

光沼灵活支撑的乡村配电网稳定与经济运行优化

王琛^{1,2}, 梁睿¹, 龚光阳¹, 孙哲夫², 张自伟², 李国欣¹, 管亚²

(1. 中国矿业大学 电气工程学院, 江苏 徐州 221116;

2. 国网江苏连云港供电公司, 江苏 连云港 222004)

摘要:为解决乡村高比例分布式光伏接入带来的电压偏差及能源资源产出与负荷需求时间上难以匹配等问题,提出了一种含光伏与沼气发电的乡村配电网运行优化策略。基于乡村可再生能源的资源优势,建立光沼能源供给下的乡村配电网架构;精准刻画厌氧发酵产沼的灵活特性和光沼能源在不同时段的互动能力,构建含光伏与沼气发电的乡村配电网模型;结合Epsilon约束法与优劣解距离(TOPSIS)法对模型求解决策,综合考虑系统经济性和稳定性,提出含光伏与沼气发电的乡村配电网运行优化策略。以我国华东某大型农场配电系统为例进行仿真实验,结果表明所提模型和方法能够提高乡村配电网电压稳定性,并通过光沼供给模式降低系统运行成本和碳排放水平。

关键词:绿色能源体系;厌氧发酵产沼;电压偏差;乡村配电网;Epsilon约束法;光伏发电;沼气发电

中图分类号: TM73

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202603028

0 引言

随着“30·60双碳目标”和乡村振兴战略^[1-2]的提出,大力发展可再生能源,加快乡村能源转型,推动乡村能源经济发展成为新趋势。当前,分布式光伏发电系统的技术创新和应用实践日趋完善,加之乡村地区丰富的生物质能资源优势,分布式能源在农村地区的应用规模与发展潜力得到了显著提升。然而,随着分布式光伏在配电网中的渗透率不断提升,传统无源配电网正逐渐演变为具有多源、多变特性的复杂有源配电系统,加上乡村地区分布式光伏大规模无序接入,加剧了乡村配电网的电压越限与谐波污染的风险,对乡村电网的安全运行造成了不利影响,给乡村经济发展带来潜在风险。因此,需要一种考虑乡村地区可再生能源特性的光沼能源供给模式,以解决乡村配电网电压偏移问题,并促进乡村经济的可持续发展。

乡村地区拥有丰富的生物质资源和广泛的分布式光伏发电潜力,目前,国内外学者对光沼能源的利用已进行了广泛研究。文献[3-4]基于太阳能辐射效应,考虑设备增温作用,提高了沼气工程发电效率,实现了沼气的灵活供应;文献[5-6]针对农村可再生能源特征和用能特性,提出了光沼等多能源耦合的乡村配置规划方法,实现了光伏、生物质能等多种能源的优化配置;文献[7-8]通过构建光伏与生物质能的耦合模型,提出了光沼综合能源系统运行策

略。然而现有研究主要将沼气能源作为一种独立能源供应形式,未充分考虑光伏和沼气发电在不同时段的协调互补能力,此外,尚未深入探讨光伏与生物质协同配合对乡村配电网运行的支撑作用。

针对高渗透率分布式光伏带来的电压失稳问题,国内外学者围绕不同技术展开了大量研究。文献[9-10]基于传统的电压调节机制,通过灵活调整有载调压变压器(on load tap changer, OLTC)分接头,建立了分接头动态调节机制,有效实现配电网稳态电压优化;在此基础上,文献[11-12]研究了无功补偿的电压调节能力,依托无功补偿装置动态调整无功功率来构建网络无功支撑,从而确保电网电压的稳定运行;随着光伏技术的不断发展,文献[13-14]凭借光伏逆变器无功补偿能力,通过光伏逆变器吸收/释放无功功率对节点电压进行调节,建立兼顾有功输出的无功调控模式,解决了分布式光伏接入后的电压偏移问题;凭借储能系统(energy storage system, ESS)的快速响应和削峰填谷能力,文献[15-19]探索了储能设备对配电网稳定运行的能力,通过能量时移与功率调节相结合的运行策略,提升了电网电压的稳定性。上述研究针对配电网电能质量需求提出了多种解决方案,但在乡村能源经济转型背景下,乡村经济实力对电网调压设备部署的支撑能力相对薄弱,且本地能源禀赋优势未能充分释放。因此,如何利用乡村地区已有的能源潜力,构建适配乡村资源的电压控制体系,是值得思考的问题。

综上,本文提出了一种含光伏与沼气的乡村配电网运行优化策略。首先,探究了光伏与沼气的能源产出特性,构建含光伏与沼气的乡村配电网模型;其次,建立了考虑经济性和安全性的乡村配电网

收稿日期:2025-11-25;修回日期:2025-11-26

在线出版日期:2026-05-06

基金项目:国网江苏省电力有限公司科技项目(J2023168)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd.(J2023168)

双目标运行优化模型,并针对双目标问题采用融合Epsilon约束法与优劣解距离(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)法的求解策略对模型进行优化求解;最后,算例仿真结果证明了本文所提方法的可行性和有效性。

1 光沼能源供给下的乡村配电网系统架构

光伏发电与沼气发电联合供给下的乡村配电网系统拓扑架构如图1所示。旨在利用沼气系统灵活可控特性,促进光伏就地消纳的同时,保障乡村配电网安全经济运行。

光沼能源供给下的乡村配电网系统主要包含沼气制备系统、沼气热电联产、热泵、储气罐、分布式光伏发电以及无功补偿装置。通过融合沼气系统和分布式光伏形成区域能源供应体系。

沼气系统主要是通过发酵罐厌氧消化反应产生沼气,随后通过输送管道,经由储气罐存储与沼气发电机组(biogas generator unit, BG)、余热回收装置相连。余热回收装置对BG的余温进行再利用,协助厌氧消化器产沼,提升沼气发酵温度和效率。

日间光伏发电充沛时,光伏发电量无法就地消纳,多余的电能可以通过热泵设备电转热,提升沼气发酵温度,增产并存储沼气,实现能源之间的时间转换,防止电压抬升过大;在夜间光伏发电匮乏时,储气罐增产的沼气可以通过BG发电,满足乡村负荷需

求并减小电压下降,同时回收沼气发电余热,维持发酵温度。因此,通过光伏和沼气的互补运行模式,乡村配电系统能够根据自身与配电网的实际运行情况,灵活调控系统内设备运行状态,实现乡村配电网灵活、经济稳定运行。

2 含光伏与沼气的乡村配电网模型

2.1 乡村生物质能产沼模型

2.1.1 物料预处理模型

在物料进入发酵罐之前,必须对其进行预处理,包括粉碎、搅拌等操作,以确保物料能够充分发酵。同时,需要将物料预先加热至适宜的发酵温度,避免因进料与出料温差过大而导致发酵效率下降,升温所需的热量模型如式(1)所示。

$$H_{i,t}^{\text{pre}} = c^{\text{dig}} m^{\text{dig}} (T_{i,t}^{\text{AD}} - T_{i,t}^{\text{air}}) \quad (1)$$

式中: $H_{i,t}^{\text{pre}}$ 为 i 节点 t 时段物料预处理需要热量; c^{dig} 为物料比热容,单位为 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; m^{dig} 为每小时投料量; $T_{i,t}^{\text{AD}}$ 为 i 节点 t 时段发酵温度; $T_{i,t}^{\text{air}}$ 为 i 节点 t 时段外界温度,单位为 $^\circ\text{C}$ 。

2.1.2 发酵罐热力学模型

在厌氧消化罐、沼气发酵过程中,发酵罐的温度呈动态变化,主要受热量传递过程的影响,具体包括3个方面:罐体与外界的热量损失、物料温度变化引起的热量传递以及外部热量的补充。罐顶和罐底的热传导过程可视为典型的一维稳态导热问题,而侧

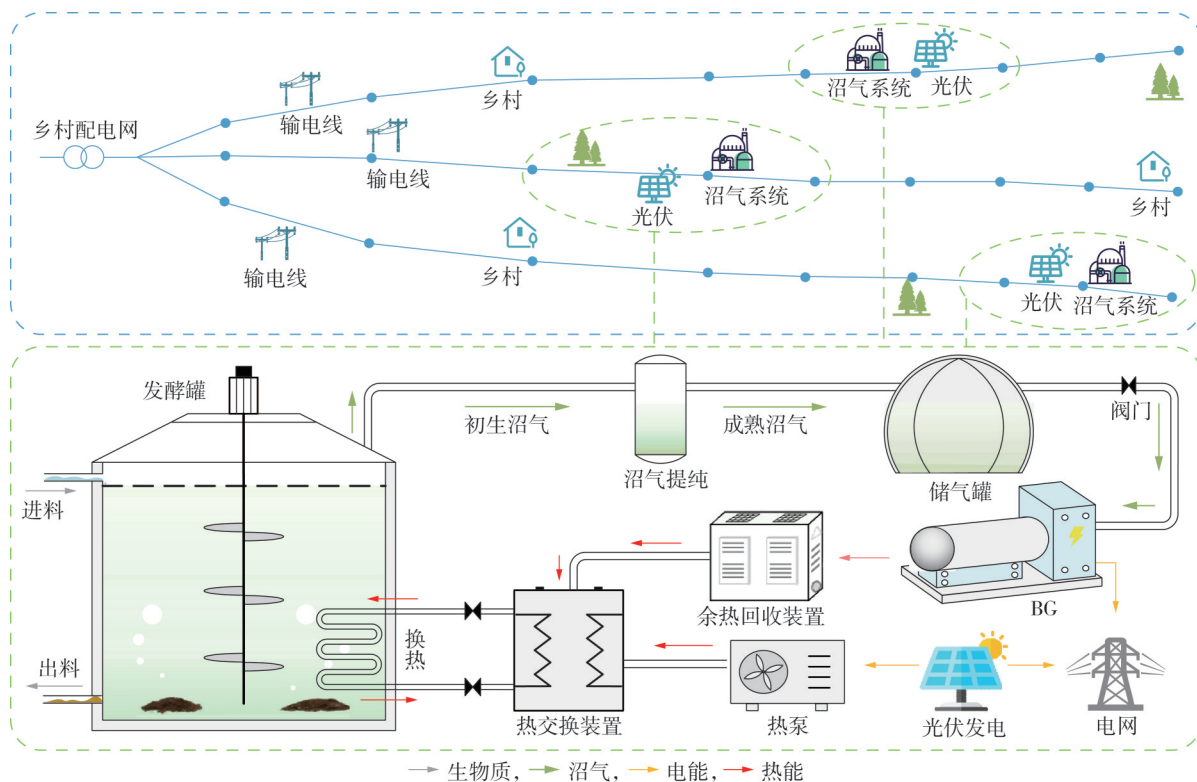


图1 光沼能源供给下的乡村配电网系统拓扑架构

Fig.1 Topology structure of PV-biogas energy supplied in rural distribution network system

壁的热传递则可抽象为筒壁的热传递问题。发酵罐热量散失由罐顶、罐壁和罐底 3 个部分组成,其表达式如式(2)所示。

$$H_{i,t}^{\text{loss}} = \sum \gamma_Q \lambda S (T_{i,t}^{\text{AD}} - T_{i,t}^{\text{air}}) \quad (2)$$

式中: $H_{i,t}^{\text{loss}}$ 为 i 节点 t 时段与外界热交换热量; λ 为发酵罐传热系数,单位为 $\text{kW} / (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$; S 为发酵罐不同位置的总表面积,单位为 m^2 ; γ_Q 为热量单位转换系数,取 $3\,600 \text{ kJ} / (\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

沼气主要由发酵罐内部物料通过厌氧发酵产生。物料发酵过程中,发酵温度的变化伴随着热量的吸收与释放。引起物料温度变化的热量传递模型如式(3)所示。

$$H_{i,t}^{\text{dig}} = c^{\text{dig}} \rho V_{\text{AD}} (T_{i,t+1}^{\text{AD}} - T_{i,t}^{\text{AD}}) \quad (3)$$

式中: $H_{i,t}^{\text{dig}}$ 为 i 节点 t 时段引起物料温度变化的热量; ρ 为反应物密度,单位为 kg / m^3 ; V_{AD} 为发酵罐体积。

发酵温度波动过大会影响沼气的产出效率,甚至可能导致沼气停产。因此,必须对发酵温度进行有效控制,其约束条件如式(4)所示。

$$\begin{cases} T_{\min}^{\text{AD}} \leq T_{i,t}^{\text{AD}} \leq T_{\max}^{\text{AD}} \\ |T_{i,t}^{\text{AD}} - T_{i,t-1}^{\text{AD}}| \leq \Delta T \end{cases} \quad (4)$$

式中: $T_{\min}^{\text{AD}}$ 、 $T_{\max}^{\text{AD}}$ 分别为最低、最高发酵温度; ΔT 为发酵温度爬坡速率。

2.1.3 厌氧消化产沼模型

厌氧发酵是一种复杂的化学反应,沼气产量受底物浓度、生物质原料、温度等多种因素影响^[20],本文通过构建厌氧消化产沼模型来描述沼气发酵速率与环境因素之间的近似关系,表达式如式(5)~(7)所示。

$$u_i^{\text{d}} = \alpha_{11} T_{i,t}^{\text{AD}} - \alpha_{12} \quad (5)$$

$$K^{\text{bio}} = \beta_{11} + \beta_{12} e^{\beta_{13} C_{\text{VS}}} \quad (6)$$

$$\gamma_{i(t)} = \frac{B_0 C_{\text{VS}} V_{\text{AD}}}{Z_{\text{HRT}} \Delta t} \left(1 - \frac{K^{\text{bio}}}{Z_{\text{HRT}} u_i^{\text{d}} - 1 + K^{\text{bio}}} \right) \quad (7)$$

式中: $\gamma_{i(t)}$ 为 i 节点 t 时段单位时间沼气产量,单位为 m^3 / h ; B_0 为甲烷生物势能,单位为 m^3 / kg ; C_{VS} 为挥发性固体浓度,单位为 kg / m^3 ; Z_{HRT} 为水力停留时间,单位为 h ; Δt 为发酵时间; K^{bio} 为无量纲动力参数; u_i^{d} 为微生物的日最大生长比速; α_{11} 、 α_{12} 和 β_{11} 、 β_{12} 、 β_{13} 为生物质发酵相关参数和沼气发酵参数,如附录 A 表 A1、A2 所示。

2.1.4 沼气存储模型

储气罐作为一个实现沼气灵活分配的中转站,具备短时沼气存储的能力,可以实现系统日内供能灵活调度^[21-22]。单个节点的沼气发电设备配备的储气罐数学模型如式(8)所示;调度周期内首末储气量满足式(9)的约束;储气罐容量以及进出气速率满足式(10)的约束。

$$G_{i,t}^{\text{st}} = G_{i,t-1}^{\text{st}} + G_{i,t}^{\text{in}} \eta_g^{\text{in}} - G_{i,t}^{\text{out}} / \eta_g^{\text{out}} \quad (8)$$

$$G_{i,0}^{\text{st}} = G_{i,24}^{\text{st}} \quad (9)$$

$$\begin{cases} G_{i,t}^{\text{in}} = \gamma_{i(t)} \\ 0 \leq G_{i,t}^{\text{in}} \leq G_{\max}^{\text{st}} \\ 0 \leq G_{i,t}^{\text{out}} \leq G_{\max}^{\text{st}} \\ K_{\min}^{\text{st}} \leq \frac{G_{i,t}^{\text{st}}}{G_{\max}^{\text{st}}} \leq K_{\max}^{\text{st}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $G_{i,t}^{\text{st}}$ 为 i 节点 t 时段储气罐内沼气的量,单位为 m^3 ; $G_{i,t}^{\text{in}}$ 为储气罐在 i 节点 t 时段的进气量,即 t 时段沼气总产量; $G_{i,t}^{\text{out}}$ 为在 i 节点 t 时段沼气总输量; η_g^{in} 、 η_g^{out} 分别为储气罐进气、释放时的转换效率; $G_{\max}^{\text{st}}$ 为储气柜最大出气量; $G_{\max}^{\text{st},s}$ 为储气罐最大存量; $K_{\min}^{\text{st}}$ 、 $K_{\max}^{\text{st}}$ 分别为储气罐最小、最大储气比; $G_{i,0}^{\text{st}}$ 为 i 节点储气罐内的初始沼气的量; $G_{i,24}^{\text{st}}$ 为 i 节点储气罐 1 d 内剩余的沼气的量。

2.2 乡村光沼能源供给模型

2.2.1 沼气发电及余热回收模型

光沼融合的乡村配电网系统通过 BG 发电,余热回收装置对 BG 余热进行回收,协助维持沼气发酵温度。同时,在光伏出力充沛时段,通过热泵消纳光伏剩余电量,电转热提供热量,帮助沼气发酵罐增温助产,减小光伏高发带来的电压越限风险;在光伏低发时段,利用储气罐灵活可控特性,通过 BG 发电和余热回收装置,在稳定发酵温度的同时,保证区域配电网电压稳定,其具体模型如下。

BG 是一种利用沼气作为燃料驱动的发电装置,在发电过程中所产生的高温气体可以根据负荷变化进行回收,从而实现余热的有效利用。

BG 的数学模型如式(11)、(12)所示。

$$Q_{i,t}^{\text{BG}} = \frac{G_{i,t}^{\text{out}} L_{\text{HM}}}{\gamma_Q} \quad (11)$$

$$P_{i,t}^{\text{BG}} = \eta_e^{\text{BG}} Q_{i,t}^{\text{BG}} \quad (12)$$

式中: $Q_{i,t}^{\text{BG}}$ 为 BG 输入功率,单位为 kW ; $P_{i,t}^{\text{BG}}$ 为 i 节点 t 时段热电联产机组输出电功率,单位为 kW ; η_e^{BG} 为 BG 发电效率; L_{HM} 为沼气热值,取 $25.9 \text{ MJ} / \text{m}^3$ 。

BG 输出功率爬坡限制如式(13)、(14)所示。

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{BG}} \leq P_{\max}^{\text{BG}} \quad (13)$$

$$|P_{i,t}^{\text{BG}} - P_{i,t-1}^{\text{BG}}| \leq r_{\text{CHP}} \quad (14)$$

式中: $P_{\max}^{\text{BG}}$ 为 BG 电功率最大出力; r_{CHP} 为 BG 的爬坡速率,单位为 kW / min 。

BG 发电的同时会产生一定热量,余热回收装置回收热量,经换热装置将热量传递到厌氧消化罐中辅助沼气生产,余热回收模型如式(15)、(16)所示。

$$H_{i,t}^{\text{BG}} = \gamma_Q \eta_h^{\text{BG}} Q_{i,t}^{\text{BG}} \quad (15)$$

$$H_{i,t}^{\text{RE}} = \eta_r H_{i,t}^{\text{BG}} \quad (16)$$

式中: $H_{i,t}^{\text{BG}}$ 为 i 节点 t 时段 BG 产热功率; η_h^{BG} 为 BG 产热效率; $H_{i,t}^{\text{RE}}$ 为余热回收的热功率; η_r 为余热回收

效率。

2.2.2 光伏协助增温模型

乡村地区丰富的太阳能资源促进了分布式光伏发电设备的广泛应用。光伏发电过程简单,具有环保、无污染等优点^[23],利用光伏发电富余电能供给热泵产热,可以协助沼气增温产沼,通过合理的沼气存储调配能够进一步保障区域能源供应。分布式光伏发电模型如式(17)所示。

$$P_{i,t}^{\text{PV}} = \begin{cases} n_{\text{PV}} S_{\text{PV}} \eta_{\text{PV}} \frac{\varphi_t^{\text{PV}}}{\varphi_{\text{test}}} & \varphi_t^{\text{PV}} \leq \varphi_{\text{test}} \\ n_{\text{PV}} S_{\text{PV}} \eta_{\text{PV}} \varphi_{\text{test}} & \varphi_t^{\text{PV}} > \varphi_{\text{test}} \end{cases} \quad (17)$$

式中: $P_{i,t}^{\text{PV}}$ 为*i*节点*t*时段光伏输出有功功率,单位为kW; n_{PV} 为光伏板的数量; S_{PV} 为单个光伏板的有效面积; φ_{test} 为标准测试下光照强度; φ_t^{PV} 为实际光照强度; η_{PV} 为光伏板的光电效率。

热泵是光沼协同增温中的关键设备,其能消耗光伏富余电能,从低温热源中提取热量,并传递到高温热源,完成高效能的电热转换,是实现能源转换的重要环节,其模型表达式如式(18)所示。

$$H_{i,t}^{\text{HP}} = \gamma_Q \beta_{\text{HP}} P_{i,t}^{\text{HP}} \quad (18)$$

式中: $H_{i,t}^{\text{HP}}$ 为*i*节点*t*时段热泵输出热功率; $P_{i,t}^{\text{HP}}$ 为*i*节点*t*时段热泵消耗电功率; β_{HP} 为热泵能效系数。

光沼协同运行约束如式(19)、(20)所示。

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{PV}} \leq P_{\text{max}}^{\text{PV}} \quad (19)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{HP}} \leq P_{\text{max}}^{\text{HP}} \quad (20)$$

式中: $P_{\text{max}}^{\text{PV}}$ 为光伏发电系统最大功率; $P_{\text{max}}^{\text{HP}}$ 为热泵消耗电功率的最大值。

2.3 能量平衡约束

本文构建的含光伏与生物质的乡村配电网模型需要满足采用二阶锥(second order cone programming, SOCP)松弛^[24]之后的Distflow约束、配电网安全约束以及热平衡约束,具体表达式见附录A式(A1)—(A8)。

3 乡村配电网运行优化模型

3.1 目标函数建模

本文所构建的乡村光沼能源供给系统以电压偏差和系统经济成本为目标,旨在用最小的经济成本,保证乡村配电网安全稳定运行,实现能源的高效利用。

1) 电压偏差。

鉴于高比例分布式光伏接入下的乡村配电网系统末端电压偏移严重问题,目标函数 f_1 主要考虑电网电压偏差,如式(21)所示。

$$\min f_1 = \sum_{i \in T} \sum_{j \in B} \left| \tilde{V}_{j,t}^2 - (\tilde{V}_{j,t}^{\text{ref}})^2 \right| \quad (21)$$

式中: $\tilde{V}_{j,t}$ 为节点*j*电压标幺值; $\tilde{V}_{j,t}^{\text{ref}}$ 为节点*j*电压参考

值; T 为调度周期; B 为系统节点集合。

2) 运行成本。

为保证乡村经济可持续发展,目标函数 f_2 主要考虑乡村配电网运行的经济性,包括系统运维成本、网损成本和电网购电成本,如式(22)所示。

$$\min f_2 = \sum_{t \in T} \sum_{k \in K} P_{k,t} C_k^M + a \sum_{t \in T} \sum_{ij \in E} r_{ij} \tilde{I}_{ij,t} + \sum_{t \in T} M_{\text{grid}} P_{\text{grid},t} \quad (22)$$

式中: C_k^M 为第*k*种设备的运维成本系数; $P_{k,t}$ 为*t*时段第*k*种设备的输出功率; a 为网损成本系数; $\tilde{I}_{ij,t}$ 为*t*时段支路*ij*电流的平方; r_{ij} 为支路*ij*的电阻; M_{grid} 为电网单位电价; $P_{\text{grid},t}$ 为与上级电网购电量; K 为系统内所有设备集合; E 为系统线路集合。

3.2 双目标求解策略

本文建立的优化模型为双目标模型,目前对于双目标模型求解策略主要有加权法和启发式算法。利用传统的加权方式存在较强的主观意识,难以对目标函数的重要程度作出客观界定,同时无法避免不同目标函数间的量纲差距,利用加权法求解,很难达到理想效果;如果采用遗传算法、粒子群算法等启发式算法无法保证所得解的准确性,容易陷入局部最优情况,导致不必要的经济损失^[25]。因此,为了解上述多目标优化问题,本文引入Epsilon约束法,Epsilon约束法的主要思路是通过选取一个主目标函数,将其余目标函数转化为约束,从而计算每个子优化目标,在2个目标函数相互博弈的过程中获取多目标优化问题的帕累托前沿^[26]。

本文选取 f_1 作为主目标,将系统经济性 f_2 转化为约束形式,通过调整Epsilon参数来平衡各个目标函数之间的优化程度,得到最终的帕累托解集,采用Epsilon约束法来求解所建立的多目标优化调度模型,如式(23)、(24)所示。

$$\begin{cases} \min f_1 \\ f_2 \leq \varepsilon_l \\ h(x) = 0 \\ g(x) \leq 0 \end{cases} \quad (23)$$

$$\varepsilon_l = f_{2,\text{max}} - \frac{(f_{2,\text{max}} - f_{2,\text{min}})(l-1)}{l_{\text{max}} - 1} \quad l = 1, 2, \dots, l_{\text{max}} \quad (24)$$

式中: $f_{2,\text{max}}$ 为以电压幅值作为单目标优化时所得出的经济性指标值; $f_{2,\text{min}}$ 为以运行成本为单目标优化时所得目标函数值; $h(x)$ 表示求解时的等式约束; $g(x)$ 表示求解时的不等式约束; ε_l 为第*l*个目标的约束值; l_{max} 为设置的最大迭代次数, l_{max} 越大,帕累托前沿拟合越准确,但是会显著增加求解时间,基于对精确度与计算效率之间的平衡,本文选取的最大迭代次数为20次。

在求解出帕累托前沿后,为了选择帕累托前沿最优解,本文选择TOPSIS法^[27]对帕累托前沿上最优点进行决策,其能充分利用原始数据的信息,精确地反映各评价方案之间的距离,通过检测评价对象与最优解、最劣解的距离来进行排序,具体表达式如式(25)所示。

$$\begin{cases} D_r^+ = \sqrt{\sum_{s=1}^m \alpha_s (Z_s^+ - z_{rs})^2} \\ D_r^- = \sqrt{\sum_{s=1}^m \alpha_s (Z_s^- - z_{rs})^2} \\ S_r = \frac{D_r^-}{D_r^+ + D_r^-} \end{cases} \quad (25)$$

式中: D_r^+ 和 D_r^- 分别为第 r 个评价对象与最大值和最小值的距离; Z_s^+ 和 Z_s^- 分别为每个指标对应的最大值和最小值, s 为不同的目标; α_s 为加权系数; m 为评价目标数量; r 为帕累托解集数; S_r 为评估指标,表示综合效果, S_r 介于0和1之间,越接近1表示该方案结果越理想,从而对不同评价对象进行最优决策。

本文采用Epsilon约束与TOPSIS相结合的方法对乡村配电网系统模型进行求解决策,通过Epsilon约束求解方法解决目标函数数量纲不匹配问题,利用TOPSIS法,考虑系统经济性与稳定性,筛选出最优折中解,从而实现乡村配电网安全、经济运行,求解流程图如附录A图A1所示,主要步骤如下。

1)导入厌氧消化参数(物料浓度、比热容等)、系统能源设备容量限制、历史典型日太阳辐射强度和环境温度数据。

2)导入光沼能源供给模型,计及爬坡约束、能量平衡约束、温度约束等,以系统经济性、稳定性为目标构建厌氧发酵模型和乡村配电网运行优化模型。

3)利用线性化方法将数学模型转化为混合整数线性规划(mixed-integer linear programming, MILP)问题,设置 ε 参数与迭代次数,调用求解器对优化模型求解。

4)针对当前循环优化结果,判断当前迭代次数是否小于最大迭代次数 $i_{\max}$:如果是,保留上阶段设备出力信息与目标函数结果,并更新 ε 参数值,返回系统优化运行模型重复进行求解;如果否,输出每次迭代保存的求解结果,形成双目标帕累托前沿解集,完成Epsilon约束法求解流程。

5)根据保存的求解结果与帕累托前沿解集,利用TOPSIS法对帕累托前沿进行决策,选取最优求解方案,生成含光伏与沼气发电的乡村配电网运行优化策略。

4 算例分析

4.1 系统参数与场景设置

本文算例采用华东某大型农场实际10 kV配电系统进行仿真分析,该配电系统拓扑有98个节点,配电系统拓扑结构如附录A图A2所示,其中,绿色节点代表接入沼气系统节点,红色代表接入分布式光伏节点。

仿真案例的调度周期为24 h,调度时间间隔为1 h。仿真平台处理器为Intel Core i5-9300HF,内存为16 GB,操作系统为64位Windows 11。仿真软件为配置Yalmip工具箱的MATLAB_R2021a,调用商业软件Gurobi 11.0求解。

系统基准电压为10 kV,基准容量为10 MV·A,基准负荷为7610 kW+5920 kvar,BG、分布式光伏接入位置和装机容量如附录A表A3所示;储气罐初始存储比为0.4,存储比范围为[0.1,0.9];以系统基准负荷和光伏装机容量为基准,系统负荷和光伏输出功率情况如图2所示。其中,光伏出力和负荷需求为标么值。

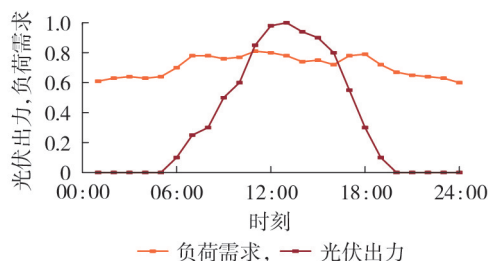


图2 光伏出力和负荷需求情况

Fig.2 PV output and load demand condition

为验证本文所提乡村配电网运行优化策略的有效性,分别以不接入沼气发电系统、不采用沼气系统消纳富余光伏运行模式作为对照组,设置3种场景进行仿真实验对比。

场景1:系统接入高比例分布式光伏。

场景2:系统在接入高比例分布式光伏的情况下,接入沼气系统,但不采用沼气系统消纳富余光伏。

场景3:系统在接入高比例分布式光伏情况下,接入沼气系统,并通过沼气系统消纳多余光伏。

4.2 仿真结果分析

4.2.1 沼气系统运行结果分析

针对本文构建的双目标问题,通过Epsilon约束法与TOPSIS法对模型进行求解决策,得出稳定性-经济性双目标帕累托前沿解集如图3所示。其纵坐标 f_1 为式(21)定义的电压平方偏差绝对值累加和,单位为标么值的平方,横坐标 f_2 为系统运行成本,可以看出系统经济性与稳定性2个目标函数呈

负相关趋势,利用TOPSIS法对求解结果进行决策,得到不同场景下的最优折中解。

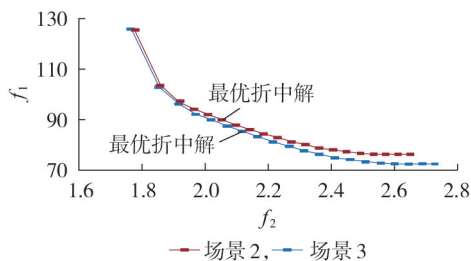


图3 双目标帕累托前沿解集
Fig.3 Pareto frontier solution set

场景3中4个沼气系统的运行情况如附录B图B1所示。从图中可以看出:BG集中在00:00—09:00和17:00—24:00时段输出功率,09:00—17:00时段停止工作,这是因为在00:00—09:00和17:00—24:00时段光伏出力匮乏,沼气机组输出功率保障用电需求,缓解节点电压下降幅度;热泵在00:00—09:00和16:00—24:00时段停止工作,在09:00—16:00时段,通过将富余的光伏出力转换成热量,协助沼气产出,减小节点电压偏移过大。结合储气量曲线分析,日间富余光伏通过热泵电热转换协助沼气增产,并将增产沼气存入储气罐中,在夜间光伏出力不足的时段,释放沼气发电,从而保证乡村用电需求。

4.2.2 安全性分析

为了体现本文所提方法的有效性,本文将各个场景下配电网电压幅值范围、网损、电压偏移率和网损率进行对比,结果如表1所示。其中,电压为标么值,后同。

表1 各场景配电网指标对比
Table 1 Indicators comparison of distribution network in each scenario

场景	电压范围	网损/kW	电压偏移率/%	网损率/%
1	[0.912, 1.077]	7 905.8	3.58	5.75
2	[0.948, 1.065]	5 999.7	1.92	4.30
3	[0.950, 1.045]	5 942.8	1.87	4.24

从表1可以看出,接入沼气系统后,配电网各方面指标都有一定提升。

从电压范围而言,10 kV配电网要求电压允许偏差范围为 $\pm 7\%$,场景1由于夜间仅有上级电网供电,而日间有高比例光伏接入,电压末端节点在夜间时段电压过低,日间时段电压过高,在接入沼气系统后,场景2、3的电压幅值得到有效控制,提升了配电网稳定性,同时在场景3中通过将富余光伏发电转换为热能供给沼气发酵增温,进一步提高配电网的电压调节裕度。

从网损角度而言,通过引入沼气系统供电,场景2相比场景1网损降低24.1%,场景3通过消纳富

余光伏,进一步降低网损水平,相较于场景1下降24.8%;从电压偏移率而言,场景2和场景3电压偏移率都有所降低,场景3通过光伏与沼气系统互动,电压偏移率比场景1下降1.71个百分点,比场景2低0.05个百分点,能够有效缓解电压偏移程度。

通过对以上数据分析可知,在接入沼气系统后配电网各项指标都有所改善,所提方法通过光沼能源供应模式能够提升配电网各项指标,提升系统稳定性。

在场景1、2和3下,各节点电压幅值如附录图B2、B3和图4所示。图中:电压幅值为标么值。从图4中可以看出,接入沼气系统后,乡村配电网电压稳定性有了明显提升。

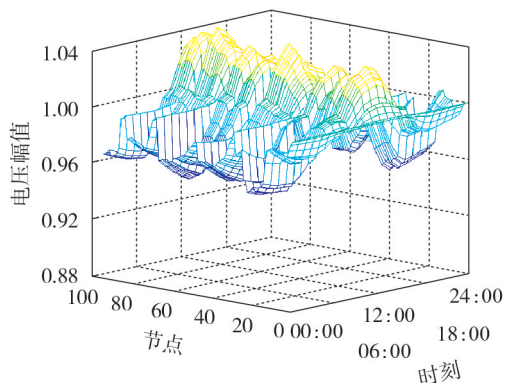


图4 场景3各节点电压幅值

Fig.4 Voltage amplitude of each node in Scenario 3

场景1中电压幅值范围为 $[0.912, 1.077]$ p.u.,场景2中电压幅值范围为 $[0.948, 1.065]$ p.u.,场景3中电压幅值范围为 $[0.950, 1.045]$ p.u.。对比发现,接入沼气系统的附近节点,在夜间光伏缺乏时,电压幅值提高;在日间光伏高发时,电压幅值降低。

4.2.3 综合效益分析

本文对各种场景下系统的综合效益进行分析,其中包括系统运行成本,碳减排量,对比如表2所示。由于现场设备已经建成投产,本文对成本进行优化时,考虑购电成本、运维成本和网损成本;碳减排量是指通过光伏和生物质能清洁能源替代传统能源发电减少的碳减排量。

表2 各场景综合效益指标对比
Table 2 Comparison of overall efficiency indicators in each scenario

场景	运行成本/元	碳减排量/t
1	25 865.2	37.3
2	20 555.2	47.5
3	20 706.9	47.6

如表2所示,接入沼气系统后配电系统经济性和减碳性有一定提升,其中场景2运行成本最低,这是因为场景3利用热泵消纳富余光伏,会产生一定

的运行成本。由图3可知,安全性和经济性是负相关,场景3较场景2运行成本稍高,但其系统稳定性提升较多,同时其总体运行成本相较于场景1下降19.9%,这是因为通过沼气系统的灵活供能特点和光沼协同增温模式,能够减小上级电网购电量和配电网网损,从而减小了系统总运行成本;在接入沼气系统后,系统减碳性有了一定提升,说明引入生物质能发电可以提升系统环保性,其中场景3碳减排量最高,比场景1高27.6%,同时较场景2有小幅提升,这是因为场景3通过富余光伏电转热协助产沼,在保障系统稳定性的同时,提升了沼气清洁能源发电量,充分发挥了光伏和生物质能发电的协同互补能力,进一步减少了系统碳排放。

4.2.4 TOPSIS 指标分析

不同方案下2个目标函数结果和最优折中解如图3所示,不同场景下TOPSIS得分曲线如图5所示。对比图3和图5可以看出,2种场景下的得分均为先增加后减小,这是因为该方法是根据2个目标的综合值进行赋值给分,在迭代次数较小和迭代次数较大时,其求解方案更加注重1个目标,所以其得分较低,2个方案均在迭代15次时得分最高,说明其方案能更好兼顾系统运行成本和安全运行。

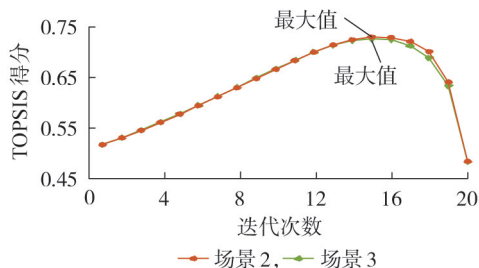


图5 不同场景TOPSIS得分

Fig.5 TOPSIS scores of different scenarios

5 结论

本文考虑乡村已有的可再生能源资源,利用光伏、生物质能的能源产出特性与互动能力,提出了一种含光伏与沼气发电的乡村配电网运行优化策略,具体工作如下。

1)基于沼气发电的灵活特性与光沼能源供应能力,刻画了乡村生物质能产沼及光沼能源产出模型,构建了含光伏与生物质的乡村配电系统运行体系。

2)建立了双目标运行优化模型,采用Epsilon约束与TOPSIS相结合的方法对双目标问题进行求解决策,相较于常用的线性加权求解和启发式算法求解,能够平衡目标函数间量纲差距的同时,避免所求解陷入局部最优情况。

3)所提的乡村配电网运行策略,能够充分利用乡村光伏和生物质能源,在改善乡村配电网电能质量

的同时,一定程度上保障了乡村配电系统的经济性,并通过生物质发电,减小了系统碳排放量,所提策略运行成本较原始场景降低19.9%,网损降低24.8%,电压偏移率降低1.71个百分点,碳减排水平提升27.6%。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 寇江泽,刘温馨. 落实“双碳”行动 建设美丽中国[N]. 人民日报,2024-04-28.
- [2] 于文静,高敬. 2024年中央一号文件公布提出有力有效推进乡村全面振兴“路线图”[N]. 新华网,2024-02-03.
- [3] Pochwatka P, Rozakis S, Kowalczyk-Jusko A, et al. The energetic and economic analysis of demand-driven biogas plant investment possibility in dairy farm[J]. Energy, 2023, 283: 129165.
- [4] 梁睿,袁乐童,黄宏旭,等. 变温影响下乡村生物质能发电系统跨周期滚动优化运行方法[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(8): 3067-3079.
- [5] Liang Rui, Yuan Letong, Huang Hongxu, et al. Multi-hydraulic retention time rolling optimal operation method for rural biomass power generation system under uncertain temperature[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(8): 3067-3079.
- [6] 俞发强,张名捷,程语,等. 需求响应下的并网型风-光-沼微能源网优化配置[J]. 上海交通大学学报, 2023, 57(1): 10-16.
- [7] Yu Faqiang, Zhang Mingjie, Cheng Yu, et al. Optimal sizing of grid-connected wind-solar-biogas integrated energy system considering demand response[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2023, 57(1): 10-16.
- [8] 申泽渊,赵海波,李伟康,等. 面向偏远地区低碳发展的风-光-沼-储综合能源微网多目标规划方法[J]. 太阳能学报, 2023, 44(7): 71-79.
- [9] Shen Zeyuan, Zhao Haibo, Li Weikang, et al. Multi-objective optimization method for low-carbon development of wind-solar-biogas-storage integrated energy microgrids in remote regions[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(7): 71-79.
- [10] 姜飞,肖昌麟,易子木,等. 含光伏与生物质能的生态农业综合能源系统多能协同及低碳运行策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(4): 1352-1364.
- [11] Jiang Fei, Xiao Changlin, Yi Zimu, et al. Multi-energy cooperation and low-carbon operation strategy of eco-agricultural integrated energy system containing photovoltaic and biomass energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(4): 1352-1364.
- [12] Li C B, Yang H Y, Shahidepour M, et al. Optimal planning of islanded integrated energy system with solar-biogas energy supply[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2437-2448.
- [13] Jiao W S, Chen J, Wu Q W, et al. Distributed coordinated voltage control for distribution networks with DG and OLTC based on MPC and gradient projection[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(1): 680-690.
- [14] 黎家明,霍群海,尹靖元,等. 考虑柔性有载调压变压器的两阶段电压无功优化协调控制方法研究[J]. 电网技术, 2025, 49(1): 272-283.
- [15] Li Jiaming, Huo Qunhai, Yin Jingyuan, et al. Research on two-stage voltage and reactive power optimization coordinated control method considering flexible on-load tap changer[J]. Power System Technology, 2025, 49(1): 272-283.
- [16] Ai Y L, Du M Z, Pan Z H, et al. The optimization of reactive power for distribution network with PV generation based on

- NSGA-III[J]. CPSS Transactions on Power Electronics and Applications, 2021, 6(3): 193-200.
- [12] Gush T, Kim C H. Robust local coordination control of PV smart inverters with SVC and OLTC in active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2024, 39(3): 1610-1621.
- [13] 马成廉, 李闯, 黄大为, 等. 基于合作博弈的高比例光伏配电网分区及无功/电压控制方法[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(6): 72-78, 87.
Ma Chenglian, Li Chuang, Huang Dawei, et al. Partitioning and voltage/var control method with high proportion of photovoltaic in distribution network based on cooperative game[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(6): 72-78, 87.
- [14] 黄蕾, 王辉, 张鑫源, 等. 面向电压主动支撑和抗扰能力提升的光伏场站两阶段协同优化控制[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(21): 28-39.
Huang Lei, Wang Hui, Zhang Xinhao, et al. Two-stage coordinated optimization control for active voltage support and disturbance rejection enhancement in PV power plants[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(21): 28-39.
- [15] 王守相, 程耀祥, 赵倩宇, 等. 考虑光储协调的配电网多阶段就地-分布式电压控制策略[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(1): 1-9.
Wang Shouxiang, Cheng Yaoxiang, Zhao Qianyu, et al. Multi-stage local-distributed voltage control strategy of distribution network considering photovoltaic-energy storage coordination[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(1): 1-9.
- [16] 黄莘杰, 方斯顿, 罗颖冰, 等. 双向潮流下考虑储能系统状态耦合特性的配电网电压协调管理策略[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(14): 5577-5588.
Huang Xinjie, Fang Sidun, Luo Yingbing, et al. A coordinated voltage management for distribution network considering the state coupling characteristics of energy storage systems under bi-directional power flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(14): 5577-5588.
- [17] 葛磊蛟, 崔庆雪, 李昌禄, 等. 计及时延的智能配电网光储就地-分布电压优化控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2025, 53(4): 48-58.
Ge Leijiao, Cui Qingxue, Li Changlu, et al. Local-distributed voltage optimization control method for photovoltaics and energy storage in a smart distribution network considering time delay[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(4): 48-58.
- [18] 夏鹤轩, 吴丽红, 夏侯元, 等. 基于IPO算法的配电网储能优化配置[J]. 智慧电力, 2025, 53(9): 91-98.
Xia Yaouxuan, Wu Lihong, Xiahou Yuan, et al. Optimal energy storage allocation in distribution networks based on IPO algorithm[J]. Smart Power, 2025, 53(9): 91-98.
- [19] 胡伟, 杨硕. 考虑配电网脆弱性的储能双层优化配置模型[J]. 智慧电力, 2024, 52(6): 1-8.
Hu Wei, Yang Shuo. Dual-tiered optimization configuration model for energy storage considering distribution network vulnerability[J]. Smart Power, 2024, 52(6): 1-8.
- [20] 王淑霞, 阮应君, 周伟国, 等. 基于沼液余热回收的沼气工程系统净产能特性[J]. 农业工程学报, 2018, 34(10): 200-209.
Wang Shuxia, Ruan Yingjun, Zhou Weiguo, et al. Net energy characteristic in biogas plants with slurry waste heat recovery[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(10): 200-209.
- [21] 王雯沁, 高红均, 王仁浚, 等. 考虑分布式电源支撑与农业设施协调的配电网分布鲁棒优化[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(21): 89-98.
Wang Wenqin, Gao Hongjun, Wang Renjun, et al. Distributionally robust optimization of distribution network considering distributed generator support and agricultural facility coordination[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(21): 89-98.
- [22] 王一鸣, 仪忠凯, 徐英, 等. 服务大型粮食基地生产保供的农场配电网优化调度策略[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(15): 100-109.
Wang Yiming, Yi Zhongkai, Xu Ying, et al. Optimal scheduling strategy of farm distribution network for power supply support for production of large-scale crop base[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(15): 100-109.
- [23] 董京, 何武, 刘雪飞, 等. 基于合作联盟的农村微电网光储协同配置与收益分配策略[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(7): 10-18, 53.
Dong Jing, He Wu, Liu Xuefei, et al. Cooperative alliance-based strategy of collaborative configuration and benefit distribution for photovoltaic-storage in rural microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(7): 10-18, 53.
- [24] Wang C L, Liu C M, Chen J, et al. Cooperative planning of renewable energy generation and multi-timescale flexible resources in active distribution networks[J]. Applied Energy, 2024, 356: 122429.
- [25] 窦迅, 邓叶航, 王顺江, 等. 基于改进多智能体深度确定策略梯度算法的配电网无功协调优化调度[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(8): 79-86, 95.
Dou Xun, Deng Yehang, Wang Shunjiang, et al. Reactive power coordination optimization scheduling of distribution network based on improved multi-agent deep deterministic policy gradient algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(8): 79-86, 95.
- [26] 孙华鹏, 丁孝华, 吴志, 等. 计及自动电压控制系统限值优化调整的配电网调压策略[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(12): 184-193.
Sun Huapeng, Ding Xiaohua, Wu Zhi, et al. Voltage regulation strategy for distribution network considering optimal adjustment of automatic voltage control system limits[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(12): 184-193.
- [27] 李东东, 汪露璐, 王维, 等. 考虑源荷互动的综合能源系统多目标双层规划[J]. 电网技术, 2024, 48(2): 527-539.
Li Dongdong, Wang Lulu, Wang Wei, et al. Multi-objective bi-level planning for integrated energy systems considering source-load interaction[J]. Power System Technology, 2024, 48(2): 527-539.

作者简介:

王琛(1984—),男,高级工程师,主要研究方向为综合能源系统优化运行、电力系统优化运行等(E-mail: 19552257137@163.com);

梁睿(1981—),男,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统自动化、综合能源系统优化运行、供配电安全与保护等(E-mail: liangrui@cumt.edu.cn);

龚光阳(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为乡村综合能源系统、电力系统优化运行等(E-mail: cumt_ggy@163.com);

李国欣(1978—),男,副教授,通信作者,主要研究方向为电能质量分析(E-mail: lee_guoxin@126.com)。

(编辑 丁欣欣)

Stability and economic operation optimization for rural distribution network with flexible PV-biogas support

Wang Chen^{1,2}, Liang Rui¹, Gong Guangyang¹, Sun Zhefu², Zhang Ziwei², Li Guoxin¹, Guan Ya²

(1. School of Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. State Grid Lianyungang Power Supply Company of Jiangsu, Lianyungang 222004, China)

Abstract: To address voltage deviation and the temporal mismatch between resource output and load demand resulting from high-penetration distributed photovoltaic (PV) integration in rural distribution network, an operation optimization strategy including PV and biomass energy for rural distribution network is proposed. Based on the advantage of renewable energy resource for distributed energy resources in rural areas, a rural distribution network architecture incorporating PV-biomass energy supply is established. The flexible characteristics of anaerobic fermentation for biogas production and the interactive capability of PV-biomass energy across different periods are accurately characterized, a rural distribution network model with PV and biomass energy is constructed. The model is solved by the combination of Epsilon constraint and technique for order preference by similarity to ideal solution (TOPSIS) comprehensive evaluation method, and the operation optimization strategy of the rural distribution network with PV and biomass is proposed, which considers the economy and stability of the system. Simulation tests performed on a distribution system of a large farm in East China demonstrate that the proposed model and method can improve the voltage stability of rural distribution networks, and reduce the system operation cost and carbon emission level through the PV-biomass supply mode.

Key words: green energy system; anaerobic fermentation for biogas production; voltage deviation; rural distribution network; Epsilon constraint method; photovoltaic power generation; biogas power generation

(上接第 155 页 continued from page 155)

Daily power generation forecasting method for small hydropower station considering spatiotemporal distribution characteristic of evaporation

Ming Di, Wei Hua

(Guangxi Key Laboratory of Power System Optimization and Energy Technology, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The traditional daily power generation forecasting models of small hydropower station are distorted due to the neglect of spatiotemporal distribution characteristic of watershed evaporation. Therefore, a daily power generation forecasting method for small hydropower station is proposed considering the spatiotemporal distribution characteristic of evaporation. The spatial distribution of precipitation and evaporation obtained from meteorological station observation and meteorological satellite remote sensing is used, the missing data is completed through bilinear interpolation, and a gridding net precipitation dataset covering relevant small hydropower stations is constructed. The cross-correlation analysis and Akaike information criterion are used to clarify the time-lag relationship between daily power generation and net precipitation, and the optimal lag period of power generation in each station responding to net precipitation is quantitatively estimated. The spatiotemporal distribution characteristic of net precipitation and historical power generation data is used to construct a machine learning network based on an improved gradient boosting regression tree, and a daily power generation forecasting model of small hydropower station with high accuracy is obtained. The forecasting results show that the average forecasting accuracy of the proposed model achieves 95.1%, which is improved by about 3% than the models without considering the spatiotemporal distribution characteristic of net precipitation, and is averagely improved by about 10% than the comparison modes such as iTransformer.

Key words: small hydropower station; power generation; forecasting; evaporation; net precipitation; machine learning