



同濟大學  
TONGJI UNIVERSITY

硕士学位论文

# 含风电电力系统的脆弱性 分析与量化评估研究

姓 名：刘雪娇

学 号：1631542

所在院系：电子与信息工程学院

学科门类：工学

学科专业：电子控制计算机

指导教师：苏永清 副教授

二〇一八年十二月





同濟大學  
TONGJI UNIVERSITY

A dissertation submitted to  
Tongji University in conformity with the requirements for  
the degree of Master of Science

**Research on Vulnerability Analysis and  
Quantitative Evaluation of Power System  
with Wind Farm**

Candidate : Liu Xuejiao  
Student Number : 1631542  
School/Department : College of Electronics and  
Information Engineering  
Discipline : Engineering  
Major : Control Science and Engi-  
neering  
Supervisor : A. Prof. Su Yongqing

December, 2018



# 学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以盈利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年    月    日



# 同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日





## 摘要

近年来,随着风能、潮汐能、光能等清洁、可再生能源接入电力系统,系统运行中表现出潜在的脆弱性趋势大增,许多的专家学者也越来越重视系统的脆弱性研究。由于含风电电力系统的工作状态受外界环境的影响极大,地理气候的变化和负荷需求的扰动都会引起系统状态的改变,影响输送的电能质量。这种潜在的系统脆弱性特征会对电能质量造成严重威胁或严重影响电能的安全可靠性,因此有必要在电力系统评估阶段对系统潜在的脆弱性进行分析,找出系统脆弱性高的节点,并针对系统的薄弱环节采取措施进行优化。

本文研究了风力发电系统的原理及组成,对风力发电机的性能进行了分析,在此基础上建立了变速风电机组的功率曲线。通过查阅文献资料,在研究了风能接入对电能质量影响的基础上,建立了随机性风电功率模型。同时,通过比较负荷的变化导致风电电力系统与普通电力系统的变化,得出了负荷对风电电力系统的影响并建立了负荷概率模型。

通过查阅相关的文献资料,分析系统脆弱性存在的原因得出系统的脆弱性本质以及其数学描述,进而得出一个较为清晰的系统脆弱性概念。分别从系统的结构和系统的状态两个角度对脆弱性进行分析研究。结构脆弱性方面,分别基于复杂网络和 *PageRank* 对系统拓扑进行分析。状态脆弱性方面,基于蒙特卡洛大量实验的方法将外界环境及用户端的随机性变化用实验模拟的方式进行分析。

针对结构脆弱性与状态脆弱性,分别根据各自脆弱性的定义与特征选取能够反映其脆弱现象的评价指标,结合综合评价法及多指标融合法,建立了系统脆弱性量化评估的数学模型。对不同的二级指标选择合适方法进行归一化后,分别采用层次分析法进行权重分配和指标融合。再使用  $D-S$  证据理论对一级指标进行融合,得到系统的综合脆弱性指标。

依据本文所建立的含风电电力系统脆弱性分析方法,以 *IEEE39* 电力系统为例,在系统模型建立的基础上,分别研究了单风机接入和多风机接入下系统的脆弱性。单风机接入的情况下,研究了系统的结构脆弱性,并且对比了不同风机接入下系统的状态脆弱性,最终得到单风机系统的综合脆弱性。多风机接入的情况下,首先对比了双风机与单风机系统的脆弱性,再对多风机系统的脆弱性进行分析。根据得到的系统的脆弱性分析结果,识别出系统的薄弱环节。

**关键词:** 风力发电, 脆弱性, 量化评估体系, 薄弱环节识别

## ABSTRACT

In recent years, with the installation of clean and renewable energy sources such as wind energy, tidal energy and light energy into the power system, the potential vulnerability in the system has increased. Many experts and scholars have paid more and more attention to research of the vulnerability. Since the working state of the wind power system is greatly affected by the external environment, the change of the geographical climate and the disturbance of the load demand will cause the change of the system state and affect the quality of the transmitted power. This potential vulnerability poses a serious threat to the safety and reliability of the quality of power. Therefore, it is necessary to analyze the vulnerability of the system during the assessment phase to identify the nodes with high vulnerability and to take measures to optimize it.

In this paper, the principle and composition of wind power system are studied. The performance of wind turbine is analyzed. Based on this, the power curve of variable speed wind turbine is proposed. Based on the researches of the influence of wind energy on power quality, the random wind power model was established. At the same time, by comparing the quality of power between wind power system and ordinary power system affected by load demand, the load probability model is established.

Through consulting relevant literature and finding the reasons of the vulnerability, the nature of the vulnerability and its mathematical description are obtained, then a clear concept of vulnerability is obtained. The vulnerability is studied from the perspective of the structure and the state of the system. The structural vulnerability is studied based on network and algorithm of PageRank. The state vulnerability is studied based on Monte Carlo, using a large number of experiments to simulate the random changes of the external environment.

According to the definition and characteristics of the structural vulnerability and state vulnerability, the evaluation indicators are selected. Combined with the comprehensive evaluation, the mathematical model of quantitative evaluation of the system vulnerability is established. After selecting the appropriate methods to normalize secondary-level indicators, the analytic hierarchy process is used to calculate the weight and index fusion. Then use the  $D-S$  evidence theory to integrate the first-level indicators to obtain the comprehensive vulnerability index of the system.

Based on the method of vulnerability analysis for wind power system, the vulnera-

bility of the single-fan and multi-fan power system is studied on IEEE39 power system. In the case of single-fan system, the structural fragility of the system is analysed, and the state fragility of the system under different wind turbines is compared, and the comprehensive vulnerability of the single-fan system is finally obtained. In the case of multi-fan system, the vulnerability of the dual-fan and single-fan system is compared, and then the vulnerability of the multi-fan system is analyzed. According to the obtained vulnerability analysis results of the system, the weak points of the system are identified.

**Key Words:** Wind power, Vulnerability, Quantitative evaluation , Weak point identification

# 目录

插图索引 .....	VII
表格索引 .....	IX
第 1 章 绪论 .....	1
1.1 研究背景与研究意义 .....	1
1.2 国内外研究现状 .....	2
1.2.1 脆弱性研究起源及现状 .....	2
1.2.2 电力系统脆弱性研究现状 .....	3
1.2.3 含风电电力系统的研究现状 .....	4
1.3 研究内容与研究路线 .....	5
1.3.1 待解决的问题 .....	5
1.3.2 研究内容与思路 .....	5
1.3.3 本文章节安排 .....	7
第 2 章 风力发电系统特性研究与建模 .....	9
2.1 引言 .....	9
2.2 风力发电系统基本组成研究 .....	9
2.2.1 风力发电系统基本组成 .....	9
2.2.2 风力发电机性能分析 .....	10
2.2.3 变速风电机组功率曲线 .....	11
2.3 风电功率模型的建立 .....	12
2.3.1 风能接入对电能质量的影响 .....	12
2.3.2 随机性风电功率模型 .....	13
2.3.3 风电功率模型仿真与验证 .....	14
2.4 负荷概率模型的建立 .....	16
2.4.1 负荷对风电电力系统的影响 .....	16
2.4.2 负荷概率模型的建立 .....	18
2.5 本章小结 .....	18
第 3 章 含风电电力系统的脆弱性研究 .....	19
3.1 引言 .....	19
3.2 含风电电力系统脆弱性 .....	19
3.2.1 含风电电力系统脆弱性本质 .....	19
3.2.2 含风电电力系统脆弱性数学描述 .....	20
3.3 含风电电力系统结构脆弱性研究 .....	21
3.3.1 基于复杂网络的结构脆弱性研究 .....	21
3.3.2 基于 <i>PageRank</i> 的结构脆弱性研究 .....	24
3.3.3 模型比较与案例分析 .....	25

3.4 含风电电力系统状态脆弱性研究 .....	28
3.4.1 蒙特卡洛方法概述 .....	28
3.4.2 含风电电力系统状态脆弱性 .....	29
3.4.3 基于蒙特卡洛的状态脆弱性研究 .....	31
3.5 本章小结 .....	34
第 4 章 含风电电力系统脆弱性量化评估 .....	35
4.1 引言 .....	35
4.2 系统脆弱性量化评估指标 .....	35
4.2.1 含风电电力系统的脆弱性指标选取 .....	35
4.2.2 脆弱性量化评估指标的语义分析 .....	37
4.2.3 系统脆弱性综合评估指标集 .....	38
4.3 脆弱性量化评估二级指标融合 .....	38
4.3.1 脆弱性量化评估二级指标归一化 .....	39
4.3.2 基于层次分析法的权重分配 .....	40
4.3.3 脆弱性量化评估二级指标融合 .....	43
4.4 脆弱性量化评估一级指标融合 .....	45
4.4.1 $D-S$ 证据理论 .....	45
4.4.2 脆弱性量化评估一级指标融合 .....	47
4.5 系统脆弱性量化评价体系描述 .....	48
4.6 本章小结 .....	48
第 5 章 含风电电力系统的脆弱性量化分析 .....	49
5.1 引言 .....	49
5.2 <i>IEEE39</i> 风力发电系统的模型 .....	49
5.3 单风机电力系统脆弱性分析评估 .....	51
5.3.1 单风机电力系统结构脆弱性分析 .....	51
5.3.2 单风机电力系统状态脆弱性分析 .....	53
5.3.3 单风机电力系统综合脆弱性分析 .....	56
5.4 多风机电力系统脆弱性分析评估 .....	57
5.4.1 双风机与单风机系统脆弱性比较 .....	57
5.4.2 多风机电力系统脆弱性分析评估 .....	58
5.5 其他风力发电系统的脆弱性分析 .....	59
5.5.1 <i>IEEE118</i> 风力发电系统的模型 .....	59
5.5.2 <i>IEEE118</i> 系统脆弱性分析评估 .....	60
5.6 本章小结 .....	63
第 6 章 总结与展望 .....	64
6.1 全文总结 .....	64
6.2 未来工作展望 .....	64

致谢 .....	66
参考文献 .....	67
附录 A <i>IEEE</i> 118 系统数据 .....	71
A.1 <i>IEEE</i> 118 系统发电节点 .....	71
A.2 <i>IEEE</i> 118 系统负荷节点 .....	72
个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果 .....	73

## 插图索引

图 1.1	技术路线图 .....	6
图 2.1	风力发电系统基本组成 .....	10
图 2.2	变速风力发电功率曲线 .....	12
图 2.3	电网与风机电能质量互相影响 .....	13
图 2.4	风速概率密度分布图 .....	14
图 2.5	鼠笼式恒速电机转速图 .....	15
图 2.6	双馈感应变速电机转速图 .....	15
图 2.7	鼠笼式恒速电机功率图 .....	15
图 2.8	双馈感应变速电机功率图 .....	15
图 2.9	某负荷有功功率改变对其他母线电压影响图 .....	16
图 2.10	某负荷功率改变对母线电压影响图 .....	17
图 2.11	某母线有功功率裕度比较图 .....	17
图 3.1	脆弱性存在的原因 .....	20
图 3.2	电气介数计算流程 .....	23
图 3.3	<i>PangRank</i> 计算流程 .....	25
图 3.4	<i>IEEE14</i> 电网拓扑原理图 .....	26
图 3.5	基于复杂网络的拓扑建模 .....	27
图 3.6	基于 <i>PageRank</i> 的拓扑建模 .....	27
图 3.7	电气介数与 <i>PangRank</i> 计算结果比较图 .....	28
图 3.8	电力系统运行状态图 .....	30
图 3.9	概率潮流计算流程图 .....	32
图 3.10	随机性风速下的概率潮流 .....	33
图 3.11	随机性风速、负荷下的概率潮流 .....	34
图 4.1	系统脆弱性综合评估指标集 .....	38
图 4.2	系统脆弱性指标的权重分配图 .....	44
图 4.3	基于 <i>D-S</i> 理论的不确定性推理步骤图 .....	46
图 5.1	<i>IEEE39</i> 系统拓扑示意图 .....	51
图 5.2	<i>IEEE39</i> 系统结构脆弱性结果 .....	53
图 5.3	发电节点 39 接入风电对负荷节点状态脆弱性影响 .....	54
图 5.4	不同风机接入对负荷节点 5 的状态脆弱性影响 .....	55
图 5.5	相同功率的单风机接入下系统的状态脆弱性 .....	55

图 5.6	单风机接入下负荷节点的综合脆弱性 .....	56
图 5.7	单风机与双风机接入下系统的状态脆弱性 .....	57
图 5.8	风机接入数目对负荷节点 5 的状态脆弱性影响 .....	58
图 5.9	多风机接入下负荷节点的综合脆弱性 .....	59
图 5.10	<i>IEEE</i> 118 拓扑示意图 .....	60
图 5.11	<i>IEEE</i> 118 系统结构脆弱性 .....	61
图 5.12	<i>IEEE</i> 118 多风机电力系统部分负荷节点的综合脆弱性 .....	63



## 表格索引

表 2.1	风电机组的优点和缺点比较.....	11
表 3.1	互联网与电网的 <i>PageRank</i> 拓扑模型比较 .....	24
表 4.1	常用的数据归一化方法 .....	39
表 4.2	判断矩阵 1-9 重要性量化标度 .....	41
表 4.3	平均随机一致性指标 .....	42
表 4.4	系统结构脆弱性评价指标重要性度量 .....	43
表 4.5	系统状态脆弱性评价指标重要性度量 .....	43
表 5.1	<i>IEEE39</i> 系统负荷节点 .....	50
表 5.2	<i>IEEE39</i> 系统发电节点 .....	50
表 5.3	<i>IEEE39</i> 系统结构脆弱性指标 .....	52
表 5.4	<i>IEEE118</i> 单风机电力系统负荷节点综合脆弱性 .....	62
表 A.1	<i>IEEE118</i> 系统发电节点 .....	71
表 A.2	<i>IEEE118</i> 系统负荷节点 .....	72



## 第 1 章 绪论

### 1.1 研究背景与研究意义

现代人类生存亟待解决的两大难题是能源紧缺和环境污染。高速发展的经济使得人类对于能源的需求愈来愈大，然而不可再生能源有限的存储问题与化石燃料带来的环境污染问题却不得不引起关注。因此，新的、清洁的替代能源逐渐进入人们的视线。随着新能源研究技术的不断提高，各国的能源与电力发展都面临着转型的挑战。在众多可再生能源中，风电作为最具竞争力的重要能源，因为它从发展速度上来说是最快速的，具有丰富蕴藏量、无污染、可再生、分布广等特性，在世界范围内越来越被广泛应用。

我国的风能资源储量丰富，分布广泛，自 1995 年开始开展风电产业以来，风力发电的安装量和累计容量持续增长逐渐占世界领先地位。据统计，2018 年 1–9 月，全国新增风电并网容量 1261 万千瓦，到 9 月底累计风电并网容量达到 1.76 亿千瓦。1–9 月，全国风电发电量 2676 亿千瓦时，同比增长 26%，平均利用小时数 1565 小时，同比增加 178 小时，全国弃风电量 222 亿千瓦时，同比减少 74 亿千瓦时。

虽然我国风电领域得到较为快速的发展，但是与风电相关的技术难题也随之凸显。相比于其他电能，风电自身具有的波动性、随机性等特点，使得风电的接入增加了系统调度决策的难度，降低了局部电网的电能质量，加剧了系统安全运行的不确定性。具体为风电的接入会使得电力系统的潮流状态发生不可逆转的改变，并且随着风电渗透率的增加，即同步发电机数目减少，由于风电机组的惯性相对同步发电机而言小得多从而导致整个系统的惯性减小，系统抵御外界环境变化、负荷突然变化、短路、断路等扰动的能力下降，使得系统的脆弱性愈易暴露<sup>[1]</sup>。

近年来，随着风能、潮汐能、光能等可再生能源接入电力系统，在系统运行中，使得系统潜在脆弱性凸显的趋势大增，这将严重威胁电力系统的安全可靠运行，许多的专家学者也越来越重视系统的脆弱性研究。由于含风电电力系统的工作状态受外界环境的影响极大，地理气候的变化和负荷需求的扰动都会引起系统状态的改变，影响输送的电能质量。这种潜在的系统脆弱性特征会对电能质量的安全可靠造成严重威胁，因此有必要在电力系统评估阶段对系统潜在的脆弱性进行分析，找出系统脆弱性高的节点，并针对系统的薄弱环节采取措施进行优化。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 脆弱性研究起源及现状

脆弱性一词来自拉丁文，意思是“可能受伤”，英文 *vulnerability*，最初来源于流行病学领域，描述的是哪些地区更容易发生流行病或易被流行病感染<sup>[2, 3]</sup>。20 世纪 70 年代开始，专家逐渐将脆弱性一词用来研究生态领域<sup>[4]</sup>；80 年代脆弱性已在全球环境生态变化和可持续发展研究中频繁出现，并逐渐延伸到灾害学以及社会经济系统领域。

近几年来，国外对于脆弱性的研究涉及多个系统领域，有学者通过研究食品安全的脆弱性驱动来源、易受攻击系统和脆弱的类型确定食品系统脆弱性的概念<sup>[5, 6]</sup>。有学者认为脆弱性研究的方法是社会科学家之间的鸿沟，他们倾向于把脆弱性视为一组社会经济因素<sup>[7]</sup>，而自然科学家则将脆弱性视为风险因素的损失程度<sup>[8-10]</sup>。气候研究员提出了一个城市尺度的气候变化脆弱性评估方法，它考虑了三个主要组成部分：暴露、灵敏度和适应能力<sup>[11]</sup>，通过分析物理和社会脆弱性，试图弥合科学和人文学者之间的鸿沟，并将分析结果纳入更广泛的脆弱性背景中。有文献提出了一种基于多数规则排序方法的分类模型来评估安全关键系统（例如核电站）对恶意故意行为的脆弱性<sup>[12]</sup>。地理学者探讨了地理信息系统（GIS）为基础的发展对沿海脆弱性和规定的建议城市规划在沿海地区在地方层面的脆弱性评估工具<sup>[13]</sup>。P.M. Makila 等人对控制系统因系统零极点导致的脆弱性现象进行了研究和分析，并针对  $H_2$  及  $H_\infty$  等鲁棒优化控制器在外部扰动作用下产生不稳定的现象进行分析与研究<sup>[14]</sup>。Iury Bessa, Hussama Ismail 以及 Reinaldo Palhares 等人针对数字控制系统的不确定性进行分析并提出了数字系统脆弱性镇定的概念<sup>[15]</sup>。

从 20 世纪 50 年代开始，中国学者开始对脆弱性理论进行了研究，脆弱性一词首先出现在计算机网络、社会经济体系以及生物遗产等领域。随着中国社会、经济的全面发展，中国学者对脆弱性的研究越来越频繁，其中在自然灾害<sup>[16, 17]</sup>、社会系统<sup>[18, 19]</sup>、生态系统<sup>[20-22]</sup>、经济系统<sup>[23, 24]</sup>、地下水资源<sup>[25, 26]</sup>、石油资源<sup>[27, 28]</sup>以及交通系统<sup>[29-31]</sup> 等方面进行了广泛研究，涉及到了多个学科。大多数学者观点认为脆弱性是一种系统本身固有的属性，是由于系统内部或外部扰动引起的，系统本身对扰动有一定的敏感性以及对扰动欠缺相应的应对能力或者恢复能力，从而导致系统的状态和功能发生变化。因此，脆弱性在系统绝对无扰动情况下不会表现出来，只有当系统存在扰动才会表现。系统脆弱性主要是由于系统结构和系统特征决定的，而外界的扰动作用于系统上会改变脆弱性的大小，这种脆弱性的变化最终体现在系统对扰动的灵敏性和恢复能力上。

### 1.2.2 电力系统脆弱性研究现状

电力系统是指由发电环节、变电环节、输电环节、配电环节和用电环节等组成的电能生产与消费系统。1974年 Petroianu 等学者最早提出了电网脆弱性的定义, 然后 1994 年 A.AFouad 等学者提出了电力系统脆弱性的相关概念<sup>[32]</sup>。有学者认为攻击和破坏等扰动施加于正常运行的电力系统, 其抗干扰能力和能否将正常运行状态持续下去的能力称为电力系统脆弱性<sup>[33]</sup>。还有学者将电力系统在外界的不确定因素比如气候、地理、人为破坏等因素的影响下, 自身内部某些环节坑内容易发生故障, 影响电网稳定运行, 这些内容易发生故障的环节称为系统脆弱点<sup>[34]</sup>。

对于电力系统的脆弱性定义不同的学者有不同的见解, 但是通过大量相关文献可以发现有关电力系统脆弱性的研究内容可分为以下三种:

- 分析电力系统脆弱性原理
- 根据相关脆弱性指标展开评估
- 针对脆弱性提出相应的管理机制与安全对策

而针对电力系统脆弱性的分析有两种: 一种是从电力系统的运行状态评估, 另一种则是从电力系统的网架结构评估, 即结构脆弱性和状态脆弱性。

电力系统脆弱性指标要求能从不同方面显示系统的能承受扰动的能力<sup>[35]</sup>, 文献中对脆弱性指标提出了下列要求:

- 指标能够反映出电网在非故障情况下的脆弱环节集合
- 指标能反映出电网在扰动情况下能承受扰动冲击的脆弱程度
- 指标能反映电网在连锁故障的情况下可能路径及发生概率

文章中常见的针对电力系统状态脆弱性指标有: 能量裕度指标、节点电压指标、系统频率指标、发电机功角指标。针对电力系统结构脆弱性指标有: 平均路径长度、节点的度、聚类系数、介数、网络冗余、最有效路径的效能、系统全局效能等。

电力系统脆弱性评估常用的方法有: 基于复杂网络分析评估法、基于暂稳脆弱性评估法和基于概率风险的脆弱性评估法。基于复杂网络分析评估法是以复杂网络为基础, 从电网拓扑结构角度分析故障的传播机理<sup>[36-38]</sup>。基于暂稳脆弱性评估法主要研究的是电力系统在暂态过程中是否能够保持在稳定的状态, 此类方法主要包括基于暂态能量函数的脆弱性评估方法<sup>[39]</sup>和基于关键割集法的脆弱性评估方法<sup>[40]</sup>。基于概率风险的脆弱性评估法具体包括确定性评估法<sup>[41]</sup>、概率性评估法<sup>[42, 43]</sup>、风险评估法<sup>[44-46]</sup>、基于蒙特卡罗模拟的脆弱性评估法<sup>[47]</sup>, 这些方法都通过概率统计的方法对系统的脆弱性进行评估。

### 1.2.3 含风电电力系统的研究现状

近几年含风电电力系统的性能研究引起了较多人的关注，目前这方面的研究主要集中在稳定性<sup>[48-50]</sup>和可靠性<sup>[51-53]</sup>的方面。有学者通过分析影响风力发电的因素对系统进行建模，找出了外界影响发电系统参数变化的原因，分析系统的稳定性<sup>[54]</sup>。有学者通过研究风力发电机组并网对电路系统造成的影响，分析使得系统稳定性受影响的因素<sup>[55]</sup>。还有学者对风电高渗透率系统的暂态稳定性进行风险评估<sup>[56]</sup>。对于风力发电系统的可靠性研究，有学者对系统的可靠性建模并提出优化检修策略<sup>[57]</sup>。有学者用相同容量的发电机等效替代风电机“组串”，并根据元件状态特性对系统可靠性状态进行划分，最后建立时间、出力、系统等指标体系对系统可靠性进行评<sup>[58]</sup>。还有学者通过归纳系统故障机制，提出基于马尔可夫维修模型的可靠性分析方法<sup>[59]</sup>。

关于含风电电力系统的脆弱性的研究，不同的学者的研究方法和关注点都不同，但思路大致都是找到导致系统脆弱的因素，再采用合适的方法进行评估。有学者通过对研究大规模风电接入的导致系统发生的级联故障对系统进行脆弱性评估<sup>[60, 61]</sup>，主要包括风电穿透率和不确定性引起故障的影响。有学者通过研究风机变换器的设计原理对其产生电能的频率的影响来研究系统的脆弱性<sup>[62]</sup>。有学者认为含风电的系统的状态脆弱性体现在短路容量裕度的参数变化上面，因为该参数体现了系统抵御级联性扰动或故障的能力<sup>[63]</sup>，通过计算短路容量裕度来评估系统的脆弱性。有学者综合考虑不同规模 and 不同并网点的风电场随机扰动性、发电机的随即故障停运率以及负荷的随机波动下，基于半不变量和 *Gram-Charlier* 技术的输电网概率潮流的方法进行评估<sup>[64]</sup>，该方法主要针对系统性能上的脆弱性，没有考虑拓扑的影响。还有学者通过断线扰动使用非线性保留算法评估系统的状态脆弱性，结构上基于复杂网络相关研究对系统整体进行评估<sup>[65]</sup>，该方法没有考虑到随机性风速本身导致系统的脆弱性特质，脆弱性的评估不太全面。有学者分别基于电气介数、拉丁超立方抽样的概率潮流和环境经济调度方面对含风电的电力系统进行风险评估<sup>[66]</sup>，评估的方面很周到，但是没有建立评估方向之间的关系和对应的量化评估体系。

含风电电力系统原理复杂、影响因素多，而系统的脆弱性研究目前业内还没有一个统一标准的脆弱性的定义，研究者的关注点不同得到的系统脆弱性的定义就不同。含风电电力系统脆弱性的分析主要关注点在于电能质量的稳定性与系统性能，因此本文在研究了含风电电力系统的工作环境背景下，给出含风电电力系统脆弱性概念，包括结构脆弱性定义和状态脆弱性定义，在此基础上构建含风电电力系统脆弱性的分析理论与量化评估的数学模型。

## 1.3 研究内容与研究路线

### 1.3.1 待解决的问题

对于含风电电力系统的脆弱性分析与量化评估的研究至今依然存在很多待解决的问题，如：

- (1) 脆弱性概念是近几年引入含风电电力系统的新理论，对于含风电电力系统的脆弱性描述尚不清晰；
- (2) 含风电电力系统中的脆弱性研究虽然考虑了风电接入的影响，但是在脆弱性方面却考虑的不够全面；
- (3) 对于含风电电力系统脆弱程度的分析与研究较少，脆弱性量化分析的相关研究未形成严格的理论体系。

### 1.3.2 研究内容与思路

研究含风电电力系统的脆弱性，首先需要了解风力发电特性从而将风力发电系统进行简化。而整个风电系统运行中，风速、负荷的变化都会给系统造成不容忽视的影响，因此，有必要研究风速和负荷的影响，在此基础上建立其各自的变化模型。

其次，针对含风电电力系统，需要通过分析系统脆弱性存在的原因得出系统的脆弱性本质以及其数学描述，进而得出一个较为清晰的系统脆弱性概念。根据脆弱性的定义，分别从系统的结构和系统的状态两个角度对脆弱性进行分析研究，得到系统的脆弱性理论。

获得含风电电力系统的脆弱性量化指标，需要针对脆弱性的定义选取指标并分析语义。在此基础上用合适的方法分别逐层进行量化融合，最终得到系统的综合脆弱性，至此系统脆弱性量化评估指标体系建立完成。

最后，以 *IEEE39* 和 *IEEE118* 系统数据为例，分别研究了单风机接入和多风机接入的情况下，系统的结构脆弱性与状态脆弱性量化分析的结果，识别出该系统的薄弱环节，为以后的系统优化设计做铺垫。

通过以上的研究工作，完成了含风电电力系统脆弱性分析与量化评估的理论研究及实验验证与分析，具体的技术路线图如下所示。

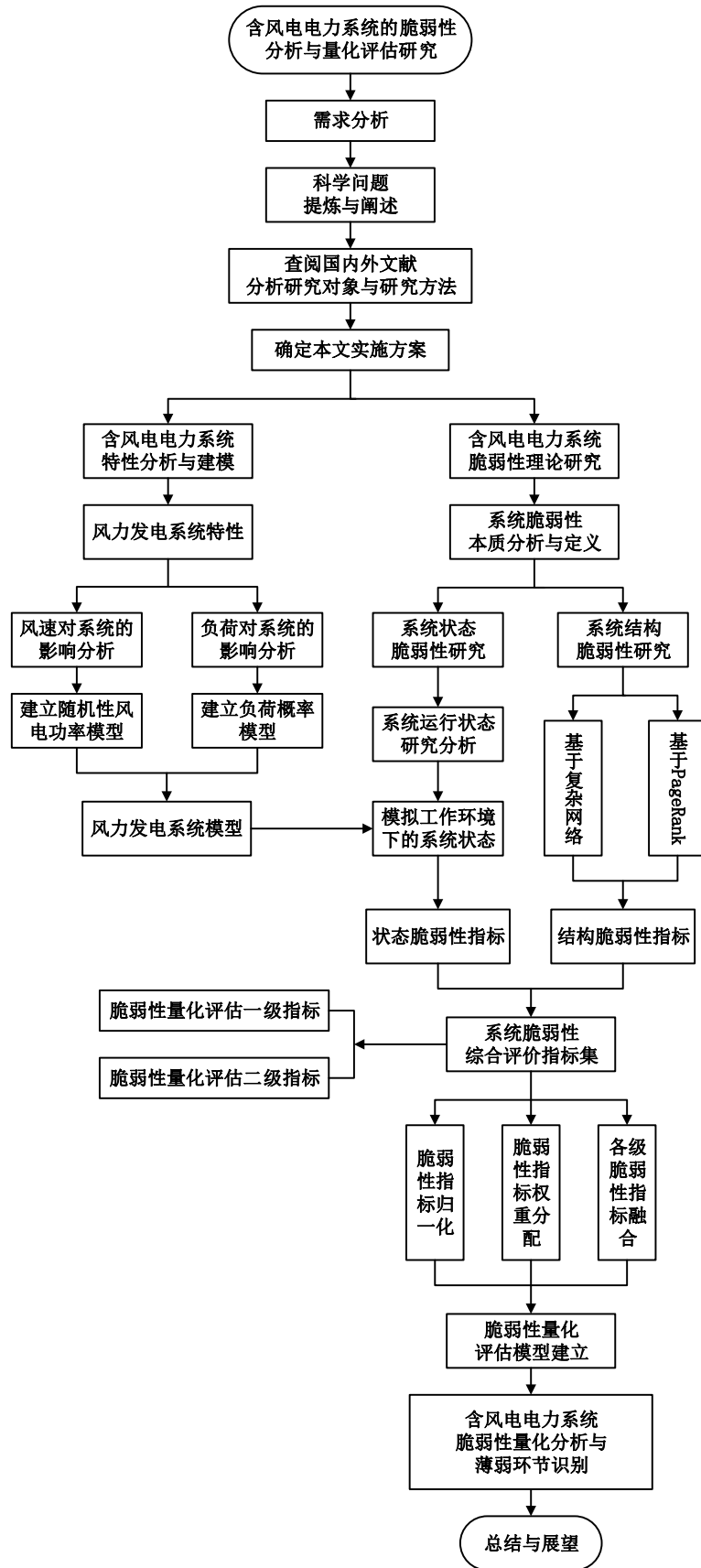


图 1.1 技术路线图



### 1.3.3 本文章节安排

本文针对含风电电力系统脆弱性分析与量化研究中待解决的问题，在研究了系统的特性与模型的基础上，给出了较为科学的含风电电力系统脆弱性定义。针对定义分别从系统结构与系统状态两方面进行脆弱性理论分析。根据结构脆弱性和状态脆弱性的理论研究进行脆弱性指标选取，从而建立系统脆弱性综合评估指标集。分别对一级脆弱性指标和二级脆弱性指标进行量化、权重分配、指标融合形成了含风电电力系统脆弱性量化模型。并且以 *IEEE39* 系统数据为例进行含风电电力系统的脆弱性分析与量化，识别系统的薄弱环节。本文的章节安排如下：

第1章：查阅国内外“风力发电”、“脆弱性分析”等相关领域研究文献与论文，对脆弱性概念的起源与发展以及脆弱性在电力系统的研究现状做了详细的调研与综述，为后续研究含风电电力系统脆弱性与量化分析方法提供必要的理论依据。在明确研究对象的基础上，科学提炼出待解决的问题，确定研究方法、目标和技术路线；

第2章：研究了风力发电系统的原理及组成，对风力发电机的性能进行了分析，在此基础上建立了变速风电机组的功率曲线。通过查阅文献资料，在研究了风能接入对电能质量影响的基础上，建立了随机性风电功率模型。同时，通过比较负荷的变化导致风电电力系统与普通电力系统的变化，得出了负荷对风电电力系统的影响并建立了负荷概率模型；

第3章：通过研究含风电电力系统自身存在脆弱性的原因，得出系统脆弱性的本质和系统脆弱性的数学描述，在此基础上，结合前人的研究，得到了含风电电力系统的脆弱性的定义。分别从系统的结构和系统的状态两个角度对脆弱性进行分析研究。结构脆弱性从系统拓扑的角度，研究了系统在运行中，保持其拓扑完整性的能力。而状态脆弱性则专注研究外界环境的变化使系统暴露出的缺陷，即向坏的方向发展的趋势；

第4章：针对结构脆弱性与状态脆弱性，分别根据各自脆弱性的定义与特征选取能够反映其脆弱现象的评价指标，结合综合评价法及多指标融合法，建立了系统脆弱性量化评估的数学模型。解决了系统脆弱性现象难以量化的问题，为后续分析含风电电力系统脆弱性问题奠定了理论基础；

第5章：以 *IEEE39* 电力系统为例，在系统模型建立的基础上，分别研究了单风机接入和多风机接入下系统的脆弱性。单风机接入的情况下，研究了系统的结构脆弱性，并且对比了不同风机接入下系统的状态脆弱性，最终得到单风机系统的综合脆弱性。多风机接入的情况下，首先对比了双风机与单风机系统的脆弱性，再对多风机系统的脆弱性进行分析。最后，使用不同的电力系统数据进行

脆弱性量化分析；

第 6 章：总结本文的研究工作，对本文中含风电电力系统脆弱性分析与量化数学模型的优点和不足进行了详细的阐述，并为后续研究工作提出了若干点建议与展望。

## 第2章 风力发电系统特性研究与建模

### 2.1 引言

研究风力发电，就是对其基本原理和系统特性进行分析。风力发电系统本质上就是一个能量转化系统，在能量转化的过程中，重点研究区别于其他能量的风能在其中扮演的角色。作为主要部件的风力发电机决定了风能和机械能的转化方式及运行特点。而整个风电系统运行中，风速、负荷的变化都会给系统造成不容忽视的影响，因此，有必要研究风速和负荷的影响，在此基础上建立其各自的变化模型。

本章对风力发电系统的基本原理进行了阐述，研究了核心部件的风力发电机的特性与作用，在此基础上建立风机功率模型。基于风速变化的随机性和易变性，建立了风速变化模型。使用 MATLAB 电力系统分析与控制的仿真工具箱对恒速电机和变速电机的输出功率性能进行了比较验证，证明变速发电机的输出电能质量高，控制能力好。

此外，本文分别研究了负荷的变化对普通电力系统和含风电的电力系统的不同的影响，通过对比，得到了负荷的变化对含风电的电力系统的特殊影响。其中，负荷的变化包括有功功率的变化和无功功率的变化。本文还研究了负荷的变化对系统中不同节点的影响。最后，根据负荷需求的特点，建立了负荷变化的概率模型。

### 2.2 风力发电系统基本组成研究

风力发电是一种通过风电机将气体动能转化为机械动能再借此生成电能的机制。风能作为一种可再生的清洁能源具有其他不可再生资源无可比拟的优点。因此，研究风力发电的原理以及各个组成成分对于系统的后续建模具有重要的意义。

#### 2.2.1 风力发电系统基本组成

风力发电系统通过风轮把从风中捕获的动能转化为风机的机械转矩，然后再通过发电机把机械能转化为电能。该系统由空气动力装置，机械装置，电气装置和控制装置等共同组成。如图 2.1 所示，完整的一个风力发电系统主要由风轮、齿轮箱、发电机、电力电子装置、变压器以及消耗电能的负荷设备共同组成。其

中，电网指的是发电机生产的电能被输送、分配的网络，而系统中有些设备的装置则根据实际发电机的类型和并网方式而变化。

风力发电系统根据发电机的运行特性和控制技术，可以分为恒速恒频风力发电系统和变速恒频风力发电系统。恒速恒频风力发电系统是 20 世纪 80 年代和 90 年代盛行的风力发电系统。这种系统典型的风电机是笼型感应发电机，由于该风电机组并网运行后，发电机磁场旋转速度由电网频率确定，发电机转速变化范围很小，转差率为 3% – 5%，故为恒速恒频。

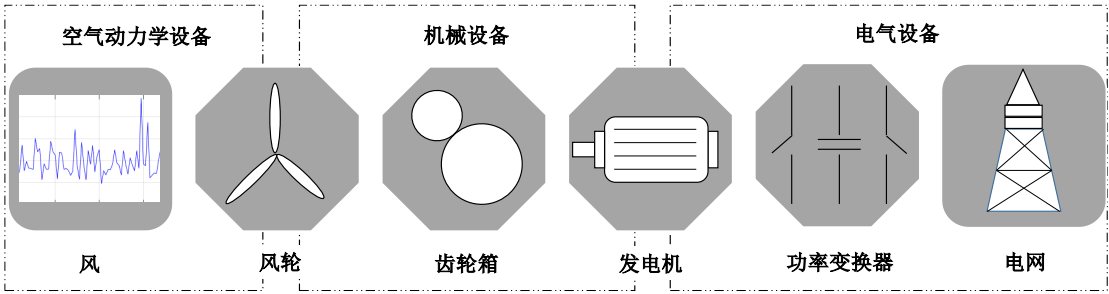


图 2.1 风力发电系统基本组成

变速恒频风力发电系统是 20 世纪 70 年代中后期发展起来的新型发电技术，因为克服了恒速恒频风力发电系统的缺陷而逐渐成为市场上的主流机型。变速恒频风力发电系统能够在风速较宽的范围内变速运行，大大提高了风能转化的效率。其变速的方法按照电力电子装置在风力发电系统中所处的位置或容量大小分为，全功率变换器变速恒频风力发电系统和部分功率变换器变速恒频风力发电系统。

### 2.2.2 风力发电机性能分析

目前市场上常用的风电机组有以下三种，分别是鼠笼式感应发电机、双馈感应发电机和直驱式同步发电机。鼠笼式感应电机是恒速风力发电系统的经典发电机，该发电机转速为常值。鼠笼式感应电机结构简单，成本较低，但是风机的转速不能随风速而变化，导致风能利用效率低。此外，鼠笼式感应电机运行时需要消耗无功功率，需要强大的网络才能稳定运行，因此大多情况下都不采用该电机。

双馈感应发电机和直驱式同步发电机都是变速恒频风力发电系统。双馈感应发电机采用的背靠背功率变换器可以通过改变励磁电流的频率和相位来调节发电机的有功功率和无功功率。直驱式同步发电机的转子为永磁式结构，无需提供外部电源，提高了效率。定子电路将发电机输出的变频交流电通过功率转换器转变为电网同侧的交流电实现了其变速恒频的控制。三种风力发电机的优缺点如表 2.1，故此，本文重点研究的是变速风力发电系统的特性。

表 2.1 风电机组的优点和缺点比较

优缺点	鼠笼式感应发电机	双馈感应发电机	直驱式同步发电机
优点	结构简单鲁棒性好 控制方便造价低 控制方便	发电机调速范围宽 风能利用效率高 电能质量高 并网简单无冲击电流	风力机直接驱动 无需齿轮箱 无需励磁装置 无需升压变压器
缺点	机械载荷沉重 需要无功补偿装置 直接并网电流冲击大	双向变换器控制复杂 变换器过载能力差	技术尚不成熟 材料性能稳定性要求高 发电机组成本高

### 2.2.3 变速风电机组功率曲线

从风电机组的工作原理可知，风电机组发出的有功功率和风能的变化有很大关系。根据相关研究，风电机组从空气流量中捕获的有效输出功率可用公式 (2.1) 表示：

$$P_w = \frac{\rho}{2} c_p(\lambda, \theta) A_r v_w^3 \quad (2.1)$$

式中， $P_w$  为从空气流量中捕获的有效输出功率

$\rho$  为流体密度

$c_p$  为功率系数

$v_w$  为气流速度

$\lambda$  为桨叶叶尖速比，风轮叶片的叶尖线速度与风速之比

$\theta$  为风轮桨叶节距角

$A_r$  为流体流过的截面积

从公式 (2.1) 可知，风能的大小与风的速度的立方、风的密度均成正比，因此风能的变化直接影响到风电机组的输出功率。而流体密度  $\rho$  与气流速度  $v_w$  受地理位置，海拔，地形等因素影响较大。本文着重研究风能的速度对系统的影响。当风速较低时，由于气流中蕴含的能量太少所以风电机组并不会发电，故而此时功率输出为 0。只有风速大于一定的风速时，风电机组才会开始工作，此时的风速被称为切入风速（一般为 3-5 m/s）。

当风速介于切入风速和额定风速之间时，发电机的输出完全取决于风速大小。额定风速指的是使发电机输出额定功率的风速，一般界于 11 m/s - 16 m/s，具体取决于发电系统的转子设计和额定输出功率。当风速逐渐增大超过额定风速时，受风机转速极限、功率极限等限制，必须依靠机械调节桨叶节距角来降低功率系数  $c_p$ 。当风速非常非常大时，气流中的能量与风轮的机械强度随之增大，出于保护风电机组，这种情况下风机无法运行，只能自动退出，此时的速度称为

切出速度。

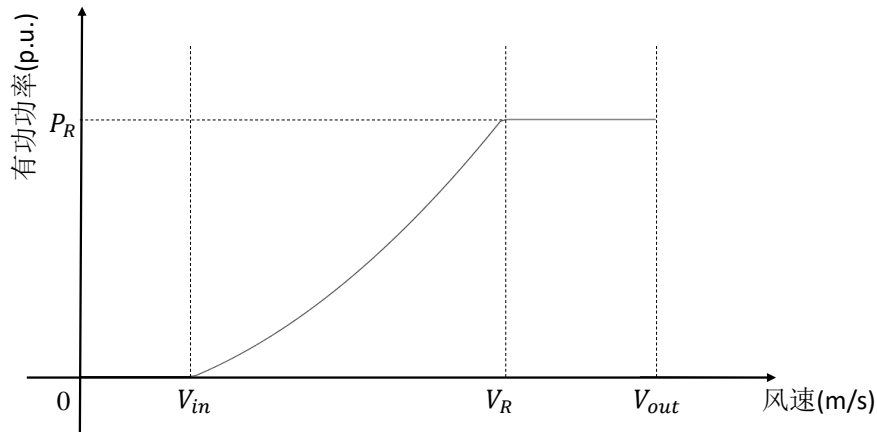


图 2.2 变速风力发电功率曲线

风速与风机输出功率之间的关系可用风机功率曲线表示，如图 2.2。其中  $V_{in}$  为切入风速， $V_R$  为额定风速， $V_{out}$  为切出风速， $P_R$  为额定功率。图中可以看出，风速在切入风速与额定风速之间时，变速风电机通过调节风电机的叶尖速比来控制功率系数  $c_p$  实现最大风能捕获。然而，根据贝兹原理最大风能利用功率系数可知，理论上风能利用系数极限为 0.593，因此目前风机的实际风能利用系数均小于该值。

## 2.3 风电功率模型的建立

风能的接入会对电力系统产生不同的影响，主要是电能的质量，而电能质量中影响较大因素的是支路潮流和节点电压。针对这些影响，在查阅资料的基础上首先建立了风速概率模型，再根据变速风机功率曲线建立了风电功率模型。最后在 *MATLAB* 中对恒速风电机和变速风电机进行了仿真验证，得出变速电机的风力利用率高且输出功率平滑的特点。

### 2.3.1 风能接入对电能质量的影响

使用风力发电对电能质量的影响主要在以下几方面：

- (1) 支流潮流和节点电压
- (2) 故障电流
- (3) 谐波和闪变

新能源接入电力系统后，由于原动机性质和并网方式的改变，都会对电力系统的支流潮流和节点电压造成影响。故障电流对于变速风力发电系统而言，由于功率转换器的采样频率很高，使得当故障发生时风机可以及时被切断，故而该响

应时间极短。由于风力发电并网时使用了功率转换器，会导致电力系统产生少量谐波的影响，由于现代转换器的高转换频率和先进控制技术，使得谐波对电力系统的影响微乎其微。

实际上风电场和电网是相互作用的，不仅风机组会影响电网，电网也会对风机组有影响。由于输电网或配电网的故障，导致风电场接入点的电压降低或者升高，使系统不能正常稳定运行。比如电压过低使得风电机过速，导致网络电压进一步降低，导致控制电路动作跳开。风机的连续运行或开断操作都有可能引起电压闪变。由于本文研究重点非恒速风力发电，故功率输出较平稳，较少出现闪变的现象。因此，风力发电对电能质量的影响主要为支流潮流和节点电压的变化。

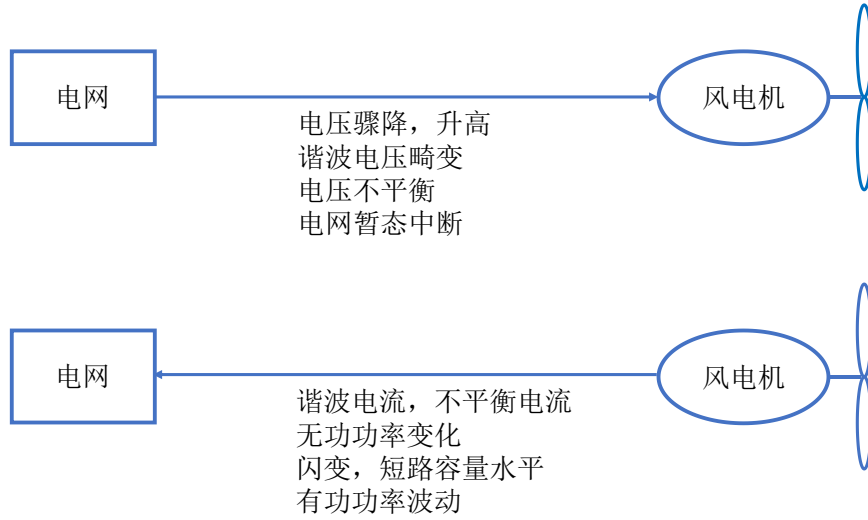


图 2.3 电网与风机电能质量互相影响

### 2.3.2 随机性风电功率模型

考虑到风速变化的复杂性和风速测量数据的准确性，本文对风速的概率分布进行建模。为了简化风速变化的同时尽可能精确的描述风能的随机性的特点，决定用两参数的韦伯分布来表示风速的概率分布。

$$f(v) = \frac{k}{c} \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left[ - \left( \frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (2.2)$$

式中， $v$  为实际风速

$c$  为比例参数

$k$  为形状参数

由 2.2.3 节可知，风电机组产生的功率随风速的变化而变化。其中，当风速在切入速度与切出速度之外时，由于风机的设计原理和安全性考虑，风电机组不会输出有效功率。风速在切入速度和额定速度之间时，理论上输出功率和风速的

立方成正比，实际上受贝兹极限的影响，功率转化因子小于 0.593，故可简化为一个二阶函数。风速大于额定速度后，风电机组的输出功率保持恒定，即额定功率。据此，可得到风机输出有效功率随风速变化的函数：

$$P(v) = \begin{cases} 0, & v < v_{in}, v > v_{out} \\ \left( \frac{v_{in}^2 - v^2}{v_{in}^2 - v_R^2} \right) P_R, & v_{in} \leq v < v_R \\ P_R, & v_R \leq v < v_{out} \end{cases} \quad (2.3)$$

式中， $P_R$  为风机额定功率

$v_{in}$  为切入风速

$v_R$  为额定风速

$v_{out}$  为切出风速

### 2.3.3 风电功率模型仿真与验证

根据上一节的理论分析，采用 *MATLAB* 中电力系统分析与控制的仿真工具箱 *PSAT* 对风电场的运行进行仿真和验证。其中，模拟风速变化的韦伯分布的两个系数  $c$  和  $k$  分别取值 20 和 2，得到风速的变化曲线，风速均值为 15 m/s。实验仿真对不同类型的风机进行了模拟，主要是恒速发电机和变速发电机。其中恒速发电机采用经典的鼠笼式恒速电机，而变速发电机则采用当下最常用的双馈感应变速电机。

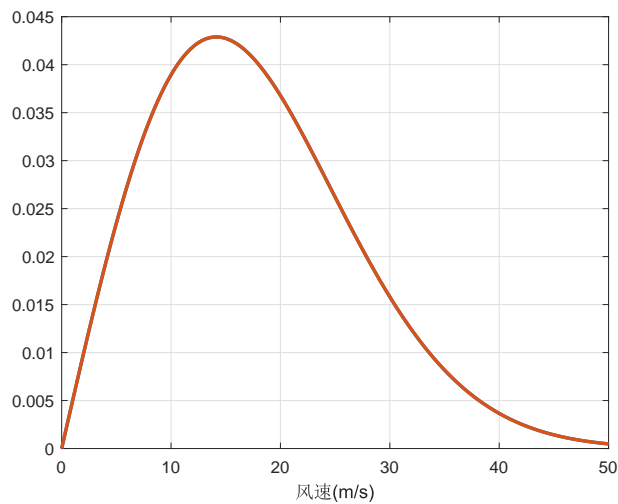


图 2.4 风速概率密度分布图

图2.5和图2.6表示的是一段时间内，随机性风速的变化对应的电机转速的变化曲线。鼠笼式恒速电机在整个风速变化的过程中，发动机的转速变化最大只



有  $0.0014 \text{ p.u.}$ ，而双馈感应变速电机的转速变化峰值为  $0.0057 \text{ p.u.}$ 。这是因为恒速发电机的转速理论上不随风速的变化而变化，这样使得恒速发电机的输出功率与风速的变化关系不太大。因此恒速发电机原理简单可靠，但是同时也导致风能浪费，有效利用率低下。相比之下，变速发电机的转速会随着风速的变化而变化，从而能够有效利用风能。

图2.7和图2.8分别表示是对应的风机功率的变化曲线。其中鼠笼式恒速电机输出功率的变化峰值为  $0.0166$ ，而双馈感应变速电机的输出功率变化峰值为  $0.0033$ 。这是因为恒速电机的转速恒定，风速的波动会进一步转成机械转矩的波动而导致输出功率的波动，由此可见其对电能质量的控制非常有限。相比之下，变速电机风能转换率高，经过功率变换器的调节使得输出功率平滑，输出的电能质量好。

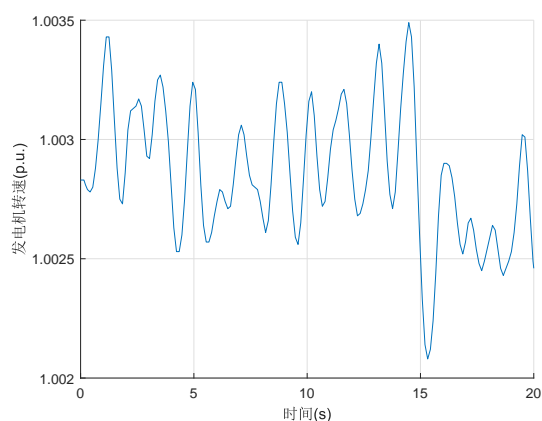


图 2.5 鼠笼式恒速电机转速图

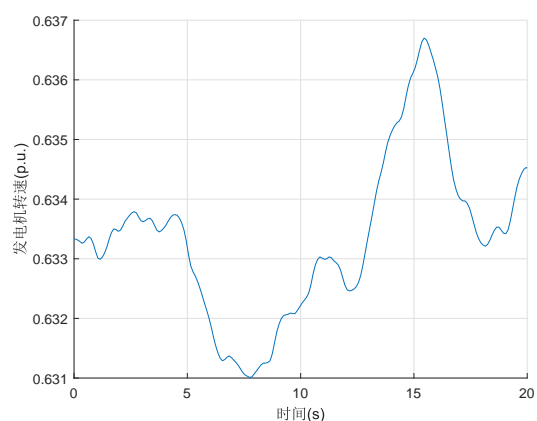


图 2.6 双馈感应变速电机转速图

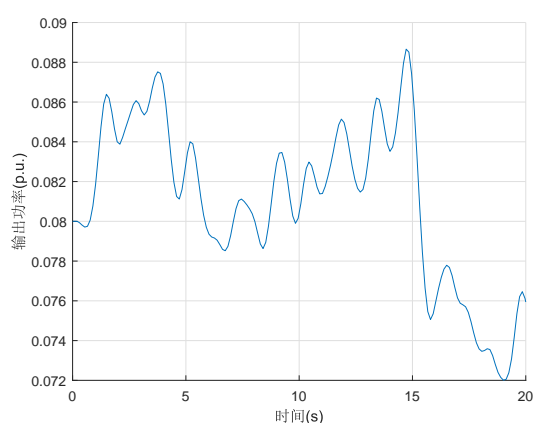


图 2.7 鼠笼式恒速电机功率图

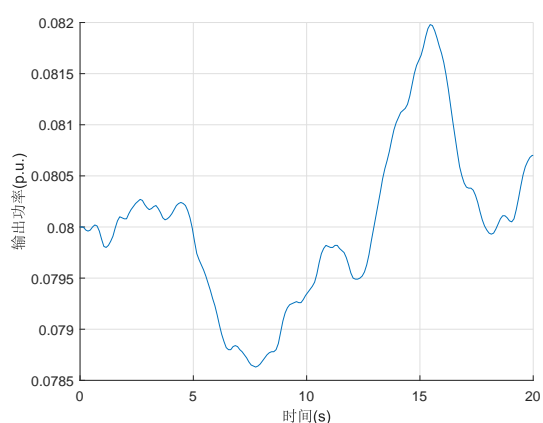


图 2.8 双馈感应变速电机功率图

## 2.4 负荷概率模型的建立

### 2.4.1 负荷对风电电力系统的影响

风电电力系统的负荷来源是发电负荷，发电负荷被用于发电厂消耗和供电。供电负荷又被用于电网功率消耗和用户的综合用电。本文研究的重点是综合用电负荷，电力系统中的综合用电负荷指的是电网负荷端用户的所有用电设备消耗的功率总和，包括电动机、照明系统、电流设备等其他设备消耗系统。在实际操作中，为了简化，通常将一条母线上连接的所有消耗设备等效为总和负荷进行计算。

普通发电系统中，当某个负荷功率增加时，对其他节点的电压幅值的影响如下图2.9。由图可见，存在一个功率极限值，该点意味着负荷功率不能无限增长，已经到达了使系统运行的临界点。对应的功率  $P_{max}$  称为有功功率裕度，即对于电力系统，如果该负荷的功率再增大  $P_{max}$ ，则系统则处于临界运行状态。

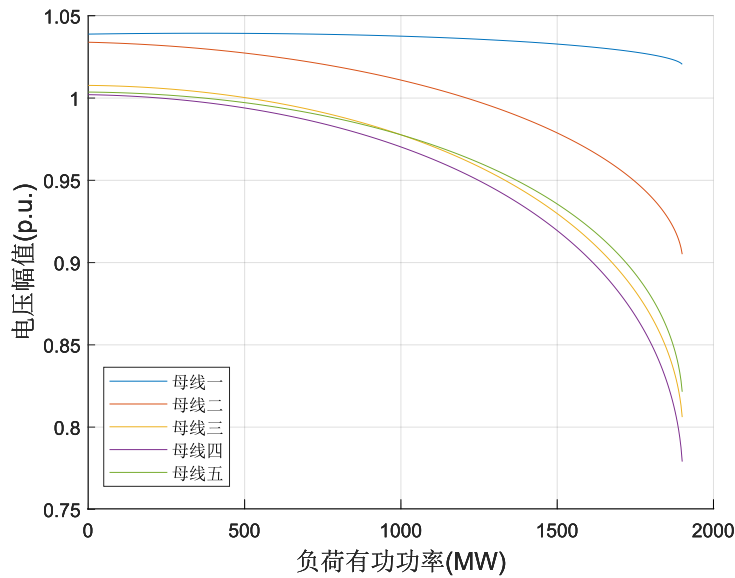


图 2.9 某负荷有功功率改变对其他母线电压影响图

同理，对应的功率  $Q_{max}$  称为无功功率裕度。同时考虑有功功率和无功功率的变化，则会得到一个三维图。如图2.10，该图表现了当某负荷的有功功率和无功功率同时变化时，母线上的电压的变化情况。随着有功功率和无功功率增大，母线的电压逐渐下降。当功率变化超过了功率裕度时，系统不能运行，对应的母线电压也变成了 0。

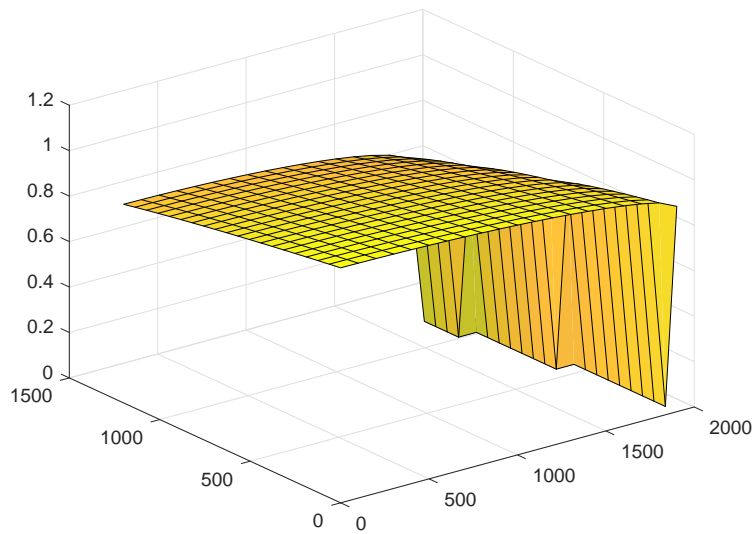


图 2.10 某负荷功率改变对母线电压影响图

根据 *P.Vijayan* 等学者的研究, 在风力发电系统中, 由于风速的波动性和随机性, 当负荷逐渐增大时, 节点的电压会随之变化的同时, 还会受风速的影响而波动<sup>[67]</sup>。所以, 含风电的电力系统的功率极限值要比普通电力系统小, 受风速的影响负荷增大时, 系统临界运行的概率也在增大。二者的比较如图2.11, 对同一个负荷节点的功率进行改变, 得到同一条母线的功率裕度是不同的, 含风电的系统的功率裕度明显小于普通的电力系统。

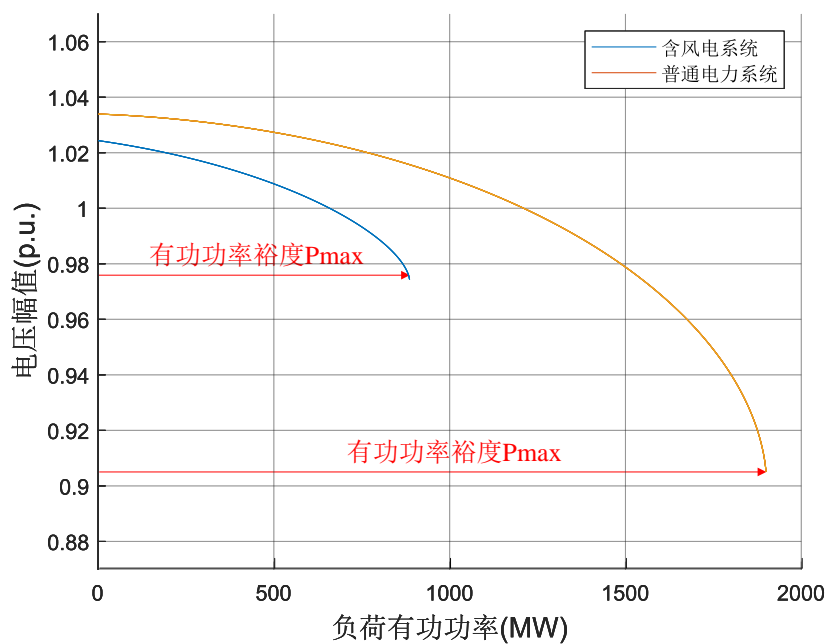


图 2.11 某母线有功功率裕度比较图

## 2.4.2 负荷概率模型的建立

负荷建模的研究往往与实际应用有着很大的关系，因为负荷有着分散性、大量性、时变性的特征。除此之外，还和负荷地区的气候、地理、经济、用户人群的生活习惯与方式有关。因此负荷的特性随区域的不同而有很大不同。针对负荷的建模问题，国内外研究很多，但是由于精准的建模需要长久的现场测量研究，故而负荷建模问题目前还没有一个权威的成果。所以本文决定采用概率的方式来模拟负荷的变化。

根据文献，负荷的功率可以被视为随机变量，该随机变量满足正态分布，其有功功率和无功功率的概率密度函数如下：

$$\begin{cases} f(P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_p} \exp\left(-\frac{(P - \mu_p)^2}{2\sigma_p^2}\right) \\ f(Q) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_Q} \exp\left(-\frac{(Q - \mu_Q)^2}{2\sigma_Q^2}\right) \end{cases} \quad (2.4)$$

式中， $\mu_p$  为负荷有功功率的均值

$\sigma_p$  为负荷有功功率的方差

$\mu_Q$  为负荷无功功率的均值

$\sigma_Q$  为负荷无功功率的方差

## 2.5 本章小结

本章是全文的基础，首先研究了风力发电系统的原理及组成，对其中的重要元素——风力发电机的性能进行了分析，在此基础上建立了变速风电机组的功率曲线。通过查阅文献资料，在研究了风能接入对电能质量影响的基础上，建立了随机性风电功率模型，并在 *MATLAB* 中进行了仿真实验与验证。此外，通过比较负荷的变化导致风电电力系统与普通电力系统的变化，得出了负荷对风电电力系统的影响。最后，在查阅文献资料的基础上建立了负荷概率模型。

## 第3章 含风电电力系统的脆弱性研究

### 3.1 引言

近年来在电力系统的研究领域中,脆弱性一直是个热点的研究课题。许多学者认为系统脆弱性是一种隐形性能,在正常工作时并不显见。一旦外界对系统产生了特定的影响,那么系统的性能参数就会迅速变坏,甚至不能稳定工作。对于含风电的电力系统本身对环境有着较大的依赖性,而其电能质量的输出仍要满足要求,具有脆弱性的系统导致的后果将十分严重。因此,分析含风电电力系统的脆弱性很有必要。

针对含风电电力系统,本章通过分析系统脆弱性存在的原因得出系统的脆弱性本质以及其数学描述,进而得出一个较为清晰的系统脆弱性概念。根据脆弱性的定义,分别从系统的结构和系统的状态两个角度对脆弱性进行分析研究。结构脆弱性从系统拓扑的角度,研究了系统在运行中,保持其拓扑完整性的能力。而状态脆弱性则专注研究外界环境的变化使系统暴露出的缺陷,即向坏的方向发展的趋势。

### 3.2 含风电电力系统脆弱性

对于含风电的电力系统而言,外界环境瞬态多变,在这种情况下,系统会不会暴露出自身的缺点,是该系统的性能分析中重要的一部分。针对系统自身存在的在一定条件下才会暴露的缺陷,本节做了较为深入的探讨。

#### 3.2.1 含风电电力系统脆弱性本质

脆弱性本身是系统的一个隐形特征,在正常工作情况下不会显现。只有针对特定的工作情况或者受到特定的干扰时,系统性能参数才会快速变差,表现出脆弱性的特征。风力发电系统本身就依靠外界风力,对环境的依赖性较强。含风电的电力系统在运行期间,产生的电能的质量除了取决于自身的可靠性和固有能力和组成系统的抗干扰能力也是影响其正常工作的关键因素。

随着风电渗透密度的增大,负荷需求时变性的增大,对系统的考验越来越大。而系统内部拓扑的设计、各母线节点的连接情况,风电功率的特性都将影响着系统的运行状态。如下图,需要在脆弱源、脆弱环节、系统性能之间建立关系,根据性能特点和实际情况来进行脆弱性分析。

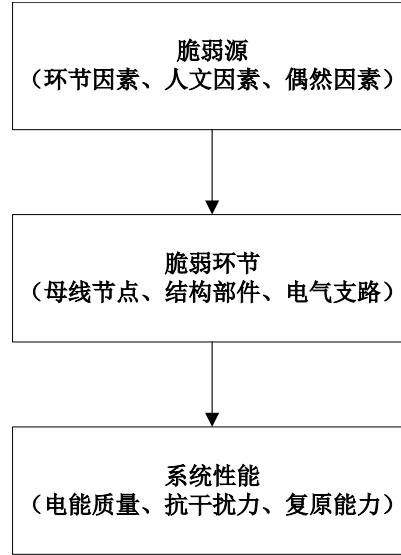


图 3.1 脆弱性存在的原因

对系统的脆弱性分析，主要包括两个环节：

- (1) 通过分析“脆弱源 → 脆弱环节”的关系来判断系统中易受脆弱源影响的节点。
- (2) 通过分析“脆弱环节 → 系统性能”的关系来评估受干扰的脆弱环节对系统性能的影响程度，又可称为脆弱程度。

### 3.2.2 含风电电力系统脆弱性数学描述

特别地，对于含风电电力系统，系统的性能变化的主要原因是风力发电系统参数的变化和外界扰动信号，参数的变化和外界的干扰信号可以看做一个事件对系统发动的“攻击”，这个“攻击”导致系统性能指标下降，那就是脆弱性的表现。

设系统  $S$  的某性能指标  $E$ ，如果存在事件  $I$ ，当它对系统的某个或者某些参数产生影响，使得系统性能指标变化，即

$$E(I^+) - E(I^-) \neq 0 \quad (3.1)$$

则称系统  $S$  具有脆弱性， $I^+$  为脆弱事件发生前， $I^-$  为脆弱事件发生后，导致系统性能改变的根本因素称为脆弱源。

综合上述对含风电电力系统脆弱性本质的研究以及数学描述的探究，本文对含风电电力系统的脆弱性做如下定义：

当系统由于工作环境导致自身部分参数发生改变时，系统承受不确定性的能力迅速变差，这种不易暴露的系统自身的缺陷即为脆弱性。

### 3.3 含风电电力系统结构脆弱性研究

风力发电系统的结构主要指的是除发电机、负荷之外，电能被输送的网络的拓扑。拓扑是整个网络性能的基础，它决定了电能是否能够被安全、有效、可靠的输送到负荷端。但是，受外界环境的干扰、人为干预、不可抗力影响，拓扑的结构并非一成不变，其组成元素都有遭到破坏的可能。因此，有必要衡量拓扑的各个组成元素在结构上的重要性，这对于提前加强防范、预先保护有着重要的意义。

本文在前人研究的基础上对结构脆弱性提出了新的定义：电力系统的结构脆弱性是指电力系统在人为或外界环境的影响下，自身组成因素性能改变后保持系统结构完整的能力。对系统结构完整性贡献的程度高、对拓扑结构关键程度高的组成元素被称为系统结构的脆弱点。因此，对电力系统的结构越重要，影响越大的组成因素的脆弱性越高。

风力发电系统的结构建模有多种，本文分别从复杂网络的角度和互联网网页重要度排序的角度进行研究。前者将电网抽象为一个加权无向图，后者将电网等效为一个有向图。二者出发的角度不同，建模方式不同，但是都从结构上对电网节点的重要性进行了评估。本文对这两种建模方法进行了研究和对比，将各自的模型指标在第四章中进行了融合评估。

#### 3.3.1 基于复杂网络的结构脆弱性研究

复杂网络的基本思想是将一个复杂系统抽象为网络，其中系统中的单个个体被视为网络的节点，而个体之间的联系被视为网络的边，由此建立复杂网络模型。对于含风电电力系统而言，系统中的母线可以被视为节点，而母线之间的电气连接可以被视为边，线路上的阻抗为权重，因此整个系统可以被等效为一个加权无向图<sup>[68-70]</sup>。

复杂网络理论中描述网络的特征参数有特征路径长度、节点度和节点度累计分布、聚类系数、介数和介数分布等<sup>[71]</sup>。其中，度是复杂网络中的一个基本且常用的参数，其公式化的定义如下：

$$k_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N a_{ij} \quad (3.2)$$

其中， $a_{ij}$  为复杂网络邻接矩阵的元素，为 0 代表  $i, j$  不相连，为 1 代表  $i, j$  相连。

对于有权网络，节点度的概念扩展为节点的连接强度，公式定义如下：

$$s_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N w_{ij} \quad (3.3)$$

其中， $w_{ij}$  为节点  $i, j$  之间的连接强度。

两种定义只考虑单方面的度的定义太过片面，第一种侧重于节点的连接数量，适合无权网络；第二种则考虑节点的连接强度，适合有权网络。因此，本文综合考虑节点连接数量与连接强度，结合电力网络的特点，定义“电气度”概念如下：

$$e_i = \sum_{j=1, j \neq i}^N ea_{ij} \cdot ew_{ij} \quad (3.4)$$

其中， $ea_{ij}$  为网络中邻接节点的连接情况，为 0 代表  $i, j$  不相连，为 1 代表  $i, j$  相连。而  $ew_{ij}$  代表支路潮流上的视在功率的大小。电气度衡量了节点在拓扑形成与结构中承担的应力大小，是网络中衡量节点重要性的重要参数。

介数作为复杂网络的关键参数之一，被用来描述节点或者边在信息、能量传递中的重要程度。介数的概念在电力系统被称为电气介数，它反映了网络节点、支路在整个电能输送过程中的贡献程度<sup>[72-74]</sup>。

假设一个电网具有  $a$  个母线节点， $b$  条电气连接的边，那么支路  $l_{mn}$  的电气介数计算公式如下：

$$C_B(m, n) = \left| \sum_{i \in G, j \in D} w_{ij} P_{mn}(i, j) \right| \quad (3.5)$$

其中， $G, D$  分别为发电节点、负荷节点的集合。 $P_{mn}(i, j)$  是单位有功功率注向发电节点  $i$  和负荷节点  $j$  时，支路  $l_{mn}$  上产生的有功功率。 $w_{ij}$  是发电节点  $i$  和负荷节点  $j$  的节点对间传输电能的权重值，大小为  $\min(|P_i|, |P_j|)$ ，分别代表了发电节点  $i$  在发电节点功率总和的比率和负荷节点  $j$  在负荷节点功率总和的比率。

电网中节点的分类分为发电节点，负荷节点，中间节点。所有的功率都是从发电节点向负荷节点传输，因此需要对上述公式进行修正得到如下的节点电气介数计算公式。式 (3.6) 中， $F(k)$  指的是与节点  $k$  相连的所有边的集合， $C_B(k, l)$  为对应支路的电气介数。节点的电气介数与拓扑中所连支路的电气介数有直接



关系。

$$C_B(k) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left( \sum_{l \in F(k)} C_B(k, l) + \sum_{i \in D} w_{ki} \right), & k \in G \\ \frac{1}{2} \left( \sum_{l \in F(k)} C_B(k, l) + \sum_{i \in G} w_{ik} \right), & k \in D \\ \frac{1}{2} \left( \sum_{l \in F(k)} C_B(k, l) \right) & k \notin G, k \notin D \end{cases} \quad (3.6)$$

由此，所有节点的电气介数计算流程如图3.2。

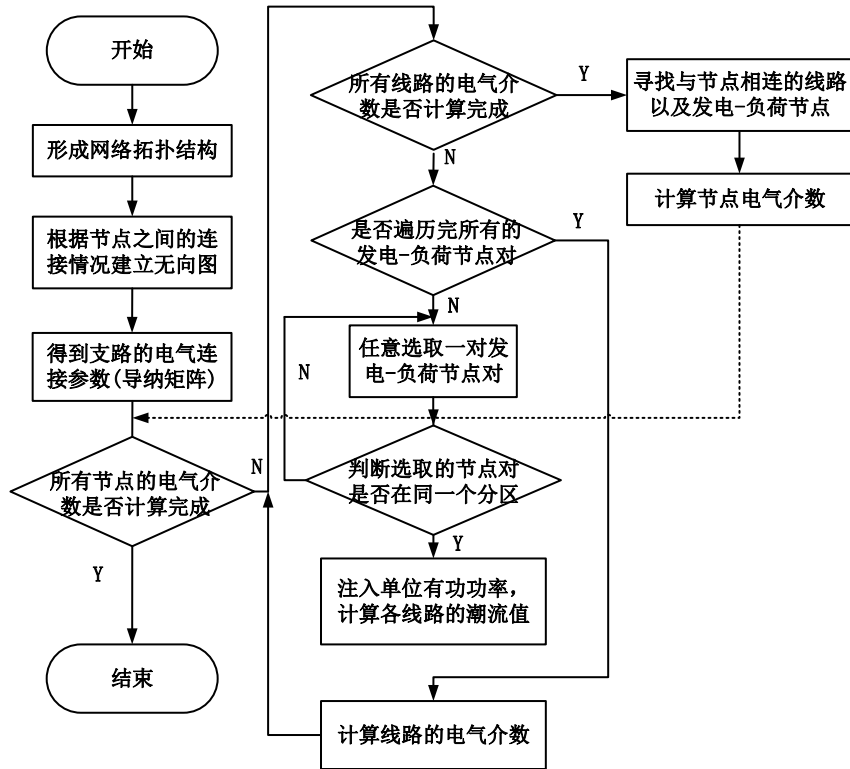


图 3.2 电气介数计算流程

从流程图可以看出，节点的电气介数综合考虑了所连支路对其的影响。而支路的电气介数则衡量了所有发电-负荷节点对支路潮流的影响，从而在分析时，不仅考虑了拓扑的影响而且增加了能量变化的考虑，使得结构的衡量更完善。电气介数不局限于能量、信息沿着网络的最短路径传播，更体现了电能在整个网络支路的分布情况。同时，电气介数还分别考虑了发电节点和负荷节点的变化影响，改变他们的容量，网络各节点的重要性也会发生变化，因此，电气介数更符合实际电网的变化情况。

### 3.3.2 基于 *PageRank* 的结构脆弱性研究

*PageRank* 最早是被用来作为互联网网页结构的模型，并且对所有网页的重要度进行量化评估的一种算法<sup>[75-77]</sup>。在众多计算互联网网页的相关性的算法中，*PageRank* 是名气最大，且最早被谷歌浏览器采用的。*PageRank* 的基本思想是一个网页的重要性依赖于所有链接向它的其他网页。比如，网页  $i$  有链接指向网页  $j$ ，如果有很多其他网页有链接指向网页  $j$ ，那么我们认为，网页  $j$  是非常重要的。另一方面，若只有一个网页有链接指向网页  $j$ ，但是这个网页是一个权威性很高的网址，如谷歌，百度等网页，我们认为网页  $j$  也非常重要，因为由受欢迎、权威的网页指向它，这份重要性将会传递下来。

电网中，每条支路上的潮流是有确定的方向的，所以可以被视为一个有向图。其中，每个母线节点被视为一个网页，母线节点之间的电气连接被视为网页中的超链接，根据电流的方向决定超链接的方向。互联网与电网的 *PageRank* 的拓扑模型比较如表 3.1。已有的研究中，大多学者在 *PageRank* 模型的网页出链的处理上采用均分的思想<sup>[78]</sup>，本文在综合考虑潮流能量对结构的影响下，认为出链是按照实际的潮流的比重进行分配的。

即按照网页的超链接可以传递重要性的思想，假设  $A$  节点拥有 3 个出链，它会分别按照视在功率的比例分别传递给所指向的  $B$ 、 $C$ 、 $D$  三个节点，按照能量的分布作为权重。根据重要性传递规则，可以得到能量转移矩阵  $A$ 。对于没有出链的节点，则按照 *PageRank* 的算法，认为该节点对所有节点都出链，从而解决终止点的问题。因为电网的潮流能量分布中不存在自己指向自己的连接，故不存在陷阱问题，因此不予考虑。

表 3.1 互联网与电网的 *PageRank* 拓扑模型比较

互联网	电网	<i>PageRank</i> 拓扑
网页	母线	节点
超链接	输电支路	有向边
指向该网页的网页数目	母线进线数目	入度
该网页指向的网页数目	母线出线数目	出度

*PageRank* 算法应用于电网拓扑的具体步骤为：

- (1) 假定初始服从均匀分布，即每个母线节点的重要性都是相同的，即对于一个一共有  $n$  个节点的系统而言，赋予每个网页初始相同的  $PR$  值，一般都为 1。
- (2) 根据电网的实际潮流计算每条连接上的视在功率得到能量分布权重的矩阵  $P$ ，再根据公式 3.7 得到能量转移矩阵  $A$ 。
- (3) 迭代计算，由于每个超链接的存在都会增加对应网页的  $PR$  值，所以通

过考虑潮流连接、能量转移情况对各个母线节点的  $PR$  值进行迭代更新。

(4) 最后, 经过若干次的迭代后, 各个母线节点的  $PR$  值会趋于一个稳定的值。

$$PR(p_i) = \frac{1-q}{N} + q \sum_{p_j \in M_{p_i}} \frac{PR(p_j)}{L(p_j)} \quad (3.7)$$

式 (3.7) 中,  $p_i$  是被计算的节点,  $M_{p_i}$  是节点  $p_i$  的入链节点集合,  $L(p_j)$  是节点  $p_j$  的出链数目,  $N$  是节点总数目。  $q$  为阻尼系数, 一般取 0.85, 引入该参数是为了解决出链为零的节点在模型计算中带来的问题, 代表了当前的母线节点没有遭到破坏正常运行的概率。  $1-q$  则代表了节点遭到意外破坏退出运行的概率。从公式中可以看出,  $p_i$  节点的  $PR$  值与和它相连的  $p_j$  节点的  $PR$  值有关, 其值越大, 且  $p_j$  节点的出链越少,  $p_i$  节点的  $PR$  值越大。其计算流程图如下:

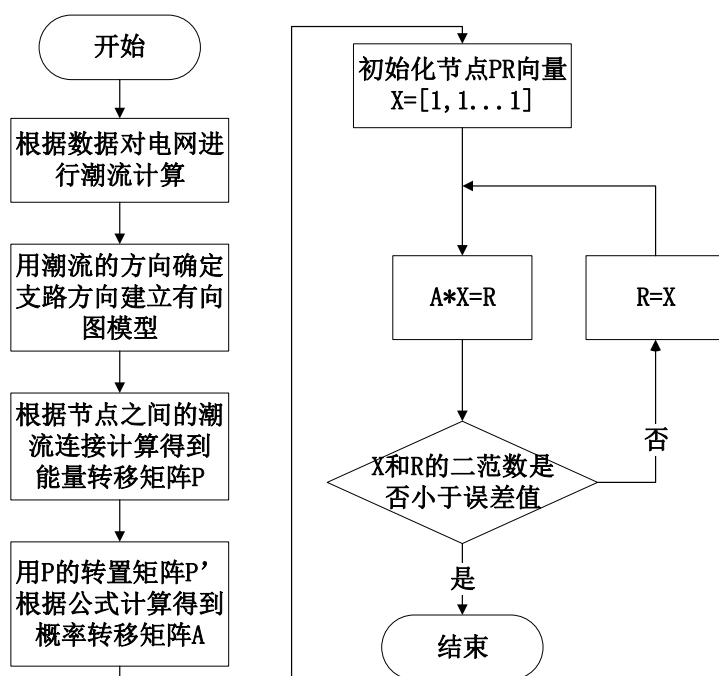


图 3.3 PangRank 计算流程

由图可知在 *PageRank* 在计算中, 考虑更多的是节点的重要性在拓扑中的传递性。即通过反复迭代, 确保所有节点的 *PageRank* 值在整个拓扑的重要性分配中趋于稳定, 误差达到最小。  $PR$  值代表了节点在网络中的重要程度,  $PR$  值越高, 节点越重要。

### 3.3.3 模型比较与案例分析

基于前面的研究可知, 对电力系统的拓扑建模有两种不同的角度。不考虑潮流的方向, 关注支路的重要性可将系统视为一个加权无向图。反之, 考虑潮流的

方向，衡量出入链对结构的影响可将系统视为一个有向图。复杂网络的电气介数更多关注的是支路上的潮流分布对拓扑重要性影响，而 *PageRank* 算法则更多关注的是有向的连接关系对拓扑重要性的影响。本节以 *IEEE14* 数据集为例，分别用以上的两种方式建模。该电网拓扑原理图如下：

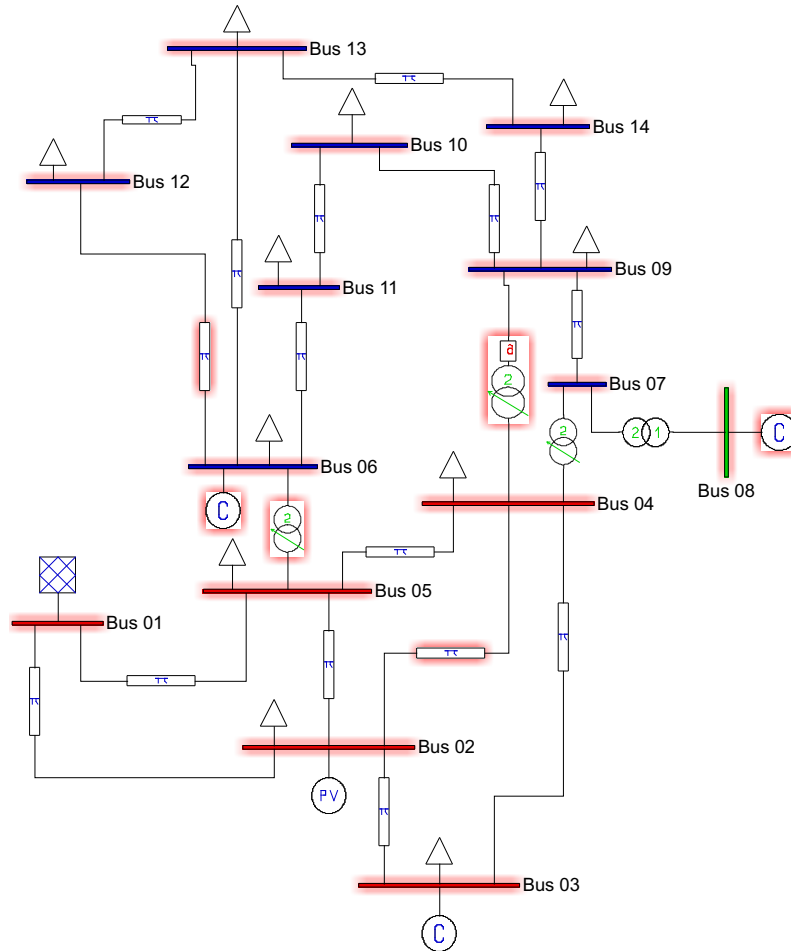


图 3.4 *IEEE14* 电网拓扑原理图

针对该拓扑，复杂网络的建模将其等效为一个无向图如图3.5，图中按照支路电气介数的大小等比例加粗了图的边，再根据图中的流程3.2最终计算得到各个节点的电气介数。电气介数计算的过程中，节点的电气介数直接受支路的电气介数影响。而支路的电气介数计算突出的是支路结构对能量分布的影响，能量分布越大的支路其电气介数也相应的越高。而 *PangRank* 的建模则将其等效为一个有向图如图3.6，再根据图3.3最终计算得到各个节点的 *PR* 值。*PangRank* 计算的过程中，突出的是拓扑的出入链的重要性。对于该模型，其迭代过程在能量转移矩阵的作用下完成，而入链累计度越高的点的 *PangRank* 越高。*PangRank* 衡量了拓扑节点在能量转移中所起的作用。

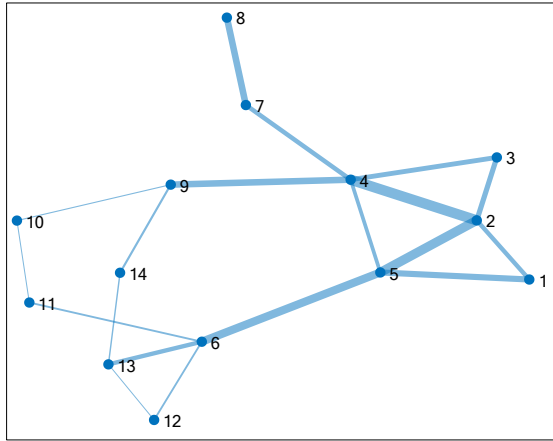
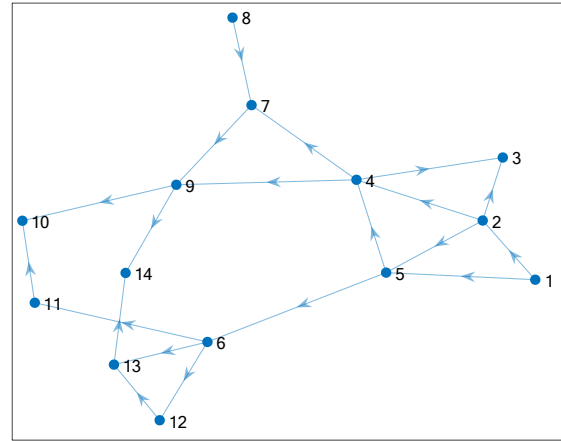


图 3.5 基于复杂网络的拓扑建模

图 3.6 基于 *PageRank* 的拓扑建模

电气介数与 *PangRank* 计算结果比较如图3.7。由于两个指标基于的拓扑模型不同，所以计算的结果相差较大。首先分析复杂网络的模型，从图中可以看出，支路的电气介数直接影响到了节点的电气介数，比如 2、4、5 节点由于与节点相连的支路比较重要而对拓扑具有较大的影响力。而支路的重要是因为 1、2、3、6 是系统中的发电节点，其功率传输分布因子较大，故而电电气阶数较大。而 4、5 处于发电和负荷的中间传输点，承担了较大的传输潮流的作用，因此相连的支路的电气介数都较大。8 由于发电功率几乎为零且所连支路只有一条所以电气节数很小。而 12、11、10 负荷节点相连的支路都不是主要输送支路，功率传输因子小，所以电气节数较小。

反观 *PangRank* 的模型，该模型将每个节点的重要性赋予在该节点指向其他节点的出链上，因此，那些入链累计度高的节点重要性也高。比如 14、10、9，这些节点均是负荷节点，能量最后传输给负荷，由于被潮流指向的累计的节点较多，即该节点的入链节点的入链节点数较多，因此重要性的权重被累计、叠加的程度较大。这种模型也符合现实，实际情况中，能量被输送、汇集到负荷节点，而负荷节点直接与用户相连，直接影响配电质量。因此，负荷节点在结构中的重要性非常高。在 *PangRank* 的模型中，由于发电节点是潮流起始点，1、8 节点不仅是发电节点，而且是单向输出，没有其他入链，所以其 *PR* 值较小。

综上分析，电气介数与 *PangRank* 均对电力系统的结构特点进行了描述，均反映了各个节点在拓扑中的重要程度：前者从能量传输分布的角度对系统的拓扑进行了研究，后者从潮流累计分布的角度对拓扑进行了分析。因此，本文在第四章中将这两个指标进行了融合分析，作为结构脆弱性的综合评价指标。

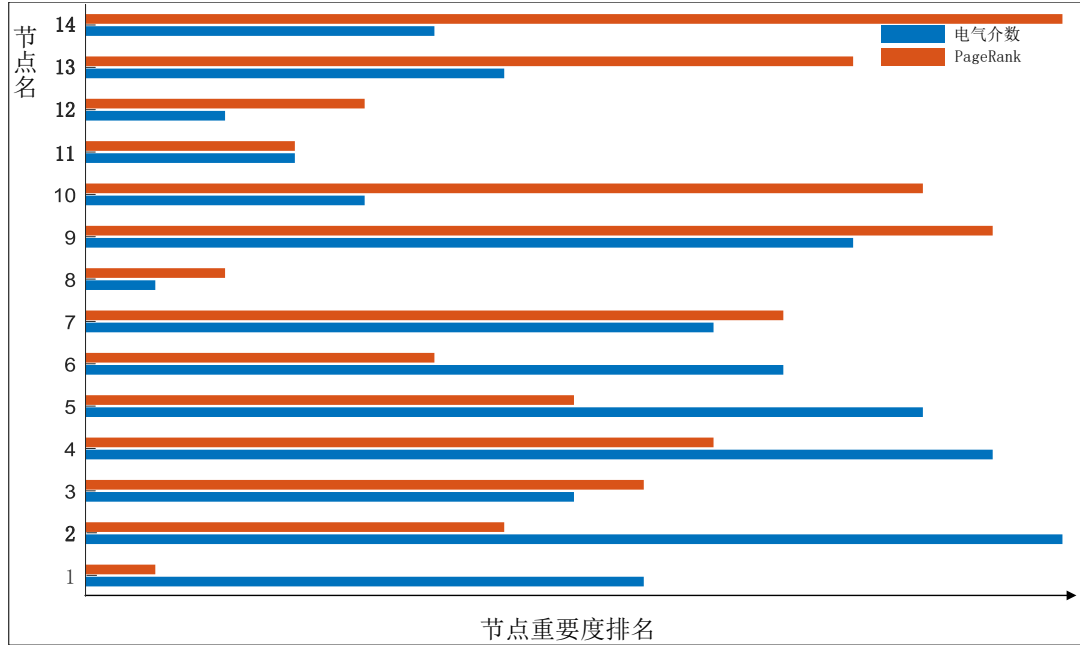


图 3.7 电气介数与 PageRank 计算结果比较图

### 3.4 含风电电力系统状态脆弱性研究

对于含风电电力系统而言，外界环境的变化会导致系统有多种运行状态，其中环境的变化主要指的是风速的变化和负荷需求的变化。在这种情况下，系统的状态决定了系统是否能够正常运行下去。因此，研究系统的状态脆弱性对评估系统是否安全运行具有重要的意义。

#### 3.4.1 蒙特卡洛方法概述

蒙特卡罗方法可以求解出事件的概率、随机事件的期望或者与概率、期望相关的量的问题。其基本思想是通过试验的方法，获取事件的概率，根据实验者获得的观察值进行问题求解<sup>[79-81]</sup>。如果蒙特卡罗方法也可以用来进行积分计算，主要是通过随机试验的方法，将所要计算的积分看做服从某种分布密度函数  $f(x)$  的随机变量  $g(x)$  的数学期望。

$$G = \int_0^{\infty} g(x)f(x)dx \quad (3.8)$$

通过某种随机试验，获取  $N$  个观察值  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ，用概率语言描述就是，从概率密度分布函数  $f(x)$  中抽取  $N$  个子样本  $g(x_1), g(x_2), \dots, g(x_n)$ ，计算  $N$  个随机变量的值的算术平均值作为积分的估计值（近似值）。

$$\bar{G} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N g(x_i) \quad (3.9)$$

通过以上蒙特卡罗方法思想的介绍,了解到蒙特卡罗方法可以作为数值计算的方法,因此,使用蒙特卡罗方法进行数值解时,其收敛性和误差是一个重要问题。

### (1) 收敛性

通过蒙特卡罗方法的计算思想得知,蒙特卡罗方法是把随机试验的  $N$  个子样本的算术平均值作为所求解的估计值。由大数定律可知,  $N$  个子样本独立同分布,且具有有限期望值,那么当  $N$  充分大时,随机变量的  $N$  个子样的平均值收敛于期望值,且收敛概率为 1。

### (2) 误差

由概率论的中心极限定理,可以得到,如果随机变量序列  $X_1, X_2, \dots, X_n$  独立同分布,且方差  $0 \neq \sigma^2 = \int (x - E(X))^2 f(x) dx < \infty$ , 其中  $f(x)$  是  $X$  的概率分布密度函数。则

$$\lim_{N \rightarrow \infty} P\left(\frac{\sqrt{N}}{\sigma} |\bar{X}_N - E(X)| < x\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-x}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (3.10)$$

当  $N$  充分大时,得到

$$\lim_{N \rightarrow \infty} P\left(|\bar{X}_N - E(X)| < \frac{\lambda_\alpha \sigma}{\sqrt{N}}\right) \approx \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\lambda_\alpha} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = 1 - \alpha \quad (3.11)$$

其中,  $\alpha$  称为置信度,  $1 - \alpha$  称为置信水平,  $\lambda_\alpha$  与置信度  $\alpha$  是一一对应的,可以通过查找正态分布表,确定  $\lambda_\alpha$ 。这表明不等式:

$$|\bar{X}_N - E(X)| < \frac{\lambda_\alpha \sigma}{\sqrt{N}} \quad (3.12)$$

近似得以概率  $1 - \alpha$  成立,且误差收敛速度的阶次为  $o(N^{-\frac{1}{2}})$ 。

因此,通常情况下,蒙特卡罗方法的误差为  $\varepsilon = \frac{\lambda_\alpha \sigma}{\sqrt{N}}$ 。

## 3.4.2 含风电电力系统状态脆弱性

在电力系统状态的研究中,潮流计算扮演了重要的角色,系统的每一种运行状态对应了一种潮流分布。潮流计算的目标是计算每种运行状态下系统的参数变化,功率或电压的分布,用来检查系统的元件是否过负荷、各点电压是否越线、功率的分布是否合理。因此在变化的潮流参数中,主要关注的参数是电压幅值,电压相角,有功功率和无功功率。潮流方程如下。

$$C_B(k) = \begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^{j=n} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^{j=n} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (3.13)$$

能够正常运行的状态通常都是满足以下两点约束:

(1) 负荷供电约束：系统的所有节点都应满足各自的功率方程，即各节点的有功负荷与无功负荷应保持平衡。

(2) 运行参数约束：系统的所有节点的电压、功率都应在一定的范围约束内，如节点电压不能越线，支路功率不能太大等。

根据系统的运行状态可以将系统划分出几个区域，如图3.8。其中，正常域表示系统可以正常运行，脆弱域表示系统可以运行，但运行参数超出了可接受范围，有可能往坏的趋势发展，即该区域存在着一定的不确定性。这两个区域都是可运行域，即系统可以运行的区域。而不可运行域表示系统已经潮流不收敛，负荷不再守恒的故障状态。

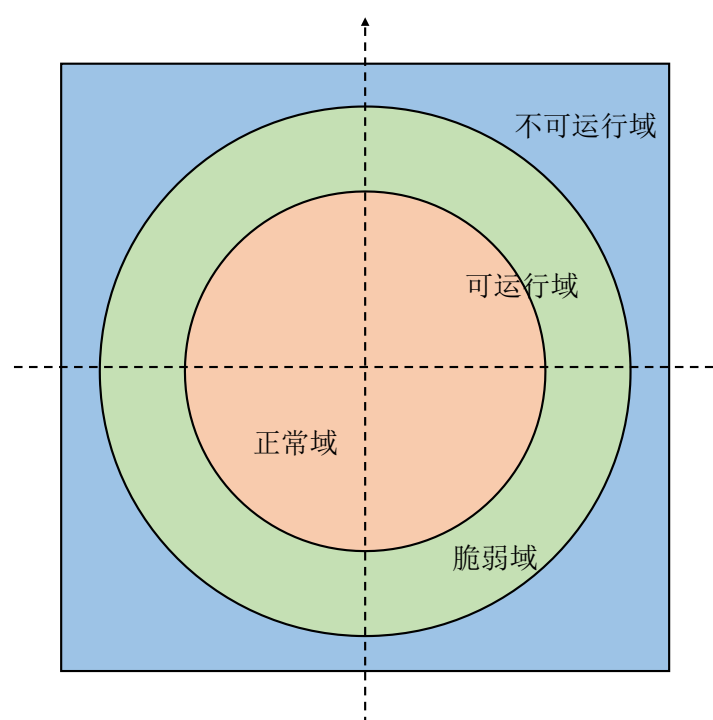


图 3.8 电力系统运行状态图

含风电的电力系统受到外界环境的变化（如风速、负荷）或者不确定性时，系统的状态会发生改变，即可能处于图3.8中表示的各个区域。如果外界的变化使得系统处于正常域，则系统是反脆弱的。若外界的变化使得系统处于非正常域，则系统处于脆弱的状态。即系统受外界其他因素干扰使得系统无法正常运行，那么系统的状态就是脆弱的。

本文在前人研究的基础上对状态脆弱性提出了新的定义：电力系统的状态脆弱性是指外界环境的变化（如风速、负荷的变化）导致系统无法正常运行，向坏的状态发展，无法恢复正常运行的一种趋势。对外界环境的变化敏感且容易往坏的方向发展的环节被称为脆弱环节。因此，环境变化的影响越大，对系统的运行状态影响越大的环节越脆弱。



### 3.4.3 基于蒙特卡洛的状态脆弱性研究

对于电力系统中脆弱域的不确定性的量化，本文采用概率的方法来进行风险统计，因为不确定性本来就是一个概率的概念，它代表的是系统往坏的方向发展的可能。从上节的介绍中可以看出，蒙特卡洛方法以概率论和数理统计为基础，通过大量实验近似接近准确的描述事物真实的特点，因此，本节将基于蒙特卡洛研究含风电电力系统的状态脆弱性。

蒙特卡洛方法首先建立概率映射模型。本节研究电力系统的状态脆弱性理论，其本质研究内容正是电力系统在外界环境变化的情况下，求取系统在不确定事件下状态变化的期望值，正好符合蒙特卡洛计算的首要条件。本节采用直接模拟的方法，即根据概率统计规律，由概率分布仿真模拟外界环境的变化趋势，得到系统对应的状态，再进行统计计算概率。随机模拟仿真次数越多，结果越精确。

系统的状态可根据电力系统的潮流方程3.13计算得到，其状态可用如下的数学方程表示：

$$\begin{cases} W = f(X) \\ Z = g(X) \end{cases} \quad (3.14)$$

式中， $X$  为系统中节点的运行状态，其中参数主要包括节点电压幅值、电压相角。 $W$  为当前外界环境影响下的功率输入，主要包括风速引起的风机的发电功率和负荷需求变化引起的负荷功率。 $Z$  为当前系统状态对应的支路的潮流状态信息。

在概率潮流模型中，节点功率输入和系统状态变量之间的关系如下：

$$\begin{cases} W = W_0 + \Delta W \\ X = X_0 + \Delta X \end{cases} \quad (3.15)$$

式中， $W_0$  和  $X_0$  分别是功率注入和对应系统状态的期望值，而  $\Delta W$  和  $\Delta X$  则是随机扰动值和系统对应的扰动下的状态改变量。潮流计算中常用方法是牛顿拉夫逊法，通过形成雅克比矩阵和求解修正方程来满足功率不平衡量的允许误差在可接受范围内。

基于蒙特卡洛概率潮流算法流程如下。在电网模型中，首先计算出额定状态（风电输入为额定功率、负荷需求功率为额定功率）下系统的潮流状态参数值  $X_0$ 。再根据本文第二章中提出的随机性风电功率模型和负荷变化概率模型进行蒙特卡洛采样，然后将采样得到的概率模型参数带入系统中进行潮流计算。通过大量采样试验，可以得到一组系统状态  $X$ ，通过对状态  $X$  进行统计、分析，得到系统状态的变化情况。即可以计算出含风电的电力系统在风电功率和负荷需求

变化中，系统正常运行的概率以及系统具有脆弱性的概率。

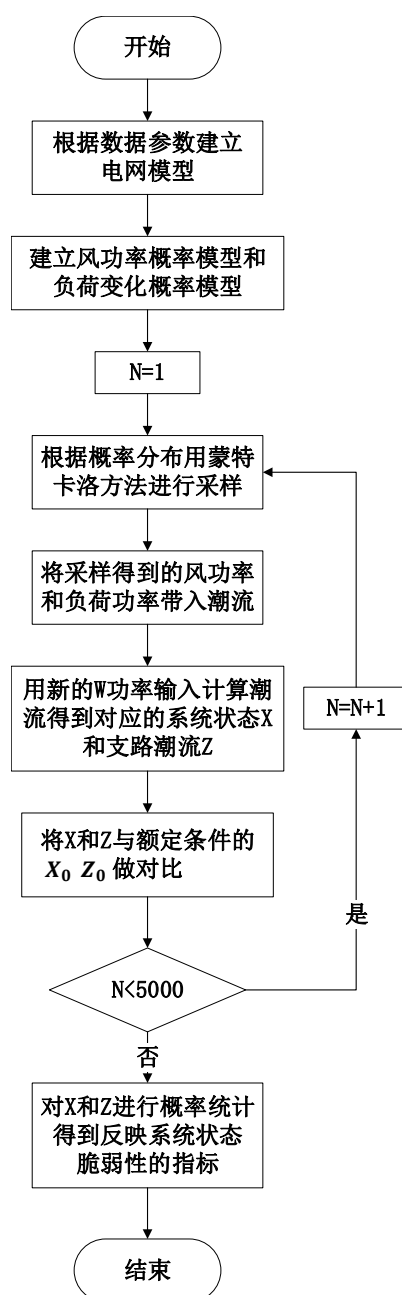


图 3.9 概率潮流计算流程图

根据上述研究，本文以 *IEEE39* 系统数据为例，用蒙特卡洛方法进行概率潮流计算。将系统中的第 10 个发电机节点用风机代替，即用随机性风电功率模型带入，用 5000 次试验仿真后得到的潮流状态进行统计。从上述分析中可知，处于脆弱域的系统状态的运行参数超过了约束的范围。经过本文第二章中的研究，可知，运行参数主要指的是节点电压。以电力系统对照明系统的影响为例，当电压较额定电压降低 5% 时，白炽灯的光通量减少 18%；当电压较额定电压升高 5% 时，白炽灯的寿命减少 30%。故而电压的偏差率超过 5%，则系统的状态不满足约束范围，即处于脆弱域。

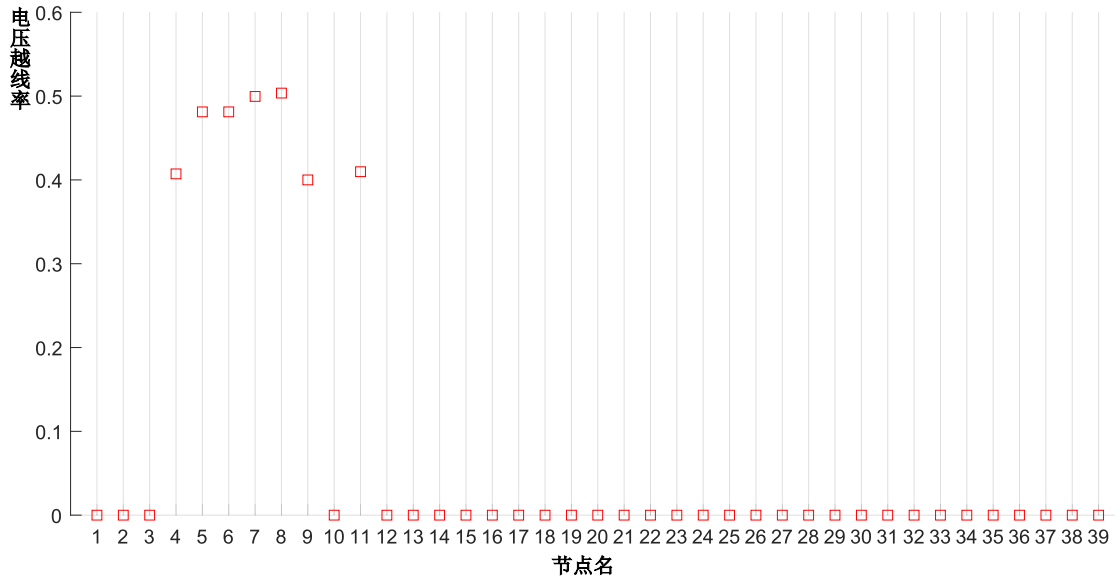


图 3.10 随机性风速下的概率潮流

由图可知，当风功率随风速随机性变化时，对应的系统的状态也在发生着变化，每个状态下的不同节点的电压的状态不同。有的节点在整个实验中电压满足约束范围，无越线。而有的节点的电压状态则不满足约束范围，存在越线的脆弱性表现，如 4、5、6、7、8、9、11 节点均存在着一定概率的越线率。而其余的节点在整个实验过程中，无越线的概率，因此不是脆弱环节。

由第二章的负荷模型可知，与风速一样，负荷的变化也可以视为随机变量。假设二者的变化互不相关，具有独立性。所以实验前的蒙特卡洛采样可以分别独立进行，即分别生成风速概率随机变量与负荷概率随机变量，再同时对他们采样带入实验。即当负荷和风速在同时变化时，含风电的电力系统的概率潮流计算可以按照图3.9中的流程，分别进行蒙特卡洛采样，再进行实验。

本文仍以 IEEE39 系统数据为例，系统中的第 10 个发电机节点用风机代替，系统中的第 3 个负荷节点用负荷概率模型代替。同样进行 5000 次实验仿真得到图3.11。由图可知，当风速和负荷同时在变化时，系统的状态变化更剧烈些。同无负荷变化的风力系统相比，当其中的一个负荷节点以额定功率为均值，一定的方差变化的高斯分布随机变化时，系统有不同的变化。系统中存在的脆弱环节变多了，如 12 节点在无负荷变化的风力系统中不存在脆弱性的状态，但是在有负荷变化的风力系统中存在脆弱性的状态。除此以外，负荷的随机性变化还对系统中原来的脆弱环节的状态有一定的影响，如 7、8 节点在有负荷变化的风力系统存在脆弱性的概率比无负荷变化的风力系统的高。

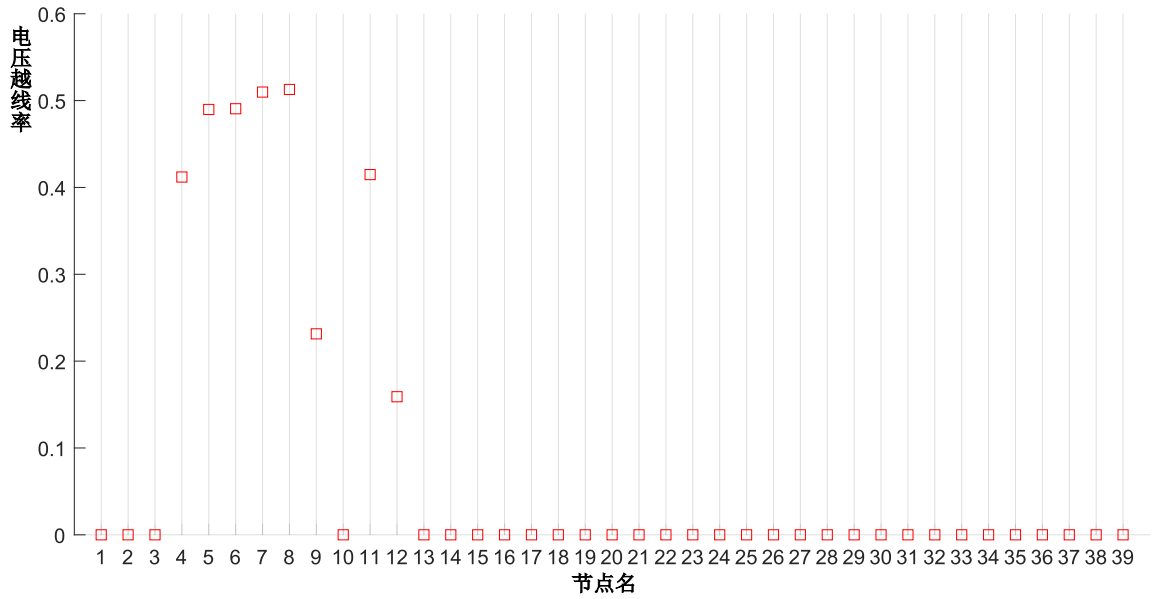


图 3.11 随机性风速、负荷下的概率潮流

### 3.5 本章小结

本章节通过研究含风电电力系统自身存在脆弱性的原因，得出系统脆弱性的本质和系统脆弱性的数学描述，在此基础上，结合前人的研究，得到了含风电电力系统的脆弱性的定义。针对该定义，本文将系统的脆弱性分为结构脆弱性和状态脆弱性。

在系统的结构脆弱性定义的基础上，分别基于复杂网络和 *PangRank* 进行建模。针对各自的模型进行脆弱性研究，分别得出了电气度、电气介数和 *PR* 重要值的算法。前二者更关注的是支路上的潮流分布对拓扑的影响，而后者更在意的是有向的链接关系对拓扑的影响。本文以 *IEEE14* 系统为例，使用两种方法建模计算并进行了比较，认为二者分别从不同的角度对拓扑的脆弱性进行了研究，均具有实际意义。

在系统的状态脆弱性定义的基础上，首先分析了含风电电力系统的几种运行状态的意义。在此基础上，采用蒙特卡洛的方法将系统运行状态处于脆弱域时的不确定性进行量化，即使用概率统计的方法研究系统的状态脆弱性。以 *IEEE39* 系统为例，研究了在风速和负荷变化的情况下，系统各节点的状态脆弱性。本章通过研究系统的结构和状态的脆弱性，确定了脆弱性问题的具体研究内容，为之后建立含风电电力系统脆弱性量化评估模型奠定了理论基础。

## 第4章 含风电电力系统脆弱性量化评估

### 4.1 引言

通过前文对含风电电力系统的脆弱性的深入研究可知，系统的脆弱性分为结构脆弱性与状态脆弱性两部分。结构脆弱性衡量了系统保持拓扑完整的能力，而状态脆弱性则衡量了系统向坏的状态发展的趋势。如何找到能够评价两种脆弱性各自的指标，且将他们合理地量化从而得到一套系统的脆弱性评估理论是本章的研究重点。

为了进一步量化分析含风电电力系统的脆弱性，得到脆弱性量化评价结果，在本章中将脆弱性量化分析问题定位为多指标综合评价问题。针对结构脆弱性与状态脆弱性，分别根据各自脆弱性的定义与特征选取能够反映其脆弱现象的评价指标，结合综合评价法及多指标融合法，建立了系统脆弱性量化评估的数学模型。解决了系统脆弱性现象难以量化的问题，为后续分析含风电电力系统脆弱性问题奠定了理论基础。

### 4.2 系统脆弱性量化评估指标

为综合评价含风电电力系统在人为或外界环境变化时，系统所暴露的脆弱性现象，需要选择能够真实反映系统脆弱性的评判指标，并对各指标进行归一化处理与指标权重分配，建立脆弱性量化评估体系，最终得到一个在 0 ~ 1 范围内的系统脆弱性综合评估结果。

#### 4.2.1 含风电电力系统的脆弱性指标选取

根据本文第三章中对于含风电电力系统脆弱性的研究，可知系统的脆弱性从结构脆弱性和状态脆弱性两个角度进行分析。因此，以真实反映系统特性为目的，系统对应的脆弱性量化指标分别从结构脆弱性指标与状态脆弱性指标中进行选取：

结构脆弱性指标  $I_1$ ：

含风电电力系统的结构脆弱性评价的是人为或外界的影响下，系统自身组成元素性能发生改变后仍能保持系统拓扑完整的能力。针对该定义，我们可知，对系统拓扑完整性贡献力高、对结构形成关键程度高的元素越脆弱。因此，可以得到的指标如下：

(1) 指标一：

基于复杂网络理论将系统拓扑等效为一个无向图，描述网络特征参数中，度作为关键参数之一，通过描述节点之间的电气连接情况，进而表现了其在拓扑中的承担的角色。为评估系统拓扑在拓扑形成与结构中的贡献，拓扑的第一个脆弱性指标选为电气度，即  $I_{11} = e_i$ 。

(2) 指标二：

基于复杂网络理论将系统拓扑等效为一个无向图，描述网络特征参数中，介数作为关键参数之一，被描述节点或边在信息、能量传递中的重要程度。为评估系统拓扑在能量传输分布中的贡献，拓扑的第一个脆弱性指标选为电气介数， $I_{12} = C_B(k)$ ，其计算流程如图3.2。

(3) 指标三：

基于互联网网页结构模型将系统拓扑按照支路潮流方向视为一个有向图，在所有量化评估网页重要度的算法中，*PageRank* 是名气最大且很经典的算法之一。本文在第三章中将传统的算法进行了创新，它描述了节点之间的连接关系在系统拓扑的能量传递中的影响程度。因此，拓扑的第二个脆弱性指标选为 *PR* 值， $I_{13} = PR(p_i)$ ，其计算流程如图3.3。

状态脆弱性指标  $I_2$ ：

根据本文之前对风能接入对电能质量的影响的研究，可知风力发电对电能质量的影响主要是支路潮流和节点电压的变化。再结合状态脆弱性的定义可知，含风电电力系统的状态脆弱性评价的是外界环境变化导致系统无法正常运行，向坏的方向发展的趋势。其具体的表现即为节点电压超出约束范围，向坏的状态发展。

概率潮流采用蒙特卡洛的方法得到了在外界环境变化的情况下，大量系统状态的节点电压。而额定状态下的电压被称为标称电压，通常用电压偏差来表示不同状态下的电压的偏差，即指的是系统的各节点的实际运行电压对标称电压的偏差的相对值，以百分数表示，计算公式如下：

$$\text{电压偏差}(\%) = \frac{|\text{电压测量值} - \text{标称电压}|}{\text{标称电压}} \times 100\% \quad (4.1)$$

因此，可以得到的指标如下：

(1) 指标一：

随机变量的值超过 5% 的概率，描述了外界环境变化时，系统的某些敏感的负荷（如白炽灯）无法正常运行的可能性。该指标从某些负荷需求的角度对电能质量进行了评价。

$$I_{23} = \frac{N_{R>5\%}}{N_{sum}} \quad (4.2)$$

## (2) 指标二：

随机变量的期望指的是实验中每次可能的结果与其结果概率乘积的总和。电压偏差的期望则描述了系统电压这个随机变量在外界环境变化的过程中，所有发生的状态的平均结果。

$$I_{21} = E[R] = \frac{\sum_{i=1}^N r_i}{N} \quad (4.3)$$

## (3) 指标三：

随机变量的方差描述的是该变量距离其期望值的距离，即描述了变量变化的离散程度。所以电压偏差的方差表示的是系统电压在外界环境变化的过程中，电压偏差状态的离散程度。因此，状态脆弱性的第三个指标选择为节点的电压方差，即：

$$I_{22} = Var(R) = \frac{\sum_{i=1}^N (r_i - \mu)^2}{N} \quad (4.4)$$

#### 4.2.2 脆弱性量化评估指标的语义分析

系统结构脆弱性指标一表征系统拓扑自身的属性，通过节点之间的电气连接情况表现出了拓扑的各组成节点在拓扑形成与结构中的重要程度。由于该指标取的是电气度的倒数，因此，该指标越小，表示元素的重要性越高，即当元素在意外扰动下退出时，对拓扑的完整度冲击越大，则系统具有的脆弱性越大。反之，指标越大，表示元素的重要性越小，对拓扑重要性小的元素退出时，系统具有的脆弱性小。

系统结构脆弱性指标二表征系统在抵御意外扰动时暴露的拓扑的缺陷，这一隐形性能表现为拓扑的各组成元素在能量传输分布中的贡献作用。贡献度越高的元素在意外扰动下退出时，对拓扑的完整度冲击越大，则系统具有的脆弱性越大。反之，对拓扑贡献力小的元素退出时，系统具有的脆弱性小。

系统结构脆弱性指标三表征意外扰动发生时，系统拓扑的各组成元素之间的有向的连接所暴露出的缺点，具体表现为拓扑节点之间的连接在潮流累计分布中的贡献程度。贡献度越低的元素在意外扰动退出时，对拓扑完整度的影响也越小，则系统具有的脆弱性也越小。

系统状态脆弱性指标一表征系统在外界环境变化时，其电压偏差状态无法使某些负荷正常运行的概率。该指标直接反映了环境的变化导致系统具有脆弱性的状态的可能性。因此，该指标越大代表外界的变化导致系统具有脆弱性的可能性越大，反之，则表示系统具有脆弱性的可能性小。

系统状态脆弱性指标二表征系统在外界环境变化时，其电压偏差状态变化的期望。若在系统的外界环境变化过程中，系统的各节点的电压偏差的期望很

小，甚至接近于 0，则代表着系统性能很好，具有的脆弱性很小。反之，若期望很大，则代表在外界环境变化时，系统的平均状态偏差，则系统具有的脆弱性较大，系统性能差。

系统状态脆弱性指标三表征系统在外界环境变化时，其电压偏差状态变化的方差。方差体现了随机变量的离散程度，所以当系统在外界环境变化过程中，该指标的值小，代表电压变化的方差大，则表示电压变化剧烈，系统具有的脆弱性大。反之，若该指标的值大，则代表系统对于外界环境变化的反应较小，系统状态的起伏较小，则系统具有较小的脆弱性。

4.2.3 系统脆弱性综合评估指标集

通过以上的分析可以知道，含风电电力系统的脆弱性评估由系统结构脆弱性与系统状态脆弱性两部分组成，每部分分别选取能够反映系统脆弱性现象的评价指标，作为各自部分脆弱性量化评估的依据。整个系统的脆弱性综合评估指标集如图4.1，其中，结构脆弱性  $I_1$  和状态脆弱性  $I_1$  是一级指标，一级指标下面的子指标为二级指标。

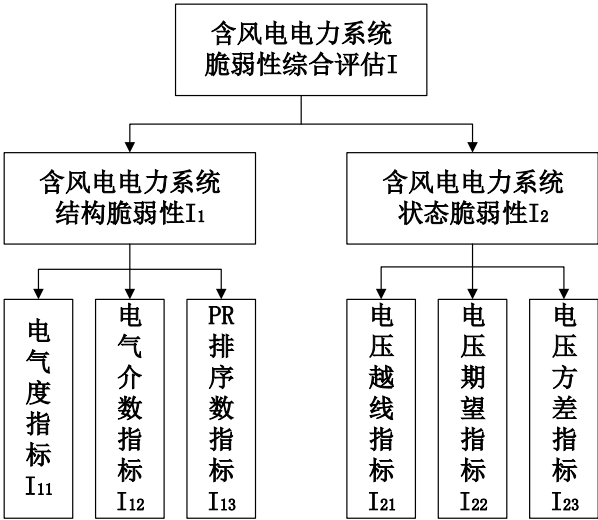


图 4.1 系统脆弱性综合评估指标集

4.3 脆弱性量化评估二级指标融合

由上述分析可知，系统的各个脆弱性评价指标分别从结构和状态的角度代表了系统脆弱性的不同属性，反应的是系统脆弱性现象的不同特征，每个指标的数量级都是不同的。因此，需要将这五个指标进行归一化处理，将数据统一映射到 [0, 1] 区间上，消除数量级的差异，从而将五个指标进行加权处理得到系统的综合脆弱性量化评估结果。



### 4.3.1 脆弱性量化评估二级指标归一化

不同的数据格式及应用模型要求对数据采用不同的归一化方法，从而对特定的应用模型得到良好的数据分析效果。数据归一化的方法多种多样，常用的数据归一化方法见表 4.1。

其中针对评判指标的数据归一化方法主要采用离差标准化法及 z-score 标准化法。在分类、聚类等算法中，经常需要使用表征距离的数据来度量相似性，在主成分分析法 PCA 的计算过程中，需要对大量的数据进行降维，从而来去除数据中的噪声，挖掘数据中的模式。在这类问题中，z-score 数据归一化方式使得经过处理后的数据符合标准的正态分布特性，可以提升分类、聚类、主成分分析等算法模型的收敛速度及模型精度。但对于不涉及到距离度量计算、协方差计算且原始数据不符合高斯分布的时候，使用 z-score 数据归一化方法改变了原数据的分布特性，归一化处理后使得原有数据丢失了相应的信息。

表 4.1 常用的数据归一化方法

方法	适用情况	特点	公式表示
离差标准化 (Min-max Normalization)	适用于最大最小值明确不变的数据	不改变数据的原始分布	$x^* = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$
z-score 标准化	适用于最大值最小值未知的情况，且数据接近正态分布	改变数据的原始分布，对离群点规范化效果好	$x^* = \frac{x - \mu}{\sigma}$
Logistic 标准化	适用于对长尾分布的数据作分段操作	改变数据的分布情况	$x^* = \frac{\ln x}{\ln n_{max}}$
小数定标标准化 (Decimal scaling)	适用于数据初期探索，不消除数据属性间权重差异	不改变数据分布	$x^* = \frac{x}{10^j}$
排序归一化	适用于对数据的具体值并不关心，更关心相对排序的数据	原始数据变为直线分布	$x^* = \frac{x_{rank}}{num_{total}}$
分段归一化	适用于数据分布有明显分段特征的情况	不改变分段数据的分布	根据不同数据段，采用不同方法

若明确知道数据的上限值和下限值，可以采用离差标准化的数据归一化方式进行数据处理。即不改变原有数据的分布规律，又将原始数据映射到 [0, 1] 数值区间内，消除了数据之间数量级的差异，解决了因量纲及数量级造成的可比性

问题。又由于对原始数据的分布规律没有要求，且经过归一化处理后的数据可以进行相互比较与加权组合，使得离差标准化法成为建立综合评价体系时常用的归一化方式。

根据系统脆弱性综合评价指标及各指标的语义分析可知，系统结构脆弱性指标与系统状态脆弱性指标之间相互独立。由前文的分析知道系统的结构脆弱性反映了拓扑本身的性质，结构脆弱性的三个指标  $I_{11}$ 、 $I_{12}$  与  $I_{13}$  都代表了节点在拓扑中的重要程度，即采用不同的建模方式均反映了节点在拓扑中的重要程度排位。其中，排位顺序是每个节点自身的属性，故三个脆弱性指标的归一化可以采用排序归一化，用顺序表明节点的相对重要性。

状态脆弱性指标通过仿真实验模拟了系统的性能的变化，所以状态指标属于评判性指标。由于脆弱性量化评价指标在数据分布上不符合标准正态分布特性，且归一化的主要目的是消除指标之间数量级的差异，并不涉及到距离度量计算和协方差计算。因此，本文在状态脆弱性指标的归一化中选择离差标准化方法。

离差标准化的指标归一化方法首先需要确定各指标的上限值和下限值，故首先要对系统的状态脆弱性指标的上限值和下限值进行分析确定。状态脆弱性指标  $I_{21}$  表示的是外界环境变化时，电压偏差状态无法使某些负荷正常运行的概率。所以该指标的上限值为 1，下限值为 0。状态脆弱性指标  $I_{22}$  表示的是环境发生变化时，电压偏差状态变化的期望，由于电压偏差  $R$  的本质是误差，故大小在 0-1 之间，所以其期望也在 0-1 之间。状态脆弱性指标  $I_{23}$  表示的是环境变化时，电压偏差状态变化的方差的倒数，所以该指标的变化范围也是 0-1，因此该指标的上限值为 1，下限值为 0。

因此，经过归一化后的系统结构脆弱性指标向量为  $I_1$  和系统状态脆弱性指标向量为  $I_2$ 。

$$I_1 = \begin{bmatrix} I_{11}^* & I_{12}^* & I_{13}^* \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$I_2 = \begin{bmatrix} I_{21}^* & I_{22}^* & I_{23}^* \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

#### 4.3.2 基于层次分析法的权重分配

系统的脆弱性量化评估体系指的是在系统的工作环境大幅度变化或者意外发生的情况下，通过分别研究系统的拓扑和状态的变化选取特定的脆弱性评判指标来建立的。由于二级指标所显示出的系统性能的变化趋势对于系统脆弱性评判的重要程度具有较大的主观因素，因此系统脆弱性指标集的二级指标量化评估体系是一个基于主观评价的定权重综合评价体系。本文采用 AHP（层次分

析法)的相关理论,使用量化处理主观评价权重的方式对系统脆弱性评估指标进行权值分配。

判断各自二级指标之间的权重时,需要构建判断矩阵,将指标元素进行两两比较,根据主观定性的评价来度量准则  $x$  相比于准则  $y$  的重要程度。采用重要性量化标度 1-9 及其倒数对指标间的相对重要程度进行量化分析。若  $x$  相对于  $y$  的标度值大于 1,则表明  $x$  比  $y$  重要;若  $x$  相对于  $y$  的标度值小于 1,则表明  $y$  比  $x$  重要;当且仅当标度值为 1 时,表明  $x$  与  $y$  有相同的重要性。通过两两比较的方式,将二级指标之间相对重要性量化为 1-9 及其倒数,以此作为矩阵元素形成准则层的判断矩阵:

$$A = (a_{ij})_{m \times m} \quad (4.7)$$

式中,  $A$  为层次分析法某一层的判断矩阵;

$a_{ij}$  为因素  $i$  针对于因素  $j$  的重要程度标度;

$m$  为该准则层元素的个数;

判断矩阵 1-9 重要性量化标度定义如表 4.2 所示

表 4.2 判断矩阵 1-9 重要性量化标度

重要性量化标度	含义
1	表示两个因素相比,前者与后者同等重要
3	表示两个因素相比,前者比后者稍显重要
5	表示两个因素相比,前者比后者明显重要
7	表示两个因素相比,前者比后者强烈重要
2, 4, 6, 8	表示两个对象相比,前者比后者的重要程度介于上述相邻判断标度之间
倒数	若因素 $i$ 相对于因素 $j$ 的重要性为 $a_{ij}$ , 则因素 $j$ 相对于因素 $i$ 的重要性为 $a_{ji} = 1 / a_{ij}$

为了保证基于层次分析法的判断意见合理准确,需要检验初始判断矩阵的一致性。根据矩阵论的相关知识,判断矩阵对应于最大特征值  $\lambda_{max}$  的特征向量经过归一化处理,即为同一层相应元素对应于上一层元素相对重要性的权值排序。由于满足式 4.8 的正互反矩阵被称为一致矩阵。根据定理可知,当且仅当  $n$  阶判断矩阵最大特征根  $\lambda_{max} = n$  时,判断矩阵为一致。当判断矩阵最大特征根  $\lambda_{max} > n$  时,判断矩阵非一致。 $\lambda_{max}$  比阶数  $n$  大的越多,判断矩阵的非一

致性程度越大。

$$a_{ij}a_{jk} = a_{ik}, \quad \forall i, j, k = 1, 2, \dots, n \quad (4.8)$$

通常，判断矩阵的阶数越大，其具有完全一致性的难度越大，在层次分析法中虽然不要求判断矩阵完全一致，但要对判断矩阵的一致性满意程度进行度量。为了界定各个阶数判断矩阵的一致性满意程度，定义一致性指标 CI (Consistency Index) 和同阶评价随机一致性指标 RI 之比 CR (Consistency Ratio) 为随机一致性比例<sup>[Deng2012AHP]</sup>，以此指标度量判断矩阵的一致性满意程度。度量判断矩阵一致性的步骤如下：

1) 计算一致性指标 CI (Consistency Index)

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4.9)$$

式中， $\lambda_{max}$  为判断矩阵的最大特征值

$n$  为判断矩阵的阶数

2) 查询评价随机一致性指标 RI，如表 4.3 所示

表 4.3 平均随机一致性指标

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
RI	0.00	0.00	0.52	0.89	1.12	1.24	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58

3) 计算一致性比例 CR (Consistency Ratio)

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4.10)$$

4) 度量判断矩阵的一致性

根据一致性比例 CR 的计算结果，判断矩阵的一致性检测规则如下。

$CR < 0.1$ ：说明判断矩阵具有良好的一致性，判断合理；

$CR = 0.1$ ：说明判断矩阵具有较好的一致性，判断较为合理；

$CR > 0.1$ ：说明判断矩阵不符合一致性原则，需要重新调整，直至满足一致性条件为止。

(4) 权重向量的计算

具有一致性的判断矩阵的最大特征根  $\lambda_{max}$  对应的特征向量经过归一化处理后，可以得到这一层元素对应于上一层元素相对重要性的权重向量。层次分析法中计算权重向量的方法主要有几何平均法 (4.11)、算术平均法 (4.12) 和特征向量法 (4.13) 等。基于以上几种方法可以通过计算得到比较相近的权重向量，在实际应用过程中可根据需求选取相应合适的权重向量计算方式，得到科学有效的决

策结果。

$$W_i = \frac{\left(\prod_{j=1}^n a_{ij}\right)^{\frac{1}{n}}}{\sum_{i=1}^n \left(\prod_{j=1}^n a_{ij}\right)^{\frac{1}{n}}}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.11)$$

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{\sum_{k=1}^n a_{kj}}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.12)$$

$$AW = \lambda_{\max} W \quad (4.13)$$

### 4.3.3 脆弱性量化评估二级指标融合

本文所研究的含风电电力系统脆弱性问题，通过分析系统结构和系统状态来描述系统运行中潜在的缺陷，建立系统脆弱性量化评估模型。分别针对系统结构脆弱性和状态脆弱性的二级指标，采用层次分析法相关理论分配权重。对各自的二级评价指标进行两两比较，依据准则层元素间重要程度 1-9 标度可以得到如表 4.4 所示的结构脆弱性评价指标的重要性度量和如表 4.5 所示的状态脆弱性评价指标的重要性度量。

表 4.4 系统结构脆弱性评价指标重要性度量

名称	指标一	指标二	指标三
指标一	1	1/2	1
指标二	2	1	1
指标三	1	1	1

表 4.5 系统状态脆弱性评价指标重要性度量

名称	指标一	指标二	指标三
指标一	1	2	3
指标二	1/2	1	2
指标三	1/3	1/2	1

因此，可以得到系统结构脆弱性评价指标重要性度量初始判断矩阵  $A_1$  和系统状态脆弱性评价指标重要性度量初始判断矩阵  $A_2$ ，利用 *MATLAB* 求解初始判断矩阵对应的特征根及特征向量，采用算数平均法对权重向量进行归一化，分别得出结构脆弱性量化评价指标的初始权重分配向量  $W(1)$  和状态脆弱性量化评价指标的初始权重分配向量  $W(2)$  分别为：

$$W(1) = [W_1 \ W_2 \ W_3] = [0.2599 \ 0.4126 \ 0.3275] \quad (4.14)$$

$$W(2) = [W_1 \ W_2 \ W_3] = [0.5396 \ 0.2970 \ 0.1634] \quad (4.15)$$

其对应的一致性比例分别为：

$$CR_1 = \frac{\lambda_{max} - n}{RI(n-1)} = \frac{3.0092 - 3}{0.58} = 0.0462 \quad (4.16)$$

$$CR_2 = \frac{\lambda_{max} - n}{RI(n-1)} = \frac{3.0536 - 3}{0.58} = 0.0079 \quad (4.17)$$

由上式可知，结构脆弱性指标和状态脆弱性指标的一致性比例均满足  $CR < 0.1$  的一致性检验标准，说明初始判断矩阵具有良好的一致性，判断合理。故初始脆弱性量化评价指标的权重分配向量  $W$  即为所求，各脆弱性评价指标的权重分配如图 4.2 所示。由图可知，对系统结构脆弱性而言，指标二和指标三的影响最大。而对于系统状态脆弱性而言，指标一的影响最大。

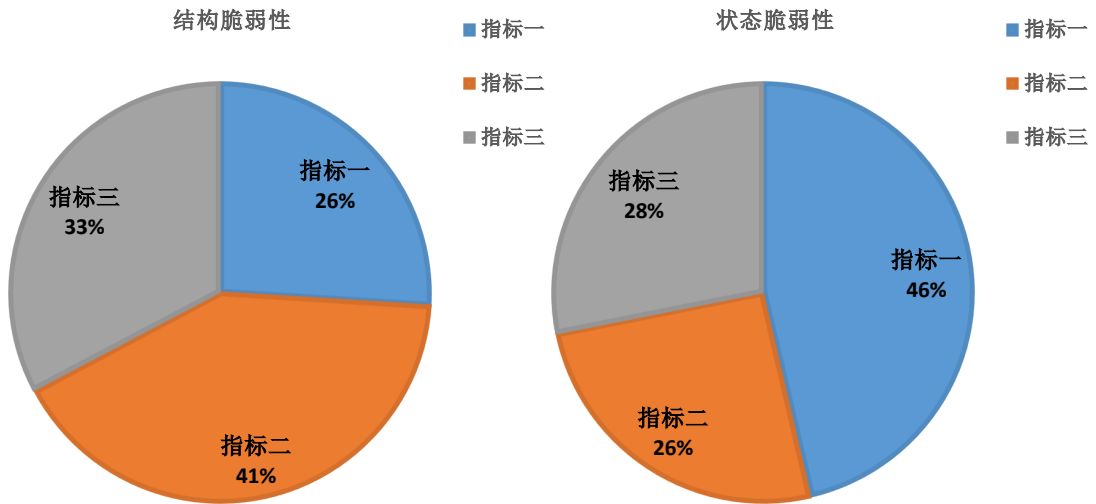


图 4.2 系统脆弱性指标的权重分配图

因此，分别对结构脆弱性的二级指标和状态脆弱性的二级指标进行融合如下：

$$\begin{aligned} V_1 &= I_1 \cdot W(1)^T \\ &= [I_{11}^* \ I_{12}^* \ I_{13}^*] \cdot [W_1 \ W_2 \ W_3]^T, \ V_1 \in [0, 1] \end{aligned} \quad (4.18)$$

$$\begin{aligned} V_2 &= I_2 \cdot W(2)^T \\ &= [I_{21}^* \ I_{22}^* \ I_{23}^*] \cdot [W_1 \ W_2 \ W_3]^T, \ V_2 \in [0, 1] \end{aligned} \quad (4.19)$$

## 4.4 脆弱性量化评估一级指标融合

经过上述的研究分析可得到量化归一后的系统结构脆弱性指标  $V_1$  和系统状态脆弱性指标  $V_2$ ，如何将这两个一级指标进行融合是本节研究的主要内容。考虑到这两个一级指标分别从不同的角度表征了系统的脆弱性，于是本文在研究  $D-S$  证据理论的基础上，进一步研究如何使用该方法来将脆弱性量化评估一级指标融合。

### 4.4.1 $D-S$ 证据理论

$D-S$  证据理论是由 *Dempster* 提出的最早用于解决统计问题的方法，后来经 *Shafer* 推广发展称为一个更具普遍意义的用于处理不确定性问题的理论。 $D-S$  证据理论原理是利用上、下限概率解决多值映射问题，其核心优点在于可以将不同数据源利用 *Dempster* 合成规则进行综合，进一步由“证据”和“组合”来处理不确定性问题。

由于证据理论所需的先验数据比概率推理中的更直观且易获得，而且 *Dempster* 合成规则可以综合不同数据源的数据，这使得该理论在信息融合、情报分析、多属性决策分析、案件分析、专家系统等多领域有着广泛的应用<sup>[82-84]</sup>。然而，该理论也存在一定的局限性，比如要求证据之间必须独立，计算上存在指数爆炸等问题。

本文的脆弱性量化评估一级指标融合问题中，由于一级指标分别从不同的角度进行脆弱性的评估，所以满足证据独立的特点。而且由于指标只有两个，并不存在计算上的指数爆炸的问题，因此可以使用该理论。 $D-S$  证据理论的基础包括以下三点：

#### (1) 识别框架

识别框架指的是互不相容的事件（命题）的完备样本集合  $\Theta$ ，表示为

$$\Theta = \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n \quad (4.20)$$

#### (2) 基本信任分配函数（BPA）

设  $\Theta$  为识别框架， $\emptyset$  为空集，若函数  $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ （ $2^\Theta$  为  $\Theta$  的幂集）满足条件

$$\begin{cases} m(\emptyset) = 0 \\ \sum_{A \subset \Theta} m(A) = 1 \end{cases} \quad (4.21)$$

则称  $m$  为框架  $\Theta$  上的基本信任分配函数（mass 函数）， $\forall A \subset \Theta$ ， $m(A)$  为  $A$  的基本信任分配值，其中，使得  $m(A) > 0$  的  $A$  称为焦元。

### (3) 证据理论合成规则

2 个证据合成:

假设  $m_1$  和  $m_2$  分别是同一识别框架  $\Theta$  上的 2 个基本信任分配函数,  $m_1$ 、 $m_2$  的焦点分别为  $A_i$  和  $B_j$ , 设  $K = \sum_{A_i \cap B_j} m_1(A_i)m_2(B_j) < 1$ , 若映射  $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ , 则合成规则为:

$$m(A) = \begin{cases} 0 & A = \Theta \\ \frac{\sum_{A_i \cap B_j} m_1(A_i)m_2(B_j)}{1 - K} & A \neq \Theta \end{cases} \quad (4.22)$$

多个证据合成:

假设  $m_1, m_2, \dots, m_r$  分别是同一识别框架  $\Theta$  上的 2 个基本信任分配函数, 对应的焦点分别为  $A_i (i = 1, 2, \dots, r)$ , 设  $K = \sum_{A_1 \cap \dots \cap A_r = \emptyset} m_1(A_1)m_2(A_1) \dots m_r(A_r) < 1$ , 若映射  $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ , 则  $r$  条证据的合成规则为:

$$m(A) = \begin{cases} 0 & A = \Theta \\ \frac{\sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_r = A} m_1(A_1)m_2(A_2) \dots m_r(A_r)}{1 - K} & A \neq \Theta \end{cases} \quad (4.23)$$

基于  $D-S$  理论的不确定性推理步骤如图4.3。由图可知, 该理论的推理首先要确定概率分配函数 ( $BPA$ ), 进而将证据数据知识的不确定性用  $BPA$  函数来表示。然后确定组合证据不确定性的算法, 进行 *Dempster* 证据合成, 从而得到最终的推理结果。

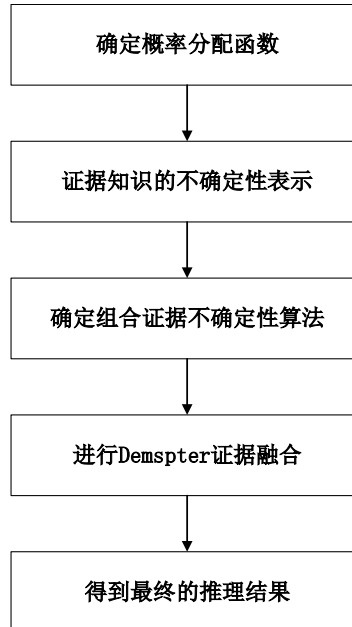


图 4.3 基于  $D-S$  理论的不确定性推理步骤图



#### 4.4.2 脆弱性量化评估一级指标融合

本文的系统脆弱性一级指标主要指的是结构脆弱性指标  $V_1$  和状态脆弱性指标  $V_2$ ，由于这两个指标分别从不同方向描述受到威胁后系统受影响的程度，因此两个指标可以视为独立的两条证据。鉴于  $D-S$  证据理论最大的特点是基于不确定的信息描述来估计不确定性的区间，所以脆弱性量化评估一级指标融合的问题可以用  $D-S$  证据理论的方法进行解决。

由前文可知，系统结构脆弱性指标  $V_1$  和系统状态脆弱性指标  $V_2$  采用层次分析法进行量化归一后，两个指标的上限阈值都是 0，代表系统是反脆弱的，系统绝对好。指标的下限阈值都是 1，代表系统是极脆弱的，系统绝对差。因此，两个指标的证据  $P_1$ 、 $P_2$  可以表示为：

$$P_1 = V_1 \times 100\% \quad (4.24)$$

$$P_2 = V_2 \times 100\% \quad (4.25)$$

两个证据的取值均为 0 – 1，设其相应的识别框架定义为：

$$\Theta = \{antivulnerable, vulnerable\} \quad (4.26)$$

则可定义如下的  $BPA$  函数：

$$m_1(\{antivulnerable\}, \{vulnerable\}) = (1 - P_1, P_1) \quad (4.27)$$

$$m_2(\{antivulnerable\}, \{vulnerable\}) = (1 - P_2, P_2) \quad (4.28)$$

在获得了两个指标的  $BPA$  之后，就可以用 *Dempster* 合成规则融合 2 个  $BPA$  值，从而得到系统的脆弱性描述。根据合成规则的公式4.22，定义脆弱性指数  $VI$  如下：

$$\begin{aligned} VI &= \{vulnerable\} \\ &= \frac{\sum_{X \cap Y = \{vulnerable\}} m_1(X) m_2(Y)}{\sum_{X \cap Y \neq \emptyset} m_1(X) m_2(Y)} \\ &= \frac{P_1 \times P_2}{P_1 \times P_2 + (1 - P_1) \times (1 - P_2)} \end{aligned} \quad (4.29)$$

可以看出， $VI$  值代表了系统的脆弱性指数，它结合了系统结构脆弱性指标与系统状态脆弱性指标这两个一级指标。而一级指标由各自的二级指标融合得到，因此  $VI$  值综合评估了含风电电力系统的脆弱性，具有普适意义。 $VI$  值越大，代表着系统越脆弱，系统越差。反之，系统具有的脆弱性越小，代表系统越好。

## 4.5 系统脆弱性量化评价体系描述

结合第三章含风电电力系统的脆弱性研究以及上述系统脆弱性量化评估指标及系统脆弱性量化评估指标融合的研究可知，建立控制系统脆弱性量化评价体系的数学模型主要有以下两部分工作。

首先，根据含风电电力系统的组成和特性，建立了系统模型。然后，在研究了含风电电力系统的脆弱性本质和数学描述的基础上，分别从结构脆弱性和状态脆弱性两方面进行研究。对于系统结构脆弱性，分别基于复杂网络和 *PageRank* 进行建模。对于系统状态脆弱性，则采用蒙特卡洛的概率潮流进行建模。

其次，对于得到的结构脆弱性模型，根据系统结构脆弱性的定义，分别计算出表征拓扑连接强度的电气度指标  $I_{11}$ 、表征拓扑能量传输分布的电气介数指标  $I_{12}$ 、表征拓扑重要性的 *PR* 排序数指标  $I_{13}$ 。将这些指标归一化后得到系统结构脆弱性指标向量  $I_1 = [I_{11}^* \ I_{12}^* \ I_{13}^*]$ 。同理，根据系统状态脆弱性的定义，分别计算出表征环境变化导致系统具有脆弱性可能的电压越线率指标  $I_{21}$ 、表征系统电压偏差状态变化均值的电压期望指标  $I_{22}$ 、表征系统电压状态偏差状态变化剧烈程度的电压方差指标  $I_{23}$ 。再将指标归一化后得到系统状态脆弱性指标向量  $I_2 = [I_{21}^* \ I_{22}^* \ I_{23}^*]$ 。采用层次分析法分别对各自的脆弱性量化指标进行权重分配，得到权重分配向量  $W(1)$  和  $W(2)$ ，进一步得到结构脆弱性指标  $V_1 = [I_{11}^* \ I_{12}^* \ I_{13}^*] \cdot [W_1 \ W_2 \ W_3]^T$  和状态脆弱性指标  $V_2 = [I_{21}^* \ I_{22}^* \ I_{23}^*] \cdot [W_1 \ W_2 \ W_3]^T$ 。最后，采用 *D-S* 证据理论将结构脆弱性指标与状态脆弱性指标进行融合，得到系统综合脆弱性指标  $VI$ 。至此，本文研究的含风电电力系统脆弱性量化评估体系数学模型建立完毕。

## 4.6 本章小结

本章在系统脆弱性的研究基础上，根据脆弱性的定义与特征，针对结构脆弱性和状态脆弱性分别选取了 3 个能够反映脆弱性的指标，从而得到系统脆弱性综合评估指标集，其中对一级指标和二级指标进行了定义与区分。鉴于系统脆弱性问题的主观性，对系统脆弱性量化评估体系问题进行分析与研究。

针对脆弱性二级指标首先选择合适的方法进行归一化处理，然后采用层次分析法进行权重分配，得到结构脆弱性和状态脆弱性的一级指标。最后，在 *D-S* 证据理论的研究基础上，将结构脆弱性指标与状态脆弱性指标进行融合，得到了系统综合脆弱性指标，为后文的脆弱性量化分析提供理论基础。

## 第 5 章 含风电电力系统的脆弱性量化分析

### 5.1 引言

依据本文所建立的含风电电力系统脆弱性分析方法，对系统进行脆弱性分析评估。首先根据系统的特性进行建模，包括随机性风电功率模型与随机性负荷概率模型。其次针对系统的拓扑和状态进行脆弱性分析，得到系统的脆弱性指标集。最后分别采用层次分析法和  $D-S$  证据理论对二级指标和一级指标进行融合，最终得到系统的综合脆弱性。

本章以 *IEEE39* 电力系统为例，在系统模型建立的基础上，分别研究了单风机接入和多风机接入下系统的脆弱性。单风机接入的情况下，研究了系统的结构脆弱性，并且对比了不同风机接入下系统的状态脆弱性，最终得到单风机系统的综合脆弱性。多风机接入的情况下，首先对比了双风机与单风机系统的脆弱性，再对多风机系统的脆弱性进行分析。最后，使用不同的电力系统数据进行脆弱性量化分析。

### 5.2 *IEEE39* 风力发电系统的模型

鉴于真实的电力系统结构过于庞大、复杂，且具体的拓扑及数据参数属于保密范畴，因此本文选择新英格兰测试系统数据——一套广泛用于学术研究的数据系统作为研究对象，进行脆弱性分析与量化评估。这套数据按照节点数目的不同而具有不同的测试数据集。

本节采用 *IEEE39* 测试系统进行仿真实验，首先对 *IEEE39* 测试系统的组成进行一个简单的介绍。该系统由 10 个发电节点，29 个负荷节点和 46 条传输线路组成。该系统的基准电压为 345KV，基准功率为 100MVA。其中负荷节点则被称为  $PQ$  节点，即负荷节点的有功功率和无功功率已知，待求的是电压幅值和相角。由表 5.1 所示，节点序号从 1 到 29。

发电节点又被称为  $PV$  节点，即发电节点的有功功率和节点电压已知，待求的是无功功率和电压相角。由表 5.2 所示，节点序号从 30 到 39，其中 31 节点为平衡节点。平衡节点的作用是提供系统的相位基准，这样系统中其他节点的电压相位以它为参考，由于该节点为  $V\Theta$  节点，对系统起到功率平衡的作用。

表 5.1 IEEE39 系统负荷节点

节点名	额定有功功率 (MW)	额定无功功率 (MVar)	节点名	额定有功功率 (MW)	额定无功功率 (MVar)
1	97.6	44.2	16	329.0	32.3
2	0.0	0.0	17	0.0	0.0
3	322.0	2.4	18	158.0	30.0
4	500.0	184.0	19	0.0	0.0
5	0.0	0.0	20	680.0	103.0
6	0.0	0.0	21	274.0	115.0
7	233.8	84.0	22	0.0	0.0
8	522.0	176.6	23	247.5	84.6
9	6.5	-66.6	24	308.6	-92.2
10	0.0	0.0	25	224	47.2
11	0.0	0.0	26	139	17
12	8.53	88.0	27	281	75.5
13	0.0	0.0	28	206	27.6
14	0.0	0.0	29	283.5	26.9
15	320.0	153.0			

表 5.2 IEEE39 系统发电节点

节点名	额定有功功率 (MW)	是否为平衡节点
30	250	否
31	677.81	是
32	650	否
33	632	否
34	508	否
35	650	否
36	560	否
37	540	否
38	830	否
39	1000	否

由第二章的研究可知，本文采用韦伯分布表示风速的概率模型如式 2.3，式中的  $P_R$  为对应的发电机节点的额定有功功率，额定风速为  $15m/s$ ，切入风速为  $5m/s$ ，切出风速为  $20m/s$ 。负荷变化采用正态分布的概率模型如式 2.4，其中均值为对应负荷节点的额定功率，标准差为对应的额定功率的 0.2 倍，根据正态分布的特性可知，随机负荷的功率 95.449% 分布在两个标准差的范围内（0.8 倍到 1.2 倍之间）。至此，IEEE39 风力发电系统的模型建立完毕。

### 5.3 单风机电力系统脆弱性分析评估

根据本文之前的研究内容，这一节对含单个风机的电力系统的脆弱性进行了分析。以 *IEEE39* 测试系统为例，分别将不同位置的发电节点接入风能，通过分析系统的结构脆弱性和状态脆弱性得到系统的综合脆弱性指标，在此基础上得出相应的结论。

#### 5.3.1 单风机电力系统结构脆弱性分析

由前文可知，系统的结构脆弱性表征的是当意外发生时，系统自身组成因素遭到破坏后仍能够保持结构完整的能力。因此，通过拓扑的不同建模，我们得到了基于复杂网络的无向图模型和基于 *PageRank* 的有向图模型，分别得到了各自对应的系统结构脆弱性指标。再将这三个二级指标进行融合，得到系统的结构脆弱性指标。

首先针对 *IEEE39* 系统的结构特点，可以得到如下的拓扑示意图。

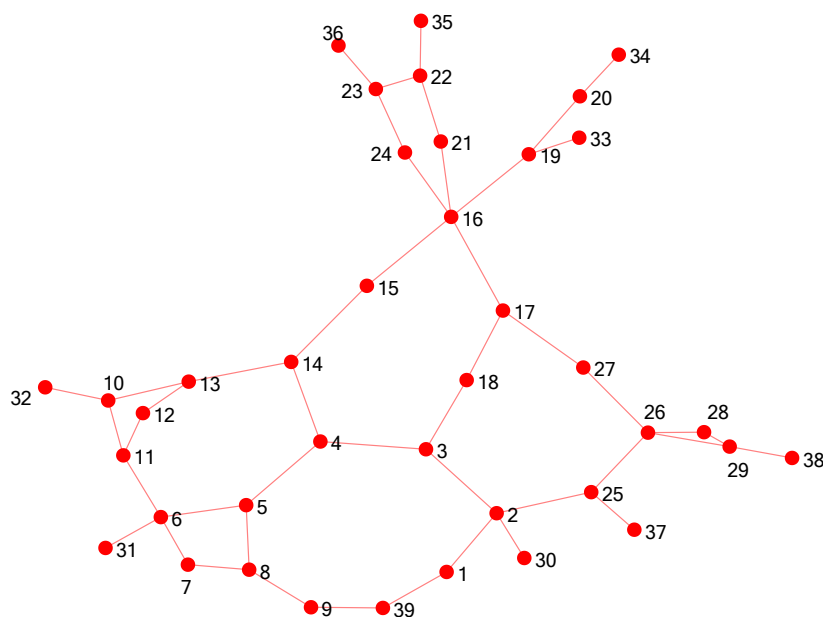


图 5.1 IEEE39 系统拓扑示意图

由于结构脆弱性指标的实质反映的是节点在拓扑中的重要程度，因此结构脆弱性指标的归一化选择了排序归一法，即按照节点在拓扑中的重要性排序进行量化。重要性最小的节点脆弱性指标为 0，重要性最大的节点脆弱性指标为 1。用这种方法量化了各自的二级指标后，再根据层级分析法得出的权重向量  $W(1) = [0.2599 \ 0.4126 \ 0.3275]$  进行融合得到结构脆弱性指标。如下表所示，由于每个结构脆弱性二级指标表示的意义不同所以计算的结果不同。在 39 个节点中，电气度指标最大的是节点 6，电气介数指标最大的是节点 16，*PR* 排序指标

最大的是节点 4。

表 5.3 IEEE39 系统结构脆弱性指标

节点序号	电气度指标	电气介数指标	PR 排序指标	结构脆弱性指标
1	0.105263158	0.131578947	0.447368421	0.228160526
2	0.815789474	0.973684211	0.684210526	0.837844737
3	0.289473684	0.947368421	0.921052632	0.767763158
4	0.394736842	0.473684211	1	0.625534211
5	0.842105263	0.105263158	0.631578947	0.469136842
6	1	0.421052632	0.710526316	0.666323684
7	0.578947368	0.236842105	0.526315789	0.420557895
8	0.657894737	0.5	0.815789474	0.644457895
9	0.052631579	0.394736842	0.868421053	0.460955263
10	0.894736842	0.763157895	0.421052632	0.685315789
11	0.684210526	0.368421053	0.289473684	0.424639474
12	0	0	0.236842105	0.077565789
13	0.605263158	0.184210526	0.263157895	0.319497368
14	0.447368421	0.157894737	0.578947368	0.371023684
15	0.184210526	0.289473684	0.842105263	0.443102632
16	0.973684211	1	0.947368421	0.975923684
17	0.236842105	0.078947368	0.763157895	0.344063158
18	0.078947368	0.052631579	0.736842105	0.28355
19	0.868421053	0.657894737	0.394736842	0.626426316
20	0.631578947	0.868421053	0.552631579	0.703444737
21	0.763157895	0.526315789	0.605263158	0.613726316
22	0.921052632	0.736842105	0.368421053	0.664060526
23	0.789473684	0.894736842	0.473684211	0.729484211
24	0.210526316	0.315789474	0.657894737	0.400471053
25	0.736842105	0.578947368	0.315789474	0.5338
26	0.526315789	0.342105263	0.789473684	0.536494737
27	0.157894737	0.263157895	0.894736842	0.442642105
28	0.263157895	0.210526316	0.5	0.319007895
29	0.947368421	0.684210526	0.342105263	0.640565789
30	0.131578947	0.447368421	0	0.218781579
31	0.552631579	0.026315789	0.026315789	0.163105263
32	0.473684211	0.789473684	0.052631579	0.466084211
33	0.421052632	0.710526316	0.078947368	0.42845
34	0.315789474	0.552631579	0.105263158	0.344563158
35	0.5	0.815789474	0.131578947	0.509636842
36	0.368421053	0.631578947	0.157894737	0.408052632
37	0.342105263	0.605263158	0.184210526	0.398973684
38	0.710526316	0.842105263	0.210526316	0.601065789
39	0.026315789	0.921052632	0.973684211	0.705747368

根据计算可以得到系统的结构脆弱性结果如下图。由图可知，该系统的拓扑中重要程度最高的节点是 16，由拓扑示意图不难看出，该节点位于拓扑的中心位置，且与该节点相连的支路有 5 条，这些支路承担了较多的能量输送，负责把位于拓扑边缘的发电节点产生的电能输送至各负荷节点，所以该节点对拓扑的重要性大。其次重要性较高的节点分别是 2、3、23、39，这些节点无论是从复杂网络模型的角度还是从 *PageRank* 模型的角度而言都是对整个拓扑非常重要的节点。同时，不难看出计算结果中结构脆弱性较低的节点有 12、31、30、1，这些节点由于自身在拓扑中所起的作用小，所连支路的传输力小所以具有较小的重要性。

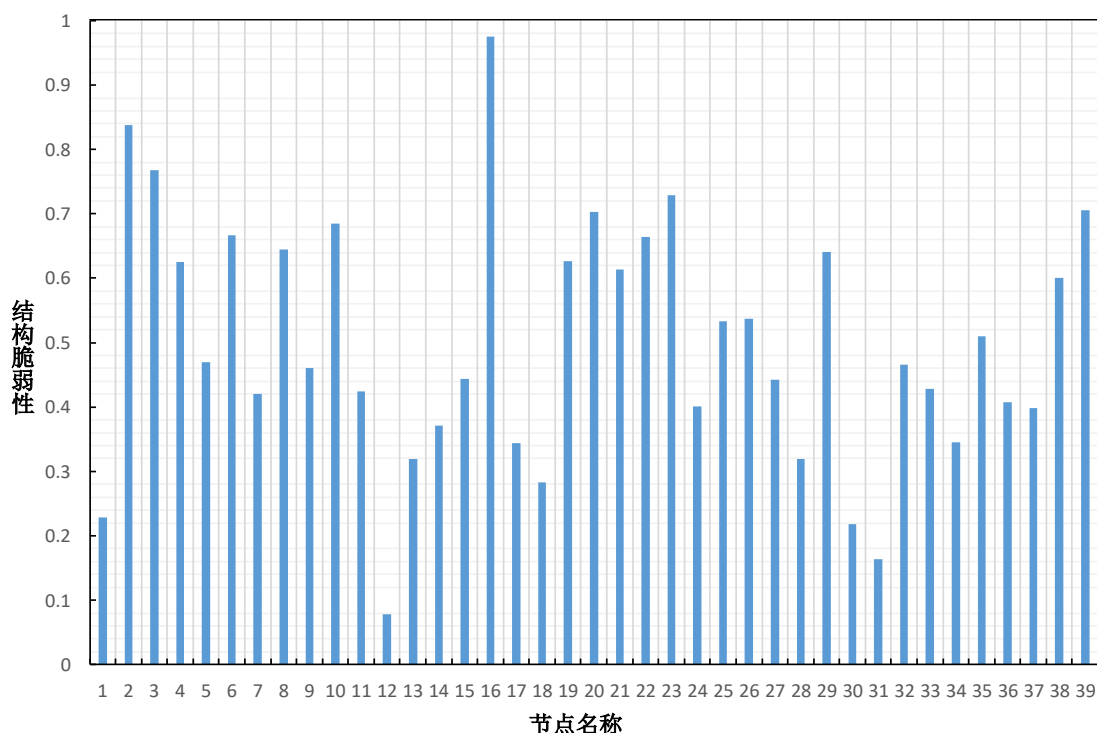


图 5.2 IEEE39 系统结构脆弱性结果

### 5.3.2 单风机电力系统状态脆弱性分析

本节研究单个风机接入时系统的状态脆弱性，鉴于 *IEEE39* 系统的发电节点有 10 个，从节点 30 到节点 39，因此分别研究每个发电节点被风机代替后对整个系统的影响。根据之前的研究可知，含风电系统的状态脆弱性使用蒙特卡洛的方法通过大量的实验模拟随机性风速和负荷的作用下系统各节点电压偏差的状态。由于发电节点在潮流计算中是 *PV* 节点，即节点的功率和电压固定为已知量，所以理论上发电节点在环境变化中，其电压状态不发生改变。因此，系统状态脆弱性的评估分析只针对负荷节点，对于 *IEEE39* 系统而言，即从节点 1 到节点 29。

下图表示的是发电节点 39 接入风电后，系统所有负荷节点状态脆弱性的变化。其中，指标 1 代表的是环境变化过程中，各负荷节点的电压越线率，在接入 39 风机后，导致不同负荷节点的越线率差异很大。指标 2 代表的是负荷节点电压偏差的期望，在环境的变化过程中，该指标的变化幅度较小。指标 3 代表了节点电压偏差的方差，整个变化中该指标数值较小，差异性不大。然后，根据层次分析法得到的权重向量  $W(2) = [0.5396 \ 0.2970 \ 0.1634]$  进行指标融合，进一步得到状态脆弱性指标。

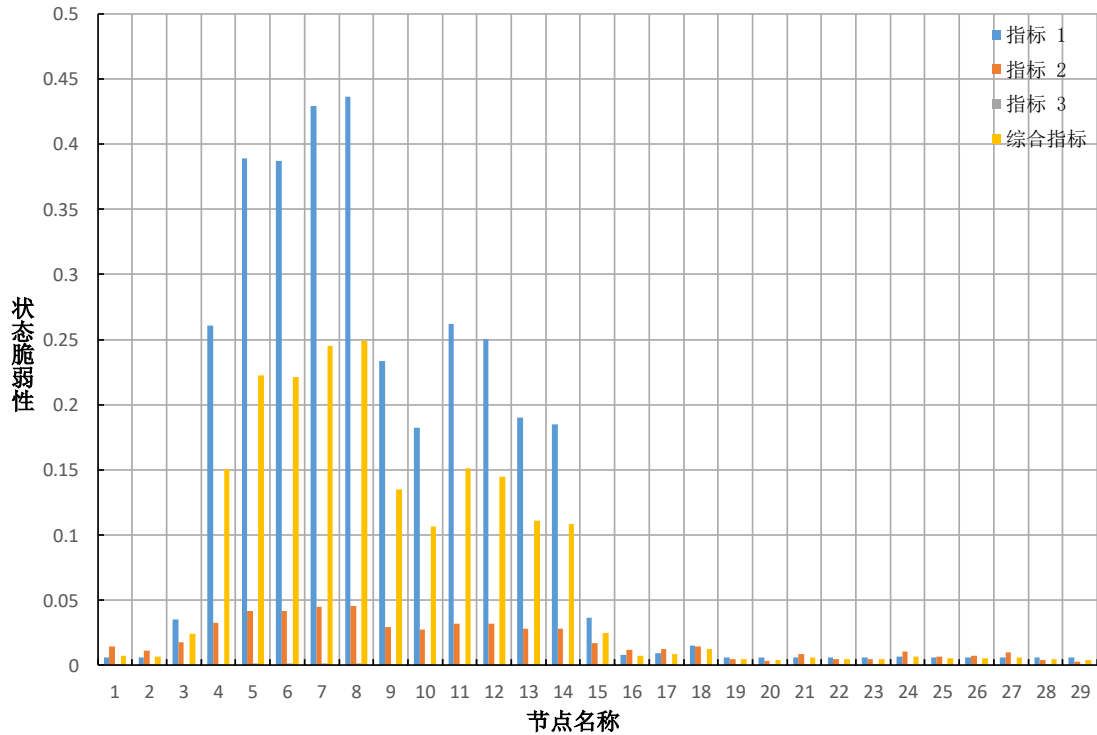


图 5.3 发电节点 39 接入风电对负荷节点状态脆弱性影响

以节点 5 的状态脆弱性为观察对象，对比了不同发电节点被风机代替后，其状态脆弱性指标的变化，如下图。由图可见，接入单个风机的不同导致同一个负荷节点的状态脆弱性指标的变化也不同。其中，指标 1 在接入单个风机不同的情况下，该指标变化剧烈。指标 2 的变化幅度较小，指标 3 在整个变化中本身数值就很小，变化较平。

图 5.4 表示的是不同单风机接入下同一个负荷节点的状态脆弱性的变化。图中结果显示，在 IEEE39 系统中，当 39、38 发电机被风机代替后，对负荷节点 5 的影响比较大。由该系统的组成不难看出，发电节点 39 的输出功率  $1000MW$  是所有发电节点中功率最大的，发电节点 39 的输出功率  $830MW$  其次最大，其他发电节点的功率较小。由于这两个发电节点本身的输出功率远超其他发电节点，所以它们各自接入风能对系统状态的影响最大，体现在节点电压的越线率、节点电压偏差的期望都很大。这也是使负荷节点 5 状态脆弱性指标在后期发生较大



幅度变化的原因。

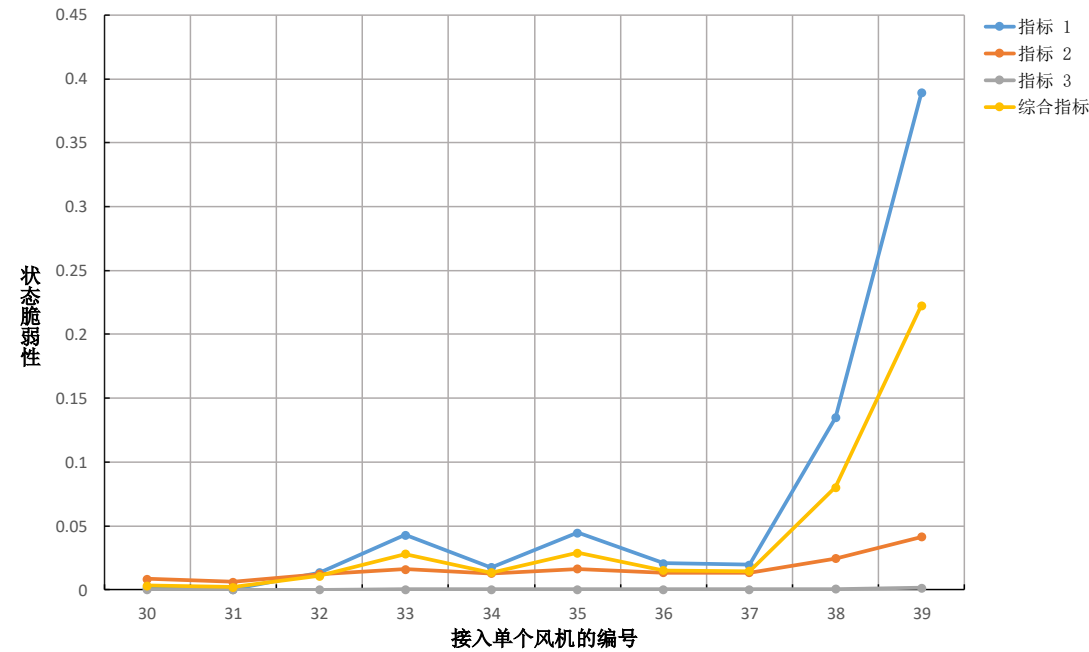


图 5.4 不同风机接入对负荷节点 5 的状态脆弱性影响

然而对于拥有着相同输出功率的发电机节点如 32 和 35，其额定输出功率都是  $650MW$ ，上述结果显示它们各自接入风能对同一负荷节点的影响是不同的。于是对比了这两个相同功率的单风机接入下系统的状态脆弱性如图5.5，结果表明 35 接入风电对负荷节点的影响比 32 接入风电的影响普遍较大。

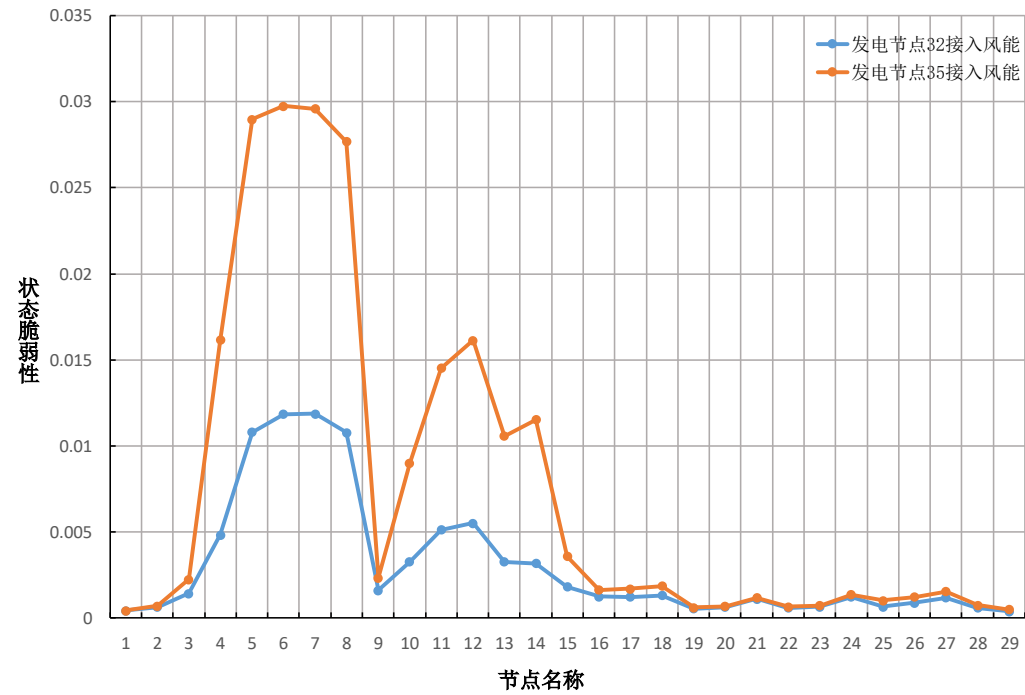


图 5.5 相同功率的单风机接入下系统的状态脆弱性

### 5.3.3 单风机电力系统综合脆弱性分析

通过上面对单风机电力系统结构脆弱性分析与状态脆弱性分析，我们可以得到融合后的结构脆弱性指标与状态脆弱性指标，再根据 4.4 的  $D-S$  证据理论将这两个一级指标进行融合从而得到系统脆弱性的综合指标。由于系统的脆弱性分析主要针对负荷节点，所以本节的综合脆弱性的研究对象依然是 *IEEE39* 系统中的负荷节点 1 至负荷节点 29。通过分析系统脆弱性综合指标，企图得到系统的薄弱环节。

下图显示的结果分别是发电节点依次单独接入风电后，系统各个负荷节点的综合脆弱性指标的变化。由于系统综合脆弱性指标融合了结构脆弱性指标与性能脆弱性指标，所以其计算结果会与上述得到的结果数值不同。但是我们发现，在不同的发电节点依次单独接入风电的情况下，负荷节点的脆弱性变化趋势却是大致相同的。也就是说脆弱性高的负荷节点无论是哪个发电节点单独接入风电它的脆弱性都相对较高，比如节点 4、6、8、10、16。而脆弱性低的负荷节点在任何发电节点单独接入风电的情况下，其脆弱性都相对较小，比如节点 1、19、20、22、28。

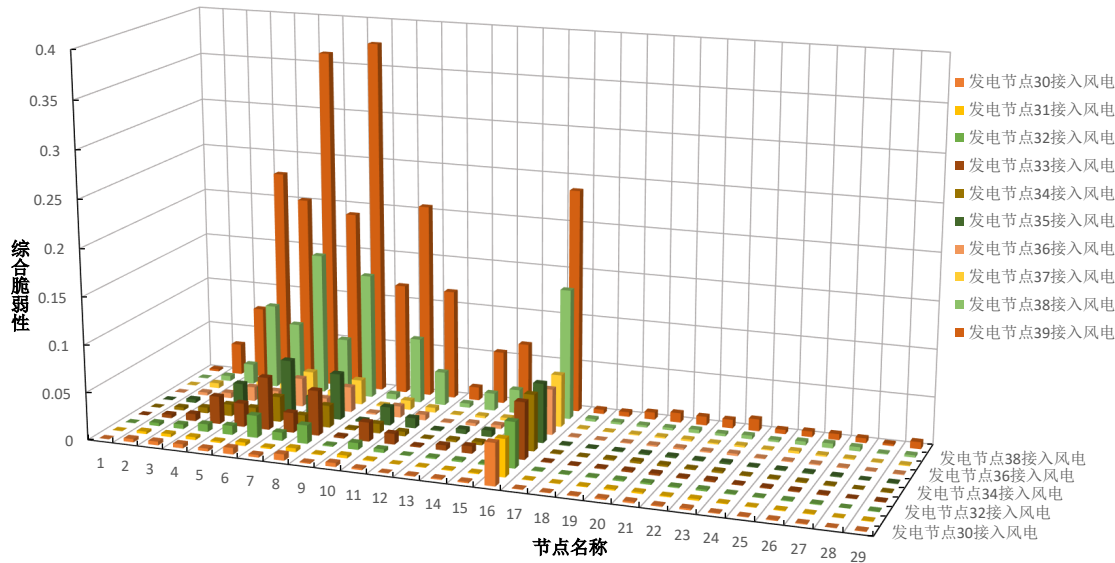


图 5.6 单风机接入下负荷节点的综合脆弱性

## 5.4 多风机电力系统脆弱性分析评估

上一节分析了单个风机接入下的系统脆弱性，本节着重对多个风机接入的电力系统的脆弱性进行研究，通过结构脆弱性指标和状态脆弱性指标进一步计算出系统的综合脆弱性。首先对比了双风机与单风机系统的脆弱性，再对多风机系统的脆弱性进行研究，从而得到一些有用的结论。

### 5.4.1 双风机与单风机系统脆弱性比较

按照之前的分析，理论上两个风机接入会比单个风机接入使得系统的脆弱性变大，因为更多的风电接入使得系统的状态变化的不确定性更大，虽然结构脆弱性不会因此发生变化，但是随着状态脆弱性的变化使得系统的综合脆弱性变化很大。因此本节着重对比了双风机接入的电力系统的状态脆弱性与单风机接入的系统的状态脆弱性。

在 *IEEE39* 系统中，以 32、33 两个发电节点同时接入风电和各自分别单独接入风电为例，进行系统的脆弱性分析得到如下所示的结果。从图中可以看出，在双风机同时接入的情况下，原来脆弱性大的薄弱节点此时的脆弱性更大了。而对于同一个负荷节点而言，多一个发电节点接入风电会比任何发电节点单独接入风电的状态脆弱性都大。

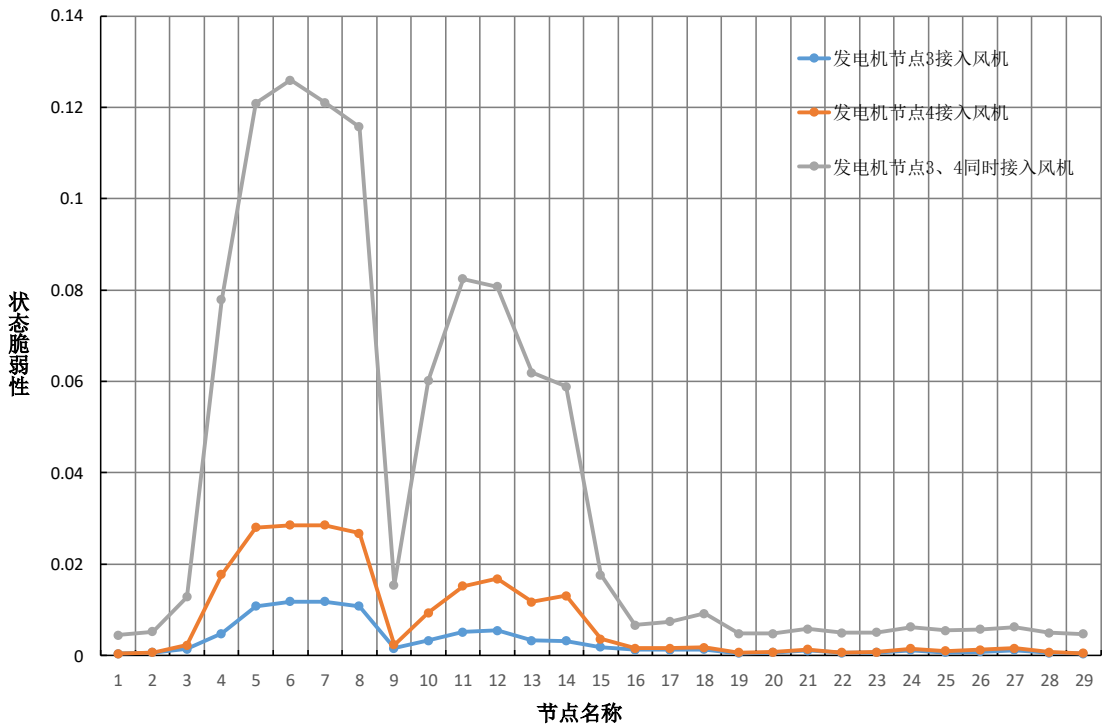


图 5.7 单风机与双风机接入下系统的状态脆弱性

### 5.4.2 多风机电力系统脆弱性分析评估

在对比了双风机接入的电力系统后，本节对多风机的电力系统的脆弱性进行研究。理论上分析由于更多数目的发电机节点被风机替代，使得系统状态变化的随机性、不确定性会更大。因此，本节通过不断地增加风机的数目来观察系统的脆弱性变化。

在 *IEEE39* 系统中，仿真实验起初是只有 31 发电节点接入风电，然后依次不断的增加接入风电的发电节点数目：32、32...39，直到所有的发电节点都被接入风电。取负荷节点 5 作为研究对象，进行状态脆弱性分析得到如下的结果。由图可知，随着接入风机数目的增大，指标 1 增长迅速，到最后所有发电节都被风机取代后，指标 1 接近极大值 1。这是因为由于越来越多的发电机被风机取代后，系统状态的随机性越来越大，使得系统处于脆弱域和不可运行域的几率越来越大。而当所有发电机都变成风机的时候，系统已经非常的脆弱了，几乎无法正常运行了。指标 2 和指标 3 虽然变化幅度较小，但是都在随着风机数目的增长而变大。最后得到的把三个指标融合的状态脆弱性指标也随着接入风机的数目在持续增长。可见风机的接入量直接影响着系统的状态脆弱性，且成正比的关系。

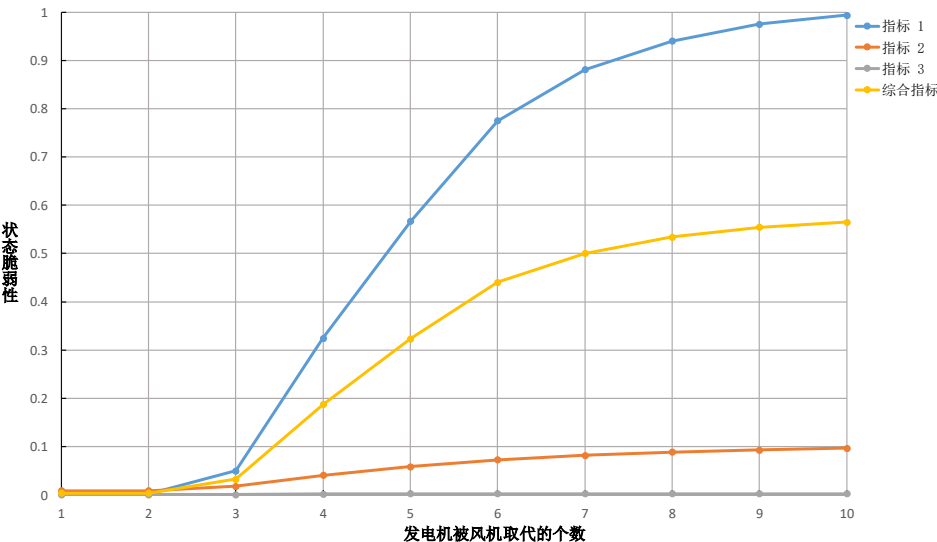


图 5.8 风机接入数目对负荷节点 5 的状态脆弱性影响

经过上述的研究分析，可知随着风机数目的增长负荷节点的状态脆弱性指标在逐渐增大，这表明系统的性能越来越差。通过结合状态脆弱性指标与结构脆弱性指标，我们可以得到随着接入风电的发电节点比率的增长，系统综合脆弱性的变化情况（如下图），从而找到系统的薄弱环节节点。从图中可以看出，随着风电接入量的增大，所有节点的脆弱性都有了不同程度的增长。其中一些脆弱性较高的节点在这个过程中一直保持远高于其他节点的脆弱性比如节点 4、6、8、10、16。也有一些开始脆弱性相对较低的节点却逐渐增大称为脆弱性相对较

高的节点，比如节点 2、20、23，这都是系统拓扑和状态共同作用的结果。

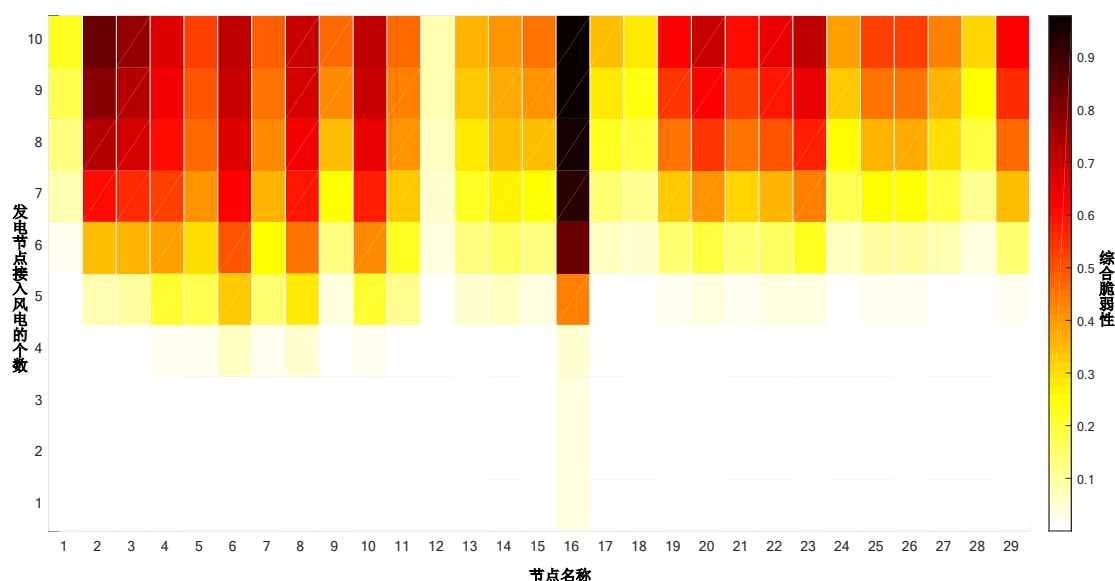


图 5.9 多风机接入下负荷节点的综合脆弱性

综合 *IEEE39* 系统在风电接入下的性能，包括单风机和多风机的情况。可以知道，该系统的风机数量大于 4 时，就会有负荷节点的脆弱性高于 0.8，当风机数目大于 6 时，会有 24% 的节点脆弱性高于 0.5。所以系统的发电节点接入风电的量应该谨慎，越多系统越脆弱。考虑到单风机与多风机综合情况，认为该系统的薄弱节点有 16、6、8、10、2、20、23 等，这些节点对环境变化或意外的反应强烈，敏感度好，脆弱性大。相比之下，脆弱性较低的节点有 1、12、24、28、18 等，这些节点对环境变化具有较强的抵抗力，脆弱性小。

## 5.5 其他风力发电系统的脆弱性分析

为了验证本文所建立的含风电电力系统脆弱性分析方法具有普适性，本节对不同的数据系统进行了脆弱性分析。鉴于 *IEEE118* 是常用来实验研究的较大型的电力系统之一，所以选择该系统进行脆弱性分析。

### 5.5.1 *IEEE118* 风力发电系统的模型

*IEEE118* 测试系统具有 118 个节点，54 个发电节点，64 个负荷节点，186 条支路。其拓扑示意图如下。该系统大多节点的基准电压为 138KV，小部分节点的基准电压为 345KV，基准功率为 100MVA。具体的发电节点和负荷节点数据见附录 A，从数据中可以看出发电节点中有很多节点的额定功率是 0，只有 19 个发电节点额定有功功率不为 0，所以随机性风电功率模型只能用在这些节点上。

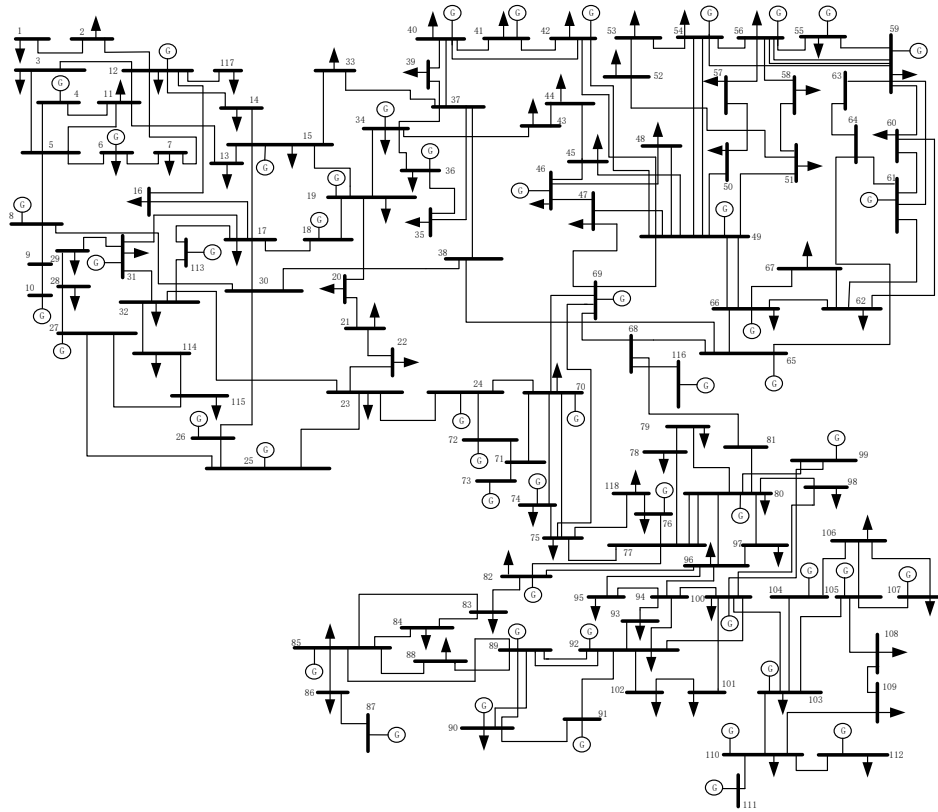


图 5.10 IEEE118 拓扑示意图

该风力发电系统的建模依据第二章的研究，采用韦伯分布表示风速的概率模型，额定风速为  $15m/s$ ，切入风速为  $5m/s$ ，切出风速为  $20m/s$ 。负荷变化采用正态分布的概率模型如式 2.4，其中均值为对应负荷节点的额定功率，标准差为对应的额定功率的 0.2 倍，根据正态分布的特性可知，随机负荷的功率 95.449% 分布在两个标准差的范围内（0.8 倍到 1.2 倍之间）。至此，IEEE118 风力发电系统的模型建立完毕。

### 5.5.2 IEEE118 系统脆弱性分析评估

根据之前的研究理论，本节对 IEEE118 系统进行单风机电力系统脆弱性分析。首先根据结构脆弱性的定义，计算三个二级结构脆弱性指标，再将二级指标融合得到结构脆弱性指标。其次根据状态脆弱性的定义，研究不同的发电节点接入风电下系统状态的变化情况，得到状态脆弱性指标。最后根据  $D-S$  证据理论融合得到单风机系统的脆弱性。

下图为该系统的结构脆弱性指标结果，如图所示，该系统的拓扑重要程度较高的节点是 100, 77, 59, 5, 8 等，这些节点无论基于复杂网络模型还是 *PageRank* 模型都是非常重要的元素。相比之下，该系统的拓扑重要程度较低的节点是 87、24、114、73、113 等，这些节点在拓扑中的重要性相对较低。

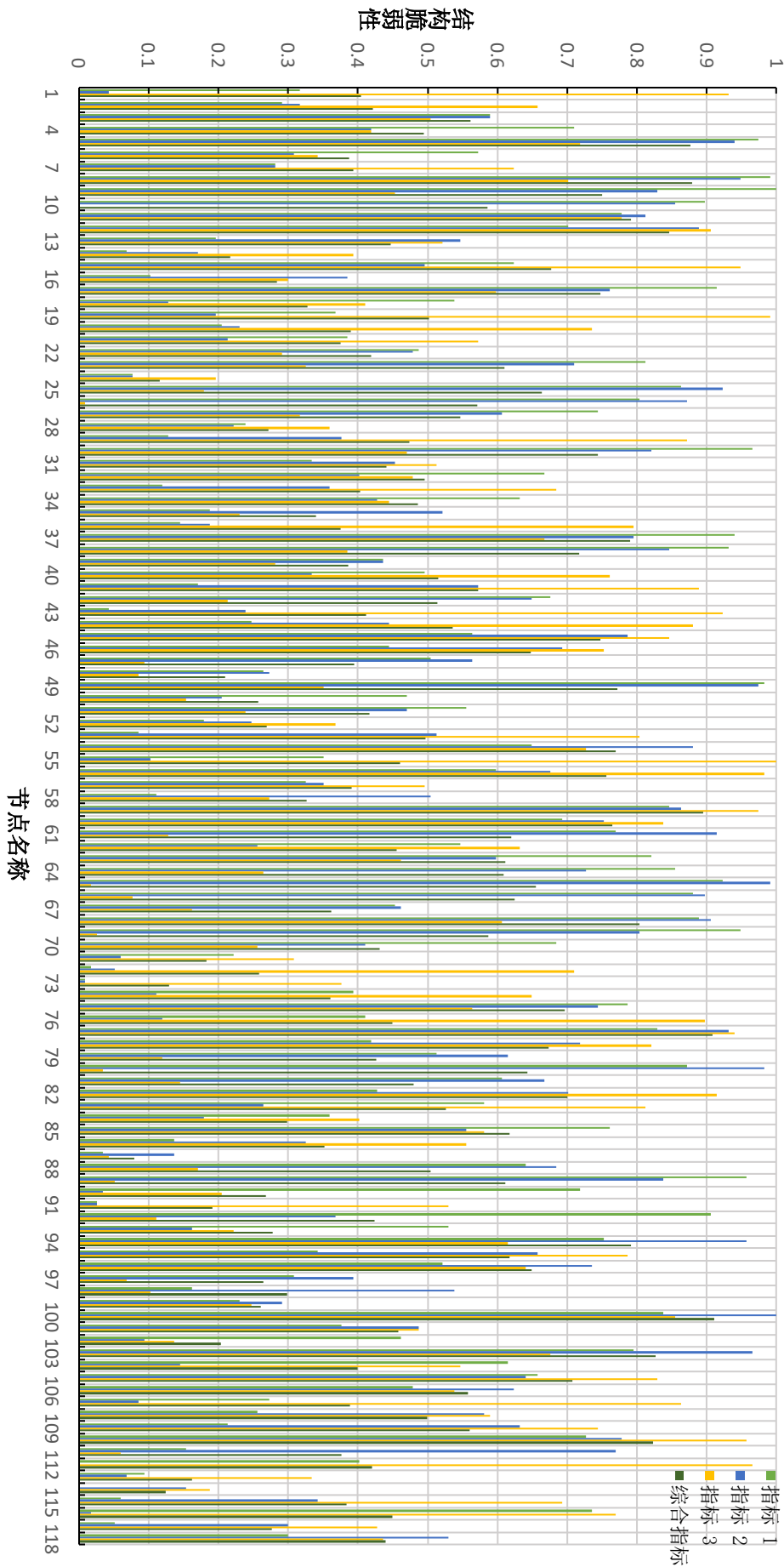


图 5.11 IEEE118 系统结构脆弱性

同样地，根据 *IEEE118* 系统的随机性风电功率模型和负荷概率模型进行蒙特卡洛实验统计得到系统的状态脆弱性指标。再根据  $D-S$  证据理论将系统的结构脆弱性指标和状态脆弱性指标进行融合得到系统的综合脆弱性指标。下表是发电节点 10 接入风电的单风机系统的脆弱性分析结果，由表可以看出，该单风机系统的脆弱性普遍偏小，这是因为该系统节点数目庞大，单个风机对系统状态的影响较小。其中，脆弱性较大的节点是节点 9、节点 30、节点 38、节点 45，这些节点即为该系统的薄弱环节。

表 5.4 *IEEE118* 单风机电力系统负荷节点综合脆弱性

节点名	综合脆弱性	节点名	综合脆弱性	节点名	综合脆弱性
2	0.000154385	41	0.000420636	82	0.001395726
3	0.000266589	43	0.00163411	83	0.000543576
5	0.000956597	44	0.003616794	84	0.000109745
7	2.3506E-05	45	0.007050231	86	0.000245509
9	0.302331265	47	0.000538372	88	0.000304921
11	0.000819715	48	6.41342E-05	93	0.000112425
13	0.000542244	50	7.41624E-05	94	0.001638393
14	5.66768E-05	51	0.000321682	95	0.00131232
16	0.000269775	52	0.000209298	96	0.000952485
17	0.00181432	53	0.000626504	97	0.000127843
20	0.000585624	57	0.000128436	98	0.000150473
21	0.000817307	58	0.000148223	101	0.000471828
22	0.00100946	60	0.000255372	102	5.15622E-05
23	0.000886376	63	0.000109107	106	0.000494005
28	8.38634E-05	64	9.83874E-05	108	7.44908E-05
29	0.000123675	67	0.000136764	109	0.000124683
30	0.005435762	68	9.52089E-05	114	2.17796E-05
33	0.000591607	71	4.27656E-05	115	0.000106394
35	7.21014E-05	75	0.001019156	117	0.000260899
37	0.002718523	78	0.000454276	118	0.000301258
38	0.009957741	79	0.00030221		
39	0.000203294	81	4.04024E-05		

此外，针对该系统的发电节点接入风电的数目不同的情况下，选取部分负荷节点的综合脆弱性指标的结果如下图。由图可以观察到，对于 *IEEE118* 这样的节点数目庞大的系统，随着风电接入数目的增大负荷节点的脆弱性虽然总体的趋势是增大的，但是并不完全成正相关的关系。而且由于该系统存在一大部分发电节点的有功功率输入为 0，剩余的 19 个可接入风电的发电节点功率小且位置分散对负荷节点的影响普遍较小。所以相比之下，*IEEE39* 风力发电系统的脆弱性结果变化起伏较大，而 *IEEE118* 风力发电系统实验结果符合结论但变化趋势



略平缓。

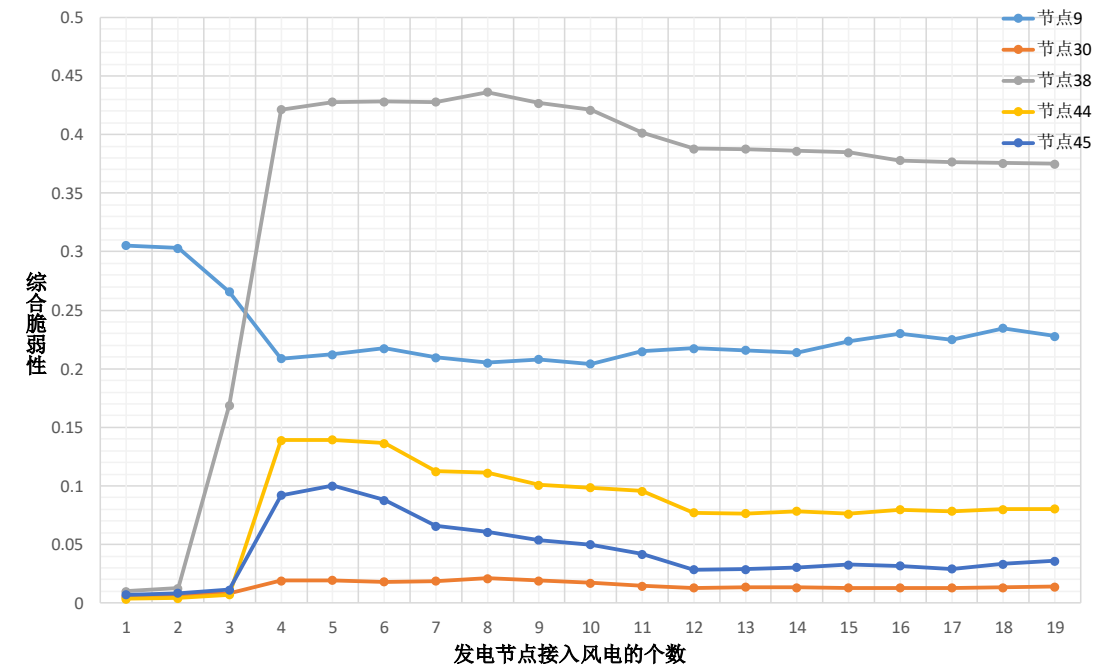


图 5.12 IEEE118 多风机电力系统部分负荷节点的综合脆弱性

### 5.6 本章小结

本章以基于 *IEEE39* 风力发电系统作为研究对象，采用本文之前章节建立的脆弱性分析方法与量化评估模型进行脆弱性分析，详细地给出了脆弱性分析与量化评估的具体步骤。

依据前文对风力发电系统特性的研究分析，建立了随机性风电功率模型和负荷概率模型，模拟系统运行中外界环境及用户需求的随机性变化。借助 *MATLAB* 软件平台，根据第三章的理论对系统的结构脆弱性进行分析计算得到相应的指标，而状态脆弱性则分别针对单风机系统与多风机系统进行蒙特卡洛模拟实验进行统计得到相应的脆弱性指标。

根据分析计算出的各级指标，基于第四章建立的指标评估体系进行量化评估。首先将二级指标量化，再使用层次分析法进行融合得到一级指标。再使用 *D-S* 证据理论将两个一级指标融合得到系统的综合脆弱性。本章对 *IEEE39* 含风电电力系统脆弱性进行了详细的评估，此外，还使用 *IEEE118* 系统进行了补充评估验证。通过对系统脆弱性的评估得到对应系统的薄弱环节，对后续优化系统设计具有现实意义。

## 第 6 章 总结与展望

### 6.1 全文总结

为保证风力发电系统产生的电能质量平稳满足用户的要求，避免地理气候等环境因素或用户负荷需求的变化对含风电电力系统造成影响，导致电能质量变差，本文针对含风电电力系统中脆弱性现象进行了清晰的定义，并采用数学方法建立了脆弱性量化评估体系，对含风电电力系统进行脆弱性分析与量化评估，识别电力系统系统的薄弱环节。全文的主要工作总结如下：

(1) 本文通过查阅相关的文献资料，对脆弱性概念的起源及发展进行了综述，并阐述了脆弱性概念在电力系统的研究现状。通过分析系统脆弱性存在的原因得出系统的脆弱性本质以及其数学描述，进而得出一个较为清晰的系统脆弱性概念。

(2) 根据本文中对含风电电力系统脆弱性的定义，分别从系统的结构和系统的状态两个角度对脆弱性进行分析研究，得到系统的脆弱性理论。结构脆弱性方面，分别基于复杂网络和 *PageRank* 对系统拓扑进行分析。状态脆弱性方面，基于蒙特卡洛大量实验的方法将外界环境及用户端的随机性变化用实验模拟的方式进行分析。

(3) 针对本文提出的系统脆弱性综合评估指标集，采用多指标综合评价相关理论，建立了一套关于含风电电力系统的脆弱性分析与量化评估体系。对不同的二级指标选择合适方法进行归一化后，分别采用层次分析法进行权重分配和指标融合。再使用  $D-S$  证据理论对一级指标进行融合，得到系统的综合脆弱性指标。

(4) 依据本文所建立的含风电电力系统脆弱性分析方法，以 *IEEE39* 和 *IEEE118* 系统数据为例，采用 *MATLAB* 软件进行模型仿真，分别对单风机接入和多风机接入的情况下，系统的结构脆弱性与状态脆弱性进行量化评估，明确系统脆弱性量化评估的方法与具体步骤，得到系统的脆弱性分析结果，识别出系统的薄弱环节。

### 6.2 未来工作展望

由于本人水平与时间所限，对于含风电电力系统的脆弱性分析与研究还存在需要完善及深入探讨之处，后续的工作可以从以下几个方面展开：

(1) 本文定义的状态脆弱性只针对负荷节点，因为状态脆弱性主要分析的是潮流中节点电压的变化。而对于发电节点由于在潮流变化中本质上是  $PV$  节点，即发电节点的电压是不变的，所以无法用本文定义的状态脆弱性来衡量，后续可以从发电节点的无功功率的变化来分析其状态脆弱性。

(2) 本文认为风力发电对电能质量的影响主要为支路潮流和节点电压的变化，实际上其影响还有很多，比如风力发电影响电能的频率。本文没有考虑含风电的系统的频率的变化，后续从频率的角度分析脆弱性同样值得深入研究。

(3) 由于实验条件和时间的有限，本文中通过查阅文献的方式最终用概率统计的方式建立了随机性风电功率模型与负荷概率模型。若实验条件许可，可以对实际的电力系统所在地的风速、负荷需求进行采样统计，得到日变化或年变化的真实数据再用本文的方法进行系统的脆弱性量化分析，这样得到的结果更具现实意义。

## 致谢

在此论文成稿之际，谨向我尊敬的导师苏永清副教授致以最诚挚的感谢！本文的选题内容、研究思路与分析过程均在苏老师的悉心指导下完成。在两年的课题研究过程中，始终得到苏老师科研上的帮助与指导。苏老师渊博的学识、严谨的治学理念以及以身作则的工作态度，深深地感染了我，在此我谨向您致以深切的感谢与诚挚的敬意。感谢岳继光教授与董延超副教授在工程项目及日常生活中给予我的帮助。你们严谨的学术态度与踏实的工作作风为实验室建立了严谨求实的研究氛围，感谢你们为实验室的辛勤付出。

感谢同门师兄韩泽文、张鲲鹏、陈峰、赵闻达在研究课题中的指导，尤其是闻达师兄多次在项目上给予中肯的帮助与建议，带我走进 *LabView* 俱乐部，领略到了更多图形化编程语言的魅力。感谢侯培鑫博士在学术方法上对我的提点以及提供的论文 *L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X* 模板使我受益匪浅。感谢王森博博士、吴琛浩博士与王栗博士在项目中的指导与帮助，祝你们顺利毕业。感谢同届研究生穆慧华、陈策、徐刚、张爽、乔琪，同窗之情，友谊长存，祝你们今后工作顺利。感谢李旻聪与武新然两位师弟在 502 研究所与 811 研究所工程项目中的协助。感谢同济大学先进测控技术课题组孙佳妮、林敏静、何士波、冀玲玲、何洪志、寿佳鑫、王浩天、宁少淳等全体成员，伴我度过了难忘的研究生时光，在此祝大家前程似锦，幸福快乐。

同时感谢张志明老师对我在虚拟仪器俱乐部工作的支持与帮助，感谢吉方成师兄、陈阳师兄、狄宗林部长、颜超进部长在虚拟仪器俱乐部对我的指导与帮助，祝同济大学虚拟仪器俱乐部越办越好。同时忠心感谢培育我的电子信息与工程学院，感谢每一位辛勤教学的老师。祝福你们一切顺利，也祝愿我的母校越来越好。

最后，要感谢我的家人，是你们的支持才使我能走到今天。养育之恩，无以为报，你们健康快乐是我最大的心愿。在未来的学习、工作与生活中，我会继续锐意进取，成于精勤、止于至善。

2018 年 12 月

## 参考文献

- [1] 梁立龙. 风电高渗透率电力系统的暂态稳定性风险评估与控制[D]. 哈尔滨工业大学, 2015.
- [2] Jaok.Han, JALON P, Gordon.K..Moe. Adrenergic Effects on Ventricular Vulnerability[J]. Circulation Research, 1964, 14(6): 516-524.
- [3] DOBBING J, HOPEWELL J, LYNCH A. Vulnerability of developing brain: VII. Permanent deficit of neurons in cerebral and cerebellar cortex following early mild undernutrition[J]. Experimental Neurology, 1971, 32(3): 439-447.
- [4] JACOBS D. Dependency and Vulnerability: An Exchange Approach to the Control of Organizations[J]. Administrative Science Quarterly, 1974, 19(1): 45-59.
- [5] KARAGIORGOS K, THALER T, HEISER M, et al. Integrated flash flood vulnerability assessment: Insights from East Attica, Greece[J]. Journal of Hydrology, 2016, 541: 553-562.
- [6] PALOVIITA A, KORTETMÄKI T, PUUPPONEN A, et al. Vulnerability matrix of the food system: Operationalizing vulnerability and addressing food security[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 135: 1242-1255.
- [7] RAJESH S, JAIN S, SHARMA P. Inherent vulnerability assessment of rural households based on socio-economic indicators using categorical principal component analysis: A case study of Kimsar region, Uttarakhand[J]. Ecological Indicators, 2018, 85: 93-104.
- [8] LI Y, ZHANG X, ZHAO X, et al. Assessing spatial vulnerability from rapid urbanization to inform coastal urban regional planning[J]. Ocean & Coastal Management, 2016, 123: 53-65.
- [9] TRAN B X, PHAN H T T, NGUYEN L H, et al. Economic vulnerability of methadone maintenance patients: Implications for policies on co-payment services[J]. International Journal of Drug Policy, 2016, 31: 131-137.
- [10] SIEVERT N A, PAUKERT C P, TSANG Y P, et al. Development and assessment of indices to determine stream fish vulnerability to climate change and habitat alteration[J]. Ecological Indicators, 2016, 67: 403-416.
- [11] KUMAR P, GENELETTI D, NAGENDRA H. Spatial assessment of climate change vulnerability at city scale: A study in Bangalore, India[J]. Land Use Policy, 2016, 58: 514-532.
- [12] LÓPEZ F A, PÁEZ A, CARRASCO J A, et al. Vulnerability of nodes under controlled network topology and flow autocorrelation conditions[J]. Journal of Transport Geography, 2017, 59: 77-87.
- [13] FRIGERIO I, VENTURA S, STRIGARO D, et al. A GIS-based approach to identify the spatial variability of social vulnerability to seismic hazard in Italy[J]. Applied Geography, 2016, 74: 12-22.
- [14] MAKILA P M. Fragility and robustness puzzles[C]// American Control Conference, 1999. Proceedings of the. 1999: 2914-2919 vol.4.
- [15] BESSA I, ISMAIL H, PALHARES R, et al. Formal Non-Fragile Stability Verification of Digital Control Systems with Uncertainty[J]. IEEE Transactions on Computers, 2017, 66(3): 545-552.
- [16] 石先武, 国志兴, 张尧, 等. 风暴潮灾害脆弱性研究综述[J]. 地理科学进展, 2016, 35(7): 889-897.
- [17] 王艳梅. 黄河三角洲自然灾害社会脆弱性评价研究[D]. 山东师范大学, 2016.
- [18] 何艳冰, 黄晓军, 翟令鑫, 等. 西安快速城市化边缘区社会脆弱性评价与影响因素[J]. 地理学报, 2016, 71(8): 1315-1328.

- [19] 张明, 谢家智. 巨灾社会脆弱性动态特征及驱动因素考察[J]. 统计与决策, 2017(20): 56-60.
- [20] 侯文娟, 高江波, 彭韬, 等. 结构—功能—生境框架下的西南喀斯特生态系统脆弱性研究进展[J]. 地理科学进展, 2016, 35(3): 320-330.
- [21] 温晓金, 杨新军, 王子侨. 多适应目标下的山地城市社会—生态系统脆弱性评价[J]. 地理研究, 2016, 35(2): 299-312.
- [22] 姚雄, 余坤勇, 刘健, 等. 南方水土流失严重区的生态脆弱性时空演变[J]. 应用生态学报, 2016, 27(3): 735-745.
- [23] 高涛涛. “新丝绸之路经济带”石油资源型城市经济系统脆弱性研究-以克拉玛依和大庆为例[D]. 山西师范大学, 2016.
- [24] 李博, 杨智, 苏飞, 等. 基于集对分析的中国海洋经济系统脆弱性研究[J]. 地理科学, 2016(1): 47-54.
- [25] 奚旭, 孙才志, 吴彤, 等. 下辽河平原地下水脆弱性的时空演变[J]. 生态学报, 2016, 36(10): 3074-3083.
- [26] 刘倩倩, 陈岩. 基于粗糙集和 BP 神经网络的流域水资源脆弱性预测研究——以淮河流域为例[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(9): 1317-1327.
- [27] 任梅, 程钰, 任建兰. 成熟期石油资源型城市人地系统脆弱性评估——以山东省东营市为例[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2017, 40(4): 1-7.
- [28] 杨艳茹. 石油城市人地系统脆弱性评价与可持续发展模式研究 -以大庆市为例[D]. 东北师范大学, 2015.
- [29] 袁朋伟. 城市轨道交通系统脆弱性研究[D]. 北京交通大学, 2016.
- [30] 毕京浩. 基于多层复杂网络理论的交通网络脆弱性研究[D]. 济南大学, 2016.
- [31] 叶青. 城市轨道交通网络脆弱性分析与客流协同控制研究[D]. 西南交通大学, 2016.
- [32] ZHOU Q, DAVIDSON J, FOUAD A A. Application of artificial neural networks in power system security and vulnerability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(1): 525-532.
- [33] 樊磊. 网络攻击威胁下电力系统脆弱性分析模型与方法[D]. 华北电力大学; 华北电力大学 (北京), 2015.
- [34] 余振华. 基于安全风险分析的复杂电力系统脆弱性评估方法研究[D]. 华中科技大学, 2013.
- [35] 申永涛. 电力系统脆弱性节点的筛选方法研究[D]. 华北电力大学; 华北电力大学 (北京), 2014.
- [36] 梅丹, 王公宝, 胡伟文, 等. 基于复杂网络理论的电力系统脆弱性研究概述[J]. 电子设计工程, 2014, 22(6): 190-192.
- [37] 苏慧玲, 李扬. 基于电力系统复杂网络特征的线路脆弱性风险分析[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 101-107.
- [38] 梁颖, 方瑞明, 卢小芬, 等. 基于复杂网络理论的电力系统脆弱线路辨识研究现状[J]. 电力系统保护与控制, 2012(20): 151-155.
- [39] 李迁, 李华强, 黄昭蒙, 等. 基于暂态能量函数混合法的电力系统脆弱性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013(20): 1-6.
- [40] 电力系统低频振荡关键支路及振荡割集辨识方法. [Z]. Patent.
- [41] 吴旭. 基于 N-k 故障的电力系统运行风险及脆弱性评估[D]. 华北电力大学; 华北电力大学 (北京), 2013.
- [42] 白加林, 徐梅梅. 基于不确定理论的电力系统脆弱性评估[J]. 贵州电力技术, 2015, 18(5): 7-12.

- [43] 屈培先, 阳育德. 考虑概率风险评估的电力系统脆弱性分析[C]// 中国高等学校电力系统及其自动化专业第 30 届学术年会论文集. 北京, 2014: 1-4.
- [44] 靳冰洁, 张步涵, 姚建国, 等. 基于信息熵的大型电力系统元件脆弱性评估[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(5): 61-68.
- [45] 丁明, 过羿, 张晶晶. 基于效用风险熵的复杂电网连锁故障脆弱性辨识[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 52-57.
- [46] 丁少倩, 林涛, 徐遐龄, 等. 基于改进的 AHP-熵权法的电网综合脆弱性评估方法研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(4): 28-33, 68.
- [47] 一种冰冻灾害下高压输电线路脆弱性的综合评估方法. [Z]. Patent.
- [48] MARINESCU C, SERBAN I. Analysis of frequency stability in a residential autonomous microgrid based on a wind turbine and a Microhydro power plant[C]// 2009 IEEE Power Electronics and Machines in Wind Applications. 2009: 1-5.
- [49] CHEN X, DU W, WANG H F. Power system angular stability as affected by the reduced inertia due to wind displacing synchronous generators[C]// 2017 2nd International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE). 2017: 402-406.
- [50] CHEN L, DAI Y, MIN Y, et al. Study on the mechanism of transient voltage stability of wind power with power electronic interface[C]// 2015 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC). 2015: 1-5.
- [51] ZHANG Y, XIANG Y, WANG L. Power System Reliability Assessment Incorporating Cyber Attacks Against Wind Farm Energy Management Systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2343-2357.
- [52] CAO F, GAO X, YU J. Study on reliability assessment of composite generation and transmission system integrated wind farm[C]// 2012 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON). 2012: 1-5.
- [53] WANG Q, MARTINEZ-ANIDO C B, WU H, et al. Quantifying the economic and grid reliability impacts of improved wind power forecasting[C]// 2017 IEEE Power Energy Society General Meeting. 2017: 1-1.
- [54] 张军. 风力发电系统稳定性研究与分析[J]. 自动化仪表, 2018, 39(9): 17-20, 24.
- [55] 彭亮. 影响风力发电机组并网系统稳定性的因素分析[J]. 电子设计工程, 2017, 25(15): 85-89.
- [56] 梁立龙. 风电高渗透率电力系统的暂态稳定性风险评估与控制[D]. 哈尔滨工业大学, 2015.
- [57] 李忠善, 杜文珍. 风力发电系统可靠性建模与优化检修策略[J]. 建筑工程技术与设计, 2017(26): 1403-1403.
- [58] 张里, 李红军, 刘兴海, 等. 风力发电系统可靠性评估体系[J]. 四川电力技术, 2018, 41(2): 5-11.
- [59] 秦洋, 马慧民, 陈玉晶. 基于马尔可夫模型的风力发电系统可靠性分析[J]. 机电工程, 2015, 32(8): 1136-1140.
- [60] ATHARI M H, WANG Z. Impacts of Wind Power Uncertainty on Grid Vulnerability to Cascading Overload Failures[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(1): 128-137.
- [61] LIU B, LI Z, CHEN X, et al. Recognition and Vulnerability Analysis of Key Nodes in Power Grid Based on Complex Network Centrality[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2018, 65(3): 346-350.
- [62] SOLOOT A H, HØIDALEN H K, GUSTAVSEN B. Influence of the winding design of wind turbine transformers for resonant overvoltage vulnerability[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(2): 1250-1257.

- [63] XUE Z, TAO L, SHAOQIAN D, et al. Research on state vulnerability of power grid with large scale new energy sources based on short circuit capacity margin[C]// International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2015). 2015: 1-5.
- [64] 赵任光, 刘群英, 陈树恒, 等. 风电场出力随机扰动下的电网概率脆弱性评估[J]. 现代电力, 2018, 35(5): 41-48.
- [65] 申永涛, 刘宗歧, 刘文霞, 等. 风电接入对电力系统节点脆弱性的影响分析[J]. 现代电力, 2013, 30(6): 1-5.
- [66] 李俊芳. 含风电场的电力系统运行风险分析方法研究[D]. 华中科技大学, 2012.
- [67] VIJAYAN P, SARKAR S, AJJARAPU V. A novel voltage stability assessment tool to incorporate wind variability[C]// 2009 IEEE Power Energy Society General Meeting. 2009: 1-8.
- [68] 术茜. 基于复杂网络理论的电网脆弱线路的识别[J]. 电力与能源进展, 2018, 6(2): 104-108.
- [69] 唐伟, 南璐, 石玉东, 等. 复杂网络理论下的电网分区及输电断面搜索方法[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(16): 198-204.
- [70] 汪颖, 王宗涛, 黄小浪. 基于复杂网络理论的电网结构研究[J]. 科学与信息化, 2018(4): 130-131.
- [71] 王意. 复杂电力网络的动力学行为及关键节点识别研究[D]. 广西师范大学, 2017.
- [72] 王龙飞, 王建华. 基于电气介数的电网连锁故障传播机制与积极防御[J]. 建筑工程技术与设计, 2018(17): 4311.
- [73] 陈伟, 段芯, 裴喜平, 等. 基于电气介数的电网关键环节辨识[J]. 甘肃科学学报, 2017, 29(4): 48-53.
- [74] 徐岩, 鄧静. 基于改进节点电气介数的电网关键节点辨识[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(9): 107-113.
- [75] 王珂, 刘东苏. 基于 PageRank 的动态网络核心节点检测及演化分析[J]. 情报学报, 2018, 37(7): 703-711.
- [76] 王东升. 基于 PageRank 改进算法的微博影响力排名[J]. 现代计算机 (专业版), 2015(19): 27-29, 35.
- [77] 白莹莹. PageRank 算法在学术网络平台中的应用研究[J]. 无线互联科技, 2017(17): 110-111.
- [78] 单政博. 电网重要节点、脆弱线路及骨干网架识别研究[D]. 浙江大学, 2017.
- [79] 张建波, 张忠伟, 杨洋. 改进拉丁超立方蒙特卡洛模拟[J]. 吉林大学学报 (信息科学版), 2018, 36(4): 452-458.
- [80] 严玲玲, 程银宝, 陈晓怀, 等. 蒙特卡洛法验证不确定度 A 类评定方法[J]. 河南科技大学学报 (自然科学版), 2018, 39(5): 17-20.
- [81] 魏源. 基于蒙特卡洛方法的互联网金融风险测度研究[J]. 技术经济与管理研究, 2018(9): 79-83.
- [82] 秦庭荣, 丁宁, 胡勤友, 等. 基于证据理论的船舶应急脆弱性评估[J]. 中国航海, 2016, 39(2): 35-39.
- [83] 李磊, 倪鹏炯, 金段艳, 等. 基于证据理论的地铁应急体系脆弱性评估研究[J]. 浙江师范大学学报 (自然科学版), 2017, 40(3): 336-342.
- [84] 吴松涛, 战兴群, 张晓婷. 基于证据推理的 GNSS 交通应用脆弱性评估[J]. 测控技术, 2016, 35(4): 128-131.



## 附录 A IEEE118 系统数据

### A.1 IEEE118 系统发电节点

表 A.1 IEEE118 系统发电节点

节点名	额定有功功率 (MW)	是否是平衡 节点	节点名	额定有功功率 (MW)	是否是平衡 节点
1	0	否	65	391	否
4	0	否	66	392	否
6	0	否	69	516.4	是
8	0	否	70	0	否
10	450	否	72	0	否
12	85	否	73	0	否
15	0	否	74	0	否
18	0	否	76	0	否
19	0	否	77	0	否
24	0	否	80	477	否
25	220	否	85	0	否
26	314	否	87	4	否
27	0	否	89	607	否
31	7	否	90	0	否
32	0	否	91	0	否
34	0	否	92	0	否
36	0	否	99	0	否
40	0	否	100	252	否
42	0	否	103	40	否
46	19	否	104	0	否
49	204	否	105	0	否
54	48	否	107	0	否
55	0	否	110	0	否
56	0	否	111	36	否
59	155	否	112	0	否
61	160	否	113	0	否
62	0	否	116	0	否

## A.2 IEEE118 系统负荷节点

表 A.2 IEEE118 系统负荷节点

节点名	额定有功功率 (MW)	额定无功功率 (MVar)	节点名	额定有功功率 (MW)	额定无功功率 (MVar)
2	20	9	57	12	3
3	39	10	58	12	3
5	0	0	60	78	3
7	19	2	63	0	0
9	0	0	64	0	0
11	70	23	67	28	7
13	34	16	68	0	0
14	14	1	71	0	0
16	25	10	75	47	11
17	11	3	78	71	26
20	18	3	79	39	32
21	14	8	81	0	0
22	10	5	82	54	27
23	7	3	83	20	10
28	17	7	84	11	7
29	24	4	86	21	10
30	0	0	88	48	10
33	23	9	93	12	7
35	33	9	94	30	16
37	0	0	95	42	31
38	0	0	96	38	15
39	27	11	97	15	9
41	37	10	98	34	8
43	18	7	101	22	15
44	16	8	102	5	3
45	53	22	106	43	16
47	34	0	108	2	1
48	20	11	109	8	3
50	17	4	114	8	3
51	17	8	115	22	7
52	18	5	117	20	8
53	23	11	118	33	15

## 个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果

### 个人简历:

1993 年 11 月 22 日出生于山西省朔州市。

2016 年 7 月本科毕业于上海大学获得学士学位。

2016 年 9 月免试进入同济大学攻读硕士学位至今。

### 发表论文:

- [1] Liu Xuejiao and Su Yongqing, "Tracking skeletal fusion feature for one shot learning gesture recognition," 2017 2nd International Conference on Image, Vision and Computing (ICIVC), Chengdu, 2017, pp. 194-200(EI Compendex).
- [2] Zhao Wenda, Su Yongqing, Yue Jiguang, Mu Huihua, Liu Xuejiao. Fragility analysis and weak point identification of power system[C]. Proceedings of SPIE, AOPC 2017 (EI Compendex).

### 参与项目:

- [1] 中科院“航天卫星推进线路盒核心部件地面测试系统”专题项目.
- [2] 上海第 811 研究所“航天卫星电源系统性能分析”项目.