

谐波的危害及其抑制措施

温伯银 (上海现代建筑设计集团 华东建筑设计研究院有限公司 200002)

摘要 随着现代科学技术的发展,大量的电子信息设备和电力电子装置在民用建筑应用,非线性负载日趋严重,谐波电压、谐波电流和电磁干扰使电能质量迅速恶化,给电子信息设备的正常工作带来严重危害。谐波是影响电能质量的重要因素。本文参照IEC60364-4-444.A2.Ed.1版及其他资料,对谐波的危害及其抑制措施作了浅析。

关键词 电磁兼容 (EMC) 电磁干扰 (EMI) 抑制措施

关于电磁兼容 (EMC) 这一专门术语,国际电工委员会 (IEC) 早已有明确的定义,即“设备或系统在其电磁环境中能正常工作且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁骚扰的能力”。

上述电磁兼容 (EMC) 的定义,有两方面的含义:

a 电子设备或系统内部的各个部件和子系统、一个系统内部的各台设备乃至相邻几个系统,在它们自己所产生的电磁环境及在它们所处的外界电磁环境中,能按原设计要求正常运行。换句话说,它们应具有一定的电磁敏感度,以保证它们对电磁干扰具有一定的抗扰度。

b. 该设备或系统自己产生的电磁噪声必须限制在一定的电平,使由它所造成的电磁干扰不致对它周围的电磁环境造成严重的污染和影响其他设备或系统的正常运行。随着信息通信和电力电子装置在各类建筑物日益广泛的应用,电磁干扰 (EMI) 和电磁敏感度 (EMS) 已成为广大电气工程和设计人员必须考虑的十分重要的设计内容之一。本文参照IEC60364-4-444.A2.Ed.1和美国国家标准 ANSI/IEEE519的有关规定,对谐波的产生、危害及抑制措施作扼要介绍。供参考,如有不当之处以标准原文为准。

1 谐波干扰的产生

1.1 发电机的谐波

1.2 变压器的谐波

1.3 荧光灯电子镇流器的谐波

1.4 电力电子装置的谐波

包括: 整流电路的谐波, 交流调压电路的谐波, 变频器的谐波, 不间断电源 (UPS) 的谐波。

1.5 电源线干扰

1.5.1 电源线上干扰的模式

电源干扰复杂性中众多原因之一就是包含了许多可变的原因。首先,电源干扰以“共模”或“差模”方式存在。见图1。

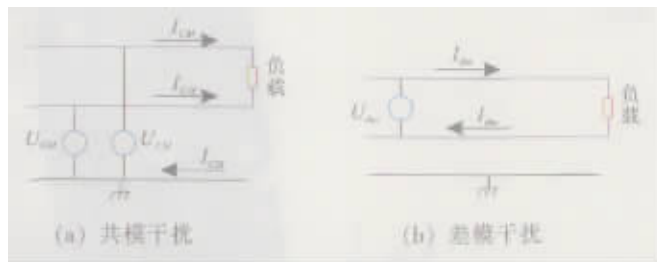


图1 共模与差模干扰

“共模”干扰是指电源线对大地,或中性线对大地之间的电位差。对于三相电路来说,共模干扰存在于任何一相与大地之间。共模干扰有时也称纵模干扰,不对称干扰或接地干扰,是载流导体与大地之间的电位差。

“差模”干扰存在于电源相线与中性线之间。对三相电路来说,还存在于相线与相线之间。

1.5.2 干扰的类型

电源干扰的类型见表1。

表1 电源干扰的类型

序号	干扰的类型	典型的起因
1	跌落	雷击, 重载接通, 电网电压低下
2	失电	恶劣的气候, 变压器故障, 其他原因的故障
3	频率偏移	发电机不稳定, 区域性电网故障
4	电气噪音	雷达, 无线电信号, 电力公司和工业设备的飞弧, 转换器和逆变器
5	浪涌	突然减轻负载, 变压器的抽头不恰当
6	谐波失真	整流, 开关负载, 开关型电源, 调速驱动
7	瞬变	雷击, 电源线负载设备的切换, 功率因数补偿电容的切换, 空载电动机的断开

1.5.3 干扰是如何进入设备的

干扰进入设备的途径不外乎是电磁耦合、电容耦合、直接进入三种。

2 谐波干扰的危害

谐波干扰的危害分为二类：其一是谐波电流引起的问题；其二是谐波电压引起的问题。

2.1 由谐波电流引起的问题

2.1.1 变压器的损耗增加而引起过热

首先是在变压器的铁芯内产生涡流损耗，和谐波次数的平方成正比，一般是满载损耗的10%左右。

其二是与3N次谐波有关。3N次谐波电流在三角形绕组中循环，在绕组中被有效吸收，对电网无影响，三角形接线的变压器起到了隔离变压器的作用。但是在考虑变压器容量时，应注意到非3N谐波电流的影响。

2.1.2 中性线过热

在三相负荷平衡的情况下。中性线的电流为零。但是在民用建筑中，三相负荷往往严重不平衡。中性线中有不平衡电流流过，再加上3N次谐波在中性线上叠加，经实测表明中性线电流经常为相线电流的150%到210%。计算机系统习惯以三相供电系统中中性线电压为相对零点标准，当中性线上有较大的谐波电流时，中性导线的阻抗在谐波下能产生大的中性线电压降，出现零点漂移。此中性线电压降以共模干扰形式在计算机和各种大型精密电子仪器中出现，干扰其正常工作。这些高灵敏度的电子系统在有谐波干扰时出现非正常现象，如：程序运行错误，数据错误，时间错误，死机，无故重启，甚至对设备造成永久性损坏。

2.1.3 断路器误动作

剩余电流断路器 (RCCB) 是以相线和中性线电流之和来确定的，如果电流之和超过了整定值，RCCB将动作，切断负荷电流。

2.1.4 电容器的过载、故障

众所周知电容器的容抗随着频率的上升而下降，而负荷阻抗通常是电感性的，随着频率的上升而增大。在谐波电流的影响下，导致电容器的重大故障。

2.1.5 载流导体的集肤效应

集肤效应随频率增加而增加。集肤效应在高频(350Hz以上)时比较严重。在低频时影响很小，可忽略不计。

集肤效应使交流电阻比直流电阻增加 C_k 倍 (k 为

谐波次数)。其基波情况下的损耗为：

$$P_1 = C_1 I^2 R$$

式中：I——基波电流；

R——直流电阻。

有谐波后，损耗为：

$$P = \sum_{K=1} I_K^2 R_K = \sum_{K=1} I_K^2 C_K R$$

增加损耗为：

$$P = P - P_1$$

C_K 随频率而变化。

《供电系统中的谐波分析测量与抑制》(陆延信编，机械工业出版社1990年出版)一书中提供的 C_K 值见表2。

表2 大截面导体的 C_K 值

谐波次数K	C_K 值
1	1.01
5	1.21
7	1.35
11	1.69

2.1.6 谐波对测量仪表和继电保护产生附加误差

2.1.7 谐波对显像和音响设备的干扰

2.1.8 谐波对通信线路的干扰

电力线路中的谐波，会对通信线路产生干扰。主要通过电容耦合、电磁感应和其他干扰。

2.1.9 功率因数降低及电容器的损坏

$$= P/S$$

在正弦波时， $\cos \phi = 1$ 。而有谐波电流存在时：

$$= P/S = V \times \cos \phi$$

式中：——总的功率因数；

$\cos \phi$ ——位移因数；

V——畸变因数。

由于谐波电流的存在。功率因数下降约10%。另一方面加速电容器老化，膨胀而破裂。以上仅仅是一些主要的危害。

2.2 谐波电压引起的问题

2.2.1 电动机及变压器的损耗增加

由于电源具有阻抗，所以谐波负荷电流使谐波电压波形畸变增加。畸变电压在电动机、变压器中引起涡流损耗增加。

2.2.2 过零噪扰

电子控制器系统在检测到电源过零点时投入负荷。当电源中存在谐波成份瞬变时,则在过零点的电压变化率加快,导致不稳定运行。

2.2.3 谐波对电源的影响

国标《电能质量 公用电网谐波》(GB/T 14549)就提出了对电能质量的要求。

3 谐波抑制的措施

3.1 有源滤波器

有源滤波器是根据电流互感器测量负载电流的谐波含量,控制电流发生器生成一个精确的负荷谐波电流,在下个周波回馈到电源,从而降低谐波电流的幅值。并且由于在谐波频率时的电源阻抗降低,使电压畸变也降低。

有源滤波器的安装位置有三种方式: 保护变压器的所有负载设备, 保护某几台重要设备, 保护某一区域内所有设备。

采用何种方式应根据具体情况而定,一般建议采用第三种方式为好。

3.2 无源滤波器

无源滤波器只是适用于设计的谐波频率。通常并联在低压母线上。

3.3 隔离变压器

隔离变压器是一个常用的措施。它可以隔离来自电源的3N次谐波。

3.4 整流装置脉冲数的选择和经济性

脉冲数的选择应与经济性能统一考虑。根据有关资料分析,应作下列几点考虑:

- a. 脉冲数越多,则谐波干扰越小。
- b. 脉冲数越多,则成本就越高。

因此,脉冲数的选择应在符合《电网质量 公用电网谐波》(GB/T14549)的允许条件下合理选择:

小功率电力电子装置,用低压(220、380V)供电,一般多采用6脉冲整流,容量特别小的可用单相整流。

中等容量的电力电子装置(容量在1500kV·A以下,10kV供电),一般采用12脉冲整流。大容量的电力电子装置,可采用24脉冲整流。

- c. 如果正常运行中的电压总畸变率不超过5%,应尽量少采用防谐波危害的措施。

3.5 专线或专用变压器供电

对谐波敏感的电子设备(如大型计算机、DS1)、核磁共振(MR1)和CT(计算机层析成像)机、X光机、数字减影仪采用专线供电。专线供电指一个负

载,由单独回路供电,这是一个简单、价廉,而且很有效的技术措施。

3.6 变压器容量的选择

在谐波情况较严重时,变压器应具有足够低的输出阻抗和足够大的容量,以耐受额外的发热。

另介绍一种按K系数法设计变压器的方法。在有大量谐波的系统内,应采用K系数为K-4的变压器。所谓K系数,即为单位谐波电流的平方乘以谐波次数的平方,然后累加。其表达式为:

$$K = \sum_{h=1} [I_{h(pu)}]^2 h^2$$

式中: $I_{h(pu)}$ ——是指相对于基波电流的单位值;

h ——谐波的次数。

K系数法考虑了谐波频率的影响,非正弦波电流使变压器因绕组非正常温升导致过早损坏。因为K系数法考虑了频率因素,它是用于计算干式变压器的非线性负载谐波影响的最精确及可行的方法。

3.7 中性线截面的选择

谐波电流大量流经中性线,为此在三相四线系统内,中性线截面取为正常相线截面的1倍、1.5倍,一直到2倍,根据具体情况而定。

谐波电压的存在,使中性线(N线)上的电压有可能大于安全电压(50V),在维修时对人身安全有害。为此在工程中采用4极开关,在切断电源同时切断中性线(N线),是有必要的。

3.8 采用直流串接扼流线圈是最经济的限制谐波的措施

3.9 具有12脉冲整流器的VFD

利用12脉冲器可将一般VFD(真空荧光显示管)的电流变化率降低90%,可满足IEEE519-92标准所规定的苛刻的电源质量的要求。

3.10 带3%的输入电抗器的VFD

带3%的输入电抗器可降低电流畸变百分数(40%至60%)与带直流串接扼流圈相同。

上述3.8、3.9、3.10三种防范措施的降低电流畸变的百分数见图2。

3.11 采用Y,d或D,y以消除3的整数倍次的谐波,依次减小谐波的影响

3.12 合理的布线

根据IEC60364-4-444.A2.Ed.1的规定,下列措施可以降低电磁干扰:

- a. 对于电磁干扰敏感的电气设备,建议使用电

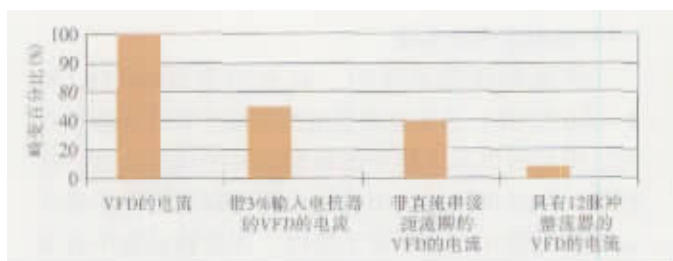


图2 三种防范措施的降低电流畸变的百分数

涌抑制器和(或)滤波器,从而提高针对电磁现象的电磁兼容性。

b. 电缆的金属屏蔽层应与共用等电位联结系统(CBN)相连接。

c. 对电力回路、信号和数据电缆回路应选用一个共同的路径以避免形成感应环。

d. 电力电缆和信号电缆应分开,当实际应用中交叉时,应形成直角(见444.6.3)。

e. 使用有中心导线的电缆来降低被保护导线里的感应电流。

f. 对于变压器和发动机之间的电气连接,请使用对称多芯发动机电缆(例如2YSLCY-J电缆),因为这些电缆有频率控制装置。

g. 在制造商的指导下使用符合EMC要求的信号和数据电缆。电力和信号电缆应与防雷引下线分开最小距离或加以屏蔽。最小距离应由防雷系统设计者根据IEC-62305-3(《雷电防护 第3部分:建筑物的实体损害和生命危险》)来决定。电力和信号电缆的金属护套或屏蔽层应根据在IEC-62305-3和IEC-62305-4(《雷电防护 第4部分:建筑物内电气和电子系统》)中对防雷保护的要求加以联结。

h. 当采用屏蔽的信号或数据电缆时应注意避免故障电流流经信号或数据电缆的接地的屏蔽层或芯线。可能需要其他的导体,例如使用旁路等电位联结线加强屏蔽,见图3。

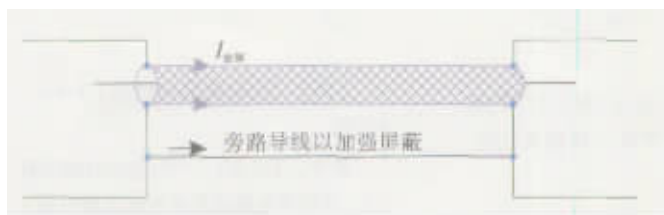


图3 旁路导线以加强屏蔽从而提供一等电位联结系统

图中:在信号或数据电缆护套附近使用旁路导体,还可以与设备相关的电路形成封闭的区域,这种情况只有在它们和保护导体接地后才能发生。这种实施方法可以大量降低雷击电磁脉冲(LEMP)的电磁干扰。

i. 当几个建筑物采用TT系统供电并有共同的屏蔽的信号和数据电缆时,应采用一旁路等电位联结线,见图4,其最小截面面积为铜质16mm²或根据IEC60364-5-54.554.1规定的等同的其他材质的电线。

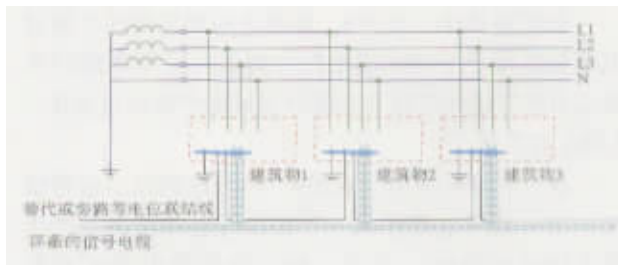


图4 TT系统内替代线或等电位联结线示例

j. 等电位联结应有低阻抗,可以通过以下方法:采用尽可能短的联结线;采用交叉型的联结使得每米的回路上的感应电势和阻抗值低。例如采用联结编织带的宽度与厚度的比值从5至1。

k. 当等电位联结系统属于有重要的信息技术装置的建筑物时,其接地干线可以安装成一封闭的环。这条措施适用于电信通讯工业的建筑物内。

3.13 低压系统

3.13.1 为了使电磁干扰最小化,适用下列措施

a. 在已建的,有或可能有大量信息技术设备的建筑物中,建议不采用TN-C系统。

b. 在新建的,有或可能有大量信息技术设备的建筑物中,建议不采用TN-C系统。任何TN-C系统装置都可能会产生负载或故障电流,并通过等电位联结转移到建筑物内的金属部件及结构部件上。

c. 在一已建的由公共低压电网供电的建筑中,若同时有或可能有大量的信息技术设备存在时,在电源进线处后宜安装TN-S系统。见图5。

d. 在新建的建筑里,TN-S系统应安装在电源进线处后面。利用符合IEC-62020标准的剩余电流监视设备(RCM)可以加强TN-S系统的有效性。

e. 在已建的建筑中,若包括变压器在内的所有低压电气装置由业主运行管理的,而且有或是可能会有大量的信息技术设备的,应采用TN-S系统,见图6。

3.13.2 当现有的装置为TN-C-S系统时,见图7,信号和数据电缆回路应避免以下情况

a 更换所有的TN- C部分 (见图7), 成为TN- S (见图5)。

b. 当以上更换不可能实现时, 需避免信号和数据电缆在TN- S装置的不同部分互相连接。

3.13.3 TT系统

在TT系统中, 见图8, 如果不同建筑物的外露导电部分连接于不同的接地板上的话, 应考虑到TT系统在带电导体和外露导电部分上可能产生的过电压。

3.13.4 IT系统

在三相IT系统中, 见图9, 应考虑到以下这种情况: 当一相导电部件和一个暴露导电部件之间产生单个接地故障时, 在另一相安全的导电部件和暴露导电部件之间的电压会上升到相间电压。若电气设备直接接在相导体和中性线之间, 应考虑到此设备能够经受住相导体和暴露导体之间产生的电压 (有关要求请参阅IEC- 60950: 信息技术设备)。

3.14 多电源供电系统

多电源供电系统中, 应使用条例444.4.6.1和444.4.6.2。注: 当多电源供电的连接中有星形连接点时, 中性线电流可能会流回到相关的星形接点, 这种情况不仅可以通过中性线而且可以通过保护导线发生, 见图10。由于这个原因, 在这种装置中各部分流经电流的总和不等0, 而且会产生一个磁场, 和单个导电电缆的情况相似。

在单个导电电缆携带有交流电的情况下, 中心导体周围会产生一环状电磁场从而干扰电气设备。谐波电流可以产生相似的电磁场, 但是此种电磁场比正弦电流引起的电磁场衰减更快。

3.14.1 TN系统的多电源供电

在多电源TN系统的情况下, 由于电磁兼容的原因, 不同电源的星形连接点宜通过一个绝缘导体互相联结, 这个绝缘导体应该与接地在同一点相连, 见图11。

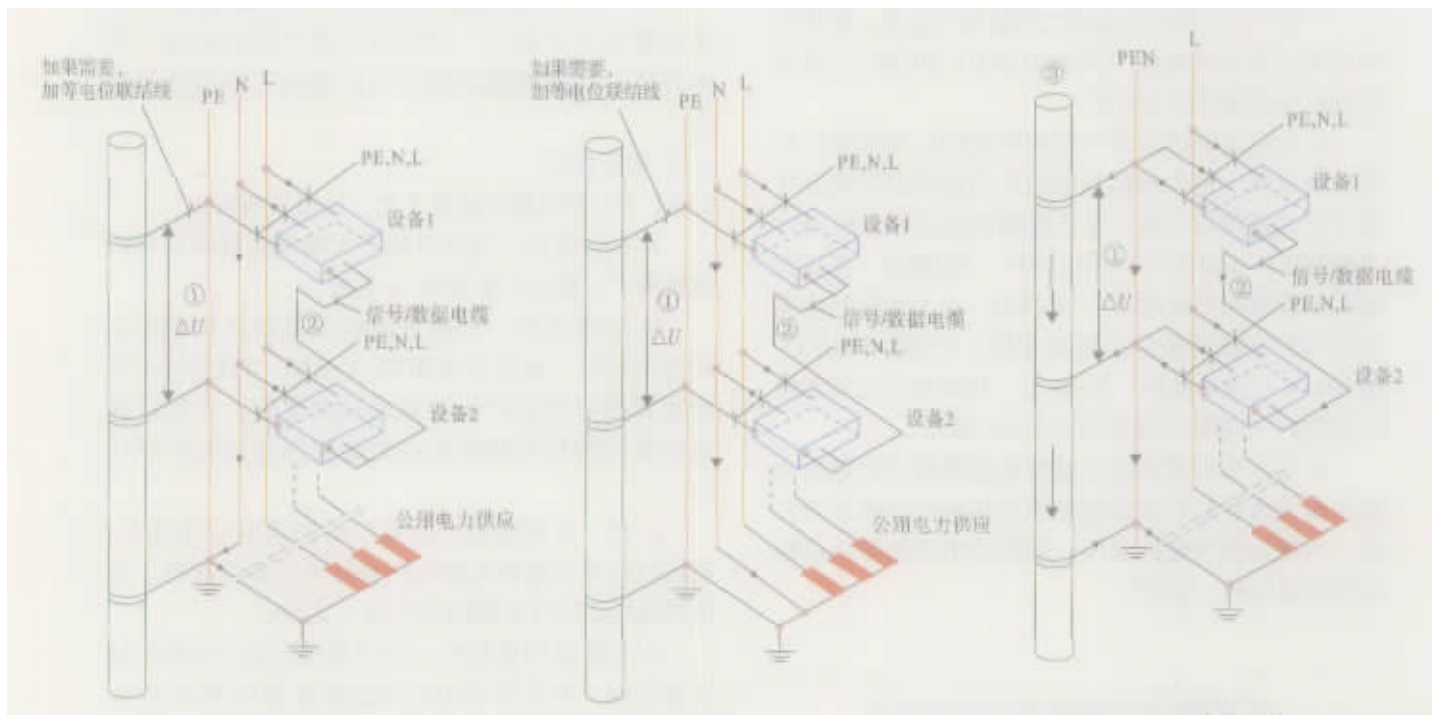


图5 在一建筑物内从进线处直至末端回路采用TN- S系统以避免在等电位联结系统内出现中性线电流

图中: 正常工作时在PE线上无电压降 U ; 信号电缆或数据电缆等形成包绕小面积的环。

图6 从用户变压器以后采用TN- S系统以避免在等电位联结系统内出现中性线电流

图中: 正常工作时在PE线上无电压降; 信号电缆或数据电缆形成包绕小面积的环。

图7 已建建筑物内的TN- C- S系统

图中: 正常工作时PEN线内有电压降 U ; 信号电缆或数据电缆形成包绕小面积的环; 装置外导电部分。

在TN- C- S系统中, 原只在TN- S系统中性线流通的电流, 也流经信号电缆的屏蔽层或参考电位线外露导电部分, 以及建筑物金属结构之类的装置外导电部分。

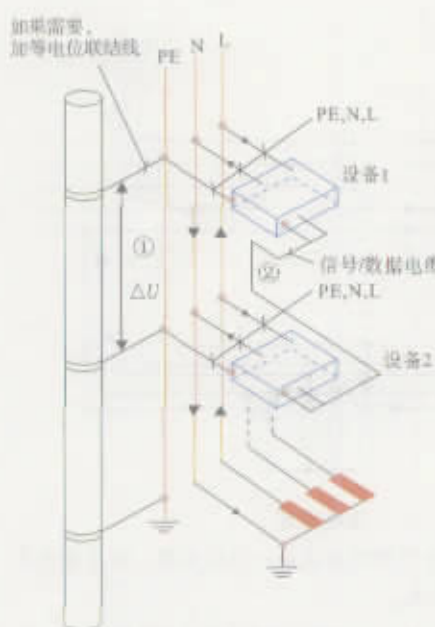


图8 建筑物内的TT系统

图中：①正常工作时PEN线内有电压降 ΔU ；
②信号或数据电缆形成包围小面积的环。

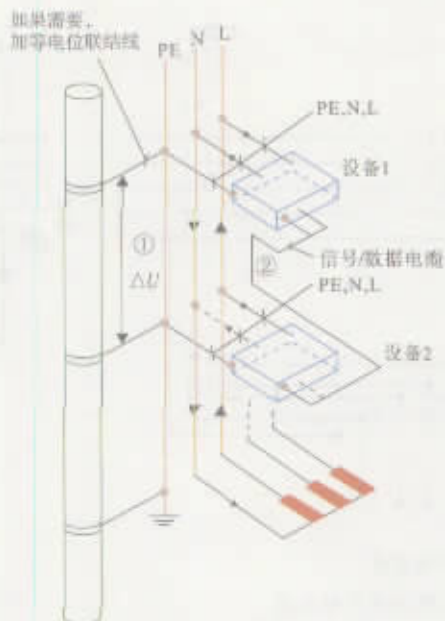


图9 建筑物内安装的IT系统

图中：①正常工作时PEN线内有电压降 ΔU ；
②信号或数据电缆形成包围小面积的环。

3.14.2 TT系统的多电源供电

在多电源TT系统的情况下，由于电磁兼容的原因，建议不同电源的星形连接点在同一点中心位置进行接地，见图12。

3.14.4 电源转换

在TN系统中，自一电源转换至替代电源上时，宜采用能同时切相线和中性线的转换开关，见图13-15。

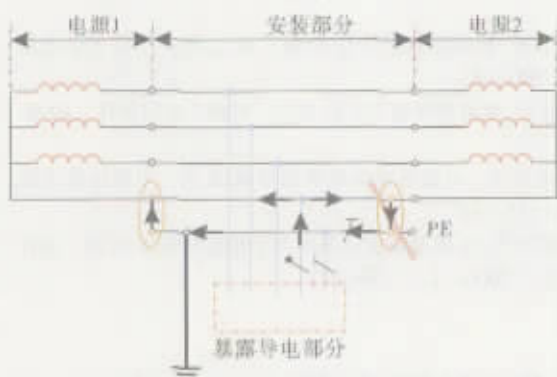


图10 TN多电源供电在PEN和接地间有一个不适当的多次连接

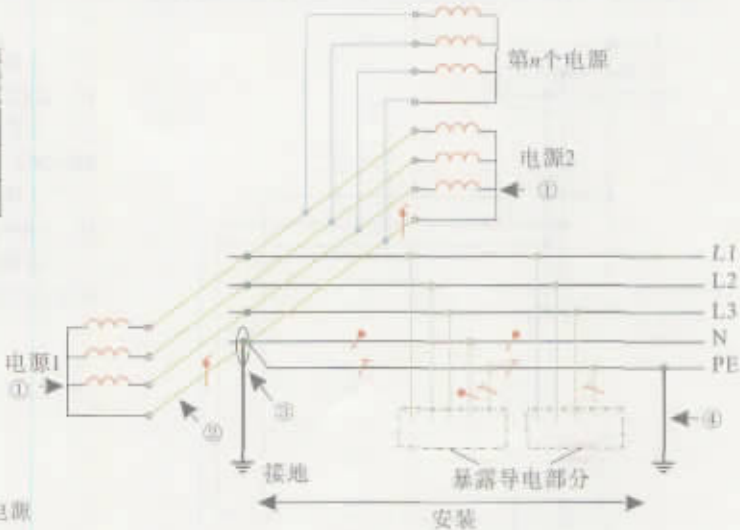
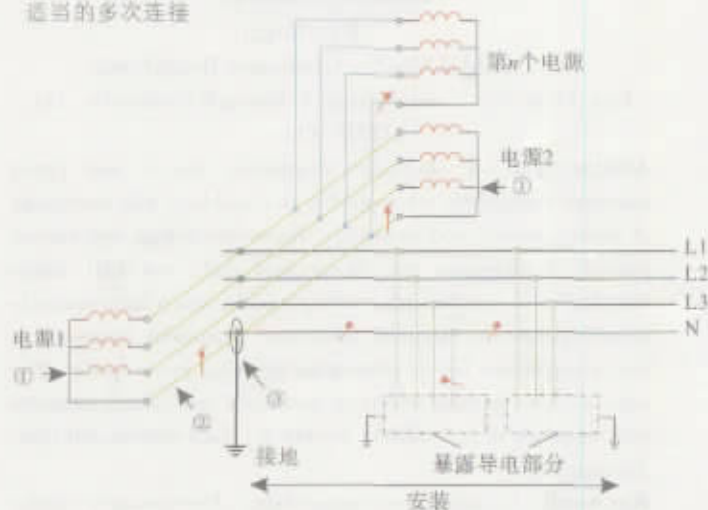


图11 多电源TN系统，所有的中性点只能在同一点接地

图中：①从变压器中性点或发电机的星形点到接地没有直接连接是允许的；②导线连接变压器中性线或发电机星形点时应绝缘，此导线功能如同PEN导线亦可标注成PEN线，但是不能连接电流使用设备，而且在导线上或附近应有警告标识；③互相连通的电源的中性点之间的联结只能有一个，而且应接地，这个连接应位于主开关组内部；④可以提供额外的PE接地。

图12 多电源TT系统，所有的中性点只能在同一点接地
图中：①-④与图11注①-④相同。

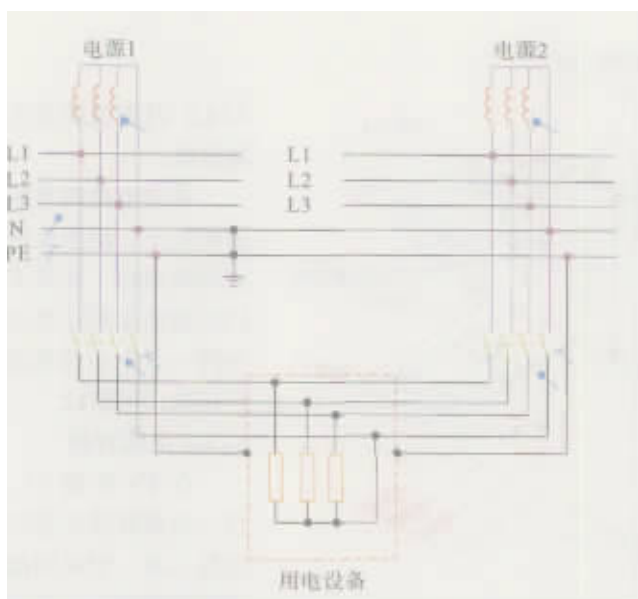


图13 装有四极开关的交流三相电源

注：这种方式可以避免产生电磁场，因为在装置的主供电系统中有偏离电流，一电缆线上的总电流必须为0，这样可以保证中性线电流只会流经相应的回路开关上的中性线导体上。3次谐波电流（150Hz）会被以相同相波形加在中性线电流上。

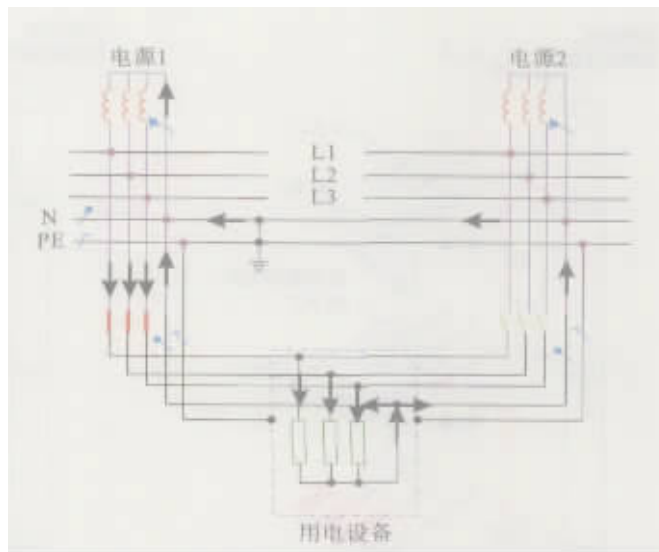


图14 中性线电流流经一三相电源，此电源有不合适的三极开关。

注：三相互为备用的电源不恰当地装了三极开关，会引起不必要的环流，从而引起电磁场。

参考文献

- 1 温伯银. 智能建筑设计技术. 第二版. 上海: 同济大学出版社, 2002: 661-685
- 2 陈伟华. 电磁兼容实用手册. 北京: 机械工业出版社, 1998: 355-362
- 3 姚世全等. 电磁兼容标准实施指南. 北京: 中国标准出版社, 1999: 115-131
- 4 钱照明等. 电磁兼容设计基础及干扰抑制技术. 杭州: 浙江大学出版社, 2000: 4-5, 205-211

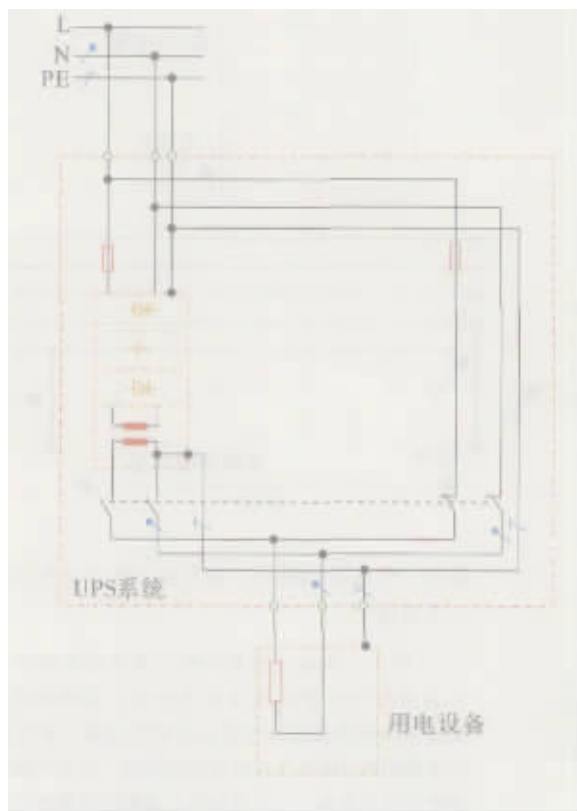


图15 带二级开关的单相电源

注：UPS的次级回路接地不是必须的，若省略此连接，以UPS模式供电时，就是IT系统的型式；在旁路模式时，和电源侧的低压供电系统一致。

Harmful Effects of Harmonics and Control Measures

Wen Boyin

(Shanghai Xian Dai Architectural Design Group
East China Architectural Design & Research Institute Co., Ltd.
200002 China)

Abstract Lots of electronic information devices and power electronic equipments are applied to civil buildings with developing of modern science and technology. Harmonics voltage and current caused by increasing non-linear load daily and EMI makes electrical power quality deteriorating rapidly, which harm seriously normal operation of electronic information equipment. Harmonics is one of importance factors influencing electrical power quality. The pape analyses harmful effects of harmonics and control measures with reference to IEC 60364- 4- 444. A2. Ed.1 version and other documents.

Key words Electromagnetic compatibility Electromagnetic interference Control measures