



华南理工大学

SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

基于节点电压和电气距离 快速估算光伏可接入容量

2022年11月7日

汇报人：赵知易

指导老师：雪映

目录

CONTENTS

01

背景

Background

02

模型建立

Model Establishment

03

仿真与结果

Simulation and Results

04

实际应用

Practice

01

背景

BACKGROUND



2021年8月

国家能源局综合司发布了《关于公布整县（市、区）**屋顶分布式光伏**开发试点名单》的通知，各省（自治区、直辖市）及新疆生产建设兵团共报送试点县（市、区）676个，全部列为整县（市、区）屋顶分布式光伏开发试点。

01

习近平总书记在中共中央政治局第三十六次集体学习时强调，要把促进新能源和清洁能源发展放在更加突出的位置，积极有序发展**光能源**、硅能源、氢能源、可再生能源。

02

2022年1月

2022年5月

国家发展和改革委员会、国家能源局发布《关于促进新时代新能源高质量发展的实施方案》，提出到2030年，风电、**太阳能**发电总装机容量达到12亿kW以上，加快构建清洁低碳、安全高效的能源体系。

03

国家发展和改革委员会等九部委联合印发《“十四五”可再生能源发展规划》，指出2025年可再生能源年发电量达到3.3万亿 kWh 左右；且“十四五”期间，可再生能源发电量增量在全社会用电量增量中的占比超过50%，**风能和太阳能**发电量实现翻倍。

04

2022年6月



截至2021年底累计并网容量（万千瓦）



华南理工大学
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

山东 / 3343.4

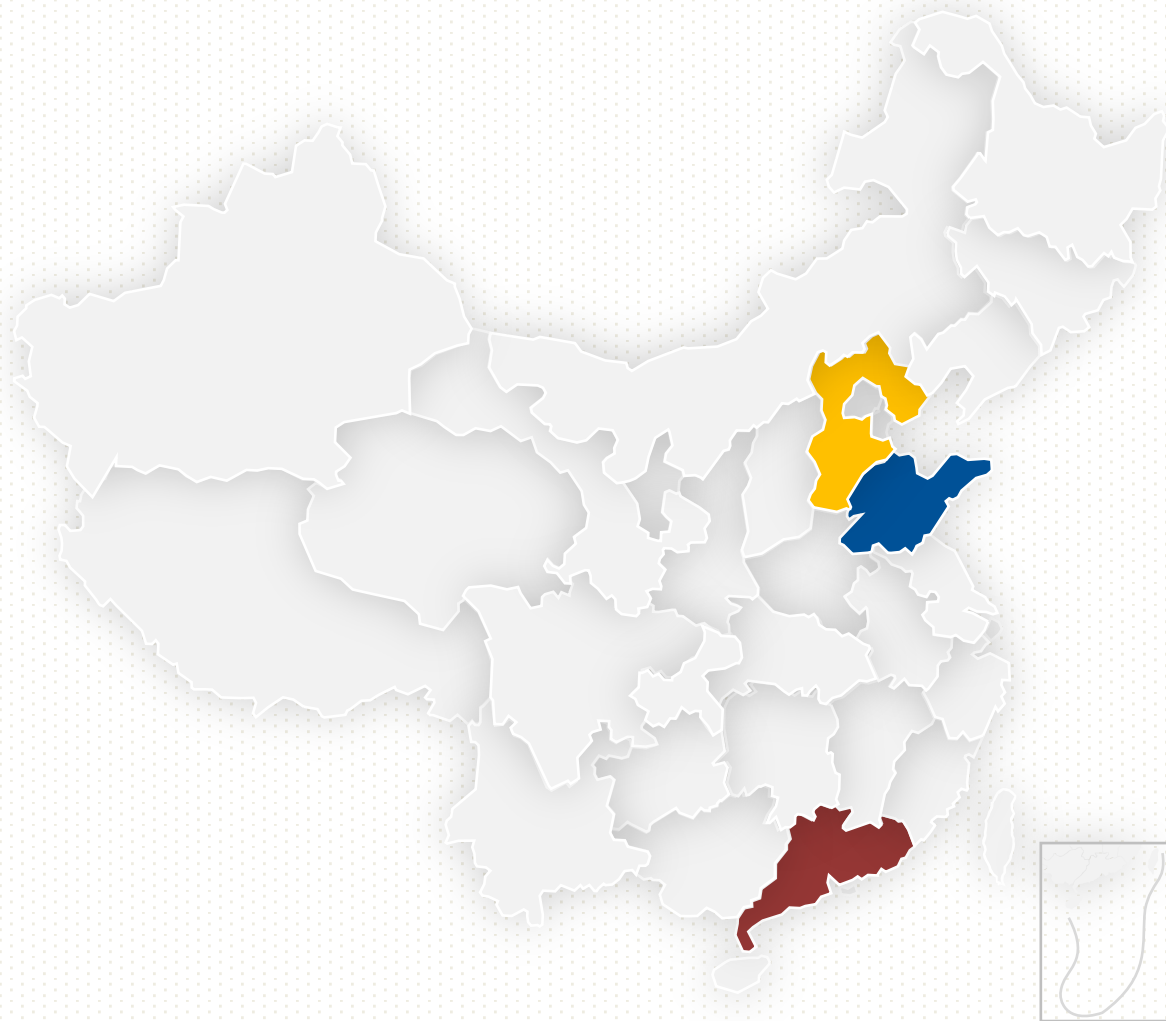
其中集中式光伏电站1008.97万千瓦；
分布式光伏2334.4。
2021年新增容量为1070.9万千瓦。

河北 / 2921.3

其中集中式光伏电站1658.84万千瓦；
分布式光伏1262.5。
2021年新增容量为730.0万千瓦。

广东 / 1020.1

其中集中式光伏电站508.20万千瓦；
分布式光伏511.9。
2021年新增容量为226.4万千瓦。



数据来源：国家能源局《2021年光伏发电建设运行情况》
（山东、河北为装机量位列全国前二）



高渗透光伏带来的问题



华南理工大学
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

高渗透光伏
(High PV penetration)

电力系统运行问题
(Operational issues)

➤ e.g., 山东部分区域因为**配电网过电压**问题, 已叫停光伏安装

节点过电压 (Overvoltage)

1 电压不平衡 (Unbalanced voltage)
电压谐波 (Voltage harmonics)

2 线路过载 (Line overloading)
电流逆流 (Inverse current flow)
热应力增加 (Increased thermal stress)

3 运行成本增加
e.g., 更多的电容开关和稳压器抽头

系统层面
计算**光伏可接入容量**
(**限制量为节点电压**),
在安装光伏前进行合理规划。

器件层面
运用电力电子技术, 通过逆变器的无功吸收降低节点电压...



计算光伏可接入容量的方法



华南理工大学
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

随机方法

- ✓ 随机方法基于概率潮流建立随机电网模型，模拟客户用电和光伏生产的变化
- 系统变量之间的数学关系随时间变化，使建立的模型无效。

时间序列方法

- ✓ 利用实际系统测量的电力消耗和太阳能光伏生产作为输入的计算。
- 需要长周期的测量(长达30年)。
- 数据可以由随机模型生成，但是计算量非常庞大。

确定性方法

- ✓ 确定性方法是基于已知和固定输入数据的潮流分析模型，分析太阳能光伏对配电网的影响。

- 现有方法需要完整的配电网拓扑结构。
- 需要每个节点下的准确负荷数据。

- ✓ 所提方法不需要完整拓扑结构；
- ✓ 不需要负荷数据；
- ✓ 保守估算，误差在6%以内！



华南理工大学
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

02

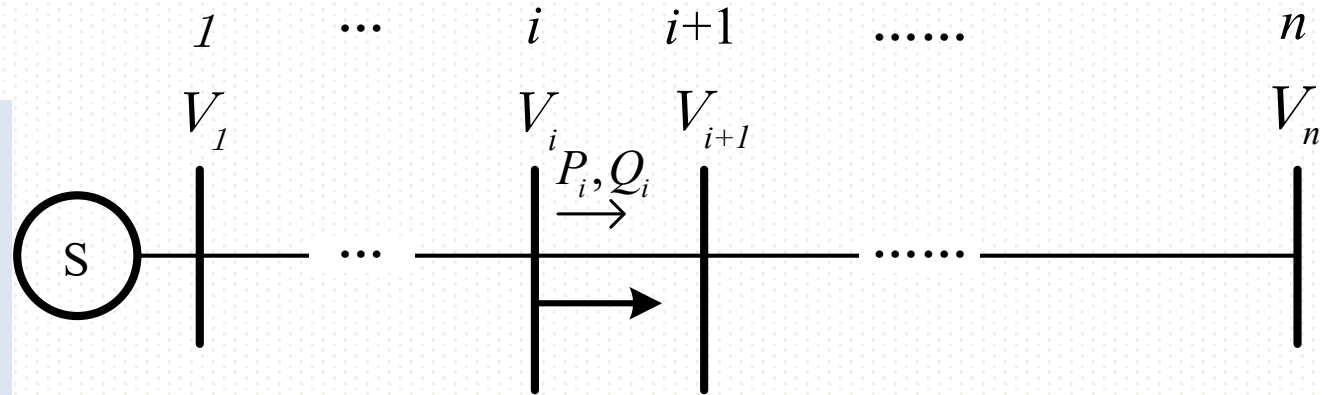
模型建立

MODEL ESTABLISHMENT



✓ 节点电压与功率的关系

$$\begin{aligned} V_{i+1}^2 &= \frac{(P_i - I_i^2 r_i)^2 + (Q_i - I_i^2 x_i)^2}{I_i^2} \\ &= \frac{P_i^2 + Q_i^2}{I_i^2} - 2(r_i P_i + x_i Q_i) + I_i^2 (r_i^2 + x_i^2) \end{aligned}$$



✓ 电压迭代方程

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 + r_i (P_i^L - 2P_i) + x_i (Q_i^L - 2Q_i)$$

✓ 迭代($n-1$)次

$$V_n^2 = V_1^2 + \sum_{j=1}^{n-1} (r_j (P_j^L - 2P_j) + x_j (Q_j^L - 2Q_j))$$

- 变电站电压 V_1 视为不变
- 潮流和线路参数共同影响节点电压

P_i^L, Q_i^L : 线路 i 上的损耗



光伏输出功率与节点电压的关系



华南理工大学
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

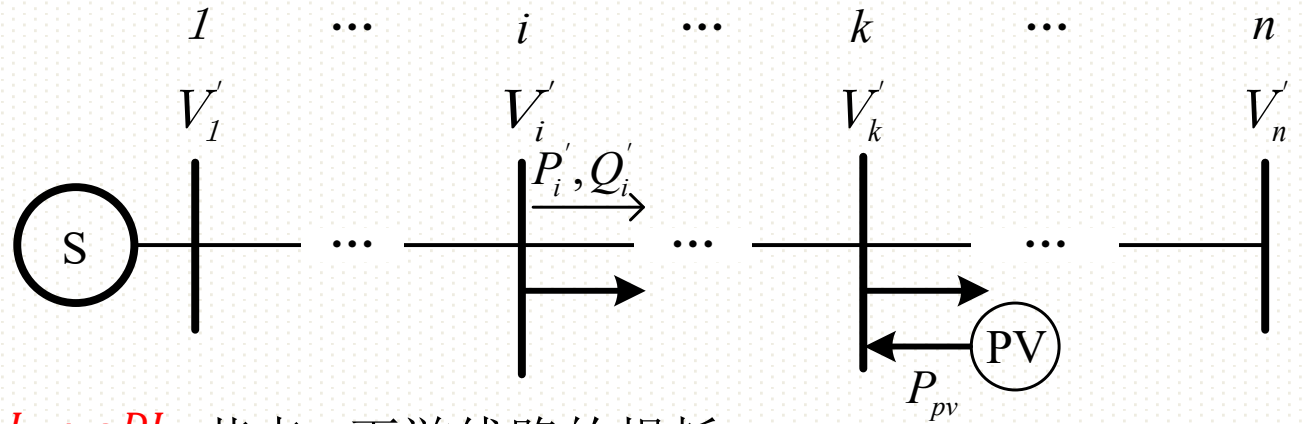
✓ 光伏并入后各参数

$$P_i^{L'} = P_i^L + \Delta P_i^L$$

$$Q_i^{L'} = Q_i^L + \Delta Q_i^L$$

$$P_i' = \begin{cases} P_i + \Delta P_i^{DL} - P_{pv} & \text{for } 1 \leq i < k \\ P_i + \Delta P_i^{DL} & \text{for } k \leq i \leq n \end{cases}$$

$$Q_i' = Q_i + \Delta Q_i^{DL}$$



$\Delta P_i^L, \Delta Q_i^{DL}$: 节点 i 下游线路的损耗

$$V_n^2 = V_1^2 + \sum_{j=1}^{n-1} (r_j(P_j^L - 2P_j) + x_j(Q_j^L - 2Q_j))$$

✓ 光伏输出功率 P_{pv} 和节点电压关系

$$(V_i^{pv})^2 = \begin{cases} V_i^2 + 2P_{pv} \sum_{j=1}^{i-1} r_j - \sum_{j=1}^{i-1} L_j & \text{for } 1 < i < k \\ V_i^2 + 2P_{pv} \sum_{j=1}^{k-1} r_j - \sum_{j=1}^{i-1} L_j & \text{for } k \leq i \leq n \end{cases}$$

$$L_j = r_j(2\Delta P_j^{DL} - \Delta P_j^L) + x_j(2\Delta Q_j^{DL} - \Delta Q_j^L)$$



✓ 准确潮流方程

$$(V_i^{pv})^2 = \begin{cases} V_i^2 + 2P_{pv} \sum_{j=1}^{i-1} r_j - \sum_{j=1}^{i-1} L_j & \text{for } 1 < i < k \\ V_i^2 + 2P_{pv} \sum_{j=1}^{k-1} r_j - \sum_{j=1}^{i-1} L_j & \text{for } k \leq i \leq n \end{cases}$$

↓ 省略 $\sum_{j=1}^{i-1} L_j$

✓ 简化后的线性方程

$$(V_i^{pv})^2 = \begin{cases} V_i^2 + 2P_{pv} \sum_{j=1}^{i-1} r_j & \text{for } 1 < i < k \\ V_i^2 + 2P_{pv} \sum_{j=1}^{k-1} r_j & \text{for } k \leq i \leq n \end{cases}$$

$(V_i^{pv})^2$ 和 P_{pv} 呈线性关系

✓ 可接入容量估算方程

$$P_{pv}^i = \begin{cases} \frac{V_{max}^2 - V_i^2}{2 \sum_{j=1}^{i-1} r_j} & \text{for } 1 < i < k \\ \frac{V_{max}^2 - V_i^2}{2 \sum_{j=1}^{k-1} r_j} & \text{for } k \leq i \leq n \end{cases}$$

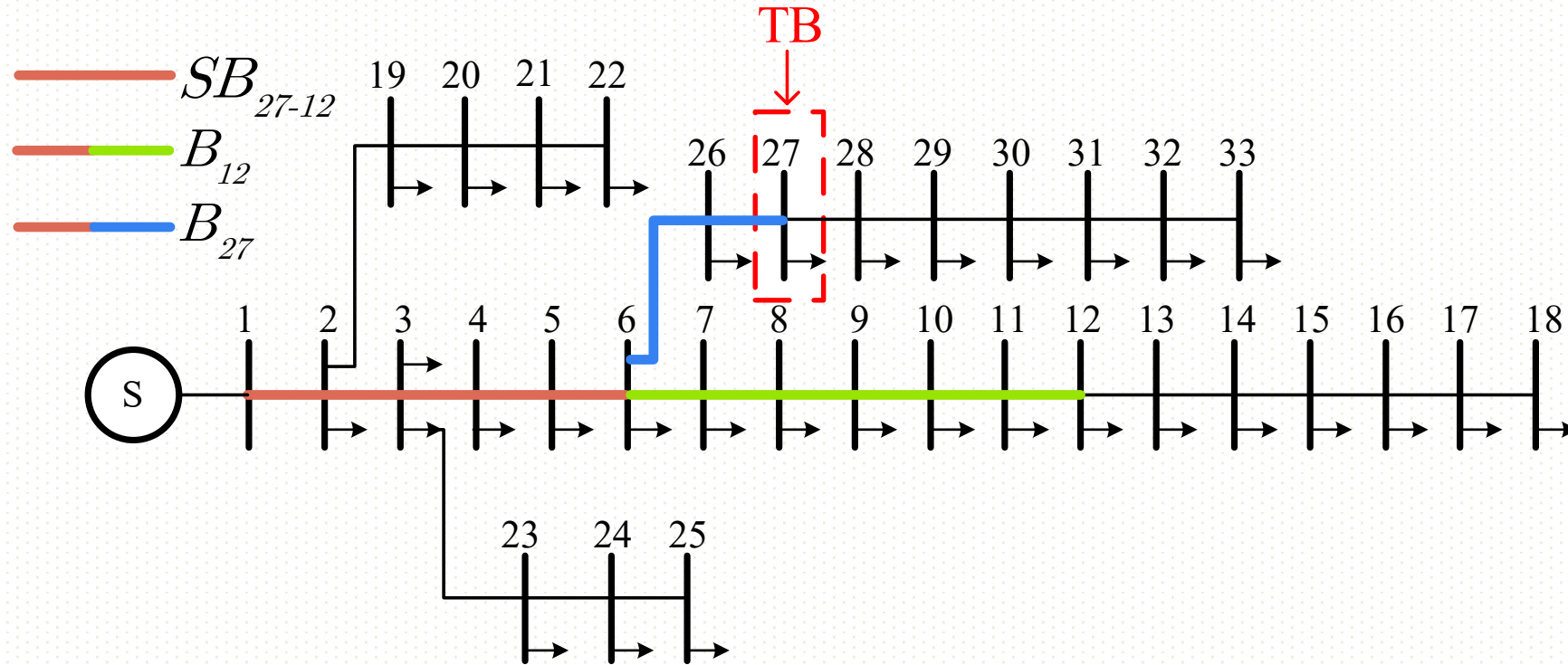
V_{max} : 电压上限 (e.g., 1.05p.u.)

P_{pv}^i : 受限于节点 i 电压下的可接入容量

可接入容量: $\min\{P_{pv}^i \mid i = 1, 2, 3, \dots, n\}$



共享支路、电气距离的概念



TB (Target Bus): 安装光伏的目标母线

B (Branch): 变电站到某一节点的线路

SB (Shared Branch): 共享支路

ED (Electrical Distance): 电气距离；共享支路上的线路电阻/电抗之和，用于计算可接入容量



1. 限制电压

- 人为设置, e.g., 1.05p.u.

2. 当前节点电压

- 从历史数据中选取最高值

$$P_{pv}^i = \begin{cases} \frac{V_{max}^2 - V_i^2}{2(\sum_{j=1}^{i-1} r_j + \alpha \sum_{j=1}^{i-1} x_j)} & \text{for } 1 < i < k \\ \frac{V_{max}^2 - V_i^2}{2(\sum_{j=1}^{i-1} r_j + \alpha \sum_{j=1}^{i-1} x_j)} & \text{for } k \leq i \leq n \end{cases}$$

3. 电气距离项

- 通过部分拓扑结构进行定位
- 从数据库中提取线路参数
- 根据光伏型号确定无功系数

估算的可接入容量 (由**TB**和**已并入光伏的节点**电压共同限制)

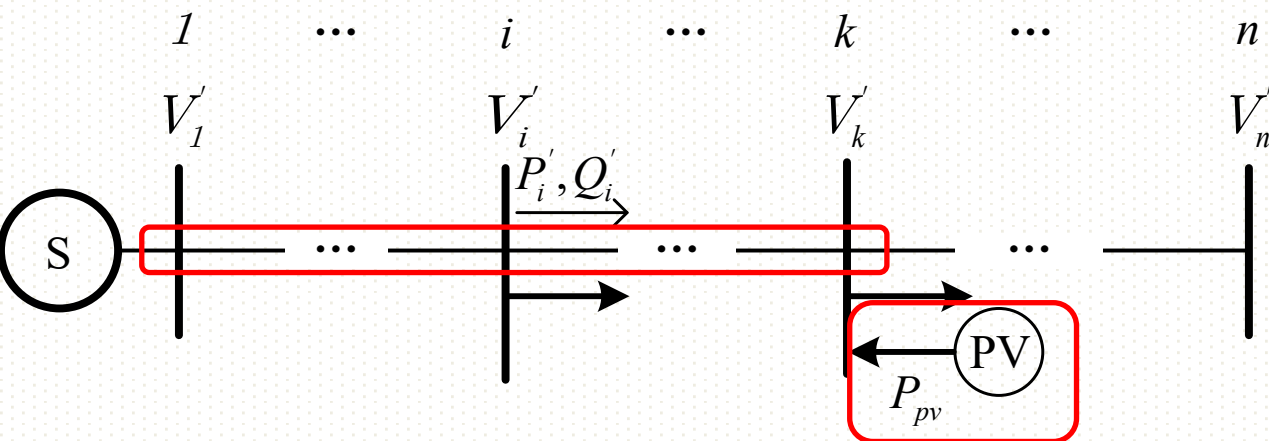
- 取最小为可接入容量
- 可用于误差分析与修正*



✓ 被忽略的损耗项

$$L_j = r_j(2\Delta P_j^{DL} - \Delta P_j^L) + x_j(2\Delta Q_j^{DL} - \Delta Q_j^L)$$

$$\begin{aligned}\Delta P_i^L &= \Delta(I_i^2)r_i \\ \Delta Q_i^L &= \Delta(I_i^2)x_i\end{aligned}$$



✓ 光伏输出直接影响上游节点发出功率

$$\begin{aligned}\Delta(I_i^2) &\approx \frac{(P_i - P_{pv})^2 + Q_i^2}{(V_i^{pv})^2} - \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \text{ for } 1 \leq i < k, \\ \Delta(I_i^2) &\approx 0 \text{ for } k \leq i \leq n-1.\end{aligned}$$

对于大容量 P_{pv} , $\Delta(I_i^2) \geq 0 \rightarrow \sum_{j=1}^{i-1} L_j > 0 \rightarrow$ 保守估算

✓ 容量修正项

$$P_{pv-c}^i = \frac{\sum_{j=1}^{i-1} L_j}{2 \sum_{j=1}^{i-1} r_j}$$

$$P_{pv-new}^i = P_{pv-original}^i + P_{pv-c}^i$$

$V_i^{pv} = V_{max}$; P_{pv} : 忽略损耗估算的容量 \rightarrow 修正后保守估算依然成立



华南理工大学
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

03

仿真与结果

SIMULATION AND RESULTS

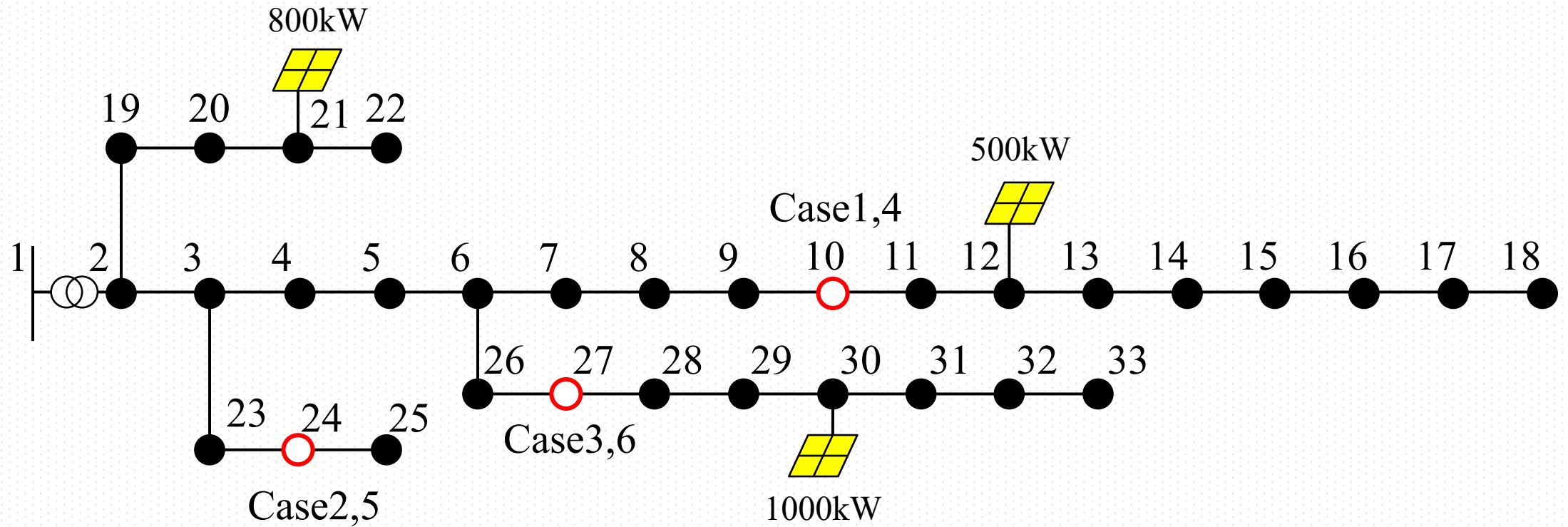
博学慎思 明辨笃行




情景描述



华南理工大学
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



○ Target Bus (TB)

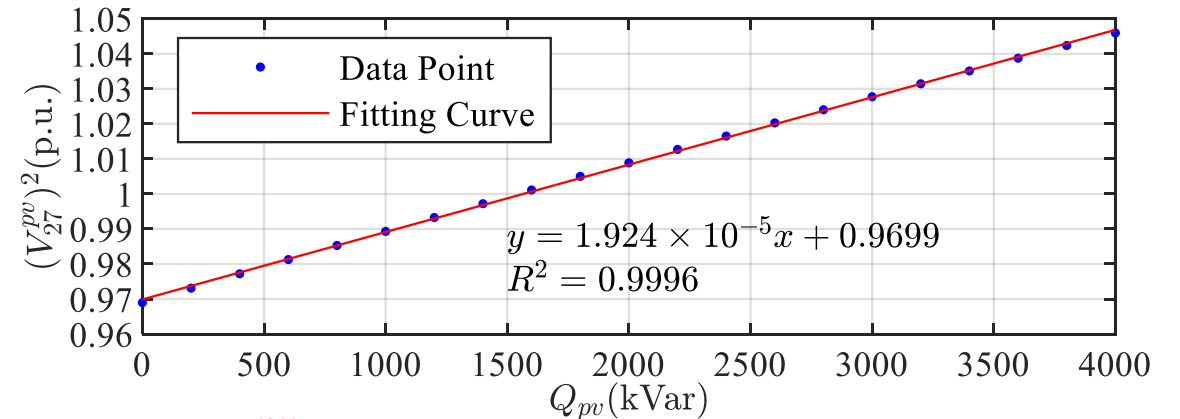
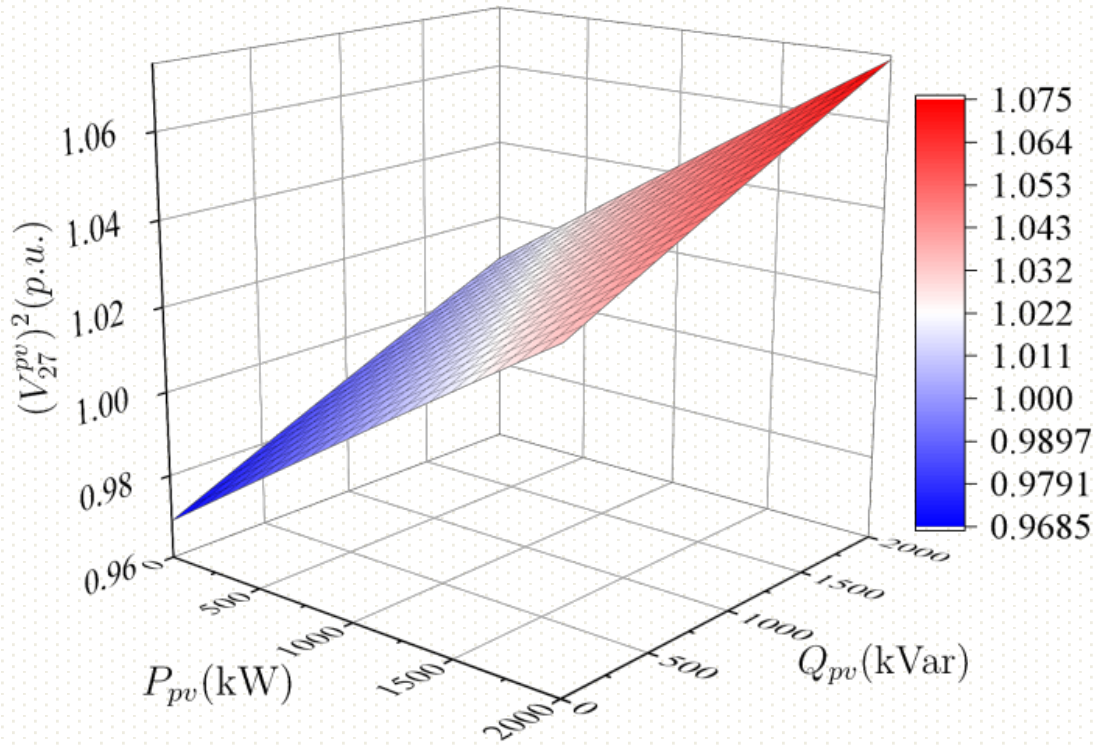
 情景二下已经安装的光伏



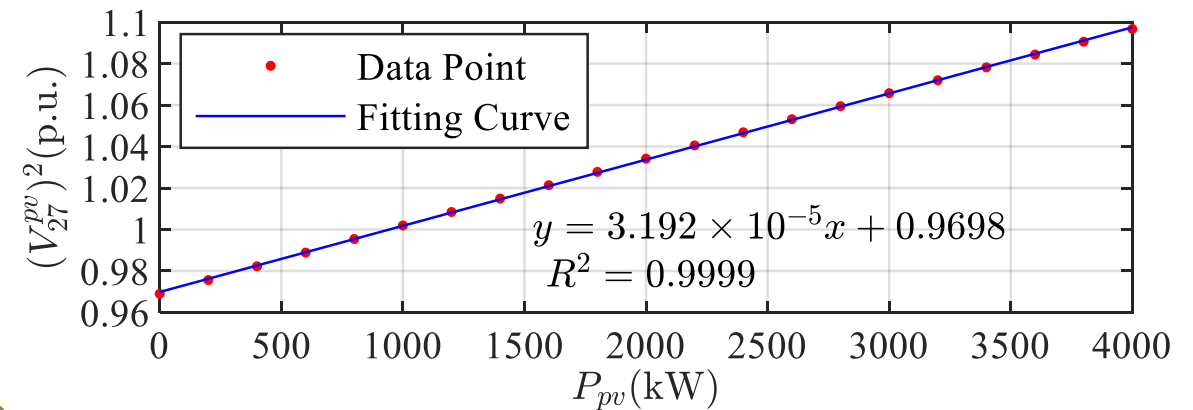
线性关系验证



$$(V_i^{pv})^2 = \begin{cases} V_i^2 + 2P_{pv} \sum_{j=1}^{i-1} r_j & \text{for } 1 < i < k \\ V_i^2 + 2P_{pv} \sum_{j=1}^{k-1} r_j & \text{for } k \leq i \leq n \end{cases}$$



(a). $(V_{27}^{pv})^2$ increases as P_{pv} rises from 0 to 4MW;



(b). $(V_{27}^{pv})^2$ increases as Q_{pv} rises from 0 to 4kVar;

(c). 3D colormap of $(V_{27}^{pv})^2$ with changing P_{pv} and Q_{pv} .



估算容量,误差及限制节点



华南理工大学
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ESTIMATION RESULTS IN SCENARIO I

Case	TB	Bus with minimum PHC	Estimated PHC (kW)	Accurate PHC (kW)	Error (%)
1	10	10	1927	2008	-4.0%
2	24	24	4900	5080	-3.5%
3	27	27	4056	4190	-3.2%

ESTIMATION RESULTS IN SCENARIO II

Case	TB	Bus with minimum PHC	Estimated PHC (kW)	Accurate PHC (kW)	Error (%)
4	10	12	1041	1095	-4.9%
5	24	24	4413	4565	-3.3%
6	27	30	2134	2220	-4.0%

ERROR REDUCTION RESULTS IN SCENARIOS I AND II

Case	Updated PHC (kW)	Accurate PHC (kW)	Error (%)
1	1927(+73)	2008	-0.4%
2	4900(+167)	5080	-0.3%
3	4056(+125)	4190	-0.2%
4	1041(+49)	1095	-0.5%
5	4413(+152)	4565	-0.0%
6	2134(+82)	2220	-0.2%

✓ 误差在5%以内

✓ 保守估算

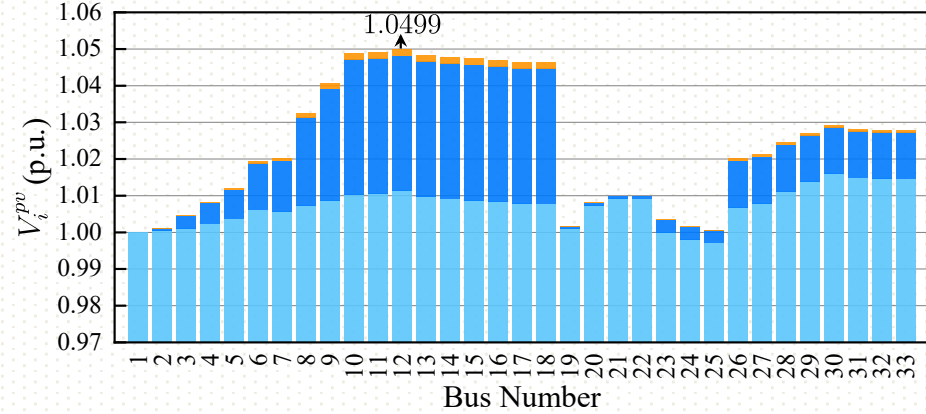
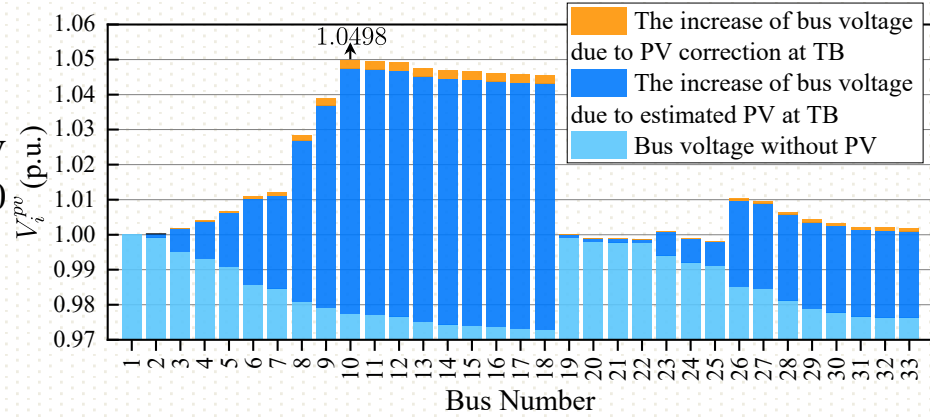


节点电压情况



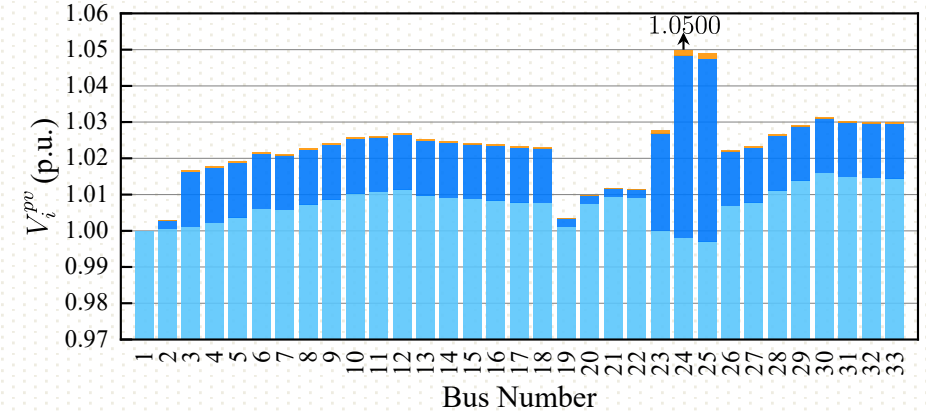
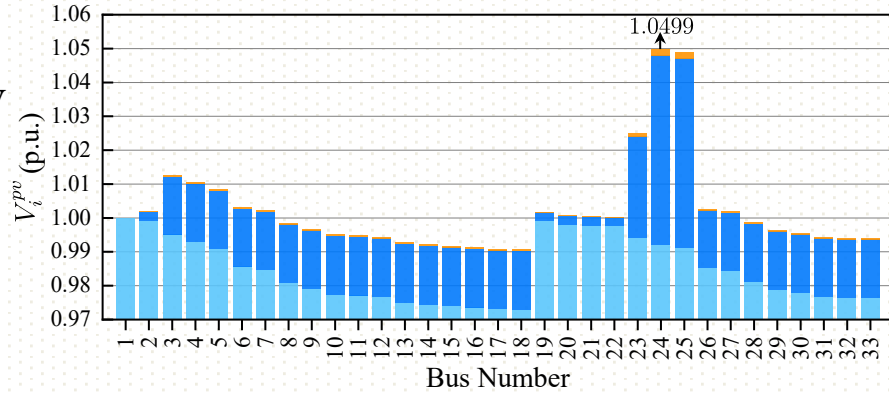
华南理工大学
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

(1927+73) kW PV
connects to bus 10
in case 1;



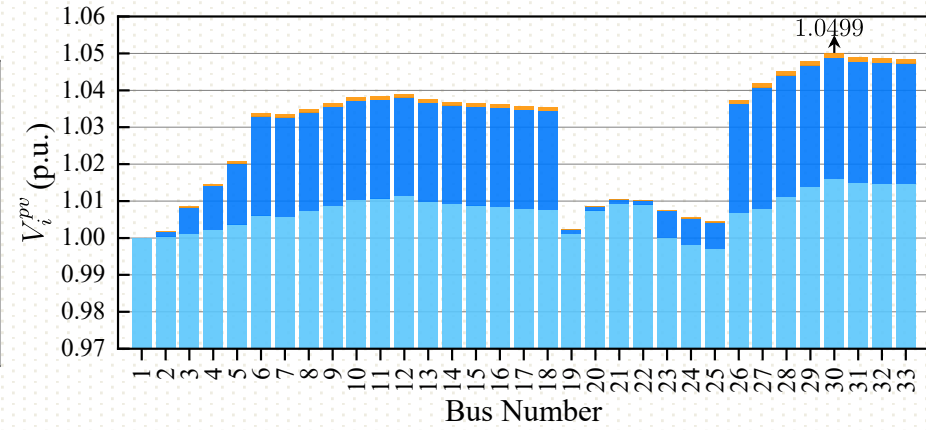
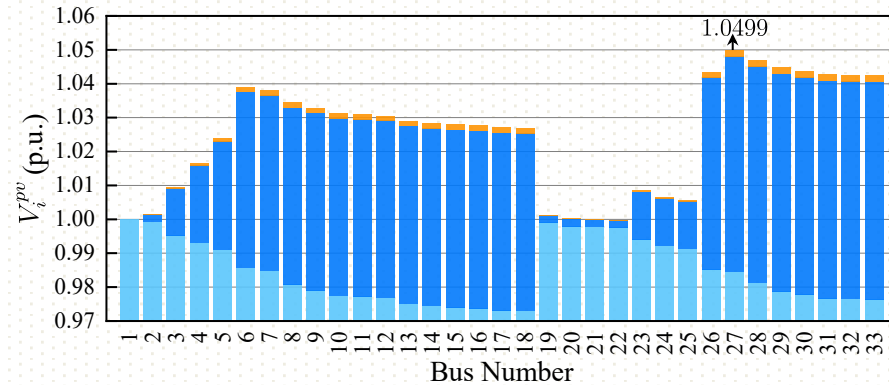
(1041+49) kW PV
connects to bus 10
in case 4;

(4900+167) kW PV
connects to bus 24
in case 2 ;



(4413+152) kW PV
connects to bus 24
in case 5;

(4056+125) kW PV
connects to bus 27
in case 3



(2134+82) kW PV
connects to bus 27
in case 6.



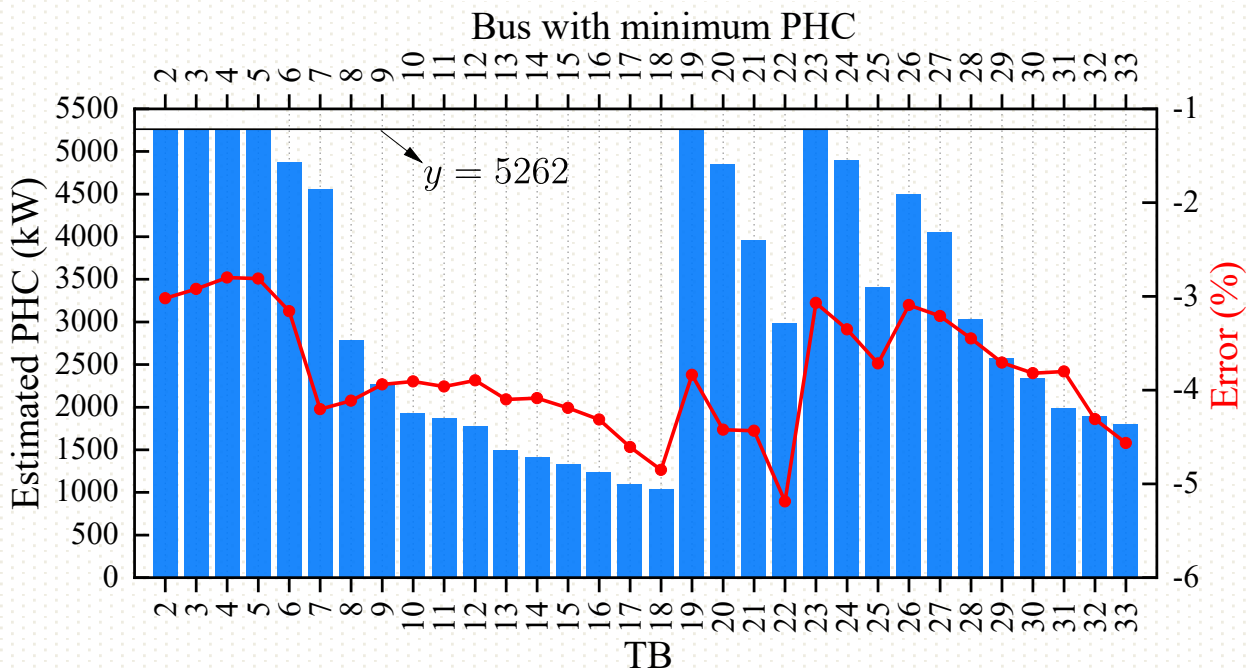
估算容量,误差及限制节点(全节点)



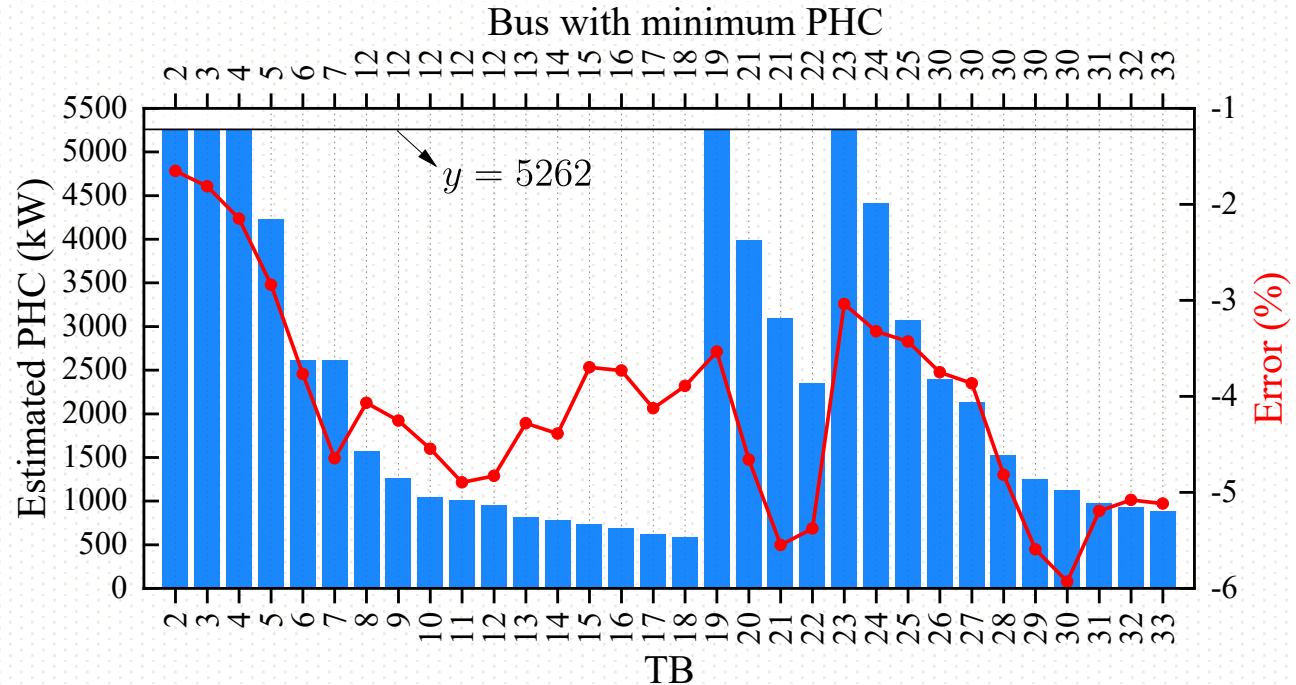
华南理工大学
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

不用误差修正, 对IEEE 33 Bus所有节点在场景一、二下进行容量计算。

$$\text{电流限制: } \sqrt{3}V_N I_N = \sqrt{3} \times 12.66 \text{ kV} \times 240 \text{ A} = 5262 \text{ kW}$$



The estimated PHC and error for each target bus in Scenario I



The estimated PHC and error for each target bus in Scenario II

✓ 误差在6%以内

✓ 保守估算

✓ 容量均被TB或已并入光伏的节点电压限制

成果：完成SCI论文一篇并提交 (Under Review)

✓ 方法优势

- 1 不需要完整拓扑结构
- 2 不需要潮流迭代
- 3 保守估计，误差较小（6%以内）

↑ 后续工作

- 1 探索该方法的实际应用
- 2 节点电压在有限条件下的估算
- 3 ...

04

实际应用（初步成果）

PRACTICE



✓ 节点电压估算方程

$$V_{i+1}^2 = V_i^2 - 2(r_i P_i + x_i Q_i)$$

节点二次侧电压可测
变压器抽头位置未知

一次侧节点电压
难以直接测量

根据已知潮流
估算节点电压

已知负荷数据

运用节点电压估算方程
估算节点电压

方法一

已知首端潮流

运用节点电压估算方程
估算节点电压

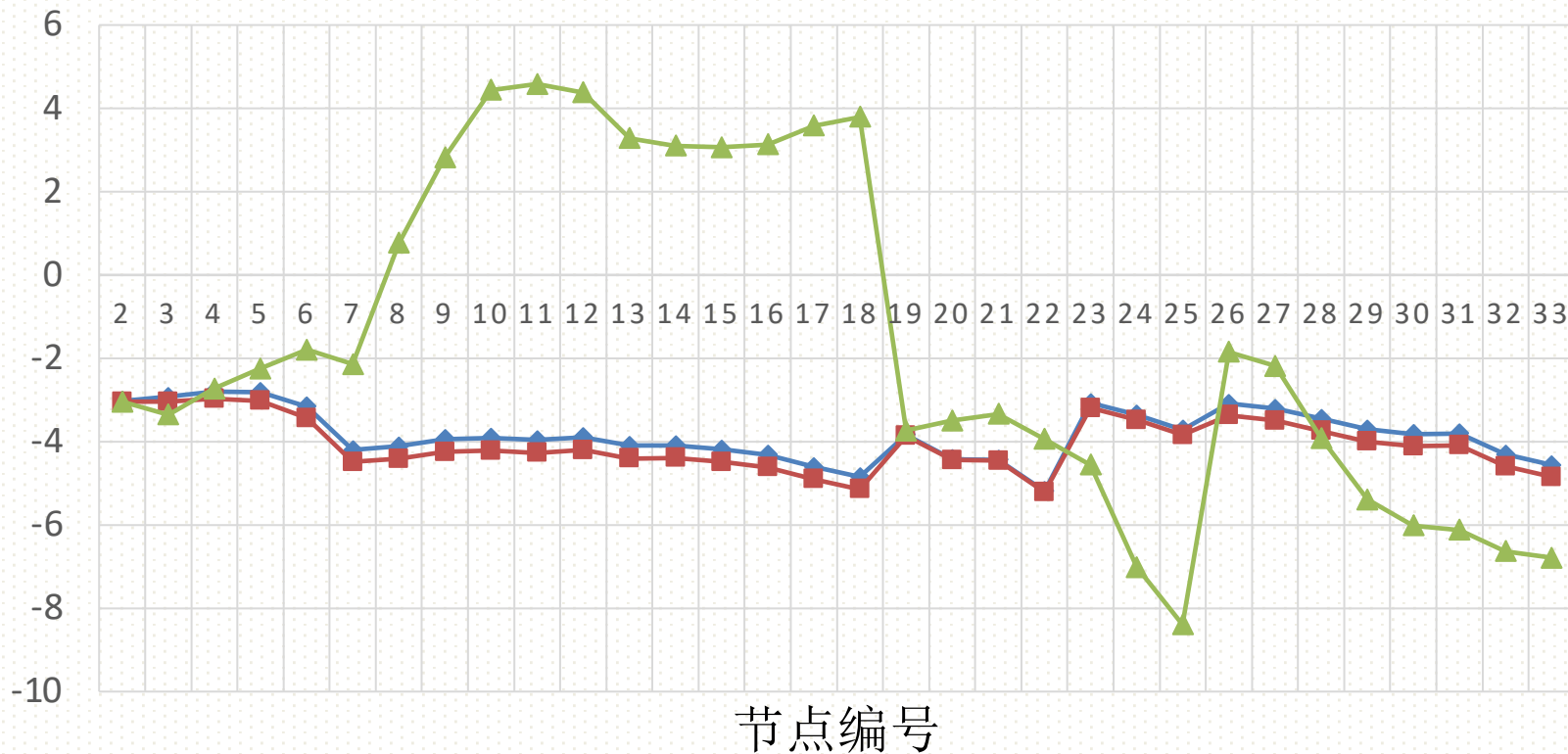
方法二

将首端潮流平均分配到各个节点



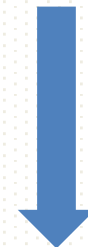
误差对比(30%负荷)

—●— 节点电压可测 —■— 方法一 —▲— 方法二



✓ 方法一更加保守

✓ 方法二误差在 $\pm 10\%$ 以内



- 实际负荷较为集中在线路末端
→ 平均首端潮流 → 节点电压估算值偏大 → 误差为负；
- 实际负荷较为集中在线路前端
→ 平均首端潮流 → 节点电压估算值偏小 → 误差为正

p.s., *线路为变电站到TB



附录一：33节点系统数据



华南理工大学
SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

节点负荷数据

Load	Location (Bus Bar)	Real Load (kW)	Reactive Load (kVAR)
L2	2	100	60
L3	3	90	40
L4	4	120	80
L5	5	60	30
L6	6	60	20
L7	7	200	100
L8	8	200	100
L9	9	60	20
L10	10	60	20
L11	11	45	30
L12	12	60	35
L13	13	60	35
L14	14	120	80
L15	15	60	10
L16	16	60	20
L17	17	60	20
L18	18	90	40
L19	19	90	40
L20	20	90	40
L21	21	90	40
L22	22	90	40
L23	23	90	50
L24	24	420	200
L25	25	420	200
L26	26	60	25
L27	27	60	25
L28	28	60	20
L29	29	120	70
L30	30	200	600
L31	31	150	70
L32	32	210	100
L33	33	60	40
Total load		3715	2300

线路参数

Line Name	From Bus	To Bus	Length (km)	Line Impedance	
				Resistance (Ohm/km)	Reactance (Ohm/km)
BRANCH-1	1	2	1	0.0922	0.0470
BRANCH-2	2	3	1	0.4930	0.2511
BRANCH-3	3	4	1	0.3660	0.1864
BRANCH-4	4	5	1	0.3811	0.1941
BRANCH-5	5	6	1	0.8190	0.7070
BRANCH-6	6	7	1	0.1872	0.6188
BRANCH-7	7	8	1	1.7114	1.2351
BRANCH-8	8	9	1	1.0300	0.7400
BRANCH-9	9	10	1	1.0440	0.7400
BRANCH-10	10	11	1	0.1966	0.0650
BRANCH-11	11	12	1	0.3744	0.1238
BRANCH-12	12	13	1	1.4680	1.1550
BRANCH-13	13	14	1	0.5416	0.7129
BRANCH-14	14	15	1	0.5910	0.5260
BRANCH-15	15	16	1	0.7463	0.5450
BRANCH-16	16	17	1	1.2890	1.7210
BRANCH-17	17	18	1	0.7320	0.5740
BRANCH-18	2	19	1	0.1640	0.1565
BRANCH-19	19	20	1	1.5042	1.3554
BRANCH-20	20	21	1	0.4095	0.4784
BRANCH-21	21	22	1	0.7089	0.9373
BRANCH-22	3	23	1	0.4512	0.3083
BRANCH-23	23	24	1	0.8980	0.7091
BRANCH-24	24	25	1	0.8960	0.7011
BRANCH-25	6	26	1	0.2030	0.1034
BRANCH-26	26	27	1	0.2842	0.1447
BRANCH-27	27	28	1	1.0590	0.9337
BRANCH-28	28	29	1	0.8042	0.7006
BRANCH-29	29	30	1	0.5075	0.2585
BRANCH-30	30	31	1	0.9744	0.9630
BRANCH-31	31	32	1	0.3105	0.3619
BRANCH-32	32	33	1	0.3410	0.5302

- V. Vita, “Development of a Decision-Making Algorithm for the Optimum Size and Placement of Distributed Generation Units in Distribution Networks,” *Energies*, vol. 10, pp. 1433, 2017.



华南理工大学

SOUTH CHINA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

汇报结束 感谢聆听！

2023年5月

汇报人：赵知易

指导老师：雪映