

500kV终端变电站 可靠性分析

主 编 杨汾艳



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

500kV终端变电站 可靠性分析

主 编 杨汾艳
副主编 唐景星 鲁宗相



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

随着我国电网复杂程度的不断增加,对变电站可靠性的要求也越来越高。本书针对 500kV 终端变电站特点,依据相关规程规范,通过系统梳理几年来的研究成果编写而成。

本书分为 6 章,主要包括典型变电站电气主接线可靠性评估分析、500kV 终端变电站可靠性与风险评估指标及方法原理、500kV 终端变电站的可靠性及风险综合评估的理论计算、500kV 终端变电站选址与建设原则、500kV 终端变电站建设方案算例等。附录中列出了双回路线路可靠性计算详细模型。

本书可指导国内外电网规划中 500kV 终端变电站的规划设计,可供从事电力系统工作的工程技术人员和相关专业人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

500kV 终端变电站可靠性分析/杨汾艳主编. —北京:中国电力出版社, 2013. 7

ISBN 978 - 7 - 5123 - 4547 - 8

I. ①5… II. ①杨… III. ①变电所 - 可靠性 - 分析
IV. ①TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 121017 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2013 年 7 月第一版 2013 年 7 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 9.75 印张 167 千字

印数 0001—3000 册 定价 50.00 元

敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

编 委 会

主 编 杨汾艳

副 主 编 唐景星 鲁宗相

编写人员 钟 清 盛 超 陈晓科 赵艳军
兑潇玮 孙 闻 曾 杰 张 跃
付 聪 王 钤 云 雷 叶 希
张俊峰 王 奕 翁洪杰 马 明



序

在现代电力系统中，根据变电站在电网中的地位和作用，分为枢纽变电站和终端变电站。枢纽变电站是主网架的支柱，位于受端电网的负荷中心，是受端核心电网重要组成部分，其任务是接受和分配电能和事故后的相互支援，同时担负着电网建设“三道防线”的重任（设置解列点，增加电网的可控性）。终端变电站任务则是接受电能，保证用户或地区的供电。枢纽变电站与终端变电站间的协调发展非常必要；枢纽变电站设置不当会使电网结构复杂，降低电网的可控性，增大短路电流。

合理的电网结构是交流电网安全稳定运行的物质基础；不管交流同步电网的规模大或小，必须具有可控性。在当前电网规划设计中，存在一定的误区，觉得终端变电站不可控，总要将变电站并入枢纽，导致电网结构环套环，从而存在大面积停电的风险。综观国内外，尽管电网、变电站电气主接线的可靠性研究已经比较成熟，但目前尚缺乏针对 500kV 终端变电站的专门评价指标体系和方法。

近年来，广东电网公司电力科学研究院在此方面专门立项开展项目，取得了一系列的研究成果。本书基于这些研究成果，针对 500kV 终端变电站特点，提出了一种全环节的 500kV 终端变电站综合分析原理，并进行了详细的理论分析，最终提出一套 500kV 终端变电站评价指标体系，该体系考虑了终端变电站与电网间的交互影响，使对 500kV 终端变电站的评价相对更加客观，同时提出了 500kV 终端变电站的选址建设原则。这是电网规划研究中关于 500kV 终端变电站规划设计的有益尝试，值得同行业技术人员在开展相关工作时借鉴。

本书提出的 500kV 终端变电站综合评价指标体系可供国内外同行在电网规划设计中论证 500kV 终端变电站建设可行性时参考，500kV 终端变电站的选址建设原则也对 500kV 终端变电站的具体建设形式具有指导意义。

2013 年 5 月



前言

随着我国电力系统规模的日趋扩大、电网复杂程度的不断增加，网架结构优化已成为关系大电网发展趋势的一个关键问题，而变电站结构及其与网架的协调设计则是关键手段。

500kV 终端变电站作为合理网架结构、降低电网互联规模的重要组成部分，一方面，能够从优化电网结构的角度来降低局部短路电流以及满足负荷中心区日益增长的供电密度需求；另一方面，终端变电站一般处于电网末端，电网对变电站的可靠性保障能力较枢纽变电站有所降低，如何准确定量评估终端变电站的可靠性水平，并研究提高其可靠性的方法，成为终端变电站设计和运营的关键问题。而目前，尽管电网、变电站主接线的可靠性研究已经比较成熟，但缺乏针对 500kV 终端变电站的专门评估指标体系和方法。研究适用于 500kV 终端变电站的可靠性和风险评价指标体系与方法，建立工程实用的 500kV 终端变电站安全评价综合指标体系，提出 500kV 终端变电站的选址与建设原则，具有重要的理论指导意义。

近年来，广东电网公司电力科学研究院针对 500kV 终端变电站特点，立项开展相关项目，重点研究了 500kV 终端变电站可靠性分析模型、方法，建立相关的评价指标体系；研究了一种计及电网损失和社会影响的电网风险评估方法及指标体系，提出了 500kV 终端变电站的一套工程化评估方法及指标体系，并在此基础上提出了 500kV 终端变电站的参考建设原则。

本书编者是这些科技项目的负责人与主要参与者，他们将多年的科技成果进行梳理编写成本书：第 1 章回顾国内外 500kV 终端变电站的兴起与发展情况、电力系统可靠性分析与风险评估技术的研究现状，并引出 500kV 终端变电站的全环节综合分析基本原理；第 2 章通过评估分析不同系列主接线的典型结构单元的可靠性以及不同规模变电站典型主接线的可靠性，为选择 500kV 终端变电站主接线型式提供理论依据；第 3 章详细介绍了 500kV 终端变电站可靠性与风险评估指标及方法原理，提出了基于致因分析法的 500kV 终端变电站全环节可靠性及风险综合评估算法；第 4 章针对 500kV 终端变电站的特点，

通过 500kV 终端变电站的可靠性及风险综合评估的理论计算，提出一套工程化的可靠性及风险综合评估方法；第 5 章从变电站主接线、500kV 网架结构、220kV 电网等层面提出了 500kV 终端变电站的选址及建设原则；第 6 章结合实际算例对指标体系和建设原则进行了论证。

在本书的编写过程中，原电力规划设计总院曾德文教授级高工和广东电网公司刘巍、李力、李峰、林勇、吴科成等专家，广东电网公司电力科学研究院陈迅教授级高工提出了很多宝贵的意见，特别得到了原电力规划设计总院丁功扬教授级高工很多建设性的技术指导与帮助，使书稿得以进一步完善，在此表示衷心感谢。

限于作者水平和编写时间，书中难免存在不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2013 年 5 月



目 录

序 前言

1 绪论	1
1.1 国内外 500kV 终端变电站的兴起与发展	1
1.2 电力系统可靠性分析与风险评估技术的研究现状	4
1.3 500kV 终端变电站的全环节综合分析基本原理	10
2 典型变电站电气主接线可靠性评估分析	12
2.1 概述	12
2.2 典型电气主接线可靠性定性分析	20
2.3 不同系列电气主接线的典型结构单元的可靠性比较分析	29
2.4 不同规模变电站典型电气主接线定量分析	36
3 500kV 终端变电站可靠性与风险评估指标及方法原理	47
3.1 500kV 终端变电站的综合评价指标体系	47
3.2 电气设备的元件可靠性模型	59
3.3 基于致因分析法的 500kV 终端变电站全环节可靠性及 风险综合评估算法	63
4 500kV 终端变电站的可靠性及风险综合评估的理论计算	78
4.1 500kV 终端变电站电气主接线可靠性评估	78
4.2 500kV 终端变电站下接 220kV 电网可靠性评估	91
4.3 500kV 联络线可靠性指标计算	107
4.4 典型结构 500kV 终端变电站综合指标计算结果	108
4.5 小结	111
5 500kV 终端变电站选址与建设原则	112
5.1 500kV 终端变电站选址原则	112
5.2 500kV 终端变电站建设原则的论证	114

5.3	500kV 终端变电站建设原则小结	117
6	500kV 终端变电站建设方案算例	119
6.1	概述	119
6.2	S1 变电站改造为终端变电站比选方案	119
6.3	S1 终端变电站方案论证	120
6.4	小结	130
附录	双回路线路可靠性计算详细模型	131



绪 论

1.1 国内外 500kV 终端变电站的兴起与发展

在现代电力系统中,根据变电站的地位和作用,将其分为枢纽变电站和终端变电站等。枢纽变电站位于电力系统的枢纽点,用于联系多个电源,出线回路多、变电容量大,是主网架的支柱和受端核心电网的重要组成部分,对电力系统运行的稳定性和可靠性起重要作用。而终端变电站则是指处于某个电压等级的电力网末端,包括分支线末端的变电站;终端变电站接近负荷点,经降压后直接向用户供电。终端变电站的建设,一方面是提高单位区域内的供电强度,另一方面对改善电网的短路电流水平也有好处。合理的电网结构是交流电网安全稳定运行的物质基础,从电网长远发展来看,枢纽变电站与终端变电站间的协调发展非常必要。

随着城市建设速度加快,城市中心区的电力供需矛盾日益突出,对终端变电站的供电容量日益提高,终端变电站的电压等级逐步提高,由原来的 10 ~ 35kV 逐步升高到 110、220kV,目前甚至出现了 500kV 终端变电站。终端变电站一般处于辐射状网络,相当于单电源受电,电网对变电站的可靠性保障能力较枢纽变电站有所降低。因此,如何准确定量评估终端变电站的可靠性水平,并研究提高其可靠性的方法,已成为终端变电站设计和运营的关键问题。

1.1.1 国外 500kV 终端变电站建设发展状况

日本东京的电力需求按照每年 2% 的速度快速增长,迫切需要通过提高供电可靠性。2000 年 11 月,日本东京电力公司在新东京热电站旧址——新丰洲变电站,启动了建设 500kV 紧凑型地下终端变电站的工程,以满足未来 20 年东京地区的用电需求。在澳大利亚的西部地区,为了满足主要城市珀斯地区日益增长的电力需求,澳大利亚西部电力公司计划在卡拉曼达(Kalamanda)和芒达

林 (Mundaring) 兴建一个新的终端变电站, 该终端变电站被称为东方终端, 旨在缓解该地区的用电紧张。美国的 500kV 终端变电站覆盖也相当广泛。

1.1.2 国内 500kV 终端变电站技术的发展

早在 2002 年, 华中电网在 500kV 电网改造和建设过程中, 就提出了建设 500kV 终端变电站的构想, 并建议在 500kV 终端变电站推广无人值守的工作方式, 以降低生产成本。由于 500kV 终端变电站接受电能的能力强、自动化程度高, 因此对提高华中电网输电灵活性、改善华中电网供用电结构不平衡具有重要意义。目前在上海和北京, 都有 500kV 终端变电站 (负荷站) 的应用工程。下面以上海 500kV 世博终端变电站的建设情况为例, 对终端变电站在国内的应用案例进行介绍。

为适应电力系统发展、缓解中心城区供电压力, 以及确保 2010 年“世博会”的电力供应, 结合上海市电力系统中长期规划, 2010 年在上海市中心城区建设了 500kV 世博终端变电站, 这是我国首座多电压等级 500kV 全地下终端变电站。站址位于市中心的北京西路以北、成都路高架以西、山海关路以南、大田路以东, 地面拟建设上海市雕塑公园。500kV 电源来自拟建的三林开关站, 全线电缆隧道长约 15.6 km。500kV 世博终端变电站建设规模如表 1-1 所示。

表 1-1 500kV 世博终端变电站建设规模

项 目	本期	远期
500kV 主变压器、500/220/66kV、1500MVA	2 组	3 组
220kV 主变压器、220/110/35kV、300MVA	2 组	3 组
500kV 进线	2 回	3 回
220kV 进线、出线	进线 1 回、出线 13 回	进线 1 回、出线 19 回
110kV 出线	12 回	12 回
35kV 出线	36 回	36 回

500kV 侧电气主接线采用线路—变压器组单元接线 (简称线变组接线)、线路侧装设断路器; 220kV 侧本期采用双母线双分段接线, 设置 2 台母联断路器及 2 台分段断路器, 远期按双母线三分段规划, 设置 3 台母联断路器及 4 台分段断路器; 主变压器低压侧 66kV 侧采用单母线接线, 同时设总回路断路器接线, 每台主变压器低压侧设置 $4 \times 60\text{Mvar}$ 并联电抗器。220kV 降压变压器采用线变组接线, 站外进线侧设断路器, 站内进线侧不设断路器; 110kV 接线采用单母线三分段接线, 设置 2 台分段断路器; 35kV 接线采用单母线六分段环型接线, 设置 3 台分段断路器, 主变压器进线采用双断路器接线方式。500kV 世博终端变电站的电气主接线方案如图 1-1 所示。

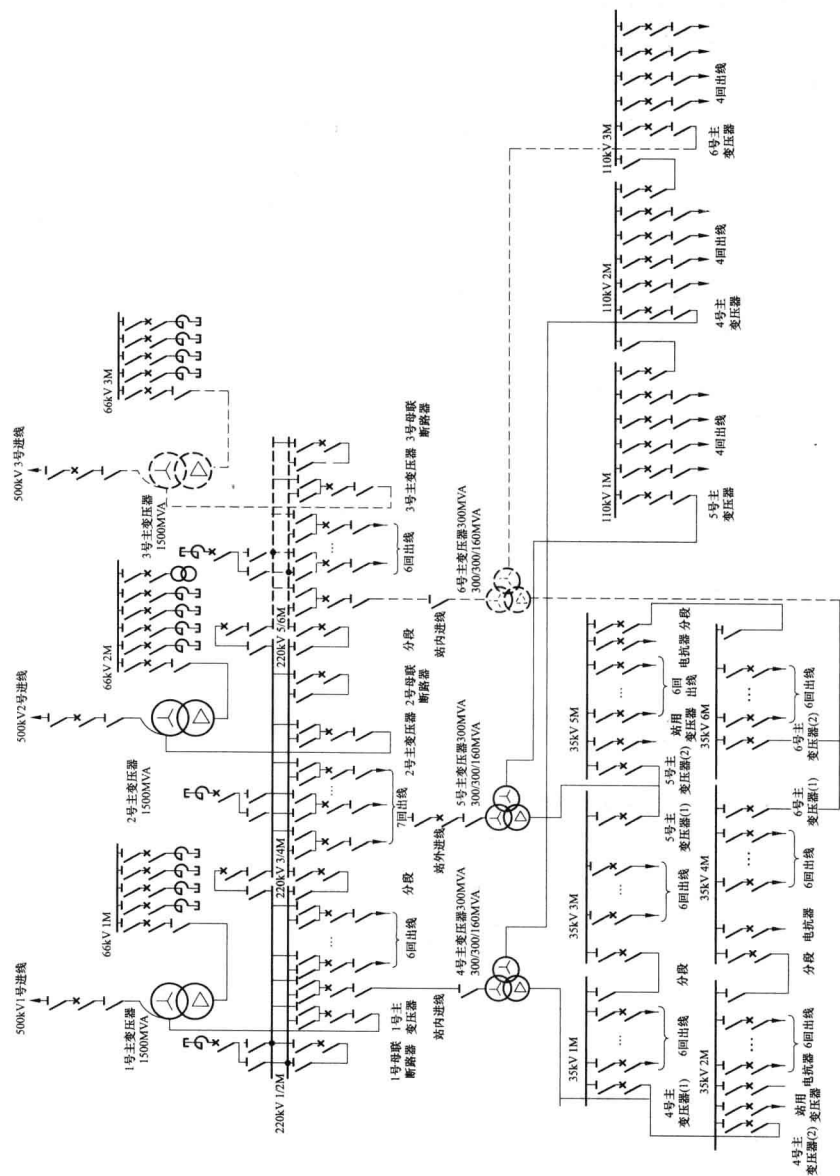


图 1-1 500kV 世博终端变电站的电气主接线方案^①

① 引自沈婷, 乐党教. 500kV 静安 (世博) 地下变电站设计方案. 电力建设, 2008, 7 (29): 8-11.

从图 1-1 的设计思想来看, 500kV 世博终端变电站秉承了负荷站(终端变电站)的一贯设计思想, 即高压侧接线尽量简洁, 而低压侧则采用设计和运行经验都非常丰富的双母线分段典型接线。高压侧采用简化接线源于两个考虑: 一是负荷站的高压侧接线作为电源, 常规条件下双电源供电的可靠性水平已经能够满足要求, 进一步到 3 回电源就能达到非常高的供电可靠性水平, 因此高压侧回路数一般就是 2~3 回, 采用简化接线有利于保证各回路的相对独立性, 从而提高电源的可靠性; 另一方面, 随着 500kV 电缆、气体绝缘金属封闭开关设备(GIS)可靠性水平的大幅度提升, 使得简单接线的可靠性水平也能达到常规供电可靠性要求。

1.1.3 终端变电站电气主接线设计的一般性特点

现在, 对城市变电站的最基本要求一般有设备无油化、小型化、高参数、少/免维修、尽量压缩占地, 满足较高的消防、环保要求, 具有较高的供电可靠性。其电气主接线设计的一般原则是尽量简化接线又满足供电可靠性、调度灵活性的要求, 为尽量减少城市变电站占地创造根本条件。因此, 终端变电站接线应以简单接线为主, 通常高压侧采用线变组接线或内桥接线, 低压侧采用母线制接线。通过选用高参数的设备和配电装置(如 GIS、混合式气体绝缘金属封闭开关设备 HGIS 等), 提高设备单体的可靠性, 从而提高终端变电站的总体可靠性水平。

1.2 电力系统可靠性分析与风险评估技术的研究现状

1.2.1 电力系统可靠性的分析与研究

1.2.1.1 电力系统可靠性的基本概念和评估方法

电力系统可靠性是指电力系统按可接受的质量标准和所需数量不间断地向电力用户供应电力和电能的能力, 通常包括充裕度(adequacy)和安全性(security)两个方面。关于电力系统可靠性的研究自 20 世纪 60 年代开始, 可靠性是评价电力系统性能的重要标准。

从评估方法来说, 可分为确定性方法(deterministic method)和概率性方法(probabilistic method)两类。但无论哪种方法, 其评估的基本思路都是由三个部分组成, 即形成停运事故集合、对各个停运事故进行可靠性评估和统计得到预先定义的可靠性指标。简单地说也就是状态筛选、状态评估和指标计算。

根据研究对象和研究目标的不同, 可靠性指标及评估方法有所不同。目

前，电力系统可靠性研究中，通常将整个电力网络分为发电系统、输电系统和配电系统，而相应地形成了不同的研究层次，定义不同的指标体系，如图 1-2 所示。

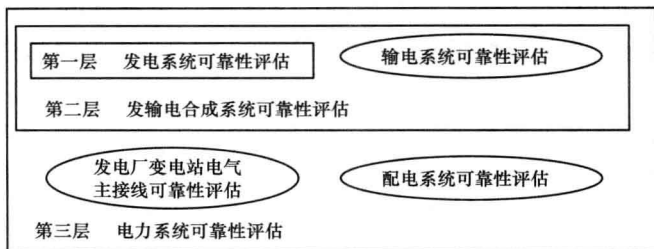


图 1-2 电力系统可靠性研究层次

而如何筛选停运事故集合以及评估集合中的所有停运事故的后果，则存在很多不同的思路，从而形成了各种不同的评估方法，具体说明如下。

(1) 确定性可靠性评估方法。该方法是采用最早的，即首先筛选出各种临界系统条件，对之进行潮流计算、短路计算以及稳定分析，从而得到可靠性指标。例如， $N-1$ 准则就是最常用的确定性准则。但是，该方法存在不能分析随机因素的缺陷。而实际电力系统中存在大量的随机因素，如负荷需求变化、元件故障的发生及持续时间等，都是复杂的随机过程。严格地说，电力系统是一个非自治、非线性、多刚体时变系统。因此，用概率方法对电力系统的随机特性进行分析，定义概率性可靠性指标对系统的随机特性进行定量评价，是必然的研究趋势。

(2) 概率性可靠性评估方法。该方法可分为解析法 (analytic method) 和蒙特卡罗模拟法 (monte-carlo simulation method) 两类。其中，解析法是研究最早、最广泛的评估方法，主要包括以下三类：第一类是基于逻辑图的网络方法 (network method)，一般用于分析由两状态独立元件组成的简单系统，采用的基本方法是串并联分析，理论基础是全概率公式和布尔展开定理；第二类方法是故障树分析法 (fault tree analysis, FTA) 和故障模式及其后果分析法 (failure mode and effect analysis, FMEA)，这类方法在核电站的安全分析以及宇航、电子等工业中已广泛应用并取得良好效果，预计在电力工业和电气设备制造业中有良好的应用前景；第三类方法是状态空间法 (state-space method)，它是马尔柯夫过程理论和电力系统的具体情况相结合的产物，在电源可靠性分析中应用十分广泛。蒙特卡罗模拟法则适用于复杂系统的分析，也是目前电力

系统可靠性研究的热点方法。

1.2.1.2 发输电系统可靠性评估的发展和研究现状

发输电系统与厂站的电气主接线系统有很大的差别。发电机和线路（包括变压器支路和并联电容器支路在内的广义线路）是发输电系统可靠性评估的主要分析对象。发输电系统的运行中往往存在电力设备过载的情况，尤其输电线路、变压器等设备的实际传输容量，必然受到实际物理设备的热容量限制，而为了保障设备及整个系统的安全稳定运行，广泛采用了各种控制技术。这些因素都必须在发输电系统的可靠性评估中进行分析，因此，单纯的连续性评估方法不再适用，必须研究新的可靠性理论和方法来对之分析。

蒙特卡罗模拟法和状态枚举法是发输电系统可靠性评估的两种基本方法，其主要区别在于事故筛选方法不同。状态枚举法通过所有元件的组合得到事故集合，并逐一分析其故障后果，从而得到相应的可靠性指标，是一种改进的连续性方法。其最大优点就是每种系统状态只评估一次，而且可以通过解析方法得到状态评估的精确结果。但是，由于系统状态数和元件个数及元件模型的状态数密切相关，呈指数增长关系，计算量也随之增加。“维数灾”问题极大地限制了状态枚举法的适用系统规模。蒙特卡罗模拟法则是研究复杂系统的强有力工具，从理论上来说，只要模拟时间足够长，它可以模拟所有可能的系统事件，而且对于系统元件的随机模型的分布没有特殊限制。其中，基于马尔柯夫链的蒙特卡罗法，沿用了连续性评估方法中的基本模型，通过随机模拟来获得系统状态序列并进行计算分析，在发输电系统的可靠性研究中得到了广泛的应用。

蒙特卡罗模拟法和状态枚举法中的故障后果评估过程是类似的，主要涉及的分析技术包括潮流计算和暂态稳定分析。通过潮流计算得到系统故障前后的运行状态，从而判定是否存在运行条件越界，而暂态稳定分析则主要用于判断系统的稳定状态。为了定量评估停运事故的后果严重程度，还需要分析事故后各种控制措施引起的电量变化以及相应的负荷损失量。

2000年，中国电力科学院研究院提出了《电网规划可靠性准则建议框架》，对发输电系统的可靠性评估的指标、方法都进行了描述。其最大的特点在于状态筛选过程中，借鉴了传统的仿真计算经验，根据研究人员的经验选择一些事件构成事件集合。这种状态枚举法实质上是一种经验统计方法，其优点是实用性，能够和目前广泛采用的 $N-1$ 准则和电力部门的统计分析工作相结合。用统计方法进行可靠性研究，是一种最根本的方法。由于统计信息来源于实际系统真实发生的事故，所以根据统计信息得到的可靠性指标是最符合实际

情况的；而任何基于数学模型的计算方法，都是基于这样或者那样的假设前提，用计算机产生虚拟的事故状态序列，对之进行统计分析，其实质也是一种统计方法，只是其事故集合是由计算机产生的模拟样本而非真实的统计样本。但一个现实的情况是：由于各项可靠性统计工作的开展并不普及，故障事故统计样本不够大，得到的可靠性指标稳定性不好。正因为这个原因，才产生了各种模拟方法，利用计算机模拟产生足够大的样本空间，从而得到比较稳定的可靠性指标结果。

但《电网规划可靠性准则建议框架》中“研究人员的经验”是一个难于定量评定的因素，这样筛选得到的事故集合的完备性就难以保障，相应得到的可靠性指标的精度不高。就目前我国可靠性研究现状来说，由于各个电力部门的基础统计数据不足，完全用统计方法进行可靠性研究的条件尚不成熟，因此，用模拟法和/或解析法建立适当的数学模型，用计算机产生模拟状态序列来统计分析可靠性指标，是比较合理的做法。

1.2.2 电力系统风险评估的应用与研究

1.2.2.1 风险理论与评估模型

风险具有概率和后果的双重性。在电力系统中，风险可以理解为在特定条件下，某一危害发生的概率与危害后果的组合。电力系统的风险评估应当不只辨识失效事件发生的可能性，而且要识别这些事件的严重程度。

风险评估是指在风险识别的基础上，对风险进行计量、比较、判断和排序等分析，从而为制订防范措施和管理决策提供科学的依据。风险评估的分析流程有以下几个关键步骤，如图1-3所示。

(1) 研究范围的划定，确定研究对象。

(2) 风险辨识，确定研究对象存在的风险及其对应的发生概率、后果分析的计算。

(3) 风险评估，根据风险辨识环节的分析结果确定对象的风险及需控制的对象。

(4) 风险控制，维修策略的制订、实施环节。

值得注意的是，由于风险包含客观性和主观性两个方面，所以风险评估一方面反映事物的客观价值，另一方面随着风险利害主体的不同，对相同状态下的同一事物也会得出不同的风险评估结果。因而科学的风险评估应该从两个方面着手：一方面准确评价事物的客观价值，另一方面需要从风险利害主体的角度评价其主观价值。只有综合了这两方面的评价，才能得出一个全面准确的风险评估结果。

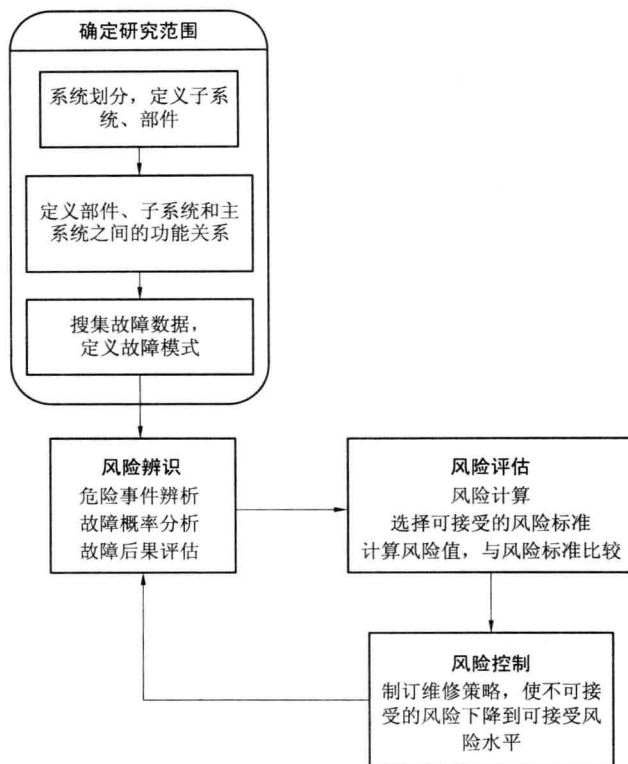


图 1-3 风险评估的分析流程

1.2.2.2 电力系统安全风险评估方法

常用的电力系统安全风险评估方法主要分为状态枚举法和蒙特卡罗模拟法两种。由于状态枚举法的计算量随元件数量呈指数增加, 对于包含有大量元件的系统, 要枚举所有的系统状态通常是不可能的。蒙特卡罗法因其灵活性而广泛应用于大电网安全评估的系统状态抽样中。

除了用状态枚举法和蒙特卡罗模拟法计算风险指标以外, 有学者将常用于金融领域的显式风险评估方法——风险价值法 (value at risk, VaR 法) 用于电力投资收益的评估中。这种方法引入了置信水平的概念, 相比于只是一个点估计值的传统风险指标能够更加显式地表达出风险水平的大小。

1.2.2.3 电力系统安全风险评估的发展

美国爱荷华州立大学的 J. McCaley 和 Vittal 等人最早将风险理论应用于电力系统安全评估, 并且在发表于 1999 年 IEEE 上的一篇基于风险理论的电力系