

基于车载整流器滑模控制的车网系统低频振荡抑制方法

田江涛,李彦哲*,陈信州,刚铁成

(兰州交通大学自动化与电气工程学院,甘肃兰州730070)

摘要:针对高速列车升弓整备时出现的低频振荡现象,提出一种自适应滑模控制(adaptive sliding mode control, ASMC)的动车组整流器控制策略。以CRH5车型为试验对象,构建与牵引网之间耦合系统的回比矩阵模型,结合改进sum-范数判据,分析低频振荡发生的原因及临界条件。根据低频振荡现象发生时的动车组工况,推导出动车组的状态空间模型,对电压外环及电流内环设计自适应滑模控制器,代替传统的线性比例积分(proportional-integral, PI)控制器。在Simulink/MATLAB中搭建车网耦合系统的仿真模型,与几种传统的控制策略进行仿真分析比较,结果表明,ASMC在超调量、调节时间、电压波动及低频振荡抑制方面综合优于其他几种控制,具有更好的性能,能够有效抑制低频振荡现象。

关键词:低频振荡;车网耦合系统;改进sum-范数判据;自适应滑模控制;整流器

中图分类号:TM712

文献标志码:A

引用格式:田江涛,李彦哲,陈信州,等.基于车载整流器滑模控制的车网系统低频振荡抑制方法[J].山东大学学报(工学版),2026,56(2):121-129.

TIAN Jiangtao, LI Yanzhe, CHEN Xinzhou, et al. Low-frequency oscillation suppression method in train-network systems based on sliding mode control structure of onboard rectifiers[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2026, 56(2):121-129.

Low-frequency oscillation suppression method in train-network systems based on sliding mode control structure of onboard rectifiers

TIAN Jiangtao, LI Yanzhe*, CHEN Xinzhou, GANG Tiecheng

(School of Automatic & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: To address the low-frequency oscillation occurring during the pantograph-raising and preparation phase of high-speed trains, an adaptive sliding mode control (ASMC) strategy was proposed for electric multiple unit (EMU) rectifiers. Using the CRH5 model as the test subject, a return ratio matrix model of the coupled system with the traction network was established. By incorporating an improved sum-norm criterion, the cause and critical conditions of low-frequency oscillation were analyzed. Based on the operational conditions of the EMU during low-frequency oscillation, a state-space model was derived. Adaptive sliding mode controllers were designed for the voltage outer loop and current inner loop to replace conventional linear proportional-integral (PI) controllers. A simulation model of the train-network coupling system was developed in Simulink/MATLAB. Comparative simulations with several traditional control strategies demonstrated that the ASMC approach comprehensively outperformed others in overshoot, settling time, voltage fluctuation, and low-frequency oscillation suppression, exhibiting superior performance and effectively mitigating the low-frequency oscillation phenomenon.

Keywords: low-frequency oscillation; train-network coupling system; improved sum-norm criterion; adaptive sliding mode control; rectifier

0 引言

随着我国高速铁路的快速发展,越来越多含有大量电力电子器件的机车投入牵引供电系统中,导致车网耦合系统的复杂程度进一步提升,在一定程度上影响车网系统的稳定性^[1]。国内曾多次出现低频振荡现象案例,且发生时都处于同一工况下(即动车组(electric multiple unit, EMU)升弓整备),振荡频率集中处于3~7 Hz。这种振荡现象会影响牵引网的供电质量及动车组的正常取流,严重时甚至造成机车牵引封锁^[2],导致不必要的损失。目前,低频振荡涉及的车型主要有动车组 CRH1、CRH3、CRH5 及电力机车 HXD1B、HXD2B 和 HXD3B 等。

许多相关专家针对牵引网低频振荡现象开展研究,普遍认为低频振荡的主要原因是车网电气参数不匹配^[3-6],故针对低频振荡现象的抑制方法主要从车侧和网侧两方面考虑。文献[7]将 CRH3 型动车组作为研究对象,设计一种电压外环参数自适应调节器,提高抗干扰性能;文献[8]对 CRH5 车型的电压环控制参数与电流环控制参数进行调节对比,得出电流环参数比电压环参数对系统影响更明显;文献[9]针对电流环控制参数进行分析,对比发现相比电流环积分参数,比例参数对低频振荡的影响更明显;文献[10]针对电流环设计一种参数自适应优化控制策略,实现电流环控制响应随瞬态误差进行宽范围自适应调整,改善控制器动态特性;文献[11]在预测控制的基础上加入扩张状态观测器,通过试验证明该方法能够加快整流器响应速度且超调量较小;文献[12]设计一种预测电流控制算法,能够在很大程度上改善电压波动问题,但超调量较大,使系统遭受较强冲击;文献[13]设计一种基于动车组整流器滑模控制的控制方法,有效抑制低频振荡现象,但未实现参数自适应调节,无法兼顾响应速度和直流侧电压的波动。

上述研究对牵引网低频振荡起到一定的抑制作用,但普遍存在一些问题,例如:直流侧电压波动大,无法同时兼顾响应速度与稳态性能;参数整定过于复杂;等等。针对上述研究出现的问题,本研究改进传统滑模控制(sliding mode control, SMC),结合自适应控制,提出一种自适应滑模控制(adaptive sliding mode control, ASMC)策略,为低

频振荡现象提供一种更可靠的抑制措施。

1 车网耦合系统低频振荡机理分析

本研究将 CRH5 车型作为研究对象,建立牵引网与动车组之间耦合系统的回比矩阵模型,分析动车组数量与低频振荡之间的联系,深入分析低频振荡现象发生的根本原因,以此作为研究低频振荡抑制措施的理论支撑。

1.1 车网耦合系统回比矩阵

车网耦合系统可以视为源-负荷模型^[9]。牵引网的本质为电源加阻抗,动车组可等效为导纳的形式。车网耦合系统的等效电路拓扑模型如图1所示,其中 U_s 为牵引变压器的二次侧电压, R_s 和 L_s 分别为网侧等效电阻和电感, Z_s 为牵引网的等效输出阻抗, Y_L 为动车组侧等效输入导纳。

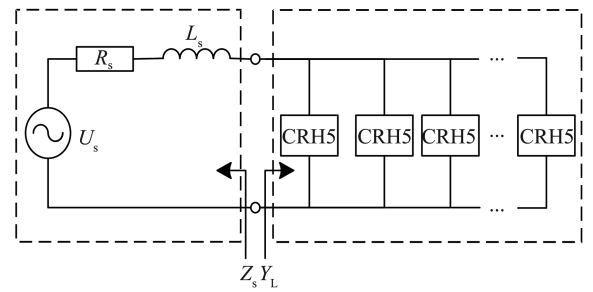


图1 车网耦合系统拓扑图

Fig.1 Topology diagram of the train-network coupling system

将网侧输出阻抗分解到两相旋转坐标系下,得到 dq 轴下的等效输出阻抗矩阵^[14]

$$Z_{sdq} = \begin{bmatrix} Z_{dd} & Z_{dq} \\ Z_{qd} & Z_{qq} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中, Z_{dd} 为 d 轴自阻抗, Z_{dq} 为 d 轴对 q 轴互阻抗, Z_{qd} 为 q 轴对 d 轴互阻抗, Z_{qq} 为 q 轴自阻抗。

文献[6]已针对 CRH5 型动车组的整流器模型进行详细推导,此处不再赘述,得到单台整流器的输入导纳矩阵 Y_{in} 。

本研究以 8 编组 CRH5 车型为算例。该算例采用 5 动 3 拖式的动力布局,即单列动车组含有 5 列动车和 3 辆拖车,单个动力单元又含有 2 个脉冲整流器,故 n 列动车组的等效输入导纳矩阵

$$Y_{Ldq} = 10nY_{in}. \quad (2)$$

多列动车组的等效输入导纳在两相旋转坐标系下的矩阵形式为

$$Y_{Ldq} = \begin{bmatrix} Y_{dd} & Y_{dq} \\ Y_{qd} & Y_{qq} \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中, Y_{dd} 为 d 轴自导纳, Y_{dq} 为 d 轴对 q 轴互导纳, Y_{qd} 为 q 轴对 d 轴互导纳, Y_{qq} 为 q 轴自导纳。

将车网耦合系统的回比矩阵 L_{dq} 定义为网侧等效输出阻抗矩阵和车侧等效输入导纳矩阵的乘积, 即

$$L_{dq} = Z_{sdq} \times Y_{Ldq} = \begin{bmatrix} L_{dd} & L_{dq} \\ L_{qd} & L_{qq} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中, L_{dd} 为 d 轴自身增益, L_{dq} 为 d 轴对 q 轴的耦合增益, L_{qd} 为 q 轴对 d 轴的耦合增益, L_{qq} 为 q 轴自身增益。

1.2 基于改进 sum-范数判据的车网耦合系统稳定性分析

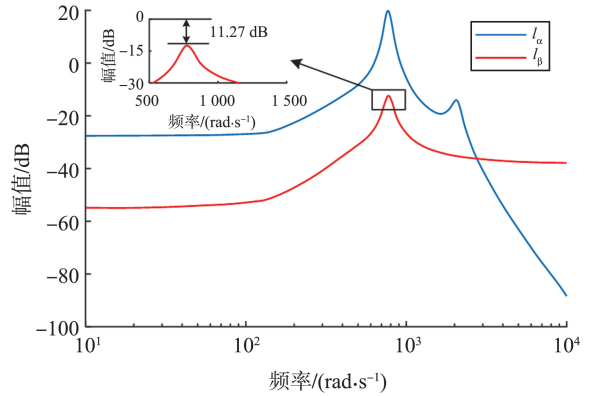
本研究基于车网耦合系统回比矩阵, 结合文献 [14] 提出的一种改进 sum-范数判据, 对车网耦合系统的稳定性进行分析, 判据为两个子判据 l_α 、 l_β 的并集。 l_α 、 l_β 分别为

$$\begin{cases} l_\alpha = \frac{1}{4} \| Z_{sdq} \|_{\text{sum}} \cdot \min \{ Y_{Ldq, G-j}, Y_{Ldq, G-i} \} < 1 \\ l_\beta = \frac{1}{4} \| Y_{Ldq} \|_{\text{sum}} \cdot \min \{ Z_{sdq, G-j}, Z_{sdq, G-i} \} < 1 \end{cases}, \quad (5)$$

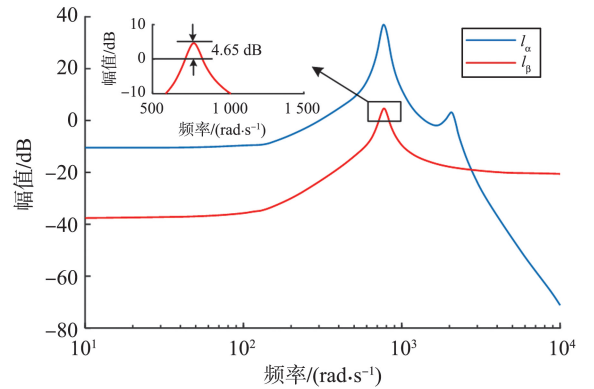
式中, $\| \cdot \|_{\text{sum}}$ 为矩阵的 sum-范数, $Y_{Ldq, G-j}$ 为导纳矩阵的列 G -范数, $Y_{Ldq, G-i}$ 为导纳矩阵的行 G -范数, $Z_{sdq, G-j}$ 为阻抗矩阵的列 G -范数, $Z_{sdq, G-i}$ 为阻抗矩阵的行 G -范数。根据文献 [14] 的分析可知, 相较常用判据, 改进型的 sum-范数判据进行稳定性分析时具有更小的保守性, 在稳定性分析中分析结果更加准确, 更适合车网耦合系统稳定性分析。

文献 [14] 通过绘制两个子判据的幅频特性曲线分析系统的稳定性。当两个子判据分别对应的幅频特性曲线在分析频率范围内均大于 0 dB 时, 认为系统是不稳定的, 其余情况均认为系统是稳定的 [14]。

接入不同数量动车组时基于改进 sum-范数判据绘制的幅频特性曲线如图 2 所示。由图 2(a) 可知, 当牵引网接入 5 列动车组时, l_β 对应的曲线在所分析频率范围内均小于 0 dB, 故此时车网系统是稳定的。由图 2(b) 可知, 当牵引网接入 6 列动车组, 在频率为 773 rad/s 时, l_β 对应的幅值为 4.65 dB, 此时 l_α 、 l_β 均大于 0 dB, 系统不稳定。图 2 与文献 [14] 中的曲线相似, 分析结果基本相同, 故该理论分析具有一定的可靠性。综合以上分析可知, 当车网耦合系统接入 6 列动车组时开始出现不稳定现象。



(a) 5列动车组接入时车网系统的稳定性



(b) 6列动车组接入时车网系统的稳定性

图2 基于改进 sum-范数判据的稳定性分析
Fig.2 Stability analysis based on improved sum-norm criterion

通过对不同数量动车组接入时的幅频特性曲线及车网耦合系统回比矩阵分析可知, 低频振荡现象的本质是电源负荷阻抗不匹配, 即 Z_{sdq} 和 Y_{Ldq} 不匹配, 故目前主要从这两个方面对低频振荡现象进行抑制。从网侧进行抑制的方法比较单一, 一般常用的方法有增大牵引变压器容量或缩短机务段到牵引变电所之间的距离, 成本较高, 不符合经济性原则 [15]。故目前主要从改变动车组的 Y_{Ldq} 进行研究。动车组车载整流器的参数、控制结构可以改变 Y_{Ldq} [16], 故本研究从优化动车组脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 整流器控制方法出发, 对低频振荡抑制方法进行研究。

2 车网耦合系统低频振荡抑制方法

动车组整流器是一种典型的非线性结构, 而传统的比例积分 (proportional-integral, PI) 控制是一种线性控制方法, 无法满足控制要求。滑模控制作为一种典型的非线性控制, 其滑动模态可以自行设计且设计方法简单。自适应控制具有能够根据环境变化实时调整控制参数的优点 [10]。故本研究尝

试将自适应控制与滑模控制相结合,设计 ASMC 方法改善低频振荡现象。

2.1 PWM 整流器 dq 轴下的状态空间模型

低频振荡现象多发生在动车组升弓整备期间,此时动车组只有 PWM 整流器参与工作,牵引逆变器和牵引电机不参与工作,故可将牵引逆变器和牵引电机等效为一个电阻^[17]。CRH5 车型单个动力单元采用双重化脉冲整流器,其拓扑图如图 3 所示,其中 C 为支撑电容, R 为牵引电机和逆变器的等效电阻。动车组 PWM 整流器如图 4 所示,其中 u_n 和 i_n 分别为车载变压器次边电压和电流, R_n 和 L_n 分别为变压器折算至二次侧的电阻和电感, u_{dc} 和 i_{dc} 分别为直流侧电压和电流, i_1 为负载电流。

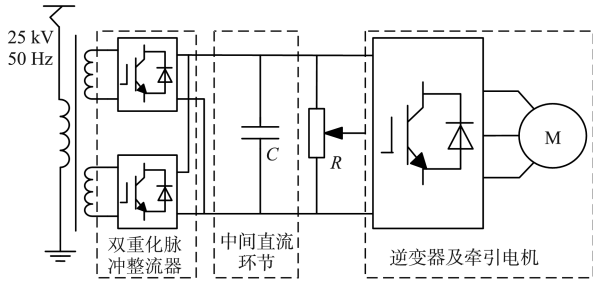


图 3 CRH5 车型单个动力单元拓扑结构

Fig.3 Topology structure of a single power unit in CRH5 train

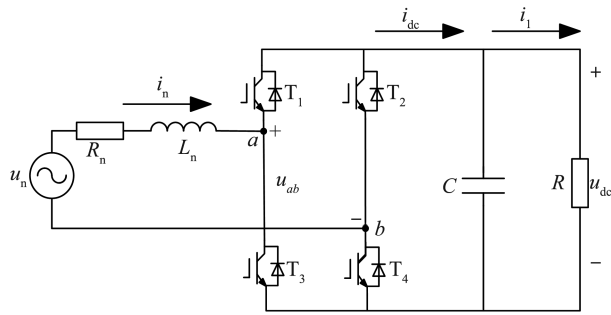


图 4 动车组 PWM 整流器等效电路

Fig.4 Equivalent circuit of the PWM rectifier for EMU

根据以上等效电路结构,可以得到 PWM 整流器状态空间方程为

$$\begin{cases} L_n \frac{di_n}{dt} = u_n - i_n R_n - S u_{dc} \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = S i_n - i_1 \end{cases}, \quad (6)$$

式中, S 为开关函数, $S = S_a - S_b$,其中 S_a 为 T_1 、 T_3 的开断状态, $S_a = 1$ 时, T_1 导通, $S_a = 0$ 时, T_3 导通, S_b 为 T_2 、 T_4 的开断状态, $S_b = 1$ 时, T_2 导通, $S_b = 0$ 时, T_4 导通。

将式(6)进行坐标变换,可得整流器在 dq 旋转

坐标系下的状态空间模型为^[18]

$$\begin{cases} L_n \frac{di_d}{dt} = u_{nd} - i_d R_n + \omega L_n i_q - S_d u_{dc} \\ L_n \frac{di_q}{dt} = u_{nq} - i_q R_n - \omega L_n i_d - S_q u_{dc} \\ C \frac{du_{dc}}{dt} = (S_d i_d + S_q i_q) - i_1 \end{cases}, \quad (7)$$

式中, u_{nd} 、 u_{nq} 分别为车侧电压在 dq 轴上的分量, i_d 、 i_q 分别为车侧电流在 dq 轴上的分量, S_d 、 S_q 分别为开关函数在 dq 轴上的分量, ω 为角频率。

2.2 滑模控制器设计

自适应滑模控制分别结合滑模结构及自适应控制的优点,滑模面的选取和自适应率的设计是控制器设计的关键。

针对电压外环,根据整流器的控制目标要求,选择直流侧目标电压 u_{dc}^* 与实际电压 u_{dc} 的偏差作为滑模函数^[13],即

$$m_{u_{dc}} = u_{dc}^* - u_{dc}. \quad (8)$$

建立 u_{dc} 对应的滑模面

$$s(m_{u_{dc}}, t) = u_{dc}^* - u_{dc} = 0, \quad (9)$$

式中 t 为时间。

基于等速趋近率 s 和系统空间状态方程可得电压环输出的参考电流

$$i_d^* = \frac{u_{dc}}{u_{nd} - R_n i_d} \left(C s + i_1 + \frac{\omega L_n i_d}{u_{dc}} i_q \right), \quad (10)$$

式中, $s = -k \operatorname{sgn}(s)$,其中 k 为切换增益, $\operatorname{sgn}(s)$ 为符号函数, $\operatorname{sgn}(s) = \begin{cases} 1, & s > 0 \\ 0, & s = 0 \\ -1, & s < 0 \end{cases}$ 。

针对电流内环,根据整流器的控制目标要求,选择 i_d 、 i_q 与它们的参考电流分量 i_d^* 、 i_q^* 的偏差作为滑模函数, i_d^* 由式(10)计算得出, i_q^* 可设为 0,设置电流内环滑模面为

$$\begin{cases} s_1(m_{i_q}, t) = i_q^* - i_q = 0 \\ s_2(m_{i_d}, t) = i_d^* - i_d = 0 \end{cases}. \quad (11)$$

基于 s 与系统状态空间方程可得开关函数在 dq 轴上的分量为

$$\begin{cases} S_q = \frac{u_{nq} - R_n i_q - \omega L_n i_d - k_1 \operatorname{sgn}(s_1)}{u_{dc}} \\ S_d = \frac{u_{nd} - R_n i_d + \omega L_n i_q - k_2 \operatorname{sgn}(s_2)}{u_{dc}} \end{cases}, \quad (12)$$

式中, k_1 、 k_2 为切换增益。

在式(10)、(12)中,符号函数会使系统在分段点处出现抖振现象。为减弱这种现象,可设置一个饱和函数 $\text{sat}(s)$ 替代符号函数,饱和函数

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} 1, & |s| \leq \lambda \\ \lambda \text{sgn}(s), & |s| > \lambda \end{cases}, \quad (13)$$

式中 λ 为大于0的常数。 s 中 k 的设置很大程度上影响系统性能,过大的 k 会使系统的抖振现象明显,影响系统静态稳定;过小的 k 则会使系统收敛速度过慢,抗干扰能力下降。为提高控制器综合性能,对电流内环控制器的 k 引入自适应率,得到引入自适应率后的切换增益

$$k_z = \begin{cases} k_m, & |s| \leq \delta \\ \delta^{1-\alpha} \text{sgn}(s), & |s| > \delta \end{cases}, \quad (14)$$

式中 k_m, δ, α 均为正实数。

根据式(13)、(14),可将式(10)、(12)改写为以下形式:

$$i_d^* = \frac{u_{dc}}{u_{nd} - R_n i_d} \left[Ck \text{sat}(s) + i_1 + \frac{\omega L_n i_d}{u_{dc}} i_q \right], \quad (15)$$

$$\begin{cases} S_q = \frac{u_{nq} - R_n i_q - \omega L_n i_d - k_{z1} \text{sat}(s_1)}{u_{dc}} \\ S_d = \frac{u_{nd} - R_n i_d + \omega L_n i_q - k_{z2} \text{sat}(s_2)}{u_{dc}} \end{cases} \quad (16)$$

由式(16)可得 PWM 所需的两个控制量为

$$\begin{cases} u_q^* = S_q u_{dc} \\ u_d^* = S_d u_{dc} \end{cases}, \quad (17)$$

式中, u_q^*, u_d^* 分别为 u_{ab} 的 q 轴和 d 轴分量。

根据式(15)设计的电压外环滑模控制器如图5所示,其中 K_C, K_R 分别为关于电容和电阻的增益。

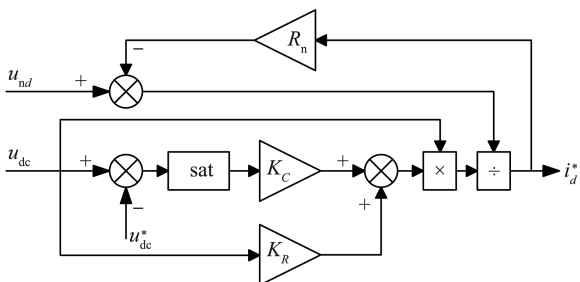


图5 电压外环滑模控制器

Fig.5 Sliding mode controller for voltage outer loop

根据式(17)设计的电流内环控制器如图6所示。

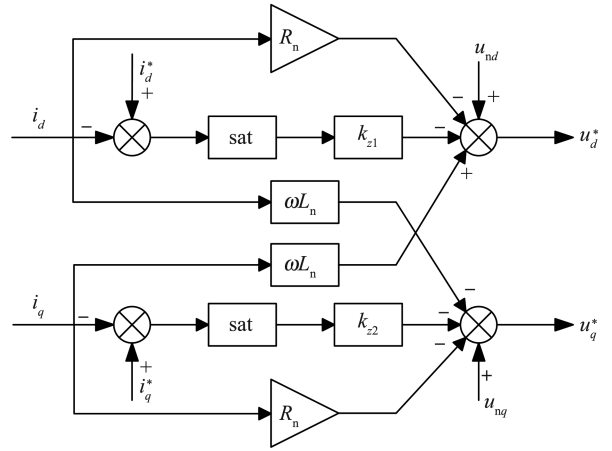


图6 电流内环滑模控制器

Fig.6 Sliding mode controller for current inner loop

2.3 基于 ASMC 的 dq 电流解耦控制策略

基于 ASMC 的动车组整流器控制结构如图7所示,其中 SPWM(sinusoidal pulse width modulation) 为正弦脉冲宽度调制。

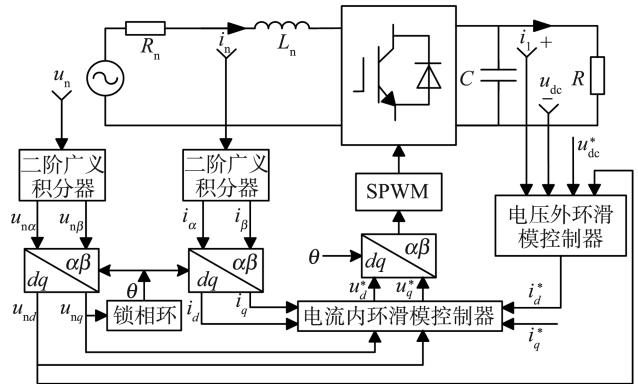


图7 基于 ASMC 的动车组整流器控制结构

Fig.7 ASMC-based control structure for EMU rectifiers

由图7可知,在基于 ASMC 控制下的整流器控制结构中,电压外环滑模控制采取所需电气量生成 i_d^* 输入电流内环,电流内环滑模控制器通过输入的电气量生成 u_d^*, u_q^* ,通过 Park 反变换生成 PWM 调制信号输入动车组整流器,实现对动车组整流器的整体控制^[19]。

3 基于滑模控制的整流器仿真分析

根据本研究设计的控制器结构,参照实际情况在仿真平台上搭建双重化整流器仿真模型,分别对 PI 控制、滑模控制、电压外环滑模控制+电流内环 PI 控制(SMC-PI)、电压外环 PI 控制+电流内环滑模控制(PI-SMC)及 ASMC 下的整流器性能进行仿真分

析,仿真参数如表1所示。

表1 动车组整流器仿真参数

Table 1 Simulation parameters of the EMU rectifier			
电源电压/kV	变压器等效电阻/ Ω	变压器等效电感/H	仿真步长 ^[18] / μs
27.5	0.145	0.005 4	10
支撑电容/F	直流侧负载等效电阻/ Ω	直流侧电压/V	PWM 开关频率 ^[18] /Hz
0.008 9	35	3 600	250

根据仿真结果得到5种控制方式下的直流侧电压波形如图8所示。5种控制方式下各个指标具体结果如表2所示。

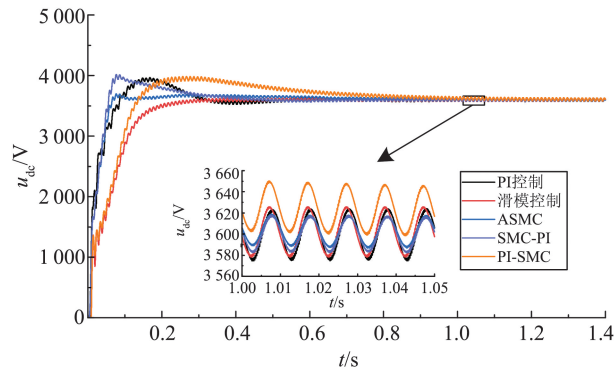


图8 5种控制方式下直流侧电压波形

Fig.8 DC-side voltage waveforms under five control approaches

表2 5种控制方式下指标对比结果

Table 2 Comparative indicators results of five control approaches

控制方式	超调量/%	调节时间/s	电压波动/V
PI控制	11.12	0.60	24
滑模控制	0	0.40	22
SMC-PI	12.51	0.50	18
PI-SMC	10.69	0.90	25
ASMC	1.38	0.20	18

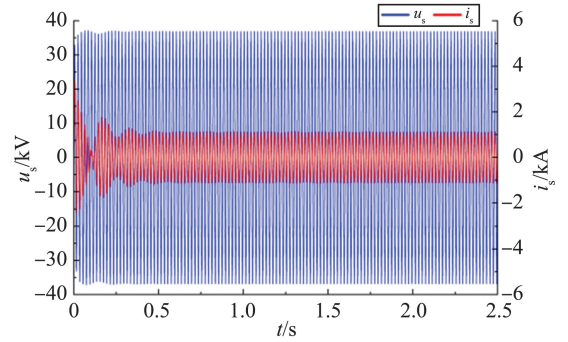
由图8及表2可以看出;PI控制、SMC-PI、PI-SMC均存在较大超调量,滑模控制不存在超调量,ASMC超调量极小,不会对系统造成严重冲击;从调节时间方面,ASMC快于其他几种控制方式,可以在0.2s内实现稳定;从电压波动方面,PI-SMC的电压波动最大,ASMC与SMC-PI的电压波动最小。综上,ASMC相比其余4种控制具有最佳的控制性能,能够更好地满足系统控制要求。

4 低频振荡验证分析

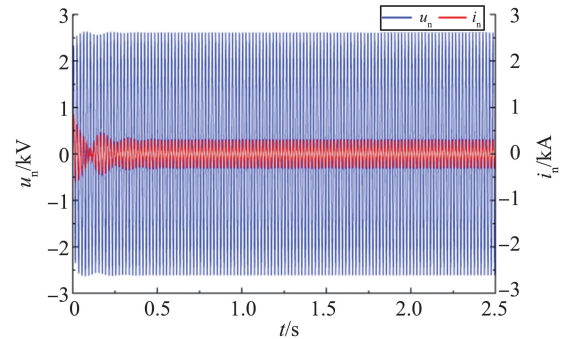
为了验证ASMC控制能否改变低频振荡现象,本研究在Simulink/MATLAB中搭建车网耦合系统仿真模型。仿真中设计多列动车组并联接入牵引网5km处^[20],分别对PI控制和ASMC控制下的系统进

行仿真,根据仿真结果对系统的稳定性进行对比分析。

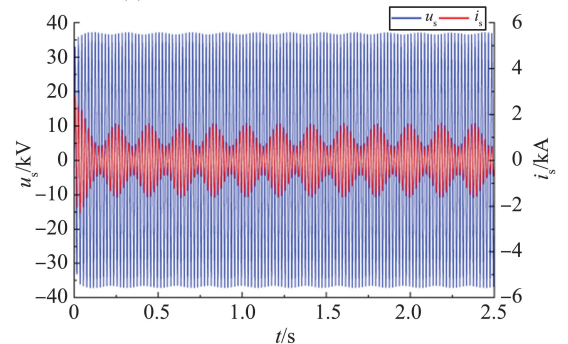
由1.2节分析可知,PI控制方式下发生低频振荡现象的临界动车组数量为6列,故本研究在PI控制方式下分别投入5、6列动车组,得到网侧电压 u_s 、网侧电流 i_s 、车侧电压 u_n 、车侧电流 i_n 波形如图9所示。



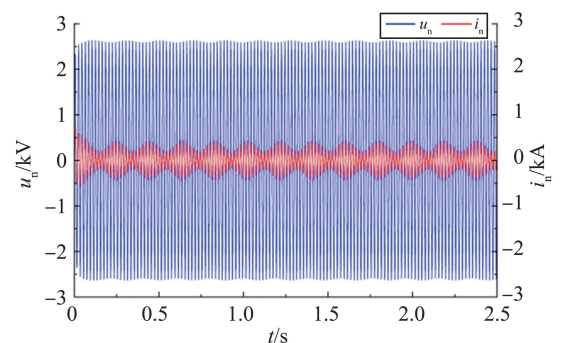
(a) 5列动车组升弓整备网侧电气量



(b) 5列动车组升弓整备车侧电气量



(c) 6列动车组升弓整备网侧电气量



(d) 6列动车组升弓整备车侧电气量

图9 PI控制下的车网系统电气量

Fig.9 Electrical quantities of train-network system under PI control

由图9可以看出:当投入5列动车组时,系统波形发生振荡现象,约0.7 s后系统恢复稳定;当投入6列动车组时,系统发生低频振荡,振荡频率约为5 Hz,系统不稳定。这与1.2节中分析得出的结论一致,由此可得本研究搭建的车网耦合系统仿真模型可靠。

在基于ASMC控制的仿真模型下,设计在开始时投入5列动车组,每过3 s再增投1列动车组,可得ASMC控制方式下投入5~7列的车侧及网侧电气量波形变化情况,如图10所示。由图10可以看出:当接入5、6列动车组时,ASMC控制下的车网系统电气量发生振荡现象,但能够在一定的时间内恢复至稳定状态,通过与PI控制方式下投入相同数量动车组对比可以发现,ASMC控制恢复稳定所需时间更少;当接入7列动车组时,ASMC控制仍能够调整系统恢复至稳态,而PI控制下接入6列动车组的车网系统已发生低频振荡,且无法恢复至稳定状态,甚至系统出现失稳现象,进一步说明本研究所提ASMC控制对车网耦合系统低频振荡抑制的有效性。

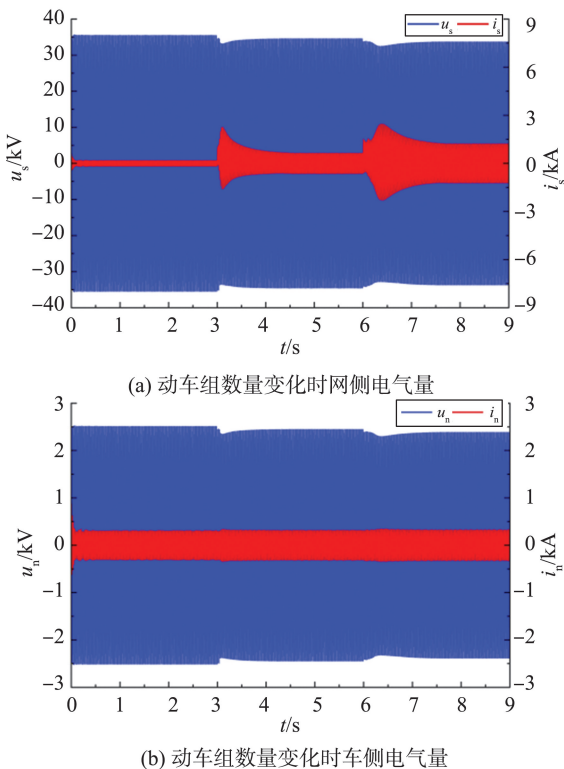


图10 ASMC控制方式下动车组数量变化时的波形
Fig.10 Waveforms under ASMC with varying numbers of EMUs

5 结论

针对大量电力机车投入牵引网导致低频振荡

现象发生的问题,本研究计算车网耦合系统的回比矩阵模型,结合改进sum-范数判据分析得到发生低频振荡的临界动车组数量,并对低频振荡原因进行深入研究。本研究构建整流器的状态空间模型,根据状态空间方程改进传统滑模控制,设计一种ASMC的非线性控制策略代替传统的PI控制策略,并与PI控制及未改进的滑模控制进行对比分析。为验证所提策略的正确性,本研究进行车网耦合系统仿真验证分析。结合理论分析结果和仿真试验结果得出以下结论。

(1)通过改进sum-范数判据的分析,得出低频振荡与动车组输入导纳密切相关。当接入动车组数量达到6列时,车网系统发生低频振荡现象。

(2)滑模控制设计简单,具有无超调、滑动模态可自行设计的优点。自适应控制具有可根据系统状态自动调节控制参数的优点。将两者进行结合能够有效提高车网系统的稳定性。

(3)相比于PI控制、滑模控制,ASMC能够更加快速、准确、无超调地对系统状态进行调节,使系统维持在稳定状态,对低频振荡现象具有良好的抑制性能。

滑模控制虽具有良好的控制性能,但想将它工程应用于动车组整流器,目前还存在一些需要解决的问题。首先,针对滑模控制存在的固有抖振,需要采取一定措施控制在工程可接受范围内,以免对开关器件和通信系统造成干扰;其次,在工程中的极端工况下,滑模控制的可靠性需要进行实际验证;最后,滑模控制的实时计算对控制器的算力要求较高,实际应用时需考虑进一步提升控制器算力。

参考文献:

- [1] 周毅, 胡海涛, 雷科, 等. 电气化铁路低频等幅振荡机理分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(9): 3024-3036.
ZHOU Yi, HU Haitao, LEI Ke, et al. Mechanism analysis of the sustained low-frequency oscillation in the electric railway system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(9): 3024-3036.
- [2] 付莉, 张桂南, 高仕斌. 高速铁路车网耦合系统网压振荡模态分析与对策[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 24-32.
FU Li, ZHANG Guinan, GAO Shibin. Modal analysis and countermeasures on voltage low frequency oscillation

- of high-speed railway traction network and EMU coupling system[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(1): 24-32.
- [3] 张桂南, 刘志刚, 向川, 等. 高铁车网耦合系统电压低频振荡现象机理研究[J]. *电网技术*, 2015, 39(7): 1956-1962.
- ZHANG Guinan, LIU Zhigang, XIANG Chuan, et al. Mechanism on voltage low frequency oscillation of high-speed railway traction network and EMU coupling system [J]. *Power System Technology*, 2015, 39(7): 1956-1962.
- [4] LIU Z G, ZHANG G N, LIAO Y C. Stability research of high-speed railway EMUs and traction network cascade system considering impedance matching[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2016, 52(5): 4315-4326.
- [5] 邓睿, 刘碧, 宋文胜. 牵引供电网-多台机车耦合系统的低频振荡分析与抑制[J]. *电工技术学报*, 2019, 34(增刊1): 327-335.
- DENG Rui, LIU Bi, SONG Wensheng. Low-frequency-oscillation analysis and suppression of the coupling system between traction network and multi-locomotives[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(Suppl.1): 327-335.
- [6] LIAO Y C, LIU Z G, ZHANG G N, et al. Vehicle-grid system modeling and stability analysis with forbidden region-based criterion [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017, 32(5): 3499-3512.
- [7] 许加柱, 程慧婕, 黄文, 等. 自适应自抗扰比例积分控制下的高速铁路车网耦合系统低频振荡抑制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(14): 4035-4045.
- XU Jiazhu, CHENG Huijie, HUANG Wen, et al. A novel approach based on self-adaptive auto disturbance rejection proportional integral controller to suppress low frequency oscillation of high speed railway electric multiple units-traction network coupling system [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(14): 4035-4045.
- [8] 王晖, 吴命利. 牵引网低频振荡及其抑制方法的仿真分析[J]. *电网技术*, 2015, 39(4): 1088-1095.
- WANG Hui, WU Mingli. Simulation analysis on low-frequency oscillation in traction power supply system and its suppression method [J]. *Power System Technology*, 2015, 39(4): 1088-1095.
- [9] 周毅, 胡海涛, 杨孝伟, 等. 电气化铁路车网耦合系统低频振荡分析[J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(增刊1): 72-80.
- ZHOU Yi, HU Haitao, YANG Xiaowei, et al. Analysis of low-frequency oscillation in train-traction network coupling system of electrified railway [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37(Suppl.1): 72-80.
- [10] 李蔚, 冉治, 孙博, 等. CRH5 动车组牵引脉冲整流器自适应优化控制方法研究[J]. *铁道科学与工程学报*, 2024, 21(2): 476-486.
- LI Wei, RAN Zhi, SUN Bo, et al. Study on adaptive optimal control of CRH5 EMU traction PWM rectifier [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2024, 21(2): 476-486.
- [11] LIU Z G, WANG Y Q, LIU S, et al. An approach to suppress low-frequency oscillation by combining extended state observer with model predictive control of EMUs rectifier[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(10): 10282-10297.
- [12] WANG Y Q, LIU Z G. Suppression research regarding low-frequency oscillation in the vehicle-grid coupling system using model-based predictive current control [J]. *Energies*, 2018, 11(7): 1803.
- [13] 刘爽, 刘志刚, 王亚绮, 等. 基于滑模控制的牵引网网压低频振荡抑制方法[J]. *电网技术*, 2018, 42(9): 2999-3006.
- LIU Shuang, LIU Zhigang, WANG Yaqi, et al. A novel approach to low frequency oscillation suppression of traction network voltage based on SMC [J]. *Power System Technology*, 2018, 42(9): 2999-3006.
- [14] 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.
- [15] 逯华, 耿民, 刘明杰, 等. 基于分流模型 PI 控制的车网耦合系统低频振荡抑制方法[J]. *北京交通大学学报*, 2024, 48(5): 118-129.
- LU Hua, GENG Min, LIU Mingjie, et al. Low-frequency oscillation suppression method for EMU-traction network coupling systems based on shunting model PI control[J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2024, 48(5): 118-129.
- [16] 冷月, 杨洪耕, 王智琦. 一种基于二自由度内模控制的牵引网低频振荡抑制方法[J]. *电网技术*, 2017, 41(1): 258-264.
- LENG Yue, YANG Honggeng, WANG Zhiqi. A method of suppressing low-frequency oscillation in traction network based on two-degree-of-freedom internal model control[J]. *Power System Technology*, 2017, 41

(1): 258-264.

[17] WEN B, BOROYEVICH D, BURGOS R, et al. Analysis of D-Q small-signal impedance of grid-tied inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 675-687.

[18] 王迎春, 杨少兵, 宋可荐, 等. 基于滑模结构无源控制的车网耦合系统低频振荡抑制方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(3): 553-563.

WANG Yingchen, YANG Shaobing, SONG Kejian, et al. An approach based on SMS to suppress low-frequency oscillation in the EMUs and traction network coupling system using PBC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(3): 553-563.

[19] 刘熠, 王跃, 李鹏坤, 等. 模块化多电平铁路功率调节器接入的机车混跑车网耦合系统稳定性分析[J]. 电

网技术, 2024, 48(2): 869-884.

LIU Yi, WANG Yue, LI Pengkun, et al. Stability analysis of locomotive mixed running vehicle-grid coupling system with access of modular multilevel converter-railway static power conditioner[J]. Power System Technology, 2024, 48(2): 869-884.

[20] 张炜璐, 吴思奇, 刘志刚. 二阶广义积分器对车网系统低频振荡的影响分析与抑制研究[J]. 电网技术, 2025, 49(2): 699-708.

ZHANG Weilu, WU Siqi, LIU Zhigang. Low-frequency stability analysis and enhancement of vehicle-grid system considering the impact of SOGI[J]. Power System Technology, 2025, 49(2): 699-708.

(编辑:孙亚彤)

(上接第120页)

[19] 中国石油天然气管道局标准化委员会. 油气输送管道沉管下沟施工规范: Q/SY GDJ 0387—2014[S]. 北京: 中国石油天然气管道局, 2015: 6-13.

[20] 徐小兵. 油气长输管道工程施工技术手册[M]. 北京: 石油工业出版社, 2011: 290-297.

[21] 孙超, 张光伟, 答武强, 等. 临山条件下大直径盾构隧道抗浮控制技术[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2024, 6(4): 27-37.

SUN Chao, ZHANG Guangwei, DA Wuqiang, et al. Anti floating control technology for large-diameter shield tunnels under mountainous conditions [J]. Hazard

Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2024, 6(4): 27-37.

[22] 杨立, 夏增选, 姜文杰, 等. 山区深埋公路隧道穿越断层破碎带施工稳定性[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2024, 6(3): 32-42.

YANG Li, XIA Zengxuan, LOU Wenjie, et al. Construction stability of deep buried highway tunnels crossing fault fracture zones in mountainous areas [J]. Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering, 2024, 6(3): 32-42.

(编辑:宋艳)