

# 计及变电站主接线影响的输电网供电可靠性分析

陈云峰, 张焰

(上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

**摘要:** 变电站电气主接线可靠性对电力系统有着重要的影响,而在传统的电力系统可靠性分析中,一般将输电网和变电站电气主接线分开进行分析,为了便于在输电网供电可靠性分析计算中计及变电站电气主接线的影响,提出了基于解析法与 Monte Carlo 模拟法相结合的输电网可靠性计算方法。首先采用解析法对变电站电气主接线进行可靠性分析,然后采用 Monte Carlo 模拟法对整个输电网进行故障采样模拟,最后得到整个输电网的可靠性指标。为了验证所提算法的有效性,以 IEEE-RTS79 系统为例进行分析计算,结果表明,提出的算法可以有效地将变电站主接线和输电网作为一个整体进行可靠性分析,并且可以定量地分析变电站主接线对输电网可靠性的影响。

**关键词:** 变电站电气主接线; 输电网; 可靠性; Monte-Carlo 模拟法

## Transmission network reliability evaluation considering the impact of substation bus arrangement

CHEN Yun-feng, ZHANG Yan

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** In order to take the impact of bus arrangement into consideration when evaluating the reliability of transmission network, a novel method is developed which combined with the traditional analytical method and Monte-Carlo simulation method. First, this paper uses the analytical method to analyze the reliability of substation bus arrangement then simulates the unit fault in the whole transmission network by Monte-Carlo Simulation method, and at last obtains the reliability index. The reliability of IEEE-RTS79 system is evaluated and analyzed to prove the validity and efficiency of the proposed method.

**Key words:** substation bus arrangement; transmission network; reliability; Monte-Carlo simulation method

中图分类号: TM732

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)02-0060-04

## 0 引言

输电系统可靠性评估是电力系统可靠性分析的一个重要组成部分,输电系统一旦故障可能引起大范围停电。随着系统规模的不断扩大和电压等级的不断提高,输电网的可靠性分析变得越来越重要<sup>[1,2]</sup>。

目前对电力系统可靠性的研究已经取得了许多成果<sup>[3-5]</sup>,但是很多单一的方法都难以对电力系统整体进行可靠性分析:解析法数学模型概念清晰,计算结果精确,但当系统规模增大时,构造模型的难度加大,计算时间也迅速增加;模拟法模型直观,采样次数和系统规模无关,不足之处在于为了获得较高的计算精度,要进行大量的采样,导致计算时间很长。总体来讲,对电力系统整体进行可靠性研究还处于探索阶段<sup>[6]</sup>。

传统方法中,由于计算方法及计算规模上的问

题,在分析电力系统可靠性时,一般是将输电网和变电站电气主接线系统分开来进行研究的<sup>[7-9]</sup>,并需要做一定程度的近似或等值,这样必然会带来较大的误差,导致分析结果不准确。比较有效的解决途径是将解析法和 Monte-Carlo 模拟法相结合的混合法:用模拟法随机模拟系统的状态转移过程,而用解析法确定系统在模拟到的各状态中的平均持续时间,这样可以充分发挥两种方法的优点,计算精度高,计算效率也得到了提高,有良好的发展前景<sup>[10,11]</sup>。

为了在输电网可靠性分析计算中能够计及变电站电气主接线的影响,本文将变电站电气主接线和输电网联系在一起作为一个整体进行研究,提出了基于解析法与 Monte Carlo 模拟法相结合的输电网可靠性计算方法。首先采用解析法对变电站电气主接线进行可靠性分析,然后采用 Monte Carlo 模拟

法对整个输电网进行故障采样模拟, 最后得到整个输电网的可靠性指标。本文提出的算法将整个电力系统分成两个层次进行分析, 有效地减小了计算的维数, 提高了效率, 适合对大规模的系统进行分析; 同时又考虑了输电网络和变电站电气主接线在可靠性方面的相互影响, 从而定量地分析变电站电气主接线对输电网可靠性的影响。

## 1 计及变电站电气主接线影响的输电网的可靠性分析

在本文提出的算法中, 首先采用解析法对变电站主接线进行可靠性分析, 并生成每个变电站的故障集, 记录故障元件, 故障类型以及故障后果; 然后采用 Monte Carlo 模拟法对整个输电网中的元件 (包括各变电站中的元件) 进行故障采样模拟, 在完成规定时间的模拟后, 总结并计算出整个输电网的可靠性指标。

### 1.1 基于解析法的变电站电气主接线可靠性分析

考虑到变电站中任意一条线路断开都会引起输电网络拓扑结构的改变, 所以将判定变电站失效的准则定为只要引起任意一条线路或者一台变压器断开。

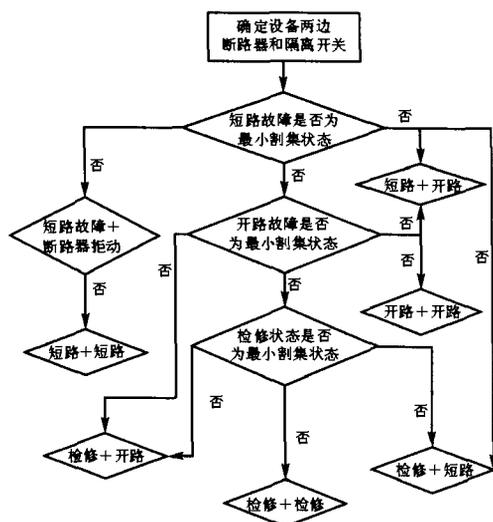


图 1 获得最小割集状态的流程图

Fig.1 Flow chart of the minimum cutset analysis

图 1 中, 每个判定进程表示判断其中的故障状态是否属于最小割集, 即判断故障是否会导致变电站失效, 如果失效则将这种状态归到最小割集中。

在具体的分析中, 首先搜索从变电站进线到出线之间的最小路集, 并进一步获得会引起变电站失效的最小割集状态, 其详细的算法见图 1。在获得

最小割集状态后, 对每种状态进行分析, 记录最小割集中每种故障状态的故障元件, 故障类型, 停电线路, 停电时间以及停电量, 最后计算变电站电气主接线的可靠性指标。

### 1.2 基于时序 Monte-Carlo 模拟法的输电网元件故障模拟

在完成各个变电站电气主接线的可靠性分析之后, 将各个变电站等值成输电网络中的一个点, 然后开始对整个输电网的元件进行故障模拟。

在传统的使用 Monte Carlo 模拟法的可靠性分析方法中, 为了减少可靠性指标的方差, 必须大量增加随机模拟次数。本文提出的算法中, 用 Monte Carlo 模拟法随机模拟系统的状态转移过程, 而用解析法确定系统在模拟到变电站主接线元件故障时的状态持续时间, 并以此代替持续时间的抽样值。

#### 1.2.1 输电网络的状态转移模拟

采用时序 Monte Carlo 模拟法模拟输电网络的状态转移。将电力系统处在状态  $i$  时按照指数分布发生的事件归为一组  $(e_1, \dots, e_n)$ , 判断事件组中哪一个随机事件先发生的具体方法是: 产生  $[0, 1]$  区间上服从均匀分布的随机数  $\mu_i$ , 根据式 (1) 计算服从参数是  $\lambda_i$  的指数分布的随机变量  $t_i$  的抽样值, 它代表随机事件  $e_i$  发生的时间, 得出各随机事件发生的时间, 比较它们的大小, 寻找最小值, 最小值所对应的随机事件就是随机事件组  $(e_1, \dots, e_n)$  中最先发生的随机事件, 计算系统在这个状态的持续时间。系统状态转移过程的随机模拟从下一个确定事件开始进行新的递推序列, 直到达到模拟时间限制。

$$t_i = -\ln(\mu_i) / \lambda_i \quad (1)$$

#### 1.2.2 元件故障的后果分析

当模拟到某状态时系统中有元件发生故障, 就要进行故障后果分析, 从而判断此元件故障是否会引起停电。详细的故障后果分析的流程见图 2。

从图 2 中可以看到, 如果发生故障的元件属于某变电站, 分析此元件故障是否会造成变电站失效, 即在变电站的故障集合中搜索此元件, 若找到, 说明此元件故障会造成变电站失效, 调出断开的线路、停电时间, 并在输电网中修改网络结构, 进行网络部分的故障分析; 若无, 则元件故障不会造成变电站失效, 系统正常, 不必对输电网再进行分析。

经过这样的处理, 就可以将变电站的可靠性分析结果结合到输电网的分析中, 又不必每次都对其

进行分析,提高了整个算法的效率;此外,对于网络部分元件的故障,不必考虑变电站的主接线结构,减小了计算分析的难度,从而使整个程序的准确性和效率都得到了提高。

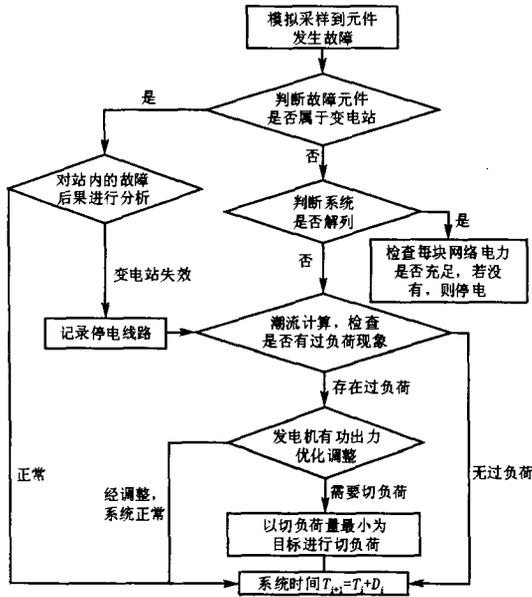


图2 故障后果分析流程图

Fig.2 Flow chart of fault result analysis

### 1.3 整个程序的流程

综上所述,整个可靠性分析程序流程如下:

- 1) 采用最小割集法对各变电站电气主接线进行可靠性分析,对于各种故障记录下其后果。
- 2) 将电网中的变电站简化成电网中的一个点,计入整个输电网进行分析。
- 3) 对计及电气主接线的整个输电网络进行拓扑分析,将网络中的元件按节点号和元件号进行排列。形成整个系统的状态空间  $(e_1, \dots, e_i, \dots, e_n)$ , 其中  $e_i$  为系统中某元件的状态标识,在以后的模拟过程中,任意元件状态的改变将导致系统状态的改变。
- 4) 设置初始状态为正常工作状态,整个模拟在初始时间  $T=0$  开始。
- 5) 在系统时间为  $T$  时,产生  $n$  个在  $[0, 1]$  区间上服从均匀分布的随机数  $\mu_i$ , 计算每个元件能够正常工作的时间  $t_i$ , 取其中的最小值,如果  $\min(t_i) = t_k$ , 第  $k$  个元件即最先发生故障。
- 6) 对于故障元件进行故障后果分析,判断元件故障是否会引起停电,如果停电,记录停电时间和停电量,停电次数加1。
- 7) 一次模拟结束后,系统时间  $T_{i+1} = T_i + D_i$ , 其中

$T_i$  是在  $i$  状态时的系统时间,  $D_i$  为系统在  $i$  状态持续的时间。判断系统时间是否已经到达退出条件,如果达到,则退出模拟并计算系统的年平均可靠性指标,否则转到(5)进行下一次的模拟。

## 2 算例分析

IEEE-RTS79(24节点)系统的数据见文献[1,2],由节点9、节点10、节点11、节点12组成的变电站包括4台变压器,4回进线,8回出线,在整个系统有重要的作用,本节将对此变电站主接线可靠性和计及该变电站电气主接线的整个系统的可靠性进行详细的计算和分析。变电站电气主接线部分的元件可靠性参数如表1所示。

表1 变电站主接线元件可靠性故障参数

Tab.1 Reliability parameters of units in substation

元件	故障率 (次·年 <sup>-1</sup> )	修复时 间/h	检修率 (次·年 <sup>-1</sup> )	检修时间 /h
变压器	0.04	200	0.5	70
母线	0.09	6	0.1	5
断路器	0.18	160	0.15	150
隔离开关	0.008	15	0.5	5

为便于比较,变电站电气主接线采用三种不同的形式,分别为:A 高压侧采用四角形,低压侧采用 3/2 断路器接线方式;B 高压侧采用四角形,低压侧采用双母分段带旁母接线方式;C 高压侧采用四角形,低压侧采用双母分段线方式。

首先对采取这三种接线方式的变电站电气主接线进行可靠性分析,结果如表2所示。

表2 不同接线方式下的变电站可靠性指标

Tab.2 Reliability results of substation with different bus arrangement modes

接线方 式	arrangement modes		
	LOLF (次·年 <sup>-1</sup> )	LOLD (h·年 <sup>-1</sup> )	LOLP
A	0.746 088	15.034 225	0.001 77
B	0.889 564	20.935 580	0.002 38
C	0.900 875	21.412 207	0.002 46

看出低压侧采用 3/2 断路器的 A 接线方式时,可靠性指标明显优于其他两种接线方式。对于变电站采用上述三种不同的接线方式时,分析整个系统的可靠性,系统模拟 100 万小时,故障模拟到 2 重,计算出年平均可靠性指标,结果如表3所示。

表3中,低压侧采用3/2断路器接线的A接线方式下的系统缺电概率LOLP、系统缺电持续时间

LOLD、系统的电量不足期望EENS都小于低压侧采用双母带旁路接线的B接线方式和低压侧采用双母线接线的C接线方式, 结合表2看出, 随着变电站主接线可靠性的提高, 整个输电网的可靠性也逐步提高。

表3 IEEE-RTS79 系统的可靠性指标

Tab.3 Reliability results of IEEE-RTS79 system

接线方式或 计算方法	LOLP	LOLD (h·年 <sup>-1</sup> )	EENS (10 <sup>3</sup> MWh·年 <sup>-1</sup> )
A	0.067 6	592.564	112.623
B	0.074 4	651.651	118.654
C	0.079 5	697.019	120.459
文献[1]	0.081 4	711.291	120.208
文献[12]	0.098 5	863.195	133.244

另外, 文献[1]中采用解析法; 文献[12]中采用Monte-Carlo模拟法, 与本文提出的算法相比较, 由于本文考虑了变电站内部的可靠性主接线影响, 使得整个系统的可靠性得到了提高, 所以评估结果优于上述文献中的结果, 结果也验证了变电站可靠性在输电网中的重要性。

### 3 结论

本文将计及变电站电气主接线的整个输电系统作为研究对象, 计算模型更加符合实际情况, 提出的可靠性评估算法可以分析变电站内的元件故障给整个输电系统带来的后果, 从而定量地分析关键站点对整个电力系统可靠性的影响。

将解析法与Monte Carlo模拟法相结合的混合法结合了两种方法的优势, 在保证计算精确度的同时, 提高了程序的效率, 能够快速而精确地得到整个系统的可靠性指标, 适用于对大规模电力系统的可靠性分析。

将网络部分和变电站主接线分层分析的方法有效地降低了计算的维数, 使算法适用于对大规模电力系统的可靠性分析。

### 参考文献

- [1] Roy B, Ronald A, Norman R. Reliability Evaluation of Power Systems[M]. New York: Plenum Press, 1996.
- [2] 郭永基. 电力系统可靠性分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.  
GUO Yong-ji. The Theory and Application of Power System Reliability[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [3] 赵渊, 周家启, 周念成. 大电力系统可靠性评估的解析计算模型[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 19-25.

- ZHAO Yuan, ZHOU Jia-qi, ZHOU Nian-cheng. An Analytical Approach for Bulk Power Systems Reliability Assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 19-25.
- [4] 文艳, 罗安, 谷群辉. 配电网可靠性分层评估算法[J]. 继电器, 2004, 32(9): 31-34.  
WEN Yan, LUO An, GU Qun-hui. Reliability Stratification Evaluation Algorithm of Distribution Network[J]. Relay, 2004, 32(9): 31-34.
- [5] 张鹏, 王守相. 大规模配电系统可靠性评估的区间算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 77-84.  
ZHANG Peng, WANG Shou-xiang. A Novel Interval Method for Reliability Evaluation of Large Scale Distribution System[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 77-84.
- [6] Roy B, LI Wen-yuan. Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods[M]. New York: Plenum Press, 1994.
- [7] 王世香, 高仕斌. 蒙特卡罗方法在变电站综合自动化可靠性评估中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 96-100.  
WANG Shi-xiang, GAO Shi-bin. Application of Monte Carlo Method in Reliability Evaluation of Integrated Substation Automation[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 96-100.
- [8] 周志超, 张焰, 王伟. 变电站供电可靠性的定量评估[J]. 电力系统自动化, 2004, 8(9): 66-69.  
ZHOU Zhi-chao, ZHANG Yan, WANG Wei. Quantitative Evaluation of Substation Supply Reliability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 8(9): 66-69.
- [9] Vega M, Sarmiento H G. Algorithm to Evaluate Substations Reliability with Cut and Path Sets [A]. In: IEEE Industry Applications Conference[C]. 2004. 2168-2175.
- [10] 万国成, 任震, 吴日昇. 混合法在复杂配电网可靠性评估中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 92-98.  
WAN Guo-cheng, REN Zhen, WU Ri-sheng. Hybrid Method for the Reliability Evaluation of the Complex Distribution System[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 92-98.
- [11] Melo A C G, Oliveira G C, Morozowski M, et al. A Hybrid Algorithm for Monte Carlo/Enumeration Based Composite Reliability Evaluation [A]. In: IEE Conference Publication[C]. 1991. 70-74.
- [12] 郭永基, 程林. 一种新得发输电系统可靠性试验系统[J]. 电力系统自动化, 2001, 5(25): 35-40.  
GUO Yong-ji, CHENG Lin. Reliability Test System for Composite Generation and Transmission System in China [TH-RTS2000] [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 5(25): 35-40.

收稿日期: 2006-08-01; 修回日期: 2006-08-24

作者简介:

陈云峰(1981-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统规划方向的研究; E-mail: yfchen1981@163.com

张焰(1958-), 女, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析和规划以及电力系统可靠性。