

基于加权信息差距决策理论及深度学习卷积神经网络之混合模型之智能微电网能源管理应用研究

A Hybrid Model Based on Weighted Information Gap Decision Making and Convolutional Neural Network for Microgrid Energy Management

蔡文昌^{1*}

Wen-Chang Tsai

摘要

微电网系统为近年我国电力科技产业发展重点,微电网主要关键技术主要包含新能源可再生能源发电技术、储能关键技术、智能能量优化调度技术、智能保护控制技术。其是一种新型网络结构,是由分布式电源、负荷、储能系统和控制装置构成的配电网络,能够实现自我控制、保护和管理的系统,既可以与外部电网并网运行,也可以孤立运行。本文讨论了提出一种新型的加权信息差距决策理论,及深度学习卷积神经网络之混合模型,应用于能源管理系统的决策,并使用一微电网基准测试来验证所提出模型的性能。

关键词: 微电网系统、可再生能源发电、新型管理技术

Abstract

Microgrid system has been the focus of the development of China's power science and technology industry in recent years, the key technologies of micro-grid mainly include new energy, renewable energy, energy storage, intelligent optimal energy dispatching and intelligent protection and control. It is a new power network system, which is composed of distributed power supply, load, energy storage system and control device. It can realize to operate in Grid-Connected and Islanded Modes by self-control, protection and management. In this paper, a new hybrid model of weighted information gap decision theory and deep learning convolutional neural network is proposed for decision making of energy management system. Finally, a microgrid benchmark is examined to verify the performance of the proposed model.

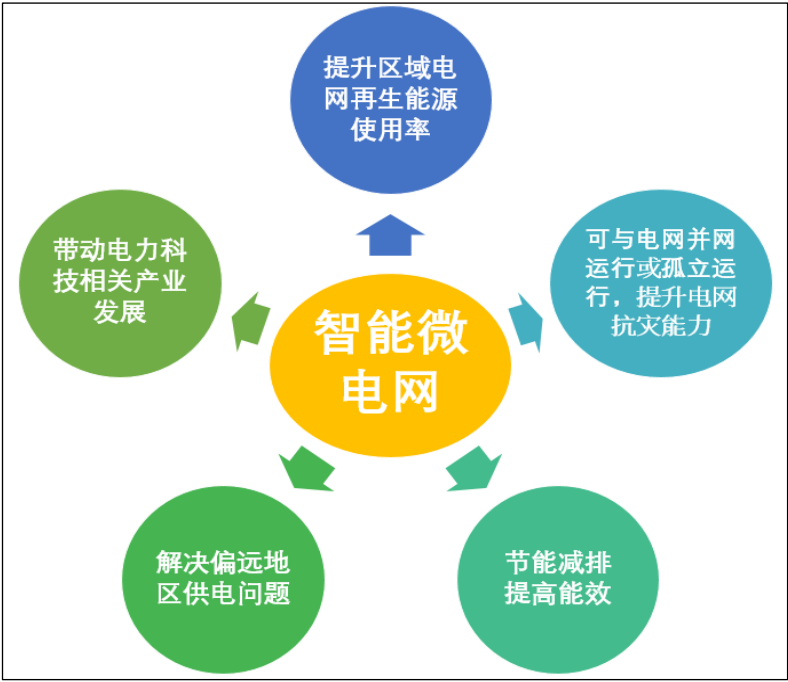
Keywords: Micro-Grid System, Renewable Energy, New Management Technology

1. 前言

智能微电网是规模较小的分散的独立系统,它将分布式电源、储能装置、能量转换装置、相关负荷和监控、保护装置汇集而成的小型发配电系统,是能够实现自我控制、保护和管理的自治系统,其可以与外部电网运行,也可以孤立运行。微网格一直在不断发展,因为它们具有许多优势,例如可减少对环境的影响,提高可靠性以及通过集成微电源而节省大量成本,从而可与可再生能源(RES)集成,这降低了输配电

¹ 厦门大学嘉庚学院机电工程学院教授 douglas@xujc.com*通讯作者

系统的成本（如图 1），因此在电力行业非常有前途（Nehrir 等，2011；Tu & Crow，2015）。微电网可以以两种不同的模式运行：并网和孤岛。在并网模式下，微电网在配电级与公用耦合点（PCC）上的主机电源系统互连，并由主电网提供支持，以提供任何潜在的电力不足或为辅助服务提供过量的电力，在定义的微电网边界内发电；相反，在孤岛模式下，这主要是由于维护上游网络的电能质量问题以及意外故障而引起的，总发电量和负载应始终在本地进行平衡，以保持电压和频率的稳定性。但是，仍然有许多偏远社区由于经济和/或技术障碍，与主电网之间没有任何互连，从而导致以离网模式永久运行（Su 等，2014；Arabali 等，2014；O'Dwyer 等，2017）。有一些挑战应该仔细理解并致力于更好地管理和运营孤立的微电网，包括在短期内根据负荷需求对发电和存储单元进行适当的计划，使用经济调度（ED），机组排程（UC）和最佳电力潮流（OPF）方法确保经济运行，并保持通过紧急情况来保护系统的安全，包括由于间歇性行为而导致发电机组关闭或可再生能源系统掉电（Feng 等，2016），这些挑战通常应该是由微电网控制器来解决。考虑到技术限制和可再生能源系统的不确定性，能源管理系统（EMS）承担着优化分配不同分布式能源（DERs）的责任。因此，开发能源管理系统以应对这些挑战，对于活跃于微电网领域的公用事业和工业具有重要意义。



资料来源：本文自行整理

图 1. 智能微电网发展及需求

微电网能源管理系统：现有文献中有许多关于微电网运行和控制的研究。一个特别突出的例子是 Liu 等（2016）利用神经网络来设计他们的能源管理系统。在这项工作中，完全连接的神经网络与最佳电力潮流方法相结合，以缩短仿真时间。尽管如此，在这项工作中并未考虑发电机组的开/关状态；另一个例子是 Duggal 等（2015）基于机组排程和最佳电力潮流架构设计能源管理系统，用于一个大型微电网，带有多个母线。在本文中，使用分解方法非同时解决了机组排程和最佳电力潮流方法论，以减少计算负担。确实，作者首先假设所有发电机和负载都连接到一个母线上，从而确定机

组排程决策；随后，考虑到这些机组排程决策，他们考虑分别使用最佳电力潮流方法和发电机成本函数进行线性近似，例如 Mao 等（2015）。另一项工作的作者将频率控制结合到能源管理系统中，通过模型预测控制（MPC）来控制可再生能源的间歇性（Hahn 等，2014）。

然而，在 Prakash 等（2017）中，机组排程和最佳电力潮流方法是连接在一起的，因此可以产生准确的结果；同样，在这项工作中使用 MPC 方法来解决可再生能源的不确定性。尽管所提出的模型是混合整数非线性规划问题，但作者证明了将机组排程和最佳电力潮流方法联系起来的重要性。实际上，已经表明分解这些方法以减少计算负担，不仅会导致不切实际的结果，而且还会增加能源储能系统（ESS）的使用。因此，为了产生准确的结果，解决混合整数非线性规划问题尽管面临自身的挑战，可能至关重要。



资料来源：本文自行整理

图 2. 智能微电网架构图

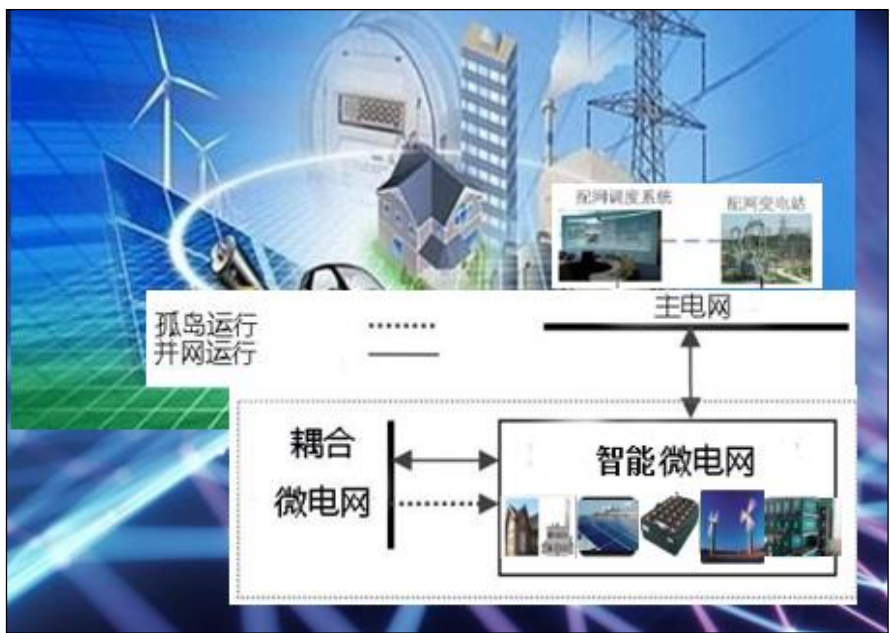
混合整数非线性规划：对系统进行精确建模后，有时必须以非线性或整数变量的形式合并更多的数学复杂性。这种准确的表示方式会导致一个称为混合整数非线性规划的问题，这是最困难的优化类别之一。然而，理论和计算方案之间的差距最近已经大大缩小，导致解决混合整数非线性规划问题的实用性和复杂性大大提高（Ostergaard，2012）。为了对微电网，特别是具有多个母线的微电网的行为进行充分建模，将单元承诺方法与潮流方程联系起来至关重要。换句话说，尽管通过功率流方程最优地确定发电单元应产生多少功率，以满足功率平衡和电网约束（例如电压水平）是很重要的，同样重要的是通过单元承诺问题，同时获取应保持联机状态，关闭电源或打开电源的状态。这可以通过使用最先进的商用求解器（例如 DICOPT（Hahn 等，2014）或 SBB（Sigarchian 等，2015），解决混合整数非线性规划问题来实现。尽管从此类典型的 NP 难题获取全局最优解通常是一项艰巨的任务，但文献表明，对于智能微电网架构中（如图 2）的能源管理系统应用，实践中几乎都需要接近最优（即次优）的解（Prakash 等，2017；Mudasser 等，2015）。

可再生能源系统的不确定性：处理与可再生能源系统相关的不确定性的方法有很多种，通常分为概率方法，例如蒙特卡洛模拟，基于场景的建模（Rahman 等，2014）

和点估计方法 (Moeini-Aghaie 等, 2014), 以及非概率方法, 例如鲁棒优化 (RO) (Zhang 等, 2015)、信息差距决策理论 (IGDT) (Shao 等, 2017) 和 MPC 方法 (Hahn 等, 2014)。尽管概率方法有其自身的优势, 但它们需要有关不确定参数过去行为的统计数据, 并且通常计算耗时。常规信息差距决策理论方法是两阶段编程, 在决策者定义的预设条件下获得最大不确定半径。有了规避风险或寻求风险的策略, 就可以计算出不确定参数的鲁棒性或机会带 (Shao 等, 2017), 本文将对此进行详细说明。

2. 智能微电网架构图

智能微电网的核心操作动作如图 3 所示, 定义如下。智能微电网通过协调可用资源来产生能量, 并与主电网和耦合的微电网进行交互以进行功率传输, 以在正常 (即并网) 运行中提供本地负载。智能微电网与主电网分配网络断开连接, 并通过耦合的微电网传输功率, 以在孤岛运行中提供局部负载。



资料来源：本文自行整理

图 3. 智能微电网的核心操作动作

即使有几篇利用常规信息差距决策理论来管理与可再生能源系统相关的不确定性的论文, 但大多数论文只关注于大型电力系统。此外, 这些论文打算将常规信息差距决策理论 应用于 AC/DC 功率流或机组承诺, 而无需考虑电网约束。例如 Mitchell 等 (2015) 在传输系统中采用常规信息差距决策理论 进行基于最佳电力潮流的研究, 而没有包含单位承诺问题; 另一个例子是 Chen 等 (2017) 研究电力系统中的长期风能规划, 但又没有考虑机组承诺问题。另一方面, 有一些研究仅将常规信息差距决策理论与基于机组排程的模型集成在一起, 例如 Rastegar 等 (2017) 应用常规信息差距决策理论之优点, 来管理由电力系统中风能不确定性引起的偏差, 但这项工作并未考虑最佳电力潮流。因此, 似乎有必要就电力和能源系统中的常规信息差距决策理论进行进一步研究。

3. 深度学习卷积神经网络

神经网络的输入变量描述了一组预测潮流的迭代序列。输出变量呈现分配的目标函数，使预测的运行成本最小化（图 4）。采用预测-校正内点算法进行调度，得到神经网络学习的预测潮流集。最大化使用预测-校正内点算法生成调度结果的概率。通过多次重复优化过程选择全局最小大种群。采用误差传播算法训练多层前馈网络。卷积神经网络可以学习和存储大量的输入输出模型的映像关系，而不需要展示描述这种映像的目标函数方程。隐层神经元的数目与输出误差函数的收敛性能有关。改良卷积神经网络采用局部优化算法，收敛速度快。神经网络训练过程中，加入动量项来更新权值和阈值修正算法，减小振荡趋势，进一步提高收敛性能（Tsai 等，2019）。

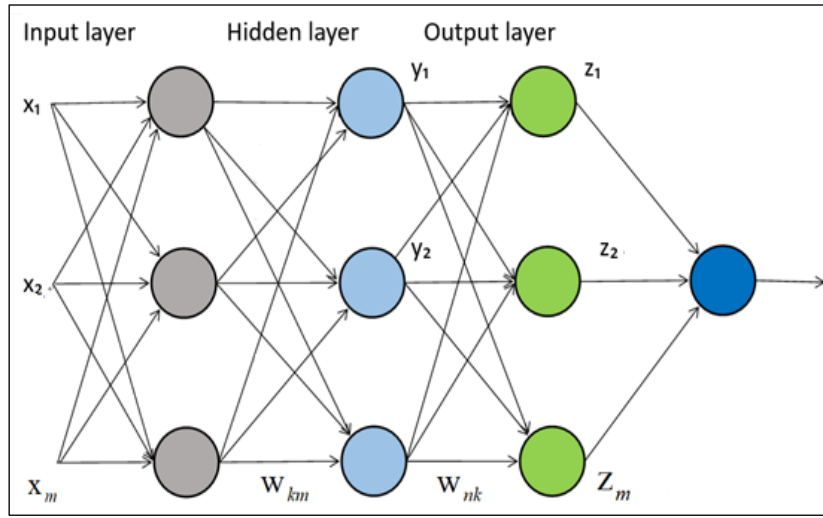


图 4. 卷积神经网络之输入及输出数据

在前向传播过程中，卷积层是 CNN 特征提取的关键步骤

$$O = I * W \quad (1)$$

其中 I 、 O 和 W 分别是输入、输出和权重； n 和 W 是输入和内核的大小，如下所示。在反向传播过程中，权重在更新过程中提供，图 4 是 CNNs 的示意图。

$$\nabla I = \nabla o * W^T \quad (2)$$

$$\nabla w = I^T * \nabla o \quad (3)$$

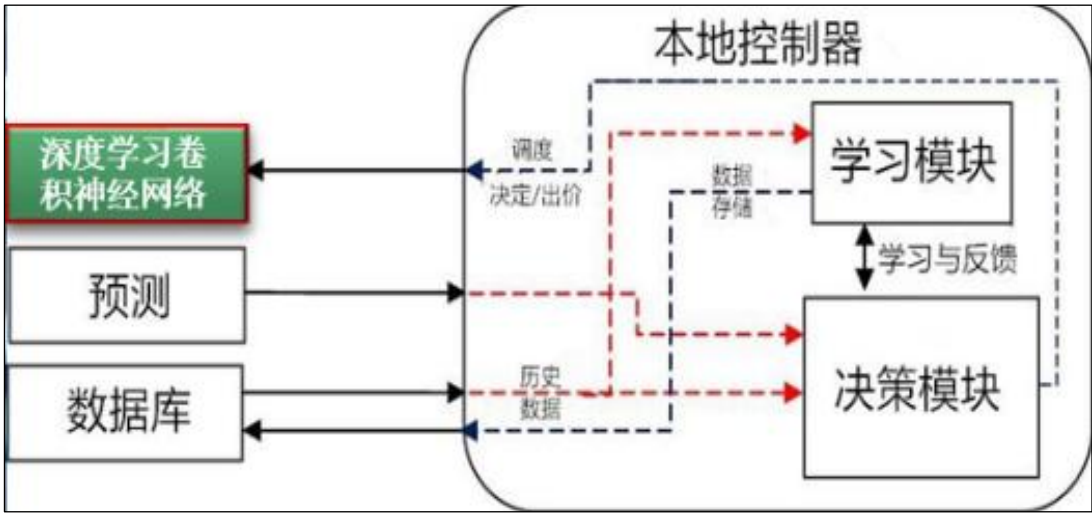
$$W_i = W_i * \lambda \nabla w \quad (4)$$

式中， λ 是学习率。

图 5 所示，在分散控制方案中，管理多阶段操作计划成为一个更具挑战性的问题，因为并非所有代理都可以获取有关系统状态，数据预测和成本函数的所有必要信息。在中提出了一种基于深度学习之 CNN 卷积神经网络的体系结构，其中包括可以实现微电网多阶段操作调度的其他代理。服务代理商向信用证提供预报信息和数据库服务，以便在更广泛的运行范围内更好地管理能源；但是，尚需研究用于处理信息以实现此所需功能的特殊协议和过程。具有服务代理的分布式次级控制的体系结构和 LC 的内部结构如图所示。本文中提出了一种类似的架构，该架构仅考虑了发电侧的投标

和顺序协商过程；从具有较低的满负荷平均成本。

然而，在微电网的情况下，确实存在更多的挑战，因为通常有许多高度可变的能源，导致每天要几次打开/关闭柴油发电机的情况。此外，储能系统通常以微电网提供，这意味着，由于其可调度的性质，应对其进行最佳调度。然而，与散装电力系统中可用的大型发电厂相比，储能系统的容量极小，因此，在那里通常不进行研究。还必须注意的是，微电网不一定限于连接所有发电和消耗组件的单个母线。大而复杂的微电网数量呈指数增长，这也表明需要考虑潮流限制。尽管只有少数几篇关于使用常规信息差距决策理论的微电网的论文，但都没有在 UC-最佳电力潮流链接环境中精确定位常规信息差距决策理论。例如 Dolatabadi 等（2017）提出一种考虑频率安全性要求的能量和频率分级管理系统，使用常规信息差距决策理论，解决了风力和光伏（PV）发电单元的不确定性，但不仅没有研究对能源储存系统（ESS）提出的模型的影响，而且该模型仅限于单总线微电网，而没有包含电力更大的微电网的流量限制。另一个例子是 Mohammadi 等（2017）集中在可靠性要求上，同时考虑了旋转储备，发电和负荷变化。尽管如此，这项工作中的模型仅限于机组承诺，而没有考虑到更复杂的微电网的功率极限。



资料来源：本文自行整理

图 5. 具卷积神经网络之智能微电网决策方块图

在上述所有基于常规信息差距决策理论的研究中，都没有使用链接的机组排程-最佳电力潮流之框架，该框架同时考虑了机组承诺和最佳潮流方程。常规信息差距决策理论仅被应用于基于最佳电力潮流的模型或基于机组排程的研究，而在 Prakash 等（2017）中已表明机组排程和最佳电力潮流，应该链接用于能源管理系统应用。

因此，在本文中，除了链接机组排程和最佳电力潮流问题之外，还提出了一种基于常规信息差距决策理论的新方法，该方法与多周期问题很好地兼容，即加权信息差距决策理论（W-IGDT），可以对单个目标问题到多目标问题。因此，本文的主要贡献可以概括如下：

- （1） 提出一个强大的规避风险的微电网能源管理系统，基于链接的机组承诺-最佳潮流环境，为柴油发电机组和能源储存系统提供最佳调度决策。
- （2） 将常规信息差距决策理论修改为新型的加权信息差距决策理论，以解决由可

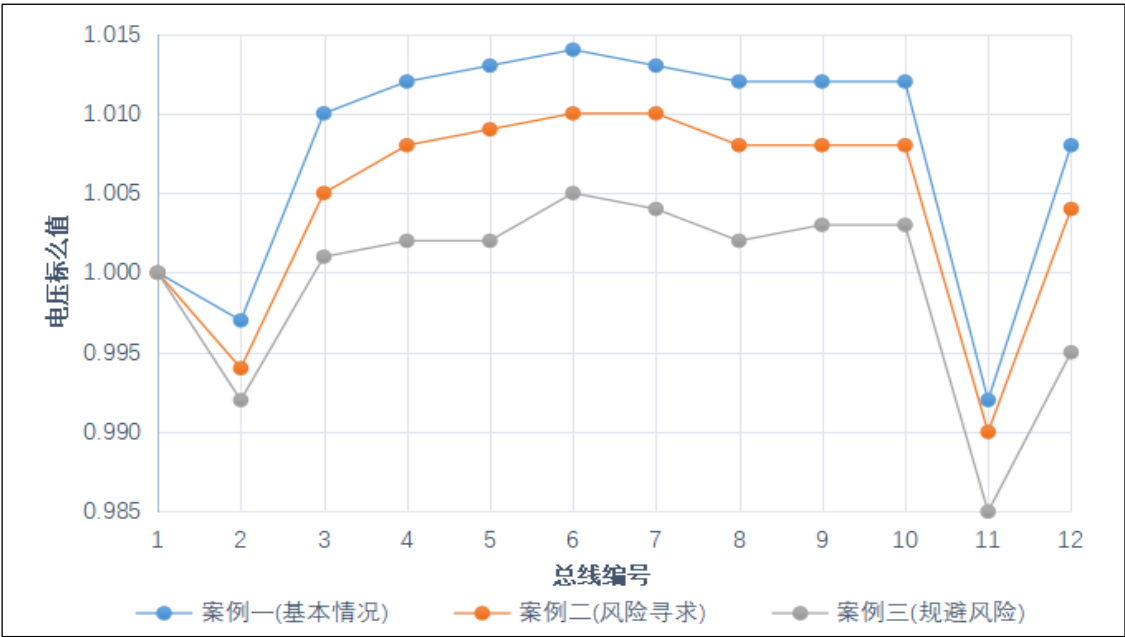
再生能源的间歇性引起的潜在问题。这种修改在更高的操作风险期间带来了更大的稳健性范围，反之亦然。

本文提供从提议的基于加权信息差距决策理论的模型及其原始版本常规信息差距决策理论获得的比较结果，以便评估和验证发现。

4. 结果与讨论

在微电网的背景下，可再生能源的变化仍然是运营商特别关注的问题，特别是在工业领域微电网通常位于远程的应用程序地区，并自主运营。信息差距决策理论是一种用于评估的非概率方法没有可用统计数据的各种风险水平，例如作为不确定参数的概率密度函数。尽管这样的奖励功能，目前的信息鸿沟决策理论无法获得随时间变化的鲁棒性带，这意味着不考虑可再生能源带来的系统风险，短期内每个单独时间间隔的能量注入操作范围。为了克服这个问题，本文提出信息差距决策理论的修改版本，称为加权信息差距决策理论，产生基于风险的时变稳健性频段，而不是与时间无关的频段。本文还提出了一种基于加权信息差距决策理论的能源管理系统，基于链接的机组排程-佳功率流框架，该框架同时合并了发电单位开/关状态以及功率限制进入优化程序。为了说明建议的性能使用能源管理系统，微电网基准测试，结果从以下方面表明基于加权信息差距决策理论之有效性能源管理系统的最佳运行，并解决可再生能源的间歇性能源。

图 6 所示，在 24 小时的时间范围内解决该建议的模型，得出的总成本为人民币 397,250 元，作为基本案例的价值。说明了在基本情况下，加权信息差距决策理论的情况下，峰值负载条件下不同系统总线的电压幅度。第二阶段的结果基于 $\sigma = 15\%$ 。所有系统总线的电压幅度均在可接受的范围内，并且与理想值 1p.u. 的最大偏差为 1.5%，而其微电网能源管理系统三阶段最佳功率分布如表 1 所示。



资料来源：本文自行整理

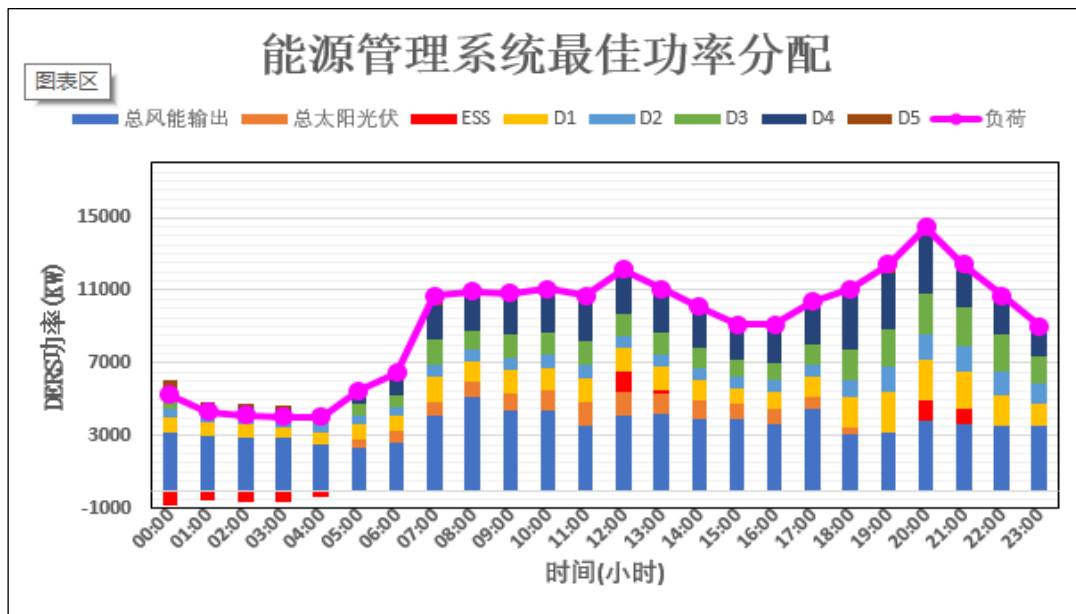
图 6. 不同情况及峰值负载条件下，系统总线的电压幅值

表 1. 微电网能源管理系统三阶段最佳功率分布（单位：千瓦）

阶段	总 PW	总 PV	ESS	D1	D2	D3	D4	D5
1	4,200	1,500	充电	1,000	1,100	1,500	2,500	500
2	4,200	1,500	充电	1,200	900	1,250	2,250	500
3	4,200	1,500	放电	1,000	500	1,000	1,500	300

资料来源：本文自行整理

继续进行风险寻求者策略，可以在图中看到能源管理系统的输出如图 7 所示。机会因子 σ 类似地被认为是 15%，而风险寻求者策略所讨论的权重因子为 $(1-W_{w, kt})$ ，例如，从 $t = 0:00$ 到 $t = 6:00$ ，没有大量的柴油机产生，这大大降低了系统惯性，或者在一天的大部分时间中，已经计划了高水平的风能注入，增加了更大的预测误差的可能性。这可以用以下事实来解释：降低风力涡轮机的额定功率，会导致增加柴油机的功率，这只会增加运行成本。因此，可以发现，风险寻求者策略更适合乐观的决策者，并且可以在永久性的离网运营模式（即隔离的微电网）中增加运营风险。



资料来源：本文自行整理

图 7. 能源管理系统获得寻求风险的最佳功率分配图

5. 结论

本文介绍了一种新颖的管理方法技术，来解决与风力发电相关的严重不确定性，该方法适用于隔离微电网中的能源管理系统应用，并与基于链接单元承诺-最佳功率流框架的微电网能源管理系统集成在一起。加权信息差距决策理论的结果与一般版本的信息差距决策理论进行了比较，以验证发现其中差异，并根据结果得出以下结论：

- (1) 加权信息差距决策理论与多周期模型具有很好的兼容性，因为从该方法获得的时变鲁棒性带与风能穿透水平成正比。

- (2) 可以通过著名的MINLP 解算器DICOPT 有效地解决建议的能源管理系统，尤其是在模型经过松弛过程的情况下。
- (3) 虽然加权信息差距决策理论中的稳健性频带的平均值，可以高于常规信息差距决策理论的健壮性频带的平均值，但总系统损耗却可以略低于从信息差距决策理论获得的健壮性频带。
- (4) 虽然加权信息差距决策理论是一个两阶段的多目标编程问题，但它的计算负担并没有比常规信息差距决策理论的两阶段的单目标编程问题高很多。

加权信息差距决策理论中，解决了常规信息差距决策理论之缺点。对于将来的扩展，本文建议将提出之加权信息差距决策理论纳入大规模的多微电网能源管理问题，尤其是寻求风险的策略，在这种策略中，有可能在市场环境中最大化多个微电网的利润。

参考文献

1. Chen, S., Wei, Z., Sun, G., Cheung, K. W., & Sun, Y. (2017). Multilinear probabilistic energy flow analysis of integrated electrical and natural-gas systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(3), 1970-1979.
2. Dolatabadi, A., Mohammadi-ivatloo, B., Abapour, M., & Tohidi, S. (2017). Optimal stochastic design of wind integrated energy hub. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 13(5), 2379-2388.
3. Duggal, I., & Venkatesh, B. (2015). Short-term scheduling of thermal generators and battery storage with depth of discharge-based cost model. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30(4), 2110-2118.
4. Feng, L., Zhang, J., Li, G., & Zang, B. (2016). Cost reduction of a hybrid energy storage system considering correlation between wind and PV power. *Protection Control Modern Power Systems*, 3, 1-9.
5. Hahn, H., Ganagin, W., Hartmann, K., & Wachendorf, M. (2014). Cost analysis of concepts for a demand-oriented biogas supply for flexible power generation. *Bioresource Technology*, 170, 211-220.
6. Hahn, H., Krautkremer, B., Hartmann, K., & Wachendorf, M. (2014). Review of concepts for a demand-driven biogas supply for flexible power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 383-93.
7. Mao, C., Feng, Y., Wang, X., & Ren, G. (2015). Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion, *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 45, 540-555.
8. Mitchell, P., & Skarvelis-Kazakos, S. (2015). Control of a biogas co-firing CHP as an energy hub,” in *Proc. Int. Universities Power Engineering Conference*, 1-6.
9. Moeini-Aghaie, M., Abbaspour, A., Fotuhi-Firuzabad, M., & Hajipour, E. (2014). A decomposed solution to multiple-energy carriers optimal power flow. *IEEE Transactions on Power Systems*, 29(2), 707-716.
10. Mohammadi, M., Noorollahi, Y., Mohammadi-ivatloo, B., & Yousefi, H. (2017). Energy hub: From a model to a concept-A review. *Renewable Sustain. Energy Reviews*, 80, 1512-1527.
11. Mudasser, M., Yiridoe, E. K., & Corscadden, K. (2015). Cost-benefit analysis of grid-connected wind-biogas hybrid energy production by turbine capacity and site. *Renewable Energy*, 80, 573-582.

12. Nehrir, H., Wang, C., Strunz, K., Aki, H., Ramakumar, R., Bing, J., Miao, Z., & Salameh, Z. (2011). A review of hybrid renewable/alternative energy systems for electric power generation: Configurations, control, and applications, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2(4), 392-403.
13. O'Dwyer, C., Ryan, L., & Flynn, D. (2017). Efficient large-scale energy storage dispatch: Challenges in future high renewables systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(5), 3439-3450.
14. Ostergaard, P. A. (2012). Comparing electricity, heat and biogas storages' impacts on renewable energy integration. *Energy*, 37(1), 255-262.
15. Prakash, M., Sarkar, A., Sarkar, J., Mondal, S. S., & Chakraborty, J. P. (2017). Proposal and design of a new biomass-based syngas production system integrated with combined heat and power generation. *Energy*, 133(15), 986-997.
16. Rahman, M. M., Hasan, M. M., Paatero, J. V., & Lahdelma, R. (2014). Hybrid application of biogas and solar resources to fulfill household energy needs: A potentially viable option in rural areas of developing countries. *Renewable Energy*, 68, 35-45.
17. Rastegar, M., Fotuhi-Firuzabad, M., Zareipour, H., & Moeini-Aghtaieh, M. (2017). A probabilistic energy management scheme for renewable-based residential energy hubs. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(5), 2217-2227.
18. Shao, C., Wang, X., Shahidehpour, M., Wang, X., & Wang, B. (2017). An MILP-based optimal power flow in multicarrier energy systems. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 8(1), 239-248.
19. Sigarchian, S., Paleta, G. R., Malmquist, A., & Pina, A. (2015). Feasibility study of using a biogas engine as backup in a decentralized hybrid (PV/wind/battery) power generation system-Case study Kenya. *Energy*, 90, 1830-1841.
20. Su, W., Wang, J., & Roh, J. (2014). Stochastic energy scheduling in Microgrid with intermittent renewable energy resources. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(4), 1876-1883.
21. Tsai, W. C., He, X., Zhang, L., Wang, Y. M., Xu, S. H., & Chen, D. (2019). Properly learned convolution neural networks and local optimization for optimal power flow. *IEEE International Conference on Architecture, Construction, Environment and Hydraulics*, 22-28.
22. Zhang, X., Shahidehpour, M., Alabdulwahab, A., & Abusorrah, A. (2015). Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy infrastructures. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(5), 2302-2311.

收稿日期: 2021-04-23

责任编辑、校对: 庄斯淇、刘舒霖