

分布式潮流控制器 (DPFC)

唐爱红

武汉理工大学



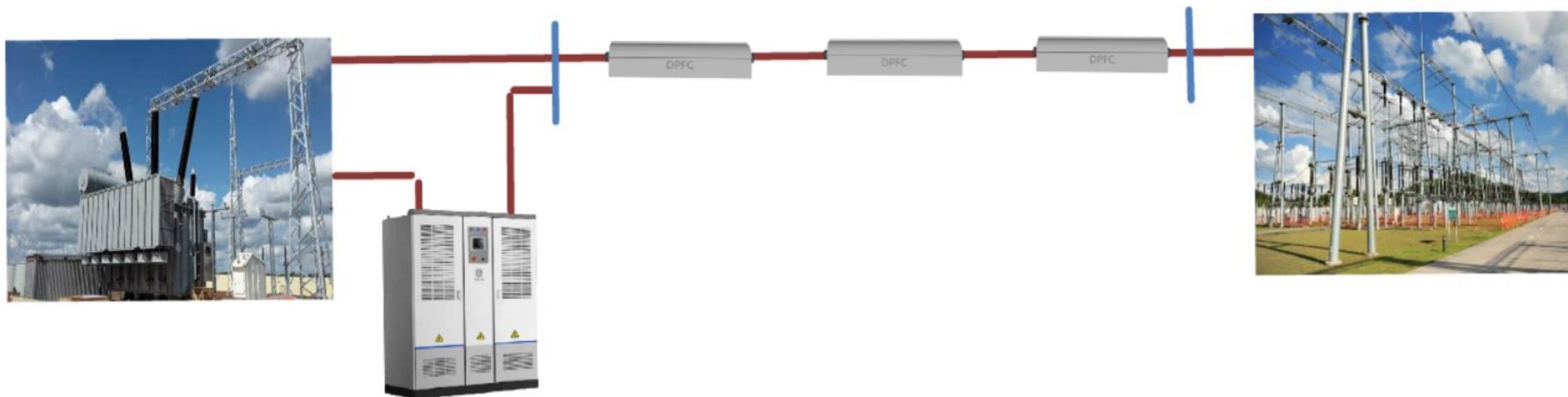
DPFC的组成与安装



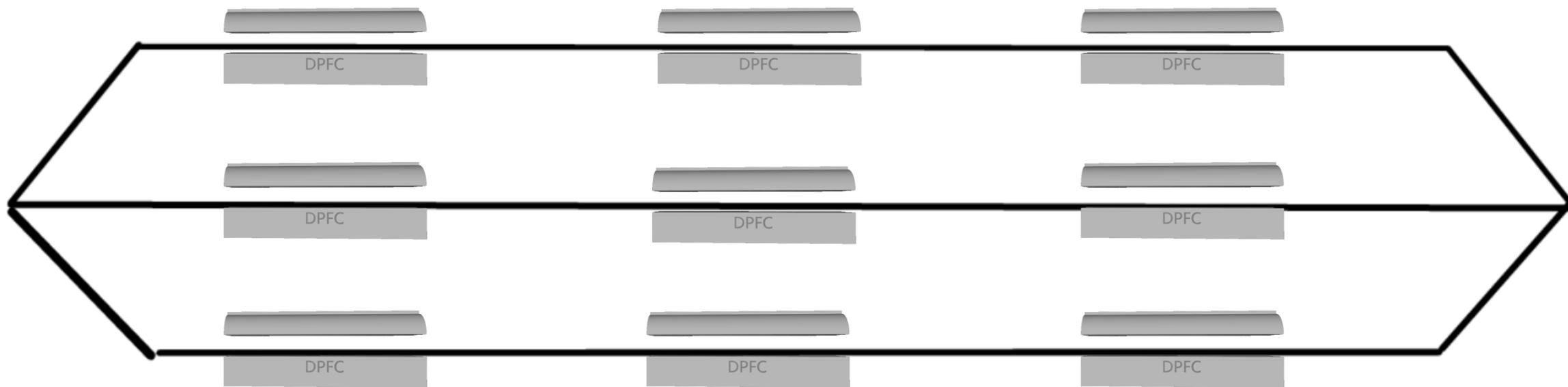
并联侧



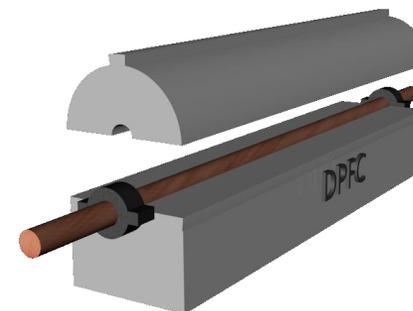
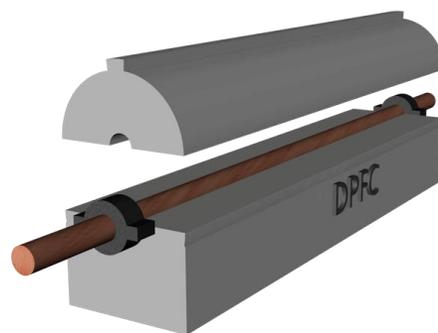
串联侧



DPFC的组成与安装

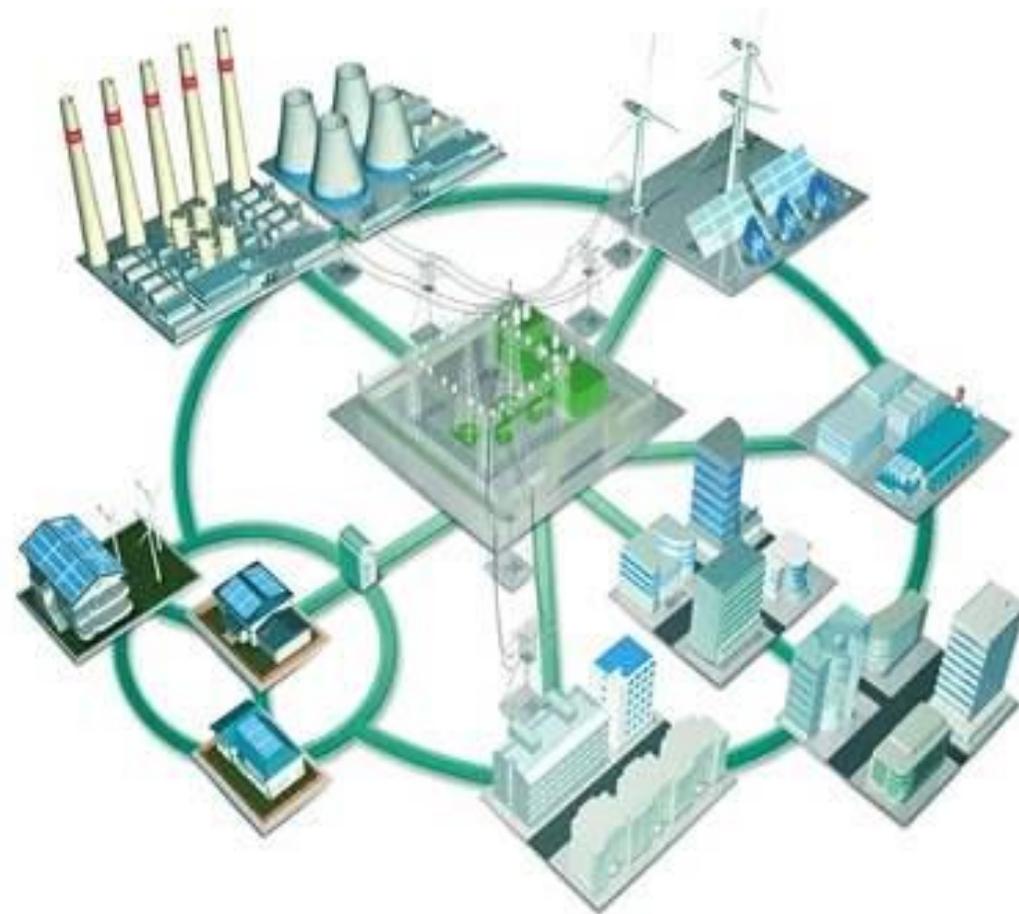


输电线路

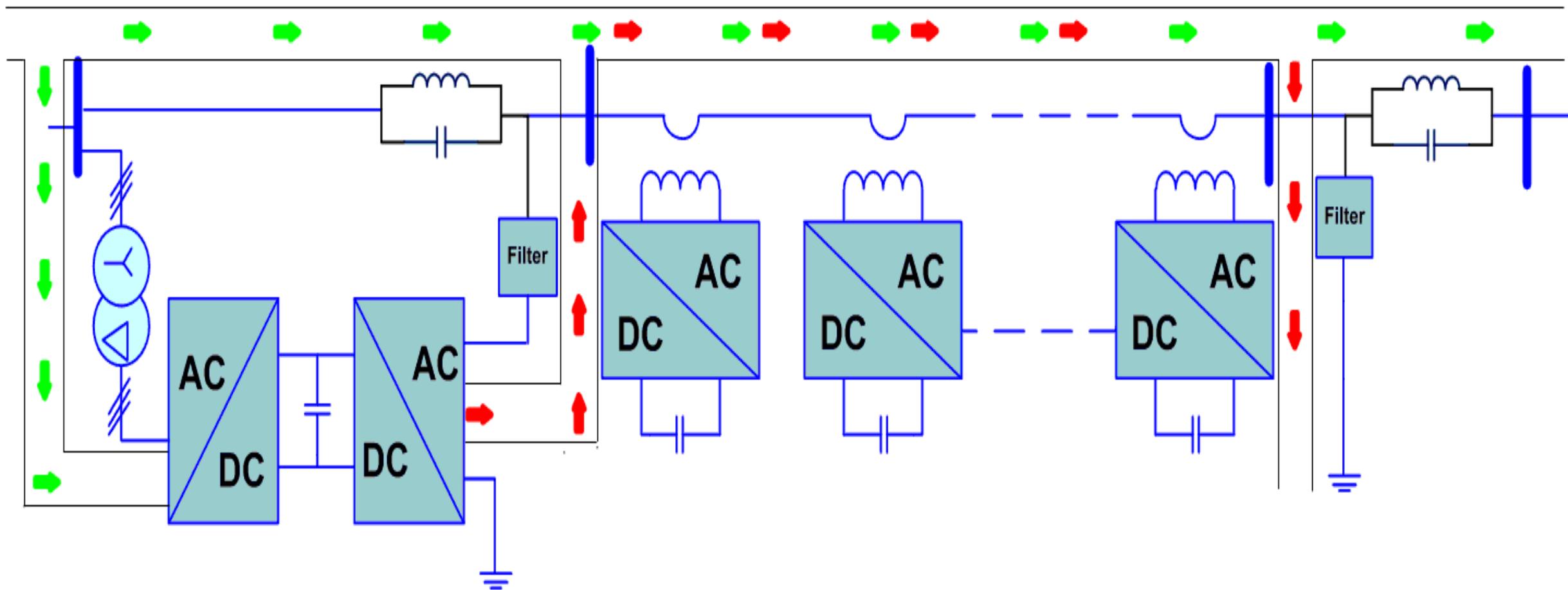


DPFC的应用范围

500kV、220kV、110kV、35kV、10kV

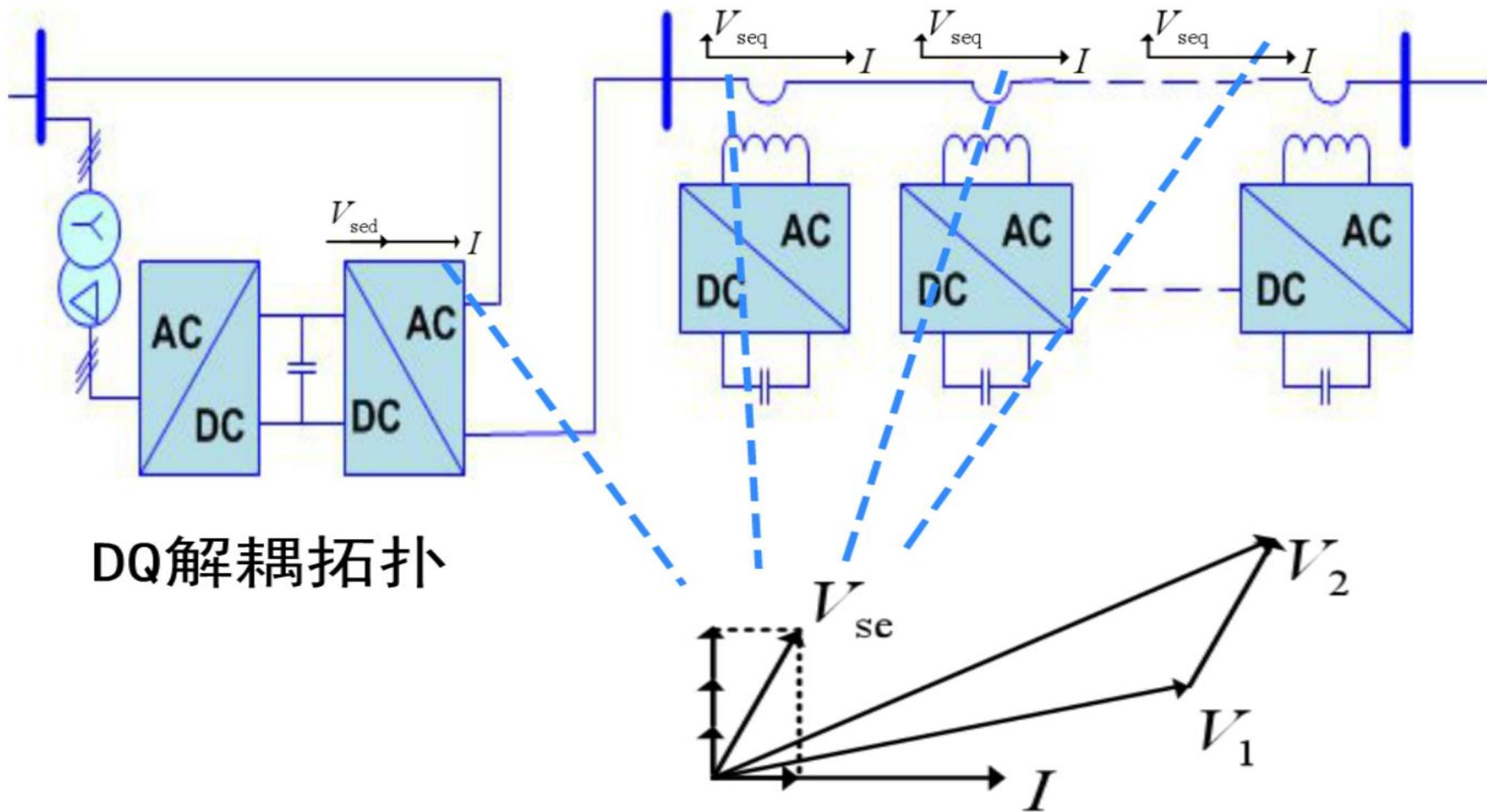


DPFC的拓扑结构

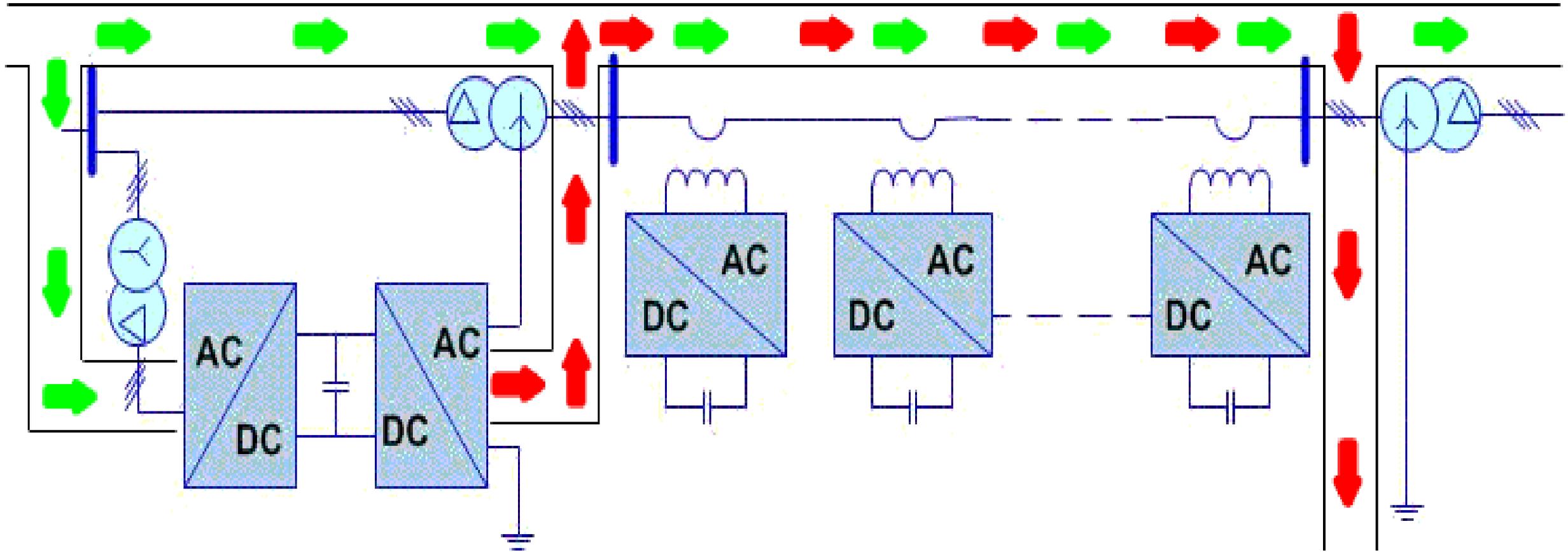


滤波器拓扑

DPFC的拓扑结构

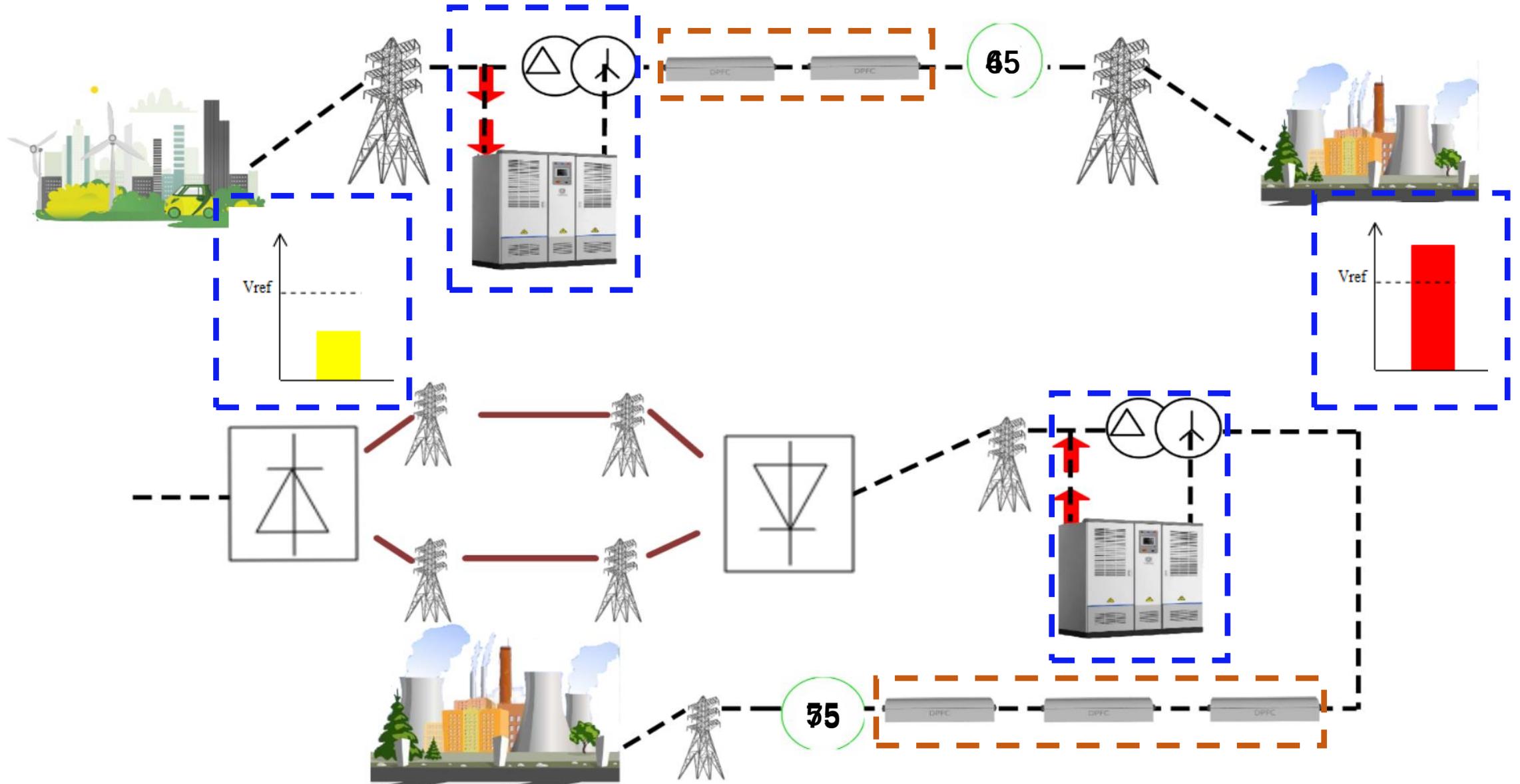


DPFC的拓扑结构

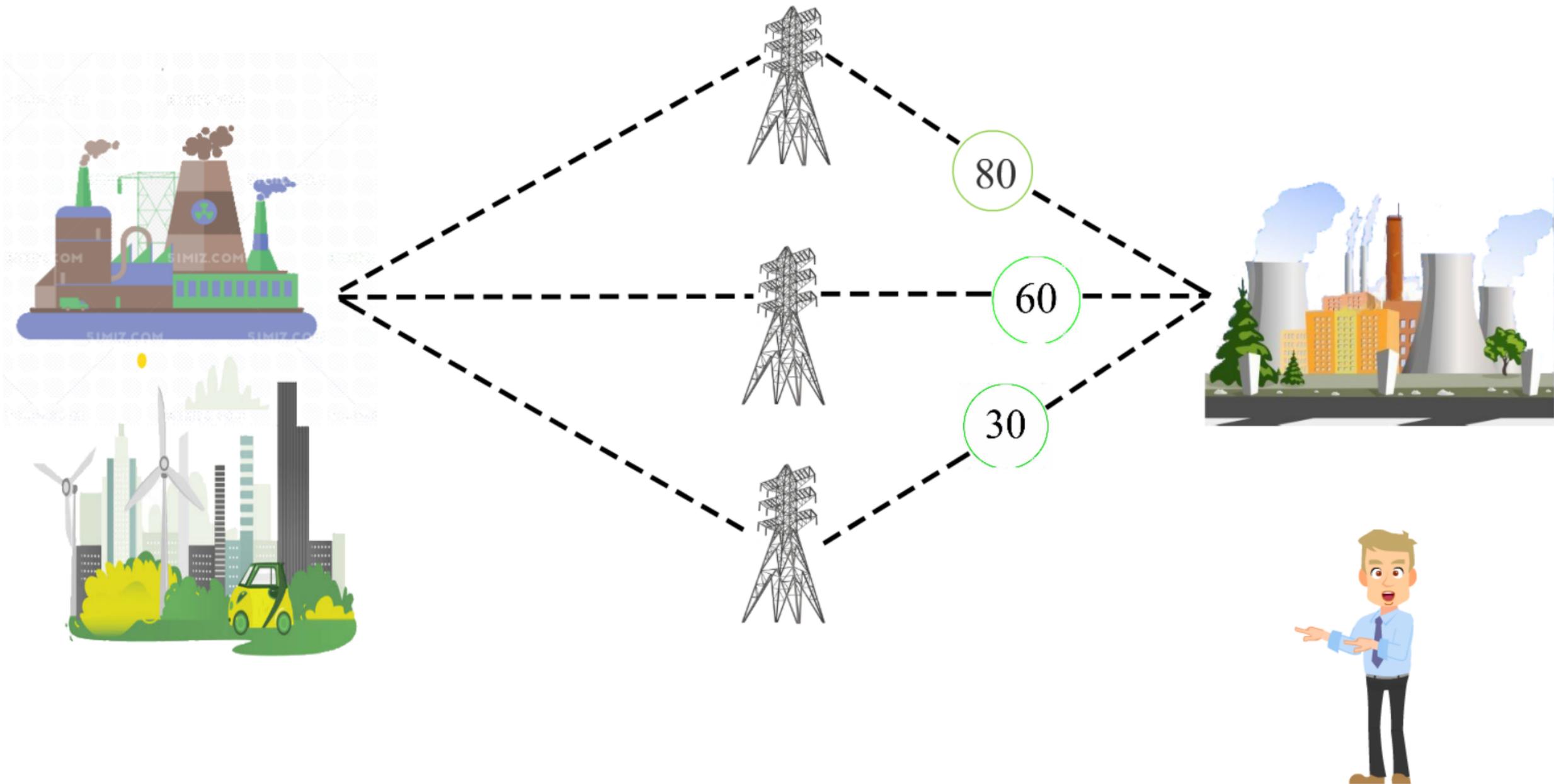


中性点注入谐波拓扑

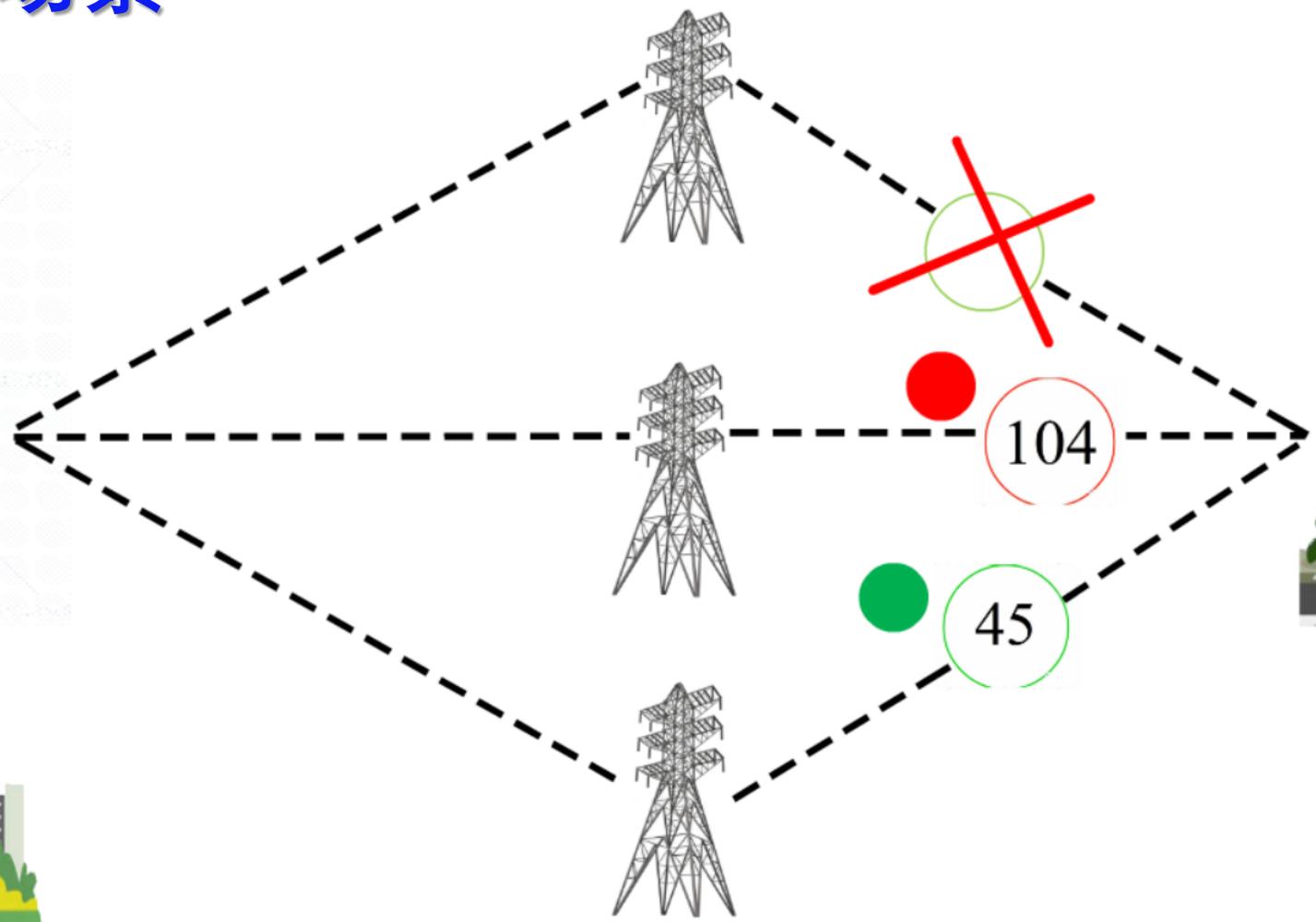
DPFC的应用场景



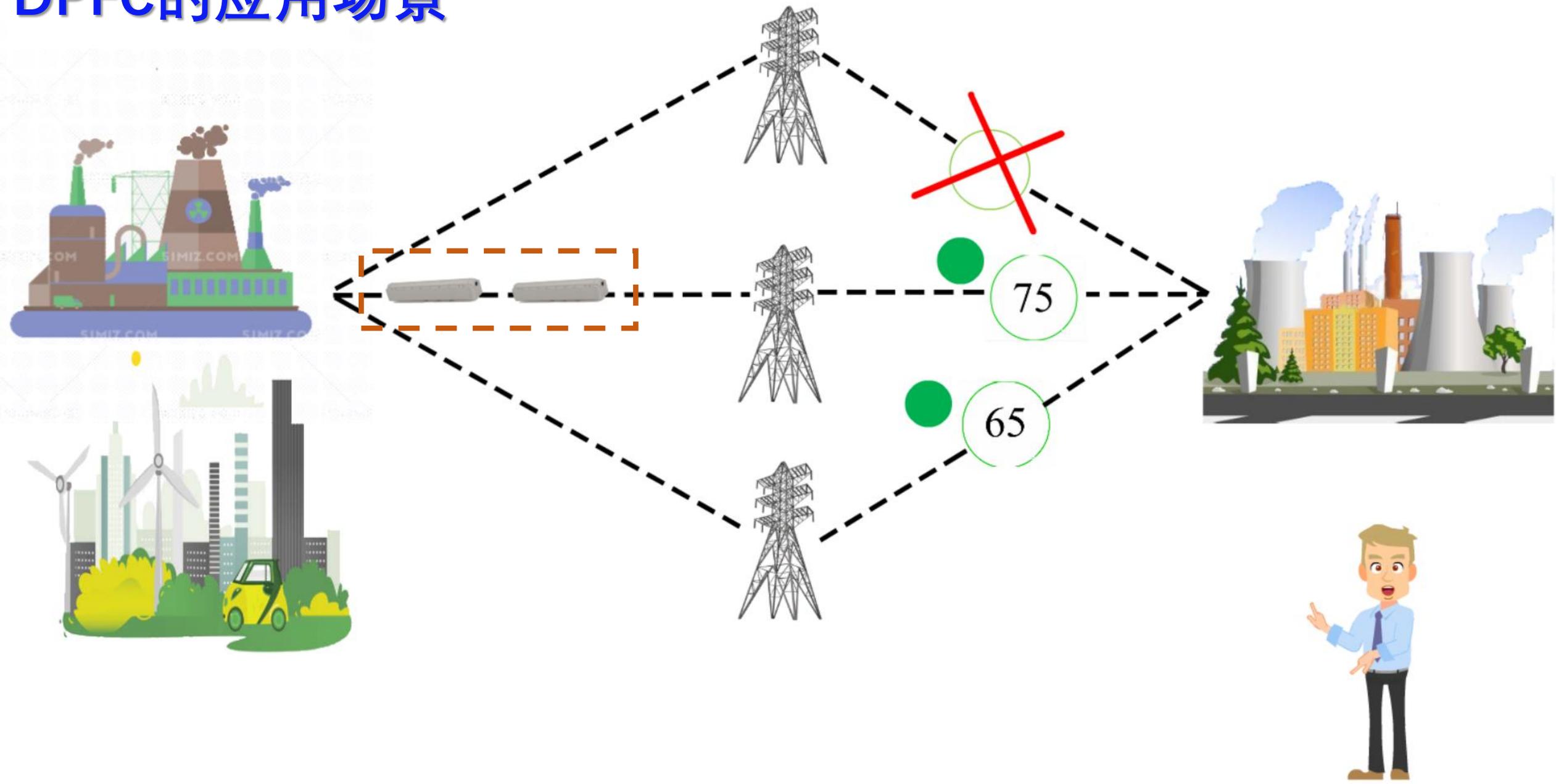
DPFC的应用场景



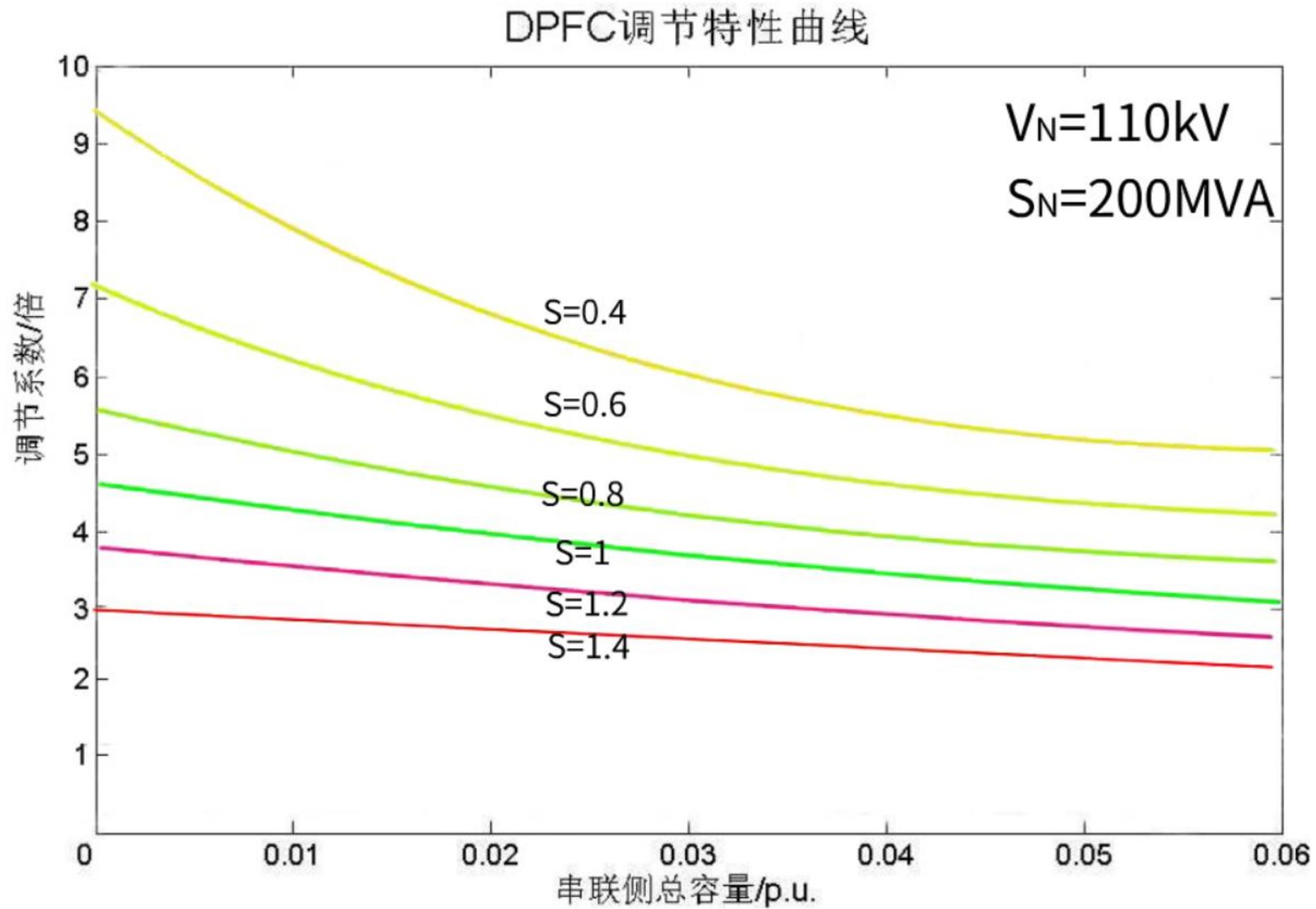
DPFC的应用场景



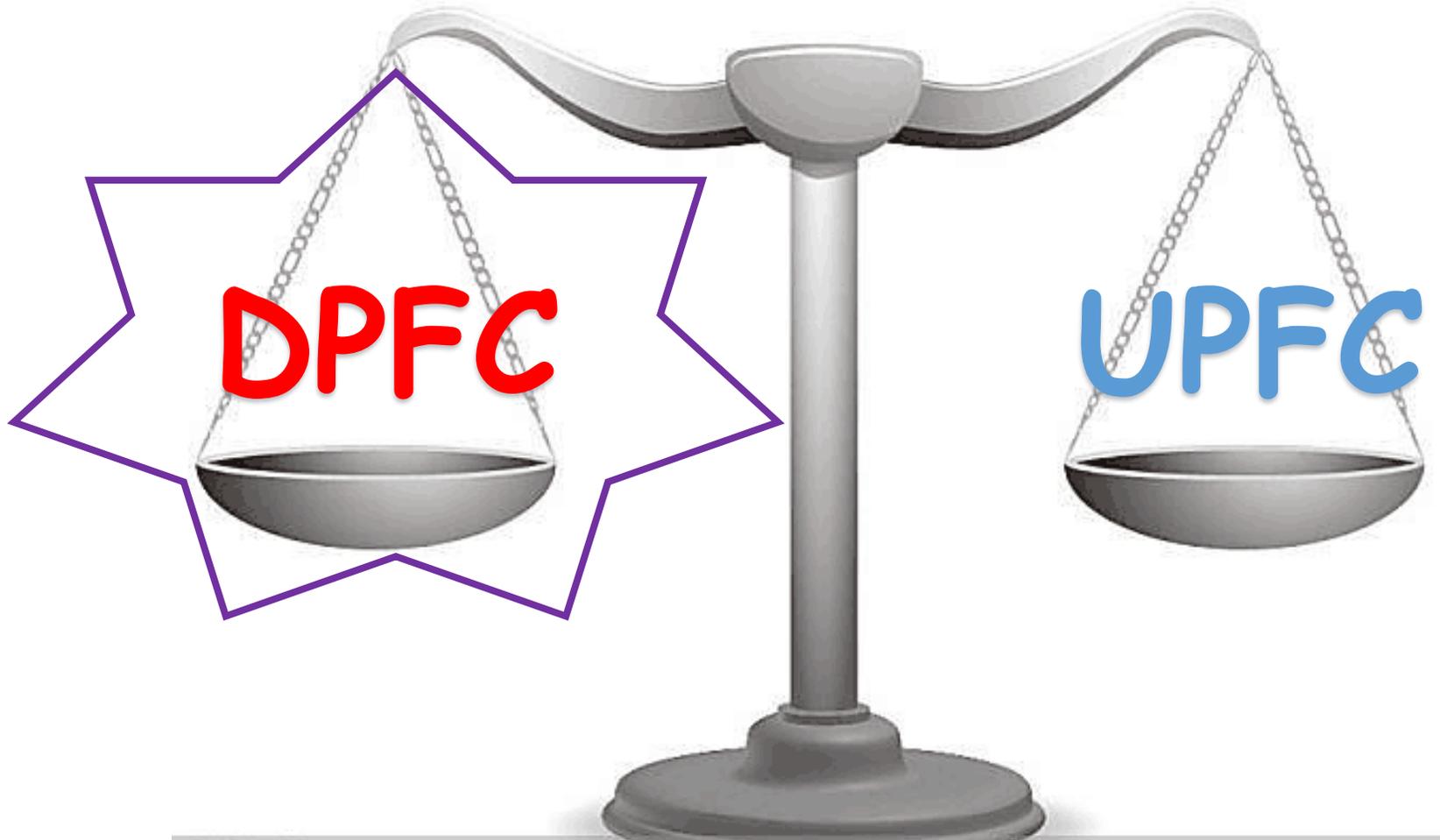
DPFC的应用场景



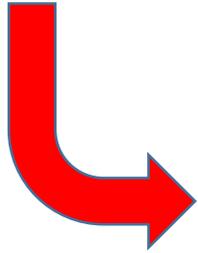
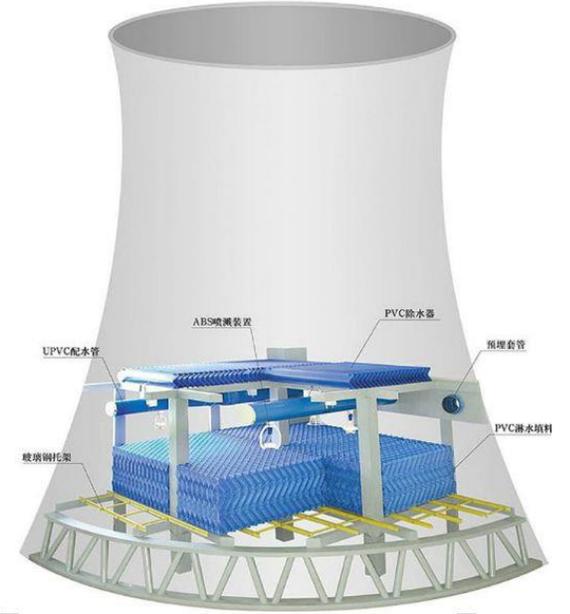
DPFC的调节特性



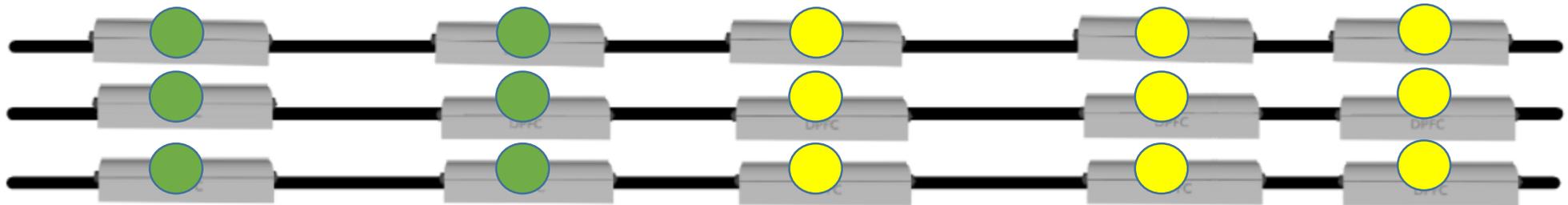
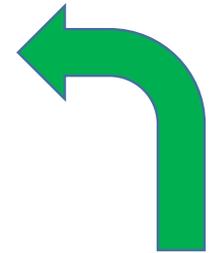
DPFC的高效性



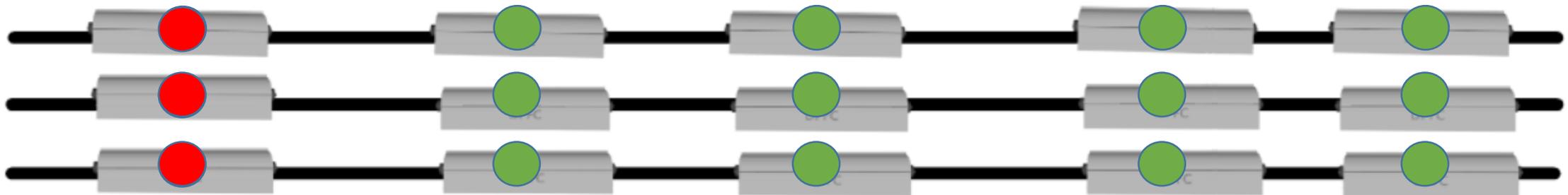
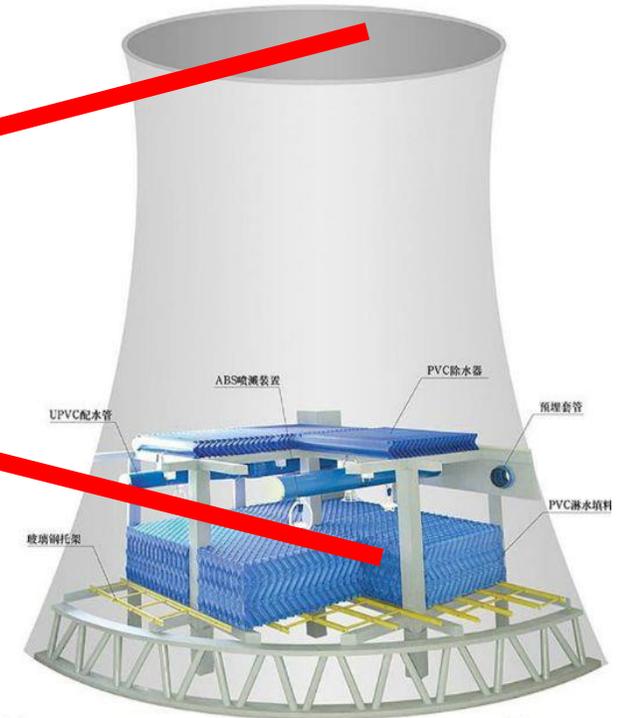
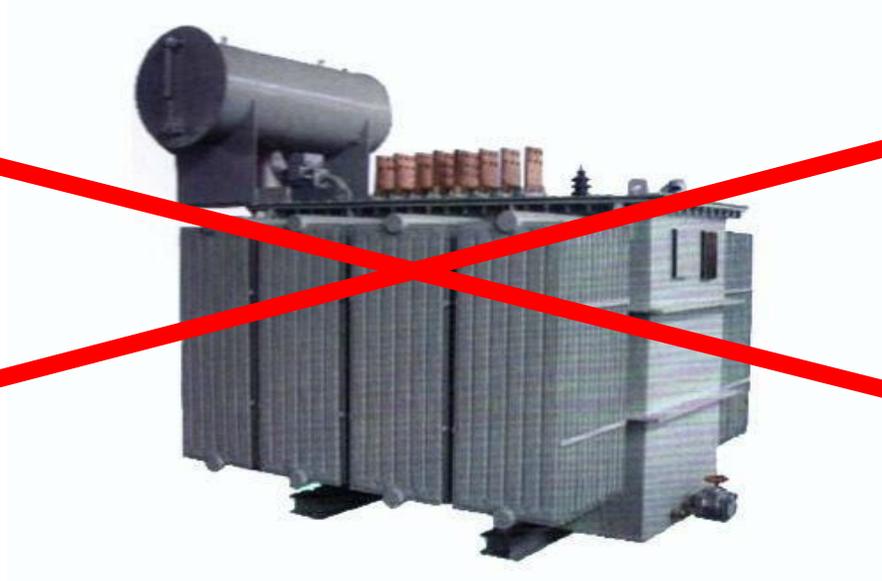
DPFC的高效性



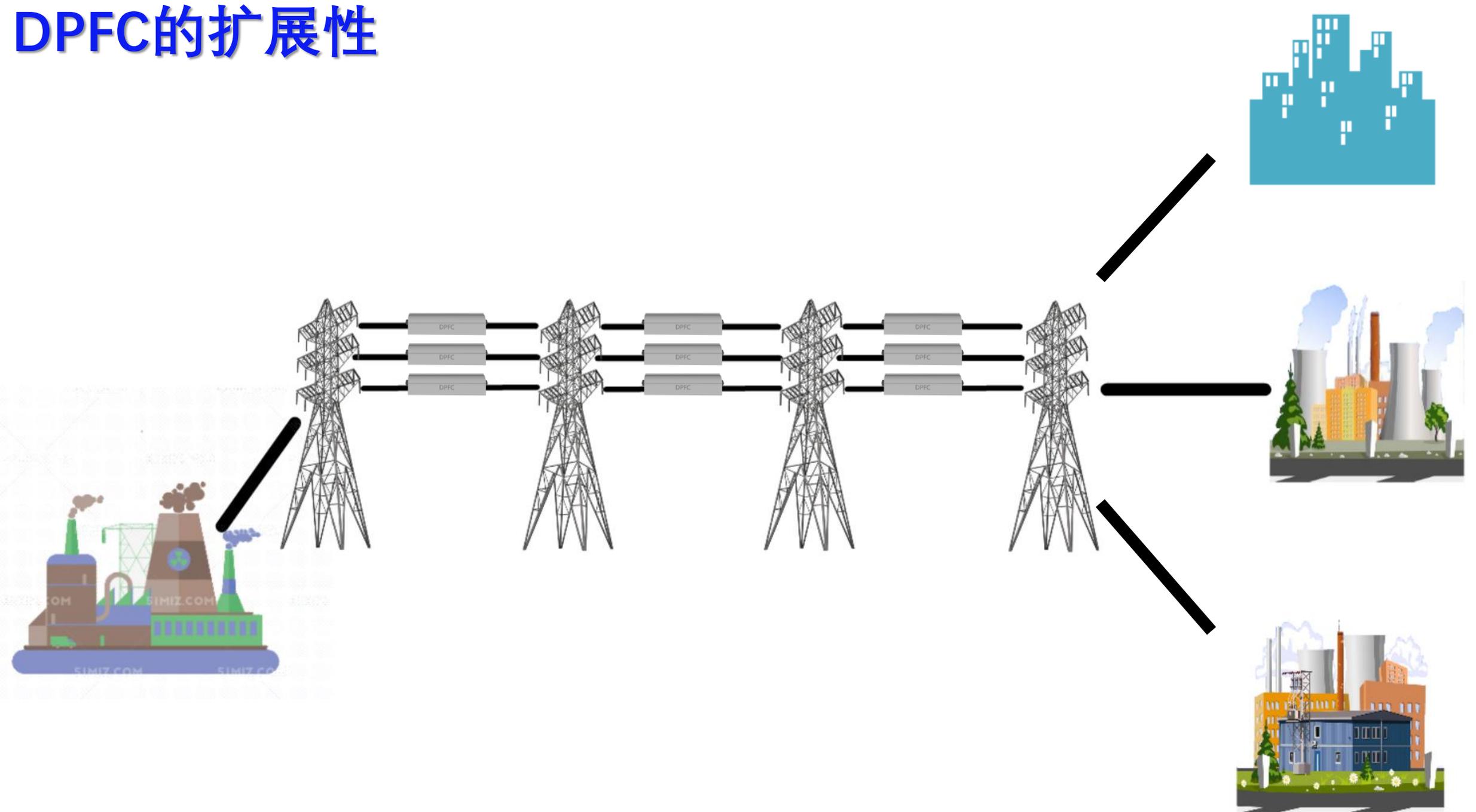
UPFC >> DPFC



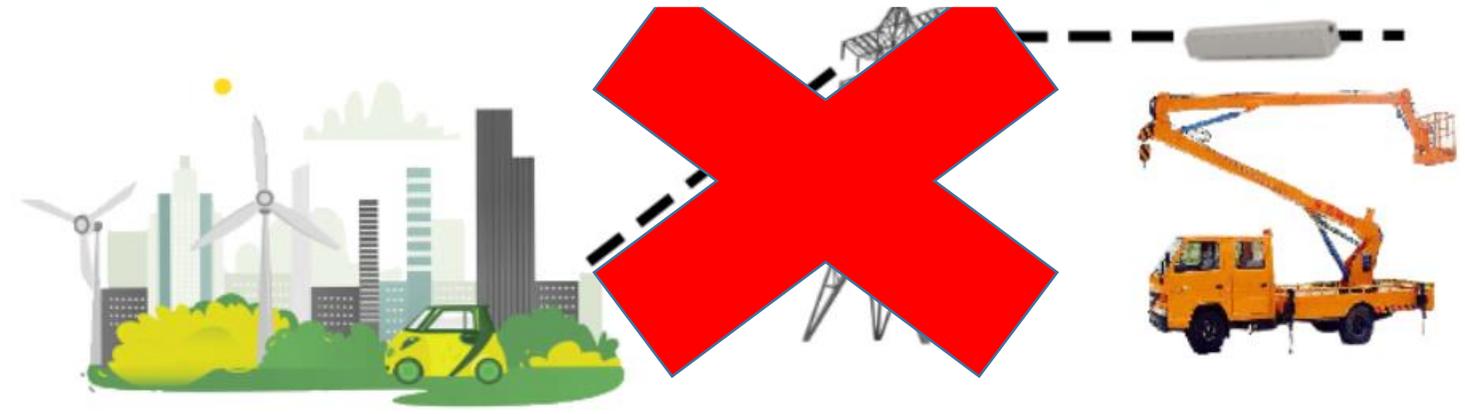
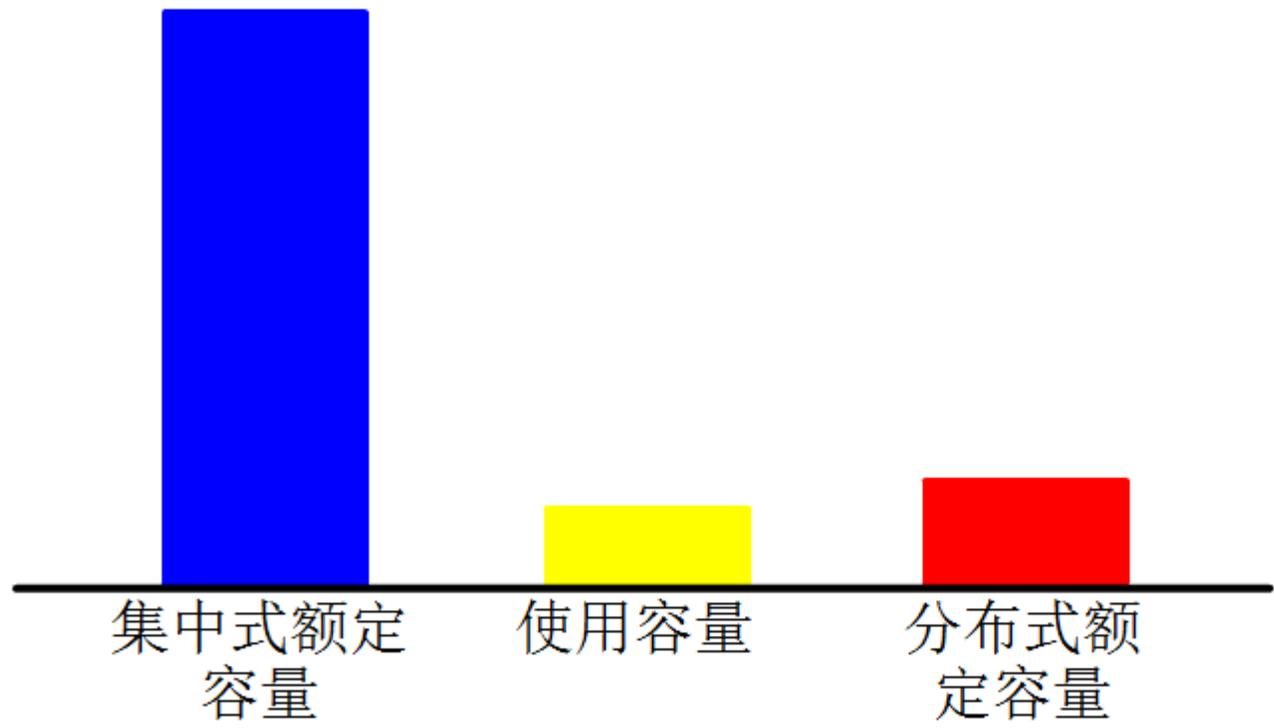
DPFC的可靠性



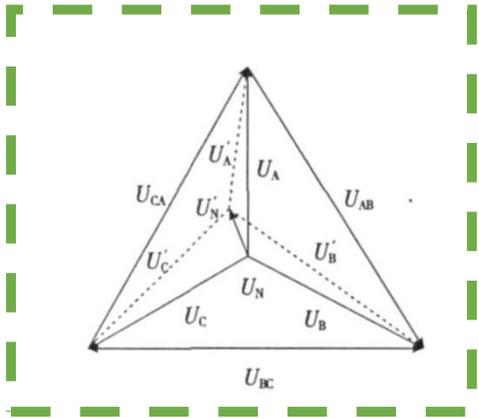
DPFC的扩展性



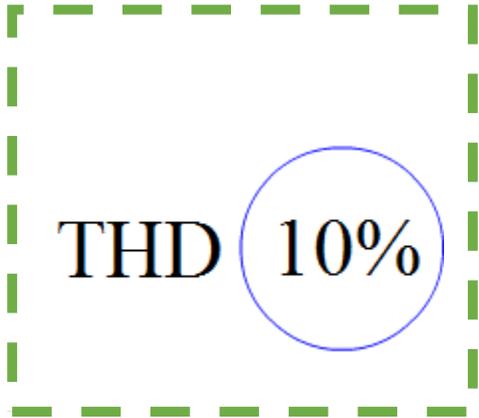
DPFC的扩展性



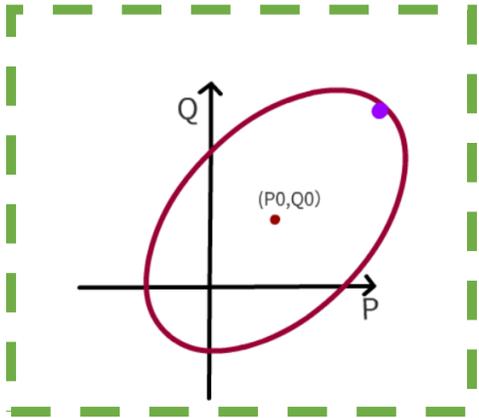
DPFC的控制灵活性



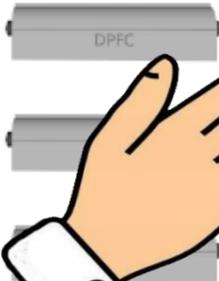
不对称
补偿组



谐波抑制组



潮流控制组

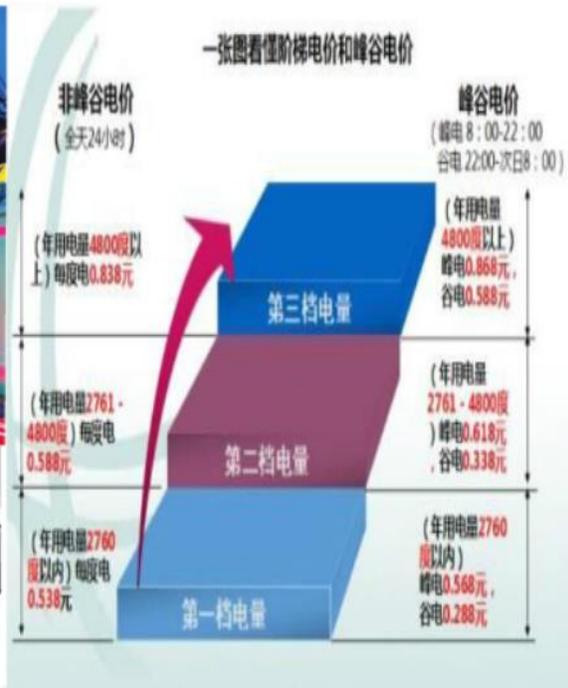




我省居民峰谷分时电价

分时：峰段为8：00时-22：00时，谷段为22：00时-次日8：00时

档位	峰段	谷段
第一档 月均用电量在180千瓦时及以下	0.55元/千瓦时	0.3元/千瓦时
第二档 月均用电量在181千瓦时至280千瓦时	0.60元/千瓦时	0.35元/千瓦时
第三档 月均用电量在281千瓦时及以上	0.85元/千瓦时	0.6元/千瓦时



附件

水泥企业用电阶梯电价加价标准

一、GB16780-2012《水泥单位产品能源消耗限额》实施之前(2013年10月1日之前)投产的水泥企业,阶梯电价加价标准如下:

水泥生产线	可比水泥综合电耗不超过90 kWh/t的,其用电不加价;可比水泥综合电耗 >90 kWh/t 但 ≤93 kWh/t的,电价每千瓦时加价0.1元;可比水泥综合电耗 >93 kWh/t的,电价每千瓦时加价0.2元。
水泥熟料生产线	可比熟料综合电耗不超过64 kWh/t的,其用电不加价;可比熟料综合电耗 >64 kWh/t 但 ≤67 kWh/t的,电价每千瓦时加价0.1元;可比熟料综合电耗 >67 kWh/t的,电价每千瓦时加价0.2元。
水泥粉磨站	可比水泥综合电耗不超过40 kWh/t的,其用电不加价;可比水泥综合电耗 >40 kWh/t 但 ≤42 kWh/t的,电价每千瓦时加价0.15元;可比水泥综合电耗 >42 kWh/t的,电价每千瓦时加价0.25元。



DPFC的便捷灵活性

线路改造

周期长

成本高

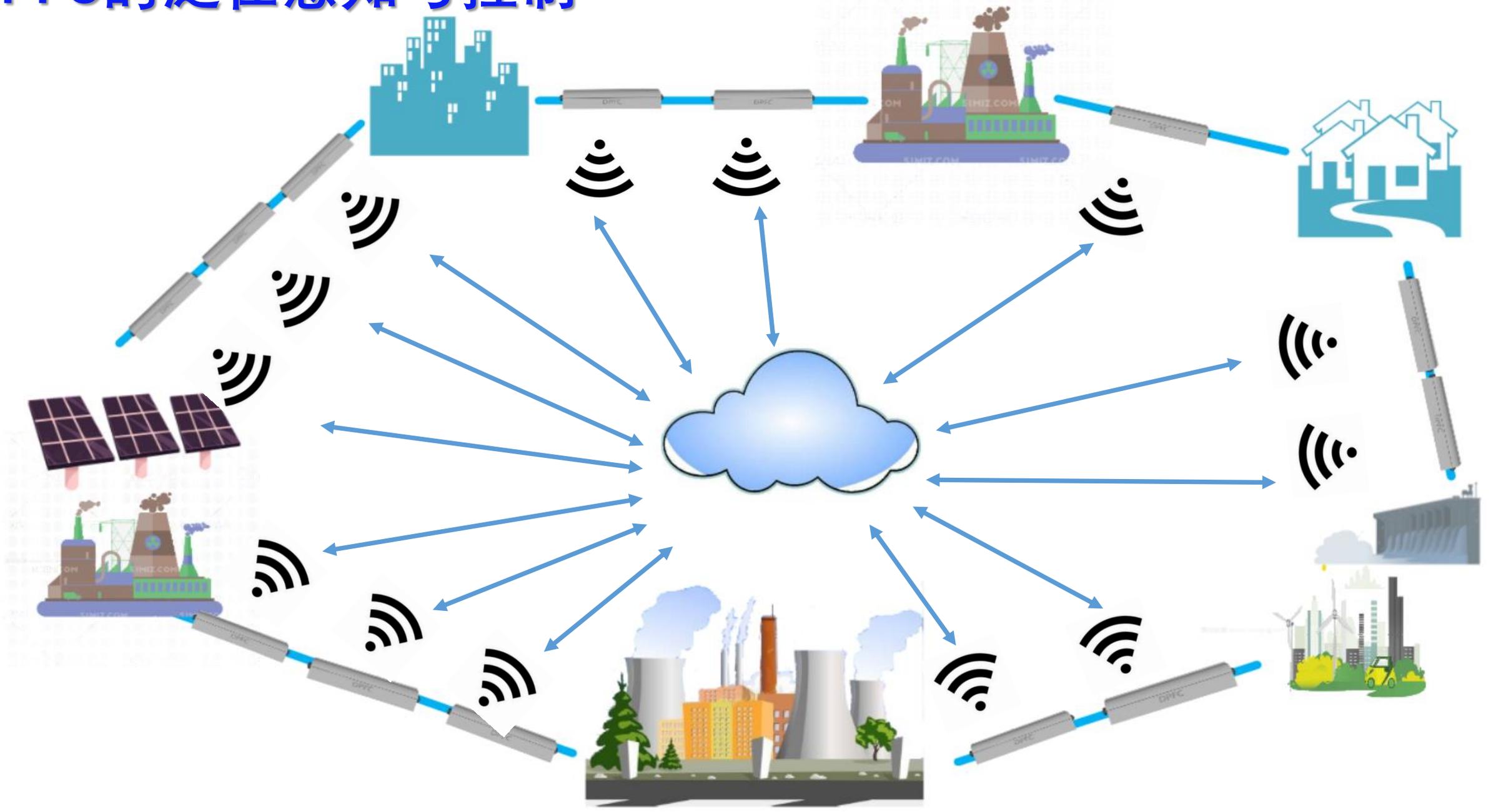
应变力差



DPFC的便捷灵活性



DPFC的泛在感知与控制



比较内容	UPFC	DPFC
类型	大容量、高电压、集中式。	小容量、低电压、分布式。
使用器件及结构特点	使用 GTO 或 MMC 模块，共直流母线。	使用成熟价廉的小功率 IGBT，由单相电压源变流器构成。
安装方式及占地面积	集中式，一般置于站内，占地面积大。	可依安装环境灵活变更，占地面积约为 UPFC 的 50%左右。
功能	可解决输电阻塞、电磁环网经济运行、无功补偿和低频振荡抑制问题。	除具备 UPFC 的所有功能外，还具备谐波补偿和不对称补偿的功能。
可靠性	除更换 MMC 模块外，某器件故障，整个装置退出工作。可靠性低。	某相或某组变流器故障，不影响其它变流器继续工作，甚至可将价格低廉的备用单元替换上。可靠性高。
建设特点	一次性建设，建设周期长，一次性投资大。不可逆投资。	根据负荷需求，分期分批建设，可扩展性强。可移植。可逆投资。
运行维护	停电维修。对运维人员技术要求高。	可带电运行维护，可带电安装拆卸，可带电将故障相拆卸带往它地维修，维修期，其它设备正常运行，也可将备用变流器重新接入。
装置制造成本	存在对地绝缘问题，设备造价高。	串联单元不接地，没有绝缘问题，制造成本要远低于 UPFC。

DPFC的优势

可靠性更高

More reliable

应用更便捷

More convenient

DPFC

功能更强大

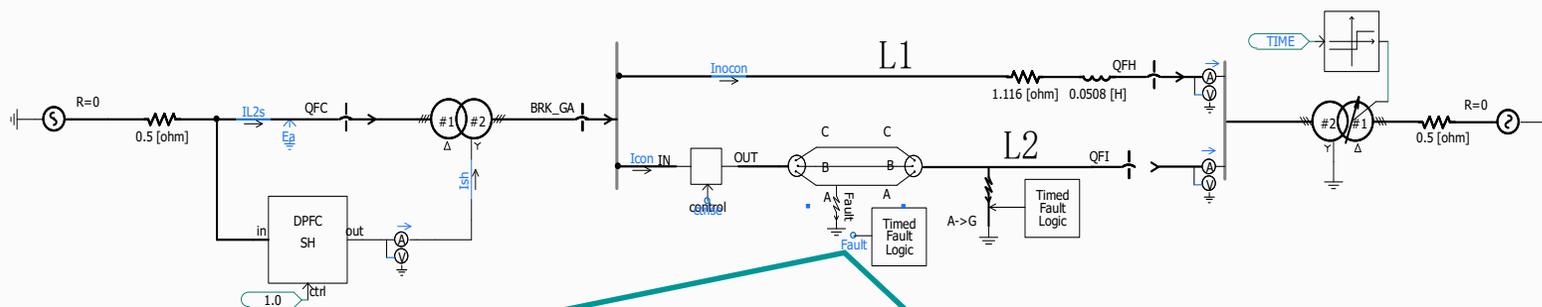
More powerful

经济型更好

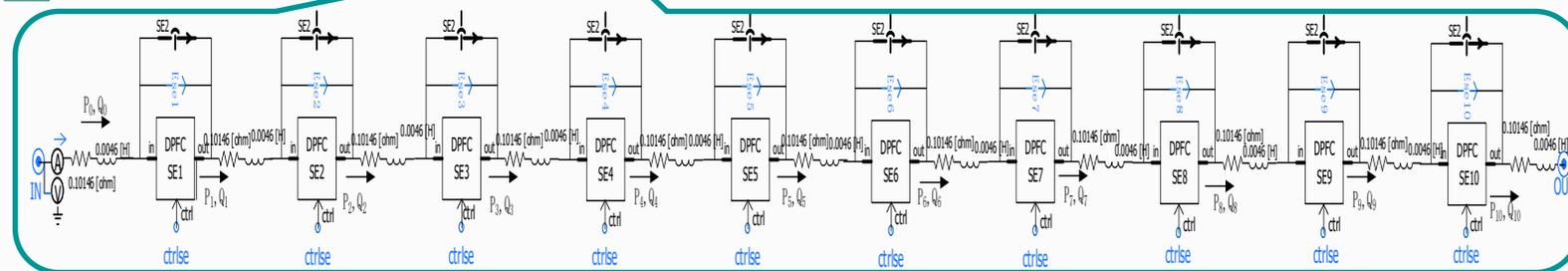
More economical

DPFC的特性研究

特性研究 — 基于PSCAD的10组串联侧潮流调节特性仿真



3s时给定目标
1.2kW.0kvar;5
s时目标值变为
1.5kW.0kvar

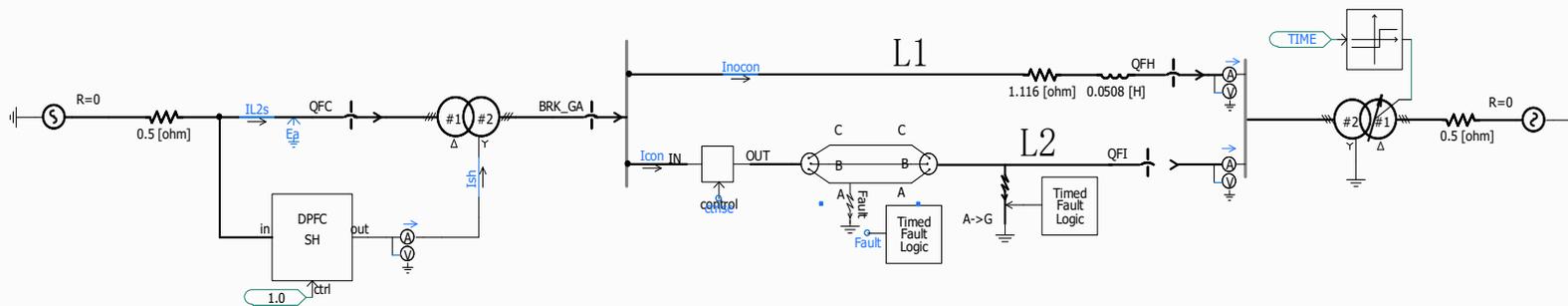


1. 在3s时，线路末端电流经过0.5s上升至1.8A并维持稳定，在5s从1.8A经0.6s上升至2.3A并维持稳定
2. 在0-10s时间段，输电线路首端电压稳定在380V
3. 在3s时，线路有功潮流经过0.5s上升至1.2kW并维持稳定，在5s从1.2kw经0.6s上升至1.5kW并维持稳定
4. 在3s时，线路末端无功功率经过0.4s变为0并基本保持不变

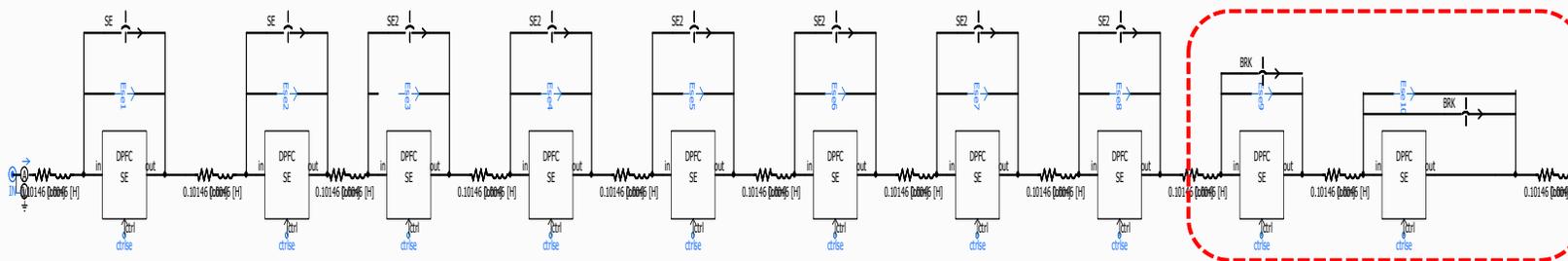
结论：含10组串联侧DPFC正常工作时可以有效的将线路潮流稳定在控制目标值。

DPFC的特性研究

特性研究 — 基于PSCAD的10组串联侧2组故障暂态仿真分析



7秒时
第9、10组串
联侧换流器
退出工作

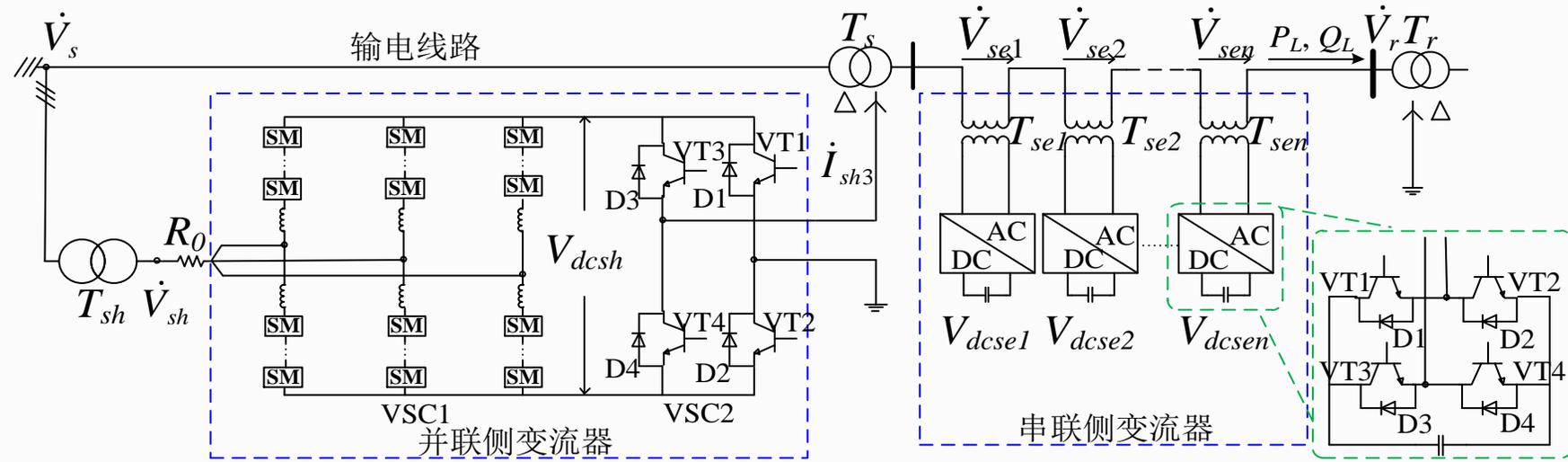


- 1.在0-7s时间段，**电流**维持在目标值2.5A，7s时DPFC两组串联侧换流器退出工作，电流略微下降后恢复至2.5A
- 2.在0-7s时间段，**电压**稳定在220V，7s时DPFC两组串联侧换流器退出工作，各相电压维持稳定
- 3.在0-7s时间段，**有功潮流**在目标值1.5kW，7s时DPFC两组串联侧换流器退出工作，线路有功潮流不受影响，仍能维持在目标值。
- 4.在0-7s时间段，**无功潮流**在目标值0kvar，7s时DPFC两组串联侧换流器退出工作，线路无功潮流不受影响，仍能维持在目标值。

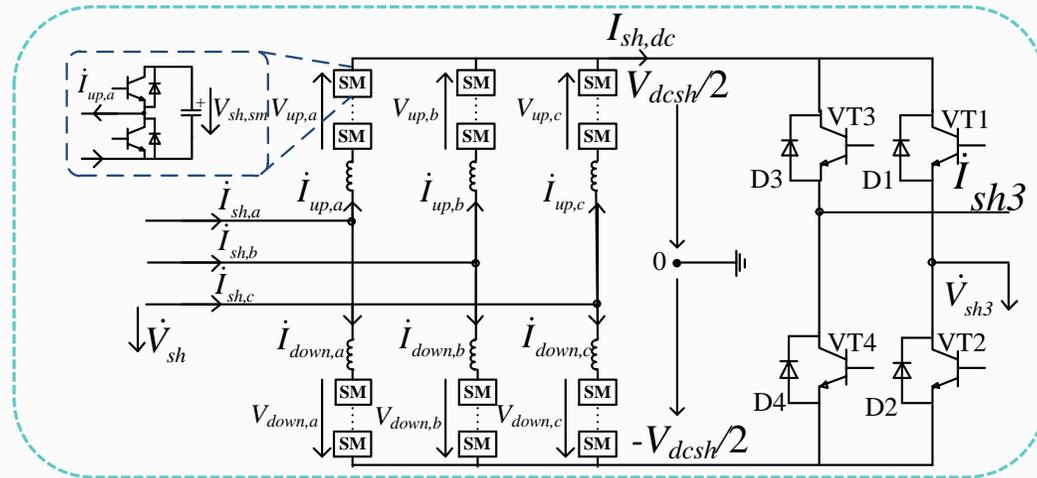
结论：在两组串联侧退出时，DPFC可保持**潮流稳定**在控制目标值，当串联侧有换流器退出运行时，系统仍能保持稳定，并且串联侧功率会根据潮流目标值进行重新平均分配。

DPFC的MMC拓扑电路分析

基于MMC的DPFC拓扑电路

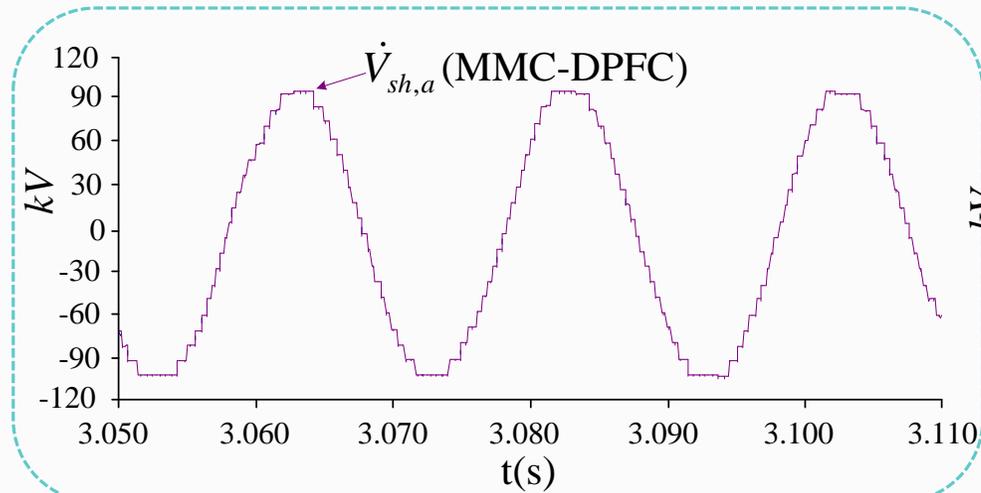


并联侧换流器详细化示意图

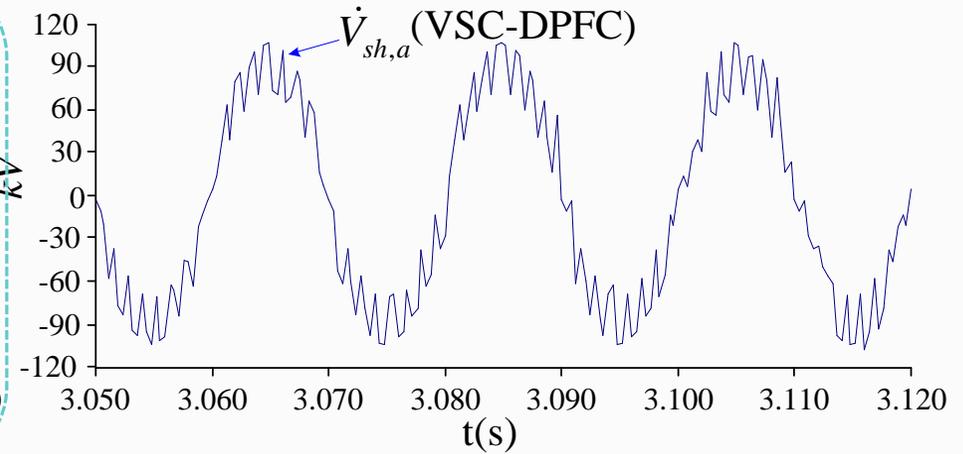


DPFC的MMC拓扑电路分析

MMC内部电磁暂态特性分析



MMC-DPFC中 V_{sh} 的A相电压

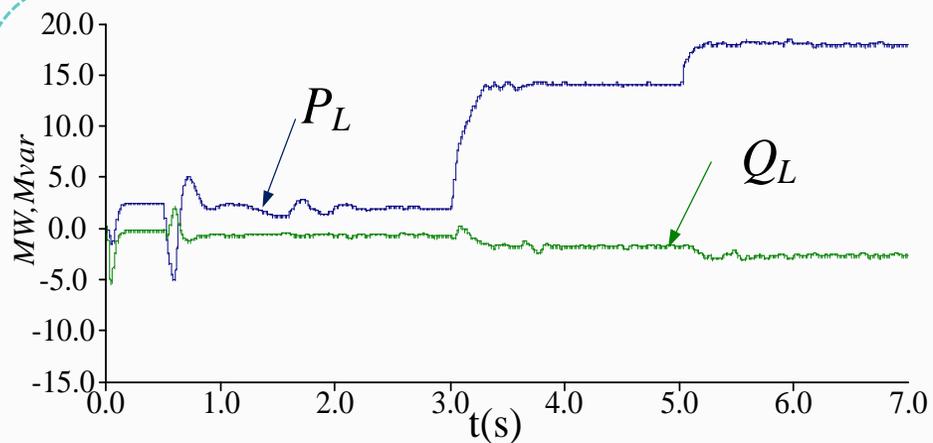


VSC-DPFC中 V_{sh} 的A相电压

仿真结果表明，**MMC-DPFC**并联侧电压 V_{sh} 能够更好地逼近正弦波，其拓扑结构能有效调节电力系统的潮流，**MMC**的采用，使**DPFC**具备更大的潮流调控能力和更少的谐波。

DPFC的MMC拓扑电路分析

MMC内部电磁暂态特性分析

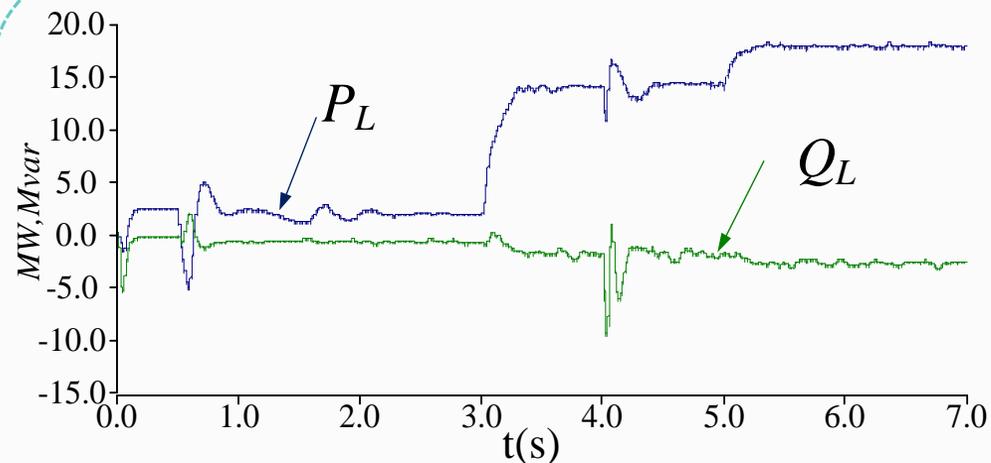


MMC-DPFC线路潮流调节特性

4s时，在线路末端设置了一个三相接地短路故障，故障持续时间为0.2s。
3s时，设置 $P_{Lref}=14\text{MW}$ 、 $Q_{Lref}=0\text{Mvar}$ ，
5s时设置 $P_{Lref}=18\text{MW}$ 、 $Q_{Lref}=0\text{Mvar}$ 。
如右图所示， P_L 和 Q_L 在故障切除后能迅速恢复到故障前状态，验证了所提出的MMC-DPFC控制器的鲁棒性。

设置 $V_{dcse,ref}=10\text{kV}$ ，1.2s时启动串联侧电容充电；3s时，系统有功功率潮流设置为14MW，5s-7s时阶跃为18MW，设置无功功率潮流为0。

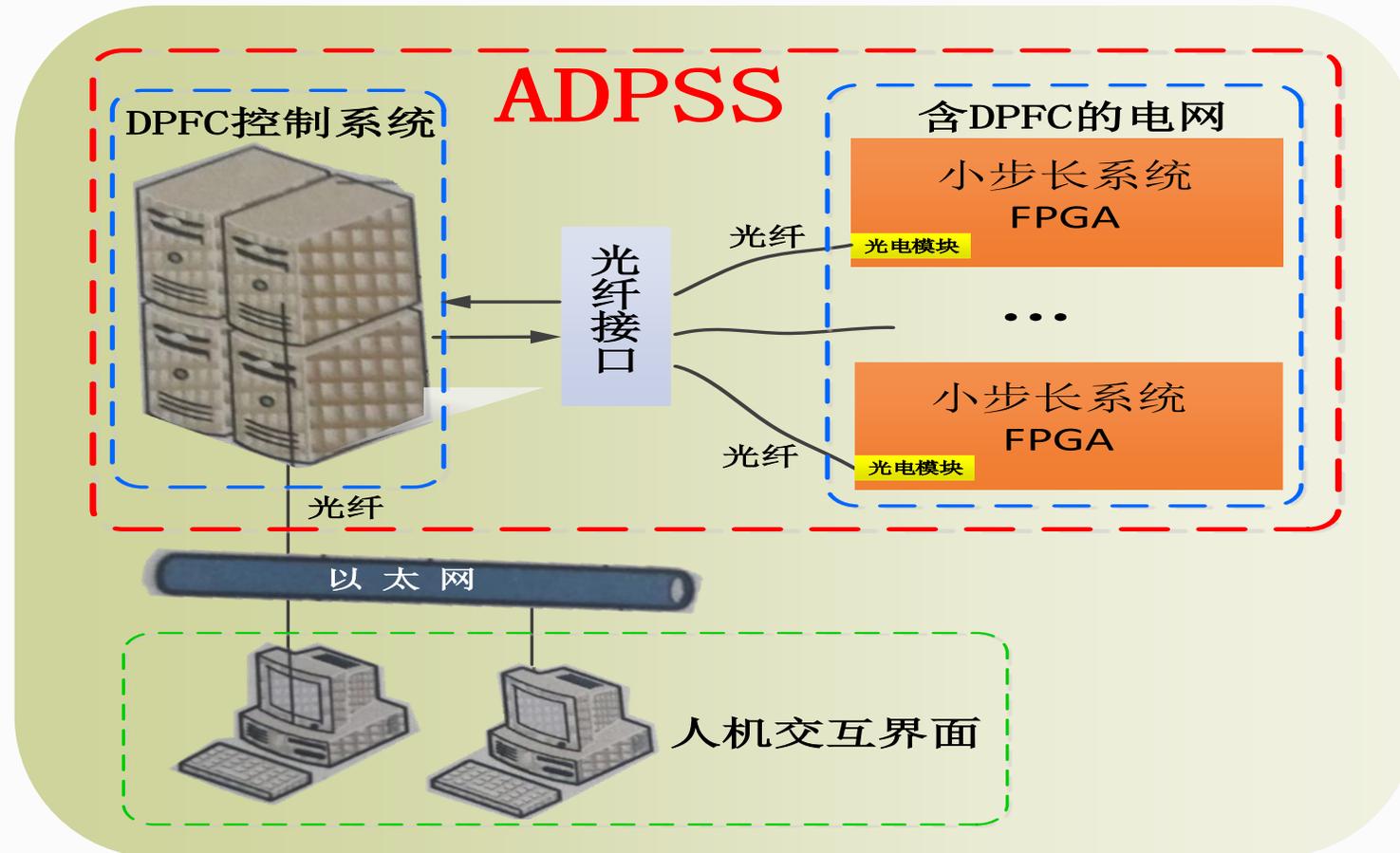
如左图所示，系统有功功率潮流在响应控制目标0.1s后能很快达到目标值，无功能保持着0。



MMC-DPFC三相接地短路时的线路潮流

基于虚拟控制器的DPFC闭环仿真试验

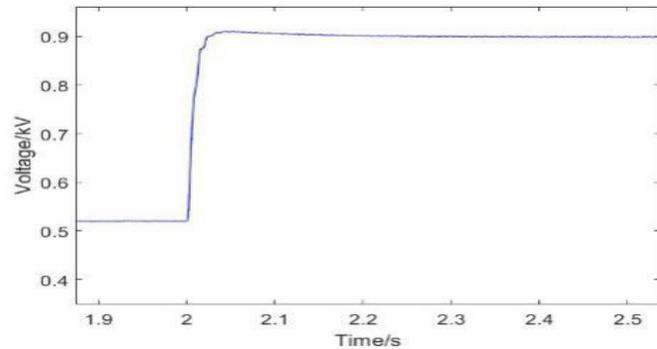
我们根据上述批复的要求，提出了采用ADPSS变频仿真和采用动模试验两种方案。但经过深入分析论证以及多方面原因，我们不得不放弃上述方案。最终确定了基于虚拟控制器的DPFC闭环仿真试验方案与基于dSPACE的DPFC闭环仿真试验方案。



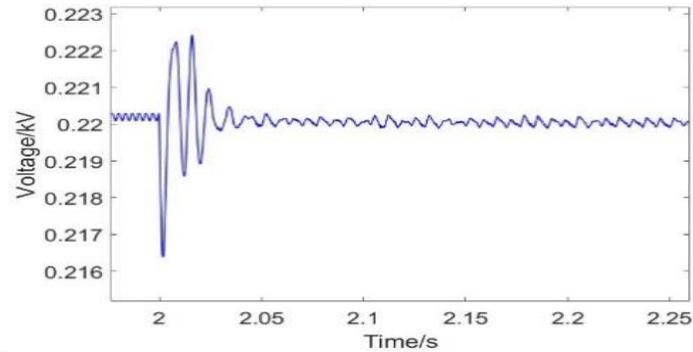
基于虚拟控制器的DPFC闭环仿真试验结构图

基于虚拟控制器的DPFC闭环仿真试验

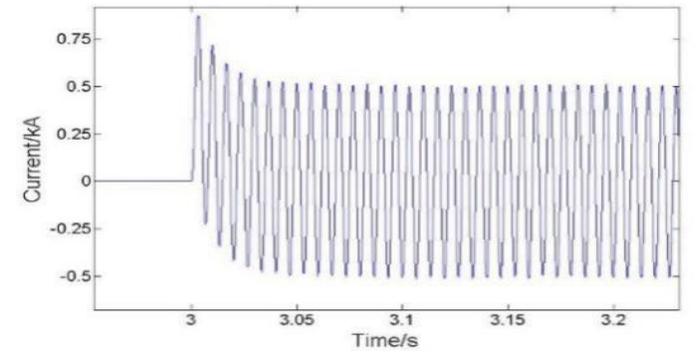
试验结果的波形如下所示



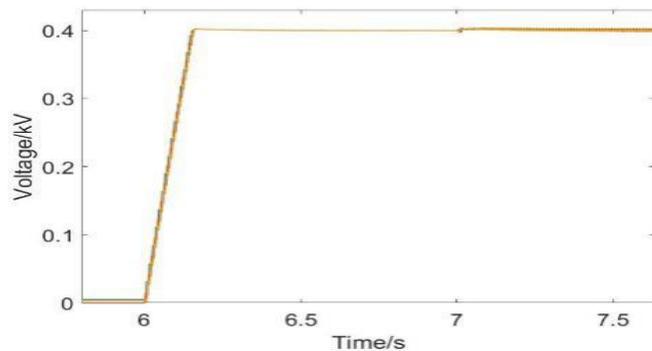
并联侧直流电容电压



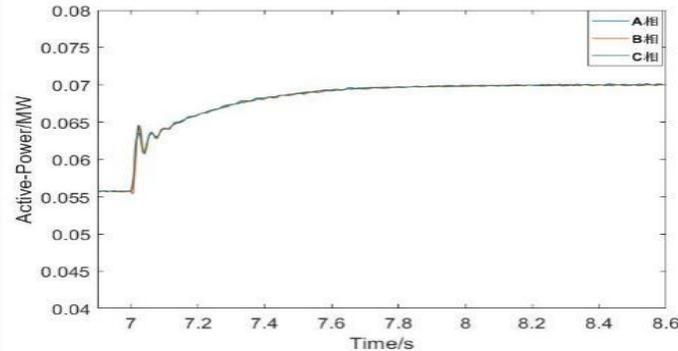
母线I电压



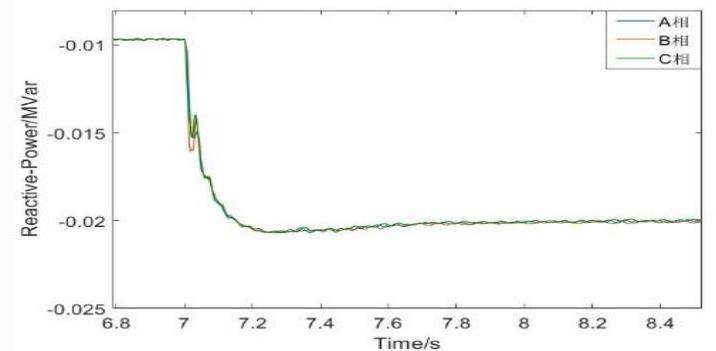
3次谐波电流



串联侧直流电容电压

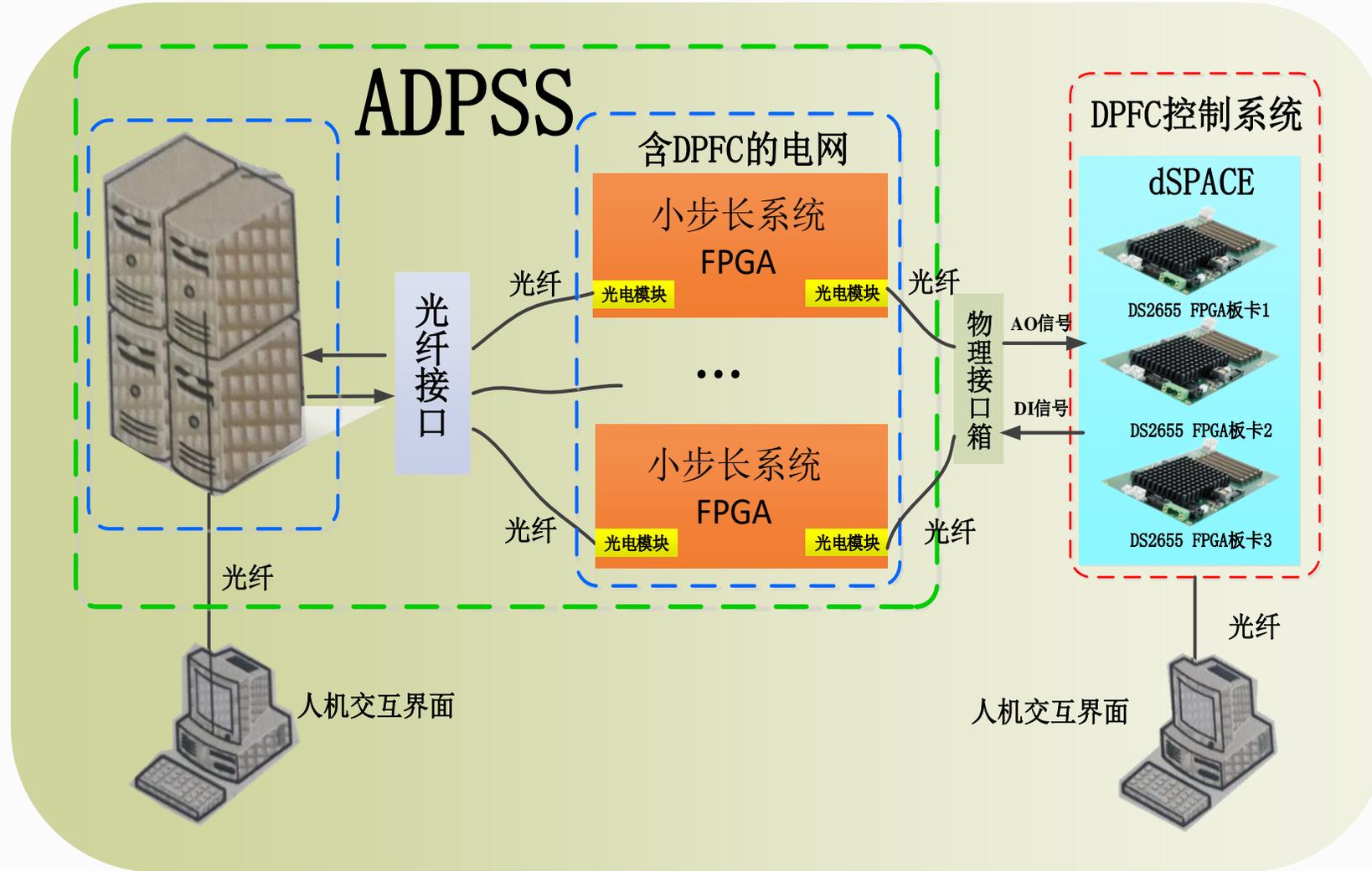


线路有功功率潮流



线路无功功率潮流

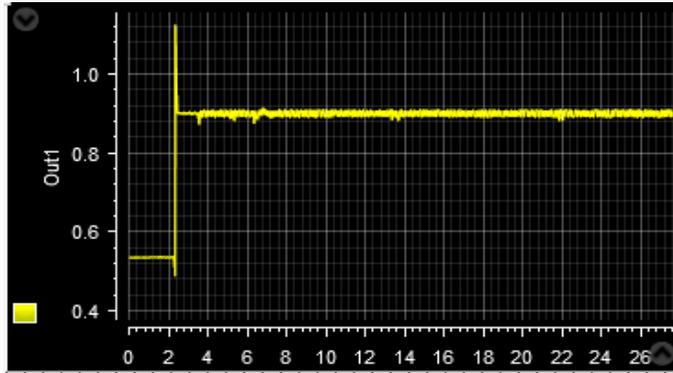
基于dSPACE的DPFC闭环仿真试验



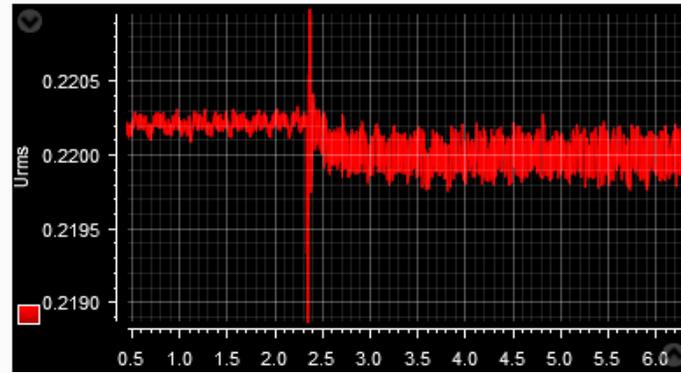
基于dSPACE的DPFC闭环仿真试验结构图

基于dSPACE的DPFC闭环仿真试验

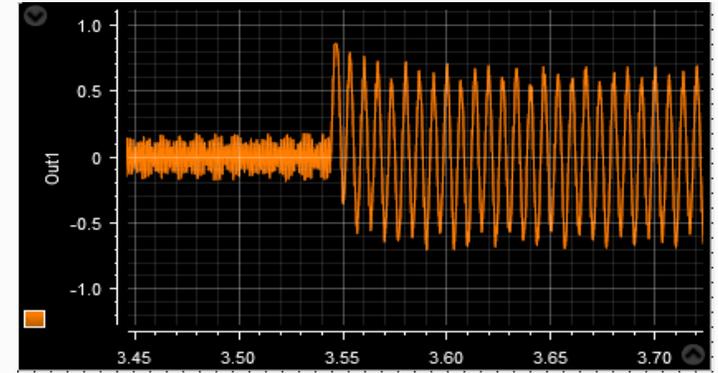
试验结果的波形如下所示



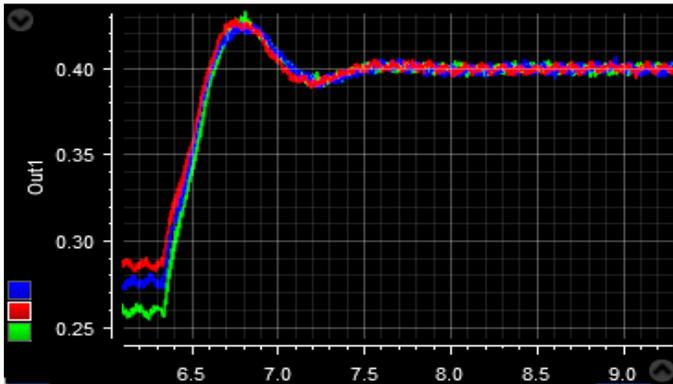
并联侧直流电容电压



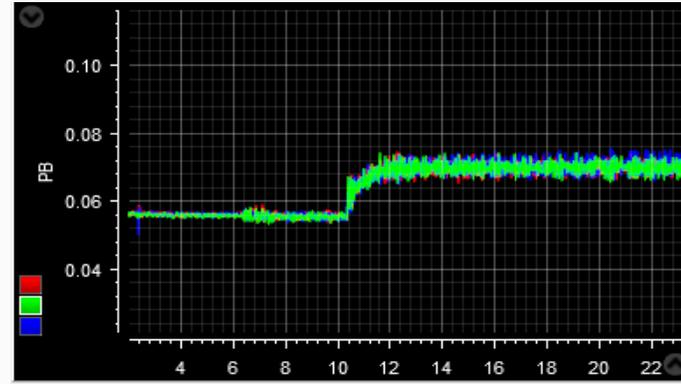
母线I电压



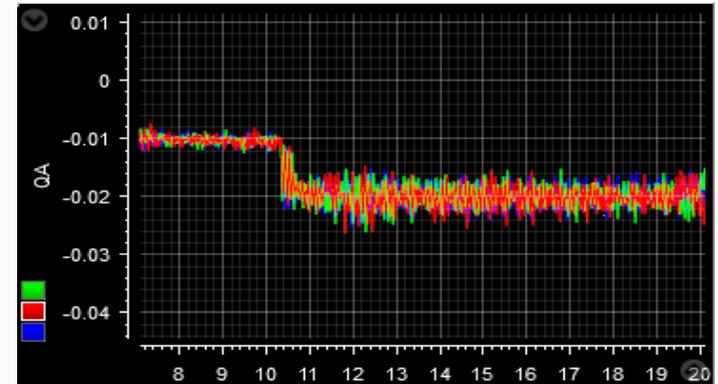
3次谐波电流



串联侧直流电容电压



线路有功功率潮流



线路无功功率潮流

The slide features a light gray background with a white central panel. On the left and right sides, there are decorative vertical panels containing 3D geometric shapes in shades of blue, gray, and yellow. The text is centered in the white panel.

谢谢大家

Thank You