

学校代码: 11632
分类号: TM727
密 级: 公开
U D C: 621.3
学 号: 12018201223



沈阳工程学院

SHENYANG INSTITUTE OF ENGINEERING

工程专业学位硕士学位论文

电动汽车接入配电网的三相不平衡 问题研究

(学位论文形式: 应用研究类)

研 究 生 姓 名: 冯万富

校内导师姓名: 刘 姝

企业导师姓名: 董鹤楠

申请学位类别 全日制工程专业学位硕士 学位授予单位 沈阳工程学院

工程领域名称 电气工程 论文答辩日期 2021 年 4 月 27 日

研究方向 新能源发电及并网技术 答辩委员会主席 赵希梅

2021 年 4 月 27 日

电动汽车接入配电网的三相不平衡问题研究

论文作者签名: 冯万富

校内导师签名: 刘姝

企业导师签名: 董鹤楠

论文评阅人 1: 赵毅

评阅人 2: 邵军强

评阅人 3:

评阅人 4:

评阅人 5:

答辩委员会主席: 赵希梅

委员 1: 李军徽

委员 2: 肖

委员 3: 孙峰

委员 4: 李潇潇

委员 5: 刘和

委员 6: 赵峰

答辩日期: 2021 年 4 月 27 日

Research on Three Phase Unbalance of Electric Vehicle Connected to Distribution Network

Author's Signature: 冯万富

Supervisor's signature: 刘峰

Supervisor's signature: 董鹤楠

Reviewers: 赵毅

邵军强

Examining Committee Chairman:

赵希梅

Examining Committee Members:

李军徽

肖

孙峰

李潇潇

刘一和

赵峰

Date of oral defense: April 27, 2021

沈阳工程学院学位论文独创性声明

作者郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用内容和致谢的地方外，本论文不包含其他个人或集体已经发表的研究成果，也不包含其他已申请学位或其他用途使用过的成果。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文题目： 电动汽车接入配电网的三相不平衡问题研究

作者签名： 冯万富 日期： 2021 年 4 月 28 日

沈阳工程学院学位论文版权使用授权书

本人完全了解学校有关学位论文知识产权的规定，在校攻读学位期间论文工作的知识产权属于沈阳工程学院，允许论文被查阅和借阅。学校有权保留论文并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印、或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

学位论文题目： 电动汽车接入配电网的三相不平衡问题研究

作者签名： 冯万富 日期： 2021 年 4 月 28 日

导师签名： 刘琳 日期： 2021 年 4 月 28 日

摘 要

未来石油资源将消耗殆尽，传统汽车尾气对大气污染严重，零污染的电动汽车逐步将取代传统汽车。电动汽车有能源利用率高，零尾气的优点，能够缓解能源与环境方面出现的问题。最近几年，国家出台电动汽车相关政策，鼓励电动汽车行业发展，大量电动汽车应用到各行各业。然而，规模化电动汽车接入电网中进行充电，将对配电网运行产生危害；电动汽车与其它负荷相比，移动性和随机性较强，大量接入电网充电，将会带来配电网的电能质量问题。电动汽车的蓄电池作为一种移动储能，通过合理的调度其充放电，参与到电网运行当中，可以有效缓解电动汽车充电带来的问题，甚至提高配电网的供电能力，如何调度电动车充放电具备研究的意义。

本文首先介绍了电动汽车动力电池及充电桩结构与工作原理，对电动汽车无序充电负荷建模，得到了电动汽车接入配电网的等效负荷曲线。然后分析了电动汽车对配电网三相不平衡的影响和控制电动汽车如何接入电网有利于配电网的三相平衡进行了研究，介绍了标准中电压不平衡度的几种算法，理论推导了不平衡电流与不平衡电压的关系。本文构建了一个能够满足配电网平衡的电动汽车充电模型，该模型以配电网的三相不平衡度为控制目标。前推回代法应用在该策略外层经过计算来求解配电网电压，内层则经过计算电动汽车充电模型取得充电负荷时序曲线。仿真结果表明应用该策略在电力系统侧有改善三相电压不平衡的效果。通过基于自动选相的电动汽车与电网互动技术能够调整充电功率和时间，如果进行电动汽车放电，还能赚取一定利润，这样更多使用者将会积极参与到电动汽车充放电调度中，从而使电力系统的峰谷差变小，大大改善配电网的电能质量，使配电网的供电能力得到了提高。

关键词：电动汽车；配电网；三相不平衡；V2G

Abstract

In the future, oil resources will be exhausted, and traditional automobile exhaust will cause serious air pollution. Zero pollution electric vehicles will gradually replace traditional vehicles. Electric vehicles have the advantages of high energy efficiency and zero exhaust, which can alleviate the problems of energy and environment. In recent years, the state has issued electric vehicle related policies to encourage the development of electric vehicle industry, and a large number of electric vehicles are applied to all walks of life. However, the large-scale electric vehicle charging into the power grid will do harm to the operation of the distribution network; compared with other loads, the mobility and randomness of electric vehicles are strong, and a large number of charging into the power grid will bring power quality problems to the distribution network. As a kind of mobile energy storage, the battery of electric vehicle can effectively alleviate the problems caused by electric vehicle charging and even improve the power supply capacity of distribution network by reasonably scheduling its charge and discharge and participating in the operation of power grid. How to schedule the charge and discharge of electric vehicle has the significance of research.

This paper analyzes the principle of electric vehicle power battery and charging pile, modeling the disordered charging load of electric vehicle, and analyzes the influence of electric vehicle on the three-phase imbalance of distribution network and how to control the orderly charging of vehicles, which is conducive to the three-phase balance of distribution network. In this paper, a charging model of electric vehicle is proposed, which can satisfy the balance of distribution network. The model takes the three-phase imbalance of distribution network as the control objective. The forward backward method is applied in the outer layer of the strategy algorithm to modify the node voltage by iteration, while the inner layer obtains the optimal charging load time series curve by calculating the charging model of the electric vehicle. The simulation results show that the strategy can improve the three-phase voltage unbalance in the power system side. Through the interaction technology of electric vehicle and power grid based on automatic phase selection, the charging power and time can be adjusted. If the electric vehicle is discharged, a certain profit can be made. In this way, more users will charge and discharge the electric vehicle in the distribution network, so as to reduce the peak valley difference of the power system, improve the power quality of the distribution network, and increase the power supply capacity of the distribution network.

Key Words: Electric Vehicle; Distribution Networks; Three-phase Unbalance; V2G

目 录

1 绪论..... 1

1.1 课题研究的背景及意义..... 1

1.2 国内外相关研究进展..... 1

1.2.1 电动汽车发展概况..... 1

1.2.2 配电网三相不平衡研究概况..... 3

1.2.3 电动汽车与电网互动研究概况..... 5

1.3 本文主要研究内容..... 7

2 电动汽车蓄电池及充电桩原理分析..... 8

2.1 引言..... 8

2.2 蓄电池充放电原理与特性分析..... 8

2.2.1 蓄电池性能参数..... 8

2.2.2 电池充放电原理..... 9

2.2.3 电池充放电特性分析..... 10

2.3 电动汽车充电桩的分类与工作原理分析..... 12

2.3.1 充电桩的分类..... 12

2.3.2 充电桩工作原理..... 12

2.4 本章小结..... 14

3 电动汽车接入配电网充电负荷建模..... 15

3.1 引言..... 15

3.2 影响电动汽车充电过程因素..... 15

3.2.1 电动汽车的发展规模..... 15

3.2.2 电动汽车的类型及充电方式..... 16

3.2.3 电动汽车的行驶特点..... 18

3.3 配电网的选择与潮流计算..... 20

3.3.1 配电网的选择..... 20

3.3.2 配电网潮流计算..... 21

3.4 基于蒙特卡罗算法的负荷建模..... 22

3.4.1 蒙特卡罗算法..... 22

3.4.2 参数设置..... 23

3.4.3 电动汽车负荷建模..... 23

3.5 本章小结	26
4 满足配电网平衡的电动汽车充放电控制策略研究	28
4.1 引言	28
4.2 电动汽车对三相不平衡的影响	28
4.2.1 电动汽车对配电网的影响	28
4.2.2 电动汽车对三相不平衡的影响分析	29
4.2.3 三相不平衡度的计算方法	30
4.3 电动汽车优化策略数学模型	32
4.3.1 模型约束条件与目标函数	32
4.3.2 优化策略算法流程	34
4.4 基于自动选相的电动汽车与电网互动技术	37
4.4.1 电动汽车与电网互动	37
4.4.2 自动选相装置结构	38
4.4.3 自动选相工作过程	39
4.5 算例仿真分析	39
4.5.1 仿真场景设置	39
4.5.2 仿真步骤	40
4.5.3 电动汽车接入配电网仿真分析	40
4.6 本章小结	43
5 结论与展望	44
5.1 结论	44
5.2 展望	44
参 考 文 献	45
附录 A IEEE33 节点配电系统三相算例数据	50
攻读硕士学位期间科研项目及科研成果	51
致 谢	52
作者简介	53

TABLE OF CONTENTS

1	Introduction	1
1.1	The Background and Significance of The Subject	1
1.2	Related Research Progress at Home and Abroad	1
1.2.1	Overview of Electric Vehicle Development	1
1.2.2	Overview of Research on Three Phase Unbalance of Distribution Network..	3
1.2.3	Overview of Research on Vehicle-to-Grid.....	5
1.3	The Main Research Contents of This Paper	7
2	Principle Analysis of Electric Vehicle Power Battery and Charging Pile	8
2.1	Introduction	8
2.2	Charging and Discharging Principle and Characteristic Analysis of Power Battery	8
2.2.1	Battery Performance Parameters	8
2.2.2	Principle of Battery Charging and Discharging	9
2.2.3	Analysis of Battery Charging and Discharging Characteristics	10
2.3	Structure and Working Principle Analysis of Electric Vehicle Charging Pile	12
2.3.1	Classification of Charging Piles	12
2.3.2	Working Principle of Charging Pile	12
2.4	The Summary of This Chapter	14
3.	Charging Load Modeling of Electric Vehicles Connected to Distribution Network ...	15
3.1	Introduction	15
3.2	Factors Affecting The Charging Process of Electric Vehicles	15
3.2.1	Development Scale of Electric Vehicles	15
3.2.2	Classification and Charging Mode of Electric Vehicles	16
3.2.3	Operation Law of Electric Vehicle.....	18
3.3	Selection of Distribution Network And Power Flow Calculation.....	20
3.3.1	Selection of Distribution Network	20
3.3.2	Power Flow Calculation of Distribution Network	21
3.4	Load Modeling Based on Monte Carlo Algorithm	22
3.4.1	Monte Carlo Algorithm	22
3.4.2	Parameter Setting	23
3.4.3	Electric Vehicle Load Modeling	23
3.5	The Summary of This Chapter	26
4	Research on Charging and Discharging Control Strategy of Electric Vehicle to Meet The Balance of Distribution Network	28
4.1	Introduction	28

4.2 The Impact of Electric Vehicle Access on Three-Phase Imbalance	28
4.2.1 The Impact of Electric Vehicles on Distribution Network	28
4.2.2 The Analysis of Influence of Electric Vehicle on Three-Phase Unbalance ..	29
4.2.3 The calculation method of three-phase imbalance	30
4.3 Mathematical Model of Electric Vehicle Optimization Strategy	32
4.3.1 Model Constraints and Control Objective	32
4.3.2 Optimization Strategy Algorithm Process	34
4.4 Vehicle to Grid Based on Automatic Phase Selection	37
4.4.1 Vehicle to Grid	37
4.4.2 Structure of Automatic Phase Selector	38
4.4.3 Automatic Commutation Process	39
4.5 Example Simulation Analysis	39
4.5.1 Simulation Scene Settings	39
4.5.2 Simulation Steps	40
4.5.3 Simulation Analysis of Electric Vehicle Access to Distribution Network ...	40
4.6 The Summary of This Chapter	43
5 The Summary and Outlook	44
5.1 The Conclusion	44
5.2 The Outlook	44
Reference	45
The Appendix A	50
Achievements	51
Acknowledgements	52
Author Information	53

图目录

图 1.1 近年来我国电动汽车市场表现情况	2
图 1.2 不平衡补偿设备示意图	4
图 1.3 总负荷平衡的三相不平衡系统示意图	6
图 2.1 锂离子电池充放电原理图	10
图 2.2 锂离子电池充电特性曲线	11
图 2.3 锂离子电池放电特性曲线	11
图 2.4 充电桩的拓扑结构	13
图 3.1 常规充电方式功率特性	17
图 3.2 私家车一天中最后一次到家时间	19
图 3.3 私家车日均行驶里程	20
图 3.4 IEEE33 配电网拓扑结构	21
图 3.5 等效日负荷曲线形成步骤	25
图 3.6 电动汽车三相充电负荷曲线	26
图 3.7 电动汽车接入配电网等效负荷曲线	26
图 4.1 电动汽车接入对配电网的影响	28
图 4.2 算法流程图	35
图 4.3 前推回代法流程图	36
图 4.4 自动选相装置结构	38
图 4.5 三相不平衡系统示意图	39
图 4.6 场景 1 无序充电三相电压不平衡度时序图	40
图 4.7 场景 1 优化充电三相电压不平衡度时序图	41
图 4.8 场景 2 无序充电三相电压不平衡度时序图	41
图 4.9 场景 2 优化充电三相电压不平衡度时序图	42
图 4.10 各相充电功率时序图	43

表目录

表 3.1 国内电动汽车销量 15

表 3.2 国内电动汽车充电模式 18

表 4.1 充放电机的分类及特点 37

表 4.2 两个不同场景下 $\epsilon_{unb,max}$ 对比 42

表 A1 IEEE33 节点配电系三相算例参数 50

主要符号表

符 号	代表意义	单 位
Q_{res}, Q_n	蓄电池剩余容量与额定容量	A h
SOC	电池电量剩余状态	%
I	电流	A
S	日行驶里程	km
$P_{0\text{max}}$	充电桩最大充电功率	k
m	恒流充电时间	h
P_c	充电功率	kW
P_i^{EV}	第 i 辆车在第 t 时间段的充电功率	kW
t_c	需要充电的时长	h
W_{100}	电动汽车百公里耗电量	kW h/km
$\varepsilon_{\text{unb},n}$	三相不平衡度	%
$P_{n,t}$	n 节点 t 时刻的节点注入功率	kW
$G_{\gamma,n}$	n 节点的 γ 相电导	S
$B_{\gamma,n}$	n 节点的 γ 相电纳	S
$U_{n,t}$	n 节点 t 时段节点电压	V
Z	自/互阻抗	Ω

1 绪论

1.1 课题研究的背景及意义

最近几年,随着传统资源不断开采,存储量在不断下降,而温室效应变得越来越严重。各国政府也慢慢意识到一个问题,人们可持续发展必须减少对传统资源的依赖和促进低碳经济发展。作为人口众多的发展中国家,我国在发展经济过程中各行各业都要使用大量汽车,传统汽车的大量使用也带来严重的环境与资源使用的问题。为了解决上述问题,我国政府近些年发布了许多有利于电动汽车发展的政策。电动汽车行业快速发展,能够使汽车行业的走向新的发展方向,我国汽车制造能力将走在世界的前列,同时大量电动汽车出口促进我国经济发展。电动汽车使用的电能作为二次能源,有着清洁、输送成本低、控制难度低等优点,在经济发展与人们的生活中不可或缺。作为电力资源传输与调控公司,国网公司一直按照国家政策进行工作部署,完成节能减排任务。为了促进电动汽车行业的发展,国网公司在主要高速服务区内建设大量的充电站,使电动汽车能够满足长途使用需求,同时增加了电能资源的使用^[1]。

接入配电网充电的电动汽车参与到电网运行调控中,将使配电网设备运行更加灵活,提高可靠性和增加容量利用率,减少运输行业对石油资源的依赖,在建设环保低碳社会中发挥重要的角色。作为一个环保型交通工具,电动汽车不仅可以作为耗能设备大规模应用在社会中,使用电动汽车与电网互动技术也可作为改变“峰荷比”的媒介和配电网的备用电源。鉴于大范围接入配电网的电动汽车,必须制定科学合理有序的充电方法,调节与常规电力负荷性质不同的规模化电动汽车电力负荷。通过大范围电动汽车接入配电网的规划,将只有储能功能的负荷转变为能够适应配电网负荷曲线的多功能负荷,可以提高配电网的供电效率,改善配电网的电能质量,将配电网的供电压力降至最低,以提高电力资源的利用率,对电网发展有重大意义。

1.2 国内外相关研究进展

1.2.1 电动汽车发展概况

在电动汽车研究领域,美国起步较早,上世纪 70 年代年美国国会通过了一项法律,通过立法和由国家出资等方法来促进电动汽车的发展^[2],2007 年 10 月,美国将一辆日本生产的电动汽车连接到电网上进行控制,该系统采用电动汽车作为储能与电网调频设备^[3]。特斯拉汽车公司(Tesla Motor Company)是一家总部位于美国硅谷的公司,在汽车行业被称为“汽车界苹果”,主要生产和销售纯电动汽车和零部件,是第一家使用锂离子

子电池作为电动汽车电池的公司，他的第一辆电动车是 Roadster^[4]。特斯拉公司正在积极建设“超级工厂”，实施自主生产电池计划，实现更快的电池创新，降低生产成本。

英国对电动汽车的研究较早，且相关技术较成熟，其电动汽车渗透率较高，从电动汽车的使用至今已有五十多年的历史，电动汽车的数量也从 12000 辆增加到了 400000 多辆，自上世纪 90 年代以来，电动汽车在法国开始快速发展。标致—雪铁龙投资生产电动汽车，有载货汽车及家用汽车，由 Renault 汽车公司开发的“Zoom”概念车在当时非常受欢迎。

我国对电动汽车的研究也在逐步加快，从 1990 年开始，对电动汽车的研究投放了大量的资金，多家公司研发出多款不同类型电动汽车，覆盖到各行各业，开展不同的运行模式^[5-6]。我国汽车保有量在世界上最多，汽车消费量逐年增加。近年来，汽车尾气引起的环境问题引起了政府的高度重视，在 1995 年国家科技部已经将电动汽车推成中国的一个重要工业项目。如今在中国城市内，公交车大部分采用电动车，出租车和其它事业单位用车也朝着电动汽车方向发展。现在私家车中电动汽车使用比例仍然不是很大，将来随着电动汽车需求量的增加及制造技术的成熟，电动汽车在国内会越发流行。我国政府继续大力支持电动汽车的发展。电动汽车产业的科技创新使该产业逐渐与西方国家的技术差距缩小。然而，我国电动汽车仍然存在许多问题，产业存在独立技术不完善和结构混乱^[7]。电动汽车在我国有良好的发展潜力，是我国发展道路交通的重要选择，但政府必须协调各部门支持电动汽车行业进步，在技术创新上给予支持，建设更多电动汽车充电站^[8]。电动汽车是未来汽车发展的趋势，随着技术的不断进步，电动汽车的应用逐步从公共用车拓展到各行各业当中，实现电动汽车产业规模化，普及化^[9]。

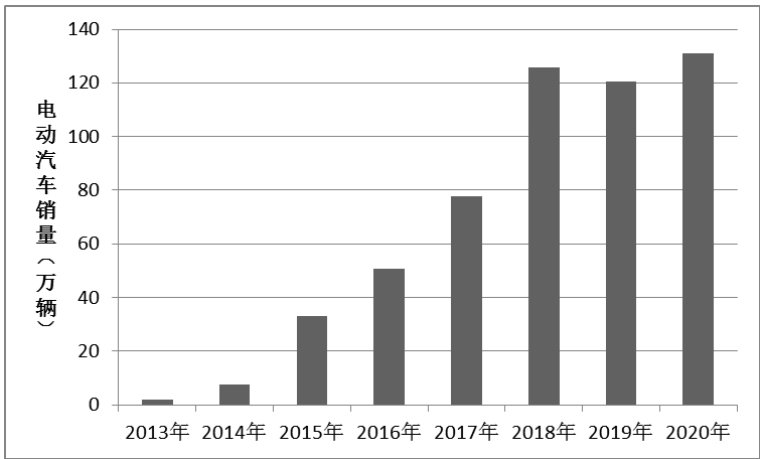


图 1.1 近年来我国电动汽车情况

Fig.1.1 Performance of China's electric vehicle market in recent years

从图 1.1 可以看出,自 2014 年开始我国电动汽车的销量在不断增加。目前,我国政府规划年生产近 200 万辆新能源汽车,历史累计销量已经超过 500 万辆。综上,目前,世界电动汽车的发展是可持续和快速的,随着技术的成熟,将来制造和使用电动汽车一定是大势所趋。大范围电动汽车接入配电网问题的研究是提高配电网运行的重要组成部分。

1.2.2 配电网三相不平衡研究概况

相关文献中提到^[10],配电网在运行中都存在一定的三相平衡度,只是轻重程度不同,因为在配电网中有以下几方面造成三相不平衡:(1) 负荷在三相之间的初始分布是不均匀的;(2) 在配电系统中有单相、两相设备接入,设备参数不一致引起不对称性;(3) 大量间歇性发电的分布式电源接入配电网,随机接入充电的电动汽车,加剧配电网的不平衡度。配电网不平衡运行将会增加网络损耗,同时影响经济性和电能质量,在对配电网的应用研究当中,需要随着时代发展,开发、分析和管理配电网三相不平衡现象,保证智能配电系统的经济安全运行。

当前研究配电网中出现的三相不平衡的现象,集中在两个不同方面:一是如何通过算法控制三相不平衡问题,二是治理三相不平衡问题的方法。其中,通过算法控制三相不平衡问题分为两类:基于相位平衡算法控制三相不平衡和补偿算法;治理三相不平衡问题的方法分为两类:采用换向开关改变负荷和在线路中增加补偿设备^[11]。

基于相位平衡算法控制三相不平衡也叫负载在三相中平均分配方法。该算法首先对负载用电功率进行初步估计,然后改变各相负载功率,最终达到减少配电网三相不平衡度的目的。目前,该算法通常用于配电网中,单相电源接入三相系统中,其中线性负载集中在某一相时可以通过该算法处理。文献[12]提出了一种方法,根据该算法,在线对低压系统中的负荷进行换相,但是需要一套完整的换向设施进行辅助该自动换相方案运行,设备成本高,使用寿命受到限制。

补偿算法有以下三类:第一类基于对称分量法^[13-15];第二类是基于无功功率瞬时计算方法^[16-17];第三类是基于同步对称分量^[18-19]。可是,在实际三相不平衡问题控制应用中,上述三种补偿方法部分在三相系统中对于四线制线路无法使用。由于需要大量计算,部分算法的运行时间长。因此,需要研究精准度高、可靠性高、投入便宜、响应快的算法控制三相不平衡问题。

增加补偿设备是为了进行不对称补偿,负载造成的三相不平衡问题时,通常会有不对称的电压及电流产生。通常,增加的补偿设备与原始负荷并联接入到三相系统中,为了系统中出现三相不平衡执行补偿动作。结构如图 1.2 所示。

增加的补偿设备是一个功率因数为1并且三相功率完全平衡,当出现不平衡问题时,用补偿设备代替不平衡的负载运行。尽管通过增加补偿设备能够处理三相不平衡问题,但该设备具有较大的尺寸和重量,安装一台这种设备需要投入 10 万元费用,后期需要进行维护和安装,还需要花费更多。目前,世界各地电网运行中通常使用增加的补偿设备来控制三相不平衡。与其他方法相比,增加的补偿设备投资太高,安装空间需求大,低压配电网使用不合适。

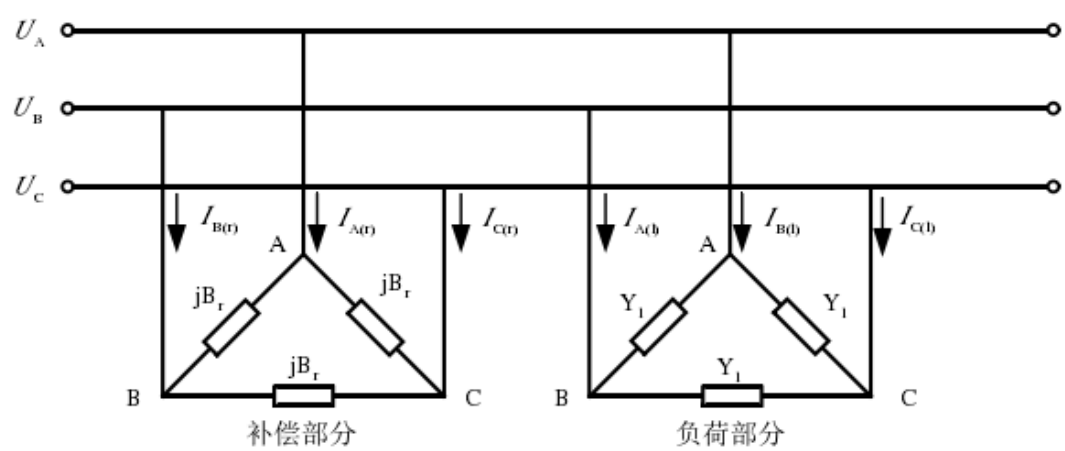


图 1.2 不平衡补偿设备示意图

Fig.1.2 Schematic diagram of unbalance compensation device

换向开关改变负荷方法分为手动切换和自动切换。手动切换是运维人员在长期不平衡和三相不平衡配电变压器区域中的常规工作内容。这种方法需要一些前期工作,首先得到变压器输出端接入单相设备的基本数据,查明产生三相不平衡问题的因素。通过整合和对比基本数据,得到优化后的负荷调整计划。尽管这种方法花费较低,并且不用附加的投入花费,但是工作过程中得加入操作和维护人员,进行大量的工作,人工成本提高较多。一旦负载接入随机性较强,这时只凭借手动切换就增加了困难。不仅达不到改善三相不平衡的目的,在运维人员操作中也会产生危险^[20]。

自动切换是依照基于相位平衡算法来治理三相不平衡问题。该方法需要用户侧增加的自动切换开关,将开关动作时间缩短,增加稳定性。自动切换设备的主要构造包括两大块:集成控制部分和在线自动切换装置。集成控制部分负责收集电压和电流等数值,然后对采集的数据进行计算求解,对结果优化。优化结束后,分析并选出将执行的结果,最后将指令发给执行装置,执行装置按照指令完成换相过程。现在,三相系统中安装一套能实现三相平衡的自动切换设备,额外需要投资近约 40000 元。考虑较高的额外投资,

当不平衡度未超过国家标准时，集成控制终端通常会减少开关的动作次数或甚至不动作，以延长开关的寿命。除了这种方法的高成本外，国产的换相开关动作最快时间需要约 1 秒。开关动作的瞬间，会出现电源断开。瞬时电源断开对于用电要求高的电力用户影响严重，还会产生潜在的危险。自动换向装置的花费大于手动切换，小于增加补偿设备，投入也很多。因此，以后配电网运行当中应研究更好的换相方案，降低配电网三相不平衡度的同时满足用户的需求，加强供电系统运行的安全性，稳定性。

作为一种近些年流行的电力负载，电动汽车功率较大且功率因数不固定，充电接入配电网将形成脉冲电压和大量非正常波形。任意在配电网中充电将导致电压大小产生变化，增加配电网损耗，并影响配电网运行的经济性。但这并不代表电动汽车的充电和放电行为只会对配电网产生不良影响。他也有许多好处，如果有序控制电动汽车充放电过程，能够用于控制三相不平衡问题，调整电网的日负荷曲线，作为电网储能单元，提高电网计量的准确性，在减少线损方面产生效益。

1.2.3 电动汽车与电网互动研究概况

大量电动汽车接入配电网对电能质量影响较为严重，为了减轻该影响，并实现配电网中电动汽车与电网之间的良好互动，国内外相关学者对此进行了大量研究。当前的互动模式主要分为两种：一种是基于时间电价的使用；另一种是基于智能电网进行互动的模式。

时间电价的使用中，根据用电时间的不同，对电价进行不同的定价，出现分级电价。分级电价的运用是为了指导人们对电动汽车充电多在低电价时进行，在低电时增加用电量，在高峰用电时减少用电量，从而缓解电量使用的供需关系^[21]。但是，如果分级电价设置不合理，将会出现许多不利电网运行的因素^[23]，甚至将在负荷曲线中出现严重的高峰，该峰值可能会高于没有接入电动汽车充电高峰值。

与时间电价的使用相比，基于智能电网进行互动的模式更加关注配电网运行的安全性和稳定性。文献[25-30]对基于智能电网进行互动的模式展开了深入研究，并从中总结出重要的结论：基于智能电网进行互动的模式不仅可以降低电动汽车的充电高峰^[25]，而且可以缩小峰谷差异^[26]，也避免了配网的电力拥挤^[27]和配网的电压稳定性的提高^[28]，甚至在减少配网的网络损耗的同时减少用户充电花费^[29]。文献[30]也提到了配电网中蓄电池作为储能单元使用年限问题，并通过改变调度模式来增加储能单元中蓄电池的使用寿命。

电动汽车充放电时接入的是电压为 380V 的电力网。当电动汽车进行充电时，由于充电接入位置的差异而引起的配电网的三相不平衡和线损也不同。此时，如果随机选择接入点进行充电一定会引起配电网的三相不平衡，并增加线损。

应该注意的是，只有当配电网处于完全平衡运行时，接入点离线路起始点越近，线损才会随着变小。但是，现实中运行的配电网通常是不平衡，并且有电流在中性线上流动，因此，通过改变接入点去降低损耗存在问题。同时，还应考虑的是，当配电网总体三相不平衡程度为零时，此时各节点还会出现局部不平衡现象，如图 1.3 所示。在线路起始点最近的节点接入充放电，三相不平衡现象通常会严重。反之，当电动汽车用户在某节点充电时，三相不平衡现象最不明显时，这时线损往往又很大。

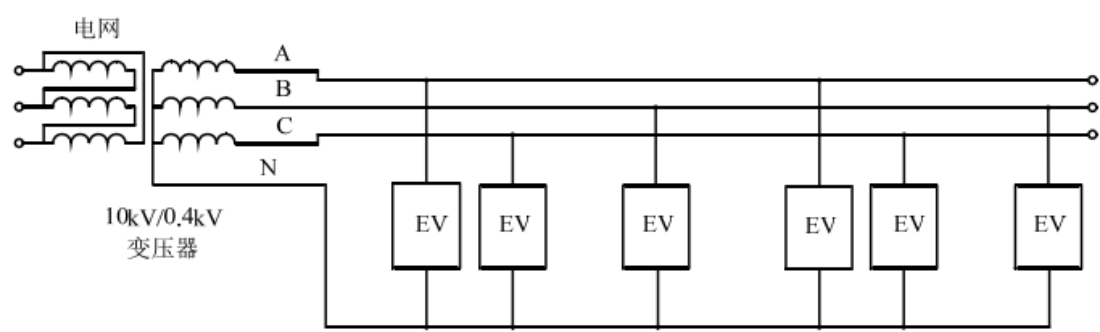


图 1.3 总负荷平衡的三相不平衡系统示意图

Fig.1.3 Three phase unbalanced system diagram of total load balance

总之，电动汽车与电网互动的主要是为了缩小峰谷差，可是常常没有考虑配电网的三相不平衡现象。当前，在配电网中随机的接入单相电动汽车进行充电和放电，会使配电网中出现三相不平衡现象，关于这方面的研究不多。文献[31-32]分析了电动汽车占比的不同，大量的电动汽车接入对配电网三相不平衡程度的差异，最后总结出大量电动汽车充电的无序化将使三相不平衡程度更加严重，还会削弱配电网运行的安全性及稳定性，并没有提出解决三相不平衡的方法。

但是，现在针对电动汽车三相不平衡问题大部分都在单相建模，而且处理方法较少。鉴于此，本文构建了一个能够满足配电网平衡的电动汽车充电模型，采用前推回代法对电动汽车充电三相不平衡问题进行优化。并根据优化结果采用基于自动选相的电动汽车和电网的交互控制技术，最将三相不平衡度降到最低，同时也提高配电网的供电能力，最终电网公司与电动汽车使用者之间都得到利润。

1.3 本文主要研究内容

家用电动汽车因为晚上休息，通常选择晚上作为充电时间，充电时间比较宽松，所以大多采用常规慢速充电方法接入 220V 电压中进行单向充电。由于任意接入充电的电动汽车，在配电网中形成三相不平衡现象，并且产生附加的电流流动。本文主要考虑三相不平衡的问题，对电动汽车接入配电网充电负荷建模求解，最后通过算例验证满足配电网平衡的控制策略。具体工作如下：

第一章简要阐述该课题应用的背景及意义，概述电动汽车、配电网三相不平衡、电动汽车与电网互动进程，重点将在配电网三相不平衡的控制基础上，在对配电网不平衡度考虑时发现了存在的问题，确立本文研究方向。

第二章首先对蓄电池的六个性能参数进行简单介绍，由于锂离子电池性价比最佳、使用广泛，将其视为典型，研究其充放电原理，并对充电进行仿真分析。得到锂离子电池的充放电特性曲线；最后列出几种常见电动汽车充电桩，并简要说明了其结构和工作过程。

第三章首先概述了影响电动汽车充电过程的几个因素。然后，根据美国运输部对美国私家车的统计信息，确定用户的每日最终到达时间和平均每日行驶里程，对两个驾驶特征进行了拟合分析，为了满足中国居民的驾驶特征并对模型参数进行了部分修改。最后，借助 Matlab R2014a 仿真软件，完成了电动汽车的充电负荷建模，获得了电动汽车的三相充电负荷以及与配电网连接的电动汽车的等效负荷曲线，为电动汽车的充电负荷提供了保证，为以下研究工作的提供了保障。

第四章首先分析了电动汽车充电在配电网造成的三相不平衡问题，然后建立了一种可以满足配电网三相平衡的电动汽车充电模型。该模型考虑了配电网的三相不平衡度为控制目标。该策略算法的外层采用前推反向替代方法，通过迭代修改电压，内层通过计算电动汽车的充电模型，获得最优的充电负荷时序曲线。仿真结果表明，电力系统侧的三相电压不平衡得到了改善。

第五章对本文电动汽车接入配电网造成三相不平衡问题的研究进行了总结，所提出的方法对于改善三相不平衡有显著效果。此外，还对在研究过程存在的不足进行了说明，以便今后对电动汽车接入配电网相关问题的研究中进行完善。

2 电动汽车蓄电池及充电桩原理分析

2.1 引言

蓄电池及充电桩作为电动汽车的重要组成部分,本章首先对决定蓄电池性能的六个参数进行简单概述,由于锂离子电池性价比最佳、应用广泛,将其视为典型,然后研究其充放电原理,并对充电进行仿真分析。最后列出几种不同类型电动汽车充电桩,并简要说明其结构、原理和工作过程。

2.2 蓄电池充放电原理与特性分析

2.2.1 蓄电池性能参数

蓄电池制造在电动汽车开发和生产过程中起着至关重要的作用。决定蓄电池的参数为:电池的额定容量、剩余电量状态、充放电截止电压、充放电速率、电池能量/功率密度和电池的循环次数^[33]。蓄电池性能的好坏由这些参数决定。

(1) 电池额定容量。在设计中指定的条件下,充满电的电池在达到规定的放电条件下以一定的电流放电时结束得到的能量值称为电池的额定容量。常用 Q_n 表示,单位是A·h或kW·h。

(2) 电池剩余电量状态(SOC)。它用于反映电池中的剩余电量。SOC 在电池参数非常关键,准确计算电池 SOC 的大小能保证合理分配能量。SOC 的计算如式(2.1)表示:

$$SOC = \frac{Q_{res}}{Q_n} \quad (2.1)$$

其中, Q_{res} 为蓄电池当前剩余容量, Q_n 为蓄电池额定容量。

当电池的使用时剩余电量状态为 SOC_0 ,则电池的剩余电量状态也可表示为:

$$SOC = SOC_0 - \frac{\int i dt}{Q_n} \quad (2.2)$$

其中, i 为放电电流值, $\int i dt$ 为释放出的能量。若电池完全充满时, $SOC_0=1$ 。当放电完成时, $SOC_0=0$ 。

(3) 电池充放电截止电压。为了不让蓄电池使用中出现过度使用问题,特别是进行充电时,蓄电池大多分两个进行阶段充电,即恒流和恒压阶段:恒流充电方式在充电的早期阶段使用,当电压大小达到充电截止电压时,它将进入恒压充电阶段,直到达到充电截止电流时停止。充放电截止电压能够决定电池的使用寿命。有时将充放电截止电压小幅度改变能够保护动力电池,并大幅度增加蓄电池的使用次数。

(4) 电池充放电速率。充放电速率是指蓄电池在设计的时间将电量释放完毕所需的电流大小与电池的额定容量之比，常用 C 表示。由以下公式计算：

$$C = \frac{I}{Q_n} \quad (2.3)$$

其中， I 为动力电池充、放电电流(A)。最大放电速率就是电池在一定时间内可以连续放电过程中电流的最大数值，电动汽车的加速性能，超车性能和爬坡性能由等它的直接决定，对电动汽车行驶至关重要。安装有能量回收系统的汽车中，最大充电率显示出其重要地位。

(5) 电池能量/功率密度。能量密度分为质量密度和体积密度。质量能量密度通常称为比能量，单位为(Wh/Kg)。体积能量密度是电池每单位体积放出的电量，单位为(Wh/L)。电池的比能量关系到电动车辆的车身质量和单次行驶里程，并且也会影响电动车辆的空间大小及设备布置。类似地，电池的功率密度也分为质量功率密度，也称为比功率，单位为(W/Kg)和体积功率密度，单位为(W/L)。在电动汽车研发生产过程中，电池比功率的计算必须根据所安装的汽车需要的爬坡能力和加速能力。

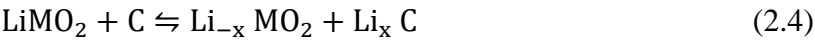
(6) 电池充放电循环次数。简而言之，它是蓄电池可以使用的次数，其定义是：蓄电池在规定使用温度下以设计的电流对其放电，当剩余电量状态达到 80%，然后进行充电直到充电完成。最后将电池静置 1 个小时，不断重复这个过程，当电池额定容量仅为初始容量的 80%，将重复的次数统计，计为充放电循环次数。电池的充放电循环次数将计入电动汽车运行成本^[34]。

2.2.2 电池充放电原理

目前为止，尽管各种不同的蓄电池被应用在各行各业，但是锂离子电池从上市开始，就展现出它的优点，在电动汽车领域被广泛使用，特别是小型汽车中。本节在研究蓄电池充放原理时，将其视作各种电池的典型。

作为一种可反复使用的电池，锂离子电池使用含碳物质当作负极，以含锂的化合物当作正极。电流的产生由锂离子与等量电子在正负极之间的移动，在此过程中，带正电的锂离子在两个电极之间不停的插入和掉落。在充电期间，带正电的锂离子从含锂化合物层中掉落并在电解液中游动，插入到负极碳层的孔中，负极现在锂离子含量较多。插入的锂离子越多，电池中能量就越多；放电时则相反。在锂离子的电池常规运行时，锂离子的移动不会破坏晶体结构，仅改变各层化合物之间距离。因此，仅从锂离子电池理想运行状态来看，使用过程中电池结构没有发生改变^[35]。

其使用过程中发生化学反应是可逆的，如式(2.4)所示：



其充、放电原理如图 2.1 所示：

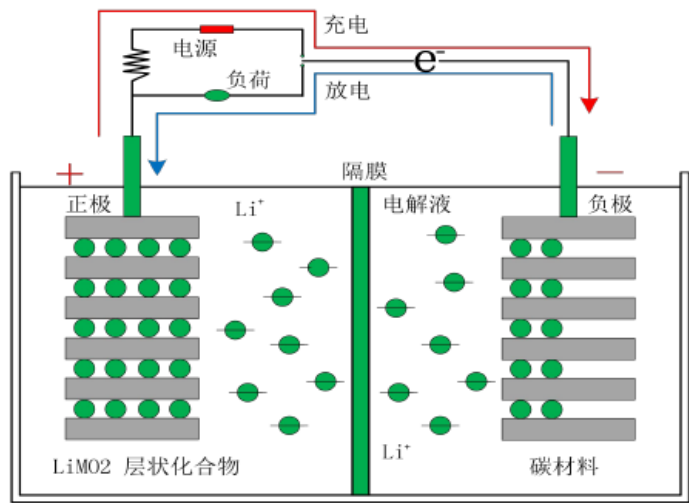


图 2.1 锂离子电池充放电原理图

Fig.2.1 Charge-discharge schematic diagram of lithium ion battery

2. 2. 3 电池充放电特性分析

(1) 锂离子充电特性分析

锂离子电池的充电过程分为三个阶段：预充电，恒流充电和恒压充电^[36]。充电电流越大，时间越短，但会增加电池发热温度。此外，当用过大的电流充电时，电池内化合物发生反应要消耗一部分时间，因此电池容易充不满电。图 2.2 显示了锂离子电池充电的三个阶段。

阶段 1：当电池放电程度较深时，常采用小电流充电开始充电时进行预充电过程，此时电池电压低于预充电电压阈值(3V)。当充电电压超过预充电电压时，将下一阶段，小电流充电速率通常采用恒定电流充电速率的百分之十。

阶段 2：当充电电压达到预充电电压时，充电电流迅速增加，并且充电过程进入恒流充电阶段。这个阶段，电池电压在不断增加，直到达到最终的电池调整节电压，该充电过程完成。

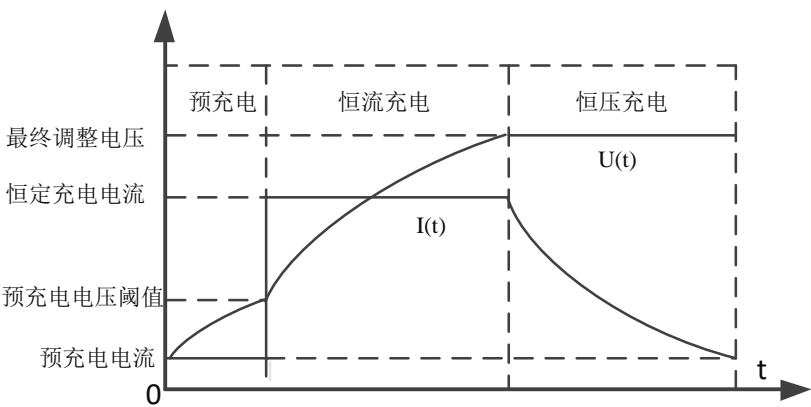


图 2.2 锂离子电池充电特性曲线

Fig.2.2 Charging characteristic curve of lithium ion battery

阶段 3：当充电电压等于最终电池调节电压时，进入恒压充电模式，充电电压一直稳定，充电持续进行中，随着电池电量增加，电池充电电流变小，当电流再次达到预充电电流的大小时，电池充满电量，整个充电过程结束。

(2) 锂离子放电特性分析

锂离子电池的放电过程是使用电池的过程。锂离子电池不能长期过放电。所以放电时必须避免以下两点：首先，使用过程中不能采用太大电流，电流过大会导致内部温度升高，对电池内部形成无法恢复的损坏。其次，不允许过度放电。一旦出现低于 2.7V 的放电电压，可能导致电池报废。幸运的是，当前过充电和过放电保护电路都安装在锂电池中，能保护电池的使用。锂离子电池放电电压与容量如图 2.3 所示。

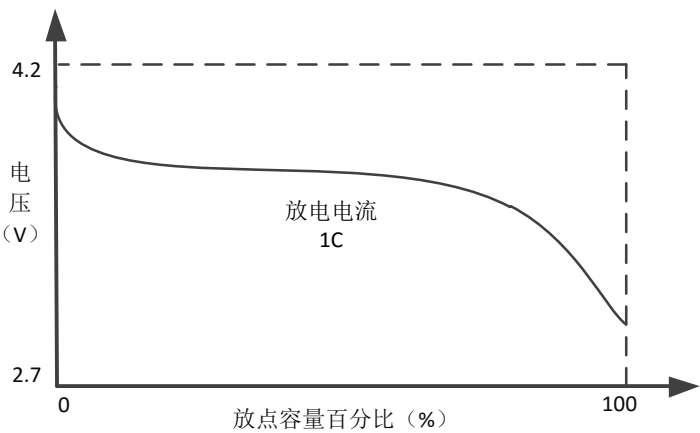


图 2.3 锂离子电池放电特性曲线

Fig.2.3 Discharge characteristic curve of lithium ion battery

从上图可以看出,随着放电容量的增加,电池电压逐渐降低,当电压等于放电截止电压,放电完成。尽管高速率放电能够提高电动汽车的加速性能和爬坡性能,但是采用高速率放电将影响动力电池的循环次数并增加电动汽车使用成本。在实际汽车使用中,必须衡量两者之间的关系。

2.3 电动汽车充电桩的分类与工作原理分析

作为电动汽车的充电基础设施,电动汽车的使用离不开充电桩的。它主要由电源转换单元和充电控制单元组成。建设在写字楼、购物中心,住宅区等的停车场内,当前国内大城市已经建设了大量充电桩,主要高速服务区也基本覆盖。大量充电桩同时工作过程中会对配电网产生一些不利的影响。对其分类及原理进行分析十分关键。

2.3.1 充电桩的分类

目前,可按照充电电流的不同将各充电站选择的充电桩分为三类:单相交流电充电桩,三相交流电充电桩和直流电充电桩。

(1) 单相交流充电桩:因其体积小可以随车携带,也称为车载充电器。最大额定充电功率为 7kW。它主要在小型家用电动汽车中使用,充电功率较小,最大额定充电功率为 7kW。连接到 220V 的城市电源即可使用,随时都能给电动汽车充电。充电电流也不是很大,习惯称为“慢速充电”。

(2) 三相交流充电桩:通常,经过变压器连接到 380V 三相交流配电网中,该充电桩固定在大型充电站内的停车位旁。三相交流充电桩仅是一种输出设备。电动汽车不能直接连接到三相交流充电桩上,需要通过车载充电器进行转换,才能进行充电工作。充电功率通常为 24kW,通常称为“正常充电”。

(3) 直流充电桩:它的输出电流是直流电,与三相交流充电桩一样,直流充电桩也连接到 380V 三相交流配电网中。直流充电桩的输入端接的是 380V 交流电,然后通过整流器,变压器等器件变换后,以输出可调直流电可以直接连接到电动汽车。直流充电桩有较宽的电压、电流调整空间,相对车载充电器可以输出更大充电功率。直流充电桩对电动汽车进行快速充电,其功率最大能达 200-500 千瓦,故人们将其称为“快速充电”。

2.3.2 充电桩工作原理

高频开关电源技术通常被使用在充电桩内。高频开关电源主要功能是校正功率因数并调节电压。其拓扑结构分别为单阶段转换结构和两阶段转换结构。由于单阶段转换结构的电压调节范围不够宽,更多情况下无法使用。因此,大多数充电桩采用的是两阶段变换结构,拓扑图如图 2.4 所示。

第一级转换器提供有源功率因数校正，其功能是提高输出功率因数，增加输出功率大小，减少谐波电流的产生。第二级转换器的功能是提高电动汽车充电直流电的电能质量。

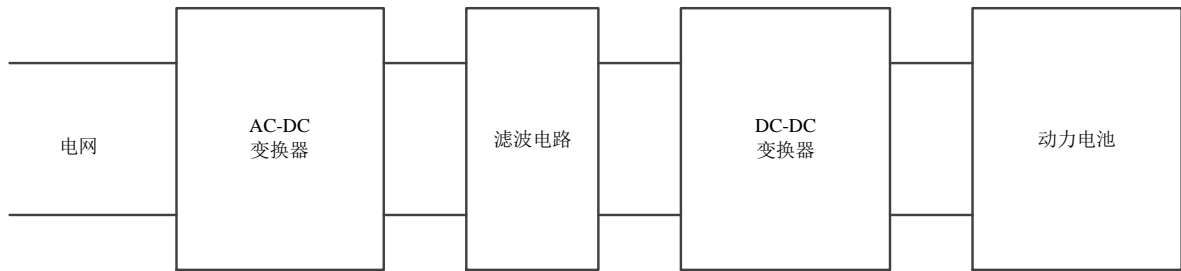


图 2.4 充电桩的拓扑结构

Fig.2.4 The charging pile topology

按照充电桩的工作原理来看，充电桩可分为三类：一类由工频变换环节，不可控整流环节和斩波环节组成。另一类由不可控的整流环节和高频直流电源变换环节组成。还有一类由高频电压转换电路，PWM 整流电路和高频直流电源变换环节组成。其中，第二类充电桩在直流侧电压波动小有高频开关隔离，占据空间小，花费少等优点。大多数各种充电站都应用这种结构的充电桩^[38]。本节简要阐述其工作过程和原理。

充电桩的工作过程如下：首先，不可控整流电路将配电提供的三相交流电转换后得到为直流电；其次，将高次谐波经过滤波环节过滤，接下来将获得的无谐波的直流电通过直流电源变换环节转换为满足电动汽车充电需求的直流电；最后，还需要进行一次滤波环节，得到稳定的直流电，电动汽车接入就可以进行充电。

根据第一部分中对动力电池的充电和放电特性的分析，通常动力电池的充电过程主为恒流充电和恒压充电两个阶段。在充电的初始阶段，通过最佳充电速率给电动汽车充电，并且当充电电压达到电压阈值时，将进行恒压充电。文献[37]中电动汽车电池充电的数据，通过拟合得到充电桩输出功率的函数：

$$P_0(t) = \begin{cases} 0.79P_{0\max}t^{0.048}, & 0 < t \leq m \\ P_{0\max}e^{-0.03(t-m)}, & t > m \end{cases} \quad (2.5)$$

其中， t 为充电时间， $P_{0\max}$ 为充电过程中最大的功率输出， m 是恒流充电时间。

在恒流充电阶段，充电桩的输出功率不断增加，当到达恒压阶段时为功率最大值，之后随着电流的减小功率不断减小，最后充电结束。明显可以看出，采用不同的充电方式，输出的充电功率不一样。

2.4 本章小结

本章首先对蓄电池的六个性能参数进行简单介绍，由于锂离子电池性价比最佳、使用广泛，将其视为典型，研究其充放电原理，并对充电进行仿真分析。得到锂离子电池的充放电特性曲线；最后列出几种常见类型的电动汽车充电桩，并简要说明了其结构和工作过程。

3 电动汽车接入配电网充电负荷建模

3.1 引言

本章首先概述影响电动汽车充电过程的几个因素，根据美国运输部对美国私家车的统计信息，确定用户的每日最终到达时间和平均每日行驶里程，对两个驾驶特征进行拟合分析。然后选择 IEEE33 配电网系统为仿真模型，并且介绍几种常见的潮流计算方法。最后详细说明蒙特卡洛模拟方法计算充电负荷的步骤，借助 Matlab R2014a 仿真软件，对电动汽车的充电负荷进行建模。

3.2 影响电动汽车充电过程因素

3.2.1 电动汽车的发展规模

电动汽车渗透率直接决定了接入配电网充电功率的大小。2009 年，国家政府出台了《汽车工业调整和振兴规划》，规划提到对电动汽车的购买给予大量补贴，更多消费者购买电动汽车，从此电动汽车发展过程越来越快，不同品牌电动汽车走向市场。由于我国政府在电动汽车领域出台的引导政策以及电动汽车制造行业先进的技术，我国电动汽车制造业快速发展，近年来每年都有巨大的销量。截至 2019 年底，我国已经销售了 400 万辆以上的电动汽车。电动汽车在国内最近几年销售量持续增长^[39]，如表 3.1 所示。

表 3.1 国内电动汽车销量
Tab.3.1 Statistics of electric vehicle sales in China

时间	销量(万辆)	时间	销量(万辆)
2010 年	0.05	2015 年	33.11
2011 年	0.62	2016 年	50.70
2012 年	1.28	2017 年	77.70
2013 年	1.76	2018 年	126.00
2014 年	7.47	2019 年	120.60

从上表中可以看出，近几年我国电动汽车保有量保持逐年递增趋势，2011~2018 年每年增幅达到了 100% 以上，电动汽车销售市场在 2018 年出现最高值，为 126 万辆。在 2019 年，因为国家对电动汽车补助的减少，销量开始呈现下降的趋势，低于上年销量。按照当前增长速度，到 2020 年结束，我国道路上行驶的电动汽车将超过 500 万辆。

2019 年冬天,工业部颁发了《新能源汽车产业发展下一个 5 年计划》初稿。计划中提出,中国新能源汽车行业将来的结构为:主要使用纯电动汽车,将新的燃料电池汽车逐步走向商业化,城市公用汽车完全使用电能,将万物互联应用到汽车驾驶中,实现自动化驾驶的汽车在社会中普遍化。2025 年底,新能源汽车销售量要占新车销售量的四分之一,带有互联网的汽车销售量将达到三分之一。完全自动驾驶的汽车将按照规定的区域在特殊情况下实现商业运用。未来中国汽车工业的趋势一定是电动汽车实现产业化。未来,我国大面积鼓励家用汽车电动化,城市内逐步完善配套的充电站建设,使充电更加便捷。大规模的电动汽车投入市场,在配电网增加较大的充电功率,改变配电网原始接入负荷的情况。

3.2.2 电动汽车的类型及充电方式

按照驱动动力来源对电动汽车分类,可以分成以下三类:纯电力驱动的汽车(PEVs)、油电混合汽车(HEVs)和使用燃料电池作为动力的汽车(FCEVs)。

纯电动驱动的汽车由铅酸电池或锂离子电池等可完全充电的电池作为动力源,以实现运行过程中无污染物排出,但其缺点是电池使用寿命不长和更换成本太大。混合动力电动汽车使用传统的燃料,同时安装电池和电动机,低速运行时通过电动机驱动。可以按照行驶情况改变动力来源,它是燃油汽车向纯电动汽车转变当中出现的产物。油电混合汽车的推广是人们最容易接受的,电池由外部电源充电,充电后用于驱动电池。现在,油电混合汽车制造花费相对燃油车较少,购买时政府还会给予补贴,在电动汽车中卖得最好。燃料电池汽车驱动动力也来自于电能,其电能是氢气等燃料与空气反应过程中产生的,只排放水蒸气等,对大气无污染,使用寿命很长。可是现在燃料电池制造技术不够完善,因此从将来汽车使用趋势中看,这种汽车发展潜力巨大。

电动汽车电能补充方式按照不同的速度及应用场所,可以分为 3 种,即常规充电、快速充电和更换电池充电^[41]。接下来分别介绍这三种充电方式。

(1) 常规充电方式

为了提高锂电池的寿命,常规充电大多数分为三个阶段。分别为起始充电阶段、恒流充电阶段和恒压充电阶段。起始充电时,为了减少电流过大对锂电池产生严重冲击,先采用预充电方式。在第二充电阶段,电压基本稳定,因而该阶段也可近似看作恒功率充电。当电动汽车电池 SOC(电池电量剩余状态)接近 1 时,进入最后充电阶段,该阶段充电功率不断降低,而且时间占比很短,近似忽略。所以,本节将常规充电方法简化为功率不变的充电方式,如图 3.1 所示。

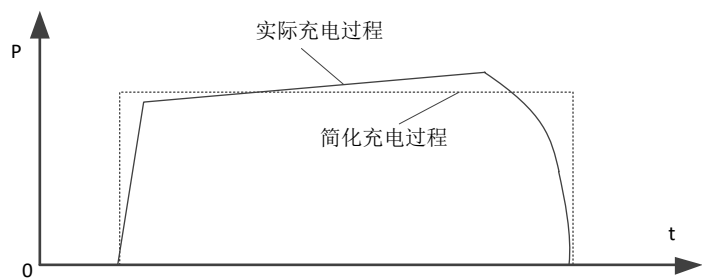


图 3.1 常规充电方式功率特性

Fig.3.1 Power characteristics of conventional charging mode

(2) 快速充电方式

快速充电方式与普通汽车加油相似，采用大电流进行充电，在短时间内充满电。主要应用在高速服务区充电站及集中充电站。快速充电当前有两种不同方式，按使用交流电和直流电分为快速交流和直流充电。快速交流充电时，充电桩的三相交流电源输出功率较高，电动汽车可以在短时间内充满电。快速直流充电期间，充电桩输出 480V 直流电。当多个充电器组合形成一个超级充电器来为电动汽车充电时，充电功率可以达到 100kW 以上，特斯拉充电站使用的就是超级充电器。

(3) 更换电池充电方式

更换电池充电方式都在大型充电站进行，主要适用于公共车辆、市内公共汽车、景区用车以及城市垃圾运输车等^[42]。更换电池充电方式有两种不同模式，分别为在充电站内更换电池进行充电和配送至充电站集中充电。更换电池充电方式有许多好处，如车辆不需等待，这样就提高了车辆利用率；使用谷电进行充电，使用户花费更低，优化电网的峰谷差；更好的直接消纳新能源发电；电池集中科学管理，提高电池寿命；相对于充电站占地面积需求少^[43]。

现在，国内电动汽车制造行业距离最高水平还差很多。尽管国内电动汽车总量已超过 500 万，但国内汽车总数相对庞大，电动汽车占汽车总量的十分之一还不到，增加电量大部分靠接入电网充电，很小一部分进行电池替换。在 2010 年，相关部门发布了《电动汽车传导式充电接口》标准规范，该标准规定不同充电方式的电流电压额定值大小及使用场景。具体如表 3.2 所示，表内 M1 表示慢速充电、M2 表示常规充电、M3 表示快速充电^[45]。

表 3.2 国内电动汽车充电模式
Tab.3.2 Charging modes of electric vehicles in China

方式	电压(V)	电流(A)	场景
M1	220	16.0	家庭使用
M2-1	220	32.0	
M2-2	400	32.0	大厦、办公楼等
M2-3	400	63.0	
M3	600	300	大型充电站

3. 2. 3 电动汽车的行驶特点

电动汽车的行驶特点包括各种类型电动汽车的起步时间，每日行驶里程，停车地点和时间。电动汽车涵盖了广泛的领域，并且电动汽车在不同领域中的行驶规则差异很大。但是，由于公司的统一管理，或建立专门的充电站，公交车和出租车等车辆，采用电池更换方式来补充电能，便于优化调度，而且几乎没有对电网负荷分布的影响。本章着重分析家用电动汽车的充电负荷分布。

对于私家车，车主的充电行为极为随机。通常来说，车主驾驶习惯，出行规则等因素的很大程度影响电动汽车充电。据了解，车主在晚上回家后更习惯为汽车充电。因此，车主每天离开和到达家中的时间以及他们每天行驶的里程数在很大程度上影响充电负荷的分配情况。

考虑到无论是电动车还是汽油车，车主的驾驶习惯都不会改变很多，因此使用了传统汽油车的行驶数据，放在电动汽车上仍然有效。本文引用的是 2017 年美国交通部对美国国家用车行驶状况的调查结果(NHTS)^[46]，并归一化统计数据。处理过程中，使用 MATLAB 拟合得到居民的最后一次回家时间和每日行进概率密度函数，可以满足正态分布和对数正态分布^[47]。

家用汽车最后回家的统计数据拟合得到的结果如图 3.2 所示，概率密度分布函数为：

$$f_t(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_t\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{(x-\mu_t)^2}{2\sigma_t^2}\right], (\mu_t - 12) < x \leq 24 \\ \frac{1}{\sigma_t\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{(x+24-\mu_t)^2}{2\sigma_t^2}\right], 0 < x \leq (\mu_t - 12) \end{cases} \tag{3.1}$$

其中， x 为 0-24 时的某时刻，期望值 $\mu_t=17.6$ ，标准差 $\sigma_t=3.4$ 。

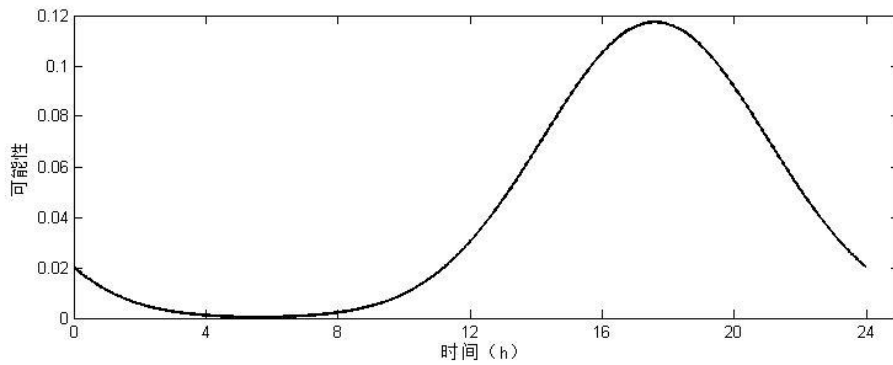


图 3.2 私家车一天中最后一次到家时间

Fig.3.2 The last time the car got home

从图 3.2 中可以看出, 美国居民返回家里的时间主要在 15:00PM 至 20:00PM 之间, 高峰时间是 17:00PM。前文提到, 由于缺乏政策引导指导, 居民经常选择回家就给汽车充电, 这导致电动汽车的充电时间集中。由于我国与美国之间交通状况的差异以及居民的工作和休息规则不同, 本文对式 3.1 的概率密度分布函数进行了一些修改, 以适应中国居民的出行条件。

修正后的概率密度函数为:

$$f_t(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x-\mu_t)^2}{2\sigma_t^2} \right], & (\mu_t - 12) < x \leq 24 \\ \frac{1}{\sigma_t \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x+24-\mu_t)^2}{2\sigma_t^2} \right], & 0 < x \leq (\mu_t - 12) \end{cases} \quad (3.2)$$

其中, 期望值 $\mu_t=18.8$, 标准差 $\sigma_t=3.5$ 。

影响车辆充电时间的主要因素是电动汽车的剩余电量状态 SOC, 影响 SOC 的因素为电动汽车的单位功耗和车辆的每日行驶里程。根据美国 NHTS 的统计数据, 使用最大似然估计方法对拟合进行近似, 以获得近似于对数正态分布的概率函数:

$$f_D(S) = \frac{1}{x \sigma_D \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(\ln x - \mu_D)^2}{2\sigma_D^2} \right] \quad (3.3)$$

其中, S 为日行驶里程, 期望值 $\mu_D=3.2$, 标准差 $\sigma_D=0.88$ 。

每日行驶里程会影响每日功耗, 而且与电动汽车电池 SOC_0 有关。电动汽车电池的初始 SOC_0 用如式(3.4)表示:

$$SOC_0 = \left(1 - \frac{\alpha S_0}{S_R} \right) \times 100\% \quad (3.4)$$

其中, α 是电动汽车充满电后使用的天数, 这里为 S_0 是平均日行驶距离。 S_R 是电动汽车的最大行驶距离。

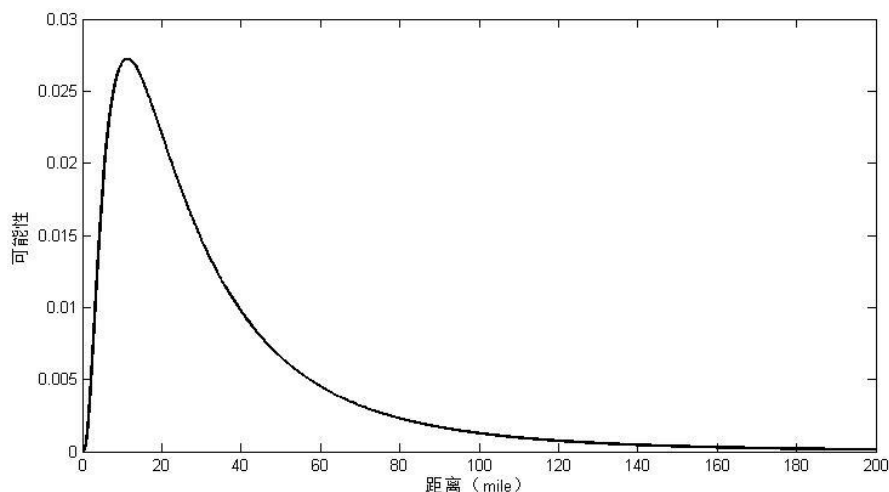


图 3.3 私家车日均行驶里程

Fig.3.3 Private electric cars drive miles every day

如上图所示, 美国家用汽车的平均每日驾驶距离主要集中在 50 英里以内, 并且大多数每日驾驶距离在 15 到 20 英里之间。转换为公里为 24 到 32 公里之间, 这通常与我国大多数城市居民的出行情况几乎一致。

3.3 配电网的选择与潮流计算

3.3.1 配电网的选择

为了建立电动汽车的充电负荷模型, 本章选择 IEEE33 节点配电系统, 操作系统选择 Windows 10, Intel Core i5-4210U CPU 1.70GHz, 4.0G 的内存配置。仿真模型基本网络参数^[48]如附录 A 所示。选择静态三相示例负载作为全天变化的三相负载的参考值。该系统仅由 33 个支路馈线组成, 连接线的的作用不计入。当配电网中的每日负荷达到峰值时, 总有功负荷为 3715.0kW, 总无功负荷为 2300.0kVar。功率基准值设置为 10MVA, 总线参考电压设置为 12.66kV, 拓扑图如图 3.4 所示。假设节点 0 保持电压幅度不变, 电压为标幺值为 1, 其余节点均为 PQ 节点, 节点 0 作为参考节点连接到主网络。

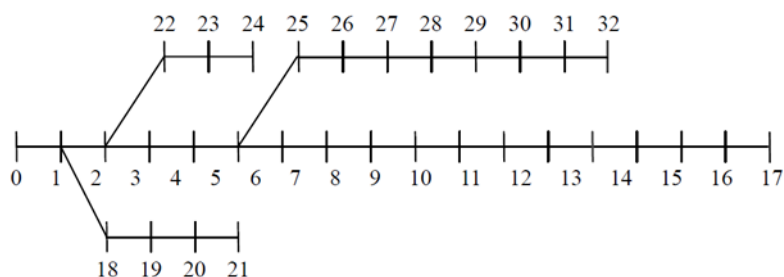


图 3.4 IEEE33 配电网拓扑结构

Fig.3.4 IEEE33 distribution network topology

3.3.2 配电网潮流计算

潮流计算是基于给定的电力系统拓扑，发电机，负载和其他组件的参数和运行条件来确定以下参数的大小和状态，电力系统中每个节点的电压，有功功率和无功功率，每个分支的网络的损耗。

解决配电网潮流的计算方法通常可分为以下几类^[49]：回路阻抗法，Zbus 高斯法，牛顿-拉夫森算法，改进的快速解耦法和前推反向替代法。这些类型的算法具有各自适用的场景和优点：

回路阻抗法的优点是，对于低压配电网的拓扑结构，可以忽略变压器和配电线对接地电容和导纳的影响，简化了拓扑结构，并降低了回路电压和电流方程数量，可以方便地构造，然后迭代求解。但是，此方法仅适合在具有三种主要类型的 PQ、PI 和 PQ(V) 节点的配电网条件下求解。

Zbus 高斯方法将稀疏节点导纳矩阵与等效电流注入相结合，以进行网络潮流计算。优点是，即使网络中包含的电压节点只能由松弛节点代替，该算法收敛速度与牛顿-拉夫森法差异不大。

牛顿-拉夫森法通常在分析环网时显示某些优势，同时具有更快的二阶收敛速度，因此在包含 PV 类型的 DG 网络上进行潮流计算时没有缺点。唯一的限制是对初始值有更多限制。如果未正确选择初始值，它将不会在很大程度上收敛，并且线路末端的电压将低于实际值，此时研究人员通常不采用此方法。

改进的快速解耦方法，根据配电网的径向运行模式，将传统算法中的雅可比矩阵简化为三角矩阵，并通过后一个节点的电压和电流值获得前一个节点的对应值。该算法在网孔分析时显示出一定的速度优势，但是其运算占用大量内存，并且与其他算法相比，该算法的收敛性相对较差。

前推反向替代法来解决确定的系统结构的支路电流和功率损耗，然后反向替换以获取配电系统节点电压，这是在配电系统网络中使用更多的一种方法。与上述方法相比，具有计算速度快，易于编程，计算效率高等优点，但是分析环网和 PV 节点比较费时。因此，针对现有配电网潮流计算方法的不足，提出了一种改进的前推反向替代法计算配电网潮流。该方法的优点在于：提出了一种节点自动编号方法，实现了节点的正反遍历，提高了计算速度。针对配电网的特殊结构，通过预处理消除了一半的节点和分支，提高了算法的效率。在上述自动编号方法可以区分 PQ 节点，PV 节点和平衡节点的基础上，判断 PV 节点是否可以转换为 PQ 节点，并进行相应的特殊处理。

3.4 基于蒙特卡罗算法的负荷建模

3.4.1 蒙特卡罗算法

本章的内容是研究连接到配电网的电动汽车充电的负载模型建立。因为电动车辆的充电和放电行为的随机性，所以难以从充电原理的角度建立电动车辆的充电和放电模型。基于统计数据定律的蒙特卡罗方法和遗传算法有很多应用在现用的统计办法。未来电动汽车的发展情况无法确定，因此本文基于已有的统计数据选择蒙特卡罗方法来模拟该充电过程。

蒙特卡罗算法也可以称为统计模拟方法或随机抽样的方法。为了解决各种问题，通常通过构造随机数的方法，特别是对于那些过于复杂而难以解决的问题，蒙特卡洛方法很有效。大多数人认为，它起源于法国数学家 Buffon 在 1777 年使用的针投实验来找到 π 值的方法。后来由参与美国“曼哈顿”计划的两个成员斯坦尼斯劳·乌兰姆和尼古拉斯·梅罗波利斯提出的，并通过某城市摩纳哥为其命名。

通常来说，蒙特卡罗算法可以大致分为两种类型^[50]。一种是通过计算机模拟问题本身的随机性。例如，中子在核反应堆中传输期间，已知中子和原子彼此相互作用。根据已知条件，可以使用随机采样来获得裂变后中子运动所需的速度和方向。另一种是通过随机抽样，基于事件的频率来估计相应的概率。

在没有任何政策法规的情况下，由于行驶规则的影响，电动汽车的充电行为不确定性较大，并且很容易在一定时间内集中一起进行充电。这仅取决于用户的工作和休息规则以及驾驶习惯。集中的无序充电将给配电系统的安全稳定运行带来严峻挑战。可以看出，分析和计算大型电动汽车的集体无序充电行为尤为重要。本文中使用的蒙特卡洛方法是指上述的第一类。

3.4.2 参数设置

由于电动汽车的充电行为在实际中受多种因素影响,因此充电过程更加复杂。为了便于仿真分析,本文对仿真前电动汽车的充电行为做出以下假设^[51]: (1) 在仿真对象中,所有车辆每天充电一次,并在居民区充电; (2) 在无序充电的情况下,默认车主开车到家后的最后一次开始充电; (3) 电动汽车的充电功率都是恒定的; (4) 车主每天开车结束时间和车子的每日里程被认为是独立的随机变量; (5) 所有车辆的电池容量和充电效率是相同的,随机接入 a、b、c 三相中。

考虑到目前电动汽车的发展情况,充电模式设定为常规慢充模式,充电电压为 220V,电流为 15-20A 之间,充电效率为 0.9,电池容量为 40kW·h,每百公里功耗为 0.14kW·h。充电功率 P_c 选定在 3.5-4.5kW 范围内满足均匀分布,即:

$$f_{P_c} = \begin{cases} 1, & x \in [3.5, 4.5] \\ 0, & x \notin [3.5, 4.5] \end{cases} \quad (3.5)$$

3.4.3 电动汽车负荷建模

以锂离子电池为电动汽车电池为例,根据前文 2.2 节中提到的电池充放电特性,电动汽车的充电方法以及电动汽车的运行规律,采用蒙特卡罗法进行负荷建模。

电动汽车充电负荷的计算基于一天的单位。首先,计算一天中每辆汽车的充电负荷曲线,然后叠加每辆电动汽车的充电负荷曲线,以获得一天中所有电动汽车的总充电负荷需求。在本文中,将 15 分钟用作计算周期,总充电负荷如式(3.6)所示:

$$P_t^{EV} = \sum_{i=1}^{1000} P_{i,t}^{EV} \quad (3.6)$$

其中, $P_{i,t}^{EV}$ 为第 i 辆车在第 t 时间段内的充电功率, P_t^{EV} 为第 t 时间段内所有汽车总的充电功率。

以每个时间段的起点为并网的电动汽车的充电时间,对白天并网的电动汽车的无序充电行为进行了蒙特卡罗模拟。流程如图 3.5 所示:

- (1) 根据仿真环境,设定基本参数;
- (2) 开始,初始化 n 、 i ; 令 $n=1$ 、 $i=1$, n 代表当前仿真次数,则 $n=1,2,3,\dots,N$, i 代表当前正在充电的车辆编号, $i=1,2,3,\dots,1000$ 。
- (3) 根据电动汽车的运行规律推算电动汽车剩余的 SOC,从而判断是否有电动汽车在对应时间节点中满足输出充电功率要求,最终确定该时间点上总的电动汽车负荷功率需求。

(4) 确定充电方式并计算需要充满的时间。设定数量中的任意电动汽车均为功率 P_Q 恒定的负荷，且为 3.5-4.5kW 之间的某一恒功率进行充电至满，本文以 15min 为一个时间段，则根据式(3.7)求得此时该 EV 的充电时长：

$$t_c = \frac{4SW_{100}}{100\eta P_c} \quad (3.7)$$

其中， t_c 为需要充电的时长，单位为 h； W_{100} 为前文设定的电动汽车百公里耗电量，单位为 kW h/km； S 为日行驶里程，单位为 km； P_c 为前文设定的充电功率； η 为电动汽车进行充电时的转化效率。

(5) 根据式(3.2)的概率密度函数产生用户最后一次抵家时间的随机数，即可得到车辆的开始充电时刻 T_i^b 。

(6) 则根据所求的电动汽车的充电时长以及根据互相独立的开始充电时刻，可求得对应电动汽车的结束充电时刻 T_i^c 。

(7) 计算第 i 辆电动汽车的充电负荷，并累加到充电负荷曲线上中。

(8) 判断当前正在充电的电动汽车 i 是否等于电动汽车总数量 1000，若不是，说明还有电动汽车未开始充电， $i=i+1$ 转入步骤 3；若是，则进行下一步；

(9) 判断当前正在仿真次数 n 是否等于设定的仿真总次数 1000，若不是，说明仿真未完成， $n=n+1$ ，转入步骤 2；若是，则进行下一步；

(10) 判断仿真结果是否收敛，若不收敛，则返回步骤 1；若收敛，则计算结束，输出仿真结果。将各个曲线进行叠加得到等效日负荷曲线。

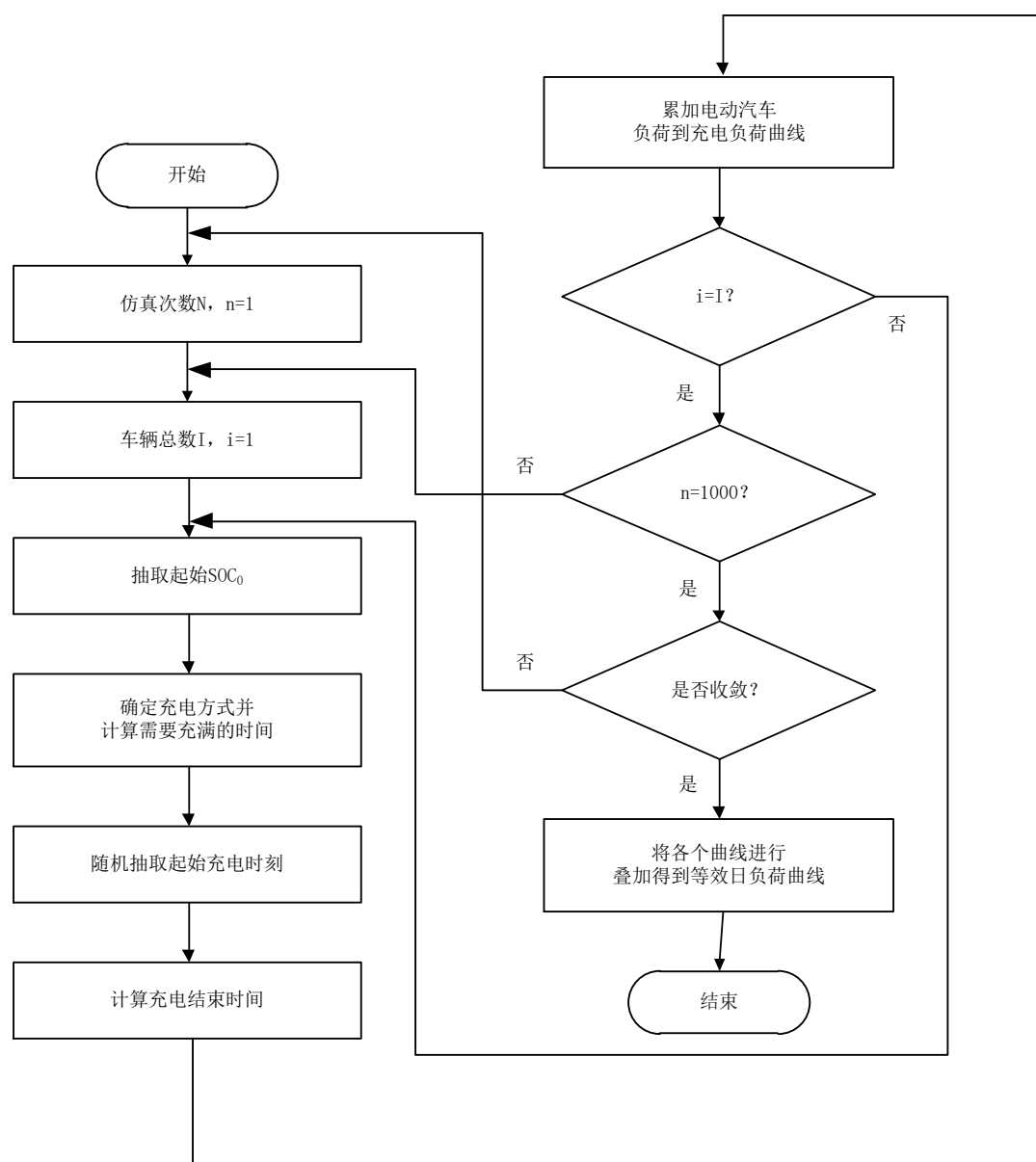


图 3.5 等效日负荷曲线形成步骤

Fig.3.5 Forming steps of equivalent daily load curve

考虑电动汽车的集中与分散充电模式，集中充电站建立在 IEEE33 配电网节点 14、7 和 27 上，其余节点为随机接入。设置该配电系统总共为 1000 辆电动汽车提供服务。首先根据电动汽车负荷计算流程以及前文配电网与电动汽车参数设置，得到一天内电动汽车三相充电负荷如图 3.6 所示，电动汽车接入配电网等效负荷曲线如图 3.7 所示。

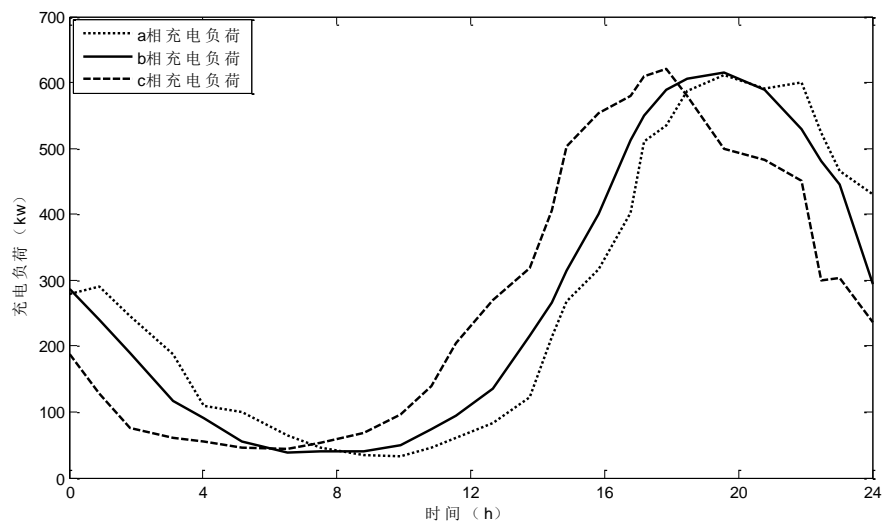


图 3.6 电动汽车三相充电负荷曲线
Fig.3.6 Electric vehicle charging load curve

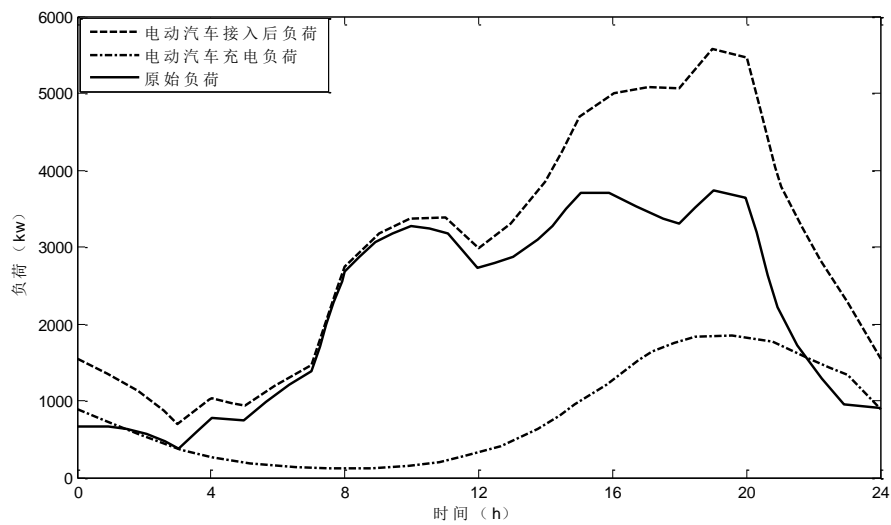


图 3.7 电动汽车接入配电网等效负荷曲线
Fig.3.7 Equivalent load curve of electric vehicle connected to distribution network

3.5 本章小结

本章首先概述了影响电动汽车充电过程的几个因素，分别从电动汽车发展规模、电动汽车的分类及电动汽车的运行规律几方面进行了详细分析，然后，根据美国运输部对美国私家车的统计信息，确定用户的每日最终到达时间和平均每日行驶里程，对两个驾

驶特征进行了拟合分析，为了满足中国居民的驾驶特征并对模型参数进行了部分修改。然后选择 IEEE33 配电网系统为仿真模型，并且介绍了几种常见的潮流计算方法，为下文潮流计算做铺垫。在此基础上，详细说明蒙特卡洛模拟方法计算电动汽车充电负荷的步骤，最后借助 Matlab R2014a 仿真软件，完成了电动汽车充电负荷建模，获得了电动汽车三相充电负荷及与配电网连接的电动汽车的等效负荷曲线，为以下研究工作的提供了保障。

4 满足配电网平衡的电动汽车充放电控制策略研究

4.1 引言

本章首先对电动汽车充电在配电网造成的三相不平衡问题进行分析，介绍了标准中电压不平衡度的算法，推导不平衡电流与不平衡电压的关系。其次建立一种可以满足配电网三相平衡的电动汽车充电模型。该模型将配电网的三相不平衡度作为控制目标，通过双层算法，获得最优的充电负荷时序曲线。然后介绍了基于自动选相的电动汽车与电网互动技术，简要概述其装置结构与工作过程。最后通过仿真分析，验证该模型在电力系统侧改善三相电压不平衡的效果。

4.2 电动汽车对三相不平衡的影响

4.2.1 电动汽车对配电网的影响

作为负载，电动汽车接入电网时间和空间上有很大的随机性。电动汽车的大量无序接入配电网将给三相配电网带来新的挑战 and 考验，其中主要的是急剧增加的网络损耗，严重加剧的三相不平衡现象，以及在各节点电压出现大幅度波动。城市中电动汽车需要充电时直接连接到城市配电网，因此它们对配电网运行的经济性和安全性都有重大冲击。连接到配电网的大量电动汽车充电也会使配电网的可靠性下降，降低配电网的电能质量，配电网的运行经济性也会受到影响。电动汽车对配电网影响因素如图 4.1 所示。

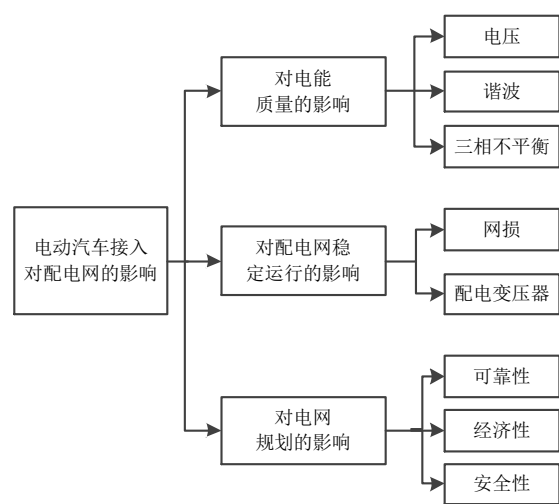


图 4.1 电动汽车接入对配电网的影响

Fig.4.1 The impact of electric vehicle access on the distribution network

电能质量从字面上不难理解,就是电力网络中各项指标的质量。最完美电能输出,各相电流的图形应显示为完全对称的正弦波。但是,在实际电网运行时,由于受到各种因素干扰及损耗,其波形通常会与理想状态出现偏差。从不同角度去衡量电能质量有不同的指标,从狭义范围来看,电压,频率和波形是主要衡量电能质量的指标,而广义上来看就有其他的指标,其中有谐波,波形失真,三相不平衡,频率偏差,电压偏差和电压波动等。

4.2.2 电动汽车对三相不平衡的影响分析

在三相配电线路中,三相不平衡现象的发生是指各相线路的电流/电压的幅值大小不一样或相角差之间不等于 120° ^[52]。三相平衡在电网中有着重要作用,是电网稳定运行的条件之一,当电网中出现三相不平衡现象,在电路和变压器中产生额外的功率损失,从而使变压器的生产效率降低,降低变压器效率,可能导致其它用电器不能正常工作,严重时可能出现用电事故。配电网是电力系统运行的终点,为电力用户供电,大多数面向的是使用单相电的家庭用户,各家各户家用电器使用时间不一样,导致配电网中出现各相用电负荷大小相差较多。

小区内家用电动汽车大多数在晚上停车充电,可以选择的充电时间较长,因而,大部分人会在 220V 单相电路中使用慢充对电动汽车进行充电。因为电动汽车随机接入电网充电,导致配电网出现三相不平衡现象,从而在线路中流动着正序和负序电流。当大量家用电动汽车在配电网中充电时,不进行控制可能会使三相不平衡现象变得更加严重,会影响电网稳定运行。

许多专家对三相不平衡问题进行了相关研究。以下文献都将由电动汽车充电引起的三相不平衡现象作为主要内容。文献[53]根据电能质量指标(三相不平衡度)开展研究,分析了住宅小区内大量电动汽车进行充电时配电网中产生的危害,并给出了一种供电方法。文献[32]针对大量电动汽车接入配电网充电,增加配电网三相不平衡度的问题,研究了电动汽车在汽车中占比的差异对配电网三相不平衡度影响不同。

文献[54]从电能质量的角度出发,分析在配电网正常运行时三相线路中接入单相负载引起的不平衡问题,而且给出相关办法去改善产生的危害。文献[55]提出治理措施去解决配电网中的三相不平衡问题,没有考虑电动汽车。在这种方法中,通过检测总线出口处低压线路各相的负载来形成用户的功耗计划,然后将控制命令发布到用户的切换开关。这种管理方法的缺点是切换开关频繁,电源可靠性低。

综上,本节在前人研究的基础上,针对规模化电动汽车导致的三相不平衡问题展开研究。

4.2.3 三相不平衡度的计算方法

《电能质量三相电压允许不平衡度》标准中关于三相不平衡度提到，电网无故障运行时，电压三相不平衡度不能大于 2%。因而，不平衡度计算方法是执行国家标准、保证电能质量的前提条件，治理三相不平衡问题之前必须计算三相不平衡度。相关标准仅有电压不平衡度的计算方法，本节将通过不平衡电压进行推导不平衡电流计算方法。

(1) 三相电压不平衡度

国家标准中三相电压不平衡度包括三相电压零序不平衡度和三相电压负序不平衡度，当得到三相电压的幅值和相位时，可以根据式(4.1)通过对称分量法分解计算正序、零序和负序电压分量，然后根据式(4.2)、(4.3)计算零序和负序电压不平衡度。

$$\begin{cases} \dot{U}_0 = \frac{1}{3}(\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c) \\ \dot{U}_1 = \frac{1}{3}(\dot{U}_a + \alpha\dot{U}_b + \alpha^2\dot{U}_c) \\ \dot{U}_2 = \frac{1}{3}(\dot{U}_a + \alpha^2\dot{U}_b + \alpha\dot{U}_c) \end{cases} \quad (4.1)$$

其中 \dot{U}_0 为零序电压分量的均方根值， \dot{U}_1 为正序电压分量的均方根值， \dot{U}_2 为负序电压分量的均方根值， α 为旋转因子， $\alpha = e^{j120^\circ}$ 。

负序不平衡度 ε_{u_2} 计算如下：

$$\varepsilon_{u_2} = \frac{U_2}{U_1} \times 100\% \quad (4.2)$$

零序不平衡度 ε_{u_0} 计算如下：

$$\varepsilon_{u_0} = \frac{U_0}{U_1} \times 100\% \quad (4.3)$$

IEEE std 112-1991 中电压不平衡度采用相电压不平衡率，相电压不平衡率等于三相相电压方均根值与平均值之差的最大值除以平均值：

$$\varepsilon_3 = \frac{\max(|U_\gamma - U_{avg}|)}{U_{avg}} \times 100\% \quad (4.4)$$

其中 U_{avg} 为三相电压有效值的平均值， U_γ 为三相电压的有效值， $\gamma \in Y$ ， Y 为一三相集合， $Y = \{a, b, c\}$ 。

IEEE std 936-1987 中相电压不平衡率中等于三相相电压中方均根的最大值与最小值的差除以平均值：

$$\varepsilon_4 = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{avg}} \times 100\% \quad (4.5)$$

其中 U_{\max} 为三相电压有效值的最大相电压， U_{\min} 为三相电压有效值的最小相电压。

国家标准中三相不平衡度计算必须通过电压的幅值和相位，但在电网实际运行时，电压相位一直在变化，测量困难，这类方法实现难度较大。IEEE 标准的两类方法是对三相不平度的估算，其中误差会比较大，但应用广泛。

(2) 三相电流不平衡度

现在大部分的标准仅有电压不平衡度计算方法，其中关于三相电流不平衡度的计算方法较少。目前配电网中出现的三相电压问题主要是由三相负荷不平衡产生的电流引起的，所以，电流不平衡度计算方法可以参照电压不平衡度的计算方法。

当得到三相电流的幅值和相位时，同样可以根据式(4.6)通过对称分量法分解计算正序、零序和负序电流分量，然后根据式(4.7)、(4.8)计算零序和负序电流不平衡度：

$$\begin{cases} I_0 = \frac{1}{3}|I_a + I_b + I_c| \\ I_1 = \frac{1}{3}|I_a + \alpha I_b + \alpha^2 I_c| \\ I_2 = \frac{1}{3}|I_a + \alpha^2 I_b + \alpha I_c| \end{cases} \quad (4.6)$$

其中 I_0 为零序电流， I_1 为正序电流， I_2 为负序电流。

负序不平衡度 ε_{I_2} 计算如下：

$$\varepsilon_{I_2} = \frac{I_2}{I_1} \times 100\% \quad (4.7)$$

零序不平衡度 ε_{I_0} 计算如下：

$$\varepsilon_{I_0} = \frac{I_0}{I_1} \times 100\% \quad (4.8)$$

当三相电流相位无法得到时，实际计算时使用速算法估算不平衡度，参照电压不平衡度算法，本节给出两种不平衡度估算方法。

方法一通过三相电流有效值的最大值与最小值得到电流不平衡度：

$$\varepsilon_3 = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max}} \times 100\% \quad (4.9)$$

其中 I_{\max} 为三相电压有效值的最大相电压， I_{\min} 为三相电压有效值的最小相电压。

方法二则通过三相电流的有效值与平均值之差的最大值得到电流不平衡度：

$$\varepsilon_4 = \frac{\max(|I_{\text{avg}} - I_\gamma|)}{I_{\text{avg}}} \times 100\% \quad (4.10)$$

其中 I_{avg} 为三相电流有效值的平均值， I_γ 为三相电流的有效值。

4.3 电动汽车优化策略数学模型

对电动汽车进行充放电控制，首先需要建立电动汽车充放电模型。本文将社区内的私家车作为研究对象，私家车大部分情况下充电都使用常规充电模式，由于家用电动汽车采用常规充电方法，因此本文仅对常规充电过程进行数学建模。选择的 IEEE 配电网中各节点各相均匀的分布着电动汽车充电桩，该配电网形式为辐射状，只有根节点与大电网连接。本文提出了一种电动汽车充电控制策略，该策略基于三相潮流计算模型，以电动汽车充电功率、电池能量以及三相潮流为约束条件，调节充放电负荷大小以及充放电时间，与此同时满足配电网三相平衡的控制目标。

4.3.1 模型约束条件与目标函数

该模型建立过程中采用以下几个约束条件：

电动汽车充电功率约束条件为：

$$0 \leq P_{i,t}^{EV} \leq P_{i,\max}^{EV} \quad (4.11)$$

其中， $P_{i,t}^{EV}$ 为第 i 辆电动汽车 t 时段的充电功率， $P_{i,\max}^{EV}$ 为第 i 辆电动汽车进行充电的功率上限。式(4.11)表示电动汽车充电时功率必须小于功率上限。

电动汽车电池能量的约束条件为：

$$\eta_i \sum_{t \in T} \Delta t P_{i,t}^{EV} \leq C_i^e - C_i^b \quad (4.12)$$

$$\begin{cases} P_{i,t}^{EV} = P_i^{EV} g_{i,t} \\ g_{i,t} = \{0,1\} \end{cases} \quad (4.13)$$

$$P_{\gamma,n,t}^{EV} = \sum_{i \in \Phi_{\gamma,n,t}} P_{i,t}^{EV} \quad (4.14)$$

其中， η_i 为第 i 辆电动汽车进行充电的效率， T 为电动汽车充电时间的集合， C_i^b 为第 i 辆电动汽车在开始时刻的剩余电量， C_i^e 为电动汽车最终的剩余电量， $g_{i,t}$ 为第 i 辆电动汽车的充电状态， $g_{i,t}$ 等于 1 或 0 分别表示充电和不充电， $\Phi_{\gamma,n,t}$ 为 t 时段在 n 节点 γ 相所有进行充电的电动汽车组成集和， $P_{\gamma,n,t}^{EV}$ 为 t 时段 n 节点的 γ 相节点总有功功率大小。

式(4.12)意味着在可利用的时间内，所有电动汽车都需要满足用户的充电需求，式(4.13)意味着电动汽车充电有功功率取决于充电状态与充电功率，式(4.14)表示 n 节点 γ 相有功功率为所有接入充电功率相加。

三相线路潮流计算公式为：

$$\dot{S}_{\gamma,N,t} = \dot{U}_{\gamma,N,t} \dot{I}_{\gamma,N,t}^* \quad (4.15)$$

其中, $\dot{S}_{\gamma,N,t}$ 、 $\dot{U}_{\gamma,N,t}$ 、 $\dot{I}_{\gamma,N,t}$ 向量分别由某一相节点的视在相量形成。

线路功率约束条件为:

$$|S_{\gamma,n,t}| \leq S_{n,\max} \quad (4.16)$$

其中, $S_{\gamma,n,t}$ 为 t 时段线路 n 的 γ 相的视在功率, $S_{n,\max}$ 为视在功率最大值。

节点电流约束条件为:

$$\begin{cases} \frac{P_{\gamma,n,t}U_{\gamma,n,t}^{\text{re}} + Q_{\gamma,n,t}U_{\gamma,n,t}^{\text{im}}}{(U_{\gamma,n,t}^{\text{re}})^2 + (U_{\gamma,n,t}^{\text{im}})^2} = \sum_{k=1}^K \sum_{h \in Y} (G_{\gamma h, nk} U_{h,k,t}^{\text{re}} - B_{\gamma h, nk} U_{h,k,t}^{\text{im}}) \\ \frac{P_{\gamma,n,t}U_{\gamma,n,t}^{\text{im}} - Q_{\gamma,n,t}U_{\gamma,n,t}^{\text{re}}}{(U_{\gamma,n,t}^{\text{re}})^2 + (U_{\gamma,n,t}^{\text{im}})^2} = \sum_{k=1}^K \sum_{h \in Y} (G_{\gamma h, nk} U_{h,k,t}^{\text{im}} + B_{\gamma h, nk} U_{h,k,t}^{\text{re}}) \end{cases} \quad (4.17)$$

其中, $P_{\gamma,n,t} + jQ_{\gamma,n,t}$ 为 t 时段 n 节点的注入功率, $U_{\gamma,n,t}^{\text{re}} + jU_{\gamma,n,t}^{\text{im}}$ 为 t 时段的 γ 相的电压值, $G_{\gamma h, nk} + jB_{\gamma h, nk}$ 为 n 节点的 γ 相与 k 节点 h 相之间的导纳, K 为与该节点连接的支路组成的集合。式(4.17)表示节点电流的实部与虚部。

节点电压约束条件为:

$$\underline{U}_n \leq |U_{\gamma,n,t}| \leq \bar{U}_n \quad (4.18)$$

其中, $U_{\gamma,n,t}$ 为 γ 相 t 时段 n 节点的电压值, \bar{U}_n 、 \underline{U}_n 分别为节点处的电压的上限值和下限值。

线路电流约束条件为:

$$0 \leq |I_{\gamma,n,t}| \leq \bar{I}_{n,L} \quad (4.19)$$

其中, $I_{\gamma,n,t}$ 为 t 时段的 γ 相的支路电流相量, $\bar{I}_{n,L}$ 为支路电流最大值。

三相潮流方程为非线性约束条件, 求解计算过程比较困难, 因此本文采用内外层优化算法进行求解模型^[57]。本文将前推回代法应用在策略算法外层通过迭代来修正节点电压, 内层计算时使用外层得到的电压。

线路电流与节点流入功率以及注入电流之间的关系为:

$$\begin{bmatrix} I_{a,n,t} \\ I_{b,n,t} \\ I_{c,n,t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (S_{a,n,t}/U_{a,n,t})^* \\ (S_{b,n,t}/U_{b,n,t})^* \\ (S_{c,n,t}/U_{c,n,t})^* \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

$$\begin{bmatrix} I_{a,L,t} \\ I_{b,L,t} \\ I_{c,L,t} \end{bmatrix} = \mathbf{T}^t \begin{bmatrix} I_{a,n,t} \\ I_{b,n,t} \\ I_{c,n,t} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

其中, $I_{\gamma,n,t}$ 为 γ 相 t 时段 n 节点的流入的电流, $S_{\gamma,n,t}$ 为 γ 相 t 时段 n 节点原始负荷的功率, $U_{\gamma,n,t}$ 为 γ 相 t 时段 n 节点的电压值, $I_{\gamma,L,t}$ 为 t 时段的 γ 相的支路电流相量, \mathbf{T} 为支路关联矩阵^[58]。

三相不平衡程度的表示方法较多, 分析三相不平衡度使用电压/电流过程较麻烦, 需要通过大量计算; 随着大规模电动汽车在电网中充电, 三相不平衡程度加大, 随之产生严重的三相不平衡现象。因而, 本文模型建立过程中对电压/电流的三相不平衡严重程度用负荷三相不平衡度来进行衡量。在本文中, 选取配电网根节点的处的 ε_{unb} 作为优化目标, 以计算配电网的总体负荷不平衡程度。配电网不平衡度如式(4.22)所示:

$$\varepsilon_{\text{unb},n} = \sqrt{\sum_{t=1}^{t_{\max}} \sum_{\gamma \in Y} (P_{\gamma,n,t} - P_{\text{avg},n,t})^2} \quad (4.22)$$

$$P_{\text{avg},n,t} = \frac{1}{3} \sum_{\gamma \in Y} P_{\gamma,n,t} \quad (4.23)$$

其中, t_{\max} 为取样时段总数, $P_{\gamma,n,t}$ 分别为 n 节点 a, b, c 三相 t 时刻的功率值, $P_{\text{avg},n,t}$ 为 n 节点 t 时刻的三相功率总和的平均数。

式(4.22)代表的是三相功率与平均功率之间的欧式距离。当系统出现三相不平衡现象越严重, 则 ε_{unb} 就越大; 当各相负荷完全相同时, $\varepsilon_{\text{unb}} = 0$, 这时系统中没有发生三相不平衡。在本文中建模过程中, 该模型的目标函数为:

$$F = \min \varepsilon_{\text{unb}} \quad (4.24)$$

式(4.11)~式(4.14)、式(4.16)~式(4.24)构成满足配电网三相不平衡度的电动汽车充电优化模型。该模型中只有线性约束条件和凸函数的目标函数。该模型求解计算时, 在 MATLAB 上调用外部求解器 CPLEX12.2 工具包, 大幅度的提升了求解速度。

4.3.2 优化策略算法流程

优化计算过程需要使用节点电压, 先设定节点初始电压, 将节点电压作为已知量, 通过节点电压, 即可进行满足配电网平衡的电动汽车充电策略优化, 优化算法主要流程如图 4.2 所示。

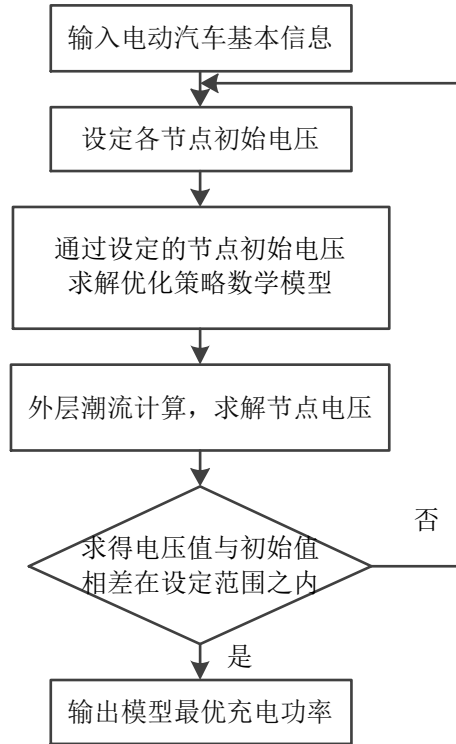


图 4.2 算法流程图

Fig.4.2 Algorithm flow chart

从图 4.2 中分析得到，用所提出的电动汽车充电控制策略进行计算求解时，在求解优化策略数学模型中出现了一个非线性约束，潮流计算时通过前推反向替换方法迭代校正每个节点的电压，以避免模型的非线性约束复杂计算过程。因此，在策略内层求解没有出现非线性约束，计算简单。

优化算法流程中外层潮流计算时，根据电动汽车充电功率，运用三相前推回代法，来求解每个节点电压。作为其中关键的一步前推回代法过程如下，流程如图 4.3 所示，

(1) 编号，获得配电网拓扑结构和参数，对 IEEE33 配电网各节点、各支路都按节点顺序进行排序编号。

(2) 注入电流的计算，根据节点各相电压及注入功率计算该节点的注入电流，其计算方法如式(4.25)所示：

$$\begin{cases} I_{\gamma,n}^{\text{re}} = \frac{U_{\gamma,n}^{\text{re}} P_{\gamma,n} + U_{\gamma,n}^{\text{im}} Q_{\gamma,n}}{(U_{\gamma,n}^{\text{re}})^2 + (U_{\gamma,n}^{\text{im}})^2} + \frac{U_{\gamma,n}^{\text{re}} P_{\gamma,n}^0 + U_{\gamma,n}^{\text{im}} Q_{\gamma,n}^0}{(U_{\gamma,n}^{\text{re}})^2 + (U_{\gamma,n}^{\text{im}})^2} \\ I_{\gamma,n}^{\text{im}} = \frac{U_{\gamma,n}^{\text{im}} P_{\gamma,n} - U_{\gamma,n}^{\text{re}} Q_{\gamma,n}}{(U_{\gamma,n}^{\text{re}})^2 + (U_{\gamma,n}^{\text{im}})^2} + \frac{U_{\gamma,n}^{\text{im}} P_{\gamma,n}^0 - U_{\gamma,n}^{\text{re}} Q_{\gamma,n}^0}{(U_{\gamma,n}^{\text{re}})^2 + (U_{\gamma,n}^{\text{im}})^2} \end{cases} \quad (4.25)$$

其中, $I_{\gamma,n}^{\text{re}} + jI_{\gamma,n}^{\text{im}}$ 为 γ 相 n 节点的流入的电流, $U_{\gamma,n}^{\text{re}} + jU_{\gamma,n}^{\text{im}}$ 为 γ 相 n 节点的电压值, $P_{\gamma,n}^0 + jU_{\gamma,n}^0$ 为 γ 相 n 节点原始负荷的功率。

(3) 注入电流回代求解支路电流。

计算支路关联矩阵 \mathbf{T} 。根据支路关联矩阵计算支路电流,其计算方法如式(4.16)所示:

$$\begin{cases} \mathbf{I}_{\gamma,L}^{\text{re}} = \mathbf{T}^t \mathbf{I}_{\gamma,N}^{\text{re}} + \sum_{k \in K} \mathbf{I}_{\gamma,L,k}^{\text{re}} \\ \mathbf{I}_{\gamma,L}^{\text{im}} = \mathbf{T}^t \mathbf{I}_{\gamma,N}^{\text{im}} + \sum_{k \in K} \mathbf{I}_{\gamma,L,k}^{\text{im}} \end{cases} \quad (4.26)$$

其中, $\mathbf{I}_{\gamma,L}^{\text{re}} + j\mathbf{I}_{\gamma,L}^{\text{im}}$ 为的 γ 相的支路电流相量, $\mathbf{I}_{\gamma,N}^{\text{re}} + j\mathbf{I}_{\gamma,N}^{\text{im}}$ 为 t 时段的 γ 相的注入电流相量, $\mathbf{I}_{\gamma,N,k}^{\text{re}} + j\mathbf{I}_{\gamma,N,k}^{\text{im}}$ 为该节点与 k 节点的支路电流。

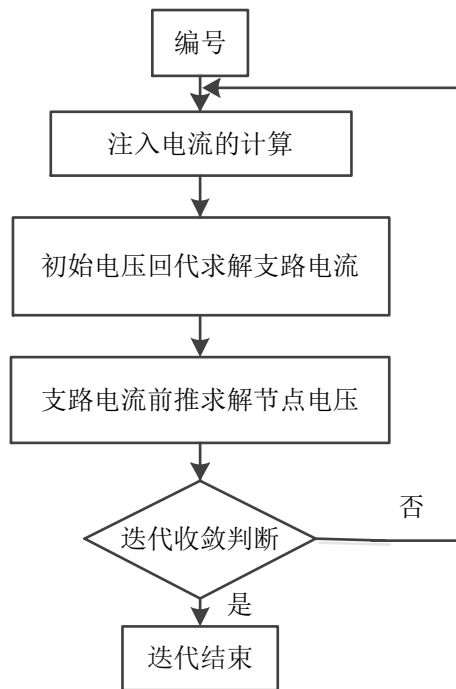


图 4.3 前推回代法流程图

Fig.4.3 Push back the generation flow chart

(4) 支路电流前推求解节点电压。

根据道路压降等于支路关联矩阵与支路压降的乘积,通过计算得到节点电压。计算节点电压,公式如下:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{U}}_{\gamma,N} = \dot{\mathbf{U}}_{\gamma,0} - \mathbf{T} \dot{\mathbf{Z}} \dot{\mathbf{I}}_{\gamma,l} \\ \dot{\mathbf{Z}} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ba} & Z_{ca} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{cb} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (4.27)$$

其中， $\dot{U}_{\gamma,N}$ 向量由 γ 相节点电压相量组成， $\dot{U}_{\gamma,0}$ 向量均由 γ 相根节点电压相量组成，维数为 N ， Z 为各相的自阻抗 / 各相互阻抗， $\dot{I}_{\gamma,l}$ 向量由 γ 相线路 l 的支路电流相量组成。

(5) 迭代收敛判断：利用计算得到的节点电压和初始电压相比，若两数之差小于在设定范围之内，则迭代结束；否则重新迭代计算。

4.4 基于自动选相的电动汽车与电网互动技术

基于上述算法讨论，满足配电网三相负荷不平衡度需要调节和控制电动汽车的充电功率和时间。电动汽车的充电功率和时间的调节可以通过基于自动选相的电动汽车和电网的交互控制来完成。本文提出一种选线装置，接入充放电机与变压器之间能够完成三相负载自动平衡。当发生三相不平衡问题时，三相电路中电压大小不相等，根据这个特性，此设备为充电桩选出最佳接入线路，大量电动汽车接入配电网进行充放电，就可以将负荷进行合理分布。通过此方法，电动汽车慢速充电导致的三相不平衡对配电系统能够从本质上最大限度地减少。

4.4.1 电动汽车与电网互动

“电动汽车与电网互动(V2G)”这一概念最早由国外学者提出^[59]。此后，V2G 的实际使用在世界各地的企业及科研机构展开。如今用来实现交换电动汽车与电网之间的电能，电动汽车通过电网充电，同时也能将电池内的电能经过放电机传给电网，电能在他们之间能够双向流动^[60]。V2G 模式下的电动汽车可以在电网交换能量是相互的。但是，目前研究基本上集中在电动汽车的充电过程对电网的影响上，很少把放电过程考虑在内。文献[61]研究了电动汽车在不同充电策略引导时对配电网的影响，对比集中策略，得到了最佳的充电和放电控制策略，可以调峰和相对减少的负荷波动的功能。

实现此操作过程必须通过双向充放电机为电动汽车接入配电网。电动汽车的充电和放电机按照携带方式可以分为车载和非车载式两种形式^[63]。两种类型的充放电机的特性如表 4.1 所示。

表 4.1 充放电机的分类及特点

Tab.4.1 Classification and features of the charge and discharge machine

分类	使用地点	体积	充电功率	建设成本
车载充电机	电动汽车	小	小	低
非车载充电机	充电站	大	大	高

在现实生活中，一般情况下家用轿车在一天 24 小时内在道路上行驶 2 至 3 个小时，剩下都处于停留状态^[64]。如果这些家用车都是电动的，并且数量很多，总电池容量将非常巨大。然后在停留的这段时间内，闲置的电动汽车可以使用动力电池来实现 V2G 功能。V2G 将电动汽车视为一种新的电能存储方式，在电动汽车停车时通过其充放电调节电网运行中出现的问题。其模式为：

- (1) 当电动汽车电量无法满足行驶需求时，其接入配电网进行充电；
- (2) 当电动汽车闲置不用，且电量充足时，其电池可以根据电网需要向电网放电。

4.4.2 自动选相装置结构

本文设计的充电接入开关设备在将充放电机连接到电路之前设置线路选择动作，实现三相负载平衡是通过检测电源接入点的电压^[65]。该过程电源不会断开，而且电动汽车充放电可以选择合适的充电相序。根据系统负荷大小进行电动汽车充放电接入，需要在低压配电网中接入电压监测装置及选相开关，电压监测装置结构包括 TV 模块、信号调理模块、A/D 采样模块、CPU 模块。结构如图 4.4 所示：

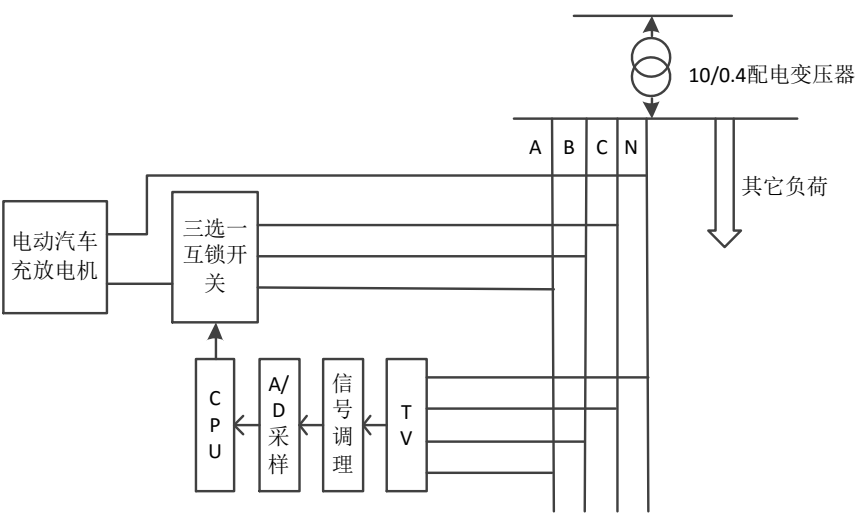


图 4.4 自动选相装置结构

Fig.4.4 Structure of automatic phase selector

低压配电变压器输出的电源为三相四线制，分别为 a 相、b 相、c 相和 N 相，充放电机单元分别与自动选相装置的选相开关的输出端和三相电源的 N 线连接。TV 模块的功能是将配电变压器输出的电压转换为需要收集的电压，信号调理模块的功能就是将 TV 转换后的电压转换为 A/D 需要收集范围内，与此同时过滤掉影响信号采集的其它波形，A/D 模块的功能是将模拟信号转换为数字信号，最终数据的处理在 CPU 模块内完

成, 计算出每一相的电压大小, 然后 CPU 模块再控制选相开关导通电压最高一相作为电动汽车充电电源, 最低一相作为电动汽车放电电源。

4.4.3 自动选相工作过程

当配电系统中出现三相不平衡现象时, 配电变压器将输出三相不同的电流, 导致中性线 N 中出现电流, 由于中性线含有阻抗, 于是有电压降产生, 这时各相电压不相等, 负荷不同压降不同, 压降与负荷大小成正比。a, b, c 三相中电压最高的一项, 负荷最小, 反之, 电压最低的一相, 负荷最大。现设定一个三相平衡系统, 各相负荷功率为 P, 基础相为 a, 即($U_a = 0^\circ$ 、 $U_b = 120^\circ$ 、 $U_c = -120^\circ$)。如果此时该系统的 a 相负荷增加为 R 的, 则 a 相电压幅值将减小, 不平衡系统如图 4.5 所示:

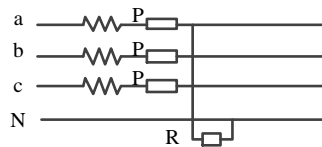


图 4.5 三相不平衡系统示意图

Fig.4.5 Three-phase imbalance system diagram

当某停车位驶入可以参加电网互动的电动汽车时, 选线装置的工作步骤如下, 首先将电源电压降至信号采集电压。其次, 将微测量电压转换器得到的电压转换为 A/D 允许电压范围, 然后并对采样信号中谐波进行过滤。再次, 经过滤波后, 采样并保持信号多通道选择和 A/D 转换。最后, CPU 根据 A/D 模块输出的结果在三相电路中选择电压最高的相, 并控制切换开关将其作为电动汽车充电电源打开, 另外两相同时进行断开操作; 选择最低电压的一相作为电动汽车的放电电源, 电动汽车用户可以通过放电来获得收益。由此, 可以实现三相负载平衡, 而不需要加入通信设备和进行远程控制。

4.5 算例仿真分析

4.5.1 仿真场景设置

为分析充电优化模型对配电网三相不平衡的影响, 设定以下假设条件^[66]: (1) 电动汽车初始 SOC=0.1, 充电结束时电量充满。(2) 电动汽车相对均匀接入配电网各节点各相。(3) 电动汽车进行充电时功率设为 4kW, 蓄电池最大容量设为 40kW h, 将充电效率设为 90%。(4) 假设停入充电桩附近的电动汽车都可以控制进行充电。(5) 假设汽车保有量为 1000 辆。

本节采用 IEEE33 节点时变系统作为基本算例, 电动汽车在不同的发展阶段, 渗透率不同, 据此设置了两个不同的场景, 定量地分析了每个场景下电动汽车随机接入配电网时三相电压不平衡度。

场景 1: 电动汽车当前发展阶段, 渗透率为 30%;

场景 2: 未来电动汽车发展阶段, 假设电动汽车的渗透率为 50%

4.5.2 仿真步骤

仿真分析时, 把 15min 作为一个时间段, 采集一次数据, 每天采集 96 组数据, 分别输出无序充电和经过优化控制充电每个时刻的三相电压不平衡度, 然后在 MATLAB 中绘制出三相电压不平衡度时序图。由于电动汽车的数量庞大, 我们将每个节点上的充电负载看作一样的, 并且配电系统的电压是使用前推反向替代方法进行计算的。

4.5.3 电动汽车接入配电网仿真分析

采用前文 3.2.3 中家用电动汽车的出行时间和路程以及行驶里程分布情况, 分别进行了无序充电和采用优化控制策略充电两种方案的进行仿真(每 15min 采集一次数据)。输出每个时刻的三相电压不平衡度。

最后得到两种不同场景下 24 小时内三相电压不平衡度随时间变化曲线图, 如图 4.6-图 4.9 所示。

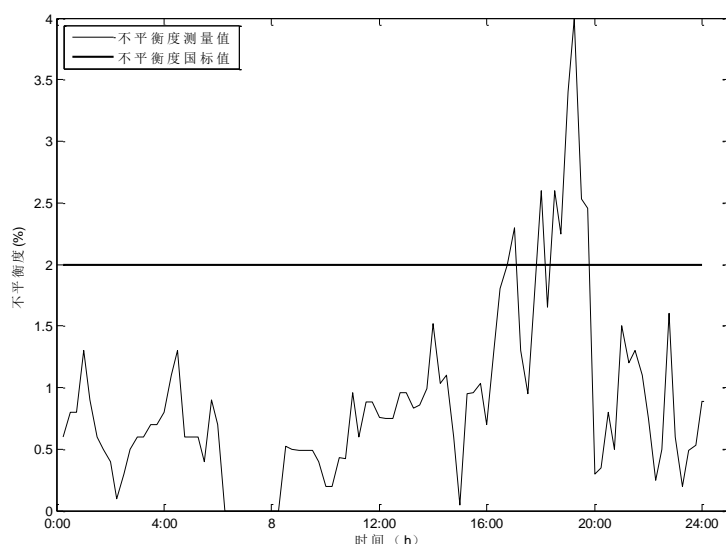


图 4.6 场景 1 无序充电三相电压不平衡度时序图

Fig.4.6 Three-phase voltage imbalance time series chart for disorderly charging

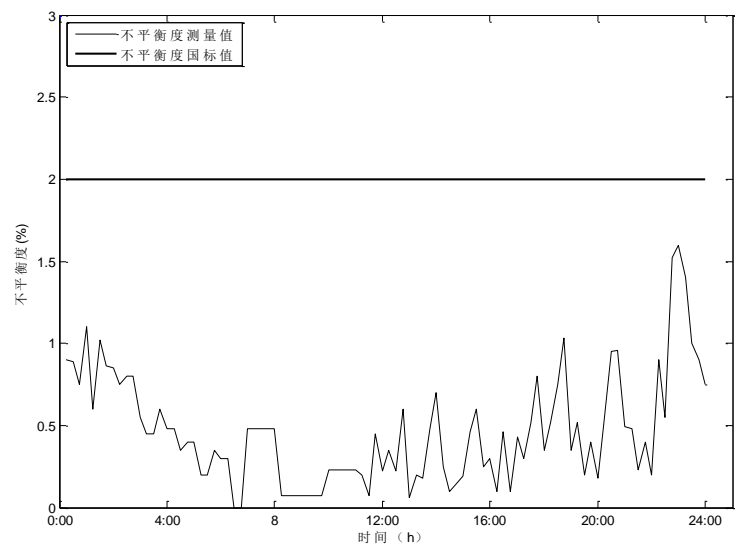


图 4.7 场景 1 优化充电三相电压不平衡度时序图

Fig.4.7 Three-phase voltage imbalance time series chart for optimize charging

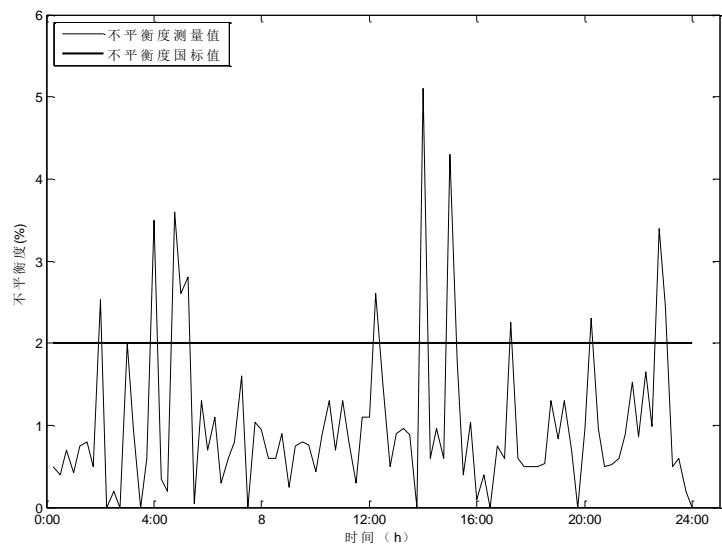


图 4.8 场景 2 无序充电三相电压不平衡度时序图

Fig.4.8 Three-phase voltage imbalance time series chart for disorderly charging

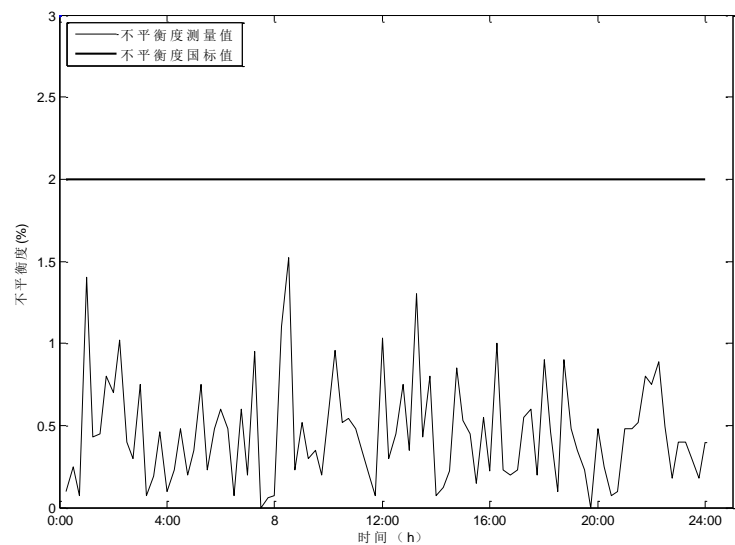


图 4.9 场景 2 优化充电三相电压不平衡度时序图

Fig.4.9 Three-phase voltage imbalance time series chart for optimize charging

《电能质量三相电压允许不平衡度》标准中关于三相不平衡度提到，电网无故障运行时，电压三相不平衡度不能大于 2%。从图 4.6 和图 4.8 中可以看出，无序充电时两个场景下系统中出现严重的三相电压不平衡，三相电压不平衡度远远超过国家标准值。从图 4.7 和图 4.9 中可以看出，采用优化控制策略对电动汽车充电时，三相电压不平衡度均在国家标准范围内。

观察 2 种情景下三相不平衡程度最大值情况，采用 $\varepsilon_{\text{unb,max}}$ 来表示，结果列于表 4.2。

表 4.2 两个不同场景 $\varepsilon_{\text{unb,max}}$ 下对比		
Tab.4.2 Comparison of network $\varepsilon_{\text{unb,max}}$ of two scenes		
	场景 1	场景 2
无序充电	4%	5.1%
优化充电	1.6%	1.52%

从表 4.2 中可以看出，随着电动汽车渗透率的提高，配电网的三相不平衡度更加严重。结果表明采用优化控制策略充电后，三相不平衡问题可以得到极大改善。

采用优化控制策略对电动汽车充电时，仿真得到场景 1 下电动汽车在 A、B、C 三相的充电功率，根据充电功率在各相分布情况和充电时间，进行调整电动汽车的充电功率和时段。充电功率分布如图 4.10 所示：

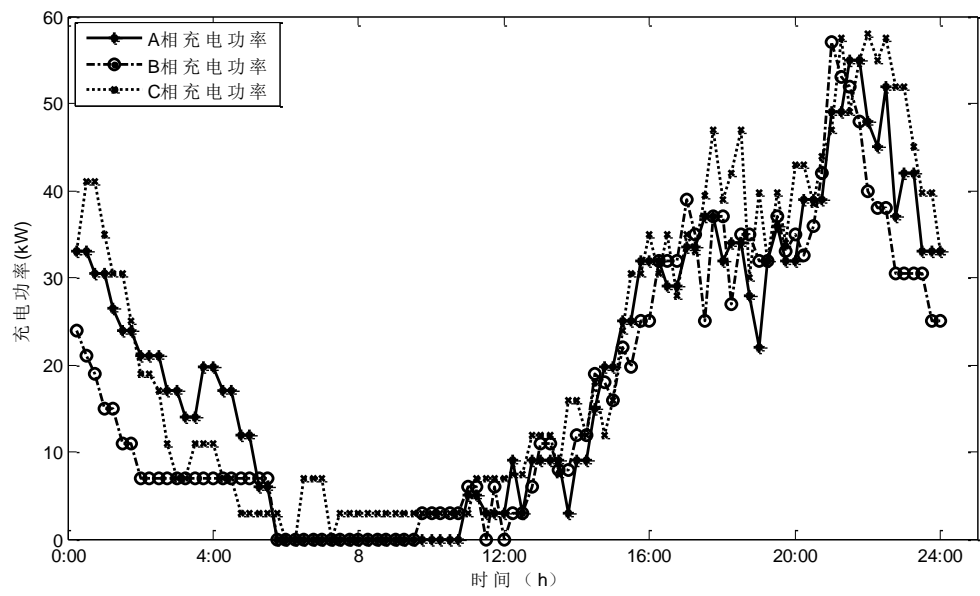


图 4.10 各相充电功率时序图

Fig.4.10 The charging power in each phase time series chart

4.6 本章小结

本章首先分析了电动汽车充电在配电网中造成的三相不平衡问题，然后建立了一种可以满足配电网三相平衡的电动汽车充电模型。该模型考虑了配电网的三相不平衡度为控制目标。该策略算法的外层采用前推反向替代方法，通过迭代修改电压，内层通过计算电动汽车的充电模型，获得最优的充电负荷时序曲线，该算法不含非线性约束，有较快的计算速度。仿真结果表明应用该策略电动汽车充电可以有效错开常规负荷的用电高峰时间，转至用电低谷时段进行充电，在电力系统侧有改善三相电压不平衡的效果。通过基于自动选相的电动汽车与电网互动技术调整充电功率和时间，如果进行电动汽车放电，还能赚取一定利润，这样更多使用者会参与到配电网调度中进行充放电，从而使电力系统的峰谷差变小，配电网电能质量将有大幅度改善，随之而来供电能力也会有明显的提升。

5 结论与展望

5.1 结论

由于电动汽车接入的随机性和不确定性，造成输出电压的三相不平衡，带来正序和负序电流。本文针对电动汽车带来的不平衡问题，对电动汽车充电过程进行数学建模，以三相电压不平衡度为目标函数，设计了一套基于前推回代法的电动汽车充电控制策略。本文主要内容和研究成果如下：

(1) 概述了影响电动汽车充电过程的几个因素。然后，根据美国运输部对美国国家私家车的统计信息，确定用户的每日最终到达时间和平均每日行驶里程，对两个驾驶特征进行了拟合分析，为了满足中国居民的驾驶特征并对模型参数进行了部分修改。最后，借助 Matlab R2014a 仿真软件，完成了电动汽车的充电负荷建模，获得了电动汽车的三相充电负荷以及与配电网连接的电动汽车的等效负荷曲线。

(2) 提出了一种能够满足配电网平衡电动汽车充电模型建立方法，前推回代法应用在策略算法外层通过迭代来修正节点电压，内层则通过计算电动汽车充电模型取得最优的充电负荷时序曲线。

(3) 仿真结果表明，该策略在电动汽车充电负荷中的应用，电动汽车充电能够错开常规负荷的高峰时段，并转移到电力负荷的低谷期，具有降低配电网三相电压不平衡度的效果。通过基于自动选相的电动汽车与电网互动技术调整充电功率和时间，使电力系统的峰谷差变小，配电网电能质量将有大幅度改善，随之而来供电能力也会有明显的提升。

5.2 展望

本文提出的基于前推回代法的电动汽车充电控制策略虽然能够达到预期效果，但是由于时间问题，还有许多不足之处有待进一步研究，主要有：

(1) 以后电动汽车产业的趋势具有不确定性，所以将有一定的偏差在本文的计算结果中。但文中提出的控制策略及结论可以作为参考，国内电动汽车产业的发展在进行优化负荷时可以参考本文的结果。

(2) 本文提出的策略没有在进行实际运行的配电网中验证优化，仅仅使用软件中仿真求解。在以后的科研工作中，能够将该优化策略应用于工程实践。

(3) 本文没有将额外增加的投资计入优化目标内。还有，计算电动汽车充放电负荷时功率时，采用确定的功率，未来电动汽车多样化，需要进行调节充放电功率进行充放电优化。

参 考 文 献

- [1] 郑颖. 高渗透率电动汽车接入下的配电网静态稳定性分析及有序充电策略研究[D]. 华中科技大学, 2014.
- [2] 许晓慧, 徐石明. 电动汽车及充换电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [3] 刘振亚. 智能电网技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [4] Lorenzo T. Geometry definition and performance assessment of Tesla turbines for ORC[J]. Energy, 2020, 25(6): 211
- [5] 杨嘉睿. 电动汽车的研究现状与发展趋势[J]. 中国高新科技, 2020, 8(12): 114-115.
- [6] 郭敏, 张昊, 陈茜雯. 我国新能源汽车技术创新态势研究——基于国内 1988—2018 年专利数据的分析[J]. 河南科学, 2020, 38(01): 128-137.
- [7] 陈中, 黄学良. 电动汽车规模化发展所面临的挑战与机遇[J]. 电气工程学报, 2015, 10(04): 35-44.
- [8] 谢旭轩, 刘坚. 我国电动汽车发展面临障碍及政策建议[J]. 可再生能源, 2014, 36(8): 15-21.
- [9] 马立强. 我国新能源电动汽车产业成长对策研究及趋势预测[J]. 汽车维修与保养, 2020, 12(08): 89-92.
- [10] Ma K, Li R, Li F. Quantification of additional asset reinforcement cost from 3-phase imbalance[J]. IEEE Transactions on Power Systems. 2016, 31(4): 2885-2891.
- [11] 储婷, 丁哲, 吴善, 等. 配电网三相不平衡治理综述[J]. 电工电气, 2016, 10(10): 6-9.
- [12] 方恒福, 盛万兴, 王金丽, 等. 配电台区三相负荷不平衡实时在线治理方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2185-2193.
- [13] Gyugyi L, Otto R A, Putman T H. Principles and applications of static, thyristor controlled shunt compensators[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1978, 97(5): 1935-1945.
- [14] Guile A E. Reactive power control in electric systems[M]. Hoboken: Wiley, 1982.
- [15] 曹磊, 王蕊, 胡鹏飞. 低压配电网三相负荷不平衡解决方法研究[J]. 电器与能效管理技术, 2017(16): 44-51+56.
- [16] 赵参, 顾硕, 黄超, 等. 三相四线三电平静止无功补偿发生器在不平衡负荷下的新控制方法[J]. 电气技术, 2020, 21(02): 31-37.

- [17] 廖坤玉, 陶顺, 姚黎婷, 等. 不平衡负荷负序加权等效模型及其平衡化补偿方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5594-5603+5836.
- [18] 辛业春, 李国庆, 王朝斌. 无功和三相负荷不平衡的序分量法补偿控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(14): 72-78.
- [19] 王晖, 常鲜戎, 郑焕坤. 基于改进瞬时对称分量与三点算法的相量测量新算法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(19): 115-120.
- [20] 叶伟杰. 江西电网配电变压器三相不平衡综合治理措施研究[D]. 南昌大学, 2013.
- [21] Axsen J, Kurani K S. The early U.S. market for PHEVs: anticipating consumer awareness, recharge potential, design priorities and energy impacts[J]. Institute of Transportation Studies Working Paper, 2011, 13(8): 32.
- [22] Parks K, Denholm P, Markel T. Costs and emissions associated with plug-in hybrid electric vehicle charging in the XCEL energy colorado service territory[R]. National Renewable Energy Laboratory, 2012.
- [23] Shao S, Zhang T, Pipattanasomporn M, et al. Impact of TOU rates on distribution load shapes in a smart grid with PHEV penetration[C]//2010 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. New Orleans, LA, USA: IEEE, 2018: 1-6.
- [24] Gao Y, Wang C, Wang Z, et al. Research on time-of-use price applying to electric vehicles charging[C]//IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies. Tianjin, China: IEEE, 2012: 1-6.
- [25] Masoum A S, Deilami S, Moses P S, et al. Smart load management of plug-in electric vehicles in distribution and residential networks with charging stations for peak shaving and loss minimization considering voltage regulation[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2011, 5(8): 877-888.
- [26] Zhang P, Qian K, Zhou C, et al. A methodology for optimization of power systems demand due to electric vehicle charging load[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1628-1636.
- [27] Sundstrom O, Binding C. Flexible charging optimization for electric vehicles considering distribution grid constraints[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(1): 26-37.
- [28] Su S, Jiang J C, Wang W. An autonomous decentralized voltage control scheme in PEV charging devices on the distribution network-reactive power compensation for voltage decreases caused by household loads and charging devices[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2014, 24(3): 412-432.

- [29] Dong Q, Niyato D, Wang P, et al. The PHEV charging scheduling and power supply optimization for charging stations[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(2): 566-580.
- [30] Hoke A, Brissette A, Smith K, et al. Accounting for lithium ion battery degradation in electric vehicle charging optimization[J]. IEEE Journal of Emerging & Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(3): 691-700.
- [31] Singh M, Kar I, Kumar P. Influence of EV on grid power quality and optimizing the charging schedule to mitigate voltage imbalance and reduce power loss[C] // Power Electronics and Motion Control Conference. Ohrid, Macedonia: IEEE, 2016:T2 196-203.
- [32] Putrus G A, Suwanapongkarl P, JOHNSTON D, et al. Impact of electric vehicles on power distribution networks[C] // Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC09. Dearborn, MI, USA: IEEE, 2009: 827-831.
- [33] 王珂. 纯电动汽车动力电池特性及应用研究[D]. 武汉理工大学, 2011.
- [34] 王玲玲, 陈昕, 石宝强. 影响锂离子电池循环寿命的因素[J]. 电源技术, 2019, 43(10): 1737-1739.
- [35] 罗军, 田刚领, 张柳丽, 等. 钛酸锂体系锂离子电池综述[J]. 电源技术, 2019, 43(4): 693-695.
- [36] 李辉. 矿用安全监控系统隔爆兼本安型 UPS 电源状态管理系统的研究[J]. 同煤科技, 2018, 06(8): 14-16.
- [37] 王健. 电动汽车充电站对电力系统的谐波影响及谐波抑制方法研究[D]. 浙江工业大学, 2016.
- [38] 王梦蔚, 晏阳. 主动配电网中电动汽车充电站智能管理控制系统设计[J]. 电工电气, 2017, 07(9): 62-66.
- [39] 管弘. 新能源汽车市场发展预测研究[J]. 时代汽车, 2020, 12(5): 48-51.
- [40] 黄海丽, 周扬. 风电电动汽车协同利用对电网风电接纳能力的影响[J]. 山东电力技术, 2014, 03(8): 1-7+24.
- [41] 杜习超, 刘永民, 徐则诚, 等. 电动汽车随机负荷建模及对配电网节点电压分布的影响[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(6): 124-130.
- [42] 和敬涵, 谢毓毓, 叶豪东, 等. 电动汽车充电模式对主动配电网的影响[J]. 电力建设, 2015, 36(01): 97-102.
- [43] 陈良亮, 张浩, 倪峰, 等. 电动汽车能源供给设施建设现状与发展探讨[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 11-17.
- [44] Liu Y, Xu R, Chen T, et al. Investigation on the construction mode of the charging station and battery-swap station[C]//2011 International Conference on Electric

- Information and Control Engineering. Wuhan: IEEE Beijing Section ED Chapter, 2011: 5080-5081.
- [45] 陈鹏, 孟庆海, 赵彦锦. 基于蒙特卡洛法的电动汽车充电负荷计算[J]. 电气工程学报, 2016, 11(11): 40-46.
- [46] U.S. Department of transportation, federal highway administration. 2017 national household travel survey[EB]. <https://nhts.oml.gov>, 2017-12/2018-03.
- [47] 徐奥林. 基于出行者特性的出行行为研究[D]. 北京交通大学, 2014. 岳芳.
- [48] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2016.
- [49] 童方格. 考虑不平衡条件的配电网重构研究[D]. 湖南大学电气工程, 2019.
- [50] 张逸超. 家用电动汽车有序充电策略研究[D]. 山东大学, 2018.
- [51] 李星. 规模化电动汽车充电负荷对配电网的影响及优化控制研究[D]. 中国矿业大学, 2019.
- [52] GB T15543-2008, 电能质量三相电压不平衡[S].
- [53] 颜湘武, 恩日, 海日, 等. 典型住宅小区接入电动汽车的供电方式研究[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 910-917.
- [54] 康鹏, 郭伟, 黄伟钢, 等. 区域电网电能质量问题及治理关键技术综述[J]. 电测与仪表, 2020, 57(24): 1-12.
- [55] 蒋传东, 廉庆强. 农村低压电网三相负荷不平衡的即时调控[J]. 农村电工, 2016, 04(3): 36-37.
- [56] 孙敬安, 刘永辉, 李景玉, 等. YH-SVG 三相负荷不平衡自动调节装置[J]. 农村电气化, 2016, 01(5): 54.
- [57] 占恺峤, 胡泽春, 宋永华, 等. 考虑三相负荷平衡的电动汽车有序充电策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 201-207.
- [58] 俎云霄. 网络分析与综合[M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [59] Kempton W, Tomić J. Vehicle-to-grid power fundamentals: calculating capacity and net revenue[J]. Journal of Power Sources, 2005, 144(1): 268-279.
- [60] Alec N, Sven H. Vehicle to grid demonstration and evaluation program[C]. The 23rd International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exhibitor, 2007: 12-13.
- [61] Mets K, Verschueren T, De Turck F, et al. Exploiting V2G to optimize residential energy consumption with electrical vehicle (dis)charging[C]. Smart Grid Modeling and Simulation, 2011: 7-12.
- [62] Stroehle P, Becher S, Lamparter S, et al. The impact of charging strategies for electric vehicles on power distribution networks[C]. Energy Market, 2011: 51-56.

- [63] 邱晓明. 具有 V2G 功能的光伏并网系统研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [64] Kempton W, Letendre S. Electric vehicles as a new power source for electric utilities[J]. Transportation Research Part D, 1997, 2(3): 157-175.
- [65] 赵可为. 规模化电动汽车接入配电网典型问题的研究[D]. 华北电力大学, 2018.
- [66] 占恺峤, 宋永华, 胡泽春, 等. 以降损为目标的电动汽车有序充电优化[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 11-18.

附录 A IEEE33 节点配电系统三相算例数据

表 A1 IEEE33 节点配电系三相算例参数
Tab.A1 IEEE33 three-phase case parameters

支路	节点	节点	阻抗值		节点上负载大小		
			R/ Ω	X/ Ω	A 相	B 相	C 相
1	0	1	0.093	0.0469	31+18.6i	33.3+20i	35.0+21.3i
2	1	2	0.493	0.2511	28+11.7i	30+13.33i	32+15i
3	2	3	0.366	0.1864	40+26.7i	40+26.67i	40+26.67i
4	3	4	0.3811	0.1941	0	20+10i	16+10.33i
5	4	5	0.819	0.707	22+7.7i	20+6.67i	18+5.67i
6	5	6	0.1872	0.6188	60+36.7i	66.67+33.33i	73.33+30i
7	6	7	0.712	0.235	76+361i	66.62+33i	56.6+30i
8	7	8	1.03	0.74	20+5i	20+6.67i	20+8.33i
9	8	9	1.044	0.74	16+7.3i	20+6.67i	16.33+7.67i
10	9	10	0.1966	0.065	15+10i	15+10i	0
11	10	11	0.375	0.124	23.5+6.7i	20+11.7i	16.7+11.7i
12	11	12	1.468	1.155	18.3+13.3i	20+11.7i	22.67+10i
13	12	13	0.54	0.714	33+20.3i	40+26.7i	40+26.7i
14	13	14	0.591	0.526	0	20+3.3i	11.67+6.67i
15	14	15	0.746	0.55	20+6.7i	20+6.7i	20+6.7i
16	15	16	1.289	1.721	23+5i	20+6.7i	23.33+9.33i
17	16	17	0.37	0.576	26.7+16.3i	25+11i	23.3+10.7i
18	17	18	0.164	0.1565	26+13.3i	25+11i	20+13.33i
19	18	19	1.51	1.356	29.3+10.7i	25+11i	23.33+10.7i
20	19	20	0.41	0.48	29.3+10.7i	25+11i	23.33+10. 7i
21	20	21	0.7089	0.9373	29.3+11.67i	30+13.3i	32+15i
22	21	22	0.4512	0.3083	32.7+20i	30+16.6i	31.33+16.67i
23	22	23	0.91	0.71	70+33.3i	70+33.3i	63.3+26.7i
24	23	24	0.896	0.7011	140+70i	133.3+66.6i	133.33+66.67i
25	24	25	0.203	0.1034	18.3+6.65i	20+8.33i	23.33+10i
26	25	26	0.284	0.145	18.3+6.65i	20+8.33i	24+11.33i
27	26	27	1.059	0.9337	16+7.3i	20+6.67i	20+6.67i
28	27	28	0.8042	0.7006	33.3+20i	40+23.33i	40+23.33i
29	28	29	0.51	0.26	76.7+166i	66.7+200i	56.67+133 i
30	29	30	0.9744	0.963	46.7+20i	50+23.33i	60+26.67i
31	30	31	0.3105	0.3619	66.7+26.7i	70+33.33i	73.33+40i
32	31	32	0.341	0.5362	16.7+11.7i	20+13.33i	20+14i

攻读硕士学位期间科研项目及科研成果

发表论文

- [1] 冯万富, 刘姝, 董鹤楠, 等. 满足配电网平衡的电动汽车充放电控制策略研究[J]. 沈阳工程学院学报(已经录用, 尚未发表)。(本学位论文第四章)

参与科研项目

- [1] 辽宁省科技厅重点研发计划指导项目(2019JH8/10100064): 基于超短期状态信息预测的风力发电智能优化控制技术研究, 2019.10–2020.9, 负责人: 刘姝。

致 谢

两年半时间匆匆而过，马上就要毕业了，我的社会角色将从大学生切换到企业的一名职工。回头想一下这几年的时间，不光学到了知识，也收获了许多朋友。在此毕业之际，我由衷的向我的两位导师、身边的朋友，还有支持我的家人致谢。

首先，感谢我的导师刘姝副教授。刘老师花费了大量时间指导我完成了本论文，选题、开题阶段，刘老师帮我收集资料，提供了丰富的学习资源。在论文的撰写过程中，每当我遇到困惑，刘老师都能给我提供更好的思路和方法。本科专业课学习时我就认识了刘老师，我一直从刘老师身上感受到严谨的教学态度、优秀的做人品质、无私奉献的精神以及诚恳的待人方式。在此向我的导师表示深深的谢意！

然后，感谢我的企业导师董鹤楠老师。在研二实习阶段，在董老师工作单位实习，一直跟着董老师学习，我学到了许多校园内接触不到的东西，给我未来的工作埋下坚固的基石。董老师工作中的认真，热情开朗生活态度都给我留下了深刻的印象，在我论文的完成中提供许多见解，在此向董老师表示我的谢意。

其次，感谢我的研究生学习期间的同学们。无论是学习上，还是生活上他们都给予了我很大的帮助，我的研究生生活有他们更加丰富。

最后，感谢我的爸爸和妈妈。他们努力工作使我顺利完成学业。工作后我一定会加倍努力，为你们提供更美好的晚年生活。愿你们健康平安。

另外特别感谢本文的评阅老师和答辩委员会的老师，让我明确自身的不足。祝愿每位老师身体健康、工作顺利。

作者简介

姓名：冯万富

性别：男

出生年月：1996 年 04 月

民族：汉

籍贯：辽宁省营口市

研究方向：新能源发电及并网技术

简历：

2014 年 9 月-2018 年 6 月 沈阳工程学院 新能源学院 新能源科学与工程

2018 年 9 月-至今 沈阳工程学院 研究生部 电气工程



明德致知

精工博學

