

Research on Operation and Maintenance Decision-Making of Main Equipment Based on UMM

Shicong Deng, Linfa Li, Weizhao Huang

Shenzhen Power Supply Bureau Co Ltd., Shenzhen
Email: qwp_425951@163.com

Received: Aug. 11th, 2013; revised: Sep. 10th, 2013; accepted: Sep. 20th, 2013

Copyright © 2013 Shicong Deng et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2013 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Shicong Deng et al. All Copyright © 2013 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: In this paper the existing situation of the operation maintenance strategy of gird main equipment is presented and the problems of traditional operation maintenance strategy are analyzed. A new model based on uncertainty multi-stage and multi-object by Bayesian network is presented in this paper, which is for making operation maintenance strategy with the consideration of life cycle cost. In the end a GIS example proves the UMM model's practical applications.

Keywords: Operation Maintenance Strategy; Bayesian Network; UMM

基于 UMM 的主设备运维策略研究

邓世聪, 李林发, 黄炜昭

深圳供电局有限公司, 深圳
Email: qwp_425951@163.com

收稿日期: 2013 年 8 月 11 日; 修回日期: 2013 年 9 月 10 日; 录用日期: 2013 年 9 月 20 日

摘要: 介绍了目前南网运维策略现状, 并分析了现在运维策略中存在的弊端。针对此, 本文提出了一种考虑设备全寿命周期成本, 基于贝叶斯网络模型的不确定多阶段多目标运维决策模型, 并给出了模型求解过程。最后通过建立 GIS 的 UMM (uncertainty) 运维策略模型, 制定最佳的运维策略, 验证所提出 UMM 决策模型的有效性。

关键词: 运维策略; 贝叶斯网络; 不确定性多阶段多目标

1. 南网运维策略研究现状

1.1. 主设备概况

南方电网断路器整体装备水平较高。目前, 500 kV 断路器全部为进口产品, 其中: 西门子公司产品占 53%, ABB 公司产品占 25%, AREVA 公司产品占 23%。220 kV 断路器中国产断路器占 14.5%, 合资及进口断路器占 85.5%。110 kV 断路器中国产断路器占 18%, 合资及进口断路器占 82%。

500 kV 隔离开关进口设备比例达 100%。220 kV 隔离开关以国产设备为主, 进口设备主要为 AREVA、西门子、施耐德等公司的产品, 占 30%; GW4 型仍为这一电压等级主导型号, 占 37.9%; 其次是 GW16 型, 占 9.1%。110 kV 隔离开关中, 进口设备占总数的 4.6%, 国产设备中 GW4 型所占比例最高, 达 62.6%。

此外, 一些新型设备得到了广泛应用, 在城市变大量使用了 GIS、COMPASS、PASS 等组合电器。2000 年后新建的线路分别占 110、220、500 kV 线路长度

的 30%、30%、40%。

1.2. 运维检修策略

传统的运维检修策略包括故障检修和计划检修。故障检修是事后检修，暴露出难以满足用户用电可靠性的要求。而计划检修则为充分考虑设备运行状态，基本按照行业相关规定进行检修安排，存在着欠修和过修等问题，这将缩短设备的安全运行能力和使用寿命。传统的以预防性试验规程为基础的检修制度暴露出以下问题^[1-3]：

- 1) 设备需要停电进行诊断测试；
- 2) 诊断测试和解体后，通常并未发现设备存在问题，导致浪费时间、资源和高的维护成本；
- 3) 设备解体维护后未有效地恢复原状，在维护检查后不久就发生故障。
- 4) 对从初始阶段到临界阶段发展迅速的一定类型的故障模式的响应能力有限，变压器套管故障就是典型的案例。
- 5) 需要大量关于设备的知识和经验；
- 6) 实施和管理费用较高。

目前南网针对重要的电网主设备，引进了状态检修制度。采用在线监测技术，如 GIS 局放在线监测系统、变压器油色谱在线监测、容性设备在线监测装置等。此外还采用了带电测试技术，如紫外检测、电缆振荡波局放检测、开关柜带电局放检测、SF6 气体成分分析、红外检测、GIS 局放带电测试等。

在考虑设备全寿命周期成^[4,5]的情况下，本文通过建立不确定性的多阶段多目标的运维决策模型，得到运维最佳方案，使有限运维资源的充分利用，直接提高了供电可靠性，提高服务质量具有重要作用，并对电力企业的全寿命周期成本进行控制。

2. 不确定多阶段多目标运维决策模型

2.1. 问题描述

不确定条件下多阶段多目标决策问题可以描述如下：

- 1) 集合 $C = \{C_1, C_2, \dots, C_l\}$ 表示进行决策操作之前，所能收集到的原始信息，该信息既可以是确定的，也可以是不确定的。
- 2) 集合 $D = \{D_1, D_2, \dots, D_m\}$ 表示在整个决策问题

中的 m 个决策选择阶段。各决策阶段之间存在时间上的先后顺序关系，即前一个决策阶段的结果会影响后续决策阶段的决策判断。

3) 集合 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_p\}$ 表示问题所有可行的决策方案集合，它由各决策选择阶段的结果组成，例如 $S_1 = (D_1 = \text{True}, D_3 = \text{False}, \dots, D_m = \text{True})$ 。

4) 集合 $O = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}$ 表示该问题需要衡量的 n 个决策目标集合，其中第 j 个决策目标 O_j 有 q_j 种可能的取值 $O_j = (O_j^1, O_j^2, \dots, O_j^{q_j})$ 。注意，各目标变量量纲不同，不具有可加性。

5) $P = \{P_{ij}\} p \times n$ 。是一个决策矩阵， P_{ij} 表示在不确定环境下，第 i 个决策方案对第 j 个决策目标的影响。它是一个随机向量，即执行第 i 个决策方案后，决策目标 O_j 取第 k 种值的概率为 P_{ij}^k 。

6) $W = \{W_1, W_2, \dots, W_n\}$ 表示各决策目标对应的权重系数向量集合，且 $\sum_{j=1}^n \max(W_j) = 1$ 。由于决策目标变量存在多态，决策目标 O_j 各取值的权重分别为 $W_j = (W_j^1, W_j^2, \dots, W_j^{q_j})$ 。

不确定条件下多阶段多目标运维决策问题就是在原始信息 C 已知或部分已知的情况下，依次确定各阶段的运维决策选择，并利用以下公式计算各方案的效用(S_i)；然后，在 p 种方案中选出最优的一种，或者给出这 p 种决策方案的优先顺序，供维护人员参考。

$$\gamma(S_i) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{q_j} W_j^k P_{ij}^k, 1 \leq i \leq p. \quad (1)$$

从问题描述中可以发现，当决策问题规模增大时，决策矩阵 P 将包含 $P \times \sum_{j=1}^n q_j$ 个参数。因此，可以考虑利用决策过程中变量间的条件独立关系来分解决策矩阵。由于贝叶斯网络表示了变量之间的依赖关系，其节点、有向边以及信息内涵有效地表征了偏好、概率估计、备选方案和信息状态；充分利用变量之间的条件独立性，使概率估计和计算更为方便，所以拟采用基于贝叶斯网络来描述决策问题，从而在建模时只需要考虑当前节点与其父节点之间的关系，以达到降低参数规模的目的。采用基于贝叶斯网络来描述决策问题，从而在建模时只需要考虑当前节点与其父节点之间的关系，以达到降低参数规模的目的。

2.2. 不确定多阶段多目标数学模型

不确定条件下多阶段多目标(UMM)决策模型是

用网络结构表达与决策问题有关的各种信息及其相互关系的一种推理模型，一个简单基于贝叶斯网络的 UMM 决策模型实例如图 1 所示。

UMM 决策模型中的节点又可根据变量特征进一步分为以下几个节点子集：

1) 决策环境节点(如图 1 中 C_1): 表达了决策者在进行决策选择前收集的所有外部信息，用圆形表示。它的主要信息来源包括直接观测信息、数学估计信息和专家估计信息；不为决策者所控制。

2) 决策选择节点(如图 1 中 D_1 、 D_2): 代表了决策问题中的一个决策变量，用正方形表示。它表示了某阶段一组备选的可行选择，是决策者可以控制的。

3) 决策传递节点(如图 1 中 E_1): 在多阶段决策问题中，前一阶段的决策选择结果往往会影响到后一阶段决策选择的判断。因此，引入决策传递节点表示前阶段决策选择的后果，用五边形表示。由于这个后果可以为下一阶段的决策选择提供更加完善的支持信息，从本质上看，决策传递节点是一种由决策者控制的决策环境节点。

4) 决策目标节点(如图 1 中 O_1 、 O_2): 表示在决策过程中最终需要衡量的因素，用六边形表示。它体现了决策者在确定一个决策方案后希望得到的结果。

5) 决策价值节点(如图 1 中 V_1 、 V_2): 是决策目标在同一统一量纲下的量化体现，用菱形表示。它表示各决策目标带来的价值，可以根据其父结点状态组合概率及对应的权重计算。

决策者在进行多阶段多目标决策时，往往以现有的决策环境信息为基础，并充分利用已完成决策阶段的效果信息，按顺序确定各决策选择阶段的操作。然后判断选择不同决策方案时各决策目标的实现程度，再利用权重信息衡量各目标的重要度，最后选择出最优的决策方案。这种方式符合人类的思维形式，又使 UMM 模型内含的条件独立性假设更为合适，便于进行概率推理。

2.3. UMM 模型求解步骤

在 UMM 决策模型中，对于决策环境节点，一般没有父节点，只要确定其先验概率即可；决策选择节点表示了决策者的判断，在未进行决策前，默认各可行选择等概率分布；对于决策目标节点和决策传递节点，它们都必然有父节点，所以必须给出其条件概率

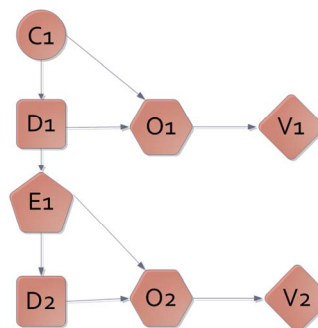


Figure 1. A simple strategy-making model of UMM based on Bayesian network

图 1. 一个简单基于贝叶斯网络的 UMM 决策模型

分布；决策价值节点将以对应的目标节点可行状态的权重代替概率分布。

1) 确定 UMM 决策模型的具体决策环境，更改决策环境节点为当前真实状态分布。如果环境变量为不确定信息，可用概率分布表示，如当前决策环境

$$C_{\text{now}} = (P(C_1 = \text{True}) = 0.3, P(C_2 = \text{True}) = 1, \dots, P(C_i = \text{True}) = 0.5)$$

2) 将决策选择节点设置为证据节点，计算决策目标节点的对应取值。依次确定各阶段决策选择节点的状态，使得决策选择节点集合取值为决策方案 S_i ，如 $S_i = (D_1 = \text{True}, D_2 = \text{True}, \dots, D_m = \text{False})$ 。

3) 利用模型进行推理，得到在当前决策环境 C_{now} 条件下，采用决策方案 S_i 时目标节点各状态发生的概率

4) 依据上述后验概率，用 $P(O_j = O_j^k | S_i, C_{\text{now}})$ 代替式(1)中的 P_{ij}^k ，计算所有决策价值节点的取值之和，即该方案的效用，如下式所示：

$$\gamma(S_i) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{q_j} W_j^k P(O_j = O_j^k | \pi(O_j)) \times P(\pi(O_j) | S_i, C_{\text{now}}) \quad (2)$$

5) 不断地改变各阶段决策选择节点的取值组合的状态，得到各种可行的决策方案 $\{S_1, S_2, \dots, S_p\}$ ，并重复步骤 3 和 4，即可计算出每个决策方案各自的效用 $\{(S_1), (S_2), \dots, (S_p)\}$ ，供维护人员选择参考。

对于复杂的大规模不确定性环境下多阶段多目标决策问题，可以考虑先验环境决策方案求解方法。首先由式(3)计算出各确定环境下所有方案的效用，其中 t 表示决策问题所有可行的确定性决策环境节点状态组合数量， C_x 表示决策环境节点的第 x 种确定取值

组合。然后，在每次进行具体决策时，只要根据实际情况各确定决策环境状态组合的概率分

$(P(C_x), l \leq x \leq t)$ ，即可利用式(4)快速求解不确定环境下的各决策方案的效用。由于 (S_{ix}) 只在预先准备时计算一次，在后续决策问题中，即使决策环境发生变化也可以不断重复使用，从而极大地减少了模型推理过程中的运算量，提高决策的实时性。

$$\gamma(S_i^x) = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{q_j} W_j^k P(O_j = O_j^k | \pi(O_j)) \times P(\pi(O_j) | S_i, C_x) \quad 1 \leq i \leq p, 1 \leq x \leq t. \quad (3)$$

$$\gamma(S_i) = \sum_{x=1}^t \gamma(S_i^x) \times P(C_x), \quad 1 \leq i \leq p. \quad (4)$$

3. 基于 UMM 的 GIS 运维决策模型研究

3.1. GIS 开关的贝叶斯网络模型

首先确定 GIS 运维决策问题的集合 D ，即设备维修决策问题中各影响因素，具体的节点描述及状态如表 1 所示；然后根据因果关系建立起这些节点之间的关联关系，得到的 GIS 维修方案 UMM 模型网络结构如图 2 所示。

3.2. GIS 运维决策模型效用计算分析

上述 GIS 运维决策模型求解的目标就是提供一个维修方案使得 $\sum_{n=1}^3 V_n$ 达到最大值。通过咨询维修决策领域专家，并分析历史故障维修工作记录，确定 GIS 维修方案 UMM 决策模型中相应节点的概率分布 P 。决策环境节点取值为 $P(C_1 = NO) = 1$ ， $P(C_2 = OK) = 0.9$ ， $P(C_3 = OK) = 0.9$ ， $P(C_4 = OK) = 0.8$ 时，决策选择节点的初始概率为等概率分布，其他节点的条件概率如下表 2 至表 8 所示。

根据公式(2)计算各维修决策方案的效用，最终效用如表 9 所示。

根据表 9 所示，采用第 4 种维修方案能够取得最大的效果。相反，进行完全维修，即方案 1、2 的效用值最低。

4. 结论

基于 LCC 的运维决策将是今后的发展方向。根据设备的运行状态和健康状况及备品备件，来制定运维策略。本文在考虑设备全寿命周期成的情况下，通

Table 1. The description of operation maintenance strategy-making model node of GIS based on UMM
表 1. 基于 UMM 的 GIS 运维决策模型节点描述

类别	节点	标识	离散状态
决策环境节点	GIS 维修备件	C ₁	YES, NO
	隔离开关状态	C ₂	OK, FAULT
	断路器状态	C ₃	OK, FAULT
决策选择节点	其他部件状态	C ₄	OK, FAULT
	维修等级 加急采购	D ₁ D ₂	PER, IMP, MIN YES, NO
决策传递节点	GIS 备件短缺	E ₁	YES, NO
决策目标节点	维修时间	O ₁	LONG, MID, SHORT
	维修费用	O ₂	HIGH, MID, LOW
	维修效果	O ₃	OK, FAULT
决策价值节点	时间损失	V ₁	W_1^L, W_1^M, W_1^S
	费用损失	V ₂	W_2^H, W_2^M, W_2^L
	运行损失	V ₃	W_3^O, W_3^F

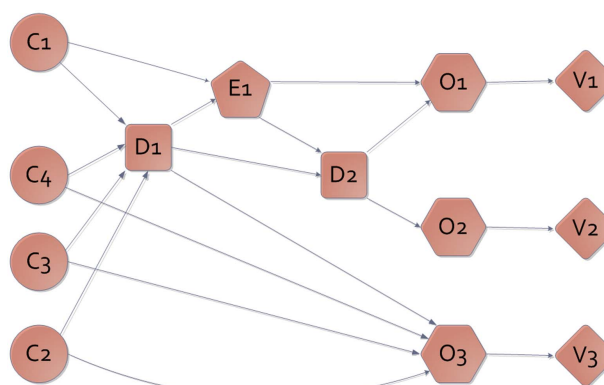


Figure 2. The GIS strategy-making model of UMM based on Bayesian network

图 2. 基于贝叶斯网络模型的 GIS 的 UMM 运维决策

Table 2. The probability distribution of parts shortage
表 2. 备件短缺概率分布

GIS 维修备件	维修周期	备件短缺概率(%)	
		NO	YES
YES	PER	100	0
YES	IMP	100	0
YES	MIN	100	0
NO	PER	0	100
NO	IMP	70	30
NO	MIN	95	5

Table 3. The probability distribution of maintenance time
表 3. 维修时间概率分布

GIS 备件短缺	加急采购	维修时间概率(%)		
		SHORT	MID	LONG
YES	YES	10	80	10
YES	NO	0	10	90
NO	YES	100	0	0
NO	NO	100	0	0

Table 4. The probability distribution of maintenance cost
表 4. 维修费用概率分布

维修等级	加急采购	维修费用概率(%)		
		LOW	MID	HIGH
PER	YES	0	0	100
PER	NO	0	50	50
IMP	YES	0	100	0
IMP	NO	50	50	0
MIN	YES	70	30	0
MIN	NO	100	0	0

Table 5. The probability distribution of maintenance effect
表 5. 维修效果概率分布

设备状态	维修等级	维修效果概率(%)	
		FAULT	OK
OK	PER	0	100
OK	IMP	0	100
OK	MIN	0	100
FAULT	PER	0	100
FAULT	IMP	30	70
FAULT	MIN	100	0

Table 6. The probability distribution of loss of time
表 6. 时间损失条件概率分布

维修时间	LONG	MID	SHORT
时间损失概率(%)	w_1^L	w_1^M	w_1^S
	0	0.15	0.3

Table 7. The probability distribution of loss of cost
表 7. 费用损失条件概率分布

维修费用	HIGH	MID	LOW
费用损失概率(%)	w_2^H	w_2^M	w_2^L
	0	0.1	0.2

Table 8. The probability distribution of loss of operation
表 8. 运行损失条件概率分布

维修效果	OK	FAULT
运行损失概率(%)	w_3^O	w_3^F
	0.5	0

Table 9. The comparison of different maintenance projects
表 9. 不同维修方案效用对比

方案序号(i)	维修等级	加急采购	效用
1	PER	YES	0.65
2	PER	NO	0.565
3	IMP	YES	0.795
4	IMP	NO	0.804
5	MIN	YES	0.762
6	MIN	NO	0.786

过建立不确定性的多阶段多目标的运维决策模型，利用贝叶斯网络计算分析，得到最佳运维决策方案。

通过对 GIS 开关进行运维决策分析，在决策环境节点一定的情况下，决策矩阵 P 的取值对决策结果有很大影响。任意节点条件概率参数变化时都有可能决策风险问题。因此，要制定好科学的正确的运维策略，必须做到如下三点：

- 1) 加强对设备初始状态的管理。
- 2) 利用“浴盆曲线”，建立健全科学的检修模式。
- 3) 基于 LCC 的状态检修。

参考文献 (References)

- [1] 马奔正, 黄宵宁, 葛乐, 等 (2010) 无人值守变电站最优运维策略的分析与建模. *电力系统及其自动化学报*, **22**, 83-87.
- [2] 章健, 张弛, 蒋声婴, 等 (2012) 基于 LCC 的配电站设备检修策略研究. *华东电力*, **40**, 1576-1579.
- [3] 李俭川, 胡莺庆, 秦国军, 等 (2003) 贝叶斯网络理论及其在设备故障诊断中的应用. *中国机械工程*, **14**, 896-899.
- [4] 殷可, 郁东升, 李莉华, 等 (2009) LCC 方法评价 500 kV 变压器的研究与应用. *华东电力*, **37**, 1916-1917.
- [5] 黄良宝, 马则良, 张建平, 等 (2007) 考虑 LCC 管理的电网规划方案评价研究. *华东电力*, **37**, 91-94.