

基于变流器的能量回馈装置设计实现

李乃坚

南京轨道交通系统工程有限公司, 江苏 南京 210019

[摘要] 为了对城轨列车再生制动能量回馈系统的功能及系统可靠性进行验证, 阐述了能馈变流器数学模型、双闭环控制策略及 SVPWM 调制模式, 进行仿真及现场带车试验。仿真及试验结果表明: 该方案能够很好地稳定直流母线电压, 保证车辆的安全运行, 能可靠、稳定地实现制动能量回馈功能, 为车辆运行提供充足的能量, 回馈的交流电能质量良好。

[关键词] 城轨列车; 再生制动; 能量回馈; SVPWM; 变流器

DOI: 10.33142/sca.v2i7.1126

中图分类号: U231.8

文献标识码: A

Design and Implementation of Energy Feedback Device Based on Converter

LI Naijian

Nanjing Rail Transit System Engineering Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210019, China

Abstract: In order to verify the function and system reliability of the urban rail train regenerative braking energy feedback system, the mathematical model of the energy-feeding converter, the double closed-loop control strategy and the SVPWM modulation mode are expounded, and the simulation and on-site driving test are carried out. The simulation and test results show that the scheme can stabilize the DC bus voltage well, ensure the safe operation of the vehicle, reliably and stably realize the braking energy feedback function, provide sufficient energy for the vehicle operation, and the feedback AC power quality is good.

Keywords: urban rail vehicle; regenerative braking; energy feedback; SVPWM; converter

引言

现如今, 国内的城规车辆内部所设置的制动装置, 大多数都是电制动, 并且会借助机械制动加以辅助。在整个电制动系统中, 利用电机以及小规模的变流器装置能够将电能变换为直流。当下, 国内大多数的线路车辆的能源消耗都集中制动电阻上面, 这样就会产生大量的资源浪费, 不利于国家的稳定健康发展, 并且在车辆行驶到隧道和车站的时候会导致环境温度的提升, 会对环境造成一定的损害。车辆的再生制动能量反馈系统可以将列车电动制动的过程中所形成的剩余电能回流到交流电网内, 来保证直流主体线路内的电压的稳定, 为车辆的正常运行提供充足的能源。

1 再生制动能量回馈系统及控制策略

1.1 能馈变流器数学模型

城轨列车再生制动能量反应装置的关键结构是大功率变流装置, 也就是能馈变流器, 其是连通牵引变电所的直流主体线路以及交流线路的部件, 其也是维持列车正常运行的主要结构部件, 其作用可以说是非常关键的, 整个拓扑结构如图 1 所示。

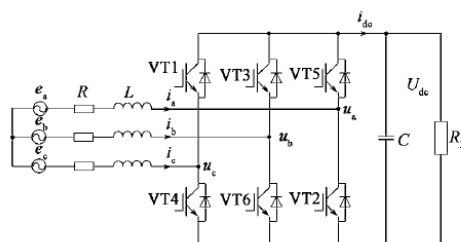


图 1 能馈变流器的拓扑结构

由基尔霍夫电压定律可以建立变流器在三相静止坐标系 (a, b, c) 下的各相电路电压方程为:

$$\left. \begin{aligned} U_a &= Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a \\ U_b &= Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b \\ U_c &= Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

将三相电压型 PWM 变流器的表达式转换到同步旋转坐标系 (d、q) 下可得

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L \frac{di_d}{dt} + R & -\omega L \\ \omega L & L \frac{di_q}{dt} + R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\frac{3}{2}(U_d i_d + U_q i_q) = U_{dc} i_{dc} \quad (3)$$

1.2 能馈变流器控制策略

城轨列车再生制动能量回馈系统控制上采用的是经典的电压外环、电流内环的双环控制策略，并基于同步旋转坐标系的 dq 变换，实现有功电流、无功电流的独立控制，为保证系统正常运行创造良好的基础。对三相交流对称系统，若只考虑交流基波分量，而对其他相关各项参数不能加以综合分析，则稳态时 dq 坐标系分量均为直流变量，设 d 轴与电网电动势矢量重合，则 d 轴表示有功分量，q 轴表示无功分量。系统控制框图如图 2。

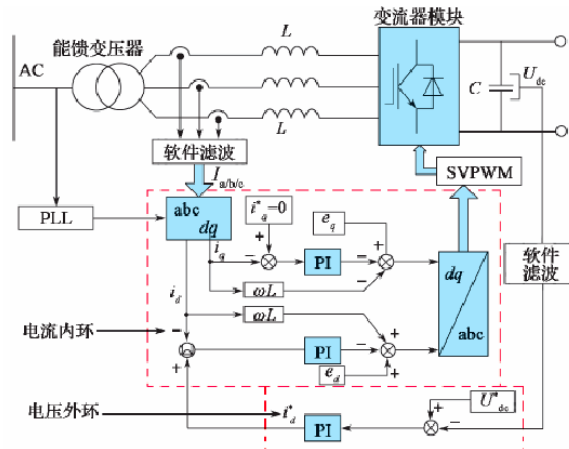


图 2 再生制动能量回馈系统控制框图

SVPWM 的优点如下：(1) 在所有的小区间内尽管会出现反复的开关操作，但是一次开关操作只会牵涉到一个结构部件，所以需要的能量非常少，并且实际使用的效果较为良好。(2) 借助电压空间矢量会形成一个三线 PWM 波，为计算工序提供便利，并且能够为后续的各项工作的实施创造良好的基础，有效的提升工作的效率和质量。(3) 逆变器能源传递线路电压基波的最高参数是直流侧电压，相对普通的 SPWM 逆变设备的输出电压要高出大约百分之二十，并且电压具有良好的稳定性。因此为了更好的实现逆变功能，控制信号精确性，保证信息传递的稳定性，选择了 SVPWM 模块生成脉冲信号，促进信号传递的稳定性提升。采取前馈解耦控制策略得到的电流内环控制方程为

$$\begin{cases} U_d = -\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(i_d^* - i_d) + \omega L i_q + e_d \\ U_q = -\left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)(i_q^* - i_q) - \omega L i_d + e_q \end{cases} \quad (4)$$

式中：Kp 和 Ki 分别为电流环比例系数和积分系数；i*d、i*q 分别为 d、q 两轴电网侧电流给定值。式 (4) 代入式 (2) 得

$$\begin{bmatrix} \frac{di_d}{dt} \\ \frac{di_q}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\left[R - \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)\right]/L & 0 \\ 0 & -\left[R - \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right)\right]/L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \left(K_p + \frac{K_i}{s}\right) \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} \quad (5)$$

式 (5) 说明前馈控制算法使电流内环实现了解耦控制。直流电压外环控制方程为

$$i_d^* = \left(K_{Up} + \frac{K_{Ui}}{s}\right)(U^* - U) - \frac{e_q i_q}{e_d} \quad (6)$$

设 $e_q=0$ ，系统的控制框图如图 3 所示。

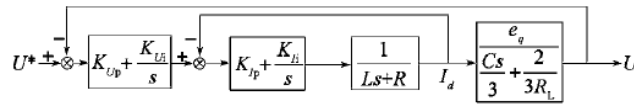


图 3 系统控制框图

当 2 个变流器并联运行时，采用共用电压外环控制器、电流内环独立控制的控制方案，对整个系统运行进行切实的监控，电流内环给定值二等分后再输入给各自的电流控制器，之后可以完成后续流程，如图 4 所示。

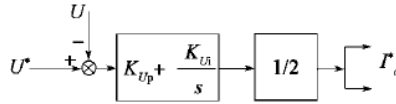


图 4 电压外环控制示意图

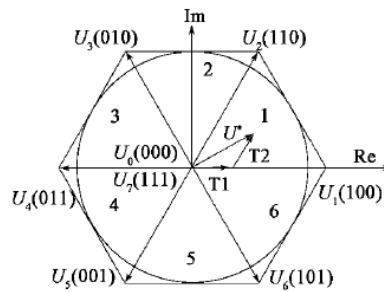


图 5 电压空间矢量位置及开关状态示意图

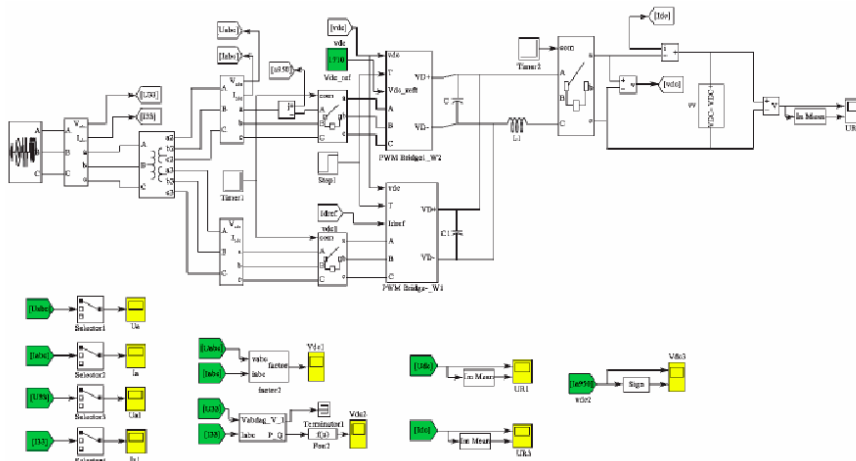
六个非零电压参数的幅度参数都是相同的，并且角度差参与也是一致的，可以将整个平面结构划分为六个相同面积的扇形结构，每个扇形的各项参数、指标都是相同的。如图 5 所示。在一个完整的脉冲周期内，促使变流器获得的电压的平均参与达到标准的水平，促使空间电压矢量轨迹能够形成一个圆形，详细的将电压空间矢量直观的呈现出来。

$$\frac{1}{T} \int_{nT}^{(n+1)T} U^*(t) dt = \frac{1}{T} (T_1 U_x + T_2 U_{x \pm 60}) \quad (7)$$

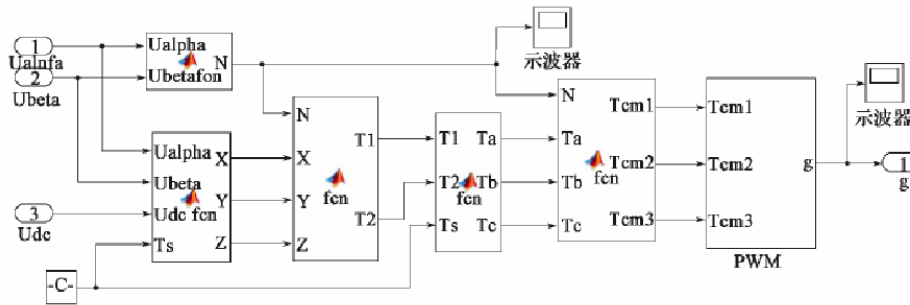
式中：T1、T2 分别为作用在基本空间矢量 U_x 、 $U_x \pm 60$ 的时间。

2 仿真结果

为了验证本文提出的城轨列车再生制动能量回馈系统及其控制策略的正确性，这篇文章在既定的环境下，来构建仿真模型结构，各项参数都保持在标准水平状态，仿真时长为 2s。列车制动时，直流侧负载特性可以看成电源或功率源，因此仿真用一个可控电源来模拟列车制动产生的能量，仿真模型如图 6(a) 所示，仿真结果如图 6(b) 所示。



(a) 仿真模型



(b) SVPWM 模块仿真模型
图 6 仿真模型

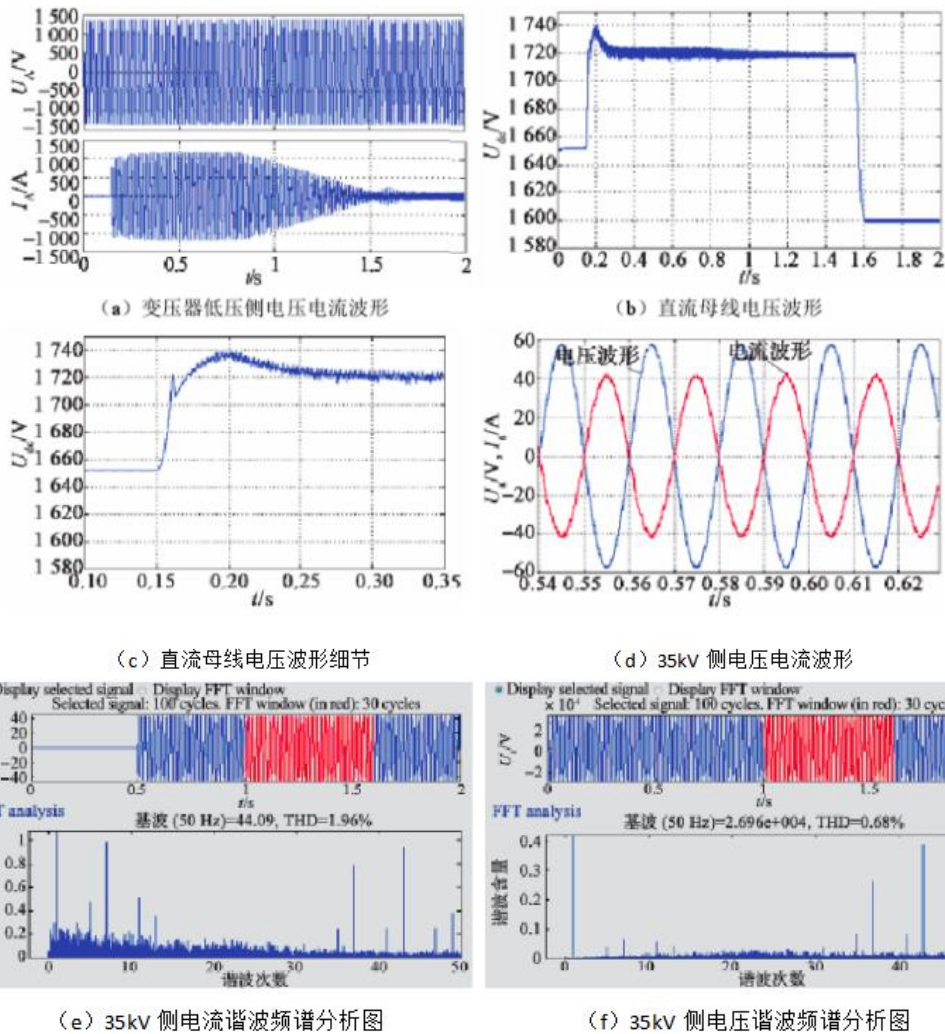


图 7 仿真结果波形

图 7 (a) 为能馈变压器低压侧单个能量回馈周期的电压电流波形，在图中我们可以看出，反馈电流在整个车辆的制动系统回馈反应之前可以保持在稳定的峰值状态，在回馈功率逐渐削弱之后，也会导致电流逐渐的缩减，城轨列车再生制动能量回馈设备暂停运行之后，回馈电流会下降到零的状态。图 7 (b)、图 7 (c) 是变流器输出电压所表现的波形。从图中可以发现，主体线路电压在 0.15s 之后逐渐开始提升，并在短时间内达到了城轨列车再生制动能量回馈系统启动电压基本参数标准，效率较好。在能馈系统的影响下，直流主体线路电压会在短时间内保持在稳定的状态，稳定状态的直流母线电压会保持在既定的范围之内，如果出现列车制动回馈功率逐渐的缩减的情况的时候，直流母线

的电压还可以保持在稳定的状态。这就充分的说明了，列车制动过程中，城轨列车再生能量回馈系统的实质作用就是在既定的范围内来保证直流母线内电压维持在稳定的状态，保证系统各项指标达到规范的标准范围，对列车的运行加以保护，为列车的正常运行提供足够的能源。

3 试验结果

本文提出的城轨列车再生制动能量回馈系统在福州地铁 2 号线进行了现场带车挂网运行，福州地铁交流网网压为 35kV，采用 DC1500V 制式，车辆为 6 节四动两拖编组 B 型，借助单车反复运行的形式来实施数据的测量，前后车辆发车间隔需要保持规定的时间，并且要由专人针对列车运行状况实施切实的监督，避免出现列车追尾等严重的不良后果。图 8 是现场运行的过程中测量获得的数据波形图，图 8 (a) 为再生制动能量回馈系统正常运转瞬时功率波动图，借助专业的仪器设备来对短时的功率波形图进行收集，并对所有收集到的信息进行综合分析研究，测量参数需要借助 CT 变比 75 换算成既定的短时有功功率，并针对性的进行电压的判断。图 8 显示的是最近九次列车运行中制动系统能量回馈过程中出现的电压情况，可以发现列车制动回馈过程中所需要的时间较短，运行效率较高，短时回馈功率较大的特征，每次列车制动回馈到交流网的平均能源都会保持在固定的范围之内，在图 8 (b) 中我们可以发现，每次列车的制动能量回馈持续时间都是二十秒，短时功率极限会达到既定的标准，各项参与也会随之进行调整。在城轨列车再生制动能量回馈系统中，直流主体线路电压可以保持在较为固定的状态，通常为 1720V，并且相关各项参数也会在稳定电压的影响下，保持在相对较为稳定的状态。

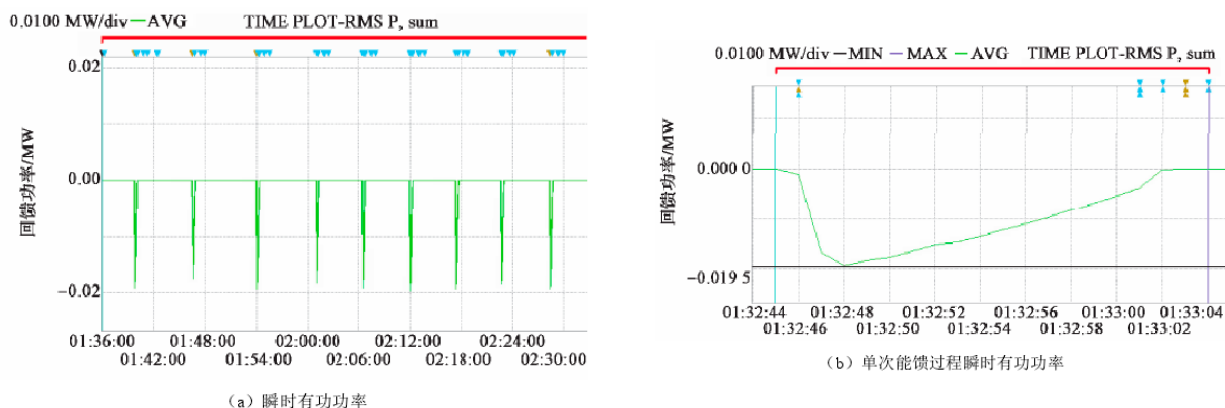


图 8 试验结果波形

4 结束语

这篇文章主要围绕能馈变流设备的结构模型以及控制系统展开分析，利用模仿或者是实验的方式，来对城轨列车再生制动系统的能量反馈情况进行检验，最终的实验结果是，再生制动能量回馈系统在整个列车制动装置中可以有效的对主体线路的电压加以保护，保证列车能够稳定的运行，确保能量充足的供给，并且网侧电流运行稳定，功率系数较高，可以保证能量回馈功能以及回馈到至交流电网的能量达到非常稳定的状态。

[参考文献]

- [1]陈梦阳,何紫薇,池佳豪,胡安正.用于能量回馈装置的变流器设计与实现[J].电子制作,2019(10):9-10.
 - [2]张碧,赵毅君,李谟发.新型兆瓦级直驱风电双变流器—能量回馈式试验系统研究[J].湖南工程学院学报(自然科学版),2017,27(04):6-9.
 - [3]金辉,李鲲鹏,易韵岚.城轨列车再生制动能量回馈系统研究[J].机车电传动,2015(04):64-67.
- 作者简介:李乃坚(1984-),铁道电气化工程师。