

串联式混合动力汽车发电机恒压发电性能试验研究

李 军, 倪大成, 姚 超, 黄 庆, 龚 军

(湖南力行动力科技有限公司, 湖南 株洲 412007)

摘 要:针对串联式混合动力汽车发电机恒压发电性能试验存在的问题,提出一种实际电机负载试验方案,并对发电机进行恒压发电性能试验。结果表明,实际电机负载试验方案切实可行,可为动力单元联合调试提供参考。

关键词:串联式混合动力汽车;发电机;恒压发电;性能试验

中图分类号:U467.2

文献标志码:A

文章编号:1006-3331(2024)01-0035-05

Experimental Study on Constant-voltage Power Generation Performance of Series Hybrid Electric Vehicle Generator

LI Jun, NI Dacheng, YAO Chao, HUANG Qing, GONG Jun

(Hunan Lixing Power Technology Co., Ltd., Zhuzhou 412007, China)

Abstract: Aiming at the problems that exist in the constant-voltage power generation performance test of series hybrid vehicle generators, this paper proposes an actual motor load test scheme and carries out the constant-voltage power generation performance test for the generator. The results show that the actual motor load test scheme is feasible, which provides a reference for the joint commissioning of power units.

Key words: series hybrid electric vehicle; generator; constant-voltage power generation; performance test

因串联式混合动力系统的结构简单、布置灵活而广泛应用于新能源汽车^[1-2]。串联式混合动力系统由发动机单元及动力电池组成,发动机单元是主要动力源,动力电池起储能、功率平衡及稳住高压母线电压的作用^[3]。发动机单元由发动机和发电机构成,发电机为动力系统提供高压直流电。

如果串联式混合动力汽车中的动力电池出现故障导致整车抛锚无法挪车,则需要发动机单元起到动力电池的作用。为此,对串联式混合动力汽车发电机恒压控制技术进行了许多研究^[4-8],但未开展性能试验的研究。为早日实现串联式混合动力汽车发电机恒压发电技术的装车应用,本文对发电机恒压发电试验方案进行研究,提出一种新型负载试验方案,并进行性能试验验证。

1 试验方案

性能试验主要测试发电系统输出电压的波动情况,试验系统包含高压电源、测功机、发电系统、检测设备及负载等。图1为性能试验原理框图。

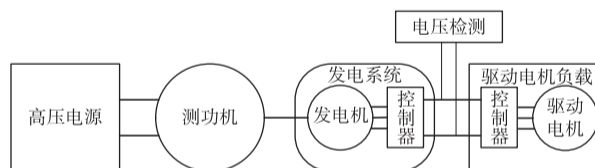


图1 性能试验原理框图

发电系统恒压发电性能测试项目有:①稳态功率下电压调整率 S_V ;②稳态功率下负载调整率 S_L ;③动态功率下负载调整率 S_D 。

1) 稳态功率下的电压调整率是指发电系统工作

收稿日期:2023-10-14。

第一作者:李 军(1989—),男,工程师;主要从事新能源动力系统集成与匹配技术的研究工作。E-mail:lijun1@csrzie.com。

在额定转速下,在工作电压范围内输出电压的最大变化率,用百分数表示。稳态功率下电压调整率 S_V 按式(1)计算:

$$S_V = |U - U_0| / U_0 \times 100\% \quad (1)$$

式中: U_0 为发电系统输出电压给定值,一般选取3个,分别设置为发电系统工作电压的典型值、最大值及最小值; U 表示发电系统输出电压的最大值或最小值,选取相对 U_0 差值较大的值(若 $|U_{\max} - U| > |U_{\min} - U|$, 计算电压调整率时, U 选 $U_{\max}$, 反之 U 则选 $U_{\min}$)。

2) 稳态功率下的负载调整率是指发电系统工作在额定电压下,功率负载不变时输出电压的最大变化率,用百分数表示。稳态功率下负载调整率 S_L 按式(2)计算:

$$S_L = |U - U_0| / U_0 \times 100\% \quad (2)$$

功率负载不变工况时,负载大小一般选取3个,分别设置为轻载、半载及满载。

3) 动态功率下的负载调整率是指发电系统工作在额定电压下,功率负载突变时输出电压的最大变化率,用百分数表示。动态功率下负载调整率 S_D 按式(3)计算:

$$S_D = |U - U_0| / U_0 \times 100\% \quad (3)$$

功率负载突变工况时,负载大小分别设置为从零到满载的突变及从满载到零的突变。

4) 电压调整率及负载调整率性能指标参考 GJB 235A—97《军用交流移动电站通用规范》^[9],对于 250 kW 及以上功率等级的发电系统,稳态功率下电压调整率 $S_V \leq 2.5\%$,稳态功率下负载调整率 $S_L \leq 2.5\%$,动态功率下负载调整率 $S_D \leq 5\%$ 。

2 传统负载试验方案

传统负载方案采用电阻箱来模拟图1中的整车驱动电机负载,所需试验设备较少,试验原理简单。试验中通过调节电阻箱中的电阻配置及通断投切开关来调节负载大小,因此负载大小不能连续变化,其负载调节表现为有级调节,调节范围有限,图2为电阻负载配置及投切示意图。

在电阻负载的基础上,文献[10]将电阻负载改为负载系统。负载系统包括负载控制柜、电阻箱、电

抗器等部分。负载控制由负载控制柜实现,包括阻性负载和感性负载的控制,结合模糊控制和对分插值逼近算法,实现了有功功率的无级调节,同时通过对电感负载的调节,实现了无功功率的无级调节。此方案与电阻负载方案相比,解决了负载大小不能连续调节的问题,但其本质是采用电阻和电感的组合来模拟后端用电负载,这种电阻和电感组合的形式与实际的整车驱动电机负载差异较大,无法准确地反映出现实工况^[11],且试验过程中通过电阻吸收发电机产生的电功率,将电能以热能的形式消耗掉,不具备能量回馈功能,试验过程能耗较大。

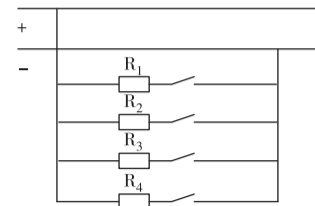


图2 电阻负载配置及投切示意图

3 新型负载试验方案

为精准模拟图1中的整车驱动电机负载,本文采用新型负载方案来开展恒压发电性能试验。新型负载方案采用真实电机负载来模拟实际整车驱动电机负载。真实电机负载方案中包含两套驱动系统、一个对拖台及一个电源柜,所需试验设备较多,试验原理复杂。其中两套驱动系统采用的电机规格与被试发电机相同,所以负载投切能力与被试发电系统性能完全保持一致。通过驱动系统的上位机控制软件进行转矩输出,可实现负载连续调节的功能。

由于负载形式与整车驱动系统一样,所以可精准模拟整车驱动工况。同时,该方案具备能量回馈功能,试验过程绿色节能。该方案中永磁同步电机主要性能指标参数如下:额定功率为 300 kW,峰值功率为 350 kW;额定转速为 1 600 r/min,峰值转速为 2 300 r/min;额定转矩为 1 789 N·m,峰值转矩为 2 088 N·m。

图3为电机负载试验原理框图。闭合接触器 K_1 , 高压直流电源1给测功机提供高压直流电,测功机通过变速器拖动被试电机 M_3 , 被试控制器 U_3 经过

不可控整流输出高压直流电, 被试电机 M_3 被反拖到给定转速, L_3 母线上高压直流电压达到被试控制器工作电压, 给被试控制器使能并下发恒压发电模式指令, 此时 L_3 母线电压稳定在给定直流电压。

闭合接触器 K_3 , 高压直流电源 2 给陪试控制器 U_1 提供高压直流电, 陪试控制器 U_1 控制陪试电机 M_1 工作于馈电模式、转速环状态, 转速设置为陪试电机额定转速, 陪试电机 M_1 通过对拖台将陪试电机 M_2

拖动至额定转速。闭合接触器 K_2 , 陪试控制器 U_2 控制陪试电机 M_2 工作于电动模式、转矩环状态。

通过调节陪试控制器 U_2 的转矩给定值, 控制陪试电机 M_2 的电动功率, 来实现被试发电机系统恒压发电负载的调节功能, 调节过程中用功率分析仪监控 L_3 直流母线电压, 用来计算电压调整率及负载调整率。

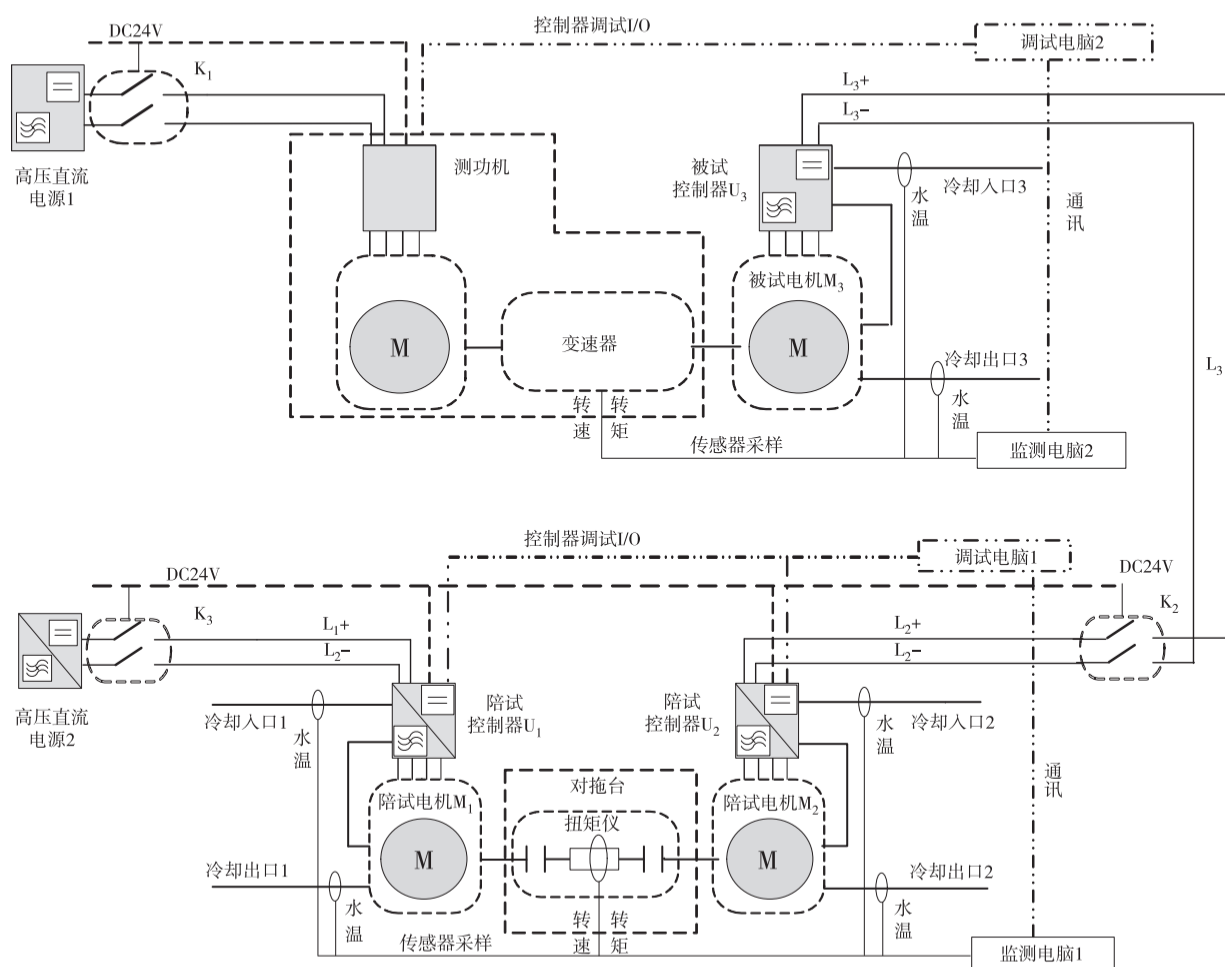


图3 电机负载试验原理框图

4 试验结果

4.1 稳态功率下电压调整率试验

被试电机 M_3 及陪试电机 M_1 工作在额定转速 1 600 r/min, 陪试发电机控制器 U_2 通过上位机给定转矩 895 N·m, 模拟驱动电机稳态负载 150 kW。被试发电机控制器 U_3 输出的给定直流电压分别设置为: 典型值 600 V、最大值 700 V、最小值 500 V, 稳态工作下电压输出波形如图4、图5、图6所示。

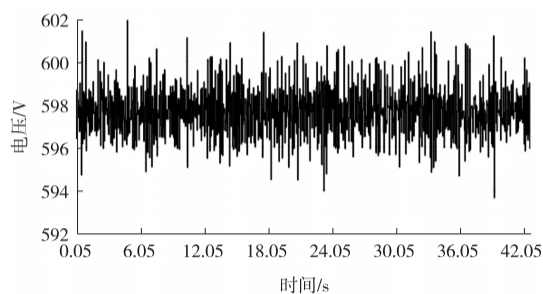


图4 600 V 电压平台下电压输出波形

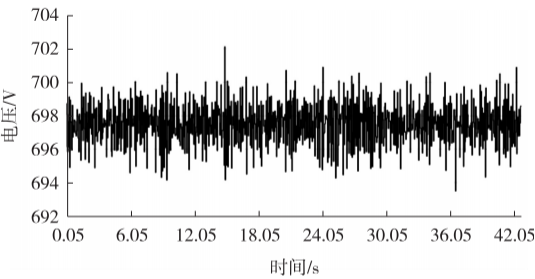


图 5 700 V 电压平台下电压输出波形

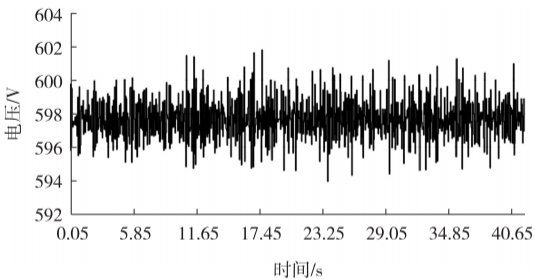


图 8 150 kW 功率下电压输出波形

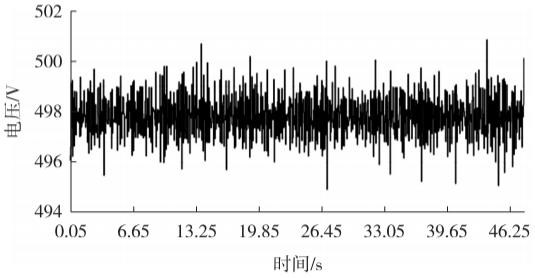


图 6 500 V 电压平台下电压输出波形

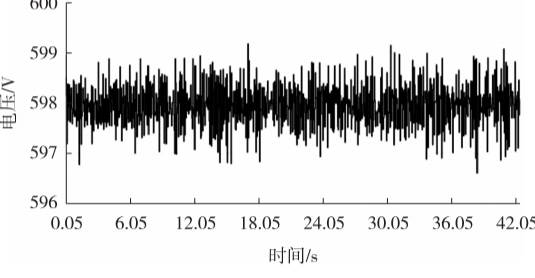


图 9 30 kW 功率下电压输出波形

各电压平台下稳态功率工作时,通过分析波形数据,并按式(1)计算电压调整率 S_V ,结果见表 1。

表 1 稳态功率下电压调整率

输出功 率/kW	给定直流 电压/V	实测母线电 压最大值/V	实测母线电 压最小值/V	电压调 整率/%
150	600	601.9	593.6	1.1
150	700	702.1	693.5	0.9
150	500	500.9	494.9	1.0

4.2 稳态功率下负载调整率试验

被试电机 M_3 及陪试电机 M_1 工作在额定转速 1 600 r/min,被试发电机控制器 U_3 输出的给定直流电压设置为 600 V,陪试发电机控制器 U_2 通过上位机分别给定转矩 1 789 N·m、895 N·m、179 N·m,模拟稳态负载分别对应 300 kW、150 kW、30 kW,稳态工作下电压输出波形如图 7、图 8、图 9 所示。

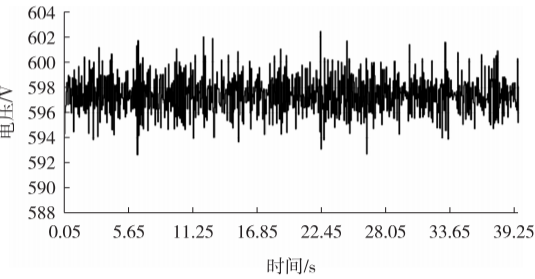


图 7 300 kW 功率下电压输出波形

各功率等级下稳态功率工作时,通过分析波形数据,并按式(2)计算负载调整率 S_L ,结果见表 2。

表 2 稳态功率下负载调整率

输出功 率/kW	给定直流 电压/V	实测母线电 压最大值/V	实测母线电 压最小值/V	负载调 整率/%
300	600	602.4	592.6	1.2
150	600	601.8	593.9	1.0
30	600	599.2	596.6	0.6

4.3 动态功率下负载调整率试验

被试电机 M_3 及陪试发电机 M_1 工作在额定转速 1 600 r/min,被试发电机控制器 U_3 输出的给定直流电压设置为 600 V,陪试发电机控制器 U_2 通过上位机给定转矩分别从 0 突变到额定转矩 1 789 N·m,从额定转矩 1 789 N·m 突变到 0,并模拟驱动电机动态功率负载从 0 突变到 300 kW 及从 300 kW 突变到 0 的各种工况,动态功率负载下电压输出波形如图 10 和图 11 所示。

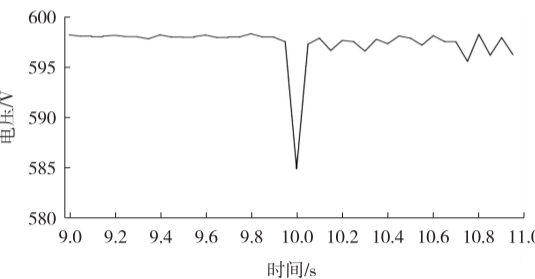


图 10 负载从 0 突变到 300 kW 时电压输出波形

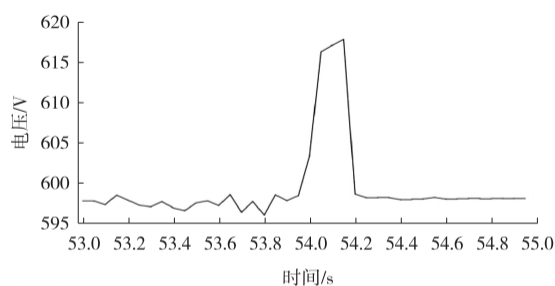


图 11 负载从 300 kW 突变到 0 时电压输出波形

功率负载突变时,通过分析波形数据,并按式(3)计算负载调整率 S_D ,结果见表 3。

表 3 动态功率下负载调整率

输出功 率/kW	给定直流 电压/V	实测母线电 压最大值/V	实测母线电 压最小值/V	负载调 整率/%
0 突变到 300	600	599.6	584.8	2.5
300 突变到 0	600	617.8	594.6	3.0

由以上试验数据可知,发电机在恒压发电模式下,驱动电机稳态功率负载时电压调整率和负载调整率精度均很高,调节精度在 1% 左右;当功率负载突变时,由于功率变化大,能量的突增突减导致母线电压瞬间波动稍大,调节精度略差,最大值达到 3%,而后输出电压恢复稳定输出,调节精度满足性能指标要求。

5 结束语

本文介绍了发电系统恒压发电的性能指标及试验原理,在研究发电机组传统负载试验方案的基础上,提出了一种电机负载实物试验方案,进行了发电系统恒压发电性能试验,并分析了试验数据。试验结

果表明,电机负载试验方案切实可行,且发电系统在不同电压平台、稳态负载及动态负载下,实际电压调整率和负载调整率均满足性能指标要求,为后续动力单元联合调试及实际装车应用提供了重要依据。

参考文献:

- [1] 徐浩轩,马晓军,刘春光. 混合动力装甲车直流微电网大信号稳定性分析[J]. 兵工学报,2023,44(1):108-116.
- [2] 盖江涛,生辉,周广明,等. 串联式混合动力履带车辆急加速工况功率平衡控制策略[J]. 兵工学报,2021,42(10):2180-2188.
- [3] 赵宏志. 电驱车辆动力单元控制策略研究[D]. 北京:中国运载火箭技术研究院,2021.
- [4] 宫佳鹏,张锦,冯京京,等. 永磁同步发电机组输出电压控制研究[J]. 工业仪表与自动化装置,2017(4):77-80.
- [5] 牛建民,卢亚辉,徐保荣. 基于永磁同步发电机可控整流稳压发电系统研究[J]. 机电工程技术,2020,49(7):53-55.
- [6] 甘志伟,缪冬敏,王云冲,等. 宽转速范围永磁同步电机系统稳压控制及参数优化[J]. 电工技术学报,2020,35(8):1624-1633.
- [7] 郝亮. 双三相永磁同步发电机抗负载扰动及无母线电流传感器稳压控制[D]. 镇江:江苏大学,2022.
- [8] 张保仓,赵峰,王永兴,等. 基于电压角度控制的稳压发电系统研究[J]. 微电机,2013,46(6):71-75.
- [9] 国防科学技术工业委员会. 军用交流移动电站通用规范: GJB 235A—97[S]. 北京:机械标准化所,1997:3.
- [10] 暨仲明,万乐生. 发电机组测试台架设计[J]. 机电工程,2009,26(11):24-26.
- [11] 何彦伟. 推土机电传动系统负荷—效率分析及试验研究[D]. 西安:长安大学,2020.