文章编号:1672-3392(2024)04-0127-08

基于光伏电池和被动光网络的碳减排技术研究

方 兵 王善立 张佳艺

(海南电网有限责任公司,海南 海口 570203)

摘要 为推进能源绿色低碳转型,建设新型能源体系,基于光伏电池(Photovoltaic,PV)与被动光网络(Passive Optical Network,xPON)的结合,提出了一种创新的可再生能源系统,旨在促进绿色电力的发展。首先,通过风力发电机组和光伏电池板的相互连接,构建出系统框架。其次,利用光纤射频通信(Radio over Fiber,RoF)和 xPON 的融合,将能源数据从风力发电机和太阳能电池传送到中央控制站。最后,搭建出 PV 等效电路与风力发电机组模型,并使用卷积核函数向量机与太阳能电池相结合,实现了风能与太阳能的高效混合。实验结果表明,系统的 PV 模块可扩展性达到 90%,服务质量高达 62%,功耗仅为 96%,网络效率高达 92%,训练精度达到 95%,其在多个方面都具有明显的优势。因此,该技术不仅可以提高可再生能源的效率,还可以优化其在光网络环境中的性能,从而为绿色能源和通信技术的融合提供了新的可能性。

关键词 光伏电池;被动光网络;光纤射频通信;向量机;卷积核函数

中图分类号 TM73 **文献标识码** A

1 引 言

目前,社会正面临着严重的能源和环境挑战,构建新能源发电项目服务绿色通道成为了不可或缺的任务[1]。为了推动新能源项目的“能并尽并”,并协助各级政府有序推进可再生能源产业的发展,研究者们需要探索更加可持续和环保的电力生产方式。其中,绿色电力作为一种通过零二氧化碳排放(或趋近零二氧化碳排放)的生产过程得到的电力,具有极大的潜力和重要性[2-5]。通过推动绿电消费和促进绿电交易,可以为能源绿色低碳转型提供重要支持,为建设新型能源体系做出积极贡献。

在当今全球面临气候变化和环境问题的背景下,实现碳减排变得尤为重要。光伏电池技术作为一种清洁能源技术,为减少碳排放提供了重要的途径和解决方案[6]。目前,众多学者对光伏发电的应用进行了广泛的研究和实践探索。其中包括采用对含有光伏发电的虚拟电厂参与电力市场交易的机制的优化[7]、基于蝗虫算法优化预测光伏电站冬季的发电功率[8]、光伏和电动汽车的多阶段配电网拓展规划[9]与铁路光伏的产业深度融合模式[10]等研究。上述的研究为光伏电池的发展和可持续利用提供了重要的指导,促进了光伏电池的高效应用,从而在碳减排和环境保护方面发挥了重要作用。但是当前的研究大多集中在光伏电池技术本身,很少有研究同时考虑光伏和风能的混合利用。实际上,将光伏和风能相结合是一种非常有潜力的可再生能源整合方式,有助于弥补它们各自的不足。

xPON 技术用于实现高速宽带互联网接入和数据传输,采用被动光学网络结构,其中“被动”表示在网络中没有需要电源供应的设备,因此减少了能源消耗和维护成本[11]。xPON 技术在风光混合系统中的应用可以提高能源系统的

收稿日期 2023-10-30 **收修改稿日期** 2024-01-03

作者简介 方兵(1983—),男,高级工程师,主要研究方向为电力规划、能源转型与低碳政策研究。

可持续性、可靠性和智能性，有助于实现碳减排目标并推动清洁能源的发展[12-14]。卷积函数向量机是一种机器学习算法，它结合了卷积神经网络的思想和支持向量机的概念，在信号处理和图像处理中被广泛使用，使得模型能够学习到数据中的局部模式和特征[15]。本文提出一种基于RoF通信的xPON的风光混合的可再生能源系统。通过风力发电机组和光伏电池板的相互连接，构建出系统框架，借助xPON实现可靠且高效的通信。搭建出等效电路与风力发电机组模型后，使用卷积核函数向量机与太阳能电池相结合，实现了风能与太阳能的高效混合。实验结果表明，本文所提出的方法在多个方面都具有明显的优势，为碳减排目标的实现提供了有力支持。

2 风光混合的可再生能源系统

图1所示为基于风光混合的可再生能源系统。该系统包括了风力发电机组和光伏电池板，二者通过一系列的电子设备和转换器与电力网络相互连接。其中，风力发电机组利用海南岛丰富的海上风能并将其转换为机械能之后，通过系列转换，将由风力发电机组产生的交流电（AC）转换为适合逆变器使用的直流电（DC）。太阳能电池板将太阳能光线转化为电能。

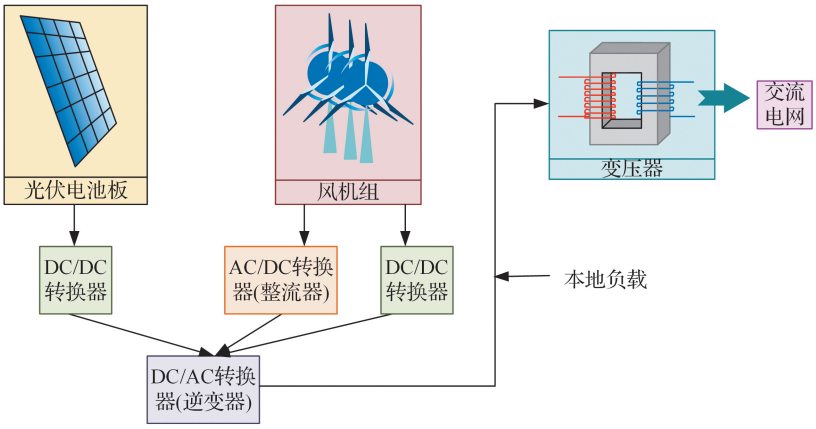

图1 基于风光混合的可再生能源系统

Fig. 1 Renewable energy system based on wind and solar hybridization

风力发电机组和光伏电池板都通过逆变器转化为交流电，以适应电力网络或本地负载。变压器用于调整电压，以适应电力网络或连接到电力网络。将调整后的电压注入到公共电力网络中，以供应其他用户或向电力网络提供多余的电能。

该系统的主要目标是将风能和太阳能光伏能源集成到一个可再生能源系统中，通过一系列的电子设备和转换器将产生的直流电转换为适合电力网络或本地负载的交流电。这有助于提高能源的可用性和可再生能源的利用率，减少对传统化石燃料的依赖，并降低了温室气体排放。因此，该可再生能源系统不仅为电力供应提供了可持续的解决方案，还积极地贡献了碳减排和环境保护方面的方案。

3 基于RoF通信的xPON基站

基于RoF通信的xPON基站作为一种先进的通信系统，结合了光纤传输和射频通信技术，用于提供高效的通信服务。

RoF技术允许在光纤网络中传输高频率的射频信号，以实现远距离和高带宽的通信。xPON用于通过光纤传输提供高速互联网接入和通信服务。作为一种经济高效的网络架构，xPON可以满足不同规模和需求的用户。xPON通常包括光线路终端（Optical Line Terminal，OLT）和光网络单元（Optical Network Unit，ONU）等元件。

基于RoF通信的xPON基站将RoF技术与

xPON 相结合，可以提供高速、高带宽的通信服务，同时具有灵活性和可扩展性，适用于不同的网络需求和场景，包括住宅区、商业区、医疗机构、酒店、购物中心、体育场馆、交通枢纽等地方。

如图 2 所示，网络采用基带单元（Base Band Unit，BBU）+射频远程单元（Radio Remote Unit，RRU）分布式基站组网，将关键处理模块置于中心机房的 BBU 中。这样一来，可以简化 RRU 的功能和结构，提高网络覆盖范围和容量，增强网络的调度和维护灵活性，同时有效降低了成本。借助已规模部署的 xPON 光分布网络，运营商可以根据网络规划需求或单个用户的需求逐步通过 RoF 加载业务。可以选择不同类型的 RRU 来满足不同场景的室外或室内覆盖需求。同时，RoF 或 xPON 的部署顺序可以根据需求进行灵活处理，使得网络的升级和扩展能够适应不同情况。

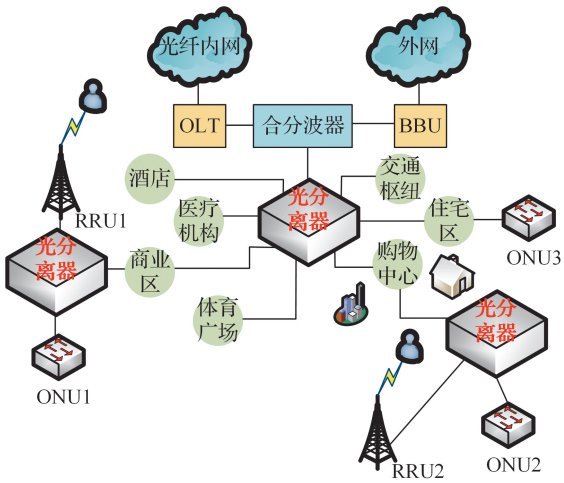

图 2　基于 RoF 通信的 xPON 基站

Fig. 2　xPON network base station based on RoF communication

此外，该基站还在光纤内网和外网中发挥了关键作用。光纤内网物理通道还能为智能用电系统提供数据通道，支持用户实时监控和控制电力消耗；支持太阳能发电系统的数据采集和监控，以优化能源利用和性能管理。其外网可以用于智能交互终端、电力自助终端与远程智能家居等数据通道。

总之，通过利用光纤和射频技术的融合，该基站支持高效的数据传输和监控，将能源数据从风力发电机和太阳能电池传送到中央控制站，实现远程监控与控制，优化能源生产，以及支持智能能源调度系统。这些先进的通信技术确保了高可靠性的通信连接，为可再生能源系统的高效运行提供了强大支持。

4　系统模型

4.1　PV 等效电路

PV 具有二极管的特性，因此其输出电流是光电流和反向流动的暗电流的叠加。光伏电池的 *I-V* 特性表达式如下：

$$I = I_{\mathrm{ph}} - I_{\mathrm{o}}\left\{\exp\left[\frac{q}{nN_{\mathrm{s}}kT}\left(V + IR_{\mathrm{s}}\right)\right] - 1\right\} - \frac{V + IR_{\mathrm{s}}}{R_{\mathrm{sh}}} \tag{1}$$

其中，I 和 V 分别表示 PV 的输出电流和电压，I_{ph} 表示光照条件下产生的光电流，I_{o} 表示二极管的反向饱和电流，q 表示单个电子的电荷量。通过 R_{sh} 描述了 PN（p 型和 n 型）结处的漏电流。N_{s}、n、k 和 T 为光伏电池板的相关参数。由于方程两边都存在电流 I，因此式（1）是一个典型的隐式超越方程。当光伏电池处于开路点（V_{oc}，0）时，方程可变为

$$I_{\mathrm{ph}} + I_{\mathrm{o}} = I_{\mathrm{o}}\exp\left(\frac{qV_{\mathrm{oc}}}{nN_{\mathrm{s}}kT}\right) - \frac{V_{\mathrm{oc}}}{R_{\mathrm{sh}}} \tag{2}$$

最大功率点的电压 v_{mp} 为

$$v_{\mathrm{mp}} = \frac{\Gamma N_{\mathrm{se}}k_{\mathrm{B}}TI_{\mathrm{sc}}}{qe}\ln\left(\frac{\Gamma N_{\mathrm{se}}k_{\mathrm{B}}T}{qeV_{\mathrm{oc}}}\right) \tag{3}$$

其中，k_{B} 表示 Boltzmann 常数，qe 表示电子电荷绝对值，Γ 表示可再生能源数量，N_{se} 表示串联配置数量，I_{sc} 表示短路电流，V_{oc} 表示开路电压。对式（2）进行化简得到：

$$I_{\mathrm{ph}} = \frac{ENC}{i_x qeNC_{\mathrm{NRet}}}\left[I_{\mathrm{ph.Kef}} + \mu_1\left(I_{\mathrm{RL}} - I_{\mathrm{SL}}\right)\right] \tag{4}$$

其中，μ_1=50 Hz，I_{RL}、I_{SL} 和 $I_{\mathrm{ph.Kef}}$ 分别表示这些频率下的阻感性电流、暗电流与残余电流的有效值（RMS 值），ENC 表示初始电荷量，$qeNC_{\mathrm{NRet}}$ 表示光照下的电荷量，i_x 表示每个相位的线电流。设单次周期为 T，利用式（5）计算每个相位电压 v_x

的有效值(均方根值):

$$v_x = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T v_x^2(t)\mathrm{d}t} \tag{5}$$

利用离散小波变换(DWT)[16-18],电压和电流波形的有效值可以扩展到三相,考虑其中的任意一相(R、S或T)的有效值 V_x 与 I_x 的计算方法如式(6)所示:

$$V_x = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T v_x^2(t)\mathrm{d}t}, I_x = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i_x^2\mathrm{d}t} \tag{6}$$

太阳辐射主要用于提升光伏电池板的内部能量(DUpanel),其余部分则散失到环境中,为 Q_{loss}。通常情况下,光伏电池板能量流和热传递方法,包括辐射、蒸发和对流这三个主要的热损失来源。式(7)定义了光伏电池板接收到的太阳辐照作为系统能量输入 Q_{solar}:

$$Q_{\mathrm{solar}} = \alpha E A_{\mathrm{p}} \tag{7}$$

其中,α 表示吸收系数,E 表示吸收电荷数,A_{p} 为温度系数。总热损失可通过如下方程计算:

$$Q_{\mathrm{loss}} = Q_{\mathrm{C}} + Q_{\mathrm{R}} + Q_{\mathrm{E}} \tag{8}$$

其中,Q_{C} 表示辐射热损失,Q_{R} 表示热对流热损失,Q_{E} 表示蒸发热损失。

4.2 风力发电机组模型

风力发电机将风的动能转化为涡轮叶片的机械旋转能量。风力发电机产生的机械功率 P_{t} 如下:

$$P_{\mathrm{t}} = \frac{1}{2}\rho A C_{\mathrm{p}}(\lambda,\beta)v_{\mathrm{w}}^3 \tag{9}$$

其中,ρ 表示空气密度,A 表示叶片面积,C_{p} 表示风力发电机的功率系数,其大小与横风比 λ 和叶片角度 β 相关,v_{w} 表示涡轮叶片的旋转速度。

在 dq 坐标系中,涡轮以电动角速度旋转。dq 参考坐标系中定子磁通矢量的 dq 分量如下:

$$\begin{cases}\psi_{sd} = L_d i_{sd} + \psi_{\mathrm{PM}} \\ \psi_{sq} = L_q i_{sq} + \psi_{\mathrm{PM}}\end{cases} \tag{10}$$

其中,定子磁通矢量 ψ_{sd}、ψ_{sq} 分别表示其在 dq 坐标轴上的分量;定子电流矢量 i_{sd}、i_{sq} 分别表示其在 dq 坐标轴上的分量;ψ_{PM} 表示永磁体创建的磁通;定子磁阻大小 L_d、L_q 分别代表其在 dq 坐标轴上的分量。电气和机械角速度分别为 ω_e、ω_m,定子相电阻以及极对数都由变量 e 和 m 表示。

4.3 基于卷积核函数向量机的风光混合模型

非线性支持向量机(SVM)在特征空间 F 中寻找一个线性边界,通过将输入数组映射到高维特征空间 F=Rl,利用非线性映射函数 $s:R_p\rightarrow R_l$ 最大化实例到该边界的最小距离:

$$Min\, w,b\frac{1}{2}WTw + c\sum_{i\in SV} a_i \tag{11}$$

其中,w 表示权重向量,b 表示偏置(或截距)项,$1/2WTw$ 表示超平面的间隔,c 表示正则化参数,a_i 表示所有支持向量 SV 对应的拉格朗日乘子。

通过 $sign(D(x))$ 函数,与式(12)一起为实例 x 分配标签:

$$D(x) = \sum_{i\in SV} k_i y_i K\left(x_i,x\right) + b \tag{12}$$

其中,k_i 表示支持向量 i 对应的拉格朗日乘子的估计值,y_i 表示支持向量 i 的类别标签,$K(x_i,x)$ 表示核函数,它衡量了输入实例 x 与支持向量 x_i 之间的相似性,b 表示偏置项,可通过式(13)计算:

$$b_j = y_j - \sum_{i\in SV} a_i y_i K\left(x_i,x_j\right) \tag{13}$$

其中,b_j 表示每个支持向量对应的偏置项,y_j 表示支持向量 j 的类别标签。通常使用一对多技术将 k 类别分类问题分解为一系列二进制分类问题:

$$D_m(x) = \sum_{i\in SV_m} a_i^{(m)} y_i^{(m)} K_m\left(x_i,x\right) + b^{(m)} \tag{14}$$

通过多数投票方法来确定最终的类别标签,利用来自所有第 m 个二进制分类的估计决策函数。SVM处理过程中有许多常见的核函数可供选择。从几何学的角度看,当特征空间 F 为欧几里德空间时,输入空间 I 中引入了黎曼度量。例如,在二维空间,输入空间中的微小变化 dx 在特征空间中表示为 $ds(x)$:

$$ds(x) = \nabla s \cdot dx \tag{15}$$

在实际情况下通常可以使用 Lp-范数解决此微小变化,由经验性可得 $L2$-范数表现最佳。

5 实验及结果分析

为验证所提出的碳减排路径的有效性,在

MATLAB 软件中对三种不同类型的光伏电池进行了模拟，分别是多晶硅 Kyocera KC200GT、单晶硅 Shell SP70 和薄膜硅 Shell ST40。

5.1　模型有效性验证

假设光伏电池的短路点（0，I_{sc}）和开路点（V_{oc}，0）与 R_s 和 R_{sh} 的尺寸无关。因此，首先需要确定本实验案例中的的短路电流和开路电压。然后通过三种特定光伏电池的 *I-V* 特性曲线，并使用所设计的数学模型评估了与它们相关的误差。

如图 3 所示，短路电流和太阳辐照度 S 之间存在良好的线性关系，同时，计算得出的 I_{sc} 与实验结果高度一致。在不同条件下，评估数据与实验数据之间呈现出显著的一致性。即使对于 Shell ST40，I_{sc} 与太阳辐照度（S=1 050 W/m²）之间的比例存在较大变化，但计算数据与实验数据之间的绝对误差仍然保持在 0.015 A 以下，这足以满足大多数工程应用的高精度要求。如图 4 所示，实验数据与计算得出的开路电压（V_{oc}）几乎一致，最大绝对误差仅为 0.16 V。上述结果证明了所采用的数学方法在光伏电池研究中的可靠性和准确性。

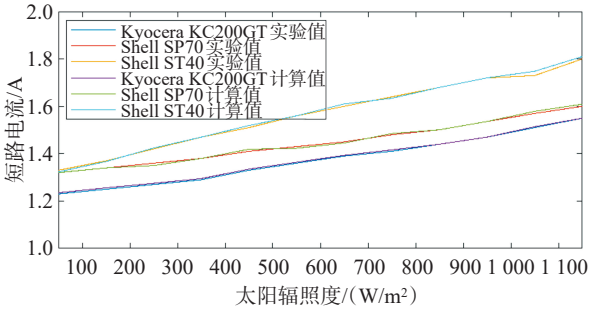

图 3　短路电流特性曲线

Fig. 3　Short-circuit current characteristic curve

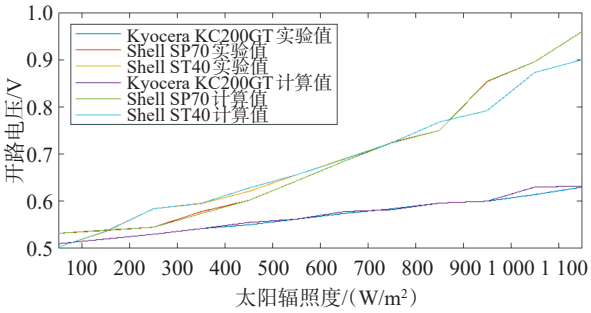

图 4　开路电压特性曲线

Fig. 4　Open-circuit voltage characteristic curve

5.2　性能对比

在风光混合的可再生能源系统的管理和优化中，采用 4.3 节介绍的卷积核函数向量机的机器学习算法。首先，通过在太阳能电池板和风力发电机等能源系统中部署传感器和监测设备，实时采集能源产生和环境条件的数据，包括太阳能电池板的输出电流和电压、风力发电机的输出功率、光照强度、风速等信息。

随后，采用 xPON 进行高带宽和低延迟的数据传输，将采集到的数据传输到中央处理单元，该单元位于集中控制点或数据中心。在中央处理单元中，机器学习算法，如卷积核支持回归向量机，对数据进行处理和分析。通过数据处理和特征提取，深入了解太阳能和风能之间的关联以及它们的互补性。

通过算法的输出，系统可以做出关于太阳能和风能混合利用的决策。其中包括太阳能电池板角度的调整、风力发电机叶片角度的控制等，以最大程度地优化混合能源系统的性能。生成的决策将被转化为控制信号，通过 xPON 传输回太阳能和风能系统，以实际调整它们的运行状态。

表 1 比较了三类 PV 模块在混合可再生能源系统（HRES）、光伏发电（PVP）与本文所提出的模型的可扩展性、服务质量（QoS）、功耗、网络效率和训练精度等参数。

在研究中，通过对多个参数进行了详细考察，发现风光混合的可再生能源系统的运行效率与风速有关。当风速较大时，系统的运行效率更高。其中的风能子系统在风速范围为 4~8 m/s 时，可以为风力涡轮机提供适量的电能输出。当风速从 8 m/s 增加到 12 m/s，并持续上升至 15 m/s 时，系统功率下降的趋势减小。对于小型风力涡轮机（400 W），最佳风速范围位于 4 m/s 以上，特别是在 8~10 m/s 之间。此外，实验过程中不能将 PV 的温度提高到 80 ℃以上，否则将显著降低系统的电能输出。

因此，太阳能子系统的电能产生主要受辐照度的影响，而风速则主要影响风能发电。辐照度和太阳能电池温度之间的相互作用非常接近，并

且对电能产生具有积极影响。风速和辐照度强度之间的相互作用对系统电能产生影响最为显著。

表1 PV模块特性分析

Table 1 PV module characteristic analysis

PV模块	技术	可扩展性/%	QoS/%	功耗/%	网络效率/%	训练精度/%
Kyocera KC200GT	HRES	77	45	76	81	82
	PVP	79	48	78	83	85
	本文所提出的模型	83	52	82	86	88
Shell SP70	HRES	84	52	78	85	87
	PVP	85	54	81	88	89
	本文所提出的模型	89	58	84	92	92
Shell ST40	HRES	85	57	92	91	92
	PVP	86	59	94	94	93
	本文所提出的模型	90	62	96	96	95

5.3 对比结果分析

针对多晶硅Kyocera KC200GT光伏模块，所提出的技术实现了可扩展性83%，QoS 52%，功耗82%，网络效率86%，培训准精度88%；针对单晶硅Shell SP70光伏模块，所提出的技术实现了可扩展性89%，QoS 58%，功耗84%，网络效率92%，培训准精度92%；针对薄膜硅Shell ST40光伏模块，所提出的技术实现了可扩展性90%，QoS 62%，功耗96%，网络效率96%，培训准精度95%。

上述数据表明所提出的技术在多个关键性能指标上表现出明显的优势，与HRES和PVP相比，我们得出以下结论：

1）所提出的技术在所有三种太阳能电池类型（多晶硅、单晶硅、薄膜硅）的情况下都展现了更高的可扩展性。这表明该技术更适合在不同规模和应用场景中使用，具有更广泛的适用性。

2）在QoS方面，所提出的技术表现出色，提供了更高的服务质量。这对于确保能源系统的稳定性和可靠性至关重要。

3）相对于HRES和PVP，所提出的技术在功耗方面较低。这有助于降低系统的运行成本，并提高能源效率。

4）在网络效率方面，所提出的技术表现更为出色，能够更有效地传输能源数据和控制信号，从而提高了整个系统的性能。

5）在培训准确度方面，所提出的技术实现了更高的数值。这确保了智能能源管理系统的准确性和稳定性。

综上所述，该对比结果表明所提出的技术在多个方面都具有明显的优势，可用于提高风光混合的可再生能源系统的性能和效率，在推进能源绿色低碳转型，发展绿色电力的同时，降低运营成本，实现碳减排的目标。

6 结 论

本文基于PV与xPON提出了一个风光混合的可再生能源系统，旨在实现碳减排的目标，促进绿色电力的发展。借助基于RoF通信的xPON实现机组与用户之间高效可靠的通信。通过采用卷积核函数向量机与太阳能电池相结合，实现了风能与太阳能的高效混合化，从而显著降低了电力成本。通过对比判断短路电路与开路电压随太阳辐照度之间的变化关系，实验验证了所提出方法的有效性。将本文所提出的方法与现有的HRES和PVP技术对比，结果表明，本文所提出的系统模型，其PV模块的可扩展性达到90%，服务质量高达62%，功耗仅为96%，网络效率高达92%，训练精度达到95%，其在多个方面都具有明显的优势。因此，本文所设计的可再生能源系统，借助清洁能源减少对传统高碳能源的依赖，为碳减排目标的实现提供了有力支持。

参 考 文 献

[1] 李丽旻. 光储一体化引领“双碳”新风尚[N]. 中国能源报, 2023-09-04(6).
LI Li-min. Integrated photovoltaic and energy storage lead the new trend of “dual carbon”[N]. China Energy News, 2023-09-04(6).

[2] Wenping Z, Yiming W, Po X, *et al*. DC-bus voltage balancing control for 3-level DC/DC converters in renewable generation systems[J]. Energy Reports, 2023, 9(S10): 145-151.

[3] Guanpeng L, Yi Y, Zhuangzhuang L, *et al*. Optimal energy portfolio allocation method for regulable hydropower plants considering the impact of new energy generation[J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 54(1): 21-33.

[4] Xueran Z, Tongjun J, Yuanyuan S, *et al*. Research on talent training mode of higher vocational colleges based on new energy generation simulation platform[J]. Advances in Vocational and Technical Education, 2022, 4(4): 215-237.

[5] Yilun T, Yucheng W. Virtual DC motor stability control method considering new energy generation fluctuation[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 2113(1): 175-198.

[6] 苏乐, 程静, 王维庆. 光伏并网的宽频振荡问题分析[J]. 电气传动, 2023, 53(9): 72-80.
SU Le, CHENG Jing, WANG Wei-qing. Analysis of broadband oscillation in photovoltaic grid connection[J]. Electrical Drive, 2023, 53(9): 72-80.

[7] 詹智民, 范玉宏, 刘翊枫, 等. 含可再生能源的虚拟电厂参与碳市场交易优化模型[J]. 可再生能源, 2023, 41(9): 1263-1269.
ZHAN Zhi-min, FAN Yu-hong, LIU Yi-feng, *et al*. Optimization model for virtual power plants with renewable energy participation in carbon market trading [J]. Renewable Energy, 2023, 41(9): 1263-1269.

[8] 李民, 杨暑森, 李科锋, 等. 覆雪状态下光伏发电功率预测方法研究[J]. 高压电器, 2023, 59(9): 250-257.
LI Min, YANG Shu-sen, LI Ke-feng, *et al*. Research on photovoltaic power generation forecasting method under snow cover[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(9): 250-257.

[9] 陈坤, 孙开元, 林琳, 等. 计及光伏和电动汽车的多阶段配电网拓展规划[J]. 电气传动, 2023, 53(9): 63-71.
CHEN Kun, SUN Kai-yuan, LIN Lin, *et al*. Multi-Stage distribution network expansion planning considering photovoltaics and electric vehicles[J]. Electric Drive, 2023, 53(9): 63-71.

[10] 欧阳鹏, 茹旭, 郝益, 等. 铁路光伏发展现状及对策建议[J]. 中国铁路, 2023, (9): 90-96.
OUYANG Peng, RU Xu, HAO Yi, *et al*. Current situation and countermeasures of railway photovoltaic development[J]. China Railway, 2023, (9): 90-96.

[11] 文闻, 吴启武, 耿新元, 等. 基于PCE架构的多域光网络安全建路机制[J]. 光通信研究, 2016, (4): 1-4.
WEN Wen, WU Qi-wu, GENG Xin-yuan, *et al*. Multi-Domain optical network security establishment mechanism based on PCE architecture[J]. Optical Communication Research, 2016, (4): 1-4.

[12] 解鹏, 董继军, 郭学让, 等. 基于光纤光栅的OPGW输电杆塔多参数监测[J]. 光学与光电技术, 2023, 21(4): 107-111.
XIE Peng, DONG Ji-jun, GUO Xue-rang, *et al*. Multi-Parameter monitoring of OPGW transmission towers based on fiber bragg grating[J]. Journal of Optics and Optoelectronics, 2023, 21(4): 107-111.

[13] 付泉泳, 赵妍妍, 吴纯模, 等. 基于QoS机制的无源光网络电网数字智能化通信研究[J]. 光学与光电技术, 2023, 21(5): 43-51.
FU Quan-yong, ZHAO Yan-yan, Wu Chun-mo, *et al*. Research on digital intelligent communication of passive optical network electric grid based on QoS Mechanism[J]. Optics and Optoelectronic Technology, 2023, 21(5): 43-51.

[14] 李雁秋, 邱昆, 凌云. 一种在光网络实现流量工程的快捷的路由算法[J]. 光学与光电技术, 2008, (2): 32-35.
LI Yan-qiu, QIU Kun, LING Yun. A fast routing algorithm for traffic engineering in optical networks[J]. Optics

and Optoelectronic Technology, 2008, (2): 32-35.

[15] 韩瑜, 张旭苹. 基于网状光网络的智能实时监测保护系统的研究[J]. 光学与光电技术, 2009, 7(2): 10-14.
HAN Yu, ZHANG Xu-ping. Research on intelligent real-time monitoring and protection system based on meshed optical network[J]. Optics and Optoelectronic Technology, 2009, 7(2): 10-14.

[16] Awais R, Muhammad O, Muhammad R, *et al*. Time-frequency analysis of radon and thoron data using continuous wavelet transform[J]. Physica Scripta, 2023, 98(10): 1452-1461.

[17] Peng Z, Tong M, Xin W, *et al*. Wavelet transform coupled with fischer plots for sequence stratigraphy: A case study in the Linxing Area, Ordos Basin, China[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2023, 231(PA): 1254-1266.

[18] Sogol M, Gregorio I, Ciaran B, *et al*. Assessing the impacts of climate change on precipitation through a hybrid method of machine learning and discrete wavelet transform techniques, Case Study: Cork, ireland[J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2023, 49(1): 135-156.

Research on Carbon Emission Reduction Technology Based on PV and xPON

FANG Bing WANG Shan-li ZHANG Jia-yi

(Hainan Power Grid Co., Ltd., Haikou 570203, China)

Abstract In order to advance the green and low-carbon transformation of energy and establish a novel energy system, this paper proposes an innovative renewable energy system based on the combination of photovoltaic (PV) and passive optical network (xPON) technologies to promote the development of green electricity. Firstly, a system framework is constructed by interconnecting wind turbines and photovoltaic panels. Secondly, by integrating radio over fiber (RoF) and xPON networks, energy data is efficiently transmitted from wind turbines and solar panels to a central control station. Finally, an equivalent PV circuit and wind turbine model are established, and the efficient hybridization of wind and solar energy is achieved by combining convolutional kernel support vector machine with solar panels. Experimental results demonstrate that the system exhibits significant advantages with a scalability of 90% for PV modules, a service quality of 62%, low power consumption at 96%, high network efficiency at 92%, and a training accuracy of 95% in multiple aspects. Therefore, this research not only enhances the efficiency of renewable energy but also optimizes its performance in optical network environments, providing new possibilities for the integration of green energy and communication technologies.

Key words photovoltaic; passive optical network; radio over fiber; vector machine; convolutional kernel function