

【引用格式】蔡久青, 倪康, 吴钫. 一种基于 FC-AE 的逆变器并联同步控制方法[J]. 数字海洋与水下攻防, 2025, 8 (1): 29-35.

一种基于 FC-AE 的逆变器并联同步控制方法

蔡久青, 倪 康, 吴 钊

(武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉 430205)

摘要 多逆变器并联是提升逆变器容量、增强舰船大功率负荷承载能力的重要途径。然而, 多个并联逆变器输出电压的不一致性会导致逆变器之间形成环流, 影响输出电压电能质量并降低负荷供电可靠性。对此, 提出了一种基于 FC-AE 的逆变器并联同步控制方法, 该方法采用光纤通信传递各逆变器间的同步信号, 考虑了通信线路长度差异带来的延时误差并设计了补偿方案。最后, 仿真和试验结果表明提出的方法可以实现多逆变器输出电压相位的高精度同步, 显著抑制了并联逆变器之间的环流。

关键词 逆变器并联; 光纤通信; 相位同步; 环流抑制

中图分类号 TM464 文献标识码 A 文章编号 2096-5753(2025)01-0029-07

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2025.01.004

A Parallel Synchronous Control Method of Inverters Based on FC-AE

CAI Jiuqing, NI Kang, WU Fang

(Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan 430205, China)

Abstract Multiple inverters in parallel is an important way to increase the capacity of inverters and to enhance the carrying capacity of high-power loads of ships. However, the inconsistency of the output voltage of multiple parallel inverters can lead to the formation of circulating current between the inverters, which will affect the power quality of the output voltage and reduce the reliability of the load power supply. In this paper, a parallel inverter synchronous control method based on FC-AE is proposed, which adopts optical fiber communication to transmit the synchronous signals between inverters. The delay error caused by the difference in the length of the communication line is considered, and a compensation scheme is designed. The results of simulation and experiment show that the proposed method can achieve high-precision synchronization of the output voltage phases of multiple inverters, which significantly suppresses the circulating current among the parallel inverters.

Key words parallel connection of inverters; fiber optic communications; phase synchronization; circulating current suppression

0 引言

近年来, 舰船综合电力系统 (Integrated Power System, IPS) 发展迅速, 其具有传统机械推进系

统无法比拟的技术优势, 可以提升舰船机动性、操控性、声隐身性, 优化机舱布局, 显著提高舰船战斗力^[1-2]。IPS 主要包括发电、输配电、变配电、推进、储能、能量管理等 6 个分系统, 三相逆变器作

为 IPS 变配电分系统中十分重要的电力电子设备，可实现直流电制到交流电制的变换，为导航、探测、日用、照明等绝大部分用电设备直接提供 AC 380 V 的电能^[3]。

为提升逆变器容量、增强大功率负荷的承载能力，将多个单体逆变器进行并联通常是最常用且直接有效的方式^[4-6]。目前，逆变器并联系统面临着 2 方面的难题：1) 如何实现逆变器输出功率均分；2) 如何实现逆变器输出电压一致性。下垂控制^[7-9]在并联系统的电流或功率平均分配上具有广泛应用，针对问题 1，文献[10]基于传统的 $P-f$ 、 $Q-V$ 下垂特性曲线对多个并联的逆变器实现输出电压幅值和频率的控制，但功率分配精度受线路阻抗影响较大，也不能解决逆变器之间环流问题，对此，文献[11]–[14]对传统的下垂控制均做出了不同形式的改进以尽可能消除线路阻抗对功率分配的影响。针对问题 2，逆变器输出电压一致性主要体现在幅值相等和相位同步，多个逆变器的输出电压幅值经电压电流双 PI 环控制比较容易实现幅值相等，而相位同步则相对更难保证。对此，文献[15]提出了一种基于 CAN 总线通信的基准时间同步方法和基于 PWM 载波周期的相位同步调整算法，采用动态主从同步控制模式实现各并联逆变器输出电压的同频同相，该方法中 CAN 通信速率较慢且未考虑通讯延迟。文献[16]提出了一种基于单同步总线的基波和载波相位同步方法实现零序环流抑制，但其实现同步的方式为将多个逆变器的同步脉冲信号并联，导致同步总线信号抗干扰性差、稳定性不高。

由于光纤通道航空环境(Fibre Channel-Avionics Environment, FC-AE) 具有信号传输速度快、传输容量大、抗干扰能力强等优势^[17-18]，在舰船综合电力系统领域具有广泛应用。因此，针对现有问题，本文提出了一种基于 FC-AE 的逆变器并联同步控制方法，借助 FC-AE 交换机，采用光纤线缆传递各逆变器间的同步信号，考虑了通信线缆长度差异带来的延时误差对同步精度的影响，并设计了对应的补偿方案，该方法可以有效提升逆变器输出电压一致性并抑制环流。

1 基于 FC-AE 的并联逆变器系统架构

基于 FC-AE 的并联逆变器系统架构如图 1 所示，其中橙色实线代表信息流，其连接部分构成 FC-AE 通信层，黑色实线代表能量流，其连接部分构成逆变功率层。在整体上，FC-AE 通信层传递同步脉冲信号、FC-AE 交换机 ID 号和延迟补偿时间等信息，逆变功率层根据接收到的同步信息执行锁相环控制与三相交流电压输出。

FC-AE 通信层主要包括 FC-AE 交换机、通信节点和监控箱。其中，FC-AE 交换机是一台具有多个 FC-AE 接口，并且支持 FC-AE-ASM 协议数据转发功能的通信设备，各个 FC-AE 交换机之间通过光纤线缆级联连接。通信节点是逆变器或监控箱与 FC-AE 交换机之间传输数据的中间枢纽，每个通信节点在硬件上为一块 FPGA 电路板卡，可实现基于 FC-AE-ASM 通信协议的数据发送与接收。监控箱的核心硬件为一块基于 DSP 芯片的控制板卡，其作为逆变器并联系统的源脉冲发生器，用于提供同步源信号，源信号经通信节点采样后发送至连接的 FC-AE 交换机。通常，级联交换机的数量越多，网络结构越复杂，单点故障引发通信中断的概率越大，因此，级联 FC-AE 交换机的数量 i 一般不大于 4。另外，综合考虑 FC-AE 交换机传输速率、端口容量和网络复杂度等因素，建议每个交换机下挂通信节点的数量 j 不大于 9。

逆变功率层包括逆变器、交流配电板及交流负载。逆变器主要由软起电路、滤波电路、电能变换电路及采样控制电路组成，可实现 DC1 000 V 向 AC380 V/50 Hz 三相交流电的转换；由前述对 FC-AE 交换机数量 i 和通信节点数量 j 的约束可得，图 1 所示并联逆变器系统的最大逆变器并联数量为 32。交流配电板用于对各逆变模块的输出电流进行汇总，为交流负载分配供电能。

2 基于 FC-AE 的脉冲同步方法

2.1 主 FC-AE 交换机的选举方法

若整个逆变器并联系统中仅有一台监控箱在发射源脉冲，则该监控箱连接的通信节点所属的 FC-AE 交换机即为主交换机。

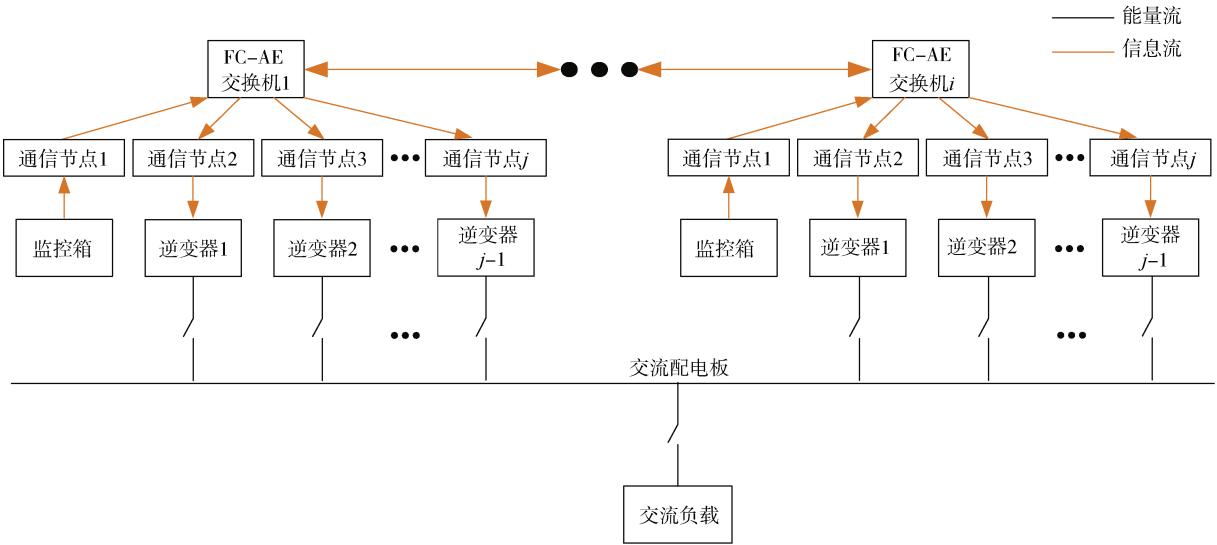


图 1 并联逆变器系统架构图
Fig. 1 Architecture diagram of shunt inverter system

若整个逆变器并联系统中存在多台监控箱发射源脉冲，则需要从对应的多台 FC-AE 交换机中选举出一台主交换机，认定其通信节点挂接的监控箱发出的源脉冲为整体并联系统的同步脉冲。假设共有 N 台 FC-AE 交换机参与选举 (N

\leqslant 交换机总台数 i)，其中每 2 台交换机均会进行一次设备 ID 号的比较，ID 号小者优先级更高，假设进行比较的 2 台 FC-AE 交换机的编号分别为 a 和 b ，它们参与主交换机选举的流程图如图 2 所示。

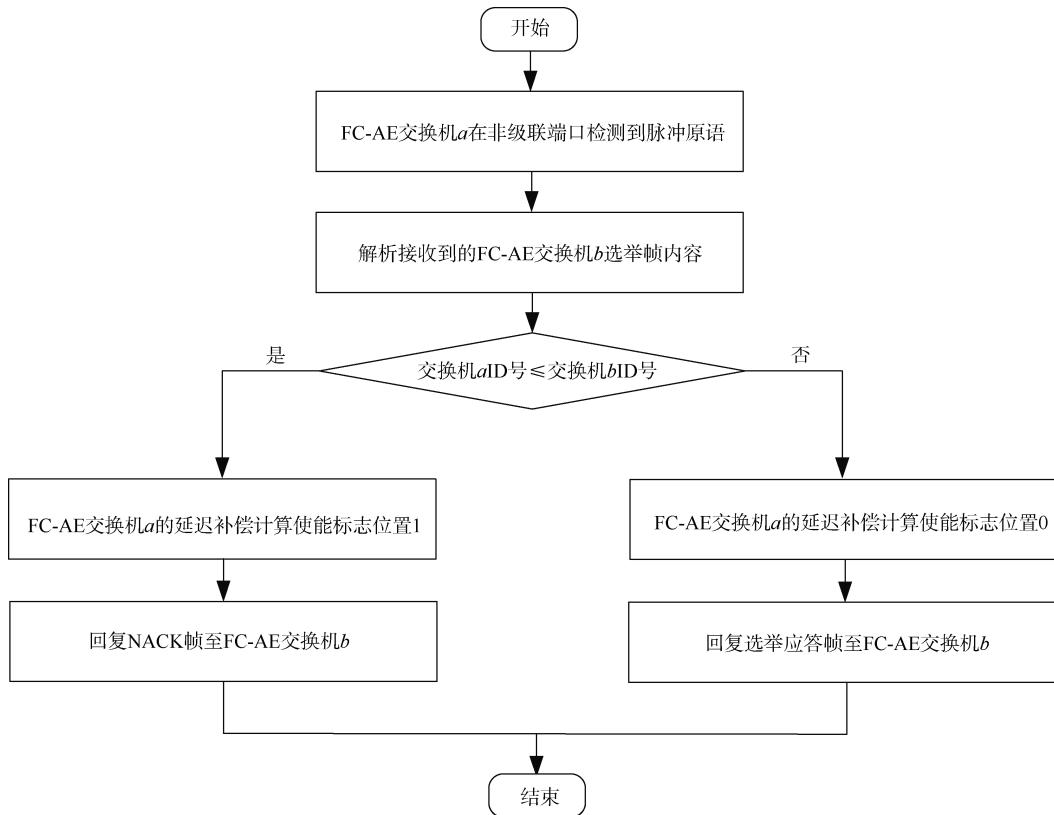


图 2 主交换机选举流程图
Fig. 2 Master switch election flowchart

由图 2 可知, 接收到 NACK 帧或延迟补偿计算使能标志被置零的 FC-AE 交换机不具备当选主交换机的资格。因此, 在 N 台 FC-AE 交换机进行主交换机的选举过程中, 若有一台交换机的延迟补偿使能标志位始终保持为 1, 则此交换机为主交换机。

2.2 脉冲同步信号的传递路径

脉冲同步信号上升沿的传递路径如下:

- 1) 监控箱发出同步脉冲信号上升沿;
- 2) 经过毛刺信号去除逻辑, FC-AE 通信节点捕获同步信号的上升沿, 并发送上升沿帧至 FC-AE 交换机;
- 3) FC-AE 交换机将接收到的上升沿帧转发至与其级联的 FC-AE 交换机;
- 4) 各 FC-AE 交换机将上升沿帧转发到其下属的通信节点;
- 5) 各通信节点读取上升沿帧的数据域字段报文, 恢复出同步信号的上升沿。

脉冲同步信号下降沿的传递路径与上升沿一致, 故不重复赘述。待恢复出同步脉冲信号下降沿后, 单次脉冲同步完成, 等待下一个同步脉冲。逆变器根据主交换机同步脉冲信号的上升沿和下降沿进行锁相环控制, 进而控制其输出电压的相位。

3 延迟补偿设计方法

首先, 计算主交换机与其它交换机的链路延迟, 具体公式如下:

$$T_{\text{delay},x} = (T_{2x} - T_{1x} + T_{4x} - T_{3x}) \times \frac{T_{\text{prd}}}{2} \quad (1)$$

式中: $T_{\text{delay},x}$ 表示主交换机与第 x 台交换机的链路延迟; T_{1x} 为主交换机发出主交换机选举帧的时间戳; T_{2x} 为第 x 台交换机(非主交换机)接收主交换机选举帧的时间戳; T_{3x} 为第 x 台交换机发送选举应答帧的时间戳; T_{4x} 为主交换机接收到第 x 台交换机发送的选举应答帧的时间戳; T_{prd} 为交换机时间戳产生逻辑的时钟周期。

其次, 主交换机连续进行 P 次选举应答互动, 并将计算出的延迟值采用集合形式表示, 每个拟合

周期内的选举应答互动次数索引记为 q ($0 \leq q < P$), 假设在第 F 个拟合周期内第 k 次选举应答互动后, 将主交换机计算得到的 i 个延迟值组成数据集 $\mathbf{M}_k(F)$, 该数据集表示为

$$\mathbf{M}_k(F) = \left\{ m_k(F) \mid m_k(F) = T_{\text{delay},x,k}(F) \right\} \quad (2)$$

式中, $0 \leq k < P$, $T_{\text{delay},x,k}(F)$ 表示第 F 个拟合周期内第 k 次选举应答互动时主交换机与第 x 台交换机的通信延迟。基于 $\mathbf{M}_k(F)$, 采用最小二乘法对通信延迟进行函数拟合, 则第 F 个拟合周期的拟合多项式可以表示为

$$T_{\text{delay},x}(F) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_m x^m \quad (3)$$

其中, 多项式系数 $a_0 \sim a_m$ 满足下式:

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1^m \\ 1 & 2 & \cdots & 2^m \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & iP & \cdots & (iP)^m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_m \end{bmatrix} = \mathbf{M}_k(F)^T \quad (4)$$

将 $T_{\text{delay},x}(F)$ 作为新的通信延迟值, 得到第 F 次拟合后第 x 台 FC-AE 交换机需要补偿的延迟值为

$$\Delta T_{\text{delay},x}(F) = \max \{T_{\text{delay}}(F)\} - T_{\text{delay},x}(F) \quad (5)$$

式中, $T_{\text{delay}}(F)$ 为第 F 个拟合周期内主交换机与所有交换机的链路延迟值。主交换机通过 FC-AE 帧交互, 将计算出的延迟补偿值发送至各个与逆变器连接的通信节点, 通信节点根据接收到的延迟值, 将恢复出的脉冲滞后对应的延迟值后输出, 即可实现高精度的脉冲同步。

4 仿真分析

在 MATLAB/Simulink 中搭建基于 FC-AE 的并联逆变器仿真系统, 结构如图 3 所示, 其中, FC-AE 交换机 1 和 FC-AE 交换机 2 的设备 ID 号分别为 01 和 02, 2 台交换机的级联线缆长度为 5 m, 每台交换机的下属通信节点分别连接 1 台监控箱和 2 台逆变器。各逆变器的额定功率均为 180 kW, 可实现 1 000 V 直流电向 380 V 三相交流电的转换。

将交流负载断路器断开, 观测逆变器 1-1 和逆变器 2-1 的 AB 线电压, 以及逆变器 1-1 空载时 A 相环流, 仿真结果如图 4。

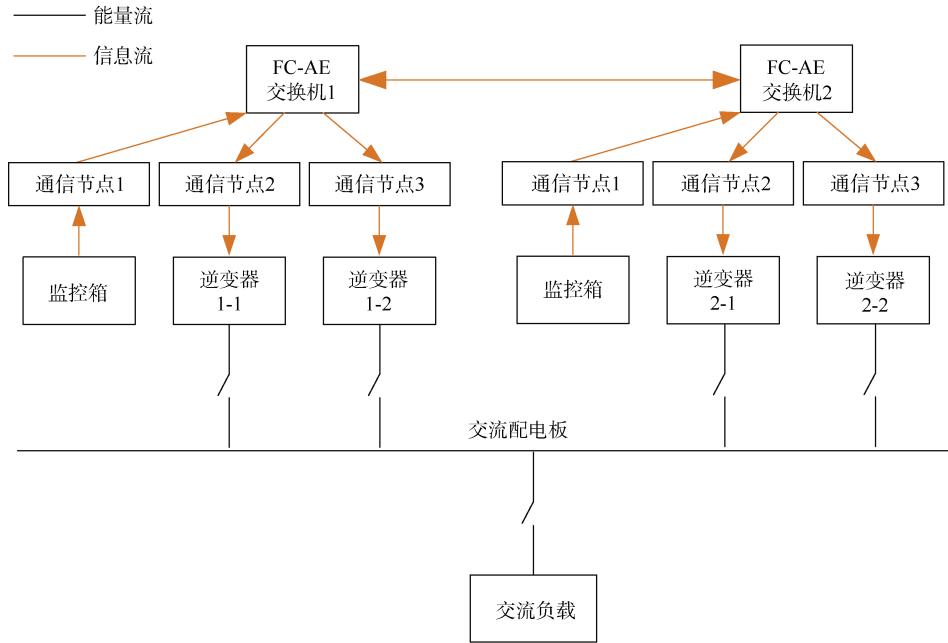


图 3 仿真系统结构图

Fig. 3 Simulation system architecture diagram

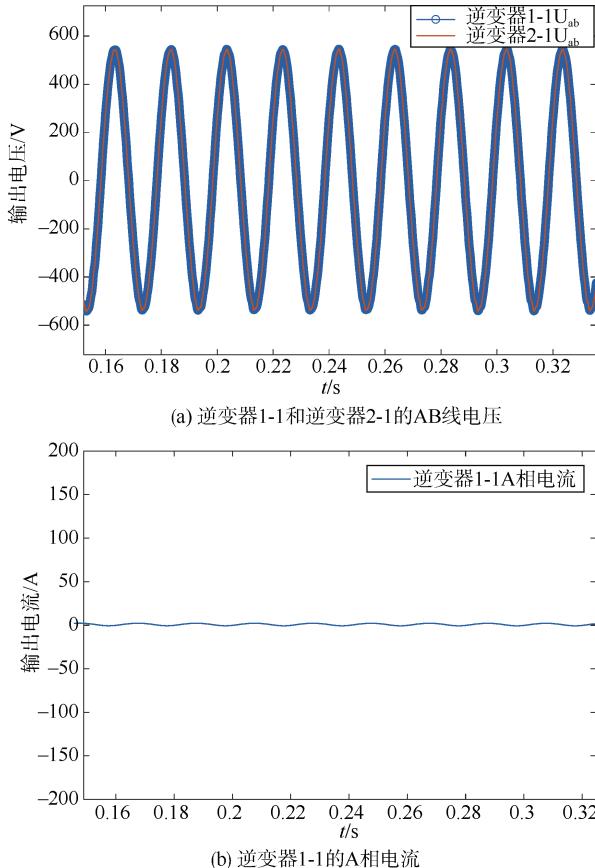


图 4 仿真结果

Fig. 4 Simulation results

由仿真结果可以看出,逆变器 1-1 和逆变器 2-1

的 AB 线电压的相位始终保持一致,逆变器 1-1 的 A 相环流几乎为 0,表明本文所提出的基于 FC-AE 的同步控制方法可实现并联逆变器输出电压的相位同步,并提升环流抑制效果。

5 试验验证

基于 FC-AE 的并联逆变器系统试验平台局部图如图 5 所示。

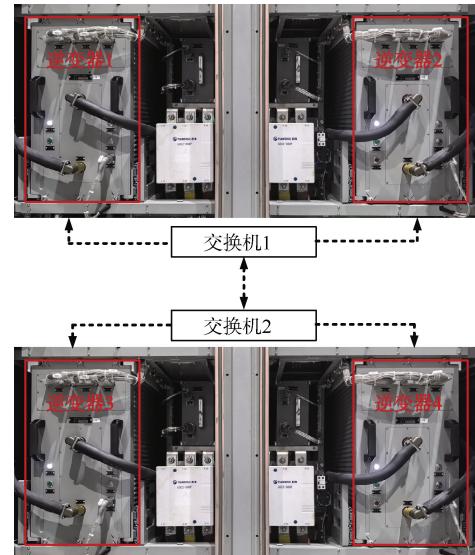


图 5 试验平台局部图

Fig. 5 Partial view of test platform

图中,逆变器 1 和逆变器 2 由交换机 1 发送同步信号,逆变器 3 和逆变器 4 由交换机 2 发送同步信号,各逆变器的额定功率为 180 kW,4 台逆变器输出连接至同一块交流配电板,2 个交换机之间采用 FC-AE 传递选举帧、应答帧和同步信号等信息。

为验证本文所提出基于 FC-AE 的逆变器并联控制方法的同步效果,分别在空载和负载突增 2 种工况下开展试验,试验结果如下。

1) 空载试验。

空载试验波形如图 6 所示。其中, U_{1-ab} 表示逆变器 1 输出 AB 线电压, U_{3-ab} 表示逆变器 3 输出 AB 线电压, I_{1-a} 表示逆变器 1 输出 A 相电流。由图可知,逆变器 1 与逆变器 3 的输出电压幅值均为 380 V,频率为 50 Hz,相位保持同步,逆变器 1 输出环流几乎为 0。

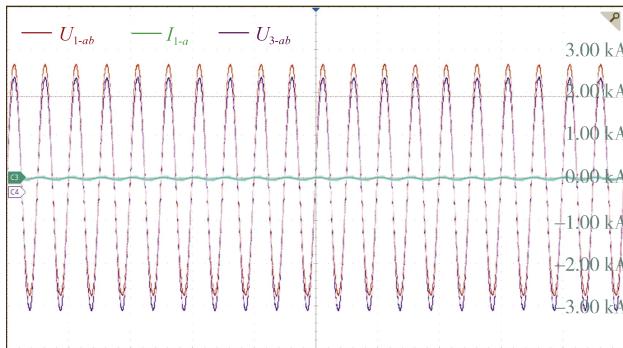


图 6 空载试验波形
Fig. 6 No-load test waveform

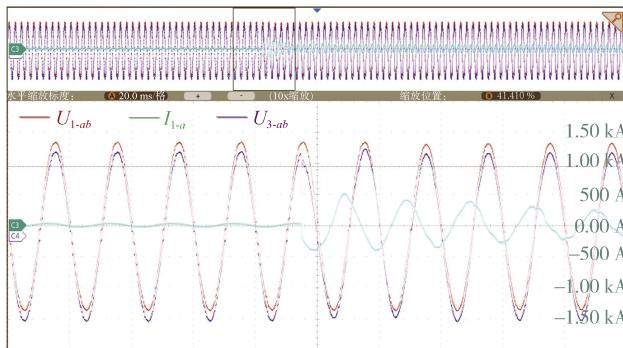


图 7 动态试验波形
Fig. 7 Dynamic test waveform

空载试验结果与前述仿真结果一致,验证了本

文所提出的基于 FC-AE 的逆变器并联同步控制方法在空载情况下的有效性。

2) 动态试验。

将交流配电板侧的负载由 0 突增至 360 kW,测得的动态试验波形如图 7 所示,图中 U_{1-ab} 、 U_{3-ab} 和 I_{1-a} 表示含义与空载试验波形一致,不再重复描述。由波形可知,在动态加载瞬间,逆变器 3 的输出电压出现轻微畸变,一个周波后恢复正常,但在整个动态过程及其后的稳态过程中,逆变器 3 和逆变器 1 的输出电压相位一直保持同步,原因主要包括 2 个方面:1) 逆变器的同步信号采用光纤通信传输,抗干扰能力强,几乎不会受到负载动态变化及主电路电磁干扰的影响;2) 逆变器在控制程序上,基于同步信号的锁相环控制和输出电压电流双闭环控制之间不存在相互耦合,双闭环控制不会影响并联逆变器之间的相位同步,同步信号也不会影响到逆变器主电路输出电压的幅值。

基于上述分析,表明基于 FC-AE 的逆变器并联同步控制方法在动态过程中也具有良好的同步效果。

6 结束语

本文首先介绍了基于 FC-AE 的并联逆变器系统架构,阐明了 FC-AE 通信层和逆变功率层中各组成单元的作用;其次提出了基于 FC-AE 的脉冲同步方法并设计了相应的延迟补偿策略;最后,采用 Simulink 仿真分析与试验验证相结合的方式对本文所提出的逆变器并联同步控制方法的有效性进行了验证。具体研究结论包括:

1) 基于 FC-AE 的逆变器并联同步控制方法可以实现并联逆变器输出电压相位的高精度同步,有效抑制逆变器之间的环流;

2) 提出的延迟补偿设计方案可以消除通信线路长度差异带来的延迟误差,保证各 FC-AE 交换下的逆变器均能实现相位同步;

3) 提出的逆变器并联同步控制方法具有较强的抗干扰能力,同步信号几乎不会受到负载动态变化及主电路电磁干扰的影响,同步稳定性高。

参考文献

- [1] 马伟明. 舰船综合电力系统中的机电能量转换技术[J]. 电气工程学报, 2015, 10 (4): 3-10.
- [2] 马伟明, 肖飞, 马凡. 舰船综合电力系统研究进展与应用建议[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44 (17): 6761-6775.
- [3] 卜乐平, 欧阳继能, 王黎明, 等. 基于模式切换的舰船逆变器并网策略[J]. 电工技术学报, 2021, 36 (14): 3000-3009.
- [4] 刘陈瑞扬, 付立军, 胡祺, 等. 柴发机组与逆变器并联运行暂稳态功率均分控制方法[J]. 电机与控制学报, 2022, 26 (3): 10-21.
- [5] BRABANDERE K D, BOLSENS B, KEYBUS J V D, et al. A voltage and frequency droop control method for parallel inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22 (4): 1107-1115.
- [6] YU X X, KHAMBADKONE A M. Reliability analysis and cost optimization of parallel-inverter system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59 (10): 3881-3889.
- [7] 王成山, 高菲, 李鹏, 等. 低压微网控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (25): 2-9.
- [8] 张明锐, 杜志超, 王少波. 微网中下垂控制策略及参数选择研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29 (2): 136-144.
- [9] 覃丹, 符荣, 王致尹, 等. 基于自适应下垂系数的微电网稳定控制方法[J]. 电气自动化, 2024, 46 (5): 23-26, 30.
- [10] 周玉柱, 茅美琴, 苏建徽. 基于功率下垂特性的逆变器无线并联控制技术[J]. 电力电子技术, 2007, (4): 9-11.
- [11] 徐玉琴, 马焕均. 基于改进下垂控制的逆变器并联运行技术[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43 (7): 103-107.
- [12] 周奇勋, 张红, 曹世宏, 等. 基于改进下垂法的微电网逆变器并联控制技术[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30 (8): 25-31.
- [13] 赵友诚, 朱长青, 刘金宁. 多逆变器并联运行的改进下垂控制策略[J]. 电工技术, 2022 (15): 26-30.
- [14] 王薪人, 王维俊, 张国平, 等. 基于改进下垂控制的孤岛微网逆变器并联技术研究[J]. 微电机, 2023, 56 (4): 48-55.
- [15] 王江波, 杨仁刚, 高春凤. 基于 CAN 总线的供电系统三相并联逆变器同步控制方法[J]. 农业工程学报, 2013, 29 (12): 179-186.
- [16] 贺诗明, 刘邦银. 模块化并联逆变器基于单总线的相位同步方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43 (20): 8015-8025.
- [17] WANG K S, ZHANG Y, WANG L, et al. Design and implementation of FC-AE-ASM data acquisition and forwarding system[C]// 2022 7th International Conference on Intelligent Computing and Signal Processing (ICSP). Xi'an: IEEE, 2022.
- [18] 张勇. 光纤技术通讯技术的应用及发展分析[J]. 中国管理信息化, 2019, 22 (15): 163-165.

(责任编辑: 张曼莉)