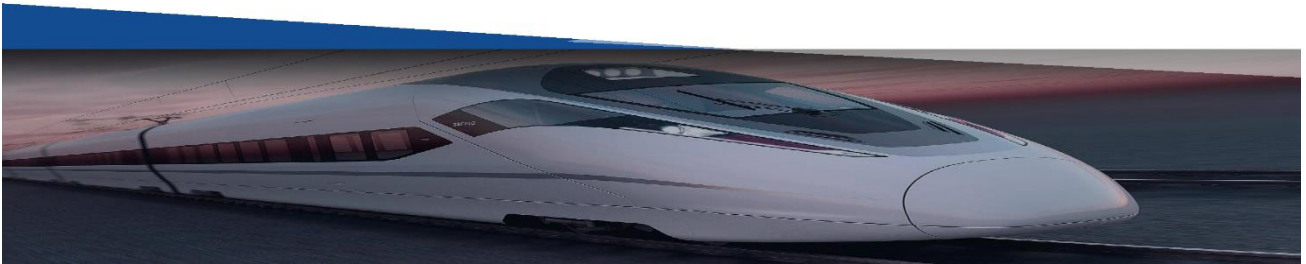




# Admittance Decomposition for Assessment of APF and STATCOM Impact on the Low-Frequency Stability of Railway Vehicle-Grid Systems

(IEEE Transactions on Power Electronics)

作者: 吴思奇 Juri Jatskevich 刘志刚 鲁兵



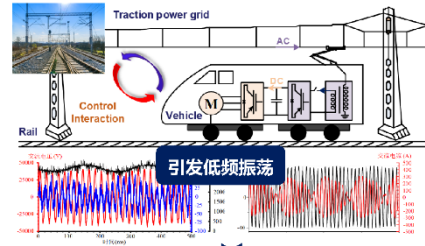
## 目录

- 01 研究意义及现状
- 02 动态功率补偿装置的导纳分解及特性分析
- 03 基于 RLC 等效电路的稳定性分析
- 04 仿真对比结果及硬件在环仿真验证

## 01 研究意义及现状



本文基于动态功率补偿装置STATCOM/APF与列车整流器的小信号耦合关系，提出了一种针对STATCOM/APF的dq导纳分解方法，分别揭示了STATCOM与APF在低频段的导纳特性及其对整个负载子系统导纳特性的影响机理；结合RLC电路理论，揭示了列车整流器不同dq导纳元素的负电导与电容特性及其对车网系统低频稳定性的影响机理，并结合STATCOM与APF对负载子系统导纳的重塑作用，揭示了其对低频振荡的抑制机理。



### 抑制机理

#### 传统分析方法

#### 基于MIMO终端阻抗的分析

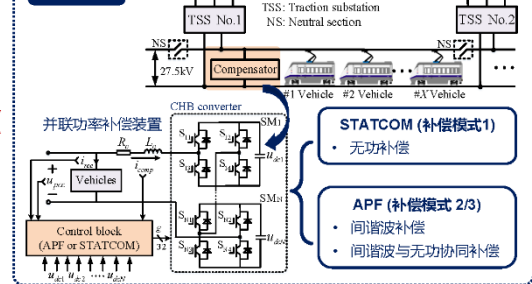
基于广义Nyquist判据的稳定性分析

无源性分析

#### 存在的问题

只能提供定性的分析结果，如稳定/不稳定或无源/非无源，无法明确揭示STATCOM与APF的低频振荡抑制机理，以及导致不同功率补偿模式/补偿装置的动态性能差异的根本原因。

### 抑制措施



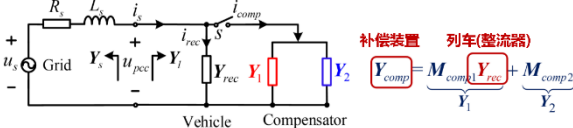
## 02 动态功率补偿装置的导纳分解及特性分析



补偿装置APF与STATCOM需要对列车整流器的输入电流进行实时检测，其通过自身控制系统与列车产生小信号动态耦合。本文基于此分别将两补偿装置的导纳  $Y_{comp}$  分解为两并联部分，即  $Y_{comp} = Y_1 + Y_2$ 。

### 1. 导纳分解方法

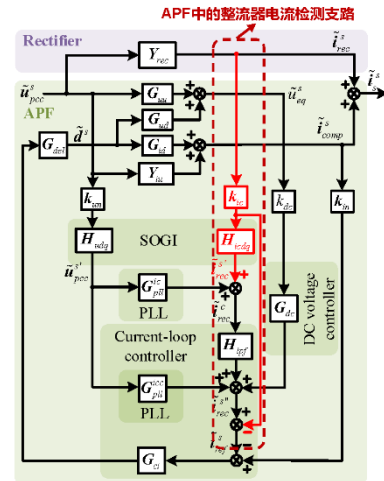
$Y_1$ : Coupling admittance  $Y_2$ : Original input admittance



$Y_1$  → 刻画了整流器与补偿装置之间的小信号动态耦合

$Y_2$  → 为补偿装置的初始输入导纳

以APF接入时负载子系统闭环dq小信号流图为例

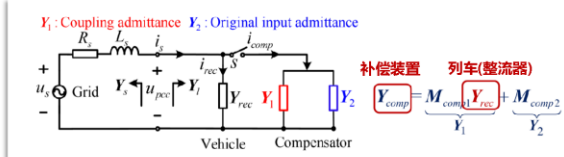


## 02 动态功率补偿装置的导纳分解及特性分析



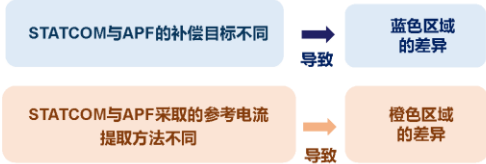
通过对STATCOM与APF耦合导纳与端口输入导纳特性的分析，揭示了其控制结构与参数对整个负载子系统导纳重塑效果的影响机理。指出APF与STATCOM中的耦合导纳对负载子系统导纳的重塑起着关键作用，其参考电流检测支路上所采用的滤波器(如采用的LPF)的频率响应特性对导纳重塑效果有显著的影响。

### 2. 导纳特性分析



导纳  $Y_{rec}+Y_1$  与  $Y_{rec}+Y_{comp}$  的特性

--	With APF	With STATCOM		
$Y_{rec}+Y_1$	$\begin{bmatrix} h_{ff}^* Y_r^{dd} & h_{ff}^* Y_r^{dq} \\ h_{ff} Y_r^{qd} & h_{ff} Y_r^{qq} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Y_r^{dd} & Y_r^{dq} \\ (1-h_{ff}) Y_r^{qd} & (1-h_{ff}) Y_r^{qq} \end{bmatrix}$		
$Y_{rec}+Y_{comp}$	$\begin{bmatrix} h_{ff}^* Y_r^{dd} & h_{ff}^* Y_r^{dq} \\ h_{ff} Y_r^{qd} & h_{ff} Y_r^{qq} + Y_2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} Y_r^{dd} & Y_r^{dq} \\ (1-h_{ff}) Y_r^{qd} & (1-h_{ff}) Y_r^{qq} + Y_2 \end{bmatrix}$		
Change of properties ( $Y_{rec}+Y_1$ vs. $Y_{rec}$ )				
Interface	Amplitude	Phase	Amplitude	Phase
dd	Reduced	Reduced	-	-
dq	Reduced	Reduced	-	-
qd	Reduced	Reduced	Reduced	Increased
qq	Reduced	Reduced	Reduced	Increased

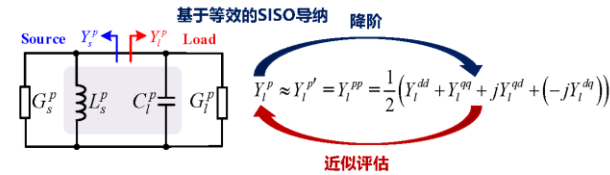


## 03 基于 RLC 等效电路的稳定性分析

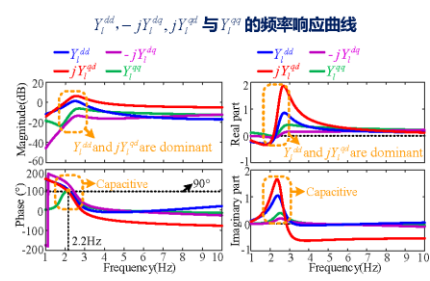


· 列车整流器在低频段具有负电导和容性特性，该特性主要源于整流器在dd和qd界面的主导导纳元素(尤其是qd界面)，这为低频振荡的形成创造了条件。  
· 在优化负载导纳特性方面(保证车网系统良好的动态特性)，APF能够通过其耦合导纳同时减小d和q通道负载导纳的幅值和相位，而STATCOM仅能通过其耦合导纳来减小q通道的负载导纳幅值。

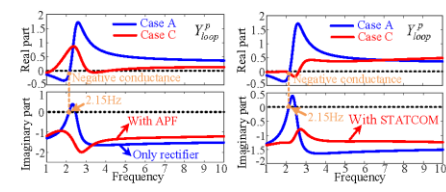
### 1. RLC等效电路



### 2. 整流器导纳特性



### 3. 稳定性分析-Part A



低频振荡  
↑  
负电导 + 容性特性  
↓

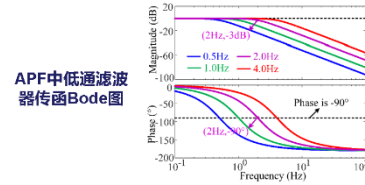
STATCOM 与 APF 大幅度削弱了该特性

### 03 基于 RLC 等效电路的稳定性分析

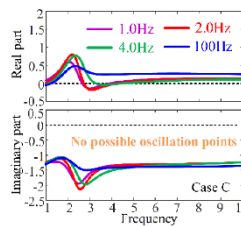


- 减小APF的LPF截止频率有利于削弱负载导纳的容性及负电导特性，从而增强系统的低频稳定性（呈负相关），且重塑q通道(qd与qq界面)负载导纳特性对APF抑制低频振荡的性能起着主导作用。
- STATCOM主要通过削弱负载子系统的容性特性来抑制低频振荡，增大其LPF截止频率有利于削弱负载容性特性，以增强系统稳定性（呈正相关）。

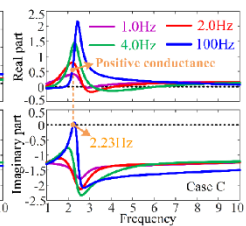
#### 3. 稳定性分析-Part C



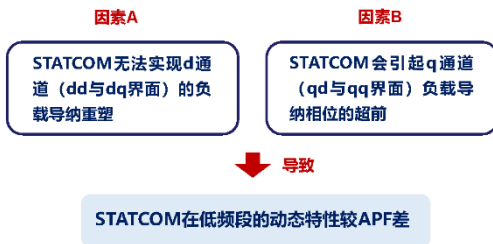
d-通道低通滤波器的影响



q-通道低通滤波器的影响



#### 3. 稳定性分析-Part B



### 04 仿真对比结果及硬件在环仿真实验



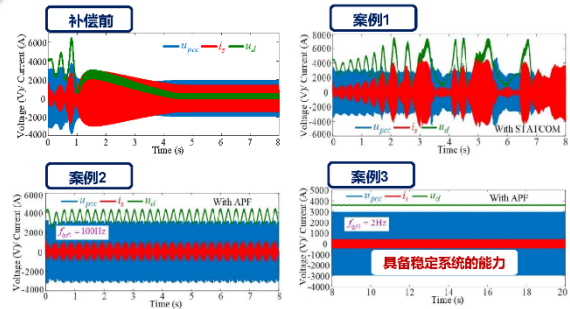
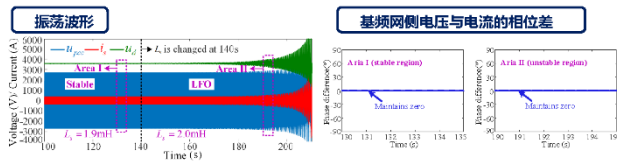
- 低频振荡发生时，整流器始终运行在单位功率因素下，网侧电压峰值与电流峰值相对位置的变化本质上是由其所含边带谐波分量的相位和幅值引起的。
- 右侧所示的案例设置：案例1中STATCOM与案例3中的APF对负载子系统导纳重塑作用的差异主要集中在d通道。在案例2中，APF的d通道LPF截止频率增加至100Hz，即其在d通道的导纳重塑作用可忽略不计，此时案例2中的APF与案例1中的STATCOM对负载导纳的重塑效果近似。

#### 2. 仿真验证-- APF vs. STATCOM

案例设置

System	With STATCOM	With APF in Mode 2	
-	Case 1	Case 2	Case 3
Parameter	$f_{cpl} = 80\text{Hz}$	$f_{cpl} = 100\text{Hz}$	$f_{cpl} = 2\text{Hz}$

#### 1. 低频振荡现象分析



## 04 仿真对比结果及硬件在环仿真验证



• 案例4被视为基准案例，用蓝色区域标记。橙色区域的单元格则表示案例5至案例8中相对案例4变化的参数。具体而言，在案例5中，APF主要针对q通道 (qd、qq界面)的负载导纳进行重塑；在案例6至7中，APF主要针对d通道 (dd、dq界面)的负载导纳进行重塑；在案例8中，APF对d通道与q通道的导纳重塑效果均很弱。

• MATLAB仿真结果与基于RLC等效电路的稳定性分析结果基本吻合

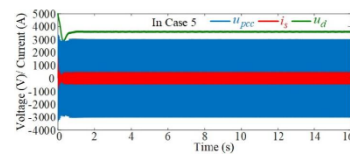
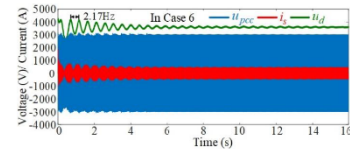
基于广义奈奎斯特判据和仿真的分析结果

Cases	GNSSC results		Simulation results	
	$\theta_{margin}$	$f_{damp}$	Stability	$f_{damp}$
Case 4	$> 60^\circ$	--	Stable	--
Case 5	$> 60^\circ$	--	Stable	--
Case 6	$13^\circ$	2.18Hz	Stable; Damped oscillation	2.17Hz
Case 7	$19^\circ$	2.24Hz	Stable; Damped oscillation	2.19Hz
Case 8	$4.8^\circ$	2.16Hz	Critically stable	2.15Hz

### 3. 仿真验证-APF控制参数的影响

案例设置

Cases	DC controller		LPF		Reshaped channel
	$k_c^p$	$k_c^i$	$f_{lp1}$	$f_{lp2}$	
Case 4	5	10	2	2	Both $d$ and $q$ channels
Case 5	5	10	100	2	Only $q$ channel
Case 6	5	10	2	100	Only $d$ channel
Case 7	0.5	0.1	2	100	Only $d$ channel
Case 8	5	10	100	100	Neither

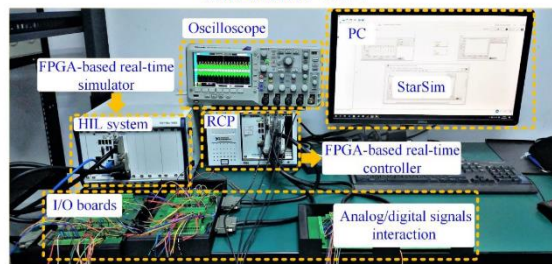


## 04 仿真对比结果及硬件在环仿真验证



• 牵引供电系统、整流器和APF的主电路通过Matlab/Simulink进行搭建，然后利用上位机中的配置型软件Starsim HIL将该模型下载到HIL实时仿真器中运行，运行步长为 $1\mu s$ 。整流器与APF的控制程序则下载到RCP实时工业控制器中运行。图中绿色的I/O板主要用于RCP控制器和HIL仿真器之间进行数字/模拟信号交互，以形成一个闭环系统，确保主电路和控制模块的正常运行。

硬件在环仿真平台配置





### 04 仿真对比结果及硬件在环仿真实验验证

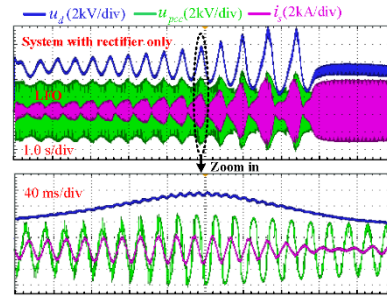


以0.1mH的步长逐渐增大网侧电感 $L_s$ ，直到系统出现低频不稳定现象。右表列出了 $L_s$ 从1.7mH增大到1.9mH时的系统稳定状态。可以看出，整流器系统临界不稳定的 $L_s$ 值为1.8mH。右图为 $L_s=1.9$ mH时的电压电流波形图。

不同 $L_s$ 值下整流器系统的低频稳定性

$L_s$	1.7mH	1.8mH	1.9mH
System state	Stable	Unstable*	Unstable**

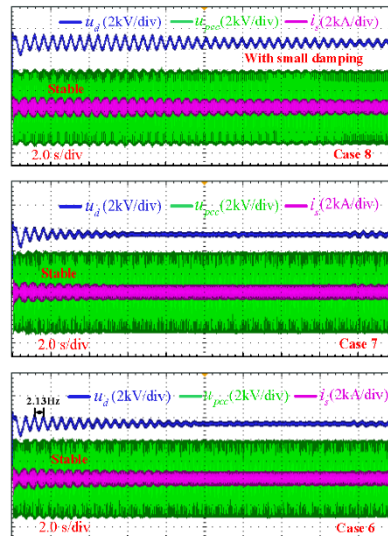
$L_s=1.9$ mH时整流器系统的硬件在环仿真波形图



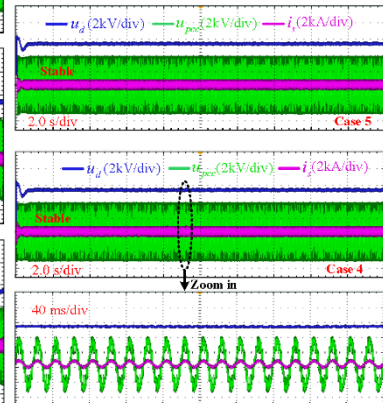
### 04 仿真对比结果及硬件在环仿真实验验证



在案例8中，振荡波形衰减地非常缓慢，意味着系统此时接近临界稳定的状态。当APF对d通道的负载导纳特性进行重塑时(案例6与案例7)，系统的动态特性得到改善(相比案例8)，但整流器直流侧电压仍存在一定幅度的波动，系统阻尼不够充足。此外，通过对比案例6与7下的波形图可知，减小APF直流电压控制环PI参数仅能轻微增大系统的阻尼。相比之下，在案例4与5中，APF能很好地消除低频振荡现象，维持系统的稳定性。硬件在环仿真结果与Matlab仿真结果及理论分析结果基本吻合



$L_s=1.9$ mH时接入APF后的硬件在环仿真波形图



05 作者简介



吴思奇，女，于2018年就读于西南交通大学电气工程学院，攻读博士学位，目前为香港理工大学 Postdoctoral Fellow。致力于电力电子化电力系统的控制、小信号稳定性分析以及振荡抑制方法等相关方向的研究。



刘志刚，男，教授，IEEE Fellow, IET Fellow, 博士生导师，西南交通大学电气工程学院副院长，国家高层次人才入选者、享受国务院特殊津贴、科技部中青年创新领军人才、交通运输部中青年创新领军人才等。长期从事高速铁路动车组-牵引网电气关系，弓网动力学、状态检测与评估等领域研究。



Juri Jatskevich，男，教授，IEEE Fellow, 博士生导师，加拿大温哥华不列颠哥伦比亚大学电气与计算机工程系。国际电力电子与电能变换领域知名专家，长期从事电力与能源转换系统建模与分析、电机及其驱动、电磁暂态建模与仿真等方面研究。



鲁兵，男，于2016年就读于兰州交通大学，攻读学士学位。目前为西南交通大学电气工程学院博士四年级研究生，致力于机车电力牵引传动系统机电耦合、车轮多边形磨耗的研究。



Thank you!

