

# 串联谐振高频链逆变电源的模糊控制仿真

## The Simulation of the Series Resonant HF Link Inverter Fuzzy-control

何艳凯, 孙宏宇

河北汇能欣源电子有限公司 (石家庄, 河北, 050051)

He Yankai, Sun Hongyu

Hebei Huineng Xinyuan, (Shijiazhuang, Hebei, 050051)

**摘要:** 串联谐振高频链逆变电源是一种性能优良的逆变电源, 采用判断谐振槽能量多少的方式进行电压、电流双闭环控制。根据谐振槽能量多与少进行判断的特点, 本文采用了电压外环 PI 控制进行输出电压稳压控制, 电流环采用模糊控制的方法对谐振槽能量多少进行判断。通过仿真研究, 证实了模糊控制方法得可行性和实用性。

**关键词:** 串联谐振 高频链 逆变 模糊控制 仿真

**Abstract:** The series resonant high-frequency link inverter has a good performance, which is controlled by voltage and current double-loop according to the amount of resonant tank energy. In the light of the characteristic of estimating resonant tank energy, this paper employs voltage loop to control output voltage and current loop fuzzy control method to control resonant tank energy. The simulation research proves that the fuzzy control method is feasible and practicable on the series resonant high-frequency link inverter.

**Key words:** Series resonant, High-frequency link, Inverter, Fuzzy-control, Simulation

[中图分类号] TN86 [文献标识码] A 文章编号: 1561-0349 (2014) 11-0024-04

### 1 引言

串联谐振高频链逆变电源, 是一种性能优良的逆变电源, 各个开关管均为全程 ZCS 软开关, 有效地降低了开关损耗, 提高了电能变换效率<sup>[1]</sup>。此逆变电源可以广泛地适用于 UPS、AC 电机驱动、感应加热以及各种新能源、可再生能源发电系统。

由于串联谐振高频链逆变电源自身的特点, 无法建立精确的数学模型。模糊控制中的知识表示、模糊规则和合成推理, 是基于专家知识或操作者的成熟经验, 是一种不需要被控对象的精确数学模型的、具有较强鲁棒性和自适应性的智能控制技术, 从而受到越来越多研究者的重视<sup>[2]</sup>。将模糊控制技术应用于逆变器的控制器设计, 是提高系统性能的有效途径之一。

本文设计了串联谐振高频链逆变电源的模糊控制器, 并通过仿真结果验证了设计的正确性。

### 2 模糊控制系统的组成、原理和特点

模糊控制系统, 是以模糊数学和模糊语言形式的知识表

示和模糊逻辑规则推理为理论基础, 采用计算机控制技术构成的一种具有反馈通道的闭环结构的数字控制系统。模糊控制系统的组成核心是智能型模糊控制器, 它的基本结构与原理如图 1 所示。

从图中可见, 模糊控制系统一般由模糊控制器、输入输出接口装置、被控对象、执行机构和传感器等 5 部分组成。

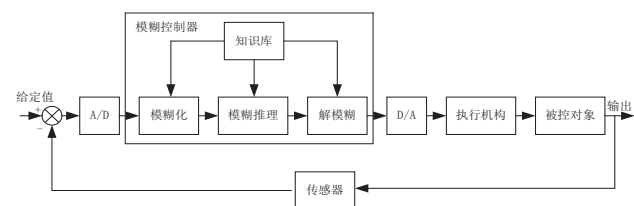


图 1 模糊控制原理图

模糊控制器通常由计算机实现, 计算机通过采样获取被控制量的精确值, 然后, 将反馈值与给定值进行比较得到误差信号  $E$ 。由于工程复杂程度的要求, 一般选择二维的模糊控

制器，这样选取误差信号  $e$  和误差的变化量  $e_c$  作为模糊控制器的输入量，把  $e$  和  $e_c$  的精确量进行模糊化后变成模糊量， $e$  和  $e_c$  的模糊量可用相应的模糊语言表示。至此，得到了  $e$  和  $e_c$  的模糊语言集合子集  $E$  和  $E_c$ 。由  $E_c$ 、 $E$  和模糊控制规则  $R$ ，根据推理合成规则进行决策，得到模糊控制量  $U$ ， $U$  同样为一个模糊量，为了对被控对象施加精确的控制，还需将模糊量  $U$  转换为精确量  $u$ ，即在图中称为非模糊化处理（去模糊化，或者是解模糊），得到了精确的数字控制量后，再通过执行机构施加给被控对象。

利用计算机可根据不同的  $E$  和  $E_c$  预先计算好控制量  $U$ ，制成控制表，作为“文件”存储在计算机中。当进行实时控制时，便于根据输出的信息，从“文件”中查询所需采取的控制策略。因此，该控制表又被称为查询表。查询表是模糊控制执行的核心部分，通过它能使模糊控制策略得以实现<sup>[3]</sup>。

为保证模糊控制系统设计的可靠性及高效性，选择合适的开发工具非常重要。MATLAB 软件中的 Simulink 图形仿真环境<sup>[4]</sup>和模糊逻辑工具箱<sup>[5]</sup>用以完成模糊控制系统的设计与仿真，极大地方便了设计者。

在模糊控制中量化因子  $K_e$ 、 $K_{ec}$  和比例因子  $K_u$ ，对控制系统的动态性能有很大的影响，根据对于一个阶跃给定信号对系统响应分析可归结如下：

(1)  $K_e$  增大时，相当于缩小了误差的基本论域，增大了误差变量的控制作用，因此使得系统上升时间变短。但  $K_e$  过大时会出现超调，并使系统的过渡过程变长，严重时甚至使系统产生振荡；若  $K_e$  较小，则系统上升较慢，快速性差，同时稳态误差较大。

(2)  $K_{ec}$  选择较大时，提高了模糊控制器的灵敏度，能有效地抑制超调，但系统的响应速度变慢； $K_{ec}$  较小时，则会产生较大的超调和振荡。 $K_{ec}$  对超调的影响十分明显。量化因子  $K_e$  和  $K_{ec}$  的大小，意味着对输入变量误差和误差变化的不同加权程度，二者之间也相互影响。

(3) 输出比例因子  $K_u$  作为模糊控制器的输出增益，它的大小直接影响着控制器的输出和模糊控制系统的特性。 $K_u$  在系统响应的上升和稳定阶段，对控制性能有不同影响。在上升阶段， $K_u$  选择越大系统动态响应越快，但容易导致系统超调；在稳定阶段， $K_u$  过大会引起振荡。 $K_u$  较小对系统稳定有利，但将延长响应时间。

### 3 控制系统设计

图 2 是串联谐振高频链逆变电源的主电路拓扑。

逆变器系统的控制框图如图 3 所示。该系统采用输出电压和谐振电感电流双闭环控制策略。电压外环选用 PI 控制策略，进行输出电压的幅值和相位控制。谐振电感电流的内环模糊控制，对谐振槽能量多少进行模糊判断控制。

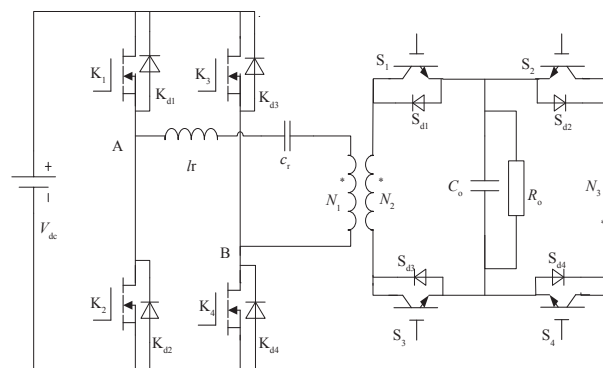


图 2 串联谐振高频链逆变器

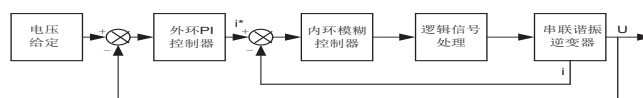


图 3 系统控制框图

变量  $E$  和  $E_c$  的隶属度函数分布，如图 4 所示，输出变量  $U$  的隶属度函数分布如图 5 所示。3 个隶属度函数均选用 7 个语言值。

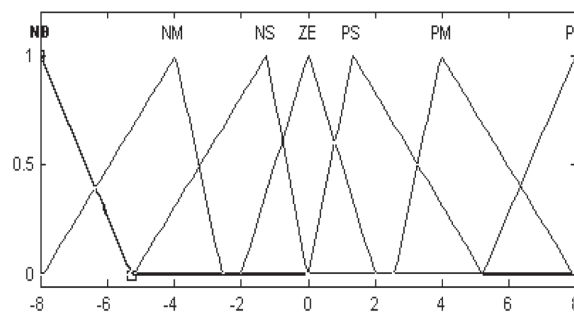


图 4 变量  $E$  和  $E_c$  的隶属度函数分布

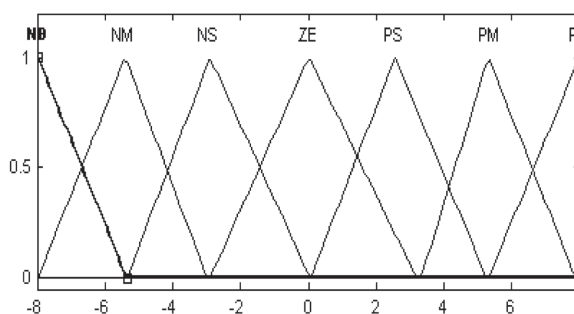


图 5 输出变量  $U$  的隶属度函数分布

其中，模糊控制器的模糊控制规则如表 1 所示。

在设计模糊控制中，考虑到系统稳态精度与快速性的折衷， $E$  和  $E_c$  的隶属度函数采用对称三角形非均匀分布，在误差较小的区域，可以设置分辨率较高，使系统具有较好的灵敏度；在误差较大的区域，设置分辨率较低，使系统具有良好的鲁棒性。

表 1 模糊控制规则表

$E_c/E_e$	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PM
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
ZS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
ZM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
ZB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

### 4 逆变器系统的仿真研究

为了验证本文所设计的基于模糊控制的逆变器双闭环控制系统的正确性，通过 Matlab 软件中的图形化仿真工具 Simulink、模糊逻辑工具箱和 SimPowerSystems 对系统进行了仿真研究。

仿真条件：输入直流 48V，输出交流 220V/50Hz，谐振频率为 50kHz，双副边绕组高频变压器的变比为 1:8。系统仿真图如图 6 所示。

不同负载时的仿真结果分别示于图 7，图 8，图 9，图 10。

仿真波形图说明：曲线 1 表示逆变器输出电压；曲线 2 表示输出电压参考；曲线 3 表示逆变器输出电流。

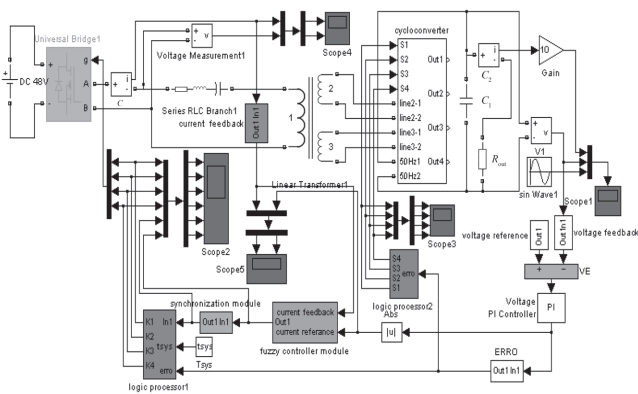


图 6 系统仿真图

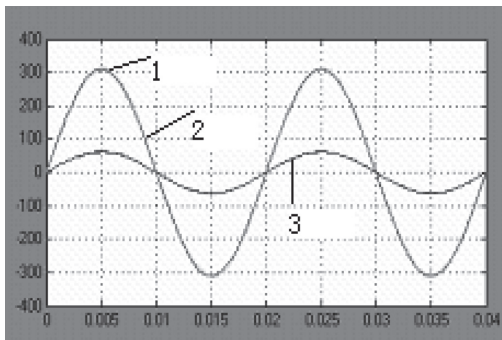


图 7 纯阻性负载

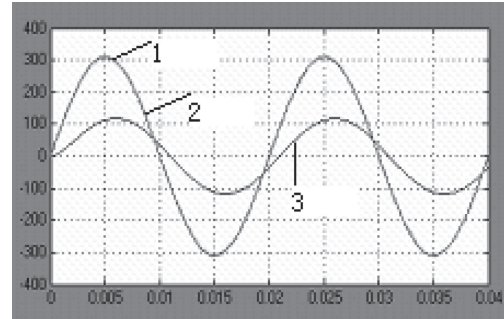


图 8 阻感性负载

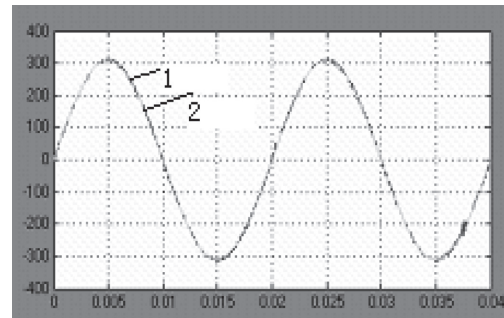


图 9 空载

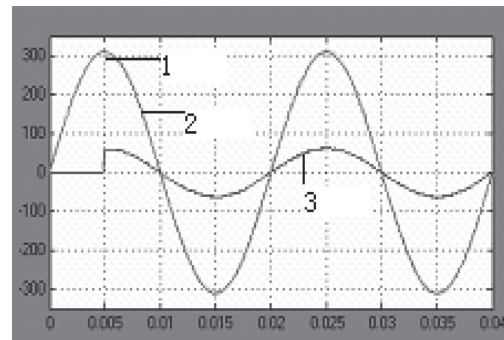


图 10 负载由空载到满载突变

### 5 结论

针对串联谐振高频链逆变器，设计了基于 PI 控制的输出电压外环、模糊控制谐振电流内环的双闭环控制系统，并对系统进行了仿真研究，仿真结果表明，所设计的系统有较好的动态响应速度和稳态精度，且在阻性负载、阻感负载、空载、空载到满载突变的条件下，都可以可靠运行。模糊控制算法简单，可操作性强，数字化实现容易，适合工程实际的应用。

基于 MATLAB 的仿真研究，为下一步的实验研究提供了一个良好可靠的基础。

#### 参考文献

[1] Weiyang Wu, Xiaoyi Jin, Xiaofeng Sun. A Novel Series Resonant High-Frequency Link Sine- (下转第 42 页)