

The Technology and Development of Multi-Energy Complementary Energy System Based on the Micro Energy Network

Zhe Chen¹, Feng Tian¹, Xiaojing Lv², Zemin Bo², Yiwu Weng²

¹Electric Power Research Institute, Guangdong Power Grid Co, Ltd., Guangzhou Guangdong

²Power Machinery and Engineering Key Laboratory of Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai

Email: ywweng@sjtu.edu.cn

Received: Dec. 24th, 2017; accepted: Jan. 11th, 2018; published: Jan. 31st, 2018

Abstract

The complementary hybrid micro power network system based on PV and micro gas turbine can improve the absorption rate and reliability of photovoltaic power, and has the advantages of low emission, high efficiency and good fuel adaptability. It has become the best prospect for development distributed power system of the CCHP micro power network. In this paper, the status and the development of micro energy network system based on solar photovoltaic and micro gas turbine at home and abroad are presented, then the challenge and development potentials are analyzed from several aspects including the planning & design of micro energy network system, energy optimization and management and the maintenance and protection. The development direction and key technology of multi-energy hybrid system based on photovoltaic power generation and micro gas turbine are summarized. The results can provide the important reference for this field from theoretical research to practical application.

Keywords

Photovoltaic Power Generation, Micro Gas Turbine, Multi-Energy Complementary, Micro-Energy Network

基于微能源网的多能互补能源系统技术与发展

陈哲¹, 田丰¹, 吕小静², 薄泽民², 翁一武²

¹广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州

²上海交通大学, 动力机械与工程教育部重点实验室, 上海

Email: ywweng@sjtu.edu.cn

文章引用: 陈哲, 田丰, 吕小静, 薄泽民, 翁一武. 基于微能源网的多能互补能源系统技术与发展[J]. 动力系统与控制, 2018, 7(1): 74-84. DOI: 10.12677/dsc.2018.71008

收稿日期：2017年12月24日；录用日期：2018年1月11日；发布日期：2018年1月31日

摘要

光伏发电与微型燃气轮机互补形成混合微能源网系统，不仅能提高光伏发电的消纳率和可靠性，同时具有排放少、效率高及燃料适应性好等优点，已成为冷热电联供微网中最有发展前景的分布式电源系统。本文以国内外的太阳能光伏与燃气轮机微能网系统的发展现状为出发点，分别从微能源网系统在规划设计、能量优化和调度管理、以及维护和保护等方面面临的挑战和发展空间进行剖析，进而梳理出光伏发电与微型燃气轮机组多能互补系统的关键技术未来发展方向，所得结果可为该领域从理论研究到实际应用提供重要的借鉴作用。

关键词

光伏发电，微型燃气轮机，多能互补，微能源网

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球经济的快速发展，能源紧缺和环境问题日趋严重，如何确保能源可持续供应和环境污染的协调发展，已成为目前世界共同关注的热点[1] [2]。

作为新能源接入的一种解决方案，21世纪初学者们提出了微网概念[3] [4] [5]。微网从系统观点出发将负荷、发电设备、储能装置及控制装置等结合，形成一个有序可控的单元，同时把电能和热能提供给用户。微电源是微网中的主要电源，即带电力电子界面的小型机组，包括风力发电机、光伏电池、微型燃气轮机、燃料电池等。微网不仅可以与公共电网相连并网运行，也可在大电网发生故障或需要时与公共电网断开单独运行[5]。其中，光伏发电以资源丰富、分布广泛、清洁等特点成为最具开发潜力的可再生能源之一，由于光伏发电具有明显间歇性，输出功率受天气变化影响大，为了提高光伏发电的可靠性，减小并网时在大电网的影响，需要加入可控微源(如微型燃气轮机等)与光伏发电互补形成混合微网，能提高光伏发电的可靠性和消纳率。在可控微源中，微型燃气轮机发电能同时供应冷热电负荷，具有排放少、效率高及燃料适应性好等优点，已成为冷热电联供微网中最有发展前景的分布式电源，因此对太阳能光伏与微型燃气轮机组成的混合微网系统的发展现状和关键技术进行剖析具有重要的指导意义[2] [6] [7]。

目前，美国、欧盟、日本等发达国家以及我国在太阳能光伏与微型燃气轮机多能互补系统方面的理论模型建立与求解[8] [9] [10]、运行特性与控制[11] [12] [13]、智能优化策略与负荷预测[14] [15] [16]、运行管理以及工程示范[17] [18] [19]等方面进行了很多研究，但取得的研究成果大多集中在微能源网中单个发电单元方面，如太阳能光伏发电技术、天然气分布式发电、冷热电联供技术、储能和储电等，对于多能互补微能网系统的整体规划设计以及运行关键技术等方面的发展还很欠缺，在微能源网系统综合建模、机理分析、能量优化和调度管理等方面面临着巨大的挑战[6] [7] [20]，制约了太阳能/天然气互补分布式供能微能源网的成功示范以及大规模商业化应用。

本文以国内外的太阳能光伏与燃气轮机微能网系统的发展现状为出发点，分别从微能源网系统在规

划设计、能量优化和调度管理、以及维护和保护等方面面临的挑战和发展空间进行剖析,最后梳理出光伏发电与微型燃气轮机多能互补系统的关键技术未来发展方向,所得结果可为该领域从理论研究到实际应用提供重要的借鉴作用。

2. 多能互补微能源系统技术

2.1. 系统集成规划设计技术

基于微能源网的光伏发电与微型燃气轮机多能互补系统相对于传统电网而言,其复杂程度和不确定性都大大增加。

1) 在微能源系统的确定性分析[21] [22] [23]和不确定性分析[24] [25] [26] [27]方面。确定性分析主要是指微电网规划设计中所涉及到的风、光等资源情况与负荷需求等信息来源于历史记录数据。不确定性分析主要是基于概率统计理论对可再生能源与负荷的变化特性进行建模。微能源系统中的太阳光具有间歇性和随机性,可用性取决于自然条件、气候、环境等多种因素,同时用户冷热电负荷受到用户类型、工作(生活)习性、春夏秋冬和日夜的影响很大,存在着大量的不确定性。如图1所示,不同月份微能源系统中负荷分布受外界环境条件影响。

2) 在系统规划设计方面,包括了:综合建模和优化设计两方面。

在综合建模方面,光伏发电和微型燃气轮机组成的多能互补的微能源网系统的各个子系统的动态特性时间尺度相差悬殊,在同一个时间尺度下进行仿真分析和协调控制难度较大,难以建立统一精度数学模型。在多能互补微能源网系统中,燃气轮机发电系统具有惯性延迟动态特性,蒸汽机发电延迟惯性更明显,需用非线性微分方程来描述,并且涉及启动、运行、扰动等动态环节[28]。电力网络功率瞬间平衡,其动态需由微分-代数方程描述。其他发电设备的动态特性,冷热的转换过程最为缓慢,通常以分、时来表述动态过程[29]。这样导致热、电等各能源子系统动态过程的时间尺度相差悬殊,在同一个时间尺度下进行仿真分析和协调控制难度较大。这些多能互补微能网系统中的子系统非线性、强耦合动态复杂过程,在统一框架下若均采用精确模型进行详细仿真建模是一个非常耗时的过程,且计算精度也无法有效保证。

在规划设计的优化方面,文献[30] [31]研究了规划设计软件 PDMG,针对分布式发电多种应用场景,

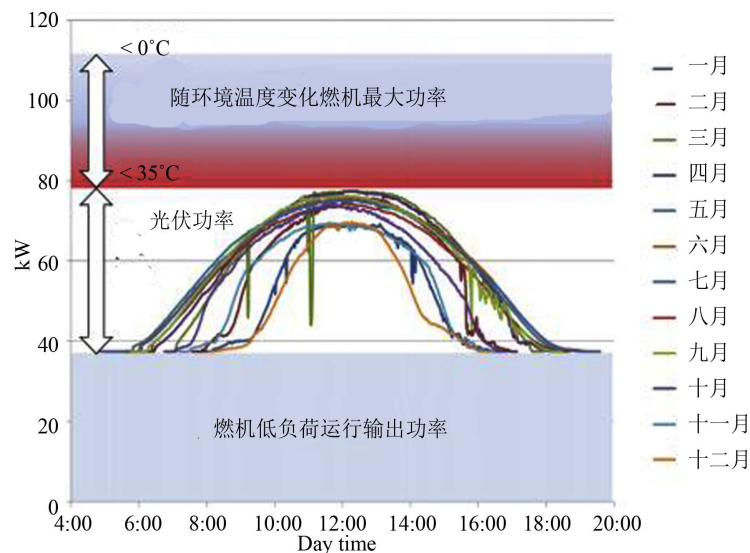


Figure 1. Load distribution of micro energy power system

图 1. 微能源系统中负荷分布情况

实现了间歇性数据分析、分布式电源规划设计、储能系统规划设计等功能，可以按场景自动生成目标曲线、逆变器结构设计、混合储能设计。文献[32]研究了基于牛顿-拉夫逊法的微网潮流计算方法，得出了微网适合的接入容量、对配网的渗透率、接入配网的电压等级及推荐采用的接线模式，考虑分布式电源负荷变化的微网规划方法。美国 National Renewable Energy Laboratory 开发的 HOMER，以微电网全寿命周期成本最低为优化目标，利用枚举法可确定微电网中分布式电源的最优容量配置[33]。文献[34]针对多分布式电源低渗透率并网的规划问题，构建了分布式电源投资和运行成本、系统有功网损和负荷节点电压偏移均最小的优化目标函数，提出了集成实数编码量子遗传算法和多目标优化策略的多目标混沌量子遗传算法。Eugenia D.Mehleri 等[35]人研究含光伏阵列的分布式热电联产系统规划设计问题，并且还包括了热管网的优化设计，以算例验证模型的正确性。Afzal S.Siddiqui 等[36]人研究以最小化微电网费用为目标，将微电网与热电联产机优化配置，引进碳排放费用，结果表明微网技术能缓解气候变化的潜在效益。翁一武等[37][38]人研究了天然气燃气轮机分布式供能与太阳能光伏互补系统，可再生能源就地消纳，大大提高了分布式供能系统的效率，见图 2。

3) 在系统集成方面，分布式冷热电联供集成遵循科学用能的原理是通过“分配得当、各得所需、温度对口、梯级利用”的方式来优化配置资源，提高综合能源利用效率。中科院金红光院士[39]对多能源互补的分布式冷热电联产系统理论与方法进行总结和研究，该研究建立了能的综合梯级利用理论，在化石燃料与太阳能热化学互补等核心技术方面取得突出进展。刘浩、隋军[40]等多能互补与余热梯级利用的冷热电联产系统集成开展研究，并探讨了每项单元技术的创新对整个系统的节能率的影响。蒋润花、杨晓西[41]对内燃机冷热电联供系统各单元设备中可用能的利用状况进行研究，并探悉了冷热电联供系统正逆耦合循环和吸收式除湿逆循环间耦合机理。

综上所述，当前研究提出的规划设计方案优化目标不够灵活、全面，大多缺乏网络建模；缺乏对电网、系统元件的可靠性建模。分布式供能系统优势体现在技术、经济、环保、社会等多方面，需从可

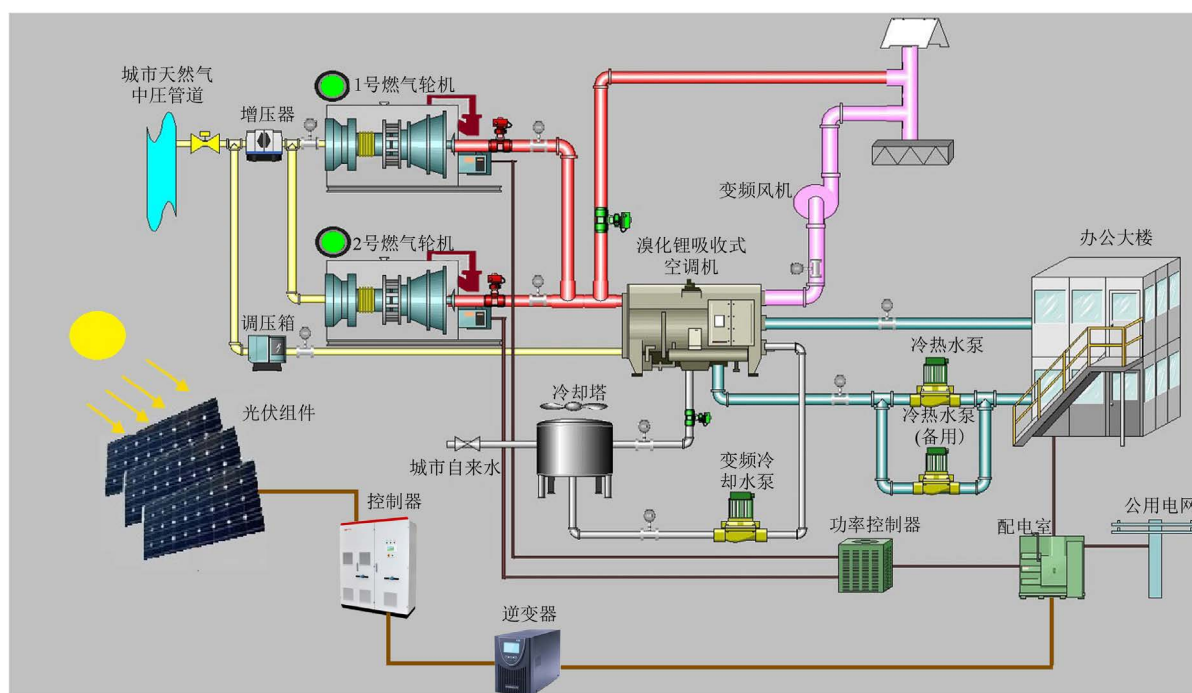


Figure 2. Energy power system combined gas turbine with PV

图 2. 天然气燃气轮机与光伏互补能源系统

靠性、全寿命周期内成本、能源利用效率、污染物及温室气体排放水平、化石燃料消耗等多个方面评价，因此系统规划不仅要确定最优的容量配置，还需要确定最优的网络结构及分布式能源位置，进行综合评价网络综合规划设计。

2.2. 能量管理与控制技术

随着新能源以及智能负荷渗透率的增加，对能源系统的调度与能量管理带来了一系列挑战。

1) 互补系统的能量管理。光伏发电与微型燃气轮机多能互补系统的能量管理要求考虑环境目标、安全目标及其组合，最大限度实现可再生能源利用率以及分布式供能系统运行经济性。分布式供能系统能量管理系统规模较小，通过管理电源及负荷运行状况，对分布式发电可控、储能进行有功无功指令，最终是实现能源最佳利用并且使系统长期经济可靠运行[27] [34]。图3为某分布式供能系统的能量管理结构拓扑图，通过控制器实时调控可以实现分布式能源的高效稳定利用。长期更多是考虑经济性和安全性，考虑环境影响以及发电成本、系统内的可控负荷和大电网的信息等方面的内容。对于短期能量管理，就要在分甚至是秒的时间段，包括系统内的频率调节、分布式电源和储能设备，响应速度相对来说快很多。主要功能包括负荷预测、大电网能量交换、分布式电源机组出力和负荷的需求侧响应等等[7] [16]。W. G. Colella [42]针对燃料电池冷热电联供系统，构建了热管理子系统实现联供系统热能的综合管理，优化组合系统中的不同换热器，系统的一次能源利用率达到最大。

2) 能量管理系统的分层。多能互补供能系统能量管理系统分成了三层：优化层、管理层和设备层三个逻辑层次[5] [20]。设备层是属于系统的各个单个设备控制部分，比如说微型燃气轮机接受上级控制指令，还有其他的比如说光伏的逆变器等接受上级的控制指令，我们都把它作为设备层。设备层是各个设备自己控制自己。管理层是整个系统网络层，比如控制器、测控装置。优化层面实际上是最上面一层，

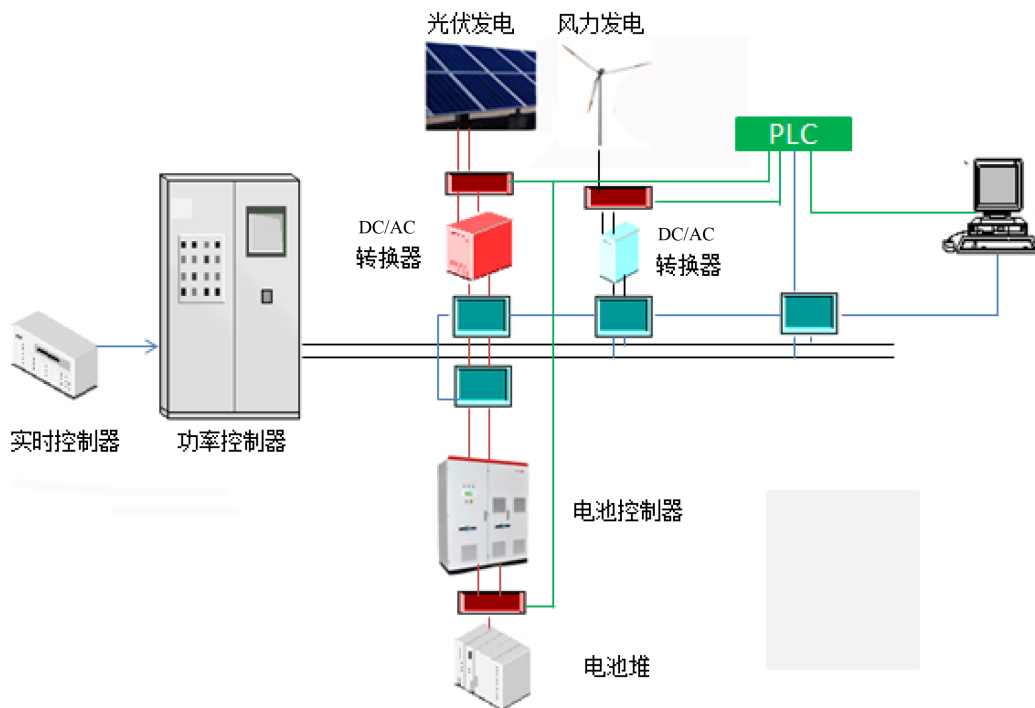


Figure 3. The topology structure of energy management for distributed power system

图3. 分布式供能系统的能量管理结构拓扑图

包括系统及部件基本模型, 可再生能源的发电预测, 包括负荷预测。以及分布式电源的控制策略。最终执行就是靠分布式能源的控制策略和最上层的能量优化调度方法。设备层这一部分时间响应速度很快, 毫秒级到秒级响应; 优化层这一部分响应时间更长, 比如小时级。如图 4 所示, 分布式供能系统能量管理系统由就地控制层、微网集中控制层和配电网调度层构成。国外学者 Rodriguez-Hidalgo 等[43]提出了一种用于商业建筑的区域冷热联供系统并对其系统配置进行了优化控制, 结果表明由太阳能转化的热能及内燃机废热驱动的吸收式制冷使得建筑的电力需求明显减少, 避免了内燃机过载运行。顾伟等人研究了包括光伏、风电的热电联供型微电网的优化运行问题, 考虑了电负荷的不确定性因素对系统的优化运行的影响, 采用机会约束规划方法处理负荷不确定性[44] [45]。TaherNiknam 等[46]人提出了一种新型的多目标模糊自适应混合粒子群优化算法(MFSAHPSO), 以燃料电池为分布式电源, 该 MOOM 问题的目的是减少总的电能损失, 总电能成本和燃料电池和变电站母线产生的污染物总量。Piperagkas G.S.等[47]人采用粒子群优化算法求解含风力发电的热电联供系统的优化运行问题, 该模型中考虑了风力发电以及负荷的随机性, 并以运行费用最小和污染气体排放量最小为多目标的运行优化问题。陈洁等[48]人研究了含多种分布式发电单元的微电网多目标优化调度问题, 其中包括风力发电、微型燃气轮机、燃料电池、光伏电池和储能电池分布式电源, 并采用遗传算法求解该问题。

3) 控制模式。多能互补供能系统能量管理系统主要有集中调度和分散控制两种模式。集中调度模式由上层中央能量管理系统和底层分布式电源、负荷等就地设备控制器组成, 两层之间要求双向通讯。上层中央能量管理系统还可与电网调度系统之间实现信息交互, 基于市场价格信息、分布式供能系统内间歇性电源出力预测、负荷预测结果等, 按照不同优化运行目标和约束条件, 融合需求侧响应, 实时制定优化运行策略, 并向底层设备控制器下达控制指令, 如图 5 所示。当采取分散控制模式时, 分布式供能系统内能量优化任务主要由分散的设备层控制器完成, 每个设备层控制器的主要功能并不是最大化该设

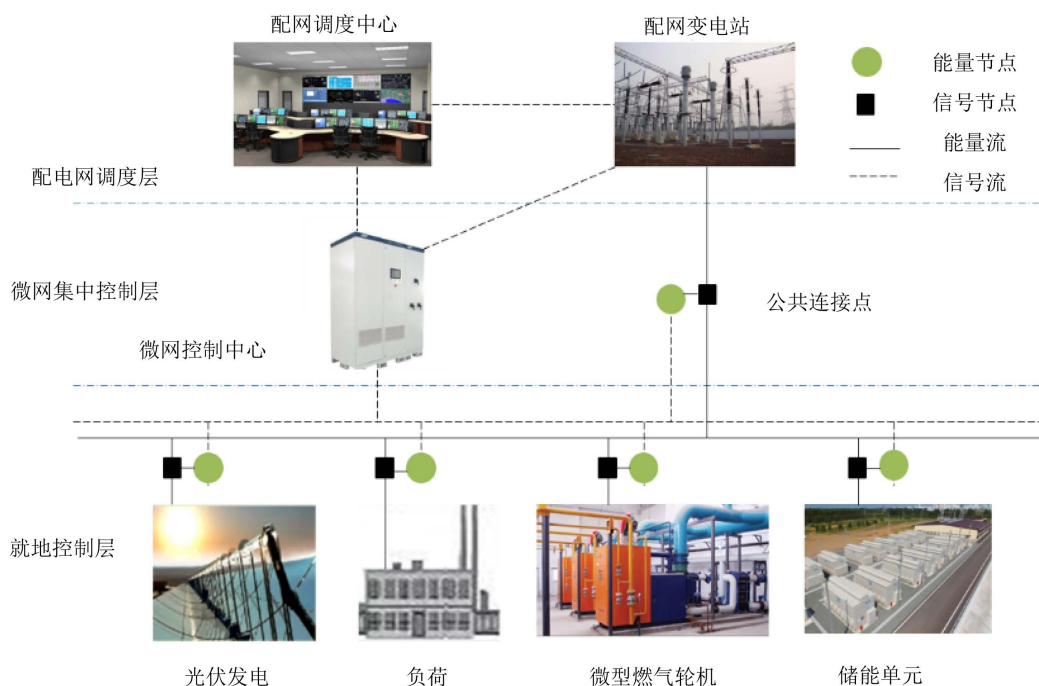


Figure 4. Diagram of energy management system for distributed power system

图 4. 分布式供能系统能量管理系统示意图

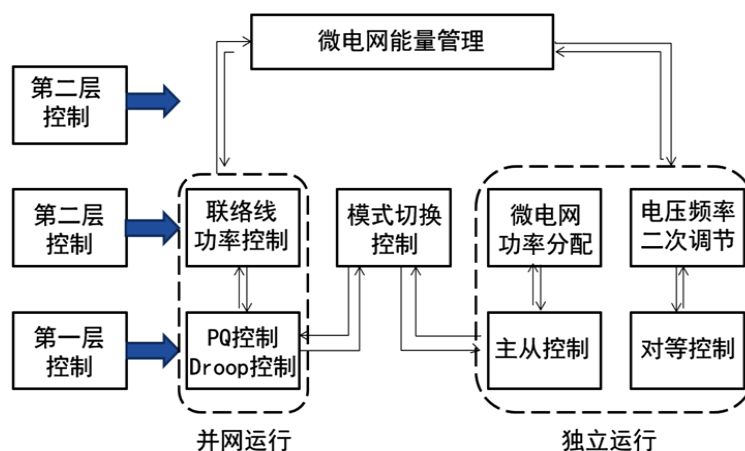


Figure 5. Diagram of hierarchical control strategy for Multi-energy complementary energy micro network

图 5. 多能互补微能源网分层控制示意图

备的使用效率，而是与系统内其他设备协同工作，以提高整个系统效能。Murai 等[49]为基于电驱动式热泵的区域冷热联供站提出了一种以运行成本为优化目标的运行控制策略。Ono 等[50]为了提高区域系统联供站的能源利用率，对供能端设备的优化运行进行了仿真，包括管道阻力优化、制冷机组及储能系统的优化运行。张万坤等[51]建立了基于燃气轮机与吸收式制冷机组的冷热电联供系统优化模型，以运行费用最低作为优化目标，得出了联供系统在不同工况下的最优化控制策略。

基本控制包括常用的 PQ 控制、VF 控制和下垂控制[11] [12] [13]。PQ 控制任何分布式电源都是常用的控制，VF 控制也是储能或者主电源单元采用的 VF 控制。这两种控制方式在微电网中用了很多，但如果微电网发展到未来发展应该要考虑灵活性，特别是即插即用，微电源或者负载可以任意增加和减少。如图 6 所示，采用多能互补系统负荷配置策略可以灵活调控光伏和微燃机输出功率。

2.3. 监测与保护技术

微能源网中多个分布式电源及储能装置的接入，彻底改变了配电系统故障的特征，使故障后电气量的变化变得十分复杂，传统的保护原理和故障检测方法将受到很大影响，可能导致无法准确的判断故障的位置。同时由于分布式电源、电力电子设备以及非线性负荷，会引起电压波动、过电压、欠电压以及电力谐波等诸多电能质量问题，对电网的安全稳定运行造成不利影响[52] [53] [54] [55] [56]。

1) 在多能互补能源系统监测研究方面。文献[52]对 Hilbert-Huang Transform (HHT)方法进行了研究，并利用 HHT 方法检测微网电能质量，针对 Empirical Mode Decomposition (EMD)分解过程中存在的端点飞翼问题及模态混淆问题，提出了相应的改进方法，加强了 HHT 的分析效果。仿真结果表明，改进后的 HHT 方法能够有效地检测出微电网中电压波动、电力谐波等电能质量问题。文献[53]针对现阶段分布式供能系统电能质量实时监测和综合评估系统软件缺失的问题，文献提出了一种基于改进的层次分析法(AHP)和灰色理论相结合的微网电能质量综合评估方法，通过 LabVIEW 平台开发了一套可实现电能质量实时监测、合理评估和综合管理的智能系统。文献[54]构建多目标配网重构模型，该模型充分考虑了风电出力、光伏发电以及负荷的不确定性，并且同时优化配网的 3 个重要评估指标：有功损耗、节点最小电压值、负荷均衡度。结果表明：所用算法能够快速找到多目标配网重构模型的决策解，具有较高的搜索效率，验证了在消纳分布式电源的情况下，通过网络重构能够明显改善网络的各项指标。

2) 在能源系统自身的保护研究方面。分布式供能系统自身的保护研究是另一个重要的研究方面。通

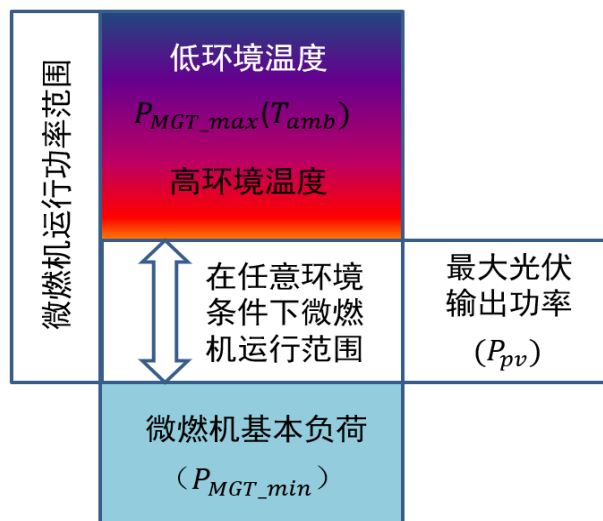


Figure 6. PV-MGT System load configuration strategy

图 6. 光伏与微燃机多能互补系统负荷配置策略

常情况下从相互关系和逻辑层次分，分布式供能系统自身保护可分为公共连接点(PCC 点)保护、内部干/支线保护和微源保护。文献[55]以此为原则，提出了分级保护的概念，根据保护区域重要程度不同，配置相应的保护策略。国内外此方面的保护研究也主要集中在上述三块保护的配置和保护协调上。不同类型的电源提供潮流的能力与其控制策略有关，这样的分布式供能系统内部结构决定了双向潮流特性，传统保护中的选择性原则在分布式供能系统保护中较难满足。尤其对于光电这些输出功率具有较大波动性的电源，不能通过配备储能装置的方法使这类电源根据负荷需求调整发电量，因为这样需要配备较大容量的储能装置，这会大大降低系统的经济性，因此这类分布式电源在微网设计时一般会满足此类电源“即插即用”的特点。这就加剧了系统中潮流流动的不确定性。因此，在设计保护方法时应尽可能做到不受潮流的影响。

分布式供能系统在运行方式上最大的特点表现为既可以并网运行又可以孤网独立运行。这种特性要求保护方式在这两种状态下都能够正常发挥作用，这给系统保护的设计带来了新的挑战，孤岛运行条件下，短路电流由 DG 提供，基于逆变器的 DG 无法提供足够大的短路电流。并网条件下，短路电流可通过迭加定理来分析，电网能提供很大的短路电流，逆变器 DG 提供的短路电流只占短路电流很小的一部分。其中前者可通过不同运行方式下故障电流的计算来整定，相对较容易实现，但是因限制条件的加入使得保护变得复杂。后者可以通过一套保护作用于不同的运行方式，但是对保护适应性的要求比较高[56]。

此外，分布式供能系统的结构复杂，其多电源结构使得其故障的判断较为复杂，有时需要利用多点的信息，这时为了确保故障能够及时地切除，基于通信的保护是必不可少的。

3. 总结

能源供给模式由集中式向分布式转型是未来发展趋势，也是实现能源系统转型的必由之路。预计在 2050 年，分布式能源将普遍存在，太阳能光伏发电与微型燃气轮机组成的多能互补微能源系统将成为能源供给的主要力量之一。综上所述，目前针对微电网规划设计的研究已有很多，但仍有许多关键技术还需继续深入和系统化研究。光伏发电与燃气轮机多能互补微能源系统无论是联网型微网还是独立型微网，由于其电源构成、结构方式、运行模式等与常规电网都有很大的不同，这使其在规划与设计、保护与控制、运行优化与能量管理、仿真分析等方面均有独特的特点，因此需要采用专有的方法或技术加以解决。

基金项目

国家自然科学基金(51376123)和国家 863 高技术项目(2014AA052803)资助。

参考文献 (References)

- [1] Energy Information Administration. World Consumption of Primary Energy by Selected Country Groups (BTU). In EIA: 2001.
- [2] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 中国电力出版社, 2015.
- [3] Lasseter, R.H. and Paigi, P. (2004) Microgrid: A Conceptual Solution. *Power Electronics Specialists Conference, PESC, IEEE 35th Annual*, **6**, 4285-4290.
- [4] Hatzigiorgiou, N., Asano, H., Iravani, R., *et al.* (2007) Microgrids. *Power and Energy Magazine, IEEE*, **5**, 78-94. <https://doi.org/10.1109/MPAE.2007.376583>
- [5] Lasseter, R.H., Akhil, A., Marnay, C., *et al.* (2002) The CERTS Microgrid Concept. Office of Power Technologies, US Department of Energy.
- [6] 王成山, 王守相. 分布式发电供能系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 1-4.
- [7] 邓浩, 周念成. 光伏与微型燃气轮机混合微网建模及控制策略研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2011.
- [8] Degobert, Ph., Kreuawan, S. and Guillaud, X. (2006) Use of Super Capacitors to Reduce the fast Fluctuations of Power of a Hybrid System Composed of Photovoltaic and Microturbine. *International Symposium on Power Electronics*, 1223-1227.
- [9] Kong, L.Z., Tang, X.S. and Qi, Z.P. (2009) Study on Modified EMAP Model and Its Application in Collaborative Operation of Hybrid Distributed Power Generation System. *Proceedings of 1st International Conference on Sustainable Power Generation and Supply*, Nanjing, 1-7.
- [10] Kim, S.K., Kim, E.S. and Ahn, J.B. (2006) Modeling and Control of a Grid-Connected Wind/PV Hybrid Generation System. *Proceedings of IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, Dallas, Vol. 5, 1202-1207. <https://doi.org/10.1109/TDC.2006.1668676>
- [11] 周德佳, 赵争鸣, 袁立强, 等. 300k W 光伏并网系统优化控制与稳定性分析[J]. 电工技术学报, 2008, 23(11): 116-122.
- [12] Lai, L.-S., Hou, W.-C., Feng, Y.-T., *et al.* (2008) Novel Grid-Connected Photovoltaic Generation System. *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, 2536-2541.
- [13] 计长安, 张秀彬, 赵兴勇, 等. 基于模糊控制的风光互补能源系统[J]. 电工技术学报, 2007, 22(10): 178-184.
- [14] Hussein, K.H., Muta, I., Hoshino, T., *et al.* (1995) Maximum Photovoltaic Power Tracking: An Algorithm for Rapidly Changing Atmospheric Conditions. *IEE Proceedings on Generation Transmission and Distribution*, **142**, 59-64. <https://doi.org/10.1049/ip-gtd:19951577>
- [15] Kim, S.K., Jeon, J.H., Cho, C.H., *et al.* (2009) Modeling and Simulation of a Grid-Connected PV Generation System for Electromagnetic Transient Analysis. *Solar Energy*, **83**, 664-678. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.020>
- [16] Lu, N. (2012) An Evaluation of the HVAC Load Potential for Providing Load Balancing Service. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **3**, 1263-1270. <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2183649>
- [17] Khoa, T.Q.D., Binh, P.T.T. and Tran, H.B. (2006) Optimizing Location and Sizing of Distributed Generation in Distribution Systems. *Power Systems Conference and Exposition*, Atlanta, 29 October-1 November 2006, 725-732.
- [18] Kalantar, M. and Mousavi, G.S.M. (2010) Dynamic Behavior of a Stand-Alone Hybrid Power Generation System of Wind Turbine, Microturbine, Solar Array and Battery Storage. *Applied Energy*, **87**, 3051-3064. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.02.019>
- [19] Heffner, G.C., Goldman, C.A. and Moezzi, M.M. (2006) Innovative Approaches to Verifying Demand Response of Water Heater Load Control. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **21**, 388-397. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2005.852374>
- [20] Wang, C. and Nehrir, M.H. (2008) Power Management of a Stand-Alone Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Energy System. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **23**, 957-967. <https://doi.org/10.1109/TEC.2007.914200>
- [21] Moradi, M.H., Eskandari, M. and Showkati, H. (2014) A Hybrid Method for Simultaneous Optimization of DG Capacity and Operational Strategy in Microgrids Utilizing Renewable Energy Resources. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, **56**, 241-258. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.11.012>
- [22] Xu, L., Ruan, X., Mao, C., *et al.* (2013) An Improved Optimal Sizing Method for Wind-Solar-Battery Hybrid Power

- System. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, **4**, 744-785.
- [23] Kamjoo, A., Maheri, A. and Putrus, G.A. (2014) Chance Constrained Programming using Non-Gaussian Joint Distribution Function in Design of Standalone Hybrid Renewable Energy Systems. *Energy*, **66**, 677-688. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.01.027>
- [24] Giannakoudis, G., Papadopoulos, A.I., Seferlis, P., *et al.* (2010) Optimum Design and Operation under Uncertainty of Power Systems using Renewable Energy Sources and Hydrogen Storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, **35**, 872-891. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.11.044>
- [25] Arun, P., Banerjee, R. and Bandyopadhyay, S. (2009) Optimum Sizing of Photovoltaic Battery Systems Incorporating Uncertainty through Design Space Approach. *Solar Energy*, **83**, 1013-1025. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.01.003>
- [26] Bahramirad, S., Reder, W. and Khodaei, A. (2012) Reliability-Constrained Optimal Sizing of Energy Storage System in a Microgrid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **3**, 2056-2062. <https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2217991>
- [27] 汪海瑛, 白晓民, 许婧. 考虑风光储协调运行的可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2012, 2(13): 13-20.
- [28] Saravanamuttoo, H.I.H., Rogers, G.F.C. and Cohen, H. (2001) Gas Turbine Theory. 5th Edition, Longman, London.
- [29] Garcia, H.E., Mohanty, A., Lin, W.C., *et al.* (2013) Dynamic Analysis of Hybrid Energy Systems under Flexible Operation and Variable Renewable Generation—Part I: Dynamic Performance Analysis. *Energy*, **52**, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.01.022>
- [30] 肖峻, 白临泉, 王成山, 等. 微网规划设计方法与软件[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 149-157.
- [31] 翁一武. 冷热电联供系统的应用分析[C]//长三角清洁能源论坛论文专辑. 北京: 中国工程院, 2005: 2.
- [32] 郭贤. 分布式电源及典型微网的规划方法研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [33] Lambert, T., Gilman, P. and Lilienthal, P. Micropower System Modeling with HOMER. <http://www.mistayaca/homer/MicropowerSystemModelingWithHOMER>
- [34] 王瑞琪, 张承慧. 分布式发电与微网系统多目标优化设计与协调控制研究[D]: [博士学位论文]. 济南: 山东大学, 2013.
- [35] Mehleri, E.D., Sarimveis, H., Nikolaos, C., *et al.* (2012) Papageorgiou. A Mathematical Programming Approach for Optimal Design of Distributed Energy Systems at the Neighbourhood Level. *Energy*, **44**, 96-104. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.009>
- [36] Siddiqui, A.S., Marnay, C., Edwards, J.L., *et al.* (2005) Effects of Carbon Tax on Microgrid Combined Heat and Power Adoption. *Journal of Energy*, **131**, 2-25. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9402\(2005\)131:1\(2\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9402(2005)131:1(2))
- [37] 陈哲, 田丰, 吕小静, 翁一武. 燃气轮机与可再生能源互补的分布式供能[J]. 自然杂志, 2017, 39(1): 48-53.
- [38] 翁史烈, 翁一武, 苏明. 燃气轮机分布式供能系统的特点和应用[J]. 航空发动机, 2006(1): 9-12.
- [39] 金红光, 隋军, 徐聪, 郑丹星, 史琳. 多能源互补的分布式冷热电联产系统理论与方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3150-3160.
- [40] 刘浩, 隋军. 多能互补与余热税级利用的冷热电联产系统集成[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [41] 蒋润花, 杨晓西. 冷热电联供系统集成机理研究及全工况性能优化[D]: [博士学位论文]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [42] Colella, W.G. (2003) Modelling Results for the Thermal Management Sub-System of a Combined Heat and Power (CHP) Fuel Cell System (FCS). *Journal of Power Sources*, **118**, 129-149. [https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(03\)00071-5](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(03)00071-5)
- [43] Rodriguez-Aumente, P.A., Rodriguez-Hidalgo, M.D.C., Nogueira, J.I., *et al.* (2013) District Heating and Cooling for Business Buildings in Madrid. *Applied Thermal Engineering*, **50**, 1496-1503. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.11.036>
- [44] Gu, W., Wu, Z., Bo, R., *et al.* (2014) Modeling, Planning and Optimal Energy Management of Combined Cooling, Heating and Power Microgrid: A Review. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, **54**, 26-37. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.06.028>
- [45] Sakawa, M., Kato, K. and Ushiro, S. (2002) Operational Planning of District Heating and Cooling Plants through Genetic Algorithms for Mixed 0-1 Linear Programming. *European Journal of Operational Research*, **137**, 677-687. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00095-9](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00095-9)
- [46] Niknam, T., Meymand, H.Z. and Mojarrad, H.D. (2010) A Practical Multi-Objective PSO Algorithm for Optimal Operation Management of Distribution Network with Regard to Fuel Cell Power Plants. *Renewable Energy*, **36**,

1529-1544.

- [47] Piperagkas, G.S., Anastasiadis, A.G. and Hatziargyriou, N.D. (2011) Stochastic PSO-Based Heat and Power Dispatch under Environmental Constraints Incorporating CHP and Wind Power Units. *Electric Power Systems Research*, **81**, 209-218. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2010.08.009>
- [48] 陈洁, 杨秀, 朱兰, 张美霞, 李振坤. 微网多目标经济调度优化[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 8213-8222.
- [49] Murai, M., Sakamoto, Y. and Shinozaki, T. (1999) Optimizing Control for District Heating and Cooling Plant. *Proceedings of IEEE Conference on Control Applications*, Hawaii, 22-27 August 1999, 600-604.
- [50] Ono, E., Yoshida, H. and Wang, F.L. (2009) Retro-Commissioning of a Heat Source System in a District Heating and Cooling System. *Proceedings of International Building Performance Simulation Association*, Glasgow, 27-30 July 2009, 1546-1553.
- [51] 张万坤. 楼宇冷热电联产系统(BCHP)的配置及其最优运行分析[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2003.
- [52] 浦源, 李征. 基于 HHT 的微网电能质量检测[J]. 电子设计工程, 2016, 24(5): 22-25.
- [53] 沈辉, 谢志云, 余子文, 等. 基于 LabVIEW 的微网电能质量监测评估系统[J]. 机电工程, 2014, 31(9): 1201-1205.
- [54] 王薪苹, 卫志农, 孙国强, 等. 计及分布式电源和负荷不确定性的多目标配网重构[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 116-121.
- [55] 朱皓斌, 吴在军, 窦晓波, 费科, 陆金凤. 微网的分层协同保护[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 9-14.
- [56] Wang, S.Y. (2013) Worldwide Standards for Integration of Microgrid and Distributed Generations. *East China Electric Power*, **41**, 1170-1174.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2325-677X, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: dsc@hanspub.org