

基于多状态节点贝叶斯网络的 HVDC 系统可靠性评估

陈碧云, 任震, 李红宁

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 贝叶斯网络具有灵活的推理机制,能深刻地揭示系统内在的机理。该文提出了将贝叶斯网络应用于高压直流系统可靠性评估的方法。该方法采用多状态节点来描述系统及节点的多态性,有效地处理了特殊的备用情况,并提出了信念度矩阵来描述系统内部各层元件之间的连接关系,通过考查给定系统状态对应的信念度,可以评估系统中的薄弱环节。此外,利用贝叶斯网络的自动更新功能,还能根据当前的元件或子系统的状态对系统未来状态作出预测。最后,通过具体的算例对所提方法的有效性进行了分析和验证。

关键词: 贝叶斯网络; 高压直流系统; 可靠性; 信念度矩阵

中图分类号: TM732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)20-0057-05

0 引言

高压直流(HVDC)系统的可靠性评估方法主要有状态空间法^[1]和等值模型法^[2~3]两种,虽然这两种方法均能有效地计算出直流系统的可靠性指标,却不能对系统内部各元件的连接关系进行精确的评估。

贝叶斯网络(Bayesian Networks)亦称信念网络(Belief Network),是1986年由Judea Pearl^[4]首先提出的,用图形模式来表示不确定变量集合的联合概率分布,以揭示变量间潜在的依赖关系。将贝叶斯网络应用于系统的可靠性研究,不但能计算出系统的可靠性指标,还能方便地给出每个元件或某个子系统对系统整体可靠性的影响大小。

David等人^[5]首先将贝叶斯网络引入了电力系统可靠性评估中,通过对电网物理拓扑结构的分析,计算出互联电网的电力不足时间概率(LOLP)。文献[6]结合故障树和最小路集来建立贝叶斯网络,并对变电站主接线的可靠性进行了评估,文献[7]在文献[6]的基础上,将多状态元件的不同状态映射成贝叶斯网络中的多个节点,从而将贝叶斯网络扩展到考虑设备计划检修的配电网可靠性评估中。

本文提出了应用多状态节点贝叶斯网络对HVDC系统进行可靠性评估的方法,采用多状态节点来描述系统及元件的多态性,有效地对特殊的共享备用现象进行了处理,并提出了用信念度矩阵的来表示各层节点之间连接关系。

1 贝叶斯网络的基本原理

贝叶斯网络的基本结构由一个含节点及有向弧的无环图和表示每个变量及其所有父代关系的条件概率表组成。它以节点代表变量,以节点间的弧表示父代与子代的概率关系,通过条件概率表的注释,可以在模型中表达局部条件的依赖性。从推理机制和状态描述上看,贝叶斯网络与故障树有很大的相似性,但是贝叶斯网络具有描述事件多态性和故障逻辑关系非确定性的能力,较之故障树更适合于复杂系统的安全性和可靠性分析。

一般来说,有 n 个命题 X_1, X_2, \dots, X_n 之间相互关系的一般知识可用联合概率分布来描述。但是,这样处理使得问题过于复杂。Pearl认为人类在推理过程中,知识并不是以联合概率分布形表现的,而是以变量之间的相关性和条件相关性表现的,即可以用条件概率表示。如

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = P(X_n | X_{n-1}, X_{n-2}, \dots, X_1) \cdot P(X_{n-1} | X_{n-2}, \dots, X_1) \dots P(X_2 | X_1) \quad (1)$$

利用条件独立性进行分解,可以极大地减少计算联合概率所需的参数数量。如图1所示的一个简单的5节点贝叶斯网络,有

$$P(A_1, A_2, A_3, A_4, A_5) = P(A_5 | A_3) P(A_4 | A_2, A_3) \cdot P(A_3 | A_1) P(A_2 | A_1) P(A_1)$$

一旦事件之间的相关性(有向弧)和条件概率(弧的权值)确定之后,事件之间的静态结构关系的有关知识就表示出来了。当获取某个新的证据事实时,要对每个事件的可能取值加以综合考查,可以对每个节点定义一个信念度,用以表示当前所具有的事实和证据 e 条件下,节点事件 X_k 的可信程度,它

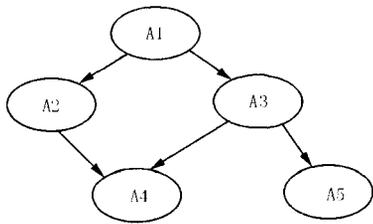


图 1 一个简单的贝叶斯网络图

Fig 1 A simple Bayesian network

反映了事件 X_k 对于事实 e 的影响程度。

$$Bel(X_k) = P(X_k | e) \quad (2)$$

$$P(X_k | e) = \frac{P(X_k) P(e/X_k)}{\sum_i P(X_i) P(e/X_i)} \quad (3)$$

将信念度用于系统可靠性评估中,可对系统中的薄弱环节进行有效的识别。

对于不同的问题,贝叶斯网络的构造过程不尽相同,但一般包括以下几个步骤:

- 1) 确定构成所研究问题领域的变量集,即形成网络中的根结点;
- 2) 根据节点之间的概率依赖关系或先验依赖关系确定网络结构,即形成有向弧及弧的权值(也称为连接强度);
- 3) 对确定的网络结构计算每个节点的概率分布,包括根据节点的先验概率分布和中间节点的条件概率分布。

2 HVDC系统贝叶斯网络的形成

直流输电系统的设备众多,结构繁杂,通常仅对影响系统运行状态的主要设备进行评估,或者将一些具有相同故障后果的设备划分为子系统。图 2 中给出了直流系统主要设备的示意图,包括:换流站的控制系统(SCI、SCII)、交流滤波器组(ACFI、ACFII)、换流变压器(T1~T4)、阀组系统(V1~V4)、极控制系统(PC1~PC4)、辅助系统(Aux1、Aux2)、直流极设备(DCP1~DCP4)、直流线路(L1~L2)以及平波电抗器(SR1~SR4)。

对于系统中大部分的元件都相互独立,并具有“工作—故障”两状态,可以用(0,1)两态模型表示。但是也存在具有一些特殊状态的元件,比如说几个元件共享备用,元件之间就并非相互独立的,因此,其模型需要详细进行分析。

2.1 系统的三状态模型

由于现代 12 脉波高压直流输电系统中一般都不装设 5 次和 7 次交流滤波器以及 6 次直流滤波

器,因此不允许出现单极 6 脉波的运行方式。这样,直流输电系统共有三种可用容量状态:双极运行的 100%容量、单极运行的 50%容量、双极停运的 0 容量,可用三状态的停运概率模型表示 $\{P_0, P_{0.5}, P_{1.0}\}$ 。

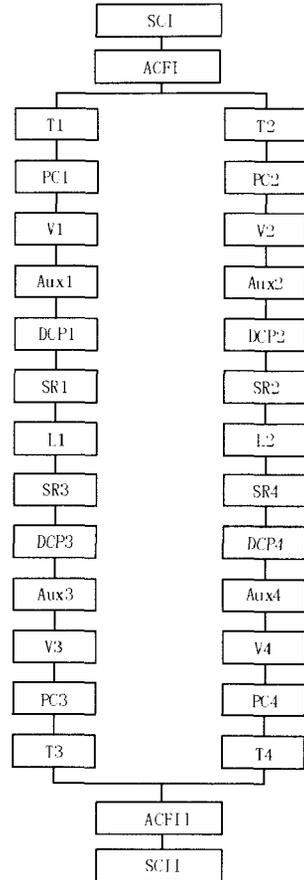


图 2 高压直流输电系统的主要设备示意图

Fig 2 Main equipments in a HVDC system

2.2 共享备用的元件模型

几个元件共享一个备用的情况可以分为两种考虑。

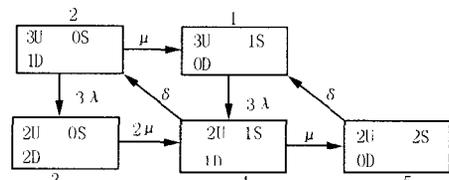


图 3 带 1 个备用的三个单相变压器组状态空间图

Fig 3 State space diagram for three single-phase transformers with one spare

第一种情况是,共享备用的各个元件故障后对系统造成的影响是相同的,如变压器。系统的每极每侧上均有一组含三个单相变压器的变压器组,而

这三个变压器共用一个单相变压器作为备用,其状态空间图如图 3 所示,方框内的 U、S、D 分别表示变压器的工作、备用及故障状态。根据各状态的转移率,建立频率平衡方程^[5]:

$$P_i \sum_j a_{ij} = \sum_j p_j a_{ji} \quad (4)$$

式中: a_{ij} 表示从状态 i 到状态 j 的转移率, p_i 为状态 i 的平稳状态概率。再联立关系式 (5) 进行求解,可以求出各 p_i 的值。

$$\sum_i p_i = 1 \quad (5)$$

由状态空间图可以看出,状态 1 和状态 2 是系统可以正常工作的状态,状态 3、4、5 则是系统失效的状态,对系统状态进行合并,可以得出 (0, 1) 两种等值状态,其中

$$\begin{cases} P(0) = P_1 + P_2 \\ P(1) = P_3 + P_4 + P_5 \end{cases} \quad (6)$$

另一种共享备用的情况是,共享备用的各个元件失效后对系统造成影响不同,例如平波电抗器。

通常同一换流站内两极上的两个平波电抗器共用一个备用。以 SR1 和 SR2 为例,由于这两个元件分属于不同的极,他们的故障将造成系统不同极的停运,因而无法简单地等值成两状态的模型,而必须保留所有可能的状态,其状态空间图如图 4 所示。上中下三个字母分别表示极 1、备用和极 2 电抗器的运行状态 (W 为工作状态, F 为故障状态)。整个系统的状态将有四种: SR1 和 SR2 均完好, SR1 故障 SR2 完好, SR1 完好 SR2 故障, SR1 和 SR2 均故障。同样应用公式 (4)、(5) 进行平稳状态的求解和合并,最终得到的 2 个平波电抗器 + 1 个备用的子系统 SR II 四状态模型 {0, 1, 2, 3}, 其状态概率分别用 $P(0)$ 、 $P(1)$ 、 $P(2)$ 、 $P(3)$ 表示。同理,可以得到另一侧换流站的平波电抗器模型 SR I。

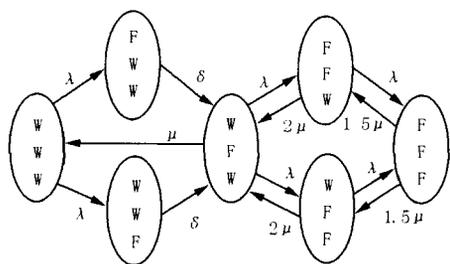


图 4 两个平波电抗器共用一个备用的状态空间图

Fig 4 State space diagram for two smoothing reactors with one spare

2.3 全系统贝叶斯网络

在建立全系统的贝叶斯网络之前,为便于描述节点间的多状态逻辑关系,在每一个父节点 F 与其相连的下级子节点 x_1, x_2, \dots, x_r 之间定义连接函数 (X) 。其中 $X = (x_1, x_2, \dots, x_r)$ 表示子节点的状态组合, (X) 表示相应的父节点的状态。连接函数实际上是节点间因果关系的函数描述形式。

确定了各个元件的模型 (根节点) 后,得到全系统的贝叶斯网络如图 5 所示,其中的 SR I、SR II 以及 T1 ~ T4 均为二级节点。由于 SR1 ~ SR4 及其备用,以及 T1 ~ T4 中各单相变压器及其备用均采用相同设备,因此 SR I 和 SR II 的子节点分别由三个相同的 SR 构成,而 T1 ~ T4 的子节点则分别由 4 个相同的 T 构成,由于篇幅关系,图 5 中并未画出。

节点 Pole1、Pole2 和 BiPole 与其子节点的连接关系为典型含 n 个两状态独立元件的或门结构,其概率链表定义为:

$X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$	(X)	P
$X_1 = (0, 0, \dots, 0)$	0	$P(X_1)$
$X_2 = (1, 0, \dots, 0)$	1	$P(X_2)$
$X_3 = (0, 1, \dots, 0)$	1	$P(X_3)$
...
$X_m = (1, 1, \dots, 1)$	1	$P(X_m)$

其中: (X) 为父节点的连接函数, P 为对应状态的概率链表, 0、1 值分别表示工作及故障状态。由于 x_1, x_2, \dots, x_n 是独立事件, 因而 $P(X_k) = \prod_{x_i \in X_k} P(x_i)$ 。

由概率链表得出父节点的状态概率:

$$\begin{cases} P(0) = P(X_1) \\ P(1) = \sum_{k=2}^m P(X_k) = 1 - P(0) \end{cases}$$

四状态节点 SR I 和 SR II 到节点 SRE 的连接关系定义为:

$$(X) = \begin{cases} 0 & X = (0, 0) \\ 1 & X = (1, 0) \text{ or } (0, 1) \text{ or } (1, 1) \\ 2 & X = (2, 0) \text{ or } (0, 2) \text{ or } (2, 2) \\ 3 & X = \text{others} \end{cases}$$

其中: $X = (SR I, SR II)$, (X) 的 0、1、2、3 值定义与 2.2 节中 SR1 ~ SR4 的定义相同。由此,得到的节点 SRE 也具有四状态的概率模型 $\{P_0, P_1, P_2, P_3\}$ 。

Pole1、Pole2、BiPole、SRE 与顶节点 System 的连接关系定义为:

$$(X) \begin{cases} 0 & X = (0, 0, 0, 0) \\ 0.5 & X = (1, 0, 0, 0), (1, 0, 0, 1), (0, 0, 0, 1) \\ & (0, 1, 0, 0), (0, 1, 0, 2), (0, 0, 0, 2) \\ 1.0 & X = \text{others} \end{cases}$$

其中: $X = (\text{Pole1}, \text{Pole2}, \text{BiPole}, \text{SRE})$, (X) 的 0, 0.5, 1.0 值分别表示正常运行、单极停运和双极停运状态。

2.4 信念度矩阵的定义

对每一个子节点 S 与其父节点 F 之间连接关系都定义一个信念度矩阵 $B = \{b_{ij}\}_{s \times f}$, 其中 s 和 f 分别为子节点和父节点的状态数, $b_{ij} = P(S_i | F_j)$ 表示父节点为状态 f 时, 子节点为状态 i 的可信度。

考虑这样的一种情况: 子节点 S (s 个状态) 与其唯一的父节点 M (m 个状态) 之间的信念度矩阵为 $B_1 = \{a_{ik}\}_{s \times m}$, 而节点 M 与其唯一父节点 F (f 个状态) 之间的信念度矩阵为 $B_2 = \{k_{kj}\}_{m \times f}$

令 $B_3 = B_1 \times B_2, B_3 = \{ij\}_{s \times f}$, 有

$$ij = \sum_{k=1}^m ik \cdot kj = \sum_{k=1}^m P(S_i | M_k) P(M_k | F_j)$$

若 S 与 M 的其它子节点相互独立, 且 M 与 F 的其它子节点相互独立, 那么

$$\sum_{k=1}^m P(S_i | M_k) P(M_k | F_j) = P(S_i | F_j) = Bel(S_i | F_j)$$

即 B_3 为 S 相对于 F 的信念度矩阵。

利用这一关系, 可以方便从根节点开始逐层计算各子节点与父节点之间的信念度矩阵, 再直接使用矩阵乘法运算求取隔代节点之间的信念度矩阵。

3 算例研究

以某一高压直流输电系统为例进行计算, 该系统以 ± 500 kV 双极运行, 元件的基本可靠性参数如表 1 所示。

表 1 算例系统的基本可靠性参数

Tab 1 Basic reliability parameters of the test system

元件	故障率 (f/yr)	维修时间 1/μ (h)	安装时间 1/λ (h)
SC I, SC II	0.000 179	1.5	
ACFI	0.000 159	4.7	
ACFII	0.000 203	4.3	
T5	0.002 7	3 100	40
V1 ~ V4	0.223 5	5.0	
PC1 ~ PC4	0.077 4	3.0	
Aux1, Aux2	0.405 7	6.6	
DCP1 ~ DCP4	0.026 1	12	
L1, L2	0.010 7	10	
SR5	0.000 8	5 110	40

*: 表中给出的是一个单相变压器的参数, T1 ~ T4 变压器组中每组均含有三个单相变压器和一个备用变压器。

** *: 各个平波电抗器其备用具有相同的参数, 均以 SR 表示。

表 2 算例系统的可靠性指标

Tab 2 Reliability index of the test system

系统状态	双极运行	单极停运	双极停运
状态概率	0.997 816 7	0.002 182	1.44e-6

应用图 5 中建立的贝叶斯网络进行计算, 得到系统正常运行 (0 状态)、单极停运 (0.5 状态) 和双极停运 (1.0 状态) 的可靠性指标分别列于表 2 中。

根据信念度的定义, 可以分别计算出各节点与其上层父节点之间的信念度矩阵。以节点 SR I 与 SRE 为例, 由于 SR I 与 SRE 均为 4 状态节点, 因此其相应的信念度矩阵 $B(\text{SR I} | \text{SRE})$ 为 4×4 阶的矩阵:

$$B(\text{SR I} | \text{SRE}) = \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0.5 & 0.409 \bar{5} \\ 0 & 0.5 & 0 & 0.090 \bar{5} \\ 0 & 0 & 0.5 & 0.090 \bar{5} \\ 0 & 0 & 0 & 0.409 \bar{5} \end{bmatrix}$$

矩阵中元素 B_{ij} 表示当 SR I 的状态为 i 时, SRE 状态为 j 的概率, 由以下算式计算得到:

$$B_{ij} = \frac{P(\text{SR I} = i) P(\text{SRE} = j | \text{SR I} = i)}{P(\text{SRE} = j)}$$

同理可以求出 SRE 与系统节点 System 之间的信念度矩阵:

$$B(\text{SRE} | \text{System}) = \begin{bmatrix} 1 & 0.992 \bar{9} & 0.988 \bar{2} \\ 0 & 0.003 \bar{5} & 0.005 \bar{8} \\ 0 & 0.003 \bar{5} & 0.005 \bar{8} \\ 0 & 0 & 0.000 \bar{4} \end{bmatrix}$$

根据 $B(\text{SR I} | \text{SRE})$ 和 $B(\text{SRE} | \text{System})$ 可以进一步计算出节点 SR I 与系统节点 System 之间的信念度矩阵 $B(\text{SR I} | \text{System})$:

$$B(\text{SR I} | \text{System}) = B(\text{SR I} | \text{SRE}) \times$$

$$B(\text{SRE} | \text{System}) = \begin{bmatrix} 1 & 0.996 \bar{5} & 0.994 \bar{1} \\ 0 & 0.001 \bar{8} & 0.002 \bar{9} \\ 0 & 0.001 \bar{8} & 0.002 \bar{9} \\ 0 & 0 & 0.000 \bar{4} \end{bmatrix}$$

根据上述方法, 求出各根节点与系统顶节点之间的信念度矩阵, 并将导致最为关心的两种系统状态 0.5 (单极停运) 和 1.0 (双极停运) 的元件状态的可信度整理成表 3 所示。

根据信念度矩阵, 很容易检测出系统中的薄弱环节。从表 3 可以看出, 不管对于系统的单极停运状态还是双极停运状态, 最薄弱的环节均为辅助系统, 其次为阀组系统。为此, 可以通过增加阀组系统的备用缩短故障后的停运时间, 加强运行人员的培训以减小人为因素造成辅助系统的故障, 提高检修

人员的工作效率以缩短故障后的维修时间等措施来提高系统的可靠性。另外,除了辅助系统和阀组外,交流滤波器组的故障也是容易造成系统双极停运的主要原因,可以考虑增加交流滤波器组的备用。

表 3 系统状态为 0.5 和 1.0 时元件状态的可信度

Tab 3 Element state beliefs for system state of 0.5 or 1.0

元件	系统状态	
	0.5	1.0
SCI SCII	(1, 0)	(0.978 7, 0.021 3)
ACFI	(1, 0)	(0.940 7, 0.059 3)
ACFII	(1, 0)	(0.930 3, 0.069 7)
T	(0.981 2, 0.018 8)	(0.968 9, 0.031 1)
V1 ~ V4	(0.941 2, 0.058 8)	(0.902 5, 0.097 5)
PC1 ~ PC4	(0.988 0, 0.012 0)	(0.980 2, 0.019 8)
Aux1, Aux2	(0.860 4, 0.139 6)	(0.768 8, 0.231 2)
DCP1 ~ DCP4	(0.983 7, 0.016 3)	(0.972 9, 0.027 1)
L1, L2	(0.994 4, 0.005 6)	(0.990 6, 0.009 4)
SR	(0.998 2, 0.001 8)	(0.997 1, 0.002 9)

假如当前已经发生了极 1 停运的事件,可以利用贝叶斯网络的自动更新功能,对系统是否会发生进一步故障进行预测。即,将节点 Pole1 的概率链表由验前概率 (0.998 916, 0.001 084) 更新为验后概率 (0, 1) 后,可以得出,系统节点 System 的发生双极故障的预测概率为 0.001 092。

4 结语

本文提出了一种采用多状态节点的贝叶斯网络对 HVDC 系统进行可靠性评估的方法,并通过实际系统的算例研究,得出以下结论:

1) 所提方法能有效地描述 HVDC 系统的多态性和故障因果关系,深刻地揭示了系统发生故障的机理;

2) 信念度矩阵反映了各元件状态对系统状态的影响程度,可用于衡量系统中的薄弱环节,以便于采取有效的提高可靠性的措施;

3) 利用贝叶斯网络的灵活推理机制进行网络信息的传播和更新,可以根据观测到的某个元件或几个元件的状态对系统未来的状态作出预测,有利于在系统发生进一步故障之前采取相应的预防措施。

参考文献:

[1] Billinton R, Ahluwalia D S Incorporation of a DC Link in a Composite System Adequacy Assessment DC System Modeling[J]. IEE Proc—Gener, Transm & Distrib,

1992, 139(3): 211-220

- [2] 任震,吴娟,陈丽芳.高压直流输电可靠性评估的等效模型[J].电力系统自动化,1999,23(9):38-41.
REN Zhen, WU Juan, CHEN Li-fang Equivalent Model for HVDC Reliability Evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(9): 38-41.
- [3] 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 Yong-jin, REN Zhen Models Combination and Its Application in Reliability Evaluation for HVDC Systems [J]. Power System Technology, 2004, 28(13): 18-22
- [4] Fusion P J. Propagation and Structuring in Belief Network [J]. Artificial Intelligence, 1986, 29(3): 241-288
- [5] Yu D C, Nguyen T C, Haddawy P. Bayesian Network Model for Reliability Assessment of Power Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(2): 426-432
- [6] 霍利民,朱永利,范高锋,等.一种基于贝叶斯网络的电力系统可靠性评估新方法[J].电力系统自动化,2003,27(5):36-40.
HUO Limin, ZHU Yong-li, FAN Gao-feng, et al A New Method for Reliability Assessment of Power System Based on Bayesian Networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(5): 36-40
- [7] 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
HUO Limin, ZHU Yong-li, ZHANG Zai-ling, et al Bayesian Networks Application to Reliability Evaluation of Electric Distribution Systems [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(8): 113-118
- [8] 郭永基.电力系统可靠性原理和应用[J].北京:清华大学出版社.
GUO Yong-ji Power System Reliability Principle and Application [J]. Beijing: Tsinghua University Press, 1986

收稿日期: 2005-02-22; 修回日期: 2005-04-04

作者简介:

陈碧云(1978-),女,博士研究生,主要研究方向为电力系统规划与可靠性; E-mail: cbybh@126.com

任震(1938-),男,教授,博导,主要研究方向为电力市场、电力系统规划与可靠性、高压直流输电、小波分析及其在电力系统中的应用;

李红宁(1982-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统可靠性。

(下转第 78 页 continued on page 78)

allenge It is the duty-bound responsibility for the electric power staffer and the government interrelated department to mark out and construct the urban distribution system reasonably. Selection of transformer substation situation, principle of feeder way of transformer substation and fundamentals of loop net composing and feeder's connection are given. Discussions on these issues are propitious to layout and construction of urban distribution.

Key words: urban distribution; layout; construction

(上接第 32 页 continued from page 32)

为有很大影响。通过检测工频电压过零点加计数器的方法,有以下不足:必须具有相应独立的测频通道,给现场应用带来不便;易受电源谐波分量和注入的 20 Hz 电源的影响。应研究在不增加硬件和降低测量精度的前提下,使用软件方法测频。

2) 录波文件的完善:录波文件中无开关量,对判断保护的動作行为会带来不便。同时,录波文件应注明是哪个 CPU 的、什么时间的录波文件。对于录波文件,应保证在发生保护和监控工控机断电的各种情况下的不丢失。

3) 告警灯的完善:在监控工控机死机和掉电的情况下,每个保护单元(CPU)的故障告警灯均会点亮,这对装置的运行和故障判断不利。

6 结束语

国产发变组保护投运三年来,经历了区外单相接地短路 50 多次,最严重的是经历了一次区外三相短路,保护无误动作和误发信号的情况。

发生了一次在厂变差动范围内的电缆头短路事

Domestic large-scale microprocessor protection debugging and operation of generator transformer unit and its auxiliary transformer

LIDe-jia

(Nuclear Power Qinshan Joint Venture Co., Ltd, Haiyan 314300, China)

Abstract: This paper summarizes debugging and operation conditions of Qinshan secondary stage of generator-transformer unit and its auxiliary transformer microprocessor protection. Reason analysis is made and countermeasures are put forward. It is a reference for similar power plants.

Key words: computer based protection; generator; transformer; nuclear power

故,差动保护正确动作,60 ms 就将故障切除。事后对厂变进行了绕组变形试验、直阻试验、短路阻抗试验、绝缘试验,一切正常后投运,运行至今没有发生异常。这说明保护的速动性能减少对被保护设备的损伤。

通过运行情况的总结,证明该装置硬件稳定可靠、软件设计合理、保护配置正确妥当,能够满足大型发电机组对继电保护的要求。

参考文献:

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998
WANG Wei-jian. Principle and Application of Electric Power Equipment Protection [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998

收稿日期: 2005-01-24; 修回日期: 2005-04-14

作者简介:

李德佳 (1964 -), 男, 高级工程师, 主要从事继电保护的调试和运行; Email: jiajiadedelili@sohu.com

(上接第 61 页 continued from page 61)

Reliability evaluation for HVDC systems based on Bayesian network with multi-state nodes

CHEN Bi-yun, REN Zhen, LI Hong-ning

(South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: With flexible inference mechanisms, Bayesian networks can describe inherent relations of the system in depth. A method of reliability evaluation for HVDC systems based on Bayesian network is proposed in this paper. Multi-state nodes are used to denote the multiple states of system and elements, which can effectively deal with the special backup modes. Belief matrices are proposed to describe the linking connection of elements from different layers, which can be used to evaluate the weak points of the system. Furthermore, automatic updating function of Bayesian networks can be used to forecast the future state of the system based on the current state of elements or sub-systems. The validity of the proposed method is proved by a test system.

Key words: Bayesian network; HVDC system; reliability; belief matrix