

· 发电技术 ·

冷热电联供型微电网优化运行及敏感性分析

崔林¹, 唐沂媛^{2,3}

(1. 国家电网公司变电站智能设备检测技术重点实验室(国网江苏省电力公司电力科学研究院), 江苏 南京 211103; 2. 国网山东省电力公司济南供电公司, 山东 济南 250012; 3. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 211109)

摘要:冷热电联供型(CCHP)微电网是一种以联供设备为核心,包含多种分布式单元存在冷热电三种能量平衡的微电网形态,具有能源利用率高、供电可靠性高、环境污染小、调度灵活等特点。文中建立由多种微电源数学模型和约束条件组成的混合整数规划模型,使建立的系统更实际情况。从微电网经济调度运行出发,在满足微电网冷热电负荷需求下,以系统的整体费用最小为优化目标,采用CPLEX优化软件求解,仿真了各月典型日的优化运行,从仿真结果可以了解不同电源在不同时段的出力情况,使电源经济运行。同时对天然气价格进行敏感性分析,分析该价格对各电源出力情况的影响。

关键词:微电网;CCHP;优化运行;敏感性分析;CPLEX

中图分类号:TM711

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2017)06-0138-06

0 引言

全球对电能需求的日益增加导致了煤和石油等非可再生能源的大量加速消耗,同时产生的排放物也对环境造成了重大影响。因此,如何有效地利用清洁能源、提高可持续发展的能力成为全球关注的热点。为了最大化开发电网的能源效率,微电网成为了各国研究的热点^[1-6]。

冷热电联供型(CCHP)微电网是一种以联供设备为核心,包含多种分布式单元(可再生能源、联供设备、储能、蓄热等),存在冷热电三种能量平衡的微电网形态。它是布置在用户附近,以燃气为一次能源,用于发电,并利用发电余热制冷、制热,同时向用户输出电能、冷热能的分布式能源供应系统。CCHP微电网具有能源利用率高、供电可靠性高、环境污染小、调度灵活等特点。冷热电联供系统在科学用能的指导下,可实现能源的梯级利用,能源利用率可以达到70%~90%,与分产系统相比,节能率可达20%~40%,实现大幅度节能,减少环境污染,符合建设节约型社会的要求。

目前对联供系统的优化主要是从2个方面进行研究:系统的优化设计和系统的优化运行。文中研究的主要内容即系统的优化运行,选择投资一定条件下运行费用最小为目标函数。目前国内研究电

收稿日期:2017-06-28;修回日期:2017-07-30

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(消纳风电的热-电联合优化规划及运行控制技术);国家电网公司科技项目(多源分布式新能源发电直流供电运行控制技术研究与应用)

力微电网优化运行和相关的一些算法相对较多,而对于含冷热电联产的微电网研究就相对较少。文献[7]研究了可靠性与经济性相协调的微电网优化运行,但是其可靠性只是作为结果的一个参考性指标而不是确定性约束条件。文献[8]运用混合整型多级目标规划方法建立优化模型,并对模型的配置和策略进行研究。文献[9-12]以CCHP系统运行成本最小为目标,进行了热电联供系统的数学优化配置模型和不同运行策略的研究。

文中建立了含冷热电联产系统的微电网孤岛系统,由风电机组、光伏电池(PV)、燃料电池(FC)、微型燃气轮机(MT)、蓄电池和蓄热槽等组成。文章建立了该系统的优化运行经济数学模型和约束条件,目标函数综合考虑了发电单元的初始投资等值费用、燃料费用、运行维护成本以及环境等值费用,采用CPLEX混合整数线性规划求解,通过算例进行设备优化运行和天然气价格的敏感性分析。

1 CCHP微电网优化运行模型

考虑电源设备的初始投资和计及环境价值的微电网优化运行,风力发电和太阳能光伏发电不计燃料成本和运行维护费,文中采用CPLEX做混合整数线性规划求解,CCHP微电网结构示意图如图1所示。

1.1 经济性目标函数

微电网优化运行目的是使系统各微电源最优化出力既能满足负荷,又要使总费用最低。建立的经济性目标函数为:

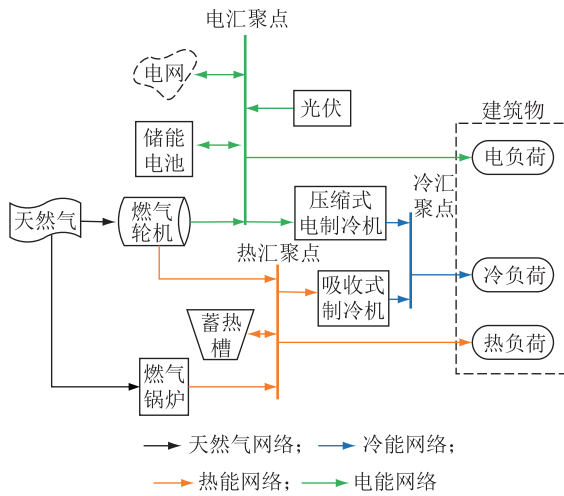


图1 CCHP 微电网系统结构

Fig.1 Structure chart of the combined cooling, heating and power microgrid

$$\min P = \sum_{i=1}^N P_i C_i + \sum_{i=1}^N P_i C_{\text{fuel}} + \sum_{i=1}^N C_{\text{inv},i} + \sum_{i=1}^N C_{\text{EC},i} \quad (1)$$

式中: P 为优化运行区间总费用; N 为系统中电源个数。 P_i 和 C_i 分别为第 i 种电源的总输出功率和单位电量的运行维护费用; C_{fuel} 为发电单元单位电量的燃料费用;发电单元的燃料成本是二项式,将二项式费用曲线分三段计算, $C_{\text{inv},i}$ 为发电单元的等值投资费用, $C_{\text{EC},i}$ 为碳排放费用。

1.1.1 初始投资成本

将MT,FC,PV风力发电机和蓄电池投资总成本等值到每一天,得到初始等值投资成本。

$$C_{\text{inv},i} = C_{\text{TCP}} \mu_{\text{CRF}}(r, Y_p) / 365 \quad (2)$$

$$\mu_{\text{CRF}}(r, Y_p) = \frac{r(1+r)Y_p}{(1+r)Y_p - 1} \quad (3)$$

式中: Y_p 为项目年,周期年限取为20a; C_{TCP} 为装机成本; $\mu_{\text{CRF}}(r, Y_p)$ 为资金回收率。

1.1.2 环境等值成本

DG发电的环境价值一般包括2方面。

(1) 环境的损失,即消耗的环境资源,包括由于污染所引起的环境质量下降和过分消耗自然资源所引起的生态环境破坏。

(2) 排放污染物所受的罚款。将微电网的电源对环境的影响统一到优化模型中,对分布式发电技术的污染排放特性来评估环境影响,将环境影响折算成费用为:

$$C_{\text{EC},i} = \sum_{k=1}^M v_{k,i} E_i (V_k + V'_k) \quad (4)$$

式中: $v_{k,i}$ 为第 k 种污染物的排放系数; V_k 和 V'_k 分别为污染物的环境价值和污染物所受的罚款。

1.2 约束条件

1.2.1 电功率和冷热功率约束

$$\begin{cases} P_{e,t} - P_{ec,t} = P_i \\ Q_{h,t} + \frac{Q_{ac,t}}{P_{ac}} \leq Q_j + Q_{b,t} + Q_{s,t} \\ Q_{c,t} \leq Q_{ec,t} + Q_{ac,t} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{e,t}$, $Q_{h,t}$ 和 $Q_{c,t}$ 分别为 t 时段的用户侧电负荷,热负荷和冷负荷需求; $P_{ec,t}$ 为 t 时段电制冷机消耗的电量; Q_j 为由联产系统提供的总热功率; $Q_{b,t}$ 为燃气锅炉在 t 时段的输出热功率; $Q_{s,t}$ 为蓄热罐在 t 时段的交换的热功率; $Q_{ac,t}$ 为吸收式制冷机制冷量; $Q_{ec,t}$ 电制冷机制冷量; P_{ac} 为吸收式制冷效率。

1.2.2 机组增负荷和减负荷的爬坡能力约束

$$\begin{cases} P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq U_i^{\max} \\ P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq L_i^{\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $P_{i,t}$ 为电源 i 在 t 时段内的输出功率; U_i^{\max} 和 L_i^{\max} 分别为机组 i 的最大增负荷爬坡率和减负荷爬坡率^[13]。

1.2.3 机组功率上下限约束

$$P_i^{\min} \leq P_{i,t} \leq P_i^{\max} \quad (7)$$

式中: P_i^{\min} 和 P_i^{\max} 分别为输出功率的上下限。

1.2.4 机组最大启停次数约束

$$\sum_{i=1}^T S_{i,t+1} (1 - S_{i,t}) \leq SN_i \quad (8)$$

式中: $S_{i,t}$ 是二进制变量,即0,1变量,0代表机组停运,1代表机组运行。

1.2.5 系统备用约束

对于微电网来说,并网运行能来自大电网的备用支持,而当处于孤网运行时,必须保留总负荷容量的 $R\%$ 备用,以保障系统的供电可靠性和安全。

$$\sum_{i=1}^N P_i^{\max} - P_{i,t} \geq R\% P_{e,t} \quad (9)$$

1.2.6 蓄电池运行约束

$$\begin{cases} P_{\text{ch}} \leq 0.2 E_{\text{ba}} / \Delta t \\ P_{\text{disch}} \leq 0.2 E_{\text{bat}} / \Delta t \\ E_{\text{ba},t} = E_{\text{ba},t-1} (1 - \varphi) + (P_{\text{ch}} \mu_{\text{ch}} - \frac{P_{\text{disch}}}{\mu_{\text{disch}}}) \Delta t \\ E_{\text{ba}}^{\min} \leq E_{\text{ba},t} \leq E_{\text{ba}}^{\max} \\ E_{\text{ba},T} \geq E \end{cases} \quad (10)$$

式中: P_{ch} , P_{disch} 分别为储能电池充放电功率; $E_{\text{ba},t}$ 为 t 时段蓄电池的容量; μ_{ch} 和 μ_{disch} 为蓄电池的充电和放电效率; φ 为蓄电池自身损耗; $E_{\text{ba},T}$ 为本调度周期末的蓄电池容量; E 为保证下一个调度周期蓄电池有

效运行的最小保有容量。

1.2.7 蓄热槽运行状态约束

$$P_{HSch}^{max} \leq P_{HS,t} \leq P_{HSdisch}^{max} \quad (11)$$

式中： P_{HSch}^{max} 和 $P_{HSdisch}^{max}$ 分别为蓄热槽的最大充放电功率^[14]。

2 算例分析

文中采用的模型是混合整数非线性模型,CPLEX 无法求解该类模型,故需要将其中的非线性部分线性化;同时通过权重系数将环境成本等值到总成本中,将多目标函数单目标化,通过在 MATLAB 中建立多约束线性混合整数规划数学模型并使用 CPLEX 软件进行求解^[15-17]。

2.1 负荷及微源参数

某区一年中典型日的冷热电负荷预测数据如图 2 所示。文中联网购电分时电价 01:00-06:00 和 23:00-24:00 电价为 0.055 7 美元/(kW·h),07:00-08:00 和 18:00,20:00 电价为 0.124 59 美元/(kW·h),09:00-11:00 和 15:00-17:00 电价为 0.204 9 美元/(kW·h),19:00-20:00 电价为 0.226 2 美元/(kW·h);联网运行售电分时电价 01:00-06:00 和 23:00-24:00 电价为 0.044 3 美元/(kW·h),07:00-08:00,12:00-14:00,21:00-22:00 和 18:00 电价为 0.096 7 美元/(kW·h),09:00-11:00 和 15:00-17:00 电价为 0.159 0 美元/(kW·h),19:00-20:00 电价为 0.175 4 美元/(kW·h)。吸收式制冷系数为 0.9,电制冷系数为 3.5。FC 发电效率为 0.38,MT 发电效率为 0.28。

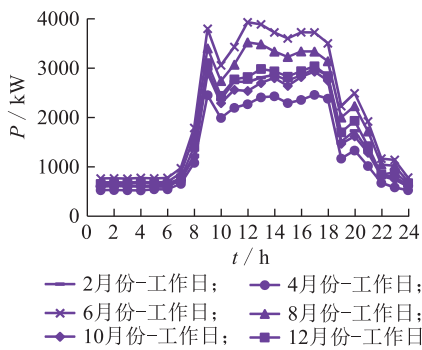


图 2 各月典型日电力负荷预测曲线
Fig.2 Electricity load forecasting curve of typical day in each month

2.2 优化出力结果分析

文中微电网的待选电源类型有光伏电池、风力发电机、燃料电池、微型燃气轮机和蓄电池。天然气价格为 0.051 6 美元/(kW·h),根据上述的数学模型和约束条件,目标函数求解的结果分别是最小化费用为 100 175.5 美元,最小化 CO₂ 排放量为

1 702.7 kg。各月典型日的优化配置结果如图 3—8 所示。

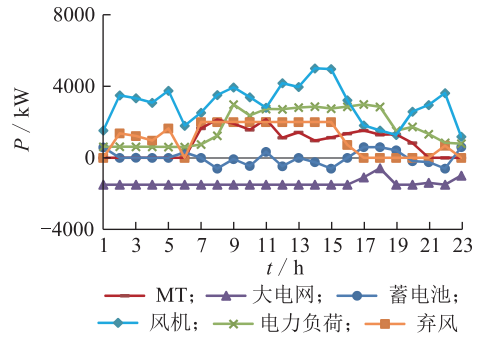


图 3 二月典型日优化结果曲线

Fig.3 Optimal results of the typical day of February

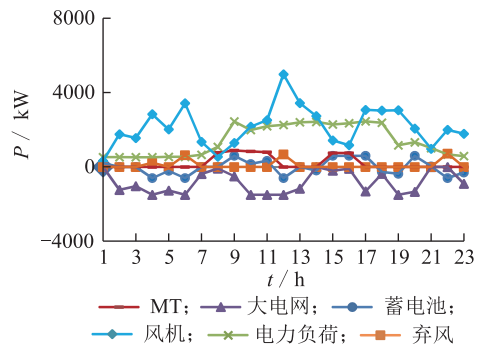


图 4 四月典型日优化结果曲线

Fig.4 Optimal results of the typical day of April

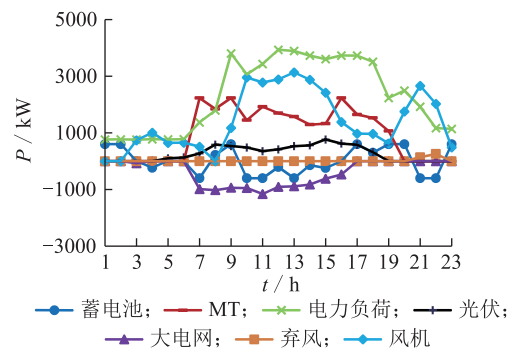


图 5 六月典型日优化结果曲线

Fig.5 Optimal results of the typical day of June

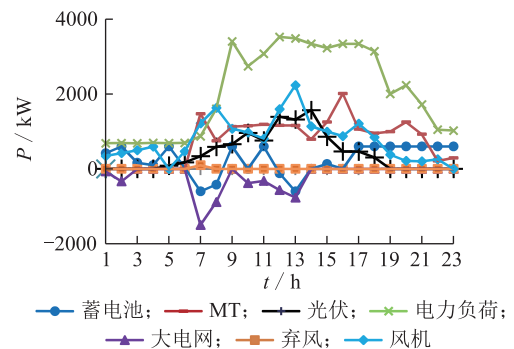


图 6 八月典型日优化结果曲线

Fig.6 Optimal results of the typical day of August

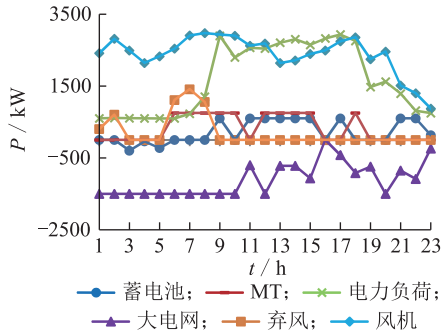


图7 十月典型日优化结果曲线

Fig.7 Optimal results of the typical day of October

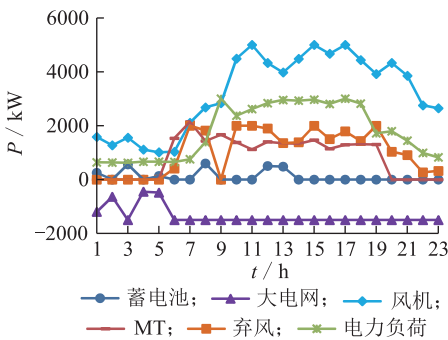


图8 十二月典型日优化结果曲线

Fig.8 Optimal results of the typical day of December

在此目标函数之下,由于FC产生的CO₂数量较多,因此在以经济性和CO₂排放为目标的配置中,FC几乎不提供出力。由图3和图8可知,冬季负荷主要靠风电机组来提供基本负荷,在09:00-18:00时段,用电负荷处于高峰期,风电机组几乎提供了大部分的电力负荷,使微电网以高电价售电获得收益,增加微电网的经济效益,并为主网起到削峰的作用。蓄电池在可再生能源出力充足的情况下充电,在可在生能源出力不足时,提供一定的电量,为微电网内部起到削峰填谷的作用,并有利于平移可再生能源发电的波动性。在24:00,由于电力负荷需求降低,而此时风机发电量仍有剩余,故此时弃风功率增大,而此时联产机组已停止供电,减少排放量。

由图5可知,春秋季节风电和光伏均存在,风电和MT提供主要电力负荷,而光伏只提供小部分,在01:00-06:00和20:00-24:00,MT输出功率为0,风电机组几乎提供了全部的电力负荷,以满足需求。

由图6可知,夏季典型日风力发电明显减少,光伏增多,主要日负荷由风电机组、光伏电池和MT共同提供,白天的风机和光伏增发的电量储存在蓄电池中,因此夜间负荷主要靠风电机组、MT和蓄电池共同提供,全天均无弃风操作。

由图7可知,秋季典型日风电机组提供主要负

荷,因发电量大,满足负荷需求之后还有剩余,因此向主电网输送一部分电量,还有一部分电量储存在蓄电池内部。

图9和图10中为典型夏季冷负荷,负荷需求由电制冷和吸收式制冷提供,根据发电量和余热来分配吸收式制冷量和电制冷量,以达到最优经济性,在联产机组停机时段,吸收式制冷由蓄热槽提供热量(吸收式制冷的值设为负值)。

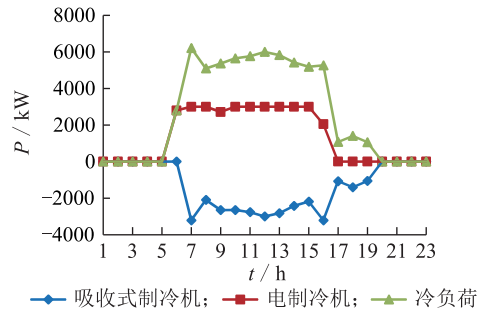


图9 六月典型日冷功率平衡曲线

Fig.9 Cooling power balance of the typical day of June

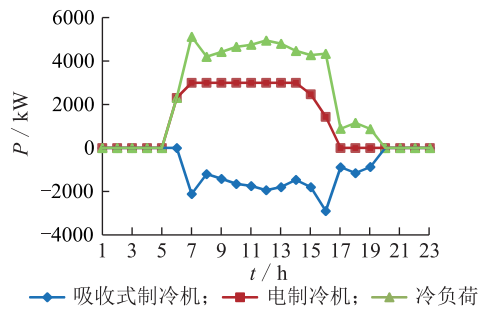


图10 八月典型日冷功率平衡曲线

Fig.10 Cooling power balance of the typical day of August

2.3 天然气价格敏感性分析

根据上述最优经济性和排放量综合目标函数和约束条件,分析燃气价格对系统容量配置的影响。各电源的配置情况如表1所示。

表1 容量配置对天然气价格的敏感性

Table 1 Sensitivity analysis of the price of natural gas to the configuration

天然气价格 / [美元·(kW·h) ⁻¹]	风机 / kW	光伏电池 / kW	MT / kW	蓄电池 / (kW·h)	总费用 / 美元
0.04	5000	855.43	2 144.7	3000	96 731.53
0.051 6	5000	855.43	2 144.7	3000	100 175.5
0.35	5000	855.43	2 144.7	3000	102 669.4
0.40	5000	900.13	2 144.7	3000	26 299.3
1.00	5000	955.79	2 144.7	3000	38 175.12
1.50	5000	960.92	2 144.7	3000	53 019.89

MT的初始投资成本低,但是发电成本高,FC初始投资成本高,但是发电成本低,风机和光伏均无

燃料费用,且不需要环境等值费用。从表 1 优化配置的结果来看,在燃料价格上涨到 0.04 美元/(kW·h)之前,系统的容量配置没有发生改变,当价格上涨到 0.04 美元/(kW·h)时,光伏电池的配置开始增加,可再生能源得到了更多利用,新能源的竞争力开始提高,随着价格继续上涨,光伏电池的配置持续增加。优化配置的结果中没有配置 FC,是由于 FC 的 CO₂排放量过大,无法满足目标函数的经济性和环境效益的统一。从优化结果来看,通过优化发电配置可以提高新能源的利用率,减少再生能源的浪费,进一步增加环境效益,但缺点是增加了系统的总费用。

3 结论

文中将环境价值利用权重系数等值到优化方法中去,使得分布式电源的环境效益得以体现。通过建立的微电网的数学模型和约束条件,以及总费用和 CO₂排放量综合最优的目标函数,优化得到不同的电源的出力,使得系统的可靠性和可再生能源的利用率提高。而后分析了不同燃料价格的变化对于系统的容量配置的影响。通过对算例的优化计算,合理配置微电源和安排微电源的运行,使得微电网更具有经济性和环境效益。

从建立各分布式单元的数学模型出发,通过建立多种微电源组合的目标函数和约束条件的混合整数规划模型,采用 CPLEX 软件进行优化求解,对不同月份典型日的优化运行进行仿真,从仿真结果对不同电源在不同月份的出力情况和敏感性分析,合理的微源容量选择可提高微电网对于不同负荷类型的适应能力,是提高系统经济、能效、环境效益的重要基础。

参考文献:

- [1] 崔恒志,黄奇峰,杨世海,等. 冷热电联供型微电网容量规划优化研究[J]. 江苏电机工程,2013,32(3):39-41.
CUI Hengzhi, HUANG Qifeng, YANG Shihai, et al. Capacity planning of combined cooling, heating, and power micro-grids [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2013, 32(3): 39-41.
- [2] 朱永利,姚建国,刘 骥. 微电网关键技术及研究现状[J]. 江苏电机工程,2012,31(03):81-84.
ZHU Yongli, YAO Jianguo, LIU Ji. Key Technologies and developing state of microgrid[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2012, 31(03): 81-84.
- [3] HATZIARGYRIOU N, ASANO H, IRAVANI R, et al. Microgrids[J]. Power and Energy Magazine, IEEE. 2007. 5(4): 78-94.
- [4] LASSETER B. Microgrids[C] // Power Engineering Society Winter Meeting. Columbus, Ohio, USA: 2001: 146-149.
- [5] LASSETER R H. Microgrids[C] // Power Engineering Society Winter Meeting. New York, USA: 2002: 305-308.
- [6] LASSETER R H, PAIGI P. Microgrid: a conceptual solution [C] // Power Electronics Specialists Conference. Aachen, Germany: 2004.
- [7] 言大伟,韦 刚,胡 吟,等. 可靠性与经济相协调的微电网能量优化[J]. 电力系统自动化,2012,36(8):18-23.
YAN Dawei, WEI Gang, HU Yin, et al. Microgrid energy optimization with coordination of reliability and economy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 18-23.
- [8] 李 赟,黄兴华. 冷热电三联供系统配置与运行策略的优化[J]. 动力工程学报,2006,26(6):894-898.
LI Yun, HUANG Xinghua. Integrated optimization of scheme and operation strategy for CCHP system[J]. Journal of Power Engineering, 2006, 26(6): 894-898.
- [9] 魏 兵,王志伟,蒋 露,等. 微型燃气轮机冷热电联供系统的优化运行研究[J]. 华北电力大学学报,2007,34(2):138-144.
WEI Bing, WANG Zhiwei, JIANG Lu, et al. Research of optimal operation on micro-turbine CCHP systems[J]. Journal of North China Electric Power University, 2007, 34(2): 138-144.
- [10] FANG F, WEI L, LIU J, et al. Complementary configuration and operation of a CCHP-ORC system[J]. Energy, 2012, 46: 211-220.
- [11] 李 赟. 联供系统设备配置与运行策略集成优化研究[D]. 上海:上海交通大学,2007.
LI Yun. Integrated optimization research on facilities scheme and operation strategy of cogeneration system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007.
- [12] 吴 志. 热电联供型微电网建模及能量优化管理[D]. 南京:东南大学,2012:12-15.
WU Zhi. Modelling and energy management of CHP Microgrid [D]. Nanjing: Southeast University, 2012: 12-15.
- [13] 许 丹,丁 强,潘 毅,等. 基于经济调度的微电网蓄电池容量优化[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(17):55-59.
XU Dan, DING Qiang, PAN Yi, et al. Study on optimizing capacity of storage battery in microgrid system based on economic dispatch[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 55-59.
- [14] 顾 伟,吴 志,王 锐. 考虑污染气体排放的热电联供型微电网多目标运行优化[J]. 电力系统自动化,2012,36(14):177-185.
GU Wei, WU Zhi, WANG Rui. Multi-objective optimization of combined heat and power microgrid considering pollutant emission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14): 177-185.
- [15] 王庆华. 基于综合性指标的天然气冷热电联供系统优化运行与配置[D]. 北京:华北电力大学,2012:56-57.
WANG Qinghua. Optimal operation and configuration of nature gas-fired combined cooling, heating and power system based

on integrated performance criterion[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012: 56-57.

- [16] 钱科军,袁越,石晓丹,等. 分布式发电的环境效益分析[J]. 中国电机工程学报,2008,28(29):11-15.

QIAN Kejun, YUAN Yue, SHI Xiaodan, et al. Environmental benefits analysis of distributed generation[J]. Proceeding of the CSEE, 2008, 28(29): 11-25.

- [17] LIU M, SHI Y, FANG F. A new operation strategy for CCHP systems with hybrid chillers[J]. Applied Energy, 2012, 95: 164-173.

作者简介:



崔林

崔林(1981—),男,江西黎川人,工程师,主要研究方向为电力系统分析、新能源并网、分布式电源微电网(E-mail: cuilin98@js.sgcc.com.cn);

唐沂媛(1992—),女,山东济南人,工程师,主要研究方向为综合能源系统的规划(E-mail:tangyy@sd.sgcc.com.cn)。

Optimal Operation and Sensitivity Analysis of the Combined Cooling, Heating and Power Microgrid

CUI Lin¹, TANG Yiyuan^{2,3}

(1. State Grid Key Laboratory of Substation Intelligent Equipment Testing Technology(State Grid Jiangsu Electric Power Research Institute), Nanjing 211103, China; 2. Jinan Power Supply Company, Jinan 250012, China; 3. College of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The combined cooling, heating and power (CCHP) microgrid is a kind of distributed power system with the cogeneration plant as the core part, existing three kinds of energy balance, including various distributed micro-sources. The CCHP micro-grid has a lot of advantages such as high energy utilization ratio, strong power supply reliability, low environmental pollution and flexible dispatching. Models of mixed integer programming (MIP) composed by a variety of power mathematical models and constraints are established, so the system can better accord with the actual situation. Considering the economic dispatching of micro-grid, this paper simulates the optimization of typical day of each month for the minimum cost of overall system using CPLEX and the result should meet the needs of electrical-cold-heat load in this micro-grid. Simulation of optimal sizing and the optimized operation of typical daily load of different seasons can learn from the simulation results, so the powers can work economically. Meanwhile, sensitivity analysis of natural gas's price was established to evaluate the impact on the operation of the system.

Key words: microgrid; combined cooling, heating and power (CCHP); optimal operation; sensitivity analysis; CPLEX

(编辑 钱悦)