

提出了一种基于机会约束规划的无功规划新方法。同确定性的无功规划方法相比,本章采用“软”约束的形式来考虑不确定运行条件下的电压波动问题,即可能要发生的电压波动是以一定的置信度限制在所要求的范围内的,而确定性方法则采用“硬”约束的形式,即电压波动范围限制必须严格满足。在电力市场环境下,要求无功规划更加灵活,规划方案更加可靠。机会约束规划通过给定合适的置信水平可以较好的满足这些要求。

关键词: 输电系统规划; 电力市场; 不确定性; 机会约束规划; 蒙特卡罗仿真; 遗传算法; 风险管理

Abstract

The transmission system plays an important role in providing access to all participants in a competitive electricity market for supply and delivery of electric power. The operation status of the transmission system such as capacity adequacy has an important influence on the electricity market competition. Reasonably expanding or reinforcing the transmission system could have an important effect on meeting generating companies and customers' needs, eliminating or relieving transmission congestion so as to enhance competition in the electricity market and to improve the operation efficiency of the power system. Compared with the problem in the traditional vertically integrated monopoly industry, the transmission system planning problem in the electricity market environment is more complicated and has more uncertain factors to be dealt with, such as uncertainties associated with locations and capacities of new power plants. Given this background, the problem of transmission system planning in electricity market environment is studied thoroughly in this dissertation.

A new transmission system expansion planning approach is developed to handle future uncertainties, especially the locations, capacities of new power plants and demand growth in a competitive market environment. The aim is to determine the optimal plan, which is robust and flexible enough to meet the requirements of the transmission planning in competitive environment.

With advancements in technology and improvements in management as well as the deepening of the restructuring of the electricity industry, engineers have the capability and need to intervene and regulate power flow patterns to some extent. This will pose higher requirements for flexibility in transmission system expansion planning. Therefore, the optimal result will be on the conservative side if the constraints are handled by deterministic methods. Given this background, a new method for the optimal transmission system expansion planning is presented in this dissertation based on chance constrained programming (CCP). CCP is a kind of

stochastic optimization approaches and is especially suitable for solving optimization problems with uncertain factors. In the electricity market environment, more flexibility and robustness are required for transmission system planning, and CCP could well meet such requirements by imposing required confidence levels.

Optimal multistage transmission system expansion planning is a large-scale nonlinear combinatorial optimization problem. Deregulation introduces more uncertain factors for the transmission planning processes, and hence security and economic risks will be inevitably incurred in the planning scheme produced under such an uncertain environment. Given this background, a new risk-constrained model for the multistage transmission system expansion planning is first presented based on the chance constrained programming, and a method is next presented for solving the optimization problem using the well-known Monte Carlo simulation method and the genetic algorithm.

Deregulation in the electricity supply industry has brought many new challenges to the problem of reactive power planning. Although the problem has been extensively studied, available standard optimization models and methods do not offer good solutions to this problem, especially in a competitive electricity market environment where many factors are uncertain. Given this background, a novel method for optimal reactive power planning based on chance constrained programming is presented in this dissertation. Given the confidence levels in advance, the proposed framework could quantify the security risk created by uncertainties while minimizing the operation cost and investment cost.

KEY WORDS: Transmission system planning; Electricity market; Uncertainties; Chance constrained programming; Monte Carlo simulation; Genetic algorithm; Risk management

致 谢

本课题的研究得到了国家科技部 973 项目《提高大型互联电网运行可靠性的基础研究》第五课题（课题编号：2004CB217905）和 2004 年度教育部“新世纪优秀人才支持计划”（项目编号：NCET-04-0818）的资助。特此致谢。

第一章 绪论

1.1 引言

目前,在全球范围内,电力工业正在进行着一场大规模的市场化改革。由于输电网在电力市场中扮演着十分重要的角色,输电容量是否充足,容量配置是否合理,将关系到各市场成员的切身利益,关系到各参与方能否公平竞争,甚至影响系统的安全运行,因而输电系统规划成为一个引人注目的问题。

电力工业改革中最具争议性的问题之一是输电环节的组织结构问题。尽管放松管制在电力工业中引起了很多变化,但由于经济、技术和地理等方面的原因,输电系统仍具有自然垄断特征,这一观点现在已得到普遍认同。这样,输电规划和投资仍应受到政府相关部门或电力监管机构的控制和监管。然而,传统的输电规划和投资方法在电力市场环境不再适用,必须发展新的方法。

加州电力危机引起了全世界的瞩目,除了发电容量不足外,没有足够的输电容量及时输送电能也是引起这场危机的主要原因之一^[1]。2003年8月14日发生的震惊全球的北美大停电事件清楚的表明了这样一个事实:输电网络是改革后的美国电力工业中最薄弱的环节^[2]。这些灾难事件的发生凸现了在放松管制的电力市场环境下输电扩展规划和投资的重要性。

1.2 传统电力工业中的输电规划与投资

在传统的、受管制的垄断电力工业中,输电规划与投资的主要目标是:在维持电力系统可靠性的前提下尽可能经济地满足负荷需求。保证充裕的输电容量是电力公司的责任,而政府或监管机构则保证成本的回收和合理的回报,且通常采用回报率管制方式来实现。输电系统是由垂直垄断的电力公司建造的,其作用是将公司自己的、分布在不同地理位置的电厂所生产的电能输送给它们的用户。为了提高供电可靠性及在某些时段共享剩余电力,相邻电力公司的电力系统之间可能会建造一些互联线路以进行电能交换或互相提供可靠性备用。总的来讲,电力公司是输电系统的唯一使用者,整个系统的可靠性则由公司的专业人员通过遵循与规划或运行相关的规则或条例来保证^[3]。

传统的输电系统规划是在很多前提或假设下进行的,如^[4]:

(1) 假设未来发电厂的位置和装机容量是已知的或比较确定的。

(2) 将来的系统的可能的场景数目有限，系统运行模拟只针对这些场景进行。

(3) 输电规划方案的论证主要是从技术的角度考虑，经济因素是第二位的。对输电扩展规划的传统理念是：“首先定义服务质量标准，然后选择满足这些标准的、成本最低的方案来扩展系统”。这样，很少对与输电系统相关的效益进行详尽的、系统的评估。

1.3 电力市场对输电规划的新要求

发电和输电环节在所有权方面的分离从根本上改变了电力系统规划的哲学。在放松管制的环境下，输电扩展规划的目标将与以往有所不同。尽管社会效益仍然是一个需要考虑的重要约束因素，但输电网络所有者或投资者更感兴趣的是如何最大化自己的收益。然而，由于输电网络仍具有自然垄断特征，因此来自政府的管制仍然无可避免。这些因素给输电规划和投资带来了许多新的挑战。需要定义新的规划目标，对现有的规划准则进行重新检验，以及发展新的规划模型和方法等等以满足新的需要^[5]。

(1) 输电规划与发电规划的关系及相互间的协调

在放松管制以前，发电规划是由电力公司统一进行的。在放松管制后，没有了统一的发电规划，没有机构有能力和义务对新电厂的兴建和老电厂的关闭进行协调。尽管政府主管部门或监管机构可以给出一些指导性的规划方案，就象智利那样^[6,7]，但这些规划方案一般不能是强制性的。对未来电价水平、供求的季节性变化、监管政策的走向等的估计是发电公司或投资者进行新增发电容量决策时要考虑的主要因素。新的发电厂的位置、装机容量和投运时间，现有发电机组的退役或发电厂的关闭等基本上都是由发电公司自己决定，这些信息通常不会立即通知市场管理机构^[8]。

在传统的电力系统规划中，发电规划是核心，输电规划是在发电规划的基础上进行的，尽管必要时会在二者之间作一些协调。在新的市场环境下，发电规划将由现有的发电公司或潜在的发电投资者独立进行，分散决策；输电规划则由电网公司基于规划期内所期望的发电/负荷模式的变化情况进行，但发电规划和输电规划在传统的电力工业中建立的紧密联系现在已不复存在。

(2) 不确定因素更多、风险更大

放松管制为输电规划过程引入了更多的不确定性因素和复杂性。首先,今后新增发电厂的位置、装机容量、投运时间,以及现有机组的退役对于输电规划而言成为不确定性因素。由于发电投资和规划决策是分散进行的,这样潜在的发电厂的位置的数目有可能大大增加。还有,由于输电线路的审批和建造需要的时间很长,这样输电规划就需要提前很多年进行,此时很难对未来的输电容量需求作比较准确的预测。此外,有些问题必须明确,如:应该由哪个机构负责提供输电规划所需的数据,特别是关于未来新增的和退役的发电厂的位置、容量和类型以及负荷预测的详细信息?应该由谁对这些数据的准确性负责?此外,未来电能政策、市场结构和管制方案等方面的不确定性也会对输电规划产生重要的影响。

不确定性会导致风险。风险可以是多方面的,如投资风险和规划结果不理想所导致的安全运行风险等。一个需要解决的关键问题是如何量化和规避这些风险。为此,必须考虑每种不确定因素的范围和这些因素组合作用的效果。

(3) 对网络灵活性和强壮性的要求更高

竞争的环境对输电系统的灵活性和强壮性提出了更高的要求。一般而言,(高压)输电工程的审批和建造时间比发电项目要长。典型地,一个输电工程项目的审批和建造需要 5-10 年的时间,而建造一个燃气轮机或联合循环发电机组(发电厂)仅需 2 年甚至更短的时间(市场环境下载电项目的审批时间一般比输电项目短得多)。这样,一个发电项目可能在一个输电项目动工后才启动,这可能会明显地改变原先论证该输电项目时所依据的财务预算和假设^[8]。

由于未来可能出现多种不同发电规划场景所引起的不确定性程度的增加对输电系统规划可以考虑的水平年的范围会产生影响^[9]。换句话说,很难进行很长期的输电规划。当输电系统规划的跨度超过 10 年时,相应的发电规划场景的不确定性很大且难以界定其范围。从这个意义上讲,对远期规划方案进行仔细分析是否有意义就很值得怀疑。然而,从另一个方面讲,输电设备的使用寿命一般长达 30 至 40 年,这样输电规划时就必须考虑设备的长期利用。这是一个两难困境!

(4) 投资者和公众利益的协调

传统地,在很多国家,尤其是发展中国家,发电和输电扩展规划方案是由政府统一确定的。在新的市场环境中,投资者将根据他们自己的评估独立地进行决

策。也就是说,发电项目和输电项目可以基于投资者而非政府机构的评估而建造。这样就带来了一个挑战:在电力系统规划尤其是输电系统规划时如何协调投资者和公众的利益?在这个问题上,政府或监管机构的介入看来是不可避免的。

在何种程度上,可以由投资者而非独立系统运行机构(ISO)或区域输电组织(RTO)来决定兴建并投资新的输电设备?在存在网络外部性的情况下,他们能否从输电项目中获得足够的收益以证明其投资的合理性?^[10]。

(5) 潮流模式的变化

在放松管制的环境下,长远来看,存在着使发电厂和负荷之间在选址上相互靠近的激励。而在短期内,基于竞价的调度方法会导致非常规的运行模式更频繁地出现。这是因为发电公司被调度的情况依赖于其报价,而报价未必是基于成本的,可以是策略性的、可变的。如果允许用户自由选择供电公司的话,发电/负荷模式将会因为用户更换供电公司而变化得更频繁^[11]。所有这些因素都令市场环境下的潮流模式变化得更频繁,也更显著。在做输电系统规划时必须考虑这些因素。

由于当前的电力系统原本并不是针对竞争环境下的电力供求模式来规划和设计的,因此现有网络或其中某些部分的使用方式可能会与原先规划的以及过去使用的方式有所不同,从而可能产生新的输电瓶颈,同时一些现有的输电阻塞也可能会更经常地出现或者产生更显著的经济影响。这样,市场化后会比以往更迫切地需要缓解输电阻塞的措施,而要从根本上解决这个问题就可能需要增加新的输电设备。

此外,在一些电力市场中允许大用户直接从发电公司购电。美国电力科学研究院(EPRI)在其所作的一个评估报告中指出,放松管制后大规模的电力交易显著的增加了,而且电力交易的输送距离也变得越来越大。因此,市场环境下输电容量的需求将会更大,对输电能力的分析也会变得更为重要。这对输电规划也提出了新的要求。

(6) 新的输电规划准则

一个好的输电扩展规划应该能够产生良好的经济效益或社会福利并能够满足系统可靠性要求。为此,采用什么规划准则来确定未来输电设备的增添至关重要。尽管存在不同的看法,大多数人认为传统的、基于成本最小化的输电扩展规

划准则在放松管制的电力系统中不再适用^[12]。

这个问题也许有不同的答案。使期望的供电不足电量最小化可能是一个选择。美国德克萨斯州的电力可靠性协会（ERCOT）曾就这个问题主办过一个研讨会。在会上，专家们提出的观点有些分歧很大^[13]。有几个机构坚持认为继续使用成本最小化作为规划准则是合适的。一些机构甚至认为今后不应再建造新的输电线路了，而是应该通过阻塞定价和策略性地选择新增发电容量的位置来解决问题。

通过这些讨论得到的建议是：未来的输电扩展规划主要应以消除那些明显影响市场运营效率的或降低系统运行可靠性的主要约束、以及容纳新的发电项目的能力为目的。

（7）可靠性准则

一个曾引起广泛争论的问题是：竞争会改善或恶化电力系统运行的可靠性吗？一般而言，放松管制后，输电系统所面对的运行压力会更大，也有必要重新定义某些可靠性准则。在美国和其它一些国家，立法机构正在研究带有惩罚和激励的绩效驱动策略。电力营销商和独立发电公司对输电系统的使用扩展了传统的输电可靠性分析的范畴。这样，可靠性的含义变成了用户会受到怎样的影响而非单一设备或部分系统多么地可靠^[5]。

供电可靠性在放松管制的系统中将会更为重要，因为基于绩效的管制措施已被广泛应用于对输电网络的所有者或投资者所施加的利润控制方案之中。供电可靠性达不到要求将会招致利润损失。

（8）RTO 或 ISO 在输电系统规划和投资中的作用

关于 RTO（ISO）在输电系统规划和投资中应该扮演何种角色方面有很多争议，其中几点如下^[10]：

①RTO 的规划是否仅应以满足可靠性要求为目标，而把所有基于商业目的（如降低阻塞成本）的输电扩展决策留给市场参与者？在不同的市场可能会有不同的做法。

②在为新的发电厂和未来的负荷的合理选址提供激励以期作为兴建新的输电线路的替代方案方面，RTO 应该扮演什么角色？RTO 是否应仅提供信息以供参考，抑或还需在资金上提供帮助？

③考虑到对输电容量的长远需求，RTO 或投资者是否应该就短期而言进行过投资以便从长远来看降低每 MW-公里的新的输电容量所需的金融成本和土地成本？应该如何平衡短期过投资可能带来的长期收益和更大的金融风险？

1.4 输电系统的投资方式

电力市场改革前，一体化电力企业通常是电网的唯一投资者，传统的机制保证电力企业能安全地实现投资回收并获得一定的利润，这种情况下电网投资不存在任何的风险。改革后的电力市场，电网的投资需要大量的资金并且投资回收是一个长期的过程，大部分投资者不太会选择长期的电网投资，因为投资时间越长不确定性就越多，例如电源规划、负荷变化、政策变化等不确定因素，导致投资回收的风险很大。因此，如何确定电网的投资方式，以及如何保证投资回收是输电规划中的一个主要问题。

电网投资总的来说可以采取以下两种方式，即垄断性的电网公司投资方式和基于市场的投资方式。

类似传统的电力企业，垄断的电网公司可以对电网进行有效的投资，以及采用其它的措施提高电网的输电容量或消除输电限制。因这种方式具有垄断企业的普遍问题，所以政府需使用一些控制垄断企业盈利的方法来保证较好的社会效益。例如，在英国电力市场中，政府为控制电网在电网阻塞情况下可能的额外盈利，规定不收取网络阻塞费用，而实行根据事先约定的限电措施来解决电网阻塞。

在采用边际电价或区域性电价的电力市场中，电网阻塞会导致各区域或节点之间的电价产生较大的差异，这时可考虑基于市场的电网投资方式，让希望从新建输电线路中获益的投资者根据市场情况自愿地进行相应的线路投资。地区性的价格差异是导致电网投资的主要激励因素，投资者将通过这个价格差（或输电阻塞费用）来获得收益。

基于市场的电网投资还可以由电网公司通过向市场参与者拍卖输电阻塞合同（Transmission Congestion Contract, TCC）的方法来获得^[14]。TCC 是一种规定了电网两点之间输电价格的套期保值（hedge）合同，提供一种避免输电阻塞费用风险的手段，当购买了一定容量的 TCC 之后，不管将来电网是否出现阻塞情况，TCC 中规定容量的电力传输都不再受此影响，供电方或用电方也无须支付额外的输电阻塞费用。目前这种机制已经在美国 PJM 市场中实行，称为固定

输电权 (Fixed Transmission Right)。另外, 为了进一步体现市场化的原则, 还可以建立相应的 TCC 交易市场。

垄断的电网公司投资方式和基于市场的投资方式并不是对立的, 而可以是相辅相成的。例如对我国来说, 除了电网公司或政府对电网进行投资之外, 还可以在保证电网安全可靠的前提下, 鼓励其它投资者参与电网设备的建设并获得利益。

对于不同的国家和不同的电力体制改革模式, 不管输电规划最终由政府、电网公司、市场参与者、ISO 等何种实体负责进行, 都需要有一个专门的政府部门对输电规划和投资进行审查, 将市场中的各种局部利益和全局利益融合起来, 保证电网建设符合社会总体效益最优的原则, 并确保电网运行安全可靠。特别要防止因市场利益的存在, 有些电网投资可能并不增加电网传输容量, 而是减少电网传输容量, 通过故意制造电网阻塞来增加某些市场参与者的利益。

1.5 输电监管

在电力市场环境下, 仍然需要对输电系统进行监管, 因为其仍具有自然垄断特征, 且要实现公平竞争提供必要的场所。输电监管的一个主要目标就是要促使输电系统在满足给定的可靠性要求的同时使经济成本最低或经济效益最高, 例如使系统以最小的总成本向用户供电。具体地讲, 对基于管制的输电投资与扩展规划进行监管的主要目的是降低未来不能有效利用输电设备的风险, 而对基于市场驱动的输电投资与扩展规划进行监管的主要目的是遏制有损整体社会福利的输电投资。

一个广泛关心的问题是输电规划人员和输电监管机构能否控制输电投资朝最大化社会效益的方向发展, 以及如何对此进行评估。为此, 一个合适的监管机制是非常重要的, 但其通常很难构造。这是因为输电业务中涉及多种成本, 其中一些是经济性成本, 而另一些则不是。它们代表着投资者、雇员、环保主义者、不同类型的用户之间相互冲突的目标。要构造一个对每个参与者来讲都是最优的监管方案是不可能的^[15], 因此一定程度的折衷总是不可避免的。

在输电监管中有很多固有的折衷, 最明显的几点是^[16]:

- (1) 在维持降低成本的激励的同时又不能让价格偏离成本太多。
- (2) 在保证基于管制的企业的长期投资的回收和合理回报的同时, 又要限

制因此可能导致的过投资的范围和程度。

(3) 要限制监管机构的权力范围, 避免随意决策, 同时又要赋予监管机构根据得到的新信息而作出正确响应的权力。然而, 必须清楚的意识到允许行使这种权力事实上导致了监管的不确定性, 并可能会破坏为促进效率和投资而设置的激励。

(4) 既要鼓励输电公司通过优化运行、合理利用和精心维护现有输电系统以最大化短期收益, 又要鼓励输电公司从长远的角度考虑而进行适当的投资。

总的来讲, 有两类主要的监管方法, 即传统的基于回报率的方法和近年来比较流行的基于绩效的激励性方法。其中, 基于绩效的监管方法又可分为很多种, 目前比较常用的有以下几种: 1) 价格上限法; 2) 收入上限法; 3) 变尺度法 (也称利益共享/责任分担法); 4) 菜单法; 5) 成本折扣法; 6) 标尺法; 7) 业绩目标法。需要指出, 这些激励监管方法并非相互排斥的。事实上, 在一个监管方案中可以同时采用上述两种或两种以上的方法, 也可以通过在上述某种激励性监管方法中一定程度地插入传统的回报率监管方法而得到一种混合监管模型^[16]。文献[17]比较系统地介绍了基于绩效的管制方法及其在电力系统中的应用, 而文献[18]对与输电系统监管相关的基于绩效的管制方法的最新理论发展做了系统的评述。

尽管人们总期望能够设计出一个最优的输电监管方案, 但事实上很难定义用于评估监管方案的最优性的指标。文献[19]在这方面做了一些研究工作, 在假设输电公司要承担全部阻塞成本和以系统边际电价定价的输电损耗的前提下, 设计了一种针对输电公司的最优监管方案, 可以激励输电公司选择最小化期望的阻塞成本、输电损耗和输电扩展所需投资成本之和的所谓“最优”输电容量。

价格监管主要包括两个方面, 即价格水平和价格结构的监管。这两个方面对吸引输电投资都有重要的影响。不同的价格水平监管方案对输电投资的影响一般是相当明显的, 而不同的价格结构监管方案对输电投资的影响却要复杂得多。文献[20]针对两部制输电定价模式对几种不同的价格上限结构管制方案进行了详尽的分析, 指出了现有的确定价格上限方法所存在的共同点, 并比较了各种方法的优缺点。

在不同的电力市场中, 对输电公司所采用的管制方案是不同的。在英国电力市场, 监管机构对 NGC 采用了收入上限管制方案。此外, NGC 还要与用户共享

或共担实际输电阻塞成本与给定的目标值之间的差额的一部分^[19]。NGC 的输电服务收入按照著名的 RPI-X 监管方式^[17]和所输送的电量按年递增。在挪威,为了鼓励垄断的输电系统的所有者能够理性地进行输电投资与规划决策,兼顾社会效益和经济效益,采用了一种激励性管制方案^[21]。在这个方案中,最重要的是要能够对投资的社会和经济效益进行正确的计算。另一个重要的方面是要保证社会效益和经济效益都比较好的输电投资项目能够有利可图。这两点并不总容易做到。

1.6 输电系统规划研究现状

在过去的几十年间,许多学者为研究输电系统规划的数学方法做了大量的工作,实践证明这些工作是有意义的,设计上的少量改善往往可以在运行中获得巨大的经济效益。

传统的输电系统规划方法主要分为启发式方法和数学优化方法两类。

启发式方法是以直观分析为依据的算法,通常是基于系统某一性能指标对可行路径上的一些参数作灵敏度分析,根据一定的原则,逐步迭代直到得到满足要求的方案为止。常用的启发式方法可分为两种:第一种是逐步扩展法,即根据灵敏度分析的结果,以最有效的线路加入系统逐步扩展网络^{[22][23]};另外一种逐步倒推法,即首先将所有待选线路全部加入系统,构成一个冗余的虚拟网络,然后根据灵敏度分析,逐步去掉有效性低的线路^{[22][24]}。启发式方法因为具有直观、灵活、计算时间短以及易于同规划人员经验相结合等优点而在实际工程中得到较多应用。但它不是严格的优化方法,不能很好地考虑各阶段各架线决策间的相互影响。因此,启发式方法不能保证得出的规划方案最优。特别是当规划期较长、待选线数量较多时,所得结果可能与真正的最优方案有很大偏差。

数学优化方法^[25-29]是将输电系统规划问题用数学优化模型进行描述,然后通过一定的算法求解,从而获得满足系统要求的最优规划方案。这种方法由于考虑了电网的决策变量与运行变量等之间的相互关系,并将实际规划问题采用优化方法求解,因而在理论上更严格,并保证了方案的最优性。但由于输电系统规划问题属于大规模的组合数学问题,计算时间长,占用计算机内存大,对于实际的大规模系统求解困难很大。因此,优化方法在建立模型时,不得不对具体问题作大量简化。此外,有些规划决策因素难以用数学模型表达,所以由优化方法求出的

数学意义上的最优解未必是符合实际的最优方案。

优化方法可分为确定性优化方法和不确定性优化方法。确定性优化方法包括线性规划法、非线性规划法、动态规划法、整数规划法、图论和网流法等；不确定性优化方法包括随机规划法、模糊规划法等。相对来讲，确定性方法出现比较早，解法也比较成熟，但难以精确考虑规划问题的不确定性及多目标性。不确定性方法出现比较晚，但它可较为有效地处理随机因素、模糊因素及目标多重性。

总之，传统的输电系统规划方法在理论研究方面已经比较成熟，在工程应用中也取得了较好的经济效益和社会效益。但随着世界范围内电力体制改革的不断深入，输电系统规划正面临着越来越多的不确定性因素^[30,31]，需要在规划过程中考虑各种不确定性因素的影响。但传统的规划方法都无法满足这种要求，其数学上严格的最优方案对于未来情况而言并非最优，甚至可能导致由于未来不确定性因素的影响而不得不进行大量的补偿投资，从而降低甚至失去了“最优”规划的意义，造成巨大的损失。为了克服传统规划方法的不足，在规划中考虑不确定性因素的影响已经得到了国内外学术界的广泛关注，成为近年输电系统规划研究的热点^[32,33]。近年来，国内外学者提出了一些新的研究方法，特别是计及不确定性因素影响的输电系统规划研究已取得一些初步的研究成果。

(1) 随机规划方法

随机规划方法^[34]是将以往的经验 and 规律采用统计参数来表示，随后在随机环境中对未来环境和参数采用概率方法进行处理，通过运行模拟方法得到评价指标，为随机规划提供数据。

(2) 模糊规划方法

在进行规划之前对各种数据、专家经验和语言规则等资料进行模糊化处理，对输入输出之间的关系通过模糊规则来描述。将模糊集理论与专家系统、决策支持系统结合起来，以及利用模糊集理论改进传统规划方法的柔性和强壮性，被证明是行之有效的^[35]。

(3) 灰色规划方法

灰色系统理论^[36]的核心是灰色动态建模，其思想是直接将时间序列转化为微分方程，从而建立系统的发展变化的动态模型。目前灰色方法在输电系统规划中已经得到了初步应用，但是灰色方法由于对灰色处理不够缜密，并且缺乏严格

的数学理论支持，还有待进一步改进和完善。

(4) 遗传算法

遗传算法^[37]是模仿生物进化过程的一种方法，因为其独特的优越性在电力系统的许多领域得到了应用。遗传算法的主要思想是，通过列出或随机产生一组待选规划方案作为祖先，经编码后生成一个个“染色体”，评价其中各方案的好坏，并通过杂交、变异等多次作用，产生出具有更好品质的子代、孙代，直到取得最优的结果。与传统方法相比，遗传算法具有多路径搜索、隐含并行性、随机操作等特点，同时它对数据的要求低，基本上不要探索空间的知识或其他辅助信息，它采用概率变迁规则来指导搜索方向，使其具有明确的搜索方向，提高了算法的鲁棒性。

(5) 进化规划

进化规划^[38]不需要对变量进行编码，与遗传算法相比，更适合连续优化问题。对于输电系统最优规划问题，进化规划方法在原理上并不十分合适。采用该方法进行输电系统规划时，在所要考虑的电网中列出所有的待选线路，计算出最为合理的潮流分布，去掉潮流小于某一阈值的支路后得到的网络方案即为所求的最优方案，其处理的是支路潮流这一连续变量。进化规划与遗传算法的主要区别是：1) 进化规划采用控制参数而不是它们的编码；2) 进化规划每代的选择过程是变异和竞争，而遗传算法是复制、变异和杂交。采用进化规划的缺点是计算量大，计算时间较长。

(6) 专家系统

专家系统^[39]主要是由规则库和推理机组成。规则库中存储着规划专家在实际规划工程中积累的大量经验和建议，推理机则具有推理的能力，即能够根据规则库进行分析和判断，并推导出结论。专家系统的特点在于其符号表达、逻辑推理及渐进式搜索能力。目前已被规划部门应用于实际规划工程中，并显示了其优越性。但专家系统由于获取信息的不完全导致其可靠性不高，因而在应用中具有一定的局限性。

(7) 分解方法

其思想是将一个大而复杂的输电系统规划问题分解成多个相对简单的子问题，然后通过求解各个小问题，得到最终的最优解的方法。目前比较常用的分解

方法是 Dantzig-Wolfe 分解和 Bender's 分解^[40]。

(8) Tabu 搜索法

Tabu 搜索法^[41]是一种高效的用于解决组合优化问题的启发式搜索算法,其基本思想是通过记录 Tabu 表搜索历史,从中获得知识并利用其指导后续的搜索方向,以避免局部最优解。Tabu 搜索法的搜索效率高,收敛速度很快。但是,Tabu 搜索法是一种扩展邻域的单点寻优方法,优化结果受初始解的影响较大,而且 Tabu 表的深度及期望水平影响搜索的效率和最终的结果,机理还不甚清楚,数学上尚无法证明其一定能达到最优解。

(9) 模拟退火算法

模拟退火算法^[42]是以马尔科夫链的遍历理论为基础的一种适用于大型组合优化问题的随机搜索技术。算法的核心在于模仿热力学中的液体的冻结与结晶的冷却和退火过程,采用 Metropolis 接收准则避免落入局部最优,渐进收敛于全局最优。模拟退火法可以较有效地防止陷入局部最优,但为使每一步冷却的状态分布平衡很耗时间,而且属于单点寻优,对求解存在多个最优解的问题有一定的困难,需要改进。通常将模拟退火方法与其它方法结合使用,以发挥各自的优势。

(10) 盲数法

盲数理论^[43]是近年来出现的研究不确定性信息的数学理论,可以处理同时具有随机性、灰性、未确知性和模糊性等两种及以上不确定性的信息。通过盲数模型,对不确定性信息进行建模,计算盲数潮流,求得在不同的线路盲数潮流过负荷概率值下的规划方案,然后通过成本效益分析,求得综合最优规划方案。

(11) 蚂蚁算法

蚂蚁算法^[44]是由意大利学者 Dorigo 研究总结出的一种新型的仿生启发式优化寻优算法,该算法仿照蚂蚁群觅食机理,构造一定数量的人工蚂蚁,每个人工蚂蚁以路径上的荷尔蒙强度大小选择前进路径,并在自己选择的行进路径上留下一定数量的荷尔蒙,当所有蚂蚁均完成一次搜索后,再对荷尔蒙强度进行一次全局更新。通过反复的迭代,最终大多数蚂蚁将沿着相同的路线完成搜索。目前有学者尝试将其应用于输电系统规划中^[45,46],但是还没有很好地将规划模型处理成适合于蚂蚁算法求解的模型,系统规模增大时,该方法将难以求得高质量的解。如何合理地将规划模型转变成适合蚂蚁算法的模型,有待人们进一步的研究。

除了上述几种输电系统规划方法之外,目前还有一些其它的方法也被应用到输电系统规划中,例如人工神经网络方法^[47]、权衡方法^[48]以及将启发式方法与数学优化方法相结合的方法^[49]等。

1.7 本文的主要工作

在电力市场环境下,发电和输电环节在所有权方面的分离从根本上改变了电力系统规划的哲学。放松管制为输电系统规划过程引入了更多的不确定性因素和复杂性,给输电系统规划带来了许多新的挑战。需要定义新的规划目标,对现有的规划准则进行重新检验,以及发展新的规划模型和方法等等以满足新的需要。

在此背景下,本博士学位论文对电力市场环境下的输电系统规划问题进行了系统、深入的研究。将机会约束规划理论引入到市场环境下的输电系统规划研究中,构造了解决市场环境下输电系统规划问题的通用框架。同时,利用机会约束规划可以显式描述风险的特点,对规划过程中的风险进行管理。

本论文的研究工作,可以帮助规划人员进行输电系统规划决策时,充分考虑各种不确定性因素的影响,通过事先给定能够承受的风险程度,对各种不确定性因素带来的风险进行管理,提高了规划方案的适应性和灵活性。

本博士学位论文的研究工作主要包括以下内容:

- ◇ 第二章作为本文工作的理论基础,主要对机会约束规划方法进行介绍,然后概述了求解机会约束规划问题需要用到的蒙特卡罗仿真和遗传算法的基本原理。
- ◇ 第三章提出了一种基于蒙特卡罗仿真和遗传算法的输电系统灵活规划方法,充分考虑了电力市场环境下的各种不确定性因素,尤其是规划期内发电厂址与装机容量,适用于电力市场环境下的输电系统规划。该方法利用蒙特卡罗仿真可以处理各种不确定性因素的特点并结合遗传算法较强的全局优化能力,为解决电力市场环境下的输电系统规划问题作了一些初步的、探索性的研究工作。
- ◇ 第四章提出了一种基于机会约束规划的输电系统规划新方法。随着科学技术的发展和管理水平的提高以及电力市场改革的深入,工程技术人员能够并需要对电网潮流的分布进行一定程度的干预和调整,这对输电系统规划的灵活性提出了更高的要求。这样,如果用确定性方法处理约束

条件,得到的优化结果一般趋于保守。而机会约束规划为处理这类问题提供了一种途径,它允许在观测到随机变量的实现之前做出决策,只要该决策使得约束条件成立的概率高于给定的置信水平。作为初步研究,本章的工作局限于水平年规划,以线路的投资和建造成本之和最小化为优化目标,且只考虑基态运行方式下的过负荷约束。

- ◇ 第五章构造了计及风险约束的多阶段输电系统规划的模型框架。利用机会约束规划可以显式刻画风险的特点,对不确定性环境下所作出的规划决策进行风险管理。
- ◇ 第六章提出了一种基于机会约束规划的无功规划新方法。同确定性的无功规划方法相比,本章采用“软”约束的形式来考虑不确定运行条件下的电压波动问题,即可能要发生的电压波动是以一定的置信度限制在所要求的范围内的,而确定性方法则采用“硬”约束的形式,即电压波动范围限制必须严格满足。在电力市场环境下,要求无功规划更加灵活,规划方案更加可靠。机会约束规划通过给定合适的置信水平可以较好的满足这些要求。
- ◇ 第七章总结了全文的研究成果,并指出了进一步的研究方向。

1.8 参考文献

- [1] 文福拴. 加州电力市场失败的教训. 电力系统自动化, 2001, 25(5): 1~5
- [2] CONTRERAS J, GROSS G. Transmission Investment in Competitive Electricity Market. In: Proceedings of Bulk Power System Dynamic and Control IV, Cortina d'Ampezzo (Italy) 2004
- [3] USA Department of Energy. National Transmission Grid Study (Mimeo, 2002). Available at <http://certs.lbl.gov/>
- [4] NADIRA R, AUSTRIA R R, DORTOLINA C A, et al. Transmission Planning Today: A Challenging Undertaken. The Electricity Journal, 2004, 17(4): 25~32
- [5] CHAO X Y, FENG X M, SLUMP D J. Impact of Deregulation on Power Delivery Planning. In: Proceedings of 1999 IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, New Orleans (USA), 1999, 1: 340~344

- [6] RUDNICK H, QUINTEROS R. Power System Planning in the South America Electric Market Restructuring. In: Proceedings of VI Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning (SEPOPE), Salvador (Brazil), 1998
- [7] RUDNICK H. Generation and Transmission in Developing Countries: Planning in a Deregulated Environment in Developing Countries: Bolivia, Chile and Peru. IEEE Power Engineering Review, 1996, 16(7): 18~22
- [8] WONG H, CHAO H, JULIAN D, et al. Transmission Planning in a Deregulated Environment. In: Proceedings of 1999 IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, New Orleans (USA), 1999, 1: 350~355
- [9] AUSTRIA R R, PANGILINAN M R. A Closer Look at Long-term Transmission Planning in a Competitive Environment. Internal Report, Power Technology Incorporation (PTI), 1995
- [10] HIRST E, KIRBY B. National Transmission Grid Study Issue Papers- Transmission Planning and the Need for New Capacity. Mimeo, 2002, available at <http://certs.lbl.gov/>
- [11] CHENG J, MCGILLIS D T, GALIANA F D. Power System Reliability in a Deregulated Environment. In: Proceedings of 2000 Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, Halifax (Canada), 2000, 2: 765~768
- [12] MERRILL H M. Why We Still Need Least-cost Planning. Internal Report, Power Technology Incorporation (PTI), 1995
- [13] JONES S R. ERCOT ISO Experience with Transmission Operating and Planning Criteria in a Competitive Environment. In: Proceedings of 1999 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Edmonton (Canada), 1999, 1: 140~142
- [14] Hogan W W. Market-based Transmission Investments and Competitive Electricity Markets. Center for Business and Government, Harvard University, August 1999
- [15] CROUSILLAT E O, DORFNER P, ALVARADO P, et al. Conflicting Objectives and Risk in Power System Planning. IEEE Transactions on Power Systems, 1993,

8(3): 887~893

- [16] WOOLF F. Global Transmission Expansion: Recipes for Success. Penn Well, Tulsa, OK, 2003
- [17] 许诺, 颜汉荣, 文福拴等. 基于绩效的管制模式及其应用. 电力系统自动化, 2003, 27(5): 13~19
- [18] VOGELSANG I. Transmission Pricing and Performance-based Regulation. In: Proceedings of CMU Conference on Electricity Transmission in Deregulated Markets, Pittsburgh(USA), 2004. Available at http://www.ece.cmu.edu/~tanddconf_2004/
- [19] LEAUTIER T O. Regulation of an Electric Power Transmission Company. The Energy Journal, 2000, 21(4): 61~92
- [20] VOGELSANG I. Price Regulation for Independent Transmission Companies. Journal of Regulatory Economics, 2001, 20(2): 141~165
- [21] HORNNES K S, GRANDE O S, BAKKEN B H. Main Grid Development Planning in a Deregulated Market Regime. In: Proceedings of 2000 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Singapore, 2000, 2: 845~849
- [22] 孙洪波. 电力网络规划. 重庆: 重庆大学出版社, 1996
- [23] Albuyeh F, James J S. A Transmission Network Planning Method For Comparative Studies. IEEE Trans on PAS, 1982, 101(1): 1679~1684
- [24] EI-Sobkl S M, EI-Melually M. New Approach for Planning High-Voltage Transmission Network. IEE Proceedings C, 1986, 5(7): 133~138
- [25] Levi V A, Calovic M S. Linear-programming-based decomposition method for optimal planning of transmission network investments. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 1993, 140(6): 516~522
- [26] Hashimoto S H M, Romero R, Mantovani J R S. Efficient linear programming algorithm for the transmission network expansion planning problem. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2003, 150(5): 536~542
- [27] Al-Hamouz Z M, Al-Faraj A S. Transmission expansion planning using nonlinear programming. In: Proceedings of Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. 2002, 1: 50~55

- [28] Boulaxis N G, Papadopoulos M P. Optimal feeder routing in distribution system planning using dynamic programming technique and GIS facilities. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2002, 17(1): 242~247
- [29] Farrag, M.A.; El-Metwally, M.M.; New method for transmission planning using mixed-integer programming. *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, 1988, 135(4): 319~323
- [30] Merrill H M, Wood A J. Risk and uncertainty in power system planning. *Electric Power & Energy System*, 1991, 13(2): 81~90
- [31] Pedro M S C, Luis A F M, Fernando G L, et al. Distribution network expansion planning under uncertainty: A hedging algorithm in an evolutionary. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2000, 15(1): 412~416
- [32] 张焰, 陈章潮, 谈伟. 不确定性的电网规划方法研究. *电网技术*, 1999, 22(3): 15~22
- [33] 张洪明, 樊亚亮. 输电系统灵活规划的模型及算法. *电力系统自动化*, 1999, 23(1): 23~26
- [34] Gorenstin B G, Campodonico N M, Costa J P, et al. Power System Expansion Planning Under Uncertainty. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1993, 8 (1): 129~136
- [35] Ekel P Ya, Terra L D B, Junges M F D. Methods of multicriteria decision making in fuzzy environment and their applications to transmission and distribution problems. In: *Proceedings of IEEE Transmission and Distribution Conference*, 1999, 2: 765~770
- [36] 张洪明, 廖培鸿, 仲建中. 电网规划的灰色系统方法. *电网技术*, 1995, 19(12): 19~23
- [37] Gallego R A, Monticelli A, Romero R. Transmission system expansion planning by extended genetic algorithm. *IEE Proceeding Generation, Transmission and Distribution*, 1998, 145(3): 329~335
- [38] Ceciliano J L, Nieva R. Transmission network planning using evolutionary programming. *Proceedings of Evolutionary Computation*, 1999, 3: 1796~1803
- [39] Kandil M S, Debeiky S M, Hasanien N E. Hybrid mathematical and rule-based

- system for transmission network planning in open access schemes. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2001, 148(5): 455~462
- [40] Binato S, Pereira M V F, Granville S. A new Benders decomposition approach to solve power transmission network design problems. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(2): 235~240
- [41] 文福拴, 韩祯祥. 基于 Tabu 搜索方法的输电系统最优规划. 电网技术, 1997, 21(5): 2~7
- [42] Romero R, Gallego R A, Monticelli A. Transmission system expansion planning by simulated annealing. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(1), 364~369
- [43] 朱海峰, 程浩忠, 张焰. 利用盲数进行电网规划的潮流计算方法. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 74~78
- [44] Dorigo M, Gambardella L M. Ant colony system: A cooperative learning approach to the traveling salesman problem. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1997, 1(1): 53~66
- [45] 陈根军, 王磊, 唐国庆. 基于蚁群最优的输电网络扩展规划. 电网技术, 2001, 25(6), 21~24
- [46] 翟海保, 程浩忠, 陈春霖等. 基于改进蚁群算法的输电网络扩展规划. 中国电力, 2003, 36(12): 49~52
- [47] Ohimoto K, Yasuda K, Yokooyama R. Transmission expansion planning using neuro-computing hybridized with genetic algorithm. In: Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Evolutionary Computation. Perth, Australia: 1995: 1226~131
- [48] Burke W J, Merrill H M, Schweppe F C, et al. Trade off methods in system planning. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(3): 1291~1297
- [49] Oliveira G C, Costa A P C, Binato S. Large scale transmission network planning using optimization and heuristic techniques. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(4): 1828~1834

第二章 机会约束规划方法

2.1 引言

作为本文工作的理论基础,本章首先对机会约束规划方法进行介绍,然后概述了求解机会约束规划问题需要用到的蒙特卡罗仿真和遗传算法的基本原理。在后面的章节中,将在需要时直接引用这些基本理论和基本概念,不再赘述。本章的主要内容包括:

- (1) 机会约束规划方法介绍;
- (2) 蒙特卡罗仿真和遗传算法的基本原理及其在求解机会约束规划问题中的应用。

2.2 机会约束规划

数学规划是运筹学的一个重要分支,并已被广泛地应用到工程技术、科学研究和经济管理等诸多领域。数学规划可以描述为在一些数学关系(如等式或不等式)表示的约束条件下,求一个(或一组)函数的极值问题的方法。常见的数学规划有线性规划、非线性规划、目标规划、多目标规划、整数规划、多层规划、动态规划、随机规划和模糊规划等等。

在现实世界中,人们制定决策时经常会碰到不确定性现象。这种不确定性现象包括我们所熟悉的两类:一类是随机现象,一类是模糊现象。描述、刻画随机现象的量称为随机变量,描述、刻画模糊现象的量称为模糊集。为了方便,不妨把二者分别称为随机参数和模糊参数。含有随机(模糊)参数的数学规划称为随机(模糊)规划,二者统称为不确定规划。随机(模糊)规划为解决带有随机(模糊)参数的优化问题提供了有力的工具^[1-10]。

机会约束规划(Chance Constrained Programming)是随机规划的一个重要分支,由 Charnes 和 Cooper^[11]首先提出,主要针对约束条件中含有随机变量,且必须在观测到随机变量的实现之前作出决策的情况。考虑到所做决策在不利情况发生时可能不满足约束条件,而采取一种原则:即允许所做决策在一定程度上不满足约束条件,但该决策应使约束条件成立的概率不小于某一置信水平。

考虑带有随机参数的数学规划模型^[12]

$$\begin{cases} \max & f(\mathbf{x}, \xi) \\ \text{s.t.} & \\ & g_j(\mathbf{x}, \xi) \leq 0, \quad j=1,2,\dots,p \end{cases} \quad (2-1)$$

其中 \mathbf{x} 是一个 n 维决策向量, ξ 是一个随机向量, $f(\mathbf{x}, \xi)$ 是目标函数, $g_j(\mathbf{x}, \xi)$ 是随机约束函数, $j=1,2,\dots,p$ 。实际上, 这个数学规划是没有定义的, 因为随机变量 ξ 使得 \max 和约束条件的意义并不明确。

一种有意义的随机规划是如下的机会约束规划模型:

$$\begin{cases} \max & \bar{f} \\ \text{s.t.} & \\ & P_r\{f(\mathbf{x}, \xi) \geq \bar{f}\} \geq \beta \\ & P_r\{g_j(\mathbf{x}, \xi) \leq 0, j=1,2,\dots,p\} \geq \alpha \end{cases} \quad (2-2)$$

其中 $P_r\{\cdot\}$ 表示 $\{\cdot\}$ 中的事件成立的概率, α 和 β 分别是事先给定的约束条件和目标函数的置信水平。

一个点 \mathbf{x} 是可行的, 当且仅当事件 $\{g_j(\mathbf{x}, \xi) \leq 0, j=1,2,\dots,p\}$ 的概率测度不小于 α , 即违反约束条件的概率小于 $(1-\alpha)$ 。

无论何种随机参数 ξ 和何种函数形式 f , 对每一个给定的决策 \mathbf{x} , $f(\mathbf{x}, \xi)$ 是随机变量, 其概率密度函数用 $\phi_{f(\mathbf{x}, \xi)}(f)$ 表示, 这样可能有多个 \bar{f} 使得 $P_r\{f(\mathbf{x}, \xi) \geq \bar{f}\} \geq \beta$ 成立。从极大化目标值 \bar{f} 的观点来看, 我们所需要的目标值 \bar{f} 应该是目标函数 $f(\mathbf{x}, \xi)$ 在保证置信水平至少是 β 时所取的最大值, 即

$$\bar{f} = \max\{f \mid P_r\{f(\mathbf{x}, \xi) \geq f\} \geq \beta\} \quad (2-3)$$

如图 2-1 所示。

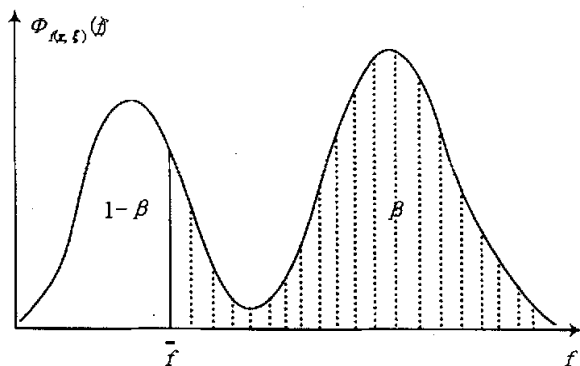


图 2-1 概率密度函数 $\phi_{f(x,\xi)}(f)$ 和目标值 \bar{f}

机会约束规划(2-2)中的概率约束称为联合机会约束。另外,联合机会约束有时可以分成几个独立的机会约束,如

$$P_r\{g_j(x,\xi) \leq 0\} \geq \alpha_j, \quad j=1,2,\dots,p \quad (2-4)$$

其中 α_j 是给定的置信水平, $j=1,2,\dots,p$ 。更一般的情况是,我们也可以采用混合机会约束:

$$\begin{cases} P_r\{g_j(x,\xi) \leq 0, j=1,2,\dots,k_1\} \geq \alpha_1 \\ P_r\{g_j(x,\xi) \leq 0, j=k_1+1,k_1+2,\dots,k_2\} \geq \alpha_2 \\ \dots \\ P_r\{g_j(x,\xi) \leq 0, j=k_{r-1}+1,k_{r-1}+2,\dots,p\} \geq \alpha_r \end{cases} \quad (2-5)$$

其中 $1 \leq k_1 < k_2 < \dots < k_{r-1} < p$ 。

类似地,对极小化问题,有

$$\begin{cases} \min \bar{f} \\ \text{s.t.} \\ P_r\{f(x,\xi) \leq \bar{f}\} \geq \beta \\ P_r\{g_j(x,\xi) \leq 0, j=1,2,\dots,p\} \geq \alpha \end{cases} \quad (2-6)$$

其中 \bar{f} 是目标函数 $f(x,\xi)$ 在置信水平为 β 时所取的最小值。

作为单目标机会约束规划的推广,多目标机会约束规划可以表示成如下形式:

$$\begin{cases} \max & [\bar{f}_1, \bar{f}_2, \dots, \bar{f}_m] \\ \text{s.t.} & \\ & P_i \{f_i(x, \xi) \geq \bar{f}_i\} \geq \beta_i, \quad i=1, 2, \dots, m \\ & P_j \{g_j(x, \xi) \leq 0\} \geq \alpha_j, \quad j=1, 2, \dots, p \end{cases} \quad (2-7)$$

其中 α_j 和 β_i 分别是第 j 个约束和第 i 个目标的置信水平, \bar{f}_i 分别是目标函数 $f_i(x, \xi)$ 在概率水平至少为 β_i 时所取的最大值, $j=1, 2, \dots, p, i=1, 2, \dots, m$ 。

此外, 还有一种特殊的机会约束规划, 目标函数为期望值的形式:

$$\begin{cases} \min & Ef(x, \xi) \\ \text{s.t.} & \\ & P_j \{g_j(x, \xi) \leq 0, j=1, 2, \dots, p\} \geq \alpha \end{cases} \quad (2-8)$$

其中 E 是关于 ξ 的期望值算子。

2.3 遗传算法

求解机会约束规划的传统方法是根据事先给定的置信水平, 把机会约束转化为各自的确定等价类, 然后用传统的方法求解其等价的确定性模型。对一些特殊情况, 机会约束规划问题确实可以转化为确定性数学规划问题, 但对比较复杂的机会约束规划问题, 如目标函数是多峰的或者机会约束条件不能转化为确定性条件的机会约束规划, 利用传统的方法很难得到满意的解或根本无法求解。然而, 随着计算机技术的高速发展, 一些革新算法如遗传算法的提出, 使得许多复杂的机会约束规划可以不必通过转化为确定性数学规划而直接得到解决。

基于蒙特卡罗仿真的遗传算法是解决复杂的机会约束规划模型的有力工具。这种方法的突出优点就是能够很好的得到全局最优解。另一个优点就是不需要把机会约束转化为它们各自的确定性等价类, 从而能够处理更一般的机会约束规划模型。

与其它算法相比, 遗传算法具有如下的优越性:

(1) 遗传算法是一种数值求解的启发式方法, 是一个有普适性的方法, 对目标函数的性质几乎没有要求, 甚至都不一定要显式的写出目标函数。

(2) 遗传算法在求解优化问题时, 不需要有很强的技巧和对问题有非常深刻的了解。

(3) 遗传算法同求解问题的其它启发式算法有较好的兼容性，如可以用其它的算法求初始解；在每一种群，可以用其它的方法求解下一代新群体。

2.3.1 遗传算法原理

遗传算法^[12,13](Genetic algorithms)是在 70 年代初期由美国密执根(Michigan)大学的 Holland 教授发展起来的。1975 年, Holland 发表了第一本比较系统论述遗传算法的专著《Adaptation in Natural and Artificial Systems^[14]》，奠定了遗传算法的基础。过去 30 年中, 在解决复杂的全局优化问题方面, 遗传算法已取得了成功的应用, 并受到了人们广泛的关注。在优化问题中, 如果目标函数是多峰的, 或者搜索空间不规则, 就要求所使用的算法必须具有高度的鲁棒性, 以避免在局部最优解附近徘徊。遗传算法的优点恰好是擅长全局搜索。另外, 遗传算法本身并不要求对优化问题的性质作一些深入的数学分析, 从而对那些不太熟悉数学理论和算法的使用者来说, 无疑是方便的。在解决全局优化问题方面, 遗传算法显示了非常广泛的应用前景, 并已应用到最优控制、运输问题、旅行商问题、调度、生产计划、资源分配、统计及模式识别等。

遗传算法主要借用生物进化中“适者生存”的规律。“适者生存”揭示了大自然生物进化过程中的一个规律: 最适合自然环境的群体往往产生了更大的后代群体。生物进化的基本过程, 见图 2-2。

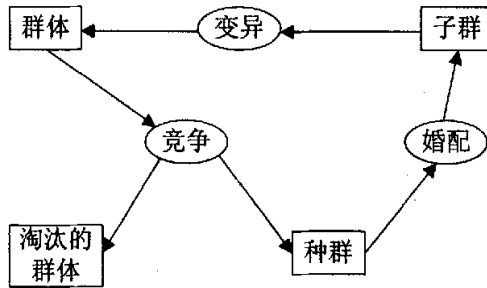


图 2-2 生物进化循环图

以这个循环圈的群体为起点, 经过竞争后, 一部分群体被淘汰而无法再进入这个循环圈, 而另一部分则成为种群。优胜劣汰在这个过程中起着非常重要的作用。即使在成活群体中, 还要通过竞争产生种群。种群通过婚配的作用产生子群。进化的过程中, 可能会因为变异而产生新的个体。综合变异的作用, 子群成长为

新的群体而取代旧群体。在新的一个循环过程中，新的群体将替代旧的群体而成为循环的开始。

遗传算法主要借鉴了生物进化的一些特征，其主要特征体现为：

- 进化发生在解的编码上。这些编码按生物学的术语称为染色体。由于对解进行了编码，优化问题的一切性质都通过编码来研究。编码和解码是遗传算法的一个主题。
- 自然选择规律决定哪些染色体产生超过平均数的后代。遗传算法中，通过优化问题的目标而人为地构造适应函数以达到好的染色体产生超过平均数的后代。
- 当染色体结合时，双亲的遗传基因的结合使得子女保持父母的特征。
- 当染色体结合后，随机的变异会造成子代同父代的不同。

表 2-1 列出了生物遗传基本概念在遗传算法中作用的对应关系。

表 2-1 生物遗传概念在遗传算法中的对应关系

生物遗传概念	遗传算法中的作用
适者生存	在算法停止时，最优目标值的解有最大的可能被留住
个体(individual)	解
染色体(chromosome)	解的编码（字符串，向量等）
基因(gene)	解中每一分量的特征（如各分量的值）
适应性(fitness)	适应函数值
群体(population)	选定的一组解（其中解的个数为群体的规模）
种群(reproduction)	根据适应函数值选取的一组解
交叉(crossover)	通过交叉原则产生一组新解的过程
变异(mutation)	编码的某一个分量发生变化的过程

2.3.2 遗传算法的实现

遗传算法包含以下的主要处理步骤。首先是对优化问题的解进行编码，此处，我们称一个解的编码为一个染色体，组成编码的元素称为基因。编码的目的主要是用于优化问题解的表现形式和利于之后遗传算法中的计算。第二是适应函数的

构造和应用。适应函数基本上依据优化问题的目标函数而定。当适应函数确定以后,自然选择规律是以适应函数值的大小决定的概率分布来确定哪些染色体适应生存,哪些被淘汰。生存下来的染色体组成种群,形成一个可以繁衍下一代的群体。第三是染色体的结合。双亲的遗传基因结合是通过编码之间的交叉达到下一代的产生。新一代的产生是一个生殖过程,它产生了一个新解。最后是变异。新解产生过程中可能发生基因变异,变异使某些解的编码发生变化,使解有更大的遍历性。

遗传算法的框图如下:

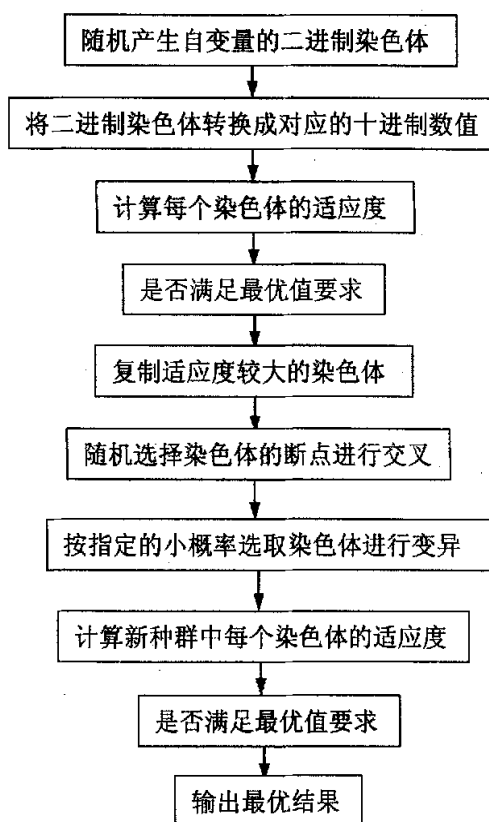


图 2-3 遗传算法的计算流程框图

具体步骤为：

(1) 编码。每个待优化问题的自变量需进行编码，一般采用有限长度的二进制代码代表各自变量的各种取值，二进制代码相当于表示该个体遗传特性的染色体。

(2) 产生初始种群。随机产生 n 条染色体组成初始种群。该种群代表优化问题的一些可行解的集合，初始种群的适应性较差，遗传算法就是从初始种群出发，模拟进化过程，择优去劣，最后找出最优群体和个体，达到满足优化的要求。

(3) 复制。将种群中的每一个个体的染色体所对应的自变量十进制数值代入目标函数表达式，计算出每个个体的适应值。按一定概率从群体中选取个体，并复制下来，作为双亲用于繁殖后代，复制的原则是适应值较大的个体，赋予更大的选中概率。因此，适应值越大的个体，有更多的机会繁殖后代，使其优良特性得以遗传和保留。

(4) 交叉。将随机选中的双亲任意配对，然后分别对其进行交叉。最简单的交叉办法是随机地选取一个或多个断点，将双亲的染色体在断点分开，然后，以一定概率 P_c 交换其尾部。

(5) 变异，按事先给定的小概率 P_m （一般取 $0 \sim 0.05$ ）随机选取若干个个体。对已选取的每个个体，随机选取某一位进行反运算，即由 $1 \rightarrow 0$ 或 $0 \rightarrow 1$ 。

(6) 由上述 (3) ~ (5) 产生了新一代的种群后，对新群体的每个个体再进行评价，即对每个染色体进行解码，并求出每个个体的适应值。

(7) 重复上述步骤，直到最优个体的适应值达到某一既定值，或最优个体的适应值和种群的平均适应值不再提高，则迭代过程结束，计算结束。

使用遗传算法解决问题时，有以下几个主要因素有待研究。

(1) 解的编码和解码。遗传算法的基础工作之一是解的编码，只有在编码之后才可能有其他的计算。编码和解码是相对应的。算法的最后一个是通过解码得到问题的一个解。选择哪种编码形式视具体情况而定，原则是便于表示和操作。

(2) 初始种群的选取和计算中群体的大小。一般采用随机产生初始种群或通过其他方法先构造一个初始群体。通过其他方法构造的初始群体可能会节省进化的代数，但也可能过早的陷入局部最优群体中，这种现象称为早熟现象。群体中

个体的个数称为群体的维数。群体的维数越大，其代表性越广泛，最终进化到最优解的可能性越大。但维数大的群体势必造成计算时间的增加，这又是我们不希望的。群体的维数常常采用一个不变的常数，在一些应用中，群体的维数可以采用同遗传代数有关的变量，以使算法更有效。

(3) 适应函数的确定。一般情况，适应函数同目标函数相关，以保证较优的解有较大的生存机会。适应函数用来对种群中的每个染色体设定一个概率，以使该染色体被选择的可能性与其种群中其他染色体的适应性成比例，即通过轮盘赌，适应性强的染色体被选择产生后代的机会要大。

(4) 三个算子。遗传算法的三个算子是：种群选取、交叉和变异或称突变。新群体产生中的一个主要问题是如何选取种群。种群是以一个概率分布一轮盘赌的形式选择个体而产生的。种群选定后需考虑它的交叉规则，如双亲遗传法。主个体副个体规则，单亲遗传规则等。还需考虑交叉位的选取、交叉概率及产生后代等一些细节问题。变异是扩大染色体选择范围的一个手段。通常，遗传算法实现变异的方法是赋予每一个基因一个相对较小的变异概率，通过随机模拟而决定一个基因是否变异。变异概率过小使解有一定的局限性，遍历性较差。变异概率较大使得进化的随机性增大，也不容易得到稳定的解。因此，变异概率如何确定这一过程不可忽略。

2.4 蒙特卡罗方法

机会约束规划与确定性规划的区别在于前者存在机会约束，因此本节讨论的重点在于如何处理机会约束上。

如果机会约束具有一些特定的形式，可以把机会约束转化为它们各自的确定性等价类。否则，可以使用蒙特卡罗方法处理复杂的机会约束。

蒙特卡罗方法是一种以概率统计理论和方法为基础的数值计算方法，它是否适合于计算机上使用为重要标志。蒙特卡罗方法也称统计试验方法或计算机随机模拟方法，以对随机性问题进行仿真为其基本特征，可以解决许多难以用解析方法求解的随机优化问题。

蒙特卡罗方法的应用范围非常广泛，如微积分、线性代数、优化问题、概率计算等。

2.4.1 机会约束的检验

考虑机会约束

$$P_r\{g_j(\mathbf{x}, \xi) \leq 0, j=1, 2, \dots, k\} \geq \alpha \quad (2-9)$$

其中 ξ 是随机向量, 其累计概率分布为 $\phi(\xi)$ 。对任意给定的决策变量 \mathbf{x} , 使用如下的蒙特卡罗方法检验机会约束(2-9)是否成立。

首先从概率分布 $\phi(\xi)$ 中产生 N 个独立的随机变量 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N$, 设 N' 是 N 次实验中 $g_j(\mathbf{x}, \xi) \leq 0 (i=1, 2, \dots, N)$ 成立的次数, 即所产生的随机变量中满足约束的个数。由大数定律, 可以用频率 N'/N 估计概率。因此, 当且仅当频率 $N'/N \geq \alpha$ 时, 机会约束(2-9)成立。

检验随机系统约束的步骤如下:

- 1 置 $N'=0$;
- 2 由概率分布 $\phi(\xi)$ 生成随机变量 ξ ;
- 3 如果 $g_j(\mathbf{x}, \xi) \leq 0, j=1, 2, \dots, k$, 则 $N'++$;
- 4 重复步骤 2 和 3 共 N 次;
- 5 如果 $N'/N \geq \alpha$, 返回“成立”, 否则返回“不成立”。

2.4.2 计算目标值

考虑带有随机参数 ξ 的目标函数

$$P_r\{f(\mathbf{x}, \xi) \geq \bar{f}\} \geq \beta \quad (2-10)$$

要找到使(2-10)成立的最大值 \bar{f} , 可以采用蒙特卡罗方法。步骤如下:

- 1 从概率分布 $\phi(\xi)$ 中生成 N 个随机向量 $\{\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N\}$;
- 2 置 $f_i = f(\mathbf{x}, \xi_i), i=1, 2, \dots, N$;
- 3 置 N' 为 βN 的整数部分;
- 4 返回序列 $\{f_1, f_2, \dots, f_N\}$ 中第 N' 个最大的元素。由大数定律, 该元素可以作

为 \bar{f} 的估计。

2.4.3 基于蒙特卡罗仿真的遗传算法

Iwamura 和 Liu^[15]使用基于蒙特卡罗仿真的遗传算法求解一般的机会约束规划。

具体步骤如下:

步骤 1 输入种群数参数 N , 交叉概率 P_c 及变异概率 P_m ;

步骤 2 对待优化问题进行编码, 初始产生有 N 个染色体的初始种群, 并利用蒙特卡罗仿真技术检验染色体的可行性;

步骤 3 对染色体进行交叉和变异操作, 并利用蒙特卡罗仿真技术检验后代的可行性;

步骤 4 使用蒙特卡罗仿真技术计算所有染色体的目标值;

步骤 5 根据目标值, 使用基于序的评价函数计算每个染色体的适应度;

步骤 6 旋转赌轮, 选择染色体;

步骤 7 重复步骤 3 到步骤 6, 直到完成给定的循环次数;

步骤 8 给出最好的染色体作为最优解。

2.5 参考文献

- [1] Dempster M A H. Stochastic Programming. London: Academic Press, 1980
- [2] Ermoliev Y, Wets RB. Numerical Techniques for Stochastic Optimization. Berlin: Springer-Verlag, 1988
- [3] Kall P, Wallace SW. Stochastic Programming. John Wiley&Sons, 1994
- [4] Kall P. Stochastic Programming. Berlin: Springer-Verlag, 1976
- [5] Kolin V V. Stochastic Programming. Dordrecht: D. Reidel, 1977
- [6] Sengupta J K. Stochastic Programming: Methods and Applications. Amsterdam: North-Holland, 1972
- [7] Vajda S. Probabilistic Programming: New York: Academic Press, 1972
- [8] Mares M. Computation Over Fuzzy Quantities. Boca Raton: CRC Press, 1994
- [9] Zimmermann H J, Zadeh L A, Gaines B R. Fuzzy sets and Decision Analysis.

Amsterdam, New York, Oxford, 1984

- [10] Zimmermann H J. Fuzzy Set Theory and its Applications. Boston: Kluwer Nijhof, 1985
- [11] Charnes A, Cooper W W. Chance-constrained programming. *Management Science*, 1959, 6(1): 73~79
- [12] 刘宝碁, 赵瑞清. 随机规划与模糊规划. 北京: 清华大学出版社, 1998
- [13] 邢文训, 谢金星. 现代优化计算方法. 北京: 清华大学出版社, 1999
- [14] Holland J H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. MIT Press, 1975
- [15] Iwamura K, Liu B. A genetic algorithm for chance constrained programming. *Journal of Information and Optimization Sciences*, 1996, 17(2): 40~47

第三章 电力市场环境下的输电系统 规划方法初探

3.1 引言

传统的输电系统规划的任务是根据规划期间的负荷增长及给定的发电规划方案,确定最佳的输电系统扩展计划,使输电系统的投资、建造和运行费用最小^[1]。数学上,这是一个十分复杂的动态多目标不确定性非线性整数规划问题。常用的方法主要包括数学规划方法和启发式方法,这些方法一般针对确定的未来环境,建立数学模型,求得最优规划方案。

电力工业市场化以后,发电厂和电网分离,发电规划在很多国家成为发电公司的内部事宜,以电厂投资者的利益最大化为目标,尽管需要满足政府或监管机构所制定的相关法规或条例的约束。发电规划在很大程度上取决于发电公司或发电厂潜在的投资者对电力市场未来的电价走势、国家相关政策的调整、能源价格走势以及负荷变化等因素的预测。因此,新的电厂或机组的类型、位置、容量和投运时间,以及旧机组和旧电厂的退役或停运等决策一般由发电公司自行作出,而且发电公司往往不会将这些信息提前在市场中公布。对于输电系统规划而言,这些都是不确定性因素,处理起来相当复杂和困难。此外,还有未来系统负荷变化的不确定性,电力市场发展所导致的合作与竞争方面的不确定性,经济的发展和环境的影响,以及相关法规和政策调整所导致的不确定性等。这些因素都给输电系统规划提出了新的挑战^[2]。

基于上述原因,在电力市场环境下,输电系统规划需要充分考虑各种不确定性因素的影响^[3]。传统的输电系统规划方法一般仅考虑一种最可能的未来场景,不能处理各种不确定性因素的影响,所得到的规划方案对未来环境变化的适应性较差,无法满足市场环境下的输电系统规划要求。近年来,能够处理不确定性因素影响的输电系统灵活规划方法引起了学术界和工程界的广泛关注,成为输电系统规划领域的研究热点之一^[4-6]。

目前国内外对输电系统灵活规划方法的研究主要集中在对不确定性因素的模拟和求解算法方面,但许多影响输电系统规划的不确定性因素难以用准确的数

学方法进行描述。为处理这些不确定性因素, 场景(Scenario)决策方法得到了比较普遍的应用^[7,8]。该方法首先识别出影响规划结果的一系列不确定性因素, 并对这些因素进行组合, 每一种组合就是一个场景, 之后对每种场景分别计算各候选规划方案的成本, 再按照某种给定的评价方法对各个方案进行比较, 得到使决策者满意的规划方案。由于所有不确定性因素在每个场景中均已成为确定性参数, 从而可以针对每个场景采用现有方法进行确定性的输电系统优化规划。

场景方法虽然原理简单, 但需要事先设想出多种可能的未来场景, 对于大规模电力系统这并不总容易做到, 此外计算量也相当大。在电力市场环境下, 影响输电系统规划的不确定性因素数量很多且变化多样, 可能的场景数量巨大, 场景方法难以应用。

在此背景下, 针对水平年输电系统规划问题, 本章提出了一种基于蒙特卡罗仿真和遗传算法的输电系统灵活规划方法, 充分考虑了电力市场环境下的各种不确定性因素, 尤其是规划期内发电厂址与装机容量, 适用于电力市场环境下的输电系统规划。该方法利用蒙特卡罗仿真可以处理各种不确定性因素的特点并结合遗传算法较强的全局优化能力, 为解决电力市场环境下的输电系统规划问题作了一些初步的、探索性的研究工作。

3.2 输电系统规划模型

3.2.1 不确定性因素的模拟

大多数不确定性因素可用概率方法(如概率密度函数)来模拟, 其中的参数可基于历史数据以及对所研究系统的未来发展情况的分析估计来确定。在影响输电系统规划的众多不确定性因素中, 最为重要的是未来电源建设和负荷增长的不确定性。有鉴于此, 本章主要考虑这两种不确定性因素的影响, 但所提出的方法框架同样可以容纳对其它不确定性因素的模拟。

前已述及, 由于电力市场环境下的发电规划一般是发电公司的内部事宜(尽管需要遵守政府或监管机构一些相关法律、法规或条例的约束), 这样, 在进行输电系统规划时, 很难得到新建电厂的位置、容量和投运时间等的准确信息, 可以采用下述方法对规划期内新的电源点进行模拟。

为了对新建发电厂的选址提供指导, 在有些国家如南美的玻利维亚、智利和

秘鲁等，政府推荐一些候选的新的发电厂的位置供投资者选择。投资者可据此选择新建发电厂的位置和装机容量^[9]。在另外一些政府处于强势的国家，政府部门或监管机构可以指定候选的发电厂址，要求投资者在这些给定的地点选择建厂。这些信息一般都是公开的。因而，对于这些国家，在进行输电系统规划时，对未来的发电厂址及其容量可以在相当程度上做出估计。

对于规划期内可能出现的电源节点 i ，假设其成为新增电源节点的概率为 p_i ，且该点的发电装机容量服从离散概率分布。例如，当确定节点 i 为一新增电源节点时，预计该点装机容量可能为 $g_{ik} (k=1, 2, \dots, M)$ ，出现每一种可能的装机容量的概率分别为 $a_{ik} (k=1, 2, \dots, M)$ 。这样，离散型随机变量的分布为：

$$P(X = g_{ik}) = a_{ik} \quad (k=1, 2, \dots, M) \quad (3-1)$$

式中， $0 < a_{ik} < 1$ ， $\sum_{k=1}^M a_{ik} = 1$ 。

对于现有负荷节点 i ，假设该点原有负荷为 P_{Di0} ，在输电系统规划期内该点负荷的变化量 ΔP_{Di} 为一随机变量，服从正态分布 $\Delta P_{Di} \sim N(\mu, \sigma_i^2)$ ，那么该点的负荷 P_{Di} 为 $P_{Di0} + \Delta P_{Di}$ 。对于规划期内新增的负荷节点 i 有 $P_{Di0} = 0$ ， $P_{Di} = \Delta P_{Di}$ 。

需要指出，本章虽然只是对新增电源和负荷增长的不确定性进行了模拟，但所提出的方法框架完全可以容纳对现有电源容量的不确定性模拟，包括现有发电机组的停运和现有发电厂的关闭所引起的容量变化的不确定性。因篇幅所限和出于突出重点的考虑，本章不对此展开讨论。

3.2.2 输电系统优化规划的基本模型

由于本章的研究重点在于对输电系统规划中的不确定性因素的处理，以期全面而贴切地模拟将来的系统情况，使规划方案具有较强的适应性。前已述及，下面将采用蒙特卡罗仿真方法，通过对各种不确定性因素的抽样，将随机优化问题转化为确定性优化问题处理，这样所提出的方法将需要借用现有的某种确定性输电系统规划方法。存在多种确定性输电系统规划方法，可以根据研究问题的实际需要酌情选定，这不是本章要讨论的重点。本章采用文献[10]中发展的水平年输电系统优化规划模型来确定满足过负荷约束且最经济的输电网络扩展方案。

$$\min f(S) = \begin{cases} W_1 Z & \text{当 } Z > 1 \text{ 时} \\ \sum_{j=1}^n R_j s_j + W_2 G & \text{当 } Z = 1 \text{ 时} \end{cases} \quad (3-2)$$

式中, S 为表示规划方案的 n 维向量, $S=(s_1, s_2, \dots, s_j, \dots, s_n)$; n 为候选线路的数目; s_j 为候选线路 j 的 0-1 决策变量, 且 $s_j=1$ 或 0 分别表示线路 j 在规划方案中被选中或不选中; R_j 为第 j 条候选线路的投资与建造费用; Z 为 S 所表示的规划方案中所包含的孤立子系统总数目, $Z=1$ 和 $Z>1$ 分别表示 S 所表示的规划方案是连通的和不连通的; G 为 S 所表示的规划方案中所有出现过负荷线路的过负荷总量; W_1 和 W_2 为惩罚系数。至于该规划模型的细节, 请参看文献[10], 这里不展开介绍。

3.2.3 网络连通性判断

在进行输电系统规划时, 一个必不可少的步骤就是判断与规划方案相应的网络的连通性。常用的方法包括图论中的广度优先搜索算法和深度优先搜索算法以及由此发展起来的各种变形算法, 这些基本上都属于通用的搜索方法。事实上, 借鉴其它领域发展的一些专门的搜索算法, 经过适当的改进, 有可能得到更有效的算法。本章在这方面也做了一些努力。

文献[11]提出了基于关联矩阵法的主接线结构辨识算法, 文献[12]则将这一方法应用到变电所一次主接线电气连通性分析之中。通过对比分析发现, 如果将输电系统规划问题中候选线路所对应的 0 和 1 状态, 看作支路上的开关元件的开合状态, 则该方法也可用于判断与输电规划方案相应的网络的连通性, 且方法灵活、易于实现。其方法如下:

首先对网络节点、支路进行编号, 原有的节点、支路编号在前, 新增的节点和候选的支路编号在后。然后将所有候选线路全部加入网络, 形成网络的初始节点-支路关联矩阵 $A_0=[a_{ij}]$, 其中 a_{ij} 表示节点 i 与支路 j 的关联值, 当节点 i 与支路 j 相连时, $a_{ij}=1$, 否则 $a_{ij}=0$ 。对于求解过程中产生的每一个新的规划方案 $S=(s_1, s_2, \dots, s_j, \dots, s_n)$, (s_j 对应于候选线路的被选状态, 该线路在规划方案中被选中时 $s_j=1$, 否则 $s_j=0$), 构造向量 $T, T=(\underbrace{1, 1, \dots, 1}_m, s_1, s_2, \dots, s_j, \dots, s_n)$, T 为 $(m+n)$ 维行向量。 m 为现有网络中的支路数, T 中前 m 个元素均为 1, 表示原有的支路始终存在, 即代表该支路的“开关”始终闭合。将 A_0 的每一行与对应的 T 的各

个元素进行“与”运算后得到矩阵 A 。矩阵 A 可看成是原始网络 A_0 的某些支路上的开关元件断开后得到的新网络的节点-支路关联矩阵，断开的线路对应于 $s_j=0$ 。当 T 的某一个元素为 0 时，对应的关联矩阵 A 的这一列全部为 0，表示该条候选线路没有被包括在规划方案之中。

用同样的方法，也可以定义支路-节点关联矩阵 $B=[b_{ij}]$ ，显然 $B=A^T$ 。

对网络连通性的判断，实际上就是要找出网络中节点间的连通关系。显然，这种连通关系是可以传递的，即

- a. 如果节点 i 与支路 j 相联，同时，支路 j 又与节点 k 相联，则节点 i 与节点 k 是相联的；
- b. 如果节点 i 与节点 k 相联，而节点 k 又与节点 l 相联，则节点 i 与节点 l 也是相联的。

定义节点-节点连通矩阵（它与网络图论中的节点-节点关联矩阵有区别） $C=[c_{ij}]$ ，当节点 i 与节点 j 连通时， $c_{ij}=1$ ，不连通时 $c_{ij}=0$ ，显然 C 是对称矩阵。

以上连通关系的传递性质可以表示如下：

- a. 若 $a_{ij}=1$ ， $b_{jk}=1$ ，则 $c_{ik}=a_{ij} \cap b_{jk} = 1$ ；
- b. 若 $c_{ik}=1$ ， $c_{kl}=1$ ，则 $c_{il}=c_{ik} \cap c_{kl} = 1$ 。

对于有 p 个节点和 $m+n$ 条支路的网络，定义以下矩阵乘法运算：

$$C=A \cdot B \tag{3-3}$$

其中 $c_{ij} = \bigcup_{k=1}^{m+n} (a_{ik} \cap b_{kj})$ ， \cap 表示“与”运算， \cup 表示“或”运算。

当 A 为节点-支路关联矩阵， B 为支路-节点关联矩阵时， c_{ij} 将表示节点 i 与节点 j 通过任一支路的关联情况。只要节点 i 和节点 j 有一条支路相联，则 $c_{ij}=1$ 。 $C=[c_{ij}]$ 表示了节点与节点之间的连通性质，称为节点-节点连通矩阵。这时的节点-节点连通矩阵仅仅表示了节点之间的直接连通性质，把它称为一级节点-节点连通矩阵，并记为 $C^{(1)}$ 。由于连通关系的传递性质，可以由一级节点-节点连通矩阵 $C^{(1)}$ 通过式(3-3)定义的矩阵乘法运算，得到二级节点-节点连通矩阵：

$$C^{(2)}=C^{(1)} \cdot C^{(1)} \tag{3-4}$$

$C^{(2)}$ 在 $C^{(1)}$ 的基础上，运用连通关系的传递性，把节点之间的部分间接连通关系表示出来了。用 $C^{(2)}$ 再自乘得到 $C^{(3)}$ ，…，直到 $C^{(m+n)}=C^{(m+n-1)} \cdot C^{(m+n-1)}$ 。通

过传递，所有连通的节点之间的关联值最后都是 1，而不连通的节点间的关联值都为 0。

这样，对应于每一个候选的规划方案 $S=(s_1, s_2, \dots, s_j, \dots, s_n)$ ，通过识别 $C^{(m+n)}$ 是否为一个全 1 阵，就可判断该规划方案所表示的输电网络是否连通，简单易行。

3.3 用蒙特卡罗方法求取输电系统最优规划方案

蒙特卡罗方法也称统计实验方法或计算机随机模拟方法，是一种以概率统计理论和方法为基础的数值计算方法。蒙特卡罗方法以对随机性问题进行仿真为其基本特征，可以解决许多难以用解析方法求解的随机优化问题。

前已述及，在输电系统的规划期内，电源和负荷情况是不确定的，可以用概率密度函数来描述，这样电力市场环境下的输电系统最优规划问题就成为一个随机优化问题，可以采用蒙特卡罗仿真方法进行求解。

基于蒙特卡罗仿真的输电系统最优规划方法的具体步骤如下：

a. 置计数器 $t=0$ 。

b. 给定随机模拟的最大允许次数 L_{max} 。

c. 置随机模拟计数器 $t=0$ 。

d. 对于第 i 个候选电源节点，产生一个 $[0,1]$ 区间内均匀分布的伪随机数 x_i ，若 $x_i \leq p_i$ (p_i 为该点出现新增电源的概率)，则该点被选中，转步骤 e；否则该点未被选中，新增发电装机容量为 0，转步骤 f。

e. 对于抽样选中的新增电源节点，还需要抽样确定新增的发电装机容量。

前已述及，发电装机容量的分布表示为 $P(X = g_{ik}) = a_{ik}$ ($k=1,2,\dots,M$)，其中

$0 < a_{ik} < 1$ ， $\sum_{k=1}^M a_{ik} = 1$ 。为此，再产生一个 $[0,1]$ 区间内均匀分布的伪随机数 y_i 。当

$\sum_{j=1}^{k-1} a_{ij} < y_i \leq \sum_{j=1}^k a_{ij}$ 时，得到装机容量的抽样值为 g_{ik} 。

f. 抽样产生规划期内新增负荷值。随机产生一个满足正态分布 $N(\mu_i, \sigma_i^2)$ 的伪随机数 ΔP_{Di} ，则该点在规划期内的负荷值为 $P_{Di0} + \Delta P_{Di}$ 。

g. 检验在这一次随机模拟中得到的所有节点发电容量总和是否大于等于所有负荷的总和，如果是，则这次模拟结果就供需而言是可行的(下称供需可行性)，

保留该次模拟结果并置 $t=t+1$, 转步骤 h, 否则转步骤 i。

h. 在抽样确定了规划期内节点的发电容量和负荷情况后, 问题就蜕化为确定的输电系统优化规划问题。基于 3.2.2 节中介绍的规划模型, 可以采用遗传算法求出最优的规划方案 S_t , 其中要用到 3.1.3 节中介绍的网络连通性的判断方法 (鉴于遗传算法已为大家所熟知, 这里不再赘述)。

i. 置 $t=t+1$ 。

j. 如果 $t < L_{max}$, 转步骤 d, 否则转步骤 k。

k. 检查在所得到的所有最优规划方案 S_1, S_2, \dots, S_t 中每条候选输电线路出现的次数, 此时 t 表示在 L_{max} 次随机模拟过程中所得到的满足上述供需可行性的模拟次数。

l. 将候选线路按出现次数多少由大到小进行排序 (下称“候选线路优先次序”), 然后按此顺序逐条加入现有网络, 直到所规划的网络连通为止。这是网络规划最基本的要求, 为此我们称这一方案为“基本规划方案”。

m. 将此“基本规划方案”带回到前述的 t 种满足上述供需可行性的模拟情况中, 计算在每一种模拟情况下该“基本规划方案”是否满足规划的约束条件。假设在 t 种情况下满足约束条件的次数为 v , 则得到该方案的一个检验指标

$$\rho = \frac{v}{t} \times 100\%。$$

n. 在“基本规划方案”的基础上, 将上述的“候选线路优先次序”中尚未加入网络的输电线路由前到后逐条加入网络, 每加入一条候选线路, 即得到一个新的规划方案, 转到步骤 m 计算相应的 ρ 。

o. 规划人员可以通过比较 ρ 的大小, 对这些规划方案进行权衡, 综合考虑成本和输电网络满足运行约束的情况, 做出最终决策。

蒙特卡罗方法原理简单, 但计算量较大, 所幸的是输电系统规划问题对计算速度要求不高。此外, 现代计算机的发展日新月异, 计算速度不断提高, 对于输电系统规划问题, 计算时间应不会成为该方法能否得以应用的制约因素。

3.4 算例分析

用修改过的文献[1]中的 18 节点系统算例对所提出的方法进行测试。

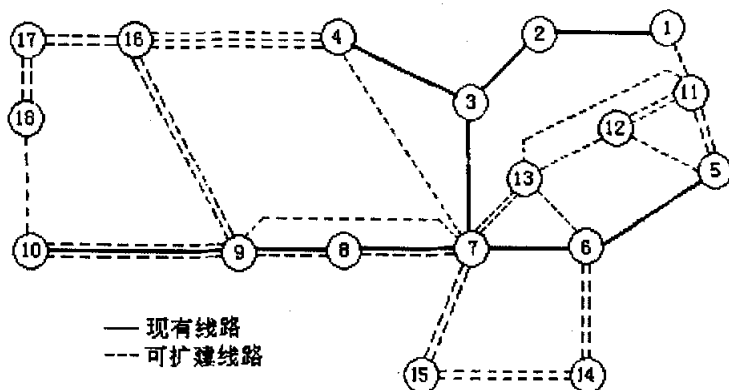


图 3-1 网络路径示意图

图 3-1 为该 18 节点系统网络路径示意图。系统原有 10 个节点，9 条线路（如实线所示）。图中虚线代表候选线路，共 33 条。系统原有节点数据见表 3-1，所有支路数据见表 3-2。为方便起见，假设线路的投资和建造成本之和在数值上与线路的长度相同，这不影响最后的规划结果，尽管如此得到的投资和建造成本数据并没有明确的量纲。假设节点 11，14，16 和 18 可能出现新增电源，有关数据如表 3-3 所示。设系统原有节点的负荷值保持不变，新增节点负荷值满足正态分布，有关参数见表 3-4。

表 3-1 原始节点数据

节点号	发电出力/MW	负荷/MW
1	0	550
2	3600	840
3	0	1540
4	0	380
5	7600	6390
6	0	1990
7	0	2130
8	0	880
9	0	2590
10	7500	940

表 3-2 支路数据

支路号	两端节点	线路电抗 /p.u.	线路容量 /MW	原有 线路数	可扩建 线路数	长度 /km
1	1-2	0.0176	2300	1	0	70
2	1-11	0.0102	2300	0	1	40
3	2-3	0.0348	2300	1	0	138
4	3-4	0.0404	2300	1	0	155
5	3-7	0.0325	2300	1	0	129
6	4-7	0.0501	2300	0	1	200
7	4-16	0.0501	2300	0	3	200
8	5-6	0.0267	2300	1	0	106
9	5-11	0.0153	2300	0	2	60
10	5-12	0.0102	2300	0	1	40
11	6-7	0.0126	2300	1	0	50
12	6-13	0.0126	2300	0	1	50
13	6-14	0.0554	2300	0	2	220
14	7-8	0.0151	2300	1	1	60
15	7-9	0.0318	2300	0	1	126
16	7-13	0.0126	2300	0	2	50
17	7-15	0.0448	2300	0	2	178
18	8-9	0.0102	2300	1	1	40
19	9-10	0.0501	2300	1	2	200
20	9-16	0.0501	2300	0	2	200
21	10-18	0.0255	2300	0	1	100
22	11-12	0.0126	2300	0	2	50
23	11-13	0.0255	2300	0	1	100
24	12-13	0.0153	2300	0	1	60

25	14-15	0.0428	2300	0	2	170
26	16-17	0.0153	2300	0	2	60
27	17-18	0.0140	2300	0	2	55

表 3-3 新增电源点数据

节点号	p_i	g_{i1}	a_{i1}	g_{i2}	a_{i2}	g_{i3}	a_{i3}
11	0.9	5800	0.1	7600	0.5	9400	0.4
14	0.8	5800	0.2	7600	0.4	9400	0.4
16	0.8	5000	0.2	6800	0.5	8600	0.3
18	0.9	1500	0.2	2100	0.6	2700	0.2

注： p_i 为节点 i 出现新增电源的概率； g_{ik} 为可能的发电装机容量，单位为 MW； a_{ik} 为 g_{ik} 出现的概率，在此算例中取 $k=1, 2, 3$ 。

表 3-4 新增节点负荷的概率分布

节点号	平均值 (MW)	标准差 (MW)
11	7000	700
12	1900	190
13	1100	110
14	300	30
15	2000	200
16	1300	130
17	4000	400
18	500	50

应用蒙特卡罗方法对规划期内可能出现的新增电源和新增负荷进行随机抽样，这里取抽样次数为 100。每一种抽样对应于一种可能的规划期内的系统情况。当系统中所有节点的发电装机容量的总和大于负荷总和时，满足供需可行性，该

次抽样有效。如果不满足供需可行性,则该抽样无效,不予保留。对于每一个满足供需可行性的抽样,规划期内的新增电源和负荷的取值就确定了,然后应用遗传算法求取最优的规划方案。计算表明,在 100 次抽样中,共有 88 次抽样有效。对每一次有效抽样,利用遗传算法寻找最优的规划方案,这样共得到 88 种规划方案。对这 88 种规划方案进行统计,可得到各候选线路在 88 次有效抽样中被选中的总次数,按次数的多少由大到小排列,得到“候选线路优先次序”。按此优先次序逐条将候选线路加入原始网络,直到网络连通,如此得到的“基本规划方案”列于表 3-5,共新建 12 条线路。

表 3-5 基本规划方案

支路号	两端节点	扩建线路数
9	5-11	1
10	5-12	1
16	7-13	2
17	7-15	1
21	10-18	1
24	12-13	1
25	14-15	1
26	16-17	2
27	17-18	2

将“基本规划方案”代回到 88 种有效的抽样方案所对应的系统进行检验,满足约束条件的次数为 0。以“基本规划方案”为基础,将“候选线路优先次序”中尚未包含在“基本规划方案”中的候选线路依先后次序逐条加入“基本规划方案”所对应的网络之中。每加入一条候选线路,就得到一种规划方案,之后代回 88 种有效的抽样方案所对应的系统进行检验,统计满足约束条件的次数 v ,于是得到该方案对应的检验指标 $\rho = \frac{v}{t} \times 100\%$, 此处 $t=88$ 。表 3-6 列出了 6 种具体的规划方案,表 3-7 对这些方案进行了比较。

表 3-6 输电系统规划方案

支路号	两端节点	原有 线路数	扩建线路数					
			方案	方案	方案	方案	方案	方案
			1	2	3	4	5	6
1	1-2	1	0	0	0	0	0	0
2	1-11	0	0	0	1	1	1	1
3	2-3	1	0	0	0	0	0	0
4	3-4	1	0	0	0	0	0	0
5	3-7	1	0	0	0	0	0	0
6	4-7	0	0	0	0	0	0	0
7	4-16	0	0	0	0	1	2	2
8	5-6	1	0	0	0	0	0	0
9	5-11	0	2	2	2	2	2	2
10	5-12	0	1	1	1	1	1	1
11	6-7	1	0	0	0	0	0	0
12	6-13	0	0	1	1	1	1	1
13	6-14	0	1	1	1	2	2	2
14	7-8	1	0	0	1	1	1	1
15	7-9	0	0	0	0	0	0	0
16	7-13	0	2	2	2	2	2	2
17	7-15	0	2	2	2	2	2	2
18	8-9	1	0	1	1	1	1	1
19	9-10	1	0	0	0	0	0	1
20	9-16	0	0	0	0	0	1	1
21	10-18	0	1	1	1	1	1	1
22	11-12	0	0	1	2	2	2	2
23	11-13	0	0	0	0	1	1	1
24	12-13	0	1	1	1	1	1	1
25	14-15	0	1	1	2	2	2	2

26	16-17	0	2	2	2	2	2	2
27	17-18	0	2	2	2	2	2	2

表 3-7 输电系统规划方案比较

	扩建线路条数	总费用	满足约束次数 s	检验指标 ρ
方案 1	15	1396	25	0.2841
方案 2	18	1536	28	0.3182
方案 3	22	1856	49	0.5568
方案 4	25	2376	69	0.7841
方案 5	27	2776	81	0.9205
方案 6	28	2976	88	1

通过比较表 3-7 中的 6 种规划方案可以看出，在保证网络连通以后，规划人员可以根据 ρ 和总费用来权衡各规划方案。当 ρ 较小时，规划方案所需投资较少，经济性较好，但对未来环境的适应能力较差。当 ρ 较大时，规划方案所需投资较大，经济性较差，但适应能力较强。规划人员可以根据所要规划的系统的实际情况，折衷考虑各个规划方案的成本和适应能力，作出合理的决策。

需要指出，本章所提出的方法充分考虑了电力市场环境下的各种不确定性因素，尤其是规划期内发电厂址与装机容量的不确定性，适用于解决电力市场环境下的输电系统规划问题。就笔者所知，到目前为止，国内外尚没有类似的方法报道，因此不存在与其它方法进行比较的问题。

3.5 结语

电力工业的市场化改革打破了原有的垄断，输电环节和发电环节的分离为输电系统的规划带来了更多的不确定性，使得问题更加复杂。电力市场环境下的输电系统规划问题已经成为国内外电力系统领域广为关注的一个重要问题。

本章提出了一种以蒙特卡罗仿真和遗传算法为基础的输电系统灵活规划方法。采用概率方法对输电系统规划期内所面对的不确定性因素进行模拟，之后采用蒙特卡罗仿真进行抽样处理，把不确定性优化问题转化为一系列确定性优化问

题求解。在对输电系统规划方案的评估方面提出了更为合理的措施。与现有的规划方法相比,所提出的方法对不确定性因素的考虑更加全面,可以更好地模拟未来可能出现的系统情况,从而得到适应能力比较强的规划方案。

最后指出,本章的重点在于系统地构造解决这一问题的方法框架,作为初步研究,仅考虑了输电系统规划期内电源和负荷的不确定性,但该方法框架可以容纳其它各种不确定性因素。

3.6 参考文献

- [1] 王锡凡. 电力系统优化规划. 北京: 水利电力出版社, 1990
- [2] David A K, Wen Fushuan. Transmission Planning and Investment under Competitive Electricity Market Environment. In: Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vancouver (Canada), 2001, 3: 1725~1730
- [3] Merrill H M, Wood A J. Risk and Uncertainty in Power System Planning. Electric Power & Energy Systems, 1991, 13(2): 81~90
- [4] Yehia M, Chedid R, Ilic M, et al. A Global Planning Methodology for Uncertain Environments: Application to the Lebanese Power System. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(1): 332~338
- [5] Saraiva J T, Miranda V, Pinto L M V G. Impact on Some Planning Decisions from a Fuzzy Modeling. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(2): 819~825
- [6] Madan S, Bollinger K E. Applications of Artificial Intelligence in Power Systems. Electric Power Systems Research, 1997, 41(2): 117~131
- [7] Crousillat E O, Dorifner P, Alvarado P, et al. Conflicting Objectives and Risk in Power System Planning. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(3): 887~893
- [8] 朱海峰, 程浩忠, 张焰等. 考虑线路被选概率的电网灵活规划方法. 电力系统自动化, 2000, 24(17): 20~24
- [9] Rudnick H. Generation and Transmission in Developing Countries: Planning in a Deregulated Environment in Developing Countries: Bolivia, Chile and Peru.

IEEE Power Engineering Review, 1996, 16(7): 18~22

- [10] 文福拴, 韩祯祥. 基于 Tabu 搜索方法的输电系统最优规划. 电网技术, 1997, 21(5): 2~7
- [11] 王湘中, 黎晓兰. 基于关联矩阵的电网拓扑辨识. 电网技术, 2001, 25(2): 10~12
- [12] 储俊杰. 变电所一次主接线电气连通性分析的数学模型. 电力系统自动化, 2003, 27(1): 31~33

第四章 基于机会约束规划的输电系统规划方法研究

4.1 引言

输电系统规划的任务是根据规划期间的负荷增长预测及给定的发电规划方案确定相应的最佳电网结构^[1]。数学上,这是一个十分复杂的动态多目标不确定性非线性整数规划问题。

传统的输电系统规划的主要任务是配合发电规划,在所研究的规划期间负荷增长预测及发电规划方案已知的基础上,为满足电力供应和需求的变化,确定最佳的输电系统扩展计划,使输电系统的投资、建造和运行费用最小。求解方法主要包括启发式方法和数学规划方法。这些方法一般假定规划期内的系统情况是确定的,在此基础上建立数学模型,求得最佳规划方案。

随着以发电厂和电网分离为主要特征的电力工业市场化在世界范围内的逐步推广,在很多国家发电规划将成为发电公司的内部事宜,以电厂投资者的利益最大化为目标,尽管需要受政府或监管机构所制定的相关法规或条例的制约。发电规划在很大程度上取决于发电公司对未来市场的电价走势、国家相关政策的调整、能源价格走势以及负荷变化等因素的预测。因此,新的电厂和机组的类型、位置、容量、投运时间,以及旧机组或旧电厂的退役或停运等决策一般由发电公司自行确定,而且发电公司往往不会将这些信息提前在市场中公布。对输电系统规划来讲,这些都是不确定性因素,给规划工作带来较大的困难。此外,还有未来系统负荷变化的不确定性,电力市场发展所导致的合作与竞争方面的不确定性,经济的发展和环境的影响,以及相关法规和政策调整所导致的不确定性等,这些都给输电系统规划带来了新的挑战^[2]。

基于上述原因,在电力市场环境下,输电系统规划要充分考虑各种不确定性因素的影响^[3],而传统的规划方法通常仅考虑一种最可能出现的未来场景,因而不能处理各种不确定性因素的影响,所得到的规划方案对未来环境变化的适应性较差,无法满足市场环境下的输电系统规划要求。近年来,计及不确定性因素影响的输电系统灵活规划方法引起了学术界和工程界的广泛关注,成为输电系统规划领域研究的热点之一^[4-6]。

目前国内外对输电系统灵活规划方法的研究主要集中在对不确定性因素的模拟和求解算法等方面,然而许多影响输电系统规划的不确定性因素难以用严格的数学方法描述。为处理这些不确定性因素,场景(scenario)决策方法^[7,8]受到了比较普遍的重视。该方法要求首先识别出影响规划结果的一系列不确定性因素,然后对这些因素进行组合,每种组合就是一种场景,之后对每种场景计算各候选方案的成本,再根据给定的评价方法进行比较,以求得使决策者满意的规划方案。由于所有不确定性因素在每个场景中均已成为确定性参数,从而可以针对每个场景进行确定性的输电系统优化规划,使问题的求解难度大为降低。

场景方法虽然原理简单,但需要事先设想出未来可能的场景,对于大规模电力系统这并不总容易做到,此外计算量也相当大。在电力市场环境,影响输电系统规划的不确定性因素数量很多且变化多样,可能的场景数量巨大,场景方法难以应用。

在此背景下,本章提出了一种基于机会约束规划的输电系统规划新方法。机会约束规划^[9,10]是专门用于解决包含不确定性因素的优化问题的一类随机优化方法,适用于市场环境下的输电系统规划问题。考虑到市场环境下电源建设和负荷增长的随机性,不失一般性,在建模时我们采用了如下两个假设:电源点的选取和相应的发电装机容量服从离散分布,各节点新增负荷或新节点的负荷服从正态分布,并且相互独立。需要指出,下面提出的规划方法对其它类型的概率分布同样适用。作为初步研究,本章的工作局限于水平年规划,以线路的投资和建造成本之和最小化为优化目标,且只考虑基态运行方式下的过负荷约束。随着科学技术的发展和管理水平的提高以及电力市场改革的深入,工程技术人员能够并需要对电网潮流的分布进行一定程度的干预和调整,这对输电系统规划的灵活性提出了更高的要求。这样,如果用确定性方法处理约束条件,得到的优化结果一般趋于保守。而机会约束规划为处理这类问题提供了一种途径,它允许在观测到随机变量的实现之前做出决策,只要该决策使得约束条件成立的概率高于给定的置信水平。

本章将机会约束规划应用于解决电力市场环境下的输电系统规划问题,给出了基于蒙特卡罗仿真和遗传算法的求解方法,最后用一个 18 节点算例系统,验证了所提方法的可行性。

4.2 输电系统规划的数学模型

4.2.1 不确定性因素的模拟

大多数不确定性因素可用概率方法（如概率密度函数）来模拟，其中的参数可基于历史数据以及对所研究系统的未来发展情况的分析估计来确定。在影响输电系统规划的众多不确定性因素中，最为重要的是未来电源建设和负荷增长的不确定性，有鉴于此，本章主要考虑这两种不确定性因素的影响，但所提出的方法框架同样可以容纳对其它不确定性因素的模拟。

前已述及，由于电力市场环境下的发电规划一般是发电公司的内部事宜（尽管需要遵守政府或监管机构一些相关法律、法规或条例的约束），这样，在进行输电系统规划时，很难得到新建电厂的位置、容量和投运时间等的准确信息，可以采用下述方法对规划期内新的电源点进行模拟。

为了对新建发电厂的选址提供指导，在有些国家如南美的玻利维亚、智利和秘鲁等，政府推荐一些候选的新的发电厂位置供投资者选择。投资者可据此选择新建发电厂的位置和装机容量^[11]。在另外一些政府处于强势的国家，政府部门或监管机构可以指定候选的发电厂址，要求投资者在这些给定的地点选择建厂。这些信息一般都是公开的。因而，对于这些国家，在进行输电系统规划时，对未来的发电厂址及其容量可以在相当程度上做出估计。

对于规划期内可能出现的电源节点 i ，假设其成为新增电源节点的概率为 p_i ，且该点的发电装机容量服从离散概率分布。例如，当确定节点 i 为一新增电源节点时，预计该点装机容量可能为 P_{Gik} ($k=1,2,\dots,M$)，出现每一种可能的装机容量的概率分别为 a_{ik} ($k=1,2,\dots,M$)。这样，离散型随机变量的分布为：

$$P(X = P_{Gik}) = a_{ik} \quad (k = 1, 2, \dots, M) \quad (4-1)$$

式中， $0 < a_{ik} < 1$ ， $\sum_{k=1}^M a_{ik} = 1$ 。

对于现有负荷节点 i ，假设该点原有负荷为 P_{Di0} ，在输电系统规划期内该点负荷的变化量 ΔP_{Di} 为一随机变量，服从正态分布 $\Delta P_{Di} \sim N(\mu_i, \sigma_i^2)$ ，那么该点的负荷 P_{Di} 为 $P_{Di0} + \Delta P_{Di}$ 。对于规划期内新增的负荷节点 i 有 $P_{Di0} = 0$ ， $P_{Di} = \Delta P_{Di}$ 。

4.2.2 基于机会约束规划的输电系统规划数学模型

由于在电力市场环境，输电系统规划期内的电源建设具有不确定性，在制定输电系统规划方案时无法获得确切的发电规划信息，这在数学上输电系统规划问题就变为约束条件中含有电源和负荷等随机变量，且必须在观测到随机变量的实现之前做出规划决策的机会约束规划问题。作为初步研究，本章针对水平年输电系统规划问题，以线路的投资和建造成本最小化为目标，允许所形成的规划方案在某些比较极端的基态情况下不满足线路过负荷约束，但这种情况发生的概率必须小于某一置信水平的前提下，构造了基于机会约束规划的输电系统规划的数学模型。需要指出，本章所提出的输电系统规划的方法框架同样可以容纳其它约束条件。基于机会约束规划的输电系统规划的数学模型如下：

$$\begin{aligned} \min f(S) &= \sum_{j=1}^n C_j L_j s_j \\ \text{s.t. } P_r\{P_l \leq P_{l\max}\} &\geq \alpha \\ B\theta &= P \\ P_G &\leq P_{G\max} \end{aligned} \quad (4-2)$$

式中， S 为一个用于表示规划方案的 n 维向量； n 为候选线路的数目； s_j 为候选线路 j 的 0-1 决策变量， s_j 取 1 或 0 分别表示该线路包括和不包括在规划方案之中； C_j 为候选输电线路 j 单位长度的投资与建造费用； L_j 为候选线路 j 的长度； P_l 为支路功率向量； $P_{l\max}$ 为支路输电容量向量； α 为线路功率约束的置信水平； B 为节点电纳矩阵； θ 为节点电压相角向量； P 为节点净注入功率向量； P_G 为发电机出力向量； $P_{G\max}$ 为发电机出力上限向量。

4.3 求解方法及步骤

4.3.1 输电系统规划中机会约束的检验

很难将式(4-2)所表示的机会约束规划问题转化为确定等价类，但可以借助蒙特卡罗仿真方法求解。考虑机会约束：

$$P_r\{P_l \leq P_{l\max}\} \geq \alpha \quad (4-3)$$

式中， P_l 是 P_G 和节点负荷功率 P_D 的函数。前已述及， P_G 和 P_D 中包含随机变量，这样 P_l 也是随机变量。对某一组给定的决策变量也即候选的规划方案，使用蒙特卡罗仿真方法检验机会约束是否满足的方法如下：

- a. 给定允许的随机模拟次数 N ;
- b. 置随机模拟计数器 $t=0$;
- c. 置机会约束成立计数器 $N' = 0$;
- d. 对于第 i 个可能的新增电源节点, 产生一个 $[0,1]$ 内均匀分布的伪随机数 x_i , 若 $x_i \leq p_i$ (p_i 为该点出现新增电源的概率), 则该点被选中, 转步骤 e; 否则该点未被选中, 则新增发电出力为 0, 转步骤 f;
- e. 对于上步中抽样得到的新增电源节点, 接下来需要抽样确定新增电源的容量。产生一个 $[0,1]$ 上均匀分布的伪随机数 y_i , 考虑到装机容量的概率分布为 $P(X = P_{Gik}) = a_{ik}$ ($k=1,2,\dots,M$), 其中 $0 < a_{ik} < 1, \sum_{k=1}^M a_{ik} = 1$ 。当 $\sum_{j=1}^{k-1} a_{ij} < y_i \leq \sum_{j=1}^k a_{ij}$ 时, 得到装机容量的抽样值为 P_{Gik} ;
- f. 抽样确定负荷值。随机产生一个满足正态分布 $N(\mu_i, \sigma_i^2)$ 的伪随机数 ΔP_{Di} , 则该点在规划期内的负荷值为 $P_{Di0} + \Delta P_{Di}$;
- g. 计算支路功率 P_l ;
- h. 当 $P_l \leq P_{l\max}$ 时, $N' = N' + 1$;
- i. 置 $t=t+1$;
- j. 如果 $t < N$, 则转步骤 d, 否则转步骤 k;
- k. 当 $N' / N \geq \alpha$ 时认为满足机会约束 $P_l \{P_l \leq P_{l\max}\} \geq \alpha$, 否则不满足。

4.3.2 基于蒙特卡罗仿真的遗传算法求解输电系统机会约束规划模型

采用基于蒙特卡罗仿真的遗传算法求解式(4-2)所描述的机会约束输电系统规划模型。在所采用的遗传算法中, 用惩罚函数方法处理约束, 也即目标函数和惩罚的约束项一起形成适应度函数。鉴于遗传算法已为大家所熟知, 这里不再详细介绍。主要求解步骤如下:

- a. 输入原始数据。
- b. 输入遗传算法中要求的染色体(候选规划方案)个数, 以及交叉和变异概率。
- c. 采用随机方法产生一组初始规划方案, 作为遗传算法的初始种群。对于种群中的每一个染色体, 采用蒙特卡罗仿真方法检验其是否满足机会约束, 即根据

随机抽样得到的电源和负荷方案, 计算支路功率, 检验是否违反过负荷机会约束。

d. 计算所有染色体对应的目标函数值, 即所有候选规划方案的投资与建造成本。

e. 以步骤 d 中求得的目标函数值为基础, 对违反约束的染色体采用惩罚函数方法计算各染色体的适应度; 对不违反约束条件的染色体, 以步骤 d 中求得的目标函数值直接作为适应度。

f. 采用轮盘赌方法对种群中的染色体进行选择操作。

g. 对种群中的染色体进行交叉和变异操作, 得到新一代染色体, 之后利用蒙特卡罗仿真方法检验是否满足机会约束。

h. 重复步骤 d~步骤 g, 达到给定的最大允许迭代次数为止。

i. 以求解过程中所发现的最好的染色体作为最后的输电系统规划方案。

4.4 算例分析

用修改后的文献[1]中的 18 节点系统算例对所提出的基于机会约束规划的输电系统规划方法进行测试。

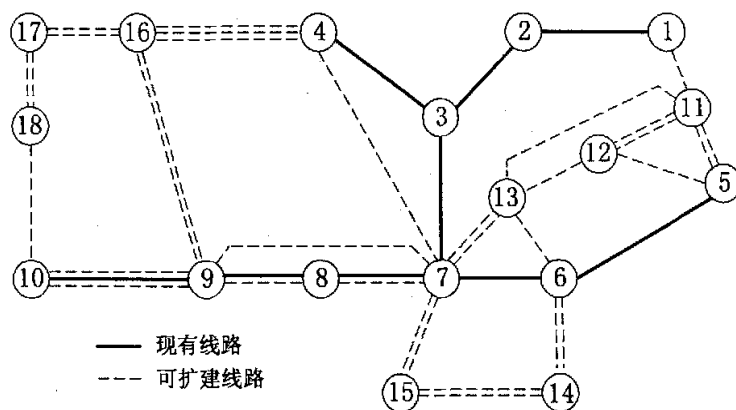


图 4-1 网络路径示意图

图 4-1 为该 18 节点系统网络路径示意图。系统原有 10 个节点, 9 条线路(如实线所示), 图中虚线代表候选线路(共 33 条)。系统原有节点(1-10)的数据见表 4-1, 所有支路数据见表 4-2。假设节点 11, 14, 16 和 18 可能出现新增电源, 各

节点数据如表 4-3 所示。设系统原有节点的负荷值保持不变，新增节点负荷值满足正态分布，有关参数见表 4-4。为方便起见，假设线路的投资和建造成本之和在数值上与线路的长度相同，如此得到的投资和建造成本数据并没有明确的量纲。

表 4-1 原始节点数据

节点号	发电出力/MW	负荷/MW
1	0	550
2	3600	840
3	0	1540
4	0	380
5	7600	6390
6	0	1990
7	0	2130
8	0	880
9	0	2590
10	7500	940

表 4-2 支路数据

支路号	两端节点	线路电抗 /p.u.	线路容量 /MW	原有 线路数	可扩建 线路数	长度 /km
1	1-2	0.0176	2300	1	0	70
2	1-11	0.0102	3000	0	1	40
3	2-3	0.0348	2300	1	0	138
4	3-4	0.0404	2300	1	0	155
5	3-7	0.0325	2300	1	0	129
6	4-7	0.0501	4000	0	1	200
7	4-16	0.0501	4000	0	3	200

8	5-6	0.0267	2300	1	0	106
9	5-11	0.0153	3000	0	2	60
10	5-12	0.0102	4000	0	1	40
11	6-7	0.0126	2300	1	0	50
12	6-13	0.0126	4000	0	1	50
13	6-14	0.0554	4000	0	2	220
14	7-8	0.0151	2300	1	1	60
15	7-9	0.0318	4000	0	1	126
16	7-13	0.0126	3000	0	2	50
17	7-15	0.0448	5000	0	2	178
18	8-9	0.0102	2300	1	1	40
19	9-10	0.0501	2300	1	2	200
20	9-16	0.0501	5000	0	2	200
21	10-18	0.0255	4000	0	1	100
22	11-12	0.0126	3000	0	2	50
23	11-13	0.0255	5000	0	1	100
24	12-13	0.0153	3000	0	1	60
25	14-15	0.0428	4000	0	2	170
26	16-17	0.0153	4000	0	2	60
27	17-18	0.0140	4000	0	2	55

表 4-3 新增电源点数据

节点号	p_i	P_{G1}	a_{i1}	P_{G2}	a_{i2}	P_{G3}	a_{i3}
11	0.9	5800	0.1	7600	0.5	9400	0.4
14	0.8	5800	0.2	7600	0.4	9400	0.4
16	0.8	5000	0.2	6800	0.5	8600	0.3
18	0.9	1500	0.2	2100	0.6	2700	0.2

注: p_i 为节点 i 出现新增电源的概率; P_{Gik} 为可能的发电装机容量, 单位为 MW; a_{ik} 为 g_{ik} 出现的概率; 此算例中 $k=1, 2, 3$ 。

表 4-4 新增节点负荷的概率分布

节点号	均值/MW	标准差/MW
11	7000	700
12	1900	190
13	1100	110
14	300	30
15	2000	200
16	1300	130
17	4000	400
18	500	50

为简单起见, 给定置信水平向量中的各元素取相同的值, 对置信水平为 0.80, 0.85, 0.90, 0.95 和 1.00 等 5 种情况进行了计算, 得到的这 5 种情况下输电系统最优规划方案如表 4-5 所示, 对置信水平取 5 种不同值的情况下所得到的规划方案的比较见表 4-6。

表 4-5 规划方案

支路号	两端节点	原有 线路数	扩建线路数				
			a	a	a	a	a
			=0.80	=0.85	=0.90	=0.95	=1.00
1	1-2	1	0	0	0	0	0
2	1-11	0	0	1	0	1	0
3	2-3	1	0	0	0	0	0
4	3-4	1	0	0	0	0	0
5	3-7	1	0	0	0	0	0

6	4-7	0	0	0	0	0	0
7	4-16	0	1	0	0	1	1
8	5-6	1	0	0	0	0	0
9	5-11	0	0	0	1	1	1
10	5-12	0	1	0	0	1	1
11	6-7	1	0	0	0	0	0
12	6-13	0	1	0	1	1	1
13	6-14	0	2	1	2	2	2
14	7-8	1	1	0	1	0	0
15	7-9	0	0	1	1	1	1
16	7-13	0	1	2	1	1	2
17	7-15	0	0	1	1	1	1
18	8-9	1	1	0	0	0	0
19	9-10	1	0	0	0	1	1
20	9-16	0	0	1	1	1	1
21	10-18	0	1	1	1	0	1
22	11-12	0	0	1	1	1	1
23	11-13	0	1	0	0	0	1
24	12-13	0	0	1	1	0	1
25	14-15	0	1	2	1	1	1
26	16-17	0	2	2	2	2	2
27	17-18	0	2	2	2	1	0

表 4-6 置信水平取不同值时规划方案比较

	扩建线路条数	总成本	最优方案 α 值
$\alpha=0.80$	15	1480	0.8256
$\alpha=0.85$	16	1644	0.8605
$\alpha=0.90$	17	1774	0.9048

$\alpha=0.95$	17	1979	0.9551
$\alpha=1.00$	19	2194	1.0000

通过比较表 4-6 中几种规划方案结果可以看出,随着线路功率约束置信水平 α 的取值的增大,所需新建线路数目增多,总的投资和建造成本增加,这在预料之中。要保证在所有可能的情况下所有线路均不出现过负荷,需要新建 19 条线路,总的投资和建造成本为 2194。当 α 为 0.80 时,只需要扩建 15 条线路,总的投资和建造成本为 1480。规划人员可以根据实际需要折衷考虑,选取相应的扩展方案。

4.5 结语

本章将机会约束规划方法用于求解电力市场环境下的输电系统规划问题,建立了相应的机会约束规划数学模型,给出了基于遗传算法和蒙特卡罗仿真的求解方法。与现有的输电系统规划方法相比,所提出的方法可以适当处理市场环境下电源建设和负荷增长的不确定性,在约束条件的处理上也更加灵活,很适于解决电力市场环境下的输电系统规划问题,并用算例系统说明了所提出的方法的基本特征。在不确定性环境下所作出的输电系统规划决策不可避免地会带有一定的风险,如何适当量化和规避由此带来的风险将是我们下一阶段的研究工作。

4.6 参考文献

- [1] 王锡凡. 电力系统优化规划. 北京: 水利电力出版社, 1990
- [2] David A K, Wen F S. Transmission Planning and Investment under Competitive Electricity Market Environment. In: Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vancouver (Canada), 2001(3): 1725~1730
- [3] Merrill H M, Wood A J. Risk and Uncertainty in Power System Planning. Electric Power & Energy Systems, 1991, 13(2): 81~90
- [4] Yehia M, Chedid R, Ilic M, et al. A Global Planning Methodology for Uncertain Environments: Application to the Lebanese Power System. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(1): 332~338
- [5] Saraiva J T, Miranda V, Pinto L M V G. Impact on Some Planning Decisions from a Fuzzy Modeling. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(2):

819~825

- [6] Madan S, Bollinger K E. Applications of Artificial Intelligence in Power Systems. *Electric Power Systems Research*, 1997, 41(2):117~131
- [7] Crousillat E O, Dorifner P, Alvarado P, et al. Conflicting Objectives and Risk in Power System Planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1993, 8(3): 887~893
- [8] 朱海峰, 程浩忠, 张焰等. 考虑线路被选概率的电网灵活规划方法. *电力系统自动化*, 2000, 24(17): 20~24
- [9] 刘宝碁, 赵瑞清. *随机规划与模糊规划*. 北京: 清华大学出版社, 1998
- [10] Charnes A, Cooper WW. Chance Constrained Programming. *Management Science*, 1959, 6(1): 73~79
- [11] Rudnick H. Generation and Transmission in Developing Countries: Planning in a Deregulated Environment in Developing Countries: Bolivia, Chile and Peru. *IEEE Power Engineering Review*, 1996, 16(7): 18~22

第五章 计及风险约束的多阶段输电系统 规划方法研究

5.1 引言

传统的输电系统规划的主要任务是配合发电规划,在所研究的规划期间负荷增长预测及发电规划方案已知的基础上,为满足电力供应和需求的变化,确定最佳的输电系统扩展计划,使输电系统的投资、建造和运行费用最小。已经发展了一些成熟的方法,并在工程中得到广泛应用。随着以发电厂和电网分离为主要特征的电力工业市场化改革在世界范围内的逐步推广,输电系统规划面临着很多新的挑战^[1],特别是需要处理更多的不确定性因素,例如未来系统负荷及电源信息的不确定性,电力市场发展所导致的合作与竞争方面的不确定性,经济发展和环境影响方面的不确定性,相关法规和政策调整以及监管方法和措施的调整所导致的不确定性等。

输电系统规划可分为静态规划和动态规划。静态规划又称为水平年规划,不涉及何时投建新输电线路的问题,因此在进行方案的费用比较时,可以不考虑资金的贴现。当规划期较长时,需要将规划期分为几个水平年并考虑各水平年规划方案的过渡问题。在这种情况下,必须同时确定在何时、何地投建新的输电线路。这种规划称为动态规划^[2]。

在静态规划方面,国内外已经进行了大量的研究,建立了多种数学模型和相应的求解方法^[3,4]。相对于静态规划,多阶段动态规划方面的研究工作还比较初步,仍有很多问题有待进一步研究。

电力工业市场化改革为输电系统规划带来了更多的不确定性因素。在不确定性环境下所作出的输电系统规划决策不可避免地会带有一定的风险,包括投资风险和安全风险。近年来,能够计及不确定性因素影响的输电系统灵活规划方法引起了学术界和工程界的广泛关注,成为输电系统规划领域的研究热点之一^[5,6]。然而,目前的研究工作主要集中在对不确定性因素的模拟和求解算法等方面,很少涉及构造计及风险约束的输电系统规划决策问题的数学模型和求解方法。

文献[7,8]提出采用场景分析方法(scenario analysis method)对输电系统规划

中所涉及的风险进行管理。该方法要求首先识别出影响规划结果的所有不确定性因素，然后对这些因素进行组合，每种组合就是一种场景。由于规划决策者对不同的场景重视程度不同，得到的最优方案也不同。然后运用运筹学中的风险决策方法对各候选方案进行综合评判，根据不同的准则，选择最优的方案。在电力市场环境，由于不确定性因素很多，对于大规模电力系统，可能的场景数目巨大，这种方法的计算量较大。

通常采用标准差或方差来度量风险。标准差之所以能用于度量风险的程度，是由于风险产生于对未来的不确定性，而这种不确定性则导致预期收益或损失的变动性。变动性越大，不确定性也越大；变动性越小，就越容易确定其实际价值。标准差越大，风险也就越大。在比较不同规模的投资项目时，可用收益的标准差除以收益的期望值即变异系数这个相对指标来比较这些项目的风险程度。

无论是采用基于场景分析方法的决策分析还是标准差来量化风险，都具有一定的局限性。由于它们对风险的衡量是“事后”的，在优化之前，无法用显式的形式预先限定所允许风险的程度。

在上述背景下，以第四章为基础，本章构造了适合于电力市场环境下的多阶段输电系统规划的一种新的方法框架，以整个规划期内的投资费用和运行费用的贴现值之和最小化为目标，利用机会约束规划来处理安全和经济风险，在此基础上发展了随机优化模型，提出了相应的求解方法，为解决这一问题探索了新的途径。

5.2 机会约束规划与风险管理

在电力市场环境下，影响输电系统规划的不确定性因素数量很多且变化多样，在信息不完全的基础上做出的规划决策就不可避免地带有一定的风险。在制定规划决策方案时，采用何种方法对风险进行量化和管理，便显得尤为重要。

5.2.1 传统风险管理方法

为了比较不同规划方案需承担的风险程度，首先要将风险量化。传统上，主要采用收益期望值的标准差（或方差）来度量风险。

标准差是对期望收益率的分散度或偏离度的衡量，是方差的平方根。

标准差之所以能表示风险的大小，其理由是风险产生于对未来的不确定性，

这种不确定性则产生预期收益的变动性。变动性越大，不确定性也越大；变动性越小，就比较容易确定其价值，标准差的作用在于度量一个数量系列变动性的平均大小。收益的标准差越大，投资的风险也越大。当比较的投资项目的规模不同时，则可用收益的标准差除以收益的期望值即变异系数这个相对指标来比较风险程度。

使用标准差来量化风险，虽然简单明了，但却具有一定的局限性。由于标准差对风险的衡量是“事后”的，在优化之前，无法得到关于风险程度的显式描述，也即无法预先限定风险的程度，需要凭经验在收益的期望值和标准差之间适当加权折衷。

5.2.2 机会约束规划

机会约束规划^[9,10]主要用于约束条件中含有随机变量，且必须在观测到随机变量的实现之前做出决策的优化问题。由于采用置信度水平来描述目标函数和约束条件满足某种给定的要求的概率，这样机会约束规划就提供了一种显式的描述某种决策所引起的风险程度的手段。机会约束规划的一种常见形式如下：

$$\begin{cases} \text{Min } \bar{f} \\ \text{s.t.} \\ P_r \{f(\mathbf{x}, \xi) \leq \bar{f}\} \geq \beta \\ P_r \{g_j(\mathbf{x}, \xi) \leq 0, j=1, 2, \dots, k\} \geq \alpha \end{cases} \quad (5-1)$$

其中， \mathbf{x} 为 n 维决策向量； ξ 为已知概率密度函数 $\phi(\xi)$ 的随机向量； $f(\mathbf{x}, \xi)$ 是目标函数； $g_j(\mathbf{x}, \xi)$ ($j=1, 2, \dots, k$) 是随机约束函数，也称机会约束； $P_r \{\cdot\}$ 表示 $\{\cdot\}$ 中的事件成立的概率； α 和 β 分别是事先给定的约束条件和目标函数的置信水平； \bar{f} 是目标函数 $f(\mathbf{x}, \xi)$ 在置信水平不小于 β 时所取的最大值。

求解机会约束规划的传统方法是根据给定的置信水平，把机会约束转化为各自的确定等价类，然后求解其等价的确定性模型。然而，对较复杂的机会约束规划问题，通常很难做到这一点，所幸的是蒙特卡罗仿真为解决这类问题提供了一条有效的途径。

有关机会约束 $P_r \{g_j(\mathbf{x}, \xi) \leq 0, j=1, 2, \dots, k\} \geq \alpha$ 的检验，以及带有随机变量 ξ 的目标函数

$$P_r \{f(\mathbf{x}, \xi) \leq \bar{f}\} \geq \beta \quad (5-2)$$

的计算，第二章中已作过详细介绍，这里不再赘述。

与传统的风险管理方法相比，机会约束规划提供了一种显式的表示和度量风险的途径，因此更容易被接受。

5.3 计及风险约束的多阶段输电系统规划数学模型

5.3.1 不确定性因素的模拟

在影响输电系统规划的众多不确定性因素中，最为重要的是未来电源建设和负荷增长的不确定性。关于对不确定性因素的模拟，第四章中已做过介绍。这里针对多阶段输电系统规划的特点，采用如下方式对电源和负荷进行模拟。

对于规划期内可能出现新增电源的节点 i ，假设其在第 k 个规划阶段 ($k=1, 2, \dots, N_p$; N_p 为规划阶段数) 出现新增电源的概率为 $p_i(k)$ ，且该点的新增发电装机容量服从离散概率分布。例如，当确定节点 i 在第 k 个规划阶段有新增发电机组出现，估计其装机容量可能为 $P_{Gim}(k)$ (m 为出现不同装机容量的可能性， $m=1, 2, \dots, M$)，出现每一种可能的装机容量的概率分别为 $a_{im}(k)$ 。这样，离散型随机变量的分布为：

$$P_i(X = P_{Gim}(k)) = a_{im}(k) \quad (5-3)$$

式中： $0 < a_{im}(k) \leq 1$ ； $\sum_{m=1}^M a_{im}(k) = 1$ ； $m=1, 2, \dots, M$ 。

对于负荷节点 j ，假设该点在第 k 个规划阶段的负荷服从正态分布 $P_{Dj}(k) \sim N(\mu_{jk}, \sigma_{jk}^2)$ 。

5.3.2 计及风险约束的多阶段输电系统规划数学模型

前已述及，在电力市场环境，输电系统规划期内的电源建设具有不确定性，在制定输电系统规划方案时无法获得确切的发电规划信息，而将来的负荷也总是随机的，这样输电系统规划问题在数学上就可表示为约束条件中含有电源和负荷等随机变量，且必须在观测到随机变量的实现之前做出规划决策的机会约束规划问题。针对多阶段输电系统规划问题，以规划方案在整个规划期内的投资费用和运行费用的贴现值之和最小化为目标，允许所形成的规划方案在某些比较极端的基态情况下不满足线路过负荷约束，但这种情况发生的概率必须小于某一置信水

平的前提下，构造了基于机会约束规划的多阶段输电系统规划的数学模型。该模型用一种显式的形式来刻画电力市场环境不确定性因素所带来的风险，包括安全风险和投资风险。需要指出，所提出的输电系统规划的方法框架同样可以容纳其它约束条件。计及风险约束的多阶段输电系统规划的数学模型如下：

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } \bar{f} \\
 & \text{s.t. } P_r\{f \leq \bar{f}\} \geq \beta \\
 & \quad P_r\{P_l(k) \leq P_{l_{\max}}\} \geq \alpha \\
 & \quad B\theta = P \\
 & \quad P_G \leq P_{G_{\max}}
 \end{aligned} \tag{5-4}$$

其中

$$f = \sum_{k=1}^{N_p} f_k = \sum_{k=1}^{N_p} \frac{C_1(u(k-1)) + C_2(x(k))}{(1+r)^{m(k-1)}} \tag{5-5}$$

式中， f 为总费用的贴现值； $P_l(k)$ 为第 k 个规划阶段的支路功率向量； $P_{l_{\max}}$ 为支路输电容量向量； β 为目标函数的置信水平； α 为线路功率约束的置信水平； B 为节点电纳矩阵； θ 为节点电压相角向量； P 为节点净注入功率向量； P_G 为发电机出力向量； $P_{G_{\max}}$ 为发电机出力上限向量； r 为贴现率； $m(k) = \sum_{i=1}^k Y(i)$ 为自规划期开始阶段到第 k 个阶段末的总年数，这里 $Y(i)$ 为第 i 个阶段包含的年数； $x(k)$ 为第 k 个阶段的网络结构状态， $x(0)$ 即为现有网络结构状态； $u(k)$ 为阶段 k 到阶段 $k+1$ 的扩展方案； $x(k+1) = x(k) + u(k)$ ； $C_1(u(k-1))$ 为第 k 个阶段网络扩展方案的投资费用，应在第 $k-1$ 个阶段末完成支付； $C_2(x(k))$ 为按方案 $u(k-1)$ 扩展网络到状态 $x(k)$ 后网络的运行费用，一般包括网损费用和维护费用。

5.4 求解方法及步骤

5.4.1 机会约束的检验

很难将式(5-4)所表示的机会约束规划问题转化为其确定性等价类，但可以借助蒙特卡罗仿真方法求解该问题。对于机会约束，

$$P_r\{P_l(k) \leq P_{l_{\max}}\} \geq \alpha \tag{5-6}$$

式中， $P_l(k)$ 是 P_G 和节点负荷功率向量 P_D 的函数。由于 P_G 和 P_D 中包含随机变量，

因此 $P_i(k)$ 是随机向量。对某一组给定的决策变量也即候选的规划方案，使用蒙特卡罗仿真方法检验该机会约束在第 k 个规划阶段是否满足的方法如下：

- a. 给定允许的随机模拟次数 N 。
- b. 置随机模拟计数器 $t=0$ 。
- c. 置机会约束成立计数器 $N' = 0$ 。

d. 在第 k 个规划阶段内，对于第 i 个可能的新增电源节点，产生一个 $[0,1]$ 内均匀分布的伪随机数 x ，若 $x \leq p_i(k)$ ($p_i(k)$ 为该点在第 k 个规划阶段出现新增电源的概率)，则该点被选中，转步骤 e；否则该点未被选中，则新增发电出力为 0，转步骤 f。

e. 对于步骤 d 中抽样得到的新增电源节点，还需抽样确定新增电源的容量。产生一个 $[0,1]$ 上均匀分布的伪随机数 y ，考虑到装机容量的概率分布如式(5-3)所示，

当 $\sum_{j=1}^{m-1} a_{y_j}(k) < y \leq \sum_{j=1}^m a_{y_j}(k)$ 时，得到装机容量 $P_{Gim}(k)$ 的抽样值为 y 。

f. 抽样确定第 k 个阶段的负荷值。随机产生一个满足正态分布 $N(\mu_{jk}, \sigma_{jk}^2)$ 的伪随机数 z ，则该点在第 k 个规划期内的负荷 $P_{Di}(k)$ 即为 z 。

- g. 计算支路功率 $P_i(k)$ 。
- h. 当 $P_i(k) \leq P_{i,max}$ 时，置 $N' = N' + 1$ 。
- i. 置 $t=t+1$ 。
- j. 如果 $t < N$ ，则转步骤 d，否则转步骤 k。
- k. 当 $N' / N \geq \alpha$ 时该规划方案在第 k 个阶段满足式(5-6)所表示的机会约束，否则就为不满足。

5.4.2 目标函数的计算

为求取使 $P_i\{f \leq \bar{f}\} \geq \beta$ 成立的最大值 \bar{f} ，同样可以借助蒙特卡罗仿真方法。

由于 f 是 P_G 和 P_D 的函数，而 P_G 和 P_D 中包含随机变量，这样目标函数 f 也是随机变量。对某一组给定的决策变量也即候选的规划方案，使用蒙特卡罗仿真方法计算目标函数的方法如下：

- a. 给定允许的随机模拟次数 N 。

- b. 置随机模拟计数器 $t=1$ 。
- c. 置规划阶段 $k=1$ 。
- d. 对于第 k 个规划阶段, 利用第 5.4.1 节中介绍的方法, 根据 P_G 和 P_D 的概率分布生成一组独立的随机向量 $\{P_G(k), P_D(k)\}$ 。
- e. 根据 $\{P_G(k), P_D(k)\}$ 的值计算第 k 个规划阶段的 $f(k)$, 其中

$$f_k = \frac{C_1(u(k-1)) + C_2(x(k))}{(1+r)^{m(k-1)}}$$
- f. 置 $k=k+1$ 。
- g. 如果 $k \leq N_p$, 则转步骤 d, 否则转步骤 h。
- h. 计算 f_t , $f_t = \sum_{k=1}^{N_p} f_k$ 。
- i. 置 $t=t+1$ 。
- g. 如果 $t \leq N$, 则转步骤 c, 否则转步骤 k。
- k. 置 N' 为 βN 的整数部分。
- l. 将序列 $\{f_1, f_2, \dots, f_N\}$ 中的第 N' 个最小的元素赋值给 \bar{f} 。

5.4.3 基于蒙特卡罗仿真的遗传算法求解多阶段输电系统机会约束规划模型

采用基于蒙特卡罗仿真的遗传算法求解式(5-4)所描述的多阶段输电系统机会约束规划模型。采用罚函数方法将式(5-4)所表示的有约束优化问题转化为无约束优化问题, 即当约束条件 $P_r\{P_l(k) \leq P_{l,max}\} \geq \alpha$ 不能成立时, 在原目标函数中加入一个惩罚项。这样, 无约束优化问题的目标函数可表示为

$$F = \sum_{k=1}^{N_p} \frac{C_1(u(k-1)) + C_2(x(k))}{(1+r)^{m(k-1)}} + \sum_{k=1}^{N_p} T(k) \quad (5-7)$$

其中 $T(k) = \begin{cases} D(k) \\ W(k) \cdot G(k) \end{cases}$

$T(k)$ 为与第 k 个规划阶段相关的惩罚项; $D(k)$ 为规划方案所表示的第 k 个阶段网络不连通时所施加的惩罚量, 该值要足够大; $G(k)$ 为第 k 个阶段网络连通时的过负荷总量; $W(k)$ 为第 k 个阶段过负荷的惩罚因子。

为了避免对过负荷的惩罚引起遗传算法计算过程的振荡, 根据过负荷程度的

不同，将惩罚因子细分为

$$W(k) = \begin{cases} 0 & P_i(k) \leq P_{i,max} \\ W_1(k) & P_{i,max} < P_i(k) \leq (1+5\%)P_{i,max} \\ W_2(k) & (1+5\%)P_{i,max} < P_i(k) \leq (1+10\%)P_{i,max} \\ W_3(k) & P_i(k) > (1+10\%)P_{i,max} \end{cases} \quad (5-8)$$

其中 $W_1(k) \ll W_2(k) \ll W_3(k)$ 。

主要求解步骤与 4.3.2 节中介绍的方法基本相同，这里不再详述。

5.5 算例分析

用修改后的文献[11]中的 19 节点系统算例对所提出的模型和方法进行测试。该算例系统包括 33 条已有线路和 21 条待选线路，规划过程分为 4 个阶段（每阶段为 1 年）。该系统的网络路径示意图如图 5-1。取基准功率 $S_B=100MVA$ ，贴现率 $r=10\%$ 。初始网络节点数据、4 个规划阶段的电源数据、负荷参数和支路数据分列于表 5-1 至表 5-4。

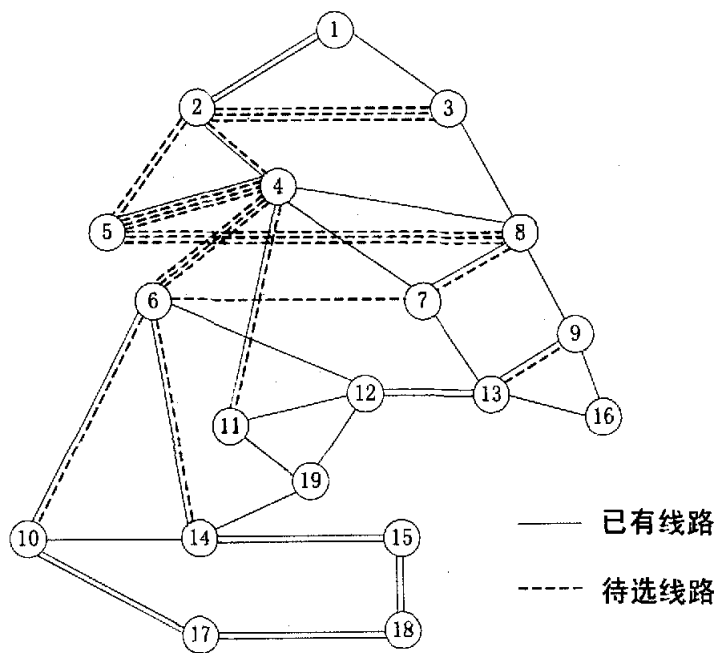


图 5-1 网络路径示意图

表 5-1 初始网络节点数据

节点号	电源功率 (MW)	负荷功率 (MW)	节点号	电源功率 (MW)	负荷功率 (MW)
1	1000	550	11	920	300
2	0	400	12	0	500
3	0	800	13	220	700
4	0	400	14	0	310
5	4000	0	15	580	660
6	4000	950	16	0	700
7	520	950	17	0	600
8	0	2850	18	0	800
9	0	400	19	630	0
10	0	0			

表 5-2 新电源点数据

阶段(k)	节点号	$p(k)$	$P_{G1}(k)$	$a_{11}(k)$	$P_{G2}(k)$	$a_{12}(k)$	$P_{G3}(k)$	$a_{13}(k)$
1	1	0.9	300	0.3	360	0.5	420	0.2
	5	0.8	700	0.3	800	0.5	900	0.2
	6	0.9	600	0.3	690	0.5	780	0.2
2	5	0.9	1200	0.2	1440	0.6	1560	0.2
	6	0.8	850	0.2	1020	0.6	1150	0.2
	10	0.9	700	0.2	840	0.5	920	0.3
	11	0.8	360	0.3	430	0.5	470	0.2
3	5	0.9	1300	0.2	1560	0.5	1700	0.3
	6	0.8	900	0.2	1000	0.6	1170	0.2
	10	0.9	600	0.2	800	0.4	1000	0.4
	11	0.8	300	0.3	360	0.5	400	0.2

4	1	0.9	360	0.2	440	0.6	470	0.2
	5	0.8	700	0.2	840	0.5	1000	0.3
	6	0.9	600	0.2	720	0.6	800	0.2
	10	0.9	200	0.2	240	0.6	280	0.2
	11	0.9	280	0.2	340	0.4	400	0.4
	15	0.8	100	0.3	130	0.5	160	0.2
	19	0.8	120	0.2	150	0.6	170	0.2

注: $p_i(k)$ 为节点 i 在第 k 个规划阶段出现新增电源的概率; $P_{Gm}(k)$ 为第 k 个阶段可能出现的发电装机容量, 单位为 MW; $a_{im}(k)$ 为 $P_{Gm}(k)$ 出现的概率; 此算例中 $M=3$ 。

表 5-3 节点负荷的概率分布

节点号	阶段 1		阶段 2		阶段 3		阶段 4	
	μ_{j1}	σ_{j1}	μ_{j2}	σ_{j2}	μ_{j3}	σ_{j3}	μ_{j4}	σ_{j4}
1	650	18	700	70	800	80	920	92
2	500	15	550	55	600	60	680	68
3	1000	30	2100	210	3200	320	3300	330
4	500	15	530	53	550	55	560	56
6	1250	38	1300	130	1450	145	1500	150
7	950	30	950	95	950	95	970	97
8	3050	90	3750	375	4500	450	4540	454
9	400	12	450	45	500	50	600	60
11	300	9	400	40	400	40	450	45
12	500	15	530	53	550	55	620	62
13	700	21	800	80	900	90	1000	100
14	310	9	400	40	550	55	610	61
15	700	21	800	80	900	90	1420	142
16	800	24	900	90	1070	107	1170	117
17	600	18	800	80	820	82	1000	100

18	900	27	1000	100	1070	107	1450	145
19	20	2	20	2	20	2	230	23

注： μ_{jk} 和 σ_{jk} 为第 k 个规划阶段的均值和标准差，单位为MW。

表 5-4 支路数据

支路号	两端节点	单回电抗 /p.u	单回容量 /MW	单回价格 /万元	原有 线路	待选 线路
1	1-2	0.02550	120	0.0	2	0
2	1-3	0.02550	120	0.0	1	0
3	2-3	0.01530	120	45.0	0	3
4	2-4	0.01020	120	11.0	1	1
5	2-5	0.02440	120	66.0	0	2
6	3-8	0.01020	120	0.0	1	0
7	4-5	0.01632	120	48.0	1	3
8	4-6	0.01632	120	48.0	0	3
9	4-7	0.02040	120	0.0	1	0
10	4-8	0.02346	120	0.0	1	0
11	4-11	0.01224	120	37.2	1	1
12	5-8	0.03570	120	105.0	0	3
13	6-7	0.03264	120	96.0	0	1
14	6-10	0.01938	120	76.0	1	1
15	6-12	0.02550	120	0.0	1	0
16	6-14	0.02346	120	70.0	1	1
17	7-8	0.00306	120	9.9	1	1
18	7-13	0.00306	120	0.0	1	0
19	8-9	0.00306	120	0.0	1	0
20	9-13	0.00306	120	10.0	1	1
21	9-16	0.00612	120	0.0	1	0

22	10-14	0.01020	120	0.0	1	0
23	10-17	0.02244	120	0.0	2	0
24	11-12	0.01530	120	0.0	1	0
25	11-19	0.00306	120	0.0	1	0
26	12-13	0.01734	120	0.0	2	0
27	12-19	0.01499	120	0.0	1	0
28	13-16	0.00816	120	0.0	1	0
29	14-15	0.02101	120	0.0	2	0
30	14-19	0.02101	120	0.0	1	0
31	15-18	0.00510	120	0.0	2	0
32	17-18	0.01020	120	0.0	2	0

为方便起见, 给定四个阶段置信水平向量中的各元素均取相同的值。当 α 和 β 均取 0.8 时, 表 5-5 给出了所求得 4 个最好的规划方案, 其中方案 1 为最优解。表 5-6 列出了 4 个方案的比较结果。

表 5-5 规划方案($\alpha=0.8, \beta=0.8$)

方案	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4
1	2-5,4-5,4-6	2-3[2],2-4,2-5	4-6[2],4-11	4-5,9-13
	5-8,7-8	5-8,6-7		
2	2-3,2-5[2],4-5	2-3,2-4,4-6[2]	4-5,4-6,5-8	6-10
	6-7,7-8	4-11,5-8	9-13	
3	2-3,2-5[2],4-5	2-3,2-4	5-8,6-10,7-8	4-5[2],4-6
	4-6(2),5-8,6-7		9-13	
4	2-4,2-5[2],4-5,4-6	2-3,5-8,7-8	2-3,4-6,4-11	4-5[2],6-14
	5-8,6-7,6-10	9-13		

注: []中的数字表示增加的线路回数, 下同。

表 5-6 4 个规划方案的比较($\alpha=0.8, \beta=0.8$)

方案	费用/万元	$\alpha(1)$	$\alpha(2)$	$\alpha(3)$	$\alpha(4)$
1	765.10	1.0000	1.0000	0.9592	0.8776
2	829.83	1.0000	1.0000	0.9815	0.9047
3	847.13	1.0000	1.0000	1.0000	0.8333
4	902.78	1.0000	1.0000	1.0000	0.8600

注: $\alpha(k)$ 为规划方案在第 k 个规划阶段所对应的 α 值, 下同。

由表 5-6 可以看出, 当给定 α 和 β 的数值后, 所得的规划方案随着各阶段 α 值的增加, 对应的规划方案的总费用也相应增加。例如, 与方案 1 相比, 方案 2 的 $\alpha(3)$ 和 $\alpha(4)$ 的数值都较大, 这说明方案 2 比方案 1 更好地满足了约束条件, 然而方案 2 的规划总费用却比方案 1 多了 64.73 万元。这在预料之中。规划方案对应的 α 值越大, 对约束条件的满足程度越高, 安全风险越小。

当将 α 固定为 0.8 时, 对 β 取 0.8, 0.9 和 1.0 这 3 种情况进行了计算, 得到的各种情况下的最优规划方案如表 5-7 所示。对 β 取这 3 个不同的值的情况下所得的规划方案的比较见表 5-8。

表 5-7 规划方案($\alpha=0.8$)

β	阶段 1	阶段 2	阶段 3	阶段 4
0.8	2-5,4-5,4-6	2-3[2],2-4,2-5	4-6[2],4-11	4-5,9-13
	5-8,7-8	5-8,6-7		
0.9	2-3,2-5[2],4-5	2-3,2-4,4-6[2]	4-5,4-6,5-8	6-10
	6-7,7-8	4-11,5-8	9-13	
1.0	2-3,2-5,4-5,4-6,5-8	2-3,2-5,5-8	2-4,4-6	4-11,5-8
	6-14,7-8,9-13	6-7,6-10		

表 5-8 规划方案比较 ($\alpha=0.8$)

β	费用/万元	$\alpha(1)$	$\alpha(2)$	$\alpha(3)$	$\alpha(4)$
0.8	765.10	1.0000	1.0000	0.9592	0.8776
0.9	829.83	1.0000	1.0000	0.9815	0.9047
1.0	910.22	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

由表 5-8 可以看出, 当 α 固定时, 随着 β 值的增大, 所需新建线路数目增多, 总费用也随之增加。要保证规划方案在所有可能情况下各个规划阶段均不出现过负荷, 所需费用为 910.22 万元。而当 β 取 0.8 时, 所需费用为 765.10 万元, 但此时 $\alpha(3)$ 和 $\alpha(4)$ 的值也随之降低。可见 β 取值越小, 规划方案对应的安全风险越大, 所需要的规划总费用越小, 但其置信度越低。

由表 5-6 和表 5-8 的分析可知, 通过给定不同的 α 和 β 值, 规划人员可以事先对多阶段规划过程中的安全风险和经济风险进行管理, 根据可以承受的风险程度的不同和实际需要, 作出相应的规划决策。

5.6 结语

多阶段输电系统规划问题是一个复杂的非线性组合优化问题。与传统的输电系统规划问题相比, 电力市场环境下的输电系统规划更加复杂, 需要处理的不确定性因素更多。在不确定性环境下所作出的输电系统规划决策不可避免地会带有一定的风险, 包括安全风险与经济风险。因此, 在制定输电系统规划方案时需要适当考虑风险的影响, 也即需要进行风险管理。

基于机会约束规划方法, 本章发展了计及风险约束的多阶段输电系统规划的新方法, 建立了相应的数学模型, 给出了基于蒙特卡罗仿真和遗传算法的求解方法。与现有的输电系统规划方法相比, 所提出的方法可以适当处理市场环境下电源建设和负荷增长的不确定性。利用机会约束规划所具备的以显式的形式刻画风险的特点, 规划人员可以事先给定能够承受的风险程度, 便于风险管理。最后用一个 19 节点算例系统说明了所提出的方法的基本特征。

5.7 参考文献

- [1] David A K, Wen F S. Transmission Planning and Investment under Competitive Electricity Market Environment. In: Proceedings of IEEE Power Engineering

- Society Summer Meeting, Vancouver (Canada), 2001(3): 1725~1730
- [2] 王锡凡. 电力系统优化规划. 北京: 水利电力出版社, 1990
- [3] Romero R, Monticelli A, Garcia A, et al. Test System and Mathematical Models for Transmission Network Expansion Planning. IEE Proceeding: Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(1): 27~36
- [4] Laura B, Gerson C O, Mario P, et al. A Mixed Integer Disjunctive Model for Transmission Network Expansion. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(3): 560~565
- [5] Yehia M, Chedid R, Ilic M, et al. A Global Planning Methodology for Uncertain Environments: Application to the Lebanese Power System. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(1): 332~338
- [6] 张洪明, 樊亚亮. 输电系统灵活规划的模型及算法. 电力系统自动化, 1999, 23(1): 23~26
- [7] Torre T de la, Feltes J W, Gomez T, et al. Deregulation, Privatization, and Competition: Transmission Planning under Uncertainty. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(2): 460~465
- [8] Crousillat E O, Dorifner P, Alvarado P, et al. Conflicting Objectives and Risk in Power System Planning. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(3): 887~893
- [9] 刘宝碇, 赵瑞清. 随机规划与模糊规划. 北京: 清华大学出版社, 1998
- [10] Charnes A, Cooper WW. Chance Constrained Programming. Management Science, 1959, 6(1): 73~79
- [11] 童陆园, 王小波, 王仲鸿等. 输电网的中长期动态整数规划—临界可行结构匹配法. 电力系统及其自动化学报, 1989, 1(1): 12~23

第六章 基于机会约束规划的无功规划方法研究

6.1 引言

同有功一样,无功作为交流电力网络所提供电力服务的一个有机部分是必不可少的。寻求一个技术上最方便而经济上又最节省的途径来满足无功需求,也是电力规划人员所追求的一个目标。

无功规划的目的是确定网络中无功补偿设备的类型、安装地点及时间,以确保电网正常及预想事故下的电压质量及稳定性,并使规划期内投资及运行等费用总和最小^[1]。电力系统无功规划是电力系统安全经济运行的一个重要方面,对无功的合理规划不仅可以提高系统运行的电压水平,而且可能降低系统的有功网损和无功网损,对提高电力系统的运行经济性起着重要的作用,可显著提高电力系统运行的经济效益。

无功规划作为输电系统规划的一个有机组成部分,通过无功补偿,可以实现电网电压控制、改善电网稳定性、减少网损及保证要求的运行裕度。

无功规划由于要同时最小化两个目标函数因而成为一个非常复杂的问题^[2]。第一个目标是要将运行成本最小化,可以通过减少有功网损和提高电压水平来实现这个目标。第二个目标则需要将投资成本最小化。同输电系统规划一样,无功规划也是一个带有多个约束条件的大规模非线性组合优化问题,常用的求解方法包括线性规划法^[3]、非线性规划法^[4]、混合整数规划法^[5]、进化规划算法^[6]和分解方法^[7]等。

随着市场化的深入,无功管理体系和电力系统的运行方式都发生了很大的变化。在传统的垄断经营的电力公司中,无功设备的拥有和运营由一家电力公司所掌控,无功供应的成本和对系统的贡献没有也不需要得到精确的评价。在电力市场环境,无功设备所有者的权利和义务将不仅影响电力工业的投资回报,而且还会影响到电力系统的安全。当一些自供应系统互联时,情况还会变得更复杂^[6]。这些都给无功规划带来新的挑战。

电力市场环境下的无功规划需要处理大量的不确定性因素,例如电源建设、负荷增长、设备费用以及可获得途径等。由于这些不确定性因素对无功规划有显

著影响，因此必须采用适当的方法处理。

在此背景下，本章提出了一种基于机会约束规划的无功规划新方法。前已述及，机会约束规划^[9,10]是专门用来解决包含不确定性因素的优化问题的一类随机优化方法，可以用来解决电力市场环境下的无功规划问题。同确定性无功规划方法相比，本章采用“软”约束的形式来考虑不确定运行条件下的电压波动问题，即可能要发生的电压波动是以一定的置信度限制在所要求的范围内的，而确定性方法则采用“硬”约束的形式，即电压波动范围限制必须严格满足。

作为一项初步的研究工作，为简化问题并不失一般性，在建模时采用了如下假设：将运行时间划分为三个时间段（高峰时段，非峰谷时段，低谷时段）；所规划的系统各节点的发电出力与负荷需求服从某种特定的概率分布，例如正态分布。需要指出，下面提出的规划方法对其他类型的概率分布同样适用。

在本章中，所采用的无功规划的目标函数为候选无功补偿装置的投资和运行成本最小。各种不确定性因素的存在对无功规划的灵活性提出了更高的要求。因此，如果用确定性方法处理约束条件，得到的优化结果一般趋于保守。机会约束规划是解决这类问题的一种很好的方法。在电力市场环境下，要求无功规划更加的灵活，规划方案更加可靠。机会约束规划通过给定合适的置信水平可以很好的满足这些要求。

在建立了基于机会约束规划的无功规划模型后，给出了基于蒙特卡罗仿真和遗传算法的求解方法。本章结构如下：6.2节给出了基于机会约束规划的无功规划模型。6.3节介绍了基于蒙特卡罗仿真和遗传算法的具体求解方法。6.4节对一个具体算例进行了详细的分析。6.5节给出了本章小结。

6.2 无功规划的数学模型

6.2.1 不确定性因素的模拟

大多数不确定性因素可用概率方法（如概率密度函数）来模拟，其中的参数可基于历史数据以及对所研究的系统的未来发展情况的分析估计来确定。在影响无功规划的众多不确定性因素中，最为重要的是未来电源建设和负荷增长的不确定性，有鉴于此，本章主要考虑这两种不确定性因素的影响，但所提出的方法框架同样可以容纳对其它不确定性因素的模拟。

假设每日的运行时间可以划分为三个时段（高峰时段，非峰谷时段，低谷时段）。为简化起见，这里设定高峰时段为 8:00~18:00，非峰谷时段为 18:00~23:00，低谷时段为 23:00~8:00。当然，规划人员可以根据实际情况，对运行时间做不同的或更详细的划分。

假设发电机节点 i 的出力为 P_{Gik} ($k=1, 2, 3$; 1: 高峰时段, 2: 非峰谷时段, 3: 低谷时段)。 P_{Gik} 为一个随机变量, 服从正态分布 $P_{Gik} \sim N(\mu_{ik}, \sigma_{ik}^2)$, 这里 μ_{ik} 和 σ_{ik} 为在时间段 k 内发电机出力的均值和标准差。

6.2.2 基于机会约束规划的无功规划数学模型

由于在规划期内发电机出力和负荷需求是不确定的, 因此可把无功规划问题描述为一个随机优化问题。机会约束规划为解决这类问题提供了一种很好的途径。无功规划的目标函数定义为候选无功补偿设备的运行和投资成本之和最小。将节点电压约束表示成软约束的形式, 即允许所形成的规划方案可以在某些特殊的情况下不满足电压约束, 但这种情况发生的概率必须小于某一置信水平。但需要指出, 下面所发展的方法框架同样可以扩展到包括其它约束条件的更一般的情形。

基于机会约束规划的无功规划模型如下:

$$\begin{aligned}
 & \min \bar{f}(\mathbf{S}) \\
 & \text{s.t. } P_i \{f(\mathbf{S}) \leq \bar{f}(\mathbf{S})\} \geq \beta \\
 & P_i \{V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}\} \geq \alpha \quad i \in N_B \\
 & Q_{ci}^{\min} \leq Q_{ci} \leq Q_{ci}^{\max} \quad i \in N_C \\
 & Q_{gi}^{\min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{\max} \quad i \in N_G \\
 & 0 = Q_i - V_i \sum_{j \in N_i} V_j (G_j \sin \theta_j - B_j \cos \theta_j) \quad i \in N_{PQ}
 \end{aligned} \tag{6-1}$$

其中

$$f(\mathbf{S}) = h \sum_{k=1}^3 t_k P_{loss,k} + \sum_{i \in N_C} (e_i + C_{ci} Q_{ci}) \tag{6-2}$$

式中

\mathbf{S} - 优化规划问题的一个 n 维解向量

n - 候选无功补偿设备的数量

- N_c - 无功补偿节点数
 N_B - 系统节点总数
 N_g - 发电机节点数
 N_{PQ} - PQ 节点数
 N_i - 与节点 i 相连的节点数, 包括节点 i
 h - 系统电价
 t_k - 时段 k 的运行时间
 $P_{loss,k}$ - 时段 k 内的系统有功网损
 e_i - 安装无功设备的固定成本
 C_{ci} - 单位无功安装成本
 Q_{ci} - 无功补偿容量
 V_i - 节点电压
 θ_{ij} - 节点间的电压相角差
 Q_{gi} - 节点无功出力
 G_{ij}, B_{ij} - 节点间的电导和电纳
 G_{ii}, B_{ii} - 节点的自电导和自电纳
 α - 约束方程的置信水平
 β - 目标函数的置信水平

6.3 求解方法及步骤

6.3.1 机会约束的检验

根据预先给定的置信水平, 很难将式 (6-1) 所表示的机会约束规划转化为确定等价类。蒙特卡罗方法^[11, 12]为解决这类问题提供了一个很好的途径。

考虑如下机会约束:

$$P_i \{V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}\} \geq \alpha \quad (6-3)$$

式中, V_i 是 P_G 和 P_D 的函数, 这里 P_G 为发电机出力向量, P_D 为节点负荷功率向量。前已述及, P_G 和 P_D 中包含随机变量, 因此 V_i 也为随机变量。对某一组给定的决策变量 S , 使用蒙特卡罗仿真方法检验机会约束是否满足的方法如下:

- a. 给定允许的随机模拟次数 N 。

- b. 置随机模拟计数器 $t=0$.
- c. 置机会约束成立计数器 $N=0$.
- d. 抽样确定发电机出力。随机产生一个满足正态分布 $N(\mu_{Gk}, \sigma_{Gk}^2)$ 的伪随机数 P_{Gk} ，得到发电出力的抽样值为 P_{Gk} 。
- e. 抽样确定负荷值。随机产生一个满足正态分布 $N(\mu_{Djk}, \sigma_{Djk}^2)$ 的伪随机数 P_{Djk} ，则该点在规划期内的有功负荷为 P_{Djk} 。利用同样的方法产生该点在规划期内的无功负荷值 Q_{Djk} ， $Q_{Djk} \sim N(\mu_{Qjk}, \sigma_{Qjk}^2)$ 。
- f. 检验在这一次随机模拟中得到的所有节点发电容量总和是否大于等于所有负荷的总和，如果是，则这次模拟结果就供需而言是可行的，转步骤 g，否则转步骤 d。
- g. 计算节点电压 V_i 。
- h. 当 $V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}$ 时， $N' = N' + 1$ 。
- i. 置 $t=t+1$ 。
- j. 如果 $t < N$ ，转步骤 d，否则转步骤 k。
- k. 当 $N' / N \geq \alpha$ 时，认为满足机会约束 $P_t\{V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}\} \geq \alpha$ ，否则不满足。

6.3.2 目标函数的计算

对于一个给定的向量 \mathbf{S} ，通常可以采用蒙特卡罗仿真方法来求取最大目标值 \bar{f} ，其中 \bar{f} 满足如下约束条件：

$$P_t\{f(\mathbf{S}) \leq \bar{f}(\mathbf{S})\} \geq \beta. \quad (6-4)$$

使用蒙特卡罗仿真方法计算目标函数的方法如下：

- a. 由抽样产生的向量 $P_{Gk}^{(1)}, P_{Gk}^{(2)} \dots P_{Gk}^{(N)}$ 和 $P_{Dk}^{(1)}, P_{Dk}^{(2)} \dots P_{Dk}^{(N)}$ 计算对应的 f ，得到序列 $\{f_1, f_2 \dots, f_N\}$ 。
- b. 置 N' 为 $(1-\beta)N$ 的整数部分。
- c. 序列 $\{f_1, f_2 \dots, f_N\}$ 中的第 N' 个最大的元素即为目标值 \bar{f} 。

6.3.3 基于蒙特卡罗仿真的遗传算法求解无功机会约束规划模型

采用基于蒙特卡罗仿真的遗传算法求解式(6-1)所描述的机会约束无功规划模型。鉴于遗传算法在许多文献中已被广泛介绍^[13-16]，这里不再做详细讨论，只对结构的表达，约束条件的处理和适应度评价问题进行讨论。

用向量 $\mathbf{X}=(\mathbf{X}^{(1)}, \mathbf{X}^{(2)})$ 作为一个染色体来代表优化问题的一个解， \mathbf{X} 由两部分构成， $\mathbf{X}^{(1)}$ 为表示 V_i 的 N_{PV} 维向量 ($i \in N_{PV}$, N_{PV} 为 PV 节点数)， $\mathbf{X}^{(2)}$ 为表示 Q_{gi} 的 N_c 维向量 ($i \in N_c$)。

本章采用在目标函数中引入罚函数的方法计算各染色体的适应度，即当约束条件不能成立时，在适应度中引入适当惩罚。适应度函数构造如下：

$$F_{fitness} = \bar{f}(\mathbf{S}) + \sum_{i \in N_{PV}} \lambda_{V_i} \Delta V_i^2 + \sum_{i \in N_{PV}} \lambda_{Q_{gi}} \Delta Q_{gi}^2 \quad (6-5)$$

这里 λ_{V_i} 和 $\lambda_{Q_{gi}}$ 分别为相应的惩罚系数， λ_{V_i} 定义如下：

$$\lambda_{V_i} = \begin{cases} 0 & V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \\ W_1 & (1-5\%)V_i^{\min} \leq V_i < V_i^{\min} \quad \text{或} \quad V_i^{\max} < V_i \leq (1+5\%)V_i^{\max} \\ W_2 & V_i < (1-5\%)V_i^{\min} \quad \text{或} \quad V_i > (1+5\%)V_i^{\max} \end{cases} \quad (6-6)$$

其中 $W_1 \ll W_2$ 。

ΔV_i 和 ΔQ_{gi} 定义如下：

$$\Delta V_i = \begin{cases} V_i - V_i^{\max} & (V_i > V_i^{\max}) \\ 0 & (V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max}) \\ V_i^{\min} - V_i & (V_i < V_i^{\min}) \end{cases} \quad (6-7)$$

$$\Delta Q_{gi} = \begin{cases} Q_{gi} - Q_{gi}^{\max} & (Q_{gi} > Q_{gi}^{\max}) \\ 0 & (Q_{gi}^{\min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{\max}) \\ Q_{gi}^{\min} - Q_{gi} & (Q_{gi} < Q_{gi}^{\min}) \end{cases}$$

主要求解步骤如下：

- a. 输入原始数据。
- b. 输入遗传算法中要求的染色体个数，以及交叉和变异概率。
- c. 随机产生一组随机规划方案，作为遗传算法的初始种群。对于种群中的每一个染色体，利用 6.3.1 中介绍的方法检验式 (6-3) 的机会约束是否成立。

- d. 利用 6.3.2 中介绍的方法计算 $\bar{f}(\mathbf{S})$ 。
- e. 根据公式 (6-5) 来计算染色体的适应度。
- f. 以步骤 d 中求得的目标函数值为基础, 对违反约束的染色体采用惩罚函数方法计算各染色体的适应度; 对不违反约束条件的染色体, 以步骤 d 中求得的目标函数值直接作为适应度。
- g. 采用轮盘赌方法对种群中的染色体进行选择操作。
- h. 对种群中的染色体进行交叉和变异操作, 得到新一代染色体, 利用蒙特卡罗方法检验是否满足机会约束。
- i. 重复步骤 d~步骤 g, 达到给定的最大允许迭代次数为止。
- j. 以求解过程中所发现的最好的染色体作为最后的规划方案。

6.4 算例分析

为了验证数学模型及算法的合理性与有效性, 本章用修改后的 IEEE 14 节点系统作为算例, 对所提出的基于机会约束规划的无功规划方法进行测试。系统网络结构如图 6-1 所示。

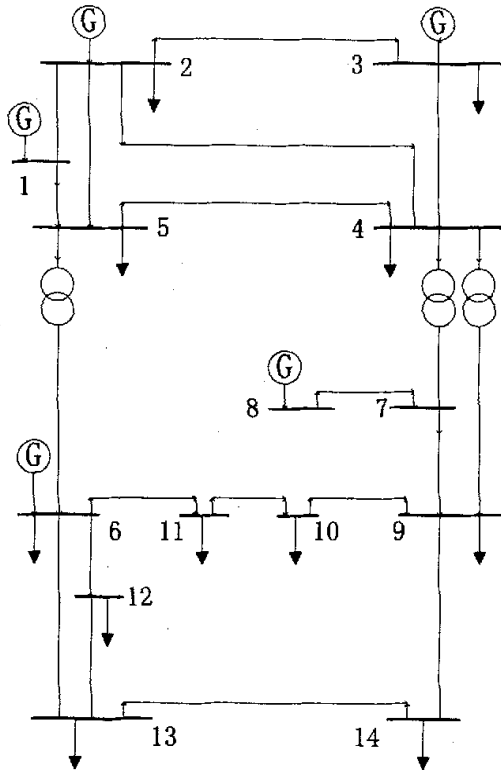


图6-1 修改的IEEE 14节点系统

该系统由一个平衡节点(节点1), 4个PV节点(节点2, 3, 6, 8), 9个PQ节点和20条线路构成。支路数据和初始节点数据见文献[17]。功率基准值和成本参数见表6-1, 变量上下限约束见表6-2, 发电机数据见表6-3, 节点负荷数据见表6-4。

表6-1 功率基准和成本参数

$S_B(\text{MVA})$	$h(\$/\text{MWh})$	$e_i(\$)$	$C_{ci}(\$/\text{Mvar})$	$t_1(\text{h})$	$t_2(\text{h})$	$t_3(\text{h})$
100	60	1000	6000	3650	1825	3285

表 6-2 变量约束(p.u.)

	Q_{g1}	Q_{g2}	Q_{g3}	Q_{g6}	Q_{g8}	V_g	V_{load}	Q_c
上限	0.8	0.6	0.6	0.5	0.5	1.1	1.05	0.2
下限	-0.2	-0.15	-0.15	-0.1	-0.1	0.95	0.95	0

表 6-3 发电机数据

节点号	8 a.m.-6 p.m.		6 p.m.-11 p.m.		11 p.m.-8 a.m.	
	μ_{i1}	σ_{i1}	μ_{i2}	σ_{i2}	μ_{i3}	σ_{i3}
	(MW)	(MW)	(MW)	(MW)	(MW)	(MW)
2	70	7	60	6	50	5
3	70	7	50	5	30	3
6	50	5	30	3	10	1
8	50	5	30	3	10	1

表 6-4 负荷数据

节点号	负荷分类	8 a.m.-6 p.m.				6 p.m.-11 p.m.				11 p.m.-8 a.m.			
		μ_{Pj1}	σ_{Pj1}	μ_{Qj1}	σ_{Qj1}	μ_{Pj2}	σ_{Pj2}	μ_{Qj2}	σ_{Qj2}	μ_{Pj3}	σ_{Pj3}	μ_{Qj3}	σ_{Qj3}
		(MW)	(MW)	(Mvar)	(Mvar)	(MW)	(MW)	(Mvar)	(Mvar)	(MW)	(MW)	(Mvar)	(Mvar)
2	1	34	3.4	25	2.5	8	0.8	6	0.6	8	0.8	6	0.6
3	1	95	9.5	71	7.1	95	9.5	71	7.1	95	9.5	71	7.1
4	3	78	7.8	58	5.8	40	4.0	30	3.0	20	2.0	15	1.5
5	2	10	1.0	7	0.7	10	1.0	7	0.7	5	0.5	3	0.3
6	1	25	2.5	18	1.8	10	1.0	7	0.7	10	1.0	7	0.7
9	2	36	3.6	27	2.7	36	3.6	27	2.7	20	2.0	15	1.5
10	3	17	1.7	12	1.2	8	0.8	6	0.6	6	0.6	4	0.4
11	3	13	1.3	9	0.9	6	0.6	4	0.4	4	0.4	3	0.3
12	4	6	0.6	4	0.4	12	1.2	9	0.9	6	0.6	4	0.4

13	4	9	0.9	6	0.6	18	1.8	13	1.3	9	0.9	6	0.6
14	4	10	1.0	7	0.7	20	2.0	15	1.5	10	1.0	7	0.7

负荷分类: 1-工业负荷; 2-商业负荷; 3-办公负荷; 4-居民负荷。

节点 4, 10, 11, 13 和 14 被选为可能的无功补偿装置安装节点。假设在每个节点可以安装无功补偿电容器, 单组容量为 2 MVAR, 由 10 组组成。电能价格为 \$60/MWh, 补偿设备单位投资为 \$6,000/MVAR。系统运行时间以 1 年计。

当将 β 固定为 0.8 时, 对 α 取 0.7, 0.8, 0.9 和 1.0 这 4 种情况进行了计算, 得到的各种情况下的最优规划方案如表 6-5 所示。

同样的, 当将 α 固定为 0.8 时, 对 β 取 0.7, 0.8, 0.9 和 1.0 这 4 种情况进行了计算, 得到的各种情况下的最优规划方案如表 6-6 所示。

表 6-5 规划方案 ($\beta=0.8$)

$\bar{f}(S)$ (\$)	V_{g2}	V_{g3}	V_{g6}	V_{g8}	Q_{c4} (Mvar)	Q_{c10} (Mvar)	Q_{c11} (Mvar)	Q_{c13} (Mvar)	Q_{c14} (Mvar)
$\alpha=0.7$ 2009313	1.05	1.03	1.02	1.08	0	0	10	2	6
$\alpha=0.8$ 2075875	1.05	1.03	1.02	1.09	12	2	8	0	10
$\alpha=0.9$ 2081500	1.04	1.02	1.01	1.10	4	0	0	0	12
$\alpha=1.0$ 2194150	1.05	1.02	1.03	1.07	2	20	0	0	10

表 6-6 规划方案 ($\alpha=0.8$)

$\bar{f}(S)$ (\$)	V_{g2}	V_{g3}	V_{g6}	V_{g8}	Q_{c4} (Mvar)	Q_{c10} (Mvar)	Q_{c11} (Mvar)	Q_{c13} (Mvar)	Q_{c14} (Mvar)
$\beta=0.7$ 2021750	1.04	1.02	1.02	1.10	0	0	2	0	8
$\beta=0.8$ 2075875	1.05	1.03	1.02	1.09	12	2	8	0	10
$\beta=0.9$ 2092625	1.05	1.02	1.01	1.10	4	2	2	0	8
$\beta=1.0$ 2170125	1.05	1.02	1.03	1.09	2	4	2	8	10

通过对比,可以得到如下结论:

(1) 当 β 取 0.8 时,随着置信水平 α 的增大,总的投资和运行成本也随之增加。当 α 取 1.0 时,意味着所有的电压约束均必须满足,此时总成本为 \$2,194,150。当 α 取 0.7 时,总成本减少到 \$2,009,313。

(2) 当 α 取 0.8 时,随着置信水平 β 的增大,总的投资和运行成本也随之增加。当 β 取 1.0 时,总成本为 \$2,170,125。当 β 取 0.7 时,总成本减少到 \$2,021,750。

(3) 置信水平 α 和 β 取值越大,规划方案对应的安全风险越小,所需要的规划总费用越高。

(4) 通过事先给定置信水平 α 和 β 的值,所提出的方法可以量化不确定性带来的安全风险。

(5) 目标函数和约束条件的置信水平不同,对应的规划方案也不相同。规划人员可以通过事先设定置信度水平对风险进行管理。

6.5 结语

本章提出了一种基于机会约束规划的无功规划新方法,建立了相应的数学模型,给出了基于蒙特卡罗仿真和遗传算法的求解方法。所提出的方法可以较好的处理各种不确定性因素的影响,对约束条件的处理也更加灵活。在不确定环境下所作出的无功规划决策不可避免地会带有一定的风险,通过事先给定置信度水平,该方法可以将不确定性因素带来的风险进行量化同时使投资和运行成本最小化。最后用修改后的 IEEE 14 节点算例系统说明了所提出的方法的基本特征。

6.6 参考文献

- [1] 孙洪波. 电力网络规划. 重庆: 重庆大学出版社, 1996
- [2] Hsiao Y T, Chiang H D, Liu C C, Chen Y L. A computer package for optimal multi-objective VAR planning in large scale power systems. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(2): 668~676
- [3] Iba K, Suzuki H, Suzuki K I, Suzuki K. Practical reactive power allocation/operation planning using successive linear programming. IEEE Transactions on Power Systems, 1998, 3(2): 558~566
- [4] Sachdeva S S, Billington R. Optimum network VAR planning by nonlinear

- programming. IEEE Transactions on Power Apparatus System, 1973, PAS-92: 1217~1225
- [5] Aoki K, Fan M, Nishikori A. Optimal VAR planning by approximation method for recursive mixed integer linear programming. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(4): 1741~1747
- [6] Lai L L, Ma J T. Application of evolutionary programming to reactive power planning-comparison with nonlinear programming approach. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(1): 198~206
- [7] Mangoli M K, Lee K Y, Park Y M. Optimal long-term reactive power planning using decomposition techniques. Electric Power System Research, 1993, 26: 41~52
- [8] Hsu C S, Chen M S. Reactive power planning and operating in the deregulated power utilities. In: proceedings of Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies Conference, 2000: 72~77
- [9] Liu B. Uncertain Programming. New York: John Wiley & Sons, 1998
- [10] Charnes A, Cooper W W. Chance Constrained Programming. Management Science 1959, 6(1): 73~79
- [11] Billinton R, Karki R. Application of Monte Carlo simulation to generating system well-being analysis. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 1172~1177
- [12] Hegazy Y G, Salama M M A, Chikhani A Y. Adequacy assessment of distributed generation systems using Monte Carlo Simulation. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(1): 48~52
- [13] Iba K. Reactive power optimization by genetic algorithm. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(2): 685~692
- [14] Lee K Y, Bai X M, Park Y M. Optimization method for reactive power planning by using a modified simple genetic algorithm. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(4): 1843~1850
- [15] Urdaneta A J, Gomez J F, Sorrentino E, Flores L, Diaz R. A hybrid genetic algorithm for optimal reactive power planning based upon successive linear

- programming. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(4): 1292~1298
- [16] Wang Z H, Yin X G, Zhang Z, Yang J C. Pseudo-parallel genetic algorithm for reactive power optimization. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 2(3): 903~907
- [17] Pai M A. Computer Techniques in Power System Analysis. New Delhi: Tata McGraw-Hill, 1979

第七章 结论

市场机制下输电系统规划将面临很多的不确定性因素,如电源规划和负荷变化等。输电系统规划要计及这些不确定性因素,使规划后的系统具有较好的灵活性和鲁棒性,相对于传统的输电系统规划来讲要困难得多。如何量化这些不确定性因素所造成的风险,并对风险进行管理,是电力市场环境下的输电系统规划需要解决的一个重要问题。电力市场环境下的输电系统规划问题已经成为国内外电力系统领域广为关注的一个重要问题。

本文将机会约束规划引入到市场环境下的输电系统规划研究中,进行了系统而深入的研究。取得了下述主要成果:

- ◇ 提出了一种以蒙特卡罗仿真和遗传算法为基础的输电系统灵活规划方法。采用概率方法对输电系统规划期内所面对的不确定性因素进行模拟,之后采用蒙特卡罗仿真进行抽样处理,把不确定性优化问题转化为一系列确定性优化问题求解。在对输电系统规划方案的评估方面提出了更为合理的措施。与现有的规划方法相比,所提出的方法对不确定性因素的考虑更加全面,可以更好的模拟未来可能出现的系统情况,从而得到适应能力更强的规划方案。
- ◇ 引入机会约束规划方法求解电力市场环境下的输电系统规划问题,建立了相应的数学模型,给出了基于遗传算法和蒙特卡罗仿真的求解方法,并用算例系统说明了所提出的方法的基本特征。与现有的输电系统规划方法相比,所提出的方法可以适当处理市场环境下电源建设和负荷增长的不确定性,在约束条件的处理上也更加灵活,很适于解决电力市场环境下的输电系统规划问题。
- ◇ 基于机会约束规划方法,发展了计及风险约束的多阶段输电系统规划的新方法,建立了相应的数学模型,给出了相应的求解方法,并用算例系统说明了所提出的方法的有效性。与现有的规划方法相比,所提出的方法可以适当处理市场环境下的不确定性因素。利用机会约束规划所具备的以显式的形式刻画风险的特点,规划人员可以事先给定能够承受的风险程度,便于风险管理。

- ◇ 提出了一种基于机会约束规划的无功规划新方法，建立了相应的数学模型。所提出的方法可以较好的处理各种不确定性因素的影响，通过采用“软”约束的形式来考虑不确定运行条件下的电压波动问题，对约束条件的处理更加灵活。在不确定环境下所作出的无功规划决策不可避免地会带有一定的风险，通过事先给定置信度水平，该方法可以将不确定性因素带来的风险进行量化同时使投资和运行成本最小化。

上述研究成果可以帮助规划人员进行输电系统规划时，更加全面而适当的考虑不确定性因素的影响，并对不确定性因素引起的风险进行量化和管理。

尽管研究工作取得了一些成果，仍然有很多有待研究或需要进一步深入研究的问题，例如：

(1) 如何更为全面而合理地处理各种不确定性因素，如经济、环境和政策方面的不确定性等，使规划方案具有更大的灵活性和更强的适应性。

(2) 如何在规划模型中更合理地协调经济性和可靠性的关系，使规划方案更具实用价值。

(3) 如何发展电力市场环境下的输电投资和规划的集成数学模型与高效的求解算法，使其符合电力工业市场化发展的需求。

作者相信，电力市场环境下的输电系统规划是一个重要的研究领域，而机会约束规划在该领域具有很大的应用潜力。

致 谢

本论文是在导师文福拴教授的悉心指导下完成的。文老师求实的作风、渊博的知识、严谨的治学态度、敏捷活跃的思维以及崇高的敬业精神和道德风范给我留下了深刻的印象，这些必将是我未来工作和学习的榜样。三年来导师对我孜孜不倦的教诲使我终身受益，给予我的关怀和鼓励令我深受感动并难以忘怀，值此论文完成之际，谨向文老师表示衷心的感谢和诚挚的敬意！

感谢浙江大学电气学院的老师和同学对我的帮助！

在清华港大深圳电力系统研究所和香港大学电能系统中心工作期间，吴复立教授、倪以信教授和严正博士给予了很多指导和帮助。在香港理工大学访问期间，余志伟教授也给予了很多指导和帮助。籍此机会，向各位老师表示衷心的感谢！

在山东大学电气工程学院 7 年的学习生活，为我的博士课题研究打下了良好的基础，在此向我的硕士导师栾兆文教授表示衷心的感谢！

感谢我的父母，在自己 20 多年的求学生涯中，一直默默的支持着我，鼓励着我。

感谢我的丈夫周长春，感谢他多年来的支持与鼓励，风风雨雨，我们携手走过……

感谢给予我帮助、和我一起工作过的浙江大学电气工程学院 2002 春博士班的全体同学，浙江大学电机系 304 实验室、深圳清华港大电力系统研究所、香港大学电能系统中心和香港理工大学电机工程系的所有老师和同学！

感谢所有关心过我、帮助过我的人！

攻读博士学位期间发表和录用的学术论文

- [1] 杨宁, 文福拴. 基于机会约束规划的输电系统规划方法. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 23~27 (EI 已收录)
- [2] 杨宁, 文福拴. 电力市场环境下的输电系统规划方法初探. 电网技术, 2004, 28(17): 47~52 (EI 已收录)
- [3] 杨宁, 文福拴. 计及风险约束的多阶段输电系统规划方法. 电力系统自动化, 2005, 29(4): 28~33 (EI 已收录)
- [4] Ning Yang, Fushuan Wen. A Preliminary Investigation on Transmission System Expansion Planning in Competitive Electricity Market Environment. IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies (DRPT 2004), Hong Kong, 2004, 2: 586~591 (EI 已收录)
- [5] Ning Yang, Fushuan Wen. A Chance Constrained Programming Approach to Transmission System Expansion Planning. Electric Power Systems Research, 2005, 75 (2,3): 171~177 (SCI 收录杂志, 将收录)
- [6] Ning Yang, C.W.Yü, Fushuan Wen. An Investigation on Reactive Power Planning Based on Chance Constrained Programming. Submitted to IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution.