

直流偏磁下变压器运行状态量化评估方法

谢志成¹, 钱海¹, 林湘宁², 邓军¹, 李正天², 郑颖³, 刘青松¹

(1. 中国南方电网超高压输电公司 检修试验中心, 广东 广州 510670;

2. 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;

3. 广州供电局有限公司, 广东 广州 510000)

摘要:针对现有的变压器状态评估方法难以有效量化直流偏磁及其持续时间对变压器状态影响的问题,在分析直流偏磁下变压器振动强度、噪声、油温温升的变化规律的基础上,结合专家知识,采用降半柯西分布函数建立了直流偏磁下振动加剧的量化评估模型,采用指数分布函数建立了直流偏磁下噪声增加的量化评估模型,采用降半正态分布函数建立了直流偏磁下油温温升增加的量化评估模型。采用层次分析法(AHP)对3种量化评估结果进行综合,形成了考虑直流偏磁持续时间的变压器状态评估修正因子,实现了对直流偏磁影响的量化,为制定相应的应对策略提供技术参考。通过实例验证了所提方法的合理性。

关键词:电力变压器;直流偏磁;状态评估;时间累积;振动加剧;噪声增加;油温温升;模型

中图分类号:TM 41

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.02.032

0 引言

近年来,随着我国电网规模的快速发展,交直流混联的电网架构也在逐步形成。若直流输电系统处于调试状态或发生单极故障,需要将系统切换为单极-大地运行方式,此时通过接地极流入大地的电流的幅值最大将达到几千安培。该入地电流将改变土壤中电位分布情况,对接地极附近交流系统中中性点接地变压器的健康运行造成不良影响。过大的直流电流侵入变压器绕组,引发变压器直流偏磁,造成变压器噪声增加、振动加剧、油温过热等一系列损害变压器状态的不良后果。这种问题在特高压直流场景下更为突出。

想要合理地度量直流偏磁对变压器运行状态的影响,正确的状态评估方法非常重要,它也是确保电网设备安全运行、合理安排检修策略的重要基础。目前,状态评估的思路是利用预防性试验数据、在线监测数据、历史记录以及同类设备家族缺陷等全过程数据,通过大量运行经验所形成的评估准则以及数据规律分析方法等技术手段来综合评价设备的当前状态,并预测事态的发展,从而为制定设备检修计划提供参考。理论研究方面,目前国内外学者的工作重点大部分集中在评估算法的研究,常用的人工智能算法包括贝叶斯网络、模糊理论、神经网络、证据理论等^[1-4],这些智能方法都取得了较好的应用效果,但考虑直流偏磁影响的研究工作未见报道。

根据现场运行情况可知,长时间的直流偏磁将会导致变压器各部件损伤累积,继而对变压器的运

行状态及构件的承载能力产生较为严重的影响,甚至会损毁设备。目前,电力部门通过对大量的现场运行经验进行总结,出台了相应的输变电设备状态评估规程^[5],但其对直流偏磁影响的衡量方式为“一刀切”方法,即一旦中性点直流电流超过所设定的门槛值,将直接设备的状态为异常,并未考虑直流偏磁影响的持续时间。

因此,研究由直流偏磁引起的设备亚健康运行状态,分析评估直流偏磁对变压器本体的影响,对提高电网安全运行水平和环境友好性具有重要意义,这也是目前我国电网发展的前瞻性需求之一。

针对现有变压器运行状态评估方法存在的不足及现场实际需求,本文提出了一种考虑直流偏磁的变压器运行状态量化评估方法。首先通过分析不同直流电流下变压器振动强度、噪声、油温温升的变化规律,揭示直流偏磁对变压器运行状态的影响机理;然后结合专家知识,采用降半柯西分布函数建立直流偏磁下变压器振动加剧的量化评估模型,采用指数分布函数建立直流偏磁下噪声增加的量化评估模型,并在分析热量传递过程的基础上建立了计及直流偏磁持续时间的油温温升增加量化评估模型;最后采用层次分析法(AHP)对3种量化评估结果进行综合,形成了考虑直流偏磁持续时间的变压器状态评估修正因子,实现对直流偏磁影响的定量分析,为制定相应的应对策略提供技术参考。

1 直流偏磁对变压器运行状态的影响机理

在直流偏磁工况下,直流励磁磁通和交流励磁磁通相叠加,形成直流偏磁工况下变压器的总磁通,使得原来处于工作区的一部分磁化曲线偏移至饱和区,继而导致励磁电流波形畸变^[6]。直流偏磁工况下的变压器励磁电流波形如图1所示。变压器励磁

收稿日期:2017-12-28;修回日期:2018-12-06

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0902701)

Project supported by the National Key Research and Development Program of China(2017YFB0902701)

电流与直流偏磁电流方向一致的半个周波大幅增加,而另外半个周波反而减小,对应的励磁电流波形呈现正负半波极不对称的形状,引起半个周期内的铁芯过饱和。

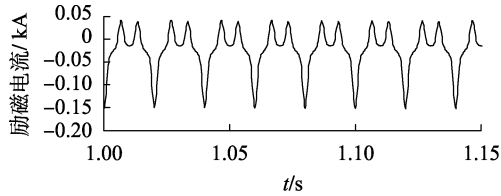


图1 直流偏磁工况下变压器励磁电流波形

Fig.1 Waveform of excitation current under DC bias

正负半波不对称的励磁电流含有较大比例的谐波成份,以受直流偏磁影响最大的单相三柱式变压器^[7]为例,不同程度直流偏磁影响下变压器励磁电流谐波含量的变化情况如表1所示。

表1 不同直流电流下励磁电流的谐波含量

Table 1 Harmonic content of excitation current under different DC currents

直流 电流/A	励磁电流谐波次数						谐波含 量/%
	2	3	4	5	6	7	
0	0.001	0	0	0.007	0	0	5.6
5	0.021	0.001	0.007	0.010	0	0.003	18.2
10	0.044	0.002	0.017	0.015	0	0.006	32.8
15	0.067	0.002	0.030	0.023	0	0.010	44.9
20	0.093	0.002	0.042	0.029	0	0.011	53.9
25	0.123	0.002	0.060	0.043	0.001	0.018	62.8
30	0.152	0.002	0.079	0.058	0.001	0.029	70.2
35	0.184	0.003	0.100	0.075	0.002	0.038	76.4
40	0.216	0.005	0.121	0.090	0.002	0.045	80.9

由表1的结果可知,当变压器处于正常运行状态(中性点直流电流为0)时,励磁电流中只存在少量的谐波,总谐波含量仅为5.6%;当变压器处于直流偏磁状态(中性点直流电流不为0)时,励磁电流中既存在奇次谐波也存在偶次谐波,总谐波含量随中性点直流电流幅值的增加而增大,而谐波含量增大是引起变压器振动加剧、噪声增大、损耗增加的直接原因。

1.1 直流偏磁与变压器振动强度变化的关系

当变压器中性点出现直流分量时,其铁芯中将产生较大的零序磁通,零序磁通改变了各相磁通的大小和相位,使得铁芯单相或两相磁通密度严重升高或饱和,造成磁致伸缩现象,进而导致变压器振动明显加剧,变压器振动强度也随着直流偏磁电流幅值的增加而增大。图2为发生直流偏磁时磁通与磁致伸缩位移幅值的近似关系,图中 B_d 为直流磁通。

虽然不同类型变压器的振动频谱分布具有差异性,但磁通与铁芯磁致伸缩位移的关系存在共性:在一定的磁通范围内,位移 $\lambda(t)$ 近似正比于磁通 $B(t)$ 的平方^[8],如式(1)所示。

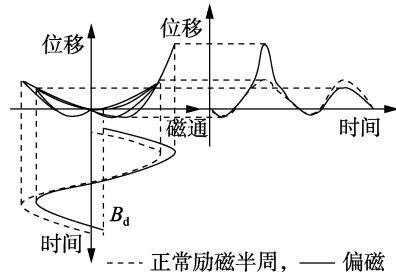


图2 发生直流偏磁时磁通与磁致伸缩位移幅值的关系

Fig.2 Relationship between magnetic flux and amplitude of magnetostriction displacement under DC bias

$$\lambda(t) \approx k B^2(t) \quad (1)$$

其中, k 为常数。当发生直流偏磁时,铁芯磁通为:

$$B(t) = B_d(t) + B_a(t) \cos(\omega t) \quad (2)$$

其中, $B_d(t)$ 和 $B_a(t)$ 分别为磁通的直流分量和交流分量。

目前变压器所加装的振动传感器监测的物理量为变压器本体的振动加速度 a ,其值可近似为铁芯磁致伸缩位移对时间的二阶导数,即:

$$a = \frac{d^2 \lambda(t)}{dt^2} \quad (3)$$

结合式(1)及(2)可知,振动加速度可以从振动剧烈程度方面衡量变压器直流偏磁程度,同时为了充分考虑振动的持续时间,本文定义直流偏磁振动能量比系数 R_{dc} 对其进行量化:

$$R_{dc} = \sum_{i=1}^m (a_i t_i)^2 / m (\bar{a}_0 \bar{t})^2 \quad (4)$$

其中, a_i 和 t_i 分别为第 i 个采样点对应的振动加速度均值和采样间隔; $\bar{a}_0$ 和 $\bar{t}$ 分别为正常情况下振动加速度均值和采样时间间隔均值; m 为时间窗内采样点的数量。当中性点直流电流超过设定值时,启动式(4)所示的能量计算,当中性点直流电流回落到设定值以下时,停止能量计算。启停能量计算的时间跨度即为式(4)的时间窗。

此外,直流偏磁电流较大且持续时间较长会使变压器持续处于高强度振动状态,继而使变压器轴向预紧力下降,增大匝间短路以及轴向失稳的风险^[9]。同时,如果预紧力下降幅度过大,则绕组固有频率也将大幅下降^[10],极可能诱发谐振,对设备产生更为严重的破坏,这方面尚需进一步的研究。

1.2 直流偏磁与变压器噪声变化的关系

直流偏磁下铁芯的磁致伸缩现象不仅会造成变压器振动加剧,同时也会引起噪声的增加,且噪声随磁通密度的增加而增加^[11]。本文采用某电网辖区内20台不同电压等级的柱式变压器在葛—上直流单极大地运行(2014年1月至7月共8次单极—大地运行)方式下,共59 810组的观测数据为样本,对变

压器中性点直流电流 i 与其噪声分贝值 L 的定量关系进行拟合分析,发现两者近似满足如下对数关系:

$$L = A \lg(i + 10) + B \quad (5)$$

其中, A 和 B 为拟合系数。对于不同的变压器,拟合参数 A 和 B 的值不尽相同,但总体而言还是满足式(5)所示的对数关系。

变压器噪声增加最为直接的影响就是干扰了变电站周围居民的正常生活,甚至出现过因为噪声过大而导致变电站被群众围堵的群体性事件^[12]。根据 GB3096—2008《声环境质量标准》规定,对于一般商业区和居民区,昼间噪声不应超过 55 dB,夜间噪声不应超过 45 dB。同时考虑到居民区与变电站主体有一定的距离,噪声在传播过程中有部分衰减,具体衰减量可以根据国际通用噪声衰减标准公式^[13]进行计算:

$$\Delta L = 4.4 + 20 \frac{\lg D'}{\sqrt{WH}} \quad (6)$$

其中, ΔL 为与箱壁距离的增加引起的噪声衰减量,单位为 dB; W 为油箱的宽度,单位为 m; H 为油箱的高度,单位为 m; D' 为噪声测量点与变压器箱壁的距离,单位为 m。

将变压器的实际参数及变电站与居民区的距离代入式(6),可得到噪声在传播过程中的衰减量,结合标准规定的分贝限值,代入式(5),即可得到不影响变电站周围居民生活的中性点直流电流限值。

1.3 直流偏磁与变压器顶层油温变化的关系

变压器的损耗主要包括空载损耗和负载损耗。考虑到直流偏磁影响的空载损耗的计算方法为:在直流偏磁的半个周期内,计算励磁电流的峰值并换算为励磁电流的有效值,继而在变压器空载励磁特性中查找相应的变压器电压 U_+ 和空载损耗值 P_+ ;在另外半个周期内,对应的变压器电压 $U_- = 2U_N - U_+$ (U_N 为变压器额定电压),同样地在变压器空载励磁特性中查找相应的空载损耗 P_- 。则直流偏磁下变压器的空载损耗 P_F 可以表示为:

$$P_F = \frac{P_+ + P_-}{2} \quad (7)$$

该方法得到了配电变压器模拟试验的验证^[14]。由于变压器励磁电流无法在线测量,因此在进行停电试验时,应该对变压器进行偏磁试验,即在中性点注入不同幅值的直流电流,测量对应的励磁电流,并通过对数据的拟合处理得到两者之间的函数关系。

变压器负载损耗 P_L 的计算方法为:

$$P_L = I_N^2 R \quad (8)$$

其中, I_N 为正常情况下变压器负载电流; R 为变压器负载损耗等效电阻。由前文可知,直流偏磁对变压器损耗的影响呈周期性,即其仅在半周期内影响

变压器损耗,则直流偏磁下变压器负载损耗可以通过式(9)进行计算。

$$P'_L = \frac{1}{2} I_N^2 R + \frac{1}{2} (I_N + I_{dc})^2 R \quad (9)$$

其中, I_{dc} 为侵入变压器中性点的直流电流。结合式(7)~(9)可得变压器在直流偏磁工况下的总损耗为 P :

$$P = P_F + \frac{P_L}{2} \left[\left(\frac{I_N + I_{dc}}{I_N} \right)^2 + 1 \right] \quad (10)$$

此外,当直流偏磁长时间作用于变压器时,将引起变压器损耗增加以及油温异常。因此,本文采用比热容将直流偏磁引起的变压器损耗增加和变压器油平均温升进行关联,实现对直流偏磁时间积累效应的量化,即在计及变压器冷却器冷却功率的前提下,将直流偏磁下变压器总损耗在时间域上进行积分所得到的能量通过比热容转化为变压器油温升值,具体计算方法如式(11)所示。

$$\int_0^T (P(I) - P_0) dt = Q = c M_T \Delta T \quad (11)$$

其中, $P(I)$ 为直流偏磁电流为 I 时变压器的总损耗,单位为 kW; P_0 为变压器冷却器的冷却容量,单位为 kW; T 为直流偏磁持续时间,单位为 h; Q 为直流偏磁工况下变压器损耗对时间积分所得热量值,单位为 kJ; c 为变压器油比热容,单位为 kJ/(kg·℃); M_T 为变压器油质量,单位为 kg; ΔT 为变压器油温温升值,单位为 K。

变压器油温升高是随着时间积累的过程,但是并不是无穷尽地进行累积,而是在发热散热达到平衡后(大约 20 h 后)保持稳定。因此式(11)中积分上限设定为 20 h,即若直流偏磁持续时间超过 20 h,则认为变压器油温已经趋于稳定。为了更直观地体现变压器油温温升与中性点直流电流的关系,可以将式(11)改写为:

$$\Delta T = \frac{\int_0^T (P(I) - P_0) dt}{c M_T} \quad (12)$$

2 直流偏磁对变压器影响的量化评估模型

如前文所述,本文从变压器振动加剧、噪声增大及损耗增加这 3 个方面衡量直流偏磁对变压器运行状态的影响,同时将这些影响进行融合,以修正因子的形式在变压器综合状态评价结果上进行体现,如图 3 所示。

直流偏磁工况持续时间一般在几小时甚至几天以上,其对变压器状态所造成的不良影响也会随着时间的推移逐渐累积,变压器绝缘性能也将受到更大程度的损害^[15]。此外,当变压器中性点直流电流

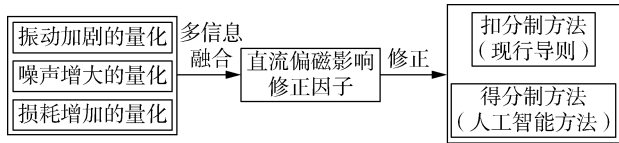


图3 直流偏磁修正变压器状态评估示意图

Fig.3 Schematic diagram of transformer condition assessment considering DC bias

幅值接近但未超过门槛值且持续时间较长时,设备所遭受的直流偏磁影响是不容忽视的。因此,准确合理地度量直流偏磁对变压器运行状态的影响,不仅可以使检修工作更具有针对性,同时也符合未来交直流混联电网架构下的实际需求。

2.1 振动加剧对变压器状态影响的量化

直流偏磁引起的振动加剧会造成变压器结构发生松动、诱发绕组变形,同时导致部件绝缘性能老化加速,存在诱发严重事故的潜在危险,因此有必要对其进行量化评估。

由于振动的强度越大,其对变压器运行状态的影响也就越大,因此需要采用偏小型隶属函数对其进行评估。本文对常见的评估函数进行了扫描,结合专家对振动强度影响的经验知识,确定采用降半柯西分布函数作为量化评估函数,如式(13)所示。

$$h(R_{dc}) = \begin{cases} 1 & R_{dc} \leq R_{set} \\ \frac{1}{1+k_1(R_{dc}-R_{set})^{k_2}} & R_{dc} > R_{set} \end{cases} \quad (13)$$

其中, $h(R_{dc})$ 为直流偏磁导致的变压器振动加剧程度的评估值,取值范围为 $[0, 1]$; R_{set} 为振动能量比门槛值; k_1, k_2 为待定系数,且 $k_1 > 0, k_2 > 0$ 。 R_{set}, k_1, k_2 均需在现场针对变压器实际情况结合专家经验进行整定。

降半柯西分布函数的示意图如图4所示。当增大 k_1 时,该分布函数将沿着曲线4→曲线5的趋势变化;当增大 k_2 时,该分布函数将沿着曲线2→曲线3的趋势变化。

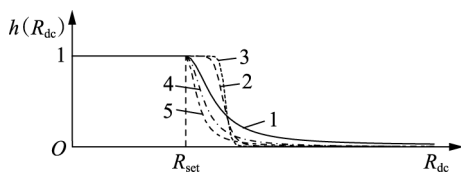


图4 降半柯西分布函数示意图

Fig.4 Schematic diagram of reduced Semi-Cauchy distribution function

2.2 噪声增大对变压器状态影响的量化

由1.2节可知,噪声增大对环境造成了不良的影响。虽然噪声增大对变压器本身的运行并没有太大的影响,但是其不利于构建环境友好型电网,同时也影响了电网公司的社会形象,因此笔者认为应该对直流偏磁导致的噪声增大进行量化评估。

考虑到人对噪声的忍耐力有限,噪声分贝越高,人对噪声的忍耐力越差,因此本文采用指数分布函数作为量化评估函数,如式(14)所示。

$$f(I, t_n) = \begin{cases} 1 & I \leq I_m \\ e^{-k_3(I-I_m)t_n} & I_m < I < I_s \\ 0 & I \geq I_s \end{cases} \quad (14)$$

其中, $f(I, t_n)$ 为直流偏磁导致的噪声增大的评估值,取值范围为 $[0, 1]$, I 为中性点直流电流值(单位为 A), t_n 为噪声持续的时间(单位为 h); k_3 为待整定系数; I_m 为标准规定的 45 dB 噪声值根据式(5)及(6)计算得到的函数分界值; I_s 为标准规定的 55 dB 噪声值所对应的函数分界值。

指数分布函数的示意图如图5所示。当增大 k_3 时,该分布函数将沿着曲线1→曲线3的趋势变化。对于式(14)所示的评估函数设定2个门槛值,即高门槛值 I_s 及低门槛值 I_m 。当中性点直流电流值未达到低门槛值 I_m 时,则认为偏磁引起的噪声不会对变电站周围居民的生活产生影响;如果中性点直流电流值超过低门槛值且未达到高门槛值,则认为该噪声已经产生影响,由其持续时间及幅值大小决定其评分值;如果超过高门槛值 I_s 时,则可认为噪声超过了人的可忍耐范围,其评分值直接置为0。本文中,这2个门槛值是参考标准及实际运行情况确定的,未来在实际运行经验积累充分后可以进行调整。

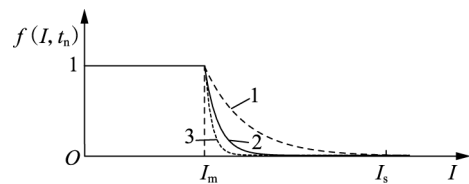


图5 指数分布函数示意图

Fig.5 Schematic diagram of exponential distribution function

2.3 损耗增大对变压器状态影响的量化

正常运行工况下变压器油温维持在较为恒定的水平,而在直流偏磁工况下,变压器损耗增加将使得油温在一定程度上升高,虽然油温变化是较为缓慢的过程量,但如果其不能被冷却器及时地消除,将会对变压器的绝缘性能造成不利影响,这也是诱发变压器过热故障的潜在重要因素。

考虑到变压器油温与变压器状态之间关联特性的模糊性,为了将直流偏磁引起的变压器顶层油温升值与其运行状态劣化程度进行定量映射,表征油温升值与状态之间的关系,本文参考相关导则对其的评估方法,选择降半正态分布函数作为评估变压器顶层油温升值的评估函数,如式(15)所示。

$$g(\Delta T) = \begin{cases} e^{-k_4 \Delta T^2 / T_m^2} & \Delta T < T_m \\ 0 & \Delta T \geq T_m \end{cases} \quad (15)$$

其中, $g(\Delta T)$ 为直流偏磁引起的油温升高的评估值, 取值范围为 $[0, 1]$; k_4 为待整定系数; T_m 为油温升温阈值。

降半正态分布函数的示意图如图 6 所示。当增大 k_4 时, 该分布函数将沿着曲线 1 → 曲线 3 的趋势变化。

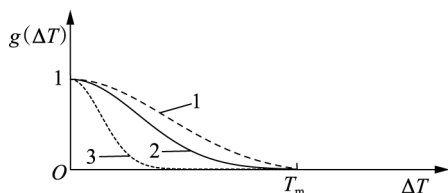


图 6 降半正态分布函数示意图

Fig.6 Schematic diagram of reduced semi-normal distribution function

本文参照 GB1094.2—2013《电力变压器第 2 部分 液浸式变压器的温升》, 将阈值 T_m 设定为 55 K, 即当油温升值低于阈值时, 根据式 (15) 所示的评估函数对该项进行评估; 当油温升值超过阈值时, 则认为直流偏磁引起的油温升高随时可能危及设备的正常运行, 其评分值直接置为 0。

2.4 直流偏磁对变压器状态评估影响的量化

直流偏磁对变压器运行状态的影响是多方面影响的复合, 由于各种影响因素在状态评估中所起的作用不同, 而权重系数是对各种因素相对重要程度的主观量度的客观反映, 因此本文采用 AHP 确定上述各种影响因素的权重系数^[16], 形成直流偏磁工况下, 综合各种影响因素的变压器状态修正因子。

AHP 是一种将专家知识所形成的定性规律进行定量化解析的系统分析方法。该方法通过对评估指标的重要度进行两两比较, 形成判断矩阵 P , 对该矩阵进行一致性校验, 若校验通过则求解出其最大特征值 $\lambda_{\max}$ 对应的特征向量, 对特征向量进行归一化处理即为各评价指标的权重系数 ω_i , 否则重新调整判断矩阵后重复上述步骤^[17]。状态评估综合结果可以记为:

$$S_{DC} = \begin{cases} 0 & s_1 \leq 0.25 \cup s_2 \leq 0.25 \cup s_3 \leq 0.25 \\ \sum_{i=1}^{m_{\text{indx}}} \omega_i s_i & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

其中, ω_i 为根据判断矩阵所确定的评价指标的权重系数; s_i 为各单项评价指标的结果; m_{indx} 为评价指标的个数; S_{DC} 为综合评价结果。当存在某个单项评分值低于 0.25 时, 则认为直流偏磁对变压器运行状态的影响达到最大, 综合评价结果 S_{DC} 置为 0。

本文中 $m_{\text{indx}} = 3$, 即对应振动强度、噪声、温升这 3 个评估指标, s_1, s_2, s_3 分别为振动强度、噪声、温升这 3 个单项评分值。此外, 由于目前缺乏对于考量直流偏磁影响变压器运行状态的经验, 为保守起见,

本文暂将振动强度、噪声、温升的权重系数均取为 1/3。

现有变压器状态评估方法主要可以分为得分制方法和扣分制方法。目前, 大部分理论研究采用得分制方法, 而现行的规程导则采用扣分制方法。

现行规程导则^[5]中将变压器的状态划分为正常、注意、异常以及严重 4 种。变压器的整体评价应综合其各部件的评价结果。当所有部件均被评价为正常状态时, 变压器整体评价结果为正常状态; 当任一部件被评价为注意状态、异常状态或严重状态时, 变压器整体评价结果应为其中最严重的状态。各部件状态的评价标准如表 2 所示。

表 2 各部件状态的评价标准

Table 2 State assessment criteria for each component

部件	评价标准/分					
	正常状态		注意状态		异常状态	严重状态
	合计扣分	单项扣分	合计扣分	单项扣分	单项扣分	单项扣分
本体	≤30	≤10	>30	[12, 20]	24	≥30
套管	≤20	≤10	>20	[12, 20]	24	≥30
冷却系统	≤12	≤10	>20	[12, 20]	24	≥30
分接开关	≤12	≤10	>20	[12, 20]	24	≥30
非电量保护	≤12	≤10	>20	[12, 20]	24	≥30

以变压器本体为例, 根据表 2 可知其状态评价标准如下。

a. 正常状态: 合计扣分不超过 30 分且单项扣分不超过 10 分。

b. 注意状态: 当合计扣分大于 30 分或单项扣分在 $[12, 20]$ 分范围内。

c. 异常状态: 单项扣分达到 24 分。

d. 严重状态: 单项扣分大于等于 30 分。

本文所提的直流偏磁工况下变压器状态影响修正因子的原理与得分制方法类似, 因此将本文方法应用于得分制方法中时, 可以作为其附加评估项目对最终的状态评分进行修正; 而将本文方法应用于规程导则采用的扣分制方法时, 可以通过修正该项扣分值进行结合, 如式 (17) 所示。

$$S' = k_5 (1 - S_{DC}) \quad (17)$$

其中, S' 为修正后导则中“变压器中性点直流电流测试”项的扣分值; k_5 为与单项扣分值有关的待定系数, 本文中 k_5 的取值参考现有规程导则中“中性点直流电流”一项的评估标准, 设定为 24 分 (基本扣分 8 分, 权重为 3)。

2.5 待定系数的确定方法

由于目前针对直流偏磁的研究集中在抑制措施方面, 评估直流偏磁对变压器等电网设备运行状态的影响方面的研究未见报道, 因此, 本文所提方法中的待定参数的确定缺乏可参照的标准, 现阶段可以

通过制定意见征集表,广泛收集专家经验,并通过统计学方法进行参数的优选。意见征集表如表3所示。

表3 参数优选专家意见征集表

Table 3 Questionnaire form of expert advice for parameter optimization

参评人数		评价时间		
评价项目	评价内容	评语		评估结论
		参考值	人数	
待定系数	k_1-k_4 的取值			
		其他(注明详细值)		
门槛值	T_m, I_s, I_m, R_{set}			
		其他(注明详细值)		
权重系数	振动强度、噪声、温升的权重系数			
		其他(注明详细值)		

需要特别说明的是,由于量化评估函数是由本文所提出,专家可以参考图4—6所示的函数变化规律给出其待定系数的取值建议。根据意见征集表收集到的专家经验知识,采用统计学方法对表中数据进行处理,如式(18)所示。

$$S_r = \frac{\sum_{i=1}^{m_{ref}} r_i n_i}{N} \quad (18)$$

其中, S_r 为统计结果; m_{ref} 为参考值的种类数量; r_i 为第*i*个参考值的具体数值; n_i 为 r_i 对应的人数; N 为参加评价的总人数。

随着对直流偏磁现象关注的增加,技术专家与运行检修部门工作人员的经验也会越多,因此,可以在未来经验积累足够后对本文方法的评估指标数目、待定系数、门槛值及权重系数进行进一步修改。

3 算例分析

3.1 算例1

本文选取处于2条同输电断面的直流输电工程送端接地极附近的某220 kV主变压器(1999年10月20日投运)为研究对象。该变压器为强迫油循环风冷(OFAF)芯式三绕组有载调压式变压器,型号为SFPSZ-150 000/220,额定电流为393.6 A(高压侧绕组),额定容量为150 MV·A,空载损耗为88.32 kW,负载损耗为500 kW,绝缘油重为46.5 t,绝缘油比热容为2.06 kJ/(kg·℃),变压器正常运行时的振动加速度幅值为5.8 m/s²;冷却器型号为YF1-200(3组

工作,1组备用,单台额定冷却容量为200 kW);油箱宽8 m、高3 m;居民区与变电站的平均距离为150 m。

由运行部门的记录可知,直流输电工程A在2014年1月26日00:45—08:31时间段处于单极—大地运行方式。该变压器中性点电流传感器检测电流幅值增大(持续时间为8 h),电流均值为4.25 A。该时间段内振动加速度平均值为19 m/s²。此时该变压器最近一次的电气试验信息、在线监测信息等状态量数据如附录中的表A1所示。

参考现有状态评估规程对表A1所示的数据进行综合分析可知,在未考虑直流偏磁影响时,变压器为正常状态。下面考虑直流偏磁的影响,对变压器状态进行评估。

a. 现行规程导则方法的评估结果。

由于南网规程中并未对中性点直流电流进行考虑,为增加方法的可比性,本文选用国网导则进行对比。由于该电流值大于导则所规定的3 A,因此“变压器中性点直流电流”项将扣除24分(基本扣分为8分,权重为3)。由于单项扣分达到24分,由表2可知,该变压器状态的导则评价结果为异常状态。

b. 本文方法的评估结果。

利用本文方法进行评估前需要对部分系数进行确定,根据表2收集了变电站运维人员对于参数优选的意见,待定参数 $k_1=1, k_2=2, k_3=1, k_4=3, R_{set}=10.05$;噪声电流高、低门槛值 I_s, I_m 可以结合变压器尺寸参数及其与居民点距离通过(5)、(6)计算得到,分别为13 A、5.07 A。评估流程如图附录中的图A1所示。

根据本文方法修正后的直流偏磁项扣分为5.92分,由表2可知,该变压器状态的评价结果为正常状态。

c. 结果对比。

通过现场运行检修报告可知,由于变压器中性点直流电流超标,基于现行导则的评估结果启动了应急检修流程。然而,检修结果发现设备仍处于正常状态,与本文方法判断结果一致,不需要检修,因此该次应急检修为过度检修,即“过检修”。

3.2 算例2

同样以算例1中的变压器为研究对象,待定参数 $k_1=1, k_2=2, k_3=1, k_4=3, R_{set}=10.05, I_s=13 \text{ A}, I_m=5.07 \text{ A}$ 。根据运行部门记录可知,直流输电工程B在2014年6月20日14:05至2014年6月22日23:46处于单极—大地运行方式。根据中性点电流传感器检测电流均值为2.91 A(持续时间为57.5 h),该时间段内变压器振动加速度平均幅值为11 m/s²。

由于变压器中性点直流电流幅值为2.91 A,尚未达到现行导则扣分的阈值,因此根据现行导则判

断此时该变压器为正常状态。采用本文所提出方法的具体流程如附录中的图 A2 所示。

从图 A2 可知,本文方法修正后的直流偏磁项扣分为 24 分,由表 2 可知,该变压器状态的评价结果为异常状态,需要及时关注。据现场运维人员反馈,该变压器运行噪声大,油温也出现了异常,这进一步验证了本文方法的有效性。

此外,本文所提出的量化直流偏磁对变压器运行状态影响的方法还可以与其他人工智能方法进行结合,实现对变压器更为全面的状态评估。

4 结论

针对目前变压器状态评估的研究仅考虑了变压器的常规检测量并未考虑直流偏磁及持续时间对变压器状态影响的缺点,本文提出了一种直流偏磁下变压器运行状态量化评估方法。通过分析直流偏磁下变压器振动强度、噪声、油温升值的变化规律,揭示了直流偏磁对变压器运行状态的影响机理。在此基础上,采用专家知识建立了直流偏磁下振动加剧的量化评估模型,采用指数分布函数建立了直流偏磁下噪声增加的量化评估模型,采用比热容将直流偏磁所带来的损耗增加与变压器油温升进行关联,并基于降半正态分布函数建立了直流偏磁下油温升增加的量化评估模型。最后基于 AHP 综合 3 种量化评估结果,形成了计及直流偏磁持续时间的变压器状态评估修正因子,该修正因子可以与得分制或扣分制的状态评估结果进行结合。通过实例与现有导则方法进行结果比对,证明了本文方法的正确性及优越性。该方法实现了对直流偏磁影响的量化,可以为制定相应的应对策略提供技术参考。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 于发威. 基于物元理论的电力变压器运行状态分级评估[D]. 郑州: 郑州大学, 2010.
YU Fawei. Classification evaluation of transformer operation condition based on matter-element theory[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2010.
- [2] 赖昱光, 管霖, 王滔, 等. 基于模糊综合评判的直流输电系统检修时机选择方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(9): 90-95.
LAI Yuguang, GUAN Lin, WANG Tao, et al. HVDC maintenance timing based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(9): 90-95.
- [3] 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.
SHI Shaowei, WANG Ke, CHEN Li, et al. Power transformer status evaluation and warning based on fuzzy comprehensive evaluation and Bayes discrimination[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(9): 60-66.
- [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, 2013.
- [5] 国家电网公司. 油浸式变压器(电抗器)状态评价导则: Q/GDW169—2008[S]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [6] 潘超, 王梦纯, 蔡国伟, 等. 单相变压器在不同直流注入方式下的偏磁效应[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(8): 128-134.
PAN Chao, WANG Mengchun, CAI Guowei, et al. DC-bias effect of single-phase transformer in different DC-injection modes[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(8): 128-134.
- [7] 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): 88-96.
LI Hongzhi, CUI Xiang, LIU Dongsheng, et al. Influence on three-phase power transformer by DC bias excitation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(5): 88-96.
- [8] 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.
GUO Jie, HUANG Hai, TANG Xin, et al. Analysis on 500 kV power transformer vibration under DC magnetic biasing[J]. Power System Technology, 2012, 36(3): 70-75.
- [9] 蒋跃强, 李红雷, 周行星, 等. 变压器直流偏磁的振动特性研究[J]. 华东电力, 2009, 37(1): 132-136.
JIANG Yueqiang, LI Honglei, ZHOU Xingxing, et al. Study of vibration of transformers under DC bias[J]. East China Electric Power, 2009, 37(1): 132-136.
- [10] 邵宇鹰, 饶柱石, 谢坡岸, 等. 预紧力对变压器绕组固有频率的影响[J]. 噪声与控制, 2006, 12(6): 50-53.
SHAO Yuying, RAO Zhushi, XIE Po'an, et al. The influence of pre-compression changing on the natural frequency of electric transformers windings[J]. Noise and Control, 2006, 12(6): 50-53.
- [11] 李长云, 刘亚魁. 直流偏磁时变压器铁芯的力学特性分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(12): 122-125.
LI Changyun, LIU Yakui. Analysis of mechanical characteristics of transformer iron core with DC bias[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12): 122-125.
- [12] 全江涛, 谢志成, 陈科基, 等. 特/超高压直流输电系统单极运行下变压器中性点直流电流分布规律仿真分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 787-795.
QUAN Jiangtao, XIE Zhicheng, CHEN Keji, et al. Mechanism analysis and simulation of DC current distribution along transformer neutral point under the condition of UHVDC/HVDC single-pole operation[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 787-795.
- [13] 张艳丽, 王佳音, 白保东, 等. 直流偏磁磁场对硅钢片磁致伸缩特性的影响分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4299-4306.
ZHANG Yanli, WANG Jiayin, BAI Baodong, et al. Influence analysis of DC biased magnetic field on magnetostrictive characteristics of silicon steel sheet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4299-4306.
- [14] 蒯狄正. 电网设备直流偏磁影响检测分析与控制[D]. 南京: 南京理工大学, 2005.
KUAI Dizheng. Inspection analysis and restraining of DC transmission on power grid equipment[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2005.

- [15] 姚缨英. 大型电力变压器直流偏磁现象的研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2000.
YAO Yingying. Research on the DC bias phenomena of large power transformers[D]. Shenyang:Shenyang University of Technology,2000.
- [16] 国连玉,李可军,梁永亮,等. 基于灰色模糊综合评判的高压断路器状态评估[J]. 电力自动化设备,2014,34(11):161-167.
GUO Lianyu, LI Kejun, LIANG Yongliang, et al. HV circuit breaker state assessment based on gray-fuzzy comprehensive evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11):161-167.
- [17] 巫伟南,杨军,胡文平,等. 考虑输电线路故障特性的电网综合风险评估体系[J]. 电力自动化设备,2014,34(6):129-134.
WU Weinan, YANG Jun, HU Wenping, et al. Power grid risk as-

essment system considering characteristics of transmission line failure[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(6):129-134.

作者简介:



谢志成(1990—),男,广东韶关人,博士,主要研究方向为电网主设备状态评估及检修(E-mail:zcxie@hust.edu.cn)。

Quantitative state assessment method for transformer under DC bias

XIE Zhicheng¹, QIAN Hai¹, LIN Xiangning², DENG Jun¹, LI Zhengtian², ZHENG Ying³, LIU Qingsong¹

(1. Maintenance & Test Center, Extra-High Voltage Power Transmission Company of CSG, Guangzhou 510670, China;
2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is difficult to effectively quantify the influence of DC bias and its duration on transformer state by existing methods for transformer state assessment, based on the change law analysis of the vibration intensity, noise and oil temperature rise under DC bias and combined with the expert knowledge, a quantitative evaluation model of vibration aggravation under DC bias is established adopting the semi-Cauchy distribution function, the quantitative model of noise increase under DC bias is established adopting the exponential distribution function and the quantitative model of oil temperature increase under DC bias is established adopting the semi-normal distribution function. AHP is used to synthesize the results of the above three kinds of quantitative evaluation, and the correction factor of transformer state assessment considering the duration time of DC bias is formed, which can quantify the influence of DC bias and provide technical reference for making the corresponding countermeasures. The correctness of the proposed method are verified by case study.

Key words: power transformers; DC bias; condition assessment; time accumulation; vibration intensified; noise increase; oil temperature rise; models

(上接第215页 continued from page 215)

- [20] 王建华,耿英三,刘志远. 输电等级单断口真空断路器理论及其技术[M]. 北京:机械工业出版社,2017.
- [21] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 北京:中国电力出版社,2003.
- [22] ESKANDARI H, JAFARIAN P. Effect of interphase magnetic coupling of shunt reactor on transmission-line open-phase overvoltages and neutral reactor optimisation[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2017, 11(4):1004-1011.

作者简介:



郑一鸣(1987—),男,浙江温州人,高级工程师,博士,主要从事系统过电压与接地技术、变电设备状态检修和运维等方面的研究工作(E-mail:yiming_zheng@yeah.net)。

Application of phase controlled circuit breakers in overvoltage suppression for 35 kV shunt reactor

ZHENG Yiming¹, YANG Songwei², HE Wenlin¹, XU Hua², YAN Dong³, SHAO Xianjun¹, ZHAO Lin¹, LUO Tianyan¹

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310014, China;
2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China;
3. Lishui Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Lishui 323050, China)

Abstract: In recent years, equipment breakdowns caused by overvoltage during 35 kV shunt reactor switching in 220 kV substations frequently occur in China, which endangers the safe and stable operation of power grid. The mechanism, perniciousness and suppression of shunt reactor switching overvoltage are systematically analyzed. The strategy of phase controlled circuit breaker is proposed, and the field overvoltage measurement and PSCAD simulation analysis are carried out, which provides solutions and engineering experiences for the switching overvoltage suppression of 35 kV shunt reactor.

Key words: shunt reactor; phase controlled circuit breaker; operation overvoltage; transient simulation

表 A1 某 220kV 主变压器状态量信息

TableA1 220kV main transformer condition information

评分项目	项目值
$\varphi\text{ (H}_2\text{)} / (\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1})$	5.98
$\varphi\text{ (C}_2\text{H}_2\text{)} / (\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1})$	0
$\varphi\text{ (CO)} / (\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1})$	456.41
$\varphi\text{ (CO}_2\text{)} / (\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1})$	2664.66
$\varphi\text{ (总烃)} / (\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1})$	43.62
绝缘吸收比	1.33
绕组介质损耗因数/%	0.205
油介质损耗因数/%	0.1
绕组直流电阻相间差/%	0.53
油击穿电压/kV	42
油中微水含量/ $(\text{mg} \cdot \text{L})^{-1}$	16
(套管) 主屏绝缘电阻/ Ω	20000
铁芯接地电流/mA	2.21

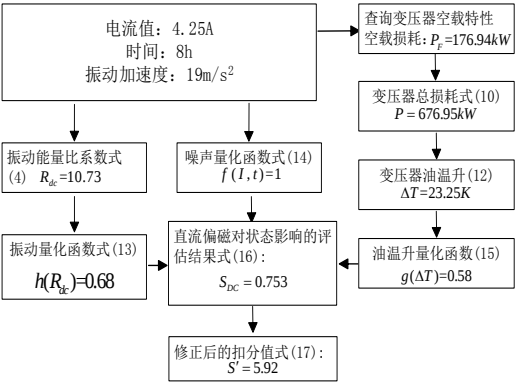


图 A1 本文方法评估流程图 (算例 1)

Fig.A1 Flowchart of proposed method for Case 1

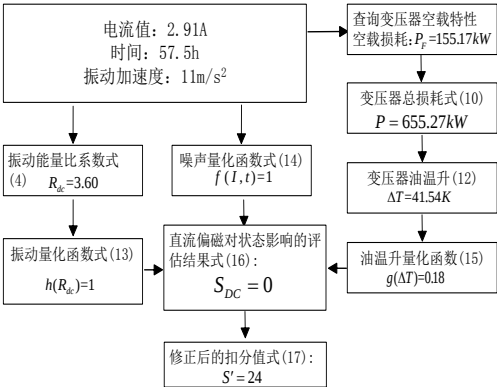


图 A2 本文方法评估流程图 (算例 2)

Fig.A2 Flowchart of proposed method for Case 2