

构网控制和柔直输电技术未来发展

主讲人：张利东

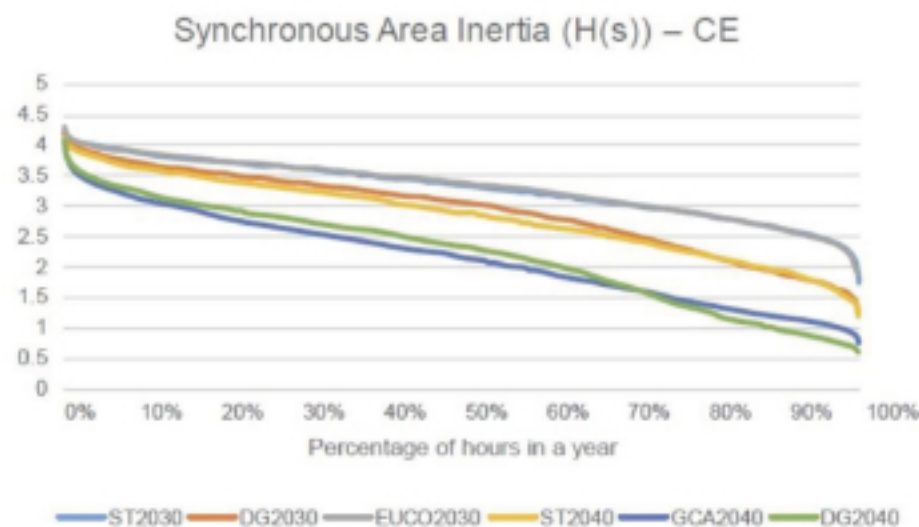
工作单位：南网科研院

时间：2023年10月24号



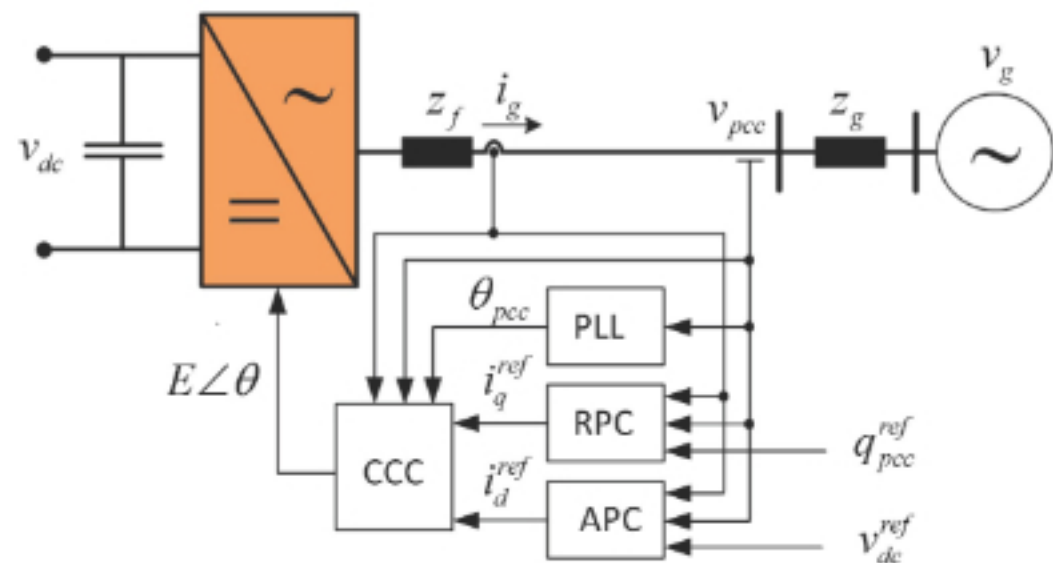
对具有构网能力的网接变流器的需求

- 电力系统安全运行依赖于同步电机的一些特性，比如
 - 自同步
 - 惯性和快速频率反应
 - 系统强度支持
 - 使用PSS来稳定低频振荡
- 发电构成变化 同步发电机逐步退出，而新能源发电比例在增加
- 新能源发电比如风电和光伏都是通过变流器与系统连接
- 目前电网里大多数网接变流器还在采用跟网控制模式，不具有电网支撑能力。

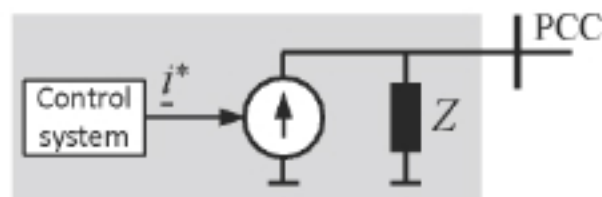


Source: ENTSO-E

跟网型控制器

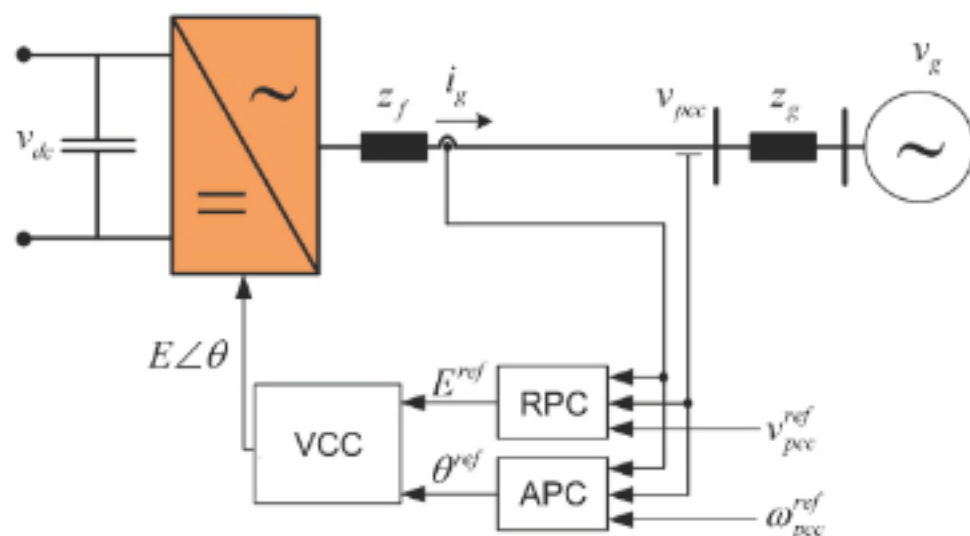


跟网型控制器典型结构

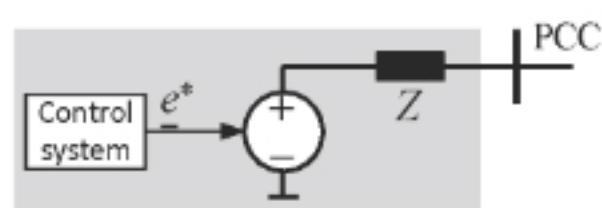


跟网型控制简化结构

构网型控制器



构网型控制器典型结构



构网型控制简化结构

APC = 有功功率控制器
RPC = 无功功率控制器

构网变流器基本概念：

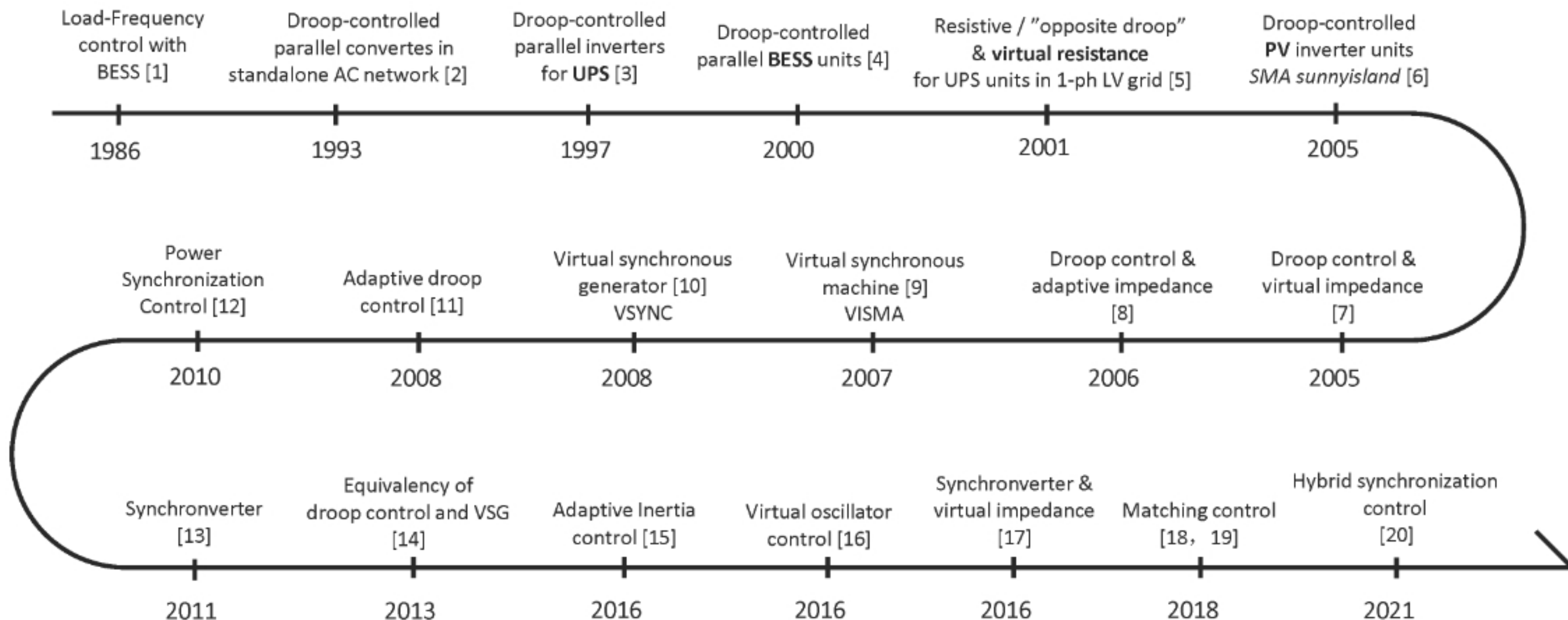
- 和同步机类似的特性
- 通过产生交流电压” 构建一个电网”
- 不用通过锁相环与电力网实现同步

现存有很多不同的构网控制器

- 不同的优缺点
- 没有最优的控制设计
- 应用场景决定了控制器的选择

这方面的研究还在进行中！

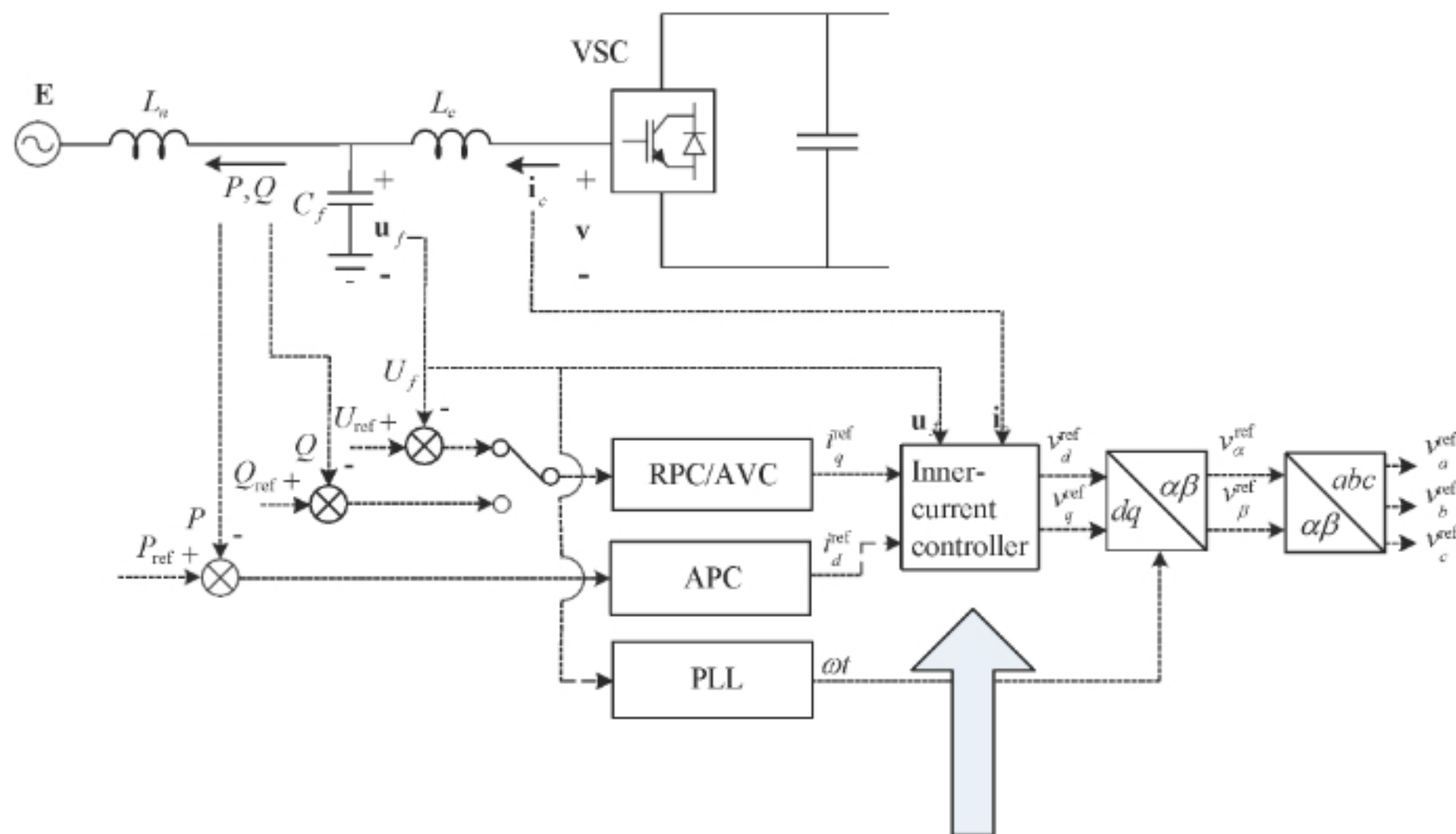
构网控制器的发展历史



Source: M. Schweizer, Corporate Research, ABB Switzerland Ltd.

- 增强型 STATCOM
 - 日立能源- SVC Light enhanced
 - 西门子 - SVC Plus
- 高压直流
 - ABB, Caprivi Link
 - 国网和南瑞, 张北直流网
- 风力发电
 - An existing 69 MW wind farm consisting of Type 4 full converter wind turbines were modified to GFM VSM47
- 太阳能发电
 - In Great Britain, controls of an existing 69 MW wind farm consisting of Type 4 full converter wind turbines were modified to GFM VSM47 .
 - Droop-based GFM solar PV models have been applied to investigate GFM frequency support for the Hawaiian islands of Oahu 48 and Maui. 49
 - ABB, GE, SMA, TMEIC
- 构网型储能
 - The VSM controlled Dalrymple Substation Battery 42 GFM project in South Australia started commercial operation in Dec. 2018
 - 在2021年8月澳大利亚投入使用的250MW/250 MWh储能系统为全球最大构网型储能系统项目
 - Hawaiian Electric Company (HECO) plans to implement wide-spread GFM BESS technology throughout their island power systems by the year 2023.
- 构网型负荷
 - Resistive loads in electric heaters (or other resistive loads).
 - 工业用电机
 - Electric vehicle (EV) chargers.
 - Hydrogen (H2) electrolyzers.

- 传统的矢量电流控制最初应用在交流可调速电机控制，其中电机的力矩和速度可以完全解耦控制。
- 早期的网接变流器都沿用了这一解耦控制思想来对变流器的有功和无功实现解耦控制。
- 这种控制思想本质上是让网接变流器变成一个跟随电网的电流源负荷。如果连接电网很弱时，这种控制的难度急剧增加。



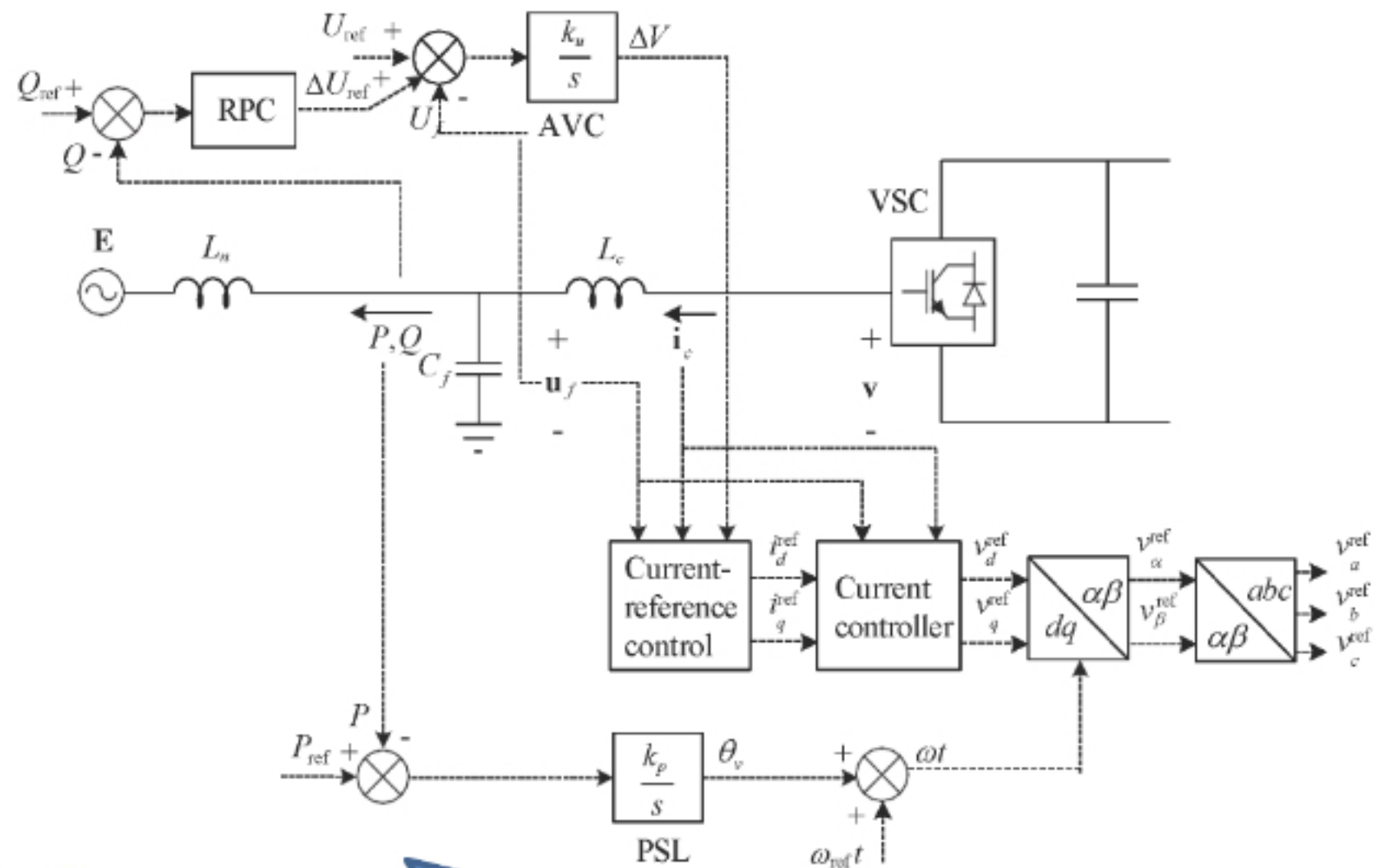
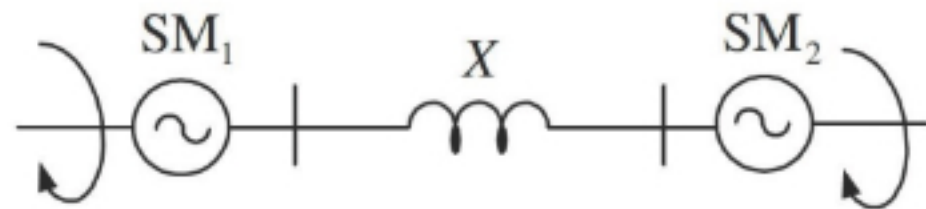
Inner current controller:

$$\mathbf{v} = \alpha_c L_c (\mathbf{i}_{ref} - \mathbf{i}_c^c) + j\omega_1 L_c \mathbf{i}_c^c + H_{LP}(s) \mathbf{u}_f^c$$

功率同步控制（构网控制）

- 功率同步控制的核心是模拟发电机摇摆公式，传统的锁相环被功率同步环所取代。
- 功率同步控制实现了对系统电压的直接支撑。
- 构网控制可以更自然的模拟同步机的虚拟阻抗，惯性，阻尼等特性。
- 在新能源占比增加的新型电力系统，具有构网能力的网接变流器可以替代同步发电机的功能。

$$J_1 \frac{d\omega_{m1}}{dt} = T_{m1} - T_{e1} \quad J_2 \frac{d\omega_{m2}}{dt} = T_{e2} - T_{m2}$$



功率同步控制故障穿越

- 功率同步控制基本结构
 - 同步环节实现矢量控制dq轴锁相和功率控制，以及惯性阻尼模拟
 - 电压环节实现VSC电压直接控制
 - 限流环节实现故障限流穿越
- 备用锁相环
 - 变流器没有解锁前
 - 故障限流期间

$$\text{VSC voltage vector:}$$

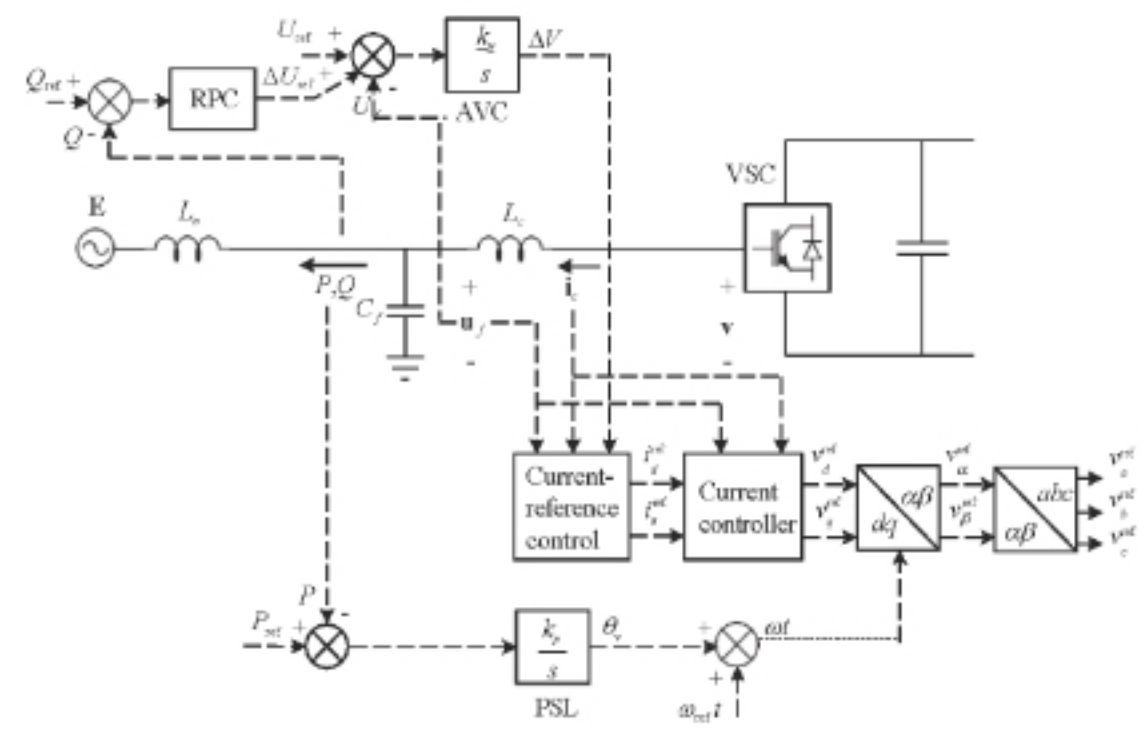
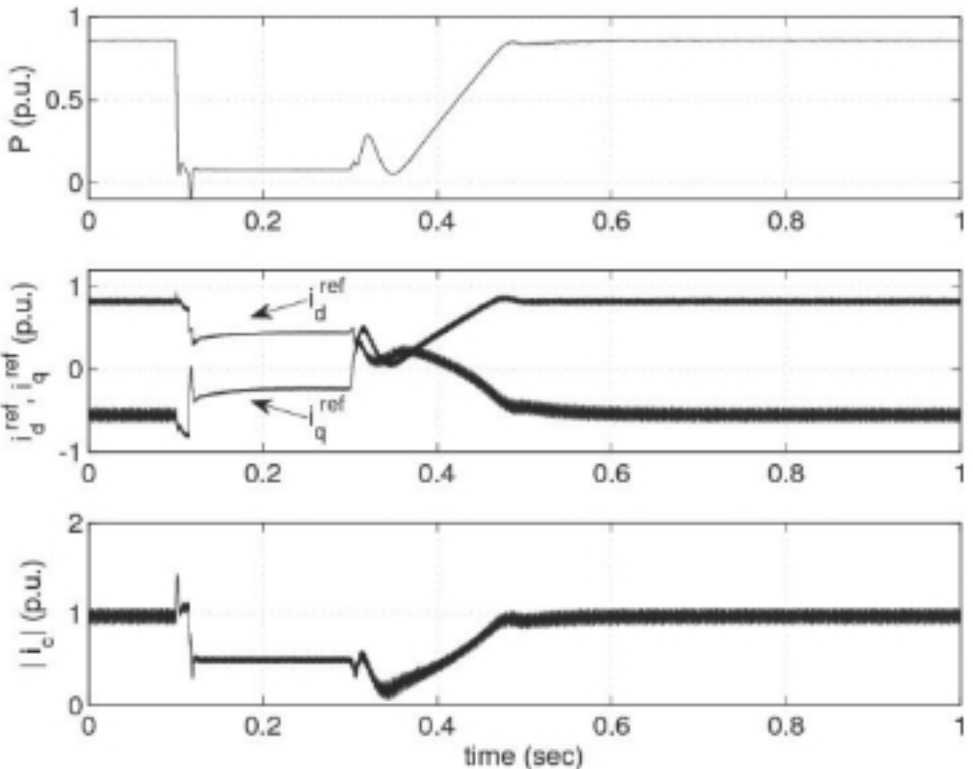
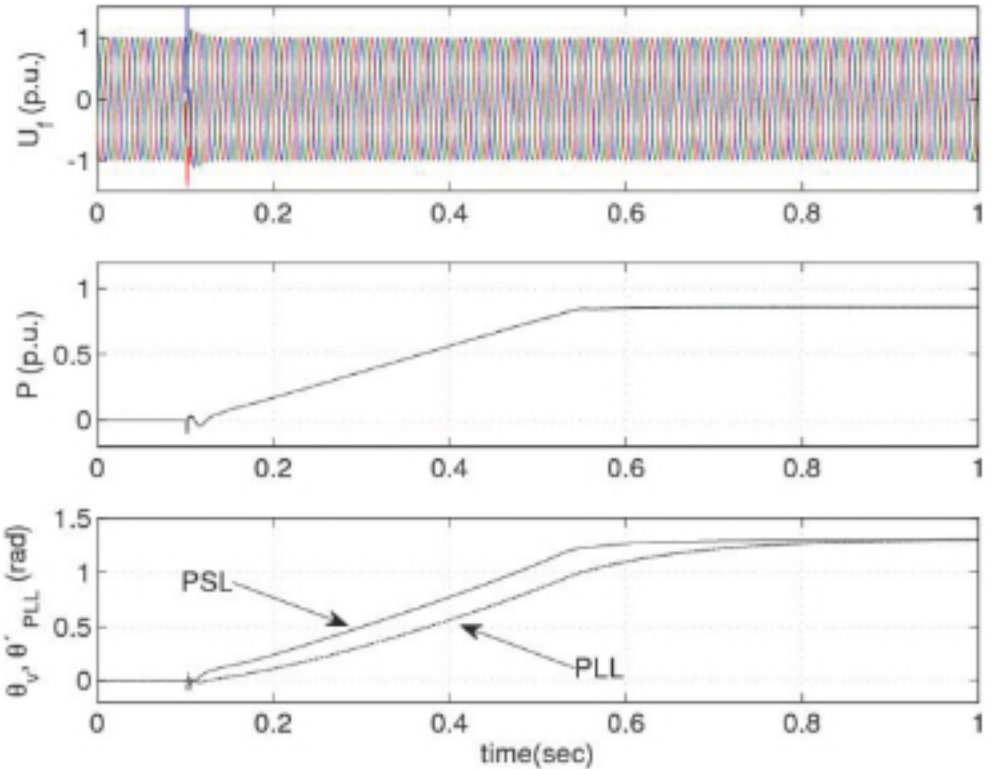
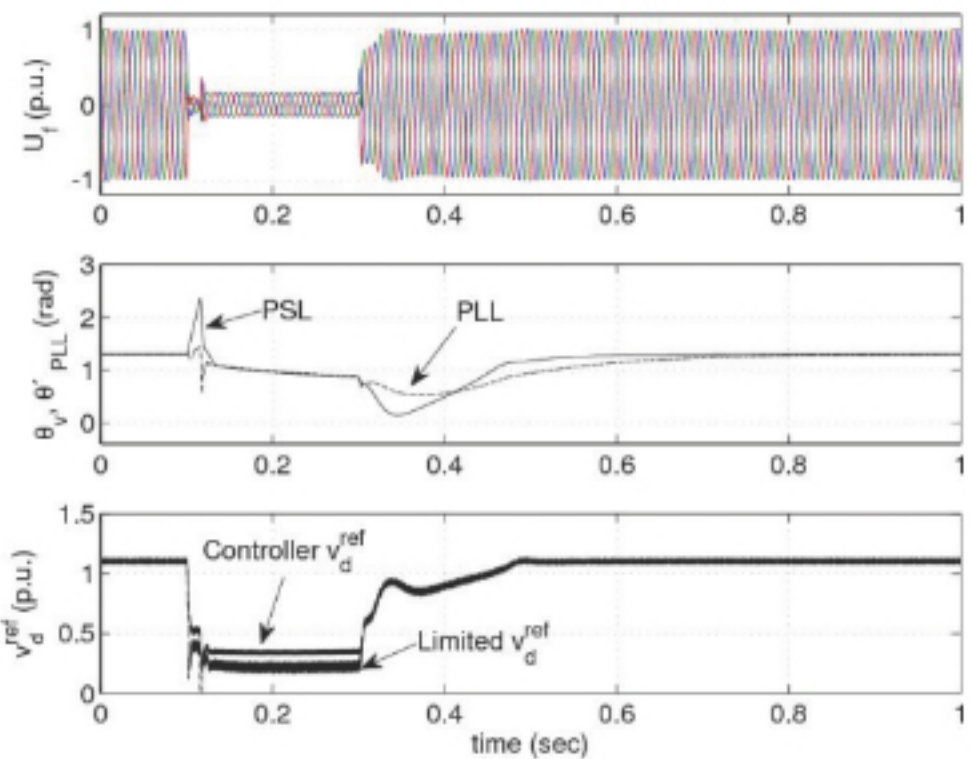
$$\mathbf{v} = (V_0 + \Delta V) - H_{HP}(s)\mathbf{i}_c^c - H_{LP}(s)\mathbf{u}_f^c - j\omega_1 L_c \mathbf{i}_c^c$$

$$\text{Current reference control:}$$

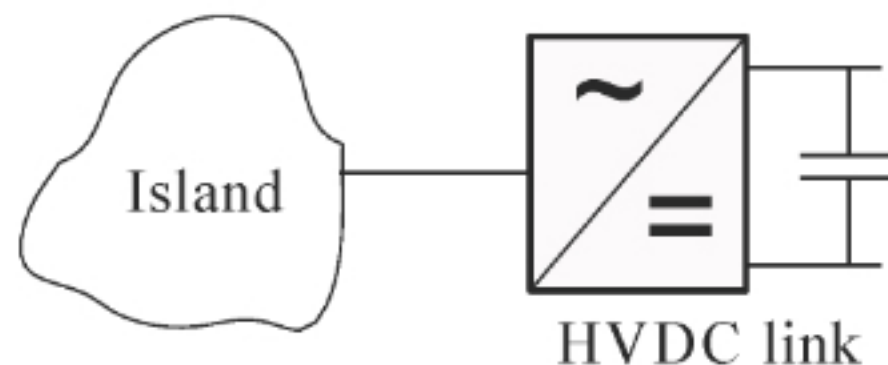
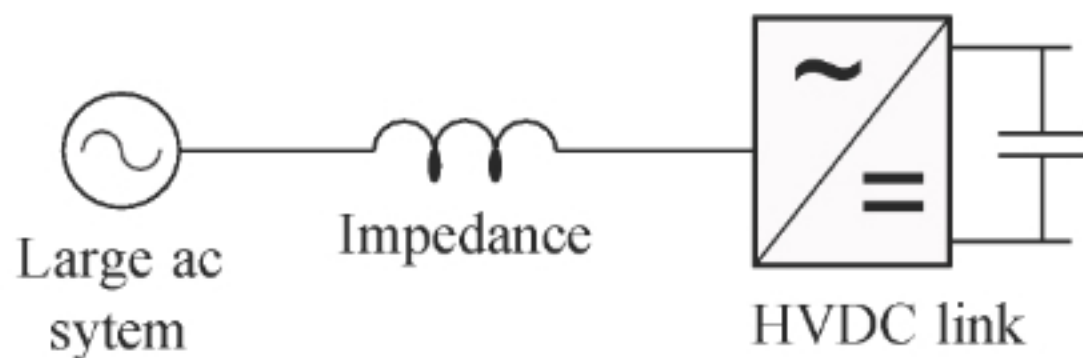
$$\mathbf{i}_{ref}^c = \frac{1}{\alpha_c L_c} [(V_0 + \Delta V) - H_{HP}(s)\mathbf{i}_c^c - H_{LP}(s)\mathbf{u}_f^c - j\omega_1 L_c \mathbf{i}_c^c] + \mathbf{i}_c^c$$

$$\text{Current controller:}$$

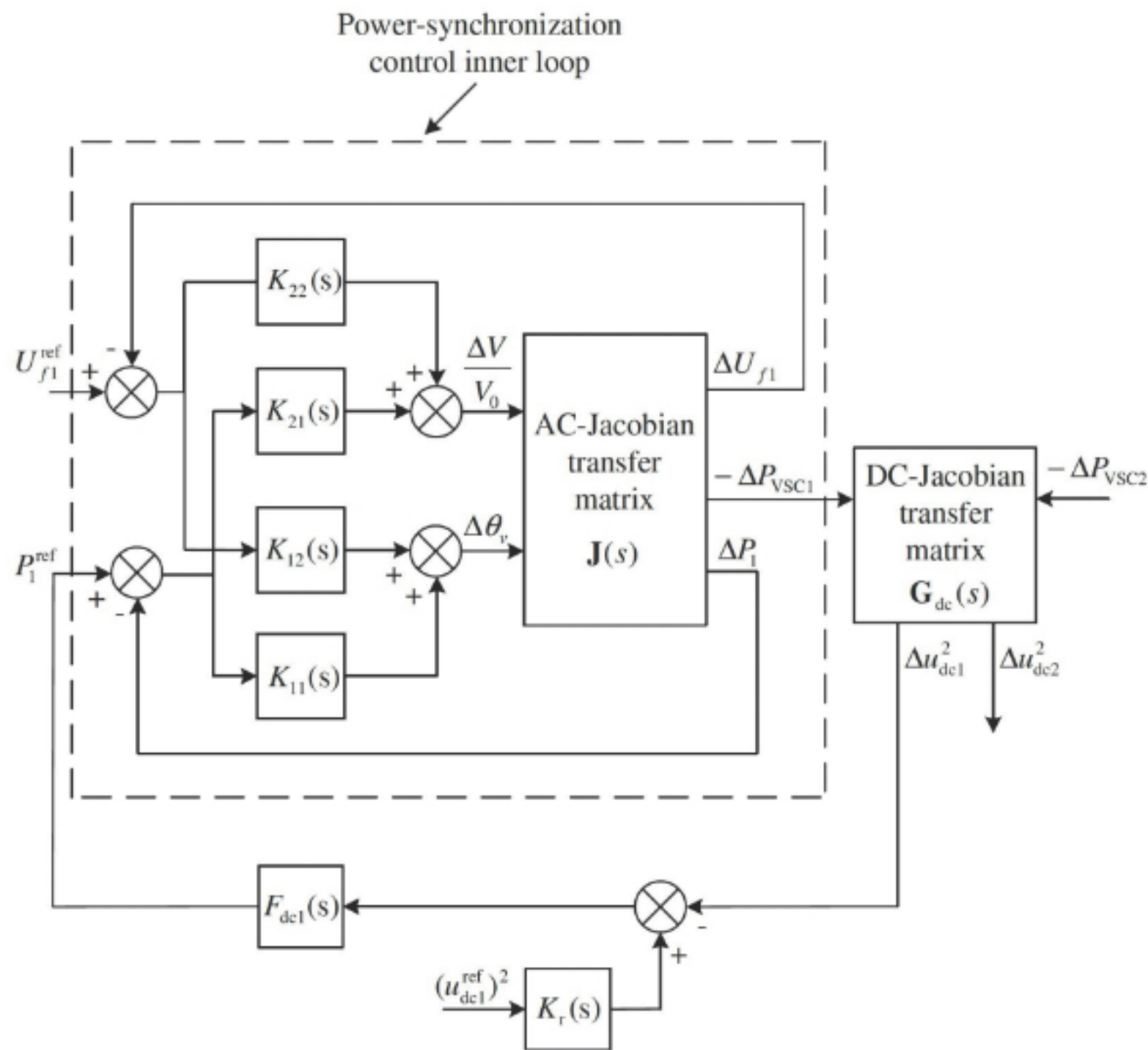
$$\mathbf{v} = \alpha_c L_c (\mathbf{i}_{ref}^c - \mathbf{i}_c^c) + j\omega_1 L_c \mathbf{i}_c^c + H_{LP}(s)\mathbf{u}_f^c$$



- 交流系统的等效阻抗相对于直流连接点的直流功率较高.
- 短路比 (SCR)
 - 交流系统的短路容量/ 直流线路的额定功率
 - 弱系统 $SCR < 3$.
- 交流系统的机械惯量相对直流注入功率较低
- 等效惯量常数
 - $H_{dc} = H \times \text{所有旋转电机的额定功率} / \text{直流的额定功率}$
 - 对常规直流 H_{dc} 至少要求在 2.0 到 3.0。



- 系统建模
 - 雅可比转移矩阵建模法可以清晰地给出被控对象的特性。
- 针对弱系统的控制架构
 - 在弱系统，交流雅可比矩阵的非对角元素会增加，当系统没有明确的惯性需求，构网控制可以采用多变量反馈控制架构以提高响应速度。
- 控制器设计基本限制
 - 交流雅可比矩阵的零点和直流雅可比矩阵的极点都对控制器的设计有着根本的限制。
- 电压控制模式
 - 在弱系统连接中，电压控制模式要优于无功控制模式。



柔直连接高阻抗弱系统的基本限制

- 交流雅克比矩阵的根本限制是右边的零点，
 - 当柔直传输功率增加，零点向原点移动
- 反馈控制器的响应速度会受到零点的限制。

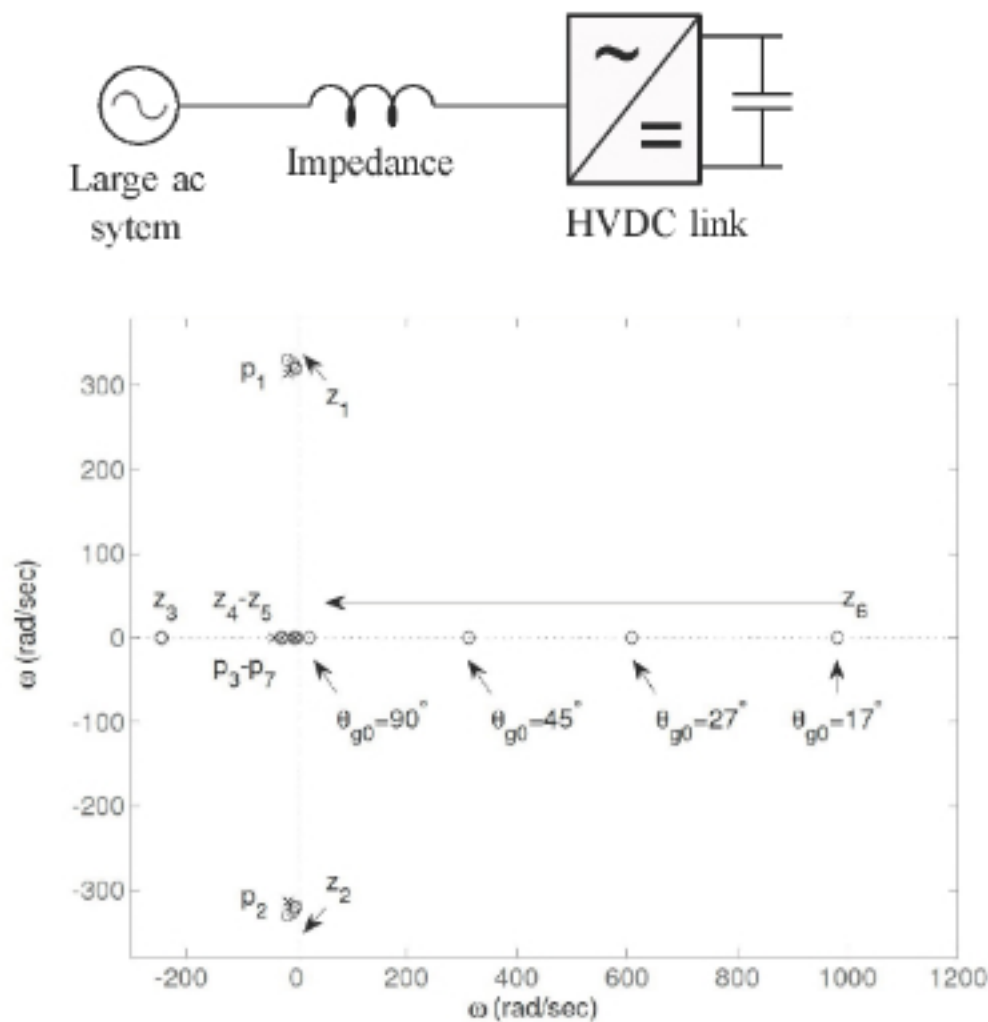


Fig. 6.17 Loci of the transmission zeros of the Jacobian transfer matrix for the synchronous generator with increased load angles.

- 直流雅克比矩阵的根本限制是右边的极点
 - 当柔直线路长度增加且传输功率增加，极点会向右侧移动
 - 反馈控制器的响应速度必须足够快来稳定系统

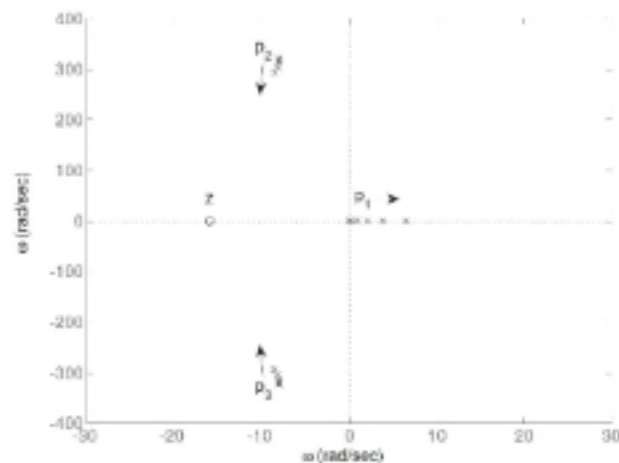
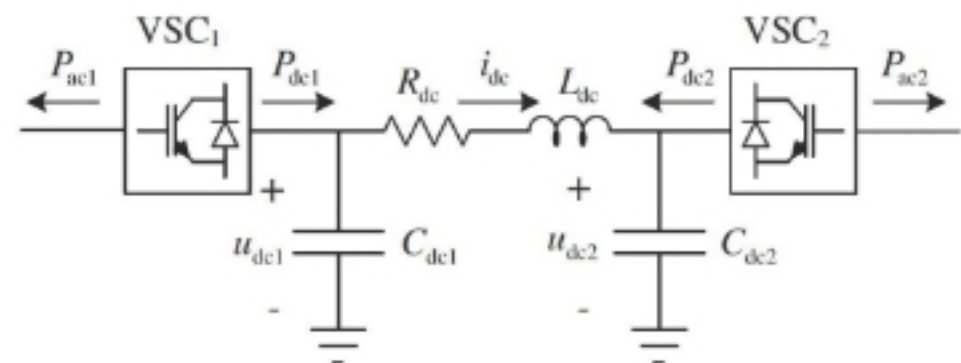


Fig. 4.26 Root-loci of $G_{dc}(s)$ regarding variations of P_{dc10} from 0.0 p.u. to 1.0 p.u.

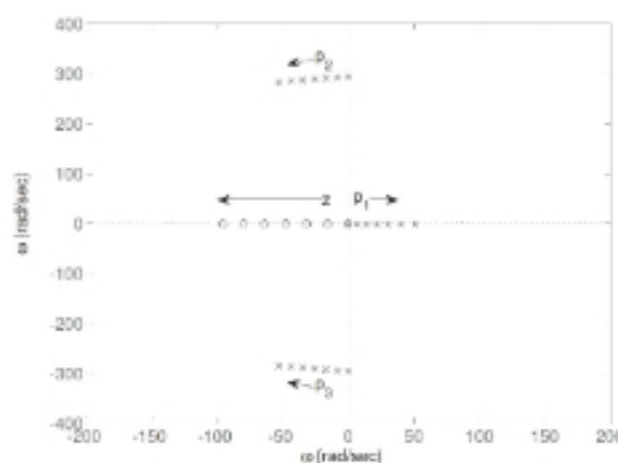
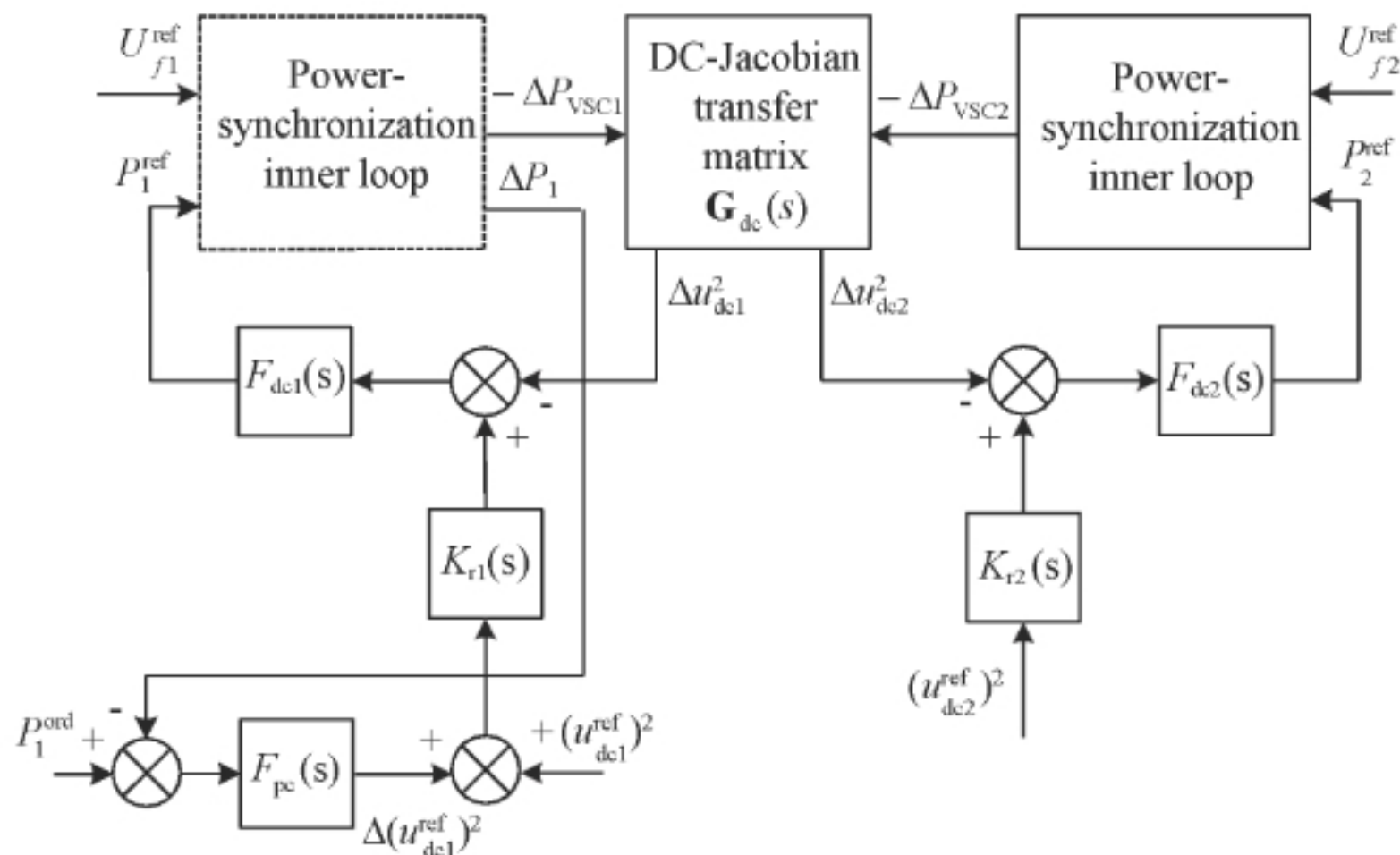
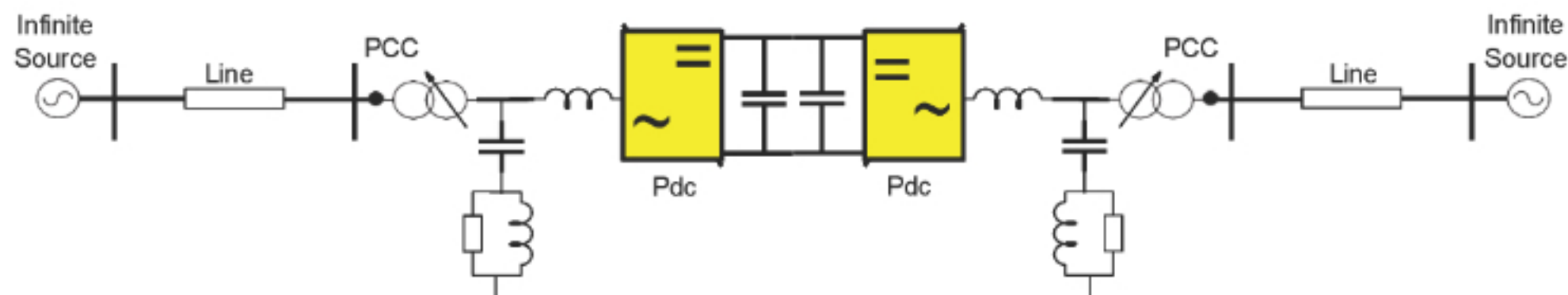


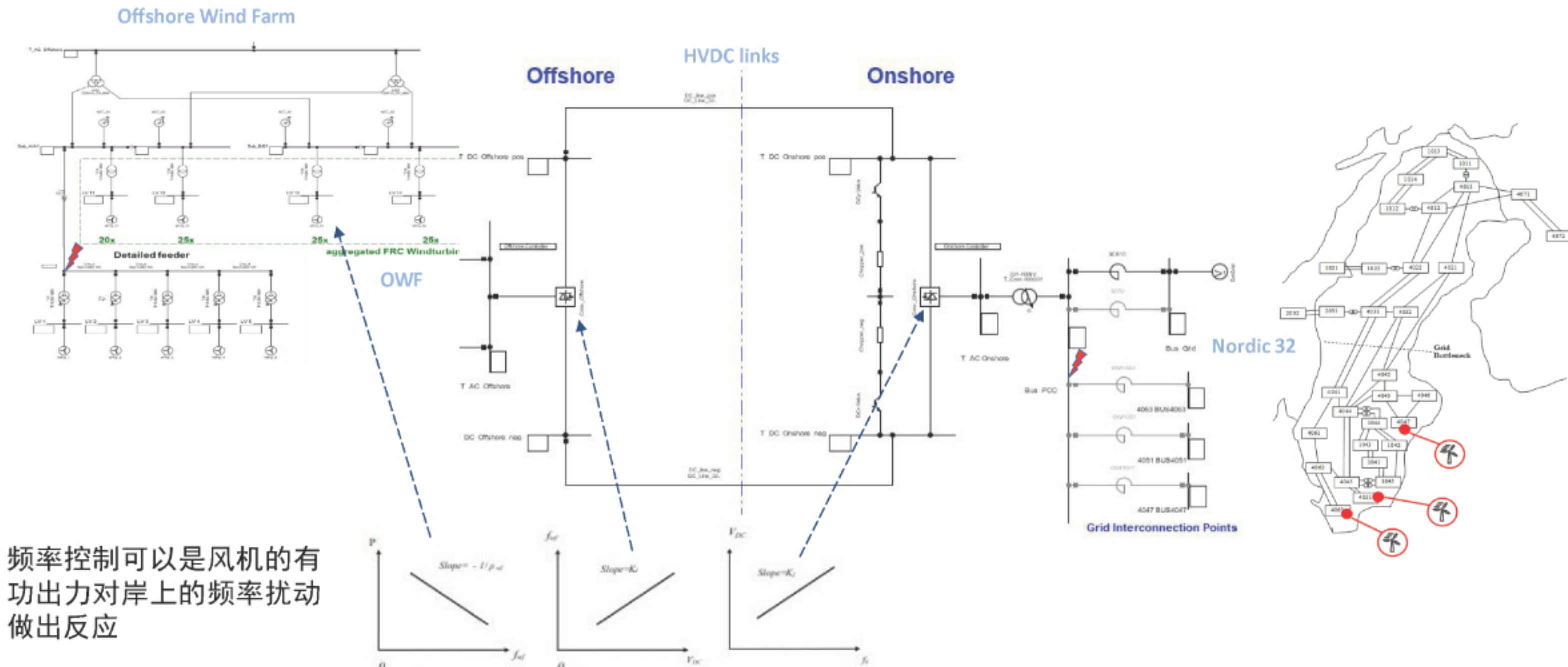
Fig. 4.27 Root-loci of $G_{dc}(s)$ regarding variations of R_{dc} from 0.0 p.u. to 0.24 p.u. Initial conditions: $P_{dc10} = 1.0$ p.u., $u_{dc10} = 1.0$ p.u.

构网柔直应用1：使用功率同步控制连接两个极弱交流系统

- 使用功率同步控制的柔直能向系统直接提供电压支撑，所以对连接系统的短路比没有要求，非常适合对极弱系统的互连。
- 传统矢量电流控制在系统短路比低于1.5时，控制系统就失去稳定。ABB在南部非洲的连接纳米比亚和赞比亚的Caprivi Link 使用了功率同步控制，控制器在送端短路比1.2，受端1.0的工况下实现稳定运行。



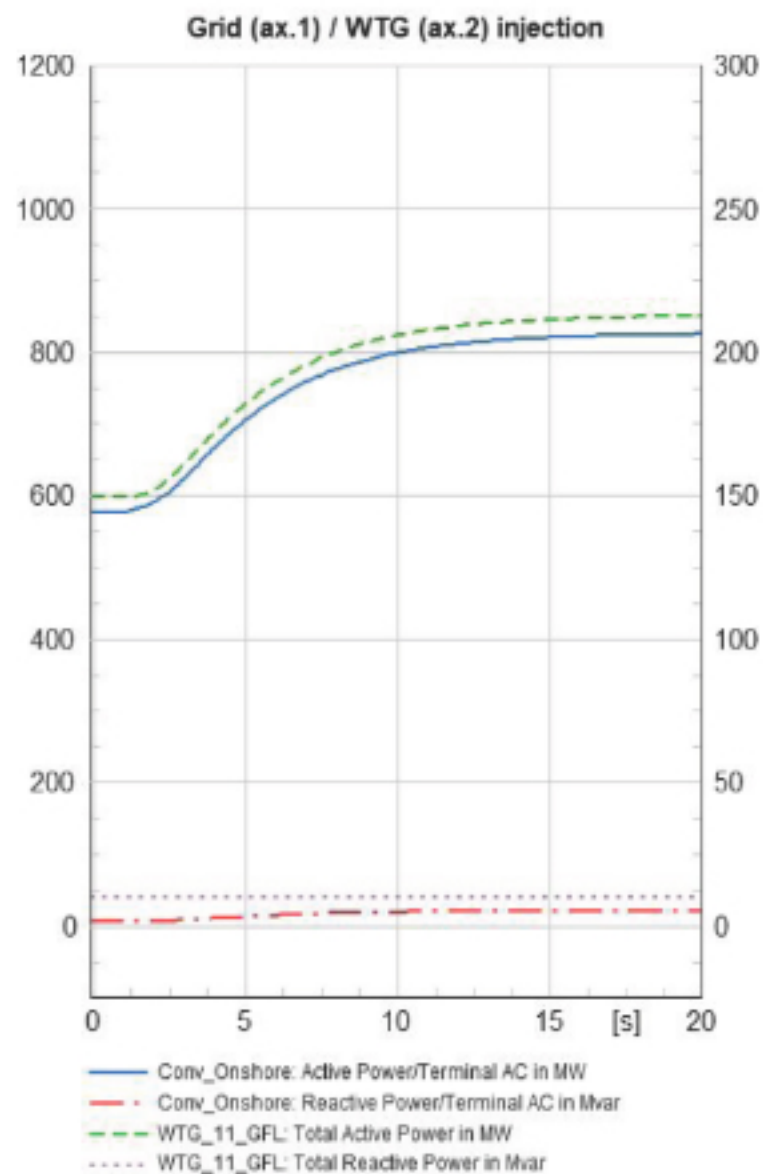
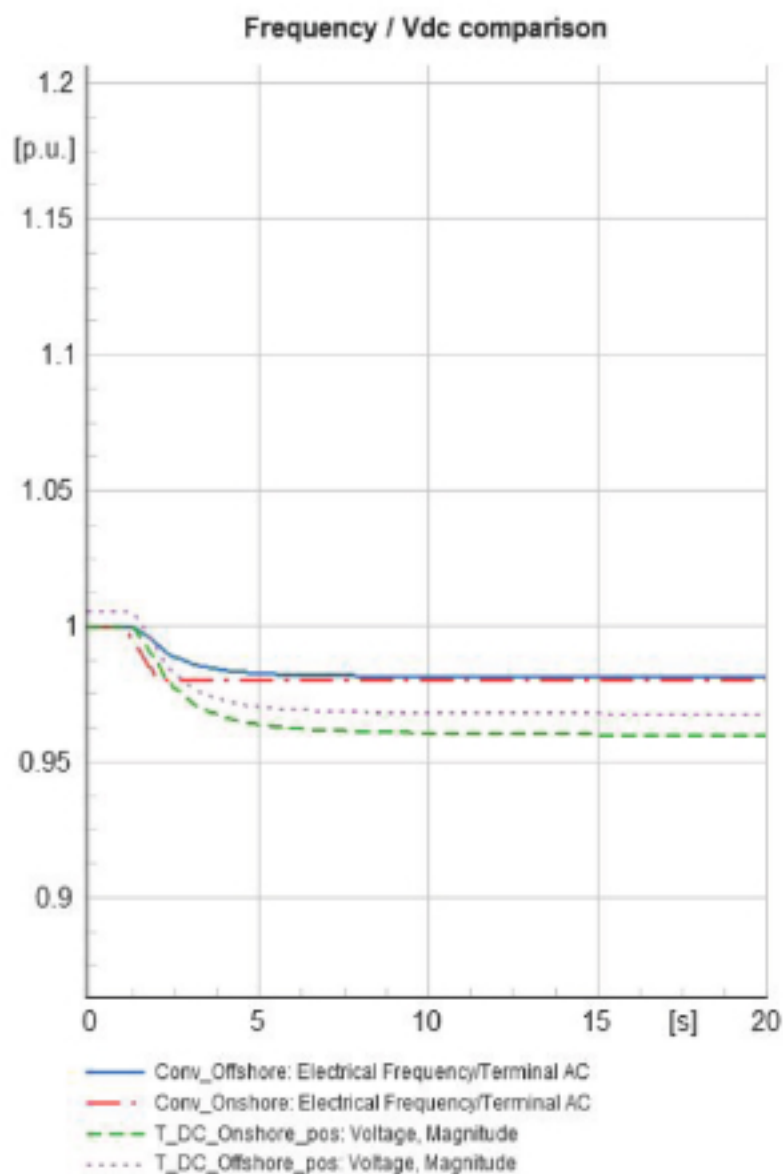
构网型柔直连接远海风场



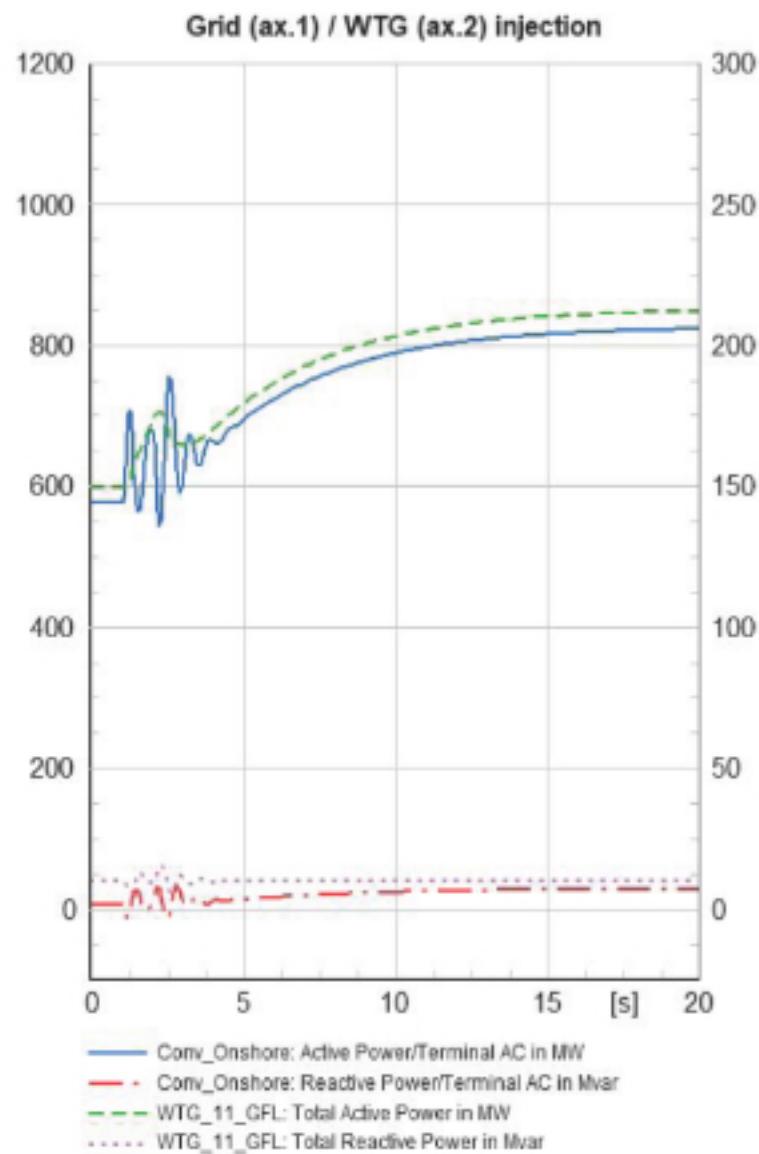
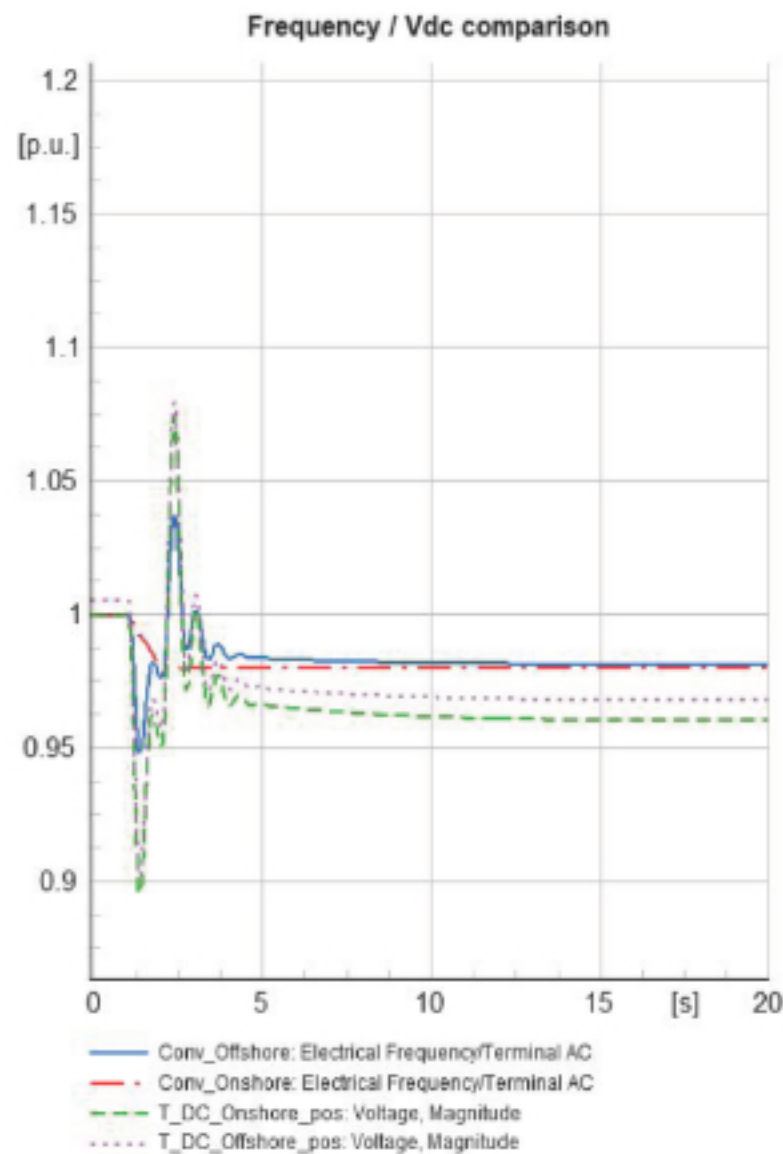
直流连接的远海风场与Nordic 32 系统连接

风机和柔直的动态交互：跟网型风机

标准跟网型柔直系统



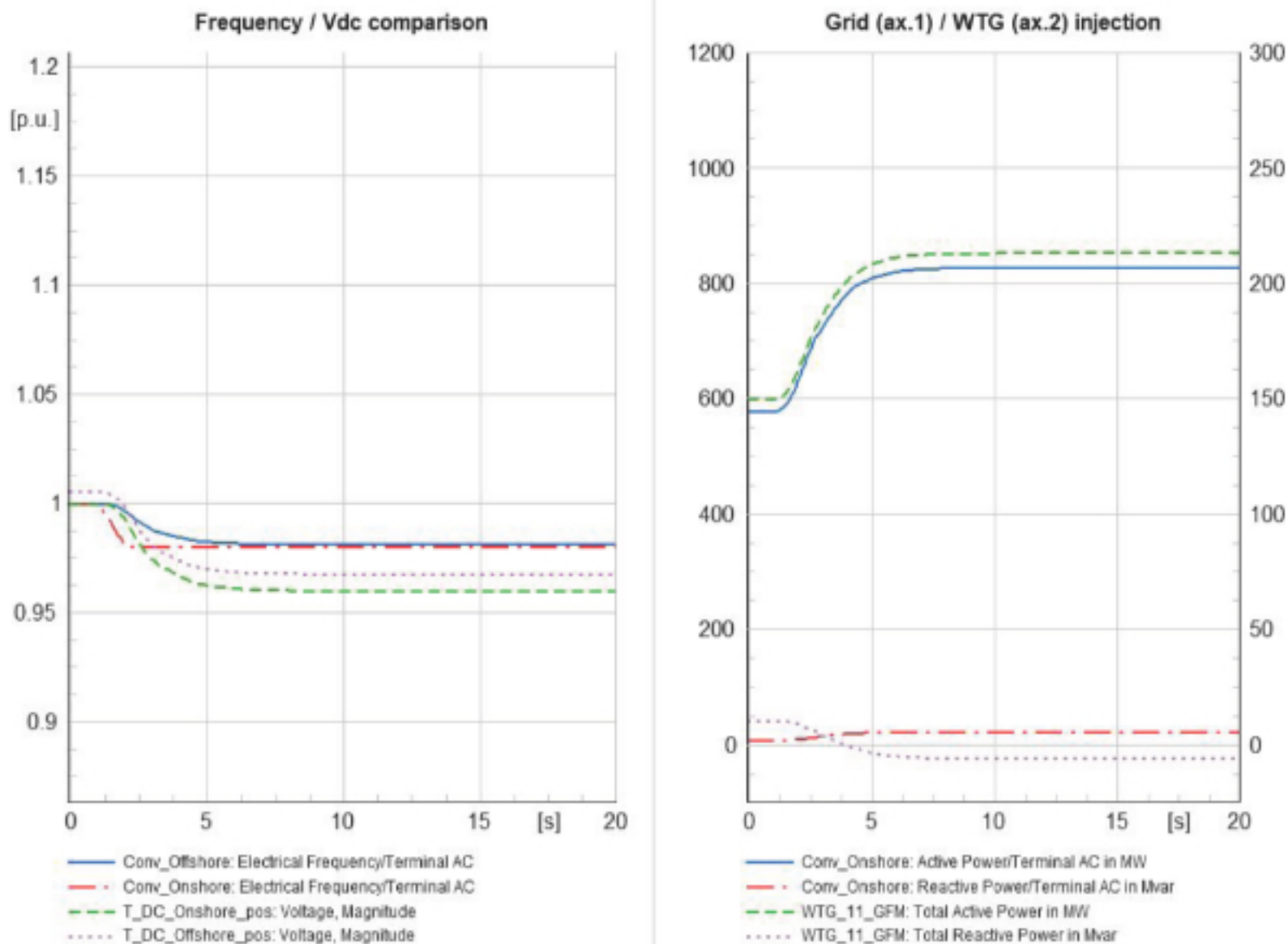
构网型柔直系统



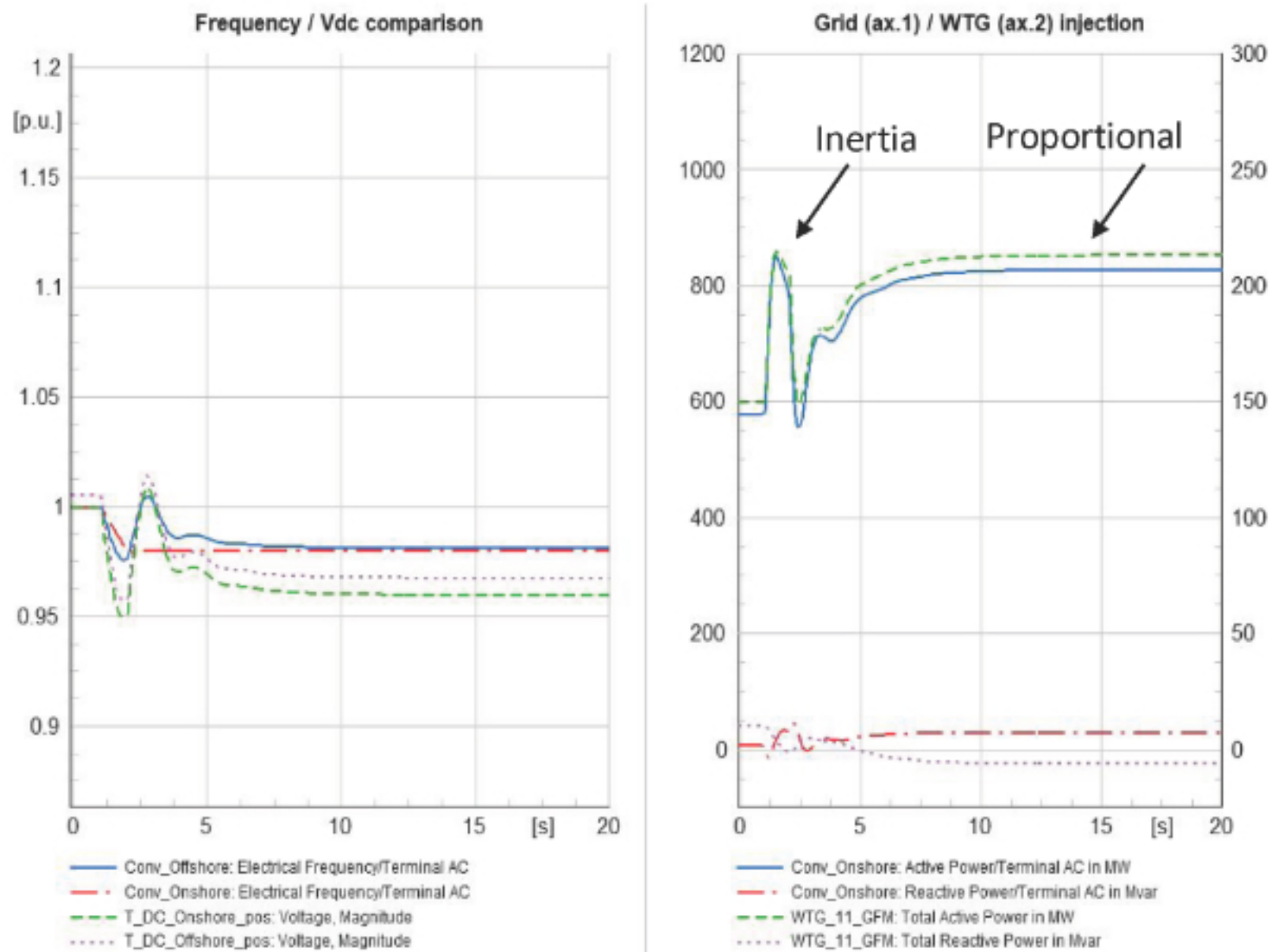
当风机是跟网型，构网型柔直的惯性支撑能力很有限

风机和柔直的动态交互：构网型风机

标准跟网型柔直系统



构网型柔直系统



使用构网型风机后，构网型柔直可以利用风机的机械转动惯量为系统提供主动惯性支撑

谢谢