

# Research Status and Prospect of Power System Risk Assessment

Xiao Zou, Zheng Wang, Lizhong Song

College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan Hubei  
Email: 781777336@qq.com

Received: May 21<sup>st</sup>, 2018; accepted: Jun. 4<sup>th</sup>, 2018; published: Jun. 11<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

This paper mainly summarizes the present situation of power system risk assessment. Firstly, the definition and development course of power system risk assessment are introduced. Secondly, the inductive classification of power system risk assessment is carried out from four categories of component level risk assessment, system level risk assessment, adequacy assessment and safety assessment, and the present research status is summarized. Secondly, the research methods of power system risk assessment and their advantages and disadvantages are discussed. Finally, the development trend of power system risk assessment is discussed.

## Keywords

Power System, Risk Assessment, Probabilistic Method, Risk Indicators

---

# 电力系统风险评估研究现状及展望

邹 泉, 王 征, 宋立忠

海军工程大学 电气工程学院, 湖北 武汉  
Email: 781777336@qq.com

收稿日期: 2018年5月21日; 录用日期: 2018年6月4日; 发布日期: 2018年6月11日

---

## 摘 要

文中主要对电力系统风险评估现状进行归纳总结。首先, 介绍了电力系统风险评估的定义和发展历程。其次, 对电力系统风险评估进行归纳分类, 分别从元件级风险评估、系统级风险评估、充裕性评估和安全性评估四个分类进行阐述, 并归纳研究现状。其次, 论述电力系统风险评估的研究方法及其优缺点。最后探讨电力系统风险评估发展趋势。

## 关键词

电力系统, 风险评估, 概率性方法, 风险指标

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

现今, 电力系统在生产生活中得到广泛应用, 电力系统在发展中呈现出高集成、大规模的特点, 并且结构日益复杂。人们在享受电力发展在工业、生产、生活中带来的便利同时, 也不得不承受越来越大的潜在风险, 一些人为难以控制的不确定性因素使得电力系统在规划、运行、管理、维修等方面工作面临着巨大的挑战。因此对电力系统进行风险评估研究对电力系统规划维护具有重大意义。

## 2. 风险理论在电力系统中的发展与定义

国际大电网会议于 1997 年首次定义了电力系统运行风险评估这一概念, 其目的是评估扰动事件对系统的潜在影响程度, 自 2000 年以来, 美国电力科学研究院 EPRI 把电力系统运行风险分析作为重要的研究方向并高度重视和支持[1]。2002 年美国能源部在风险评估的基础上提出了脆弱性评估的概念, 并初步制订了电力系统脆弱性评估方案, 该方案初步确定了电力系统脆弱性评估的主要内容[2], 2003 年美国和加拿大大面积停电事故发生后, 美国政府更加意识到电力系统的安全风险评估的重要性, 并积极组织了专家学者在安全风险评估、应急管理、应急体系建设等方面开展了大量的研究工作, 为电力系统安全风险评估理论的发展奠定了良好的基础[3][4][5]。

美国电力专家威塔尔对电力系统风险评估概念提出如下定义: 根据电力系统所面临的各种不确定因素, 对事故发生的可能性与严重性进行综合度量。其表达式为:

$$R_{Risk} = \sum P_r(E_i) \left[ \sum_j P_r(X_{t,j} | X_{t,f}) \times S_{ev}(E_i, X_{t,j}) \right]$$

式中:  $R_{Risk}$  为系统在  $X_{t,j}$  运行方式下的风险指标;  $X_{t,j}$  为  $t$  时刻的运行方式;  $X_{t,f}$  为第  $j$  个可能的负荷水平;  $P_r(X_{t,j} | X_{t,f})$  为  $t$  时刻出现  $X_{t,j}$  负荷水平的概率;  $E_i$  为出现的概率;  $S_{ev}(E_i, X_{t,j})$  第  $j$  个负荷水平下第  $i$  个扰动因素发生后系统的严重程度[6]。

## 3. 电力系统风险评估分类

根据研究对象级别不同, 可将电力系统风险评估分为元件级风险评估以及系统级风险评估。

### 3.1. 元件级风险评估

电力系统是由大量的电力电子器件组成的, 包括发电机、变压器、电缆、断路器、隔离开关、负载元件等一系列元器件设备, 构成完整的发电、输电、配电、用电的统一系统。元件停运是电力系统失效的根本原因, 元件故障停运模型是电网风险评估的底层基础模型[7]。通常在考虑电力系统元件级风险评估时, 应先确立元件停运模型, 将停运类型分为独立停运和相关停运两种。文献[8]采用电压和过载风险指标, 分析元件停运对电力系统的影响, 依据 ALARP 准则对元件综合风险进行量化分级。文献[9]综合

考虑保护元件的动作特性和运行环境对元件的影响，计算保护元件的运行失效概率，对超高压输电线路后备保护运行风险进行评估，较准确的反映了保护装置的运行风险。

### 3.2. 系统级风险评估

系统级风险评估主要分析考虑系统运行中的不确定性，是人们对电力系统整体运行安全的综合评估，根据具体系统对环境因素、负荷波动、电压稳定、故障连锁等要求选取相应评估方法对系统静态、动态或暂态制定相应评估流程和定量的评价指标，根据实际使用要求提出提高可靠性的改进措施。文献[10]提出通过失负荷风险值、电压越限风险值和过载风险值三个评估指标，确定了单一风险值与综合风险值之间的权重比，属于电力系统静态安全评估。文献[11]通过计算各个指标失稳概率对电力系统暂态进行评估，提出了用于评估的三个风险指标：功角失稳、电压失稳、频率失稳。

若是按照系统状态分析的性质，又可将电力系统风险评估分为系统充裕性评估和系统安全性评估两方面[12]。

### 3.3. 系统充裕性评估

充裕性评估重点考虑系统设备能否充分满足系统稳定运行的约束条件以及用户的负荷使用需求，由此看出充裕性只与系统的稳态条件相关，而不必进行系统动态和暂态分析，也称为静态评估。传统电力系统的充裕性评估主要采用确定性方法，现今概率性方法逐步成为热门研究方向。文献[13]将回路概念引入充裕性评估中，提出大电网分层指标体系和分级制度。文献[14]通过对发电容量充裕性的相关指标和蒙特卡罗仿真算法研究，针对电网运行中主要随机因素，建立发输电系统充裕度概率模型，设计了适用于电网规划和安全运行的仿真流程。文献[15]将元件的老化失效、可修复失效和天气相依失效三因素纳入元件停运模型，考虑多因素的综合影响，更加真实反映电网的运行过程，提高模拟准确性。文献[16]研究判别电压稳定性的新方法，将最小切负荷作为目标函数，建立潮流计算优化模型，结合模态分析判别系统电压失稳状态。文献[17]深入探讨了可用于静态安全风险在线评估的随机潮流方法，依据负荷的波动性和发电机出力的随机性建立相应的概率模型，通过随机潮流计算，分析系统中由这些因素引起的线路功率和节点电压稳定性。文献[18]将严重度信息与概率信息结合进行风电静态电压稳定的在线风险评估，它是一种基于戴维南等值参数辨识的方法，可以构建反映静态电压稳定裕度的严重程度。

### 3.4. 系统安全性评估

安全性则表明系统对动态和暂态扰动的响应能力，因而要对系统中出现的扰动及其后果进行评价[19]。安全性评估中主要包括系统动态、暂态分析以及电压稳定性分析。文献[20]对电网运行风险评估提出了一种新的流程与定级体系。它是将风险评估过程中每个预想事故下产生的风险看作一个单独的风险个体，将电网运行时面临的载荷、电压、停运风险集合分为六个类别，三个严重等级，结合风险发生概率等级、严重程度等级和风险综合等级的划分方法，提出了风险评估整体流程步骤。文献[21]制定了电压不安全的风险指标，所提供的风险计算既考虑了系统未来的不确定性，也考虑了与电压崩溃和违反限制有关的后果。文献[22]将基于连锁故障事故链搜索的方法引入输电网风险评估中，考虑暂态稳定、电压稳定、频率稳定等因素，计及多种故障类型，能够较好的顾及不同故障的相关性。文献[23]提出保护失效严重度的概念，可以在电网风险评估中表征局部特性的保护失效与全局电网系统之间的相关度。

系统安全性评估较之系统充裕性评估，能够关注更多的动态因素扰动，并且可以对扰动后果做出相应评价，在经济性和安全性之间搭建了连接桥梁。目前实际工程应用中使用的风险评估技术有所局限，主要属于充裕性的评估范围，风险指标也不是总体的风险指标，大多数充裕性不足。

## 4. 电力系统风险评估方法

研究电力系统风险评估的方法早期是确定性方法，目前主要使用概率性方法。本文主要探讨概率性方法，此类方法能够充分考虑随机系统概率分布特性，使用范围更广，评估偏差小。

### 4.1. 简单电力系统风险评估一般方法

对简单电力系统来说，可用一些通用的可靠性评估方法进行风险评估，常用的有概率卷积法、串并网络法、马尔可夫方程以及频率-持续时间法。简单发电系统的风险评估可用离散概率卷积法。串并网络法与并集和交集的概念是一致的，可用于简单配电系统和简单变电站主接线的风险评估。马尔可夫方程及其状态空间图提供了清晰表达状态之间转移关系的手段，可用于建立系统元件的停运模型。这些方法着重在指标计算，强调风险评估的基本概念，但只可用于模拟复杂系统中的一部分，难以直接用于大规模的复杂电力系统结构。

### 4.2. 复杂电力系统风险评估方法

在大规模复杂电力系统中，直接使用通用的解析评估方法得不到准确的估算结果，需要使用概率方法，包括状态枚举法和蒙特卡罗模拟法。实现复杂电力系统的风险评估是通过以下四个步骤的迭代过程来完成的[19]。

- 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) 计算失效状态的风险指标
- 4) 修改累计指标

状态枚举法和蒙特卡罗模拟法两者选择系统状态的方式不同，但他们在系统分析中是相同的。

#### 4.2.1. 状态枚举法

状态枚举法是通过实验统计的手段，分析电力系统中元件状态，计算系统中失效/未失效状态概率的方法，在含有少量元件或元件失效率低的系统中选择状态枚举法较为有效。状态枚举法存在一些局限性，在系统规模较大时，计算量巨大，并且在元件可用率较低时，计算误差很大。但使用时应当注意的是，状态枚举法无法模拟时序相关的事件，因此在某些需要考虑扰动时序模拟的特定情况下，不能采用状态枚举法。

#### 4.2.2. 蒙特卡罗模拟法

蒙特卡罗法又可分为序贯和非序贯两种抽样方法。蒙特卡罗模拟法以统计实验数据为基础，其核心思想是，为了求解某个问题，首先建立一个概率模拟或随机过程，并把它的参数设置成所求问题的解，然后通过对模型或过程的观察来抽样实验，以此计算统计结果，最后得出所求问题的近似解，其精度用估计值的方差表示[24]。

序贯蒙特卡罗法是依照时间先后，在一个时间跨度上进行的仿真模拟。它使用状态持续时间抽样法和系统状态转移抽样法，优点是能精确地评估频率和持续时间指标，能灵活地模拟状态持续时间的任何分布，以及具有计算系统风险指标的统计概率分布的能力[25]。然而它在计算过程中会占用大量的计算时间和存储空间，对计算机硬件和计算效率都带来不小的挑战，并且参数选择要求高，需要与元件状态持续时间分布有关的所有参数，对于多状态元件模型，因状态情况增多，可能难以获得全部数据。

非序贯蒙特卡罗法又称为状态抽样法，它在电力系统风险评估中得到广泛应用。此方法的依据是，所有元件的状态组合成一个系统的状态，并且每一个元件状态可通过对元件处于该状态的概率进行抽样



来确定。非序贯模拟中抽样过程的输入数据仅由元件的失效概率提供，根据这样的特点建立独立的随机数，这样能够更直观地依据关心的状态指标进行可靠性评估。但是由于非序贯蒙特卡罗无法计及事件时序信息，最后所得结果是近似估计。文献[26]就是利用非序贯蒙特卡罗模拟法对太阳光辐照度分布区间进行模拟，建立光伏电站输出模型，对元件运行状态和电站出力运用随机抽样计，计算设定的电网运行风险指标，做出评估分析。

### 4.3. 抽样算法的改进

蒙特卡罗法的计算时间与计算精度紧密相关，整体上是一个波动收敛的过程，风险指标总是在一个相应的置信范围内，目前已有的一些关于减少蒙特卡罗法计算时间的研究，主要是通过减少方差的方法来减少抽样次数从而提高蒙特卡罗法的收敛速度。通常有分层抽样法、重要抽样法、等分抽样、对偶变数法和控制变量法等[24]。文献[27]结合解析法和蒙特卡罗法，提出了混合法，并将其与等分抽样相结合有效减少了实验方差，提高了收敛速度。对于如何更有效的提高蒙特卡罗法的计算精度同时减少计算时间，在算法改进上具有较大的研究空间，出了上述的改进方面外，还可以从系统状态选择进行优化分析，提高抽取系统失负荷状态效率着手，包括有功出力再调度、有功负荷切除等。文献[28]将最小割集理论和RVR算法结合，改进蒙特卡罗法进行传感器系统的可靠性计算，取得了较好的效果。

## 5. 总结与展望

本文对电力系统风险评估进行概述分类，归纳总结了可应用于电力系统通用的风险评估方法。在工程实际中，对电力系统来说，特别是大规模复杂系统，进行风险评估需要考虑的方面很多，针对具体电力系统如何建立科学而全面的风险指标体系是重点，也是难点，必须多角度考虑，而不能仅用单一的指标衡量系统的可靠性和安全性，需尽量将电压稳定性、过负荷、连锁故障、继电保护等纳入指标体系，综合分析评估整体风险。目前，已经有许多风险指标的计算研究成果，但计算精度和速度依然有所局限，随着计算机的发展，为适应电力系统在线风险评估的实时需求，追求风险评估精度与计算速度将是研究的热点。智能电网发展迅猛，电能的使用延伸于生产生活的方方面面，而风险是无法完全避免的。电力系统的风险评估将在风险预警和管控、在线安全分析、电网薄弱辨识等方面得到广泛应用，并且进一步促进电力发展和应用。

## 基金项目

国家自然科学基金(51307178)。

## 参考文献

- [1] Hua, W., McCalley, J.D. and Vittal, V. (2000) Risk Based Voltage Security Assessment. *IEEE Transactions on Power Systems*, **15**, 1247-1254. <https://doi.org/10.1109/59.898097>
- [2] U.S. Department of Energy Office of Energy Assurance. (2002) Vulnerability Assessment Methodology Electric Power Infrastructure.
- [3] Chen, Q.M. and McCalley, J.D. (2005) Identifying High Risk N-k Contingencies for Online Security Assessment. *IEEE Transactions on Power Systems*, **20**, 823-834. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.846065>
- [4] Chen, Q.M., Jiang, C.W., Qiu, W.Z., *et al.* (2006) Probability Models for Estimating the Probabilities of Cascading Outages in High-Voltage Transmission Network. *IEEE Transactions on Power Systems*, **21**, 1423-1431. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.879249>
- [5] Xiao, F. and McCalley, J.D. (2009) Power System Risk Assessment and Control in a Multi-Objective Framework. *IEEE Transactions on Power Systems*, **24**, 78-85. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2008.2004823>
- [6] 马振宇. 电网可靠性的蒙特卡洛仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 55-58.

- [7] 何迪, 章禹, 郭创新, 等. 一种面向风险评估的输电线路故障概率模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 69-76.
- [8] 张毅明, 张忠会, 姚峰, 等. 基于风险理论的电力系统元件风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 73-78.
- [9] 王焯. 超高压输电线路后备保护运行风险评估研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [10] 张忠会, 李玉婷, 何乐彰, 等. 蒙特卡洛方法在电力系统静态安全风险评估中的应用[J]. 电测与仪表, 2015, 52(19): 106-111.
- [11] 刘文洋, 游昌清. 考虑多风险因素的电力系统暂态风险评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(S1): 148-151.
- [12] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [13] 肖雅元. 大电网充裕性评估实用化研究及应用[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2016.
- [14] 董宸, 周霞, 丁军策, 等. 基于蒙特卡罗算法的发输电系统充裕性模型及评估方法研究[J]. 南方电网技术, 2013, 7(6): 99-103.
- [15] 贾鸥莎, 李伟, 黄奕, 等. 基于多因素的电力系统充裕性评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(S1): 38-42.
- [16] 余娟, 李文沅, 颜伟. 静态电压稳定风险评估[J]. 中国电机工程学, 2009, 29(28): 40-46.
- [17] 朱益华. 基于输电线路实时评估模型的电力系统静态安全在线风险评估[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [18] 丰颖. 含高比例风电电力系统静态电压稳定在线风险评估和预防控制研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2017.
- [19] 李文沅. 电力系统风险评估模型、方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [20] 王一枫, 汤伟, 刘路登, 等. 电网运行风险评估与定级体系的构建及应用[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 141-148.
- [21] Wan, H., Mccalley, J.D. and Vittal, I. (2000) Risk Based Voltage Security Assessment. *IEEE Transactions on Power Systems*, 15, 1247-1254.
- [22] 孙启明, 石立宝, 司大军, 朱继忠. 基于连锁故障事故链搜索的输电网风险评估研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 27-34.
- [23] 金波, 肖先勇, 陈晶, 等. 考虑保护失效和电网动态平衡特性的连锁故障风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 1-7.
- [24] 杨博. 基于混合法和控制变量法的发输电系统可靠性评估研究[D]: [硕士学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2013.
- [25] 温秀峰. 基于云理论的电力系统运行风险评估的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- [26] 徐乾宸, 王琦, 张文祺, 等. 含光伏电站的电力系统运行风险评估[J]. 南京师范大学学报(工程技术版), 2017, 17(3): 7-14.
- [27] 王晶. 电力系统可靠性评估中的抽样方法研究[D]: [硕士学位论文]. 济南: 山东大学, 2007.
- [28] 潘骏, 陈子沐, 詹月红. 电力系统可靠性的蒙特卡洛方法[J]. 数理统计与管理, 2017, 36(2): 208-214.

#### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2333-5394, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
期刊邮箱: [jee@hanspub.org](mailto:jee@hanspub.org)