

FLUKE®

电能质量故障排查



介绍

目录	页号
安全信息	2
入门	3
开始步骤	3
第 I 部分：设施配电系统	
第 1 节：插座分支电路	4
第 2 节：供电配电盘	8
第 3 节：变压器	10
第 4 节：电气噪声和瞬变	16
第 5 节：雷击防护	21
第 II 部分：三相负载	
第 6 节：多相感应电机	22
第 7 节：交流调速驱动器	25
第 8 节：商业照明	30
电能质量问题的主要原因	31
测试工具	封底

虽然固态技术的发展为我们带来了巨大的利益，事实上，需要洁净电源的微电子技术才是该技术的核心。速度越来越快、电压越来越低，意味着对电能质量的要求越来越严，没什么空间了。

电能质量 (PQ) 涉及大量问题，涵盖电压干扰 (如电压下降、电压突升、供电中断和瞬变)，电流谐波直至布线 and 接地等问题。

低电能质量的症状包括，间歇性锁合和复位、数据劣化、设备过早失灵、部件故障不明地过热，等等。其最终的代价是机器停机、生产率下降以及人员受伤等。

本技术应用文章介绍了对电能质量问题进行排查的方法。它还提供了

有关如何开始修复这些问题方面的信息。

但是在拿起仪表之前，请先阅读以下注意事项：

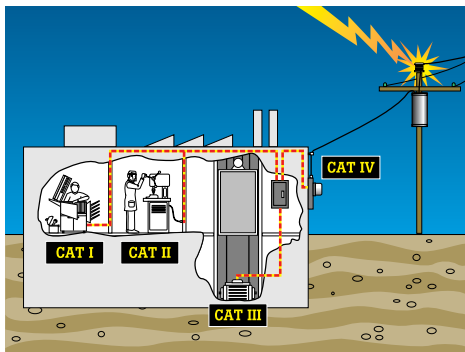
1. 建议测量只应由经过培训的合格人员以安全的方式进行，测量时应该采用正确的步骤以及安全等级适合被测电路的测试工具。
2. 就我们所知，所建议的解决方案符合美国国家电气规范 (NEC)，在任何情况下，都不要违反 NEC 的规定。
3. 我们已尽力使所提供的信息精确和符合现实情况，但并无意让它们来取代专业电能质量从业人员的专门知识和经验。

本技术应用文章所提供的只是一个知识入门，而不是最终的电能质量故障排查方法。

国际安全 测试工具标准

过电压类别	概要说明
CAT IV*	公用电力连接处的三相线路，任何室外导体 (低于 1000 V)
CAT III	三相配电 (低于 1000 V)，包括单相商用照明和配电盘
CAT II	单相插座连接的负载
CAT I	电子设备

*CAT IV 产品技术规格在标准中尚未定义。



IEC 61010 针对低压 (1000 V 或更低) 电气设备，提出了测量、控制和实验室应用等方面的国际通用安全要求。低压配电系统基于与电源的靠近程度而被划分为四个类别。在每个类别中都列出了一些电压：1000V、600V、300V 等。

需要了解的关键之处是，您应该使用一块安全等级符合您所处理的最高电压的最高类别仪表。对于电能质量故障排查人员来说，这就意味着使用一块安全等级为 CAT III-600V 或 CAT III-1000V 的仪表 (IEC 尚未定义 CAT IV 的技术规格)。我们建议，不要在 CAT III 电路上使用安全等级为 CAT II 的仪表、示波器、测试线和探头。应该在仪表的电压输入附近位置标出 CAT 安全等级。按照以前的标准 IEC 348 设计的仪表一般不符合 IEC 61010 CAT III-600/1000 V 的更为严格的安全规格。IEC 61010 要求提高对瞬变过电压所带来的

危险的防护。

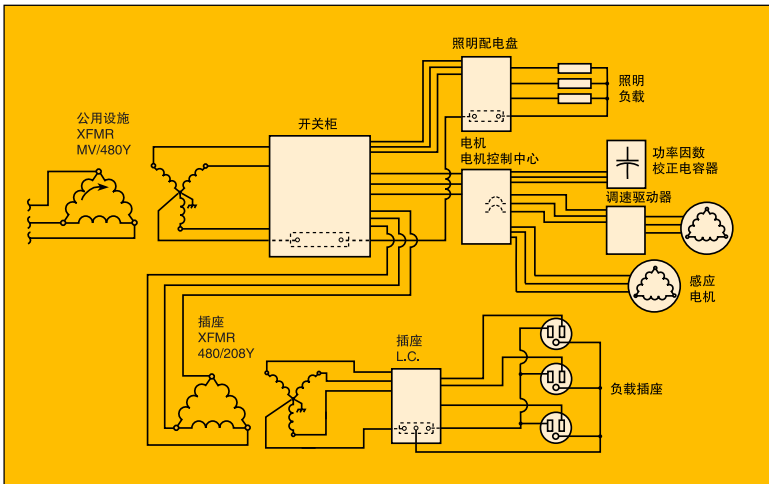
瞬变可能会在保护不充分的仪表中引起电弧放电。若电弧放电发生于一个高能量环境中 (如三相馈线电路)，其结果则可能是危险的电弧爆炸。

这可能会对人员造成严重伤害，并使仪表损坏。有关详细信息，请参见福禄克技术应用文章“万用表安全性的初步知识” (文档编号 B0317UEN) 以及福禄克视频短片“福禄克数字式万用表安全性的初步知识” (部件号 609104)。

独立测试和认证

厂商可以自行对是否符合 IEC 61010 技术规格进行认证，但是，由最终用户自行认证有明显的缺陷。通过一个独立测试实验室进行认证可以确保满足 IEC 要求。寻找一个独立测试实验室的符号或编号，如 UL、CSA、TÜV、VDE 等。例如，UL 3111 就是基于 IEC 61010。

入门



商业和工业设施中典型的简化配电系统。

从犯罪现场着手

排除电能质量问题的一种方法，是尽可能地从最靠近“受害负载”的地方着手。“受害负载”，典型为电子负载，即因不明原因而发生故障的敏感负载。低电能质量值得怀疑，但工作的一部分是必须将电能质量作为一个原因从其它可能原因中分离出来（硬件，软件？）。如侦探一样，您应该从犯罪现场入手。这种自下而上的方法，可能耗时日久。它取决于是否独具慧眼，以及能否采取某些基本手段。

另一种方法是从进线口开始，采用三相监测器，自后面一直查找到“受害负载”。若问题发端于公用设备，则这种方法最为有效。然而，经反复调查后，结论是最主要的电能质量原因源于设备。实际上，按照常规，进线口（连接公共设施）电能质量最好，顺着电力配送系统，越到下游，电能质量越差。这是因为设备自身负载正在导致问题。另一个明显的事实证明，75%的电能质量问题与布线 and 接地问题密不可分！

由此，许多电能质量权威人士建议，合理的故障排除工作流程应该首先对建筑的电力基础设备作出判断，必要的话，接下来，对它进行监控。

我们设计了这个自下至上的检修流程，能帮助您完成这个侦探工作。

第一步

1. 制作一个地图：获得或创建一个电流单线图

不了解正当前被研究现场的工作情况，想判断出电能质量问题，极为困难。您可以从查找或重新构建一个现场单线图着手。

该单线图能确定出交流电源及其所带的负载。带有红线的“按实际构建的”单线图是您所需要的。

如果您在现场工作，则该线路图可能已存在于您的脑海中，但如果您把它绘制在纸上，则将会对每个人（包括您自己）产生巨大帮助。如果您是第一次来到工作现场，得到一个最新的单线图就意味着可以识别出新的负载或系统中的最新变化。

为何要这样做？因为系统是动态的，它们会随时间而发生改变，而这些变化经常无规律可循，是任意发生的。而且，虽然一些问题在起因和影响上都是局部的，但也有许多问题来源于系统中一部分与另外一部分之间的相互作用。

您的工作就是要了解这些系统之间的相互影响。您的文档准备得越完备，则您的工作就会越完美。

然而，合乎事实的是，维护工作量需求最大的地方正是系统运行记录表现良好的可能性最小的地方。许多咨询公司通过按照现场实际情况更改提交给他们的文档，已经赚走了佣金。因此，简单的规则就是，在调查过程中的该点，尽力制作一份良好文档，而不要指望别人所提供的那个文档。

2. 围绕现场走一圈

有时候，目视检测可能发现直接线索：

- 变压器温度过高
- 布线接头因过热而褪色
- 带延伸带的插座呈菊花状链接至延伸带
- 信号电缆与电力电缆布线在同一个电缆槽内
- 附加的中性线、地线在分配电盘内连接在一起。
- 接地导体连接在悬于半空的管道上。

立即，您就能够了解设备是如何布线连接的，且什么是其典型负荷。

3. 查访受影响有关工作人员并坚持记事件日记

查访受影响设备的操作人员。您可能会获得关于问题的描述，并且，通常会发现一些意外线索。记录下问题发生的时间及其症状也可能是一个良好的习惯。这对于间歇性出现的问题，最为重要。其目的在于，找出某种有助于将“受害负载”问题的出现与某处同时发生的事件联系起来的模式。按道理，故障日记记录工作是最接近受影响设备的操作人员的职责。

第 I 部分：设施配电系统

第一节：插座分支电路

支回路级存在许多电能质量问题。原因很简单：这里是大多数灵敏负载（以及敏感员工）所在的地方。它也是电气系统的“线路末端”，也是缺陷无法隐藏的地方。我们假设您被要求去处理这个问题。与有关人员交流后，您大致地了解所需处理问题的症状（设备锁定无法开机、间歇性地复位或者瘫痪等等）、发生时间以及过去历史。好，现在是努力收集证据的时候了：进行测量。

我们主要关注于插座级检修，以确定可用相线 - 中性线 (L-N) 电压是否足够稳定，是否能够满足负荷需求。

测量

1. 波形

波形能为我们提供快速的快照信息。理想波形应该是正弦波形。在该情况下（参见图 1.1），电压波形顶部是平的，这是装安装有了如计

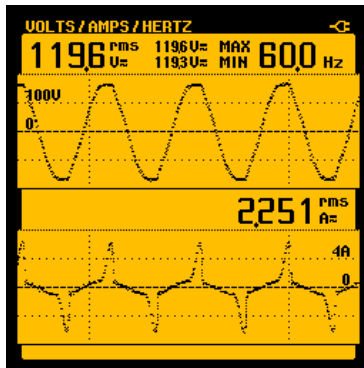


图 1.1 插座处的平顶电压。

算机和其它办公设备等非线性负荷的典型电压波形（参见第 5 页上的“平顶电压”）。

其它的测量可告诉我们这种平顶是否过度。

2. 峰值电压

峰值对于电子负荷极为关键，因为，电子设备电源会将其内部电容器充电至线性电压峰值水平。若峰值过低，会导致电容器不能完全充电，并影响电源克服线电压瞬时下降的能力。波形为正弦波时，对于

115V 的有效电压，其峰值电压应为 $1.414 \times 115V = 162.6V$ 。然而，仅从平顶波形来看，它与正弦波完全不同，且峰值将较低。

3. 有效电压

标称线电压即被测的有效（均方根）值，它与有效发热值相类对应。设备是根据有效值，而非峰值进行等级划分，因为它们的主要限制在于散热。

有效电压可能会过高或过低，但通常，低压会导致问题。平顶（低峰值）低有效电压与敏感型负荷密不可分。

电压下降是回路负荷和源阻抗的函数，实际上暗示了导线的长度和直径（厚度）。NEC (210-19.a, FPN No. 4) 推荐，自支回路断路器到最远插座的电压降极限值为 3%，包括馈送器和支回路的总电压降不得大于 5%。

4. 记录（短期）

上述测量的限制即它是静态的。许多负荷，当启动时，需要更大电流（通常指冲击电流等）。这种短期高电流流经导体时，会产生额外电压降，从而导致短期低电压（下跌）。这种电压跌落通常是因为负荷从同一支回路，或者从同一配电盘吸入冲击电流所造成。

在向负荷供电期间，采用 Fluke 87 数字万用表的 MIN MAX 功能，可以测出大于等于 100 ms（频率为 60 Hz 时，约为 6 个周期）的电压突降。若想知道是否存在电压突降，有什么方法呢？通过 Fluke 43 电能质量分析仪的电压突降及骤升趋势分析功能，可以持续地捕获短至一个周期 (17 ms) 的电压突降。只需 4 分钟至 1 小时，就足以告诉你是否发生了电压突降和突升现象。

表 1.1 在插座分支电路上进行的测量。

电压测量	检查	仪器
1. 波形	电压畸变严重程度的快照信息	43 电能质量分析仪 41B 谐波分析仪
2. 峰值电压	过度削顶	43 电能质量分析仪、 41B 谐波分析仪 87 数字式万用表（峰值 / 最小值 / 最大值）
3. 有效电压	有效值过低（长期的低有效值，或者间歇性 / 周期性电压跌落）	43 电能质量分析仪（电压突降 / 骤升） 41B（最小值 / 最大值） 87 数字式万用表（最小值 / 最大值）
4. 记录（短期）	检修员在现场时的电压突降、突升、断电等现象（典型记录时间为 4 分钟至 1 小时）	43 电能质量分析仪（电压突降 / 骤升或瞬变）
5. 记录（长期）	最多达 4000 次的电压突降、突升、停电、暂态	VR101S
6. 中性线对地电压	中性线对地电压太高（或接近零）	43 电能质量分析仪、 87 数字式万用表

平顶电压

平顶波形是带有计算机负荷的商用建筑内的典型电压波形。是什么导致平顶呢？

公共设施供应交流电压，然而，电子设备工作于直流电压。由电源完成交流至直流的变换。电源具有二极管桥电路，能将交流电流转变成平滑的直流电流，并接下来，给电容器充电。若负荷从电容吸取电荷，则重新对电容充电。

然而，由于只有在波形出现峰值时，供电电压才大于电容自身电压，故，只有峰值电压才能对电容进行重充电过程。在供电电压每个半周期峰值时，电容从脉冲中吸取电流。实际上，回路中的全部电子负荷都在发生这一切。既然，我们已经明白了负荷对源的需求，就让我们看看源能提供些什么吧。

若源极为“强劲”，意味自它的能力没有限制，可以满足全部所需电流，那么，就不会有诸如削顶等事情（或电压突降，或者任何的电压畸变）。如下想一想：如果世界上的所有钱都归您，您就不

会在各项帐单摆在您面前时变得坐立不安了。但现实世界的情况是，电源所提供的电能具有一个实际限值。

该限制通常可以用一个称之为源阻抗的概念来描述，它是从测量点（或者负荷所在点）向后直到源的总阻抗。源阻抗有两个主要的贡献者。一个是布线；导体越长，直径越小（精度越高），则阻抗越大。

另一个因素为变压器（或源设备）内阻。

内阻是某一给定规格/定额的变压器仅能提供如此大电流的简便的表示方法。

自然，距源最远的支回路端的源阻抗为最大。这也是那些正在波形峰值吸取电流的所有电子负荷所处的地方。

结果，电压峰值趋向于下降，换句话说，即被削顶了。

当某月同一时间内，所有账单都全部向你飞来时，你也许有这种感觉。负载越多（帐单越多），平顶程度越高。同样，电源阻抗越大（现金越少），平顶程度越高。

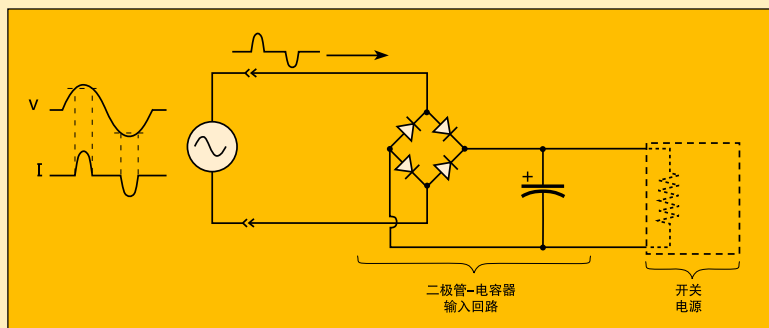


图 1.2 平顶电压

5. 记录（长期）

福禄克 VR101S 电压事件记录器加电后，能记录更长时间内的电压突降、突升、停电、暂态和频率偏移等现象。（参见第 7 页上的“在插座处进行记录”）。该装置可以在现场、无需看管地、成天成周地工作，不间断地捕捉间歇性事件（最多可存储 4000 个事件）。现在，您应该明白为什么要求用户保持检修记录是如此的重要了吧：设备故障和电压事件的相互关系是电能质量问题的铁定证据。

6. 中性线至地的电压

假设您简单地测量一下插座的 L-N 电压，并发现读数偏低。

您无法区分该读数偏低是因为馈送器电压过低（在分配电盘）呢，还是因为支回路过载。您可能试图测量一下配电盘电压，但通常很难区分出为您所测插座供电的配电盘，况且有时候，接近配电盘也很不方便。

N-G 电压为提供了一个更为方便的回路负荷测量手段。当电流流经回路时，在火线和中性线中会产生一定大小的电压降。

如果火线和中性线具有相同的线规和长度，则它们上面的电压降相同。两条导线上的总电压降要从电源电压中减去，因此，负载得到的电压就大大降低。负载越大，电流越大，中性线对地电压就越高。

可以将火线对地电压看成与火线对中性线电压相反：如果火线对中性线电压较低，所表现出的中性线对地电压就较高（参见图 1.4）。

插座 N-G 电压测量注意事项

1. 业内广为使用的一个规则是，插座处 N-G 电压不高于 2 伏时，则表示正常。而为几伏或更多时，则表示过载，5 伏被认为是上限电压。在该测量过程中，很明显，存在一定的判断空间。
2. 读数高表示可能存在共用中性线，即多个支回路共用一根中性线。共用中性线会只增加过载，以及某个回路影响其它回路的机会。
3. 在负荷回路中，一定数量的 N-G 电压是正常的。如果读数稳定在接近于 0 伏，则应该怀疑在插座（通常是因为松散的中性线束碰到某个接地点）或分配电盘是否存在不合格的 N-G 连接。应该拆除在变压器源（和/或主配电盘）以外位的所有 N-G 连接，以防止回流电流流经接地导线。
4. 若插座处的 N-G 电压较低，则表明处于良好状态（参见测量说明 #3 以了解规则的例外情况）。若较高，则你还必须确定，问题主要地是在分支路级呢，还是主要地在配电盘级。请记住，假如有关配电盘或插座上没有非法中性线对地连接，您的“接地测试线”也会一直通向供电电源，因此您会读取一直到供电电源的电压降。

因为流经中性线回到 N-G 连接的电流会产生电压降，因此，存在 N-G 电压。若系统布线合理，则除了电源变压器（NEC 中称为另起电源系统，或者 SDS，通常为变压器）以外，应该不存在 N-G 连接。该情况下，接地导体实际上应该没有电流，故在它上面也不存在电压降。实际上，接地导线可用作一根接回 N-G 连接的长测试导线。

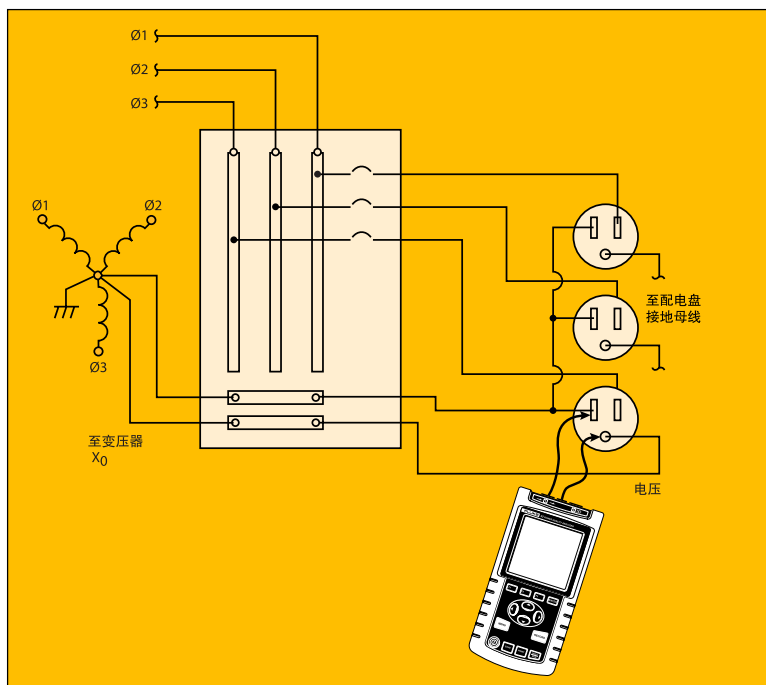


图 1.3：中性线至地的电压因共用中性线而增加。

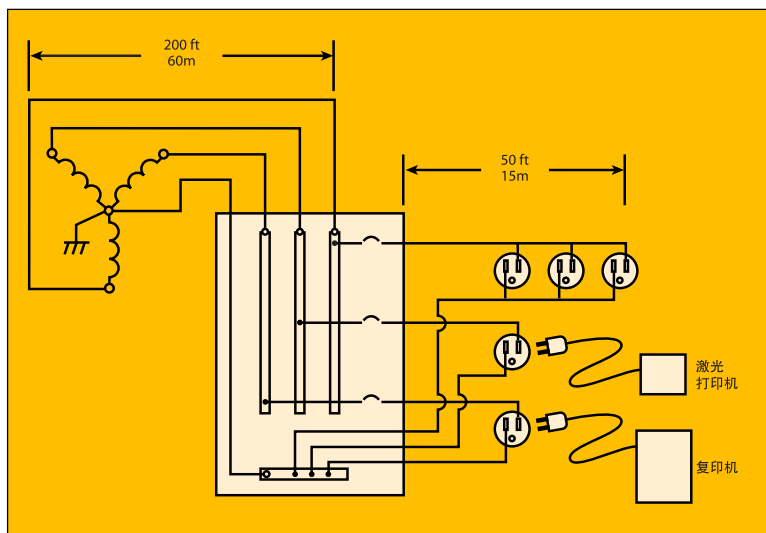


图 1.4 中性线至地电压随负荷电流增加而增加。

共用中性线

一些建筑布线中，存在两或三根相线共用一根中性线的情况。其初始想法是在支回路级复制配电盘的四线布线方式（三根相线和一根中性线）。理论上，仅不平衡电流才会返回中性线。这使得三根相线可以仅采用一根中性线。随着单相非线性负荷的增加，这种布线捷径很快就进入了死胡同。

问题在于来自非线性负荷的零序电流，主要是三次谐波电流，会线性叠加，并返回至中性线。除了因中性线规格不足，导致过热而成为安全隐患以外，这种额外的中性线电流还会形成较高的 N-G 电压。记住这种 N-G 电压减少了可供负荷使用的 L-N 电压。若你开始认为其用中性线是一种最糟糕的想法，你就和许多人想到一块了。

解决方案

布线性能 vs. 最小原则

任何有经验的电能质量检修员都会告诉你，问题最多的第一个地方就是建筑物的布线系统（包括其接地系统）。高品质的电力取决于高品质的布线；该说法在业内被称之为性能布线（参见表 1.2）。性能布线的主要目的是，维持 L-N 电压，或者将 L-N 电压归还给负荷。“高性能接线”与“规范最小要求接线”存在区别。主要针对防火和人身安全，NEC 规定了布线工作必须无条件遵守的最低要求。

当然，我们应该永远不要违反 NEC 规定，但是也必须明白，该原

则的目标不是为电能质量的实施而制定标准。然而，许多研究机构正在发现，采取额外步骤、部署或者甚至于重新返工进行性能布线工作是极有价值的。就像一个经验人士所说“如果所有建筑特均采用了性能布线，我就得停业了。…但根本无需担心这会发生。”

电力调节

也存在一些场合，采用插座安装的电力调节设备是一个良好的解决方案。它可能作为布线更改的补充，或者作为某些布线更改的经济可行的替代方案。

在插座处进行记录

通过在插座处监测电压事件，您可以精确观察到灵敏负载所经历的不同电压。

将 VR101 插到插座中之后，可以记录下最多 4000 个事件，包括：

- 电压突降和骤升
- 断电
- Transients (L-N and N-G) with peak values 峰值时的瞬变 (L-N 和 N-G)
- Frequency deviation 频率误差

事件可按类型、实时时间戳记以及持续时间加以识别。

VR101S 操作设置

使用 EventView 软件对记录仪进行配置。记录仪带有默认阈值，但用户可以输入新阈值。通过随软件一起提供的一个光学读取棒，将新配置传输到 VR101。

插入

您可以将 VR101 留在现场任意长时间。无需与计算机进行连接。它从线路中获取电能，发生断电时，一个内置电池会将数据保存。

下载

将 VR101 带到计算机处。光学读取棒会从记录仪上提取数据。

分析

记录的时间以电子表格形式在 EventView 软件中显示。还提供了各种图形、表格和波形，以便生成报告。

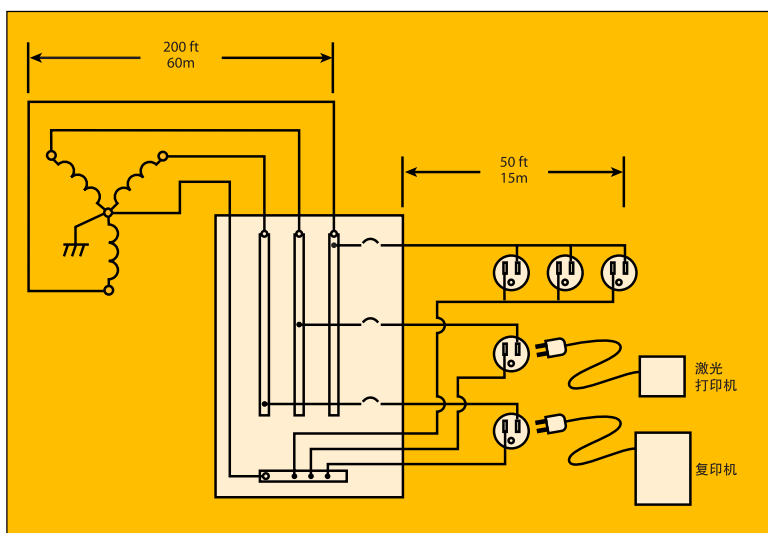


图 1.5 性能布线

表 1.2 对于支回路性能布线的建议

推荐	理由
检查松动连接。	很容易忽视这些明显的连接松动。
彻底清除共用中性线。在新建系统中，为每个支回路设置一根中性线。	最小化负荷相互作用和源阻抗。
将每个支回路中的插座数限制为 3。	最小化负荷和负荷相互作用。
限制 120 V 支回路长度不得超过 50 英尺 (15 米)。	把电源阻抗降到最低。
针对所有激光打印机和复印机安装专用分支电路。专用电路应该布置在自己的导线管内。	使受影响负载与有问题负载保持分离。使用导线管可防止电路之间发生耦合。
安装一个绿线接地端（不要仅依赖于导线管连接）。	保持连续的低阻抗接地。
为所有配电盘、断路器和插座贴上标签。	严格地说，这将会提高电能质量，但它肯定会使检修员和安装人员的工作更加轻松。



第二节：供电配电盘

通过以下方法来检查供电配电盘：

- 目视检查
- 馈线电流测试
- 中性线电流测试（馈线和分支）
- 火线对中性线电压测试（馈线和分支）
- 中性线对地电压测试（馈线）
- 分支相线上的断路器电压降及电流

供电配电盘是一个便于测量单相谐波负载作用的位置。一块真有效值仪表可确保获得非线性电压和电流的精确读数（请参见第 27 页上的为什么采用“真有效值”）。

目视检查

- 寻找分配电盘中的非法中性线对地连接。这种连接违反了 NEC 有关获得高电能质量接线规定。这种做法是极为常见的。如果在一个地点的某个配电盘上发现有非法中性线对地连接，就有可能在多个配电盘上存在这种情况。谁知道那里为什么会这样接线：也许安装人员认为，所有配电盘都可以像住宅供电配电盘那样去接线。

表 2.1 供电配电盘测量。

测量	检查	仪器
1. 馈线相电流	过载和失衡。	43、41B、87（带有 80i-400）、真有效值钳形表
2. 馈线中性线电流	来自失衡基频和 3 次谐波的高电流。	43、41B 用于测量频谱。87 用于发现主导频率。
3. 馈线中性线对地电压	高电压指示出电流过大，接近于零的电压指示出可能存在分配电盘中性线对地连接。	相同
4. 分支电路火线对中性线电压	低电压。	相同
5. 分支电路中性线电流	共用的中性线。	相同
6. 断路器触头间的电压降。高温断路器。	触头磨损。需要更换断路器。	43、87

或者他们认为，降低中性线对地电压的最快速方法是安装一根跨接线，或者接地越多越好。在任何情况下，统统取消所有非法中性线对地连接。

- 查找过热迹象，如发生退色的接头。松动的接头和过大的负载会以热量形式表现出来。在确定原始导线规格时所没有考虑到的高谐波电流可能也会引起过热。红外传感器是用于进行非接触式温度测量的首选方法。
- 特别值得注意的是馈线中性线导体的规格。

人们早已知道，来自三相中单相负载不平衡的基频电流将会在中性线上返回，但一个相对较新的现象则是，由非线性单相负载所产生的三次谐波（三次谐波序列）电流也会在中性线上返回。

1996 年，NEC 第一次做出表述，即“在一个主要负载为非线性负载的三相四线制星形连接线路中，中性线导体中存在着谐波电流，中性线应被看作是一条载流导线。”（第 310 款“0 至 2000 V 电流表的说明”的说明 10.c）。在实施中，这就要求中性线导体的规格至少等于相导体的规格。这种要求建立在可靠研究基础上：1990 年对全国范围 146 个地点的调查发现，其中 22.6 % 的地点，中性线电流超过相电流的 100%！

很多专家建议，中性线规格应该为相线规格的两倍。

- 检查是否有共用的分支电路中性线。检查分支电路的中性线数目：如果它们的数目少于相线数目，则说明存在共用的中性线。
- 检查导线管接头的紧密性，特别是在导线管被专门用作接地导体的情况下（不建议这样）。

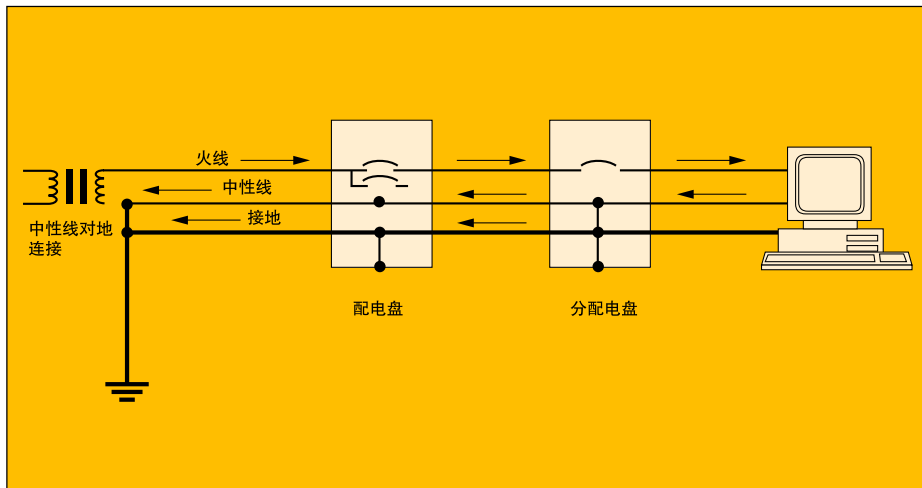


图 2.1 分配电盘中性线对地连接引起负载返回电流在接地导体上流动。这会引起接地系统中的管道发生腐蚀，并产生很高的接地噪声。

测量

1. 馈线相电流

检查每一相以确保没有过载。还要检查是否有过度的不平衡。

2. 馈线中性线电流

测量馈线中性线导体上的累加中性线电流。来自所有相的三次谐波将在中性线上算术相加在一起。

3. 馈线中性线对地电压测试

与在插座上一样，过高的中性线对地电压指示出过载状况。数值为零或接近零的中性线对地电压表明在分配电盘上存在非法中性线对地连接。

4. 火线对中性线电压测试

测量并记录火线对中性线电压。可以将它们与插座的火线对中性线电压进行比较，以测量电压降。

5. 分支电路中性线电流

测量每个分支电路中性线，看是否发生过载。之所有测量中性线而不是相线，是因为中性线可能会汇集来自几条相线的返回电流，但它们却没有通过断路器进行保护。

6. 断路器的电压降

横跨一组断路器触头的电压降会使您快速了解这些触头的磨损情况。理想情况下，该电压降应该为零。实际上，将存在 mV 范围内的一个电压降，准确数值取决于负载电流。通常，该电压降不应超过 20-100 mV，具体值取决于负载的大小。更换破旧的断路器。

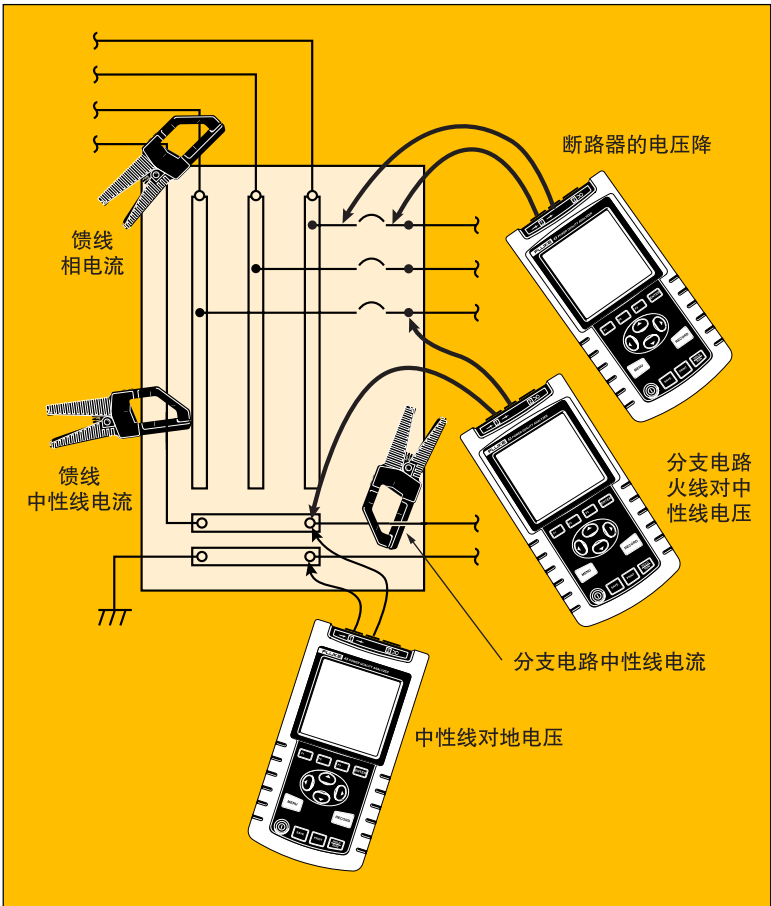


图 2.2 带有夹钳、探头的配电盘，用于显示进行的测量。

解决方案

表 2.2 供电配电盘上的建议测量。

推荐	理由
将 208 V 馈线到 120 V 分配电盘的电缆长度限制在 200 ft. (65m) 以内。	将电源阻抗以及电压突降的可能降到最低。
在可能的情况下，不要将分配电盘级联（菊花链连接）在其它分配电盘上，特别是在上游配电盘具有很高负载或带有冲击电流很高的负载的情况下。	上游负载可能引起电压突降，将会影响到所有下游负载。
安装一条绿色接地导体（不依赖于导线管连接）。	保持连续的低阻抗接地。
如果需要，降低配电盘上的负载。	将热量和电压突降减少到最低程度。
重新分配分支电路负载，以提高三相的平衡程度。	降低（基频电流的）中性线返回电流。
需要时将馈线中性线的规格加大，以容纳三次谐波。这可通过平行布置另外一条中性线来实现。	防止馈线中性线发生过载和过热。将会降低中性线对地电压。
安装 3 次谐波滤波器。	降低中性线电流。
非线性负载配电盘。	厂商针对非线性负载而设计。

第三节：变压器

变压器会因谐波电流而发生过热。应该对为非线性负载供电的变压器定期进行检查，以确认其运行处于可接受的限值范围内。变压器对于接地系统的完整性也十分重要。

测量

1. 变压器负荷 (kVA)

如果变压器具有一个星形连接的次级绕组（对于商业单相负载来说是标准配置），就可以很轻松地测定实际 kVA。（参见图 3.2）

- 将电压探头连接在相线 1 上和中性线上，将夹钳式电流探头夹在相同的相上。对于相线相线 2 和 3 重复上述操作。
- 读取每一相的 kVA 值，并将三相的值相加，作为整个变压器的 kVA。
- 将实际负荷 kVA 与铭牌上的 kVA 进行比较，以计算负荷百分比。

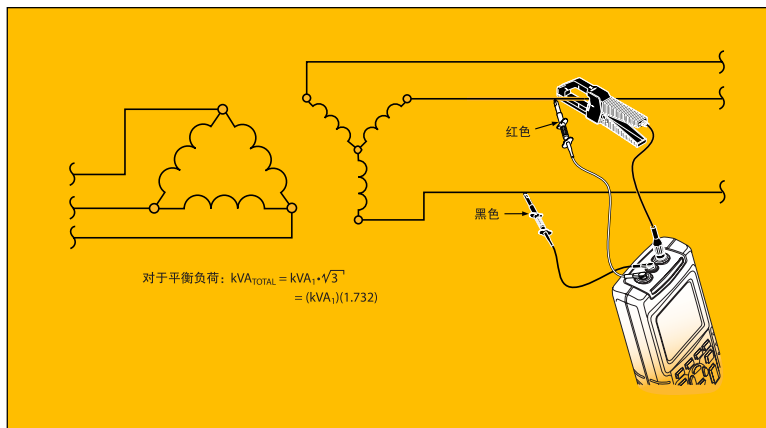


图 3.1 测量变压器负荷（平衡）

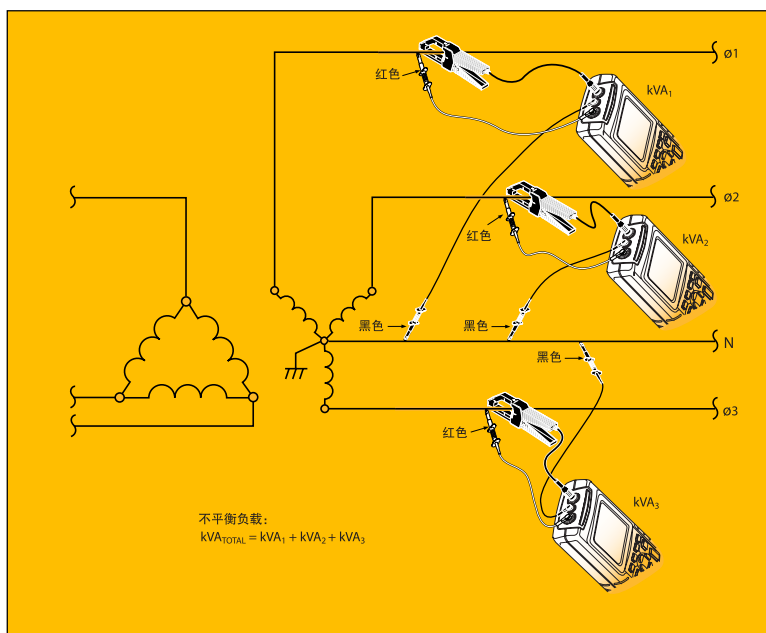


图 3.2 测量变压器负载（不平衡）

如果负载是平衡的，则进行一次测量就足够了。（参见图 3.1）负荷不到 50% 的变压器一般不会发生过热。但是，随着负荷的增加，应该定期进行测量。在某个点处，变压器需要降额（参见第 15 页）。

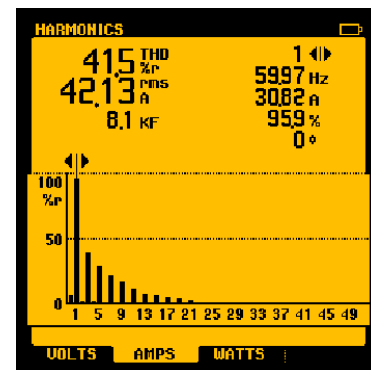


图 3.3. 谐波波形

2. 谐波波形

次级（负载）电流的谐波波形可使我们了解所存在的谐波的级次和幅度：

- 在变压器馈电单相负载中，所关心的主要谐波为 3 次谐波。3 次谐波会在中性线上算术相加，并在星-三角连接变压器的三角连接初级绕组中循环。有利的方面是，星-三角连接趋向于使系统的其余部分与 3 次谐波隔离（不过，不会与 5 次、7 次或其它非三次谐波序列谐波隔离）。不利的方面是，变压器会产生附加热量。
- 在包含驱动器或带有 6 脉冲转换器的 UPS 系统的变压器馈电三相负载中，5 次和 7 次谐波将占主导地位。过量的 5 次谐波特别值得注意，因为它是一个负序谐波。它趋向于在多相电机中产生反向转矩和过热。

表 3.1 配电电变压器测量

测量	检查	仪器
1. kVA	变压器负载。如果负载超过 50%，则检查谐波，可能需要进行降额。	43、41B
2. 谐波波形	● 谐波级数 / 当前幅值： ● 3 次谐波（单相负荷） ● 5 次、7 次（主要的三相负荷） ● 高次谐波共振 ● 谐波陷波滤波器有效性	相同
3. 总谐波畸变率 (THD)	限值以内的谐波负载： 电压 %THD <5% 电流 %THD <5-20%（表 3.2）	相同
4. K 因数	谐波负载对变压器的热效应	相同
5. 地电流	● *NEC 没有指定令人讨厌的地电流数值大小，但是禁止它出现。 ● 中性线 - 地在合适地点进行连接 ● ESG (电气安全地) 接头合适地连接到接地电极 (典型为建筑钢)	相同 真有效值电流钳

- 谐波幅度一般随频率的上升而降低。如果某个频率的幅值明显地高于其它低频率的幅值，则可以怀疑在该频率存在共振情况。如果检测到这种情况，必须检查电容器组，看看这些电容是否存在过流 / 过压情况。
- 对谐波频率的周边频率进行测量对判断谐波抑制技术（例如设定在某个特定频率的陷波滤波器）是否合适以及是否按期望方式进行工作极为有价值。
- 不同的谐波频率会对设备的影响各不相同（见下面）。

名称	F	2 次	3 次	4 次	5 次	6 次	7 次	8 次	9 次
频率	60	120	180	240	300	360	420	480	540
顺序	+	—	0	+	—	0	+	—	0

规则：如果波形对称，偶次谐波会消失。

谐波的影响

顺序	旋转	影响作用（来自肌肤效应、涡流等）
正	前向	导体、断路器等发热
负	反向	导体、断路器等发热以及电机故障
零	无	上述发热 叠加至三相、四相系统中中性线中

谐波分类如下：

1. 次数或编号：基波的倍数，例如，3 次谐波的频率是基波的 3 倍，或者 180 Hz。
2. 奇次或偶次：奇次谐波在非线性负载的正常运行过程中产生。偶次谐波只在系统中存在直流时出现。在电源电路中，只有在转换电流中二极管或 SCR 等固态元件发生故障时，才会出现偶次谐波。
3. 顺序：
 - 正序：主要效应是过热。
 - 负序：在电机中产生反向扭矩，即导致电机反向转动趋势，从而使电机过热。主要是 5 次谐波。
 - 零序：会叠加至三相、四相系统中性线中。主要是 3 次谐波。

3. 总谐波畸变率

检查电压和电流的总谐波畸变率 (THD)：

- 对于电压，总谐波畸变率不应超过 5%
- 对于电流，总谐波畸变率不应超过 5-20%（表 3.2）

IEEE 519 为公共设施和用户间公共耦合点 (PCC) 的谐波设置了极限值。(EN50160 为欧洲标准)。IEEE 519 则是以在公共耦合点的总谐波畸变率测量为基础。从技术上说，公共耦合点是公共设施供电变压器的初级 (尽管，如果次级挂接了一定数量的用户时，也在公共耦合点位于次级的例子)。实际上，通常对用户主变压器的次级采取这些措施，这是因为在该点可以最方便地处理所有的组成部分 (而且，还因为通常是采用低压测量)。

一些电能质量人士扩展了公共耦合点的概念，将 (例如在馈送系统上的) 设备内点也包括进来。在这些点，一组负荷产生的谐波电流通过明显地导致电压畸变而可能影响另一组负荷。关键在于应该改善工厂内电能质量，而不是简单地不影响公共设施电能质量。

3a. 电压总谐波畸变率

在工业界，总谐波畸变率可谓历史悠久。其基本思想即，负荷产生的谐波流经系统阻抗时会导致电压畸变 ($E=IZ$)。该电压畸变接下来成为系统级的谐波载波：例如，如果畸变电压作为如电机等设备的供电电压时，它会在该线性负荷内形成谐波电流。设置电压畸变最大极限值，则可以限制谐波对整个系统的影响。

表 3.2 IEEE 519 规定的公共耦合点谐波电流极限值。
(图中所有比值均为百分比，最大需量负荷电流)

SCR= I_{sc}/I_L	奇次谐波					TDD
	<11	11-17	17-23	23-35	>35	
<20	4.0%	2.0%	1.5%	0.6%	0.3%	5.0%
20-50	7.0%	3.5%	2.5%	1.0%	0.5%	8.0%
50-100	10.0%	4.5%	4.0%	1.5%	0.7%	12.0%
100-1000	12.0%	5.5%	5.0%	2.0%	1.0%	15.0%
>1000	15.0%	7.0%	6.0%	2.5%	1.4%	20.0%

SCR= 短路比 (I_{sc}/I_L)

I_{sc} = 可用公共耦合点短路电流

I_L = 最大需量负荷电流 (rms amps)

TDD= 总需量畸变率

注: IEEE 允许每天最多一小时可超过这些极限值, IEC 允许它们在上述时间内可超出 5%。

I_L 指最大需量负荷电流, 是使用表 3.2 的关键。对于现有设备, 其 I_L 可通过求连续 12 个月最大需量负荷电流的平均值求得(可从记录单上获得这些信息)。对于新设备, 必须评估其 I_L 。可采用变压器额定值, 但应该为最保持的估计 (即, 它应该能产生最低短路比), 这是由于假设变压器应该工作于全容量状态。

但是, 电压畸变取决于电源阻抗, 也就是说, 它取决于系统容量。第一个客户将比较大的谐波电流注入到系统中而不会使电压总谐波畸变率超过 5% 是非常有可能的。减轻谐波的整体责任可能会落在不幸使电压总谐波畸变率超过 5% 的最后客户身上, 即使他们的特定谐波负载很小。

3b. 电流总谐波畸变率

在这些情况下, 为了保留一些公正性, 添加了最大电流谐波标准, 这是因为电流谐波受当地设施和设备制造商的控制 (记住, 谐波“负荷”就如同谐波“发电机”)。这种在负荷上抑制电流谐波的重要性, 包括负荷实际上不得产生谐波等并不苛刻的要求, 已经成为主导的指导思想。它将责任分摊到本地和设备制造商身上。

对于设备厂商来说, 1995 年颁布的 IEC 1000-3-2 是适用的标准。它规定了一直到 40 次谐波的最大电流。该标准的预期生效日期为 2001 年年初。为了按照欧洲市场上的 CE 要求进行认证, 厂商们必须满足这个标准的要求。该标准对于供电系统设计具有很大影响。对于设施来说, IEEE 519 是适用标准 (欧洲的 EN 50160)。IEEE 519 中针对谐波电流所设立的限值取决于客户方面系统容量的大小。(参见表 3.2)

SCR (短路比) 是度量电气用户规模相对于公用设施源的标准。用户数越少 (短路比越高), 对公用设施源的潜在冲击越少, 并且, 谐波极限值余量越大。用户数越多 (短路比越小), 谐波电流极限值越严峻。

3c. TDD 和 THD

TDD (总需量畸变系数) 是电流谐波与最大负荷 (I_L) 的比值。THD 与它不同的是, THD 是谐波与瞬时负荷的比值。为什么用 TDD 而不用 THD? 假设你正在运行轻量负荷 (正在使用一小部分的系统容量), 但, 这些负荷是非线性的, 则 THD 应该相对较高, 但实际上, 所产生的谐波电流可能较低, 对供电系统的影响实质上应该忽略不计。那么, 谁会注意到该现象呢? TDD 知道这一点, 并且允许谐波负荷参考引用最大负荷: 若负荷最大时, 谐波负荷很高, 则我们必须注意对供电电源的影响作用。那么, 电流 THD 在哪里才能用作一个有用的量度呢? 测量电流 THD 时, 越接近最大负荷, 则其读数越接近 TDD。

变压器地检测	说明
检查 N-G 连接。	高阻抗 N-G 连接将导致电压波动。
检查接地导体, 以及建筑钢连接 (放热熔接) 的完整性。	故障电流会通过这些连接返回到电源, 因此, 阻抗应该尽可能低。
检查所有导线管接线盒的牢固性。	若导线管自身没有接地处理, 其作用就相当于高频扼流圈, 有可能限制故障电流 (记住: 故障电流不只是 60 赫兹, 还含有高频成分)。
测量接地导体上的地电流。	理想情况下, 应该为零, 由于保护元件 (自相线或中性线连接至地) 的正常工作或漏电现象, 总会存在一些地电流。然而, 上述所有情况下, 电流应该是怀疑的因素 (没有什么非常确定的规则, 但, 有经验的电能质量检修人员能凭感觉发现可能的故障)。

关于 THD 测量的最后一句话：单个产生谐波的负荷不适用该规范。这将总会存在最坏情况的畸变和使人误解的测量数据。这是因为，当谐波向上游蔓延时，会发生某种程度的减弱（由于相关关系，并非偶然地，不可预测）。在公共耦合点，或者在源变压器处进行测量。

4. K 因数

K- 因数是一个通用的谐波发热效应特殊量度，尤其适用于变压器上的谐波。它与总谐波畸变率的计算不同，原因在于，它除了强调谐波级次的幅度之外，还强调其频率。这是因为，热效应会随频率的平方而增加。

一个 K-4 读数意味着，杂散损耗热效应是标准热效应的 4 倍。一台标准变压器实际上就是一台 K-1 变压器。与总谐波畸变率一样，在负载或插座处测量到的 K 因数具有误导性，因为存在一定长度的上游抵消；变压器处侧得的 K 因数才会反映实际情况。一旦确定了 K 因数，就应该选择下一个较高行业规格。通过 K 因数分级的变压器具有 K-4、

K-13、K-20、K-30 等行业规格。其中，K-13 是为办公设备负载供电的变压器的常见等级。配电装置 (PDU) 一般具有较高的 K 等级，它们经过特殊设计，可为计算机和其它对电能质量敏感的设备供电。。

5. 地电流

地电流过大时，非法 N-G 连接（位于分配电盘、插座，甚至于设备内）和所谓的隔离接地棒是两个主要怀疑对象：

- 分配电盘 N-G 连接会产生一条使正常返回电流通过接地导体返回的通路。如果中性线发生断线，则设备的安全接地端就变为唯一的返回通路；如果此返回通路具有高阻抗，就会形成危险电压。（第 8 页上的图 2.1）
- 单独隔离的接地棒几乎总会产生两个处于不同电位的接地参考，它们反过来又引起“接地回路”电流循环流动，以使这些电位平衡。也会对安全与设备构成危害：雷击时，冲击电流抵达不同地电位地，会产生危险的电位差。（请参见第 31 页）

变压器接地

变压器的正确接地十分重要。（表 3.3）电气规范 NEC 的第 250 款概括介绍了另起的电源系统 (SDS) 的接地要求，第 250-26 款对此进行了专门介绍。

- 通过一个接地连接来建立一个接地参考，通常连接到建筑物的钢制结构（要求此结构与冷水管或任何接地电极相连）。钢制结构的连结应该使用铝热焊，而不是使用会随时间推移而松动的夹子。“接地极导体”本身应具有尽可能低的高频阻抗（而不是最低，因为故障电流具有高频成分）。宽的扁导体要优于圆形导体，因为它们较高频率下的感抗较低。出于相同原因，“系统的接地极导体连接点”（即变压器上的连接点）与接地电极（建筑物钢制结构）之间的距离应尽可能短：按照电气规范中的描述，应该尽可能靠近，最好在相同区域内“...”
- 中性线和地应该在变压器中性线母线上一个点上连接。虽然允许，但不建议在主配电盘上进行中性线对地连接，为的是保持正常返回电流与接地电流的分离。变压器上的这个点是应该在系统中进行中性线对地连接的唯一一点。

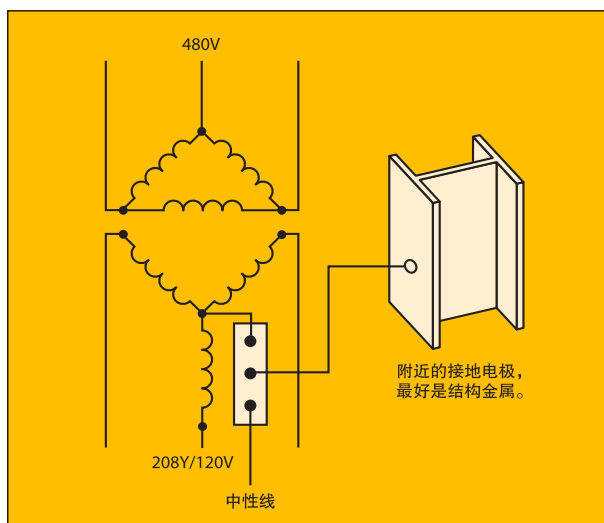


图 3.4 变压器接地

解决方案

与变压器相关的电能质量问题，有大量解决方案：

- 安装附加配电变压器（另起电源系统）。
- 减少变压器额定值
- 安装 K 因数变压器
- 采用强制空气冷却措施

1. 另起的电源系统 (SDS)

配电变压器是另起电源系统 (SDS)-NEC（第 100 款）定义的一个术语补充设备。主要构想是采用该变压器次级为其所有下游负荷提供新的电源。这对于提高改善电能质量配电系统，是一个非常美妙的构想。SDS 实现了许多目标，全部对电能质量均有利：

- 它建立了新电压基准。变压器具有能逐级调高或调低次级电压的抽头，能补偿馈送器的任何电压跌落。
- 它可通过缩短（有时十分显著）负载与电源之间的距离而降低电源阻抗。电压扰动（尤其是电压突降）的可能性被降到最低。
- 通过它可实现隔离。由于初级和次级之间没有电气连接而只有磁耦合，SDS 可将它的负载与电气系统的其余部分隔离开来。为了将这种隔离扩展到防止高频干扰，特殊构造的隔离变压器在初级和次级之间提供了一个屏蔽，以将 RF（射频）噪声分流到接地端。否则，初级和次级制的电容耦合会趋向于使这些高频信号直接通过。



- 建立了一个新的地基准。SDS 的部分定义如下：“它没有向来自其它系统的导体提供直接电气连接（包括固定连接的接地回路导体）。”(NEC 100) 可以将由 SDS 供电的子系统与接地回路进行隔离并将 SDS 上游的噪声接地，反之亦然。

2. K 因数变压器

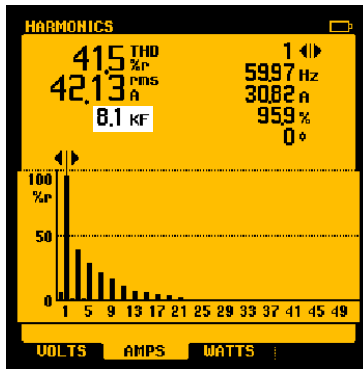


图 3.5 典型的商用 K 因数建筑。

与等值基波电流相比，谐波电流可能导致更为严重的变压器发热现象。这是由于谐波的频率较高。变压器中存在三个随着频率上升而增加的发热效应：

- 磁滞。铁磁化后，磁极子都变为有序，北极都指向一个方向，南极会指向另外一个方向。这些磁极会随着电流的极性而进行切换。频率越高，切换就越频繁，与摩擦的效果相类似，热量损失就会变得越大。
- 涡流。交变磁场形成局部性涡流，导致热损。该效应与频率的平方成正比。例如，一个 3 次谐波电流的热效应是等值基波电流热效应的 9 倍。
- 肌肤效应。随着频率的增加，电子会迁移到导体的外表面 大量电子聚集在狭小的空间，故导体的有效电阻将增加。频率更高时，则该导体就好像一根小直径、低容量、高阻抗的导线。

针对谐波对变压器产生的影响，行业内采取了两种一般性解决方法：安装一个 K 因数分级的变压器，或将标准变压器降额。首先让我们来看看 K 因数方法的优缺点。

K 因数是根采用谐波电流有效值、%HD (谐波畸变), 和谐波次数平方值进行计算而得到的结果值。实际上, 没有必要进行计算, 谐波分析器会为你处理。必须注意的是, 等式中谐波次数经过了平方, 这也正是高频热效应, 如涡流损耗, 需要考虑之处。

K 因数变压器的设计致力于最小化、并控制谐波热效应。K 因数变压器不能彻底消除谐波 (除非另加例如过滤器等的附加元件)。而是采用大量小型、并联线圈绕组代替单个大型线圈绕组, 以抑制谐波; 这为电子流动提供了更大的表面积。初级的三角形连接绕组规格被加大, 以承受循环的三次谐波电流而不致发生过热。次级上的中性线也被加大规格以承受三次谐波 (规定通常定在相线电流的两倍)。

K 因数变压器中存在的应用问题

K 因数变压器已得到广泛采用, 但它们仍存在着一定问题。许多顾问人员没有注意到对等级高于 K-13 的变压器的需求, 虽然 K-20 及更高等级的变压器可以作为集成配电装置 (PDU) 的一部分而提供。另外, 早期的应用有时还忽视了这样一个事实, 即 K 因数变压器必然具有一个较低的内部阻抗。标准变压器的阻抗通常在 5-6% 范围内, 而 K 因数变压器的内部阻抗可低至 2-3% (随着 K 因数的增加而降低)。在通过具有相同 kVA 的 K 因数变压器来更换标准变压器而进行改造时, 可能需要进行新的短路计算, 并重新计算次级过电流保护装置的规格。

3. 标准变压器降额处理

当变压器主要为单相、非线性负荷供电时, 一些设备管理员凭经验, 将变压器额定下调 50%。这意味着, 一台 150 kVA 的变压器只能为 75 kVA 的负荷供电。IEEE 1100-1992 (Emerald Book) 降额曲线表明, 变压器负荷率为 60% 时, 若包括有开关电源 (SMPS), 在商用办公楼中当然有可能, 则实际上变压器应该降额 50%。

变压器仅用于单相负荷时, 可用降额计算方法如下。它基于一个非常有理由的假设, 即单相回路中, 三次谐波占主导地位, 且能导致峰值可预见的畸变电流波形。

使用一块真有效值仪表来进行以下测量:

1. 测量每条次级相线的有效值和峰值电流。(峰值是指瞬时峰值, 而不是指冲击电流峰值或“峰值负载”有效值电流)。
2. 计算这三个有效值读数和三个峰值电流的平均值, 并在第三步中采用该平均值 (若负荷本来就是平衡的, 则无需该步)。
3. 计算 Xformer 谐波降额系数:

$$xHDF = (1.414 * IRMS) / I_{PEAK}$$

4. 或者, 由于峰值与有效值之比被定义为波峰因子, 此公式也可重新写为: $xHDF = 1.414 / CF$

如果您的测试仪器具有这种功能, 则直接测量每相的峰值因子。如果负载是不平衡的, 则计算三相的平均值, 然后在上式中使用该平均值。

由于正弦电流波形的 $CF=1.414$, 将会有 $xHDF=1$, 无需进行降额。3 次谐波越多, 峰值越高, 峰值因子就越大。如果 CF 峰值因子为 2.0, 则 $xHDF=1.414 / 2 = 0.71$ 。CF=3 时 $xHDF = 0.47$ 。CF=3 的电流波形发生恶劣的畸变, 在单相配电变压器中并非罕见。

(注意: 该方法并不适用于三相负荷变压器, 因为, 那种情况下, 非三次谐波将占主导地位, 则 CF 作为一个简单的畸变程度预测因数, 将不再有价值。ANSI/IEEE C57.11 中讨论了三相负载的计算。但是, 对于这种计算存在这一些争议, 因为它低估了谐波可能会引起的共振, 而这种机械共振又会在热效应之外加速变压器的磨损。)

4. 强制空气冷却

如果热量是一个主要问题, 那么解决方法就是冷却。准备好风机, 接通变压器并使用强制空气冷却。一些有经验的人员估算, 这相当于提高 20-30% 的价值成本。不管怎样, 这将是有益的。

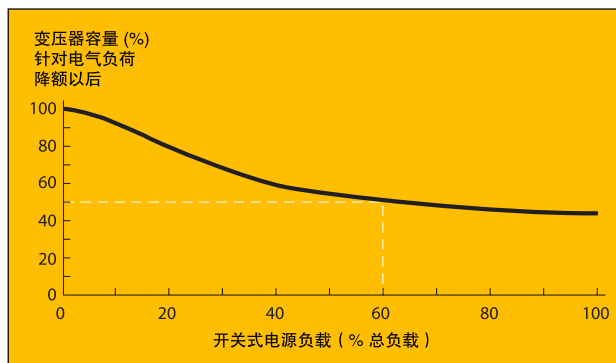


图 3-6 变压器降额曲线 (IEEE 1100-1992)

第四节：电气噪声和瞬变

电气噪声在不同程度上是由于随机电信号耦合到不需要这种信号的电路中所致,也就是说,它们会干扰携带信息的信号。噪声会发生在电源和信号电路上,但一般来说,它会在进入信号电路时成为问题。信号和数据电路特别易于受噪声的影响,因为这些电路在极快的速度和很低的电压电平下工作。信号电压越低,可承受的噪声电压的幅度就越低。信噪比描述了在有效信息(即信号)被破坏之前电路能够承受的噪声大小。

对于电能质量来说噪声是一个尤为神秘的问题,特别是因为它总必须与其同样神秘的孪生兄弟-接地一起考虑。为了揭开这个秘密,必须搞清两个关键概念:

- 第一,电气效应无需直接连接(例如,通过铜导体),也能产生。对于接受过布线排线、安装和测试培训的电工来说,也可能不能仅凭直觉就知道这一点。但想一想雷电的作用、隔离变压器的初级和次级或收音机的天线:它们都没有直接的硬接线连接,但仍存在着完整的电路。噪声耦合过程也存在同样的电气行为规律,就像下面将要解释的一样。
- 第二个概念是,我们不再能停留在 60 Hz 世界里。60 Hz 的优点之一是,它是一个甚至连电源电路(如直流电路)都可处理的足够低的频率。这时,基本欧姆定律处处适用。但在存在噪声时,我们需要记住,信号电路的工作频率很高,噪声通常是一个很宽的频谱,需要考虑潜在噪声源的频率相关行为。

耦合机制

共有四种基本噪声耦合机制。由于许多检修人员必须确定特定情况下起主导作用的耦合效应,因此,了解这些耦合机制及其相互间的区别,有益无害。

1. 电容耦合

通常也称之为静电噪声,是一种电压效应。雷击放电就是一个极好的例子。由一种绝缘材料(包括空气)隔开的两个导体构成一个电容器,换言之,电容是任何电路不可分割的一部分。频率越高,发生电容耦合的可能性越大(容抗,可以看作电容耦合过程的阻抗,从下式中可以看出,它随频率升高而降低: $X_C = 1 / 2\pi fC$)。

2. 电感耦合

它是磁耦合噪声,是一种电流效应。每个流过电流的导体都具有一个相关磁场。变化的电流可在另外一个电路中感应出电流,即使该电路是一个单一回路。换言之,源电路相当于一个变压器的初级,而受影响的电路相当于变压器的次级。感应耦合效应随下列因素而增强:(1) 流过的电流更大;(2) 电流变化速度更快;(3) 两个导体(初级和次级)的更加接近;(4) 相邻的导体更像是一个线圈(圆形而不是扁形,盘绕而不是直向)。

下面是电感耦合引起电源电路中产生噪声的一些例子:

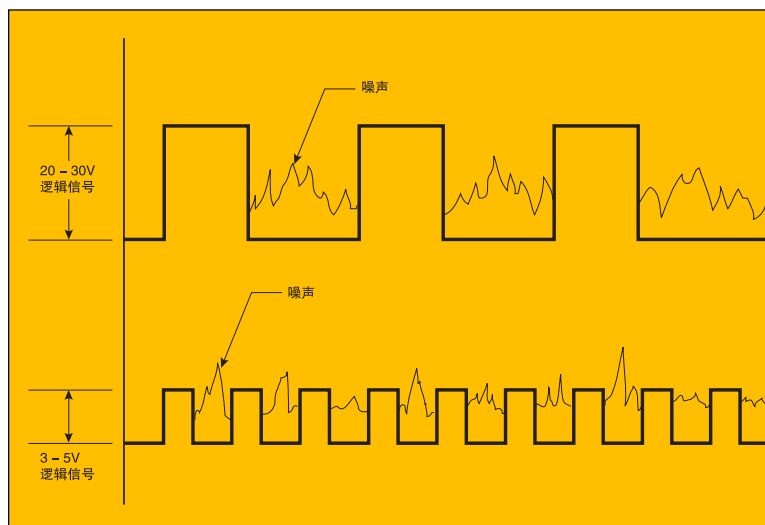


图 4.1 工作电压越低、信号变化越快,对噪声越灵敏

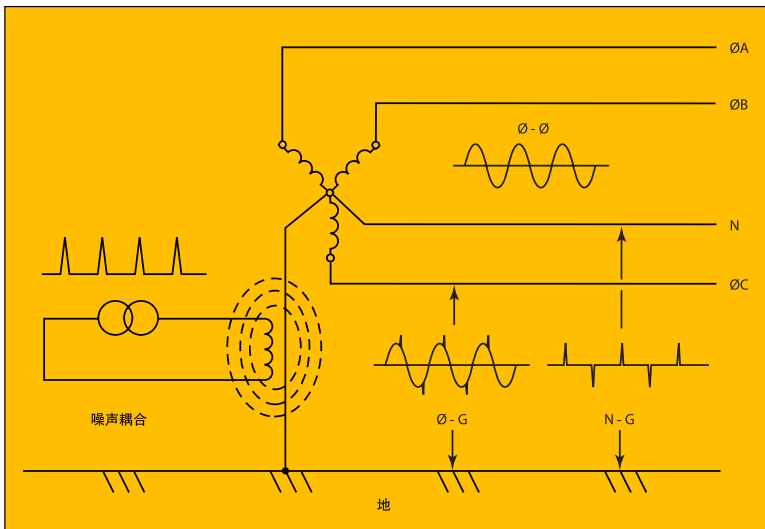


图 4.2 噪声耦合。测量为 ϕ -G 或 N-G 噪声的接地噪声

- 瞬态浪涌，尤其发生在大功率电路中时，会导致电流发生极快变化，并可能耦合至邻近导体内。雷击浪涌最严重，但常见的开关瞬变或电弧现象也可产生相同后果。
- 如果馈电器电缆安置在存在净磁场的位置，则在同一电缆槽内的接地电缆中就可能形成感应电流。
- 众所周知，信号电线和电力导体不得在同一个电缆槽内彼此并行布线，因为这会使它们之间的电感耦合达到最强；而应该单独布线，并且必要时彼此垂直交叉布线。输入和输出电缆也应以相同方式相互隔离。

采用有效屏蔽措施，隔离电磁场。所用的材料必须能够传导磁场（如铁性材料，而不是像铜这样的材料）。一个专用电路（火线、中性线、地线）应该尽可能布置在自己的金属导线管中的原因是，实际形成的磁屏蔽可将电感耦合效应降到最低程度。

电感耦合和电容耦合都称为近场效应，因为它们主要发生在近距离内，距离增加，耦合效应随之减弱。这能解释一个神秘的噪声现象，即为什么仅稍许改变并重新布线，就对耦合噪声有如此大的影响。

3. 传导性噪声

尽管所有耦合噪声最后都归结为传导性噪声，但这个术语一般是指通过直接的（金属）电路连接而耦合的噪声。具有共用导体（如共用的中性线或接地线）的电路均属此类。传导性噪声频率可能很高，但也可能是 60 Hz。

下面是一些将不需要的噪声电流注入到接地回路中的常见连接示例：

- 带有额外中性线对地连接的分配电盘

- 插座的 N 线和 G 线接反
- 具有固体保护装置、线路或中性线短路接地的设备，或者无故障但通常存在漏电流的设备。对于插入式连接设备，该泄漏电流被 UL 限制为 3.5 mA，但对于具有更高潜在泄漏电流的永久性接线设备，则没有这种限值。（泄漏电流易于识别，因为它们将在设备断电时消失）。
- 另外一个常见例子是所谓的隔离接地棒。当它处在与电源接地电极不同的接地电位时，就会产生一个接地回路电流。这仍然是一个传导噪声，即使连接是通过接地进行的。
- 可提供从一个端子到另外一个端子的金属通路的数据通信连接也可传导噪声。在单端、不平衡连接情况下 (RS-232)，在电缆的每一端都连接接地端子。如果每一端的设备都通过不同的接地端参考到不同的电源，这样就提供了一条接地电流通路。

4. RFI（射频干扰）

RFI 的频率范围从 10 kHz 一直到几十 MHz（或更高）。在这些频率下，电路就开始充当起类似于发射和接收天线的角色。施主电路充当发射机，受主电路充当接收天线。与其它耦合机制一样，RFI 也是一种噪声耦合形式，但它可以得到控制（但需要花费一些思考和努力）。

可以使用以下方法来降低射频干扰噪声：

- 光缆，当然能杜绝电气噪声。
- 使用屏蔽电缆（如同轴电缆）以中断噪声和信号之间的耦合。
- 平衡电路（如双绞线）不会中断耦合，但可利用其可将射频干扰耦合进两条导线中（信号和返回）这个优点。该噪声（称为共模噪声）随后被消除，而信号被保留。实际上，平衡电路可为耦合噪声产生一个高阻抗。
- 另外一个针对噪声产生高阻抗方法的例子是使用射频扼流圈。不管使用的是数据电缆还是电力电缆，射频扼流圈都可以提供有效的高频阻抗（ X_L 随频率升高而增加）。

- 低阻通道可用来分流噪声。滤波和去耦电容器的应用即基于该原理（对高频呈现低阻抗，但在电网频率呈开路）。时常被忽略的一个关键方面是，接地通路和接地板必须能处理高频电流。为此，可采用高频接地技术。SRG（信号基准网）最初为高架地板计算机室的安装而设计，是一个有效的解决方案。实质上，它就是一个高频等电势接地平面。（有关高频接地的详细信息，请参见后附参考文献。）

信号接地

为了理解“清洁”信号接地的重要性，让我们讨论一下差模（DM）与共模（CM）信号之间的差别。想象

一个基本的双线电路：供电和返回。任何循环的电流或任何在两条导线之间的负载上读取的电压都称为差模（也使用正模、横模和信号模式这些术语）。差模信号是典型的期望信号（就像插座上的 120 伏电压）。想象存在着通常作为接地导线的第三条导体。现在，任何电流流经原来的两根导体，并从原来的两根导体所共用的第三根导体返回。共模电流即真正的信号必须要克服的噪声。共模信号就是线路上的所有的额外传输量。任何一种耦合机制，如电网频率电磁场耦合或者高频射频干扰，都可能引入这种信号。关键是控制或最小化这些接地电流或共模电流，使情况对差模电流更为有利。

测量

借助零序技术（zero-sequence technique），可以采用电流钳测量共模电流。采用电流钳圈住信号导线对（或者，在三相电路中，圈住全部三相导线和中性线。如果有的话）若信号电流和回流电流相等，则它们的电磁场大小相等、方向相反，能互相抵消。任何读取的电流一定是共模电流，换言之，任何读取的电流都不是从信号线返回、而是通过接地通路返回的电流。这种技术适用于信号线和电源线。对于基频电流来说，使用一个钳形表或数字式万用表与电流钳的组合就足够了。但对于更高的频率，则应该使用像 Fluke 43 电能质量分析仪或 ScopeMeter 这样具有高带宽的仪表和一个电流钳附件。

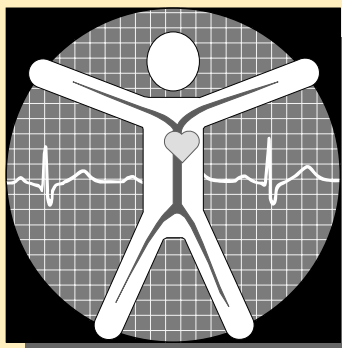
事关生死

有时候，电能质量排查是生死攸关的问题。

Dave 是一家医院的一名现场工程师。一天，一个急救室护士非常焦急地给他打了一个电话。护士说，他们的一个病人已经死亡了。但这并不是另人不安的主要原因。实际上不寻常的事情是，这个尸体的心跳还在跳动。

Dave 立即赶到现场。经过快速观察之后他便知道，这个人不会起死回生了。问题另有原因。护士们说明了她们所看到的情况：心电图上指示出有心跳。但是，这个信号有着一些不寻常的现象（似乎这并不是来自一具尸体的信号）。他注意到，该信号是一个 60 赫兹正弦波形（顶部稍平）。

仔细检查，他发现信号电线与电力电缆处于平行状态。信号导线和电力导线之间的耦合效应导致了心电图机上的 60 赫兹“心跳”这个故事的意义，即在耦合效应成为一个事关生死的问题之前，人们应该始终隔离信号导线和电力导线。



瞬变

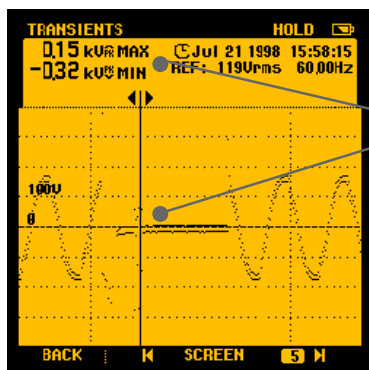
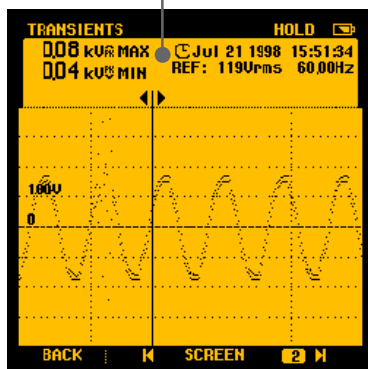


图 4.3 Fluke 43 可捕获和保存最多 40 个瞬变事件。

移动光标，可显示 Min/Max 值
实时时间标记。日：时：分：秒



应该将瞬变和浪涌区分开来。浪涌是因雷击导致的一种特殊的高能量瞬变。(参见第 5 节“避雷系统的电能质量故障排查”)。电压瞬变是较低的能量事件，通常由设备分断所引起。

它们的害处有多种：

- 它们会使固态元件性能下降。有时，一次高能量瞬变将会穿透一个固态连接，有时，重复性的低能量瞬变也会导致同样结果。例如，大于二极管反向峰值电压的瞬变是二极管损坏的常见原因。
- 它们的高频分量(快速上升时间)可使它们电容耦合到相邻导体中。如果这些导体携带有数字逻辑信号，则该逻辑信号会丢失。如果不采用特殊屏蔽措施，瞬变也能压垮变压器线圈耦合。幸运的是，上

述高频分量导致瞬变具有相对局部性，因为它们随阻抗而减弱(频率越高，感抗越大)。

- 电力设施电容器开关瞬变是可能影响配电系统各级负载的常见高能量瞬变的一个例子(决不属于雷电一类)。它们是可变速驱动器恼人脱扣的人所共知的原因：它们具有足够能量，能在直流线路中产生足够大的瞬变电流，从而导致过压脱扣现象。

瞬变可按波形进行分类。第一类为“冲击式”瞬变，通常称为“尖峰冲击式”，因为会在波形上产生一个突出的高频尖峰。另一方面，电容开关瞬变是一种“振荡式”瞬变，因为会产生一个振荡的波形，并使正常波形畸变。它的频率较低，但能量较高。

原因

瞬变不可避免。它们因快速切换相对较高的电流而产生。例如，感性负载，如电机，被切断时，就会产生一个反向尖峰脉冲。实际上，当从高频电路中拆除Wiggy(一种电磁电压测试器)时，能产生几千伏的尖峰脉冲电压！。另一方面，当电容器接通时，产生一个瞬态短路电流。供电电压会发生突然性跌落，在这之后，又开始回升，从而产生振荡波形。并非所有瞬变都相同，但总体上说，负载切换时，会导致瞬变。

在办公室，激光复印/打印机是公认的影响办公室支回路的“坏孩子”。无论何时，只要它处于使用状态，就必须启动其内部加热器，并且，处于未工作状态时，每 30 秒或与此相当的时间启动一次。这种不断的开关切换，会导致两个后果：该电流冲击或浪涌会导致重复性电压峰值；电流快速改变也会产生瞬变，从而影响同一支路其它负载。

测量和记录

数字存储示波器(DSO)可以捕捉瞬变现象。Fluke 43 PQ 分析器具有数字存储示波器功能，能捕捉、存储，并进而显示最多 40 个瞬变波形。事件都带有时间和日期戳记(实时戳记)。VR101S 电压事件记录器还能捕捉插座上发生的瞬变。能记录峰值电压和实时日截。

瞬变电压冲击抑制器 (TVSS)

幸运的是，瞬变防护并不昂贵。实际上，所有电气设备都（或应该）内置某种级别的保护。一种常用的保护元件即 MOV（金属氧化物变阻器），它能抑制过电压。

TVSS 可用作附加的瞬变防护。

TVSS 是一种低电压（600V）设备，它们按照 UL 1449 进行测试和认证。UL 1449 按等级、类别和模式对 TVSS 设备进行划分。例如，TVSS 的最高级别为“等级 A”（6000V、3000A）、“类别 1”（最大允通电压为 330V）和“模式 1”（L-N 抑制）。应该根据负载的防护需要，正确地选用级别：

- 较低的等级可能就是一个持续使用一年而不是十年的 TVSS。
- TVSS 中的固体元件本身的性能会随着不断承受瞬变而下降。
- 较低的类别可能会产生过高的允通电压，可能使负载受到破坏。类别 1 被建议用于开关式电源装置。
- “一个模式 2”设备会将瞬变传递至地，可能会使电子电路的工作发生中断。”

电压灵敏性曲线

新的 ITIC（信息技术工业委员会）曲线基于广泛的研究，它是对 CBEMA 曲线的更新。CBEMA（计算机和商业设备制造商协会，现在的 ITIC）曲线，是适用于计算机和其它灵敏设备厂商的初始电压灵敏性曲线。用于 230V/50Hz 设备和调速驱动器的相似曲线正在开发之中。灵敏设备应该能够不受曲线内事件的影响。

曲线外面的事件可能需要附加的电源电源调节设备或其它补救措施。ITIC 中的一个大的变化是，断电的跨越时间以及对电压突降的承受度都得到提高。现场故障排查人员切记，这些曲线只是建议，特定设备可能与曲线相符，也可能不符。即使这样，这些曲线仍然有用处，因为在将记录的时间对照这些曲线绘图时，它们可提供某个特定位置处电压质量的大致情况。

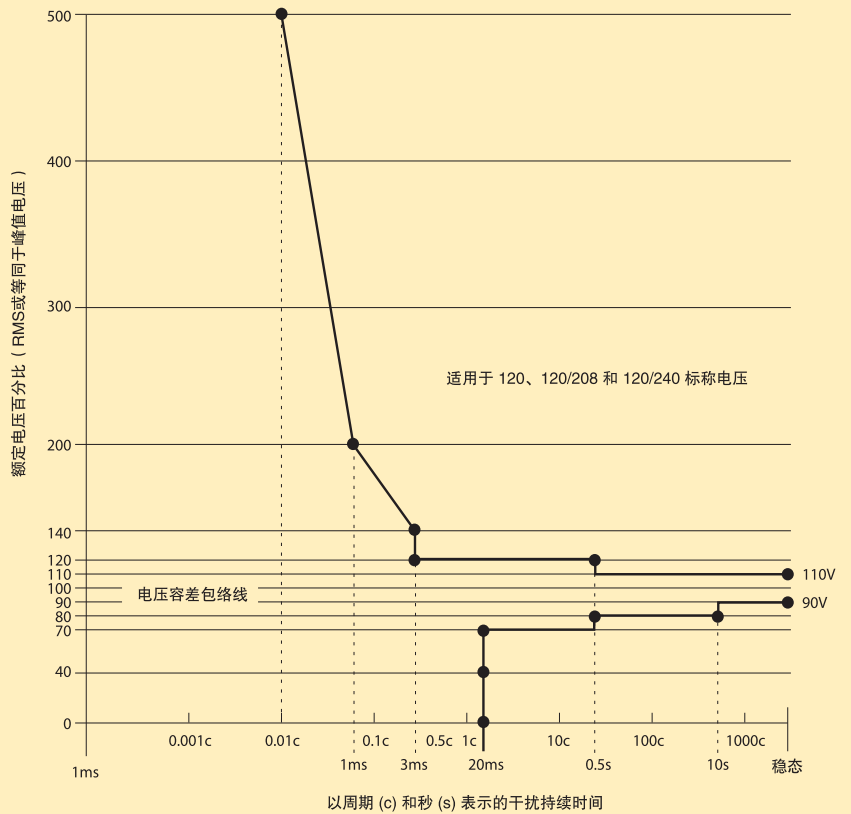


图 4.4 ITIC 曲线

第五节：雷击防护

避雷装置在电力系统的总电能质量上起着重要作用。雷电的发生率随地理位置而不同，比如，佛罗里达州就是美国的雷电之都。直接雷击本身不一定具有破坏性的作用。它具有很高的能量，可以将浪涌电流耦合到导体之中，包括暴露在空气中的导体和埋在地下的导体。

对基本避雷装置有两个主要要求：

1. 有效接地

接地电极系统对地具有低阻抗非常重要。但接地系统的所有部分相互联结在一起也是同等重要的：对所有接地电极进行联结（移去无关的接地棒），将结构钢部件连接到电力进线处接地端，所有接地接头都保持紧密接触、没有腐蚀等。这会将称为“转移接地电位”的现象降到最低程度，在这种现象中，很大的浪涌电流会在两个具有不同对地阻抗的接地点之间产生很大的电压差。这种接地做法对于提高性能十分重要，因为这可降低用于平衡接地电位的接地回路电流。

表 5.1 雷击防护系统的检测

检查	检查	理由
浪涌保护器	● 安装于主配电盘、分配电盘和关键设备上。 ● 导线应短，且无弯曲，以最小化高频阻抗。	● 雷击能量巨大，需采用多级防护。 ● 雷击包含有高频部分。导线越短，XL 越小，高频时的阻抗越小。
电力进线处或 SDS 处的接地电机导体	● 接地电极接头不得松动或锈蚀。 ● 接地导体不应卷绕或不必要的弯曲。	● 确保低阻抗地，以使得雷击感应浪涌电流导致的对地电势最小。 ● 最小化对于雷击高频成分的阻抗。
接地电极连接	所有接地电极彼此间应该可靠地连接在一起 ($<0.1 \Omega$)。	防止雷击发生时，电极间地电位的不同。
分隔驱动（绝缘损坏）电极	电极和设备地应该都连接至建筑钢材，并连接至接地入口。	同上。整个接地系统应是一个抗雷电的等电位接地平面。
建筑物中的 Datacom 布线	datacom 电缆布线上有浪涌避雷器或者采用光纤电缆。	由于建筑物地电位的不同，建筑物之间的 Datacom 电缆布线可能存在浪涌电流。

避雷装置涉及众多标准和规范，包括：

NEC：第 250 和 280 款
 美国国家防火协会：NFPA 780
 美国防雷协会：LPI-175
 UL-96 和 UL-96A

2. 电涌保护器

浪涌保护器“是一个用于通过释放和分流浪涌电流而限制浪涌电压的保护装置...” (NEC 280)。由于浪涌电流被分流到地，因此，浪涌保护器的作用与接地系统一样有效。

浪涌保护器的规格是针对它们的安装位置而确定的。共定义了三个类别 (ANSI/IEEE C62.41-1991)。

位于户外装置上的浪涌保护器最接近于雷电事件，必须能够吸收最多的能量。这些属于 C 类范畴（相当于 IEC 61010 的 CAT IV）。B 类是指馈线和配电盘（相当于 IEC 61010 的 CAT III），与插座相连的浪涌保护器属于 A 类（相当于 CAT II）。

用于 TVSS 的浪涌保护器

浪涌保护器用于保护绝缘，最终可防止发生可能会导致火灾的故障。它不一定被设计为对灵敏设备进行保护。这个工作由 TVSS（瞬变电压浪涌抑制器）来完成。

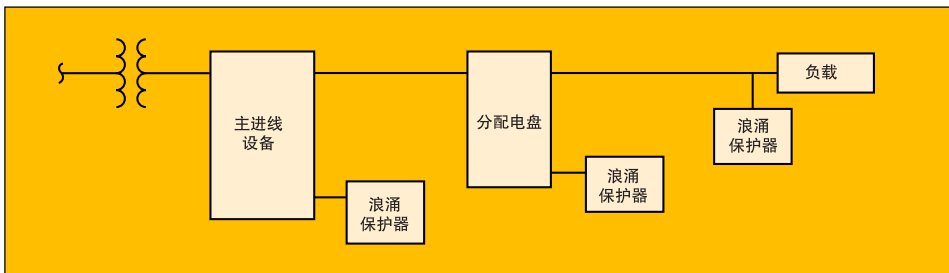


图 5.1: 安装在配电盘、分配电盘和负载上的浪涌避雷器。

第 II 部分：三相负载

第六节：多相感应电机

在美国，大约三分之二的电能是由电机消耗的，迄今为止，其中的用电大户是马力高于 5 HP (7 kW) 的电机。它们属于线性负载，因此不会产生谐波。但它们是位移功率因数降低的主要原因，该功率因数是系统容量有效利用的一个量度。

测量

1. 电压不平衡

电压不平衡不应超过 1-2% (除非电机的负载很小)。为什么数值如此之小？电压不平衡对电流不平衡有着非常大的影响，大约达到 8:1。换言之，1% 的电压不平衡可引起 8% 的电流不平衡。电流不平衡将使电机吸收更多的电流。这反过来又会产生更多热量，而热量是电机寿命的大敌，因为它会使绕组绝缘性能下降。

电压不平衡可能由严重的负载不平衡引起，但它也很容易由松动的接头和磨损的触头引起。

电压不平衡计算示例：

$$\%VUNBALANCE = \frac{\text{与平均值的最大偏差} \times 100\%}{\text{平均值 (三相)}}$$

1. 进行三个相间测量：

$$A-B = 475V \quad A-C = 471V \quad B-C = 470V$$

2. 计算平均值：(475+471+470)/3 = 472V

3. 计算与平均值的最大偏差：

$$\text{最大偏差发生在 A-B 相：} 475V - 472V = 3V$$

4. 将最大偏差除以平均值以求得不平衡 %：3V/472V < 1%

2. 电压 %THD 和谐波波形

任何一相上得电压 THD (总谐波畸变率) 不得超过 5%。如果任一相上存在过大的电压畸变，它就可引起电流不平衡。通常的原因是 5 次谐波，因此，应特别针对 5 次谐波来检查谐波波形。5 次谐波是一个负序谐波，它会在电机中产生反向转矩。通过具有很高 5 次谐波成分的电压供电的电机将导致吸收更大的电流。当直接加压起动或软起动机与调速驱动器共用同一条母线时，这会成为一个大的问题。

3. 电流不平衡

要查找电流不平衡，需要测量三相中的电流。进行与计算电压不平衡相同的计算。一般来说，电流不平衡不应超过 10%。但是，如果最高的读数没有超过铭牌上的 FLA (满负载电流) 和 SF (容许过载因数)，则不平衡程度通常是可以承受的。满负载电流和容许过载因数在电机铭牌上标出。如果电压不平衡和电压总谐波畸变率在限值范围内，则较高的电流不平衡可能表明电机存在问题，如绕组绝缘受到破坏或空气间隙不均匀。

通过电流测量，也可以找到单相故障。如果三相电机丢失一相 (可能由熔断器烧断或接头松动引起)，它就会尝试在缺失一相的情况下依靠其余的两相运转。由于电机充当一个恒功率设备，它将会吸收额外电流以提供足够转矩。单独靠电压测量不一定会发现这种状况，因为电压通过两个通电绕组而被感应到非通电绕组中。

表 3.1 配送电变压器测量

测量	检查	仪器
1. 电压不平衡	不平衡 <1%	43、41B、87
2. 电压 %THD	%THD <5%	43、41B
3. 电流不平衡	不平衡 <10%	43、41B 带 80i-400 的 87
单相故障 (极高的电流不平衡)	一相上没有电流。	
4. 负载	- 有关 FLA¹ 和 SF² 的铭牌数据：电流 < (FLA × SF)。 - 过载或极高的欠载。额定负载的 80% 为最佳值。	相同
5. 冲击电流	- 引起电压突降的冲击电流。 - 引起误脱扣的冲击电流。	43
6. 功率因数	- 低位移功率因数。 - 指示出存在谐波的 DPF 和 PF (总功率因数) 之间的较大差别。	43、41B

¹ FLA = 满负载电流

² SF = 容许过载因数

(如果 FLA = 100A 而 SF=1.15，则惦记可载 115A 电流下连续运转。)

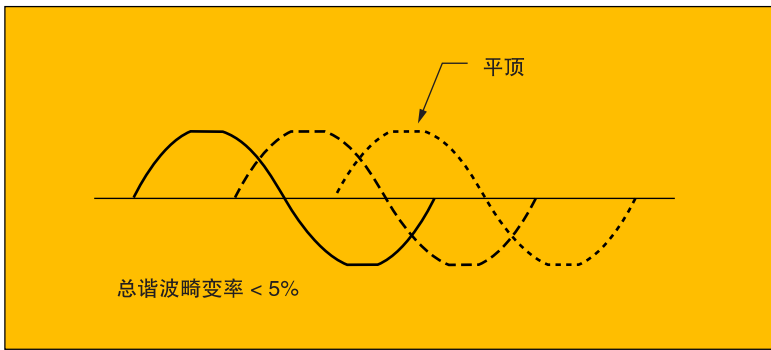


图 6.1: 电压畸变

4. 负载

测量电机的吸入电流。如果电机在(或接近)其满负载电流额定值(乘以容许过载因数)下运转,它对来自谐波及电流不平衡的附加热量就会更加敏感。负载很小的电机通常不会发生过热。另一方面,其效率和 DPF 都小于最佳值。多数电机是在满负载额定值的 60%-80% 处取得最高效率。位移功率因数在额定负载下(考虑容许过载因数)最大,并尤其会在小于满负载的 80% 情况下降低。这就得出如下结论:为了使电机负载恒定和可以预测,额定负载的 80% 是效率最高的工作范围。

5. 冲击电流

直接加压起动电机(与软起动电机或驱动器相对)会吸收一个冲击电流,也称为堵转电流。这个冲击电流会随着电机达到正常转速而逐渐减小到正常运转电流。

- 老式电机吸收大小为运转电流的 500-600% 的冲击电流。较新的节能型电机可吸收高达运转电流的 1200% 的短暂冲击电流,这是首先可帮助它们取得更高能效的较低阻抗的直接结果。
- 高转矩、高马力电机负载需要成比例的较高冲击电流。
- 同时起动的电机负载将具有一个累计冲击电流。

冲击电流的另一个来源是带有二极管转换器的 UPS 和调速驱动器系统。它们会随着其电容器组的第一次充电而吸入冲击电流。

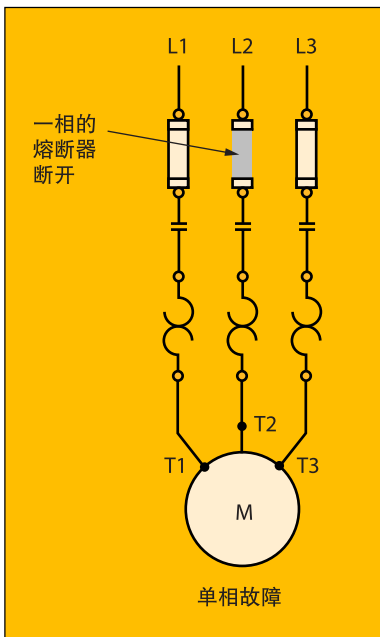


图 6.2: 单相故障

冲击电流的影响

1. 如果电源电压不是足够稳固,则冲击电流会引起电压突降:
 - 继电器和接触器线圈可能会断电(通常,电压突降必须达到标称输入电压的 70% 这样差的情况);或者,如果它们保持通电,则它们的触头会发生跳动(特别是如果附加的负载引起长时间的欠压)。
 - 控制电路可能会复位或锁定(在 90% 及以下时)。
 - 驱动器可能会脱扣(欠电压脱扣)。
2. 高峰值需求期间可能会产生较高的用电量。
3. 循环负载可引起周期性的电压突降,可能表现为照明灯发生闪烁。
4. 如果电机需要在高转矩负载下起动,则冲击电流时间会相对延长(例如,10 至 20 s 或更长),这样就可能会因过载加热使电机起动器过扣而引起恼人的脱扣。

6. 功率因数

为了确定功率因数校正电容器的规格,需要测量电机的 DPF (位移功率因数) 和有功功率消耗 (kW)。三相感应电机的 DPF 和 kW 的测量在下页的辅助说明文字中介绍。这些测量假设,电机电压和电流是平衡的。因此,在进行功率因数校正之前,首先要确保电压和电流不平衡处于限值范围内。两种问题都可能缩短电机寿命,在进行 DPF 校正之前要首先加以考虑。

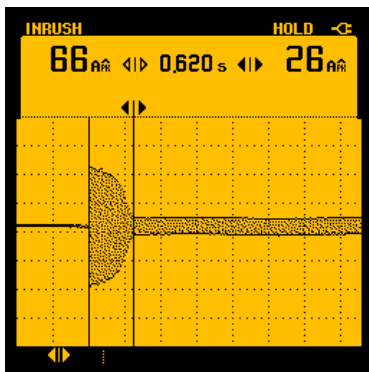


图 6.3: 冲击电流 (型号 43)

测量三相感应电机上的位移功率因数

根据为电机供电的变压器的配置，选择两种测量方法之一。两种方法将会给出相同的结果。方法 1 适用于接地的星形连接电源。它十分简单，可在多数情况下使用，因为商业和轻工业设施中几乎所有低压电机都是通过接地的星形连接电源供电的。方法 2 适用于有时在重工业设施中存在的浮置电源。

方法 1：接地的星形连接电源

要检查电源是否为接地的星形连接，需要测量每个火线对地电压。如果读数相等，您就可以使用这种测量方法。

设置：

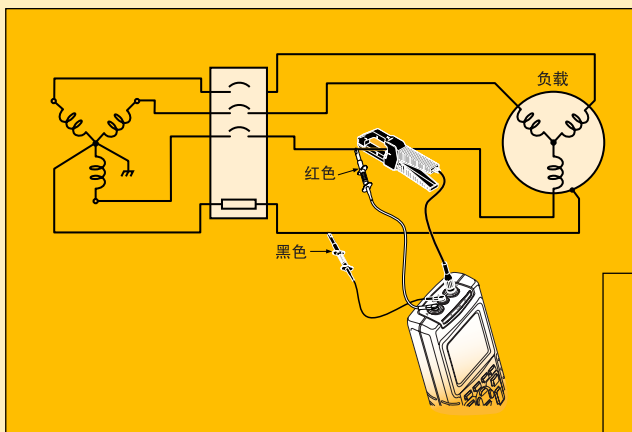
1. 将电流探头夹在任一相线上（使电流夹上的箭头指向电机）。
2. 将红色电压探头与相同的相线相连，将黑色探头与地线相连（而不是另外一条相线）。

有功功率：读取 kW 值并乘以 3：

$$kW_{MOTOR} = 3 * kW$$

位移功率因数：读取位移功率因数 (DPF)。

(不需要测量 kVA)



方法 2：三线制电源

在浮置星形、浮置三角形或接地三角形连接中，至少其中一个火线对地电压的读数是不同的。(对于浮置电源，火线对地电压是不可预测的，因为它取决于火线对地电容)。方法 2 是一种双瓦特表法。

设置：

1. 将黑色电压探头与任一相相连。
2. 将红色电压探头和电流夹（使箭头指向负载）一起连接在另外一相上。记录 kW_1 。
3. 将红色探头和电流夹移动到第三相（不要移动黑色探头）。记录 kW_2 。记录 kVA（如果电流不平衡在限值范围内，则两相的 kVA 将大约相等）。

有功功率： $KW_{MOTOR} = kW_1 + kW_2$ （如果其中有一个 kW 读数为负，就像在负载很小的电机上可能发生的那样，则要将它减去而不是相加）

视在功率： $kVA_{MOTOR} = kVA * 1.73$ 。

$$DPF = kW_{MOTOR} / kVA_{MOTOR}$$

示例（双瓦特表）：

测量：

$$kW_1 = + 1.52$$

$$kW_2 = + 1.74$$

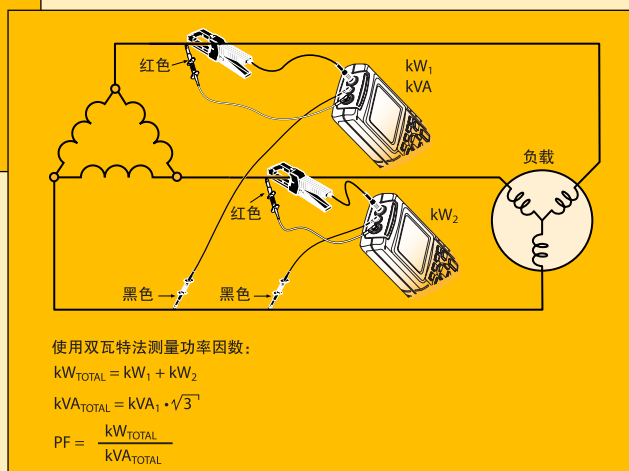
$$kVA = 2.41$$

计算：

$$KW_{MOTOR} = kW_1 + kW_2 = (+ 1.52) + (+ 1.74) = 3.26 \text{ kW}$$

$$kVA_{MOTOR} = kVA * 1.73 = (2.41) (1.73) = 4.17 \text{ kVA}$$

$$DPF = KW_{MOTOR} / kVA_{MOTOR} = 3.26 / 4.17 = 0.78$$



第七节：调速驱动器的 PQ 故障排查

交流调速驱动器可以是不良电能质量的来源或受影响的设备（有关驱动器故障排查的详细信息，请参见“使用福禄克仪表测量调速驱动器”，文档编号为 G0416UEN）。

调速驱动器和受影响负载

虽然调速驱动器通常被看作是影响电能质量的一个来源，但在许多情况下，它们也是一个受影响负载。

电容器开关瞬变

电力电容器开关中所常见的高能量（相对较低频率）瞬变可通过电力进线变压器、馈线和驱动器的转换器前端直接到达直流链路母线，并经常在这里引起直流链路过电压脱扣。输入二极管也可能会因这些瞬变而烧毁。

电压畸变

如果高电压畸变表现为过度平顶，则它会阻止直流链路电容器完全充电，并会降低驱动器的断电跨越能力。因此，通常不会对驱动器产生影响的一个电压突降将会使驱动器在欠电压时脱扣。

不正确的接地将影响驱动器的内部控制电路，并产生无法预测的后果。

调速驱动器是影响负载

一个驱动器可能可以作为一个“影响负载”，并对系统的电能质量产生极大影响。但在我们讨论问题之前，先让我们看一看驱动器对电能质量的积极作用。首先，它们具有内置的软起动能力。

这意味着，将不存在对系统其

余部分的冲击电流和电压突降影响。其次，如果驱动器为带有一个二极管管转换器前端的 PWM 型，则位移功率因数会很高（通常在额定负载下 >95%），并在整个范围内大致恒定。这意味着，这些驱动器可以减少能耗，同时还能对位移功率因数进行校正。这也是一个好的方面，因为驱动器和功率因数校正电容器不会混合（请参见第 28 页上的“电源系统谐振”）。电容器很容易受由驱动器产生的较高频率谐波电流的影响，因为它们的阻抗会随频率的升高而降低。

这种类型驱动器因转换器设计不同而对电力系统质量有着很大影响（转换器或整流器将交流转换为直流，并构成驱动器的第一级电路）。有两种主要转换器设计类型。带电压源型逆变器的 SCR 转换器 / 可变电电压逆变器 (VSI/VVI) 驱动器它们通常又称为 6 步驱动器，在其转换器前端中使用了 SCR（可控硅整流器）（以下讨论适用于也使用 SCR 的 CSI，即电流源型逆变器驱动器）。VSI 和 CSI 驱动器设计过去常用在较大型电机上（>100HP）。SCR 转换器可通过接通所施加正弦波形中的一部分电流（“门控”）并在过零点处关断来控制直流链路电压。与二极管不同，SCR 需要用于门触发的控制电路。

表 7.1 在调速驱动器输入侧进行的测量

测量	检查	仪器
电压波形	- 电压陷波（SCR 转换器） - 平顶	43
谐波波形	使用滤波器之前和之后的谐波级次和幅度。	43、41B
位移功率因数	对于 PWM 驱动器，DPF 即使在低速下也应保持高数值（通常会略微降低）	43、41B
电压不平衡	小于驱动器厂商技术规格，或可能发生电流过载脱扣。驱动器与电动机相比可能具有较高的不平衡限值。	43、41B

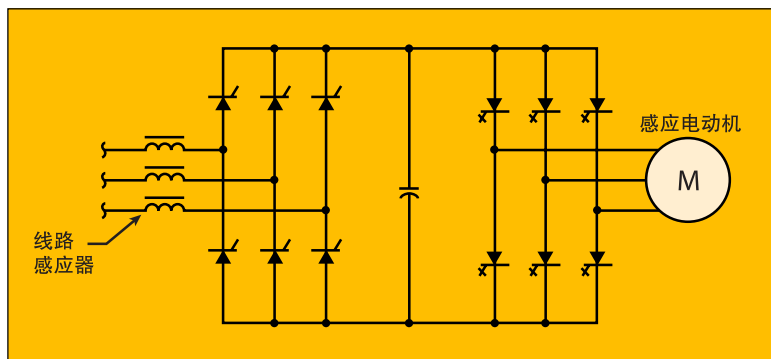


图 7.1 电压源型逆变器 (VSI) 调速驱动器

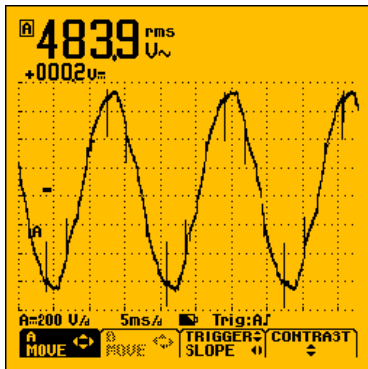


图 7.2 电压陷波

对于 SCR 转换器，有三个可影响线侧电能质量的主要问题：

- 换向陷波。在 SCR 开关或换向中，存在着两个相都为接通状态的短暂时刻。实际上，这会引起一个导致输入电压崩溃的瞬时短路。它表现为电压波形上的“陷波”。这些陷波会引起很高的电压总谐波畸变率和瞬变。解决方法是与驱动器的前端串联一个电抗器线圈或隔离互感器以清除这两个问题。
- 位移功率因数会随着驱动器转速的降低而下降。这个问题并不像听起来那么严重，因为驱动器 - 电机负载的功率要求会下降得更多。
- 通常 5 次和 7 次谐波电流由 VSI 驱动器产生。

脉宽调制 (PWM) 驱动器的二极管转换器

另外一个更常见的转换器设计使用了二极管，并在 PWM 驱动器中使用。二极管不需要开关控制电路。PWM 驱动器的普遍使用成为业界的主要趋势之一，主要是由于驱动器的逆变器（将直流转换交流）部分中使用的快速开关高效 IGBT（绝缘门双极晶体管）的持续开发。出于所有实用目的，PWM 驱动器已成为行业标准驱动器。

有关对 PWM-IGBT 驱动器对电机的作用的详细讨论，请参见“使用福禄克仪来测量调速驱动器”（文档编号 G0416UEN）。

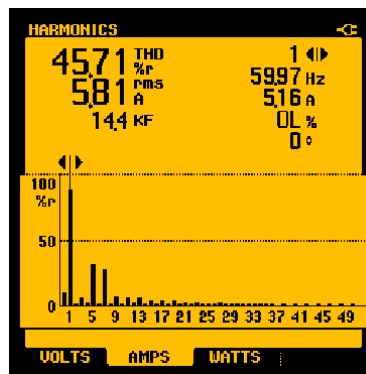


图 7.3 典型的 ASD 谐波波形

对于二极管转换器来说，主要的电能质量问题是谐波。所产生的实际谐波级次取决于前端中二极管的数目。对于三相转换，最少需要使用 6 个二极管。

这个“6 脉冲”转换器将生成 5 次和 7 次谐波。如果使用一个 12 脉冲转换器，则将产生 11 次和 13 次谐波而不是 5 次和 7 次谐波 - 非常重要。对于相同的负载，11 次和 13 次谐波的幅度会大大小于 5 次和 7 次谐波的幅度。因此，总谐波畸变率将更小。但是，绝大多数驱动器都是 6 脉冲 PWM 型，这是我们在系统上看到如此多的 5 次谐波的一个原因。

谐波问题解决方案

有多个减轻驱动器生成的谐波的方法：

谐波陷波滤波器（图 7.5）

它们通常是在谐波源处（换言之，在驱动器输入处）并联连接的典型 LC 网络。它们被调谐至仅仅低于 5 次谐波（典型值为 280 Hz），并趋向于吸收 5 次谐波和大部分 7 次谐波。很显然，它们的规格必须与产生谐波的负载相符。

移相变压器

它可以简单到为一个驱动馈电的三角 - 星形配置变压器和为其它驱动器馈电的三角 - 三角配置变压器，在这两个配置之间存在一个 30 度的相位移，可以有效地促使在最近的 PCC（公共耦合点）处发生谐波抵消。这种抵消作用在两个负载大致相等时达到最佳。

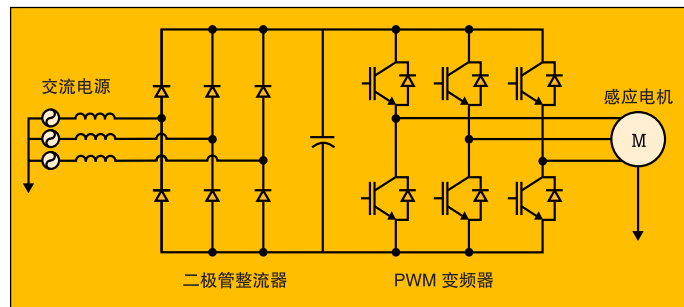


图 7.4：脉宽调制 (PWM) 调速驱动器

12 脉冲转换器

如果星形-三角/三角-三角配置被封装在一起(三角形配置初级、三角形和星形配置次级),并且每个次级为两个并联的 6 脉冲转换器之一馈电,则可以利用上面所述的所有优点来构建一个 12 脉冲前端。也可以使用 18 脉冲设计。由于会产生额外成本,这种解决方案仅趋向于在高马力负载上使用。

有源滤波器

这个相对较新的技术基于使用功率电子电路来解决功率电子电路所产生的问题这一极好概念原理。它可以检测瞬时交流正弦波,随后通过生成大小相等、方向相反的极性谐波来有效抵消它所检测到的谐波,从而重新构建正弦波形。市面销售的滤波器还提供了电压调节功能。

有源功率因数校正

另外一个较新的解决方案是,厂商使用可生成极少量谐波并具有单位功率因数(总功率因数和位移功率因数)的快速开关技术来提供转换器前端。

关于在某个特定情况下采用什么谐波减轻方法可能最经济有效这个问题,尚存在着讨论的空间。但是,最终用户经常忽视且从本节中提供的信息就可澄清的问题是,一个驱动系统的总成本应该包括驱动器本身的成本以及减轻谐波的成本(不管是作为驱动器的一部分还是单独安装)。

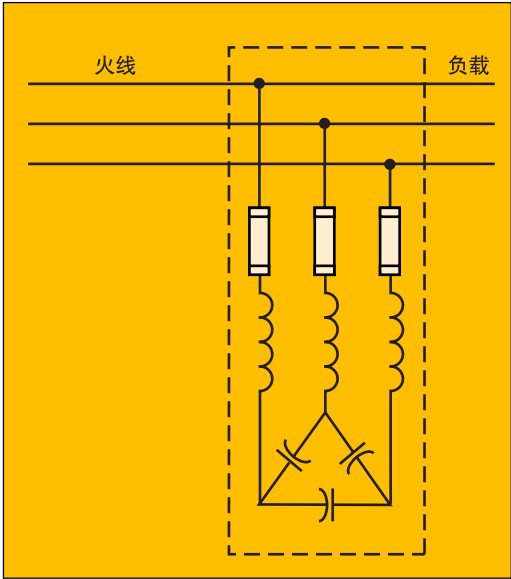
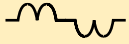


图 7.5 谐波陷波滤波器

为什么使用真有效值

畸变波形的精确测量需要使用真有效值测试工具。有关详细信息,请参见福禄克技术文章“为什么使用真有效值”(文档编号 B0294A)。

平均响应万用表和真有效值万用表的比较

波形	名称	万用表读数	
		平均值检测 DMM	真有效值 DMM
	正弦波	正确	正确
	方波 (平顶电压)	高 10%	正确
	至单相二极管整流器的电流	低 40%	正确
	至三相二极管整流器的电流	低 5-30%	正确

电源系统谐振

谐波与电容器在一起时就会产生热振动

安装了“功率因数校正电容器”之后功率因数可能会变差吗？当然可能。理解这个迷团应从理解位移功率因数 (DPF) 与总功率因数 (PF) 之间的区别开始。没有理解这个区别所得到的惩罚可能是电容器被烧毁，投资被浪费。

总功率因数和位移功率因数从基本意义上来说是相同的：它们都是有功功率与视在功率的比值（或 Watt 与 VA）。DPF 是功率因数的传统概念。它可被认为是基频下的功率因数。简称为功率因数 (PF) 的总功率因数现在包括基频和谐波电流的影响（也称为真功率因数或畸变功率因数，见图 7.7）。由此得出结论，当存在谐波时，PF 总是低于 DPF，与 DPF 相比，它更为精确地描述了总系统效率。

严格来说，“功率因数”这个术语是指总功率因数，但在实际中，也可用于指 DPF。不用说，这会为功率因数的讨论带来一些混乱。您必须要清楚正在讨论的是哪种情况。

位移功率因数

较低的 DPF 是由电机负载引起的，它们引入了无功功率（无功 VA 或 VAR）。系统必须具有以 VA 表示的提供无功功率 VAR 和有功功率 Watt 的能力。需要的 VAR 的越多，VA 要求就越高，DPF 就越小。VAR 的成本已计算在一种功率因数处罚性收费中。电力公司常常会针对低于某个值的 DPF 收取附加费用。DPF 的实际值变化很大，但典型值为 0.90 至 0.95。

要想降低由电机负载引起的 VAR，就需要安装功率因数校正电容器。装置系统内以及公用电力设施一级处的上游系统容量将得到释放，并用于其它用途。（图 7.6）

从历史上看，这是解决功率因数问题的要旨：使用相对直接的解决方案来解决相对熟知的问题。

谐波和电容器

谐波对我们针对功率因数校正所采取的方法有着显著影响。上面所述的电机和电容器负载都是线性负载，在各种实际应用中不会产生谐波。另一方面，调速驱动器 (ASD) 等非线性负载将会产生谐波电流。

以一个逐步在电机负载上添加调速驱动器的装置为例。ASD 会产生很大的谐波电流（在 6 脉冲转换器驱动器上为 5 次和 7 次谐波）。突然间，现有功率因数校正电容器上的熔断器被烧断。由于它们是三相电容器，因此仅可能烧坏其中的一只熔断器。现在产生了不平衡电流，可能还有不平衡电压。电工更换了熔断器。但它们又被烧断了。他换上了规格更大的熔断器。现在熔断器安然无恙，但电容器却烧坏了。他又更换了电容器。又发生了相同的事情。究竟是什么原因？谐波为频率较高的电流。频率越高，电容器的阻抗就越低 ($X_C = 1/2\pi fC$)。电容器的作用就像是一个谐波电流的吸收器。

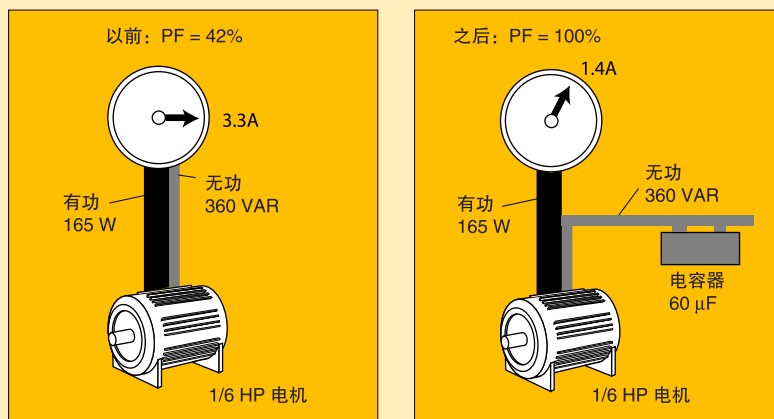


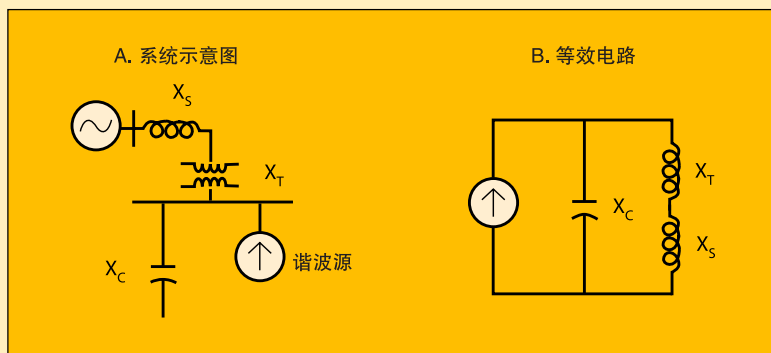
图 7.6 使用电容器来校正位移功率因数 (DPF)。

电源系统谐振

在最差情况下，互感器的感抗 (XL) 和功率因数校正电容器的容抗 (XC) 构成了一个并联谐振电路：在等于或接近于谐波频率的一个谐振频率下， $X_L = X_C$ 。负载所产生的谐波电流会刺激电路产生振荡。

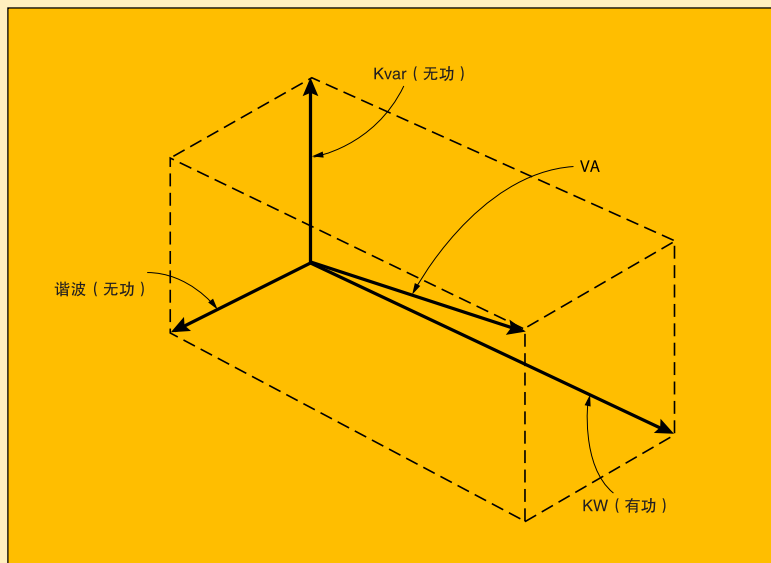
电流随后在这个比刺激电流大很多倍的这个回路中流动。这种振荡电路可能会使设备受到严重破坏，并引起功率因数的下降。这种谐振情况一般总会在系统负载较小时出现，因为此时阻性负载的阻尼效应被去除了。换言之，我们拥有了音响爱好者所称的一个“高品质因数”电路。(图 7.8)

想象一下某个星期一去上班时发现电缆上的绝缘已被烧化的情况。在系统上几乎没有任何负载的周末时段，这种情况是怎么发生的？欧姆定律不起作用了？您上当了。您的电源系统在整个周末都因谐波而在发生着振荡。问题与它关系密切，但现在已经有了解决办法。



从减轻谐波着手

正确的问题解决途径是从测量并减轻驱动器产生的谐波开始。一般要使用谐波陷波滤波器。要将这些陷波滤波器安装在驱动器的输入侧。它们的作用在两个方面非常类似于传统的功率因数校正电容器：它们可降低 DPF 和 PF，还可将问题谐波的循环限制在局部(一般为 5 次谐波)。减轻谐波和传统的 DPF 校正应作为一个系统问题考虑。换言之，要控制总功率因数，而不仅仅是 DPF。



第八节：商业照明负荷故障检修

照明是许多大型工厂的主要负荷。为了节约能源和提高供电质量，对这些电路进行评测必不可少。我们必须注意，商业照明负荷采用单相供电，负载连接在相线与中性线之间。典型的相线-相线电压为 480 伏，相线-中性线电压为 277 伏。因为每根相线的功率消耗和功率因数都可能各不相同，因此必须测量照明配电盘上的所有相线。

1. 功率消耗

过度的相不平衡能导致电压不平稳，因而可能影响三相电机负荷。

2. 功率因数

低功率因数镇流器购买成本可能较低，但使用成本却更高。

3. 总谐波畸变率

选用镇流器时，应该考虑电流总谐波畸变率，尤其是变压器可能过载的时候。

4. 电压稳定性

Fluke 43 的电压突降和骤升测量模式，对于记录表现为照明灯闪烁的重复性电压突降尤为适用。它可以同时监视电流和电压。这可以帮助我们判断电压突降是在测量点的下游（与负载有关）还是在上游（与电源有关）。例如，若电流出现峰值时存在电压跌落，则下游冲击电流有可能是导致该电压跌落的原因。若电压和电流同时突降，则可能是上游某个事件导致该跌落。

可能是上游负载，例如某个并联支路回路上的电机，导致供电电压的下降。也可能与电源有关，例如，受到雷击或者公用配电系统上的断路器脱扣/重新接入。

测量	检查	仪器
1. 功率损耗 (kW)	三相间保持平衡。	43、41B
2. 功率因数 (DPF 和 PF)	磁性镇流器具有较低 DPF。电子镇流器的位移功率因数应该较低。尽管新式电子镇流器大多内置谐波抵制功能，但是它的总谐波畸变率应该很低。	43、41B
3. 总谐波畸变率 (%THD)	电流总谐波畸变率期望值 <20 %。	43、41B
4. 电压稳定性	电压不稳可能导致灯光的闪烁现象。	43

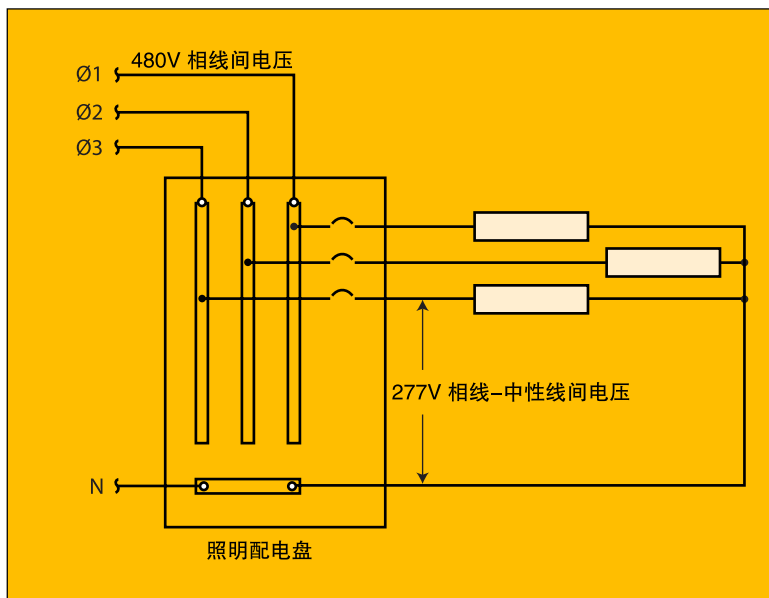
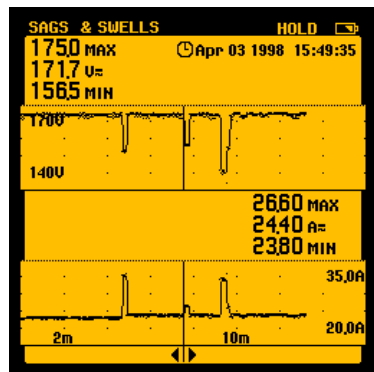


图 8.1



Fluke 43B 电能质量分析仪能同时显示电压（上部）和电流（下部）曲线。电流激增/涌入导致电压跌落，显示测量点下游某个负载导致这个扰动。

历数电能质量的罪魁祸首 从公共设施源至插座

雷击

如果没有设置合适的冲击防护, 则可能遭到毁灭性破坏。如果距离很远, 则也可能导致电压下降和公用设施线路欠压。若被切断, 则导致电压突升和过电压。但是, 在最终分析中, 雷击是一种自然现象, 与人类给自己造成的损伤不处于同一个类别。

公用设施自动断路器的重接入

导致短时间的电压下突降 / 停电, 但要好于其另一种现象, 即长时间停电。

公用设施电容器投切

导致高能量电压干扰现象 (看起来就像在波形上叠加了一个振荡暂态)。若电容器组靠近设备, 该暂态可能传遍整个建筑物。

无足够容量配电变压器的商用高层建筑
试图在错误的地点马虎了事; 为 20 层高楼仅部署 208 V 馈送器, 不是通向电能质量之路。

发电机组容量与负荷不协调

过大电压畸变可能影响电子控制回路。若有可控硅变换器负载, 则切痕可能影响频率控制电路。

部署 PF 功率因数补偿电容器时, 没有考虑谐振效应

谐振和电容器水火不相容。那些不断膨胀的电容器正在高呼救命。

来自大扭矩电机负负荷的冲击电流开始传遍整个线路

若负负荷太大, 或者电源阻抗太大, 则导致电压下降。交错配置电机启动有助于解决问题。

配电盘上中性线规格过小

在三次谐波区段, 中性线一不小心就有可能承载与相导线相同大小或者超出相导线的电流。若配电盘中性线规格一直过小, 则导致接线柱过热、潜在火灾隐患以及高 N-G 电压。

电力电缆和信号电缆接触布线

将信号电缆想象为单匝变压器次级, 电力电缆想象为初级。则为耦合敞开了无边无际的大门。

导线管接线盒松散, 且没有绿色导线接地导体

导致开路, 或者高阻抗地回路。对于电能质量或安全有害无益。

支回路中的共享中性线

导致负载相互作用, 以及中性线过载。

与敏感型负载共享分支回路的激光打印机和复印机

导致周期性的电压下降和开关瞬变。

插座错误布线 (N-G 互换)

难以令人置信, 但确实存在一定数量。必定会导致回流电流流经接地导线, 并形成噪音地。

数据电缆两端分别接到不同参考地

哎呀! 在设备外壳和数据电缆接头之间出现了电压。

高频噪声

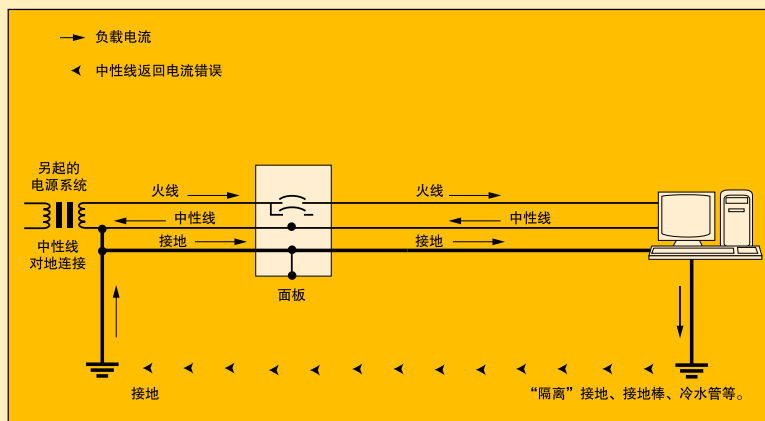
最有效的高频接地技术是安装信号基准网 (SRG)。

以及由它们自己所造成的一类 被隔离的接地棒 (下)

由于地球是一个高阻抗通路, 并阻能防止足够大小的电流流动以脱扣断路器, 因此, 它们事关安全风险。它们也会导致地环路; 最终, 每个电子还得回到它其出发地。关于电能质量, 一个巨大的神秘现象是, 为什么一些制造商坚持除非用户安装了隔离式接地棒, 他们的设备质保才有效。我的汽车机械师深受此做法的影响, 以致于在每辆他所维修的汽车被正常驾驶之前, 他不会做出什么保证。

N-G 非法连接 (第 8 页上的图 2.1)

必定会将回流电流导入地。这种现象太普遍了, 如果电能质量顾问联盟想要以计件形式收取费用, 也就是说, 针对发现的每个中性线对地连接收取 1 美元的话。他们都会变富的。它不仅是一个电能质量问题, 也是一个管道安装问题。循环流动的地电流会导致水管腐蚀。它解释了为什么您从不会发现电工人员进行这些中性线对地连接, 这些工作都是由管子工们暗地里完成的。就业得到了保证, 好象他们真的需要这种工作。



测试工具一览

对电能质量故障排查中所使用工具的最低要求是：

- 具有可准确测量谐波和畸变波形的真有效值功能。

- CAT III-600V 或更高 (CAT III-1000V) 安全等级，适合测量电力电路。

另外，还需要使用具有记录、波形显示和特殊测量功能的仪器（如谐波、电压突降和骤升、瞬变捕获、高频干扰等）。

本技术应用文章中提到了以下仪器。

型号	Fluke 43	Fluke 41B	Fluke VR101S	Fluke 87 Series III	Fluke 36
测试工具	电能质量分析仪	谐波分析仪	电压事件记录仪	数字式万用表	钳形表
功率	kVA、kW、kVAR、PF、DPF	kVA、kW、kVAR、PF、DPF			
记录点数	TrendPlot™、PC 记录	PC 记录	4000 个电压事件		
实时时钟	●		●		
谐波	达 51 次谐波	达 31 次谐波		真有效值电压和电流	真有效值电压和电流
电压瞬变	20 ns，带波形		1 微妙事件记录	250 微妙峰值/最小值最大值	
突降和骤升（仅限电压）	单周期最小值/最大值，带趋势图		单周期事件记录	100 ms 最小值/最大值	
突降和骤升（电压和电流同时）	单周期最小值/最大值				
断电	单周期最小值/最大值，带趋势图	带持续时间的事件记录		100 ms 最小值/最大值	
归档、RS232 计算机	FlukeView® 电能质量分析软件	FlukeView® 41 软件	EventView® 软件		
电机冲击电流	带光标的波形			最小值/最大值	最大值保持
波形	20 MHz 示波表	基频			
噪声	●				
峰值	●	●		●	
真有效值	●	●		●	●

参考资料和鸣谢

- 《EC&M Practical Guide to Quality Power for Sensitive Electronic Equipment》(EC&M 灵敏电子设备优质电力实用指南)，第 2 版
- 《Dranetz Field Handbook for Power Quality Analysis》(Dranetz 电能质量分析现场手册)
- 《Ontario Hydro Power Quality Reference Guide》(Ontario 水电站电能质量参考指南)
- 美国能源工程师协会：《Fundamentals of Power Quality》(电能质量基本知识)
- IEEE 标准 1100-1992：《Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment》(灵敏电子设备供电和接地建议实用方法)
- 美国电力科学研究院 (EPRI)、Electrotek Concepts 公司：《Power Quality for Utility and Industrial Applications》(公用电力及工业应用的电能质量)
- 《Power Quality Assurance Magazine》(电能质量保证杂志)



电能质量故障排查

学习测量、诊断和解决电能质量问题。

部件号：800919 - NTSC
800927 - PAL

数字式万用表安全知识带

了解正确的工作步骤和设备如何保护您免遭危险。部件号：609104
在福禄克分销商处购买，或拨打右面列出的对应的电话号码。

了解及管理谐波

部件号：609096

福禄克，助您与时代同步！

美国福禄克公司 中文网址：www.fluke.com.cn
英文网址：www.fluke.com

福禄克中国客户服务中心热线：400-810-3435

北京办事处	电话：(010)65123435
上海办事处	电话：(021)61286200
成都办事处	电话：(028)85268810
西安办事处	电话：(029)88376090
深圳办事处	电话：(0755)83680030
重庆联络处	电话：(023)86859655
乌鲁木齐联络处	电话：(0991)3628551
武汉联络处	电话：(027)85743386
济南联络处	电话：(0531)86121727
沈阳联络处	电话：(024)22813668/9/0
南京联络处	电话：(025)84731286
广州分公司	电话：(020)38795800
北京维修站	电话：400-810-3435
上海维修中心	电话：(021)54402301
深圳第一特约维修点	电话：(0755)86337229