



西安交通大学

Xi'an Jiaotong University

电力电子与新能源技术研究中心



Power Electronics & Renewable Energy Research Center

光伏并网发电系统 能效建模分析与优化方法

西安交通大学电气学院 卓放

2016年5月



目录

- 1 研究背景与研究现状
- 2 光伏组件的能效影响机理及优化策略
- 3 光伏电站直流汇集系统损耗分析及能效优化
- 4 光伏并网逆变器的能效分析及优化设计
- 5 光伏发电系统的综合能效机理及评价方法研究
- 6 光伏发电系统的仿真及实验研究
- 7 结论与展望

研究背景与研究现状（1/4）

研究背景

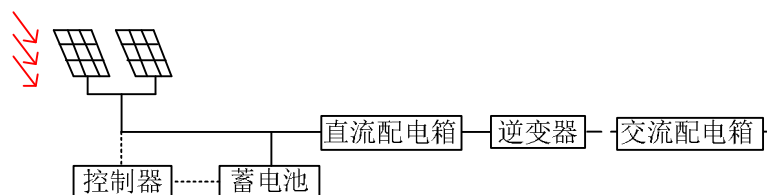
光伏发电正在快速进入电力能源结构，并且将逐步成为其重要的组成部分

光伏发电效率偏低、发电成本偏高是光伏发电大规模推广应用的瓶颈

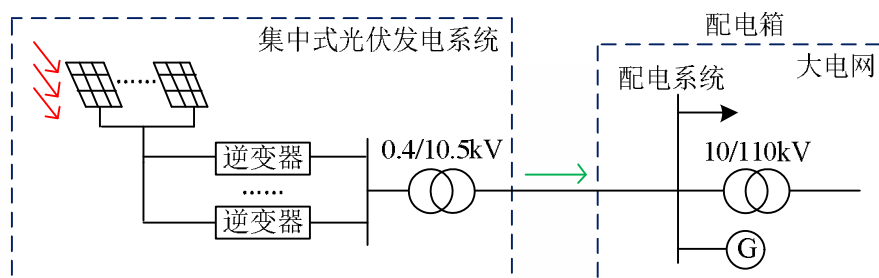
光伏发电系统有其自身特点，能效及损耗机理有别于传统发电模式

研究背景与研究现状 (2/4)

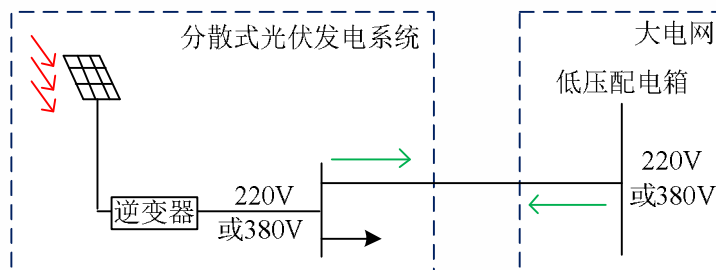
光伏并网发电系统的拓扑结构



光伏发电系统



集中式并网



分散式并网



目录

1 研究背景与研究现状

2 光伏组件的能效影响机理及优化策略

3 光伏电站直流汇集系统损耗分析及能效优化

4 光伏并网逆变器的能效分析及优化设计

5 光伏发电系统的综合能效机理及评价方法研究

6 光伏发电系统的仿真及实验研究

7 结论与展望



西安交通大学

电力电子与新能源技术研究中心

光伏组件的能效影响机理及优化策略（1/12）

光伏组件的能效影响因素

地理因素

- 经度、纬度
- 日期、时刻
- 大气透明系数
- 地面反射系数

地理位置

- 安装方位角
- 安装倾斜角

安装位置

气象因素

- 辐射强度
- 光谱分布
- 大气质量

光照辐射

- 环境温度
- 风速、风向
- 空气湿度

电池温度

- 开路电压 V_{oc}
- 短路电流 I_{sc}
- 最大功率电压 V_{mpp}
- 最大功率电流 I_{mpp}
- 最大功率 P_{mpp}
- 额定效率 η_{STC}

标准测试条件参数

- V_{oc} 修正系数 α
- I_{sc} 修正系数 β
- NOCT

温度修正因子

影响因素

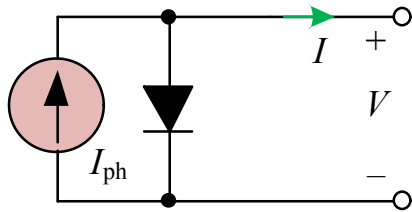
组件特性

光伏组件的运行特性

光伏组件的能效影响机理及优化策略 (2/12)

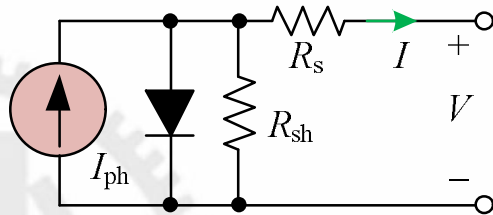
光伏组件的电路模型

单二极管理想模型



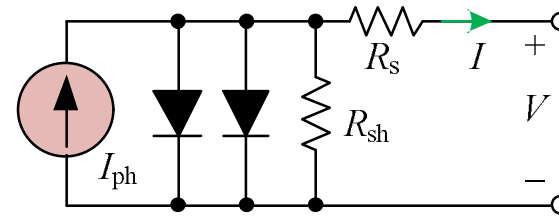
$$I = I_{sc} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{V}{V_T} \right] - 1 \right\}$$

单二极管模型



$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{nKT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

双二极管模型



$$I = I_L - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{nKT} \right] - 1 \right\} - I_{02} \left\{ \exp \left[\frac{q(V + IR_s)}{2KT} \right] - 1 \right\} - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

工程数学模型

$$\begin{cases} I = I_{scref} \left[1 - C_1 \left(e^{U/(C_2 U_{ocref})} - 1 \right) \right] \\ C_1 = (1 - I_m / I_{sc}) e^{-U_m / (C_2 U_{oc})} \\ C_2 = (U_m / U_{oc} - 1) / \left[\ln(1 - I_m / I_{sc}) \right] \end{cases}$$

$$I = I_{sc} \left[1 - C_1 \left(e^{U/(C_2 U_{oc})} - 1 \right) \right]$$

光伏组件的能效影响机理及优化策略 (3/12)

地理因素的影响模型 太阳几何学

太阳赤纬角

$$\delta = 23.45^\circ \sin\left(2\pi \frac{284 + n_T}{365}\right) \frac{\pi}{180^\circ}$$

太阳高度角

$$\begin{aligned} \sin \alpha_s &= \cos \theta_z \\ &= \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \end{aligned}$$

太阳方位角

$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \left| \arccos\left(\frac{\cos \theta_z \sin \phi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cos \phi}\right) \right|$$

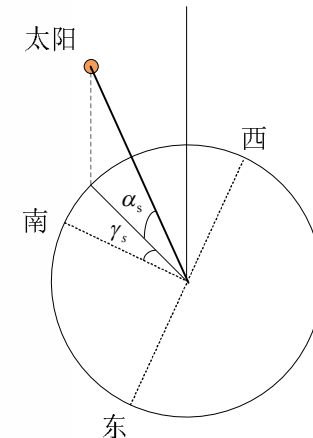
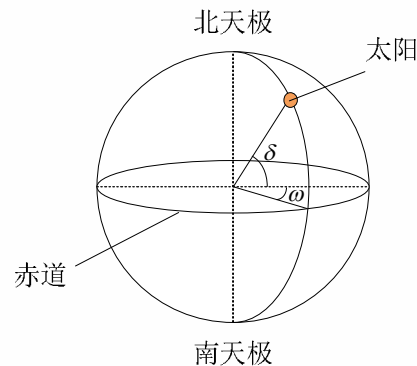
时角

$$\omega = (t_s - 12) \times 15^\circ \times \frac{\pi}{180^\circ}$$

$$t_s = t + \frac{(L_{st} - L_{local}) \times 4 + E}{60}$$

$$E = 9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B$$

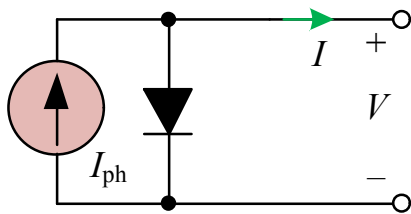
$$B = \frac{2\pi(n_T - 81)}{364}$$



光伏组件的能效影响机理及优化策略 (7/12)

气象因素的影响模型 电路模型分析1/2

光照影响

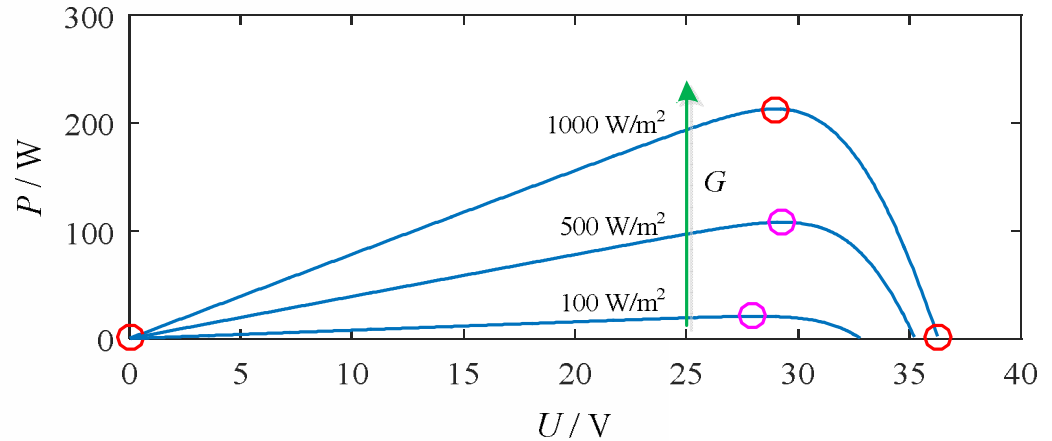
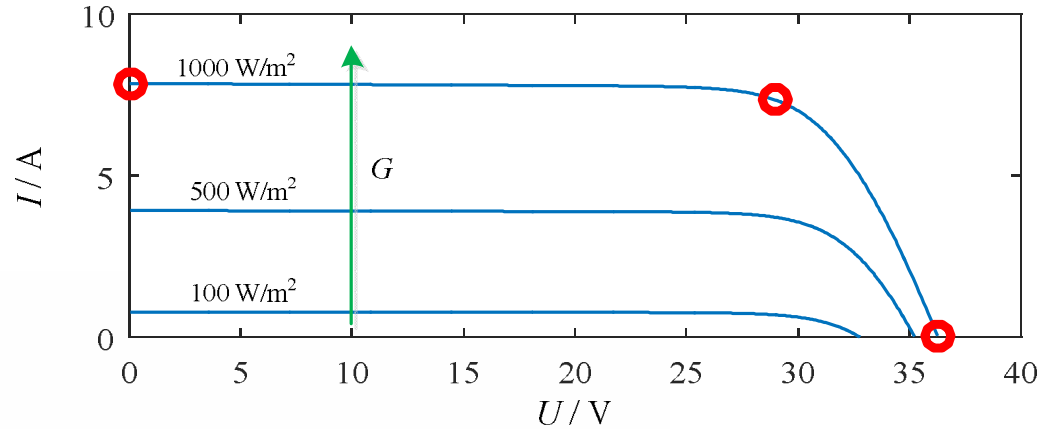


$$I = I_{sc} - I_0 \left\{ \exp \left[\frac{V}{V_T} \right] - 1 \right\}$$

$$\text{短路电流 } I_{sc} = \frac{J_{sc} A}{1000} G$$

$$\text{开路电压 } V_{oc} = V_T \ln \left(1 + \frac{I_{sc}}{I_0} \right)$$

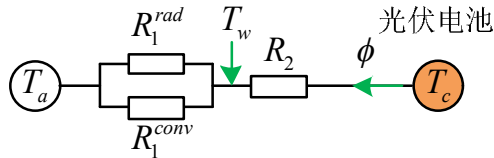
光照强度对短路电流的影响远大于对开路电压的影响



光伏组件的能效影响机理及优化策略 (10/12)

气象因素的影响模型 计算太阳电池温度的传热模型2/3

热阻计算



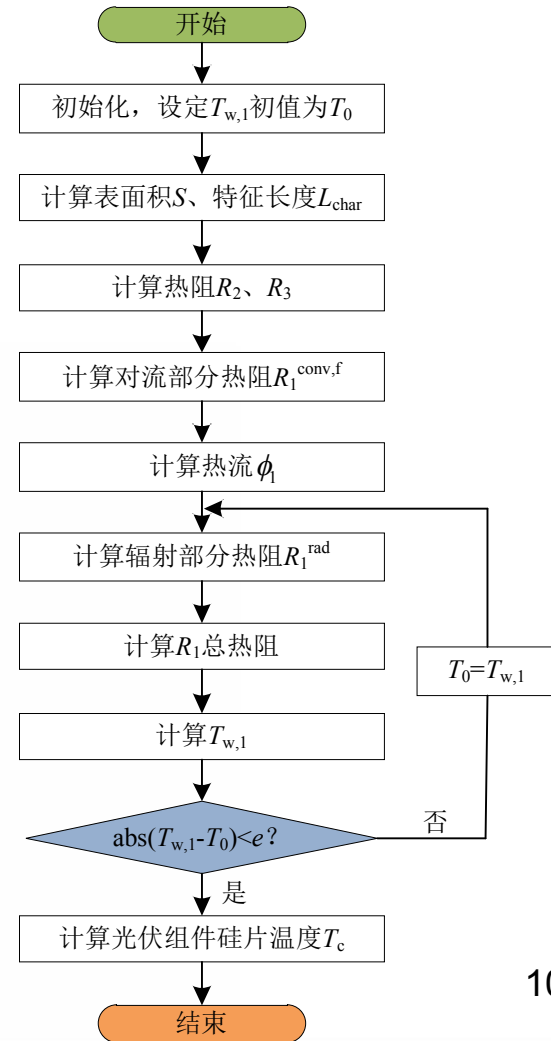
EVA $R_j = \frac{l}{\lambda S} \quad (j = 2, 3)$

外层 $R_j = R_j^{rad} \square R_j^{conv} \quad (j = 1, 4)$

辐射 $R_j^{rad} = \frac{1}{2S\sigma_0 e (T_w + T_a)(T_w^2 + T_a^2)} \quad (j = 1, 4)$

对流 $R_j^{conv,f} = \frac{1}{h_f S} \quad (j = 1, 4)$

$$h_f = \frac{N_{Nu} k}{L_{char}} \quad N_{Re} = \frac{4S\xi W}{\mu P}$$

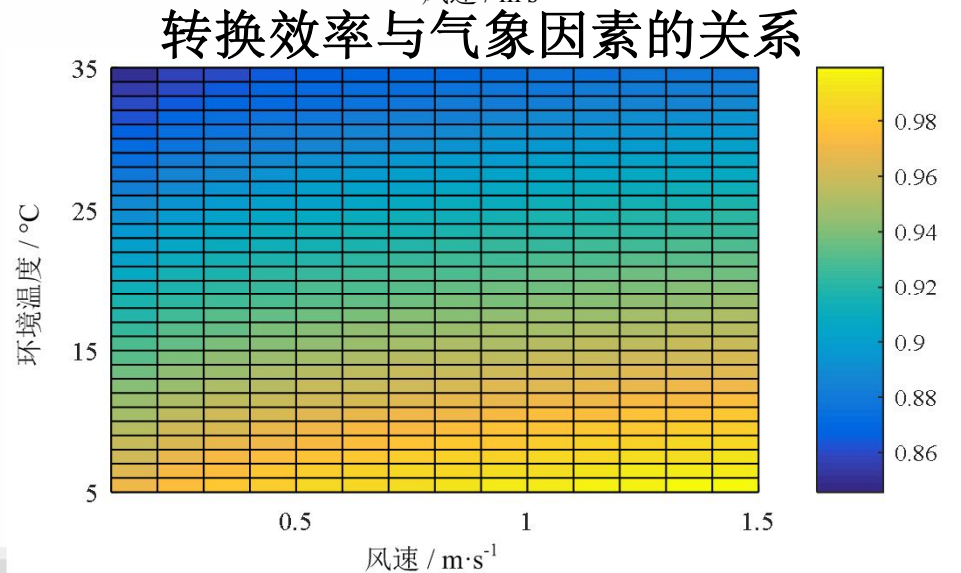
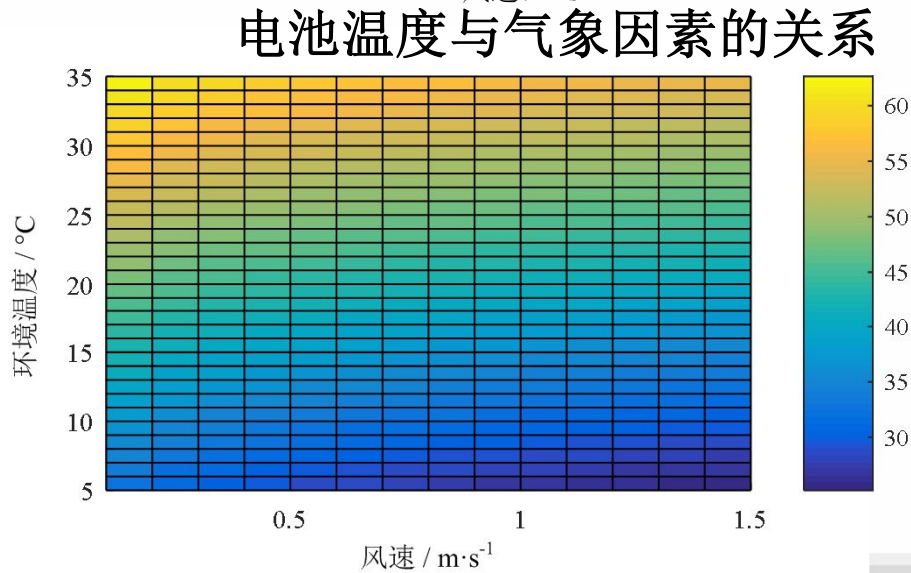
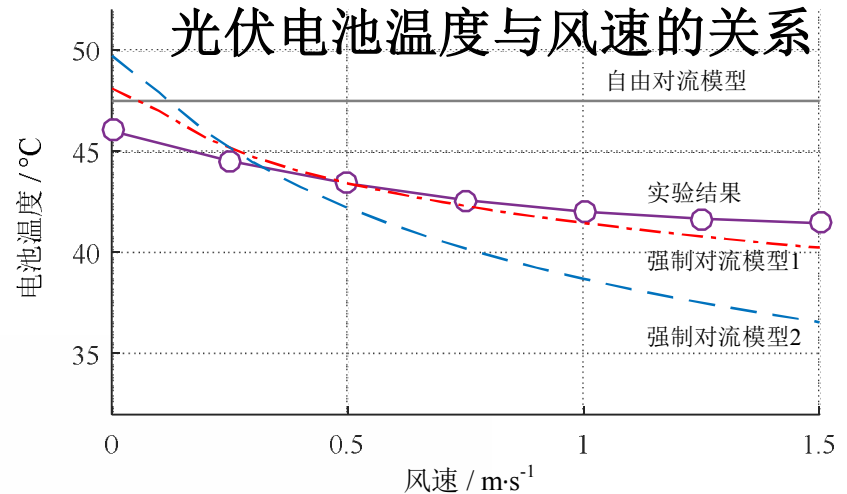
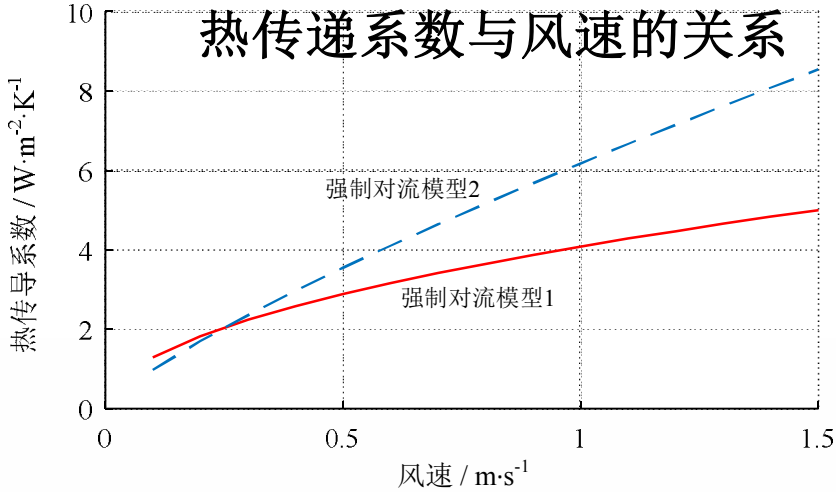


光伏组件的能效影响机理及优化策略 (11/12)

气象因素的影响模型

计算太阳电池温度的传热模型3/3

结果分析



光伏组件的能效影响机理及优化策略（12/12）

光伏组件能效优化的硬件配置方法

增加有效辐射

- ① 合理建站选址
优化安装位置
- ② 安装跟踪装置
- ③ 组件定期维护



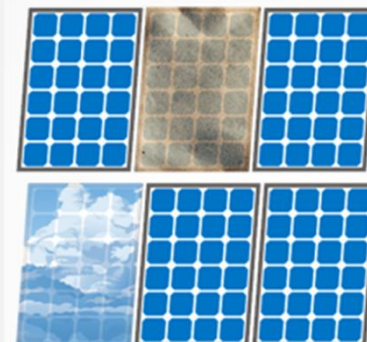
降低电池温度

- ① 水幕散热装置
- ② 红外散热涂料



减少组件失配

- ① 组件并二极管
- ② 组串串二极管



目录

1 研究背景与研究现状

2 光伏组件的能效影响机理及优化策略

3 光伏电站直流汇集系统损耗分析及能效优化

4 光伏并网逆变器的能效分析及优化设计

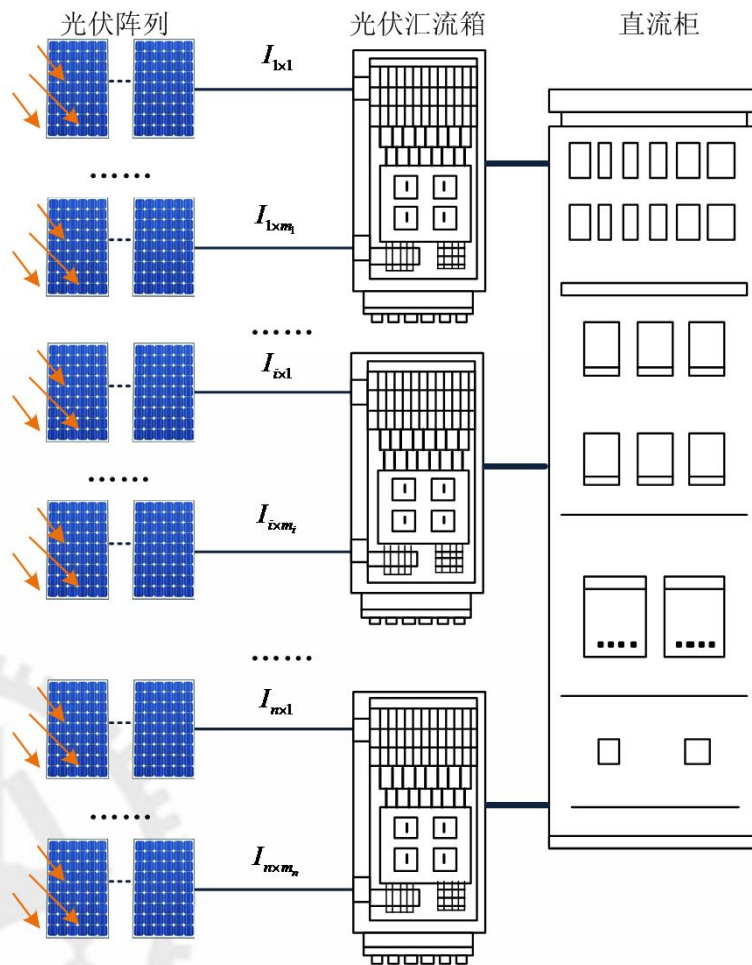
5 光伏发电系统的综合能效机理及评价方法研究

6 光伏发电系统的仿真及实验研究

7 结论与展望

光伏电站直流汇集系统损耗分析及能效优化 (1/4)

大型并网光伏电站典型直流汇集系统



直流电缆损耗分析

单根直流电缆

$$R = \rho L / S$$

$$\Delta U = IR = I \rho L / S$$

光伏电站

光伏阵列到汇流箱

$$P_1 = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{m_i} I_{ik}^2 R_{ik} = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{m_i} I_{ik}^2 \rho_{ik} L_{ik} / S_{ik}$$

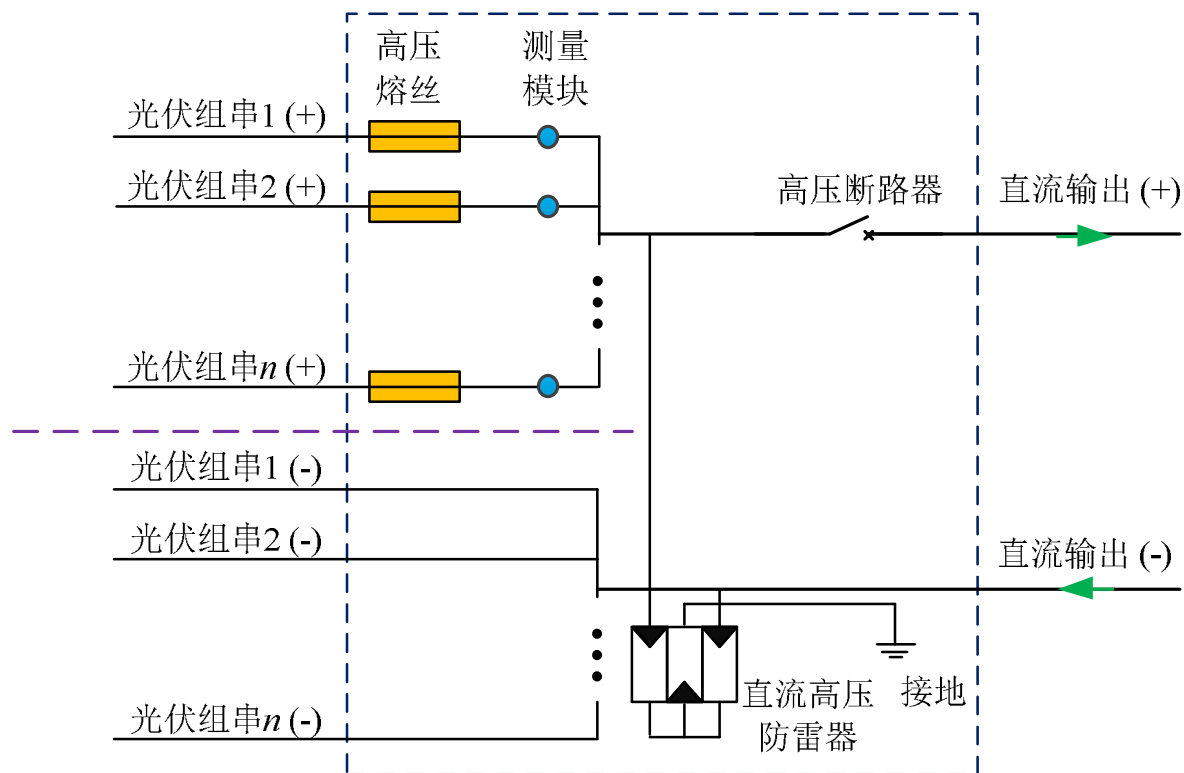
汇流箱到直流配电箱

$$P_2 = \rho_2 / S_2 \sum_{i=1}^n \left(\sum_{k=1}^{m_i} I_{ik} \right)^2 L_{2i}$$

$$\approx \rho_2 / S_2 \sum_{i=1}^n (m_i I_i)^2 L_{2i}$$

光伏电站直流汇集系统损耗分析及能效优化 (2/4)

光伏汇流箱的能效分析 汇流箱的典型配置方案

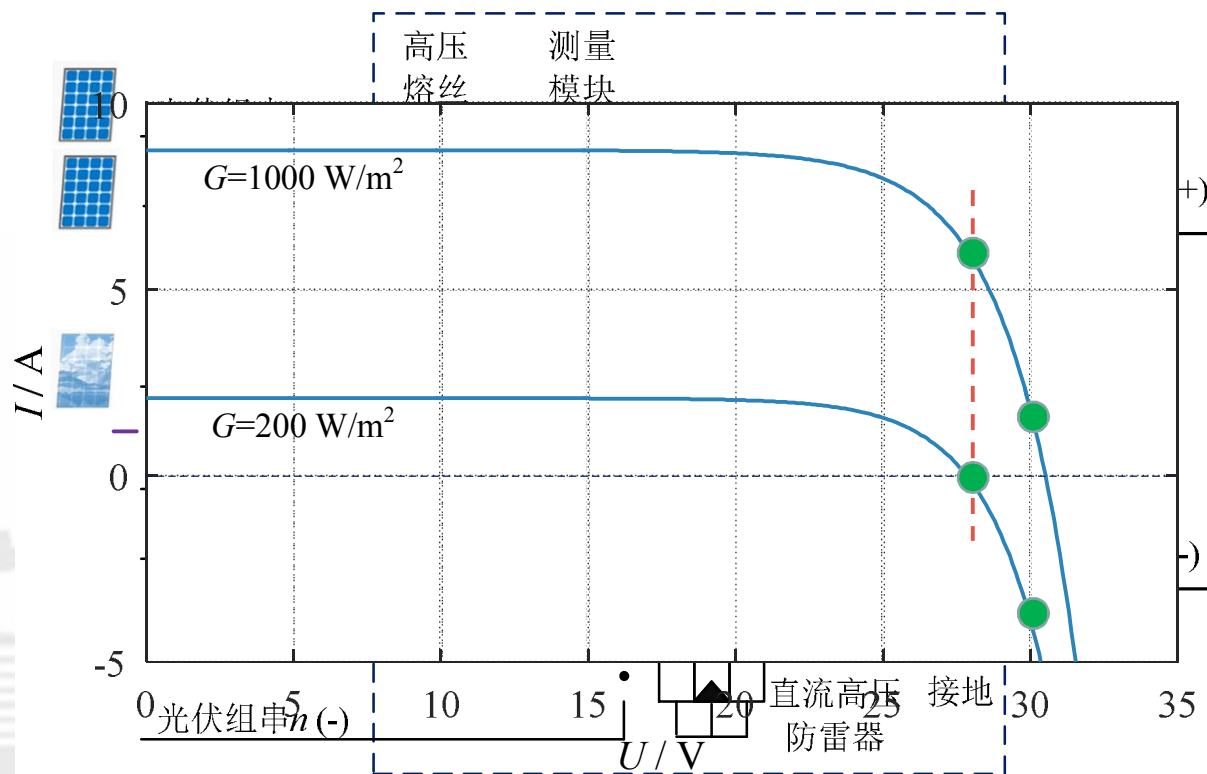


无防反二极管

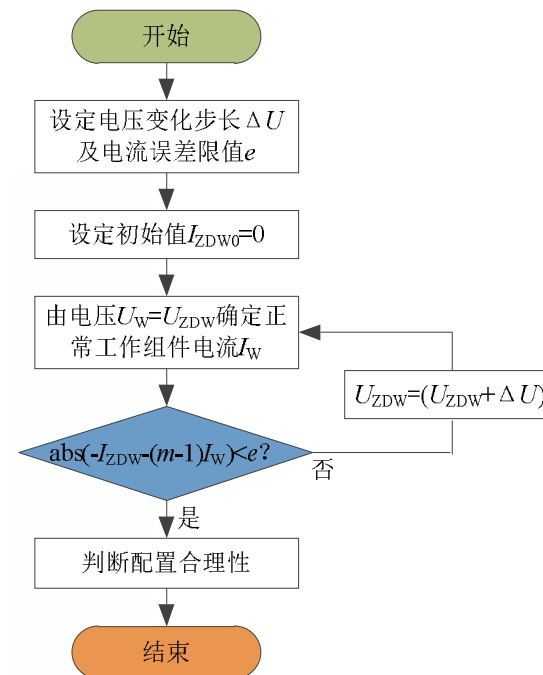
光伏电站直流汇集系统损耗分析及能效优化 (3/4)

光伏汇流箱的能效分析 汇流箱反向电流校验

反向电流示意图



反向电流计算流程



目录

1 研究背景与研究现状

2 光伏组件的能效影响机理及优化策略

3 光伏电站直流汇集系统损耗分析及能效优化

4 光伏并网逆变器的能效分析及优化设计

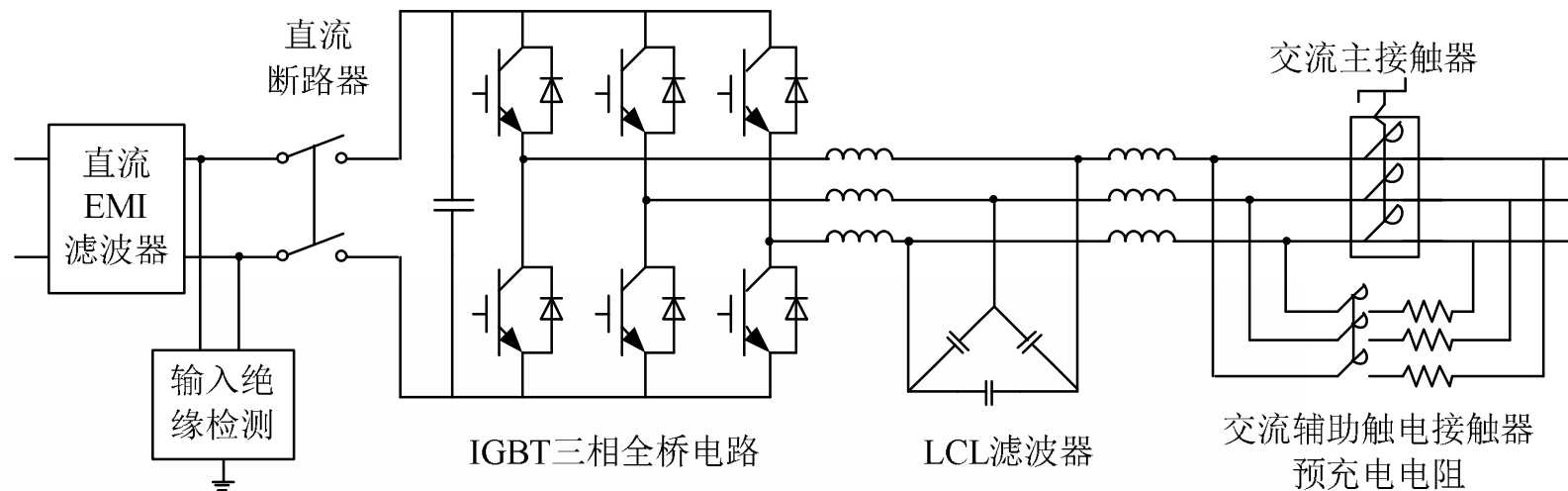
5 光伏发电系统的综合能效机理及评价方法研究

6 光伏发电系统的仿真及实验研究

7 结论与展望

光伏并网逆变器的能效分析及优化设计（1/5）

损耗来源分析



三相大功率非隔离型逆变器系统

损耗来源：有源器件损耗与无源器件损耗

有源器件损耗：IGBT与二极管的导通损耗与开关损耗

无源器件损耗：直流侧电容器，LCL滤波器，线路，断路器，接触器等

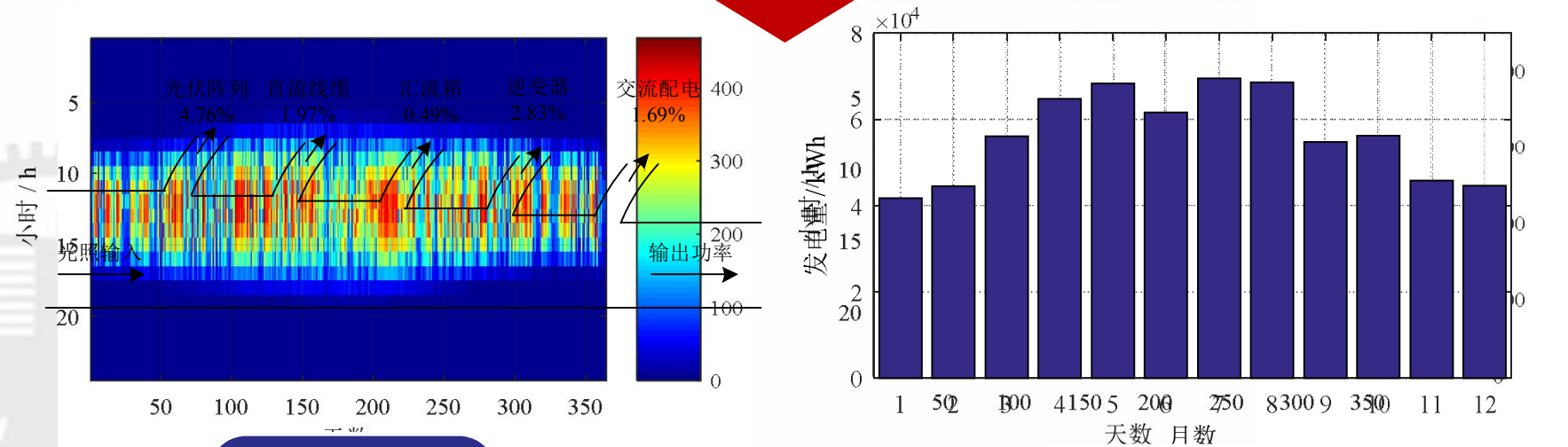
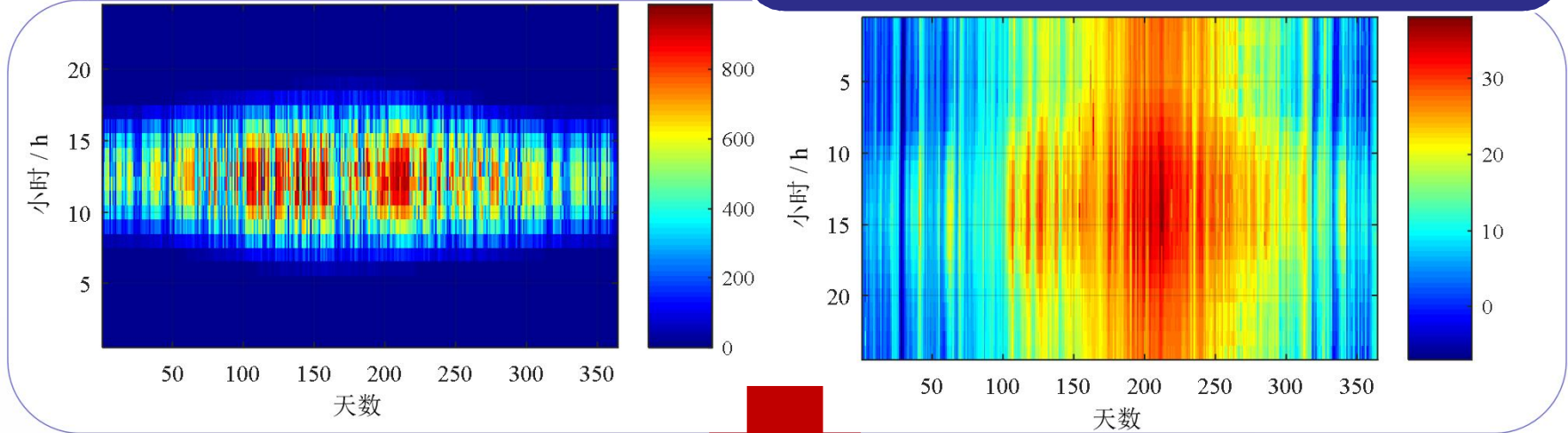
目录

- 1 研究背景与研究现状
- 2 光伏组件的能效影响机理及优化策略
- 3 光伏电站直流汇集系统损耗分析及能效优化
- 4 光伏并网逆变器的能效分析及优化设计
- 5 光伏发电系统的综合能效机理及评价方法研究
- 6 光伏发电系统的仿真及实验研究
- 7 结论与展望

光伏发电系统的综合能效机理及评价方法研究 (4/4)

光伏发电系统能效分析

输入：光照强度（左），环境温度（右）



功率损耗

每月发电量

目录

1 研究背景与研究现状

2 光伏组件的能效影响机理及优化策略

3 光伏电站直流汇集系统损耗分析及能效优化

4 光伏并网逆变器的能效分析及优化设计

5 光伏发电系统的综合能效机理及评价方法研究

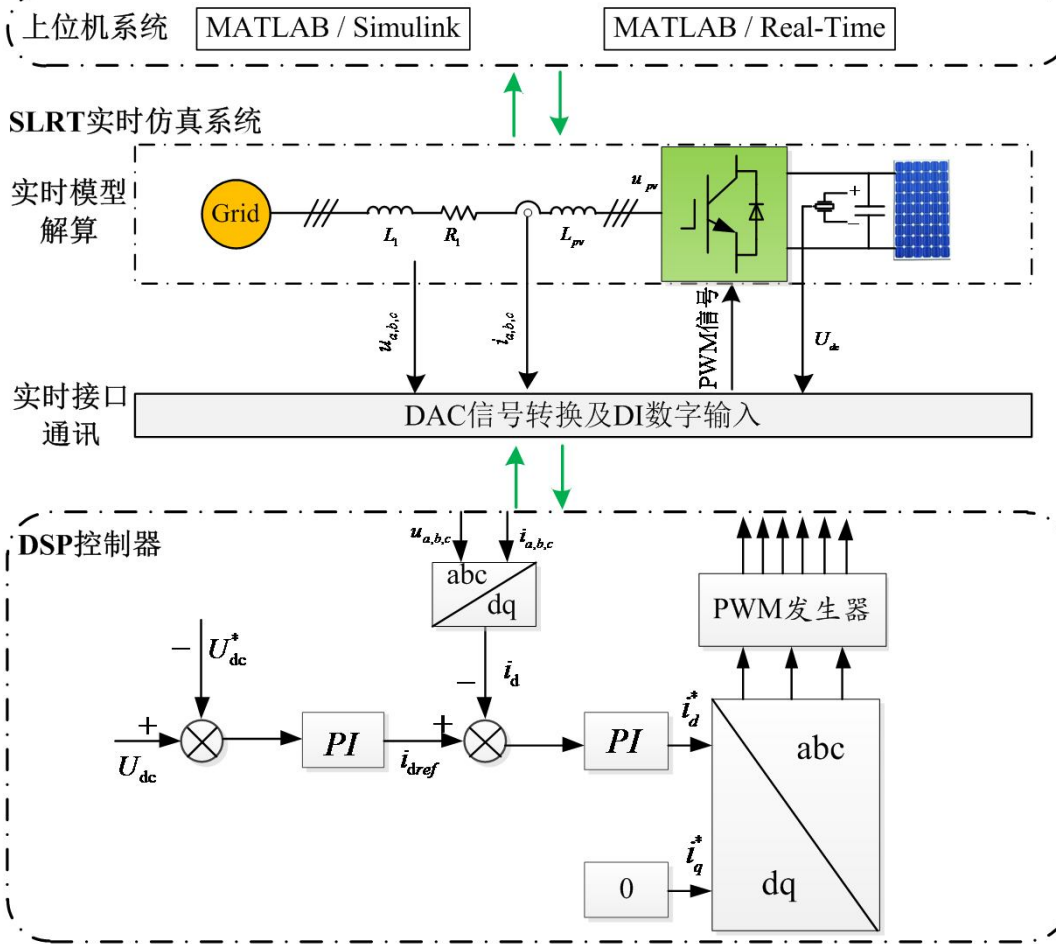
6 光伏发电系统的仿真及实验研究

7 结论与展望

光伏发电系统的仿真及实验研究 (1/4)

硬件在环实验 实验配置方案

实验方案示意图



实验实物

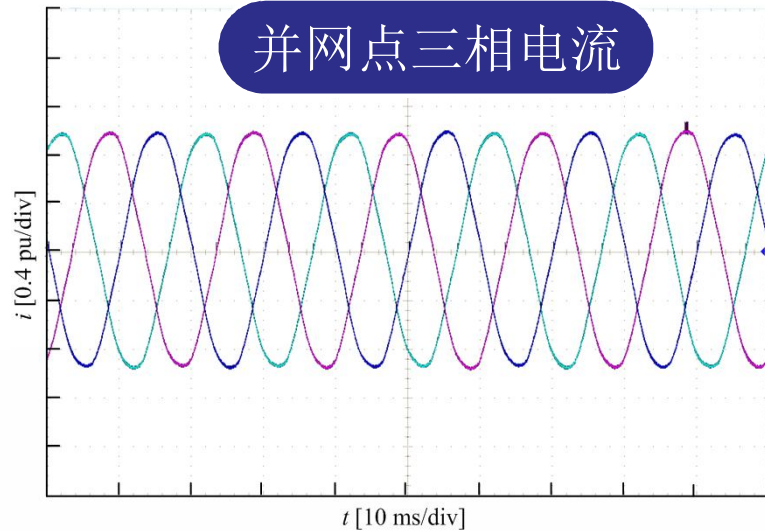


光伏发电系统的仿真及实验研究 (2/4)

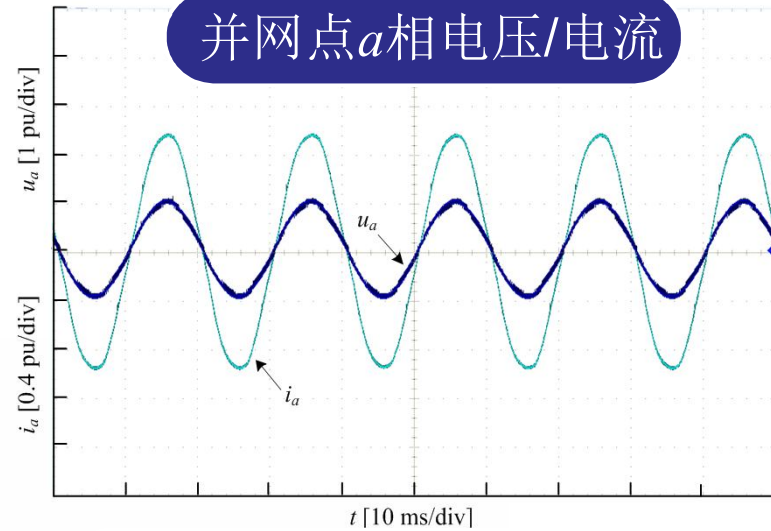
硬件在环实验

实验结果

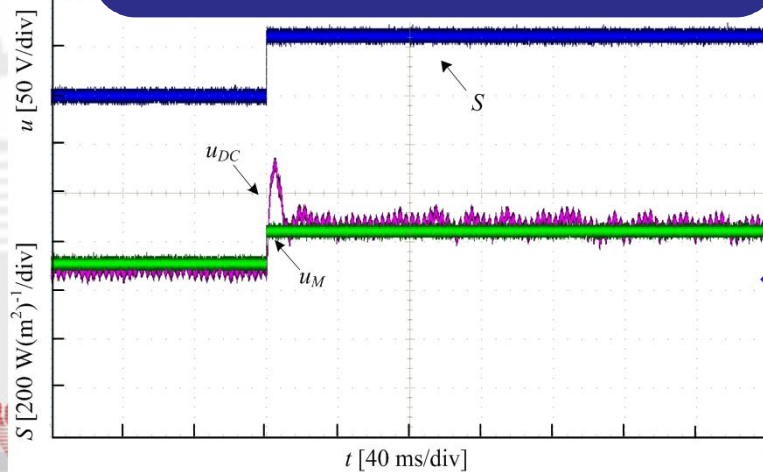
并网点三相电流



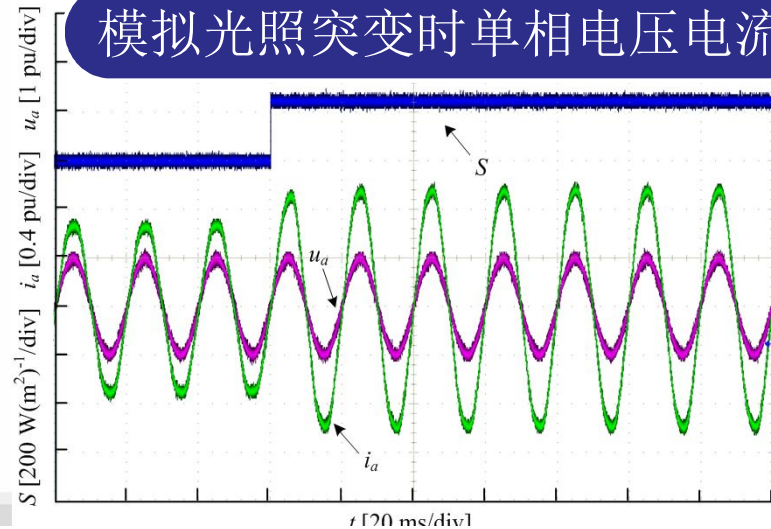
并网点a相电压/电流



模拟光照突变时直流侧电压



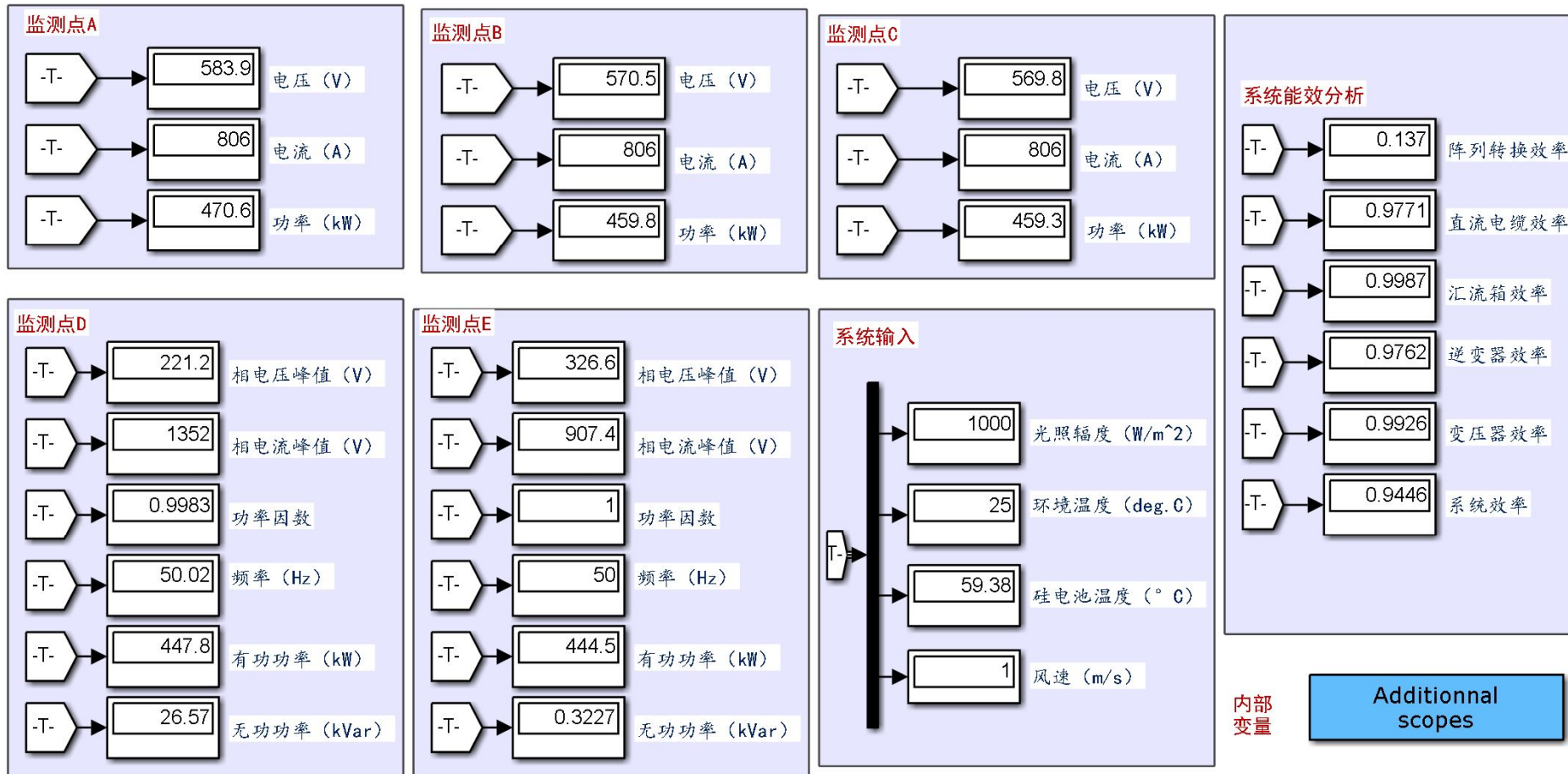
模拟光照突变时单相电压电流



光伏发电系统的仿真及实验研究 (4/4)

综合能效仿真

仿真结果



目录

1 研究背景与研究现状

2 光伏组件的能效影响机理及优化策略

3 光伏电站直流汇集系统损耗分析及能效优化

4 光伏并网逆变器的能效分析及优化设计

5 光伏发电系统的综合能效机理及评价方法研究

6 光伏发电系统的仿真及实验研究

7 结论与展望

结论与展望

主要结论

- 1、建立了光伏组件/阵列的能效影响模型，可用于光伏电站的发电量与能耗预测、光伏组件输出性能的在线评估。
- 2、直流汇集系统的损耗主要为电缆欧姆损耗与汇流箱防反二极管损耗；提出合理减少防反二极管个数的汇流箱能效改善措施。
- 3、光伏并网逆变器系统的主要损耗来自电力电子器件损耗、直流侧电容损耗、LCL滤波器损耗、变压器及其他部分损耗。
- 4、提出光伏全系统的能效评测指标体系及仿真实验方法，为光伏系统的能效评估提供依据。

进一步工作

建立更加精确的全系统模型、考虑控制策略、系统拓扑、发电量衰减、阵列局部遮挡等对系统特性的影响。

感谢各位聆听！

