

基于D-S融合的配网设备状态可信度评估方法研究

配网设备安全稳定运行直接关系到用户的用电体验，然而传统的定期配电检修方法费时费力，易发生两次检修之间出现故障的事件，且大规模安装在线监测系统的投入产出比较低。因此通过对实际运行数据分析，找出与配网设备状态直接相关且易于获得的变量，分析变量的置信区间，基于D-S融合建立设备评价模型，提出了一种新的设备状态可信度评估方法，为设备状态检修提供参考。

沈 煜 杨 帆 杨志淳/国网湖北省电力公司电力科学研究院
郑 重 于志诚/华北电力大学高电压与电磁兼容北京市重点实验室

0 引言

配网设备运行质量直接影响用户用电体验，是电力供应系统中“最后1 km”。因此对配网设备进行状态评价，保证设备的正常运行具有重要的意义。

虽然国家电网公司对配网设备的评价有《配网设备状态评价导则》作为指导，但配网设备数量多、范围广、价值低且故障影响小，依照《配网设备状态评价导则》全面检测则监测系统硬件量、人工量与数据量极大，投入产出比小，并且各种状态对最后结果的表征可能存在互相矛盾或数据缺失等情况^[1]。因此建立一种新的评价模型，可以方便、准确地评估出设备目前的状态，对于减少检修部门工作量、提高配网供电可靠性具有重要的意义。

本文针对目前配网中可获得数据进行分析，确定可有效反映设备状态的数据量，在此基础上建立新的评价模型，利用D-S判据解决判据来源之间的冲突

性，将缺失信息的置信区间带入评价模型得到设备的状态分布区间，解决非全信息下的设备状态评价问题。为配网设备合理安排检修进度提供依据^[2]。

1 筛选重要变量

传统设备评价方法：《配网设备状态评价导则》中，对反映设备状态的变量指标有明确的规定，但在实际的操作过程中许多指标难以获取或获取性价比极低。如某些评价方法中要求提供变压器局部放电数据信息，但在实际的配网中配电变压器造价低、故障影响范围小，故而检修部门通常不对配电变压器的局部放电信息进行测量。因此对反映设备状态的物理量进行筛选，从数据分析的角度出发，提出能有效反映设备状态且相对较易获得的数据，对减轻设备维护工作量、实现设备“网络式一体化管理”有着重要的意义^[3]。

本文对湖北某地供电局配电网PMS系统、SCADA系统中可获得的数据进行处理^[4]，如图1所示，利用相关性分析与故障溯源法提取出与设备最终损耗相关联的变量作为评价模型的输入项。

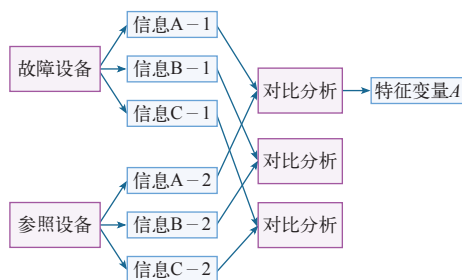


图1 故障溯源法流程

国家重点研发计划重点专项（2016YFB0901800）。



沈 煜/高级工程师

关键词/Keywords

配电检修·
D-S融合·
置信区间·
评价模型·

图2为良好变压器套管与故障套管的绝缘电阻随运行时间的变化。

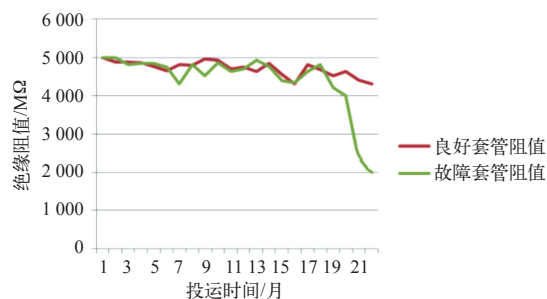


图2 故障套管绝缘阻值对比

以变压器为例，经过数据筛选后确定的输入评价系统的状态变量如表1所示。

表1 配电变压器特征变量

部件	特征变量				
	绝缘电阻	温度	外观污秽	负荷情况	接地电阻
绕组及套管	✓	✓	✓	✓	
油箱		✓	✓		
接地			✓		✓
绝缘油		✓	✓		
导线及接头		✓	✓		

2 设备状态量打分

对于不同的设备状态变量，打分方法有所不同，对于不可量化的状态变量（如外观）采用经验打分法^[5]；对于可量化但不同个体由于制造等原因有所不同的状态变量（如绝缘电阻）采用函数图打分法^[6]；对于可量化且只受运行影响的状态变量（如接头温度）采用统计分布图打分法。

2.1 经验打分法

经验打分法是根据检修人员的现场经验，人为地对设备状态进行分级，不同的等级打不同的分数，以变压器油箱外观污秽为例：无污秽100分；轻微污秽85分；明显污秽75分；严重污秽65分。

2.2 函数图打分法

针对不同个体状态变量不尽相同（如绝缘阻值），故而打分函数以百分比的形式给出，变压器绝缘电阻打分函数图和过负荷打分函数图分别如图3和图4所示。

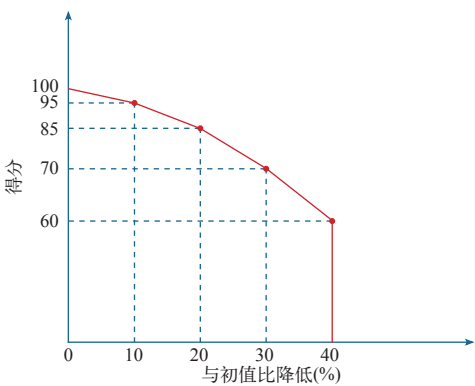


图3 绝缘电阻打分函数图

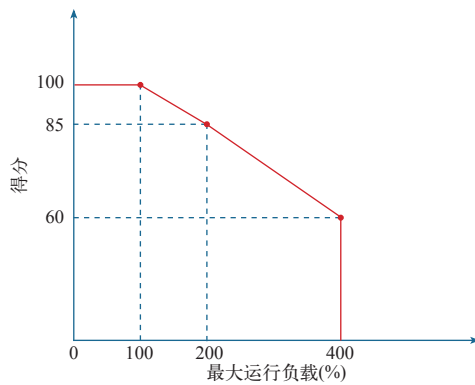


图4 过负荷打分函数图

2.3 统计分布打分法

对于温度等受运行状态影响且无法与以往数据对比的变量，采用统计方法求出其置信区间，根据置信区间参数设定相应的打分方程。以变压器接头温度为例。

图5为变压器温度的统计结果。

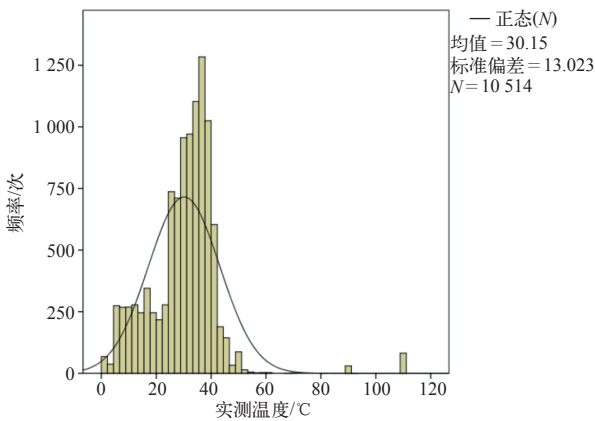


图5 变压器接头温度

由统计结果可得变压器接头温度满足均值为30.15℃、标准偏差为13.023的正态分布。由数学

知识易知其概率分布函数为

$$F(x)=\frac{1}{13.023\sqrt{2\pi}}e^{-\frac{(x-30.15)^2}{2\times13.023^2}} \tag{1}$$

设测量结果为y，得分B按下式计算

$$B=\begin{cases} 100 & y<\text{均值} \\ 100-0.8\left(\int_{-\infty}^y P(x)dx-0.5\right)\times100 & y\geq\text{均值} \end{cases} \tag{2}$$

3 基于D-S模型建立评价模型

3.1 建设备状态评语集

建设备状态评语集： $C=\{\text{良好，正常，可疑，异常，危险}\}=\{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5\}$ 。

1) 设备处于“危险”状态。指设备状态量严重超出异常值或严重异常，设备在运行中随时可能发生事故。此时，设备应该立即停电进行检修。

2) 设备处于“异常”状态。指设备状态量接近或达到规程中的异常值，显示设备将要或者已经出现故障，但是在短期内不会发生事故的情况。此时，应减小设备检修的周期。

3) 设备处于“可疑”状态。指某些状态量参数反映设备内部可能有异常显现，设备状态量接近异常值。此时，应加强对设备的关注。

4) 设备处于“正常”状态。指设备状态量正常或其中个别参数表明可靠性稍有下降，但远未达到异常值。此时，应按照设备原有检修计划安排检修。

5) 设备处于“良好”状态。指设备运行稳定，所有状态量符合标准或远离异常值。此时，设备发生故障的概率极低，可以长期运行。

3.2 确立状态评语隶属度

将设备状态变量打分之后，单一分值对应确定的评语，如80分代表良好、81分代表异常，1分的波动致使设备处于两种不同的状态，这显然是不合适的。因此利用模糊判据的方式对得分进行隶属度划分，状态等级隶属度函数图^[7]如图6所示。

由图6可得隶属度函数如下。

良好状态隶属函数

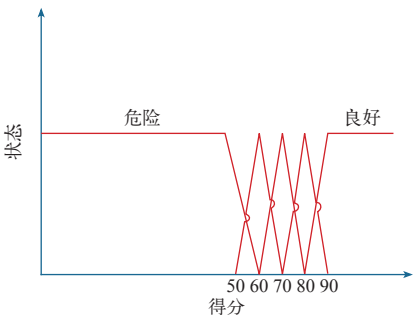


图6 状态等级隶属函数图

$$u(x)=\begin{cases} 1 & x\geq90 \\ 0.1x-8.0 & 80\leq x<90 \\ 0 & x<80 \end{cases} \tag{3}$$

正常状态隶属函数

$$u(x)=\begin{cases} -0.1x+9.0 & 80\leq x<90 \\ 0.1x-7.0 & 70\leq x<80 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \tag{4}$$

可疑状态隶属函数

$$u(x)=\begin{cases} -0.1x+8.0 & 70\leq x<80 \\ 0.1x-6.0 & 60\leq x<70 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \tag{5}$$

异常状态隶属函数

$$u(x)=\begin{cases} -0.1x+7.0 & 60\leq x<70 \\ 0.1x-5.0 & 50\leq x<60 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \tag{6}$$

危险状态隶属函数

$$u(x)=\begin{cases} 1 & x<50 \\ -0.1x+6 & 50\leq x<60 \\ 0 & x\geq60 \end{cases} \tag{7}$$

将设备得分带入隶属度函数，即可得到所对应的状态评语概率，表2为变压器套管各评价状态得分对应评语集概率。

表2 套管各评价指标对应评语集概率

(单位：%)

状态（得分）	评语概率				
	良好	正常	可疑	异常	危险
绝缘电阻（88）	80	20	0	0	0
温度（87）	70	30	0	0	0
外观（85）	50	50	0	0	0
重过载（88）	80	20	0	0	0
三相不平衡（86）	60	40	0	0	0

3.3 多维信息融合

不同评价指标对于设备最终状态的反映不尽相同，数据之间存在冲突与矛盾，本文利用D-S理论将不同来源的评价指标融合，得到设备最终状态的概率分布，保证了评价体系的客观准确。

D-S 证据理论^[8-10]是1967年由Dempster提出的，他首先提出了上、下界概率的定义，后由Shafer于1976年加以推广和发展，故也把证据理论称为D-S理论。证据理论可处理由不知道所引起的不确定性。

对一个判决问题，设所能认识到的可能结果用集合 U 表示， U 称为识别框架。如果有一批针对该框架的证据，那么依据证据理论，可以在框架 U 上产生一个信度函数。信度函数是该批证据作用的结果。它反映了根据该批证据对框架 U 可识别的各个命题所赋予的真值。如果有多批证据同时作用于框架 U ，可以用Dempster合成法则合成依据每批证据所得到的信度函数，该信度函数可以表示以上各批证据的联合作用^[11-13]。

不同评价指标经过模糊判据得到的评语集概率即为该证据所对应的信度函数（置信度函数）。

针对识别框架 U ，假设两个证据信息对于该命题的信度函数分别为 $m(X)$ 、 $m(Y)$ ，每个证据得到对命题的基本概率赋值函数。对于同一识别框架，需要通过特定的规则进行融合，得到目标命题的最终信任函数。

若两个证据对状态 Q 支持的概率分别为 $m_1(X)$ 、 $m_2(Y)$ ，两个证据对于状态 Q 的支持程度的合成法则为

$$m(Q) = \begin{cases} 0 & X \cap Y = \emptyset \\ \frac{\sum_{X \cap Y = Q, X, Y \in U} m_i(X) m_i(Y)}{1 - \sum_{X \cap Y = \emptyset, X, Y \in U} m_i(X) m_i(Y)} & X \cap Y \neq \emptyset \end{cases} \quad (8)$$

式中， $m(Q)$ 为两个证据对状态 Q 的合成支持度。

融合法则亦可推广到多个证据的情况，进行分析处理，即

$$m(Q) = \begin{cases} 0 & X \cap Y \cap Z \cdots = \emptyset \\ \frac{\sum_{X \cap Y \cap Z \cdots = Q} m_i(X) m_i(Y) m_i(Z) \cdots}{1 - k} & X \cap Y \cap Z \cdots \neq \emptyset \end{cases} \quad (9)$$

式中， $k = \sum_{X \cap Y \cap Z \cdots = \emptyset} m_i(X) m_i(Y) m_i(Z) \cdots$ 为证据间冲突系数； $1 - k$ 为归一化因子，可以防止融合时空集分配置信度。

将表2各置信度函数带入式（9），即得到各变量对套管状态的合成支持度，如表3所示。

表3 套管状态概率

（单位：%）

状态	良好	正常	可疑	异常	危险
合成概率	98.2	1.8	0	0	0

3.4 权重计算与整体评价合成

利用3.3节中各步骤可以获得设备各部件的合成概率，采用国家电网《配网设备状态评价导则》中规定的部件权重，进行加成计算以获得设备最终状态分布概率。

以变压器权重为例，由于《配网设备状态评价导则》中某些评价部件在本项目中被删去，所以权重值应进行归一化，归一化之后变压器部件归一化权重如表4所示。

表4 变压器部件权重

部件	绕组与套管	油箱	接地	绝缘油	导线与接头
权重	0.375	0.125	0.125	0.25	0.125

3.5 一票否决制

当致命指标：各设备绝缘电阻，出现严重超标的情况时（绝缘低于初始绝缘水平的40%，得分低于60分），将绝缘电阻的权重至为1，即采用一票否决制，无论其他指标是否良好，均认为设备处于危险状态，应即刻采取检修措施。

4 数据缺失评价方法

由于配电网设备众多，在监测、记录的过程中可能会出现数据缺失的情况，例如某台变压器没有温度数据，本文利用非全信息置信区间带入的方法解决了在此情况下如何评价设备的状态

的问题。

如当变压器接头温度数据由于某种原因造成缺失。

1) 将该数据的统计分布式(3)带入打分式(4)中,由此得到该数据的得分分布情况 $F(X_{分})$ 。

2) 将得分分布函数按照隶属度函数所分区间进行划分(注意温度小于均值得分均为满分),并在各个区间内分别对得分分布函数 $F(X_{分})$ 进行积分。

3) 积分段的积分结果即为表征该积分段所对应的状态概率。

随后将该概率与其他信息来源一同带入融合公式,即可得到最终设备状态置信区间。

当缺失数据不止一种时,如当缺失数据种类为 N 时,将 N 中缺失数据依次和已有数据带入评价模型,得到 N 组概率分布,然后根据各缺失数据的权重进行融合,以得到最后的状态概率置信区间。

5 结束语

本文通过对大量现场运行数据的分析,统计出和设备状态直接相关的状态变量的置信分布区间,通过模糊打分得到不同状态变量所得分值,然后经由D-S融合将不同证据来源的判据进行融合,得到设备最终状态概率分布区间,使设备评价结果的信度大幅提高,所得结果不再是单一状态,而是置信区间,检修人员可以更好地依据此结果对设备合理地安排检修。

在本文的研究过程存在由于技术原因导致部分设备检测数据种类不全的问题,在未来的展望中,配电系统的数据监测系统更加完善^[14],所得数据更加齐全,使评价结果更加准确。

参考文献

- [1] 白洋. 面向大数据的电力设备状态监测信息聚合研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.
- [2] 宫宇, 吕金壮. 大数据挖掘分析在电力设备状态

评估中的应用[J]. 南方电网技术, 2014, 8(6): 74-77.

- [3] 翟登辉. 基于数据挖掘技术的电力网络状态估计研究[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2010.
- [4] 安文斗, 孙才新, 周泉, 等. 基于SCADA/AM/FM/GIS的电气设备绝缘在线监测系统的设计[J]. 中国电力, 2003, 36(11): 29-32.
- [5] 李双全. 10 kV配电设备状态评价模型的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [6] 范帅. 配电网关键设备状态检修评估与决策支持系统研究与开发[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- [7] 廖瑞金, 王谦, 骆思佳, 等. 基于模糊综合评判的电力变压器运行状态评估模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 70-75.
- [8] 张阳, 何正友, 林圣. 一种基于DS证据理论的电网故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(9): 5-10.
- [9] 王力. 基于DS证据理论的多传感器数据融合算法研究与应用[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- [10] 董增寿, 邓丽君, 曾建潮. 一种新的基于证据权重的D-S改进算法[J]. 计算机技术与发展, 2013(5): 58-62.
- [11] Shannon C E. A mathematical theory of communication[J]. Mobile Computing and Communications Review, 2001, 5(1): 3-55.
- [12] 刘青松, 等. 基于正反向推理的电力系统故障诊断专家系统[J]. 电网技术, 1999, 29(9): 66-68, 71.
- [13] 袁炜灯, 吴杰康, 郑风雷, 等. 多元件并列运行电力系统供电可靠性评估方法[J]. 电气工程学报, 2017, 12(2): 43-46.
- [14] 苏鹏声, 王欢. 电力系统设备状态监测与故障诊断技术分析[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(1): 61-65.

(收稿日期: 2016-08-10) **EA**