能源网络的混合整数非线性规划最优设计问题：可能的

Handan AKÜLKER *

Erdal AYDIN**,***

摘要： 随着技术进步和能源需求增长，能源行业已成为全球优先发展的领域。如今，构成能源来

关键词：混合整数非线性规划（MINLP）、能源网络优化、微电网、剩余发电量、二氧化碳排放、水资源短缺

能源电网优化设计的混合整数非线性规划：优化问题、可能的解决方案与模型构建

摘要：随着技术发展以及电力和能源需求的不断增长，能源行业已成为全球关注的重点。能源生产所

* 博阿齐奇大学，工程学院，化学工程系， 34342，贝贝克，伊斯坦布尔**科奇大学，工程学院，化学与生物工程系， 34450，萨勒耶尔，伊斯坦布尔***科奇大学-图普拉什能源中心（KUTEM），33450，萨勒耶尔，伊斯坦布尔

通讯作者：Erdal AYDIN（eaydin@ku.edu.tr）

规划 采用混合整数非线性规划（MINLP）进行微电网规划。研究了过剩电力、一氧化碳$_2$排放和

关键词：混合整数非线性规划（MINLP）、能源电网优化、微电网、剩余（盈余）电力、二氧化碳排放、缺水

1. 引言

由于能源价格快速上涨、气候变化以及技术进步，能源工业已成为全球优先发展的领

土耳其在能源生产方面严重依赖进口天然气和石油等不可再生能源资源。此外，电力

近年来，使用MINLP对能源网络系统进行最优设计和运行的研究逐渐增多。

在进行电力生产计划时，文献中也有将交流电（AC）潮流约束纳入其中的研究。例如，Santos等人

系统配置问题，并为此提出了混合整数非线性规划模型。在该模型中，他们考虑了交流潮

近年来日益流行的住宅型微电网（r-住宅型微电网），采用混合整数非线性规划，以

随着能源生产技术的发展和多样化，未来的能源网络将由多能载微电网构成。

随着水资源短缺问题的出现，能源网络优化研究开始转向水-能源耦合微电网研究领

本综述研究考察了采用混合整数非线性规划（MINLP）对包含可再生能源和传统发

问题的可能解决方案及模型公式均得到了详细说明。由于能源系统优化 能够提供求解便

微电网优化中会遇到许多问题，例如电网组件的使用寿命、社会或监管约束条件、剩

2. 微电网 组件

2.1. 热电联产（CHP）发电机

热电联产（CHP）发电机用于利用一种燃料来源同时生产电能和热能。它们安装在用

每种热电联产系统都具有相同的工作机制。它们本质上将化学燃料转化为电能，但并不是

表1. 热电联产系统的优点和缺点 (EPA，2017年)

热电联产功率系统	**优点**	**缺点**
往复式内燃机	*部分负荷运行灵活性和高功率效率 *设备快速启动 *与其他类型相比，较低投资成本 *普通操作员可在现场修改。	*维护成本高 *受低温限制 *与其他类型相比，气体排放量较高 *即使不利用回收热量冷却需求。
蒸汽轮机	*总效率较高 *突然 更多 地方的 isi需求。 欢迎能力 *使用寿命长	*设备启动缓慢 *极低的功率/热比 *其他锅炉 和蒸汽源所需
燃气轮机	*高耐久性 *低气体排放 *高品质热量 *无需制冷	*高 加压的 气体 ve gaz需要压缩机 *低负荷下效率低 *输出随环境温度升高而下降
微型涡轮机	*运动部件少 *紧凑尺寸和轻量化 *低气体排放 *无需制冷	*高成本 *与其他方案相比机械效率较低 *受限于低温
燃料电池	*低气体排放 *高效率 *模块化设计	*高成本 *对燃料杂质敏感 *低功率密度

2.2. 光伏电池

光伏电池是能够直接或间接将太阳辐射转化为能量的发电机。太阳辐射以白光的形式

光伏电池产生的最大功率主要取决于制造这些电池所用的材料。第一代光伏电池由晶

2.3. 风力涡轮机

由于风能是一种可再生且取之不尽的能源来源，因此受到许多国家的青睐。尤其在过

安装更大型的风力涡轮机时，必须考虑一些容量限制。功率输出与涡轮机叶片的面积

风力涡轮机根据风速分为四个特定的运行区域。在第一区域，由于风速低于“切入风

2.4. 储能单元

储能是文献中相对较新的研究领域，许多储能技术尚未得到充分开发。要了解各种储

电化学储能技术通常统称为“电池”，用于储存能源系统产生的多余电力。由于电池便于移

机械储能是通过将动能以物理方式转化为电能来实现的。机械储能有两种重要技术：

化学储能是一项重要的储能技术，包括储存氢气和甲烷这两种对能源系统至关重要的

低密度氢储存通过压缩或液化氢气并将其储存在容器中来实现。高密度储存则使用纳米管或固态金属

实现。地下盐穴可用于长期储存大量氢气。

通过建设基础设施来储存和运输甲烷是切实可行的。在天然气网络中储存甲烷也是可行的

热能储存技术通过加热或冷却储存介质来储存热能。介质中储存的能量随后可用于制

3. 微电网设计与运行中遇到的问题及解决方案

本研究探讨了发电过程中的 3 个重要运行变量：剩余发电量、一氧化碳$_2$ 排放和供水

3.1. 剩余发电量问题及可能的解决方案

剩余电力生产是一个重要的经济问题。这是因为，储存超过需求的电力存在困难。电

电解可以是利用多余电力的一种合理方案。电解通过消耗大量电力，将水转化为氢气

电解有几种类型。第一种是碱性电解，其电解槽使用某种液体电解质。第二种是质子交换膜电解

此外，它使用聚合物电解质作为离子传输介质酸性膜 。另一种技术是固体氧化物电解池

3.2. 二氧化碳$_2$ 排放问题及可能的解决方案

根据2018年发布的政府间气候变化专门委员会（IPCC）报告，温室气体排放应受到

生成的二氧化碳主要可通过两种方式去除：用于最终用途的碳捕集与利用（CCU），以及

二氧化碳也用于采矿业中的岩石破碎。例如，黏土页岩（页岩）地层广泛分布于世界

甲烷和甲醇合成是其他需要以二氧化碳和氢气为原料的应用。甲烷通过多阶段工艺生

甲醇合成是化学应用中第二种常见的耗氢工艺。甲醇通过基于合成气工艺的方式生产，

3.3. 水资源不足问题及可能的解决方案

为减少过剩电力，本研究前一部分提出了对水进行电解。将电解作为替代方案时，应

海水淡化是当今岛屿上广泛采用的 一种水处理技术。然而，考虑到供水短缺的威胁，

在反渗透法中，水在高压下通过半透薄膜，从而降低盐浓度。全球已建成的水处理厂

4. **混合**（混合）整数**非线性规划**

企业设计、选址和生产计划等涉及多个优化问题，这些问题通过连续和离散决策变量

这类优化问题可以根据其离散变量、目标函数和约束条件的数学结构进行分类。混合

混合整数规划（MIP）问题根据目标函数和约束条件是线性还是非线性，分为两大类。

凸混合整数非线性规划中最常用的算法包括分支定界、基于非线性规划的分支定界、

一个简单的MINLP问题可以表述如下：

$$\underset{x,y}{Min} c_1^T.x + c_2^T.y \quad (1)$$

$$N = g_i(x,y) \leq 0 \quad (2)$$

$$L = Ax + By \leq b \quad (3)$$

$$c \leq y_i \leq d, \forall i = 1,2,\ldots m \quad (4)$$

方程1-4给出了非线性（N）、线性（L）和二元变量（y）约束。y_i 为离散变量，x

扩展切平面（ECP）算法通过逐次迭代线性化非线性约束，从而构建多面体外逼近。

外逼近（OA）是一种分解方法，通过求解一系列混合整数线性规划和非线性规划子

广义 Benders 分解（GBD）算法是一种为求解混合整数线性规划问题而开发的分解过程。

与外逼近算法密切相关。两者的主要区别在于主问题的推导方式。广义 Benders 分解中,

AlphaECP、Antigone、AOA、BARON、BONMIN、Couenne、DICOPT、Juniper、

BARON 使用分支削减（branch and reduce）算法求得全局解。它求解分支定界节

SCIP（求解约束整数规划）求解器由柏林扎伊斯研究所开发，对学术用户免费。它采

DICOPT 用于求解包含线性二元或整数变量以及线性和非线性连续变量的混合整数非

5. 优化模型的构建

要解决能源管理系统设计问题，需要建立优化模型。优化模型包括目标函数（用于计

5.1. 目标函数和约束条件

目标函数可以用不同方式表示。最常见的目标函数是经济目标函数。该函数可以表示

$$\boldsymbol{Kurulum\ Maliyeti = a + b.P_r} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{Kurulum\ Maliyeti = d + e.P_r + f.P_r^2} \tag{6}$$

线性成本函数始终随容量增加而线性增长，而非线性成本函数则随容量增加而以递减

如果建立模型的目的在于确定微电网中应安装的最优设备数量，就必须在模型中引入

建立设备的模型方程后，应写出系统的能量平衡。包含客户能源需求的能量平衡在优

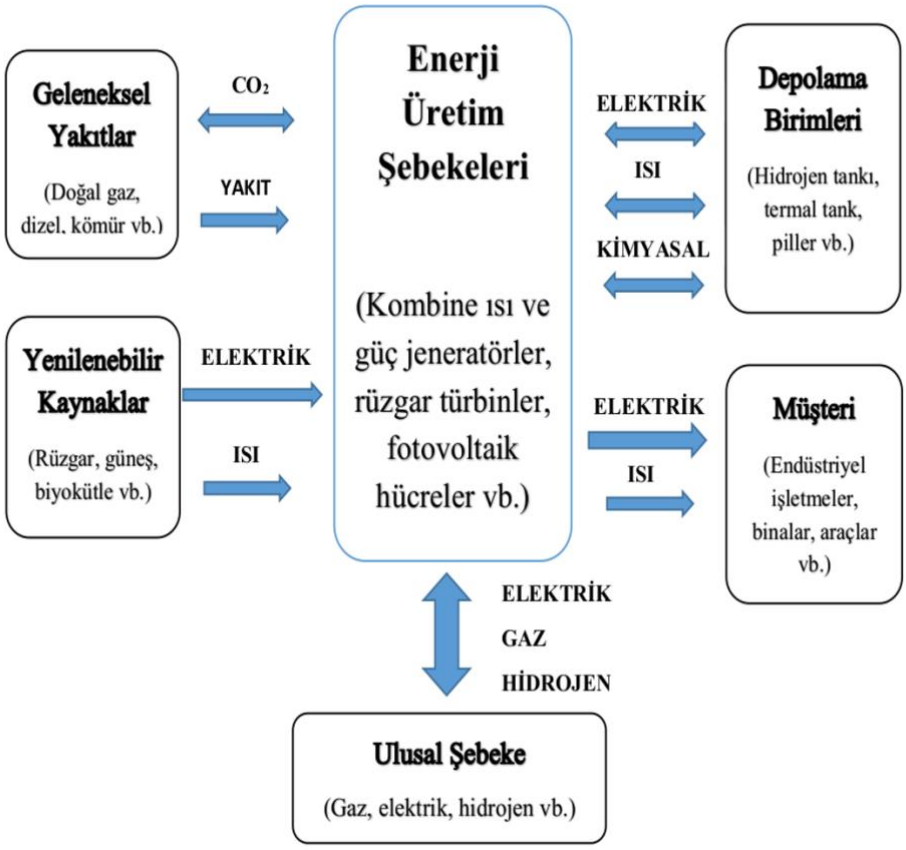


图1. 能源生产网络中的简单能量流图。

微电网的运行条件应作为不等式约束或等式约束加入模型。部分约束条件如下：1）

）。

5.2. 微电网组件的模型方程

本节介绍发电机的模型方程以及储能设备的充放电模型。

5.2.1. 热电联产（CHP）发电机

热电联产系统能够同时产生功率和热，以提高能源效率。热电联产装置分为背压机组

$$M(H_{chp}, P_{chp}) = a_{chp} + b_{chp}P_{chp} + c_{chp}{P_{chp}}^2 + d_{chp}H_{chp} + e_{chp}{H_{chp}}^2 + f_{chp}H_{chp}P_{chp} \quad (7)$$

$M(H_{chp}, P_{chp})$是每小时燃料消耗成本。 H_{chp}是热电联产系统在运行时段产生的热； P_{chp} 则

热电联产系统的每小时总气体 排放量根据所产生的功率，通过线性函数计算。方程

$$\boldsymbol{CO2_{chp}\ (ton/saat) = 0,99(\emptyset_{chp} + \mu_{chp})P_{chp}} \quad (8)$$

$\emptyset_{chp}$ 和μ_{chp} 是该函数的常数项系数。

5.2.2. 常规能源发电机

常规能源发电机使用煤炭、天然气和石油等燃料发电。安装和运营成本取决于所使用

$$\boldsymbol{M_{konv} = c_{konv}({P_{konv}}^2) + b_{konv}(P_{konv}) + a_{konv} + \left|d_{konv}\, sin\left(e_{konv}({P_{konv}}^{min} - P_{konv})\right)\right|} \quad (9)$$

M_{konv}表示每小时燃料消耗成本。 P_{konv}表示发电机运行时段内产生的功率， ${P_{konv}}^{min}$ 则表示发

常规功率发电机的二氧化碳排放与其使用的燃料类型 直接成正比。二氧化碳排放函

$$\boldsymbol{CO2_{konv}}\ \left(\frac{\boldsymbol{ton}}{\boldsymbol{saat}}\right)=\boldsymbol{ef_{konv}}\left(\boldsymbol{h_{konv}P_{konv}^{2}}\ +\boldsymbol{g_{konv}P_{konv}}+\boldsymbol{f_{konv}}\right) \tag{10}$$

在方程10中，ef_{konv} 是一个随燃料消耗变化的常数系数。h_{konv}，g_{konv} 和f_{konv} 是多项式

5.2.3. 光伏电池

光伏电池的功率输出可按以下方式计算：

$$\boldsymbol{P_{FV}(t)=P_{FVref}.\frac{S(t)}{S_{ref}}[1+B_{ref}(T_c(t)-T_{ref})]} \tag{11}$$

$$\boldsymbol{T_c(t)=T_a(t)+\frac{(NOCT-20)}{800}.S} \tag{12}$$

(

在方程11-12中，t表示瞬时时间，$P_{FV}(t)$表示光伏电池在该时刻产生的功率输出，P_{FVref} 表示参

，

在微电网优化中，光伏电池产生的能量输出可用其额定功率与相应时间段太阳辐射量之间的比

$$\boldsymbol{P_{FV}(R)=\begin{cases}P_{nominal}\left(\frac{R^{2}}{R_{C}R_{STD}}\right), & 0\le R\le R_{C}\\ P_{nominal}\left(\frac{R}{R_{STD}}\right), & R_{C}<R<R_{STD}\\ P_{nominal}, & R_{STD}\le R\end{cases}} \tag{13}$$

在公式 13 中，$P_{nominal}$ 为光伏电池的额定功率。R 为辐射量（W/m²）。R_{STD}为标准

5.2.2. 风力涡轮机

风力涡轮机的功率输出表示如下：

$$P_{RT}=\frac{1}{2}\rho AC_{p}V^{3} \tag{14}$$

公式中，ρ 为空气密度，A 为扫掠面积，C_p 为功率系数，V 为风速。（Abo-Elyousr 和 Elnozahy,

在微电网优化中，风力涡轮机产生的功率输出可用额定功率与该时间段风速相关的比例表示：

$$P_{RT} = \begin{cases} 0 & , \quad v < v_{cut,in} \\ 0 & , \quad v > v_{cut,out} \\ P_{nominal} & , \quad v_{nominal} \le v \le v_{cut,out} \\ P_{nominal}\left(\dfrac{v - v_{cut,in}}{v_{nominal} - v_{cut,in}}\right) & , v_{cut,in} \le v \le v_{nominal} \end{cases} \tag{15}$$

在公式 15 中，$v_{nominal}$ 为额定风速。风速低于切入风速或高于切出风速时，产生的功率输出

5.2.3. 储能单元

电池、氢气罐和蓄热罐等储能设备在充放电模式下运行。储能设备的充放电模型可表示如下:

$$X_t = X_{(t-1)} \cdot \eta + \Delta t \cdot (\eta_{ch} X_t^{ch} - X_t^{dch} / \eta_{dch}) \tag{16}$$

在方程中，η 表示待机效率，η_{ch} 表示充电效率，η_{dch} 表示放电效率，X_t 表示储能设备在 t 时刻

6. 结论

本研究考察了包含化石能源和可再生能源的微电网的最优设计与发电计划。针对剩余电力生产、

7. 致谢

本出版物依托土耳其科学技术研究理事会的2232国际杰出研究人员奖学金计划（项目编号：118C245）资助

参考文献

1. Abo-Elyousr, F. K. 和 Elnozahy, A.（2018年）。埃及孤岛地区采用多种燃料方案的混

。

5. Alvarado-Barrios, L., Rodríguez del Nozal, Á., Boza Valerino, J., García Vera, I. 和

理论与应用，10，237–260。22. Giglio, E., Lanzini, A., Santarelli, M. 和 Leone, P.（

38. Montoya, O. D., Gil-González, W. 和 Grisales-Noreña, L. F.（2020）。用于配电网

论文集。https://doi.org/10.1109/SYSCON.2016.7490610 53. Tenfen, D. 和