

孤立发电系统的可靠性区间评估

苏慧玲, 王淳

(南昌大学信息工程学院, 江西 南昌 330029)

摘要: 考虑发电系统原始参数具有不确定性, 结合概率论和区间运算概念, 提出了一种孤立发电系统的可靠性区间评估方法。它不但可以处理可靠性原始参数的不确定性对发电系统可靠性指标的影响, 还可以求出参数在一定范围内变化时的系统可靠性指标区间值, 更能体现出系统可靠性的真实性。最后采用一个三机的算例对所提方法的正确性进行了验证, 并对采用点值与采用区间数得到的发电系统可靠性评估结果进行了对比分析, 进一步说明了该方法的有效性。

关键词: 孤立发电系统; 区间分析; 可靠性评估

An interval approach for evaluating isolated generating system reliability

SU Hui-ling, WANG Chun

(School of Information Engineering, Nanchang University, Nanchang 330029, China)

Abstract: Based on the description of the uncertainty of prime parameters about generation system using probabilistic method and interval operation, an interval evaluation method, which can take into account the uncertainty of the parameters and is able to give all possible solutions, is presented for evaluating isolated generating system reliability. The effectiveness of this method has been proved using a test example. And the comparison between point evaluation and interval evaluation is made as well.

Key words: isolated generating system; interval analysis; reliability evaluation

中图分类号: TM715

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)08-0027-04

0 引言

衡量发电系统可靠性的方法主要有两种: 确定性方法和概率方法^[1]。确定性方法主要根据长期积累的发电系统可靠性资料、负荷预测资料和电源配置以及规划设计人员的经验, 采用最大负荷的百分数备用法来确定系统的装机容量, 没有计及机组及负荷的特性, 比较粗糙。概率方法采用电力不足概率、电力不足频率和持续时间等定量指标对发电系统可靠性进行描述, 考虑了机组停运及负荷变化等的随机性, 与确定性方法相比, 是一个从定性到定量的跃变。但概率法无法计及可靠性原始数据的不确定性对发电系统可靠性的影响, 有可能与将来的实际情况存在较大的偏差。实际工作中, 原始参数可能会因为统计资料不足或统计误差以及对电网未来运行环境预测不足而具有不确定性^[2, 3]。此外, 电力设备的可靠性基础数据是通过现场运行记录的统计加工得到的, 是一平均值, 可能在某一范围内波动。若利用不准确的点值对电力系统进行可靠性

定量评估, 给出一确切值, 显然是不合理的。此时, 采用区间数对原始数据所处的范围进行描述并利用区间数学求得该问题未知解的界限是比较恰当的^[3]。因此采用区间数进行发电系统可靠性评估更加符合实际。

文献[4, 5]与文献[6]分别提出了采用区间分析法进行配电系统可靠性评估与电气主接线可靠性评估。本文结合区间运算和发电系统概率分析方法, 探讨了一种基于区间分析的孤立发电系统可靠性评估方法。该方法将可靠性原始参数采用区间数表示, 在此基础上进行发电系统可靠性评估。以下凡区间数和区间值公式都加方括号以示区别。

1 区间数与区间运算

在进行区间数运算时, 对于给定数对, x_{dn} , $x_{up} \in R$, R 为实数域, 若满足条件 $x_{dn} < x_{up}$, 则可定义一个区间数集合为

$$[X] = [x_{dn}, x_{up}] = \{x \in R \mid x_{dn} \leq x \leq x_{up}\} \quad (1)$$

式中: x_{dn} , x_{up} 分别为区间数 X 的上、下端点。当 $x_{dn} = x_{up}$

时, 该区间数为点区间数。

将实数域 R 上所有有界闭区间数的集合记为 $I(R)$ 。给定区间数 $[X]=[x_{dn}, x_{up}]$ 和 $[Y]=[y_{dn}, y_{up}] \in I(R)$, 则区间四则运算规则为

$$[X]+[Y]=[x_{dn}+y_{dn}, x_{up}+y_{up}] \quad (2)$$

$$[X]-[Y]=[x_{dn}-y_{up}, x_{up}-y_{dn}] \quad (3)$$

$$[X] \cdot [Y]=[\min(x_{dn}y_{dn}, x_{dn}y_{up}, x_{up}y_{dn}, x_{up}y_{up}), \max(x_{dn}y_{dn}, x_{dn}y_{up}, x_{up}y_{dn}, x_{up}y_{up})] \quad (4)$$

$$[X]/[Y]=[x_{dn}, y_{up}] \cdot [1/y_{up}, 1/y_{dn}], \text{ 若 } 0 \notin Y \quad (5)$$

2 孤立发电系统可靠性区间评估

孤立发电系统可靠性区间评估流程如图 1 所示。发电系统是由发电机组和负荷构成的, 因此将发电机组可靠性模型和系统负荷可靠性模型相结合形成适当的风险模型后, 即可计算出系列可靠性指标。文献[7]采用发电机组的停运表表示发电机组的可靠性模型, 本文在此基础上将原始可靠性数据用区间表示, 并采用停运表的形式建立发电机组的区间停运表。用负荷停运表表示各负荷功率出现的概率和频率, 然后将负荷停运表与发电系统区间停运表用并联组合公式进行合并, 形成发电系统区间裕度表, 并进行发电系统可靠性区间评估。

孤立发电系统可靠性区间评估的计算公式在形式上与点值评估的计算公式相同^[8], 所不同的是, 在区间评估计算公式中, 变量都是区间数, 所进行的运算都是区间运算。以下给出发电系统可靠性区间评估的计算公式。

(1) 建立发电机组停运表: 设一台发电机组的可用容量为 C_i , 强迫停运率为 $[q_i]$, 修复时间为 $[r_i]$, 则可以按式(6)计算得到用区间数表示的发电机组停运表。其中, \bar{X} 、 P 、 P^* 、 f 及 F^* 分别表示发电机组停运容量、确切概率、累计概率、增量频率及累积频率。

$$\begin{cases} [P(\bar{X})] = 1 - [q_i] \\ [P(\bar{X} = C_i)] = [q_i] \\ [P^*(\bar{X} = 0)] = 1 \\ [P^*(\bar{X} = C_i)] = [q_i] \\ [f(\bar{X} = 0)] = -[q_i]/[r_i] \\ [f(\bar{X} = C_i)] = [q_i]/[r_i] \\ [F^*(\bar{X} = 0)] = 0 \\ [F^*(\bar{X} = C_i)] = [q_i]/[r_i] \end{cases} \quad (6)$$

(2) 建立电力负荷的可靠性模型: 从电力平衡

观点考虑, 负荷可以看作负的发电机组容量, 因此也采用停运表的形式给出各负荷功率出现的概率和频率。

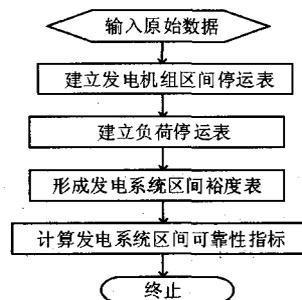


图 1 发电系统可靠性区间评估框图
Fig.1 Flow chart of generating reliability interval evaluation

(3) 发电系统裕度表的形成: 发电系统可靠性的分析计算涉及发电机组之间及发电机组与负荷的并联组合。两个元件并联组合时, 组合元件的停运容量等于两元件停运容量之和。采用区间数, 组合元件 c 在 \bar{X}_k 的确切概率 $[P_c(k)]$, 累积概率 $[P_c^*(k)]$, 增量频率 $[f_c(m)]$ 以及累积频率 $[F_c^*(k)]$ 计算式可以分别表示为

$$[P_c(k)] = \sum_{i=0}^{n_k} [P_a(i)] \cdot [P_b(k-i)] \quad (7)$$

$$[P_c^*(k)] = \sum_{i=0}^{n_k} [P_a(i)] [P_b^*(k-i)] \quad (8)$$

$$[f_c(m)] = \sum_{i+j=m} \{ [P_a(i)] [f_b(j)] + [f_a(i)] [P_b(j)] \} \quad (9)$$

$$[F_c^*(k)] = \sum_{i=0}^{n_k} [P_a^*(i)] [F_b^*(k-i)] + \sum_{i=0}^{n_k} [f_a(i)] [P_b^*(k-i)] \quad (10)$$

利用式(7)~(10)就可以由发电机组的区间停运表和负荷的停运表逐步形成整个发电系统的区间裕度表, 并进而可以求出孤立发电系统可靠性区间指标。所得区间指标为一数值范围, 不同于采用概率方法评估发电系统可靠性所得的点值指标。可靠性区间指标可以反映出由原始参数的不确定性所带来的影响。而点值指标仅考虑了机组停运及负荷波动等随机因素, 不能反映参数不确定性所带来的影响。因此, 发电系统可靠性区间评估较采用概率方法进行点值评估能提供更多信息, 对评估发电系统可靠性更具有实际工程意义。

3 算例计算与分析

本文采用文献[9]中的 3 台机组组成的发电系统进行孤立发电系统可靠性区间评估方法的算例分

析。该系统中 3 台机组容量分别为 30、40 和 50MW。为了进行区间评估, 对于发电机组原始数据作如下处理: 假定发电机组的故障率和修复时间在文献[9]的基础上有 50% 的统计误差, 这样得到用区间数表

示的三台发电机组强迫停运率分别为 [0.02, 0.06], [0.03, 0.09], [0.04, 0.12], 平均修复时间均为 [1.901042E+01, 2.851563E+01] 天。该系统最大负荷为 100 MW。具体的负荷曲线见参考文献[9]。

表 1 40 MW 发电机组的区间停运表

Tab.1 Outage chart of 40MW generator

序号	停运容量/MW	累积概率	累积频率	确切概率
0	0	[1.000000E-00, 1.000000E-00]	[0.000000E-00, 0.000000E-00]	[9.100000E-01, 9.700000E-01]
1	10	[3.000000E-02, 9.000000E-02]	[1.052055E-03, 4.734247E-03]	[0.000000E-00, 0.000000E-00]
2	20	[3.000000E-02, 9.000000E-02]	[1.052055E-03, 4.734247E-03]	[0.000000E-00, 0.000000E-00]
3	30	[3.000000E-02, 9.000000E-02]	[1.052055E-03, 4.734247E-03]	[0.000000E-00, 0.000000E-00]
4	40	[3.000000E-02, 9.000000E-02]	[1.052055E-03, 4.734247E-03]	[3.000000E-02, 9.000000E-02]

表 2 发电系统的裕度表

Tab.2 Outage chart of generation system

序号	停运容量/MW	累积概率	累积频率	确切概率
0	120	[1.000000E-00, 1.000000E-00]	[0.000000E-00, 0.000000E-00]	[0.000000E-00, 0.000000E-00]
1	110	[1.000000E-00, 1.000000E-00]	[0.000000E-00, 0.000000E-00]	[0.000000E-00, 0.000000E-00]
2	100	[1.000000E-00, 1.000000E-00]	[0.000000E-00, 0.000000E-00]	[0.000000E-00, 0.000000E-00]
3	90	[1.000000E-00, 1.000000E-00]	[0.000000E-00, 0.000000E-00]	[0.000000E-00, 0.000000E-00]
4	80	[1.000000E-00, 1.000000E-00]	[0.000000E-00, 0.000000E-00]	[0.000000E-00, 0.000000E-00]
5	70	[1.000000E-00, 1.000000E-00]	[0.000000E-00, 0.000000E-00]	[3.058267E-02, 3.828867E-02]
6	60	[9.617113E-01, 9.694173E-00]	[7.217999E-01, 9.319556E-01]	[1.529133E-01, 1.914433E-01]
7	50	[7.702680E-01, 8.165040E-01]	[7.245918E-01, 9.325029E-01]	[9.174800E-02, 1.148660E-01]
8	40	[6.554020E-01, 7.247560E-01]	[7.262670E-01, 9.328312E-01]	[1.535807E-01, 1.937713E-01]
9	30	[4.632307E-01, 5.697087E-01]	[2.947026E-00, 3.745914E-00]	[1.878667E-01, 2.449000E-01]
10	20	[2.287307E-01, 3.723087E-01]	[1.507217E-00, 1.992602E-00]	[1.309223E-01, 1.825377E-01]
11	10	[6.633233E-02, 2.226470E-01]	[7.551643E-02, 2.678893E-01]	[1.353700E-02, 4.601900E-02]
12	0	[5.221000E-02, 1.784800E-01]	[1.234903E-01, 4.331473E-01]	[1.345500E-02, 4.610100E-02]
13	-10	[3.791900E-02, 1.350310E-01]	[1.663703E-01, 5.782236E-01]	[1.611200E-02, 5.564600E-02]
14	-20	[2.099033E-02, 8.205100E-02]	[1.875489E-01, 6.438419E-01]	[1.291867E-02, 4.521000E-02]
15	-30	[7.689666E-03, 3.803500E-02]	[7.078703E-02, 2.542044E-01]	[6.114666E-03, 2.319400E-02]
16	-40	[1.565000E-03, 1.493100E-02]	[4.137187E-03, 3.992024E-02]	[4.246667E-04, 4.074000E-03]
17	-50	[1.128333E-03, 1.096500E-02]	[5.222766E-03, 5.007732E-02]	[5.060000E-04, 4.842000E-03]
18	-60	[6.143333E-04, 6.195000E-03]	[6.066392E-03, 5.763284E-02]	[4.083333E-04, 3.945000E-03]
19	-70	[2.060000E-04, 2.250000E-03]	[2.308897E-03, 2.207702E-02]	[1.910000E-04, 1.845000E-03]
20	-80	[1.500000E-05, 4.050000E-04]	[3.083835E-05, 7.119123E-04]	[5.000000E-06, 1.350000E-04]
21	-90	[1.000000E-05, 2.700000E-04]	[1.005589E-04, 2.634608E-03]	[6.000000E-06, 1.620000E-04]
22	-100	[4.000000E-06, 1.080000E-04]	[4.982356E-05, 1.313043E-03]	[4.000000E-06, 1.080000E-04]

表3 发电系统的可靠性区间指标
Tab.3 Reliability interval indices of generation system

系统	电力不足概率	电量不足期望值/MWh	停电频率(次/天)	停电持续时间/h
区间指标	[3.791900E-02, 1.350310E-01]	[1.683400E+01, 6.964920E+01]	[1.663703E-01, 5.782236E-01]	[0.000000E-00, 5.604656E-00]

根据图1所示评估框架图,对算例进行了可靠性区间评估,得到可靠性区间评估计算结果如表1~3所示。表1为采用区间参数所得的容量为40MW机组的区间停运表。表2所示为发电系统裕度表。所得可靠性区间指标如表3所示。计算结果表明:发电机组原始参数在一定误差范围内变化时,累积概率、累积频率等中间指标及最后得到的发电系统可靠性指标均在一定范围内变化,且这些指标仍不失发电系统可靠性评估的物理意义。区间评估能够反映出当参数在一定范围内变化时,可靠性指标变化的区间范围。只要参数变化不超过预定的范围,可靠性指标也不会超过所得的区间。因此,可以不必进行多次点值评估,只需通过一次区间评估就可以求出可靠性参数在任意可能区间段内变化时可靠性指标的范围,减少了计算量,具有一定的理论意义和工程实用价值,且包含的信息量较点值分析法多。

将本文所得到的区间计算结果与文献[9]中的点值计算结果进行了比较,其结果表明,所有点值都落在区间范围内,这也从侧面反映了计算结果的合理性。

此外,本文假定所有参数设置为点区间数时,仍然根据图1所示评估框架图,对算例进行了可靠性区间评估,所得系统可靠性指标与文献[9]完全一致,表明区间分析不仅能够反映可靠性原始参数的不确定造成的可靠性指标精确变动范围,而且具备概率分析法的优点,能够处理固定原始参数下的可靠性评估,得到点值可靠性评估指标。因此,区间分析评估法可同时用于点值可靠性指标与区间可靠性指标的计算。

4 结论

1)孤立发电系统可靠性区间评估方法建立在区间运算和概率方法的基础上,考虑了电力负荷的随机波动、发电机组的随机停运情况,及对设备的运行状况无法准确预测,统计数据的不完全与统计误差等多种因素。

2)该方法可以方便地求解出发电系统可靠性原始参数在任意可能区间内变化时的指标范围,从而更全面真实地反映了系统的可靠性。

3)该方法只需通过一次区间评估就可以方便地

计算发电系统可靠性指标变化区间段,计算速度快,且包含信息量大,更具有工程实用价值。

参考文献

- [1] 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. Power System Reliability Analysis[M]. Beijing: Tingshua University Press,2003.
- [2] 肖俊,罗凤章,等.一种基于区间分析的电网规划项目决策方法[J].2004,28(7):62-67.
XIAO Jun,LUO Feng-zhang,et al. An Interval-based Method for Evaluation and Decision-making of Power System Planning Projects[J]. Power System Technology, 2004, 28(7):62-67.
- [3] 王成山,王守相.基于区间算法的配电网三相潮流计算及算例分析[J].中国电机工程学报.2002,22(3):58-62.
WANG Cheng-shan,WANG Shou-xiang. Distribution Three-phase Power Flow Based on Interval Algorithm and Test Result[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3):58-62.
- [4] 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.
- [5] 任震,万官泉,等.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.
REN Zhen,WAN Guan-quan. An Interval Approach to Evaluate Distribution System Reliability with Parameters Uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 23(12): 68-73.
- [6] 张鹏,郭永基.电气主接线可靠性评估的区间方法[J].电力系统自动化,2004,28(19):48-52.
ZHANG Peng,GUO Yong-ji. Interval Method for Power Station and Substation Reliability Evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004,28(19): 48-52.
- [7] 杨蔚百.发电系统可靠性分析原理和方法[M].北京:水利电力出版社,1985.
YANG Shi-bai. The Theory and Method on Reliability Andlysis of Generation System[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1985.

(下转第40页 continued on page 40)

网络强, EMD-LSSVM 组合预测的能力最强。

这是因为 EMD 将非平稳的原始负荷序列分解为一系列平稳的具有一定规律的单一分量, 跟原始负荷序列相比, 这些分量更容易预测; 其次, 与传统的神经网络方法相比, 支持向量机不是以经验风险最小化为原则, 而是建立在结构风险最小化原理基础上, 通过调整常数, 使误差尽可能的小的同时, 使回归函数尽可能地平滑, 因此, 它具有更强的泛化能力。

4 结论

电力负荷是一个非平稳信号, 运用 EMD 对其平稳化处理, 能得到一系列的不同频率的平稳分量, 这些分量更能准确地反映原负荷的特征信息。根据这些分量的变化规律建立不同的 LS-SVM 子模型, 最后通过对子模型预测结果进行相加得到最终预测结果。试验仿真结果表明, 此方法运算速度快, 精度高, 泛化能力强, 是一种行之有效的预测方法。

参考文献

- [1] Moghram I, Rahman S. Analysis and Evaluation of Five Short-term Load Forecasting Techniques[J]. IEEE Trans Power Systems, 1989, 14 (4): 1484-1491
- [2] Huang S J, Shih K R. Short-term Load Forecasting Via ARMA Model Identification Including Non-Gaussian Process Considerations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(2): 673-679.
- [3] Saini L M, Soni M K. Artificial Neural Network-based Peak Load Forecasting Using Conjugate Gradient Methods [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 12 (3): 907-912.
- [4] Hippert H S, Pedreira C E, Souza R C. Neural Networks for Short-term Load Forecasting: a Review and Evaluation [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2001, 16(1): 44-55.
- [5] Kim K H, Youn H S, Kang Y C. Short-term Load Forecasting for Special Days in Anomalous Load Conditions Using Neural Networks and Fuzzy Inference Method [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 559-565.
- [6] Rocha Reis A J, da Silva A P. Feature Extraction via Multiresolution Analysis for Short-term Load Forecasting[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(1): 189-198.
- [7] 杨延西, 刘丁. 基于小波变换和最小二乘支持向量机的短期电力负荷预测[J]. 电网技术, 2005, 29(13): 60-63.
YANG Yan-xi, LIU Ding. Short-term Load Forecasting Based on Wavelet Transform and Least Square Support Vector Machines[J]. Power System Technology, 2005, 29(13): 60-63.
- [8] Huang N E, Shen Z, Long S R. The Empirical Mode Decomposition and The Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis[J]. Proc R Soc London A, 1998, 454: 903-99.
- [9] 李天云, 赵妍, 李楠. 基于 EMD 的 Hilbert 变换应用于暂态信号分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 29(4): 49-51.
LI Tian-yu, ZHAO Yan, LI Nan. Apply Empirical Mode Decomposition Based Hilbert Transform to Power System Transient signal Analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 29(4): 49-51.
- [10] Vapnik V N. The Nature of Statistical Learning Theory [M]. New York: Springer Verlag, 1999.
- [11] Suykens J A K, Vande walle J. Least Squares Support Vector Machine Classifiers[J]. Neural Processing Letters, 1999, 9(3): 293-300.
- [12] Vapnik V N, Golowich S E, Smola A J. Support Vector Method for Function Approximation, Regression Estimation and Signal Processing[J]. Adv Neural Information Processing Systems, 1996, 281-287.

收稿日期: 2006-07-26

作者简介:

祝志慧 (1975-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为现代信号处理在电力系统中的应用; E-mail: zzhlsx@sohu.com

孙云莲 (1963-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事信号处理研究。

Planning[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003.

收稿日期: 2006-07-02; 修回日期: 2007-03-14

作者简介:

苏慧玲 (1983-), 女, 硕士研究生, 从事电力系统规划与可靠性方面的研究; E-mail: suhuil@163.com

王淳 (1963-), 男, 博士, 副教授, 从事电力系统规划、可靠性与电力市场方面的研究。

(上接第 30 页 continued from page 30)

- [8] 雷秀仁, 任震, 等. 电力系统可靠性评估的不确定性数学模型探讨[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(11): 1-4.
LEI Xiu-ren, REN Zhen, et al. Study on Uncertainty Math Models of Power System Reliability Evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(11): 1-4.
- [9] 王锡凡. 电力系统规划基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
WANG Xi-fan. The Basis Knowledge of Power System