

文章编号:1001-8360(2016)04-0032-07

# 交流传动电力机车车网电压低频振荡分析

林 飞<sup>1</sup>, 连巧娜<sup>1</sup>, 杨中平<sup>1</sup>, 焦京海<sup>2</sup>, 张志强<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044; 2. 南车青岛四方机车车辆股份有限公司, 山东 青岛 266000)

**摘 要:**单相四象限变流器广泛应用于交流传动电力机车中,由于其非线性因素,四象限变流器控制参数与牵引供电系统参数不匹配造成的低频振荡问题不容忽视。本文对多台列车同时运行时,牵引供电系统和瞬态电流控制下的四象限变流器耦合系统进行等效建模,推导出系统的小信号模型,解释多车运行时系统出现低频振荡的原因,定量分析低频振荡与列车数量及四象限变流器控制参数的关系。小功率实验平台对理论分析结果进行了验证。

**关键词:** 低频振荡; 四象限变流器; 电压环; 控制参数

中图分类号:U264.37 文献标志码:A doi:10.3969/j.issn.1001-8360.2016.04.005

## Analysis of Low Frequency Voltage Oscillation between AC Drive Electric Locomotive and Power Supply Networks

LIN Fei<sup>1</sup>, LIAN Qiaona<sup>1</sup>, YANG Zhongping<sup>1</sup>, JIAO Jinghai<sup>2</sup>, ZHANG Zhiqiang<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. CSR Qingdao Sifang Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

**Abstract:** Single-phase four quadrant converter is widely used in AC drive electric locomotives. However, the problem of low frequency oscillation caused by mismatching between the control parameters of the four quadrant converter and parameters of the traction power supply system, due to nonlinear factors of the converter, could not be ignored. The equivalent model for the coupling system between the traction power supply system and the four quadrant converter controlled by transient current method was built under the situation of multiple trains running at the same time. With the linearization, the small signal model of the coupling system was derived. The reason of the low frequency oscillation occurring to the system during the simultaneous running of multiple trains was explained, while the relations between the oscillation, the number of trains and the control parameters of four quadrant converter were analyzed quantitatively. Finally, the result of the theoretical analysis was validated on small power experiment platform.

**Key words:** low-frequency oscillation; four quadrant converter; voltage loop; control parameter

在交流传动电力机车中,单相四象限变流器作为AC-DC环节,具有功率因数高、交流电流谐波低等优点,但也出现了由于车网耦合参数不当而造成的高频谐振或低频振荡等新问题<sup>[1-3]</sup>。其中,当有多台车共同运行在同一地点时,出现过牵引网电压及车上牵引传动系统直流环节电压的低频振荡现象。例如:2007年太原铁路局湖东机务段6台HXD<sub>1</sub>同时投入运行时出现了牵引传动系统直流电压振荡,7台同时投入运

行时低频振荡增大导致列车牵引变流器直流环节过压保护动作,变流器封锁脉冲<sup>[2]</sup>。2010年9月,北京、沈阳等地的动车所均出现CRH<sub>5</sub>型动车组由于网压出现5 Hz左右的低频振荡而导致牵引封锁、列车无法出发的现象<sup>[3]</sup>。

国内外对多车系统低频振荡问题展开了深入研究。文献<sup>[2-7]</sup>对多台列车接入电网时出现的低频振荡现象进行了分析,认为列车台数 $n$ 的增加会改变牵引网的等效阻抗,造成了车网阻抗不匹配而引起系统振荡。文献<sup>[8]</sup>通过建立四象限变流器状态变量之间的函数关系,根据特征值的特性研究控制参数对低

收稿日期:2015-04-22; 修回日期:2015-06-10  
基金项目:国家973高速列车基础力学问题研究(2011CB711106)  
作者简介:林 飞(1975—),男,浙江黄岩人,副教授,博士。  
E-mail:flin@bjtu.edu.cn

频振荡的影响。文献[9]根据稳态功率守恒推导出了直流电压环节控制系统闭环传递函数,认为车网间低频振荡主要与电压环比例系数有关。但由于四象限变流器为较复杂的非线性系统,目前尚未对车网电压低频振荡的产生及振荡频率进行定量分析。

针对四象限变流器的系统建模,文献[10]基于状态空间平均模型及输出波形特点,提出了适用于建立系统控制模型的平均值分离法和半周期平均法,进而线性化后得到有关变流器的传递函数模型。文献[11]针对四象限变流器的时变特性,采用将输入电流、电压等交流稳态值进行正、余弦分解的方法消除了系统方程的时变特性,进而利用小信号方法推导出包含直流环节电压控制外环的传递函数。文献[12]利用电压平方控制的方法推导出四象限变流器的大范围线性化模型,规避了非线性系统近似线性化的复杂过程以及建模偏差。文献[13]主要针对多逆变器并网问题进行建模研究,建立了包含电压源、电流源的变流器等效模型,最终与电网等效阻抗电路构成级联系统,运用阻抗比判据及数值仿真研究了系统稳定性。本文在此基础上基于系统输入输出的瞬态功率守恒,建立车网耦合系统小信号模型,针对系统的阻尼比、振荡频率与控制参数的关系,分析系统低频振荡的产生原因及影响因素,并提出改善多车系统低频振荡的建议。

### 1 车网系统电路模型分析

#### 1.1 车网系统的数学模型

为了方便分析多车运行时系统的稳定性,假设同一供电臂下某点有  $n$  台列车,且所有车的电流均同步,此时网侧线路阻抗的压降是单车运行时的  $n$  倍,因此可等效为单车情况时,线路等效线路阻抗  $Z_l$  扩大为原来的  $n$  倍<sup>[2]</sup>,此时的等效模型如图 1 所示。

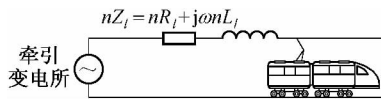


图 1 多车系统等效为单车时车网模型

将牵引供电系统考虑在内的四象限变流器的等效电路如图 2 所示。其中,  $u_s$  是牵引变电所折算到机车变压器副边的电压值,假设为理想电压源;  $Z_s$  是牵引变电所阻抗及牵引变电所到机车接入端口的线路阻抗折算到变压器副边的阻抗;  $L_m$  是变压器(含四象限变流器交流电抗器)折算到变压器副边的感抗;  $R$  是牵引电机-逆变器在直流侧的等效负载;  $u_m$  是受电弓处电压折算到变压器副边的等效电压;  $i_m$  是四象限变流器的输入电流;  $u_{ab}$  为四象限变流器交流侧的电压;  $u_d$  为直流侧电压;  $i_d$  为直流侧电流。

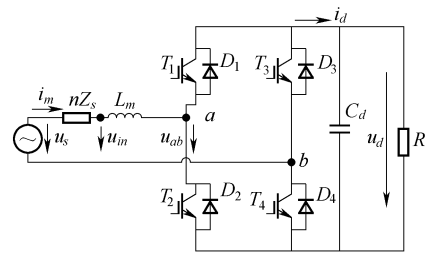


图 2 牵引传动系统等效电路图

四象限变流器在双极性调制下存在两种工作模式: 模式 1,  $T_1$  与  $T_4$  导通,  $T_2$  与  $T_3$  截止,  $ab$  端线电压  $u_{ab}$  为  $u_d$ ; 模式 2,  $T_2$  与  $T_3$  导通,  $T_1$  与  $T_4$  截止,  $ab$  端线电压  $u_{ab}$  为  $(-u_d)$ 。模式 1 的状态方程为

$$\begin{bmatrix} \frac{di_m}{dt} \\ \frac{du_d}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-nR_s}{nL_s + L_m} & -\frac{1}{nL_s + L_m} \\ \frac{1}{C_d} & -\frac{1}{C_d R} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_m \\ u_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{nL_s + L_m} \\ 0 \end{bmatrix} \times u_s \quad (1)$$

模式 2 的状态方程为

$$\begin{bmatrix} \frac{di_m}{dt} \\ \frac{du_d}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-nR_s}{nL_s + L_m} & \frac{1}{nL_s + L_m} \\ -\frac{1}{C_d} & -\frac{1}{C_d R} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_m \\ u_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{nL_s + L_m} \\ 0 \end{bmatrix} \times u_s \quad (2)$$

#### 1.2 车网系统的控制模型

目前,四象限变流器常采用瞬态电流控制策略<sup>[14-16]</sup>,其控制框图如图 3 所示。直流环节电压指令值  $U_d^*$  与采样值  $u_d$  求差,经过 PI 控制器后得到交流电流的幅值指令值,与网侧电压  $u_m$  相位相乘得到电流内环指令值  $i_m^*$ ,电流指令与电流采样值  $i_m$  求差并经过比例环节计算得到电流内环控制输出量,再经补偿运算后最终得到  $u_{ab}$  的指令值,直流侧电压外环与交流侧电流内环共同构成四象限变流器的双环控制器。

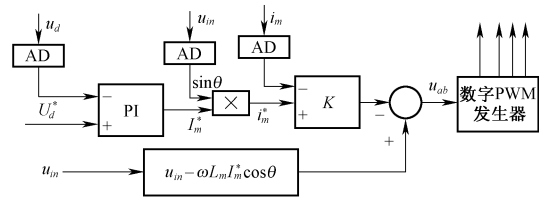


图 3 四象限变流器瞬态电流控制策略框图

忽略 PWM 开关周期内系统的动态变化及其产生的高次谐波,只考虑 PWM 过程中调制波基波(设调制度为  $m$ )的作用,将 1.1 节提到的模式 1 与模式 2 进行合并,即

$$\begin{cases} (L_m + nL_s) \frac{di_m}{dt} = u_s - nR_s i_m - mu_d \\ C_d \frac{du_d}{dt} = mi_m - \frac{1}{R} \times u_d \\ m = \frac{1}{u_d} [u_{in} - K(I_m^* \sin\theta - i_m) - \omega L_m I_m^* \cos\theta] \end{cases} \quad (3)$$

考虑电压控制环存在积分环节,增加电压外环控制器输出量  $I_m^*$  作为第三个状态变量,则有

$$\frac{dI_m^*}{dt} = k_p \times \frac{d(U_d^* - u_d)}{dt} + k_i \times (U_d^* - u_d) \quad (4)$$

因  $U_d^*$  为常数,故有

$$\frac{dI_m^*}{dt} = -k_p \times \frac{du_d}{dt} - k_i u_d + k_i U_d^* \quad (5)$$

将式(3)代入式(5),可得

$$\frac{dI_m^*}{dt} = -\frac{k_p m i_m}{C_d} + \left(\frac{k_p}{C_d R} - k_i\right) u_d + k_i U_d^* \quad (6)$$

式中: $k_p$ 、 $k_i$  分别为电压外环控制器比例系数和积分系数,令  $k_i = \frac{k_p}{\tau}$ ,  $\tau$  为积分器时间常数。

以四象限变流器输入侧电流  $i_m$ 、电压外环控制器输出的电流指令幅值  $I_m^*$  和直流环节电压  $u_d$  作为系统变量,系统状态方程可以表示为

$$\begin{bmatrix} \frac{di_m}{dt} \\ \frac{dI_m^*}{dt} \\ \frac{du_d}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K}{L_m} & \frac{K \sin\theta}{L_m} + \omega \cos\theta & 0 \\ -\frac{k_p m}{C_d} & 0 & \frac{k_p}{C_d R} - k_i \\ \frac{m}{C_d} & 0 & -\frac{1}{C_d R} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_m \\ I_m^* \\ u_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ k_i \\ 0 \end{bmatrix} \times U_d^* \quad (7)$$

由于系统的状态矩阵含有时变量  $\theta$  和状态变量函数  $m$ ,系统存在时变性和强非线性,不利于系统性能的分析。

### 1.3 车网系统模型的线性化

为此,需将系统在平衡点附近进行线性化。系统平衡点为

$$\begin{cases} u_d = U_d^* + u_a \sin(2\omega t + \delta) \\ i_m = I_m \sin\omega t = \frac{2P_1}{U_m} \sin\omega t = \frac{2U_d^2}{U_m R} \sin\omega t \\ I_m^* = I_m = \frac{2U_d^2}{U_m R} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $u_a$  为直流环节二次脉动的幅值; $\delta$  为二次脉动电压的相位角; $P_1$  为四象限变流器稳态有功功率。

为了得到系统的控制函数,根据 IGBT 桥臂输入

侧与输出侧瞬时功率相等的原则,可得各变量幅值的关系为

$$u_{ab} \times i_m = mu_d \times i_m = u_d \times i_d \quad (9)$$

$$[u_s - (nL_s + L_m) \frac{di_m}{dt} - nR_s i_m] \times i_m = u_d \times i_d \quad (10)$$

其中

$$\begin{cases} u_s = U_m \sin(\omega t + \varphi) \\ i_m = I_m \sin(\omega t) \\ u_{in} = U_{in} \sin(\omega t) \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\varphi$  为变电所电压与网侧电流之间的相角; $R_s$ 、 $L_s$  分别为牵引变电所及牵引网阻抗折算到变压器副边的电阻和电感。

考虑在系统平衡点附近,式(10)可以表示为

$$\begin{aligned} & \{U_m \sin(\omega t + \varphi) - (L_m + nL_s) [\omega(I_m + \Delta I_m) \cdot \\ & \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) + \frac{d(\Delta I_m)}{dt} \times \sin\omega t] - nR_s (I_m + \Delta I_m) \cdot \\ & \sin\omega t\} \times (I_m + \Delta I_m) \sin\omega t = [U_d^* + \\ & U_a \sin(2\omega t + \delta) + \Delta U_d] \times (I_d + \Delta I_d) \end{aligned} \quad (12)$$

同时,四象限变流器直流环节支撑电容与电阻并联,有

$$\Delta I_d = C_d \frac{d(\Delta U_d)}{dt} + \Delta U_d / R \quad (13)$$

忽略式(12)中二倍工频交流分量,交流侧电流幅值与直流环节电压微变量关系可以表示为

$$\begin{aligned} & \frac{U_m \cos\varphi}{2} \times \Delta I_m - \frac{(nL_s + L_m) I_m}{2} \times \frac{d(\Delta I_m)}{dt} - \\ & nR_s I_m \Delta I_m = \frac{2U_d^*}{R} \times \Delta U_d + C_d U_d^* \frac{d(\Delta U_d)}{dt} \end{aligned} \quad (14)$$

四象限变流器的小信号模型可以表示为

$$\frac{\Delta U_d}{\Delta I_m} = \frac{-(nL_s + L_m) I_m s + (U_m \cos\varphi - 2nR_s I_m)}{2U_d^* C_d s + \frac{4U_d^*}{R}} \quad (15)$$

基于图2电路拓扑,交流侧电流的幅值以及相位角均随列车台数  $n$  变化,根据图4所示交流侧电压电流之间的相量关系以及系统有功功率守恒,可求得  $I_m$  和  $\cos\varphi$ 。

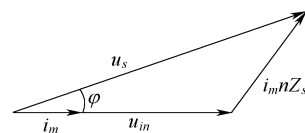


图4 交流侧电压、电流相量图

$$\begin{cases} \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} = P_1 \\ \left(\frac{I_m}{\sqrt{2}}\right)^2 n \cdot R_s = P_2 \\ \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cos\varphi = P_1 + P_2 \\ \cos\varphi = \frac{U_m^2 + U_m'^2 - (n \cdot Z_s \cdot I_m)^2}{2 \cdot U_m \cdot U_m'} \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $P_2$  为牵引变电所及牵引网阻抗消耗的有功功率。

交流电流幅值  $I_m$  可以表示为

$$I_m = \frac{\sqrt{U_m^2 - 4nR_sP_1 - \sqrt{(4nR_sP_1 - U_m^2)^2 - 16n^2Z_s^2P_1^2}}}{2n^2Z_s^2} \quad (17)$$

将式(17)代入式(16)中求取交流侧电压电流之间的相位关系,进而为下文的稳定性分析提供支撑。

基于上文推导的四象限变流器小信号模型以及瞬态电流控制策略,电压环采用 PI 调节器,电流环近似成一阶惯性环节  $\frac{1}{hs+1}$ ,其时间常数为  $h$ ,可进一步将直流环节输出电压  $u_d$  对其指令的传递函数框图化简为如图 5 所示形式。

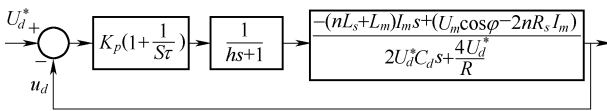


图 5 线性化后得到的闭环系统框图

闭环系统特征多项式为

$$G(s) = as^3 + bs^2 + cs + d \quad (18)$$

其中

$$\begin{cases} a = 2hU_d^* C_d \tau \\ b = 2U_d^* C_d \tau + \frac{4U_d^*}{R} h \tau - k_p(nL_s + L_m) I_m \tau \\ c = k_p \tau (U_m \cos\varphi - 2nR_s I_m) + \frac{4U_d^*}{R} \tau - k_p(nL_s + L_m) I_m \\ d = k_p (U_m \cos\varphi - 2nR_s I_m) \end{cases} \quad (19)$$

## 2 系统低频振荡的机理

多车系统的振荡与闭环系统的阻尼比<sup>[17]</sup>有着密切关系。对于式(18)所示的三阶系统,其 3 个极点可以分别表示为  $x_1 = \lambda$ ,  $x_2 = A + jB$ ,  $x_3 = A - jB$ 。

根据三角函数法,式(18)所对应的三个极点分别为

$$\begin{cases} x_1 = -\frac{b}{3a} - \frac{H}{3a} - \frac{b^2 - 3ac}{3aH} \\ x_2 = \left(-\frac{b}{3a} + \frac{H}{6a} + \frac{b^2 - 3ac}{6aH}\right) + j\sqrt{3}\left(\frac{H}{6a} - \frac{b^2 - 3ac}{6aH}\right) \\ x_3 = \left(-\frac{b}{3a} + \frac{H}{6a} + \frac{b^2 - 3ac}{6aH}\right) - j\sqrt{3}\left(\frac{H}{6a} - \frac{b^2 - 3ac}{6aH}\right) \end{cases} \quad (20)$$

其中

$$\begin{cases} H = \sqrt[3]{0.5(Q + 2b^3 - 9abc + 27a^2d)} \\ Q = \sqrt{(2b^3 - 9abc + 27a^2d)^2 - 4(b^2 - 3ac)^3} \end{cases} \quad (21)$$

参考国内某型车牵引变流器的主要电路参数,其极点分布如图 6 所示,该系统具有一对共轭主导极点,系统非主导极点实部的模远大于主导极点实部的模,因此该三阶系统可以近似看成形如  $S^2 + 2\xi\omega_n S + \omega_n^2$  的二阶系统。

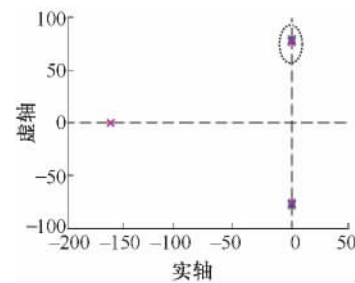


图 6  $n=1 \sim n=10$  的系统极点分布图

根据式(22)、式(23)可以求出系统阻尼比  $\xi$  与振荡频率  $\omega$ 。

$$\xi = \frac{\frac{b}{3a} - \frac{H}{6a} - \frac{b^2 - 3ac}{6aH}}{\sqrt{\left(-\frac{b}{3a} + \frac{H}{6a} + \frac{b^2 - 3ac}{6aH}\right)^2 + 3\left(\frac{H}{6a} - \frac{b^2 - 3ac}{6aH}\right)^2}} \quad (22)$$

$$\omega = \sqrt{3}\left(\frac{H}{6a} - \frac{b^2 - 3ac}{6aH}\right) \quad (23)$$

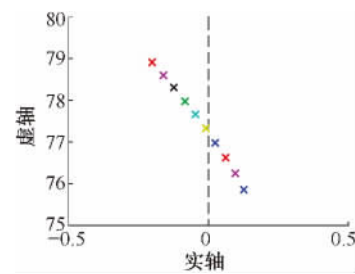


图 7  $n=1 \sim n=10$  的系统主导极点分布图

依据式(20),在某些控制参数下,随着列车增多,系统主导极点向复平面的右半平面移动,系统阻尼比

下降,如图 7 所示(图 6 虚线处放大),严重时甚至为负,系统会产生振荡。根据式(22)和式(23),系统的阻尼比及振荡频率与四象限变流器电压环的控制参数也有密切关系。如图 7 所示,电压环比例系数  $k_p$  越大,积分时间常数  $\tau$  越小,则系统阻尼比越小。故列车数目  $n$ 、电压环控制器的 PI 参数均是振荡特性的重要影响因素,其中 PI 参数影响相对较大。而由图 8 同样可知,在运行列车台数一定时,若电压环控制参数恰当,可增大系统阻尼比,进而抑制系统的振荡。

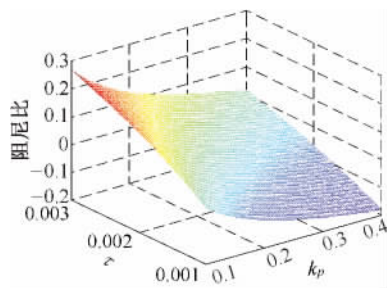


图 8  $n=5$  时,阻尼比与控制参数之间的关系

依据式(23),如图 9 所示,振荡频率随控制参数变化明显,但振荡频率一直都处于基波频率之下,故由于系统阻尼过低而引起的振荡均为低频振荡,与事故现象一致。

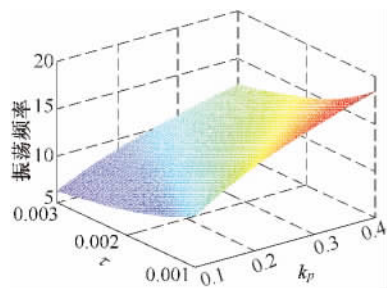


图 9  $n=5$  时,振荡频率与控制参数之间的关系

本节中通过研究低频振荡机理,表明多车系统时电压环控制参数设置不当可能造成系统产生低频振荡。而一旦直流侧电压振荡幅值超出了保护阈值,将导致牵引封锁,对铁路的运营造成很大影响。通过设置适当的电压环控制参数可提高系统的稳定性。

### 3 实验验证

在实验室对前文的理论分析进行了实验验证,实验参数见表 1。

表 1 实验平台的四象限变流器及线路参数表

输入电压有效值 $U_m/V$	110	直流侧支撑电容 $C_d/mF$	3.3
直流侧电压指令 $U_d^*/V$	300	负载电阻 $R/\Omega$	200
交流侧电感 $L_m/mH$	7	线路等效电感 $L_s/mH$	2.6

在未加入线路等效电感  $L_s$  时,视为单车情况,而

加入线路等效电感  $L_s$ ,来近似模拟多车系统时线路阻抗加大的情况。根据表 1 参数,按照上述理论公式进行计算可知:

(1)如图 10 所示,相同控制参数时,多车系统的主导极点位于  $s$  平面的右半平面,由于四象限变流器的非线性因素,系统会发生 2.2 Hz 左右(图 11 数据显示)的持续振荡,较单车系统稳定性差。

(2)如图 11 所示,多车系统发生低频振荡时,可以通过调整电压环控制参数,增大系统阻尼,使失稳系统恢复稳定。

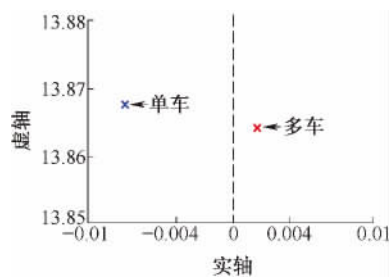


图 10  $k_p=1.8, \tau=0.228$ ,

单车与多车系统的主导极点分布对比图

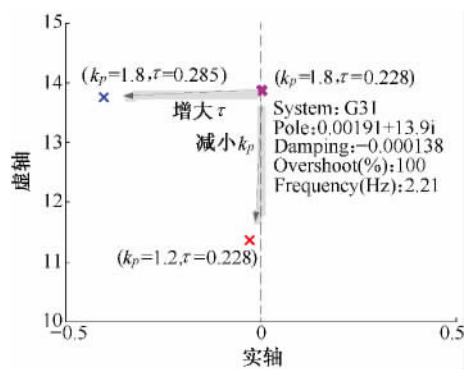


图 11 控制参数调整前后,

多车系统主导极点分布对比图

未加入线路等效电感  $L_s$  时,即单车情况下,实验平台结果如图 12 所示。

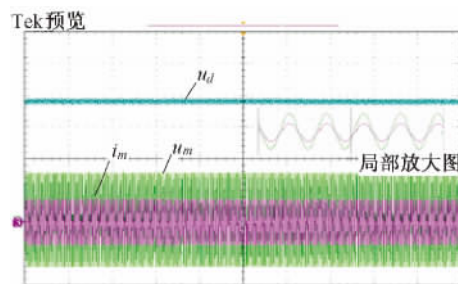


图 12  $k_p=1.8, \tau=0.228$ ,单车时直流侧电压  $u_d$ 、

交流电压  $u_m$ 、交流电流  $i_m$  的波形

可见,单车时直流电压保持稳定,网压与网流相位一致,控制性能较好。

而相同控制参数下,接入线路等效电感  $L_s$  后,即

模拟多车情况下的实验结果如图 13 所示。可见,此时直流侧电压和交流电流幅值出现了约为 2 Hz 的明显振荡。此结果与图 11 数据显示的理论分析结果基本吻合。

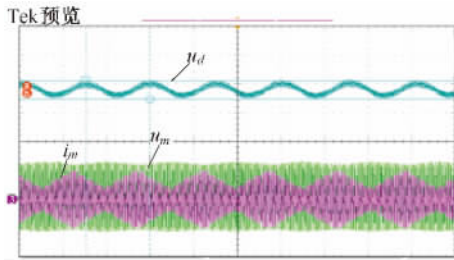


图 13  $k_p = 1.8, \tau = 0.228$ , 多车时直流侧电压  $u_d$ 、交流电压  $u_m$ 、交流电流  $i_m$  的波形

保持其他系统参数不变,在图 13 的控制参数基础上,只调小  $k_p$  或仅增大  $\tau$ ,系统恢复稳定,结果分别如图 14 和图 15 所示。

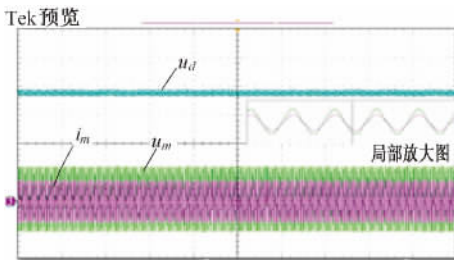


图 14  $k_p = 1.2, \tau = 0.228$ , 多车时直流侧电压  $u_d$ 、交流电压  $u_m$ 、交流电流  $i_m$  的波形

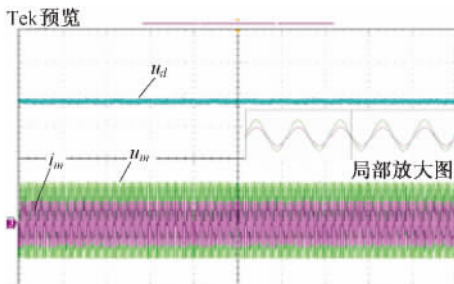


图 15  $k_p = 1.8, \tau = 0.285$ , 多车时直流侧电压  $u_d$ 、交流电压  $u_m$ 、交流电流  $i_m$  的波形

实验结果同样验证了前面的理论分析,电压环控制参数设置不当时,列车运行台数增多会导致系统低频振荡,但是通过调整控制参数可以使系统稳定性有较好的改善。

#### 4 结论

本文基于单相四象限变流器,建立多车系统车网耦合等效模型,利用系统的阻尼比解释了多车系统低频振荡机理,分析结果表明列车数目及四象限变流器的电压环控制参数对系统稳定性影响较大。一般情况下,通过调节电压环控制参数可以使车网系统重新获

得稳定。本文的分析为进一步研究列车低频振荡的影响因素以及如何避免这些影响提供重要的参考,为保证多台列车稳定运行提供了理论支撑。

#### 参考文献:

- [1] LIU J, YANG Q, ZHENG T Q. Harmonic Analysis of Traction Networks Based on the CRH380 Series Emus Accident[C]//IEEE Transportation Electrification Conference and Expo. New York: IEEE Press, 2012:1-6.
- [2] 郑琼林. HXD1 交流传动电力机车谐振原因分析与对策[J]. 变频器世界, 2009(5): 40-44.  
ZHENG Qionglin. A Probe on Causes and Solution of the HXD1 AC Locomotive's Resonance[J]. The World of Inverters, 2009(5): 40-44.
- [3] 王晖, 吴命利. 动车组引起牵引供电系统网压低频振荡现象测试及分析[C] //中国高等学校电力系统及其自动化专业学术年会, 2011.
- [4] MOLLERSTEDT E, BERNHARDSSON B. Out of Control Because of Harmonics—An Analysis of the Harmonic Response of an Inverter Locomotive[J]. Control Systems, 2000, 20(4):70-81.
- [5] BARTELT R, OETTMEIER M, HEISING C, et al. Improvement of Low-frequency System Stability in 16.7 Hz Railway-Power Grids by Multivariable Line-Converter Control in a Multiple Traction-Vehicle Scenario[C]//Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion. New York: IEEE Press, 2010.
- [6] HEISING C, BARTELT R, OETTMEIER M, et al. Improvement of Low-frequency System Stability in 50 Hz Railway-Power Grids by Multivariable Line-Converter Control in a Distance-Variation Scenario[C]// Electrical Systems for Aircraft Railway and Ship Propulsion. New York: IEEE Press, 2010.
- [7] HEISING C, BARTELT R, OETTMEIER M, et al. Enhancement of Low-frequency System Stability of 60 Hz Railway Power Grids[C]//International Power Electronics and Motion Control Conference. New York: IEEE Press, 2010.
- [8] DANIELSEN S, FOSSO O B, MOLINAS M, et al. Simplified Models of a Single-phase Power Electronic Inverter for Railway Power System Stability Analysis—Development and Evaluation [J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(2):204-214.
- [9] 韩智玲, 唐蕾, 李伟. 交流传动电力机车车网电压不稳定的原因分析与解决[J]. 铁道学报, 2011, 33(10):25-28.  
HAN Zhiling, TANG Lei, LI Wei. Causal Analysis and Resolution of the Voltage Instability between AC Drive Electric Locomotive and Power Supply Network[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(10): 25-28.

- [10] 张加胜, 李浩光. 单相 PWM 可逆整流器的动态控制建模方法[J]. 电力电子技术, 2008, 42(3):66-68.  
ZHANG Jiasheng, LI Haoguang. Method on Dynamic Control Modeling of Single Phase PWM Reversible Rectifiers[J]. Power Electronics, 2008, 42(3):66-68.
- [11] BRENNAN M, FOIADELLI F, ZANINELLI D. New Stability Analysis for Tuning PI Controller of Power Converters in Railway Application[J]. Industrial Electronics IEEE Transactions on, 2011, 58(2):533-543.
- [12] HE L, XIONG J, OUYANG H, et al. High-performance Indirect Current Control Scheme for Railway Traction Four-quadrant Converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(12):6 645-6 654.
- [13] 许德志, 汪飞, 毛华龙, 等. 多并网逆变器与电网的谐波交互建模与分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(12): 64-71.  
XU Dezhi, WANG Fei, MAO Hualong, et al. Modeling and Analysis of Harmonic Interaction between Multiple Grid-connected Inverters and the Utility Grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(12):64-71.
- [14] 郑俊, 冯晓云, 谢望玉, 等. 单相 PWM 整流器瞬态电流控制策略的研究[J]. 电力电子技术, 2009, 43(12):2-3.  
ZHENG Jun, FENG Xiaoyun, XIE Wangyu, et al. The Transient Current Control for Single Phase PWM Rectifiers[J]. Power Electronics, 2009, 43(12): 2-3.
- [15] OETTMEIER M, HEISING C, STAUDT V, et al. Dead-beat Control Algorithm for Single-phase 50 kW AC Railway Grid Representation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(5): 1184-1192.
- [16] HEISING C, OETTMEIER M, BARTELT R, et al. Multivariable Pole-placement Control Design for a Single-Phase 50 kW, 16.7 Hz Railway Traction Line-side Converter[C] //International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, New York: IEEE Press, 2009.
- [17] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 71-121.

(责任编辑 聂清立)

### 《铁道学报》被数据库收录情况

起始年份	收录系统名称
1985	《中文科技资料目录—铁路》、“中国铁路文献数据库”
1988	中国科技信息研究所“中国科技论文与引文数据库(CSTPCD)”
1990	中国科学院文献情报中心“中国科学引文数据库(CSCD)”
1992	《中文核心期刊要目总览》铁路运输类核心期刊、中国科技信息研究所重庆分所“中文科技期刊数据库”(全文)
1994	清华大学“中国学术期刊(光盘版)”(全文)、“中国知网(CNKI)”(全文)、“中国学术期刊综合评价数据库(CAJCED)”
1995	美国工程信息公司“Ei page one”数据库
1996	中国科协《中国学术期刊文摘》(中文版)
1998	中国科技信息研究所“万方数据电子期刊”(全文)
1999	德国“国际建筑文献数据库(ICONDA)”
2000	美国“剑桥科学文摘(CSA)”
2001	俄罗斯文摘杂志(AJ)
2005	中国台湾华艺中文电子期刊服务数据库(CEPS)(全文)
2006	美国工程信息公司“Ei Compendex”数据库
2007	中国科协《中国学术期刊文摘》(英文版)
2012	荷兰爱思维尔 Scopus 数据库