

基于联系数的输电系统可靠性评估

王 磊¹, 张明文²

(1. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北 保定 071003; 2. 河北省电力公司, 河北 石家庄 050021)

摘 要:传统输电系统可靠性评估将可靠性数据作为确切值进行评估,但是由于客观条件的影响,部分可靠性数据是不确定的,这必然会导致评估不准确。在联系数理论和输电系统可靠性评估的基础上,提出了输电系统可靠性评估的新方法。该方法用联系数表示可靠性参数,通过联系数运算处理具有不确定性的可靠性参数,计算出具有确定项与不确定项的可靠性联系数指标。该方法可反映各原始参数不确定对可靠性指标的影响,能更好地评估系统可靠性的真实程度。通过分析 IEEE-RBTS 和 IEEE-RTS79 两个算例,表明了该方法的合理性和有效性。

关键词:联系数;输电系统;可靠性评估;深度优先搜索算法;最小切负荷

中图分类号:TM732

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2010)06-0024-04

输电系统可靠性评估是电力系统可靠性分析的重要组成部分^[1-7]。电力系统可靠性评估是其规划、设计、运行和维修的重要标尺之一。对输电网进行准确、快速的可靠性分析,会给规划和运行人员提供重要的参考信息,以保证电网能安全、经济、优质、可靠地运行。常规的可靠性评估方法是建立在元件可靠性原始参数基础上的,将可靠性的原始参数(故障率和修复时间)取为确定值(平均值),从而得到可靠性指标也是确切值(平均值)。但是可靠性原始参数中包含大量的不确定因素,故障率和修复时间均是不确定的因素,如果将其取为确切值就行可靠性评估,必然会导致评估结果不准确,不能反映可靠性指标的真实程度,有可能与将来的实际情况存在较大的偏差,从而对工作人员产生误导作用。为了处理可靠性原始参数不确定对可靠性评估的影响,目前一些学者已经提出了一些方法,如文献[8]中提出的用随机变量表示原始参数和可靠性指标的方法和文献[9]中提出的模糊集可靠性评估方法,但这些方法都有一定的局限性,文献[8]中的方法计算公式推导十分复杂,无法运用到工程实际,文献[9]中的方法存在如何选取模糊集及其隶属函数的问题。在此基础之上,提出了基于联系数理论的可靠性评估的一种新方法,用联系数表示可靠性原始参数和可靠性指标。

1 联系数理论

1.1 联系数的概念

集对分析^[10]由赵克勤于 1989 年提出,目前已受到国内学术界的重视。集对分析的核心思想是把不确定性与确定性作为一个系统来进行数学处理和辩证分析,引进既确定又不确定的联系数来系统地

处理由随机、模糊、不确定和中介等不确定性所导致的综合不确定性问题^[11-13]。联系数的意义不仅在于把一个具体的数与这个数所在的范围联系起来,更在于把一个具体的数与它所在范围内的确定性与不确定性联系起来,使得一定范围内的确定性与不确定性的相互联系、渗透、制约与转化在数量上得到客观地反映。联系数有不同的表达式,为讨论方便,本文仅考虑 $a+bi$ 形式的联系数。

定义^[12]:设 $u=A+Bi$,则称 u 为联系数,其中 A 为联系数的确定部分, Bi 为联系数的不确定部分, i 是不确定量, $i \in [-1, 1]$,但需要根据具体情况取值, i 与 B 一起决定对 A 的修正方向和修正数值。

2.2 联系数的运算^[10]

设 $u_1=A_1+B_1i$, $u_2=A_2+B_2i$,则联系数的加法运算公式如下:

$$u_1+u_2=A_1+B_1i+A_2+B_2i=(A_1+A_2)+(B_1+B_2)i \quad (1)$$

联系数的乘法运算公式如下:

$$u_1u_2=(A_1+B_1i)(A_2+B_2i)=A_1A_2+A_1B_2i+A_2B_1i+B_1B_2i^2 \quad (2)$$

由于不确定性相对于确定性而言是不确定的,因此集对分析规定在不计不确定性层次性的条件下,不确定数的各次幂仍记为不确定数,即有

$$i=i^2=i^3=\cdots=i^n \quad (3)$$

综合式(2)和式(3)可得 2 个 $A+Bi$ 联系数相乘的结果仍可化为 $A+Bi$ 形式。即

$$u_1u_2=A_1A_2+(A_1B_2+A_2B_1+B_1B_2)i \quad (4)$$

联系数 $A+Bi$ 的加法和乘法运算满足交换律、结合律和分配律:

$$u_1+u_2=u_2+u_1 \quad (5)$$

$$u_1u_2=u_2u_1 \quad (6)$$

$$u_1+(u_2+u_3)=(u_1+u_2)+u_3 \quad (7)$$

$$u_1(u_2u_3)=(u_1u_2)u_3 \quad (8)$$

$$u_1(u_2+u_3)=u_1u_2+u_1u_3 \quad (9)$$

系数的减法运算公式如下:

$$u_1 - u_2 = (A_1 - A_2) + [\max(B_1, B_2)]i \quad (10)$$

该定义说明 2 个相同的系数之差等于零;即使 $A_1 - A_2 = 0$, 但不确定性仍然存在。

系数的除法运算公式如下:

$$u_2 / u_1 = (A_2 + B_2 i) / (A_1 + B_1 i) = A_2 / A_1 + (B_2 - \frac{A_2 B_1}{A_1})i / (A_1 + B_1 i) \quad (11)$$

设有系数 $u = A + Bi$, 则系数的平方根运算公式如下:

$$\sqrt{u} = \sqrt{A + Bi} = \sqrt{A} + (-\sqrt{A} \pm \sqrt{A + B})i \quad (12)$$

设有系数 $u_1 = A_1 + B_1 i, u_2 = A_2 + B_2 i, \dots, u_n = A_n + B_n i$, 则系数的均值运算公式如下

$$U = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n A_k + i \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n B_k, \quad k=1, 2, \dots, n \quad (13)$$

式中: U 为 n 系数的平均值。

3 算法原理

输电系统可靠性评估由三部分组成: 系统状态选取、系统状态分析、系统可靠性指标的累计。

3.1 系统状态选取

系统状态选取方法包括枚举法和蒙特卡洛方法。这些方法都已成功的运用发电、发输电系统可靠性评估中。蒙特卡洛方法(包括序贯蒙特卡洛和非序贯蒙特卡洛)是基于概率论的, 之所以能够成功使用在于系统发电部分的强迫停运率比较大, 进行系统采样时能够形成多重故障, 利于可靠性指标的累计, 从而得到近似准确的评估结果。而单纯输电部分的强迫停运率比较小, 进行系统采样时很难形成多重故障, 不利于可靠性指标的累计, 评估结果会严重偏离实际可靠性指标。

虽然可以通过增加抽样次数的方法来提高可靠性评估的准确性, 但计算机运行时间太长, 所以本文在选取系统状态时采用枚举法。系统状态选取包括对线路、变压器、断路器和母线等元件状态的选取。为提高可靠性评估的计算速度, 忽略对可靠性指标贡献较小的事件^[14]。系统元件中线路、变压器和母线的故障是不可忽略的事件, 其他元件的故障属于贡献较小的事件, 所以进行系统状态选取时只对线路、变压器和母线的状态进行选取。

3.2 系统状态分析

3.2.1 深度优先搜索算法^[15]

输电元件的状态发生变化时, 可能引起系统拓扑结构发生变化。此时需重新分析连通性, 搜索系统连通块数以及每个连通块内的发电机、负荷和线路连接情况。深度优先搜索算法可描述为: 从接线图中

某个顶点出发, 访问此顶点, 然后依次从这个顶点的未被访问的邻接点出发深度优先遍历, 直至图中所有和这个顶点有路径相通的点被访问到; 若此时图中尚有顶点未被访问, 则另选接线图中未曾访问的顶点作起点, 重复上述过程, 直到图中所有顶点都被访问到为止。在对图进行遍历时, 如果接线图是连通图, 那么仅从图中任一顶点出发, 进行深度优先搜索, 便可访问到图中所有顶点; 如果接线图是非连通图, 则选择已搜索到的子系统外的任一节点, 进行深度优先搜索, 即可搜索到各个子系统的节点集, 从而形成各子系统的结构参数。

3.2.2 最小切负荷模型^[16]

正常状态下, 机组和线路的容量相对于负荷有一定的裕度, 不会出现切除负荷的情况。但若系统中出现输电元件的停运故障会使电网输电能力下降, 为提高当前系统的输电能力, 应最大程度地减小负荷切除功率。对一个有 n 个节点、 m 条线路的系统, 其最小切负荷的数学模型如下:

$$\begin{aligned} P_c &= \min \sum_{i \in \Omega_1} P_{c_i}, \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} \sum_{i \in \Omega_2} \sum_j P_{G_{ij}} = \sum_{i \in \Omega_1} P_{L_i} + \sum_{i \in \Omega_1} P_{c_i}, \\ (P_c + P_c - P_L) = -Y\theta, \\ P_{b_k} = \frac{\theta_{s(k)} - \theta_{e(k)}}{x_k}, (k=1, 2, \dots, m), \\ |P_{b_k}| \leq P_{b_k \max}, \\ P_{G_{ij \min}} \leq P_{G_{ij}} \leq P_{G_{ij \max}}, (i \in \Omega_2), \\ 0 \leq P_{c_i} \leq P_{L_i}, (i \in \Omega_1), \end{cases} \end{aligned} \quad (14)$$

式中: P_c 为系统负荷切除功率; Ω_1, Ω_2 分别为负荷、电源节点的集合; $P_{G_{ij}}, P_{G_{ij \max}}, P_{G_{ij \min}}$ 分别为第 i 个电源节点中第 j 个处于运行状态的发电机组的实际出力、有功出力上限和下限; P_{L_i}, P_{c_i} 为第 i 个负荷节点上的原始负荷功率和负荷切除功率; $P_b, P_{b \max}$ 为 m 维列向量, 其元素分别为各条线路上的有功潮流值和线路输送功率上限; P_G, P_L, P_c 均为 $(n-1)$ 维列向量, 相应的元素分别为各独立节点上电源有功注入功率、负荷功率和切负荷功率; θ 为 $(n-1)$ 维向量, 其元素是各独立节点上的电压相角; Y 为线路电抗倒数建立的节点电纳矩阵; $s(k), e(k)$ 分别为第 k 条线路起始、终止节点的编号。

3.3 系统可靠性指标的累积

输电系统可靠性评估指标包括^[17]: 电力不足概率 $LOLP$, 表示系统中出现停电事件的概率; 电力不足期望 $LOLE$, 表示平均每年缺电小时, 单位是 h 。

年;电力不足频率 $LOLF$,表示每年系统出现切负荷故障的次数,单位是次/年;电力不足持续时间 $LOLD$,表示平均每次停电的持续时间,单位是 h/次;电力不足期望值 $EENS$,表示平均每年缺电多少,单位是 $MW \cdot h$ /年。它们计算公式分别为:

$$LOLP = \sum_{F_i \in F} P_{rob}(F_i) \tag{15}$$

$$LOLE = 8\,760 \times P\left\{\bigcup_{F_i \in F} F_i\right\} \tag{16}$$

$$LOLF = \sum_{F_i \in F} f_{re}(F_i) \tag{17}$$

$$LOLD = LOLE/LOLF \tag{18}$$

$$EENS = 8\,760 \times \sum_{F_i \in F} P_{rob}(F_i) \times DNS(F_i) \tag{19}$$

式中: F 为系统失效事件集; F_i 表示失效事件; $P_{rob}(F_i)$ 表示系统故障状态的出现概率; $P\{\bigcup_{F_i \in F} F_i\}$ 表示所有故障系统状态发生概率的总和; $f_{re}(F_i)$ 表示从故障系统状态 F_i 经过一次状态转移就能够穿过边界墙并到达正常系统状态的所有转移频率的总和; $DNS(F_i)$ 表示在故障系统状态 F_i 下,由于输电设备没有充足的容量满足所有负荷需求而引起的电力不足。

当考虑输电线路可靠性数据的不确定性时,每条输电线路的故障率和修复时间用联系数表示,这样,就将输电系统的可靠性评估问题转化成联系数的运算求解问题,利用联系数算法,实现输电系统可靠性的联系数评估。

3.4 算法流出图

通过以上几个部分的分析,可以得出基于联系数的输电系统可靠性评估的算法流程图,见图 1。

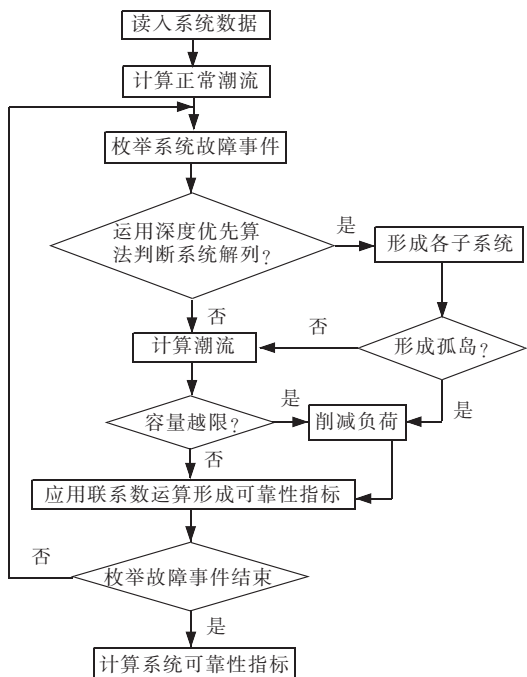


图 1 算法流程图

4 算例分析

根据上述提出模型算法,分别对 IEEE-RBTS^[18]和 IEEE-RTS79^[19] 可靠性测试系统进行可靠性评估,系统状态的选取采用状态枚举法,线路故障考虑到 2 重。

假设 2 个可靠性测试系统的故障率和平均修复时间在文献[18,19]的基础上分别存在 5%的偏差。例如原有强迫停运率为 1.5,平均修复时间为 10 小时,考虑 5%的偏差后,用联系数表示故障率为 $1.5+0.075i$ 、平均修复时间为 $(10+0.5i)$ 小时。

用 MATLAB7 编写程序,分别对 IEEE-RBTS 和 IEEE-RTS79 可靠性测试系统进行可靠性评估,得到可靠性指标如表 1、表 2。

表 1 RBTS 评估结果

可靠性指标	常规评估	联系数评估
$LOLP$	5.327 6e-3	(5.327 6+0.576 2 i)e-3
$LOLE/(h \cdot 年^{-1})$	46.669 6	46.669 6+5.047 7 i
$LOLF/(次 \cdot 年^{-1})$	4.559 3	4.559 3+0.240 6 i
$LOLD/(h \cdot 次^{-1})$	0.236 1	10.236 1+0.538 5 i
$EENS/(MW \cdot h \cdot 年^{-1})$	252.267 3	252.267 3+28.176 4 i

表 2 RTS79 评估结果

可靠性指标	常规评估	联系数评估
$LOLP$	1.887 5e-3	(1.887 5+0.201 8 i)e-3
$LOLE/(h \cdot 年^{-1})$	16.534 9	16.534 9+1.767 3 i
$LOLF/(次 \cdot 年^{-1})$	1.483 3	1.483 3+0.078 2 i
$LOLD/(h \cdot 次^{-1})$	11.147 5	11.147 5+0.573 5 i
$EENS/(MW \cdot h \cdot 年^{-1})$	30.877 8	30.877 8+6.746 3 i

从表 1 和表 2 中可以看出,常规方法评估得到的结果只是联系数方法评估得到结果的确 定部分,即当 $i=0$ 时联系数评估的结果,所以常规评估结果可以认为是联系数评估结果的特殊情况,联系数评估结果包含常规评估结果。

表中联系数评估结果是在考虑故障率和平均修复时间存在 5%的偏差得到,联系数评估的各结果中不确定部分占确定部分的百分比最大为 21.85*i*%,最小为 5.14*i*%,说明可靠性原始数据的不确定性对评估结果的影响明显。

如果原始数据存在更大的偏差,则评估结果的偏差将会更大,所以可靠性原始数据的不确定性在进行可靠性评估时是必须要考虑的因素。

5 结束语

(1) 可靠性原始参数的不确定性是必须要考虑的因素,即使原始参数存在比较小的偏差对评估结

果的影响也是比较明显的。

(2) 原始参数和评估结果的不确定性以联系数的形式表示,这是很有意义的。一方面是根据工程需要,对不确定性有确定的度量,以表示不确定性的大小;另一方面,系统中的不确定性通常不是静止的,而是动态的,通过调整的不同取值可以体现出不确定性的动态波动。

(3) 用联系数处理原始参数的不确定性,不需要已知原始参数服从的概率分布(一般都是人为设定),并且可以保持数据的完整性。这是联系数评估相对其他评估的明显优势,从而可以减少人为主观因素的影响,使评估结果更客观。

参考文献:

- [1] 张鹏,王守相. 电力系统可靠性经济评估的区间分析方法[J]. 中国电机工程学报,2004,24(2):71-77.
- [2] 宋云亭,郭永基,程林. 大规模发输电系统充裕度评估的蒙特卡罗仿真[J]. 电网技术,2003,27(8):24-28.
- [3] 丁明,张瑞华. 发输电组合系统可靠性评估的蒙特卡罗模拟[J]. 电网技术,2000,24(3):9-12.
- [4] 程林,郭永基. 发输电系统充裕度和安全性算法研究[J]. 电力系统自动化,2001,25(19):23-26,57.
- [5] 别朝红,王锡凡. 蒙特卡洛法在评估电力系统可靠性中的应用[J]. 电力系统自动化,1997,21(6):68-75.
- [6] ZHANG W,BILLINTOU R. Application of an Adequacy Equivalent Method in Bulk Power System Reliability Evaluation[J]. IEEE Trans. on Power Systems,1998,13(2):661-666.
- [7] 吴开贵,王韶,张安邦,等. 基于RBF神经网络的电网可靠性评估模型研究[J]. 中国电机工程学报,2000,20(6):9-12.
- [8] BILLINTON R,HAMOUD G. Considerations in Including Uncertainty in LOLE Calculations for Practical System[C]. Proceedings of IEEE PES Winter Meeting, Feb 11,15-18, 1999, New York, NY, USA:67-73.
- [9] KIM J O,SINGH C. Including Uncertainty in LOLE Calculation Using Fuzzy Set Theory[J]. IEEE Trans on Power Systems,2002,17(1):19-25.
- [10] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州:浙江科技出版社,2000.
- [11] 赵克勤,宜爱理. 集对论——一种新的不确定性理论方法与应用[J]. 系统工程,1996,14(1):18-23.
- [12] 赵克勤. 联系数及其应用[J]. 吉林师范学院学报. 1996,17(8):50-53.
- [13] 赵克勤. 集对分析(SPA)中的联系数与不确定量[J]. 大自然探索,1997,16(2):91-91.
- [14] 吴开贵,吴中福. 基于灵敏度分析的电网可靠性算法[J]. 中国电机工程学报,2003,23(4):53-56.
- [15] 张硕,李庚银,周明. 基于序贯蒙特卡罗仿真的发输电系统充裕度评估算法[J]. 中国电力,2009,42(7):10-14.
- [16] 宋晓通,谭震宇. 大型发输电组合系统可靠性评估方法[J]. 高电压技术,2007,33(7):191-194.
- [17] BILLINTON R. Incorporation of Weather Effect in Transmission System Models for Composite System Adequacy Evaluation[J]. IEE PROC,1986,133(6):319-327.
- [18] BILLINTON R,KUMAR S,CHOWDHURY N,et al. A Reliability Test system for Educational Purposes-Basic Data[J]. IEEE Transaction on Power System,1989,4(3):1238-1244.
- [19] A Report Prepared by the Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee. IEEE Reliability Test System[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1979, PAS-98(6):2047-2054.

作者简介:

王磊(1985-),男,天津人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制;
张明文(1963-),男,河北人,高级工程师,主要从事电力经济研究工作。

Reliability Evaluation of Transmission System Based on Connection Number

WANG Lei¹, ZHANG Ming-wen²

(1. North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Hebei Electric Power Corporation, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Traditional reliability evaluation of transmission systems use fixed value to evaluate reliability, but part of the reliability date is usually uncertain because of the impact of objective conditions, which will inevitably lead to inaccuracy of the evaluation. In this paper, a new method based on the theory of connection number and reliability evaluation of transmission systems is presented for evaluating reliability of transmission systems. The method expresses reliability parameters in connection number. The connection number theory is applied to deal with various uncertainties of reliability parameters to calculate the connection number indices with certainty and uncertainty. The method can reflect the influence of original parameters' uncertainty on reliability indices. which give a more refined degree of truth of system reliability. Analyzing results on IEEE-RBTS and IEEE-RTS79 show the rationality and effectiveness of the approach.

Key words: connection number; transmission systems; reliability evaluation; depth priority algorithm; minimum load-shedding