

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181334

基于IADRC的多CRH5型车网耦合系统低频振荡抑制方法

王英¹, 陈思彤¹, 王迎晨¹, 母秀清², 高峰阳¹, 何正友²

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 611756)

摘要: 近年来国内相继出现多起高速铁路车网耦合系统低频振荡, 振荡严重时甚至导致动车组牵引封锁。针对多列CRH5型动车组升弓整备投入牵引网时发生低频振荡提出了一种有效抑制方法。首先, 分析了多列CRH5型动车组同时升弓接入牵引网的多车网电气耦合系统特性。其次, 基于改进自抗扰控制策略对车网系统负载CRH5型动车组整流器的控制器进行优化设计来抑制系统低频振荡。最后, 相比原有动车整流器PI控制和传统自抗扰控制技术, 在Matlab/Simulink平台下测试验证了基于改进自抗扰控制的多CRH5型动车组升弓整备投入牵引网的车侧电气量发生低频振荡抑制的正确性和有效性。

关键词: 高速铁路; CRH5型动车组; 车网电气耦合系统; 低频振荡; 改进自抗扰控制

A suppressing method of low-frequency oscillation of railway traction network and multi-CRH5 EMUs coupling system based on IADRC

WANG Ying¹, CHEN Sitong¹, WANG Yingchen¹, MU Xiuqing², GAO Fengyang¹, HE Zhengyou²

(1. School of Automation & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: In recent years, many low frequency oscillation of high-speed railway vehicle-network coupling system occurred in China. When the oscillation was severe, it even led to Electric Multiple Units (EMU) traction blockade. This paper presents an effective method to suppress the low frequency oscillation when the multi-CRH5 EMU pantograph is lifted and put into traction network. First, the characteristics of electric coupling system of multi-CRH5 EMUs simultaneously connecting to traction network are analyzed. Next, based on an Improved Active Disturbance Rejection Control (IADRC) strategy, the controller of CRH5 EMU rectifier load of the vehicle-network coupling system is optimized and designed to suppress the low frequency oscillation. Finally, based on the IADRC, the correctness and effectiveness of vehicle-side electrical quantity low frequency oscillation suppression when multi-CRH5 EMU pantographs are lifted and connected to traction network are verified by comparing PI control and ADRC control technology under Matlab/Simulink platform.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB1201003-020), National Natural Science Foundation of China (No. 51767013 and No. 51867012), Natural Science Foundation of Gansu Province Education Department (No. 2017A-020), Science and Technology Research and Development Plan of China Railway Corporation (No. 2017J012-A), and Natural Science Foundation of Gansu Science and Technology Department (No. 18JR3RA111).

Key words: high-speed railway; CRH5 EMU; vehicle-network electric coupling system; low frequency oscillation; improved active disturbance rejection control (IADRC)

0 引言

随着西成、石济等高铁线路相继开通, 截至

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2017YFB1201003-020); 国家自然科学基金项目资助(51767013, 51867012); 甘肃省教育厅自然科学基金项目资助(2017A-020); 中国铁路总公司科技研究开发计划重点课题资助(2017J012-A); 甘肃省科技厅自然科学基金项目资助(18JR3RA111)

2017年底, 我国高速铁路总里程已达2.5万公里, 日开行高速列车2300余对。各种型号动车组在既有线、新建高速铁路上高密度、高速度运营, 系统各种耦合性问题日益严重^[1-2], 尤其近年来多区域出现的车侧电气量低频振荡^[3]甚至导致机车大面积牵引封锁。

不同于电力系统低频振荡^[4-6], 电气化铁路网侧低频振荡属于运营中出现的车网电气匹配问题^[3,7]。目前针对多车网电气耦合低频振荡的研究方法^[8]主

要有时域分析法、特征值分析法和频域分析法。文献[9]利用主导极点分析了机车数量、电压环、电流环参数对低频振荡现象的影响规律；文献[10]设计了二自由度内模控制器，能有效抑制高速铁路牵引网低频振荡；文献[11-12]构建了四象限脉冲整流器状态空间模型和闭环小信号模型传递函数，分析了多车接入牵引网的稳定性以及控制参数、动车数量等因素的影响；文献[13]通过非线性模式分析方法 Hopf 分叉理论研究了脉冲整流器及其构成系统的非线性特性，分析了脉冲整流器的非线性特性对低频振荡的影响；文献[14]利用单相系统 dq 解耦理论，通过主导极点和欠阻尼机理分析了机车数量、负荷大小、供电臂长度、积分器与控制参数对系统低频稳定性的影响。

综上，针对多车网低频振荡，除了牵引网的影响^[10]，机车整流器不同控制参数和控制结构也有很大影响。目前国内研究较多的是 HX_D1B、HX_D2B、HX_D3B 型机车^[11]和 CRH1、CRH3 型动车组^[15]等负载，而对大量投入的采用 dq 解耦控制的 CRH5 型动车组和牵引网耦合低频振荡研究不多。2010 年 9 月，由于北京、沈阳、青岛等铁路局投入运行的 CRH5 型动车组密度较大，这些地方多辆 CRH5 型动车组升弓整备时发生了牵引封锁，导致动车组牵引动力单元无法获得电力。国内学者、各铁路局人员对经常发生低频振荡的动车所、机务段、大型站场的牵引网电气量也进行了大量实际测量^[16]。

基于此，本文针对北京、沈阳、青岛等地动车所 CRH5 型动车组整流器发生封锁的现象，提出了一种改进自抗扰控制(Improved Active Disturbance Rejection Control, IADRC)技术的抑制方法。首先分析了多 CRH5 型动车组整备投入 AT 牵引网的多车网耦合系统；然后，分析了 CRH5 型动车组基于 PI 电压控制器的 dq 解耦电流控制对解决低频振荡的不足；其次，基于自抗扰控制，改进了原有控制函数的非线性组合，建立了基于 IADRC 的 CRH5 型动车组整流器控制技术；最后，通过仿真测试验证了基于 IADRC 的控制策略对多 CRH5 型车网耦合系统出现车侧低频振荡具有很好的抑制效果。

1 多 CRH5 型动车组-AT 牵引网耦合系统

图 1 为多列 CRH5 型动车组整备投入全并联 AT 复线单相工频交流 2×27.5 kV 的牵引供电示意图。图 1 中，当多列 CRH5 型动车组投入系统发生网侧电气量低频振荡甚至发生列车牵引封锁时，通常这

些动车组处于空载/轻载整备状态，即牵引逆变器和牵引电机部分处于不工作状态。因此，牵引供电系统的动态时变特性、CRH5 型动车组负荷的非线性及多车-网系统电气耦合等共同构成车网电气耦合系统的核心问题。考虑到从牵引网侧抑制低频振荡措施的成本较大，系统网侧电气量低频振荡抑制主要与动车组整流器的控制参数和控制结构相关。

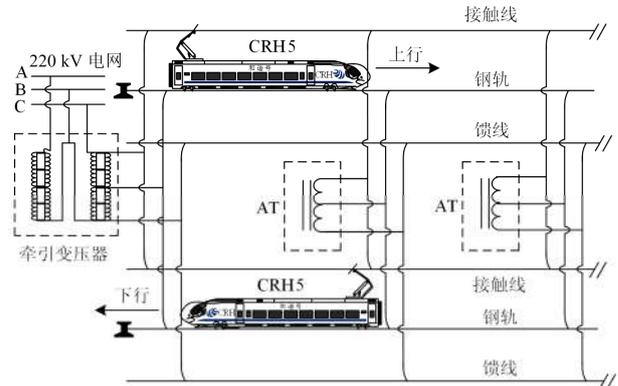


图 1 多 CRH5 型动车组-AT 牵引网耦合系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of coupling system for multi-CRH5 EMUs and AT traction network

CRH5 型动车组牵引传动系统如图 2 所示。动力配置为 5 动 3 拖的动力分散式，在 3 号和 6 号车厢上装设有受电弓，动车组运行时采用单弓受流方式。动力单元 3 可以由主变压器 1 直接供电，也可通过转换开关由主变压器 2 供电。

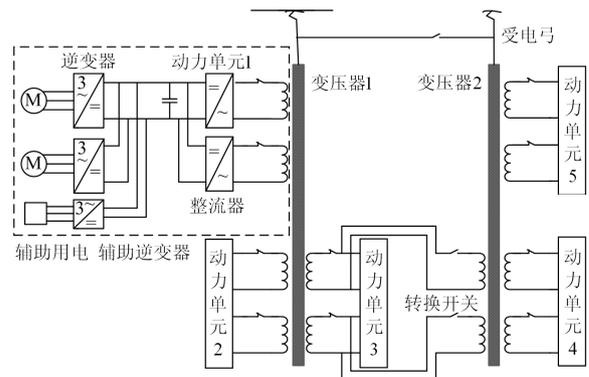


图 2 CRH5 型动车组牵引传动系统结构图

Fig. 2 Structure diagram of CRH5 EMU traction drive system

电气化铁路发生低频振荡时，动车组处于空载或轻载状态，只有整流器和辅助逆变器参加工作，逆变器、异步电机均处于不工作状态。此外，辅助逆变器向车载三相 380 V/50 Hz 用电设备供电，此时直流环节也可以等效成恒流源或阻抗。综上，CRH5 型动车组两重化四象限脉冲整流器控制为本文系统网侧电气量低频振荡抑制的研究着力点。

2 CRH5 动车组整流器 dq 解耦控制器

2.1 CRH5 动车组基于 PI 的 dq 解耦控制器

CRH5 型动车组整流器采用 dq 解耦电流控制策略^[17], 即 dq 轴下的电压/电流控制策略, CRH5 型动车组整流器控制结构主要由四部分组成: 电流同步系统(AC Current Synchronization System, CSS)、电压同步系统(AC Voltage Synchronization System, VSS)、电流控制器(AC Current Controller, ACC)和电压控制器(DC Voltage Controller, DVC)。其中电压同步系统由电压二阶带通滤波器(Second Order Generalized Integrator, SOGI)和锁相环(Phase Locked Loop, PLL)组成; CSS 与 VSS 结构相似, 由电流二阶带通滤波器、锁相环组成。CRH5 型动车组整流器控制框图具体如图 3 所示。

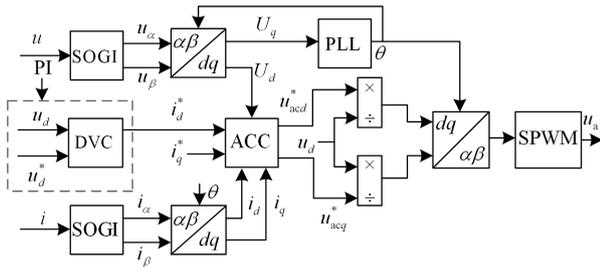


图 3 基于 PI 的 CRH5 动车组整流器控制图

Fig. 3 Control diagram of CRH5 EMU rectifier based on PI

图 3 中, 网压 u 和整流器输入电流 i 通过 SOGI 滤波后生成 $\alpha\beta$ 静止坐标系下的电压控制信号(u_α 、 u_β)、电流信号(i_α 、 i_β), 形成两相静止坐标系下($\alpha\beta$ 轴)的变量。 u_α 和 u_β 通过 $\alpha\beta/dq$ 转换模块变为网压的 dq 轴分量, 同时整流器输入电流 i 的 dq 轴分量 i_d 和 i_q 也通过同样方式获得。 θ 为网压同步相角, u_d 、 u_d^* 分别为整流器直流侧电压、直流侧电压参考值, 末端 u_a 为调制波电压。图 3 中, PI 控制采用的输出电压 u_d 与参考电压 u_d^* 差值的线性策略并不能完全应用于非线性系统, PI 控制器参数也无法实时跟踪系统状态的变化。

2.2 CRH5 动车组基于 IADRC 的 dq 解耦整流控制

相较 PI 控制策略, 自抗扰控制(Active Disturbance Rejection Control, ADRC)^[18]能实时跟踪系统状态信息以及模型中未考虑的内部扰动和外部扰动, 但是由于 ADRC 固有的非线性环节选取的分段非线性函数易存在不光滑硬点, 造成系统的波形存在一定的抖动。从某种意义上说, 电气量的抖动反而会增大车网电气耦合系统发生低频振荡的可能, 与选用 ADRC 来对低频振荡抑制的目标背道而驰, 不能充

分发挥 ADRC 动态跟随、动态补偿优点。

这里采用一种可用于 CRH5 车 dq 解耦电流控制整流器基于改进的自抗扰控制(Improved Active Disturbance Rejection Control, IADRC)的方法, 具体控制框图如图 4 所示。和传统 ADRC 一样, 图 4 也包括微分跟踪器(Tracking Differentiator, TD)、扩张状态观测器(Extended State Observer, ESO)和非线性状态误差反馈控制律(Nonlinear States Error Feedback Control Laws, NLSEF)三部分。本文改进的 IADRC 主要针对非线性状态误差反馈控制律 NLSEF 中分段的非线性组合函数进行优化设计, 以进一步抑制车侧电气量发生低频振荡。

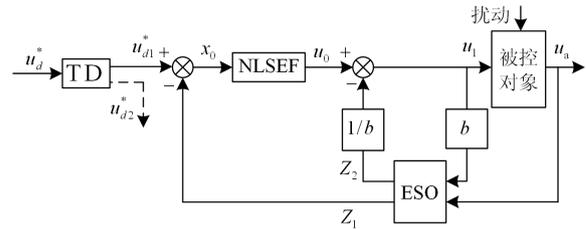


图 4 基于 IADRC 的 CRH5 整流器 DVC 单元控制框图

Fig. 4 DVC unit control block diagram of CRH5 EMU rectifier based on IADRC

图 4 中, u_d^* 为输入电压参考值, u_{d1}^* 为 u_d^* 的跟踪信号, u_{d2}^* 为 u_d^* 的跟踪信号的一阶微分, x_0 为输入量偏差, u_0 为偏差的非线性组合控制量, u_1 为直接控制量, u_a 为 PWM 调制电压; b 为补偿因子, Z_1 为整流器直流侧电压的估计值, Z_2 表示外界扰动的估计值。需要指出的是, 图 4 所示的 IADRC 控制框图中, 由于 u_{d1}^* 为 u_d^* 的跟踪信号, 则 u_{d1}^* 与 u_d^* 近似相等, 由于 u_{d1}^* 是 u_{d2}^* 的函数, 所以这里的 IADRC 控制含有 u_{d2}^* 。

3 基于 IADRC 的整流器控制建模

3.1 基于 IADRC 的控制器设计

基于改进的 IADRC 控制策略对 CRH5 型动车组整流器电压控制器进行具体设计, 主要包括 TD、ESO 和改进后的 NLSEF 三大控制模块的设计。

1) 基于 ADRC 的微分跟踪器 TD

CRH5 型动车组升弓整备时, 车载整流器输出只能从零状态开始向预设值缓慢变化, 而控制目标预设值在初始时刻却是一个非零量, 因此在系统阻尼值恒定情况下, 降低初始时刻给定值与实际值误差, 可有效处理 PI 控制策略下快速与超调的矛盾。

图 5 所示为微分跟踪器 TD 模块输入/输出波形, 其可为预设值设置合适的过渡过程, 跟踪该过程满足控制要求, TD 模块方程为

$$\begin{cases} u_{d1}^*(k+1) = u_{d1}^*(k) + h \cdot u_{d2}^*(k) \\ u_{d2}^*(k+1) = u_{d2}^*(k) + h \cdot \text{fhan}(u_{d1}^*(k) - u_d^*, u_{d2}^*(k), r, h_0) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: h_0 为采样步长; h 为积分步长, 且 $d = rh_0$, h 对扰动有一定的滤波效果, 增大该值可以更好地抑制误差; r 为速度因子, r 的取值与跟踪速度成正比; fhan 为系统控制函数, 表达式为

$$\text{fhan} = \begin{cases} -r \cdot \text{sign}(a) & |a| > d_0 \\ -r \cdot d/a & |a| \leq d_0 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中:

$$a = \begin{cases} u_{d2}^*(k) + \frac{y}{h_0} & |y| \leq d_0 \\ u_{d2}^*(k) + \frac{\text{sign}(y) \cdot (a_0 - d)}{2} & |y| > d_0 \end{cases}, \quad d_0 = dh_0,$$

且 $a_0 = \sqrt{d^2 + 8r|y|}$, $y = u_{d1}^*(k) - u_d^* + h_0 \cdot u_{d2}^*(k)$; sign 表示符号函数。

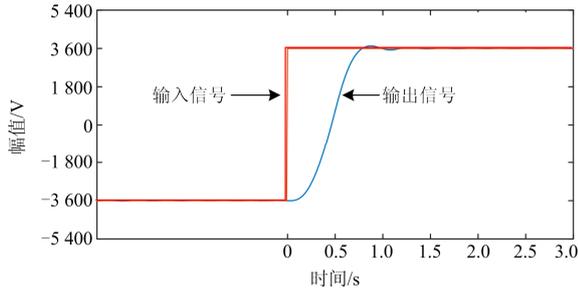


图 5 微分跟踪器示意图

Fig. 5 Schematic diagram of differential tracker

2) 基于 ADRC 的扩张状态观测器 ESO

CRH5 型动车组整流器具有非线性, 且外部电源对整流器扰动具有随机性和不确定性, 需构建非线性扩张状态观测器 ESO 来实时观测和跟踪整流器电气量参数。具体的 ESO 模块方程为

$$\begin{cases} x(k) = Z_1(k) - u_d^* \\ Z_1(k+1) = Z_1(k) + h \cdot [Z_2(k) - \beta_1 \cdot x(k) + bu] \\ Z_2(k+1) = h \cdot \beta_2 \cdot \text{fal}(x, \alpha, d) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: x 为系统误差; β_1 和 β_2 为输出误差的可调系数; 最优控制函数 $\text{fal}(x, \alpha, d)$ 为

$$\text{fal}(x, \alpha, d) = \begin{cases} |x|^\alpha \text{sign}(x) & |x| > d \\ x/d^{1-\alpha} & |x| \leq d \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: x 为输入误差; α 和 d 分别为滤波因子和非线性因子。

3) 改进的非线性状态误差反馈控制律 NLSEF
非线性状态误差反馈控制律 NLSEF 模块是对

ESO 模块观测来的未知扰动进行动态补偿, 计算求得整流器最终控制量 u_1 , 其控制方程为

$$\begin{cases} x_0 = u_d^* - Z_1(k) \\ u_0 = k \cdot \text{fal}(x, \alpha, d) \\ u_1 = u_0 - Z_2(k) / b \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: k 为直流电压预设值与实际值逼近系数; $Z_2(k)/b$ 为扰动补偿; u_1 为控制量; b 为补偿因子。

最优控制函数式(4)的快速收敛特性, 使其对大误差具有小增益, 对小误差具有大增益, 非常适合用于 CRH5 型动车组整流器这一非线性系统控制。然而, 我国电气化铁路具有高速列车负荷波动很大的特点, 用传统 ADRC 对多车网电气耦合系统的负载 CRH5 型动车组进行控制时, 分段的非线性组合会使电气量产生抖动, 这里提出一种连续、光滑的非线性函数 $\text{fen}(x, \alpha)$, 具体如式(6)所示。

$$\text{fen}(x, \alpha) = |x|^\alpha \cdot \frac{e^{x/2} - 1}{e^{x/2} + 1} \quad (6)$$

将该函数与已有的式(4)中 $\text{fal}(x, \alpha, d)$ 函数相比较, 两个函数随误差变量 x 的变化趋势如图 6 所示。

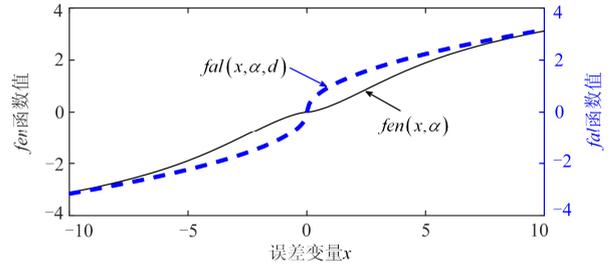


图 6 基于非线性组合的非线性函数性能比较图

Fig. 6 Performance comparison of nonlinear combinations based on nonlinear functions

根据图 6, 在同样扰动下, 非线性函数 $\text{fen}(x, \alpha)$ 反应不敏感, 抑制扰动能力强。当系统误差(即为控制参数 x)增大时, 非线性函数 $\text{fen}(x, \alpha)$ 仅有很小变化, 可有效降低控制饱和发生的概率。 $\text{fen}(x, \alpha)$ 函数既能保证在系统反馈误差 x 较小时对干扰的抑制能力, 又能在系统反馈误差 x 较大时表现出较强饱和性, 实质是对系统反馈误差 x 具有很强抑制能力。

3.2 基于 IADRC 的整流器控制模型

根据第 3.1 节, 基于 IADRC 结构对 CRH5 型动车整流器的电压控制器进行建模, 其最终数学表达式如下。

- 1) 跟踪微分器 TD 如式(1)所示。
- 2) 扩张状态观测器 ESO。

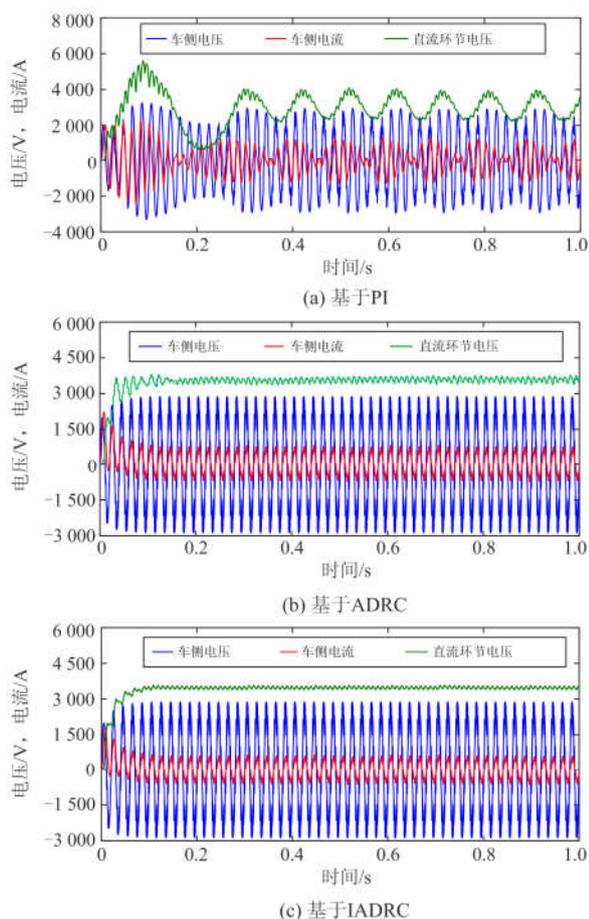


图 12 基于不同控制方法的 6 列 CRH5 动车组同时投入牵引网的车侧电气量波形

Fig. 12 Electrical waveforms of vehicle side for six CRH5 EMUs are connected into traction network simultaneously based on different control methods

由图 12(a)可知,当投入 6 列动车组时,网侧电压峰值在 34~42 kV 范围内有规律地低频振荡,该结果与文献[16]中 2010 年青岛动车组测试结果和文献[17]中低频振荡分析结果一致,该结果也再现了低频振荡现象,同时说明图 8 搭建模型接近实际。当投入 6 列动车组时,采用基于 ADRC 和 IADRC 控制的车侧电气量都未发生低频振荡现象,车端电压、车侧电流和直流环节电压均经历 1 个工频周期左右达到稳定,未发生车网低频振荡现象。该结果表明,相较于 PI 控制,ADRC 和 IADRC 能从整流器控制结构上抑制多车接入系统的低频振荡现象。然而,由图 12(b)和图 12(c)可知,和很平顺的基于 IADRC 控制的车侧电气量波形比较,基于传统 ADRC 波形还是有轻微扰动,尤其是整流器侧直流电压的波形产生了明显波动。这是因为在传统 ADRC 控制中的 $fal(x, \alpha, d)$ 函数是一个分段非线性组合函数,该非线

性函数在分段点处存在硬点,该硬点是导致系统随扰动或负荷变化较大的原因,因此 $fal(x, \alpha, d)$ 非线性函数并不完全适用于像电气化铁路这种负荷波动很大的场合。相反,本文改进的 IADRC 很好地避免了电气量波动,且完全抑制了系统车侧电气量低频振荡。

5 结论

针对多 CRH5 型动车组-牵引网电气耦合系统出现的车侧电气量低频振荡现象,提出了一种基于 IADRC 的非线性控制器,替代传统的线性 PI 控制器。搭建了多列 CRH5 型动车组接入牵引网的多车网耦合模型,并对比了基于 PI 控制、ADRC 控制和 IADRC 控制策略的防止系统抖动和抑制低频振荡的效果。最终得出如下结论:

1) 动车组网侧整流器是一个非线性、强耦合的时变参数系统,CRH5 车网系统随扰动或负荷变化较大,线性 PI 控制器难以达到控制要求并抑制低频振荡。

2) ADRC 控制器能够克服 PI 控制器的快速性和超调之间的矛盾,但存在控制抖动问题;IADRC 解决了传统 ADRC 控制技术非线性组合因存在硬点而使车网电气耦合系统对扰动敏感的问题,增强了对扰动的抑制能力,适用于像电气化铁路这种负荷波动很大的场合。

3) 基于 IADRC 电压控制器的 dq 解耦电流控制策略有效地抑制了多 CRH5 型动车组-牵引网电气耦合系统车侧电气量低频振荡现象。

参考文献

- [1] WANG Ying, LIU Zhigang, MU Xiuqing, et al. An extended Habedank's equation-based EMTP model of pantograph arcing considering PAC interactions and train speeds[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(3): 1186-1194.
- [2] 李宏强, 王晓茹, 徐家俊, 等. 车网耦合的牵引供电系统谐波仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 116-122.
LI Hongqiang, WANG Xiaoru, XU Jiajun, et al. Harmonic simulation analysis of traction power supply system based on train-network coupling system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 116-122.
- [3] 林飞, 连巧娜, 杨中平, 等. 交流传动电力机车车网电压低频振荡分析[J]. 铁道学报, 2016, 38(4): 32-38.
LIN Fei, LIAN Qiaona, YANG Zhongping, et al. Analysis of low frequency voltage oscillation between AC drive electric locomotive and power supply networks[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(4): 32-38.
- [4] 杨健维, 贾勇, 何正友, 等. 利用随机响应的低频振荡

- 模式估计方法比较分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 102-109.
- YANG Jianwei, JIA Yong, HE Zhengyou, et al. Comparison analysis for low-frequency oscillation mode estimation method using stochastic responses[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 102-109.
- [5] 李林, 宋宗勋, 李峰, 等. 抑制区域间低频振荡的UPFC模糊滑模控制器[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 104-109.
- LI Lin, SONG Zongxun, LI Feng, et al. UPFC fuzzy sliding mode controller for damping inter-area low frequency oscillation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 104-109.
- [6] 李志晗, 张英敏, 李兴源. 基于 H_∞ 回路成形法的VSC-HVDC附加鲁棒阻尼尼控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 124-130.
- LI Zhihan, ZHANG Yingmin, LI Xingyuan. Design of additional robust damping controller for VSC-HVDC based on H_∞ loop shaping[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 124-130.
- [7] 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.
- [8] WANG Dan, WANG Ying, LI Qiyao, et al. Low frequency voltage fluctuations in electrical vehicle-grid system based on Luenberger-observer's multivariable control[C] // 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), 2017, Beijing, China: 1-6.
- [9] 周毅, 胡海涛, 何正友, 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(9): 72-80.
- ZHOU Yi, HU Haitao, HE Zhengyou, et al. Analysis of low-frequency oscillation in train-traction network coupling system of electrified railway[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 72-80.
- [10] 冷月, 杨洪耕, 王智琦, 等. 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): 207-213.
- LENG Yue, YANG Honggeng, WANG Zhiqi, et al. A method of suppressing low-frequency oscillation in traction network based on two-degree-of-freedom model control[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 207-213.
- [11] 陶海东, 胡海涛, 姜晓锋, 等. 牵引供电低频网压振荡影响规律研究[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1830-1838.
- TAO Haidong, HU Haitao, JIANG Xiaofeng, et al. Research on low frequency voltage oscillation in traction power supply system and its affecting factors[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1830-1838.
- [12] LI Qiyao, WANG Ying, CHEN Xiaoqiang, et al. Study on low frequency voltage fluctuation considering different running-vehicle numbers in electrical railway[C] // 9th International Conference on Modelling, Identification and Control, 2017, Kunming, China: 752-757.
- [13] LIAN Qiaona, LIN Fei, SHI Wei, et al. Analysis of nonlinear oscillation of four-quadrant converter in high-speed railway based on discrete model[C] // 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 2016, Yokohama, Japan: 2124-2129.
- [14] WANG Hui, WU Mingli, SUN Juanjuan. Analysis of low-frequency oscillation in electric railways based on small-signal modeling of vehicle-grid system in dq frame[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2015, 30(9): 5318-5330.
- [15] 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.
- [16] 吴命利, 王晖. 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.
- [17] LIAO Yicheng, LIU Zhigang, ZHANG Guinan, 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.
- [18] 韩京清. 从 PID 技术到自抗扰控制技术[J]. 控制工程, 2002, 9(3): 13-18.
- [19] 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: 28-29.
- LIAO Yicheng. Research on low-frequency stability of high-speed railway system with multiple vehicles paralleled [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018: 28-29.
- [20] FARINI A, FUGA F, MANIGRASSO R, et al. The aims and the control structure of the Italian poly-current pendolino[C] // Proceedings of Power Electronics and Applications, 1993, Brighton, England: 109-116.
- [21] TOREID E. Active control of reactive power in a modern electrical rail vehicle[D]. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2011.

收稿日期: 2018-10-26; 修回日期: 2019-02-18

作者简介:

王英(1978—), 男, 通信作者, 博士, 硕导/副教授, 研究方向为电气化铁路弓网系统耦合稳定性和行车过电压抑制; E-mail: wyview@163.com

陈思彤(1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向为高速铁路多车网系统低频振荡抑制; E-mail: 2217726422@qq.com

王迎晨(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高速铁路多车网耦合系统谐波. E-mail: wyview@outlook.com

(编辑 魏小丽)