

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.03.023

# 变电站经济运行年限区间评估研究\*

许 巍<sup>1</sup>, 杜振东<sup>2</sup>, 王慧芳<sup>1\*</sup>

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江省电力公司 经济技术研究院, 浙江 杭州 310008)

**摘要:**针对现阶段电网规划、改造等相关决策缺乏变电站寿命依据的问题,将最小二乘支持向量机、全寿命周期成本理论和区间分析法应用到变电站寿命评估中。对变电站外部运行环境和自身质量状况进行了综合分析,在考虑变电站不同运行年限的情况下,建立了上述两种因素对变电站缺陷级故障、失效级故障和事故级故障 3 类故障率的影响关系,提出了一种变电站经济运行年限区间的评估方法。在 3 类故障率变化下,计算了变电站的年维修成本区间和故障成本区间,最后将变电站年平均成本最小的运行年数区间作为变电站的经济运行年限区间。研究结果表明,最终计算得到的变电站经济运行年限区间能为电网规划、变电站改造等决策提供有益指导,进一步提高电网规划与运维决策的科学性。

**关键词:**变电站故障率;经济运行年限区间;变电站改造

中图分类号:TM731

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)03-0409-06

## Research on economical operating life interval evaluation of substation

XV Wei<sup>1</sup>, DU Zhen-dong<sup>2</sup>, WANG Hui-fang<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. The Economic and Technical Research Institute, Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310008, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that planning and retrofit of power network require more evidences based on substation life, least squares support vector machine, the theory of life cycle cost and interval analysis were investigated. After operating environment and quality condition of substation were analyzed, the influence of factors above on the failure rate of the three types of failure which are ordinary failure, larger failure and catastrophic failure were established considering different enlistment ages of substation. A method was presented to estimate economical operating life interval of substation. Based on the change of the three types of failure rate, annual maintenance cost interval and failure cost interval were calculated. At last, the time interval with the minimum annual average cost was regarded as economical operating life interval of substation. The results indicate that proposed method is beneficial for decision-makings such as network planning and substation retrofit, and can further improve scientific character of power network planning and decision-making of operation and maintenance.

**Key words:** failure rate of substation; economical operating life interval; substation retrofit

## 0 引 言

从系统的观点看,电网是由变电站和输电线路构成的。变电站内设备种类繁多且设备间寿命匹配状况复杂多样,因此在未达到预期设计寿命之前就可能出现设备故障率偏高、更换频繁等情况。通过对具有一

定役龄的变电站进行寿命评估,可以有效避免过高的故障率或频繁的维修造成大量直接经济损失,并且在减少停电造成的电网高风险运行后果和间接经济损失方面更有不可估量的作用<sup>[1-2]</sup>。在电网的全寿命周期资产管理中,变电站寿命预测能够实现电力设备间的寿命匹配,提高设备利用率,减少电力企业运营成

收稿日期:2014-10-17

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51107112);国家电网浙江省电力公司科技项目“变电站、线路全寿命应用模型研究”资助项目(5211011306Y1)

作者简介:许 巍(1989-),男,浙江宁波人,主要从事电力设备状态评估方面的研究。E-mail: xuwei1989@zju.edu.cn

通信联系人:王慧芳,女,副教授,硕士生导师。E-mail: huifangwang@zju.edu.cn

本<sup>[3-4]</sup>。此外,随着我国电网规模的不断扩大和电网结构的日益复杂,合理的变电站运行年限还可用于指导未来电网的规划、改造和升级<sup>[5]</sup>。因此,对变电站进行运行年限评估具有重要意义。

由于不同类型变电站之间设备寿命匹配差异较大以及运行环境多有不同,至今尚未制定出统一的变电站运行年限评判标准。变电站的经济性评估虽只涉及资金收支,但在考虑成本等经济性指标时综合了故障率等可靠性指标<sup>[6]</sup>,故对变电站进行经济运行年限评估更为可行。根据全寿命周期成本理论,变电站固定初始投入成本的年均值逐年减少,运维成本随着运行年数的增加不断提高,总成本年均值最小时的运行年数即为变电站的经济运行年限。由于变电站的维修成本和故障成本与故障率关系密切,变电站的故障率预测是评估变电站经济运行年限的前提。但是,以往基于威布尔分布或指数分布的故障率模型<sup>[7-8]</sup>仅仅将役龄作为变量,并没有考虑众多影响变电站故障率的因素,因此不适合作为变电站故障率的预测模型。此外,若对故障后果的严重程度不加以区分,则难以精细化计算故障成本和维修成本。因此,故障率预测结果的误差和全寿命周期成本部分参数粗略计算的主观性会使得采用单一定值计算的经济寿命结果有较大偏差。

本研究根据历史统计资料,对影响变电站故障率的因素进行整理和分类,主要包括变电站外部环境、内部质量状况两类;然后利用模糊综合评判法和层次分析法分别计算各因素隶属度和权重。接着,参考国网的相关标准<sup>[9]</sup>,根据故障后果严重程度将故障分为缺陷级故障、失效级故障和事故级故障 3 种类型,通过最小二乘支持向量机结合变电站的役龄、运行环境及质量状况的相关数据对变电站的 3 种故障率分别进行训练输出和误差计算,得到变电站的故障率区间模型。最后,将区间分析法引入到全寿命周期成本理论中,由待评估变电站故障率区间计算故障成本和维修成本并将各成本指标区间化,以年均成本最小为目标求解最优的变电站运行年限区间。

## 1 影响变电站故障率的因素分析

### 1.1 影响因素集和评语集的建立

笔者的研究对象是较高电压等级的屋外变电站。电力企业多年收集的数据表明,该类变电站故障的发生主要与运行环境、质量状况有关。考虑到变电站各类因素评估的模糊性,本研究将模糊综合评判法与层次分析法相结合建立评估变电站的因素集和评语集。

因素集从变电站的外部运行环境、内部质量状况进行相关因素及子因素的说明,分别如表 1、表 2 所示。

表 1 运行环境评估因素集 E

因素集	子因素说明
气候 $E_1$	温度、湿度、风速
自然灾害 $E_2$	雷电、覆冰、台风等自然灾害严重程度
污秽等级 $E_3$	影响绝缘受污秽程度
电力需求饱和度 $E_4$	电力需求程度和实际供给程度

表 2 质量状况评估因素集 H

因素集	子因素说明
一次设备 $H_1$	变压器、断路器等一次设备质量状况
二次设备 $H_2$	保护测量控制等二次设备质量状况
土建 $H_3$	接地网、电缆沟、房屋等建设质量状况
匹配状况 $H_4$	一次设备、二次设备、土建之间的匹配

本研究将变电站的运行环境 E 和质量状况 H 及各下层因素,均分为“优异”、“尚好”、“一般”、“不良”4 个等级,即评语集为:  $V_{\{\text{优异,尚好,一般,不良}\}} = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ 。

### 1.2 因素模糊隶属度和权重的计算

变电站定量因素的取值评价是通过研究文献[10-11]的规程和技术规定后总结出的,而定性因素则要依据专家的主观经验给出。

定量因素隶属度的计算采用三角形分布法。利用三角形分布函数,建立因素估分值与相应评估等级的隶属度函数。三角形分布函数如图 1 所示。

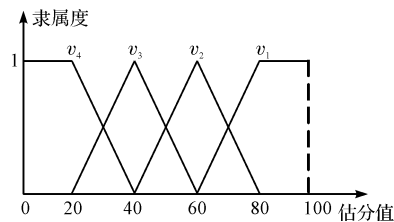


图 1 三角形隶属函数

各因素根据子因素集的指标得分评估得到相应估分值。估分值的范围为 0 ~ 100,由子因素集的单指标分值与权重乘积之和求得。雷电灾害、变压器两种子因素的得分评估情况如表 3、表 4 所示,其他定量因素限于篇幅原因不再列出。

表 3 雷电灾害评估

子因素集	指标集	单指标分值	权重
雷电日	$\leq 30$	5	10
	31 ~ 50	3	
	$> 50$	2	
落雷密度/ (个 · km <sup>-2</sup> )	$\leq 5$	5	10
	6 ~ 10	3	
	$> 10$	1	

表4 变压器得分评估

子因素集	指标集	单指标分值	权重
役龄(年)	≤20	5	10
	21~30	3	
	>30	1	
短路故障次数	0	5	5
	1~2	3	
	≥3	1	
检修记录 (家族记录和该台 变压器记录)	良好	5	5
	中等	3	
	较差	1	

定性因素隶属度的计算采用模糊统计试验法<sup>[12]</sup>。本研究通过专家调查的形式给出评判对象和评判指标依据,制作评价表给各位专家,根据专家的评定情况计算各个指标的隶属度,指标隶属度  $r_{ij}$  的计算公式如下:

$$r_{ij} = \frac{P_{ij}}{P_{total}} \quad (1)$$

式中: $P_{ij}$ —认为因素集中第  $i$  指标属于评语  $v_j$  的专家人数; $P_{total}$ —参加评定的专家总人数; $u$ —因素集中的因素个数, $i=1,2,\dots,u,j=1\sim4$ 。

在求得因素集的隶属度之后,可得因素集模糊隶属度矩阵  $R$ 。如运行环境因素集  $E$  的评判矩阵  $R_E$  为:

$$R_E = \begin{matrix} R_{E_1} & r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ R_{E_2} & r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ R_{E_3} & r_{31} & r_{32} & r_{33} & r_{34} \\ R_{E_4} & r_{41} & r_{42} & r_{43} & r_{44} \end{matrix} \quad (2)$$

本研究采用层次分析法(AHP)中的“9分度法”对各因素进行权重赋予。如运行环境因素集  $E$  的计算权重  $W_E$  为:

$$W_E = [w_{E_1} \quad w_{E_2} \quad w_{E_3} \quad w_{E_4}] \quad (3)$$

### 1.3 运行环境和质量状况的综合评估及评分

$B$  为模糊综合评判结果,则  $B$  的计算公式如下所示:

$$B = WoR \quad (4)$$

式中:“ $o$ ”—运算符,代表合成运算,本研究采用  $M(\cdot, +)$  模型,即:

$$b_j = \sum_{i=1}^u w_i r_{ij} \quad (5)$$

式中: $b_j$ —因素集对评语  $v_j$  的隶属度; $w_i$ —因素集中第  $i$  因素的权重。

笔者计算得到因素集的模糊综合评估向量后,依照最大隶属度原则,则因素集的综合评估结果为最大隶属度所对应评语  $v_j$ 。本研究假设评语集对应的评分集为  $S = \{s_{v_1}, s_{v_2}, s_{v_3}, s_{v_4}\} = \{1, 2, 3, 4\}$ ,即相应的评语等级对应相应的评分,则综合评估结果为评语  $v_j$  的因素集评分为  $s_{v_j}$ 。

笔者按照上述步骤,依次求得变电站因素集  $E, H$

的综合评估结果,并得到各因素集相应评分  $S_E, S_H$ 。

## 2 变电站故障率区间预测模型

### 2.1 历史数据训练和误差分析

变电站的故障率与役龄、运行环境和质量状况的函数关系是不明确的,很可能存在复杂的非线性关系,本研究采用最小二乘支持向量机进行训练,对变电站故障率的统计以年为时间周期,单位为次/年。

用于函数估计的最小二乘支持向量机算法推导见文献[13],本研究取径向对称的高斯函数作为核函数:

$$K(x, x_i) = \exp - \frac{\|x_i - x\|^2}{2\sigma^2} \quad (6)$$

变电站电压等级不同,采用的设备类型多有差异,导致故障率差别较大,因此在对变电站故障率进行训练拟合时,应采用相同电压等级的变电站数据。

此外,本研究提出根据变电站的故障后果严重程度,来分别计算故障率,以提高后续经济分析的准确度。本研究参考文献[9]和相关电力公司统计资料,将故障分为缺陷级故障、失效级故障、事故级故障3种类型。3类故障说明如表5所示。

表5 故障类型说明

故障类型	说明
缺陷级	变电站设备严重缺陷,无需停电检修
失效级	变电站设备故障停运,但未酿成事故
事故级	变电站设备故障停运,并造成电网事故

变电站故障率预测模型中,样本为变电站基本信息向量  $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3})$  和变电站实际故障率统计值  $y_i = (y_{i1}, y_{i2}, y_{i3})$ 。其中, $i=1,2,\dots,M+N$ ( $M+N$ 组样本); $x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}$  分别表示变电站役龄  $T$ ,外部运行环境因素集评分  $S_E$ ,内部质量状况因素集评分  $S_H$ ;  $y_{i1}, y_{i2}, y_{i3}$  分别为缺陷级故障、失效级故障和事故级故障的故障率统计值。该模型采用  $M$  组样本做训练,  $N$  组样本做验算,误差计算公式如下:

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{|y_n^{re} - y_n^{pre}|}{y_n^{re}} \quad (7)$$

式中: $y_n^{re}$ —用作验算的样本变电站故障率实际统计值; $y_n^{pre}$ —用作验算的样本变电站故障率预测值; $N$ —用作验算的样本数量; $\varepsilon$ —误差平均值。

### 2.2 待评估变电站的故障率区间预测

对待评估变电站进行故障率预测时,该变电站的运行环境因素集评分  $S_E$  取变电站投运后历史平均水平来判定,质量状况因素集评分  $S_H$  按照变电站投运后运行状况来评定。

假设变电站最长能运行至  $T_{max}$  年,求得  $S_E, S_H$  后,

将待评估变电站的役龄按“1”到“ $T_{\max}$ ”依次代入,求得该变电站不同役龄时的 3 类年故障率。最后,根据误差  $\varepsilon$  将故障率区间化,计算 3 类故障的故障率范围。故障率区间化公式如下:

$$[\lambda_t^{\min}, \lambda_t^{\max}] = [(1 - \varepsilon)\lambda_t, (1 + \varepsilon)\lambda_t] \quad (8)$$

式中: $\lambda_t^{\min}, \lambda_t^{\max}$ —第  $t$  年待评估变电站故障率的下限和上限; $\lambda_t$ —训练输出后第  $t$  年待评估变电站故障率预测值。

### 3 变电站年均成本区间计算

#### 3.1 变电站全寿命周期成本分析

全寿命周期成本分析是从变电站的长期经济效益出发,全面考虑变电站的设计、建造、设备购置及安装、运行、维修直至报废的全过程中所发生的成本。全寿命周期成本分解结构一般可表示为:

$$C^{LCC} = C^I + C^O + C^M + C^F + C^D \quad (9)$$

式中: $C^{LCC}$ —全寿命周期成本; $C^I$ —初始投入成本; $C^O$ —运行成本; $C^M$ —维修成本; $C^F$ —故障成本; $C^D$ —废弃成本。变电站的成本构成如表 6 所示。

表 6 变电站成本构成表

$C^{LCC}$	费用项目构成	时间阶段
$C^I$	规划设计、土地设备购买及建造成本	购建成本
$C^O$	定期检修、日常巡视费用	
$C^M$	故障部件更换及维修人工成本	运行阶段
$C^F$	故障造成的直接和间接损失成本	
$C^D$	设备退役处理及残值回收成本	报废阶段

变电站的全寿命周期成本可分为随故障率变化的劣势成本和不随故障率变化的折旧成本两类。受故障率影响较大的劣势成本主要有维修成本  $C^M$  和故障成本  $C^F$ 。考虑到变电站的运行年限较长,涉及到资金的时间价值,本研究采用加入贴现率的方式进行了成本在时间上的折算。当变电站运行至第  $Z$  年退役时,其年平均成本如下式所示:

$$NF_Z = \frac{1}{Z} C^I + \sum_{t=1}^Z (C_t^O + C_t^M + C_t^F) \frac{1+R}{1+r}^{t-1} - C^D, t = 1, 2, \dots, Z \quad (10)$$

式中: $NF_Z$ —变电站的年平均费用; $Z$ —变电站的运行年限; $r$ —贴现率; $C_t^O, C_t^M, C_t^F$ —变电站第  $t$  年的运行成本、维修成本和故障成本; $R$ —人工材料费用增长率;结合电力部门的相关数据资料,可得历年人工材料费用的增长幅度。

劣势成本主要有维修成本  $C^M$  和故障成本  $C^F$ , 变电站第  $t$  年所需的维修成本和故障成本分别为:

$$C_t^M = \sum_{k=1}^3 C_k^M \lambda_k(t) \quad (11)$$

$$C_t^F = \sum_{k=1}^3 C_k^F \lambda_k(t) \quad (12)$$

式中: $C_k^M$ —变电站  $k$  类故障的平均维修成本; $C_k^F$ —变电站  $k$  类故障的平均故障成本; $\lambda_k(t)$ —变电站  $k$  类故障率,下标  $k=1, 2, 3$ —缺陷级故障、失效级故障、事故级故障。

#### 3.2 变电站成本区间化计算

考虑到变电站中各种成本的单一值计算往往会造成较大的误差,故本研究使用区间分析法<sup>[14]</sup>采取区间数进行计算。

变电站完工后,初始投入成本  $C^I$  是固定的。运行成本  $C^O$  在运行计划确定的情况下,每年的支出基本在一个区间内浮动。变电站改造时,原有站址可以继续使用,且变压器、断路器等设备废弃后仍旧拥有较高剩余价值,故废弃成本  $C^D$  一般较高,其计算公式如下:

$$C^D = p \times C^I \quad (13)$$

式中: $p$ —废弃成本百分比区间。

此外,社会贴现率  $r$ 、维修成本  $C_k^M$ 、故障成本  $C_k^F$ 、人工材料费用增长率  $R$  均采用区间数表示。

求得各类成本区间之后,通过寻找年平均费用  $NF_Z$  最小时的运行年数范围,可得变电站的经济运行年限区间。

### 4 算例分析

本研究对某地区一座 220 kV 变电站进行经济运行年限区间评估,该变电站于 2004 年 5 月投运,完成时造价为 9 122 万元。该变电站的模糊综合评判结果如下:

$$B_E = [0.1450 \quad 0.3615 \quad 0.4355 \quad 0.0579]$$

$$B_H = [0.2302 \quad 0.4619 \quad 0.2854 \quad 0.0225]$$

可得变电站外部运行环境因素集  $E$  和内部质量状况因素集  $H$  的评估结果分别为一般、尚好,即  $S = [S_E, S_H] = [3, 2]$ 。

故障率预测模型中,采用 40 组样本做训练,5 组样本做验算。由最小二乘支持向量机训练输出,则变电站缺陷级故障、失效级故障和事故级故障的故障率曲线如图 2~4 所示。

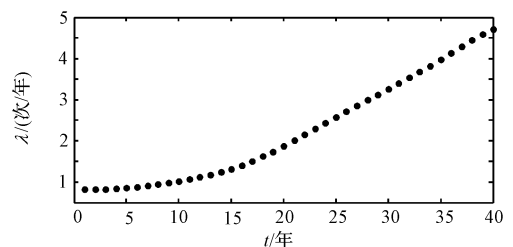


图 2 缺陷级故障的变电站故障率

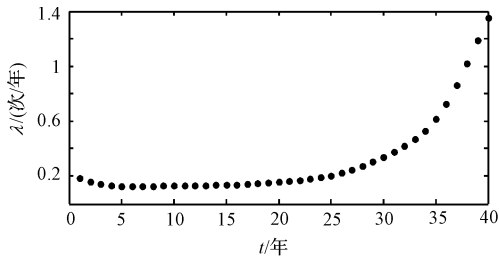


图3 失效级故障的变电站故障率

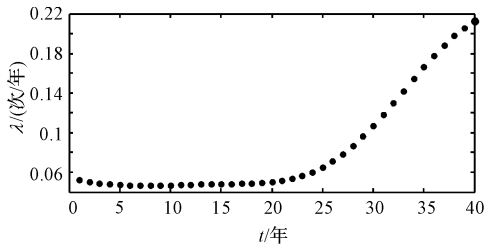


图4 事故级故障的变电站故障率

由图2~4中的故障率曲线变化趋势可得,失效级故障和事故级故障在变电站开始投运的一段运行时间内基本保持故障率稳定,但分别在运行时间达到30年和25年后增长较快速,缺陷级故障则保持持续增长趋势,说明随着变电站运行时间的增长和其内部设备的老化,平时的基本运维已经无法使得失效级和事故级的故障率保持稳定水平,需要进一步加强维护。缺陷级故障则由于其无需停电检修即可消除,对变电站可靠运行影响较另两种故障小而没有使其在运行年限内强制保持稳定。本研究根据式(7),求得缺陷级故障、失效级故障和事故级故障的误差分别为7.93%、8.31%、7.64%,故取故障率的预测误差为±8.5%。参考文献[15]和实际电力公司的相关历史数据,变电站各成本及相关经济参数区间如表7所示。

表7 变电站各成本及相关经济参数区间

成本及相关经济参数	区间范围
运行成本/(万元/年)	[75,100]
缺陷级故障平均维修和故障成本和/(万元/次)	[25,40]
失效级故障平均维修和故障成本和/(万元/次)	[215,260]
事故级故障平均维修和故障成本和/(万元/次)	[530,600]
社会贴现率 $r$	[0.055,0.06]
人工材料费用增长率 $R$	[0.053,0.058]
废弃成本百分比 $p$	[0.2,0.25]

本研究根据上述数据,计算出变电站不同运行年限时的年平均全寿命周期成本的上下限值并绘制成曲线,如图5、图6所示。

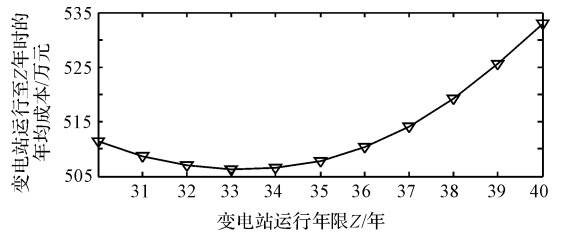


图5 变电站年平均全寿命周期成本(上限)

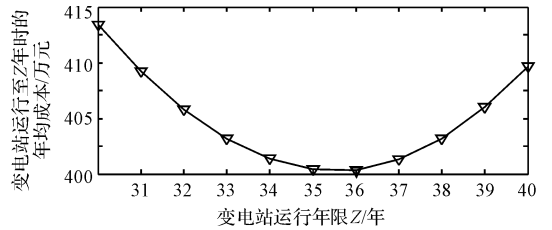


图6 变电站年平均全寿命周期成本(下限)

图5中的曲线表示变电站在最高故障率和最高运行故障成本下运行至年33年时,其年平均全寿命周期成本最小。图6中的曲线表示变电站在最低故障率和最低运行故障成本下运行至36年时,其年平均全寿命周期成本最小。因此,该变电站经济运行年限区间为33年~36年。

结合电网规划和变电站改造计划,当变电站由于容量不足需要扩容时,若变电站役龄距经济运行年限区间较远,可以选择扩建,若变电站役龄距经济运行年限区间较近,则可以选择重建。该算例中变电站还较新,离经济运行年限还远,面对所在地区负荷增长较快的要求,建议该站扩建或在负荷增长密集区新建一变电站。

## 5 结束语

笔者研究了变电站经济运行年限区间的评估方法,可以得到如下几个结论:

(1)与以往单役龄变量的故障率曲线拟合预测模型相比,本研究结合了变电站中故障“多因素影响,多后果构成”的复杂特性以及故障率误差分析,使得变电站故障率预测结果更加合理。

(2)运用区间化方法,并以年均成本最小作为判据求得综合可靠性和经济性指标的变电站经济运行年限,充分考虑了不确定信息对变电站运行年限评估结果的影响,提高了结果的可信度和合理性。

(下转第423页)

### 本文引用格式:

许巍,杜振东,王慧芳. 变电站经济运行年限区间评估研究[J]. 机电工程,2015,32(3):409-413,423.

XV Wei, DU Zhen-dong, WANG Hui-fang. Research on economical operating life interval evaluation of substation[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015,32(3):409-413,423.