

# 大规模光伏电站并网下的电网安全与 应对措施

*Safety issue on large-scale PV integration and  
corresponding measure*

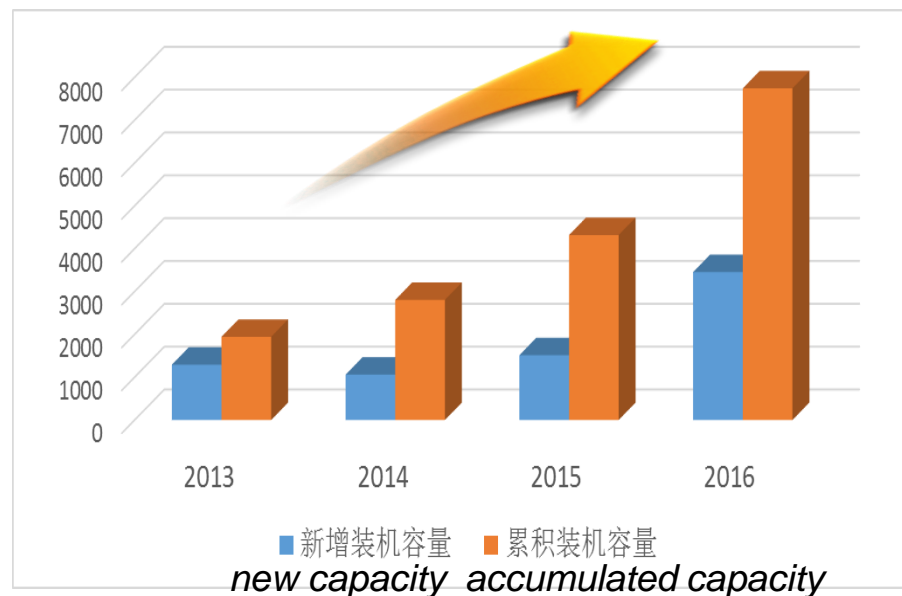
2017-11

中国电力科学研究院·新能源研究中心  
国家能源太阳能发电研发（实验）中心

CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE · NEW ENERGY RESEARCH CENTER  
National Solar Power Generation R&D (Test) Center

- 1 大规模光伏并网的安全问题** *Safety issue on large-scale PV integration*
- 2 国内外标准要求** *Domestic and oversea standard requirements*
- 3 光伏逆变器及场站建模** *Modeling PV inverter and plants*
- 4 模型参数测试及验证** *Model parameter testing and validation*
- 5 逆变器及场站建模实施案例** *Modeling Case*

### ◆ 光伏发电装机及渗透率持续增长 *PV capacity and penetration increasing*



**我国光伏产业发展迅速，装机容量在2015年已位居全球首位。光伏发电在部分区域已经成为系统中重要的电源之一。** *China PV industry grows fast and ranks first place in the world. The PV plants play important roles in power system.*

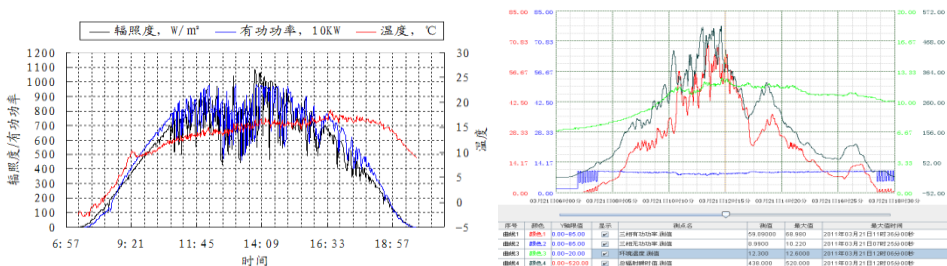
# 光伏并网问题 *Integration impact*



国家电网  
STATE GRID

## 光照资源：波动性大、随机性强，预测难

*Irradiation: fluctuation, randomness, and hard to predict*



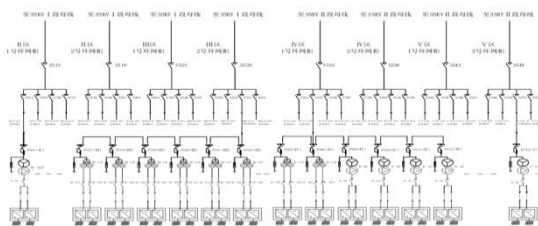
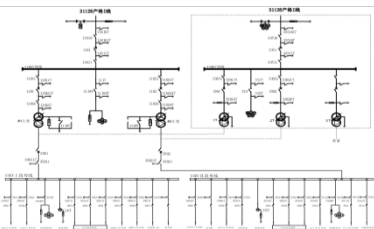
## 光伏电站：设备种类多，控制保护复杂

*Plants: massive components and complicated relay protection*

### 某200MW光伏电站 A 200MW PLANT

- 9种型号光伏逆变器，共392台
- 6种型号光伏组件

*9 types of inverter and 6 types of modules*



### 2007年以来风电主要脱网事故

#### 河北省张家口

2011年4月，佳鑫风电场内故障，造成张家口地区风电机组脱网644台。

#### 甘肃省酒泉

2011年发生3次大规模风电脱网事故；最严重一次造成风电机组脱网1278台。

#### 河南省三门峡

2008年，电铁引起电网三相电压不平衡度增加，导致风电机组脱网。

#### 内蒙古赤峰

2007年，风电机组无法耐受自身产生的谐波，大范围跳闸。

#### 吉林省白城

2010年，500kV合松线故障导致大量风电机组切除，风电出力骤降70万千瓦。

#### 山东省莱州

风电机组的电网适应性不足，电网正常运行时风电机组经常脱网。

*Important wind turbine off-grid accident since 2007*

2011年10月，青藏直流人工短路试验，出现逆变器脱网问题。

2013年11月，在青海开展750kV线路人工短路试验，光伏逆变器脱网严重。

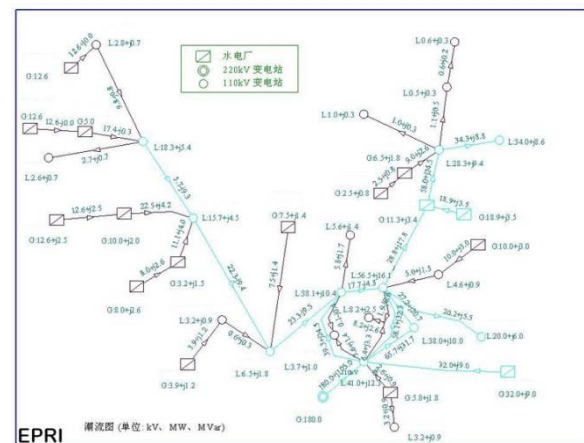
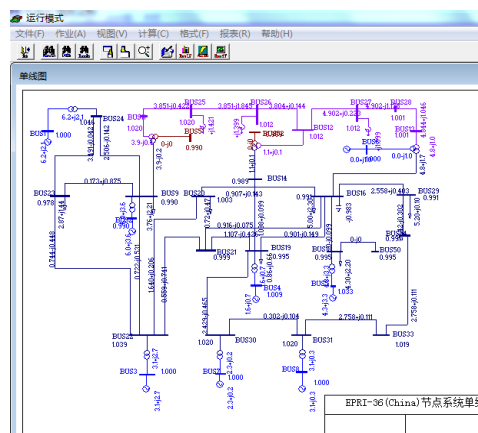
2015年7月，220kV夺乃I线故障，光伏电站大面积脱网，导致电网周波跌至49.2赫兹，损失负荷29.8兆瓦。

# 光伏并网问题 *Integration impact*



国家电网  
STATE GRID

## 调度对光伏发电接入分析的需求迫切 *Urgent demands on analysis of PV integrating*



开展并网分析  
*Integrating analysis*

区域性可再生能源规划  
*Area Renewable energy planning*

输电系统评估  
*Transmission system evaluation*

安排生产运行方式  
*arrange operation mode*

制定控制措施  
*determine the corresponding control measures*

电网安全稳定

# 光伏并网问题 *Integration impact*



国家电网  
STATE GRID

- **检测容量限制，无法开展整站并网全系列现场测试** *Limited by testing equipment capacity, the integration performance of PV station cannot be tested in field*



**因此需完善并网检测型式试验及现场检测，以充分开展光伏建模工作，用于评估电站并网特性。**

*Therefore, it is necessary to improve the type test and field test of PV inverters and plants, so as fully develop the modeling and evaluate the grid-connecting characteristics.*

- 1 **大规模光伏并网的安全问题** *Safety issue on large-scale PV integration*
- 2 **国内外标准要求** *Domestic and oversea standard requirements*
- 3 **光伏逆变器及场站建模** *Modeling PV inverter and plants*
- 4 **模型参数测试及验证** *Model parameter testing and validation*
- 5 **逆变器及场站建模实施案例** *Modeling Case*

### ◆ 我国光伏发电并网标准发展历程

*China PV standards on integration developing history*

GB/T 19939-2005 光伏系统并网技术要求

GB-Z 19964-2005 光伏电站接入电力系统技术规定

GB/T 20046-2006 光伏(PV)系统电网接口特性

*GB 19964 technical rule for connecting PV power station to electric power systems*

2005.11

2005.12

2006.01

GB/T 19964-2012 光伏电站接入电力系统技术规定  
GB/T 29319-2012 光伏发电系统接入配电网技术规定

2012.12

2009.07

光伏电站接入电网技术规定 ( 试行 )

2011.05

Q/GDW617-2011光伏电站接入电网技术规定



# 标准要求 *standard requirement*



国家电网  
STATE GRID

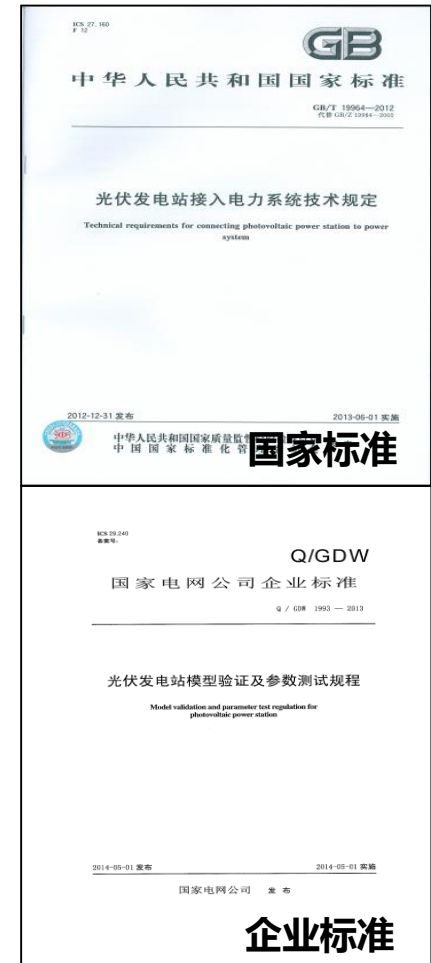
国标GB/T 19964-2012 《光伏电站接入电力系统技术规定》 *GB 19964 technical rule for connecting PV power station to electric power systems*

- 光伏电站应建立光伏发电单元（含光伏组件、逆变器、单元升压变压器等）、光伏电站汇集线路、光伏电站控制系统模型及参数，用于光伏电站接入电力系统的规划设计及调度运行。

*The models of PGU(including PV modules, inverters and PGU transformer ),resembling line and control system are required to built and used in grid plan and operation.*

国网公司企业标准Q/GDW 1993-2013 《光伏电站模型验证及参数测试规程》 *State Grid standard Q/GDW 1993 Model validation and parameter test regulation for photovoltaic power station*

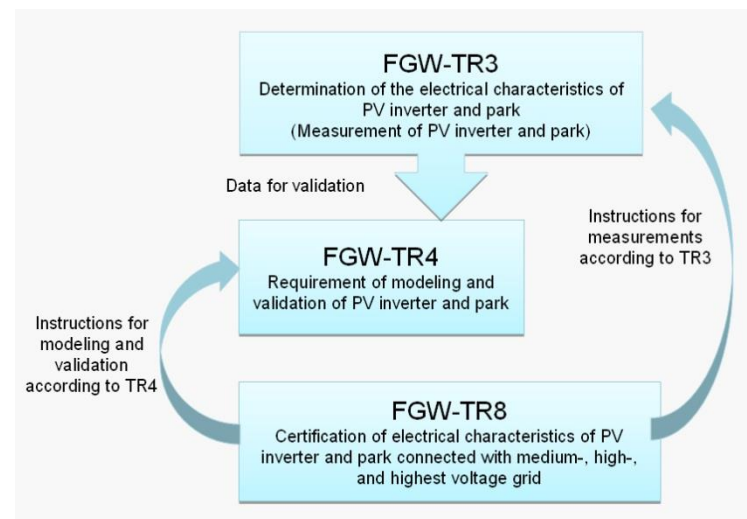
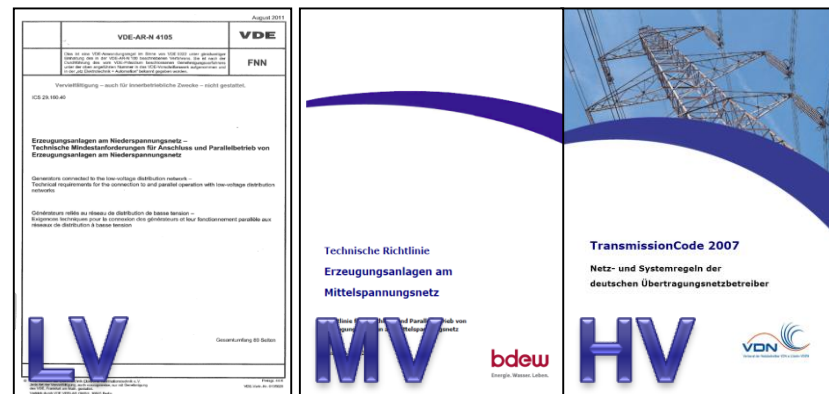
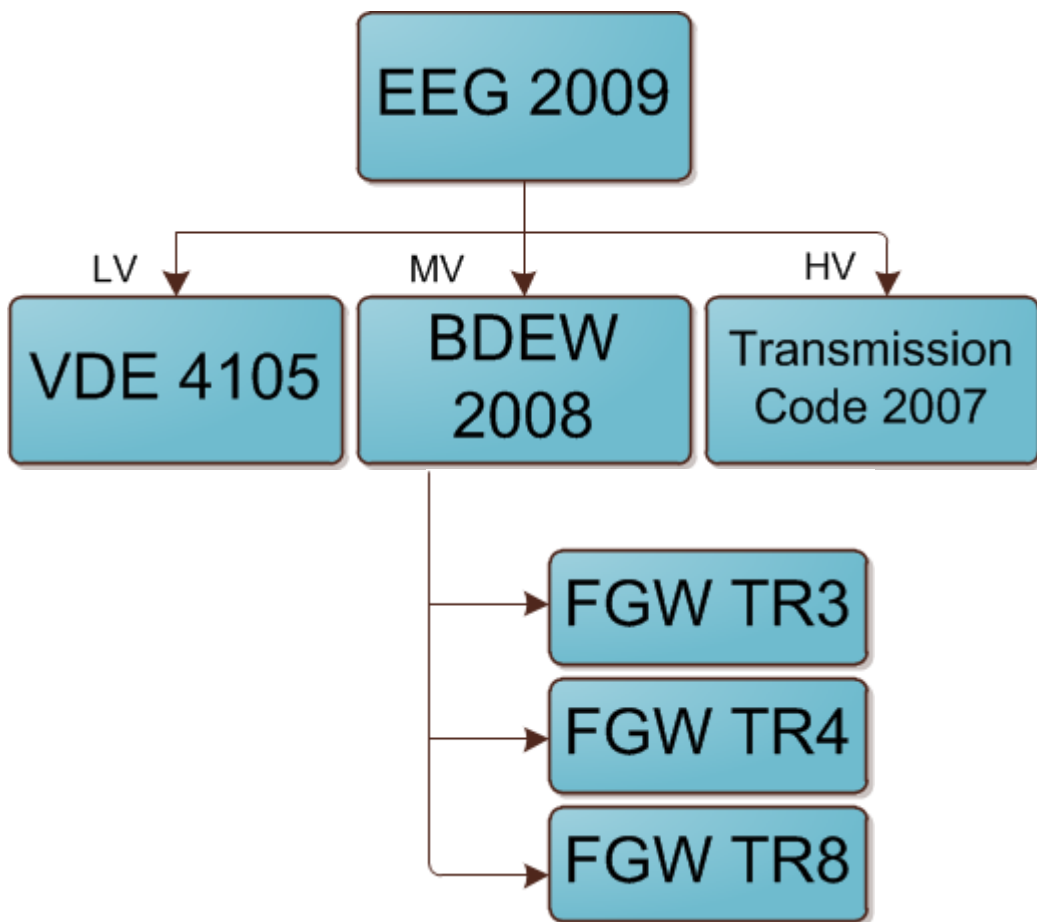
对于不同类型、不同容量的光伏方阵、逆变器构成的光伏发电单元应分别进行模型验证与参数测试。 *The PGU consists of different types modules or inverters should be modeled and parameter tested respectively*



# 标准要求 *standard requirement*



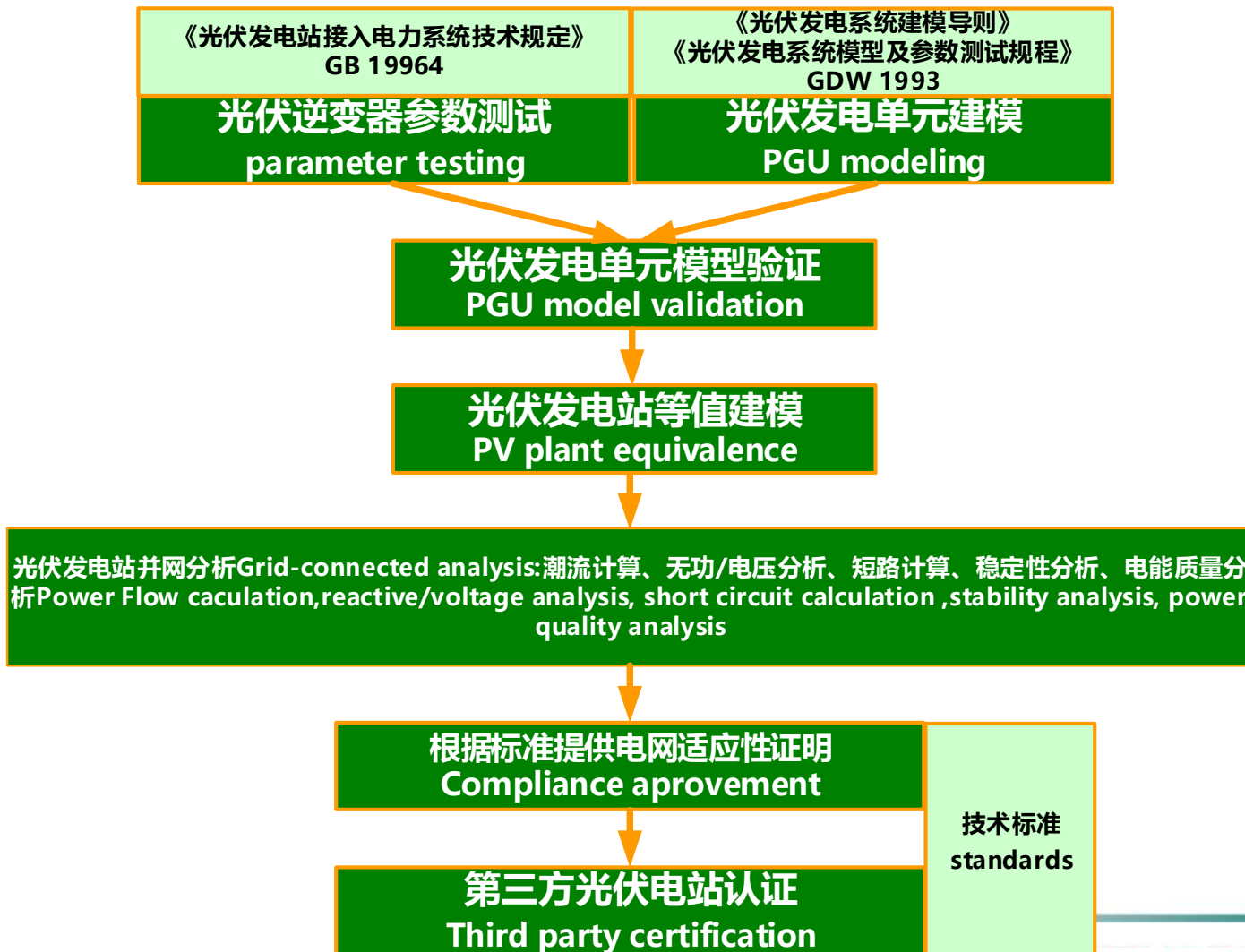
国家电网  
STATE GRID



# 标准要求 *standard requirement*



国家电网  
STATE GRID



# 内容目录 *Contents*



国家电网  
STATE GRID

- 1 **大规模光伏并网的安全问题** *Safety issue on large-scale PV integration*
- 2 **国内外标准要求** *Domestic and oversea standard requirements*
- 3 **光伏逆变器及场站建模** *Modeling PV inverter and plants*
- 4 **模型参数测试及验证** *Model parameter testing and validation*
- 5 **逆变器及场站建模实施案例** *Modeling Case*

# 光伏逆变器及场站建模

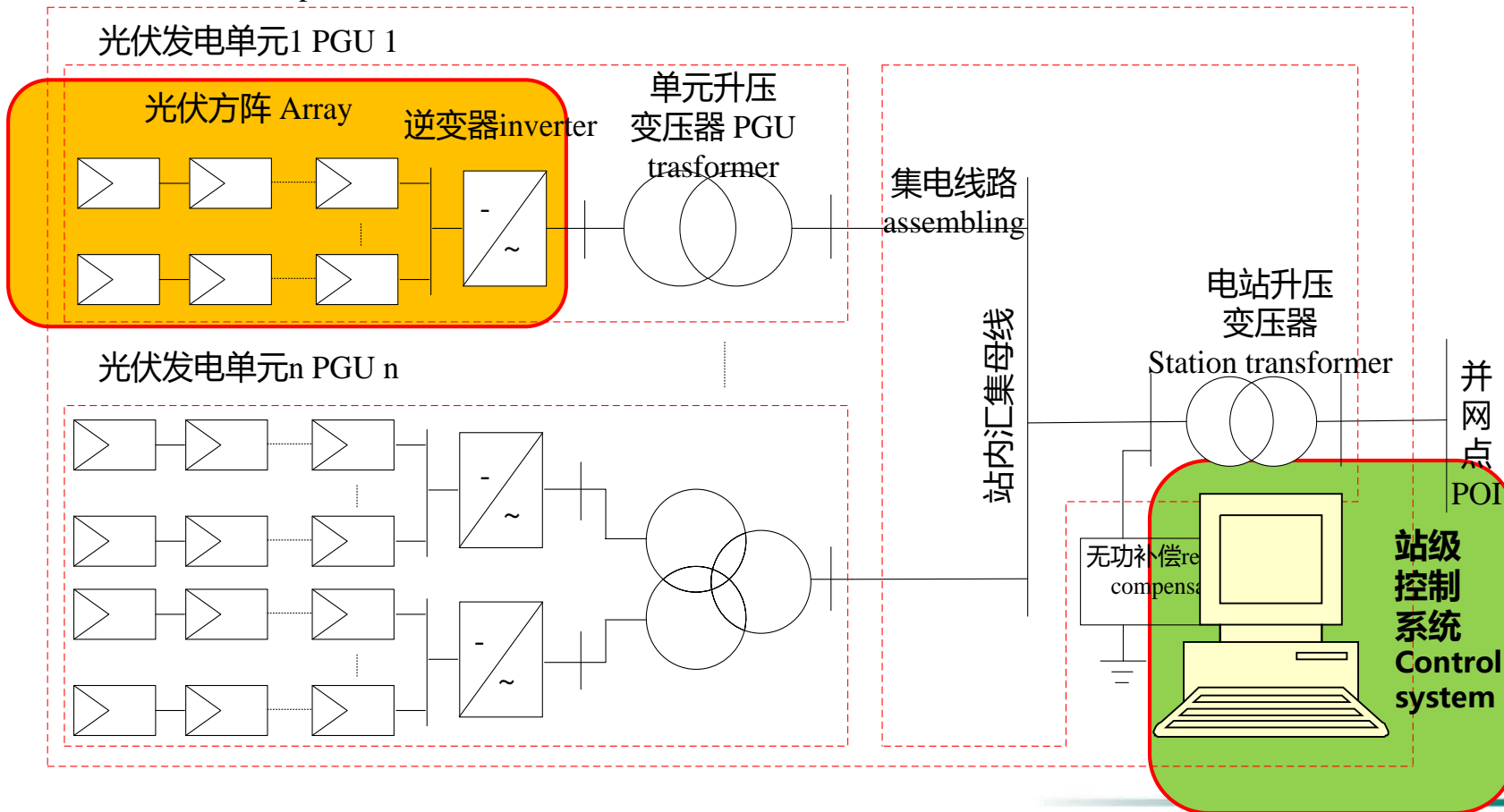
Modeling inverters and plants



国家电网  
STATE GRID

## ◆ 光伏电站典型结构 *Typical structure for PV plants*

光伏发电站 PV plant



# 光伏逆变器及场站建模

Modeling inverters and plants



国家电网  
STATE GRID

## 光伏逆变器模型 *inverter model*

《光伏发电系统建模导则》中规定了三种典型的光伏逆变器机电暂态分析模型

*There are three typical inverter model for Electromechanical Transient analysis*

### 逆变器机电暂态分析 I 型模型

B.1 逆变器机电暂态分析 I 型模型考虑了逆变器的 PWM 调制、直流侧电容、逆变器有功和无功控制、故障穿越控制、逆变器电压电流和频率保护、厂站级有功无功控制等环节。

B.2 模型连接关系

逆变器机电暂态分析 I 型模型的连接关系如图 B.1 所示：

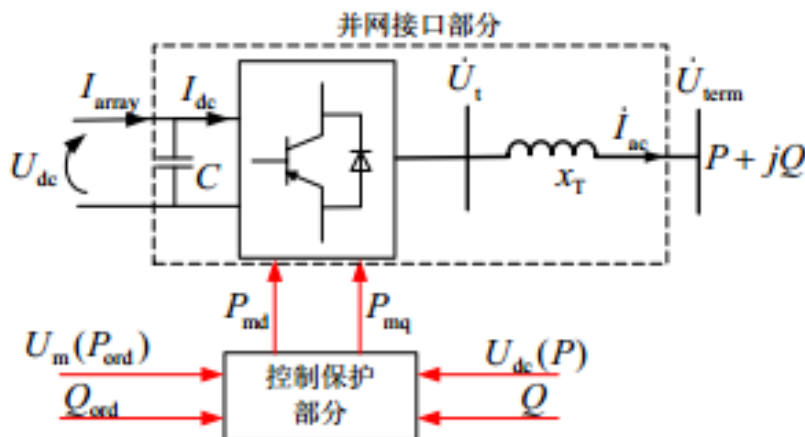


图 B.1 逆变器机电暂态分析 I 型模型连接关系

### I 型模型

# 光伏逆变器及场站建模

Modeling inverters and plants



国家电网  
STATE GRID

## 光伏逆变器模型 *inverter model*

### 逆变器机电暂态分析 II 型模型

C.1 逆变器机电暂态分析 II 型模型相对于 I 型模型简化了响应速度较快的 PWM 调制环节。

#### C.2 模型连接关系

逆变器机电暂态分析 II 型模型的连接关系如图 C.1 所示：

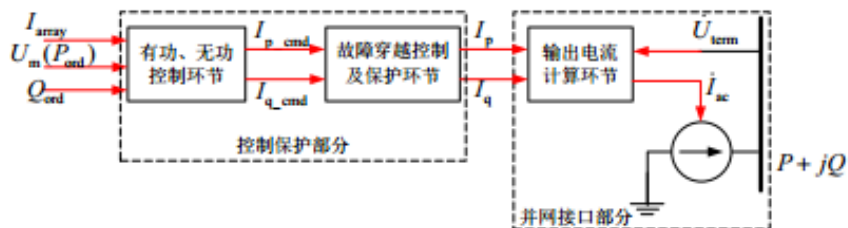


图 C.1 逆变器机电暂态分析 II 型模型连接关系

### II 型模型

### 逆变器机电暂态分析 III 型模型

D.1 逆变器机电暂态分析 III 型模型相对于 II 型模型简化了逆变器直流侧电容环节。

#### D.2 模型连接关系

逆变器机电暂态分析 III 型模型的连接关系如图 D.1 所示：

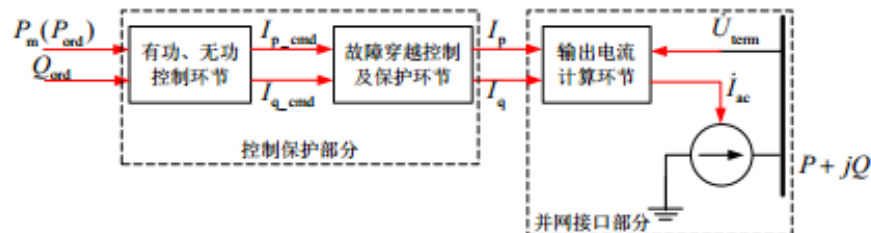


图 D.1 逆变器机电暂态分析 III 型模型连接关系

### III 型模型

中国电力科学研究院

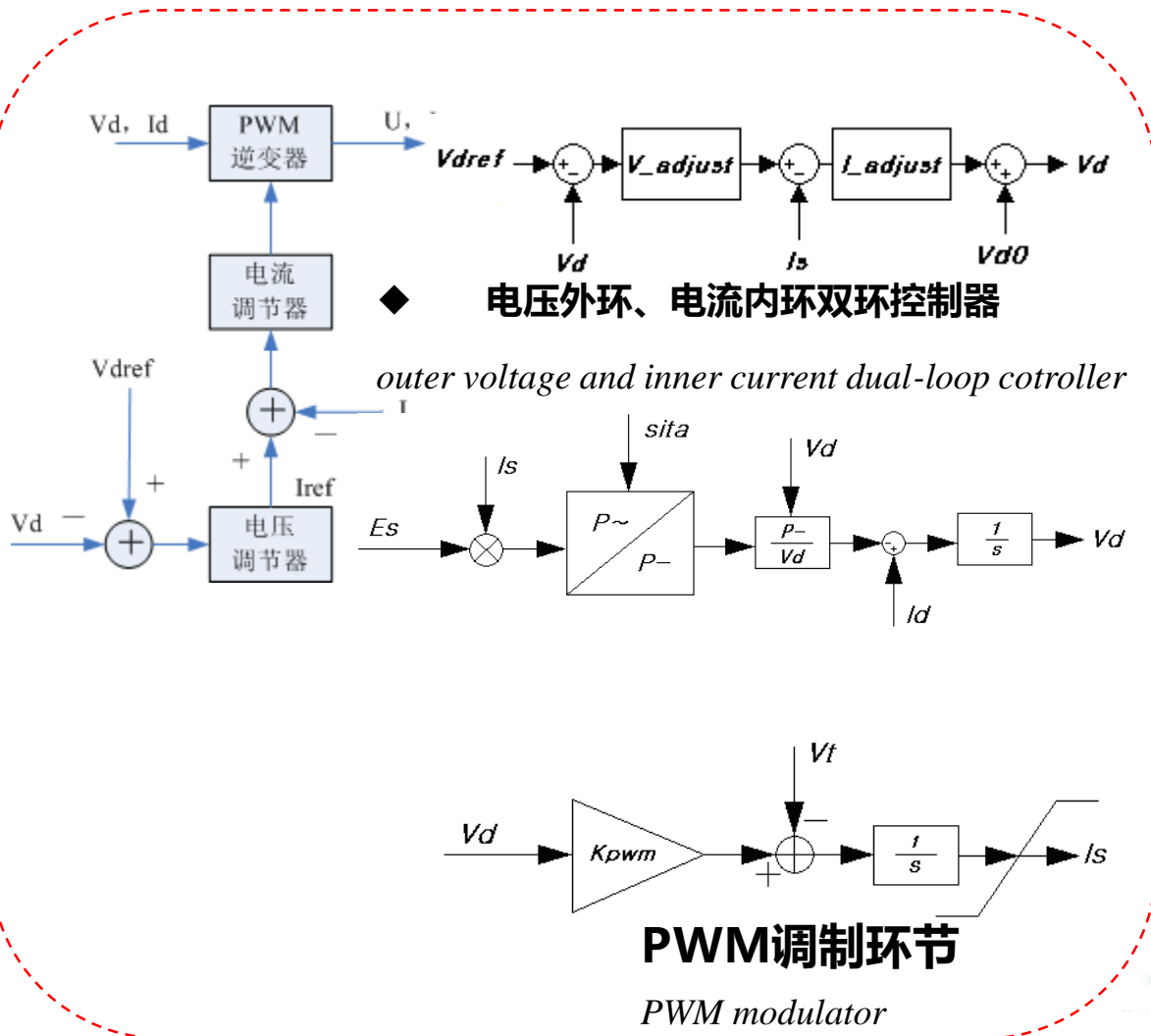
CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE

# 光伏逆变器及场站建模

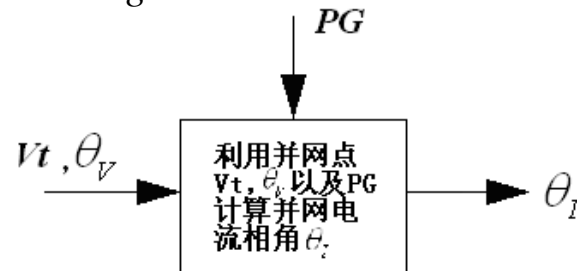
Modeling inverters and plants



国家电网  
STATE GRID



◆ **功率调节模块** power regulation module



◆ **保护模块** protection module

◆ **电压保护** voltage protection

◆ **频率保护** frequency protection

● **过电流保护** over current protection

● **电压不平衡保护** unbalance protection



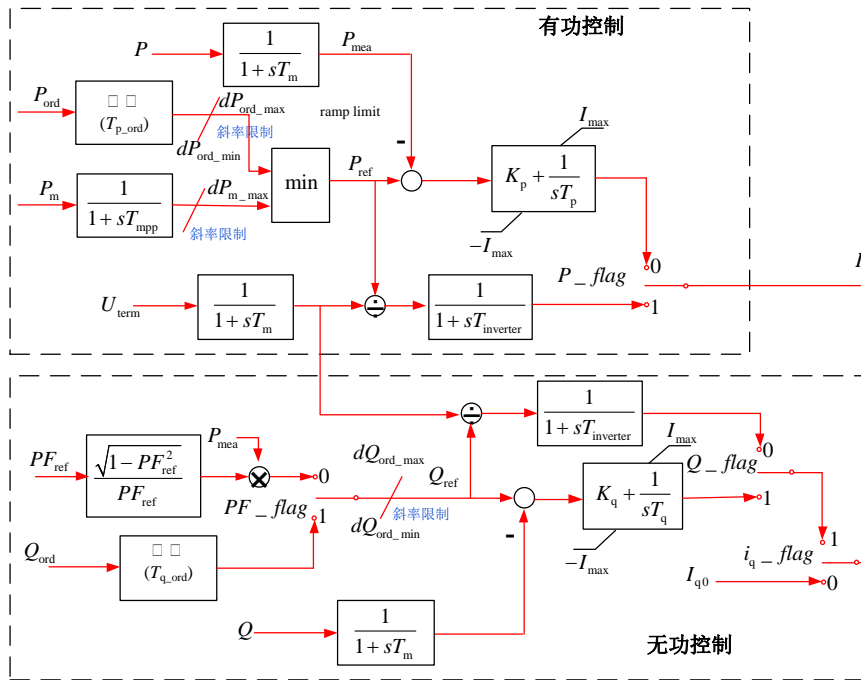
# 光伏逆变器及场站建模

Modeling inverters and plants



国家电网  
STATE GRID

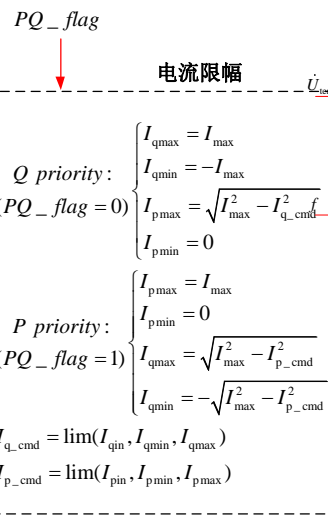
## 逆变器模型



$$I_{p\_cmd} \rightarrow I_q = \begin{cases} -K_{q,v}(HVRT) \cdot (U_{term} - 1.1) & (U_{term} \geq 1.1) \\ I_{q\_cmd} & (0.9 < U_{term} < 1.1) \\ K_{q,v}(LVRT) \cdot (0.9 - U_{term}) & (0.2 \leq |U_{term}| \leq 0.9) \\ K_{q,v}(ZVRT) & (U_{term} < 0.2) \end{cases}$$

$$I_p = \lim \left( \begin{cases} I_{p\_cmd} & (0.9 < U_{term} < 1.1) \\ \lim(I_{p\_cmd}, 0, \sqrt{I_{max}^2 - I_q^2}) & \text{其他} \end{cases} \right), 0, I_p(t - \Delta t) + K_p \cdot \Delta t$$

有功电流变化率限制



电压保护

电压范围	运行要求
0.9pu ~ 1.1pu	正常运行
1.1pu ~ 1.2pu	应至少持续运行 30s
1.2pu ~ 1.3pu	应至少持续运行 5s

保护信号

保护范围	运行要求
<40Hz	根据当地电网电压逆变器允许运行的最低频率而定
40Hz ~ 45.5Hz	频率每低于 40.5Hz, 光伏逆变器应至少运行 10min
45.5Hz ~ 50.2Hz	连续运行
50.2Hz ~ 51.5Hz	频率每高于 50.2Hz, 光伏逆变器应至少运行 2min, 光伏阵列应限制在最大功率点跟踪范围内
>51.5Hz	应禁止光伏阵列跟踪最大功率, 光伏阵列应停止跟踪最大功率点跟踪

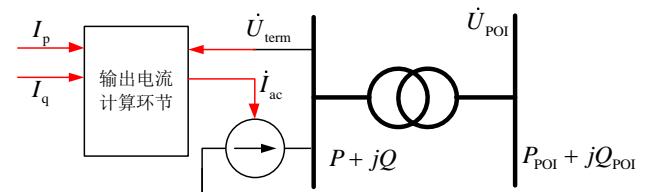
## 故障穿越控制环节

fault-ride through controller

$$I_{ac} = \left( \frac{|\dot{U}_{term}| \cdot I_p - j |\dot{U}_{term}| \cdot I_q}{\dot{U}_{term}} \right)^*$$

有功控制环节 active controller

无功控制环节 reactive controller



## 输出电流计算环节

output current calculator

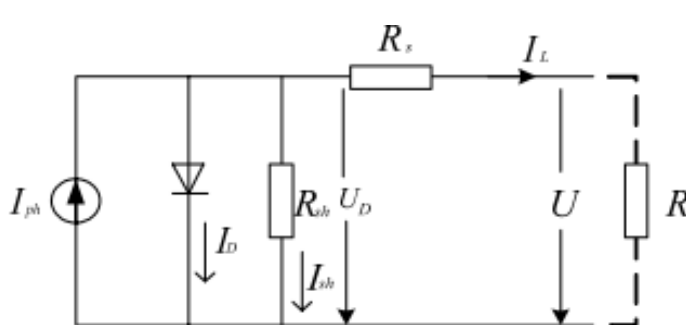
# 光伏逆变器及场站建模

Modeling inverters and plants



国家电网  
STATE GRID

## ◆ 方阵模型 *Array model*



$$T' = T - T_{ref}$$

$$S' = S / S_{ref} - 1$$

$$I'_{sc} = I_{sc} \cdot S / S_{ref} (1 + aT')$$

$$U'_{oc} = U_{oc} \cdot (1 - cT') \ln(e + bS')$$

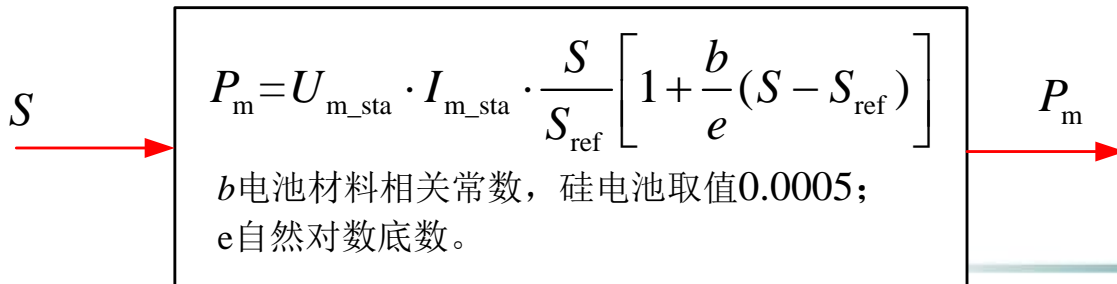
$$I'_m = I_m \cdot S / S_{ref} (1 + aT')$$

$$U'_m = U_m \cdot (1 - cT') \ln(e + bS')$$

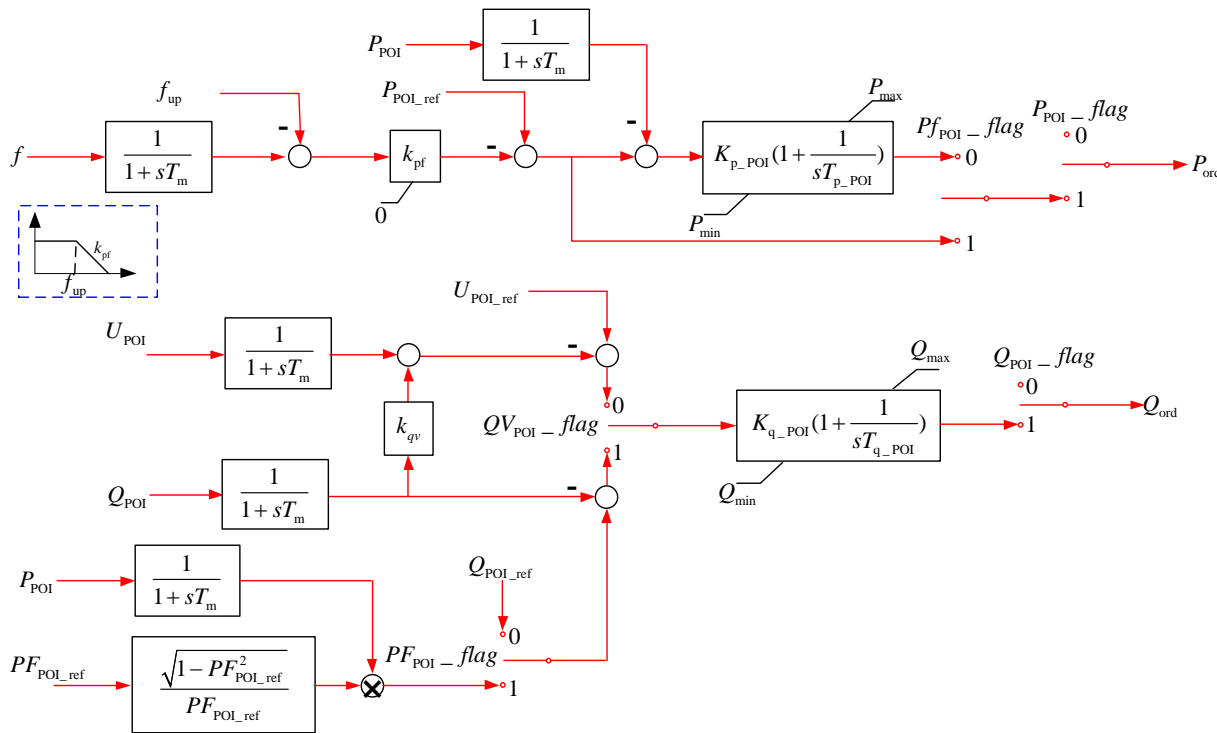
$$I_L = I_{sc} [1 - C_1 (\exp \frac{V}{C_2 V_{oc}} - 1)]$$

$$C_1 = (1 - \frac{I_m}{I_{sc}}) \exp(-\frac{V_m}{C_2 V_{oc}})$$

$$C_2 = (\frac{V_m}{V_{oc}} - 1) [\ln(1 - \frac{I_m}{I_{sc}})]^{-1}$$



### ◆ 厂站级功率控制系统 *power control system in plant*



厂站级功率控制系统模型结构  
*power control system model structure*

- ◆ 定功率控制模式  
*fixed active/reactive power mode*
- ◆ 频率、电压下垂控制模式  
*Frequency/voltage droop mode*
- ◆ 最大功率跟踪控制模式  
*MPPt mode*
- ◆ 定电压、功率因数控制模式  
*fixed voltage/PF mode*

- 1** 大规模光伏并网的安全问题 *Safety issue on large-scale PV integration*
- 2** 国内外标准要求 *Domestic and oversea standard requirements*
- 3** 光伏逆变器及场站建模 *Modeling PV inverter and plants*
- 4** 模型参数测试及验证 *Model parameter testing and validation*
- 5** 逆变器及场站建模实施案例 *Modeling Case*

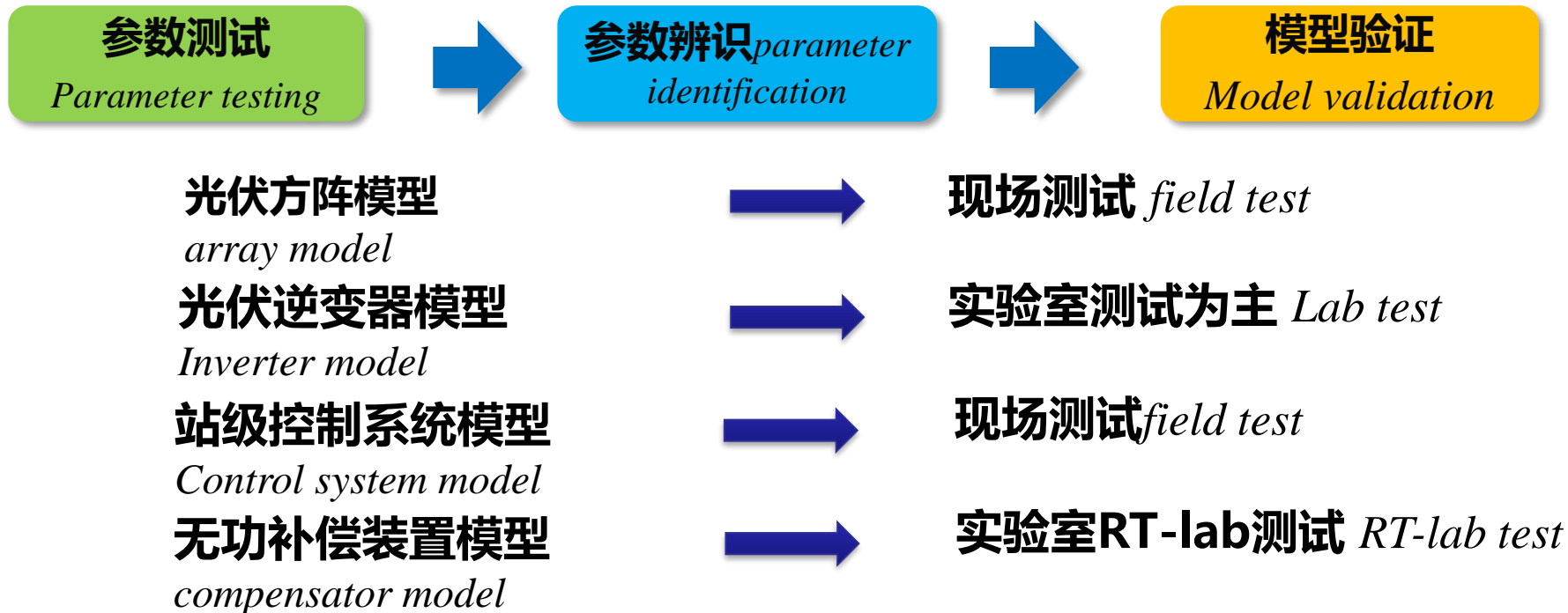
# 模型参数测试及验证

Model parameter testing and validation



国家电网  
STATE GRID

## ◆ 基本原则 *principle*



# 模型参数测试及验证

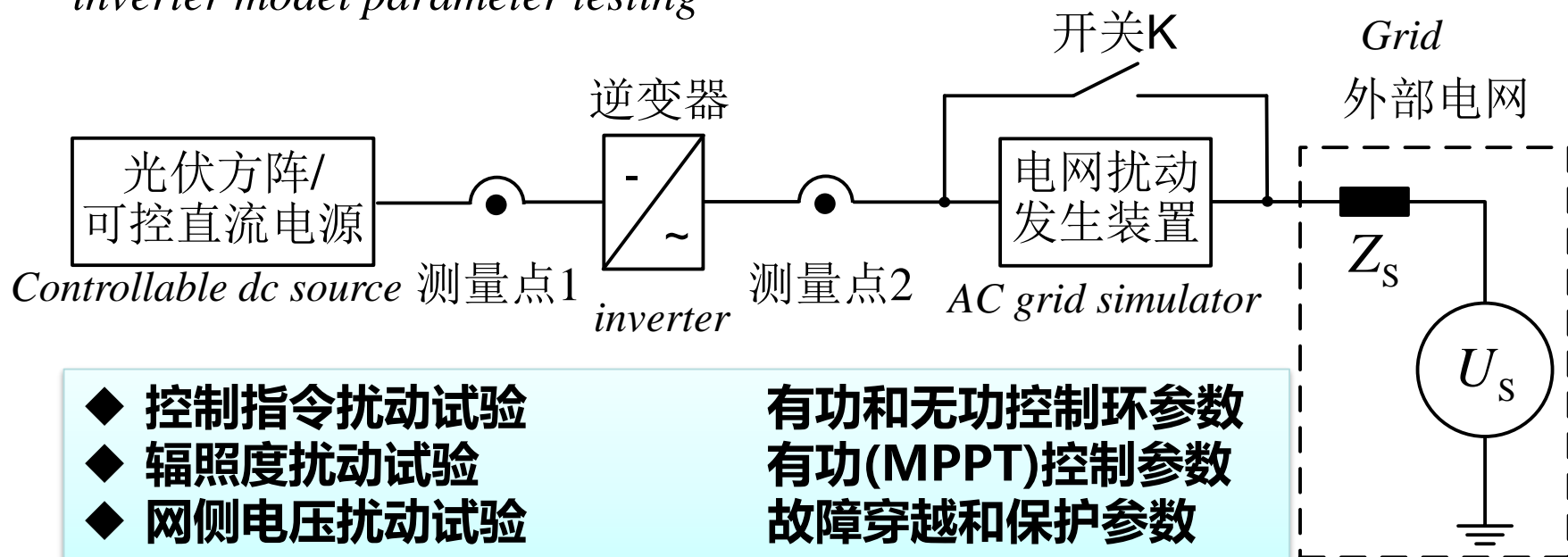
Model parameter testing and validation



国家电网  
STATE GRID

## ◆ 逆变器模型参数测试试验

*inverter model parameter testing*



- ◆ 控制指令扰动试验
- ◆ 辐照度扰动试验
- ◆ 网侧电压扰动试验

有功和无功控制环参数  
有功(MPPT)控制参数  
故障穿越和保护参数

- ◆ *Control disturbance test*
- ◆ *Irradiation disturbance test*
- ◆ *AC voltage disturbance test*

*active/reactive control parameter*  
*MPPT control parameter*  
*FRT parameter*

# 模型参数测试及验证

*Model parameter testing and validation*



国家电网  
STATE GRID



**世界最大的光伏逆变器及储能变流器测试实验室，最大测试容量1.5MW。**

*Biggest PV inverter and storage converter testing lab in the world.*

*Max testing capacity reaches to 1.5MW, located in pukou, Nanjing.*

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

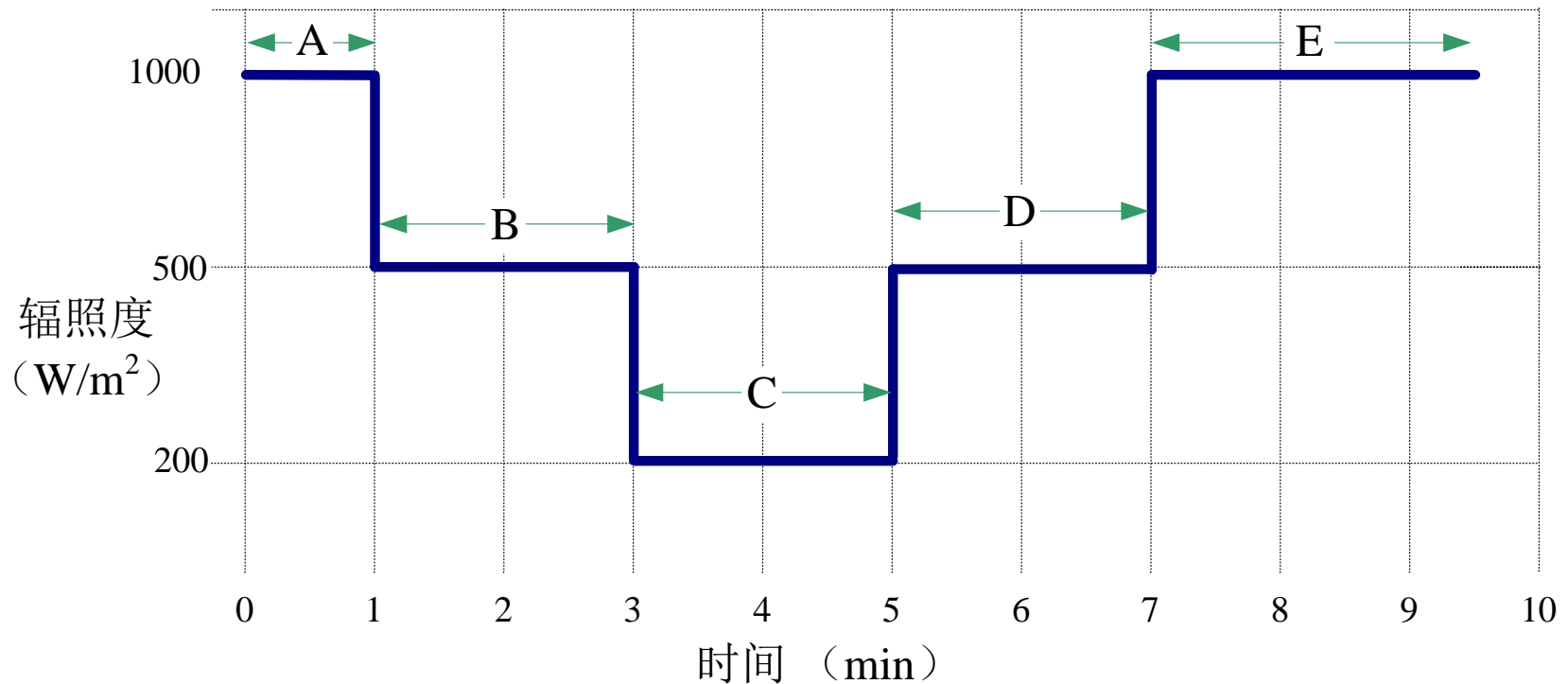
# 模型参数测试及验证

Model parameter testing and validation



国家电网  
STATE GRID

## ◆ 逆变器模型参数测试试验 inverter model parameter testing



*Irradiation disturbance test*



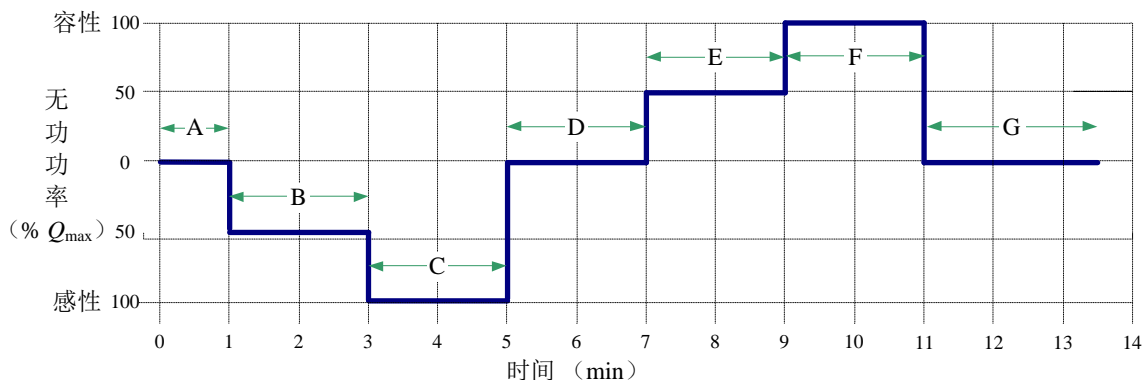
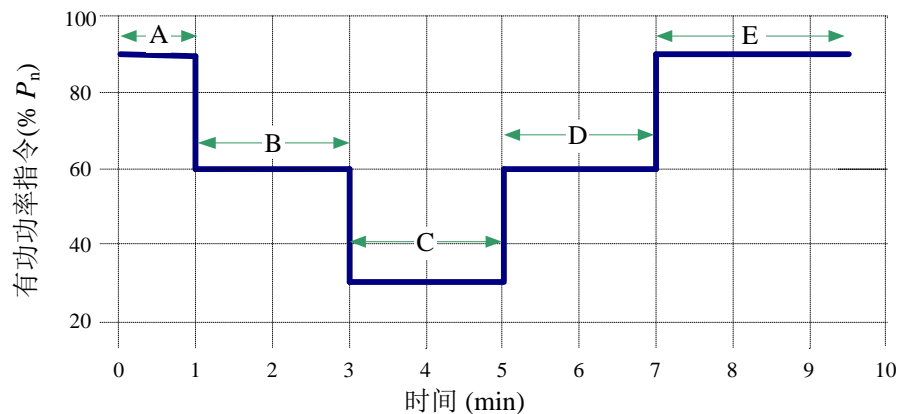
# 模型参数测试及验证

Model parameter testing and validation



国家电网  
STATE GRID

## ◆ 逆变器模型参数测试试验 *inverter model parameter testing*



Control disturbance test

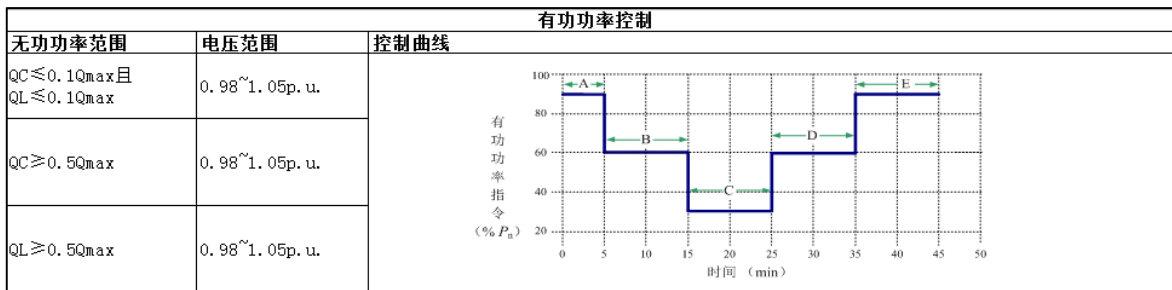
# 模型参数测试及验证

Model parameter testing and validation

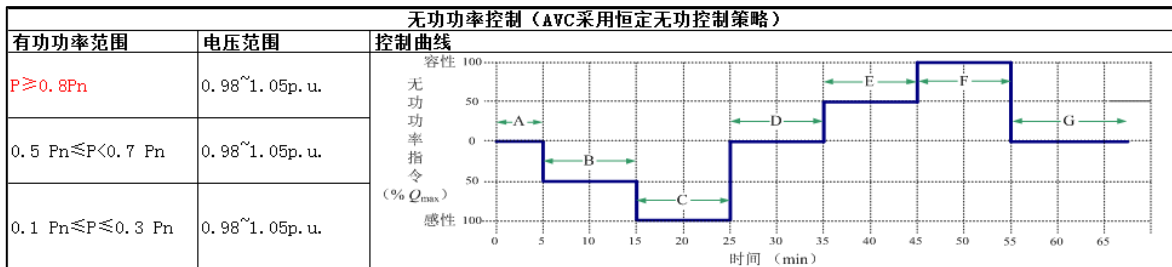


国家电网  
STATE GRID

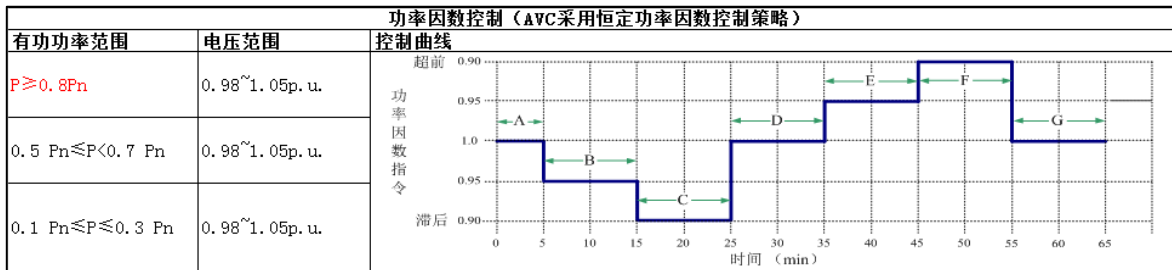
## ◆ 厂站级功率控制系统 *power control system in plant*



◆ 定有功控制模式  
*Fixed active control mode*



◆ 定无功功率控制模式  
*Fixed reactive control mode*



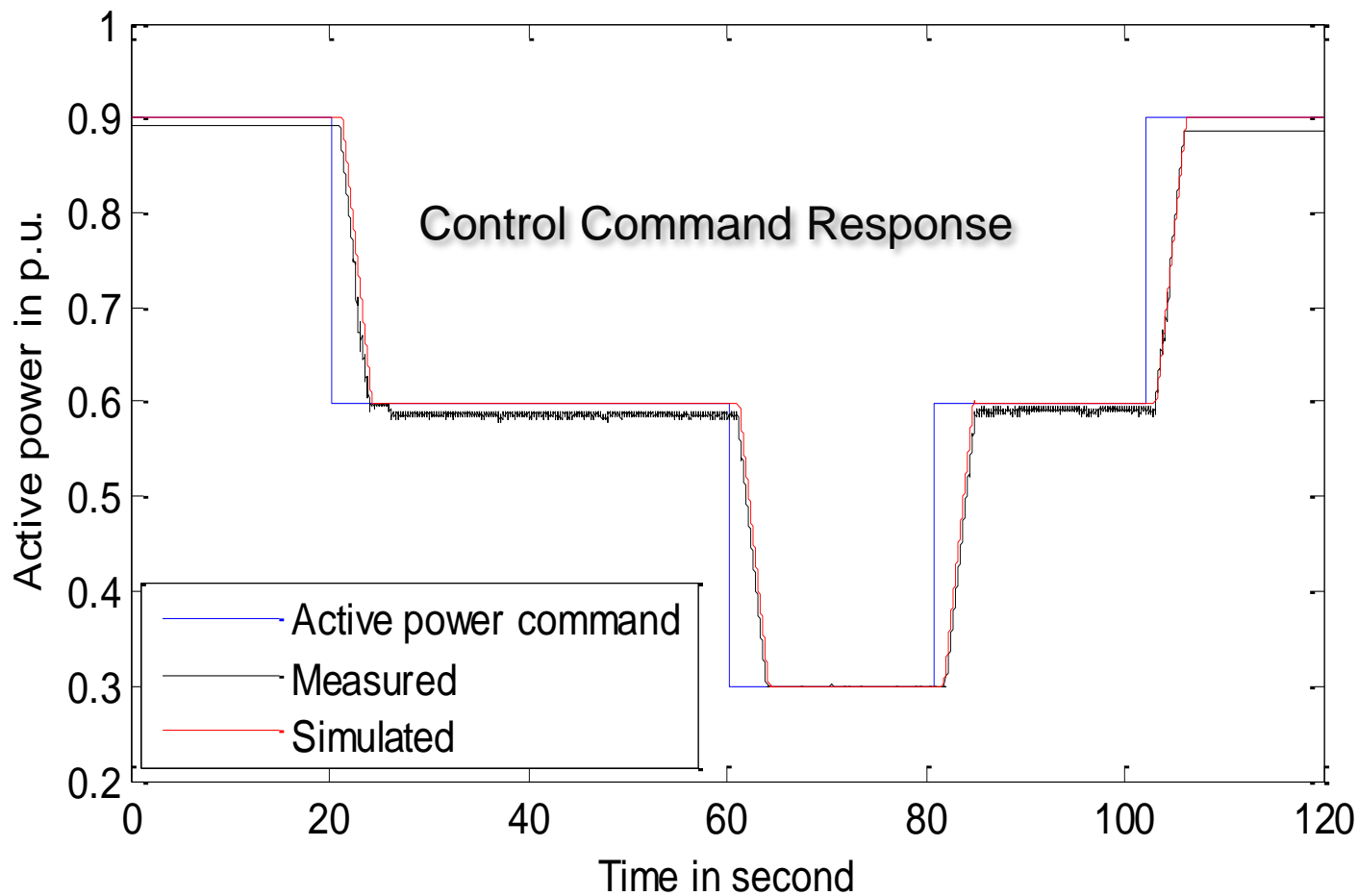
◆ 定功率因数控制模式  
*Fixed PF control mode*

# 模型参数测试及验证

Model parameter testing and validation



国家电网  
STATE GRID

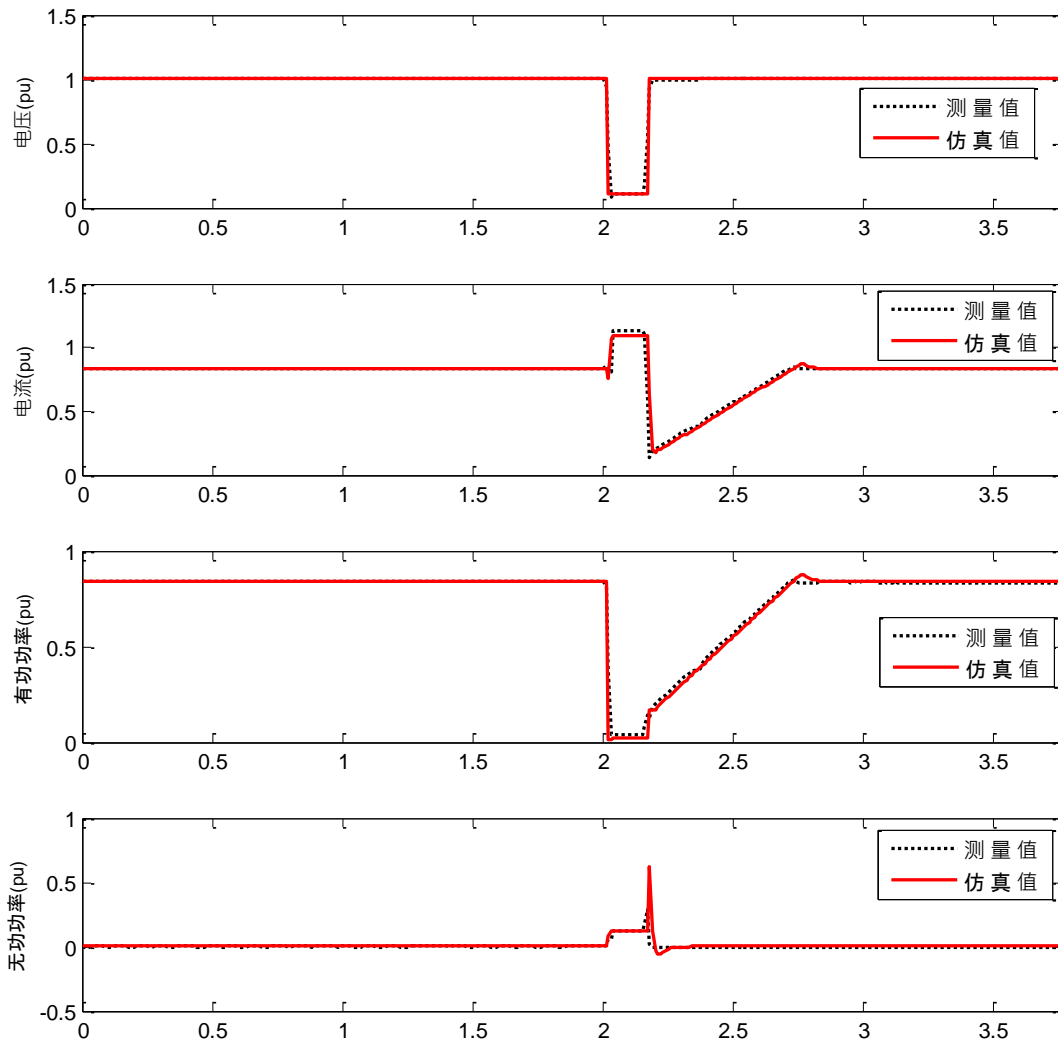


# 模型参数测试及验证

Model parameter testing and validation



国家电网  
STATE GRID



# 太阳能中心介绍

Introduction for NESG



国家电网  
STATE GRID

国家能源光伏发电设备  
评定中心

国家能源局

国家能源太阳能发电  
研发(实验)中心

国家能源局



## National Solar Energy Research Center (NESG)

- September 2009, National Energy Solar Center (NESG) has been approved by National Energy Administration (NEA). July 2010, the center officially put into operation.
- Accredited by China National Accreditation Service for Conformity Assessment (CNAS) 中国合格评定国家认可委员会: covering 46 standards with 538 sub-items;
- China Metrology Accreditation (CMA) 中国计量认证: covering 46 standards with 161 sub-items;

# 太阳能中心介绍

Introduction for NESC



国家电网  
STATE GRID



分布式光伏发电系统移动检测平台



MW级光伏电站移动检测平台

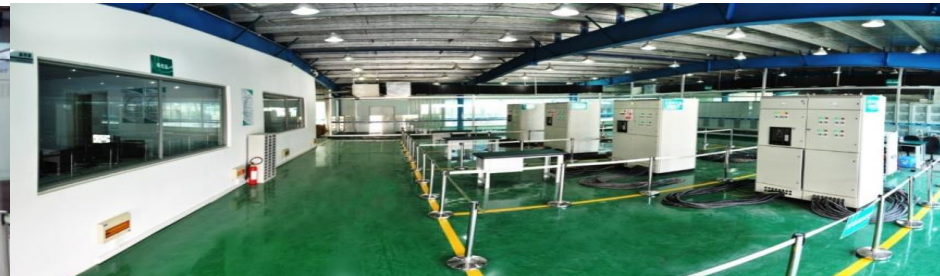


高海拔光伏电站移动式并网性能检测平台

*PV plants field-test platform for large-scale plants and distributed system, also customized platform for high altitude areas.*



*Labs with 1.5MW PV simulator*



*Labs with 1.5MW bidirectional simulator*

*NESC consists of two experimental sites. It could, according to the national standard GB/T 19964-2012, carry out test service, including active / inactive power inverter control, grid adaptability,, voltage ride-through fault power quality test.*

# 太阳能中心介绍

Introduction for NESC



国家电网  
STATE GRID

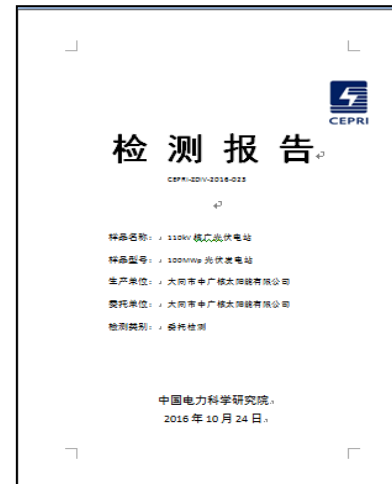
## 电站企业



## 国外逆变器企业



## 国内逆变器企业



*NESC has accomplished 400 types inverters testing and over 200 plants testing, which sum up to 20GW.*



国家电网  
STATE GRID

谢 谢 !

[zhangjunjun@epri.sgcc.com.cn](mailto:zhangjunjun@epri.sgcc.com.cn)

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