

电气设备状态监测与故障诊断技术的现状与展望

朱德恒, 谈克雄

(清华大学, 北京 100084)

摘要: 介绍电气设备监测与诊断技术的意义和监测诊断系统的组成, 阐述了几种设备的监测诊断技术。对变压器, 主要介绍局部放电和油中溶解气体监测; 对电容式设备, 主要介绍介质损耗因数、电容量及三相不平衡电流监测; 对金属氧化物避雷器, 主要介绍阻性电流监测。监测诊断技术的发展趋势是: 加强信号处理、识别诊断、人工智能等新技术的应用; 综合性、分布式、远程监测与诊断系统和电力设备虚拟医院的研发; 以可靠性为中心的维修策略的研究及推广等。

关键词: 电气设备; 状态监测; 故障诊断

中图分类号: TM835

1 概述

1.1 意义及现状

电气设备是电力系统的基本单元, 一旦失效将造成巨大的经济损失和社会影响。提高设备的可靠性, 除应提高设备质量, 还必须对设备进行必要的检查和维修。早期实行的是事故维修, 即设备故障后再维修, 对大型设备这种维修方式将造成巨大损失; 其后, 发展成定期试验和维修, 即预防性维修。这种维修方式已在电力部门形成制度, 有良好的效果。其不足之处是: ①需停电; ②设备状态和运行中不符; ③维修不足。设备可能在试验间隔期间发生故障; ④维修过度。即使设备良好, 仍需试验和维修, 造成浪费甚至损坏设备。

目前正在发展以状态监测和故障诊断为基础的状态维修。设备的劣化、缺陷大多有一定的发展期, 其电气、物理、化学等特性会发生少量渐进的变化, 出现前期征兆。对电气设备进行在线监测, 及时取得各种信息、进行处理和综合分析, 根据其数值及变化趋势, 可对设备可靠性随时作出判断, 早期发现潜伏故障, 提供预警, 还可预测剩余寿命。在线监测诊断的特点是可对运行中设备进行连续或随时的判断, 故可避免预防性试验的缺点; 并可使预防性维修向预知性维修即状态维修过渡。

状态监测与故障诊断技术是具有交叉学科性质的一门新兴技术, 有很大难度。随着传感、电子、计算机、光电、信号处理、干扰抑制、网络、数据仓库、数据

挖掘等技术的发展, 监测诊断技术正在大步发展中。通常, 各种监测特征量和设备状态并不一一对应, 而具有错综复杂的关系。如果说离线预防性试验结果的分析, 已经积累了大量经验, 据此制订出了相应规程, 那么对于在线诊断现仍处于研究试行、积累经验的阶段。

1.2 状态监测与故障诊断系统的组成

监测与诊断系统包括以下基本单元:

(1) 信息检出单元。由传感器检出反映待测设备状态的物理量(特征量)并将其转换为合适的电信号。

(2) 数据采集单元。对传感器变送来的信号进行预处理, 主要是抑制干扰, 然后进行 A/D 转换及采集记录。

(3) 信息传输单元。将采集信息传送到后续单元。对于固定式装置, 因数据处理单元远离现场, 故需配置专门的信息传输单元。对便携式装置, 只需对信号进行适当的变换和隔离。

(4) 数据处理单元。对采集的数据进行处理和分析, 例如抑制干扰、提取特征值, 为诊断提供有效数据。

(5) 诊断单元。对处理后数据及历史数据、判据、规程以及运行经验等进行分析比较, 对设备状态及故障部位作出判断, 为采取进一步的措施提供依据。

2 变压器的监测与诊断

电力变压器主要采用充油绝缘, 也有一些采用环氧树脂浇注绝缘或 SF₆ 气体绝缘。对于充油变压器

的绝缘诊断,油中溶解气体分析得到广泛采用。对于各种类型的变压器绝缘,局部放电的测量是重要的监测诊断手段。

2.1 局部放电的监测与诊断^[1]

局部放电会产生下述效应:① 在相关电回路中产生电脉冲信号;② 电磁辐射;③ 声辐射;④ 材料的化学变化。针对不同效应有不同的试验方法,常用的试验方法是对局部放电脉冲进行测量和对局部放电的声辐射信号进行探测。

2.1.1 放电的在线监测

变压器局部放电在线监测诊断系统的原理图见图1。安装在接地线与套管末屏引下线上的电流传感器提取放电的脉冲电流信号;安装在外壳上的超声传感器提取局部放电的声信号。高压母线起到了耦合电容的作用。电、声信号经过数据采集单元实现数字化测量并送入微计算机进行数据处理与存储。

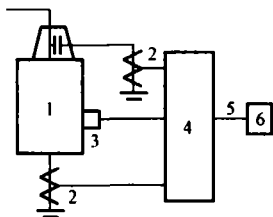


图1 变压器局部放电在线监测系统原理图

1—电力变压器;2—电流传感器;3—超声传感器;
4—数据采集单元与控制单元;5—光纤;6—微计算机

2.1.2 放电的诊断

(1) 根据视在放电量判断。目前许多产品的局部放电试验标准中,几乎都是以视在放电量的大小作为评定局部放电性能的指标。电力设备预防性试验规程 DL/T 596—1996 规定,离线试验时,在线端电压为 $1.5U_m/\sqrt{3}$ (U_m 为最大工作电压) 时,放电量一般不大于 500 pC; 在线端电压为 $1.3U_m/\sqrt{3}$ 时,放电量一般不大于 300 pC。但这是为保证新投运或大修后的变压器的质量而规定的数值,并不意味着在上述放电量下即将发生故障。此外,由于存在强烈的无线电干扰,在线监测装置通常也达不到如此高的分辨率。现在有关规程中尚未规定在线监测时的允许放电量。根据国内外运行经验,充油电力变压器应予注意的危险放电量可在 10^3 pC 以上。经验表明,脉冲重复率、放电平均电流也是重要的判断指标。

(2) 根据分布谱图判断。在一定的测量时间内,测得各次放电的放电量 q 、放电时外加电压的相位 ϕ 和放电重复次数 n , 经过统计处理,可得各种分布谱图: $\phi-q$ 、 $q-n$ 、 $\phi-n$ 等二维谱图; $\phi-q-n$ 三维谱图。

这些谱图相当于放电的“指纹”,分析放电“指纹”可以识别放电模式(故障类型)和严重程度。

(3) 放电源定位。① 声信号定位。采集放电产生的电信号和 3 组声信号。将电信号作为时间参考基准,根据电、声信号的时差和声传播速度,求解一组球面方程即可求得放电源位置。也可根据 4 路声信号的相对时延,求解双曲面方程定位放电源;② 电信号定位。变压器绕组内部发生放电时,放电脉冲向绕组二端传播。采集绕组高压端和中性端的电信号。在较高频段内,二端响应的比值和放电源位置呈线性关系。在离线情况下,通过调试,求得此关系后即可据此对放电源定位。

2.2 油中溶解气体的监测与诊断

2.2.1 油中溶解气体的色谱分析

充油变压器采用油纸绝缘。放电和过热过程中,油和纸将裂解,产生如 H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 、 CO 、 CO_2 等各种气体。这些气体能溶解于油中,分析油中溶解气体的成分和比例可以判断潜伏性故障和类型。

油中溶解气体浓度很小,需采用气相色谱仪进行分析。分析流程简述如下:① 取油样;② 采用真空法等各种方法从油中脱出气体;③ 脱出气体由载气(惰性气体)推动通过色谱柱,各组分气体由于运动速度不同而分离;④ 用热导池鉴定器和氢火焰离子化鉴定器测定气体的成分和浓度。气相色谱仪属于精密分析仪器,设备复杂,操作技术要求高,因而油样分析需在专门的试验室内进行。

2.2.2 油中溶解气体的现场监测

常规的气相色谱分析需在专门的试验室内进行,不甚方便。近来有些单位研究开发了能在现场进行分析甚至能实时监测的仪器,其流程简述如下:

(1) 脱气。① 渗透膜脱气法。利用高分子膜(如聚四氟乙烯等)的透气性,分离出油中气体;② 鼓泡脱气法。用定量的空气循环吹入油中,直至油面上空间中的气体浓度和油中的达到平衡。

(2) 气体分离。为了简便易行,现场监测时往往只监测 H_2 。这时采用渗透膜脱气法即可富集到油中溶解的 H_2 。如需监测或检测多种气体,仍需采用色谱柱分离不同组分。此时常采用鼓泡脱气法并用空气作为载气。

(3) 气体鉴定。① 半导体气敏传感器。传感器与待测气体接触后,其电气性能(如接触 H_2 后 SnO_2 的电阻、钨栅金属氧化物半导体场效应管的阈值电压)会发生改变。可利用此原理来鉴定气体;② 燃料电池。由电解液(如 H_2SO_4 溶液)和一对电极组成。

由于电化学反应产生的电流正比于导入氢气的体积浓度。可用于测量油中溶解的氢。

2.2.3 故障的诊断

不同性质的故障所产生的溶于油中的气体的组分和其浓度是不同的,据此可以判断故障的类型。国际电工委员会(IEC)和我国国家标准 GB 7252—1987《变压器油中溶解气体分析和判断导则》推荐用5种气体的浓度的3个比值 C_2H_2/C_2H_4 、 CH_4/H_2 、 C_2H_4/C_2H_6 来判断故障的性质。将测得的数据的3个比值编码。得到编码后即可判断故障的性质。

3 电容型设备的监测与诊断

介质损耗因数、电容量、三相不平衡电流是电容型设备的主要监测量。

3.1 介质损耗因数监测^[2]

对介质损耗因数 $\tan\delta$, 在线监测时应用的是数字测量技术。运行中电容型设备的介质大多为0.001~0.02, δ 的限值一般不超过0.01, 因此 δ 测量误差的绝对值不应超过0.001~0.002。 δ 的数字化测量, 都是先测量流经绝缘的电流与施加于绝缘的电压之间的初相角差 φ , 然后算出 δ 。由于 δ 值较小, 因而 δ 或 φ 的测量误差的绝对值要求很小, 即 φ 测量准确度的要求很高。 δ 的数字测量大致分为二类: 直接测量法和信号重建法。

3.1.1 直接测量法

直接测量法是直接测量 φ , 如过零点时差法。此法是通过方波电路和门电路, 将周期为 T 的正弦 i 、 u 信号变换成一方波, 其脉宽等于二正弦信号由负变正过零点的时差 ΔT , 用脉冲计数技术测量 ΔT , 换算为 $\varphi = 2\pi(\Delta T/T)$, 再算得 $\delta = (\pi/2) - \varphi$ 。本方法对硬件的要求高, 对谐波和干扰敏感。目前更多使用的是信号重建法。

3.1.2 信号重建法

信号重建法是根据 i 、 u 的采样数据重建正弦信号, 再由波形参数求得 φ , 如傅立叶分析法、正弦波参数法和高阶正弦拟合法。

傅立叶分析法是广泛采用的一种算法。 δ 是工频基波频率信号的特征, 而正弦信号经傅立叶变换得到的是线谱, 若不满足条件 ($f_s/f = \text{Int}_1$ 和 $M/\text{Int}_1 = \text{Int}_2$, 其中 f_s 是采样频率, f 是电网频率, M 是采样长度, Int 是整数), 则分离线谱不一定对应基波频率。虽可使用插值法来取得基波信号特征, 但会带来误差。此外, 还会因信号截断, 频域泄漏而影响测量结果。正弦波参数法是根据三角函数正交性来测量 δ , 但正交性仅在 f_s 和 f 满足整数倍时才成立。因此, 应

用这些方法时, 需要相应硬件—同步采样卡。

高阶正弦拟合法是非同步采样条件下测量 δ 的算法, 他以直流分量幅值、基波频率、基波和谐波分量的幅值及初相角为优化对象, 用高阶正弦模型来拟合 i 、 u 的采样数据。根据拟合条件, 得到一个非线性方程组, 使用 Newton 迭代法求解, 得到基波的 φ , 再算得 δ 。此法结果准确, 能够满足 δ 在线监测的要求。

3.1.3 传感单元

流经电力设备绝缘的电流与施加在绝缘上的电压需要通过传感单元, 转换为合适的信号, 才能输入数字测量单元。电压信号可由电压互感器的二次侧取得。电流信号则需借助电流传感器取得。

电流传感器对监测装置的性能有较大影响。某地区自1998年起陆续投运了多套电容型设备监测装置。图2给出其中6台设备 $\tan\delta$ 监测值的变化。投运初期 $\tan\delta$ 值介于0.002~0.0055, 但大部分设备的监测数据先升后降, 变动范围达到0.006, 分析认为这反映了介损监测值随四季温度变化的关系。对介损大量停电测试结果的统计分析和专门试验的结果表明, 介损监测数据随温度变化的现象主要不是由设备本身介损的温度特性造成的, 相反, 在实验室对传感器进行测试的结果表明, 传感器角差随温度而变, 虽然变化趋势和幅度各不相同, 但与相应设备的介损监测值比较接近。可知, 电流传感器的温度特性是介损监测值不稳定的主要原因。因此, 需要选用性能优良的电流传感器。

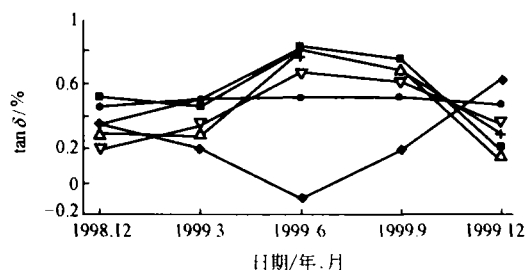


图2 $\tan\delta$ 监测数据1年内的变化

3.2 电容量监测

采样流经绝缘的电流和绝缘二端电压, 求得电流、电压的有效值 I 、 U 。监测装置同时测量工频电压的频率 f 。设备的电容量 C 可由公式

$$C = (I \cos \delta) / (2\pi f U) \approx I / (2\pi f U)$$

求得。实际上, 当 $\tan\delta$ 小于0.1时, 近似式算得的电容量的误差可以忽略。

3.3 三相不平衡电流监测

监测流经绝缘的电流对发现绝缘缺陷更为灵敏。通常是监测三相设备的总电流, 若某相绝缘出现缺

陷,流经该相绝缘的电流发生微弱变化,因而出现三相不平衡电流,监测装置能很灵敏地发现此电流,从而及时发现故障。

图3为监测三相不平衡电流的原理电路图。为了检测电流 I_A 、 I_B 、 I_C ,在每相设备的接地线处接入检测单元(电阻、电容或电流传感器) Z_A 、 Z_B 、 Z_C ,其阻抗值比 Z_A 、 Z_B 、 Z_C 小得多,他们的接入对流经绝缘的电流值几乎没有影响。检测单元的输出电压 U_a 、 U_b 、 U_c 反映了电流 I_A 、 I_B 、 I_C ,正常情况下,这3个电压的相量和为0,即加法器无输出信号。但当某相绝缘出现故障时,3个电压的相量和不再为0,加法器有信号输出,经放大器 K_0 放大后给出故障信息。

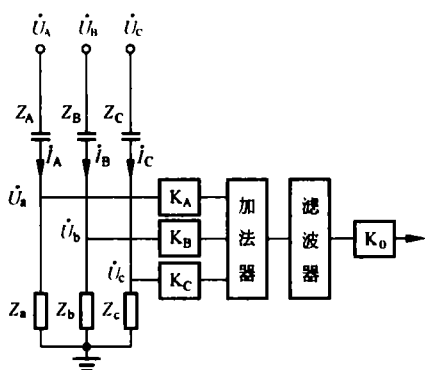


图3 监测三相不平衡电流的原理电路图

对称化单元—幅值调节装置 K_A 、 K_B 、 K_C 的作用是消除下述影响:三相设备阻抗及三相检测单元阻抗不完全相同,三相电压不完全平衡。引入对称化单元后,绝缘状况正常时加法器的输出为0;当某相绝缘出现故障时,流经该相绝缘的电流发生变化,此时加法器的输出即为故障信息。

4 金属氧化物避雷器的监测与诊断

金属氧化物避雷器(MOA)阀片的主要成分是 ZnO ,掺有少量 Bi_2O_3 、 CoO 、 Cr_2O_3 、 MnO 、 Sb_2O_3 等金属氧化物。 ZnO 颗粒的直径约 $10\ \mu m$,周围包有厚 $0.1\ \mu m$ 的掺杂物氧化膜形成的晶界层。晶界层的电阻率是变化的,使阀片具有极好的非线性保护特性;而其相对介电常数可达 $500 \sim 2\ 000$,因而阀片具有相当大的电容量,在运行电压下经过阀片的电流主要是电容电流。正常工作电压下,流过 MOA 的电流极小(微安级),但因阀片长期承受工频电压作用,可能逐渐劣化而导致泄漏电流增加;或因避雷器密封不严,阀片受潮,也会使泄漏电流增加。阻性电流分量的急剧增加,可导致阀片温度上升而发生热崩溃,甚至引起爆炸事故。对 MOA 主要是监测阻性电流。由于总电流中容性分量比例很大,故关键是如何从总电流中

分离出微弱的阻性电流。

4.1 补偿法

补偿法是在测量电流的同时,检测系统的电压,利用电压信号消除总电流中的容性分量。监测系统原理见图4。由同相 TA 取出的电压信号 \dot{E}_s ,经移相电路移相 90° 为 \dot{E}_{sq} ,使之和总电流 \dot{I}_X 中的电容分量 \dot{I}_C 同相。GCA 为增益控制放大器, G_0 是其放大增益。当系统自动调节到使 $G_0 \dot{E}_{sq}$ 与 \dot{I}_C 大小相等时,差分放大器的输出为

$$\dot{I}_X - G_0 \dot{E}_{sq} = \dot{I}_X - \dot{I}_C = \dot{I}_R$$

乘法器 M_1 将 \dot{E}_{sq} 和 DFA 的输出相乘,经积分器 I 以调整 GCA 的增益(相互垂直的相量相乘后积分为0,同相的相量相乘积分有值),使 \dot{I}_X 中的 \dot{I}_C 抵消。 M_2 是为了计算阻性分量引起的功耗 P_X 。该监测系统可测量总电流 \dot{I}_X 、阻性电流 \dot{I}_R 和功率损耗 P_X 。

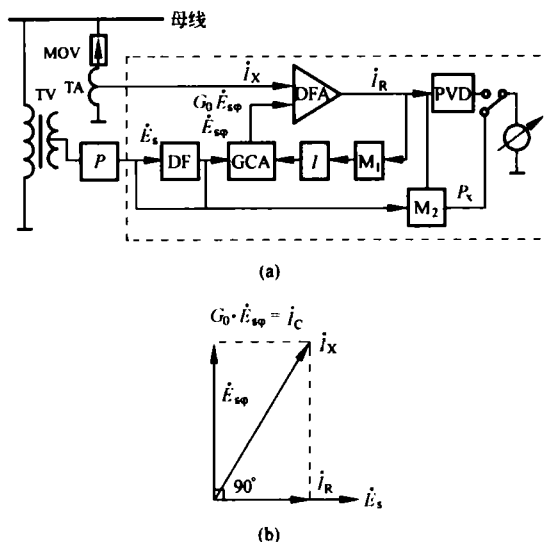


图4 补偿法泄漏电流监测系统原理图

(a) 原理图; (b) 相量图

P—光电隔离器; TA—电流传感器; DFA—差分放大器; M—乘法器; I—积分器; GCA—增益控制放大器; DF—移相电路; PVD—峰值测量电路; TV—电压互感器

在现场,三相避雷器呈一字形排列,各相避雷器阀片除承受本相电压外,还通过相间杂散电容的耦合,受到邻相电压作用。边相(A、C相)避雷器的电流将发生变化。中间相(B相)避雷器由于同时受到A、C相的作用,电流基本不变。抑制措施是将TA的电压相量先移动适当角度后再送入监测系统。先在调试过程中,各相单独加电压,测得其总电流和其电阻分量与电容分量。在TA电压信号回路中加入移相电路后,于运行条件下再进行测量。测量中调整移

相角度,使运行中测得的电流值尽量接近各相单独加电压时的数值。此后保持相同的移相条件进行在线监测,相间干扰就可以显著减轻。

4.2 谐波分析法

在正弦交流电压下,由于阀片的非线性特性使阻性电流中除基波外还含有高次谐波。由于只有同频率的电压、电流才能产生功率,导致发热,因此使阀片发热的仅是阻性电流 I_R 中的基波分量,即 I_{R1} 才是关键的监测量。当电网电压含有谐波时,会影响阻性电流的测量值,但不影响 I_{R1} ,故监测 I_{R1} 还可避免电网谐波电压对的影响。采用数字化测量和谐波分析技术可以从总电流中分离出 I_{R1} 。避雷器的总电流及电网电压由电流传感器及电压互感器提取,经 A/D 转换后输入微计算机进行分析计算,因此这种系统是一种以软件为主的监测系统。

5 断路器的监测与诊断^[3]

高压断路器是电力系统最重要的开关设备,担负着控制与保护的双重任务。根据其绝缘及灭弧介质的不同,高压断路器分为油断路器和 SF_6 断路器。由于 SF_6 气体的灭弧与绝缘性能优越, SF_6 断路器得到广泛采用。断路器结构复杂,现场解体、维修不便,不适当的维修反而容易造成故障。因此迫切需要推行状态维修。近年来发展了一种所谓暂时性状态监测技术,即将断路器暂时退出运行,处于离线状态,但不需将其解体,然后运用体外检测技术来诊断其内部状态。实际上体外检测技术和在线监测技术很多方面是相同的。

气体绝缘封闭组合电器(GIS)是将变电站里除变压器外的各种电气设备全部封闭在接地金属外壳内组成的装置,壳内充以 0.3~0.4 MPa 的 SF_6 气体作为绝缘与灭弧介质,也称气体绝缘变电站。断路器是 GIS 中的主要电力设备。因此对 GIS,除了对其有关绝缘特性的监测与诊断外(后面有文章单独对介绍)主要是对其中断路器的监测与诊断。

5.1 断路器机械故障的监测与诊断

5.1.1 合、分闸线圈电流的监测

高压断路器一般都以电磁铁作为操作的第一级控制元件,其合、分闸线圈通常用直流电源供电。合、分闸线圈的电流中含有可作为诊断机械故障用的丰富信息。电流信号的监测可选用补偿式霍尔电流传感器。图 5 是操作时线圈中的典型的电流波形图。图中 t_0 为命令下达时刻,是开关合、分过程计时起点; t_1 为线圈中电流、磁通上升到足以驱动铁心运动,

即铁心开始移动的时刻; t_2 为铁心已触动操作机构负载,也是开关触头开始运动的时刻,此时电流到达谷底。 t_3 为开关辅助接点切断也即电磁线圈回路断开的时刻。 t_1 、 t_2 、 t_3 及其相应的电流反映了操作传动系统运动的情况。比较电流的波形可诊断出操作机构的故障。

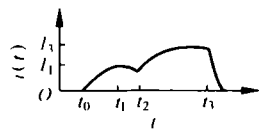


图5 合、分闸线圈电流的波形

5.1.2 行程、速度的监测

断路器行程的监测可采用光栅行程传感器。对于能打开灭弧室上盖的断路器(如少油断路器),可以选用直线式行程传感器,直接测定动触头运动曲线。否则,可以选用旋转式角位移传感器,安装在操作机构的转动轴上,间接计算触头的运动特性。显然,对于在线监测,只能采用旋转式传感器。

旋转式光栅行程传感器的结构原理见图 6。将圆形光栅安装在断路器操作机构的转动轴上。发光元件发出的光经过圆形光栅为接收元件所接收。圆形光栅旋转时接收元件将接收到一系列光脉冲并将之转换为电脉冲。经数据处理后可得断路器操作过程中的行程和速度随时间的变化关系。据此可计算出以下参数:动触头行程、分合闸同期性、超行程、平均速度、刚分后及刚合前 10 ms 内速度的平均值、最大速度等。

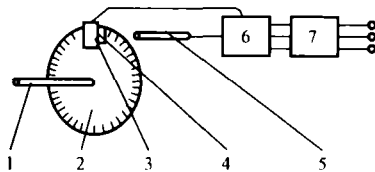


图6 旋转式光栅传感器的结构原理

1—旋转轴;2—光栅;3—接收元件;4—狭缝;
5—发光元件;6—信号处理单元;7—输出单元

5.1.3 振动信号的监测

断路器在合、分闸过程中,由于操动机构、连动机构、触头等运动、撞击,产生一系列振动信号。应用振动传感器(通常使用频率响应达几十 kHz 的加速度传感器)在断路器体外采集振动信号,经信号处理后可以得到一系列反映断路器机械振动的参数,可用以判断断路器的机械状态。

5.2 动态电阻的检测

一般的 SF_6 断路器有主触头和弧触头,灭弧主要靠弧触头。当断路器在闭合状态,测得的回路电阻主

要是主触头接触电阻和弧触头接触电阻的并联值。一般前者比后者小得多,所以所测回路电阻无法反映弧触头烧损情况。

在断路器分断过程中,主触头先分离,开断电流转移到弧触头上,弧触头间出现电弧,借助灭弧装置使电弧熄灭。如果弧触头严重烧损,在分断过程中先于主触头分离,则灭弧装置不能发挥作用,这样会导致断路器烧损。从主触头分离到弧触头分离这段时间称为有效接触时间,其行程称为有效接触行程。为了断路器能顺利灭弧,必须保证弧触头有足够的有效接触行程和时间。检测在断路器动作过程中的回路电阻变化曲线可以不用拆开断路器就能得到弧触头的有效接触时间。这种检测方法称为动态回路检测,测得的电阻称为动态回路电阻,用以区别通常在断路器闭合时测得的回路电阻(静态回路电阻)。图7为动态回路电阻检测原理图。测量动态回路电阻需要一个稳定的低压大电流直流电源。可采用蓄电池作为电源,利用它过载放电,输出直流大电流,基本可以满足要求。在过载放电的情况下,蓄电池不能长期工作。因此在测量时,断路器先处于分断状态,然后测量断路器在合-分过程中的电流、电压波形。回路电流用分流器测量,电压直接测量。信号放大后,经A/D转换,进入微计算机,完成计算、显示及打印。

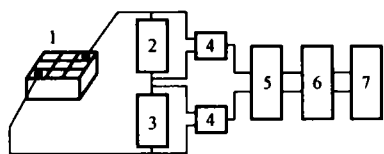


图7 动态回路电阻检测原理图

1—蓄电池;2—断路器;3—分流器;4—放大器;
5—A/D转换;6—微计算机;7—显示打印

6 发展趋势

监测与诊断技术的发展趋势是进一步加强信号处理、识别诊断、人工智能等新技术的应用;综合性、分布式、远程监测诊断系统与电力设备虚拟医院的研发;以可靠性为中心的维修技术的推广等。

6.1 信号处理与识别诊断^[4]

6.1.1 信号处理

对检测信号进行处理有2方面的作用,第1是抑制干扰,保留或增强有用信号;第2是提取信号特征。

信号处理可区分为时域分析、频域分析、时频分析等。将信号作为时间的函数,在时间域进行的分析处理称为时域分析。通过傅里叶变换,将信号作为频率的函数,在频域进行的分析处理称为频域分析。由

于傅里叶变换不能反映信号在局部时间范围内的频率特征,因此又发展出了时频分析法。

具体的方法包括时域图形显示、数据时域开窗、检测量随时间的变化趋势、时域平均法、相关分析、干扰自适应抑制、信号的回归模型、频谱分析、数据频域开窗、数字滤波、短时傅里叶变换、小波变换、分形特征提取、数字图象特征提取等。

以小波变换为例进行简单说明。小波变换具有在时、频二域突出信号局部特征的能力。小波变换奇异点(如过0点、极值点)在多尺度下的综合表现,使其具有了表征信号突变特征的能力。例如,当信号中混有白噪声时,由于白噪声的小波变换极大值随尺度增加而减小,大尺度下的极大点主要属于信号,可据此消除白噪声。

6.1.2 诊断方法

依据特征量的性质,诊断方法可区分为:阈值诊断、时域波形诊断、频率特性诊断、指纹诊断等。

按照所得特征量是否超过规定阈值来判断设备状态的方法,称为阈值诊断。电气设备一些特征量的阈值在原电力部颁布的《电气设备预防性试验规程》中有明确规定。

将测得的某种物理量随时间变化的曲线与样板对照来判断设备状态的方法,称为时域波形诊断。例如,依据断路器合、分闸线圈电流波形对操作机构的诊断。

根据测得的设备的频率特性或将测得的某种物理量的频谱与样板对照来判断设备状态的方法,称为频率特性诊断。例如电力变压器绕组变形诊断的频率响应法。

对测得的数据进行处理,将得到的某种特殊图形与样板对照来判断设备状态的方法,称为指纹诊断。例如依据设备绝缘局部放电图谱识别故障即为指纹诊断。

6.1.3 基于人工神经网络的诊断

是故障模式的一种识别工具。例如对局部放电指纹,可使用人工神经网络识别放电类型、严重程度等。

前馈人工神经网络模型见图8。网络分3层即输入、隐含和输出层,每层由若干神经元(结点)组成,相邻层各结点间由连接线相互联系,信息分散地储存于各连接线的权系数以及各神经元的阈值(分别称为权矩阵和阈值向量)。若输入向量为 $[I]$,则隐含层某结点收到的是输入层各结点输出信号的加权和,此加权信号和与阈值一起激励该结点,使之输出信号;激励函数为非线性函数。隐含层输出信号 $[H]$,并以类

似方式使输出层输出信号 $[O]$ 。

对应于某样板模式, 设定网络的期望输出 $[T]$ 。因实际输出 $[O]$ 与 $[T]$ 不一致, 采用反向传播(BP)算法逐步调整权矩阵和阈值向量。网络不断学习, 最终 $[O]$ 接近 $[T]$ 。经训练的网络将能识别待检样本的模式。

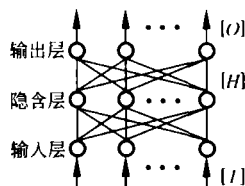


图8 前馈网络模型简图

6.1.4 专家系统

设备的故障诊断十分复杂, 尽管已研发了各种检测手段, 但通常还是需要由专家利用丰富的理论知识和经验, 进行综合分析, 才能最终作出诊断结论。

诊断专家系统的定义是: 将专家的专业知识及含糊、复杂的经验知识存入计算机, 非专家运用计算机的推理功能, 以对话形式作出专业决断的系统。专家系统可博采众长, 研究和采纳设备研制、应用、运行、维护等各方面专家的知识。专家系统中的知识可随新的经验而方便地增删与修改。因而专家系统的功能可超过单个的专家, 提高了诊断的准确性。借助专家系统可以实现诊断系统的智能化与自动化。

6.2 分布式远程监测诊断系统与虚拟医院

6.2.1 分布式远程监测诊断系统

监测诊断系统的发展方向是分布式系统。这种系统面向多台设备或整个变电站、发电厂, 采用多台计算机的分级管理体制形式(见图9)。服务器负责整个系统的管理、控制和诊断, 各个辅助计算机分别承担不同设备的数据采集及初步处理、诊断。服务器与辅助计算机通过网络进行通信联络。

分布式监测诊断系统可以扩展到整个电力系统。不同变电站、发电厂的监测诊断子系统局域网通过互联网或电力部门的信息管理系统(MIS)连接到设在电力管理或其他部门的设备运行分析中心, 实现对电力系统主要设备状态的远程监测与诊断。这使得技术管理人员可以随时掌握设备状态, 必要时迅速、及时地作出技术决策, 从而显著提高了电力系统的运行可靠性。

6.2.2 电力设备虚拟医院

当前, 各种针对电力设备的离线、在线监测试验技术得到了日益广泛的应用, 积累了大量的试验数据。然而, 由于通信技术的限制以及缺乏合适的交流

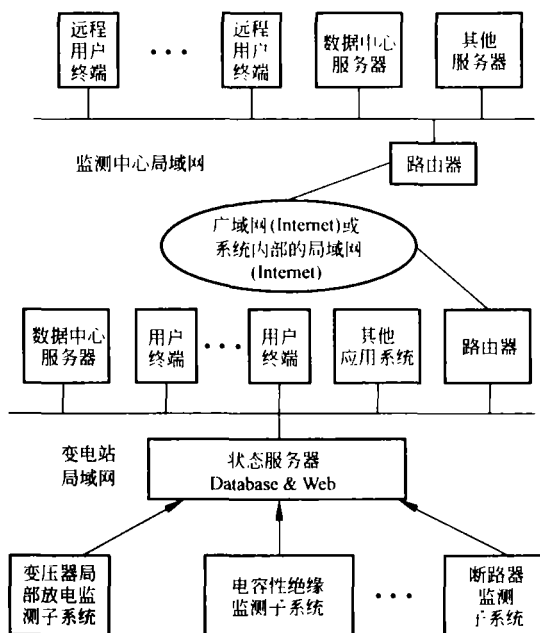


图9 分布式远程监测诊断系统

渠道, 这些数据只能堆积在现场, 而非需要这些数据的技术人员却难以方便地获得。除了现场试验数据缺乏交流以外, 各个不同的电力部门、厂商、诊断技术专家之间的诊断知识、技术和经验也常常处于孤立状态, 缺乏必要的沟通。这导致了一些新的监测和诊断技术在电力部门很难得到快速应用。

Internet的发展为解决这一问题开辟了新的途径。基于Internet的电力设备虚拟医院可成为电力部门、厂商、诊断技术专家等各方沟通渠道, 促进各方交流讨论, 达到信息共享的目的。电力设备虚拟医院将是一个电力设备诊断技术综合性信息中心, 他的建立有利于促进整个行业的社会性协作, 共同收集诊断案例, 积累现场数据, 展示最新的诊断技术成果, 对人员进行远程培训, 促进行业的标准化建设等具有重要的实用价值。

虚拟医院可具有如下一些栏目:

(1) 标准中心。收集测试、诊断、维护等方面的相关标准。

(2) 基础知识中心。收集与特定设备诊断和维护技术相关的基础性知识, 包括设备的具体配置, 典型的机械、电、热性能参数, 相关材料特性, 设备稳定性, 设备的预期寿命等信息, 以及用于远程教学和培训的书籍、多媒体课件等。

(3) 典型故障集。收集典型的故障案例数据及相关案例分析判断方法等。

(4) 数据处理中心。收集诊断领域中常用的数

据分析方法,如时频分析,人工神经网络,统计分析,模式识别等。

(5) 诊断维护技术中心。收集诊断算法以及设备维护方法等,包括基于专家系统和人工神经网络的诊断算法、应用模糊理论的诊断算法、统计诊断算法、故障定位算法、趋势分析算法等。

(6) 远程诊断服务。提供常见设备的远程故障诊断服务。

(7) 专家链接。提供在诊断领域内各专家的个人简历、研究方向、联系方式等信息。

(8) 诊断论坛。建立网上交流渠道。

(9) 厂商名录。收集电力设备和检测仪器制造商的介绍、产品信息以及网址链接等。

(10) 学术动态。收集反映当前研究进展,研究热点的文章以及学术会议的信息。

6.3 以可靠性为中心的维修策略^[5]

上世纪末在美、欧发达国家发展了以可靠性为中心的维修策略(Reliability Centered Maintenance, RCM)。RCM的内容是根据设备重要性、各种失效模式、其危害度与发生频度以及各种维修投入的人力与费用的综合分析,通盘考虑,贯彻省钱—有效(Cost-Effective)的原则,确定包括预知性维修和预防性维修(及其间隔周期)的最优维修方案。所以 RCM 是对维修策略的优化,目的是实现省钱、有效这一原则。

7 参考文献

- [1] 李福祺,姜磊,朱德恒,谈克雄. 新型固定式变压器放电在线监测系统. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(7): 5~8.
- [2] 谈克雄,李福祺,张会平,周良才. 提高电容型设备介损监测装置性能的意见. 高电压技, 2002, 28(11): 21~23.
- [3] 徐国政,张节容,钱家骊,黄瑜珑. 高压断路器原理和应用. 北京:清华大学出版社, 2000.
- [4] 朱德恒,谈克雄. 电绝缘诊断技术. 北京:中国电力出版社, 1999.
- [5] S Asgarpour, R Billinton, N Chowdhury, et al. The Present Status of Maintenance Strategies and the Impact of Maintenance on Reliability. IEEE Trans. On Power Systems, 2001, 16(4): 638~646.

收稿日期:2003-06-23

修回日期:2003-10-20

作者简介:

朱德恒(1933-),男,教授,博导,研究方向为高电压绝缘和电气设备状态监测与故障诊断;

谈克雄(1937-),男,教授,博导,研究方向为高电压绝缘和电气设备状态监测与故障诊断。

Present Situation and Prospects of Condition Monitoring and Fault Diagnosis Technology for Electrical Equipments

ZHU De-heng, TAN Ke-xiong
(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: This paper briefly introduces the significance of condition monitoring and fault diagnosis technology and the composition of monitoring and diagnosis system for electrical equipments, and describes the monitoring and diagnosis technology for some kinds of equipments. Partial discharge and monitoring of dissolving gas in oil for transformer, dielectric loss factor and capacitance and three-phase unbalanced current for capacity type equipments, monitoring of resistance current for metal oxide lightning arrester are mainly introduced. It is pointed out that the development tendency of monitoring and diagnosis technology is to strengthen the new technical applications such as signal processing, identification diagnosis and artificial intelligence; to research and develop comprehensive and distributive remote monitoring, diagnosis system and virtual hospital of power equipment; to research and popularize the maintenance strategy based on reliability.

Keywords: electrical equipment; condition monitoring; fault diagnosis