

基于动态权变层次分析法的输电网络线路风险评估模型

基于动态权变的思想,提出了输电网络线路健康状态动态评估的权变层次分析法,对于输电线路的影响因素进行分析提炼,总结出主要的影响因素变量,以动态权变的思想构建输电线路评估的层次模型,研究状态变量的体系结构并计算状态的期望值。系统分析输电网络状态评价、故障概率分析、风险评估等环节,提出了输电网络线路风险评估方案以及适合输电线路健康度评估的新算法。

纪航 袁奇 蒋文贤 何冰/ 国家电网上海市电力公司检修公司

0 引言

能源是经济发展的保障,特别是电力能源在经济的发展中所扮演的角色更是重中之重,确保电力的稳定,是国民经济发展的必然要求。输电网络安全是保证电力稳定运行的基础,在新的经济发展时期,输电网络安全可靠将会有更高的要求。输电网络的安全实际上是确保输电网络中的输电线路和输电杆塔的安全,任何一点出现问题,都会影响整个输电网络的安全,甚至会造成大规模的输电网络崩溃。进而就要求在日常的输电线路维护中,做好前期的预防,对输电网络中输电线路的安全评估,动态了解输电线路的运营状况,根据评估结果,进行人为的干预,对安全度较低的线路实施停电检修,将隐患消灭在萌芽阶段,避免大面积的停电故障的发生,确保输电线路安全稳定运行,提高整个输电网络的输电安全保障程度,为国民经济的发展保驾护航。

输电线路精益化是现阶段输电网络管理的重点,减少输电线路停电次数,避免大规模的网络输电线路停电事故的

发生,提高整个输电线路的鲁棒性,传统的输电线路定期停电检修或者是故障后的检修等安全保障模式已不再适用,对输电线路实时监控,动态评估安全度的应急检修策略成为电网安全的日常检修维护的常态,成为输电线路提升精益化管理的重要技术支撑^[1-2]。鉴于输电线路动态安全评估的迫切性,大量的学者、电力行业从业者根据实际的工作情况,结合输电线路在日常检修中存在的问题,进行了相关的理论和实际的研究积累。但是系统的研究并不多见,特别是定量的研究比较少。本文研究的对象就是输电线路的安全评估问题,借助动态权变层次分析法的评估策略,系统梳理输电线路状态评估,包括输电网络的状态评价、故障概率分析、风险评估等环节,进而提出有关输电线路风险评估的方法策略,以期对输电线路的风险评估和日常检修维护提供理论参考。

1 动态权变的输电网络线路风险评估模型

1.1 基于动态权变层次分析法的输电网络线路状态评价

动态的输电线路安全度评估,实际上涉及到对整个输电线路健康度在不同环境下的评估,涉及到不同的参数变量在特定环境下的权变,对于输电线路的评价结果产生影响。在实际评估过程中,影响输电线健康状况的因素很多,在不同的环境下影响因素的权重也不一样,在构建输电线路健康度评估模型时,不仅要考虑这种状态参量与评价目



纪航/工程师

关键词/Keywords

输电线路·
层次分析法·
故障概率分析·
风险评估·

标之间的关系,还要考虑状态参量彼此之间的关系,参数权重发生变化。因为在进行目标层的评价时,往往因为权重的分配不合理会使得权重较小的状态参量会消失^[3]。输电网络本身是一个非常复杂的系统,影响输电网络运行的因素众多,而且在不同时期状态参量的权重也不同。本文借鉴动态权变层次分析法的思想,通过对输电网络中输电线路状态变量进行分析,构建影响输电线路动态权变层次分析法的评价层,对于状态层的信息进行分析,进而构建具有层次化的输电线路状态变量的指标体系。由于状态变量之间的关系随外界环境影响而变化,重要性程度也将不同,需要动态调整状态变量的权重大小,基于动态权变的思想对输电线路进行健康度评估,评估结果更加科学准确。相对于传统的层次分析方法,状态变量的自始至终的权重都是不变的,每一个状态的变量具有相同的状态,无法保证外界因素对于状态变量的影响,每一个状态变量的描述不能真实反映状态变量的变化,这也是传统的层次分析方法的局限性^[4-5]。本文借鉴动态权变的输电线路动态评估的思想,突破传统层次分析方法的局限性,在因素集合中,状态变量因为环境发生改变后有不同的取值,使评价结果更加合理准确。输电线路网络本身涉及因素多,是一个复杂系统,所有下层因素对于上层因素有影响,从整体的角度研究下层对于上层的影响,下层因素实际上是输电线路系统的输入,上层因素实际上视为系统的输出,中间的过程无法清晰展示,是一个黑箱过程。图1中向上的箭头表示系统自下而上的输入输出过程;基于权变的AHP分析方法,既保存了静态权重的AHP层次分析法的框架,又在一定程度上扩展了传统的层次分析法,从全局的视角切入研究各层影响因素之间的关系,使相关结论更加可靠,更符合现实意义。

将输电网络线路各层的影响变量分成多目标层次,最高层属于总的目标层,研究输电线路的总体安全度或者是健康度指标;中间层属于总目标下的子目标,实际上总目标的刻画,研究输电线路健康的影响因素,分为各项性能指标、部件指标与状态指标。V:表示总目标;R:表示目标

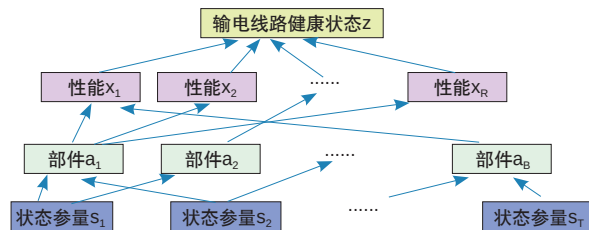


图1 输电网络线路动态权变层次分析结构

性能指标中的影响因素数量;S:表示部件指标中的影响因素数量;T:表示部件状态指标中的影响因素数量。

若输电线路各状态量指标的取值为: $V=(S_1, S_2, \dots, S_n)$, u_1 定义为状态量指标 S_1 的效用值, ω_1 定义为状态量指标 S_1 的变权。对于输电线路的健康度综合评价可以写成

$$Y = \omega_1 u_1 + \omega_2 u_2 + \dots + \omega_n u_n \quad (1)$$

令 $\frac{\partial Y}{\partial u_1} = \omega_1$, 设 U_r 为线路 a_r 的总评价, 此时 U_r 可理解成相对的效用值, 与综合效用 Y 之间用一个系数 ϕ 建立二者之间的联系, 即 $U_r = \phi Y$ 。

由于 $\frac{\partial U_r}{\partial u_i} = \phi \frac{\partial Y}{\partial u_i}$, $\sum_{r=1}^N \frac{\partial U_r}{\partial u_i} = \phi \sum_{r=1}^N \frac{\partial Y}{\partial u_i} = \phi \sum_{r=1}^N \omega_i = \phi$, 则 $\omega_i = \frac{1}{\phi} \frac{\partial U_r}{\partial u_i} = \frac{\partial U_r}{\partial u_i} / \sum_{r=1}^N \frac{\partial U_r}{\partial u_i}$ 。

ω_1 必为 $u_1, u_2, \dots, u_n$ 的函数, 假设为

$$\omega_1 = F(u_1, u_2, \dots, u_n) = F(u_1(S_1), u_2(S_2), \dots, u_n(S_n)) \quad (2)$$

随着影响因素 $S_1, S_2, \dots, S_n$ 取值的变化, 因素 S_1 的权重 ω_1 也随之变化。状态量指标 S_1 的权重 ω_1 不仅仅取决于自身的权重变化, 而且依赖于其他因素 $S_2, S_3, \dots, S_n$ 的变化而变化, 是一种动态变化的权重。

1.1.1 输电网络线路健康状况的评价框架构建

在改进传统层次分析法的基础上^[6], 用动态权变的评价思想来分析输电网络线路的健康状态, 首先需要分析的是输电线路状态评价价值体系, 即, 输电网络线路动态权变层次分析结构图中每层因素各状态的一组偏好的效用值。请专家给因素的各个状态进行评判, 并且打分, 在 0~100 之间进行效用赋值, 根据历史数据统计得出因素的各个状态发生的频率, 二者结合得到输电线路因素在各个状态下的期望值, 进而可以确定因素的期望状态或者期望状态区间。

1.1.2 输电线路健康度影响因素的期望值确定

(1) 输电线路各状态量的期望值

假设状态参量 s_1 有 S_1 个状态 $L_{11}, \dots, L_{1S_1}$, 对于每一个状态进行评判, 并且打分, 在0~100之间进行效用赋值, 100代表最好的状态, 0代表最差的状态, 效用表示为: $u_{11}^{s_1}, \dots, u_{1S_1}^{s_1}$ 根据历史数据统计得出因素的各个状态发生的频率, 二者结合得到输电线路因素在各个状态下的期望值: $U_l^i = \sum_{s_1=1}^{S_1} p_{s_1}^i u_{s_1}^i$ 。

(2) 部件集合与性能集合的期望

状态参量集合与部件集合、性能集合三者之间的关系复杂, 是一种动态权变的体系, 对于部件集合的判断应该从整体出发, 研究状态影响因素变量对于其性能的整体描述。论文采用一种新的全景分析方法^[7-8], 从属性的不同视角为切入点, 进而求出部件与性能变量的期望集合 U_l^a, U_l^x 。

(3) 性能指标的权重

利用摆幅置权的方法^[9]确定各个性能指标的权重集合, 假设输电线路的状态从最差开始到最好状态, 实际上每一个性能也可以定义在最差和最好的区间之中, 性能指标 x_ξ 由 L_ξ, x_ξ 改进到 $L_{\xi 1}$ 的改进价值 $(u_{\xi 1}^{(x_\xi)} - u_{\xi, x_\xi}^{(x_\xi)})$ 确定为 100, 就是说性能指标 x_ξ 的初权为 100, 其余不同的性能指标计算要依据 x_ξ 初权数值估算得出, 最后进行归一化得到 $x_1, x_2, \dots, x_R$ 的相对权重 $(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_R)$ 。

1.1.3 确定输电网络线路健康度

设 $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_R$ 为性能 $x_1, x_2, \dots, x_R$ 的效用相对变化系数, 刻画状态变量的相对变化程度, 则输电线路的总体健康程度可由公式3式进行刻画。

$$U_l' = \delta_1 (U_l^{(x_1)} - u_{x_1}^{(x_1)}) + \delta_2 (U_l^{(x_2)} - u_{x_2}^{(x_2)}) + \dots + \delta_R (U_l^{(x_R)} - u_{x_R}^{(x_R)}) \quad (3)$$

由SW相对重要性权重性质有

$$\frac{\delta_2 (u_{21}^{(x_1)} - u_{2x_2}^{(x_1)})}{\delta_1 (u_{11}^{(x_1)} - u_{1x_1}^{(x_1)})} = \frac{\omega_2}{\omega_1}, \dots, \frac{\delta_R (u_{R1}^{(x_R)} - u_{Rx_R}^{(x_R)})}{\delta_1 (u_{11}^{(x_1)} - u_{1x_1}^{(x_1)})} = \frac{\omega_R}{\omega_1}$$

$$\text{令, } \frac{d_1 (u_{11}^{(x_1)} - u_{1x_1}^{(x_1)})}{\omega_1} = l, \text{ 则: } U_l' = \lambda \left[\frac{(U_l^{(x_1)} - u_{x_1}^{(x_1)})}{(u_{11}^{(x_1)} - u_{1x_1}^{(x_1)})} \omega_1 + \dots + \frac{(U_l^{(x_R)} - u_{x_R}^{(x_R)})}{(u_{R1}^{(x_R)} - u_{Rx_R}^{(x_R)})} \omega_R \right]$$

由于 λ 的取值不影响相对价值, 因此, 输电网络线路健康度为

$$U_l = \left[\frac{(U_l^{(x_1)} - u_{x_1}^{(x_1)})}{(u_{11}^{(x_1)} - u_{1x_1}^{(x_1)})} \omega_1 + \dots + \frac{(U_l^{(x_R)} - u_{x_R}^{(x_R)})}{(u_{R1}^{(x_R)} - u_{Rx_R}^{(x_R)})} \omega_R \right] \quad (4)$$

利用变权的思想研究输电线路的健康度评估, 各个层次中性能指标的期望值权重都是动态

变化的, 包括状态参量的期望价值、部件的期望价值以及性能的期望价值。由于设备本体和设备状况是动态变化, 对于输电线路总体目标的影响程度也是动态可变的, 可以看成是输电线路健康度中函数刻画的隐形变量。

且各权重随着状态量的变化而进行动态的改变, 输电线路健康度函数是权重的隐函数。

1.2 输电网络线路故障概率分析

输电线路的健康状态直接影响输电线路的故障概率, 是线路风险评估的直接影响因素, 可以影响输电线路具体中线路的运行风险。从已有的相关研究来看, 主要专注点在输电线路的故障与线路运营之间的关系, 借助浴盆曲线以及Weibull分布等来推导设备故障率^[10-11], 反过来, 从输电线路的健康度状态来研究输电线路故障的描述并不多见, 二者之间的可借助公式5来刻画^[12]

$$P(V) = T \times e^{-C \times V} \quad (5)$$

V 定义为输电线路的设备本体的状态评价, 不同的状态按照实际状况从最差状态到最优状态的区间进行赋值, 假设区间为^[1,100], T 定义为比例系数; C 定义为曲率系数; P 定义为故障发生概率, 取值范围0~1。

1.3 基于状态的输电网络线路风险评估

输电线路的安全与运行受到输电线路本体设备和外界环境因素的双重影响, 保证输电线路的安全运行是输电管理部门的工作重点, 将输电线路潜在风险扼杀在萌芽状态, 避免大规模的输电线路事故的发生, 需要输电线路以及整个输电网络的线路的健康度进行动态评估。输电线路的风险评估的思路是假设系统中线路故障的实效模式研究, 进而评估其后果严重程度, 需要对所有输电线路存在可能的实效模式进行分析研究, 详细推断自身设备的损失以及对于整个输电网络的影响, 可能引发的后果与损失, 探讨如何减少和避免这种损失。

输电线路故障所引起的后果是可以进行评估判断的, 论文针对系统中获知的不同状态, 对其失效后的影响进行风险评估以及最终可能的发展趋势, 在实际的输电网络中, 可将变电站和电厂视为一级节点, 一级节点之间会有一条以上的输

电线路相连，假设输电网络线路损失指线路故障造成的负荷损失，若一级节点*i*与一级节点*j*有*K_{ij}*条输电线路，每条线路等负荷运行，不考虑超负荷问题。*m_{ij}*为负荷率，如*Q^{ij}*中一条线路发生故障造成的负荷损失可以表示为

$$\Delta Q_{k_{ij}}^{ij} = \begin{cases} 0 & m_{ij} \leq 1 - \frac{1}{K_{ij}} \\ bK_{ij}m_{ij} - b(K_{ij} - 1) & m_{ij} > 1 - \frac{1}{K_{ij}} \end{cases}$$

$$m_{ij} \leq 1 - \frac{1}{K_{ij}}$$

$$m_{ij} > 1 - \frac{1}{K_{ij}}$$

$$, i, j = 1, 2, \dots, n; k_{ij} = 1, 2, \dots, k_{ij};$$

其中*b*为一条边的满负荷值，当*m_{ij}* ≤ 1 - $\frac{1}{K_{ij}}$ 时，剩余的*K_{ij}* - 1条线路足够承担全部负荷，一级节点*i*与一级节点*j*之间没有负荷损失；*m_{ij}* > 1 - $\frac{1}{K_{ij}}$ 时，剩余的*K_{ij}* - 1条线路满负荷运行只能承载*b(K_{ij}* - 1)，损失负荷*bK_{ij}m_{ij}* - *b(K_{ij}* - 1)。

为了简化计算，假设一级节点*i*与一级节点*j*之间只有一条线路可能发生故障，即康度值最小的线路极有可能发生故障，导致无法正常工作，一级节点*i*与一级节点*j*上的风险值可以写为

$$F_{ij} = \Delta Q_{k_{ij}}^{ij} \text{Max}\{P(V_{ij}^1), P(V_{ij}^2), \dots, P(V_{ij}^{K_{ij}})\}$$

表1 一级节点与一级节点之间的输电线路动态权变层次分析结构

目标层	性能	部件	状态参量
输电网络线路健康度	介电性能	基铁塔	抗震基础 <i>s</i> ₁₁ (<i>Z</i> _{11.1} , <i>Z</i> _{11.2} , <i>Z</i> _{11.3})
			防护与监控设施 <i>s</i> ₁₂ (<i>Z</i> _{12.1} , <i>Z</i> _{12.2})
		<i>c</i> ₁ (<i>Z</i> ₁₁ , <i>Z</i> ₁₂ , <i>Z</i> ₁₃)	基铁塔所处环境 <i>s</i> ₁₃ (<i>Z</i> _{13.1} , <i>Z</i> _{13.2} , <i>Z</i> _{13.3} , <i>Z</i> _{13.4})
			介电保护装置 <i>s</i> ₂₁ (<i>Z</i> _{21.1} , <i>Z</i> _{21.2} , <i>Z</i> _{21.3})
			外力破坏 <i>s</i> ₂₂ (<i>Z</i> _{22.1} , <i>Z</i> _{22.2} , <i>Z</i> _{22.3})
	机械性能	输电线路导线	微气象 <i>s</i> ₂₃ (<i>Z</i> _{23.1} , <i>Z</i> _{23.2} , <i>Z</i> _{23.3} , <i>Z</i> _{23.4})
			运行年限 <i>s</i> ₂₄ (<i>Z</i> _{24.1} , <i>Z</i> _{24.2} , <i>Z</i> _{24.3})
		<i>c</i> ₂ (<i>Z</i> ₂₁ , <i>Z</i> ₂₂ , <i>Z</i> ₂₃)	线路人文环境 <i>s</i> ₂₅ (<i>Z</i> _{25.1} , <i>Z</i> _{25.2} , <i>Z</i> _{25.3})
			变压器 <i>s</i> ₃₁ (<i>Z</i> _{31.1} , <i>Z</i> _{31.2})
			运行负荷 <i>s</i> ₃₂ (<i>Z</i> _{32.1} , <i>Z</i> _{32.2} , <i>Z</i> _{32.3})
		其他 <i>c</i> ₃ (<i>Z</i> ₃₁ , <i>Z</i> ₃₂ , <i>Z</i> ₃₃)	

1.4 基于状态的输电网络线路风险评估步骤

按照之前分析的思路，对于输电线路风险评估可以分为以下3个步骤：

Step1：请*N*位专家对在不同状态下的状态参量进行打分，进而确定状态参量集合的价值期望集 *U_i^s*；

Step2：采用交合分析的全景法，确定部件和性能的期望价值集 *U_i^a*, *U_i^x*；

Step3：由式（4）确定输电网络线路健康度 *U_i*；

Step4：由EA 经验公式（5）确定输电线路发生故障的概率；

Step5：由式（7）确定一级节点*i*与一级节点*j*之间的风险值。

2 算例分析

选取上海城市输电网络为例，截至2010年上半年，其运营变电站97座，线路305条、总长4 273.437 km，杆塔总数8517基；选取一级节点*i*与一级节点*j*之间第*k_{ij}*的线路本身作为研究对象，借助前文多讨论的动态权变明细对其健康度进行评估，如表1所示。

www.eage.com.cn

2015年·增刊·电业应用 | 455

中国知网 https://www.cnki.net

状态评价总目标为线路 K_{ij} 的健康度 $V_{ij}^{k_{ij}}$,分目标为该线路的介电性能 x_1 、机械性能 x_2 ;由于输电网络不同线路之间相对独立,为了研究的便捷性,将一级节点 i 与一级节点 j 之间的输电线路部件划分为:基铁塔、输电线路导线、其他三部分;其中,基铁塔的状态参量包括:抗震基础、防护与监控设施、基铁塔所处环境;输电线路导线的状态参量包括:介电保护装置、外力破坏、微气

象、运行年限、线路人文环境;其他主要包括:变压器、运行负荷。

对传统的层次分析法进行适当改进,首要的任务是确定该评价方法的框架体系,按照国家电网相关要求,利用专家打分的方式对于各个参量进行评估并赋值,并对各个状态发生的概率,如表2所示。输电线路最终的状态评价结果如表3所示。

表2 一级节点 i 与一级节点 j 之间的输电线路详情

状态	价值	概率	状态	价值	概率	状态	价值	概率
$Z_{11.1}$	100	1	$Z_{23.1}$	100	0.6	Z_{11}	100	0.9
$Z_{11.2}$	60	0	$Z_{23.2}$	60	0.3	Z_{12}	60	0.1
$Z_{11.3}$	20	0	$Z_{23.3}$	20	0.1	Z_{13}	20	0
$Z_{12.1}$	100	0.1	$Z_{23.4}$	0	0	Z_{21}	100	1
$Z_{12.2}$	0	0.9	$Z_{24.1}$	100	0.9	Z_{22}	60	0
$Z_{13.1}$	100	0.2	$Z_{24.2}$	60	0.1	Z_{23}	20	0
$Z_{13.2}$	60	0.6	$Z_{24.3}$	20	0	Z_{31}	100	0.8
$Z_{13.3}$	20	0.2	$Z_{25.1}$	100	0.8	Z_{32}	60	0.2
$Z_{13.4}$	0	0	$Z_{25.2}$	60	0.2	Z_{33}	20	0
$Z_{21.1}$	100	1	$Z_{25.3}$	20	0	Z_{x11}	100	0.8
$Z_{21.2}$	60	0	$Z_{31.1}$	100	1	Z_{x12}	60	0.2
$Z_{21.3}$	20	0	$Z_{31.2}$	0	0	Z_{x13}	20	0
$Z_{22.1}$	100	0.7	$Z_{32.1}$	100	0.8	Z_{x21}	100	0.7
$Z_{22.2}$	60	0.2	$Z_{32.2}$	60	0.1	Z_{x22}	60	0.1
$0Z_{22.3}$	20	0.1	$Z_{32.3}$	20	0.1	Z_{x23}	20	0

表3 一级节点 i 与一级节点 j 之间的输电线路状态评价结果

因素	期望	因素	期望	因素	期望	因素	期望	因素	期望
S_{11}	100	S_{21}	100	S_{24}	96	S_{32}	88	C_3	92
S_{12}	10	S_{22}	84	S_{25}	92	C_1	96	x_1	92
S_{13}	60	S_{23}	80	S_{31}	100	C_2	100	x_2	76

请专家按照SW的方法确定出了 x_1 和 x_2 的相对权重,分别是45和55,并 x_1 和 x_2 的相对权重、 x_1 和 x_2 最好和最差状态的价值在 x_1 和 x_2 各状态上的期望价值,利用式2-3求出一级节点 i 与一级节点 j 之间的第 K_{ij} ($K_{ij}=1$)条输电线路的健康度 $V_{ij}^{k_{ij}}=79$ 。取 $T=3.367$, $C=0.038$,则 $P(V_{ij}^1)=0.1673$;假设一级节点 i 与一级节点 j 之间有3条输电线路,即, $K_{ij}=3$;取 $m_{ij}=0.8$; $b=90$,则一级节点 i 与一级节点 j 之间一条线路发生故障造成的负荷损失为: ΔQ_{kij}^{ij}

$=12$ 。同理可计算 $P(V_{ij}^2)=0.2241$; $P(V_{ij}^3)=0.1028$ 。由式(2-6)确定一级节点 i 与一级节点 j 之间的风险值: $F_{ij}=\Delta Q_{kij}^{ij} \text{Max}\{P(V_{ij}^1), P(V_{ij}^2), P(V_{ij}^3)\}=2.6892$ 。

输电网络风险度量是对输电线路故障风险的定量刻画,基于已有的输电线路具体设备点的风险状态评估总的输电线路的运营风险。对于日常的巡视与管理情况,

数值描述,从量纲上用一级节点之间的风险

值判别输电线路运行的风险高低,对于日常检修与管理工作,可以按照输电线路风险以及危害程度对输电线路风险值进行不同对待,期待最终构建不同风险的应急预案。

3 结束语

由于传统的层次分析法在整个评估过程中权重是恒定不变的,无法根据内部本体和外界环境因素影响动态调整权重值,无法准确的刻画状态过程。本文研究的重点是输电线路的安全度动态评估,输电线路本身是一个复杂的系统,影响输电线路安全的因素多,包括设备本体和外界因素,传统的层次分析法无法满足输电线路动态评估的要求,无法刻画输电网络线路各个状态变量之间的动态时变的复杂关系。本文正是在这样的环境下提出了输电线路动态权变的评估模型,动态分析与评估影响输电线路故障的各类状态变量,构建动态权变的输电线路健康度安全评估的动态权变的层次分析法的框架,进而构建输电线路的价值体系,结合各因素在每个状态上的概率得到其状态期望价值。每一次状态变量的权重不仅仅依赖自身的变化,同时也受到其他变量的影响,不是固定不变的状态参量,是一个动态组合的结果,真实反映输电线路健康的内部本体因素和外部环境因素之间的复杂关系。在此基础上,根据经典的EA经验公式计算输电线路发生故障的概率,以负荷损失为评判标准,计算输电线路一级节点之间的风险值,管理者可以按照输电线路风险以及危害程度对输电线路风险值进行

不同级别的确认,并将风险级别与相对应的措施相对应,在此基础上对于输电线路的巡视与业务外包进行不同的侧脸展开,实时而真实地反映输电线路的运行状态,提高输电线路的智能程度,并控制风险,提高输电线路效率,确保输电线路安全稳定运行。

参考文献

- [1] 赵涛. 设备管理理论体系与发展趋势[J], 工业工程. 2001(6): 17-18.
- [2] DING Jin-hua, WANG Xue Jun, ZHOU Rong, et

al. Maintenance and condition-based maintenance [J]. International Journal of Plant Engineering and Management, 2005, 10(3): 160-161.

- [3] Leung L C, Co D. On the efficacy of modeling multi-attribute decision problems using AHP and Sinarchy [J]. European Journal of Operational Research, 2001, 132(1): 39-49.
- [4] Wang Y M, Elhag T M S. An approach to avoiding rank reversal in AHP [J]. Decision Support System, 2006, 42(3): 1474-1480.
- [5] Wang Y M, Luo Y. On rank reversal in decision analysis [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2009, 49(5-6): 1221-1259.
- [6] 李春好, 孙永河, 贾艳辉等. 变权层次分析法[J]. 系统工程理论与实践. 2010, 30(4): 723-731.
- [7] Moskowitz H R, Silcher M. The applications of conjoint analysis and their possible uses in sensometrics [J]. Food Quality and Preference, 2006, 17(3-4): 145-165.
- [8] Ida T, Kinoshita S, Sato M. Conjoint analysis of demand for IP telephony: The case of Japan [J]. Applied Economics, 2008, 40(10): 1279-1287.
- [9] 王莲芬, 许树柏. 层次分析法引论[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1990.
- [10] WAL KER J. Condition based risk management [J]. Power Engineer, 2003, 17(1): 34-35.
- [11] 张耀辉, 郭金茂, 徐宗昌等. 基于故障风险的状态维修检测间隔期的确定[J]. 中国机械工程, 2008, 19(5): 555-557.
- [12] 赵振宁, 陈锋. 以可靠性为中心的检修在电力公司中的应用[J]. 华北电力技术, 2002(3): 20-23.

(收稿日期: 2015-5-21) EA

作者简介

纪航(1982-)男, 国家电网上海市电力公司检修公司工程师。