

新加坡太阳能资源评估及发展路径研究

白苏^{1,2}, 高艺^{1,2}

(1.全球能源互联网集团有限公司,北京 100031;2.全球能源互联网发展合作组织,北京 100031)

摘要 太阳能是新加坡唯一可能大规模开发的可再生能源。新加坡土地资源有限,根据土地用途,太阳能可开发区域可分为屋顶光伏、楼宇表面光伏、陆基光伏、漂浮式光伏和基建光伏五类,各类型光伏可开发总面积约 $3680 \times 10^4 \text{m}^2$ 。根据评估,2050年新加坡光伏可开发潜力约 $968 \times 10^4 \text{kW}$,其中分布式太阳能约占74%。屋顶、楼宇、基建光伏主要采用分布式开发,度电成本较高;陆基、漂浮式光伏主要采用集中式开发,成本较低。根据各类太阳能的成本下降速度和开发程度,提出两种2030~2050年太阳能开发路径,即充分开发路径和经济开发路径。充分开发路径以太阳能潜力的充分开发为目标,经济开发路径考虑太阳能开发的度电成本,两条路径的不同之处集中在屋顶光伏和楼宇表面光伏的开发程度。充分开发路径下,电气化水平达到61%,相比经济开发路径提高16个百分点;可再生能源装机占比达到51%,相比经济开发路径提高19个百分点。在两种太阳能开发路径的基础上,提出两种适应不同太阳能发展路径的2050能源情景。新加坡在这两种发展路径下均无法实现碳中和,还需提升跨国输电规模。

关键词 太阳能资源 光伏 充分开发 经济开发 度电成本 新加坡

1 前言

新加坡是全球著名的“袖珍”发达国家,化石能源资源匮乏,但却利用自身地缘优势,走上了以原油加工为核心的外向型能源富国之路。新加坡以城市绿化、可持续生活和绿色经济为目标,在过去的50年里完成了石油向天然气的转变,实现了电力清洁化。随着全球变暖带来的气候变化挑战,如何减少碳排放、实现碳中和成为新加坡政府和研究机构关注的焦点。

发展可再生能源是达成碳中和的重要措施,但是新加坡可再生能源匮乏,没有任何水力和地热能源。风能方面,除了沿海地区和近海岛屿,平均风速一般小于 2m/s ,并且,大部分沿海地区用作港口、停泊处和航道,因此几乎没有风资源开发潜力。太阳能是新加坡最有前途的可再生能源,年平均辐照强度为 $1600 \sim 1700 \text{kW} \cdot \text{h}/\text{m}^2$,发展太阳能是新加坡最可行的可再生能源选择^[1-7]。

本文以太阳能为核心,评估新加坡各类型太阳能可开发资源,计算各类型太阳能度电成本变化,并给出充分开发和经济开发两种太阳能发展路径,以及适应不同太阳能发展路径的新加坡2050能源情景展望。

2 太阳能资源评估

2.1 可开发面积评估

新加坡土地资源有限,可建设大规模光伏基地的土地较少,需要充分利用各种可开发光伏的区域。根据土地用途,可以将新加坡太阳能可开发区域分为以下五类:屋顶光伏、楼宇表面光伏、陆基光伏、漂浮式光伏和基建光伏。

2.1.1 屋顶光伏

屋顶光伏可开发潜力的评估基于新加坡土地管理局(SLA)的详细3D城市模型,该模型包括新加坡全部15.8万座建筑。在移除可用表面非常小(小于 10m^2 ,不能用于光伏部署)的建筑后,参与屋顶光伏可开发潜力评估的建筑约有13.2万座,屋顶总面积约 $9870 \times 10^4 \text{m}^2$ 。经过最小辐照量、最大倾角、最小连续面积以及建筑类型筛选后,屋顶光伏可开发总

基金项目:全球能源互联网集团有限公司科技项目“考虑大规模多态电能替代负荷接入的电源充裕度量与规划方法研究”(编号:SGGEIG00JYJS2100033)。

作者简介:白苏,博士,2019年毕业于清华大学电气工程专业,目前主要从事电力规划研究及宏观能源战略研究。

E-mail: 744176958@qq.com

面积约 $1322.1 \times 10^4 \text{m}^2$, 其中居民房屋可开发面积约 $222.5 \times 10^4 \text{m}^2$, 工业建筑可开发面积约 $805.6 \times 10^4 \text{m}^2$, 商业建筑可开发面积约 $165.6 \times 10^4 \text{m}^2$, 其他用途建筑可开发面积约 $128.4 \times 10^4 \text{m}^2$ 。

2.1.2 楼宇表面光伏

楼宇表面光伏可开发潜力的评估与屋顶类似, 基于新加坡土地管理局(SLA)的详细 3D 城市模型。评估包括所有适合光伏安装的外立面区域, 与建筑的整合程度无关, 即由建筑增建光伏(BAPV)和建筑一体化光伏(BIPV)两部分组成。参与楼宇表面光伏可开发潜力评估的总面积为 $2.14 \times 10^8 \text{m}^2$, 经过最小辐照量、最小连续面积、建筑窗墙比以及表面朝向筛选后, 现有楼宇的表面光伏可开发面积约 $787.7 \times 10^4 \text{m}^2$ 。根据新加坡过去 10 年平均新增建筑数量, 以每年新增 100 座建筑计算, 至 2050 年新建楼宇可开发面积约 $195 \times 10^4 \text{m}^2$ 。

2.1.3 陆基光伏

陆基光伏可开发潜力的评估基于新加坡土地管理局(SLA)的空置土地地理信息系统, 评估区域包括新加坡主岛以及可能接入主岛电网的两个较大岛屿——裕廊岛和普劳塞马考岛的空置土地。评估是否可用于太阳能部署时, 充分考虑公众接受程度、利益冲突以及经济性, 排除田野、森林、自然保护区、不适合的杂物区以及填海造地区。陆基光伏可开发总面积约 $500 \times 10^4 \text{m}^2$, 其中主岛 $35 \times 10^4 \text{m}^2$, 裕廊岛 $380 \times 10^4 \text{m}^2$, 普劳塞马考岛 $85 \times 10^4 \text{m}^2$, 大部分可开发区域集中在裕廊岛上^[8]。

2.1.4 漂浮式光伏

漂浮式光伏是指在水体上安装太阳能光伏系统, 可开发潜力的评估包括内陆水体和近海水域的漂浮式光伏。新加坡内陆水体总面积约为国土总面积的 6%, 但由于各种限制, 其中只有一小部分可以用于浮式光伏部署。经过评估, 内陆水体理论上可部署太阳能光伏发电总面积约 $400 \times 10^4 \text{m}^2$, 扣除指定用于维护浮标和安全浮标的水域后, 净光伏面积约为 $250 \times 10^4 \text{m}^2$ 。由于新加坡海上空间非常拥挤, 只有被称为“死海空间”的区域才被纳入评估, 排除生物多样性等环境要求, 可用于设置漂浮式光伏的海上区域约 $211.6 \times 10^4 \text{m}^2$ ^[9]。

2.1.5 基建光伏

基建光伏是指利用现有的基础设施, 将其与太

阳能光伏系统相结合, 同时不干扰土地的原有用途。纳入评估的基建包括土地(露天停车场、农业区等)、隔音屏障、防洪渠、道路等。通过对现有基建进行三维空间扩展等新型技术改造, 可用于安装基建光伏的区域约 $415 \times 10^4 \text{m}^2$, 其中土地约 $250 \times 10^4 \text{m}^2$, 隔音屏障约 $100 \times 10^4 \text{m}^2$, 防洪渠约 $25 \times 10^4 \text{m}^2$, 道路约 $40 \times 10^4 \text{m}^2$ ^[10]。新加坡各类型光伏可开发面积见表 1。

表 1 新加坡各类型光伏可开发面积

太阳能类型	子类	可开发面积/ 10^4m^2
屋顶光伏	居民房屋	222.5
	工业建筑	805.6
	商业建筑	165.6
	其他	128.4
楼宇表面光伏	楼宇翻新	787.7
	新建楼宇	195.0
陆基光伏	本岛	35.0
	裕廊岛	380.0
	普劳塞马考岛	85.0
漂浮式光伏	内陆	250.0
	近海	211.6
基建光伏		415.0
总计		~3680

2.2 可开发潜力评估

根据各种类型太阳能可开发面积, 预测未来光伏系统面积系数, 进而评估得到新加坡光伏可开发潜力。2020 年, 最先进的光伏板面积系数可以达到 $0.19 \text{kW}/\text{m}^2$, 根据国际太阳能组织预测, 2050 年光伏系统面积系数可以达到 $0.25 \sim 0.3 \text{kW}/\text{m}^2$ ^[11]。陆基光伏面积系数取 $0.3 \text{kW}/\text{m}^2$, 其余类型取 $0.25 \text{kW}/\text{m}^2$ 测算, 2050 年新加坡光伏可开发潜力为 $968 \times 10^4 \text{kW}$, 其中屋顶光伏的开发潜力最大, 约 $330 \times 10^4 \text{kW}$, 占比 34%; 楼宇表面光伏可开发潜力约 $246 \times 10^4 \text{kW}$, 占比 25%; 陆基光伏可开发潜力约 $150 \times 10^4 \text{kW}$, 占比 16%; 漂浮式光伏可开发潜力约 $138 \times 10^4 \text{kW}$, 占比 14%; 基建光伏可开发潜力约 $104 \times 10^4 \text{kW}$, 占比 11%。新加坡各类光伏可开发潜力见表 2。

3 太阳能度电成本

3.1 度电成本预测方法

3.1.1 计算模型

太阳能度电成本(LCOE)计算公式见式(1)。式中分子为整个生命周期内的项目成本, 包括权益投

资成本(*EPCI*)、运营成本(*OM*)、保险(*IC*)、变频器保修延期成本(*IEI*)。延长保修的年份取决于变频器供应商,该模型假设保修期限为20年。贷款(*LP*)包括年度利息和摊销。*OM*、*IC*和*IEI*在第一年后根据

$$LCOE = \frac{EPCI + \sum_{n=1}^N \frac{OM^* + IC^*}{(1+DR)^n} + \frac{IEI_{n=5,10,15,20}^*}{(1+DR)^{n=5,10,15,20}} + \sum_{n=1}^N \frac{LP}{(1+DR)^n}}{\sum_{n=1}^N \frac{(IRD \times PR) \times (1-SDR)^n}{(1+DR)^n}} \quad (1)$$

分子和分母由加权平均资本成本(*WACC*)的净现值计算得到的名义贴现率(*DR*)进行折现。

$$WACC = (1-D) \times (RFR_{20} + b \times MRP) + D \times (RFR_{10} + DP) \times (1-TR) \quad (2)$$

其中,当地无风险利率(*RFR*)以新加坡政府债券收益率数据为基础,债务成本为10年(*RFR*₁₀),股权成本为20年(*RFR*₂₀);权益成本假设太阳能系统投资与投资新加坡经济的风险相等,贝塔系数(*b*)为1.0;市场风险溢价(*MRP*)使用新加坡国家电力市场(*EMA*)提供的最新数据进行计算;债务比率(*D*)为由外部贷款人提供资金的投资的百分比;债务附加费(*DP*)取3.07%;税率(*TR*)使用新加坡企业的所得税率,即17%。

表2 新加坡各类型光伏可开发潜力

太阳能类型	子类	开发潜力/10 ⁴ kW
屋顶光伏	居民房屋	56
	工业建筑	201
	商业建筑	41
	其他	32
楼宇表面光伏	楼宇翻新	197
	新建楼宇	49
陆基光伏		150
漂浮式光伏	内陆	75
	近海	63
基建光伏		104
总计		968

3.1.2 基本假设

为了简化计算,做如下假设:

① 投资成本方面。因空间限制,新加坡不再考虑低效率模块(低于或等于300W的多晶硅模块),光伏组件最低成本设定为0.10美元/W;中央逆变器的最低成本设定为0.025美元/W,串式逆变器的最低成本设定为0.035美元/W^[12];不考虑太阳能并

通货膨胀率进行调整。

分母为系统的全生命周期发电量。系统第一年的发电量由可用辐照度(*IRD*)及性能比率(*PR*)计算。第一年后,每年根据系统衰退率(*SDR*)调整发电量。

网成本和输电成本;为简化分析,不考虑剩余价值和退役成本,假设它们相互平衡。

② 运营成本方面。不包括任何租金费用;运营和维护成本占资本支出的1%~1.45%不等,具体取决于系统类型(大型屋顶为1%,小型为1.45%);随着资本支出随时间的推移而减少;保险成本估计在资本支出的0.4%~0.6%之间;基于新加坡国家环境局(*NEA*)的经验数据^[13],以及1991~2000年和2010~2018年的月度数据,假设整个预测期内P50的年辐照度恒定为1644kW·h/m²;性能比率从78%开始,并以每年0.5%的速度提高,直至达到单晶硅82%的上限;假设浮动光伏系统比屋顶光伏和陆基光伏系统的性能比率增加6%^[14];系统衰退率在整个预测期内保持不变,屋顶和陆上光伏系统为0.8%,内陆水库漂浮光伏为1%,近海漂浮光伏为1.5%。

3.1.3 模型基本财务参数选择

贷款期限为10年;采用25年线性折旧;系统寿命为25年;运营成本(*OPEX*)通胀率为1.7%;不计税;在建设期间没有利息,假设贷款人提供宽限期;整个预测期内固定汇率,1美元兑换1.36新加坡元;名义债务率为5%(无风险利率1.92%,债务溢价3.08%);权益成本为8.75%~9%(无风险利率2.22%,市场风险溢价6.53%,贝塔系数1.0);100%股权融资*WACC*=9%。

3.2 度电成本变化预测

根据评估,各类光伏2025~2050年*LCOE*变化如图1所示。2025年,陆基光伏*LCOE*为0.08新加坡元/(kW·h),与气电成本相当,其他光伏种类成本依然较高,在0.12~0.19新加坡元/(kW·h)之间。

到2030年,陆基光伏*LCOE*持续下降至0.054新加坡元/(kW·h);内陆漂浮式光伏*LCOE*下降至0.07新加坡元/(kW·h);屋顶光伏、楼宇表面光伏、

近海漂浮式光伏和基建光伏 $LCOE$ 保持在 0.09~0.11 新加坡元/(kW·h) 的高位。

2050 年,陆基光伏和内陆漂浮式光伏 $LCOE$ 下降至 0.05 新加坡元/(kW·h);近海漂浮式光伏和基建光伏 $LCOE$ 均下降至 0.076 新加坡元/(kW·h);屋顶、楼宇表面光伏分别降至 0.09 新加坡元/(kW·h) 和 0.105 新加坡元/(kW·h)。

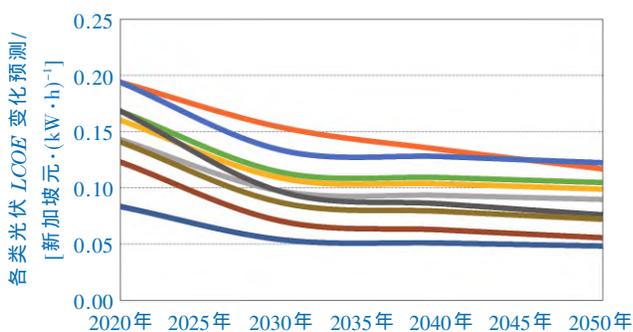


图 1 各类光伏 2025~2050 年 $LCOE$ 变化预测

— 居民房屋; — 工业建筑; — 商业建筑; — 其他屋顶;
— 楼宇翻新; — 新建楼宇; — 陆基;
— 内陆; — 近海; — 基建

3.3 太阳能发展路径预测

太阳能的发展路径不仅取决于成本的下降速度,还取决于政府对其发展的态度。目前,新加坡能源市场管理局规划至 2030 年太阳能装机达到 $200 \times 10^4 \text{kW}$,但对太阳能的中远期发展规划并不明确,难以根据现有政策及相关数据给出一条明确的太阳能发展路径。因此,针对政策的不确定性,本文给出两种 2030~2050 年太阳能发展路径,即充分开发路径和经济开发路径。

3.3.1 充分开发路径

在 2030 年太阳能装机达到 $200 \times 10^4 \text{kW}$ 的规划基础上,至 2050 年太阳能潜力基本开发完毕,太阳能装机达到 $900 \times 10^4 \text{kW}$ 。开发顺序根据 $LCOE$ 从较经济的太阳能种类开始开发,2030 年前主要开发陆基光伏,2040 年前主要开发陆基光伏、内陆漂浮式光伏、基建光伏以及少量屋顶光伏,2050 年全部类型太阳能开发完毕。充分开发路径下 2030~2050 年太阳能装机变化如图 2 所示。

3.3.2 经济开发路径

在 2030 年太阳能装机达到 $200 \times 10^4 \text{kW}$ 的规划基础上,开发具有一定经济性的太阳能种类,当太

阳能的 $LCOE$ 降至 0.08 新加坡元/(kW·h) 以下时开始该类太阳能的开发,预测至 2050 年太阳能装机达到 $600 \times 10^4 \text{kW}$ 。2030 年前主要开发陆基光伏,2040 年前主要开发陆基光伏、基建光伏以及内陆漂浮式光伏,2050 年陆基光伏、基建光伏以及漂浮式光伏太阳能开发完毕,屋顶光伏少量开发,墙面光伏开展试点性开发,预计太阳能开发总成本仅为充分开发路径的一半。经济开发路径下 2030~2050 年太阳能装机变化如图 3 所示。

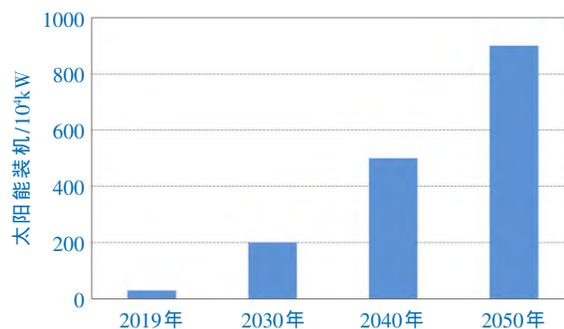


图 2 太阳能装机变化——充分开发路径

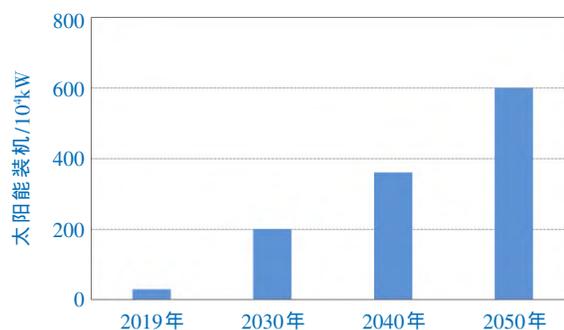


图 3 太阳能装机变化——经济开发路径

两种太阳能发展路径的对比如图 4 所示。至 2050 年,两条发展路径均基本完成陆基光伏、基建光伏和漂浮式光伏的开发,两条发展路径的不同之处集中在屋顶光伏和楼宇表面光伏的开发程度。由于屋顶光伏和楼宇表面光伏度电成本较高,难以大规模集中开发,在经济开发路径中,2030~2040 年仍以试点形式开展屋顶光伏的开发,2040~2050 年开发比较便宜的工业屋顶光伏并开展楼宇光伏的试点性开发。

4 适应不同太阳能发展路径的 2050 能源情景展望

4.1 情景构建方法

在两种太阳能开发路径的基础上,根据可再生能源消纳、气电机组退役以及跨国互联情况,得到

两种能源电力发展情景,即可再生能源充分开发情景和可再生能源经济开发情景。对这两种情景展开讨论,给出两个极端情景下,新加坡能源电力发展的具体路径,对比分析两个极端情景的能源结构、电力结构、成本差异以及互联程度。

两种情景的约束条件包括新加坡 2030 能源电力规划,可再生能源装机沿用各自的太阳能发展路径,电力电量平衡以及能源终端消费平衡。

可再生能源充分开发情景的发展目标为可再生能源比例尽可能高,为达到目标不限制跨国通道容量、不限制能源结构变化、气电机组仅服役 30~40 年。可再生能源经济开发情景的发展目标为成本尽量低,为了达到目标电力优先自给自足、现有工业不进行电气化改造(新增部分不限制)、气电机组服役 50 年。新加坡两种能源情景的约束条件及发展目标如图 5 所示。

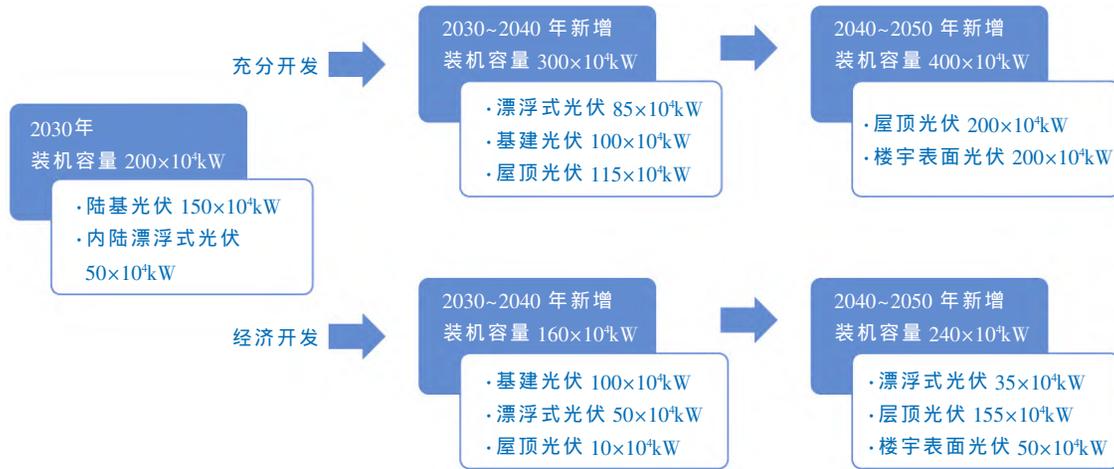


图 4 太阳能发展路径对比

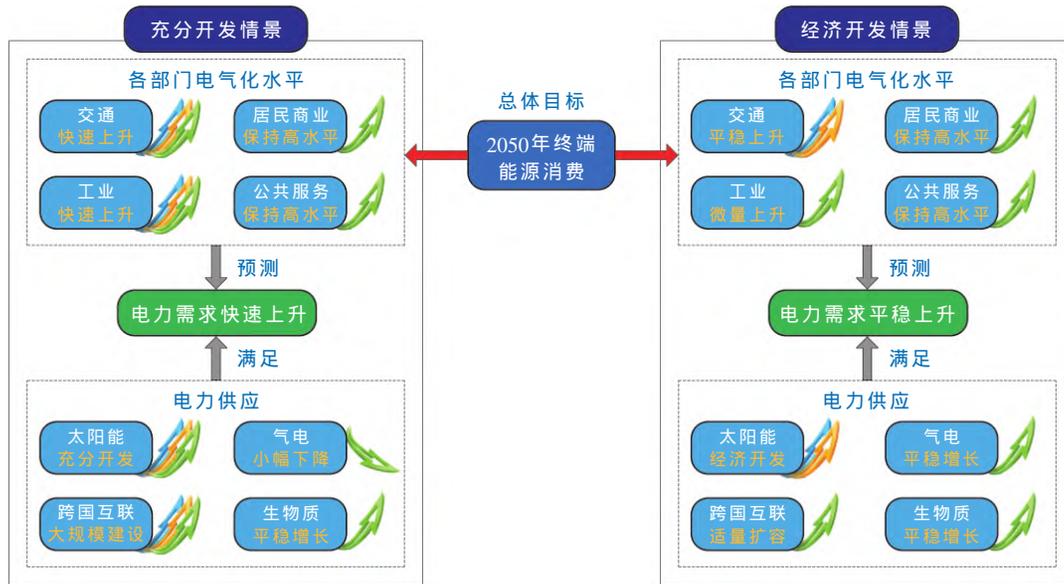


图 5 两种能源情景的约束条件及发展目标

4.2 太阳能充分开发情景

4.2.1 能源转型方式

交通部门,考虑电动乘用车、货用汽车等燃油车的电能替代,对飞机、轮船等不考虑电力替代。交通部门终端能源电气化率计算公式见式(3)。

$$I = \frac{E_{\text{电车}}}{E_{\text{电车}} + E_{\text{油车}} + E_{\text{其他}}} \quad (3)$$

$$E_{\text{电车}} = M(1+r_{\text{车}})^n \cdot R_{\text{电车}} \cdot L \cdot K_{\text{电}}$$

$$E_{\text{油车}} = M(1+r_{\text{车}})^n \cdot (1-R_{\text{电车}}) \cdot L \cdot K_{\text{油}}$$

式中: I 为交通部门终端能源电气化率; E 为各类交

通工具终端能耗, 例如 $E_{\text{电车}}$ 为电动汽车终端能耗, 而 $E_{\text{其他}}$ 取 2020 年飞机、轮船等其他交通工具终端能耗, 假设其不变化; M 为现有汽车总量; $r_{\text{车}}$ 为车辆年均增长率; n 为增长年份, 如以 2050 年为目标年则 n 取 30; $R_{\text{电车}}$ 为目标年电动车比例; L 为车辆平均行驶里程; K 为单位里程终端能耗。

据新加坡土地交通管理局(LTA)数据显示, 2018 年新加坡汽车保有量约 60 万辆, 受土地资源和道路承受力限制, 未来新加坡汽车年增长率不会超过 0.2%^[15-17]。预计 2030 年, 新加坡电动汽车占比将达到 30%, 总数超过 20 万辆。充分开发路径下, 2050 年, 新加坡电动汽车占比将达到 80%, 总数超过 50 万辆, 电力占交通部门能源消费的 55.8%, 如图 6 所示。

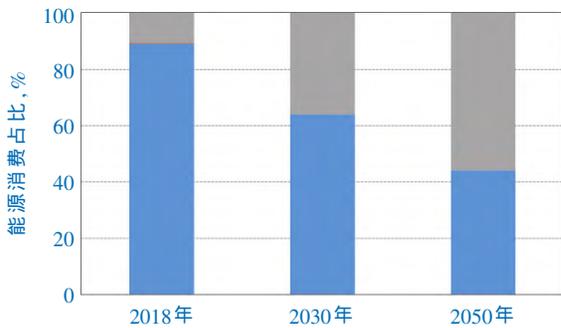


图 6 交通部门能源消费变化——充分开发路径

■ 电; ■ 油; ■ 气

预计至 2030 年, 新加坡工业部门能源结构不会发生重大转变, 小部分供热使用的燃油设备将进行燃气和电力改造, 石油占终端消费比重下降至 57.3%, 天然气上升至 15.9%, 电力上升至 25%, 煤炭保持在 1.8%。充分开发路径下, 考虑成本和技术因素, 燃油设备将按各自特点分别进行燃氢或电气化改造, 煤炭设备完全淘汰。至 2050 年, 石油占终端消费比重下降至 39.5%, 天然气为 15.8%, 电力上升至 44.7%, 如图 7 所示。

充分开发路径下, 2050 年新加坡能源消费结构如图 8 所示, 其中电力消费 9219.9kt 标准油, 天然气消费 1427.7kt 标准油, 石油消费 4536kt 标准油。电力行业通过开发可再生能源和进口清洁电力减少碳排放量, 根据 IPCC 给出的各类能源碳排放因子(见表 3)进行测算, 充分开发路径的碳排放量约 $3140 \times 10^4 \text{t}$ 。

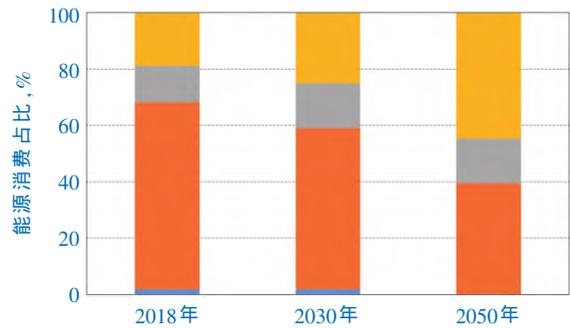


图 7 工业部门能源消费变化——充分开发路径

■ 氢; ■ 电; ■ 气; ■ 油

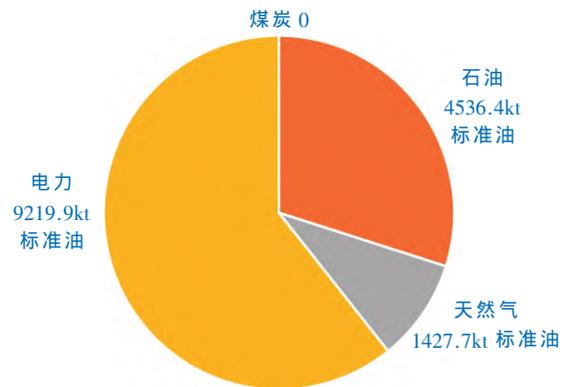


图 8 2050 年新加坡能源消费结构——充分开发路径

表 3 各类能源消费碳排放因子

能源消费类型	二氧化碳排放因子
煤炭	94600kg/TJ
石油	71900kg/TJ
天然气	56100kg/TJ
电力	0.4kg/(kW·h)

4.2.2 电力供应方式

根据终端能源需求量, 预测 2030 年新加坡电力需求量 $711 \times 10^8 \text{kW} \cdot \text{h}$, 最大负荷 $981 \times 10^4 \text{kW}$; 2050 年电力需求 $1100 \times 10^8 \text{kW} \cdot \text{h}$, 最大负荷 $1500 \times 10^4 \text{kW}$ 。2050 年总装机规模 $1850 \times 10^4 \text{kW}$, 其中太阳能资源基本全部开发, 装机容量达 $900 \times 10^4 \text{kW}$, 气电装机达 $900 \times 10^4 \text{kW}$, 生物质装机 $50 \times 10^4 \text{kW}$, 如图 9 所示。

根据电力电量平衡分析, 晚 19 时由于太阳能出力下降, $900 \times 10^4 \text{kW}$ 气电装机和 $50 \times 10^4 \text{kW}$ 生物质装机, 不能满足约 $1500 \times 10^4 \text{kW}$ 的电力需求, 考虑备用, 还需跨国受入约 $850 \times 10^4 \text{kW}$ 电力。跨国电力交易规模超过最大负荷的 50%。

结合新加坡地理位置, 电力受入方向多元化, 可分别从马来西亚、印度尼西亚进口 $300 \times 10^4 \text{kW}$ 电

力,从澳大利亚进口 $250 \times 10^4 \text{kW}$ 电力。

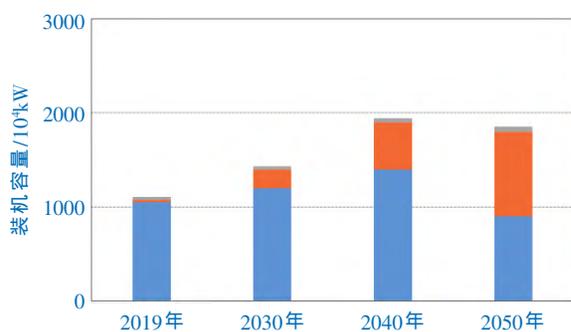


图9 装机结构变化——充分开发路径

■ 生物质; ■ 太阳能; ■ 气电

4.3 太阳能经济开发情景

4.3.1 能源转型方式

交通部门,预测方式与充分开发路径一致。预计2030年新加坡电动汽车占比将达到30%,总数超过20万辆,新增电力需求 $68 \times 10^8 \text{kW} \cdot \text{h}$,交通部门的电气化率从2018年的11%提升至2030年的36%。2050年新加坡电动汽车占比将达到48%,总数超过30万辆,新增电力需求相比于2030年增加 $100 \times 10^8 \text{kW} \cdot \text{h}$,交通部门的电气化率提升至48.5%,如图10所示。

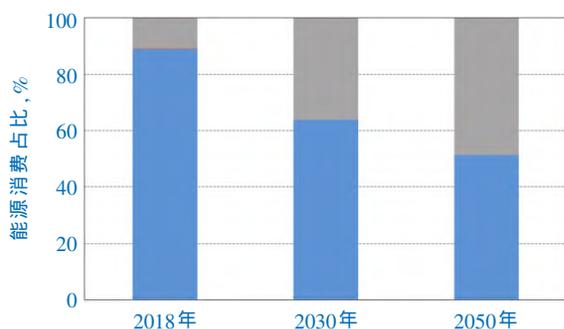


图10 交通部门能源消费变化——经济开发路径

■ 电; ■ 油; ■ 气

工业部门,仅考虑电能替代石油。预计2030年,通过油改电,将工业部门的电气化率从2018年的19%提升至27%。2050年,对新增天然气消费进行试点性的氢气替代,工业部门的电气化率缓慢增长至30%。

经济开发路径下,2050年新加坡能源消费结构如图11所示。其中电力消费 6939.9kt 标准油,天然气消费 1727.7kt 标准油,石油消费 6516kt 标准油,

煤炭消费 130kt 标准油。根据IPCC碳排放因子进行测算,经济开发路径碳排放量约 $4100 \times 10^4 \text{t}$ 。

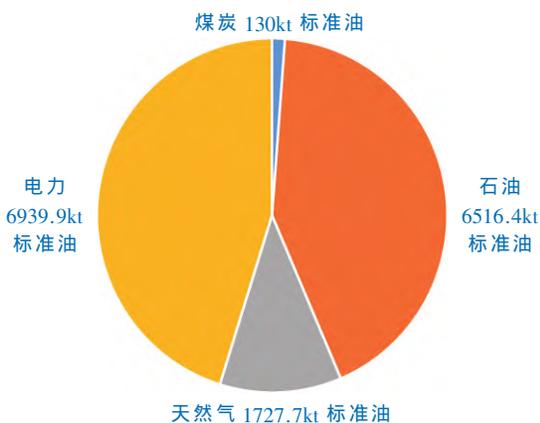


图11 2050年新加坡能源消费结构——经济开发路径

4.3.2 电力供应方式

根据终端能源需求量,预测2030年新加坡电力需求 $711 \times 10^8 \text{kW} \cdot \text{h}$,最大负荷 $981 \times 10^4 \text{kW}$;2050年电力需求 $820 \times 10^8 \text{kW} \cdot \text{h}$,最大负荷 $1300 \times 10^4 \text{kW}$ 。在经济开发路径下,2030年太阳能装机达到 $200 \times 10^4 \text{kW}$,完成规划目标;2040年,随着基建光伏和内陆漂浮式光伏具备开发经济性,太阳能装机增长至 $360 \times 10^4 \text{kW}$;2050年,新加坡具有经济性的太阳能资源基本全部开发,装机容量约 $600 \times 10^4 \text{kW}$,如图12所示。

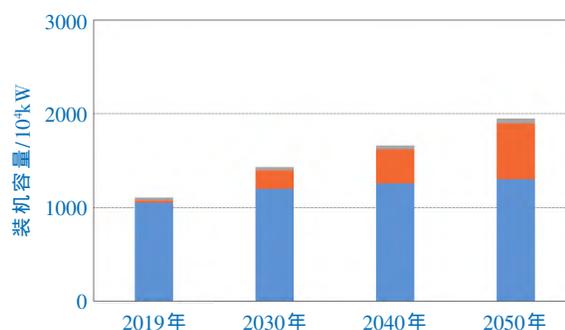


图12 装机结构变化——经济开发路径

■ 生物质; ■ 太阳能; ■ 气电

5 结语

① 根据评估,2050年新加坡光伏可开发潜力约 $968 \times 10^4 \text{kW}$,其中屋顶光伏约 $330 \times 10^4 \text{kW}$ 、楼宇表面光伏约 $246 \times 10^4 \text{kW}$ 、陆基光伏约 $150 \times 10^4 \text{kW}$ 、漂浮式光伏约 $138 \times 10^4 \text{kW}$ 、基建光伏约 $104 \times 10^4 \text{kW}$,分布式太阳能占比约74%。至2050年,屋顶、楼宇、基建光伏主要采用分布式开发,度电成本较高,屋顶光

伏为 0.09~0.12 新加坡元/(kW·h), 楼宇表面光伏为 0.10~0.12 新加坡元/(kW·h), 基建光伏为 0.072 新加坡元/(kW·h)。陆基、漂浮式光伏主要采用集中式开发, 成本较低, 分别为 0.038 新加坡元/(kW·h)和 0.04~0.06 新加坡元/(kW·h)。

② 太阳能是新加坡唯一可大规模开发的可再生资源, 根据太阳能资源开发程度及成本变化提出两种发展路径。充分开发路径下, 电气化水平达到 61%, 相比经济开发路径电气化水平提高 16 个百分点; 可再生能源装机占比达到 51%, 相比经济开发路径提高 19 个百分点。

③ 新加坡仅依靠本国可再生能源资源难以实现碳中和, 需要提升跨国输电的比例。新加坡可再生资源稀缺, 风能、水能短缺, 太阳能较丰富, 但是国土面积小, 难以开展大规模太阳能基地的建设, 研究规划的两种发展路径均无法实现碳中和。2050 年, 充分开发路径下新加坡碳排放为 $3140 \times 10^4 \text{t}$, 经济开发路径下碳排放约 $4100 \times 10^4 \text{t}$ 。新加坡需要在开发太阳能的基础上, 提升跨国输电规模, 安装碳捕捉系统, 减少碳排放, 实现碳中和。

参考文献:

- [1] KHEW E E .Renewable Energy and Its Relevance for Singapore in 2065[M]//QUAH E T E.Singapore 2065 :Leading Insights on Economy and Environment from 50 Singapore Icons and Beyond.World Scientific Publishing Co.Pte.Ltd,2015: 113-118.
- [2] Singapore.Energy Market Authority.Singapore Electricity Market Outlook (SEMO) 2018:Third Edition[EB/OL].(2019-01).https://www.ema.gov.sg/emsmedia/Singapore_Electricity_Market_Outlook_2018_Final_rev11Jan2019.pdf.
- [3] KARTHIKEYA B R,NEGIP S,SRIKANTH N.Wind Resource Assessment for Urban Renewable Energy Application in Singapore[J].Renewable Energy,2016,87:403-414.
- [4] AMIN Z M,HAWLADER M N A.A Review on Solar Assisted Heat Pump Systems in Singapore[J].Renewable & Sustainable Energy Reviews,2013,26:286-293.
- [5] KING S,WETTERGREN P.Feasibility Study of Renewable Energy in Singapore[R].KTH Royal Institute of Technology,2011.
- [6] QUEK A,EE A,NG A,et al.Challenges in Environmental Sustainability of Renewable Energy Options in Singapore[J].Energy Policy,2018,122:388-394.
- [7] HE Jianzhong.Renewable Bioenergy Development in Singapore and Recent Discoveries on Biofuel Generation[C]//American Institute of Chemical Engineers.2012 AIChE Annual Meeting, Pittsburgh, PA, USA.2012:276863.
- [8] Solar Energy Research Institute of Singapore.Solar Photovoltaic (PV) Roadmap for Singapore[EB/OL].(2020-04).<https://www.nccs.gov.sg/docs/default-source/default-document-library/solar-photovoltaic-roadmap-for-singapore-a-summary.pdf>.
- [9] DONG Zibo,YANG Dazhi,REINDL T,et al.Satellite Image Analysis and a Hybrid ESSS/ANN Model to Forecast Solar Irradiance in the Tropics[J].Energy Conversion and Management,2014,79:66-73.
- [10] NG H.Tender Called for 3rd Phase of Railway Noise Barrier Works[EB/OL].(2018-12-15).<https://www.straitstimes.com/singapore/tender-called-for-3rd-phase-of-railway-noise-barrier-works>.
- [11] ZUMBO L,LERAT J-F,CONNELLI C,et al.Influence of Defects on Silicon Heterojunction Solar Cell Efficiency: Physical Model and Comparison with Data[J].AIP Advances,2021,11:015044.
- [12] GANDHI O,RODRIGUEZ-GALLEGOS C D,GORLA N B Y,et al.Reactive Power Cost from PV Inverters Considering Inverter Lifetime Assessment[J].IEEE Transactions on Sustainable Energy,2019,10(2):738-747.
- [13] Singapor.National Environment Agency.E² Singapore[EB/OL].(2010).<http://www.e2singapore.gov.sg/DATA/0/docs/Booklet/E2S%20Publication.pdf>.
- [14] KOKATE A,WAGH M.Experimental Analysis of Performance Ratio of Solar Rooftop Photovoltaic System (SRTPV) for Various Roof Orientation and Tilt[C]//Journal of Physics Conference:Conference Series,Vol.1172.IOP Publishing Ltd,2019: 012067.
- [15] OH S,SESHADRI R,AZEVEDO C L,et al.Assessing the Impacts of Automated Mobility-on-Demand through Agent-Based Simulation:A Study of Singapore [J].Transportation Research Part A:Policy and Practice,2020,138:367-388.
- [16] LI M Z F,LAU D C B,SEAH D W M.Car Ownership and Urban Transport Demand in Singapore[J].International Journal of Transport Economics,2011,38(1):47-70.
- [17] FWA T F.50 Years of Transportation in Singapore: Achievements and Challenges[M].World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd,2016:1-576.

(编辑 张峰)

Study on Evaluation and Development Routes of Solar Energy Resources in Singapore

Bai Su^{1,2}, Gao Yi^{1,2}

(1.Global Energy Interconnection Group Co.,Ltd.,Beijing 100031;

2.Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization,Beijing 100031)

[Abstract] Solar energy is the only renewable energy that can be developed on a large scale in Singapore. The land resources in Singapore are limited. According to land use, the exploitable area of solar energy can be divided into rooftop PV, building surface PV, land-based PV, floating PV and infrastructure PV, with a total exploitable area of about 36.8 million m². According to the assessment, Singapore's exploitable potential of PV in 2050 is about 9.68 million kW, of which distributed solar energy accounts for about 74%. Rooftop PV, building surface PV and infrastructure PV are mainly developed in distributed mode with high cost of energy, while land-based PV and floating PV are mainly developed in centralized mode with low-cost. According to the cost reduction rate and development level of all kinds of solar energy, two development routes are put forward for solar energy from 2030 to 2050, i.e., full development route and economic development route. The full development route aims to fully develop the potential of solar energy, while the economic development route takes into account the cost of energy of solar energy development. The differences between the two routes focus on the development level of rooftop PV and building surface PV. With the full development route, the electrification level reaches 61%, 16% higher than that of the economic development route, and the proportion of renewable energy installed capacity reaches 51%, 19% higher than that of the economic development path. Based on the two solar energy development routes, two 2050 energy scenarios adapted to different solar energy development routes are proposed. Singapore cannot achieve carbon neutrality under both THE development routes, so it is necessary to upgrade the scale of transnational power transmission.

[Keywords] solar energy resource; photovoltaic; full development; economic development; cost of energy; Singapore

· 广告目次 ·

封面:天津南港工业区

封底:中石化胜利石油工程有限公司钻井工艺研究院

封二:北京飞燕石化环保科技发展有限公司

封三:海蓝立方展览 2022 年度活动列表

前插 1:克隆集团

前插 2~3:天津南港工业区

前插 4:天津中瑞邦络克管道联接技术有限公司

后插 1:中石化胜利石油工程有限公司

钻井工艺研究院

后插 2~3:中石化催化剂(北京)有限公司

后插 4:摩根先进材料有限公司