

DOI: 10.13622/j.cnki.cn42-1800/tv.1671-3354.2024.05.019

# 水轮发电机组故障监测系统互感器选型优化设计

张国容<sup>1,2</sup>, 袁建华<sup>1</sup>, 谈 顺<sup>1,2</sup>, 周海齐<sup>2</sup>

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443000; 2. 中国长江电力股份有限公司, 湖北 宜昌 443000)

**摘要:**建设和运维成本低以及安全可靠是水电站水轮发电机组追求的目标。基于 APH 方法设计和优化水轮发电机组故障监测系统方案,通过设置监测系统多个属性,建立方案中互感器选择的层次分析因素矩阵模型,对系统中互感器的功效做出全面的综合评价,选择最优的互感器,并以此量化得到最优的机组故障监测系统方案。

**关键词:** APH; 水轮发电机组; 监测; 互感器; 优化

中图分类号: TM312

文献标志码: A

文章编号: 1671-3354(2024)05-0072-04

## Optimization Design of the Transformer Selection for Fault Monitoring System of Hydro-turbine Generator Units

ZHANG Guorong<sup>1,2</sup>, YUAN Jianhua<sup>1</sup>, TAN Shun<sup>1,2</sup>, ZHOU Haiqi<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and New Energy, Three Gorges University, Yichang 443000, China;

2. China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443000, China)

**Abstract:** Low construction, operation and maintenance costs, as well as safety and reliability of hydro-turbine generator units, are the important goals pursued by hydropower stations. Based on the analytical hierarchy process (AHP) method, a fault monitoring system for hydro-turbine generator units is designed and optimized. By setting multiple attributes of the monitoring system, an AHP factor matrix model for the transformer selection is established. A comprehensive evaluation of the effectiveness of the transformers in the system is then carried out and the optimal transformer types are selected. Thus, an optimal scheme for the unit fault monitoring system is obtained with quantified indicators.

**Key words:** APH; hydro-turbine generator unit; monitoring; transformer; optimization

层次分析法(AHP, the analytic hierarchy process)主要用于定性和定量相互结合系统的分析优化方法。这类系统不仅具有多个和多种类型影响因素,同时其目标要求往往也具有多重性。实践中建设与管理的较为繁杂的工程项目,均属于这种多影响因素和多目标要求的系统。而不管系统中的影响因素和目标要求个数较多,以及这些因素是具备定量特性还是定性特性,都可以使用专家 AHP 法来进行优化决策<sup>[1]</sup>。

AHP 法较为广泛地用于解决如社会、经济和生态等各领域、各方面复杂工程项目的建设、运维管理等。专家 AHP 法基于技术专家库,从而就能和具备定量特性的影响因素一起参与数学运算,最终一起参与系统

目标要求函数的优化计算中去。专家 AHP 法首先要明确系统的目标要求,围绕系统目标要求来制定影响因素的指标体系,来对难以量化的具有定性特性的影响因素实施精细化和标准化的离散操作,将定性指标转化为可以量化的数据指标;若系统目标的达成过程影响因素较复杂,可将目标要求分解为多层子目标,即建立目标评价指标层;以及接着往下分解子目标要求和评价指标层,从而构建出一种递进层次结构。在该递进层次结构中,通过构造两两判断矩阵,求解出该矩阵的特征向量,从而得到每一层元素相对于上一层次下的权重系数,权重系数反映出该层不同指标的相对重要性;最后采用加权方法确定出指标层各指标

收稿日期: 2023-10-08

作者简介: 张国容,男,助理工程师,主要从事水电站设备选型和监测的研究工作。

对总目标要求的权重<sup>[2-3]</sup>。

1 水轮发电机组专家 AHP 分析法的建模分析及优化求解

水电站有关的建设与运维管理项目大多也属于具有多种影响因素和目标要求的系统,因此也可以使用层次分析法(AHP)来进行优化分析以及决策处理。使用 AHP 法来对水轮发电机组状态实施监测和故障处理时:首先要深入地影响水轮发电机组状态的目标要求和多种影响因素进行分析,并依据不同的逻辑

属性把这些影响因素和目标进行划分。多种影响因素和目标要求进行划分后就形成了不同的层次因素矩阵。在因素矩阵中,所处不同层次的影响因素不仅同层次之间相互影响,同时对其他层次的影响因素也有影响,从而形成了各种交互影响系数。为了简明分析这些因素矩阵,如果该层次的影响因素和目标要求数量很多,如果多于 9 条,则一般要再分解出子层次<sup>[4-6]</sup>。

图 1 为分析水轮发电机组状态实施监测和故障处理目标优化问题时,建立的一个典型 AHP 模型图。

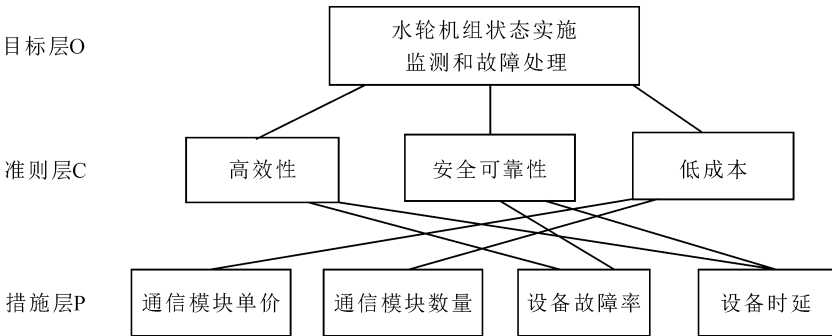


图 1 典型的水轮发电机组状态实施监测和故障处理优化 AHP 模型

把项目中多种影响因素和目标要求进行划分后,形成层次因素矩阵,即判断矩阵,然后来计算矩阵中各种交互影响系数,即特征向量。因素矩阵以及特征向量的计算均基于模型结构图。通过分解项目的目标要求,然后构造层次因素矩阵,并结合各种影响因素得到不同层次的属性及其对应权重系数,从而获得一个综合的权重系数矩阵,在矩阵中根据这些权重系数逐层地逆运算,最后得到目标值<sup>[7-10]</sup>。

为确保水电站水轮机安全可靠运行,技术人员要选择好包括互感器在内的基本硬件型号,来完成对水轮发电机组状态实时监测方案设计,并对各方案达到的目标优化求解,主要包括如下主要步骤:

- 1)建立包括目标层、准则层、方案层等在内的递进阶层次结构模型;
- 2)构造两两判断矩阵,并求解出其特征向量,即每元素相对应的权重系数;
- 3)计算每一层的权向量并通过一致性检验,归一化后形成矩阵特征向量;
- 4)循环上述 3)直到计算出总目标下各因素的权重系数,并一致性检验通过。

基于 AHP 法的水轮发电机组状态实施监测和故

障处理方案的流程如图 2 所示。

2 方案目标指标评价体系的建立

监测系统中互感器的设置与性能对系统的目标实现具有关键作用。针对不同类型不同作用的水电站水轮发电机组状态监测二次系统方案,都需对互感器做出全面评价,综合评价多方面的影响,然后才能选择得到更合适的互感器选型指标体系。

2.1 初始方案描述及对比

在实践中,选取湖北清江水电开发有限责任公司管辖范围内的多个水电站进行水轮发电机组状态监测二次系统方案分析,利用最基础的层次分析法进行互感器的选型。最终求出最优的互感器方案,可供选择的方案如下:

- 1)电压互感器挑选的是电容分压式,电流互感器挑选的是油浸式。将对应的一、二次设备都以常规的方式摆放。
- 2)电压互感器挑选的是电容分压式,电流互感器挑选的是 SF<sub>6</sub> 设备。均采纳一体化配置办法,配置方式和上述方案 1)相似。

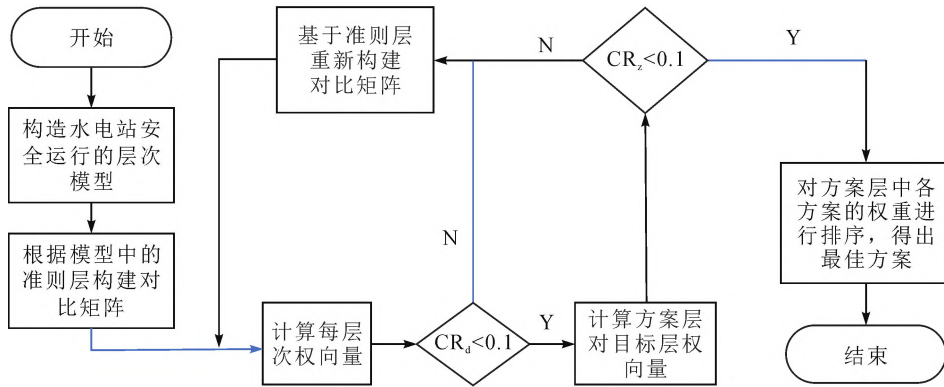


图2 基于 AHP 法的水轮发电机组状态实施监测和故障处理方案流程

3) 电压互感器挑选的是电容分压式, 电流互感器主要选择 RCT 电流互感器和 LPCT 电流互感器。互感器均采用的是单一独立间隔的摆放。

4) 电压互感器挑选的是电容分压式, 电流互感器选择 FOCT 电流互感器。

建立基于 APH 层次分析法的互感器选择评价判断矩阵如下:

$$\begin{aligned}
 A_1 &= \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 1/5 & 3 & 5 \\ 2 & 1 & 1/2 & 5 & 6 \\ 5 & 2 & 1 & 5 & 7 \\ 1/3 & 1/5 & 1/5 & 1 & 2 \\ 1/5 & 1/6 & 1/7 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \\
 A_2 &= \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/4 & 2 & 4 \\ 3 & 1 & 1/3 & 5 & 7 \\ 4 & 3 & 1 & 5 & 7 \\ 1/2 & 1/5 & 1/5 & 1 & 3 \\ 1/4 & 1/7 & 1/7 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \\
 A_3 &= \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/3 & 2 & 4 \\ 3 & 1 & 2 & 3 & 5 \\ 3 & 1/2 & 1 & 4 & 6 \\ 1/2 & 1/3 & 1/4 & 1 & 2 \\ 1/4 & 1/5 & 1/6 & 1/2 & 1 \end{bmatrix} \\
 A_4 &= \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 3 & 4 & 6 \\ 3 & 1 & 2 & 5 & 7 \\ 1/3 & 1/2 & 1 & 4 & 6 \\ 1/4 & 1/5 & 1/4 & 1 & 4 \\ 1/6 & 1/7 & 1/6 & 1/4 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (1)$$

专家群体评价的各个准则的相对权重向量取为:

$$W = (\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4 + \omega_5) / 5 = [0.176 \ 8, 0.340 \ 5, 0.361 \ 5, 0.079 \ 1, 0.042 \ 1]^T \quad (2)$$

## 2.2 目标指标及下级各因素权重确定

本文建立了基于 AHP 的以五个指标度量的互感器选择法, 其建立过程如下: 首先, 请水电站水轮发电机组运维和状态监测技术人员以及电力行业中对互感器熟悉的专家组对每个指标进行相互独立的评价, 使用 AHP 中的 1-9 标度手段来获得这些指标的权重系数。论文中以查验系数  $CR < 0.1$  进行判断, 最后形成一个经过了一致性查验的全面权重向量矩阵。

接下来论文计算全面权重向量矩阵的特征向量, 找出最大的特征值, 再以最大特征值对特征向量实施归一化, 归一化后的特征向量为  $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ , 通过算术平均获得相对权重向量  $W$  如公式 (3) 所示:

$$W = (\omega_1 + \omega_2 + \dots + \omega_n) / n \quad (3)$$

本文建立了基于 AHP 的以测量特性、可靠性、经济性、环境因素和配置灵活性共五个指标度量的互感器选择评价体系。使用 AHP 中的 1-9 标度手段来获得这些指标的权重系数。

1) 测量特性层的权重系数获取。测量特性应该归结为定性因素, 专家会使用定性语言来评价每个方案的该层价值。每个方案具体的权重系数如下:

$$w_B = [0.095 \ 5, 0.095 \ 5, 0.249 \ 5, 0.559 \ 6]^T \quad (4)$$

2) 可靠性层的权重系数获取。可靠性应该归结为定性因素, 本论文针对湖北清江水电开发有限责任公司下属多个水电站水轮发电机组实施不同的状态监测方案进行可靠性的计算。本文参考权威专业机构针对每个方案中的互感器可靠性评价指标来进行评判。每个方案具体的权重系数如下:

$$w_C = [0.255 \ 3, 0.579 \ 6, 0.110 \ 5, 0.054 \ 6]^T \quad (5)$$

3) 经济性层的权重系数获取。经济性应该归结为定量因素, 本文使用的经济性层指标利用互感器的

全生命周期成本的倒数来计算,同时使用互感器的成本作为修正参照,不同类型互感器的成本很容易通过市场调研数据获取得到。每个方案具体的权重系数如下:

$$w_D = [0.313\ 9, 0.273\ 9, 0.265\ 6, 0.146\ 6]^T \quad (6)$$

4) 环境因素层的权重系数获取。环境因素应该归结为定性因素,综合各专家使用的定性语言来评价每个方案的该层价值。每个方案具体的权重系数如下:

$$w_E = [0.386\ 1, 0.386\ 1, 0.164\ 7, 0.063\ 2]^T \quad (7)$$

5) 配置灵活层的权重系数获取。配置灵活因素也应该归结为定性和定量因素的综合,综合专家使用的定性语言以及参考互感器安装工时工资等数据来评价每个方案的该层价值。每个方案具体的权重系数如下:

$$w_F = [0.067\ 1, 0.106\ 3, 0.446\ 4, 0.380\ 1]^T \quad (8)$$

### 3 方案优化过程及确定

本论文研究的具体工程项目为:通过对水电站水轮发电机组实施不同的状态监测方案,从而提高这些水电站水轮发电机组运行的安全和可靠性。在这个总目标之下,对于不同准则的相对权重以及不同方案在不同指标之下的相对权重进行了科学和权威的量化和计算,针对本次工程设计了指标层  $w_B, w_C, w_D, w_E, w_F$  共五个,每个指标层有四个方案权重系数,然后形成  $4 \times 5$  矩阵,获得不同方案下的综合优先权重如下式所示:

$$W = V * w = \begin{bmatrix} 0.095\ 5 & 0.255\ 3 & 0.313\ 9 & 0.386\ 1 & 0.067\ 1 \\ 0.095\ 5 & 0.579\ 6 & 0.273\ 9 & 0.386\ 1 & 0.106\ 3 \\ 0.249\ 5 & 0.110\ 5 & 0.265\ 6 & 0.164\ 7 & 0.446\ 4 \\ 0.559\ 6 & 0.054\ 6 & 0.146\ 6 & 0.063\ 2 & 0.380\ 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 0.176\ 8 \\ 0.340\ 5 \\ 0.361\ 5 \\ 0.079\ 1 \\ 0.042\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.250\ 6 \\ 0.348\ 3 \\ 0.209\ 6 \\ 0.191\ 5 \end{bmatrix} \quad (9)$$

最终通过运算可以得出分析,CT 的选择以常规六氟化硫为佳,PT 选择的是电容分压式。即采用 APH 方法计算出所有方案之中最优的方案占权重最大的方案就是方案 2;CT 选择的是常规的六氟化硫设备,PT 选择的是电容分压式。均采用一体化的安装方式,所有的互感器都选择通过设置单独的支架和设备,将对应的一、二次设备都以常规的方式摆放。

方案 2 能够满足当前水电站对于水轮发电机组状

态监测的互感器配置的要求。虽然智能电网建设中比较看重互感器的自动化程度以及功能方面的强大,不过在电网体系建设中,体系可靠性占有比较重要的权重,即体系可靠性还是目前智能水电站建设优化选择的方向。本论文通过优化分析所选取的方案 2,方案中互感器测量精度不是最高的,但互感器构成的系统可靠性高,并且互感器安装实施灵活方便,符合现场工作实际需要,经实践检验,也确定了其为最优方案。结果表明采用 AHP 方法进行互感器优化配置分析,这种分析方式既兼顾互感器选择时所要考虑的定量因素,同时也兼顾了定性因素。

### 4 结 语

安全可靠以及建设和运维追求低成本和高效率性是水电站水轮发电机组追求的目标指标。本文基于水轮发电机组故障监测系统中关键元件之一的互感器的准确度和测量特性,基于 APH 方法得到水轮发电机组故障监测系统模型,以及互感器选型指标评价体系。然后依据故障监测系统模型和互感器选型指标评价体系,设计比较了多组水轮发电机组故障监测系统互感器方案,对各方案中的层次分析因素矩阵进行设计并计算,获取综合优先权重来对各方案互感器的功效进行整体优化评价,从而较为方便地甄选出水轮发电机组故障监测系统互感器最优化的方案。

#### 参考文献:

- [1] 李发保. 基于层次分析法的生态环境评价研究——以安徽省舜盛矿山为例[J]. 绿色科技, 2022, 24(16): 119-123
- [2] 朱喜龙. 基于层次分析法的河道底泥重金属污染环境风险评价研究[J]. 河南科技, 2022, 41(14): 110-114
- [3] 赵鑫, 孙春花, 沈贤. 基于层次分析法的城市生态环境质量评价[J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(5): 163-166
- [4] 庄明. 基于故障参数辨识的水轮发电机组综合状态监测系统研究[J]. 水电站机电技术, 2017, 40(4): 13-17
- [5] 周俊. 水轮发电机组状态监测系统的组成及应用探讨[J]. 低碳世界, 2016, 6(16): 63-64
- [6] 江学文, 刘春波. 状态监测系统在水轮发电机组配重中的应用[J]. 水力发电, 2009, 35(1): 40-42
- [7] 张成. 水轮发电机组状态监测系统的组成及应用[J]. 机电信息, 2011(18): 3-4
- [8] 令狐克诚. 水电站水轮发电机组远程监测系统设计与实现[J]. 科技创新与应用, 2022, 12(23): 117-121
- [9] 李美威. 大型水轮发电机组推力轴承润滑状态监测与故障诊断研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020
- [10] 杨铭轩, 于亚雄, 李青, 等. 基于 KNN 的水轮机组轴承监测与故障诊断[J]. 自动化与仪器仪表, 2023(4): 66-70