

储能式无轨电车 DC/DC 非线性控制策略的研究

王俊然¹, 张昆仑¹, 黄庆², 徐绍龙²

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031;
2. 株洲中车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 在超级电容储能式无轨电车的充电控制系统中, 外部的扰动会使得控制系统的输出控制性能降低, 从而导致系统的噪声放大。为了增强控制系统的鲁棒性和自适应能力, 基于跟踪微分器提出了一种新型的非线性控制方法, 提高了超级电容储能式无轨电车的充电控制性能, 优化了系统的输出电流电压的控制曲线。针对控制参数变化和调节的问题, 加入 Ziegler-Nichols 的频域响应法(简称 ZN 法)来整定控制参数。通过仿真及试验分析, 验证了所提控制算法的有效性, 对于系统的输出控制性能有明显的提升, 解决了系统快速性和超调之间的矛盾, 从而实现了超级电容储能式无轨电车高效快速地充电。

关键词: 超级电容; Ziegler-Nichols 法; 跟踪微分器; 非线性控制

中图分类号: U482.2

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2018.01.018

Research on No-linear DC/DC Control Strategy for Energy Storage Trolley Bus

WANG Junran¹, ZHANG Kunlun¹, HUANG Qing², XU Shaolong²

(1. School of Electric Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 610031, China;

2. Zhuzhou CRRC Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: In charging control system of trolley bus, the output performance of the control system would be unstable caused by external turbulent, which results in the noise amplified. To enhance the robust and adaptive of control system, a new no-linear control method was proposed based on tracking differentiator to improve the charging control performance of ultra-capacitor trolley bus and optimize the curve of the output current and voltage of the system. Aiming at the problem of control parameter variety, a Ziegler-Nichols method was used to adjust the parameter. Simulation and test results completely proved that the proposed method was effective, which improved performance of the control system apparently, solved the contradiction between rapidity and overshoot, and realized quick and smooth charging for the super-capacitor energy storage trolley bus.

Keywords: super-capacitor; Ziegler-Nichols method; tracking differentiator; no-linear control

0 引言

超级电容储能式无轨电车 DC/DC 控制系统在传统 PID 调节过程中, 往往因为控制参数不准确而导致系统出现超调量过大, 纹波大的问题^[1]。在实际充电过程中, 由于储能式无轨电车受电弓与充电桩轨道接触不良,

导致系统电流波动、电压抖动较大, 时常发生充电过流故障, 同时由于输出电流谐波较大, 导致弓轨之间时常出现电流烧蚀现象^[2]。

就目前的研究状况, 有滑膜控制、神经网络控制以及人工经验 PID 参数控制等方式来解决 DC/DC 系统纹波大、超调量过大的问题。然而, 滑膜控制的参数非常难选择, 在实际充电过程中难以实现。神经网络控制对于控制参数的数据量有很高的要求, 产生的误差会比较大。人工 PID 参数控制则太依赖于操作人员

收稿日期: 2017-06-05; 修回日期: 2017-11-10

基金项目: 湖南省战略性新兴产业项目(2016GK4027); 湖南省科技计划项目(2016GK2060)

的经验, 矫正率不稳定^[3]。

本文提出一种储能式无轨电车 DC/DC 非线性控制方法, 利用非线性跟踪微分器 (Tracking differentiator, TD) 实现充电电流信号的微分提取, 跟踪给定的输出电流值, 避免了传统 PID 控制中微分环节的噪声放大。通过跟踪微分器可以在不连续或带随机噪声的电流值中合理提取连续的微分信号, 同时构建非线性控制器, 采用外环电压环和内环电流环的双闭环控制系统, 对储能式无轨电车超级电容进行充电控制。非线性微分跟踪器为给定充电电流信号安排过渡过程, 解决了系统初始化超调的问题; 同时, 引入 Z-N 频域响应参数整定控制的方法, 让控制系统的充电过程更加准确, 解决参数设置受外部扰动而导致控制输出不稳定的问题。其次, 通过跟踪微分器对输出电流值进行状态变量反馈, 以实现非线性误差反馈的自适应调节, 最后对负载突投突切导致的电流波动总扰动进行补偿, 以满足在不同时刻、不同工况下实现对超级电容充电的最优控制。

1 储能式无轨电车充电系统设计

储能式无轨电车充电变流器应用于无轨电车充电装置系统中, 每套充电装置系统包含有一套充电变流器, 主要完成将 10 kV 交流网侧电能快速转移到无轨电车载超级电容, 其系统电路图如图 1 所示。充电装置系统包括 10 kV 开关柜、变压器、充电变流器^[4]。

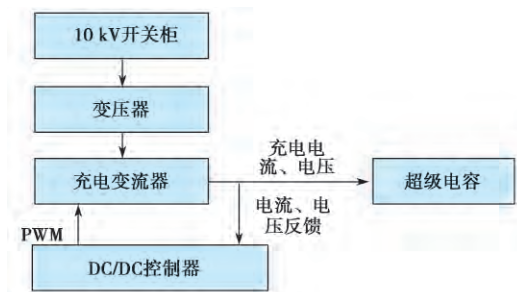


图 1 储能式无轨电车充电系统框图

充电变流器主要包括三相 PWM 整流模块、DC/DC 斩波模块、中间直流环节及输出滤波回路等, 变压器输出交流电源通过预充电回路、PWM 整流后建立中间直流电压, 再经过双向 DC/DC 斩波电路为无轨电车载超级电容充电^[5]。

2 充电电路控制模型

系统采用 DC/DC 的降压式控制电路, 如图 2 所示, C 为超级电容, U_{dc} 为直流母线电压, VQ 为 IGBT 模块, L 为平波电抗器, R 是电路的负载等效电阻。该电路中, 对 VQ1 进行 PWM 控制, 保持 VQ2 关断, 直流母线对超级电容进行降压充电, 实现能量的储存。控制器运行于降压模式时, 超级电容器储能阵列作为负载进行充电。由于超级电容采用的是多个个体超级电容串联的形式, 所以其内阻值很小, 可以忽略。设超级电容

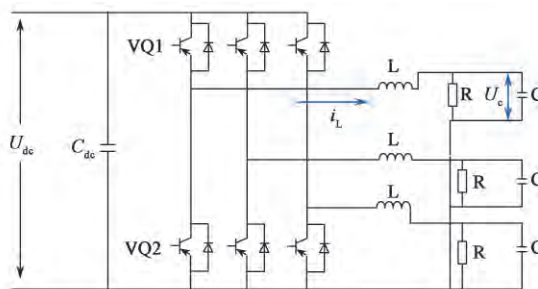


图 2 DC/DC 降压型 Buck 电路

器初始端电压为 $U_{sc}(t)$, 充电变流器输出电压为 $U_c(t)$, 选取电感电流 $i_L(t)$ 和超级电容储能阵列端电压 $U_c(t)$ 为状态变量, 开关管导通和关断时的状态微分方程:

导通时为:

$$u_{dc}(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} + U_c \quad (1)$$

$$i_L(t) = C \frac{dU_c(t)}{dt} + \frac{u_c}{R} \quad (2)$$

关断时为:

$$L \frac{di_L(t)}{dt} = -u_c(t) \quad (3)$$

$$i_L(t) = C \frac{dU_c(t)}{dt} + \frac{u_c}{R} \quad (4)$$

转化成矩阵形式为:

$$\begin{bmatrix} \frac{di_L(t)}{dt} \\ \frac{dU_c(t)}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_L \\ u_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix} U_{dc} \quad (5)$$

对以上的基本状态空间平均方程施加扰动信号得到小信号扰动方程, 对扰动方程化简后进行拉氏变换并求解, 可得动态小信号传递函数^[6]为

$$G_{vd}(s) = \frac{\dot{u}_c(s)}{d(s)} = \frac{U_{dc}}{LCs^2 + \frac{L}{R}s + 1} \quad (6)$$

3 参数整定

在得出系统的传递函数以后, 针对改进系统的电压环控制参数, 本文加入了 Z-N 频域响应的参数整定法, 进一步对控制参数进行优化。

Z-N 频域响应法的核心内容是在 Z-N 经验公式法的基础上, 根据被控系统的传递函数来精确输入电压环的 K_p 、 K_i 等控制参数, 这样可以有效地得到 PI 控制量, 减小系统的误差^[7]。

由已知的传递函数 $G(s)$ 进一步求出系统的根轨迹方程和闭环增益。在根轨迹图形上找到对应穿越 $j\omega$ 轴的点, 也就是增益 K_m , 而此点对应的 ω 值即为 ω_m , 通过 Z-N 整定经验和实际操作过程得出的整定公式为

$$K_p = 0.6K_m, K_i = \frac{K_p \omega_m}{\pi} \quad (7)$$

可以计算出输出的控制参数为

$$Y = k_p \left[\left| I_{e1} / k_i \right|^{\alpha} \operatorname{sig}(I_{e1}) + \left| I_{e2} \right|^{\alpha} \operatorname{sig}(I_{e2}) + \left| I_{e3} / k_d \right|^{\alpha} \operatorname{sig}(I_{e3}) \right]$$

(18)

将输出 Y 作为 PWM 调节控制量, 以实现自适应闭环控制, 完成系统的充电过程。

5 仿真以及试验结果

5.1 仿真结果分析

为验证非线性 DC/DC 控制的方法可以更好地提升整个系统电路给超级电容充电的准确性, 本文利用 Matlab/Simulink 对控制系统进行了数字仿真。

超级电容的内阻为 $r=50\text{ m}\Omega$, 电感 $L=2\text{ mH}$, 超级电容的容值为 $C=41\text{ F}$, 输入电源电压为 $U_i=700\text{ V}$ 。以储能式无轨电车 DC/DC 系统各参数指标为例, 推算出该系统的传递函数, 然后运用 Ziegler-Nichols 的频域响应分析法, 对传递函数进行分析, 求出传递函数的根轨迹。由根轨迹求得控制参数 $K_m=18.91$ 和穿越频率 $\omega_m=0.27\text{ rad/s}$, 再由式 (7) 可以求出 $K_p=8.4$, $K_i=0.74$ 。将上面比例和积分参数作为参数整定之后的优化参数值, 代入电压控制环中。同时, 按照充电电流为 250 A 的标准, 取 $r_1=1\ 300$, $r_2=2\ 000$, $K_p=0.5$, $K_i=0.1$, $\alpha=1$, $\delta=0.05$, 将这些参数代入非线性跟踪微分器进行仿真试验, 得出的仿真结果波形如图 5~图 8 所示。

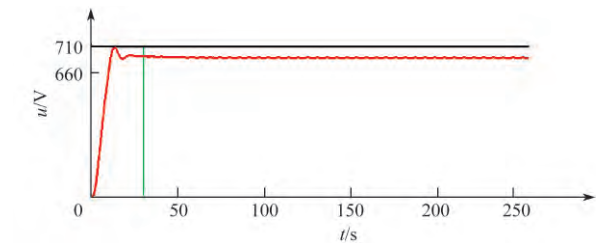


图 5 传统 PID 控制下的电压曲线

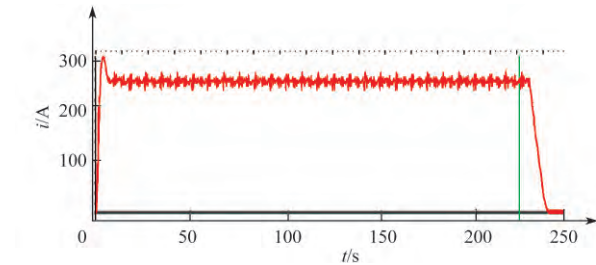


图 6 传统 PID 控制电流仿真波形图

图 5、图 6 中, 采用传统 PID 控制给超级电容充电过程中, 输出电压超调至 720 V , 同时, 充电电流也超调至 300 A , 系统纹波也较大。图 7、图 8 中, 采用非线性 DC/DC 控制给超级电容充电过程中, 输出电压和充电电流的超调量减小明显, 系统充电更加稳定。仿真结果表明, 非线性微分跟踪器控制方法使得系统纹波和超调量明显减少, 保证了电压稳定输出, 实现了电流的自适应调节功能, 优化了控制系统的充电波形。

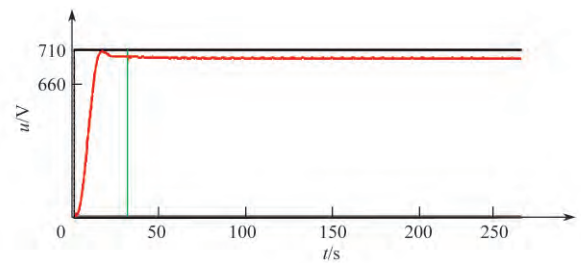


图 7 非线性控制系统的电压曲线

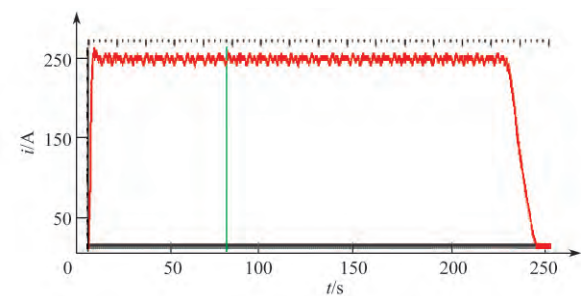


图 8 非线性控制电流仿真波形图

5.2 试验结果分析

为验证 DC/DC 控制性能提升, 针对现场的超级电容储能式无轨电车, 采用了新型的非线性控制策略。在实际操作中, 母线输入电压 $U_i=900\text{ V}$, 非线性控制参数设为 $r_1=1300$, $r_2=2000$, $K_p=0.5$, $K_i=0.1$, $\alpha=1$, $\delta=0.05$, 结果如图 9~图 10 所示。图 9 中, 采用传统 PID 控制的充电过程中, 由于受到扰动, 控制参数调节自适应能力较弱, 充电电流超调量大, 从而导致输出电压纹波较大。图 10 中, 在非线形控制系统的充电过程中, 充电电流按照设定要求从 0 A 升至 300 A 后,

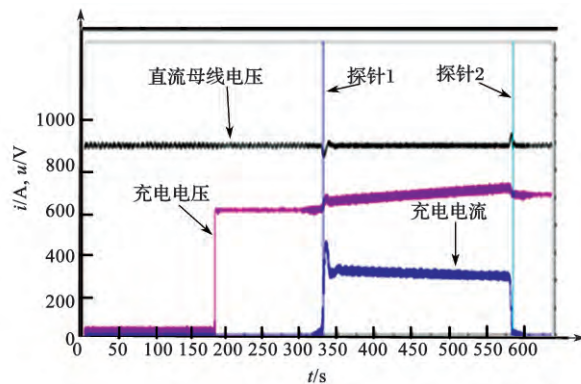


图 9 传统 PID 控制系统的试验波形图

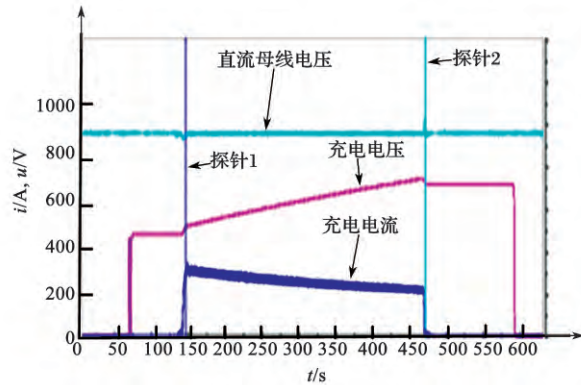
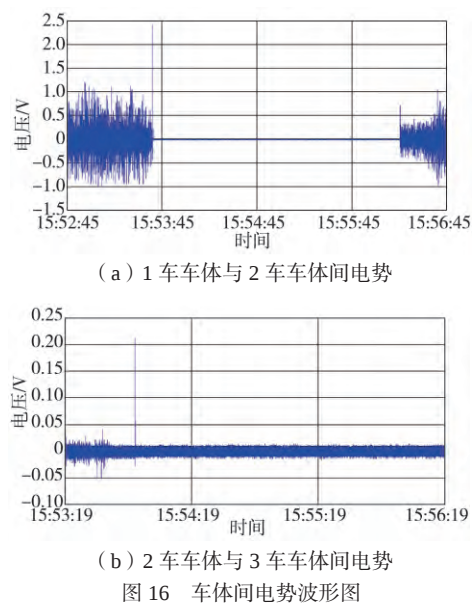


图 10 非线性控制系统的试验波形图

(下转第 93 页)



从以上数据可以看出,在动车组运行过程中,在接触网电压正常的情况下,动车组车体对轴端和车体之间的电势差基本维持在较小的范围内,最大冲击电压不超过 4 V,有效避免了由于轨道及车体阻抗异常而产生的较高电势对轴端传感器等设备造成的电压冲击;各轴端保护接地电流最大幅值基本小于 20 A,个别冲击超过 100 A 是由于列车的运行状态以及轨道线路状态造成的;3 车 2 个工作接地电流比较均衡,而 2 车 2 个工作接地电流出现了不均衡现象,经后续测试发现,

这与列车的运行方向和轨道阻抗有关。动态测试试验结果充分验证了接地技术方案的可行性和合理性。

4 结语

本文从某型城际动车组接地技术方案的合理性入手,通过搭建动车组阻抗和供电网的数学模型,模拟动车组的运行工况,利用仿真计算的手段最终确定了该型城际动车组的接地技术方案。通过最终的样车动态测试试验验证,充分证明了该接地技术方案的可行性与合理性,同时也证明了该仿真计算方法的有效性,可为其他新型动车组接地技术方案的设计提供参考。

参考文献:

[1] 杜会谦,宋立群.CRH380B(TX)动车组保护接地技术方案设计[J].铁道机车车辆,2014,34(4):52-54.

[2] 相阿峰,郭秀违.高速动车组牵引电机轴承电蚀及对策[J].铁道机车车辆,2015,35(2):102-106.

[3] 孙菁睿,刘晓悦,尹方,等.动车组接地系统[J].自动化应用,2015(5):112-113.

[4] 李石.动车组保护接地技术方案研究[D].北京:北京交通大学,2013:6.

作者简介:陈乐恒(1982-),男,硕士,高级工程师,主要从事轨道交通车辆的研发设计。

(上接第 83 页) 平稳下降至 250 A 左右给超级电容充电,使得输出电压从 500 V 逐渐稳定地升至 700 V,电流超调量及电压纹波得到明显改善,系统的充电曲线也达到理想充电要求。试验验证了系统的输出控制性能有显著的提升。

6 结语

本文针对储能式无轨电车充电控制的问题,提出了 DC/DC 非线性控制方案,通过跟踪微分器构建非线性电流闭环控制方法,采用电压电流双闭环控制结构对储能式无轨电车超级电容进行充电控制,解决了系统充电过程中超调与快速性的问题,有效抑制了弓轨之间电流烧蚀现象发生。对电压环参数整定,系统的充电过程更精准,解决了外部扰动而导致控制输出不稳定的问题,实现了系统在不同时刻和不同工况下对超级电容充电的最优控制。

参考文献:

[1] 张方华,朱成花,严仰光.双向 DC-DC 变换器的控制模型[J].

中国电机工程学报,2005,25(11):46-49.

[2] 蔡国营,王亚军,谢晶,等.超级电容器储能特性研究[J].电源世界,2009(1):33-38.

[3] Chen Jiunn-Jiang, Chin Kan-Ping. Automatic flux-weakening control of permanent magnet synchronous motors using a reduced-order controller[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(5): 881-890.

[4] 陈爱军,范丽冰,周安德.基于超级电容的内燃动车组动力包启动方案[J].机车电传动,2016(6):27-29.

[5] 王俭朴,任成龙.考虑电流约束的轨道车辆车载超级电容优化配置[J].机车电传动,2016(6):92-94.

[6] 韩京清.自抗扰控制技术—估计补偿不确定因素的控制技术[M].北京:国防工业出版社,2008.

[7] 朱业鹏.PID 控制器的参数整定及其稳定域研究[D].南京:南京理工大学,2007:15-18.

[8] 黄庆,黄守道,李孟秋,等.基于变结构自抗扰的永磁电动机速度控制系统[J].电工技术学报,2015,30(20):31-39.

作者简介:王俊然(1992-),男,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动。