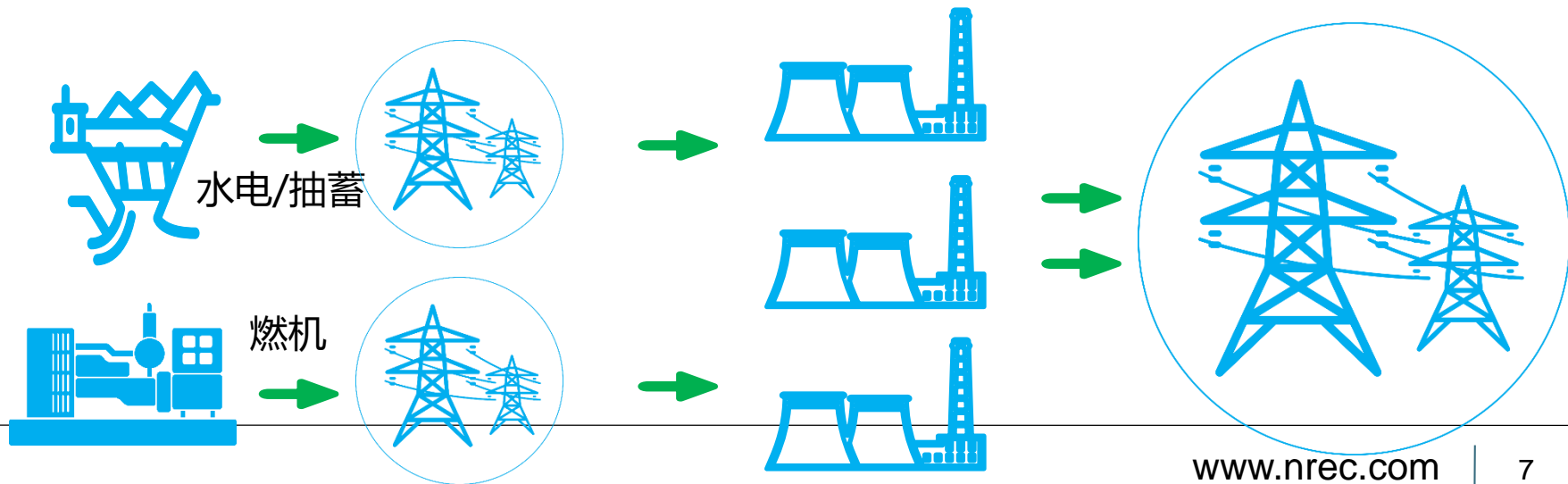
- 电网黑启动：

- 电力系统因故障全部停电，处于全“黑”状态，通过系统中具有黑启动能力的发电机组启动，向无黑启动能力的发电机组供给厂用电源，帮助实现启动，逐渐恢复系统供电能力和供电范围，最终实现整个系统的恢复运行



- 燃机作为黑启动电源的优点：

- 燃机黑启动能力强：辅机设备少，启动流程简单，启动速度快；单机功率大，靠近电网主干网架，恢复电网快
- 燃机黑启动可靠性高：机组启动流程简单操作少、电网操作少





E级以下燃机 6B、9E

- 对启动电源容量要求不高，多采用蓄电池组或柴油发电机作为黑启动电源。
- 9E燃机电源需求容量一般在5MW以内

7F、9F F级燃机

- 启动电源需求一般大于5MW，部分机组甚至超过10MW，如果用柴油发电机进行F级燃机黑启动，将面临多台协同困难、维护费用高、日常利用率低、增加风险源等问题。



PRESS RELEASE
Hybrid solutions: GE Completes First Battery Assisted Black Start of a GE Heavy Duty Gas Turbine



2020年2月26日，美国GE公司在路易斯安那州佩里维尔发电厂使用7.4MW储能带一台150MW的7F级重型燃气轮机单循环机组，完成世界首次F级重型燃气轮机黑启动。

- **2020年12月世界首个储能辅助9F级燃机黑启动**--珠海横琴电厂“辅助调频+黑启动”项目顺利投运。项目配置锂电池储能系统：14MW/17.29MWh 磷酸铁锂+8MW/3.2MWh 钛酸锂，实现对390MW 9F级燃气-蒸汽联合循环机组的黑启动。

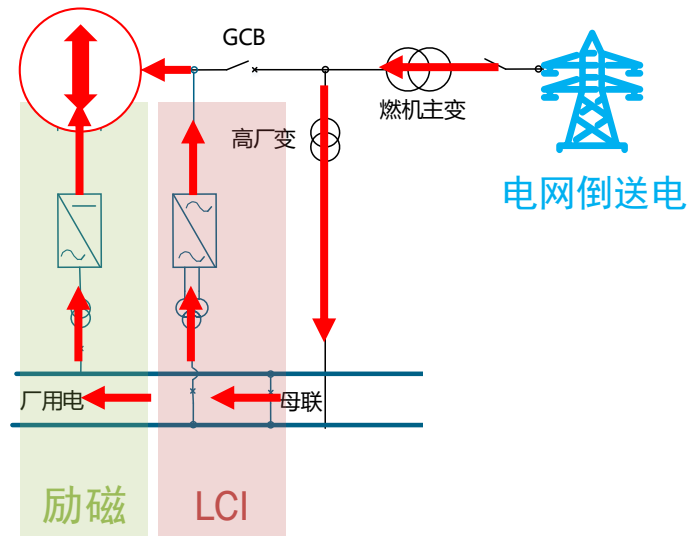


● 燃机正常启动

- 电网倒送电至燃气电厂，厂内负荷通过厂用母线利用外部电网作为电源，进行燃机的启动。

启动装置

- 负载换相器—LCI 也有称为：静止变频器—SFC
- 初始阶段以同步电动机方式启动升速，直到拖动到自持转速



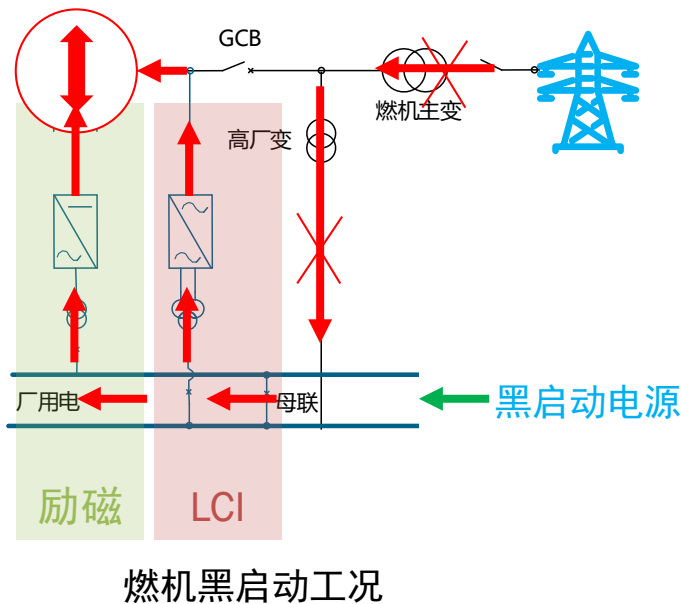
燃机正常启动工况

● 燃机黑启动

- 电网黑了后，电站厂用电消失，燃气机组黑启动需要外部启动电源

启动电源要求

- 容量大于所有启动时必要负荷功率之和
- 承受负荷投入的冲击，比如变压器空充涌流
- 满足负荷特性要求，能够持续供电



储能黑启动的负荷特性

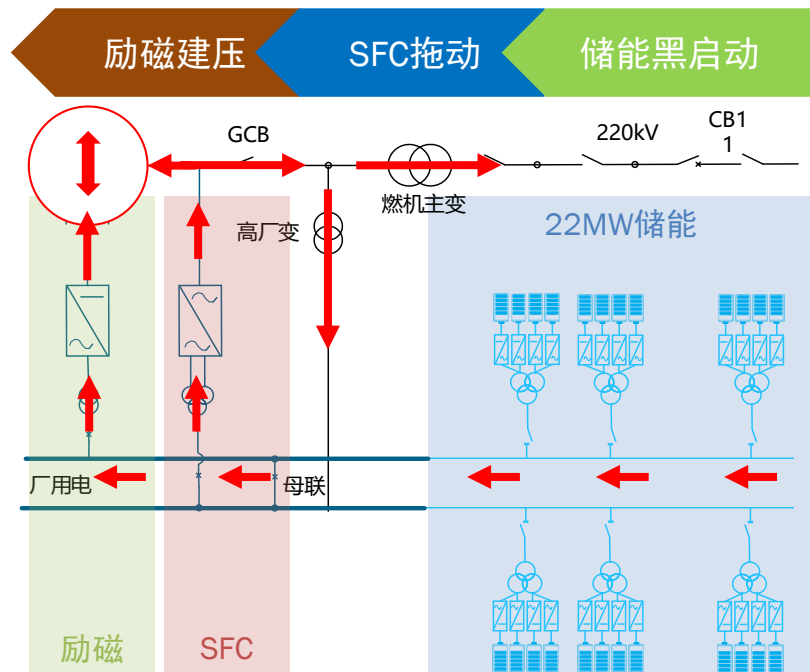
静止变频器

- 交 - 直 - 交变频器
- 6或12脉动整流器
- 平波直流电抗器
- 6脉动逆变器

励磁

- 6脉动整流器

- 容量满足
- 谐波耐受
- 冲击耐受
- 维持电压和频率稳定



燃机“黑启动+辅助调频”储能系统一次接线图

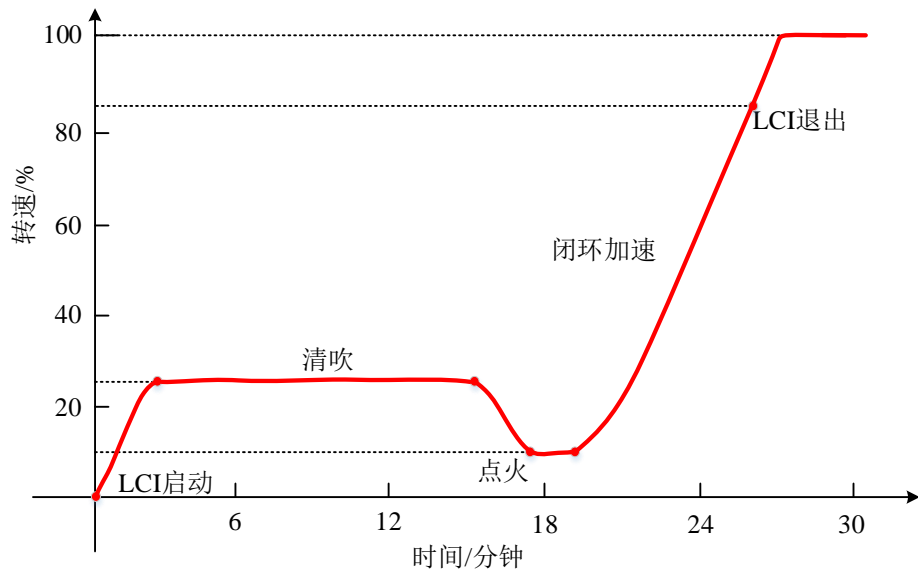


黑启动负荷 关键影响因素

- 负荷必要性
- 负荷功率
- 运行特性

设备名称	必要性	功率/kVA	运行特性
燃机励磁变	√	3000	有冲击, 软启动
高压给水泵	√	2200	有冲击, 变频启
循环泵	√	1000	有冲击
机组工作低厂变	√	2000	有冲击, 软启动
公用化水变	√	2000	有冲击, 软启动
凝泵	√	560	有冲击, 变频启
公用主厂房变	√	1000	有冲击, 软启动
LCI电源变	√	7000	有冲击, 软启动
公用厂区变	√	1250	有冲击, 软启动
公用补给水变	√	500	有冲击, 软启动

- 启动时LCI连接到发电机定子侧，启动过程如下：
 - 由盘车拖动到清吹转速——清吹
 - 降速到点火转速——点火，暖机
 - 升速到燃机自持转速——逐渐减小输出到零，退出



某燃机典型启动转速曲线

黑启动主要难点

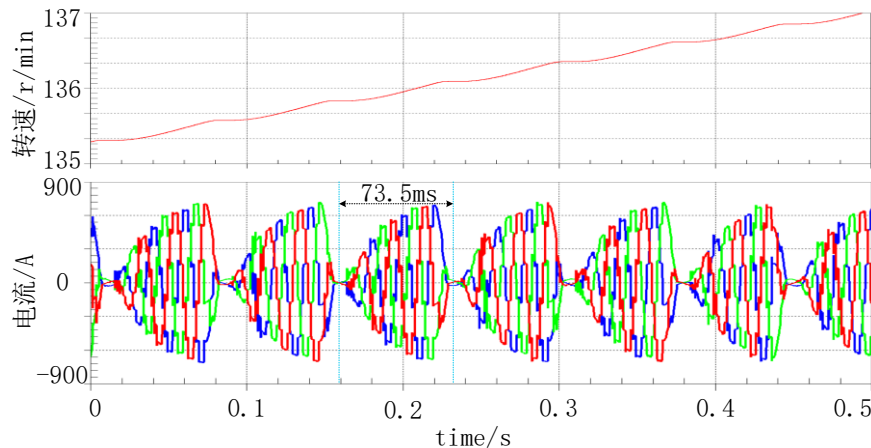
- 1) LCI功率间歇性快速波动
- 2) 无功功率消耗大
- 3) 负荷冲击电流大
- 4) PCS多机并联稳定性
- 5) 谐波电流污染大

由于存在LCI、励磁等大功率整流设备，包含较多谐波，主要谐波次数为：

$$h_n = k \times p_{ls} \pm 1$$

LCI的10%转速以下阶段，由于脉冲换相会出现间歇性的功率突升突降。功率突变的频率为：

$$f_{\text{init}} = 6f_s = \frac{rp}{10}$$



LCI脉冲换相阶段典型间歇电流

三层



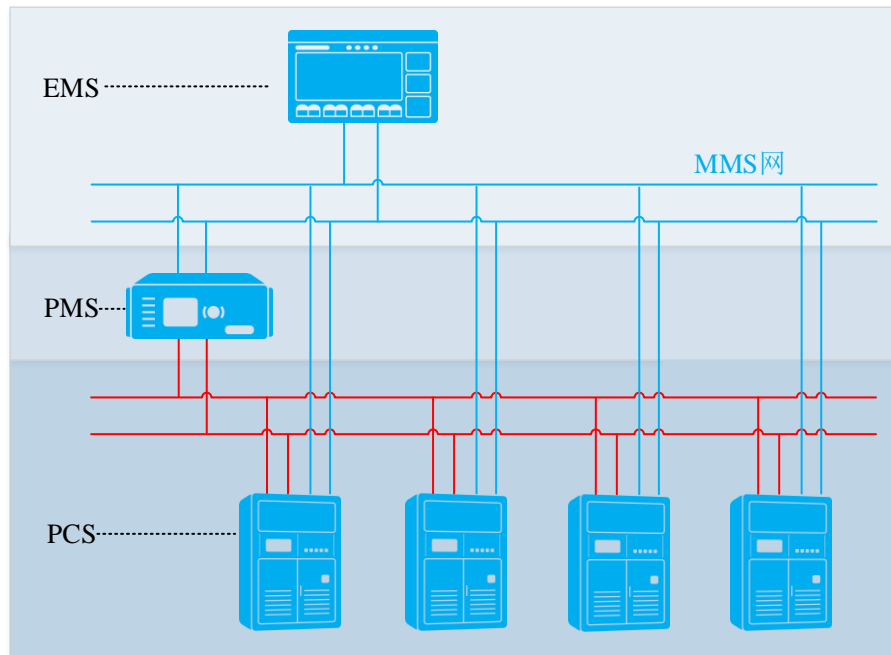
- 能量管理系统(EMS)
- 功率协调控制系统(PMS)
- 储能变流系统(PCS)

两网



- 常规监控网(MMS)
- 快速控制网

实现站级功率响应时间 < 50ms

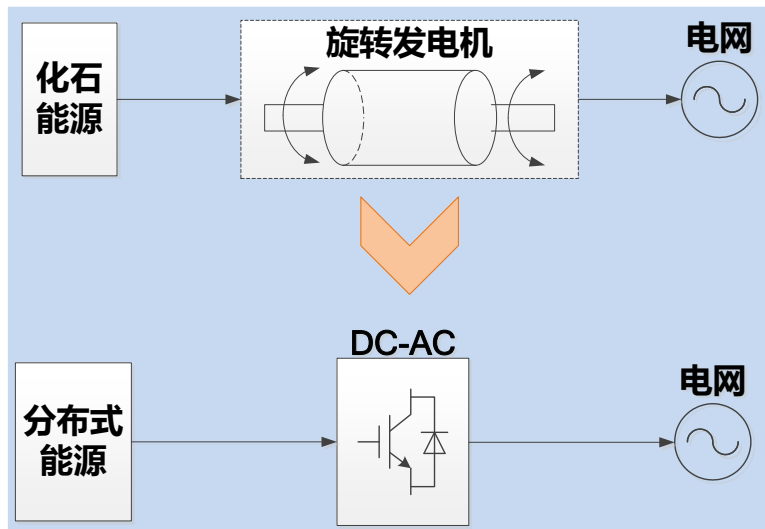


燃机黑启动“三层两网”储能控制系统

虚拟同步机(VSG)控制, 自主调频、
自主调压、惯性、电压源型外特性:

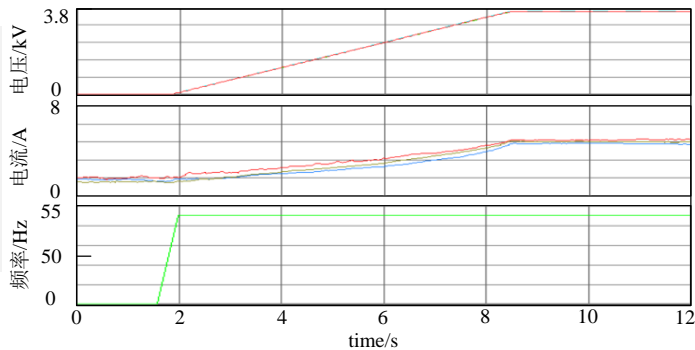
$$P_{\text{set}} + D_p(\omega_0 - \omega) - P_o = J\omega \frac{d\omega}{dt}$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega$$

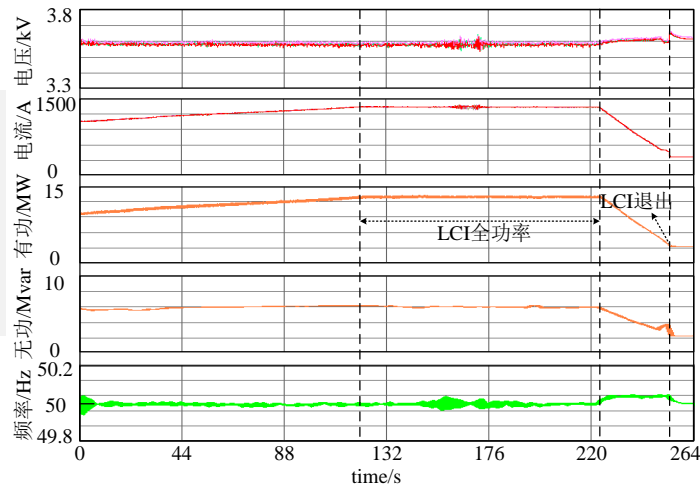


- 黑启动过程的控制效果
 - 实现了44台500kW储能PCS并网
 - VSG模式并联稳定运行

黑启动
软启动
升压
软压
波形

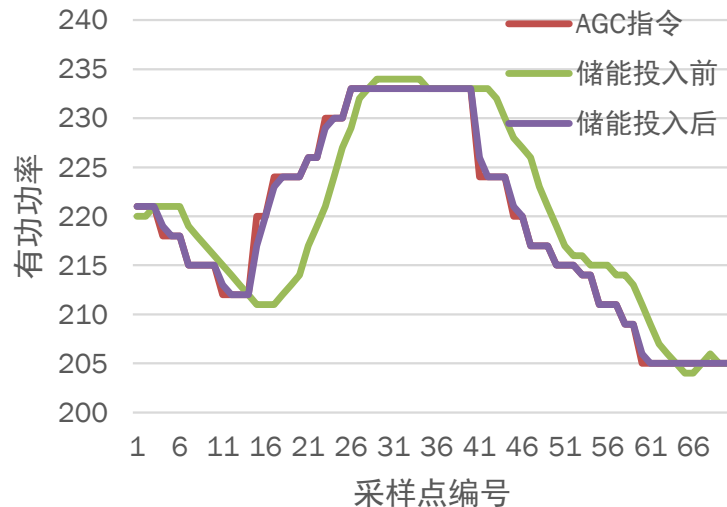
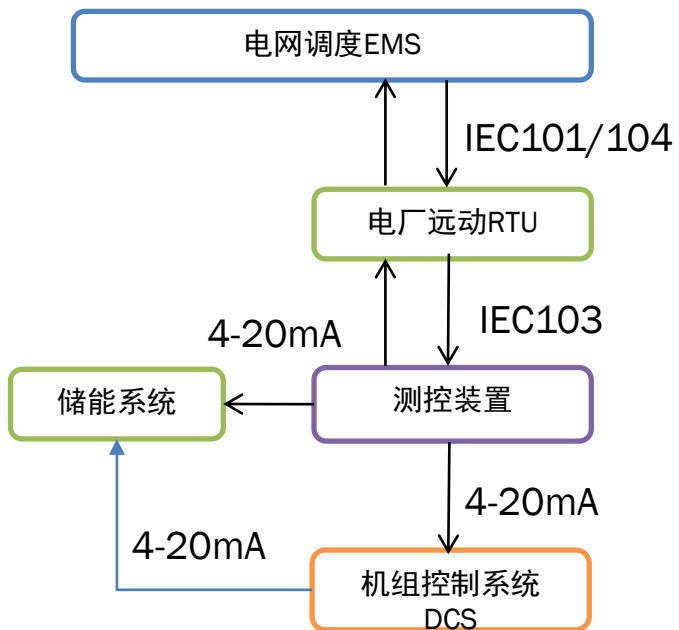


LCI
全功率
运行
波形





● 控制系统架构



**储能系统目标出力 =
AGC调频指令-机组当前出力**

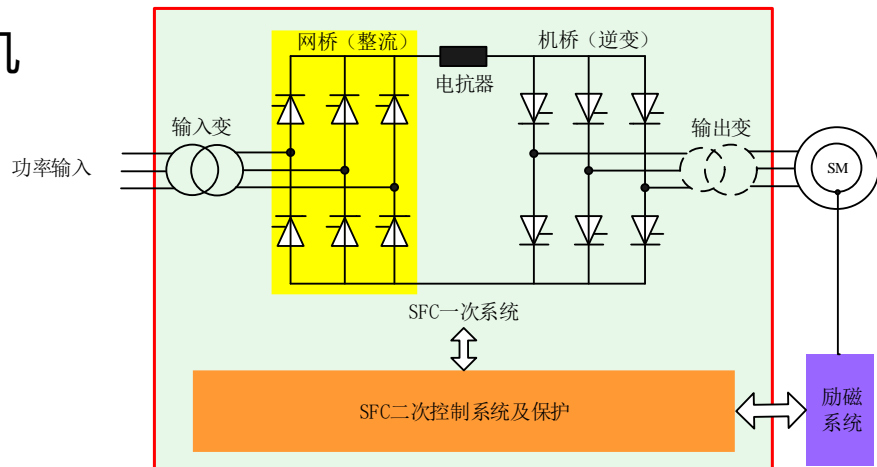
储能辅助9F燃机黑启动+调频的应用实践

项目名称	珠海横琴电厂“辅助调频+黑启动”储能项目
机组参数	390MW 9F级联合循环机组、LCI功率14MW
储能配置	22MW/20MWh (磷酸铁锂+钛酸锂混合储能系统)
时间	2020年12月投运 (世界首个储能辅助9F级燃机黑启动)

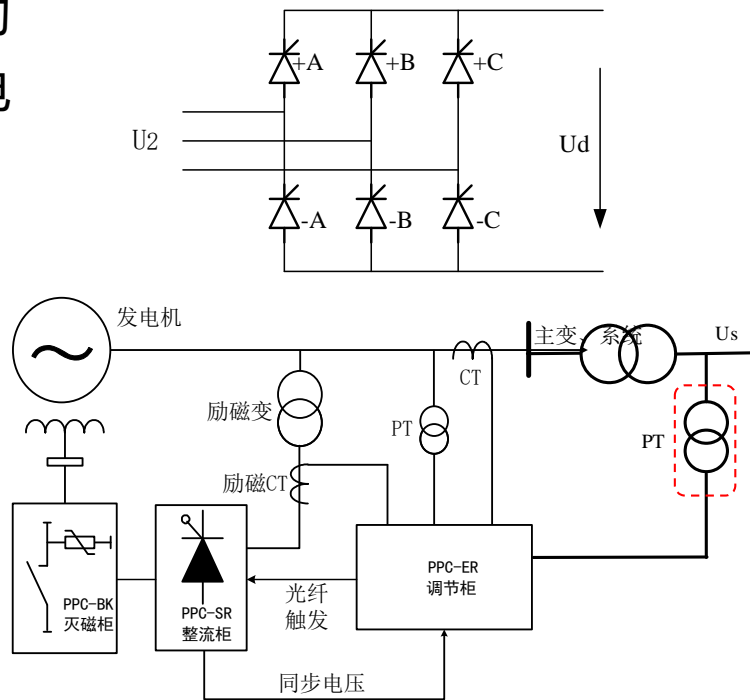


- 一 背景
- 二 储能辅助燃机黑启动和调频
- 三 燃机启动及励磁控制优化
- 四 燃机自主可控DCS/TCS
- 五 小结

- 启动流程优化及SFC的配合：
 - 结合燃机主机的允许条件，优化起机流程，SFC配合，缩短起机时间
- SFC系统设备自主可控，彻底解决卡脖子问题
 - 完全国产化芯片，实现自主可控



- 燃机励磁强励和深度进相能力提升，使机组无功输出和电压控制能力提升，适应燃气轮机作为电力系统稳定支撑地位的需求
 - 新建机组对于强励倍数做出严格的要求，励磁配合
 - 在运行机组，励磁整定值和控制参数值优化
- 燃机励磁引入系统电压控制，提升机组无功输出对于系统电压的灵敏度，提高对电力系统电压稳定的贡献
 - 励磁采集电厂高压母线电压，并参与闭环调节
- 燃机励磁的自主可控，彻底解决卡脖子问题
 - 完全国产化芯片，实现自主可控

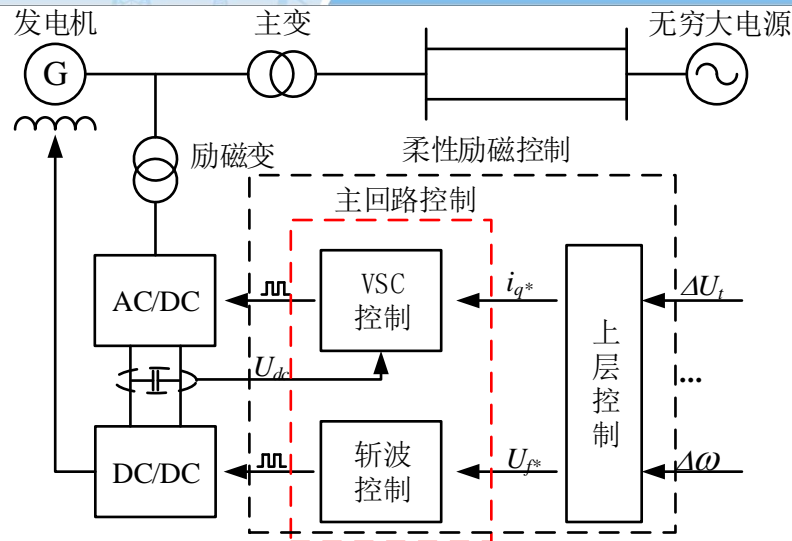


● 燃机励磁采用柔性方案

- 基于全控器件构成励磁功率回路，实现整流和逆变输出
- 交流侧功率因数可控制到1，谐波成分降低
- 励磁变容量降低，励磁系统损耗减小，效率提升

● 柔性励磁方案的优势

- 励磁电压调节速度快、暂态电压支撑能力和无功输出能力强
- 励磁侧和机端并联侧阻尼功率振荡输出，提升系统稳定性

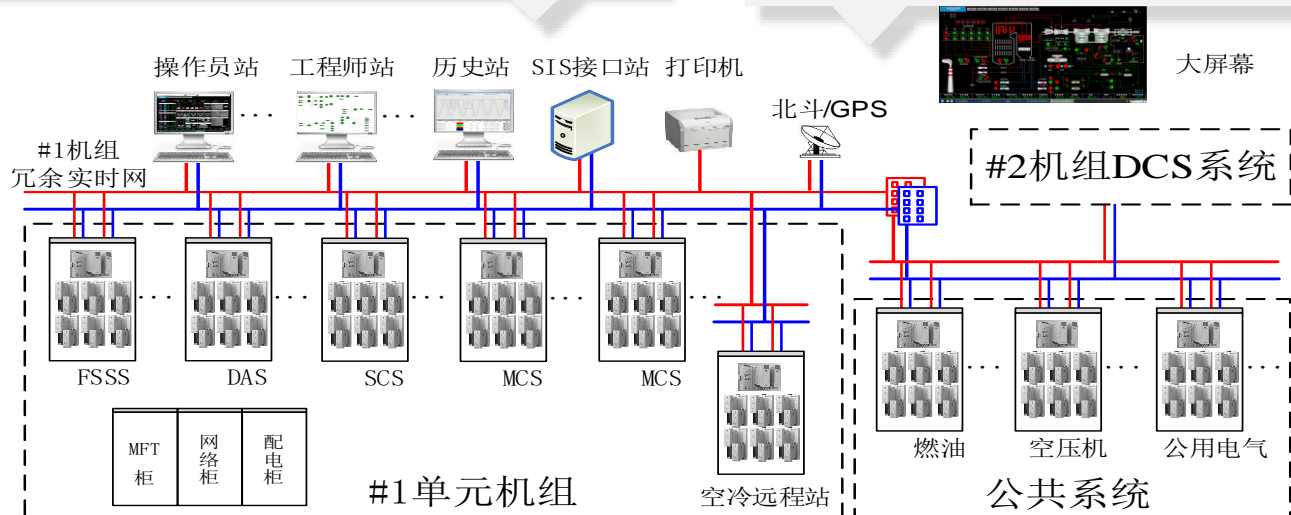


- 一 背景
- 二 储能辅助燃机黑启动和调频
- 三 燃机启动及励磁控制优化
- 四 燃机自主可控DCS/TCS
- 五 小结

燃机自主可控DCS/TCS的网络结构

全冗余结构，分布式组网

集成化的监控及控制器算法组态环境



软硬件100%完全自主可控，实现燃机、汽机（含DEH）、发电机的全覆盖控制，支持与电力监控构成一体化的监控系统

控制器

PCS-9150G

南瑞继保自研，采用全
国产芯片及电子元器件

IO模块

PCS-9150G系列

南瑞继保自研，采用全
国产芯片及电子元器件

组态软件

Smart IC

南瑞继保自研

操作系统

采用国产化操作系统
自研软硬件的适配

监控后台软件

PCS-9700

南瑞继保自研

历史数据库

采用国产数据库
自研软硬件的适配

全方面的冗余

控制器冗余，电源冗余，网络冗余，IO冗余，硬件ECC，监控分布式平行架构

稳定性设计

支持模块热插拔、模块地址自适应（无拨码），支持故障安全

安全性设计

强电误接自恢复、短路自闭锁、模块无电池（超级电容）

高标准认证

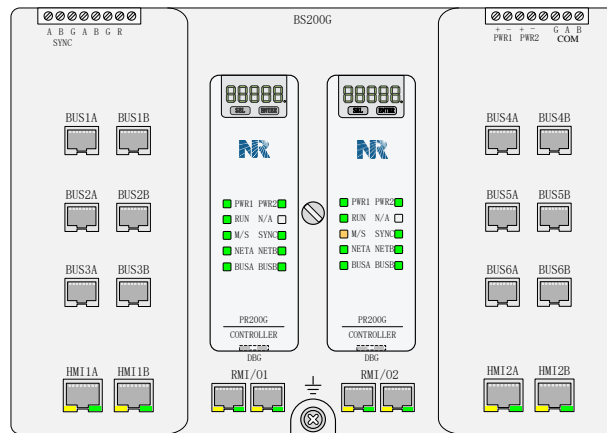
高EMC等级认证，权威信息安全认证，支持国密算法。出厂高温老化试验、三防

硬件高性能

- 高性能双核处理器，主频1GHz
- 本地5Mbps快速I/O网络，最快数据刷新周期5ms
- 5ms任务周期，1msSOE，冗余切换时间不超过4ms
- 0.1%模拟量精度

软件大容量

- 20万点存储，分布式架构
- 1000算法页，8级任务



只有可信任的设备，才允许接入
只有可信任的消息，才允许传输
只有可信任的软件，才允许执行

完善的工控安全整体防护体系

- 提出工控网络安全“白环境”为核心的整体解决方案，内置安全机制
 - 建立自主可控、安全可靠的工控安全整体防护体系。系统支持等保2.0三级测评
- 组态软件支持封装及加密，提供完善的组态工具及监控系统的权限管理功能

集中监控

系统边界隔离

运行环境加固

网络通信异常检测

安全管理

安全

白名单

主动防护
设置允许规则
数量可控
抵御未知风险
效率更高
适用固化环境

VS

黑名单

被动防御
设置不允许规则
难以穷举
防范已知威胁
效率较低
适用灵活环境

- 一 背景
- 二 储能辅助燃机黑启动和调频
- 三 燃机启动及励磁控制优化
- 四 燃机自主可控DCS/TCS
- 五 小结

- 燃机在“碳达峰”、“碳中和”的背景下作为电力系统重要调节电源的地位应该是可以预期的！
- 燃机要发挥好调节电源的作用，除了本体一次设备需要稳定可靠外，其调节能力的发挥主要依靠电气控制！
- 燃机的电气控制系统仍然有优化提升空间，优化工作需要继续探索，继续研究！

感谢关注!

www.nrec.com

版本 2020

Copyright © 2020 南京南瑞继保电气有限公司版权所有