

动车组变流器中间直流电压保持控制策略研究

蒋 威^{1, 2}

(1. 中国铁道科学研究院 机车车辆研究所, 北京 100081;

2. 北京纵横机电技术开发公司, 北京 100081)

摘 要: 介绍了动车组变流器中间直流电压保持模式的特点及应用工况, 提出了基于矢量控制的中间直流电压保持控制策略, 从理论上分析了控制策略中前馈补偿对控制的影响, 给出了前馈功率的计算方法。最后通过试验结果验证了控制策略的有效性。

关键词: 动车组; 变流器; 中间直流电压; 再生制动; 过分相; 无动力回送; 高速列车

中图分类号: U266.2

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2019.02.110

Research on DC-link Voltage Hold Control Strategy for EMUs Converter

JIANG Wei^{1,2}

(1. Locomotive & Car Research Institute, China Academy of Railway Sciences, Beijing 100081, China;

2. Beijing Zongheng Electro-Mechanical Technology Development Co., Ltd., Beijing 100081, China)

Abstract: The characteristic and application of DC-link voltage hold mode for EMUs converter were introduced, and the DC-link voltage hold control strategy based on vector control was proposed. The influence of feed-forward compensation in control strategy was analyzed theoretically, and the calculation method of feed-forward power was provided. Finally, the validity of the control strategy was verified by the experiment results.

Keywords: EMUs; converter; DC-link voltage; regenerative braking; passing neutral section; unpowered return; high-speed train

0 引言

高速动车组变流装置包括牵引变流器与辅助变流器。牵引变流器的主要功能是将牵引变压器降压后的单相交流电, 通过交直交变换输出VVVF三相PWM电压驱动牵引电机, 为列车的运行提供动力^[1], 辅助变流器的主要功能是为动车组运行所必需的辅助设备供电, 例如为各种冷却装置、空压机、照明和空调、蓄电池等供电^[2]。

辅助变流器根据输入方式的不同, 主电路拓扑可

分为交直交型和直交型^[3-4]。

交直交型辅助变流器通常从牵引变压器的辅助绕组取电, 其拓扑结构与牵引变流器相似。辅助变流器将交直交变换后得到的三相PWM交流电压, 再经过滤波输出三相正弦交流电压作为辅助负载的供电电源。采用该拓扑结构的辅助变流器独立于牵引变流器运行, 不会受到牵引变流器故障的影响, 其缺点是列车网侧无供电时, 辅助变流器也将失电无法工作, 且该电路拓扑所需要的功率器件较多, 控制上也相对复杂^[3]。

直交型辅助变流器通常从牵引变流器中间直流环节取电, 经过逆变变换、变压器降压及滤波后, 输出三相正弦交流电压为辅助负载供电^[5]。采用该拓扑结

收稿日期: 2018-04-23; 修回日期: 2018-06-03

基金项目: 中国铁道科学研究院基金项目(2017YJ012)

构的辅助变流器在列车网侧无供电的某些特殊工况下, 可以利用牵引变流器的中间直流电压保持功能为辅助供电系统连续提供能量, 保证负载设备的持续工作。对于载客运营的高速列车来说, 保证空调、照明等设施的正常工作对乘坐的舒适性十分重要, 同时减少辅助变流器及辅助设备的频繁启停, 也有利于降低故障率和维护成本。由于当前动车组普遍采用多台辅助变流器并联运行的方式, 有效提高了辅助供电系统的冗余度和可靠性, 因此直交型拓扑辅助变流器在当前高速动车组领域得到了广泛的应用。

本文主要介绍动车组变流器中间直流电压保持模式的控制策略及具体实现方法。

1 中间直流电压保持模式及其应用

1.1 中间直流电压保持模式简介

动车组变流器系统拓扑结构如图 1 所示, 牵引变流器部分主要由四象限整流器、中间直流环节和牵引逆变器组成^[1]。四象限整流器可实现单相交流电与直流电之间的四象限变换, 并保证网侧功率因数接近于 1; 中间直流环节主要起到储能和稳定中间直流电压的作用, 并保证能量传递时的瞬时功率平衡; 牵引逆变器主要为牵引电机提供驱动电源, 可使牵引电机工作在牵引或再生制动工况。

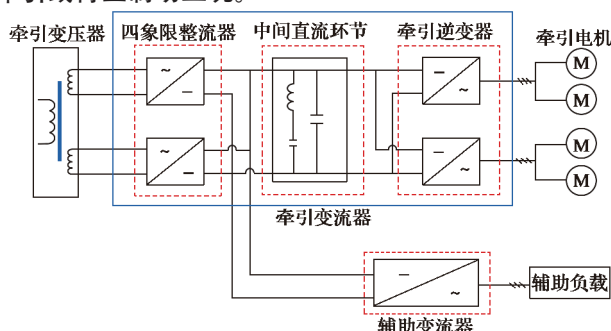


图 1 动车组变流器系统拓扑结构

辅助变流器采用直交型拓扑结构, 输入侧并联到牵引变流器中间直流环节获取电能, 将中间直流电压变换成三相 380 V/50 Hz 正弦交流电压提供给各类辅助负载。

列车在牵引工况运行时, 牵引电机工作在电动机状态, 牵引逆变器工作在逆变状态, 能量从中间直流环节流向牵引电机; 列车在再生制动工况运行时, 牵引电机工作在发电机状态, 牵引逆变器工作在整流状态, 可将牵引电机制动产生的能量回馈至中间直流环节。

在某些特殊运行工况下, 高速列车会失去网侧对牵引系统的供电, 四象限整流器将停止工作, 此时为保证车载空调、照明、冷却装置等辅助设备的正常工作, 可以使牵引变流器工作在中间直流电压保持模式。中间直流电压保持模式下牵引变流器不再受控于列车控制级发送的牵引或制动指令, 仅根据辅助供电系统

的功率需求, 由变流器控制单元控制中间直流电压保持稳定, 利用再生制动反馈的能量保证辅助变流器及必要负载设备的持续正常工作。由于辅助系统的功率相对于牵引系统较小, 中间直流电压保持模式下牵引变流器相当于工作在“微电制”状态。

1.2 中间直流电压保持模式应用工况

1.2.1 过分相^[6]

在单相交流供电的电气化铁路上, 为使电力系统三相负荷尽可能平衡, 接触网通常采用分段换相供电, 每隔 20~30 km 设置一段供电绝缘区域, 即分相区。接触网在分相区两侧由不同两相进行供电, 在分相区内则无供电。高速列车在经过分相区时, 通常需要采用自动过分相方式, 控制单元提前接收到过分相信号, 并封锁四象限整流器的控制脉冲。在过分相过程中, 仅依靠变流器的中间直流电容储能难以维持中间直流电压的稳定和辅助系统的持续工作, 因此通常使牵引变流器切换到中间直流电压保持模式。经过分相区之后, 控制单元重新激活对四象限整流器的控制, 使牵引逆变器退出中间直流电压保持模式恢复到正常牵引或电制动运行状态。

1.2.2 无动力回送^[7]

高速列车在载客运营过程中, 如果发生严重故障导致失去牵引动力, 则需要机车实施救援, 将其回送到便于乘客换乘的车站。在无动力回送过程中, 将禁止升弓、闭合主断路器等操作, 整个列车将在网侧无供电情况下运行。由于高速列车的车窗为封闭结构, 为了不影响乘客乘坐的舒适性, 需要使空调以及照明等设施能够正常工作, 为解决该问题, 动车组变流器通常配备回送发电装置, 该装置电路结构如图 2 所示。

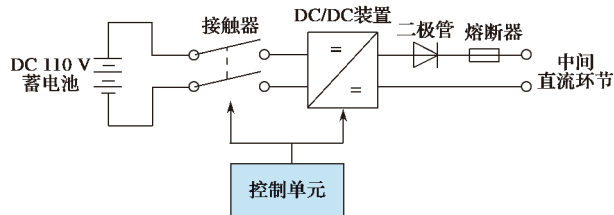


图 2 回送发电装置

无动力回送工况下, 当使用回送发电装置时, 首先通过 DC/DC 装置将来自 DC 110 V 蓄电池的电压为中间直流环节充电至一定初始电压, 然后利用该初始电压建立起牵引电机的励磁, 并进入中间直流电压保持模式, 控制中间直流电压上升到给定值且保持稳定, 进而在无动力回送过程中将来自列车的动能转化为电能, 为动车组必要的辅助设备提供持续供电。

2 中间直流电压保持控制策略

2.1 牵引传动系统矢量控制原理

动车组牵引传动系统采用直接磁场定向矢量控制策略, 核心控制原理如图 3 所示。

$$\Delta W = \int_0^t P_{DC}(t) dt = \frac{1}{2} C_D (U_{DC}^2(t) - U_{DC}^2(t_0)) = C_D \overline{U_{DC}} \Delta u_{DC}(t) \quad (13)$$

式中: $\overline{U_{DC}}$, $\Delta u_{DC}(t)$ 分别为中间直流电压的直流分量和波动量; C_D 为中间直流环节电容值。

在频域内可表示为

$$\Delta u_{DC}(s) = \frac{1}{s C_D \overline{U_{DC}}} P_{DC}(s) \quad (14)$$

前馈控制的基础是计算得到负载功率值 P_F^* , 得到该功率值需要进行的采样和计算导致其与实际负载功率 P_L 之间存在延迟, 可将其等效为一阶惯性环节, 则有

$$P_F^*(s) = \frac{1}{1+sT_F} P_L(s) \quad (15)$$

电压闭环中采样和计算得到误差电压也可等效为一阶惯性环节, 则有

$$\Delta u_{DCF}(s) = \frac{1}{1+sT_{DC}} \Delta u_{DC}(s) \quad (16)$$

中间直流电压的误差经 PI 调节输出电流补偿量 ΔI_{DC} , 可等效为对前馈功率加入补偿量 ΔP_C^* , 即

$$\Delta P_C^*(s) = \left(K_P + \frac{K_I}{s} \right) \Delta u_{DCF} \quad (17)$$

中间直流电压保持模式下牵引逆变器实现对输出功率的响应控制, 输入、输出功率响应延迟函数可表示为

$$P_{INV}^*(s) = \frac{1}{1+sT_{DI}} P_{INV}(s) \quad (18)$$

综上所述, 可将整个控制系统各环节之间的传递函数结构表示为图 5。

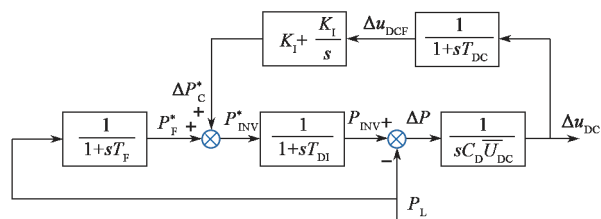


图 5 加入前馈补偿控制的传递函数结构

根据图 5, 中间直流电压波动量 Δu_{DC} 与负载功率 P_L 之间的传递函数可表示为

$$\frac{\Delta u_{DC}(s)}{P_L(s)} = \frac{-s^2(1+T_{DC}s)(T_{DI}T_Fs + T_{DI} + T_F)}{(1+T_Fs)\Delta(s)} \quad (19)$$

式中:

$$\Delta(s) = C_D \overline{U_{DC}} T_{DI} T_{DC} s^4 + C_D \overline{U_{DC}} (T_{DI} + T_{DC}) s^3 + C_D \overline{U_{DC}} s^2 - K_P s - K_I$$

为了进行对比分析, 图 6 为未加入前馈控制补偿的控制结构图, 即直接对中间直流电压的误差进行 PI

调节产生功率给定值, 对应的传递函数可表示为

$$\frac{\Delta u_{DC}(s)}{P_L(s)} = \frac{-s(1+T_{DC}s)(1+T_{DI}s)}{\Delta(s)} \quad (20)$$

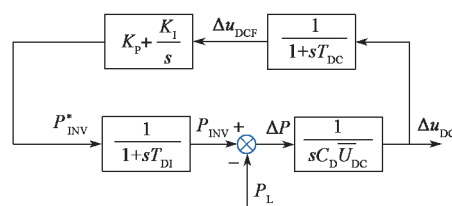


图 6 未加入前馈补偿控制的传递函数结构

采用表 1 所示的系统控制参数, 可得到式 (19)、式 (20) 所描述传递函数的幅频特性如图 7 所示。

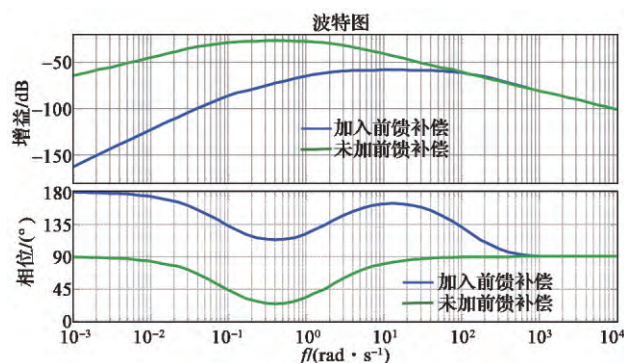


图 7 传递函数的幅频特性对比

中间直流电压保持控制过程中系统的性能主要取决于传递函数的低频段性能。从图 7 可以看出, 在低频段加入功率前馈补偿控制的传递函数增益明显减小, 即中间直流电压波动量对输出功率的敏感度相对较低, 中间直流电压在输出功率变化情况下系统具有更好的动态、静态性能。

表 1 系统控制参数

参数名称	参数值
T_{DC}/ms	0.5
T_{DI}/ms	10
K_P	20
K_I	1.75
T_F/ms	1
C_D/mF	3
U_{DC}/V	3 600

2.4 前馈功率计算

补偿的前馈功率主要包括辅助变流器消耗功率、电机损耗以及牵引变流器损耗。除此之外, 其他的功率消耗所占比例很小, 基本可以忽略, 引起的实际偏差通过电压 PI 调节器补偿即可。

2.4.1 辅助变流器消耗功率计算

辅助变流器消耗功率可采用 2 种方法进行计算。

1) 采用中间直流侧电流计算

采用该方法时, 需要在牵引变流器中间直流环节向辅助变流器供电的线路上加装电流传感器。

由于辅助变流器的输入侧通常采用三相桥式逆变电路^[5], 因此电流传感器测量到的瞬时值并非稳定的直流量, 这种情况下需要对采集的电流进行滤波处理以得到辅助直流电流的平均值, 即

$$\overline{I_{DCA}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N i_{DCA}(k) \quad (21)$$

式中: i_{DCA} , $\overline{I_{DCA}}$ 分别为辅助变流器输入直流电流的瞬

时值和平均值。

根据中间直流电压实际值以及滤波得到的辅助直流电流平均值, 可得到辅助变流器消耗的有功功率, 即

$$P_{\text{Aux}} = U_{\text{DC}} \times \overline{I_{\text{DCA}}} \quad (22)$$

2) 采用辅助变流器电压电流计算

该方法由辅助变流器控制器计算出功率, 然后通过数字通信接口将功率值传递给牵引变流器控制单元, 这种情况下可省去在线路上加装电流传感器, 适用于主辅一体的变流器结构。

进行辅助变流器控制需要采集三相隔离变压器二次侧电压和一次侧电流数据, 可根据三相隔离变压器的联结方式和变比将二次侧电压折算至一次侧, 则辅助变流器的输出功率可用式 (23) 计算得到:

$$P_{\text{Aux}} = u_{\text{A}} i_{\text{A}} + u_{\text{B}} i_{\text{B}} + u_{\text{C}} i_{\text{C}} \quad (23)$$

式中: $u_{\text{A}}, u_{\text{B}}, u_{\text{C}}$ 为折算至隔离变压器一次侧三相电压值; $i_{\text{A}}, i_{\text{B}}, i_{\text{C}}$ 为一次侧三相电流值。

2.4.2 电机损耗计算^[9]

采用异步电机作为牵引电机时, 电机损耗主要包括定子、转子铜耗和定子、转子铁耗, 以及包括机械损耗在内的其他损耗。其中, 铜耗和铁耗所占比例较大 (至少 80% 以上), 因此前馈功率补偿中仅考虑电机的铜耗和铁耗即可。

在异步电机采用矢量控制情况下, 定子铜耗可由反馈的励磁电流分量和转矩电流分量计算得到:

$$P_{\text{Cus}} = \frac{3}{2} (i_{\text{sd}}^2 + i_{\text{sq}}^2) R_{\text{s}} \quad (24)$$

转子铜耗可表示为

$$P_{\text{Cur}} = \frac{3}{2} i_{\text{rq}}^2 R_{\text{r}} \quad (25)$$

根据电机转子电压方程可得

$$i_{\text{rq}} = -\frac{\omega_{\text{sl}} \psi_{\text{rd}}}{R_{\text{r}}} \quad (26)$$

将式 (26) 代入式 (25) 可计算得到转子铜耗

$$P_{\text{Cur}} = \frac{3\omega_{\text{sl}}^2 \psi_{\text{rd}}^2}{2R_{\text{r}}} \quad (27)$$

一般情况下, 异步牵引电机转子铁耗远小于定子铁耗, 在进行前馈功率估算时可忽略转子铁耗, 则电机定子铁耗可表示为

$$P_{\text{Fe}} = \frac{3\omega_{\text{s}}^2 \psi_{\text{rd}}^2}{2R_{\text{m}}} \quad (28)$$

式中: 铁耗电阻 R_{m} 为等效计算值。

铁耗电阻 R_{m} 在电机运行过程中主要受到磁链大小、转差、定子频率的影响而变化。考虑到控制策略中加入了电压闭环调节, 一定程度内参数偏差引起的功率偏差可以通过调节器输出进行补偿, 因此计算电机铁耗时用设计值进行计算即可。

根据式 (24)、式 (27)、式 (28) 可计算得到电机损耗为

$$P_{\text{Lm}} = P_{\text{Cus}} + P_{\text{Cur}} + P_{\text{Fe}} \quad (29)$$

2.4.3 牵引逆变器损耗计算

牵引逆变器在能量传递过程中均会产生损耗。逆变器损耗主要包括功率器件的通态损耗、开关损耗以及线路损耗, 通态损耗取决于器件的管压降和负载电流, 开关损耗取决于开关频率和负载电流。牵引逆变器损耗所占系统整体损耗比例较小, 因此可根据其输出功率和效率近似计算得到, 即

$$P_{\text{Linv}} = \frac{P_{\text{Aux}} (1 - \eta)}{\eta} \quad (30)$$

式中: η 为牵引逆变器效率。

综上所述, 总的前馈功率值可表示为

$$P_{\text{L}} = P_{\text{Aux}} + P_{\text{Lm}} + P_{\text{Linv}} \quad (31)$$

3 试验结果

针对本文提出的变流器中间直流电压保持控制策略, 利用高速动车组交流传动试验台进行了试验验证。图 8 和图 9 为模拟过分相工况的试验结果。试验台采

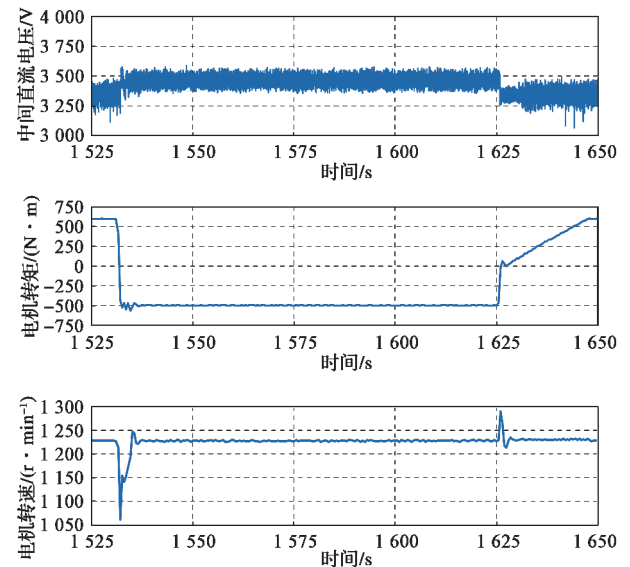


图 8 模拟过分相工况的试验波形

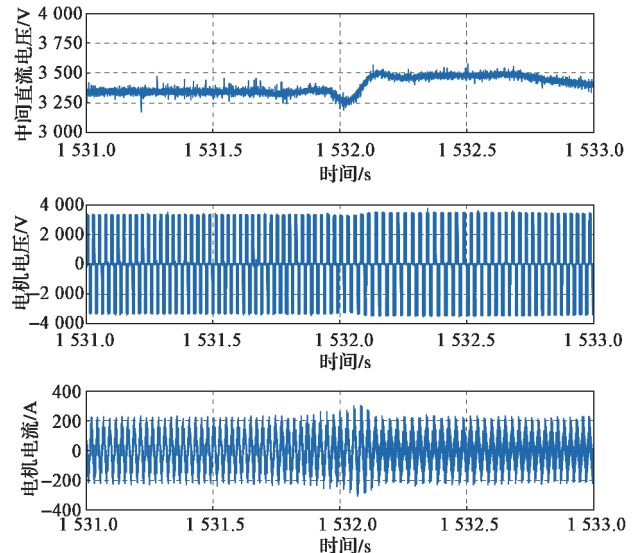


图 9 过分相切换到中间直流电压保持模式的电压和电流波形

用变流器-牵引电机“背靠背”对拖式结构,试验过程中陪试系统工作在速度模式,被试牵引系统工作在转矩模式。辅助变流器输入侧连接到牵引变流器中间直流环节,并投入一定功率的辅助负载。

由图 8 的模拟过分相的试验波形可以看到,牵引变流器收到过分相指令后进入中间直流电压保持模式,然后出相退出中间直流电压保持模式,进入中间直流电压保持模式后,变流器中间直流电压跟随指令值变化到约 3 500 V,牵引电机状态由牵引特性转变为再生制动特性,并且在整个过分相试验过程中,中间直流电压及电机转矩保持稳定。由于试验电机转速由陪试系统控制,因此在再生制动工况下电机转速维持恒定。

图 9 为过分相切换到中间直流电压保持模式时刻的电机电压、电流波形。从图 9 可以看到,从切换时刻到进入稳态的过程中,电机电压、电流均在出现因控制切换造成的突变扰动之后较快地恢复稳定,控制策略达到良好的动态效果。

图 10 和图 11 为模拟无动力回送工况的试验结果。

从图 10 可以看到,牵引变流器中间直流电压初始值约为 1 000 V,收到无动力回送模式指令后,切换到中间直流电压保持模式,通过中间直流电压保持控制将中间直流电压提升至约 3 500 V,维持一段时间之后再平稳退出中间直流电压保持模式。

图 11 为无动力回送工况变流器中间直流电压建立过程中的电机电压、电流变化波形,从图 11 可以看到,在无动力回送工况下,通过中间直流电压保持控制可以较快地建立并保持系统工作所需要的中间直流电压,电机电压、电流变化正常,控制策略的动态、稳态响应良好。

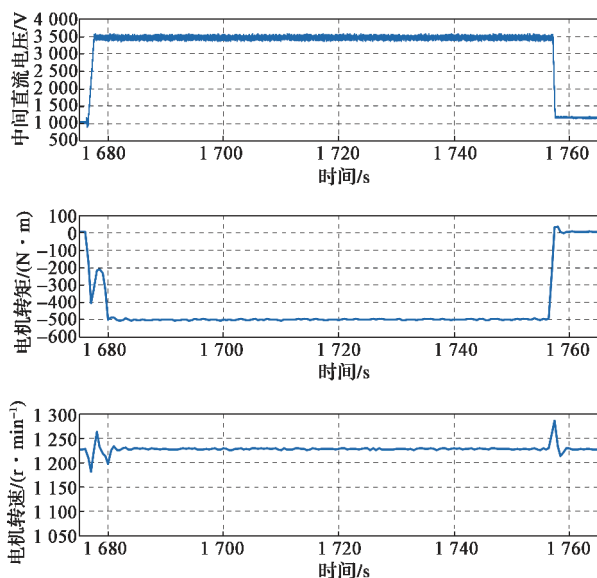


图 10 模拟无动力回送工况的试验结果

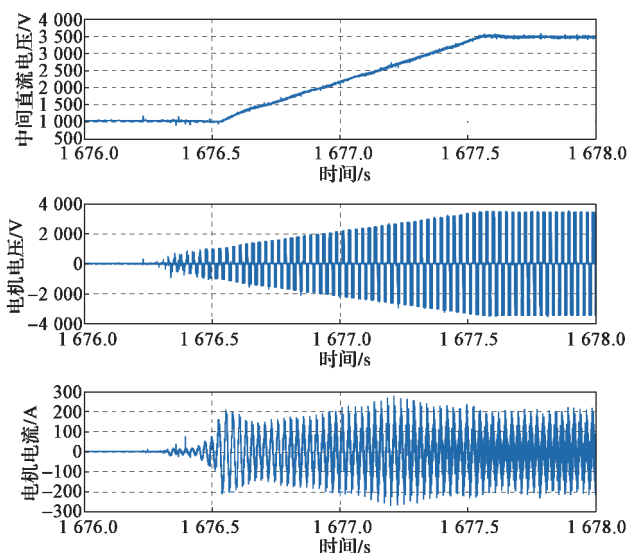


图 11 无动力回送工况中间直流电压建立过程中的电压和电流波形

4 结语

本文在介绍动车组变流器中间直流电压保持模式的特点及应用工况的基础上,研究并提出了基于矢量控制的中间直流电压保持控制策略,从理论上分析了功率前馈补偿对控制的影响,给出了相应的前馈功率计算方法。试验结果验证了本文提出的控制策略在过分相和无动力回送工况下,可以有效实现变流器中间直流电压的保持控制,且具有良好的动态和稳态性能。

参考文献:

- [1] 冯晓云. 电力牵引交流传动及其控制系统 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [2] 刘建强. 高速列车辅助供电系统 [J]. 电力电子, 2011(6): 50-54.
- [3] 郭晓燕. 铁道机车车辆的辅助电源系统 [J]. 机车电传动, 2008(4): 16-19.
- [4] 郑华熙, 高吉磊, 郑琼林. 我国高速动车组辅助供电系统的比较与分析 [J]. 电气传动, 2010, 40(3): 53-59.
- [5] 左鹏, 马颖涛, 王永翔, 等. 高速动车组辅助变流器研制 [J]. 铁路技术创新, 2015(2): 73-76.
- [6] 谢兴中. 电力机车过分相问题的探讨 [J]. 机车电传动, 2008(3): 64-66.
- [7] 高吉磊. 高速动车组牵引系统无动力回送发电功能的研究 [J]. 机车电传动, 2017(1): 46-50.
- [8] 丁荣军, 黄济荣. 现代变流技术与电力传动 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [9] 文晓燕. 列车牵引电机低速运行优化控制研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2012: 27-31.
- [10] 王建渊, 秦伟, 孙向东. 三电平双 PWM 变频器负载功率前馈控制仿真研究 [C] // 中国电工技术学会电力电子学会第十四届学术年会论文集. 福州: 中国电工技术学会, 2015: 148-153.

作者简介: 蒋 威 (1982—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事高速动车组及城轨车辆牵引传动控制系统的研发工作。