

350 km/h 中国标准动车组 辅助变流器并网控制研究

宋永丰^{1,2}

(1. 中国铁道科学研究院集团有限公司 机车车辆研究所, 北京 100081;
2. 动车组和机车牵引与控制国家重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 350 km/h 中国标准动车组辅助变流器采用无互联线并网技术, 提升辅助供电冗余能力。辅助变流器采用 PQ 下垂控制, 以三相同步坐标变换的方式实现对供电母线电压的锁相, 以有功功率实现对辅助变流器输出频率控制、无功功率实现对辅助变流器输出电压幅值控制的方式实现并网均流控制。该控制策略在 350 km/h 中国标准动车组上进行了实车试验, 试验结果表明: 350 km/h 中国标准动车组辅助变流器并网控制效果良好, 在动车组辅助变流器启动、投切、负载变化过程中, 动态响应快, 均流效果好, 满足动车组运行的要求。

关键词: 中国标准动车组; 辅助变流器; 并网控制; 下垂特性; 锁相技术

中图分类号: U266.2

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2019.02.005

Research of 350 km/h CEMUs Auxiliary Converter Parallel Control

SONG Yongfeng^{1,2}

(1. Locomotive & Car Research Institute, China Academy of Railway Sciences Co., Ltd., Beijing 10081, China;

2. State Key Laboratory for Traction and Control System of EMU and Locomotive, Beijing 100081, China)

Abstract: The auxiliary converter of the 350 km/h CEMUs adopts wireless parallel technology, which improves the power supply redundancy. The auxiliary converter was controlled with PQ droop control. The phase-locking of supply bus voltage was realized with three-phase synchronous coordinate transformation mode, grid-connected flow control was realized by means of active power controlling frequency of auxiliary converter and reactive power controlling output voltage amplitude of auxiliary converter. A real-vehicle test had been conducted. The test results show that the 350 km/h CEMUs auxiliary converter has a good grid-connected control effect with fast dynamic response and nice current sharing effect in the process of starting, switching, and load fluctuation, which meets the requirements of the EMUS operation.

Keywords: CEMUs; auxiliary converter; parallel control; droop characteristic; phase-locking technique

0 引言

动车组的辅助负载主要包括列车空调、照明、厨房设备等旅客用电负载和牵引冷却系统、控制系统、空气压缩机等列车系统工作用电负载, 负载的可靠供

电不仅影响到旅客的乘坐舒适性, 同时也对列车关键系统的运行至关重要。为提高辅助电源的冗余能力, 目前动车组均采用分散辅助供电的方式。

采用互联线并联技术的动车组辅助变流器均流效果较好, 但互联线在长距离通信过程中容易受到干扰。在现有的逆变器并联技术研究中, 基于 PQ 下垂控制的无互联线逆变器并联技术已得到了广泛的研究和应用。文献[1]在传统下垂法中额外加入瞬态下垂分量,

收稿日期: 2018-05-31

基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划项目 (2017J008-A); 中国铁道科学研究院行业服务技术创新项目 (2017YJ010)

并且稳态下垂分量采用了旨在减小连线阻抗影响的并联控制策略，使多个逆变器模块的电流能快速均分并达到稳定。文献 [2] 在传统的下垂法中加入了积分和微分环节来达到快速动态均流。上述前沿研究虽然在小功率单相逆变器平台得到了验证，但在三相大功率平台上的工程应用还需要进一步研究。结合上述研究，本文针对 350 km/h 中国标准动车组辅助供电系统的特点，采用 PQ 下垂控制的无互联线母线并网技术使多个辅助变流器共同承担整车负载，最后对并联供电系统进行了启动、投切、负载突投等工况的实车试验。

1 辅助供电系统

根据铁总技术条件^[3]要求，350 km/h 中国标准动车组辅助供电系统采用母线并网供电方式，由分散布置在若干车厢的各辅助变流器向 AC 380 V/50 Hz 母线供电并网运行。辅助变流器并网设计提高了辅助变流器故障情况下辅助供电的冗余能力，350 km/h 中国标准动车组辅助供电系统冗余性能见表 1。

表 1 350 km/h 中国标准动车组辅助冗余性能

故障辅助变流器数量 / 台	对用电设备影响
1	辅助设备工作正常；牵引功率不受影响
2	除空调系统半载运行外，其他辅助设备工作正常；牵引功率不受影响
3	所有空调停止运行，自动切除失效动力单元对应风机负载，厨房设备自动切除

图 1 所示。为了提高辅助 AC 380 V/50 Hz 母线短路等故障情况下辅助用电的冗余能力，将整个三相交流辅助供电母线分为 2 段：1 车~4 车为一段，称为 A 段；5 车~8 车为另一段，称为 B 段。这 2 段供电母线之间通过 1 个受网络控制的隔离接触器 TB 连接在一起。列车工作正常时，通过网络发出接触器 TB 闭合指令。如果辅助母线发生故障，则通过控制隔离接触器 TB，维持一半的车辆辅助用电。当动车组主断路器闭合，延时 10 s 后，网络将按照 M1-M2-M3-M4 的顺序循环检测单台辅助变流器是否满足启动条件，满足条件依次启动辅助变流器。

辅助逆变器输出主要参数：

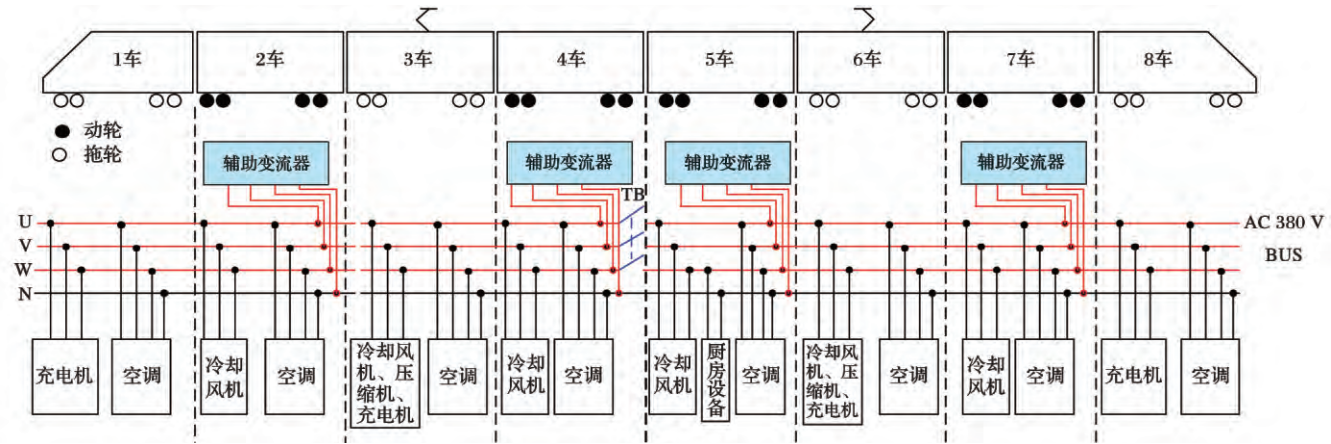


图 1 350 km/h 中国标准动车组辅助供电系统拓扑图

单台辅助变流器额定输出容量	260 kVA
额定输出线电压（基波有效值）	380 V
额定输出频率	50 Hz
输出电压范围（稳态）	±5%
输出频率波动范围	±2%
输出电压谐波波动含量	≤ 5%

并联方式可以分为有互联线并联和无互联线并联 2 种方式。350 km/h 中国标准动车组全长约为 209 m，在 2 车、4 车、5 车和 7 车各设 1 台辅助变流器，2 台辅助变流器的最远距离约为 50 m。如果采用有互联线的并联方式，互联线必须能在长跨度、高干扰的环境下工作，还需克服由振动引起的接触部件脱落等意外情况，因此采用有互联线的并联方式并不太恰当；无互联线的并联技术只需各辅助变流器之间通过三相 AC 380 V 功率母线相连，各辅助变流器间不通过控制信号线连接，不需要同步总线和均分电流总线，拥有独立的控制系统，有利于提高辅助电源系统的抗干扰性和

可靠性。因此，350 km/h 中国标准动车组辅助变流器并网采用基于无互联线的并联控制方式。

2 无互联线并网控制原理

2.1 下垂控制原理

下垂控制法是根据功率大小调节输出量的控制方法。这种控制思想源自电力系统中同步电机并网理论，认为辅助变流器自身的输出有功功率变化取决于输出电压相位差，输出无功功率变化取决于输出电压幅值差。每台辅助变流器通过检测自身的输出电压和电流，计算出瞬时输出有功功率和无功功率，利用有功功率控制辅助变流器输出电压相位，无功功率控制辅助变流器输出电压幅值，得到参考电压，再通过闭环控制，实现功率均分^[4-5]。

图 2 为 350 km/h 中国标准动车组辅助供电系统模型，辅助变流器 n 输出电流为

$$\dot{I}_n = \frac{\dot{E}_n - \dot{U}}{R_n + jX_n} \quad (1)$$

式中: $n=1, 2, 3, 4$, 分别代表标准动车组 4 个辅助变流器。

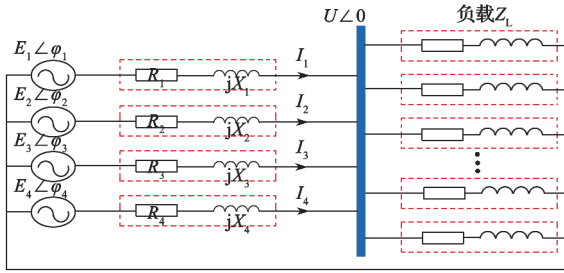


图 2 350 km/h 中国标准动车组辅助供电系统模型

辅助变流器 n 输出视在功率为

$$S_n = P + jQ = \dot{U} \dot{I}_n^* = \dot{U} \left(\frac{\dot{E}_n - \dot{U}}{R_n + jX_n} \right)^* \quad (2)$$

展开后为

$$S_n = \left(\frac{R_n}{R_n^2 + X_n^2} U E_n \cos \varphi_n - \frac{R_n}{R_n^2 + X_n^2} U^2 + \frac{X_n}{R_n^2 + X_n^2} U E_n \sin \varphi_n \right) + j \left(-\frac{R_n}{R_n^2 + X_n^2} U E_n \sin \varphi_n + \frac{X_n}{R_n^2 + X_n^2} U E_n \cos \varphi_n - \frac{X_n}{R_n^2 + X_n^2} U^2 \right) \quad (3)$$

辅助变流器 n 输出给负载的有功功率 P_n 和无功功率 Q_n 分别为:

$$P_n = \frac{R_n}{R_n^2 + X_n^2} U E_n \cos \varphi_n - \frac{R_n}{R_n^2 + X_n^2} U^2 + \frac{X_n}{R_n^2 + X_n^2} U E_n \sin \varphi_n \quad (4)$$

$$Q_n = -\frac{R_n}{R_n^2 + X_n^2} U E_n \sin \varphi_n + \frac{X_n}{R_n^2 + X_n^2} U E_n \cos \varphi_n - \frac{X_n}{R_n^2 + X_n^2} U^2 \quad (5)$$

系统并联运行时, 辅助变流器 n 输出电压和母线电压的相位角差非常小, 可以认为

$$\sin \varphi_n \approx \varphi_n, \cos \varphi_n \approx 1 \quad (6)$$

将式 (6) 带入式 (4) 和式 (5), 得到:

$$P_n = \frac{U(R_n E_n - R_n U + X_n E_n \varphi_n)}{R_n^2 + X_n^2} \quad (7)$$

$$Q_n = -\frac{U(R_n E_n \varphi_n - X_n E_n + X_n U)}{R_n^2 + X_n^2} \quad (8)$$

由于一般线路的电阻较小, 线路阻抗主要呈感性, R_n 可忽略不计, 则由式 (7) 和式 (8) 可以得到:

$$P_n = \frac{U E_n}{X_n} \varphi_n \quad (9)$$

$$Q_n = \frac{U(E_n - U)}{X_n} \quad (10)$$

从式 (7) 和式 (8) 可以看出, 对于上述并联辅助供电系统而言, 辅助变流器输出电压与母线电压相角差主要由有功功率决定, 电压差异主要由无功功率决定。通过分别控制调整有功功率和无功功率, 可以达到控制输出电压的幅值和相角。

由于并联的每台辅助变流器不知道其他辅助变流器的初始相角, 但是空载条件下的初始角频率 ω_0 是固定的, 式 (11) 用 ω_n 代替了 φ_n , 下垂控制方法的更直观的表达式为:

$$\omega_n = \omega_0 - k P_n \quad (11)$$

$$E_n = E_0 - m Q_n \quad (12)$$

式中: ω_0 为空载频率; E_0 为空载电压幅值; k 为频率下垂系数; m 为电压幅值下垂系数。

图 3 为辅助变流器并联时的频率下垂特征图, 图 4 为辅助变流器并联时的电压幅值下垂特征图。

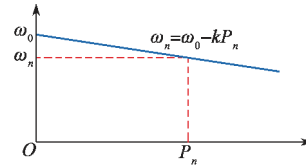


图 3 频率下垂特征

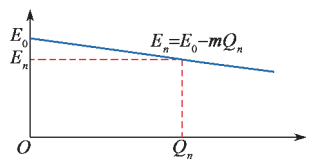


图 4 电压幅值下垂特征

2.2 辅助并网控制策略

相位跟踪是辅助供电网控制的重要环节, 350 km/h 中国标准动车组辅助变流器需实时跟踪其母线相位, 动态响应快, 锁相精度高。目前相位检测通常采用过零比较锁相环法, 但其动态特性较差, 误差较大。因此, 350 km/h 中国标准动车组采用基于坐标变换的三相数字锁相技术。假定三相母线电压合成空间矢量 $\mathbf{u}_m$ 以恒定角频率 ω_m 旋转, 与 α 轴负半轴夹角为 θ^* , θ^* 随时间斜率上升; dq 坐标系以角频率 ω 旋转, 其 d 轴与 α 轴夹角为 θ ; 电压矢量 $\mathbf{u}_m$ 在 dq 坐标系上投影为 u_d, u_q , 如图 5 所示。 u_q 可表明电压矢量与坐标系间的相位关系, 当 $u_q > 0$ 时, 电压矢量 $\mathbf{u}_m$ 领先于 d 轴, 应增大 Park 变换同步角; 当 $u_q = 0$ 时, 电压矢量 $\mathbf{u}_m$ 与 d 轴同相位; 当 $u_q < 0$ 时, 电压矢量 $\mathbf{u}_m$ 滞后于 d 轴, 应减小 Park 变换同步角。假设母线电压的幅值为 u_m , 则电压矢量 $\mathbf{u}_m$ 在 q 轴上的投影可表示为

$$u_q = U_m \sin(\theta^* - \theta) \quad (13)$$

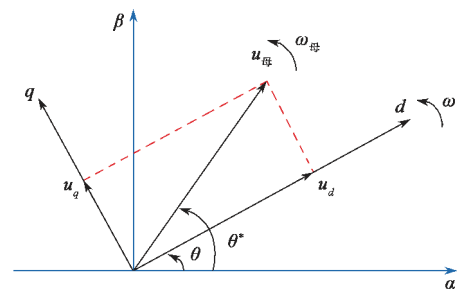


图 5 基于同步参考坐标系的矢量示意图

因此, 以 u_q 为反馈, dq 坐标系的旋转角频率 ω 为控制量, 以 $u_q = 0$ 为控制目标, 即可控制 d 轴跟随 $\mathbf{u}_m$ 并获得当前母线电压的相位^[6-7], 据此建立的锁相环结

构框图如图 6 所示。

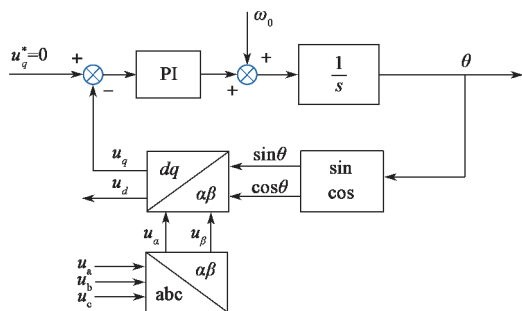


图 6 基于同步参考坐标系的锁相环结构框图

并网控制策略如图 7 所示, 同步锁相模块首先检测三相母线的相位和输出母线电压当前相位; 下垂控制模块根据瞬时功率实时计算有功功率 P 和无功功率 Q , 不断修正电压的幅值和频率, 以实现辅助变流器输出功率的平衡。上述信号经过电压、电流闭环控制后通过 PWM 调制控制三相桥输出交流电压对负载供电。

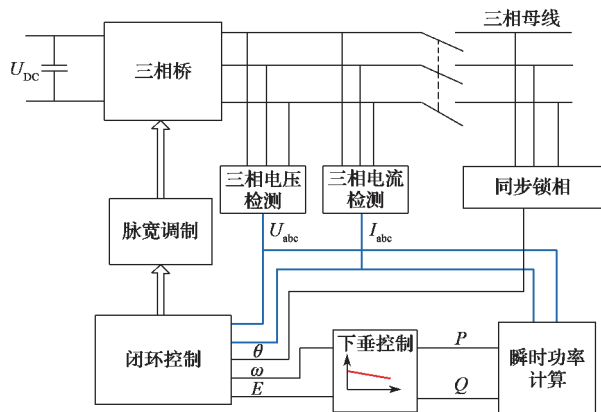


图 7 辅助变流器并网控制策略

3 实车带载试验

350 km/h 中国标准动车组在大西综合试验段进行了实车辅助供电并网专项测试。动车组中的 M2 车、M4 车、M5 车和 M7 车分别设有 1 台 260 kVA 的辅助变流器。试验时, 闭合主断路器, 整车根据启动逻辑正常启动辅助变流器及负载, M2 车辅助变流器启动后, 其为负载供电的同时还提供所需的母线电压, 然后依次启动 M4 车、M5 车和 M7 车辅助变流器进行并网。M4 车辅助变流器根据母线电压 (M2 车辅助变流器输出电压) 相位进行锁相并进行软启动, 并网过程电压波形如图 8 所示。从图 8 可看出刚启动时, M4 车辅助

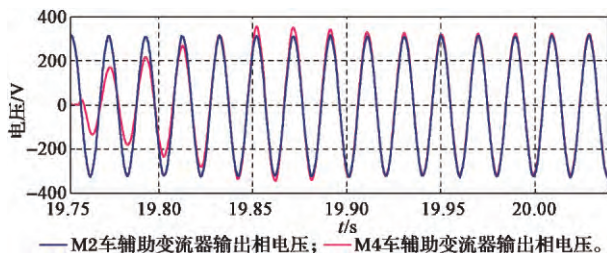


图 8 M4 车辅助变流器输出并网过程电压波形

变流器电压和 M2 车辅助变流器电压存在相位差, M4 车辅助变流器通过调整自身输出, 使得其输出电压、频率、相位与 M2 车辅助变流器输出一致。4 台辅助变流器成功并网后的输出电压波形如图 9 所示, 各辅助变流器输出电压一致性较好。

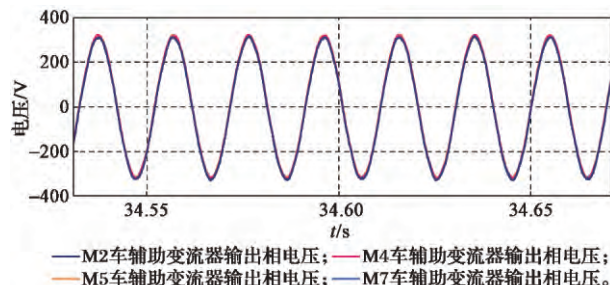


图 9 4 台辅助变流器输出并网完毕后电压波形

图 10 为 4 台辅助变流器并网过程中电压和功率变化曲线。从图 10 可以看出, 当主断闭合后, M2 车、M4 车、M5 车和 M7 车的辅助变流器依次进行启动, 当 M4 车辅助变流器启动后, 通过下垂控制, 电压快速调整至与 M2 车辅助变流器输出电压一致, M2 车和 M4 车辅助变流器输出功率也快速调整接近一致; 当 M5 车和 M7 车辅助变流器启动后, 4 辆车辅助变流器输出电压和输出功率基本保持一致, 4 辆车辅助变流器输出均流效果良好。

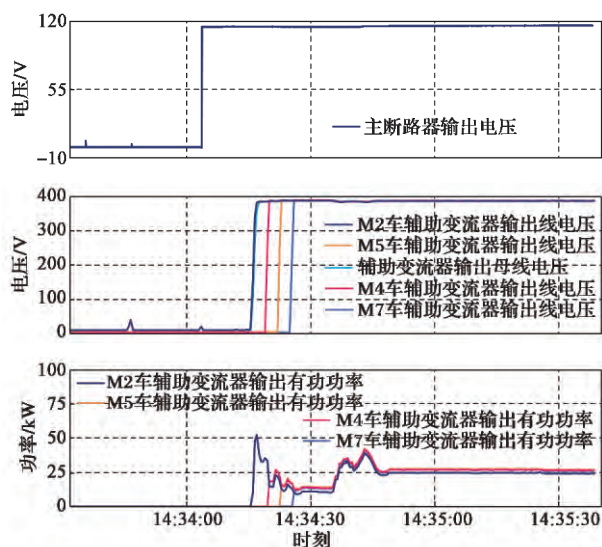


图 10 并网过程输出电压和功率变化

图 11 为在列车运行过程中 M7 车辅助变流器切除后再次恢复过程中的电压、功率变化情况。从图 11 可以看出，当 M7 车辅助变流器切除后，其输出电压和功率降为 0；M2 车、M4 车和 M5 车辅助变流器输出电压有所跌落，但其输出功率快速调整，分担 M7 车辅助变流器原输出功率；当 M7 车辅助变流器恢复后，4 台辅助变流器输出电压调整至一致，辅助负载功率又均分到每台辅助变流器上，整个过程动车组辅助负载运行正常。

(下转第34页)

- 流分析及抑制 [J]. 电网技术, 2017, 42(2): 610-616.
- [10] 岳雨霏, 徐千鸣, 马伏军, 等. 基于子模块电压波动估计的 MMC 双环二倍频环流抑制策略 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(10): 20-32.
- [11] 姚骏, 赵磊, 谭义, 等. 适用于模块化多电平换流器的环流抑制策略 [J]. 电网技术, 2016, 40(9): 2764-2771.
- [12] ZHAN H L, ZHU Z Q, ODAVIC M. Analysis and suppression of zero sequence circulating current in open winding PMSM drives with common DC bus [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(4): 3609-3620.
- [13] 苑宾, 许建中, 赵成勇, 等. 模块化多电平换流器 PR 环流抑制器优化设计 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2567-2575.
- [14] WANG Jinyu, LIANG Jun, WANG Chengfu, et al. Circulating current suppression for MMC-HVDC under unbalanced grid conditions [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2017, 53(4): 3250-3259.
- [15] 徐千鸣, 罗安, 马伏军, 等. 谐振滤波型模块化多电平换流器低频控制方法 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 489-498.
- [16] XIA Changliang, JI Bingnan, YAN Yan. Smooth speed control for low-speed high-torque permanent-magnet synchronous motor using proportional - integral - resonant controller [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(4): 2123-2134.

- [17] 张海洋, 许海平, 方程, 等. 基于比例积分 - 准谐振控制器的直驱式永磁同步电机转矩脉动抑制方法 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(19): 41-51.
- [18] ZHAO R, XIN Z, LOH P C, et al. A novel flux estimator based on multiple second-order generalized integrators and frequency-locked loop for induction motor drives [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(8): 6286-6296.
- [19] 刘桂花, 曹小娇, 王卫. 弱电网下单相光伏并网逆变器锁频环同步方法 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 5022-5029.
- [20] XIN Zhen, ZHAO Rende, BLAABJERG F, et al. An improved flux observer for field-oriented control of induction motors based on dual second-order generalized integrator frequency-locked loop [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(1): 513-525.
- [21] JOVCIC D, JAMSHIDI Far A. Phasor model of modular multilevel converter with circulating current suppression control [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(4): 1889-1897.
- [22] JAMSHIDI Far A, JOVCIC D. Small-signal dynamic DQ model of modular multilevel converter for system studies [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 191-199.

作者简介: 宋平岗 (1965—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力电子与新能源。

(上接第 27 页)

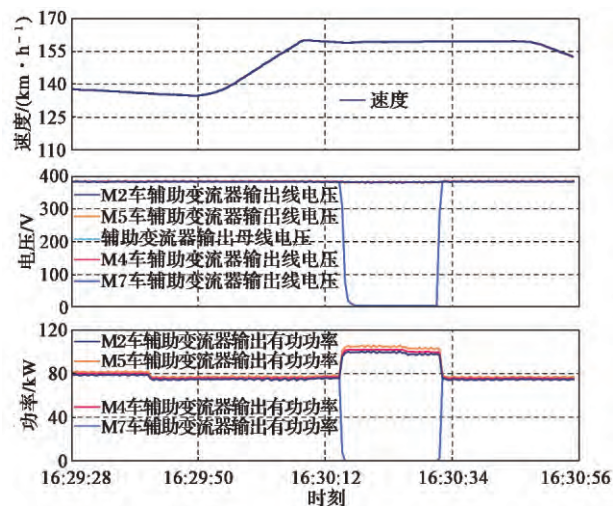


图 11 辅助变流器投切时输出电压和功率变化

4 结语

针对 350 km/h 中国标准动车组辅助供电系统母线并网供电的需求, 对并联供电方式进行分析, 采用适用于动车组的无互联线并网技术。本文对无互联线辅助供电并网三相锁相技术和下垂控制进行了研究, 并给出了其控制算法原理。实车试验表明, 350 km/h 中

国标准动车组辅助供电并网控制技术动态响应快、均流效果好, 达到了预定并网效果。

参考文献:

- [1] 张尧, 马皓, 雷彪, 等. 基于下垂特性控制的无互联线逆变器并联动态性能分析 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(3): 42-48.
- [2] 张丹红, 李乐, 刘开培. 无互联线逆变器并联控制的一种改进下垂算法 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2006, 39(5): 97-101.
- [3] 中国铁路总公司. 关于印发《时速 350 公里中国标准动车组暂行技术条件》的通知: 铁总科技 [2014] 50 号 [S]. 北京: 中国铁路总公司, 2014.
- [4] 陈杰. 城轨列车辅助供电系统高品质波形控制及无互联线并联关键技术研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [5] FUKUDA S, MATSUSHITA K. A control method for parallel-connected multiple inverter systems [C] // IET. 1998 Seventh International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives (IEE Conf. Publ. No.456). London: IET, 1998: 175-180.
- [6] 洪小圆, 吕征宇. 基于同步参考坐标系的三相数字锁相环 [J]. 电工技术学报, 2012, 27 (11): 203-210.
- [7] 龚锦霞, 解大, 张延迟. 三相数字锁相环的原理及性能 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 94-99.

作者简介: 宋永丰 (1988—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事动车组牵引辅助系统性能研究及检测。