

一种高速列车-牵引网阻抗测量方法及其稳定性分析

刘方平¹,葛兴来¹,余思儒¹,江珂滕²

(1. 西南交通大学 磁浮技术与磁浮列车教育部重点实验室,四川 成都 611756;

2. 清华四川能源互联网研究院,四川 成都 610213)

摘要:高速列车运行过程中容易出现低频振荡,影响高速列车牵引传动系统稳定运行。以高速列车单相牵引整流器为研究对象,以分析车-网系统稳定性为研究目标,基于阻抗定义模型,提出了一种牵引传动系统输入导纳及网侧输出阻抗的测量方法。通过对整流器稳定性运行情况的检测,进行阈值判定,进而实时调节扰动谐波幅值的大小。并设计了该测量方法所对应的扰动注入装置,通过对程控电阻的调节实现对扰动谐波幅值的调节。在 dq 旋转坐标系下对车-网系统阻抗进行测量,基于测量结果进行稳定性分析,通过MATLAB/Simulink进行仿真验证,并进行硬件在环测试验证。仿真及测试结果表明车-网系统时域运行工况与稳定性分析的结果相符合,验证了所设计测量方法的有效性。

关键词:车-网系统;稳定性分析;阻抗测量;稳定阈值判断;谐波参数自调节

中图分类号:TM 922.3

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202006025

0 引言

伴随着我国高速铁路的快速发展,基于交直交牵引传动系统的高速列车得到了越来越广泛的应用。在列车-牵引网耦合系统(以下简称“车-网系统”)中,多辆列车与牵引网之间的相互作用导致低频振荡、谐波共振和谐波不稳定性等问题的发生:低频振荡的频率范围通常为1 Hz到几Hz,经常发生在多车投运时;谐波共振发生的频率范围通常为几百Hz到几kHz;谐波不稳定性发生的频率范围通常为几百Hz以内^[1-2]。此类不稳定问题不仅会给牵引供电系统带来严重的安全隐患,还会对高速列车牵引传动系统的稳定运行产生巨大影响^[3-6]。

针对系统稳定性问题的分析研究,Middlebrook首先提出了基于电源输出阻抗与负载输入导纳的系统稳定性阻抗判据^[7]。进一步地,针对电力电子系统稳定性方面的问题进行分析研究,基于电源输出阻抗与负载输入导纳的交流系统稳定性判据^[8-9]亦得以发展,基于阻抗的稳定性分析方法被广泛应用^[10-12]。因此获取电力电子系统端口输出阻抗以及输入导纳的研究成为热门,而通过阻抗测量的方式获取系统阻抗更为直接、准确^[13]。

电力系统谐波阻抗测量技术的相关研究较多,阻抗测量的注入扰动方式可分为非干扰被动式与干扰主动式两大类:非干扰被动式可以在没有任何干扰注入的情况下基于数学分析和数值处理估计阻抗^[14-15],但所获得的阻抗通常不够准确,并且数学计算过程复杂,导致阻抗测量的速度较慢^[16];干扰主动

式是在系统正常运行情况下,向系统加入谐波电压或谐波电流扰动信号,通过对端口采集电压、电流进行分析得到阻抗。

接入电网的变流器阻抗测量技术为当前的研究热点。文献[17]提出了一种单个电流源注入的测量方式,所注入的谐波采用单频注入方式,以测得三相并网变流器在 dq 坐标系下的输入阻抗。由于变流器为非线性负载,文献[18]以三相6脉冲全桥整流器为例,提出了一种多频注入的阻抗测量技术,同时注入多个频率的扰动信号,由于在交流侧产生的频率响应分量出现重叠,其测量结果与单频注入的测量结果存在非常大的偏差。

单相整流器广泛应用于高速列车牵引传动系统中,目前关于单相整流器的阻抗测量技术研究相对较少,因此对其进行研究十分必要。单相整流器阻抗模型通常建立在 dq 坐标系下,采用 dq 解耦电流控制方式。现有 dq 坐标系下单相整流器的稳定性判据可用于车-网系统的稳定性分析^[13,19],而 dq 坐标系下阻抗的测量方法较少,目前主要测量方法为单频注入法中的正弦扫频测量方法^[13]。为保证测量的准确性,谐波幅值取值需足够大以保证足够的信噪比,然而注入的谐波幅值过大会干扰整流器系统的正常运行,而干扰谐波源的幅值通常需要根据实验经验进行选取,并且需要根据测量结果以及全程整流器的运行情况分析本次测量的谐波幅值是否合适,进而对谐波幅值进行修正,重新进行某频率下注入谐波的测量计算,这样无法保证测量准确度,同时测量效率较低。

因此,本文根据整流器稳定性运行情况实时调节产生扰动信号的谐波幅值注入装置,保证整流器稳定运行的前提下,准确测量车-网系统在 dq 坐标系下的阻抗、导纳,并根据所测得的阻抗、导纳进行

收稿日期:2019-12-03;修回日期:2020-05-06

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677156,61733015)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51677156,61733015)

稳定性分析,最后通过 MATLAB / Simulink 仿真及硬件在环实验,证明车-网系统时域运行工况与稳定性分析的结果相符合,验证所设计测量方法的有效性。

1 动车组牵引传动系统模型

动车组牵引传动系统通常采用交直交牵引驱动系统。某型动车组牵引传动系统的主电路拓扑见图 1。图中, L_2 、 C_2 、 C_d 分别为滤波电感、滤波电容、中间直流侧支撑电容; i_{n1} 、 i_{n2} 和 e_{n1} 、 e_{n2} 分别为变压器原、副边的输出电流和输出电压; i_{dc} 、 i_d 、 i_c 以及 i_{LC} 分别为整流器输出电流、逆变器输入电流、流过支撑电容 C_d 的电流以及流过 LC 滤波器的电流; u_{dc} 为直流侧输出电压。该动车组牵引传动系统由牵引变压器将牵引供电网提供的 25 kV 单相交流电转换成 1550 V 单相交流电,通过二重化牵引整流器转换成 3600 V 直流电,再经过牵引逆变器转换成三相交流电,通过控制其电压幅值及频率控制电机运行。

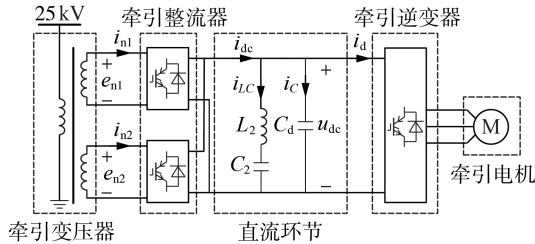


图1 交直交牵引传动系统主电路图

Fig.1 Main circuit diagram of AC/DC/AC traction drive system

1.1 单相脉冲牵引整流器模型

单相两电平脉冲牵引整流器拓扑如图 2 所示。图中, i_s 、 u_s 、 L_s 、 R_s 分别为网侧电流、电压、等效电感、等效电阻; L_n 、 R_n 分别为牵引变压器绕组侧等效电感、等效电阻; S_1 、 S_2 和 S_3 、 S_4 为 IGBT 模块, 分别构成整流桥桥臂 a 和 b; Z 为直流侧等效负载。

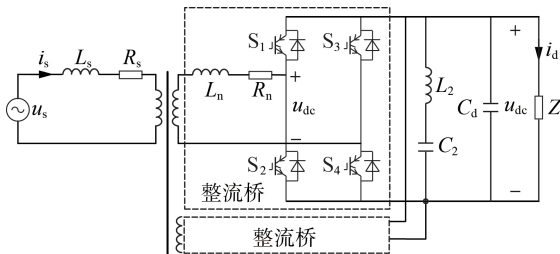


图2 单相两电平脉冲牵引整流器拓扑

Fig.2 Topology of single-phase two-level pulse traction drive rectifier

单相两电平脉冲牵引整流器的控制目标为交流侧电压与电流同相位,直流侧电压稳定于合理范围内的整定值。其常用的控制策略包括瞬态直接电流控制、 dq 解耦电流控制^[20]、预测直接电流控制、滞环直接电流控制、间接电流控制等。本文采用 dq 解耦

电流控制,其控制原理如图 3 所示。广义二阶积分器 SOGI(Second-Order Generalized Integrator) 产生 1/4 周期延时信号,构成虚拟正交信号以获得 dq 坐标系下的电压、电流分量。图中, u_d 、 u_q 和 i_d 、 i_q 分别为 dq 旋转坐标系下交流侧电压和电流有功分量、无功分量; PWM 为脉冲宽度调制; θ 为锁相环(PLL)输出角度; U_{dc}^* 、 I_d^* 分别为直流侧电压给定值、电流环有功分量给定值; K_{vp} 、 K_{vi} 分别为电压环比例参数和积分参数; K_{dp} 、 K_{di} 分别为电流环有功环节比例参数、积分参数; ω 为系统基波角频率; K_{qp} 、 K_{qi} 分别为电流环无功环节比例参数、积分参数; S_a 、 S_b 分别为整流桥桥臂 a、b 的开关控制信号。

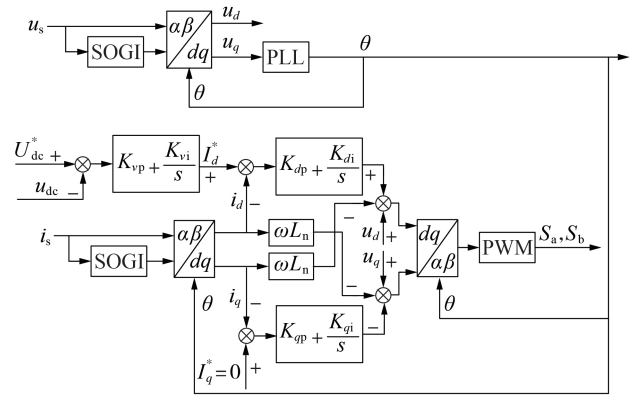


图3 dq 解耦电流控制框图

Fig.3 Block diagram of dq decoupling current control

2 车-网系统阻抗测量

2.1 dq 坐标系下车-网系统的阻抗模型

车-网牵引传动系统级联示意图见图 4。图中, PCC 为公共连接点; Z_s 为牵引供电网的输出阻抗, 根据 u_s 和 i_s 计算得到; Y_l 为动车组的输入导纳, 根据动车组侧电压 u_l 以及电流 i_l 计算得到。

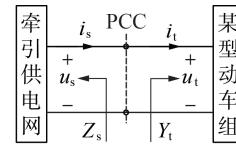


图4 车-网系统级联示意图

Fig.4 Schematic diagram of cascade high-speed train-traction network

由图 4 可知, 动车组交流侧电压、电流可通过 SOGI 以及 dq 变换得到电压、电流的 dq 轴分量, 再通过快速傅里叶变换(FFT)得到某频率下动车组交流侧电压和电流的 d 、 q 轴分量 $U_{dt}(\omega)$ 、 $U_{qt}(\omega)$ 和 $I_{dt}(\omega)$ 、 $I_{qt}(\omega)$ 。由此, dq 坐标系下的动车组交流侧输入导纳矩阵为:

$$\begin{bmatrix} Y_{ddt}(\omega) & Y_{dqf}(\omega) \\ Y_{qdt}(\omega) & Y_{qqt}(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{dt}(\omega) \\ I_{qt}(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{dt}(\omega) \\ U_{qt}(\omega) \end{bmatrix}^{-1} \quad (1)$$

其中, Y_{dd} 、 Y_{qq} 和 Y_{dq} 、 Y_{qd} 分别为动车组交流侧输入导纳矩阵的4个阻抗分量。将网侧电压和电流分别进行 dq 变换后, 再通过FFT得到某频率下网侧电压 d 、 q 轴分量 $U_{ds}(\omega)$ 、 $U_{qs}(\omega)$ 以及电流 d 、 q 轴分量 $I_{ds}(\omega)$ 、 $I_{qs}(\omega)$ 。 dq 坐标系下牵引供电网的输出阻抗矩阵为:

$$\begin{bmatrix} Z_{dds}(\omega) & Z_{dqs}(\omega) \\ Z_{qds}(\omega) & Z_{qqs}(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{ds}(\omega) \\ U_{qs}(\omega) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds}(\omega) \\ I_{qs}(\omega) \end{bmatrix}^{-1} \quad (2)$$

其中, Z_{dds} 、 Z_{qq} 和 Z_{dq} 、 Z_{qd} 分别为牵引供电网的输出阻抗矩阵的4个阻抗分量。

2.2 dq 坐标系下车-网系统的阻抗测量方法

由2.1节可知, 为了获得网侧及动车组侧某频率下的阻抗, 需要通过采集级联端口的电压、电流值进行 dq 变换和FFT得到该频率下的电压、电流分量, 该频率下的谐波电压、电流分量通常需要额外注入系统中, 引起对应频率的响应, 进而进行测量计算。因此当进行阻抗测量时, 通常将谐波源注入级联端口。下面介绍注入系统谐波源的设计过程。

由式(2)可知, dq 坐标系下的待测阻抗为二阶矩阵, 则针对同一频率 ω_n , 需要对2组线性不相关的电压、电流分量进行解算, 其分别为 $U_{d1}(\omega_n)$ 、 $U_{q1}(\omega_n)$ 、 $I_{d1}(\omega_n)$ 、 $I_{q1}(\omega_n)$ 和 $U_{d2}(\omega_n)$ 、 $U_{q2}(\omega_n)$ 、 $I_{d2}(\omega_n)$ 、 $I_{q2}(\omega_n)$ 。阻抗和导纳的解算公式分别如式(3)、(4)所示。

$$\begin{cases} Z_{dd}(\omega_n) = \frac{U_{d1}(\omega_n)I_{q2}(\omega_n) - U_{d2}(\omega_n)I_{q1}(\omega_n)}{I_{d1}(\omega_n)I_{q2}(\omega_n) - I_{d2}(\omega_n)I_{q1}(\omega_n)} \\ Z_{dq}(\omega_n) = \frac{U_{d1}(\omega_n)I_{d2}(\omega_n) - U_{d2}(\omega_n)I_{d1}(\omega_n)}{I_{d2}(\omega_n)I_{q1}(\omega_n) - I_{d1}(\omega_n)I_{q2}(\omega_n)} \\ Z_{qd}(\omega_n) = \frac{U_{q1}(\omega_n)I_{q2}(\omega_n) - U_{q2}(\omega_n)I_{q1}(\omega_n)}{I_{d1}(\omega_n)I_{q2}(\omega_n) - I_{d2}(\omega_n)I_{q1}(\omega_n)} \\ Z_{qq}(\omega_n) = \frac{U_{q1}(\omega_n)I_{d2}(\omega_n) - U_{q2}(\omega_n)I_{d1}(\omega_n)}{I_{d2}(\omega_n)I_{q1}(\omega_n) - I_{d1}(\omega_n)I_{q2}(\omega_n)} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} Y_{dd}(\omega_n) = \frac{I_{d1}(\omega_n)U_{q2}(\omega_n) - I_{d2}(\omega_n)U_{q1}(\omega_n)}{U_{d1}(\omega_n)U_{q2}(\omega_n) - U_{d2}(\omega_n)U_{q1}(\omega_n)} \\ Y_{dq}(\omega_n) = \frac{I_{d1}(\omega_n)U_{d2}(\omega_n) - I_{d2}(\omega_n)U_{d1}(\omega_n)}{U_{d2}(\omega_n)U_{q1}(\omega_n) - U_{d1}(\omega_n)U_{q2}(\omega_n)} \\ Y_{qd}(\omega_n) = \frac{I_{q1}(\omega_n)U_{q2}(\omega_n) - I_{q2}(\omega_n)U_{q1}(\omega_n)}{U_{d1}(\omega_n)U_{q2}(\omega_n) - U_{d2}(\omega_n)U_{q1}(\omega_n)} \\ Y_{qq}(\omega_n) = \frac{I_{q1}(\omega_n)U_{d2}(\omega_n) - I_{q2}(\omega_n)U_{d1}(\omega_n)}{U_{d2}(\omega_n)U_{q1}(\omega_n) - U_{d1}(\omega_n)U_{q2}(\omega_n)} \end{cases} \quad (4)$$

同一频率下所注入的2组线性不相关的扰动信号见附录中图A1。图中, V_1 、 V_2 和 θ_1 、 θ_2 分别为2组不同的扰动电压矢量及其对应的初相位角度。相同频

率下扰动信号的初相位不同, 因此设计扰动源时2组扰动信号的初相位不同。

单相脉冲牵引整流器从启动至稳定工作的调节过程需要一定时间, 而本文研究整流器稳定工作时的阻抗特性, 因此谐波源投入系统后进行测量的时间点应在系统稳定运行之后, 并进行及时测量。所注入的谐波不能对系统正常运行造成干扰。附录中图A2为扰动装置在1s后分别注入2个不同频率、相同谐波幅值的扰动信号后的直流电压。由图A2可知, 频率为75 Hz的扰动信号对直流侧电压的影响比频率为300 Hz的扰动信号影响更大, 即采用不同频率、相同谐波幅值的扰动信号对系统影响不同。因此需要对不同频率谐波注入后整流器的工作状态进行实时监测, 根据监测结果实时调整扰动信号的谐波幅值。

本文采用谐波电压幅值扰动法, 阻抗测量模块工作原理见附录中图A3。图中 R_2 为普通分压电阻。谐波源发生电路并入系统, 在车-网系统的耦合点分别通过电压传感器和电流传感器采集网侧输出电压与电流、动车组交流侧输入电压与电流以及直流侧电压, 然后传输至数据分析参数设置系统中进行FFT分析得到在本次注入频率下整流器的运行工况以及该注入频率下的阻抗值。控制信号由数据分析参数装置设计输入量, 一方面控制程控断路器由闭合至断开, 另一方面控制 IGBT 驱动电路产生驱动信号控制 IGBT 通断, 通过调节程控电阻 R_1 控制注入谐波幅值 U_r , 随 R_1 接入阻值的增大 U_r 变小。

图5为阻抗测量过程。图中, 系统稳定工作的阈值判定过程如下: ①对整流器网侧、直流侧电压传感器采集的数据进行FFT, 得到网侧输入电压幅值 U_s ; ②设整流器的正常工作范围所对应的网侧输入侧电压幅值、电流幅值、直流侧电压幅值的阈值分别为 $[U_1, U_2]$ 、 $[I_1, I_2]$ 、 $[U_{d1}, U_{d2}]$; ③当满足 $U_s \in [U_1, U_2]$ 、 $u_{dc} \in [U_{d1}, U_{d2}]$ 时, 整流器处于正常工作状态。

系统正常运行后, 控制扰动信号源产生扰动信号, 在各个频率下分别注入2组初相位不同的扰动信号, 分别对2组信号注入后系统能否维持稳定工作进行阈值判定, 若判定条件未能同时满足, 则实时修改本次注入频率及该相位所对应的谐波幅值; 若判定条件表明系统处于正常工作状态, 则对牵引网侧及机车侧的电压、电流信号进行分析计算, 得到该频率所对应的牵引网输出阻抗及机车侧输入导纳; 循环上述过程至完成所有频率下的阻抗测量。

使用固定扰动幅值注入与幅值自调节注入进行阻抗测量, 扰动信号源在0~25s内分别注入频率为0~100 Hz的扰动谐波, 扰动信号对直流侧电压、交流侧电压基频幅值影响对比见图6, 扰动信号占比(即扰动信号幅值在交流侧基频电压幅值所占比值)对

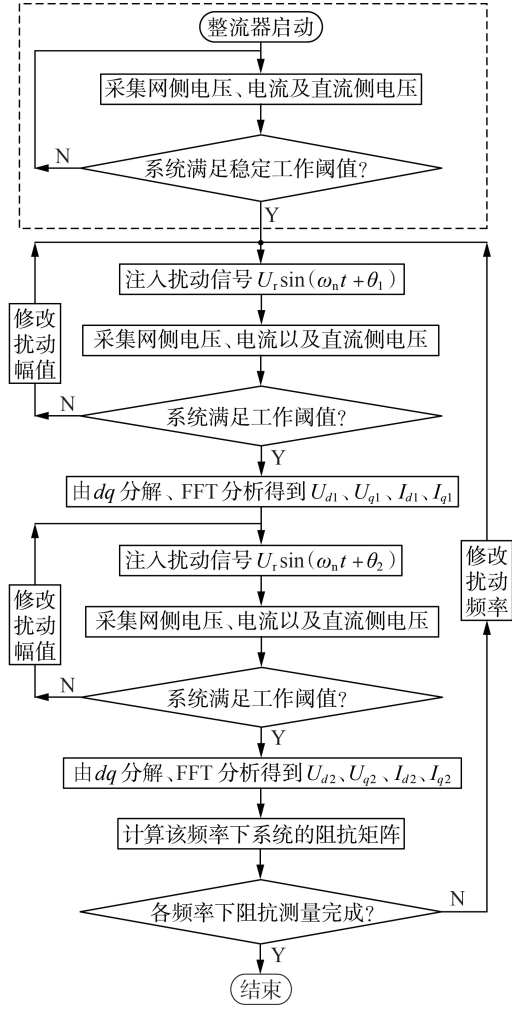


图5 阻抗测量流程

Fig.5 Flowchart of impedance measurement

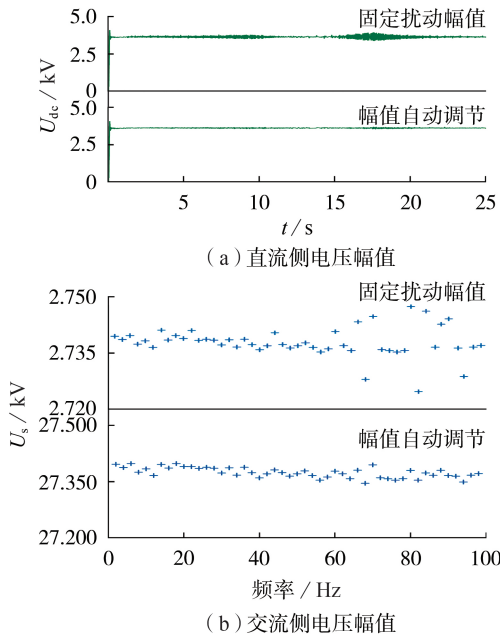


图6 扰动信号对直流侧、交流侧电压幅值的影响
Fig.6 Influence of disturbance signal on voltage amplitudes at DC and AC sides

比见图7。由图6、图7可知,本文所提幅值自调节测量方法可根据交流侧以及直流侧电压的波动情况进行调整,当超出工作阈值时,实时闭环步进方式调节程控电阻,减小该频率下扰动信号占比,减小扰动,维持系统稳定工作,从而避免在固定扰动幅值下不满足阈值要求而需重新测量所带来的测量时间的浪费问题;以及避免在固定扰动幅值下重新进行阻抗测量时,为满足部分频率下的阈值要求,降低其他频率下扰动信号占比,导致的阻抗测量准确度下降问题。

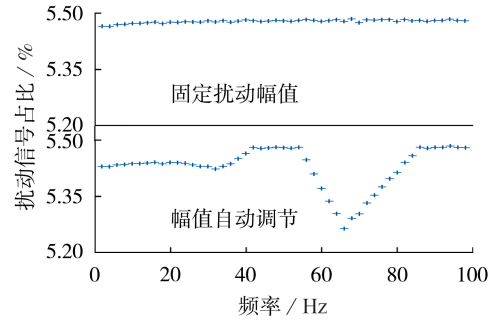


图7 交流侧电压扰动信号占比图

Fig.7 Diagram of signal ratio of disturbance signal at AC side

3 dq坐标系下的车-网系统稳定性分析

基于阻抗测量结果进行稳定性分析,使用文献[19]中提出的改进型基于禁区的稳定性判据对测得的牵引网输出阻抗矩阵 $Z_{sdq}(\omega_n)$ 、动车组输入导纳矩阵 $Y_{ldq}(\omega_n)$ 进行系统稳定性分析,从而对本文所设计阻抗测量方法的准确性进行验证。计算返回比矩阵 $L_{dq}(\omega_n)$ 、 $L_{dq1}(\omega_n)$, 分别如式(5)和式(6)所示。

$$L_{dq}(\omega_n) = Z_{sdq}(\omega_n) Y_{ldq}(\omega_n) =$$

$$\begin{bmatrix} Z_{dd} & Z_{dq} \\ Z_{qd} & Z_{qq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{dd} & Y_{dq} \\ Y_{qd} & Y_{qq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{dd} & L_{dq} \\ L_{qd} & L_{qq} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$L_{dq1}(\omega_n) = Y_{ldq}(\omega_n) Z_{sdq}(\omega_n) =$$

$$\begin{bmatrix} Y_{dd} & Y_{dq} \\ Y_{qd} & Y_{qq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{dd} & Z_{dq} \\ Z_{qd} & Z_{qq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{dd1} & L_{dq1} \\ L_{qd1} & L_{qq1} \end{bmatrix} \quad (6)$$

将式(5)、式(6)代入式(7):

$$\left(\begin{aligned} & f_1: \operatorname{Re}\{L_{dd}\} - |L_{dq}| + 1 > 0 \\ & f_2: \operatorname{Re}\{L_{qq}\} - |L_{qd}| + 1 > 0 \end{aligned} \right) \cup \left(\begin{aligned} & f_3: \operatorname{Re}\{L_{dd}\} - |L_{qd}| + 1 > 0 \\ & f_4: \operatorname{Re}\{L_{qq}\} - |L_{dq}| + 1 > 0 \end{aligned} \right) \cup \left(\begin{aligned} & f_5: \operatorname{Re}\{L_{dd1}\} - |L_{dq1}| + 1 > 0 \\ & f_6: \operatorname{Re}\{L_{qq1}\} - |L_{qd1}| + 1 > 0 \end{aligned} \right) \cup \left(\begin{aligned} & f_7: \operatorname{Re}\{L_{dd1}\} - |L_{qd1}| + 1 > 0 \\ & f_8: \operatorname{Re}\{L_{qq1}\} - |L_{dq1}| + 1 > 0 \end{aligned} \right) \quad (7)$$

式(7)中的每组子判据均可得到幅频特性曲线。当4组子判据组合均不成立,即各组合中至少出现1条幅频特性曲线在同一频率处的幅值小于0的情况时,系统将出现不稳定现象;当4组子判据中存在任意一组成立时,即在所有频率下至少存在1组子判据成立时,该判据中的2条幅频特性曲线在所有频率下的幅值均大于0,系统稳定。

对图A3中阻抗测量模块进行仿真,系统仿真参数见附录中表A1。运用2.2节所设计的阻抗测量方法对车-网系统进行阻抗测量,将测量所得的阻抗、导纳进行稳定性分析。

6辆动车组接入牵引网后,通过本文设计的阻抗测量方法将所得系统阻抗值代入式(7)中,所得系统幅频特性见附录中图A4。由图A4可知,当6辆动车组并网时,车-网系统运行稳定。7辆动车组接入牵引网后,所得幅频特性见附录中图A5。由图A5可知,车-网系统在6 Hz附近产生低频振荡。

4 仿真及实验验证

将设计的阻抗测量方法对车-网系统进行阻抗测量,将所得阻抗进行稳定性分析的结果与多辆动车组并入牵引网时运行工况进行对比,以验证阻抗测量方法的准确性。首先,基于MATLAB/Simulink平台进行仿真验证,然后,基于RT-LAB实时仿真器、上位机及TMS320F28335数字信号处理器进行硬件在环测试。

4.1 仿真验证及结果分析

仿真模型系统见附录中图A6,将含5组动力单元的动车组接入牵引网,各动力单元的拓扑、控制方法和详细参数均相同,仿真参数见表A1。

6辆动车组接入牵引网后,系统时域仿真结果如图8所示。由图8可知,系统运行稳定,与图A4所分析的稳定性结果相一致。

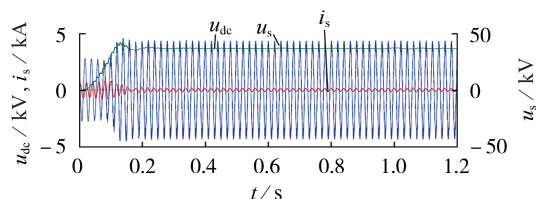


图8 6辆动车组入网后的交流电压、交流电流及直流电压
Fig.8 AC voltage, AC current and DC voltage after 6 trains merge into network

7辆动车组接入牵引网后,系统时域仿真结果如图9所示。由图9可知,系统在6 Hz左右发生低频振荡,与图A5所示分析结果相一致,验证了本文所提测量方法对系统稳定性的分析结果。

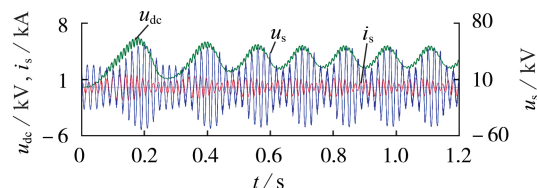


图9 7辆动车组入网后的时域低频振荡现象
Fig.9 Low frequency oscillation phenomenon after 7 trains merge into network

4.2 硬件在环测试

为进一步验证本文设计的阻抗测量方法所得测量阻抗对系统稳定性分析结果的准确性,将同样参数的车-网系统在硬件在环平台上进行试验验证,硬件在环测试系统见附录中图A7。RT-LAB测试系统(采用RT-LAB实时仿真器OP5600作为载体)通过PCI-E总线进行数据交互,经由CPU core-i7及以太网线与上位机进行交互,通过数/模转换板卡将模拟信号(电压、电流信号)传输至DSP28335主控制器的ADC采样端口及示波器,主控制器将数字信号(PWM驱动信号)通过数字信号输入板卡对虚拟被控对象进行控制。硬件在环平台见附录中图A8。

6辆动车组接入牵引网后系统时域运行工况如图10所示。由图10可知,系统未出现振荡,与图A5中的稳定性分析结果以及图8中的仿真验证结果吻合。7辆动车组接入牵引网时域运行工况如图11所示。图中出现了较为明显的等幅低频振荡现象,整流器直流电压的振荡周期为184 ms,振荡频率在6 Hz附近,与图A6中的稳定性分析结果以及图9中的仿真结果基本吻合。

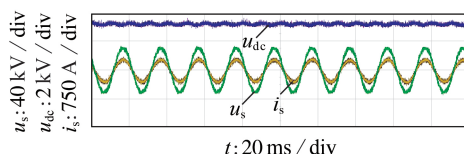


图10 6辆动车组入网后系统运行情况
Fig.10 Operation conditions of system after 6 trains merge into network

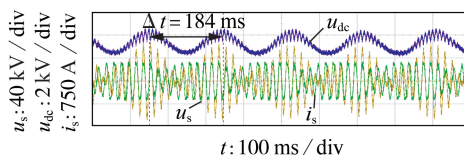


图11 7辆动车组入网后低频振荡现象
Fig.11 Low frequency oscillation phenomenon after 7 trains merge into network

5 结论

本文提出了一种牵引传动系统输入导纳及网侧输出阻抗的测量方法,该方法可根据整流器稳定性

运行情况实时调节扰动谐波幅值,在 dq 旋转坐标系下实现对车-网系统阻抗、导纳矩阵更省时、准确的测量。在此基础上,通过MATLAB/Simulink仿真以及硬件在环实验对所测量的阻抗、导纳进行稳定分析。仿真及实验结果表明,由所提测量方法得到的车-网阻抗、导纳可用于车-网系统稳定性分析,所得低频振荡频率范围与车-网系统时域运行时产生低频振荡频率范围相吻合。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] HU H, TAO H, BLAABJERG F, et al. Train-network interactions and stability evaluation in high-speed railways-part I: phenomena and modeling[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(6): 4627-4642.
- [2] 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): 127-134.
ZHANG Guinan, LIU Zhigang, XIANG Chuan, et al. Voltage fluctuation characteristics of traction power supply system considering AC-DC-AC electric locomotives accessed[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 127-134.
- [3] MOLLERSTEDT E, BERNHARDSSON B. Out of control because of harmonics-an analysis of the harmonic response of an inverter locomotive[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2000, 20(4): 70-81.
- [4] LEE H, LEE C, JANG G, et al. Harmonic analysis of the Korean high-speed railway using the eight-port representation model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 979-986.
- [5] 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, 2013, 29(4): 1735-1743.
- [6] 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): 151-156.
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): 151-156.
- [7] MIDDLEBROOK R D. Input filter considerations in design and application of switching regulators[C]//IEEE Industry Application Society Annual Meeting. Chicago, USA: IEEE, 1976: 94-107.
- [8] 刘增, 刘进军. 带变流器负载的三相交流电源系统稳定性判据的研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 143-148.
LIU Zeng, LIU Jinjun. Stability criterion for three-phase AC power systems with converter load[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 143-148.
- [9] 辛焕海, 李子恒, 董炜, 等. 三相变流器并网系统的广义阻抗及稳定判据[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1277-1293.
XIN Huanhai, LI Ziheng, DONG Wei, et al. Generalized-impedance and stability criterion for grid-connected converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1277-1293.
- [10] SUN J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(11): 3075-3078.
- [11] CAO W, MA Y, YANG L, et al. D-q impedance based stability analysis and parameter design of three-phase inverter-based AC power systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(7): 6017-6028.
- [12] 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.
- [13] 廖一橙. 高速铁路多车并联系统低频稳定性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
LIAO Yicheng. Research on low-frequency stability of high-speed railway system with multiple vehicles paralleled[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [14] COBRECES 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.
- [15] 潘鹏宇, 胡海涛, 杨孝伟, 等. 基于宽频带扰动的牵引供电系统频域阻抗测量方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(2): 153-157.
PAN Pengyu, HU Haitao, YANG Xiaowei, et al. Frequency-domain impedance measurement method for traction power supply system based on broadband perturbation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 153-157.
- [16] PAN P, HU H, YANG X, et al. Impedance measurement of traction network and electric train for stability analysis in high-speed railways[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(12): 10086-10100.
- [17] HUANG J, CORZINE K A, BELKHAYAT M. 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.
- [18] ZHOU B, JAKSIC M, SHEN Z, et al. Small-signal impedance identification of three-phase diode rectifier with multi-tone injection[C]//2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition-APEC 2014. Fort Worth, TX, USA: IEEE, 2014: 2746-2753.
- [19] JIANG K, ZHANG C, GE X. Low-frequency oscillation analysis of the train-grid system based on an improved forbidden-region criterion[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(5): 5064-5073.
- [20] 宋文胜. 电力牵引变流器控制与调制算法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
SONG Wensheng. Control and modulation algorithm of railway electrical traction converter[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.

作者简介:



刘方平

刘方平(1995—),男,江西南昌人,硕士研究生,主要研究方向为列车牵引传动系统-牵引网阻抗测量及稳定性分析(E-mail: 1667106264@qq.com);

葛兴来(1979—),男,山西太原人,教授,博士,主要研究方向为电力牵引系统控制与仿真,电力牵引系统稳定性分析,电力牵引系统故障预测、诊断及容错控制(E-mail: xlgee@163.com)。

(编辑 王欣竹)

(下转第178页 continued on page 178)

性试验研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(2): 211-218.

OUYANG Sen, LI Xiang, LIU Ping, et al. Experimental research on sensitive characteristic to voltage sag for electronic circuit of low-voltage release[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(2): 211-218.

作者简介:

吴国沛(1975—), 男, 河南南阳人, 高级工程师, 博士, 从



吴国沛

事电力系统生产运行管理和设备管理工作
(E-mail: wuguopei@hotmail.com);

钟 庆(1978—), 男, 江西赣州人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 研究方向为电能质量分析与控制(E-mail: epqzhong@scut.edu.cn)。

(编辑 王锦秀)

Evaluation of equipment malfunction probability considering load randomness

WU Guopei¹, XU Zhong¹, HE Qizhang², CHEN Weikun², ZHONG Qing²

(1. Guangzhou Power Supply Bureau Co., Ltd., Guangzhou 510600, China;

2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: Taking the uncertainty of equipment malfunction under voltage sag into account, an evaluation method of equipment malfunction probability under different voltage sags is proposed with the consideration of load randomness. VTC (Voltage Tolerance Curve) is used to analyze the uncertainty of equipment malfunction under different voltage sags, the two-dimensional space represented by residual voltage and duration is divided to different zones, and the uncertainty characteristics of equipment malfunction in different zones are obtained. An evaluation model of equipment malfunction probability is built according to the factors influencing equipment malfunction and the probability density function of equipment load ratio in different zones, and the application flowchart of probability evaluation method is given. The variable frequency speed control system commonly used in industry is taken as the evaluation object to verify the proposed method. The proposed method effectively considers voltage sag tolerance ability under load randomness and different load ratios, and can reflect the uncertainty of equipment malfunction under voltage sag more accurately.

Key words: power quality; voltage sag; malfunction probability; voltage tolerance curve

(上接第159页 continued from page 159)

Impedance measurement method and stability analysis of high-speed train-traction network

LIU Fangping¹, GE Xinglai¹, YU Siru¹, JIANG Keteng²

(1. Key Laboratory of Magnetic Suspension Technology and Maglev Vehicle, Ministry of Education, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610213, China)

Abstract: During the operation of high-speed trains, low-frequency oscillations are likely to occur, which affects the stable operation of the high-speed-train traction drive system. Taking the high-speed train single-phase traction rectifier as the research object and the stability analysis of the train-network system as the research goal, based on the impedance definition model, a method for measuring the input admittance of the traction drive system and the output impedance of the network side is proposed. Through detection of the rectifier operation condition, the threshold value is determined, and then the magnitude of the real-time disturbance harmonic is adjusted. The disturbance injection device corresponding to the measurement method is designed to achieve the adjustment of the disturbance harmonic amplitude by adjusting the programmable resistance. The impedance of the train-network system is measured in the dq rotating coordinate system, the stability analysis is performed based on the measurement results, and the simulative verification is performed through MATLAB/Simulink, and the hardware-in-the-loop test verification is performed. The simulative and test results show that the time-domain operating conditions of the train-network system are consistent with the results of the stability analysis, and the effectiveness of the designed measurement method is verified.

Key words: train-network system; stability analysis; impedance measurement; stability threshold determination; harmonic parameter self-adjustment

附录

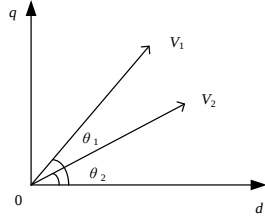


图 A1 2 组线性不相关的扰动信号示意图

Fig.A1 Schematic diagram of two sets of linearly uncorrelated disturbance signals

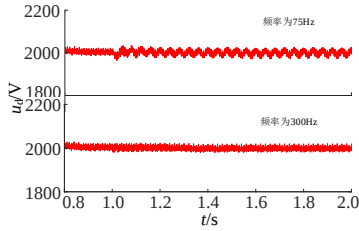


图 A2 相同幅值、不同频率扰动信号注入直流侧电压对比

Fig.A2 Comparison of DC voltages affected by disturbance signal with different frequencies and same amplitude

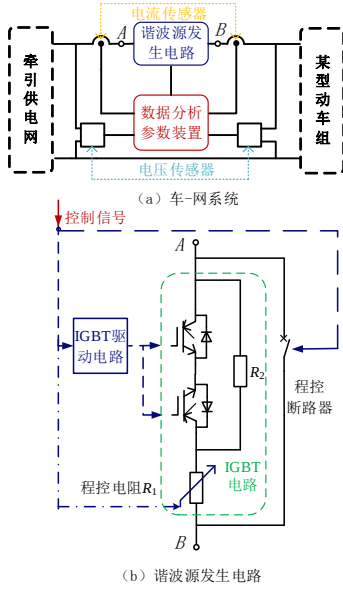


图 A3 阻抗测量模块工作示意图

Fig.A3 Schematic diagram of working process of impedance measurement module

表 A1 仿真参数
Table A1 Simulation parameters

参数	参数值
网侧电压幅值 e_n /kV	27.5
网侧等效电阻 R_s / Ω	1.172
网侧等效电感 L_s /mH	7
整流器直流侧电压 U_{dc} /kV	3.6
牵引变压器绕组侧等效电阻 R_{tr} / Ω	0.2
牵引变压器绕组侧等效电感 L_n /mH	5.4
直流侧等效负载 R_d / Ω	25
直流侧支撑电容 C_d /mF	9
直流侧滤波电感 L_2 /mH	0.84
直流侧滤波电容 C_2 /mF	3
电压环比例参数 K_{pv}	0.4
电压环积分参数 K_{iv}	3
电流环比例参数 K_{pi}	0.64
电流环积分参数 K_{ii}	18.4
固定扰动电压幅值 V_r /kV	1.5
程控可调电阻 R_1 / Ω	0~100
普通分压电阻 R_2 / Ω	100

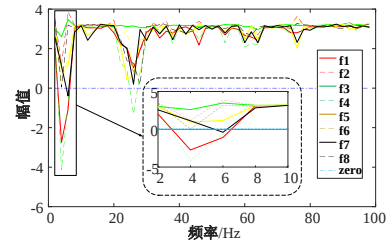


图 A4 6 辆动车组入网后各子判据中系统的幅频特性

Fig.A4 Amplitude-frequency characteristic of sub-criteria after 6 trains merged into network

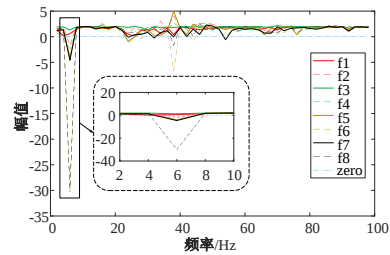


图 A5 7 辆动车组入网后各子判据中系统的幅频特性

Fig.A5 Amplitude-frequency characteristic of sub-criteria after 7 trains merged into network

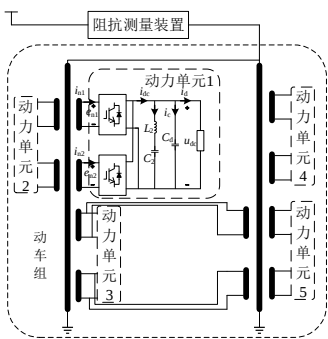


图 A6 仿真系统框架

Fig.A6 Frame of simulation system

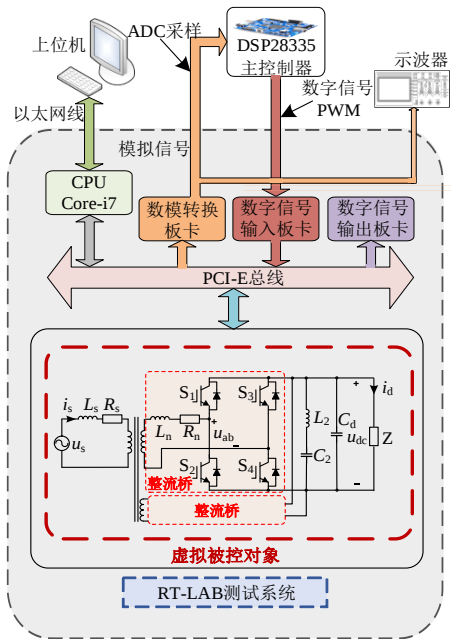


图 A7 硬件在环测试系统框图

Fig.A7 Block diagram of hardware-in- loop test system



图 A8 硬件在环实验平台

Fig.A8 Experimental platform of hardware-in-loop