

基于运行最优模拟的综合能源系统经济评价方法

马超,肖汉,李嘉逸

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川成都 610021)

摘要:基于综合能源项目全生命周期分析法,通过系统运行优化调度模拟,提出了一种聚合燃气轮机、锅炉、风机、光伏、电热储能、电负荷、热负荷等的综合能源协调优化调度模型和全生命周期的经济分析模型的经济评价方法,解决了综合能源规划设计中粗放式经济分析估算的问题;并以重庆某一园区 CHP 型综合能源系统为例,通过对供能调度模拟及经济指标的分析,验证了该经济评价方法的有效性。结果表明,所提出的基于运行最优模拟的综合能源系统经济评价方法能够极大地提高综合能源规划设计经济分析的精确性和灵活性,能够更好地评价系统方案的合理性和可操作性。

关键词:综合能源;全生命周期;优化调度;经济评价

中图分类号:F407 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2021)01-0077-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210116

Economic Evaluation Method of Integrated Energy System Based on Operational Optimal Simulation

Ma Chao, Xiao Han, Li Jiayi

(CPECC Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract:Based on the life cycle analysis method of integrated energy project and considering the optimal dispatching strategy of system operation, an economic evaluation method is proposed with integrated energy coordination and optimal dispatching model and full life cycle economic analysis model together, including gas turbine, boiler, fan, photovoltaic, electro-thermal energy storage, electric load and thermal load, which solves the problems of extensive economic analysis and estimation in comprehensive energy planning and designing. Taking CHP-type integrated energy system of a park in Chongqing for example, the effectiveness of the proposed economic evaluation method is verified through the analysis of energy supply dispatch and economic indicators. The results show that the economic evaluation method of integrated energy system based on the proposed optimal operation simulation can greatly improve the accuracy and flexibility of economic analysis of integrated energy planning and designing, and can better evaluate the rationality and operability of the system scheme.

Key words:integrated energy; whole life cycle; optimal dispatch; economic evaluation

0 引言

随着中国能源结构的持续调整,一种能够实现节能减排、有效提高能源利用效率促进绿色健康发展的新型一体化能源系统(综合能源系统)得到越来越多的关注。作为新型能源系统,其具有多元、耦合、协调的鲜明特征。如何让系统能够满足用户多变的能源需求。同时实现效率最大化,是亟需研究的问题^[1-4]。

目前,各类综合能源示范系统大多以热电联供系统(combined heat and power, CHP)为供能核心,聚合风能、太阳能、地热、储能等系统联合构建一个完整的供能系统。根据用户的电、热负荷情况,采用合理的运行策略和供能模式对联供系统运行性能的提高有很大帮助^[5-6];一方面可以减少非可再生能源消耗,优化电源结构;另一方面可以促进新能源消纳,改善电能清洁度。中国正在加速能源系统的多能协同、互补发展,新能源微电网示范项目朝着“源-网-荷-储”一体化方向发展建设^[7-8]。

下面从综合能源规划设计角度出发,将综合能源优化调度与项目全生命周期经济分析相结合,提出了基于运行最优模拟的综合能源系统经济评价方法。外层为全生命周期的经济评价模型,内层为生产模拟的 0-1 混合整数规划模型,通过调节能源供给生产运行方式和状态,实现对系统综合效益的分析评价。

1 综合能源系统结构

综合能源系统是指以电力网为载体,融合热网、天然气网等多种能源网络,涵盖多能源的生产、传输、供给的系统。目前应用和推广较多的一般是以三联供系统为核心,辅以风电/光伏系统、储能系统等构成的多能源综合供给系统,系统结构如图 1 所示。

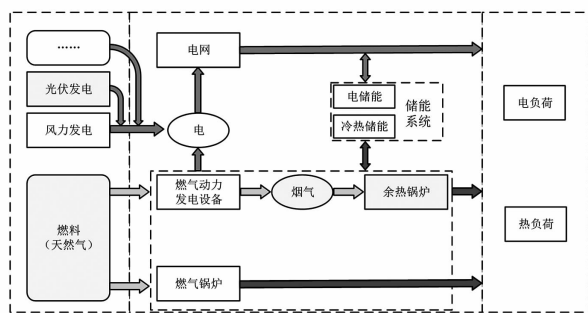


图 1 一般综合能源系统结构

2 经济评价分析模型

经济评价分析模型是在项目全生命周期内,综合考虑能源系统的生产协调调度优化问题,聚合不同供能单元间和不同能源品类间的能量传输供给,实现电、热等能量的平衡,从而准确地计算出工程项目的经济性。所建经济评价分析模型由外层模型和内层模型构成,外层模型为全生命周期的建设项目经济评价模型,内层模型为生产模拟的最大运行收益优化模型。在设定目标收益值下,不断调整边际参数,通过内外层的循环迭代,计算得到满足工程需求的边界值来分析工程项目的经济可行性,从而为工程的规划咨询设计提供数据支持,其算法流程如图 2 所示。

2.1 经济评价分析模型

一般对于工程的经济性分析以盈利能力分析为主,清偿能力分析为辅,通过各种分析指标评价判断

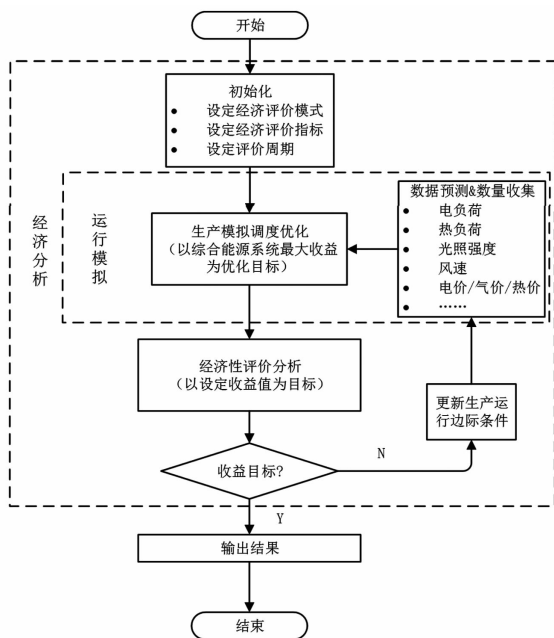


图 2 运行最优模拟的综合能源系统经济评价流程

项目在经济上的可行性。这里主要从盈利分析的角度建立经济分析模型,依据《建设项目经济评价方法与参数》^[9],主要从融资前和融资后两个角度分析项目的经济可行性。主要指标包括财务内部收益率(F_{IRR})、投资回收期(P)、财务净现值(F_{NPV})等。

1) 财务内部收益率

$$\sum_{t=1}^n (C_{\text{sale}} - C_{\text{run}} - C_{\text{oth}})_t (1 + F_{\text{IRR}, \text{aim}})^{-t} = 0 \quad (1)$$

式中: C_{sale} 为销售收入,包含售电、售热等收入之和; C_{run} 为运行成本包括原料成本、维修成本或购电成本等; C_{oth} 为借贷费用及税费支出等; $F_{\text{IRR}, \text{aim}}$ 为设定财务内部收益率; n 为项目运营计算周期。

2) 项目投资回收期

$$\sum_{t=1}^{P_t} (C_{\text{sale}} - C_{\text{run}} - C_{\text{oth}})_t = 0 \quad (2)$$

式中, P_t 为项目投资回收期,投资回收期一般以年为单位,宜从建设期开始算起。

3) 财务净现值

$$F_{\text{NPV}} = \sum_{t=1}^n (C_{\text{sale}} - C_{\text{run}} - C_{\text{oth}})_t (1 + i_c)^{-t} \quad (3)$$

式中: F_{NPV} 为项目财务净现值; i_c 为按照行业基准选取的基准收益率。

2.2 运行模拟调度优化模型

2.2.1 目标函数

内层优化调度模型以最大收益为优化目标,在

设定目标收益值的情况下,综合能源系统主要收益来源为售电、售热收入,运行成本主要是系统运行费用、维护费用以及电网电量购入费用^[10-16]。其优化目标函数可以表示为

$$\max \sum_{h=1}^T (C_{\text{sale},h} - C_{\text{run},h}) \quad (4)$$

式中: $C_{\text{sale},h}$ 为 h 时段能源系统销售收入; $C_{\text{run},h}$ 为 h 时段能源系统的运行成本; T 为优化调度计算周期。

综合能源系统的销售收益为

$$\begin{aligned} C_{\text{sale},h} &= C_{\text{ele},h} + C_{\text{heat},h} \\ &= \sum_{i=1}^{n_p} \lambda_{\text{ele},i}^h P_i^h + \sum_{i=1}^{n_q} \lambda_{\text{heat},i}^h Q_i^h \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $C_{\text{ele},h}$ 为 h 时段的系统售电收入; $C_{\text{heat},h}$ 为 h 时段的售热收入; $\lambda_{\text{ele},i}^h$ 为 h 时段系统第 i 种电能的销售价格; P_i^h 为 h 时段系统第 i 种电源的出力; $\lambda_{\text{heat},i}^h$ 为 h 时段系统第 i 种热源的销售价格; Q_i^h 为 h 时段系统第 i 种热源的出力。

综合能源系统的运行成本为

$$\begin{aligned} C_{\text{run},h} &= C_{\text{fuel},h} + C_{\text{ope},h} + C_{\text{grid},h} \\ &= \sum_{i=1}^{n_{\text{chp}}} \lambda_{\text{fuel},i}^h f(P_i^h) + \sum_{i=1}^{n_{\text{gb}}} \lambda_{\text{fuel},i}^h f(Q_i^h) \\ &\quad + \lambda_{\text{ope}}^h + \lambda_{\text{grid}}^h P_{\text{grid}}^h \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $C_{\text{fuel},h}$ 表示 h 时段的系统燃料费用; $C_{\text{ope},h}$ 为 h 时段系统运维费用; $C_{\text{grid},h}$ 为 h 时段购电费用; λ_{fuel}^h 为 h 时段天然气价格, f 为耗量特性曲线; P_i^h 为第 i 台燃气轮机的电功率输出, Q_i^h 为第 i 台调峰燃气锅炉的功率输出; λ_{ope}^h 为系统 h 时段的运维费用; λ_{grid}^h 为 h 时段购电或售电价格; P_{grid}^h 为 h 时段的系统购电量。

2.2.2 约束条件

综合能源系统优化调度模型的约束条件包括功率平衡约束、设备运行约束、设备容量约束等。

1) 电功率平衡方程式

$$\sum_{i=1}^{n_p} P_i^h + P_{\text{grid}}^h + P_{\text{store},\text{out}}^h - P_{\text{store},\text{in}}^h = P_{\text{load}}^h \quad (7)$$

式中: P_i^h 为 h 时段第 i 台机组发电功率; P_{grid}^h 为 h 时段从电网的购电量; $P_{\text{store},\text{out}}^h$ 、 $P_{\text{store},\text{in}}^h$ 分别为 h 时段蓄电池充放电输出和输入电功率; P_{load}^h 为 h 时段的负荷需求。

2) 热功率平衡方程式

$$\sum_{i=1}^{n_q} Q_i^h + Q_{\text{HStore},\text{out}}^h - Q_{\text{HStore},\text{in}}^h = Q_{\text{load}}^h \quad (8)$$

式中: Q_i^h 为 h 时段第 i 台机组输出的热功率; $Q_{\text{HStore},\text{out}}^h$ 、 $Q_{\text{HStore},\text{in}}^h$ 分别为 h 时段蓄热装置的输出、输入热功率; Q_{load}^h 为 h 时段系统热负荷需求。

3) 设备出力约束

$$\begin{aligned} P_{i,\text{min}} &\leq P_i^h \leq P_{i,\text{max}} \\ P_{\text{grid},\text{min}} &\leq P_{\text{grid}}^h \leq P_{\text{grid},\text{max}} \\ P_{\text{store},\text{out},\text{min}} &\leq P_{\text{store},\text{out}}^h \leq P_{\text{store},\text{out},\text{max}} \\ P_{\text{store},\text{in},\text{min}} &\leq P_{\text{store},\text{in}}^h \leq P_{\text{store},\text{in},\text{max}} \\ Q_{i,\text{min}} &\leq Q_i^h \leq Q_{i,\text{max}} \\ Q_{\text{HStore},\text{out},\text{min}} &\leq Q_{\text{HStore},\text{out}}^h \leq Q_{\text{HStore},\text{out},\text{max}} \\ Q_{\text{HStore},\text{in},\text{min}} &\leq Q_{\text{HStore},\text{in}}^h \leq Q_{\text{HStore},\text{in},\text{max}} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $P_{i,\text{max}}$ 、 $P_{i,\text{min}}$ 分别为第 i 台机组电功率的上、下限; $P_{\text{grid},\text{max}}$ 、 $P_{\text{grid},\text{min}}$ 分别为向电网购电的上、下限; $Q_{i,\text{max}}$ 、 $Q_{i,\text{min}}$ 分别为第 i 台机组热功率的上、下限; $P_{\text{store},\text{out},\text{max}}$ 、 $Q_{\text{HStore},\text{out},\text{max}}$ 、 $P_{\text{store},\text{in},\text{max}}$ 、 $Q_{\text{HStore},\text{in},\text{max}}$ 、 $P_{\text{store},\text{out},\text{min}}$ 、 $Q_{\text{HStore},\text{out},\text{min}}$ 、 $P_{\text{store},\text{in},\text{min}}$ 、 $Q_{\text{HStore},\text{in},\text{min}}$ 分别为储能蓄电与蓄热装置的单位时间输入、输出功率上、下限。

4) 储能装置能量约束

$$\begin{aligned} W_{e,\text{store},\text{min}} &\leq W_{e,\text{store}}^h \leq W_{e,\text{store},\text{max}} \\ W_{h,\text{store},\text{min}} &\leq W_{h,\text{store}}^h \leq W_{h,\text{store},\text{max}} \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $W_{e,\text{store}}^h$ 、 $W_{h,\text{store}}^h$ 为 h 时段储能装置的能量状态; $W_{e,\text{store},\text{max}}$ 、 $W_{h,\text{store},\text{max}}$ 、 $W_{e,\text{store},\text{min}}$ 、 $W_{h,\text{store},\text{min}}$ 分别为储能装置的最大和最小储能量。

2.3 模型求解方法

经济评价模型求解的核心在于内层生产优化调度的模型求解。内层函数为含有耗量特性曲线、热电比曲线的非线性函数模型,通过分段线性化的方法将问题转化为 0-1 混合整数线性规划问题,求解标准形式为^[10]

$$\begin{cases} \min c^T x \\ \text{s. t. } Ax = b \\ x_{\text{min}} \leq x_i \leq x_{\text{max}}, i \in I \\ x_j \in \{0,1\}, j \in J \end{cases} \quad (11)$$

式中: x 为源类设备的出力、转换设备的输入、储能的输入和输出、电网购电量的优化变量; 等式约束为能量平衡方程式以及储能设备的储能关系式; 不等式约束为各设备运行约束。由于约束条件中包含耦合变量,如蓄电池的充放电功率、电网的购电和回购功率等,因此在模型中引入 0-1 变量。

针对上述模型,可采用常用线性规划软件如 CPLEX 等对其求解,这里采用 Matlab 编写了基于 CPLEX 优化引擎的算法求解程序对该模型进行求解。

3 实例分析

3.1 边际条件

该案例位于重庆某规划工业园区,总面积约为 4.6 km²,是以环保及装备制造、医药化工、特色轻工产业功能为主的产业聚集区。园区用电负荷约为 30.96 MWh,热负荷约为 26 t/h。图 3 为园区典型日负荷曲线,由于工业园区生产型企业居多,且其倒班轮换的工作机制使得工业园区一般都具有较为稳定的电、热负荷。工业园区各类负荷都比较大,受季节性变化影响较小,案例中假设每月逐天的需求相同。园区综合能源系统方案如表 1 所示,对其 CHP 系统、光气互补系统进行评价比较。通过调研分析,该系统投资造价、负荷及光伏预测出力数据如表 2、表 3 所示。

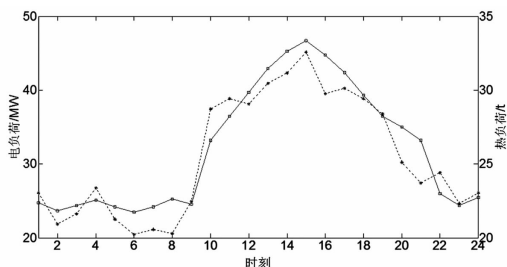


图 3 园区典型日电热负荷需求

表 1 园区综合能源系统方案

方案	综合能源系统方案
1	CHP 系统:电网 + CHP 系统
2	光气互补系统:电网 + CHP 系统 + 光伏机组

表 2 综合能源系统投资估算

系统设备	投资估算/万元
CHP 系统	16 531
中低压配电网	6808
光伏发电系统	2200

3.2 结果分析

为了验证所提经济评价方法的有效性,采用基于运行最优模拟的经济评价分析方法对两种设定的供能方案分别进行计算分析,分析边际条件如表 4 所示,两种方案优化计算结果如表 5 所示,日间热电调度情况如图 4、图 5 所示。该分析计算结果为假

定热价不变的情况下,以电价为测算指标进行计算。

表 3 光伏出力和负荷分布

序号	时刻	电负荷/ MW	热负荷/ (t · h ⁻¹)	光伏预测 功率/ MW
1	00:00—01:00	26.05	22.37	0
2	01:00—02:00	21.86	21.83	0
3	02:00—03:00	23.26	22.19	0
4	03:00—04:00	26.74	22.55	0
5	04:00—05:00	22.56	22.10	0
6	05:00—06:00	20.46	21.74	0.25
7	06:00—07:00	21.16	22.10	0.90
8	07:00—08:00	20.60	22.64	1.55
9	08:00—09:00	24.93	22.28	2.15
10	09:00—10:00	37.44	26.60	2.60
11	10:00—11:00	38.84	28.22	2.85
12	11:00—12:00	38.14	29.84	3.20
13	12:00—13:00	40.93	31.46	3.10
14	13:00—14:00	42.33	32.63	2.70
15	14:00—15:00	45.12	33.35	2.15
16	15:00—16:00	39.54	32.36	1.50
17	16:00—17:00	40.24	31.19	0.90
18	17:00—18:00	38.84	29.66	0.30
19	18:00—19:00	36.75	28.22	0
20	19:00—20:00	30.23	27.50	0
21	20:00—21:00	27.44	26.60	0
22	21:00—22:00	28.84	23.00	0
23	22:00—23:00	24.65	22.19	0
24	23:00—24:00	26.05	22.73	0

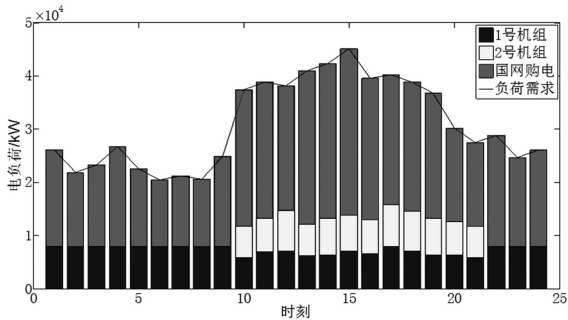
表 4 综合能源系统方案测算边际条件

参数	数值	参数	数值
融资比/%	0.2	天然气/Nm ³	1.8
贷款利率/%	4.9	容量电价/(元/kVA · 月)	24
贷款期限/a	10	建设期/a	1
运营期/a	30	网损率/%	0.5

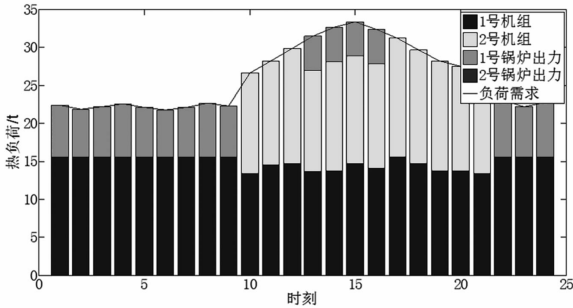
表 5 两种方案分析结果比较

方案	发电/ MW	产热/ GJ	生产成本/ 万元	目标收益率/ %	电价/ 元
1	85 029	597 568	16 375	5	0.603 1
2	93 095	597 568	16 183	5	0.596 5

注:分析结果按锁定项目资本金内部收益率 5% 的情况下进行测算。重庆市 110 kV 目录电价为 0.565 7 元/kWh, 10 kV 目录电价为 0.605 7 元/kWh, 含政府基金 0.049 7 元/kWh。

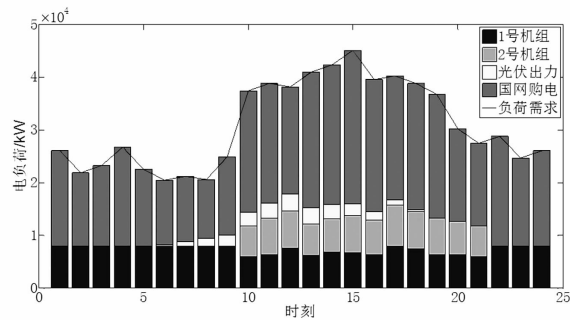


(a) 电负荷优化调度

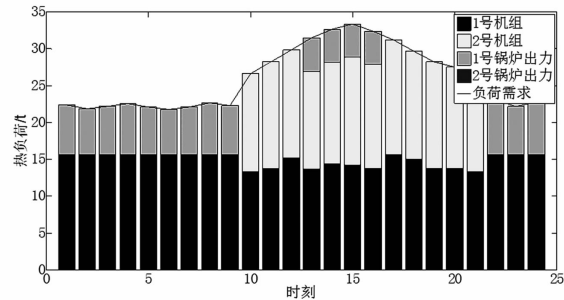


(b) 热负荷优化调度

图 4 电热负荷调度优化情况(方案 1)



(a) 电负荷优化调度



(b) 热负荷优化调度

图 5 电热负荷调度优化情况(方案 2)

对比方案 1 和方案 2 可以发现,通过增加光伏系统实现光气互补,能够在满足工程项目收益的情况下有效降低用户侧的用能成本,同时模拟得到全

生命周期的优化调度生产曲线。

在实际工程生产中,通常需要对销售侧电热价格进行比选计算,下面通过运行最优模拟的经济评价方法,将热价、电价作为双变量进行分析计算,给出了在方案 2 的基础上,当电力市场热价格浮动 5% 的情况下的对应电价格曲线,如图 6 所示。通过计算曲线,能够根据不同客户需求,制定不同热电市场交易套餐,即不同的热电价格组合,从而更有利于推进工程项目落地实施。

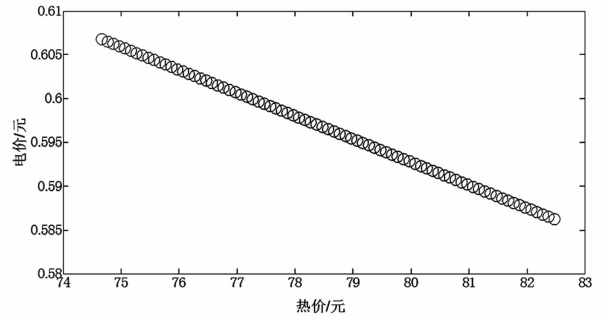


图 6 目标收益下终端电价、热价变化

4 结 语

前面提出了基于运行最优模拟的综合能源系统经济评价方法,建立了聚合燃气轮机、锅炉、风机、光伏、电热储能、电负荷、热负荷等的综合能源协调调度优化模型和全生命周期经济分析的经济评价模型,解决了传统综合能源规划设计中粗放式分析估算的问题。以重庆某园区 CHP 型综合能源系统为例,通过对不同供能方案下经济性的分析,验证该经济评价分析方法的有效性。结果表明,所提出的基于运行最优模拟的综合能源系统经济评价方法能够极大地提高综合能源规划设计分析的精确性和灵活性,能够更好地实现自然资源的合理配置和系统方案设计。

参考文献

[1] 贾宏杰,王丹,徐宪东,等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化,2015,39(7):198-207.
 [2] 张东霞,姚良忠,马文媛. 中外智能电网发展战略[J]. 中国电机工程学报,2013,33(31):1-14.
 [3] 胡燕飞,吴静怡,李胜. 冷热电联供系统的优化运行分析[J]. 华北电力大学学报,2010,31(1):5-9.
 [4] Siddiqui A S, Firestone R M, Ghosh Srijay, et al. Distribu-

- ted Energy Resources Customer Adoption Modeling with Combined Heat and Power Applications [R]. Berkeley, CA, USA: California Energy Commission, 2004.
- [5] 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.
- [6] 李赞,黄兴华. 冷热电三联供系统配置与优化策略的优化[J]. 动力工程, 2006, 26(6): 894-898.
- [7] 蒋润花,蔡睿贤,韩巍,等. 太阳能与冷热电联产系统集成[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(5): 721-724.
- [8] 张世翔,吕帅康. 面向园区微电网的综合能源系统评价方法[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2431-2438.
- [9] 国家发展改革委建设部. 建设项目经济评价方法与参数[M]. 北京: 中国计划出版社, 2006.
- [10] 王成山,洪博文,郭力,等. 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(31): 23-33.
- [11] 于波,孙恒楠,项添春,等. 综合能源系统规划设计方法[J]. 电力建设, 2016, 37(2): 78-84.
- [12] 夏永洪,吴虹剑,辛建波,等. 考虑风/光/水/储多源互补特性的微网经济运行评价方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 63-69.
- [13] 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.
- [14] 郑漳华,艾芊,徐伟华. 智能电网经济运行的多目标调度优化策略[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 7-13.
- [15] Mago P J, Chamra L M. Analysis and Optimization of CCHP Systems Based on Energy, Economical, and Environmental Considerations [J]. Energy and Buildings, 2009, 41(10): 1099-1106.
- [16] [泰]威拉昆·昂撒考(Weerakorn Ongsakul), [越]天·语·屋(Dien Ngoc Vo)著. 连晓峰译. 人工智能在电力系统优化中的应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.

作者简介:

马超(1990),男,硕士研究生,工程师,主要从事综合能源规划、工程经济性分析、智能配电网方面的研究工作。

(收稿日期:2020-08-08)

(上接第37页)

查找线路单相接地故障点试送时,根据需要,可临时退出接地跳闸出口压板。

3) 推广使用CT自产零序电流。从保护装置算法等方面升级,采用自产零序的方式,避免外接零序CT带来的一系列问题。

4 结语

随着城市配电网的不断发展,电缆线路越来越密集,电缆沟道数量急剧增加,对快速切除电缆线路单相接地故障的要求越来越高,对比开展了小电流接地系统单相接地故障时快速切除故障的研究与试点。

首先,对灵活并小电阻选线跳闸、灵活并中电阻选线跳闸、主动干预灭弧、分布式选线跳闸、集中式选线跳闸共5种接地选线跳闸方案的动作逻辑、主要优缺点进行了介绍及评述;然后,通过某电力公司试点建设的动作数据及运行经验,分析认为通过二次设备改造的分布式、集中式选线方案准确率较高,且不会对一次系统造成影响;最后,通过逐级配合选线跳闸后不会扩大停电范围,建议已投运变电站推荐集中式单相接地选线跳闸方案,新建与改造变电

站推荐分布式单相接地选线跳闸方案。

参考文献

- [1] 艾冰,张如恒,李亚军. 小电流接地故障选线技术综述[J]. 华北电力技术, 2009, 45(6): 45-49.
- [2] 李建鸿,夏金亮,蒋伟. 小电流接地系统单相接地故障分析及预防措施[J]. 山东电力技术, 2019, 41(6): 46-50.
- [3] 董雷,何林. 中性点接地方式对配电网可靠性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 96-101.
- [4] 李科峰,张海台,樊晓峰,等. 小电流接地故障选线技术探讨[J]. 山东电力技术, 2017, 44(241): 41-49.
- [5] 李谦,赵东生,肖磊石,等. 广东电网小电流接地系统中性点接地方式优化对策[J]. 广东电力, 2017, 30(12): 124-129.
- [6] 何满,梁庆光. 配电网小电流接地选线情况分析及提升措施[J]. 电气开关, 2016(2): 11-12.

作者简介:

周兰(1983),女,本科(工程硕士),高级工程师,主要从事电力系统继电保护方面的工作与研究;

尚超(1988),男,硕士研究生,工程师,主要从事电力系统调度与运行方式方面的工作与研究。

(收稿日期:2020-06-30)