



国家能源集团
CHN ENERGY

基于构网型储能的 “沙戈荒” 新能源基地 源侧新型电力系统示范

汇报人：米晨旭

龙源电力集团股份有限公司

龙源电力集团共享储能技术（北京）有限公司





目录

- 一、项目背景及研究必要性
- 二、研究内容及目标
- 三、指南响应情况
- 四、创新点
- 五、实施方案
- 六、效益预测
- 七、研究进展

一、项目背景及研究必要性——依托工程

“双碳”目标的提出促进了能源清洁化和高效化发展，以“沙戈荒”基地为代表的大型新能源基地建设是推动清洁能源成为电力电量主体、实现新型电力系统战略目标的重要举措。



2020年12月12日，习近平总书记在气候雄心峰会上表示，**2030年碳达峰、2060年碳中和**。2021年3月15日，习近平总书记“中央财经委员会第九次会议”指出，要构建**清洁低碳安全高效的能源体系和以新能源为主体、清洁低碳、安全充裕、经济高效、供需协同、灵活智能的新型电力系统**。



沙漠、戈壁、荒漠地区因面积广阔，风能、太阳能资源富集的优势，已计划开展多项大型新能源基地建设，国家能源局更是把以沙漠、戈壁、荒漠地区为重点的大型风电、光伏基地建设作为“十四五”新能源发展的重中之重。

一、项目背景及研究必要性——问题1

“沙戈荒”新能源基地，常规电源少，送端配套新能源场站短路比不足，存在严重的暂态过电压及宽频振荡问题；直流闭锁之后，引发全网的频率及电压稳定问题，导致送端联动切机，威胁设备安全，且不利于后续快速并网，限制了新能源基地外送能力。

- 调节能力下降
- 稳定形态复杂
- 失稳风险加剧



- 送端换流站和新能源场站安全稳定问题突出，限制**新能源基地直流外送能力**。
- 送端配套新能源多场站**短路比不足**，新能源顺利并网面临阻碍。



宁湘直流送端电网系统图

特高压直流线路	容量	年输电量	可再生电量占比	直流送出受限因素
天中直流（哈密-郑州）	800	440	39.7%	送端暂态过电压/ 宽频振荡
吉全直流（淮东-皖南）	1200	632	27.6%	
祁韶直流（酒泉-湖南）	800	284	41.1%	
灵绍直流（宁东-浙江）	800	551	19.9%	
宁湘直流*（中卫-衡阳）	800	-	-	

一、项目背景及研究必要性——问题2

高比例新能源、高电力电子化的“**双高**”特征，使得宽频带振荡问题凸显；特别在直流大功率运行工况下，功率的快速、大幅变化造成过压越频问题严重，无法支撑基地电网在直流故障后的**自主稳定运行**；另一方面，现有控制系统各自为政，在频率和电压控制环节上耦合较严重，难以实现暂态电压和系统频率支撑和快速精准控制。

风光储能源基地应该依靠构网型储能具备解列后孤网自主运行能力



双高特征易引发直流输电系统换相失败或直流闭锁故障



2022年5月26日15:43分，陕武直流闭锁，损失功率232万千瓦，主网频率升至50.11Hz，切除陕西新能源24万千瓦；具不完全统计，2022年发生的直流单极闭锁12次，换相失败10次，直流功率速降或异常波动2次，背靠背N-M闭锁、背靠背换流单元全停、直流双极闭锁各1次。



新能源AGC/AVC

分钟级有功/无功控制

多类型储能协调控制

百毫秒安全稳定控制

控制系统分析



一、项目背景及研究必要性——问题3

甘塘-沙坡头区块存在新能源多场站**短路比不足**、**暂态过电压越限**等问题。现有方案考虑在基地**装设24台调相机**，然而，上述方案未考虑非同步电源的短路比，且调相机**年运行和投资成本较高**，存在经济性差的问题。



甘塘-沙坡头区块

新能源接入方案

- 中卫沙漠光伏 6000MW
- 中宁风电 228MW

调相机配置要求

- 装设 **24** 台 50Mvar 调相机



调相机单台有功功率50MW,自损耗电1.2%,运行时长24h,下网电价0.486元/kwh,单台调相机折算平均运行成本**10000元/天/台**(电费+运维费用)
24台设备造价合计**108000万元**
24台设备运行费用合计**8760万元/年**

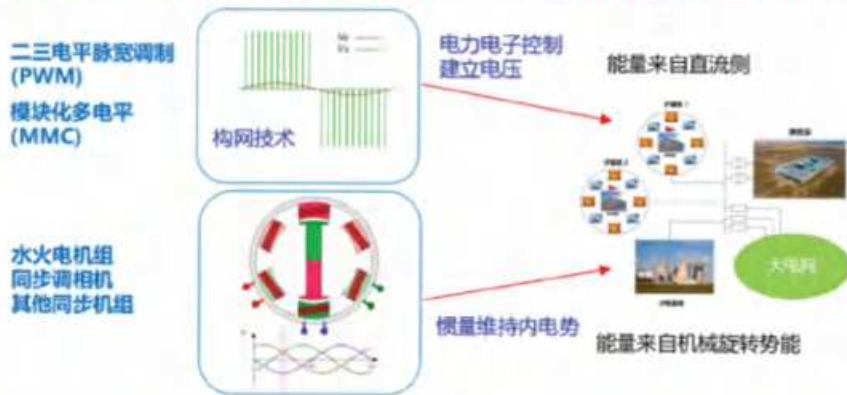


亟需开展构网型储能与调相机优化配置研究，**部分替代24台调相机**。



一、项目背景及研究必要性——构网技术

为了提升“沙戈荒”新能源多场站短路比及“宁湘直流”新能源外送能力，亟需探索支撑效果等同/超越调相机的构网型技术。储能可基本实现全容量SOC下的构网控制，是构网技术的最佳载体，而风电构网存在多电压源并列运行的稳定性问题、光伏夜间无法构网，均存在一定的局限性。

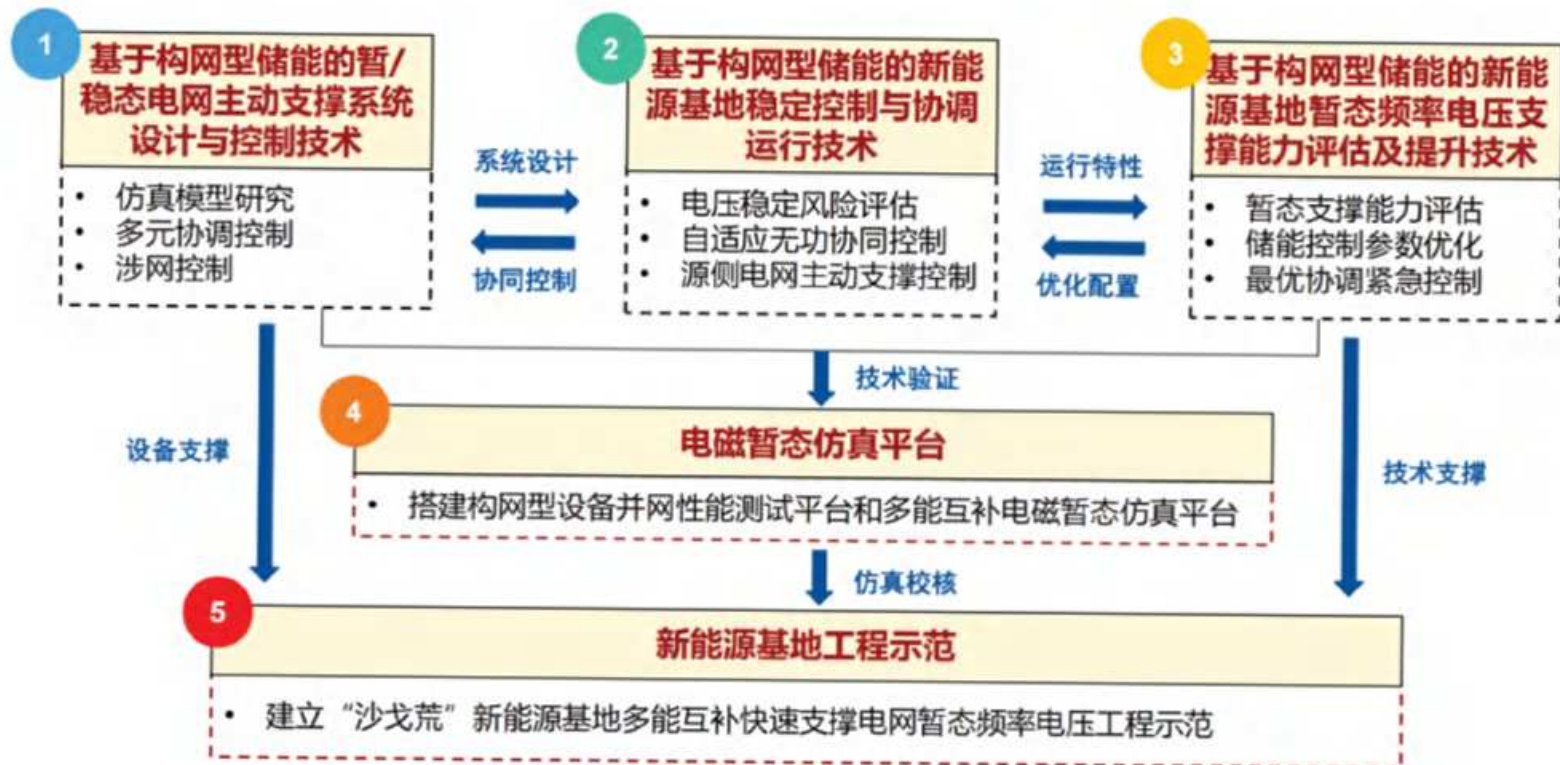


- 风电：少量风机旋转势能(惯量)、场内、场外多电压同步稳定；
- 光伏：微量的电容储能，只能降功率不能增功率；
- 储能：储能容量大，可瞬间自然释放。



以构网储能为核心的源网荷储一体化解决方案在**额济纳**成功投运，世界上首次验证了广域大网架纯新能源黑启动、全域离网中长期运行和人工短路故障穿越，为新能源大规模消纳奠定了核心技术基础。

二、研究内容及目标



二、研究内容及目标

预期目标:

建成**全国首个**
源侧新型电力系统综合能源基地
示范工程，提升
“**宁湘直流**”新
能源**外送能力**及
大基地**自运行能力**

- 01 | 开发基于构网型储能的快速支撑电网暂态电压频率关键技术
- 02 | 建立满足大电网安全稳定控制需求的构网型储能机电暂态仿真模型
- 03 | 搭建并网性能测试平台和多能互补电磁暂态仿真平台
- 04 | 建立“沙戈荒”新能源基地协调优化控制系统
- 05 | 研究基于构网型储能的“沙戈荒”新能源基地设备及参数优化
- 06 | 完成构网型储能工程示范

先进性

可靠性

友好性

安全性

稳定性

总体目标

目标分解

技术效果

二、研究内容及目标

考核指标：

技术指标

成功建设10万千瓦构网型储能电站示范工程。

- 基于构网型储能的新能源场站并网点**短路比提升至2.0**，**机端短路比至1.5**；
- 构网储能**暂态过流能力达到额定电流3倍**，系统稳态与暂态均实现电压源特性；
- 系统频率响应较传统跟网型**控制频率变化率降低20%以上**，**惯量时间常数可实现百毫秒到秒级的全覆盖**。
- 故障情况下新能源发电单元机端**工频过电压水平不超过 1.3 标么值**。

仿真测试平台达到**微秒级**暂态故障的仿真测试与故障采集，实现**3000节点**系统的数字-物理混合系统仿真与实测

运行优化方案可自主计算百兆瓦级储能电站发电曲线、备用容量

知识产权指标

完成5项发明专利受理，录用或发表5篇论文

三、指南响应情况

(一) 研究内容

指南内容	项目研究内容	响应情况
提出面向风光电站支撑电网暂态电压频率的构网型储能系统配置与支撑能力评估方法；	课题3 ：研究基于构网型储能的“沙戈荒”新能源基地快速支撑电网暂态频率电压能力评估方法、储能系统及参数优化配置方案	响应
研究面向风光电站主动支撑的构网型储能系统设计与主动控制技术；	课题1 ：研究暂/稳态均具备短路容量、惯量、频率、电压支撑能力的构网型储能系统设计与控制技术	响应
规模化主动支撑型风光储电站电磁暂态仿真平台技术与稳定性分析；	课题2 ：研究基于构网型储能的“沙戈荒”新能源基地稳定控制技术协调运行技术	响应
电站与构网设备惯量阻尼测试技术开发与平台搭建；	课题4 ：搭建构网设备惯量、阻尼等并网性能测试平台和多能互补电磁暂态仿真平台	响应
风光储电站快速支撑电网暂态频率电压技术示范。	课题5 ：“沙戈荒”新能源基地多能互补快速支撑电网暂态频率电压工程示范	响应

三、指南响应情况

(二) 考核指标 (参考指标)

指南考核指标 (参考指标)	项目考核指标 (参考指标)	响应情况
基于构网型储能的新能源场站并网点短路比提升至 2.0, 机端短路比至 1.5	课题1: 基于构网型储能的新能源场站并网点短路比提升至 2.0, 机端短路比至 1.5	响应
机端暂态过流能力达到额定电流 3 倍, 系统稳态与暂态均实现电压源特性, 暂态电压响应时间十毫秒级, 无功调节能力不低于系统容量的 150%	课题1: 机端暂态过流能力达到额定电流 3 倍, 系统稳态与暂态均实现电压源特性, 暂态电压响应时间十毫秒级, 无功调节能力不低于系统容量的 150%	响应
惯量时间常数可实现百毫秒到秒级的全覆盖	课题2: 惯量时间常数可实现百毫秒到秒级的全覆盖	响应
故障情况下新能源发电单元机端工频过电压水平不超过 1.3 标幺值	课题2: 故障情况下新能源发电单元机端工频过电压水平不超过 1.3 标幺值	响应
仿真测试平台达到微秒级暂态故障的仿真测试与故障采集, 实现 2000 节点系统的数字-物理混合系统仿真与实测	课题4: 仿真测试平台达到微秒级暂态故障的仿真测试与故障采集, 实现 3000 节点系统的数字-物理混合系统仿真与实测	响应
示范系统构网型储能装机容量不低于100MW	课题5: 示范系统构网型储能装机容量不低于100MW	响应

四、创新点

01 构网型储能系统设计与控制技术

提出适用于“沙戈荒”新能源基地的**构网型储能系统设计与控制技术**，兼顾同步惯量支撑、一次调频和快速调压等功能，明确涉网控制保护特性参数要求

02 稳定控制技术和协调控制技术

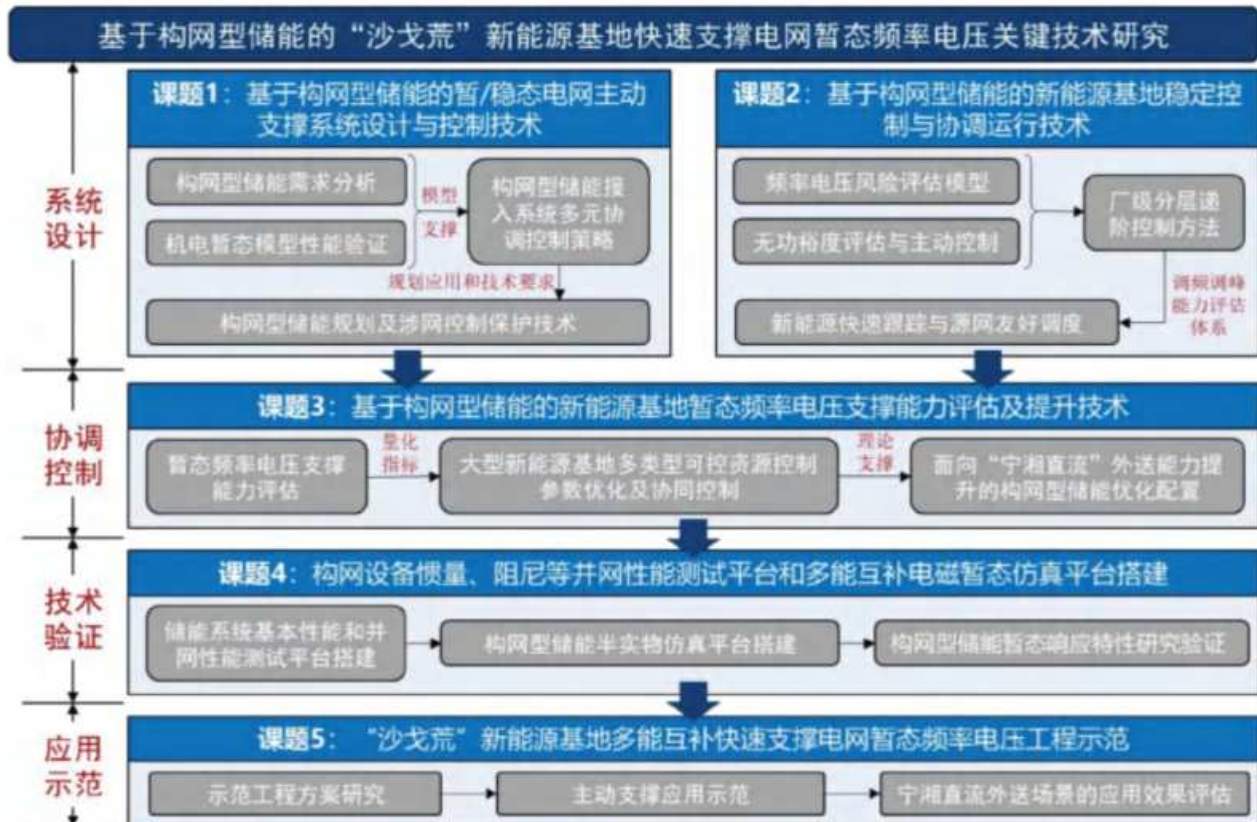
提出基于构网型储能的新能源基地**稳定控制技术和协调控制技术**，充分协调风光储多类型电源，并/离网稳定高效运行，提高新能源基地运行灵活性，提高电能利用率

03 暂态电压频率支撑能力评估方法

提出基于构网型储能的新能源基地快速支撑电网**暂态频率电压能力评估方法**，并明确基于构网型储能的暂态频率电压支撑能力量化评估指标

04 构网型储能设备和参数优化方法

提出面向电网暂态电压频率快速支撑的**构网型储能控制参数优化方法**，解决现有控制参数优化方法在暂态电压频率快速支撑场景下适应性不足的问题



五、实施方案

技术路线：（研究内容1-暂/稳态构网储能系统设计与控制）

仿真模型研究

- 构建安全稳定分析模型，评估应用场景及应用需求；
- 构建构网型储能机电暂态仿真模型，开展性能验证。

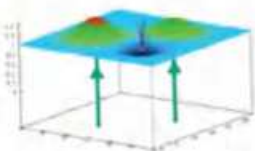
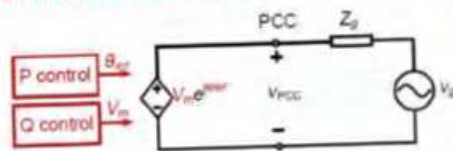
多元协调控制

- 构建构网型储能支撑系统小信号分析模型，进行系统稳定性影响评估及控制参数优化；
- 提出构网型储能接入后与新能源、直流的协调控制策略，实现多时间尺度的多元协调优化。

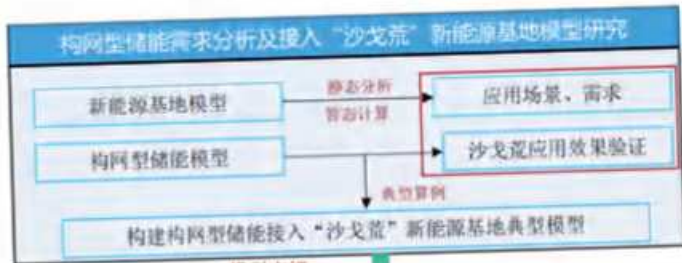
规划及涉网控制

- 提出构网型储能系统原则与方法，开展系统设计，达到3倍暂态过流能力；
- 提升多场站短路比：并网点至2.0，机端至1.5。

- 提出适用于“沙戈荒”新能源基地的构网型储能系统设计与控制技术



- 功率同步
- 惯量和系统强度支撑
- 电压源特性



技术路线：（研究内容2-新能源基地稳定控制与协调运行）

电压稳定风险评估



多机自适应无功 协同控制

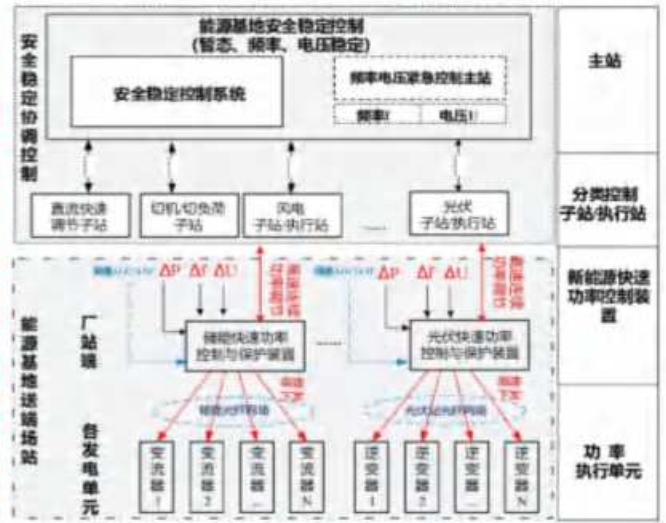
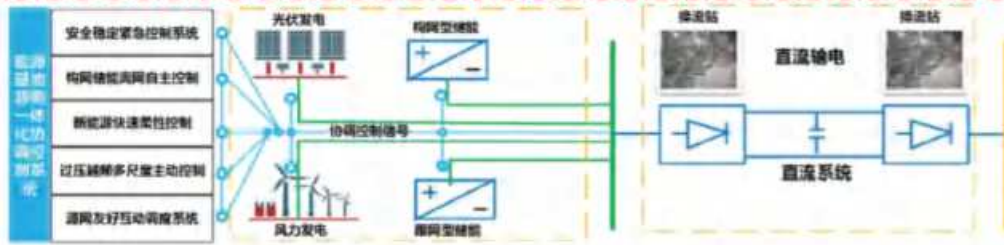


广域基地电网多能 互补快速柔性控制



- 建立**频率电压风险评估模型**，在线识别、溯源预警；
- 构建无功裕度评估与**主动控制在线安全分析系统**。
- 基于线路阻抗特征，提出一种**自适应无功控制策略**，解决直流发生闭锁故障后的**暂态电压突变**问题；
- 研究多**机构网无缝切换**与频率电压支撑技术，实现直流故障下送端电网短时**自主运行**。
- 基于调频/调压控制目标，研究**多场站广域有功/无功快速柔性精准控制**，降低直流故障后的切机量。

■ 研发整组动作时间不大于100ms的能源基地安全稳定控制系统



基于构网型储能的纯新能源电力系统离网长期运行曲线



五、实施方案

技术路线：（研究内容3-暂态频率电压支撑能力评估及提升）

支撑能力评估

- 构建系统数学模型，分析交直流故障下系统的**动态响应**
- 考虑典型故障场景，提炼暂态支撑能力的**关键影响因素**
- 构建基于构网型储能的频率电压支撑能力**量化评估指标**

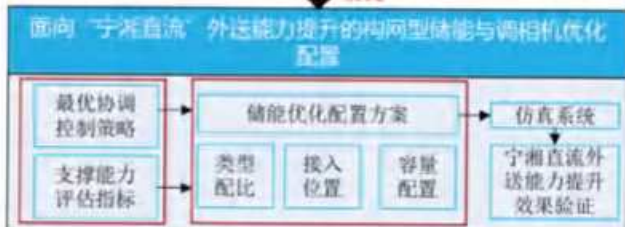
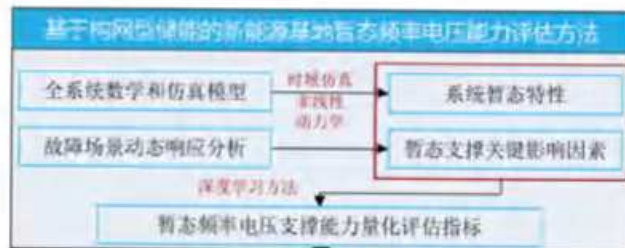
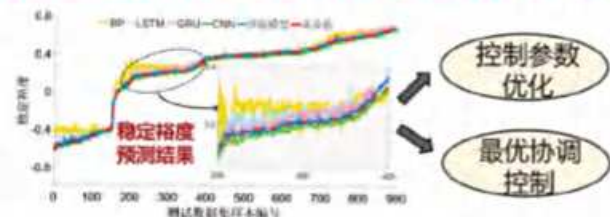
最优协调控制

- 构建适应大型新能源基地场景的暂态**电压频率预测模型**
- 评估可控对象**控制参数变化**对系统暂态电压频率的影响
- 建立计及实际运行约束的**紧急控制措施优化模型**

储能优化配置

- 构建兼顾经济性和支撑能力的**构网型储能配置模型**
- 提出**储能配比、接入位置和容量**的最优配置方案
- “宁湘直流”外送能力提升效果**仿真验证**

■ 实现“沙戈荒”新能源基地暂态电压频率支撑能力的准确评估及提升



技术路线：（研究内容4-电磁暂态仿真平台）

并网性能特性评估



- 建立储能系统基本性能与**并网性能**测试平台
- 研究储能电池的**电性能**、安全性能、**并网性能**特性

精细化建模仿真

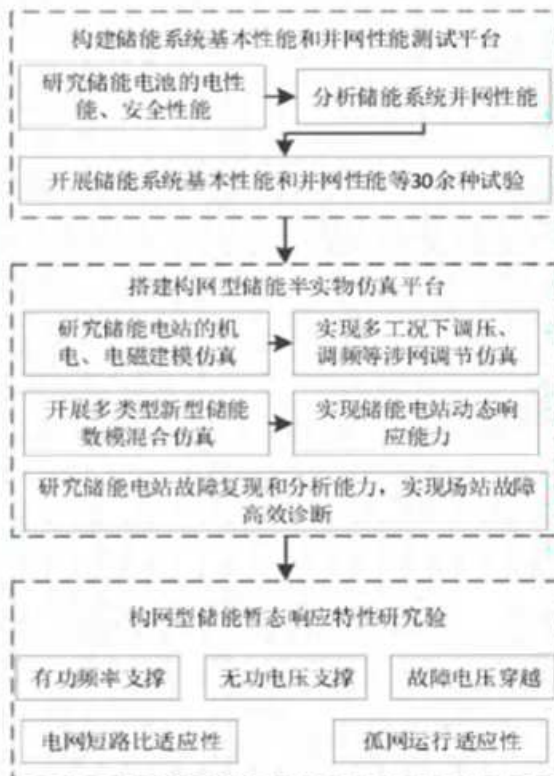
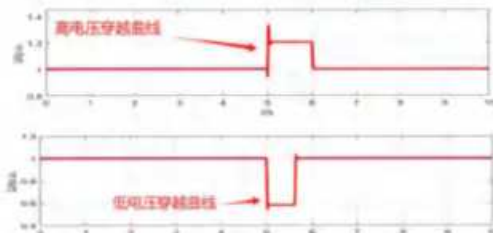
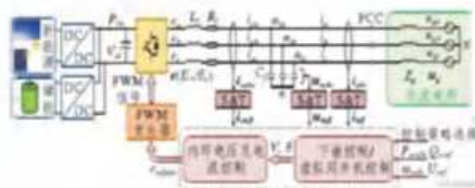


- 搭建3000个节点构网型储能**半实物**仿真平台
- 研究储能**机电、电磁（微秒级）**精细化建模仿真，实现其**多工况下调压、调频**等涉网调节仿真
- 开展**多类型新型储能**数模混合并行实时仿真
- 构网型储能**暂态响应特性**研究验证

暂态响应特性验证



- 建立适用于“**沙戈荒**”新能源大基地的**千万千瓦级**的**电磁暂态仿真平台**



五、实施方案

计划
进
度

研究内容		2024年			2025年			2026年		
课题一	构网型储能需求分析									
	构网型储能接入“沙戈荒”新能源基地建设									
	构网型储能接入系统多元协调控制策略									
	构网型储能规划及涉网控制保护技术要求									
课题二	能源基地电压稳定风险评估方法研究									
	直流故障送端电网自主运行控制设计									
	多场站快速柔性精准控制系统研制									
	一体化协调控制系统集成与工程应用									
课题三	大型新能源基地暂态频率电压支撑能力评估理论									
	面向暂态频率电压支撑能力提升的构网型储能控制参数优化									
	基于构网型储能的大型新能源基地多类型可控资源协同控制									
	面向“宁湘直流”外送能力提升的构网型储能与调相机优化配置									
课题四	搭建储能系统基本性能和并网性能测试平台									
	搭建构网型储能半实物仿真平台									
	构网型储能暂态响应特性验证									
课题五	构网型储能电站设计和工程建设									
	构网型储能并网系统测试技术									
	电网主动支撑应用验证与综合效能评估									

重要节点

2024.03
方案设计

2024.12
并网集成

2025.06
暂态频率电压支撑能力评估理论

2025.12
多类型可控资源协同控制策略验证

2026.06
性能测试、电磁暂态仿真平台搭建

2026.12
运行示范

■ 实施方式描述：
本项目采用自主研发和委托研发相结合的方式开展，计划与设备制造企业、高等院校、电网公司等共同实施，低碳院开展评估技术研究。

五、实施方案

经费预算

费用名称	取费说明	预算费用 (单位: 万元)			
		2024	2025	2026	合计
1 直接费	1+2+3+4+5+6+7+8+9+10+11+12	21989.4	1944.6	1550.36	25484.36
2 材料费	(1)+(2)+(3)+(4)	100	50	50	200
3 设备费	(1)+(2)+(3)+(4)	20719.6	532	837.76	22089.36
仪器、设备购置费		20053.2	532	837.76	21422.96
仪器、设备升级改造费		666.4	0	0	666.4
4 测试化验加工费		200	350	300	850
5 新产品设计费、新工艺规程制定费		260	300	100	660
6 差旅费		36.8	21.6	21.6	80
7 专家咨询费		5	5	5	15
8 会议费		5	5	5	15
8 出版/文献/信息传播/知识产权事务费等	(1)+(2)+(3)+(4)+(5)+(6)	663	681	231	1575
出版费		0	2	2	4
资料费		0	20	20	40
专用软件或数据购买费		655	650	200	1505
文献检索费		5	5	5	15
专利申请及知识产权事务费		3	4	4	11
合计	一+二	21989.4	1944.6	1550.36	25484.36

效益预测：

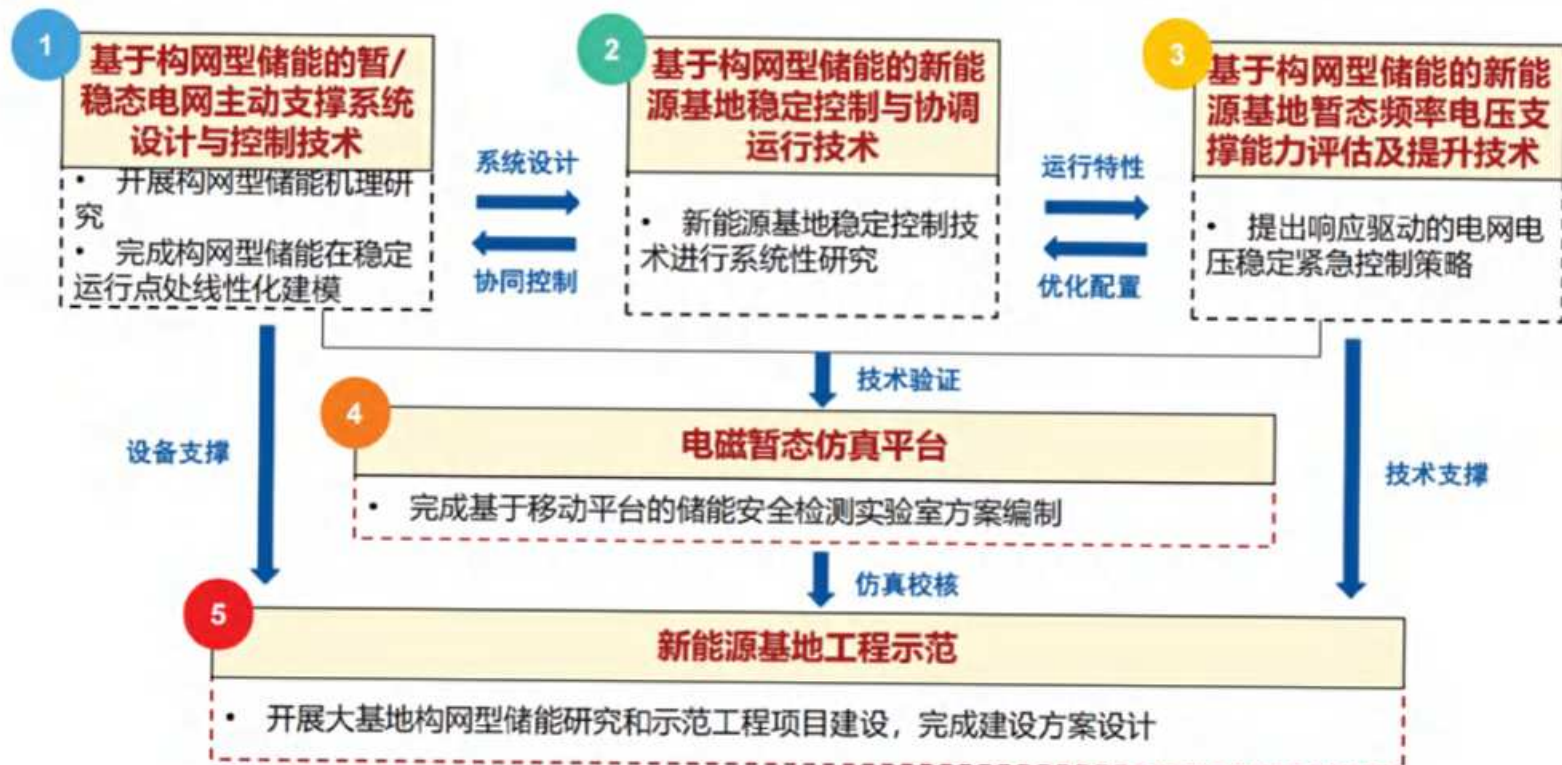
经济效益

- 按照主动支撑型新能源场站提升**5%**并网电量估算，项目**每年增发电量收益2000万元**。
- 新能源发电、构网储能协同支撑电网电压频率示范运营，可为新能源弃光问题提供新的解决方法，**减少调相机投资约22500万元，后期维护费用每年减少1850余万元**。
- 构网型储能降低电源侧的电压和频率波动，保证各场站设备在安全稳定的环境下运行，延长使用寿命，增加了机组的有效运行时间，提升新能源场站的发电量。
- 本示范项目可模拟转动惯量，参与辅助服务市场并获得转动惯量补偿（0.3~0.7元/kWh）。

社会效益

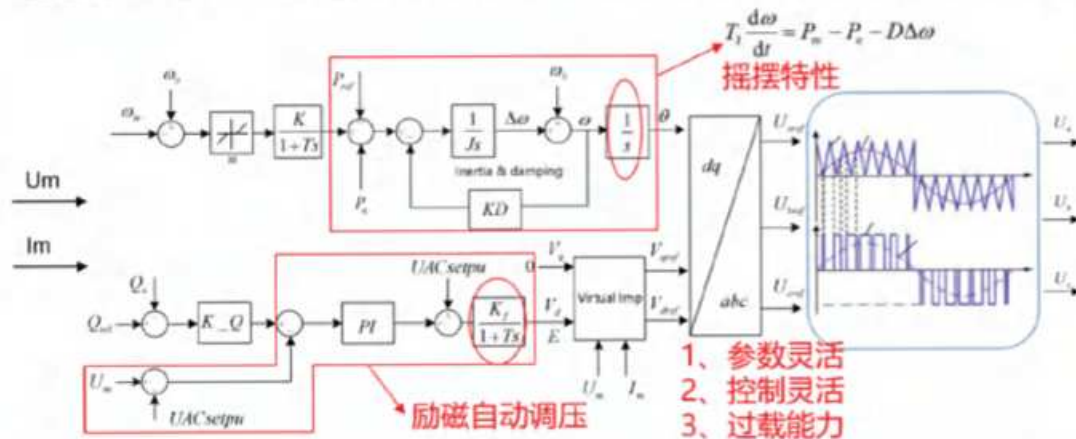
- 构网型储能能为新能源场站电网支撑提供虚拟惯性，提升短路容量，加强系统强度，能在**多种工况及工作场景下为新型电力系统的稳定运行保驾护航**。
- 为“沙戈荒”新能源基地的建设和运维提供重要的理论支撑和技术指导，**提高对“宁湘直流”新能源外送及西北电网支撑能力**。同时，项目技术体系可为集团后续**千万千瓦、百万千瓦新能源基地迭代应用**，助力以新能源为主体的新型电力系统构建。



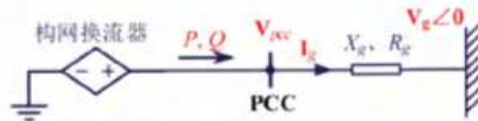


研究内容1：暂/稳态构网储能系统设计与控制

搭建构网型储能机电暂态仿真模型，模拟同步发电机关键控制环节，具备内电势幅值和相角相对独立的电压源外特性。通过驱动级控制，为电网提供一个段时间尺度不变的电压，实现交流-直流、交流-交流之间功率自然交换；利用功率慢速闭环实现自同步运行；利用电压无功闭环实现电压动态调整。



构网型储能系统暂态输出等效电路图如下：



忽略网侧等效电阻R，构网电压源的有功、无功自然响应表达式如下：

$$P = \frac{3 V_{pcc} V_g \sin \delta}{2 X_g}$$

$$Q = \frac{3 V_{pcc}^2 - V_{pcc} V_g \cos \delta}{2 X_g}$$

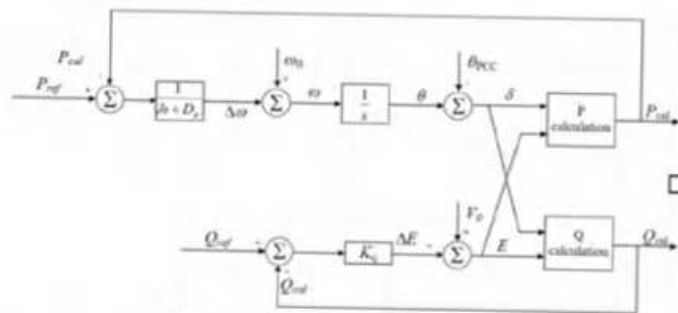
研究内容1：暂/稳态构网储能系统设计与控制

将构网型储能的功率自然响应表达式在稳定运行点处线性化，建构网型储能支撑系统的小信号分析模型，初步开展系统稳定性影响评估及控制参数优化工作。

将功率自然响应表达式在稳定运行点处线性化：

$$\hat{P} = \left. \frac{\partial P}{\partial \delta} \right|_{\delta=\delta_0} \hat{\delta} = \frac{3}{2} \frac{V_g E \cos \delta_0}{X} \hat{\delta} = K_{p\delta} \hat{\delta}$$

$$\hat{Q} = \left. \frac{\partial Q}{\partial E} \right|_{E=E_0} \hat{E} = \frac{3}{2} \frac{2E - V_g \cos \delta_0}{X} \hat{E} = K_{qv} \hat{E}$$

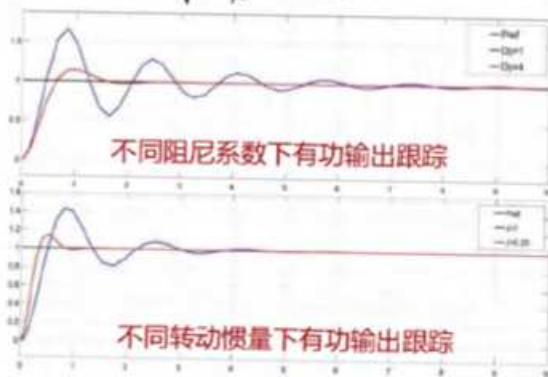


构网型储能小信号分析模型

构网储能有功环的小信号传递函数为一个二阶系统：

$$G_p = \frac{\hat{P}}{\hat{P}_{ref}} = \frac{K_{p\delta}}{Js^2 + D_p s + K_{p\delta}} = \frac{K_{p\delta} / J}{s^2 + \frac{D_p}{J} s + \frac{K_{p\delta}}{J}} = K \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

其中, $\xi = \frac{D_p}{2\sqrt{JK_{p\delta}}}$, $\omega_n = \sqrt{\frac{K_{p\delta}}{J}}$

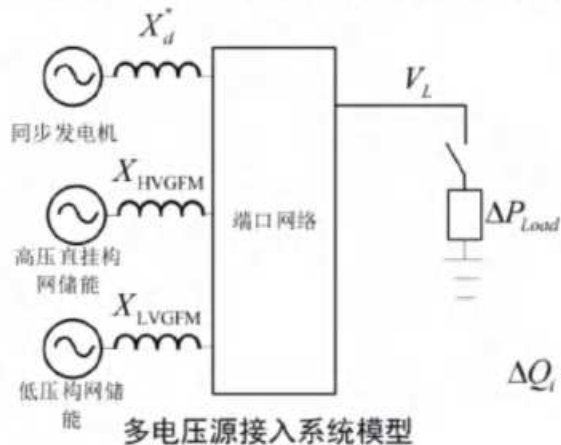


优化设计构网储能功率外环的惯性时间常数J以及下垂系数Dp都可以改变系统的阻尼比参数，从而影响系统的稳定性。

七、研究进展

研究内容2：新能源基地稳定控制与协调运行

构网型储能作为电压源，在系统发生故障或扰动瞬间，会发生多类型电力电子设备功率转移和重新分配。因此，需要结合新能源基地稳定控制要求，对外部扰动后系统无功的变化和分布进行分析，以实现电压的评估。



不同类型电源在发生 ΔP 的有功功率扰动后，节点 i 有功出力变化量 ΔP_i 的表达式：

$$\Delta P_i = \sum_{j=1, j \neq i, L}^n (E_i E_j B_{ij} \cos \delta_{ij0}) \Delta \delta_{ij} + (V_L E_i B_{iL} \cos \delta_{iL0}) \Delta \delta_{iL}$$

不同类型电源在发生 ΔQ 的有功功率扰动后，节点 i 有功出力变化量 ΔQ_i 的表达式：

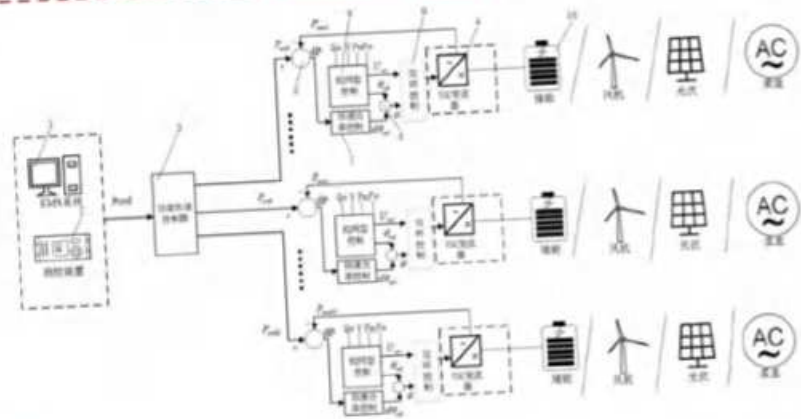
$$\Delta Q_i = \sum_{j=1, j \neq i, L}^n B_{ij} \cos \delta_{ij} (E_{i0} \Delta E_j + E_{j0} \Delta E_i) - E_{i0} B_{iL} \cos \delta_{iL} \Delta V_L - (V_{L0} B_{iL} \cos \delta_{iL} + 2 B_{ij} E_{i0}) \Delta E_i$$

- 通过建立构网型储能频率电压风险评估模型，对静态电压稳定性、小扰动电压稳定性、暂态电压稳定性进行综合评估，根据各区域无功资源评估情况及实际可调节能力情况，提升系统电压稳定运行裕度。

七、研究进展

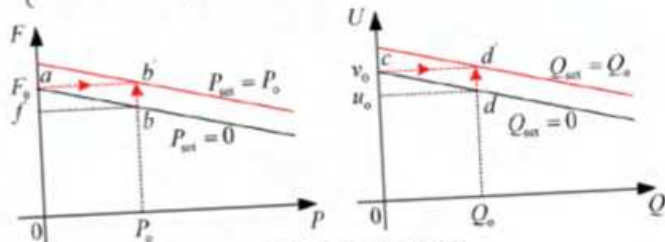
研究内容2：新能源基地稳定控制与协调运行

建立适用于构网型设备的快速功率控制方法与系统，在不影响其相关构网控制特性的基础上，实现整站ms级的功率响应速度，满足快速二次调频需求，并可融入电网三道防线，响应稳控指令实现以调代切。



$$\begin{cases} P_{\text{set_sup}} = \Delta F \left(k_{\text{pf}} + \frac{k_{\text{if}}}{s} \right) \\ Q_{\text{set_sup}} = \Delta U \left(k_{\text{qv}} + \frac{k_{\text{iv}}}{s} \right) \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_{\text{set}_i} = S_i m_p (P_{\text{set_base}} + P_{\text{set_sup}}) \\ Q_{\text{set}_i} = S_i m_q (Q_{\text{set_base}} + Q_{\text{set_sup}}) \end{cases}$$



二次调频调压原理

- 在保留构网型设备具备类似常规发电机的短路电流、转动惯量支撑能力的基础上，充分发挥其快速功率控制的优势，进一步提升构网型设备对电网三道防线适应性的关键。

研究内容3：基于构网型储能的新能源基地暂态频率电压支撑能力评估及提升技术

暂态电压支撑能力影响因素：分析暂态过电压的产生机理，明确换相失败后送端母线电压呈现“先低后高”的暂态特性，通过分析送端电压与无功盈余关联关系，提炼影响暂态电压支撑能力的关键影响因素：新能源接入比例、直流传输功率、送端系统强度。

◆ 送端电压与无功盈余关联关系

$$\Delta U_l = \frac{Q_{ex}}{S_{cr}} = \frac{Q_{ac} + Q_w + Q_{cr} + Q_{dr}}{S_{cr}}$$

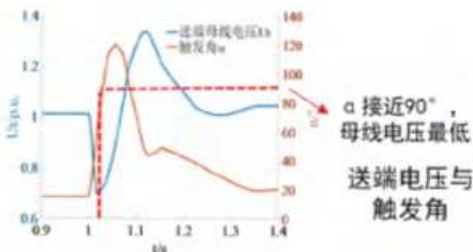
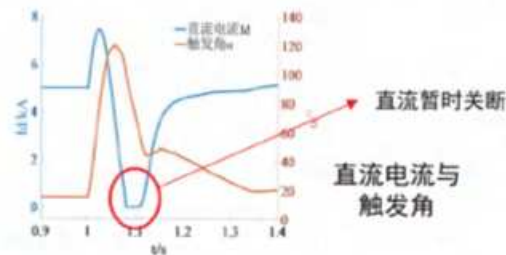
◆ 主要影响因素

直流系统的影响：

$$Q_{dr} = P_{dr} \sqrt{\left(\frac{1.35 E_r}{1.35 E_r V_l \cos \alpha - 3 / \pi X_l I_d} \right)^2 - 1}$$

风力发电系统的影响：

$$\Delta Q_{gw} = [\lambda_w (0.9 - U_w) - 1] Q_{gw0}$$

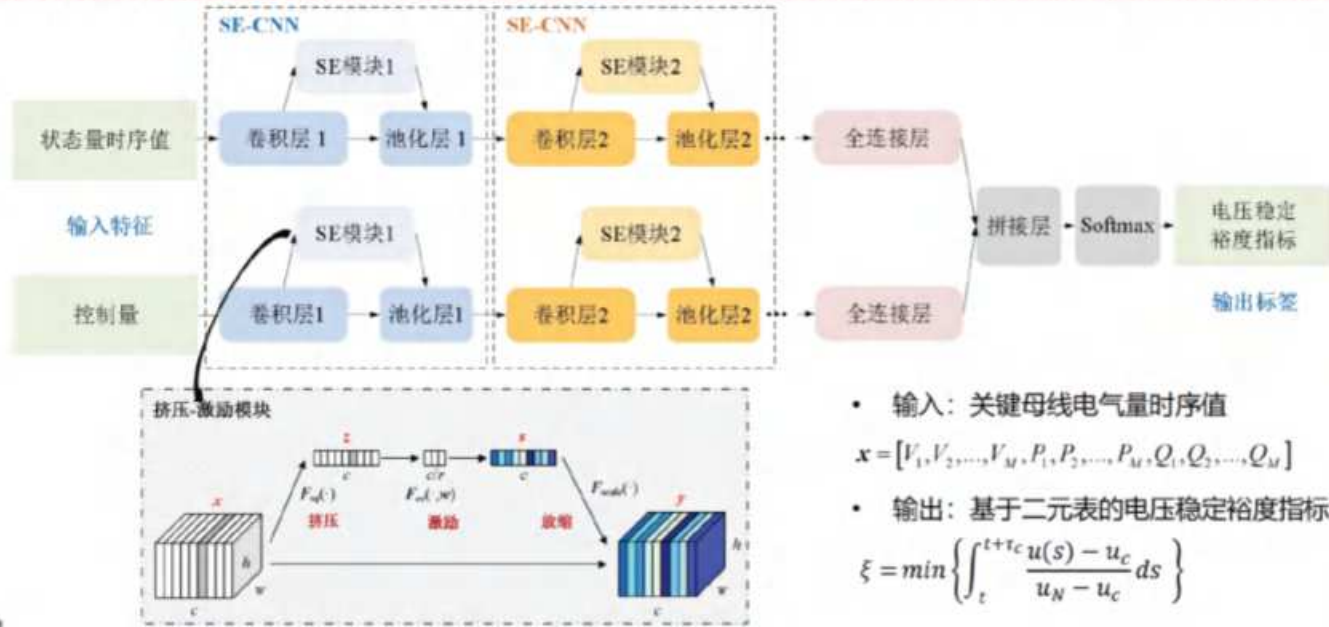




七、研究进展

研究内容3：基于构网型储能的新能源基地暂态频率电压支撑能力评估及提升技术

暂态电压支撑能力量化评估：建立基于挤压-激励-卷积神经网络的电网电压稳定水平评估模型，揭示复杂多变运行场景下系统关键电气量和稳定水平之间的映射关系。



谢谢！

