

天津大学

本科生毕业论文



题目：考虑多场景全周期的光伏接入配电网适应性规划方法

学 院 求是学部

专 业 电气工程及其自动化

年 级 2018 级

姓 名 樊东来

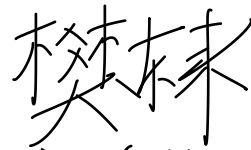
学 号 3018208174

指导教师 王守相

独创性声明

本人声明：所呈交的毕业设计（论文），是本人在指导教师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本毕业设计（论文）中不包含任何他人已经发表或撰写过的研究成果。对本毕业设计（论文）所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在论文中作了明确的说明。本毕业设计（论文）原创性声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：



2022年 6 月 12 日

本人声明：本毕业设计（论文）是本人指导学生完成的
研究成果，已经审阅过论文的全部内容。

论文指导教师签名：

年 月 日

摘 要

在配电网分布式光伏渗透率不断提升的背景下,本文对配电网电压和潮流越限风险及光伏并网的规划方法进行了研究。首先建立了配电网风险评估指标对电压和潮流越限风险进行评估,其次,通过主成分分析(PCA)降维聚类的方法将全年划分为16种典型光伏出力日场景。接下来,采用基于密度峰值的快速聚类算法(CFSFDP)将配电网划分为5个区域并在每个分区内选择分布式光伏的安装节点。在此基础上,考虑光伏从初始安装到投入使用再到回收的全生命周期,选择年平均净收益、平均有功网损、电压和潮流越限风险等指标构成目标函数,建立了光伏并网的多目标适应性规划模型,通过改进的自适应非支配排序遗传算法-II(NSGA-II)求解,实现了含分布式光伏配电网多场景全周期地适应性规划。最后,基于MATLAB仿真平台,对IEEE 33节点配电系统算例进行分析,将节点电压和支路潮流越限风险转化为自适应惩罚成本,结果表明,考虑多场景全周期的分布式光伏的接入可以提升系统经济效益,降低配电网平均有功网损,降低电压和潮流越限的风险,提升了配电网运行的可靠性。

关键词: 配电网; 分布式光伏; 多场景; 全周期; 适应性规划; 风险评估

ABSTRACT

Under the background of the large-scale integration of distributed photovoltaics into the distribution network, this thesis conducts an in-depth study on the over-limit risks and the adaptive planning of distributed photovoltaics in the distribution network. First, considering the risks of voltage and power flow, risk assessment indicators of the distribution network are established. Second, PCA clustering method is used to divide the whole year into 16 typical daily scenarios of photovoltaic output. Besides, CFSFDP algorithm is used to divide the distribution network into 5 areas and select the installation location of distributed photovoltaics within each division. On this basis, comprehensively considering the reliability of the distribution network and the economic benefits of photovoltaic operators, transforming the over-limit risks of voltage and power flow into adaptive penalty costs, a multi-objective planning model with the largest annual profit and the smallest active network loss is established. Solved by improved adaptive NSGA-II algorithm, the model realizes adaptive planning of distributed photovoltaics with multi-scenarios and full-cycle. Finally, based on MATLAB, an example of IEEE 33 node distribution network is analyzed. The results show that distributed photovoltaic access considering multi-scenarios and full-cycle can improve the economy of the system, reduce the average active network loss, the over-limit risks of node voltage and branch power flow and improve the reliability of the distribution network.

KEY WORDS: Distribution network; Distributed photovoltaics; Multi-scenarios; Full-cycle; Adaptive planning; Risk assessment

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景和意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 分布式电源接入配电网的风险评估研究.....	2
1.2.2 含分布式电源的配电网规划模型研究.....	3
1.2.3 配电网规划方法的研究.....	3
1.3 本文主要工作.....	4
第二章 配电网风险的定义与评估.....	6
2.1 配电网风险的定义.....	6
2.2 风险的求取方法.....	6
2.2.1 解析法.....	6
2.2.2 模拟法.....	7
2.3 配电网风险评估指标.....	8
2.3.1 节点电压越限风险的评估.....	9
2.3.2 支路潮流越限风险的评估.....	10
2.4 本章小结.....	11
第三章 场景划分及配电网分区.....	12
3.1 日场景划分.....	12
3.1.1 PCA 降维聚类.....	12
3.1.2 负荷-时间曲线.....	13
3.1.3 光伏出力-时间曲线.....	13
3.2 配电网分区调控策略.....	15
3.2.1 节点电气距离.....	15
3.2.2 CFSFDP 算法.....	16
3.2.3 配电网分区调控策略.....	16
3.2.4 算例分析.....	17
3.3 本章小结.....	20

第四章 考虑多场景全周期的光伏接入配电网.....	21
4.1 分布式光伏规划目标函数.....	21
4.2 约束条件.....	23
4.2.1 光伏安装容量自适应约束.....	23
4.2.2 配电网运行约束.....	23
4.3 自适应规划算法.....	24
4.3.1 快速非支配排序遗传算法.....	24
4.3.2 改进的自适应遗传算法.....	27
4.4 算例分析.....	29
4.5 本章小结.....	31
第五章 总结与展望.....	33
5.1 总结.....	33
5.2 未来展望.....	34
参考文献.....	35
致 谢.....	38

第一章 绪论

1.1 研究背景和意义

能源是人类社会进步的基础，在生产生活中发挥着重要作用，其深刻影响着国际社会的稳定发展^[1]。随着工业化进程的推进，人们对能源的需求量日益提升，能源短缺现象愈发严重，加之传统能源消耗带来的环境污染等问题，各国政府都更加重视可再生清洁能源的发展。随着“碳达峰”、“碳中和”等战略目标的提出，我国政府积极推动能源产业革命，大力倡导光伏、风电等可再生能源的发展。其中，光伏发电利用了丰富的太阳能资源，具有安全可靠、绿色低碳和节能环保等突出优势，获得了全世界各国的广泛关注。

在各项政策的激励下，近年来我国光伏产业迅速发展^[2]。2021 年底我国累计光伏装机容量达 3.06 亿千瓦，连续七年位排名全球首位。作为光伏并网发电的利用方式之一，目前大量分布式光伏被接入低压配电网，为电网末端负荷提供功率和电压保证^[3-4]。

分布式光伏的出力受季节和天气等因素的影响具有波动性，并网后会改变配电网的拓扑结构和潮流特性^[5]，同时也会对继电保护、系统调度等产生影响^[6-7]。此外，分布式光伏的接入也会影响配电网的供电可靠性，一方面分布式光伏通常就地安装，距离用户侧较近，一旦光伏设备出现故障，用户的用电质量易受到严重影响；另一方面，分布式光伏出力的波动性和随机性以及配电设施的多元化和复杂化加剧了配电网运行的不确定性，容易发生电压和潮流越限风险，影响电力系统的安全稳定运行。因此，为了保证含分布式光伏的配电网的运行可靠性，同时提升配电网的适应性规划能力，需要对光伏并网的运行风险进行评估。

分布式光伏的布局和装机容量会影响到配电网的运行^[8]。合理的分布式光伏接入配电网的适应性规划方法可以提升电网整体的可靠性和经济性，反之可能对配电网的安全产生巨大影响，造成社会经济的严重损失。因此，本文针对光伏并网的研究现状，在保证配电网电压和潮流越限风险尽可能小的基础上对分布式光伏的接入位置和安装容量进行规划，以保证配电网安全可靠供电，提升系统整体的经济性和适应性。

综合以上论述，本课题以分布式光伏并网为研究切入点。首先建立综合的风险评估指标对含分布式光伏配电网的电压和潮流越限风险进行评估。接下来，考虑光伏并网的多场景和全周期性，对光伏接入位置和安装容量进行规划，建立一

种综合考虑配电网经济效益和运行电能质量的多目标自适应规划模型,在保证含分布式光伏配电网安全可靠运行的基础上提升配电网光伏接纳能力分析的准确性和适应性,充分发挥光伏并网的经济和环境效益,对能源的发展和社会的进步具有重大意义。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 分布式电源接入配电网的风险评估研究

近年来,有关分布式光伏并网的风险评估研究成果较为丰富,配电网的风险评估体系逐步建立,各国陆续开展分布式光伏并网风险的相关研究。配电网运行过程中不确定性因素较多,节点电压、支路潮流等越限风险均可能对配电网的安全稳定运行造成严重影响。部分学者提出了特高压骨干网架理论^[9]来评估配电网运行风险,在配电网自动化和智能化程度不断提升的背景下,该理论为电网风险评估奠定了基础。在分布式光伏快速发展的情况下,各国学者综合考虑不同的风险因素建立风险评估指标来评估配电网的运行风险,并据此构建了风险评估的结构框架^[10-11]。

目前,学者们针对配电网所采用的评估方法主要是指风险评估^[12]。风险评估是指对配电网运行过程中可能面临的风险进行量化,通过风险发生的概率和严重度指标对风险进行描述。该方法是对概率评估方法的深入发展,能够提升分布式光伏规划的适应性,对配电网的安全运行十分关键。风险评估方法主要包括了模拟法、解析法和混合法^[13-14]。模拟法通常指蒙特卡洛模拟法^[15-16]。该方法考虑了配电网负荷和元件的概率分布,并结合天气情况,随机选择参数,进而对随机生成的系统进行状态分析,有效地提升了分布式光伏规划的可靠性和适应性。解析法是根据系统的组成关系建立模型并通过数学表达式对风险因素进行计算^[17]。

学者们常用风险发生的概率和严重度两个指标来描述风险并计算电网的风险程度。文献[18]以光伏安装节点和容量为研究对象,通过电压和潮流越限两个指标来评估配电网的运行风险。文献[19-20]建立了一种风险评估模型主要针对风电出力的随机性和负荷的波动性问题进行改进。此外,学者们还运用最优潮流模型、半不变量指标等来量化分析配电网运行过程的风险。

综合以上讨论,配电网风险评估的领域已取得了一定的研究成果,但目前尚有的研究大多是在探讨配电网故障对电网安全和经济效益的影响,针对配电网运行过程电压和潮流越限风险的研究尚未形成体系。因此,在分布式光伏大规模并网后,需要建立一套科学合理的评估体系对配电网的电压和潮流越限风险进行评估,以提升光伏并网规划的可靠性和适应性。

1.2.2 含分布式电源的配电网规划模型研究

传统的配电网运行规划通常是考虑配电网运行的经济性和可靠性,很少对配电网光伏接纳能力的适应性进行分析。相比于传统的配电网运行规划,含分布式光伏电源的配电网在规划时要考虑更多的因素。首先,就配电网运行本身而言,要考虑电压越限风险、潮流越限风险和电能质量影响等,同时还要结合经济性指标,考虑负荷调度的需求,将运行控制策略与规划方法结合起来以求获得最大的经济效益。此外,分布式光伏大规模接入配电网后,为减小对配电系统的冲击,还应该将光伏的出力预测考虑进规划中。

目前,各国学者在分布式光伏并网规划领域已经开展了相关研究。其中,优化重组是分布式光伏接入配电网规划的一种常用方法^[21-23]。该方法是以规划整体方案的经济效益最佳、配电网有功网损最小等经济性指标以及配电网运行风险最低等运行指标为目标函数进行规划,对分布式电源容量等参数进行优化,最终使配电网安全稳定运行的同时获得最大的经济效益。文献[24]研究了多个运行场景。作者以年平均有功网损最小为目标函数,综合考虑了分布式电源可能存在的运行状态及其相应的概率,考虑配电网多场景运行情况下建立了光伏出力概率模型,提升了分布式光伏规划的适应性。文献[25]以分布式光伏装机容量最大为目标,以电能质量为约束条件,通过遗传算法完成规划。在规划过程中,作者引入各项电能指标,较为全面地考虑了分布式光伏并网对电能质量的影响,使规划结果更加可靠合理。文献[26]以电压和潮流越限作为规划的约束条件。作者综合考虑了光伏出力的波动性和随机性及负荷需求的不确定性,力求使光伏并网的经济效益最佳,并通过遗传算法对优化模型求解,但文献中缺少对光伏并网造成的配电网安全及电能质量等方面的影响的深入探究。

综合上述分析,接入分布式电源后配电网的安全运行及供电可靠性将会受到影响,此外分布式电源出力的波动性和负荷的不确定性会加重这一影响,使电网产生越限风险从而影响配电网的电能质量。因此,在现有文献的研究基础之上,还需要对分布式电源的安装位置和接入容量进行优化,以提升配电网整体规划的可靠性及适应性。

1.2.3 配电网规划方法的研究

在现有的研究成果中,分布式光伏并网规划的求解方法可以分为传统算法和智能算法。光伏并网规划问题是求解非线性优化模型,通常模型维数高,形式复杂,因此采用传统算法很难求解。目前配电网规划大多采用智能算法,包括了遗传算法和粒子群算法等^[27-28]。其中,粒子群算法收敛速度快,缩短了迭代时间,

但容易陷入局部最优状态导致寻优结果变差。遗传算法将配电网节点位置转化为染色体中二进制信息,可以实现光伏安装节点的规划,且准确度较高,但遗传算法迭代过程复杂,收敛速度慢,对于大型的配电网通常需要花费较长的时间求解。

文献[29]的光伏规划过程中采用了粒子群算法。作者以节点电压、支路电流、光伏接入的容量等作为约束条件,以配电网运行的经济效益最优为目标函数进行规划,将最终的运行结果与通过传统的粒子群算法的求解结果进行比较。文献[30]得到了粒子群算法和原对偶内点法结合的新算法。借助改进的粒子群算法,作者对光伏安装容量进行优化求解,运行结果表明算法具有较高的收敛速度和收敛精度。但作者在规划时仅考虑了光伏的安装容量,没有优化光伏的安装位置。文献[31]对传统的遗传算法改进后用于光伏规划问题的求解。该方法对每代种群进行自适应选择,通过减小种群优秀个体的交叉和变异概率的方式来降低优秀个体被淘汰的概率。作者基于自适应进化的思想,通过对传统的遗传算法进行改进,可以加快传统遗传算法的迭代寻优速度,提升求解效率。

综上所述,遗传算法和粒子群算法在解决分布式电源并网规划问题时有各自的优缺点。遗传算法全局搜索能力突出,能过获得较好的优化结果,但通常求解时间较长;粒子群算法收敛速度快,缩短了迭代时间,但容易陷入局部最优状态导致寻优结果变差。因此,若能参考两种算法的优点并将其结合起来形成一种更优异的算法,可以显著提升配电网规划的效率。

基于上述梳理,分布式光伏并网研究已经取得了一定的研究成果。现有研究表明,分布式光伏接入后会对配电网的潮流状态及运行稳定性产生较大影响,因此需要对光伏的接入位置、安装容量等进行规划。但目前的配电网规划算法尚不能保证求解结果成熟收敛,规划模型需要进一步完善,实现含分布式光伏的配电网多场景全周期地最优化运行,以提升配电网光伏接纳的能力。

1.3 本文主要工作

在各地分布式光伏渗透率逐年提升的背景下,本文对配电网的运行越限风险及分布式光伏并网的规划方法开展了研究。本文综合考虑了配电网自身运行的可靠性及分布式光伏接入的经济性及适应性,建立了以光伏年均收益和配电网平均有功网损为目标函数、以节点电压和支路潮流偏差为约束条件的分布式光伏并网自适应规划模型,最终得到了考虑多场景和全周期的分布式光伏并网的适应性规划方法。本文研究工作的具体开展情况如下:

(1) 分析了分布式光伏并网的研究背景及意义,在此基础上梳理了国内外学者对配电网规划及光伏并网的研究成果,并提出了本文的主要工作和研究内容。

(2) 介绍了电力系统风险的定义及配电网风险的求取方法。基于节点电压和支路潮流两个维度分析配电网风险发生的概率及其严重程度,建立分布式光伏并网规划的风险评估体系。

(3) 考虑到分布式光伏接入配电网后其出力情况受季节和天气等因素的影响具有波动性和随机性,同时针对负荷需求的不确定性等问题,通过聚类算法将全年划分为不同的典型日场景进行分析。为了确定分布式光伏的安装节点以及实现配电网的分区调节策略,本文根据节点电气距离、综合电压灵敏度等指标对配电网进行分区。

(4) 为了保证配电网安全可靠运行,实现分布式光伏并网的最大经济效益,同时提升配电网光伏接纳能力的适应性,在前文的基础上,建立分布式光伏并网的多目标自适应规划模型,并通过相关算法求解,实现含分布式光伏的配电网多场景和全周期地适应性运行规划。

(5) 最后,对全文进行总结概括,得出光伏并网规划问题的研究结论并对未来研究改进方向进行展望。

第二章 配电网风险的定义与评估

2.1 配电网风险的定义

风险是指在一定的时间或空间范围内,实际结果与人们理想目标之间的偏差所产生的不确定性。风险评估是综合考虑各种风险发生的概率及其后果,在实际操作过程中既要评估风险发生的可能性,又要计算其严重程度。

在电力行业中,学者们通常对电力系统的运行风险进行评估,电力系统风险评估是指将各种风险发生的概率与其严重度乘积再求和,对各种可能发生的风险因素进行量化,以提升系统供电的安全性和可靠性。具体计算的数学表达式如下:

$$Risk(X_i) = \sum_{i=1}^n P_R(\tau_i) \times S_{ev}(\tau_i, X_i) \quad (2-1)$$

式中, X_i 表示系统的运行状态; $Risk(X_i)$ 表示该状态下风险指标的大小; τ_i 表示第 i 个风险; $P_R(\tau_i)$ 表示风险 τ_i 发生的概率; $S_{ev}(\tau_i, X_i)$ 表示风险的严重程度。

在研究过程中,本文将风险定义为配电网面临的各種风险因素的概率与其严重程度的乘积和。首先分析配电网运行过程中可能面临的风险,并计算各种风险发生的概率,然后求解各种风险对配电网运行的影响程度,将两个指标共同度量,综合形成配电网风险评估体系。

2.2 风险的求取方法

2.2.1 解析法

解析法是根据系统各要素的组成关系对系统整体进行描述并通过数学表达式或图形的方法对系统进行计算求解。解析法具体可分为状态空间法、故障树分析法、网络法和频率-持续时间法。解析法可以通过准确的数学模型对风险进行评估,但是计算量与元件数量成指数型增长关系。一般对于复杂的系统解析法并不适用。

(1) 状态空间法: 首先对系统可能出现的状态逐一列举,然后通过马尔可夫链对状态空间进行判断分析,最后通过状态空间求取各风险的风险值。相比于前三种方法,状态空间法可以对复杂系统的运行状态进行准确分析,同时该方法可以计算系统暂态和稳态发生的概率,但对于元件数目较多的系统,状态空间法并不适用。

(2) 故障树分析法: 该方法是采用树状图的方式对系统的风险进行描述,通过图形的方法对元件间的组成关系进行分析,当系统中元件出现故障时,该方

法首先判断各故障之间的关系，从而定位故障发生的位置。此方法直观易懂，但只能判断系统有无故障，无法进行风险的量化。

(3) 网络法：该方法首先是将各组成元件连接成串并联网络，再根据各元件的组成关系对整个系统的状态进行分析。在实际操作过程中，该方法特别适用于规模较小的系统，方法简单，便于操作。但该方法只能将系统的状态划分为工作和故障两种状态且一旦系统规模庞大时，该方法的复杂程度和实现难度将大大增加，可操作性不强。

(4) 频率-持续时间法：该方法综合考虑概率、频率和持续时间的关系，根据系统各状态出现的概率计算频率，同时运用状态的转移率参数求解系统中该状态的持续时间。该方法综合考虑了时间因素，对长时间运行的系统也可以准确分析，但很难对大规模的系统元件进行建模。

2.2.2 模拟法

模拟法是指通过随机抽取样本的方式对系统的实际运行状态进行模拟仿真，其中蒙特卡洛法是经典的模拟法。蒙特卡洛法可以分为序贯和非序贯方法，通常适用于大规模复杂系统，可以通过模拟获得系统的频率和持续时间等信息，实用性较强，目前蒙特卡洛法已广泛应用于科学研究及实际工程领域，

(1) 序贯蒙特卡洛法

序贯法具有时序特性，在对系统进行抽样模拟时考虑了系统随时间的状态变化，该方法可用于电力系统的风险评估，在对系统状态进行模拟时综合考虑了时间序列因素，同时针对系统的运行状态和经济特性进行全方位模拟，最终可以得到系统处于不同运行状态下的概率和修复时间，但该方法的缺点是模拟速度慢，运行持续时间长。

(2) 非序贯蒙特卡洛法

非序贯蒙特卡洛法并不考虑模拟状态的时序特性，大大减少了模拟运行的时间，该方法通过多次重复随机抽样的方式来确定系统处于不同运行状态下的概率，适用于规模庞大，形式复杂的系统，且模拟时间较短，在实际工程领域已得到广泛应用。科学研究中通常使用的是非序贯的蒙特卡洛法，其原理具体如下：

假设随机变量 X 的期望值表示为 η ，对其进行 n 次重复抽样得到变量 X 相互独立的抽样值 $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ ，抽样结果的平均值可以表示为：

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (2-2)$$

根据大数定律，假设随机抽样次数 n 足够大时，可以得到：

$$P\left\{\lim_{n \rightarrow \infty} \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i = \eta\right\} = 1 \quad (2-3)$$

$$\eta = \bar{X} \quad (2-4)$$

因此， η 值可以根据随机变量的抽样结果进行近似估计。

在电力系统的状态评估过程中，可以采用上述原理进行风险评估。其中， X_i 表示元件 i 的故障状态， R_i 和 η_i 分别用来表示元件的随机抽样状态和故障停运概率， R_i 是通过随机模拟生成的处于 $[0,1]$ 的随机数，通过比较 R_i 和 η_i 的大小可以分析得出元件 X_i 的运行状态，具体表达式如下：

$$X_i = \begin{cases} 0, R_i > \eta_i (\text{元件 } i \text{ 处于正常状态}) \\ 1, R_i < \eta_i (\text{元件 } i \text{ 处于故障状态}) \end{cases} \quad (2-5)$$

假设电力系统中共有 m 个电气元件，则由 m 个元件的状态组合 $(X_1, X_2, X_3, \dots, X_m)$ 可以来表示系统运行状态 x 。

在每次模拟抽样结束后，根据系统各元件的状态对系统整体的运行状态进行评估，并计算该次抽样结果的测试函数，重复进行多次抽样将测试函数的结果取平均即可以得到电力系统的风险指标，具体表达式如下：

$$E(F) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n F(x_j) \quad (2-6)$$

式中， $F(x_j)$ 是测试函数， $E(F)$ 是测试函数的期望值。

非序贯蒙特卡洛法不考虑抽样的时序特性，相比于序贯法操作简单、更易实现。综合来看，解析法和蒙特卡洛模拟法均能够实现对系统某一状态发生的概率进行计算，模拟法在电力系统评估中具有以下优点：（1）模拟法在进行风险评估时可以考虑系统运行过程中的人为因素，使模拟结果更加真实可靠；（2）蒙特卡洛法更适用于元件规模庞大，结构复杂的系统，该方法的模拟次数和运算时间取决于指标的收敛速度，与系统的复杂性无关，因此对于解析法难以求解的形式复杂的系统，蒙特卡洛法通常可以获得较为准确的运行结果。（3）相比于解析法，蒙特卡洛法可以模拟系统中难以量化的指标，更接近于系统的真实运行状态。

2.3 配电网风险评估指标

短路、断路等系统故障对电力系统的安全运行将会产生严重干扰，影响电网的电能质量，从而引起电压和潮流越限、频率失稳等运行风险。为保证电网能够可靠供电，需要对电力系统的运行风险指标进行评估。通常情况下，风险指标是指风险发生的概率与风险后果严重度的乘积。风险评估侧重点通常有以下三个方面：

1. 越限指标

越限指标通常用来衡量系统的参数或变量超过允许范围的程度，由下式表示：

$$Risk_l = \sum_{i \in N_l} P_i \times S_{evi}(\Delta x) \quad (2-7)$$

式中， N_l 表示越限风险的集合； P_i 表示第 i 种越限风险发生的概率； $S_{evi}(\Delta x)$ 表示第 i 种风险的严重程度；其中 Δx 可以表示支路潮流越限、节点电压越限等。

2. 期望失负荷指标

期望失负荷指标用来衡量系统在某一时间内可能损失的负荷量，由下式表示为：

$$Risk_q = \sum_{i \in N_2} P_i \times S_i \quad (2-8)$$

式中， N_2 表示失负荷风险的集合； P_i 表示第 i 种失负荷风险发生的概率； S_i 表示第 i 种风险系统负荷损失的严重程度。

3. 系统的状态指标

系统的状态指标通常用来衡量系统处于正常、故障和越限等不同状态下的概率。该指标的具体表达式如下：

$$Risk_x = \sum_{i \in N_x} P_i \quad (2-9)$$

式中， N_x 表示为系统风险状态 x 的集合； P_i 表示系统第 i 种状态发生的概率。

为了使各风险指标能够全面分析配电网潜在的运行风险，需要考虑配电网自身的结构和性质。配电网的风险主要包括了短路、过电压、过负荷等，各种风险会对配电网供电产生较大影响，继而影响整个电力系统的安全可靠运行，例如电压和潮流越限、频率失稳、供电中断等。风险评估是指对配电网出现的各种风险进行描述，建立相关的风险评估体系，综合反应配电网整体的风险状况。

综合以上分析，分布式光伏并网会改变原有配电网的拓扑和潮流状态，造成电网电压和潮流出现越限情况，对电网安全运行及供电可靠性产生影响。因此，本文对节点电压和支路潮流越限风险进行评估，运用概率密度函数求取各越限风险发生的概率，同时考虑各风险后果的严重程度，综合建立配电网的风险评估指标，以提升分布式光伏并网规划的可靠性和适应性。

2.3.1 节点电压越限风险的评估

配电网节点电压越限不仅影响本地负荷的电能质量，而且危害绝缘设备，对电力系统运行安全产生影响，因此需要对配电网节点电压越限进行深入研究。电压越限风险指标的具体求取过程如下：

步骤 1：通过系统潮流分析计算节点电压越限的概率

$$P_{vi}(V_i) = \begin{cases} P_{vi}(\overline{V_i}) = P(V_i > V_{i\max}) = 1 - F(V_{i\max}) \\ P_{vi}(\underline{V_i}) = P(V_i < V_{i\min}) = F(V_{i\min}) \end{cases} \quad (2-10)$$

式中， V_i 表示各节点电压的幅值； $V_{i\max}$ 和 $V_{i\min}$ 分别表示节点 i 电压允许范围的上、下边界； $P_{vi}(\overline{V_i})$ 和 $P_{vi}(\underline{V_i})$ 表示电压越上下限的概率； $F(V)$ 表示节点电压的累积分布函数。

步骤 2：计算电压越限的严重度

电压超出允许范围的偏移量可以用来表示电压越限的严重程度。严重程度指标可以通过如下公式计算：

$$S_{evi}(V_i) = \begin{cases} \frac{V_i - V_{i\max}}{V_{i\max}}, V_i > V_{i\max} \\ 0, V_{i\min} \leq V_i \leq V_{i\max} \\ \frac{V_{i\min} - V_i}{V_{i\min}}, V_i < V_{i\min} \end{cases} \quad (2-11)$$

式中， $S_{evi}(V_i)$ 表示节点 i 电压超越允许范围的严重程度。

其中，我国对各等级配电网的电压允许工作范围有着明确规定，具体的运行范围如下所示：

表 2-1 各等级电网电压允许偏移范围

电压等级	上限	下限
35kV 及以上	+5%	-5%
10kV 及以下	+7%	-7%
220V 单相供电	+7%	-10%

步骤 3：综合上式得到，节点 i 的电压越限风险可以表示为：

$$Risk_i = P_{vi}(V_i) \times S_{evi}(V_i) \quad (2-12)$$

步骤 4：系统整体的风险是组成系统各节点的风险之和，对系统内各节点电压越限风险求和，计算公式为：

$$R_v = \sum_{i=1}^n Risk_i \quad (2-13)$$

式中， n 表示配电网中的节点个数。

2.3.2 支路潮流越限风险的评估

在配电网运行过程中，潮流越限风险可能使系统失负荷造成电网经济损失，配电网潮流越限越严重，继电保护的動作时间越短，系统恢复原有正常运行状态

的可能性越低，供电中断事故发生的概率越大。因此有必要对配电网支路潮流越限风险进行深入研究。配电网支路潮流越限的具体求取过程如下：

步骤 1：支路潮流越限风险只需要计算其越上限的概率。具体的计算公式为：

$$P_{sij}(S_{ij}) = P(S_{ij} > S_{ij\max}) = 1 - F(S_{ij\max}) \quad (2-14)$$

式中， S_{ij} 表示支路 ij 实际流通的有功潮流； $S_{ij\max}$ 表示支路 ij 允许通过的最大有功潮流； $F(S)$ 表示支路有功潮流的累计分布函数。

步骤 2：计算潮流越限的严重程度

$$S_{evij}(S_{ij}) = \begin{cases} \frac{S_{ij} - S_{ij\max}}{S_{ij\max}}, & S_{ij} > S_{ij\max} \\ 0, & S_{ij} \leq S_{ij\max} \end{cases} \quad (2-15)$$

步骤 3：综合步骤 1 和 2，支路 ij 的潮流越限风险指标可以表示为：

$$Risk_{ij} = P_{sij}(S_{ij}) \times S_{evij}(S_{ij}) \quad (2-16)$$

步骤 4：对所有支路的潮流越限风险求和，即可以表示配电网的总体潮流越限风险。

$$R_s = \sum_{ij \in N_{ij}} Risk_{ij} \quad (2-17)$$

传统的配电网在运行过程中，潮流会从线路首端向末端单相供电，分布式电源的接入会改变原有配电网的拓扑结构和潮流状态，使电网出现功率倒送的现象。此外，光伏出力和负荷的不确定性加剧了这一现象，受季节和天气等因素的影响，光伏出力通常在正午时达到最大，但此时负荷需求往往较轻，分布式光伏的剩余功率将沿馈线倒流，较大的倒送功率可能会导致变压器过载甚至损坏，因此有必要对配电网的潮流越限风险开展深入研究。

2.4 本章小结

本章主要针对风险的定义、风险的求取方式、配电网风险评估指标开展研究，并对配电网电压和潮流的越限风险进行了量化求解。本文界定的电力系统风险是指考虑了风险概率和严重程度的综合性评估指标，风险的求解方法包括了解析法和模拟法。本章计算了系统电压和潮流发生越限风险的概率，并求解各越限风险的严重程度，综合两指标可以计算得到电压和潮流的越限风险，将所有节点或支路的越限风险相加即可以得到整个系统的风险，建立了综合的配电网风险评估指标，为后文建立光伏并网自适应规划模型奠定了基础。

第三章 场景划分及配电网分区

3.1 日场景划分

分布式光伏接入配电网后的出力情况受季节、天气等因素的影响具有明显的波动性。如果只选取某季节单日 24h 的光伏出力参数进行规划，则没有考虑季节和天气的变化对光伏出力的影响，并不能实现含分布式光伏配电网多场景和全周期的运行规划。但如果以全年 8760h 的光伏出力数据作为规划参数，则系统规模过于庞大，潮流计算复杂，迭代次数多、求解时间长，最终导致了模型的规划效率过低。综合以上分析，本文对光伏全年出力场景进行划分，分类为 4 种不同的季节(春、夏、秋、冬)，同时各季节对应 4 种不同的天气(晴、多云、阴、雨/雪)，共同组成了 16 种不同的日场景。

3.1.1 PCA 降维聚类

数据降维能够将高维度数据降至低维，降维的原理是过滤掉高维数据的不重要因素而保留数据的关键要素以简化数据分析过程。对于分布式光伏全年的出力数据，可以通过主成分分析法（PCA）进行预处理。

PCA 降维聚类是将已有的数据点通过一组基向量来表示，通过提炼数据的关键因素对高维数据降维。对于高维度数据 $\{x_i\}$ ， $i=1,2,\dots,n$ ，为实现降维，需要使数据在某一基向量上的投影最大。具体关系式表示如下：

$$y_i = w_i \cdot (x_i - m) \quad (3-1)$$

式中， w_i 是选取的基向量， y_i 是各数据在基向量 w_i 上投影分量的大小。

其中 m 是数据点的中心，可以表示为：

$$m = \frac{1}{n} \sum x_i \quad (3-2)$$

求解时，为了使聚类得到的数据更易区分，对于 $i=1,2,\dots,n$ ，需要找到单位基向量 w_i ，使得 y_i 的方差最大，用式子表示为：

$$\max Var(y_i), s.t. \|w_i\| = 1 \quad (3-3)$$

其中，

$$Var(y_i) = E(y - E(y))^2 \quad (3-4)$$

式中， $Var(.)$ 表示方差， $E(.)$ 表示数学期望。

从而可以得到解为

$$Cw_i = \lambda w_i, \|w_i\| = 1 \quad (3-5)$$

其中 C 是 $Z = (X - m)$ 的协方差矩阵，可以表示为

$$C = E\{(X - m)(X - m)^T\} \quad (3-6)$$

综上所述, w_i 即为所要求的特征向量。通过上述分析, 我们将问题转变成了求解 Z 的协方差矩阵 C , C 的单位特征向量即是要求取的基向量。

对降维后的数据进行聚类分析, 聚类过程中首先确定质心数, 也就是将已有数据划分的类别个数。质心数通常是根椐待解决的实际问题人工指定, 没有统一标准或固定的计算公式, 选择较大的质心数可以减小数据的误差, 但同时会增加拟合的风险, 通常情况下, 可以参考通过层次聚类的方法获得数据类别的数量来确定质心数。最后, 通过欧式距离公式计算数据间 (假设数据为 n 维) 的距离:

$$d(x, y) = \sqrt{(x_1 - y_1)^2 + (x_2 - y_2)^2 + \cdots + (x_n - y_n)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (3-7)$$

式中, x_i 和 y_i 分别表示数据点的坐标, 欧式距离越小表示数据的相似度越高。

3.1.2 负荷-时间曲线

负荷的需求受季节因素影响较大, 而随天气变化较小, 因此负荷的典型日场景只需要根椐季节性变化聚类为四部分。本文选取华东某地区 2020 年全年的负荷数据进行 PCA 降维聚类, 得到一年四季负荷—时间变化曲线, 如图 3-1 所示。

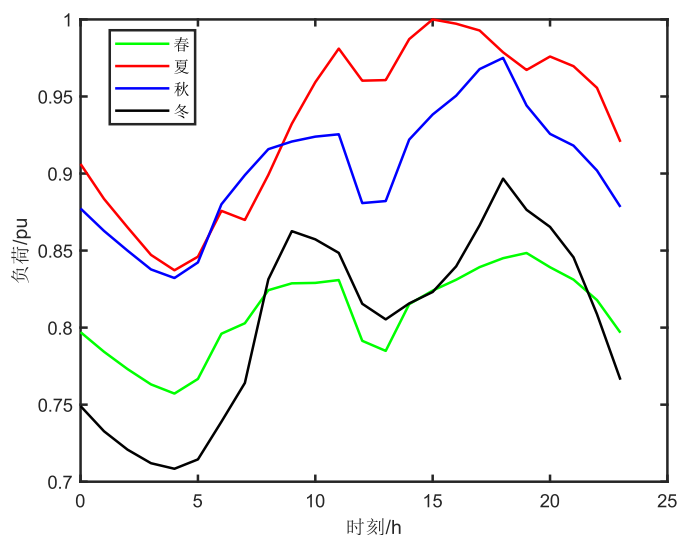


图 3-1 不同季节负荷—时间曲线

3.1.3 光伏出力-时间曲线

本文根椐季节和天气两种影响因素对光伏日场景进行聚类, 采用 PCA 降维聚类的方法对华东某地区 2020 年全年光伏出力的数据进行分析。前文已对负荷

按照季节因素进行聚类，因此在处理光伏出力数据时，将前文的负荷季节标签直接带入，然后在每种季节下根据晴/多云/阴/雨（或雪）四种天气进行聚类分析，最终可以得到 16 条不同季节和不同天气等场景下的光伏—时间出力曲线，如图 3-2 所示。

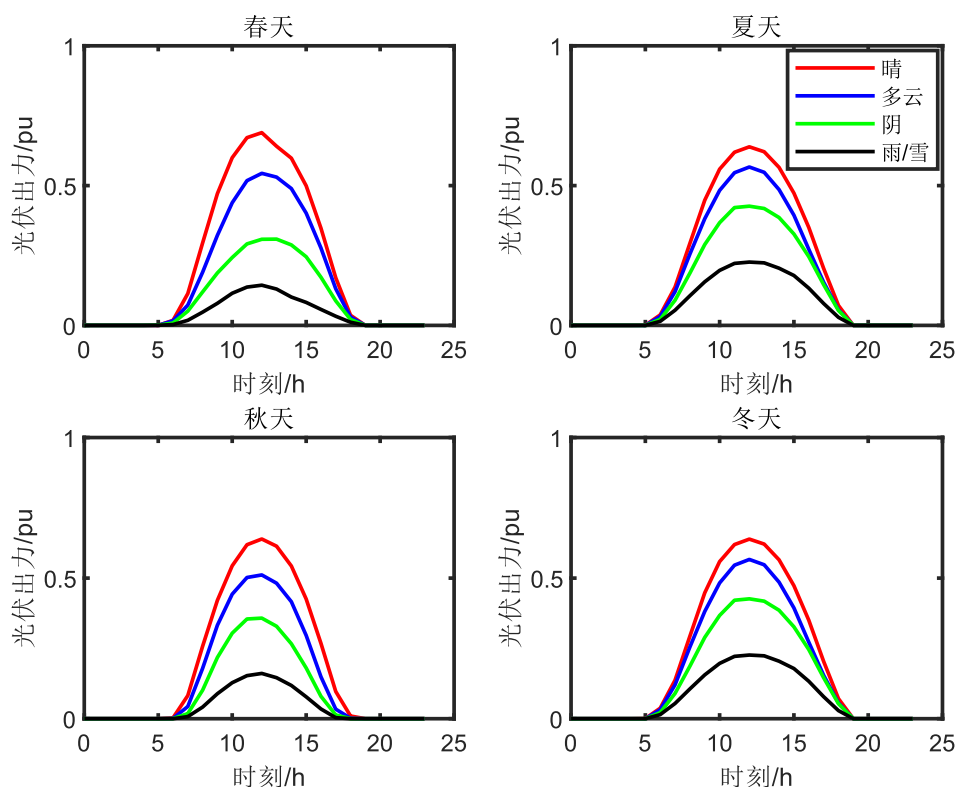


图 3-2 典型日场景光伏出力—时间曲线

通过 PCA 降维聚类法对我国华东某地区 2020 年全年春、夏、秋、冬四种季节和晴、多云、阴、雨/雪四种不同天气组成的日场景进行划分，共分成了 16 种典型光伏出力日场景。各典型日场景 S 发生的概率 $P(S)$ 可以表示为：

$$P(S) = \frac{T_s}{365} \quad (3-8)$$

式中， T_s 表示一年中典型场景 S 所占的天数。

本文在分布式光伏并网规划过程中，综合考虑了季节和天气等影响因素，通过 PCA 降维聚类的方法对全年光伏出力日场景进行划分，有助于实现含分布式光伏配电网多场景地规划，提升了配电网光伏接纳能力分析的准确性。

3.2 配电网分区调控策略

当配电网中出现节点电压越限或支路潮流越限等紧急情况时,若配电网采用分区调控策略,可以根据事先的分区结果在区域内快速响应有功或无功的分区调节方法,改变该时刻的潮流状态,将电压或潮流越限调节至合理范围内。此外,针对本文研究的分布式光伏并网规划问题,通过对配电网分区还可以选择光伏安装节点。因此,本文采用基于密度峰值的快速聚类算法(CFSFDP)对配电网的节点进行分区,选择分布式光伏的安装节点,同时通过分区协调的控制策略,满足系统紧急情况下的快速控制要求。

3.2.1 节点电气距离

电气距离是指两点间导线或电气耦合的距离,描述了各节点之间的联接程度,配电网中通常采用该指标对节点进行分区。高压输电网中满足 $X \gg R$ 的阻抗特性,节点间的电气距离可以通过有功或无功功率与电压的关系来判断。但该方法在中低压配电网中并不成立,为了实现配电网快速分区以选择分布式光伏安装节点的目的,同时能够及时调节电压和潮流越限风险,本文首先求解综合电压灵敏度指标,并以此为基础计算节点间的电气距离以实现配电网的快速分区。同时,该方法可以避免对配电网的有功、无功分别解耦,节省了分区计算的时间。

配电网的潮流计算满足:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

式中, ΔU 和 $\Delta \delta$ 表示节点电压幅值和相角的变化量; ΔP 和 ΔQ 表示有功和无功功率的变化量; J 是雅可比矩阵。

对上式进行逆变换:

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{P\delta} L_{Q\delta} \\ L_{PU} L_{QU} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

式中,对于分块矩阵来说, $L_{P\delta}$ 、 $L_{Q\delta}$ 、 L_{PU} 和 L_{QU} 分别表示了有功、无功功率和电压相角、幅值之间的关系。

综合电压灵敏度矩阵计算表达式为:

$$L = L_{PU} + L_{QU} \quad (3-11)$$

最后,通过欧几里得公式计算得到节点间的电气距离矩阵,各元素计算公式表示如下:

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (L_{ik} - L_{jk})^2} \quad (3-12)$$

式中, d_{ij} 表示节点 i 和 j 之间的电气距离。 n 表示潮流计算中 PQ 节点的个数。 L_{ik}

和 L_{jk} 是电压灵敏度矩阵 L 中的元素。

3.2.2 CFSFDP 算法

CFSFDP 算法通过各节点的密度指标对节点进行聚类, 可以实现将配电网划分为不同的区域。在实际计算过程中, 首先求解各节点的局部密度 ρ_i 和距离 δ_i 形成综合指标 γ_i , 并以此为依据确定类中心点, 之后再根据综合指标将其他节点归为对应的类中。

假设对含有 n 个节点的系统进行聚类, 其中节点 i 的局部密度 ρ_i 可表示为:

$$\rho_i = \sum_{j=1}^n \chi(d_{ij} - d_c), i, j = 1 \cdots n, i \neq j \quad (3-13)$$

函数 $\chi(x)$ 表达式为:

$$\chi(x) = \begin{cases} 1, x < 0 \\ 0, x > 0 \end{cases} \quad (3-14)$$

式中, n 表示数据点 (节点) 的个数; d_c 表示截断距离, 通常根据实际问题来指定。

若节点 i 的局部密度不是最大值时, 其距离公式表示为

$$\delta_i = \min_{j: \rho_j > \rho_i} (d_{ij}) \quad (3-15)$$

若节点 i 的局部密度最大时, 其距离公式表示为

$$\delta_i = \max_j (d_{ij}) \quad (3-16)$$

将每个节点的局部密度 ρ_i 和距离 δ_i 组成二元对 (ρ_i, δ_i) 在决策图中绘制出来, 通常选取数值较大的点作为聚类中心, 综合考虑局部密度 ρ_i 和距离 δ_i 的计算公式为:

$$\gamma_i = \rho_i \delta_i \quad (3-17)$$

由类中心点向非中心点过渡时 γ_i 值会呈现跳跃特性, 通常, 选择综合指标较大的点作为聚类中心点, 并根据跳沿所在位置之前的点的个数来判断类的个数。

3.2.3 配电网分区调控策略

配电网的分区调控步骤如下:

- (1) 计算各节点间的电气距离 d_{ij} ;
- (2) 根据电气距离求取节点相似度矩阵, 在本研究中是指电气距离矩阵 D ;
- (3) 计算节点的局部密度 ρ_i 和距离 δ_i ;
- (4) 根据局部密度 ρ_i 和距离 δ_i 确定聚类中心;
- (5) 将其它点划分到以聚类中心点为中心的类中;
- (6) 每个类为一个区域, 区域中至少安装一个光伏实现配电网的分区调节。

通过对配电网进行分区，当节点电压或支路潮流发生越限风险时，配电网可以启动分区调控策略。首先根据当前的潮流状态找到各自分区内越限最严重的节点或支路，并利用该区域内的光伏电源出力进行调节。调节过程中应优先采用无功调节方式，当本区域分布式光伏无功调节后仍无法满足需求时，则通过其他区域与其电气距离最近的光伏进行无功调节。当所有分区都无法进行无功调节时，则启动分布式光伏的有功调节。以节点电压越限为例，配电网的分区调控策略如图 3-3 所示。特殊情况下，若有功调节仍无法满足调压需求时，则采用有载调压变压器进行调节。分区调节能够使配电网对电压、潮流等越限情况迅速做出反应，提升了配电网光伏规划的可靠性和适应性。

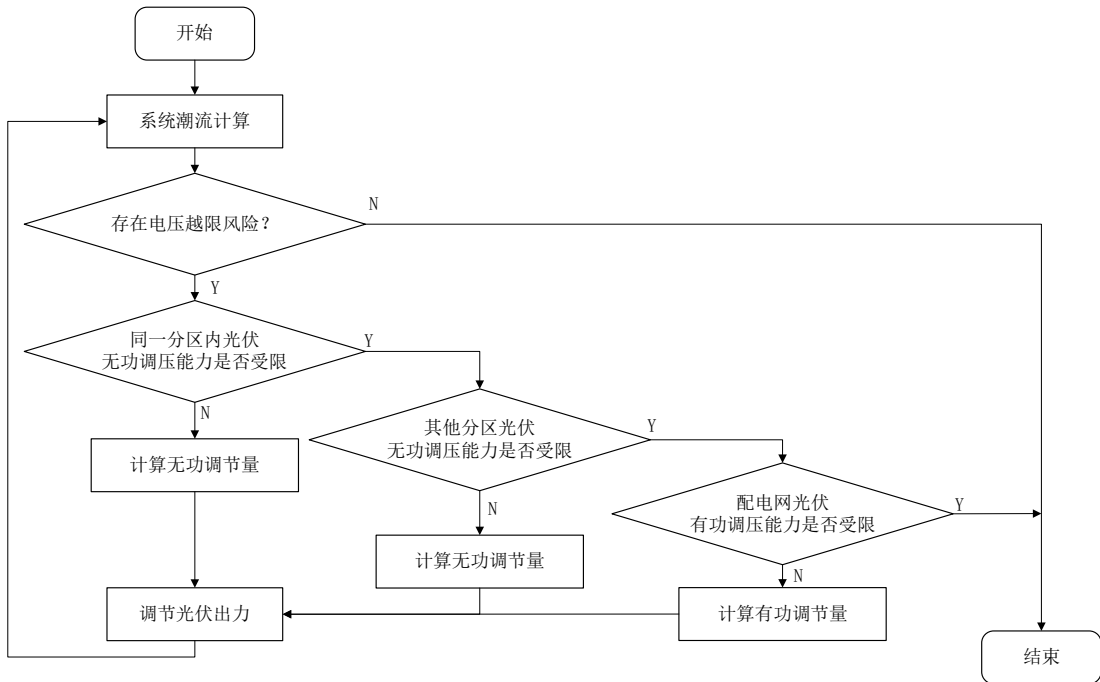


图 3-3 配电网分区调控策略图

当分布式光伏进行无功调压时，其所需要的无功调节量为：

$$\Delta Q = \frac{\Delta U}{L_{QU}} \quad (3-18)$$

式中， ΔU 表示系统内电压越限节点的电压偏移量， L_{QU} 表示分布式光伏对该节点的无功电压灵敏度。

3.2.4 算例分析

本文选择 IEEE 33 节点算例应用于配电网分区算法的实现，配电网模型如图 3-4 所示。该模型首端基准电压为 12.66kV，总负荷（5084.26+j2547.32）kVA，三相功率基准值为 10MVA，在 MATLAB 平台中采用标幺值进行潮流计算，系统

电压安全允许范围是 0.93-1.07p.u.。

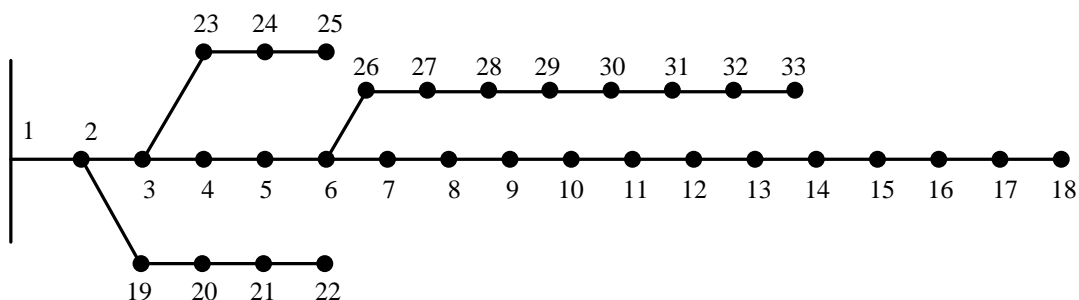


图 3-4 IEEE 33 节点配电网系统接线图

配电网分区计算时，系统首端平衡节点 1 并不参与分区计算，分区完成后直接将其划分至距离最近的区域中。其余 32 个节点为 PQ 节点，潮流计算时联络开关处于断开状态。配电网节点分区决策图和 γ 值降序图分别如图 3-5 和图 3-6 所示。

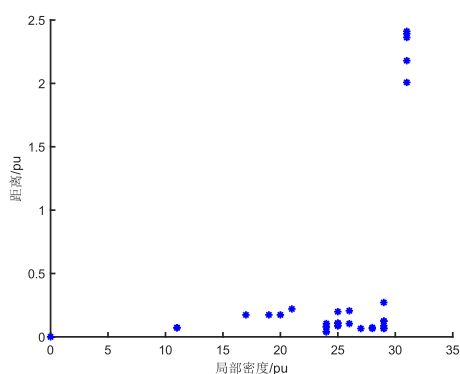


图 3-5 节点分区决策图

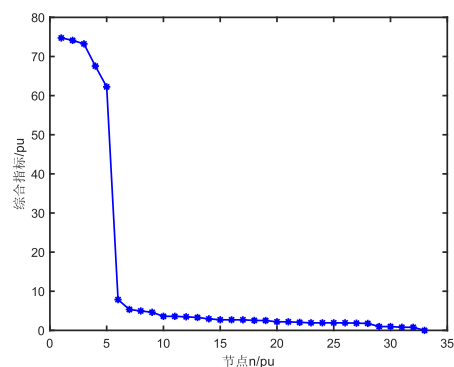


图 3-6 配电网分区 γ 值降序图

在决策图中共有 5 个点的局部密度 ρ_i 和距离 δ_i 远大于其他点，其对应于 γ 值降序图中的前五个点，从第六个点开始 γ 值曲线开始变得平滑。由前文分析可知， γ 值由聚类中心点向非中心点过度时呈现跳跃特性，因此综合来看，IEEE 33 节点配电系统可以分成 5 个区域。配电网具体的分区结果如图 3-7 所示，图中采用相同的符号来表示同一分区内的节点。对分区结果进行二维非经典尺度变换， (X,Y) 坐标描述了节点在二维平面的相对位置，如图 3-8 所示，可以直观地表示出各节点之间的相对电气距离。

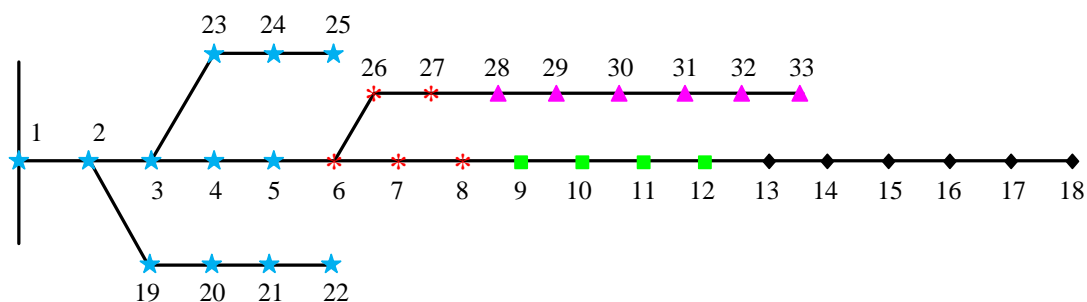


图 3-7 配电网分区结果图

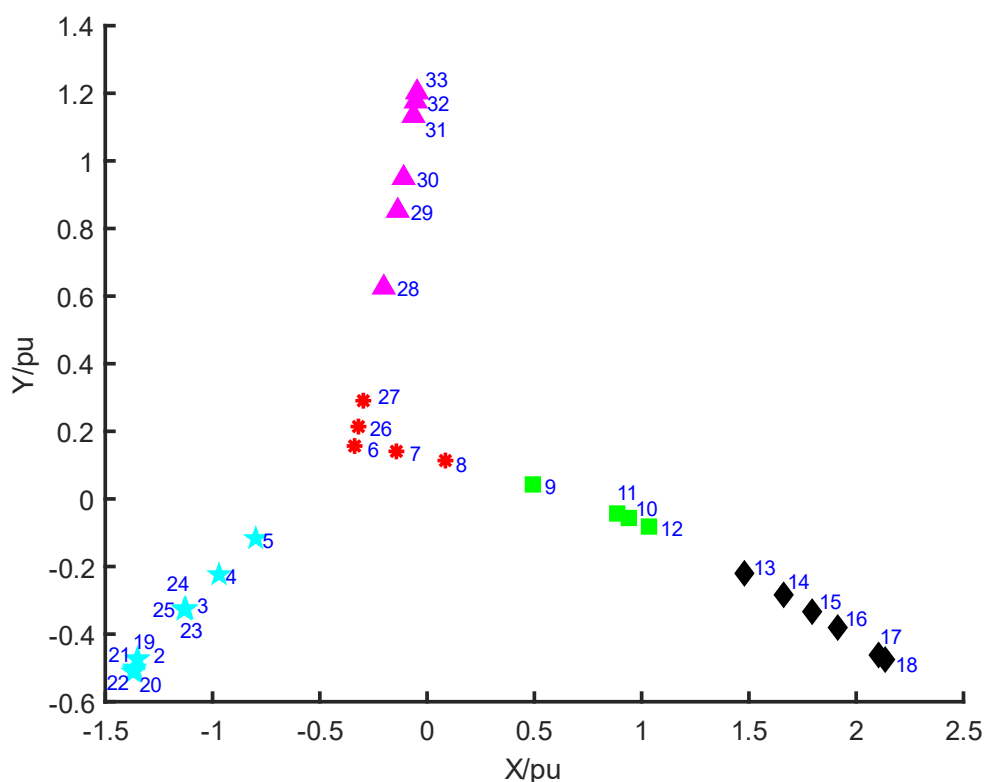


图 3-8 配电网节点相对位置坐标图

可以看出，由于配电网是辐射架构，聚类结果各节点在二维平面上呈现辐射状分布。关于每个分区内聚类中心点的选择，在人工选择时没有统一标准，但通常要选择综合指标 γ 较大的点作为聚类中心。本文在选择时考虑了聚类中心点要满足局部密度 ρ_i 和距离 δ_i 大于最大值的 20% 的要求，选择节点 11、17、21、26、32 作为聚类中心，配电网具体的分区结果如表 3-1 所示。为了满足节点电压越限或支路潮流越限时配电网能够快速反应的需求，在每个分区内至少安装一个分布式光伏。为简化光伏安装节点优化的研究过程，本文根据分区结果在每个区域的聚类中心点安装分布式光伏。

表 3-1 配电网分区结果

分区	分区方案	聚类中心
1	1-5、19-25	21
2	6-8、26-27	26
3	9-12	11
4	13-18	17
5	28-33	32

3.3 本章小结

(1) 本章主要考虑了分布式光伏接入配电网后出力的波动性及负荷的不确定性等问题，采用 PCA 降维聚类的方法对日场景聚类。考虑季节和天气等因素对光伏出力和负荷需求的影响，本章聚类得到了 4 条不同季节下的负荷需求时序曲线，结合 4 种天气因素组合成 16 种典型的光伏出力日场景，聚类得到了 16 条日光伏出力时序曲线。

(2) 为了能够有效降低分布式光伏接入配电网后电压和潮流越限的风险或当风险发生时配电网能够快速反应。本章采用 CFSFDP 算法对配电网进行分区。首先根据潮流计算求取配电网综合电压灵敏度矩阵，再计算各节点间的电气距离，然后求解各节点的局部密度和距离综合指标，最后根据决策图和节点相对位置坐标图对配电网进行分区。本章将配电网分为 5 个区域，每个区域内选择聚类中心点安装分布式光伏，最后，根据配电网分区结果，提出了一种先无功后有功的电压调节策略，提升了含分布式光伏配电网规划的可靠性和适应性。

第四章 考虑多场景全周期的光伏接入配电网

前文主要分析了分布式光伏并网后节点电压和支路潮流越限等安全性问题，本章将在前文的基础上综合考虑分布式光伏规划的经济性和适应性。本章将选择配电网年均净收益、平均有功网损、电压和潮流越限风险等指标作为目标函数来建立分布式光伏并网规划模型。同时考虑配电网的分区调控策略，以系统潮流计算、电压和潮流运行约束等作为约束条件来优化分布式光伏安装容量，以实现配电网多场景和全周期地适应性运行规划。

4.1 分布式光伏规划目标函数

1. 光伏运营商年平均净收益

基于前文的分析，PCA 降维聚类算法将全年划分为 16 个典型日场景。在分布式光伏的规划运营全生命周期内，光伏运营商的收入来源主要包括了光伏并网售电收入、期末设备净残值、政府补贴收入，主要成本包括了光伏的初始安装成本和运行维护成本。本文考虑了光伏从初始安装到投入使用再到回收的全生命周期，并将每个日场景划分为 24 个时间段分别计算相关指标。同时考虑经济学中的货币时间价值理论，规划期内不同年份的收入和成本价值也不同，因此采用将分布式光伏全生命周期现金流折现的方法对各年收益和成本折现后再进行比较。光伏运营商的年平均净收益 L 表达式如下：

$$\max L = R - C \quad (4-1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R = \frac{1}{Y} \left[\sum_{y=1}^Y \frac{1}{(1+r)^y} (R_{sell} + R_{gov}) + \frac{1}{(1+r)^Y} R_{res} \right] \\ R_{res} = \eta C_{ini} \\ R_{sell} = 365 \sum_{s=1}^{N_s} \alpha_s \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{N_i} P_{s,t,i}^{now} \Delta t \gamma_{sell} \\ R_{gov} = 365 \sum_{s=1}^{N_s} \alpha_s \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{N_i} P_{s,t,i}^{now} \Delta t \gamma_{gov} \\ C = \frac{1}{Y} \left[C_{ini} + \sum_{y=1}^Y \frac{1}{(1+r)^y} C_{rep} \right] \\ C_{ini} = \sum_{i=1}^{N_i} P_i^{ini} \gamma_{ini} \\ C_{rep} = 365 \sum_{s=1}^{N_s} \alpha_s \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{N_i} P_{s,t,i}^{now} \Delta t \gamma_{rep} \end{array} \right. \quad (4-2)$$

式中， R 、 C 表示光伏运营商的年平均收入和成本； R_{sell} 、 R_{gov} 、 R_{res} 表示年售电收入、每年政府补贴和设备残值； C_{ini} 、 C_{rep} 表示初始投资成本和年运行维护费用； N_s 、 N_t 、 N_i 表示每年 16 种典型日场景数、一日 24 小时和安装光伏的节点个数（本文为 5）； γ_{sell} 、 γ_{gov} 、 γ_{rep} 、 γ_{ini} 表示单位电价、单位电量的政府补贴、运行维护费用、单位装机容量的初始投资成本； $P_{s,t,i}^{now}$ 、 P_i^{ini} 表示场景 s 时段 t 的第 i 个光伏的有功出力和初始安装容量； Y 、 r 表示规划年限和货币折现率； α_s 表示场景 s 的概率，计算公式为 $\alpha_s = P(S) = T_s / 365$ ； $\Delta t = 1$ ， η 表示设备净残值系数。

2. 配电网平均有功网损

配电网的有功网损影响了电网运行的经济效益。本文通过计算各场景下配电网每小时有功网损的平均值来描述该指标，具体的表达式如下：

$$\min P_{loss} = \frac{1}{N_t} \sum_{s=1}^{N_s} \alpha_s \sum_{t=1}^{N_t} P_{s,t}^{loss} \quad (4-3)$$

式中， $P_{s,t}^{loss}$ 和 P_{loss} 表示场景 s 时段 t 配电网的有功网损和平均有功网损。

3. 配电网的平均节点电压偏差

配电网节点电压偏差是指节点电压幅值偏离允许范围的程度，配电网规划时该值应尽可能小。本文通过计算各场景下每小时各节点电压偏差的平均值来表示。具体的表达式为：

$$\min U_d = \frac{\sum_{s=1}^{N_s} \alpha_s \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{n=1}^{N_n} |U_{s,t,n} - U_{rat}|}{N_t N_n} \quad (4-4)$$

式中， $U_{s,t,n}$ 和 U_d 表示场景 s 时段 t 第 n 个节点的电压幅值和平均节点电压偏差； U_{rat} 表示额定电压，标么值为 1； N_n 表示节点个数。

4. 配电网的平均支路潮流偏差

类比节点电压偏差的概念，支路潮流偏差是指支路中实际潮流超越其允许流通最大潮流的绝对值，同样，我们将所有典型日场景下每小时的每条支路潮流偏差期望值之和取平均，来表示规划中配电网的平均支路潮流偏差，实际运行过程中，该值越小表明配电网潮流水平越好。该规划对应的目标函数为：

$$\min S_d = \frac{\sum_{s=1}^{N_s} \alpha_s \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{l=1}^{N_l} |S_{s,t,l} - S_{max}|}{N_t N_l} \quad (4-5)$$

式中， S_d 表示配电网的平均支路潮流偏差； N_l 表示配电网的支路条数； $S_{s,t,l}$ 表示第 s 个场景第 t 个时段第 l 条支路的实际潮流； S_{max} 表示配电网允许流通的最大潮流。

4.2 约束条件

4.2.1 光伏安装容量自适应约束

考虑单个节点安装光伏的容量上限，其规划的不等式约束为：

$$P_i^{ini} \leq P_i^{\max} \quad (4-6)$$

式中， P_i^{\max} 表示节点 i 允许安装的最大光伏容量。

同时，受不同地区光伏渗透率政策的约束，配电网分布式光伏总体安装容量需要满足的约束条件为：

$$\sum_{i=1}^{N_i} P_i^{ini} \leq \beta P_L \quad (4-7)$$

式中， P_L 表示配电网负荷的最大有功功率， β 表示光伏渗透率，即配电网分布式光伏电源的有功装机容量与负荷最大有功功率的比值。

在《光伏电站接入电网技术规定》中，国网公司针对光伏并网装机容量问题做出了明确规定：10-35kV 中压配电网光伏接入总容量不应超过线路最大传输容量的 30%，380V 电压等级的低压配电网其分布式光伏接入的容量不应超过供电区域最大负荷的 25%。

此外，计及光伏出力和负荷需求的不确定性，为了提升配电网光伏接纳的适应性程度，尽可能地减少运行过程中功率倒送现象。本文考虑任意时刻光伏出力不宜超过该时刻负荷需求的某一特定比例，约束条件表达式为：

$$\sum_{i=1}^{N_i} P_{s,t,i}^{now} \leq \chi \sum_{i=1}^{N_n} P_{s,t,n}^{load} \quad (4-8)$$

式中， $P_{s,t,n}^{load}$ 表示 s 场景 t 时段下第 n 个节点的负荷功率， χ 表示分布式光伏出力与该时刻配电网负荷总有功功率的比值。

4.2.2 配电网运行约束

分布式光伏的接入会改变配电网的潮流状态且光伏出力和负荷需求的不确定性加剧了这一影响。因此，在规划时需要考虑每个典型日场景下每个时段的配电网运行约束条件。

1. 潮流等式约束

$$\begin{cases} P_{PV}^i - P_L^i = U^i \sum_{j \in i} U^j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_{PV}^i - Q_L^i = U^i \sum_{j \in i} U^j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (4-9)$$

式中， P_{PV}^i 和 Q_{PV}^i 表示光伏 i 输出的有功和无功功率； P_L^i 和 Q_L^i 表示节点 i 负荷的有功和无功功率； U^i 是节点 i 的电压幅值； G_{ij} 、 B_{ij} 、 θ_{ij} 表示节点 i 和 j 之间的电导、

电纳、相角差。

2. 节点电压约束

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max} \quad (4-10)$$

式中, U_i^{\max} 和 U_i^{\min} 分别表示节点 i 电压允许范围的上下边界。

3. 支路潮流约束

$$S_l \leq S_l^{\max} \quad (4-11)$$

式中, S_l^{\max} 表示支路 l 允许传输的最大功率, S_l 表示支路 l 实际传输的功率。

4. 光伏逆变器的容量约束

分布式光伏若想接入电网供电, 需要通过光伏逆变器将直流电逆变为交流电。结合配电网的分区调控策略, 分布式光伏在调节越限风险时, 节点 i 的无功调节量 Q_i 还需要考虑光伏逆变器额定容量 S_i 、实时传输功率 P_i^{now} 的约束, 其表达式为:

$$-\sqrt{S_i^2 - P_i^{now2}} \leq Q_i \leq \sqrt{S_i^2 - P_i^{now2}} \quad (4-12)$$

5. 配电网网架运行的约束条件

配电网通常要满足闭环设计, 开环运行, 分布式光伏接入配电网后仍要保持配电网的开环运行状态。

4.3 自适应规划算法

4.3.1 快速非支配排序遗传算法

本文结合了分布式光伏自适应规划的方法, 通过对初始种群、交叉和变异概率及选择方法的自适应调整对传统的遗传算法做出改进来求解光伏并网多目标规划模型。首先, 标准遗传算法的程序流程图如图 4-1 所示。

单目标优化问题往往只存在一个目标函数, 可以通过遗传算法、粒子群算法等方法计算全局最优解, 这个解通常使目标函数取值最大或最小。但对于多目标规划问题通常很难存在一个解实现全局最优。求解结果往往是一个解集, 可以结合实际问题的选择解集内的某个解作为最终的解决方案, 或者将多目标规划问题通过归一化权重求和的方式转化为单目标优化模型, 此时各目标函数的权重值将直接影响了问题的求解结果。

非支配排序遗传算法-II (NSGA-II) 通常用来求解多目标规划问题, 通过精英保留策略对各代个体进行非支配排序。相比于传统的遗传算法, 该算法依据支配关系对每代种群个体进行排序然后根据排序结果来选择执行算子, 并通过 Pareto 最优理论求解多目标规划模型。该算法的具体原理可以概括如下:

多目标优化问题的目标函数为:

$$f(X) = (f_1(X), f_2(X), \dots, f_N(X)) \quad (4-13)$$

式中, $f_i(i=1,2,\cdots,N)$ 表示规划问题的 N 个目标分量。

其中支配关系可以表示为:

$$f_i(X_a) < f_i(X_b) \quad (4-14)$$

式中, $X_a, X_b \in U$, 为解集任意给定的两个解, 当且仅当对于 $\forall i \in \{1,2,\cdots,N\}$, 都有 $f_i(X_a) < f_i(X_b)$, 则称 X_a 支配 X_b 。

当一个变量无法被其他任何变量支配时, 则该变量被称为非支配解或 Pareto 最优解。在多目标规划问题的求解过程中, 首先在初始解集中筛选出非支配解并定义其 Pareto 等级为 1, 同时将这些解从解集中删除, 接下来从剩余的解集中再次筛选出非支配解其 Pareto 等级为 2, 重复上述操作直至对所有的解完成非支配排序。图 4-2 描述了二维目标函数下经排序后的解的形式。

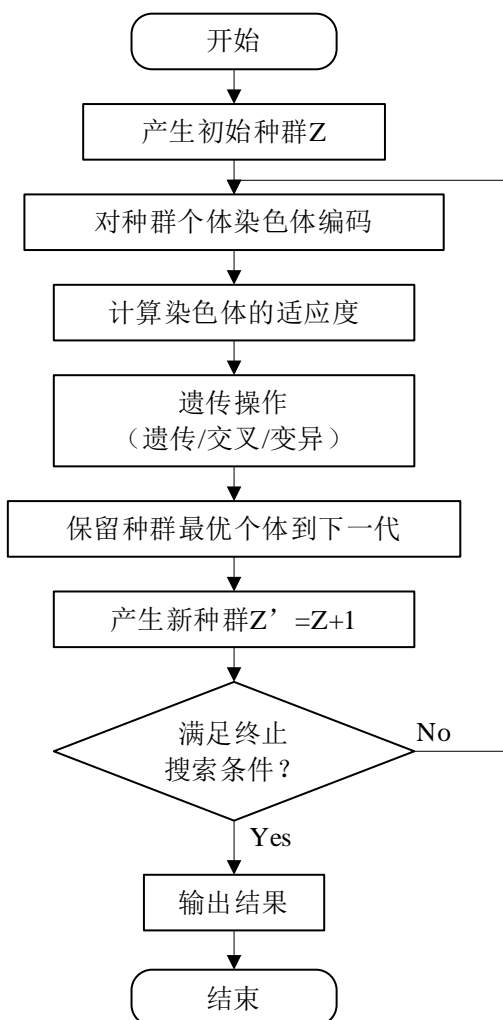


图 4-1 标准遗传算法程序流程图

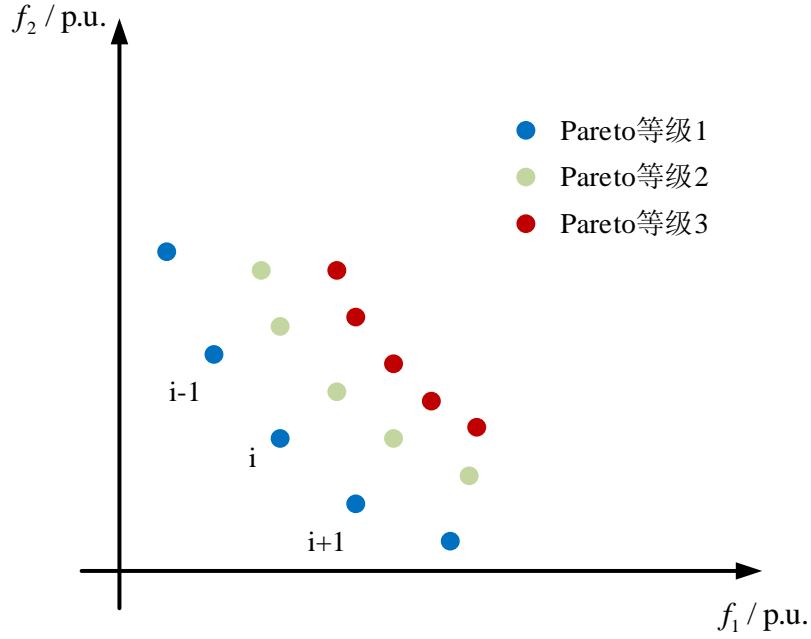


图 4-2 二维目标函数 Pareto 等级图

对于同一 Pareto 等级下的点，为了进一步比较各个解的优先级，需要计算解的拥挤度。将各 Pareto 等级两端边界点的拥挤度定义为 ∞ ，该等级下其他点的拥挤度主要和相邻的两点有关。首先，各个解在不同目标函数下的拥挤距离计算公式如下：

$$CD_{in} = \frac{f_n(x_{i+1}) - f_n(x_{i-1})}{f_n(x_{\max}) - f_n(x_{\min})}, i = 2, \dots, (l-1) \quad (4-15)$$

式中， CD_{in} 表示解 x_i 在第 n 个目标函数下的拥挤距离； x_{\max} 和 x_{\min} 分别表示同一 Pareto 等级下横坐标最大和最小的解； l 表示该 Pareto 等级下解的个数。

接下来，计算解的拥挤度，将不同目标函数下的拥挤距离求和即可以表示解在该 Pareto 等级下的拥挤度，具体的数学表达式如下：

$$CD_i = \sum_{n=1}^N CD_{in} \quad (4-16)$$

式中， N 表示目标函数的个数。

通常情况下，解的异质性越强，拥挤度越大，说明该解与其他解的相似程度越低，定义该解为解集中的精英解。在进行最终选择时保留同一 Pareto 等级下拥挤度较大的解能够更好地保存解的多样性。

综合以上分析，NSGA-II 算法的基本思想是先对所有满足条件的解进行非支配排序，对于处于同一 Pareto 等级下的解再计算解的拥挤度。具体操作步骤可以概括如下：

- (1) 随机产生初始种群并完成非支配排序；
- (2) 初始种群通过遗传进化得到第一代子代种群；

- (3) 将父子代种群合并，完成非支配排序和个体拥挤度的计算；
 - (4) 选择合适的个体组成新的父代种群；
 - (5) 再次进化得到新子代种群，重复上述迭代过程直至满足进化结束条件。
- 相应的程序流程图如图 4-3 所示：

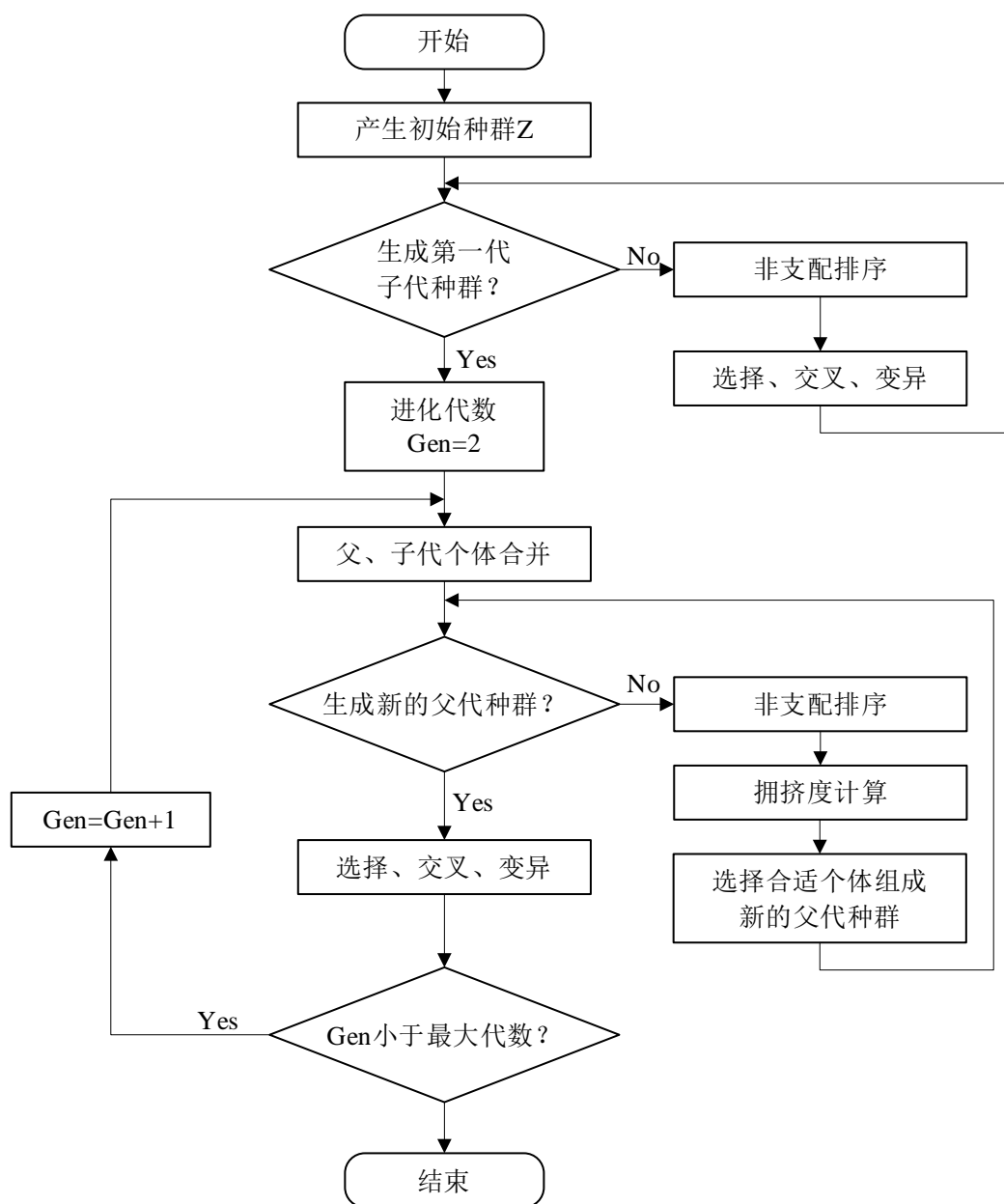


图 4-3 NSGA-II 算法程序流程图

4.3.2 改进的自适应遗传算法

NSGA-II 算法可以求解多目标规划问题，但对于维度较高的复杂问题，该算法容易出现收敛速度慢、局部收敛、可信度不高等现象。因此，本文对该算法进

行改进，通过自适应遗传算法来分析配电网的分布式光伏接纳能力。

(1) 改进初始种群

在传统的遗传算法中，初始种群是随机产生的。如果初始种群选择不合理，会导致遗传算法收敛速度减慢，甚至出现局部收敛的情况，因此，需要对初始种群进行筛选，选择其中适应度较高的个体以提升种群整体的适应度，从而提高规划算法的全局收敛性。

(2) 改进交叉和变异概率

标准遗传算法中，种群的交叉和变异概率都是恒定值，但对于复杂问题，该方式搜索时间长，迭代求解效率低，且容易出现局部收敛现象。因此，本文对传统遗传算法进行自适应改进，在迭代过程中，如果种群个体出现局部收敛或发散的趋势时，则通过人工干预的方式调整交叉和变异的概率。具体来说，在种群进化过程中，可以通过提高交叉和变异概率的方式来防止个体出现局部最优收敛现象，相反若有发散趋势时，则降低交叉和变异的概率。

本文采用自适应遗传算法求解光伏并网规划问题，在种群进化过程中根据个体迭代趋势动态调整交叉和变异概率，以提升算法的全局搜索能力。具体的表达式如下式所示：

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{P_{c1} - P_{c2}}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}(f_c - f_{\text{avg}}), f_c \geq f_{\text{avg}} \\ P_{c1}, f_c < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (4-17)$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{P_{m1} - P_{m2}}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}(f_{\max} - f_m), f_m \geq f_{\text{avg}} \\ P_{m1}, f_m < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (4-18)$$

式中， P_c 和 P_m 分别表示交叉和变异概率； P_{c1} 和 P_{c2} 分别表示最高和最低交叉概率，通常取 0.9 和 0.4-0.6； P_{m1} 和 P_{m2} 分别表示最高和最低变异概率，通常取 0.1 和 0.001； f_c 和 f_m 表示个体交叉和变异的适应度值； f_{\max} 和 f_{avg} 表示每代种群中最大和平均的适应度值。

(3) 改进选择方法

传统的遗传算法通常采用轮盘对赌的方式来选择子代，个体的适应度越高，被保留至下一代的可能性越大，该种选择方式容易产生超级适应度后代，在子代个体中占绝对优势，从而使种群失去优良个体。本文采用的 NSGA-II 算法通过锦标赛的方法对种群中的个体随机两两比较适应度值以实现对个体的选择，保留高适应度个体并将其复制到下一代。可以有效避免高适应度个体通过交叉和变异被淘汰，重复进行上述操作直至满足新一代种群规模。该方法能够在有效保留种群中高适应度个体的同时，使种群在解空间分布更加合理，有效避免了局部最优

收敛现象。

4.4 算例分析

本节基于 MATLAB 平台的 IEEE 33 节点配电网系统，对前文章节提出的分布式光伏并网规划算法进行分析。前文通过 CFSFDP 算法将配电网分为 5 个区域，并在每个区域内安装分布式光伏电源进行配电网分区调控，通过计算选择 11、17、21、26、32 节点处安装光伏，如图 4-4 所示。

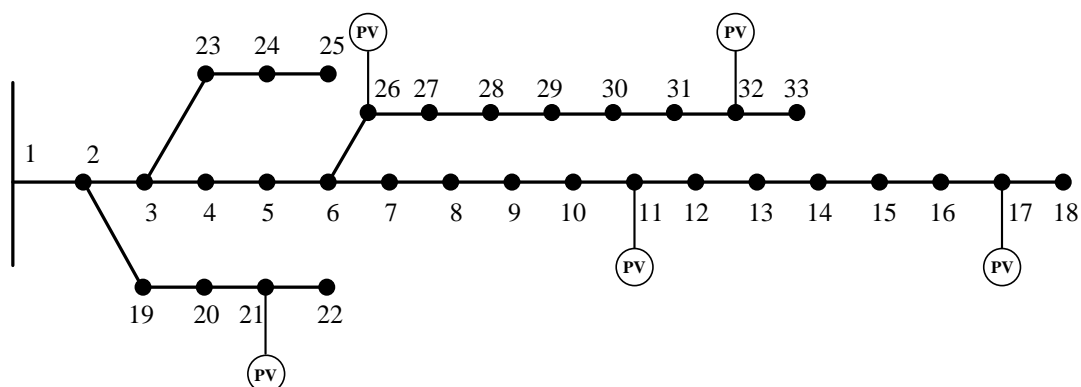


图 4-4 含分布式光伏配电网接线图

其中，每个光伏安装节点最大允许安装的容量为 1MW，单个分布式光伏的额定装机容量为 100kW，即每个节点最多可安装 10 个分布式光伏， $P_i^{\max}=1000\text{kW}$ 。同时，考虑当地的光伏渗透率 $\beta=0.25$ ，即光伏的初始安装总容量不应超过该地区最大负荷有功功率的 25%。此外，考虑配电网光伏接纳能力分析的适应性，在任意时刻光伏出力不宜超过该时刻负荷有功功率的 $\chi=0.95$ 。根据统计，该地区一年中各典型场景的概率如表 4-1 所示；分布式光伏规划的相关参数如表 4-2 所示。

表 4-1 我国华东某地区 2020 年各典型日场景的概率

	晴	多云	阴	雨
春	0.139	0.068	0.029	0.013
夏	0.060	0.080	0.060	0.049
秋	0.064	0.086	0.067	0.033
冬	0.044	0.072	0.072	0.061

表 4-2 分布式光伏规划模型相关参数

规划周期	贴现率	γ_{sell} / [元/	γ_{gov} / [元/	γ_{ini} / [元/	γ_{rep} / [元/	η
Y/a	r/%	(kW·h)]	(kW·h)]	(kW)]	(kW·h)]	
20	5	0.725	0.150	12000	0.120	0.1

本文通过改进的 NSGA-II 算法基于 MATLAB 平台迭代求解多目标优化模型。为提升配电网分布式光伏规划的适应性,同时提升 NSGA-II 算法迭代寻优效率,本文减少目标函数的个数,将配电网电压和潮流平均越限风险转化为自适应惩罚成本,并与光伏运营商年平均净收益综合考虑进行规划。节点电压越限风险罚函数和支路潮流越限风险罚函数可以分别表示为:

$$F_v = \begin{cases} 1.75 \times 10^5 R_v, 0 < R_v \leq 0.015 \\ 3.25 \times 10^5 R_v + 1.375 \times 10^3, 0.015 < R_v \leq 0.02 \\ 5.75 \times 10^5 R_v + 2.045 \times 10^3, R_v > 0.02 \end{cases} \quad (4-19)$$

$$F_s = \begin{cases} 2.15 \times 10^5 R_s, 0 < R_s \leq 0.015 \\ 5.25 \times 10^5 R_s + 2.1 \times 10^3, 0.015 < R_s \leq 0.02 \\ 7.75 \times 10^5 R_s + 4.4 \times 10^4, R_s > 0.02 \end{cases} \quad (4-20)$$

经调整后该模型的目标函数变为:

$$\begin{cases} \max L = P - C - F_v - F_s \\ \min P_{loss} = \frac{1}{N_t} \sum_{s=1}^{N_s} \alpha_s \sum_{t=1}^{N_t} P_{s,t}^{loss} \end{cases} \quad (4-21)$$

分布式光伏并网规划模型通过改进的自适应 NSGA-II 算法求解,考虑多场景全周期情况下分布式光伏接入配电网的适应性规划方案如表 4-3 所示。

表 4-3 光伏并网适应性规划方案

安装节点	光伏安装个数/个 (总容量/kW)
11	1 (100kW)
17	5 (500kW)
21	1 (100kW)
26	1 (100kW)
32	4 (400kW)

为了分析分布式光伏接入后对配电网运行特性和经济效益的影响,下面比较了接入分布式光伏前后年平均净收益和配电网电压及潮流的越限程度,具体的计算结果如下表 4-4 和 4-5 所示:

表 4-4 光伏并网方案的结果对比分析

方案	安装节点及 容量/kW	年平均净收益 / 元	平均有功网 损/kW	平均电压偏 差/p.u.	平均潮流偏 差/p.u.
无光伏接入 配电网	/	0	148.1429	0.0438	0.0008
分布式光伏 接入配电网	11 (100kW)	58771.23	132.6079	0.0408	0.0004
	17 (500kW)				
	21 (100kW)				
	26 (100kW)				
	32 (400kW)				

表 4-5 光伏并网方案的经济性分析

光伏规划年均净收益 /元	节点电压越限年均 惩罚成本/元	支路潮流越限年均惩 罚成本/元	规划综合年均收益 /元
58771.23	6764.84	10621.49	41384.90

从对比结果可以看出,分布式光伏接入配电网后光伏运营商能够获得经济利益,其年平均净收益为 58771.23 元。从配电网运行的角度来看,光伏并网可以降低配电网的平均有功网损,提升电网运行的经济效益。同时分布式光伏的接入还可以减小配电网平均节点电压偏差和平均支路潮流偏差,改善系统的电能质量,降低了配电网运行过程中电压和潮流越限的风险,提升了配电网运行规划的可靠性和适应性。

4.5 本章小结

本章从分布式光伏并网规划的可靠性、经济性和适应性角度出发,建立了考虑多场景全周期的分布式光伏并网规划模型。基于配电网运行安全性的角度出发,同时综合考虑了光伏运营商的经济效益,本章选择了年平均净收益、有功网损、电压和潮流越限风险等指标来建立目标函数,同时以系统潮流等作为约束条件,建立了分布式光伏并网规划模型。其次,本章介绍了 NSGA-II 遗传算法的求解原理,在此基础上,通过动态调整算法种群交叉和变异的概率等方式提升算法的搜索能力和寻优效率。此外,为了提升配电网分布式光伏规划的可靠性和适应性,本章通过将配电网电压和潮流越限风险转化为自适应惩罚成本的方式,与光伏运营商年平均净收益最大目标函数综合考虑来将多目标规划问题转化为双目标规

划问题，实现了模型的简化。最后，基于 MATLAB 仿真平台，利用改进的自适应 NSGA-II 算法对 IEEE 33 节点配电系统算例进行分析，实现了含分布式光伏的配电网多场景和全周期地适应性运行规划。

第五章 总结与展望

5.1 总结

分布式光伏电源具有低碳、清洁、经济等突出优势，近年来得到了迅速地推广，但是分布式光伏受季节和天气等因素的影响出力具有明显的波动性，接入配电网后会影响电网的安全稳定运行。同时配电网的负荷需求也具有不确定性，进一步加剧了系统节点电压和支路潮流越限的风险。为了确保配电网能够安全、可靠、经济运行，需要对分布式光伏的安装位置和容量进行合理规划。本文首先对配电网的越限风险进行合理评估，并考虑多场景和全周期对分布式光伏进行适应性规划，最后基于 MATLAB 平台进行算例分析，取得的研究成果主要如下：

（1）本文首先介绍了配电网风险的定义和求取方式，得到了电压和潮流越限风险评估的计算表达式，通过各种风险发生的概率和严重度对风险进行描述，建立了配电网运行过程的风险评估指标。

（2）基于多场景目标规划的考虑，针对负荷的不确定性和光伏出力的波动性等问题，采用 PCA 降维聚类的方式对日场景进行分析，得到了 4 种不同季节下的负荷需求时序曲线和 16 种不同季节和天气下的日光伏出力曲线，定义了 16 种典型日场景。

（3）为了选择分布式光伏的安装节点，以及分布式光伏并网后发生越限时系统能够快速反应，本文采用 CFSFDP 算法对配电网进行分区。首先通过潮流计算求取配电网综合电压灵敏度矩阵，计算各节点间的电气距离，然后求解各节点的局部密度和距离综合指标，通过决策图和二维节点分布图对配电网进行分区并选择分布式光伏的安装节点，最后，根据分区结果提出了一种先无功后有功的电压分区调控策略。

（4）在前文的基础上，综合考虑配电网分布式光伏规划的可靠性和适应性及光伏运营商的经济效益，建立了多场景全周期的分布式光伏并网适应性规划模型，将电压和潮流越限风险转化为自适应惩罚成本，选择年平均净收益、平均有功网损为目标函数建立多目标优化模型，通过改进的 NSGA-II 算法对模型求解，最后，基于 MATLAB 仿真平台对 IEEE 33 节点配电系统算例进行分析，实现了分布式光伏并网自适应规划。结果表明，分布式光伏的接入可以提升系统经济效益，降低配电网平均有功网损，降低电压和潮流越限的风险，从而提升了配电网运行的可靠性。

5.2 未来展望

本文实现了分布式光伏接入配电网的多场景和全周期地适应性规划，虽然取得了一定的研究成果，但本文的研究内容仍有很大的拓展空间，以下方面未来值得进一步探究：

（1）本文对分布式光伏并网进行风险评估时，仅考虑了电压和潮流两种越限风险，而没有对其他运行风险进行分析。为了提升含分布式光伏配电网风险评估的可靠性，未来可以对频率失稳、失负荷等风险进行深入研究。

（2）本文在选择分布式光伏的安装节点时，直接根据配电网分区结果选定安装位置，并没有单独进行光伏安装节点的规划。在今后的研究过程中，可以结合整数规划等优化算法对分布式光伏安装节点规划问题开展深入研究。

（3）工程实际中通常通过储能装置进行调压、改善线路的潮流结构，储能装置具有削峰填谷的作用，后续研究可考虑分布式光伏与储能等后备电源综合规划来建立光储联合系统的规划模型。

参考文献

- [1] Wang S, Dong Y, Wu L, et al. Interval overvoltage risk based PV hosting capacity evaluation considering PV and load uncertainties[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3): 2709-2721.
- [2] 金卓就, 向铁元, 陈红坤, 等. 考虑电能质量问题的分布式光伏发电接入规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 1-8.
- [3] 付丽伟, 王守相, 张永武, 等. 多类型分布式电源在配电网中的优化配置[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 6.
- [4] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14.
- [5] Rodrigues E.M.G., Godina R., Marzband M., et al. Simulation and comparison of mathematical models of PV cells with growing levels of complexity[J]. Energies, 2018, 11(11): 2902-2922.
- [6] Madaeni S.H, Sioshansi R, Denholm P. Comparing capacity value estimation techniques for photovoltaic solar power[J]. IEEE Transaction on Photovoltaics, 2013, 3(1): 407-415.
- [7] 李继红, 戴彦, 王超, 等. 大电网连锁故障的风险分析及对策[J]. 电网技术, 2011, 35(12): 43-49.
- [8] Negnevitsky M, Nguyen D.H, Pickutowski M. Risk assessment for power system operation planning with high wind power penetration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3): 1359-1368.
- [9] 杜鹏. 城市电网规划项目风险评价研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [10] 熊飞, 董蓓蓓, 李更丰. 含间歇性分布式电源的配电系统风险评估[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 62-67.
- [11] Xiao F, Mccalley J. Power system risk assessment and control in a multi-objective framework[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 24(1): 78-85.
- [12] Ciapessoni E, Cirio D., Grillo S, et al. An integrated platform for power system security assessment implementing probabilistic and deterministic methodologies [J]. IEEE Systems Journal, 2013, 7(4): 845-853.
- [13] Khatod D.K., Pant V, Sharma J. Analytical approach for well-being assessment of

- small autonomous power system with solar and wind energy sources[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(2): 535-545.
- [14] Zhang P, Wang Y, Xiao W, et al. Reliability evaluation of grid-connected photovoltaic power system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(3): 379-389.
- [15] El-Khattam W, Hegazy Y.G., Salama M.M.A. Investigating distributed generation systems performance using monte carlo simulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 524-530.
- [16] 别朝红, 王锡凡. 蒙特卡洛法在评估电力系统可靠性中的应用[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(6): 68-75.
- [17] Dhople S.V, Dominguez-Garcia A.D. Estimation of photovoltaic system reliability and performance metrics [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 554-563.
- [18] Zhang H, Ji C, Ping Y, et al. Research on risk assessment in distribution network with PV generations [C]. 2018 3rd International Conference on Integrated Circuits and Microsystems, Shanghai, China, 2018: 249-253.
- [19] Li X, Zhang X, Wu L., et al. Transmission line overload risk assessment for power systems with wind and load-power generation correlation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(3):1233-1242.
- [20] Wan H, McCalley J.D., Vittal,V. Risk based voltage security assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(4): 1247-1254.
- [21] 陈亚林. 分布式发电接入配电网影响及其主动管理技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [22] 张沈习, 程浩忠, 邢海军, 等. 配电网中考虑不确定性的分布式电源规划研究综述[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9): 1-9.
- [23] 王宣定, 吴文传, 刘锚, 等. 基于多参数规划的有源配电网分布式光伏容量评估方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(24): 20-26.
- [24] 章力, 高元海, 熊宁, 等. 考虑潮流倒送约束的分布式光伏电站选址定容规划[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 43-48.
- [25] 梅红兴, 程浩忠, 王宸, 等. 主动配电网中分布式电源优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(11): 1-8.
- [26] 杨毅, 韦钢, 周冰, 等. 含分布式电源的配电网模糊优化规划[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(13): 19-23.
- [27] 张节潭, 程浩忠, 姚良忠, 等. 分布式风电源选址定容规划研究[J]. 中国电

- 机工程学报, 2009, 29(16): 1-7.
- [28] Li J, Peng J. Task scheduling algorithm based on improved genetic algorithm in cloud computing environment[J]. Journal of Computer Applications, 2011, 31(1): 184-186.
- [29] Gouveia E, Matos M. Evaluating operational risk in a power system with a large amount of wind power[J]. Electric Power Systems Research, 2010, 79(5): 734-739.
- [30] 王钰楠, 杨镜非, 何也帅, 等. 基于复杂网络理论的主动配电网多级运行风险快速评估[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 65-71.
- [31] 麻秀范, 崔换君. 改进遗传算法在含分布式电源的配电网规划中的应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(03): 175-181.

致 谢

行文至此，本科的毕设工作即将收官，我的大学时光也将要画上句号。自己在天大的四年里，收获的宝贵知识固然重要，但唯有学会了思考，才让我找准了未来的方向，收获了更快的成长。开放包容、严谨求是是我与每一位天大老师交流过程中最直观的感受，感谢天津大学这座巨轮载着我不断追寻自己的梦想，何其有幸能够在这里度过四载时光，遇到了志趣相投的人，每一天都充满了乐趣与挑战。

首先，感谢我的学部。在求是学部开阔的框架下，我恣意遨游、广泛涉猎，获得了提前接触科研的机会，也收获了一段又一段充实的竞赛经历。感谢学部的栽培，让我能够全方面发展，感谢学部提供的机会，让我能够选择电气工程及其自动化专业，有机会领略强电之美。

其次，感谢老师和师长。感谢王守相老师、赵倩宇老师、尹孜阳博士对我毕设工作的耐心指导，让我一次又一次在困难面前学会坚持，也让我体会到了科研人的严谨和踏实。感谢穆云飞老师、赵金利老师对我大创工作的指导，帮助我打开了科研的大门，让我有机会在电气学科领域不断探索。感谢本科阶段每一位授课教师的辛勤付出，让我能够不断深化知识体系，厚积薄发。

此外，感谢我的父母。他们的陪伴给予了我家的温暖，是我成长过程中不可或缺的一环，给予了我无限的安全感。父母用善良的品行潜移默化地教育着我，教会我如何成长，让我懂得要学会感恩。从材料到电气再到金融专业，每一次重要的选择都离不开父母的支持，亲人的鼓励是我继续前进的动力。

最后，感谢那个为了梦想而拼搏的自己。四年时光，无数次的困难与挑战，感谢自己从未放弃前进的脚步。从北洋园凌晨两三点的夜到卫津路的漫天繁星，新老校区的图书馆和教学楼都曾留下了我拼搏的身影。虽然也有过怀疑、有过踌躇、有过对未来的迷茫，但这些经历将成为我人生中宝贵的精神财富。升研之际，我再次选择了一个新的专业，希望自己未来仍能坚定执著地走下去，不忘初心。

巍峨的北洋学府承载着我的青春和梦想，也见证了我的成长与蜕变，我感谢这里的每一位师友，每一座建筑，感谢这里的一草一木。如今，这座凝聚了悠久历史文化和现代工学氛围的学府将继续承载着我的梦想伴随我走向下一个人生战场。犹记得电机学么莉老师曾经说过，天大的学生要自信。未来，我将牢记这句话，永远铭记北洋学子的身份。实事求是的校训也已融入我的血脉，让我受益终生。