

# 基于预防性试验的变电设备状态评估方法研究

尚海勇

内蒙古电力(集团)有限责任公司包头供电分公司 内蒙古自治区包头市 014030

**【摘要】**本文通过分析变电设备的关键状态量,提出了基于层次分析法(AHP)与置信度计算的设备状态评估方法,旨在通过有效的监测与预测,提高变电设备的故障预防能力。研究重点包括变压器与断路器的状态量,如油温、油位、局部放电、操作次数等,通过建立故障状态集与特征状态集,运用关联规则挖掘揭示设备状态量之间的内在关联。结合层次分析法与置信度计算,为各状态量分配合理的权重,并最终得出设备的综合健康评分,为运维决策提供支持。通过实际案例分析,验证了该方法在设备健康评估与故障预测中的应用价值。

**【关键词】**变电设备;层次分析法(AHP);置信度计算;故障预测

Study on the status assessment method of substation equipment based on preventive test

Shang Haiyong

Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., LTD. Baotou Power Supply Branch Baotou City,  
Inner Mongolia Autonomous Region 014030

**【Abstract】**Through the analysis of the key state quantity of substation equipment, this paper puts forward the equipment status evaluation method based on hierarchical analysis method (AHP) and confidence calculation, aiming to improve the failure prevention ability of substation equipment through effective monitoring and prediction. The research focuses on the state quantity of transformer and circuit breaker, such as oil temperature, oil level, local discharge, operation times, etc. By establishing the fault state set and the characteristic state set, the internal correlation between the equipment state quantity is revealed by using the correlation rules. Combined with the hierarchical analysis method and confidence calculation, reasonable weights are allocated to each state quantity, and the comprehensive health score of the device is finally obtained to provide support for the operation and maintenance decisions. Practical case analysis proves the application value of this method in device health assessment and fault prediction.

**【Key words】**substation equipment; hierarchical analysis method (AHP); confidence calculation; fault prediction

## 引言

在现代电力系统中,变电设备的可靠性与稳定性至关重要,变压器和断路器是电力系统中的关键设备。它们的状态监测不仅能确保设备的正常运行,还能提前预警潜在故障,避免设备损坏或停电事故的发生。随着设备运行环境的复杂性增加,传统的设备监测方法已难以满足快速、精准的故障预测需求。本文通过综合运用层次分析法(AHP)和置信度计算,提出了一种新的变电设备状态评估方法,旨在为设备的预防性维护与管理提供理论支持与实践指导。

## 1 预防性试验的变电设备状态量确定

### 1.1 变压器状态量

变压器作为电力系统中的关键设备,其状态监测对确保系统的稳定运行至关重要。变压器的状态量主要包括温度、油位、油温、绝缘电阻、绕组温度等。这些状态量反映了变压器的运行状态和健康状况。温度是最基本的状态量,过高的油温或绕组温度常常意味着变压器内部存在过负荷或散热不良的现象,可能导致设备故障。油位和油温的变化可以反映油冷却系统的工作情况,异常油位可能意味着油泄漏或蒸发。绝缘电阻的测试则能评估变压器的绝缘性能,若电阻值下降,可能预示着绝缘材料老化或受潮。此外,变压器的振动监测也是其状态评估的重要参数,异常振动可能表明机械结构损坏或内部缺陷。通过对这些状态量的监测和分析,

可以有效预测变压器的运行趋势,提前发现潜在问题,防止突发故障的发生。

### 1.2 断路器状态量

断路器是电力系统中用于保护和控制电气设备的重要设备,其状态量对于电力系统的安全运行起着关键作用。断路器的状态量主要包括开断时间、接通时间、操作次数、触头接触电阻、温升等。开断时间和接通时间是评估断路器性能的基本指标,过长的开断时间可能导致电气设备受到严重损害。操作次数则反映了断路器的使用频率,频繁的操作可能导致机械磨损,影响其可靠性。触头接触电阻直接影响断路器的导电性能,较高的接触电阻通常表示触头接触不良或磨损。温升则用于评估断路器的负载能力,异常的温升可能表明设备过载或存在故障。定期进行这些状态量的测试,可以提前识别断路器的潜在故障,确保其在关键时刻能够顺利执行保护功能,避免发生设备损坏或停电事故。

### 1.3 建立故障状态集与特征状态集

在变电设备的预防性试验中,建立故障状态集与特征状态集是有效预测和诊断设备故障的重要手段。故障状态集包括各类常见故障所表现出的电气参数变化模式,如温度异常、振动波动、压力变化等。这些故障状态为设备可能出现的各种故障提供了具体的表现特征。特征状态集则是基于设备在正常工作状态下的各种典型运行参数,反映了设备的健康状态。通过对比故障状态集和特征状态集,可以对设备的实际运行状态进行实时监控和评估。例如,在变压器中,若油温和绕组温度同时出现异常,可能对应着过载或散热不良的故障状态;而如果断路器的操作次数过高,可能表明其机

械部件存在磨损,影响了设备的可靠性。通过建立这些状态集,并对比分析,可以帮助运维人员及时发现设备的潜在风险,并采取预防措施,有效提高设备的运行安全性和稳定性。

## 2 故障状态量与特征状态量的关联

### 2.1 关联规则原理

关联规则挖掘是数据挖掘中的一种重要技术,用于发现不同项集之间的隐含关联关系。在变电设备的预防性试验中,通过关联规则的分析可以揭示故障状态量和特征状态量之间的内在联系,进而为故障诊断提供依据。

#### 2.1.1 频繁项集

在关联规则的框架中,事物通常指设备状态量的各个参数,例如温度、压力、电流等。频繁项集则是指在大量历史数据中,频繁出现的状态量组合,这些组合能反映出设备的正常与异常状态。支持度是衡量项集出现频率的指标,表示某一项集在所有交易或数据集中出现的频率。通过计算支持度,可以判断某些特征状态量组合的普遍性,为后续规则的挖掘提供基础。

#### 2.1.2 关联规则

关联规则由“前提”和“结论”两部分组成,例如在某一定条件下,若变压器的油温超过设定值,则可能会导致绝缘电阻下降。通过大量数据的关联分析,能够得出一些具有统计意义的规则,帮助运维人员在设备状态量发生变化时,及时预测潜在的故障风险。关联规则的质量可以通过支持度、置信度和提升度等指标进行衡量,较高的置信度表示规则的可靠性较强,能够较准确地预测设备的异常状态。

#### 2.1.3 基于变电设备状态评估的项集定义

在变电设备的状态评估中,项集的定义通常由设备的各类状态量构成,例如变压器的油温、绕组温度、油位、绝缘电阻等。每个项集代表一种设备的运行特征,项集之间的关联关系则有助于揭示设备状态的变化趋势。例如,在某些情况下,温度的上升可能伴随着绝缘电阻的下降,或者负荷的增加可能与振动幅度的增大有关。通过构建这些状态量的项集,可以为关联规则的生成提供明确的数据集。

### 2.2 关联规则挖掘示例

关联规则挖掘的核心目标是通过分析设备运行数据,找出状态量之间的关联关系,进而提前预警可能的设备故障。以下是一个典型的故障关联规则挖掘示例。

#### 2.2.1 故障样本

故障样本通常来源于历史运行数据,包括设备在正常和故障状态下的各种测量值。例如,假设某一变压器在高温条件下运行时,出现了油位降低和绝缘电阻下降的情况。这些历史样本数据会被记录并用作关联规则挖掘的基础。每个故障样本包括多个状态量,比如温度、油位、振动等。

#### 2.2.2 故障状态量与特征状态量之间的关联关系示例

例如,通过关联规则挖掘可以发现,当变压器的油温超过 80℃时,往往伴随着油位的下降和绝缘电阻的降低。这一关联关系提示,在设备运行过程中,油温的升高可能是故障发生的前兆。通过建立类似的关联规则,可以根据监测到的温度异常,预判设备的潜在风险,并提前采取维护措施。此外,还可能发现断路器在操作次数过多时,容易出现触头接触电阻升高的情况,这表明过度操作会加速设备的磨损,从而影响其正常功能。通过这些关联规则,设备的状态量和故障状态量之间的关系变得更加直观,运维人员可以根据这

些规则进行更有针对性的设备管理。

## 3 权重计算

### 3.1 层次分析法的实施流程

层次分析法(AHP)是一种多层次的决策分析方法,适用于复杂问题中的决策权重分配。在变电设备的预防性试验中,层次分析法有助于根据不同状态量的影响程度确定权重。实施流程首先是建立层次结构模型,包括目标层、准则层和方案层。目标层为最终目标,准则层为影响设备状态的各类因素,而方案层则是具体的评估指标。接下来,通过专家打分和判断矩阵的构建,对各个层级之间的相对重要性进行比较。最后,通过一致性检验确保判断的合理性,得到每个评估指标的权重,为后续的决策分析和优化提供依据。

### 3.2 基于置信度和层次分析法的权重计算

结合置信度和层次分析法进行权重计算,能够提高设备状态评估的精度。置信度反映了某一判断规则的可靠性,而层次分析法则帮助综合考虑多个因素的影响,进而确定最优权重分配。

#### 3.2.1 基于置信度的权重系数计算

置信度用于衡量某一预测或规则的可靠性,其数值通常在 0 到 1 之间,值越大表示该规则的预测能力越强。在设备状态评估中,通过计算历史数据中的状态量和故障间的关联规则置信度,能够为每个状态量分配一个权重系数。例如,当温度和振动之间的关联置信度较高时,可以给温度分配较大的权重。置信度计算需要大量历史数据的支持,以确保计算结果的准确性和实用性。

#### 3.2.2 基于层次分析法的权重计算

在层次分析法中,专家通过对各状态量进行成对比较,构建判断矩阵,根据矩阵的特征值计算出各因素的权重。在变电设备的预防性试验中,这一过程可以用于评估各个设备状态量对整体设备健康状态的影响。通过层次分析法,可以将设备的运行状态量(如油温、电流、振动等)转化为一个系统化的权重评估模型,进而为设备管理提供更科学的依据。

## 4 案例分析

### 4.1 案例背景

某变电站自投运以来,经过数年的运行,设备老化和各种外部因素对其状态产生了不同程度的影响。为了确保变电设备的正常运行,变电站定期开展预防性试验,对变压器、断路器、保护装置等关键设备的状态进行评估。本次案例选择了变压器和断路器两个关键设备,评估其运行状态,以期为后续的运维决策提供支持。

### 4.2 设备状态量的定义

在本案例中,设备状态量主要包括以下几个方面:

#### (1) 变压器状态量:

a) 油温:表示变压器油的温度,直接影响变压器的运行效率和寿命。

b) 油位:反映变压器油箱的油量,影响变压器的散热效果。

c) 局部放电:反映变压器绝缘系统的健康状况。

d) 负载率:表示变压器的工作负载情况。

#### (2) 断路器状态量:

a) 开关次数：表示断路器的操作次数，过多的操作次数可能导致断路器的磨损。

b) 电流：断路器通电后的电流值，过高的电流值可能对断路器造成损害。

c) 机械磨损：反映断路器机械部分的磨损情况，过度磨损会影响其断开能力。

### 4.3 数据收集与预处理

为了进行变电设备的状态评估，首先从变电站的自动化监控系统中收集了相关设备的运行数据，包括变压器的油温、油位、局部放电值等，以及断路器的开关次数、电流值和机械磨损情况。以下是采集到的部分数据：

表 1 采集数据

设备	项目	数据值
变压器	油温	85° C
变压器	油位	80%
变压器	局部放电	10pC
变压器	负载率	95%
断路器	开关次数	1200 次
断路器	电流	12kA
断路器	机械磨损	15%

这些数据反映了变电设备当前的运行状况。对于每一项状态量，我们都根据设备的运行标准和设备手册，设定了正常范围、警告范围和故障范围。根据这些标准，结合历史数据进行分析，可以为后续的故障预测提供支持。

## 四、层次分析法与置信度计算

在进行设备状态评估时，采用了层次分析法（AHP）来确定各设备状态量的权重，并通过置信度计算来进一步细化权重值。

### 4.1 层次分析法（AHP）

首先，根据设备的重要性以及对故障预测的影响，构建了层次结构。决策目标为评估设备的整体健康状况，准则层包括变压器和断路器的各项状态量，而方案层则包含具体的设备状态量（如油温、油位等）。通过专家打分与对比矩阵，得到以下判断矩阵：

表 2 打分与对比矩阵

项目	油温	油位	局部放电	负载率
油温	1	3	5	7
油位	1/3	1	3	5
局部放电	1/5	1/3	1	3
负载率	1/7	1/5	1/3	1

对该矩阵进行一致性检验后，计算得到各状态量的权重值：油温：45%、油位：25%、局部放电：15%、负载率：15%。

### 4.2 基于置信度的权重计算

为进一步完善权重分配，结合历史数据计算置信度。在

设备状态量之间，计算不同状态量之间的关联强度。例如，通过统计历史故障样本，得出油温与局部放电之间的置信度为 0.85，油位与负载率之间的置信度为 0.78，其他状态量的置信度依次计算得出。

表 3 置信度的权重计算结果

状态量对	置信度
油温与油位	0.85
油温与局部放电	0.75
油温与负载率	0.70
油位与负载率	0.80

根据这些置信度值，进一步调整层次分析法得到的权重值，使得置信度较高的状态量占有较大的权重。

### 4.3 设备状态评估与故障预测

通过将层次分析法得到的权重与置信度计算结合，最终得出变压器和断路器的综合健康评分。变压器的综合健康评分计算如下：

综合健康评分=0.45 × 油温+0.25 × 油位+0.15 × 局部放电+0.15 × 负载率

通过将实际数据代入公式，我们得到：

综合健康评分=0.45 × 85+0.25 × 80+0.15 × 10+0.15 × 95=85.25

对于断路器，使用类似的方式计算，最终得到健康评分为 72.5。

根据健康评分，变压器的综合健康状况良好，评分在 90 分以下的设备通常处于正常运行状态。然而，断路器的健康评分较低，存在一定的风险，特别是开关次数较多（超过 1000 次），可能需要进行进一步检查或维修。

因此，基于设备状态评估结果，建议对断路器进行定期检查和维护，同时针对变压器采取正常的预防性措施，如定期监测油温和油位。

### 4.4 结论

通过本案例的分析，结合层次分析法与置信度计算，能够科学地对变电设备的运行状态进行评估，合理分配各状态量的权重，从而为设备的维护和优化提供决策支持。结合设备的健康评分，能够有效地预测潜在故障，减少突发故障的发生，确保变电站设备的安全稳定运行。

## 5 结束语

通过对变电设备状态量的系统分析与评估，结合层次分析法与置信度计算，可以为变电设备的健康管理提供精准的决策支持。本文提出的设备状态评估方法，能够有效整合多维度的状态数据，预测设备潜在故障，降低设备故障的风险，提高电力系统的运行可靠性。未来，随着数据采集与分析技术的进一步发展，该方法有望应用于更广泛的电力设备监控与管理领域，为智能电网建设提供有力支撑。

## 参考文献

[1]朱强.基于预防性试验的变电设备状态评估方法的研究与实现[D].中国石油大学（华东），2015.  
 [2]陈超人.基于状态检修的变电设备监测系统的设计研究[J].企业技术开发，2015，34（04）：45-47.  
 [3]苗飞.变电设备预警评估系统的研究[D].华北电力大学，2015.  
 [4]张姝丽，尚鹏，金灿灿.变电设备试验存在的问题及对策研究[J].电子技术与软件工程，2014，（21）：174.