

基于宽频带扰动的牵引供电系统频域阻抗测量方法

潘鹏宇, 胡海涛, 杨孝伟, 周毅, 何正友

(西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 611756)

摘要:当不能准确获取牵引供电系统详细的拓扑及参数时,很难对其频域阻抗特性进行量化计算与分析。为得到精确的牵引供电系统频域阻抗特性,提出了一种基于宽频带扰动的牵引供电系统频域阻抗精确测量方法。介绍了牵引供电系统频域阻抗测量原理;基于正弦脉宽调制 (SPWM) 机理,结合能量谱分析,提出了一种只需一次实验即能得到牵引供电系统测量点处精确频域阻抗特性的测量方法;通过软件仿真和实物实验分别对所建牵引供电系统模型进行频域阻抗测量,结果表明阻抗测量值均能够与理论值保持一致,共同验证了所提阻抗测量方法的正确性与实用性。

关键词:牵引供电系统;频域阻抗测量;宽频带扰动;SPWM;精确测量技术

中图分类号:U 223.5

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.02.023

0 引言

随着我国高速铁路的快速发展,以电压源型换流器 (VSC) 作为接口的牵引负荷/动车组在牵引供电系统中的渗透率逐年提高。VSC 技术在发挥其优良换流性能的同时,因具有响应速度快、电力电子切换过程复杂、控制方式多样等特点,其与牵引供电系统的交互作用造成的谐波谐振及稳定性问题被更多地关注^[1-3],这些问题会对牵引供电系统的安全稳定运行产生不利的影响。

目前,对于此类问题的研究大多基于阻抗分析的思想^[4]。已有研究表明,牵引供电系统的一系列谐波谐振与不稳定问题是由机车与牵引供电网 (简称车网) 电气参数不匹配引起的,而这种不匹配可以用车网阻抗特性的不匹配来描述^[5]。利用车网阻抗特性,结合特征值分析或者奈奎斯特稳定性判据,可以对车网系统的稳定性进行判定。例如牵引供电系统中低频振荡现象时有发生,基于车网阻抗分析的方法可以得到牵引网长度、牵引变压器接线方式、机车负载情况及机车控制参数对低频网压振荡的影响规律,从而采用相应的抑制措施^[6]。因此,精确地对牵引供电系统频域阻抗进行测量对于牵引供电系统谐波谐振及稳定性分析而言至关重要^[7]。

根据是否在系统中施加扰动信号,阻抗测量方法主要分为主动测量法与被动测量法 2 类^[8]。被动测量法是在无施加扰动,存在系统自身扰动的情况下利用数学分析和数值处理等数学方法进行阻抗的估算^[9-10]。这种方法虽然对原系统没有任何影响,

但是其计算量大、精度不高,难以精确地对频域阻抗进行测量。主动测量法则需要在系统中施加扰动信号,如投切电容器、桥式电力电子电路等。基于扰动的主动测量法虽然给原系统带来了影响,但是在影响允许的范围内可以精准地对阻抗进行测量,近些年来得到了较快发展。

主动测量法可以归纳为 2 类。第一类是通过向系统注入特定次谐波电流,观察系统所响应出的电压、电流特性,结合快速傅里叶变换 (FFT) 可得到系统的特定次频域阻抗。基于分段二叉树的阻抗测量方法通过注入频率间隔可以自动选取的扰动信号,从而得到系统的特定次频域阻抗,与传统的扫频法相比,其能够更准确地测量系统频域阻抗^[11];基于正弦调制电流注入的阻抗测量方法对系统注入幅值、频率可控的谐波电流,由此测量得到 dq 坐标系下系统的频域阻抗特性^[12];除此之外,通过在两相之间注入一组特定频率下的谐波电流,也可得到系统的频域阻抗特性^[13]。这类方法虽然能够精准地测量系统阻抗,但是一次扰动实验只能测量特定次频率下的频域阻抗,不能得到完整的频域阻抗特性,需要重复多次测试,所需测量时间长,对系统的影响较大。第二类是通过在系统中增设扰动信号或扰动电路,产生宽频带的谐波电压或电流信号,通过一次实验便可得到系统宽频带下的频域阻抗特性。基于 dq 解耦控制的系统,在 dq 轴参考电压分量上叠加一组正交最大长度二进制序列或者叠加一组离散二进制序列信号,可以在系统中产生宽频带下的电压或电流谐波信号,由此可得到宽频带下的频域阻抗特性^[14-15];利用不控整流电路结合脉宽调制 (PWM) 控制信号对负载进行控制,也能得到宽频带下的电压、电流谐波信号,但是这种方式得到的谐波频率分辨率不够高^[16]。这类基于宽频带下电压、电流谐波信号的扰动只需一次实验就能得到较完整频域下的系统频域阻抗特性,并且测量精度高、测量速度快。

收稿日期:2018-01-05; **修回日期:**2018-09-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目 (51677154); 国家重点研发计划项目 (2017YFB1200802)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51677154) and the National Key Research and Development Plan of China (2017YFB1200802)

本文基于主动测量法中的第二类阻抗测量方式,提出了一种基于宽频带扰动的牵引供电系统频域阻抗测量方法,该方法测量时间短、测量精度高、测量过程简单。在牵引供电系统测量点处并联单相不控整流电路,利用正弦脉宽调制 (SPWM) 信号驱动 IGBT 对扰动电路中的负载进行开关控制,由此在牵引供电系统中产生宽频带下的谐波信息。利用 FFT 对时域电压、电流信号进行处理,结合频域阻抗计算公式,可以得到牵引供电系统的精确频域阻抗特性。通过 MATLAB/Simulink 仿真和等效实物实验对牵引供电系统模型进行频域阻抗测量,验证所提方法的精确性与实用性。

1 频域阻抗测量原理

牵引供电系统元件数量多、参数拓扑动态变化复杂、运行工况多变,其频域阻抗特性是复杂且随时间变化的,很难通过数学推导用一个固定简单的数学公式获取其动态的频域阻抗特性。而基于测量的思路省去了大量的数学推导与参数的不确定性等因素,得到的频域阻抗特性更为精准,可为牵引供电系统谐波谐振及稳定性分析提供重要参考数据。因此,采用测量的方法得到牵引供电系统的频域阻抗特性发展迅速。

当牵引供电系统正常运行时,其只含有某些特定次谐波,根据此时网络表现出的特定次电压、电流谐波特性,只能得到相应频率下的频域阻抗值,不能得到宽频带范围下精确的频域阻抗特性。因此,需要对网络施加扰动,使系统出现宽频带下的电压、电流谐波特性,进而得到牵引供电系统的等效频域阻抗特性。系统的扰动施加方式如图 1 所示。

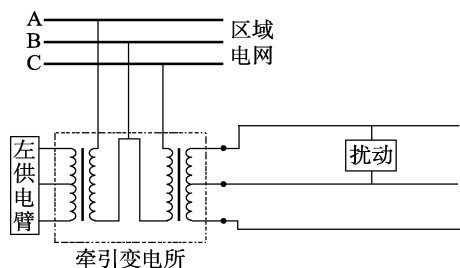


图 1 扰动施加方式

Fig.1 Disturbance injection way

将从扰动电路连接点看进去的复杂牵引供电系统看成一个黑匣子,通过连接点处表现出的电压、电流特性,结合 FFT 将电压、电流时域信号转换成频域信号,利用式 (1) 可以得到被测系统的频域阻抗特性。其等效测量示意图如图 2 所示。

当连接点位于系统的不同位置时,可以得到从不同点看进去的系统等效频域阻抗特性如下:

$$Z_c(j\omega) = U_c(j\omega) / I_c(j\omega) \quad (1)$$

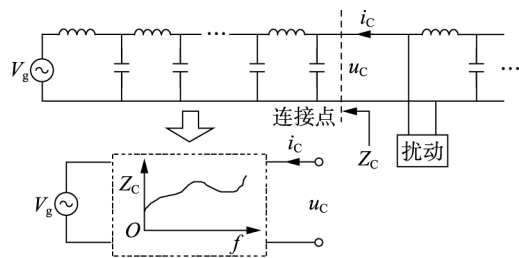


图 2 等效频域阻抗测量方法

Fig.2 Equivalent frequency-domain impedance measurement method

其中, $Z_c(j\omega)$ 、 $U_c(j\omega)$ 和 $I_c(j\omega)$ 分别为连接点处在频域下的等效阻抗、电压值和电流值。

当不考虑背景谐波/间谐波时,通过式 (1) 能准确得到牵引供电系统的频域阻抗特性,但实际系统中不能忽略背景谐波/间谐波的影响。当考虑背景谐波/间谐波的干扰,设定系统无外加扰动运行时,公共连接点处所表现出的电压、电流信息分别为 u_{c1} 、 i_{c1} ,如图 3 所示。

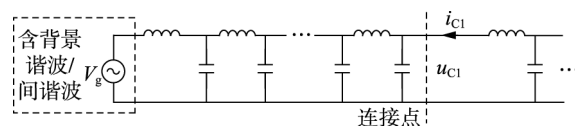


图 3 背景谐波/间谐波的影响

Fig.3 Effects of background harmonic/interharmonic

可得到消除背景谐波/间谐波干扰的频域阻抗计算公式如下:

$$Z_c(j\omega) = \frac{U_c(j\omega) - U_{c1}(j\omega)}{I_c(j\omega) - I_{c1}(j\omega)} \quad (2)$$

其中, $U_{c1}(j\omega)$ 、 $I_{c1}(j\omega)$ 分别为系统无外加扰动时连接点处在频域下的电压值、电流值。

2 基于 SPWM 的扰动产生方式

2.1 扰动产生电路

文献 [16] 提出基于不控整流技术的扰动产生电路能一次性产生宽频带的谐波扰动,即在牵引供电系统中并联扰动产生电路,通过不控整流电路接直流负载,利用 IGBT 对负载进行开关控制,由此得到牵引供电系统较为丰富的谐波特性。当 IGBT 控制信号是占空比为 50% 的等宽脉冲 PWM 信号时,可以得到其引入的强谐波分量频率表达式如下^[16]:

$$f_{d,pwm}(k) = f_{pwm} \times (1 + 2k) \pm 50 \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

其中, $f_{d,pwm}(k)$ 为引入的强谐波分量频率; f_{pwm} 为 PWM 信号频率。

以上方式只能引入与 PWM 信号频率相关的一部分频段下的强谐波分量,因此也只能得到相应频率下的频域阻抗值。为了得到宽频带的阻抗特性,需要引入更多的强谐波分量。在式 (3) 中,若 PWM 信号的频率具有多样性,则引入的强谐波分量将大

幅增加。

基于以上思想,提出一种基于 SPWM 技术的扰动产生方式,利用 SPWM 信号对 IGBT 进行控制,扰动产生电路如图 4 所示。由于 IGBT 控制信号为具有周期性的 SPWM 信号,其相当于脉冲宽度按正弦规律变化的 PWM 波。因此,在一个正弦调制波周期内,其含有不同频率的 PWM 波成分,具体如下:

$$K_{\text{spwm}} = [K_{\text{pwm}}(f_1), K_{\text{pwm}}(f_2), \dots, K_{\text{pwm}}(f_n)] \quad (4)$$

其中, $K_{\text{pwm}}(f_n)$ 表示频率为 f_n 的 PWM 信号。

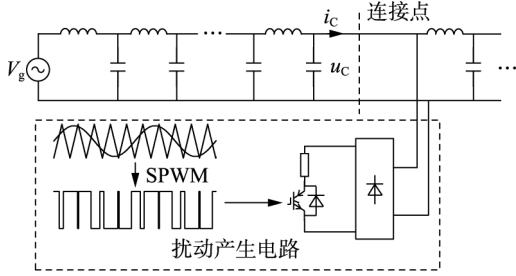


图4 基于 SPWM 扰动产生电路

Fig.4 Disturbance generation circuit based on SPWM

因此,当利用 SPWM 信号进行控制时,在任意一个正弦调制波周期内产生的强谐波分量如式(5)所示。可见,其引入的强谐波分量大幅增加。基于任意一个扰动周期内的谐波特性都能得到牵引供电系统的频域阻抗特性。因此,其扰动施加时间短,扰动后电压、电流谐波信号的处理方法简单。

$$\begin{cases} f_{d1,\text{spwm}}(k) = f_{\text{pwm1}} \times (1+2k) \pm 50 \\ f_{d2,\text{spwm}}(k) = f_{\text{pwm2}} \times (1+2k) \pm 50 \\ \vdots \\ f_{dn,\text{spwm}}(k) = f_{\text{pwmn}} \times (1+2k) \pm 50 \end{cases} \quad k=0,1,2,\dots \quad (5)$$

其中, $f_{d1,\text{spwm}}(k)$ 、 $f_{d2,\text{spwm}}(k)$ 、 $\dots$ 、 $f_{dn,\text{spwm}}(k)$ 为 SPWM 下引入的强谐波分量的频率; f_{pwm1} 、 f_{pwm2} 、 $\dots$ 、 f_{pwmn} 为 SPWM 信号分解的 PWM 信号频率。

2.2 扰动信号能量谱分析

信号的能量谱是指信号在单位频带内的能量,可以用来表现信号的谐波分布情况。根据帕塞瓦定理,信号的能量谱为该信号 FFT 绝对值的平方:

$$E(\omega) = |F(j\omega)|^2 \quad (6)$$

其中, $E(\omega)$ 为能量谱; $F(j\omega)$ 为信号的傅里叶变换。

由此可得电压、电流信号的能量谱表达式如下:

$$\begin{cases} E_u(\omega) = |u_{\text{pcc}}(j\omega)|^2 \\ E_i(\omega) = |i_{\text{pcc}}(j\omega)|^2 \end{cases} \quad (7)$$

其中, $E_u(\omega)$ 为电压信号能量谱; $E_i(\omega)$ 为电流信号能量谱; $u_{\text{pcc}}(j\omega)$ 为扰动产生电路连接点处的电压值; $i_{\text{pcc}}(j\omega)$ 为扰动产生电路连接点处的电流值。

基于 SPWM 的扰动产生方式,得到电流信号能量谱如图 5 所示。

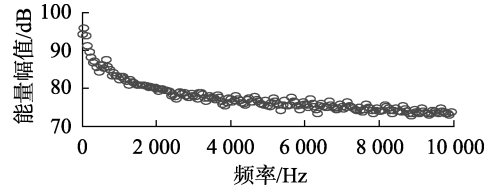


图5 基于 SPWM 的电流信号能量谱

Fig.5 Current signal energy spectrum based on SPWM

由图 5 可见,SPWM 的扰动产生方式下电流信号频谱能量分布较均匀,频带分布较宽。因此,利用此扰动产生的谐波特性能精准地测量牵引供电系统宽频带下的频域阻抗特性,此结论可在下节中得到验证。在进行阻抗测量时,为了不对系统造成较大影响,扰动功率一般小于负载功率的 10%^[15]。

3 仿真实验

3.1 牵引供电系统频域阻抗测量仿真模型

基于 MATLAB/Simulink 搭建牵引变压器、牵引网、负载及扰动电路模型,如附录 A 中图 A1 所示。采用 V/x 接线方式的牵引变压器将电网的三相交流电转化成单相交流电,经过牵引网将电能传输给负载,扰动电路通过降压变压器并联在连接点处。

牵引供电系统频域阻抗测量模型主要参数如附录 A 中表 A1 所示。根据式(2)进行阻抗计算时,FFT 只需对其中的一个周期进行分析,因此,如果系统响应时间足够快,扰动的施加时间理论上只需大于 0.02 s。考虑系统的响应时间,设置扰动施加时间为 1 s。

3.2 牵引供电系统频域阻抗测量结果分析

采集扰动施加后牵引供电系统频域阻抗测量模型连接点的电流、电压信息,得到电流、电压及其谐波分量如图 6 所示。可见,加入扰动后引入的电流、电压谐波分量在宽频带(0~10 000 Hz)下均有分布。

利用式(2)可得到宽频带(0~10 000 Hz)下牵引供电系统频域阻抗特性曲线,结果如图 7 所示。从图 7 中可以看出,在宽频带范围内频域阻抗仿真测量值(幅值与相位)均与理论值曲线基本完全重合,验证了所提阻抗测量方法的精确性。

4 实验验证

4.1 牵引供电系统频域阻抗测量模拟实验平台

本文利用附录 B 所示的牵引供电系统等效阻抗计算方法^[17-18],参考徐州北铁路枢纽相关参数^[17],如附录 C 中表 C1 所示,可计算得到用于实验的被测网络等效参数,扰动电路相关参数根据 3.1 节的仿真验证确定,公用电网相关参数为用户标准用电参数,从而保证实验参数的有效性与精确性。实验平台详细参数如附录 C 中表 C2 所示。

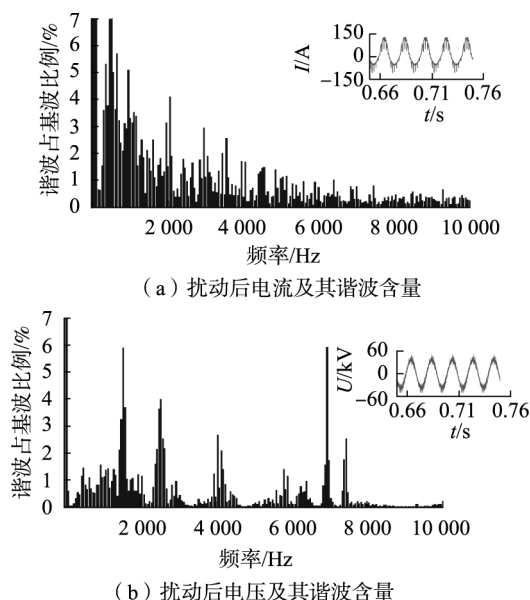


图 6 扰动后连接点处电流、电压及其谐波分布

Fig.6 Current, voltage and their harmonic distributions of PCC after injecting disturbance

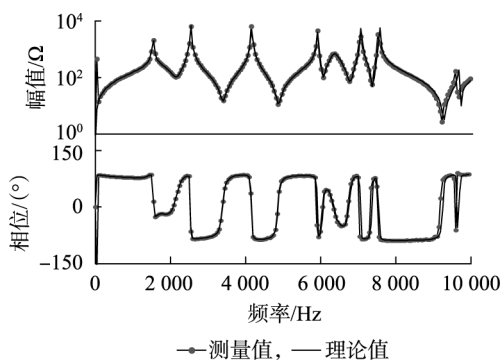


图 7 牵引供电系统频域阻抗特性测量结果

Fig.7 Frequency-domain impedance measurement result of traction power supply system

基于本文所提扰动产生方式,搭建基于单相不控整流器的扰动产生电路,IGBT 控制信号为 SPWM 信号,由 DSP 芯片结合驱动电路产生。利用基于 LabVIEW 开发的电压电流测量仪采集电压电流信息,结合 FFT 分析及阻抗计算公式,可得到所搭建的等效牵引供电系统的频域阻抗特性。牵引供电系统频域阻抗测量模拟实验平台示意图如附录 C 中图 C1 所示。牵引供电系统阻抗测量实物平台如附录 C 中图 C2 所示。

4.2 牵引供电系统频域阻抗测量结果

将电压、电流测量仪采集的数据进行 FFT 分析,并结合式(2)可以得到所搭建的牵引供电系统等效模型的频域阻抗特性曲线,如图 8 所示。从图 8 中可以看出,除去一些由测量过程中测量误差所带来的频域阻抗测量偏差之外,牵引供电系统频域阻抗特性实测值能够与理论值曲线保持一致,验证了所提阻抗测量方法的准确性与实用性。

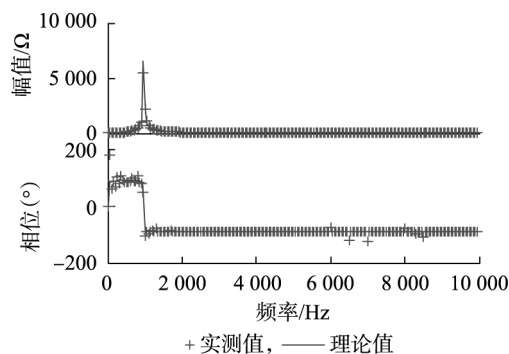


图 8 牵引供电系统频域阻抗测量结果

Fig.8 Frequency-domain impedance measurement results of traction power supply system

5 结论

本文基于 SPWM 机理并结合不控整流电路,在牵引供电系统中进行一次扰动实验,利用该扰动产生的宽频带下的电压、电流谐波信息,结合阻抗计算方法,得到牵引供电系统连接点处精确频域阻抗特性。并通过软件仿真和实物实验同时进行验证,得到结论如下:测量得到的牵引供电系统频域阻抗值能与其理论值保持一致,验证了所提方法的有效性与准确性;所提的基于 SPWM 的扰动产生方法能一次性得到宽频带下的电压、电流谐波特性,因此只需进行一次扰动实验便能得到牵引供电系统连接点处的精确频域阻抗特性;所提的牵引供电系统频域阻抗测量方法扰动电路拓扑简单,SPWM 信号易获取,因此该方法实用性较高。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 中国铁道科学研究院. 大秦线 HXD1 型机车车网匹配关系测试报告[R]. 北京:中国铁道科学研究院,2008.
- [2] 上海南翔开闭所. CRH1067 接触网电压电流测试报告[R]. 北京:中国铁道科学研究院,2010.
- [3] 张桂南,刘志刚,向川,等. 交-直-交电力机车接入的牵引供电系统电压波动特性[J]. 电力自动化设备,2018,38(1):121-128.
ZHANG Guinan, LIU Zhigang, XIANG Chuan, et al. Voltage fluctuation characteristic of traction power supply system considering AC-DC-AC electric locomotives accessed [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 121-128.
- [4] 王晓兰,李晓晓. 孤岛模式下风电直流微电网小信号稳定性分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(5):92-99.
WANG Xiaolan, LI Xiaoxiao. Small-signal stability analysis of islanded DC microgrid with wind power[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 92-99.
- [5] 李强. 电气化铁路车网电气匹配问题[J]. 电气化铁道,2014(3):13-16.
LI Qiang. Electrical matching problem of electrified railway network [J]. Electric Railway, 2014(3): 13-16.
- [6] 陶海东,胡海涛,姜晓峰,等. 牵引供电低频网压振荡影响规律研究[J]. 电网技术,2016,40(6):1830-1838.

- TAO Haidong, HU Haitao, JIANG Xiaofeng, et al. Research on low frequency voltage oscillation in traction power supply system and its affecting factors[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1830-1838.
- [7] 张权, 胡海涛, 陶海东, 等. 基于电容器投切法的牵引供电系统谐波阻抗测试分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(11): 145-150.
- ZHANG Quan, HU Haitao, TAO Haidong, et al. Harmonic impedance measurement analysis of traction power supply system based on capacitor switching technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 145-150.
- [8] 谢少军, 季林, 许津铭. 并网逆变器电网阻抗检测技术综述[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 320-326.
- XIE Shaojun, JI Lin, XU Jinming. Review of grid impedance estimation for grid-connected inverter[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 320-326.
- [9] COBRECE S, BUENO E J, PIZARRO D, et al. Grid impedance monitoring system for distributed power generation electronic interfaces[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(9): 3112-3121.
- [10] MAURICIO C, SUN Jian. Adaptive control of grid-connected inverters based on online grid impedance measurements[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(2): 516-523.
- [11] 岳小龙, 卓放, 张政华, 等. 电力电子系统阻抗测量的分段二叉树法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(24): 76-83.
- YUE Xiaolong, ZHUO Fang, ZHANG Zhenghua, et al. Segmented binary tree method for power electronic system impedance measurement[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(24): 76-83.
- [12] 师洪涛, 卓放, 杨祯, 等. 基于改进正弦调制电流注入的三相交流电源系统频域阻抗测量研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 257-264.
- SHI Hongtao, ZHUO Fang, YANG Zhen, et al. Study of harmonic impedance measurement for three-phase AC power system based on an improved modulated current injection method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 257-264.
- [13] HUANG Jing, KEITH A C, MOHAMED B. Small-signal impedance measurement of power-electronics-based AC power systems using line-to-line current injection[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(2): 445-455.
- [14] TOMI R, TUOMAS M, ENRICO S. MIMO-identification techniques for rapid impedance-based stability assessment of three-phase systems in DQ domain[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(5): 4015-4022.
- [15] TOMI R, MATTI V, SUN Jian. Online grid impedance measurement using discrete-interval binary sequence injection[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(4): 985-993.
- [16] MICHAEL J, HAUKE L, TRUNG D T, et al. Frequency dependent grid-impedance determination with pulse-width-modulation-signals[C]//Compatibility and Power Electronics(CPE). Tallinn, Estonia: [s.n.], 2011: 131-136.
- [17] 赵朝蓬. 徐州铁路枢纽接触网电压低频振荡分析及对策研究[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(2): 89-96.
- ZHAO Chaopeng. Low-frequency voltage oscillation and mitigation of catenary system in Xuzhou railway hub[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(2): 89-96.
- [18] JIANG Xiaofeng, HU Haitao, HE Zhengyou, et al. Study on low-frequency voltage fluctuation of traction power supply system introduced by multiple modern trains[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 146: 246-257.

作者简介:



潘鹏宇

潘鹏宇(1993—),男,四川南充人,博士研究生,主要研究方向为牵引供电系统和机车频域阻抗测量及稳定性分析(E-mail: ppyswjtu@163.com);

胡海涛(1987—),男,安徽阜阳人,副教授,博士,主要研究方向为牵引供电/电力系统电能质量与稳定性分析(E-mail: hht@swjtu.edu.cn);

杨孝伟(1994—),男,四川泸州人,博士研究生,主要研究方向为直流牵引供电系统;

周毅(1994—),男,陕西汉中,博士研究生,主要研究方向为牵引供电系统低频振荡分析;

何正友(1970—),男,四川富顺人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为信息理论在电力系统中的应用、电力系统继电保护、电网故障诊断、智能配电网与微电网等。

Frequency-domain impedance measurement method for traction power supply system based on broadband perturbation

PAN Pengyu, HU Haitao, YANG Xiaowei, ZHOU Yi, HE Zhengyou

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: It is difficult to quantify the frequency-domain impedance of the traction power supply system when the accurate topology and parameters are unavailable. To obtain accurate frequency-domain impedance characteristics of traction power supply system, a broadband perturbation-based impedance measurement method is presented. The impedance measurement principles of traction power supply system and calculation formula are introduced. Based on the SPWM(Sinusoidal Pulse Width Modulation) mechanism and the energy spectrum analysis, a disturbance method is proposed to obtain the accurate frequency domain impedance characteristics at the measuring points of the traction power supply system through only one perturbation experiment. The impedance of traction power supply system is obtained using both software simulation and physical experiment. Test results show that the measurement values are consistent with theoretical values, which verifies the effectiveness of the proposed method.

Key words: traction power supply system; frequency-domain impedance measurement; broadband perturbation; SPWM; precise measurement technique

附录

附录 A

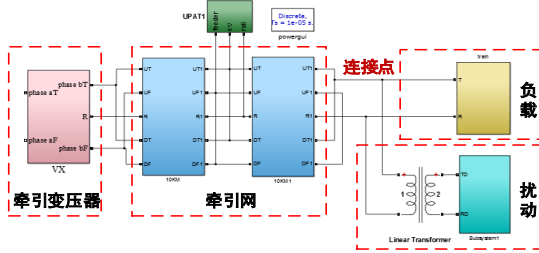


图 A1 牵引供电系统频域阻抗测量模型

Fig.A1 Impedance measurement model of traction power system

表 A1 牵引供电系统频域阻抗测量模型主要参数

Table A1 The main parameters of impedance measurement model

元 件	参 数
三相交流电源	220kV, 50Hz
牵引变压器变比	220kV/27.5kV
车载变压器变比	27.5kV/1485V
扰动降压变压器变比	27.5kV/380V
正弦调制波频率	50Hz
三角载波频率	500Hz

附录 B

此附录呈现了牵引供电系统等效阻抗计算方法。下面将以徐州北铁路枢纽为例具体介绍。

上海铁路局徐州北变电所主变压器为三相接线平衡变压器，其从 110kV 区域电网取电，绕组接线如图 A1 所示。其变比为：110kV/27.5kV，容量为：31.5MVA，短路阻抗百分比为：10.54%。徐州北铁路枢纽的供电方式为带回流线的直接供电方式。

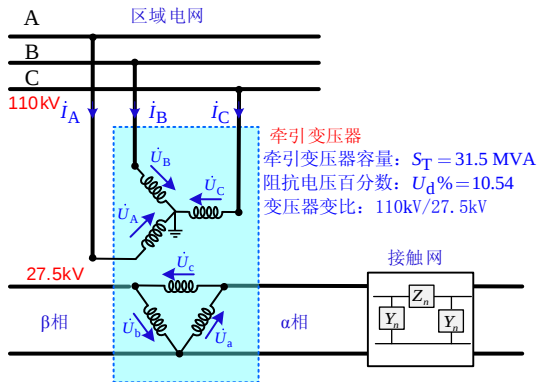


图 A1 徐州北主变压器绕组接线示意图

Fig.A1 The winding connection of main transformer in Xuzhou North substation

参考徐州北牵引供电系统，搭建实验平台。其中牵引供电系统等效阻抗主要由三部分构成：1) 区域电网等效阻抗；2) 牵引变压器等效阻抗；3) 牵引网线路等效阻抗。

1) 区域电网等效阻抗。

牵引变电所进线点的区域电网三相短路容量为 S_{SC} (MVA)，电力系统电抗电阻比为 $k_{X/R}$ ，变压器二次侧额定线电压为 27.5kV。则区域电网的等效阻抗表达式如下所示。

$$\begin{cases} X_s = \frac{3 \times 27.5^2}{S_{SC}} \\ R_s = \frac{X_s}{k_{X/R}} \end{cases} \quad (A1)$$

其中， X_s 为区域电网等效电抗； R_s 为区域电网等效电阻。

2) 牵引变压器等效阻抗。

牵引变压器归算到二次侧的等值电路模型如图 A2 所示。

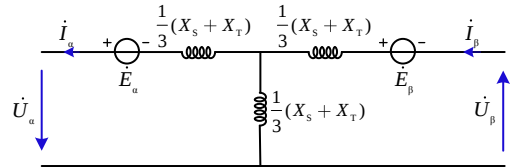


图 A2 牵引变压器归算到二次侧的等效电路

Fig.A2 Equivalent circuit of the traction transformer imputed to the secondary side

其中， X_T 为牵引变压器归算到二次侧的等效电抗，其表达式为：

$$X_T = \frac{U_d \%}{100} \times \frac{3 \times 27.5^2}{S_T} \quad (A2)$$

式中， $U_d \%$ 为阻抗电压百分数； S_T 为牵引变压器容量。从 α 相或 β 相端口看进去，等效电抗为：

$$X_\Sigma = \frac{2}{3} (X_s + X_T) \quad (A3)$$

3) 牵引网线路等效阻抗。

设牵引网线路等效长度为 l ，单位长度的等效阻抗为 $r \angle \varphi$ ，则考虑复线情况下的牵引网等效电阻和电抗为：

$$\begin{cases} R_j = \frac{1}{2} \times r \times l \times \cos \varphi \\ X_j = \frac{1}{2} \times r \times l \times \sin \varphi \end{cases} \quad (A4)$$

将以上三部分的阻抗归算到一起，由此，可得到牵引供电系统等效阻抗，从而设计出合理的实验

平台参数。

附录 C

表 C1 徐州北铁路枢纽相关参数

Table C1 The corresponding parameters of Xuzhou North substation

元 件	参 数
区域电网容量 S_{SC}	938MVA
电力系统电抗电阻比 $k_{X/R}$	14
区域电网额定电压	110kV
牵引变压器容量 S_T	31.5MVA
牵引变压器阻抗电压百分数 $U_d\%$	10.54
牵引变压器变比	110kV/27.5kV
牵引网等效长度 l	7 km
牵引网单位长度等效阻抗 $r\angle\varphi$	$0.6\angle 67^\circ$

表 C2 牵引供电系统频域阻抗测量实验平台元件参数

Table C2 Parameters of the experimental platform

元 件	参 数
牵引供电系统等效电阻 R_1	0.93 Ohms
牵引供电系统等效电抗 X_1	8.606 Ohms
牵引供电系统等效电感 L_1	27.4mH
网侧等效对地电容 C_1	1uF
负载电阻 R_2	50 Ohms
负载侧电感 L_2	16mH
直流侧电容 C_2	4mF
扰动电路电阻 R_3	200 Ohms
公用电网	220V, 50Hz
调压器输出	220V, 50Hz
车载变压器变比	220V/22V
测量仪采样频率	100kHz
正弦调制波频率	50Hz
三角载波频率	500Hz

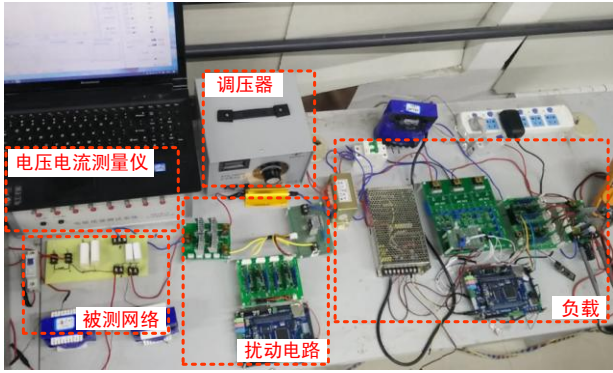


图 C2 牵引供电系统频域阻抗测量实物平台

Fig.C2 Experimental platform of impedance measurement for traction power system

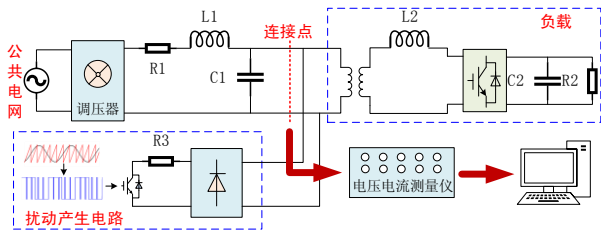


图 C1 牵引供电系统频域阻抗测量实验平台示意图

Fig.C1 Schematic diagram of the experimental platform