

# 再生制动工况下牵引变流器系统的稳定性分析

张承焯<sup>1</sup>, 汤 赐<sup>1</sup>, 曾云龙<sup>1</sup>, 唐 强<sup>1</sup>, 李建奇<sup>2</sup>

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 分布式电推进飞行器控制技术湖南省重点实验室, 湖南 常德 415000)

**摘要:**随着交直交传动方式在高速列车上的普及, 接触网电压波动甚至失稳现象出现频率日趋上升, 影响了设备安全及正常的运行。研究发现高速列车运行在再生制动模式下时对电网稳定性有很大影响, 为实现牵引变流器再生制动能量回收, 同时确保电网与牵引变流器的级联系统稳定运行, 该文在非理想电网情况下, 通过阻抗分析法推导产生稳定性问题的原因, 并在 Simplerer、Maxwell、RMxpert、Matlab/Simulink 仿真环境下进行联合仿真验证, 结果表明: 改善参数可以有效抑制级联系统的振荡问题, 提高列车运行可靠性。

**关键词:**牵引变流器; 再生制动; 稳定性分析; 级联系统

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.04.018 中图分类号: TM46; TN922.7 文章编号: 1673-9140(2021)04-0141-09

## The stability analysis of traction converter systems under regenerative braking conditions

ZHANG Chengye<sup>1</sup>, TANG Ci<sup>1</sup>, ZENG Yunlong<sup>1</sup>, TANG Qiang<sup>1</sup>, LI Jianqi<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;  
2. Hunan Provincial Key Laboratory for Control Technology of Distributed Electric Propulsion Aircraft, Changde 415000, China)

**Abstract:** In recent years, the AC-DC-AC transmission methods have been deployed ubiquitously in the high-speed trains, the grid voltage fluctuation and even instability becomes more frequently which will affect the safe operations of these equipment. The previous study found that the stability of the power grid will be sufficiently impacted when high-speed trains are in the regenerative braking mode. In order to realize the regenerative braking energy recovery of the traction converter, and to ensure the stable operation of the cascade system between the power grid and the traction converter. In the non-ideal power grids, the cause of the stability problem is derived based on the impedance analysis in this paper. The joint simulation verification is conducted among the Simplerer, Maxwell, RMxpert, Matlab/Simulink platforms. The results show that improved parameters can overtly reduce the oscillation in the cascade system, and hence enhance the train operation reliability.

**Key words:** traction converter; regenerative braking; stability analysis; cascade system

随着中国社会经济的不断发展, 人们对出行的要求也越来越高, 高速列车组速度快、安全性高、能耗低、运载力高的优点也突显出来, 成为人们出行的

首选, 并且一直都是世界各国现代化交通运输体系中最重要运输手段, 在国民经济的发展中发挥着不可替代的作用。在高速动车组技术引进项目

收稿日期: 2020-04-05; 修回日期: 2020-05-31

基金项目: 湖南省自然科学基金(2017JJ2265); 湖南省电动交通与智能配网工程技术研究中心开放基金(2015TP2001); 湖南省教育厅科学研究项目(14C0022); 分布式电推进飞行器控制技术湖南省重点实验室资助(2020TP1017)

通信作者: 汤 赐(1978-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力电子技术在电能质量管理中的应用研究; E-mail: tangci2679@126.com

中,CRH5 动车组是由长春轨道客车股份有限公司和法国阿尔斯通公司合作生产,该动车组是在阿尔斯通公司为芬兰提供的 SM3 动车组基础上改进设计的动力分散型电动车组,采用 8 辆编组、2 个动力单元、五动三拖,运营速度为 250 km/h,具有车体强度高、防火性能好、安全可靠、启动加速度大、噪音低、维护量小、寿命长、寿命周期成本低等优点。

CRH5 型高速列车在工况下供能的模式是通过受电弓从高压电网中获得的单相交流电先由变压器降压后,经牵引变流器 AC-DC-AC 变换成为三相交流电后为高速列车的牵引电机进行供电。牵引变流器拓扑结构及其控制方法对牵引电机接收电压的品质有决定性影响,进而影响着牵引电机的工作稳定性。

动车组在高速铁路上高密度、高速度运营,导致耦合性问题日益严重<sup>[1-2]</sup>。以徐州铁路枢纽为例,近年来采用新型的交—直—交大功率电力机车,频繁出现接触网低频电压波动,影响设备安全及正常的运输组织,反映了电力机车 PWM 四象限变流器的控制策略与牵引供电系统参数不匹配等深层次问题<sup>[3]</sup>。在牵引网传播的过程中,当牵引网参数同动车组匹配时谐波会发生谐振。谐振引起电压畸变,进一步使动车组或机车谐波电流增大,这就成了一个类似于正反馈的互相激励的过程。目前,高速动车组均采用了调速范围大、防滑性能好、可减少与轮缘摩擦等优点的再生制动方式。当高速列车处于再生制动模式下时,牵引电机将机械能转化为电能传送回电网中。制动工况下产生的谐波电流要比牵引工况高得多<sup>[4]</sup>。动车组网侧整流器是一个非线性、强耦合的时变参数模型<sup>[5]</sup>,与电网相连接后组成的级联系统更容易产生稳定性问题,因此有必要对其稳定性进行分析。

与电力系统低频振荡不同<sup>[6-7]</sup>,电气化铁路网侧低频振荡属于运营中出现的机车与电网组成的级联系统匹配问题<sup>[8-9]</sup>。目前,针对车网电气耦合振荡的研究方法主要有时域分析法、特征值分析法和频域分析法。文献[10]提出了母线电压振荡抑制补偿器,以达到提高系统阻抗的效果;文献[11]提出了一种针对该系统稳定性分析的改进的 sum-范数判据,通过与不同的范数判据比较,进行了高速铁路多 CRH5 动车组接入牵引供电网络耦合系统的稳定性分析。

该文在非理想电网情况下,通过阻抗分析法推导产生稳定性问题的原因,并结合 Nyquist 曲线图分析。在多仿真平台下进行联合仿真验证,结果表明:改善参数可以有效抑制级联系统的振荡问题。

## 1 稳定性原理分析

这里把牵引变流器中三相逆变器(再生制动模式下为三相整流器)和牵引电机看作一个整体,为单相整流器(再生制动模式下为逆变器)直流侧提供电压。再生制动模式下单相逆变器并入电网的结构如图 1 所示, $U_d$  为牵引电机通过整流器提供的等效电压, $L_0$  为滤波器, $Z_g = L_g + R_g$  为电网经变压器降压后的等效阻抗, $U_g$  为电网经变压器降压后的等效电压,PCC 为公共接入点。

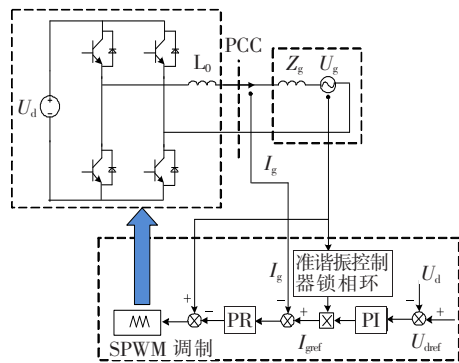


图 1 逆变器并入电网结构

Figure 1 Structure diagram of the inverter integrated into the power grid

单相逆变器并入电网的等效电路如图 2 所示, $I_0(s)$  为逆变器端口等效电流源, $Z_0(s)$  为逆变器端口等效输出阻抗; $I_g(s)$  为并网电流。根据图 2 可以推出并网电流  $I_g(s)$  和  $U_{PCC}(s)$  电压分别为

$$I_g(s) = \frac{1}{1 + \frac{Z_g(s)}{Z_0(s)}} \left[ I_0(s) - \frac{U_g(s)}{Z_0(s)} \right] \quad (1)$$

$$U_{PCC}(s) = \frac{1}{1 + \frac{Z_g(s)}{Z_0(s)}} [Z_g(s)I_g(s) + U_g(s)] \quad (2)$$

整个级联系统是否稳定将取决于并网电流及 PCC 处电压是否稳定。一般在分析级联系统的稳定性时,首先应确保系统中各子系统的稳定性。对于电网来说,不接入牵引变流器的情况下本身是稳定的,等效为图 2 中  $U_g(s)$ 、 $Z_g(s)$  稳定;对于牵引变

流器,当电网视为理想电网时,即电网阻抗为零,级联系统稳定,等效为图 2 中  $I_0(s)$ 、 $Z_0(s)$  稳定。式(2)中等号右边部分的分式是否稳定将决定级联系统的稳定性。单独把该分式提出,表示为

$$G(s) = \frac{1}{1 + \frac{Z_g(s)}{Z_0(s)}} \quad (3)$$

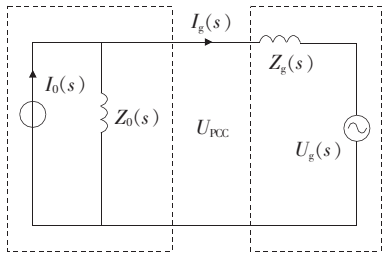


图 2 单相逆变器并入电网的等效电路

Figure 2 Equivalent circuit of a single-phase inverter incorporated into the power grid

## 2 输出阻抗建模

牵引变流器中单相逆变器的控制结构如图 3 所示,  $G_K(s)$  为逆变桥增益,其值为  $G_K(s) = U_d/U_{tri}$ , 其中

$$G_1(s) = \frac{G_K(s)G_{PR}(s)}{sL + R + G_K(s)G_{PR}(s)} = \frac{2K_r\omega_c s}{Ls^3 + (2\omega_c L + R + K_{pr})s^2 + (\omega_0^2 L + 2\omega_c R + 2\omega_c K_r G_K(s))s + \omega_0^2 R + \omega_0^2 K_{pr}} \quad (7)$$

$$G_2(s) = \frac{G_K(s) - 1}{sL + R + G_K(s)G_{PR}(s)} = \frac{(G_K(s) - 1)s^2 + 2(G_K(s) - 1)\omega_c s + (G_K(s) - 1)\omega_0^2}{Ls^3 + (2\omega_c L + R + K_{pr})s^2 + (\omega_0^2 L + 2\omega_c R + 2\omega_c K_r G_K(s))s + \omega_0^2 R + \omega_0^2 K_{pr}} \quad (8)$$

$G_1(s)$  为参考电流与实际并网电流间的传递表达式,  $G_2(s)$  为并网电流与电网电压间的传递表达式。从式(6)可以看出,参考电流值  $I_{gref}$  和电网电压  $U_g$  同时影响并网电流  $I_g$ 。

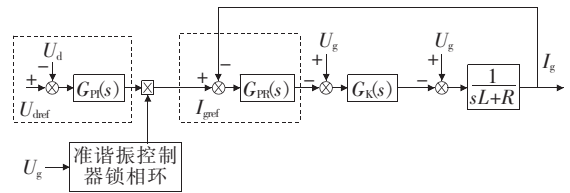


图 3 单相逆变器的控制结构

Figure 3 Structure diagram of single-phase inverter control

$U_d$  为直流母线电压值,  $U_{tri}$  为三角形载波幅值。  $R = R_g, L = L_g + L_0$ 。  $G_{PI}(s)$  为 PI 控制器的传递函数,  $G_{PR}(s)$  为准谐振 PR 控制器的传递函数<sup>[12]</sup>, 其表达式分别为

$$G_{PI}(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (4)$$

$$G_{PR}(s) = K_{pr} + \frac{2K_r\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega^2} \quad (5)$$

根据图 3 可得到并网电流  $I_g$ 、参考电流  $I_{gref}$  与电网电压  $U_g$  的关系式:

$$I_g(s) = G_1(s)I_{gref}(s) - G_2(s)U_g(s) \quad (6)$$

其中

根据诺顿等效定理,令图 2 中的  $I_0(s) = 0$ , 即控制结构图中  $I_{gref} = 0$ , 可以求出等效阻抗  $Z_0(s)$ ; 令  $U_g = 0$ , 即将电网端短路, 可以求出逆变器的等效电流源  $I_0(s) |_{U_g=0}$ , 分别为

$$Z_0(s) = \frac{U_g(s)}{I_g(s)} \Big|_{I_{gref}(s)=0} = \frac{sL + R + G_K(s)G_{PR}(s)}{1 - G_K(s)} = \frac{Ls^3 + (2\omega_c L + R + K_{pr})s^2 + (\omega_0^2 L + 2\omega_c R + 2\omega_c K_r G_K(s))s + \omega_0^2 R + \omega_0^2 K_{pr}}{(G_K(s) - 1)s^2 + (G_K(s) - 1)\omega_c s + (G_K(s) - 1)\omega_0^2} \quad (9)$$

$$I_0(s) \Big|_{U_g=0} = I_g(s) \frac{Z_0(s) + Z_g(s)}{Z_0(s)} = \frac{sL + R + G_K(s)G_{PR}(s) + Z_g(s) - Z_g(s)G_K(s)}{sL + R + G_K(s)G_{PR}(s)} = \frac{Ls^3 + M_1 s^2 + M_2 s + M_3}{Ls^3 + (2\omega_c L + R + K_{pr})s^2 + (\omega_0^2 L + 2\omega_c R + 2\omega_c K_r G_K(s))s + \omega_0^2 R + \omega_0^2 K_{pr}} \quad (10)$$

其中

$$M_1 = 2\omega_c L + R + Z_g(s) - Z_g(s)G_K(s)$$

$$M_2 = \omega_0^2 L + 2\omega_c R + 2\omega_c K_r G_K(s)$$

$$M_3 = \omega_0^2 R + (Z_g(s) - Z_g(s)G_K(s))\omega_0^2$$

### 3 牵引变流器并网级联系统阻抗稳定性分析

根据广义 Nyquist 稳定性判据进行稳定性分析,在级联系统稳定性分析中,Middlebrook 将电网阻抗与变流器阻抗的比值定义为最小环路增益  $T_m$ ,其表达式为

$$T_m = Z_g/Z_0 \quad (11)$$

以最小环路增益为基础,Middlebrook 提出了基于级联系统中源模块输出阻抗和负载模块输入阻抗的阻抗比判据。当且仅当最小环路增益  $T_m$  在复平面的轨迹顺时针绕过  $(-1, j0)$  点的圈数为 0 时系统稳定,反之则系统不稳定。

为分析变流器并入电网稳定性,应推导出其回比矩阵。级联系统所使用的等效环路增益应该由源模块的工作性质所决定,而 Middlebrook 判据的等效回路增益仅仅只适用于 PCC 点电压由源模块所控制的场合,它的等效回路增益为前一级子系统的阻抗比上后一级子系统的阻抗。而对于变流器并网的级联系统,其回路增益应该为后一级的电网阻抗比上前一级逆变器的输出阻抗,恰好与 Middlebrook 判据相反。变流器向 PCC 端口汇入电流表达式为

$$I_g(s) = I_0(s) - Z_0(s)^{-1}U_{PCC}(s) \quad (12)$$

$$U_{PCC}(s) = U_g(s) + Z_g(s)I_g(s) \quad (13)$$

综合式(12)、(13)可得注入电流与 PCC 电压表达式:

$$I_g(s) = (1 + Z_0(s)^{-1}Z_g(s))^{-1} \cdot (I_0(s) - Z_0(s)^{-1}U_g(s)) \quad (14)$$

$$U_{PCC}(s) = (1 + Z_g(s)Z_0(s)^{-1})^{-1} \cdot (U_g(s) + Z_g(s)I_0(s)) \quad (15)$$

显然注入电流与 PCC 电压表达式的回比矩阵不同,即  $L_i(s) = Z_0(s)^{-1}Z_g(s)$ ,  $L_v(s) = Z_g(s)Z_0(s)^{-1}$ 。因此,为确保两者同时稳定,必须使 2 个回比矩阵同时满足广义 Nyquist 判据,而由线性代数理论可推出矩阵  $L_i(s)$  和  $L_v(s)$  具有相同的特征根,故只需求出其一满足判据即可确定级联系统的稳定性。

一般情况下电网呈现感性,故可以将 RL 串联电路等效为电网阻抗。为电网在不同参数情况下对系统稳定性的影响,并验证阻抗分析的正确性,将搭建仿真来分析不同电网阻抗参数时级联系统的稳定性,同时,在 Matlab 环境下绘制出  $Z_g(s)Z_0(s)^{-1}$  的奈奎斯特曲线,将仿真结果与奈奎斯特曲线进行对比分析。

首先设置电网为理想情况下,即电网阻抗为 0,此时级联系统一定是稳定的,得出电压、电流波形如图 4 所示,作为对比参考。

选取 4 组电网阻抗参数,如表 1 所示。分别对此 4 组参数进行仿真,得到电压和电流波形,如图 5~11 所示;该参数下绘制的奈奎斯特曲线如图 6~12 所示。

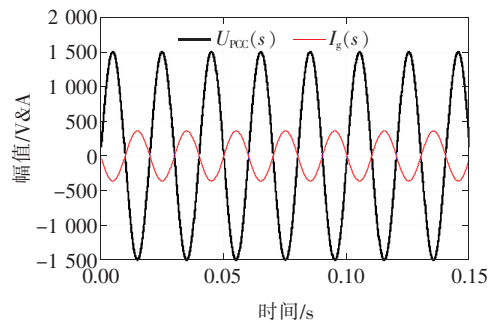


图 4 电压、电流波形

Figure 4 Voltage and current waveforms

表 1 参数设置

Table 1 Parameter settings

组数	$R_g/\Omega$	$L_g/mH$
第 1 组	0.00	1.5
第 2 组	0.18	1.5
第 3 组	0.30	1.5
第 4 组	0.30	2.2

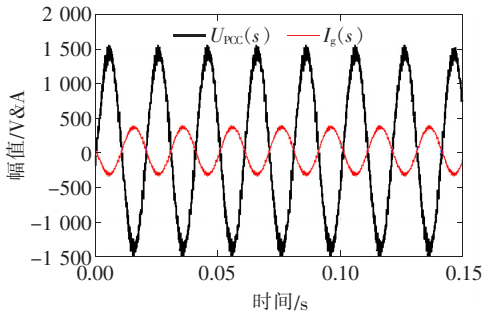


图 5 电压、电流波形( $R_g=0.00 \Omega, L_g=1.5 \text{ mH}$ )  
**Figure 5** Voltage and current waveforms  
 ( $R_g=0.00 \Omega, L_g=1.5 \text{ mH}$ )

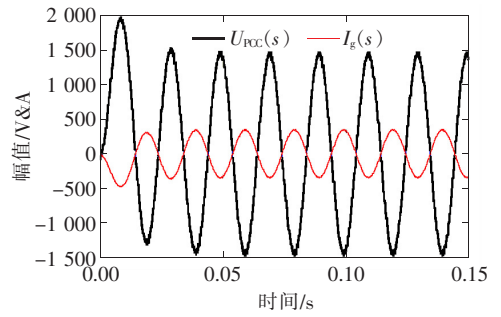
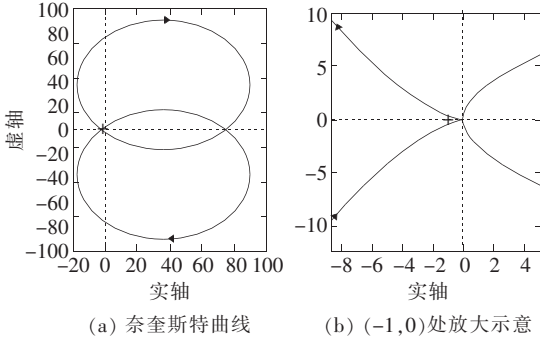
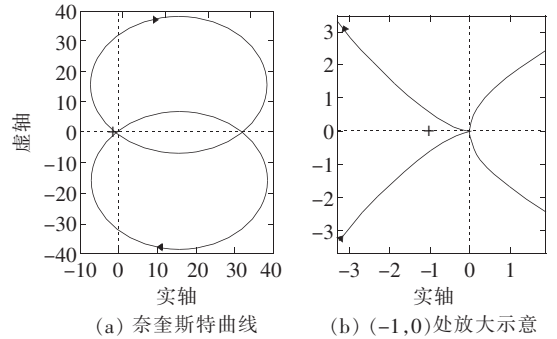


图 9 电压、电流波形( $R_g=0.30 \Omega, L_g=1.5 \text{ mH}$ )  
**Figure 9** Voltage and current waveforms  
 ( $R_g=0.30 \Omega, L_g=1.5 \text{ mH}$ )



(a) 奈奎斯特曲线 (b)  $(-1,0)$ 处放大示意  
 图 6 奈奎斯特曲线及 $(-1,0)$ 处放大示意  
 ( $R_g=0.00 \Omega, L_g=1.5 \text{ mH}$ )

**Figure 6** Nyquist curve and enlarged view at  $(-1, 0)$   
 ( $R_g=0.00 \Omega, L_g=1.5 \text{ mH}$ )



(a) 奈奎斯特曲线 (b)  $(-1,0)$ 处放大示意  
 图 10 奈奎斯特曲线及 $(-1,0)$ 处放大示意  
 ( $R_g=0.30 \Omega, L_g=1.5 \text{ mH}$ )

**Figure 10** Nyquist curve and enlarged view at  $(-1, 0)$   
 ( $R_g=0.30 \Omega, L_g=1.5 \text{ mH}$ )

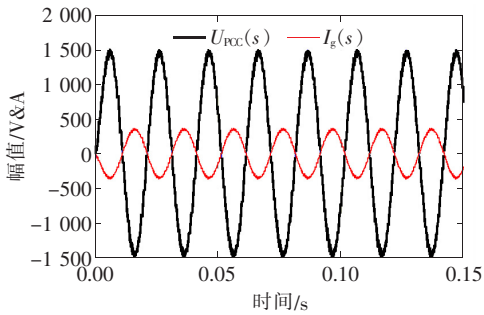


图 7 电压、电流波形( $R_g=0.18 \Omega, L_g=1.5 \text{ mH}$ )  
**Figure 7** Voltage and current waveforms  
 ( $R_g=0.18 \Omega, L_g=1.5 \text{ mH}$ )

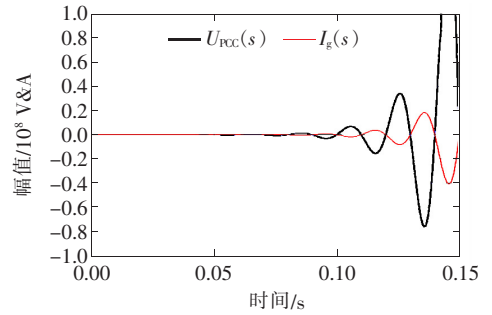
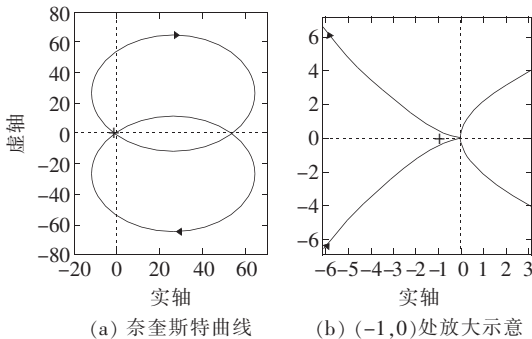
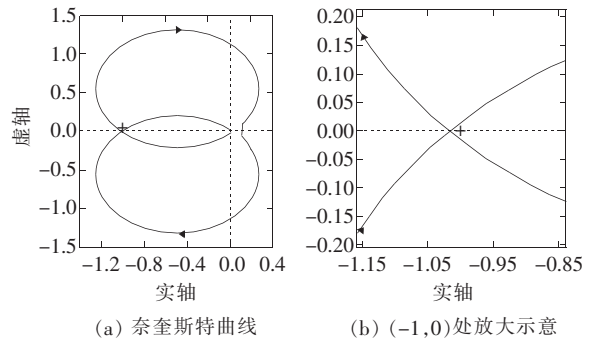


图 11 电压、电流波形( $R_g=0.30 \Omega, L_g=2.2 \text{ mH}$ )  
**Figure 11** Voltage and current waveforms  
 ( $R_g=0.30 \Omega, L_g=2.2 \text{ mH}$ )



(a) 奈奎斯特曲线 (b)  $(-1,0)$ 处放大示意  
 图 8 奈奎斯特曲线及 $(-1,0)$ 处放大示意  
 ( $R_g=0.18 \Omega, L_g=1.5 \text{ mH}$ )

**Figure 8** Nyquist curve and enlarged view at  $(-1, 0)$   
 ( $R_g=0.18 \Omega, L_g=1.5 \text{ mH}$ )



(a) 奈奎斯特曲线 (b)  $(-1,0)$ 处放大示意  
 图 12 奈奎斯特曲线及 $(-1,0)$ 处放大示意  
 ( $R_g=0.30 \Omega, L_g=2.2 \text{ mH}$ )

**Figure 12** Nyquist curve and enlarged view at  $(-1, 0)$   
 ( $R_g=0.30 \Omega, L_g=2.2 \text{ mH}$ )

根据仿真结果及奈奎斯特曲线可知,两子系统本身是稳定的,故当牵引变流器并入理想电网时也是稳定的。选取电网阻抗参数为  $R_g = 0.00 \Omega$ ,  $L_g = 1.5 \text{ mH}$  时,电压和电流波形发生畸变,含有较多谐波,级联系统出现不稳定情况,从奈奎斯特曲线也可以看出,奈氏曲线靠近点  $(-1, 0)$ ,系统稳定性接近于临界点。

保持  $L_g = 1.5 \text{ mH}$ ,增加电网阻抗参数  $R_g$  的数值,分别选取  $0.18, 0.30 \Omega$ ,此时根据奈奎斯特曲线可以看出,曲线较之前到点  $(-1, 0)$  的距离随  $R_g$  增大而变大,波形中的谐波也随  $R_g$  增大而减少,说明级联系统趋向于稳定的。而后保持  $R_g = 0.30 \Omega$ ,增大电感  $L_g = 2.2 \text{ mH}$ ,此时奈奎斯特曲线已经包围了  $(-1, 0)$ ,电压电流幅值急剧增大,级联系统已经失稳。

通过选取不同的电网阻抗参数进行仿真,在牵引变流器参数不变的情况下,验证电网阻抗参数变化是否会对整个级联系统稳定性产生较大影响。仿真结果说明:电网阻抗参数中电感值的增大会使得奈奎斯特曲线靠近甚至包围点  $(-1, 0)$ ,而电阻值的增大可以增加阻尼,抑制级联系统的振荡。

## 4 再生制动仿真

利用 Simplorer 软件仿真平台,对 CRH5 型动

车组牵引变流器的主电路部分进行建模,建立单相四象限脉冲整流器和三相两电平逆变器模型,变流器中整流器和逆变器的控制信号由 Simulink 中搭建的模型产生,与电网受电弓相连的牵引变压器模型在 Maxwell 下搭建,牵引电机则在 RMxprt 下搭建,而后分别导入到 Simplorer 中进行联合仿真,仿真参数如表 2 所示,Simplorer 中搭建的整流器、逆变器主电路模型及交互模块和 Simulink 中搭建的整流器、逆变器控制部分及交互模块分别如图 13~16 所示。通过仿真分析,模拟实际高速列车的运行情况。

电网等效阻抗选择表 1 中第 3 组参数,即  $R_g = 0.30 \Omega, L_g = 1.5 \text{ mH}$ ,进行再生制动仿真,仿真时长设置为  $2.0 \text{ s}$ ,电机空载起动运行至  $0.8 \text{ s}$  时保持稳定,此时模拟高速列车减速,电机转为再生制动模

表 2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters

名称	单位	数值
电网电压 $E_1$	kV	$25 \times 10^{-3}$
交流侧等效电感 $L_1, L_2$	mH	3
直流侧电容 $C_2$	mF	4.4
等效电阻 $R_{\text{load}}$	$\Omega$	12
参考电压值 $U_{d,\text{ref}}$	—	3 000
电压外环 PI 控制器 $K_p, K_i$	—	0.1, 50
电流内环准谐振 PR 控制器 $K_p, K_r, \omega_c$	—	1, 100, 5

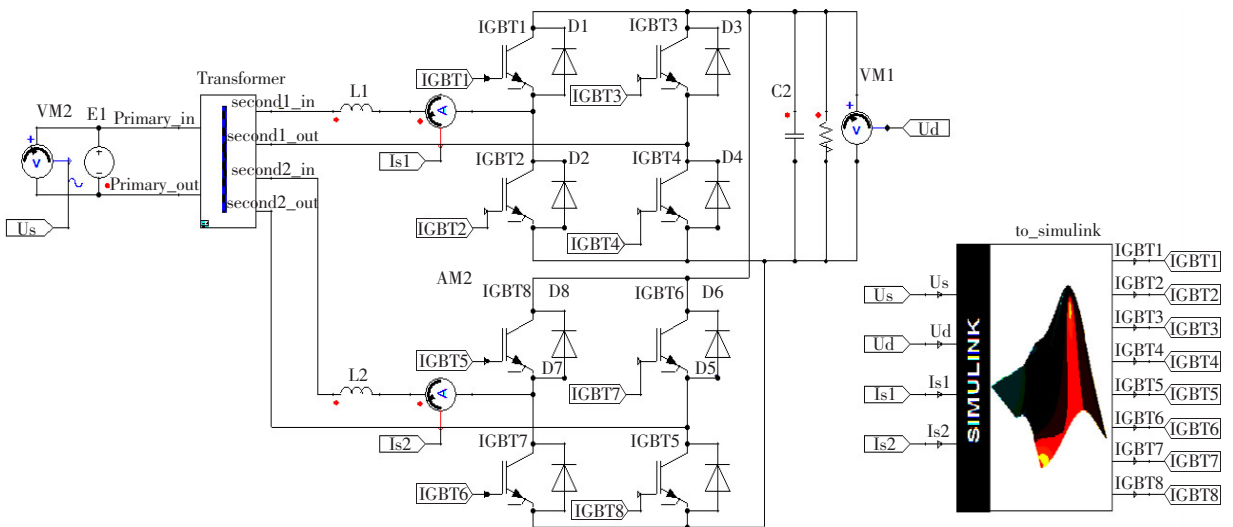


图 13 Simplorer 中搭建的整流器主电路模型及交互模块

Figure 13 Rectifier main circuit model and interaction module built in Simplorer

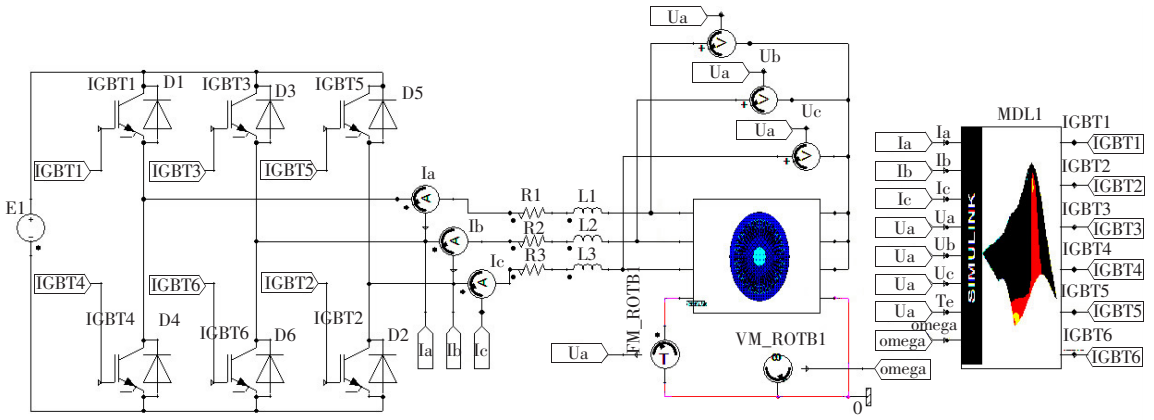


图 14 Simpleror 中搭建的逆变器主电路模型及交互模块

Figure 14 Inverter main circuit model and interaction module built in Simpleror

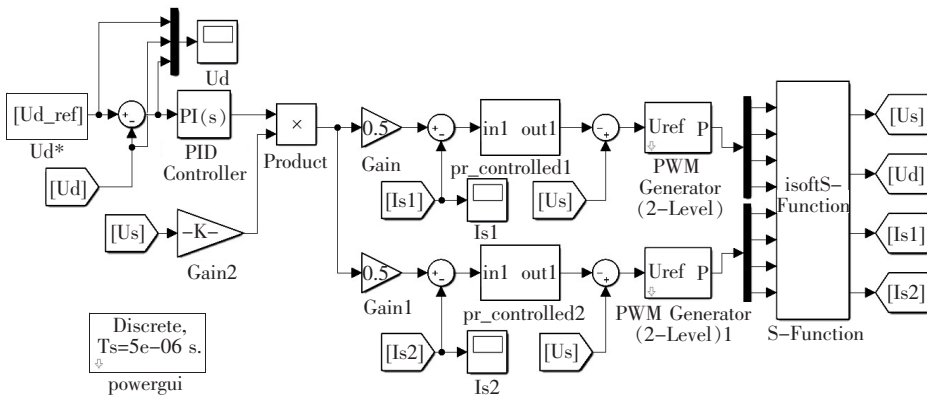


图 15 Simulink 中搭建的整流器控制部分及交互模块

Figure 15 Rectifier control part and interactive module built in Simulink

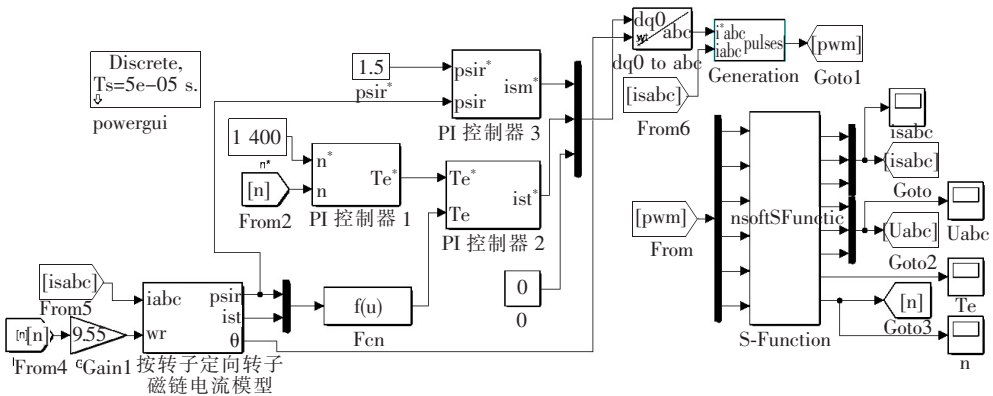


图 16 Simulink 中搭建的逆变器控制部分及交互模块

Figure 16 Inverter control part and interactive module built in Simulink

式,将参考转速从 1 400 r/min 下降至 400 r/min,仿真结果如图 17~20 所示,可知电机空载起动后,在转速上升的过程中,电磁转矩在起动阶段也随之增大,达到上限后转为恒力矩运行,转子、定子三相电流幅值随着转速上升而逐渐减小;经过约 0.6 s 后转速达到 1 400 r/min 并且保持恒速,电磁转矩在转速达到参考值后迅速下降至 0 处波动,即不再

继续大幅输出转矩,转子、定子三相电流也下降至稳定状态时的幅值;在 0.8~1.0 s 时,设定参考转速值从 1 400 r/min 逐渐下降至 400 r/min,此时电机反向输出电磁转矩,牵引转矩变为制动转矩,转子、定子三相电流幅值增大,直至转速达到 400 r/min 稳定后,电磁转矩恢复至 0 处波动,转子、定子三相电流也恢复至稳定状态的幅值。

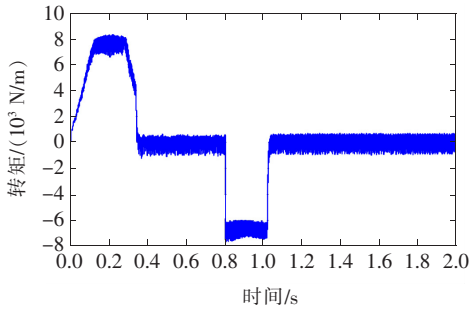


图 17 再生制动下电磁转矩变化情况

Figure 17 Change of electromagnetic torque under regenerative braking

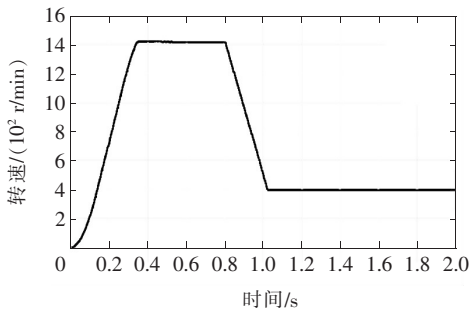


图 18 再生制动下电机转速变化情况

Figure 18 Change of motor speed under regenerative braking

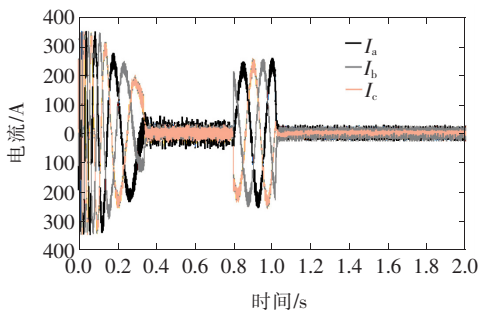


图 19 再生制动下转子三相电流变化情况

Figure 19 Changes in three-phase current of the rotor under regenerative braking

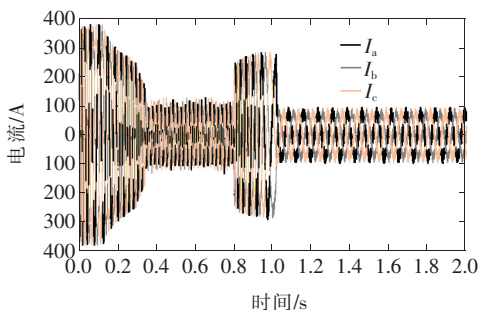


图 20 再生制动下定子三相电流变化情况

Figure 20 Change of stator three-phase current under regenerative braking

## 5 结语

该文通过分析牵引变流器在再生制动模式下与非理想电网组成的级联系统的稳定性问题,通过绘制奈奎斯特曲线图说明在不同的参数情况下是否会出现失稳现象,最后使用场路耦合多物理域的方法进行联合仿真,由仿真分析可以得出结论:

1)该文中采用了场路耦合多物理域联合仿真的方式,可以使仿真结果更贴近实际,分析更为准确;

2)实际情况下电网阻抗参数对整个级联系统的稳定性有较大影响,根据仿真结果看,电网阻抗参数中感性较高时,级联系统容易失稳,而电阻性较高时,级联系统更容易稳定下来。

仿真结果说明再生制动工况下整个仿真过程经过暂态波动后能够恢复稳定运行,说明了控制策略的有效性,奈奎斯特稳定判据对参数验证的准确性。

## 参考文献:

- [1] Wang Y, Liu Z, Mu X, et al. An extended habedank's equation-based emtp model of pantograph arcing considering pantograph-catenary interactions and train speeds [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3):1186-1194.
- [2] Wang H, Mingli W, Sun J. Analysis of low-frequency oscillation in electric railways based on small-signal modeling of vehicle-grid system in  $dq$  frame[J]. Power Electronics IEEE Transactions on, 2015, 30(9):5318-5330.
- [3] 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.
- [4] 周胜军, 谈萌. 基于监测数据的高铁动车组谐波特性分析[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(3): 128-133.  
ZHOU Shengjun, TAN Meng. Harmonic characteristics analysis of electric multiple units in high-speed railway based on the monitoring data[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(3): 128-133.



- [5] 王英,陈思彤,王迎晨,等. 基于 IADRC 的多 CRH5 型车网耦合系统低频振荡抑制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11):1-8.  
WANG Ying, CHEN Sitong, WANG Yingchen, et al. A suppressing method of low-frequency oscillation of railway traction network and multi-CRH5 EMUs coupling system based on IADRC[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11):1-8.
- [6] 张艳军,殷翔翔,葛延峰,等. 基于 APIT-MEMD 的电力系统低频振荡模式辨识新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(14):165-174.  
ZHANG Yanjun, YIN Xiangxiang, GE Yanfeng, et al. Low frequency oscillation mode estimation in power systems using adaptive-projection intrinsically transformed multivariate empirical mode decomposition[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(14):165-174.
- [7] 张宁宇,刘建坤,陈静,等. 基于柔性负荷及 UPFC 的低频振荡抑制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10):82-87.  
ZHANG Ningyu, LIU Jiankun, CHEN Jing, et al. Low frequency oscillation suppression method based on flexible load and UPFC[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10):82-87.
- [8] 陈喜峰,任玮蒙,武侠. 适用于低频振荡分析的电力电子接口电源模型研究[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(6):61-67.  
CHEN Xifeng, REN Weimeng, WU Xia. Research on power supply model with a power electronic interface for low frequency oscillation analysis[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(6):61-67.
- [9] 母秀清,王英,何正友,等. 电气化铁路多车网级联系统低频网压稳定性研究[J]. 铁道学报, 2018, 40(12):61-70.  
MU Xiuqing, WANG Ying, HE Zhengyou, et al. Study on low frequency voltage stability in vehicle-grid cascade system of electrical railway[J]. Journal of the China Railway Society, 2018, 40(12):61-70.
- [10] 曲诗健,单宝钰,刘梦琪,等. 牵引变流器母线电压振荡抑制[J]. 电力电子技术, 2019, 53(2):79-82+136.  
QU Shijian, SHAN Baoyu, Liu Mengqi, et al. Suppression of bus voltage oscillation in traction converter[J]. Power Electronics, 2019, 53(2):79-82+136.
- [11] 母秀清,王英,陈思彤,等. 基于改进 sum-范数判据的高速铁路车网电气耦合系统稳定性研究[J]. 电工技术学报, 2019, 34(15):3253-3264.  
MU Xiuqing, WANG Ying, CHEN Sitong, et al. Stability research on high-speed railway vehicle network electric coupling system based on improved sum-norm criterion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(15):3253-3264.
- [12] 陈新,张旻,王赟程. 基于阻抗分析法研究光伏并网逆变器与电网的动态交互影响[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27):4559-4567.  
CHEN Xin, ZHANG Yan, WANG Yuncheng. A study of dynamic interaction between PV grid-connected inverters and grid based on the impedance analysis method[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27):4559-4567.