

[苏]П.М.斯维 著

张仁豫 朱德恒 译

高电压设备的 绝缘监测

контроль
изоляции
оборудования
высокого
напряжения

水利电力出版社

高电压设备的绝缘监测

М 85
105
2

版社

高电压设备的绝缘监测

[苏]И.М.斯维 著

张仁豫 朱德恒 译

水利电力出版社

内 容 提 要

本书论述高电压设备在运行情况下的带电绝缘监测方法。主要内容为绝缘的介电特性测量和局部放电的测量。介绍了测量原理、测量方法、测量仪器和现场测量时排除干扰的措施以及有关实际高电压设备的测量数据。书中除叙述定期的绝缘监测外,对绝缘监测的自动化也进行了讨论。

著者从事绝缘监测工作多年,本书总结其丰富经验并着重反映近期带电绝缘监测工作的情况和观点。所介绍的方法曾在现场使用多年,也比较切合我国高电压设备绝缘监测情况。

本书可供从事高电压设备绝缘监测和高电压测试的工程技术人员以及有关高校和中专师生阅读。

СВИ ПАВЕЛ МАКСОВИЧ
КОНТРОЛЬ ИЗОЛЯЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ
ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ
ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ» 1980

高电压设备的绝缘监测

[苏] П. М. 斯维著

张仁豫 朱德恒译

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 3.75印张 81千字

1984年11月第一版 1984年11月北京第一次印刷

印数00001—14330册 定价0.75元

书号 15143·5476

译 者 的 话

高电压设备的绝缘监测对我国电力系统的安全运行有极重要意义。为此，我们翻译了苏联近年出版的П.М.斯维所著的《高电压设备的绝缘监测》一书。著者多年从事绝缘监测方面的工作，在编写本书时，除引用了多种文献资料外，还总结了他多年的工作经验。

本书主要讨论在运行条件下高压设备绝缘的带电监测方法。全书共分五章。第一章叙述绝缘预防性试验的一般性问题，如绝缘带电监测的特点，监测的准确度等。第二章叙述绝缘监测时所测试的各种参数。第三章叙述各种介电特性的测量方法。第四章专门讨论局部放电特性的测量方法。第五章叙述各种测量设备，还讨论了试验中的安全以及如何消除干扰等问题。

本书前言和第一、二章由朱德恒翻译，第三、四、五章由张仁豫翻译。

限于译者水平，错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

1983年11月

前 言

如果没有可靠及不间断的电力供应，近代工业、运输业、农业和市政公用事业都不能正常进行。这就对电力系统以及包括高压设备在内的各组成部分的可靠性提出了很高的要求。高压设备事故损坏中很大一部分是和其绝缘发生事故有关。预防性监测系统的任务就是为了防止绝缘发生事故。随着电网额定电压提高，预防性试验也变得复杂了。将被试设备退出运行并进行试验准备很费事费工，进行试验时还必须设置临时供电电路，而其可靠性又通常较低。

绝缘预防性监测系统的有希望的发展方向之一是带电监测，这时被试设备不需退出运行。

本书就是试图对运行状态下带电监测系统中积累起来的资料进行总结并对能否建立绝缘带电监测系统作出估计。书中只讨论了那些目前可加以推荐的测量方法。

书中阐述了高压配电装置中设备（电力变压器和互感器，套管等等）绝缘的监测方法。但所用测量方法也有可能用于监测其它设备（如发电机）的绝缘。

编写本书时除引用了文献资料外，还采用了作者在研究制订各种监测方法中取得的经验。

作者对全苏电力技术联合公司中的同事们和全国电力系统中从事绝缘维护的工作者致以诚挚的谢意，他们在设备绝缘带电监测方法的研究、检验及实际应用各方面都做了大量工作。在研制及应用上述测量设备的工作中，工程师 O.B.

巴洛门金、A. H. 勃特辽舒金、A. B. 柏洛赫洛夫及M. Ф. 索林作出了很大贡献。

作者对IO. C. 宾泰尔技术副博士和 M. B. 洛夫欣娜表示感谢，他们和作者就预防性监测的一些基本问题进行了讨论。

作者将怀着感激的心情采纳旨在消除本书缺点的各种批评性意见。

目 录

译者的话

前言

第一章 绝缘预防性监测	1
1. 绝缘状态的技术诊断系统	1
2. 在设备不停电条件下进行的绝缘监测	5
3. 监测的准确度	9
第二章 绝缘监测参数	15
4. 介电特性	15
5. 沿着绝缘的电压分布	24
6. 局部放电	27
7. 绝缘分解产物	34
8. 设备不能运行的判据	38
第三章 介电特性的测量方法	39
9. 基本方法	39
10. 不平衡-补偿法	43
11. 电桥方法	55
12. 瓦特表法	59
第四章 局部放电特性的测量	62
13. 基本方法	62
14. 测量装置的刻度	73
15. 发现局部放电的条件	76
16. 配电装置设备绝缘的监测	81
17. 电力变压器绝缘的监测	84

第五章 测量装置和设备	96
18. 安全保证	96
19. 干扰的防止	97
20. 传送器	100
21. 测量介电特性的装置	103
22. 测量局部放电的仪器	105
参考文献	109

第一章 绝缘预防性监测

1. 绝缘状态的技术诊断系统

现代高压设备的可靠性在很大程度上取决于其绝缘的可靠性。

大家知道，为了保证设备具有必要的可靠性可以采用两类解决方法。第一类方法的依据是：设备所以能在整个运行期间具有必要的可靠性，取决于其结构和制造工艺。第二类方法是在运行过程中对设备进行各种预防性试验，这是属于技术维护性质的工作。

制造能在整个运行期间都能确保必要可靠性的绝缘结构，技术上是非常复杂的，尤其是对于电压等级高的设备。不少情况下这在经济上也是不合理的。所以，虽然设备的质量和可靠性主要取决于设计和制造阶段，但为了保证高压设备绝缘具有必要的可靠性，也要借助于技术维护工作，其中包括监测工作和检修工作。

本书只讨论和设备绝缘监测有关的问题。

运行中在各种因素作用下绝缘内发生的过程会导致其性能的劣化，即发生老化。绝缘老化的后果是不能继续运行，表现为电气强度降低，不能耐受作用电压（持续作用电压——工作电压，短时作用电压——各种过电压）。

绝缘电气强度的降低决定于各种因素的作用，因而是一种随机性过程。所以有计划地进行预防性监测的任务在于发现那些设备，它们的绝缘在到下一次试验前发生事故的概

高于按一定的各种判据而确定的数值。根据具体情况可以采用各种不同的绝缘预防性试验优化判据（在保证必要的可靠性指标的前提下费用最少等等）。

绝缘预防性监测系统，一般情况下，必须包括技术诊断（绝缘状态的评定）和试品可靠性预测两方面。绝缘的状态须综合各种参数来说明，这些参数反映了进行检查试验时绝缘的各种性能。

预防性监测过程由如下三个基本阶段组成：试验，绝缘状态评定和决定试品能否继续运行。

试验是为了取得关于绝缘性能的信息。对于试验应理解为既包括施加试验电压，又包括绝缘参数的测量或试样的分析。

绝缘状态的评定是根据将试验结果和规程规定及以往试验结果作比较而得到的。对绝缘结构总的状态的评定，在分析取得的所有各种信息（即各种试验所得结果）的基础上进行。

判定绝缘可以继续运行或需进行恢复性检修及何时需进行检修是根据对绝缘可靠性进行预测而作出的。

在最简单情况下容易作出唯一的决定是，当参数值超出了规程规定的范围时，将试品剔除（应该根据绝缘必需的可靠性制订这种规程）。在这种情况下，决定绝缘能否运行这一阶段实际上和绝缘状态评定这一阶段合而为一了。

当预防性监测牵涉到好几个参数，特别是这些参数值和绝缘可靠性之间的关系还不十分清楚时，如何作出决定就可能比较复杂了。作出能否继续运行的决定必须针对各个具体试品，并考虑到该种类型设备的运行经验，绝缘状态的评定结果以及一系列偶然的因素；试品在电网中的安装地点，它对供

电可靠性的影响，由于事故而可能造成的损失，设备检修图表等等。

预防性监测方法之一是定期地施加试验电压，试验电压和运行中遇到的作用电压性质相同，但数值较高。这类试验称为破坏性试验。破坏性试验没有得到广泛的发展，一般只用于额定电压低于35千伏的设备。这是由于高压试验设备笨重，而且破坏性试验还可能造成绝缘损伤，导致设备损坏。选择试验电压水平时希望既能足够准确地发现缺陷，又不致于在绝缘中额外造成损伤的危险。但这样的要求并不是总能得到满足的。

基于绝缘非破坏性试验的预防性监测方法得到非常广泛的发展。用这些方法虽不能确定绝缘的电气强度，但可确定表征绝缘状态的一种或几种参数。

对某种预报性参数进行监测就属于这种预防性监测系统^[9]。假设被监测的试品具有这样的参数 $x(t)$ ，它可以测定并可用来预测试品事故，即于时间间隔 $(t, t + \Delta t)$ 间发生事故的该参数 $x(t)$ 间具有随机性的联系。

存在预报性参数的前提是假定：试品发生事故之前先有损伤积累的过程，而事故则意味着在这种过程影响下绝缘状态发生突变。高压绝缘的事故过程通常都是这样发展的。

绝缘预防性监测的有效性主要取决于能否从希望的运行可靠性的观点评定绝缘状态。绝缘状态这样的评定的准确性和可信性依赖于被监测的参数值和事故概率间的联系密切到什么程度。所以在没有发现这种联系之前，无论是确定参数临界值（制定检出事故试品的标准）或制定监测周期都没有充分的根据。

确定绝缘的各种被试参数和其可靠性间联系程度的工作才开始^[35]，而已进行的研究表明问题不可能很快得到解决。

既然现在评定绝缘状态可靠性的可信程度还很低，所以

现有预防性监测系统的主要任务是确定绝缘状态劣化的程度。这时绝缘的状态由一系列参数所表征，其值决定于电介质中发生的各种过程（极化，吸收，电导等等）。这些参数有：绝缘的介电特性（电容量， $\text{tg}\delta$ ），绝缘电阻和吸收过程有关的参数（电阻和电容随时间的变化规律），以及绝缘和冷却媒质的一系列其它特性（化学组成，油中水份及气体含量等等）。

评定绝缘状态的方法是将这些参数值和规程规定的数值相比较，这些规程是根据高压设备多年运行经验制定的。

从绝缘运行可靠性观点来看，允许的参数劣化程度，在大多数情况下还未能加以确定^[6]。规程值只是在不大的程度上含有有关试品可靠性的信息，而且实质上只是该类试品在运行中其绝缘被测参数分散范围的极限值而已。通常根据被测参数和工厂试验中相应的数值间的偏离程度来估计绝缘状态的劣化程度。

从上述可得出结论：现有的预防性监测系统实际上只是技术诊断系统，用以确证由一系列被测参数作为表征的试品绝缘状态保持未变（在一定范围内）。这时假定绝缘状态劣化程度如果在允许范围之内，就可保证试品可靠性下降不多。

研究结果不只一次地表明^[7, 14, 31]，这样的绝缘预防监测系统不够有效。这是由于被测参数所具有的信息不足以及试验太费事（为了进行试验需要经常将设备退出运行）。

由于渴望绝缘状态实际上能维持不变，这将会导致把过多的设备作为废品剔除掉（从可靠性要求的观点来看是过多了），还会造成预防性试验工作量过大。

近年来电器和电力变压器的绝缘结构得到改进，这也影响到现在采用的监测方法的有效性。

这可用具有浸油绝缘的设备为例加以说明。大家知道，对于这类绝缘受潮是导致其老化的因素之一。所以根据损伤发展的机理，那些受潮时会改变的绝缘参数在第一级近似时可以认作能用来预测绝缘状态的参数。随着绝缘结构和制造工艺的改进其受潮的可能性显著下降。于是导致绝缘缺陷发展的其它一些原因变得突出起来了，如局部过热，电场强度过大等等。由此发现绝缘受潮的那些监测方法的相对有效程度也就降低了。

可以并且必须按若干不同方向去进一步发展和改进高压设备绝缘预防性监测系统。其中包括：研究能发现用现有方法不能发现的缺陷的监测新方法，建立预防性监测的概率模型，制订可靠性预测方法以及应用上述成果对绝缘监测系统的优化。

预防性监测的一些首要问题的综合性解决途径之一（必须提高预防性监测的有效性，同时又减少进行监测所需的工作量），是推行设备的不停电监测，即采用试品带有工作电压的测量方法。

带电监测方法除了能提高预防性试验的有效性之外，还能积累评定设备可靠性所必需的大量数据。

2. 在设备不停电条件下进行的绝缘监测

基本论点 在其它条件相同下缩短监测的周期可以提高及时发现缺陷的概率，从而降低设备发生事故的概率。在试运行期间经常进行监测特别重要，因为这时发生事故的概率较大。

在工作状态下进行绝缘带电试验时，即使试验周期较短，所花工作量也可能比采用一般的监测方法（试品从电源断开）为少。这是由于测量绝缘参数的电路经常接好不改

变，并且设备进行试验时无需作准备工作（即从电源断开，撤去分母线）。

带电监测时还可利用一系列能更好发现绝缘缺陷的运行中才有的因素（例如，利用绝缘温度较高时进行测量以发现受潮，利用高电压以发现电离等等^[28]）。

设备在工作状态下的绝缘监测，像设备停电监测那样，也可由相应的运行人员对试样作定期测量和分析。但大部分测量和分析的过程理应自动化。

测量和分析实现自动化不仅能减少运行人员的工作量，而且数据测量周期可以任意选定，包括可以连续测量。这样的监测系统的主要优点是可以让信息-测量装置完成监测本身的部分功能。该装置根据事先给定的程序（严格的计划）处理测量结果，评定所得数据并且在被试验设备绝缘状态和规程的规定之间存在不可允许的偏差时发出信号。测量采用自动化由于消除了数据处理的误差以及运行人员的主观误差，还可提高测量的准确度。

根据一系列参数的测量结果，并分析他们的变化速度，来评定高压设备绝缘状态。

在作出进行预防性检修的必要性及其迫切性的决定时，要考虑到绝缘可靠性的评价及设备发生事故损坏时可能带来的损失。这个过程希望能全部规范化，编好完整的监测程序，即可直接得出试品能否继续运行的结论。

完全自动化监测或许将会随着绝缘可靠性评定方法的发展而得到实现。它可以由电力系统和电站的电子计算机来储存和处理所需信息。这样的监测方式用于电压等级高的设备比较适当。

可是即使监测方法和测量技术处于目前的发展水平，也有可能制成足够简单的信息-测量装置，该装置可以根据对一、二个参数的评定发出绝缘劣化状态已达到不能允许程度的信号。

这样的信号发生器特别适用于重要的设备。附加有继电保护元件的信号发生器还可在绝缘损坏时断开设备以便限制事故面和减轻事故后果。

这种装置（绝缘状态事故预警信号发生器）有些已经研制出来，并将在以下加以介绍。

采用设备带电的绝缘预防性监测后在目前还不能完全取消那些一般性的试验。

有一系列绝缘特性（如吸收性能）的带电测试方法（设备仍处于工作电压下）目前还未研究成功。由于这个原因，还由于某些设备缺少用于带电监测的附加部件，因此不少关于绝缘状态的信息就无法获得，那些信息本可在试品不退出运行条件下取得的。

采用带电测量和分析的方法以求得绝缘状态出现重大改变的数据，再根据所有可能的试验结果（包括设备断电后所做的试验）作出绝缘能否工作的最后评价。这样的预防性监测综合系统才是最灵活和最有效的。

设备运行中的监测不限于绝缘试验。还需监测触头及带电部件的状态，热状态，振动等等。属于这类监测方法的有：热通量的测量（用热成像仪，分光测热仪），表面发热的测量（用测温器），振动幅值和频率的测定，一些辅助系统（冷却系统，润滑系统等等）工作缺陷的监测。这类测量大部分都可在设备不退出工作带电条件下进行，而且还可能实现监测自动化。

所有上述表明可以建立一种设备状态自动化监测综合系统，从按计划的预防性定期监测改为连续性的（频繁的）监测以消除暴露的缺陷。后一种监测方式可能对于电压等级高的设备以及单台容量大的设备是经济上及技术上的合理的。

监测方法 介质的老化（介质逐渐变化，伴随着性能劣化甚至完全丧失绝缘性能）由一系列过程引起，这些过程和

化学的、热的、机械的和电气的作用因素有关。这些过程同时存在并且互相有关，其中任何一种过程都会引起另一种过程。

有机绝缘材料劣化的化学过程有聚合，氧化和与周围媒质中腐蚀性成份发生的化学反应（湿气和高温会加速这些化学反应）。在外界因素及介质损失造成的热量的作用下会出现物质裂解，材料变脆，机械强度降低，从而导致损坏。

由电气因素造成的老化过程的主要现象是有机绝缘材料在电离过程（局部放电）作用下发生的物理方面及化学方面的改变。机械作用引起材料完整性的破坏（裂缝，分层），降低绝缘结构的电气强度，促使老化过程的发生及加速。

上述各种因素作用于绝缘结构的最终结果是介质结构及其性能的变化，分解产物的出现。绝缘状态的监测方法必须能够揭示这些变化。所以介质或绝缘结构作监测用的参数必须能随着上述绝缘老化过程而改变。这些参数还必须能在运行条件下用可行的办法加以测定。

有两类绝缘监测方法不需要把设备退出工作：测量试品处于工作电压下的参数以及分析从工作设备上取出的绝缘试样^①。

沿绝缘结构电压分布的测量方法和绝缘油化学-物理特性的试验方法比较起来最为成熟并已获得广泛采用^[20]。

近年来为了电器绝缘带电监测，开始成功地采用了各种介质性能的测量方法^[16,29,15,13,19,37]。研究制定了一系列测量运行中设备的绝缘内部局部放电的电气方法^[41,27]。采用了声学方法以发现放电部位^[39]。还采用了监测冷却及绝缘

① 破坏性试验方法不包括在内，因为不符合在不破坏装置工作状态下进行试验的原则。

媒质的各种方法以发现绝缘的分解产物^[18,10]。还正在进行着探索性研究工作,采用远距离测量绝缘结构表面温度的方法以发现绝缘的局部缺陷。

以上简短的综述已经表明,在绝缘带电监测领域内已进行了相当大量的工作:确定那些参数应予测定并研究制定了其中大部份参数的测量方法。

3. 监测的准确度

绝缘监测的最终结果是确定试品能否继续运行。将被测参数和规定的极限值(标准)相比较,然后作出试品可以运行或不能运行的决定。

如第1节中所述,现有的各种监测方法还不能确信无误地评定绝缘的可靠性。测量结果中除了被测参数值以外还含有由于测量设备及外界干扰所引起的误差。所以监测结果发生错误的可能性总是存在的:

将无故障设备判定为不可用(虚假缺陷或第一类错误);

将有故障设备判定为可用(未发现的缺陷或第二类错误)。

采用两者选一(判定可用或不可用)的监测时,监测结果的分组如图1所示,图中阴影部分反映了监测结果不可靠的概率(第一类和第二类错误)。

可以人为确定获得正确结果的某个概率,以此作为某种监测方法的准确性的判据。此处略去监测方法准确性评定过程的数学分析,但应该指出,各种具体监测方法究竟能否用于工程实际取决于获得正确结果和错误结果的概率之比。

第一类错误和第二类错误引起的后果是不同的:如果说