

多目标优化的微电网运行模式

毛知新

中国电建集团江西电力建设有限公司, 江西 南昌
Email: mzx699@vip.sina.com

收稿日期: 2021年5月10日; 录用日期: 2021年5月24日; 发布日期: 2021年6月7日

摘要

为解决用户侧能源与环境的双重压力, 构建了由分布式天然气、分布式太阳能光伏、分散式风力发电机、储能、冷热电负荷组成的多能互补的微电网及其数学模型, 从技术、经济、能效和环保等维度分析了微电网的运行, 并结合工程实际案例, 设计了低碳、经济、高效、自治和优化等运行模式, 结果表明这五种运行模式能满足微电网的不同运行需求, 具有推广价值。

关键词

多能互补, 微电网, 运行模式, 运行优化, 能量管理

Operation Mode of Multi-Energies Complementary Microgrid

Zhixin Mao

PowerChina Jiangxi Electric Power Construction Co., LTD, Nanchang Jiangxi
Email: mzx699@vip.sina.com

Received: May 10th, 2021; accepted: May 24th, 2021; published: Jun. 7th, 2021

Abstract

A multi-energies complementary microgrid and its mathematical model were presented, composed of gas turbine, photovoltaic, wind power generation, energy storage, and cooling/heating/electrical loads. The operation mode of microgrid was analyzed from dimensions of technology, economy, energy efficiency and environment. Combined with practical engineering cases, 5 operation modes were designed for the multi-energy-sources complementary microgrid, including low-carbon mode, economical mode, high-efficiency mode, autonomic mode, and optimized mode. The results show that these operation modes can meet the different operational requirements of micro energy network and can be extended.

Keywords

Multi-Energies Complement, Microgrid, Operation Mode, Operation Optimization, Energy Management

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

随着国民经济快速发展, 能源的需求不断增加, 化石能源的过度开发的碳排放严重影响人们的生活环境, 为了促进国家“2030年碳达峰、2060年碳中和”的目标达成, 在用户侧, 分布式可再生能源构成的微电网是解决能源和环境双重压力的最佳选择。由分布式光伏、风电、分布式天然气、生物质、地热能、海洋能等清洁能源和可再生能源通过不同的形式和储能、智能控制装置及负荷等组成的微电网是现在能源技术的发展方向。由不同微电源构成的微电网在用户侧解决了能源的就地生产和利用问题, 有效避免了“弃风、弃光”, 增强了区域能源供应的安全性和稳定性, 同时在峰谷分时电价的情况下, 通过“削峰填谷”有效地利用了电能并降低了用户的度电电费[1] [2] [3]。热泵和冷热电联供(Combined Cooling, Heating and Power, CCHP)技术的发展和运用, 也更好地推动了用户侧多能互补综合能源的发展[4] [5] [6], 多能互补微电网的能源结构和设备间耦合关系非常复杂, 认真研究其多能互补和耦合机理对于微电网的智能控制和优化运行具有十分重要的实用意义[7] [8] [9]。

目前, 多能互补微电网的研究已经取得一定的进展[10], 但主要集中在系统模型、运行效率和经济性等方面。由分布式天然气、太阳能光伏、微风发电、储能、地源热泵等清洁能源和可再生能源形式构成协同优化的多源互补微能源系统得到了越来越广泛的应用。微电网的规划、设计和低耦合运行已经实现, 在规划层面可以给出定容定址规划模型等[11] [12]。现有的研究主要集中在微电网多能互补集成优化的控制策略, 包括黑启动、离/并网切换、微电网优化调度和能量管理等方面[13] [14] [15] [16], 考虑风、光、负荷等的随机特性, 通过粒子群算法和差分进化算法求解, 建立微电网经济运行的随机优化模型[17], 或基于母线结构建立冷热电联供系统的通用模型[18]。通过不同的数学模型和经济分析来研究微电网的经济性, 分析冷热电联供系统“以电定热”或“以热定电”的能效差异[19] [20]。环境因素的影响也是多能微电网的研究对象之一, 在目标函数中加入污染气体排放惩罚函数等可以建立起微电网的经济调度模型[21] [22]。

目前的研究都集中在微电网的单一方面, 未能从整个系统的运行进行分析研究。针对以上问题, 本文以智能工业园区由分布式天然气、太阳能光伏、风电、地源热泵、储能等清洁能源和可再生能源组成的微电网为基础, 从技术、经济、能效和环保等角度进行综合分析, 建立了低碳、经济、高效、自治和优化五种不同的运行模式, 微能源系统可根据不同利益体的需求进行模式选择。

2. 多能互补微电网模型

多能互补发电作为未来能源利用的一种趋势, 在能源互联网和智能电网建设中得到了越来越多的研究和应用。由分布式光伏、分散式风电、地热能、分布式天然气、储能等清洁能源和可再生能源以及负荷组成, 多种一次能源通过特定的能源转换方式转换成电、热、冷、汽、水等二次能源, 大大提高了二次能源的综合利用效率, 在供电的同时, 通过热回收系统、制冷设备实现能量的梯级利用, 使能源利用率达到 80%以上。微电网中的风力发电和太阳能光伏发电受环境温度、气候和季节的影响, 有很大的随

机性和波动性，一定容量的储能不但能抑制光伏和风电的随机性和波动性，还能实现“削峰填谷”，有效地稳定电能供应，避免“弃风弃光”。多能互补微电网由燃气轮机、分布式光伏、风电、储能电池和负荷等构成，系统结构如图1所示。

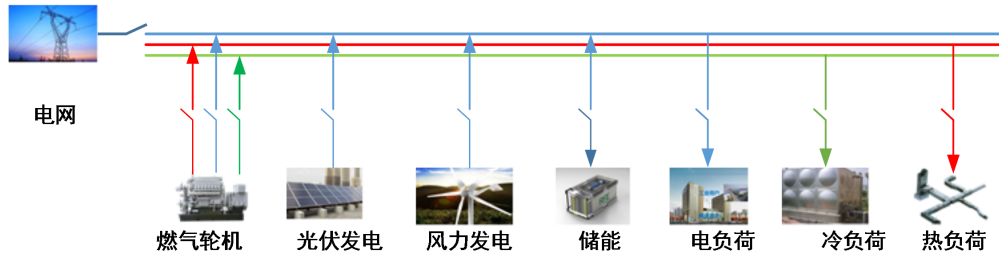


Figure 1. Architecture of multi energy complementary microgrid system
图1. 多能互补微电网系统架构图

分布式光伏和分散式风电等可再生能源为用户提供电能，燃气轮机在微电网中主要作为冷热电联供设备，除了发电外，还可通过溴化锂机组吸收微型燃气轮机所排放烟气后制热或制冷，为用户提供热能和冷能，实现能源的梯级利用。储能在微电网中除了平抑风电、光伏的波动外，在微电网中还起调频调峰的作用，和燃气轮机一起可以实现微电网黑启动，在孤网运行时，作为主电源，为微电网提供电压和频率支撑，保证微电网稳定运行。微电网的能量流动和功率平衡如图2所示。

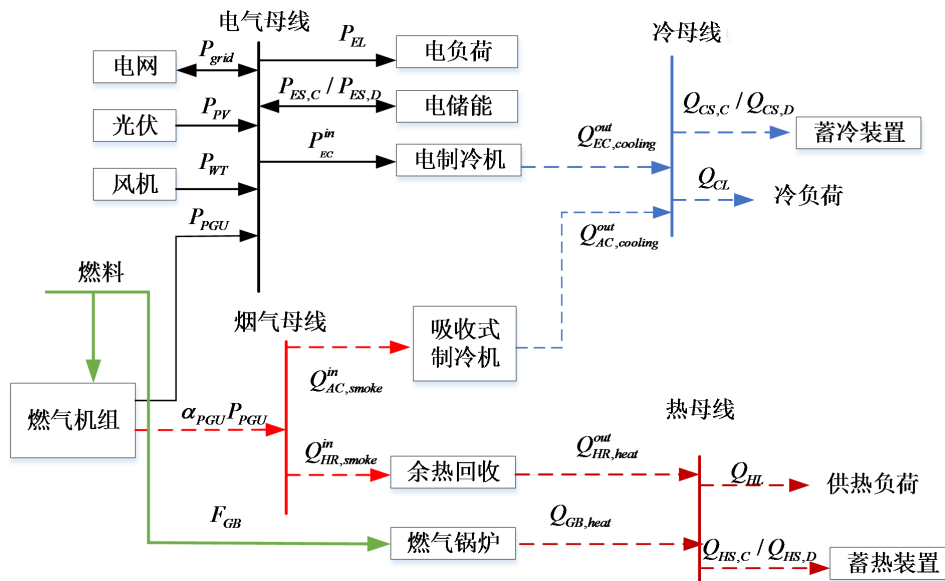


Figure 2. Microgrid structure
图2. 微电网结构图

根据图2可以得到系统的能量平衡约束。

1) 电母线平衡方程:

$$P_{grid} + P_{PGU} + P_{WT} + P_{PV} + P_{ES,D} = P_{EL} + P_{EC}^{in} + P_{ES,C} \quad (1)$$

2) 烟气母线平衡方程式:

$$\alpha_{PGU} P_{PGU} = Q_{AC,smoke}^{in} + Q_{HR,smoke}^{in} \quad (2)$$

3) 热母线平衡方程式:

$$Q_{HR,heat}^{out} + Q_{GB,heat} + Q_{HS,D} = Q_{HL} + Q_{HS,C} \quad (3)$$

4) 冷母线平衡方程:

$$Q_{EC,cooling}^{out} + Q_{AC,cooling}^{out} + Q_{CS,D} = Q_{CS,C} + Q_{CL} \quad (4)$$

其中, *PV* 为光伏, *WT* 为风电, *ES* 为电储能, *CS* 为蓄冷装置, *EC* 为电制冷, *AC* 为吸收式制冷机, *GB* 为燃气锅炉, *PGU* 为燃气机组, *HR* 为余热, *HS* 为蓄热装置, *F* 为燃气热值, *P* 为电功率, *Q* 为冷、热功率, *L* 为负载。

3. 微电网运行策略

根据不同利益体追求的目标不同, 微电网可分为技术、经济、能效、环境和综合等运行策略实现, 其相互关系如图 3 所示。

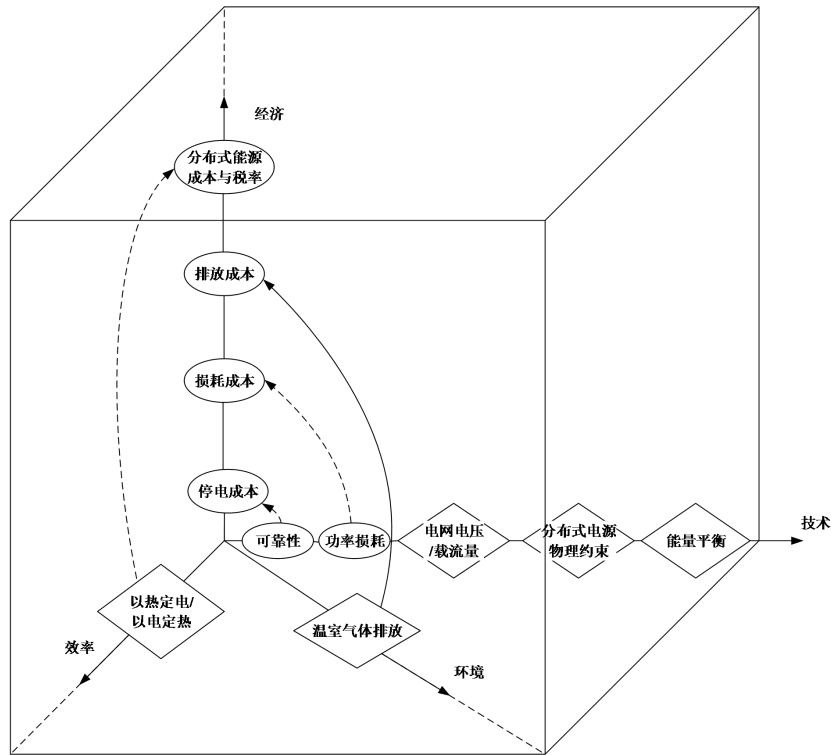


Figure 3. Microgrid operation strategy
图 3. 微电网运行策略

3.1. 技术

技术是保证微电网稳定、可靠运行的基础, 通过技术的手段优化系统运行, 即在考虑电压变化和元件热限制等所有网络约束的同时, 使网络损耗的外部成本最小化。技术目标最大化提高微电网独立运行的能力, 当微电网与配电网之间的电量交易越少, 微电网的自治性越高, 紧急情况下越能平滑地从并网运行状态过渡到孤网运行状态。其最优化模型为

$$\text{Min}_{P,u} \sum_{i=1}^T \{ P_{d\text{buy}}^t - P_{d\text{sell}}^t \} \quad (5)$$

模型的约束条件包括有功功率平衡约束、分布式能源出力上下限约束、发电机组爬坡约束、储能电池能量约束和微电网与配电网交互的最大容量约束。

技术不但能保证系统的稳定运行，还能根据经济性和环保性的要求来调节和控制微能源的运行。

3.2. 经济

经济性是微电网运行首先要考虑的因素。其优化模型为：

$$\text{Min}_{P,u} \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^{N_g} (f_{i,g}^t + f_{i,OM}^t + f_{i,DEP}^t) + f_{dbuy}^t - f_{dsell}^t \right\} \quad (6)$$

式中， N_g 为微电源个数； f_{dbuy}^t 为 t 时刻微电网从配电网购电的成本； f_{dsell}^t 为 t 时刻微电网向配电网售电的成本； $f_{i,g}^t$ 为微电源 i 在 t 时刻的燃料费用函数； $f_{i,OM}^t$ 为微电源 i 在 t 时刻的运行维护费用函数； $f_{i,DEP}^t$ 为微电源 i 在 t 时刻的折旧费用函数。

3.3. 环境

微电网的环保性目标是保证微电网并网运行时污染物排放量最小，实现微电网的绿色运行。其最优优化模型为

$$\text{Min}_{P,u} \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_{i=1}^{N_g} E_i^{m,t}(P_i) + E_{buy}^{m,t}(P_i) \right\} \quad (7)$$

式中， $E_i^{m,t}(P_i)$ 为微电网内各微电源所排放的污染物总量(kg)； $E_{buy}^{m,t}(P_i)$ 为微电网从配电网买电所排放的污染物总量(kg)； m 为所排放的污染物类型(CO₂、SO₂、NO_x等)。各微电源和配电网的排放系数根据实际数据选取。

3.4. 能效

微电网能有效提高能源的综合利用率，降低能耗量和运行成本，分布式天然气冷热电联供运行模式能实现能源的梯级利用，系统优先利用余热锅炉回收的废气来实现制冷或制热，实现能源的综合利用效率最高。能源利用效率的优化模型为

$$\eta = \frac{3.6W + Q_1 + Q_2}{BQ_L} * 100\% \quad (8)$$

式中， W 为年联供系统净输出电量，kWh； Q_1 为年有效余热供热总量，MJ； Q_2 为年有效余热供冷总量，MJ； B 为年联供系统燃气总耗量，m³； Q_L 为燃气低热值，MJ/m³。

3.5. 综合优化

综合优化是在满足各种约束条件的基础上，综合求取系统运行费用、环境效益、自治性和能源利用效率最优时的各种微电源出力与配电网的交互电量，实现微电网运行成本最低、污染物排放最小、能源利用效率最高及与电网交互功率最小的目标。优化模型为

$$\text{Min}_{P,u} (\alpha f_{operation} + \beta E_{emission} + \gamma P_{inter} + \delta \eta) \quad (9)$$

式中， $f_{operation}$ 为微电网的运行管理费用； $E_{emission}$ 为微电网中微电源和配电网所排放的污染物总量； P_{inter} 为微电网与配电网的交互功率； η 为微电网的能源利用效率； α 、 β 、 γ 、 δ 为权重系数。

4. 微电网运行模式

基于物理信息融合的微电网能源管理系统架构如图 4 所示。

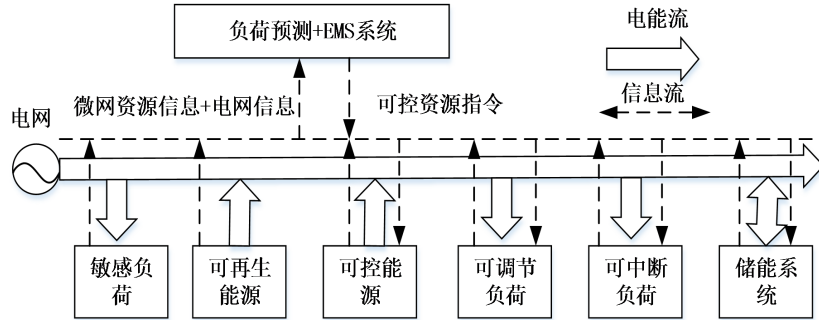


Figure 4. Microgrid control diagram
图 4. 微电网控制示意图

根据负荷预测和系统实时监测信息，微电网的优化运行模式如下图 5 所示。

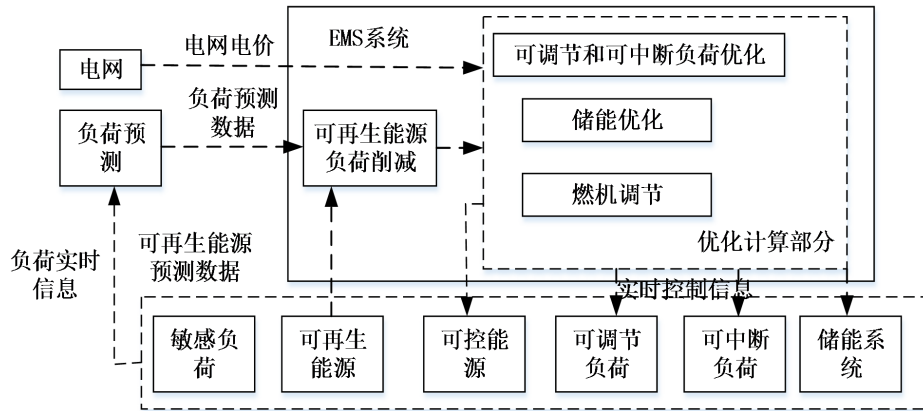


Figure 5. Microgrid optimal control model
图 5. 微网优化控制模型

在主控单元实现微电网的调度，在保证系统稳定可靠运行的基础上，1) 设计燃机以及分布式能源的成本模型，包括燃料成本、运行成本、环境成本以及冷热电协调成本等；2) 设计以热定电的计算模型，根据经济、环保和技术要求设计微能源的运行模式；3) 通过节能减排的经济性和排放量为约束，建立环境保护约束等，构建满足不同经济利益体需求的低碳、经济、高效、自治和优化运行模式。

4.1. 自治模式

在自治运行模式下，为保证敏感负荷不间断供电以及较高的供电质量，调度控制系统优先调整用户侧一般性负荷，保证系统的稳定和安全运行。

在外部电力供应中断的情况下，微电网进入孤岛运行模式，燃气轮机如果能正常运行，则燃气轮机作为主电源，迅速从 PQ 控制模式切换到 V/f 控制的主从控制模式，燃气轮机通过 V/f 控制维持微电网系统的电压和频率稳定，其他电源仍以 PQ 控制模式运行，保证微电网系统内重要负荷的可靠供电。如果此时燃气供应也中断，则由储能系统担任主电源进入孤岛运行，储能负责微电网系统电压和频率的稳定。

4.2. 低碳模式

低碳模式优先利用风能、光伏发电、地源热泵等可再生能源，风能、光伏发电作为基本负荷不做控制和调整，其生产电量的多少完全取决于自然条件，尽可能做到系统内部发多少用多少。调度控制系统根据负荷和可再生能源发电情况对可调节电源下达指令，微型燃气轮机作为具有自适应调节功能的调节电源，可快速跟踪、补充负荷有功功率和无功功率的变化。

4.3. 经济模式

通过不同能源经济测算模型，优选最经济的运行方式，蓄电池既可作为调节电源用来稳定微电网系统，也可作为经济调度的手段。在微电网运行的条件下，尽量做到峰价时放电，谷价时充电，提高系统经济性。

4.4. 能效模式

溴化锂以“以热定电、梯级利用”方式运行，充分利用余热资源，提高综合能源利用效率；微风、光伏发电、天然气分布式发电、烟气型溴化锂机组、地源热泵和能源用电组成的微型能源网络使电能与冷、热能互联起来，使多种能源产生互补效应。调度控制系统根据各能源系统的效率设定优先使用次序，使微电网综合效率最大化。

4.5. 优化模式

优化运行模式实现微能源系统最优调度运行，综合考虑技术、环境、经济和能效等因素约束，根据各因素在利益平衡中的权重，使系统运行成本最低，利润最大，实现整体目标最大化。

4.6. 模式间切换

正常情况下，系统自动运行于优化运行模式，当外部环境发生变化时，按如下图 6 所示控制流程自动切换到相应的运行模式，在用户参与模式切换时，系统进入手动控制模式，系统则根据用户的选择进入相应的运行模式。

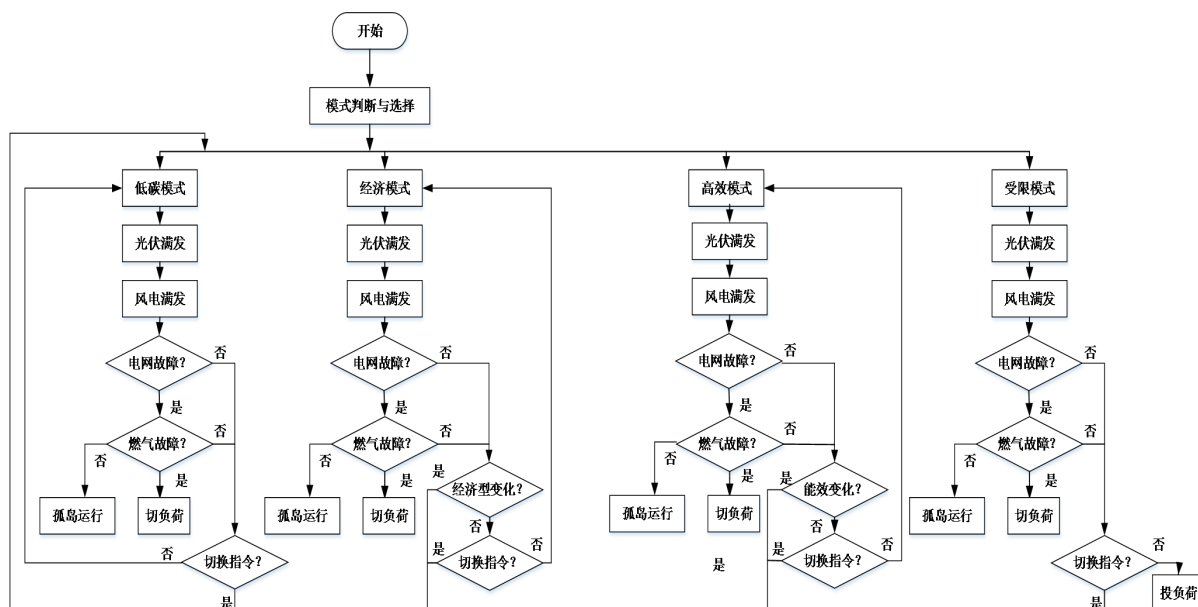


Figure 6. Flow chart of operation mode conversion

图 6. 运行模式转换流程图

5. 案例分析

在某工业园区, 建筑面积 21,315 m², 电力、空调用冷、用热、热水等总用能需求设计负荷约在 3650 kW。光伏可提供 350 kW 的电能, 天然气分布式三联供可提供 400 kW 电能、400 kW 热/冷能; 微风发电 80 kW; 同时配有调节整个微电网稳定性的储能 50 kW/100kWh; 自供能率超过 60%。系统接线如下图 7 所示。

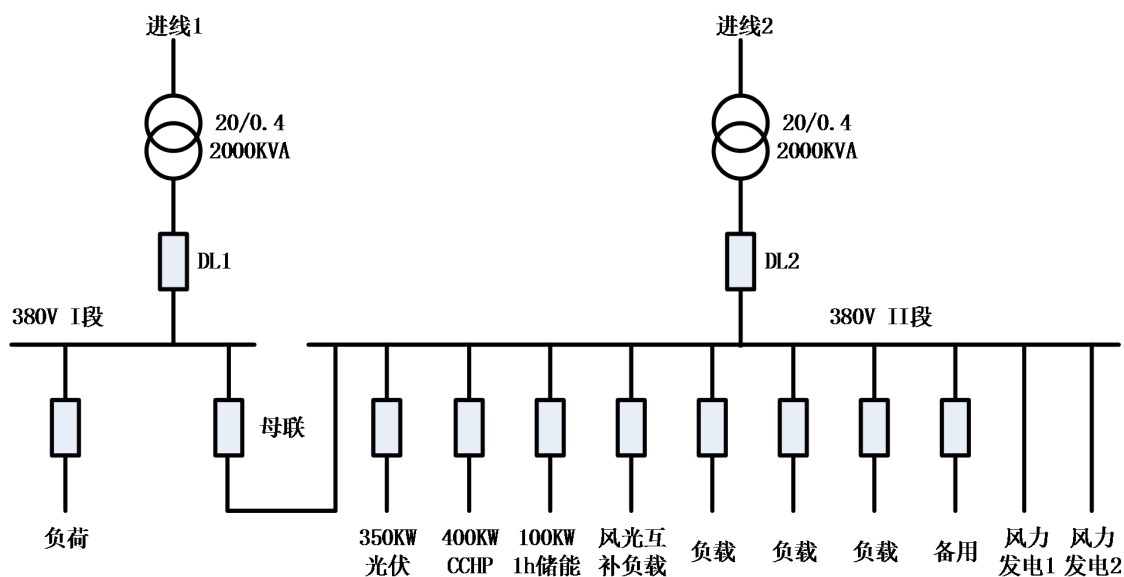


Figure 7. System wiring diagram
图 7. 系统接线图

该系统为微电网的控制策略的验证提供了良好的试验条件, 该园区天然气价格为 3.25 元/m³, 工业用电价格为 0.81 元/度。该项目所采用的燃机为卡特彼勒 CG132-8 型, 发电效率为 42.3%, 热效率为 45.2%, 计算可得, 燃机发电的度电成本约为 0.86 元/度, 高于市电价格, 并不是一种经济的发电方式, 但燃机发电的 CO₂ 排放比化石能源减少约 45%, 是一种低碳的发电方式, 通常情况下, 微电网运行在优化模式。

为了验证本文设计的运行模式及切换, 进行了仿真模拟实验, 实验时, 气温 15.8℃, 风速为 1.28 m/s, 光伏出力为 49.58 kW, 风机出力为 0, 负荷为 429.6 kW, 系统正常运行于优化模式。

当切换到低碳模式时, 燃机自动启动后稳定出力为 364 kW, 市电供给 68.4 kW, 满足负荷供电, 系统稳定运行。当切换到经济模式时, 燃机停止, 负荷由光伏、风电和市电供应, 当将天然气价格人为修改为 2.5 元/m³ 时, 此时燃机发电的度电价格为 0.66 元/kWh, 此时, 燃机启动并稳定在最大出力运行。当切换到高效模式时, 输入热负荷 160 kW 时, 此时燃机发电功率为 148 kW, 市电功率为 248.6 kW。当切换到自治模式时, 断开母联开关和 DL2 进线开关, 微电网进入孤网运行模式, 燃机作为主电源切换为恒压恒频控制模式, 为微电网系统提供稳定的电压和频率, 适当调整负荷后, 燃机出力为 368 kW。

经过测试, 模式切换不影响系统运行, 且精度和准确度都达到设计要求。

6. 结论

本文构建了由太阳能光伏、风力发电、天然气燃气轮机和储能等不同形式的清洁能源和可再生能源协同优化的微电网系统, 分析了各种分布式能源的特性, 从技术、经济和环保等维度研究微电网的协调控制和优化调度, 提出了针对不同利益体需求的低碳、经济、自治、高效和优化等运行模式。结合工业园区微电网项目, 验证并优化了系统控制策略, 运行效果达到设计目标, 具有推广应用价值。

基金项目

江西省重点研发计划江西省 03 专项及 5G 项目(20204ABC03A34); 中国电建股份有限公司重点研发计划项目(DJ-ZDXM-2018-56)。

参考文献

- [1] 梁亮, 李建林, 惠东. 光伏-储能联合发电系统运行机理及控制策略[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(8): 20-23.
- [2] 朱兰, 严正, 杨秀, 符杨, 陈洁. 风光储微网系统蓄电池容量优化配置方法研究[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 26-31.
- [3] 吴杰康, 唐利涛, 黄兔, 卢永文. 基于遗传算法和数据包络分析法的水火电力系统发电多目标经济调度[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 76-81.
- [4] Hawkes, A.D. and Leach, M.A. (2007) Cost-Effective Operating Strategy for Residential Micro-Combined Heat and Power. *Energy*, **32**, 711-723. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.06.001>
- [5] Mago, P.J., Fumo, N. and Chamra, L.M. (2007) Methodology to Perform a Non-Conventional Evaluation of Cooling, Heating and Power Systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, **221**, 1075-1087. <https://doi.org/10.1243%2F09576509JPE442>
- [6] 荆有印, 白鹤, 张建良. 太阳能冷热电联供系统的多目标优化设计与运行策略分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(20): 82-87.
- [7] Pruitt, K.A., Braun, R.J. and Newman, A.M. (2013) Establishing Conditions for the Economic Viability of Fuel Cell-Based, Combined Heat and Power Distributed Generation Systems. *Applied Energy*, **111**, 904-920. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.06.025>
- [8] Fang, F., Wang, Q.H. and Shi, Y. (2012) A Novel Optimal Operational Strategy for the CCHP System Based on Two Operating Modes. *IEEE Transactions on Power Systems*, **27**, 1032-1041. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2011.2175490>
- [9] Flores, R.J., Shaffer, B.P. and Brouwer, J. (2014) Dynamic Distributed Generation Dispatch Strategy for Lowering the Cost of Building Energy. *Applied Energy*, **123**, 196-208. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.02.028>
- [10] 牛铭, 黄伟, 郭佳欢, 苏玲. 微网并网时的经济运行研究[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 38-42.
- [11] Fumo, N., Mago, P.J. and Chamra, L.M. (2009) Emission Operational Strategy for Combined Cooling, Heating, and Power Systems. *Applied Energy*, **86**, 2344-2350. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.03.007>
- [12] 黎灿兵, 刘屿, 曹一家, 谭益, 薛晨, 唐升卫. 低碳发电调度与节能发电调度的一致性评估[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 94-101.
- [13] 王晓晶, 陈星莺, 陈楷, 丁孝华, 蒋宇, 余昆. 智能配电网清洁性评估指标研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 43-50.
- [14] 郭力, 许东, 王成山, 王守相. 冷电联供分布式供能系统能量优化管理[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(19): 96-100.
- [15] 吴雄, 王秀丽, 王建学, 别朝红. 微网经济调度问题的混合整数规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 1-8.
- [16] 刘小平, 丁明, 张颖媛, 徐宁舟. 微网系统的动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 77-84.
- [17] 杨佩佩, 艾欣, 崔明勇, 雷之力. 基于粒子群优化算法的含多种供能系统的微网经济运行分析[J]. 电网技术, 2009, 33(20): 38-42.
- [18] 王成山, 洪博文, 郭力, 张德举, 刘文建. 冷热电联供微网优化调度通用建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 26-33.
- [19] 许昌, 李旻, 袁媛, 郭苏, 刘德有, 郑源. 塔式太阳能集热-燃用天然气燃气轮机复合发电系统建模[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(32): 62-69.
- [20] Ghadimi, P., Kara, S. and Kornfeld, B. (2014) The Optimal Selection of On-Site CHP Systems through Integrated Sizing and Operational Strategy. *Applied Energy*, **126**, 38-46. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.03.085>
- [21] 王锐, 顾伟, 吴志. 含可再生能源的热电联供型微网经济运行优化[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 22-27.
- [22] 周任军, 李绍金, 陈瑞先, 李红英, 杨雨薇, 陈云. 采用模糊自修正粒子群算法的碳排放权交易冷热电多目标调度[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6119-6126.