采用水力储能的太阳能-电网供水系统优化：案例研究

Mariamawit Gashahun
Arega卡内基梅隆大学工程学院
卢旺达基加利
marega@andrew.cmu.edu

Jesse Thornburg卡内基梅隆大学工程学院，美国宾夕法尼亚州研究员，基加利协作研究中心，卢旺达基加利；卡内基梅隆大学斯科特能源创新研究所特聘教员，美国宾夕法尼亚州
jthornbu@andrew.cmu.edu

arXiv:2611.30019v1 [eess.SY] 23 Nov 2026

摘要—鉴于电网级电池成本高昂，发展中地区和低收入地区需要采用其他储能方式。在这些地区，高位蓄水通常比电池更具经济可行性。本文提出一种双框架建模方法，用于分析其中一种储能配置：埃塞俄比亚干旱的阿法尔地区的太阳能-电网混合供水系统。该系统利用一座容量为1,900 m3的高位蓄水池作为“水力电池”，取代传统电化学储能，大幅降低资本支出。通过使用 Python 进行高分辨率技术仿真，并使用 Xendee 进行经济优化，研究显示太阳能占比为55.1%，内部收益率（IRR）为10%。结果证实，采用水力储能的混合系统能够为能源受限地区的供水提供经济可行且可靠的解决方案。

索引词—光伏系统、太阳能发电、储能、混合电力系统、电力系统可靠性

一、引言

撒哈拉以南非洲面临严重的能源与水资源缺口，近一半人口缺乏现代能源。在阿法尔地区，仅有 4.1% 的人口能够使用改良型卫生设施，而只有 11% 的人使用改良水源 [1]。频繁的干旱和极不可靠的国家电网使这一状况雪上加霜。尽管面临这些挑战，该地区拥有丰富的太阳能资源，年法向直接辐照量约为 2,045 kWh/m2 [2]。近期其他研究表明，在东非，将现场太阳能光伏与不稳定的国家电网相结合，可以提高本地负荷的稳定性和可靠性 [3]。太阳能光伏是一种日益经济实惠的发电技术，非常适合撒哈拉以南非洲的大部分地区，因为无需成本高昂且耗时漫长的可行性研究，就能对其进行容量配置和安装；即使借助卫星图像和计算机实现自动化容量配置，也同样如此愿景 [4]。近期一项研究表明，借助可在网上免费使用的大语言模型（LLM）工具，可以完成东非小型太阳能光伏设施的预可行性分析 [5]。

本研究介绍了一种太阳能—电网混合供水系统的设计与验证。为确定其最优规模，本研究采用双框架方法，结合气象模型与 Xendee 优化，验证微电网的技术可行性和财务可行性。设计的技术稳健性也得到证明，供水可靠性达到 100%，太阳能占比超过 55%。本方法通过一项案例研究加以展示，该案例研究针对埃塞俄比亚阿法尔地区，将太阳能光伏与现有水库及电价机制相结合。具体贡献有三点：（i）构建基于物理的 Python 模型，将气候敏感型用水需求转换为逐时电力负荷曲线；（ii）明确将现有高位水库视为等效电池储能系统（电池储能系统），即“水力电池”，其参数依据重力储能物理原理推导，而非假设得出；（iii）将这一物理模型与 Xendee 技术经济平台集成，以共同评估电网停电条件下的成本、太阳能占比和韧性。

*979-8-3195-1706-7/26/$31.00 ©2026 IEEE

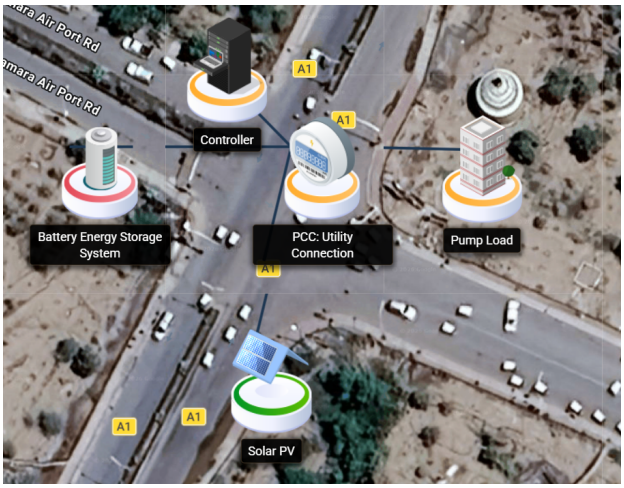


图 1：使用 Xendee 建模的埃塞俄比亚阿法尔系统布局。

II. 背景

全球有11.8亿人生活在能源贫困中（无法可靠地使用电力），其中约有一半居住在撒哈拉以南非洲 [6]。电力可及性是推动任何国家经济发展、减贫和建设更清洁环境的关键因素 [11]。即使是南非等电气化程度较高的国家，家庭电气化缺口仍达20% [9]。该地区可再生资源丰富，维护和运营成本低于核能或化石能源系统，但农村电气化日益依赖分布式微电网，而这类微电网持续面临技术、经济和政策方面的挑战。

先前的研究展示了这些挑战的多样性。Babay- omi和Okharedia提出了CETEP框架，强调社区所有权、财务可行性和政策不确定性是决定长期可持续性的因素，但并未针对这些社会约束提出工程设计调整方案 [7]。电价设计也会影响经济可行性：Raji等人指出，分时电价、阶梯电价和订阅式电价会直接影响消费模式，且往往产生意料之外的后果；然而，这类电价研究通常与技术优化分开建模 [8]。在并网层面，Khan等人指出，埃塞俄比亚电网规范在电压穿越、频率响应和无功功率方面存在缺漏，这些缺漏限制了可再生能源渗透率，使其低于IEEE 1547标准所要求的水平 [18]。配电层面的决策同样重要；Ehnberg等人指出，埃塞俄比亚和卢旺达光伏微电网的电缆选型受到当地电价和碳强度的影响：在卢旺达，电缆选型偏大有利；而在埃塞俄比亚，受补贴电价影响，这种做法则不受鼓励 [19]。

在系统规模设计方面，Abebe 等人使用 HOMER 对埃塞俄比亚 Gedro Kebele 的光伏–风能–电池混合微电网进行了优化，发现太阳能光伏贡献了 94% 的发电量，而风能仅占 6%，这凸显了太阳能资源在埃塞俄比亚环境中的主导地位 [20]。其他研究则整合了微型水电[10] 或灌溉基础设施 [12],，而 Beyene 等人明确对工业园区的停电频率和可靠性约束进行了建模 [13]。然而，在这些研究中，大多数工作将技术可行性与社会经济现实割裂开来，或将政策与工程设计分开讨论；很少有研究将技术可靠性、经济可持续性和社区熟悉度纳入同一框架。本研究通过太阳能-电网混合供水系统弥补这一不足：该系统沿用现有蓄水池、水泵和电价结构，同时引入太阳能光伏这一低维护创新，使设计兼顾技术可行性与社会接受度。

III. 方法论

A. 集成建模框架

本研究采用混合仿真—优化框架，将基于 Python 的物理系统模型与 Xendee 的时间序列优化平台相结合，以评估系统性能、成本和韧性。其他研究也曾使用 Python 对东非能源项目进行优化建模，例如对卢旺达某设施的太阳能—电网混合容量进行调度 [14]。针对阿法尔研究，Python 模块为供水泵系统生成逐时电力负荷曲线，并将其作为输入数据提供给 Xendee。工作流程分为三个依次进行的阶段：（1）物理系统仿真（Python）；（2）时间序列优化（Xendee）；（3）经济与韧性评估。这样可以确保在经济优化过程中保留基于物理的建模所推导出的运行约束。

1) 选择 *Xendee* 的理由：选择 Xendee 而非 HOMER 等通用工具或定制求解器，原因有多项。首先，它能基于用户提供的小时级时间序列执行混合整数线性规划，使我们能够输入外部计算的、基于物理原理的负荷和光伏功率曲线（来自我们的 Python 模型），而非依赖软件内置的简化估算器。其次，它原生支持对通用电池储能资产进行建模，并可配置容量、充放电效率和荷电状态限值，这与我们的“水力电池”抽象直接对应。第三，它内置配电级经济与韧性报告功能（净现值、内部收益率、电价敏感性、孤岛运行），可在同一环境中联合开展技术经济评估和可靠性评估。HOMER 在导入完全外生的负荷曲线方面灵活性较低，而定制求解器则会重复实现 Xendee 已验证的功能。更广泛地说，对于在单一软件中同时进行经济和技术建模（无需对输配电基础设施中的暂态等进行建模），Xendee 是本研究的理想选择，而非 Adaptricity、PowerFactory、GridLab-D 或 PLASMiS 等其他电力系统仿真工具[15]–[17]。

B. 基于 *Python* 的水能系统模型

1) 时变用水需求建模：用水需求被建模为动态、随时间变化的变量，纳入季节变化和温度敏感性，并依据 Timotewos 等人针对科拉气候区（阿法尔的代表性区域）的区域实测数据 [21]。全年需求按归一化月度系数分配至三个气候季节：Belg（2 月至 5 月）占年需求的 34.5%，系数为 1.035；Bega（6 月至 9 月）占 33.3%，系数为 0.999；Kiremt（10 月至次年 1 月）占 32.2%，系数为 0.966。月用水需求计算如下：

$$D_{month} = D_{avg} \times M_{season} \tag{1}$$

其中，D_{month} 为月用水需求（m3），D_{avg} 为月平均需求（m3），M_{season} 为无量纲季节乘数。需求还根据温度，利用弹性系数进行调整：

$$D(t) = D_{base}(t) \times (1 + \alpha \cdot (T(t) - T_{ref})) \tag{2}$$

其中，D（t）为时刻 t经温度调整后的需求（m3），D_{base}（t）为基础需求（m3），$\alpha = 0.0528$ 为温度弹性系数（每℃为5.28%），T（t）为环境温度（℃），T_{ref} 为参考温度（℃）。最终小时用水需求为：

$$D_{hour}(t) = D_{daily} \times f_{diurnal}(t) \times M_{season} \times (1 + \alpha \Delta T(t)) \tag{3}$$

其中，D_{hour}（t）为小时用水需求（m3），D_{daily} 为日用水需求总量（m3），$f_{diurnal}$（t）为归一化小时用水比例，用于表示早晚高峰（无量纲），ΔT（t）$= T$（t）$- T_{ref}$（℃）。

2) 负荷生成与水泵需求：Python 模块通过水力能量关系将时变需求转换为电负荷。水泵功率为：

$$P = \frac{\rho g Q H}{\eta} \tag{4}$$

其中， P 为水泵电功率（W）， $\rho = 1000$ kg/m3 为水密度， $g = 9.81$m/s2 为重力加速度，Q 为流量（m3/s）， H 为总扬程（m），η 为无量纲泵效率 [23]。每小时能耗为：

$$E_{hour} = \frac{\rho g V H}{\eta \cdot 3600 s/h} \tag{5}$$

其中， E_{hour} 为每小时抽水能耗（Wh）， V 为该小时的抽水量（m3）。

3）太阳能资源整合：光伏发电量根据辐照度数据建模：

$$P_{PV} = G \cdot A \cdot \eta_{PV} \tag{6}$$

其中， P_{PV} 为光伏功率输出（W）， G 为入射太阳辐照度（W/m2）， A 为光伏板面积（m2）， η_{PV} 为无量纲的光伏转换效率。系统损耗（逆变器、温度、布线）依据标准光伏建模方法处理。在小时级时间步长（每年8760小时）下，模型计算气候调整后的需求、抽水能耗、光伏发电量和净负荷。

4）太阳几何：太阳几何通过赤纬角（δ）和日落时角（ω_{ss}）定义太阳相对于场址纬度和年积日的位置：

$$\delta = 0.40928 \cdot \sin\left(\frac{2\pi(doy - 80)}{365}\right) \tag{7}$$

$$\omega_{ss} = \cos^{-1}(-\tan L \cdot \tan \delta) \tag{8}$$

其中， δ 为太阳赤纬角（rad）， ω_{ss} 为日落时角（rad），doy 为年积日（1–365）， L为场址纬度（rad） [22], [24]。

5) 小时辐照度分布（马尔可夫链）：使用马尔可夫链方法将日总辐照量分解为小时辐照度。晴空指数（K_t）被建模为一个随机过程，其转移矩阵根据月平均值确定：

$$K_t = \frac{H_t}{H_{et}} \tag{9}$$

其中， K_t 是无量纲的日晴空指数， H_t 是日全球地表辐照量（kWh/m2）， H_{et} 是日地外辐照量（kWh/m2）。转移矩阵定义了晴空状态之间转换的概率，从而确保真实的自相关性和变异性 [27]。

*6) Erbs*模型分解：全球水平辐照度（GHI）被分解为散射（G_d）和直射光束（G_b）分量：

$$k_d = \begin{cases} 1 - 0.09K_t, & K_t \le 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604K_t + 4.388K_t^2 & \\ \quad - 16.638K_t^3 + 12.336K_t^4, & 0.22 < K_t \le 0.80 \\ 0.165, & K_t > 0.80 \end{cases} \tag{10}$$

$$G_d = k_d \cdot GHI, \quad G_b = GHI - G_d \tag{11}$$

其中， k_d 是无量纲散射比例， GHI 是全球水平辐照度（W/m2）， G_d 和 G_b 是水平面散射与直射分量（W/m2） [26]。

7) 换算模型：倾斜光伏表面的辐照度由直射、散射和反射分量组成：

$$G_{tilt} = G_b \cdot \frac{\cos\theta}{\sin h_s} + \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) G_d + \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right) GHI \cdot \rho_g \tag{12}$$

其中， G_{tilt} 是倾斜面总辐照度（W/m2）， θ 是入射角（rad），h_s 是太阳高度角（rad）， β 是组件倾角（rad）， ρ_g 是无量纲的地面反照率 [26]。

8) 逐小时温度模型：根据每日最高/最低温度和太阳辐射，通过累积辐照量比（k_x）模拟逐小时环境温度：

$$k_x(t) = \frac{\int_{sunrise}^{t} GHI(\tau)\, d\tau}{\int_{sunrise}^{sunset} GHI(\tau)\, d\tau} \tag{13}$$

$$T_a(t) = \begin{cases} T_{min} + slp_{before} \cdot k_x(t), & t \le t_{kxmax} \\ T_{max} - slp_{after} \cdot (k_{xmax} - k_x(t)), & t > t_{kxmax} \end{cases} \tag{14}$$

$$slp_{before} = \frac{T_{max} - T_{min}}{k_{xmax}}, \quad slp_{after} = 1.7 \cdot slp_{before} \tag{15}$$

其中， $k_x(t)$ 是无量纲累积辐照比（日出时为 0，日落时为 1）， $T_a(t)$ 是环境温度（°C），T_{min} 和 T_{max} 是每日最低/最高温度（°C）， k_{xmax} 是在峰值温度时的k_x， t_{kxmax} 是该峰值出现的时间，而 slp_{before} 和 slp_{after} 是升温/降温斜率（每单位 k_x对应的 °C）。日落至日出期间的夜间降温 [28] 采用线性模型。

C. 蓄水池作为等效电池储能系统

1）“水力电池”概念：本研究所称的水力电池，是指将现有高位水库用作重力储能介质，其功能相当于用于负荷转移的电化学电池。太阳能充足时，通过水泵将水抽至高处“充电”；太阳能不足时，则依靠重力放水“放电”。从概念上看，这属于抽水蓄能（PHES）的一种形式，但有三点不同。第一，规模和用途不同：传统抽水蓄能将两个大型蓄水池与可逆式水轮机相结合，可发电数十至数百兆瓦；而我们的水力电池储能规模约为数百千瓦时，“放电”时提供的是供水服务，而非重新发电。第二，基础设施再利用：储能资产已存在于供水系统中，因此无需为专用蓄水池组或水轮机厂房提供资金。第三，能量转换路径不同：储存的能量直接以输送水的形式消耗，水泵是唯一的转换设备，从而避免了抽水蓄能中电能往返转换造成的损耗。全球已有类似概念，包括对现有水利基础设施进行微型抽水蓄能改造，以及通过安排市政抽水来吸纳可再生能源盈余的“水电池”示范项目，

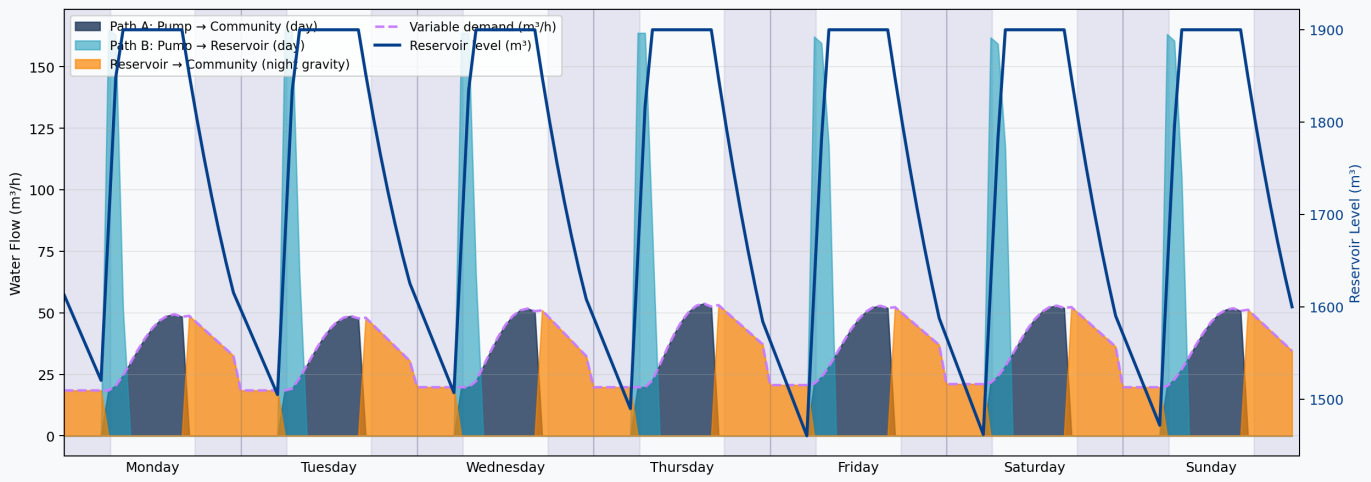


图2：Python仿真中示例周的每小时水流路径，显示抽水流入量、蓄水池储存水量和供水需求。

以及在南亚和撒哈拉以南非洲各地部署的太阳能抽水系统与高架水箱。

2) 储能推导与参数估计：蓄水池被建模为重力储能：

$$E = \rho g h V \tag{16}$$

$$E_{kWh} = \frac{\rho g h V}{3.6 \times 10^6 \cdot \eta} \tag{17}$$

其中， E 为储存势能（J）， E_{kWh} 为电能等效值（kWh）， h 为有效储能水头（m）， V为储存水量（m3），η 为泵送／回收效率（无量纲）， 3.6×10^6 用于将J转换为kWh。因此，Xendee中使用的电池等效参数并非假定值，而是根据实际水库规格推导得出：有效水头为 $h = 30$ m（使用点以上的高程），可用水量为 $V = 1900$ m3，由此得到的能量强度为0.163 kWh/m3（通过计算 E_{kWh}/V获得）：

$$E_{res} = 1900 \times 0.163 \approx 311 \text{ kWh} \tag{18}$$

其中， E_{res} 为总电能等效容量（kWh）。提供给Xendee的充电／放电效率分别对应泵效率（充电）和重力供水效率（放电），荷电状态限值对应于水箱运行水位的最小值／最大值，与既有的抽水蓄能公式一致 [25]。因此，在Xendee中，蓄水池被建模为容量为311 kWh的电池储能系统，通过水泵运行充电，并通过重力供水放电，从而实现负荷转移，将多余的太阳能储存为水，以供日后使用。

*D. Xendee*时序优化

该优化旨在使系统总成本最小：

$$\min \sum_{t=1}^{T} \left(C_{grid}(t) + C_{O\&M}(t)\right) \tag{19}$$

其中， $C_{grid}(t)$ 是第 t 小时购买电网电力的成本（美元），$C_{O\&M}(t)$ 是运行维护成本（美元），T 是时间步数。该优化受功率平衡和储能动态约束：

$$P_{PV}(t) + P_{grid}(t) = P_{load}(t) \tag{20}$$

$$SOC(t+1) = SOC(t) + \eta_c P_{charge}(t) - \frac{P_{discharge}(t)}{\eta_d} \tag{21}$$

其中， $P_{PV}(t)$、 $P_{grid}(t)$、 $P_{load}(t)$分别为光伏、电网和负荷功率（kW）； $SOC(t)$为蓄水池荷电状态（以水位表示，单位为kWh当量）； η_c、 η_d 为无量纲充电/放电效率； $P_{charge}(t)$、$P_{discharge}(t)$分别为充电（水泵）功率和放电（重力供水）功率（kW）。通过强制 $P_{grid}(t) = 0$来模拟电网停电，随后根据储存的水量（蓄水池SOC）和可用光伏对可靠性进行评估。

E. 经济分析

净现值（NPV）、内部收益率和盈亏平衡点计算如下：

$$NPV = \sum_{t=0}^{N} \frac{R_t - C_t}{(1+r)^t} \tag{22}$$

$$0 = \sum_{t=0}^{N} \frac{R_t - C_t}{(1+IRR)^t} \tag{23}$$

$$\sum_{t=0}^{t_b} (R_t - C_t) = 0 \tag{24}$$

其中， NPV以美元计， R_t和 C_t分别为第t 年（美元）的收入和成本， r 为折现率（无量纲）， N 为项目寿命（年）， IRR 为内部收益率（使 $NPV = 0$成立的折现率）， t_b为盈亏平衡年份（累计净现金流首次非负的年份）。停电期间满足以下条件时，系统充裕度得以保证：

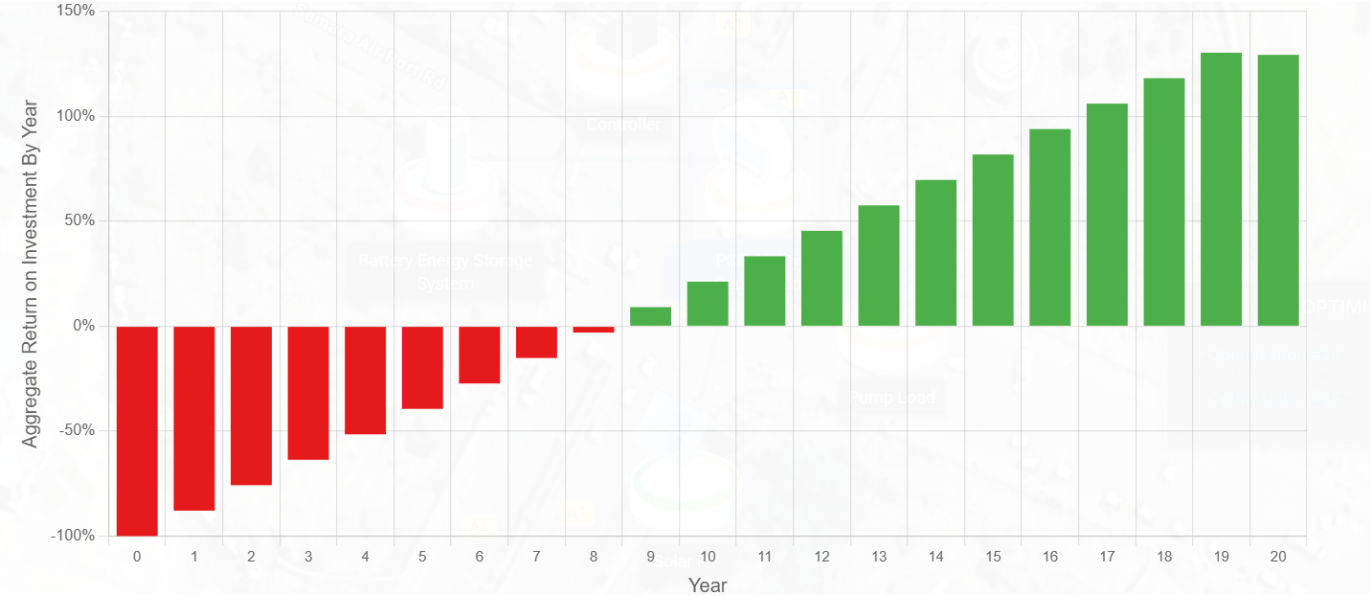


图 3：预计运营前二十年的年度投资回报率（%）。

$$E_{PV}(t) + E_{res}(t) \geq E_{load}(t) \tag{25}$$

其中，$E_{PV}(t)$、$E_{res}(t)$、$E_{load}(t)$分别表示时间 t 可用的光伏能量、水库储能和所需负荷能量（kWh）。蓄水池通过将供水与实时能源可用性解耦，增强了系统韧性。

IV. 结果

A. 技术性能

Python 仿真（涵盖 2,251 天）得出的太阳能占比为 55.1%，日均供水量为 944.4 m3/day；电网主要在多云时段或夜间水库耗竭时提供备用电源。图2 展示了具有代表性的一周内每小时的水流路径：白天的抽水流入量随太阳能可用性变化，而高位水库则缓冲供水，使需求得到持续满足，包括夜间无抽水时段。图中可见的水库交替蓄水和放水，正是负荷转移行为背后的物理机制。

B. 经济可行性

修订后的总资本支出估计为 879,912 美元，年度运营支出为 9,500 美元。Xendee 模型预测内部收益率为 10%，盈亏平衡点为 9 年，最优水价为 12 比尔/立方米（0.076 美元/立方米）。这一水价既能确保项目具备可融资性，又能与罐车运水保持竞争力，因为罐车运水的价格通常超过 20 比尔/立方米。图中按年份绘出了投资回报率3，利润从第 9 年开始。“水力电池”方案在成本和使用寿命方面优于电化学电池，后者使用寿命较短（5–15 年），且更换成本较高。

C. 可靠性

模型表明，在停电情景下，水储能可以有效替代电池：2025 年 6 月 16 日发生 24 小时公用电网停电期间，负荷需求得到全面满足，服务未曾中断，凸显了该设计的可靠性和成本效益。

V. 讨论

结果表明，所提出的太阳能–电网混合供水系统通过集成建模框架，实现了提升技术性能、经济可行性和韧性的目标。

55.1%的太阳能占比表明，超过一半的能源需求由可再生能源满足，而日均944.4 m3的供水量能够在运行稳定的情况下满足需求曲线。云层遮挡期间以及夜间蓄水池耗竭时对电网电力的依赖，凸显了将储能与备用电源相结合的价值。结果证实，基于水库的储能能够有效转移用能，使水泵优先在太阳能峰值时段运行——如图2 所示，这与在确保连续供水的同时最大限度降低对电网的依赖这一设计目标一致。

从经济性来看，资本支出为 ~$879,912、年度运营支出较低（~ $9,500）、内部收益率为 10%，并在第 9 年实现盈亏平衡，这些指标表明该项目在合理电价下具备财务可持续性。由于储能资产是现有蓄水池，而非化学电池，该项目既避免了电池前期成本，也避免了每 5–15 年发生的重复更换成本——后者是其具有良好经济效益的主要驱动因素之一。在韧性方面，该系统能够在 24 小时停电期间全程维持运行而不中断；将供水与即时电力供应解耦，意味着即使电网中断一整天，只要蓄水池充注充足，也不会中断供水服务——这对于电网极不可靠的地区尤为宝贵。

在方法论方面，将马尔可夫链随机模拟（Python）与确定性时间序列优化（Xendee）相结合，相较于单独采用任一方法具有优势。气象模型刻画了太阳能、需求和环境不确定性，并在较长时间范围内得出统计上稳健的指标；与此同时，Xendee 在成本和系统约束下提供最优运行策略、高分辨率调度以及经济权衡分析。二者结合，既能确保设计在不确定性下具备韧性，又能以最低成本运行，从而形成更接近实际运行情况的模型。

若干局限性为未来研究指明了方向。本分析假设蓄水池几何形状固定且仅涉及一个地点；扩展至不同容量和海拔的情形，将有助于阐明水力电池的经济效益如何随规模变化。停电分析仅考虑了持续 24 小时的事件；纳入多日情景并开展完整的概率可靠性评估（例如失负荷概率），将使韧性结论更有说服力。最后，优化上网电价协议或水费协议，或可进一步提升该项目对私人投资者的吸引力。

VI. 结论

本研究采用气象模型与 Xendee 优化相结合的双框架方法，对埃塞俄比亚塞梅拉的太阳能—电网混合供水系统进行建模。结果证实，将水库视为储能等效量（约为 311 kWh）在技术上可行，且比传统电池更经济，能够显著降低总资本支出。在太阳能占比稳定为 55.1%、内部收益率达到财务可持续的 10% 的情况下，该模型表明，混合系统能够在干旱地区提供可靠且经济高效的供水。通过直接根据水库物理特性推导储能参数，并选择适用于外生负荷曲线和储能调度的优化平台，本研究为类似的基础设施再利用项目提供了一套可推广的方法论。未来工作应优化上网电价协议，并将可靠性分析扩展至多日停电情景。

参考文献

[1] 联合国儿童基金会，《阿法尔地区简报》，联合国儿童基金会埃塞俄比亚办事处，2022年4月。[在线]。可访问：www.unicef.org/ethiopia/media/6491/file/Afar%20regional%20brief.pdf [2] 世界银行，《埃塞俄比亚 DNI 中尺寸地图》，10月。 15, 2019 [ ] _ 3 _ 。在线可访问：https://worldbank-atlas.s-.us-east-1.amazonaws.com/download/Ethiopia/Ethiopia DNI mid-size- map 156x166mm-300dpi v20191015.png [3] I. Ahereza 和 J. Thornburg，《乌干达电动汽车直流快速充电的太阳能光伏与电网并网技术经济分析》，2025 IEEE 亚太交通电气化会议暨博览会（ITEC Asia-Pacific），新加坡，2025年，第1-6页，doi: 10.1109/ITECAsia-Pacific63742.2025.11344958。[4]F. C. dos Santos、J. Thornburg 和 T. S. Ustun，《结合航空影像处理的屋顶光伏系统自动化规划》，2018 IEEE PES 亚太电力与能源工程会议（APPEEC），马来西亚亚庇，2018年，第736-740页，doi: 10.1109/APPEEC.2018.8566666。[5] S. S. Moses 和 J. Thornburg，《面向可再生能源项目预可行性分析的可解释人工智能》，2025 IEEE PES 第17届亚太电力与能源工程会议（APPEEC），新西兰奥克兰，2025年，第1-6页，doi: 10.1109/APPEEC66370.2025.11382138。

[6] D.O. Akinyele 和 R.K. Rayudu，《为偏远社区开发能源系统的策略：最佳实践与可持续性的启示》，《可持续能源技术与评估》，第16卷，第106-127页，2016年。[7] O. Babayomi 和 T. Okharedia，《撒哈拉以南非洲可再生能源微电网扩展面临的挑战——CETEP解决方案模型》，载于2019 IEEE PES/IAS PowerAfrica，尼日利亚阿布贾，2019年，第617-621页。[8] T. Raji、L. Maqelepo、N. J. Williams 和 A. Bett，《资金与权力：电价结构对非洲太阳能微电网电力消费的影响》，载于2022 IEEE PES/IAS PowerAfrica，卢旺达基加利，2022年，第1-5页。[9] H. Patel 和 S. Chowdhury，《南非农村电气化的经济型微水电微电网方案》，载于2018年第53届国际大学电力工程会议（UPEC），英国格拉斯哥，2018年，第1-6页。[10] A. Mekonnen、R. Hiremath 和 D. Shiferaw，《埃塞俄比亚基于微电网的农村电气化可再生能源资源设计与仿真》，《美国电力与能源系统期刊》，第10卷，第51-59页，2021年。[11] T. T. Erbato 和 T. Hartkopf，《面向埃塞俄比亚农村能源解决方案的智能微电网》，载于2012 IEEE PES创新智能电网技术会议（ISGT），美国华盛顿特区，2012年，第1-7页。[12] S. Emmanouil、J. Philhower、S. Macdonald、F.K. Khadim、M. Yang、E. Atsbeha、H. Nagireddy、N. Roach、E. Holzer 和 E.N. Anagnostou，《埃塞俄比亚农村可再生能源微电网设计的综合方法：技术与社会视角》，《可持续性》，第13卷，第3974页，2021年。[13] Y. Bekele 等，《埃塞俄比亚可持续并网微电网分布式能源资源的设计与优化》，《国际氢能期刊》，第48卷，2023年。[14] C. Ogbogu、M. Kipsang 和 J. Thornburg，《卢旺达可再生能源调度计划的粒子群优化》，2025 IEEE PES/IAS PowerAfrica，埃及开罗，2025年，第1-6页，doi: 10.1109/Pow- erAfrica65840.2025.11289052。[15] J. A. Thornburg，《一种用于对采用可再生能源与需求侧管理的智能微电网建模的概率工具》，2022年计算智能与可持续工程解决方案国际会议（CISES），印度大诺伊达，2022年，第188-195页，doi: https://doi.org/10.1109/CISES54857.2022.9844342。[16] J. Thornburg，《微电网建模与需求响应模拟器比较》，2021 IEEE PES/IAS PowerAfrica，肯尼亚内罗毕，2021年，第1-5页，doi: https://doi.org/10.1109/PowerAfrica52236.2021.9543254。[17] J. A. Thornburg，《一种用于概率评估微电网运行策略与需求侧管理的工具》，博士学位论文，卡内基梅隆大学，2018年12月。[18] B. Khan、J. M. Guerrero、S. Chaudhary、J. C. Vasquez、K. H. B. Frederiksen 和 Y. Wu，《埃塞俄比亚可再生能源接入的电网规范要求综述》，《能源》，第15卷，第14期，2022年。[19] J. Ehnberg、M. A. Gelchu 和 P. D. Uwitije，《光伏微电网电缆选型评估：聚焦经济与环境因素——埃塞俄比亚与卢旺达案例研究》，载于2024 IEEE PES/IAS PowerAfrica，南非约翰内斯堡，2024年，第1-5页。[20] A. Ashetehe 等，《农村电气化微电网电力系统最优设计可行性研究：埃塞俄比亚阿姆哈拉州》，《亚洲电气科学期刊》，第8卷，第26-30页，2019年。[21] M.T. Timotewos、M. Barjenbruch、B.M. Behailu，《气候变量与地理分布对埃塞俄比亚居民饮用水需求的影响评估》，《水》，第14卷，第1722页，2022年。[22]《赤纬角》，PVEducation，[在线]。可访问：pveducation.org [23] M. El-Wakil，《电厂技术》，麦格劳-希尔，1984年。[24] Md. Shariful Alam Emon、Mohsan Uddin Ahmad、Md Hasanuzzaman，《第2章——太阳能热转换》，载于《太阳能热利用技术》，学术出版社，第25-54页，2022年。[25] A. Harby 等，《抽水蓄能水电》，2013年。[26] D.G. Erbs、S.A. Klein、J.A. Duffie，《小时、日和月平均全球辐射散射辐射比例的估算》，《太阳能》，第28卷，第4期，第293-302页，1982年。[27] R.J. Aguiar、M. Collares-Pereira、J.P. Conde，《利用马尔可夫转移矩阵库生成日辐射值序列的简易方法》，《太阳能》，第40卷，第3期，第269-279页，1988年。[28] Meteotest，《Meteonorm 8：地球各地的辐照数据，手册第二部分：理论，第8.2版》，2023年7月。