

本文全文线上首发由  
上海电机系统节能工程技术  
研究中心有限公司  
支持

王昊,姚远,申卿,刘耀元,贾奕健.  
基于CAN总线的柴电机组控制系统策略  
研究与实现.  
电机与控制应用,2021,48(12):104.



**SEARI**  
上電科

**NCMS**  
上科电机

[www.nems.com.cn](http://www.nems.com.cn)

掌握电机行业制造核心技术,  
辐射智能制造产业发展



## · 业务范围 ·



异步电机装配线



永磁电机装配线



悬挂链电机喷漆线

上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司 [www.nems.com.cn](http://www.nems.com.cn)

地址: 上海市武宁路505号

手机: 18918357509

电话: 021-62574990-436

传真: 021-62163904

邮箱: wangcj@seari.com.cn

# 基于 CAN 总线的柴电机组控制系统 策略研究与实现

王昊<sup>1,2</sup>, 姚远<sup>3</sup>, 申卿<sup>1,2</sup>, 刘耀元<sup>2</sup>, 贾奕健<sup>2</sup>

(1. 船舶与海洋工程动力系统国家工程实验室, 上海 200090;

2. 上海船用柴油机研究所, 上海 200090; 3. 中国交通信息科技集团有限公司, 北京 100088)

**摘要:** 为提高孤岛有限容量系统的稳定性和经济性, 通常采用多台同型或异型发电机组并机运行的方法来实现系统的输出扩容。机组的并机控制、负荷分配策略是决定系统运行稳定的核心因素, 因此设计了一种基于 CAN 总线的柴电机组控制系统。首先, 针对 CAN 总线控制系统进行总体设计; 然后, 针对柴电机组并机运行要求, 对其调速、调压、负荷均衡分配控制策略进行分析研究, 制定了并机控制、负荷分配策略; 最后, 结合工程应用案例, 成功实现了该控制系统在同型/异型机组间的应用, 该系统还具有完善的发动机燃油控制、故障诊断功能。

**关键词:** 孤岛有限容量系统; CAN 总线; 同型/异型机组; 并机控制; 负荷均衡控制

中图分类号: TM 31 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)12-0104-07

doi: 10.12177/emca.2021.134

## Research and Implementation for Diesel Generator Sets Control System Strategy Based on CAN Bus

WANG Hao<sup>1,2</sup>, YAO Yuan<sup>3</sup>, SHEN Qing<sup>1,2</sup>, LIU Yaoyuan<sup>2</sup>, JIA Yijian<sup>2</sup>

(1. National Engineering Laboratory for Marine and Ocean Engineering Power System,  
Shanghai 200090, China;

2. Shanghai Marine Diesel Engine Research Institute, Shanghai 200090, China;

3. China Communications Information Technology Group Co., Ltd., Beijing 100088, China)

**Abstract:** In order to improve the stability and economy of the island limited capacity system, multiple same type or different type generator sets are operated in parallel to realize the output expansion of the system. The parallel control and load distribution strategy of the generator sets are the core factors which determine the stability of the system. Thus, a diesel generator sets control system is designed based on CAN bus. Firstly, the integrated design for the CAN bus control system is carried out. Secondly, according to the requirements of parallel operation of the diesel generator sets, the control strategies of speed and voltage regulation, and load balancing distribution are analyzed and studied. The parallel control and load distribution strategies are formulated. Lastly, combined with engineering application cases, the application of the control system is successfully realized for the same type and different type generator sets. The system also has perfect engine fuel control and fault diagnosis functions.

**Key words:** island limited capacity system; CAN bus; same type/different type generator sets; parallel control; load balancing control

收稿日期: 2021-08-31; 收到修改稿日期: 2021-11-15

作者简介: 王昊(1992—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统及其自动化。

## 0 引言

随着国内外大力推进绿色低碳港口建设,港口大型装卸设备“油改电”和“靠港船舶岸电供电”等港口电气化新建或改造已大规模实施,电力已成为港口的主要能源。而港口设备单机功率大且工况复杂频变,此类工程负载,运行于大电网时一般较为稳定。但运行于由柴油发电机组组成的有限容量系统时,会对该有限容量系统造成较大负载冲击,严重影响港口设备供电品质。针对上述问题,通过将多台同型或异型发电机组(控制器、容量、转速、特性均不相同)并机运行的方法来实现港口孤岛电站的扩容,同时采用飞轮储能技术改善该孤岛有限容量电力系统的供电品质已成为电网薄弱港口建设的主要手段<sup>[1-2]</sup>。该方案不仅可以平缓冲击负载对港口电网造成的冲击,而且能够随着负荷的变化灵活调整发电机组的投运数量,提高港口的运营经济性。

目前,大多数柴油发电机组控制系统仍是采用常规的数字量和模拟量控制,控制器和数据采集多选用西门子PLC组件,如文献[3-5]设计的基于PLC的柴油发电机组控制系统虽具有较为完整的保护功能且自动化程度较高,但该类型的系统均需使用大量的PLC组件,控制系统复杂。CAN因具有实时性好、抗干扰能力强、成本低、传输速率高等特点,而广泛应用于汽车、自动控制、电力系统等多个工程领域<sup>[6-7]</sup>。文献[8]设计了一套基于CAN总线的船舶电站自动控制系统,该系统集控制、监测、保护、管理于一体,采用双冗余网络结构并具备较强的扩展能力,很大程度地提高了船舶电站的系统安全性和稳定性,并可根据不同船舶电站控制系统的结构差异灵活配置控制系统设备,具有较强的工程应用价值。文献[9]采用CAN总线技术实现了柴油发电机组的并机控制,该系统相较于以往基于模拟量的柴油发电机组并机控制系统具有较大优势,大幅提高系统数字化水平的同时,在系统运行的稳定性、可靠性及交互性方面均有较大提升,具有较好的工程推广应用价值。文献[10]为实现柴油发电机组的自动控制及远程监控功能,结合高性能单片机,采用CAN总线技术实现了发电机组的自动起动、并车、负载分配及自动卸载等功能,实现了系统输入输出共享、控

制器冗余设计,提高了系统的可靠性。

虽然以上文献所提出的基于CAN总线的控制系统均可较好地适用于同型柴油发电机组,但对于频变负荷环境下的异型机组并网运行控制未有涉及,而异型发电机组在并网过程及频变负荷过程中机组有功功率及无功功率的均衡分配很难控制,实现并保证由异型机组组成的有限容量系统的稳定运行是工程应用的重中之重。本文设计了一套基于CAN总线的柴油发电机组控制系统来实现多台同型或异型柴油发电机组的起停控制、电压/频率调节、并网/解列控制、负荷均衡分配、状态监测及故障诊断功能。

## 1 基于 CAN 总线的控制系统总体方案

柴油发电机组的输出频率与发电机组电枢转速有关,当输出频率随负载变化时,应通过柴油发电机组的ECU调节喷油量和正时以稳定发动机转速。而发电机组的机端电压会随负载而变化,要维持输出电压不变,就必须在负载变动时调节发电机的励磁电流。同时,有功/无功功率也能在并联机组间合理分配<sup>[11]</sup>。基于以上要求,设计的基于CAN总线的柴电机组并机控制系统控制原理如图1所示。

图1所示的控制系统由①Woodward easYgen-2500 机组控制器、②Basler DECS-150 数字式励磁调节器、③发动机 ECU、④真空断路器及二次控制回路组成。控制系统通过J1939协议实现发动机的运行监测、故障诊断、安保及控制功能。通过CANopen协议实现在网运行机组的负荷管理,并集成有Modbus RS485通信接口同上位机进行通信。

## 2 控制系统控制策略研究

在实现了柴油发电机组控制系统总体方案之后,需对基于CAN总线的柴电机组控制策略进行深入研究,以期实现各种控制功能并为后续的软件设计提供指导依据。控制策略研究主要包括三方面内容:(1)并机过程中发动机转速及发电机端电压的调节控制策略研究,以确保顺利并机;(2)并机成功后的负荷均衡控制策略研究,以确保柴电机组间有功功率、无功功率的合理分配,使电网稳定运行;(3)机组解列过程中负荷转移控制策略研究,确保机组平滑退网,避免对微电网造成较大的负荷冲击。

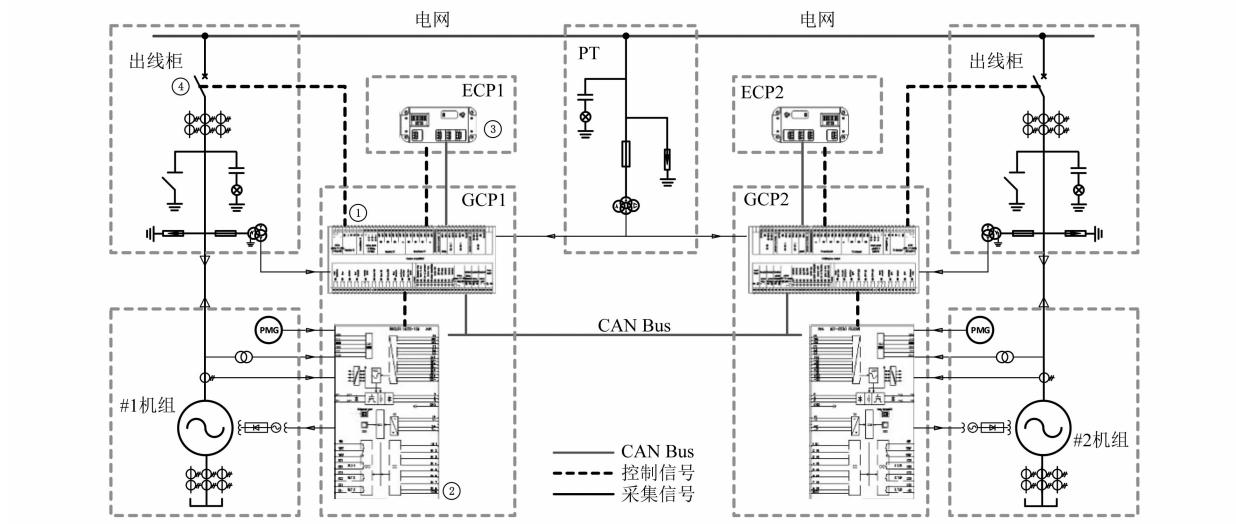


图 1 基于 CAN 总线的柴电机组控制系统原理图

## 2.1 并机控制策略研究

孤岛有限容量电力系统往往需要将多台同型或异型发电机组并机运行以达到孤网系统高效、经济、稳定运行的目的。发电机组投入并联运行的过程称为并机，该过程须满足并机技术条件，否则将会对孤岛有限容量电力系统造成较大的冲击或并机失败，对并机技术条件总结如下：(1) 待并发电机组的电压和系统母线电压幅值相等且波形一致；(2) 待并发电机组的电压和系统母线电压相位一样；(3) 待并发电机组的频率和系统母线频率相等；(4) 待并发电机组的相序和系统母线相序相同。

为达到上述并机技术条件，应分别对柴电机组的频率和机端电压进行调节。

### 2.1.1 发动机转速控制策略

当上述并机技术条件的其他三项满足而转速存在偏差即频率不一致时，发电机的机端电压  $E_{01}$  和电网电压  $U$  便有相对运动，两相量间的相位差在  $0^\circ \sim 360^\circ$  之间不断变化，且电压差  $\Delta U = E_{01} - U$  忽大忽小。频率差越大，变化越剧烈，并机过程也越困难；若投入电网，亦较难牵入同步，且在电机和电网间会引起较大的拍振电流和功率振荡。发动机转速调整策略应根据发动机转速调整特性曲线制定，如图 2 所示。

发动机转速应随着机组有功功率的变化而自动调节，为了柴电机组稳定地并机运行且不同机组间均匀承担有功功率，发动机的调速特性曲线

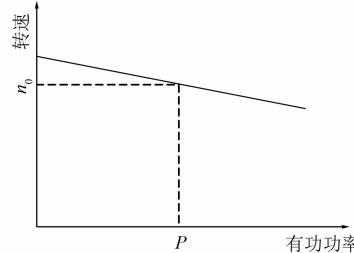


图 2 调速特性曲线

应设置为下垂特性曲线。

### 2.1.2 发电机电压控制策略

当上述并机技术条件的其他三项满足而电压幅值不一致时，并入电网相当于突加电压差  $\Delta U$  引起的瞬态过程，此时将在发电机和电网中产生一定的冲击电流，严重时该电流可达额定电流的 5~8 倍。机端电压调整策略应根据发电机电压调整特性曲线制定，如图 3 所示。

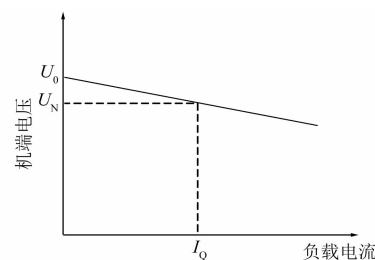


图 3 调压特性曲线

发电机的机端电压应随着机组无功功率的变化而自动调节，为了柴电机组稳定地并机运行且不同机组间均匀承担无功功率，发电机的调压特

性曲线应设置为下垂特性曲线。

## 2.2 负荷均衡控制策略研究

发动机输出功率和负载消耗功率不平衡是孤岛有限容量电力系统频率变化的根本原因。在孤网系统负荷发生变化时,发动机通过电子调速器来调节发动机的喷油量,从而使发动机的输出功率和负载消耗功率保持动态平衡以此来维持机组频率稳定。另外,若孤网系统无功功率储备不足,当系统无功负荷增加时,需降压运行来满足系统无功功率的平衡,若无功负荷无法均衡分配,在并联运行的发电机组之间将出现无功环流,影响孤

网系统的稳定性。

关于柴油发电机组有功功率与无功功率分配与调节控制策略研究可查阅文献[12]相关论述。

## 3 实例应用

海外某港口孤岛电站系统为港口集装箱堆场起重机、场桥及基础设施提供电力供应。该孤岛电站系统由3台8 500 kW的中速柴油发电机组,2台2 000 kW的高速柴油发电机组和4台2 000 kW的飞轮储能机组组成,馈线回路设置为2回,系统单线图及控制架构如图4所示。

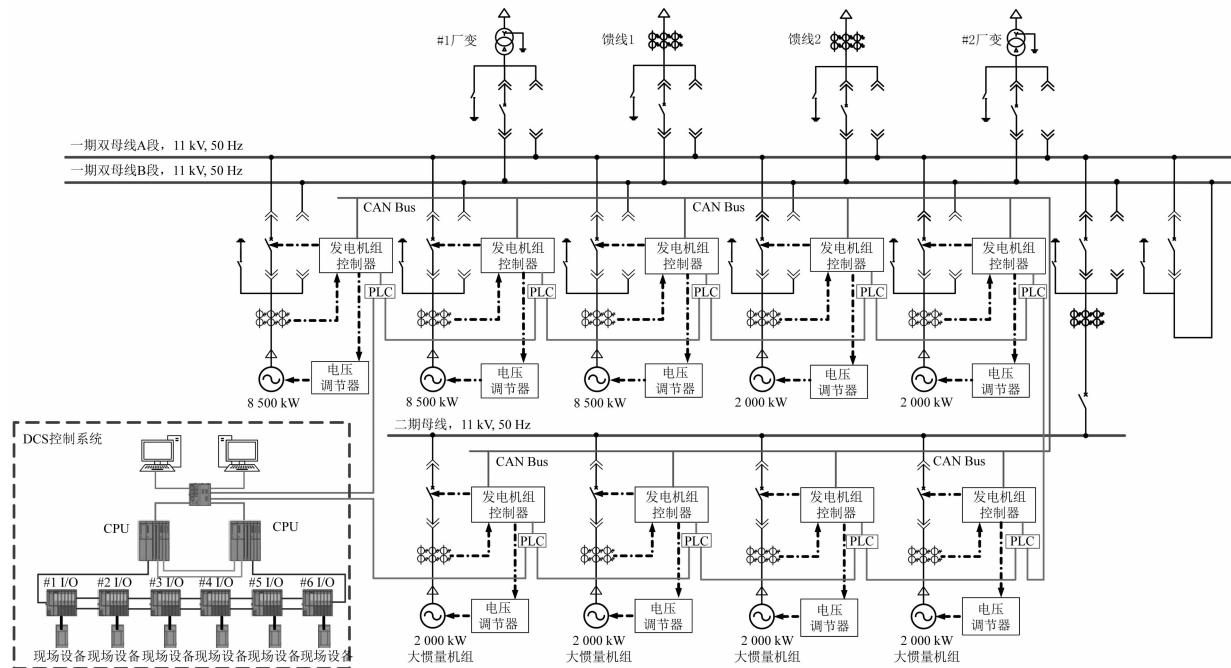


图4 系统单线及控制架构图

### 3.1 负荷均衡控制实现

机组控制器通过CAN Bus网络相互通信实现有功功率的自动分配和转移。系统软件通过实时计算电网负载率,将电网负载率和机组负载率进行偏差比较得到新的变量设定值,机组调速系统将根据新的设定值进行转速控制调节以改变柴油机的喷油量,进而完成并联运行机组间有功功率的转移和分配,如图5所示。

系统软件在电压调节器双闭环控制策略的基础上,设计一套集中式无功功率控制模块来统一协调异型机组并联运行时无功功率的均衡控制,

如图6所示。集中式无功功率控制模块不断地检测各并联运行机组的无功功率并和设定值进行比较,经软件处理计算后,输出偏差控制信号到电压调节器电压设定值处。该差值信号与电压设定值、实测机端电压信号叠加处理得到励磁调节器的输入,以此来完成励磁电流的调节控制,进而实现并联异型机组间无功功率的转移和分配。

柴油发电机组的解列与卸载过程是机组间负载分配转移的逆过程,在实现了机组有功及无功的转移之后,便可将待解列机组从电网中解列退出。

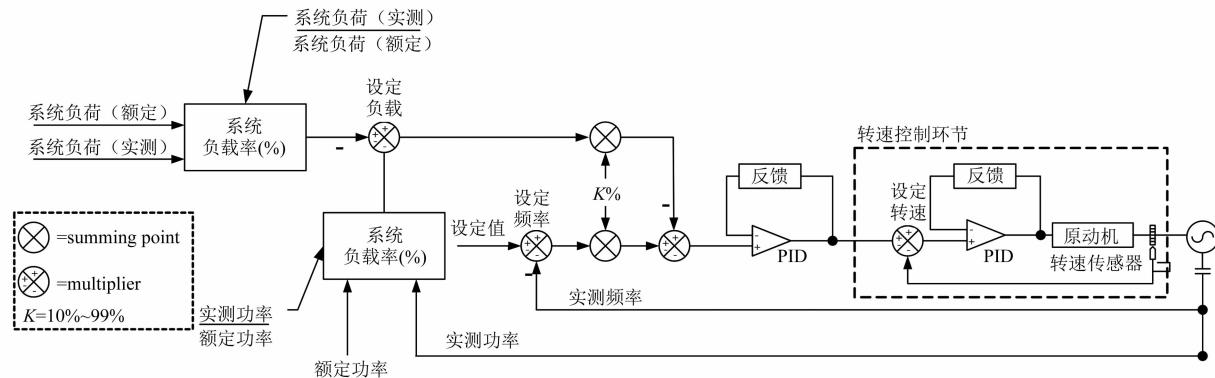


图 5 有功功率分配控制原理图

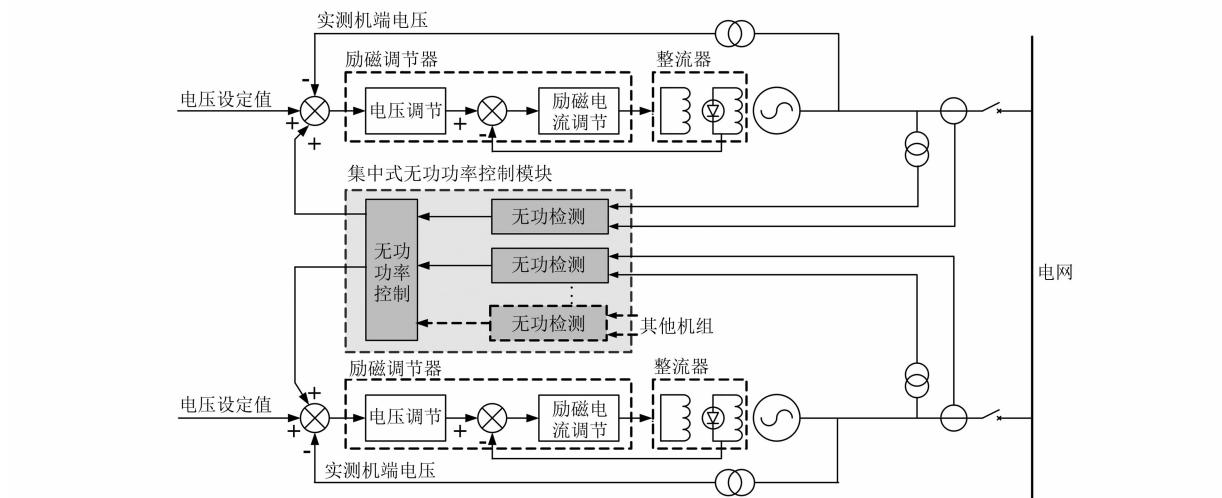


图 6 无功功率分配控制原理图

### 3.2 控制系统通信实现

CAN 报文的标识符影响标识符使用的效率、报文的相关优先权、通信结构的适用性和报文滤波适用性。本文所提系统采用 11 位标识符的标准帧结构为各控制器发送 ID，并由控制系统软件设计决定各机组所接收的标识符报文。各控制器的 ID 设定遵循以下原则：各控制器节点发送报文时，ID 逐渐增大而其优先权逐渐依次降低。如设定#1 机组控制器发送报文 ID 为 0X00，接受报文 ID 为 0X01/02/03/04…，#2 机组控制器发送报文 ID 为 0X01，接受报文 ID 为 0X00/02/03/04…。另外，根据该电站系统传输信息类型的不同而设置不同的优先级，如周期性播报的电网、机组参数及机组运行状态信息对于系统响应实时性要求不高，设置为较低的优先级；对于控制类、调度类、指令信息，设置优先级高于周期性播报信息。而对

于故障类、安保类、紧急操作类等涉及设备、系统安全的信息，设置为最高的优先级。

CAN 报文采用短帧结构，本文采用 8 字节报文传送数据。在协议中报文的数据用来传输与功能相关的信息，在数据传送过程中，当数据大于 8 位时，采用分段传输；当数据小于 8 位时，尽可能地合理利用 8 位字节传输更多的有效数据。报文数据分配原则如下所示：如 Data.0(电压有效值)，Data.1(电流有效值)，Data.2~3(有功功率)，Data.4~5(无功功率)等。

### 3.3 系统测试

该孤岛电站中各柴电机组将按比例执行负荷(有功/无功)分配，即并机运行的机组均承担相同比例的负载。试验过程中 3 台 3 MW 飞轮储能机组并机运行(出厂联调试验)，并机运行功率分配计算<sup>[13]</sup>如表 1 所示。

表 1 并机机组运行功率分配计算

| 负荷率/%          | 20  | 50    | 75    | 100   |
|----------------|---|-------|-------|-------|
| #1 机组有功功率/kW   | 408   | 1 029 | 1 530 | 2 000 |
| #2 机组有功功率/kW   | 416   | 1 033 | 1 532 | 2 010 |
| #3 机组有功功率/kW   | 415   | 1 036 | 1 537 | 2 010 |
| 总有功功率/kW       | 1 239   | 3 098 | 4 599 | 6 020 |
| #1 机组无功功率/kvar | 307   | 749   | 1 131 | 1 525 |
| #2 机组无功功率/kvar | 309   | 755   | 1 138 | 1 532 |
| #3 机组无功功率/kvar | 293   | 734   | 1 114 | 1 514 |
| 总无功功率/kvar     | 909   | 2 238 | 3 383 | 4 571 |
| $\delta P/\%$  | -0.3 0.2 0.1 -0.2 0 0.2 -0.2 0 0.2 -0.4 0.2 0.2     |       |       |       |
| $\delta Q/\%$  | 0.3 0.5 -0.8 0.2 0.7 -0.9 0.3 0.8 -1.1 0.1 0.7 -0.8 |       |       |       |

试验过程中 2 台 2 MW 飞轮储能机组和 1 台 8.5 MW 中速机组并机运行(现场交接试验时受港口运营负载功率限制,无法实现并网机组

20%~100% 负荷率下的所有负载测试,故重复测试了 20% 负荷率的并机运行试验测试系统的稳定性),并机运行功率分配计算如表 2 所示。

表 2 并机机组 20% 负荷率稳定性测试

| 项 目            | 1  | 2       | 3       | 4       |
|----------------|--|---------|---------|---------|
| #1 机组有功功率/kW   | 419.0  | 414.8   | 401.7   | 382.8   |
| #2 机组有功功率/kW   | 424.7  | 416.7   | 399.0   | 383.3   |
| #3 机组有功功率/kW   | 1 890.0  | 1 764.0 | 1 872.0 | 1 701.0 |
| 总有功功率/kW       | 2 733.7  | 2 595.9 | 2 672.7 | 2 467.1 |
| #1 机组无功功率/kvar | 95.9   | 82.8    | 74.8    | 71.9    |
| #2 机组无功功率/kvar | 172.0  | 164.7   | 153.0   | 153.0   |
| #3 机组无功功率/kvar | 630.0  | 630.0   | 630.0   | 630.0   |
| 总无功功率/kvar     | 897.9  | 877.5   | 857.8   | 854.9   |
| $\delta P/\%$  | 0.3 0 -0.3 -0.2 -0.2 0.4 0.4 0.5 -0.9 0.1 0.1 -0.2 |         |         |         |
| $\delta Q/\%$  | 2.6 -3.7 1.1 4.2 -2.1 -2.1 0 -1.6 1.6 -3.2 1.6 1.6 |         |         |         |

由表 1、表 2 可以看出,3 台储能机组分别在 20%、50%、75%、100% 负荷下并机运行,在不同的负荷率下,每台机组的有功功率分配均匀度及无功功率分配均匀度在 -1.1%~0.8% 之间;在 20% 负荷率下,每台机组的有功功率分配均匀度及无功功率分配均匀度在 -3.7%~2.6% 之间,分配均匀度优于 GB/T 2820.5-2009 G3 性能等级机组的指标。

#### 4 结语

基于 CAN 总线的柴电机组控制系统研究是一个具有实际意义的课题,通过 CAN 总线控制系统可实现孤岛有限容量系统的自动运行控制及异

型机组间并网运行负荷的均衡分配,切实提高了孤岛电站系统在频变负荷冲击下运行的可靠性和稳定性,并能使并联运行的各发电机组运行在经济区间,大大降低了系统运行成本,增加了运行效益。本文提出的基于 CAN 总线的柴电机组控制系统对于类似的工程使用场景具有较强的借鉴意义和推广意义。

#### 【参考文献】

- [1] 楚万秀,陈原伟,林志育,等.瞬变负荷蓄能发电机组设计[J].柴油机,2015,37(3): 43.
- [2] 益斌,杨文杰,陈松,等.瞬变负荷蓄能柴油发电机组预升速技术研究[J].柴油机,2015,37(2): 39.

- [ 3 ] 王征宇,程小猛,陆海峰.基于 CAN 总线和虚拟仪器技术的变频调速实时监控系统 [J]. 电测与仪表,2020,57(18): 1.
- [ 4 ] 姜春宇,金江善,王君惠,等. 船用柴油机冗余 CANopen 过程数据对象可调度性与一致性问题研究 [J]. 内燃机工程,2019,40(4): 78.
- [ 5 ] 郭林林,朱存平,傅卓人,等. 基于 PCS7 的 SBO 后备柴油发电机控制系统设计 [J]. 自动化仪表,2019,40(2): 26.
- [ 6 ] 桑秀典. PLC 在柴油发电机组控制系统中的应用分析 [J]. 科技创新与应用,2020(8): 162.
- [ 7 ] 刘超,陈武生,李建伟,等. 柴油电站控制系统的设计与应用 [J]. 通信电源技术,2020,37(9): 80.
- [ 8 ] 王爱军. 基于 CAN 总线的船舶电站自动控制系统设计 [J]. 南通航运职业技术学院学报,2015,14(2): 23.
- [ 9 ] 李帅帅,狄乐蒙,徐刚强,等. 基于 CAN 总线的柴油发电机组并机控制系统解决方案 [J]. 曲阜师范大学学报:自然科学版,2020,46(1): 82.
- [ 10 ] 莫剑冬,王宇轩. 基于 CAN 总线的发电机组自动控制装置 [J]. 自动化技术与应用,2014,33(11): 7.
- [ 11 ] 杨红波,徐卫忠,李东超. 基于孤岛电站多机组并列运行的控制策略 [J]. 机电设备,2020,37(4): 55.
- [ 12 ] 王昊,申卿,李东超,等. 频变负荷下异型机组负荷均衡控制技术研究 [J]. 电气自动化,2021,43(4): 67.
- [ 13 ] 中国电器工业协会. GB/T 2820.5—2009: 往复式内燃机驱动的交流发电机组 第 5 部分: 发电机组 [S]. 北京: 中国标准出版社,2009.

(上接第 60 页)

- [ 8 ] 王臻,李承,王蕾,等. 基于解析导纳的感应电机故障诊断 [J]. 电力自动化设备,2016,36(8): 170.
- [ 9 ] ZHANG P, LU B, HABETLER T G. An active stator temperature estimation technique for thermal protection of inverter-fed induction motors with considerations of impaired cooling detection [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46 (5): 1873.
- [ 10 ] 李良,周明,王伟,等. 基于全过程移动监督技术的感应电机定子绕组温度实时监测系统 [J]. 电机与控制应用,2019,46(11): 69.
- [ 11 ] 中华人民共和国工业和信息化部. 电动汽车用驱动电机系统: 第 2 部分 试验方法: GB/T 18488.2—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社,2015.
- [ 12 ] 李良,何瑞东,路艳巧,等. 基于快速参数辨识的感应电机转子温度在线评估方法 [J]. 电机与控制应用,2020,47 (3): 51.
- [ 13 ] 武迪,林荣文,田峰. 异步电机矢量控制系统的仿真分析 [J]. 电气开关,2020,58(2): 11.
- [ 14 ] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统: 运动控制系统 [M]. 第 3 版. 北京: 机械工业出版社,2003: 200-205.
- [ 15 ] 石建飞,戈宝军,吕艳玲,等. 永磁同步电机在线参数辨识方法研究 [J]. 电机与控制学报,2018,22(3): 17.
- [ 16 ] 宋建国,张振路,李向诚. 基于改进最小二乘法永磁同步电机多参量辨识 [J]. 电机与控制应用,2021,48(3): 16.
- [ 17 ] 李建军,盛洁波,王翠,等. 异步电机定转子参数的辨识方法研究 [J]. 电工技术学报,2006,21(1): 70.
- [ 18 ] 张虎,李正熙,童朝南. 基于递推最小二乘算法的感应电动机参数离线辨识 [J]. 中国电机工程学报,2011,31(18): 79.