

考虑直流偏磁的变压器状态分析及量化评价

李 晖,钟卓江

(四川能投发展股份有限公司,四川 成都 611130)

摘要:在中国交直流混联系统的快速发展中,由直流系统运行产生的直流偏磁现象对附近变压器的影响越来越大。为此,提出了考虑直流偏磁影响的变压器状态分析及量化评价方法。首先,从变压器噪声、振动强度和损耗3个方面量化了直流偏磁对变压器状态的影响,并给出了量化表达式;在此基础上,建立了考虑直流偏磁影响的变压器状态量化评价模型,并采用数据拟合法避免人工经验法的主观影响;最后,通过实际案例对比分析,证明了该模型方法能有效量化直流偏磁对变压器状态的影响程度。基于此,可以有效辨别变压器的实际工作状态,提高了运行维护人员工作效率和设备管理效率。

关键词:直流偏磁;状态评价;交直流混联系统;模糊综合评价

中图分类号:TM 412 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)05-0041-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210509

State Analysis and Quantitative Evaluation of Transformers Considering DC Bias

Li Hui, Zhong Zhuojiang

(Sichuan Energy Investment Development Co., Ltd., Chengdu 611130, Sichuan, China)

Abstract: In the rapid development of AC-DC hybrid system in China, the DC bias phenomenon generated by the operation of DC system has an increasing impact on the nearby transformers. For this reason, a transformer state analysis and quantitative evaluation method considering the influence of DC bias is proposed. Firstly, the influence of DC bias on transformer state is quantified from three aspects of transformer noise, vibration intensity and loss, and a quantitative expression is given. On this basis, a quantitative evaluation model of transformer state considering the influence of DC bias is established, and the data fitting method is used to avoid the subjective influence of artificial experience method. Finally, the effectiveness of the proposed model method is proved through the comparative analysis of actual cases, which qualifies the influence of DC bias on the state of transformer. So, the actual working status of transformer can be effectively distinguished, and the working efficiency of operation and maintenance personnel and the equipment management efficiency are improved.

Key words: DC bias; state evaluation; AC/DC hybrid system; fuzzy comprehensive evaluation

0 引 言

随着中国交直流电网的逐步发展,交直流网架结构正在逐渐成形。在混联系统中,当直流输电系统在单极大地回路运行、调试时,该方式将会向大地流入几千安培的电流,使周围处于中性点接地状态的变压器发生直流偏磁现象,并造成噪声、振动、损耗增大等有损变压器运行的现象。

若要考虑直流偏磁对变压器状态的影响,需要正确的方法对其评价,该评价方法不仅是确保变压器安全运行的基础,更是变电站运行维护人员合理安排检修计划的重要参考。由长期的现场运行情况可知,经常性的直流偏磁将会使变压器的各部分受到影响,进而日积月累产生不良的运行状态,甚至损坏设备。如文献[1-4]分析了直流偏磁对变压器噪声、振动、损耗的影响,使变压器噪声、损耗增大并且产生振动现象。文献[5]研究了直流偏磁对变压

器连接组别的影响,分析了不同的连接组别受直流偏磁的不同影响。但上述文献研究的侧重点在直流偏磁对变压器产生的具体影响上,未从整体定量考虑如何影响变压器的整体运行状态。

目前变压器状态评价的方法有多种,如神经网络、贝叶斯网络、模糊理论等,都取得了较好的评价效果,但是考虑直流偏磁影响的工作鲜有报道。文献[6]虽然考虑了直流偏磁对变压器状态评估的影响,但其评价方法采用人工经验法,评价结果易受主观影响。

基于此,提出了考虑直流偏磁影响的变压器状态分析及量化评价方法。首先,从直流偏磁产生的现象出发,定量分析了直流偏磁对变压器状态的影响;其次,给出了考虑直流偏磁影响的具体表达式,在此基础上,建立了考虑直流偏磁影响的变压器状态量化评价模型并优化了模型的客观性,使之更能反映变压器的状态;最后,通过实际案例的对比分析,证明了该方法的有效性,量化了直流偏磁对变压器状态的影响程度。

1 直流偏磁产生原理

当直流输电系统在单极大地回路运行、调试时将产生电位差,直流侵入变压器中性点,产生直流偏磁现象。

当直流偏磁发生时,其磁通变化情况如图1所示;变压器交流部分 i_{ac} 和直流量 i_{dc} 叠加为励磁电流的大小,如式(1)所示。

$$i = i_{ac} + i_{dc} \quad (1)$$

根据全电流定律 $\int \vec{H} d\vec{l} = \sum I$, 可得

$$Hl = Ni \quad (2)$$

式中: H 为磁场强度; l 为主磁路长度; N 为线圈匝数。

将式(1)、式(2)和方程 $B = \mu H$ 代入磁通表达式 $\Phi = BS$, 可得

$$\Phi = \frac{\mu SN(i_{ac} + i_{dc})}{l} \quad (3)$$

式中: μ 为磁导率; S 为截面面积。

因此,当变压器中性点电流出现交直流叠加情况时,将出现直流偏磁。与原始磁通相比,叠加后的总磁通多了直流磁通分量,这将使磁化曲线到达非线性区域导致铁芯饱和,产生畸变的励磁电流,进而

导致变压器内部振动现象加剧,如图1所示。同时,由实际运行经验判断,当直流偏磁发生时,变压器内部振动、噪声和损耗等单个因素的变化相对不大,因此,通过多维因素叠加评判分析直流偏磁对变压器状态的影响。

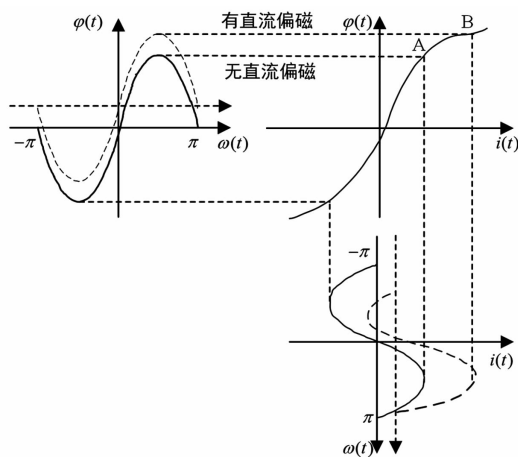


图1 直流偏磁产生原理

2 直流偏磁对变压器运行的影响量化

2.1 对变压器噪声的影响

当变压器发生直流偏磁时,不仅会加剧变压器的振动频率,也会导致噪声的增大。通过分析文献[7]的噪声 C 与中性点直流 i_{dc} 的数据,得到了两者的近似关系式如式(4)所示。

$$C = m \lg(i_{dc} + 8) + n \quad (4)$$

式中, m 和 n 为常数,具体确定方法见第3.1节。由于变压器产生的噪声对其周围居民的生产生活有直接的影响,因此,在量化评价变压器状态时,需要考虑居民生产生活可以接受的噪声水平,这也利于贯彻国家提倡的环保策略。由此,通过查找有关噪声水平的规定,确定居民区的最小噪声标准为45 dB。同时,考虑到变电站和居民区之间的距离将会产生部分传播损耗,通过国际通用衰减公式可以计算噪声衰减量,如式(5)所示。

$$\Delta C = 4.4 + 20 \frac{\lg L}{\sqrt{dh}} \quad (5)$$

式中: ΔC 为噪声衰减量; d 、 h 分别为变压器油箱的宽度和高度; L 为测量点到箱壁之间的距离。

联立式(4)和式(5)可得到不影响居民生产生活的变压器中性点直流限值。

在找到噪声与变压器中性点直流之间的关系后,进而对变压器的噪声进行量化评价。下面通过指数函数进行量化评价,同时为了方便计算,将量化数据进行同向化处理,即量化结果均在 $[0,1]$ 区间内,并且数值越小,影响越小,运行状态越好。直流偏磁对变压器噪声影响的量化表达式如式(6)所示。

$$f_1(i_{dc}, t_n) = \begin{cases} 1 & i_{dc} \leq i_m \\ e^{-(i_{dc}-i_m)t_n} & i_m < i_{dc} < i_s \\ 0 & i_{dc} \geq i_s \end{cases} \quad (6)$$

式中: $f_1(i_{dc}, t_n)$ 为考虑直流偏磁后的噪声评估值,取值范围为 $[0,1]$; i_{dc} 为中性点直流电流; t_n 为噪声持续时间; i_m 和 i_s 分别为不同噪声值下的函数分界值,由式(4)和式(5)计算所得。

2.2 对变压器振动强度的影响

由上节分析可知,铁芯磁通饱和是使变压器振动加剧的原因。根据文献[4]得到振动位移与磁通的近似正比关系,同时考虑到振动加速度和振动的剧烈程度对振动的影响,可得到式(7)。

$$\begin{cases} s(t) = kB^2(t) \\ B(t) = B_{ac}(t) \cos(\omega t) + B_{dc}(t) \\ a = \frac{d^2s(t)}{dt^2} \\ E_c = \sum_{i=1}^j \frac{a_i t_i}{\bar{a}_0 \times \bar{t} \sqrt{j}} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $s(t)$ 为位移距离; $B(t)$ 为磁通; k 为常数; $B_{ac}(t)$ 和 $B_{dc}(t)$ 为磁通的交、直流分量; a 为变压器的振动加速度; E_c 为直流偏磁能量系数; a_i 和 \bar{a}_0 分别为振动加速度及其均值和; t_i 和 \bar{t} 分别为采样间隔及其均值; j 为时间窗口内的采样点数量。

时间窗口的确定由中性点直流的设定而定。当中性点直流超过设定的限值时,时间窗口开始计时并开始计算能量系数,直到小于中性点直流设定值结束并停止计算能量系数。

由上述分析可知,振动强度对变压器状态的影响成正相关,因此,采用升半梯模型进行量化分析,直流偏磁对振动强度影响的量化表达式如式(8)所示。

$$f_2(E_c) = \begin{cases} 0 & 0 < E_c < E_{ce1} \\ \frac{m_2 - E_{ce1}}{E_{ce2} - E_{ce1}} & E_{ce1} \leq E_c \leq E_{ce2} \\ 1 & E_c \geq E_{ce2} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $f_2(E_c)$ 为考虑直流偏磁后的振动强度评估

值,取值范围为 $[0,1]$; E_{ce1} 和 E_{ce2} 是由式(7)求得的阈值; m_2 为常系数,具体确定方法见第3.1节。

2.3 对变压器损耗的影响

当直流偏磁发生时,若变压器长期在此状态下,其产生的偏磁电流将会使变压器的空载和负载损耗增加。当计及直流偏磁的影响时,通过两部分进行损耗计算。一是空载损耗的计算,在2.5个周期内分别通过计算得到的励磁电流有效值查找相应的变压器空载损耗 P_1 和 P_2 ,由此可得到考虑直流偏磁的空载损耗表达式;二是负载损耗的计算,根据常规负载损耗计算方法进行。由此可以得到考虑直流偏磁影响的变压器损耗计算公式如式(9)所示。

$$\begin{cases} P_a = \frac{P_1 + P_2}{2} \\ P_1 = \frac{1}{2} [I_N^2 R + (I_N + I_{dc})^2 R] \\ P = P_a + P_1 \\ \Delta T = \frac{\int_0^T (P - P_0) dt}{cM} \end{cases} \quad (9)$$

式中: P_a 为空载损耗; P_1 为负载损耗; P 为总损耗; P_0 为冷却器容量; I_N 为负载电流; I_{dc} 为发生直流偏磁时变压器中性点的直流电流; ΔT 为变压器油温的温升; c 、 M 和 R 分别为变压器油比热容、质量以及变压器损耗等效电阻。

由上述分析可知,变压器损耗对其状态的影响成正相关,因此,同理采用升半梯模型对其量化分析,直流偏磁对变压器损耗影响的量化表达式如式(10)所示。

$$f_3(P) = \begin{cases} 1 & 0 < P < P_{e1} \\ \frac{m_3 - P_{e1}}{P_{e2} - P_{e1}} & P_{e1} < P < P_{e2} \\ 0 & P \geq P_{e2} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $f_3(P)$ 为取值在0~1之间的变压器损耗评估值; P_{e1} 和 P_{e2} 为计及直流偏磁对变压器损耗影响的阈值,由式(9)求得; m_3 为常系数,具体确定方法见第3.1节。

3 直流偏磁对变压器状态影响的量化评价

3.1 系数确定方法

在考虑噪声、振动强度和损耗对变压器的影响

量化中,产生了一些待定系数以及影响权重集参数。文献[8-11]在处理待定系数时,采用人工统计打分方法确定,具有很强的主观性,而通过使用统计分析软件 SPSS 进行大数据拟合分析,确定这些待定系数,更具客观性和可行性,如图 2 所示为待定系数确定流程。

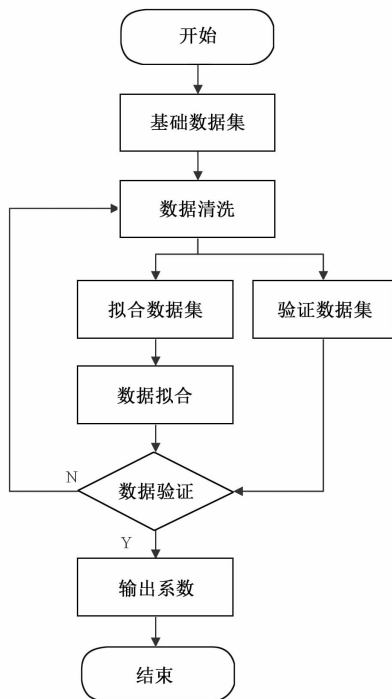


图 2 待定系数确定流程

确定系数时,把出现直流偏磁下的变压器基础运行数据分为拟合数据集和验证数据集。首先,对基础运行数据进行数据清洗,去除异常数据点;然后,输入拟合数据集进行数据拟合;接着通过验证数据集对系数进行验证,若验证成功,则确定系数,若验证失败,返回到数据清洗步骤,更新数据库,再次拟合,直至输出系数。

通过上述系数确定方法,采用实际运行的某 220 kV 变电站变压器的运行数据进行拟合分析,得到待定系数和权重系数。

由上可知,系数确定及量化评价所需的数据有变压器基础数据和运行数据两部分。基础数据有变压器的尺寸数据,运行数据包括由振动传感器监测的变压器本体加速度、采样时间间隔和采样数量、变压器油温数据以及变压器励磁电流、中性点直流电流等运行数据。同时由于变压器结构的不同将会导致直流偏磁对变压器状态的影响不同,因此,选取了输电网常用的三相变压器和单相自耦变压器数据分

别进行系数确定。

根据待定系数确定方法可求得不同的变压器结构类型相关系数值如表 1、表 2 所示,其中待定系数通过发生直流偏磁时的数据拟合而得,权重系数通过正常运行数据和发生直流偏磁时的数据共同作用下拟合而得。

表 1 三相式结构相关系数值

m	n	k	m_2
2.3	4.2	12.3	2.37
m_3	w_1	w_2	w_3
530	0.23	0.41	0.36

表 2 单相自耦式结构相关系数值

m	n	k	m_2
10.8	8.2	17.3	8.31
m_3	w_1	w_2	w_3
427	0.38	0.29	0.67

3.2 模糊综合评价

模糊综合评价的基础是模糊集合论,该理论主要作用是提供受模糊因素影响或对多类型模糊因素现象分析的评价方法。模糊关系可以定量分析主观性强和边界不清的因素,并对多类型因素进行综合性评价。该评价方法结果清晰,极具客观性,是一个好的问题解决思路。

在前述直流偏磁对变压器运行影响量化的基础上,首先求出噪声、振动、损耗量化表达式的相关系数;然后将量化表达式融入模糊综合评价中;最后通过模糊综合评价方法对变压器状态进行评价。

采用加权归一化后的评分方式对变压器受直流偏磁影响的状态进行评价,状态划分参照文献[12-14]进行,划分结果如表 3 所示。

表 3 变压器状态划分

分数	状态
0 ~ 0.2	正常
0.21 ~ 0.4	注意
0.41 ~ 0.7	异常
0.71 ~ 1.0	严重

变压器状态模糊综合评价有如下步骤:

1) 创建状态变量集 F 。 $F = \{f_i \mid (i = 1, 2, 3)\}$, $f_i (i = 1, 2, 3)$ 分别代表噪声、振动强度和损耗的量化指数。

2) 建立状态变量集中上述 3 个指标的归一化权重集 W 。 $W = \{w_1, w_2, w_3\}$, 其值需满足同一性和非负

性,即要求权值满足 $w_i \geq 0 (i = 1, 2, 3)$ 和 $\sum_{i=1}^3 w_i = 1$ 。

3) 建立评估集 V 。变压器状态评估集由正常状态、注意状态、异常状态、严重状态等 4 类状态构成。

4) 建立隶属度矩阵。其表示从状态变量集 F 到评估集 V 的模糊关系,并从中得到单因素隶属度 D 。

5) 求解模糊综合评价结果 \bar{D} 。模糊综合评价过程是对一系列指标权重加权求和,如式(11)所示。

$$\bar{D} = \sum_{i=1}^3 f_i w_i, i = 1, 2, 3 \quad (11)$$

至此,完成了考虑直流偏磁影响的变压器状态分析及量化评价的模型建立工作。

4 实例分析

选取距离某 2 座特高压直流换流站 100 km 范围内的 220 kV 变电站,该变电站的变压器中性点采用直接接地方式,其型号为 SSZ11 - 180000/220,变压器结构均为三绕组有载调压变压器,额定容量为 180 000/180 000/90 000 kVA,额定电流为 386.9 A,空载损耗为 82.3 kW,负载损耗为 450 kW,正常运行振动加速度为 4.2 m/s²,连接组别为 YNyn0d11。该变电站投运于 2016 年 5 月 25 日,从投运至今已产生了多次因直流偏磁而导致的变压器异常运行的情况。

选用三相式结构的相关数据为例,代入初始条件后,按照不考虑直流偏磁影响和考虑直流偏磁影响的变压器状态量化对比评价,其中 D_1 、 D_2 分别为不考虑直流偏磁影响和考虑直流偏磁影响的评价结果,可得结果如表 4 所示。

由表 4 评价结果可以看出,当考虑直流偏磁影响时,预测状态与实际状态相吻合,而不考虑影响时存在与实际状态不符的情况,如样本 5—6、样本 10—12 都出现了状态转换。其中样本 6 和样本 10 由注意状态转变为异常状态,样本 5 和样本 12 由正常状态转变为注意状态。同时由样本 6 和样本 10 以及样本 5 和样本 12 评价结果的量化对比可以看出,当考虑直流偏磁转变成异常状态时,增加了 36% 的影响(影响量化结果以表 3 的状态上限分数为基准,求取各个样品的误差并取平均值,下面影响

表 4 变压器状态评价结果 1

样本	D_1	D_2	不考虑影响	考虑影响	实际状态
1	0.167	0.186	正常	正常	正常
2	0.153	0.175	正常	正常	正常
3	0.124	0.121	正常	正常	正常
4	0.228	0.347	注意	注意	注意
5	0.192	0.215	正常	注意	注意
6	0.319	0.445	注意	异常	异常
7	0.153	0.167	正常	正常	正常
8	0.267	0.285	注意	注意	注意
9	0.314	0.306	注意	注意	注意
10	0.355	0.473	注意	异常	异常
11	0.437	0.589	异常	异常	异常
12	0.187	0.242	正常	注意	注意
13	0.144	0.153	正常	正常	正常
14	0.172	0.187	正常	正常	正常
15	0.121	0.135	正常	正常	正常

计算思路相同),当转变成注意状态时,增加了 21% 的影响,因此可以说明的是考虑直流偏磁对变压器的状态评价结果影响显著。

另外在考虑直流偏磁的基础上,以人工法和数据拟合法确定系数为自变量对变压器状态进行对比评价,其中 D_3 、 D_4 为人工法和数据拟合法评价结果,其结果如表 5 所示。

表 5 变压器状态评估结果 2

样本	D_3	D_4	人工法	数据拟合法	实际状态
1	0.124	0.154	正常	正常	正常
2	0.169	0.178	正常	正常	正常
3	0.112	0.131	正常	正常	正常
4	0.157	0.211	正常	注意	注意
5	0.269	0.305	注意	注意	注意
6	0.192	0.195	正常	正常	正常
7	0.353	0.387	注意	注意	注意
8	0.219	0.293	注意	注意	注意
9	0.357	0.429	注意	异常	异常
10	0.279	0.318	注意	注意	注意
11	0.181	0.195	正常	正常	正常
12	0.144	0.172	正常	正常	正常
13	0.183	0.228	正常	异常	异常
14	0.141	0.169	正常	正常	正常
15	0.259	0.315	注意	注意	注意

由表 5 的评价结果可以看出,当选择数据拟合法时,预测状态与实际状态相吻合,而用人工法时存在与实际状态不符的情况,如样本 4、样本 9、样本 13 发生了状态转变,其中样本 4 和样本 13 由正常状态转变为注意状态,样本 9 由注意状态转变为异常状态。对样本 4 和样本 13 以及样本 9 评价结果进一步量化,当采用数据拟合法时,正常状态转变成

注意状态时增加了29%的影响,注意状态转变成异常状态时增加了20%的影响。由此,可以证明的是数据拟合法更符合实际状态,且比人工法能更加优越地对变压器状态量化评价。同时,可以给运行维护人员提供有效信息,注意变压器状态,合理安排检修计划。

由于所采用的数据为220 kV变电站数据,其数据范围可能具有局限性,因此,通过采集靠近换流站的另一220 kV变电站和某110 kV变电站数据用所提方法进行分析验证(35 kV因其电压等级较低,受影响小,因此不考虑该电压等级),结果如表6所示,其中 D_6 为220 kV评价结果, D_7 为110 kV评价结果。

表6 变压器状态评价结果3

样本	D_6	D_7	实际状态(D_6)	实际状态(D_7)
1	0.192	0.196	正常	注意
2	0.359	0.319	注意	注意
3	0.101	0.304	正常	注意
4	0.561	0.166	异常	正常
5	0.086	0.257	正常	注意
6	0.371	0.281	异常	注意
7	0.146	0.672	正常	异常
8	0.219	0.116	正常	正常
9	0.311	0.189	注意	注意
10	0.118	0.162	正常	正常
11	0.261	0.283	注意	注意
12	0.184	0.086	正常	正常
13	0.191	0.176	正常	正常
14	0.226	0.319	正常	注意
15	0.181	0.422	正常	注意

由表6可以看出,220 kV变压器的评价结果与实际状态相比,有2个出现了状态转换,即出现2个未能成功评价的样本,其成功评价率为86.67%。具体来说,未成功评价的样本6和样本8评价结果与所定义的状态量化指标相比,其平均误差率为8.375%,由此可知所提方法在相同电压等级下的评价效果较好。同样地,110 kV变压器出现3个未能成功评价的样本,其成功评价率为80%。具体上,未成功评价的样本1、样本9和样本15评价结果与所定义的状态量化指标相比,其平均误差率为2.68%,由此可知所提方法在不同电压等级下的评价效果同样较好。因此,可以得出所提方法在不同电压等级下的状态评价同样适用,工程应用性较强。同时,由上述仿真分析可知,通过把2座变电站的实际状态数据代入所提模型,判断变压器状态,其判断

结果与实际运行状态相一致,可以说明的是所采用的状态划分标准是合理的。

在上述仿真的基础上,分析所提方法对不同内部结构变压器的适用情况。仿真结果如表7所示,其中 D_4 、 D_8 分别为三相式和单相式结构评价结果。

表7 变压器状态评价结果4

样本	D_4	D_8	实际状态(D_4)	实际状态(D_8)
1	0.154	0.328	正常	注意
2	0.178	0.381	正常	正常
3	0.131	0.357	正常	注意
4	0.211	0.523	注意	注意
5	0.305	0.208	注意	注意
6	0.216	0.159	正常	正常
7	0.387	0.499	注意	注意
8	0.293	0.183	注意	正常
9	0.429	0.153	异常	注意
10	0.318	0.177	注意	正常
11	0.195	0.182	正常	正常
12	0.172	0.105	正常	正常
13	0.228	0.194	异常	正常
14	0.169	0.387	正常	注意
15	0.315	0.318	注意	注意

由表7可以看出,三相式和单相式评价结果分别存在2个和3个未能成功评价的样本,其成功评价率分别为93.33%和96.67%。具体说,三相式结构变压器未成功评价的样本13与所定义的状态量化指标相比,其平均误差为25.5%;单相式结构变压器未能评价的样本2、样本4和样本9的平均误差为48.25%。由此可知,所提方法对不同结构的变压器有较好的适用性,但相对于单相式结构变压器,所提评价方法更适合于三相式变压器。

5 结论

从直流偏磁的原理出发,通过考虑直流偏磁对换流站附近变电站变压器的影响并进行了量化评价,有如下结论:

1)从直流偏磁的角度,分析了直流偏磁对变压器噪声、振动强度和损耗的影响,给出了考虑直流偏磁的量化表达式和相应模型。

2)为了避免人工经验的主观性,采用数据拟合的方式确定模型中的待定系数,由实例仿真可知,采用数据拟合的方式能显著提高预测精度,更加准确地预测变压器的状态。

3)采用模糊评价法对模型进行仿真验证,与不

考虑直流偏磁影响和采用人工法确定系数的模型对比,得到了考虑直流偏磁影响和采用数据拟合法的模型更加符合变压器实际状态;同时所提方法对不同电压等级和不同结构的变压器状态评价具有普适性,工程应用性好,使运行维护人员能更加高效地制定检修计划,提升了工作效率。

参考文献

[1] 郭超,朱虎,杨新春. 直流偏磁对电力变压器的影响及其抑制方法[J]. 山东工业技术, 2017(15):175 - 175.

[2] 李冰,王泽忠,刘海波,等. 直流偏磁下 500 kV 单相变压器振动噪声的试验研究[J]. 电工技术学报,2021, 36(13):2081 - 2811.

[3] 蒋伟,兰新生,周易谦. 直流输电导致变压器噪声异常的测试及分析[J]. 四川电力技术, 2017, 40(1): 58 - 62.

[4] 王佳音,白保东,刘宏亮,等. 直流偏磁对变压器振动噪声的影响[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8):56 - 61.

[5] 李泓志,崔翔,刘东升,等. 直流偏磁对三相电力变压器的影响[J]. 电工技术学报, 2010, 25(5):88 - 97.

[6] 谢志成,钱海,林湘宁,等. 直流偏磁下变压器运行状态量化评估方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(2): 216 - 223.

[7] 郭洁,黄海,唐昕,等. 500 kV 电力变压器偏磁振动分析[J]. 电网技术,2012,36(3): 70 - 75.

[8] 严宇,李庚银,周明,等. 基于模糊综合评价的交易结算偏差电量处理方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3):200 - 204.

[9] 刘万勋,于琳琳,张丽华,等. 基于 AHP 和多级模糊综合评判的电网发展水平评估[J]. 智慧电力, 2020, 48(5):80 - 85.

[10] 田松峰,铁成梁,栗国鸿,等. 模糊综合评判法在电厂点检系统中的应用研究[J]. 电力科学与工程, 2019, 35(2):67 - 74.

[11] 赵艳龙,熊兰,徐敏捷,等. 基于模糊层次分析法的干式变压器运行状态综合评估[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2013, 27(4):60 - 67.

[12] 石少伟,王可,陈力,等. 基于模糊综合评价和贝叶斯判别的电力变压器状态判别和预警[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(9):60 - 66.

[13] 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.

[14] 李秀广,吴旭涛,刘世涛,等. 基于模糊综合评判的防污闪涂层状态评估方法[J]. 水电能源科学, 2019, 37(1):176 - 178.

作者简介:

李晖(1963),男,工程师,研究方向为电网生产运行管理。

(收稿日期:2021 - 03 - 24)

(上接第 35 页)

[10] 闫红艳,高艳丰,王继选,等. 同杆双回线路行波故障测距的关键问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018,46(4):120 - 128.

[11] 李振兴,吴李群,田斌,等. 不同步双端数据修正波速的单端行波测距算法研究[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(8):16 - 22.

[12] 范春菊,郭煜华,徐礼葆,等. 输电线路行波故障测距技术的发展与应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017,29(4):129 - 134.

[13] 刘顺桂,李勋,张宏钊,等. 一种采用时间判别法的混合线路故障行波定位方法[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(1):41 - 46.

[14] 高效海,苏晓龙. 一种新的单端行波测距方法[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(12):87 - 91.

[15] 高艳丰,朱永利,闫红艳,等. 一种新型的输电线路双端行波故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016,44(8):8 - 13.

[16] 黄元亮,郝真真,姜甜甜,等. 一种新的输电线路双端行波故障定位算法[J]. 电子测量与仪器学报,2016, 30(1):20 - 29.

[17] 张书娴,谭建成. 基于行波的输电线路保护综述[J]. 电气开关,2015,53(6):1 - 4.

[18] 刘慧海,张晓莉,姜博,等. 行波故障测距装置的检测与评价[J]. 电力系统保护与控制,2015,43(1): 145 - 149.

[19] 何军娜,陈剑云,艾颖梅,等. 电力系统行波测距方法及其发展[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(24): 148 - 154.

[20] 许勇,牛永会,郭宁明,等. 新型输电线路故障测距系统的研制[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(12): 119 - 125.

作者简介:

邹磊(1982),男,硕士,工程师,研究方向为电力系统继电保护控制技术的研发及开发工作。

(收稿日期:2021 - 04 - 20)