

配电网中考虑不确定性的分布式电源规划研究综述

张沈习¹,程浩忠¹,邢海军¹,姚良忠²,张逸³

(1. 上海交通大学 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室,上海 200240;

2. 中国电力科学研究院,北京 100085;3. 福建省电力科学研究院,福建 福州 350007)

摘要: 间歇性分布式电源接入配电网运行大幅增加了配电网中的不确定性因素,给相关规划工作带来了新的挑战。介绍了适用于规划阶段的风电、光伏和负荷等一系列不确定性因素的建模工作;评述了传统配电网中考虑不确定性的分布式电源(DG)规划方法,包括多场景规划方法、机会约束规划方法和模糊规划方法;综述了主动配电网中考虑不确定性的规划方法,包括单层规划方法和双层规划方法。在此基础上,从网源协调规划、风险规划、考虑全生命周期成本的 DG 规划、考虑需求侧管理的 DG 规划和考虑储能系统接入的 DG 规划等方面着手,展望了配电网中考虑不确定性的 DG 规划领域在未来可能出现的理论和方法。

关键词: 配电网; 不确定性分析; 分布式电源; 选址定容; 规划

中图分类号: TM 715⁺.2

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.08.001

0 引言

近年来,分布式电源 DG(Distributed Generation)技术得到了快速发展,并成为智能电网背景下电力系统的研究热点之一。DG 合理地接入配电网运行对提高电压质量、降低网络损耗、缓解电力紧张、改善系统可靠性和减少环境污染等均能起到重要的作用^[1-5];但是当 DG 接入不合理时,也会对配电网带来一些不利影响,例如谐波污染、电压波动和技术经济风险增大等问题^[1-5]。

为了充分发挥 DG 的优势并减少其不利影响,有必要对接入配电网的 DG 进行合理的选址定容规划。配电网中 DG 选址定容规划可定义为:在已知规划期间内负荷预测的结果以及现有配电网基本状况的基础上,确定 DG 在配电网中的安装类型、安装位置、安装容量和安装时间等,使得整个规划期内配电网的经济性、可靠性和安全性等达到最优。

DG 按出力特性不同可分为稳定出力型 DG 和间歇出力型 DG 两大类。稳定出力型 DG 主要包括微型燃气轮机、冷热电联产发电机、柴油发电机、燃料电池等。间歇出力型 DG 亦可称为间歇性 DG,主要包括分布式风电、分布式光伏发电等。间歇性 DG 的输出功率具有明显的间歇性、随机性和波动性,接入配电网运行后,将大幅增加配电网中的不确定性,从而影响配电网运行过程中的各项指标,且影

响程度与接入的位置和容量有着密切的关系,给相关规划工作带来了新的挑战^[3]。

配电网按照是否在运行过程中采用主动管理措施可分为 2 类:一类是传统的不考虑主动管理措施的传统配电网 TDN(Traditional Distribution Network);另一类则是考虑一系列主动管理措施的主动配电网 ADN(Active Distribution Network)^[6-8]。

目前,配电网中考虑不确定性的 DG 规划研究主要可归结于以下 3 个方面。

(1) 不确定性因素的建模研究。

不确定性因素的建模研究是配电网中考虑不确定性的 DG 规划的基础,其涉及风电和光伏的出力特性、负荷的不确定性、未来电价的不确定性和燃料成本的不确定性等。

(2) TDN 中的 DG 规划方法。

DG 接入 TDN 后,遵循“安装即忘记”的原则,即 DG 在运行过程中不接受来自配电网的主动管理和控制。目前,TDN 中考虑不确定性的 DG 规划方法主要有 3 类:第 1 类是基于多场景技术的规划方法;第 2 类是基于机会约束理论的规划方法;第 3 类则是基于模糊数学理论的规划方法。

(3) ADN 中的 DG 规划方法。

ADN 是目前智能配电网一种新的发展模式,能利用先进的自动化、通信和电力电子等新技术实现对接入配电网的 DG 和其他设备进行主动管理^[6-8]。目前,ADN 中考虑不确定性的 DG 规划方法主要包括单层规划方法和基于双层规划理论的双层规划方法。

下文将依次从上述 3 个方面综述目前配电网中考虑不确定性的 DG 规划相关问题的研究现状和研究成果,分析其面临的挑战和机遇,并展望未来可能的发展方向。

收稿日期:2015-09-10;修回日期:2016-07-05

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2014-AA051901);国家自然科学基金资助项目(51261130473)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2014AA05-1901) and the National Natural Science Foundation of China(51261130473)

1 配电网中不确定性因素的建模

1.1 风电的不确定性

风速是影响风电出力的主要因素,风速的不断变化会使得风电的输出功率在 0 到额定值之间波动。现有研究中用来描述风速的不确定性主要有 3 类模型:概率模型^[9-17]、模糊模型^[18]和区间模型^[19-20]。风速的概率模型包括 Weibull 分布^[9-15,21]、Rayleigh 分布^[14,16-17]、Inverse Gaussian 分布^[14]和 LogNormal 分布^[14-15]等。其中,两参数 Weibull 分布是应用最广泛的一种,该分布的 2 个参数(尺度参数和形状参数)可通过对观测到的历史风速数据进行统计计算得到,常用方法包括极大似然估计法^[22]、均值和方差估算法^[23]、最小二乘法^[24]等。风速的模糊模型^[18]以模糊数学理论为基础,采用三角模糊数和梯形模糊数等来描述风速的不确定性,主要适用于风速不具备统计性质的场合。风速的区间模型^[19-20]基于区间数理论,采用区间数来表征风速的不确定性,主要用于风速预测结果不精确但在一定范围内准确的场合。

研究风速分布的不确定性模型是为了确定风电的出力。风电的出力特性主要取决于风速,通常可用风电的切入风速、额定风速和切出风速 3 个参数来描述。当风速小于切入风速或大于切出风速时,风电的出力为 0;当风速大于额定风速且小于切出风速时,风电的出力可达额定值;当风速介于切入风速和额定风速时,文献^[25]认为风电的出力和风速的关系是三次函数关系,文献^[26-27]则认为风电的出力和风速之间的关系可近似为线性。

1.2 光伏的不确定性

光伏发电的出力受很多因素的影响,例如太阳能光照强度、光伏组件表面的温度和湿度等,其中受太阳能光照强度的影响最大^[27]。光照强度的变化会使得光伏发电的输出功率在 0 到额定值之间变化。现有研究工作中用来描述光照强度的不确定性主要有 2 类模型:概率模型^[9-11,27-31]和区间模型^[20]。光照强度的概率模型包括 Beta 分布^[9,11,28-31]和 Weibull 分布^[10,27]等。其中,Beta 分布是应用最广泛的一种,该分布的参数可通过对历史数据进行统计计算得到,常用的方法是均值和方差估算法^[9,28-29]。光照强度的区间模型^[20]则是采用区间数来描述其不确定性,具有模型简单的特点。

对光照强度进行不确定性建模是为了确定光伏发电的出力。文献^[9,30]认为光伏发电的出力与光照强度呈正比例关系;文献^[10,27,29,31]在建模过程中引入额定光照强度这一参数,认为当光照强度小于额定光照强度时,光伏发电的出力与光照强度呈正比例关系,当光照强度大于额定光照强度时,光伏发电的出力恒为额定值。

1.3 负荷的不确定性

负荷预测误差和负荷的波动性导致未来负荷具有不确定性。目前负荷的不确定性模型主要包括概率模型^[9-12,26-27]、模糊模型^[32-34]和区间模型^[19-20]。负荷的概率模型最常见的是正态分布,其参数可通过非参数概率密度估计法^[35]来估算。模糊模型^[32-34]和区间模型^[19-20]则分别采用模糊数和区间数来表征负荷的不确定性。

1.4 其他不确定性

除了风电、光伏和负荷的不确定性外,配电网中还存在其他一些不确定性因素,例如配电网向上级电网购电电价的不确定性、燃料成本的不确定性等。购电电价会随着市场的波动而变化,常用正态分布^[16,35]、模糊数^[32-34]、几何布朗运动^[27]等来表示未来电价的不确定性。对于需要燃料的 DG(例如微型燃气轮机、柴油发电机等),其运行成本以燃料成本为主,而未来的燃料价格会受很多因素影响,要准确预测并不容易,一般认为未来燃料价格的随机变化可用模糊数^[32-33]、几何布朗运动^[10,27]等来描述。

2 TDN 中考虑不确定性的 DG 规划

TDN 中考虑不确定性的 DG 规划方法主要可分为 3 类:第 1 类是基于多场景技术的规划方法;第 2 类是基于机会约束理论的规划方法;第 3 类则是基于模糊数学理论的规划方法。这 3 类规划方法对应的规划模型、求解算法和特点具体如下所述。

2.1 基于多场景技术的 DG 规划方法

基于多场景技术的 DG 规划方法的思路是:将风电、光伏和负荷等不确定性因素可能的取值通过某种规则选取出来并进行一一枚举,从而组成一系列“规划场景”,每个“规划场景”对应一组确定的规划参数,从而将不确定性问题处理成一系列确定性问题。

现有的基于多场景技术的 TDN 中考虑不确定性因素的 DG 规划方法具体如下。文献^[28]将风电出力、光伏出力和负荷分为多个场景组合,以系统年网损最小为目标,建立了多类型可再生能源 DG 优化配置的混合整数非线性规划模型。文献^[36]基于多场景技术,研究了考虑 DG 无功出力约束的多阶段规划问题。文献^[37]选取一个典型日,采用多场景技术建立了考虑环境成本的 DG 优化配置模型。文献^[38]将风电出力、负荷和电价分为多个场景,以总费用最低和技术风险最小为目标,建立了多目标 DG 规划模型。文献^[39]将 DG 出力时序特性曲线和负荷时序特性曲线离散化并组合成多个耦合场景,以网损最小和停电损失最小为目标建立规划模型。

上述基于多场景技术的 DG 规划模型的一般形式可概括为:

$$\begin{cases} \min f(E,X) \\ \text{s.t. } h(E,X) \leq 0 \\ g(E,X) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, $f(E,X)$ 为目标函数,一般以费用最小、损耗最小、技术风险最小等为目标; E 为 DG 的投资决策变量,包括 DG 的安装类型、位置、容量和时间等; X 为状态变量,包括各场景的节点电压幅值和相角、支路功率等; $h(E,X) \leq 0$ 为不等式约束,包含了各场景的节点电压幅值上下限约束、各场景的支路功率约束、可靠性约束、DG 渗透率约束、DG 待选节点的装机容量上限约束等; $g(E,X) = 0$ 为等式约束,包含了各场景的潮流方程约束和节点功率平衡方程约束等。

式(1)属于混合整数非线性规划模型,现有文献中常用的求解方法有 2 类:一类是基于商业软件平台(例如 GAMS^[28])的求解方法;另一类则是以粒子群优化算法^[37]和遗传算法^[38-39]为代表的智能算法。

2.2 基于机会约束理论的 DG 机会约束规划方法

基于机会约束理论的 DG 规划方法以不确定数学理论中的机会约束方法为基础,将规划过程中的大量不确定性因素用相应的随机变量加以描述和模拟,并将这些数学变量直接纳入建模过程^[40]。

文献[3]建立了考虑无功补偿装置因素影响的间歇性 DG 机会约束规划模型,该模型考虑了风电、光伏和负荷的不确定性,着重研究了无功补偿装置对规划结果的影响;文献[10,27]计及电动汽车充放电电站的不确定性,建立了 DG 多阶段机会约束规划模型,重点研究了可再生能源 DG 带来的潜在效益;文献[12]以年综合费用最小为目标,基于机会约束方法建立了 DG 选址定容规划模型,并分析了不同置信水平对规划结果的影响;文献[26]以独立发电商收益最大为目标,建立了 DG 选址定容规划模型,同样分析了不同置信水平对规划结果的影响;文献[41]考虑风电和光伏出力的互补性,利用机会约束规划方法研究了间歇性 DG 的优化配置问题;文献[42]利用相关系数矩阵描述风电和负荷间的相关性,建立风电选址定容多阶段机会约束规划模型,重点研究了相关性对规划结果带来的影响;文献[43]针对在不同发展阶段可能存在不同的 DG 投资主体,以机会约束理论为基础,建立了考虑配电网运营商需求指标和用户需求指标的 DG 优化配置模型。

TDN 中考虑不确定性的 DG 机会约束规划模型的一般形式如下:

$$\begin{cases} \min f(E,X) \\ \text{s.t. } P\{f(E,X) \leq \bar{f}\} \geq \alpha \\ P\{h_1(E,X) \leq 0\} \geq \beta \\ h_2(E,X) \leq 0 \\ g(E,X) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $f(E,X)$ 为目标函数; E 为 DG 的投资决策变量; X 为包含随机变量的状态变量; α 和 β 均为决策者预先给定的置信水平; $\bar{f}$ 为给定置信水平 α 下能实现的最优目标函数值; $P\{\cdot\}$ 为 $\{\cdot\}$ 中事件成立的概率; $h_1(E,X) \leq 0$ 通常为节点电压约束和支路功率约束; $h_2(E,X) \leq 0$ 为常规不等式约束,主要有 DG 渗透率约束、DG 待选节点的装机容量上限约束、可靠性约束等; $g(E,X) = 0$ 为等式约束,主要有潮流方程约束、节点功率平衡方程约束等。

式(2)属于复杂的混合整数非线性机会约束规划模型,难以采用传统的数学优化方法进行求解,一般采用智能算法结合概率潮流法进行求解。其中,智能算法(包括遗传算法^[3,10,27,41-43]、混合蛙跳算法^[12]、模拟植物生长算法^[26]等)是整个求解方法的框架,用于获得 DG 规划方案;概率潮流则用来模拟不确定性并检验智能算法中每个个体(一个个体对应一套 DG 规划方案)的机会约束条件。机会约束条件的检验方法关系到模型的计算速度和精度,现有文献中检验机会约束条件的方法主要有 3 种:(1)基于简单随机采样的蒙特卡洛模拟 SRS-MCS(Simple Random Sampling-based Monte Carlo Simulation)^[10,27];(2)基于拉丁超立方采样的蒙特卡洛模拟 LHS-MCS(Latin Hypercube Sampling-based Monte Carlo Simulation)^[12,42-43];(3)基于半不变量法和级数展开 SMSE(Semi-invariant Method and Series Expansion)^[3,26,41]的概率潮流法。3 种方法各有优缺点:文献[10,27]采用的 SRS-MCS 法在检验机会约束条件时具有操作简单的优点,但是该方法往往需要大量的采样规模才能保证计算结果的精度和稳定性,具有耗时长缺点;针对 SRS-MCS 法在检验机会约束条件时的缺点,文献[12,42-43]提出采用 LHS-MCS 法对机会约束条件进行检验,该方法能在保证计算精度的同时,大幅减少采样规模、缩短计算时间,且稳定性较好;文献[3,26,41]则提出了基于 SMSE 的概率潮流法对机会约束条件进行检验,该方法具有计算速度快、结果稳定的优点,但是计算精度相对较差。3 种检验机会约束条件的方法对比如表 1 所示。

表 1 机会约束条件检验方法的对比表
Table 1 Comparison among methods for checking chance constraints

方法	计算精度	稳定性	计算速度
SRS-MCS 法	很好	较差	很慢
LHS-MCS 法	很好	较好	一般
SMSE 法	较差	很好	相对较快

2.3 基于模糊数学理论的 DG 模糊规划方法

DG 模糊规划方法以不确定数学中的模糊理论为基础,将规划过程中的不确定性因素用相应的模糊数来表征。该方法的特点是不仅多个约束函数中的

物理量本身及其取值范围具有模糊性,而且目标函数本身及其趋优也具有模糊性。

文献[32]用三角模糊数来描述不确定性因素,在此基础上以总费用最少、技术风险最小和经济风险最小为目标建立 DG 多目标多阶段模糊规划模型;文献[33]利用模糊数来表征负荷需求、电力价格、DG 运行成本以及投资成本的不确定性,从经济、技术和环境方面对 DG 在既有配电网中的选址定容和技术比重规划进行优化;文献[34]基于模糊规划理论,以收益最大、技术风险最小和环境最友好为目标,以经济可靠运行的各种限制为约束条件,建立了 DG 多目标静态模糊规划模型。

基于模糊数学理论的 DG 模糊规划模型的一般形式可概括为如下形式:

$$\begin{cases} \min \tilde{f}(\mathbf{E}, \tilde{\mathbf{X}}) \\ \text{s.t. } \tilde{h}_1(\mathbf{E}, \tilde{\mathbf{X}}) \leq 0 \\ \quad h_2(\mathbf{E}) \leq 0 \\ \quad \tilde{g}(\mathbf{E}, \tilde{\mathbf{X}}) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\tilde{f}$ 为目标函数的模糊量; $\mathbf{E}$ 为 DG 的投资决策变量; $\tilde{\mathbf{X}}$ 为状态变量的模糊量,主要有负荷模糊量、电价模糊量、DG 出力模糊量、节点电压和支路功率模糊量等; $\tilde{h}_1(\mathbf{E}, \tilde{\mathbf{X}}) \leq 0$ 是含有模糊量的不等式约束,主要有节点电压模糊约束、支路功率模糊约束等; $h_2(\mathbf{E}) \leq 0$ 是只含决策变量的不等式约束,主要包括 DG 渗透率约束、DG 待选节点安装容量上限约束等; $\tilde{g}(\mathbf{E}, \tilde{\mathbf{X}}) = 0$ 是模糊等式约束,主要包括模糊潮流方程约束、模糊节点功率平衡约束等。

式(3)通常采用智能算法进行求解。文献[32]采用非支配排序遗传算法得到费用、技术风险和经济风险的折中解,并采用最大最小法选取最终规划方案;文献[33-34]同样采用非支配排序遗传算法得到多目标规划模型的帕累托最优解集,供决策者进行选择。

2.4 规划方法对比

基于多场景技术的 DG 规划方法可将不确定性规划模型转化为各自的确定性等价类,然后利用传统方法建立其等价的确定性规划模型,从而降低建模和求解的难度。但当不确定性因素过多时,如何对其进行合理的分类、组合,从而构成各种具有代表性的场景且保证模型的精度,是一大难点,也是制约其广泛应用的主要因素。

基于机会约束理论的 DG 机会约束规划方法能够精确地利用随机变量的表达式来描述 DG 规划时的不确定性因素。该方法最大的特点是允许最终的 DG 规划方案在一定程度上不满足电气约束条件,且

能在规划过程中根据实际需求来控制规划方案的风险。该方法的缺点是当系统规模增大时,规划模型的计算时间普遍较长。

基于模糊数学理论的 DG 模糊规划方法采用模糊数来描述 DG 规划过程中的不确定性因素。和机会约束规划方法一样,DG 模糊规划模型的部分约束条件通常也采用软约束的形式。相比于机会约束规划方法,模糊规划方法的优点是无需知道不确定性因素的概率分布函数,缺点则是规划结果的精度不够高。

3 ADN 中考虑不确定性的 DG 规划

在 TDN 中,DG 接入后遵照“安装即忘记”的原则,这样不仅无法充分利用 DG 在降低网损、改善系统潮流分布等方面的积极作用,还很大程度上限制了 DG 的渗透容量。针对 TDN 的弊端,ADN 应运而生。ADN 是目前智能配电网一种新的发展模式,能利用先进的自动化、通信和电力电子等新技术实现对 DG 和其他设备进行主动管理和控制。

ADN 的出现给考虑不确定性的 DG 规划问题带来了新的挑战。在 ADN 中进行考虑不确定性的 DG 规划时,除了需要计及各种不确定性因素的影响外,还需在规划阶段模拟 ADN 的运行和主动管理措施。现有文献中考虑的主动管理措施主要包括调节 DG 的有功出力、调节 DG 的功率因数、调节有载调压变压器抽头、调节无功补偿装置和切负荷等[44-54]。

目前,ADN 中进行考虑不确定性的 DG 规划时,通常采用多场景技术[44-49]或概率模型[50-54]来处理各种不确定性因素。文献[44-49]均采用联合概率分布法来构建不确定因素的典型场景,从而将不确定性问题转化为一系列确定性问题;文献[50-54]采用概率模型来直接处理不确定性,并利用概率最优潮流技术[50-53]或者概率潮流技术[54-55]来计及不确定性因素。

ADN 中考虑不确定性的 DG 规划方法可以归纳为 2 类:一类是 DG 单层规划方法[44-48];另一类是基于双层规划理论的 DG 双层规划方法[49-54]。这 2 类规划方法的研究现状具体如下所述。

3.1 DG 单层规划方法

文献[44]对风电和负荷进行多场景分析,在此基础上以 DG 渗透容量最大为目标建立多时段优化规划模型;文献[45-47]考虑了风电出力和负荷之间的时序耦合性,分别以网损最小、DG 渗透容量最大、DG 发电量消纳最大为目标建立了优化模型;文献[48]考虑短路电流约束,以风电发电量消纳最大为目标建立规划模型,详细分析了不同主动管理措施组合对结果的影响。此类模型一般采用以内点法为基础的多时段最优潮流法进行求解。

3.2 DG 双层规划方法

双层规划方法是基于双层规划理论的一种分层

协调优化方法^[55]。文献[49]采用联合概率分布法来处理 DG 和负荷间的时序耦合性,在此基础上建立了 DG 选址定容双层规划模型;文献[50-51]以独立发电商收益最大为目标建立了 DG 在 ADN 中的优化配置双层规划模型;文献[52]以 DG 投资费用最小和网损最小为目标,建立了多目标 DG 规划模型;文献[53]基于双层规划理论,以年费用最小为目标建立了 DG 和无功补偿装置联合规划模型,上层规划用来优化 DG 的安装类型和容量,以及补偿电容器的容量,下层规划则用来优化 DG 和补偿电容器的日运行状态;文献[54]研究了间歇性 DG 和补偿电容器联合规划问题,采用双层规划模型得到的最优方案在兼顾经济效益的同时,还可利用补偿电容器进一步改善系统的电压质量,从而获得经济效益与电压质量的综合最优。

ADN 中考虑不确定性的 DG 双层规划模型的总体建模思路为:上层规划模型用于确定规划方案(包括 DG 安装类型、位置、容量和时间等),下层规划模型则用来确定 ADN 在不同场景下的最优运行方式。上、下层规划模型的数学表达分别如式(4)、(5)所示。

$$\begin{cases} \min f_U(E, X) \\ \text{s.t. } h_U(E) \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \min f_L(E, X) \\ \text{s.t. } h_L(E, X) \leq 0 \\ g_L(E, X) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中, f_U 和 f_L 分别为上、下层规划的目标函数; $h_U(E) \leq 0$ 为上层规划模型的不等式约束,包括 DG 待选节点安装容量上限约束、DG 渗透率约束、可靠性约束等; $h_L(E, X) \leq 0$ 为下层规划模型的不等式约束,包括节点电压约束、支路功率约束、DG 出力约束、DG 功率因数约束、无功补偿容量约束、有载调压变压器抽头约束和容量约束、切负荷量约束等; $g_L(E, X) = 0$ 为下层规划的等式约束,包括潮流方程约束、DG 出力的有功和无功关系约束等。

式(4)、(5)属于非常复杂的混合整数非线性双层规划模型,现有文献中主要有 2 类求解策略:(1)智能算法,例如文献[54-55]均采用遗传算法对 DG 双层规划模型进行求解;(2)混合求解算法,其将智能算法和内点法进行结合,用智能算法优化离散变量,用内点法优化连续变量,充分发挥各自的优点。混合求解算法中,智能算法是框架,用于确定上层规划中 DG 的安装类型、位置、容量和时间等;在智能算法的每次迭代过程中,需要确定 ADN 在每个场景中的最优运行方式。上层规划将 DG 规划方案传递给下层,下层规划则在此基础上对每个场景的 ADN 进行考虑主动管理措施的优化运行模拟,并将相应结果传递回上层,上层规划再利用下层规划传递来的结果计算目标函数值和适应度值,如此交替迭代直至收

敛。文献[50-51]采用模拟植物生长算法作为混合求解策略的外部框架,运用点估计法和内点法相结合的概率最优潮流法对下层规划模型进行求解;文献[52]采用差分进化算法结合内点法对模型进行求解;文献[53]采用非支配排序遗传算法结合内点法对模型进行求解,得到帕累托最优解集,供决策者选择。

3.3 规划方法对比

DG 单层规划模型采用的基于内点法的多时段最优潮流法具有计算速度快的优点,但是该方法难以处理离散变量,故难以计及 DG 安装容量的离散性约束。因此,该方法在应用中具有一定的局限性。

DG 双层规划采用了分层协调的思想,将 DG 模型划分为规划主问题和运行子问题,并采用交替迭代的思想对模型进行求解。DG 双层规划模型的 2 类求解方法各有优缺点:智能算法具有编程易实现的优点,但是采用该方法求解 DG 双层规划模型时,待优化变量非常多,尤其是当系统规模增大时,算法计算时间长、收敛速度慢且精度低,因此该求解方法具有一定的局限性;混合求解算法采用智能算法优化离散变量、用内点法优化连续变量,能够充分发挥各自的优点,是目前求解 DG 双层规划模型较为有效的一种方法。

4 未来发展方向

4.1 不确定性建模

配电网中的不确定性因素大都是相互影响且多重相关的,然而现有相关研究中大多假设各类不确定性因素相互独立,通常对各不确定性因素进行单一处理而忽略它们之间的相关性。虽然已有文献考虑了相关性,例如文献[39,41]采用典型日的时序来代表随机变量间的相关性,文献[42]在进行 DG 规划时利用相关系数矩阵考虑了风速和负荷间的相关性,文献[52]利用联合概率分布法处理风电出力和负荷间的相关性,但是这些方法在考虑相关性时都不够系统、全面,还需进一步考虑各节点间的风速相关性、各节点间的光照强度相关性、各节点间的负荷相关性等。因此,在配电网中进行考虑不确定性的 DG 规划时,如何建立能够全面考虑不确定性因素多重相关性的数学模型是一个亟待解决的问题。

4.2 规划模型

4.2.1 网源协调规划

在进行考虑不确定性的 DG 规划时,配电网的本身结构将会对规划结果造成重要的影响。传统的规划方法往往先进行网架规划,然后再进行 DG 规划,这样通常会导致最终的规划结果并非整体最优。此外, DG 作为配电网扩展规划的一种选择,给配电网的升级改造带来了新的挑战。因此,如何在满足各类技术经济约束条件的基础上实现 DG 和配电网的联合优化规划,将是未来考虑不确定性的 DG 规划领域

中一个值得研究的热点。

4.2.2 风险规划

风险规划本质上是不确定规划的进一步延伸。大量间歇性 DG 接入配电网后,规划中需要计及 DG、负荷和其他一系列不确定性因素,造成了规划结果的安全性和经济性均存在着一定的风险。因此,如何在不确定性环境下对技术风险和经济风险进行评估,并在此基础上通过规划的手段尽可能地降低风险,将是未来智能电网背景下 DG 规划领域的一个研究方向。

4.2.3 考虑全生命周期成本的规划

全生命周期成本建模的关键是要明确所包含的费用项目,即要列出设备或者系统的费用构成体系或分解结构^[56]。不同类型的 DG 设备或者不同规模的配电网,其分解结构也会不同,在计算全生命周期成本时不应漏掉重要的费用项目,也不允许重复计算费用项目。因此,如何对 DG 和配电网进行全生命周期建模和相关费用分解,在规划过程中尽可能详细地计及设备整个生命周期中的相关费用,从而使得规划方案利于未来的电力系统资产全寿命成本管理,将是一个研究难点。

4.2.4 考虑需求侧响应的 DG 规划

随着智能配电网的发展,各种需求侧响应和管理应运而生。目前,对需求侧响应的研究包括直接负荷控制、可中断负荷控制、紧急需求响应机制、分时电价机制、可靠性电价机制和关键峰荷电价等。不同的需求侧响应方式具有不同的特性。因此,如何针对需求侧响应本身的特性进行建模,并将其融入现有的考虑不确定性的 DG 规划模型将是未来智能配电网中的一个研究热点。

4.2.5 考虑储能系统接入的 DG 规划

随着储能技术的成熟,储能系统已在配电网中得到了示范性应用,能够起到平抑间歇性 DG 出力波动和削峰填谷等作用。储能系统在运行过程中需要遵循充放电状态约束、最大充放电功率约束、剩余容量约束和充放电次数约束等。若在 DG 规划阶段考虑储能系统的接入,其物理特性约束将使得配电网的前后运行状态之间存在时序耦合关系,意味着在规划过程中需要模拟包括储能系统在内的时序动态特性,这将大幅增加规划模型的复杂度。因此,如何在进行 DG 规划时合理地 对储能系统进行建模并计及其带来的时序动态特性,将是未来研究的一大挑战。

4.3 求解算法

配电网中进行考虑不确定性的 DG 规划时,模型的复杂度会随着电网规模的扩大和 DG 类型的增加而呈现指数形式的增长。目前,在求解配电网中考虑不确定性的 DG 规划模型时,通常采用基于智能算

法的求解策略,这类方法在小规模系统中的求解效果比较好,但是当问题规模增加时,其计算效率和收敛性均受到影响。此外,随着智能电网的发展,需求侧响应和储能技术在配电网中得到了推广,这大幅增加了规划模型的复杂度。因此,研究规划模型的合理简化方法、采用新思路或者新的数学理论来研究更高效的求解算法也将是一个非常重要的研究领域。

5 结语

本文围绕配电网中考虑不确定性因素的 DG 规划,综述了现有文献中不确定性因素的建模工作,评述了近年来配电网中考虑不确定性因素的 DG 规划模型和求解方法。在此基础上,从不确定性因素建模、规划模型和求解算法 3 个方面着手,展望了考虑不确定性因素的 DG 规划领域在未来可能出现的理论和方法,以期能为该领域将来的研究提供一些参考。

参考文献:

- [1] 王守相,王慧,蔡声霞. 分布式发电优化配置研究综述[J]. 电力系统自动化,2009,33(18):110-115.
WANG Shouxiang,WANG Hui,CAI Shengxia. A review of optimization allocation of distributed generations embedded in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(18):110-115.
- [2] 王建,李兴源,邱晓燕. 含有分布式发电装置的电力系统研究综述[J]. 电力系统自动化,2005,29(24):90-97.
WANG Jian,LI Xingyuan,QU Xiaoyan. Power system research on distributed generation penetration[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(24):90-97.
- [3] 邓威,李欣然,刘志勇. 考虑无功补偿影响因素的间歇性分布式电源综合优化配置[J]. 中国电机工程学报,2012,32(10):80-88.
DENG Wei,LI Xinran,LIU Zhiyong. Comprehensive optimal allocation of intermittent distributed generation considering reactive power compensation[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(10):80-88.
- [4] HADJSAID N,CANARD J,DUMAS F. Dispersed generation impact on distribution networks[J]. IEEE Computer Applications in Power,1999,12(2):22-28.
- [5] IPAKCHI A,ALBUYEH F. Grid of the future[J]. IEEE Power and Energy Magazine,2009,7(2):52-62.
- [6] D'ADAMO C,JUPE S,ABBEY C. Global survey on planning and operation of active distribution networks-update of CIGRE C6.11 working group activities[C]//CIRED 2009(20th International Conference on Electricity Distribution). Prague,Czech Republic:IET Services Ltd.,2009:1-4.
- [7] 尤毅,刘东,于文鹏,等. 主动配电网技术及其进展[J]. 电力系统自动化,2012,36(18):10-16.
YOU Yi,LIU Dong,YU Wenpeng,et al. Technology and its trends of active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(18):10-16.
- [8] 范明天,张祖平,苏傲雪,等. 主动配电系统可行技术的研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(22):12-18.
FAN Mingtian,ZHANG Zuping,SU Aoxue,et al. Enabling technologies for active distribution systems[J]. Proceedings of the

- CSEE,2013,33(22):12-18.
- [9] 王成山,郑海峰,谢莹华,等. 计及分布式发电的配电系统随机潮流计算[J]. 电力系统自动化,2005,29(24):39-44.
- WANG Chengshan,ZHENG Haifeng,XIE Yinghua,et al. Probabilistic power flow containing distributed generation in distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(24):39-44.
- [10] 刘志鹏,文福拴,薛禹胜,等. 计及可入网电动汽车的分布式电源的最优选址和定容[J]. 电力系统自动化,2011,35(18):11-16.
- LIU Zhipeng,WEN Fushuan,XUE Yusheng,et al. Optimal siting and sizing of distributed generators considering plug-in electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(18):11-16.
- [11] ZHANG S X,CHENG H Z,ZHANG L B,et al. Probabilistic evaluation of available load supply capability for distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2013,28(3):3215-3225.
- [12] 张沈习,陈楷,龙禹,等. 基于混合蛙跳算法的分布式风电源规划[J]. 电力系统自动化,2013,37(13):76-82.
- ZHANG Shenxi,CHEN Kai,LONG Yu,et al. Distributed wind generation planning based on shuffled frog leaping algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(13):76-82.
- [13] DONG Z Y,WONG K P,MENG K,et al. Wind power impact on system operations and planning[C]//2010 IEEE PES General Meeting. Minneapolis,America;IEEE,2010:1-5.
- [14] LO BRANO V,ORIOLI A,CIUULLA G. Quality of wind speed fitting distributions for the urban area of Palermo,Italy[J]. Renewable Energy,2011,36(3):1026-1039.
- [15] GARCIA A,TORRES J L,PRIETO E. Fitting wind speed distributions:a case study[J]. Solar Energy,1998,62(2):139-144.
- [16] SOROUDI A,AFRASIAB M. Binary PSO-based dynamic multi-objective model for distributed generation planning under uncertainty[J]. IET Renewable Power Generation,2012,6(2):67-78.
- [17] ATWA Y M,EL-SAADANY E F. Probabilistic approach for optimal allocation of wind-based distributed generation in distribution systems[J]. IET Renewable Power Generation,2011,5(1):79-88.
- [18] 洪芦诚,石立宝,姚良忠,等. 计及风电场发电功率不确定性的电力系统模糊潮流[J]. 电工技术学报,2010,25(8):116-130.
- HONG Lucheng,SHI Libao,YAO Liangzhong,et al. Fuzzy modeling and solution of load flow incorporating uncertainties of wind farm generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,25(8):116-130.
- [19] 王守相,徐群,张高磊,等. 风电场风速不确定性建模及区间潮流分析[J]. 电力系统自动化,2009,33(21):82-86.
- WANG Shouxiang,XU Qun,ZHANG Gaolei,et al. Modeling of wind speed uncertainty and interval power flow analysis for wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(21):82-86.
- [20] 韩亮,王守相. 含光伏风电的基于仿射算法的配电三相潮流计算[J]. 电网技术,2013,37(12):3413-3418.
- HAN Liang,WANG Shouxiang. Affine algorithm based calculation of three-phase power flow in distribution network connected with PV generation and wind generation[J]. Power System Technology,2013,37(12):3413-3418.
- [21] WENG Z X,SHI L B,XU Z,et al. Effects of wind power variability and intermittency on power flow[C]//2012 IEEE PES General Meeting. [S.l.];IEEE,2012:1-7.
- [22] 丁明,吴义纯,张立军. 风电场风速概率分布参数计算方法的研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(10):107-110.
- DING Ming,WU Yichun,ZHANG Lijun. Study on the algorithm to the probabilistic distribution parameters of wind speed in wind farms[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(10):107-110.
- [23] JANGAMSHETTI S H,RAU V G. Optimum siting of wind turbine generators[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2001,16(1):8-13.
- [24] KAMIO T,IIDA M,ARAKAWA C. Influences of the estimating methods on Weibull parameter for wind speed distribution in Japan[C]//Proceedings of European Wind Energy Conference & Exhibition. Milan,Italy:[s.n.],2007:7-10.
- [25] CHEN Y,WEN J Y,CHENG S J. Probabilistic load flow method based on Nataf transformation and Latin hypercube sampling[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2013,4(2):294-301.
- [26] 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.
- ZHANG Jietan,CHENG Haozhong,YAO Liangzhong,et al. Study on siting and sizing of distributed wind generation[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(16):1-7.
- [27] LIU Z P,WEN F S,LEDWICH G. Optimal siting and sizing of distributed generators in distribution systems considering uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2011,26(4):2541-2551.
- [28] ATWA Y M,EL-SAADANY E F,SALAMA M M A,et al. Optimal renewable resources mix for distribution system energy loss minimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2010,25(1):360-370.
- [29] ABOUZAHR I,RAMAKUMAR R. Loss of power supply probability of stand-alone photovoltaic systems;a closed form solution approach[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,1991,6(1):1-11.
- [30] KARAKI S H,CHEDID R B,RAMADAN R. Probabilistic performance assessment of autonomous solar-wind energy conversion systems[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,1999,14(3):766-72.
- [31] SARKAR S,AJJARAPU V. MW resource assessment model for a hybrid energy conversion system with wind and solar resources[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2011,2(4):383-391.
- [32] HAGHIFAM M R,FALAGHI H,MALIK O P. Risk-based distributed generation placement[J]. IET Generation,Transmission & Distribution,2008,2(2):252-260.
- [33] 曾鸣,杜楠,张巍,等. 基于多目标静态模糊模型的分布式电源规划[J]. 电网技术,2013,37(4):954-959.
- ZENG Ming,DU Nan,ZHANG Kun,et al. Distributed generation planning based on multi-objective static fuzzy model[J]. Power System Technology,2013,37(4):954-959.
- [34] ZANGENEH A,JADID S,RAHIMI-KIAN A. A fuzzy environmental-technical-economic model for distributed generation planning[J]. Energy,2011,36(5):3437-3445.
- [35] CHARYTONIUK W,CHEN M S,KOTAS P,et al. Demand forecasting in power distribution system using non-parametric probability density estimation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1999,14(4):1200-1206.

- [36] ZOU K, AGALGAONKAR A P, MUTTAQI K M, et al. Distribution system planning with incorporating DG reactive capability and system uncertainties[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(1): 112-123.
- [37] 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): 79-84.
FU Liwei, WANG Shouxiang, ZHANG Yongwu, et al. Optimal selection and configuration of multi-types of distributed generators in distribution network[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 79-84.
- [38] SOROUDI A, CAIRE R, HADJSAID N, et al. Probabilistic dynamic multi-objective model for renewable and non-renewable distributed generation planning[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2011, 5(11): 1173-1182.
- [39] 李亮, 唐巍, 白牧可, 等. 考虑时序特性的多目标分布式电源选址定容规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 58-63.
LI Liang, TANG Wei, BAI Muke, et al. Multi-objective locating and sizing of distributed generators based on time-sequence characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 58-63.
- [40] 刘宝碇, 瑞清, 王纲. 不确定规划及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 79-82.
- [41] 邓威, 李欣然, 李培强, 等. 基于互补性的间歇性分布式电源在配网中的优化配置[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 216-225.
DENG Wei, LI Xinran, LI Peiqiang, et al. Optimal allocation of intermittent distributed generation considering complementarity in distributed network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 216-225.
- [42] 张沈习, 程浩忠, 李珂. 考虑相关性的风力发电机组多阶段选址定容规划[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 53-59.
ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, LI Ke. Multistage planning for wind turbine generator considering correlations[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 53-59.
- [43] 江知瀚, 陈金富. 计及不确定性和多投资主体需求指标的分布式电源优化配置方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 34-42.
JIANG Zhihan, CHEN Jinfu. Optimal distributed generation allocation method considering uncertainties and requirements of different investment entities[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 34-42.
- [44] OCHOA L F, DENT C J, HARRISON G P. Maximization of intermittent distributed generation in active networks[C]//CIRED Seminar 2008: Smart Grids for Distribution. Frankfurt, Germany: [s.n.], 2008: 1-4.
- [45] OCHOA L F, HARRISON G P. Minimizing energy losses: optimal accommodation and smart operation of renewable distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(1): 198-205.
- [46] OCHOA L F, KEANE A, DENT C J, et al. Applying active network management schemes to an Irish distribution network for wind power maximization[C]//International Conference on Electricity Distribution. Prague, Czech Republic: [s.n.], 2009: 1-4.
- [47] OCHOA L F, DENT C J, HARRISON G P. Distribution network capacity assessment: variable DG and active networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(1): 87-95.
- [48] SIANO P, CHEN P, CHEN Z, et al. Evaluating maximum wind energy exploitation in active distribution networks[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2010, 4(5): 598-608.
- [49] 滕春贤, 李智慧. 二层规划的理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 45-48.
- [50] ZHANG J T, FAN H, TANG W, et al. Planning for distributed wind generation under active management mode[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 47(1): 140-146.
- [51] 张节潭, 程浩忠, 欧阳武, 等. 主动管理模式下分布式风电源规划[J]. 电力科学与技术学报, 2009, 24(4): 12-18.
ZHANG Jietan, CHENG Haozhong, OUYANG Wu, et al. Siting and sizing of distributed wind generation under active management mode[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2009, 24(4): 12-18.
- [52] 张沈习, 李珂, 程浩忠, 等. 主动管理模式下分布式风电源选址定容规划[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 208-214.
ZHANG Shenxi, LI Ke, CHENG Haozhong, et al. Optimal siting and sizing of distributed wind generation under active management mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 208-214.
- [53] 张翔, 程浩忠, 方陈, 等. 考虑主动管理模式的多目标分布式电源规划[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(9): 1231-1238.
ZHANG Xiang, CHENG Haozhong, FANG Chen, et al. Multi-objective distributed generation planning considering active management[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2014, 48(9): 1231-1238.
- [54] 张璐, 唐巍, 丛鹏伟, 等. 基于机会约束规划和二层规划的配电网广义电源优化配置[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(5): 50-58.
ZHANG Lu, TANG Wei, CONG Pengwei, et al. Optimal configuration of generalized power sources in distribution network based on chance constrained programming and bi-level programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(5): 50-58.
- [55] 郭金明, 李欣然, 邓威, 等. 基于2层规划的间歇性分布式电源及无功补偿综合优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 25-33.
GUO Jinming, LI Xinran, DENG Wei, et al. Comprehensive optimal allocation of intermittent distributed generation and reactive power compensation based on bi-level planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 25-33.
- [56] 蔡亦竹, 柳璐, 程浩忠, 等. 全寿命周期成本(LCC)技术在电力系统中的应用综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 149-154.
CAI Yizhu, LIU Lu, CHENG Haozhong, et al. Application review of Life Cycle Cost(LCC) technology in power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 149-154.

作者简介:



张沈习

张沈习(1988—),男,浙江宁波人,博士研究生,研究方向为电力系统分析、电力系统优化规划(E-mail: willzsx@163.com);

程浩忠(1962—),男,浙江金华人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统规划、电压稳定、电能质量;

邢海军(1979—),男,江苏南京人,博士研究生,主要研究方向为配电网规划和运行。

Review of DG planning considering uncertainties for distribution network

ZHANG Shenxi¹,CHENG Haozhong¹,XING Haijun¹,YAO Liangzhong²,ZHANG Yi³

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Transformation,Ministry of Education, Shanghai Jiao Tong University,Shanghai 200240,China;2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100085,China;3. Fujian Electric Power Research Institute,Fuzhou 350007,China)

Abstract: The integration of intermittent DG(Distributed Generation) increases greatly the uncertain factors of distribution network,which brings new challenge to its planning. The modeling of the uncertain factors brought by wind turbine generators,photovoltaic generators,loads,and so on during the planning stage is introduced. The DG planning methods considering uncertainties for traditional distribution network are commented,including multi-scenario planning,chance-constrained planning and fuzzy planning. The active distribution network planning methods considering uncertainties are summarized,including single-level planning and bi-level planning. Furthermore,the theory and methodologies of DG planning considering uncertainties,which may arise for the future distribution network,are prospected in the aspects of coordinated grid-source planning,risk planning,DG planning considering life-cycle cost,DG planning considering demand-side management,DG planning considering energy storage system,etc.

Key words: distribution network; uncertainty analysis; distributed power generation; siting and sizing; planning

第五届直流输电与电力电子专委会学术年会征稿启事

为了全面反映近年来我国在直流输电与电力电子领域科研、设计、生产运行、设备制造、教学等方面的科研成果,特别是特高压直流输电技术、柔性直流输电技术以及智能电网技术等方面的科研成果,中国电机工程学会直流输电与电力电子专业委员会定于2016年12月21—24日在哈尔滨市(哈尔滨华旗饭店,哈尔滨市南岗区红旗大街301号)召开直流输电与电力电子专委会2016年学术年会(第五届)。

本次会议由中国电机工程学会直流输电与电力电子专业委员会主办,直流输电技术国家重点实验室、国际大电网会议中国国家委员会高压直流输电与电力电子(B4)专委会联合主办,哈尔滨工业大学承办。会议有关事项如下。

一 会议组委会机构

- 大会主席:李立涅
- 合作主席:余建国、于永清、段献忠、肖立业、白继斌
- 技术委员会
- 主席:饶宏
- 合作主席:汤广福、徐殿国
- 委员:直流输电与电力电子专业委员会及技术委员会委员
- 组织委员会
- 主席:徐殿国
- 委员:张学广、李卫星、武健、郑重、李彬彬、刘瑜超

二 会议组织形式

会议采取主旨报告、专题研讨和论文张贴的形式,同时组织新技术、新产品展示和技术参观。

三 会议征文要求

- 1. 征文范围

- (1)高压直流输电技术
- (2)柔性直流输电技术
- (3)直流电网技术
- (4)灵活交流输电技术
- (5)新能源发电技术
- (6)电能质量治理技术
- (7)电力节能新技术
- (8)电源与储能技术
- (9)电力拖动技术
- (10)直流融冰技术
- (11)智能电网与微网技术
- (12)其他

2. 征文要求

参会论文所反映的科研成果应是近三年完成的,年会论文集只收录未发表的论文,请勿一稿多投,论文需确保其内容的真实性 and 客观性。

论文投稿截止日期:2016年10月21日。请于截止日期前通过会议网站注册投稿,具体投稿要求请详见会议网址:
<http://hvdcpe2016.hit.edu.cn>。

四 联系方式

作者在投稿以及稿件评审过程中如有问题需要咨询,请致函或致电联系会议秘书处。

- 联系人:刘瑜超
- 电 话:18246152289
- 邮 箱:liuyuchaohit@outlook.com
- 地 址:黑龙江省哈尔滨市西大直街92号哈尔滨工业大学电机楼10018室,邮编:150001。