机车电传动 2017 年第 6 期 (2017-11-10)
ELECTRIC DRIVE FOR LOCOMOTIVES №6, 2017(Nov. 10, 2017)
文章编号：1000–128X(2017)06–0064–05

基于阻抗分析的铁路车网耦合系统低频振荡研究

陶　艳

（湖南铁道职业技术学院，湖南 株洲　412001）

摘　要：针对国内电气化铁路频繁发生低频振荡现象并造成机车牵引闭锁、供电系统保护跳闸等事故，围绕机车—供电网（车网）低频振荡的产生机理、影响因素进行理论与仿真分析，推导得到了车网阻抗模型。采用阻抗比稳定性判据，分析了机车数量、供电网等效阻抗和机车整流器控制参数等对车网系统低频振荡现象的影响规律。利用详细的车网时域仿真模型，验证了频域阻抗模型分析所得结论，为更好地抑制车网系统低频振荡现象提供了参考依据。

关键词：车网系统；低频振荡；阻抗模型；阻抗比稳定性判据

中图分类号：U223.5　　**文献标识码：**A

doi：10.13890/j.issn.1000-128x.2017.06.014

Study on Low-Frequency Oscillation in Train-Traction Network Coupling System Based on Impedance Model

TAO Yan

(Hunan Railway Professional Technology College, Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: The low-frequency oscillation phenomenon had been frequently occurred in China electrified railways, which caused the traction locked of the train and the protection tripped of power supply system as well as other accidents. The mechanism of this low-frequency oscillation in train-traction network system and its influential factors were fully investigated through both simulation and theoretical studies. The impedance modeling method for converter was presented. Based on the stability criterion of impedance rate, the influence of different available factors had been detailed studied, such as the number of trains, equivalent impedance of traction network and the control parameters of onboard rectifier on the low-frequency oscillation of train-traction network system. The results of the theoretical analysis in impedance model were verified by the detailed time domain simulations, which provided a reference for suppressing the low-frequency oscillation in train-traction network systems.

Keywords: train-traction network system; low-frequency oscillation; impedance model; stability criterion of impedance ratio

0　引言

近年来，我国电气化铁路经历了跨越式的发展，路网规模不断扩大。但伴随着电力机车数量的增加，车网低频振荡现象频繁发生，造成牵引闭锁，机车无法正常出库，干扰了铁路运输秩序。据报道，低频振荡现象多发生于多台机车在同一供电区间升弓整备时，振荡频率在 2~7 Hz。涉及的车型包括动车组 CRH1、CRH5 及机车 HXD2B、HXD3B 等多种车型。2008 年 1 月，湖东机务段发生网压低频振荡，HXD1 型机车共发

收稿日期：2017–05–24；修回日期：2017–06–21
基金项目：湖南省教育厅科学研究项目（16C1045）

生了 13 次牵引闭锁 [1]；2010 年 1 月，南翔动车所多列 CRH1 动车组引起网压低频振荡 [2]；2010 年下半年，CRH5 动车组在多地发生多次低频振荡导致动车组晚点 [3]；2011 年 11 月，山海关铁路枢纽 HXD3B 型机车发生低频振荡导致牵引封锁 [4]；2011~2016 年间，徐州北铁路枢纽多台 HXD2B 型机车多次引起低频振荡现象 [5-6]。

从现场问题来看，存在如下规律：①低频振荡多发生在一些特殊车型，且属于弱电网、多台机车同时运行情况下的振荡；②随着机车（动车组）数量的增加，振荡更为剧烈，临界数量一般在 5~8 台（列）；③一般会造成变电所、机车保护动作及闭锁，造成停电与机车（列车）停运。由此可见，研究车网系统低频振荡问题的产生原因可以为抑制车网系统低频振荡提供重要的理论基础。

目前，车网系统低频振荡问题已被关注。主要的研究手段有：时域分析仿真 [7]、分析特征值 [8] 及频域分析建模 [9]。但时域分析仿真对不同车型要搭建不同模型，耗时长，且无法给出参数对振荡的具体影响；频域分析模型方法十分复杂，且无法利用验证控制参数对低频振荡影响规律。

针对上述问题，本文基于分析搭建了机车牵引变流器的阻抗模型，结合低频振荡的工况，得出了阻抗传递函数，采用阻抗比稳定性判据，分析各种参数对低频振荡的影响规律，并在此基础上，利用时域仿真对频域分析的结果进行了验证。

1　车网阻抗模型

建立车网系统的模型是分析低频振荡机理的重要手段。用电压源和阻抗串联的戴维南等效模型表示供电网。由于低频振荡多发生在机车升弓整备的空载工况下，因此，对四象限变流器的建模是本文的重点，车网系统模型如图 1 所示。四象限变流器器中主要有锁相环、直流电压环控制、交流电流控制等部分。

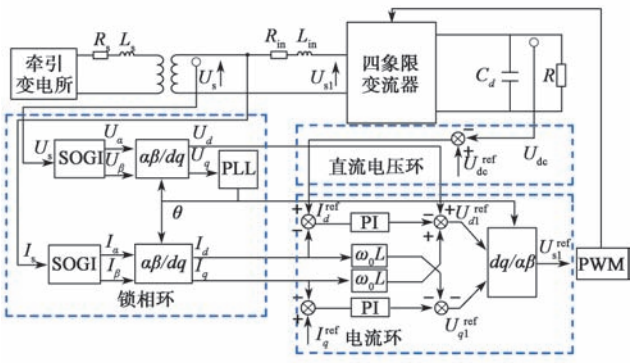
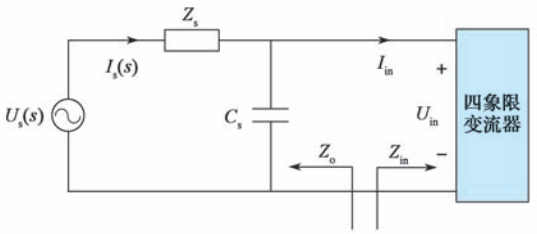


图 1　车网系统模型

1.1　牵引网络建模

可以将牵引网等效成一个线路阻抗与理想电源的串联，机车牵引变流器接入其中，所以车网系统等效电路图如图 2 所示。



$U_s(s)$—牵引网电压源；$I_s(s)$—牵引线路上的负载电流；I_{in}—机车牵引变流器电网侧的输入电流；Z_s—牵引网等效电阻与感抗；C_s—牵引网对地电容；Z_o—牵引网等效输出阻抗；Z_{in}—牵引变流器等效输入阻抗

图 2　系统等效电路图

可以看出，牵引网的输出阻抗为线路等效阻抗与对地等效电容的并联：

$$Z_o(s)=\frac{Z_s(s)\cdot\frac{1}{sC_s}}{Z_s(s)+\frac{1}{sC_s}}=\frac{Z_s(s)}{Z_s(s)C_s s+1} \tag{1}$$

本文使用的牵引网建模数据如表 1 所示。

表 1　牵引供电网络参数

牵引变电所容量	变压器等效阻抗	牵引线路长度	线路单位阻抗
15 MW	0.373+j7.36	13 km	0.08+j0.12

1.2　机车建模

机车输入阻抗无法直接算出，需要利用变流器的输入电压与输入电流求出等效输入阻抗。对于图 1 所示的同步旋转坐标系下的电流解耦控制方法。单台机车输入阻抗 Z_{in} 为

$$Z_{in}=\frac{U_{in}}{I_{in}} \tag{2}$$

多台机车同时运行，输入阻抗变为所有机车输入阻抗的并联：

$$Z_{in1}=1/\left(\frac{1}{Z_{in1}}+\frac{1}{Z_{in2}}+\cdots+\frac{1}{Z_{inn}}\right) \tag{3}$$

由式（3）可见，多机车同时运行时，每增加 1 台机车，都会影响整个系统输入阻抗。故系统稳定性与机车的台数有关。

本文以 HXD2B 型机车为例，分析车网谐振情况，机车参数如表 2 所示 [10]。

表 2　HXD2B 型机车主电路参数

轴功率	输入电压	输入电流	直流电压
1 600 kW	2 100 V	1 000 A	3 775 V
开关频率	支撑电容	滤波电容	滤波电感
500 Hz	3 mF	4 mF	633 μH

2　阻抗比判据

阻抗比判据是近年来新出现的一种稳定性判断方法 [11]，可以用于带滤波器的 DC/DC 变换器并联稳定性研究。判据内容为：系统稳定性由前级模块输出阻抗

与后级模块的输入阻抗之比决定。如果该比值的模远小于 1，则系统稳定。按照阻抗比判据原理，可以把牵引网与机车变流器看作前后 2 个模块级联起来，如图 3 所示。

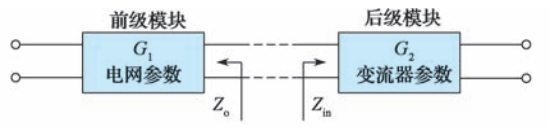


图 3　车网系统模块级联

牵引网部分的传递函数为 $G_1(s)$，其输出阻抗为 $Z_0(s)$；机车变流器部分的传递函数为 $G_2(s)$，其输入阻抗为 $Z_{in}(s)$。

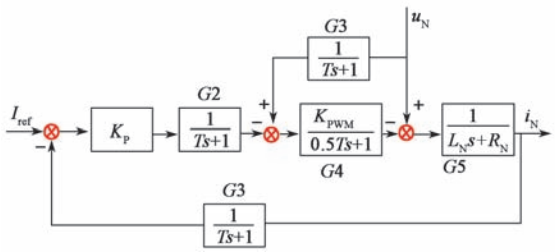
要保证系统稳定，则应保证

$$\left|Z_o(s)/Z_{in}(s)\right| \ll 1 \tag{4}$$

3　牵引供电系统低频振荡机理研究

3.1　电流控制器参数影响分析

前面指出过四象限变流器由电压控制器、电流控制器构成，电流控制器是使四象限变流器的输入电流跟踪电压环产生的指令电流，其控制框图如图 4 所示。



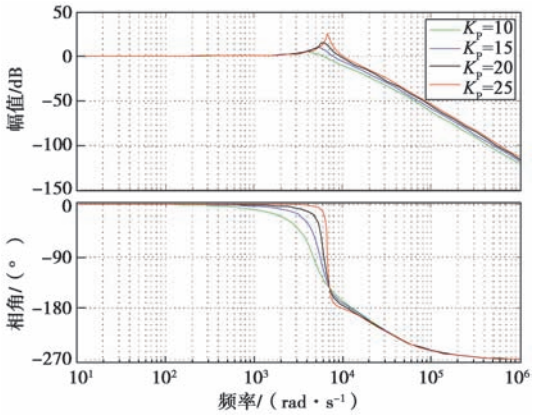
u_N—牵引网侧电压；K_P—电流控制器比例系数；K_{PWM}—PWM 环路放大倍数；L_N—四象限变流器网侧滤波电感；R_N—四象限变流器网侧等效电阻；T—PWM 开关周期 / 控制器控制周期

图 4　电流内环控制框图

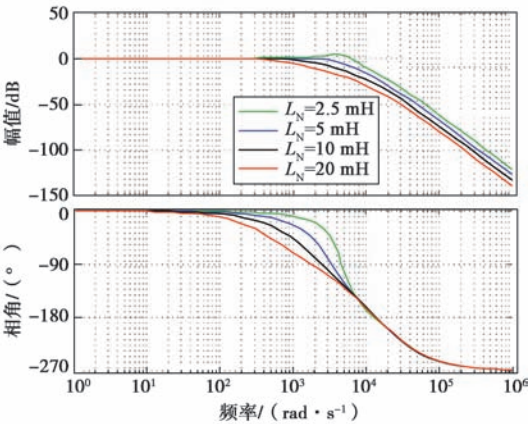
利用图 4，可以推导出机车输入导纳的传递函数 i_N/u_N 为

$$G_Z(s)=\frac{G_5-G_3G_4G_5}{1+G_2G_3G_4G_5}=\frac{(4-2.5K_{PWM})Ts+4-K_{PWM}}{4L_NTs^2+(4TR_N+1.5TK_PK_{PWM})s+R_N+K_PK_{PWM}} \tag{5}$$

根据式（5），利用 Matlab 软件绘制出机车输入导纳随频率变化的 Bode 图，观察不同频率下，不同的四象限变流器电流控制器比例系数 K_P 与四象限变流器滤波电感 L_N 对系统频率特性的影响。图 5（a）显示，随着电流环比例环节系数 K_P 的增大，机车输入导纳幅频曲线的峰值增大，同时向右移，说明系统输入阻抗随电流内环比例系数增加而变小，结合阻抗比判据，牵引网阻抗不变的话，阻抗比变大，因而系统稳定性变差，但从 Bode 图上可以看出，此时导纳增加的部分集中在高频段，所以，电流内环比例系数对高频区域的稳定性有一定的影响；同理，图 5（b）则显示，增大四象限变流器的滤波电感，系统对应的幅频曲线在高频段的稳定性增加。



（a）电流环比例系数的影响



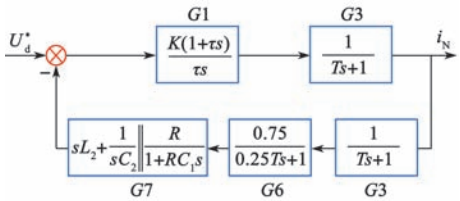
（b）滤波电感对稳定性的影响

图 5　电流控制器稳定性分析

由以上分析可知，车网系统高频段的稳定性受电流控制器的参数影响，增加电流控制器的比例系数，系统容易在高频段发生振荡；增加网侧滤波电感的大小，系统的稳定性得到改善。

3.2　电压控制器参数影响分析

电压控制外环的作用是控制四象限变流器直流侧电压保持恒定。与上节分析的电流控制器相比较，由于电压控制环节的时间常数远远大于电流控制器的时间常数，所以在分析电压控制器时，可以将电流控制器等效成一阶惯性环节[12]，电压控制外环的四象限变流器控制框图如 6 所示。

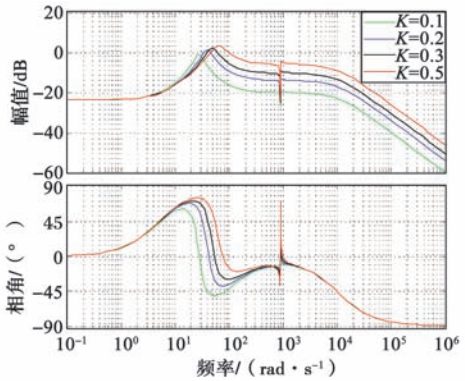


U_d^*—直流侧给定电压；K—电压环 PI 调节器中比例系数；τ—电压环 PI 调节器中积分时间常数；C_1—直流滤波电容；R—直流部分等效的负载；T—PWM 开关周期 / 控制器控制周期

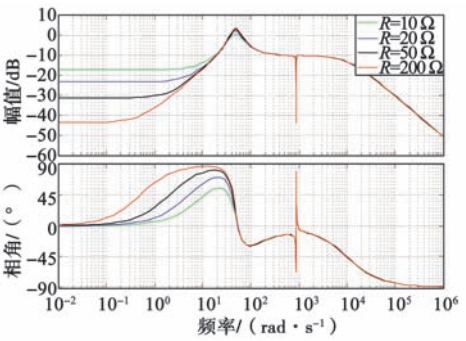
图 6　电压外环控制框图拓扑

同理，可写出考虑电压控制环后的机车导纳传递函数。图 7 是在不同的电压环比例系数、直流滤波电

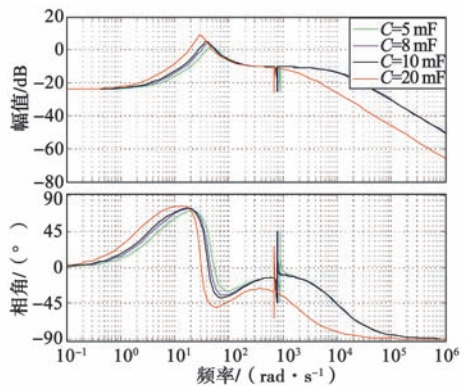
容以及机车等效负载的条件下，得到的系统导纳 Bode 图。由图 7 可知，车网系统低频段的稳定性会受电压控制环节的参数影响。电压环比例系数 K 值越大，系统越不稳定；负载电阻阻值越小（负载增加），系统的稳定性得到改善；随着直流侧支撑电容的增大，系统低频区域的稳定性变差，同时谐振频率也会降低。



（a）电压环比例系数的影响



（b）负载电阻的影响



（c）直流侧支撑电容的影响

图 7　电压外环对系统稳定性的影响

由上述分析可以得出，电压外环的参数主要影响车网系统低频段的稳定性，电压环比例系数越大，负载越小，直流侧滤波电容数值越大，系统的稳定性越差，越容易发生低频谐振。这些结论与现场实际发生谐振事故时的规律完全吻合。

3.3　机车运行数量对稳定性的影响

图 8 是包含有电压控制外环、电流控制器、反馈滤波、控制采样延迟的完整四象限变流器控制框图。根据图 8，结合前面给出的牵引网参数，绘制不同数量机车接入时的系统阻抗比的 Bode 图，如图 9 所示。

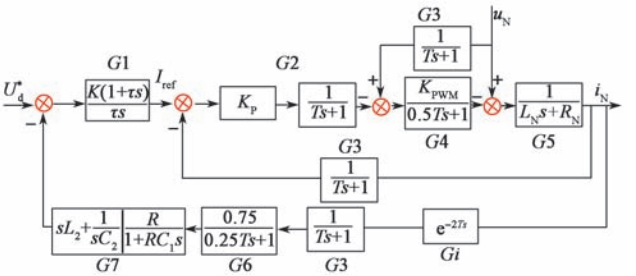


图 8　机车双环控制电路图

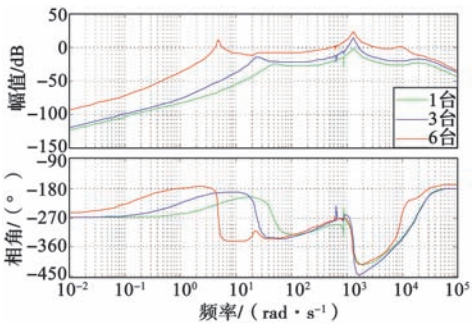


图 9　不同数量机车接入时车网系统阻抗比 Bode 图

如果牵引网中只有 1 台机车，整个频域范围内，车网系统的阻抗比幅频特性曲线都位于 0 dB 线以下，因此，此时系统不会发生振荡。但是随着机车台数的增多，系统的阻抗比传递函数幅频特性曲线会整体上移，同时幅频特性增益的峰值点对应的频率变低，当 6 台机车同时接入牵引网中时，幅频特性曲线峰值点超过 0 dB，而且系统此时的相位裕度 $\gamma=180°+\varphi(\omega_c)<0$，所以该条件下车网系统会发生低频谐振，而且从图 9 中可以看出谐振频率在 5 Hz 左右。

因此同一供电线路中升弓整备的列车数量会对系统低频稳定性产生很大的影响，机车数量越多，系统稳定性越差，越容易产生低频振荡。通过分析数据也可以看出，如果牵引供电系统的参数如表 1 所示，那么 HXD2B 型机车在该牵引网条件下，发生车网系统低次谐振的机车数量临界值为 6 台，也可以看出谐振点大约在 5 Hz 左右。

3.4　车网振荡抑制措施

结合前面的分析，可以采用如下措施来抑制低频振荡：

①降低供电网络（含接入电力网阻抗、牵引变压器、牵引网线路等）阻抗，即增强供电网络容量，减小供电距离，有利于抑制低频振荡的发生，但该方法实施困难，资本投入大。

②严格控制在同一供电区间内升弓整备的空载机车数量。在参数已经确定的情况下可以利用阻抗比模型计算同一供电区间内容纳机车的临界稳定数量。

③对于已经出现低频振荡的车型，由于控制参数对低频振荡有影响，可以在考虑满足四象限整流器能正常工作的基础上调整控制参数，尤其是调整电压环的 PI 参数，该方法在现有的基础上投资小，实施也较为容易。此方案目前也是各个机车车辆厂解决现场问

题的主要方案。

4 车网系统分析结果验证

前面利用得到的车网阻抗比模型，采用阻抗比稳定性判据，得出了在表 1、表 2 的参数下，当升弓整备空载状态下的机车数量超过 5 台时，车网系统将发生谐振频率在 5 Hz 左右的低频振荡。本节在 Matlab/Simulink 中搭建了车网系统时域仿真模型，如图 10 所示。

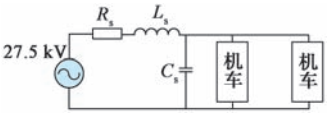
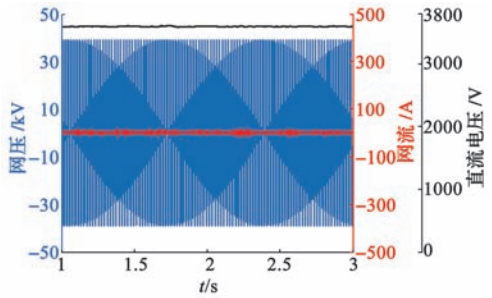
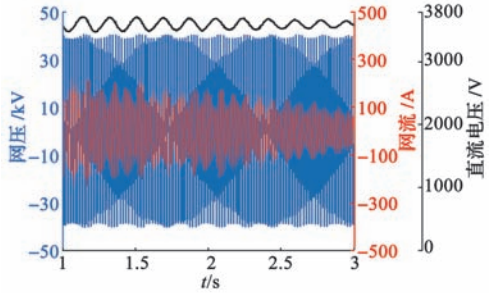


图 10 车网系统时域仿真模型

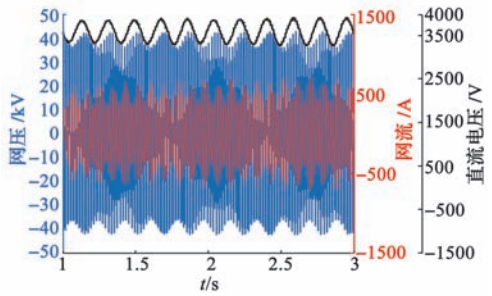
电路参数与表 1、表 2 中保持一致。图 11 分别是牵引网接入不同数量机车时的仿真结果。



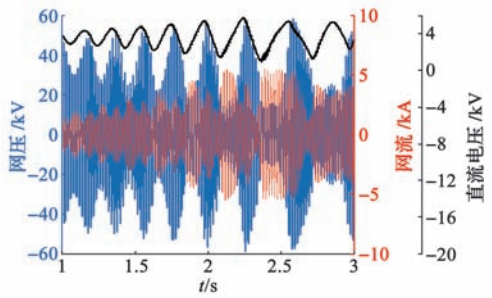
（a）1 台机车运行



（b）5 台机车运行



（c）6 台机车运行



（d）7 台机车运行

图 11 不同数量机车接入的仿真波形

从图 11 可以看出，当牵引网接入第 5 台机车时，网压网流及直流电压都发生了小幅振荡，但振荡幅值逐渐衰减。结合图 9 可知此时系统阻抗比虽然小于 1，但十分接近 1，基本处于临界稳定状态之下，衰减过程会持续比较长的时间，但最终会趋于稳定。在接入 6 台机车的情况下，网压网流及直流电压发生了振荡，此时系统阻抗比已经大于 1，振荡会一直持续。当接入机车数量达到 7 台时，网压网流振荡幅度进一步加大，并且频率变低，有可能造成牵引闭锁，从仿真结果可以看出谐振频率约为 5.3 Hz。仿真结果与理论分析吻合，并与振荡事故的实际情况描述一致[1–6]。

5 结语

本文针对牵引供电系统中车网系统低频振荡问题，建立了车网系统的数学模型，推导了车网系统阻抗比传递函数。利用阻抗比稳定判据，分析了各个参数对振荡的影响情况，结合分析结果，给出了几种抑制低频振荡的方法。最后，通过时域仿真验证了理论分析的正确性。

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] 北京交通大学. CRH5 动车组网压振荡牵引丢失测试分析报告[R]. 北京：北京交通大学，2010.

[4] 北京交通大学. HXD3B 电力机车网压振荡牵引封锁测试分析报告[R]. 北京：北京交通大学，2011.

[5] 徐州北机务段. 接触网电压波动测试报告[R]. 北京：中国铁道科学研究院，2011.

[6] 西南交通大学. 徐州北枢纽供电电压异常波动测试报告[R]. 成都：西南交通大学，2016.

[7] Heising C, Oettmeier M, Bartelt R, et al. Single-phase 50 kW 16.7Hz PI-controlled four-quadrant line-side converter lab model fed by rotary converter[C]//Proceedings of Compatibility and Power Electronics. Badajoz, Spain: IEEE, 2009：232–239.

[8] Danislsen S, Toftevaag T, Fosso O B. Application of linear analysis in traction power system stability studies[C]//Proceedings of Eleventh International Conference on Computer System Design and Operation in the Railway and Other Transit Systems. Toledo, Italy: Wessex Institute of Technology, 2008：401–410.

[9] Pika S, Danislsen S. Understanding of the stability criterion for a double-feedback loop system[C]// Proceedings of Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion. Bologna, Italy: IEEE, 2010:1–5.

[10] 张杰，尚敬，张志学，等. 电气化铁路车网低频振荡机理研究[J]. 机车电传动，2016(4)：16–22.

[11] 朱成花，严仰光. 一种改进的阻抗比判据[J]. 南京航空航天大学学报，2006 (3)：315-320.

[12] 张兴，张崇巍. PWM 整流器及其控制[M]. 北京：机械工业出版社，2014.

作者简介：陶 艳（1980–），女，硕士，副教授，高级工程师，主要研究方向为电气工程。