

周孝信 郭剑波 孙元章 主编

大型互联电网运行 可靠性基础研究

(I)



清华大学出版社

周孝信 郭剑波 孙元章 主编

大型互联电网运行 可靠性基础研究

(I)

清华大学出版社

北京

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

大型互联电网运行可靠性基础研究 / 周孝信, 郭剑波, 孙元章主编. —北京: 清华大学出版社, 2008.5

ISBN 978-7-302-17652-7

I. 大… II. ①周… ②郭… ③孙… III. 联合电网-电力系统运行-可靠性-文集 IV. TM727-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 064496 号

责任编辑: 张占奎

责任校对: 王淑云

责任印制: 李红英

出版发行: 清华大学出版社

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175

邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者: 三河市春园印刷有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185×260 本册印张: 18.75

本册字数: 454 千字

版 次: 2008 年 5 月第 1 版

印 次: 2008 年 5 月第 1 次印刷

印 数: 1~500

定 价: 198.00 元 (全套)

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题, 请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:
010-62770177 转 3103 产品编号: 029914-02

前 言

电气化是现代社会发展水平的重要标志,电力作为基础能源与现代社会息息相关,电网安全维系国家安全。随着我国电力需求的快速增长,西电东送、全国联网战略的实施,我国电网的规模日益扩大、互联程度不断提高。提高大型互联电网运行可靠性、保证电网安全已成为我国电力系统面临的关键性和迫切性问题。电网安全运行涉及的技术十分复杂,是世界电网技术发展面临的共性问题。2008年1月我国南方多个省级电网遭受了低温雨雪冰冻灾害,给电网造成了毁灭性的破坏。本书集紧密围绕提高大型互联电网运行可靠性的目标,总结了几个方面科学问题的阶段性研究结果,如电力受端系统大面积停电的机理,大型互联电网分布式计算的理论和办法,大电网在线运行可靠性评估、预警及决策理论,以及提高输电系统输送能力和运行可靠性的关键技术。

本书汇集了国家“973”计划《提高大型互联电网运行可靠性的基础研究》的主要研究成果。该项目针对上述的科学问题开展了多方面的基础理论和系统性的关键技术研究,初步建立了电网运行可靠性的理论体系和新的分析方法,在一些关键科学技术问题上取得了突破,为提高大型互联电网运行可靠性的实用化技术提供了科学依据。在理论创新上,系统地建立了超大规模互联电网在线运行可靠性的安全风险评估理论、指标体系和分析方法;提出了保证受端电网运行可靠性的评估、预警及决策理论和方法;建立了超大规模互联电网的分布式计算理论和方法,实现跨大区电网的潮流、暂态和电压稳定性的分布式计算。在技术创新上,提出了大幅度提高500 kV超高压交流输电线路输电能力和电网充裕度的柔性紧凑型输电技术;建立了多区域互联电网的分布式计算示范系统;构造了电力市场和电网运行可靠性相互影响研究的数字仿真平台;提出了提高受端电网运行可靠性的技术方案。本书的部分研究成果已在实际电力系统中应用,对电力系统基础理论以及大系统理论、控制理论、材料科学等相关学科的发展也有一定的推动作用。本书中的研究成果经进一步应用开发和集成,将形成新一代电网调度控制中心能量管理系统,显著提高我国电网事故分析和处理能力,从而减少大面积停电给社会带来的灾难性损失。这些研究成果将为大幅度提高我国输电系统的输电能力和运行可靠性提供关键技术基础,为我国大规模的电网建设节省输电走廊,减少电网建设的环境压力,从而提高电网的运行可靠性、确保供电安全提供充分保证。这样将使我国电网的安全运行技术与我国电网的发展相适应并跻身国际先进行列。

非常感谢国家科技部“973”项目的大力支持,同时也衷心感谢参与该项目的全体研究人员对该项目的研究成果所做出的贡献,最后还要感谢刘应梅博士、何剑博士生对该书的整理出版所付出的辛勤劳动和汗水。

周孝信 郭剑波 孙元章

2008年4月16日

目 录

电力系统运行可靠性评估理论与方法·····	孙元章 程林 刘海涛 何剑 邹欣 (1)
电力系统运行可靠性概率评估方法指标体系探讨 ·····	周家启 谢开贵 曹侃 (23)
电力系统电压稳定研究·····	汤涌 孙华东 仲悟之 林伟芳 (46)
电力系统自组织临界理论及大电网安全·····	梅生伟 郭剑波 (71)
复杂网络理论与电力网络复杂性的相关研究 ·····	曹一家 王光增 丁理杰 陈晓刚 孙可 (99)
大型互联电网分布式并行算法、数据平台和计算平台的研究 ·····	李亚楼 郭剑 李芳 严亚勤 陈勇 (114)
互联电网分布式计算·····	沈沉 (135)
动态调度自动化系统的研究和开发·····	白晓民 (155)
三维协调的新一代电网能量管理系统关键技术研究 ·····	张伯明 孙宏斌 吴文传 郭庆来 (184)
市场运营与可靠性综合仿真平台的研究与开发 ·····	王锡凡 王秀丽 别朝红 王建学 丁晓莺 刘林 冯长有 周鑫 汪静 (204)
1000 kV 紧凑型线路导线排列的初步研究·····	梁曦东 李岩 许苑 (230)
采用储能技术提高电网传输能力的研究·····	孙海顺 文劲宇 唐跃进 程时杰 (243)
FACTS 与电网可靠性的交互影响 ·····	鲁宗相 (264)
大功率电力电子装置试验等效机理及试验方法的基础理论研究 ·····	汤广福 贺之渊 温家良 查鲲鹏 钱峰 李强 (274)

电力系统运行可靠性评估理论与方法

孙元章 程林 刘海涛 何剑 邹欣

(清华大学电机系电力系统国家重点实验室 北京 100084)

摘 要 本文基于 SCADA/EMS 提供的实时运行信息, 研究电力系统在实时运行状态下的可靠性, 系统地提出了基于实时运行状态的运行可靠性的全新概念与理论框架。主要研究了运行可靠性评估的理论与方法, 提出了基于实时运行条件的元件可靠性模型, 基于该模型能够评估系统在实时运行状态下的可靠性; 初步探讨了运行可靠性基础数据统计与分析方法来获得可靠性参数与运行条件之间的变化关系; 提出了基于瞬时概率的短期可靠性评估算法, 能够评估系统在当前运行状态下的短期可靠性; 提出了基于快速排序技术的系统状态选择算法, 能够实现运行可靠性的快速准确评估; 定义了运行可靠性指标体系, 包括状态类指标、程度类指标、层次类指标和时限类指标, 能够全面度量系统的运行可靠性。

关键词 运行可靠性; 元件实时模型; 瞬时概率; 快速排序技术; 运行指标体系

0. 引言

随着电网互联规模和复杂性的提高, 国内外大停电事故频繁发生。评估系统在实时运行过程中的可靠性, 并以此为依据指导运行调度是保障系统可靠运行的关键性问题。

目前的评估理论与技术对于解决这一难题已遇上了难以克服的困难。电力系统的在线安全评估^[1-3]一直是采用确定性方法, 未计及系统运行过程中不确定性因素的影响, 难以实现对系统运行可靠性的科学表征。常规可靠性评估理论^[4-11]虽然建立在概率风险的科学概念上, 能综合考虑故障发生的可能性和严重性, 但主要应用于电力系统规划设计, 研究系统长期运行的平均可靠性, 没有考虑电网实时运行状态的变化对元件停运的影响, 难以评估系统在实时运行方式下, 特别是在接近或达到安全运行极限时的可靠性。目前刚开展的风险评估理论^[12-15]虽然进一步面向运行调度提出了一些关键技术, 但仍没有考虑实时运行状态的变化对元件停运的影响, 难以评估系统在实时运行状态下的运行风险。

随着数据采集与监控/能量管理系统(SCADA/EMS)的逐渐完善和成熟, 为实现电网可靠性实时评估提供了可能性。论文基于 SCADA/EMS 提供的实时运行信息, 研究电力系统在实时运行状态下的可靠性, 系统地提出了基于实时运行状态的运行可靠性的全新概念与理论框架。主要研究了运行可靠性评估的理论与方法, 建立了元件实时模型、快速评估算法、运行指标体系。

1. 运行可靠性的概念与特点

1) 运行可靠性的概念

文献[16]给出了一种被广泛接受的可靠性定义: 可靠性是一台设备在所处运行条件下, 在预定的时期内能够充分执行其预期功能的概率 (Reliability is the probability of a device

performing its purpose adequately for the period of time intended under the operating conditions encountered)。文献[17]给出了系统工程中可靠性的经典定义：可靠性是元件、设备和系统在规定条件下和预定时间内，完成预定功能的概率。

可见，可靠性的定义包括5点要素：描述对象、运行条件、时间期限、预定功能、概率指标。针对电力系统的运行可靠性，分别给出这5点要素的含义：

描述对象——电力系统；

运行条件——在实时运行状态和外界工作环境下；

时间期限——短期（数小时或数分钟）；

预期功能——持续满足系统运行约束和电力用户负荷需求；

概率指标——运行可靠性指标体系。

基于以上分析，论文给出电力系统运行可靠性的定义：电力系统在实时运行状态和外界工作环境下，在短期能够持续满足系统运行约束和电力用户负荷需求的能力。与常规可靠性的主要区别在于，运行可靠性关注的是电力系统在实时运行状态下的短期可靠性。

电力系统运行可靠性的研究方法是：基于RTU/SCADA/EMS提供的实时运行信息，评估系统在当前运行状态下的短期可靠性和连锁故障风险，实时地给出可视化可靠性指标。

电力系统运行可靠性的目标是：实时地提供可靠性指标与综合控制方案，辅助决策，指导运行调度，保证电力系统持续地安全、可靠运行。

2) 相对于静态安全评估的特点

与基于确定性方法的静态安全评估相比，运行可靠性评估的最大特点是应用了概率的思想，综合考虑了故障发生的可能性与严重性，使得评估结果更科学合理。

3) 相对于常规可靠性评估的特点

与常规可靠性评估相比，它们的目标与定位不同，由于目标与定位不同，导致二者在元件模型的建立、评估算法的实现以及指标体系的定义上都存在不同，如表1所示。

4) 相对于基于风险的静态安全评估的特点

与基于风险的静态安全评估相比，它们的目标与定位基本一致，但运行可靠性评估针对基于风险的静态安全评估的不足做了改进，使得它们在元件模型、评估算法和指标体系上存在很大不同，如表2所示。

表1 与常规可靠性评估的比较

评 估 理 论		常规可靠性评估	运行可靠性评估
目 标		应用于电力系统规划设计，为规划人员提供决策依据	应用于电力系统运行调度，为调度人员提供决策依据
定 位	研究的内容	研究系统在长期不同运行状态下的平均可靠性	研究系统在实时运行状态下的时变可靠性
	研究的时间框架	研究系统长期运行的可靠性，时间框架是数年	研究系统短期运行的可靠性，时间框架是数分钟或数小时
	应用模式	离线评估	在线评估
元件模型		元件停运率采用长期统计平均值，反映系统在长期不同运行状态下的平均可靠性	元件停运率随运行条件的变化而改变，反映系统在实时运行状态下的时变可靠性

续表

评估理论		常规可靠性评估	运行可靠性评估
评估算法	系统状态概率计算	采用 Markov 过程平稳状态概率表征系统状态的长期发生概率,反映系统长期运行的可靠性	采用 Markov 过程瞬时状态概率表征系统状态的短期发生概率,反映系统短期运行的可靠性
	系统状态选择	采用状态枚举法或模拟抽样法选择系统状态	采用快速排序技术选择系统状态,协调评估速度与精度的矛盾,实现快速评估
	系统状态后果分析	采用发电调度和切负荷算法模拟实际运行调度操作,分析故障状态下的负荷损失量	采用发电调度和切负荷算法模拟实际运行调度操作,或根据实际运行调度策略、安自装置策略,计算故障状态下的负荷损失量
指标体系		主要以切负荷指标度量系统可靠性。指标体系包括状态类、层次类指标。	以裕度指标、越限指标、切负荷指标度量系统的运行可靠性。指标体系包括状态类、程度类、层次类和时限类指标

表 2 与基于风险的静态安全评估的比较

评估理论		基于风险的静态安全评估	运行可靠性评估
元件模型		元件停运率采用长期统计平均值,不能反映系统在实时运行状态下的运行风险	元件停运率随运行条件的变化而变化,能够反映系统在实时运行状态下的时变可靠性
评估算法	系统状态概率计算	采用 Poisson 分布表征系统状态的短期发生概率,反映系统短期运行的风险	采用 Markov 过程瞬时状态概率表征系统状态的短期发生概率,反映系统短期运行的可靠性
	系统状态选择	预想故障集合,或采用状态枚举法或模拟抽样法选择系统状态	采用快速排序技术选择系统状态,协调评估速度与精度的矛盾,实现快速评估
	系统状态后果分析	未模拟实际运行调度操作,采用线性函数描述线路潮流过载、母线低电压的后果严重性程度	模拟实际运行调度操作或根据实际运行调度策略,采用负荷损失量度量线路潮流过载、母线电压过低的后果严重性程度
指标体系		以线路过负荷、母线低电压等越限指标度量系统运行风险。指标体系包括元件级与系统级	以裕度指标、越限指标、切负荷指标度量系统的运行可靠性。指标体系包括状态类、程度类、层次类和时限类指标

2. 运行可靠性的理论框架

电力系统运行可靠性理论的研究内容是:基于 RTU/SCADA/EMS 系统提供的大量实时运行数据,考虑线路潮流、母线电压、系统频率等运行条件的实时变化对元件可靠性模型的影响,以及机组运行方式、负荷水平、网络结构等运行状态的实时变化对系统可靠性的影响,研究系统在当前状态下的短期可靠性和连锁故障风险,实时地给出系统的运行风险可视化指标;基于评估结果,定量分析影响系统可靠性的关键因素,快速寻找系统薄弱环节和薄弱环节,综合考虑各种控制措施带来的可靠性提升和经济性代价,建立最优的控制决策方案,形成一整套实时监测、评估、预警、控制理论体系。最终在实际电力系统中在线实施整套运行可靠性理论,提高互联电网运行可靠性,预防大面积停电事故。整套理论框架如图 1 所示。

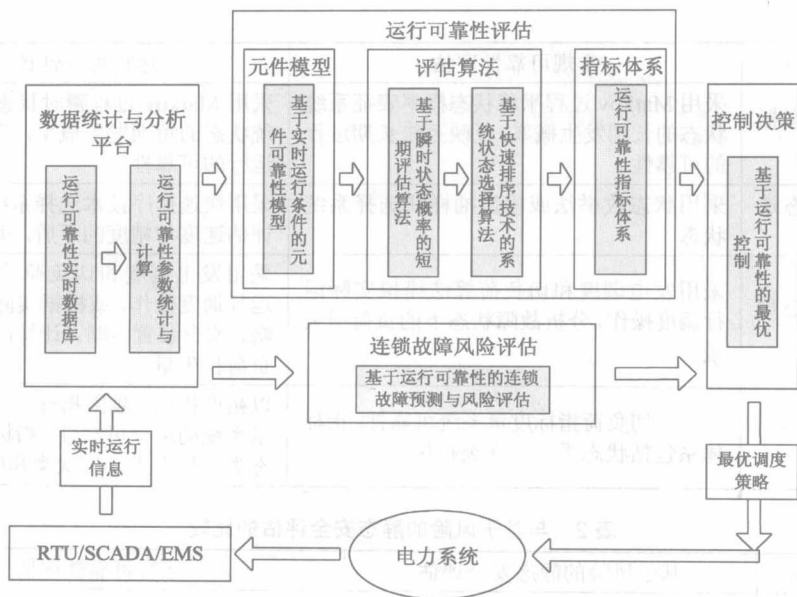


图1 运行可靠性理论框架

运行可靠性理论包括运行可靠性评估、连锁故障风险评估、控制决策三部分。需要研究的关键问题有以下几方面：

1) 基于实时运行条件、外界工作环境的元件可靠性模型

运行调度人员关注的是系统在当前运行状态下的可靠性，特别是当系统在接近或达到安全运行极限时，重载元件停运的概率急剧增大，系统的安全运行受到严重威胁，运行调度人员急需获取系统在当前运行状态下的可靠性，以便及时制定应对控制措施，预防大停电事故发生。

在目前的评估理论与技术中，元件可靠性参数（元件停运率）采用长期统计数据平均值，没有考虑实时运行条件对元件停运的影响，难以评估系统在实时运行方式下的可靠性。

运行可靠性理论分析线路潮流、系统频率、发电机机端电压、负荷母线电压等实时运行条件对元件停运概率的影响，提出了建模原则与方法，建立了基于实时运行条件的元件停运概率模型^[18-21]。研究与运行条件相关的元件停运因素，并分类建模，综合考虑较为全面的停运因素，建立了基于实时运行条件的元件停运率模型^[22]。进一步考虑外界工作环境对元件停运的影响，建立了基于实时运行条件与外界工作环境的元件可靠性模型^[23]。

2) 运行可靠性基础数据统计与分析

元件建模的关键是准确建立元件的可靠性参数与运行条件之间的变化关系。在常规的可靠性数据统计工作中，元件的可靠性参数采用长期统计平均值，没有记录元件停运时相应的运行条件信息，无法直接获得这两者之间的关系。

运行可靠性理论初步探讨了运行可靠性基础数据统计与分析方法来实现准确建模。基于 SCADA/EMS 系统建立运行可靠性实时数据库，并随着系统的运行实时更新数据信息。基于实时数据库，通过可靠性参数统计与计算方法，获得不同停运因素的停运率模型，进而建立元件的可靠性参数与运行条件之间的变化关系。

3) 基于瞬时概率的短期可靠性评估

在实际系统运行中,运行调度人员关注系统在将来数小时或数分钟内的短期可靠性,以便制定运行调度方案,或针对系统未来可能出现的运行风险制定应对措施。常规可靠性评估反映的是系统长期运行的平均可靠性,基于 Markov 过程平稳概率进行系统状态枚举与分析,无法评估系统在当前运行状态下的短期可靠性。

根据 Markov 转移过程,元件的瞬时停运与修复概率随着运行时间的变化而改变,导致系统可靠性在不同运行时段发生变化。因此,运行可靠性理论引入 Markov 过程瞬时概率进行系统状态预测与评估,提出短期可靠性的概念和评估算法^[24-26],进一步考虑运行备用对短期可靠性的影响,基于面积指标曲线,给出了计及运行备用的短期指标计算方法^[25]。

4) 基于快速排序技术的系统状态选择

运行可靠性理论要根据实时运行状态在线地给出评估指标,以指导运行调度。因此,快速评估算法的研究是实现运行可靠性在线应用的关键问题之一。常规可靠性评估主要应用于离线规划分析,对计算时间的要求不高。如果要保证较高的评估精度,需要枚举或抽样非常多的故障状态进行评估,计算量巨大,难以实现快速评估。

研究表明短期评估只需选择少量概率较大的系统状态就能满足较高的指标精度,具备在线应用的前景^[25,26]。但是,如何在海量的系统状态中,快速准确地选择所需的概率较大的系统状态是在线评估首要解决的问题。

运行可靠性理论提出了基于快速排序技术的系统状态选择算法,能够快速、依次地选出短期概率较大的系统状态,直至满足指标精度^[25,27,28]。由于该技术选择系统状态速度极快,且与截至故障重数方法相比,只需少量的系统状态就可达到相同的指标精度。因此,评估耗时少,能够实现运行可靠性的快速准确评估。

5) 运行可靠性指标体系

运行可靠性评估是为指导电网运行服务,因此,指标要符合运行层面的要求和定位:①不仅能够反映系统的负荷损失情况,还要能够反映系统的安全裕度,以及线路潮流过载、节点电压越限等运行约束违限的情况;②能够直观全面地描述系统整体可靠性;③能够反映重要负荷节点和关键元件的可靠性;④能够反映系统短期与长期的可靠性。

常规可靠性指标难以全部满足这些要求,因此运行可靠性理论对常规可靠性指标进行拓展,定义了一套运行可靠性指标体系^[29],包括状态类指标、程度类指标、层次类指标和时限类指标,从可靠性能、评估范围、时间框架三个维度全方位地表征运行可靠性。在可靠性能方面,通过状态类指标描述整体可靠性,通过程度类指标从安全裕度、越限程度、负荷损失三个角度度量可靠性;在评估范围方面,通过层次类指标反映系统、区域、负荷点、元件四个层次的可靠性;在时间框架方面,通过时限类指标描述短期与长期的可靠性。

6) 基于运行可靠性的连锁故障预测与风险评估

在系统运行过程中,容易导致系统崩溃的一类连锁故障是某一关键联络线或设备发生故障,引起其他线路过负荷,在继电保护与控制的作用下退出运行,如此循环引发连锁反应,最终导致整个系统崩溃。

对此类连锁故障进行预测和风险评估,以指导运行调度规避连锁故障风险,是运行可靠性需要解决的重大课题之一。

针对该类型连锁故障,目前的研究方法一般是基于复杂理论、图论或模式搜索方法进

行研究。基于复杂理论的研究从宏观上描述了连锁故障的自组织临界性,但不能给出可能发生的连锁故障路径。基于图论的研究从电力系统网络拓扑的角度给出了连锁故障的传播方式,但是元件模型过于简单,与实际相差较大。基于模式搜索方法的研究通过解析法或模拟法搜索连锁故障路径,但对于连锁故障发生的可能性和严重性没有系统的理论论述。

运行可靠性理论为连锁故障的在线预测与风险评估提供了理论基础。基于系统实时运行状态,预测系统可能发生连锁故障的概率和路径,在线分析连锁故障发生的风险,定量评估连锁故障风险指标,达到在线评估与预警的目标。

7) 基于运行可靠性的控制决策

电力系统运行可靠性理论的目标是实时地给出综合控制方案,辅助决策,指导运行调度,保障电力系统持续地安全、可靠运行。

基于 SCADA/EMS 的安全约束调度已经广泛应用于电力系统,能够解决当前系统出现的安全约束违限现象,并消除某些潜在(即由预想故障引起)的不安全现象。但它本质上属于基于确定性准则的调度方式,难以处理电网运行的不确定性因素,无法给出规避运行风险的控制策略。

运行可靠性评估理论为电网的运行调度提供了新的依据。建立基于运行可靠性的辅助控制决策系统,实现运行可靠性控制决策系统与 EMS 系统的实时数据交换。研究可靠性约束的预防控制和可靠性最优控制,通过事故发生前的控制来保证系统的可靠运行,降低系统运行的风险。同时开发快速有效的控制算法,以实现在线生成控制策略。

8) 测试系统的建立与实验研究

运行可靠性研究是一项崭新的课题,存在很多问题,这些问题的理论和方法尚在不断探索中,因此建立符合中国国情的运行可靠性测试系统,对推动理论研究的深入和算法的验证是至关重要的,也是理论研究成果实用化的必经途径。

华东电网是一个结构复杂,且具代表性的电力系统,以此系统为基础,正确等值华东电网结构、参数,控制系统,模拟电网实际运行过程,并提供实时运行状态信息。在此实验平台上,能够评估在不同运行状态下的系统可靠性,研究影响可靠性的薄弱因素和提高可靠性的控制措施。

9) 评估平台的建立与实际应用

为了将运行可靠性理论成果实用化,在实际系统开展运行可靠性在线评估与控制,需要开发运行可靠性评估软件平台。整个平台包括四个功能模块。

数据统计与分析模块:实时读取 SCADA/EMS 的刷新运行数据,存入运行可靠性实时数据库,并进行运行可靠性参数的统计与计算。

评估模块:从数据统计与分析模块读入系统实时运行信息与元件可靠性模型的参数,进行运行可靠性评估与连锁故障风险评估。

控制模块:从评估模块读入评估指标,从数据统计与分析模块读入实时运行信息,制定运行可靠性最优控制策略。

结果显示模块:采用人机交互式界面,在线提供可视化指标。

3. 运行可靠性评估理论与方法

论文建立了一套运行可靠性评估理论与方法,提出了基于实时运行条件的元件可靠性模型,基于该模型能够评估系统在实时运行状态下的可靠性;初步探讨了运行可靠性基础数据统计与分析方法来获得可靠性参数与运行条件之间的变化关系;提出了基于瞬时概率的短期可靠性评估算法,能够评估系统在当前运行状态下的短期可靠性;提出了基于快速排序技术的系统状态选择算法,能够实现运行可靠性的快速准确评估;定义了运行可靠性指标体系,包括状态类指标、程度类指标、层次类指标和时限类指标,能够全面度量系统的运行可靠性。

3.1 基于实时运行条件的元件可靠性模型

3.1.1 元件停运概率模型

1) 基于传输潮流的线路停运概率模型

线路潮流增加会导致线路停运概率增大,主要原因是:①随着线路潮流的增加,输电线路的发热量增加,如果线路长时间处于高温下,线路会逐渐失去机械强度;同时,导体在高温时会膨胀,增加线路的弧垂,降低离地的高度。如果线路潮流持续增加,长时间超过线路热稳定极限,线路会发热熔断。②当线路潮流大于热稳定极限时,线路的过负荷、过电流保护装置会动作,其动作时限与线路的潮流大小有关,潮流越大,保护动作时间的整定值越小,采取控制措施成功降低线路潮流到正常值范围的可能性越小,线路跳闸退出运行的概率就越大。

但是在实际的线路可靠性数据统计工作中,没有按照潮流的大小分段统计线路的停运概率,无法获得停运概率与潮流的关系表达式。作者根据以下假设条件拟合线路停运概率随潮流变化的曲线 $P_i(L)$, 如图 2 所示。

当线路潮流在正常值范围内时,潮流对线路停运概率的影响很小,线路停运概率 $P_i(L)$ 取为统计值 $\bar{P}_i$, 即

$$P_i(L) = \bar{P}_i, \quad L_{\min}^n \leq L \leq L_{\max}^n \quad (1)$$

式中, $L_{\min}^n$ 、 $L_{\max}^n$ 分别为线路潮流正常值的下限与上限。

当线路潮流大于等于极限值 $L_{\max}$ 时,线路发热熔断或过负荷保护装置动作,线路停运概率为 1, 即

$$P_i(L) = 1, \quad L \geq L_{\max} \quad (2)$$

当线路潮流在正常值与极限值之间时,线路熔断或保护装置动作的概率随线路潮流的增加而增大,采用直线拟合线路停运概率,即

$$P_i(L) = \frac{1 - \bar{P}_i}{L_{\max} - L_{\max}^n} \times L + \frac{\bar{P}_i \times L_{\max} - L_{\max}^n}{L_{\max} - L_{\max}^n}, \quad L_{\max}^n \leq L \leq L_{\max} \quad (3)$$

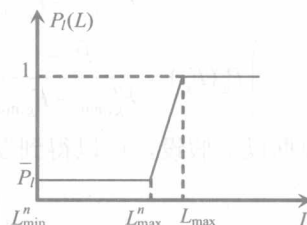


图 2 基于传输潮流的线路停运概率模型

2) 基于频率、电压的发电机停运概率模型

当频率、电压升高或降低到保护整定值时, 发电机保护装置(低周保护、高周保护、低压保护或过电压保护)动作, 并且随着频率、电压越限程度的加深, 发电机保护的动作时限减小, 发电机跳闸退出运行的概率增大。

与线路停运概率分析同理, 作以下假设:

当发电机频率 F_g 在正常值范围内时, 频率对发电机停运概率的影响很小, 发电机停运概率 $P_g(F_g)$ 取为统计值 $\bar{P}_g$, 即

$$P_g(F_g) = \bar{P}_g, \quad F_{g,\min}^n \leq F_g \leq F_{g,\max}^n \quad (4)$$

式中, $F_{g,\min}^n, F_{g,\max}^n$ 分别为发电机频率正常值的下限与上限。

当发电机频率越过极限值时, 发电机保护装置动作, 发电机停运概率为 1, 即

$$\begin{cases} P_g(F_g) = 1, & F_g \geq F_{g,\max} \\ P_g(F_g) = 1, & F_g \leq F_{g,\min} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $F_{g,\max}, F_{g,\min}$ 分别为发电机频率上限值与下限值。

当发电机频率在正常值与极限值之间时, 发电机保护装置动作的概率随频率趋近于极限值而增大, 采用直线拟合发电机停运概率, 如下式所示:

$$\begin{cases} P_g(F_g) = \frac{1 - \bar{P}_g}{F_{g,\max} - F_{g,\max}^n} \times F_g + \frac{\bar{P}_g \times F_{g,\max} - F_{g,\max}^n}{F_{g,\max} - F_{g,\max}^n}, & F_{g,\max}^n \leq F_g \leq F_{g,\max} \\ P_g(F_g) = \frac{\bar{P}_g - 1}{F_{g,\min}^n - F_{g,\min}} \times F_g + \frac{F_{g,\min}^n - \bar{P}_g \times F_{g,\min}}{F_{g,\min}^n - F_{g,\min}}, & F_{g,\min} \leq F_g \leq F_{g,\min}^n \end{cases} \quad (6)$$

根据以上假设, 可以得到发电机停运概率随频率变化的曲线, 如图 3 所示。

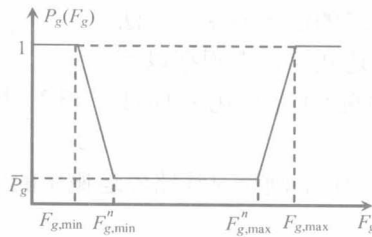


图 3 基于频率的发电机停运概率模型

同理, 可以得到发电机停运概率随机端电压 V_g 变化的表达式, 如式(7)~(9)所示:

$$P_g(V_g) = \bar{P}_g, \quad V_{g,\min}^n \leq V_g \leq V_{g,\max}^n \quad (7)$$

$$\begin{cases} P_g(V_g) = 1, & V_g \geq V_{g,\max} \\ P_g(V_g) = 1, & V_g \leq V_{g,\min} \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} P_g(V_g) = \frac{(1 - \bar{P}_g) \times V_g}{V_{g,\max} - V_{g,\max}^n} + \frac{\bar{P}_g \times V_{g,\max} - V_{g,\max}^n}{V_{g,\max} - V_{g,\max}^n}, & V_{g,\max}^n \leq V_g \leq V_{g,\max} \\ P_g(V_g) = \frac{(\bar{P}_g - 1) \times V_g}{V_{g,\min}^n - V_{g,\min}} + \frac{V_{g,\min}^n - \bar{P}_g \times V_{g,\min}}{V_{g,\min}^n - V_{g,\min}}, & V_{g,\min} \leq V_g \leq V_{g,\min}^n \end{cases} \quad (9)$$

式中, $V_{g,\min}^n$, $V_{g,\max}^n$ 分别为发电机电压正常值的下限与上限; $V_{g,\max}$, $V_{g,\min}$ 分别为发电机电压上限值与下限值。

发电机停运概率随机端电压变化的曲线如图 4 所示。

考虑到发电机停运概率受频率和电压两个因素的影响, 其中任何一个因素到达极限值都会导致发电机的停运概率为 1, 因此, 定义发电机停运概率为

$$P_g(F_g, V_g) = \max\{P_g(F_g), P_g(V_g)\} \quad (10)$$

3) 基于频率、母线电压的负荷停运概率模型

如果频率、电压降到保护或减载装置的整定值以下, 则负荷的自动保护装置或低频、低压减载装置将动作, 切掉负荷。

与线路、发电机的停运概率分析同理, 负荷停运概率 P_d 随系统频率 F_d 变化的关系如式(11)~(13)所示:

$$P_d(F_d) = 0, \quad F_d \geq F_{d,\min}^n \quad (11)$$

$$P_d(F_d) = 1, \quad F_d \leq F_{d,\min} \quad (12)$$

$$P_d(F_d) = \frac{1}{F_{d,\min} - F_{d,\min}^n} \times F_d + \frac{F_{d,\min}^n}{F_{d,\min}^n - F_{d,\min}}, \quad F_{d,\min} \leq F_d \leq F_{d,\min}^n \quad (13)$$

式中, $F_{d,\min}^n$ 是负荷频率正常值的下限; $F_{d,\min}$ 是系统频率的下限值。

负荷停运概率随系统频率变化的曲线 $P_d(F_d)$ 如图 5 所示。

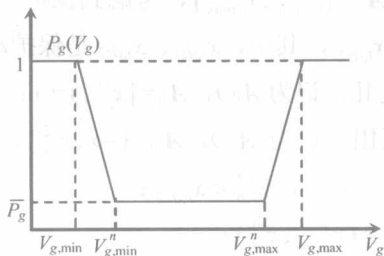


图 4 基于机端电压的发电机停运概率模型

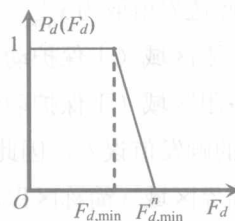


图 5 基于频率的负荷停运概率模型

负荷停运概率与母线电压 V_d 的关系如式(14)~(16)所示:

$$P_d(V_d) = 0, \quad V_d \geq V_{d,\min}^n \quad (14)$$

$$P_d(V_d) = 1, \quad V_d \leq V_{d,\min} \quad (15)$$

$$P_d(V_d) = \frac{1}{V_{d,\min} - V_{d,\min}^n} \times V_d + \frac{V_{d,\min}^n}{V_{d,\min}^n - V_{d,\min}}, \quad V_{d,\min} \leq V_d \leq V_{d,\min}^n \quad (16)$$

式中, $V_{d,\min}^n$ 为负荷母线电压正常值的下限; $V_{d,\min}$ 为负荷电压下限值。

负荷停运概率随母线电压变化的曲线 $P_d(V_d)$ 如图 6 所示。

与发电机停运概率的定义相似, 定义负荷停运概率为

$$P_d(F_d, V_d) = \max\{P_d(F_d), P_d(V_d)\} \quad (17)$$

3.1.2 元件停运率模型

1) 元件停运因素分析

在实际电力系统运行过程中, 导致元件停运的因素^[30,31]有很多, 大致可以分为四类:

①元件不正常运行时引起元件保护装置的动作；②元件本身的故障，例如制造缺陷、部件老化、设备发热、绝缘损坏等；③外界环境，例如雷击、雨雪、鸟害、兽害、山林火灾、风害、树害、洪水、地震等；④人为误操作以及元件保护误动作。其中，与实时运行条件相关的因素为前两类。当元件运行在非正常工作状态、偏离额定值时，元件本身的故障率会增加^[32,33]。例如，长时间的过负荷、电气设备的载流部分和绝缘材料过度发热，将使绝缘老化或损坏。此外，由于电力系统发生有功功率缺额而引起的频率降低，水轮发电机突然甩负荷而产生的过电压等，也会导致电力设备发生故障的可能性增大。同时，经过一段延时，元件保护装置会将不正常运行的元件，即继续运行会造成损坏或发展为故障的设备切除^[32,33]。

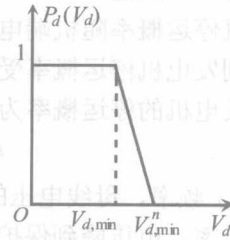


图6 基于母线电压的负荷停运概率模型

2) 基于实时运行条件的元件停运率分类建模

(1) 基于停运因素1的元件停运率模型

该停运率是指由元件不正常运行时保护动作而导致元件退出运行的频率，用 λ_1 表示。用 x_i 表示第 i 个运行条件变量， x_i 可能是频率 F 、电压 V 、电流 I 等某个状态量。为了便于分析，将 x_i 分为5个区域。

① 正常工作区域（简称区I，记为 A_I ）， $A_I = [x_{i,\min}^n, x_{i,\max}^n]$ ，考虑到保护继电器的触发值误差，因此边界值取为 $x_{i,\max}^n < x_{i,dz1}$ ， $x_{i,\min}^n > x_{i,dz2}$ ，其中， $x_{i,dz1}$ 、 $x_{i,dz2}$ 是保护动作整定值；

② 上越限区域（上保护动作区域，简称区II，记为 A_{II} ）， $A_{II} = [x_{i,b}^{v1}, +\infty)$ ；

③ 下越限区域（下保护动作区域，简称区III，记为 A_{III} ）， $A_{III} = (-\infty, x_{i,b}^{v2}]$ ，同样考虑到保护继电器的触发值误差，因此边界值取为 $x_{i,b}^{v1} > x_{i,dz1}$ ， $x_{i,b}^{v2} < x_{i,dz2}$ ；

④ 上临界区域（简称区IV，记为 A_{IV} ）， $A_{IV} = (x_{i,\max}^n, x_{i,b}^{v1})$ ；

⑤ 下临界区域（简称区V，记为 A_V ）， $A_V = (x_{i,b}^{v2}, x_{i,\min}^n)$ 。

下面对这5个区域分别分析，得到 $\lambda_1(x_i)$ 模型，如图7所示。

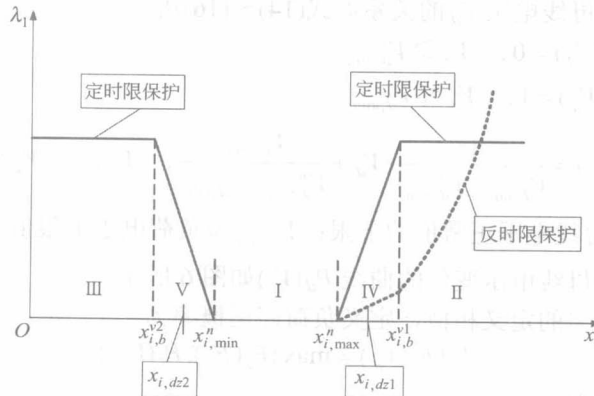


图7 基于停运因素1的元件停运率模型

当 x_i 在区 I 时, 保护不动作, 因此

$$\lambda_1(x_i) = 0, \quad x_{i,\min}^n \leq x_i \leq x_{i,\max}^n \quad (18)$$

当 x_i 在区 II 时, 相应的保护装置动作, 例如发电机的过电压保护、过负荷保护等。元件的停运率为保护动作时限的倒数。根据保护的类型不同, 分为两种情况。

情况一 保护为定时限保护, 动作时限为 T_{dz} , 则停运率为

$$\lambda_1(x_i) = \frac{1}{T_{dz}}, \quad x_i \geq x_{i,b}^{v1} \quad (19)$$

如图 7 中区 II 实线所示。

情况二 保护为反时限保护, 动作时限为

$$T_{dz} = \frac{kt_p}{(x_i/x_{i,dz1})^\alpha - 1} \quad (20)$$

式中, t_p 为时间常数; k, α 为曲线族参数, 根据具体的反时限特性选取。

停运率为

$$\lambda_1(x_i) = \frac{(x_i/x_{i,dz1})^\alpha - 1}{kt_p}, \quad x_i \geq x_{i,b}^{v1} \quad (21)$$

如图 7 中区 II 虚线所示。

当 x_i 在区 III 时, 相应的元件保护动作, 例如发电机的低频保护等, 与 x_i 在区 II 时分析类似, 如果保护为定时限保护, 可得

$$\lambda_1(x_i) = \frac{1}{T_{dz}}, \quad x_i \leq x_{i,b}^{v2} \quad (22)$$

当 x_i 在区 IV 时, 保护动作率随运行条件的增大而增大。采用直线拟合元件停运率的变化,

$$\lambda_1(x_i) = \frac{\lambda_1(x_{i,b}^{v1})}{x_{i,b}^{v1} - x_{i,\max}^n} x_i + \frac{x_{i,\max}^n \lambda_1(x_{i,b}^{v1})}{x_{i,\max}^n - x_{i,b}^{v1}}, \quad x_{i,\max}^n < x_i < x_{i,b}^{v1} \quad (23)$$

当 x_i 在区 V 时, 保护动作率随运行条件的减小而增大。采用直线拟合元件停运率的变化

$$\lambda_1(x_i) = \frac{\lambda_1(x_{i,b}^{v2})}{x_{i,b}^{v2} - x_{i,\min}^n} x_i + \frac{x_{i,\min}^n \lambda_1(x_{i,b}^{v2})}{x_{i,\min}^n - x_{i,b}^{v2}}, \quad x_{i,b}^{v2} < x_i < x_{i,\min}^n \quad (24)$$

需要说明的是, 对于某个运行条件 x_i , 如果在区 II 未安置保护装置, 则 $\lambda_1(x_i)$ 在区 II、IV 为 0; 如果在区 III 未安置保护装置, 则 $\lambda_1(x_i)$ 在区 III、V 为 0。

(2) 基于停运因素 2 的元件停运率模型

该停运率是指由元件本身故障所引起的元件停运的频率, 用 λ_2 表示。当运行条件偏离基准值 (电流、电压的基准值为 0, 频率的基准值为额定值 50 Hz) 时, 该停运率增大, 其值为

$$\lambda_2(x_i) = \lambda_{2,0} + \Delta\lambda_2(x_i) \quad (25)$$

式中, $\lambda_{2,0}$ 为所有运行条件在基准值时元件的故障率; $\Delta\lambda_2(x_i)$ 为 x_i 偏离基准值时元件停运率的增量, 当 x_i 为基准值时, $\Delta\lambda_2(x_i)=0$ 。

$\lambda_2(x_i)$ 模型有以下两种:

一是 x_i 以 0 为基准值, 停运率随着 x_i 的增大而增加, 例如发电机电压、发电机电流、

变压器电流、线路电流, 这种停运率用 $\lambda_{2,1}(x_i)$ 表示, 如图 8 所示。

二是 x_i 以额定值为基准值, 停运率随着 x_i 的增大或减少都增加, 例如发电机频率, 这种停运率用 $\lambda_{2,2}(x_i)$ 表示, 如图 8 所示。

$\lambda_2(x_i)$ 可以通过试验分析方法或可靠性数据分段统计获得, 例如通过试验分析方法可以得到变压器的 $\lambda_2(I)$ 模型^[23]

$$\lambda_2(\Theta_A, I) = \frac{1}{NIL} \cdot e^{\frac{B}{\Theta_{Href} + 273} - \frac{B}{\Theta_H(\Theta_A, I) + 273}} \quad (26)$$

式中, NIL 为额定寿命期望值; B 为常数; Θ_H 为绕组最热点温度; Θ_{Href} 为热点温度参考值; Θ_A 为瞬时环境温度; I 为变压器电流。

(3) 基于停运因素 3 的元件停运率模型

该停运率是指由外界自然环境(雷击、雨雪、鸟害、山林火灾、风害、树害、洪水、地震等)所引起的元件停运频率, 用 λ_3 表示。 λ_3 受气温、天气、季节、地理位置等因素影响, 可以根据不同的外界环境进行数据分类统计得到。在运行评估中, 需要根据实时的外界环境选取对应值, 由于目前缺少分类统计数据, 本论文暂取其为常数, 如图 9 中 λ_3 所示。

(4) 基于停运因素 4 的元件停运率模型

该停运率是指由人为误操作和元件保护误动作所引起的元件停运的频率, 用 λ_4 表示, 通过可靠性数据统计得出, 为常数, 如图 9 中 λ_4 所示。

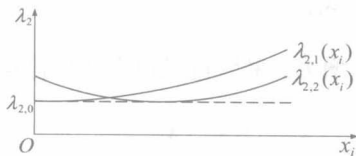


图 8 基于停运因素 2 的元件停运率模型

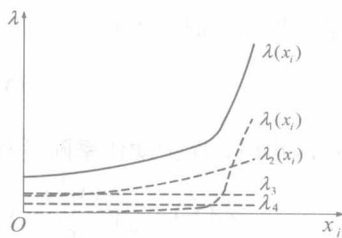


图 9 综合考虑 4 类因素的元件停运率模型

3) 综合考虑 4 类停运因素的元件停运率模型

由于 4 类停运因素互相不包含, 具有互斥性, 因此只考虑单个运行条件 x_i 的元件停运率为

$$\lambda(x_i) = \lambda_1(x_i) + \lambda_2(x_i) + \lambda_3 + \lambda_4 \quad (27)$$

如图 9 所示, 将上式进一步合并为

$$\lambda(x_i) = \lambda_0 + \Delta\lambda(x_i) \quad (28)$$

其中, $\lambda_0 = \lambda_{2,0} + \lambda_3 + \lambda_4$, 为元件的所有运行条件在基准值时的停运率; $\Delta\lambda(x_i) = \lambda_1(x_i) + \Delta\lambda_2(x_i)$, 为 x_i 偏离基准值时的停运率增量。

因为停运率是个频率的概念, 所以多个运行条件对元件停运率的影响为单个运行条件的影响之和, 因此考虑 n 个运行条件的元件停运率为

$$\lambda(x_1, x_2, \dots, x_n) = \lambda_0 + \sum_{i=1}^n \Delta\lambda(x_i) \quad (29)$$