



兰州交通大学
LANZHOU JIAOTONG UNIVERSITY

基于拓展禁区判据的光伏接入牵引供电系统 低频稳定性分析

作者：赵霞，谢子昀，王英，陈小强，辛月阳，母秀清

CONTENTS

- 1 研究背景及研究思路
- 2 模型搭建
- 3 低频稳定性分析
- 4 半实物平台验证

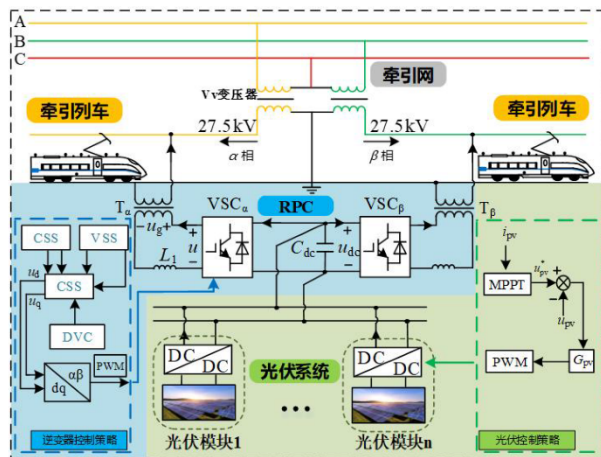
1 研究背景及研究思路



1.1 研究背景

随着电气化铁路的高速发展，为达成“碳中和”愿景，需实现其用能结构的**低碳绿色化**发展。

西部地区光伏资源丰富，光伏接入牵引网系统具有深远的发展前景。



光伏-车-网耦合系统拓扑

但由于大量电力电子变换器接入，系统呈现**强耦合、非线性特性**，从而引发低频不稳定问题。



基于阻抗的稳定性分析
具有理论和工程意义。

1 研究背景及研究思路



1.2 研究思路

现有文献多以可行性和能量规划为主，鲜有对其进行稳定性分析。



建立光储并网数学模型和仿真模型，利用基于阻抗模型的稳定性判据分析系统稳定性。

现有分析判据保守性较大，与实际系统临界稳定条件相差较大。



提出改进的禁区判据，降低稳定性分析的保守性。

建立光伏-车-网阻抗模型



提出拓展禁区判据



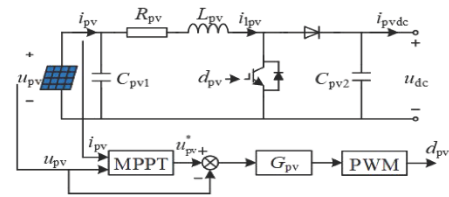
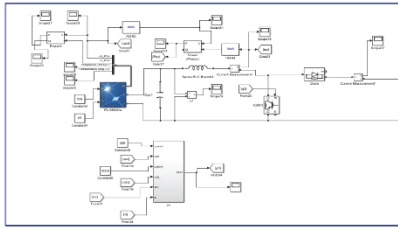
分析系统低频稳定性



利用半实物平台测试验证

2 模型搭建

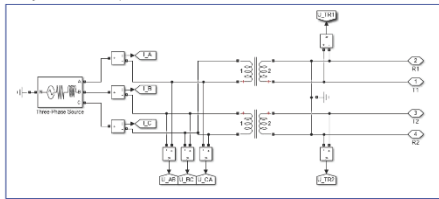
① 光伏系统



光伏最大功率追踪模式

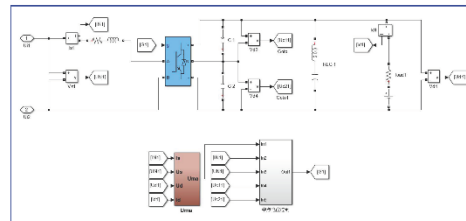
$$Z_{pvui} = \frac{G_{pv7} - K_{pv} G_{upv} G_{pvic} G_{pv8} - G_{pv4} G_{pvic} G_{pv8}}{1 + G_{upv} G_{pvic} G_{pv8}}$$

② 车-网系统



牵引网模型

$$Z_i = \frac{1}{4k^2} [(z_0 x + Z_{AT}) \frac{z_0 (D-x) + Z_{AT}}{2Z_{AT} + z_0 D} + z_0 l + (z_0 + z_1) x (1 - \frac{x}{D})]$$

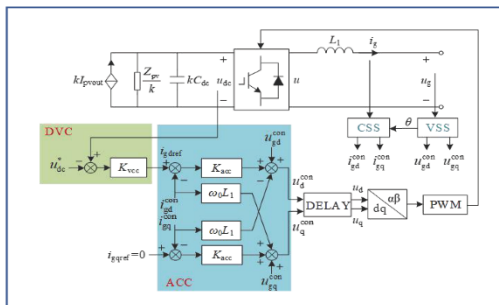


牵引列车模型 (CRH5)

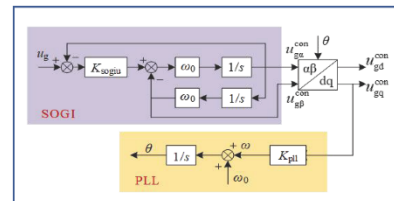
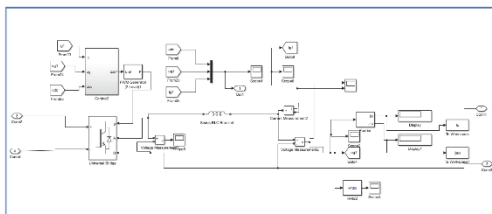
$$Y_{ch} = n_{ch} \cdot 5 \cdot 2 \cdot (G_{usur} G_{urir} G_{irir} + G_{(e-u)usur})^{-1} \cdot (I - G_{usur} G_{urir} G_{eres} - G_{usur} G_{urir} G_{ues} - G_{uses})$$

2 模型搭建

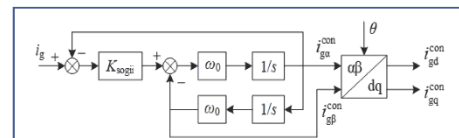
③ RPC



VSC_α模型



电压同步环节
VSS



电流同步环节
CSS

$$Z = (M_2 H_i - H_{delay} M_1 H_i - H_{delay} K_{acc} G_{iref} + H_{delay} H_i K_{acc}) \cdot (H_{delay} K_{acc} G_{uref} + H_{delay} G_{css} M_1 + H_{delay} G_{vss} - H_{delay} K_{acc} G_{css} - G_{vss} - M_2 G_{css})^{-1}$$

Z由光伏输出电流和阻抗、逆变器控制策略等共同决定。

2 模型搭建

④ RPC阻抗验证

利用“扫频法”测量RPC阻抗

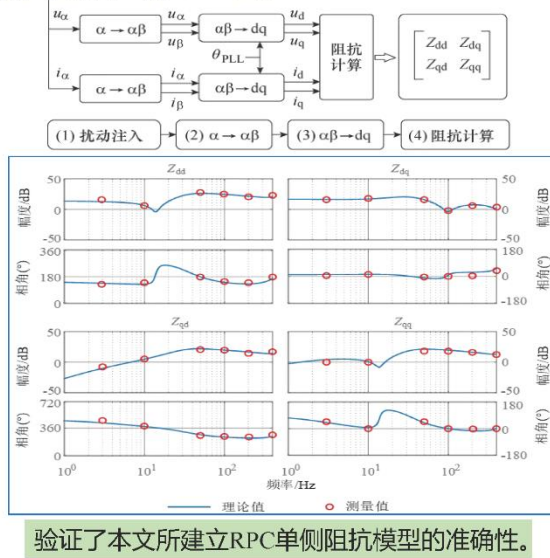
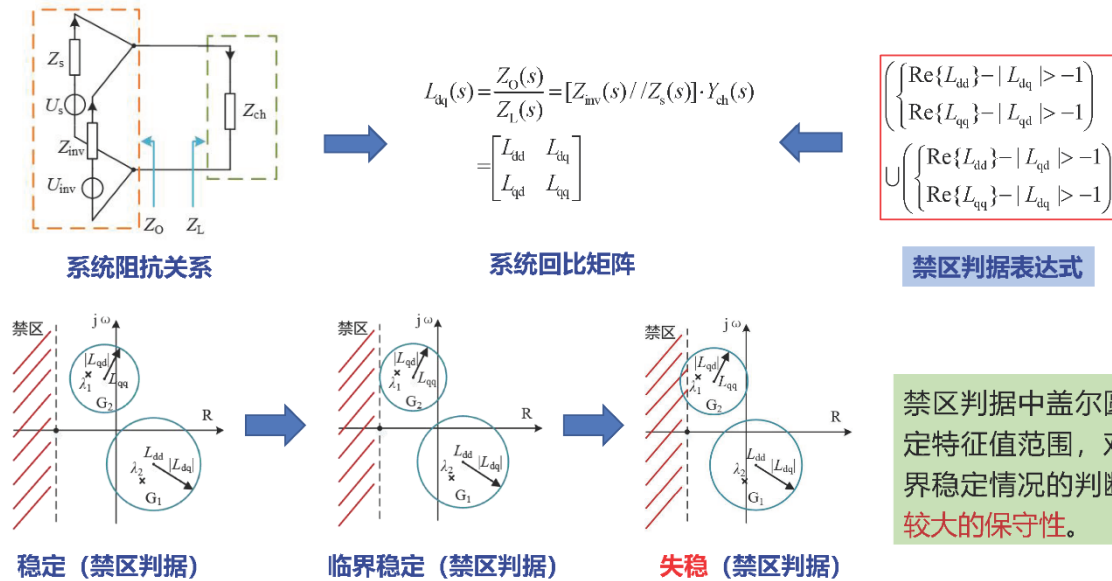


表 1 仿真参数

系统参数	数值
滤波电感 L_f/mH	5.6
直流侧电容 C_{dc}/F	0.025
T_a 变比 k_T	1500/27500
直流侧电压参考值 u_{dc}^*/V	3000
VSS 广义积分器增益 K_{vgss}	0.8
CSS 广义积分器增益 K_{cgss}	1
RPC	
DVC 比例系数 K_{dvc}	1.5
DVC 积分系数 K_{dvc}	1.4
ACC 比例系数 K_{acc}	2.8
ACC 积分系数 K_{acc}	14
PLL 比例系数 K_{pll}	0.7
PLL 积分系数 K_{pll}	25
延迟时间 T_d/ms	1.2
光伏阵列侧电容 C_{p1}/mF	2
直流母线侧电容 C_{p2}/mF	0.2
光伏阵列等效电阻 R_{pv}/Ω	0.02
变换器储能电感 L_{pv}/mH	8
单个光伏模块最大功率/MW	0.42
光伏模块并联数 n_{pv}	5
最大功率点电压 u_{mp}/V	290
MPPT 控制比例参数 K_{mppt}	8
MPPT 控制比例参数 K_{mppt}	20
牵引列车	
单臂列车数 n_{ch}	5

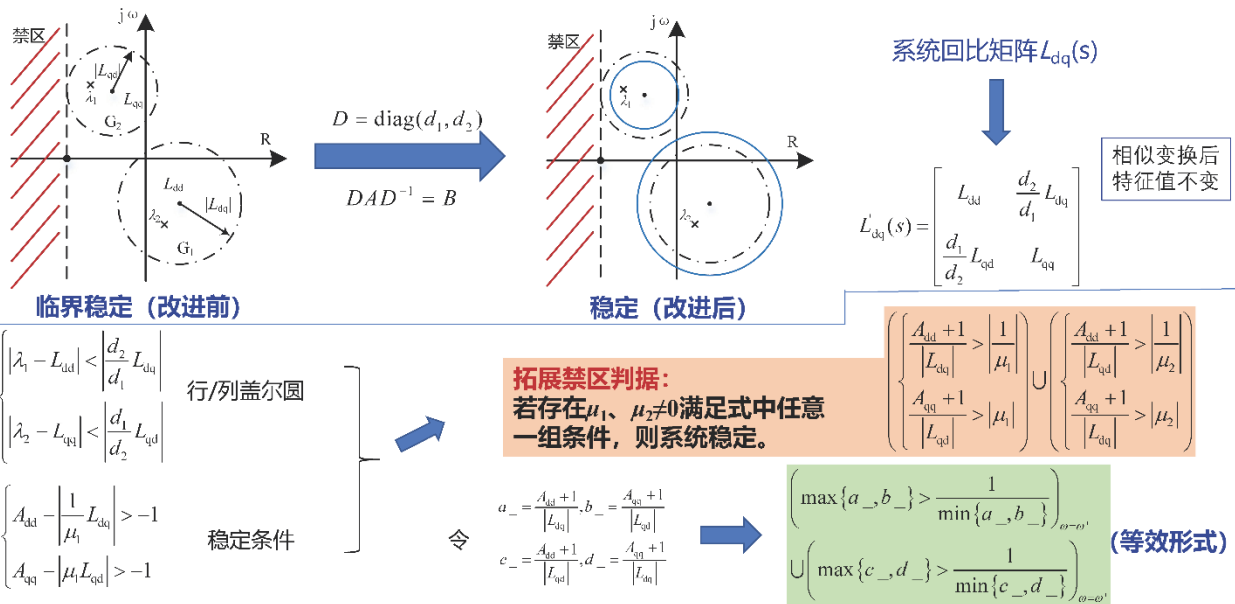
3 低频稳定性分析

3.1 拓展禁区判据的提出



3 低频稳定性分析

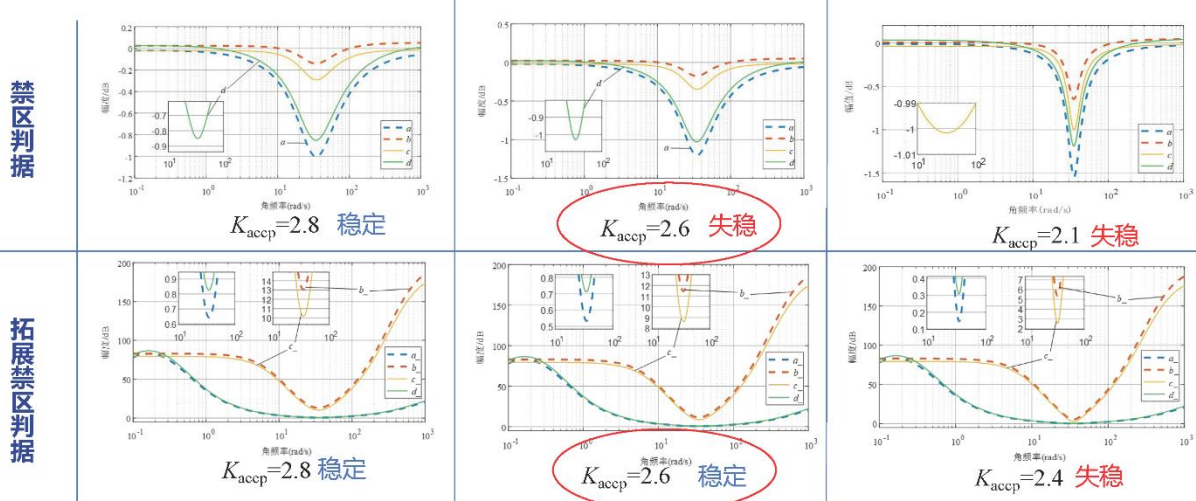
3.1 拓展禁区判据的提出



3 低频稳定性分析

3.2 基于拓展禁区判据的低频稳定性分析

① RPC控制器参数 K_{accp} 对系统稳定性的影响



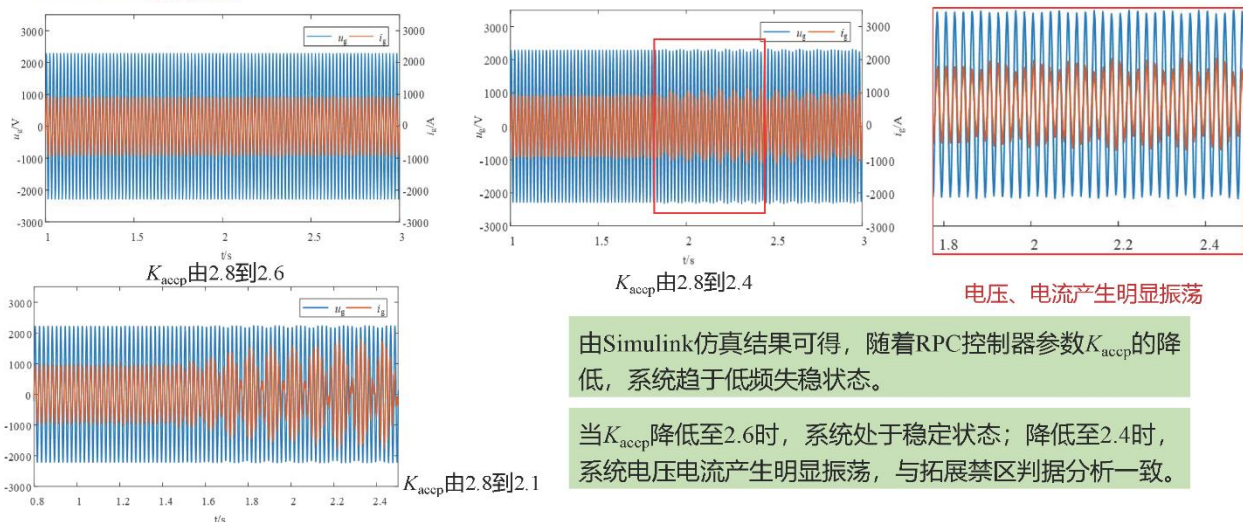
由禁区判据和拓展禁区可知, 当 K_{accp} 降低时, 系统趋于低频失稳。

3 低频稳定性分析

3.2 基于拓展禁区判据的低频稳定性分析

① RPC控制器参数 K_{accp} 对系统稳定性的影响

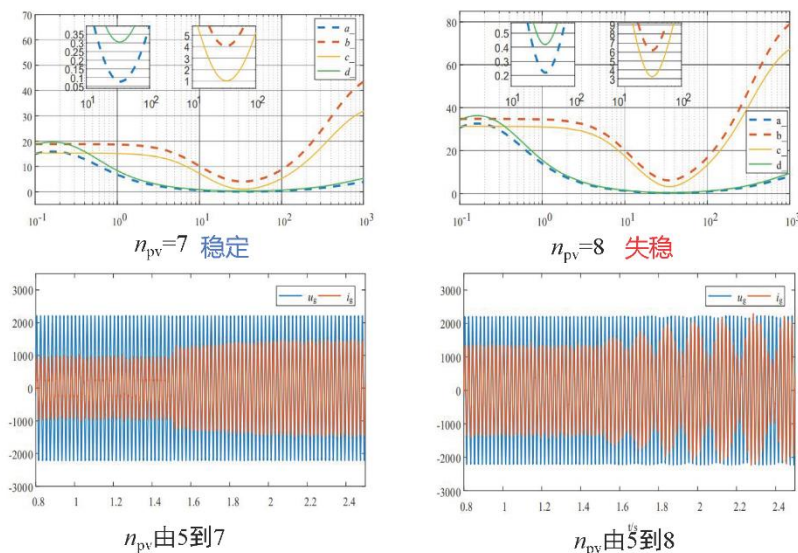
Simulink仿真结果



3 低频稳定性分析

3.2 基于拓展禁区判据的低频稳定性分析

② 光伏并联数量对系统稳定性的影响



3 低频稳定性分析

3.2 基于拓展禁区判据的低频稳定性分析

③ 其他参数下稳定性分析

表 2 其它参数下的稳定性分析与仿真验证

参数	数值	FRBC	EFRBC	仿真结果
n_{pv}	5	稳定	稳定	稳定
	7	失稳	稳定	稳定
	8	失稳	失稳	失稳
C_{dc}/F	0.025	稳定	稳定	稳定
	0.036	失稳	稳定	稳定
	0.039	失稳	失稳	失稳
K_{acci}	14	稳定	稳定	稳定
	27	失稳	稳定	稳定
	35	失稳	失稳	失稳
n_{ch}	5	稳定	稳定	稳定
	8	稳定	稳定	稳定
	9	失稳	失稳	失稳

由表中数据可得，随着直流侧电容 C_{dc} 、变流器控制器参数 K_{acci} 、牵引列车数量 n_{ch} 的增加，禁区判据和拓展禁区判据都表明，系统将趋于不稳定状态。

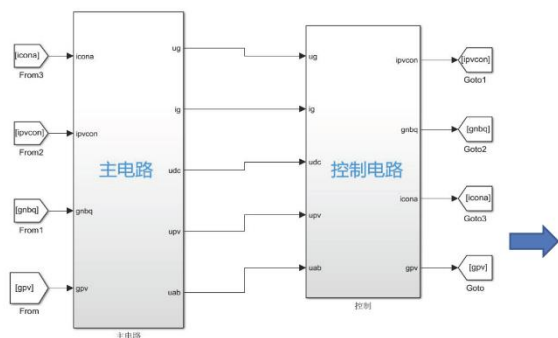
以直流侧电容 C_{dc} 为例，当 C_{dc} 从0.025F变为0.036F时，禁区判据判断系统失稳，与拓展禁区判据分析结果不同且与仿真结果不同，拓展禁区判据的分析则更接近仿真结果。

结论：

拓展禁区判据对于光伏-车-网耦合系统的低频稳定性分析具有更好的效果，相较于原禁区判据保守性降低。

4 半实物平台验证

为进一步验证光伏-车-网耦合系统稳定性分析的准确性和拓展禁区判据的有效性，利用上海远宽能源的MT 6020实时仿真器进行硬件在环(HIL)实验。



Simulink仿真模型



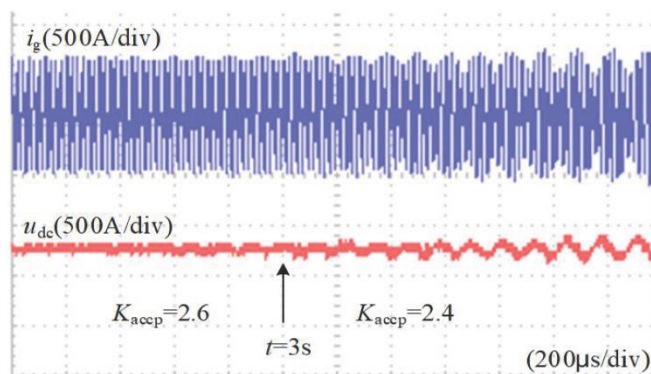
StarSim半实物平台 (MT 6020)

上位机
实时仿真系统
I/O接口
示波器

4 半实物平台验证



K_{accp} 变化时直流侧电压和光伏侧电流波形如下图所示，从图中可以看出，当 $K_{accp}=2.6$ 时系统处于稳定运行状态，在3s处将 K_{accp} 降低到2.4时，直流侧电压和光伏侧电流都产生了明显的振荡现象，表明随着 K_{accp} 的降低系统趋于不稳定。

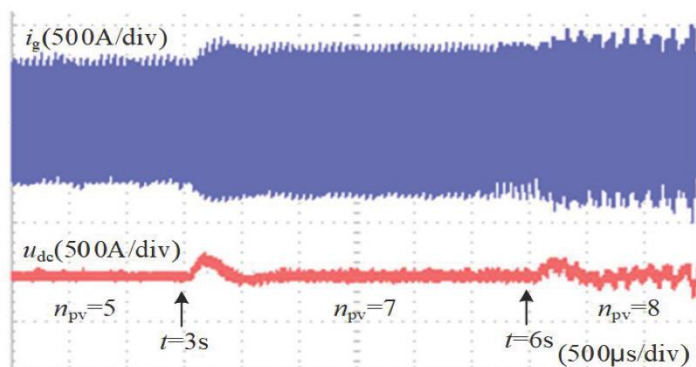


RPC控制器参数改变

4 半实物平台验证



n_{pv} 变化时直流侧电压和光伏侧电流波形如下图所示，图中3s和6s后波形的变化与前文稳定性分析和仿真波形一致，表明随着光伏模块接入数量的增加，光伏-车-网系统趋于不稳定。



光伏并联数量改变

结论：

与禁区判据和拓展禁区判据分析结果相比，半实物平台的测试结果与拓展禁区判据的分析一致，验证了 K_{accp} 和 n_{pv} 对光伏-车-网耦合系统低频稳定性的影响的准确性和拓展禁区判据分析的有效性。

作者简介



ZHAO Xia

赵 霞

1979—，女，副教授

主要从事电力电子技术、计算电磁学方面的研究

2314486731@qq.com



XIE Ziyun

谢子昀(通讯作者)

1998—，男，硕士研究生

主要从事牵引供电系统稳定性方面的研究

ziyun225@163.com

THANKS

感谢您的观看!

作者：赵霞，谢子昀，王英，陈小强，辛月阳，母秀清