

优化绿色能源交互系统及其普适性的数学模型



金安君^{1,*}, 谈建²

¹ 宁波大学海运学院, 浙江宁波 315000

² 浙大宁波理工学院计算机与数据工程学院, 浙江宁波 315100

摘要: 本文研究多种能源集成的智能微电网并建立一个具有普适性的数学模型。因为此模型能使用户及产消者在以下 3 个关键输出函数之间实现最佳权衡, 它可提供输出功率、碳排放、以及能源效益或成本并且具有重要应用价值。智能电网的解决方案必须整合可再生能源和储能技术, 以便解决常见新能源电站的弃风弃光问题。智能可再生能源系统可以保证各种智能电网的供电稳定安全运行, 以合理应对其电力波动。根据研究结果, 该数学模型可获得智能绿色能源交互系统 (SDER) 在数学上有效解; 模型具有电力效用矩阵 PUM。因为该矩阵是 3X3 方阵; 它可以推导获得的 3 个本征输出函数及 3 个本征值。SDER 在应用案例中可有效减少碳排放。例如, 在一个典型应用的运营期间, SDER 实现的碳排放减少到 79.6%。得到的碳排因子在碳达峰状态下达到 0.425kg/kWh 至 0.5537 kg/kWh, 在碳中和时接近于零。最后, 最优调度方法可使绿色能源交互系统的碳排放量最小化, 从而有力推进宏观上碳达峰碳中和的目标及进度。

关键词: 碳达峰; 碳中和; 能碳价模型; 绿色能源; 能源转型; 能源独立

DOI: [10.57237/j.jest.2024.03.003](https://doi.org/10.57237/j.jest.2024.03.003)

Application of a Mathematical Model on the Hybrid Optimized Green Energy Systems

Anjun Jin^{1,*}, Jian Tan²

¹The Maritime Faculty, Ningbo University, Ningbo 315000, China

²Inst. of Comp Science & Data Engineering, NingboTech University, Ningbo 315100, China

Abstract: This article investigates a mathematical model for smart microgrids that integrate several energy resources. The model is ubiquitously applicable such that it enables users and prosumers to deliver an optimal trade-off among the following three key output functions. The solutions of smart grids deliver output power, an energy benefit or cost, and carbon emissions during operations. It is imperative for smart renewable energy systems to integrate both renewable energy and energy storage technologies so that the commonly discounted solar and/or wind power issues can be addressed. Energy storage technology can ensure the production of various smart grids with stable and safe operations to counter normal power fluctuations. The investigation conducted herein yields a predictive model with a mathematical power utility matrix that is specified by a 3X3 square matrix. As a result, carbon emissions can be effectively reduced; e.g., in one case, the achieved reduction is approximately 79.6% in real time. The standard carbon emissions reach a range of 0.425kg/kWh to

*通信作者: 金安君, ajj_0321@qq.com

0.5537 kg/kWh at the carbon peak state and nearly zero at carbon neutrality. Finally, the optimal scheduling method results in minimized carbon emissions, thus greatly benefitting the existing carbon peak and carbon neutrality goals.

Keywords: Carbon Peak; Carbon Neutrality; PEC Model; Green Energy; Energy Transition; Energy Independence

1 混搭式发电

随着人类对能源需求的不断增长，全球能源资源面临着极大的供给压力满足需求。传统的能源资源已经无法满足社会的需求。新兴的综合能源和数字化能源的发展，已经成为减少对传统能源依赖的重要途径[1-4]。

为了减少能源系统在输出电能对于碳排放量的转化，混搭式能源已经成为各国能源政策的重点关注对象[3]。混搭式能源目的之一是解决能源生产对于 CO_2 排放量转化率高问题。能源对于物质 CO_2 排放量转化率简称为能质转化率（EMCR）。混搭式能源是指对多种不同形式的能源进行智慧混合利用，以便减低 EMCR [5]、更好地满足清洁能源的需求。因为混搭式能源能一定程度减少对单一能源的依赖性，降低能源成本，并能减少环境污染，它是可再生能源实际应用的重要解决方案之一。另外，混搭式发电是指“互补性”多个能源的应用，如通常的风光发电按照特定比例互补应用。

譬如，风光互补的混搭式能源发展较好[3]。在风电和太阳能产业日益发展的情况下，风光互补成为混搭式能源的最主要表现形式之一。风光互补能源能够提供初级的不间断的电力。同时混搭式能源可以通过技术手段进行储存，以便在不时之需时使用。此外，混搭式能源可以实现全年电能产出量比较好分配，提高能源产出的稳定性和可靠性。

在本章简要介绍有普适性的数学模型如下：

对于可再生能源（RE），有必要研究这些能源系统是如何随着时间和空间而变化运行的。例如，对瑞典替代能源的详细研究显示，太阳辐照度和风速在小时和年尺度上都呈负相关。为了优化季节性能源输出的稳定性，研究人员建议该系统应在 70% 的太阳能发电和 30% 的风能发电下运行[3, 6]。当设计为混搭式使用时，应在分区中逐个验证光伏和风能的互补输出。这两种能源的合并使用效率比单独使用时要大得多。尽管太阳能的日内变化和风能的不稳定性面临着不可预见的挑战，但许多国家已经开发出了先进的技术。因此，他们能够更好地使用这两种可再生能源。

在能源脱碳的领域和碳中和领域已经取得许多有价值的技术和商业的进展[7-9]；现代微电网[10-12]比以往更受欢迎并变得更加普及。人们正在对微电网采集了与消费、交易和管理相关的大数据；这些大数据因为需求可能大大增加其商业价值。

在微电网中产生的能量可以通过精心导出和先进的算法进行监测和分布使能源生产商的供应与消费者的需求相匹配，确保电力的稳定和质量得到保持。

对于那些不能参与主要有可再生能源的公用事业电网的客户，他们可以选择购买绿电进行间接参与。可再生能源可以包括当地产电的系统，形成微电网，并集成各种类型的互补发电和存储应用过程。除了能源的生产和消费外，还有一类崭新的微电网的电力生产既消费者（prosumer，简称产加消者）。产加消者可以与其他用户交易剩余的能源和/或从与能源相关的交易中获利。譬如，区块链技术鼓励通过分布式电网进行数据共享和协作，进行此类能源交易即能源区块链 EBC [13-15]。

终端用户和生产企业之间的交易已经被几个研究小组进行研发。例如，一些研究人员已经探索了大数据和机器学习，而其他研究人员已经发表了调查结果；关于能源区块链（EBC）应用程序，涉及家庭和建筑，以及分布式点对点（P2P）能源交易。

本文指出一种针对分布式能源资源（DER）的智能算法，该算法利用数据的输入来帮助实现既定的最优目标。以下是公用电力设备矩阵（PUM）方法作为子系统提供了一个具有智慧能源方法的 PUM 设计的典型案例。这个 PUM 子系统是实现智慧能源系统的关键部分。在本文以外更多信息，可参考文献[5]。

研究人员在这一领域取得了重要进展。这里研究一个通用的方法来获得一个新颖的和有价值的基本框架，这将为确定过程奠定基础。

在对广泛的可再生能源 RE 研究中，有几个因素可以进行系统表征。对于任何给定的微电网，为 3 个

关键输出函数确定最佳的 DER 和/或能源管理系统至关重要, 具体如下: 电力输出、智慧能源使用/交易和碳足迹。碳足迹定义为总的碳排放。实现碳中和必须缩小碳足迹, 其必要性参照有关政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 关于全球变暖比工业化前水平高 1.5°C 的影响以及相关的全球温室气体排放途径。

可再生能源正成为一种主流能源, 每年提供 20TW 的电力, 以完全满足世界当前的能源需求。多能源 (MER) 系统可以促进智慧能源系统的智慧能源。可以从数学框架中得到一个重要的应用; 能量与物质转换率关系 (EMCR) 是受质量和能量转换关系的启发, 作为一个重要的概念加以应用。在本文中, EMCR 将温室气体生产与能源产出联系起来。

本文构建一个简单而普遍适用的智能微电网和能源区块链框架。为了实现稳定的供电, 采用 PUM 模型可以降低需求高峰时期对电网的电力压力。此外, 用户可以采用商业上可用的控制策略, 如减载、需求响应和储能作为调控, 来维护一个强大的微电网。

此外, 开发智能微电网的通信和网络技术以及利用智能微电网中的机器学习具有重要价值。能源区块链利用区块链技术来管理生产者、消费者和分布式电网之间的能源交易。能源区块链 EBC 的分散系统确保了交易的安全和透明, 使其成为管理可再生能源生产者和消费者之间的能源交易的理想解决方案, 这是一个非常令人兴奋的研究领域。

本章节的结构如下。第 1 部分介绍了背景及人类对绿色经济电力资源的迫切需求; 并介绍了可再生能源 REs 和公用电力系统特征矩阵 PUM。在第 2 部分中, 讨论 PUM 的数学模型和几个应用。此外, 在第 3 部分中, 还讨论了 PUM 及求解具有 PUM 模型系统方法的应用。在第 4 部分中, 讨论实现碳中和目标需要的解决方案和资源。最后第 5 部分包含讨论和结论。

2 数学模型

图 1 展示了一个 DER、微电网和简化的 PUM 模型, 以解决供应能源的电力、成本和碳排放问题。图的左侧表示 3 个输入端, 即 PG、ES 和 GP。GP 就是电网供电, 它是较大的骨干电力资源。其右侧包括功率输出、碳排放数据及其用户的功率经济性。优化能源调度的重点是在实现经济和环境目标的同时, 提供所需的电力输出。

在电网模式下, 微电网并网模式通常比独立模式

具有更佳长期可预测性和可靠性。科研人员研究了微电网矩阵的 PUM 模型目标是产生稳定的输出功率, 以满足用户需求, 满足给定的经济和环境要求的标的容量。PUM 模型可以表达如下。

其中, Δt 为调度时间; $\tau = \Delta t / TU$ 为调度区间, TU 是 1h 为单位。例如, 如果调度时间为 5min, 则调度区间为 $\tau = 1/12$ 。下面的公式-1 中 En^t 表示在给定时间内的总能量输出给用户。左侧另外 2 项是给定区间的总碳排放及相关的用户花费。

类似地, 公司-2 中 CP^t 表示功率输出。CE^t 表示来自分布式能源 (DER) 和电力公司的碳排放率 (包含产品生命周期的碳排)。Co^t 表示用电量对用户的花费率。

根据这些公式, 我们可以推导出 3 个输出函数值的依赖关系。在微电网经济和碳排放计算模型, 矩阵的第一行表明, 用户的电力需求全部由新能源、储能和电网提供满足。换句话说, 这一行使用了当前的能源产出水平, 可用的存储能量, 和外部电网提供的能源; 并以智慧化方式确保消费者可以在不中断服务的情况下使用电力。

$$\begin{bmatrix} En^t \\ CE^t \\ Co^t \end{bmatrix} = \int_{T_0}^T \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ K_{e,PG} & K_{e,ES} & K_{e,GP} \\ K_{c,PG} & K_{c,ES} & K_{c,GP} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} P_{PG}^t \\ P_{ES}^t \\ P_{GP}^t \end{bmatrix} * dt \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} CP^t \\ CE^t \\ Co^t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{L,PG} & K_{L,ES} & K_{L,GP} \\ K_{e,PG} & K_{e,ES} & K_{e,GP} \\ K_{c,PG} & K_{c,ES} & K_{c,GP} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} P_{PG}^t \\ P_{ES}^t \\ P_{GP}^t \end{bmatrix} * \tau \quad (2)$$

图 1 展示了多种能源输入和 3 个输出函数的详细原理图, 简称之为能碳价模型。

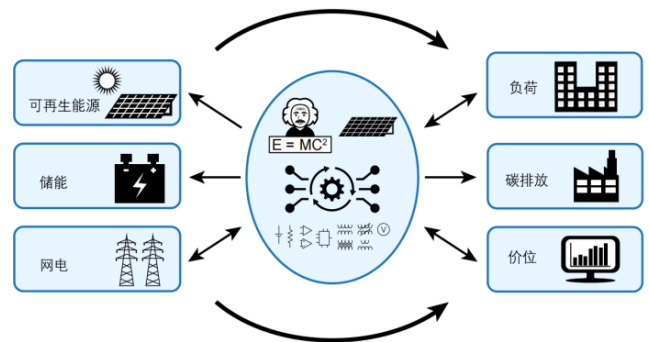


图 1 多种能源输入和 3 个输出函数的原理图, 简称能碳价模型

图 1 的中间列图示说明了一个模型及其呈现智慧电力效用矩阵 (PUM) 系统的解决方案。

$$[\text{负荷, 碳排, 花费}] = [K_{ij}; 3 \times 3] * [PG, ES, GP] \quad (3)$$

或

$$[3O]=PUM*[3I] \quad (4)$$

公式-4 中的 3I 表示 3 个输入参数；PUM 为一个 3×3 的方阵。公式-3 中 K_{ij} 的共 9 个参数是电力微电网系统的特征参数值。

3O 表示 3 个输出变量或关键输出函数；它们分别为负荷，碳排，花费。

图 1 的左侧为输入参数包括可再生能源，储能，网电。图的右侧为 3 个输出函数。

公式-2 的第一行中系数的典型值通常在 0.95 左右。因此，本文研究中每个 K_{ij} 被简单地分配一个约定值 1。 K_{ij} 是对于输入与输出功率的传递系数。

典型数值 K_{11} 为 0.92 至 0.98；对于储能供电， K_{12} 的典型数值为 0.095 至 0.98；对于电网供电， K_{13} 的典型数值为 0.95 至 0.98。为了保持特定公式-2 的输出功率质量，必须满足功率平衡约束；因此，PUM 的第一行公式可以写成如下。

$$CP^t(t) = P_{PG}^t + P_{ES}^t + P_{GP}^t \quad (5)$$

其中 $CP^t(t)$ 代表输出给消费者的电力， P_{PG}^t 对于由发电机产生的功率， P_{ES}^t 为 ES 系统交换的功率，和 P_{GP}^t 为微电网和电网的电力交换值。

数学模型的有关解答对客户具有重要价值。第 2 行中所有 PUM 系数的典型值如下。在对 K_{2j} 的研究中，有一个详细的模型具有时间依赖性。矩阵的第 2 行表示微电网运行所产生的碳排放。

选择典型的二氧化碳排因子 K_{2n} 。根据对目前的技术发展调研，研究人员获取了相关产业供应链的全生命周期反应的碳指标。

有关设备指数的有关 K 矩阵值如下。对于光伏系统，PV 的典型数值 K_{21} 为 0.09283kg/kWh；或者对于风能系统，PV 的典型数值 K_{21} 为 0.011128kg/kWh；对于锂电池储能系统，ES 的典型数值 K_{22} 为 0.00057kg/kWh；对于中国市场的标准煤系统，其典型数值 K_{23} 为 0.832kg/kWh，或者相关的清洁炭粉的 K_{23} 值为 0.425 kg/kWh。

该 DER 系统的碳排放值参照公式-6 如下：

$$CE^t = K_{21} * P_{PG}^t + K_{22} * P_{ES}^t + K_{23} * P_{GP}^t \quad (6)$$

DER 系统的碳排放量（在市场数据中）取决于相关技术的成熟度，这可能严重依赖于时间、制造方法、工作条件及其在供应链中的相对位置。

本文调研了目前采用太阳能再生能源（即锂电池）电网发电技术的商业成本结构。净电费是收入和费用的差额。它是当用户从微电网或者从电网购买电力时所产生的费用；对应的是卖电给电网都收入。通过管理高峰、低谷和存储，产销者应该有可能保持供需之间的费用平衡，而没有昂贵的电力峰值费用。基于目前的技术发展，我们展示了一个普遍适用的科学原理。每个原理都是帮助智能电力系统设计的良好工具。运行微电网的净电费显示在公式的第 2 行。

从外部电网购买能源的成本和输出能源的收入参考后面的表 1。

在目前的商业阶段，提供一些 K 矩阵值如下。按照某省市典型的电价数值 K_{31} 为 0.648 RMB¥/kWh；对于 K_{32} 为 0.72 RMB¥/kWh；对于 K_{33} 为 0.36 RMB¥/kWh。

$K_{3j}(t)$ 的典型电价不是固定的。它们可以随时间和不同地区变化；譬如，按照定价的政策分时段和市场指定可以变化。

提供了一些 K 值。参照公式-7 如下：

$$Co^t = K_{31} * P_{PG}^t + K_{32} * P_{ES}^t + K_{33} * P_{GP}^t \quad (7)$$

K_{31} 为光伏功率每千瓦时（kWh）的成本，主要包括光伏组件、逆变器、变压器、支架、配电设备的采购和安装费用的折旧，以及日常维护费用。光伏组件的燃料成本为零；设备折旧和维护成本（包括运行成本）的比率一般约为 7:3。其设备的实际使用寿命约为 20 年。影响折旧成本的最大变量是当地的光照资源。光资源越丰富，相当于安装单位的投资越低，折旧也越低。 K_{31} 的值来源于中国的平均水平，对于光学资源极其丰富的地区，如印度、巴基斯坦、中东、北非和中美洲， K_{31} 可以用相同的设备减少甚至减半。

K_{32} 为储能成本，主要包括设备折旧和电力损耗。维护成本相对较低，主要由人员工资组成，但太阳能/风电配电网储能电站一般由太阳能/风电站人员兼职维护。在确定技术条件的情况下，储能成本最关心的是储能系统的利用频率：较高的回收频率可以降低一定设备有关后两个因素的分摊折旧成本。其原因主要是由于储能电池的日历寿命和全寿命周期。当任何一个日历寿命或周期达到设计值时，需要更换储能设备；因此，当在周期寿命之前达到日历寿命时，使用频率的增加可以按比例减少折旧和分配，反之亦然。此外，更高的回收频率也可以减少功率损耗，这主要是由于储能系统的内部热管理、监测等支持功耗比随着使用

频率的增加而减小。公式-7 根据平均充放电频率，一天一次，计算出 K_{32} 值。

K_{33} 是外部购（销）电的成本（收入）。一般来说，在交易过程中，购入价 C_b 、销售价 f_s 及其可能的差额政策。 f_s 和 C_b 值并不相等，这取决于微电网投资者和电网公司是否签署了电力买卖协议；一般来说， C_b 的绝对值约等于 f_s 的绝对值。 K_{33} 值是前两个因素的市场状况的平均值。在中国和德国等国家，各国政府已经实施了 20 年来的目标政策，这些政策提供了大量的责任险定价激励措施，以增加电网上的销售。

整个矩阵与典型碳排放情况可以预估。能源产出可能会有所不同。因此，实际数字部分取决于工业生态链内的采购过程。

1) 技术调研导致了当前水平的典型技术规范。

2) 根据技术数据提供的规格是从商品中提取的。

以上有关碳中和 CE 公式的计算及预测，对于 2030 年实现碳达峰及 2060 年实现碳中和具有重要意义。并且其应用具有很重要的附加社会价值。公式-1 可方便应用于科学方法规划和执行，有关更多的研究可参考文献[16-18]。

3 模型的电力效用矩阵应用案例

本文提供了一种普适性的智能电网技术工程师的数学模型。根据公式-1，该数学方程是一个普适的积分方程。

问题一旦成为一个有趣的数学公式，其数学方程的解答或框架就可一般性地解决。通过求解这三个本征值并导出特征空间中的 3 个本征态，可以简化线性代数方程。这个线性代数问题导致了本征空间中具有 1 个可对角化矩阵和 3 个正交变量的本征（求本征值）方程。这 3×3 方阵是一个可对角化的矩阵。我们可以从矩阵的线性代数计算中推导出这样的本征态，如行列式、辅助因子等。

研究通过模拟计算的发现如下。来自微电网的电通过物理交易方式销售给用户；这些交易通常发生在高峰时间和低谷时期。它是许多独立的发电储能和微电网在能源分配网络中的竞争过程。

微电网必须进行电力需求管理（PDM），以确保其在紧急情况下能够满足相关的能源需求。微电网负荷一般分为临界负荷、可控负荷或不可控负荷。电力

系统必须能在任何给定的时刻满足临界负荷的要求。

双储能 DES 具有一种工作模式。在特殊情况下，可根据需要削减或调整可控负载。在正常情况下，优化负荷使用和节能的目的以管理对需求的响应。例如，当电价较低且系统没有出现需求峰值时，可以使储能或储热储冷等热负荷可转移电力负荷。特定家庭的用电负荷与用户的用电偏好及其舒适度直接相关。用户可以通过使用智能设备（譬如智能开关和智能恒温器）。ES 是普通微电网关键组成部分之一；双储能（DES）在电网运行中既有用，对电池寿命也有价值。RE，如太阳能光伏，具有可变性及可用性，大约是四分之一的时间；它的实际时间取决于太阳在天空的运行位置。为了持续供电，剩余的电力必须通过互补性提供，如 ES 和电池。下面将讨论 ES 的工作原理。

i) 有关工作注意事项可扩展到各种应用程序。例如，科研人员及其工程师已设计了一个对 ES 利用率的改进。

ii) ES 是 DER 中的关键组成部分之一。研究人员发现所有的 ES 电池都有最佳充放电的循环深度。备用电池全寿命周期的寿命取决于一个重要参数，即电池的放电深度。

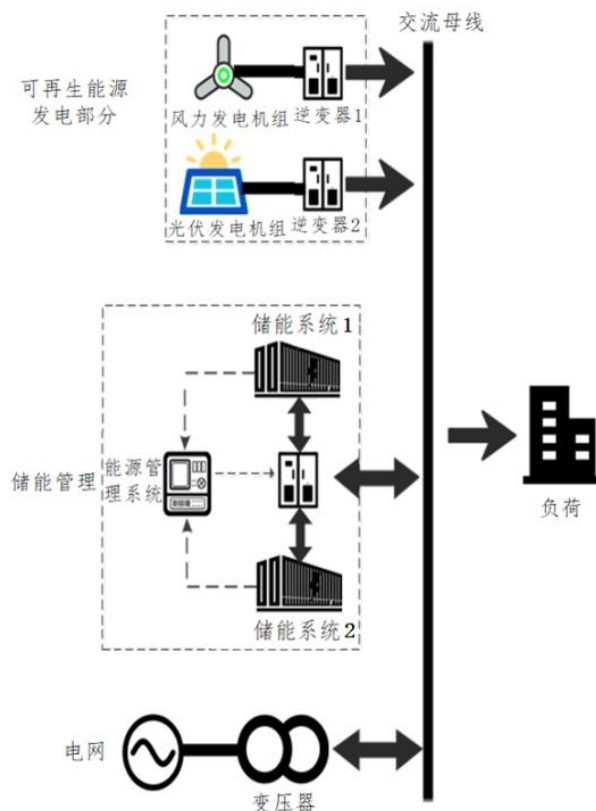


图2 微电网架构包含双储能 DES 模式

智能微电网架构如图 2 所示[11]。每个 ES 设备都以 DES 模式编程；它会在整个充放电循环中反复工作。深度循环通过消除大量安全的充放电循环非常有利于 ES 的充放电寿命。

在分布式能源条件下的 PUM 模型的模拟。图 3 包含一个地铁公交系统模拟的测试结果。该测试结果显示了典型的能量进出情况，结果如下：具有储能的分布式能源系统的(a)调度组情形；(b)比较组情形。

图中 DBESS 指分布式电池的储能系统。发电，交流连接逆变器，负荷，储能管理变流器，电网，变压器，变电站。逻辑说明的一些数学记号英文字母请忽略。

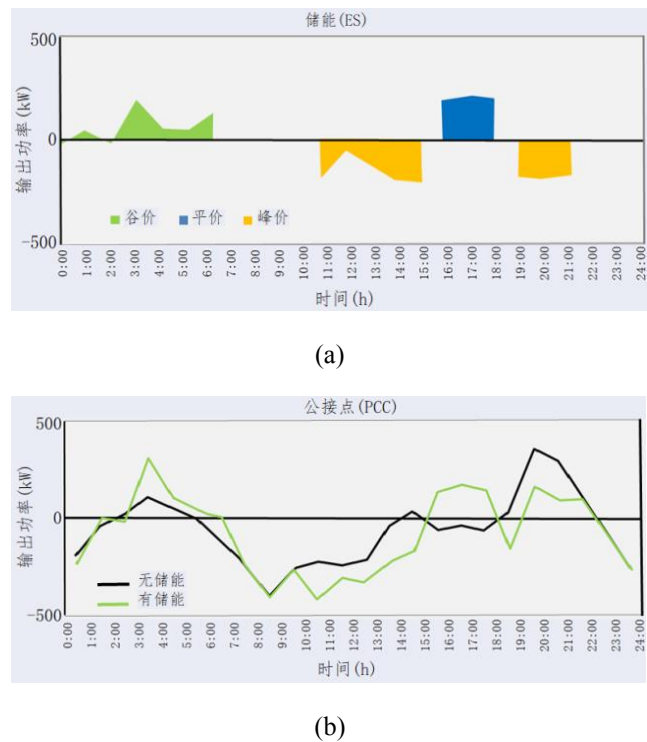


图 3 典型的能量进出速度：(a)带储能的分布式能源系统的调度方法，(b)以及公接点（PCC）的比较组情形。在 DES 系统中，DES 可以被单独用来克服预测误差，并实时跟踪微电网系统的日前交易计划

根据上一节的分析，使用 DES 模式是有益的。其工作原理图如图 4 所示，以及它的利益。外部查看者的能源供应似乎是一样的，提供 ES，增加存储寿命，并包括许多潜在利益的操作有明显差别。

微电网系统的架构和变换矩阵。该 PUM 的数学模型可以很容易地应用于所有的微电网系统，简化为公式 3。

参考表 1，它显示了基于计算机模拟的每天一转

的峰谷循环结果及其在多种硬件情况和架构方法下的经济成本列表。表中给出了多种方法的比较。

表 1 此表比较了一个兆瓦级分布式功率合并的总功率数据和成本数据。注：负成本表示支出，负峰值或谷负荷表示产出。请注意，成本“+”表示收入；峰值或谷负荷“-”表示输出数量

方法	基本荷载	传统的风能太阳能	智慧风能太阳能
财务/成本（¥人民币）	-10330.2	-88.272	577.368
峰值负载（KW）	6908	40	-1289
谷负荷（KWh）	2608	-398	22

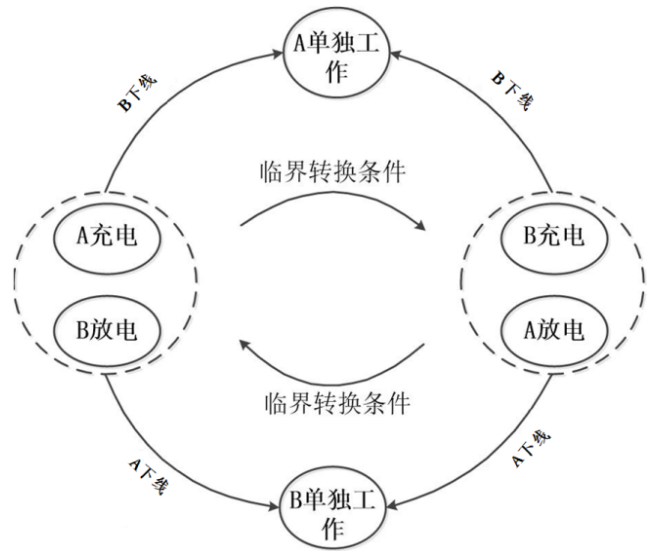


图 4 显示 DES 系统合作工作模式的充放电循环原理图

在上一节中，PUM 变换矩阵提供了基于输入 DER 变量的输出解决方案。因此，推导技术上复杂的 DER 的架构成为一种简化的 DER 形式。在简化的 PUM 设计问题中，3 项输出函数（3O）如下。

公式 4 写为 $[3O]=PUM*[3I]$ ，3I 表示三个输入参数，PUM 为一个 3×3 方阵。这个转换方程的解决方案在本征空间中可以直接获得，并且可由一组具有 3 个本征值和 3 个本征态来表征： λ_1 、 λ_2 和 λ_3 。很重要的是，上述解答很有实用价值。这里省略了这个本征态推导的细节。

简要说明如下。在相关的本征空间中，每个输出函数都与每个确定的本征态相关，并直接关联到相应的输入变量，称为正交变量。这三个本征态的每个临界输出都取决于它的正交变量。例如，本征空间中功率输出的增量是通过调整其正交本征变量来实现的，这不会影响其他输出值。这在一些程度上有益于碳排放值的调控。

讨论有关实现碳中和目标，前面所述的 EMCR 基本上由 Beta 因子，即 $\lambda, 2/\lambda, 1$ 决定。

PUM 系统的 Beta 因子的公式-8 如下：

$$\beta, c = \lambda, 2/\lambda, 1 \quad (8)$$

基于本征空间中临界变量内的临界值建立了输出函数。该贝塔 Beta 因子将决定输出能量和碳排放的比率。一种人工智能（AI）算法发出命令，自动设置输出功率值。当实现 EBC 作用时，功率呈现转换交易并连接到可再生能源 RE 和储能 ES。

分布式能源方法如图 1 所示。在实际应用时，该模型可以在 DES 的应用中进行进一步分析扩展。用 DES 方法和在 3I3O 模型中，如图 4 所示。以上这些情形已经在本文中完成了案例应用及算法验证。

4 能源区块链

在一个分散的能源系统中，能源供应合同可以实时在生产者和消费者之间直接沟通交易。启用 EBC 可能导致生产者和消费者之间产生相当数量的交易[13-15]，这使得每笔交易总体上更便宜。区块链通过消除对第三方监测平台的需求，促进了当地能源消纳之间的直接互动和交易。

AI 软件指示系统连接到输出终端，即客户端节点。EBC 的分类帐可以在 5min（或在不同的时间内实现）。可再生能源将会成为能源行业应用的区块链重要选项。研究人员发现了各种科学现象和数据，也有许多研究报道。

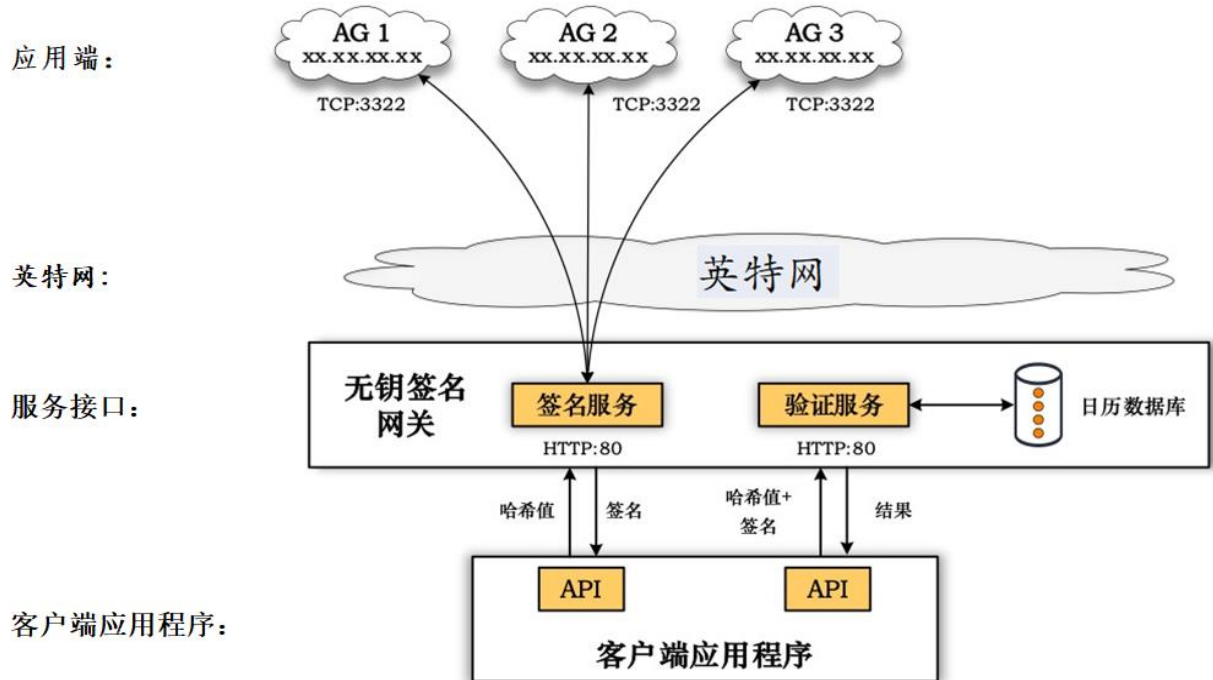


图 5 无钥区块链即服务接口的流程图

如图 5 所示，分布式能源可以通过互联网选择区块链选项与客户交易。EBC 的经典区块链结构说明了提供商与客户和客户和互联网的点对点网关。例如，一个智能电网可以适用于所有的数字电力，其中的客户端节点代表所有的产品：AG1、AG2、AG3。无钥区块链即服务接口（KBaaS）参考图 5。它的优势是信任，它满足了对供求群体的安全需求。图 5 提供基于轻量级和无钥匙的区块链即服务（KBaaS）的微电网管理数据来源。EBC 的区块链结构如下所示。

5 讨论和结论

1 讨论

全球必须增加再生能源发电的份额。按照中国的能源需求，有预测认为太阳能和风能必须达到 78% 份额才能实现碳中和[8, 16]。为了在 2030 年达到排放峰值和在 2060 年实现碳中和目标，国家目前的政策要求一次能源供应中的可再生能源需要达到 47%-78%。全球发电的总额已超 20TW；因此世界需要 20TW 来

保持生活质量。因为碳中和状态有大约 78%使用太阳能及风能可再生能源。这相当于 6.2TW 和 9.4TW, 储能实现碳中和。

科研人员研究 EMCER 分布式电网发现, 贝塔因子是一个衡量跨多个能量系统的 EMCER 转化率的指标。按照碳中和的进度划分节点如下: 1) 标准煤发电的碳排因子为 0.832kg/kWh; 2) 要达到预期的碳排因子峰值[8], 中国当前合适的目标在 0.425 至 0.557 kg/kWh; 3) 要达到碳中和, 碳排因子应接近零。

研究人员发现有一个有趣的挑战是怎样获得一个纯粹的分类输入 (Cat)。每个类别都可以由一些匹配的输入实体的组合组成。本文中的 PUM 是一个 3X3 方阵, 在推导本征态矢量和本征值方面具有优势。PUM 可以传递 3 个本征态或本征值。因此, 一些简化的碳中和指标从公式-4 求矩阵数学解已经在本文优雅地出现了。

因为许多复杂交互的可再生能源系统的特点, 本文为该系统的优化已简化地建立了一个重要的基础数学模型。为了提供有普适性数学描述的背景, 微电网的能量优化调度是一个具有多重约束条件和多目标优化问题。优化的目标是通过合理的协调来实现最大的总体收益, 使用大数据进行能源、存储、微电网和负载的各方通信, 以便于协调使用调度。分布式电网可以以并网模式或独立模式二种运行模式。这两种模式都需要适当的 DER、ES 和负载调度。例如, 微电网在独立运行模式下可以更可靠地运行。然而, DER 的调度过程是复杂的。数学模型可以描述其普遍存在的定律。并适当地求解讨论。

目前的 PUM 利用了三个输入类别的基本分类, 每个类别都可以扩展如下: Cat1 有可再生能源; Cat-2 有能源存储; Cat-3 有微电网。需要注意的是, PUM 模型在实践中可能会遇到超过基本 PUM 方案的情况如下; 每个输入参数可以是多个参数的组合, 如几种可再生能源或混搭式新能源。此外, 客户在应用程序中可能有不同的要求, 而数据和机器使用深度学习的知识对于良好的解决方案很有价值。每类分解都可以被适当地捆绑起来, 以便满足所述模型的建模要求。

在实际应用中, 人们可以处理复杂性并使用更复杂的系统解决方案。PUM 模型是解决微电网问题的一种有效方法。

2 结论

总结来看, 对于分布式能源系统的预测、设计、和执行模型的研究得到绿色能源系统优化的结果。本文提供了数学模型或称为公用电力设备矩阵 PUM 模型、3I3O 模型, 对此展开进行了多种应用讨论。还进行了 3I3O 模型的案例研究; 其中包含 2 个重要的和有普适性的公式。另外, 能源区块链是很有趣的应用。本文提供所有这些模型及其应用, 相信这些应用将有力推动碳中和的实现进程。

通过该模型的解决方案, 我们可以更加准确地预测能源供需情况, 合理设计能源系统的结构。该解决方案帮助产销者 Prosumer 有效执行其能源生产、储能、及分配方案。另外, 本文探讨了能源区块链技术; 它能够提高能源数据的透明度、安全性和可追溯性。能源区块链为分布式能源系统的管理提供了新的可能性, 促进了能源市场的公平竞争和高效运行。通过将区块链技术与数学模型相结合, 可以实现能源系统的智能化管理, 进一步推动碳达峰碳中和目标的实现。有关 2030 年为实现碳达峰目标, 研究建议目前中国合适的碳排因子目标在 0.425 至 0.557 kg/kWh。

最后, 期待未来进一步研究可以深入挖掘这些模型、算法、和相关区块链技术的潜力, 为可持续能源发展提供可规模化、更加可靠的高能效系统。

参考文献

- [1] NASA, 詹姆斯·汉森气候变暖国会作证, June, 1988 年 6 月. 他在 1974 年开发出 NASA 第一代全球气候模式. 他于 1981 年在 Science 发表的文章首次使公众意识到了人为排放的温室气体对气候产生的重要影响, 并成功地预测了气候变化的趋势.
- [2] Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner H. O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P. R., 陈 Y., 周 X., 戈米斯 M. I., 朗诺伊, E., 梅科克, T., 蒂格诺 M., 沃特菲尔德, T. (编辑) (2018). IPCC 探讨有关全球变暖 1.5°C. 政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 关于全球变暖比工业化前水平高 1.5°C 的影响以及相关的全球温室气体排放途径的特别报告, 探讨加强全球应对气候变化威胁、可持续发展和消除贫困的努力的背景. 国际标准书号 978-92-9169-151-7.
- [3] A. Couto, A. Estanqueiro, "Exploring Wind and Solar PV Generation Complementarity to Meet Electricity Demand," Energies, vol. 13, pp. 4132, 2020. [Online]. <https://doi.org/10.3390/en13164132>.
- [4] 联合国气候变化框架公约 (2015). 《联合国气候变化框架公约》简称《巴黎协定》.

- [5] A. J. Jin, "Fundamental theory on multiple energy resources and related case studies", *Scientific Reports* 2023, vol. 13, Article number: 10965
<https://www.nature.com/articles/s41598-023-37653-5>. 综合能源的智慧微电网技术包含混搭式能源的应用及智慧优化.
- [6] 卡尼亚诺 A、图格利 E D、曼卡雷拉 P, (2020); 微电网: 实际实施和运行的概述和指南[J]. *Applied Energy*, 2020, 258: 114039.
- [7] 金安君; 李昌利; 苏家鹏; 谈建(2022); 智能分布式能源的基础研究以及能源区块链. *能源* 2022, 15, 806701-806712. (英文).
- [8] 生态环境部(2022). 官方解读 | 《2021、2022 年全国碳排放权交易配额总量设定与分配实施方案 (征求意见稿)》2022-11-04, 来源: 生态环境部关键词: 碳配额碳排放发电企业. 要达到预期的碳排因子峰值, 国内当前合适的目标低于 0.557 kg/kWh. (last access, 2024-2-28).
- [9] 国家发展改革委国家能源局(2022). 关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见. *发改能源* (2022) 206 号.
- [10] Cortesc C A, Contreras S F, Shahidehpour M. (2018), 增强主动配电网可靠性的微电网拓扑规划 [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(6): 6369-6377.
- [11] 苏家鹏, "基于负荷侧管理和双储能模式的微电网多时间尺度能量优化调度研究", *浙江* 2022: 宁波大学 2022-6-2.
- [12] Muhtadi A, Pandit D, Nguyen N, et al. (2021), 基于分布式能源的微电网: 架构、控制和可靠性综述[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2021, 57(03): 2223-2235.
- [13] Andoni, M., Robu, V., Flynn, D., et al, "能源领域的区块链技术: 对挑战和机遇的系统回顾", *可再生能源与可持续能源评论* 2019, 第 100 卷, 143-174(2019). (英文).
- [14] 李智豪等, 《已发布的能源和智能区块链展望》, *Advanced Materials Letters* 2021, 第 12 卷, 第 3 期, 第 21-031607 页. (英文).
- [15] 颜拥, 赵俊华, 文福拴, 陈星莺, "能源系统中的区块链: 概念、应用与展望", *电力建设* 2017 (中文), CEPC Vol. 38 (2): 12. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7229.2017.02.002>.
- [16] 蓝虹, 陈雅函 (2022); 碳交易市场发展及其制度体系的构建, 《改革》 2022 年 1 月 21 日. <http://www.reform.net.cn>; <https://gddc.sass.org.cn/2023/0320/c5953a535779/page.htm>
- [17] 熊灵, 齐绍洲, 沈波 (2016), 中国碳交易试点配额分配的机制特征、设计问题与改进对策, 《社会科学文摘》. <https://xueshu.baidu.com/usercenter/paper/show?paperid=61b08e0844662b4505a7f51d7502cb42>. <https://doi.org/CNKI:SU N:WSLD.0.2016-03-008> http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-02/11/content_5673015.htm
- [18] 国际能源署 (2020): 到 2050 年实现净零排放: 全球能源部门路线图. 国际能源署.