

## 计及电网节点重要度的变压器检修排序方法

张宏志<sup>1</sup>,熊卫红<sup>2</sup>,谢志成<sup>3</sup>,韩雄辉<sup>4</sup>,李正天<sup>1</sup>,林湘宁<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学 电气与电子工程学院 强电磁工程与新技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074;

2. 国家电网公司华中分部,湖北 武汉 430077;

3. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司,广东 广州 510663;

4. 广东省电力公司梅州供电局,广东 梅州 514021)

**摘要:**采用健康指数理论对变压器运行状态进行分级评估。通过复杂网络理论建立电网拓扑模型,以节点重要度指标来表征变压器运行状态对电网的影响。结合节点重要度对变压器状态评估结果进行修正,制定全网设备的检修次序。以某电网实际数据为例对所提方法的可行性及有效性进行了验证。

**关键词:**变压器;状态评估;健康指数理论;复杂网络;节点重要度;检修次序

**中图分类号:**TM 407

**文献标识码:**A

**DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2018.09.028

## 0 引言

随着“西电东送、南北互供、全国联网”战略的实施和特高压交直流输电系统的规划建设,我国电网将成为世界上最先进、最复杂的电网。提高变电设备,特别是大型电力变压器运行的可靠性,对整个电网的安全可靠运行和降低电网运行成本都具有十分重要的意义。

提高变电设备运行可靠性不仅需要要在设备设计及制造过程中提高其质量,更重要的是在变电设备运行过程中改善其维护水平,制定合理的检修计划。而制定变压器运维检修计划的关键是对变压器的运行状态进行准确的评估。对在运的变电设备运行状态进行准确评估是目前国内外的研究热点之一,学者主要采用人工智能方法实现变压器运行状态的综合评估,常见方法有物元理论、模糊综合评判、贝叶斯网络、灰靶理论等<sup>[1-4]</sup>。在实际生产方面,电力部门也出台了相应的输变电设备状态评估规程<sup>[5-6]</sup>。

已有方法极大地推进了输变电设备状态评估的研究,为输变电设备状态检修提供了坚实基础,也取得了一定的应用效果。但目前的方法所形成的评价体系只是以输变电设备本体的状态量为输入量,未考虑输变电设备在电网中所处的节点位置,换言之是将输变电设备从电网中脱离进行评估,基于此评估结果所制定的检修计划也仅以输变电设备本体状态优劣为基础。然而从电网安全性的角度考虑,由于电网中节点的类型及权重不同<sup>[7]</sup>,不同节点的状

态对于全网的影响是不同的,而节点所连接输变电设备的状态对节点状态的影响较大。因此,在对输变电设备进行状态评估时,考虑其在电网中所处的位置是十分有必要的,这也为输变电设备的检修排序提供了更为合理的参考。

针对上述问题,本文提出了一种考虑电网节点重要度 NI(Node Importance)的变压器检修排序方法。本文首先采用健康指数理论建立了变压器状态评估模型,以此获得未考虑所处节点位置的变压器状态值;然后,通过复杂网络理论对电网拓扑结构进行建模,以节点重要度作为变压器运行状态与电网进行关联的指标;最后结合节点重要度对变压器状态评估结果进行修正,将该结果作为制定合理的检修次序的重要指标。

## 1 分层级状态评估模型

为了得到考虑节点重要度的变压器检修排序结果,本文结合层次分析法的思想建立了自下而上的分层级评估模型,如图1所示。

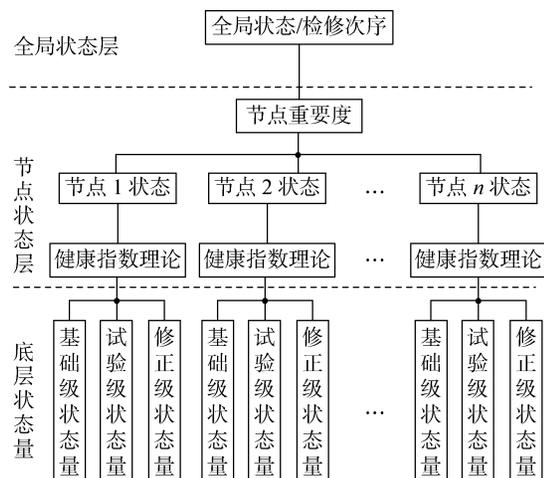


图1 计及电网节点重要度的变压器分层评估结构图

Fig.1 Hierarchical evaluation structure of transformer considering NI of power grid

收稿日期:2017-05-25;修回日期:2018-06-07

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51477090);武汉市黄鹤英才(科技)计划资助项目;南网广州供电局科技项目(GZHKJXM20160038)

Project supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China(51477090), Wuhan Yellow Crane Talents(Science) Plan and the Science and Technology Project of Guangzhou Power Supply Bureau(GZHKJXM20160038)

a. 最底层为状态量层:节点状态主要取决于节点下设备的状态,该层主要由反映设备当前状态的状态量构成,每台设备的状态量都分为基础级状态量、试验级状态量和修正级状态量。

b. 中间层为节点状态层:基于健康指数理论方法对最底层的设备状态量进行信息融合,得到设备的状态集,即节点状态集  $S=[s_i](i=1,2,\dots,n,n$  为网络中节点数量)。

c. 最上层为全局状态层:通过复杂网络理论对电网进行建模,得到节点重要度指标集  $S_{Ni}=[S_{Ni}](i=1,2,\dots,n)$ ,再通过融合函数  $\beta=f(S,S_{Ni})$  将节点状态集、节点重要度指标集进行结合,以此指导检修排序。

## 2 基于健康指数理论的设备状态评估

### 2.1 健康指数的定义

健康状态指数  $I_{Ht}$  的定义为:在现有的运行状态下,完成规定功能的能力的量化表征,其与设备的老化程度密切相关,因此随着服役时间的增长其大小会不断发生变化。健康指数的取值范围为  $[0,10]$ ,取值越大表示其状态越优秀。

本文采用的是英国 EA 公司提出的健康指数计算公式<sup>[8]</sup>,其已经在多个国家及地区得到了相当成功的应用,具有实际意义的指导作用。英国 EA 公司提出的健康指数计算公式为:

$$I_{Ht} = I_{H0} e^{B(T_1 - T_0)} \quad (1)$$

其中,  $I_{Ht}$  为当前或未来某年的健康指数;  $I_{H0}$  为充油设备的初始健康指数,由设备的原始信息确定,包括原始技术规格、生产厂家、运行经验等;  $T_1$  为  $I_{Ht}$  对应的年份;  $T_0$  为设备初始投运时对应的时间;  $B$  为老化因子。

### 2.2 基于健康指数的变压器分级评估模型

前文所述基础级状态量、试验级状态量及修正级状态量分别为第 1 级评估模型、第 2 级评估模型、第 3 级评估模型的输入量,三者间的关系见图 2。

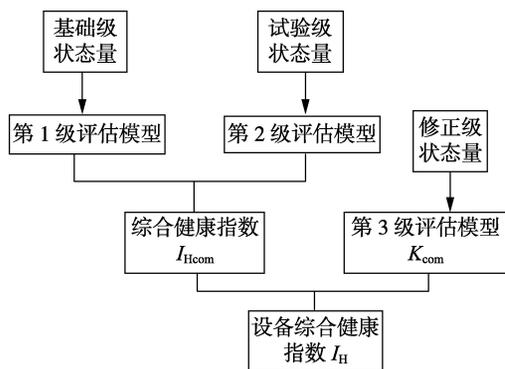


图 2 分级评估模型结构图

Fig.2 Structure of hierarchical evaluation model  
通过第 1、2 级评估模型获取设备的综合健康指

数,再利用第 3 级评估模型对其进行修正,得到最终的状态评估结果。

#### 2.2.1 第 1 级评估模型

第 1 级评估模型主要是通过设计寿命、服役年龄、负荷水平和运行环境等基础级状态量完成设备初始健康状态指数的计算。根据式(1)可推导得:

$$B = (\ln I_{Ht} - \ln I_{H0}) / T_{end} \quad (2)$$

$$T_{end} = T_{des} / (K_L K_T) \quad (3)$$

其中,  $T_{end}$  为变压器的预期运行年限,  $T_{end} = T_1 - T_0$ ;  $T_{des}$  为设备的设计寿命(一般为 30 a);  $K_L$  为负荷水平修正因子;  $K_T$  为运行环境修正因子。一般认为刚投运的设备其健康指数为 9.5,在由式(2)、(3)得到老化因子  $B$  后,将其代入式(1)即可得第 1 级健康指数  $I_{H1}$ :

$$I_{H1} = I_{H0} e^{B(T_1 - T_0)} = 9.5 e^{BT} \quad (4)$$

其中,  $T = T_1 - T_0$ , 为设备从投运开始到进行健康评估时经历的时间。

#### 2.2.2 第 2 级评估模型

第 2 级评估主要利用试验数据(油简化试验、油色谱试验)完成设备老化进程的状态评估。油简化试验包括酸值、击穿电压、微水含量及油介质损耗,油色谱试验包括氢气、甲烷、乙烷、乙烯、乙炔及总烃。不同试验的不同参数指标对设备老化进程的影响程度各不相同,可采用改进层次分析法<sup>[9]</sup>得到的各指标的权重系数,同时根据现行设备状态评估导则中所确定的各指标的注意值,确定各指标的评分区间,从而可以得到:

$$I_{H2a} = \sum_{i=1}^{A_1} \omega_{1i} C_{1i} \quad (5)$$

$$I_{H2b} = \sum_{j=1}^{A_2} \omega_{2j} C_{2j} \quad (6)$$

其中,  $I_{H2a}$  为油简化试验对应的健康指数;  $I_{H2b}$  为油色谱试验对应的健康指数;  $\omega_{1i}$ 、 $\omega_{2j}$  为权重系数;  $C_{1i}$ 、 $C_{2j}$  为根据评分区间确定的评分分值;  $A_1$ 、 $A_2$  分别为油简化试验和油色谱试验的测试项目数目。

根据第 1、2 级评估模型的评估结果  $I_{H1}$ 、 $I_{H2a}$ 、 $I_{H2b}$ , 可以确定综合健康指数  $I_{Hcom}$  为:

$$I_{Hcom} = f_{com} \min(I_{H1}, I_{H2a}, I_{H2b}) \quad (7)$$

其中,  $f_{com}$  为修正常数。

#### 2.2.3 第 3 级评估模型

第 3 级评估模型的主要目的是结合设备的运行环境信息(包括负荷水平、环境情况、历史故障检修情况等),修正前 2 级评估模型得到的评估结果。健康状态修正因子可以分为两大类:基于运行状况数据的修正和基于故障检修记录的修正。其中,运行状况数据包括投运时间及铁芯接地电流,故障检修记录包括外观等级、套管可靠性、是否存在家族缺

陷、故障次数及是否存在局部放电。

结合输变电站的在线监测系统的情况,从现行设备状态评估导则的评分项目中选取部分项目对评估模型进行修正,采用主成分分析法<sup>[10]</sup>、模糊综合评价法<sup>[11]</sup>对各修正项目的影响权重进行确定,进而得到对应的修正系数  $K_{li}$  和  $K_{lj}$ ,其中若某一项指标缺省,则该项对应的修正系数为 1。

综合修正因子  $K_{com}$  即为:

$$K_{com} = \left( \prod_{i=1}^2 K_{li} \right) \times \left( \prod_{j=1}^5 K_{lj} \right) \quad (8)$$

通过 3 个层级的评估,可以得到最终的变压器健康指数为:

$$I_H = K_{com} I_{Hcom} \quad (9)$$

### 3 基于复杂网络的节点重要度分析

#### 3.1 基于复杂网络的电网拓扑模型

复杂网络是由具有自组织、自相似、吸引子、小世界、无标度中部分或全部性质的网络,由节点和节点间的边组成,其中节点表示系统的元素,边表示元素之间的相互作用。根据复杂网络的边有无权值,可将复杂网络分为有权网络模型和无权网络模型。无权网络所有边的权值都相同,反映节点之间简单连接方式和相互作用。若对每条边都赋予相应的权值,则该复杂网络就成为有权网络。有权网络能够描述节点之间的连接程度的强弱,更为完整地表达复杂网络的结构<sup>[12]</sup>。含有  $n$  个节点和  $m$  条边的有权网络模型可以用图  $G$  及边权连接矩阵  $\mathbf{W}$  描述:

$$G = (V, E) \quad (10)$$

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1n} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{n1} & w_{n2} & \cdots & w_{nn} \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$w_{ij} = \begin{cases} 0 & i=j \\ F & i \neq j \text{ 且 } \{v_i, v_j\} \text{ 为图 } G \text{ 的边} \\ \infty & i \neq j \text{ 且 } \{v_i, v_j\} \text{ 非图 } G \text{ 的边} \end{cases} \quad (12)$$

其中,  $V$  为网络中所有节点的集合;  $E$  为网络中所有边的集合;  $w_{ij}$  为相连节点  $v_i, v_j$  间的权值;  $F$  为大于 0 的常数。

类似地,电力网络也是由节点与支路所构成,因此,可以采用复杂网络理论对其进行建模。由于电力用户负荷分布的差异,电网节点与支路的重要程度都不同,因此本文提出将线路输送功率值作为电网拓扑结构边的权值参数,并将发电机组、变电站和用户负荷作为该网络的节点,输电线路视为网络的边,边的权值定义为此边对应的线路输送功率值。

根据上述定义,含有  $n$  个节点和  $m$  条边的电网有权网络模型可以用图  $G_g$  及边权连接矩阵  $\mathbf{W}_g$

描述:

$$G_g = (N, L) \quad (13)$$

$$\mathbf{W}_g = \begin{bmatrix} w_{g11} & w_{g12} & \cdots & w_{g1n} \\ w_{g21} & w_{g22} & \cdots & w_{g2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{gn1} & w_{gn2} & \cdots & w_{gnn} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$w_{gij} = \begin{cases} 0 & i=j \\ X_{ij} & i \neq j \text{ 且 } \{n_i, n_j\} \text{ 为图 } G_g \text{ 的边} \\ \infty & i \neq j \text{ 且 } \{n_i, n_j\} \text{ 非图 } G_g \text{ 的边} \end{cases} \quad (15)$$

其中,  $N$  为发电机组、变电站和用户负荷节点的集合,  $N = \{n_1, n_2, \dots, n_n\}$ ;  $L$  为电网有权边的集合,  $L = \{l_1, l_2, \dots, l_m\}$ ;  $X_{ij}$  为节点  $i$  和节点  $j$  之间线路的传输功率模值。

#### 3.2 节点重要度计算

节点对全网的影响不仅仅体现在对网络结构的影响,同时也体现在对网络潮流传输的影响,因此本文将电网有权网络模型中的节点重要度定义为:

$$S_{Ni}(t) = \alpha p_i(t) + \beta q_i \quad (16)$$

其中,  $p_i(t)$  为负荷重要度,  $q_i$  为结构重要度,采用加权的方式对两者进行整合,由于  $q_i$  并不会随着时间变化,因此本文中  $\alpha=0.7$ 、 $\beta=0.3$ 。

$p_i(t)$ 、 $q_i$  的计算公式分别如式(17)、(18)所示。

$$p_i(t) = \frac{\sum_{j=1}^n X_{ij}(t)}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_{ij}(t)} \quad (17)$$

$$q_i = \frac{c_i}{\sum_{i=1}^n c_i} \quad (18)$$

其中,  $\sum_{j=1}^n X_{ij}(t)$  为  $t$  时刻节点  $i$  的传输(输入及输出)功率模值之和;  $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n X_{ij}(t)$  为  $t$  时刻全网节点传输功率模值之和;  $c_i$  为节点  $i$  的节点介数,即所有最短路径经过该节点的数量,反映了该节点在全网中的作用和影响力。

为了便于对比不同节点的重要度,将各节点重要度通过式(19)进行处理:

$$\bar{S}_{Ni}(t) = \frac{S_{Ni}(t)}{\sum_{i=1}^n S_{Ni}(t)} \quad (19)$$

此外,由于节点负荷随时间波动,同时也会受电网运行方式改变的影响,因此本文提出了如下定义:

$$a_i(t) = a \bar{S}_{Ni}(t) + b a_i(t-1) \quad (20)$$

其中,  $a_i(t)$  为  $t$  时刻节点  $i$  的重要度对该节点下变

电设备状态评估结果的影响因子; $a_i(t-1)$ 为 $t-1$ 时刻节点 $i$ 的重要度对该节点下变电设备状态评估结果的影响因子; $a$ 和 $b$ 为对应的权重系数,本文中 $a=0.8$ 、 $b=0.2$ 。

本文所提的节点重要度方法的实现步骤如下:

a. 确定图 $G_g$ 及边权连接矩阵 $W_g$ ;

b. 分别根据式(17)、(18)依次计算网络中每个节点的负荷重要度 $p_i(t)$ 及结构重要度 $q_i$ ,结合式(16)、(19)及(20)得到各节点重要度;

c. 对各节点的重要度由大到小进行排序, $a_i(t)$ 的值越大说明该节点越重要,处于核心位置。

### 3.3 节点重要度分析

根据式(18)可计算电网中各个节点的重要度指数,为了区分不同节点对电网安全稳定运行的影响程度,本文根据节点重要度将节点分为以下3类。

a. 核心节点。该类节点位于电网能量交换的关键位置,其所承担的功率交换任务重大,因此与其相连接的节点较多。核心节点一旦失效,将造成大范围的失电,严重影响用户的正常用电。对于电网而言,一般500 kV变电站均可归为核心节点。

b. 边界节点。该类节点位于电网能量交换的边缘位置,不需要承担太多的功率交换任务,所连接的节点数目较少,一旦失效,影响的范围相对而言较小。对于电网而言,一般110 kV变电站可归为边界节点。

c. 常规节点。该类节点的重要程度介于核心节点和边界节点之间,可以视为核心节点和边界节点的连接枢纽,一旦失效,将造成其所连接的边界节点(或其他常规节点)失电,影响范围较大。对于电网而言,一般220 kV变电站可归为常规节点。

### 3.4 基于节点重要度的变压器检修排序指标

节点下变压器的运行状态将影响到该节点传输电能的能力。为保证设备处于良好的运行状态、避免节点失效事件的发生,需要根据设备状态评估结果合理安排检修。由于不同节点传输功率的总量不同,节点下变压器受到的影响也不同,因此有必要将节点重要度与节点下变压器运行状态评估进行结合。

为了将变压器状态评估结果与其所处的节点在全网中的重要程度进行结合,本文提出设备节点状态 $\gamma_i(t)$ 的概念,将其定义为关于设备当前状态的健康指数 $I_{Hi}$ 及当前节点重要度影响因子 $a_i(t)$ 的函数,如式(21)所示。

$$\gamma_i(t) = 10 - a_i(t) (10 - I_{Hi}) \quad (21)$$

由式(21)可得到全网各个节点设备对应的设备节点状态 $\gamma_i(t)$ ,将其根据大小进行排序,则可以制定变压器检修次序提供有效参考。

## 4 实例分析

本文以某实际运行电网为例,通过从运行部门获取的电网拓扑结构及实际参数,建立了某实际运行电网40节点系统模型,该模型包含7个500 kV节点、30个220 kV节点和3个35 kV节点。通过计算各节点介数以及对该网络进行潮流计算,将结果代入式(16)~(20)得到各个节点重要度影响因子 $a_i(t)$ 。同时根据所收集的各个节点下变压器的相关状态量数据,采用健康指数理论方法得到了对应的健康指数 $I_{Hi}$ ,将 $a_i(t)$ 及 $I_{Hi}$ 代入式(21)得到设备节点状态 $\gamma_i(t)$ 及基于该指标的检修次序,如表1所示。表中,次序1为根据设备健康指数 $I_{Hi}$ 确定的检

表1 某电网40节点系统的节点重要度和检修次序

Table 1 NI and maintenance order of 40-bus system in some power grid

节点	$a_i(t)$	$I_{Hi}$	$\gamma_i(t)$	次序1	次序2
1	0.006 32	7.316 2	9.983 0	15	26
2	0.002 35	7.144 7	9.993 3	14	31
3	0.018 16	8.296 6	9.969 1	30	20
4	0.000 08	8.385 6	9.999 9	31	33
5	0.003 64	6.560 6	9.987 5	5	29
6	0.020 78	7.469 3	9.947 4	18	16
7	0.007 41	7.336 8	9.980 3	16	24
8	0.021 19	7.938 9	9.956 3	24	18
9	0.006 52	8.128 1	9.987 8	28	30
10	0	8.264 1	10.000 0	29	36
11	0.017 11	6.828 1	9.945 7	11	15
12	0.008 26	8.039 1	9.983 8	26	27
13	0.035 50	7.965 3	9.927 8	25	12
14	0.129 24	6.487 8	9.546 1	4	1
15	0.027 56	6.357 0	9.899 6	1	9
16	0.064 69	7.495 1	9.838 0	19	5
17	0.064 69	8.879 2	9.927 5	37	10
18	0.144 69	7.021 2	9.569 0	12	2
19	0	7.755 8	10.000 0	22	37
20	0.065 48	6.671 4	9.782 0	7	3
21	0	—	—	—	—
22	0	—	—	—	—
23	0.026 60	7.517 9	9.934 0	20	14
24	0.011 61	8.097 2	9.977 9	27	22
25	0.001 06	8.672 7	9.998 6	34	32
26	0.017 81	8.877 9	9.980 0	36	23
27	0.030 02	7.641 6	9.929 2	21	13
28	0.031 39	6.415 9	9.887 5	2	6
29	0.029 98	6.447 9	9.893 5	3	8
30	0.002 09	—	—	—	—
31	0.033 54	8.522 2	9.950 4	33	17
32	0.033 86	6.762 8	9.890 4	10	7
33	0.017 41	8.442 9	9.972 9	32	21
34	0.010 98	6.730 6	9.964 1	8	19
35	0.000 02	8.787 8	10.000 0	35	35
36	0.004 98	7.050 0	9.985 3	13	28
37	0.021 19	6.589 8	9.927 7	6	11
38	0.005 35	6.753 3	9.982 6	9	25
39	0.000 03	7.848 1	9.999 9	23	34
40	0.078 43	7.419 9	9.797 6	17	4

修次序,次序2为根据设备节点状态 $\gamma_i(t)$ 所确定的检修次序。

节点21、22及30的电压等级为35 kV,其为变电站站用电,因此在进行检修排序时不予考虑。节点18—20、31—33及40为500 kV节点,其余节点均为220 kV节点。

由表1可见,500 kV节点的节点重要度一般是最高的,这也反映了其在电网中的重要地位。不考虑节点重要度的变压器检修次序与计及节点重要度的检修次序有较为明显的差别,如节点5下变压器的检修次序在不考虑节点重要度的情况下排序为5,是需要尽快安排检修的,主要是因为其健康指数较低,然而由于其节点重要度较低,因此在计及节点重要度的情况下其检修次序为29。由此可知,计及节点重要度对检修次序进行确定是必要且有效的。

## 5 结论

随着电网规模的日渐扩大、电力系统复杂程度的不断加深,提高输电系统中电力变压器运行的可靠性是保障复杂电网安全、稳定、经济运行的基础和前提。然而,系统中变压器数目众多、运行状态各异,且由于设备所处节点不同,其故障停运的影响范围也存在差异。为此,本文从2个角度出发,分别评估变压器自身运行状态和其所处电网节点对全网运行造成的影响,从电网全局角度提出了一种考虑电网节点重要度的变压器检修排序方法,论文主要的工作如下:

**a.** 采用健康状态指数,构建了变压器的分级评估模型,基于设备的在线监测数据、离线试验数据、运行环境参数等信息完成设备自身状态的定量化评估;

**b.** 基于复杂网络理论,根据传输功率和节点负荷等数据,对电力网络的节点重要度进行了定义和计算;

**c.** 将节点重要度与节点对应的变压器运行状态进行综合考量,得到节点状态参数并进行排序,制定电力变压器的检修次序;

**d.** 在实例分析中采用某电网实际数据对本文所提方法的可行性及有效性进行了验证。

综上所述,本文所提出的检修排序方法可以为电网运维人员制定检修计划提供参考,提高检修任务繁重时的检修效率,保证电网设备运行的可靠性,降低变压器故障对电网造成的影响。目前,文中仅考虑了节点下变压器的状态,未来可以将更多设备的状态值以加权的方法导入,同时引入检修经济性指标,更为全面地评估节点的状态,以便于制定更符合实际情况的检修计划。

## 参考文献:

[1] 张哲,赵文清,朱永利. 基于支持向量机回归的电力变压器状态

评估[J]. 电力自动化设备,2010,30(4):81-84.

ZHANG Zhe, ZHAO Wengqing, ZHU Yongli. Power transformer condition evaluation based on support vector regression[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(4): 81-84.

[2] 费胜巍,孙宇. 融合粗糙集与灰色理论的电力变压器故障预测[J]. 中国电机工程学报,2008,28(16):154-160.

FEI Shengwei, SUN Yu. Fault prediction of power transformer by combination of rough sets and grey theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 154-160.

[3] 赵文清,朱永利,姜波,等. 基于贝叶斯网络的电力变压器状态评估[J]. 高电压技术,2008,34(5):1032-1040.

ZHAO Wenqing, ZHU Yongli, JIANG Bo, et al. Condition assessment for power transformers by Bayes networks[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5): 1032-1040.

[4] 田丰. 基于改进灰靶理论的变压器状态评估[D]. 北京:华北电力大学,2011.

TIAN Feng. Transformer condition assessment based on improved grey target theory[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2011.

[5] 李喜桂,常燕,罗运柏,等. 基于健康指数的变压器剩余寿命评估[J]. 高压电器,2012,48(12):80-86.

LI Xigui, CHANG Yan, LUO Yunbai, et al. Remnant life estimation of power transformer based on health index[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(12): 80-86.

[6] IEC. IEC guide for power transformer: part 7: loading guide for oil-immersed power transformers; IEC Std 60076-7-2005[S]. Geneva, Switzerland; IEC, 2005.

[7] 蔡泽祥,王星华,任晓娜. 复杂网络理论及其在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术,2012,36(11):114-121.

CAI Zexiang, WANG Xinghua, REN Xiaona. A review of complex network theory and its application in power systems[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 114-121.

[8] JAHROMI A, PIERCY R, CRESS S. An approach to power transformer asset management using health index[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2009, 25(2): 20-34.

[9] LIAO Ruijin, ZHENG Hanbo, GRZYBOWSKI S, et al. An integrated decision-making model for condition assessment of power transformers using fuzzy approach and evidential reasoning[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 1111-1118.

[10] 张承彪,罗运柏,文习山. 主成分分析在变压器故障诊断中的应用研究[J]. 高电压技术,2005,31(8):9-11.

ZHANG Chengbiao, LUO Yunbai, WEN Xishan. Study on fault diagnosis of transformer based on principal component analysis of dissolved gas[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(8): 9-11.

[11] 骆思佳,廖瑞金,王有元,等. 带变权的电力变压器状态模糊综合评判[J]. 高电压技术,2008,33(8):106-110.

LUO Sijia, LIAO Ruijin, WANG Youyuan, et al. Fuzzy synthetic evaluation of power transformer condition with variable weights[J]. High Voltage Engineering, 2008, 33(8): 106-110.

[12] AMANIA M, JALILI M, YU X, et al. Finding the most influential nodes in pinning controllability of complex networks[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2017, 64(6): 685-689.

## 作者简介:



张宏志

张宏志(1993—),男,湖北黄梅人,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为高电压与绝缘和变压器状态检修(E-mail: hongzhi\_zhang@hust.edu.cn);

熊卫红(1971—),男,湖北武汉人,高级工程师,硕士,主要研究方向为设备状态检修。

## Transformer maintenance scheduling method considering node importance of power grid

ZHANG Hongzhi<sup>1</sup>, XIONG Weihong<sup>2</sup>, XIE Zhicheng<sup>3</sup>, HAN Xionghui<sup>4</sup>, LI Zhengtian<sup>1</sup>, LIN Xiangning<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology,

School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074 China;

2. Central China Electric Power Company, Wuhan 430077, China; 3. Extra-High Voltage Transmission Company of CSG, Guangzhou 510663, China; 4. Meizhou Power Supply Bureau of Guangdong Electric Power Company, Meizhou 514021, China)

**Abstract:** The operating state level of transformer is evaluated by using the health index theory. The power grid topology model is established by the complex network theory, and the impact of the operating status of the power transformer on the power grid is represented by node importance index. Combined with the importance of nodes, the transformer state assessment results are modified and the maintenance sequence of all equipments in power grid is worked out. The feasibility and validity of the proposed method are verified by the actual data of some power grid.

**Key words:** power transformers; state assessment; health index theory; complex network; node importance; maintenance sequence

.....  
(上接第 191 页 continued from page 191)

## Detection of broken rotor bar fault of asynchronous motor based on Duffing system and extended Prony algorithm

XU Boqiang, WANG Zhiyuan

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** A method combining with Duffing system and extended Prony algorithm is proposed for the BRB (Broken Rotor Bar) fault detection of asynchronous motors. The Duffing system is sensitive to the initial parameters, which can be used to accurately extract the fault feature components in stator current signal, however, it cannot effectively estimate the amplitude of fault feature components. In order to solve this problem, the extended Prony algorithm is proposed to determine the amplitudes and initial phase angles of fault feature components. Simulative and experimental results show that the proposed method is practicable, effective and simple, and the detecting results are intuitive.

**Key words:** asynchronous motors; Duffing system; extended Prony algorithm; broken rotor bar fault; detection