

电气设备诊断技术 及其自动化

〔日〕和田 昱二等 编著



机械工业出版社

73.1
9010517

电气设备诊断技术及其自动化

〔日〕 和田 显二等 编著

张家元 陈幼祥 陈进跃 译

机械工业出版社

本书译自日本電気書院1985年出版的《電気計算》臨時増刊第11期。
本期的内容都是有关电气工程设备的诊断技术及其自动化的内容。

经编者系统的整理,其内容丰富、实用,可分为:维修和诊断、绝缘老化和诊断、无损检查、架空线路的诊断、地下线路的诊断、工厂和配电系统中谐波的联机诊断等。

本书可供从事电气工程工作的科技人员和大专院校的师生参考。

《電気計算》臨時増刊11

設備診断 オートメーション
予知保全・常時監視のテクニック

和田 昱二等

電気書院 1985

* * *

电气设备诊断技术及其自动化

〔日〕 和田 昱二等 编著

张家元 陈幼祥 陈进跃 译

*

责任编辑:刘思源 版式设计:吴静霞

封面设计:郭景云 责任校对:熊天荣

责任印制:王国光

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $17 \frac{1}{2}$ · 字数 522 千字

1990 年 7 月北京第一版·1990 年 7 月北京第一次印刷

印数 0,001—3,600 · 定价:13.90 元

*

ISBN 7-111-01694-7/TM · 214

译 者 的 话

输变电工程中的安全与否关系着国民经济中的各个生产部门，也关系着成千上万的家庭和机关等。随着科学技术的进步，电力系统日益扩大。为确保用电部门的安全，对维护和检测电力系统的技术要求也越来越高。技术先进的国家都大力研究在线电气设备的预测和诊断技术，以防患未然。

本书系统地整理了有关电气设备自动诊断的文章共计 37 篇。其中包括了架空线路和地下线路的诊断，变电设备、旋转电机的诊断，绝缘老化的诊断和工厂与配电系统中谐波的联机诊断等内容。

这本书译自 1985 年日本電気書院出版的《電気計算》第 11 期。本书由日本各电气公司、电力中央研究所和有关大学的专家学者执笔，总结和反映了近年来自动诊断的成就和正在探索的方向。由于它的内容新而全，非常适于我国从事电气工程的科技人员参考。

因水平所限，谬误之处在所难免，恳请读者批评指正。

译者

目 录

第1章 预测维修和诊断自动化·····	富士电机技术公司 和田 昱二	1
第2章 老化和诊断自动化·····		8
2-1 绝缘老化和诊断自动化·····	东京电机大学 井関 昇	8
2-2 材料老化和诊断自动化·····	电力中央研究所 新田 明人	15
2-3 腐蚀、电蚀和诊断技术·····	电力中央研究所、东京芝浦电气公司 黒沢 辰雄、福井 清	22
第3章 无损检查自动化·····		30
3-1 采用超声波探伤装置的设备诊断·····	三菱电机公司 松山 宏、西村 照弘	30
3-2 采用手提式超声波厚度记录仪的自动诊断·····	石川島检查计测公司 矢嶋 邦夫、藤原 貢	39
3-3 采用光的诊断自动化·····	三菱电机公司 亀井 光仁	43
第4章 架空电路的诊断自动化·····		50
4-1 电线导体老化的自动诊断技术·····	关西电力公司 森村 晃、西村庄一郎	50
4-2 瞬间接地和短路故障区检测装置的应用技术·····	四国电力公司 大角 芳史	55
4-3 永久接地点的探测技术·····	北海道电力公司 福島 正雄	60
4-4 断线检测和诊断技术·····	日新电机公司 江村 徳男	70
4-5 数字型故障连续检测继电装置的使用方法·····	日新电机公司 佐藤 辰三	78
4-6 低压线漏电的诊断技术·····	中部电力公司 中村 昭彦、那須野 高保	84
4-7 接地电阻的诊断技术·····	音羽电机工业公司 木村 茂	91
4-8 输电线不良绝缘子检测技术·····	日本绝缘子公司 入江 孝、藤田 博	98
第5章 地下电路的诊断自动化·····		107
5-1 地下输电设备的常时监视技术·····	东京电力公司 中挾 俊明	107
5-2 地下输电线路接头部分的内部诊断技术·····	古河电气工业公司 藤井 治	119
5-3 地下配电线路的诊断新技术·····	东京电力公司 寺部 聡実、西村 洋一	131
5-4 电力电缆的绝缘老化监视技术·····	电力中央研究所 深川 裕正	145
5-5 交联聚乙烯电缆的诊断管理技术·····	关西电力公司 和田 道夫	154
第6章 变电设备的诊断自动化·····		161
6-1 建立变电设备自动诊断系统·····	东京电力公司 花村 信	161
6-2 气体绝缘断路器 (GIS) 外部诊断的自动化·····	四国电力公司 山下 忠男・菅 保	165
6-3 采用油中气体分析法的变压器诊断自动化·····	东京芝浦电气公司 市川 元保	176
6-4 油浸设备外部诊断的技术·····	· · · 明电舎公司 平野 郁朗	181
6-5 注塑电器的外部诊断技术·····	富士电机综合研究所 夏目 文夫	187
6-6 电力电容器的绝缘诊断技术·····	日新电机公司 池本 欽哉	192
6-7 电力断路器异常诊断技术·····	日立制作所 広瀬 義昭	198
6-8 真空阀 (VD) 诊断自动化·····	明电舎公司 菅野 正幸	205
6-9 盐害污染的诊断自动化·····	东京电力公司 村本 裕	209
6-10 电晕的现场诊断技术·····	富士电机综合研究所 松浦 清	217
第7章 旋转电机的诊断自动化·····		224

7-1	电动机线圈绝缘的诊断技术·····	安川电机制作所	高橋 守	224
7-2	振动数据处理和联机诊断·····	富士电机综合研究所	西本 晴保、岸 郁朗	229
7-3	绝缘老化和寿命预测技术·····	日立制作所	谷口 正俊、松延 謙次	237
7-4	大型电动机的绝缘诊断技术·····	三菱电机公司	川上 剛、岩渕 直	242
7-5	采用发电机状态监测器的诊断自动化·····	日立制作所	渡辺 孝	254
7-6	自诊断的高压电动机·····	富士电机公司、富士电机综合研究所	小寺 昭紀、川畑 理	260
第8章	工厂或配电系统中谐波的联机诊断·····	日新电机公司	宮田 紀夫、角田 孝典	266

第1章 预测维修和诊断自动化

富士电机技术公司 和田 显二

1. 前言

随着电气设备规模的扩大,因电气设备的故障而停车给生产带来的影响非常大。在经济从高速增长的时代转向低速增长时代的今天,由于设备更新缓慢,所以认为对长期运行的电气设备,确保它的运行可靠是个重要问题。

保证电气设备运行可靠的是维修,它也从事后维修向预防性维修以及生产中维修和全面预防性维修(TPM)发展。以预防性维修谋求增加机器的寿命,同时趋向按预测维修所获得的各种数据估算出机器的寿命。

根据这一观点,以求电气设备维护的合理化,为了实现确保安全和防止事故于未然,更加需要在电气设备运行状态下诊断它的事故苗头和加以监视的技术。为了诊断电工设备,需要搞清楚所用机器的老化机理,同时还要先行开发用于检测各种事故苗头和现象的传感器技术。由此才能检测各种复杂的物理现象和化学现象。

最近由于信息处理和传输技术的进步,实现了以检测器所测得信号的传输和信息处理,能够做到可靠的诊断和监视了。而且在最近,这种诊断和监视除脱机状态进行之外,以联机状态自动进行的方法也实用化了。

2. 设备维修的变迁

回顾一下关于机器或设备的维修概念的变迁,能够明确产生预测维修的背景和它的必然性。

图1-1示出设备维修概念的变迁。日本在1950年引进预防性维修的概念。那以前搞的是事故后维修,其方法是发生事故时才采取对策。采用这种方法进行维修,对生产的影响很大,使作业遭受巨额损失也是不少的。所以当时出现的新的预防性维修,是每隔一定期限更换机器的零件或进行大修,以防止发生突然事故,这对保持机器的可靠性是有效的,所以广泛地代替了事故后维修。而另一方面,由于更换了还能使用的零件,或者维修过度,因为在极端情况下进行了维修,也会出现反而损坏机器的状态这样一类的问题。

1954年进入叫做反省期的时期,废除了为维修

而进行的维修,代之以提高设备生产率为目的的的生产中维修这一概念。

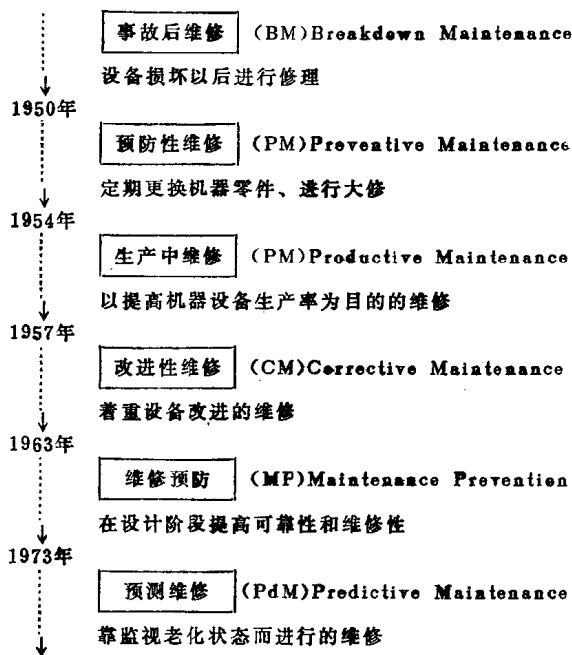


图1-1 设备维修概念的变迁

1957年提倡叫做改进设备体质的改进性维修。在预防性维修的同时,改进设备本身的体质以降低老化程度和故障率来降低由于老化而造成的损失和维修费用,这是更高的预防,当能够减少的损失和维修的费用超过改进体质所需的费用时,这就更加经济。

1963年提出维修预防的概念,是把改进性维修向前推进了一步,上溯到设备的设计和施工时期,即使设备费用稍微高一些,如果将来的维修费用和老化损失较少,则从长远角度来看经济性是较好的。其方法如下:

(i) 把机器设备设计成难以发生故障的。

(ii) 即使发生故障和异常,也能迅速而容易地修理。

(iii) 使设备费用和维修费用的合计额下降。

一般把这些分别称之为可靠性、可维修性、经济性,在使维修工作容易的同时,将设备的使用寿命有效地加以利用和管理。

从1978年迄今,再一次努力定量地掌握机器的状态,预测机器的异常征兆和将来会发生的事态,基本上根据需要进行维修的概念采取预测维修。这一概念和预防性维修并行构成了现在维修的中心思想。预测维修与预防性维修相对照的方法是以状态为基础的维修(Condition Based Maintenance)。

3. 机器的故障和诊断技术

机器故障的一般形态,随着运行的时间过程,向初期故障、偶发故障、磨损故障发展。预防性维修对磨损故障是有很有效的。典型的例子是更换电动机的滚动轴承、断路器进行定期的检修等等。对这些机器根据设计数据和运行实际情况分出开始达到频繁发生磨损故障的使用时间,在适当时期进行维修和更换零件,以预防故障的发生于未然。

而偶发故障是随机发生的,但与其对应的机器的诊断技术,即监控技术是很重要的。乍看起来似乎是不规则地发生的机器的异常,如果微观地来看,也归属于发生故障的部位的磨损故障,可以把机器细分成能够预测它的故障的构成单元,分别对各个单元进行检测,判定有无异常情况,万一发现异常时可对其进展情况加以监视,就能够在发展成机器的重大故障之前采取适当的对策。

如果能够有效地应用诊断技术,就能够知道构成机器的元件是否接近产生磨损故障的时期,所以能够把以时间为基础的维修转变成以状态为基础的维修。

为了进行诊断,下列三项工作是必要的。

- (i) 与异常或故障相对应的信号的检测;
- (ii) 引出信号的特征,也就是信号处理;
- (iii) 识别故障原因,标定故障部位,即用于判定故障的软件。

因此,要研究同机器的异常和老化有关的故障机理。这一领域对提高可靠性和维修效果是很重要的,但是还没有充分得到发展,故障结构的分析、老化速度和寿命等有待今后解答的问题很多。

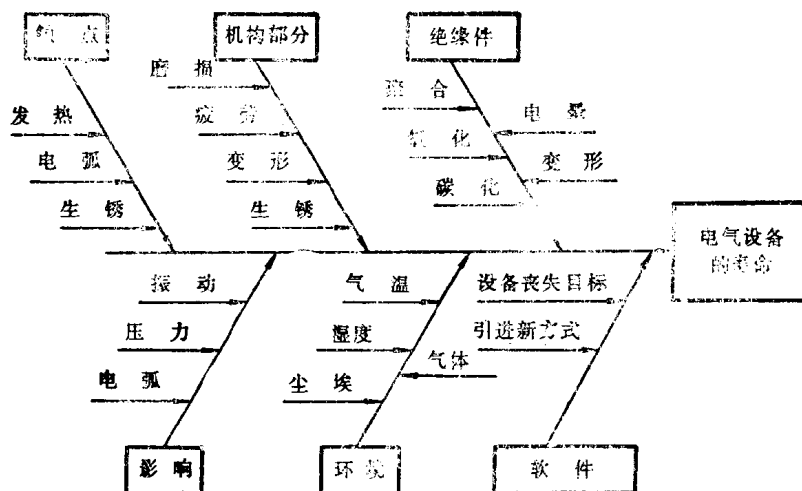


图1-2 与电气设备的寿命有关的因子

4. 用于诊断的传感器技术

设备诊断技术的基础在于掌握当前的状态,因此暂且不讨论传感器技术所要完成的重要任务,而是要得到对应于被检测机器分别估计老化的合适的状态量。

电气设备的寿命如图1-2所示,当按其主要功能分别研究时,可以分成绝缘件、触点(导体)、机构部分的寿命,并分别规定老化因子。还必须考虑环境加给它们的应力。表1-1给出适用于检测这些老化因子的传感器的典型例子。由此可以理解在设备诊断技术领域里,很需要极其广泛的传感器技术。

表1-1 适合用于设备诊断的传感器⁽⁸⁾

项目	测定	传感器	应用的例子
1	振动测定	• 振动传感器 • 波形处理	• 轴承老化诊断 • 不平衡调整
2	音响测定	• 音响传感器 • 超声波传感器	• 轴承部分损伤检测 • 局部放电声测定 • 超声波探伤法
3	温度测定	• 热电偶温度计 • 电阻温度计 • 放射线温度计 • 红外线传感器	• 绕组温度监视 • 轴承温度监视 • 转动部位温度测定 • 因温度分布而造成的异常磨损部位的检测
4	压力测定	• 压力传感器	• 流路堵塞的诊断

(续)

项目	测定	传感器	应用的例子
5	流量测定	• 流量传感器	• 冷却水量 • 冷却油量的测定
6	应变测定	• 变位传感器	• 应力测定
7	光测定	• 光传感器	• 断路器行程特性的测定 • 气体绝缘内部异常检测装置
8	放射线测定	• 放射线传感器 X光片	• 配管壁厚的测定 • 水垢粘附状态的检查 • 机器破损的检查
9	音响发射	• 超声波传感器	• 大型结构件、工作中的压力容器的监视
10	化学计量	• 气体色谱仪 气体传感器	• 变压器油中气体分析 • 铁心监视器 • 润滑油诊断

5. 诊断装置的改进

诊断装置改进的趋势是从追求维修工作的可靠性、经济性，并将诊断数据的脱机倾向管理改进为联机监视系统。以旋转机械的振动管理为例，叙述如下。

(1) 简易诊断的系统化

旋转机械的振动管理，是对每台被测机器的轴承、测定方向、振幅的类型（变位、速度、加速度）等，按测定日整理数据，这种工作需要很多劳力。于是，开发了图 1-3 所示的一种系统，把在现

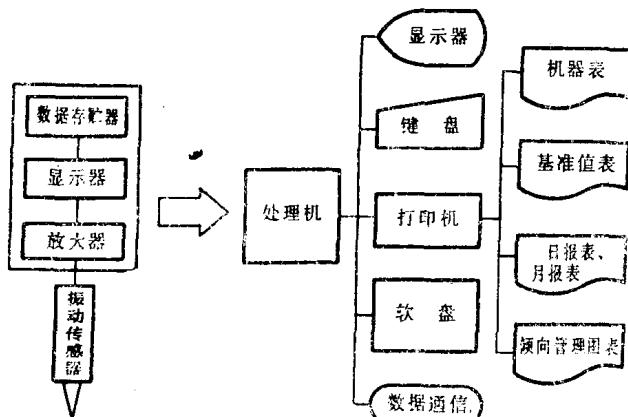


图1-3 运行倾向管理系统(4)

场测得的振动数据存入存贮器，并把该数据转送到设置在办公室等处的个人计算机中，再用软盘上完整的维修管理程序对此数据加以记录管理。

如采用这种数据管理系统，可使过去进行的数据收集、转记作业、整理业务合理化，并容易获得与已设定的报警电平的比较和长期变化曲线，所以可以有效地编制维修计划。

(2) 联机监视系统

为了管理重要的而且老化速度快的设备，采用联机监视器是有效的，它能够在短时间内简便地诊断许多被测机器的异常情况，能够进行老化倾向的管理和选定精密诊断的对象。

图 1-4 为联机监视系统的例子。若采用它，可把诊断对象设备的许多测量点来的信号按处理机的指令由多路转换器加以转换，在作为管理数据加以存贮的同时，当测定值超过设定基准值时，将作为设备的异常情况实时地发出警报。

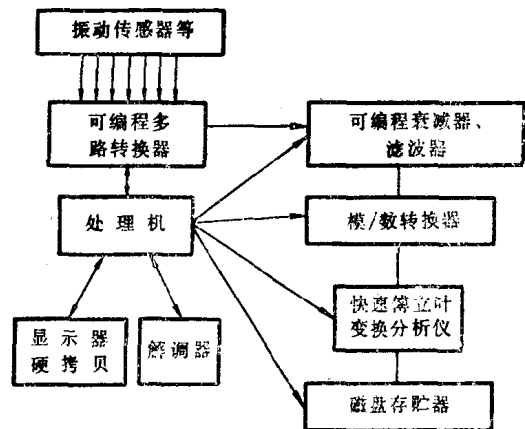


图1-4 联机监视系统(4)

这种联机监视器本身具有对老化进行定量管理和及早发现故障的功能，同时脱机状态采用快速傅里叶变换分析仪对异常原因进行精密诊断，或者也能够方便地根据存贮的数据作出倾向诊断和日报表、月报表等。

当被诊断设备数量很多，并且分散装在各处时，把多路转换器按传感器分群加以设置，采用中央处理机对精密诊断和数据管理进行统一处理的方法。

6. 自动化的诊断装置

开发了许多电气设备的诊断装置，在此只对下列装置加以说明。

(i) 把许多试验方法加以系统化自动化, 例如高压交流电动机的绝缘诊断装置

(ii) 联机诊断装置, 例如变压器的局部放电监视装置

(iii) 具有自诊断功能的装置, 例如控制保护装置的自动监视系统

(1) 高压交流电动机的绝缘诊断装置⁽⁸⁾

高压交流电动机的绝缘诊断试验方法是比较普遍采用的, 并且能够得到它和绝缘击穿电压之间有某种程度的相关关系的, 可以举出下列试验方法。

(i) 绝缘电阻试验

(ii) 介质损耗角正切试验

(iii) 交流电流试验

(iv) 局部放电试验

这种装置在现场用于高压交流电动机的绝缘管理和老化诊断的电气试验, 能够进行上述试验项目, 并能够自动进行绝缘诊断、数据整理、数据收集记录、剩余寿命判断等工作。

使它能够通过微型计算机大体上自动地进行过去所做的测定、记录、数据整理等一系列工作, 将诊断结果保存在软盘上, 以供以后的绝缘管理之用。

(2) 变压器的局部放电监视装置

最近的变压器, 在工厂试验时, 施以严格的局部放电试验, 以验证它确无电晕放电。但是长年累月之后, 由于时效老化和过电压的冲击等原因, 绝缘件也会产生局部损伤。因此, 经常监视变压器的

运行状态, 证实它能够正常运行, 在稳定供电方面也是很有意义的。

局部放电监视装置对运行中的变压器进行连续的监视, 当在变压器内部产生作为绝缘击穿前兆的局部放电时, 它能够迅速加以检测。它就是为此目的而开发的装置, 着眼于当变压器内部一旦发生局部放电时产生的电脉冲和超声波脉冲, 采用同时检测这两个物理量来检测局部放电, 图 1-5 示出系统组成的概要。

若变压器内部发生局部放电, 装在绝缘套管抽头或中性点接地线上的脉冲检测器就能测出电脉冲。如图 1-6 a 所示, 超声波脉冲比此电脉冲滞后一个在油中的传播时间 t_0 , 能够由超声波检测元件检测出来。检测出来的电脉冲究竟是内部放电引起的, 还是干扰引起的呢? 可如图 1-6 所示来判断, 并从电脉冲和超声波脉冲的相关关系求出。如果是干扰, 则如图 1-6 b、c 所示只检测出电脉冲, 或者同时检测出电脉冲和超声波脉冲。

所以采用逻辑判断功能电路, 根据脉冲检测图形辨别是内部放电还是干扰, 在向外部发出报警的同时, 自动记录发生放电的时刻和放电电荷量的大小。

再若装上许多个超声波检测元件, 根据内部放电造成的超声波传播时间的差异, 还能够预测放电的部位。

(3) 控制保护装置的自动监视系统

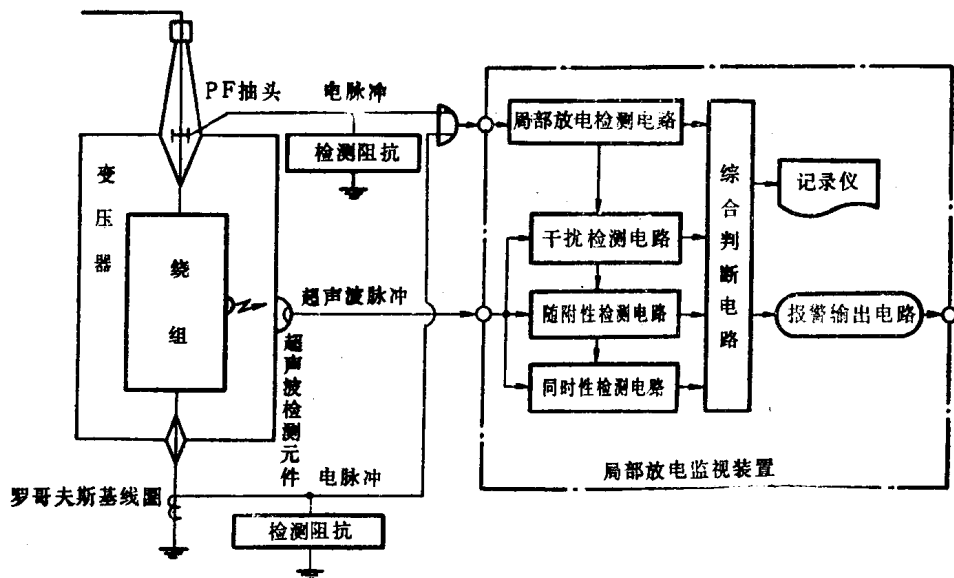


图 1-5 局部放电监视装置的系统组成

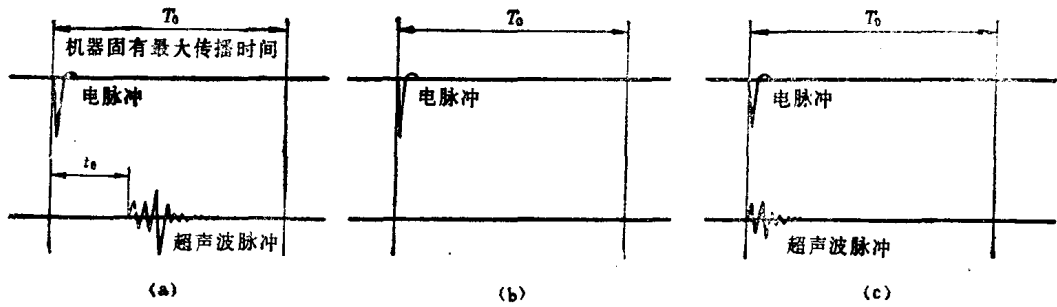


图1-6 电脉冲和超声波脉冲的关系

a) 内部局部放电 b) 干扰 (T_0 内无超声信号) c) 干扰 (同时有电脉冲和超声波脉冲)

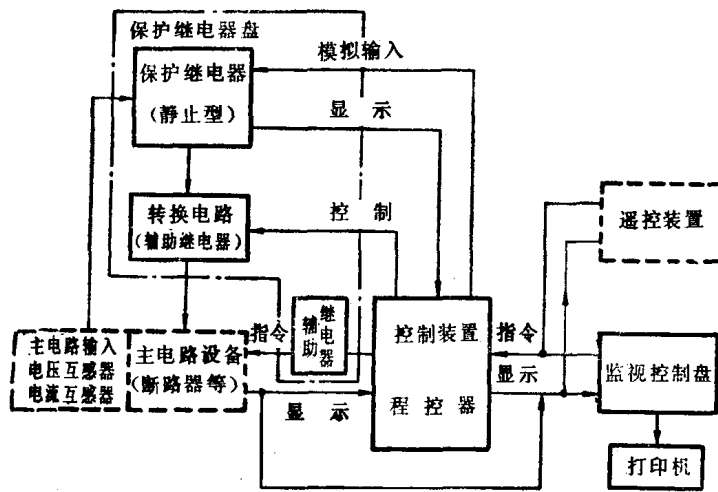


图1-7 控制保护装置框图

控制保护装置根据提高可靠性、简化维护工作、缩小占地面积等要求, 已经考虑采用静止型装置。

电气化铁道变电所采用的静止型控制保护装置, 如图1-7所示, 它由程序控制器和保护继电器盘组成。这种装置可进行常时监视和自动检测, 此外, 还能够按开关的操作进行手动检测。

(a) 常时监视 对下列项目进行常时监视, 当发生异常时进行报警显示。

(i) 保护继电器的误动作监视 把保护继电器的电平检测器以后部分加以双重化, 通过检测它的不平衡动作(一侧的元件在超过一定时间后动作)来监视误动作。

(ii) 断路器脱扣线圈的断线监视 经常给脱扣线圈通以微小电流, 根据此电流的有无来检测脱扣线圈的断线。

(iii) 程序控制器的自诊断 根据程序控制器

的自诊断功能, 监视程序控制器内部的异常。

(b) 自动检测 利用程序定时器每天检查一次起动, 对保护联动按如下方式进行。

如图1-8所示, 首先把断路器的脱扣线圈锁住, 确认锁定之后, 对保护继电器的直流电路以后部分施加输入检查, 以验证保护继电器的动作和到断路器控制电路的最终端所加的电压(脱扣指令)。再去掉输入检查, 并验证保护继电器的复位和脱扣指令的恢复。

7. 监视控制装置的进步

最近, 为了适应在工厂控制领域里的复杂控制和高功能以及处理的数据量的增加等, 开发了以微型控制器继承下来的高速运算、控制功能和阴极射线管显示监视为主的人机功能复合化的简洁的系统。

主要特点为

(i) 工厂控制、记录、监视显示、运行操作等功能均由一台装置进行的复合功能系统。

(ii) 由汉字、图表显示、光笔、键盘操作等提供的多种多样的人机接口。

(iii) 完备的在阴极射线管显示屏上方便地进行控制程序、显示图象的制订和修改的自支持系统等。

采用上列最新控制技术, 可对设备监视提供极大的方便。

8. 对诊断方法的知识工程学的利用

应用知识工程学方面的知识信息处理, 正在研

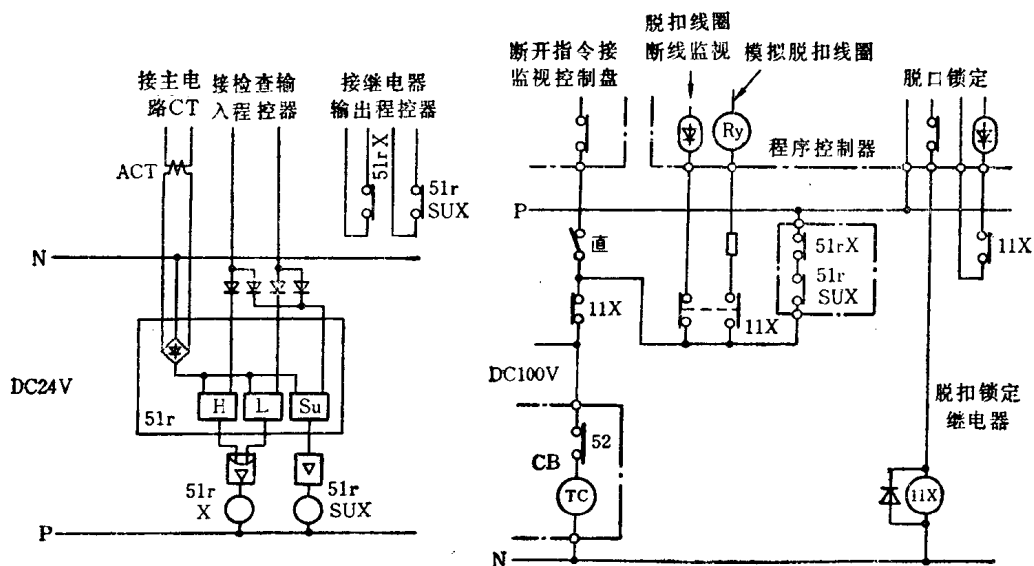


图1-8 保护继电器检查电路

究开发诊断的知识化。诊断往往必须依靠故障原因的检索、未来的预测和预知等人类的思考，目前的尝试就是把这些加以知识化，并使诊断技术电子计算机化。

在此介绍一下用个人计算机组成的绝缘诊断专家系统用于电机绝缘诊断的例子⁽⁶⁾。

绝缘专家在考虑了被测电机的绝缘结构及其经历之后，对求得特性中与老化因子有密切关系的特性加以评价，根据经验知识试求最可能的结论。

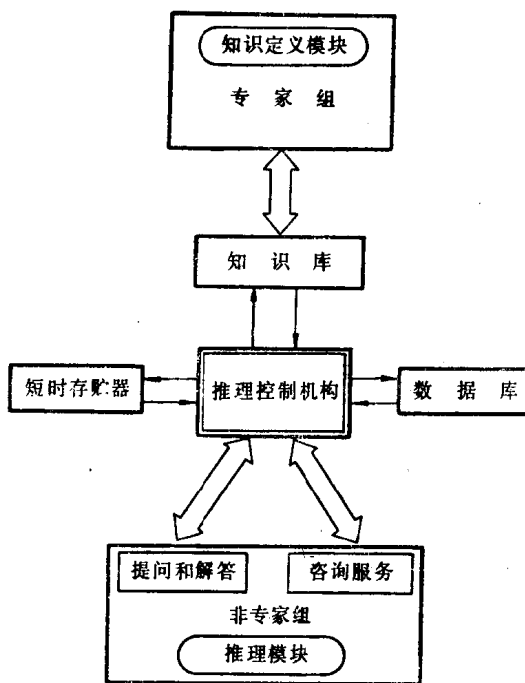
绝缘诊断专家系统是把该绝缘专家的专业知识和含糊而复杂的经验知识存入电子计算机，非专家动用计算机的推理功能，以对话形式试图做出专业决断的系统。

(1) 系统的概要

应用被测领域的专家知识进行推理的知识程序叫做专家系统，绝缘诊断专家系统采用东京电机大学开发的知识型专家系统的开发工具 COMEX (Compact knowledge based expert system)，是和该大学共同研究试制成功的系统。

COMEX 是采用 FORTRAN 语言编写的，其概念结构如图 1-9 所示，由定义专家知识的知识定义模块和非专家进行推理的推理模块组成。推理模块还有显示达到结论的推理过程的功能，也能够评定知识模型的稳妥性。

另一方面，COMEX 也照顾到它和用户之间的接口问题，也具备了求助功能，知识基础结构的顺序和推理过程的说明等功能。

图1-9 专家系统的概念结构框图⁽⁶⁾

(2) 系统结构和推理的执行

高压旋转电机的绝缘结构根据电压等级和绝缘材料而不同，所以要针对各种绝缘结构建立知识模型。

绝缘诊断专家系统的综合评定是对吸潮、污染、老化、漏电痕迹等假定的原因，能够得出决定性的、有可能性、不能忽视可能性等加权的结论。

知识模型是根据绝缘专家定义的判定结果、判

定标准、排除条件和中间假说而建立的。

这样建立的知识模型，非专家以对话形式输入判定结果就能得到结论。

表1-2示出绝缘专家和本专家系统得出的诊断结果的对比的例子。由此可知两者的诊断结果比较一致，特别是采用本专家系统得出的结论，其特点是微妙地表现出专家的潜在意识。

表1-2 诊断结果的对比⁽⁶⁾

事 例	专家诊断	本专家系统 诊断	采取对策	
电动机 250kW 6kVs39 (紫胶)	采取 对策前	因局部放电而造成导线绝缘老化，建议重绕	决定性：老 化 有可能：吸 潮 不能忽视： 污染	重新绕
	对策后	良好	良好	
电动机 130kW 6kVs38 (紫胶)	采取 对策前	绝缘有吸潮、老化的征兆，建议重新进行绝缘处理	有可能：吸 潮 有可能：老 化 不能忽视： 污染 不能忽视： 漏痕	清洗 干燥 清漆处理
	对策后	良好（建议继续诊断）	良好	

为了使本专家系统更加接近高级专家的系统，还要对绝缘特性的长期变化、确切的对应措施和紧

急程度等更多的课题进行研究，也是很重要的。

此外，还想开展其他诊断系统的应用。

9. 结束语

上面叙述了电气设备的预测维修的目的和诊断技术，特别是在自动化系统这一方面。为了提高维修性，诊断技术的开发对机器制造厂来说是重要的课题，但是由于下列原因，完全消除故障还是个困难的课题。

(i) 故障机理复杂；

(ii) 不能准确算出负荷应力；

(iii) 故障现象本身的产生带有概率的性质。

而机器老化机理的研究也较活跃，可望对诊断技术的开发有所促进。预测维修的最终形态是在联机状态下进行数据检测、信息的处理和显示，对它的要求更加多起来，所以渴望随着传感器的开发而使联机诊断系统得到推广和充实，以便确保电气设备的可靠性。

参 考 文 献

- (1) 「予防保全特集号」，富士時報，第55卷，2号，1982
- (2) 倉持：「電気機器の予防保全技術の現状と動向」，電気学会誌，104卷，1号，1984，
- (3) 倉持：「電気機器の予防保全におけるセンサの応用」，富士時報，第54卷，8号，1981
- (4) 伊藤：「回転機・予知保全のための管理データ」，電気と管理，1985-2
- (5) 「高圧交流電動機の絶縁診断装置-TOSPAC」，東芝レビュー，第39卷，10号，1984
- (6) 伊藤：「電気機器の劣化診断実例」，プラントエンジニア，1984-7

第2章 老化和诊断自动化

2-1 绝缘老化和诊断自动化

东京电机大学 井関 昇

1. 前言

最近的最大新闻之一，恐怕就是谁都提到的日航喷气式客机坠毁事件。它在航空事故史上不仅遇难人数是最多的，而且是世界上人们认为最安全可靠而乘的飞机，但其安全性却出了问题。关于查明该事故原因，由于有对社会的影响程度和补偿损失等问题，所以存在一些麻烦，但若如现在所传说的那样，是压力隔板的金属疲劳问题，则可以说只从技术角度来看问题就比较简单。若被分析对象是在材料中的一种最均质的金属，就能按较单纯的重复负荷引起的累积疲劳和一次冲击负荷造成的疲劳的重叠来加以处理。

然而，电气绝缘的老化并非如此简单。绝缘结构是各种气体、液体、固体绝缘材料的复合系统，有起源于热、电的各种各样的应力很复杂地纠缠在一起，而且以随时间变化的形式相互起着作用。

关于绝缘老化及其对策，在战后近40年来，在理论、材料、设计结构、试验评价等所有方面，取得了不断的进步和今天的发展。

但是，技术越是发展，越是要求在较大应力条件下使用和具有更高的可靠性，所以这个问题经常提供既陈旧而又新鲜的话题。绝缘老化问题涉及的面很广，所以在有限篇幅内不能详细叙述，本文将首先就绝缘老化的基本事项中的，特别是最近常提到的新开展的事项进行叙述。然后对本文的主题绝缘诊断，特别是其自动计测技术的动向和有关问题方面进行论述。

2. 老化因子的分类及复合因子老化

(1) 老化因子的分类

对绝缘的应力，最近叫做影响因子，可分为热、电、环境和机械因子四种，(合起来叫做TEAM)，在IEC 505 (1975)^[1]标准中有详细定义。其中，热老化的历史最久，其机理和评价方法也进行了仔细的研究。电老化是大约30年来随着设备的高电压化和小型化而变得更加重要了，但是其机

理复杂，评价试验技术也未必说得上十分完善。环境老化由于工作环境复杂多变，难以一概而论，它无论在理论上或实际上都是没有得到开展的领域。机械老化大致可分成纯机械应力和电磁力等以电力为基础的应力、以热胀冷缩为基础的应力等，随着设备容量的增加，其重要性也有所增加。表2-1-1给出主要电气设备的种类和各老化因子的重要性及其间的关系⁽²⁾。

表2-1-1 主要电气设备、电缆与各种老化因子及其有关配合

分类	品 种	热	电	环境	机械
旋转电机	汽轮发电机	小(大型) 中(中型)	大	小	大
	感应电动机	中(中型) 小(小型)	中	大	中~大
	直流电动机	大	小	中	中
变压器	油浸电力变压器	中	大	小	中
	干式变压器	中	中	中~大	小
开关设备	气体绝缘成套变电所	小	大	小	小
	成套开关装置	小	中	中~大	中
电容器	充油电容器	中	中	小	小
	薄膜电容器	中	大	小	小
电缆	充油电缆	大	大	小	中
	交联聚乙烯电缆	中	大	小	中

(2) 复合因子老化的定义

电气绝缘在使用中，通常受到两种以上老化因子的影响，往往不仅受到各个单一因子的影响，而且还受到各因子之间相互作用或协同作用的影响。在这种情况下，必须知道有无相互作用及其种类和大小，而过去这种作用的定义和术语不一定明确。最近按IEC 792 (1984)标准^[2]，其概念和定义已经明确了，下面对它扼要进行叙述。

所有的电绝缘在使用中，都处在多因子影响之下。现在给出影响因子和老化的作用量如下。

	影响因子	老化作用量
单一因子老化	F_1	A_1
单一因子老化	F_2	A_2
复合因子老化	F_1, F_2	A_{12}

并可定义如下的相互作用。

有相互作用： $A_{12} \neq A_1 + A_2$

无相互作用： $A_{12} = A_1 + A_2$

此处所谓老化的作用量是绝缘的一次变化，即指作为老化反应的结果而产生的某一化学成分的含量变化或者生成物的量等。与此相反所谓老化的程度是指物理性质，例如绝缘击穿强度的变化等。这如图 2-1-1 所示的具体例子。

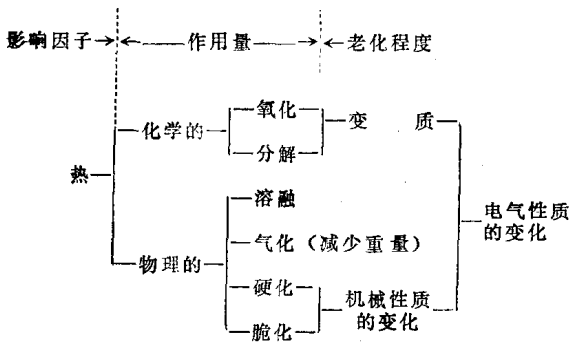


图 2-1-1 影响因子、老化作用量、老化程度的具体示例

这样一来，相互作用的定义明确了，但实际上几乎是不能直接测定一次变化的，所以通常根据老化的程度来判断有无相互作用。

(3) 相互作用的种类

相互作用有直接相互作用和间接相互作用两

种。前者指两个以上影响因子同时作用时的老化，不等于它们依次作用时的老化，而后者是指两者相等时的情况。如此说来，后者乍看起来如同没有相互作用，但并非这样。也就是说，上述两个相互作用从机理上来讲，可表述如下。

所谓直接相互作用的第一个因子引起的老化速度是第二个因子所造成的变化。即直接相互作用是由第二个因子本身的直接作用产生的。与此相反，间接相互作用的第二个因子对绝缘引起不可逆变化，它是由于改变第一个因子的老化速度而产生的。即间接相互作用是由第二个因子的间接作用产生的。例如由于机械应力而气孔增加，并产生局部放电，或局部放电的强度产生变化，将使局部放电老化的速度发生变化，就是后一种的例子。

所以，当进行老化试验时，关于同时施加应力或者依次施加应力，在 IEC 792 标准中给出如图 2-1-2 所示的例子。

此外，关于复合因子老化问题，最近由电气学会绝缘结构复合应力老化专业委员会进行了深入的调查，其成果不久将作为技术报告予以发表。

3. 热老化和耐热寿命评定

在电气绝缘领域里，战后一直有发展和进步，对电气设备的大容量化、小型化和提高可靠性有较大的贡献，耐热性能提高了。表 2-1-2 示出各种电气设备耐热性能的变迁⁽²⁾，可知除油浸变压器之外，设备的耐热性能逐年有所提高。这是由于耐热有机材料的开发、热老化理论及其评定方法的发展形成的。下面就后者的基础理论和最近的动向进行概述。

(1) 关于热老化的反应速度论和耐热寿命评

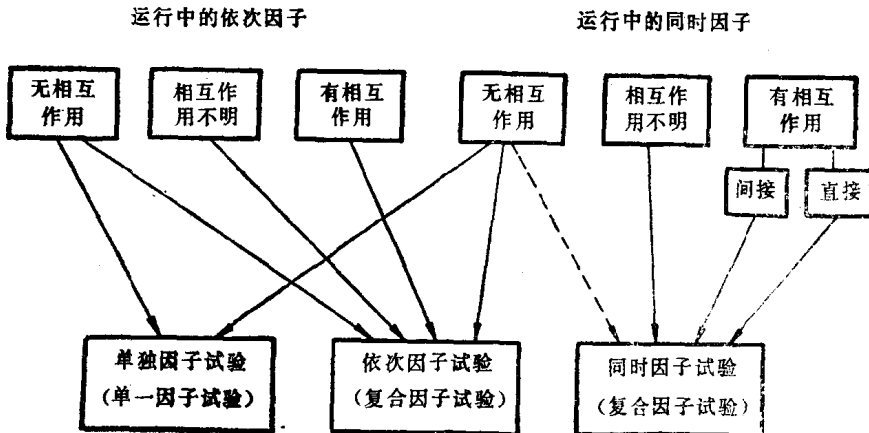


图 2-1-2

表2-1-2 电气设备耐热性能的变迁
(日本国内)

设备名称	1955	1960	1965	1970	1975	1980
大型电动机 (水轮发电机 汽轮发电机)	A级	B级	F级	H级		
中容量高压 感应电动机	A级	B级	F级	H级		
主牵引电动机	A级	B级	F级	H级		
直流电动机	A级	B级	F级	H级		
大容量油浸变压器	A级	B级	F级	H级		
干式变压器	B级	F级	H级			
注塑变压器					B级	F级
牵引变压器	A级				H级	
						特A级

定义

热老化是对物质加上热能，在物质中产生不可逆的化学变化而使特性下降的一种现象。Dakin⁽⁴⁾把热老化现象与有关化学反应速度的 Arrhenius 定律联系起来进行说明。他的模型被广泛认识，把它通用化后可表示如下。

设物质的特性值（例如绝缘击穿电压）为 P ， P 取决于该物质中的某一化学物质的浓度（例如终端团浓度） C ，可用下式表达。

$$P = f_1(C) \quad (1)$$

C 的变化，根据化学反应，可用下式表示。

$$\frac{dC}{dt} = k f_2(C, C_1, C_2, \dots) \quad (2)$$

式中， k 为反应速度常数； $C_1, C_2, \dots$ 表示除了 C 之外其他项目的浓度，对反应也有影响。根据化学反应速度定律，用 $f_2 = C^\alpha \cdot C_1^{\alpha_1} \cdot C_2^{\alpha_2}$ 表达，而我们不需要知道 f_1, f_2 的函数（ $\alpha, \alpha_1, \alpha_2$ 等为反应的次数）。

根据 Arrhenius 定律，反应速度常数 k 可用下式表达。

$$k = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (3)$$

式中， E 为现在考虑的化学反应的活化能， R 为气体常数。

假定物性值 P 达到某一值 P_L 时，它的寿命終了，设该时间为 t_L ，则根据式 (1)~(3)， t_L 可用下式表达。

$$t_L = \frac{f_3(P_L, C_1, C_2, \dots)}{k} = t_0 \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (4)$$

即 $\log t_L$ 和 $\frac{1}{T}$ 有线性关系。

在 1950 年以后耐热寿命试验就是根据这一原理进行的，60 年代作为 IEC 216⁽⁵⁾ 标准制定了试验原理和方法，例如广泛采用模型线圈进行试验。

然而，因为采用模型线圈进行试验将需要几千小时，所以作为短时间的耐热寿命评定方法，最近考虑采用 TG 法（热解重量分析法）⁽⁶⁾ 和 EGA-GC 法（析出气体色谱分析法）⁽⁷⁾。图 2-1-3 给出模型线圈法和 EGA-GC 法的对比示例⁽⁷⁾。而这些方法虽可求得活化能，但算不出寿命的绝对值，所以要在高温的某一点进行过去的加速试验。

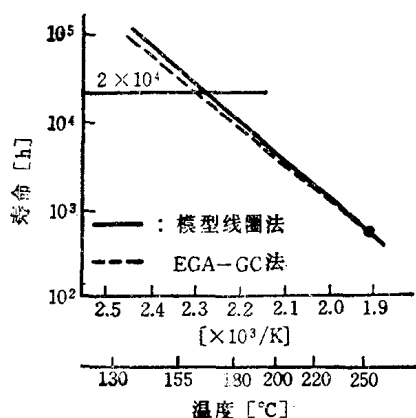


图2-1-3 模型线圈法和 EGA-GC 法的对比

(2) 引入等效老化过程 (EAP) 的耐热寿命试验方法

虽然广泛采用了上述假定 (4) 式的寿命试验，但是当老化过程有两个以上重要反应过程参与时，(4) 式已不再正确。在实际试验中也常常得到 $\log t_L - 1/T$ 是非线性的经验。其结果是向低温侧外延时的估算寿命，当然只能很不可靠。Paloniemi 已提出等效老化过程 (equalized thermal aging process) 和引入这个过程的耐热寿命试验方法 (简称 EAP 法)，作为解决这个问题方法⁽⁸⁾。对此简述如下。

热老化过程大致可分为化学老化过程和物理老化过程两类。前者还可大致分为

- (i) 狭义的热老化过程（没有氧化等其他物质参与，只有该物质和热产生作用面引起的老化）；
- (ii) 氧化分解老化过程；
- (iii) 加水分解的过程。

而后者指物质成分的挥发和氧气等活性气体向材料内部扩散。所谓等效老化过程是这些化学的、物理

的老化反应,在试验温度条件下,以相等于实用温度的比率进行加速时,才能正确再现初始热老化时的加速。此处对试验方法的详细情况不予赘述,文献(8)中对理论和方法有详细介绍。

4. 电压老化和 $V-t$ 特性

对减少绝缘厚度、提高工作电场的要求最近更加高涨,特别对聚乙烯电缆这种趋势是明显的(见图2-1-4)。聚乙烯电缆所以能够实现如此高的工作电场,据称是因为成功地采用干式交联法防止气孔的产生,并采用三层同时挤压等防止外导、内导表面产生树枝状放电。而仅仅工作电场增高部分就对运行中的绝缘监视等在确保长期可靠性方面的要求提高了。

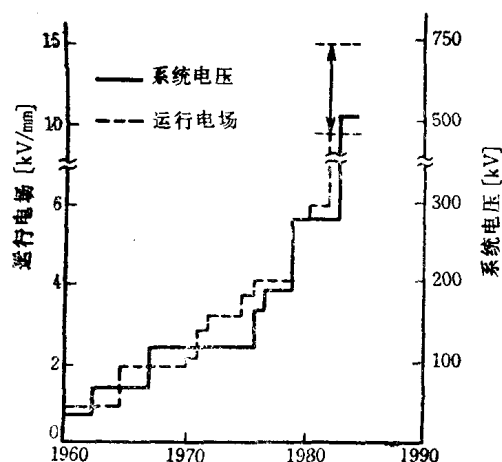


图2-1-4 交联聚乙烯电缆的系统电压及运行电场的变迁

另一方面,由于在高压发电机等采用的云母绝缘中没有气孔几乎是不可能的,以及充油电容器工作在结构上刚开始局部放电的边缘等情况,所以局部放电老化及其对策是最重要的课题。还有气体绝缘成套变电所等采用的环氧树脂注塑件以及上述聚乙烯电缆等以固体绝缘为主的设备,要重视防止树枝状放电的产生。在当初制造时未检测出局部放电,而偏偏在长时间带电后开始产生树枝状放电,终于导致绝缘击穿的现象,不一定说明还未解决问题。局部放电老化、树枝状放电老化的机理还有许多不明之处⁽⁹⁾;但这里不再深入其机理,下面对电场(压)和寿命的关系,即绝缘的 E (或 V)- t 特性和采用这一特性关系的寿命评定进行概述。

电压老化大致分为局部放电老化和树枝状老化,其 $V-t$ 特性有单对数表达和双对数表达两种

方法。任何一种都是经验公式,但双对数表达方法往往更符合实际,而且便于在绝缘设计时使用,耐压寿命和电场 E (或 V)的关系用双对数表达时以下式表示。

$$L = KE^{-n} \quad (5)$$

n 为取决于材料、老化因子种类及其作用的常数,表2-1-3⁽¹⁰⁾给出其数值示例。此值一般在局部放电老化时较小,树枝状老化时较大。若 $V-t$ 特性单用式(5)表示,则事情比较简单,而老化机理随着 E 值的大小复杂而微妙地变化,通常不能用一根直线来表达。图2-1-5给出用三根折线近似地表达的示例。此处为了长时间绝缘设计第三区段特别重要。这个区段是在局部放电开始电场(E_0)附近,所以局部放电发生的次数和强度是不规则的,老化反应不仅变慢,而且数据偏差也增大了(偶然性)。如此,当 $V-t$ 特性为折线时,寿命从第三区段求出比较合理,而试验需要的时间太长(一年或更多),未必实用。这时采用频率加速试验,通常采用1000Hz以下的频率,但是老化速度正比于频

表2-1-3 电压老化的种类和 n 值

电压老化的种类		n 值		电极形状	
		平均值	最小~最大		
局部放电	集中IEC (b)	2.6	2.0~3.1		
	集中 (半球棒)	3.2	2.4~4.0		
	气 孔	3.6	2.5~4.1		
	包层电极	5.9	5.0~6.7		
树枝放电	产生树枝 *	10.6	5.5~14.9		
	树枝造成的击穿	12.1	3.6~18.5		
发电机线圈		11.8	7.7~14.3		
油浸绝缘	充油电容器		10.9		
	油浸纸	密封	11.1		
		集中	10.7	6.7~14.3	
	油 间 隙		23.0	20~25	

* 最近此值有比这大的趋向