

基于循环路径的级联多电平逆变器母线电容波动均衡控制系统

钟斌¹, 李刚², 张兴才³

(1. 浙江工业大学 容大后勤集团, 杭州 310014; 2. 浙江工业大学 机械工程学院, 杭州 310014;

3. 浙江工业大学, 杭州 310014)

摘要: 传统控制级联多电平逆变器的频率偏差较大, 性能不稳定; 为此, 设计一种级联多电平逆变器母线电容波动均衡控制系统; 在调频盲卷积开发平台的基础上, 协调母线电容大数据采集器及均衡控制器的连接方式, 完成新型系统的硬件运行环境搭建; 利用线性聚类控制程序中的目标节点, 移植调频盲卷积的协议栈及规划大数据的循环路径, 完成新型系统的软件运行环境搭建, 实现基于循环路径的级联多电平逆变器母线电容波动均衡控制系统的搭建; 对比试验结果表明, 与传统系统相比, 应用均衡控制系统后, 时域、频域调频仿真波形的控制有效性均能达到 65% 以上。

关键词: 线性调频; 盲卷积; 大数据; 开发平台; 协议栈; 循环路径

Bus Capacitance Fluctuation Equalization Control System for Cascaded Multilevel Inverters Based on Cyclic Path

Zhong Bin¹, Li Gang², Zhang Xingcai³

(1. Rongda Service Group, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China;

3. Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The conventional control cascade multilevel inverter has large frequency deviation and unstable performance. Therefore, a cascaded multilevel inverter bus capacitor fluctuation equalization control system is designed. On the basis of the blind convolution development platform of frequency modulation, the connection mode of bus capacitor big data collector and equalizer controller is coordinated, and the hardware operating environment of the new system is built. By using the target node in the linear clustering control program, the protocol stack of blind convolution of FM is transplanted and the cycle path of big data is planned to complete the software running environment of the new system. The bus capacitance fluctuation equalization control system of cascaded multilevel inverter based on cyclic path is implemented. The experimental results show that, compared with the traditional system, the control effectiveness of the simulation waveforms in time domain and frequency domain can reach more than 65% after applying the equalization control system.

Keywords: linear frequency modulation; blind convolution; large data; development platform; protocol stack; loop path

0 引言

在大功率或者中高压的环境下, 多电平逆变器与传统两电平逆变器相较而言存在一定差异, 其凭借其输出电压稳定、控制方便等特点, 成为该领域研究的热点, 并逐渐开始取代两电平逆变器^[1-2]。级联多电平逆变器的使用范围广泛, 并用于各个行业, 如: 电力、石油、化工、采矿、煤炭等。将级联多电平逆变器为主电路的控制系统投入和使用到其中, 改善了功率因数, 避免了直接起动造成对电

机损坏和对电网的冲击事故, 减少了停产维修时间, 装置的智能化优化了生产工艺, 提高了产品质量, 也带来了十分可观的直接经济效益, 在某些场合大于节能本身带来的效益。然而在这种逆变器中母线的电容波动对其运作有着极为重要的作用^[3-4]。为了更好地使级联多电平逆变器正常运作, 需要保证母线的电容波动一直保持在均衡状态, 故而对此进行研究。王瑞, 赵金提出四开关逆变器直流母线电容电压均衡控制研究方法, 首先通过电路分析给出电容电压波动公式, 指出从正常运行切换到四开关拓扑结构瞬间流入电容中点电流的相位对两电容电压波动的影响。分析了电容电压产生漂移的原因并给出通过发送特定开关状态实现两电容电压均衡的控制方法。实验结果验证了分析的正确性和电压均衡控制方法的有效性^[5]。但其运行过程复杂, 没有良好的实用性。张兵, 王政, 储凯, 等人提出 NPC 型三电平逆变器容错控制模式下的母线电容电压波动控制

收稿日期: 2018-12-13; 修回日期: 2019-01-07。

基金项目: 中国教育后勤协会 2016 年课题(YBKT2016004)。

作者简介: 钟斌(1976-), 男, 浙江诸暨人, 工程硕士, 工程师, 主要从事高校水电及节能管理, 后勤信息化方向的研究。

李刚(1971-), 男, 教授级高级工程师, 硕士研究生导师, 主要从事能源信息化方向的研究。

分析方法, 通过实验对理论推导的母线电容电压波动规律及其在容错控制模式下母线电容电压波动抑制策略进行验证^[6]。但这种方法在同等输出容量条件下功率器件耐压等级增加、系统运行效率降低并且还负载星形联结方式产生依赖性。

为解决上述问题, 本文提出基于循环路径的级联多电平逆变器母线电容波动均衡控制系统, 通过基本工作原理, 根据工作环境以及多电平逆变器运作特征来分析其内部母线电容电压波动特性, 以保证其波动稳定来促进多电平逆变器的运作。

1 硬件设计

在研究的级联多电平逆变器中, 以 4 电平级联逆变器作为研究对象, 逆变器结构如图 1 所示。

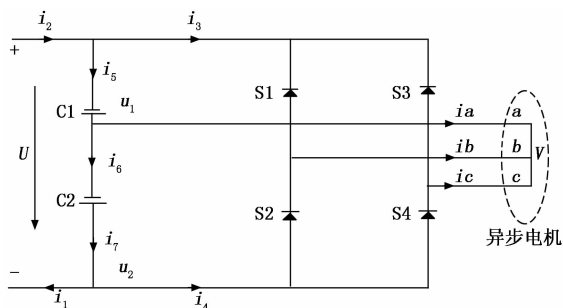


图 1 逆变器结构示意图

级联多电平逆变器母线电容波动均衡控制系统的硬件运行环境主要包含调频盲卷积开发平台、母线电容大数据采集器、均衡控制器三个组成部分, 其具体结构如图 2 所示。

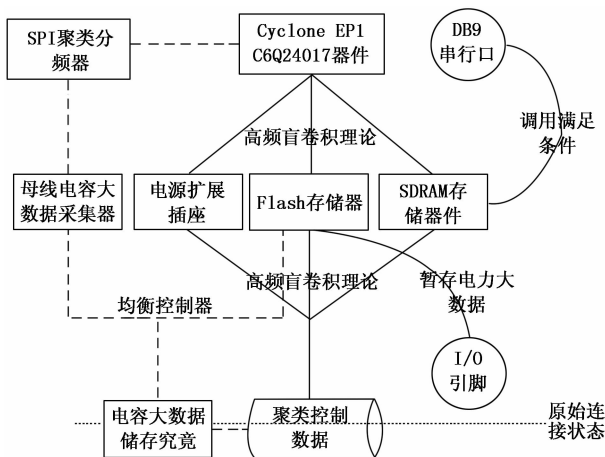


图 2 调频盲卷积开发平台结构图

1.1 调频盲卷积开发平台

调频盲卷积开发平台以具有 2 个锁相环的 Cyclone EP 1 C6Q24017 器件作为核心搭建设备。且在该设备周围分布着 Flash 存储器、SDRAM 存储器件、电源扩展插座、母线电容大数据采集器等多个组成部分。

其中, Flash 存储器具备 16 Mb 的基础存储空间, 可在

系统运行过程中, 通过调频盲卷积理论获取大量的聚类控制数据, 在 I/O 引脚控制开关处于持续连接状态时, 存储器释放空间内的暂存数据, 回归原始连接状态^[7]。

SDRAM 存储器件具备一个 DB9 串行口, 可通过并行连接开关控制该模块与 Cyclone EP 1 C6Q24017 器件间的连接状态, 当系统中的母线电容大数据满足调频盲卷积原理的调用条件时, 对系统中的运行数据进行长久存储处理。

电源扩展插座是系统中的核心供电单元, 满足 3.3 V 的额定输电要求, 可以 JTAG 方式连接多个运行环节, 在输电控制过程中, 通过调频盲卷积原理实现对 Cyclone EP 1 C6Q24017 器件的间性供电。

1.2 母线电容大数据采集器

母线电容大数据采集器作为整体控制系统硬件运行环境的核心处理模块, 可经过 SPI 聚类分频器对电容大数据进行基础筛选处理后, 与调频盲卷积开发平台的 Cyclone EP 1 C6Q24017 器件相连。这种新型的系统搭建方式, 在电容大数据采集器的基础上, 增设了两个辅助移位寄存器设备。其中一个设备可同时接收 Cyclone EP 1 C6Q24017 器件和 SPI 聚类分频器中的电容大数据, 另一个设备在原始移位寄存器的基础上, 对母线电容大数据进行线性整合, 并将这些数据按照符合调频盲卷积抓取规则的排列顺序, 传输至母线电容大数据采集器中。控制寄存器作为大数据采集器的直属下级结构, 能够以从机选择的方式判断上级结构中电容大数据的连接属性是否满足线性调频盲卷积原理, 并在电源扩展插座保持额定工作限度的条件下, 将这些电力大数据以 IRO 信息流的形式传输至 Avalon 总线接口。该接口是系统大数据采集器、均衡控制器间的唯一信息传输途径。图 3 反应了母线电容大数据采集器的详细结构。

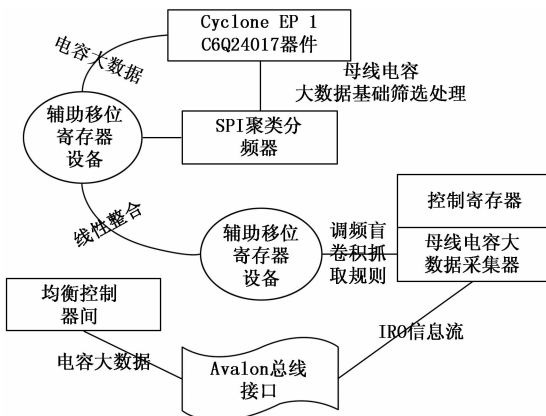


图 3 母线电容大数据采集器结构图

1.3 均衡控制器设计

均衡控制器作为硬件运行环境的末尾模块, 可对整个系统中运行的电容大数据进行整合处理。SDRAM 芯片作为该模块的核心搭建设备, 可以通过调节电力大数据存储空间的方式, 来满足线性调频盲卷积原理约束下的系统聚类

代码空间。Avalon 总线接口是均衡控制器与外界系统运行环境进行数据通信的唯一交流通道，可以在 PC 传输标准的约束下，直接获取 SDRAM 芯片中的电容数据，并利用线性调频盲卷积原理对系统中的聚类指令进行调节分析。SDRAM 芯片与 Flash 存储器中记忆单元具备相似的物理性质，可通过 Flash 存储器的 I/O 引脚与 Avalon 总线接口相连，并在保持持续连接的状态下，控制数据在系统中的传输速率。电容数据从 Avalon 总线接口到 SDRAM 芯片的传输过程中，始终遵循线性调频盲卷积原理，且在聚类控制指令的促进下，均衡控制器始终能够保持良好的运行状态，图 4 反应了系统均衡控制器的详细搭建原理。

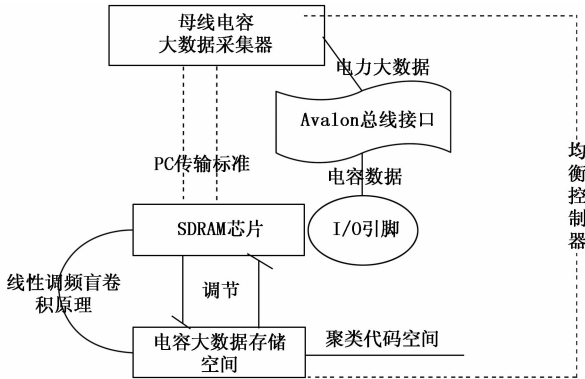


图 4 均衡控制器搭建原理详解图

通过对各个模块的结构进行设计，为其软件设计部分打下基础，能够清晰的看出每个部件之间相互关系，有助于更深入的研究级联多电平逆变器母线电容波动均衡控制系统基本流程。

2 软件设计

在系统硬件运行环境的基础上，通过线性聚类控制程序设计、调频盲卷积协议栈移植、电力电容数据循回路径规划三个基础环节，完软件运行环境搭建，实现系统的顺利运行。

2.1 线性聚类控制程序设计

线性聚类控制程序以 SPI 映射代码作为核心编写原则，且这些代码程序既能保证电容数据的顺向传输，也能在一定程度上提升线性调频盲卷积原理对系统各执行模块的促进作用。当相关执行指令从聚类寄存器传输至控制寄存器后，DeleteData 指令可对电容数据中的稳定寄存部分进行目标定义，并在每一个已定义数据节点后增设一个 . * Node 后缀^[8-9]。这些标记后的电容数据在符合线性调频盲卷积原理的前提下，可按照 InsertData 控制原理进行重新排列，并随着数据流的走向趋势完成对系统相关执行模块的运行调节。这种新型的线性聚类程序搭建方式，既遵循 class 链表语句的调节方式，也能在一定程度上体现代码类程序对电容数据的控制作用。新型系统的线性聚类程序具备多个可连接的插入节点，可以通过 delptr 指令对电容数据进行重新定义，达到提升程序控制效果的目的。具体线性聚类控

制程序的编程代码如下：

```
using namespace std;
DeleteData (ptr=List::Head;
GetHeadNode();
{return List::Head;} . * Node;
InsertData newptr->Next=ptr->Next;
void List::DeleteData();
if (ptr->Data==d && ptr==List::Head);
else if (ptr->Next->Data==d;
return Antitone Show List();
List::Unite2List(Node * lit);
```

2.2 调频盲卷积协议栈移植

调频盲卷积协议栈移植是系统软件运行环境的搭建基础。ARP 协议栈、ICMP 协议栈、UDP 协议栈、BOOTP 协议栈是几种常见的调频盲卷积协议栈，与传统控制系统不同，新型系统在协调上述几种协议栈 MAC 地址的基础上，利用 PIO 控制器调节相关协议栈间电力大数据的传输方式。当电容数据可以在聚类控制系统的输出通道内保持长时间的顺位连接状态，在以太网接口闭合的情况下，首协议栈会自发与尾协议栈的物理节点连接，并将处于传输过程中的电容数据暂时存储于系统数据库中，以便协议栈物理节点可以在没有传输压力的情况下，完成关联性拼接，这种自发的协议栈连接方式即为调频盲卷积协议栈移植。具体移植原理如图 5 所示。

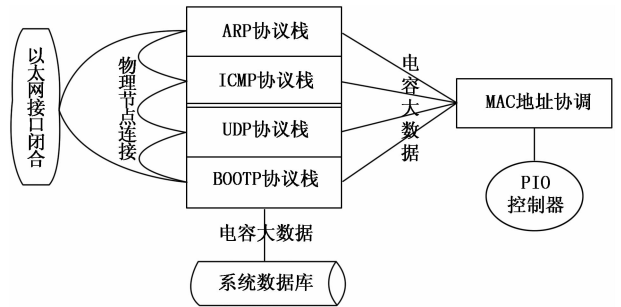


图 5 调频盲卷积协议栈移植原理解析图

在对调频盲卷积协议栈移植过程中，首先需要计算出首协议栈与尾协议栈相连接的物理能量，获取各个节点的短时平均过零率，设定一定数量的预加重滤波器，对各协议相连所得能量进行预加重滤波，获取协议栈移植的静态与动态特性，并进行相比较，提取协议栈移植的特征向量，以该向量为依据完成对调频盲卷积协议栈移植准确性对比中的能量过滤。具体的步骤如下详述：

假设，由 Y_n 代表节点通过零值次数， A 代表每段能量值，则利用式 (1) 获取各个短时平均过零率：

$$Y_n = median \left[\frac{z(n) \cdot \omega(m-n)}{z_\omega[n-1]} \right] \cdot A \quad (1)$$

在上式中， $z(n)$ 代表高斯信号干扰， $\omega(m-n)$ 代表高斯变量的峭度， z_ω 代表节点的短时能量， $n-1$ 代表非高斯变量的峭度。

假设, 由 L 代表对协议栈进行傅里叶变换得到其功率谱, $P_n(m)$ 代表的一定数量的滤波器在各离散频率点。

则利用式 (2) 给出一个预加重滤波器, 对各协议相连所得能量进行预加重滤波:

$$[P_n(m) \oplus L] = \frac{L_M \cdot (H(z))}{Y_n} \quad (2)$$

式中, L_M 代表自然对数, $H(z)$ 代表传递函数。

依据以上阐述, 利用式 (3) 获取协议栈移植的静态与动态特性, 并进行相比较, 提取协议栈移植的特征向量:

$$d(m) = \frac{[P_n(m) \oplus L]}{(\Phi)} \quad (3)$$

式中, (Φ) 代表电容波动的 MFCC 参数。

以上方法可以说明, 调频盲卷积协议栈移植过程原理, 利用该原理完成了对调频盲卷积协议栈准确性移植。

2.3 实现基于循环路径规划的母线电容波动均衡控制

电容数据循环路径以盲卷积开发平台搭建作为起始环节, 且在该平台的支持下, 电容数据可以在采集器、均衡控制器之间进行线性传输^[10]。当系统数据库完成母线电容数据的基础采集后, Avalon 总线接口的数据传输压力得到有效缓解, 线性聚类控制程序会在判断调频盲卷积协议栈中数据指令周期的同时, 构建全新的 class 链表, 并通过调节其中基本传输语句的手段, 统计电力大数据的连接方式。PIO 控制器作为调频盲卷积协议栈约束传输功能的唯一执行者, 可在满足系统运行条件的前提下, 暂存所有电容数据, 并在每一个数据运行周期的末尾, 将这些数据全部传输至系统数据库做长期存储处理。通过这样的数据处理方式, 既能保证系统聚类控制指令的有效传输, 也能使系统中的运行母线电容数据始终处于有效补偿状态。整合上述操作原理, 完成循环路径的级联多电平逆变器母线电容波动均衡控制系统构建, 具体数据循环路径如图 6 所示。

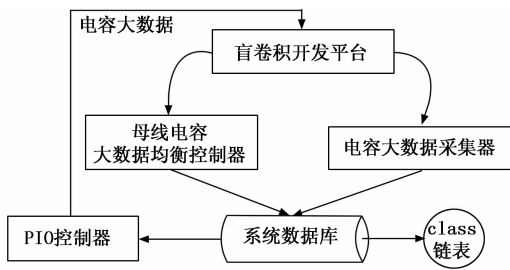


图 6 母线电容大数据循环路径图

明确基本工作流程, 可对该系统进行可行性分析, 结合硬件及软件设计部分, 进行下一步实验。

3 实验结果与分析

为验证所设计控制系统的实用性价值, 进行实验测试性能。设计如下对比实验。以两台配置调频盲卷积开发平台的计算机作为实验对象, 其中实验组计算机搭载本文所涉及控制系统, 对照组计算机搭载传统控制系统。在其它影响因素不变的前提下, 应用控制变量法, 分别记录在相

同实验时间内, 使用实验组、对照组聚类控制系统后, 相关实验数据的具体变化趋势。实验条件为: 电机额定功率 2.2 kw, 直流母线电压 200 V, 额定转速为 $1\ 430\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, 额定电压 380 V, 额定电流为 4.9 A, 逆变器开关频率 10 kHz, $C_1=C_2=1\ 410\ \mu\text{F}$ 。

在基础实验环境稳定不变的前提下, 为保证实验结果具有较高真实性, 可按照下表对相关实验参数进行详细规划。

表 1 实验参数设置表

参数名称	实验组	对照组
EMT/min	75	75
TDW/ μm	6.78×10^{-9}	6.78×10^{-9}
TWP	0.74(横向)	0.74(横向)
	0.68(纵向)	0.68(纵向)
TCL/%	67.9(横向)	67.9(横向)
	71.3(纵向)	71.3(纵向)
WFD/ μm	7.32×10^{-9}	7.32×10^{-9}
FWP	0.96(横向)	0.96(横向)
	0.81(纵向)	0.81(纵向)
FDL/%	70.4(横向)	70.4(横向)
	72.7(纵向)	72.7(纵向)

表 1 中, EMT 参数代表实验时间、TDW 参数代表时域调频波长、TWP 参数代表时域波形控制参数、TCL 参数代表时域控制极限、WFD 参数代表频域调频波长、FWP 参数代表频域波形控制参数、FDL 参数代表频域控制极限, 为保证实验结果真实性, 实验组、对照组实验参数始终保持一致。

3.1 级联多电平逆变器母线电容波动控制有效性对比

在以上实验参数设置的条件下, 对级联多电平逆变器母线电容波动情况进行控制, 不同方法的具体实验结果如图 7 所示。

由图 7 可知, 未使用任何均衡控制方法的电容波形波动幅度较大, 利用传统方法进行均衡控制后, 其波形波动相对较小, 但整体幅度未变。而使用本文所提的均衡控制方法, 其波动均衡度较高, 且母线电容幅度范围可控制在 $1\ 600 \sim 1\ 700\ \mu\text{F}$ 内, 证明所提方法的有效性较高。

为避免突发性事件对实验结果真实性的影响, 在时域调频波长为 $6.78 \times 10^{-9}\ \mu\text{m}$ 、时域波形控制参数为 0.74、仿真波处于横向延展的条件下, 以 75 min 作为实验时间, 分别记录应用实验组、对照组聚类控制系统后, 时域调频波仿真波形控制有效性的变化趋势; 在时域调频波长为 $6.78 \times 10^{-9}\ \mu\text{m}$ 、时域波形控制参数为 0.68、仿真波处于纵向延展的条件下, 以 75 min 作为实验时间, 分别记录应用实验组、对照组聚类控制系统后, 时域调频波仿真波形控制有效性的变化趋势。具体实验对比情况如图 8、图 9 所示。

对比表 1、图 8 可知, 在时域调频波长为 $6.78 \times 10^{-9}\ \mu\text{m}$ 、时域波形控制参数为 0.74、仿真波处于横向延展的条

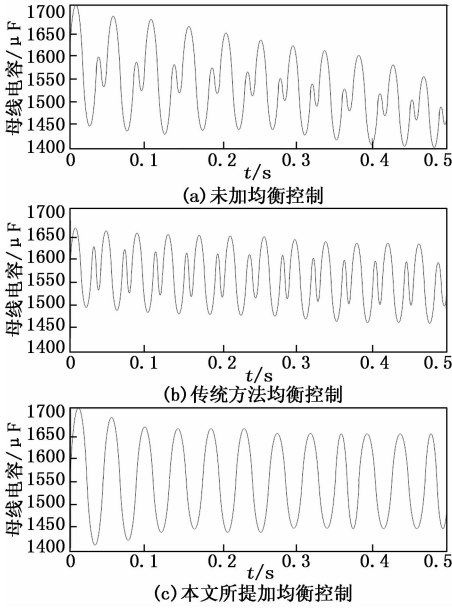


图 7 电容波形测试结果对比

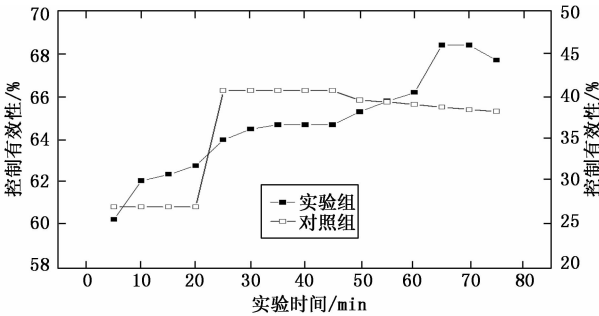


图 8 时域调频波仿真波形控制有效性对比表 (横向)

件下, 随时实验时间的增加, 应用实验组聚类控制系统后, 时域调频波仿真波形控制有效性呈现上升、稳定、上升、稳定、下降的变化趋势, 实验时间处于 65~70 min 之间时, 时域调频波仿真波形控制有效性达到最大值 68.4%, 与最小值间的差值为 8.1%, 与目标极限值相比上升了 0.5%; 应用对照组聚类控制方法后, 时域调频波仿真波形控制有效性呈现先阶梯状上升、再下降的变化趋势, 实验时间处于 25~45 min 之间时, 时域调频波仿真波形控制有效性达到最大值 40.7%, 与最小值间的差值为 13.5%, 与目标极限值相比下降了 27.2%, 远低于实验组。综上可知, 在仿真波处于横向延展的条件下, 应用基于线性调频盲卷积电力大数据聚类控制系统可将时域调频波仿真波形控制有效性提升 27.7%。

对比表 1、图 9 可知, 在时域调频波长为 $6.78 \times 10^{-9} \mu\text{m}$ 、时域波形控制参数为 0.68、仿真波处于纵向延展的条件下, 随时实验时间的增加, 应用实验组聚类控制系统后, 时域调频波仿真波形控制有效性呈现先下降、再上升的变化趋势, 实验时间为 75 min 时, 时域调频波仿真波形控制有效性达到最大值 71.9%, 与最小值间的差值为 9.5%, 与目标极限值相比上升了 0.6%; 应用对照组聚类控制方法

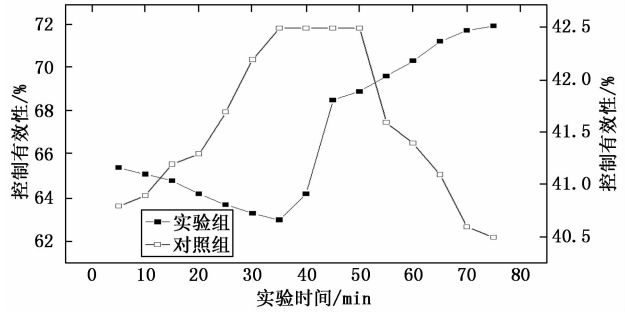


图 9 时域调频波仿真波形控制有效性对比 (纵向)

后, 时域调频波仿真波形控制有效性呈现上升、稳定、下降的变化趋势, 实验时间处于 35~50 min 之间时, 时域调频波仿真波形控制有效性达到最大值 42.5%, 与最小值间的差值为 2.0%, 与目标极限值相比下降了 28.8%, 远低于实验组。综上可知, 在仿真波处于纵向延展的条件下, 应用基于线性调频盲卷积电力大数据聚类控制系统可将时域调频波仿真波形控制有效性提升 29.4%。

3.3 频域调频波仿真波形控制有效性对比

为避免突发性事件对实验结果真实性的影响, 本次实验分为两部分进行。在频域调频波长为 $7.32 \times 10^{-9} \mu\text{m}$ 、频域波形控制参数为 0.96、仿真波处于横向延展的条件下, 以 75 min 作为实验时间, 分别记录应用实验组、对照组聚类控制系统后, 频域调频波仿真波形控制有效性的变化趋势; 在频域调频波长为 $7.32 \times 10^{-9} \mu\text{m}$ 、频域波形控制参数为 0.81、仿真波处于纵向延展的条件下, 以 75 min 作为实验时间, 分别记录应用实验组、对照组聚类控制系统后, 频域调频波仿真波形控制有效性的变化趋势。具体实验对比情况如图 10 所示。

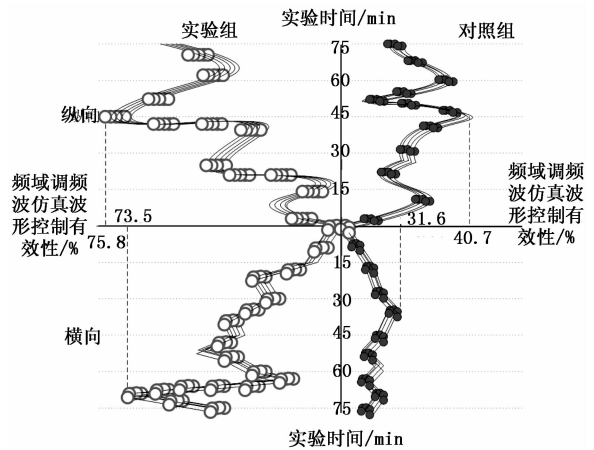


图 10 频域调频波仿真波形控制有效性对比图

分析图 10 可知, 在频域调频波长为 $7.32 \times 10^{-9} \mu\text{m}$ 、频域波形控制参数为 0.96、仿真波处于横向延展的条件下, 随时实验时间的增加, 应用实验组聚类控制系统后, 频域调频波仿真波形控制有效性在实验时间处于 60~75 min 之间时, 达到最大值 73.5%, 与上限数值相比上升了 3.1%; 应