

城轨供电系统新型再生制动能量回馈系统

张铁军, 陈 雪, 陈广赞, 林 丽

(株洲变流技术国家工程研究中心有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘 要: 再生制动是城轨交通系统中的关键技术之一, 但其应用的同时也带来了诸如能源浪费、隧道温度升高以及接触网电压波动等许多问题。文章针对这些问题, 提出一种基于多重化四象限变流器的新的解决方案, 它能与电网以及现有牵引整流机组有较好的兼容性。通过仿真和样机试验, 证明了该系统的有效性。

关键词: 再生制动; 城市轨道交通; 多重化四象限变流器

中图分类号: U231.8

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2011)05-0037-04

A Novel Regeneration Braking Power Feedback Set for MRT Power System

ZHANG Tie-jun, CHEN Xue, CHEN Guang-zan, LIN Li

(Zhuzhou National Engineering Research Center of Converters Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: Regeneration braking is one of the key technologies of Mass Rapid Transit system(MRT), but the application brings a large amount of problems, such as energy waste, temperature rising and catenary voltage swing. Therefore, a new approach is developed to solve the above issues based on multiple 4-quarter PWM converter, which can be compatible with the power grid and the existing traction rectifier sets. Through the simulation and the prototype implementation, the result proves the effectiveness of the proposed system.

Key words: regeneration braking; mass rapid transit; multiple 4-quarter PWM converter

0 引言

城轨交通供电系统一直采用二极管整流技术实现交流电源到直流牵引电源的转换, 特别是采取24脉波整流技术后, 与电网的谐波兼容问题得到较好地解决。该技术虽然可以较好地满足车辆牵引取流的需求, 但是此类系统存在以下问题: (1) 只能实现能量的单向流动, 车辆制动时产生的大量多余再生能量仅有一部分被同网临近加速车辆吸收, 大部分通过车载的或地面的制动电阻以发热的形式消耗, 对于频繁后/制动的城轨车辆, 无疑造成极大的能源浪费; (2) 由于制动电阻的发热引发站台和地下隧道热量积累、温度上升, 某些城轨系统隧道温度高达50℃, 不得不加大通风设备的容量, 造成严重的二次能耗; (3) 对于车载制动电阻模式,

制动电阻增加车体自重造成的电能消耗十分可观; (4) 牵引网上同时在线运行的车辆有十几对甚至几十对, 负荷的变化造成牵引网压波动严重, 不利于车辆平稳、可靠运行。目前, 在我国大力提倡节能降耗的形势下, 城轨供电系统的发展进度已滞后列车车辆技术的发展, 多个待建的城市轨道线路, 如无锡、苏州、长沙、西安、深圳和广州等多条线路, 都提出了对现有牵引供电系统进行技术改造的需求。

1 解决方案

针对上述问题, 本文采用如图1所示的方案加以解决。虚线框中的部分即所提出的再生制动能量回馈系统, 从主接线上看, 该系统与牵引供电支路并列布置在交流中压电网和直流牵引母线之间。系统包含1台多重化变压器以及多个四象限PWM变流器模块, 整套装置与传统的二极管整流机组并列布置。系统的多重化变

收稿日期: 2011-07-29

作者简介: 张铁军(1981-), 男, 工程师, 现从事电力电子变流器研究开发工作。

压器一次侧通过高压开关柜 QF_{ac} 与交流中压电网相连,其低压侧每套绕组都与一个四象限变流器模块交流侧相连,四象限变流器直流侧则并联在一起后通过直流开关柜 QF_{dc} 和负极柜 QC_{dc} 与直流牵引母线相连。

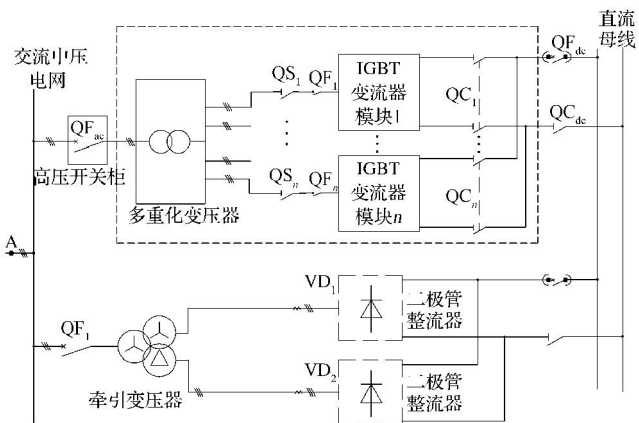


图1 城轨供电系统再生制动能量回馈系统
Fig.1 Regenerative energy feedback system for MRT power system

2 工作原理

2.1 数学模型

系统最基本的拓扑结构是四象限PWM变流器,每重变流器的基本拓扑如图2所示。

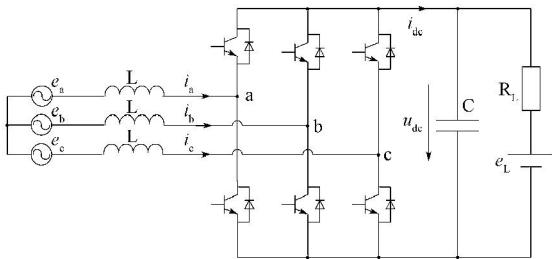


图2 三相半桥式PWM变流器拓扑图
Fig.2 Three-phase half-bridge PWM converter topology

对于上述拓扑结构,基于同步旋转坐标系的 dq 数学模型为:

$$\left. \begin{aligned} L \frac{di_d}{dt} + Ri_d - \omega Li_q &= e_d - v_d \\ L \frac{di_q}{dt} + Ri_q - \omega Li_d &= -v_q \\ C u_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} + \frac{u_{dc}^2}{R_{dc}} &= \frac{3}{2} (v_d i_d + v_q i_q) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: i_d, i_q ——同步旋转坐标系下网侧电流; e_d, e_q ——同步旋转坐标系下电网电压; V_d, V_q ——同步旋转坐标系下整流器网侧电压; u_{dc} ——直流侧电压。

单重变流器控制采用的是经典的双闭环PWM四象限变流器控制策略,电流内环、电压外环控制技术。由式(1)可以得知,整流器 d 轴和 q 轴存在耦合分量 ωLi_q

和 ωLi_d ,给控制系统的设计带来不便。若把这两个耦合分量视为两个电流控制的受控电压源,那么适当的调节控制量 V_d 和 V_q 便可实现系统的解耦。系统的控制框图如图3所示。

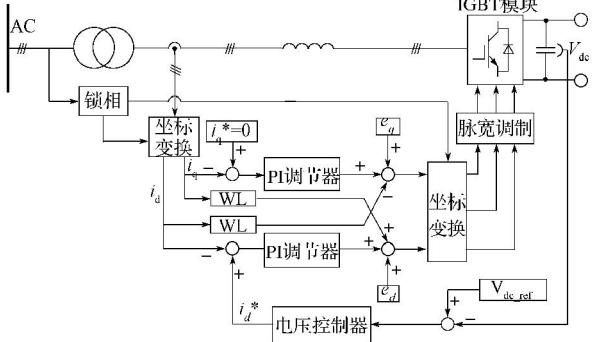


图3 电压外环、电流内环控制框图
Fig.3 Control block of voltage loop and current loop

图中,直流侧给定电压 V_{dc}^* 与实际直流侧电压 V_{dc} 的误差经PI调解器后产生电流内环的有功电流给定 i_d^* ,它与有功电流的实际值比较,其误差通过PI调解器后解耦产生控制信号 V_d 。至于 q 轴分量,由于其解耦之后是一个一阶的线性系统,用一个PI调解器就可达到相应的控制效果。这里的 i_d^* 实际上就体现了需要回馈的再生制动能量的大小。回馈时,各变流器均工作在单位功率因数逆变状态,因此,中压网侧功率因数为-1。

至于多重化变流器的协同控制,系统采用共用电压外环、独立电流内环的结构,如图4所示。其核心是决定各变流器模块有功电流指令值的电流给定模糊控制器。模糊控制是智能控制的一种,此处引入模糊控制的原因在于线路上多对车辆同时运行,不同时刻反映到装置安装处的牵引功率和制动功率都不同,且变化情况不好预测。通常的PI调节的控制参数是通过试验,并折衷暂态和稳态过程以达到一种较满意的效果,这显然会影响其在大扰动或小扰动下的控制效果。因此如果采用一般的线性控制策略不能及时准确地反映相关信息。采用模糊控制,其优势在于不需要知晓系统信息及其数学模型而在较宽的系统运行条件下进行有效控制,增加了系统的鲁棒性。通过模糊控制器后得到系统总有功电流给定 $i_{d_TOT}^*$, n 等分后作为每重模块给定有功电流 i_d^* 供电流环使用。

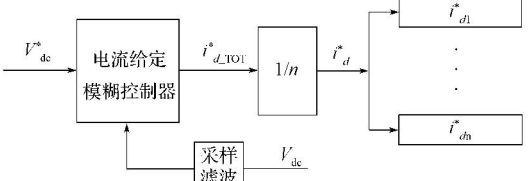


图4 电压外环控制结构
Fig.4 Control structure of voltage loop

2.2 工作逻辑

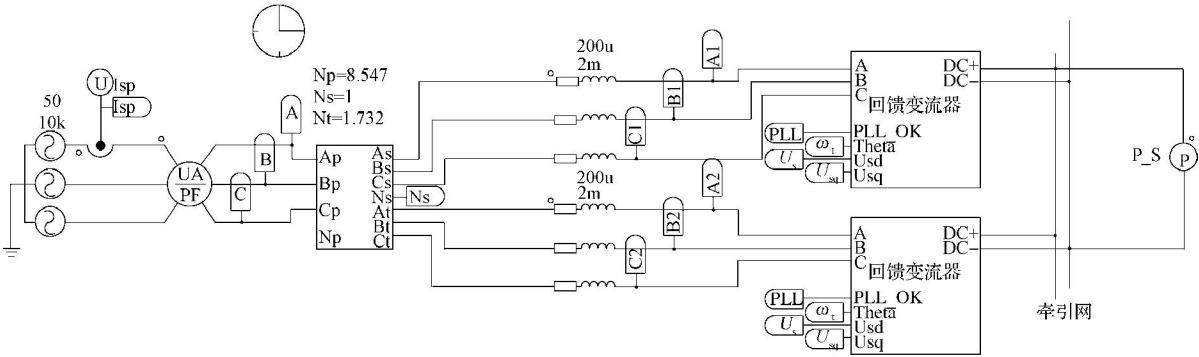
系统检测直流母线电压，当确定有车辆制动且直流母线电压超过设置的门槛值时，进入回馈模式。此时装置将多余的再生制动能量通过各重IGBT变流器以及多重化变压器回馈到交流中压电网，此时装置内能量的流动方向是从牵引直流母线流向交流中压电网，且

交流中压电网侧的功率因数接近 -1。

3 系统仿真及试验

3.1 系统仿真

为了验证上述原理的可行性，在样机开发前进行了仿真。用Psim7.1搭建的系统仿真模型如图5所示，该



注： N_p 、 N_s 、 N_t ——分别是原边绕组相对匝数、第二套绕组相对匝数、第三套绕组相对匝数；PLL——锁相环； ω_t ——锁相环输出相位角； U_{sd} 、 U_{sq} ——电网电压d轴、q轴分量； I_{sp} ——网侧（10 kV侧）电流

图5 仿真模型
Fig.5 Simulation model

模型为两重化结构。

仿真参数：车辆制动功率为2MW（仿真模型中用P_S模拟功率源）；变压器二次侧电压为920 V；变压器一次侧电压为10 kV。

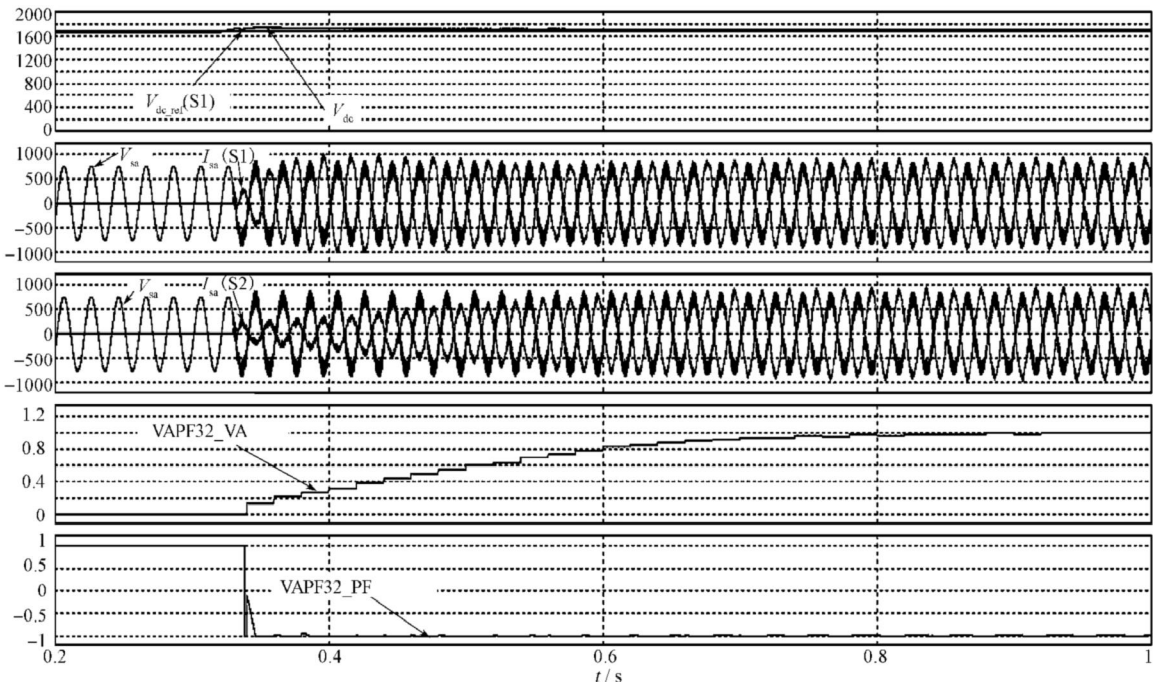
仿真过程：

$t < 0.32$ s时，系统处于待机状态，不断监视直流牵引

网电压，判断是否有车制动；

$t = 0.32$ s时，车辆开始制动，并向直流牵引网灌入2MW的有功功率，直流牵引网电压随即迅速抬升，当 $V_{dc} > 1700$ V时，再生制动能量回馈系统开始启动，并迅速将直流网侧电压限制在1700 V。

仿真结果如图6所示。图中看到，系统能够迅速响



注：S1、S2——两个回馈变流器模块； V_{dc_ref} ——回馈时直流牵引网电压给定值（V）； V_{dc} ——直流牵引网电压（V）； V_{sa} ——网侧（920V侧）相电压（V）； I_{sa} ——网侧（920V侧）相电流（A）；VAPF32_VA——每重变流器回馈的视在功率（MVA）；VAPF32_PF——回馈过程中的功率因数

图6 仿真结果
Fig.6 Simulation result

应车辆制动状态，并将制动产生的再生功率以非常高的功率因数回馈至网侧。

3.2 样机试验

为了验证系统的的基本功能及实际性能参数，我们进行了样机试制。样机采用背靠背方式试验，试验平台中有1套陪试变流器按照如图7所示的脉冲电流向公共直流母线注入有功功率，被试系统监测直流母线电压并作出反应。脉冲电流的幅值、上升时间及下降时间在试验时可人为调整，以模拟不同制动工况。

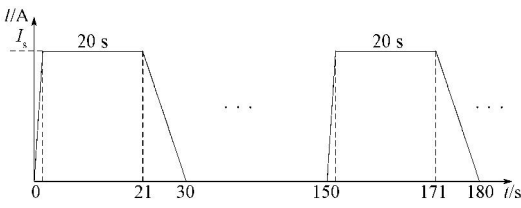
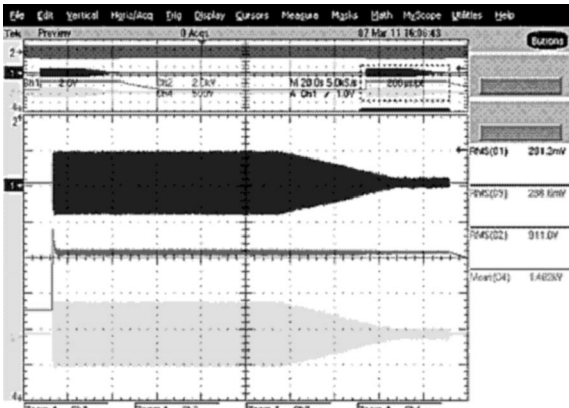


图7 陪试变流器有功脉冲电流给定示意图
Fig.7 The referenced diagram of active impulse current for accompany converter

试验情况如下：

如图8所示，试验按照比较恶劣的条件测试，即脉冲峰值功率持续20 s、脉冲功率上升斜率50 ms、装置启动门槛电压1 750 V进行测试，回馈功率为1.8 MW。

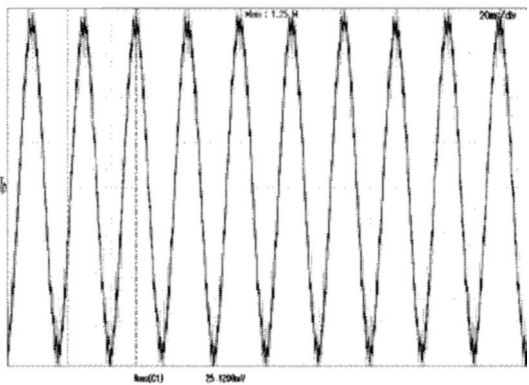


注：CH1\CH3：回馈系统低压侧电流，1 000 A/Div；Ch4：直流母线电压，1 000 V/Div
图8 满负荷脉冲功率回馈试验波形
Fig.8 The test waveforms at rated power feeding-back

试验时直流母线电压由于陪试柜灌入有功功率而迅速抬高，当达到门槛值1 750 V时，能量回馈装置立即启动。图8是满负荷测试结果，CH1和CH3为变流器回馈

电流，Ch4为直流母线电压。可以看到，被试装置在监测到直流母线电压超过1 750 V后，系统立即启动，整个过程中被试装置内两重变流器电流均衡，装置运行后直流母线电压被限制在设定的1 700 V。

另外，通过示波器测得10 kV网侧电流波形如图9所示。回馈时10 kV侧谐波总含量很小，通过多功能表测到的总谐波含量为3.7 %。



注：Ch1-10 kV网侧电流，4 A/mV
图9 满负荷回馈时10 kV网侧电流波形
Fig.9 The 10 kV side current at rated power feeding-back

4 结语

针对目前城轨供电系统再生制动能量回馈的几个问题，本文提出了基于多重化四象限变流器的制动能量回馈系统。仿真和样机试制表明，该系统可以在满足电网兼容性要求的前提下实现制动能量回馈至中压电网的功能，加之所述系统与现有牵引供电系统并列连接，并与中压交流电网和直流牵引网之间相互间兼容性好，有着较大实际意义和推广价值。

参考文献：

[1] 王磊，刘志刚，张钢，等. 基于PWM整流器的城轨牵引供电系统研究[J]. 电力电子技术，2009，43(7)：75-77.
[2] 谢方. 城市轨道交通直流供电整流机组研究[D]. 成都：西南交通大学，2009.
[3] 王彦峥，苏鹏程. 城市轨道交通再生电能的吸收与利用分析[J]. 城市轨道交通研究，2007，10(6)：42-45.
[4] 黄守道，张铁军，陈颖，等. 一种三相PWM整流器控制方法研究[J]. 电气应用，2005，24(3)：106-109.
[5] 张文丽，李群湛，刘炜，等. 地铁列车再生制动节能仿真研究[J]. 大功率变流技术，2008(3)：41-44,53.