

[谐波治理]

地铁谐波电流分析及治理方式探寻

文/程 冲
福州地铁建设有限公司

随着科学技术的发展，地铁车站的非线性负荷越来越多，产生的谐波电流有明显上升的趋势。通过对地铁非线性设备谐波电流的特征进行分析，并对现有的三种谐波治理方案的优缺点进行分析对比，得出在高压侧35 kV配置SVG，低压侧400 V配置APF方案是较为有效的谐波治理措施。

随着科学技术的发展，地铁车站的动力照明设备、变频器水冷机组、EC风机、LED灯具、自动扶梯和集中UPS等非线性负荷越来越多，反馈到110 kV主变电站PCC点的谐波电流有增加的趋势。本文从谐波的产生及危害、地铁系统谐波源分析、谐波源方案探讨等方面进行阐述，对地铁谐波治理的方向进行探寻。

谐波的产生及危害

1. 谐波的产生

当电流流经非线性负荷时，与所加的电压呈非

线性关系，形成非正弦电流，进而产生谐波。谐波频率是基波频率的整倍数，根据法国数学家傅里叶分析原理证明，任何重复的波形都可以分解为含有基波频率和一系列为基波倍数的谐波的正弦波分量。谐波可以区分为偶次与奇次，第3次、5次、7次的谐波为奇次谐波，而第2次、4次、6次和8次谐波为偶次谐波，如基波为50 Hz时，2次谐波为100 Hz，3次谐波为150 Hz。具体情况如图1所示。

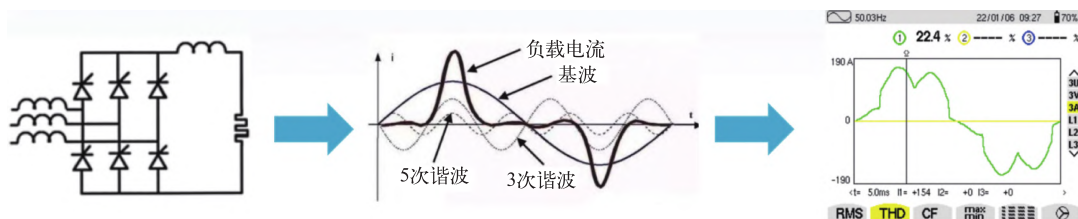


图1 谐波产生原理图

2. 谐波危害

地铁系统内大量使用非线性负荷，如UPS、变频器、LED光源、整流器和逆变器等。在工作时会产生大量谐波电流，注入配电系统后对系统造成危害，主要表现如下。

1) 谐波电流（或电压）在地铁风水电系统的水泵电动机产生附加损耗，降低用电设备的效率。

2) 谐波使正弦波幅值增大，导致电动机、变压器、电容器等电气设备的磁滞及涡流损耗增加。谐波使正弦波幅值出现瞬间变大，曲线尖峰增大使变频器、LED光源、整流器和逆变器等地铁设备寿命非正常降低。

3) 谐波产生额外的热效应，引起用电设备发热，使绝缘老化，降低设备的使用寿命，增加电力

能耗。

4) 增大测量仪表、计量装置显示错误率。断路器的开断能力受谐波含量的影响, 发生短路的风险大幅增加。

5) 电气二次设备误动作或拒动作的概率大幅增加, 干扰通信系统正常运转, 威胁通信设备及人身安全。

地铁系统谐波源分析

地铁普遍采用整流变压器, 主要产生高次谐波, 次要产生低次谐波。但由于变压器不是理想变压器, 磁路无法做到完全对称, 且各参数与设计值有差异, 因此24脉波整流机组产生其他次谐波。根据谐波规律, 谐波次数越大, 幅值越小。理论上三相变压器等铁心设备主要产生3次、5次和7次谐波, 低压配电系统中的照明、空调器、电梯等负荷主要产生3次、5次、7次、11次和13次谐波。整流机组正常运行负荷情况下, 一般谐波总含量在4%以下。

1. 动力照明设备谐波
- 1) 变频器水冷机组以CA300-132 kW汇川测试数据为例 (具体详见表1、表2), 按照车站典型配置160 kW两台, 经测试确定主要谐波次数为5次、7次、11次和13次谐波, 电流分别为79.84 A、28.56 A、18.96 A和10.61 A。

表1 测试数据 (未加滤波器)

I_{icm}	A相	B相	C相
U_{rms}/V	403.55	402.85	401.80
U_{rms}/A	268.28	264.13	263.46
$U_{thd}/(\%)$	5.12	5.15	5.24
$I_{thd}/(\%)$	36.26	36.78	36.57

表2 测试数据 (加滤波器)

I_{icm}	A相	B相	C相
U_{rms}/V	403.61	403.26	402.69
U_{rms}/A	265.05	260.78	260.85
$U_{thd}/(\%)$	4.91	4.86	4.98
$I_{thd}/(\%)$	30.12	30.58	31.15

- 2) EC风机以站典型配置为例 (配置详见表3), 经测试确定主要谐波次数为5次、7次、11次和13次谐波。电流分别为24.45 A、13.24 A、9.33 A和5.26 A。

表3 典型配置明细表

名称	型号	功率/kW
大系统组合式空调器 (自带变频器控制柜)	AHU-A01	27.2
大系统组合式空调器 (自带变频器控制柜)	AHU-B01	17.2
小系统空调器 (自带变频器控制柜)	AHU-A301	11

注: 车站排热风机、回排风机等也采用变频控制, 变频器安装在环控柜内。

- 招标要求THDI小于5%。
- 3) 车站典型灯具按公共区500套、设备区200套30 W灯具配置为例, 总容量约为21 kW, 经测试确定主要谐波次数为3次谐波。
- 4) 车站典型自动扶梯每车站按14台24 kW扶梯计算, 其中站内6台、出入口8台, 总容量为336 kW。主要谐波次数为5次、7次谐波。
- 5) 集中UPS主要谐波次数为5次、7次、11次、13次谐波。集中UPS谐波总含量在2.4%左右。
- 6) 车站动力照明负荷谐波理论计算, 典型车站0.4 kV变电所谐波计算数据 (冷水机组、EC风机、自动扶梯均不进行治疗), 谐波总电流约374 A; 单段0.4 kV母线谐波总电流约185 A。典型车站0.4 kV变电所谐波计算数据 (冷水机组THDI控制在5%以下, EC风机和自动扶梯不做治理), 谐波总电流约215 A; 单段0.4 kV母线谐波总电流约110 A。

2. PCC点谐波测试数据分析

在主变电站35 kV母线进行谐波数据分析, 动力照明负荷各次谐波的绝对值不高, 但是谐波含量占比高。5次、7次是主要谐波, 11次、13次为次要谐波。低压负荷的5次谐波含量为2%~10%不等; 整流机组的谐波 (单个样本) 以5次、7次、23次和25次谐波为主, 平均占比在1.5%左右。主变压器低侧母线的谐波迭加数据显示, 迭加后的低压谐波绝对值与整流机组相当, 但由于低压基波小, 谐波含量占比高于整流机组; 系统谐波存在放大现象, 110 kV主所的PCC点谐波数据放大倍数达到2倍。

3. 小结

地铁系统动力照明负荷及牵引负荷都为谐波源, 随着电力电子设备应用的增加, 系统谐波含量有上升趋势。通过设备理论数据、实测分析, 地铁PCC点谐波以5次、7次、11次和13次为主, 其中动力照明负荷以5次、7次谐波为主, 牵引负荷以3次、5次、7次、11次、13次、23次和25次谐波为主, 5次、7次和11次相对突出。低压谐波绝对值

与整流机组相当，但由于低压基波小，谐波含量占比高于整流机组。由于公网供电系统短路容量偏低，供电局对110 kV高压用户PCC注入点谐波考核严格。PCC点实际谐波含量与系统运行网络参数有关，存在着不确定性。

谐波治理方案探讨

为降低系统谐波含量，需加装谐波治理装置。目前，国内的谐波治理措施主要有串联电抗器和整流脉冲装置等方案。

1. 串联电抗器，增加整流脉冲装置

该方案的优点是可以部分滤除谐波，有效消除某些特征次谐波，6脉冲谐波增加到12脉动，可以减少5次、7次谐波电流。但缺点是滤波效率低，串联电抗器电抗率过高，影响设备出力，电压降过大。只能消除特定次谐波，滤波效率有限，增大系统复杂性，降低整流器效率，移相变压器移相角度的精确程度直接影响谐波含量。设备散热较大，仅适合户外配置，对主变电站的用地面积有较高的要求，对环境噪声有一定的影响。

2. 高低压侧各安装无源滤波装置

无源滤波器对某一频率的谐波呈低阻抗，与电网阻抗形成分流关系，就近吸收谐波源产生的谐波电流，使大部分该频率的谐波流入滤波器。该方案的优点是投资小、结构简单、效率高，对目标谐波滤波效果明显。缺点是每次谐波需要一组滤波器，只能消除特定次的谐波，对于某些次谐波，产生谐振放大作用，滤波的同时会产生无功，增加系统无功补偿的需求。当谐波电流增大时，滤波器过载概率陡然增加。原理接线图如图2所示。

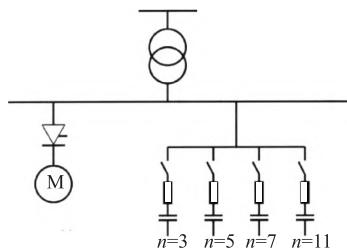


图2 LC+FC无源滤波装置接线图

3. 高压侧配置SVG，低压侧配置APF

该方案是通过实测电流值，经过运算确认补偿电流，进而降低系统电流谐波含量。该方案的优点

是系统阻抗无法影响滤波特性，可消除串联谐振的危险。具备滤波和无功补偿的自主调节能力，自动跟踪补偿变化的谐波，滤波效率高且不发生过载。低压有源滤波装置技术、市场成熟，经济性较好。系统性解决方案，谐波就地、分层、分区处理；灵活性好，适应系统运行后产生的不确定性，经济合理。缺点是目前SVG滤波功能尚不完善，高次谐波滤波效果较差，且需要较大的无功支撑容量。APF滤波效果如图3所示。

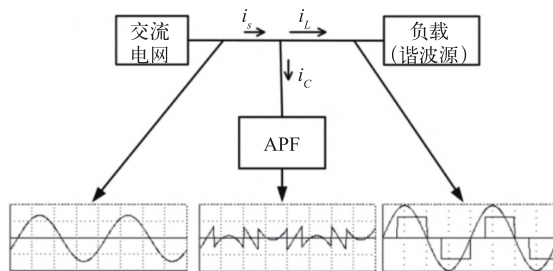


图3 APF滤波效果图

4. 主所集中配置SVG

该方案的优点是设备集中，同时治理无功和谐波可针对供电局考核要求进行治理。但缺点是装置容量大、耗能高、费用高，不能解决低压系统内部的供电质量问题。适用于降压所内轻负荷，PCC点谐波超标不多，或降压所内没有APF安装条件的工程。

5. 主所集中配置FC滤波及电抗器或SVC或SVG

该方案的优点是设备集中，同时治理无功和谐波；FC治理主要超标谐波，设备故障率相对低。缺点是电抗器或SVC或SVG治理系统内无功和FC产生的无功。装置容量大、耗能高、土建占地大。适用于谐波含量固定、土建预留空间足够、系统实际运行后根据实测数据进行设备参数定制的工程。

结束语

经论证并实际应用，在高压侧配置SVG，低压侧配置APF方案为较成熟的地铁谐波治理方案。该方案可以系统性地解决地铁谐波超标问题，该方案旨在就地、分层、分区处理，降低谐波电流对设备的影响，降低系统谐波放大几率；灵活性好，适应系统运行后产生的不确定性，经济合理。可以高效率地治理动力照明设备所产生的谐波。EA

(收稿日期：2023-04-23)