



国家电网
STATE GRID

中国自动化学会控制理论专业委员会
第四届控制科学与工程前沿论坛（中国·南京）

适应我国智能电网发展的 安全稳定柔性控制技术

孙华东

中国电力科学研究院
二〇一二年五月二十日

中国电力科学研究院
CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE

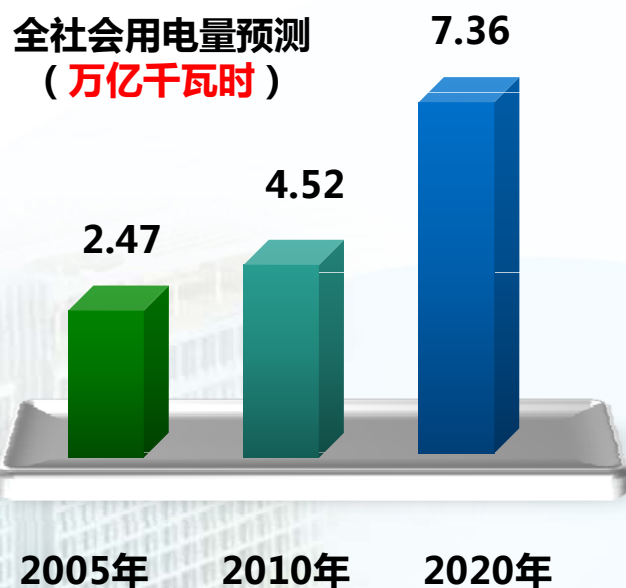
汇报提纲

- 一、我国电网发展及安全稳定柔性技术需求**
- 二、安全稳定柔性控制理念探讨**
- 三、安全稳定柔性控制技术研究进展**
- 四、结语**

一、背景及需求—电力需求

我国国民经济和电力需求将保持持续快速增长。预计到2020年，发电装机将达到**16亿千瓦**，全社会用电量达到7.36万亿千瓦时，**比目前水平翻一番还要多。**

负荷中心主要位于东部沿海及京广铁路沿线。



我国经济社会发展对电力工业有更高要求

一、背景及需求—大型能源基地分布

火电：



我国煤炭资源保有储量的76%分布在北部和西部地区。2015年主要煤电基地外送规模可达2亿千瓦以上。

水电：



2011~2020年我国水电总投产规模在1亿千瓦以上。2015年西南水电基地外送规模将达6000万千瓦。

风电：



风电开发主要集中在三北地区，2015年风电外送规模将达4500万千瓦左右。



风电

八大风电基地

火电

八大火电基地

水电

四大水电基地

我国电力能源主要分布在远离负荷中心的三北和西南地区

一、背景及需求—大容量远距离输电格局

我国能源资源与用电需求地理分布上极不均衡，决定了我国必须走远距离、大规模输电和全国范围优化电力资源配置的道路。大力发展超特高压交流/直流输电工程将电能由西部、北部送往东部负荷中心。



| 水平年 | 2015年 | 2020年 |
|--------|-------------|-------|
| 跨区输电规模 | 2亿千瓦 | 4亿千瓦 |
| 输电距离 | 1000至3000公里 | |

大规模、远距离输电是我国电网发展的必然格局 研究院

一、背景及需求——交直流大容量送电的快速发展

| 年份 | 送电方式 | 输电容量 (万千瓦) |
|-------|---------|------------|
| 2011年 | 西北送华北华中 | 800 |
| | 华北华中送华东 | 1660 |
| 2020年 | 西北直流送华中 | 2150 |
| | 西北直流送华北 | 860 |
| | 华中直流送华东 | 1470 |
| | 华北直流送华东 | 1500 |

| 年份 | 直流 | 最大额定容量 | 直流总容量 |
|-------|-----|---------|----------|
| 2011年 | 16回 | 640万千瓦 | 达4500万千瓦 |
| 2020年 | 38回 | 1045万千瓦 | 约1.91亿千瓦 |



现状电网



未来规划电网

2015年，特高压跨区、跨国电网输送容量达2.61亿千瓦，特高压交、直流承担80%以上的电力传输，“三华”受端电网从区外受电约1.938亿千瓦，区外受电比例达到地区总负荷32%，受电比例高。

电网进入了特高压大容量交、直流输电建设的快速发展时期——

一、背景及需求—电网发展面临新问题

交直流输电工程输送容量大、故障对电网的打击力度大。

单回特高压交流线输电容量为400~500万千瓦，单回特高压直流输电容量为640~1000万千瓦。2015年，特高压交直流承担了跨区80%以上的电力传输。**交直流输电通道故障后造成送受端不平衡功对电网打击力度增加。**

| 项目名称 | 输电距离(km) | 输电容量(万千瓦) | 预计投运时间 |
|--------------|----------|-----------|--------|
| 1000千伏锡盟双回送出 | 1449.5 | 900 | 待核准 |
| 1000千伏淮沪双回送出 | 2×656 | 电厂全部送出 | 2013年 |
| ±800千伏哈密~河南 | 2280 | 800 | 2012年 |
| ±800千伏酒泉~湖南 | 2300 | 800 | 2013年 |
| ±1100千伏淮东~重庆 | 2687 | 1000 | 2014年 |
| ±800千伏呼盟~山东 | 1600 | 800 | 2013年 |

单一输电工程输电容量大，故障后对电网的打击力度大

一、背景及需求—电网发展面临新问题



- ◆ 我国已形成跨大区复杂交直流接续式/混联电网，送受端落点分散与集中并举，多回直流间的协调难度加大，交流系统薄弱环节与多回直流运行方式相关性增强，局部与整体措施存在互斥的可能。
- ◆ 大规模风电随机功率多方向、多点交/直流馈入电网，会同时加重电网安全稳定、调峰等压力，现有技术难以解决。

电网规模大、运行方式复杂多变、安全稳定控制难度加大

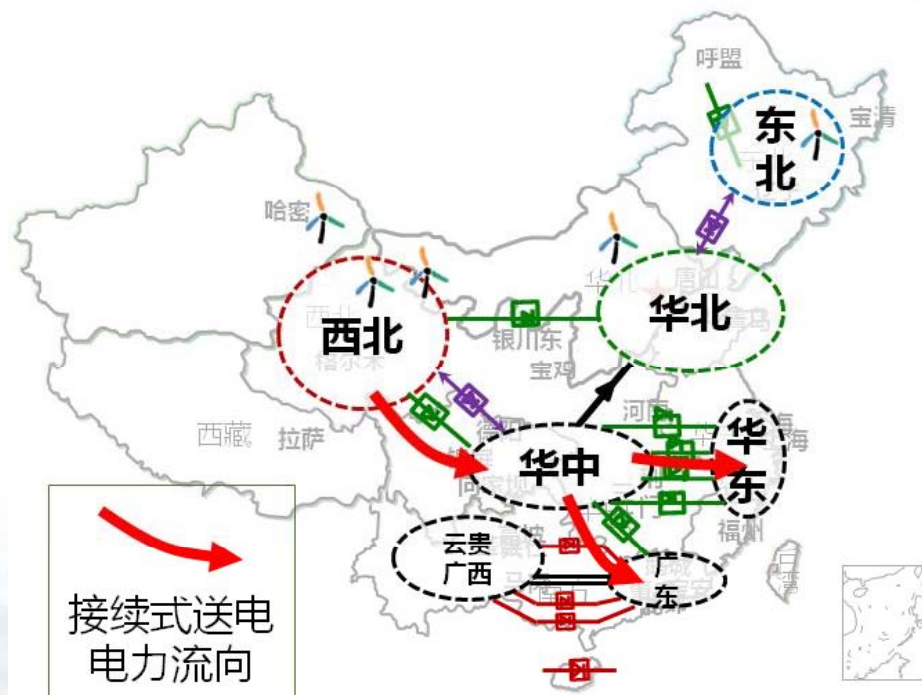
一、背景及需求—电网发展面临新问题

- **受端电网受电比例高、直流落点密集。**
- 随着用电需求增加及环保因素制约，受端受点比例仍将增加。未来华东地区直流落点总数达到近10回，主要落点长三角地区，对受端电网的电压无功支撑和广域协调控制能力提出了很高的要求。单一故障引发直流连续换相失败的风险需要新的控制理念和手段。



受端电网受电比例不断增大，电网的电压控制难度加大

一、背景及需求—电网发展面临新问题



直流输电容量不断增大，强直弱交电网结构表现出的安全稳定运行，势必需要采取大量切机和集中切负荷措施，安控配置复杂，电网运行压力极大。

潮流大范围、远距离穿越，稳控措施量大

一、背景及需求—问题应对

电网发展面临的新问题：

- 单一输电工程输电容量大，故障后对电网的打击力度大
- 电网规模大、运行方式复杂多变、安全稳定控制难度加大
- 受端电网受电比例不断增大，电网的电压控制难度加大
- 潮流大范围、远距离穿越，稳控措施量大

《电力系统安全稳定导则》规定：

电力系统承受大扰动能力的安全稳定标准分为三级：

- 第一级标准：保持稳定运行和电网的正常供电；切机但不能失负荷。
- 第二级标准：保持稳定运行，但允许损失部分负荷；连锁切机切负荷保稳定。
- 第三级标准：当系统不能保持稳定运行时，必须防止系统崩溃并尽量减少负荷损失。根据特征量切机切负荷、解列保证电网不崩溃。

一、背景及需求—现有稳定控制技术的主要特征



基于仿真计算

预案式（基于特定故障）

局部控制

特征：

- 基于模型的仿真计算
- 基于预想事故的策略匹配
- 基于本地信号的局部控制
- 基于切机/切负荷的硬控制

“刚性”控制难以满足智能电网对稳定控制技术的要求

一、背景及需求—电网发展对控制手段的要求

1

传统的电力系统安全稳定“三道防线”控制措施，以切机、切负荷，系统解列等“硬控制”体现。

2

应对电网发展面临的新问题，替代或减少切机、切负荷、解列等安全稳定“硬控制”措施损失及影响。

3

用户对供电可靠性的要求越来越高，传统“硬控制”中以牺牲用户用电为代价的措施已经难以满足要求。（2011年9月1日国务院令）

4

电力电子技术及直流输电的发展为电网安全稳定控制提供了快速、灵活、连续的调节手段，以转移、调配取代或部分取代“硬性控制”的“柔性安控”适逢其时。

电网安全运行和用电可靠性对安全稳定控制的灵活性提出了更高要求

一、背景及需求—电网发展对控制手段的要求

传统安全
稳定控制

切除负荷

切除机组

系统解列

带来的问题

预案式控制导致
策略失配

硬控制 导致
巨大负荷损失

用户对供电
可靠性要求高

安全稳定
柔性控制

广域协调性

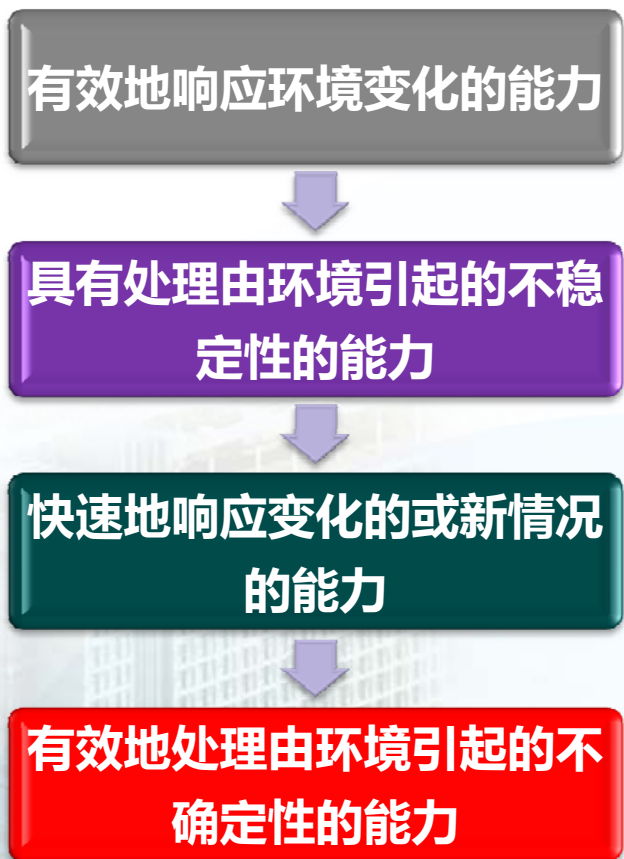
实时应变性

连续性

柔性控制是解决大电网发展面临问题的最佳手段

二、安全稳定柔性控制—柔性控制的发展

柔性（Flexibility）兴起于二十世纪八十年代，最初发源于管理和生产制造领域。柔性概念历经了几个阶段：



从柔性概念的发展过程可见，柔性概念经历了在“**行动**”上从“**响应**”到“**处理**”，在“**对象**”上由“**环境**”到“**不确定性**”的变化，主要体现了**全局、应变、有效**的特征。

柔性引入到电力系统是在1988年提出、1997年IEEE PES定义的柔性交流输电系统（FACTS），是指应用于交流输电系统的电力电子装置，是基于本地装置的控制技术，仅能解决局部问题，仍旧无法解决交直流电网发展与安全稳定之间的矛盾。

二、安全稳定柔性控制—柔性控制的理念

大电网安全稳定柔性控制

基于广域信息源，利用直流输电和FACTS设备的快速调控优势，由预想场景式控制转变为特征响应式控制，优先实施全局性交直流协调控制、多FACTS协调控制等控制措施，应对电网变化或运行中出现的不确定性的能力，提升电网安全与运行效率。其特点是**协调性、应变性和连续性**。

二、安全稳定柔性控制—柔性控制的特征

协调性：

- ◆ 交直流输电容量大、其扰动对电网的冲击大，靠本地的安控系统其控制效果有限、切机和切负荷的措施量大，通过广域信息实现各控制设备间的协调，**通过转移调配功率替代或部分替代损失发电与负荷**，提升控制性能和效果。

应变性：

- ◆ 大规模新能源接入、现代电网运行方式复杂多变等发给电网运行和稳定控制带来诸多不确定性，控制系统必须具备应对不确定因素的能力。**由预想场景式控制转变为特征响应式控制，实施安全稳定的高应变性柔性控制。**

连续性：

- ◆ 发挥FACTS设备及直流输电调控连续的、快速的控制能力，使各个状态间能够平滑过渡，应对低频振荡、联络线功率波动及协调无功电压控制，降低对电网的冲击。

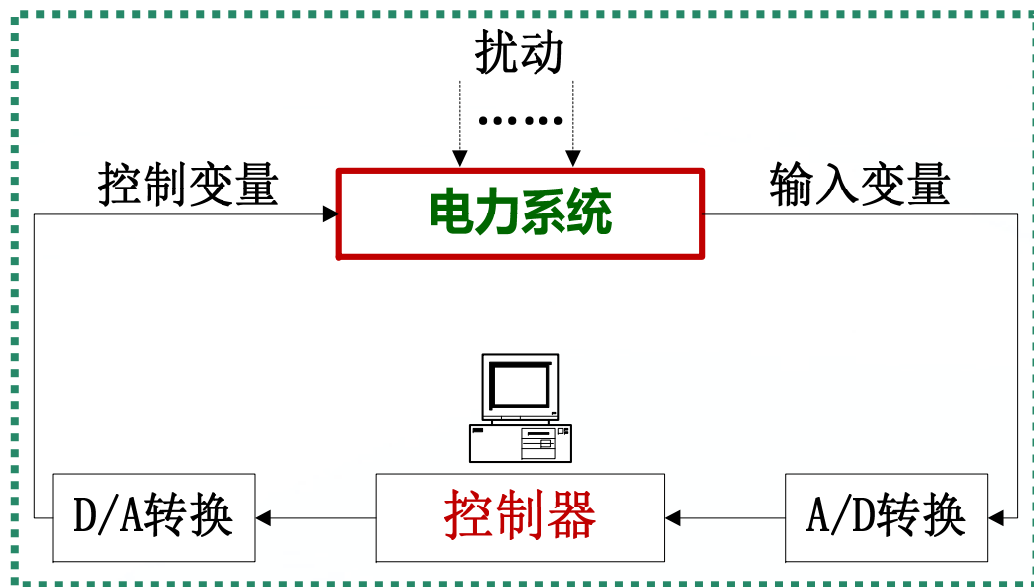
二、安全稳定柔性控制—柔性控制的基础

电网安全稳定柔性控制基础

1. 计算机技术和电力电子技术的快速发展，为电网提供了更多控制手段，如TCSC、SVC、STATCOM、TCSR以及可控高抗等FACTS装置的应用提高了电网的可控能力；
2. 直流输电（HVDC）和灵活交流输电（FACTS）设备的广泛应用，使大电网在多个关键节点上都具备了快速响应控制能力；
3. 监控与数据采集系统/能量管理系统（SCADA/EMS）和广域量测系统（WAMS）可为电网控制中心提供多时间尺度的多信息源，为跨大区交直流电网各种可控设备间的协调提供了可能。

我国电网已具备发展柔性控制的理论基础和应用基础

二、安全稳定柔性控制—安全稳定柔性控制技术



基于响应的控制是根据外部动态响应过程实时调节控制器控制变量达到对系统状态的校正。电力系统中基于响应的控制有励磁调节器、PSS、调速器、SVC等。但

这些控器均是针对单一设备的本地控制。

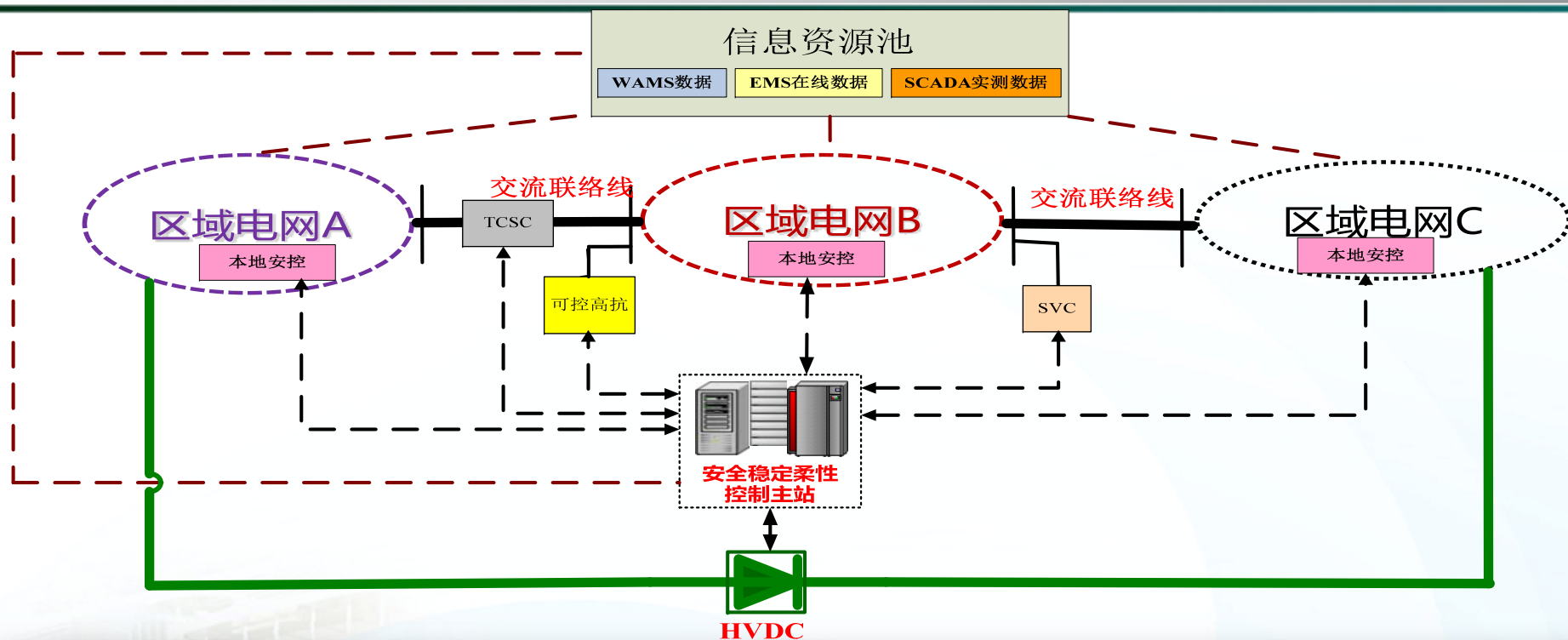
对于电力系统的安全稳定控制，基于响应的控制技术是根据各种测量信息实时监测电网响应过程、实时判断稳定特性、实时控制直流调制系统、本地安控系统以及SVC、TCSC、TCR等FACTS可控设备，无需离线计算预先制定控制策略，实现对电网的广域协调控制。

三、安全稳定柔性控制—功能设想

- **直流紧急提升/回降直流功率替代或部分替代损失负荷与机组。**充分利用直流过载能力，通过紧急提升/回降直流功率来提高系统暂态稳定性，减少切机切负荷量。
- **抑制区域间低频振荡，增强系统阻尼特性。**通过HVDC、FACTS的(广域)阻尼调制功能，可对互联交流电网的区域间低频振荡产生良好的抑制效果。
- **抑制跨大区交流联络线功率波动。**通过多直流快速调制功能，抑制跨大区交流联络线功率波动。
 - ① 冲击响应引起的功率波动
 - ② 阶跃响应引起的功率波动（《中国电机工程学报》2010年7月）
 - ③ 不规则负荷波动引起的联络线功率随机波动
- **广域协调的全时域电压无功协调控制。**广域协调FACTS及其他无功补偿装置，由就地指标控制向广域目标控制转变。（大直流闭锁后的广域电压控制）
- **广域阻尼控制，次同步振荡控制。**。。。。。
- 。。。。。

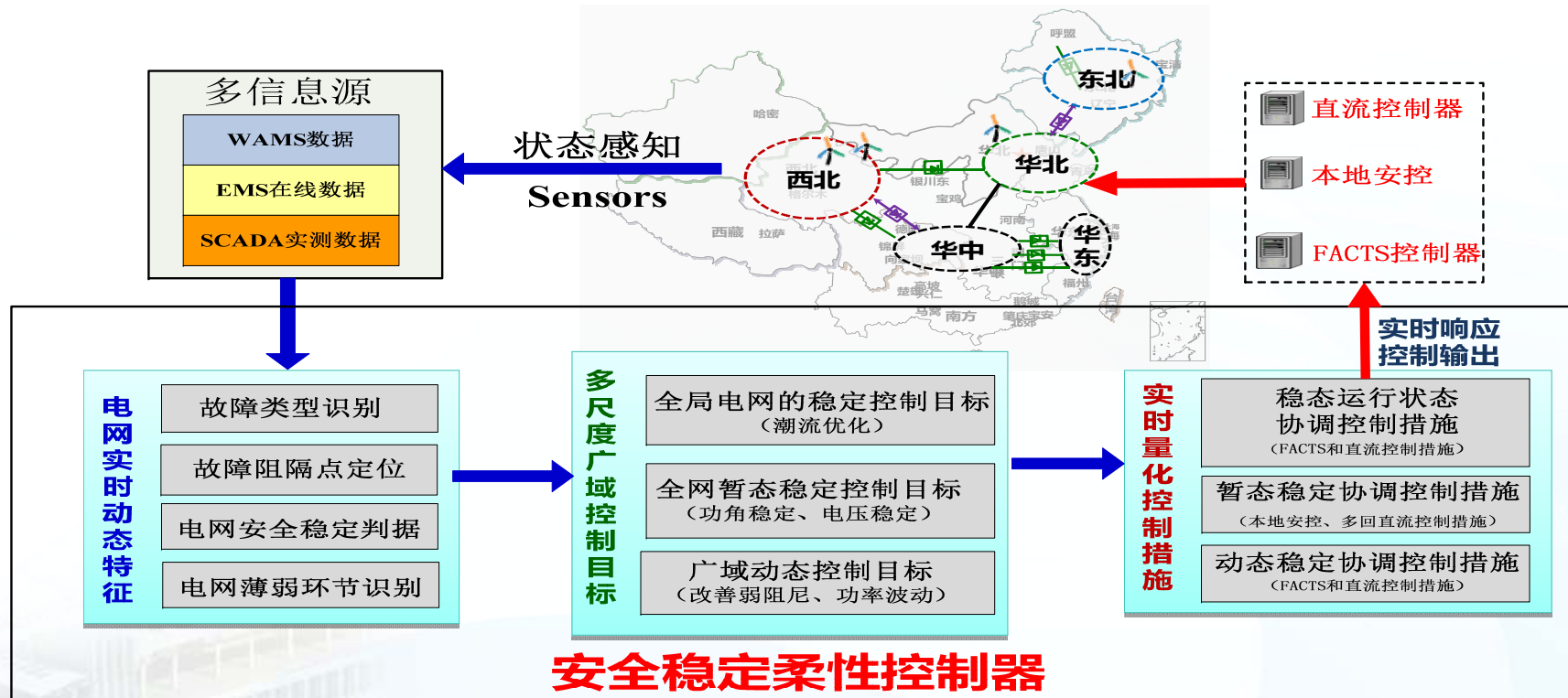
直流交流化、交流直流化

3.1 安全稳定柔性控制系统结构设计示意图



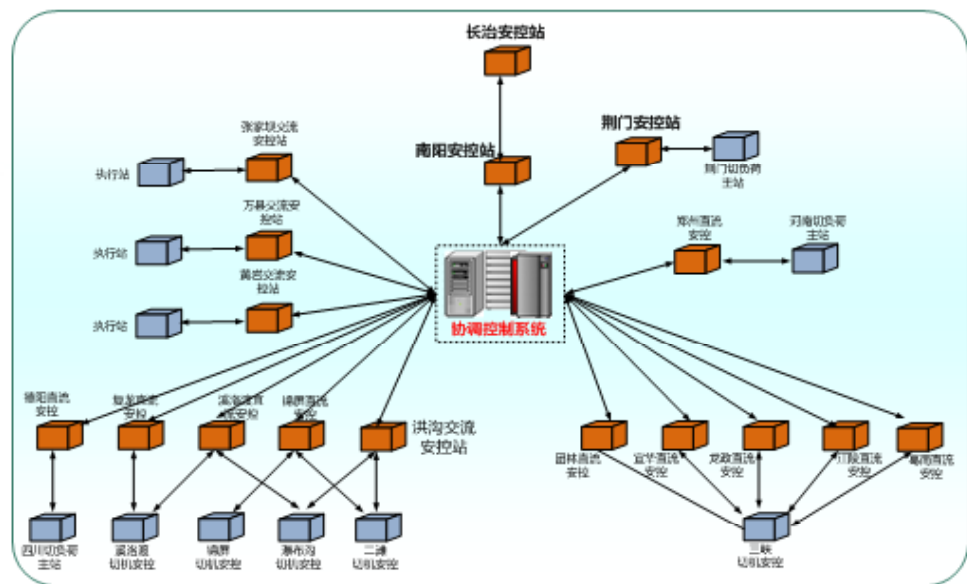
1. SCADA、EMS、WAMS等电网状态传感系统构成信息资源池，提供多时间尺度信息，作为安全稳定柔性控制的“神经系统”。
2. 电网中的可控设备包括：本地安控、直流控制系统、FACTS装置。
3. 基于多信息源平台，**协调控制**电网中各种可控设备；利用FACTS设备和直流系统的快速调节，实现电网状态的**连续控制**；通过对电网状态的实时监测和分析，实现**响应控制**。

3.2 安全稳定柔性控制关键技术

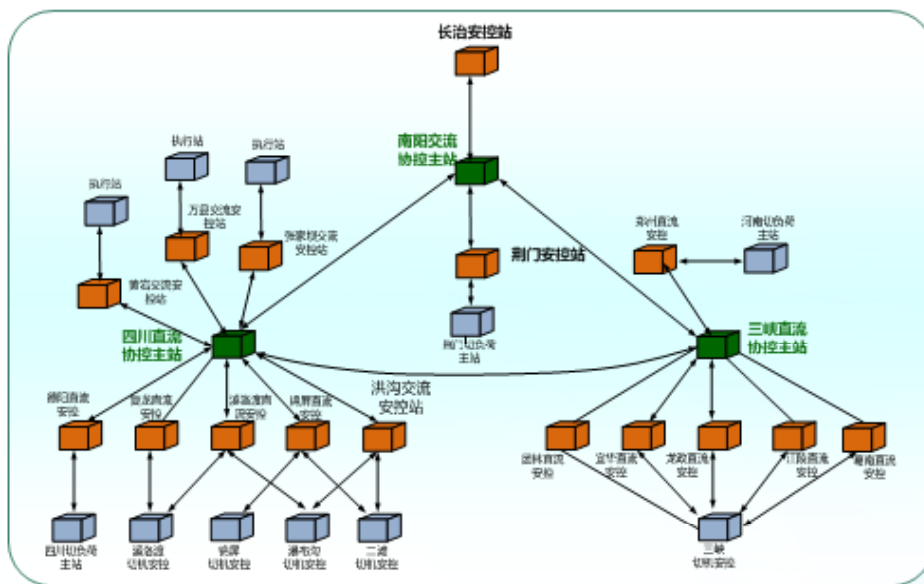


- 1. 提取电网实时动态特征**：基于电网多信息源数据，分析电网的主要特征，实时识别电网的稳定特性。
- 2. 确定多尺度广域控制目标**：根据电网存在的稳定问题确定广域控制目标及控制点。
- 3. 制定实时量化控制措施**：根据不同的广域控制目标，定量化协调控制措施。

三、安全稳定柔性控制系统方案



(一) 集中协调控制方案



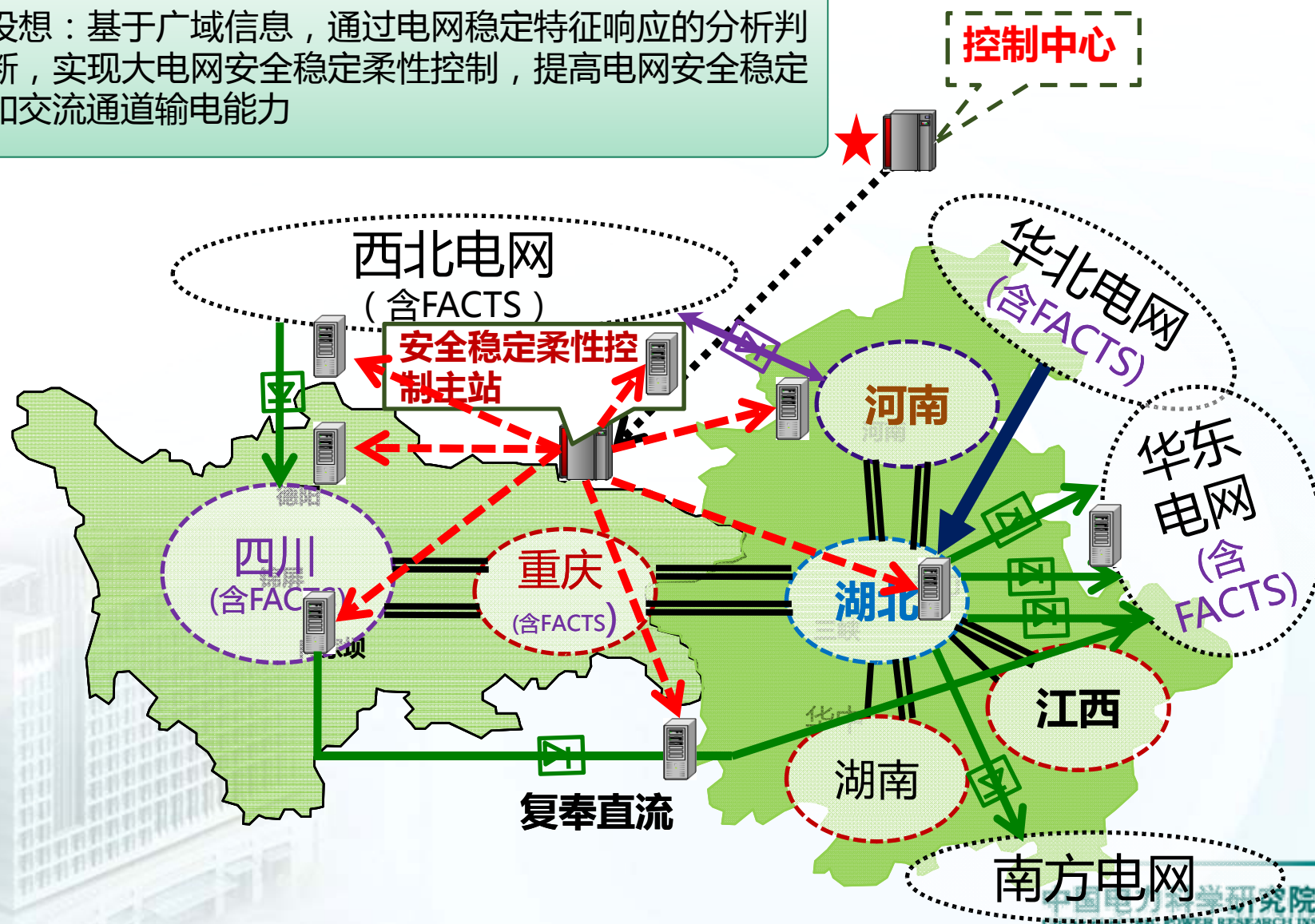
(二) 分散协调控制方案

现有安控系统是协控系统的执行站。集中协调控制系统设置1个集中协控中心站，统一对华中安控系统进行决策和控制；分散协控系统则设3个协控主站并列运行，其通信通道相对前者较短。

控制效果对比、通信通道组织、工程实施等方面的可行性分析结果表明，采用交直流集中和分散协调两种控制方案都是可行的，可同时协调控制多回直流和多个交流输电通道。

三、安全稳定柔性控制—稳定柔性控制设想

设想：基于广域信息，通过电网稳定特征响应的分析判断，实现大电网安全稳定柔性控制，提高电网安全稳定和交流通道输电能力



三、安全稳定柔性控制—交直流协调控制

| 控制技术 | 直流不参与控制 | 德宝直流故障直接驱动直流紧急控制 | 示范工程功率波动驱动多回直流协调控制 |
|-------|---------|------------------|--------------------|
| 切负荷级别 | 大 | 中 | 无 |



- ◆ 枯水期，德宝直流和特高压交流示范工程向华中电网送电，输电能力相互耦合。德宝直流故障后，有无交直流协调控制，集中切负荷量相差悬殊。
- ◆ 多回直流参与的多目标交直流协调控制效果更好。

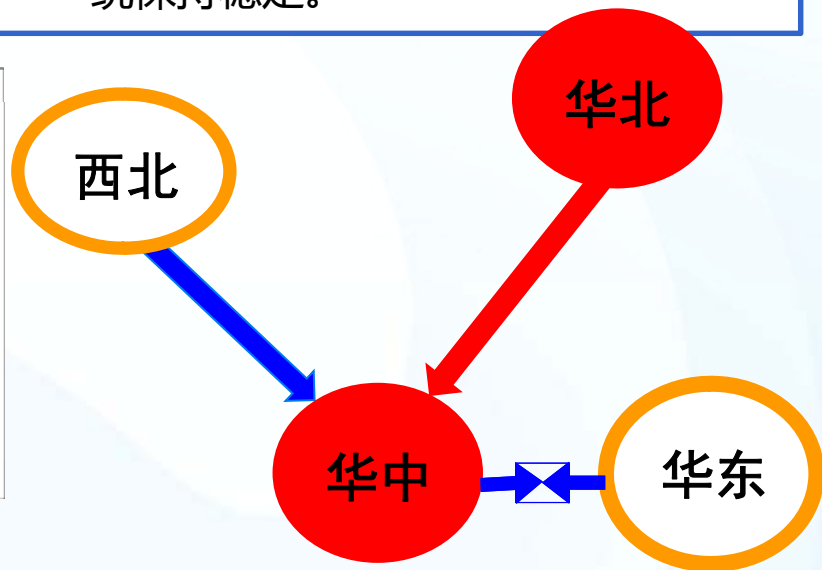
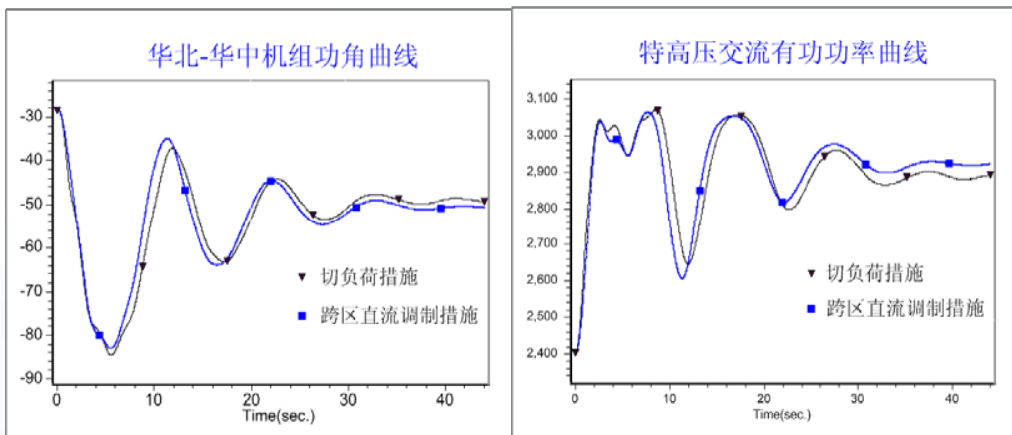
接续式混合交直流电网迫切需要新型交直流综合协调控制技术

三、安全稳定柔性控制—交直流协调控制

例：直流故障需要跨区直流协调控制

| | |
|------------|-------------------|
| 德宝直流双极闭锁 | |
| 受端 安控措施 | 或切四川2150MW负荷 |
| | 或降华中送华东直流功率1400MW |

- 德宝直流双极闭锁后华中出现大量功率缺额，华北潮流通过交流系统向华中转移。
- 通过速降华中送华东直流功率可使系统保持稳定。



$$P_{\text{tie}}(t_p) = \Delta P_{\text{tie}}(t_p) + P_{\text{tie}}(0) = \Delta P \frac{H_{\Sigma 2}}{H_{\Sigma 1} + H_{\Sigma 2}} \cdot (e^{-\pi\xi/\sqrt{1-\xi^2}} + 1) + P_{\text{tie}}(0)$$

三、安全稳定柔性控制—交直流协调控制

大容量功率缺额或盈余造成的频率稳定问题

华北-华中联网阶段，华中电网从华北电网受电500万千瓦（负荷水平为8200万千瓦，特高压解列后，华中电网需切除大量负荷。

安控切负荷措施：华中电网切除约负荷400万千瓦

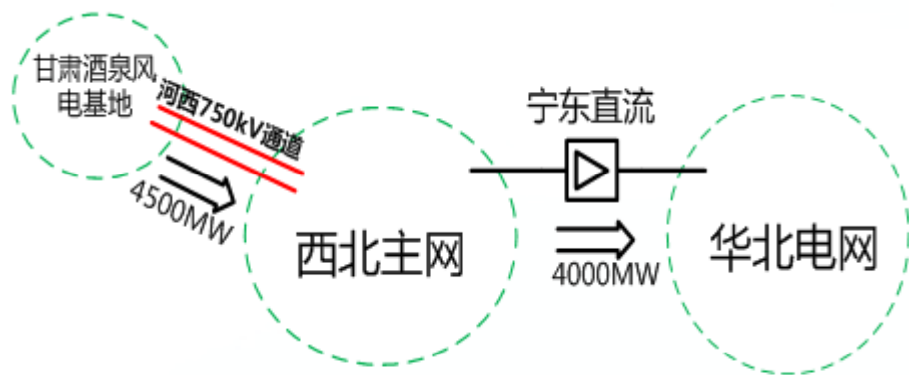
协调控制措施：华中切电泵120万千瓦，直流速降150万千瓦

现有安控系统现有安控系统需切负荷438万千瓦，占华中全网总负荷的5.3%。

而采用切电泵和直流紧急速降的协调控制后，华中电网无需损失负荷。

三、安全稳定柔性控制—交直流协调控制

例：交流故障需要跨区直流协调控制



西北甘肃酒泉风电基地通过750kV通道送电西北主网，西北主网通过±660kV宁东直流送电至华北电网，构成典型的跨区接续式交直流混联电网结构。

河西750kV通道N-2故障下，西北主网功率缺额450万千瓦，需切负荷250万千瓦，措施实施困难。若故障后紧急降低宁东直流功率50%，只需切50万千瓦负荷。华北电网负荷1.9亿千瓦，能够承受200万千瓦功率缺额。

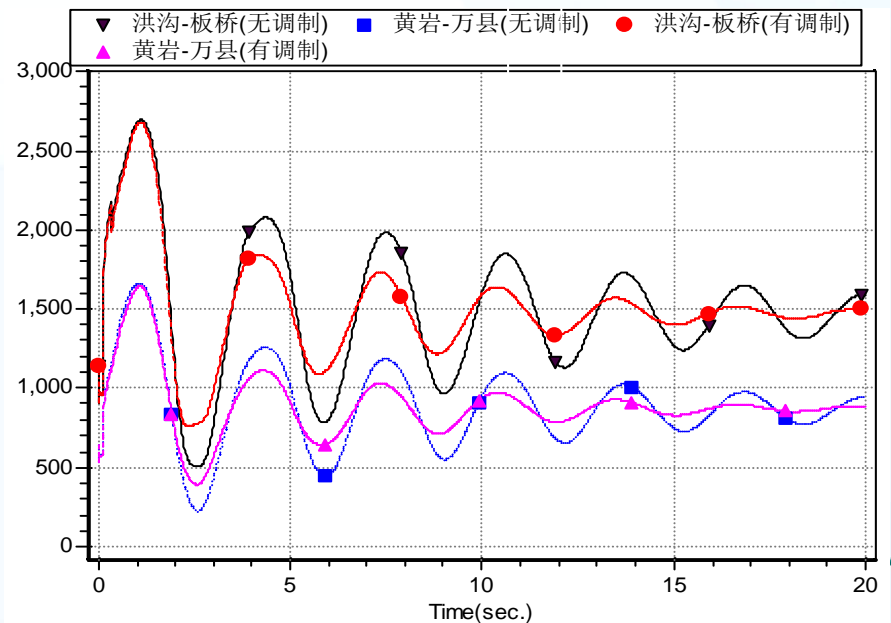
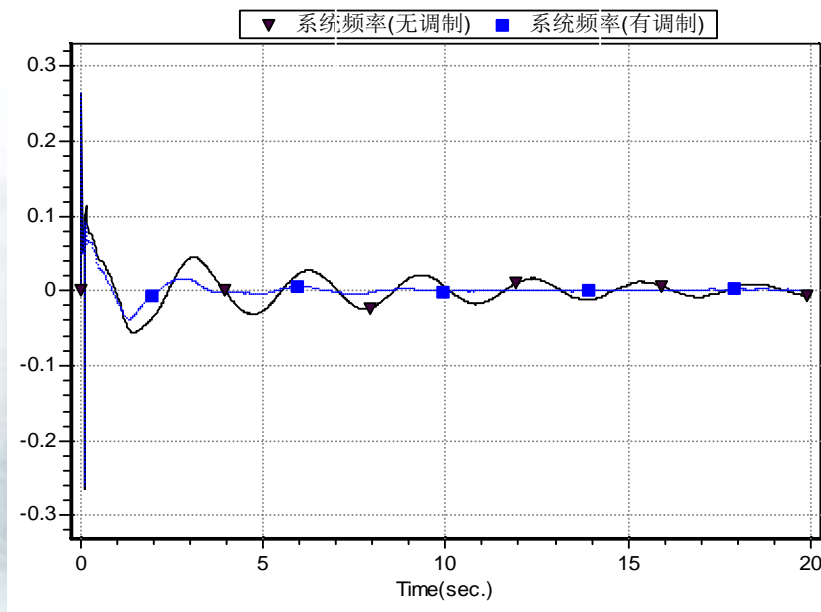
| 故障 | 措施 | 协调控制 |
|--------------|---------------|--------------|
| 河西750kV通道N-2 | 西北主网切2500MW负荷 | 无 |
| | 西北主网切500MW负荷 | 宁东直流紧急降功率50% |

需要发展跨大区协调控制技术

三、安全稳定柔性控制—提高阻尼水平

大容量水电送出通道弱阻尼低频振荡

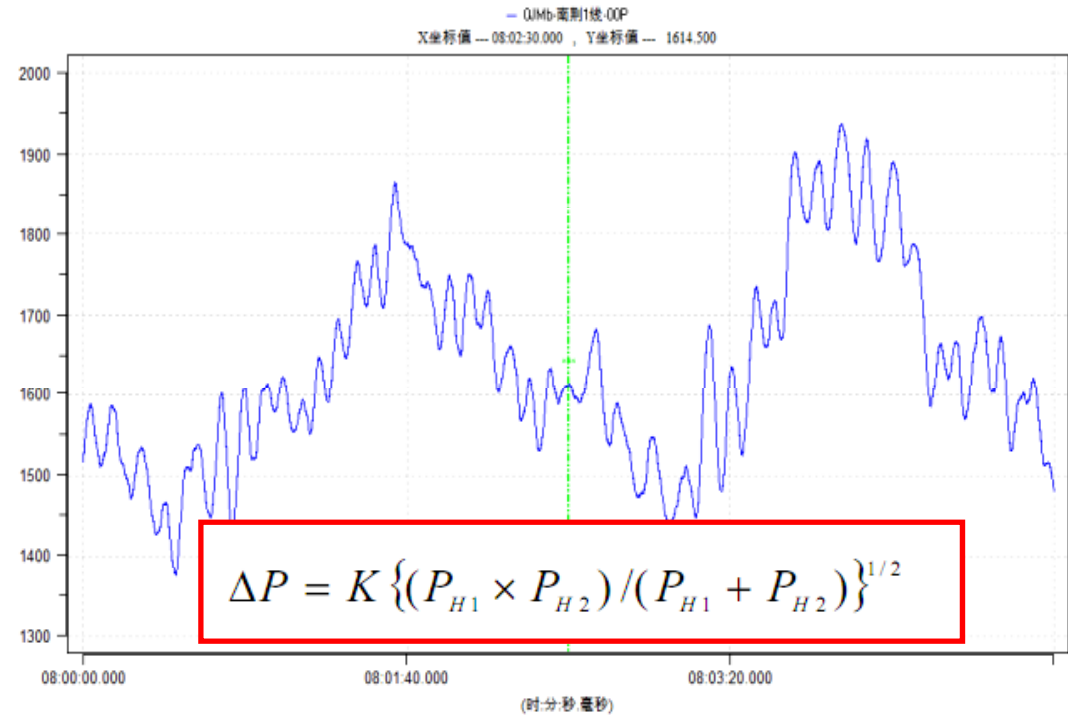
四川电网是我国最大的水电送出地区电网，且交直流联网混杂，交流送出通道弱阻尼低频振荡特征明显。发电机侧的阻尼控制对于抑制这类低频振荡的能力有限，通过向上直流、锦苏直流、溪洛渡直流多直流协调阻尼控制可以提高交流外送断面阻尼水平，提高输电能力。



三、安全稳定柔性控制—降低随机功率波动

大规模交流联网断面随机功率波动问题（非低频振荡）

右图为联络线上功率的典型PMU录波曲线，可以看出，功率波动是由两种成分叠加而成，其中主要成份的波动频率低于0.005Hz，幅值大约为±280MW。由于其波动频率远低于



低频振荡的频率（华北-华中电网主导振荡模式的振荡频率约为0.11Hz），可以确定这种功率波动并非由低频振荡引起的，而是一种随机的不规则功率波动。

三、安全稳定柔性控制—降低随机功率波动

大规模交流联网断面随机功率波动问题突出

随着交流联络线两端大区电网规模（发电容量和负荷容量）的不断增大，因不规则负荷波动引起的交流联络线的随机功率波动随之增大。以华北电网、华中电网为例，这两个大区电网的最大用电负荷都在100GW以上。两网15分钟爬坡负荷差平均为37.5万千瓦，最大可达150万千瓦以上，在联络线产生平均为22万千瓦，最大超过89万千瓦的潮流波动，是联络线功率波动产生的重要原因。（电网自然特性）

现有的控制手段只能将随机功率波动幅值降低至30~60万千瓦。通过控制速度很快的直流控制系统来跟踪联络线功率波动，将进一步降低随机功率波动的幅值，提高安全稳定裕度。

结语



- **安全稳定柔性控制技术是智能电网技术的重要体现。**
- **安全稳定柔性控制技术将从不同层面、多时间尺度实现对电网的连续、平滑控制，使电力系统的运行更加柔性化、智能化。**
- **期待着控制理论与控制工程领域的专家学者为我国智能电网的发展提供先进的理论与技术。**

报告结束
谢谢！