

基于 NSGA-II 算法的互补能源接入 方案优化配置

张育颖, 谢品杰

(上海电力大学经济与管理学院, 上海 200090)

摘要:构建以电力为主体,融合热、气等不同形式能源,在生产、消费多个环节优势互补的多能源系统,是提升能源利用效率,促进能源清洁发展,构建能源互联网的关键。首先,依据风、光等分布式能源稳定模型,构建智慧城市多能互补系统架构;然后综合考虑投资商、电力公司、用电客户等能源主体利益,以系统潮流、接入互补能源的节点电压、装机容量等为条件,建立智慧城市多能互补系统规划模型;最后,引入改进的遗传进化算法,确定模型的寻优流程,对多能互补系统能源网络接入能源的节点位置与装机容量进行优化求解。结果表明,对多能互补系统合理规划,有助于智慧城市能源供应向清洁、可持续化方向发展。

关键词:智慧城市;能源互联网;多能互补系统;NSGA-II算法;效益评估

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.05.019 中图分类号:TM61 文章编号:1673-9140(2021)05-0153-05

Research on multi-energy supplement system optimization method based on NSGA-II

ZHANG Yuying, XIE Pinjie

(School of Economics and Management, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Constructing a multi-energy supplement system that combines heat, gas and other forms of energy, with electric power as its main energy, and has complementary advantages in multiple parts of production and consumption, is the key for improving energy efficiency, promoting clean energy development, and building energy Internet. Firstly, according to the distributed energy (such as wind, light, etc.) stability model, the smart city multi-energy supplement system architecture is constructed. Secondly, by comprehensively taking the investors, power companies, electricity customers and other energy interest bodies into consideration, the smart city multi-energy supplement system planning model on the conditions of power flow, node voltage with complementary energy, and installed capacity, is built. Thirdly, the improved genetic algorithm is introduced to determine the optimization flow of the model, and the node location and capacity of the energy network of multi-energy supplement system are optimized. The results show that the proper planning of multi-energy supplement system is helpful to the development of energy supply in smart city to be cleaner and more sustainable.

Key words: smart city; energy internet; multi-energy supplement system; NSGA-II algorithm; benefit evaluation

近年来,随着城市能源消费量持续快速增长,能源供需矛盾日趋紧张。能源危机与环境污染 2 大难题促使人们开始对电、热、气等多形式能源的互补利用进行探索^[1-3]。能源互联网以可再生能源为主要能源,纵向上实现“源—网—荷—储”协调,横向上实现多源互补,包括天然气系统、冷热供应系统等,是面向用户的高效综合能源网络^[4-5]。文献[6-8]展示了综合考虑电、热、气等不同形式能源协同优化是构建能源互联网基础的愿景;文献[9-10]对未来能源系统进行战略布局,描绘了能源互联网从能源生产、输送、转化、消耗等一整套的能源体系;文献[11-13]针对城市能源互联网的基本架构与组成进行了论述,并建立了基本模型;文献[14]对面向用户供电、供热和供冷的多能源供给系统提出了供能质量综合评价的应用思路。面对多形式能源在生产、消费等各个环节的协同互补作用越来越强的趋势,中国前期对多类能源的分开规划,独立运行的方式已不能满足能源清洁高效利用的要求,多能互补才是实现产能用能的清洁高效的有效方式。在能源生产侧,热电联产机组在产生电能的同时,热能也可以同时利用^[15];在能源消费侧,用户能够选择消费不同的能源而达到同样的效果,如用户可意愿选择空调、地热或者热管道等不同的取暖方式。文献[16]指出在配、用环节利用冷、热、电、气等能量的相互转化和替代来建设智慧城市能源互联网。智慧城市多能互补系统需要从能源供给、输送、消费等多源大数据以及协同优化调控等方面建立架构模型。文献[17]从分布式能源智能调控管理、能源生产消费一体化、多源协同优化调度等方面探讨了未来的智慧城市能源互联网的运营模式。美国能源部提出能源集成系统发展计划,旨在加快电、热、气等多形式能源集成技术在相关领域内的应用与推广^[18]。瑞士也启动了综合考虑各种能源形式,实现多能源系统集成,以产生协同效应的研究项目“未来能源网络愿景(Vision of Future Energy Networks)^[19]。国际杂志《IEEE Power & Energy Magazine》也在 2013 年设置了专栏,对中国、美国、瑞士、丹麦等国家多能源系统的研

究进行分析和报导^[20-24]。文献[25-27]提出了建设新型智慧城市能源网络是以电力为主体,同时耦合天然气、热能和交通等多种能源形式的综合能源系统,指出目前能源规划主体不再是独立的电网公司,而应实现多种能源系统间的利益均衡。多能互补是能源发展的必然趋势,从能源的不同主体去考虑,包括能源建设运营投资商、负责电力输配环节的电网公司、“自发自用为主,余电上网”的用户角度、国家地方节能减排标准目标等角度去考虑,不同的主体供需不同,综合考虑各方面的需求,求解整体利益最大化。

1 多能互补系统架构

多能互补系统能源流架构如图 1 所示,多能互补系统是多种一、二次能源相互转化、互相补充、综合利用,借鉴互联网思维,通过能源系统与信息通信系统的深度融合,实现多能源的传输、分配、存储、交易、消费以及相互之间的转换和交互,构建高效、清洁、智慧的能源网络。

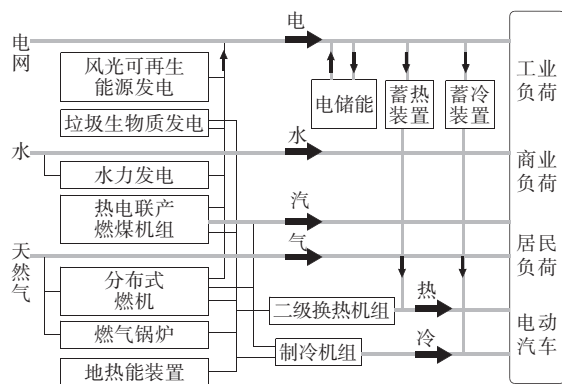


图 1 多能互补系统能源流架构

Figure 1 Multi-energy supplement system energy flow

2 多能互补系统数学模型建立

从分布式能源的不同能源主体角度考虑,建立优化模型。充分考虑分布式能源投资商、电网公司、电力用户的各方效益,建立投资商年投资效益最大、电网有功损耗最小、用户静态电压稳定性最好的多

目标函数模型,并依据风能、光能等分布式能源出力的间歇性和波动性,建立相应的机会约束规划模型,保证供能系统的安全性和稳定性。

2.1 目标函数的确定

1) 从各类分布式能源投资商角度考虑。从投资商的角度,以年收益最大化为目标,投资商年收益最大目标函数为

$$\begin{cases} \max f_1 = C_{in} - C_{inv} \\ C_{inv} = \sum_{i=1}^{N_{DG}} \alpha_{DGi} P_i C_i^{fix} + \sum_{i=1}^N P_i C_i^{op} T_i \\ C_{in} = \sum_{i=1}^{N_{DG}} (C_{Gi} + C_{Ai}) P_i T_i \end{cases} \quad (1)$$

式中 C_{in} 、 C_{inv} 为收益和分布式能源投资; N_{DG} 为分布式电源数目; P_i 为第 i 个分布式电源的容量; C_i^{fix} 为分布式电源单位容量安装成本; C_i^{op} 为分布式电源单位容量运行维护成本; T_i 为分布式电源年等效运行小时数; α_{DGi} 为年费用折算系数; C_{Gi} 为电源上网电价; C_{Ai} 为政府补贴电价。

2) 从电网公司角度考虑。电网公司以电能传输的过程中能量损耗量最小为目标,多类分布式能源的合理接入可以很好地降低系统的有功损耗。

$$\min f_2 = \sum_{i=1}^N R_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \quad (2)$$

式中 N 为总的支路数; R_i 为第 i 条支路的电阻; P_i 、 Q_i 、 V_i 分别为第 i 个节点的有功功率、无功功率和电压值。

3) 从用户角度考虑。用户希望通过配电网得到可靠优质的电能,而电力系统电压的波动异常会导致系统的异常,进而给用户带来经济损失。用户总是希望系统电压维持在一个相对稳定的水平,用指标 L 表示。 L 表示的是系统支路电压稳定性,一个系统的稳定性往往是由系统中最薄弱的线路决定的,只需考虑支路中的最大值最小,即

$$L = \max(L_1, L_2, \dots, L_{N-1}) \quad (3)$$

其中, L 越小,系统电压稳定裕度越大,系统就越稳定,用户获得电能也就越稳定,电压稳定指标为

$$\min U = \min L \quad (4)$$

2.2 约束条件的确定

考虑到分布式能源出力的波动性和间歇性,潮流约束采用不等式约束,根据实际情况,使潮流在给定的置信度水平下成立。

1) 能源系统潮流约束。

$$P \{P_G + P_{DG} \geq P_L + P_{loss}\} \geq \beta_1 \quad (5)$$

$$P \{Q_G + Q_{DG} \geq Q_L + Q_{loss}\} \geq \beta_2 \quad (6)$$

式(5)、(6)中 P_G 、 Q_G 为系统注入的有功功率和无功功率; P_{DG} 、 Q_{DG} 为分布式电源产生的有功功率和无功功率; P_L 、 Q_L 为系统有功和无功负荷; P_{loss} 、 Q_{loss} 为系统有功和无功网损; β_1 、 β_2 为置信水平参数。

2) 各节点接入能源装机容量约束。

$$0 \leq P_{DG_i} \leq P_{DG_i}^{\max} (i = 1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

3) 接入系统的能源总容量约束。由于分布式电源的出力受自然条件影响较大,具有很大的间歇性和波动性,如果配电网安装太大容量的分布式电源,会导致潮流反向,给系统带来很大的负面影响。故必须对配电网分布式电源总的安装容量进行限制,即

$$\sum_{i=1}^N P_{DG_i} \leq a P_L \quad (8)$$

式中 a 为分布式电源总安装容量占配电网总的有功负荷的比例。

4) 接入能源的节点电压约束。

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad (9)$$

式中 U_{\min} 、 U_{\max} 分别为配电网节点所允许的最小电压和最大电压。

5) 环保性约束。多能互补系统年二氧化碳(CO_2)排放量 E_{CO_2} 小于智慧城市环保标准 N_{CO_2} , 即

$$f_3(E_{CO_2}) \leq N_{CO_2} \quad (10)$$

3 求解寻优算法的选取

NSGA 算法适用于解决多目标优化问题,相比于传统的遗传算法,NSGA-II 计算了不同个体的拥

拥挤度,可以最大限度的挑选出多目标的优选个体,并且保留了种群的多样性。拥挤度的计算也可以更加客观地区分出同一等级个体的分布密度,使得选择过程中的最优个体分布更加均匀,算法流程如图2所示。

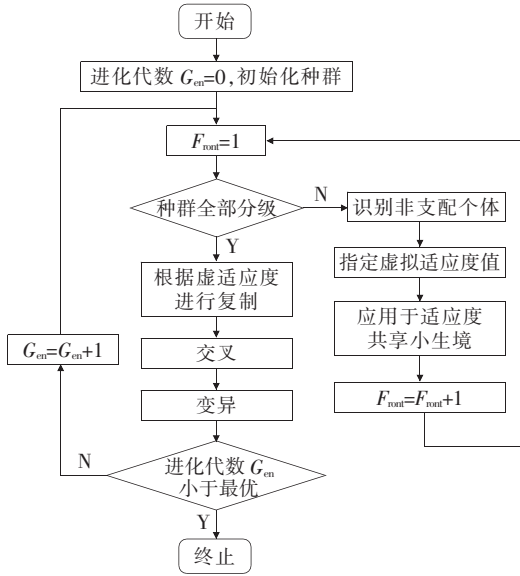


图2 遗传算法

Figure 2 Flow chart of genetic algorithm

4 多能互补优化算例分析

根据建立的多目标优化模型,选取 IEEE 33 节点算例的基础上,并运用 NSGA-II 算法在以下几种仿真实验下分别对多种能源的接入位置、容量、能源类别进行优化,充分考虑“管住中间,放开 2 头”背景下的三方利益主体,模拟出不同目标下的 Pareto 最优解集。

4.1 算例节点选取

选用 IEEE 33 节点典型网络进行仿真计算,如图3所示,网络参数见表1,接入各类分布式能源参数见表2。

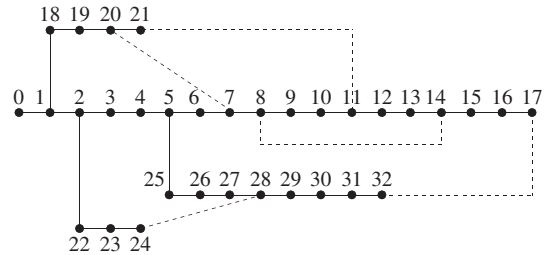


图3 IEEE 33 节点典型网络节点

Figure 3 Typical network node graph of IEEE33 node system

表1 IEEE 33 节点配电网线路参数

Table 1 Distribution line parameters of IEEE33 node system

节点		支路阻抗	节点 j 负荷	节点		支路阻抗	节点 j 负荷
i	j			i	j		
0	1	$0.092\ 2 + j0.047\ 0$	$100 + j60$	16	17	$0.372\ 0 + j0.574\ 0$	$90 + j40$
1	2	$0.493\ 0 + j0.251\ 1$	$90 + j40$	1	18	$0.164\ 0 + j0.156\ 5$	$90 + j40$
2	3	$0.366\ 0 + j0.186\ 4$	$120 + j80$	18	19	$1.504\ 2 + j1.355\ 4$	$90 + j40$
3	4	$0.381\ 1 + j0.194\ 1$	$60 + j30$	19	20	$0.409\ 5 + j0.478\ 4$	$90 + j40$
4	5	$0.819\ 0 + j0.707\ 0$	$60 + j20$	20	21	$0.708\ 9 + j0.937\ 3$	$90 + j40$
5	6	$0.187\ 2 + j0.618\ 8$	$200 + j100$	2	22	$0.451\ 2 + j0.308\ 3$	$90 + j50$
6	7	$0.711\ 4 + j0.235\ 1$	$200 + j100$	22	23	$0.898\ 0 + j0.709\ 1$	$420 + j200$
7	8	$1.030\ 0 + j0.740\ 0$	$60 + j20$	23	24	$0.896\ 0 + j0.701\ 1$	$420 + j200$
8	9	$1.044\ 0 + j0.740\ 0$	$60 + j20$	5	25	$0.203\ 0 + j0.103\ 4$	$60 + j25$
9	10	$0.196\ 6 + j0.065\ 0$	$45 + j30$	25	26	$0.284\ 2 + j0.144\ 7$	$60 + j25$
10	11	$0.374\ 4 + j0.123\ 8$	$60 + j35$	26	27	$1.059\ 0 + j0.933\ 7$	$60 + j20$
11	12	$1.468\ 0 + j1.155\ 0$	$60 + j35$	27	28	$0.804\ 2 + j0.700\ 6$	$120 + j70$
12	13	$0.541\ 6 + j0.712\ 9$	$120 + j80$	28	29	$0.507\ 5 + j0.258\ 5$	$200 + j600$
13	14	$0.591\ 0 + j0.526\ 0$	$60 + j10$	29	30	$0.974\ 4 + j0.963\ 0$	$150 + j70$
14	15	$0.746\ 3 + j0.545\ 0$	$60 + j20$	30	31	$0.310\ 5 + j0.361\ 9$	$210 + j100$
15	16	$1.289\ 0 + j1.721\ 0$	$60 + j20$	31	32	$0.341\ 0 + j0.536\ 2$	$60 + j40$

表 2 接入各类分布式能源的参数

Table 2 Parameters of grid-connected DG

电源类型	功率因数	容量/kW	安装成本/(万元/kW)	运行成本/(元/kW·h)	上网电价/元	政府补贴电价/元	年最大运行小时数/h	折旧年限/a
风能	0.9	0~1 000	1.2	0.045 0	0.56	0.18	248 0	20
光能	1.0	0~1 000	2.2	0.009 6	0.95	0.42	146 8	15
微燃机	0.9	0~2 000	0.6	0.120 0	0.45	0.00	328 0	10

IEEE 33 节点网络中,若 1~32 节点均可接入分布式能源,现研究风能、光能、燃气轮机 3 种类型的能源接入系统进行多能互补。

4.2 算例分析

若无能源接入系统互补时单一火电系统总的网损为 0.202 65 MW,电压稳定指标为 0.074 592,银行基准利率假定为 4%。研究分析风能、光伏、微型燃气轮机等类型能源不同位置、不同容量的能源接入多能互补系统对能源网络的影响,并做出模拟仿真实验,进而得出结论。

4.2.1 接入互补能源及改善能源系统参数

多能源互补可以明显改善线路网损和电压稳定指标 L ,当分布式能源接入线路末端时,网损改善效果较其他节点较为明显。当分布式能源接入系统 11~17 和 29~32 节点时,系统网损分别改善了 36.5、36.6、36.1、35.7、34.7、34.8、30.1、36.7、37.2、36.6、37.8%,同时电压稳定指标也得到了相应的改善,相比于原来的 0.074 592,优化比例近 30%。

分布式能源接入前后的节点电压变化情况如图 4 所示。由图 4 可知,在不同位置接入分布式能源,节点电压幅值有着显著的变化。当系统未接入其他能源时,节点 11 附近的电压为 11.75 kV,支路 10~

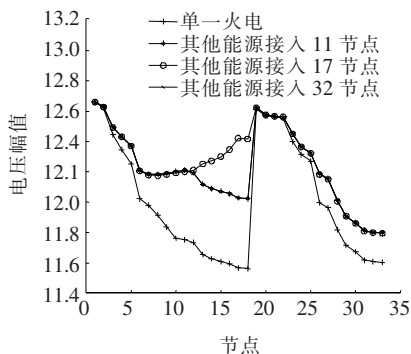


图 4 不同位置分布式能源接入后系统节点电压分布
Figure 4 Distribution of the system node voltage for different location DGs

11 线路网损为 553.68 W,支路 10、11 电压稳定指标为 0.003 698 5;当在节点 11 接入 1 MW 的风能时,节点 11 电压变为 12.2 kV,支路 10、11 的网损变为 354.52 W,相应支路电压稳定指标变为 0.002 802 7,具体优化比例如图 5 所示,此时电压幅值、网损、电压稳定性指标改善比例分别为 3.83、35.97、2.42%,相比优化前网损有大幅度的改善,电压幅值和电压稳定指标也有一定提升,改善效果如图 5 所示。

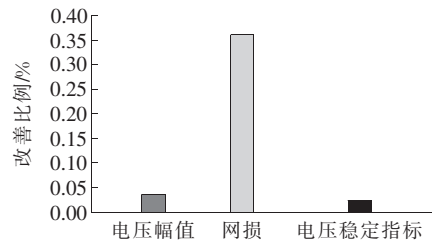


图 5 多能互补各指标改善比例

Figure 5 Improved percentage of multi-energy supplement indices

4.2.2 能源的装机容量优化配置

能源接入位置确定的情况下,若在节点 2、17、32 同时安装光伏发电装置,容量为 0~1 MW,遗传算法种群个体数取 100,迭代次数取 50,对能源系统进行兼顾三方利益的多目标优化,得 Pareto 的最优解集如图 6 所示。

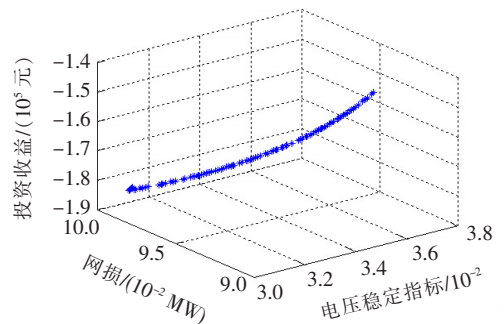


图 6 多目标利益优化的 Pareto 最优解集
Figure 6 Pareto optimal solution set for multi-objective optimization

由解集可知,不同的能源容量配置情况下,优化求解后的多目标函数不能同时达到最优。当年投资收益最大时,线路网损比较大;当线路网损较小时,投资收益会变小,同时电压稳定指标会增大。

在 Pareto 最优解集中不同的解对应 3 个目标函数的不同值,现对 4 组典型的最优解进行对比,4 组解分别对应投资商收益最大、电压稳定指标最小、网损最小和兼顾 3 个目标,具体结果如表 3 所示。

表 3 容量优化后的 4 组典型最优解分析

Table 3 Optimal solution analysis after capacity optimization

不同情形	年投资收益/万元	电压稳定指标	有功网损/MW	节点容量/MW		
				2	17	32
投资收益最大	18.244	0.031	0.099 0	1.000	1.000	1
电压稳定最优	17.993	0.030	0.098 0	1.000	0.978	1
网损最小	15.259	0.035	0.092 6	0.100	0.734	1
兼顾三者	16.849	0.032	0.095 0	0.999	0.876	1

4.2.3 能源的接入位置优化配置

同时优化分布式能源接入位置及其装机容量。分布式能源接入的位置和容量对分布式能源的投资收益、线路网损、电压稳定性都有密切关系。假设系统中节点 1~32 均可接入分布式能源,若接入的全是风电,则 Pareto 最优解如图 7 所示。

Pareto 最优解集中的 3 个代表性方案如表 4 所示。3 个方案分别对比了 3 种典型情况下的分布式能源的优化配置情况,各方案对应的节点分布式能源容量分布如图 8~10 所示。

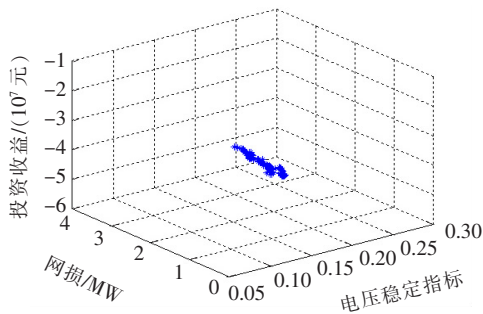


图 7 优化能源容量和位置时的 Pareto 最优解
Figure 7 Pareto optimal solutions of optimizing energy capacity and location

表 4 优化能源容量和位置时 3 种配置方案下的各项指标

Table 4 Indicators under three configurations when optimizing energy capacity and location

方案	年投资收益/万元	网损/MW	电压稳定指标
未接其他能源	0.0	0.202 650	0.074 498
1	5 905.9	3.129 900	0.264 730
2	3 238.3	0.936 130	0.130 630
3	1 922.9	0.293 500	0.070 746

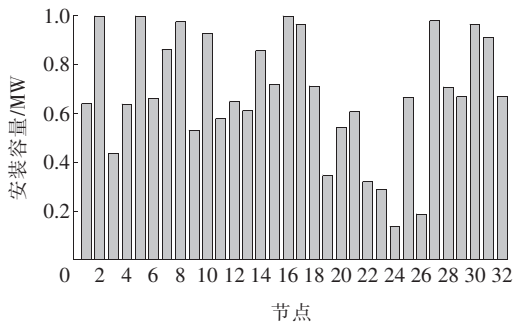


图 8 方案 1 的分布式能源容量分布

Figure 8 Distributed energy capacity allocation of mode 1

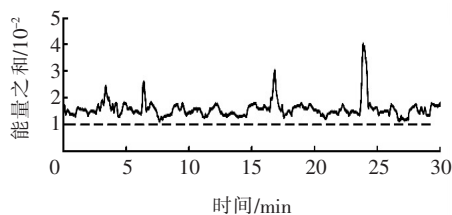


图 9 方案 2 的分布式能源容量分布

Figure 9 Distributed energy capacity allocation of mode 2

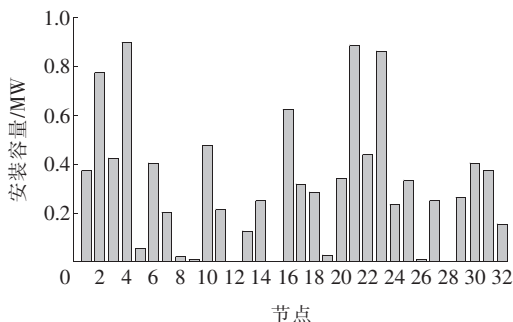


图 10 方案 3 的分布式能源容量配置

Figure 10 Distributed energy capacity allocation of mode 3

由图 8~10 可知,方案 1 情形下的分布式能源总容量是最大的,且分布较为均匀;方案 2 和方案 3 接入的分布式能源容量分布不均,且总容量相对较少。从表 4 可以看出方案 1 带来的投资收益是最好的,但网损和电压稳定指标有所下降,方案 3 的网损和电压稳定指标最好,但投资收益相对较少,方案 2

能够权衡 3 个目标的总体利益。

4.2.4 不同类型能源的位置容量优化配置

能源系统接入多种类型的分布式能源时,需要合理配置各类型能源的接入位置和容量才能更好发挥多能互补作用。假设在节点 15、16、17 分别安装风机、光伏、微型燃气轮机,各能源容量如表 2 所示。则根据算法可优化得出 Pareto 最优解集如图 11 所示,为了对比 3 种类型的分布式能源接入对系统带来的影响,仿真同时出在 15、16、17 节点时,只安装风机、光伏、微型燃气轮机的 Pareto 最优解,分别如图 12~14 所示。

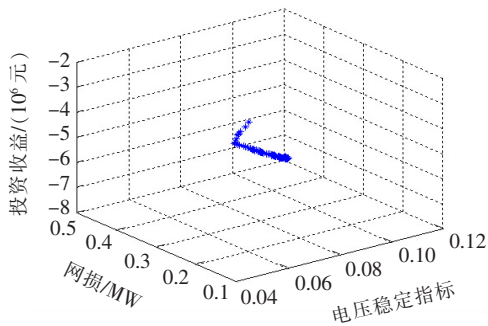


图 11 同时接入 3 种类型能源时的 Pareto 最优解
Figure 11 Pareto optimal solution for simultaneous access to three types of energy

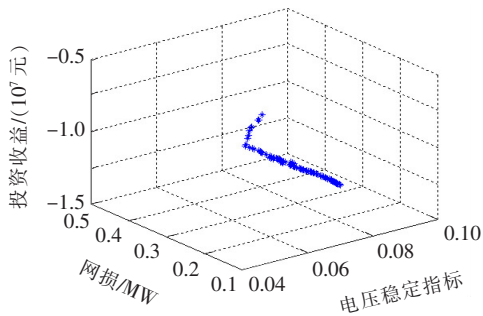


图 12 仅接入风能时的 Pareto 最优解
Figure 12 Pareto optimal solution for wind energy access only

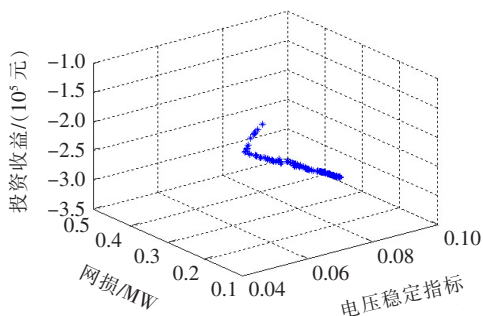


图 13 仅接入光伏时的 Pareto 最优解
Figure 13 Pareto optimal solution for PV access only

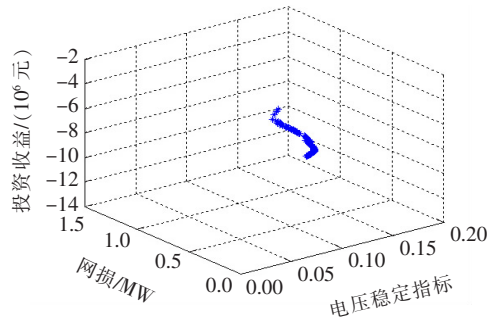


图 14 仅接入微型燃气轮机时的 Pareto 最优解
Figure 14 Pareto optimal solution for micro gas turbine access only

由以上仿真 Pareto 最优解集对比可以看出,在不同的节点接入不同种类、不同容量的分布式能源,所得的投资收益是差别非常大的。在分布式能源一定容量的装机范围内,多能互补对系统网损和电压稳定指标都是有所改善的,但是当接入容量过大时,会导致潮流反向流动,所以多能互补系统规划时必须因地制宜,合理地规划所接入能源装机容量与能源类型。通过算例仿真,对所建立的互补能源接入系统方案优化配置模型进行了验证;对仿真结果的分析证明了在能源系统接入互补能源的可行性与必要性。

目前中国正处于能源转型时期,培育天然气成为转型主体能源之一已成为必然趋势。微型燃气轮机发电以天然气为燃料,其输出有多种模式,采用热电联产和冷热电三联产等形式,使能源得到梯级利用,从而获得更好的收益。随着能源互联网、智慧城市的建设,天然气分布式能源的优点会越来越凸显,冷热电三联供将更加适用于智慧园区中智能楼宇的建设规划。在智慧城市的建设中,存量能源系统的互补改造工程众多,该文所建立的互补能源接入系统优化配置模型为多能互补系统的构建提供了参考。

5 结语

在智慧城市与能源互联网背景下,多能源互补的综合能源系统也逐渐成为能源发展的关键问题。该文构建了未来能源系统的多能互补架构,参考现已逐渐完善的风、光、微燃机模型,以投资商、电力公司、用电客户三方利益最优为目标,综合能源系统的多种约束,建立了多目标的优化模型,并通过带精英策略的改进遗传算法求解。对能源系统的多能源接

入方案进行了合理地优化配置,通过仿真分析可以得出多能源接入能源系统的容量、位置、类别方案,这为智慧城市建设中综合能源系统的构建提供了参考。但目前对于多能互补的研究仍处于探索阶段,对多种能源的协同优化和控制存在一些不足,对于不同类能源的安装配比及其相互影响仍需深入研究,需要加强对多能互补的深入研究再配合储能,从而更好地促进智慧城市能源系统的供需平衡与清洁可持续发展。

参考文献:

- [1] 梁曦东. 高电压工程[M]. 北京:清华大学出版社,2006:68-69.
- [2] 吴传奇,丁黎,贺恒鑫,等. 湖南省电网雷电活动时空分布特征[J]. 高电压技术,2010,36(4):932-938.
WU Chuanqi, DING Li, HE Hengxin, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of lightning activity of Hunan Power Grid[J]. High Voltage Engineering, 2010,36(4):932-938.
- [3] 马奔. 雷电监测地理信息系统的研究与数据分析实践[D]. 成都:电子科技大学,2011.
- [4] 张涛,郭玥彤,李逸鸿,等. 计及电气热综合需求响应的区域综合能源系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(1):52-61.
ZHANG Tao, GUO Yuetong, LI Yihong, et al. Optimization scheduling of regional integrated energy systems based on electric-thermal-gas integrated demand response[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1):52-61.
- [5] 罗庆,张新燕,罗晨,等. 新能源发电中储能综合利用的优化评估[J]. 智慧电力,2020,48(9):51-55+62.
LUO Qing, ZHANG Xinyan, LUO Chen, et al. Optimal evaluation of energy storage comprehensive utilization in new energy generation[J]. Smart Power, 2020, 48(9):51-55+62.
- [6] Meyer V K, Höller H, Betz H D. Automated thunderstorm tracking: utilization of three-dimensional lightning and radar data[J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013,13(10):5137-5150.
- [7] 魏瑞增,李敏,王彤,等. 雷暴天气识别及其在电网运行中的应用[J]. 电网与清洁能源,2019,35(9):12-24.
WEI Ruizeng, LI Min, WANG Tong, et al. Thunderstorm weather identification and its application in power grid operation[J]. Power System and Clean Energy, 2019,35(9):12-24.
- [8] 高文胜,张博文,周瑞旭,等. 基于雷电定位系统监测数据的雷暴云趋势预测[J]. 电网技术,2015,39(2):523-529.
GAO Wenshen, ZHANG Bowen, ZHOU Ruixu, et al. Nowcasting of the thunderstorm trend based on data collected by lightning location system[J]. Power System Technology, 2015,39(2):523-529.
- [9] 胡豪,陶鑫. 基于雷电定位系统的山区地形地闪密度差异研究[J]. 高压电器,2020,56(10):190-196.
HU Hao, TAO Xin. Study on Difference of ground flashover density in mountain terrain based on lightning location system[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(10):190-196.
- [10] Guo J T, Gu S Q, Feng W X, et al. A lightning motion prediction technology based on spatial clustering method[C]//7th Asia-Pacific International Conference on Lightning, Chengdu, China: IEEE, 2011.
- [11] 刘林,张运洲,王雪,等. 能源互联网目标下电力信息物理系统深度融合发展研究[J]. 中国电力,2019,52(1):2-9.
LIU Lin, ZHANG Yunzhou, WANG Xue, et al. Research on deep integration of power cyber physical system under energy internet goals[J]. Electric Power, 2019,52(1):2-9.
- [12] 刘英培,栗然,梁海平. 基于最小二乘支持向量机优化自抗扰控制器的永磁同步电机直接转矩控制方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(27):4654-4664.
LIU Yingpei, SU Ran, LIANG Haiping. Direct torque control for permanent magnet synchronous motor based on active-disturbance rejection control optimized by least squares support vector machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2014,34(27):4654-4664.
- [13] 李德斌,文凯,赵雪琳,等. 输电线路多脉冲雷电响应探讨[J]. 电测与仪表,2020,57(2):88-94.
LI Debin, WEN Kai, ZHAO Xuelin, et al. Discussion on multi-impulse lightning response of transmission lines[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(1):88-94.
- [14] 李家启. 基于LLS的重庆地区雷电活动规律及其风险评估研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2012.