



# 数字(智能)电网及其工程实现



清华大学电力系统国家重点实验室

数字电力系统研究室

2009.3





DPS

# 提纲

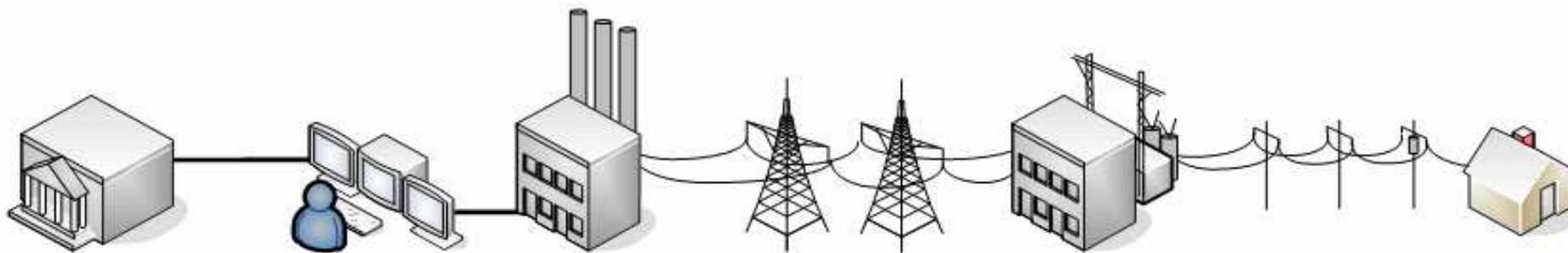


- 数字(智能)电网定义
- 数字(智能)电网工程实现
  - 方法论
  - 控制目标与控制基础
  - 核心技术
  - 初步实现
- 数字(智能)电网实践



## 智能电网是全球电力行业的新话题

不同的国家和组织都在以自己的方式研究和实践智能电网,希望最终实现更加安全、可靠、环保、经济的电力系统运行



### 发电

- 优化的电厂选址
- 鼓励可再生能源投资
- 严格的排放管理
- 有效的成本管理
- 可靠经济的设备管理
- 灵活的竞价策略

### 输电

- 优化的电网规划
- 具有“自愈”特征的坚强电网
- 安全、可靠、节能、经济的优化调度
- 适应各种类型的发电资源
- 更高的设备利用水平
- 更低的传输网损
- 可靠经济的设备管理
- 更可靠的电力传输

### 配电

- 科学经济的配网规划
- 自适应的故障处理能力
- 更迅速的故障反应
- 更可靠的电力供给
- 更出色的电能质量
- 可靠经济的设备管理
- 支持分布式能源和储能元件
- 与用户的更多交互

### 售电

- 更具竞争力的市场营销策略
- 针对用户需求定制服务
- 允许用户向电网提供多余的电力
- 根据用户的信用控制电力的供给

# 国内外探索与实践

## 国内探索与实践



2000年 清华大学《数字电力系统》揭开数字电力系统的序幕



2005年 国网公司委托南自院开展数字化变电站及数字化电网关键技术研究框架的研究工作。



2004~2005年 南方电网委托清华大学开展《数字南方电网规划》方面研究



2007年 华东电网、华北电网等开始关注智能电网

# 国内外探索与实践

## 国外探索与实践



2003年 美国能源部 Grid 2030



2004年 GridWise组织 GridWise



2005年 美国电科院 Intelligrid



2006年 欧洲技术论坛 SmartGrid



## DPS

### 美国智能电网的定义

- 实现自愈
- 在物理上和计算机攻击上更安全
- 支持分布式发电的大规模应用
- 与用户友好的互动
- 可帮助增加电网输变电能力，降低电力成本，更加经济高效

### 欧洲智能电网的定义

- 以客户为中心
- 支持分布式和可再生能源的接入
- 负载和电源的本地交互
- 高级自动化和分布式智能
- 灵活的电网运营
- 面向服务的架构
- 更可靠、安全的电力供应

不同的国家和地区建设智能电网的驱动因素都不同，定义亦有差别



角度:从各自未来发展需求进行定义

欧美智能电网的特征

**自我修复:** 出现故障时, 能够迅速识别、分析故障, 快速复役

**与电力用户互动:** 将电力用户使用的设备纳入电网设计和电网运营

**反外力破坏和攻击:** 具有规避和抵抗物理破坏和信息攻击的能力

**满足高质量的电能需求:** 高质量不间断的满足居民和生产用电

**适应多种电源送电需求:** 满足各种电源分布模式和发电模式的需求

**支持成熟电力市场:** 支持充分竞争的电力市场

**资产优化:** 使用信息系统和监控技术持续优化资本性资产建设, 降低运维成本



# DPS

## 角度：从各自未来发展需求进行定义

### 问题？

- 1 需求是不断变化的，因时因地而异；我国有自己特殊背景和特殊要求。
  - 2 没有指明如何来满足需求？
  - 3 各个需求之间是否会有矛盾？有矛盾时如何同时满足多个需求？
- ⇒ 至今没有统一的智能电网定义

自我修复，... 能够迅速识

与电...  
设备结

力破坏和攻击：具有规避和抵抗  
坏和信息攻击的能力

满足  
间断自

种电源送电需求：满足各种  
布模式和发电模式的需求

支持  
的电

资产优化：使用信息系统和监控技术持  
续优化资本性资产建设，降低运维成本



# DPS



- 由于国情不同，我国未来电网建设必定具有自己特殊背景与特殊需求，是否应该给“**中国智能电网**”下一个定义？
- 是否智能电网在不同地方应有不同定义？
- 总结国内外智能电网实践，我们认为：
  - 智能电网不仅应该关注未来电网发展外部需求，更应关注其建设**根本目标与内在本质**
  - 进一步，应从其根本目标与内在本质出发给出智能电网定义
  - 这一定义将不仅适用于中国电网，也将适用于欧美等全世界各国电网





# DPS



- 电网最高智能形式：
  - 多指标自趋优运行
    - **多指标**：指安全、优质、低耗、清洁等多种电网运行指标
      - 可定义**电网运行综合指标体系**加以规范和量化
    - **趋优**：指令人满意状态
      - 追求最优不仅代价高昂，而且实际上无法达到
    - **自**：闭环自动控制
      - 协同所有可控资源
      - 协同不同时间段
      - 反映了最高智能





# DPS



- 具有“多指标自趋优运行能力”的电网是**真正意义上的智能电网**
  - 涵盖了欧美智能电网全部内容，包括了“自愈”概念，也包括了“安全、优质、低耗、清洁”概念
  - 指标体系有自适应性，可由**电网运行综合指标体系**加以量化
  - 反映了电网运行的**最终目标**和本质特性
- 因欧美智能电网概念繁乱纷纭，称这样的电网为“数字(智能)电网”



## 数字(智能)电网定义

# DPS



具有多指标自趋优运行能力的电网

愿景:把电力大系统控制得如同一台智能机器人

以电力混成控制论  
为理论基础

以标准化数据建模  
为技术支撑

以信息全局共享、  
智能决策和协同调  
控为手段



DPS

# 提纲



- 数字(智能)电网定义
- 数字(智能)电网工程实现
  - 方法论
  - 控制目标与控制手段
  - 核心技术
  - 初步实现
- 数字(智能)电网实践





## 如何才能实现电网多指标自趋优运行呢？

理论基础和方法论是什么？如何做到？

只有“事件驱动”才能做到这一点。

——将一切不满意状态均定义为事件

——事件驱动控制，控制消除事件

——消除了一切事件系统必然是趋优运行的

怎么实现事件驱动？

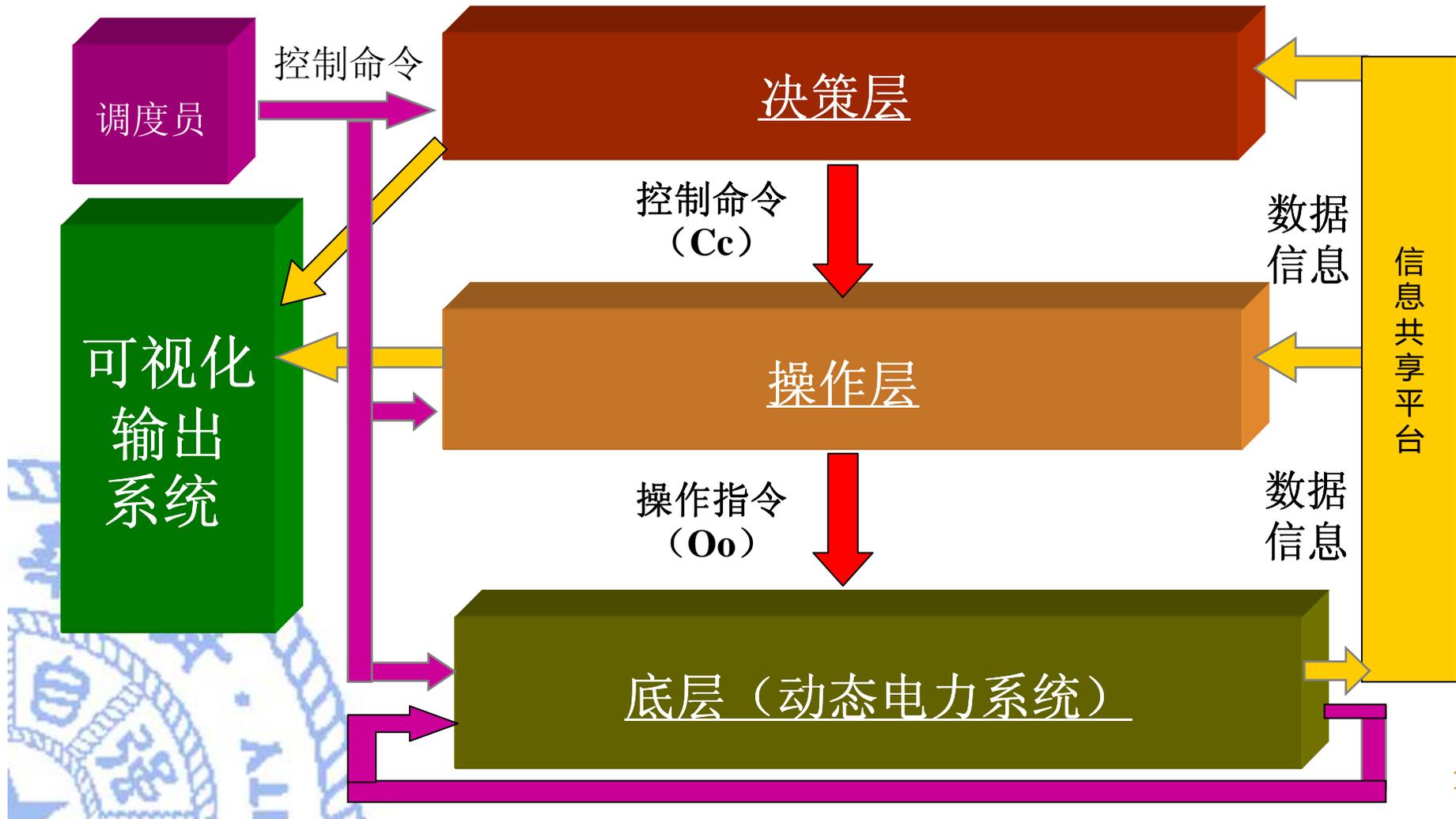




# 怎么实现事件驱动?



## DPS





# DPS



- 上述控制系统包含了连续运行的动态电力系统和标准的时间离散变量，是典型的混成系统结构。
- 称这样系统为电力混成系统。
- 称这样的控制理念及由此产生的一整套方法论为“**电力混成控制论**”。
- 这一方法论为应对电网发展中诸多问题，如**大规模风电接入下电网安全稳定问题**，提供了统一理论框架。





DPS

# 提纲



- 数字(智能)电网定义
- 数字(智能)电网工程实现
  - 方法论
  - 控制目标与控制手段
  - 核心技术
  - 初步实现
- 数字(智能)电网实践





# 控制目标?



## DPS

- 三类目标：安全、优质、经济
- 正与某电网联合研究：电网运行综合指标体系
  - 电网多指标自趋优中的“多指标”，可由电网运行综合指标体系加以量化
  - 进一步，可对各个电网“智能”程度加以量化评估。





# 控制手段?



DPS

- 协同控制电网中所有可控资源
- 目前已实现AGC和AVC的协调控制
- 未来希望协同控制：
  - 继电保护定值
  - 快速燃气轮机
  - 风电
  - 机组起停
  - 水库调度...





DPS

# 提纲



- 数字(智能)电网定义
- 数字(智能)电网工程实现
  - 方法论
  - 控制目标与控制手段
  - 核心技术
  - 初步实现
- 数字(智能)电网实践





# DPS



## 核心技术

1

电力混成控制论

2

电网运行综合指标体系

3

新型状态估计技术

4

动态测量单元(RDTU)

5

全图形自生成及其三维可视化



# DPS

## 新型状态估计技术



- 各级调度中心普遍有提高状态估计收敛率、合格率的急迫需求。传统状态估计方法（现状）：
  - 以残差平方和最小为目标，存在数据污染问题，无法准确识别坏数据，合格率较难进一步提高；
- 基于全新理念，提出了新的状态估计方法
  - 坏数据识别率高、计算速度快，不需做坏数据校验、权重因子设置，调试和维护极为简单
- 大量算例证明：
  - 收敛率100%，计算速度在1秒以内
  - 没有坏数据时，合格率与最小二乘相当；
  - 当存在坏数据时，合格率远超包括最小二乘在内的所有常用状态估计方法。

The logo for DPS (Data Processing System) features the letters 'DPS' in a bold, blue, sans-serif font. The letters are filled with a horizontal line pattern. To the left of the letters is a stylized blue icon of a power transmission tower. The entire logo is positioned above a double-line horizontal bar that spans the width of the slide.

- 先进状态估计方法
- 基本思想：
  - 任给一个相容的系统状态，由该状态可以计算出测点处与量测值相对应的估计值。
  - 若某测点处量测值与估计值接近(满足合格率计算公式要求)，则认为该测点“投票同意”这一状态；否则，认为该测点“投票反对”这一状态
  - 认为：最多测点赞同的状态为系统真实状态
  - 推论：若绝大多数点赞同某一状态，则投票反对该状态的测点必为坏量测点。





DPS

## 动态测量单元 (RDTU) 研究

核心技术

### □ 实时监控系統现状

#### □ RTU+SCADA+EMS

□ 慢 (2~5秒扫描一次)，只能满足稳态要求

#### □ RTU/PMU + SCADA + EMS/WAMS

□ 数据不全，无法获取足够多、快的数据

#### □ PMU + WAMS + 高级应用

□ 上传数据量大，刷新速度过快，对硬件要求高

□ 投资大，且不能充分利用已有投资

□ 解决途径：RDTU+AEMS，0.2秒周期，先进状态估计，  
时间序列数据库，真正满足实时动态监控系统需求



DPS

## □解决途径：RDTU

- RDTU，在已有RTU进行改造，上传绝对时标信息和相位信息，改造费用低廉

- 0.2秒扫描一次，对测量单元、通讯系统、服务器等硬件要求不高，现有通讯网络基本满足要求

- 满足电网实时动态监控系统的真正需求

## □应用关键：

- 状态估计系统应精度高，应0.2秒内计算完毕

- 采用时间序列数据库来满足大量实时数据接收和存储问题



DPS

## 图形自生成及三维可视化技术

核心技术

- 基于公共信息模型，自动生成：
  - 潮流单线图、基于GIS的单线图、厂站接线图
  - 更彻底的“图模库一体化”
    - 从模型可自动生成图形和库，无需额外存储、传输
- 基于JOGLE (Java+OpenGL) 技术，实现图形系统
  - 全三维图形系统
  - 适应各种硬件平台和软件平台
  - 显示速度快。每秒播放帧数大于24帧（一般在50~100帧）





# 目标：满足闭环控制要求

## DPS

- 闭环控制对采集系统速度、精度，**对状态估计的合格率、坏数据识别率、计算收敛率、计算速度**都提出了苛刻的要求
- 我们希望通过以上技术等研究
  - 数据采集周期缩减到0.2秒
  - 坏数据识别率、计算收敛率都达到100%
  - 状态估计计算能在0.1秒至0.2秒内完成
  - 可视化效果象观看电影一样流畅
- [状态估计结果可视化示例](#)





DPS

# 提纲



- 数字(智能)电网定义
- 数字(智能)电网工程实现
  - 方法论
  - 控制目标与控制手段
  - 核心技术
  - 初步实现
- 数字(智能)电网实践





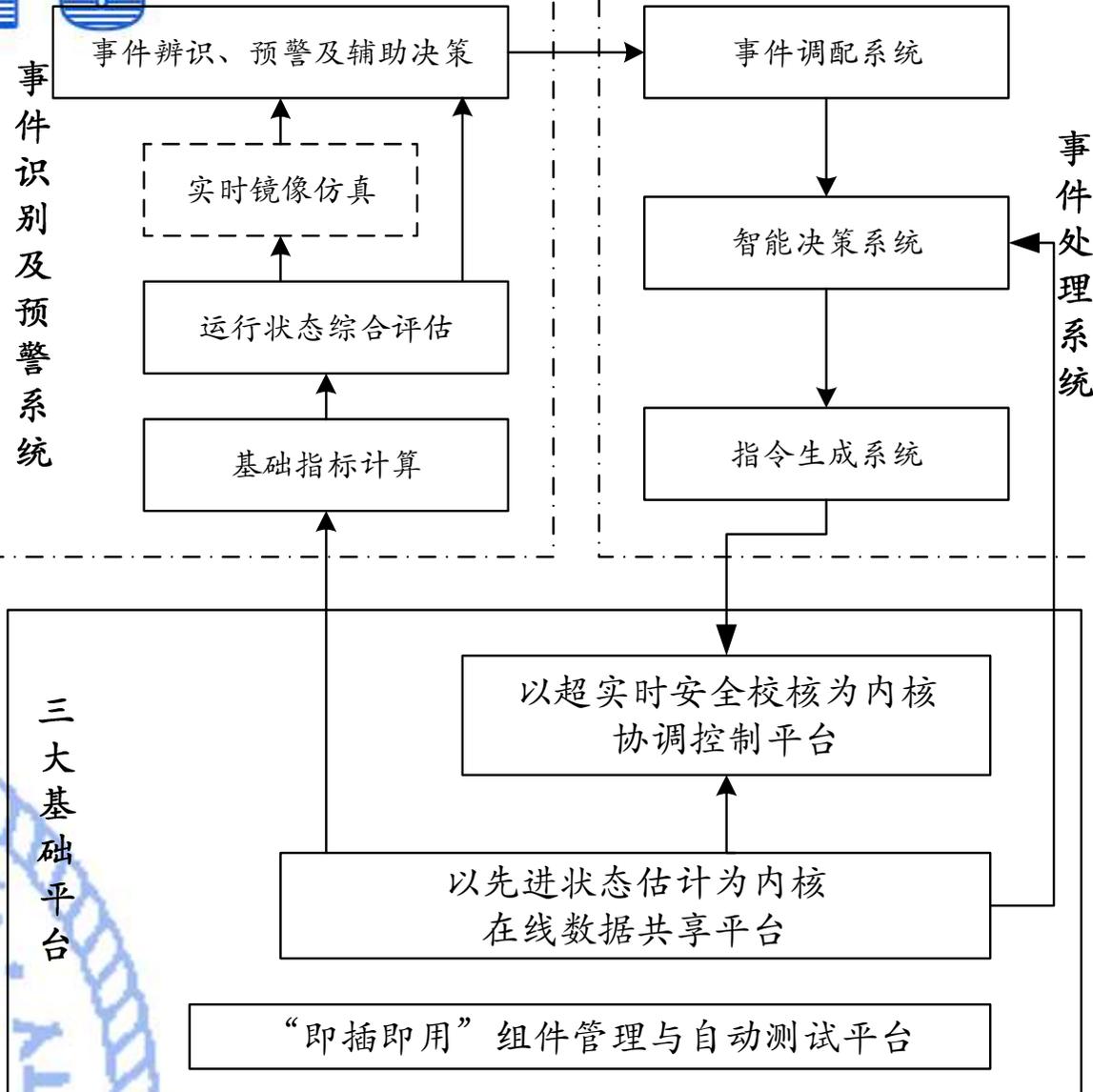
# DPS

- AEMS系统是为实现数字(智能)电网而做的初步工程尝试!
- 系统已于2007年4月起在上海电网投入运行, 至今运行稳定。
- AEMS是为实现电网多目标(安全、优质、经济)自趋优运行而实现的一套自动化系统。
- 主要内容包括:
  - 一大理论、二大系统、三大平台



# AEMS组成：一大理论、二大系统、三大平台

## DPS



两大系统：  
实现  
多指标  
自趋优运行

三大平台



## 三大基础平台

DPS



- “即插即用”组件管理与自动测试平台
  - 基于SOA体系结构
  - 接口标准化
  - 组件依赖关系自动管理
  - 组件在线自动测试
  - 从而实现组件即插即用和在线升级





## 三大基础平台

# DPS



### □ 以超实时安全校核为内核的协调控制平台

- 对网内所有可控资源状态进行统一监视
- 进一步，实现网内所有可控资源的协调控制，包括AGC、AVC的协调控制
- 保证控制指令的有效性、合法性和安全性

### □ 以先进状态估计为内核的在线数据共享平台

- 可为其他分析应用系统提供以标准格式封装的准确的实时数据，大幅提升EMS/AEMS的开放性
- 大幅提升状态估计的收敛率和合格率，将状态估计计算周期由分级提升至秒级，并极大减轻维护工作量

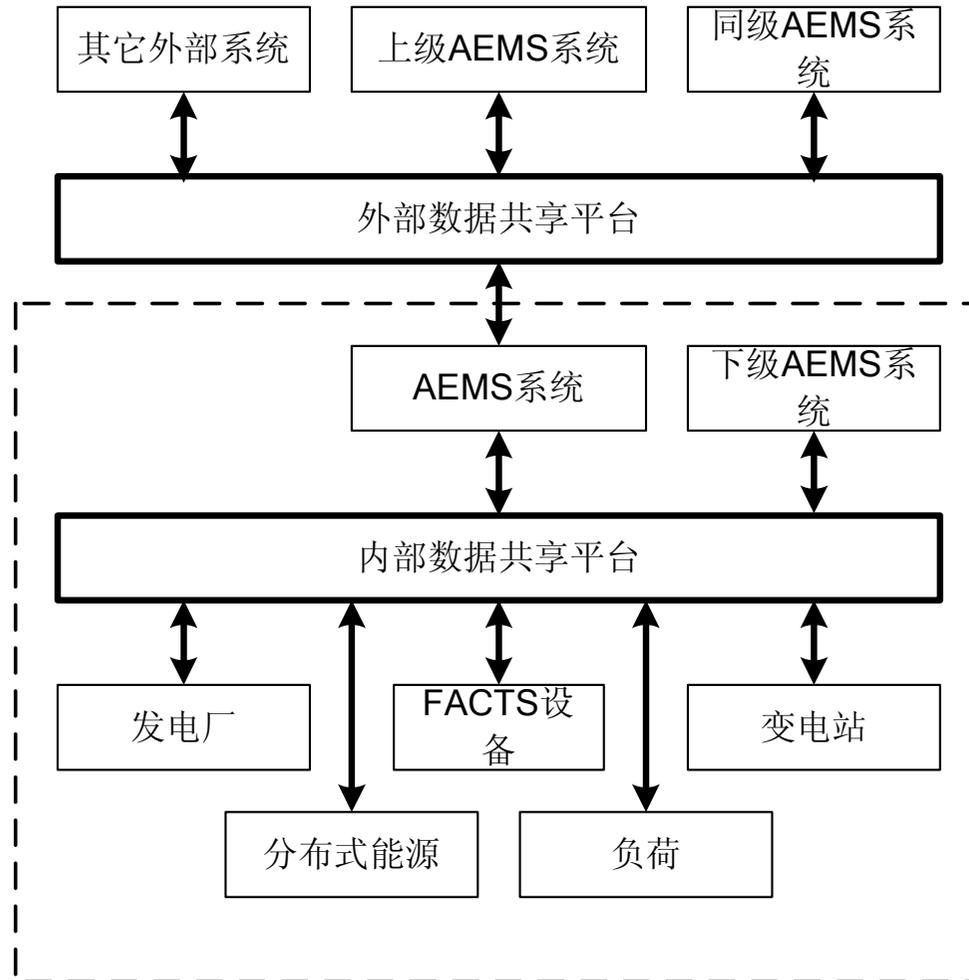




# DPS



**多级AEMS  
(国、网、省、  
地、县)  
构成统一  
调控体系**





DPS

# 提纲



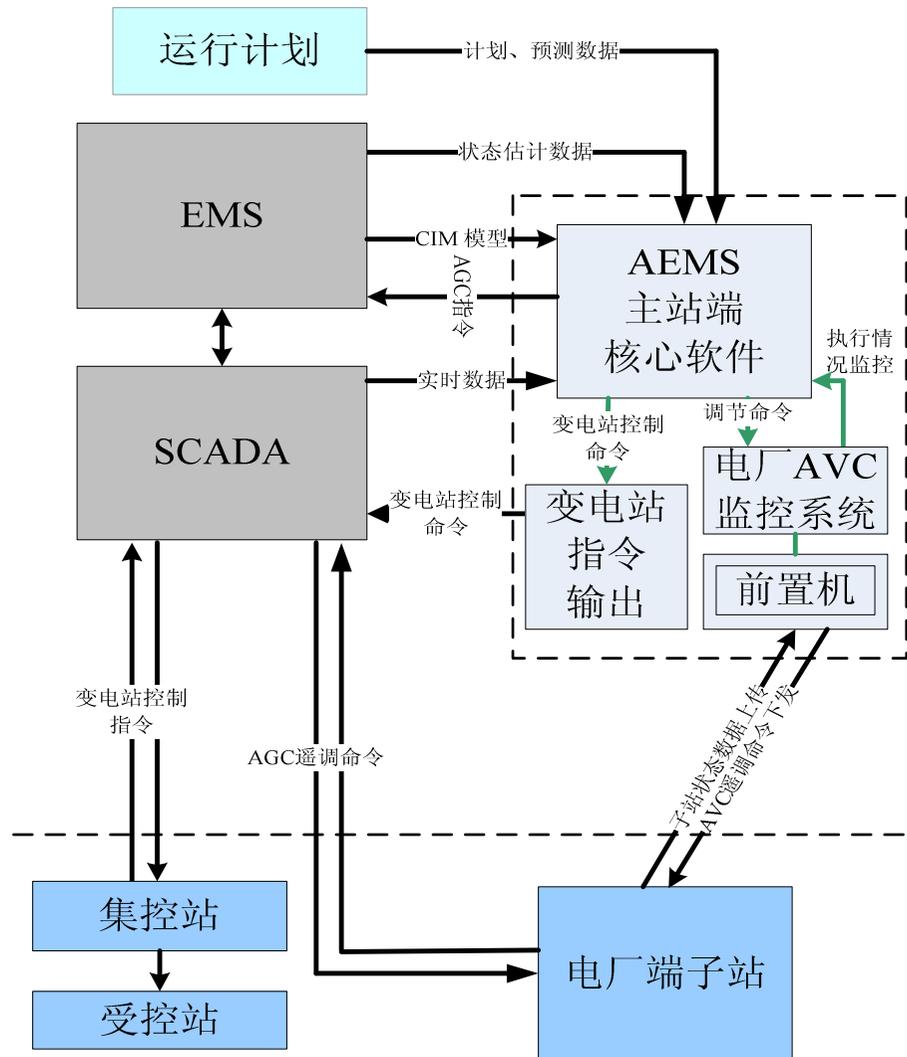
- 数字(智能)电网定义
- 数字(智能)电网工程实现
  - 方法论
  - 控制目标与控制手段
  - 核心技术
  - 初步实现
- 数字(智能)电网实践





# DPS

## 上海电网AEMS概览



# 应用情况：2007年4月23日期AEMS一期工程完成

# DPS

AEMS 基础  
安全简单的使用  
控制集成  
提高稳定水平  
系统的经济运行

**AEMS**  
AEMS混成控制系统

运方处	调度处	自动化处
电压计划 发电计划	超短期负荷预测	用户管理 控制设备维护 任务调度 运行情况监视

- AEMS与混成自动控制系统实现的安全控制功能，将提高系统运行的稳定性和品质。
- 混成自动控制系统将AVC和AGC控制集成在一个统一的平台之上，并进行综合优化。
- AEMS系统将合理分配和充分利用系统中各发电机的有功和无功储备，减少运行费用和额外无功补偿设备投资。
- AEMS系统有助于提高整个系统的安全稳定水平。
- AEMS系统与混成自动控制系统可以有效降低网损，有利于上海电网的经济运行。

Copyright © 2007 清华大学

## 2007年8月16日超短期负荷预测



运行稳定可靠，经济效益和社会效益显著

- 系统于2007年4月23日期投入试运行
- 试运行以来，系统运行一直稳定可靠

### 主要创新

- 首次实现了OPF在线工程控制
- 无先例地实现了AGC与AVC协同动作
- 原创性地提出了先进能量管理系统（AEMS）的理念、理论和方法



DPS

运行稳定可靠，经济效益和社会效益显著

- 系统于2007年4月23日期投入试运行
- 试运行以来，系统运行一直稳定可靠

主要创新

- 首次实现了OPF在线工程控制
- 无先例地实现了AGC与AVC协同动作
- 原创性地提出了先进能量管理系统（AEMS）的理念、理论和方法

鉴定认为：  
在多目标闭环  
趋优控制方面  
达到国际领先水平！



DPS



谢谢!

