

分类号	
UDC	
密 级	
学 号	2150320017

西安理工大学 硕士学位论文

计及电动汽车充电负荷的微电网能量优化调度研究

朱宗耀

学 科 名 称: 电力系统及其自动化

学 科 门 类: 工 学

指 导 教 师: 张 志 禹 教授

申 请 日 期: 2018 年 6 月

独创性声明

本人所呈交的学位论文是在导师指导下进行的研究工作及取得的成果。尽我所知，除特别加以标注的地方外，论文中不包含其他人的研究成果。与我一同工作的同志对本人的研究工作和成果的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并已致谢。

本论文及其相关资料若有不实之处，由本人承担一切相关责任。

论文作者签名：朱宗耀 2018 年 6 月 25 日

学位论文使用授权

本人作为学位论文作者了解并愿意遵守学校有关保留、使用学位论文的规定，即：在导师的指导下创作完成的学位论文的知识产权归西安理工大学所有，本人今后在使用或发表该论文涉及的研究内容时，会注明西安理工大学。西安理工大学拥有学位论文的如下使用权，包括：学校可以保存学位论文；可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文；可以查阅或借阅。本人授权西安理工大学对学位论文全部内容编入公开的数据库进行检索。本学位论文全部或部分内容的公布（包括刊登）授权西安理工大学研究生院办理。

经过学校保密办公室确定密级的涉密学位论文，按照相关保密规定执行；需要进行技术保密的学位论文，按照《西安理工大学学位论文技术保密申请表》内容进行保密（附《西安理工大学学位论文技术保密申请表》）。

保密的学位论文在解密后，适用本授权。

论文作者签名：朱宗耀 导师签名：张友军 2018 年 6 月 25 日

论文题目：计及电动汽车充电负荷的微电网能量优化调度研究

学科专业：电力系统及其自动化

研究生：朱宗耀

签名：朱宗耀

指导教师：张志禹教授

签名：张志禹

摘 要

随着社会经济的不断发展，能源紧缺和环境污染问题日益严重，实现发电侧的清洁能源替代和用电侧的电替代具有重大而迫切的现实意义。微网由于可以解决大电网与分布式电源的融合问题，实现多能互补，因此是清洁能源替代的重要途径。而随着交通电气化，未来电动汽车（Electric Vehicle, EV）在电替代方面具有很大的潜力。因此，十分有必要研究微网的运行优化及电动汽车的接入对微网优化调度的影响。

本文首先详细分析了微网中常见分布式电源的工作原理及运行特性，并通过分析电动汽车的行驶特性，在考虑电动汽车动力电池荷电状态约束及峰谷电价的基础上，采用蒙特卡洛仿真方法分别建立了电动汽车无序充电和有序充放电时的负荷模型。

然后分别建立了含电动汽车的微网在并网和孤岛两种运行模式下的经济优化模型，提出了运行成本最低、污染治理成本最小和综合成本最低的多目标优化函数。分析介绍了天牛须搜索（Beetle Antennae Search, BAS）算法，针对其全局搜索能力较弱，容易出现早熟现象的问题，在其基础上设计了改进的天牛须搜索算法。

最后根据微网的不同运行模式及电动汽车的不同入网方式制定了4种含电动汽车的微网运行控制策略。采用改进的天牛须搜索算法对经济优化模型进行了求解，通过算例仿真，分析对比了微网在不同运行控制策略、不同优化目标及不同权重系数下的调度方案，并对电动汽车的需求侧响应进行了分析。

仿真结果表明：电动汽车采用有序充放电入网方式，不仅有益于微网的“削峰填谷”、减小负荷波动，还可提高微网运行经济性，降低电动汽车车主用电成本；同时，仿真结果表明微网运行于并网模式比运行于孤岛模式时更具经济性。

关键词：微网；电动汽车；经济调度；改进的天牛须搜索算法；需求侧响应


**Title: Research on Energy Optimization Dispatch of Microgrid
Considering Charging Load of Electric Vehicles**

Major: Power System and its Automation

Name: Zongyao Zhu

Supervisor: Prof. Zhiyu Zhang

Signature: 

Signature: 

Abstract

With the continuous development of the social economy, the problem of energy shortage and environmental pollution is becoming more and more serious. It is of great and urgent practical significance to realize the replacement of clean energy on the power generation side and the replacement of electric energy on the electric side. Because microgrid can solve the problem of convergence between large power grid and distributed generation, it can realize multiple energy complementarity, so it is an important way to achieve clean energy substitution. With the electrification of electric vehicles, Electric Vehicles (EVs) will have great potential in the future. Therefore, it is very necessary to study the optimization of microgrid operation and the influence of electric vehicle access on the optimal scheduling of microgrid.

In this paper, the working principle and operating characteristics of the common distributed generators in the microgrid are analyzed in detail. On the basis of the analysis of the driving characteristics of the electric vehicle, the state of the power charge and the time sharing price, the Monte Carlo simulation method was used to establish the load model of the disordered charging and ordered charging and discharging of electric vehicles.

Then, the economic optimization model of microgrid with electric vehicles in two operating modes of grid and island was established respectively. And the multi-objective optimization function was proposed, which is the lowest operating cost, the least pollution control cost and the lowest comprehensive cost. In this paper, the Beetle Antennae Search (BAS) algorithm was introduced and analyzed. In view of its weak global search ability and the premature convergence, an improved search algorithm for the BAS was proposed.

Finally, according to the different operation modes of microgrid and the different network entry modes of electric vehicles, four kinds of microgrid operation control strategies including electric vehicles were formulated. The optimization model of the economy was solved by the improved BAS algorithm. Through the simulation, the scheduling schemes of the microgrid under different operation control strategies, different optimization targets and different weight coefficients were analyzed and compared. And the demand side response of the electric vehicle was analyzed too.

The results showed that the sequential charging and discharging mode of electric vehicles was not only beneficial to the "cutting peak and valley" of the microgrid, reducing the load fluctuation, but also improving the operation economy of the microgrid. At the same time, compared to unordered charging, the use of ordered charge and discharge can significantly reduce the cost of power consumption for the owner of the car. And the simulation results showed that the microgrid was more economical when it runed in the grid mode than in the island mode.

Key words: Microgrid; Electric Vehicle; Economic Dispatch; Improved Beetle Antennae Search algorithm; Demand Response

目 录

1 绪论.....	1
1.1 研究的背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 微网的研究现状.....	2
1.2.2 V2G 技术的研究现状.....	4
1.2.3 微网经济调度的研究现状.....	5
1.3 论文的主要内容及章节安排.....	6
2 分布式电源及电动汽车负荷建模.....	9
2.1 概述.....	9
2.2 分布式发电单元.....	9
2.2.1 光伏发电技术.....	9
2.2.2 风力发电技术.....	9
2.2.3 柴油发电机.....	10
2.2.4 燃料电池技术.....	11
2.2.5 蓄电池.....	12
2.3 电动汽车负荷建模.....	13
2.3.1 电动汽车在微网中的应用背景.....	13
2.3.2 电动汽车行驶随机特性分析.....	13
2.3.3 电动汽车无序充电负荷模型.....	17
2.3.4 电动汽车有序充放电负荷模型.....	18
2.4 本章小结.....	22
3 含电动汽车的微网经济调度及改进的天牛须搜索算法.....	23
3.1 微网经济调度概述.....	23
3.2 微网经济调度建模.....	23
3.2.1 微网运行模式.....	23
3.2.2 并网优化调度模型.....	24
3.2.3 孤岛优化调度模型.....	26
3.3 微网不同运行模式下的调度原则.....	26
3.4 求解算法.....	27
3.4.1 经济调度求解算法概述.....	27
3.4.2 天牛须搜索算法.....	28
3.4.3 天牛须搜索算法测试验证.....	30
3.4.4 改进的天牛须搜索算法.....	33
3.5 本章小结.....	35

4 含电动汽车的微网经济调度算例分析.....	37
4.1 概述.....	37
4.2 微网结构.....	37
4.3 微网能量优化调度策略.....	39
4.4 算法求解过程.....	40
4.5 优化结果.....	41
4.5.1 不同策略下的调度方案及分析.....	41
4.5.2 不同优化目标下的调度方案及分析.....	44
4.5.3 电动汽车需求侧响应分析.....	46
4.5.4 不同权重下微网优化调度对比.....	48
4.6 本章小结.....	48
5 总结与展望.....	51
5.1 总结.....	51
5.2 展望.....	51
致谢.....	53
参考文献.....	55
攻读硕士学位期间发表的论文.....	61

1 绪论

1.1 研究的背景及意义

近年来,随着化石能源加速消耗、全球变暖趋势加剧,人类社会可持续发展受到严重威胁,能源革命已成为时代的核心议题。欧美国家相继出台了《能源路线图 2050》、《全面能源战略》等战略规划,积极推进技术革新与能源结构转型,我国政府也提出要全面推进能源供给、消费、技术和体制等领域的革命。当前,有 90%以上的清洁能源必须转化为电能才能得以有效利用,电力系统在能源特别是清洁能源开发、生产、输送、变换及消费中的枢纽与核心地位已得到了学术界和工业界的广泛认可。

为了解决我国能源中心与负荷中心的地域分布不平衡问题,必须建设超高压、远距离的输电网络,实现全国互联的大电网。“大电网、大系统、高电压”的互联电力系统虽然有很多优势,然而随着电网规模的逐步增大,由其带来的不利影响日渐体现,如对电网的安全稳定运行造成了潜在的威胁。小范围的电力故障极易发展为大规模电力系统故障,甚至导致电网瘫痪。比如 1965 年加拿大与美国东北部停电事故、2012 年印度大停电、2008 年中国湖南省大停电等。此外,对于一些偏远地区,如青海内蒙部分地区、山区海岛等采用传统电网供电方式存在投资大,维护成本高,长距离输电线损高,电能质量差等问题。针对这些实际问题,急需提出切实可行的方案。

近年来,由于分布式发电的日趋成熟,分布式电源技术已成为世界各国电力部门及科学机构的研究热点^[1]。通常分布式电源为接入 35kV 及以下电压等级的小型发电装置,分布式电源包括风力发电、光伏发电、微型燃气轮机、柴油发电机、燃料电池及储能装置等。分布式发电系统中各发电装置之间相互独立,因此当其中一处出现故障时不会造成大规模的连锁故障发生,具有安全可靠、输配电损耗小、操作简单便于实现、环保经济等优点。因此,分布式发电技术已发展为集中式供电不可或缺的重要补充^[2]。但由于大规模的分布式电源接入配电网后,配电网转变为含源网络,网络潮流的大小和方向等都可能发生变化,所以分布式电源的大量接入会导致配电网在结构、运行方式、继电保护、安全及稳定性等方面面临严重的影响。并且当系统故障时,处于检修安全等考虑,常常要求分布式电源退出配电网,这大大限制了分布式电源的充分利用。由于分布式电源容量较小,出力不稳定,为解决分布式发电与大电网的融合问题,“微网”(Micro grid, MG)这一概念应运而生^[3]。

微电网的基本组成包括分布式电源、储能装置、负荷等不同组成单元。微电网可作为一个完整的电力系统,依靠自身的控制管理即能实现功率平衡、保持电压及频率稳定、故障检测与保护、系统优化调度运行及电能质量治理等功能。同时微网既可并网运行,又可孤岛运行,可灵活控制其运行模式。从各国已建成投运的微电网示范工程及一些相关研究表明,微电网可有效解决分布式电源并网时存在的各种问题,将会是未来电力系统的一个重要组成部分^[4]。

随着电动汽车（Electric vehicle, EV）技术的不断发展,电动汽车的数量在不断攀升。然而大量电动汽车接入电网将会对电网负荷造成诸多不利影响,如加大负荷峰谷差,造成“峰上加峰”的现象,此外,由于电动汽车的充电负荷具有非线性、不稳定的特征,会引入谐波,影响电能质量^[5]。研究表明,大部分的乘用车日平均行驶时间仅为1h左右,95%的时间处于停驶状态。因此将足够大规模的电动汽车接入电网,电动汽车就可以作为分布式储能设备,在满足其自身驾驶需求的基础上,将多余电能回馈到电网,反过来,当电动汽车需要充电时又可从电网获取电能,这就是V2G（Vehicle-to-grid, V2G）技术。V2G技术突破了电动汽车只能作为负荷进行充电的模式,实现了电动汽车与电网之间的双向能量流动,使电动汽车具有“源-荷”双重特性。通过合理的控制,V2G技术的实现可提供调峰、调频以及电压控制,增强对间歇性的分布式发电单元的电能利用,维持电力系统安全稳定运行。采用V2G技术,电动汽车的充放电行为将被合理引导,根据既定的充放电策略,使电动汽车用户、电网共同获益。因此,V2G技术将在未来电力系统发展中扮演越来越重要的角色^[6]。

微网研究中的一个重要内容即是微网能量的经济优化调度,而由于电动汽车的充放电行为具有时间和空间上的不确定性,当大规模的电动汽车不加控制地接入微网,尤其是在负荷高峰情况下,会加大负荷峰谷差,加重微网的供电负担,增加微网的运行控制难度,使微网的经济调度更为复杂。因此,研究计及电动汽车情况下的微网经济优化调度,分析电动汽车大量接入微网对微网经济调度方案及对电动汽车车主经济性带来的影响具有重要意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 微网的研究现状

近年来,微电网逐渐得到了各国电力行业的高度重视,众多国家都将其作为未来电力系统的重要组成部分。目前,美国、欧盟、日本等许多国家和地区均根据自身的电力发展情况及本国经济能源发展目标,逐步展开了微电网的相关研究,并且解决了一些微电网技术中的运行、保护、经济性等理论问题^[7-8]。

美国首先定义了微电网的概念,美国电气可靠性技术解决方案联合会（CERTS, the Consortium for Electric Reliability Technology Solutions）于1999年首次对微电网在结构、控制、经济等方面进行了研究,并在2002年正式定义了较为全面的微电网概念,直至目前仍是目前微电网概念中最权威的一个^[9]。其研究重点主要侧重于提高微网供电的可靠性、满足不同电能质量的要求、降低运行成本、减小对环境的污染及实现智能化管理调度等方面^[10]。与此同时,一批微电网示范工程也相继建立。如Mad River微电网是美国第一个微电网示范性工程,包含100kW发电机,30kW微型燃气轮机,280kW光伏电池。接入7.2kV配网,既可孤网运行,也可联网运行,负责向6个商业区和工业厂区及12个居民区进行供电。Mad River作为美国微电网项目的成功应用,检验了微电网的建模和仿

真方法、控制和保护策略、经济效益等技术方案，并初步制定了关于微电网的运行条例和相关参考法规^{【11】}。

欧洲在微电网的研究与发展方面更侧重于供电可靠性，经济环保和根据不同的用户需求提供差异化的电能质量服务。根据欧洲电力系统未来的发展需要，其在 2005 年便提出了“智能电网”计划。针对欧洲电网的实际需求，该计划确定了灵活性、可接入性、可靠性、经济性为其电网未来发展的方向，并根据这些需求特点相继建设了一批微电网示范工程，如英国埃格岛微电网示范工程、荷兰 Bronsbergen 假日公园微电网工程、希腊吉斯诺斯岛微电网示范工程等。

日本能源相对匮乏，而负荷增长却日益加快，可再生的清洁能源一直以来是日本电力发展建设的重点对象。针对微电网的研究及发展，日本也进行了大量的分析与探索，但其发展目标主要定位于满足不同用户差异化的用电需求、减少污染排放、实现多能互补^{【12-13】}。新能源与工业技术发展组织（NEDO）是日本针对其微电网的发展专门成立的一个组织机构。NEDO 长期支持日本国内的微电网研究及示范工程建设。NEDO 已经分别在京都县、青森县及爱知县建立了多个微网工程。在 Hachinohe 微网工程中，其主要研究方向为间歇性的可再生能源对微网运行控制的影响。Kyoto 的微电网展示项目中，包括多种可再生电源及各种燃料电池，其研究目标重点集中于能源管理系统的通信基础建设。青森县的微网示范工程较大，供电目标包括 4 所中小学、市政厅和供水管理局。采用热电联产方式提高了能源利用率，并实现了一周的孤岛模式运行。

目前，美国、欧洲和日本等发达国家在微电网技术研究及示范工程建设上已取得了一定的进展，但各自的研究侧重点又有所不同。我国的微电网发展尚处于起步阶段，主要为概念性研究，并且以建设试点项目为主。虽然我国微电网的发展起步较晚，但由于微电网十分适合我国电力发展的需求和方向，具有广阔的发展前景。为实现我国微电网的快速发展，国家通过一系列政策措施，鼓励各电力研究机构及高校开展微电网研究及建设，并已初具成效，建成了一批微电网示范工程：

由日本 NEDO 组织、浙江省发改委和国家发改委合作，于 2008 年 9 月在杭州电子科技大学建立了一微网试验系统，该微网系统光伏发电容量大，包含 240kW 的光伏容量，可并网运行，研究重点为光伏发电微网系统中的关键技术^{【14】}。

2010 年南方电网兆瓦级燃气轮机冷电联供微网系统投入运行，该微网系统包含 3 台 200kW 微型燃气轮机，1 台溴化锂制冷机，提供 3 栋大楼冷电负荷，装机容量 600kW，供电量 570kW。该微网系统可充分提高能源利用率，提高供电可靠性电能质量，并降低污染排放^{【15】}。

2011 年 7 月河北承德风光储微电网投入运行，电源包括 60kW 风力发电、50kW 光伏发电及 80kW/128kWh 储能，主要负荷该地区农户的用电需求^{【16】}。

2014 年 9 月投入运行的浙江南麂岛微电网示范工程总投资 1.5 亿元，主要在岛上建设 1000kW 的风力发电系统、30kW 的海流能发电系统、545kW 的光伏发电系统以及储能单

元装置,并保留了柴油发电系统,通过结合智能电表、电动汽车充电站、用户信息交互等先进的智能电网技术,满足了生态环保型岛屿的用电需要。江南鹿岛微电网示范工程是一个复杂离网状态下的具有较高运行可靠性的多能互补型微电网系统,可以针对微网的设计建造、控制保护策略的制定、能量管理方法、优化调度运行策略和评价指标系统进行测试研究^{【17-18】}。

1.2.2 V2G 技术的研究现状

电动汽车由于具有污染排放低、能源来源广、噪声小、经济节能等优点,是当今新能源汽车发展的主流方向。根据动力源的不同,电动汽车可以分为以下四类:纯电动汽车(Pure Electric Vehicle, PEV)、混合动力电动汽车(Hybrid Electric Vehicle, HEV)、插电式混合动力电动汽车(Plug-in Hybrid Electric Vehicle, PHEV)以及燃料电池动力汽车(Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV)^{【19】}。随着交通电气化的不断发展,未来纯电动汽车将是电动汽车发展的主要趋势^{【20】}。

电动汽车的能源供给方式可分为快充、慢充和换电池三种方式。快充模式虽然充电速度快,但充电装置安装成本高,且由于充电时的电压电流较大对电池的冲击较大,会影响电池的使用寿命。和快充模式相比,慢充模式虽然充电速度慢,充电时间较长,但对充电装置的要求低,充电器安装成本小。目前的慢充模式基本均采用定电流和定电压混合充电方式,充电前期采用定电流方式以保证充电深度,后期采用定电压方式,自动调节充电电流大小,避免过充,对电池具有较好的保护性。相比于快充和慢充,换电池模式的电池更换速度和目前燃油车的加油时间大致相当。但由于需要大量的规格标准不一的电池储备,因此成本较大。且需要协调统一各电动汽车车主,在实际操作中很难实现。因此国家电网在2014年推出了以“主导快充、兼顾慢充、引导换电、经济适用”为原则的充电站建设方案^{【21-22】}。

随着电动汽车技术的不断发展,电动汽车的数量在不断攀升,对电网的影响也越来越严重。目前,我国也在积极推广普及电动汽车,预计到2020年,我国的电动汽车数量将突破500万辆。由于电动汽车的充电时间及充电时长均具有随机性,当越来越多的电动汽车无序的接入电网中进行充电,不仅会对电网负荷带来极大的负担,对电网负荷造成“峰上加峰”的影响,还会给电网的安全经济运行和电能质量保障带来新的挑战,主要体现在线路过载、电压暂降、谐波污染、三相不平衡等方面^{【23-24】}。文献【25】分析了电动汽车接入对频率调节的影响。文献【26】针对大量电动汽车接入充电站进行充电时对电压造成的影响,提出了一种新型的无功补偿策略。文献【27】根据电动汽车接入数量及电动汽车日平均行驶时间研究了电动汽车入网后对电网负荷峰谷差和旋转备用容量等造成的影响。文献【28】同时考虑了分布式发电及电动汽车大规模入网后对电网稳定运行造成的影响,并提出了一种超导储能控制策略来平抑分布式发电的出力不确定性及电动汽车入网充电的随机性带来的不利影响。

大量的电动汽车可认为是移动的分布式储能装置,合理地利用电动汽车的电能将缓解

电动汽车无序充电对电网的影响，V2G 概念应运而生^[29]。V2G 技术是指电动汽车作为分布式储能单元，利用其具有的“源-荷”双重特性参与电网的调度运行。在负荷高峰时段，电动汽车通过 V2G 技术向电网进行放电；而当电网处于负荷低谷时，电力汽车进行充电以减小电网负荷的落差，从而实现减小电力系统负荷波动、削峰填谷的目标^[30]。文献【31】提出了一种集群电动汽车参与主动配电网实时需求响应的 V2G 控制策略，该方法在满足电动汽车用户的充电需求前提下，通过有序控制电动汽车充、放电状态的切换，实现了集群电动汽车的需求侧响应。文献【32】以电网负荷波动最小为目标，建立了电动汽车与电网互动的最优峰谷电价模型，计算了未来实行 V2G 的最优峰谷电价和对应时段，通过最优峰谷电价的激励引导作用，使得电动汽车充电时段避开了负荷高峰。文献【33】分别对不同类型的电动汽车充电拓扑结构进行了分析，结果表明利用电动汽车的分布式储能特性，可以起到无功补偿的作用。文献【34】对含电动汽车的微网进行了能量优化管理，分析了电动汽车对减小微网负荷波动，提高微网稳定性的作用。

同时，通过 V2G 技术和智能电网技术的融合，采用合理的激励措施，引导电动汽车车主的充放电行为，将使电动汽车车主与电网达到双赢。电动汽车合理的充放电行为不仅会减小电网负荷的峰谷差，还会降低负荷波动，从而减少电网的备用容量，降低电网投资成本。对电动汽车车主而言，利用电网制定的分时电价，可在电价较低时进行充电储能，而在电价较高时进行放电盈利，从而降低车主的用电成本^[35-36]。国内外一些研究机构及高校也针对 V2G 技术开展了大量的理论研究。文献【37-39】分别通过排队论和出行链方法对电动汽车充电负荷进行了预测分析，用蒙特卡洛模拟法针对不同渗透率、不同季节、不同时段等多种情景下的电动汽车充电负荷进行了分析。韩国 Konkuk 大学建立了一个微网调度系统，该调度系统可充分利用电动汽车的储能特性，实现电动汽车充放电的最优控制调度，从而减小电动汽车无序充电对微网造成的不利影响^[40-41]。

1.2.3 微网经济调度的研究现状

微电网的经济调度是微电网能量管理系统中的一个主要内容，其目的是在实现微电网系统稳定可靠运行的前提下，充分考虑各分布式电源发电特性、大电网的发电成本、分时电价及各种约束，使微电网运行成本最小化。因此，针对微电网的经济调度进行研究具有十分现实的意义。

相比传统的电力系统经济调度，微电网由于其内部分布式电源容量小、出力具有随机性等特点，使其优化调度模型更为复杂。首先，为了提高微电网能量的综合利用率，微电网通常采用热电联产能量供给模式。其次，微电网中各分布式电源发电原理各异，运行方式各不相同，且光伏、风电等可再生能源发电具有不确定性。第三，微网不仅可以并网运行，还可以孤岛自治运行，其频率控制及电压稳定及两种运行模式的平滑切换均增加了调度的难度。最后，微电网优化调度不仅仅需要考虑其自身的运行管理，还需要综合考虑对环境的影响等。这些因素极大的增加了微网的调度的复杂性。

因此,微电网的优化调度必须综合考虑微电网运行时的各项指标,如供电可靠性、环保经济性等,计及微网内各微源的运行特性、储能约束、不同用户的负荷需求和电能质量要求等信息,从而确定微网与大电网间的交互功率、各分布式电源的出力分配及需求侧响应命令,实现微电网的最优运行^[42]。

目前,针对微电网的优化调度问题,国内外学者已做了一些相关的研究。文献【43】对孤岛运行模式下的微网能量优化调度进行了研究,针对微电网可靠性、经济性和环保性三种不同的优化目标,建立了多目标优化模型,并采用多目标粒子群算法进行求解。文献【44】根据电动汽车用户的出行特性建立了电动汽车的负荷模型,然后建立了微网多目标优化的数学模型,并对多目标函数之间的关系进行了分析。文献【45】分析了含便携式可再生能源的微网能量调度问题,将便携式可再生能源纳入微网进行考虑,并分析了其但对微网调度方案的影响。需求侧响应也是微网能量调度研究中的一个重要问题,文献【46】根据负荷的优先等级实时合理地投切负荷对维持微网的稳定运行具有重要意义。文献【47】以大型园区的能量需求为研究对象,分析了热电联供型微电网分别在并网和孤岛两种运行模式下的运行调度策略,然后以一生态产业园为例进行了热电联供型微网优化调度的研究,并取得了一定的理论研究成果。文献【48】对离网运行模式下的微电网能量调度问题,提出了微网能量优化算法,通过分析微网各个时段的运行状态,实时确定相应的控制策略。文献【49】建立了包含光伏电池、风力发电机、柴油发电机、储能等分布式电源的热电联供型微网系统,在计及各种约束条件的情况下建立了以微网运行成本最低和污染治理成本最小的多目标优化调度模型,采用改进的粒子群优化算法对模型进行了求解,并对微网处于不同运行模式下的调度策略进行了分析对比。文献【50】分别对微网并网和孤岛两种运行方式下的经济优化调度进行了研究,并对孤岛运行模式下微网的不同下垂控制策略进行了分析对比,最后采用直接搜索算法对所建模型进行了求解。文献【51】针对微网内可再生能源发电的随机性,提出了利用概率分布对分布式电源建模的数学方法,并采用一种全新的随机能源和备用调度方法,让不同类型的用户参与到需求侧响应计划中,通过算例仿真,表明合理的需求侧响应不仅可以减少微网运行成本,还可以更充分地利用分布式发电资源。

1.3 论文的主要内容及章节安排

本文首先分析了微网中各常见分布式电源的工作原理及运行特性,建立其相应的数学模型,然后根据电动汽车的充放电特性,采用蒙特卡洛模拟法建立了电动汽车无序充电和有序充放电的负荷模型,将电动汽车纳入到微网中,讨论分析了含电动汽车的微网运行控制策略。然后建立了微网运行成本最小、污染治理成本最低和综合成本最小的多目标经济调度模型。最后采用改进的天牛须搜索算法进行求解,得到微网在不同运行策略及不同优化目标下的调度运行方案,分析了电动汽车的需求侧响应对微网经济调度的影响。

各章节内容安排如下:

第一章首先阐明了课题的背景,明确了本文的研究意义,然后介绍了微网及 V2G 技

术的研究现状,并介绍了微电网的经济优化调度。最后对本文的研究内容作了详细的介绍。

第二章详细介绍了微网中常见各分布式电源的工作原理及运行特性,并根据私家电动汽车的上下班出行特性,利用蒙特卡洛仿真法分别建立了电动汽车无序充电负荷模型和有序充放电负荷模型。

第三章分别建立了含电动汽车的微网在不同运行模式下以微网运行成本最小、污染治理成本最低和综合成本最小的多目标经济优化模型,分析了微网在不同运行模式下的调度原则。详细介绍了天牛须搜索优化算法的基本原理及改进后的天牛须搜索算法,并进行了仿真对比验证。

第四章建立了含电动汽车的微网系统结构,采用改进的天牛须搜索算法对经济优化模型进行了求解,分析讨论了微网在不同运行控制策略和不同优化目标下的优化调度方案,并分析了电动汽车的需求侧响应对微网经济调度的影响及对电动汽车车主用车经济性的影响。最后分析了优化目标的权重系数对优化结果的影响。

第五章为总结与展望。本章对论文的研究内容和主要结论进行了总结,指出了本文研究内容中存在的不足,并针对本次毕业设计过程中存在的不足,展望了未来的研究方向。

2 分布式电源及电动汽车负荷建模

2.1 概述

微网中分布式电源种类繁多，较常用的有风力发电机、光伏电池、柴油发电机、燃料电池、储能装置等，要对微网的优化调度进行研究首先需要了解各个分布式电源的工作原理及运行特性。由于电动汽车在一天大部分时间处于停驶状态，因此可视为移动的分布式储能装置接入微网。但由于电动汽车的使用具有很大的随机性，当大量的电动汽车无序充电时会对电网造成很大的负担，因此有必要对其充放电行为进行研究并通过合理的激励措施加以引导。本章详细介绍了各种常用分布式电源的工作原理及运行特性，并根据电动汽车的使用特性建立了其无序充电和在分时电价引导下的有序充放电负荷模型。

2.2 分布式发电单元

2.2.1 光伏发电技术

光伏发电（Photovoltaic, PV）是通过半导体的光生伏特效应来产生电能。当不均匀半导体或半导体与金属结合的不同部位之间受到光线照射时会产生电位差，这即是光电效应。它首先是由光子转化为电子、光能量转化为电能的过程；其次，是电压形成的过程。太阳能由于具有绿色清洁、无污染且取之不竭的特点，因此，随着光伏发电技术的快速发展，光伏发电在能源输出中将占有越来越大的比例。

光伏发电输出功率与环境温度和太阳光辐射强度具有密切关系^[52]，公式如下：

$$T_j(t) = T_{amp} + 30G(t)/1000 \quad (2.1)$$

式中， $G(t)$ 为光伏组件接收太阳辐射值； T_{amp} 、 $T_j(t)$ 分别为环境温度和光伏组件温度。

光伏电池输出功率表达式为：

$$P_{PV}(t) = P_{PV,STC} \frac{G(t)}{G_{STC}} [1 + k(T_j(t) - T_{STC})] \quad (2.2)$$

式中， G_{STC} 为日照强度 $1000 W/m^2$ ，以此强度为基准值； T_{STC} 为参考温度基准值，即 $25^\circ C$ ； $P_{PV,STC}$ 为温度为 $25^\circ C$ ，日照入射强度为 $1000 W/m^2$ 下的测试功率最高值； $T_j(t)$ 为光伏电池当前工作温度； k 为功率温度系数。

由于光伏电池发电过程中不需要燃料且无污染排放，因此光伏发电的燃料成本及污染治理成本为零。

由于光伏发电受温度、太阳光辐射强度、入射角等环境因素的影响，出力具有随机性，属于不可调度电源。而太阳能具有清洁无污染的特点，因此为了充分利用太阳能，避免弃光现象的发生，光伏发电的输出控制通常采用最大功率跟踪模式。

2.2.2 风力发电技术

风力发电是指风力机（Wind Turbine, WT）把风的动能转化为电能的发电过程。风

力发电作为一种绿色能源不仅对能源结构有改善作用，还具有清洁无污染的特性，在未来的电力能源发展中具有很大的潜力。随着相关技术的日趋成熟，风力发电正在世界上形成一股热潮。

风速的大小直接影响风电机组的输出功率，而额定功率不同的风机对应的切入、切出风速也各不相同。在风电机组的实际运行中，若风速小于切入风速则风叶片停止转动，输出功率为零，不发电；当风速过大超过切出风速时，采取制动措施使风叶片停转以保护风机的安全；当风速大于切入风速而小于额定风速时，风电机组的输出功率跟随风速实时变化以捕获最大风能，此时，风机的出力与风速直接相关，为一曲线关系，有多项函数及分段函数等不同表达形式，也可简化为一次型函数；当风速大于额定风速而小于切出风速时，在控制系统的作用下，风机的输出功率保持额定功率不变。如图 2-1 所示为风机的输出功率随风速变化的关系曲线。

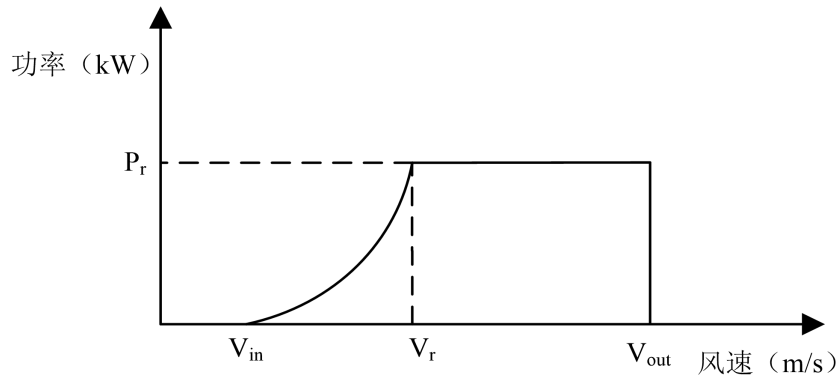


图 2-1 风机的输出功率与风速的关系曲线

Fig.2-1 Relationship between wind power generator output power and wind speed

风机的输出功率可采用分段函数表示^[53]，如下式：

$$P_{wind} = \begin{cases} 0, v < v_{in} \\ av^2 + bv + c, v_{in} \leq v \leq v_r \\ P_r, v_r \leq v \leq v_{out} \\ 0, v \geq v_{out} \end{cases} \quad (2.3)$$

式中， P_{wind} 为风机的输出功率； P_r 为风机的额定输出功率； v 为风速； v_{in} 为切入风速； v_r 为额定风速； v_{out} 为切出风速； a ， b ， c 分别为风机的出力特性参数。

2.2.3 柴油发电机

柴油发电机（Diesel Generator, DE）是一种小型发电设备，由柴油机和发电机组成，柴油机作为原动机为发电机提供动力来进行发电。柴油发电机具有以下特点：

（1）每单位出力的体积小，灵活轻便，系统简单，一般多为整体配套。因此，柴油发电电站建设速度快；

（2）柴油发电机热效率高，而且在部分负荷或轻负荷时，每单位出力的燃料消耗量

的变化不大；

(3) 柴油发电机的启动、带负荷和停机时间都较短，可以随时启动，特别适合于作应急电源；

(4) 操作简单方便，便于维护；

(5) 输出稳定，易于控制。

由于以上优点，柴油发电机被广泛应用。而在微电网中，柴油发电机不仅在并网时可提供功率输出，当微网孤岛运行时还可作为主电源为系统提供电压频率支撑。

柴油发电机运行时的燃料成本与输出功率关系如下^[54]：

$$C_{De} = aP_{De}^2 + bP_{De} + c \quad (2.4)$$

式中， C_{De} 为柴油发电机运行时的燃料成本； P_{De} 为其输出功率； a ， b ， c 分别为成本系数，本文取 $a = 0.0071$ ， $b = 0.2333$ ， $c = 0.4333$ 。

2.2.4 燃料电池技术

燃料电池（Fuel Cell，FC）发电是指通过把燃料所具有的化学能直接转化为电能的发电过程。对于燃料电池而言，煤炭、石油、天然气、甲醇、酒精、沼气等含有氢原子的物质都可以作为发电所需的燃料，因此燃料电池可充分利用众多不同类似的能源进行发电，从而减缓主流能源的消耗。并且当燃料电池的负载有变动时，它会很快响应，具有很高的运行可靠性。

由于燃料电池的发电过程属于电化学反应过程，其能量转化过程不受卡诺循环效应的制约，因此发电效率高。另外，燃料电池发电过程为燃料与氧气的电化学反应过程，几乎没有机械传动部件，故噪声小，且排放的有害气体极少。并且其具有安装维修方便，易于建设的优点。由此可见，从生态环境保护和能源节约的角度来看，燃料电池具有广阔的发展前景。

燃料电池在发电的同时还会产生大量的热能，若能采取有效的措施充分地利用这些热能，实现热电联产，便可更大程度地提高能源利用率。如图 2-2 为燃料电池的工作示意图。

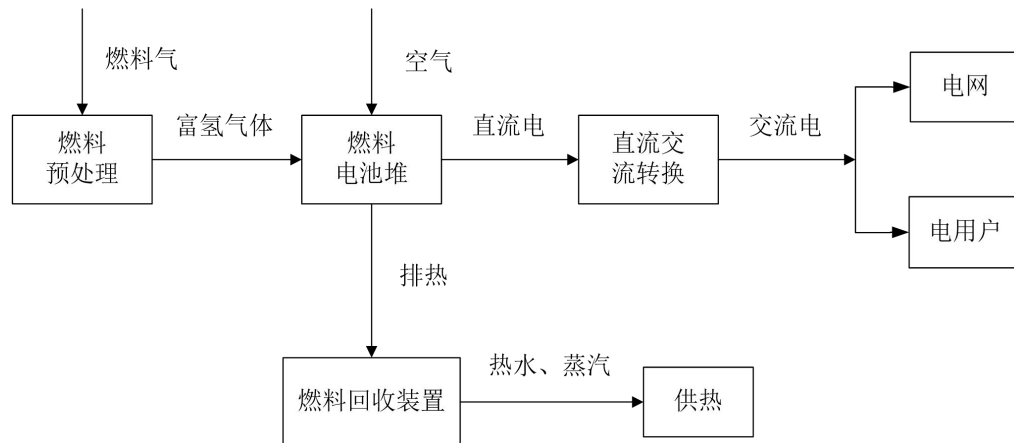


图 2-2 燃料电池工作示意图

Fig.2-2 Schematic diagram of fuel cell operation

燃料电池的发电成本与输出功率直接相关，计算公式如下^[55]：

$$C_F = (C_{ng} / L) \cdot P_F / \eta_F \quad (2.5)$$

$$\eta_F = -0.0023P_F + 0.6735 \quad (2.6)$$

式中， C_{ng} 代表天然气价格； P_F 代表燃料电池的输出功率； η_F 代表燃料电池的发电效率。

2.2.5 蓄电池

在现下电改的大背景下，无论是调峰调频、用户需求管理还是将来开放的新市场，储能（Energy Storage，ES）在配网和微电网里面将会扮演越来越重要的作用，它的商业价值也会得到越来越大的体现。

分布式发电具有能效高、污染小、可靠性高、安装地点灵活等优点，但同时又存在输出功率波动性强、控制复杂等不足。为了有效整合微网中分布式发电的优势，提高可再生能源的发电率，增强电网的稳定性，储能系统受到能源界广泛关注。

目前，常用的储能装置主要包括以下几种：蓄电池储能、超导磁储能、飞轮储能、超级电容器储能等。如表 2-1 所示为几种常用储能装置的技术参数^[56]：

表 2-1 各种储能装置的性能参数比较

Table 2-1 Comparison of performance parameters of various energy storage devices

储能装置	钠硫蓄电池	铅酸蓄电池	飞轮储能	超级电容器	超导磁储能
额定功率	1kW~10MW	1kW~50MW	5kW~5MW	1kW~100kW	10kW~20MW
能量密度/ $Wh \cdot kg^{-1}$	>100	30~40	5~50	1~10	<1
功率密度/ $W \cdot kg^{-1}$	90~200	75~300	180~5000	7000~18000	1000
循环寿命/次	60000	600~1200	50000	>50000	50000
能量转换效率/%	75~80	60~70	80~90	>95	90
响应速度	1s~20min	1min~3h	15s~15min	15s~1min	1s~15min
环境污染	中	大	无污染	无污染	无污染
安全性	低	低	不高	高	低
投资成本	中	低	中	高	高
价格/(元·kWh ⁻¹)	/	600~1000	2000~5000	>10000	/
维护量	小	小	较大	很小	大

铅酸蓄电池凭借其电压特性平稳、温度适用范围广、安全性高和原材料丰富且可再生利用、价格低廉、技术成熟等一系列优势，在绝大多数传统领域及一些新兴领域被广泛应用。因此，本文所建微网模型中储能装置采用铅酸蓄电池。在使用蓄电池时必须注意两个重要的参数：

- (1) 电池容量（ C_{Bat} ）：在规定的放电条件下电池所能输出的电量总和；
- (2) 荷电状态（SOC）：指电池的剩余电量与电池的标称电量比值。

$$\text{SOC} = \frac{C_s}{C_{\text{Bat}}} = 1 - \frac{\int I dt}{C_{\text{Bat}}} \quad (2.7)$$

式中， C_s 、 C_{Bat} 分别代表储能当前容量和储能的额定容量； I 为放电电流。

2.3 电动汽车负荷建模

2.3.1 电动汽车在微网中的应用背景

“电能替代”是限制、减少化石能源使用和解决环境问题的重要手段。随着交通电气化的快速发展，电动汽车在电能替代中具有巨大的潜力。目前电动汽车在美国、欧洲、丹麦、日本等地形成规模市场。而我国也在《节能与新能源汽车产业发展规划（2011-2020 年）》中提出，至 2020 年，我国的电动汽车保有量应达到 500 万辆^[57]。而随着电动汽车的大规模接入将对电网负荷造成“峰上加峰”等不利影响。因此，研究电动汽车的并网方式及对微电网的影响已经是迫在眉睫的课题，而分析电动汽车的充放电时的负荷模型尤为重要。

电动汽车不仅可作为用电负荷，同时在满足一定条件下还可作为电源放电供其它负荷使用，与传统负荷存在明显不同。因此，充分利用电动汽车“源-荷”双重特性具有十分重要的意义。随着 V2G 技术的提出，通过合理的激励措施鼓励电动汽车车主参与到电网的优化调度中来，对其充放电行为进行有序地引导，不仅可缓解电动汽车无序充电对电网负荷造成“峰上加峰”的影响，还可充分利用电动汽车的分布式储能作用。相关调查表明，乘用车在一天中大部分时间是处于停驶状态。因此可通过 V2G 技术合理地引导电动汽车用户进行充放电操作。将电动汽车纳入微网中，充分利用电动汽车的分布式储能特性，采取一些合理的激励措施，如分时电价等，鼓励电动汽车车主在负荷低谷时充电而在负荷高峰时放电，不仅对微网负荷可以到达“削峰填谷”、提高微网稳定性的作用，同时也可以减少车主的用电成本，提高系统的经济性^[58-59]。

2.3.2 电动汽车行驶随机特性分析

电动汽车车主的用车习惯是影响电动汽车充放电行为的重要因素，具有随机不确定性。对电动汽车负荷功率产生影响的用户行为主要包括行驶距离、充电时间、电动汽车电池容量和荷电状态等因素。行驶距离越远，需要充电的负荷需求越大；充电时间越集中，对电网负荷造成的“峰上加峰”影响越明显；而电池容量及荷电状态则会影响充放电频率。

电动汽车的行驶特点与用户行为密切相关,目前我国电动汽车可以简单分为公用和私用两部分。公用的电动汽车,如公交车、出租车等使用时间较长,且在负荷高峰时仍被使用,可调度性较差;而私人电动汽车的用车方式相对灵活,且一天中大部分时间处于停驶状态,据调查研究私家车一天的用车时间不超过 2 小时^[60]。因此,由于私家车具有相对可调度时间长等优点,本文主要将私家车列为调度研究对象。

就车主的使用而言,电动汽车与普通汽车并无区别。因此,可通过研究普通汽车的行驶特点来分析电动汽车的行驶特性。本文用概率统计方式来表示用户驾驶行为的不确定性,主要考虑日行驶里程、上班时间和初始荷电状态等因素^[61-63]：

a: 日行驶里程反应了电动汽车当日行驶的耗电量,在一定的充电功率下,充电持续时长与日行驶里程直接相关。调查研究表明,电动汽车的日行驶里程 S 服从对数正态分布,即 $S \sim \text{Log} - N(\mu_s, \sigma_s^2)$, 其概率密度函数如下:

$$f_s(x) = \frac{1}{x} \cdot \frac{1}{\sigma_s \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln x - \mu_s)^2}{2\sigma_s^2} \right] \quad (2.8)$$

式中, $\mu_s = 3.2$; $\sigma_s = 0.88$ 。

如图 2-3 为电动汽车一天的行驶里程分布图,可看出平均行驶里程在 35 公里左右。根据日行驶里程的概率密度函数产生行驶里程数,然后根据电动汽车的每公里耗电量即可求出电动汽车一天行驶过程中所消耗的电能。

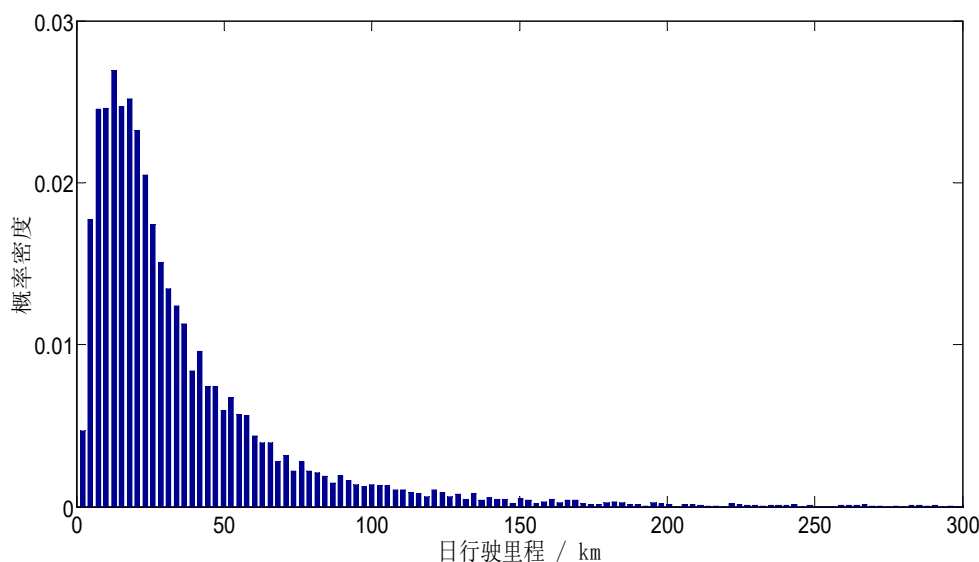


图 2-3 日行驶里程分布

Fig.2-3 Daily mileage distribution

b: 电动汽车车主早上上班出发时间 t_1 近似服从 $t_1 \sim N(\mu_1, \sigma_1^2)$ 的正态分布,其概率密度函数为:

$$f_{t_1}(x) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2} \right] \quad (2.9)$$

式中, $\mu_1 = 7.62$; $\sigma_1 = 2.14$ 。

如图 2-4 为电动汽车车主早上上班时间分布图,可看出上班时间集中在早上 7 点左右,与实际情况相符。

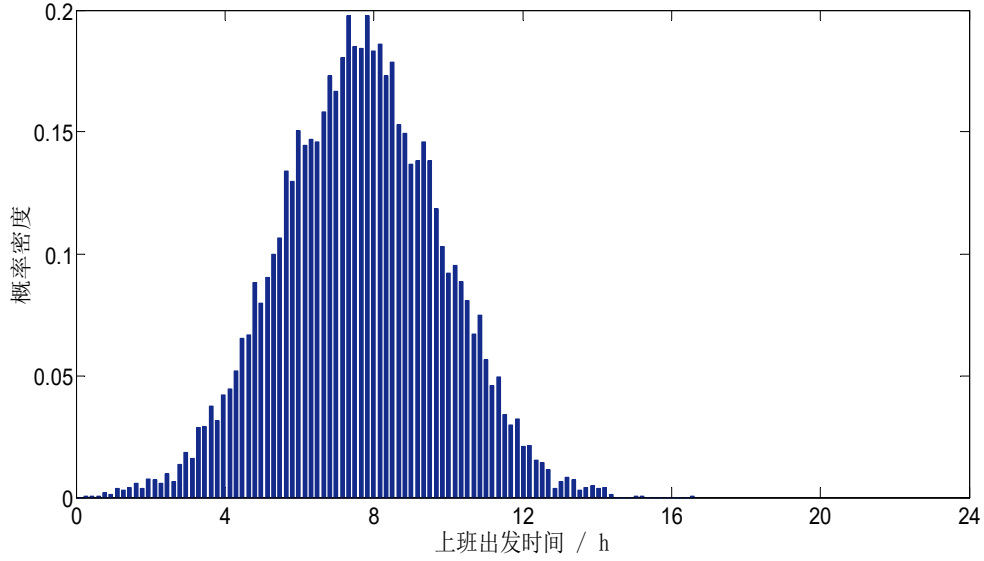


图 2-4 上班出发时间分布

Fig.2-4 Departure time distribution

c: 电动汽车晚上下班到家时间 t_2 服从 $t_2 \sim N(\mu_2, \sigma_2^2)$ 的正态分布, 其概率密度函数为:

$$f_{t_2}(x) = \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2} \right] \quad (2.10)$$

式中, $\mu_2 = 18.5$; $\sigma_2 = 1.25$ 。

如图 2-5 为电动汽车车主下班回家时间分布图,可看出下班回家时间集中在下午 7 点左右,与实际情况相符。

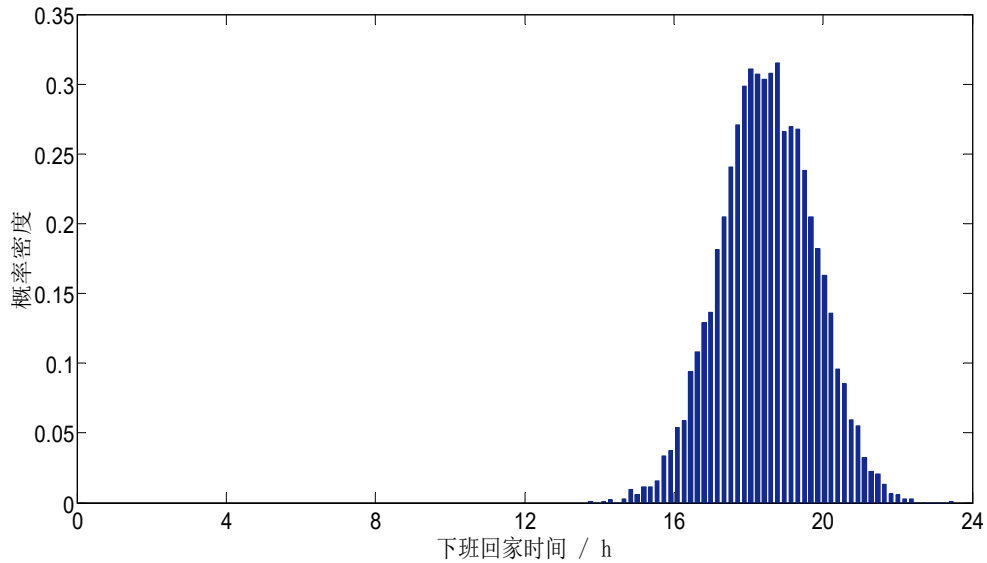


图 2-5 下班回家时间分布

Fig.2-5 Time to go home from work

d: 电动汽车每天用车前的初始荷电状态 SOC 满足 $SOC \sim N(\mu_{es}, \sigma_{es}^2)$ 的正态分布; 式中, $\mu_{es} = 0.7$; $\sigma_{es} = 0.1$ 。

$$f_{soc}(x) = \frac{1}{\sigma_{es}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu_{es})^2}{2\sigma_{es}^2}\right] \quad (2.11)$$

如图 2-6 为电动汽车每天出发前的初始荷电状态值分布图，可看出 SOC 集中在 0.6 与 0.8 区间内。

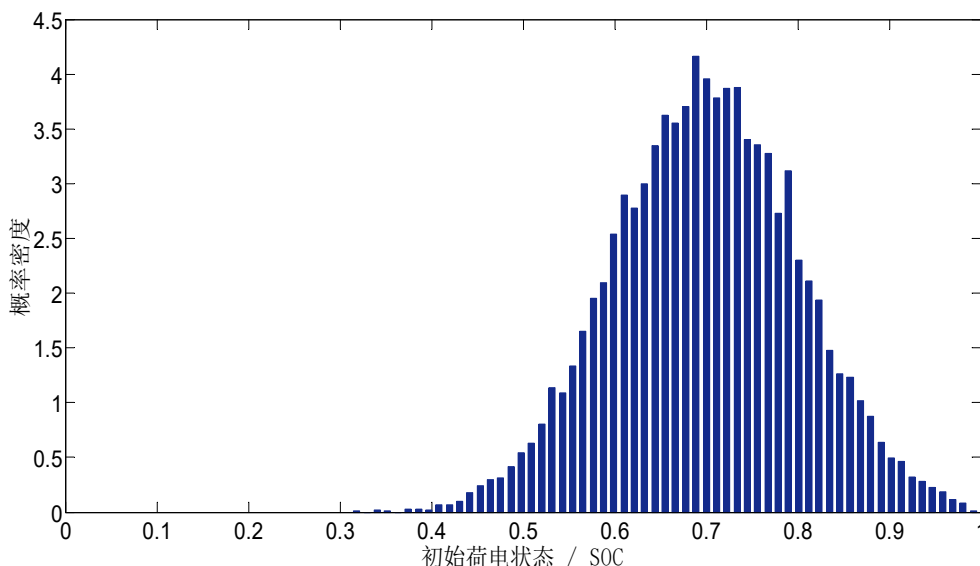


图 2-6 初始荷电状态值分布

Fig.2-6 Initial state of charge state distribution

由于慢充对充电要求不高，充电装置的安装成本较低，且充电时间长，可充分利用夜间谷值电价进行充电以降低充电成本。更为重要的优点是可对电池深度充电，降低充电成本，提升电池充放电效率，延长电池寿命。故本文中电动汽车假定均采用常规慢速充电方式，充电功率 P_c 在 2kW ~ 3kW 之间服从均匀分布 $U(2,3)$ ，即

$$f_{pc}(x) = \begin{cases} \frac{1}{3-2} = 1 & x \in [2,3] \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (2.12)$$

根据目前市场上电动汽车的性能调查，对私家车的一些具体参数做出假设^[39]，如表 2-2 所示：

表 2-2 电动汽车参数
Table 2-2 Electric vehicle parameters

参数	数值
每公里耗电量 w / kWh	0.25
电池容量 C / kWh	25
充电功率 P_c / kW	2 ~ 3
充电效率 η_{C_EV}	75%
放电功率 P_d / kW	1.5

2.3.3 电动汽车无序充电负荷模型

在无利益或政策激励的情况下，电动汽车车主的充电行为较随意，因为目前大部分电动汽车的动力电池一般均可以满足私家车一天的驾驶需求，因此可假设车主都在下班回家后开始充电，即行驶结束时刻即为起始充电时刻。

单辆电动汽车充电时所需电量为一天中行驶所耗总能量：

$$W_{EV} = S * w \quad (2.13)$$

式中， w 为每公里耗电量； S 为日行驶里程。 W_{EV} 除以充电功率及充电效率，可得充电持续时间 T_C ，公式如下：

$$T_C = \frac{W_{EV}}{P_C \eta_{C_EV}} \quad (2.14)$$

式中， P_C 为充电功率； η_{C_EV} 为充电效率。

通过蒙特卡洛模拟法便可得每辆电动汽车的日行驶里程 S 和电动汽车的返程时刻 t_1 ，即入网充电起始时刻。由充电起始时刻及充电持续时长可求得单辆电动汽车一天 24h 的充电负荷曲线。然后将所有的电动汽车的负荷曲线累加即得到总的电动汽车无序充电日负荷曲线。

$$P_{EV} = \sum_{i=1}^n P_i \quad (2.15)$$

式中， P_{EV} 即为电动汽车总的日负荷功率， P_i 为单个电动汽车的日负荷功率。

如图 2-7 为无序充电模式的负荷计算流程图。如图 2-8 为不同数量电动汽车无序充电模式下的日负荷曲线图。分别选取 150 辆、300 辆、450 辆电动汽车进行仿真研究。

从图 2-8 中可看出负荷高峰主要集中在 16:00~22:00 时段，充电负荷最高峰在 19:00 左右，即电动汽车车主下班回家时间，且电动汽车数量越多，则负荷峰值越高，与实际情况相符，证明了模型的正确性。

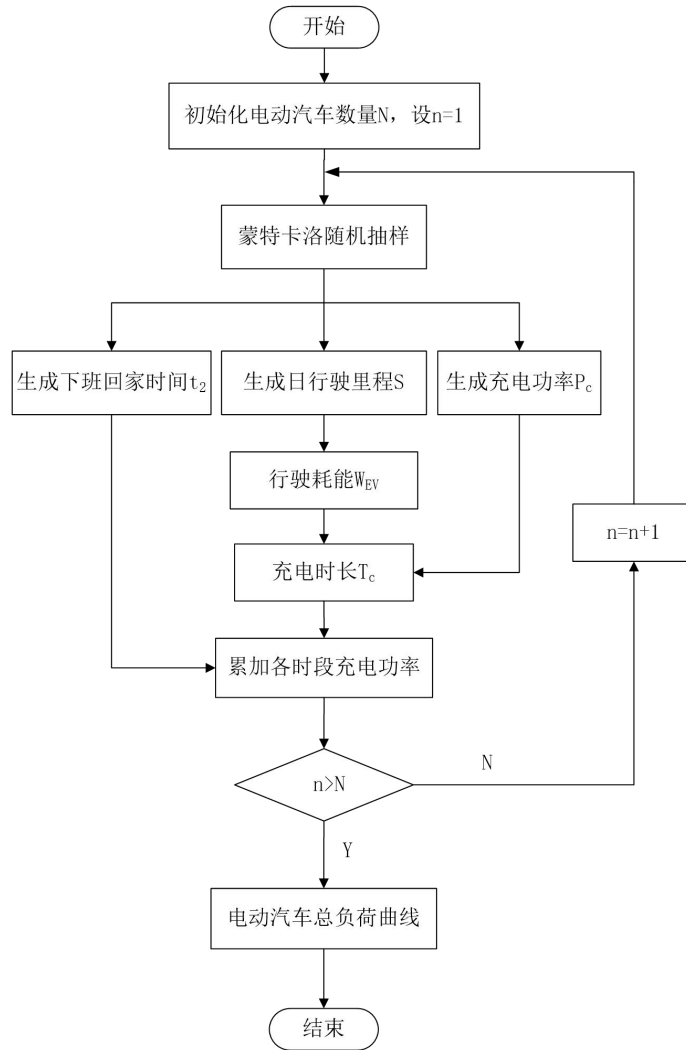


图 2-7 无序充电模式下的负荷计算流程图

Fig.2-7 Flow chart of load calculation under disordered charging mode

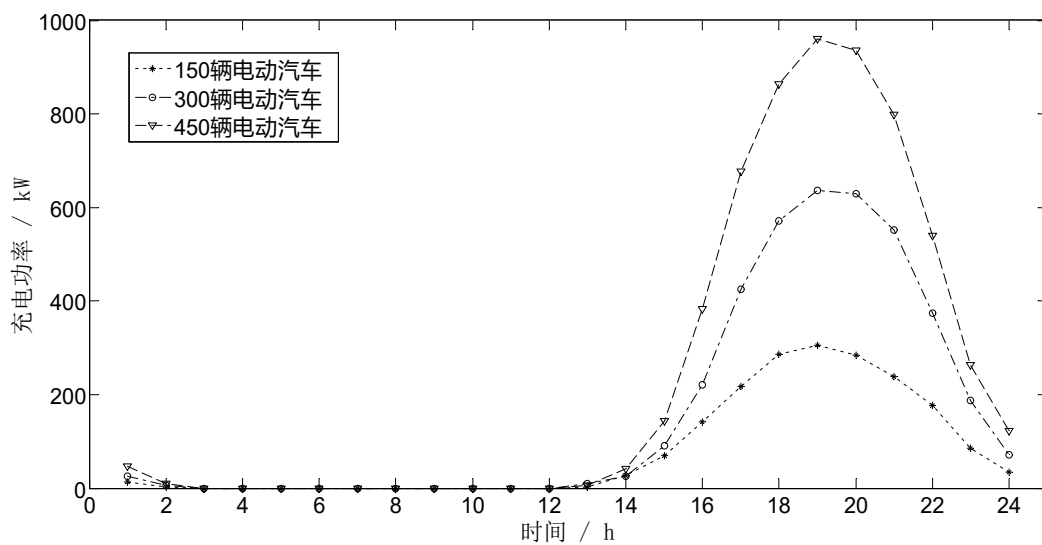


图 2-8 无序充电模式下的电动汽车负荷曲线

Fig.2-8 Load curve of electric vehicle under disordered charging mode

2.3.4 电动汽车有序充放电负荷模型

用户充放电时均是理性的,在不影响出行使用的前提下会选择在电价低时充电而在电价高时停止充电甚至放电盈利。因此,微网可以通过激励手段吸引用户有序的进行充放电。

充放电行为的确定由三个因素确定:在停驶期间;电动汽车自身的荷电状态;实时电价。

(1) 电动汽车行驶状态估计

电动汽车的上下班的行驶时间一般基本相同,因此根据日行驶里程便可求得单次驾驶行驶时长,如下式

$$T_s = \frac{S}{2v} \quad (2.16)$$

式中, T_s 为上下班单次驾驶行驶时长; v 为电动汽车的行驶速度,本文中假设电动汽车的平均行驶速度为 40km/h。

根据 2.3.2 节得出的日行驶里程、上下班时间、初始荷电状态及公式 (2.16) 即可确定电动汽车在一天中的用车时段及停驶时段。

(2) 停驶期间的充放电策略

停驶期间的充放电行为由电动汽车自身的荷电状态和实时电价来决定,基于电池的使用寿命考虑,荷电状态上下限分别取 0.4 和 0.8,为了保证用户的临时用车情况,下限取值略高。具体策略如下:

若 $SOC \leq 0.4$ 时:

如果 $P_sell(t) < Set_sell(t)$, 则充电;

如果 $P_sell(t) \geq Set_sell(t)$, 则保持不变。

若 $SOC \geq 0.8$ 时:

如果 $P_buy(t) > Set_buy(t)$, 则放电;

如果 $P_buy(t) \leq Set_buy(t)$, 则保持不变。

若 $0.4 < SOC < 0.8$ 时:

如果 $P_buy(t) > Set_buy(t)$, 则放电;

如果 $P_sell(t) < Set_sell(t)$, 则充电。

式中, $P_sell(t)$ 、 $P_buy(t)$ 分别代表在第 t 时段微网向电动汽车卖电及买电的价格。 $Set_sell(t)$ 、 $Set_buy(t)$ 分别为决定充放电的行为的价格阈值。

微网向电动汽车的售电价格及购电价格表 2-3 所示:

表 2-3 微网向电动汽车的售电及购电价格

Table 2-3 The sale and purchase price of micronet to electric vehicle

时段 (h)	01:00 ~ 07:00	08:00 ~ 22:00	23:00 ~ 24:00
售电价格 (元/kWh)	0.35	0.8	0.35
购电价格 (元/kWh)	0.1	0.4	0.1

(3) 有序充放电曲线分析

由以上分析可得单辆电动汽车有序充放电的日负荷曲线,为解释充放电策略在此随机选一辆电动汽车进行分析,如图 2-9 所示为一辆电动汽车在一天中的荷电状态变化情况,表 2-4 为其对应的各个时刻详细的行驶情况及参数说明。

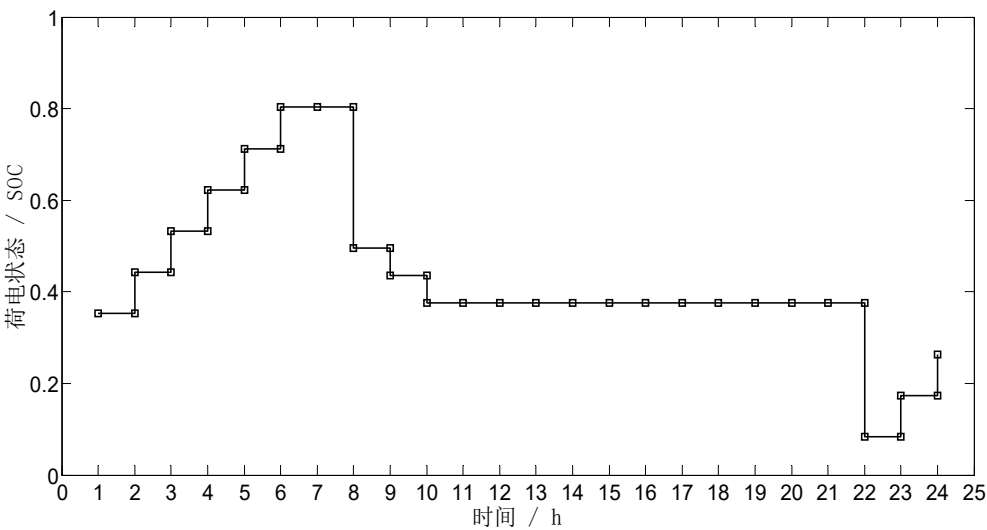


图 2-9 电动汽车实时荷电状态

Fig.2-9 Real time charge state of electric vehicle

表 2-4 电动汽车实时荷电状态

Table 2-4 Real time charge state of electric vehicle

Time	P_sell	P_buy	SOC	state	Time	P_sell	P_buy	SOC	state
01:00	0.35	0.10	0.3529	$P_c = 2.5$ (kW)	13:00	0.80	0.40	0.3753	——
02:00	0.35	0.10	0.4429		14:00	0.80	0.40	0.3753	
03:00	0.35	0.10	0.5329		15:00	0.80	0.40	0.3753	
04:00	0.35	0.10	0.6229		16:00	0.80	0.40	0.3753	
05:00	0.35	0.10	0.7129		17:00	0.80	0.40	0.3753	
06:00	0.35	0.10	0.8029		18:00	0.80	0.40	0.3753	
07:00	0.35	0.10	0.8029	——	19:00	0.80	0.40	0.3753	Road
08:00	0.80	0.40	0.4953	Road	20:00	0.80	0.40	0.3753	
09:00	0.80	0.40	0.4353	$P_d = 1.5$ (kW)	21:00	0.80	0.40	0.3753	
10:00	0.80	0.40	0.3753		22:00	0.80	0.40	0.0829	
11:00	0.80	0.40	0.3753	——	23:00	0.35	0.10	0.1729	$P_c = 2.5$ (kW)
12:00	0.80	0.40	0.3753		24:00	0.35	0.10	0.2629	

表 2-4 中“Road”表示电动汽车处于行驶状态,“——”表示电动汽车既不充电也不放电。从表中可看出电动汽车在一天中有两个行驶时段,08:00 和 22:00 两个时段分别为

上班及下班回家过程，在此阶段电动汽车行驶消耗电能。而在其它时段电动汽车根据自身的荷电状态 SOC 及实时电价来决定充放电行为。在 01:00~06:00 期间由于电网售电价格处于谷时段且电动汽车荷电状态较低，因此电动汽车以 2.5kW 的功率进行充电；07:00 时段内虽然电网售电价格仍处于谷时段价格，但由于电动汽车的荷电状态已达到上限因此停止充电。在 09:00~10:00 期间由于电网购电价格较高且电动汽车的荷电状态高于最低值因此向电网放电，直至 11:00 时刻荷电状态低于下限时停止放电。11:00~21:00 时段内由于电动汽车荷电状态低而购电价格又高，因此既不充电也不放电。直到晚上 23:00 回到家后开始利用谷电价进行充电。

最后根据公式 (2-15) 将所有电动汽车对应各个时段的充放电功率累加起来便可得到电动汽车的有序充放电日负荷曲线。如图 2-10 为有序充放电模式下的负荷计算流程图，图 2-11 为不同数量电动汽车参与有序充放电时的日负荷曲线图，其中正值代表电动汽车进行充电储能，负值代表电动汽车进行放电盈利。

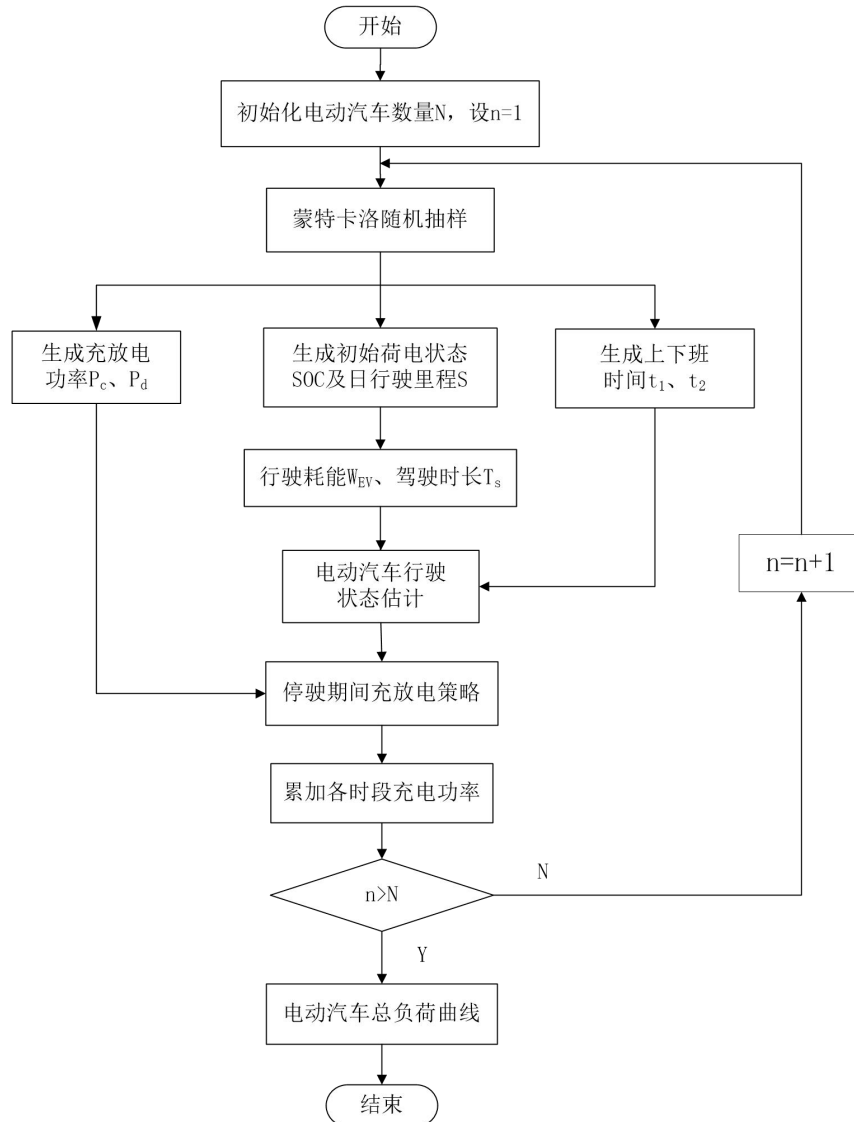


图 2-10 有序充放电模式下的负荷计算流程图

Fig.2-10 Flow chart of load calculation under ordered charging and discharging mode

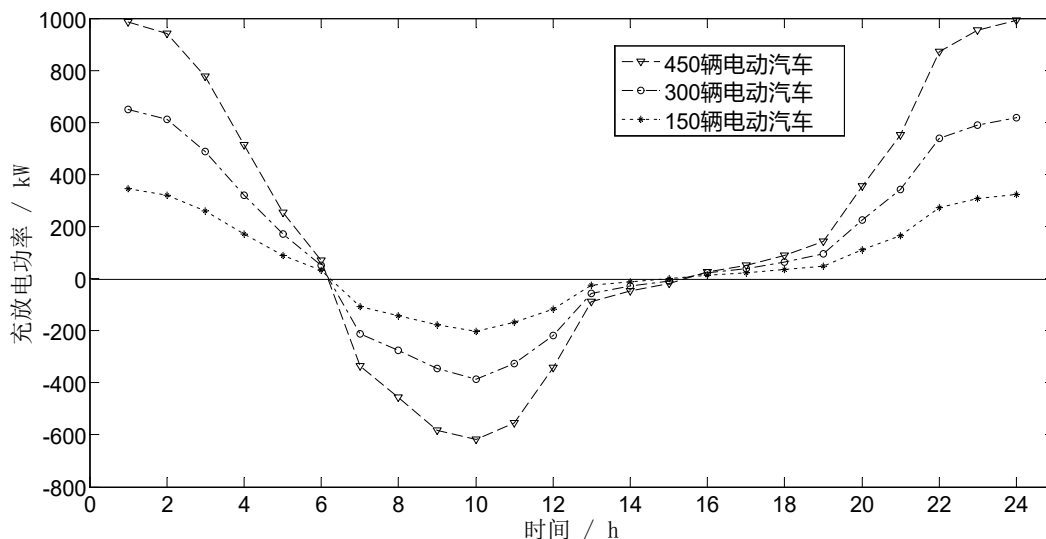


图 2-11 有序充放电模式下的电动汽车负荷曲线

Fig.2-11 Load curve of electric vehicle under orderly charge and discharge mode

由图 2-11 可看出, 电动汽车充电时段主要集中在夜间和凌晨, 处于谷电价时段, 不仅为车主节约了充电成本, 还错开了白天的负荷高峰时段, 避免了“峰上加峰”的现象; 在 06:00~16:00 期间, 由于电动汽车电量充足且向微网售电电价较高, 故电动汽车作为储能单元参与微网调度, 进行放电盈利, 有助于降低电网负荷高峰。

2.4 本章小结

本章详细分析了光伏发电、风力发电、柴油发电机、燃料电池和蓄电池的工作原理及运行特性。然后根据私家电动汽车的上下班行驶特性及充放电特性, 分别建立了电动汽车无序充电时的负荷模型和有序充放电时的负荷模型, 并通过仿真进行了分析验证。为第三章考虑电动汽车的微电网优化调度研究建立了基础。

3 含电动汽车的微网经济调度及改进的天牛须搜索算法

3.1 微网经济调度概述

微网的经济优化调度是一种多目标、多约束、非线性的复杂优化问题。功率平衡是传统电力系统优化调度首先要解决的问题，其保证了系统频率及电压的稳定。同样的，微网作为可以孤岛运行的自治系统也是如此。微网能量管理系统的作用即是在满足发电侧与负荷侧功率平衡的基础上，保证微网稳定可靠的运行，并最小化微网的运行成本和污染排放成本^[64]。

如图 3-1 为微网能量优化调度示意图。微网运行在不同的模式下有不同的调度管理策略，能量管理系统需要根据负荷预测信息，分布式电源的出力预测和市场电能交易价格来制定优化调度方案。从而确定微网与大电网之间的电能交换量、各分布式电源的发电功率及投切负荷的大小。

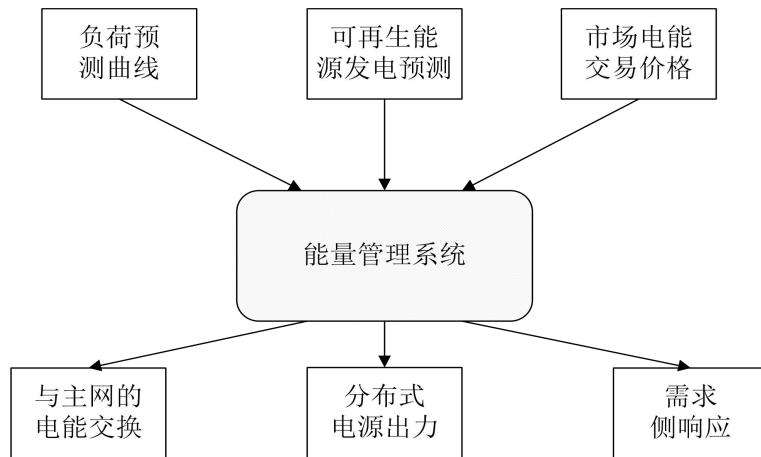


图 3-1 微网能量优化调度示意图

Fig.3-1 Schematic diagram for optimal scheduling of microgrid energy

随着电动汽车的不断普及，大量的电动汽车无序充电将对电网负荷造成“峰上加峰”等不利影响，而微网由于建设规模及容量较小且存在出力不稳定的可再生发电单元，因此当电动汽车大量接入后对其稳定运行将带来更大的挑战。基于以上背景，十分有必要展开电动汽车接入对微网优化运行的影响。本章通过 2.3 节建立的电动汽车负荷模型，结合微网的不同运行模式，建立了计及电动汽车的微电网经济调度模型。

3.2 微网经济调度建模

3.2.1 微网运行模式

根据微网是否与大电网并网运行，微网运行模式分为两种，并网运行模式和孤岛运行模式：

并网运行模式：微网系统在并网运行时，受市场环境、政府政策等影响，通常会产生不同的控制策略。根据微网的运行调度方式及微网与大电网间的能量交换方式，微网并网

时的运行方式主要有以下三种：（1）完全开放的市场竞争环境，微网内的各微源同大电网共同参与优化调度，大电网与微网之间可自由地交换功率，交易完全由微网内各微源的发电成本及电能交易价格主导；（2）大电网同微网内各微源展开竞争，当从大电网购电价格高于微网内的微源时，则优先采用微网内微源供电的方式，反之则向大电网购电，但微网不可向大电网输送功率；（3）优先采用微网内部的微源满足自身的负荷需求，尽量减小与微网的交互功率量，只有当微网内部电源不能满足自身负荷时，才考虑大电网购电的方式，但仍不可向大电网输送能量。

孤岛运行模式：相比于并网运行模式，孤岛运行模式下的微网同大电网之间无功率传输，微网内部的负荷需求完全由微网自身的微电源满足。因此，孤岛运行模式下的微网经济优化调度不需要考虑与大电网的能量交易，只需考虑微网内部各发电单元的运行及排放成本。

微网处于不同的运行模式，经济优化调度也会有所区别。相比于孤岛运行模式，并网运行模式下微网需考虑同大电网的能量交易成本。而在孤岛运行模式下，微网只需优化调度自身内部各微电源的出力及负荷投切，不需要考虑与大电网的电能交易成本，此外，还需要考虑投切负荷时造成的补偿成本。

3.2.2 并网优化调度模型

微网处于并网运行模式时，微网与大电网之间可以自由地进行能量交换，微网内的各微电源与大电网一起参与调度优化。微网并网运行时的经济优化调度需要在满足负荷需求的基础上考虑分时电价对调度过程的影响，从而调整微网内部各分布式电源的出力及与大电网之间的功率交换，达到微网经济运行最优。

（一）目标函数

本文中微网经济优化的目标函数包括：微网运行成本最低、污染治理成本最小及综合成本最小。

目标函数一：运行成本最低

$$\min F_1 = C_{Fuel} + C_{OM} + C_{Cut} + C_{Buy} + C_{Sell} \quad (3.1)$$

式中， $F_1(t)$ 表示运行成本； C_{Fuel} 、 C_{OM} 分别为燃料成本和运行管理成本； C_{Cut} 为切负荷后的补偿成本，当微网并网运行时为零； C_{Buy} 、 C_{Sell} 分别为微网向大电网的购、售电成本。

$$C_{Fuel} = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i=1}^n K_{Fuel_i} \cdot P_i(t) \right] \quad (3.2)$$

$$C_{OM} = \sum_{t=1}^T \left[\sum_{i=1}^n K_{OM_i} \cdot P_i(t) \right] \quad (3.3)$$

$$C_{Cut} = \sum_{i=1}^T S_{Cut} \cdot P_i(t) \quad (3.4)$$

$$C_{Buy} = \sum_{t=1}^T S_{Buy} \cdot P_{Buy}(t) \quad (3.5)$$

$$C_{Sell} = \sum_{t=1}^T S_{Sell} \cdot P_{Sell}(t) \quad (3.6)$$

式中, T 、 n 分别表示时段数和微电源个数; K_{Fuel_i} 、 K_{OM_i} 分别为各微电源的燃料成本系数和运行管理系数; $P_i(t)$ 为第 i 个微电源在第 t 时段的出力; $P_{Buy}(t)$ 、 $P_{Sell}(t)$ 分别为微网向大电网的购电功率和售电功率大小; S_{Cut} 、 S_{Buy} 、 S_{Sell} 分别为切负荷补偿价格和微网向大电网的购、售电价格。

目标函数二: 污染治理成本最小

$$\min F_2 = \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^m \left[\sum_{i=1}^n v_j \alpha_{ij} P_i(t) + v_j \beta_j P_{Buy}(t) \right] \quad (3.7)$$

式中, $F_2(t)$ 表示污染治理成本; m 表示污染物种类; α_{ij} 为第 i 类微电源的第 j 种污染物排放系数; β_j 表示大电网发电时的第 j 种污染物的排放系数; v_j 表示第 j 种污染物的治理成本系数。

目标函数三: 综合成本最小

综合成本不仅需要考虑微网的运行成本, 还需要考虑污染治理成本, 而二者在优化时又互为矛盾函数, 因此属于多目标优化问题。目前, 处理多目标优化问题的常用方法为线性加权法, 其原理是根据优化时对不同优化目标的重视程度, 为各目标设置不同的权重系数。从而将多目标优化问题转化为单目标优化问题进行分析求解。本文同时考虑微网的运行成本最低和污染治理成本最小两个不同的优化目标, 从而最小化综合成本。因此, 综合成本最小化的目标函数如下:

$$\min F_3 = w_1 \cdot F_1 + w_2 \cdot F_2 \quad (3.8)$$

$$w_1 + w_2 = 1 \quad (3.9)$$

式中, F_3 代表微网综合成本; w_1 、 w_2 分别为微网运行成本和污染治理成本两个目标函数的权重系数。

(二) 约束条件

1) 功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^n P_i(t) + P_{Buy}(t) - P_{Sell}(t) = P_{Load} + P_{EV.Load} \quad (3.10)$$

式中, P_{Load} 为常规负荷; $P_{EV.Load}$ 代表电动汽车的充放电负荷, 当电动汽车处于充电状态时 $P_{EV.Load}$ 取值为负, 而当电动汽车处于放电状态时 $P_{EV.Load}$ 取值为正。

2) 各微源有功出力约束

$$P_{i.min} \leq P_i \leq P_{i.max} \quad (3.11)$$

$$P_{Grid.min} \leq P_{Buy}, P_{Sell} \leq P_{Grid.max} \quad (3.12)$$

式中, $P_{i.min}$ 、 $P_{i.max}$ 分别代表第 i 个微电源的所能输出功率的上下限; $P_{Grid.max}$ 、 $P_{Grid.min}$ 分别代表微网与大电网间交互功率的上下限。

3) 储能容量限制约束

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max} \quad (3.13)$$

式中, SOC_{max} 、 SOC_{min} 分别代表储能装置荷电状态的上下限。

3.2.3 孤岛优化调度模型

和并网运行模式相比, 孤岛运行模式下的微电网同大电网之间无功率交换, 由微网自身的微电源满足微网内部的负荷需求。因此孤岛运行模式下的微网经济优化调度只需优化调整内部的微源出力, 不需要考虑与大电网的能量交易。即运行成本不需要考虑购电成本及售电收益, 污染治理成本不需要考虑大电网发电造成的污染治理费用, 并且功率平衡约束中不需要考虑购电及售电功率。其它成本及约束条件基本同微电网并网运行时相同。

3.3 微网不同运行模式下的调度原则

(1) 并网运行模式: 微网并网运行时的经济优化调度是在满足微网内部功率平衡的基础上通过与大电网之间合理的交换电能来降低微网运行成本。因此, 微网并网时的经济优化调度与电能交易价格密切相关, 需要综合考虑购、售电成本及微源运行成本, 从而达到微网运行成本最低的目的。

根据以上分析, 微网并网时的优化调度需要考虑分时电价的影响, 即根据不同时段的微网向大电网购电及售电价格与微网内部各微源的发电成本进行对比来确定调度原则。具体调度采用如下原则:

a: 由于光伏发电与风力发电利用的是太阳能和风能这些清洁能源, 不消耗化石能源, 且对环境无污染, 因此在不考虑其安装成本的前提下, 就从微网的经济运行与低污染排放的角度出发, 风力发电及光伏发电应当被优先利用。在微网能量管理系统的调度过程中光伏发电及风力发电采用最大功率跟踪模式, 始终会优先调用;

b: 储能微网中具有十分重要的作用, 在并网运行模式下, 储能同其他微源共同参与优化调度。而当风力发电和光伏发电超过负荷量, 即微网内部净负荷小于零时, 此时优先对储能进行充电, 然后再考虑向大电网输电, 服从尽量减小与大电网间交互功率的原则;

c: 若微网内各微源在储能装置放电最大状态时仍不能满足负荷需求时, 则直接从大电网购电; 若在满足负荷的前提下还有冗余, 则对比与大电网的交易电价来确定各微源出力及购、售电量;

d: 目前, 我国电力系统仍以集中式发电为主, 微网只是作为区域性、辅助性的电力供应, 规模容量尚小, 对大电网的影响十分有限, 因此可认为微网与大电网之间可以进行自由的双向功率交换, 但需设定功率交换限值。

(2) 孤岛运行模式: 孤岛运行模式下的微网与大电网之间无法进行功率交换, 因此不考虑微电网与大电网间进行电能交换的成本, 由微网自身的微电源满足微网内部的负荷

需求。因此孤岛运行模式下的微网经济优化只需考虑微网内部各微源的出力成本及负荷需求不能被满足时的切负荷补偿成本。

具体调度原则如下：

a：同并网运行模式一样，由于风力发电和光伏发电成本低和无污染的特点，孤岛运行模式下风力发电和光伏发电仍采用最大功率跟踪模式，优先调度出力以充分利用风能及太阳能，避免弃风弃光现象；

b：当各储能荷电状态较低，且风力发电和光伏发电超过负荷量，即净负荷量小于零时，则储能装置进行充电。而当各微源不能满足负荷时则储能进行放电；

c：当储能装置荷电状态已达到上限，且微网内各分布式电源均按最大功率输出仍不能达到负荷需求量时，可切除部分低优先等级负荷以保障重要负荷的正常供电；

d：孤岛运行模式下微网与大电网之间无功率交换，因此不需考虑购、售电成本及大电网发电造成的污染治理成本。

3.4 求解算法

3.4.1 经济调度求解算法概述

微电网的经济调度是一种非线性、多模型、多目标的复杂系统优化问题。微网中分布式电源各不相同，工作原理和运行特性也不尽相同，而待优化的目标函数及约束条件也会使优化模型存在较大差异。因此求解所需的优化算法也各不相同，常用的优化算法主要包括数学规划方法和人工智能优化算法。

负荷调度问题的求解常用到数学规划方法，如文献【65】和文献【66】分别采用混合线性整数规划法和二进制整数规划法。但是，当变量的维数过大，且在求解过程中使用动态规划或者分支定界时，算法的求解时长便会指数增大。因此，数学规划法只适用于简单优化问题的求解。

鉴于实际工程问题的复杂性、非线性、多约束、多极值等特点，研究一种适合于大规模复杂优化问题求解的方法具有迫切而现实的实际意义。随着众多学科相关科研人员的不断努力，一些优秀的智能优化算法被不断提出，如模拟退火算法、差分进化规划、遗传算法、粒子群算法、禁忌搜索算法等，这些算法通过观察模拟自然界的一些生物行为或自然现象来建立优化算法的理论框架。鉴于这些算法的提出思想及发展原理，通常被称为人工智能优化算法。文献【67】利用改进的遗传算法对微网的单目标优化与多目标优化进行了对比分析，仿真结果证明了多目标模型比单目标模型更能确切反应微网的实际运行状态。文献【68】利用粒子群算法对微网优化模型进行了求解，保证了微网运行的经济可靠性。文献【69】对多微网情况下各种调度策略进行了评价对比，采用禁忌搜索算法进行求解，并获得了较好的结果。文献【70】针对经济优化问题采用进化算法进行了求解，并对优化调度方案及需求侧响应结果进行了分析。

3.4.2 天牛须搜索算法

天牛须搜索 (Beetle Antennae Search, BAS) 算法是 2017 年提出的一种高效的智能优化算法^[71-72]。类似于粒子群算法、差分进化算法、蚁群算法等优化算法, 天牛须搜索不需要知道函数的具体形式, 不需要梯度信息, 就可以智能高效地寻优。相比粒子群算法, 天牛须搜索只需要一个个体, 即一只天牛, 运算量大大降低, 且代码简短, 容易实现, 非常适合工程应用。

如图 3-2 所示, 天牛是根据食物的气味强弱来觅食的, 天牛有两只长触角, 如果左边触角感觉到的气味强度比右边大则下一步往左飞, 否则往右飞。依据这一简单原理就可有效找到食物。而食物的气味就相当于一个函数, 这个函数在三维空间每个点值都不同, 天牛两个须可以采集自身附近两点的气味值, 天牛的目的是找到全局气味值最大的点。因此仿照天牛的行为便可以进行高效寻优。

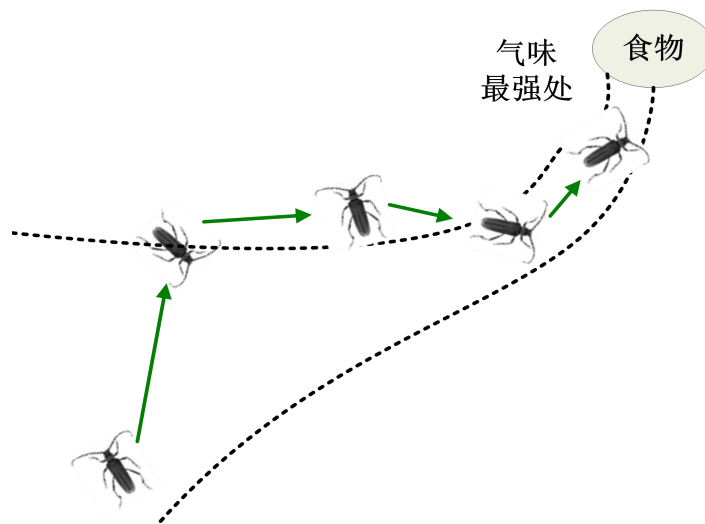


图 3-2 天牛搜索食物原理图

Fig.3-2 Schematic of the beetle to search for food

天牛在三维空间运动, 而天牛须搜索算法是对天牛觅食行为在任意维空间的推广。采用如图 3-3 的简化模型假设天牛:

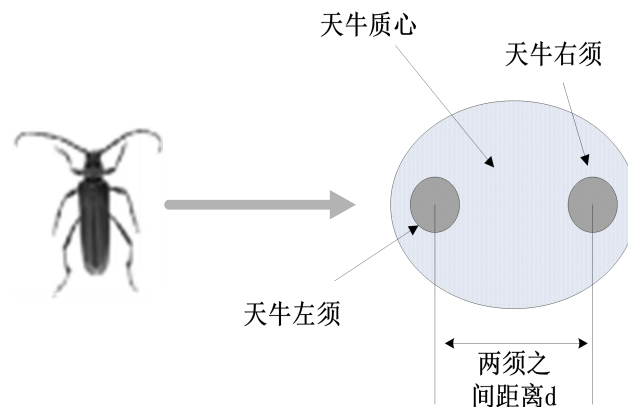


图 3-3 天牛简化模型图

Fig.3-3 Simplified model of the beetle

- 1: 天牛左右两须位于质心两边。
- 2: 天牛步长与两须之间距离的比是固定常数。
- 3: 天牛飞到下一步后, 头的朝向是随机的。

由于天牛每一步头的朝向都是随机的, 即右须指向左须的方向向量朝向是随机的, 定义如下:

$$\vec{b} = \frac{rnd(k,1)}{\|rnd(k,1)\|} \quad (3.14)$$

式中, $rnd(\cdot)$ 为随机函数; k 代表空间的维度。获得方向向量后, 定义左右须的位置如下:

$$x_l = x^t - d^t \vec{b} \quad (3.15)$$

$$x_r = x^t + d^t \vec{b} \quad (3.16)$$

式中, x_l 与 x_r 分别为左右须位置; x^t 为 t 时刻天牛的质心位置; d^t 为 t 时刻两须之间的距离。然后便可以确定下一刻天牛的运动方向和距离, 如下式:

$$x^t = x^{t-1} + \delta^t \vec{b} \text{sign}(f(x_r) - f(x_l)) \quad (3.17)$$

式中, $f(\cdot)$ 为待优化函数; δ^t 代表 t 时刻的搜索步长, 初始步长较大方便全局搜索, 随着迭代次数的增加步长逐步减少以进行更精细的搜索, 如公式 (3.18) 所示:

$$\delta^t = k\delta^{t-1} \quad (3.18)$$

式中, k 为步长的衰减系数。

在实际应用中, 两须之间的距离 d^t 可随步长 δ^t 调整, 如下式:

$$d^t = \delta^t / c \quad (3.19)$$

式中, c 为常数, 可取 2~10 之间。

天牛须搜索算法流程如下:

第一步: 随机初始化天牛位置;

第二步: 计算天牛的适应度值;

第三步: 根据公式 (3.14) 随机生成天牛须方向并根据公式 (3.18) 更新步长;

第四步: 根据公式 (3.15)、公式 (3.16) 确定左、右两须位置;

第五步: 计算左、右两须适应度值;

第六步: 根据公式 (3.17), 由左、右两须适应度值的大小判断天牛下一步移动方向, 从而更新天牛位置;

第七步: 判断是否达到收敛条件, 如果循环到最大迭代次数或得到期望的适应度值, 则结束迭代过程, 否则转回第三步, 继续迭代。

天牛须搜索算法流程图如图 3-4 所示:

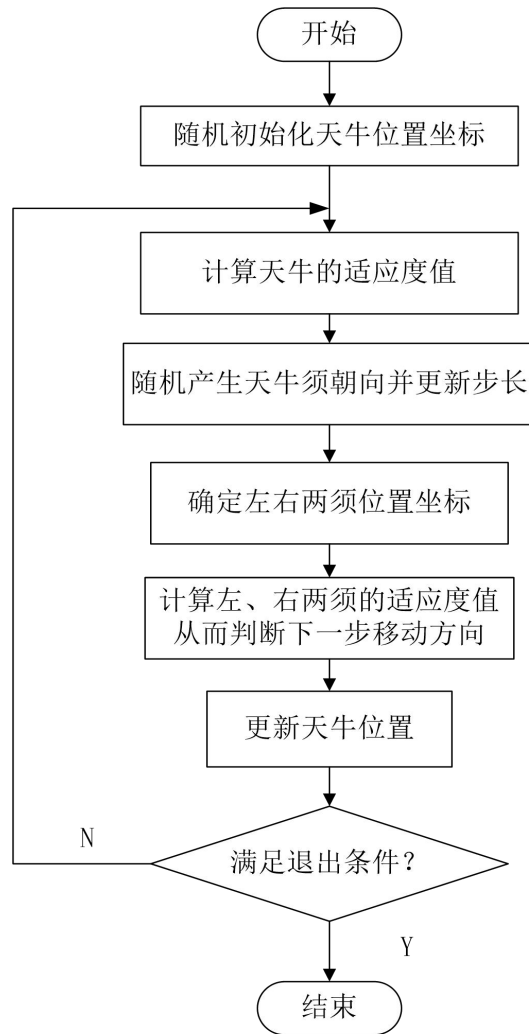


图 3-4 天牛须搜索算法流程图

Fig.3-4 The flow chart of the search algorithm for the beetle

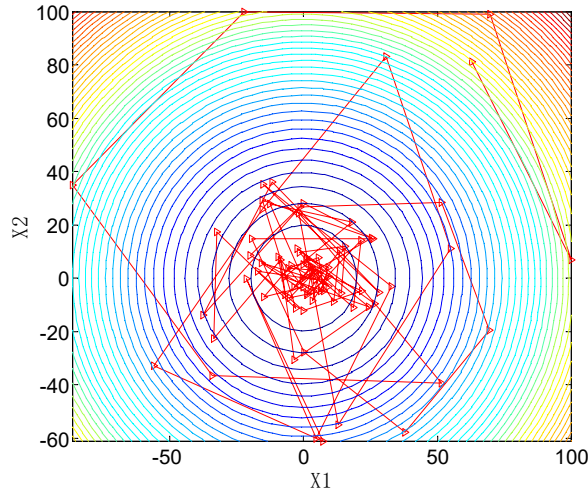
3.4.3 天牛须搜索算法测试验证

为了测试算法有效性，分别采用单峰值基准函数Sphere Model和多峰值基准函数Generalized Rastrigin's进行验证。

首先对单峰值基准函数Sphere Model进行测试，函数如下：

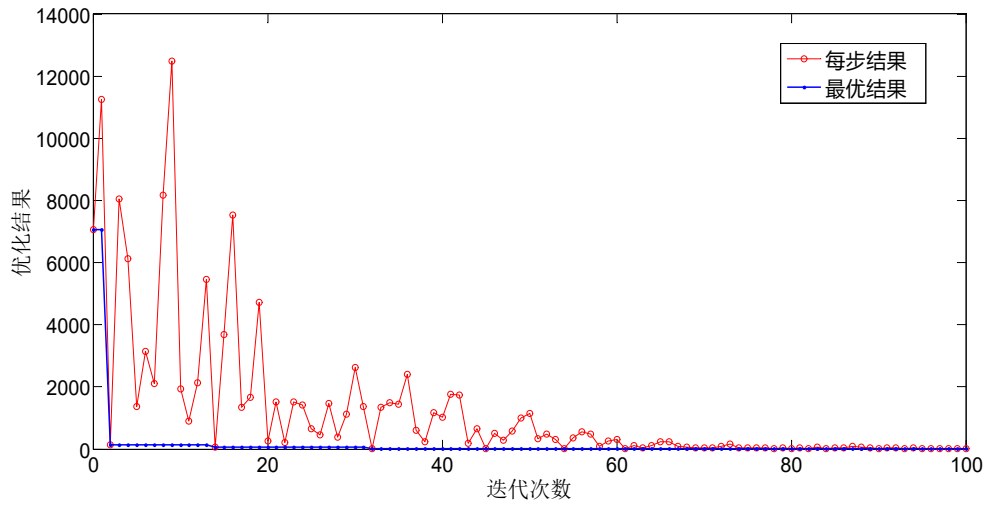
$$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2 \quad (3.20)$$

式中， $\{x | x_i \in [-100, 100], i = 1, 2\}$ ，当 $x_i = 0$ 时，式 (3.20) 存在最小值 $f_1(x) = f_1(0, 0) = 0$ 。利用BAS算法进行优化求解，迭代次数取100次，步长衰减系数k取0.97，优化结果如图3-5所示。图3-5 (a) 为搜索过程图，图3-5 (b) 为优化结果迭代搜索过程图。



(a) 搜索过程

(a) Search process



(b) 搜索迭代过程

(b) Search iterative process

图 3-5 BAS 算法优化结果图

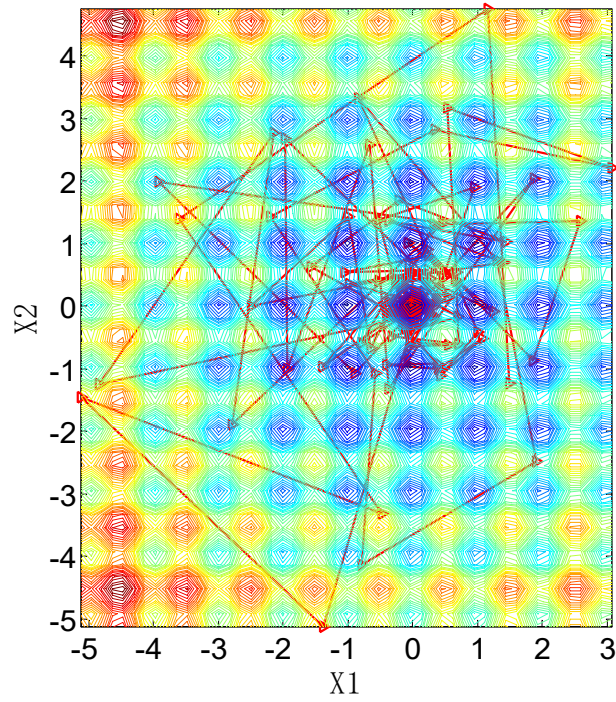
Fig.3-5 Bas algorithm optimization result diagram

图3-5 (a) 中红色虚线为算法的搜索轨迹, 图3-5 (b) 中的红色曲线和蓝色曲线分别为每一步搜索后的结果和函数值更新后的最优结果。在第32次迭代后, 最终优化结果便已经稳定, 最优结果 $f_1(x^*) = 4.5542 \times 10^{-7}$, 对应的最优位置 $x^* = [0.0003, 0.0005]$ 。

然后对多峰值基准函数Generalized Rastrigin's进行测试, 函数如下:

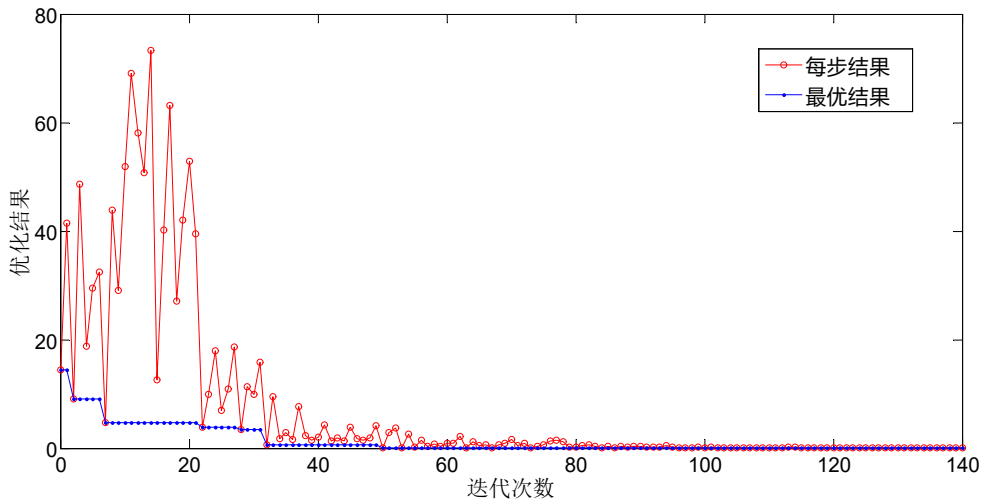
$$f_2(x) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10] \quad (3.21)$$

式中, $\{x | x_i \in [-5.12, 5.12], i=1,2\}$, 当 $x_i = 0$ 时, 式(3.21)存在最小值 $f_2(x) = f_2(0,0) = 0$ 。利用BAS算法进行优化求解, 迭代次数取140次, 步长衰减系数k取0.97, 优化结果如图3-6所示, 图3-6 (a) 为搜索过程图, 图3-6 (b) 为优化结果变化曲线图。



(a) 搜索过程

(a) Search process



(b) 搜索迭代过程

(b) Search iterative process

图 3-6 BAS 算法优化结果图

Fig.3-6 Bas algorithm optimization result diagram

图3-6 (a) 中红色虚线为算法的搜索轨迹，图3-6 (b) 中的红色曲线和蓝色曲线分别为每一步搜索后的结果和函数值更新后的最优结果。在第50次迭代后，最终优化结果便已经稳定，最优结果 $f_2(x^*) = 4.9262 \times 10^{-4}$ ，对应的最优位置 $x^* = [0.0029, 0.0016]$ 。

通过以上仿真测试，可看出BAS搜索算法具有全局寻优能力，运算量小收敛快。并且通过大量仿真可发现寻优结果对常数 c 的取值并不敏感，因此实际应用中仅需调整步长 δ' 即可，参数调节方便，并且算法原理简单，容易实现，非常适合工程优化。

3.4.4 改进的天牛须搜索算法

天牛须搜索算法具有算法简单, 搜索效率高及收敛特性快等优点, 但在搜索求解的过程中步长的变化策略对搜索过程具有至关重要的影响。通过合理的步长设置可以均衡算法的全局搜索能力和局部搜索能力, 因此可以根据求解问题的需要在算法的迭代寻优过程中对步长进行动态的调整。

天牛须搜索原始算法在每次迭代过程中给步长乘以一个衰减系数, 利用步长衰减策略达到了较快的收敛速度和求解精度。但此步长调整策略在前期过程中步长衰减过快, 虽然步长较早的衰减有利于更精细地局部寻优, 但有可能出现算法早熟现象, 全局寻优能力较弱。

为了有效地控制天牛须搜索算法的全局搜索与局部搜索, 本文设计了改进的天牛须搜索算法, 即基于步长随迭代次数增加而减小的基本思想, 在原有衰减系数控制步长策略的基础上, 考虑设计了开口向下抛物线的步长衰减策略, 如公式 (3.22) 所示:

$$\delta^t = -(\delta_{start} - \delta_{end}) \left(\frac{t}{t_{max}} \right)^2 + \delta_{start} \quad (3.22)$$

式中, δ^t 代表第 t 次迭代时的步长; δ_{start} 代表初始步长; δ_{end} 代表迭代到最大次数时的最终步长, 通常可取算法搜索的最小分辨率; t_{max} 代表最大迭代次数。

图3-7为天牛须搜索算法及改进天牛须搜索算法的步长随迭代次数增加的变化曲线, 可看出天牛须搜索算法的步长衰减策略中, 初始阶段步长下降速度快, 随着迭代次数的增加, 下降速度逐渐减慢, 为凹函数。而改进后的天牛须搜索算法初始下降速度小于步长衰减策略的速度, 随着迭代次数的增加, 下降速度逐渐加快, 为凸函数。

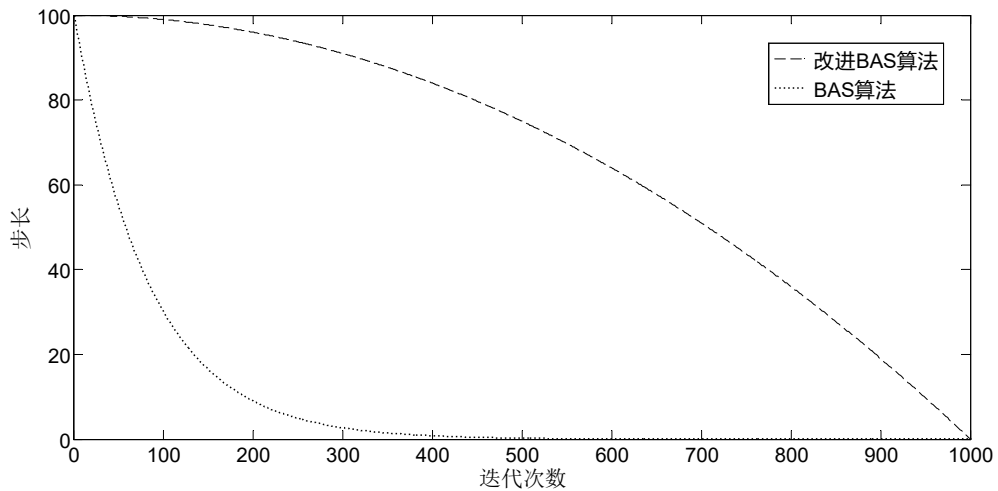


图 3-7 步长下降策略对比曲线

Fig.3-7 Step reduction strategy contrast curve

1995年, 受到鸟群捕食行为的启发, 一种进化优化算法首次被提出, 即粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) [73]。同遗传算法和蚁群算法等相比, PSO由于原理简单、容易实现等优点, 被广泛应用于各种工程优化问题中。因此本文对PSO算法、BAS

算法和改进BAS算法三者进行测试对比。

为了测试收敛速度及全局寻优能力，本节仍采用标准测试函数中的多峰值基准函数 Generalized Rastrigin's 进行仿真测试，维数取10维，搜索空间为 $[-10,10]$ 。PSO算法采用标准PSO算法，算法中的粒子数取30，两个加速因子均取2，最大迭代次数为1000。BAS算法和改进BAS算法的初始步长 δ_{start} 取10，最终步长 δ_{end} 取迭代精度，步长衰减系数k取0.98。

PSO算法、BAS算法和改进BAS算法分别对10维的Generalized Rastrigin's函数进行了50次仿真测试，图3-8值画出了仿真测试平均最优适应度值随迭代次数的变化过程，表3-1给出了测试所得最优解的均值、方差及仿真计算时间三个指标。

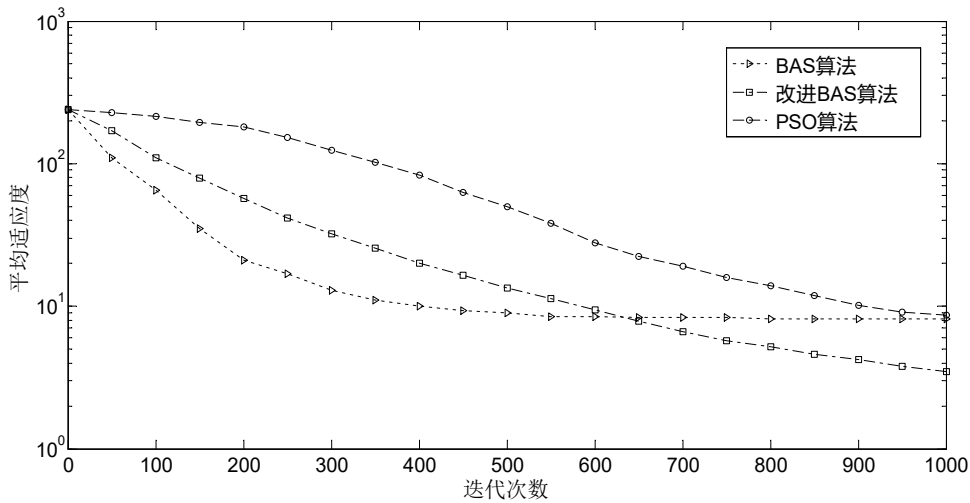


图 3-8 优化结果对比图

Fig.3-8 Optimization result contrast diagram

表 3-1 测试指标计算结果

Table 3-1 Calculation result of test index

对比测试算法	PSO算法	BAS算法	改进BAS算法
均值	8.925	8.173	3.452
方差	2.574	3.681	2.289
计算时间 / s	0.2358	0.1527	0.1753

由图 3-8 和表 3-1 的结果可看出，BAS 算法的前期收敛速度最快，但它在后期和 PSO 算法的最优解相差不大。而改进 BAS 算法相比于 BAS 算法及 PSO 算法具有更出色的全局寻优能力，可以更好的避免陷入局部最优解，并且从方差可看出其具有的稳定性也更强。说明 BAS 算法具有非常好的局部寻优能力，因此需要放慢前期步长衰减速度来加强算法的全局寻优能力，避免其过早的进入局部搜索而使算法早熟现象加剧。从计算时间上可看出 BAS 算法和改进 BAS 算法的计算时间较 PSO 算法大幅减少，而改进 BAS 算法相比 BAS 算法在牺牲了较小计算时间的情况下获得了更好的全局寻优能力。

本节利用多峰值基准函数 Generalized Rastrigin's 对天牛须搜索算法、改进后的天牛须搜索算法及标准粒子群算法进行了对比测试。仿真表明改进后的天牛须搜索算法优于天牛

须搜索算法及标准粒子群算法。

3.5 本章小结

本章首先介绍了微网的经济调度的,然后分别建立了计及电动汽车的微电网在并网运行和孤岛运行两种方式下的经济调度数学模型,并分析了不同运行模式下的调度原则。详细地介绍了天牛须优化算法的基本原理、数学描述及算法流程,并针对天牛须搜索算法全局搜索能力相对较弱容易出现早熟现象的问题,设计了改进的天牛须搜索算法,最后进行了仿真对比验证。

4 含电动汽车的微网经济调度算例分析

4.1 概述

随着电动汽车技术的不断发展，电动汽车的普及率越来越高，同时大规模电动汽车入网对电网造成的影响也越来越严重。因此本章建立了一个计及电动汽车的微网算例系统。然后根据微网的不同运行模式及电动汽车的不同入网方式提出了 4 种不同的运行控制策略。最后采用改进的天牛须搜索算法对模型进行了求解，分析了在不同运行策略及不同优化目标下微网内各分布式电源的出力，并对电动汽车的需求侧响应进行了分析。

4.2 微网结构

本文仿真算例中的微网结构包括风电、光伏、柴油发电机、燃料电池、储能及负荷。其中负荷不仅包含常规负荷还包括电动汽车充放电负荷，本节选取 40 辆电动汽车参与调度来进行研究，微网结构如图 4-1 所示。微网向大电网的购电、售电电价如表 4-1 所示^[74]。切负荷补偿价格取 1.35 元/kWh。微网各微源的污染排放系数及对应的污染治理成本系数、运行参数分别如表 4-2 和表 4-3 所示^[45;55;65]。储能的容量为 150kWh，初始荷电状态 SOC 取 50%，而上限和下限分别取 20%和 80%。图 4-2 为典型的风电、光伏出力及负荷的日前预测曲线，图 4-3 为 40 辆电动汽车分别在无序充电和有序充放电下的负荷曲线。

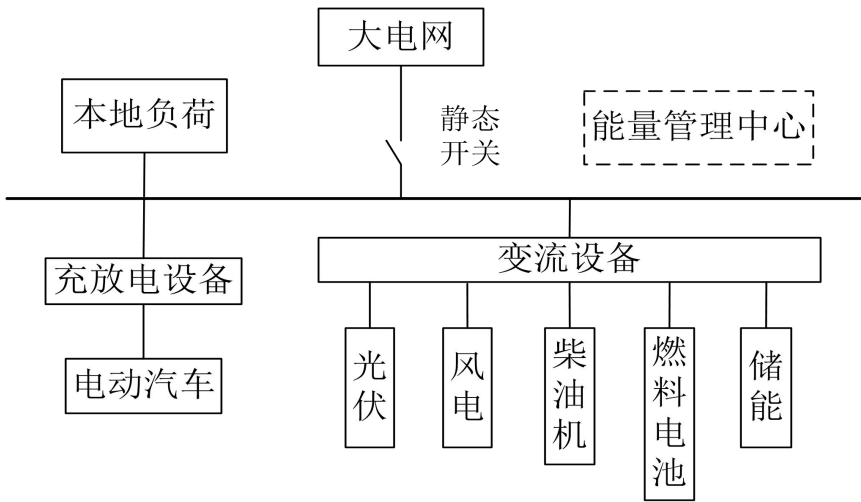


图 4-1 微网结构简图

Fig.4-1 Microgrid structure diagram

表 4-1 微网向大电网购电、售电电价

Table 4-1 Microgrid purchase and sale of electricity prices

时段 (h)	峰时段	平时段	谷时段
	08:00-11:00 19:00-22:00	11:00-18:00	23:00-24:00 01:00-07:00
购电价格 (元/kWh)	1.3141	0.8686	0.4431
售电价格 (元/kWh)	0.9199	0.6080	0.3102

表 4-2 各微源污染排放系数及污染治理成本系数

Table 4-2 Emission coefficient of various micro sources and pollution treatment cost coefficient

污染物类型	CO ₂	SO ₂	NO _x
治理系数/（元/kg）	0.210	14.842	62.964
污染物排放系数/ （g/kWh）	光伏	0	0
	风电	0	0
	储能	0	0
	柴油机	0.206	9.890
	燃料电池	0	0.023
	大电网	1.8	1.6

表 4-3 各微源参数

Table 4-3 Parameters of each micro source

微源类型	光伏	风电	柴油机	燃料电池	储能
功率上限/（kW）	200	60	80	60	30
功率下限/（kW）	0	0	0	0	-30
燃料成本系数/（元/kWh）	0	0	0.396	0.206	0
运行管理系数/（元/ kWh）	0.0096	0.045	0.128	0.0293	0.045

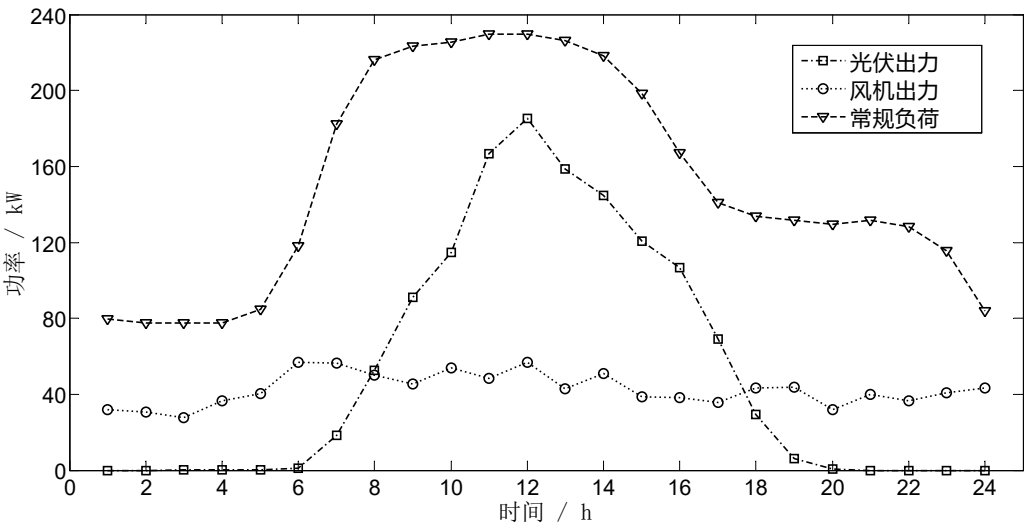


图4-2 典型微源及日负荷预测曲线

Fig.4-2 Typical micro source and daily load forecasting curves

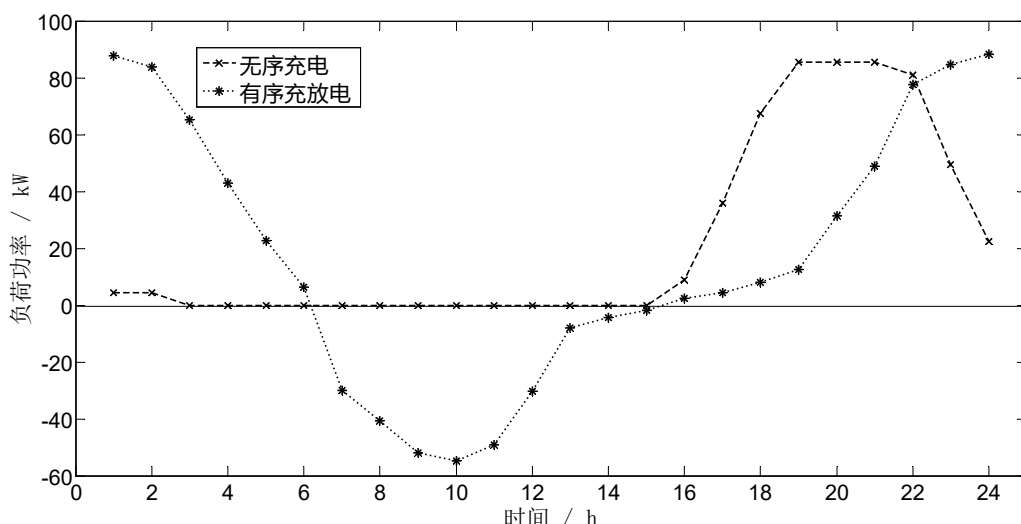


图 4-3 40 辆电动汽车负荷曲线

Fig.4-3 Disordered and ordered charge/discharge load curve of electric vehicles

4.3 微网能量优化调度策略

通过第二章建立的电动汽车负荷数学模型分别得到无序充电和有序充放电两种入网方式下的负荷曲线, 然后与常规负荷相加得到微网总的日负荷曲线。由于光伏发电和风力发电均为可再生清洁能源, 因此为避免弃风弃光现象的发生, 光伏发电和风力发电采用最大功率跟踪的控制方式。从而微网中的净负荷等于常规负荷减去风电和光伏的输出功率后再与电动汽车负荷相加。对于其他分布式电源的出力情况则根据微网的不同运行模式及电动汽车的不同入网方式, 分别采取以下四种调度策略:

(一) 微网并网运行

策略 1: 电动汽车采用无序充电入网方式。总负荷等于电动汽车无序充电负荷和常规负荷的相加, 由柴油发电机、燃料电池、储能装置及大电网共同按照优化调度方案为其供电。微网同大电之网间可双向输送功率。

策略 2: 电动汽车采用有序充放电入网方式。通过合理的电价引导让电动汽车在电价低谷时充电而在电价高峰时电动汽车放电供其它负荷使用, 从而达到削峰填谷和降低电动汽车车主用电成本的目的。此时总负荷等于电动汽车有序充放电负荷和常规负荷的相加, 负荷由柴油发电机、燃料电池、储能装置及大电网共同按照优化调度方案为其供电。微网同大电之网间可双向输送功率。

(二) 微网孤岛运行

策略 3: 电动汽车采用无序充电入网方式。电动汽车采用无序充电方式时, 总负荷等于电动汽车无序充电负荷与常规负荷的相加, 由燃料电池、柴油发电机、储能装置按优化调度结果出力供电, 微网同大电网之间无功率交换。当微网内所有分布式电源按最大出力仍不足以满足负荷需求时, 则考虑切出部分低优先级负荷, 以保证重要负荷的持续供电, 并对切出负荷按照补偿电价进行一定的经济补偿。

策略 4: 电动汽车采用有序充放电入网方式。通过合理的电价引导让电动汽车在电价

低谷时充电而在电价高峰时电动汽车放电供其它负荷使用,从而达到削峰填谷和降低电动汽车车主用电成本的目的。此时总负荷等于电动汽车有序充放电负荷与常规负荷的相加,负荷由柴油发电机、燃料电池、储能装置按优化调度方案为其供电,微网同大电网之间无功功率传输。同样地,当微网内所有微源按最大出力仍不足以满足负荷需求时,则考虑切出部分低优先级负荷,并对切出负荷按照补偿电价进行一定的经济补偿。

4.4 算法求解过程

本文通过改进的天牛须搜索算法对微网经济调度模型进行求解。天牛包含某个时刻所有的分布式电源出力及微网与大电网的交互功率,其中微网内每个各分布式电源的输出功率及微网与大电网间的交互功率分别视作天牛的一维,即 $[P_1(t), P_2(t), \dots, P_i(t)]$ 。每台分布式电源的出力 $P_i(t)$ 根据公式(3.11)和(3.12)在初始可行解域内随机产生。算法分别根据4.3节采取的四种调度策略分别进行求解,当对运行策略1和运行策略2求解时, P_{Buy} 和 P_{Sell} 均按公式(3.12)的约束进行求解,而对运行策略3和运行策略4求解时,公式(3.12)中 P_{Buy} 和 P_{Sell} 均取零。电动汽车则根据不同的入网方式由2.3节建立的电动汽车负荷模型求得相应数量电动汽车的负荷然后与微网常规负荷相加。

本文采用集中式的控制方法进行日前经济优化调度,由微网能量管理系统进行优化调度。将一天划分为时间间隔为 ∇t 的 N 等份, ∇t 的取值范围由优化的时间尺度决定,当解决日前的微网经济优化时, ∇t 的选取范围可为 $5\text{ min} \sim 1\text{ h}$;当解决在线经济优化时,则应进一步缩小 ∇t 的值,通常选取范围为 $1 \sim 5\text{ min}$ 。本文旨在解决日前经济优化调度,将1天分为24个时段分别进行计算, ∇t 取值为 1 h 。

改进的天牛须搜索算法优化过程如下:

(1) 根据4.2节介绍的微网结构,输入微网内各单元参数,然后根据3.2.2节和3.2.3节建立的微网经济调度模型输入目标函数及约束条件参数;

(2) 输入天牛须优化算法参数,如天牛两须间距、步长更新策略参数、最大迭代次数、初始步长等,其中各微源的初始步长各不相同,取各自对应的出力上下限约束差值,从而保证较大搜索范围,达到更好的全局寻优能力;

(3) 根据3.2.2节中三种不同的优化目标函数及约束条件计算天牛的适应度值,即相应的优化目标函数值,分别为运行成本最低、污染治理成本最小和综合成本最小;

(4) 根据公式(3.14)随机生成天牛须方向,天牛须方向的随机性避免了陷入局部最优,并根据公式(3.22)更新步长,步长按改进后的开口向下抛物线的步长衰减策略进行逐代递减;

(5) 根据公式(3.15)、公式(3.16)确定左、右两须位置;

(6) 计算左、右两须适应度值;

(7) 根据公式(3.17),由左、右两须适应度值的大小判断天牛下一步移动搜索方向,从而更新天牛位置,计算此时优化目标对应的新的优化值;

(8) 判断是否达到收敛条件,如果循环达到最大迭代次数则结束迭代过程,否则转

回第四步，继续迭代寻优。

按照上面的寻优步骤，算法的求解流程如图 4-4 表示。

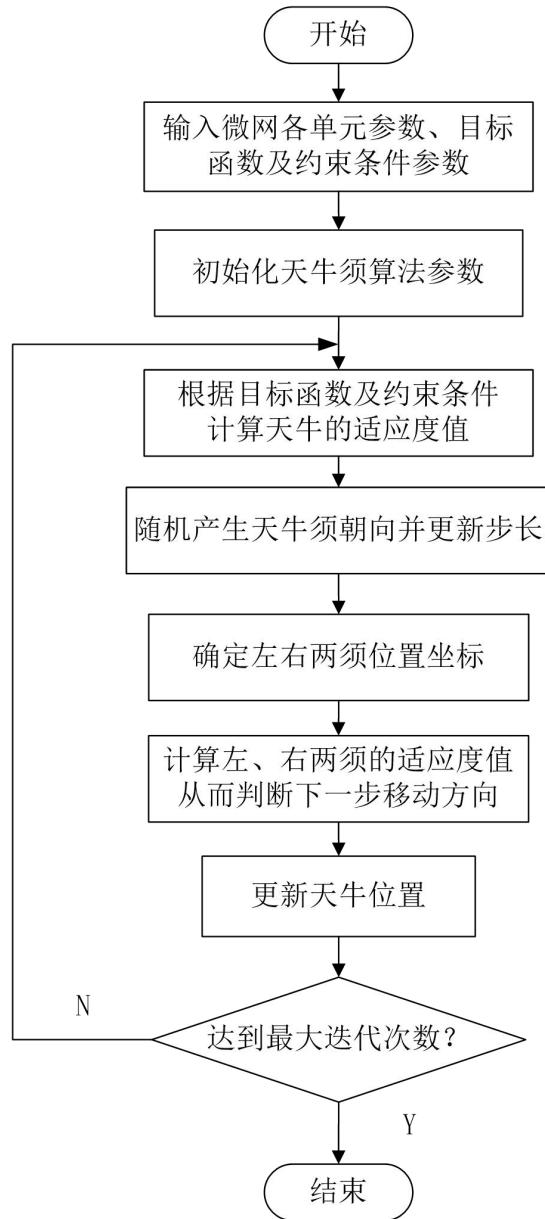


图 4-4 算法求解流程图

Fig.4-4 Flow chart of algorithm solution

4.5 优化结果

4.5.1 不同策略下的调度方案及分析

如 4.3 节分析所述，根据微网的两种不同运行模式及电动汽车的不同入网方式，有四种控制运行策略。本节以优化目标 1 为例，即运行成本最低，分别在四种控制运行策略下进行优化分析，结果分别如图 4-5、图 4-6、图 4-7 和图 4-8 所示。

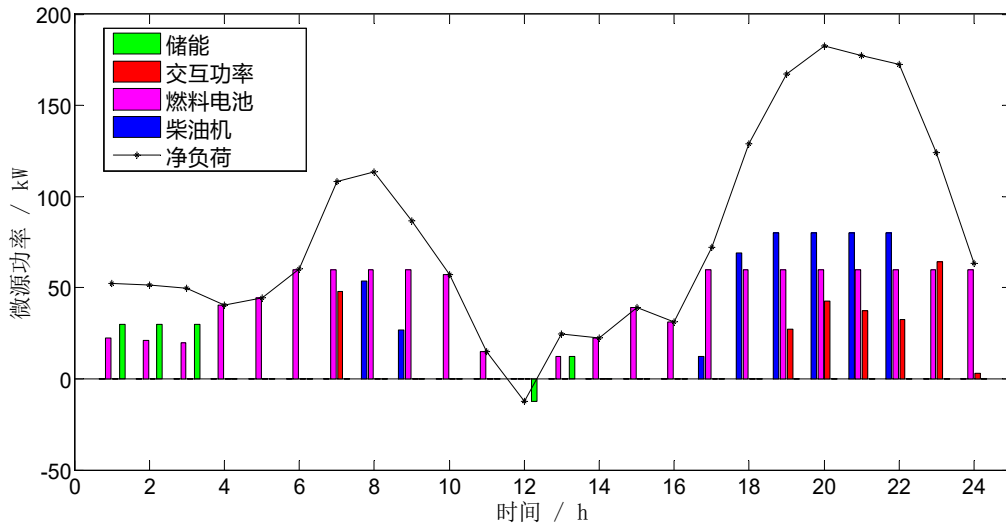


图 4-5 控制策略 1 下的目标 1 的优化结果

Fig.4-5 Optimization results of target 1 under control strategy 1

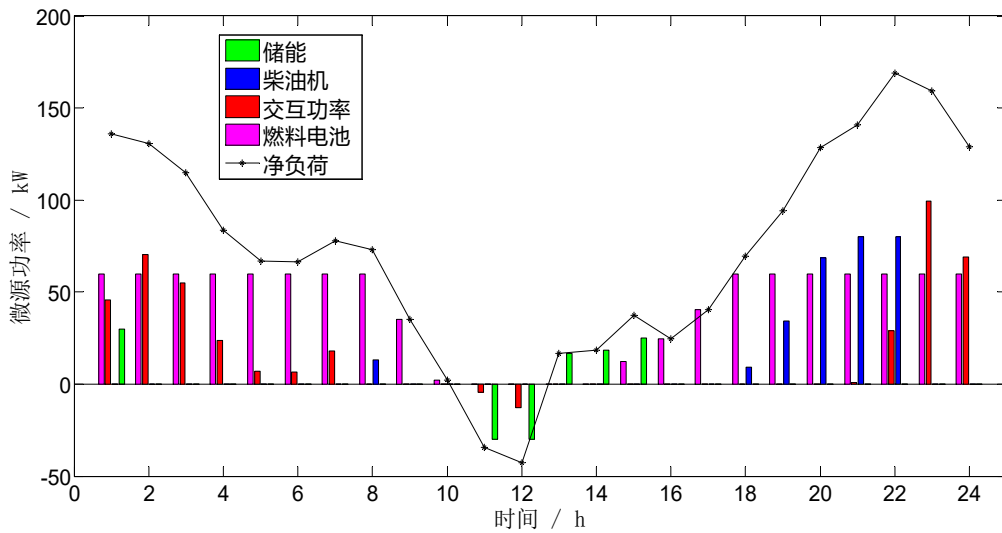


图 4-6 控制策略 2 下的目标 1 的优化结果

Fig.4-6 Optimization results of target 1 under control strategy 2

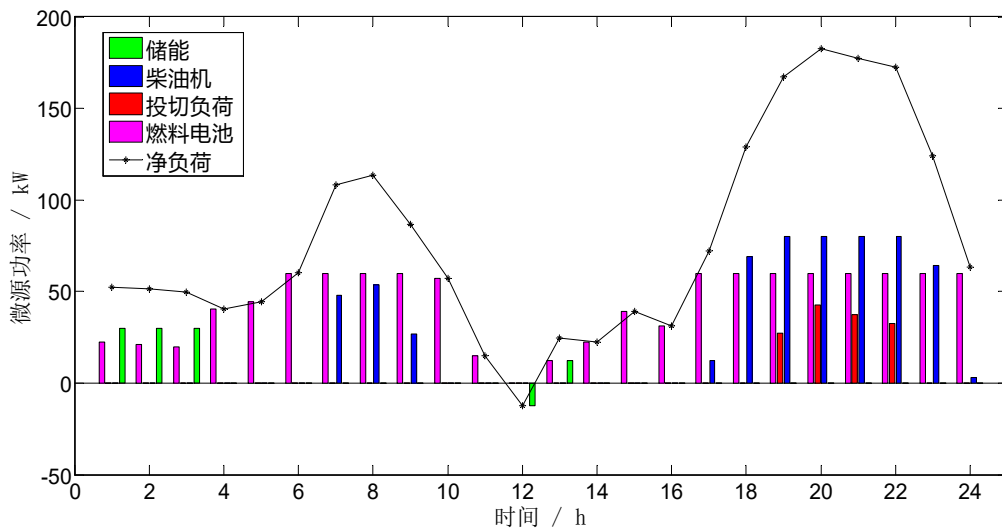


图 4-7 控制策略 3 下的目标 1 的优化结果

Fig.4-7 Optimization results of target 1 under control strategy 3

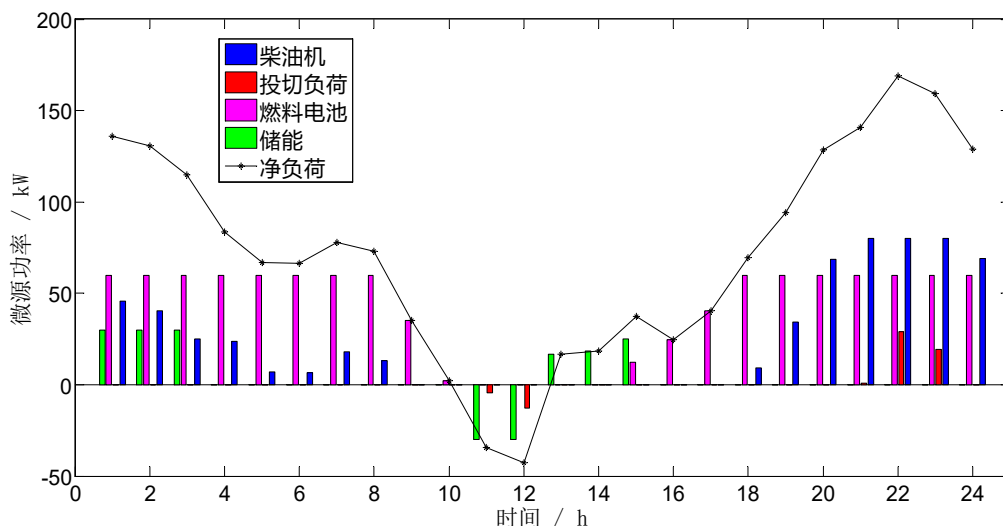


图 4-8 控制策略 4 下的目标 1 的优化结果

Fig.4-8 Optimization results of target 1 under control strategy 4

通过分析以上 4 幅优化结果图，可得出以下结论：

(1) 由于储能具有无污染且运行成本低的特点，因此在满足最低荷电状态的要求下优先调度。在 4 种控制策略下，当净负荷功率为正且不能被储能满足时，燃料电池均被优先安排出力，说明燃料电池发电运行成本最低，始终被优先调用；

(2) 图 4-5 为控制策略 1，即微网并网且电动汽车采用无序充电方式下的优化结果。从图中可看出，在 01:00~06:00 时段内燃料电池和储能共同承担负荷。07:00~09:00 时段内，储能已达到荷电状态下限不再出力，燃料电池按最大功率输出仍不能满足负荷需求，此时在 07:00 时段内通过向电网购电的方式来满足负荷，而在 08:00~09:00 时段内则是调用柴油发电机进行发电，说明在 07:00 时段内微网向大电网的购电成本低于柴油发电机的运行成本，而在 08:00~09:00 时段内则高于柴油发电机运行成本。当在 12:00 时，由于微网净负荷小于零，即此时微网发电量高于用电量，则蓄电池被安排充电储能。在 18:00~22:00 时段内负荷需求较大，此时优先调用柴油发电机进行发电，当柴油发电机按最大功率输出仍不能满足负荷需求时再从大电网进行购电，说明此时段内向大电网购电的成本高于柴油发电机的发电成本。而在 23:00~24:00 时段内，此时处于谷电价阶段，购电成本较低，因此优先从大电网购电；

(3) 图 4-6 为电动汽车采用有序充电方式下的优化结果，可看出和图 4-5 电动汽车采用无序充电方式相比净负荷曲线发生了变化，在 11:00~12:00 时段内微网在满足净负荷的基础上还有多余的电能可以对蓄电池进行充电，其它调度方式与图 4-5 相同；

(4) 图 4-7、图 4-8 分别为微网在孤岛情况下电动汽车无序充电和有序充放电两种控制策略下的优化结果。由于孤岛运行模式下的微网与大电网无交互功率，当微网内净负荷为负且储能已满时或者微网不能满足自身负荷时则需要投切负荷。当投切负荷值为正值时表示需要切负荷，而为负值时为投入负荷。可看出相比于电动汽车处于无序充电方式，当电动汽车处于有序充放电方式时需要投切的负荷值较小。

以目标 1，即运行成本最低为优化目标时，不同运行控制策略下对应的微网运行成本如表 4-4 所示。

表 4-4 目标 1 下各控制策略成本

Table 4-4 The cost of each control strategy under target 1

成本/(元)	运行成本	污染治理成本	投切负荷成本	总成本
控制策略 1	795.8449	587.8896	0	1383.7
控制策略 2	631.0587	468.4779	0	1099.5
控制策略 3	810.1992	592.8276	188.2	1406
控制策略 4	709.7847	594.2148	89	1304

由表 4-4 可得出以下结论：

(1) 由于控制策略 1 和控制策略 2 均为并网模式，微网可与大电网自由进行功率交换，因此不需要投切负荷，故投切负荷成本为零。而控制策略 3 和控制策略 4 为孤岛运行模式，因此存在投切负荷成本；

(2) 控制策略 1 和控制策略 2 均为并网模式，可看出采用电动汽车有序充放电方式的控制策略 2 的总成本低于控制策略 1；同样的在孤岛运行模式下的控制策略 4 的总成本低于控制策略 3。可看出电动汽车采用有序充放电入网方式可降低微网成本；

(3) 通过对比控制策略 3 与控制策略 1 及控制策略 4 与控制策略 2 可得出以下结论：在同样的负荷需求情况下，微网采用并网运行模式较孤岛运行模式更具经济性。因为在并网运行模式下，微网可以利用大电网的分时电价来降低运行成本，而在孤岛模式下当微网不能满足负荷需求时还需要付出额外的投切负荷成本。

4.5.2 不同优化目标下的调度方案及分析

以控制策略 1 为例，分别以运行成本最低、污染治理成本最小和综合成本最低三种不同的目标进行优化分析，优化结果分别如图 4-9、图 4-10 和图 4-11 所示。

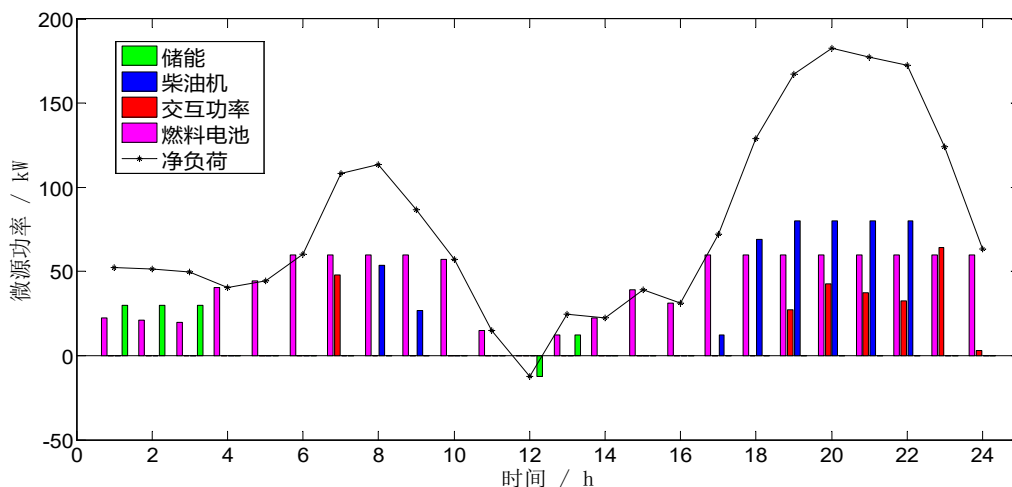


图 4-9 控制策略 1 下的目标 1 的优化结果

Fig.4-9 Optimization results of target 1 under control strategy 1

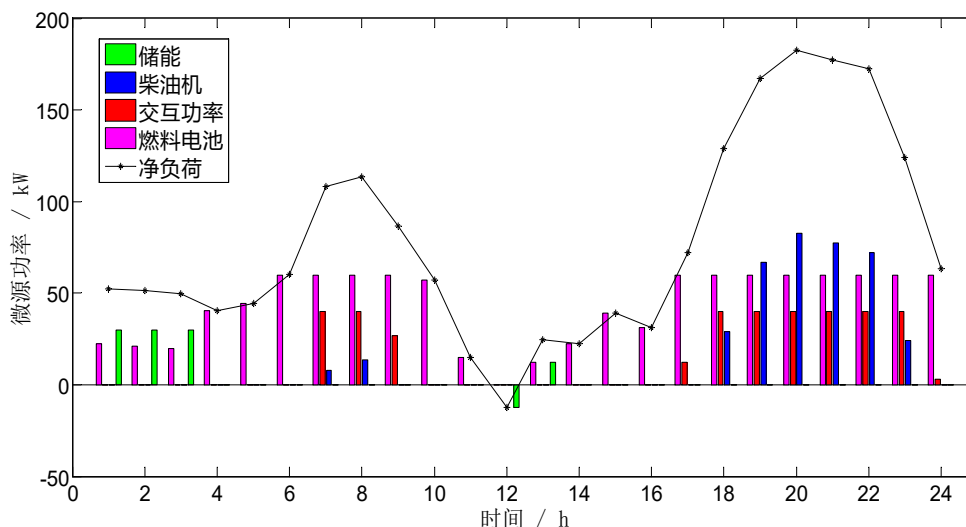


图 4-10 控制策略 1 下的目标 2 的优化结果

Fig.4-10 Optimization results of target 2 under control strategy 1

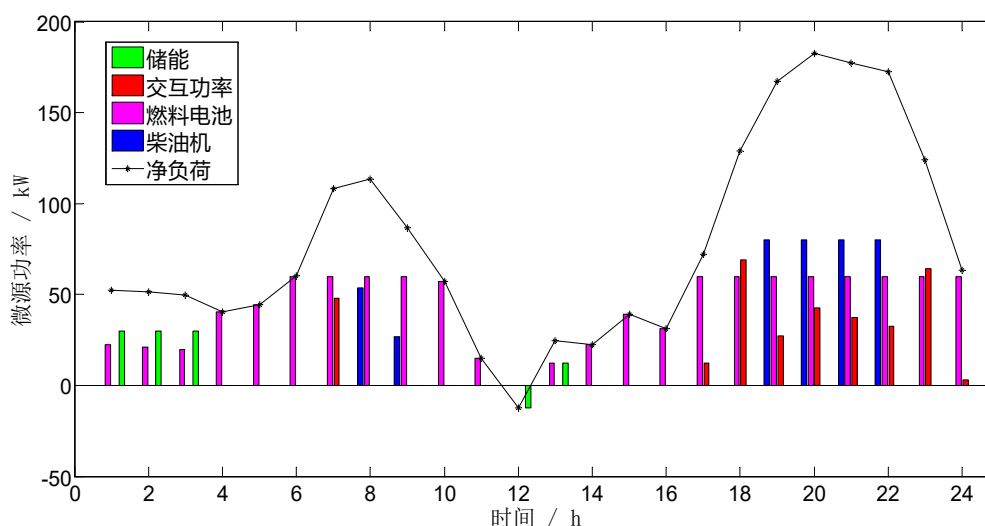


图 4-11 控制策略 1 下的目标 3 的优化结果

Fig.4-11 Optimization results of target 3 under control strategy 1

通过对比控制策略 1 在运行成本最低、污染治理成本最小和综合成本最小三种不同优化目标下的优化结果，可得出以下结论：

(1) 三个目标下微网都优先调用储能和燃料电池，在两者仍不能满足负荷需求时再考虑调用柴油发电机或从大电网购电，说明两者的运行成本和污染治理成本均低于柴油发电机和向大电网购电的成本；

(2) 图 4-9 的优化目标为运行成本最低，从图中可看出在 07:00 和 23:00~24:00 两个时段内当燃料电池和储能出力不能达到负荷要求时，采用了向大电网购电的方式，而在 08:00~09:00 和 15:00~22:00 两个时段内，相比较采用向大电网购电的方式，微网优先调用了柴油发电机进行发电。说明在 07:00 和 23:00~24:00 两个时段内柴油发电机的发电成本高于购电成本，而在 08:00~09:00 和 15:00~22:00 两个时段内购电成本高于柴油发电机成本。对比微网的购电电价可发现，07:00 和 23:00~24:00 两个时段为微网购电谷电价时段，而 08:00~09:00 和 15:00~22:00 两个时段为购电的峰、平电价时段，验证

了优化结果的合理性；

(3) 图 4-10 的优化目标为污染治理成本最少，从图中可看出当柴油发电机进行发电时，微网向大电网的购电量均达到上限值。即相比于调用柴油发电机，微网优先采用向大电网购电的方式，说明柴油发电机的污染处理成本最大；

(4) 图 4-11 为以目标 3 综合成本最小为目标进行优化的结果，综合考虑了各个微源的运行成本和污染治理成本，对应图中各个时段的微源出力，可判断在各个时段中各微源的综合成本大小关系。

表 4-5 为在控制策略 1 下，分别以三种目标进行优化后的成本关系：

表 4-5 控制策略 1 下各优化目标成本

Table 4-5 Optimal target cost under control strategy 1

成本/（元）	运行成本	污染治理成本	总成本
目标 1	795.8449	587.8896	1383.7
目标 2	885.4894	539.7935	1425.3
目标 3	823.7534	551.614	1375.4

从表 4-5 可看出：当优化目标为目标 1 即运行成本最低时，污染治理费用较高；而优化目标为目标 2 即污染治理成本最少时，运行成本又太高；目标 3 为综合成本最小，协调了目标 1 与目标 2 的关系，取折中值，折中程度与权重系数有关，可由微网运行管理方确定，本文取两者相等，权重系数均为 0.5。

4.5.3 电动汽车需求侧响应分析

本节利用 40 辆电动汽车在分别采用无序充电和有序充放电的入网方式下，对比分析了电动汽车对微网常规日负荷的影响及电动汽车车主的用电成本。如图 4-12、图 4-13 分别为电动汽车采用无序充电和有序充放电两种入网方式下的微网负荷曲线图，图中常规负荷为微网典型的日负荷曲线，总负荷即常规负荷与电动汽车负荷的叠加。

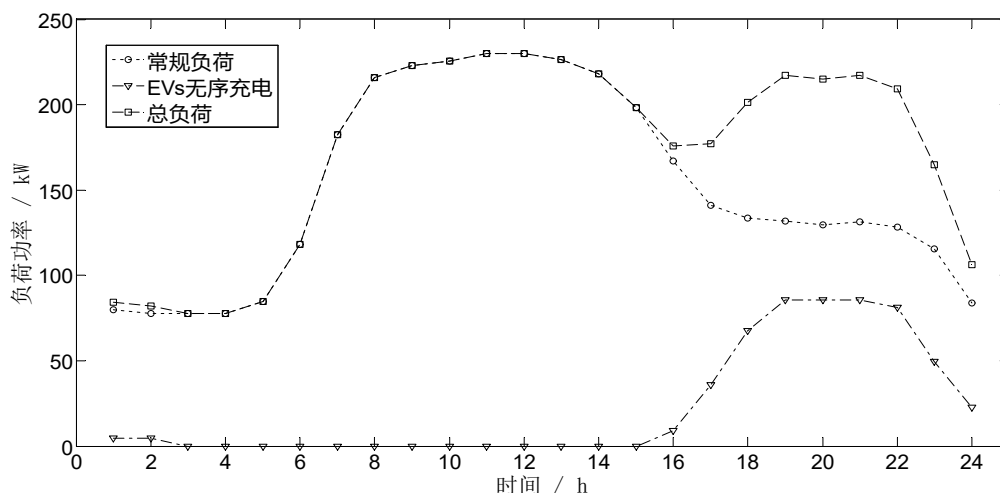


图 4-12 电动汽车无序充电时微网负荷曲线图

Fig.4-12 Microgrid load curve diagram for disorderly charging of electric vehicles

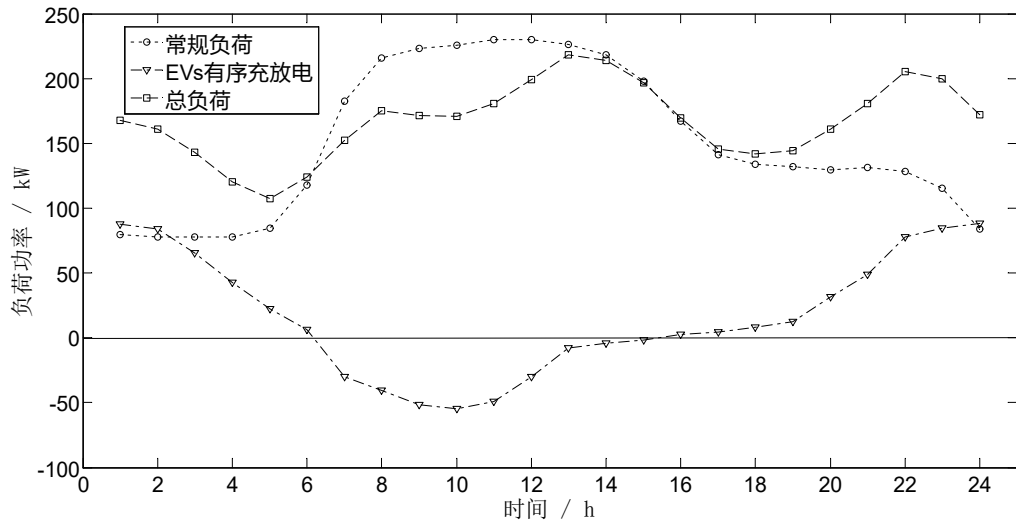


图 4-13 电动汽车有序充放电时微网负荷曲线图

Fig.4-13 Load curve of microgrid when EVs are charged and discharged orderly

为了评价电动汽车对微网负荷的影响,本文采用负荷峰谷差和负荷均方差两个参数来分析负荷的波动情况:

1) 负荷峰谷差: 负荷一个周期内最大负荷与最小负荷的差值, 本文以日作为一个周期, 将一天分为 24 个时间段:

$$M = P_{L \max} - P_{L \min} \quad (4.1)$$

式中, M 代表负荷峰谷差; $P_{L \max}$ 、 $P_{L \min}$ 分别代表一天中负荷的最大值和最小值。

2) 负荷均方差: 可用于评价负荷的波动情况, 均方差越小则表示负荷变化越平稳, 公式如下:

$$D = \sum_{i=1}^{24} (P_{Li} - P_{avr})^2 \quad (4.2)$$

$$P_{avr} = \sum_{i=1}^{24} P_{Li} / 24 \quad (4.3)$$

式中, D 代表负荷均方差; P_{Li} 表示第 i 个时段负荷的功率值; P_{avr} 为负荷的平均值。

表 4-6 电动汽车不同入网方式下对微网负荷的影响

Table 4-6 Influence of electric vehicle on load of microgrid under different network access modes

评价指标	负荷峰谷差 (kW)	负荷均方差 (kW)	车主用电成本 (元/天)
常规负荷	152.3	75758	~
EVs 无序充电+常规负荷	152.3	76712	7.05
EVs 有序充放电+常规负荷	111.1661	19892	5.213

表 4-6 为电动汽车在不同入网方式下对微网负荷的影响及车主用电成本分析, 由表 4-6 中可得出以下结论:

(1) 电动汽车采用无序充电方式后微网的负荷均方差增大了 954kW, 上升了 1.26%,

加大了微网的负荷波动。并且从图 4-12 中可发现，若电动汽车数量继续增加，最终还会加大负荷峰谷差，造成“峰上加峰”的现象；

(2) 相比于电动汽车无序充电，电动汽车采用有序充放电不仅降低了微网负荷峰谷差 41.14kW(27%)，起到了“削峰填谷”的作用。还可降低了负荷均方差 55866kW(73.74%)，平抑负荷波动；

(3) 相比于无序充电方式，当电动汽车采用有序充放电方式后，电动汽车车主每天的平均用电成本节省了 1.837 元。

通过以上分析可知，电动汽车在合理的电价引导下采用有序充放电的入网方式不仅可以为车主减少用电成本，还可降低微网负荷的峰谷差及负荷均方差，起到平抑微网负荷波动和“削峰填谷”的作用。

4.5.4 不同权重下微网优化调度对比

优化目标 3 综合成本包含运行成本和污染治理成本两部分，本节在运行策略 2 下分别对运行成本和污染治理成本取不同的权重系数 w_1 、 w_2 ，两者的和为 1。分析各成本变化，优化结果如表 4-7 所示：

表 4-7 不同权重系数下各成本对比

Table 4-7 Comparison of costs under different weight coefficients

权重系数		成本/元		
w_1	w_2	运行成本	污染治理成本	总成本
1	0	621.0587	478.4779	1099.5366
0	1	761.6613	434.1664	1195.8277
0.4	0.6	671.4753	455.213	1126.6883
0.5	0.5	630.3628	463.082	1093.4448
0.6	0.4	629.1513	474.0942	1103.2455

由表 4-7 可看出对运行成本和污染治理成本设定不同的权重值对优化结果有较大影响。当 w_1 的值越大，则运行成本的优化结果越小；而当 w_2 的值越大，则污染治理成本的优化结果越小。

因此通过 w_1 、 w_2 两个权重系数可以调整优化的侧重点，其取值可由微网运行管理方根据需要确定。

4.6 本章小结

本章首先构建了含电动汽车的微网算例系统，其次制定了 4 种不同的运行控制策略。然后采用改进的天牛须搜索算法求解微网在不同运行控制策略、不同优化目标及不同权重系数下的调度方案，并对电动汽车的需求侧响应进行了分析。最后，得出以下结论：

(1) 燃料电池的发电成本较低故优先调用，柴油发电机的发电较高，在并网调度时需对比柴油发电机的发电成本与微网向大电网的购电成本来确定调度方案；

(2) 相比无序充电方式，电动汽车采用有序充放电入网方式可降低微网运行成本，且微网采用并网运行模式较孤岛运行模式更具经济性；

(3) 优化目标不同得到的优化调度方案不同，多目标优化可求解出相对权衡合理的折衷解；

(4) 电动汽车采用有序充放电的入网方式不仅可以为车主减少用电成本，还可降低微网负荷的峰谷差及负荷均方差，起到平抑微网负荷波动和“削峰填谷”的作用；

(5) 进行多目标优化时各目标选取不同的权重系数对优化结果有较大影响，其取值要根据不同的优化侧重点进行调整。

5 总结与展望

5.1 总结

微网集成了多种分布式电源及储能装置,实现了多能互补,解决了大电网与分布式电源的融合问题。而交通电气化是未来的发展趋势,未来电动汽车将逐步替代燃油汽车。但由于电动汽车的行驶和充电具有很大的随机性,随着大量电动汽车接入微网将使微网的经济调度更为复杂,大大增加微网的运行控制难度。因此,本文对计及电动汽车的微网优化运行进行了研究,主要工作及结论如下:

(1) 分析总结了光伏发电、风力发电、燃料电池、柴油发电机和蓄电池的工作原理及运行特性。随后分析了电动汽车的行驶特性及充放电特性,分别建立了电动汽车无序充电和有序充放电负荷模型。

(2) 分别建立了计及电动汽车的微网在并网和孤岛两种运行模式下的经济调度模型,并分析了微网在不同运行模式下的调度原则。然后详细地介绍了天牛须搜索算法,并针对天牛须搜索算法全局寻优能力较弱容易陷入早熟的问题,设计了改进的天牛须搜索算法,最后进行了仿真对比验证。

(3) 构建了一个微网仿真算例系统,根据微网的不同运行模式及电动汽车的不同入网方式制定了4种不同的运行控制策略。最后采用改进的天牛须搜索算法对模型进行了求解,分析了在不同运行控制策略及不同优化目标下微网内各分布式电源的出力,并分析了电动汽车的需求侧响应。通过算例仿真最终得到以下结论:

a: 通过仿真结果可看出,燃料电池的发电成本较低故优先调用,柴油发电机的发电成本较高,在并网调度时需对比柴油发电机的发电成本与微网向大电网的购电成本来确定调度方案。这一优化结果同分布式电源的实际运行情况相符,证明了本文所建经济调度模型的正确性及改进天牛须搜索算法的有效性。

b: 微网在不同的运行控制策略下得到的优化方案各不相同。微网采用并网运行模式较孤岛运行模式更具经济性,且相比无序充电方式,电动汽车采用有序充放电入网方式可降低微网运行成本。

c: 优化目标不同得到的优化调度方案不同,多目标优化可求解出相对权衡合理的折衷解;而进行多目标优化时,各目标选取不同的权重系数对优化结果也有较大影响,其取值由微网运行管理方根据不同的优化侧重点进行调整。

d: 电动汽车在合理的电价引导下,采用有序充放电入网的需求侧响应方式,不仅可以为车主减少用电成本,还可降低微网负荷的峰谷差及负荷均方差,起到“削峰填谷”、平抑微网负荷波动的作用。

5.2 展望

本文主要研究了计及电动汽车的微网经济优化调度,但以下几个方面仍存在不足,

需进一步改进和深入研究:

(1) 在微电网的能量管理中, 热电联产是提高微网的能量利用率的重要途径, 但是本文还未对微电网热电联产综合优化调度进行分析。

(2) 本文只考虑了典型的私家电动汽车上下班的用户行为。随着电动汽车规模的不断增大, 有必要考虑电动公交车、出租车等其它不同类型电动汽车的车辆参数及用车行为, 从而更全面地分析电动汽车接入对微网的影响。

(3) 电价理论是电力市场的核心理论之一, 制定合理的能量交易价格不仅可以降低微网的运行成本, 同时也可以更好地引导鼓励电动汽车车主进行有序的充放电操作。因此, 对于微网与大电网及微网与电动汽车的能量交易价格需要进行更深入地研究。

致谢

研究生三年一晃而过，三年中有太多的美好回忆，过去一幕幕鲜活的场景在记忆中回放，一路走来，唯有感激二字永存心间。本文是在张志禹教授的悉心指导下完成的，值此论文完成之际，谨向我的导师表示最诚挚的谢意。在论文选题及撰写过程中，张老师准确的把握了当今电力系统方面的研究热点，对于我的研究课题给予了悉心指导，始终一丝不苟、诲而不倦的帮我解决课题上的难点，生活上对我无微不至的关怀让我备受感动。

还要感谢满蔚仕老师的无私指导与帮助，满老师严谨的科学态度、科学有效的工作方法、实事求是的科研精神给了我极大影响，并将使我受益终身。同时还要感谢同向前老师，同老师丰富的电力知识，清晰的思路、严谨的治学风格深深影响了我。

感谢实验室的同窗和师弟师妹们，在论文的写作过程中，你们给予了莫大的支持，感谢你们，与你们在一起是一段美好而又充实的回忆。

还要特别感谢我的父母，感谢你们一直对我的鼓励、支持，成长的路上你们是我坚强的后盾，感谢你们无私的付出支持我不断前行，我爱你们！

最后，祝：所有的老师、朋友和同学生活愉快、健康幸福。

参考文献

- 【1】 季阳, 艾芊, 解大. 分布式发电技术与智能电网技术的协同发展趋势[J]. 电网技术, 2010(12):15-23
- 【2】 张光资. 分布式发电技术及其对电力系统的影响[J]. 科技展望, 2016, 26(03):104.
- 【3】 马艺玮, 杨苹, 王月武, 赵卓立. 微电网典型特征及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(08):168-175.
- 【4】 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 刘海涛, 李蕊. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(01):57-70.
- 【5】 马玲玲, 杨军, 付聪, 刘培, 孙元章. 电动汽车充放电对电网影响研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(03):140-148.
- 【6】 刘晓飞, 张千帆, 崔淑梅. 电动汽车 V2G 技术综述[J]. 电工技术学报, 2012, 27(02):121-127.
- 【7】 Basak P, Chowdhury S, Dey S H N, et al. A literature review on integration of distributed energy resources in the perspective of control, protection and stability of microgrid[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(8):5545-5556.
- 【8】 Patrao I, Figueres E, Garcerá G, et al. Microgrid architectures for low voltage distributed generation[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2015, 43(C):415-424.
- 【9】 Lasseter R H, Paigi P. Microgrid: a conceptual solution[C]// Power Electronics Specialists Conference, 2004. Pesc 04. 2004 IEEE. IEEE, 2004:4285-4290 Vol.6.
- 【10】 Eto J H, Eto J H, Lasseter R, et al. CERTS Microgrid Laboratory Test Bed - PIER Final Project Report[J]. Power Delivery IEEE Transactions on, 2008, 26(1):325 - 332.
- 【11】 邱鹏光. 基于群智能算法对微电网经济调度的研究[D]. 华北电力大学, 2013.
- 【12】 Morozumi S. Micro-grid Demonstration Projects in Japan[C]// Power Conversion Conference - Nagoya. IEEE, 2007:635-642.
- 【13】 Morozumi S, Kikuchi S, Chiba Y, et al. Distribution technology development and demonstration projects in Japan[C]// Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the, Century. IEEE, 2008:1-7.
- 【14】 荣延泽. 分布式电源建模与微电网控制及保护[D]. 杭州电子科技大学, 2012.
- 【15】 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(08):22-27.
- 【16】 许志新. 承德风光储微电网项目开工[N]. 国家电网报, 2011-07-14(003).
- 【17】 全国首个兆瓦级离网型微网工程在浙江南麂岛投运[J]. 浙江电力, 2014, 33(10):74.
- 【18】 高雅. 南麂岛:微电网的大效能[J]. 国家电网, 2014(09):95-97.
- 【19】 蒋欣, 江鹏, 王永生. 浅议电动汽车[J]. 时代汽车, 2017(10):25+27.
- 【20】 刘卓然, 陈健, 林凯, 赵英杰, 许海平. 国内外电动汽车发展现状与趋势[J]. 电力建设, 2015, 36(07):25-32.
- 【21】 刘卓然, 陈健, 林凯, 赵英杰, 许海平. 国内外电动汽车发展现状与趋势[J]. 电力建

- 设,2015,36(07):25-32.
- 【22】 C. K. Wen, J. C. Chen, J. H. Teng and P. Ting, "Decentralized energy management system for charging and discharging of plug-in electric vehicles," 2012 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP), Huangshan, 2012, pp. 1-6.
 - 【23】 蒋玉玲, 侯思佳, 余博阳, 杨珺东, 王威, 朱华希, 徐懂理. 电动汽车接入电网对配电网造成的影响分析[J].机电信息,2017(21):113-115.
 - 【24】 Clement-Nyns K, Haesen E, Driesen J. The Impact of Charging Plug-In Hybrid Electric Vehicles on a Residential Distribution Grid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 25(1):371-380.
 - 【25】 Yao E, Wong V W S, Schober R. Robust Frequency Regulation Capacity Scheduling Algorithm for Electric Vehicles[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 8(2):1-14.
 - 【26】 Yong J Y, Ramachandramurthy V K, Tan K M, et al. Bi-directional electric vehicle fast charging station with novel reactive power compensation for voltage regulation[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 64:300-310.
 - 【27】 李志伟, 赵书强, 刘应梅. 电动汽车分布式储能控制策略及应用 [J]. 电网技术,2016,40(02):442-450.
 - 【28】 Gao S, Chau K T, Liu C, Wu D, et al. SMES Control for Power Grid Integrating Renewable Generation and Electric Vehicles[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2012, 22(3):5701804-5701807.
 - 【29】 Akhavan-Rezai E, Shaaban M F, El-Saadany E F, et al. Online Intelligent Demand Management of Plug-In Electric Vehicles in Future Smart Parking Lots[J]. IEEE Systems Journal, 2016, 10(2):483-494.
 - 【30】 Mozafar M R, Amini M H, Moradi M H. Innovative appraisalment of smart grid operation considering large-scale integration of electric vehicles enabling V2G and G2V systems[J]. Electric Power Systems Research, 2018, 154:245-256.
 - 【31】 唐佳, 王丹, 贾宏杰, 高爽, 宋毅, 李娟, 孙充勃, 范孟华. 基于迟滞模型的集群电动汽车参与实时需求响应 V2G 控制策略研究[J].电网技术,2017,41(07):2155-2165.
 - 【32】 项顶, 宋永华, 胡泽春, 等. 电动汽车参与 V2G 的最优峰谷电价研究[J]. 中国电机工程学报, 2013(31):15-25.
 - 【33】 Buja G, Bertoluzzo M, Fontana C. Reactive power compensation capabilities of V2G-enabled electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(12):9447-9459.
 - 【34】 苏粟, 蒋小超, 王玮, 姜久春,V.G.AGELIDIS,耿婧. 计及电动汽车和光伏一储能的微网能量优化管理[J].电力系统自动化,2015,39(09):164-171.
 - 【35】 Mwasilu F, Justo J J, Kim E K, et al. Electric vehicles and smart grid interaction: A review on vehicle to grid and renewable energy sources integration[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014, 34:501-516.

- 【36】 郭小敏, 杨健维, 何正友. V2G 模式下城市电网电压质量概率评估方法[J]. 电网技术, 2015, 39(10): 2986-2992.
- 【37】 Bae S, Kwasinski A. Spatial and Temporal Model of Electric Vehicle Charging Demand[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 394-403.
- 【38】 陈丽丹, 聂涌泉, 钟庆. 基于出行链的电动汽车充电负荷预测模型[J]. 电工技术学报, 2015, 30(04): 216-225.
- 【39】 Li G, Zhang X P. Modeling of Plug-in Hybrid Electric Vehicle Charging Demand in Probabilistic Power Flow Calculations[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 492-499.
- 【40】 Han S, Han S, Sezaki K. Development of an Optimal Vehicle-to-Grid Aggregator for Frequency Regulation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(1): 65-72.
- 【41】 Bessa R J, Matos M A. Economic and technical management of an aggregation agent for electric vehicles: a literature survey[J]. European Transactions on Electrical Power, 2012, 22(3): 334-350.
- 【42】 王金全, 黄丽, 杨毅. 基于多目标粒子群算法的微电网优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(01): 49-54.
- 【43】 庄怀东, 吴红斌, 刘海涛, 季宇. 含电动汽车的微网系统多目标经济调度[J]. 电工技术学报, 2014, 29(S1): 365-373.
- 【44】 Tabar V S, Jirdehi M A, Hemmati R. Energy management in microgrid based on the multi objective stochastic programming incorporating portable renewable energy resource as demand response option[J]. Energy, 2017, 118: 827-839.
- 【45】 Bruni G, Cordiner S, Mulone V, et al. Energy management in a domestic microgrid by means of model predictive controllers[J]. Energy, 2016, 108: 119-131.
- 【46】 陈鸿亮. 面向大型园区供能的冷热电联供型微网优化调度研究[D]. 南京理工大学, 2017.
- 【47】 石庆均, 耿光超, 江全元. 独立运行模式下的微网实时能量优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 26-35.
- 【48】 Wu H, Liu X, Ding M. Dynamic economic dispatch of a microgrid: Mathematical models and solution algorithm[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 63(63): 336-346.
- 【49】 Ahn S J, Nam S R, Choi J H, et al. Power Scheduling of Distributed Generators for Economic and Stable Operation of a Microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2013, 4(1): 398-405.
- 【50】 Zakariazadeh A, Jadid S, Siano P. Smart microgrid energy and reserve scheduling with demand response using stochastic optimization[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 63(12): 523-533.
- 【51】 闫凯, 张保会, 瞿继平, 吴兴全. 光伏发电系统暂态建模与等值[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(01): 1-8.
- 【52】 Tabar V S, Jirdehi M A, Hemmati R. Energy management in microgrid based on the multi objective

- stochastic programming incorporating portable renewable energy resource as demand response option[J]. Energy, 2017, 118:827-839.
- 【53】 杨赞. 含电动汽车微网的经济调度研究[D].浙江工业大学,2013.
- 【54】 胡晓通, 刘天琪, 何川, 刘舒, 刘一奎. 计及蓄电池损耗特性的微网多目标优化运行[J].中国电机工程学报,2016,36(10):2674-2681.
- 【55】 何正鑫. 计及储能和用户侧响应的微网经济运行优化[D].华南理工大学,2014.
- 【56】 徐立中. 微网能量优化管理若干问题研究[D].浙江大学,2011.
- 【57】 庄怀东. 含电动汽车的微网系统经济调度和优化配置研究[D].合肥工业大学,2017.
- 【58】 Aluisio B, Conserva A, Dicorato M, et al. Optimal operation planning of V2G-equipped Microgrid in the presence of EV aggregator[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 152:295–305.
- 【59】 Anastasiadis A G, Konstantinopoulos S, Kondylis G P, et al. Electric vehicle charging in stochastic smart microgrid operation with fuel cell and RES units[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(12).
- 【60】 徐智威, 胡泽春, 宋永华, 张洪财, 陈晓爽. 基于动态分时电价的电动汽车充电站有序充电策略[J].中国电机工程学报,2014,34(22):3638-3646.
- 【61】 张洪财, 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 贾龙. 考虑时空分布的电动汽车充电负荷预测方法[J].电力系统自动化,2014,38(01):13-20.
- 【62】 郭晓斌, 张乐平, 赖宇阳. 不同模式下电动汽车充电负荷及充电设施需求数量计算[J].电网与清洁能源,2013,29(11):76-81.
- 【63】 Hajimiragha A H, Zadeh M R D. Research and development of a microgrid control and monitoring system for the remote community of Bella Coola: Challenges, solutions, achievements and lessons learned[C]// IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering. IEEE, 2014:1-6.
- 【64】 丁明, 张颖媛, 茆美琴, 刘小平, 徐宁舟. 包含钠硫电池储能的微网系统经济运行优化[J].中国电机工程学报,2011,31(04):7-14.
- 【65】 Angelis F D, Boaro M, Fuselli D, et al. Optimal Task and Energy Scheduling in Dynamic Residential Scenarios[J]. Lecture Notes in Computer Science, 2012, 7367:650-658.
- 【66】 Nistor S, Wu J, Sooriyabandara M, et al. Cost optimization of smart appliances[C]// IEEE Pes International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies. IEEE, 2011:1-5.
- 【67】 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):57-66+19.
- 【68】 祖其武, 牛玉刚, 陈蓓. 基于改进粒子群算法的微网多目标经济运行策略研究[J].电力系统保护与控制,2017,45(14):57-63.
- 【69】 Arefifar S A, Ordonez M, Mohamed Y. Energy management in multi-microgrid systems — development and assessment[C]// IEEE Power & Energy Society General Meeting. IEEE, 2017:1-1.
- 【70】 Sinha N, Chakrabarti R, Chattopadhyay P K. Evolutionary programming techniques for economic

- load dispatch[J]. International Journal of Emerging Electric Power Systems, 2003, 7(6):83-94.
- 【71】 Xiangyuan Jiang and Shuai Li, BAS: Beetle Antennae Search Algorithm for Optimization Problems, arXiv: 1710.10724v1
- 【72】 Xiangyuan Jiang and Shuai Li, Beetle Antennae Search without Parameter Tuning (BAS-WPT) for Multi-objective Optimization , arXiv: 1711.02395v1
- 【73】 Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]// IEEE International Conference on Neural Networks, 1995. Proceedings. IEEE, 2002:1942-1948 vol.4.
- 【74】 魏大钧, 张承慧, 孙波, 崔纳新. 基于分时电价的电动汽车充放电多目标优化调度[J]. 电网技术, 2014, 38(11):2972-2977.

攻读硕士学位期间发表的论文

- [1] **Zongyao Zhu**, Zhiyu Zhang, Weishi Man, Xiangqian Tong, Jinzhe Qiu, Fangfang Li. A New Beetle Antennae Search Algorithm for Multi-Objective Energy Management in Microgrid[C]. 2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Wuhan, China. 31 May-2 June 2018. (已录用)
- [2] 满蔚仕, **朱宗耀**, 张志禹, 等. 采用同步挤压小波变换的人体运动姿态分析[J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(12):8-13.
- [3] Weishi Man, **Zongyao Zhu**, Zhiyu Zhang, Ruwei Ma, Jianhua Wang. Islanding Detection Based on S - Transform and Neural Network[C]. The 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS 2017). Hangzhou, China. 15-16 April 2017.
- [4] 张志禹, **朱宗耀**, 满蔚仕. 基于快速 S 变换的小电流单相接地故障选线[J]. 微型机与应用, 2016, 35(24):73-76.