

# 基于层次分割的电网灾难性事故风险模糊评估法

田立伟,肖先勇

(四川大学电气信息学院,四川 成都 610065)

**摘要:**提出一种基于层次分割的电网灾难性事故风险模糊评估高效算法。该方法采用考虑安防装置的层次分割策略,综合利用枚举法和模拟法的优点,避免了模拟法对无故障状态的无效抽样,克服了由此可能造成的抽样空间狭窄。算法采用可信性测度度量故障发生可能性,无需构造复杂抽样密度函数,在保证计算精度的前提下提高计算效率。通过对 IEEE 24 节点测试系统的仿真并与现有方法比较,证明方法计算速度快,算法合理,可有效识别最可能的事故序列。

**关键词:**灾难性事故;可信性测度;层次分割;风险评估

**Abstract:** Based on hierarchy partition, an efficient risk fuzzy assessment method for catastrophic accident of power grid is proposed. This method uses the hierarchy partition strategy which takes the security devices into consideration. It can avoid fault-free state sampling in each space and overcome the possible narrowness of sampling space by taking advantage of enumeration method and simulation method. The credibility measure is adopted to describe the fault possibilities, so it is no need to construct complex sampling density function, which can improve both analysis speed and calculation accuracy. The IEEE 24-bus reliability test system is used in simulation, compared with some traditional methods, the results show that the proposed method is faster and more reasonable and it can identify the most possible accident sequences more efficiently.

**Key words:** catastrophic accident; credibility measure; hierarchy partition; risk assessment

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)02-0022-05

## 0 引言

近年来,多起电网大停电事故给社会、经济带来了严重影响,电网灾难性事故风险已成为全球关注焦点。中国也曾多次发生大面积停电事故,随着电网规模的增大,每次大停电事故造成的平均负荷损失也随之增大。电网风险评估是极富挑战性的任务<sup>[1]</sup>。电网的运行状态与行为具有多样性、复杂性和不确定性等特点,风险的存在是必然的。及时、准确地识别最可能诱导灾难性事件事故序列,确保电网经济安全运行已成为当前中国电网面临的迫切问题,对系统调度运行和决策等,具有重要意义<sup>[2]</sup>。

现有电网风险评估方法主要有:状态枚举法<sup>[3,4]</sup>和蒙特卡罗模拟法<sup>[5,6]</sup>。前者概念清晰,计算精度高,但计算量随故障阶数和系统复杂性的增加而急剧增加。基于故障概率截取的枚举法<sup>[7]</sup>,通过舍去发生概率小的事件,减少计算量,但随着电网复杂性的增加,故障阶数越高,故障概率越小,被舍去

的小概率事件可能因丢失了关键信息而导致评估结果失准。模拟法是一种典型的多因素敏感性分析方法,适用于复杂系统,计算效率随精度要求的提高而降低。但系统大部分是正常状态和低阶故障状态,为了更多地抽取高阶故障状态,在抽样过程中需要大量抽样来保证结果的准确性,导致计算效率变低。为有效利用枚举法和模拟法的优点,分割思想是一种有效的解决途径<sup>[8,9]</sup>。

基于分割的思想可抽象为问题归约法,通过归约,把复杂问题分解成不同层次的、比原有问题更简单的问题,然后分别分析子问题,并通过一定关系联系起来,得到问题的分析评估结果。文献[10]在可靠性评估中提出了分层重要抽样的思想;文献[11]采用分层均匀抽样方式,避免了构造抽样函数的复杂性。但电网灾难性事故大多由后果严重的稀少事件诱导,对稀少事件进行抽样,必然面临确定最优抽样密度函数的问题,影响评估结果。而电网本质上运行在不确定的环境中。重要设备的随机停运引起系统潮流转移,恶劣的气候环境和过负荷等条件又

导致元件故障率的增加,最终形成大停电事故。电网灾难性事故风险受多种因素影响,具有复杂不确定性。文献 [12] 基于可信性测度提出了电网灾难性事故模糊模拟评估方法,为复杂不确定性的刻画和模拟提供了参考。

这里提出基于层次分割的电网灾难性事故风险模糊评估方法。利用数学上随机性与模糊性的统一性原理 [13], 将电网灾难性事故的复杂不确定性转化为模糊性,在现有电网连锁性故障风险的复杂不确定性模糊模拟方法的基础上 [14], 采用考虑保护、安控和自动装置的分割策略对状态空间进行层次分割。该方法能综合状态枚举法和模拟法的优点,克服构造抽样函数、可能造成抽样空间狭窄等问题,在保证计算精度的前提下提高计算效率。对 IEEE 24 节点测试系统的仿真表明,该方法所得结果正确、可信,计算时间较短。

### 1 系统状态空间层次分割策略

现代电力系统已配置了较完备的保护、安防、安控和自动装置,这些装置直接影响系统状态,尤其对第一、二阶低阶状态空间有重要影响,因此,对系统状态进行空间分割时必须考虑安防装置等的影响。以系统状态空间的特点和风险分析方法的适用条件为划分依据,提出基于故障阶数的全局分割与基于故障状态的高阶状态空间局部分割策略,通过层次分割同时提高结果准确性和计算效率。基本策略如图 1。

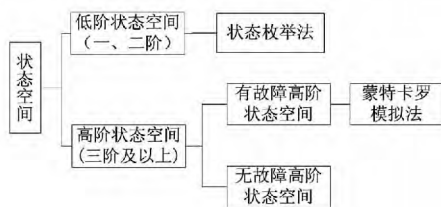


图 1 状态空间层次分割策略

设  $\Omega$  为全体系统状态构成的空间,风险指标  $R(X)$  为

$$R(X) | X \in \Omega = \sum_{x \in \Omega_1} R(X) + \sum_{x \in \Omega_2} R(X) \quad (1)$$

式中,  $\Omega_1$  为低阶故障系统状态组成的空间;  $\Omega_2$  为高阶故障系统状态所组成的空间;  $R(X)$  为风险测度。

枚举法计算精度高,对低阶故障状态空间  $\Omega_1$  的所有系统状态进行枚举评估,以确保信息的完备

性和准确性。状态枚举公式如下 [15]。

$$(P_1 + Q_1) \cdots (P_i + Q_i) \cdots (P_N + Q_N) \quad (2)$$

式中,  $P_i$  和  $Q_i$  分别是第  $i$  元件正常和故障的概率测度;  $N$  为系统元件数。

对高阶故障,枚举法的计算量大大增加,而模拟法适于复杂情况分析评估,故高阶故障状态空间  $\Omega_2$  选择用模拟法分析。同时,为更有效地保证抽样效果,避免无效抽样对计算效率和精度的影响,在  $\Omega_2$  内将各阶故障再进一步进行局部分割,分割为有故障状态子空间  $\Omega_k$  和无故障状态子空间  $\Omega_0$ 。对于  $\Omega_0$  有  $\sum_{x \in \Omega_0} R(X) = 0$ , 无需抽样,因此,

$$R(X) | X \in \Omega_2 = \sum_{x \in \Omega_k} R(X) + \sum_{x \in \Omega_0} R(X) = \sum_{x \in \Omega_k} R(X) \quad (3)$$

从以上理论分析来看,利用所提出的全局和局部分割策略,能在保证精度的同时,减少计算量。

### 2 风险评估原理及指标

#### 2.1 评估原理

连锁故障是引起电网灾难性事故的主要原因,表现为一系列元件连锁反应跳闸,最终发展为频率或电压崩溃,甚至电网解列。电网的最主要变量之一是负荷,连锁故障发展为灾难性事故的过程中,当电网电压或频率发生变化时,采取的操作经常与负荷有关。因此,是否发生灾难性事故可用电网丢负荷程度来判定。在仿真中,若事故引起丢负荷超过 20% 或电网潮流不收敛的情况,判定该事故为灾难性事故 [16]。

电网灾难性事故的物理传播过程可以简单描述为以下 3 点: ① 某线路发生初始故障,保护动作,故障线路被切除; ② 初始故障后引起电网潮流改变,与故障线路相连线路的保护形成准误动集,其中的某些保护可能以一定“测度”触发隐性故障,对应线路被切除; ③ 重复上述过程,故障连续发生,且危害达到一定程度时,就可能引发电网灾难性事故。

由以上分析可知,连锁性故障是否会发展为灾难性事故受初始故障和故障的后续发展等的影响。不同初始故障会引起一系列不同反应,产生不同后续故障,这里以  $N-1$  故障为初始故障,采用隐性故障模型作为灾难性事故传播机制 [17]。根据当前故障线路搜索下一阶全部可能发生隐性故障的线路,

以每条线路故障可信性测度大小为抽样依据,产生随机数进行抽样选择出故障线路。

### 2.2 风险指标

通过电网灾难性事故风险评估,分析电网实际运行中存在的风险,得到表征系统风险的指标。风险指标定义为故障发生可能性和严重程度的综合度量<sup>[15]</sup>,表达式如式(4)所示。

$$R(X) = Cr(X) \cdot Sev(X) \quad (4)$$

式中  $R(X)$  为研究对象风险值;  $Cr(X)$  为可信性测度;  $Sev(X)$  为事故严重性指标。下面依次说明可信性测度和事故严重性指标。

#### 2.2.1 基于可信度的模糊模拟

在低阶故障状态枚举分析的基础上,高阶故障状态空间采用模糊模拟评估法,用“模糊性”描述灾难性事故的不确定属性,可信性测度刻画故障发生可能性,区分“容易”和“不容易”发生故障的支路。

根据不确定性理论<sup>[18]</sup>,并结合文献[12]提出的可信性测度成立需满足的公理化条件,可知,主观上认为可能性为 1 时最容易发生隐性故障。当线路保护都不可能发生隐性故障时,可能性为 0,该故障最不容易发生。当故障传播至某一阶段时,认为至少有一个故障是最容易发生的,该故障可认为具有最大的可能性。可能性测度的基本思想是,灾难性事故  $X$  包含  $i$  个事件,即  $X_1 \sim X_i$  同时发生才诱导的电网灾难性事故  $X$  为

$$X = \cup (X_1 \cap X_2 \cap \dots \cap X_i) \quad (5)$$

只有  $X_1 \sim X_i$  中发生可能性最小的事故发生时,才会引发电网灾难性事故  $X$ 。与概率测度需满足的可列可加条件相比,该条件无需建立在不同事件互不相关的基础上。详见文献[12, 18]。

电网灾难性事故  $X$  的可信性测度为

$$Cr(X) = 0.5 \cdot (Pos(X) + Nec(X)) \quad (6)$$

其中,

$$Nec(X) = 1 - Pos(\bar{X}) \quad (7)$$

式中  $Pos(X)$  为故障发生的可能性测度;  $\bar{X}$  为  $X$  的补集;  $Nec(X)$  为必要性测度,反映  $\bar{X}$  的不可能程度。

可信性测度在  $[0, 1]$  中取值,故障必然发生时,取值为 1,必然不发生时,取值为 0,故障发生的可信性随测度增加而增大。 $Cr(X)$  值越大,故障发生可能性越大,模拟时被抽取的概率也越大。

#### 2.2.2 严重性指标

电网中有多种因素影响元件运行状态,这里以

模糊隶属函数度量严重性指标,由失负荷、母线电压、支路过载、机组有功和无功出力 5 种指标构成。详见文献[12]。

严重性指标为

$$Sev = \prod_{i=1}^5 Sev_i \quad (8)$$

式中  $Sev_1 \sim Sev_5$  分别代表各组成因素的严重性指标,且  $Sev_i \in [0, 1]$ ,1 表示最严重,取值在  $[0, 1]$  上增加,代表严重性增加。

## 3 算法流程

算法流程如图 2 所示。

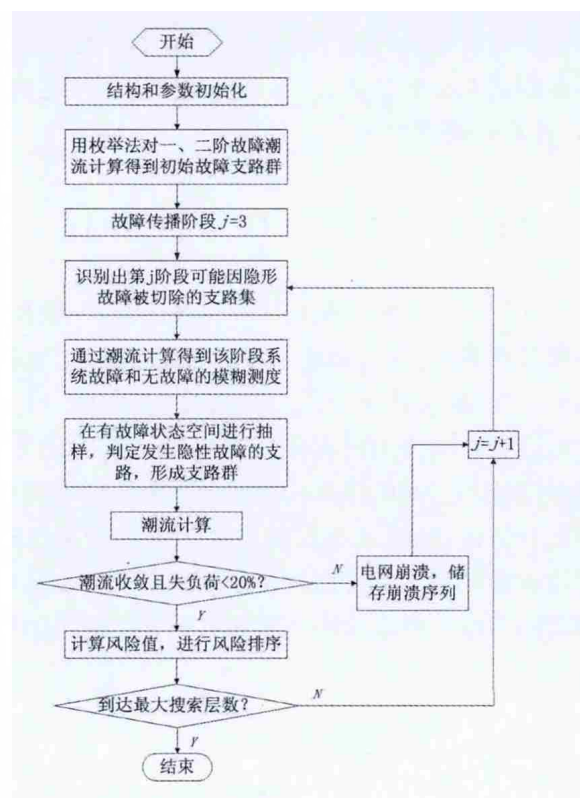


图 2 算法流程图

## 4 算例分析

利用提出的基于状态空间层次分割与模糊模拟的电网灾难性事故风险评估法(方法 1)对 WSCC IEEE 24 节点测试系统进行评估,以计算时间、方差、灾难性事故序列和计算效率为方法比较指标,与状态枚举法(方法 2)和现有模糊模拟法(方法 3)进行比较。

选用式(4)计算风险测度值。方法 1 的计算时

间为枚举法与蒙特卡罗模拟法的计算时间之和。为比较 3 种方法的计算效率,定义方法 1 对方法 3 的相对计算效率<sup>[5 9]</sup>为

$$\eta_i = (\beta_i^2 t_i)^{-1} / (\beta_3^2 t_3)^{-1} \quad (9)$$

式中  $t$  为方法 3、1 的计算时间; $\beta$  为方法 3、1 的方差系数。

在仿真分析中,有以下两点说明。

①由于枚举法没有方差系数问题,故仅计算方法 1 的计算效率即可。②计算  $N-1$  事故风险评估,以验证该方法的准确性,计算  $N-k$  事故风险评估,以验证该方法的计算效率。

用 MATLAB 进行仿真,计算环境为 1 台 CPU 为 2.6 GHz,内存为 2.00 GB,系统为 Windows7 的电脑。

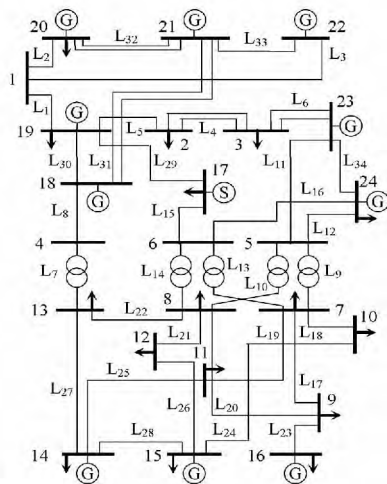


图 3 IEEE 24 节点标准测试系统

图 3 所示 IEEE 24 节点测试系统<sup>[20]</sup>。系统由 1 台同步调相机、10 台发电机组、5 台变压器、24 条母线和 33 条输电线路组成。表 1 为不同方法所得  $N$

表 2 使用不同方法计算的系统风险指标

指标	方法 1				方法 2	方法 3			
	1 000	5 000	10 000	50 000		1 000	5 000	10 000	50 000
计算时间 $t/s$	1.633 1	5.436 8	10.307	50.747	381.390	25.476	130.331	261.405	1342.768
方差 $\beta$	1.697 8	0.531 9	0.281 2	0.058 8	—	3.283 1	0.688 6	0.349 2	0.079 2
$K=3$	{ L5, L4, L6 }				{ L5, L4, L6 }	{ L5, L4, L6 }			
$K=5$	{ L8, L30, L5, L4, L6 }				{ L8, L30, L5, L4, L6 }	{ L8, L30, L5, L4, L6 }			
风险序列	{ L7, L27, L22, L21, L26, L24, L18 }				—	{ L7, L27, L22, L21, L26, L24, L18 }			
	{ L4, L5, L30, L8, L7, L27, L22 }					{ L7, L22, L27, L25, L19, L18, L24 }			
	{ L27, L7, L22, L21, L26, L24, L18 }					{ L7, L27, L22, L14, L10, L21, L20 }			
	{ L7, L22, L27, L25, L19, L18, L24 }					{ L7, L27, L22, L14, L10, L20, L21 }			
	{ L4, L5, L29, L15, L13, L18, L24 }					{ L27, L7, L22, L21, L26, L24, L18 }			
	{ L7, L27, L22, L14, L10, L21, L20 }								
	{ L7, L27, L22, L14, L10, L20, L21 }								

表 1  $N-1$  事故风险排序

方法 1		方法 2		方法 3	
事故	$R(X)$	事故	$R(X)$	事故	$R(X)$
8	350.9	8	478.2	8	388.3
7	301.0	7	413.2	7	320.2
13	198.5	13	294.4	13	210.5
9	168.4	9	257.0	29	175.1
29	151.3	29	225.1	9	150.5
23	120.4	23	198.3	23	136.3
11	115.2	11	177.1	10	120.6
10	108.3	10	151.1	11	105.4
6	102.9	6	134.0	6	101.6
24	98.4	24	118.9	34	95.7

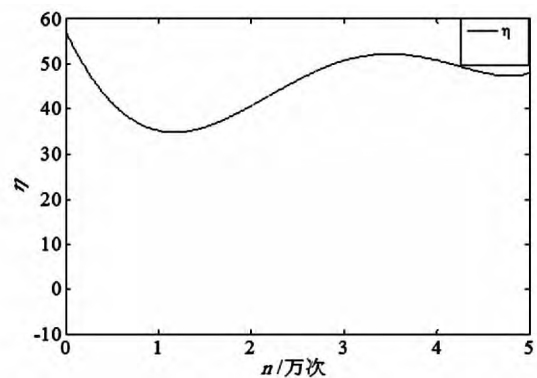


图 4 计算效率曲线

$-1$  事故风险评估结果,表 2 为  $N-k$  事故风险评估结果,其中方法 1 和方法 3 的抽样次数分别为: 1 000 次、5 000 次、10 000 次和 50 000 次。图 4 为方法 1 相对方法 3 的效率曲线。

分析表 1 和表 2 中风险序列,可知,所提方法所得风险序列与方法 2、3 所反映的变化规律一致,证明方法在 IEEE 24 节点系统中应用正确。

分析表 2 和图 4 可得出以下结论。

①方法 1 的计算效率比方法 3 高。

②对比方法 1 和方法 3 的计算结果可知,以抽样 50 000 次结果计算,方差  $\beta$  指标的相对差别是 34.69%。这说明方法 1 计算的结果具有较高的精度。

③从计算时间看,方法 1 相比方法 2、3 具有极高的计算效率,其计算时间约是方法 3 的 26.5 倍,方法 2 的 7.5 倍。方法 1 具有极高计算效率的根本原因是用枚举法评估低阶故障状态,并避免了蒙特卡罗模拟法的无故障抽样,增加了抽样的有效性。

④分析表 2 中风险序列,可以看出方法 1 在有限的工作量中得到了更丰富的故障序列。

## 5 结 论

提出了一种基于层次分割和模糊模拟评估的电网灾难性事故风险评估高效算法。通过仿真分析,证明该算法合理、正确,在复杂电网风险评估中具有一定的推广价值。结论如下:①较高的计算效率和精度。算法对系统状态空间的层次分割,避免了枚举法在复杂系统中“维数灾难”问题,和蒙特卡罗模拟法对无故障状态进行无效抽样的缺点,有效提高了计算效率和精度。②抽样序列更有效。通过对不同电网仿真分析表明,该算法不舍弃初始小概率故障序列,在有限的工作量中能获得更多丰富的序列。③以可信性度量故障发生可能性,无需构造复杂抽样函数,以隐性故障模型刻画故障传播机制,考虑故障发生顺序,更符合实际。

### 参考文献

[1] M. Vaiman(Lead), K. Bell. Risk Assessment of Cascading Outages: Methodologies and Challenges [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 631-641.

[2] 田世明,陈希,朱朝阳,等. 电力应急管理平台研究[J]. 电网技术, 2008, 32(1): 26-30.

[3] 高亚静,周明,等. 基于马尔可夫链和故障枚举法的可用输电能力计算[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 26-30.

[4] 魏远航,刘思革,苏剑. 基于枚举抽样法的城市电网风险评估[J]. 电网技术, 2008, 32(18): 62-66.

[5] 谢绍宇,王秀丽,王锡凡,等. 自适应重要抽样技术在发输电系统可靠性评估中的应用[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 13-17.

[6] 周阳洋. 重要抽样法在概率潮流中的应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.

[7] 刘海涛,孙元章,程林,等. 计及多状态元件模型的系统状态快速排序技术[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 16-21.

[8] He J, Sun Y, Kirschen D S, et al. State Space Partitioning Method for Composite Power System Reliability Assessment [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2010, 4(7): 780-792.

[9] 何剑,孙华东,刘明松. 基于扩展状态空间分割法的含风电场电力系统运行备用风险评估[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 257-263.

[10] 王晓滨,郭瑞鹏,曹一家,等. 用于系统可靠性评估的各阶故障独立重要抽样算法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(16): 24-31.

[11] 黄江宁,郭瑞鹏,赵舫,等. 电力系统可靠性评估中的分层均匀抽样法[J]. 电力系统自动化, 2012(20): 19-24.

[12] 马超,肖先勇,杨洪耕,等. 电网灾难性事故不确定性评价测度体系与模型[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(10): 118-125.

[13] 李洪兴. 不确定性系统的统一性[J]. 工程数学学报, 2007, 24(1): 1-21.

[14] 马超,肖先勇,袁志坚,等. 电网连锁性故障发生可能性的模糊模拟评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 77-84.

[15] 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: 67-69.

[16] Hazra J, Sinha AK. Identification of Catastrophic Failures in Power System Using Pattern Recognition and Fuzzy Estimation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1): 378-387.

[17] 杨明玉,田浩,姚万业. 基于继电保护隐性故障的电力系统连锁故障分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010(9): 1-5.

[18] 刘宝碇,彭锦. 不确定理论教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 74-128.

[19] 肖刚,李天托. 系统可靠性分析中的蒙特卡洛方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

[20] IEEE RTS Task Force of APM Subcommittee. The IEEE Reliability Test System - 1996 [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 1010-1020.

### 作者简介:

田立伟(1989), 硕士研究生, 研究方向为电力系统连锁故障风险评估;

肖先勇(1968), 教授, 博士生导师, 研究方向为电能质量分析与控制等。 (收稿日期: 2013-01-09)