基于贝叶斯网络计及元件联合故障的电力系统可靠性评估

基于贝叶斯网络，将系统元件的联合故障模型引入到网络建模过程中，建立了计及元件故障间联合概率分布的贝叶斯网络模型。采用贝叶斯推理得到系统各元件故障状态及其概率分布，并将其应用到电力系统可靠性评估中，改进了以往贝叶斯网络可靠性评估方法未考虑对系统可靠性指标影响较大的元件故障间关联的不足。在求解故障后潮流时，采用最优潮流（OPF）算法来计算优化后切负荷量，提高了计算的准确度，进一步算得指标，评估得到系统可靠性水平。IEEE－RTS24测试系统算例分析，验证了方法的正确性和有效性。

郭屹全　方　勇　詹红霞／西华大学电气与电子信息学院

郭屹全／硕士研究生

关键词／Keywords
贝叶斯网络·
联合故障·
电力系统可靠性·
最优潮流·

电力作为清洁和方便的二次能源，在推进社会进步，提高人民生活质量方面发挥着越来越重要的作用[1]。当前电网已进入大规模跨区域、超高压混合交直流输电发展阶段，大停电事故造成的社会经济损失越来越大，有关电力系统运行可靠性的研究也就备受重视。系统的可靠性分为充裕性（adequacy）和安全性（security），当前电力系统可靠性研究主要集中在充裕性方面[2]。

电力系统可靠性研究的目的是为系统决策者提供概率指标依据，从而评估系统容量满足总负荷的充裕性情况。目前电力系统可靠性评估主要分为确定性方法[3]和概率性方法[4]两大类，其中最常用的概率性评估方法包括解析法[5]和蒙特卡洛法[6]，这两种方法在分析系统可靠性时各有优点、缺陷以及适用范围。但这些方法在定量评估得到系统可靠性指标时，都不能有效识别系统拓扑内对可靠性影响较大的环节。因此，一些学者考虑结合贝叶斯网络[7-8]的不确定性推理特性，利用其网络拓扑与系统物理结构相似的特点来评估电网可靠性。文献[9]提出将贝叶斯网络推理算法和时序模拟法相结合用于电力系统可靠性评估，改进了与时间相关的可靠性指标；文献[10]参照系统物理结构，利用故障树和最小割集法建立贝叶斯网络模型，并将其应用到小型复合系统的可靠性评估；文献[11]利用贝叶斯网络学习参数数据的能力，搭建了可区分系统元件重要度的网络模型，为从不同负荷点来识别元件的重要程度提供了可能性。但这些方法在建立贝叶斯网络模型时都没有考虑元件的联合故障分布，而系统元件的联合故障通常对可靠性指标有较大影响。

系统元件联合故障事件发生的概率较小，但是造成的负荷削减以及停电损失后果往往很大，所以在分析时不能忽略。针对以往贝叶斯网络方法应用到电力系统可靠性分析研究时未考虑元件联合故障的影响，基于贝叶斯网络，在可靠性评估过程中建立了计及元件联合故障的贝叶斯网络模型。在故障后果分析计算中利用最优潮流（OPF）的数学模型，采用优化潮流算法并结合推理得到的故障状态和概率对该模型进行求解，所得结果更为准确可靠。最后，以IEEE－RTS24节点系统为例，通过枚举单重故障和联合故障事件，对系统故障后果进行分析，并与其他方法对比得到

西华大学重点科研基金项目（Z1220935）。

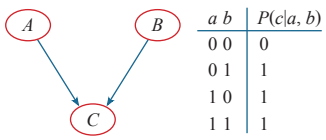
中国知网 https://www.cnki.net

系统的可靠性水平。

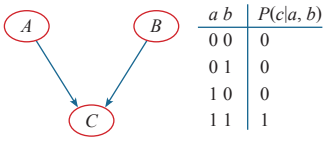
贝叶斯网络概述

贝叶斯网络是一种能够有效处理不确定性信息和推断理论的概率图形化网络模型，由网络结构和变量参数两部分构成[11]。网络中节点代表随机变量，节点间连线表示变量间的条件概率关系，连线方向代表这些变量的因果影响关系。在一个贝叶斯网络模型中有关变量A和B的条件概率分布$P(B/A_1，\cdots，A_n)$通常用来定量分析变量A对变量B影响作用的大小，其中节点A_i是节点B的父节点，节点B为每一个节点A_i的子节点。

贝叶斯网络建模时常用逻辑“或”节点和逻辑“与”节点两个模型，如图1所示。对于一个简单电网，可利用这两个逻辑关系模型参照系统物理拓扑架构，通过串并联直接搭建贝叶斯网络。图1中，假设节点变量A和B为系统的实际元件，则节点变量C为两元件组成的系统节点，此时就可以把它看成一个简单系统。其对应的变量a、b和c表示节点变量的具体取值（其中，0代表正常，1代表故障）。



（a）“或”节点



（b）“与”节点

图1 “与”、“或”节点模型

利用上述节点模型搭建评估系统的完整贝叶斯网络，可对该网络完成各种诊断推理、辩解推理和因果推理。其中贝叶斯推理方法具体可分为两类：一类是基于搜索或仿真的近似推理算法；另一类是准确推理算法，如连接树（Junction Tree Propagation）算法、桶排除（Bucket Elimination）算法[12]等。已知网络的拓扑结构和节点模型的条件概率分布，就可以得到系统的联合概率分布，进一步可算得表征系统可靠性的概率指标。

贝叶斯网络元件的联合故障概念

由于贝叶斯独特的双向推理能力以及可直观图形表达可靠性网络的优势，贝叶斯技术在可靠性方面的应用日益受到重视，目前最常用的有基于故障树法[13]和最小状态割集法[14]所建立的评估模型。为了计及到系统内各元件的故障状态间影响，同时也为了避免以上两种方法求解最小割集不交化的复杂计算过程，将系统元件的联合故障分布引入到贝叶斯网络建模中，提出了一种新的可靠性贝叶斯建模方法。

电网中某一元件故障通常会引起其相关元件的停运，从而对系统安全稳定运行造成严重影响，因此在可靠性评估的贝叶斯建模时要考虑联合故障事件的存在。故障元件联合概率分布的数学描述为：假设随机事件X和Y发生的概率分别为$P(X)$和$P(Y)$，则联合分布概率为

$$P(XY)=P(Y|X)P(X)=P(X|Y)P(Y) \quad (1)$$

由于贝叶斯网络能很好地表示变量的随机不确定性和相关性，非常适合联合概率分布事件的分析。

可靠性指标和系统的可靠性评估模型

1. 可靠性指标

1）切负荷概率LoLP（Loss of Load Probability）。LoLP指系统在各种干扰和故障情况下会发生切负荷行为的概率，其计算公式为

$$\mathrm{LoLP}=\sum_{i\in S}p_i \quad (2)$$

式中，S为系统全部会造成负荷削减的故障状态的集合；p_i为系统处于故障状态i的概率。

2）停电功率期望值EDNS（Expected Demand Not Supplied）。EDNS表示系统所有故障状态下停电功率的期望值，单位为MW，其计算为

$$\mathrm{EDNS}=\sum_{i\in S}C_i p_i \quad (3)$$

式中，C_i为系统状态i时对应的切负荷量。

3）电量不足期望值EENS（Expected Energy

中国知网 https://www.cnki.net

Not Supplied）。EENS为在指定研究时段内（通常指全年）系统电量不足的期望值，单位为MW·h/a，计算公式为

$$\mathrm{EENS}=\sum_{i\in S}D_iC_ip_i=\sum_{i\in S}8\,760C_ip_i \qquad (4)$$

式中，D_i为研究时段内故障状态i的持续时间；p_i为系统处于状态i的概率；C_i为状态i对应的切负荷量。

由于EENS是能量指标，对于进行可靠性经济评估、最优可靠性及系统规划等均具有重要意义，因此EENS是系统整体可靠性评估中非常重要的指标。

2. 系统的可靠性评估模型

基于美国匹兹堡大学（Pittsburghp）研制的GeNIe软件，在C++软件平台中通过编制程序，自动生成GeNIe软件可以打开的DSL格式文件（GeNIe软件中用于存放节点间连接关系和各节点条件概率表的格式文件），运行GeNIe即得可视化的贝叶斯网络，利用软件中内嵌的贝叶斯推理算法推理即得到系统各故障状态以及处于该状态下的概率分布。

（1）可靠性评估的贝叶斯网络模型

图2中，节点变量L_1，L_2，…，L_{38}为IEEE－RTS24节点测试系统[15]的38条支路元件，L_1L_2，L_1L_3，…，$L_{37}L_{38}$是这38条支路元件两两对应的网络联合分布节点，共703个，所有节点变量都包含0和1两个状态（0代表正常，1代表故障）。其中，支路节点变量的故障率和正常工作概率可从相关文献中查到，对于中间节点变量L_1L_2，当且仅当L_1、L_2两个子节点都故障（即取值为1）时，才取值为1，系统完整的贝叶斯网络如图2所示。

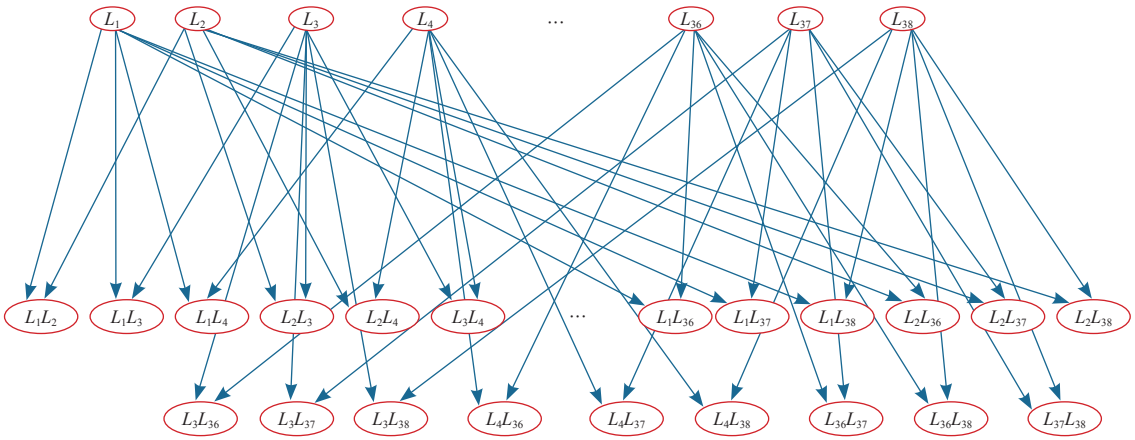


图2　计及元件联合故障的贝叶斯网络模型

（2）系统的状态评估模型

文献[16]中为方便计算，基于线性规划潮流算法，采用直流潮流模型，建立了最小切负荷的状态评估模型；但由于其未考虑无功和电压之间的关系，评估结果相对不够准确。针对上述贝叶斯推理得到的状态结果，在可靠性评估建模时采用交流潮流模型，建立了一个满足功率平衡，节点电压约束以及线路容量约束等条件的最优潮流模型，并采用优化算法算得故障状态下的切负荷量以及系统可靠性指标。

采用OPF来计算切负荷，比采用直流法明显提高了计算准确度，并提高了指标的准确性。最优潮流算法求解模型具体过程将在下文中进行阐述。

系统的可靠性评估流程

基于上述通过贝叶斯网络建模得到的系统联合故障状态和概率，并枚举单重故障事件，编制了系统状态评估模型的Matlab可靠性评估程序。在求解优化潮流时，采用迭代次数较少的原始－对偶内点法[17-18]来计算故障下的切负荷量。计算过程流程图如图3所示。

算例分析

应用上述编制的Matlab可靠性评估程序，对

中国知网 https://www.cnki.net

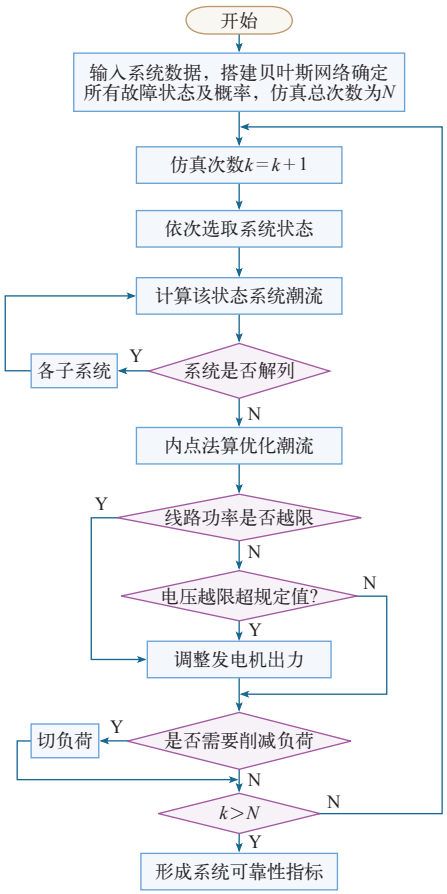


图3 可靠性评估流程图

IEEE－RTS24节点测试系统进行仿真计算，算得了可表征电力系统可靠性水平的几个常用指标。计算时，枚举了单重故障事件38个，联合故障事件数703个，共741个评估状态。

IEEE－RTS24节点测试系统是电力系统可靠性评估研究常用的一个24节点系统，该测试系统网络拓扑包含38条输电线路、32台发电机、5台变压器和17个负荷点，系统总装机容量为3 405 MW，系统年最大负荷为2 850 MW。该节点系统的参数详见参考文献[15]。

利用本文贝叶斯网络建模方法，并经过优化潮流计算后的各故障状态下切负荷情况如表1所示。由表1可知，该测试系统基本满足可靠性的$N-1$准则，切负荷事件主要是由元件的联合故障引起的，其比例高达96.9%。

表1 系统的切负荷情况

故障信息	切负荷个数	所占比例（%）
单支路	3	3.1
联合故障	94	96.9
总切负荷个数	97	100

可靠性指标以及与其他文献方法计算结果比较如表2所示。

表2 系统可靠性指标计算结果比较

可靠性指标	本文数值	文献[16]方法
LoLP	0.130 92	0.084 64
EDNS/MW	21.710 16	14.595 86
EENS/(10^4kW·h/a)	19 018.100 21	12 785.973 36

从表2中可以看出，所得出的指标数值对比文献[16]结果略大。这是因为文献[16]中采用模拟抽样的方法来确定系统状态，由于可能会发生负荷削减的状态在总的模拟次数中出现次数很少，因此指标数值也会较小。而所有仿真都基于元件故障行为，计算的是枚举到的单重故障事件和联合故障事件下系统可能会切负荷的情况。另外，本文在计算中还考虑了节点电压约束，故算得的切负荷量以及概率指标会相对较大。由于每次计算的切负荷量会有差别，因此最后累计得出的系统电量不足期望就会相差较大。

图4为通过观察优化潮流计算过程的收敛趋势，挑选两种故障情形下的收敛曲线所绘制的图形。

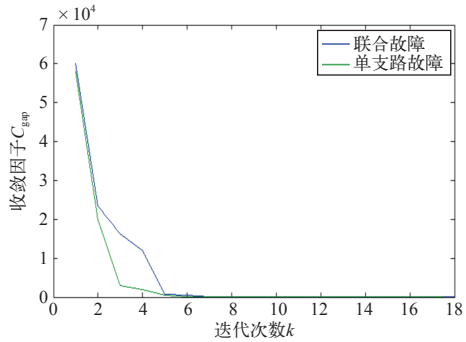


图4 优化潮流计算过程收敛曲线

由图4可知，内点法计算在迭代前期收敛很快，最终两条曲线在迭代十几次后就已经达到准确度要求，因此有效节省了仿真时间（准确度ε取10^{-5}）。

结束语

研究了电力系统中计及联合故障的贝叶斯可靠性评估，针对以往贝叶斯网络法未考虑元件联

中国知网 https://www.cnki.net

合故障对可靠性指标影响的不足，对其进行了改进。在建模时考虑了元件的联合故障事件，建立了系统的贝叶斯网络评估模型，所得模型更为准确可靠。在潮流计算过程建立了交流潮流模型，采用OPF算法来计算故障后切负荷量从而算得可靠性指标，比起直流法提高了计算准确度，同时并未带来太大的计算代价。算例系统分析表明，本文方法是切实可行的，同时也为贝叶斯网络法在电力系统可靠性评估中的应用研究提供了新思路。

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．

[2] 鲍晓慧，侯慧．电力系统可靠性评估述评 [J]．武汉大学学报，2008，41 (4)：96-101．

[3] 赵霞，周家启，胡小正，等．暂态稳定性分析中的确定性方法和概率性方法 [J]．电力系统自动化，2006，30 (6)：100-103．

[4] 赵阳，李华强，王伊渺，等．基于复杂网络理论和条件概率的灾难性事故风险评估方法 [J]．电网技术，2013，37 (11)：3190-3196．

[5] 赵渊，谢开贵．电网可靠性指标概率密度分布的解析计算模型 [J]．中国电机工程学报，2011，31 (4)：31-38．

[6] Celli G，Ghiani E，Soma G G，et al．Active distribution network reliability assessment with a pseudo sequential Monte Carlo method [C]．PowerTech，2011 IEEE Trondheim，IEEE，2011：1-8．

[7] Ebrahimi A，Daemi T．A novel method for constructing the Bayesian Network for detailed reliability assessment of power systems [C]．International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems，IEEE，2009：1-6．

[8] 雷娜，周渝慧，王蓉蓉．贝叶斯网络的复杂配电网可靠性评估 [J]．电力系统及其自动化学报，2009，21 (1)：108-112．

[9] 霍利民，朱永利，张立国，等．用于电力系统可靠性评估的贝叶斯网络时序模拟推理算法 [J]．电工技术学报，2008，23 (6)：89-95．

[10] Zhao S，Wang H，Cheng D．Power distribution system reliability evaluation by D–S evidence inference and Bayesian Network method [C]．International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS 2010)，Singapore，2010：654-658．

[11] Daemi T，Ebrahimi A，Fotuhi-Firuzabad M．Constructing the Bayesian Network for components reliability importance ranking in composite power systems [J]．Electrical Power and Energy Systems，2012 (43)：474-480．

[12] Dechter R．Bucket elimination：a unifying framework for probabilistic inference [C]．Proceedings of Twelfth Conference on Uncertency in AI，San Francisco，Morgan Kaufmann，1996：211-219．

[13] Ebrahimi A，Daemi T．Considering the rare events in construction of the Bayesian Network associated with power systems [C]．International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS 2010)，Singapore，2010：659-663．

[14] 霍利民，朱永利，张在玲，等．贝叶斯网络在配电系统可靠性评估中的应用 [J]．电工技术学报，2004，19 (8)：113-118．

[15] Reliability Test System Task Force．IEEE reliability test system [J]．IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems，1999，14 (3)：1010-1020．

[16] 石文辉，别朝红，王锡凡．大型电力系统可靠性评估中的马尔可夫链蒙特卡洛方法 [J]．中国电机工程学报，2008，28 (4)：9-15．

[17] 李华强，刘亚梅，Yorino N．鞍结分岔与极限诱导分岔的电压稳定性评估 [J]．中国电机工程学报，2005，25 (24)：56-60．

[18] 卫志农，季聪，孙国强，等．含VSC-HVDC的交直流系统内点法最优潮流计算 [J]．中国电机工程学报，2012，32 (19)：89-95，190．

（收稿日期：2015－03－10）EA

中国知网 https://www.cnki.net