

# 基于电容器投切法的牵引供电系统谐波阻抗测试分析

张 权,胡海涛,陶海东,何正友

(西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031)

**摘要:** 针对牵引供电系统供电拓扑结构复杂、系统等效阻抗难以精确计算等特点,提出基于电容器投切法的谐波阻抗测试方法。并联电容器开关闭合的过程可以等效为一个谐波源向系统注入谐波电流,基于此建立了阻抗测试系统用于处理拓扑结构特殊的牵引供电系统,该阻抗测试系统由 27.5 kV/380 V 的变压器、电容器、开关和负载阻抗组成。考虑到现场测量中存在背景谐波、噪声等干扰,利用波动量法和小波分层算法对采集信号进行处理。基于 Simulink 仿真平台搭建牵引供电系统阻抗测量模型,仿真及误差分析结果验证了所提方法能有效地测量牵引供电系统的谐波阻抗。

**关键词:** 牵引供电系统; 阻抗频率特性; 电容器投切; 阻抗测量; 时域仿真

**中图分类号:** TM 922.3;U 223

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.11.023

## 0 引言

自 2007 年铁路实施第六次大提速以来,HXD 系列电力机车和 CRH 系列动车组(EMU)逐渐投入运行,在京哈线、京津城际铁路、哈大线、合武客专、武广客专等电气化铁路上,都发生过谐波谐振事故,这些事故通常造成接触网避雷器炸毁、机车高压电气设备损坏、变电所馈线跳闸等后果,对电气化铁路正常运输秩序造成很大干扰<sup>[1-2]</sup>。现场测试报告表明,当电力机车或动车组的谐波注入电流与某区段(通常为一个供电臂)牵引供电系统的固有谐振频率匹配时,将在牵引网中激发谐波谐振现象<sup>[3]</sup>。因此,在新建铁路的联调联试阶段,迫切需要通过现场测试的方法获得电气化铁路各区段牵引网的阻抗频率特性<sup>[4]</sup>,从而准确可靠地确定系统的固有谐振频率,并及时采取措施减少或避免谐波谐振的发生。

目前,关于谐波阻抗的测量,国内外总体还处于探索阶段。文献[5-8]根据电力系统谐波阻抗的特性,主要研究了谐波电流注入法、晶闸管支路投切法、投切电容器法等。其中,谐波电流注入法需要特定的谐波源,在实际电网中谐波电流的注入会对电网产生较大干扰,提高电网电压畸变率,干扰系统稳定运行;晶闸管支路投切法存在某一频率范围内谐波电流含量过低而影响测量准确性的情况;电容器作为主要的无功补偿设备,在电力系统中各个变电站、换流站、电厂等地大量应用,其投切可较为方便地改变供电网络的运行方式,创造出阻抗的测量条件,投切电容器测量谐波阻抗方法的使用范围十分广泛。基于此,本文将采用投切电容器法测量牵引

供电系统的谐波阻抗。文献[9-10]对牵引供电系统进行建模,计算系统的谐波阻抗,以此根据其阻抗频率特性曲线确定系统谐振频率。

上述研究主要存在如下不足之处:已有研究中利用的变电站并联电容器,其容量是针对无功补偿参数设置的,因此可能会出现电容器容量不足引发谐波电流注入过小,从而导致注入的谐波含量不全、不可控制;牵引供电系统由于其供电方式的多样性以及线路特殊性(如线路架设并非完全平行,锚段、交叉线路较多)使得系统分析的复杂程度较高,投切电容器法是否适用于牵引供电系统谐波阻抗测量需要进一步探讨研究;现有的研究方法未考虑注入微弱频谱电流以及没有测试误差的分析,应用于实际测量时精度低,使某些频率点处的测量结果较理想化。

因此,本文拟设计基于投切电容器法的阻抗测试系统进行牵引供电系统的谐波阻抗测量研究。首先,对基于电容器投切法的谐波阻抗测量过程进行理论分析;然后,确定牵引供电系统阻频特性测试方案,基于 Simulink 仿真平台搭建牵引供电系统阻抗测量模型;最后,对模型进行仿真分析,考虑背景谐波与噪声信号的影响,分析不同情况下牵引供电系统阻抗-频率特性,并对其进行误差、电容参数分析。

## 1 基于电容器投切法的谐波阻抗测量

### 1.1 谐波阻抗测量基本原理

图 1 为基于电容器投切法的谐波阻抗测量基本原理图。图 1 中, $u_s$  为系统等效电压源; $Z_s$  为系统等效阻抗;PCC 为系统的公共耦合点; $i_c$  为注入系统的冲击电流; $Z_L$  为负载阻抗; $u_1$ 、 $u_2$  为电容器两端测量得到的电压; $i_1$ 、 $i_2$  为测量得到的流过整个系统的电流。如图 1(a)所示,当开关断开时,电容器未连接到系统中,此时可测量得到电流  $i_1$  与电容器两端产生

的暂态电压  $u_1$ 。如图 1(b)所示,当开关闭合时,电容器投入运行,向系统注入一个瞬时冲击电流  $i_c$ ,通过测量获取电流  $i_2$  与电容器两端产生的暂态电压  $u_2$ 。对电压、电流分别进行快速傅里叶变换(FFT)可以得到各个频率下的分量。最后,利用投切前后各个频率下电压、电流的增量之比来计算谐波阻抗<sup>[5]</sup>。由于在理想条件下  $U_S(s)$  中只包含 50 Hz 分量,因此在其他频率分量下计算谐波阻抗时,可将  $U_S$  视为短接,电容器等效为谐波电流源<sup>[6]</sup>。

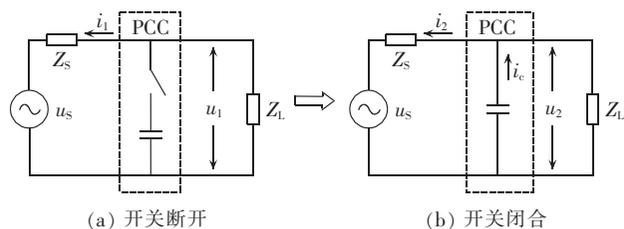


图 1 谐波阻抗测量基本原理

Fig.1 Basic principle of harmonic impedance measurement

根据图 1,可列拉普拉斯方程如下<sup>[7]</sup>:

$$U(s) = Z_s(s)I(s) + U_S(s) \quad (1)$$

其中,  $s = j\omega$ ,  $\omega = 2\pi f$ ,  $f$  为系统频率。

根据投切电容器获得的暂态量计算系统的谐波阻抗,计算步骤如下<sup>[11-17]</sup>。

a. 开关断开时,电容器未连接到系统中,提取一个周期的暂态电压  $u_1$ 、电流  $i_1$ ;当开关闭合时,电容器投入运行,提取一个周期的暂态电压  $u_2$ 、电流  $i_2$ 。

b. 对不同状态下的电路列写拉普拉斯方程:

$$\begin{cases} U_1(s) = Z_s(s)I_1(s) + U_S(s) \\ U_2(s) = Z_s(s)I_2(s) + U_S(s) \end{cases} \quad (2)$$

c. 系统等效阻抗可根据式(2)计算得到:

$$Z_s(s) = \frac{U_1(s) - U_2(s)}{I_1(s) - I_2(s)} = \frac{\Delta U(s)}{\Delta I(s)} \quad (3)$$

然后对电压、电流进行傅里叶分解,取不同频率分量下的值进行计算,最终计算出相应频率下的等效系统阻抗  $Z_s$ 。

## 1.2 波动量法计算谐波阻抗

为了避免背景谐波的影响,使测量得到的阻抗频率特性曲线能更加真实、可靠地反映实际情况,本文采用波动量法对测量得到的数据进行处理,具体计算流程如图 2 所示<sup>[18-23]</sup>。

## 1.3 小波分层算法处理噪声信号

实际牵引供电系统阻抗测试时会存在大量的噪声信号,这些干扰信号将会影响阻抗测试结果的准确度,因此需要滤除这些干扰信号。在实际的工程中,有用信号通常表现为低频信号或一些比较平稳的信号,而噪声信号则表现为高频信号<sup>[9]</sup>。可按如下过程进行信号消噪处理:首先对信号进行小波分解,本文将信号进行 5 层分解,分解过程如图 3 所示,噪声部分通常包含在 cd1、cd2、cd3、cd4、cd5 中,可以

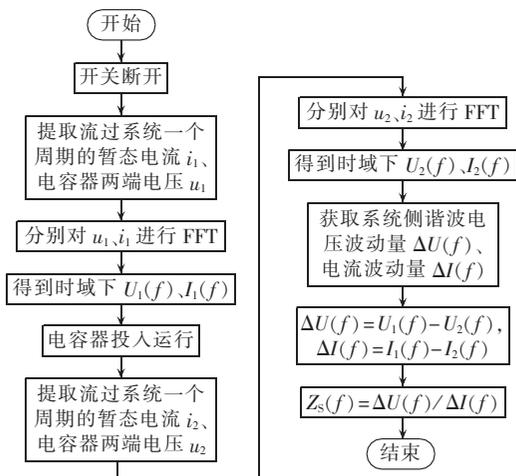


图 2 波动量法计算谐波阻抗流程图

Fig.2 Flowchart of calculating harmonic impedance by fluctuation quantity method

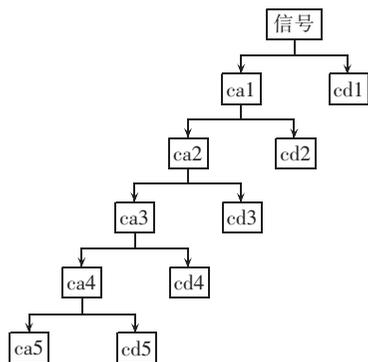


图 3 小波分层示意图

Fig.3 Schematic diagram of wavelet decomposition

以门限阈值等形式对小波系数进行处理;然后对信号进行重构,最终达到消噪的目的<sup>[24]</sup>。

## 2 牵引供电系统阻频特性测试方案

### 2.1 牵引供电系统

牵引供电系统是指将电能从电力系统传送给电力机车的电力装置的总称,其主要包括牵引变电所和牵引网,如图 4 所示<sup>[11]</sup>。其中,牵引变电所将电力系统输电线路电压从 110 kV(或 220 kV)降到 27.5 kV,经馈电线将电能送至接触网;接触网沿铁路上空架设,电力机车升弓后便可从其取得电能,用以牵引列

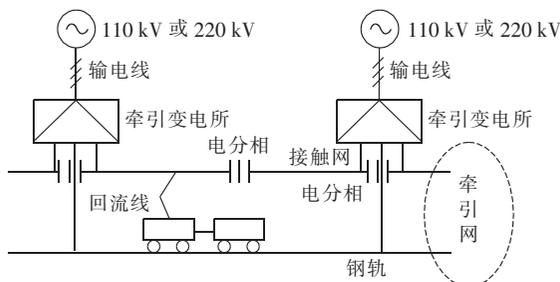


图 4 牵引供电系统示意图

Fig.4 Schematic diagram of traction power supply system

车。牵引变电所所在地的接触网设有分相绝缘装置,两相邻牵引变电所之间设有分区亭,接触网在此也相应设有分相绝缘装置。

我国高速铁路普遍采用的是自耦变压器 AT (AutoTransformer) 供电方式。AT 供电方式下,每隔 10~15 km 距离将设置 1 台 AT,实现对接触网-钢轨、钢轨-正馈线电压的平衡。AT 提供  $2 \times 25$  kV 的供电电压,电压等级提高一倍,而供给机车的电压仍为 25 kV,未增加绝缘成本,同时有效降低了网损和压损。因此,AT 供电方式在高速铁路以及重载线路中得到广泛应用。图 5 为复线 AT 供电方式示意图。

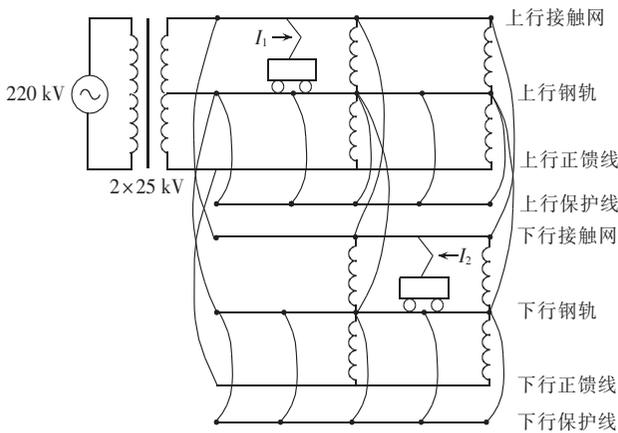


图 5 复线 AT 供电示意图

Fig.5 Schematic diagram of double AT power supply

### 2.2 测量方案

结合投切电容器法的基本原理以及牵引供电系统的拓扑结构,设计如图 6 所示的阻抗测试模型。图中,受电弓从分区所 SPs (Sectioning Posts) 出线母线取电,经断路器 QF 传送给变压器 ST,ST 通过断

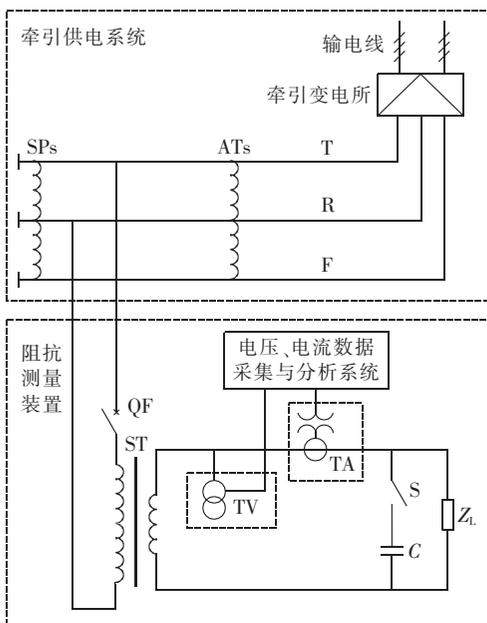


图 6 阻抗测试模型

Fig.6 Model of impedance measurement

路器和受电弓接于分区所出线母线 T 与钢轨 R 之间。降压变压器 ST 一次侧绕组额定电压按牵引网额定电压取值,二次侧绕组额定电压取值与实际测量用电匹配,TA、TV 分别为电流、电压数据采集与分析系统。阻抗测试装置的模型参数如下:变压器 ST 变比为 27.5 kV/380 V,TV 额定电压为 500 V,TA 额定电流为 2 kA,电容器电容为 734  $\mu$ F,电容器额定电压为 480V,电阻阻值为 1  $\Omega$ ,电阻额定功率为 18kW。

### 3 案例分析

#### 3.1 仿真模型

根据牵引供电系统具体内部结构以及阻抗测试模型,基于 Simulink 仿真平台,搭建如图 7 所示的牵引供电系统阻抗测试仿真模型。图中,UF1 和 UF2 表示上行正馈线;UT1 和 UT2 表示上行接触线;R1 和 R2 表示钢轨;DT1 和 DT2 表示下行接触线;DF1 和 DF2 表示下行正馈线。牵引变电所主要由 220 kV/2 $\times$ 27.5 kV 电压等级的 V/x 接线牵引变压器构成;AT 所由变比为 25 kV/25 kV 的 AT 构成;牵引网采用五导体传输线 T 型电路模型;供电臂长度为 20 km。牵引供电系统的电气参数如下<sup>[10-11]</sup>:220 kV 系统,系统容量为 4.5 GV·A,额定电压为 220 kV,输电线路长度为 10 km,线路电阻为 0.208  $\Omega$ ,电感为 0.25477 mH;V/x 变压器,短路阻抗为 13%,牵引变压器额定容量为 60 MV·A,变压器变比为 220 kV/(2 $\times$ 27.5)kV;AT 所,变压器变比为 25 kV/25 kV,漏阻抗为 0.1+j0.45  $\Omega$ 。

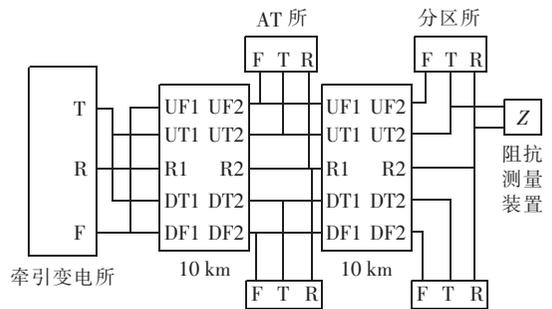


图 7 牵引供电系统阻抗测量仿真模型

Fig.7 Simulation model of impedance measurement of traction power supply system

#### 3.2 结果分析

##### 3.2.1 理想状态

假定系统处于理想状态,不受背景谐波及噪声信号的干扰,可得牵引供电系统阻抗的幅频特性、相频特性见图 8。图 8 将牵引供电系统实际阻抗频率特性与测量得到的阻抗频率特性进行对比分析。由图 8 知,理论计算值与实测值拟合性较好,测量结果准确。

##### 3.2.2 背景谐波影响

考虑到实际牵引供电系统中存在背景谐波的情况,本文在电源侧加入 3、5、7、11、13 次背景谐波电

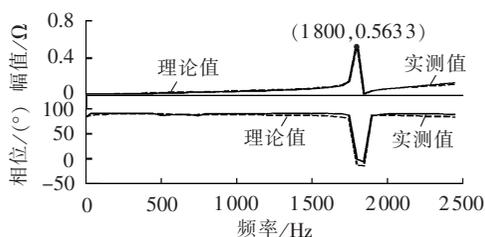


图 8 谐波阻抗测试值与计算值对比

Fig.8 Comparison between measurement result and calculative result of harmonic impedance

流源,背景谐波含量采用文献[13]所述的工程实测数据,即各次背景谐波电流含量分别取为 0.143%、0.179%、1.896%、0.391% 和 0.158%。在增加以上背景谐波下进行了仿真分析,分析结果如图 9 所示。经仿真实验表明,有无背景谐波测试所得阻抗结果与理论计算值较为吻合。

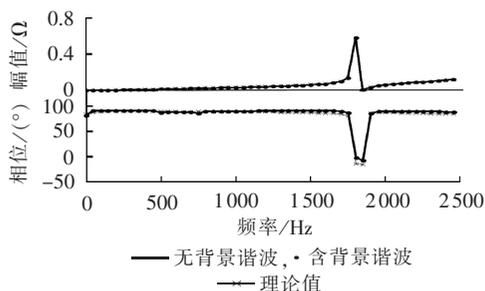


图 9 有无背景谐波时谐波阻抗测试值对比

Fig.9 Comparison of harmonic impedance measurement result with and without background harmonics

### 3.3 误差与干扰分析

根据上述结果,本文将基于电容器投切法得到的阻抗测试值与理论计算值进行了比较分析。表 1 为系统有无背景谐波时实测值对比情况,表 2 分析了有无背景谐波时的阻抗测试值与理论值之间的误差。由表 1、2 数据分析可知,无论系统中是否存在背景谐波,所提测量方法的误差均较小,可真实地反映牵引供电系统的阻抗频率特性,满足工程需要。

考虑到实际测量过程中存在测量噪声或测试误差问题,将仿真测量得到的信号加入信噪比为

表 1 有无背景谐波时谐波阻抗测试值对比

Table 1 Comparison of harmonic impedance measurement result with and without background harmonics

谐波次数	阻抗幅值/Ω		阻抗相角/(°)			
	不含背景谐波	含有背景谐波	不含背景谐波	含有背景谐波	理论值	
1	0.00169	0.00168	0.00347	90.00	89.80	85.50
3	0.00480	0.00470	0.00700	90.01	89.96	87.85
5	0.00780	0.00780	0.01050	90.30	90.01	88.18
7	0.01100	0.01090	0.01410	90.24	86.58	88.22
11	0.01750	0.01760	0.02140	86.38	87.20	87.98
13	0.02110	0.02110	0.02550	86.97	87.02	87.69

表 2 有无背景谐波时谐波阻抗测量误差

Table 2 Measurement error of harmonic impedance measurement result with and without background harmonics

谐波次数	阻抗幅值误差/Ω		阻抗相角误差/(°)	
	不含背景谐波	含有背景谐波	不含背景谐波	含有背景谐波
1	0.3369	0.3364	5.105	5.030
3	0.4179	0.4175	2.432	2.402
5	0.5052	0.5049	2.062	2.019
7	0.5878	0.5869	2.017	2.030
11	0.7388	0.7386	1.799	1.590
13	0.2435	0.2427	2.817	2.804

0.005 dB 的高斯白噪声,然后通过小波分解,用 db1 小波对测量信号进行 5 层分解并提取小波系数,即将小波分解结构中的高频系数置 0,滤掉所有高频部分,然后对信号进行小波重构。图 10 为有无噪声时谐波阻抗测量结果对比。由图 10 可以看出,通过滤波算法可以有效地滤除噪声信号,计算准确性大幅提高,使测量所得结果能够比较真实地反映含噪情况下的阻抗频率特性。

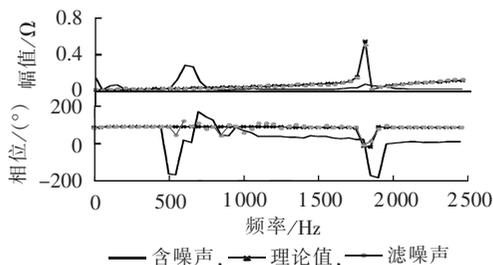


图 10 有无噪声时谐波阻抗测试值对比

Fig.10 Comparison of harmonic impedance measurement result with and without noise

### 3.4 参数影响分析与讨论

改变仿真模型中电容器电容的大小,其余参数不变,牵引网长度为 20 km,仿真分析电容器参数对测试结果的影响,仿真结果见图 11,其中  $C=734 \mu\text{F}$

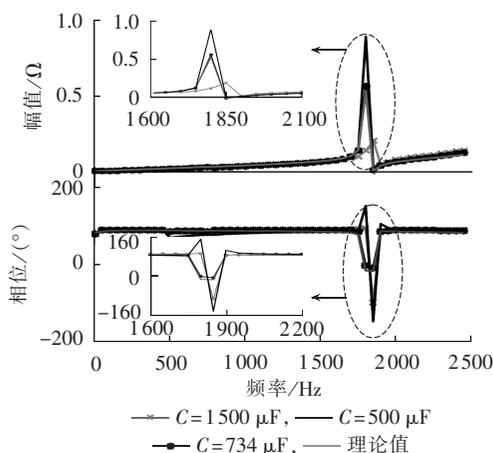


图 11 不同参数下谐波阻抗测试结果

Fig.11 Measurement results of harmonic impedance with different parameters

为对照组(图 8)波形。电容器可采用  $3 \times 250 \mu\text{F}$  并联、额定电压为 480 V、额定容量为 20 kvar 的规格。

仿真结果表明,减小电容参数  $C$  时,理论计算值和测试值曲线趋势大致相同,但是在谐振点处幅值存在差异;增大电容  $C$  后,实测值的阻抗频率特性曲线相较于理论计算值而言发生了谐振频率偏移现象,但是二者曲线的走势大致相同。通过对电容参数的调整使得牵引供电系统阻抗频率特性曲线理论计算值和实测值之间拟合较好,说明电容器参数对测试结果存在一定的影响,设计合理的电容器参数能够有效地得到准确的阻抗频率特性。

在实际的测量过程中,若只是单纯地采用变电站中已有的无功补偿电容进行投切,则会存在是否可操作性的问题。由于利用的是变电站并联电容器,其容量是针对无功补偿参数设置的,因此可能出现电容器容量不足,引发注入的谐波电流过小的情况,幅值不足的谐波电流注入会造成谐波阻抗测量的结果准确度降低。其次,考虑到投切电容器时各方面的安全性、经济性,则不能进行人为投切,若采用此装置则会实现操作的便利性以及设备的便携性,最终达到既解决实际问题又提高经济性的目的。本文在分区所的出线母线端和钢轨之间安装变比为 27.5 kV/380 V 的降压变压器,然后在变压器二次侧并入投切电容器。在操作过程中,应严格按照电容器投切的标准步骤来进行。本文考虑了背景谐波的影响,通过在算法上作出改进,用投切电容器时刻前后一个周期得到的暂态波形量结合波动量法进行计算,避免了背景谐波的干扰。最后,考虑到测量过程中白噪声的影响,本文采用小波分层算法进行消噪处理。根据以上提到的各种影响因素,本文模拟了实际的工况条件,使测试所得结果更加可靠。

## 4 结论

牵引供电系统谐波阻抗测量的理论与技术研究相对较少。对于现场频发的谐波谐振事故而言,准确地得出各区段牵引供电系统的阻抗频率特性就显得十分必要。投切电容器法在谐波阻抗测量领域已得到认可,通过本文相关仿真分析可得出以下结论。

**a.** 考虑到背景谐波的影响,使用投切电容器法获得的暂态量及波动量进行计算处理。通过误差分析可知,理论值和实测值之间误差较小,说明所提计算处理方式可以有效地消除背景谐波的影响。

**b.** 通过向系统中加入高斯白噪声,模拟实际测量过程中存在的测试干扰或误差,运用小波分层算法对噪声进行处理,可以使测量所得结果更加准确,满足工程需要。

**c.** 可在现场通过这种测试的方法准确获得各区

段牵引供电系统的阻抗-频率特性,进而对各区段系统的谐振情况进行评估,同时在必要条件下可针对阻抗曲线制定合理的滤波方案与选择合适的滤波器。

## 参考文献:

- [1] 赵元哲,李群湛,周福林. 基于阻波高通滤波器的高速铁路谐振抑制方案[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):139-144.  
ZHAO Yuanzhe,LI Qunzhan,ZHOU Fulin. Resonance suppression based on wave-trap high-pass filter for high-speed railway[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(4):139-144.
- [2] 初曦,林飞,杨中平,等. 高速列车与牵引供电网高次谐波谐振分析[J]. 电工技术学报,2013(增刊 2):354-359.  
CHU Xi,LIN Fei,YANG Zhongping,et al. Analysis of high frequency resonances in the power supply line of the high speed train[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013(Supplement 2):354-359.
- [3] 何正友,胡海涛,方雷,等. 高速铁路牵引供电系统谐波及其传输特性研究[J]. 中国电机工程学报,2011,31(16):55-62.  
HE Zhengyou,HU Haitao,FANG Lei,et al. Research on the harmonic in high-speed railway traction power supply system and its transmission characteristic[J]. Proceedings of the CSEE, 2011,31(16):55-62.
- [4] 吴命利,吴丽然,杨少兵,等. 交流电气化铁道牵引网阻抗频率特性测试装置:CN104090182A[P]. 2014-10-08.
- [5] 李尚盛,吴楠,查晓明. 基于电容器分组投切的电网谐波阻抗特性研究[J]. 高电压技术,2016,42(10):3354-3360.  
LI Shangsheng,WU Nan,ZHA Xiaoming. Study on network harmonic impedance characteristics based on packet capacitor switching[J]. High Voltage Engineering,2016,42(10):3354-3360.
- [6] 王彦东,李群湛. 电力系统谐波阻抗特性及测量方法的探讨[J]. 电工技术,2004(3):64-67.  
WANG Yandong,LI Qunzhan. Study and discussion on electric power system harmonic impedance characterizes and its measurement method[J]. Electric Engineering,2004(3):64-67.
- [7] 吕洋. 电网系统谐波阻抗测量[D]. 杭州:浙江大学,2010.  
LÜ Yang. Measurement of power system harmonic impedance [D]. Hangzhou:Zhejiang University,2010.
- [8] HUR K,SANTOSO S. An improved method to estimate empirical system parallel resonant frequencies using capacitor switching transient data[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2006, 21(3):1751-1753.
- [9] AYAT M,SHAMSOLLAHI M B,MOZAFFARI B,et al. ECG denoising using modulus maxima of wavelet transform[C]// EMBC 2009 International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. [S.l.]:IEEE,2009:416-419.
- [10] 邵洋. 枢纽牵引供电系统谐振与谐波特性分析及治理研究[D]. 成都:西南交通大学,2017.  
SHAO Yang. Resonance and harmonic characterstic analysis and uppression study on hub traction supply power system[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2017.
- [11] 王奇,刘志刚,白玮莉,等. 基于 PSCAD/EMTDC 的牵引供电系统仿真模型研究[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(16):35-40.  
WANG Qi,LIU Zhigang,BAI Weili,et al. Research on the simulation model of traction power supply system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control,2009, 37(16):35-40.
- [12] XU W,AHMED E E,ZHANG X,et al. Measurement of network

- harmonic impedances; practical implementation issues and their solutions[J]. IEEE Power Engineering Review, 2001, 21(11): 63.
- [13] XIE C, TENNAKON S B, LANGELLA R, et al. Harmonic impedance measurement of 25 kV single phase AC supply systems[C]//International Conference on Harmonics and Quality of Power. Orlando, FL, USA: IEEE, 2000: 214-219.
- [14] SANTOSO S, MAITRA A. Empirical estimation of system parallel resonant frequencies using capacitor switching transient data[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1151-1156.
- [15] XIAO Y, MAUN J C, MAHMOUD H B, et al. Harmonic impedance measurement using voltage and current increments from disturbing loads[C]//International Conference on Harmonics and Quality of Power. Orlando, FL, USA: IEEE, 2000: 220-225.
- [16] 郭伟峰, 徐殿国, 武健, 等. LCL有源电力滤波器新型控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(3): 42-48.
- GUO Weifeng, XU Dianguo, WU Jian, et al. Novel control method for LCL active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(3): 42-48.
- [17] 冯宇, 王晓琪, 陈晓明, 等. 电容式电压互感器电路参数对电网谐波电压测量的影响[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4968-4975.
- FENG Yu, WANG Xiaoqi, CHEN Xiaoming, et al. Influences of circuit parameters of capacitor voltage transformer on grid harmonic voltage measurements[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4968-4975.
- [18] SUMMER M, PALETHORPE B, THOMAS D W P, et al. A technique for power supply harmonic impedance estimation using a controlled voltage disturbance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(2): 207-215.
- [19] WANG W, NINO E E, XU W. Harmonic impedance measurement using a thyristor-controlled short circuit[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2007, 1(5): 707-713.
- [20] HE Z, HU H, ZHANG Y, et al. Harmonic resonance assessment to traction power-supply system considering train model in China high-speed railway[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(4): 1735-1743.
- [21] PALETHORPE B, SUMNER M, THOMAS D W P. Power system impedance measurement using a power electronic converter[C]//International Conference on Harmonics and Quality of Power. Orlando, FL, USA: IEEE, 2000: 208-213.
- [22] 王诗超, 沈沉, 李洋, 等. 基于波动量法的系统侧谐波阻抗幅值估计精度评价方法[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 145-149.
- WANG Shichao, SHEN Chen, LI Yang, et al. A fluctuation quantity based method to evaluate estimation precision of harmonic impedance amplitude at system side[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 145-149.
- [23] 邱思语, 杨洪耕. 考虑波动系数筛选的谐波发射水平估计[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(4): 55-59.
- QIU Siyu, YANG Honggeng. Assessment on harmonic emission level considering volatility coefficient screening[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(4): 55-59.
- [24] 韩志伟, 刘志刚, 鲁晓帆, 等. 基于CUDA的高速并行小波算法及其在电力系统谐波分析中的应用[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(1): 98-101.
- HAN Zhiwei, LIU Zhigang, LU Xiaofan, et al. High-speed parallel wavelet algorithm based on CUDA and its application in power system harmonic analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(1): 98-101.

#### 作者简介:



张 权

张 权(1993—),女,湖北黄冈人,硕士研究生,研究方向为牵引供电谐波阻抗抗测量(E-mail:15884537185@163.com);

胡海涛(1987—),男,安徽阜阳人,副教授,博士,通信作者,研究方向为牵引供电/新能源系统谐波与电能质量;

陶海东(1993—),男,贵州贵阳人,博士研究生,研究方向为牵引供电电能质量;

何正友(1970—),男,四川自贡人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统故障诊断、配网综合自动化等。

## Harmonic impedance measurement analysis of traction power supply system based on capacitor switching technology

ZHANG Quan, HU Haitao, TAO Haidong, HE Zhengyou

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** Due to the complex topology of traction power supply system and numerical accurate calculation difficulty of system equivalent impedance, a harmonic impedance measurement method based on capacitor switching technology is proposed. The switching process of the shunt capacitor can be equivalent to a harmonic source injecting harmonic currents into the system, based on which a harmonic impedance measurement system is established to deal with the special topology of the traction power supply system. The harmonic impedance measurement system is composed of a 27.5 kV/380 V transformer, a shunt capacitor, a switch and a load impedance. Fluctuation quantity method and wavelet decomposition algorithm are applied to deal with the collected signals in field measurement with background harmonics and noises. The impedance measurement model of traction power supply system is built on Simulink simulation platform, and simulative results and error analysis results verify that the proposed method can measure the harmonic impedance of the traction power supply system effectively.

**Key words:** traction power supply system; impedance-frequency characteristics; capacitor-switching; impedance measurement; time domain simulation