

计及元件故障的电力系统输电阻塞 评估和辨识方法的研究

甘 明 谢开贵◎著



 中国财富出版社
CHINA FORTUNE PRESS

计及元件故障的电力系统输电 阻塞评估和辨识方法的研究

甘 明 谢开贵 著

中国财富出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

计及元件故障的电力系统输电阻塞评估和辨识方法的研究/甘明, 谢开贵著.

—北京: 中国财富出版社, 2017. 4

ISBN 978-7-5047-6444-7

I. ①计… II. ①甘… ②谢… III. ①输电线路—电力系统运行—阻塞—研究 IV. ①TM726

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 077740 号

策划编辑 郑欣怡

责任编辑 徐宁

责任印制 方朋远

责任校对 孙丽丽

责任发行 敬东

出版发行 中国财富出版社

社址 北京市丰台区南四环西路 188 号 5 区 20 楼 邮政编码 100070

电话 010-52227588 转 2048/2028 (发行部) 010-52227588 转 307 (总编室)

010-68589540 (读者服务部) 010-52227588 转 305 (质检部)

网址 <http://www.cfpress.com.cn>

经销 新华书店

印刷 北京九州迅驰传媒文化有限公司

书号 ISBN 978-7-5047-6444-7/TM·0002

开本 710mm×1000mm 1/16

版次 2017 年 6 月第 1 版

印张 7.75

印次 2017 年 6 月第 1 次印刷

字数 139 千字

定价 32.80 元

版权所有·侵权必究·印装差错·负责调换

前 言

受输电线路热容量和系统稳定性的限制，输电线路输送功率达到或超过输电容量限制时会出现阻塞现象。通常，根据电力系统拓扑结构、电气参数、运行参数及负荷水平等确定性信息，通过潮流分析，即可判断阻塞是否发生。这种阻塞判断方法为传统的确定性方法，即只能给出某时刻是否阻塞的判断，而不能给出阻塞程度的描述。

在电力系统运行及电力市场中，存在多种不确定因素，例如，负荷预测的不确定性、发电计划的随机性、电力设备（发电机、线路、变压器等）故障的随机性、电价的不确定等，这些都会引起输电阻塞的不确定性。因此，除了知道阻塞的确定性判断外，电力系统运行人员还需要知道阻塞的程度，即未来一段时间内阻塞出现的概率、频率以及线路裕度等信息。另外，对存在输电阻塞的系统，如果能辨识引起输电阻塞的关键元件，并从源头上采取相应措施，可望从本质上缓解或消除输电阻塞。因此，计及不确定因素的输电阻塞评估、输电阻塞关键元件的辨识等研究可为电力系统运行、检修、维护等提供更充分的决策依据，具有重要的理论和工程实用价值。

本书对计及元件故障等不确定因素的输电阻塞评估方法、电力系统输电阻塞跟踪及薄弱环节辨识方法等进行了研究；在此基础上，进一步研究了含风电场的电力系统输电阻塞评估。本书主要内容如下：

(1) 为克服大多数方法只能针对单一潮流断面阻塞分析的不足，结合负荷时序变化特点，基于负荷时序曲线分析输电阻塞现象的概率特性，利用聚类分析法对负荷进行分层分级，基于 Monte Carlo 法建立计及负荷曲线的多时段的输电阻塞概率评估模型。以 IEEE-RTS 为例，利用评估模型计算出单一输电线路阻塞概率指标，验证了评估模型的可行性和正确性。

(2) 分别从输电元件和系统层面提出刻画阻塞程度的指标体系。评估输电元件阻塞程度的指标包括：线路阻塞概率、线路阻塞频率、线路阻塞容量和线路受阻电量；评估系统阻塞程度的指标包括：系统阻塞概率、系统阻塞

频率、系统阻塞容量和系统受阻电量。该指标体系从两个层面（输电元件、系统）、三个方面（概率、频率和容量）建立较完备的指标体系，其既能从整体上评估系统阻塞状况，又能给出输电元件阻塞的严重程度。

(3) 计及电力元件（发电机、线路、变压器等）随机故障等不确定因素，基于非时序 Monte Carlo 模拟法，建立输电阻塞的概率评估模型。基于 Monte Carlo 法抽取元件状态，形成系统状态，并计算系统故障状态潮流，通过机组调度和负荷削减等措施，以判断输电元件的阻塞状况。如果输电元件发生阻塞，则累计阻塞指标，重复抽样，直至抽样完成，最后计算出系统和每一输电元件的阻塞概率、阻塞频率、阻塞容量和受阻电量。以 IEEE-RTS 为例进行算例分析，验证了模型的有效性和正确性；同时，算例结果表明电力元件的可靠性参数、负荷削减策略等对输电阻塞指标均有较大影响。

(4) 为从源头上找到系统输电阻塞的“诱因”，借鉴可靠性跟踪技术，提出阻塞跟踪的准则，即故障元件分摊准则、比例分摊准则，建立输电阻塞跟踪模型及 Monte Carlo 求解方法。对某一抽样状态，若系统出现阻塞，则基于比例分摊方法将该状态出现的概率和频率、失去的电量等指标分摊到各故障元件。基于所有系统抽样状态，各元件累计各自分摊到的指标，即可得到各元件的阻塞跟踪指标，实现输电元件（系统）阻塞指标的跟踪，从而辨识引起输电元件（系统）阻塞的薄弱环节。以 IEEE-RTS 为例进行算例分析，结果表明本书提出的阻塞跟踪模型及算法可将阻塞指标公平合理地分摊到各元件，并辨识引起输电阻塞的关键元件。

(5) 由于风电具有间歇性、波动性等特点，其并网后对电网调度、运行等均会产生影响。为刻画风电场并入电网对输电阻塞的影响，提出风电出力对输电阻塞的贡献指标体系，以描述风电场并入电力系统对输电阻塞变化的贡献；建立计及风电场出力—负荷相关性的大电网系统输电阻塞评估模型。从系统输电阻塞角度，定义风电场的发电容量可信度；建立基于 Monte Carlo 法的计及元件故障的风电场容量可信度模型，提出该模型的二分法求解算法。以 IEEE-RTS 修改系统作为算例，分析并入风电场位置及容量对系统输电阻塞的影响。

本书在写作过程中参考了一些国内外文献资料，在此，谨向这些著作者表示真诚的感谢。由于时间仓促，不足之外在所难免，欢迎广大读者批评指正。

作者

2017年2月

目 录

1 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 电力系统输电阻塞指标	4
1.3 电力系统输电阻塞评估方法	5
1.4 电力系统输电阻塞的跟踪和消除措施	8
1.4.1 电力系统输电阻塞跟踪	8
1.4.2 消除输电阻塞的措施	10
1.5 含新能源电力系统输电阻塞的研究现状	13
1.5.1 新能源发展现状	13
1.5.2 含新能源电力系统的输电阻塞	15
1.6 本书的主要研究内容及框架结构	16
2 电力系统输电阻塞评估的 Monte Carlo 模拟法	19
2.1 引言	19
2.2 Monte Carlo 法	20
2.2.1 Monte Carlo 法的基本原理	20
2.2.2 随机数的产生算法	21
2.2.3 系统状态产生的 Monte Carlo 法	24
2.3 负荷多状态聚类分析模型	27
2.4 负荷削减策略	29
2.5 输电阻塞评估的非时序 Monte Carlo 法	30
2.5.1 算法步骤	30
2.5.2 算法流程图	31
2.6 算例分析	32

2.7 本章小结	35
3 计及元件故障的输电阻塞指标体系和评估方法	36
3.1 引言	36
3.2 发输电元件的可靠性模型	37
3.2.1 元件的两状态可靠性模型	37
3.2.2 元件的多状态可靠性模型	38
3.3 电力系统输电阻塞指标	38
3.3.1 元件层面的输电阻塞指标	38
3.3.2 系统层面的输电阻塞指标	39
3.4 计及元件故障的输电阻塞模型	40
3.5 计及元件故障的输电阻塞模型求解算法	41
3.6 算例分析	42
3.6.1 基于恒定负荷的输电阻塞分析	43
3.6.2 基于分级负荷的输电阻塞分析	51
3.7 本章小结	53
4 电力系统输电阻塞跟踪及薄弱环节辨识方法	55
4.1 引言	55
4.2 输电阻塞跟踪的准则	56
4.3 发输电组合系统输电阻塞跟踪模型	57
4.3.1 输电元件阻塞指标的跟踪模型	58
4.3.2 系统阻塞指标的跟踪模型	58
4.4 输电阻塞跟踪算法	59
4.5 算例分析	60
4.5.1 基于恒定负荷的输电阻塞跟踪及薄弱环节辨识	60
4.5.2 基于分级负荷的输电阻塞跟踪及薄弱环节辨识	68
4.6 本章小结	71
5 含风电电力系统的输电阻塞指标和评估模型	72
5.1 引言	72
5.2 风电场出力模型	73

5.2.1 风速模型	73
5.2.2 计及尾流效应的风速模型	74
5.2.3 风电机组与风电场出力模型	75
5.3 计及风电场出力—负荷相关性的抽样模型	76
5.3.1 风电机组出力的多状态概率模型	77
5.3.2 分级负荷概率模型	77
5.3.3 风电场出力—负荷联合分布函数的建立	78
5.4 风电出力对输电阻塞的“贡献”指标	80
5.5 含风电电力系统输电阻塞的评估算法	81
5.6 基于输电阻塞的风电场容量可信度	83
5.6.1 基于阻塞指标的风电场容量可信度模型	83
5.6.2 风电场容量可信度求解算法	83
5.7 算例分析	85
5.7.1 含风电场的电力系统输电阻塞评估算例	86
5.7.2 风电场容量可信度算例	89
5.8 本章小结	91
6 结论与展望	93
6.1 本书研究工作总结	93
6.2 后续研究工作展望	95
参考文献	96
附 录	109
致 谢	114

1 绪论

1.1 引言

电力体系改革和电力市场的逐步形成,提高了电力生产效率,改善了电能质量,并使全社会从改革中得到更好的经济和社会效益。与此同时,深刻的电力体制变革给电力系统运行和规划带来了巨大的挑战,这就需要对市场环境下支撑电力系统运行、规划和管理等相关决策研究的理论和应用技术加以更新、扩充和开拓。

在竞争电力市场中,发电竞争、输电开放和用户选择已成为其三大支柱。作为电能输送通道的输电系统将发电厂和用户连接起来,其开放运行不仅波及整个电力系统的安全性和可靠性,而且还会严重影响市场效率。我们知道,输电元件受其热容量及系统稳定性等限制,当输电元件的输送功率达到或超过输电容量时会引起阻塞现象^[1]。一旦发生输电阻塞,电力系统的充裕性和安全性会受到严重威胁,不仅影响电能交易计划的实现,而且还会影响资源的优化配置及利用,更为严重的是,因市场力的滥用可能引起电价扭曲^[2]。对电力系统运行人员而言,若能获取丰富的输电阻塞信息,则有利于其采取有效的措施,遏制输电阻塞的发生,以确保电力系统安全经济运行。

通常,输电阻塞发生后,通过调整发电机组出力、启用灵活交流输电 FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System) 设备和削减负荷等措施,以消除输电阻塞。但是,这种阻塞管理往往导致发电成本的急剧增加,即产生阻塞成本,例如,美国 PJM 电力市场 2004 年和 2005 年总阻塞成本分别高达 7.5 亿和 2.09 亿美元。自 2000 年以来,其总阻塞成本占年总成本的 6%~10%^[3]。

一般情况,根据电力系统拓扑结构、电气参数、运行参数及负荷水平等

确定性信息,通过潮流分析,即可判断阻塞是否发生。显然,这种阻塞判断方法为传统的确定方法,只能给出是否阻塞的判断,即确定性判别,而不能给出输电阻塞程度的描述,如发生的概率、频率等信息。

在电力系统运行及电力市场中,负荷会随时间发生日、周、年等周期性的变化,确定的负荷水平只能体现某时刻的负荷水平,不能反映负荷时序变化的特征。除负荷因素外,还存在其他不确定因素,如发电计划的随机性、设备(发电机、线路、变压器)故障的随机性、电价的不确定等。这些因素都会引起输电阻塞的不确定性。因此,电力系统运行人员除了要知道阻塞的确定性判断外,还需知道阻塞的程度描述,即未来一段时间内阻塞出现的概率、频率以及线路裕度等信息。

由此可知,传统阻塞模型未计及元件随机故障、未考虑负荷时序变化等因素,属确定性输电阻塞模型,其指标只能回答是否出现阻塞,而难以刻画其受阻程度等信息。计及元件故障等不确定因素、考虑负荷时序变化等输电阻塞模型,可提供输电阻塞的程度描述,提供更丰富的阻塞信息,该研究具有重要的理论意义和工程实用价值。

开放的输电网、日益增多的跨区域电能交易,尤其是国内大区域电网互联以及西电东送等项目的实施,使得输电阻塞问题越发严重^[4]。为了减少甚至避免阻塞费用的产生,需建立有效的输电阻塞评估模型,提前决策电力系统运行的调度方式,以确保电力系统安全、经济运行。有效的输电阻塞评估就是在建立一套全面、系统的输电阻塞评估指标体系的基础上,运用评估方法确定未来一段时间内输电阻塞概率、阻塞频率以及阻塞容量等相关量,发现阻塞程度严重的输电线路。根据输电阻塞评估结果启动阻塞预案,选择经济手段和技术措施等尽可能消除输电阻塞,减小市场风险,降低系统阻塞费用,促进电网安全经济运行。

目前,在关于输电阻塞产生机理、输电阻塞模型、消除阻塞的手段、阻塞成本分析等方面已有大量研究成果^[1-3,5]。消除阻塞措施主要集中在 FACTS 技术、优化机组再调度和经济手段。由于网络参数会影响潮流的分布,因此可利用 FACTS 装置改变网络参数,调节系统的潮流分布,从而达到缓解甚至消除输电元件阻塞状况的目的^[6,22]。实时阻塞管理常采用发电机组重新调度、负荷削减等措施以消除或缓解阻塞。

机组调度模型通常表示为一优化规划模型,其目标函数为经济性(阻塞成本)最好或负荷削减量最小,约束因素包括电压和输电容量等运行条件、

公平竞争和资源优化等^[7-8,11-13,23]，以确定参与调整的发电厂、负荷及其调整量。在电力市场下，可利用价格信号促使市场参与者自发调节交易量，避开输电阻塞。引入阻塞价格因子不失为一种好的策略。当系统发生阻塞时，以电网用户的初始交易量或报价为依据，电力系统运行人员便可算出各用户的价格阻塞因子，其效果类似于最优潮流调度，可以消除系统阻塞现象。由此出现了基于节点电价法^[20]、区域电价法及输电权的输电阻塞管理的新模式^[16]。然而，这些成果大多是基于确定性阻塞模型，仅有几篇文章以输电阻塞概率为例探讨了输电阻塞的不确定性^[17,24-25]。笔者目前还未查阅到能够描述输电阻塞严重程度的完整、系统的指标体系。

如前所述，对电力系统进行输电阻塞评估的价值在于为有效的阻塞管理提供丰富的决策信息。通过对电力系统输电阻塞评估，获得定量的输电阻塞指标并对其进行比较分析，找到系统中阻塞程度严重的输电元件——输电薄弱环节。为确保电网安全经济运行，需采取有效的经济手段和技术措施解决阻塞问题。我们知道，采取措施的前提是必须探究发生输电阻塞现象的根源，找出引起系统中出现输电阻塞的薄弱环节，即辨识引起输电阻塞的关键元件。

输电系统结构复杂，包含元件众多，如发电机组、输电线路、变压器等，它们对输电元件（或系统）阻塞的影响各不相同。如果能找到一种合理的阻塞分摊的方法，即在对系统进行阻塞评估求出阻塞指标的基础上，量化各元件对阻塞指标承担“责任”大小，就可以确定引起阻塞的主要元件，辨识引起系统出现输电阻塞的薄弱环节，而输电阻塞跟踪正是要研究这个问题。输电阻塞跟踪是一种辨识引起系统输电阻塞薄弱环节的重要技术。该问题的研究可指导 FACTS 设备的配置和选型，为运行和规划人员优化系统设计和运行维护关键部件的选择提供理论依据。

近年来，随着全球气候变暖，加之石油价格波动等因素引起世界能源危机，国际社会越来越重视再生能源的利用，发展再生能源相关政策和法规也在不同国家陆续出台。除中小型水电需分步发展外，风力作为一种可再生能源，适合大规模开发，并因其成本低、风电技术成熟，风电已在许多国家（如中国、丹麦、美国等）得到快速发展。丰富的风能资源为我国风力发电快速发展创造了有利条件，风力发电已成为电力系统的重要电源。据预测，到 2020 年，我国并网风电装机累计将达到 2×10^5 MW，年发电量超过 3.9×10^8 MWh，其中海上风电装机达到 3×10^4 MWh^[26]。

虽然能源危机会因风电并网得到一定缓解,但也增加了电力系统输电阻塞评估的难度。风是风电的动力,具有间歇性和波动性特点,这就决定了风电出力具有随机性,使得风电不同于火电、水电和核电等常规发电,其出力不易调度和控制,势必对电力系统的输电阻塞产生较大影响。还有,负荷与风速一样也随时间变化,并受温度、季节、天气等气候因素的影响。

同时,风速时间序列与时序负荷不是相互独立的随机变量,它们具有一定的相关性。因此,在评估含风电场的电力系统输电阻塞时不能忽略这种相关性对系统输电阻塞的影响。另外,风电场接入电力系统对系统输电阻塞的变化具有一定的“贡献”,应进一步提出刻画风电场对输电阻塞影响的“贡献”指标,建立相应的含风电场的输电阻塞评估模型。

1.2 电力系统输电阻塞指标

目前,关于系统输电阻塞程度评估方面的研究相对较少,仅少量文献提出了单一的输电阻塞指标。文献 [27] [28] 提出了输电线路无功和有功潮流的灵敏度指标——输电阻塞分布因子 TCDF (Transmission Congestion Distribution Factors)。根据 TCDF 的相似性将系统划分为不同区域,易发生阻塞区域的 TCDF 值具有大且不均匀的特点,可通过重新调度位于这些区域发电机组的有功来缓解系统输电阻塞。文献 [29] 从电力系统的热、电压、稳定性限制角度,提出了系统安全指标 (System Security Index) 及相关灵敏度指标。

电力市场运行表明,电价是反映输电阻塞的最重要信号。阻塞发生时,因线路传输功率受限,不仅使系统运行的可靠性受到严重影响,而且还致使阻塞区域的电价远大于未阻塞区域^[24],因此,通过价格信号进行阻塞管理可以激励系统长期健康发展^[30]。以电力市场自我调节角度来看,电价可以反映输电阻塞的状况,因而部分文献以电价的角度提出了输电阻塞指标。在电力市场中,最基本的定价概念是市场清算价格 MCP (Market Clearing Price)。在没有输电阻塞时, MCP 是整个系统的唯一价格。但是,当出现阻塞时,常常采用区域边际价格 LMP (Locational Marginal Price)。LMP 是发电边际成本、输电阻塞成本和网损成本的总和^[31]。文献 [32] 从阻塞定价的角度,将输电阻塞成本指标 TCC (Transmission Congestion Cost) 和区域边际价格 LMP 作为评估输电阻塞程度的指标。文献 [33] 提出了阻塞盈余指标 (Con-

gestion Surplus)。阻塞盈余是指由于输电阻塞引起的交易盈余。当采用区域定价方法消除输电阻塞时，由于电能输入区的市场清算价通常高于电能输出区，这样由电能输入区清算价和阻塞断面的电能输送所确定的购电费用（含阻塞附加费）要高于电能输出区清算价和阻塞断面的电能输送所确定的售电收入（含阻塞补偿收入），二者的差额就是阻塞盈余。

以上文献主要在系统安全性、电价方面探讨了输电阻塞指标。由于设备故障、检修或运行方式改变等，不能完全满足所希望的输电计划状态，出现输电元件的潮流超过允许极限，以及节点电压越限^[34]，从而产生输电阻塞。电力系统安全性与系统负荷水平、网络拓扑结构、安全限制等因素有关^[9]。从电价角度归根结底是以一种经济学方法研究阻塞。随着电力市场的开放，输电阻塞可以通过调节电价等经济手段得到改善，然而，输电阻塞在未实行电力市场前也是客观存在的。

另外，上述文献提出的阻塞指标是基于电力系统拓扑结构、电气参数、运行参数及负荷水平等确定性信息，根据确定性输电阻塞模型建立，其只能断定是否阻塞，不能从实质上刻画输电阻塞的程度。这是因为，输电阻塞的实质问题是输电元件输电受限，它涉及元件故障、负荷时序变化等关键因素。而上述指标却未考虑影响输电阻塞程度的关键因素——元件故障、负荷时序的随机变化。可见，这些研究中涉及输电阻塞最关键的问题未解决。

目前，仅有少量文献提出计及元件故障的单一的阻塞评估指标。文献^[25]从输电线路层面提出了计及元件故障的输电阻塞指标——输电阻塞概率。该指标也仅以输电元件角度而未考虑系统层面，同时也无法实现对阻塞频率、线路裕度等的评估。

可见，到目前为止，还没有一套能够从本质上全面地、系统地刻画阻塞程度的指标体系，特别是计及元件故障的输电阻塞评估指标体系。因此，需要进一步深入研究输电阻塞的概率指标。

1.3 电力系统输电阻塞评估方法

电力系统输电阻塞可从时刻和时段两个不同时间尺度进行评估。

对某一时刻进行输电阻塞评估，即对电力系统某时刻（一个状态）输电阻塞的状况进行评估。现有电力系统输电阻塞的评估大多针对时刻进行。这

类方法是在系统负荷水平固定、元件故障状态确定的前提下，即电力系统拓扑结构、电气参数、运行参数及负荷水平等信息均为确定性信息，通过潮流分析，判断阻塞是否发生。这种阻塞判断方法为传统的确定性方法。

对某一时段进行输电阻塞评估，即对电力系统多时段（多个状态）输电阻塞状况的评估。这类方法是一种概率性方法。概率性方法是根据元件故障和修复的统计值，通过对系统运行方式和元件故障模式的概率模拟，得到概率性指标。计算指标时，又可采用解析法和模拟法。

解析法是用数学模型描述元件或系统的寿命过程，通过计算模型计算输电阻塞指标。状态空间法和故障树法是解析法常用的方法。解析法常常需要先计算停运容量概率表，包括概率、累积概率、频率、累积频率，再结合负荷水平计算输电阻塞指标。

模拟法是用计算机模拟元件状态或元件状态的持续时间，即将元件或系统的状态或寿命过程通过计算机进行模拟，观察其模拟过程，分析模拟结果，计算输电阻塞指标。

在电力系统中，系统负荷水平随时间不断变化，设备（发电机组、输电线路、变压器）等会出现随机故障，时刻保持电力平衡是电力系统正常运转的基本要求。为维持电力平衡，电力系统的潮流、阻塞情况随时都在变化。目前，关于输电阻塞的研究大多针对电力系统某一时刻的输电阻塞状况进行评估，而对计及系统元件故障和负荷时序变化的输电阻塞评估模型的研究还很鲜见。

为了全面、客观地对系统输电阻塞状况进行评估，本书对传统的输电阻塞评估方法进行改进，即在评估过程中考虑负荷时序变化和元件随机故障等因素。通过模型改进，可实现输电阻塞从确定性评估模型转变为概率型模型；从对一个系统状态进行评估的单时刻评估到对多个系统状态进行评估的多时段评估；从单个阻塞指标到建立一套完备的、系统的指标体系。

在电力系统可靠性评估方面，国内外相关研究比较成熟，已建立了一套成熟的评估指标体系。采用概率评估模型可实现电力系统可靠性的多时段评估^[35-40]。因此，本书借鉴电力系统风险评估方法对输电阻塞进行评估。

大电力系统可靠性评估的时段评估方法主要有：状态枚举法和 Monte Carlo 法，它们均属于状态选择法。通过以下步骤的迭代过程，可实现对复杂系统的评估：①选择一个系统状态；②分析系统状态，判断其是否是失效状

态；③计算失效状态的评估指标；④累计指标。

系统状态选择的主要方法有状态枚举法和 Monte Carlo 法，它们都不依赖于系统状态。尽管计算指标的公式有差异，但其系统分析方法相同。状态枚举法和 Monte Carlo 法各有千秋。一般说来，状态枚举法适合于元件失效概率很小的情形；当运行工况复杂或有大量失效事件时，则 Monte Carlo 法更合适。

下面介绍状态枚举法和 Monte Carlo 模拟法。

状态枚举法^[41]用以下的式子展开：

$$(P_1+Q_1)(P_2+Q_2)\dots(P_i+Q_i)\dots(P_N+Q_N) \quad (1-1)$$

其中， P_i 和 Q_i 分别是第 i 个元件工作（运行）和故障（失效）的概率； N 是系统中的元件数。

系统状态概率为：

$$P(s) = \prod_{i=1}^{N_f} Q_i \prod_{i=1}^{N-N_f} P_i \quad (1-2)$$

其中， N_f 和 $N-N_f$ 分别是状态 s 中故障和未故障的元件数量。

正常状态时，所有的元件在运行， $N_f=0$ ，则式（1-2）变为

$$P(s) = \prod_{i=1}^N P_i \quad (1-3)$$

系统状态频率和平均持续时间

$$f(s) = P(s) \sum_{k=1}^N \lambda_k \quad (1-4)$$

$$d(s) = \frac{1}{\sum_{k=1}^N \lambda_k} \quad (1-5)$$

其中， λ_k 是第 k 个元件从状态 s 离开的转移率。如果第 k 个元件处于工作状态，则 λ_k 为失效率；如果第 k 个元件处于停运状态，则 λ_k 为修复率。

由式（1-2）可看出，所有枚举的系统状态互斥，因此所有失效状态概率之和就是系统的累计失效概率，即

$$P_f = \sum_{s \in G} P(s) \quad (1-6)$$

其中， G 是所有失效状态的集合。

系统的累计失效频率为

$$F_f = \sum_{s \in G} f(s) - \sum_{n, m \in G} f_{nm} \quad (1-7)$$

其中, f_{nm} 代表从状态 n 到状态 m 的转移频率。第二项表明系统失效状态间的所有转移频率必须从系统全部失效状态的频率的总和中减去。在实际电力系统风险评估中, 经常忽略这一项, 从而得出系统累计失效频率的近似表达式, 即

$$F_f = \sum_{s \in G} f(s) \quad (1-8)$$

在实际系统中, 正常状态和失效状态间的转移占据了支配地位, 失效状态间的转移比较罕见, 因此, 这种近似是可接受的。

蒙特卡洛 (Monte Carlo) 法^[42]的基本思想是用一个概率模型或随机过程描述实际问题。将参数作为该问题的解, 然后通过对模型或过程的观察或抽样试验来计算所求参数的统计特征, 最后得到所求解的近似值, 用估计值的标准误差表示解的精确度。

Monte Carlo 法的优点是: 可非常直观地模拟系统的实际运行情况, 一些很难预料事故容易被发现, 模拟次数与系统规模无关, 实践中各种控制策略也易于实施, 在评估大型电力系统风险时, 其优势更突出。

1.4 电力系统输电阻塞的跟踪和消除措施

从输电元件和电力系统层面提出的输电阻塞评估指标体系可以量化输电元件和系统阻塞程度, 根据指标辨识阻塞程度严重的输电元件——输电薄弱环节。然而, 电力系统出现输电阻塞往往源于电力元件随机故障、检修等, 使得元件输送容量与额定容量间出现矛盾所致。只有找到引起输电阻塞的源头, 即辨识引起输电阻塞的关键元件, 采取相应技术和经济措施, 才能从根本上消除或缓解电力系统输电阻塞。

1.4.1 电力系统输电阻塞跟踪

阻塞跟踪是一种辨识输电阻塞关键元件的重要技术。目前, 跟踪技术已经应用在电力系统潮流跟踪和可靠性跟踪领域。

1.4.1.1 潮流跟踪

潮流跟踪是指在特定的运行状态下, 通过对潮流的分析及计算, 明确发电机或负荷功率在各输电元件中的分布状况, 以此衡量它们对输电网络的使用程度, 明确负荷对发电机的汲取以及输电线路的利用情况^[43-46]。依据潮流

跟踪结果, 可将输电费用和网络损耗公平合理地分摊到发电方和用户, 跟踪结果为合理制定电价提供依据。

根据建模机制和分摊准则不同, 潮流跟踪算法可分为功率跟踪法、电流跟踪法和功率解析法。

比例分摊准则是功率或电流跟踪常采用的原则^[47-52], 即各输入支路的潮流混合形成每个节点输出支路的潮流, 且节点输出支路的比率与输入支路功率占该节点总注入功率的比率相同。如图 1-1 所示, 节点 i 与 4 条支路相连, 其中注入流包括 j 和 k 支路, 输出流包括 m 和 l 支路。注入节点 i 的总功率为 $P_i=60+40=100\text{MW}$, 所以, 线路 $i-m$ 流出的 70MW 功率中, 有 $40\times 70/100=28\text{MW}$ 来自线路 $j-i$, 有 $60\times 70/100=42\text{MW}$ 来自线路 $k-i$ 。同样的, 线路 $i-l$ 流出的 30MW 功率中, 有 12MW 来自线路 $j-i$, 有 18MW 来自线路 $k-i$ 。

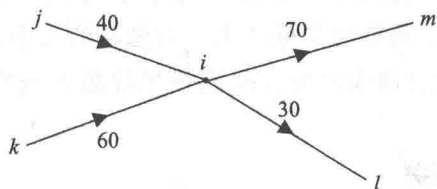


图 1-1 比例分摊准则

1. 功率跟踪法

功率跟踪法本质上是拓扑分析方法。其思路如下: 先计算系统交流潮流, 功率跟踪遵循的比例分摊准则, 把有损网络等效成无损网络, 将有功、无功解耦形成无损的有功功率有向图和无损的无功功率有向图。根据有向图, 按比例即可实现功率的分摊。

2. 电流跟踪法

与功率相比, 电流在系统中没有损耗, 而功率在系统流动中有损失。因此, 通过跟踪电流可以实现潮流的准确跟踪。电流跟踪的思路如下: 先计算系统潮流, 根据计算结果, 确定每个负荷从每个电源获得的电流, 即电流跟踪, 再将电流转化为功率, 进而实现功率的跟踪。

3. 功率解析法

传统追踪法采用复功率负荷吸收功率追踪, 这是一个有损耗且较复杂的顺流追踪问题。针对传统的流追踪问题, 提出了功率解析法的潮流跟踪, 以