arXiv:2602.01502v1 [eess.SY] 2 Feb 2026

通过协同优化实现重型电动交通充电能源枢纽的最优规模配置 ⋆

M. Izadi、D. Fernandez Zapico、M. Salazar、T. Hofman *

*埃因霍温理工大学机械工程系，荷兰（电子邮箱：{*m.izadi.najafabadi1*、*d.fernandez.zapico*、*m.r.u.salazar*、*t.hofman*}*@tue.nl*）。

摘要： 重型车辆电气化给配电网带来了巨大压力，而充电能源枢纽（CEH）通过整合充电基础设施、可再生能源和电池储能，可减轻这些影响。因此，CEH组件的最优规模配置是一项关键的投资决策，但也颇具挑战，因为设计选择高度依赖运行动态。本文提出一种用于CEH组件最优规模配置的混合整数线性规划模型，并采用协同设计方法，对组件容量配置和运行决策进行联合优化。针对一支重型车队的案例研究表明，该方法有助于制定兼顾成本效益、可扩展性和电网合规性的CEH规划方案。

关键词：电力与能源系统；电动汽车充电站；可再生能源系统建模与集成；最优规模配置；混合整数线性规划。

1. 引言

在欧盟“Fit for 55”一揽子计划（欧盟理事会（2021年））、2050年净零排放目标（国际能源署（2021年））以及荷兰城市逐步设立零排放区（荷兰政府（2023年））等法规和举措的推动下，加之荷兰政府制定了到2050年实现气候中和的国家目标，物流业正被推动转向电气化。这一转型预计将显著增加电力需求，尤其是重型电动汽车的用电需求，因为这类车辆的电池容量更大，且需要快速途中充电。对于重型运输而言，这一转型尤为关键，因为预计到2030年，电动卡车的总拥有成本将低于柴油卡车。然而，由于可再生能源和电动汽车充电需求迅速增长，荷兰正面临电网拥塞；若不采取解决措施，这一问题可能会延误甚至阻碍向零排放重型运输转型（TNO（2025年））。

为应对电力需求不断增长和电网拥塞日益加剧的挑战，充电能源枢纽（CEH）这一概念应运而生，成为一种颇具前景的解决方案。充电能源枢纽是在现有电网中整合充电基础设施、电池储能和可再生能源的本地能源系统，可实现更智能、更灵活的能源管理。CEH内的直流（DC）微电网通过统一的直流配电网，将光伏（PV）系统、风力涡轮机（WT）和电池储能系统（BESS）等本地电源与电动汽车（EV）充电基础设施连接起来。原生直流技术等

⋆ 本研究由荷兰企业局通过充电能源枢纽项目（项目编号NGFS23020）提供支持，并部分获得荷兰国家增长基金资助。

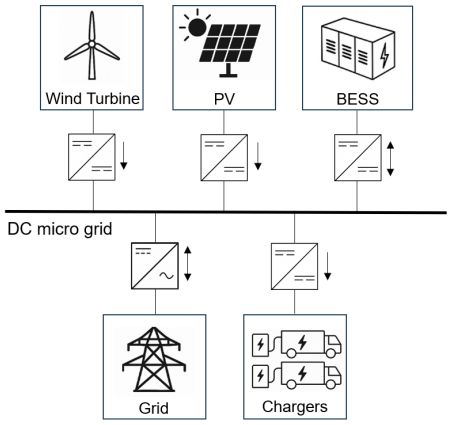


图1. CEH内直流微电网的示意配置：通过交流/直流和直流变换器，将光伏系统、风力涡轮机、电池储能系统和电动汽车充电器集成在一起。

随着光伏系统和电动汽车电池通过减少变换损耗、简化电网接口并提高效率、稳健性、可靠性和控制简易性，使直流架构比基于交流的系统更具吸引力。CEH 内直流微电网的配置如图 1 所示。其中包括用于电网互联的双向交直流变换器、用于连接光伏系统、风力涡轮机和充电桩的单向直流变换器，以及用于电池储能系统的双向直流变换器，以实现充电和放电操作。充电能源枢纽可通过提高本地发电的自发自用率来削减电网功率峰值，并可通过与国家电网连接，在可再生能源电力过剩或短缺时提供灵活性。因此，它们在以可持续且可扩展的方式推动下一阶段电气化进程中发挥着关键作用。CEH 的一个关键方面是

投资决策中的配置问题：在假定每种电动汽车类型的电池容量固定的前提下，确定充电桩、电池储能单元和可再生能源的最佳数量，以最大限度地降低总拥有成本。这一目标还可扩展至纳入其他目标，例如减排，以及面向 CEH 用户的服务质量指标（如等待时间）。

相关文献：文献中用于确定充电基础设施规模的方法可分为物理—经济模型（PEM）和数据驱动模型。这些类别指的是用于估算系统行为并评估不同设计方案的底层建模方法。数据驱动方法（Wei 等（2022））因能够从历史数据中学习系统行为而受到关注，但通常无法保证全局最优性，可能需要大量训练时间，而且往往依赖于足够丰富的训练数据集。PEM方法包括基于规则的方法和基于优化的方法。基于规则的策略（Mohandes 等（2020））结构清晰且透明；然而，它们通常无法获得最优解，并依赖预先设定的决策规则来确定规模设计策略。基于优化的PEM方法包括全局规划方法和启发式算法，例如遗传算法（Tran 等（2018））和粒子群优化（Bhatti 等（2019））。尽管启发式算法应用广泛，但无法保证全局最优性，且通常需要较大的计算量。在全局规划方法中，线性规划和混合整数线性规划（MILP）尤其具有吸引力，因为它们能够保证全局最优性，并且有成熟的求解器支持，计算效率较高。因此，MILP已成为大规模能源系统规划的主流框架，因为大多数系统特性都可以通过线性公式以合理的精度表示。Khaksari 等（2021）采用混合整数线性规划模型确定电动汽车充电站的规模，在满足服务质量要求的同时，通过确定充电桩的最佳数量和类型来降低基础设施成本。服务质量通过机会约束予以保障，该约束限制了充电延迟超过用户要求的离开时间的概率。然而，该研究未考虑可再生能源发电或固定式电池储能的规模设计，仅关注充电桩规模。Aluisio 等（2019）开发了一个混合整数线性规划框架，用于确定包括光伏、电池储能系统、电网连接和变流器在内的关键微电网组件的规模，但充电桩数量则通过基于车辆在场峰值的规则近似方法单独确定。Aliamooei-Lakeh 等（2024）提出了一个混合整数线性规划模型，用于对配电系统中的并网充电基础设施进行规模设计和选址，并优化光伏、风力涡轮机、电池储能系统和电动汽车充电站。然而，组件规模被建模为连续变量而非离散变量，这虽然提高了计算效率，却限制了物理可扩展性和模块化程度。Vehlhaber 和 Salazar（2024）提出了一个混合整数线性规划框架，用于确定面向电动航空网络的离网电动机场规模。然而，他们的模型不对充电基础设施进行规模设计，并将光伏和电池储能系统的容量视为连续变量，从而忽略了模块化配置。总之，据作者所知，目前尚无研究提出一种混合整数线性规划框架，能够以离散方式确定所有关键CEH组件的规模，并联合优化设计与运行；该框架需要对所有组件的行为以及每个独立的充电会话进行建模，同时还要考虑电网约束。

贡献声明：为弥补现有文献中的这一空白，本文提出一种混合整数线性规划模型，用于配置充电能源枢纽（CEH）的组件容量，以降低重型电动汽车的总拥有成本，同时确保电动汽车车队完全满足所研究区域预先设定的物流需求。我们采用协同设计方法，联合优化组件容量配置与运行决策，以反映设计选择与CEH运行之间的紧密耦合关系。该模型采用模块化、可扩展的设计方法，在考虑功率需求、天气变化曲线、能源价格和电网约束的同时，确定光伏、风力涡轮机、电池储能系统及充电桩的最优规模。所有单次电动汽车充电会话均采用智能充电框架建模，每次充电会话都必须安排在车辆的到达—离开时间窗口内。所提出的混合整数线性规划模型纳入了电网功率约束，该约束根据CEH的电网连接合同，对电力进口与出口设定上限。

2. 方法与数学模型

本研究将CEH设计优化问题构建为混合整数线性规划模型，以确定充电单元的数量和类型，以及光伏系统、风力涡轮机和电池储能系统单元的最优数量。研究采用协同设计框架，同时优化设施设计（组件容量配置）和能源管理策略，后者负责在不同能源之间分配功率。这种方法十分重要，因为容量配置决策会显著影响运行灵活性和成本，而电网限制、可再生能源波动性以及电动汽车物流等运行约束，则直接决定哪些组件容量配置可行或具有成本优势。运行变量包括电网功率交换、电池充电与放电功率、电池荷电状态（SOC）、充电桩功率，以及与电池充电/放电和从电网进口/向电网出口电力相关的决策；还包括电动汽车—充电桩分配决策，用于指定每辆电动汽车在不同时段分配至哪个充电桩。目标函数旨在降低CEH的总拥有成本，同时确保电动汽车车队的能源需求得到充分满足。我们采用模块化配置，以确保方案具有实际可实施性和可扩展性。在此配置中，每个组件均视为具有已知容量和技术特性的离散单元，随后由优化过程确定应安装的单元数量。

在一年期时域内构建优化问题，会得到一个高维且计算负担较重的混合整数线性规划模型。为降低计算负担，该方法采用基于情景的方法。我们定义一组代表性场景 $s \in S$ ，因为太阳能和风能发电取决于天气条件和季节，而电动汽车充电需求不仅在工作日和周末之间有所不同，在一年中的不同时段也有所差异。每个场景代表一个

典型日，并分配相应的出现频率因子 D_s，表示该场景在一年内出现的次数。一个场景 s涵盖一个完整的代表日，并离散为时段 $t \in T$，分辨率为 Δt，使得$|T| = 24/\Delta t$。运行变量以(t, s)为索引，而设计变量则与场景无关。

模型需要一年规划期内的输入数据，包括：(i) 物流数据，例如电动汽车到达和离开时间，以及电动汽车车队的能源需求；(ii) 气象数据，包括 CEH 所在地的太阳辐射和风速曲线；(iii) 电网约束，规定最大输入和输出功率；(iv) 电价数据；以及 (v) 描述系统组件规格和成本的技术与经济参数。模型输出包括最优设计变量和运行变量。离散设计变量对应于光伏单元、风力涡轮机、电池储能系统单元的数量，以及各类充电器的充电点数量；运行输出则包括电网功率交换、社区能源枢纽总需求、电池储能系统充放电功率、电池荷电状态和最优充电计划。

以下各小节将详细介绍所有 CEH 组件的数学公式，包括其运行约束、物理约束和目标函数。所有模型均采用线性形式表示，以确保混合整数线性规划模型具有可解性。CEH 模型使用索引集 $p \in P$ 表示光伏，$w \in W$ 表示风力涡轮机，$b \in B$ 表示电池储能系统，以代表可用的技术选项。

2.1 光伏发电

情景 s 中时刻t 所有光伏技术产生的总功率，记为 $P_t^{\mathrm{PV}}{}_{,\ s}$ [kW], , 其表达式为

$$P_{t,s}^{\mathrm{PV}} = n_p \sum_{p \in P} \eta_p A_p G_{t,s}, \tag{1}$$

其中，n_p 为光伏技术 p 的设备数量，$G_{t,\ s}$为情景 s [中时刻 t 的太阳辐照度，单位为{kW/m^2], ; η_p 和 A_p 分别表示技术 p 的效率和面积 [m^2]。这里忽略面板倾斜角、朝向和环境温度对光伏输出的影响。我们假设 $G_{t,\ s}$ 表示有效入射辐射，并将光伏效率 η_p 视为常数。

2.2 风力发电

情景 s 中时刻 t 产生的总风力，记为 $P_t^{\mathrm{WT}}{}_{,\ s}$ [kW], , 其表达式为

$$P_{t,s}^{\mathrm{WT}} = \begin{cases} n_w \sum\limits_{w \in W} 0.5 c_w \rho A_w^{\mathrm{sw}} v_{t,s}^3, & v_w^{\mathrm{ci}} \le v_{t,s} \le v_w^{\mathrm{r}}. \\ n_w \sum\limits_{w \in W} 0.5 c_w \rho A_w^{\mathrm{sw}} (v_w^{\mathrm{r}})^3, & v_w^{\mathrm{r}} \le v_{t,s} \le v_w^{\mathrm{co}}, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases} \tag{2}$$

其中，n_w 为风力涡轮机技术 w的装机数量，A_w^{sw}为风力涡轮机类型 w [的转子扫掠面积（m^2], ），而v_w^{ci}、v_w^{co}和v_w^{r} 分别表示风力涡轮机类型 w [的切入风速、切出风速和额定风速（m/s）。c_w 表示风机效率系数，定义为 $c_w = \frac{P_w^{\mathrm{r}}}{0.5 \rho A_w^{\mathrm{sw}} (v_w^{\mathrm{r}})^3}$，其中，$P_w^{\mathrm{r}}$ 为风力涡轮机类型 w的额定功率。风速风力涡轮机轮毂高度处的风速记为$v_{t,\ s}$，通过幂律关系$v_{t,\ s} = v_{t^{\prime},\ s}^{\mathrm{m}} \left(\frac{h_{\mathrm{hub}}}{h_{\mathrm{m}}} \right)^{\alpha}$，根据实测风速$v_{t^{\prime},\ s}^{\mathrm{m}}$ 估算。其中，h_{m} 为风速测量高度，α 为风切变指数；在大气稳定度为中性的情况下，该指数通常约为0。143。我们采用这种缩放方法，是因为风速会随高度增加，因此必须对实测数据进行调整，以反映风力涡轮机轮毂高度处的状况。我们假设空气密度恒定，因此忽略温度和气压的影响。

2.3 电池储能系统

我们通过描述电池储能系统在每个时间间隔 Δt内荷电状态的变化来表示其动态过程，同时考虑充电和放电过程。情景 s 中第 b 种电池储能系统技术在时间 t 的荷电状态表示为

$$E_{b,t,s} = E_{b,t-1,s} + \eta_b^{\mathrm{ch}} P_{b,t,s}^{\mathrm{ch}} \Delta t - \frac{P_{b,t,s}^{\mathrm{dis}}}{\eta_b^{\mathrm{dis}}} \Delta t - z_b n_b s_b \Delta t, \tag{3}$$

其中，s_b 是第 b [类电池储能系统的单位容量（kWh）], η_b^{ch}和η_b^{dis}分别是其充电和放电效率，z_b是其自放电率（[h^{-1}]）。我们引入两个非负变量 P充电$b,\ t,\ s$和 $P_{b\,t,\ ,\ s}^{\mathrm{dis}}$, 分别表示充电功率和放电功率。该公式使我们能够采用不同的充电和放电效率，同时保持荷电状态方程的线性。模型通过以下约束强制执行电池储能系统的运行限制

$$n_b s_b \underline{E}_b \le E_{b,t,s} \le n_b s_b \overline{E}_b, \tag{4}$$

其中,$_ E_b$ 和 $\overline{\ } E_b$ 分别表示允许的最小和最大荷电状态比例，满足 $0 \le E_b \le E_b \le 1$。为确保不同代表日之间的一致性，我们约束每天开始时的电池荷电状态均从相同的初始值开始:

$$E_{b,1,s} = n_b s_b E_{\mathrm{o}}, \tag{5}$$

其中，n_b 是电池储能系统技术 b的单元数量，E_{o} 是 [0 1]范围内的初始荷电状态比例。电池的充电功率和放电功率必须非负，且受最大充电限制和放电限制约束:

$P^{\max}{}_{,\ b}{}^{\mathrm{c}}$和 P最大值，放电b，分别为:

$$0 \le P_{b,t,s}^{\mathrm{ch}} \le n_b P_b^{\max,\mathrm{c}}, \tag{6}$$

$$0 \le P_{b,t,s}^{\mathrm{dis}} \le n_b P_b^{\max,\mathrm{d}}. \tag{7}$$

为避免同一时间步内同时充电和放电，我们施加以下约束:

$$0 \le P_{b,t,s}^{\mathrm{ch}} \le N_b^{\max} P_b^{\max,\mathrm{c}} \delta_{t,s}, \tag{8}$$

$$0 \le P_{b,t,s}^{\mathrm{dis}} \le N_b^{\max} P_b^{\max,\mathrm{d}} (1 - \delta_{t,s}), \tag{9}$$

其中，$\delta_{t,\ s}$是一个二元变量，用于表示电池储能系统在情景 s的时间 t 处于充电（1）还是放电（0）状态；$N_b^{\max}$ 表示CEH内可安装的 b 型电池储能系统的最大单元数量。

2.4 电动汽车充电会话智能调度模型

本研究考虑不同类型的充电桩，并根据其额定功率将其作为 CEH 中的潜在安装候选项。候选充电桩集合定义为 $c \in C$，对于该集合中的每个充电桩，引入一个二元决策变量 q_c，用于表示是否选择安装该充电桩（$q_c = 1$）或不安装（$q_c = 0$）。考虑到 N_c 种充电桩，令 m_l 表示数量

在所有 $l \in \{1,2,\ldots,N_c\}$中，候选充电桩集合内类型为 l 的充电桩数量。一种合理的假设是，将 m_l 设为规划时域内 CEH 中同时停放的车辆平均数量。

我们考虑一组到达车辆 $v \in V$，其中每辆车辆 v 由其到达时间 t_v^{arr}、离开时间 t_v^{dep}和充电能量需求 E_v刻画。所有这些物流充电数据均作为输入提供给模型。为对CEH中的电动汽车充电会话进行建模，该方法受Khaksari等（2021）启发，采用智能调度模型，使每辆电动汽车可在到达后的某一时段开始充电，并在离开前完成其充电会话。充电过程必须连续；一旦开始，便不可中断。

我们使用相对时间变量 $t_r \in T_r$对充电会话的候选开始时间进行索引，其中 $T_r = \{1,\ldots,T_{\max}^{\mathrm{parked}}\}$ $T_{\max}^{\mathrm{parked}} = \max_v (t_v^{\mathrm{dep}} - t_v^{\mathrm{arr}})$ ，其中 $T_{\max}^{\mathrm{parked}}$ 表示物流数据中观测到的最大停车时长。二元变量$x_{v,c,t_r} \in \{0,1\}$ 表示车辆 v 是否在相对索引 t_r 于充电桩 c 开始充电（$x_{v,c,t_r}=1$），抑或不开始（$x_{v,c,t_r}=0$）；等价地，$x_{v,c,t_r}=1$ 表示 v 在时段 $t_v^{\mathrm{arr}}+t_r-1$于充电桩 c 开始充电。引入相对时间变量 t_r 是为了缩小问题规模，仅在每辆车辆到达后的有限时间窗内定义$x_{v,c,t}$ ，从而在保持充电调度精度的同时减少二元变量的数量。

第一项约束确保只有在选定安装时，才能将候选充电桩集合中的充电桩 c 分配给车辆：

$$x_{v,c,t_r,s} \le q_c, \quad \forall c \in C, v \in V, t_r \in T_r. \tag{10}$$

如果将 v 分配给 c，则需要 $\tau_{v,c}$ 个时段才能完成其充电任务，$\tau_{v,c} = \frac{1}{\Delta t}\left\lceil \frac{E_v}{p_{v,c}} \right\rceil$，其中 $\lceil\cdot\rceil$表示向上取整到最近的整数，而 $p_{v,c} = \min\{p_v^{\max}, p_c^{\max}\}$ 是有效充电速率，$p_v^{\max}$ 为车辆 v 的最大充电速率。为简化起见，模型假设每个充电会话期间的充电功率保持恒定。

对于每个情景 s，每辆电动汽车都恰好分配给一个充电桩，并且恰好在一个时段 $t \in T$ 开始充电：

$$\sum_{c \in C} \sum_{t_r=1}^{t_v^{\mathrm{dep}} - t_v^{\mathrm{arr}} - \tau_{v,c} + 2} x_{v,c,t_r,s} = 1, \quad \forall v \in V. \tag{11}$$

此外，对于所有充电桩 $c \in C$ 、时段 $t \in T$ 和情景 $s \in S$，任意时刻每个充电桩上最多只能有一辆电动汽车正在充电：

$$\sum_{v \in V} \sum_{t_r=\max\{1,\, t - t_v^{\mathrm{arr}} - \tau_{v,c} + 2\}}^{t - t_v^{\mathrm{arr}} + 1} x_{v,c,t_r,s} \le 1. \tag{12}$$

因此，对于情景 s中的所有充电桩 $c \in C$ 和时段 $t \in T$，充电桩 c 的充电功率表示为：

$$P_{c,t,s} = \sum_{v \in V} p_{v,c} \sum_{t_r=\max\{1,\, t - t_v^{\mathrm{arr}} - \tau_{v,c} + 2\}}^{t - t_v^{\mathrm{arr}} + 1} x_{v,c,t_r,s}. \tag{13}$$

充电桩集合 C 包含所有不同类型的候选充电桩。对于每种充电器类型 $l \in \{1,\ldots,N_c\}$，定义一个子集 $C_l \subset C$ ，并将其排序为 $C_l = \{c_l(1)\ldots, c_l(m_l)\}$。为避免仅通过相同充电桩的排列而有所不同的对称解——仅通过相同充电桩的排列而有所不同的对称解，针对所有 $l \in \{1,\ldots,N_c\}$和 $j \in \{1,\ldots,m_l-1\}$施加以下对称性破缺约束：

$$q_{c_l(j+1)} \le q_{c_l(j)}, \tag{14}$$

$$x_{v,\,c_l(j+1),\,t,s} \le \sum_{t_r=\max\{t_v^{\mathrm{arr}},\, t - \tau_{v,\,c_l(j)} + 1\}}^{t} x_{v,\,c_l(j),\,t_r,s}, \forall v \in V. \tag{15}$$

第一个约束确保每种充电器类型都按顺序安装：只有在充电桩 j 也已安装的情况下，才能安装充电桩 $j+1$。第二个约束确保同一类型中编号较高的充电桩只有在所有编号较低的充电桩均已投入使用后才能使用。

2.5 电网约束与功率平衡

电网功率约束根据 CEH 的电网接入协议，对电力进口与出口施加随时间变化的界限。情景 s中时刻 t 的电网功率记为 $P_{t,\,s}^{g}$ [kW]，必须满足

$$-\bar{P}_{t,s}^{g,\mathrm{inj}} \le P_{t,s}^{g} \le \bar{P}_{t,s}^{g,\mathrm{wdl}}, \tag{16}$$

其中，$\bar{P}_{t,\,s}^{g,\,\mathrm{inj}}$ 以及 $\bar{P}_{t,\,s}^{g,\,\mathrm{wdl}}$ 定义了随时间变化的注入和取电限值 [kW]，这些限值可能因昼夜或工作日与周末等运行条件而变化。$P_{t,\,s}^{g}$ 的正值表示电网取电，负值则表示电网注入。

电网交易成本，$C_{t,\,s}^{\mathrm{el}}$， [=C],表示 CEH 与电网之间电力交易所涉及的货币交换。从电网购电时（$C_{t,\,s}^{\mathrm{el}} = \lambda_{t,\,s}^{\mathrm{b}} P_{t,\,s}^{g} \Delta t$）该值为正，向电网售电时（$C_{t,\,s}^{\mathrm{el}} = \lambda_{t,\,s}^{\mathrm{s}} P_{t,\,s}^{g} \Delta t$）该值为负。这里，$\lambda_{t,\,s}^{\mathrm{b}}$ 和 $\lambda_{t,\,s}^{\mathrm{s}}$ 分别情景 s [=中时间 t 的购电价格和售电价格，单位为 C/kWh]。

假设 $\lambda_{t,\,s}^{\mathrm{b}} > \lambda_{t,\,s}^{\mathrm{s}}$，我们将这两个等式约束放宽为以下不等式：

$$C_{t,s}^{\mathrm{el}} \ge \Delta t \lambda_{t,s}^{\mathrm{b}} P_{t,s}^{\mathrm{g}}, \tag{17}$$

$$C_{t,s}^{\mathrm{el}} \ge \Delta t \lambda_{t,s}^{\mathrm{s}} P_{t,s}^{\mathrm{g}}. \tag{18}$$

这种放宽避免了使用二元变量来区分进口与出口模式的需要。由于 C_t^{el}在目标函数中受到惩罚，因此每个时间步的最优解都会使这两个约束中的一个处于生效状态。

功率平衡约束确保在情景 s的每个时间步 t ，总发电量和供电量（包括光伏和风力发电、可能的电池储能系统放电以及电网取电）等于 CEH 内的总需求，其中包括电动汽车充电负荷、可能的电池储能系统充电以及电网注入。相应的功率平衡方程如下：

$$P_{t,s}^{\mathrm{pv}} + P_{t,s}^{\mathrm{WT}} + P_t^{\mathrm{g}} + \sum_{b \in B} P_{b,t,s}^{\mathrm{dis}} - \sum_{b \in B} P_{b,t,s}^{\mathrm{ch}} = \sum_{c \in C} P_{c,t,s}. \tag{19}$$

2.6 目标函数

优化问题的目标是最小化 CEH 在一年期内设计与运行所产生的总拥有成本，表示为

$$\min J^{\mathrm{TCO}} = J^{\mathrm{CapEx}} + J^{\mathrm{OpEx}} + J^{\mathrm{deg}}. \tag{20}$$

第一项 J^{CapEx} 表示光伏系统、风力涡轮机、电池储能系统单元和充电桩的投资成本所对应的年度资本支出。第二项 J^{OpEx} 计入运营支出，包括电网能源交易和维护成本。第三项 J^{deg} 表示电池储能系统退化成本，用于惩罚为从向电网输电中获利而对电池储能系统进行过度循环充放电的行为。

资本支出采用资本回收系数进行年化，记为 κ。该系数考虑了货币时间价值和组件寿命，可根据贴现率 r 及其寿命 L，将每个组件的投资成本转换为等值年度成本，定义如下：

$$\kappa = \frac{r(1+r)^L}{(1+r)^L - 1}.$$

根据各技术类型（光伏、风力涡轮机、电池储能系统和充电桩）的寿命，我们分别计算其对应的 κ。总资本支出为：

$$J^{\mathrm{CapEx}} = \sum_{p\in P} n_p\,\kappa_p C_p + \sum_{w\in W} n_w\,\kappa_w C_w + \tag{21}$$

$$\sum_{b\in B} n_b\,\kappa_b C_b + \sum_{c\in C} q_c\,\kappa_c C_c, \tag{22}$$

其中，C_p、C_w、C_b和 C_c 分别为单个光伏技术 p、风力涡轮机类型 w、电池储能系统技术 b和充电器类型 c [=C], 的投资成本。每一项均表示对应 CEH 组件的年化投资成本。

运营支出由电网交易成本和资产的年度维护成本构成：

$$J^{\mathrm{OpEx}} = J^{\mathrm{OpEx,G}} + J^{\mathrm{OpEx,M}} = \sum_{s\in S} D_s \sum_{t\in T} C^{\mathrm{el}}_{t,s} + \sum_{p\in P} n_p C^{\mathrm{M}}_p + \sum_{w\in W} n_w C^{\mathrm{M}}_w + \sum_{b\in B} n_b C^{\mathrm{M}}_b + \sum_{c\in C} q_c C^{\mathrm{M}}_c, \tag{23}$$

其中，第一项表示年度电网交易成本，即所有场景中各时间步电网交换成本的总和，并按其年度发生次数 D_s加权。参数 C^{M}_p、C^{M}_w、C^{M}_b和 C^{M}_c分别表示单个光伏技术 p、风力涡轮机类型 w、电池储能系统技术 b和充电器类型 c [=C],的年度维护成本。

我们对电池储能系统的退化成本进行建模，以惩罚电池功率幅值：

$$J^{\mathrm{deg}} = \sum_{b\in B}\sum_{s\in S} D_s \sum_{t\in T} C^{\mathrm{deg}}_b (P^{\mathrm{dis}}_{b,t,s} + P^{\mathrm{ch}}_{b,t,s}), \tag{24}$$

其中，C^{deg}_b 为类型为 b [=的电池储能系统的退化成本，单位为 C/kW]。这一项可抑制电池储能系统的过度使用，并减少由向电网输电激励导致的过度循环充放电。

定义所有组件、约束和目标后，CEH 设计问题表述如下。

问题 *1*。（CEH 设计优化）。

$$\min_{z} \quad J^{\mathrm{TCO}} = J^{\mathrm{CapEx}} + J^{\mathrm{OpEx}} + J^{\mathrm{deg}}$$

s.t.

$$(1)\text{–}(19),$$
$$n_p, n_w, n_b \in \mathbb{N},$$
$$q_c \in \{0,1\}, \quad \forall c \in C,$$
$$x_{v,c,t_r,s} \in \{0,1\}, \quad \forall v \in V,\ c \in C,\ t_r \in T_r,\ s \in S,$$
$$\delta_{t,s} \in \{0,1\}, \quad \forall t \in T,\ s \in S,$$

其中，$z = (z^{\mathrm{des}}, z^{\mathrm{op}})$ 汇集了所有设计与运行决策变量，其中

$$z^{\mathrm{des}} = \{n_p,\, n_w,\, n_b, q_c\},$$
$$z^{\mathrm{op}} = \{\, P^{\mathrm{ch}}_{b,t,s},\ P^{\mathrm{dis}}_{b,t,s},\ P_{c,t,s},\ P^{g}_{t,s}, E_{b,t,s},\ \delta_{t,s},\ x_{v,c,t_r,s},\ \forall c \in C,\ v \in V,\ t \in T,\ t_r \in T_r,\ s \in S.\}$$

问题1是一个混合整数线性规划，因此可保证全局最优性，并可使用现成的求解器求解。

3. 案例研究

在本案例研究中，我们使用12个月的天气变化曲线，以及24条需求曲线（每个月分别对应工作日和周末）。每个场景将某个月的天气曲线与相应的工作日或周末需求模式配对，从而得到24个代表性场景，反映全年典型的CEH运行条件。每个场景均分配一个出现频率因子 D_s，对应其每年的发生次数。所有场景均采用一小时的时间分辨率进行模拟。请注意，此场景定义基于物流充电数据中明显的工作日/周末模式和月度季节性，以及气象数据中呈现的月度模式。

案例研究中，每种组件仅考虑一种技术：光伏、风力涡轮机和电池储能系统。光伏组件的额定功率为 550 W，效率为 $\eta_p = 0.20$, 表面积为$A_p = 2.58\mathrm{m}^2$, ，投资成本为 C_p =C495。风力涡轮机的切入风速为 $v^{\mathrm{ci}}_w = 3\mathrm{m/s}$，切出风速为 $v^{\mathrm{co}}_w = 20\mathrm{m/s}$，额定风速为$v^{\mathrm{r}}_w = 13$ / 1734 ^{2}, $A^{\mathrm{sw}}_w =$ m s。风力涡轮机叶片的扫掠面积为 m，空气密度为 kg m，轮毂高度为 $h_w = 60\,\mathrm{m}$。额定功率为 $P^{\mathrm{r}}_w = 500\,\mathrm{kW}$，投资成本为 C_w =C750000。电池储能系统的容量为 $s_b = 580\mathrm{kWh}$, 最大充放电功率为 $P^{\max,\,b}$ $^{\mathrm{c}}$ = $P_{\text{最大}b}$ $'$ = $300\,\mathrm{d}\,\mathrm{kW}$, 充放电效率为 $\eta^{\mathrm{ch}} = \eta^{\mathrm{dis}} = 0.95$。荷电状态限制在 $[E_b, E_b] = [0.1, 0.95]$, 初始值为 $\underline{E}_{b,\,0} = 0.5$。自放电率为 $z_b = 10^{-4}\mathrm{h}^{-1}$，投资成本为 C_b =C32000，退化成本为 $C^{\mathrm{deg}}_b = 0.03$ =C/kW，最大可安装单元数为 $N^{\max}_b = 100$。本研究考虑两种类型的充电桩。对于每种类型 $l \in \{1,2\}$，根据物流数据（显示 CEH 中平均同时停放六辆电动汽车），将候选充电桩数量设为六个。因此，候选充电桩总数为 12 个（每种类型六个）。两种类型充电桩的最大充电功率分别为 180kW 和 360 kW，单台投资成本分别为 =C90，000 和=C180，000。分析中仅考虑一种电动汽车，其最大电池充电速率为 $p^{\max}_v$ =400 kW。电网最大允许输入和输出

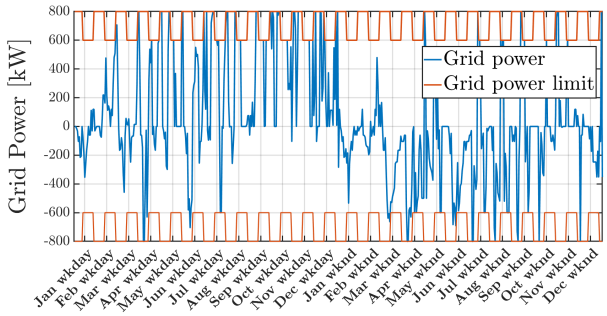


图 2. 所有代表性场景下的电网功率（正值：取电；负值：注入），橙色线表示电网限制。

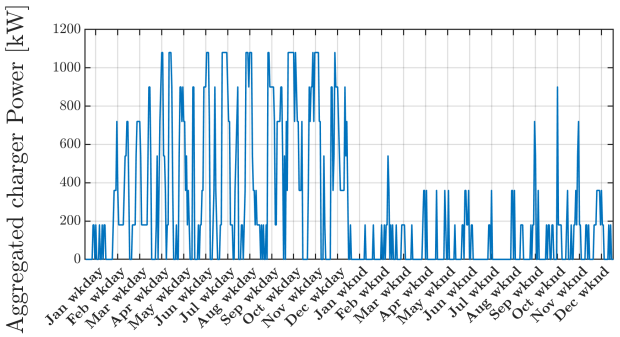


图 3. 所有代表性场景下的电动汽车总充电功率，展示了充电需求的变化。

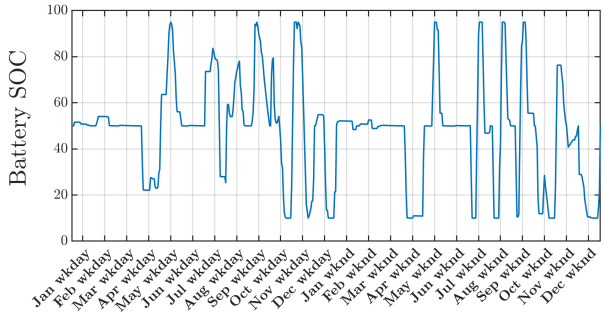


图 4. 所有代表性场景下的电池荷电状态，每天均从相同的初始荷电状态开始

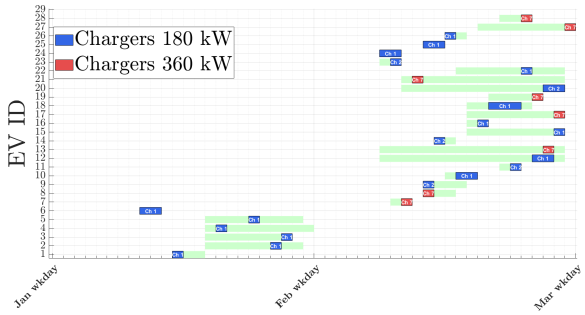


图 5. 优化的电动汽车充电计划前两个代表日的放大视图。

功率设定为白天时段（08:00– 20:00）600kW，夜间时段（20:00–08:00）800kW，以反映 CEH 的并网限制。假设光伏和风力涡轮机组件的寿命为 20 年，电池储能系统为 15 年，充电桩为 10 年。经济分析采用 $r = 2.75\%$ 的贴现率。所有组件的年度维护成本均按其投资成本的 1% 计算。请注意，我们在咨询专家后选定模型参数，以反映具有现实性的中型 CEH，并与制造商数据表中报告的典型数值保持一致。2024 年的气象数据和电价数据分别来自荷兰皇家气象研究所（2024年）和欧洲电力输电系统运营商网络（2024年）。我们使用了 Maxem 提供的物流充电数据。Maxem 是一家荷兰公司，专门从事电动汽车基础设施的智能充电和能源管理解决方案。该数据集由直接从充电站及其相关计量设备收集的汇总测量数据构成，并经 Maxem 的能源管理平台处理。

我们在 MATLAB 环境中使用 GUROBI 优化器（Gurobi Optimization有限责任公司（2024年）），通过 YALMIP 实现了所提出的混合整数线性规划模型。仿真在一台 HP ZBook 工作站上进行，该工作站配备 Intel Core i7-13700H 处理器（2.40GHz）和 16 GB 内存。根据混合整数线性规划优化结果，最终的 CEH 配置包括 **1110 个光伏单元**、**1 台风力涡轮机**和 **6 个电池储能系统单元**。对于充电基础设施，$q_c = [1,1,1,1,0,0,1,0,0,0,0,0]^\top$ 表明从候选集合中选定了 **4 个第一类型的充电桩**和 **1 个第二类型的充电桩**。优化后的 CEH 年度总成本为=C4.01×10^5，其中 68.96% 为年化资本支出，17.87% 为电网交易成本，8.49% 为年度维护费用，4.68% 为电池衰减成本。

CEH配置的最优运行曲线如图2–4所示。图2展示了所有场景下的电网功率交换，表明输入与输出限制在任何时刻均得到严格遵守。图3描绘了已安装充电桩所提供的聚合充电功率，反映了由物流数据决定的电动汽车需求以及优化后的充电计划。图4给出了电池储能系统的荷电状态轨迹；每个典型日均从固定的50%荷电状态水平开始，从而确保各场景之间的一致性。尽管电动汽车充电需求峰值超过1100kW，但得益于可再生能源发电与电池储能的协同利用，所有物流需求均得到满足，且未违反 600/800kW的日间/夜间电网限制。

图 5 展示了 CEH 的优化充电计划。浅绿色条表示每辆车的可用时间窗口（到达至离开时段）。每辆电动汽车恰好分配至一个充电桩，相应的充电时段以彩色方块表示（蓝色：180 kW，红色：360 kW），并置于其可用时间窗口内。由于全年计划包含所有代表日中的大量充电事件，为便于查看，图中仅放大显示前两个代表日。

如图6所示，年度能量平衡表明，光伏发电贡献约15.7%的

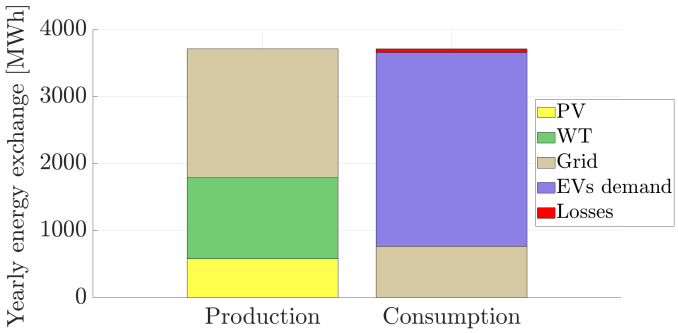


图6. 各能源来源与用途的年度能源生产和消耗构成。

总发电量，风力发电供应约32.5%，其余51.8%从电网进口。在消费侧，约78%的能量用于满足电动汽车需求，20.7%回输至电网，约1.3%对应于电池损耗。

4. 结论

本研究提出了一种混合整数线性规划（MILP）模型，用于在协同设计框架下对充电能源枢纽（CEH）组件进行成本最优规模配置，并强调规模配置选择在根本上受电网限制和物流驱动的充电需求等运行约束影响。通过纳入代表性场景，该方法能够刻画季节性天气变化和充电模式，同时保持问题的计算可处理性。案例研究表明，经过合理规模配置的 CEH 能够可靠地满足所有车队充电需求，且不违反电网约束，凸显了可再生能源一体化发电与储能在实现可扩展、符合电网要求的重型车辆电气化方面的潜力。

未来的工作包括纳入更贴近实际的电动汽车充电功率曲线（其充电功率会随充电会话进行而降低），开展敏感性分析以评估关键参数对 CEH 最优规模配置的影响，并开发充电能源枢纽仿真工具以进行动态验证。另一个有前景的方向是采用 Li 等人（2023年）提出的机器学习方法，通过学习有效的分支切割分离器来加速混合整数线性规划求解。

生成式人工智能声明

作者使用 ChatGPT 改进了本文中若干句子的清晰度和结构。

参考文献

Aliamooei-Lakeh, S., Corzine, K., Parsa, L. 和 de Castro, R.（2024）。一项关于集成分布式发电单元、电动汽车充电站和储能系统的电力系统规模配置与选址的多目标优化问题。载于*2024*年*IEEE*第*67*届国际中西部电路与系统研讨会论文集（*MWSCAS*），618–622。Aluisio, B., Dicorato, M., Ferrini, I., Forte, G., Sbrizzai, R. 和 Trovato, M.（2019）。基于直流微电网并采用站点承诺机制的电动汽车供电基础设施最优规模配置流程。《能源》，12，1901。Bhatti, A., Salam, Z., Sultana, B., Rasheed, N., Awan, A., Sultana, U. 和 Younas, M.（2019）。采用粒子群优化算法对并网光伏电动汽车充电系统进行最优规模配置。《国际能源研究期刊》，43(1)，500–522。欧盟理事会（2021）。Fit for 55：实现欧盟2030年气候目标，迈向气候中和。网址 https://www.consilium.europa.eu/nl/policies/fit-for-55。欧洲电力输电系统运营商网络（2024）。透明度平台。网址 https: // transparency.entsoe.eu/。荷兰政府（2023）。城市物流零排放区。网址 https://www.opwegnaarzes.nl/bedrijven/toegangsregels。Gurobi Optimization有限责任公司（2024）。Gurobi优化器参考手册。在线查阅：http://www. gurobi.com。国际能源署（2021）。2050年净零排放：全球能源部门路线图。网址 https:// www.iea.org/reports/net-zero-by-2050。Khaksari, A., Tsaousoglou, G., Makris, P., Steriotis, K., Efthymiopoulos, N. 和 Varvarigos, E.（2021）。具备智能充电能力并满足服务质量要求的电动汽车充电站规模配置。《可持续城市与社会》，70，102872。Li, S., Ouyang, W., Paulus, M. 和 Wu, C.（2023）。学习配置分支定界法中的分离器。《神经信息处理系统进展》，36，60021–60034。Mohandes, B., Acharya, S., El Moursi, M.S., Al-Sumaiti, A.S., Doukas, H. 和 Sgouridis, S.（2020）。采用电能与热能储存系统之间负荷转移机制的孤岛微电网最优设计。《*IEEE*电力系统汇刊》，35(4)，2642–2657。荷兰皇家气象研究所（2024）。逐小时天气数据。网址 https://daggegevens.knmi.nl/klimatologie/uurgegevens。TNO（2025）。电网排队可能拖慢交通转型。网址 https://www.tno.nl/en/newsroom/2025/11/queue-power-grid-mobility-transition。Tran, D.D., Hegazy, O., Van Mierlo, J., Smijtink, R., Hellgren, J., Lindgarde, O., Pham, T. 和 Wilkins, S.（2018）。重型卡车的建模与协同设计优化。载于第*31*届国际电动汽车研讨会与展览会暨国际电动汽车技术会议论文集。Vehlhaber, F. 和 Salazar, M.（2024）。区域电动航空网络的机场基础设施规模配置。载于国际航空科学理事会第*34*届大会（*ICAS*）。Wei, Y., Han, T., Wang, S., Qin, Y., Lu, L., Han, X. 和 Ouyang, M.（2022）。一种用于光伏—电池电动汽车充电微电网的高效数据驱动最优规模设计框架。《能源储存杂志》，55，105670。