

基于EtherCAT协议的电力电子系统同步控制研究

周 鹏, 潘 旭, 艾世强

国网辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2024年11月20日; 录用日期: 2024年12月13日; 发布日期: 2024年12月24日

摘 要

在电力行业大力推动高质量发展的背景下, 开展电力电子系统同步控制相关研究对于实现电力电子系统智能化普及有重要意义。研究发现目前我国电力电子系统中应用同步控制技术主要有模块化多电平变换器、碳化硅智能功率模块、分布式系统通信协议三种, 基于EtherCAT协议的电力电子分布式控制系统同步技术应用广泛, 具有数据传输快和精度高的优势, 但在应用过程中时钟同步会对其运行产生影响, 在使用过程中需要做好时钟同步误差分析, 希望本研究结果能够为提升电力电子系统智能化水平提供理论参考。

关键词

电力电子系统, 同步控制, EtherCAT协议

Research on Synchronous Control of Power Electronic Systems Based on EtherCAT Protocol

Peng Zhou, Xu Pan, Shiqiang Ai

State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang Liaoning

Received: Nov. 20th, 2024; accepted: Dec. 13th, 2024; published: Dec. 24th, 2024

Abstract

Under the background of vigorously promoting high-quality development in the power industry, it is of great significance to carry out research on synchronous control of power electronic systems

for realizing the intelligent popularization of power electronic systems. It is found that the application of synchronous control technology in power electronic system in China mainly includes modular multilevel converter, silicon carbide intelligent power module and distributed system communication protocol. The synchronization technology of power electronic distributed control system based on EtherCAT protocol is widely used, which has the advantages of fast data transmission and high precision. However, clock synchronization will affect its operation in the application process, and clock synchronization error analysis needs to be done in the use process. It is hoped that the results of this study can provide theoretical reference for improving the intelligent level of power electronic system.

Keywords

Power Electronic System, Synchronous Control, EtherCAT Protocol

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

电力电子技术由电路拓扑、电力电子器件、控制技术三大部分组成。电力电子技术的发展通常伴随着电力电子器件的发展，上个世纪五十年代末，美国通用电气公司研制出世界上第一支硅晶闸管，标志着电力电子技术的开端。现代电力电子技术基于大功率电力电子器件和不同的变换电路，根据不同的负载制定不同的控制目标，变换电能以得到所期望的最优波形，高效率地实现变换目标[1]。从晶体管的诞生到全控型功率器件的问世，电力电子技术不断地朝着集成化、模块化、高频化、数字化、全控化和绿色化的方向发展。

电力电子系统智能化的浪潮已经席卷全球，而智能化进程中不可避免地会要求各个分系统及总控制单元间要传递信息、感知态势和协同动作。该诉求尤其在近年来飞速发展的模块化多电平电路(MMC)中表现得尤为突出，控制单元要给所有子模块发送信息和指令，所有的子模块要感知对方的运行工况，投入运行的子模块和切出的子模块要在同一时刻精准地完成投切动作[2]。同时，人们对于电力电子系统在功率密度和可靠性方面近乎苛刻的要求，使得集成功率元件、驱动电路、控制单元、乃至网络通信的新型智能模块成为满足使用需求的优选方案。高集成度电力电子系统虽然具有巨大的优势，但是却对同步控制工作提出更高的要求，同时，也对信道容量和同步精度的严苛要求，所以提高电力电子系统通信网络同步控制能力对于发挥电力电子系统运行效率有至关重要的作用。本文首先对电力电子系统中应用的同步控制技术进行综述，开展电力电子系统通信系统设计与同步技术研究。

2. 电力电子系统同步控制技术应用现状

2.1. 模块化多电平变换器

模块化多电平变换器(MMC)是一种用于电力转换和控制的高效能模块化电路，被认为是可再生能源与现有公用事业电网之间的关键接口控制技术，是一种应用中压、高压变换器为关键部件的电能变换技术的装置，对于提高电力电子系统运行效率、优化电力变换方案有重要作用[3]。目前，多电平变换器被用于诸如中压驱动器、有源滤波器，以及将可再生能源变换为电能输送到电网、高压直流电传输系统等应用中。模块化多电平变换器拓扑结构提出后，相关学者积极对其进行数学建模与仿真分析，并在系统

及装备参数选取、调制方法、均压策略、环流抑制等方面进行大量研究[4]。电感器件是 MMC 的关键部件，主要发挥柔化电压应力、抑制变换器内部环路电流，实现放电、充电、旁路等功能，也是 MMC 实现灵活控制方式的关键，虽然 MMC 是模块化设计，但其具体功能实现需要受到很多因素影响，包括子模块功率拓扑、换流结构、器件数量等[5]。

2.2. 碳化硅智能功率模块

集成化、模块化能够有效控制电力电子系统中电源单元和功率器件的体积，利用标准模块，研发人员可以简化设计流程和系统控制流程，从而节约大规模复杂电力电子系统的研制成本和时间成本，同时提高系统的可维护性和可扩展性。电力电子系统集成思想是，以微控制器(MCU)等为核心，将电力电子标准模块像搭积木一样组合在一起，构成各种不同的电能变换系统，通过不同的控制策略，达到不同的控制目标和性能要求。现有的研究和开发不同程度上体现了电力电子系统集成思想，但在实际应用中，电力电子集成模块依然在通用性和灵活性上表现较差。碳化硅控制模块的设计结果虽然与传统硅基模块相似，但能够通过利用标准模块来将多种功能进行封装集成，能够支持更高的电力电子系统控制需求，虽然较传统硅基模块的性能有显著改善，但加工工艺和技术应用难度也随之增加，稳定性方面也不适用于大规模电力电子系统，其在汽车领域应用最多[6]。所以，碳化硅智能功率模块极少在大规模电力电子系统中应用。

2.3. 分布式系统通信协议

由于电力电子系统中存在大量的模块化变换器，因此控制系统的实现非常具有挑战性。对于这样一个复杂的系统，通常有两种控制架构：集中式控制架构和分布式控制架构。集中式控制架构对于小规模系统而言简单而直接，但应用于大规模系统时，中央控制器的计算负担大且接口数量大幅增加，笨重且复杂的机械连接结构和长距离的光纤、电缆也会导致通信系统产生延迟问题[7]。同时集中式控制架构全冗余成本较高且控制系统的柔性差。相反，分布式控制架构可以解决这些问题，分布式控制架构可以实现完全模块化，其中计算负担共享，脉宽调制(PWM)信号在本地生成，光纤或电缆的长度缩短为相邻的两个节点之间的距离，通信系统信息数据传播效率更高，可以有效规避延迟的发生。目前我国电力电子系统中以 EtherCAT 协议的分布式控制架构应用最多且效果最好，但在应用过程中仍然存在通信延迟和时钟同步误差的问题，这也是该协议控制架构在未来应用与发展过程中需要重点关注的问题。

3. 基于 EtherCAT 协议的电力电子分布式控制系统同步技术研究

3.1. EtherCAT 协议的优势

工业以太网技术在通信实时性方面达不到高标准，不能应用于响应时间小于 5 ms 的场合。在此背景下，实时以太网技术应运而生，其根据工业自动化数据通信的背景和需求，基于 ISO/IEC8802-3 协议在实时通信方面做出提升和改进。目前主流实时工业以太网协议有五个，分别是 EtherCAT、SERCOSIII、PROFINET、POWERLINK 和 Ethernet/IP，倍福官方通过实验对比分析，EtherCAT 协议具有多方面的优势，如：EtherCAT 协议具有极短的以太网帧循环时间、较高的实时同步性、灵活的拓扑、自由的网络结构和自动连接检测对应节点。EtherCAT 协议采用标准的以太网物理层和网卡，具有高速和高数据有效率的特点。在通信方式上，EtherCAT 协议采用全双工模式，通过“OnFly”数据传输方式提高了数据传送的效率，最大化利用了以太网所提供的带宽[8]。EtherCAT 协议在数据传输和高精度控制方面优势十分显著，在解决当前电力电子系统运行过程中节点之间的延迟和精确同步控制方面作用明显，且该协议也有助于实现电力电子系统的高效管理，增强电力电子系统的可靠性、安全性和稳定性[9]。

3.2. EtherCAT 协议同步控制技术

EtherCAT 协议同步控制技术是主从式的结构网络,网段中至少有一个主站和一个从站。其主站可以采用标准的以太网控制器,物理传输媒介可以选用 100BASE-TX 规范的五类 UTP 线缆。通信模块负责完成以太网数据链路的介质访问控制。物理层(PHY)芯片完成数据的编码和译码,采用隔离式变压器将数据链路层和物理层完全隔离,使得不同电平的以太网设备之间可以互联而不会损坏对方设备,提高了数据通信的可靠性和稳定性。EtherCAT 协议根据主站形式的不同,其表现形式也略有差异。如果将个人 PC 作为主站, EtherCAT 协议可以使用网络接口卡;如果将嵌入式系统作为主站, EtherCAT 协议使用微控制器。EtherCAT 协议从站设备在实现通信功能的同时,可以通过 I/O 口实现对外的简单控制,由从站控制器、物理层器件、应用层器件构成,其中应用层器件根据需要可选。EtherCAT 从站控制器负责处理数据帧,与主站进行数据交互。报文信息从主站发出,当经过从站时,相应的从站控制器从报文中取出对应的输出数据并将信息存储到内部存储区。与此同时,输入数据从内部存储区被写到报文中。EtherCAT 协议的大带宽为高分辨率的系统时间提供了储存与传输的空间,分布式时钟(DC)可以使所有 EtherCAT 设备使用相同的系统时间,从站控制器可以根据系统时间产生相应的同步信号。第一个具有分布式时钟功能的从站时钟提供系统时间,为了实现精确的时钟同步控制, EtherCAT 协议测量并计算了数据传输延迟时间和本地时钟偏移量。EtherCAT 协议同步控制系统硬件连接完成后,线路传输延迟和时钟初始偏移量和硬件相关,每次上电后固定不变,只需要一次测量和计算,为了得到更准确的时间参数,可以多次同步测量取其平均值。由此可以看出, EtherCAT 协议同步控制技术能够改善传统控制的时延局限性,实现主线高速同步控制,在电力电子系统中应用 EtherCAT 协议同步控制技术能够提高整体同步控制效率,减少控制误差的产生。

3.3. 时钟同步对分布式控制系统的影响

实时性对于分布式控制系统各控制节点的协同作业至关重要。主从站各节点的时钟在物理上具有分散性,其中存在着线路延时问题、晶振容易受到影响造成时钟漂移等等,这些因素共同作用,导致各节点的本地时钟时间不一致。电力电子领域对于时钟要求较高,分布式控制系统需要对各节点上传的数据进行分析整合,根据控制策略实时计算,并将相关控制指令通过网络下发至各从站节点。任一节点的时钟同步误差过大,就会导致从站节点的大功率器件未能同时动作,有可能带来环流等问题,轻则导致协同作业失败,影响系统功能实现,重则造成系统运行事故。有研究指出,设置精确的时间参数对于减少时钟同步误差有显著效果,电力电子系统硬件连接完成后,线路传输延迟和时钟初始偏移量和硬件相关,每次上电后固定不变,只需要一次测量和计算,可以多次同步测量取平均值得到更准确的时间参数[10]。

4. 总结

综上所述,现阶段我国大规模电力电子系统同步控制技术应用主要以实时工业以太网技术为主,分析发现 EtherCAT 协议同步控制技术相较于其他相关技术而言有一定优势,但在实际应用过程中要注意时钟同步的影响。

参考文献

- [1] 王朝辉. 现代电力电子技术的发展趋势初探[J]. 现代工业经济和信息化, 2021, 11(5): 165-166.
- [2] 张传雷, 张豪. 电力电子系统集成研究综述[J]. 电工技术, 2023(19): 9-11.
- [3] Perez, M.A., Ceballos, S., Konstantinou, G., Pou, J. and Aguilera, R.P. (2021) Modular Multilevel Converters: Recent Achievements and Challenges. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, 2, 224-239. <https://doi.org/10.1109/ojies.2021.3060791>

-
- [4] 孔祥平, 宾子君, 张雅倩, 等. 基于电容电压波动补偿的混合型模块化多电平变换器[J]. 电力工程技术, 2023, 42(5): 214-223.
- [5] Martinez-Rodrigo, F., Ramirez, D., Rey-Boue, A., De Pablo, S. and Herrero-de Lucas, L. (2017) Modular Multilevel Converters: Control and Applications. *Energies*, **10**, Article 1709. <https://doi.org/10.3390/en10111709>
- [6] 张运久. 电子器件在电力电气自动化工程中的应用[J]. 集成电路应用, 2021, 38(12): 216-217.
- [7] Sharifabadi, K., Harnfors, L., Nee, H., Norrga, S. and Teodorescu, R. (2016) Design, Control and Application of Modular Multilevel Converters for HVDC Transmission Systems. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118851555>
- [8] 任计羽. EtherCAT 从站软件的设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院, 2014.
- [9] Martin, R., Joseph, E.S. and Dmitry, D. (2010) EtherCAT Enabled Advanced Control Architecture. 2010 *IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference (ASMC)*, San Francisco, 11-13 July 2010, 39-44.
- [10] 李正军. EtherCAT 工业以太网应用技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.