**课程名称： 先进控制理论及应用**

**论文题目：基于模型预测控制的半桥LLC变换器优化研究**

**所在学院： 自动化与电子信息学院**

**姓 名： 熊宣雯**

**学 号： 202221623241**

**专 业： 能源动力**

**联系方式： 13972905955**

**指导老师： 王昭鸿**

**摘 要**

半桥LLC变换器作为一种常见的电力电子变换器拓扑，在能量转换和电源管理方面具有重要应用。传统的控制方法如比例积分控制（PI控制）在半桥LLC变换器中广泛应用，但在系统动态响应和抗扰性方面存在局限。为了克服这些问题，本文提出了一种基于模型预测控制（MPC）的半桥LLC变换器优化方法。通过建立半桥LLC变换器的数学模型、定义优化目标和约束条件，并应用MPC算法进行优化控制，该方法能够提高系统的性能和鲁棒性。

**关键词：**半桥LLC变换器、模型预测控制、优化、动态响应、抗扰性

Abstract

As a common power electronic converter topology, half-bridge LLC converter has important applications in energy conversion and power management. Traditional control methods such as proportional integral control (PI control) are widely used in half-bridge LLC converters, but there are limitations in system dynamic response and immunity. To overcome these problems, a half-bridge LLC converter optimization method based on model predictive control (MPC) is proposed in this paper. By establishing the mathematical model of the half-bridge LLC converter, defining the optimization objectives and constraints, and applying MPC algorithm to optimize the control, the method can improve the performance and robustness of the system.

**Key words:**  Half-bridge LLC converter, model predictive control, optimization, dynamic response, immunity

# 目 录

[一、引言 5](#_Toc144502528)

[二、半桥LLC变换器的工作原理 5](#_Toc144502529)

[2.1结构介绍 6](#_Toc144502530)

[2.1.1半桥电路 6](#_Toc144502531)

[2.1.2 LLC谐振电路 6](#_Toc144502532)

[2.1.3 输出滤波电路 7](#_Toc144502533)

[2.2 LLC谐振变换器的三种工作模式 7](#_Toc144502534)

[2.3电路特点及其优缺点 8](#_Toc144502535)

[2.3.1电路特点 8](#_Toc144502536)

[2.3.2优缺点 8](#_Toc144502537)

[三、模型预测控制与普通控制方法 9](#_Toc144502538)

[3.1模型预测控制 9](#_Toc144502539)

[3.1 .1选取预测模型 9](#_Toc144502540)

[3.1.2构造最小代价函数 9](#_Toc144502541)

[3.1.3滚动优化 10](#_Toc144502542)

[3.2普通控制方法 10](#_Toc144502543)

[四、总结 10](#_Toc144502544)

一、引言

随着能源管理和电力电子技术的快速发展，半桥LLC变换器作为一种高效的能量转换和电源管理解决方案，受到了广泛关注。该变换器拓扑具有许多优势，如高效性能、低开关损耗、较低的电磁干扰和高功率密度，因此在许多应用中得到了广泛应用，包括电力系统、电动汽车充电器、太阳能和风能发电等。然而， 半桥LLC变换器的性能优化一直是研究的焦点，因为传统的控制方法在满足系统动态性能和抗扰性方面存在一定的局限性。传统方法通常使用比例积分控制（PI控制）来调节变换器的输出电压，但这种方法需要手动调整参数，并且在快速变化的负载条件下可能无法满足系统的性能要求。为了克服这些问题，近年来，基于模型预测控制（MPC）的方法在半桥LLC变换器优化研究中得到了广泛关注。MPC方法是一种先进的控制策略，通过对系统进行建模、预测和优化控制，可以在每个控制周期内计算最优控制序列，以实现系统性能的优化。相比传统的PI控制方法，MPC方法具有更好的动态响应性能、抗干扰能力和鲁棒性。

本论文旨在研究基于模型预测控制的半桥LLC变换器优化方法，以提高系统的性能和鲁棒性。通过建立半桥LLC变换器的数学模型，定义优化目标和约束条件，并应用MPC算法进行优化控制，我们将探索如何利用MPC方法优化半桥LLC变换器的动态特性、提高输出电压稳定性、减小响应时间并提高抗干扰能力。

本论文的结构如下：第一部分介绍半桥LLC变换器的工作原理和传统控制方法；第二部分详细描述基于模型预测控制的半桥LLC变换器优化方法以及传统控制方法的弊端；第三部分总结全文并展望未来的研究方向。通过本论文的研究，我们期望为半桥LLC变换器的控制和优化提供一种新的方法和理论基础，为电力电子领域的实际应用提供有益的指导和参考。

二、半桥LLC变换器的工作原理

半桥LLC变换器是一种常见的电力电子拓扑，用于能量转换和电源管理应用。它由半桥电路、LLC谐振电路和输出滤波电路组成。以下是半桥LLC变换器的详细工作原理：

|  |
| --- |
|  |
|  |  |

图2.1半桥LLC的简单拓扑图

2.1结构介绍

2.1.1半桥电路

输入侧：输入电压通常来自于电网或其他直流电源。输入电压通过输入电感（Ls）与半桥电路连接。

开关元件：半桥电路由两个开关器件（如MOSFET或IGBT）组成，分别位于输入电感的两端。这两个开关器件根据控制信号的输入进行开关操作。当一个开关器件导通时，另一个开关器件截止，从而形成一个方波电压信号。

2.1.2 LLC谐振电路

谐振电容（Cr）：谐振电容并联连接在半桥电路的输出端，接收半桥电路产生的方波电压信号。

谐振电感（Lr）：谐振电感串联在谐振电路中，其作用是实现能量存储和传输，并控制谐振回路的电流和电压。当谐振电路的开关器件导通时，电源通过Lr将能量存储在磁场中，形成磁能。这样，能量就可以在开关器件切换周期内存储在Lr中，以供后续的能量传输和转换使用。通过调整Lr的数值，可以控制电流的上升和下降速度，从而减小电流的冲击和压降，提高系统的稳定性和可靠性。

Lr可通过磁场耦合实现能量的传输。当开关器件截止时，Lr释放存储的能量，供应给谐振回路和负载。Lr的数值也会影响LLC谐振电路的谐振频率。通过调整Lr的数值，可以改变谐振回路的固有频率，从而匹配输入电源和输出负载的需求，并实现谐振条件。

 励磁电感（Lm）：励磁电感与谐振电感（Lr）和谐振电容（Cr）共同构成谐振回路，实现能量的传输和谐振现象。励磁电感Lm与变压器的一次侧线圈耦合，将能量从电源传输到谐振回路。当开关器件导通时，Lm存储能量，并形成磁场储能。当开关器件截止时，Lm释放存储的能量，实现能量的传输和转换。通过调整Lm的数值，可以改变谐振回路的固有频率，以匹配输入电源和输出负载的要求。谐振频率的调节对于实现高效的能量转换和稳定的输出特性非常重要。并且它可以限制电流的变化率，稳定谐振回路的电流波形，并控制输出电压的调节范围和稳定性。以及抑制谐振回路中的谐振峰值电压。通过合理选择Lm的数值，可以调节谐振回路的阻尼特性，减小谐振峰值电压，提高系统的稳定性和可靠性。

2.1.3 输出滤波电路

输出滤波电路在LLC谐振变换器中起到重要作用，它用于滤除谐振回路产生的高频噪声和谐振波形，使得输出电压能够稳定、平滑地提供给负载。通常由以下几个主要组成部分构成：

输出电感（Lout）：输出电感是输出滤波电路中的关键元件之一。它被串联在负载和输出电容之间，用于储存和传递能量。输出电感能够平滑输出电流，减小电流的纹波，并提供稳定的输出电压。

输出电容（Cout）：输出电容是输出滤波电路中另一个重要的元件。它被并联在负载和输出电感之间，用于储存电荷和平滑输出电压。输出电容具有低阻抗特性，可以对高频噪声进行滤波，使得输出电压具有较低的纹波。

负载（Load）：负载是输出滤波电路的最终接收端，它通常是电子设备、电路或其他负载元件。负载的特性和要求决定了输出滤波电路的设计和参数选择。

输出滤波电路的工作原理是将高频噪声和谐振波形通过输出电感和输出电容的组合滤除，从而实现输出电压的平稳和稳定。输出电感和输出电容共同构成了一个低通滤波器，通过选择合适的参数和组件值，可以实现对高频噪声的抑制和输出纹波的降低。

输出滤波电路在LLC谐振变换器中起到平滑输出电流和电压的作用，通过输出电感和输出电容的组合滤除高频噪声和纹波，确保稳定、可靠的输出。合理的设计和配置输出滤波电路是实现高质量输出的关键。

2.2 LLC谐振变换器的三种工作模式

工作模式1：fs＜fr。该模式下，励磁电感Lm部分时间参与谐振，LLC谐振变换器不仅能实现原边侧开关管零电压开通(ZVS)，也能同时实现副边侧整流部分二极管零电流关断(ZCS)。

工作模式2：fs=fr。该模式下，励磁电感Lm始终被输出电压钳位一直未参与谐振，其两端电压一直被输出电压箝位在nVo。整流二极管电流临界连续，因此同样能够实现ZCS关断。

工作模式3：fs＞fr。该模式下，励磁电感Lm始终被输出电压嵌位，一直未参与谐振。原边开关管可实现ZVS开通，但副边侧整流二极管上的电流不能ZCS关断，且换流时因反向恢复产生损耗。

对于LLC谐振电路来说是有两个谐振频率的：

当谐振电容和谐振电感参与谐振时谐振频率为fr1，


当谐振电容和谐振电感以及励磁电感都参与谐振时谐振频率为fr2



2.3电路特点及其优缺点

**2.3.1电路特点**

半桥式LLC谐振电路由励磁电感（Lm）与谐振电感（Lr）和谐振电容（Cr）共同构成谐振回路，其直流增益可大于1，可小于1，且LLC谐振电路可以实现零电压开关（Zero Voltage Switching，ZVS）和零电流开关（Zero Current Switching，ZCS）的操作。开关管在开通和关断时，开关管源漏极电压与电流会出现重叠的现象，即有额外的开关损耗产生，这种开通与关断称为硬开关。在开关管导通前，使用特定的措施使得开关管两端电压预先下降到零，随后开通开关管。即可实现软开通（ZVS，零电压开通）；在开关管关断前，使用特定的措施使得开关管的电流预先下降到零，随后关闭开关管，即可实现软关断（ZCS，零电流关断）。

在LLC谐振电路中，通过合理的设计和控制，使得开关器件在切换过程中能够实现零电压开关和零电流关断。当开关器件（如MOSFET）被打开或关闭时，通过调整谐振电容和谐振电感的参数，可以确保开关器件在切换瞬间电压为零，或者电流为0，从而实现零电压开关操作和零电流关断操作。ZVS操作和ZCS操作可以减少开关器件的开关损耗，提高系统的效率和可靠性、降低电路中温度升高，提高LLC谐振电路的效率和性能。此外，ZVS和ZCS操作还可以减少开关器件的电磁干扰（EMI）和噪声产生，提升电路的电磁兼容性（EMC）。

**2.3.2优缺点**

优点：1、可实现更多区域内的ZVS；2、能够在输入电压和负载大范围变化的情況下调节输出，同时开关频率变化相对很小；3、循环电流随负载减小而减小；4、谐振电容能有效防止变压器磁饱和。

缺点：1、空载不能稳压、输出电压纹波较大。2、工作区域多，参数计算复杂，变压器设计困难。

三、模型预测控制与普通控制方法

3.1模型预测控制

模型预测控制（Model Predictive Control, MPC）是一种利用当前时刻的变量信息对下一个时刻的控制变量进行调节的一种控制方法，起源于石油化工产业。如今，MPC 也开始应用在电气领域，如将有限集模型预测控制应用在光伏并网逆变器的控制。MPC方法通过对系统进行预测，并在每个控制周期内计算最优控制序列，以实现系统性能的优化。该算法可以提供较好的动态性能和鲁棒性，对于半桥LLC变换器的控制具有重要意义。总体来说，MPC 分为选取预测模型、构造最小代价函数、滚动优化三个步骤。

3.1 .1选取预测模型

首先，考虑基于物理原理建立LLC变换器的动态模型。这可以通过分析电路拓扑和元件特性，建立包括电感、电容、变压器、开关器件等元件在内的差分方程或状态空间模型。如果基于物理原理建模复杂，可以考虑使用经验模型。这种模型可以通过系统辨识技术从实验数据中获得。

无论是物理模型还是经验模型，都需要进行验证和调整。将模型的预测与实际系统响应进行比较，如果存在差异，则需要调整模型参数以更好地匹配实际情况。

在选取预测模型时，需要考虑模型的复杂度。模型应该能够准确地描述系统的动态，但也要尽量避免过于复杂的模型，以免增加计算负担。

3.1.2构造最小代价函数

首先，明确LLC变换器的控制目标。这可以是输出电压的追踪、输出电流的控制、开关器件的工作频率等。

基于控制目标，构造一个最小代价函数。这个函数通常是一个关于控制输入和系统状态的二次型函数，其中包括控制误差、控制变量变化量等。

如果存在约束条件，如电流限制、电压限制等，需要将这些约束加入到代价函数中，以确保系统在允许范围内运行。

3.1.3滚动优化

基于选取的预测模型，预测未来时刻的系统状态。这涉及到模型的迭代和仿真。

将预测的未来状态和构造的最小代价函数结合起来，构造一个优化问题。这个问题的目标是找到一个最优的控制输入序列，以使代价函数最小化。通过优化算法，如二次规划（QP）、动态规划等，求解构造的优化问题，得到最优的控制输入序列。

从最优控制输入序列中选择第一个控制输入，并将其应用于系统。然后，观察系统的响应，更新状态估计。在下一个时刻，重复上述滚动优化过程。通过持续的预测、优化和应用控制输入，MPC控制器能够适应系统动态变化，实现系统优化控制。

3.2普通控制方法

传统的控制方法，如比例积分控制（PI控制），在半桥LLC变换器中常用。然而，PI控制往往需要手动调整参数，且在系统动态响应和抗扰性方面可能存在一定的局限性。

四、总结

本文探讨了在LLC（Half-Bridge LLC）变换器中应用MPC（Model Predictive Control）的原理和优势。LLC变换器作为一种高效能量转换器，结合了半桥拓扑和LLC谐振电路，具有高效率和低损耗的特点。而MPC作为一种基于模型的控制方法，为LLC变换器的能量转换和传输提供了高效且精确的控制手段。

在应用MPC控制LLC变换器中，我们着重强调了关键步骤，包括选取预测模型、构造最小代价函数、滚动优化等。选取合适的预测模型和构造代表性的最小代价函数对于控制性能至关重要。滚动优化确保了在每个时刻都能选择最优的控制输入，以实现系统输出的追踪和性能优化。

在未来的研究中可以在以下几个方向进行拓展：研究如何将MPC扩展到多个输出变量和多个控制目标的情况。这将涉及到更复杂的代价函数构造和优化算法设计。探索如何使MPC在面对参数不确定性、扰动和噪声时保持稳定性和鲁棒性。这可以通过优化算法的改进和鲁棒控制技术的应用来实现。将深度学习和数据驱动方法应用于LLC变换器的MPC中，可以通过大量实验数据来学习复杂的系统动态和模型，从而进一步提高控制性能。总之，LLC变换器的MPC控制是一个充满潜力的研究方向。通过进一步研究和创新，可以进一步提升LLC变换器的控制性能，推动其在能量转换和传输领域的应用。