

一种抑制地铁列车牵引系统直流侧振荡的控制方法

李江红, 应 婷, 卿光明

(中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 为解决地铁列车牵引系统的直流侧振荡严重影响列车牵引性能的问题, 文章以列车牵引系统的直流侧为研究对象, 用可变功率负载等效牵引变流器和电机, 建立了直流侧的非线性二阶系统模型。在分析该系统的平衡工作点后, 用小信号分析法得到并分析了等效线性二阶系统, 指出负载功率的增大是导致系统不稳定的原因, 进而提出了状态反馈的控制方案, 并通过根轨迹分析给出了能充分保证直流电压稳定的反馈增益的调整方法。最后, 通过纯数字和半实物仿真验证了所提方法的正确性和有效性。

关键词: 地铁车辆; 牵引系统; 直流侧振荡; 状态反馈控制; 非线性二阶系统模型

中图分类号: U231; U264.91

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2018)01-0033-05

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2018.01.006

A DC-Link Oscillation Control Method for Subway Train Traction System

LI Jianghong, YING Ting, QING Guangming

(CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: When DC link voltage of metro traction system is oscillating, performance of the metro vehicle is seriously deteriorated. In order to solve this problem, DC link of the metro traction system was studied, and the converter and the motor were equivalent to a power-variable load of DC link, and a nonlinear second-order model was obtained. After discussing the possible equilibrium operating points of the DC Link, a second-order linear model of DC link was derived by small signal analysis. Based on the stability analysis of the second-order linear model, it pointed out that increasing the load power would lead to instability and proposed a state feedback control to stabilize the system. By analyzing the root locus of the control system, it deduced the rule of adjusting the state feedback gain which can fully guarantee the stability of DC link. Numerical simulation and HIL simulation proved the correctness and validity of the proposed control method.

Keywords: metro vehicle; traction system; DC link oscillation; state feedback control; nonlinear second-order model

0 引言

地铁牵引系统是地铁列车的核心装置, 其稳定性直接决定地铁运营的效能。地铁牵引系统大多由直流接触网供电, 其直流侧由滤波电抗器和支撑电容器组成, 而在某些情况下, 地铁牵引系统直流侧会出现电压持续振荡, 使得牵引电机转矩产生脉动, 损害齿轮箱并影响乘坐舒适性。牵引系统直流侧振荡严重时甚至会触发过电压、过电流保护, 导致牵引系统封锁脉冲, 完全丧失

牵引能力。因此, 如何有效解决牵引系统直流侧振荡问题、确保直流电压稳定已成为地铁交通的研究热点。

以 Siemens 公司为代表的国外地铁设备公司针对牵引系统直流侧振荡问题进行了研究, 其将由输入滤波器、牵引变流器和牵引电机等构成的牵引系统视为一个整体来分析, 提出了系统参数匹配与软件控制协同的解决方案^[1-5], 但该方案依赖于高性能的电机转矩控制策略, 不具有普遍适用性。文献 [6] 提出在牵引系统直流侧额定工作电压和额定工作电流工况下, 采用小信号分析法得到直流侧的线性化模型, 通过分析指出直流侧振荡是因其负阻抗特性降低了系统阻尼, 并提出一种通过

收稿日期: 2017-10-27

作者简介: 李江红 (1970-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 长期从事轨道车辆粘着控制、交流传动系统仿真与控制的研究工作。

滤波器提取直流电压谐振分量、基于电压振荡比修正给定牵引/制动转矩的直流侧振荡抑制方法,但该方法需要设计特殊的滤波器,工程实现过程相对复杂。文献[7]将牵引变流器等效为一个非线性函数,视牵引系统为一个整体进行研究,通过小信号分析法建立了在额定电压和额定电流工况下的牵引系统等效电路模型,分析了电路参数与系统稳定性的关系并给出了一种提升系统稳定性的新型控制器,但该方案需建立脉宽调制策略的近似线性模型,因此对于根据电机转速调整脉宽调制策略的牵引系统,其等效模型将是一个变结构或参数的时变系统,使得控制器的设计十分复杂。文献[8]通过对比牵引系统直流侧正常和振荡时的电流波形,建立了以电抗电流和电容电压为状态的非线性二阶系统方程,然后利用Lyapunov法分析了导致系统振荡的结构原因,但没有给出解决系统振荡的方法。

针对上述牵引系统直流侧振荡解决方案的不足,本文以牵引系统直流侧电路为研究对象,将牵引变流器和电机等效为牵引系统直流侧的可变功率负载,从而不需要对它们进行分析,也不需要考虑电机控制策略的影响;根据得到的牵引系统直流侧的非线性二阶系统模型分析了其平衡工作点,并在选定的平衡点处应用小信号分析法建立了其对应的线性二阶系统;基于该线性二阶系统的分析,认为负载功率的增大是导致系统不稳定的原因并采用状态反馈的控制方案,依此利用根轨迹分析法给出了能充分保证直流电压稳定的状态反馈增益的调整方法。最后,通过纯数字和半实物仿真分析,验证了所提方法的正确性和有效性。

1 牵引系统直流侧模型

地铁牵引系统直流侧电路如图(1)所示,其中 u_s 为直流接触网电压, L 为滤波电抗器的电感, C 为支撑电容, R 为线路电阻、滤波电抗器电阻和直流接触网内阻的总和。为便于分析,将变流器与电机端等效为一个电流源,其电流值 $i_d = \frac{P}{u_c}$,其中 i_s 、 u_c 和 P 分别为直流侧输入电流、直流侧电压和直流侧输出功率。

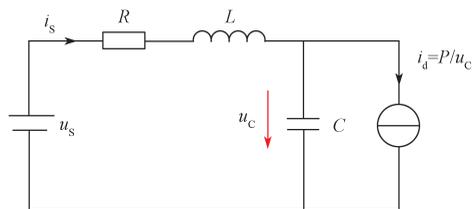


图1 地铁牵引系统直流侧电路

Fig. 1 DC-side circuit of metro drive system

由图(1)可知,供电系统中只含 L 和 C 两个储能器件。根据基尔霍夫定律,取电容电压与电感电流作为状

态变量,可得该二阶系统的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{i}_s = -\frac{R}{L}i_s - \frac{1}{L}u_c + \frac{1}{L}u_s \\ \dot{u}_c = \frac{1}{C}i_s - \frac{P}{Cu_c} \end{cases} \quad (1)$$

式中: \dot{i}_s ——直流侧输入电流的导数, $\dot{i}_s = \frac{di_s}{dt}$; \dot{u}_c ——支撑电容 C 两端电压的导数, $\dot{u}_c = \frac{du_c}{dt}$ 。

由式(1)可以看出, \dot{u}_c 不是 u_c 的线性函数,因此图1所示直流侧电路为非线性系统。为了应用线性系统理论对 u_c 进行控制并使其稳定,需在系统平衡工作点位置应用小信号分析法对系统进行线性化处理以得到线性系统。

2 平衡工作点分析

假定该直流侧电路平衡工作点位置的直流接触网电压、直流侧电压、电源电流和输出功率分别为 u_{s0} 、 u_{c0} 、 i_{s0} 和 P_0 。当系统处于平衡工作点时,其状态不随时间变化,故在平衡工作点由式(1)可得

$$\begin{cases} -\frac{R}{L}i_{s0} - \frac{1}{L}u_{c0} + \frac{1}{L}u_{s0} = 0 \\ \frac{1}{C}i_{s0} - \frac{P_0}{Cu_{c0}} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

整理后可得

$$\begin{cases} u_{c0} + R \times i_{s0} = u_{s0} \\ u_{c0} \times i_{s0} = P_0 \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知,在该直流侧电路中,不存在电压振荡的理想状态是 u_c 恒定为 u_{c0} 。当 u_s 恒定为 u_{s0} 时,由式(3)可知,输出功率 P_0 和 i_{s0} 可随外部负载的变化而变化,因此合理的 u_{c0} 取值非常重要。下面就 $P_0=0$ 和 $P_0 \neq 0$ 两种工况进行分析。

(1) $P_0=0$ 工况

当 $P_0=0$ 时,根据式(3)可知 $i_{s0}=0$ 。因 $u_{c0}+Ri_{s0}=u_{s0}$,则有 $u_{c0}=u_{s0}$ 。

因此当直流侧电路空载时,直流侧电压稳定值 u_{c0} 等于电源电压 u_{s0} ,与实际情况一致。

(2) $P_0 \neq 0$ 工况

当 $P_0 \neq 0$ 时,根据式(3)可知 $i_{s0} \neq 0$ 。由 $u_{c0}+Ri_{s0}=u_{s0}$ 可得 $|i_{s0}| = \frac{|u_{s0}-u_{c0}|}{R}$ 。由此可知,为了保证电流 i_{s0} 不超过线路容许最大电流并降低线路损耗 $i_{s0}^2 R$, u_{c0} 应尽量接近 u_{s0} 。

综上分析可知,直流侧电压稳定值 u_{c0} 应取为 u_{s0} 。由于直流侧电路空载时,直流侧电压自然恒为 u_{s0} ,因此只需分析在 $P_0 \neq 0$ 时直流侧电压的控制。

3 线性化系统模型

在平衡工作点时,应用小信号分析法对式(1)进行线性近似,可得

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{i}_s &= -\frac{R}{L} \Delta i_s - \frac{1}{L} \Delta u_c + \frac{1}{L} \Delta u_s \\ \Delta \dot{i}_c &= \frac{1}{C} \Delta i_s + \frac{P_o}{Cu_{co}^2} \Delta u_c - \frac{\Delta P}{Cu_{co}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: $\Delta i_s = i_s - i_{s0}$; $\Delta u_s = u_s - u_{s0}$; $\Delta u_c = u_c - u_{c0}$; $\Delta P = P - P_o$ 。

当 u_s 恒定时, $\Delta u_s = 0$, 可将式(4)变换为线性系统形式:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{i}_s \\ \Delta \dot{i}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & \frac{P_o}{Cu_{co}^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_s \\ \Delta u_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{Cu_{co}} \end{bmatrix} \Delta P \quad (5)$$

由式(5)可得该系统的特征多项式:

$$\left[\begin{array}{cc} s + \frac{R}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & s - \frac{P_o}{Cu_{co}^2} \end{array} \right] = s^2 + \left(\frac{R}{L} - \frac{P_o}{Cu_{co}^2} \right) s + \frac{1}{LC} - \frac{RP_o}{LCu_{co}^2} \quad (6)$$

根据二阶系统稳定的充要条件,即特征多项式的所有系数都大于0,可得:当且仅当 P_o 满足

$$P_o < \min \left(\frac{RCu_{co}^2}{L}, \frac{u_{co}^2}{R} \right) \text{ 时, 式(5)所示线性系统稳定。}$$

一旦 P_o 增大,使得 $P_o < \min \left(\frac{RCu_{co}^2}{L}, \frac{u_{co}^2}{R} \right)$ 不成立,则直

流侧电压将不稳定,因此为使任意输出功率 P_o 下直流侧电压 u_c 都稳定,须对式(5)所示线性系统进行控制。

4 控制系统设计

由式(5)所示线性系统可知,其输入信号为 ΔP , 因此若想控制 u_c 并使其趋于稳定值 u_{co} , 即 $\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta u_c = 0$, 须对信号 ΔP 进行调节。根据该系统的特点,可采用状态反馈来实现对信号 ΔP 的调节:

$$\Delta P = \begin{bmatrix} 0 & \frac{g}{u_{co}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_s \\ \Delta u_c \end{bmatrix} = \frac{g}{u_{co}} \Delta u_c \quad (7)$$

式中: g ——待定的增益。

采用根轨迹法来设计增益 g , 将式(7)代入式(5)后,可得闭环系统:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{i}_s \\ \Delta \dot{i}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & \frac{P_o - g}{Cu_{co}^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta i_s \\ \Delta u_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

其特征方程为

$$\left[\begin{array}{cc} s + \frac{R}{L} & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & s + \frac{g - P_o}{Cu_{co}^2} \end{array} \right] = \left(s + \frac{R}{L} \right) \left(s + \frac{g - P_o}{Cu_{co}^2} \right) + \frac{1}{LC} = s^2 + \frac{R}{L} s + \frac{1}{LC} + \frac{g - P_o}{Cu_{co}^2} \left(s + \frac{R}{L} \right) = 0 \quad (9)$$

为应用根轨迹法设计 g , 令 $k = g - P_o$ 并将其代入式(9)后,可得:

$$s^2 + \frac{R}{L} s + \frac{1}{LC} + \frac{k}{Cu_{co}^2} \left(s + \frac{R}{L} \right) = 0 \quad (10)$$

在保持闭环特征根不变的条件下,可得出系统根轨迹方程的标准形式:

$$1 + \frac{k}{Cu_{co}^2} \times \frac{s + \frac{R}{L}}{s^2 + \frac{R}{L} s + \frac{1}{LC}} = 0 \quad (11)$$

由线性系统的根轨迹分析法可知,当增益 k 从0变到无穷时(即增益 g 的变化),即可根据根轨迹方程绘出闭环系统极点的变化轨迹,从而判定系统的稳定性。

由式(11)可知,其等价开环系统为

$$G(s) = \frac{s + \frac{R}{L}}{s^2 + \frac{R}{L} s + \frac{1}{LC}} \quad (12)$$

由式(12)可以看出,系统只依赖于直流侧的电路参数,而与平衡工作点无关。由式(12)可知,其开环零点为

$$z = -\frac{R}{L} \quad (13)$$

因 R 、 C 和 L 值一般情况下都满足 $R^2 C < L$, 因此可得系统开环极点 $p_{1,2}$ 为

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2L} \left(R \pm j \sqrt{4L - R^2 C} \right) \quad (14)$$

根据式(13)和式(14)并利用根轨迹的特性,可得式(8)所示闭环系统在 k 变化时的根轨迹(图(2))。

可以看出, $p_{1,2}$ 为位于 s 左半平面的共轭极点。

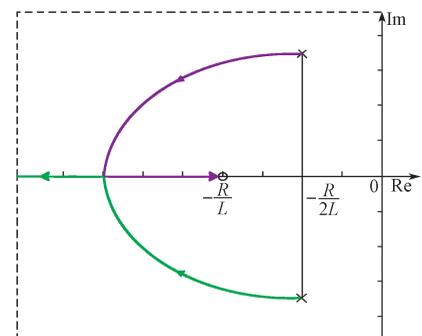


图2 闭环系统在 k 变化时的根轨迹
Fig. 2 Root locus of the system for varying k

由图2可知,只要 $k>0$ (即 $g>P_{\text{omax}}$, P_{omax} 是系统最大输出功率),控制系统就稳定。因此,在调节参数 g 时,可从初值 $g_0=P_{\text{omax}}$ 开始逐渐增加,直到直流电压的控制性能满足要求为止。另外,式(7)中 ΔP 信号可通过调节电机输出转矩来实现^[9]。

5 仿真验证

为验证上述理论的正确性,以某地铁牵引传动系统为例通过纯数字仿真和半实物仿真进行验证。

5.1 纯数字仿真

该地铁列车牵引系统主电路如图(3)所示,利用Matlab软件搭建仿真模型。其主要参数为:直流网

压为DC 1 500 V,滤波电抗器为5 mH,线路电阻阻值为25 m Ω ,滤波电容参数为8 mF,电机额定功率为4 \times 190 kW。仿真时采用定步长离散算法,采样步长为10 μ s。

根据线性系统的稳定性判断条件及系统参数,可知该系统的稳定功率为 $P_0 < \min\left(\frac{RCu_{\text{co}}^2}{L}, \frac{u_{\text{co}}^2}{R}\right) = \min\left(\frac{0.025 \times 0.008 \times 1500^2}{0.005}, \frac{1500^2}{0.025}\right) = 90$ (kW),远小于系统实际功率(4 \times 190 kW),因此可推测该系统为不稳定系统,将出现直流侧振荡。

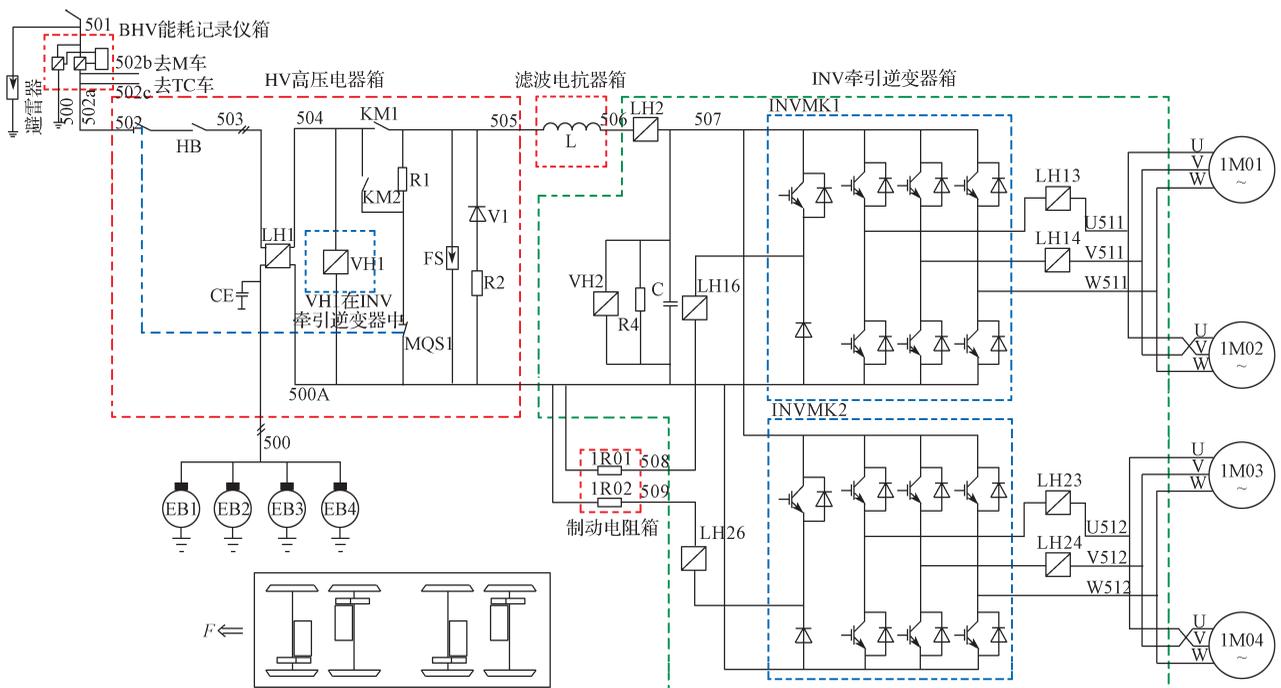


图3 某地铁列车牵引系统主电路结构
Fig.3 Main circuit structure of a metro drive system

未加入任何稳定控制方法时,系统的仿真波形如图(4)所示。可以看出,牵引系统直流侧发生了明显振荡,导致系统无法稳定运行,验证了本文所推导的牵引系统稳定性判断条件的正确性。

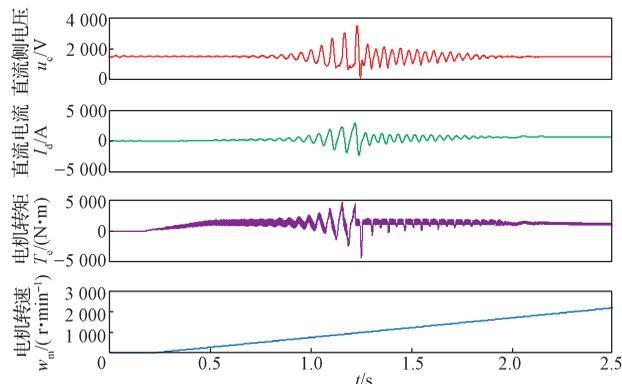


图4 未加入稳定控制方法时地铁牵引系统的仿真波形
Fig.4 Simulation results of the metro drive system without stability control

加入本文所提出稳定控制策略后,系统的仿真波形如图(5)所示。可以看出,本文所提稳定控制策略能有效抑制直流侧振荡现象,系统能稳定运行,系统直流侧电压、网侧电流以及电机转矩变化平稳。

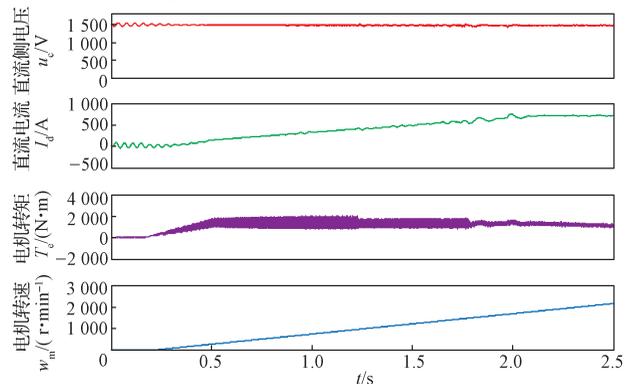


图5 加入振荡抑制策略的地铁牵引系统仿真波形
Fig.5 Simulation results of the metro drive system with stability control

5.2 半实物仿真

使用该地铁传动控制单元(DCU)实物作为控制器,结合 dSPACE 实时仿真器模拟地铁牵引系统主电路进一步验证上述理论。其中系统主电路拓扑及参数与纯数字仿真的参数一致。

未加入任何稳定控制方法时,系统的半实物仿真波形如图(6)所示。可以看出,电机运行到某转速时,牵引系统直流侧发生了明显振荡,其幅值超过控制器保护门槛,导致封锁脉冲,该趋势与纯数字仿真结果完全一致。

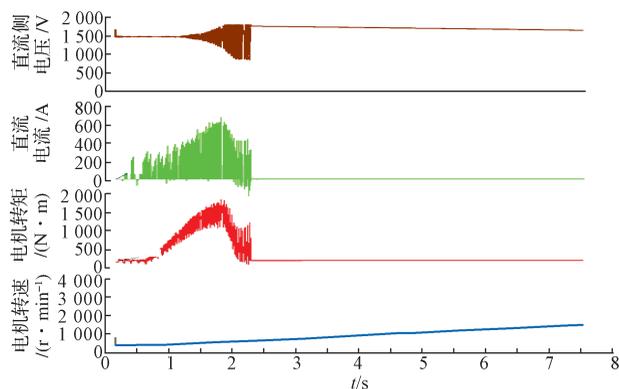


图6 未加入稳定控制方法时地铁牵引系统的半实物仿真波形

Fig. 6 HIL-simulation results of the metro drive system without stability control

加入本文所提稳定控制策略后,系统的半实物仿真波形如图(7)所示。可以看出,本文所提稳定控制策略能够有效的抑制直流供电的牵引系统直流侧振荡,保证了牵引系统的稳定性。

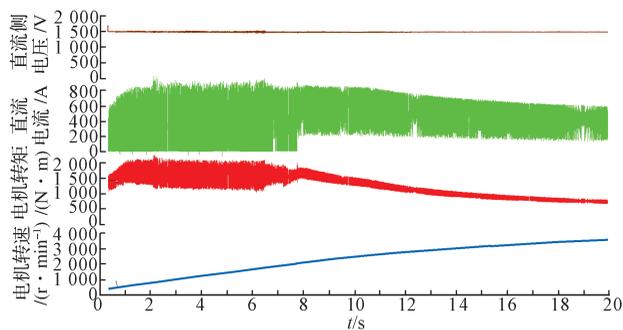


图7 加入稳定控制的地铁牵引系统半实物仿真波形

Fig. 7 HIL-simulation results of the metro drive system with stability control

6 结语

本文针对地铁列车牵引系统的直流侧振荡问题进行

分析,提出了状态反馈的控制方案;并通过纯数字和半实物仿真验证了该方法的正确性和有效性。本文所提控制方法简单、易行,同时该方法适用于所有因负载功率变化引起的直流侧振荡的控制,具有极强的工程实用性。为进一步提高地铁列车牵引系统的稳定性,后续还将开展系统最佳参数分析和多车运行时直流侧振荡研究工作。

参考文献:

- [1] LEE W J, SUL S K. DC-Link Voltage Stabilization for Reduced DC-Link Capacitor Inverter [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50 (1): 404-414.
- [2] MAGNE P, MARX D, NAHID-MOBARAKEH B, et al. Large-Signal Stabilization of a DC-Link Supplying a Constant Power Load Using a Virtual Capacitor: Impact on the Domain of Attraction [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48 (3): 878-887.
- [3] SUDHOFF S D, CORZINE K A, GLOVER S F, et al. DC link stabilized field oriented control of electric propulsion systems [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1998, 13 (1): 27-33.
- [4] MOSSKULL H, GALIC J, BO W. Stabilization of induction motor drives with poorlydamped input filters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54 (5): 2724-2734.
- [5] DELEMONTEY B, LUNG C, JACQOT B, et al. Nonlinear decoupling of an induction motor drive with input filter [C] // Proceedings of the IEEE Conference on Control Applications. USA: IEEE, 1995: 1004-1009.
- [6] 孙大南, 刘志刚, 林文立, 等. 地铁牵引变流器直流侧振荡抑制策略研究 [J]. 铁道学报, 2011, 33 (8): 52-57.
SUN D N, LIU Z G, LIN W L, et al. Research on DC-link oscillation suppression strategy in metro traction converter [J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33 (8): 52-57.
- [7] 赵雷廷, 刁利军, 董侃, 等. 地铁牵引变流器-电机系统稳定性控制 [J]. 电工技术学报, 2013, 28 (6): 101-107.
ZHAO L T, DIAO L J, DONG K, et al. Stabilization Control for Metro Traction Converter-Motor System [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28 (6): 101-107.
- [8] 王建民, 李夏青, 田行军. 地铁直流牵引供电系统振荡机理分析 [J]. 北京石油化工学院学报, 2014 (4): 58-64.
WANG J M, LI X Q, TIAN X J. An Analysis of Oscillation Mechanism for Metro DC Traction Power Supply System [J]. Journal of Beijing Institute of Petro-chemical Technology, 2014, 22 (4): 58-64.
- [9] 刘可安, 高首聪, 刘晨, 等. 地铁车辆交流传动系统主电路振荡抑制研究 [J]. 机车电传动, 2006 (3): 48-53.
LIU K A, GAO S C, LIU C, et al. Study on main circuit oscillation impression of AC drive system for metro vehicles [J]. Electric Drive for Locomotives, 2006 (3): 48-53.