

改进贝叶斯网络GO法在高压直流输电系统的可靠性分析

田录林¹, 刘沛盛²

(1. 西安理工大学水利水电学院, 西安 710048; 2. 国网陕西电力公司西安供电公司, 西安 710032)

摘要: 文中针对贝叶斯网络GO法仅适用于简单不可修系统可靠性分析的不足,提出了改进贝叶斯网络GO法。改进算法依据元件之间的相关性和系统运行工况,在贝叶斯网络中构建了串、并联相关性结构等效算法,改进了模型映射流程,使之适应复杂可修高压直流输电系统可靠性分析。在建立的高压直流输电系统可靠性模型上应用该方法进行定量计算验证,结果表明:改进贝叶斯网络GO算法是可行的,它仅需多次贝叶斯网络推理就可直接计算等效单元可靠性特征量,无需考虑共有信号问题,省去了复杂的GO运算,还可利用贝叶斯网络寻找系统中可靠性薄弱环节。该方法相比传统GO法具有明显优势。

关键词: GO法; 贝叶斯网络; 可修系统; 高压直流输电; 可靠性分析

Reliability Analysis on HVDC Transmission System Based on Improved Bayesian Networks GO Methodology

TIAN Lulin¹, LIU Peisheng²

(1. College of Water and Electricity Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;
2. State Grid Xi'an Electric Power Supply Company, Xi'an 710032, China)

Abstract: Aimed at the deficiencies of Bayesian network GO methodology, which is only applicable to simple immutable system reliability analysis, an improved Bayesian network GO methodology is proposed in this paper. In order to make it adapt the reliability analysis of complex repairable high-voltage direct current (HVDC) system, the algorithm constructed the equivalent element method of the serial and parallel correlation structure in the Bayesian network and changed the model mapping rules based on the actual operating mode and the correlation of the components. The method is verified by quantitative calculation in the establishment of HVDC system reliability model. The results show that the improved algorithm is feasible, it only needs multiple Bayesian network inference to directly calculate the reliability of the equivalent unit, without taking into account the shared signal and complicated GO operation. Bayesian network can also be used to find the weak link of the system reliability. Compared with the traditional GO methodology, this method has obvious advantages.

Key words: GO methodology; Bayesian network; repairable system; HVDC; reliability

0 引言

高压直流输电(high-voltage direct current, HVDC)输送容量大、输送距离远^[1],对其可靠性要求也更高,因此研究 HVDC 系统的可靠性就很有必要^[2-3]。当前对高压直流输电可靠性分析采用的方法主要

有 Markov 状态空间法^[4]、故障树法^[5]、频率—持续时间法(FD)^[6]等。对于复杂的多状态高压直流输电系统,上述方法均存在维数灾问题,可靠性分析难以得到精确结果。

GO法^[7]是一种以成功为导向的概率分析技术,适用于有多状态和有时序功能变化的复杂直流系统的可靠性分析。文[8]将 GO 法应用于多状态系统

收稿日期:2017-02-08; 修回日期:2017-03-19

基金项目:陕西省科学技术研究计划资助项目(010K733);国家自然科学基金资助项目(51279161, E090604)。

Project Supported by Study Plan of Shaanxi Province Science and Technology(010K733), National Natural Foundation(51279161, E090604).

故障率分析,验证了GO法在多状态复杂系统故障率分析的优势;文[9]将GO法引入特高压直流输电系统的可靠性分析,证明了该方法的有效性。但分析时假设元件相互独立,使精确性降低;文[10-12]在文[9]的基础上考虑了元件相关性对系统的影响,优化了算法。但进行GO运算时,多重共有信号项会使得计算变得复杂繁琐,推理过程也少有成熟软件支持。因此,有必要采取新的推理方法。贝叶斯网络(Bayesian networks, BN)是目前不确定知识表达和推理领域最有效的理论模型^[13-14],其分析能力能够很好地克服GO运算的复杂性。文[15]提出一种基于贝叶斯网络GO法的新算法,它将GO法易于建模和适于评价多状态的特点同贝叶斯网络推理能力相结合,无需考虑共有信号问题,计算可利用贝叶斯网络算法软件工具。但这种算法仅适用于简单的不可修复系统可靠性分析,无法满足复杂直流高压输电系统可靠性分析的要求。为使贝叶斯网络GO法适用于可修高压输电的可靠性评估。该文将HVDC系统中的复杂相关性结构等效为单元节点,进而简化系统模型进行精确推理。根据元件相关性在贝叶斯网络中构建了串、并联结构等效算法,改进了映射规则。最后对建立的高压直流输电系统GO图进行可靠性分析,与传统GO法分析结果比较,验证了该文算法的正确性和快速性。

1 贝叶斯网络GO算法

1.1 GO法的思想

GO法的主要步骤是建立GO图并进行GO运算。GO图由信号流和操作符组成。操作符代表具体的部件或逻辑关系,在GO法中定义了17种操作符^[7]。不同类型的操作符有着不同的作用和运算规则,大致可分为功能操作符和逻辑操作符两类。信号流代表物流(如电流)或是逻辑上的进程。

1.2 贝叶斯网络的思想

贝叶斯网络是由有向无环图和图中各个节点的条件概率表(conditional probability table, CPT)组成的。其中节点代表随机变量,有向边表示节点之间的关联关系,父节点由有向边指向子节点,没有父节点的节点称为根节点,没有子节点的节点称为叶节点。根据节点之间的有向边和节点的CPT可确定整个系统的结构关系,从而由不完全、不精确的给定信息或知识做出推理。

1.3 贝叶斯网络GO法的思想

贝叶斯网络GO法是基于贝叶斯网络对GO图的推理,它通过模型间的映射将GO法和贝叶斯网

络结合起来,推理借助贝叶斯算法软件实现,无需考虑共有信号问题。其可靠性分析流程见图1。

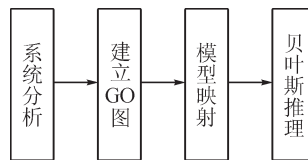


图1 贝叶斯网络GO法可靠性分析过程

Fig. 1 Reliability analysis of Bayesian networks and GO method

1.3.1 系统分析

分析系统,规定范围是建立GO图的前提,只有明确系统的输入、输出信号,确定系统的运行状态才能对系统进行可靠性分析。

1.3.2 建立GO图

GO图就是GO法分析模型。其建模简便,可直接对系统原理图或流程图采用相应的操作符和信号流模拟,通过信号流连接操作符生成GO图,且信号流不允许循环。

1.3.3 模型映射

模型映射为算法的核心部分,为使算法适用于可修高压直流输电系统的可靠性分析,改进贝叶斯网络GO法模型算法也就是改进模型的映射规则。模型映射是根据映射规则将GO图中的操作符映射为贝叶斯网络节点,并按操作符的运算逻辑给出映射节点的条件概率表。节点的CPT表现为操作符输入信号状态 S 、本身状态 C 和输出信号状态 R 之间的关系,根据操作符类型的不同对应的节点条件概率表和映射方式也不同,其映射规则如下:

1)若GO图中操作符为第5类操作符(单信号发生器),则将其映射为贝叶斯网络的根节点;

2)若操作符为逻辑操作符,将其输入信号和输出信号映射至贝叶斯网络并建立相应父子关联关系,即确定有向边;

3)若操作符为功能操作符,则将操作符本身状态映射为贝叶斯网络的根节点并同其输出信号的映射建立父子关联关系;

4)根据操作符的状态概率确定根节点的状态概率分布;

5)根据操作符的运算逻辑给出所有输出信号对应贝叶斯网络子节点的CPT;

6)根据GO图中信号流方向确定节点之间的关联关系;

7)转换算法结束。

1.3.4 贝叶斯网络推理

贝叶斯网络推理就是基于贝叶斯公式对系统

结构关系的分析^[16-17]。贝叶斯网络的双向推理能力在寻找复杂系统的可靠性薄弱环节中有明显优势。当给定系统中某些节点状态作为证据, 就能推出其相关事件的后验概率, 反映了事件对证据的影响程度。

2 建立高压直流输电系统 GO 图

直流输电系统图见图 2。因其设备众多, 关系繁杂, 可优先考虑影响系统运行状态的主要设备, 见图 3, 是一个典型两阀组高压直流输电模型。图 3 中主要包括: 换流站的控制系统(SC₁、SC₂); 交流滤波器组(ACF₁、ACF₂); 换流变压器组(T₁~T₄); 极控制系统

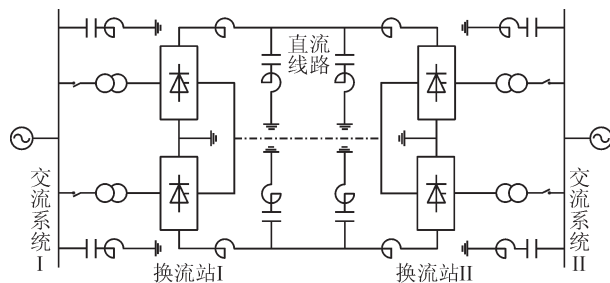


图 2 高压直流输电系统图

Fig. 2 HVDC transmission system

(PC₁~PC₄)、阀组系统(VG₁~VG₄); 直流单极设备部分(DCP₁~DCP₄)以及直流线路单极部分(L₁、L₂)。

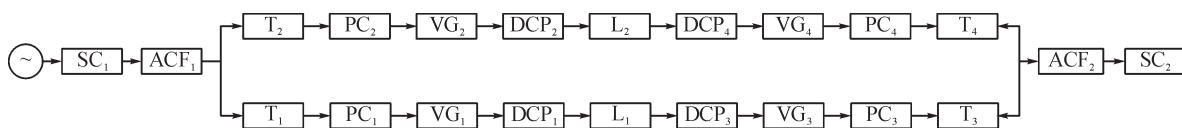


图 3 高压直流输电系统主设备模型

Fig. 3 HVDC system main device model

根据图 3 考虑实际系统运行工况建立 GO 图。直流输电系统有 3 种容量状态: 双极停运(0 容量)、单极运行(50%容量)、双极运行(100% 容量)状态。受端母线可用三状态的概率模型表示为{P₀, P_{0.5}, P₁}，在 GO 图中用类型 3 操作符(触发发生器)模拟。系统中大部分的元件仅具有“工作—故障(1-0)”两种状态, 如: 换流站的控制系统、交流滤波器组、换流变压器组、阀组系统、极控系统和直流单极部分, 则可采用类型 1 操作符(两状态单元)表示。当不考虑

外界故障对系统的影响时, 送端母线可用类型 5 操作符(单信号发生器)来模拟。在一个换流器故障或检修停运时, 同极中的另一个换流器不受影响正常运行, 则这两个换流器在可靠性模型中相当于采用或门连接, 以类型 2 操作符(或门)表示。从而建立 GO 图, 见图 4。GO 图中前面的数字代表操作符类型, 后面的数字代表操作符编号。各操作符的编号、类型、元件名称、及相应的故障率和平均修复时间见表 1^[18]。

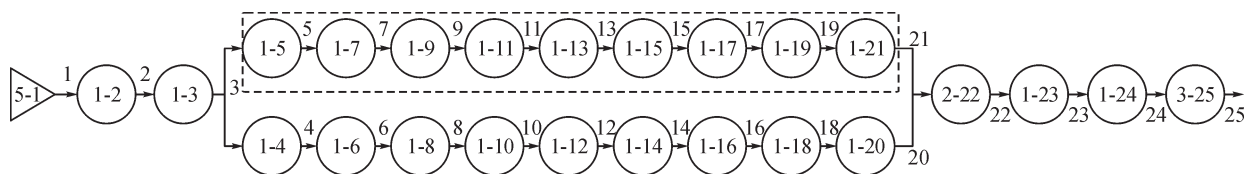


图 4 高压直流输电系统 GO 图

Fig. 4 GO diagram of the HVDC system

根据表 1 给定的各单元可靠性参数和图 4, 采用贝叶斯网络 GO 法就可以求取未考虑相关性的整个高压直流输电系统可靠性指标, 但所得结果准确度不高, 不能满足复杂直流输电系统的可靠性要求。要得到较准确的分析结果, 必须考虑相关性的影响。

3 考虑相关性的贝叶斯网络 GO 算法

3.1 定性分析

可修系统的寿命和修复时间均服从指数分布, 若系统长期连续工作时单元取稳态可靠性特征量,

见以下公式^[19]。

平均无故障工作时间为

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (1)$$

平均维修时间为

$$MTTR = \frac{1}{\mu} \quad (2)$$

式(1)、(2)中: λ 为故障率; μ 为维修率。

平均寿命周期为

$$MCT = MTTR + MTBF \quad (3)$$

稳态可用率(平均工作概率)为

表1 高压直流输电系统操作符可靠性参数

Table 1 Reliability data of operational character of the HVDC system

操作符编号	类型	部件名称	故障率/(次·年 ⁻¹)	平均修复时间/h
1	5	送端母线	0.020	10
2,24	1	控制系统	0.010	5
3,23	1	交流滤波器	0.005	20
4,5,20,21	1	换流变*	0.020	5 600
6,7,18,19	1	极控制	0.070	10
8,9,16,17	1	阀组	1.900	5
10,11,14,15	1	单极设备	0.600	6
12,13	1	单极线路	0.750	1
22	2	或门	—	—
25	1	受端母线	0.020	10

注:*表示一个单相变压器的参数,T₁~T₄换流变压器组中每组均含有3个单相变压器和1个备用变压器。

$$A = \frac{MTBF}{MCT} = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad (4)$$

稳态不可用率(平均停工概率)为

$$\bar{A} = 1 - A = \frac{MTTR}{MCT} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \quad (5)$$

高压直流输电系统单元与单元之间,单元和系统之间存在一定的相关性,这包括停工相关、维修相关、冗余相关及备用相关。结构上可分为串联结构和相同部件的并联结构。对已有贝叶斯网络GO法未考虑相关性而导致可靠性分析准确度不高的问题,该文考虑可将系统中相互联系的元件合并为独立的等效单元,并构建算法求得等效单元的所有可能状态概率,再根据结构的相关性参数判定其成功状态和故障状态。

$$\bar{A} = G_1 / (G_1 + G_2); \quad (6)$$

$$A = G_2 / (G_1 + G_2). \quad (7)$$

式(6)、(7)中: G_1 表示等效单元的故障状态概率; G_2 表示等效单元的成功状态概率。

由式(6)、(7)求取等效单元故障维修概率 $\bar{A}$ 和正常工作概率 A ,从而精确分析可修系统的可靠性。

3.1.1 并联相关性结构分析

相同部件的并联结构的相关性通常较为复杂,需考虑元件备用和冗余相关,即备用元件发生故障和其余元件是否在故障状态有关。图3中高压直流输电系统每侧上的换流变压器组(T₁~T₄),即图4中编号为4、5、20、21的操作符,是由3个单相变压器和1个备用变压器组成的4取3冗余并联结构,其单元间存在停工相关、维修相关、备用相关。换流变压器组的并联结构GO图见图5。

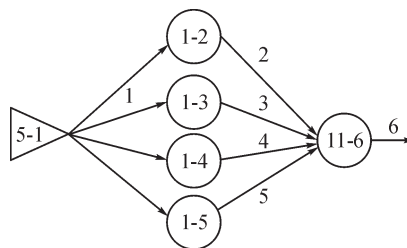


图5 换流变压器组的GO图

Fig. 5 GO diagram of converter transformer unit

并联结构等效单元共有5种可能状态,用 $i(i=0,1,\dots,4)$ 表示状态号,则 P_i 表示当 i 个单元故障,5- i 个单元正常时的系统状态概率。系统稳态时,状态概率 P_i 不变,因此状态 $i-1$ 的故障概率就等于状态 i 的修复概率。根据马尔科夫状态转移矩阵,即当前状态仅决于过去有限个状态值,从而引入状态转移率 a_i, b_i 求解状态概率,则有 $P_{i-1}a_i = P_i b_i$,其中 a_i 为 $i-1$ 个单元故障时的状态故障率, b_i 为 i 个单元故障时的状态修复率。在贝叶斯网络中构建并联结构,见图6,并求解所有状态概率。

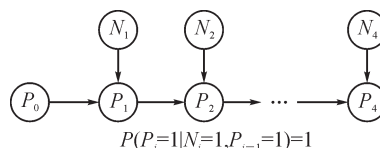


图6 贝叶斯网络中并联结构

Fig. 6 Parallel structure of Bias network

图6中:根节点 N_i 的状态概率为 $\left(\frac{a_i}{b_i}, 1 - \frac{a_i}{b_i}\right)$;成功状态概率 P_0 可由推理得到;其余节点的CPT如图6中所示。而等效单元的 a_i, b_i 取值,成功状态和故障状态,由并联结构的5个参数:单元总数、成功数、停工故障数、维修工数、备用指数确定,见式(8)。

状态转移率为

$$\begin{cases} a_i = \begin{cases} (M-i+1)\lambda & \text{当 } J=0 \text{ 或 } M-i+1 < K \\ K\lambda & \text{当 } J=1 \text{ 或 } M-i+1 \geq K \end{cases} \\ b_i = \begin{cases} i\mu, i \leq L \\ L\mu, i > L \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中,停工状态数主要影响等效单元的故障状态选取范围,而备用指数和维修工数分别决定了状态间转移的故障率和修复率。将结果带入贝叶斯网络推理求解等效单元的故障状态概率和成功状态概率。由式(6)、(7)在MATLAB Bayesian Networks Toolbox (BNT)中编写并联相关性结构算法,从而可对并联结构定量求取可靠性特征量。

3.1.2 串联相关性结构分析

串联结构较并联结构的相关性更为单一,其元

件间相关性主要为停工相关。以图 3 中高压直流输电系统的支路中串联结构一组单极元件为例, 换流变压器、阀组系统、极控系统、直流单极设备部分以及直流线路, 即图 4 中操作符编号为 4、6、8、10、12、14、16、18、20, 以及 5、7、9、11、13、15、17、19、21 之间存在停工相关, 且停工阶数 $I=1$, 说明支路中一个部件发生故障时, 其余部件不再发生故障相关性。为计算停工相关串联结构等效单元状态概率, 需先根据停工相关数确定等效单元故障状态, 即仅发生一种设备故障的状态, 则其成功状态为所有设备均正常运行的状态。串联结构状态概率可直接求取, 在贝叶斯网络中构建相应的有向无环图逐一求取所有的状态概率, 见图 7。

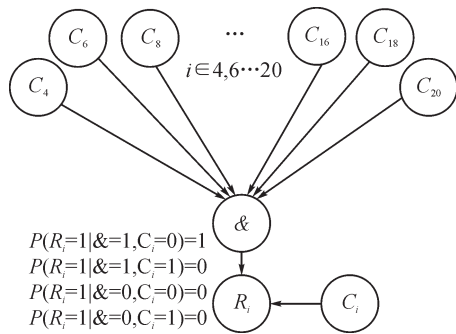


图 7 贝叶斯网络中停工相关单元的串联结构

Fig. 7 Series structure of Bias network

图 7 中, $C_4, C_6 \dots C_{20}$ 分别代表对应的编号的单极支路操作符在贝叶斯网络上映射的根节点, 其状态概率见表 1。节点 $\&$ 定义为逻辑门中的与门, 其 CPT 已知。末端节点 $R_i (i \in 4, 6 \dots 20)$ 的 P_{Ri} 表示当节点 C_i 故障且其余停工单元均正常工作时, 整个串联结构的故障概率, 其 CPT 见图 7, 从而计算串联结构等效单元的状态概率。

将结果代入式(6)、(7)编写相应算法, 整个串联结构推理过程只需遍历所有相关性单元对 N 个停工单元的串联结构进行 $N+1$ 次贝叶斯网络推理, 便可得到其等效单元的可靠性特征量。而对于停工阶数大于 1 的串联结构, 需建立相应有向无环图进行运算, 一般认为系统中多个的相关元件同时发生故障的概率很小。

3.2 模型映射

结合串、并联相关性结构算法, 将存在复杂相关性的系统模块化, 所构造的等效单元和元件间相互独立, 需改进贝叶斯 GO 法的模型映射规则, 进而精确分析整个系统可靠性。文中的改进模型映射流程见图 8。

步骤 1: 按编号顺序遍历 GO 法模型的信号流,

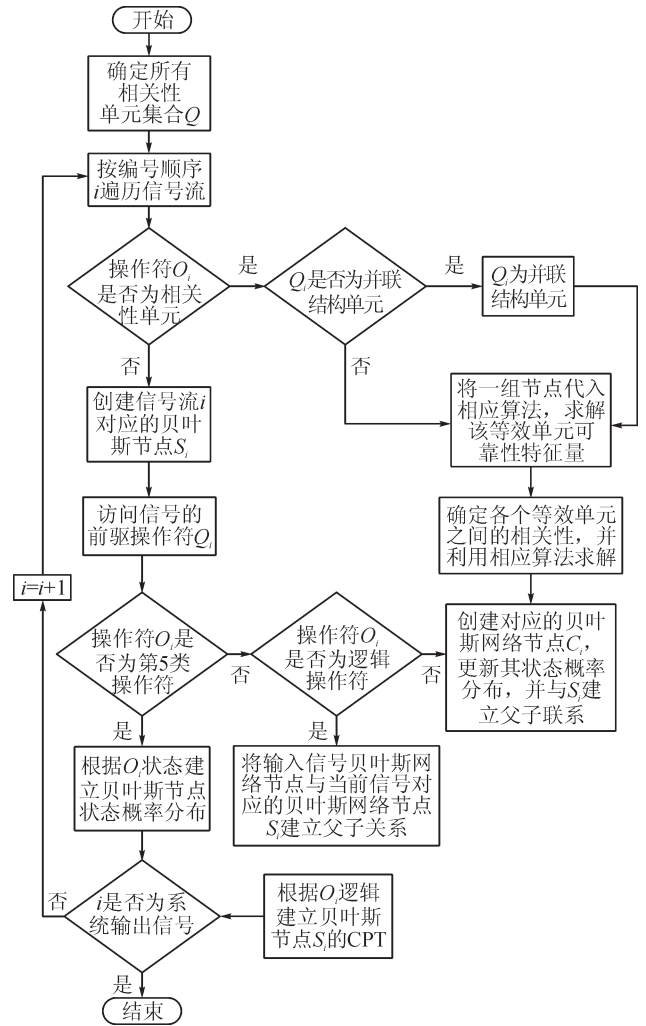


图 8 模型映射流程图

Fig. 8 Model mapping flow chart

访问信号流的前驱操作符, 并判断操作符 Q_i 是否为相关性单元。

1) 若操作符 O_i , 则将该组相关性单元以两状态单元操作符形式映射至贝叶斯网络, 并利用串联结构算法求解等效单元可靠性特征量;

2) 若操作符 O_i 是相关性单元且为一组并联结构单元, 同串联结构将该组映射至贝叶斯网络并求解可靠性参数;

3) 若 O_i 操作符不是相关性单元, 则按一般模型映射规则进行投影。

步骤 2: 确定各个等效单元之间, 等效单元和元件之间是否存在相关性, 并利用相应算法求解, 更新贝叶斯网络。

步骤 3: 判断信号流是否为系统输出信号, 如果否, 则访问下一个信号流, 即置 $i=i+1$; 如果是, 则结束流程, 元件相关性的等效模型映射完成。

按改进规则将图 4 高压直流系统 GO 图转换为贝叶斯网络, 见图 9。系统非相关性节点, 如控制系

统、交流滤波器、受端母线等功能操作符分别在贝叶斯网络上投影为有父子关联关系的根节点 C_i 和节点 S_i (i 为操作符对应编号), 而送端母线和或门逻辑操作符仅投影其输出信号为节点 S_i , 按操作符的运算逻辑确定非根节点 S_i 的 CPT。对于相关性部件映射, 先将复杂相关并联结构, 即换流变压器组, 按改进映射规则等效为单元节点并计算可靠性特征量, 映射至贝叶斯网络。考虑等效单元同串联支路上其他节点还存在停工相关性, 需再次计算并更新贝叶斯网络, 用编号 e_1, e_2 表示等效单元 $C_{e_1}, S_{e_1}, C_{e_2}, S_{e_2}$ 。完成考虑相关性的算例系统的模型映射。

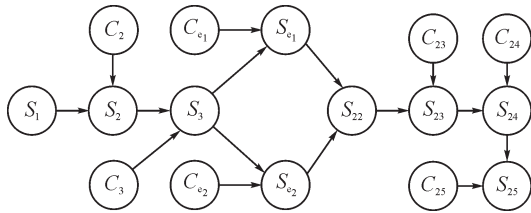


图9 高压直流输电系统贝叶斯网络

Fig. 9 HVDC system Bias network

3.3 定量分析

基于改进后的贝叶斯网络 GO 法和表 1 中的主要设备可靠性参数, 对图 2 可修的高压直流输电系统算例定量推理。

确定算例系统的相关性结构, 算例中的并联结构为一组换流变压器, 其相关性参数可取单元总数 $M=4$ 、成功数 $K=3$ 、停工故障数 $I=0$, 从而确定等效单元的故障状态概率 $G_1=P_2$, 成功状态概率 $G_2=P_0+P_1$; 又以维修工数 $L=1$ 、备用指数 $J=1$ 求取 a_i, b_i 代入算法解得换流变等效单元参数。等效单元与其串联元件的停工相关性 $I=1$, 求得其 $G_1=P_{R_1}+P_{R_2}+\dots+P_{R_n}$, 改变 CPT 再次计算所有单元均正常运行下的概率 G_2 。串并联结构相关性的可靠性参数见表 2。

表2 相关性结构等效单元可靠性参数

Table 2 The reliability parameters of equivalent unit

名称	复杂相关并联结构		停工相关串联结构	
	故障率/ (次·年 ⁻¹)	工作概率	故障率/ (次·年 ⁻¹)	工作概率
完全独立时	0.003	0.999 06	5.906	0.994 89
有复杂相关	0.002	0.998 58	5.896	0.993 95

分析算例直流输电系统故障概率时, 考虑传输中极与极之间状态相互独立, 同时对于末端节点的多状态应在算法中编写对应 CPT, 计算结果见表 3。为验证该方法的有效性, 表 3 列出了采用传统 GO 法对同一模型的分析结果。

比较表 2、3 中考虑相关性与未考虑相关系统

表3 高压直流输电系统故障率计算结果

Table 3 Failure rate results of HVDC system 次·年⁻¹

名称	系统状态		
	双极运行	单极停运	双极停运
改进算法 (考虑相关性)	0.987 98	0.011 92	0.000 010
基于 BN 的 GO 法 (未考虑相关性)	0.989 97	0.009 95	0.000 085
传统 GO 法 (考虑相关性)	0.987 97	0.011 93	0.000 010

的计算结果, 前者系统成功概率数据偏小, 符合实际工况, 说明了在实际系统中由于元件相互作用或维修工数量不足, 使系统的故障概率的增大, 但并联系统的冗余相关使具体差值不大。由表 3 可见, 基于改进贝叶斯网络的 GO 法与传统 GO 法在分析有相关性系统时其可靠性结果一致, 表明了该改进算法在计算可修的高压直流输电系统状态概率时的正确性。同时该改进算法较 GO 法推理过程耗时短, 在硬件环境为 4 核 3.3 GHz CPU, 4 G 内存, 软件环境为 MATLAB 2010 时, 整个推理过程仅用时 0.095 1 s。

基于建立的图 9 贝叶斯网络模型还可利用贝叶斯推理寻找系统的可靠性薄弱点。假设系统故障, 以末端节点处于故障状态(双极停运)为证据 A , 令 $P_{S_{25}}(2)=1$, 代入贝叶斯公式进行推理, 贝叶斯公式为

$$P(B_i|A) = \frac{P(B_i)P(A|B_i)}{\sum_{i=1}^N P(B_i)P(A|B_i)} \quad (9)$$

式(9)中: $P(B_i)$ 为系统元件的基础概率, 可由表一得到; $P(B_i|A)$ 为在给定证据后的计算概率, 即后验概率。计算结果见表 4, 从而进行故障诊断。

表4 系统故障状态时元件的后验概率

Table 4 The component's posteriori probability of the system failure state

序号	元件名称	后验概率
1	送端母线	(0.791 7, 0.208 3)
2, 24	控制系统	(0.895 8, 0.104 2)
3, 23	交流滤波器	(0.879 8, 0.120 2)
e_1, e_2	等效单元 *	(0.621 3, 0.378 8)
25	受端母线	(0.789 1, 0.210 9)

注: * 表示表 4 中的等效单元由换流变压器组、阀组系统、极控系统、直流单极设备部分、以及直流线路节点合并得到。

从表 4 可以看出, 在系统双极停运的前提下, 等效单元的故障概率最高, 所以图 9 中的可靠性薄

弱点为等效单元,进而还需再次对等效单元内部进行故障诊断,最终确定阀组系统为算例系统的薄弱环节。针对薄弱点可通过增加相应设备备用和提高维修人员工作效率等措施来有效提高系统可靠性指标。

4 结论

忽略系统元件的相关性,会给系统可靠性分析带来较大误差。该文考虑到系统元件的相关性,改进了贝叶斯网络 GO 算法,并将文中算法引入到复杂可修高压直流输电系统进行可靠性分析,和传统 GO 法分析比较,得出以下结论:

1)改进后的算法可以有效地描述高压直流输电系统的相关性和多态性关系。依靠软件算法工具支持,计算的精度和速度都大大提高。

2)通过贝叶斯网络可以寻找系统中的可靠性薄弱点,从而可以采取针对性措施来提高系统的可靠性。

参考文献:

- [1] 詹奕,尹项根. 高压直流输电与特高压交流输电的比较研究[J]. 高电压技术,2001,27(4):44-46.
ZHAN Yi,YIN Xianggen. Comparative research on HVDC and UHV power transmission[J]. High Voltage Engineering,2001,27(4):44-46.
- [2] 梁旭明,张平,常勇. 高压直流输电技术现状及发展前景[J]. 电网技术,2012,20(4):40-47.
LIANG Xuming,ZHANG Ping,CHANG Yong. Recent advances in high-voltage direct-current power transmission and its developing potential[J]. Power System Technology,2012,20(4):40-47.
- [3] 张文亮,汤勇,曾南超. 多段高压直流输电技术及应用前景[J]. 电网技术,2010,34(9):1-6.
ZHANG Wenliang,TANG Yong,ZENG Nanchao. Multi-terminal HVDC transmission technologies and its application prospects in China[J]. Power System Technology,2010,34(9):1-6.
- [4] 陈永进,任震. 模型组合及其在直流输电系统可靠性评估中的应用[J]. 电网技术,2004,28(13):18-22.
CHEN Yangjin,REN Zhen. Models combination and its application in reliability evaluation for HVDC systems[J]. Power System Technology,2004,28(13):18-22.
- [5] 郑传材,管霖. 云广特高压直流故障特性及其强迫停运对受端系统影响评估[J]. 电网技术,2012,36(1):32-38.
ZHENG Chuancail,GUAN Lin. Assessment on fault characteristics of yunnan to guangdong UHVDC transmission and the influence of forced outage on power system at receiving end[J]. Power System Technology,2012,36(1):32-38.
- [6] 刘耀,王明新,曾南超. 高压直流输电保护装置冗余配置可靠性的接续分析[J]. 电网技术,2010,34(11):92-99.
LIU Yao,WANG Mingxin,ZENG Nanchao. Sequential reliability analysis on redundant configuration of protective devices for HVDC power transmission system[J]. Power System Technology,2010,34(11):92-99.
- [7] 沈祖培,黄祥瑞. GO 法原理及应用:一种系统可靠性分析方法[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
SHEN Zupei,HUANG Xiangrui. Principle and application of GO methodology[M]. Beijing:Tsinghua University Press,2004.
- [8] 李哲,杨小明,鲁宗相. 基于 GO 法的多状态可修系统故障率分析[J]. 原子能科学技术,2011,45(11):1341-1345.
LI Zhe,YANG Xiaoming,LU Zongxiang. Failure rate analysis of multi-state repairable system based on GO methodology[J]. Atomic Energy Science and Technology,2011,45(11):1341-1345.
- [9] 王超,张雪松,徐政,等. 基于 GO 法的特高压直流输电可靠性研究[J]. 浙江大学学报,2009,43(1):159-165.
WANG Chao,ZHANG Xuesong,XU Zheng,et al. Reliability analysis of ultra high voltage direct current system based on GO methodology[J]. Journal of Zhejiang University,2009,43(1):159-165.
- [10] 张雪松,王超,常勇,等. GO 法在特高压直流输电可靠性研究中的应用[J]. 高电压技术,2009,35(2):236-241.
ZHANG Xuesong,WANG Chao,CHANG Yong,et al. Reliability analysis of UHVDC system by the GO methodology[J]. High Voltage Engineering,2009,35(2):236-241.
- [11] 龚剑波,黄民翔,徐国丰. 基于改进 GO 法的 1 000 kV 电气主接线可靠性研究[J]. 机电工程,2012,29(2):215-219.
GONG Jianbo,HUANG Mingxiang,XU Guofeng. Reliability research of 1 000 kV main electrical connections based on improved GO methodology[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering,2012,29(2):215-219.
- [12] 刘林林,任羿,王自力,等. 基于贝叶斯网络的 GO 法模型算法[J]. 系统工程与电子技术,2014,36(5):46-51.
LIU Linlin,REN Yi,WANG Zili,et al. Algorithm based-on Bayesian networks for GO methodology[J]. Systems Engineering and Electronics,2014,36(5):1-9.
- [13] KHAKZAD N,KHAN F,AMYOTTE P. Safety analysis in process facilities:Comparison of fault tree and Bayesian network approaches[J]. Reliability Engineering & System Safety,2011,96(8):925-932.
- [14] 王博,游大海,尹项根,等. 基于多因素分析的复杂电力系统安全风险评估体系[J]. 电网技术,2011,35(1):11-15.
WANG Bo,YOU Dahai,YIN Xianggen,et al. A security risk assessment system of complicated power grid based on multiple factor analysis[J]. Power system technology,2011,35(1):11-15.
- [15] FABER M H,KROON I B,KRAGH E. Risk assessment of

(下转第 66 页)

- tions on Electrical Insulation, 1992, 27(2):362-373.
- [14] SILI E, CAMBRONNE J P, NAUDE N, et al. Polyimide lifetime under partial discharge aging: effects of temperature, pressure and humidity[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2013, 20(2):435-442.
- [15] LUO Y, WU G N, XIA J, et al. Degradation mechanism of polyimide film under square impulse voltages[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(8):1925-1931.
- [16] 冯宇, 殷景华, 陈明华, 等. 聚酰亚胺/TiO₂ 纳米杂化薄膜耐电晕性能的研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22):142-147.
- FENG Yu, YIN Jinghua, CHEN Minghua, et al. Study on corona-resistance of the polyimide/nano-TiO₂ hybrid films[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22):142-147.
- [17] 高波, 吴广宁, 曹开江, 等. 聚酰亚胺纳米复合薄膜的耐电晕机理[J]. 高电压技术, 2013, 39(12):3082-3088.
- GAO Bo, WU Guangning, CAO Kaijiang, et al. Corona-resistance mechanism of polyimide nano-composite film[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(12):3082-3088.
- [18] PRAMODA K P, CHUNG T S, LIU S L, et al. Characterization and thermal degradation of polyimide and polyamide liquid crystalline polymers[J]. Polymer Degradation & Stability, 2000, 67(2):365-374.
- [19] DINETZ S F, BIRD E J, WAGNER R L, et al. A comparative study of the gaseous products generated by thermal and ultra-violet laser pyrolyses of the polyimide PMDA-ODA[J]. Journal of Analytical & Applied Pyrolysis, 2002, 63(2):241-249.
- [20] JAVERBERG N, EDIN H, NORDELL P, et al. Dielectric properties of alumina-filled poly(ethylene-co-butyl acrylate) nanocomposites part II: Wet studies[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2012, 19(2):391-399.
- [21] MELCHER J, YANG D, ARLT G. Dielectric effects of moisture in polyimide[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1989, 24(1):31-38.
- 钟鑫(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事纳米复合电介质电气特性的研究。
- 吴广宁(1969—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事高压与绝缘技术相关教学与科研工作。

(上接第59页)

- decommissioning options using Bayesian networks[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2002, 124(4):231-238.
- [16] LANGSETH H, PORTINALE L. Bayesian networks in reliability[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2007, 92(1):92-108.
- [17] HORVITZ E, HOVEL D, KADIE C. MSBNx: A component-centric toolkit for modeling and inference with Bayesian networks[R]. Redmond: Microsoft Research, Redmond, WA, 2001.
- [18] 张禄琦, 周家启, 刘洋, 等. 高压直流输电工程可靠性指标统计分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19):95-99.
- ZHANG Luqi, ZHOU Jiaqi, LIU Yang, et al. High-voltage direct current transmission engineering reliability statistical analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19):95-99.
- [19] 沈祖培, 黄祥瑞, 高佳. 可修复系统可靠性分析中 GO 法的应用[J]. 核动力工程, 2000, 21(5):456-461.
- SHEN Zupei, HUANG Xiangrui, GAO Jia. Application of GO methodology for reliability analysis of repairable system[J]. Nuclear Power Engineering, 2000, 21(5):456-461.
- 田录林(1959—), 男, 教授, 主要从事电气工程及其自动化和磁浮力方面的研究。