

[电能质量]

三相桥式整流电路谐波分析及控制

文/中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司 严 雄

谐波对电力系统正常及高质量运行具有一定危害，而系统中谐波的来源众多，对其中较具代表性的三相桥式整流电路谐波进行分析。首先阐述谐波危害，根据谐波成因及特征，构建三相桥式整流电路数学模型，分析谐波构成，再针对特征谐波提出检测、控制策略。

以电力系统工频为基准，电压信号通过傅里叶变换后，其中频率为基波频率整数倍（ >1 ）的分量就是谐波。一旦谐波大量产生，电力系统不但会出现异常，还可能产生一些长期性的故障，因此，有必要对三相桥式整流电路谐波进行控制。但控制不可盲目，实际操作中应当先对该谐波进行检测分析，再提出控制策略，对此进行分析具有一定现实意义。

三相桥式整流电路谐波危害、谐波成因及特征

1. 危害影响

三相桥式整流电路谐波的危害影响非常严重，一旦产生，会对电网电力系统、电气设备造成影响，而两者中任意一方出现异常，都会直接导致电网运行故障，甚至造成安全事故。因此，必须对三相桥式整流电路谐波进行分析与控制。例如根据某地区连续10年的统计数据，在谐波影响下辖区内电力系统异常率达到100%，电气设备异常率及故障率分别为100%、80%，同时还造成过两起电力工作人员触电事件，粗略估计下给当地电力部门造成了上千万元经济损失，可见该谐波危害影响重大。

三相桥式整流电路谐波的危害影响一般具有

如下四种表现。

1) 谐波导致电气设备内电力电子元件损耗变大，导致设备效率降低，且在长期谐波工况下运行，设备老化速度会加快。在谐波情况严重时，电子元件在损耗增大的情况下会产生较大的热能，容易出现设备烧毁的问题。

2) 谐波是一种能量波，它的产生必然会带来一些物理效应，其中最明显的就是振动力。因此，当谐波在某电气设备中形成，设备容易出现高频或异常振动，这种现象会加速设备损耗，引起电力故障。同时，设备受谐波影响而振动会出现噪声，降低工作环境舒适度。

3) 从电力系统整体构成看，系统内所有电气设备都是通过LC电路串联/并联进行连接，若系统内部分谐波源（如三相桥式整流电路）注入系统的谐波超标，会导致电力系统出现串联、并联谐振现象，造成大面积的设备损害，甚至系统瘫痪。

4) 现代电力系统都是通过信号技术来联系的，系统各组成部分之间的通信质量非常重要，但在三相桥式整流电路谐波影响下，电力系统之间的通信会受到严重干扰，出现信号质量差、无故中断等现象，给系统维护带来较大的困难。

2. 谐波成因及特征

电流谐波成因在于无功功率负荷。在实际应

用中,负载一般情况下属于阻感负载,而这种负载来源于直流电整流器(三相桥式整流电路的相关设备)。受该设备影响就会出现无功功率负荷,同时一些非线性特性的电力设备在运行中会消耗无功功率,随之产生无功电流,带来无功功率负荷。因此,即使在变压器输入交流电为正弦波条件下,也会因为负荷中的电抗性、变压器二次侧漏抗特征导致交流侧输入电流发生异常,产生非正弦波,带来谐波电流。

三相桥式整流电路谐波普遍具有分量较大、功率因数较低的特征。另外,在二极管整流电路当中,虽然该电流的相移因素接近1,但受电容滤波影响,输入电流同样具备谐波分量、功率因数低的特征;在电流输入端不具备校正功能的情况下,电流输入功率因数一般不超过0.8,这时整流电路中的输入电流谐波波形将具备平顶波特征,甚至接近方波,会给电网造成巨大影响。

三相桥式整流电路数学模型构建

根据以上分析,构建三相桥式整流电路数学模型,以便于检测分析。

1. 模型拓扑与假设

图1所示为三相桥式整流电路结构,依照该结构可以进行数学建模,但考虑到模型分析的便捷性,将排除结构中的换向需求,并提出三项假设条件:①电源三相平衡;②交流侧电抗为零;③直流电感 L_d 无限大。

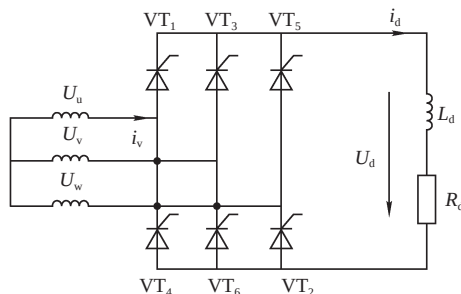


图1 三相桥式整流电路结构

2. 谐波分析

在假设条件①的基础上,以图1中的U相为例,依照三相电源的对称原则采用傅里叶级数将电流波形展开,同时选取电流负、正两半波中心点为时间零点,可得

$$i_u = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\sin \omega t - \frac{1}{5} \sin 5\omega t - \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \frac{1}{11} \sin 11\omega t + \frac{1}{13} \sin 13\omega t - \frac{1}{17} \sin 17\omega t - \frac{1}{19} \sin 19\omega t \right) \quad (1)$$

因三相电流的波形相同,且相互依次相差 120° ,所以电流有效值与直流电之间的关系为

$$I = \sqrt{\frac{2}{3}} I_d \quad (2)$$

通过式(2)可知,当电流中只具有次谐波,且谐波满足 $6k \pm 1$ 的条件下(k 为正整数),次谐波的有效值将与谐波次数呈反比关系,同时次谐波与谐波的有效值比值将成为谐波次数的倒数。

三相桥式整流电路谐波的检测、控制策略

1. 检测策略

三相桥式整流电路谐波检测策略以三相电路瞬时无功功率理论为基础,根据该理论演化出了两种检测方法,分别为“p-q”法、“ i_p-i_q ”法。两种方法中前者操作难度较大,因此,本文将“ i_p-i_q ”法为例,结合图1进行分析。“ i_p-i_q ”的检测步骤大体可以分为两个环节,具体如下。

1) 选择图1中的U相,利用锁相环将其与正余弦发声电路连接,由此可得正余弦信号 $\sin \omega t$ 、相应的余弦信号 $-\cos \omega t$,两者与电压的相位相同,随后采用矩阵 C_{23} 对三相负载总电流进行三相-两相坐标处理,可得正余弦信号 i_α 、 i_β 。

2) 依照正余弦信号 i_α 、 i_β 可得三相桥式整流电路的有功电流、无功电流,采用低通滤波器进行滤波处理,可知两者的直流分量 i_p-i_q 。继续使用 C_{23} 矩阵进行反变化,可知电流基波分量,最后将总电流分量与电流基波分量相减,可知总电流谐波分量,完成检测。

2. 控制策略

如果通过检测策略确认三相桥式整流电路谐波存在或可能存在,则要采取谐波补偿、设备改造来进行控制,具体如下。

(1) 谐波补偿

谐波补偿适用性非常广泛,几乎能对所有谐波源进行控制,实现谐波预防和治理目的。具体应用中,首先确认谐波源,同时采集谐波信号,其次依照检测策略测得谐波与完整正弦波标准之间的差距,最后根据差距设置外接式谐波补偿装置,并调试好补偿功率,可在补偿装置运作中将谐波补偿为完整正弦波,消除或预防谐波产生。

(2) 设备改造

较于谐波补偿策略,设备改造策略更加有

(下转第74页)

为0来判断下一步操作为更新菜单列表还是执行功能界面。若下一步操作为更新菜单列表，则调用菜单绘制函数，菜单绘制函数根据操作码以及当前选择项 menu_selected 变量的值在液晶屏上绘制菜单。若下一步操作为执行功能界面，则通过SWITCH-CASE结构跳转至对应功能界面执行，将系统控制权交给功能界面程序，菜单界面程序不再对输入事件做出响应。

5. 程序运行结果

依照本菜单界面方案开发的程序已经在符合国网用电信息采集系统标准的I型集中器硬件平台上成功实现并验证，可正确地响应用户按键操作。图6为I型集中器液晶显示模块实物图，液晶屏显示主功能菜单界面。

结束语

本文描述了一种应用于用电信息采集系统集中器的多级菜单人机界面，该方案基于I型集中器搭载的160×160点阵液晶及按键实现，其数据结构简单易懂，程序结构紧凑、易于维护。本方案抛弃了传统的链表式菜单结构，使用菜单列表的ID编码区分并管理菜单结构层级，程序可读性

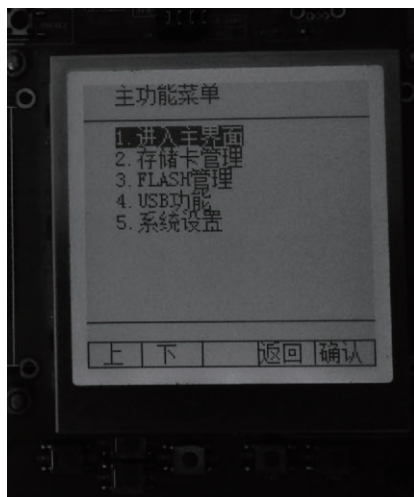


图6 主功能菜单界面

高，菜单列表分级清晰，易于添加或删除菜单列表及菜单项。该方案稳定可靠，已成功在一种数据采集装置上实现，并且此方案由C语言编写，可方便地移植至各种硬件平台，对电力系统所应用的智能化仪器仪表人机界面的开发有一定的参考意义。EA

(收稿日期：2020.06.05)

(编辑：朱金凤)

(上接第44页)

效，在适用范围内基本能完全根治谐波，但该策略使用率并不高，原因在于设备改造难度大、成本高和耗时长等。因此，在控制谐波的工作中，如果有其他方法可以选择，都不建议采用设备改造策略，但如果其他方法都不能处理谐波，则必须使用改造策略。设备改造适用于谐波源为电气设备的情况下，主要对变流器进行开发改造，如果改造成功，通过变流器能够对三相桥式整流电路的U、V、W相电流进行控制，使三者与电压相位相同，且功率因数接近1，这样就实现了谐波控制目的。

此外值得注意的是，以上两种策略是可以联合使用的，即假设出现了三相桥式整流电路谐波，可以先采用谐波补偿策略来进行治理，完成后采用检测策略确认电流状态，如果状态依旧处于谐波范畴，则在补偿策略基础上对设备进行改造，由此能最大限度地控制、消除谐波。而在两种策略的应用中，工作人员必须关注改造后设备

的适用性，即某些改造策略中为了消除谐波或控制谐波，会对设备进行大幅度改造，导致改造后设备不再满足电网供电需求，甚至会产生新问题。因此，设备改造必须在保障设备性能的前提下使用。

结束语

综上所述，三相桥式整流电路谐波的危害重大，涉及电力配送、电力企业经济及电力安全范畴。因此，相关人员必须对该现象进行治理。对此本文采用数学方法构建了三相桥式整流电路谐波模型，通过模型展示了谐波检测逻辑，并依照逻辑提出了谐波检测策略，随后依照谐波原理阐述了两种谐波的控制策略，分析了控制策略的基本原理、应用方式，利用检测、控制策略能够确认谐波状况，并最大限度地控制、消除谐波危害。EA

(收稿日期：2020.07.05)

(编辑：朱金凤)