

---

# 目录

第 1 章 背景.....	3
1.1 项目研究背景.....	3
1.1.1 可再生能源研究现状.....	3
1.1.2 微电网研究现状.....	4
1.1.3 电动汽车研究现状.....	6
1.2 金风智能微网.....	7
1.2.1 公司介绍.....	7
1.2.2 江苏大丰智能微电网项目.....	7
1.3 本报告研究内容.....	9
第 2 章 微电网系统结构及建模.....	10
2.1 系统结构.....	10
2.2 风电场出力模型建立.....	10
2.3 光伏阵列出力模型建立.....	12
2.4 集群电动汽车模型建立.....	14
2.5 本章小结.....	14
第 3 章 风电为主型风光储充微电网优化控制策略.....	15
3.1 集群电动汽车及储能系统的优化控制.....	15
3.2 电动汽车功率分配模型.....	16
3.3 本章小结.....	17
第 4 章 算例分析.....	18
4.1 系统配置及参数.....	18
4.2 仿真结果分析.....	18
4.3 本章小结.....	21
第 5 章 结论.....	22

---

# 第 1 章 背景

## 1.1 项目研究背景

### 1.1.1 可再生能源研究现状

在全球气候变暖、传统化石能源枯竭的大背景下，建立健全新的能源生产供应体系是当今国际社会所面临的重大挑战。推进低碳经济发展、控制温室气体排放，不仅是国际社会的共识，也是我国落实科学发展观，建设资源节约型社会，实现经济社会全面协调可持续发展的必然要求。可再生能源以其低能耗、低排放、可再生的特性成为促进低碳发展的重要途径。目前，我国正处于全面建成小康社会的关键时期和工业化、城镇化加快发展的重要阶段，能源需求还将持续增长，推动可再生能源的发展是我国优化能源结构、满足能源增长需求的必然选择。为了促进可再生能源健康、持续发展，我国将可再生能源列为战略新兴产业加以扶持和推动，并通过行政立法、可再生能源规划、财政税收补贴等手段积极鼓励、促进可再生能源的发展。目前，因为传统的化石燃料发电带来负面的环境影响，电力体制改革的争论焦点转向电力工业的环境问题。可再生能源发电技术虽然比燃煤发电昂贵，但是，它被认为是获得清洁环境、实现政府目标的一个很现实的替代品。在技术评价时，如果考虑燃煤和燃气机组的社会环境风险因素，可再生能源例如太阳能和风力发电无疑更具有竞争力。

风力发电是将风能转化成电能的一种发电技术，由于风力发电成本较低且几乎无污染，因此风力发电技术得到大规模发展，成为发展最快、最受欢迎的新能源发电技术之一。风力发电是目前新能源开发技术中最成熟、最具规模化商业开发前景的发电方式。随着全球风电规模持续扩大，中国的风电开发也进入了快速发展阶段。根据《风电发展“十二五”规划》，截止 2015 年，蒙西、甘肃、新疆等 9 个大型风电基地风电开发量规划达到 600~1300 万 kW。单个风电场容量通常约 5 万 kW，一般不超过 20 万 kW。与单个风电场相比，集中开发规模大于 100 万 kW 的风电场群出力特性呈现明显的差异性：1) 风电出力具有间歇性、波动性，风电场及风电群规模越大，其出力波动量对电网的冲击越

---

大。2) 由于地理分散效应, 随着风电场(群)规模增加, 其出力波动量与装机容量之比反而呈下降趋势。3) 由于风速变化的时空差异性, 风电场群出力的时空关系更为复杂。因此, 对于风电场群特别是大型风电基地出力特性及其时空关系的研究日益受到重视。风电场的风能资源状况评估是风力发电项目最基础的工作, 风能具有较强的随机性, 可通过风速概率分布来描述其统计特性。一般风速的概率分布为偏正态分布, 用于拟合风速分布的概率模型很多。研究表明, 双参数威布尔分布的形式简单, 又能较好地拟合实际风速分布, 适合用于对风速作统计描述, 在风能资源评估、风电场经济评价等方面被广泛应用。

光伏发电(技术是将太阳能转化为电能的技术), 其核心原理是依靠光生伏打效应, 在半导体器件表面产生电动势进而形成电流。光伏发电项目即是利用光伏发电技术, 通过光伏组件将太阳辐射能转换成电能的新型发电项目。我国幅员辽阔, 太阳能资源十分丰富, 尤其是西藏、新疆、青海等地区, 日照时间更长。光伏发电技术是利用半导体器件接受光照产生光伏效应的原理将太阳能直接转换成电能的发电方式, 其资源广泛、不浪费燃料、不受地域限制、环保绿色, 同时由于其由固态电子器件组成, 坚固耐用, 维修成本很低。但是太阳能受天气和时间影响较大, 且太阳能转换效率较低。目前应用的光伏发电系统一般指的是光伏阵列, 其既可以独立运行, 也可以并网运行, 输出功率从瓦级到兆瓦级。研究表明, 集中接入的光伏发电易受气象因素影响导致输出功率波动较大, 而可再生光伏发电系统由于地理位置的分散性, 输出功率较为平稳, 因此光伏发电将会在未来得到更为广泛的运用。

本项目的研究对落实国家电网发展规划、国家可再生能源规划、实施可再生能源重点发展领域、项目实施优先布局及制定相关政策具有重要的理论与应用价值, 具有广阔的应用前景, 可以带来巨大的经济效益和社会效益。

### 1.1.2 微电网研究现状

目前, 全球范围内进行规划、在建以及投入运行的微电网示范工程已超过400个, 辐射世界各个板块, 涵盖北美、欧洲、东亚、非洲、拉美等地区。预计2023年微电网产业覆盖到的市场规模将达到1550亿美元以上。

---

美国拥有全球最多的微电网示范工程，其数量超过 200 个，总数量为全球微电网数量的 50%，在世界微电网的研究和实践中居于领先地位。最早提出微电网概念的是美国权威机构电力可靠性技术解决方案联盟(Consortium for Electric Reliability Technology Solutions, CERTS)，CERTS 在对微电网概念描述的报告中详细介绍了微电网的主要思想以及关键性技术等问题，并引入了电力电子技术的控制方法，创建了特色的对等控制思想，具有代表性的工程有 2001 年威斯康星大学麦蒂逊分校的微电网示范工程，以及 2005 年北部电力微电网的第一示范工程等。

欧洲在 1998 年就开始对微电网开展系统的研究和开发。目前，欧盟在微电网方面的研究成果主要包括：分布式电源模型建立、基于代理的控制、孤岛互联等方面，并建设了一批微电网示范工程，例如希腊基斯诺斯岛微电网示范工程，以及英国埃格岛微电网示范工程等。

在亚洲，研究和建设微电网较早的国家是日本。由于日本是岛屿国家，所以建立的微电网形式主要是海岛孤立微电网，并且拥有全球最多的海岛孤立微电网。日本微电网发展的重要方向和特点是发展集成可再生能源的海岛微电网，进而替代成本高昂、污染严重的化石燃料的使用。

我国虽然在发展微电网方面起步较晚，但由于微电网对于解决我国电网规模大、可再生能源整合效率低的问题提供了重要的技术支持，所以近年来我国相继在这一领域投入了大量精力。“十二五”期间中国微电网的市场规模随着智能电网的建设平均增长率为 8%左右，并在 2015 年装机容量达到 1.7 万千瓦，市场投资规模约 31.8 亿元。随着“973”、“863”等国家科技项目的开始，更加大规模的推动了我国微电网核心技术的开发与研究。在“十三五”电网规划中表示，为了更加促进分布式能源的发展与利用，我国预计在 2020 年建设 100 个新能源示范城市、以及 200 个绿色能源示范县。许多高校以及科研机构陆续加入研究分布式发电以及微电网技术的行列，其中含风力发电、光伏发电、储能元件的多能源微电网系统的运行控制技术成为研究热点。我国现有的微电网示范工程包括边远地区、海岛地区以及部分城市地区，目前，我国已在西藏、青海、内蒙古、江苏、河北、浙江等省份建立了微电网工程。

---

### 1.1.3 电动汽车研究现状

目前，在国外电动汽车行业发展中，美国是全球最大的电动汽车市场，在2017年美国的新能源汽车的年销售量达到了20万辆，其中电动汽车占其53%。美国政府投资超过50亿元用于电动汽车部件及充电设备的开发、制造和应用，并鼓励消费者购买电动汽车，购买电动汽车用户可享受2500-7500美元补贴的优惠政策。法国的电动汽车市场已经成为目前欧洲最大的电动汽车市场，在2008年，法国开始实施基于二氧化碳排放量的财税奖惩政策，对二氧化碳排放量少的车辆给予补贴金鼓励，对二氧化碳排量多的车辆征税。法国政府投入5.9亿欧元，用于电动汽车的研发以及能源供给站的建设，并表示到2030年，全法国的充电桩数量将达到700万；到2040年，将禁止国内销售汽油和柴油等内燃机汽车，实现全民电动汽车。此前，挪威也宣布到2025年不再销售内燃汽车。早在2009年，英国就开始为电动汽车的大批量生产而铺路，英国政府将4000万英镑资金划拨给伦敦市，主要用于开发和建设可以照明又同时可以给电动汽车充电的街灯，此外，伦敦市为了推广电动汽车，斥资1300万英镑启动了“未来乡邻”计划，该计划目的是给电动汽车司机提供更多便利的服务，其中包括免费的停车位以及交通优先权等。英国计划到2020年，纯电动汽车和混合动力汽车数量达到120万辆和35万辆。日本政府早在2002年就提出，购买的政府用车必须为低公害车型，并要求在3年内将全部政府用车更换为低公害车型，日本在2012年，重新修订了关于新能源汽车的减免税制，对新电动汽车或首次年检前的电动汽车免征汽车税，从首次年检开始按50%征收汽车税，日本预计到2020年电动汽车数量将达到1350万辆。

电动汽车产业化在国内同样受到重点推进。由于电动汽车的“零污染”优点以及国家政策的支持，使得近年来我国新能源汽车数量增长迅猛，2016年我国新能源汽车共生产51.7万辆，销售50.7万辆，2017年增长了54.70%，产量达到790,470辆，其中纯电动汽车产量为663,686辆，同比增长58.68%，插电式混合动力汽车产量为126,784辆，同比增长36.72%。中国政府表示，到2025年每年售出700万辆插电式混合动力汽车或电动汽车，约占汽车总销量的20%。国际能源署发布的《2018全球电动汽车展望》报告中显示，到2017年为止，中国的电动汽车保有量达到了128万辆，是保有量最高的国家，并且根据数据

---

显示，中国电动汽车保有量增长速度也是全球第一，预计在 2020 年，中国电动汽车保有量将达到 500 万辆，其中包括 460 万辆乘用车、20 万辆客车和 20 万辆货车。

## 1.2 金风智能微网

### 1.2.1 公司介绍

金风科技是全球清洁能源和节能环保领域的领跑企业，致力于推动能源变革，让人人可负担、可靠、可持续的能源惠及全球，构建“可持续 更美好”的未来。金风科技深度聚焦风电、能源互联网、环保三大领域，以强大科研创新和最佳业务实践，将可再生能源的利用效率提升至新高度。作为在深交所、港交所两地上市的公司，金风科技多次入选“气候领袖企业”、“亚洲地区最受尊敬公司”，并荣登“全球最具创新能力企业 50 强”、“全球最环保企业 200 强”、“《财富》中国 500 强”等多个影响力榜单。

金风所参与的智能微网项目依据用能需求和属地清洁能源禀赋，科学规划、合理配置、集成各类分布式能源（风、光、储、燃等），实现多元化能源的优化配置、协同高校供给、智能调度，有效降低客户用能成本，提高终端能源利用率和清洁能源占比。金风智能微网项目能够因地制宜选择多种供能形式，实现多种能源的综合高效利用；可以充分利用属地能源禀赋，减少公网购电量，降低能源利用成本；能够实现可再生能源的高渗透率运行，提高企业绿色度；可以与电网相辅相成，提升供电可靠性和电能质量。

### 1.2.2 江苏大丰智能微电网项目

智能微网项目研究中涉及到多种核心技术。其中风光储规划设计技术根据客户需求因地制宜选择可再生能源类型、配比；冷热电三联供技术用于实现用户侧冷、热、电三种能源形式综合高效供给；储能系统技术以平滑新能源出力、提高用户侧电能质量及供电可靠性、参与调峰调频等；能量管理系统技术用于实现用户侧分布式光伏、风电、储能、可调负荷在并网和离网方式下的多目标优化调度，辅助电网动态调压调频；动态扰动控制系统技术用于解决可再生能

源高渗透率运行下可能出现的系统振荡、电压波动及电能质量等问题，保证供电系统稳定性的同时兼具储能变流器功能；暂态扰动控制系统技术能够准确平抑电力系统瞬时大扰动导致的频率、电压异常变化，实现毫秒级抑制电网电压频率瞬时波动，非计划并/离网无缝切换；故障保护系统能够实现 10kv 及以下微电网精准故障定位、故障类型判定、快速故障隔离，保障大电网及微电网内部安全可靠运行。

江苏大丰智能微电网项目位于江苏大丰，是国内首个商业化并网型工业区微网项目，规划容量达 2.196MW，包括 2.0MW 风机，196KW 光伏以及 200KW\*3h 储能系统。微网电力给江苏南车厂生产使用，南车年耗电 1100 万度左右，IRR(内部收益率)为 9.54%，投资回收期为 8.68 年。此项目的经济指标如下图 1-1 与图 1-2 所示。

#### I 洁净能源占总能源供应的37%

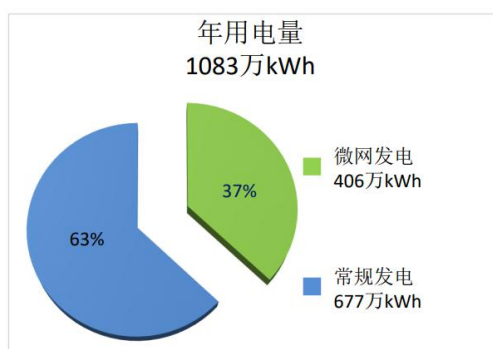


图 1-1 江苏大丰智能微电网项目经济指标 1

#### II 降低发电成本

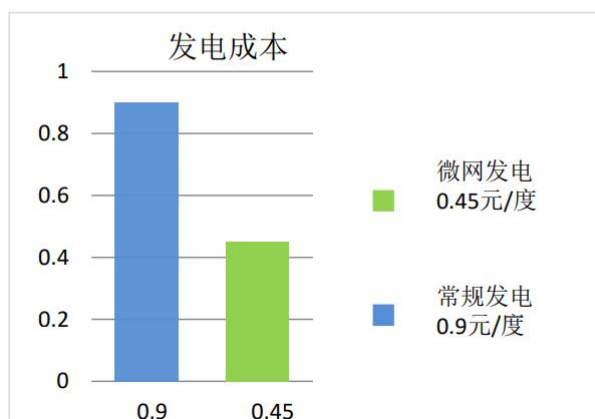


图 1-2 江苏大丰智能微电网项目经济指标 2

---

### 1.3 本报告研究内容

第一章主要阐述了当前可再生能源、微电网与新能源汽车的发展研究现状，详细介绍了金风科技公司及参与的微电网项目，包括金风科技公司的整体背景及发展历程。最后介绍了江苏大丰智能微电网项目所涵盖的智能微网项目核心技术、示范体系及经济指标。

第二章主要针对电动汽车数量的日益增长使得微电网内的不确定性不断增加这一现状以及可再生能源的有效利用，以金风科技公司的江苏大丰智能微电网项目系统为示范系统，将微电网与电网之间通过传输线进行连接，分别详细介绍了风电场出力模型、光伏阵列出力模型以及集群电动汽车模型的建立，为下文微电网的优化控制策略奠定基础。

第三章基于新能源的快速消纳与主微网之间交换功率的降低，建立了相应目标函数，使其满足约束条件，继而针对集群电动汽车及储能系统进行优化控制。针对单个电动汽车的实际功率分配，通过考虑其充电后的剩余电量，建立了电动汽车功率分配模型。

第四章通过仿真针对江苏大丰智能微电网项目中的集群电动汽车及储能的优化充放电问题进行研究，实现风电为主型风光储充微电网优化控制。在有效满足用户的充电需求的基础上，实现新能源的最大程度消纳以及最大化经济效益。

第五章对本项目所做的工作进行了总结。



## 第 2 章 微电网系统结构及建模

### 2.1 系统结构

本研究以金风科技公司参与的江苏大丰智能微电网项目系统，即包含风电、基本负荷以及集群电动汽车的微电网系统为背景展开研究，微电网与电网之间通过传输线进行连接，系统结构如图 2-1 所示。

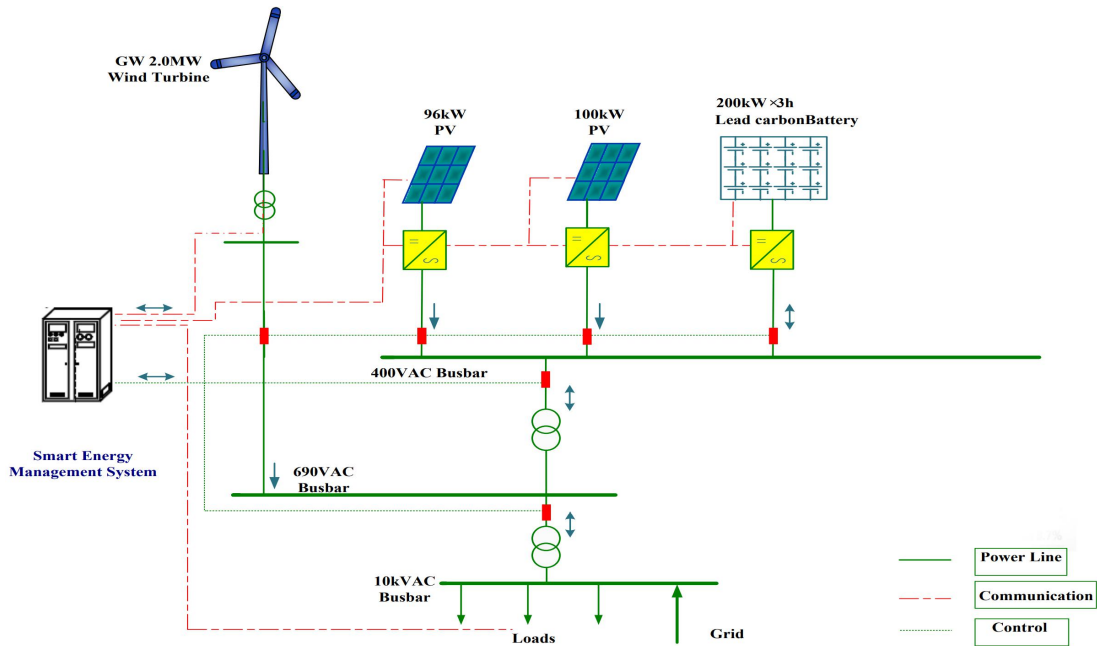


图 2-1 微电网系统结构及其与电网互联示意图

由图 2-1 可以看出，微电网与电网之间的能量可以通过传输线进行传递。微电网内部，风电向电网供电，基本家用负荷从电网中获取电能，而集群电动汽车既可通过充电从电网获取电能，也可通过放电向电网输送电能。因此微电网与电网之间的能量传输可以通过集群电动汽车的充放电与风电、基本负荷的协调进行最小化控制。

### 2.2 风电场出力模型建立

针对风电场出力的双参数威布尔分布是一种单峰函数族，其分布函数为

$$P(v \leq V) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

概率密度函数为

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2)$$

式中： $v$ 为实测风速，m/s； $V$ 为给定风速，m/s； $k$ 为形状参数； $c$ 为尺度参数，m/s。

只要给定了威布尔分布参数  $k$ ， $c$ ，风速的分布特征随即确定，风能的特征指标也随之确定。

给出风电机组输出功率的数学模型，将风电机组出力  $P$  由风速  $v$  直接算出

$$P_w = \begin{cases} 0 & V_w \leq V_{ci} \\ P_{wr} \frac{(V_w - V_{ci})^3}{(V_r - V_{ci})^3} & V_{ci} \leq V_w \leq V_r \\ P_r & V_r \leq V_w \leq V_{co} \\ 0 & V_w > V_{co} \end{cases} \quad (3)$$

$$P_{total} = N_w c_{tail} P_w$$

式中： $v_{ci}$ 为切入风速； $v_{co}$ 为切出风速； $v_r$ 为额定风速； $P_{wr}$ 为单台风电机组额定出力； $N_w$ 为风电场总装机台数； $c_{tail}$ 为尾流效应系数（考虑风电机组出力相关系数）。

风电机组的输出功率与风速之间的近似关系如下图 2-2 所示。

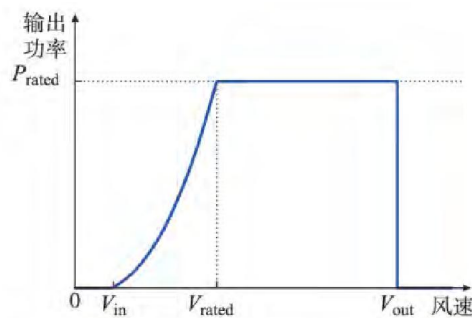


图 2-2 风速的输出功率曲线图

根据风机出力特性方程，即可得到任意风速下的发电机发电功率。在本项目仿真中，可采用典型日的历史风速数据得到风力发电机的出力。典型日的风速数据曲线如图 2-2，对应的风力发电机出力曲线如图 2-3、图 2-4 所示。

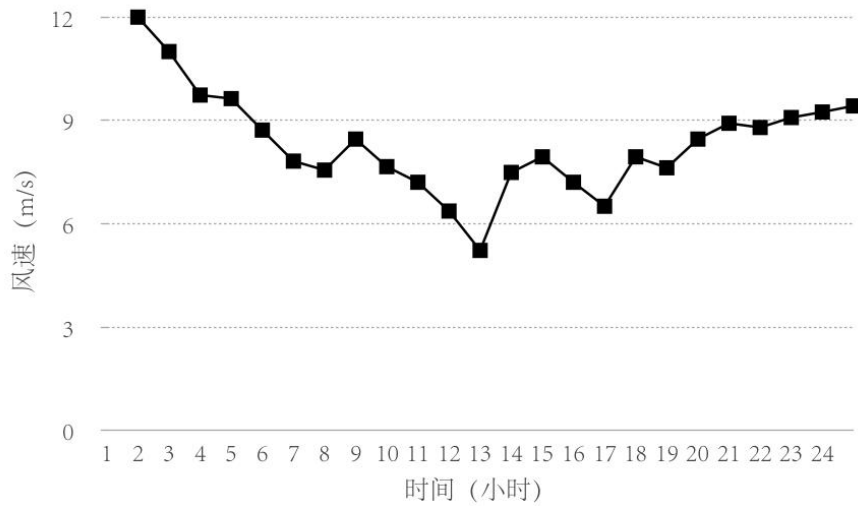


图 2-3 典型日下风速数据曲线

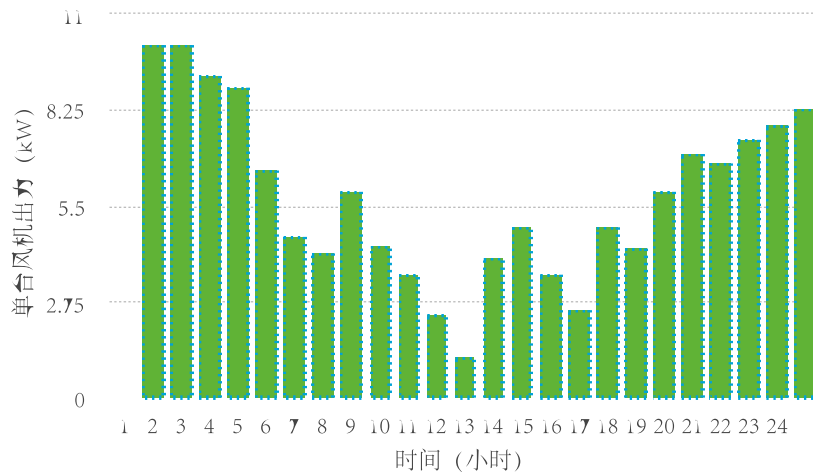


图 2-4 典型日下单台风机出力曲线

## 2.3 光伏阵列出力模型建立

据统计，在一段较短的时间内（一小时或几小时）光照强度可以近似作 Beta 分布，其概率密度函数如下

$$f(r) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{r}{r_{\max}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{r}{r_{\max}}\right)^{\beta-1} \quad (4)$$

式中， $r$  为这段时间内某时刻实际光照强度(W/m)； $r_{\max}$  为这段时间内最大光照强度(W/m)； $\alpha$  和  $\beta$  为 Beta 分布的形状参数； $\Gamma$  为 Gamma 函数。

光照强度 Beta 分布的形状参数可以由这段时间内光照强度的数学期望  $\mu$  和方差  $\delta$  计算得到，对应关系如下

$$\alpha = \mu \left[ \frac{\mu(1-\mu)}{\delta^2} - 1 \right] \quad (5)$$

$$\beta = (1-\mu) \left[ \frac{\mu(1-\mu)}{\delta^2} - 1 \right]$$

光伏阵列的输出功率主要与实时的光强以及温度有关。由于温度的影响比较小并且一般情况下系统中的光伏阵列均配备了最大功率跟踪（MPPT）装置，可以认为光伏的实时出力主要取决于光强。因此，本项目采用的光伏模型下光伏的出力和光强的关系如图 2-5 所示，由非线性区、线性区和恒定区三个部分组成，其数学表达形式见下式。

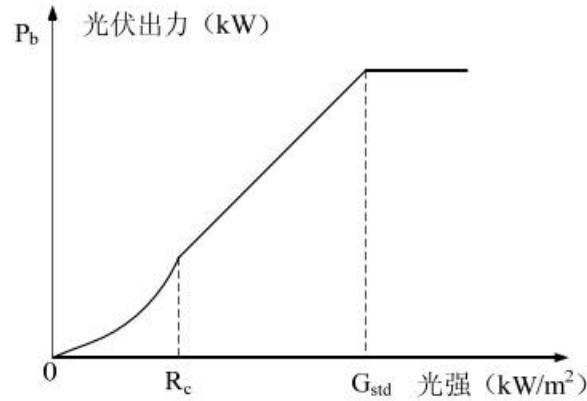


图 2-5 光伏出力模型

采用的光伏模型下光伏的出力和光强的关系由非线性区、线性区和恒定区三个部分组成，其数学表达形式如下

$$P_b = \begin{cases} P_{sn} (G_{bt}^2 / (G_{std} R_c)) & 0 \leq G_{bt} < R_c \\ P_{sn} (G_{bt} / G_{std}) & R_c \leq G_{bt} < G_{std} \\ P_{sn} & G_{bt} \geq G_{std} \end{cases} \quad (6)$$

其中， $p_b$  为光伏阵列的实际出力（kW）， $p_{sn}$  为光伏阵列的额定功率，表示在标准测试条件下单位光强所能产生的功率； $G_{std}$  为额定光照强度（kW/m<sup>2</sup>）； $R_c$  为某一特定强度的光强，在该光强下光伏出力与光强的关系开始由非线性变为线性； $G_{bt}$  为第  $t$  个小时的实时光强（kW/m<sup>2</sup>）

---

## 2.4 集群电动汽车模型建立

各电动汽车开始充电的时间及其当日的行驶距离满足一定的概率分布。可以认为，电动汽车开始充电的时间满足一种正态分布，其概率密度函数为

$$f_t = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(t - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2} \right] \quad (7)$$

式中： $\mu_1$ 为均值， $\sigma_1$ 为方差。

各电动汽车当日的行驶距离也满足一种对数正态分布，其概率密度函数为

$$f_d = \frac{1}{d\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(\ln d - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2} \right] \quad (8)$$

式中： $\mu_2$ 为均值， $\sigma_2$ 为方差。

由于各电动汽车刚接入微电网时的电量与其当日的行驶距离有关，因此各EV的初始电量可以表示为行驶距离  $d$  的函数

$$SOC = \frac{C_{EV} - P_0 d}{C_{EV}} \quad (9)$$

式中： $C_{EV}$ 为各电动汽车蓄电池的标称容量， $P_0$ 为各电动汽车行驶1公里消耗的电能。根据实际情况，设定各EV到达充电站时的SOC均大于0。

## 2.5 本章小结

由于电动汽车数量的日益增长使得微电网内的不确定性不断增加，针对这一现象以及可再生能源的有效利用，本章以江苏大丰智能微电网项目系统为示范系统，将微电网与电网之间通过传输线进行连接，分别详细介绍了风电场出力模型、光伏阵列出力模型以及集群电动汽车模型的建立，为后文微电网的优化控制策略奠定基础。

---

## 第 3 章 风电为主型风光储充微电网优化控制策略

### 3.1 集群电动汽车及储能系统的优化控制

为了最大程度的消纳风电、光伏等新能源，同时降低微电网功率波动对主网的影响，本研究通过控制集群电动汽车及储能系统的充放电过程得到其最优的充放电功率曲线。

#### (1) 目标函数

本研究的目标函数为微电网与主网之间交换功率的最小化，该目标函数可以表示为

$$\min f = \sum_{i=1}^H (P_1^i + P_2^i - C_i)^2 \quad (10)$$

式中： $P_1^i$  为集群电动汽车在第  $i$  时段的充电功率； $P_2^i$  为储能系统在第  $i$  时段的充电功率； $C_i$  为第  $i$  时段风能出力与基本负荷的差值； $H$  为一天中时段的个数。

#### (2) 约束条件

集群 EV 及储能系统的充放电功率约束可表示为

$$\begin{cases} -P_{rat} N_{EV}^i \leq P_1^i \leq P_{rat} N_{EV}^i, & 1 \leq i \leq H \\ -P_{ESS}^{rat} \leq P_2^i \leq P_{ESS}^{rat}, & 1 \leq i \leq H \end{cases} \quad (11)$$

式中： $N_{EV}^i$  为第  $i$  时刻已到达的 EV 数量； $P_{rat}$  为单个电动汽车的额定充放电功率； $P_{ESS}^{rat}$  为储能系统的额定充放电功率。

集群 EV 以及储能系统的 SOC 上下限约束可表示为

$$\begin{cases} 0.1 \leq SOC_1^i \leq 1, & 1 \leq i \leq H-1 \\ 0.9 \leq SOC_1^i \leq 1, & i = H \\ 0.1 \leq SOC_2^i \leq 1, & 1 \leq i \leq H \end{cases} \quad (12)$$

式中： $SOC_1^i$  为  $i$  时刻集群 EV 的 SOC 值； $SOC_2^i$  为  $i$  时刻储能系统的 SOC 值。

集群 EV 及储能系统的 SOC 随时间的递推式可以表示为

$$\begin{cases} SOC_1^{i+1} = \frac{SOC_1^i N_{EV}^i C_{EV} + \eta_1 P_1^i h + \sum_{k=1}^{New_1^{i+1}} SOC_k C_{EV}}{N_{EV}^{i+1} C_{EV}} \\ SOC_2^{i+1} = SOC_2^i + \frac{\eta_2 P_2^i h}{C_{ESS}} \end{cases} \quad (13)$$

式中： $New_1^{i+1}$  为第  $i$  个时间区间内新到达的 EV 的数量，且  $i=1,2,\dots,H-1$ ；如果  $P_1^i \geq 0$ ，则  $\eta_1 = \eta_c$ ，否则  $\eta_1 = \eta_d$ ；如果  $P_2^i \geq 0$ ，则  $\eta_2 = \eta_c$ ，否则  $\eta_2 = \eta_d$ 。

### 3.2 电动汽车功率分配模型

在集群电动汽车及储能系统的优化控制中，对于集群电动汽车的优化模型只是对集群电动汽车这一整体进行优化分析，只约束了集群电动汽车整体的充放电功率及 SOC，并未涉及到单个电动汽车的功率分配。因此需要对单个电动汽车的功率分配原则进行建模。

#### (1) 目标函数

为使得实际各 EV 的充放电功率之和与集群电动汽车充放电功率优化结果有着最大的匹配度，该目标函数可以表示为

$$\min f = \left| \sum_{k=1}^{N_{EV}^i} P_{EV}^k - P_1^i \right| \quad (14)$$

式中： $P_{EV}^k$  为第  $k$  辆 EV 的充放电功率。

#### (2) 约束条件

各 EV 的充放电功率约束可以表示为

$$-P_{rat} \leq P_{EV}^k \leq P_{rat}, \quad k=1,2,\dots,N_{EV}^i \quad (15)$$

滚动时域最后一个时段前各 EV 的 SOC 上下限约束可表示为

$$0.1 \leq SOC_{EV}^k \leq 1, \quad k=1,2,\dots,N_{EV}^i \quad (16)$$

式中： $SOC_{EV}^k$  为第  $k$  辆 EV 的 SOC 值。

滚动时域最后一个时段各 EV 的 SOC 上下限约束可表示为

$$0.9 \leq SOC_{EV}^k \leq 1, \quad k=1,2,\dots,N_{EV}^i \quad (17)$$

微电网内各 EV 的 SOC 随时间的递推式可以表示为

---

$$SOC_{EV,i+1}^k = SOC_{EV,i}^k + \frac{\eta P_{EV}^k h}{C_{EV}} \quad (18)$$

式中： $SOC_{EV,i}^k$  为第  $k$  辆 EV 在  $i$  时段初的 SOC 值， $i=1,2,\dots,H-1,k=1,2,\dots,N_{EV}^i$ 。

各 EV 充放电功率的分配情况由其充电后的剩余电量来决定，具体的优先充放电原则为：当集群 EV 处于充电状态时，电量低的 EV 优先充电；当集群 EV 处于放电状态时，电量高的 EV 优先放电。

### 3.3 本章小结

本章基于新能源的快速消纳与主微网之间交换功率的降低，建立相应目标函数，使其满足约束条件，继而针对集群电动汽车及储能系统进行优化控制。然后针对单个电动汽车，由其充电后的剩余电量决定充放电顺序进行功率分配，建立了电动汽车功率分配模型。



## 第 4 章 算例分析

所建立的集群电动汽车及储能系统的优化控制模型及电动汽车功率分配模型本质上是线性规划问题，因此算例通过在 MATLAB 中通过调用 CPLEX 进行优化求解。

### 4.1 系统配置及参数

本研究针对江苏大丰智能微电网，其中包括 2MW 的风机，196kW 光伏以及 200kW\*3h 储能系统，基本负荷以及 160 辆电动汽车。本微电网系统中需要用到的具体参数值如表 4-1 所示。

表 4-1 仿真中各 EV 参数设置

参数	$C_{EV}/\text{kWh}$	$P_0/(\text{kWh}/\text{km})$	$P_{rat}/\text{kW}$	$C_{ESS}/\text{kWh}$
取值	57	0.195	7	600
参数	$P_{ESS}^{rat}/\text{kW}$	$\eta_c$	$\eta_d$	$h/\text{min}$
取值	200	0.95	1.05	10
参数	$H$	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\mu_1$
取值	144	3.5	1.18	68.7
参数	$\mu_2$	$SOC_2^1$	/	/
取值	19.8	0.5	/	/

### 4.2 仿真结果分析

由于本报告主要研究江苏大丰智能微电网项目中集群电动汽车及储能系统的充放电控制策略，其中涉及到风电、光伏、居民负荷、电动汽车等多种元素。根据当地的风电及光伏数据及居民负荷数据，选取某日 06:00 至次日 6:00 共计 24 小时的数据绘制如图 4-1 所示曲线。研究将整个时域平均分成 144 个时段，每时段为 10 分钟。另外，根据电动汽车的数量累积到达数据，绘制出各时段到达的 EV 数量如图 4-2 所示。

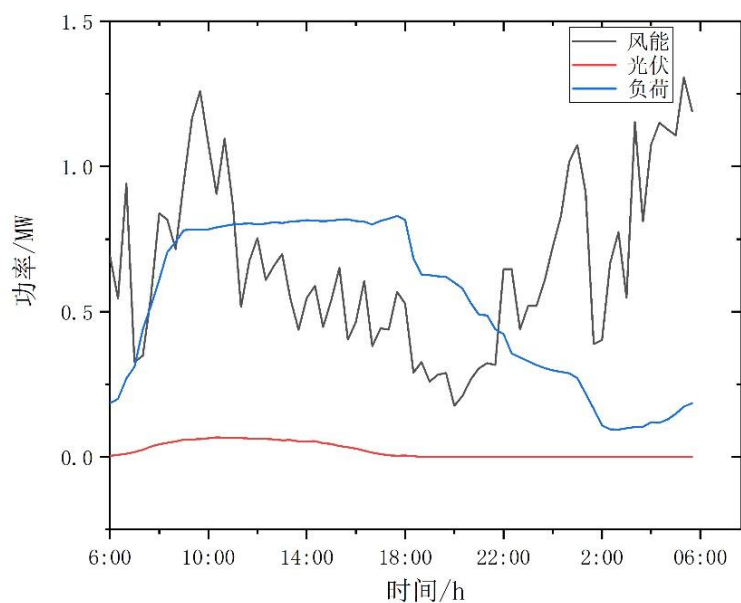


图 4-1 风能、光伏与基本负荷功率曲线图

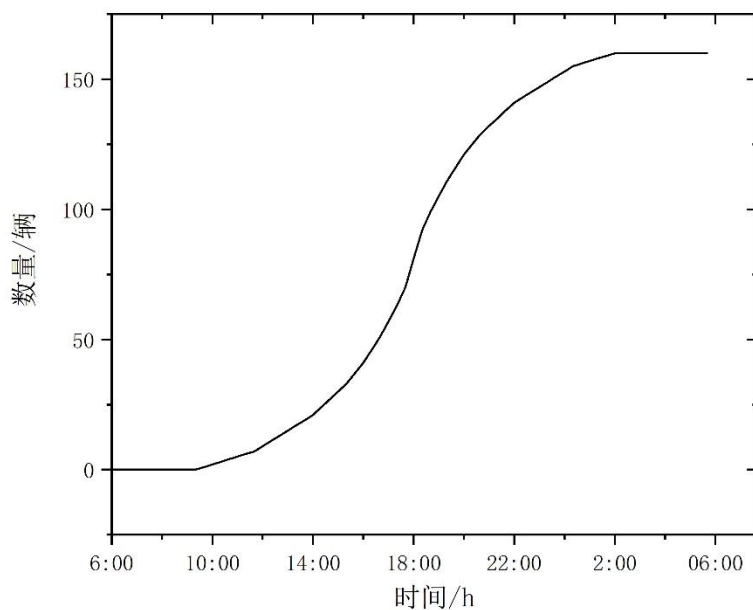


图 4-2 各时段到达的 EV 数量采样结果

本研究将对电动汽车无序充电及所提集群电动汽车及储能系统的优化控制结果进行对比，以说明本研究所提策略的有效性。图 4-3 展示了风能与基本负荷的差值曲线，以及集群电动汽车无序充电的功率曲线。无序充电即当 EV 刚接入微电网时便开始以额定功率充电，直到充满为止。在 14:00 前充电功率几乎稳定 0.6MW 附近，在其后迅速下降，并于次日 2:00 后几乎降为 0。由图 4-3

可以看出，两条曲线的变化趋势完全不同。如图中 22:00 后风能光伏与负荷之差增加，但此时集群 EV 的充电功率仍减小且接近 0，导致风光无法被消纳。由以上分析可知，无序充电是一种效果较差的充放电策略，因此需要对其进行优化改进。

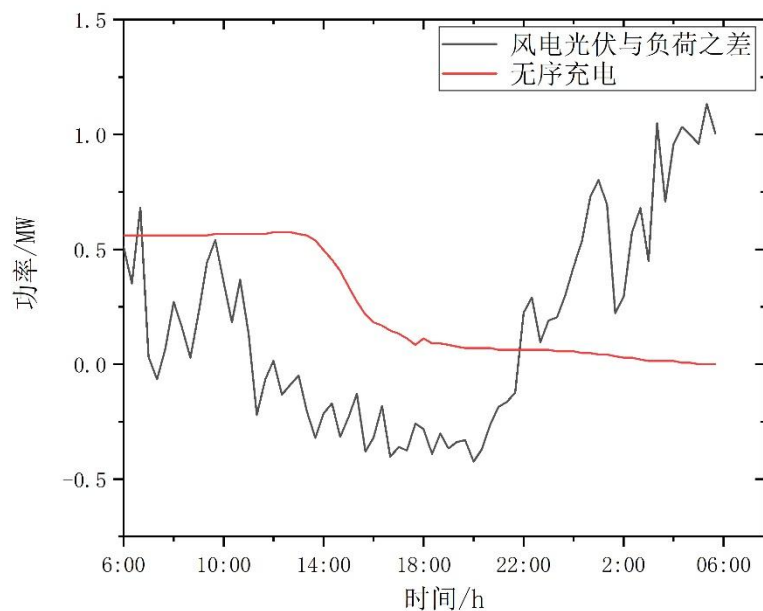


图 4-3 风能、光伏与基本负荷的差值曲线及无序充电的功率曲线对比图

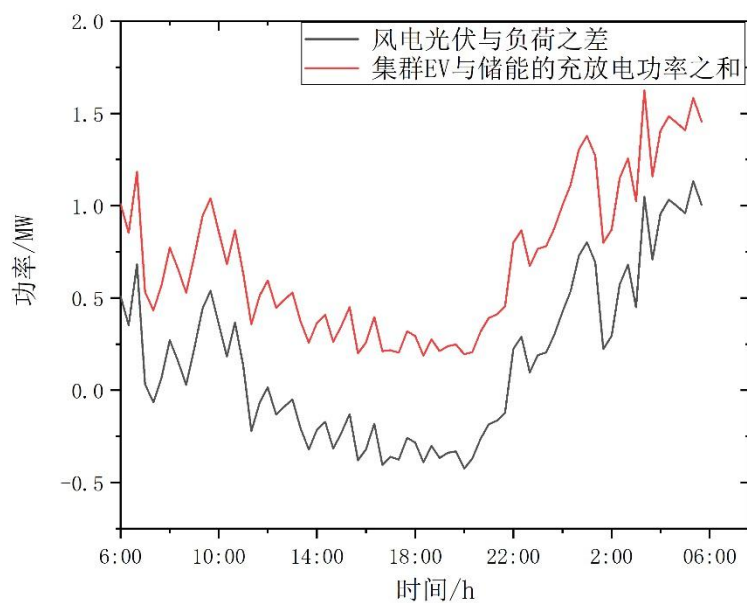


图 4-4 考虑集群电动汽车及储能系统的优化控制的优化结果

---

图 4-4 给出了集群 EV 与储能系统充放电功率之和曲线。从图中可以看出，充放电功率曲线与风光与负荷之差曲线基本平行。这是由于在 6:00—9:00 无 EV 到达，此时给储能充电，而在 9:00 后由于接入电动汽车，风电及光伏对其进行充电，同时储能不断对其放电。从曲线结果上可以看到，集群电动汽车及储能系统的充电功率始终位于风电光伏发电功率之上，说明其对微电网内的新能源实现了完全的消纳。另外，在消纳风光的同时充分利用了电动汽车及储能系统的充放电特性，从而使得其与电网交换功率最少。在本研究中，储能系统的初始 SOC 设置为 0.5，在 9:00 前增加，在 9:00 后不断减少，最终降低到接近最低 SOC 值，即 0.1；集群 EV 的 SOC 由于始终充电，将不断上升并接近于 1。

由以上仿真分析可以发现，本研究所提出的充电策略无论在新能源的消纳还是对于充放电功率的调节效果上均较无序充电效果更优，可以更适用于风电为主型风光储充微电网的实际情况。

### 4.3 本章小结

本章对所提出的风电为主型风光储充微电网优化控制策略进行实例验证。基于江苏大丰智能微电网数据，在有效满足电动汽车用户的充电需求的基础上，通过调节电动汽车及储能系统的充放电功率，实现新能源的最大程度消纳以及最大化经济效益。

---

## 第5章 结论

本项目按照“微电网新能源汽车与可再生能源背景调研-微电网新能源汽车与可再生能源融合的多种关键影响因素主导的模型建立-风电为主型风光储充微电网优化控制策略研究-微风电为主型风光储充微电网优化控制策略实证研究”的主线，得到了一系列的结论。

针对微电网的实际情况和可再生能源发展现状选择合适的融合方案对新能源汽车研究具有重要的参考意义。本文以金风科技公司的江苏大丰智能微电网项目系统为示范系统，将可再生能源的出力特性作为主要的因素，建立了风速概率密度函数，继而建立了风电机组功率曲线模型；分析了光伏发电技术对可再生能源利用的影响，建立了光照强度概率密度函数，继而建立了光伏阵列功率曲线模型；以电动汽车刚接入微电网时的电量与其当日的行驶距离之间的函数关系，建立了电动汽车初始电量与行驶距离之间的概率密度模型，为后面微电网的优化控制策略奠定基础。基于新能源的快速消纳与主微网之间交换功率的降低，建立了相应目标函数，使其满足约束条件，继而针对集群电动汽车及储能系统进行优化控制。然后针对单个电动汽车，由其充电后的剩余电量进行功率分配，建立了电动汽车功率分配模型。最后通过仿真江苏大丰智能微电网项目中的集群电动汽车及储能系统的充放电问题进行研究。这一策略考虑了新能源的消纳及微电网与主网间的交换功率的最小化，有效的满足了用户的充电需求，符合实际情况。

本项目研究内容广泛，提出了针对微电网新能源汽车与可再生能源融合研究技术的诸多方案，提出了风电为主型风光储充微电网优化控制策略，并在算例中得到了验证效果，对于未来的课题研究具有一定的指导意义。