



华北电力大学

NORTH CHINA ELECTRIC POWER UNIVERSITY

直流输电系统的小信号稳定性分析

—状态空间模型和特征根分析方法的应用

郭春义 副教授 博士生导师

新能源电力系统国家重点实验室（华北电力大学）

2019年10月

中国·北京

1.1 世界直流输电的发展概况

2018年CIGRE公开的数据指出：

- 正在运行的157个HVDC项目中，LCC-HVDC占70%，VSC-HVDC占21%
- 即将投运的49个HVDC项目中，LCC-HVDC占20%，VSC-HVDC占43%



数据来源：《Development of the LCC-VSC HVDC System in China Southern Power Grid》，Shukai Xu, EPRI CSG, Guangzhou, 2019.01.24

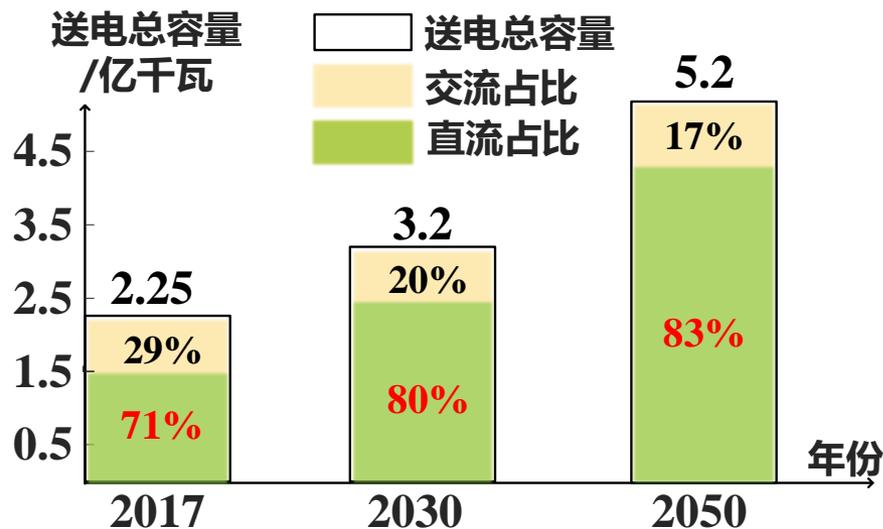
1.2 我国直流输电的现状

直流输电的稳定运行是国民经济和社会发展的重大需求!

- 我国能源资源与负荷呈逆向分布，跨区域、远距离输电是负荷中心供电的必然需求。
- 直流输电在电能的西电东送中占有绝对优势，2017年直流占比为71%。



我国面临西电东送的重大需求



西电东送直流输电所占比例

1.3 我国直流输电的工程现状

直流电压等级的发展:

LCC-HVDC: $\pm 100\text{kV} \rightarrow \pm 500\text{kV} \rightarrow \pm 800\text{kV} \rightarrow \pm 1100\text{kV}$

MMC-HVDC: $\pm 160\text{kV} \rightarrow \pm 320\text{kV} \rightarrow \pm 500\text{kV} \rightarrow \pm 800\text{kV}$

直流容量等级的发展:

LCC-HVDC: $100\text{MW} \rightarrow 3000\text{MW} \rightarrow 8000\text{MW} \rightarrow 12000\text{MW}$

MMC-HVDC: $200\text{MW} \rightarrow 1000\text{MW} \rightarrow 3000\text{MW} \rightarrow 5000\text{MW}$

工程名称	投运时间	容量 (kV/MW)	主要用途	工程名称	投运时间	容量 (kV/MW)	主要用途
舟山直流工程	1987年	$\pm 100/100$	远距离输电	南澳多端柔性	2013年	$\pm 160/200$	新能源送出、 海岛供电
三峡—广东	2004年	$\pm 500/3000$	水电外送	厦门柔性	2015年	$\pm 320/1000$	城市供电
哈密—郑州	2014年	$\pm 800/8000$	风光火电外送	张北柔性	2020年	$\pm 500/3000$	城市供电
昌吉—吉泉	2018年	$\pm 1100/12000$	远距离输电	昆柳龙混合直流	2021年	$\pm 800/5000$	水电外送

国内部分LCC-HVDC工程

国内部分MMC-HVDC工程

直流输电工程技术已成为国家名片!

1.3 我国直流输电的工程现状

近些年，混合直流输电工程逐渐出现。



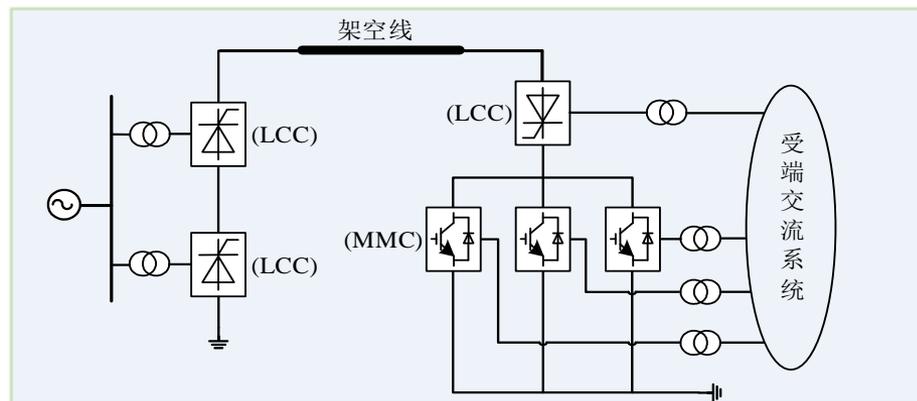
嵊泗岛混合双馈入直流系统 (2014年)



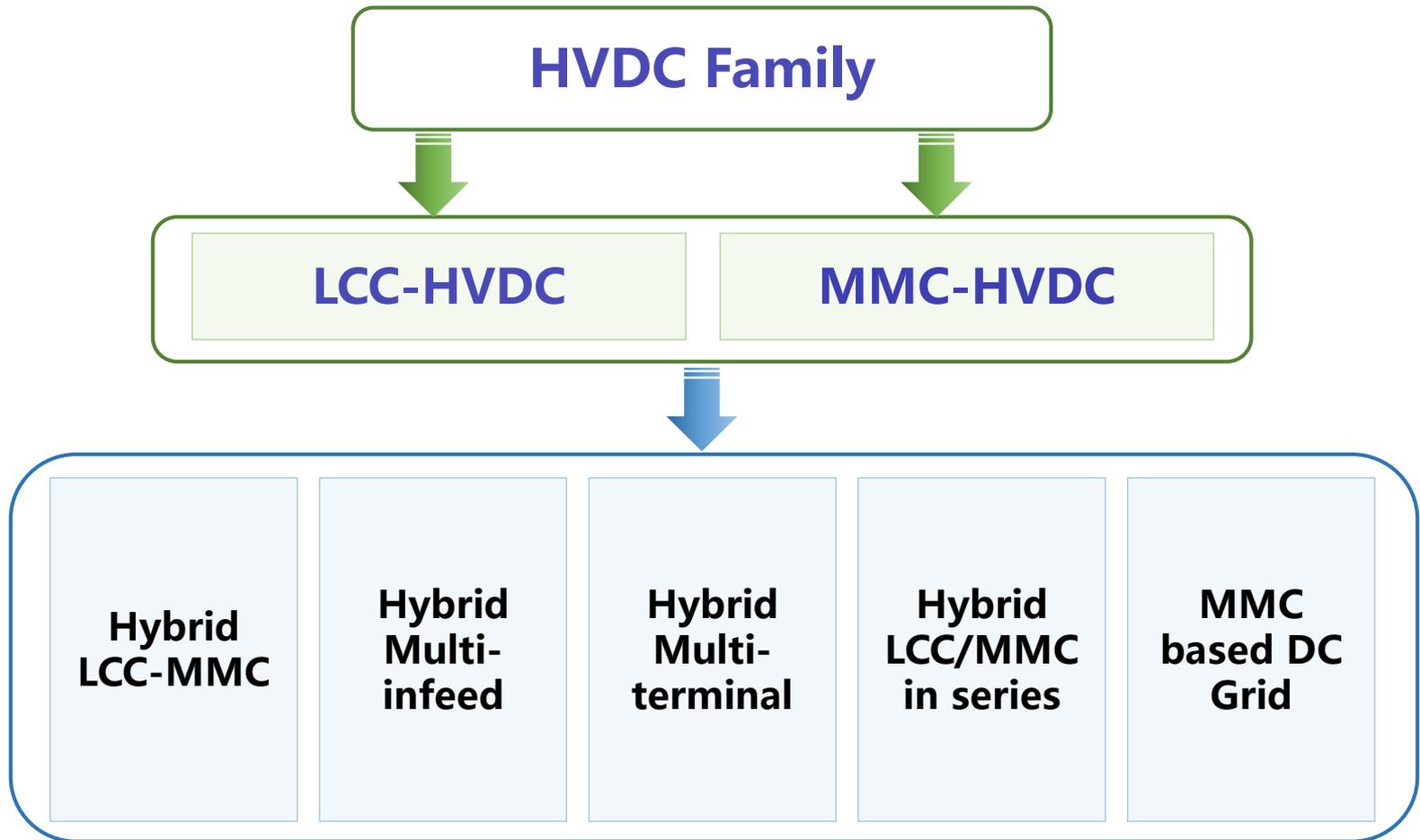
鲁西背靠背混合直流异步联网工程 (2016年)



乌东德混合三端直流工程 (在建)



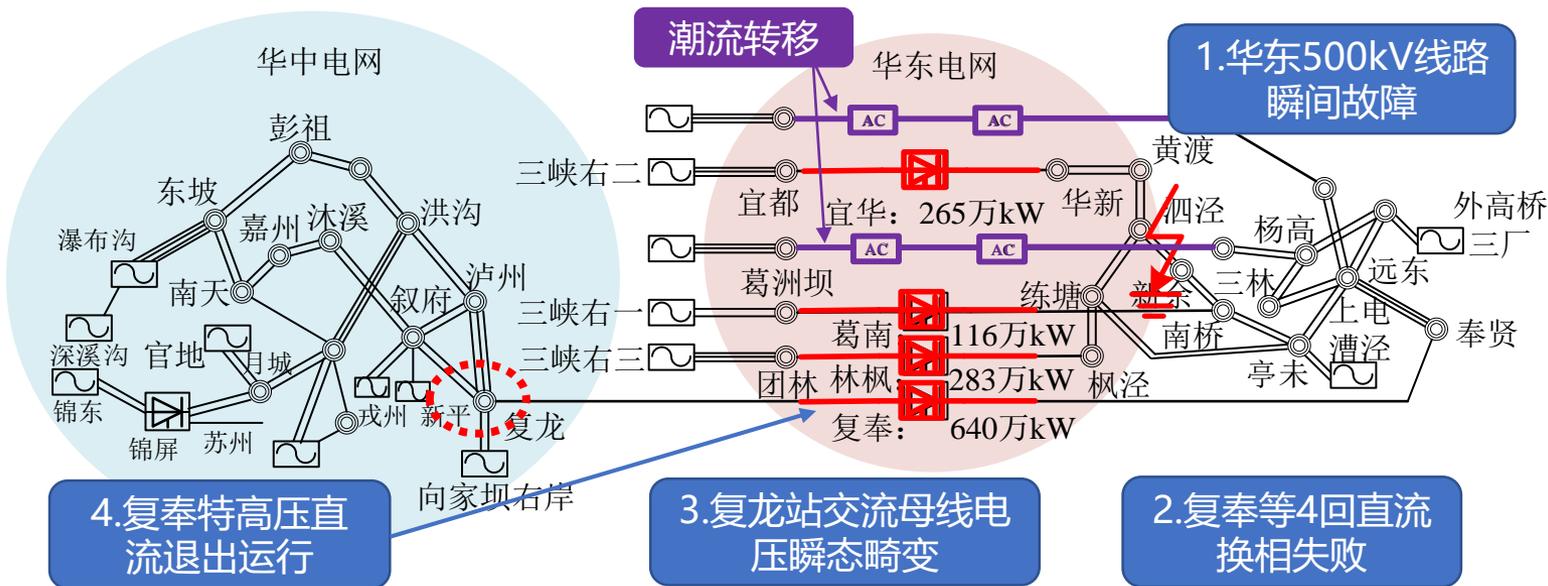
白鹤滩特高压直流拓扑方案 (计划建设)



2 面临的主要挑战

挑战1：多馈入直流输电的现状给电网的安全稳定带来了重大挑战！

- **多条直流从不同能源基地向同一负荷中心输电，出现多馈入直流输电场景。**
- **馈入直流落点密集、功率大、耦合紧密，故障时极有可能导致连续和级联换相失败的发生，严重威胁电网的安全稳定运行。**



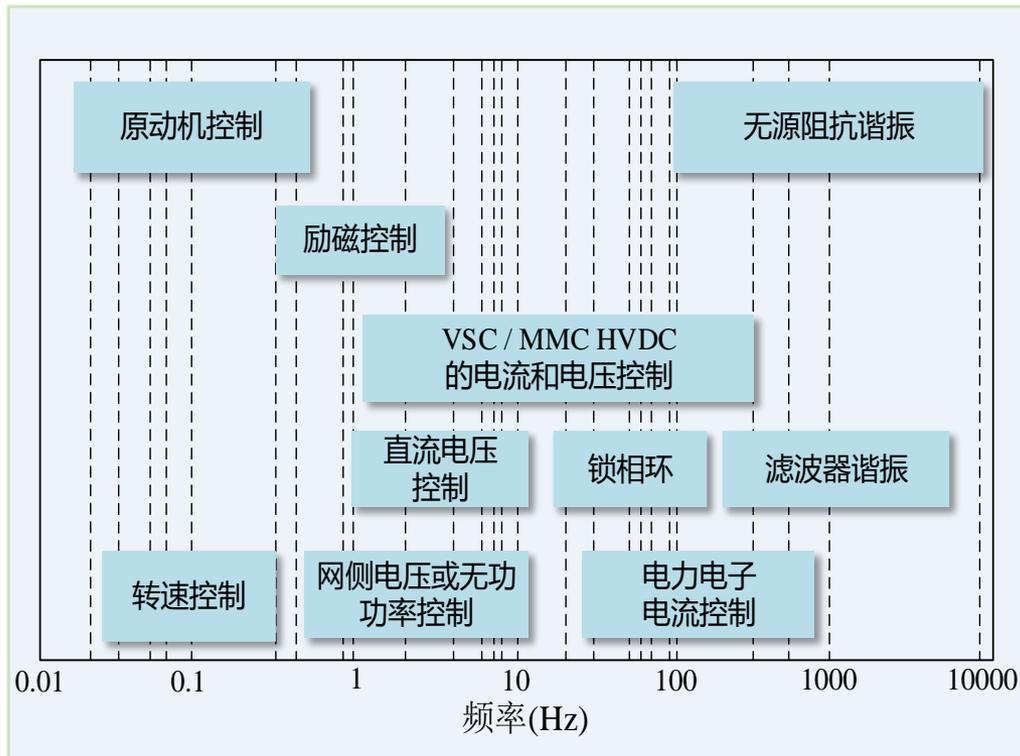
华东电网损失功率453万千瓦(上海负荷19%)，存在崩溃风险。

2 面临的主要挑战

挑战2：可能诱发直流输电系统的耦合振荡现象

- 换流器类型多样、运行工况多变、耦合机理复杂、控制系统频带宽；
- 馈入弱交流电网、参数配置不合理、协同运行机制缺乏导致运行困难。

- 德国北海海上风电场经柔性直流送出时，发生了250~350Hz的振荡
- 鲁西直流工程一端柔直换流站接入交流电网时，发生1.2kHz左右的高频谐振
- 南澳多端直流工程风电场出力逐渐增大的过程中，观测到频率在30Hz左右的振荡现象
- 渝鄂背靠背直流工程弱系统满功率情况下的低频振荡



3 小信号振荡现象分析方法—状态空间模型+特征根分析

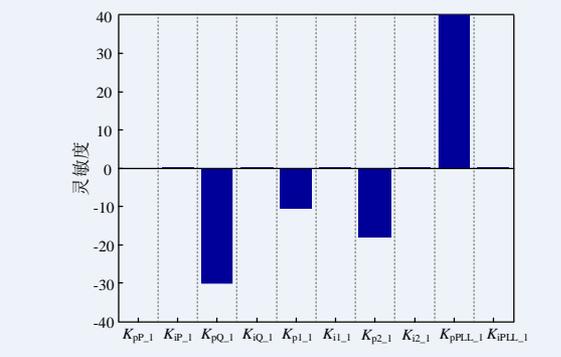
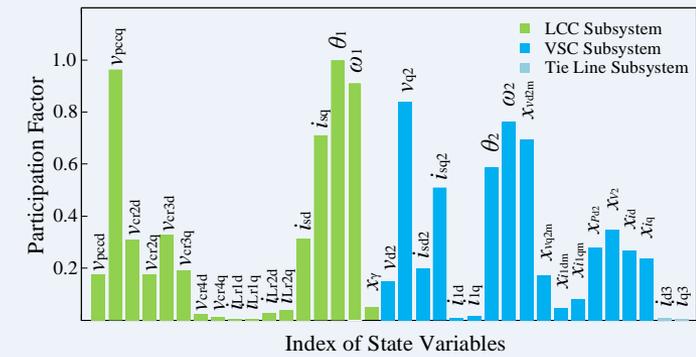
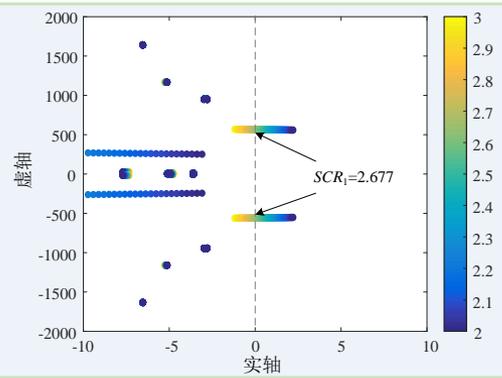
状态空间模型

- **状态空间模型**：非线性微分方程描述电力系统这样的动态系统。
- **线性化后的小信号模型**：可根据特征根判断系统的小干扰稳定性。

$$\frac{d\Delta X}{dt} = A\Delta X + B\Delta U$$

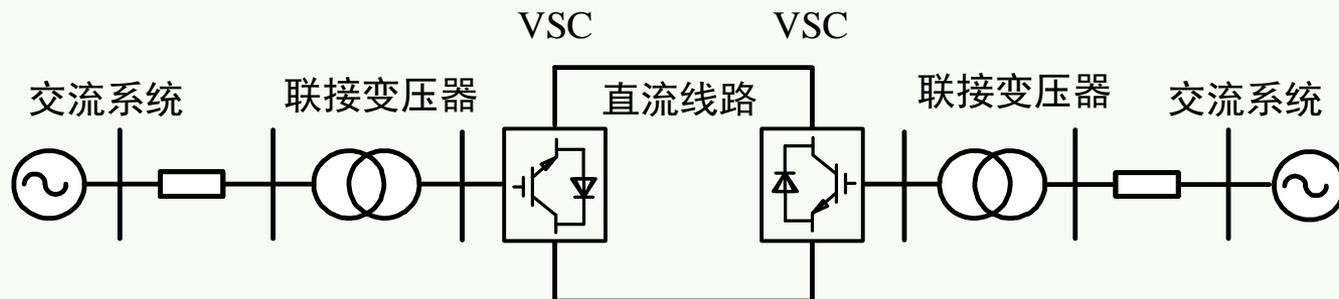
特征根分析

- **根轨迹**：系统某一可调参数变化时状态矩阵的特征根在复平面上运动所形成的轨迹，可用于研究参数变化对系统小信号稳定性的影响；
- **参与因子**：被研究模态中各状态变量的相对参与程度，可用于辨识令系统失稳的状态变量
- **灵敏度**：特征值 λ_i 对状态矩阵元素或控制参数的偏微分，可用于定位对系统稳定性影响较为灵敏的关键参数

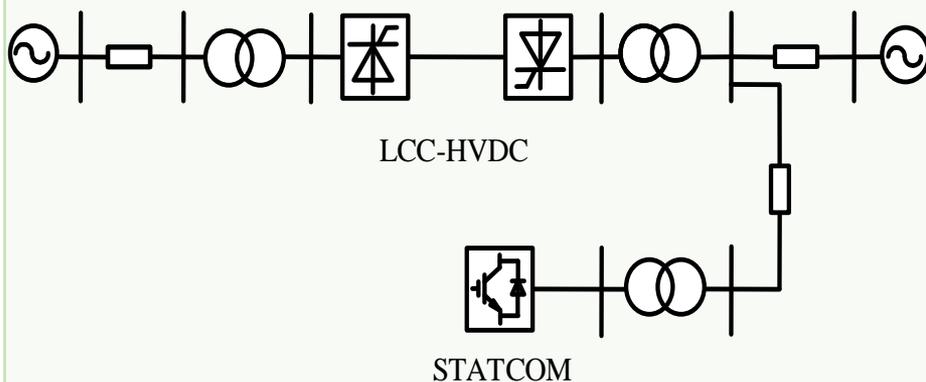


4 应用案例

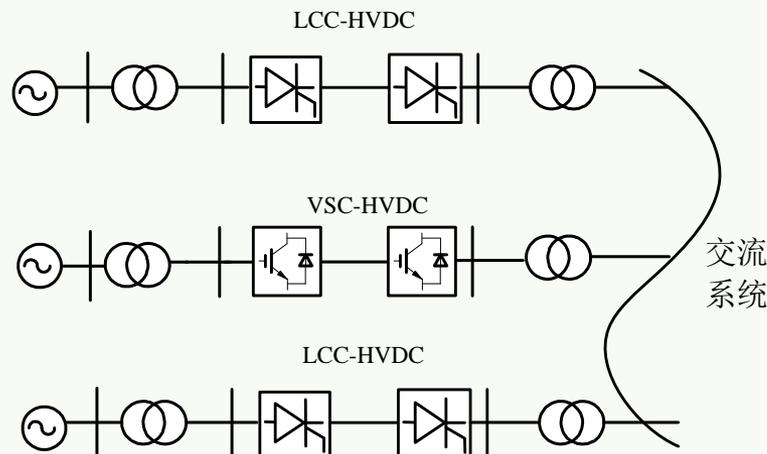
案例1：弱系统下VSC/MMC的小信号稳定性



案例2：STATCOM+LCC-HVDC混合系统的耦合作用



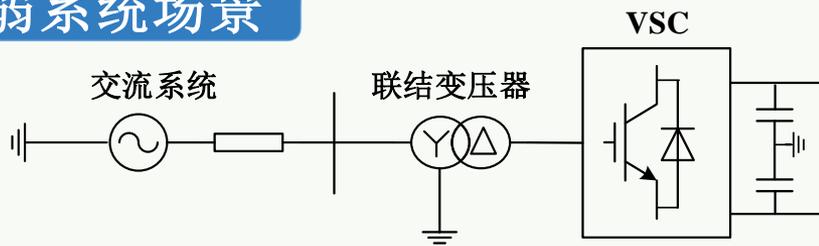
案例3：混合多馈入直流系统中不同控制参数的协同优化



4.1 案例1——VSC-/MMC-HVDC系统

4.1.1 弱系统下VSC-HVDC的小信号失稳问题

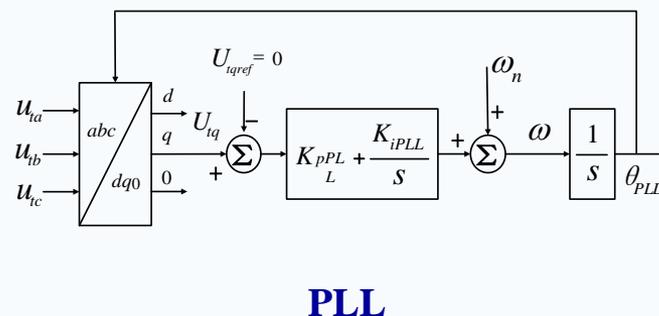
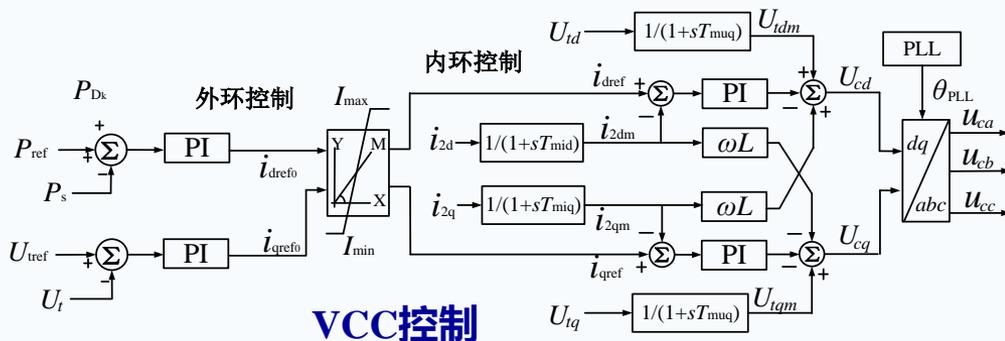
弱系统场景



- ✓ 规模化风电/太阳能仅通过柔直并网
- ✓ 故障导致交流线路跳闸
- ✓ 柔直向孤岛或弱系统供电

存在问题

- 弱系统下PLL和VCC控制（尤其是电压/无功控制环）的紧密耦合特性，使VSC系统在高PLL增益下易产生小信号失稳现象^[1]，同时使系统传输功率受限。

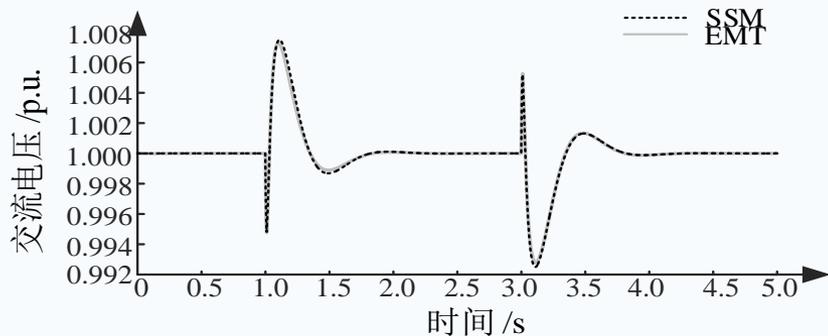
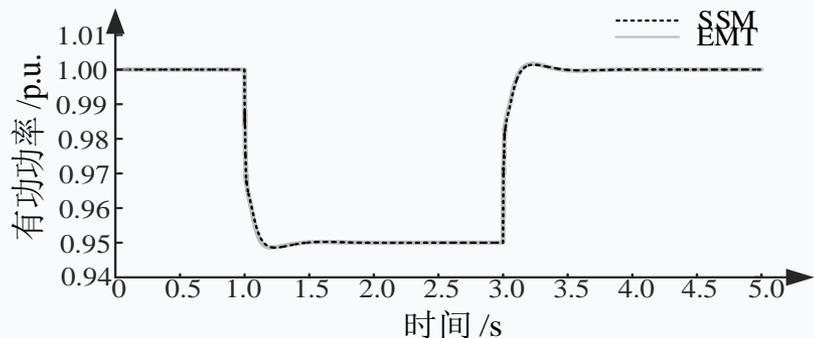


[1] J. Z. Zhou, H. Ding, S. Fan, Y. Zhang, and A. Gole. Impact of short-circuit ratio and phase-locked-loop parameters on the small-signal behavior of a VSC-HVDC converter. *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 29, no. 5, pp. 2287-2296, Oct. 2014.

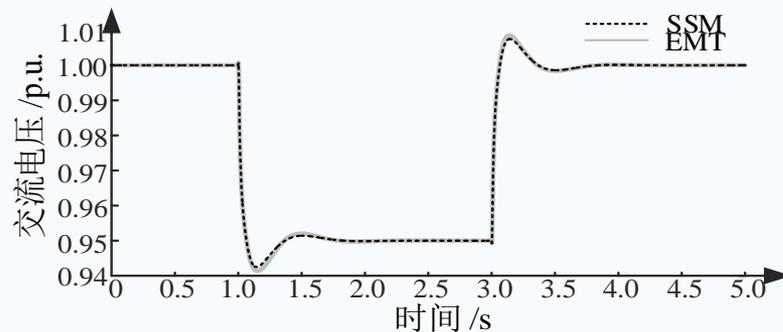
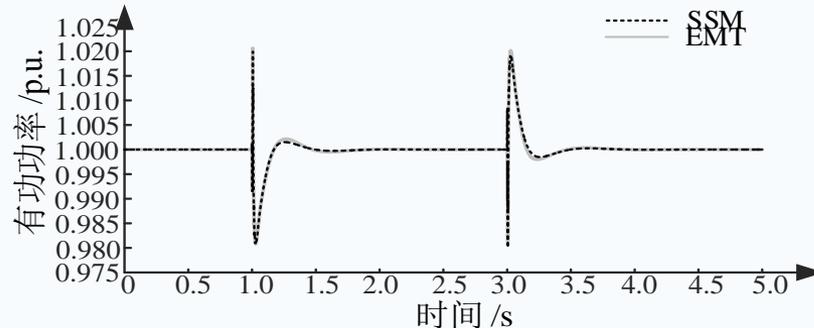
4.1 案例1——VSC-HVDC/MMC-HVDC系统

4.1.2 VSC-HVDC系统小信号模型验证

初始运行状态: $SCR=1.0$, $\varphi=85^\circ$, 逆变运行, $V_t=1.0\text{p.u.}$ 、 $P=1.0\text{p.u.}$ 。



有功功率阶跃验证



交流电压阶跃验证

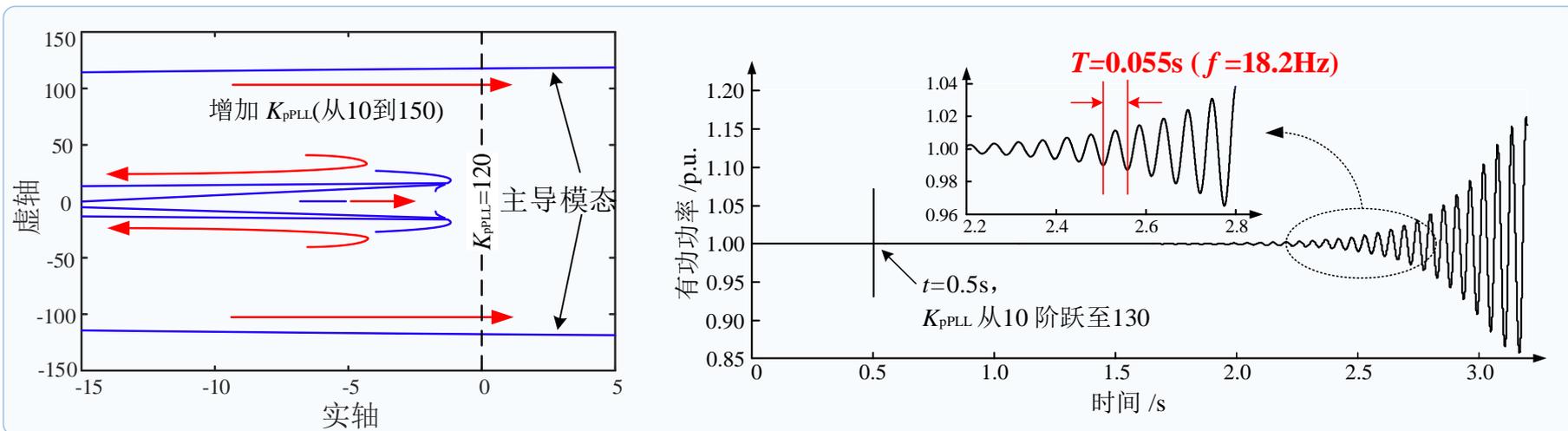
结论

- 小信号模型(SSM)与电磁暂态仿真(EMT)结果一致, 说明小信号模型的准确性。

4.1 案例1——VSC-HVDC/MMC-HVDC系统

4.1.3 特征根分析—主导模态特征

K_{pPLL} 变化范围: 10~150, $K_{iPLL}=5K_{pPLL}$, 初始运行状态: SCR=1.0。



结论

- 锁相环比例增益 $K_{pPLL} > 120$ 时, 主导模态穿越虚轴进入右半平面, 其振荡频率 $f = 18.9\text{Hz}$;
- 弱系统工况下, 高PLL增益易引起系统小信号失稳现象。

模态	特征根	振荡频率/Hz	阻尼比
1	$-205.49 \pm j3261.06$	519.0	0.063
2	$-201.83 \pm j2685.77$	427.5	0.076
3	$-177.09 \pm j723.56$	115.2	0.238
4	-450.49	0.0	1.000
5	-245.64	0.0	1.000
6	$5.48 \pm j118.69$	18.9	-0.046
7	$-3.37 \pm j26.38$	4.2	0.127
8	-22.37	0.0	1.000
9	$-31.71 \pm j3.14$	0.5	0.995
10	-5.107	0.0	1.000

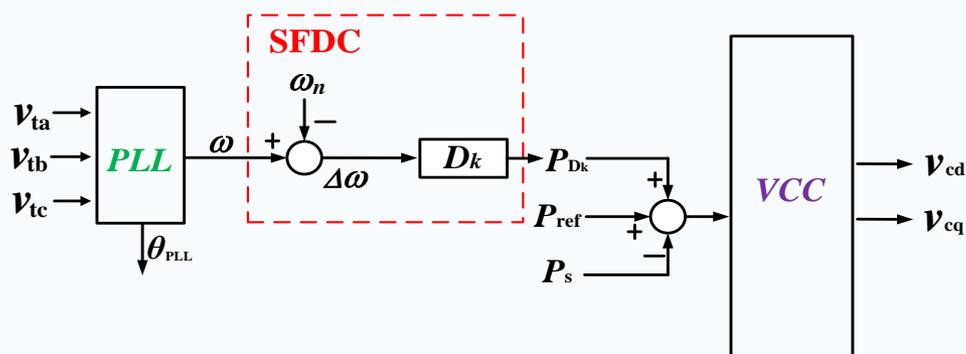
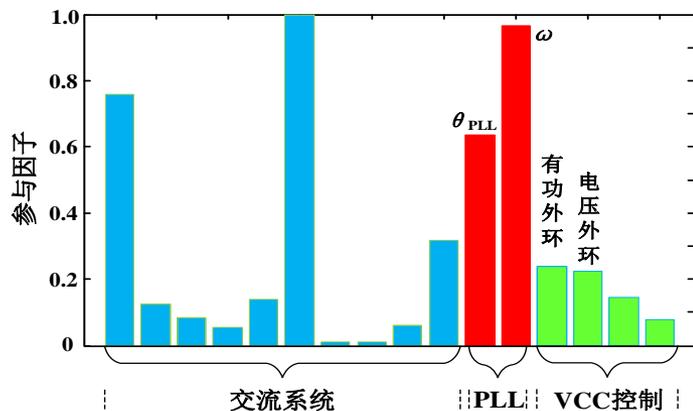
4.1 案例1——VSC-HVDC/MMC-HVDC系统

4.1.4 附加频率阻尼控制(Supplementary Frequency-based Damping Control , SFDC)

控制需求: 快速的动态响应、满足稳定裕度的要求、优良的暂态性能

研究思路

- 利用参与因子法揭示关键主电路/控制系统参数——有功功率外环及锁相环；
- 采用附加阻尼法，引入的阻尼系数 D_k ，生成阻尼分量 $P_{Dk}=D_k * \Delta\omega$ 反馈至有功功率外环，抑制/消除小信号失稳现象。

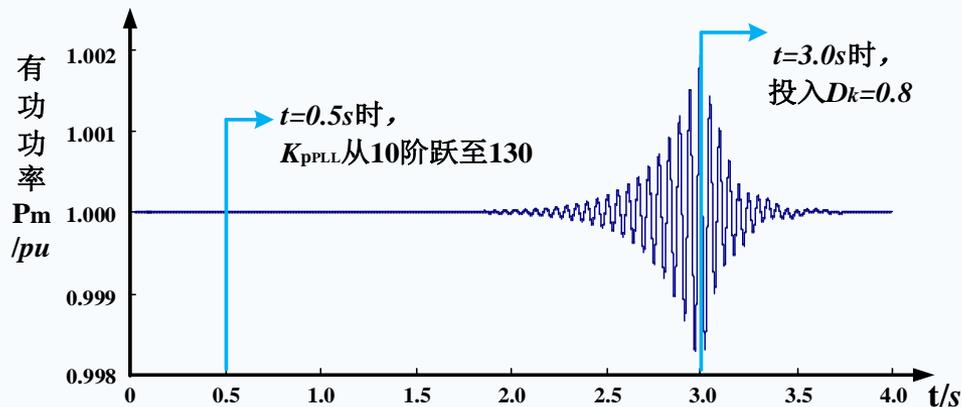
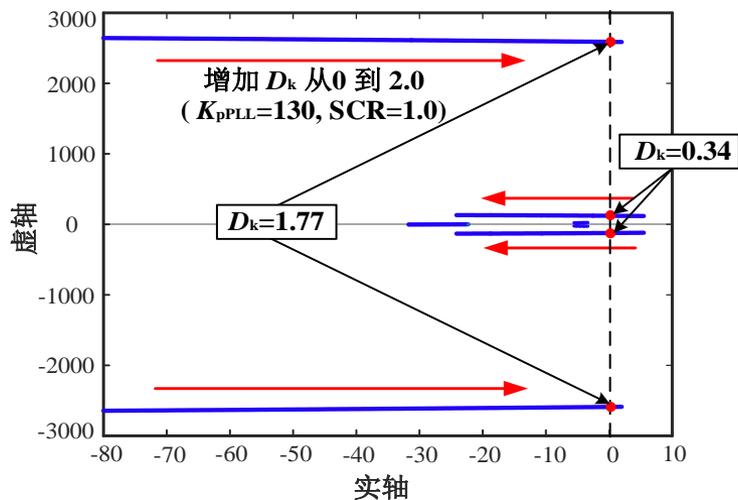


- **SFDC特点:** 附加阻尼提高稳定裕度；高PLL增益系统仍然稳定；保留VCC内环用以限制故障电流。

4.1 案例1——VSC-HVDC/MMC-HVDC系统

4.1.5 阻尼系数 D_k 对系统小信号稳定性的影响

D_k 变化范围: 0~2.0, $K_{pPLL}=130$ (120临界稳定)



结论

- 阻尼系数 $D_k \in [0.34, 1.77]$ 时, 系统能够稳定运行;
- 投入阻尼控制后系统逐渐恢复稳定, 说明该控制抑制振荡的有效性。

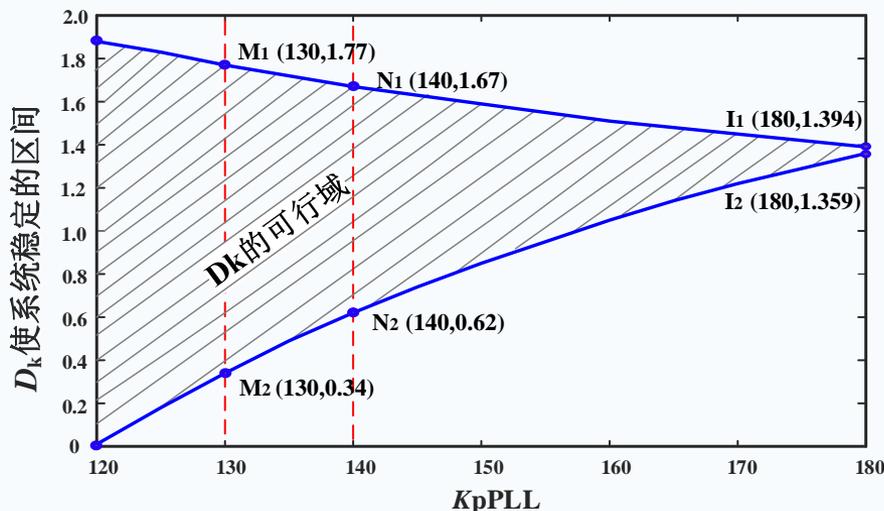
存在矛盾

- D_k 过小——高PLL增益时, 无法达到抑制振荡的效果;
- D_k 过大——可能诱发新的弱阻尼模态, 使得系统稳定裕度降低。

4.1 案例1——VSC-HVDC/MMC-HVDC系统

4.1.6 K_{pPLL} 对阻尼系数 D_k 可行域的影响

K_{pPLL} 变化范围：120 ~ 180



K_{pPLL}	D_k 可行域
120	[0.00, 1.88]
130	[0.34, 1.77]
140	[0.62, 1.67]
180	[1.359, 1.394]
>180	无合适取值

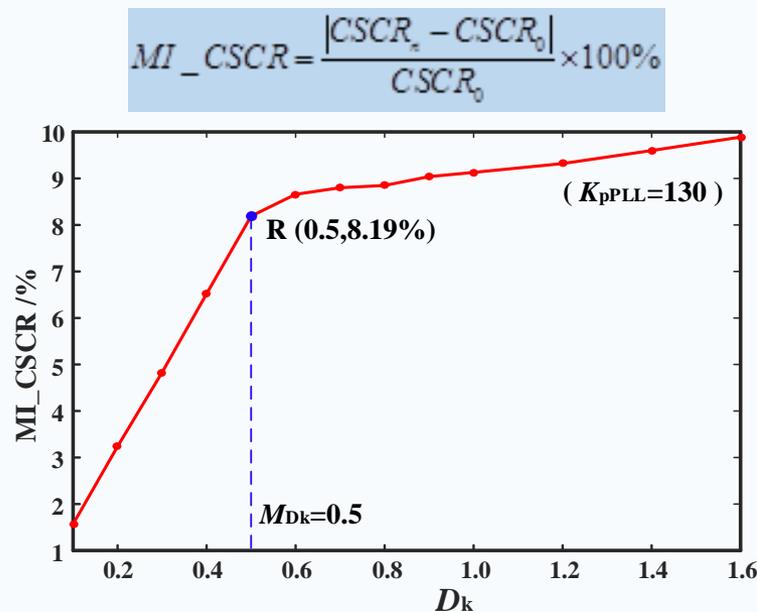
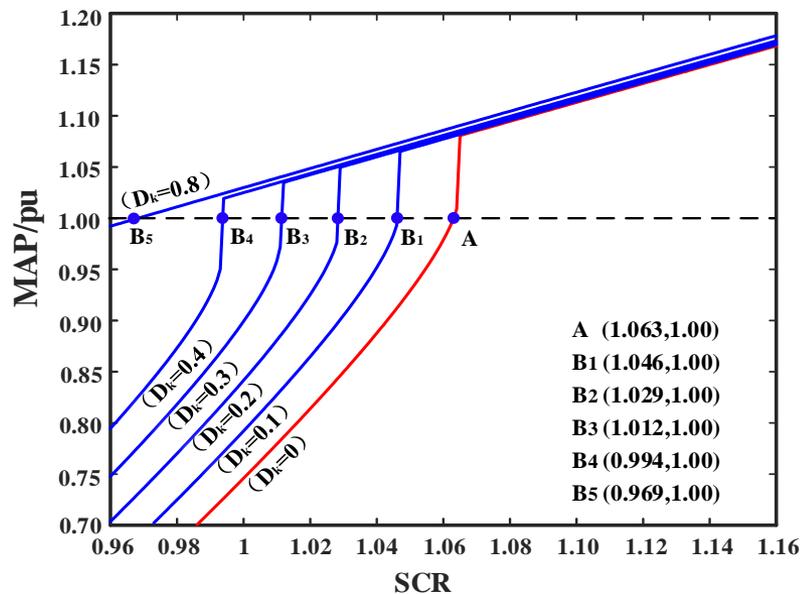
结论

- 随着锁相环比例增益 K_{pPLL} 增大，阻尼系数 D_k 可行域逐渐减小；
- $120 < K_{pPLL} < 180$ 时，合理进行 D_k 取值可以提高系统的稳定裕度；
- K_{pPLL} 取值过大($K_{pPLL} > 180$)时，无法找到合适 D_k 取值使得系统在额定工况下稳定运行。

4.1 案例1——VSC-HVDC/MMC-HVDC系统

4.1.7 阻尼系数 D_k 对系统MAP和 SCR_{min} 的影响

D_k 变化时的MAP特性和参数选取方法



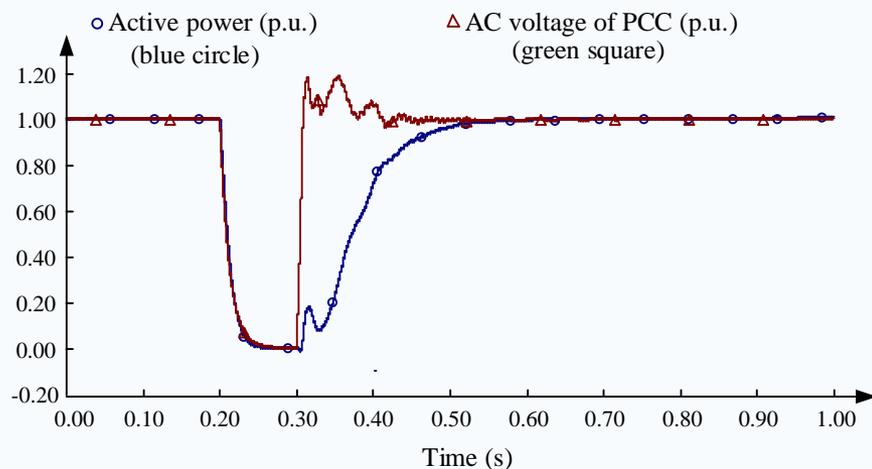
结论

- 投入SFDC控制时，VSC系统临界短路比 SCR_{min} 降低，临界短路比裕度增加量MI_CSCR得到提升；
- SFDC控制使得VSC系统在传输额定功率时降低了对交流系统强度的要求。

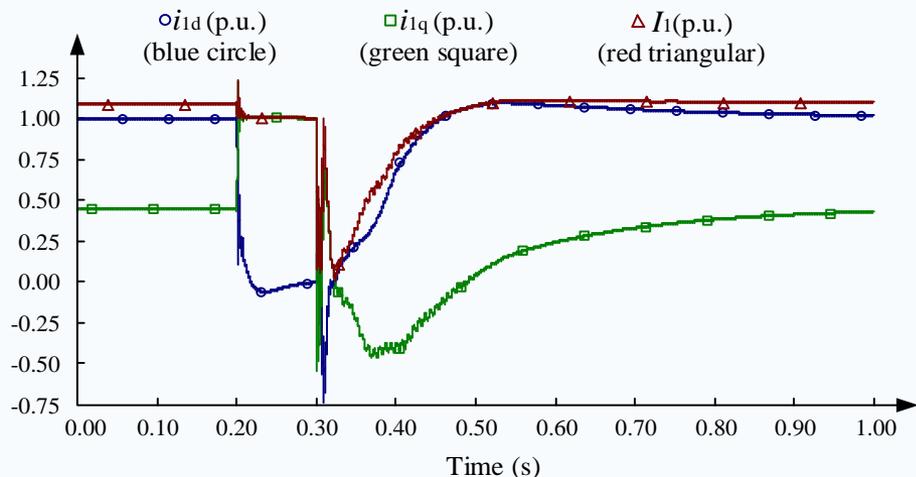
4.1 案例1——VSC-HVDC/MMC-HVDC系统

4.1.8 含SFDC系统的暂态特性测试

- **故障类型：三相直接短路故障，持续时间：10个周波；**
- **初始工况：SCR=1.0, $V_t=1.0$ p.u., $P=1.0$ p.u., $K_{pPLL}=130$ (120临界稳定), $D_k=0.5$ 。**



系统传输功率及母线电压



换流器出口交流电流

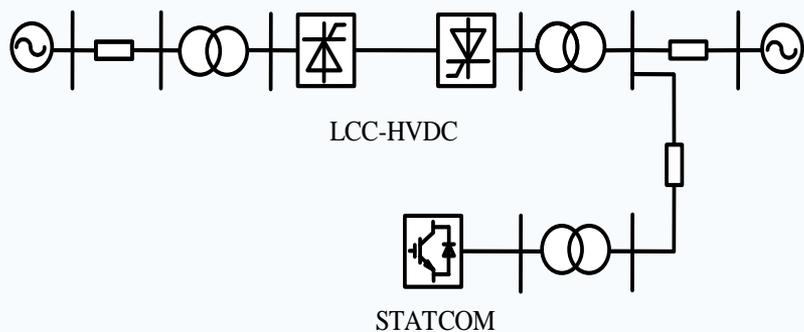
结论

- **极弱交流系统 (SCR=1.0)、高PLL增益 ($K_{pPLL}=130$)、最严重三相故障情况下，故障电流在可接受范围内，系统具有良好的故障恢复性能。**

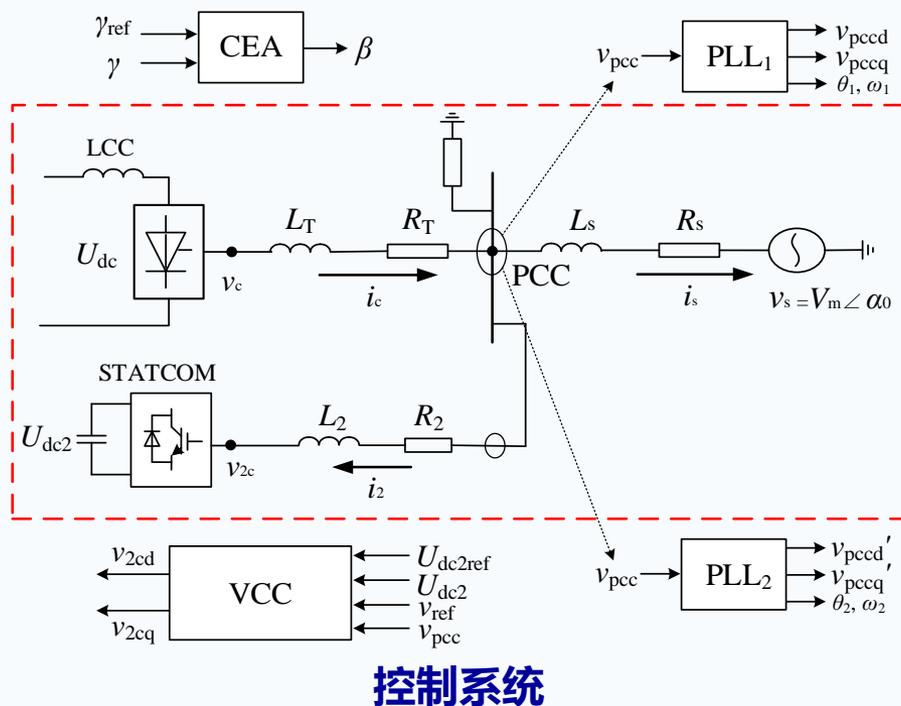
4.2 案例2——含STATCOM的LCC-HVDC系统

将STATCOM并联在LCC-HVDC系统逆变侧的同一交流母线

- 可以改善LCC-HVDC系统的交流母线电压动态特性
- 增强LCC-HVDC系统抵御换相失败的能力



含STATCOM的LCC-HVDC系统

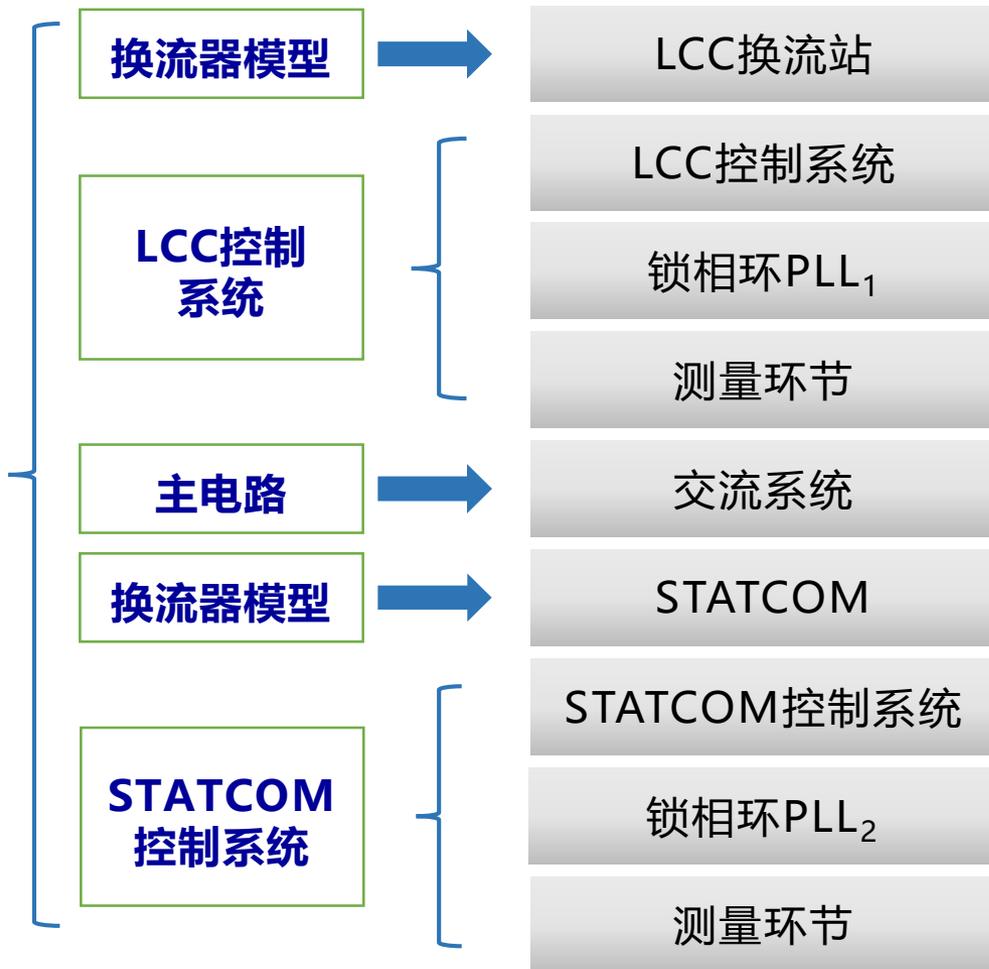


东莞、北郊、水乡及木棉的多个STATCOM工程相继投产。

4.2 案例2——含STATCOM的LCC-HVDC系统

4.2.1 含STATCOM的LCC-HVDC系统小信号模型

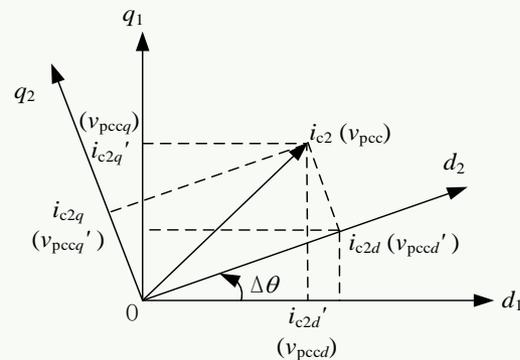
状态空间模型



■ 基于开关函数建立LCC换流站模型

$$\begin{cases} S_{ai} = A_i \cos(\omega t + \varphi) \\ S_{bi} = A_i \cos(\omega t + \varphi - \frac{2}{3}\pi) \\ S_{ci} = A_i \cos(\omega t + \varphi + \frac{2}{3}\pi) \end{cases}$$

■ LCC-HVDC系统(PLL₁)与STATCOM(PLL₂)之间的接口模型



4.2 案例2——含STATCOM的LCC-HVDC系统

4.2.1 含STATCOM的LCC-HVDC系统小信号模型

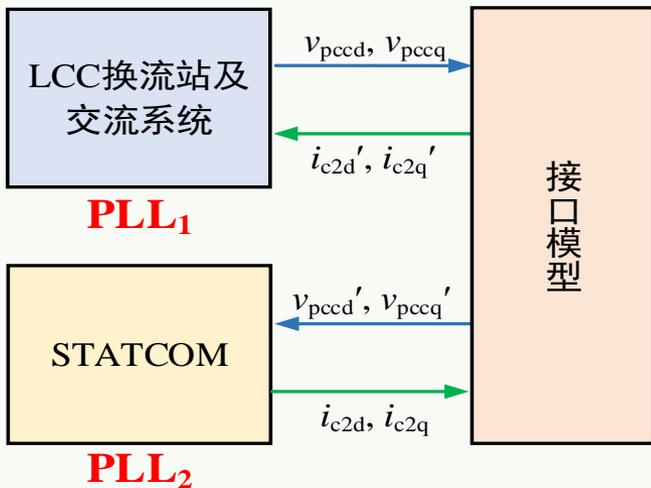
小信号模型:

- 将混合系统的非线性状态空间模型于**额定运行点线性化**
- 得到含STATCOM的LCC-HVDC系统**小信号模型**

小信号模型

$$\frac{d\Delta X}{dt} = A\Delta X + B\Delta U$$

STATCOM与LCC-HVDC系统的连接



子系统	物理含义	状态变量	参考系
交流系统	PCC点电压 v_{pcc}	v_{pccd}, v_{pccq}	PLL ₁
	交流滤波器	$v_{cr2d}, v_{cr2q}, v_{cr3d}, v_{cr3q}, v_{cr4d}, v_{cr4q}, i_{Lr1d}, i_{Lr1q}, i_{Lr2d}, i_{Lr2q}$	
	交流系统电流	i_{sd}, i_{sq}	
LCC 控制	关断角控制器及测量环节	x_γ, γ_m	
PLL ₁		θ_1, ω_1	
STATCOM 控制	v_{pcc} 测量值	v_{pccdm}, v_{pccqm}	PLL ₂
	i_{2d} 测量值	i_{c2dm}, i_{c2qm}	
	直流电压控制器	x_u	
	交流电压控制器	x_v	
	内环控制器	x_{id}, x_{iq}	
	内环d、q轴电流	i_{c2d}, i_{c2q}	
STATCOM直流电压	U_{dc2}		
PLL ₂		θ_2, ω_2	

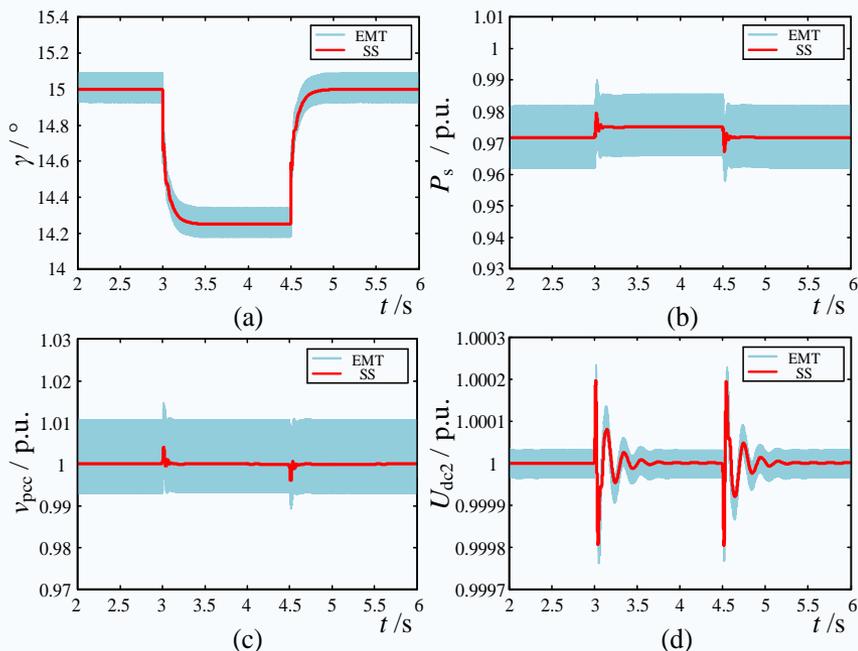
4.2 案例2——含STATCOM的LCC-HVDC系统

4.2.1 含STATCOM的LCC-HVDC系统小信号模型

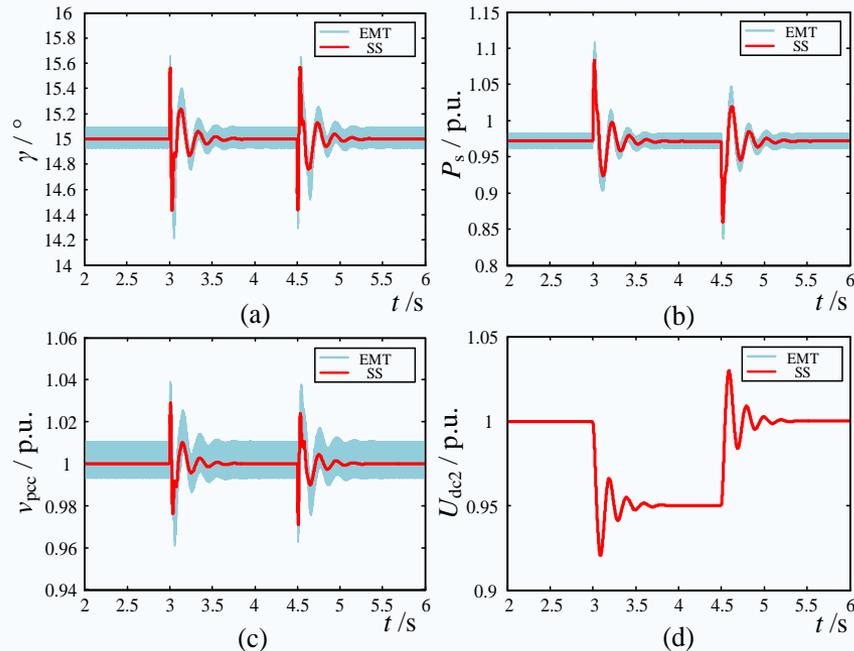
小信号模型验证:

验证工况1: LCC关断角参考值阶跃

验证工况2: STATCOM直流电压参考值阶跃



LCC关断角参考值阶跃时的动态响应



STATCOM直流电压参考值阶跃时的动态响应

[1] 郭春义, 蒋雯, 赵成勇, 刘炜. 含STATCOM的LCC-HVDC系统的动态模型及小信号稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(14): 4046-4055+4310.

4.2 案例2——含STATCOM的LCC-HVDC系统

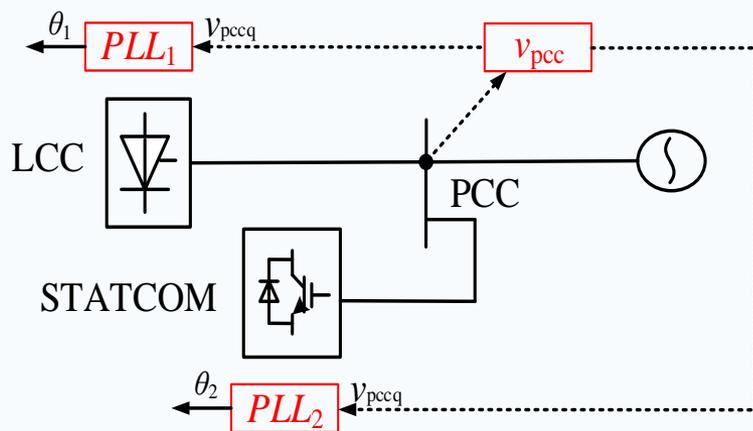
4.2.2 STATCOM对LCC-HVDC系统稳定裕度的影响

关键问题

PLL  LCC-HVDC

PLL  STATCOM

PLL  混合系统



含STATCOM的LCC-HVDC系统中

两个PLL输入取自同一交流母线电压

存在问题

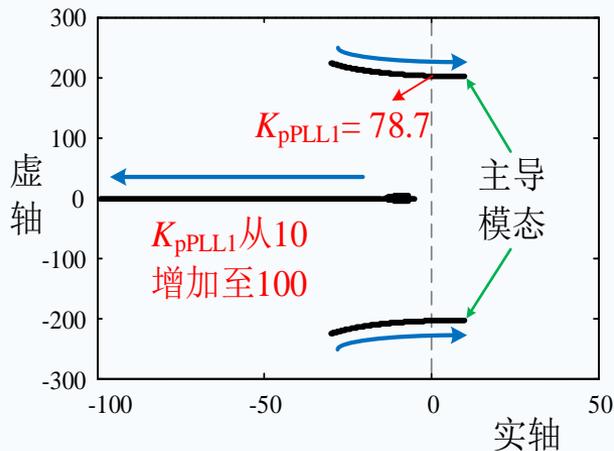
PLL动态性能有可能恶化系统的稳定性:

- PLL₁与PLL₂输入为同一交流母线电压
- 交流母线电压扰动更加敏感
- STATCOM调节母线电压，造成耦合影响

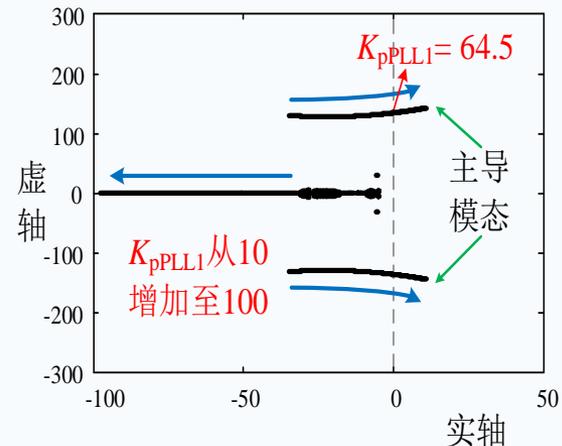
4.2 案例2——含STATCOM的LCC-HVDC系统

4.2.2 STATCOM对LCC-HVDC系统稳定裕度的影响

- 逐渐增大LCC锁相环的比例增益 K_{pPLL1} 从10到100 ($SCR=2\angle 84^\circ$, 230kV)
- Case 1: LCC-HVDC系统; Case 2: 含STATCOM的LCC-HVDC系统



Case 1: PLL₁增益 $K_{pPLL1} < 78.7$



Case 2: PLL₁增益 $K_{pPLL1} < 64.5$

结论

弱系统下引入STATCOM使得混合系统中LCC锁相环的稳定可行域减小 ($SCR=2.0$).

4.2 案例2——含STATCOM的LCC-HVDC系统

4.2.2 STATCOM对LCC-HVDC系统稳定裕度的影响

参与因子分析

(SCR=2, $K_{pPLL1}=70$)

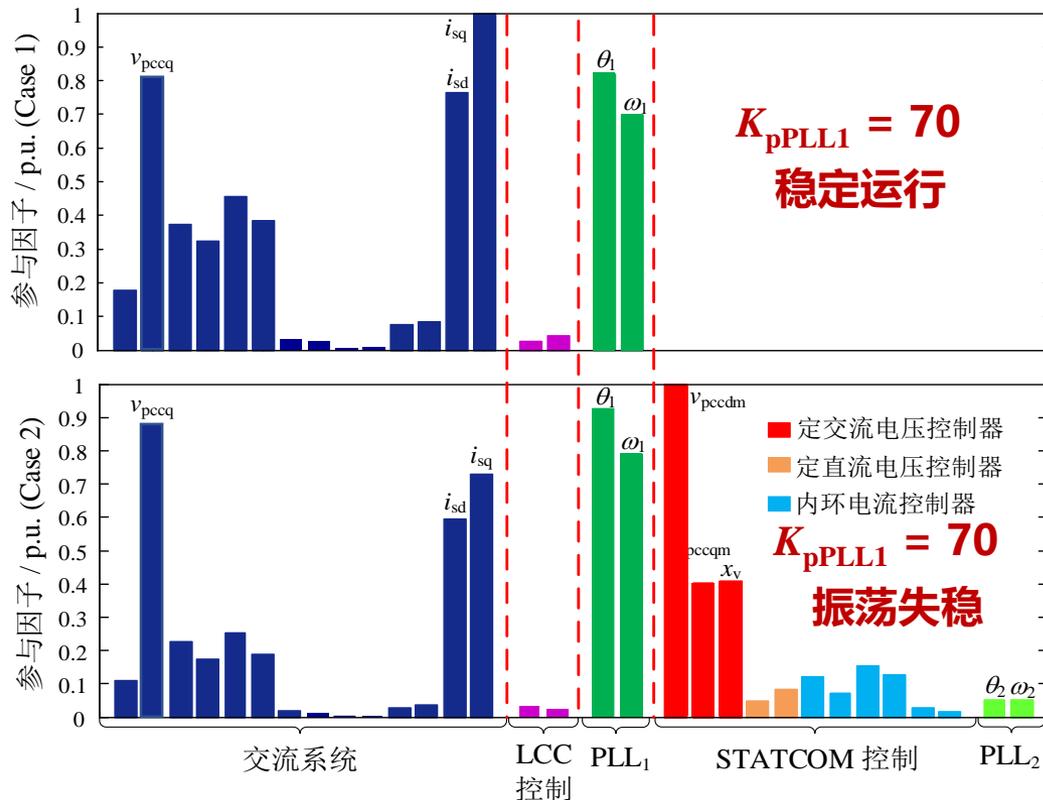
■ $v_{pccq}, \theta_1, \omega_1$

1. 与LCC锁相环PLL₁相关
2. 在混合系统中参与程度更高 (有STATCOM引入)

↕ 控制器耦合作用

■ $v_{pccdm}, v_{pccqm}, x_v$

1. STATCOM的交流电压控制相关的状态变量
2. 参与程度较高



$K_{pPLL1}=70$ 两系统主导模态中各状态变量的参与因子

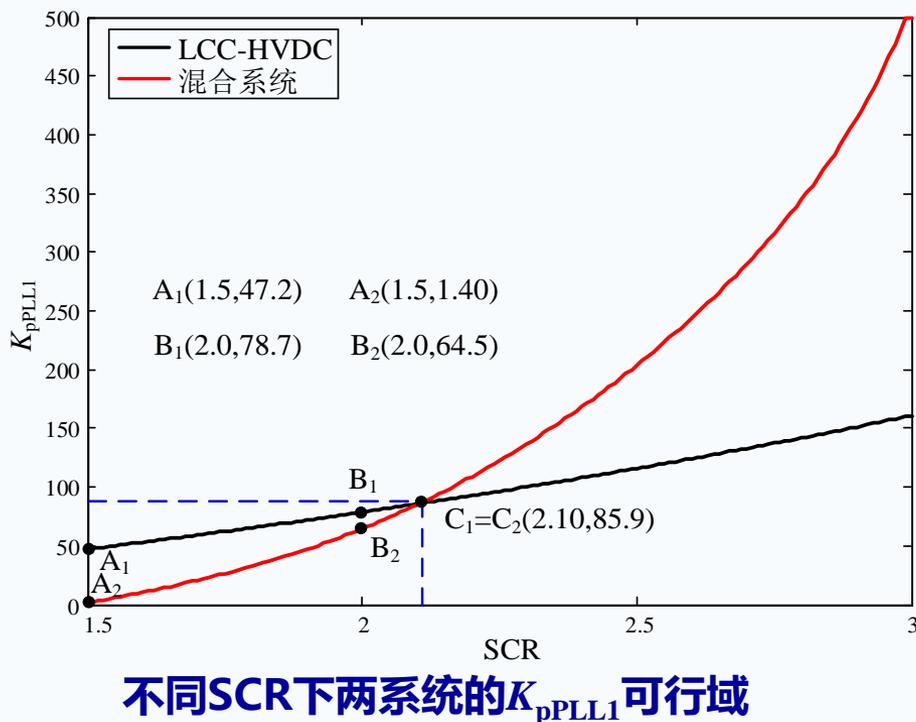
结论

弱系统下STATCOM交流电压控制器与LCC锁相环间的耦合作用，是引入STATCOM后LCC锁相环动态特性恶化、LCC-HVDC系统稳定裕度降低的关键因素。

4.2 案例2——含STATCOM的LCC-HVDC系统

4.2.2 STATCOM对LCC-HVDC系统稳定裕度的影响

PLL₁可行域与交流系统强度SCR的关系



- 随着SCR的下降，两系统的 K_{pPLL1} 可行域均逐渐减小
- 两条曲线在 $C_1/C_2(2.10, 85.9)$ 点相交
- 当 $SCR < 2.1$ 时，混合系统的 K_{pPLL1} 可行域比LCC-HVDC系统更小
- 当 $SCR > 2.1$ 时，混合系统的 K_{pPLL1} 具有更大的稳定可行域

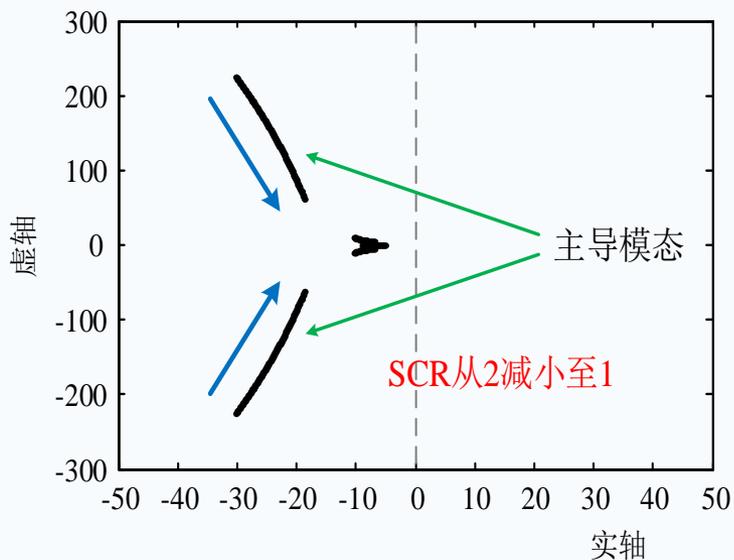
结论

- 当受端交流系统较强时，STATCOM的馈入可以增加LCC锁相环的可行稳定范围；
- 当受端交流系统较弱时，STATCOM的馈入反而会降低LCC锁相环的稳定可行域。

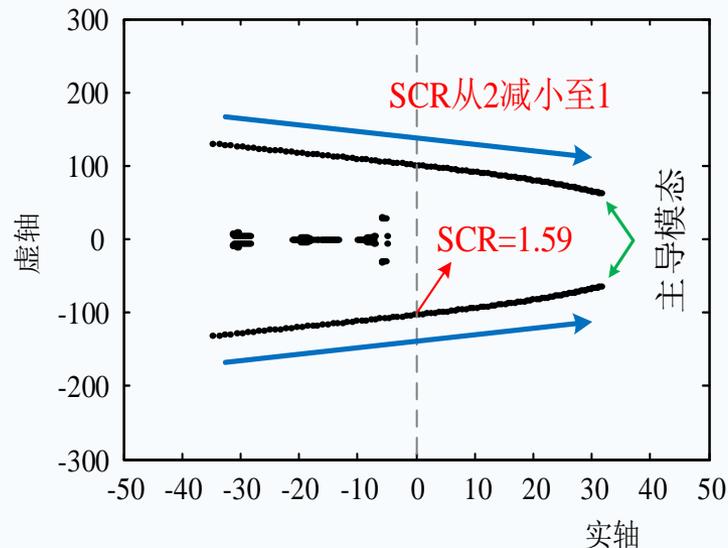
4.2 案例2——含STATCOM的LCC-HVDC系统

4.2.2 STATCOM对LCC-HVDC系统稳定裕度的影响

- 逐渐减小交流系统短路比SCR从2到1
- **Case 1:** LCC-HVDC系统; **Case 2:** 含STATCOM的LCC-HVDC系统



Case 1



Case 2: $SCR_{min} = 1.59$

结论

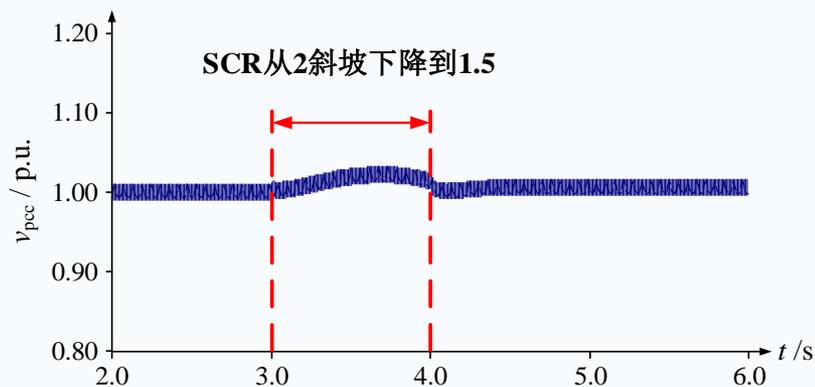
混合系统在交流系统较弱时更易出现小信号失稳现象。

4.2 案例2——含STATCOM的LCC-HVDC系统

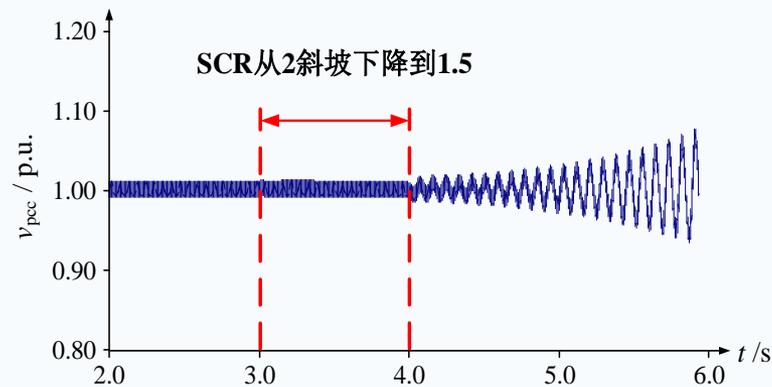
4.2.2 STATCOM对LCC-HVDC系统稳定裕度的影响

仿真验证

- **Case1:** LCC-HVDC系统; **Case 2:** 含STATCOM的LCC-HVDC系统
- 系统运行于额定状态, $t = [3s, 4s]$ 时SCR由2斜坡下降至1.5



SCR从2减小至1.5后交流母线电压响应
(Case 1)



SCR从2减小至1.5后交流母线电压响应
(Case 2)

结论

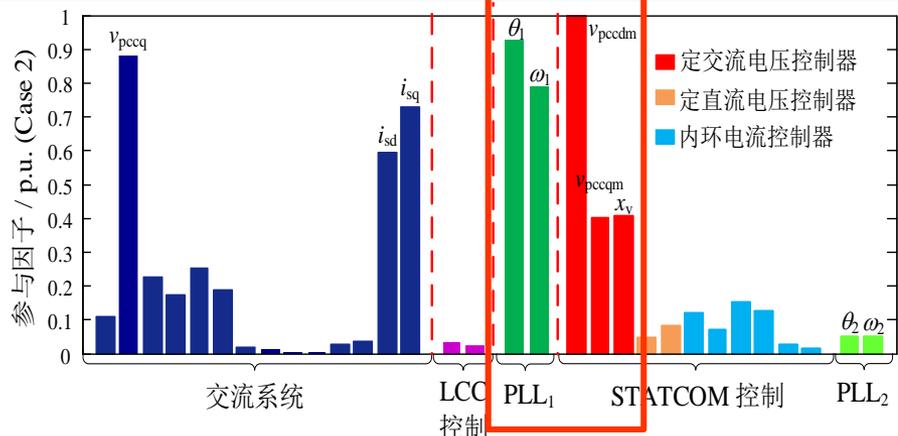
SCR由2减小至1.5时, LCC-HVDC系统(Case 1)仍能保持稳定运行, 而含STATCOM的LCC-HVDC系统(Case 2)逐渐发散。

4.2 案例2——含STATCOM的LCC-HVDC系统

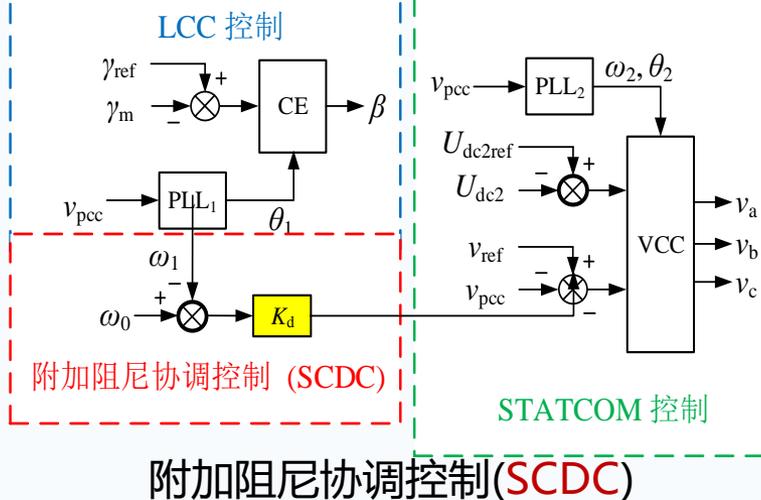
4.2.3 新型附加阻尼协调控制方法

思路

- 特征根分析法→主导模态特征
- 参与因子法→关键主电路/控制系统参数
- 附加阻尼协调控制→抑制/消除小信号失稳



$K_{pPLL1} = 70$ 混合系统主导模态状态变量的参与因子



附加阻尼协调控制(SCDC): 基于LCC锁相环输出频率信息, 生成附加阻尼分量, 反馈到STATCOM定交流电压控制外环上。

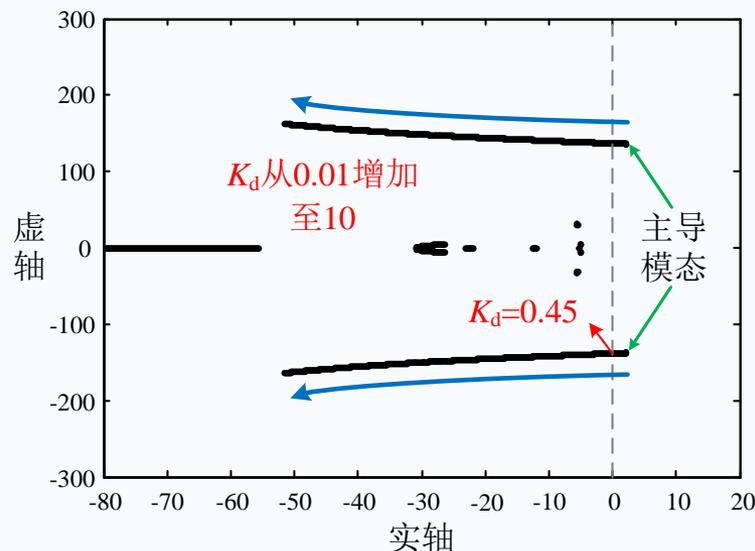
4.2 案例2——含STATCOM的LCC-HVDC系统

4.2.3 新型附加阻尼协调控制方法

SCDC控制有效性验证——特征根分析

- 初始状态: $v_{pcc}=1.0$ pu, $P=1.0$ pu, $SCR=2.0$ 且 $K_{pPLL1}=70$ (不稳定)
- 阻尼系数 K_d 从 0.01 增加至 10

- 当 K_d 逐渐增大时, 主导模态逐渐向左移动
- 当 $K_d > 0.45$ 时, 混合系统恢复稳定运行, 且稳定性逐渐增强
- 准则: i) 最大允许频率偏差为 ± 0.2 Hz, ii) 最大允许交流偏差为 $\pm 3\%$, 因此 $K_d \leq 7.5$



阻尼系数 K_d 变化时系统根轨迹

结论

当 $K_{pPLL1}=70$ 时混合系统可以稳定运行的 K_d 的可行域为 $[0.45, 7.5]$ 。

4.2 案例2——含STATCOM的LCC-HVDC系统

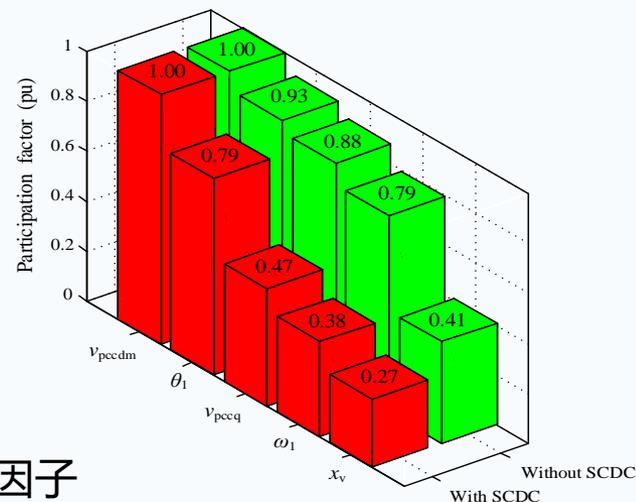
4.2.3 新型附加阻尼协调控制方法

SCDC控制有效性验证——参与因子分析

- Case 2: 无SCDC的混合系统($K_{pPLL1}=70$, 不稳定)
- Case 3: 含SCDC的混合系统($K_{pPLL1}=70$ 且 $K_d=5$, 稳定)

	V_{pccq}	θ_1	ω_1	V_{pccqm}	x_v
混合系统	88.05%	92.83%	79.11%	100%	40.81%
含SCDC的混合系统	47.02%	78.92%	37.98%	100%	27.26%

主导模态中主要状态变量的参与因子



结论

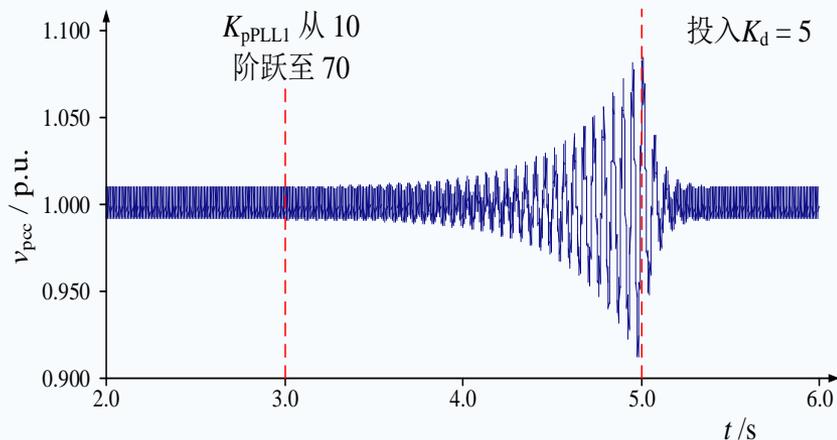
SCDC控制削弱了STATCOM交流电压控制器与LCC锁相环之间的耦合作用，从而在一定程度上提高了混合系统的稳定裕度。

4.2 案例2——含STATCOM的LCC-HVDC系统

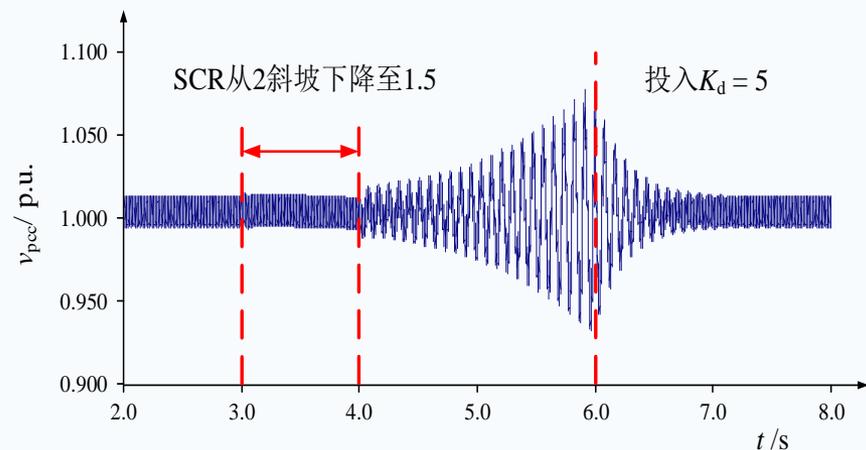
4.2.3 新型附加阻尼协调控制方法

SCDC控制有效性验证——仿真验证

- **案例1:** $t=3\text{s}$ 时 K_{pPLL1} 由10阶跃至70, $t=5\text{s}$ 时投入SCDC控制
- **案例2:** $t=[3\text{s}, 4\text{s}]$ 时SCR由2斜坡下降至1.5, $t=5\text{s}$ 时投入SCDC控制



投入SCDC前后交流母线电压响应 (案例1)



投入SCDC前后交流母线电压响应 (案例2)

结论

所提出的SCDC控制可以有效抑制弱系统下混合系统在高LCC锁相环增益下的系统小信号失稳，最终提高整个混合系统的稳定裕度。

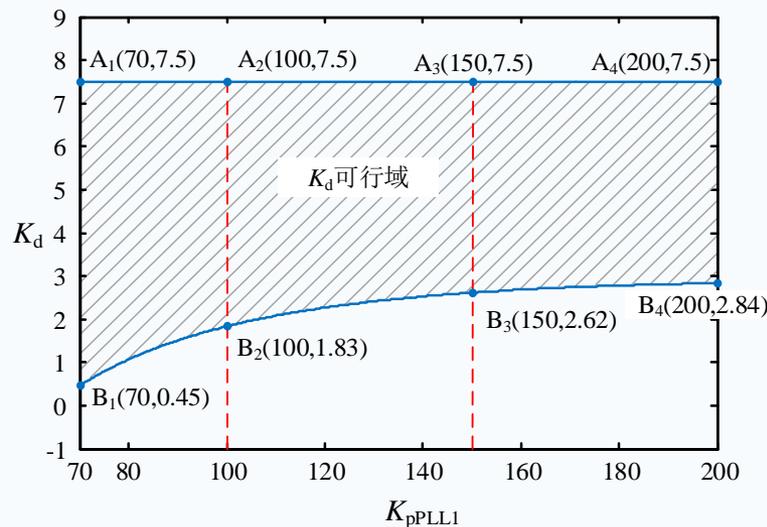
4.2 案例2——含STATCOM的LCC-HVDC系统

4.2.3 新型附加阻尼协调控制方法

不同LCC锁相环增益 K_{pPLL1} 下阻尼系数 K_d 的可选范围

- K_{pPLL1} 取值不同时, K_d 的可行域也会有所不同
- K_{pPLL1} 从70增大至200 (SCR=2.0), K_d 的可行域如图所示

- 当 $K_{pPLL1}=70$ $K_d \in [0.45, 7.5]$
- 当 $K_{pPLL1}=100$ $K_d \in [1.83, 7.5]$
- 当 $K_{pPLL1}=150$ $K_d \in [2.62, 7.5]$



K_{pPLL1} 取值不同时 K_d 的可行域

结论

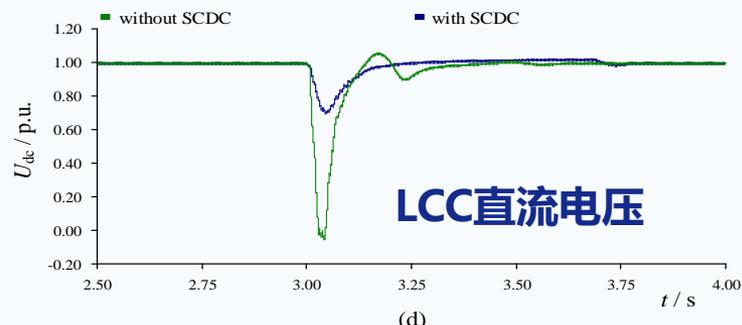
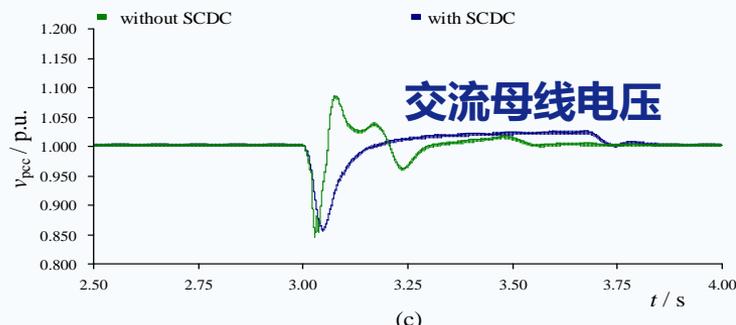
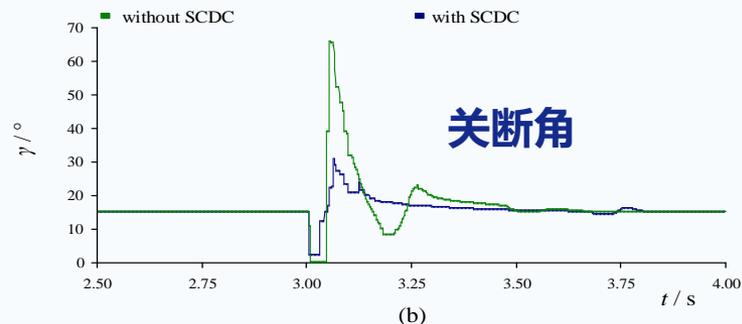
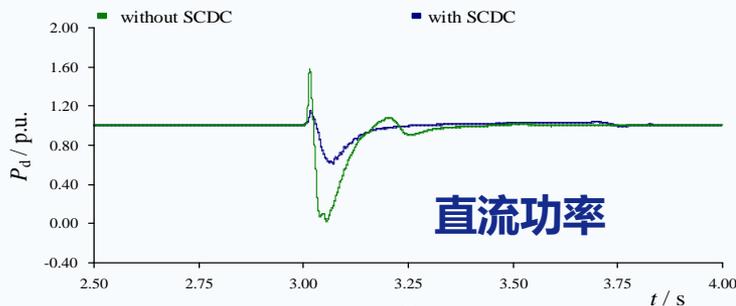
- K_d 的可行域随着 K_{pPLL1} 的增大而逐渐减小
- 利用所提出的SCDC控制, 可以提高混合系统的稳定性

4.2 案例2——含STATCOM的LCC-HVDC系统

4.2.3 新型附加阻尼协调控制方法

附加阻尼协调控制对系统暂态特性的影响

- $t=3.0s$ 时，逆变侧换流母线处设置单相感性接地故障(0.78H)，故障持续0.1s
- Case 2: 无SCDC控制的混合系统; Case 3: 含SCDC控制的混合系统($K_d=5$)



系统在单相接地故障下的暂态特性: Case 2—绿色; Case 3—蓝色

结论

不含SCDC控制的混合系统发生了换相失败，而含SCDC控制的混合系统未发生换相失败。此外，SCDC控制可以有效地调节交流母线电压，减少故障期间直流电压的跌落。

4.2 案例2——含STATCOM的LCC-HVDC系统

4.2.3 新型附加阻尼协调控制方法

附加阻尼协调控制对系统暂态特性的影响

- 逆变侧换流母线故障，临界电感与CFII值对比
- Case 2: 无SCDC控制的混合系统, Case 3: 含SCDC控制的混合系统 ($K_d=5$)

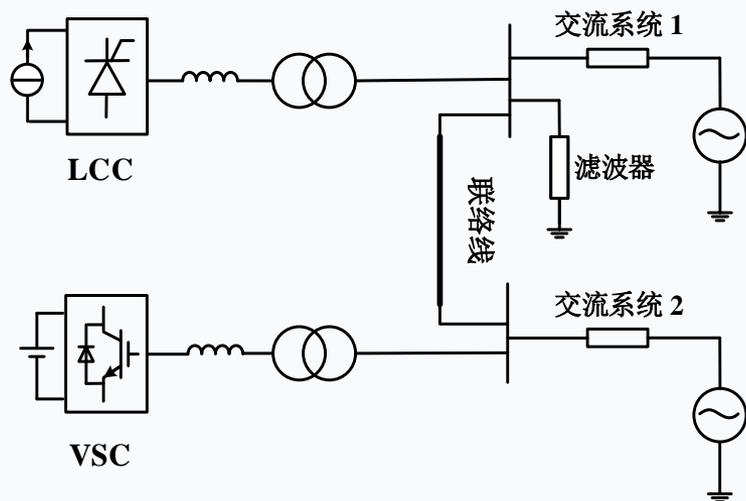
	单相接地故障		三相接地故障	
	临界电感 (H)	CFII (%)	临界电感 (H)	CFII (%)
无SCDC的混合系统	0.80	21.05	0.96	17.54
含SCDC的混合系统 ($K_d=5$)	0.76	22.16	0.93	18.11

结论

- 无论三相还是单相故障，含SCDC的混合系统CFII值都略高于无SCDC的混合系统
- 所提出的SCDC控制可以提高系统小信号稳定裕度，同时在一定程度上改善系统的暂态性能

4.3 案例3——混合多馈入直流系统

4.3.1 系统结构



系统参数:

额定容量: LCC 2000MW, VSC 1500MW

交流系统强度: $SCR_{LCC}=2$, $SCR_{VSC}=1.5$

联络线长度: 50km

控制方式:

LCC采用定关断角控制

VSC采用定有功功率及定交流母线控制

LCC(PLL₁)与VSC (PLL₂) 接口模型

$$\dot{v}'_{pccd} = v_{pccd} \cos(\theta_2 - \theta) + v_{pccq} \sin(\theta_2 - \theta)$$

$$\dot{v}'_{pccq} = v_{pccq} \cos(\theta_2 - \theta) - v_{pccd} \sin(\theta_2 - \theta)$$

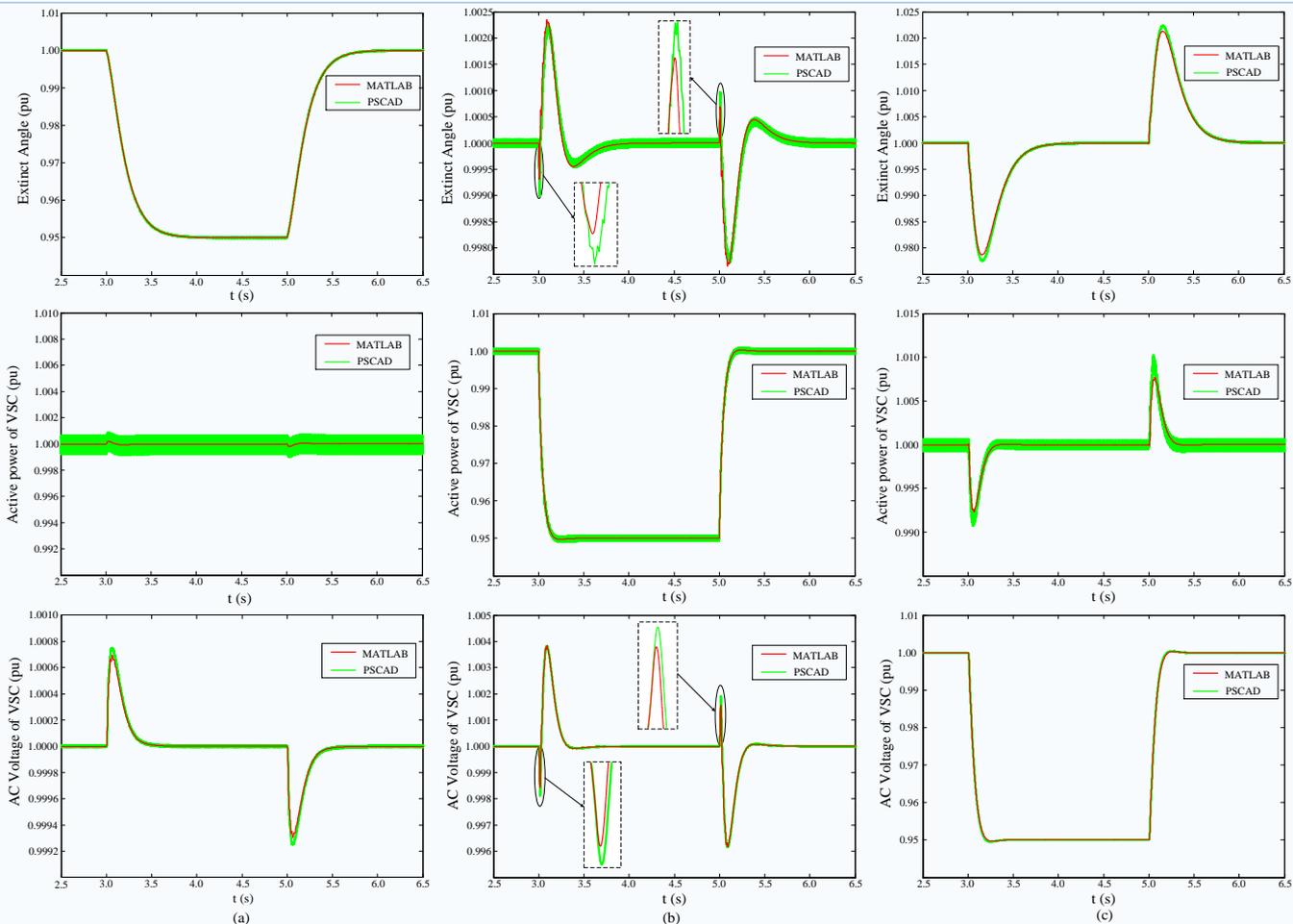
$$\dot{i}'_{d3} = i_{d3} \cos(\theta - \theta_2) + i_{q3} \sin(\theta - \theta_2)$$

$$\dot{i}'_{q3} = i_{q3} \cos(\theta - \theta_2) - i_{d3} \sin(\theta - \theta_2)$$

子系统		状态变量
LCC 子系统	交流系统1	$\Delta v_{pccd}, \Delta v_{pccq}, \Delta v_{cr2d}, \Delta v_{cr2q}, \Delta v_{cr3d}, \Delta v_{cr3q}, \Delta v_{cr4d}, \Delta v_{cr4q}, \Delta i_{Lr1d}, \Delta i_{Lr1q}, \Delta i_{Lr2d}, \Delta i_{Lr2q}, \Delta i_{sd}, \Delta i_{sq}$
	LCC 控制器	$\Delta \theta_1, \Delta \omega_1, \Delta X_Y$
VSC 子系统	交流系统2	$\Delta v_{d2}, \Delta v_{q2}, \Delta i_{1d}, \Delta i_{1q}, \Delta i_{1d}, \Delta i_{ds2}, \Delta i_{qs2}$
	VSC控制器	$\Delta \theta_2, \Delta \omega_2, \Delta X_{vd2m}, \Delta X_{vq2m}, \Delta X_{i1dm}, \Delta X_{i1qm}, \Delta X_{Pd2}, \Delta X_{V2}, \Delta X_{id}, \Delta X_{iq}$
联络线		$\Delta i_{d3}, \Delta i_{q3}$

4.3 案例3——混合多馈入直流系统

4.3.2 小信号模型验证



不同参数阶跃时SSM模型与EMT模型的动态响应对比

(a) γ 阶跃, (b) P_{VSC} 阶跃, (c) V_{VSC} 阶跃

4.3 案例3——混合多馈入直流系统

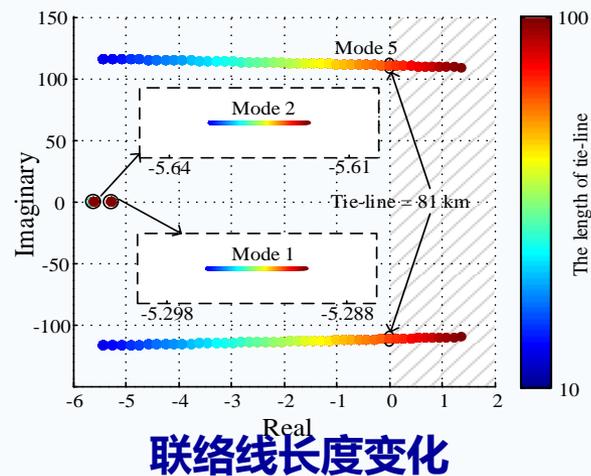
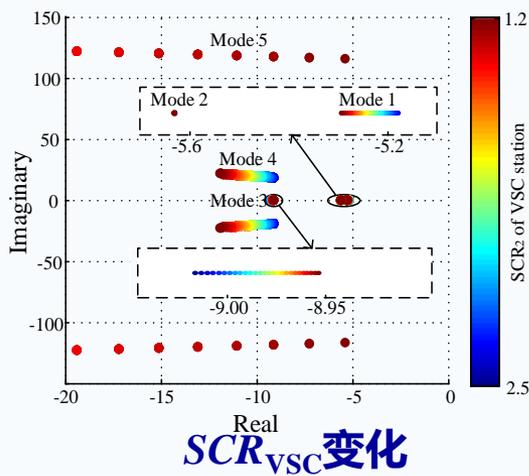
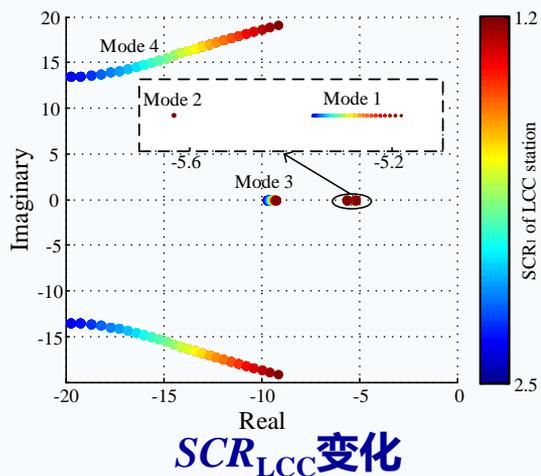
4.3.3 多直流控制参数优化设计

关键难点

- 多馈入直流控制参数数量多且交互耦合，难以综合优化设计；
- 弱交流系统下易引发耦合振荡失稳现象，然而关键控制参数辨识及优化困难。

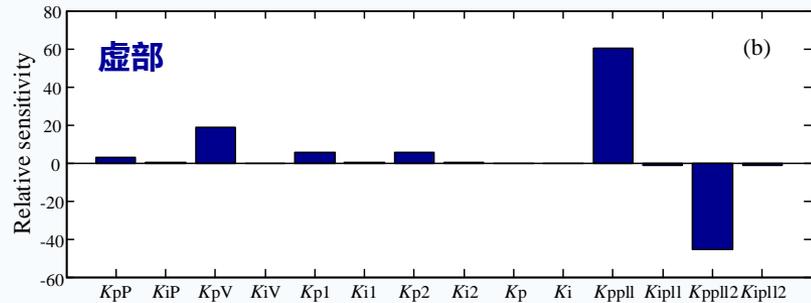
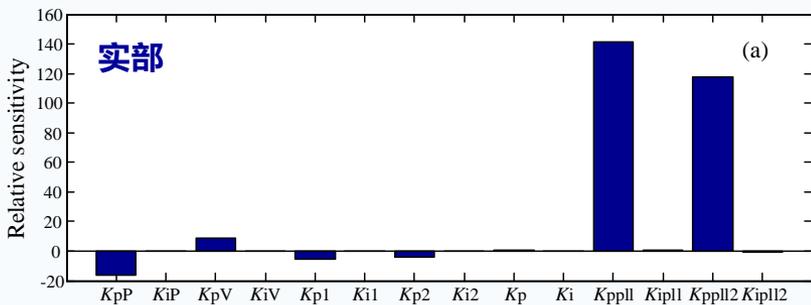
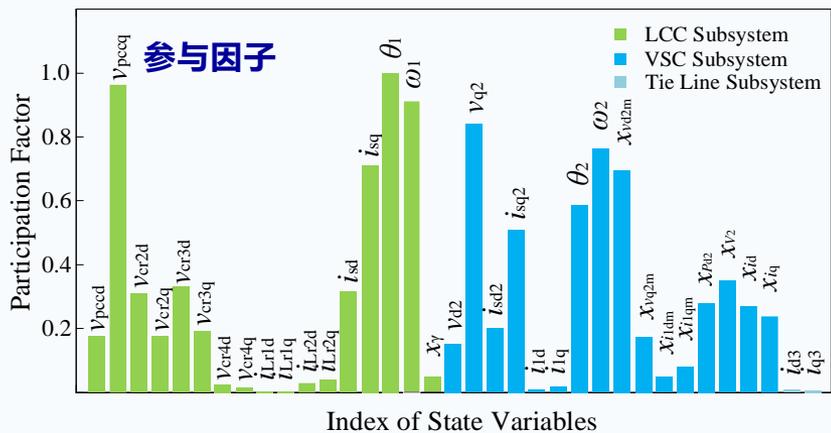
研究思路

- 构建多馈入系统状态空间模型，基于经典特征根理论和参与因子法获取易引发耦合振荡现象的主导模态及关键参与状态变量；
- 基于参数灵敏度法，辨识与系统阻尼比和稳定性最灵敏的控制参数及调节方向。

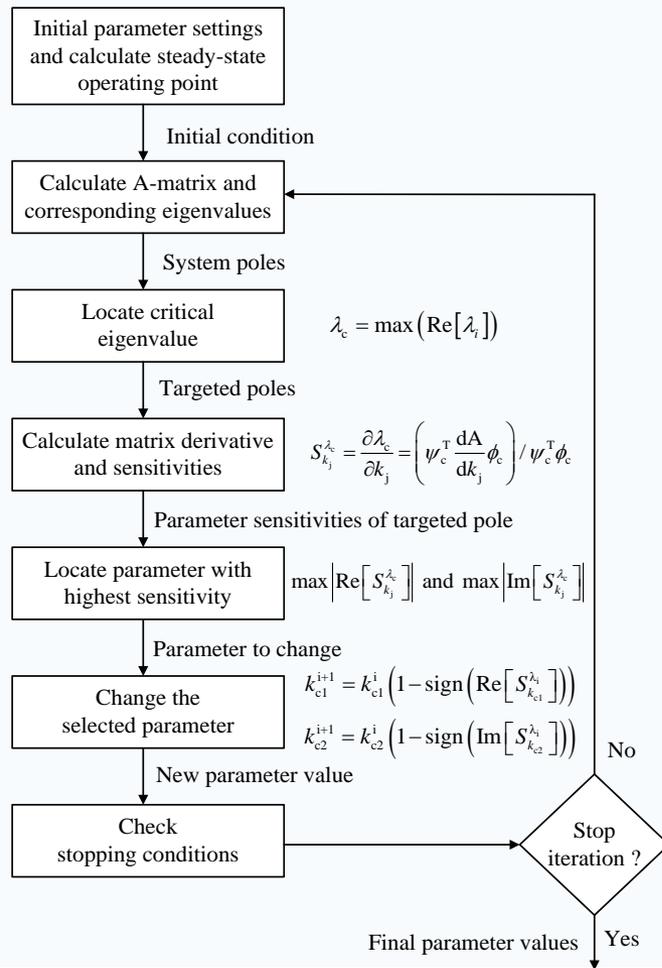


4.3 案例3——混合多馈入直流系统

4.3.3 多直流控制参数优化设计

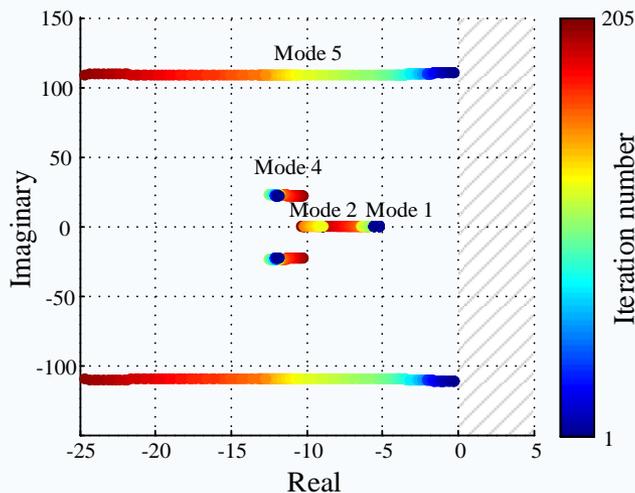


优化流程图

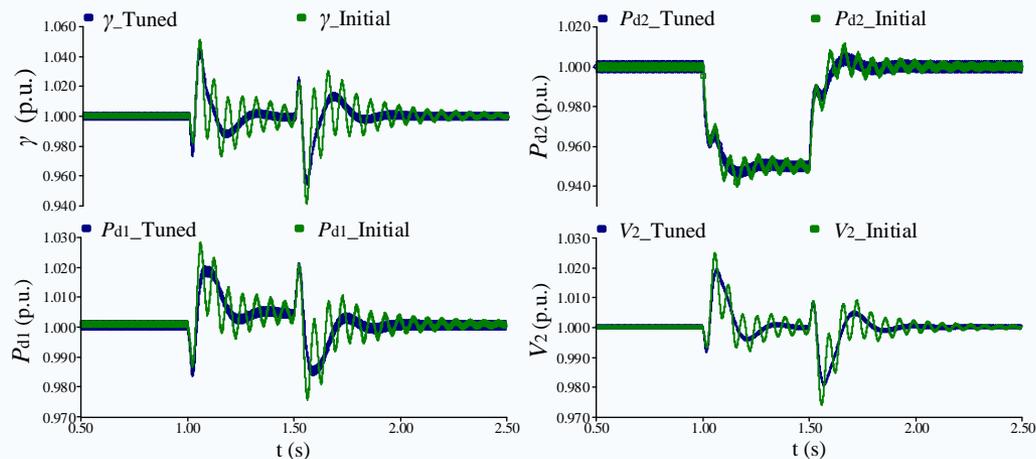


4.3 案例3——混合多馈入直流系统

4.3.3 多直流控制参数优化设计



优化过程中模态移动轨迹



优化前后结果对比（混合多馈入中VSC功率阶跃）

成效：

- 在提升系统稳定裕度的前提下，在一定程度上改善了动态性能。
- 该方法同样适用于其它类型交直流系统的控制器参数优化。

[1] Chunyi Guo, Wei Liu, Chengyong Zhao, Xiaojun Ni. Small-Signal Dynamics and Control Parameters Optimization of Hybrid MultiInfeed HVDC System. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 409-418.

[2] 刘炜, 郭春义, 赵成勇. 混合双馈入直流输电控制系统交互影响机理分析. 中国电机工程学报 (已录用)

团队在该领域发表的学术论文(2017年-2019年)

- [1]Chunyi Guo, Wei Liu, Chengyong Zhao, Reza Iravani. A Frequency-based Synchronization Approach for the VSC-HVDC Station Connected to a Weak AC Grid. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017, 32(3), 1460-1470.
- [2]C. Guo, J. Yang and C. Zhao. Investigation of Small-Signal Dynamics of Modular Multilevel Converter Under Unbalanced Grid Conditions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, no. 3, pp. 2269-2279, March 2019.doi: 10.1109/TIE.2018.2831193.
- [3]Chunyi Guo, Chengyong Zhao, Reza Iravani, Hui Ding, Xiaolin Wang. Impact of Phase-locked Loop on Small-Signal Dynamics of the LCC-HVDC Station. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2017, 11(5), 1311-1318.
- [4]C. Guo, W. Liu, J. Zhao and C. Zhao. Impact of control system on small-signal stability of hybrid multi-infeed HVDC system. *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, no. 19, pp. 4233-4239, 30 10 2018. doi: 10.1049/iet-gtd.2018.5087.
- [5]Ye Wang, Chunyi Guo and Chengyong Zhao. A Novel Supplementary Frequency-based Dual Damping Control for VSC-HVDC System under Weak AC Grid[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018, 103:212-223.
- [6]Ye Wang, Chengyong Zhao and Chunyi Guo. Comparison Study of Small-Signal Stability of MMC-HVDC System in Different Control Modes. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2019(111): 425-435.
- [7]Guo C Y, Zheng A R, Yin Z R, et al. Small-signal stability of hybrid multi-terminal HVDC system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2019, 109: 434-443.
- [8]Chunyi Guo, Wei Liu, Chengyong Zhao, Xiaojun Ni. Small-Signal Dynamics and Control Parameters Optimization of Hybrid MultiInfeed HVDC System[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2018, 409-418.
- [9]Chunyi Guo , Zihan Yin, Chengyong Zhao, and Reza Iravani. Small-Signal Dynamics of Hybrid LCC-VSC HVDC Systems. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2018, 362-372.

团队在该领域发表的学术论文

- [10]Chunyi Guo, Wen Jiang, Chengyong Zhao, Small-signal instability and supplementary coordinated damping-control of LCC-HVDC system with STATCOM under weak AC grid conditions, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 104, 2019, Pages 246-254, ISSN 0142-0615.
- [11]Anran Zheng, Chunyi Guo, Peng Cui, Wen Jiang and Chengyong Zhao, Comparative Study on Small-Signal Stability of LCC-HVDC System With Different Control Strategies at the Inverter Station[J]. *IEEE Access*, vol. 7, pp. 34946-34953, 2019.
- [12]刘炜,郭春义,赵成勇.混合双馈入直流输电控制系统交互影响机理分析[J]. *中国电机工程学报*,2019,39(13): 3757-3766.
- [13]郭春义,蒋雯,殷子寒,赵成勇.弱交流电网下含STATCOM的LCC-HVDC系统的附加阻尼协调控制方法[J]. *中国电机工程学报*,2018(20):5957-5964.
- [14]郭春义,蒋雯,赵成勇,刘炜.含STATCOM的LCC-HVDC系统的动态模型及小信号稳定性研究[J]. *中国电机工程学报*,2018,38(14):4046-4055+4310.
- [15]郭春义,蒋雯,郑安然,赵成勇,刘炜.弱交流系统下STATCOM对LCC-HVDC小干扰稳定裕度的影响研究[J]. *中国电机工程学报*,2018,38(19):5679-5686+5925.
- [16]郭春义, 殷子寒, 王焯, 赵成勇. LCC-MMC型混合直流输电系统小干扰动态模型[J]. *中国电机工程学报*. 2018, Vol. 38 (16): 4705-4714.
- [17]郭春义, 殷子寒, 王焯, 赵成勇.一种适用于MMC-HVDC联接弱受端交流电网的附加频率-电压阻尼控制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2018, Vol. 38 (17): 5020-5028.
- [18]郭春义,殷子寒,赵成勇.MMC-HVDC系统在整流和逆变工作模式下的小干扰稳定性对比研究[J]. *中国电机工程学报*,2018,38(24):7349-7358+7461.
- [19]郭春义,殷子寒,王焯,赵成勇.LCC-MMC型混合直流输电系统小干扰稳定性研究[J]. *中国电机工程学报*,2019,39(04):1040-1052.
- [20]郭春义, 赵剑, 刘炜, 赵成勇. 一种适用于混合多馈入直流输电系统的附加虚拟电阻阻尼控制方法. *中国电机工程学报*, 2019, 39(12): 3400-3408.

团队在该领域发表的学术论文

- [21]郭春义,宁琳如,刘炜,赵成勇,刘栋. 基于频率同步控制的VSC-HVDC在弱交流系统下的动态特性研究[J]. *中国电机工程学报*,2017,37(15):4344-4354.
- [22]王焯,宁琳如,赵成勇,郭春义.VSC-HVDC联接弱交流系统下的新型附加频率阻尼控制方法[J]. *中国电机工程学报*,2018,38(10):2989-2998+3149.
- [23]刘炜, 郭春义, 赵成勇, 李承昱. 一种适用于MMC-HVDC连接极弱受端交流电网的功率阻尼同步控制方法. *中国电机工程学报*, 2016,36(17), pp: 4647-4655.
- [24]崔鹏,郭春义,赵成勇.基于二次型指标和蒙特卡洛方法的含STATCOM的LCC-HVDC系统的控制参数优化[J]. *中国电机工程学报*. (已录用)
- [25]刘炜, 郭春义, 杨硕, 赵成勇. 混合双馈入直流输电系统的交互作用机理研究 Part I: 等值单馈入直流输电模型. *中国电机工程学报*. (已录用)
- [26]刘炜, 郭春义, 杨硕, 赵成勇. 混合双馈入直流输电系统的交互作用机理研究 Part II: 小干扰稳定裕度分析. *中国电机工程学报*. (已录用)
- [27]王一凡;赵成勇;郭春义.直驱风电场经柔直并网系统的单输入单输出传递函数模型及其稳定性分析[J]. *中国电机工程学报*. (已录用)
- [28]郑安然,郭春义,殷子寒,赵成勇.提高弱交流系统下混合多端直流输电系统小干扰稳定性的控制参数优化调节方法[J/OL]. *电工技术学报*:1-10[2019-08-22].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2188.TM.20190809.1348.002.html>. (网络发表)
- [29]王燕宁,郭春义,郑安然,殷子寒.极弱受端交流系统下LCC-MMC型混合直流输电系统的附加频率-电压阻尼控制[J/OL]. *电工技术学报*:1-12[2019-08-22].<https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.190525>. (网络发表)
- [30]王一凡,赵成勇,郭春义.双馈风电场孤岛经模块化多电平换流器直流输电并网系统小信号稳定性分析与振荡抑制方法[J]. *电工技术学报*,2019,34(10):2116-2129.

《直流输电系统的小信号稳定性》

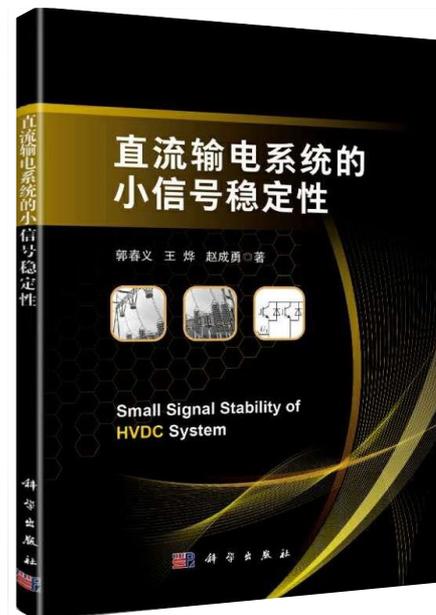
绪论

上篇 直流输电系统的小信号模型

- 第2章 LCC-HVDC系统的小信号模型
- 第3章 VSC-HVDC系统的小信号模型
- 第4章 混合直流输电系统的小信号模型
- 第5章 柔性直流电网的小信号模型

下篇 直流输电系统的小信号稳定性分析

- 第6章 LCC-HVDC系统的小信号稳定性
- 第7章 VSC-HVDC系统的小信号稳定性
- 第8章 LCC-MMC型混合直流输电系统的小信号稳定性
- 第9章 混合多端直流输电系统的小信号稳定性
- 第10章 混合多馈入直流输电系统的小信号稳定性
- 第11章 含STATCOM的LCC-HVDC系统的小信号稳定性
- 第12章 柔性直流电网的小信号稳定性





谢谢, 请各位专家批评指正!