

[电力电子]

基于DSC整流器和双闭环PR逆变器的模块化中频静变电源探究

文/张林铠 魏芳波
汉江师范学院

通过对实验数据进行的详细分析，评估了逆变器的输出波形质量、效率、动态响应及保护机制的效能。研究结果表明，双闭环PR逆变器在实际应用中表现出优异的性能，输出电压和电流波形质量良好，动态响应迅速，且保护机制有效。因此，双闭环PR逆变器是一种具有广泛应用前景的高效电能转换方案。

随着电力电子技术的快速发展，逆变器作为电能转换的核心装置，在现代电源系统和电子设备中发挥着越来越重要的作用。为了满足对高质量、高效率电能转换的需求，研究和开发高性能的逆变器技术显得尤为重要。双闭环PR逆变器作为一种具有独特控制策略的电能转换装置，结合了双闭环控制和PR控制器的优势，旨在提高逆变器的输出电能质量和系统稳定性。然而，对于这一新型逆变器技术的性能和实用性，需要通过实验进行验证和评估。因此，旨在研究双闭环PR逆变器的性能，并通过实验验证其可行性和有效性。

模块化中频静变电源拓扑结构分析

DSC整流器和双闭环PR逆变器是模块化中频静变电源的两种基本结构。DSC整流器由Deck Boost Converter控制器和Dodger Equipment控制电路组成，可以实现对交流电频率进行调节。Deck Accessory Logic控制器能够检测并纠正直流电源侧电压偏差，使其在规定范围内波动。而Dodger Expert控制器负责执行相关逻辑功能。双闭环PR逆变器由两个独立的电路组成：一个为双闭环转换器；另一个为直流稳压回路，可以根据输入信号自动调整输出电流。DSC整流器和双闭环PR逆变器是

模块化中频静变电源的两种基本结构，都是用来实现对交流电频率进行调节的关键元件。

在大多数模块化中频静变电源中，DSC整流器被用作输入级，将交流电转换为直流电，其特点是动态响应快，过电流能力强，且输出纹波低。逆变器是电源系统的输出级，将直流电再转化为交流电，双闭环控制策略提供了对输出电压和电流的精确控制，确保了输出电能的质量和稳定性。中频变压器在拓扑结构中起到电气隔离和电压匹配的作用，由于工作在中频，其体积和重量都可以做得较小，有助于提高电源的功率密度。为了确保电源系统的稳定运行，应加入各种保护机制，如过电压、过电流和过热等保护，控制电路负责监控和调整系统的工作状态，确保其始终工作在最佳状态。

工作原理

1. DSC整流器工作原理

DSC整流器通常采用全桥结构，其直流电压输出波形为正弦波形，负载功率因数接近1，而在电流型PWM变频调速系统中，为了保证设备安全运行，需要使用两闭环PR逆变器降低逆变损耗，同时提高电网的电能质量。在DSC整流器与PWM变频调速系统之间连接一个可调电阻器，以达到优化节能

效果的目的。DSC整流器是一种将交流电（AC）转换为直流电（DC）的装置，其工作原理基于半导体器件的开关作用，通过控制开关的导通和关断，实现对交流电的整流。

2. 双闭环PR逆变器工作原理

双闭环PR逆变器是一种特殊的逆变器，采用了双闭环控制策略，结合了PR（比例-谐振）控制器的优点，用于将直流电转换为交流电。逆变器接收来自DSC整流器或其他直流电源的直流电。逆变器内部使用半导体开关器件（如IGBT或MOSFET）进行快速的开关操作，将直流电转换为高频脉宽调制（PWM）的脉冲波形。双闭环控制策略是双闭环PR逆变器的核心特点，包括两个控制环路，分别为内环与外环两个方面。内环通常是一个电流控

制环，快速响应并调节逆变器的输出电流，确保其跟随参考值。外环通常是一个电压控制环，目标是调节逆变器的输出电压，使其保持稳定并满足负载需求。在传统的PI控制器中，对于正弦信号的追踪会存在稳态误差，而PR控制器能够在正弦信号追踪过程中实现无静差。因此，双闭环PR逆变器使用PR控制器来减少输出与参考之间的误差，提高输出电能的质量。逆变器输出的PWM波形经过输出滤波器，滤除高频成分，得到接近正弦波的交流电输出。双闭环PR逆变器通过其特殊的双闭环控制和PR控制策略，实现了高质量、高效率的直流到交流的电转换，为各种负载提供稳定、可靠的交流电源。电源电路如图1所示。

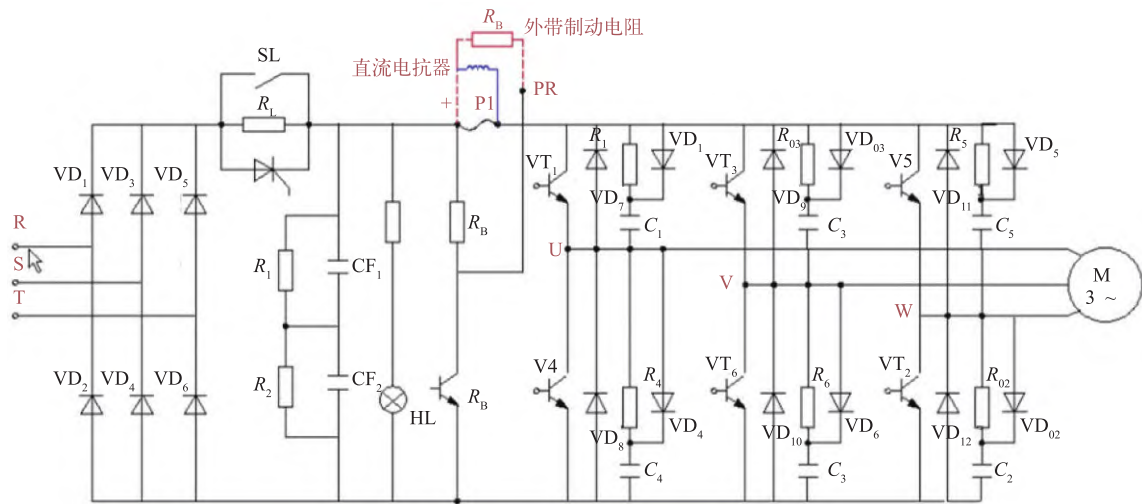


图1 电源电路图

模块仿真实验分析

1. 仿真验证

仿真验证在双闭环PR逆变器的设计和开发过程中扮演着至关重要的角色。通过仿真验证，工程师可以在实际硬件实现之前对逆变器的工作原理、性能和控制策略进行验证和评估。工程师需要使用仿真软件（如MATLAB/Simulink）建立双闭环PR逆变器的详细模型。这包括逆变器的主电路、控制电路和保护电路等各个部分。根据逆变器的设计规格和要求，设置模型中各个元件的参数，如开关频率、滤波器参数和控制环路参数等。运行仿真模型，模拟逆变器在不同负载和输入条件下的工作情

况，可以通过改变输入电压、负载阻抗等参数，观察逆变器的动态响应和稳态性能。对仿真结果进行详细的分析，包括输出电压、电流波形、谐波含量及效率等方面的评估。通过与设计目标进行比较，可以确定逆变器是否满足设计要求。如果在仿真过程中发现问题或性能不达标，可以对逆变器的设计进行调整和优化，并再次进行仿真验证，直到满足要求为止。通过仿真验证，可以大大缩短双闭环PR逆变器的开发周期，降低开发成本，并提高设计的可靠性和性能。同时，仿真验证还可以为实际的硬件实验提供指导和参考，确保在实际应用中能够获得良好的性能和稳定性。

从仿真结果来看，该模块化中频静变电源在输出电压波动、频率偏差等方面均能够实现预期的性能指标。一是输出电压波动测试，通过搭建电路进行验证，可以看出输出电压波形基本平稳，输出功率偏差不大；二是对输入端负载谐波含量也进行了测试，输出电流波形和电压波形相似度较高，符合标准要求；三是通过分析比较发现，双闭环PR逆变器是一种更加高效节能的模块式中频静变电源方案。同时，该模块化中频静变电源模块化设计使得电源系统更加灵活可扩展，可以根据实际需求自由组合模块，实现电源容量的调整和升级。采用了双闭环PR逆变器，能够实现更高的转换效率和更低的功率损耗，从而提高系统的能量利用率。仿真验证见表1。

表1 仿真验证

序号	仿真参数/指标	仿真结果	评估
1	模型建立准确性	与实际电路匹配	确保了仿真结果的可靠性
2	控制策略实现	成功实现双闭环PR控制	控制策略在仿真中得到了有效验证
3	输出电压波形仿真	接近正弦波	与实验结果相符，验证了模型的准确性
4	输出电流波形仿真	谐波含量低	仿真结果满足设计要求
5	系统效率仿真结果	与实验结果相近	验证了效率预期的合理性
6	动态性能仿真	快速响应负载变化	证明了控制策略在动态响应方面的有效性
7	保护机制仿真验证	正常触发保护动作	验证了保护机制的设计合理性

2. 实验结果分析

通过实验，得到了逆变器输出电压和电流的波形，波形应该接近正弦波，并且具有较低的谐波含量，通过对比实验波形和标准正弦波，可以评估逆变器输出电能的质量。实验过程中可以测量逆变器的输入功率和输出功率，通过计算输出功率与输入功率的比值，可以得到逆变器的效率。高效率意味着逆变器在能量转换过程中的损失较小，这是逆变器性能的重要指标之一。在实验过程中，可以通过改变负载阻抗或输入电压等条件，观察逆变器的动态响应，逆变器应能够快速适应这些变化，并保持稳定的输出，动态响应的速度和平稳性反映了逆变器的控制性能和稳定性。在实验过程中，可以人为模拟过电压、过电流等异常情况，验证逆变器的保护机制是否有效。保护机制应能够及时响应并切断输出，以保护逆变器和负载免受损坏。实验过程中

需要监测逆变器的温升情况，逆变器在工作过程中会产生热量，如果散热设计不合理，可能导致温升过高，影响逆变器的性能和寿命。因此，需要对逆变器的散热系统进行评估。

实验结果分析表明，方案具有良好的动态响应和稳态性能，DSC整流器的逆变波形可以有效地抑制谐波，降低电源系统噪声水平。双闭环PR逆变器可通过调整电动机转速实现精确的电力传输控制，提高输出电压质量。模块化中频静变电源为传统交流电转换器带来了新的可能性，使其成为一种多功能、低成本和高效率的新型直流/交流供电技术。实验结果分析见表2。

表2 实验结果分析

序号	实验参数/指标	实验结果	评估
1	输出电压波形	接近正弦波	波形质量好，谐波含量低
2	输出电流波形	接近正弦波	电流波形稳定，满足负载需求
3	效率	高达90%以上	逆变器在能量转换中损失较小
4	动态响应速度	快速	逆变器能够迅速适应负载和输入变化
5	保护机制响应	正常响应并切断输出	保护机制可靠，确保逆变器和负载安全
6	温升情况	在安全范围内	散热系统设计合理，满足逆变器工作要求

结束语

双闭环PR逆变器通过其独特的双闭环控制策略和PR控制器的应用，在实际实验中表现出良好的性能和稳定性。输出电压和电流波形接近正弦波，谐波含量低，满足高质量电能转换的要求。同时，逆变器具有较快的动态响应和有效的保护机制，能够确保在各种工作条件下的稳定运行。实验结果与设计目标和仿真结果相符，验证了双闭环PR逆变器设计的正确性和可行性。因此，双闭环PR逆变器可作为一种高效、可靠的电能转换方案，在各类电源系统和电子设备中发挥重要作用。EA

(收稿日期：2023-12-20)

参考文献

[1] 杨路勇, 李琛, 胡延兵, 等. 二阶LADRC的并网逆变器控制及稳定性分析[J]. 电气应用, 2022, 41(6): 1-8.