

基于集对故障树方法的电网安全运行风险评估模型

张丽英,王绵斌,谭忠富,乞建勋

(华北电力大学 电力经济研究所,北京 102206)

摘 要:本文首先对电网安全运行风险进行分析,并结合实际情况,运用故障树法构建电网安全运行模型;然后,利用集对分析的概念及其运算法则推导出集对与门算子和集对或门算子;接着,采取集对分析方法,得出具有确定性与不确定性的各个底事件的联系度;最后,以算例表明本文所提出的集对故障树分析方法是可行的,既能实现对电网安全运行风险的度量,又避免了以往采用概率度量的不准确性,能更好地描述电网运行风险的真实程度。

关键词:电网安全;故障树;概率风险分析;集对分析;风险评估

中图分类号: TM 73; F123.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-980X(2009)05-0026-06

电网公司的主要职责就是把电这个商品安全、稳定、可靠地提供给用户。随着电力市场改革的进一步深入,电网公司中断用户的用电,不仅仅是物理上的拉闸限电问题,还需要对用户进行赔偿,因此研究电网的安全可靠问题并提出一些有效防范措施对电网公司具有重要的实际意义。

目前国内外针对电网安全研究已有一些成果,主要分类两类。其一是对连锁故障的分析。文献[1]、文献[2]以故障树的图形化方式描述了电力系统连锁故障发展的逻辑结构,并求取了导致连锁故障的最小割集和连锁故障的发生概率。文献[3]按照连锁故障发生、发展的物理过程,结合各个阶段事件的概率特点,建立了一种电网连锁故障的概率分析方法。但上述理论研究仅从内部物理现象进行分析,并未从外部寻求原因。而电网故障不仅仅由内部因素导致,还会由许多外部因素导致,因此上述研究对故障树方法的运用还不够深入,需要进一步完善。其二是对电网可靠性的分析。文献[4]提出了基于联系数的配电系统可靠性不确定性评估新方法,但该方法只是考虑局部的可靠性分析,缺乏全系统的观念。文献[5]、文献[6]提出了一种基于贝叶斯网络的故障树分析法,并将其应用于配电系统可靠性评估中,但该方法并未考虑各发生概率的不确定性问题。文献[7]在结合区间运算和配电网可靠性评估网络等值法的基础上,提出一种可靠性区间

评估方法,但该方法只能给出参数和指标区间,不能反映配电网可靠性的不确定性变动情况。电网系统是一个复杂的庞大系统,由许多设备组成,因此其发生“故障”或“失效”本身常常具有随机、模糊、中介等特性,是一个动态的变化过程。因此,电网安全运行的风险评估,不仅需要全面考虑电网各个组成部分,还要选择合理的风评估方法,这样才能对其风险进行准确度量。

故障树法与集对分析法的联合运用可以解决传统方法所存在的上述问题。传统故障树法可以对影响顶事件发生的各因素的逻辑结构进行分析,但对底事件发生概率的计算过于绝对,而集对分析法正好可以把不确定与确定联系起来,很好地体现随机、模糊、中介等各种不确定因素。因此,本文运用集对分析法,在统筹考虑电网各组成部分的基础上,全面分析影响电网安全的内外因素,构建电网运行安全的故障树,并采用集对分析法度量各因素的发生概率,由此进行风险决策,提出预防电网跳闸事故的合理措施,为电网公司安全运行提供决策支持。

1 集对故障树法

1.1 故障树分析方法

概率风险评估,也称概率风险分析(probabilistic risk analysis, PRA),是将定性分析与定量计算相结合的、以事件树和故障树为核心的分析方法。

收稿日期:2009-02-09

基金项目:国家自然科学基金项目(70373017、70571023)、国家“新世纪优秀人才支持计划”项目(NCET-060208)资助

作者简介:张丽英(1960—),女,河北武邑人,华北电力大学博士研究生,高级工程师,主要研究方向:电力风险管理、电力经济;王绵斌(1979—),男,广东澄海人,华北电力大学博士研究生,研究方向:电力经济、电力风险管理;谭忠富(1964—),男,吉林长岭人,华北电力大学工商管理学院教授、博士后,华北电力大学电力经济研究所所长,博士生导师,主要研究方向:电力经济、电力风险管理理论;乞建勋(1946—),男,华北电力大学工商管理学院教授,博士生导师,主要研究方向:网络优化理论、电力经济。

PRA 提供了一种将整个系统逐步分解为初事件的方法,然后通过一系列过程确定系统失败的事件序列组合和失效概率,通过逻辑及概率方法对风险源进行组合,从而实现系统风险的度量,确切地描述系统可能发生的危险状态^[8]。

概率风险分析最常用的方法是故障树分析法(fault tree analysis, FTA)。故障树分析法是由贝尔电话实验室的 Waston 于 1961 年提出的一种分析系统可靠性的数学模型,它是对可能造成系统失效的各种因素(包括设备、环境、人为因素)进行分析、画出逻辑框图(即故障树),从而确定系统失效原因的各种组合方式及其发生概率,进而计算出系统事故发生的概率,并据此采取相应的纠正措施来提高系统可靠性的一种方法。其分析步骤为:确定顶事件;调查事故的原因;构造故障树;求最小割集进行定性分析;进行定量分析;制定预防事故(改进系统)的措施。

本文将运用故障树方法来分析影响电网安全运行的各风险因素。

1.2 集对故障树分析方法

传统的故障树方法都采用精确的概率来表示发生的情况,但电网安全运行风险的原始数据可能存在统计误差或者原始数据本身就具有变化波动的特点^[4],因此精确的概率只能体现电网安全运行风险而确定的一面,却无法体现其受外界影响而不确定的一面。而集对分析法恰好可以将确定性与不确定性结合起来,所以本文将采用集对分析法对故障树各底事件的发生概率进行描述。

集对分析(set pair analysis)是我国学者赵克勤于 1989 年提出的一种处理不确定性问题的系统分析理论。其核心思想是,把确定性和不确定性视作一个确定系统,在这个系统中存在多种不确定性,且确定性与不确定性互相影响、互相制约、在一定条件下可互相转化,并用一个能充分体现上述思想的联系度来表示^[9]:

$$u = a + bi + cj. \quad (1)$$

式(1)中: a 表示同一度; b 表示差异度; c 表示对立度, $a + b + c = 1$ 。 i 和 j 既是差异度和对立的标记,还可以赋值计算联系度。在计算中, $j = -1$,而 i 的取值范围为 $[-1, 1]$,视具体问题而定。基于联系度的概念,电网安全运行风险可定义为:在 t 时间内,如果电网的一个组成部分有 P 次属于供电完好状态,有 S 次属于跳闸、完全失效状态,有 F 次既不是供电完好状态又不属于跳闸状态,且 $S + P + F = N$,那么该设备在电网供电安全的联系度为:

$$u(t) = \frac{S(t)}{N} + \frac{F(t)}{N}i + \frac{P(t)}{N}j. \quad (2)$$

采用联系度来描述影响电网安全的每个风险因素,既可以忽略风险因素的概率分布类型,又可以对其确定性、不确定性和中介等进行描述,因此更加符合实际情况。

联系度也有计算法则,下面将着重讨论加法法则和乘法法则。

1)联系度的加法^[10]。两个联系度 u_1 、 u_2 相加可采用式(3)来计算:

$$u_1 + u_2 = a_1 + b_1i + c_1j + a_2 + b_2i + c_2j = 2[(a_1 + a_2)/2 + (b_1 + b_2)i/2 + (c_1 + c_2)j/2]. \quad (3)$$

在式(3)中,之所以提取2,是为了使 $(a_1 + a_2)/2 + (b_1 + b_2)i/2 + (c_1 + c_2)j/2 = 1$,以符合集对分析的定义。式(3)也可以推广到多个联系度相加的情况。

2)联系度的乘法。关于联系度的乘法,文献[10]认为可以采用“先简化 u ,即先不考虑不确定性 b 或 c ,再进行运算,最后把结果还原”的做法。但是不管是先简化 b 项还是 c 项,都不符合联系度的定义,都存在偏差,因此需要根据联系度系数的定义来实现联系度的乘法。因为联系度公式即式(1)中等式右边的第一项表示同一度,第二项表示差异度(即不确定性),第三项表示对立度,所以同一度项与不确定性项相乘的结果应仍为不确定性,同一度项与对立度项相乘时应仍为对立度,同一度项与同一度项相乘时应为同一度,不确定性项与不确定性项相乘时应为不确定性,不确定性项与对立度项相乘时应为不确定性,对立度项与对立度项相乘时应为同一度。由此可得出:

$$\begin{aligned} u_1 u_2 &= (a_1 + b_1i + c_1j)(a_2 + b_2i + c_2j) = a_1 a_2 + a_1 b_2i + a_1 c_2j + a_2 b_1i + b_1 b_2i^2 + c_2 b_1ij + a_2 c_1j + c_1 b_2ij + c_1 c_2j^2 \\ &= (a_1 a_2 + c_1 c_2) + a_1 b_2i + a_2 b_1i + c_2 b_1ij + c_1 b_2ij + b_1 b_2i^2 + (a_1 c_2 + a_2 c_1)j = (a_1 a_2 + c_1 c_2) + (a_1 b_2 + a_2 b_1 + c_2 b_1 + c_1 b_2 + b_1 b_2)i + (a_1 c_2 + a_2 c_1)j. \end{aligned} \quad (4)$$

上述乘式可推广到多个联系度相乘。

1.3 故障树分析的集对算子

传统故障树分析中顶事件的失效概率是利用逻辑门算子对基本事件发生的概率进行运算获得的。当电网安全运行风险采用集对分析的联系度来表示时,应采用集对逻辑门算子。如传统的故障树分析中,取事件发生的概率为精确值 P_k ,与门算子为

$$P(X_1 \cdot X_2 \cdot \dots \cdot X_n) = P_1 \cdot P_2 \cdot \dots \cdot P_n = \prod_{k=1}^n P_k. \quad (5)$$

式(5)中, P_k 为时间 k 发生的概率,为精确值。如果事件 k 发生的概率采用集对分析的联系度 $u(X_k) = a_k + b_k i + c_k j$ 表示,那么根据集对分析运算法则与门集对算子为

$$u(X_1 \cdot X_2 \cdot \dots \cdot X_n) = u(X_1) u(X_2) \dots u(X_n) = \prod_{k=1}^n (a_k + b_k i + c_k j)。(6)$$

在传统的故障树分析中,或门算子为 $P(X_1 + X_2 + \dots + X_n) = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2) \dots (1 - P_n)。(7)$

如果电网安全运行风险的底事件 k 发生的概率采用集对分析的联系度来表示,则或门集对算子为

$$u(X_1 + X_2 + \dots + X_n) = u(X_1) + u(X_2) + \dots + u(X_n) = n(\frac{\sum a_k}{n} + \frac{\sum b_k}{n} i + \frac{\sum c_k}{n} j)。(8)$$

2 电网安全运行风险的集对故障树分析

故障树的建立是故障分析法最关键和最重要的一个环节,需要对电网安全运行风险进行全面细致的分析和研究。电网安全运行风险就是对用户中断供电,因此本文把这一最不希望发生的事件作为顶事件。电网系统的供电中断分为 500kV 系统、220kV 系统和 110kV 以下的系统,而每个系统又包括变压器故障、断路器故障、线路故障和继电保护误操作,每个故障又可对应若干影响因素。本文对 2006 年某电网公司的跳闸事故进行深入调查研究,找出导致电网安全运行风险的因素,并构建了故障树逻辑图,见图 1。

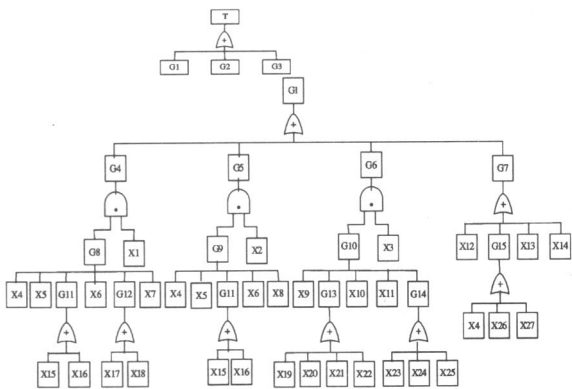


图 1 500kV 电力系统的故障树
注:图中字母的含义请参见表 1 和表 2。

因为 220kV 系统的故障树 G2 和 110kV 系统的故障树 G3 与 500kV 系统的故障树 G1 基本相同,且下文算例也主要以 500kV 系统为分析对象,因此本文不再赘述 200kV 系统和 110kV 系统的故

障数。

表 1 故障树中间事件

G_i	中间事件	G_i	中间事件
G_1	500kV 系统故障	G_9	断路器开关跳闸
G_2	220kV 系统故障	G_{10}	线路开关跳闸
G_3	110kV 及以下系统故障	G_{11}	检修人员责任
G_4	变压器故障	G_{12}	变压器本体故障
G_5	短路器故障	G_{13}	自然灾害类跳闸
G_6	线路故障	G_{14}	外力破坏类跳闸
G_7	继电保护不正确动作	G_{15}	制造厂家责任
G_8	变压器开关跳闸		

表 2 故障树底事件

X_i	底事件	X_i	底事件
X_1	没有备用变压器	X_{15}	检修质量不当
X_2	没有回路可替代	X_{16}	运行维护不当
X_3	没有备用线路	X_{17}	渗漏油
X_4	制造质量不良	X_{18}	其他本体故障
X_5	安装质量不良	X_{19}	大风导致线路跳闸
X_6	恶劣气象	X_{20}	倒塔所致线路跳闸
X_7	相关一次设备故障	X_{21}	风偏闪络
X_8	外力所致	X_{22}	冰闪及冰害
X_9	雷击闪络	X_{23}	山火导致线路
X_{10}	污闪(雾闪)	X_{24}	吊车碰线等违章施工
X_{11}	鸟粪闪络	X_{25}	异物短接
X_{12}	继电保护人员误接线	X_{26}	软件问题
X_{13}	基建人员误碰	X_{27}	设备其他问题
X_{14}	其他部门导致误动作		

3 电网安全体系结构分析

3.1 定性分析

通过定性分析来确定最小割集。可采用从下向上的上行法:从底事件开始,由下向上逐级进行,直到所有结果事件均已处理,将所得表达式逐次代入,按布尔逻辑运算规则,将顶事件 T 表示为底事件相乘之和的最简式,其中每一项对应一个最小割集,从而得到电网安全运行风险故障树所有的最小割集^[11]。由图 1 可知,造成电网供电中断的初始原因有 27 个,用集合 $C = \{X_1, X_2, \dots, X_{27}\}$ 来表示。若集合 C 中的全部底事件都发生,顶事件必然发生,则称 C 为故障树的一个割集;若去掉集合 C 中的任意一个底事件后就不是割集,则称 C 为最小割集。一个割集代表系统故障发生的一种可能性,即系统的一种失效模式。根据 500kV 系统故障树逻辑图,利用 Semanderes^[12] 算法可求得每个割集和最小割集。具体计算如下:

$$\begin{aligned} G_{11} &= X_{15} + X_{16}; & (9) \\ G_{12} &= X_{17} + X_{18}; & (10) \\ G_{13} &= X_{19} + X_{20} + X_{21} + X_{22}; & (11) \end{aligned}$$

$$G_{14} = X_{23} + X_{24} + X_{25}; \quad (12)$$

$$G_{15} = X_4 + X_{26} + X_{27}; \quad (13)$$

$$G_8 = \sum_{k=6}^7 X_k + \sum_{k=16}^{18} X_k; \quad (14)$$

$$G_9 = \sum_{k=11}^{14} X_k + X_8 + \sum_{k=25}^{27} X_k; \quad (15)$$

$$G_{10} = \sum_{k=14}^{17} X_k + \sum_{k=27}^{29} X_k; \quad (16)$$

$$G_7 = \sum_{k=11}^{14} X_k + \sum_{k=25}^{27} X_k + X_4; \quad (17)$$

$$G_4 = X_1 \left(\sum_{k=6}^7 X_k + \sum_{k=16}^{18} X_k \right); \quad (18)$$

$$G_5 = X_2 \left(\sum_{k=11}^{14} X_k + X_8 + \sum_{k=25}^{27} X_k \right); \quad (19)$$

$$G_6 = X_3 \left(\sum_{k=14}^{17} X_k + \sum_{k=27}^{29} X_k \right). \quad (20)$$

那么,500kV 电网系统故障树的最小割集为:

$$G_1 = \sum_{k=6}^7 G_k = X_1 \left(\sum_{k=6}^7 X_k + \sum_{k=16}^{18} X_k \right) + X_2 \left(\sum_{k=11}^{14} X_k + X_8 + \sum_{k=25}^{27} X_k \right) + X_3 \left(\sum_{k=14}^{17} X_k + \sum_{k=27}^{29} X_k \right) + \sum_{k=14}^{17} X_k + \sum_{k=27}^{29} X_k + X_4. \quad (21)$$

将式(21)展开,共有 30 项,故最小割集数为 30 项。由式(21)可看出, X_1 、 X_2 、 X_3 在 30 个集合中出现的频率最高,因此它们是影响电网安全风险的主要因素,也是电网安全运行中的最薄弱环节,如果采取一些针对性的有效措施,电网安全将会得到进一步改善。这是符合电网实际情况的,因为当电网受到外界干扰而发生电网跳闸时,如果有相应的备用系统,将会大大减少电网事故、提高电网供电安全性。

3.2 定量分析

电网安全运行风险故障树的定量分析就是计算顶事件 T(即“电网系统中断用户供电”)发生的概率。为了研究问题方便,假设底事件 X_k ($k = 1, 2, \dots, 27$) 之间是相互独立的无重复事件。确定底事件失效的概率值 P_k 需要通过对以往电网系统的情况做大量统计。由于底事件发生的概率是不确定的,且很难确定其分布函数,因此本文将采用集对分析中的联系度来表示底事件发生的概率。基于联系度的概念,底事件发生概率为:

$$u(P_k) = a_k + b_k i + c_k j \quad (k = 1, 2, \dots, 27). \quad (22)$$

式(22)中: a_k 表示底事件一定发生的概率; c_k 表示底事件一定不会发生的概率; b_k 表示底事件可能发生也可能不发生的中介状态的概率。根据式(7)和式(8),对式(21)两边求联系度,得顶事件即

500kV 系统发生供电中断的联系度:

$$u(G_1) = u(X_1) \left[\sum_{k=6}^7 u(X_k) + \sum_{k=16}^{18} u(X_k) \right] + u(X_2) \left[\sum_{k=11}^{14} u(X_k) + u(X_8) + \sum_{k=25}^{27} u(X_k) \right] + u(X_3) \left[\sum_{k=14}^{17} u(X_k) + \sum_{k=27}^{29} u(X_k) \right] + \sum_{k=14}^{17} u(X_k) + u(X_4). \quad (23)$$

将统计得出的底事件发生的联系度系数 a_k 、 b_k 、 c_k 代入式(23),运用联系度的运算法则,可求出 500kV 系统发生供电中断的联系度:

$$u(G_1) = 8(a_1 + b_1 i + c_1 j) \left[\left(\sum_{k=6}^7 a_k + \sum_{k=16}^{18} a_k \right) / 8 + \left(\sum_{k=11}^{14} b_k + \sum_{k=25}^{27} b_k \right) / i + \left(\sum_{k=14}^{17} a_k + \sum_{k=27}^{29} a_k \right) / 8 j \right] + 6(a_2 + b_2 i + c_2 j) \left[\left(\sum_{k=11}^{14} a_k + a_8 + \sum_{k=25}^{27} a_k \right) / 6 + \left(\sum_{k=14}^{17} b_k + b_8 + \sum_{k=25}^{27} b_k \right) / 6 i + \left(\sum_{k=14}^{17} c_k + c_8 + \sum_{k=25}^{27} c_k \right) / 6 j \right] + 10(a_3 + b_3 i + c_3 j) \left[\left(\sum_{k=14}^{17} a_k + \sum_{k=27}^{29} a_k \right) / 10 + \left(\sum_{k=14}^{17} b_k + \sum_{k=27}^{29} b_k \right) / 10 i + \left(\sum_{k=14}^{17} c_k + \sum_{k=27}^{29} c_k \right) / 10 j \right] + \left(\sum_{k=14}^{17} a_k + \sum_{k=27}^{29} a_k + a_4 \right) / 6 + \left(\sum_{k=14}^{17} b_k + \sum_{k=27}^{29} b_k + b_4 \right) / 6 i + \left(\sum_{k=14}^{17} c_k + \sum_{k=27}^{29} c_k + c_4 \right) j.$$

设定电网公司的安全运行风险阈值,当电网安全运行风险的联系度值超过它时,表明电网安全超出了电网公司的最大承受能力,需要采取一些有效措施减少电网安全事故的发生。

4 算例分析

某电网公司对 2006 年影响电网运行安全的因素进行分析,并构建了如图 1 所示的故障树。各因素过去发生的联系度可根据以往输配电网故障记录的数据库系统并采用历史数据计算得出。但由于历史数据不全,因此本文假设这些因素发生的联系度系数的统计数据如表 3 所示。

将表 3 的数据代入式(23),并设 $i = 0.5$, $j = -1$, 则

$$u(G_1) = 8(0.1 + 0.6i + 0.3j)(0.0625 + 0.415i + 0.5225j) + 6(0.12 + 0.55i + 0.33j)(0.07 + 0.47i + 0.46j) + 10(0.08 + 0.45i + 0.47j)(0.041 + 0.486i + 0.473j) + 6(0.017 + 0.183i + 0.8j) = 8(0.163 + 0.766i + 0.071j) + 6(0.160 + 0.762i + 0.078j) + 10(0.226 + 0.717i + 0.057j) + 6(0.017 + 0.183i + 0.8j) = 30(0.154 + 0.632i + 0.214j) =$$

30 ×0.257。

表 3 故障树底事件的集对系数

X_i	底事件	联系度系数[a,b,c]	X_i	底事件	联系度系数[a,b,c]
X_1	没有备用变压器	[0.10,0.60,0.30]	X_{15}	检修质量不当	[0.15,0.64,0.21]
X_2	没有回路可替代	[0.12,0.55,0.33]	X_{16}	运行维护不当	[0.02,0.23,0.75]
X_3	没有备用线路	[0.08,0.45,0.47]	X_{17}	渗漏油	[0.01,0.25,0.74]
X_4	制造质量不良	[0.02,0.21,0.77]	X_{18}	其他本体故障	[0.02,0.35,0.63]
X_5	安装质量不良	[0.05,0.32,0.63]	X_{19}	大风导致线路跳闸	[0.03,0.72,0.25]
X_6	恶劣气象	[0.15,0.64,0.21]	X_{20}	倒塔所致线路跳闸	[0.10,0.32,0.58]
X_7	相关一次设备故障	[0.08,0.68,0.24]	X_{21}	风偏闪络	[0.04,0.35,0.61]
X_8	外力所致	[0.03,0.78,0.19]	X_{22}	冰闪及冰害	[0.01,0.27,0.72]
X_9	雷击闪络	[0.04,0.82,0.14]	X_{23}	山火导致线路	[0.05,0.38,0.57]
X_{10}	污闪(雾闪)	[0.03,0.62,0.35]	X_{24}	吊车碰线等违章施工	[0.02,0.25,0.73]
X_{11}	鸟粪闪络	[0.08,0.78,0.14]	X_{25}	异物短接	[0.01,0.35,0.64]
X_{12}	继电保护人员误接线	[0.02,0.13,0.85]	X_{26}	软件问题	[0.01,0.15,0.84]
X_{13}	基建人员误碰	[0.01,0.25,0.74]	X_{27}	设备其他问题	[0.02,0.21,0.77]
X_{14}	其他部门导致误动作	[0.02,0.15,0.83]			

假设电网公司设定的安全阈值为 0.2,由于 $u(G_1) > 0.2$,说明电网安全运营风险较大,该电网公司应采取相应的措施,以减少安全运行风险,使其达到可承受的范围。

为了检验 i 值对电网安全运行的联系度的影响,本文多次迭代不同的 i 值,联系度的变化趋势如图 2 所示。

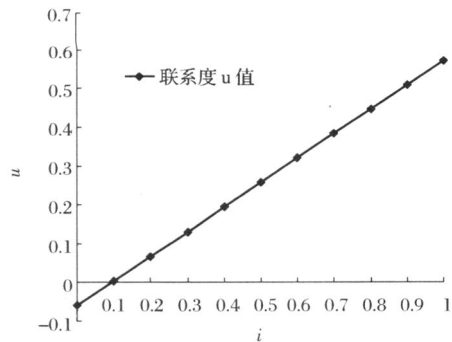


图 2 i 与联系度 u 的关系图

由图 2 可以看出, i 的取值对电网安全风险评估的影响非常大。随着 i 值逐渐增大,电网安全运行风险的联系度值也随之增大,从而影响电网公司的安全决策,因此需要合理地确定 i 的取值。

为了分析各底事件的联系度对最终电网安全运行风险的联系度的影响程度,本文任意选择 X_1 、 X_2 、 X_3 这 3 个底事件,不断变动其集对系数值,具体的影响程度如图 3、图 4 所示。

从图 3、图 4 可以看出,无论是在 b 值不变的条件下还是在 c 值不变的条件下,随着 3 个底事件联系度系数 a 的变化率的增加,电网安全运行风险的 u 值在不断减小。从斜率来看, X_1 的变化是最快

的,接着是 X_3 和 X_2 ,这说明 X_1 比其他两个因素更敏感。因此,当电网安全运行风险的联系度值超过电网公司的承受力时,可优先调整敏感性因素。

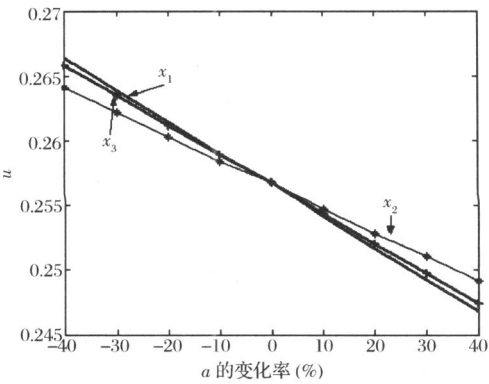


图 3 a 与联系度 u 的关系图(b 不变条件下)

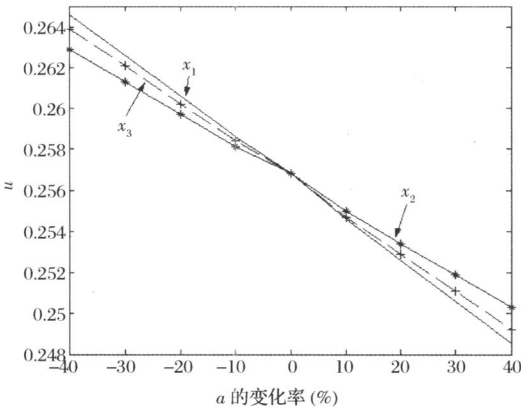


图 4 a 与联系度 u 的关系图(c 不变条件下)

5 结论

电网的安全运行风险是电网公司最关心的问题。本文通过联合运用集对分析法与故障树法对电

网安全运行风险进行了研究,具有显著的实际意义。通过分析可看出,采用故障树法对电网安全运行风险进行定量分析和评价时,如何确定底事件的发生概率是分析的关键。由于每个导致安全问题的因素的发生都具有一定的不确定性,因此在故障树分析中采用联系度表示事件发生的状态克服了运用传统故障树分析法对概率难以精确赋值的缺点。集对故障树法具有较大的灵活性和适应性,可将现场和少量实验数据与工程技术人员的经验结合起来,更加符合工程实际。同时,基于集对分析的故障树分析方法是对传统故障树分析的推广,它们的结合可为电网的安全风险评估提供一定的理论基础。

本文只是对电网安全运行风险发生的概率进行了研究,但对于电网公司而言,其不仅关注发生供电中断的概率,同时还关心供电中断所带来的损失,因此如何合理确定供电中断所带来的损失及发生的概率将是下一步研究的方向。

参考文献

- [1] 周宗发,艾欣,邓慧琼,等. 基于故障树和模糊推理的电网连锁故障分析方法[J]. 电网技术, 2006,30(8):86-91.
- [2] 刘昊,艾欣,邓慧琼. 基于循环完善法和树状结构事故的电网连锁故障研究[J]. 现代电力,2006,23(2):24-29.
- [3] 邓慧琼,艾欣,余洋洋,等. 电网连锁故障的概率分析模型及风险评估[J]. 电网技术,2008,32(15):41-46.
- [4] 万官泉,张尧,汪穗峰. 基于联系数的配电系统可靠性不确定性评估[J]. 电力系统自动化,2008,32(4):30-35.
- [5] 卢锦玲,杨晓东,栗然,等. 一种基于贝叶斯网络的配电网可靠性评估方法[J]. 华北电力大学学报,2004,31(2):16-19.
- [6] 张蔼蓓. 故障树分析在电力系统可靠性研究中的应用[J]. 华东电力,2005,33(2):14-17.
- [7] 任震,万官泉,黄雯莹. 参数不确定的配电系统可靠性区间评估[J]. 中国电机工程学报,2003,23(12):68-73.
- [8] 张一饶,杨世平. 基于 PRA 的电子商务安全风险评估模型[J]. 计算机工程与设计,2008,29(17):4420-4422.
- [9] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州:浙江科技出版社,2000:15-24.
- [10] 高峰,陈英武. 基于集对分析的项目风险排序方法[J]. 基建优化,2005,26(1):1-4.
- [11] 李焕良,杨承先,左洪福,等. 基于故障树分析法与虚拟仪器技术的工程装备电控系统故障诊断[J]. 中国工程机械学报,2007,5(3):340-346.
- [12] 沈轶,陆晓峰. 高温法兰连接系统的故障树分析[J]. 南京工业大学学报,2006,28(5):100-104.

Risk Evaluation Model of Power Grid Security Based on Set Pair and Fault Tree Method

Zhang Liying, Wang Mianbin, Tan Zhongfu, Qi Jianxun

(Institute of Electricity Economics, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: This paper analyzes the operation security risk of power grid, and uses the fault tree method to construct the fault tree of operation security of power grid according to actual operation situation of power grid. Then, it deduces the set pair 'and' and 'or' arithmetic operators based on the concept and rule of set pair analysis, and evaluates the operation security risk of power grid through calculating the relationship among 'bottom affairs' with the certainty and the uncertainty, which avoids the inaccuracy caused by the probability evaluation. The simulation result shows the set pair and fault tree method is feasible, and can describe the real degree of operation security risk of power grid, which helps to make decisions for power grid companies.

Key words: power grid security; fault tree; probability risk analysis; set pair analysis; risk evaluation