



清华大学-  
三相并网 PWM 整流器基于 TS 模糊模型的稳定性  
分析

## 用户与研究成果简介：

清华大学电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室的聂金铜博士所在团队建立并网的 T 型三电平整流器的 TS 模糊模型；并基于此模型来分析整流器系统主电路参数和控制器参数与稳定区间之间的关系；构造出的 Lyapunov 备选函数能够绘制出稳定吸引域，从而实现大扰动情况下的稳定性分析。

研究人员利用了上海远宽的 MT3060 电力电子实时仿真器来进行硬件在环实时仿真实验；通过硬件在环仿真的实验波形验证了所提方法的有效性，成果总结发表于《电网技术》：

聂金铜，赵争鸣，袁立强等，级联恒功率负载情况下三相并网 PWM 整流器基于 TS 模糊模型的稳定性分析[J]. 电网技术. 网络首发，2020 年 3 月。

## 课题研究背景

### 带恒功率负载的并网逆变器稳定性问题

在电力电子化的电力系统中，电力电子变换器级联是很常见的拓扑结构，大多级联的后级变换器工作在恒值功率或可调功率的恒功率模式下，当外部扰动造成变换器耦合的公共母线电压波动时，由于连接到公共母线上的恒功率负载变换器的闭环控制会反方向调整从母线上抽取的电流，即表现出负阻抗特性。如果源变换器无法及时补偿所需功率时，将造成母线电压电流的急剧振荡，使整个系统失去稳定。在这种情况下，确定源变换器的主电路和控制器参数对稳定性的影响并用于系统设计、评估级联系统的稳定边界、优化电感电容等储能元件的参数等都较为重要。

恒功率负载并网逆变器模型中状态变量的非线性关系和 PWM 整流器模型的非线性，使得过去相关文献中对稳定性的分析大多采用小信号线性化的方法，对非线性系统矩阵在平衡状态附近进行线性化，只能得到平衡状态附近的局部稳定性结论，无法描述出大信号扰动时的渐近稳定范围。

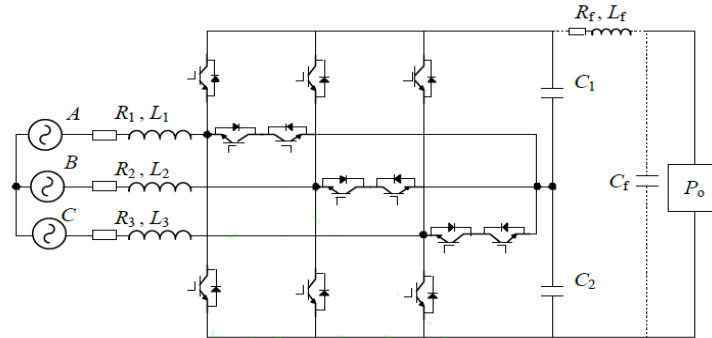
## 研究重要内容和创新点

### 并网逆变器的 TS 模糊模型与稳定性判定算法

TS 模糊模型是以简单的线性组合来有效近似表示非线性系统，对于非线性系统的状态空间描述为：

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t))(A_i x(t) + B_i u(t)) \\ y(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t))C_i x(t) \end{cases}$$

其中  $h$  为成员函数，满足  $\sum h_i = 1$ ，通过选择合适的模糊规则数量和成员函数，可以用线性子空间的组合来表示出非线性系统。对于如下图的 T 型三电平并网整流器系统：



经过推导[过程详见清华大学的研究团队文献]可以得到如下式的非线性状态方程：

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \frac{-R - k_{pi}}{L} & 0 & -\frac{k_{pi}k_{pv}}{L} & \frac{k_{ii}}{L} & 0 & \frac{k_{pi}k_{iv}}{L} \\ 0 & \frac{-R - k_{pi}}{L} & 0 & 0 & \frac{k_{ii}}{L} & 0 \\ \frac{1.5 \cdot [e_d + k_{pi}(x_1 + I_{d0}) - RI_{d0}]}{C(x_3 + U_{DC0})} & 0 & \frac{1.5 \cdot k_{pi}k_{pv}(x_1 + I_{d0})}{C(x_3 + U_{DC0})} & -\frac{1.5 \cdot k_{ii}(x_1 + I_{d0})}{C(x_3 + U_{DC0})} & 0 & -\frac{1.5 \cdot k_{pi}k_{iv}(x_1 + I_{d0})}{C(x_3 + U_{DC0})} \\ -1 & 0 & -k_{pv} & 0 & 0 & k_{iv} \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot x$$

定义如上矩阵系数中的非线性项： $f_1(x_1) = x_1 + I_{d0}$ ， $f_2(x_3) = \frac{1}{(U_{DC0} + x_3)}$ ；

以状态变量  $x_1, x_3$  的最小值和最大值构建对应的局部模型；对于一个具体的模型的系数矩阵  $A$  来说，以是否能找到正定矩阵  $P$  使  $A^T P + P A < 0$  成立作为临界的稳定判据。

### 临界稳定功率边界搜索算法

对临界稳定功率大小进行判断搜索时，状态变量  $x_1, x_3$  始终为 0，模糊规则减少为 1，对应的搜索算法为：

---

```

for  $i=1:1:I_{dmax}$ 
 $I_{d0}=i$ ;
 $f_{1max}=f_{1min}=I_{d0}$ ;
 $f_{2max}=f_{2min}=1/U_{DC0}$ ;
SDP problem:
 $A^T P + P A < -I$  (6)
If SDP is feasible then  $P_{feasible}=P$  and continue;
Else break;
End for
 $P_{crit}=1.5e_d(i-1)$ 

```

---

## 大信号扰动情况下最大扰动边界搜索算法

由于闭环系统中母线电压状态变化后才引起电流控制环的调整使网侧电流改变，且电流内环带宽较快、具有快速调整能力，在大信号扰动情况下稳定性评估时认为  $i_d$  保持不变，以简化分析。此时模糊规则数量为 2，主要需评估  $x_{3min}$  和  $x_{3max}$  扰动变化而不引起系统失去稳定的边界范围。具体算法如下[详细推导请参考清华大学的研究团队文献]：

---

```

for  $i=0:-1:-500$ 
 $f_{1max}=f_{1min}=I_{d0}$ ;
 $f_{2max}=1/(i+U_{DC0})$ ;
 $f_{2min}=1/(-i+U_{DC0})$ ;
SDP problem:
 $A^T P + P A \leq -I$  (6)
If SDP is feasible then  $P_{feasible}=P$  and continue;
Else break;
End for
 $x_{3max}=|i+1|$ ;

```

---

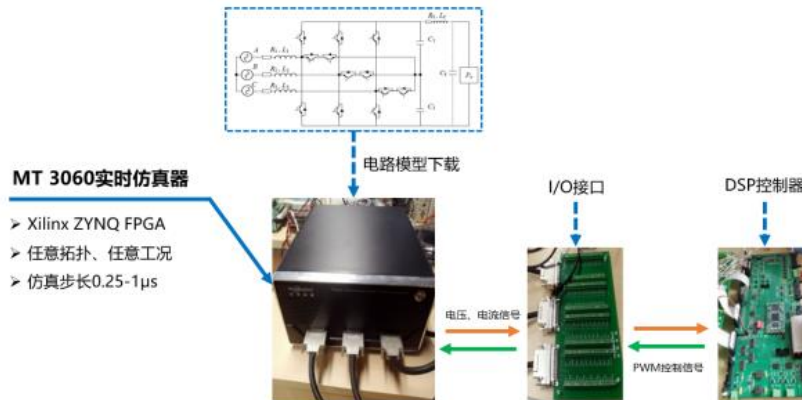
## 基于实时仿真器的算法验证

为了验证所建立的并网 PWM 整流器 TS 模糊模型对稳定性分析的有效性，清华大学的研究团队采用 PLECS 软件仿真结果与基于 TS 模糊模型的整定矩阵解算求解结果进行了比较和验证；由于主电路实物验证对于稳定性分析有一定的困难性，因为在实物系统上验证系统的稳定边界（如增加负载功率到系统失稳）或者施加大的系统扰动（如突然较大的改变直流电压设定值）是比较危险的，容易引起振荡、过流；损坏设备。

硬件在环仿真实验的方法利用实时仿真器来模拟实物行为，它可以同真实控制器构成一个非常接近真实的闭环系统，同时相对实物系统，硬件在环系统可以很容易的进行各种危险的极限工

况和失稳工况的实验验证；硬件在环仿真是进行并网整流器稳定性分析验证理想实验方式。

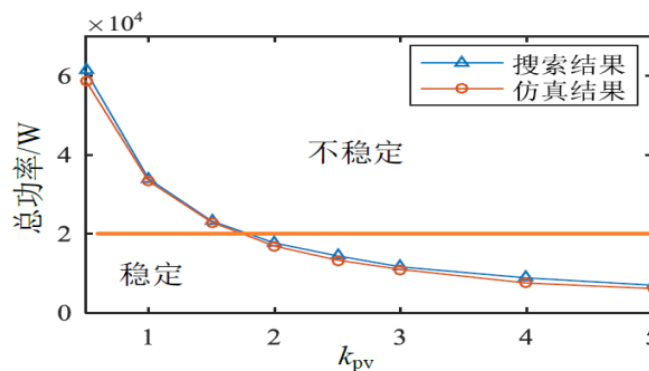
远宽能源（www.modeling-tech.com）提供的电力电子实时仿真器，基于电力电子器件的细节模型，利用最新的 FPGA 技术，可以实现 1 微秒步长、任意拓扑、任意工况的电力电子系统实时仿真，被广泛应用于电力电子与电机驱动系统的控制策略验证、故障工况测试等用途中。清华大学的研究团队采用上海远宽的 MT3060 电力电子实时仿真器来进行硬件在环实时仿真验证，详见下图：



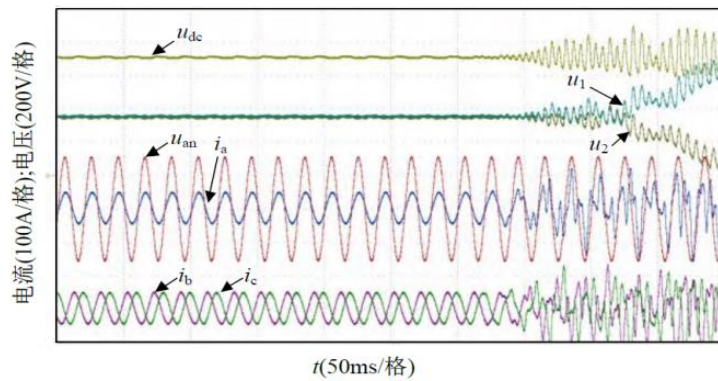
### 理论分析结论与实时仿真实验波形：

PWM 整流器连接恒功率负载稳定性分析结论：

1. 并网电感和直流母线电容参数对稳定性影响较大，大的直流电容和小的并网电感值可以拓宽系统的稳定工作区。
2. 增大电流环的比例系数和减小电压环的比例系数都能够明显地提高稳定区域，如下图显示的是理论分析出的不同电压环比例系数时的临界稳定功率；从图上可以看到对于 20kW 的功率， $K_{pv}$  为 2 时系统将失去稳定。



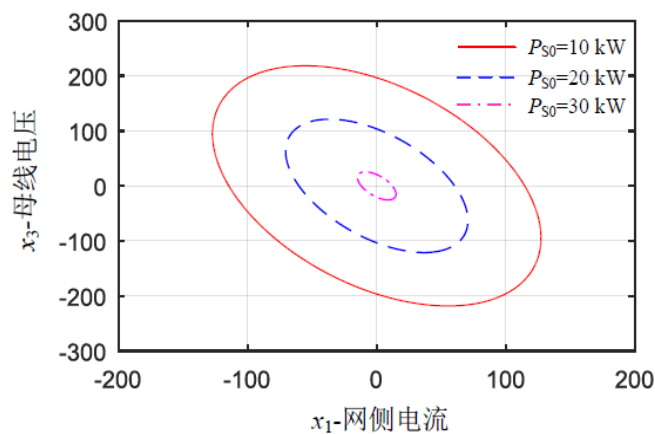
下图是 20kW 稳态时硬件在环仿真实验的实验波形，当电压环的比例系数  $K_{pv}$  从 1 改变到 2 后，可以看到系统失稳，验证了 TS 模糊模型分析得到的结果。



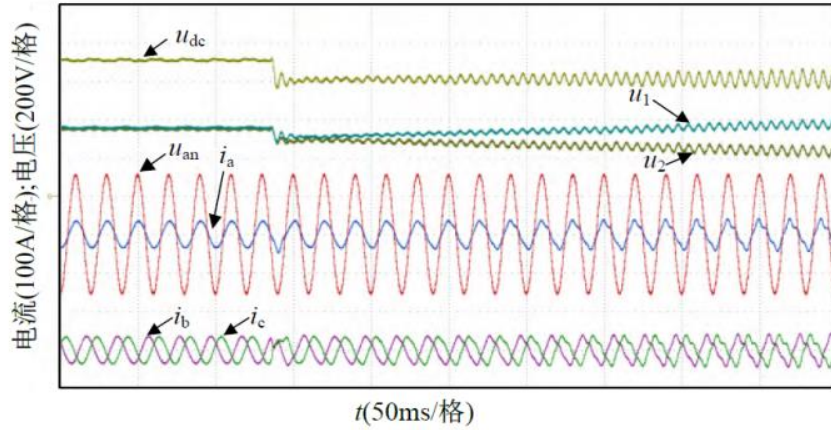
20kW 稳态时  $k_{pv}$  由 1 改变到 2 对应的实验波形

大信号扰动情况下稳定性分析

下图是利用大信号扰动分析的搜索算法绘制出的不同工况下的整流器稳定吸引域， $x_1$ 表示网侧电流的变化量， $x_3$ 表示的是直流电压的变化量。



可以看到并网变换器工作的稳态功率越大，其稳定的吸引域越小，此时母线电压或并网电流因负载投切或瞬时故障引起的小范围扰动即可能带来系统状态轨迹越过吸引域边界，使系统不稳定。下图显示的是 30kW 时直流母线电压由 700V 调节到 600V 后对应的实验波形，可以看到 100V 的直流电压变化量已经超出了 30kW 时的系统稳定吸引域，系统失稳，验证了 TS 模糊模型稳定性分析的结果。



**30kW 时直流母线电压由 700V 调节到 600V  
对应的实验波形**

更多详细的理论分析结果和实验波形，还请参考清华大学的研究团队文献。