

面向新一代电网需求的电力电子技术与装备

赵争鸣 萧艺康

清华大学电机工程与应用电子技术系

1 背景与意义

2 挑战与机遇

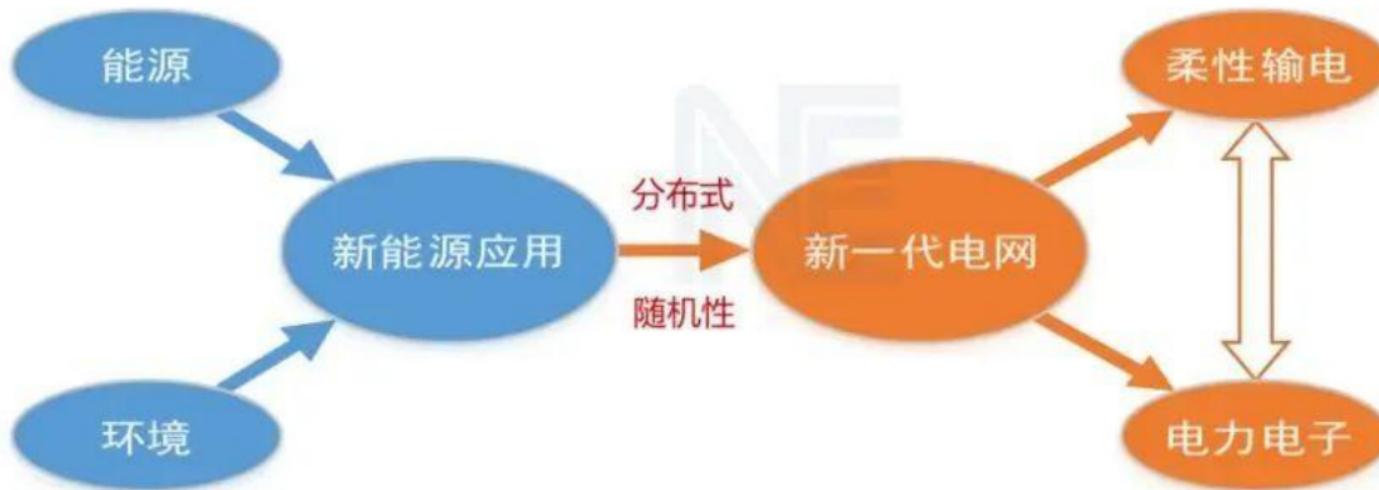
3 建模与仿真

4 应用与示范

5 发展与展望

一、背景与意义

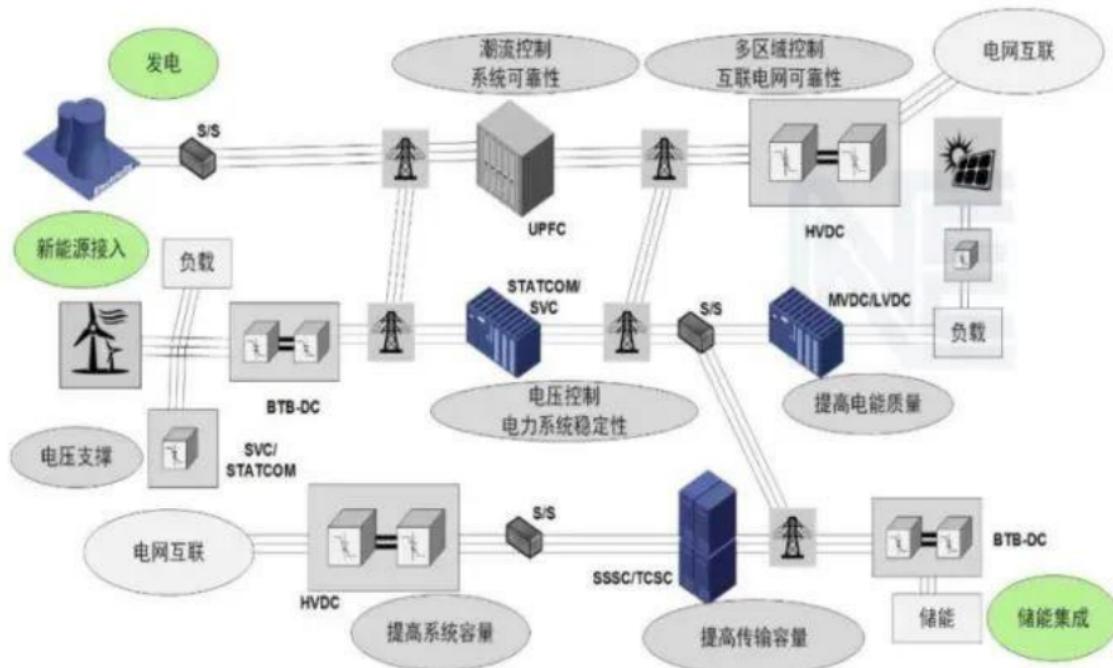
全球范围内的能源与环境的问题引发了新能源的广泛应用，中国计划2030年左右非化石能源（水电、风电和光伏）占一次能源消费比重提高到20%左右。



80%的一次能源转化为电能使用，产生新一代电网，包括特高压交直流输电、柔性交直流输电、分布式交直流主动式配电网。大量的电力电子装置设备被应用到电网之中。

一、背景与意义

新一代电网示范框图^[1]



统一潮流控制器: UPFC

统一电能质量控制器: UPQC

静止无功补偿器: STATCOM

动态电压恢复器: DVR

有源滤波器: APF

直流阀: HVDC

固态变压器: SST

固态断流器: SSB

SVG、SSSC、TCSC....

电力电子化的电力系统

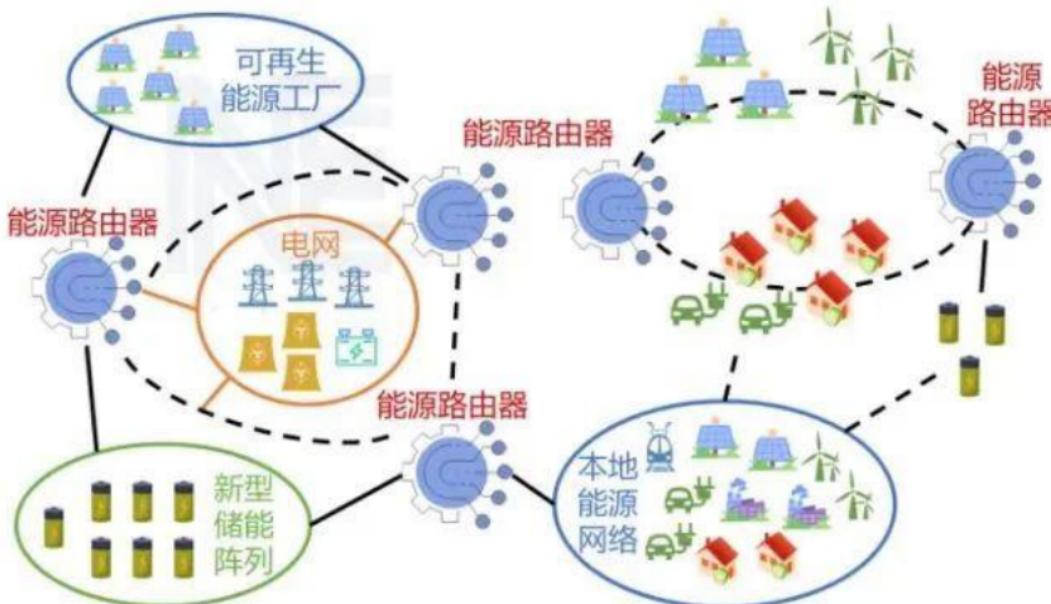
现代电网的支撑技术之一

为什么新一代电网需要用到电力电子技术和装备？电力电子技术和装备带来了哪些特点和变化？

一、背景与意义

新一代电网将发展成为所谓的“**能源互联网**”：它以互联技术为核心，以配电网为基础，以接入大量的分布式可再生能源为主，通过EMS对分布式能源设备实施广域控制，实现多种能源的互补，提高用电效率的智能能源管理系统。

新一代电网就是由分布式电源、微网、装置、电力电子变压器、智能终端和EMS组成。其中**电力电子变压器**（也有人称之为“**能源路由器**”或“**电能路由器**”）成为必不可缺的核心装备。

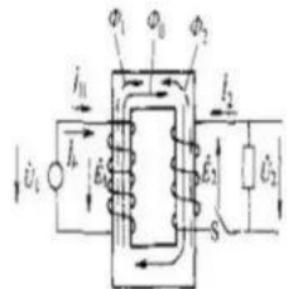


新一代电网的基本形态

一、背景与意义

常规电力变压器

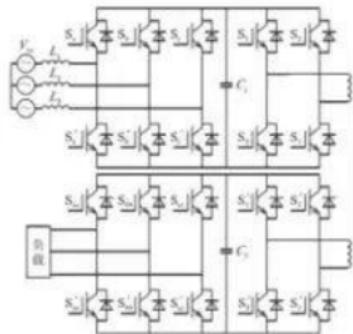
由铜铁构成，在现代电力系统中扮演着非常关键的角色，能够实现交流电压等级变换、电气隔离和能量传递，被广泛用于交流输电系统和配电系统中，是电力系统中应用数量最多的输变电设备之一。



传统配电网中的电力变压器

电力电子变压器

采用电力电子器件和线路及高频变压器实现的具有但不限于传统变压器功能的电力电子变流装置，具有电压变换、电气隔离和能量传输等基本功能，还可以实现无功补偿、谐波治理、电网互联、新能源并网等諸多功能。



新一代电网中的电力电子变压器

一、背景与意义

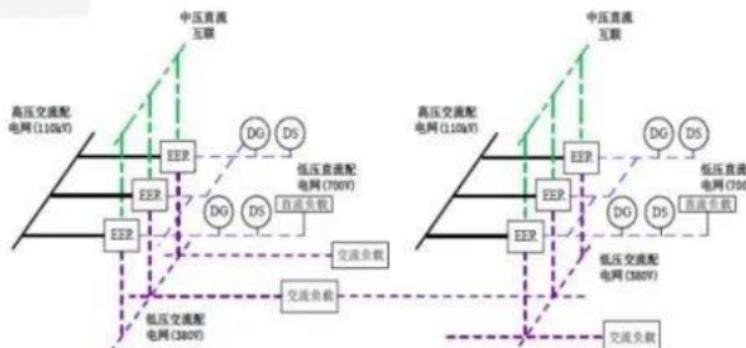
电力电子变压器特征

- 能够为分布式可再生能源发电和储能提供即插即用的交/直流接口
- 能够实现电压变换、电压隔离、提升电能质量、能量双向流动的综合调节能力
- 能够根据故障情况或系统需要，自主地与主网分离，提高电网的自愈性



用于分布式微网系统的自治节点设备

- 从电力系统看：面向主动配电网及智能用电终端的电力管理调节器；
- 从互联网系统的角度来看：物理系统与信息系统深度融合的网络节点装置；
- 从电力电子的角度来看：多端口、多级联、多流向和多形态的电力电子变换器。

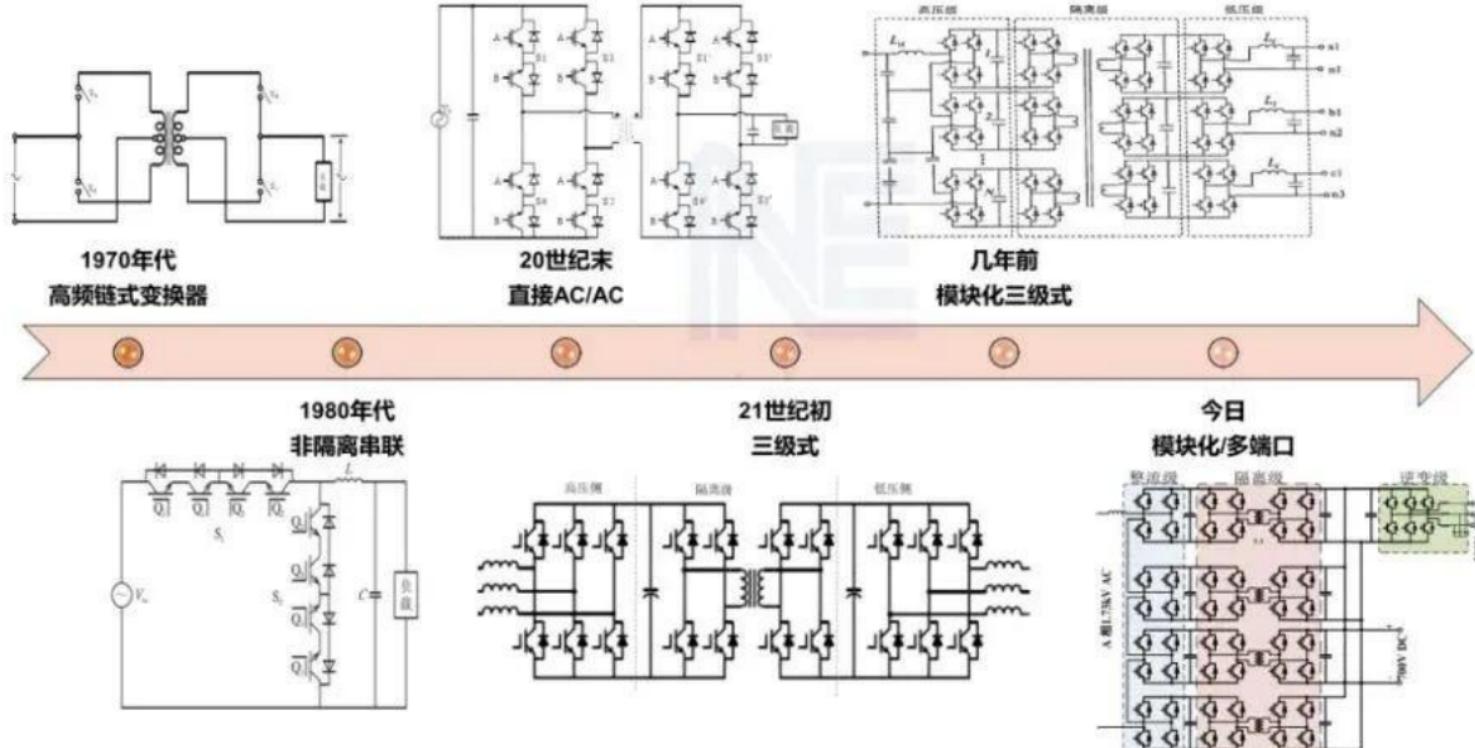


以电力电子变压器为节点的新型混合配电网模型^[1]

^[1]赵争鸣 等 电能路由器的发展及其关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13):3823-3834.

一、背景与意义

- 电力电子变压器的电气结构发展^[1]——多端口、多级联、多路由、多形态

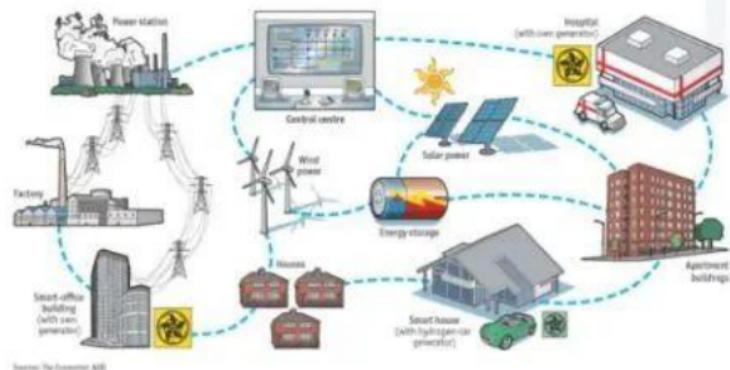


[1] 赵争鸣 等.电能路由器的发展及其关键技术[J].中国电机工程学报,2017,37(13):3823-3834.

二、机遇与挑战

◆ 系统结构与电力电子变压器组合关系 (1)

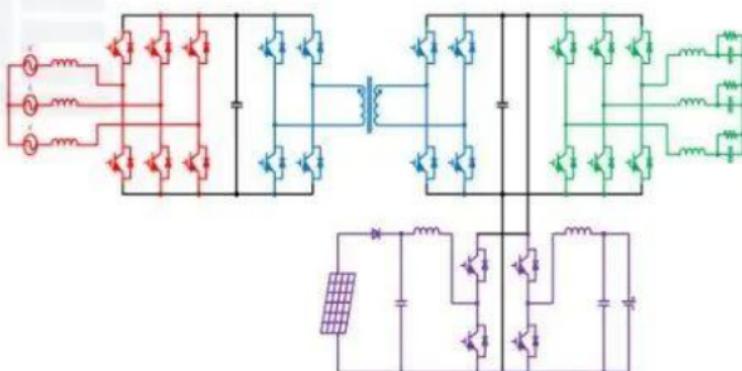
- 电力系统网络结构的顶层研究 → 系统网络结构与互联规律；
- 多端输配电网系统源-网-荷等值建模理论和方法 → 多电力电子变压器相互作用机理与系统间的相互影响规律。



新一代电网的基本构架

(图源: The Economist; ABB)

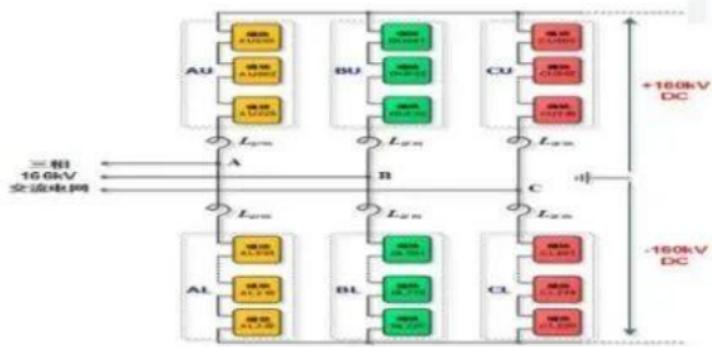
新一代电网 —— 多端柔性直流输电系统 —— 变换器组合 —— 电力电子变压器



典型的多端电力电子变压器拓扑结构

◆ 电力电子变压器模块组合关系 (2)

- 多模块化变流器拓扑结构→适用于电磁瞬态分析的换流拓扑回路模型→不同时间常数的换流拓扑回路中电磁能量变换特征；
- MMC拓扑存在许多缺陷：功率器件数目多，调制和控制复杂，分布式储能电容电压均衡成为难点，各桥臂之间的环流等，需要研究新的拓扑结构。

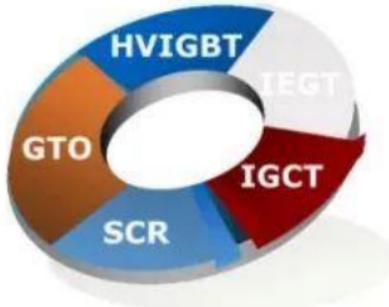


柔性直流输电系统中的电压源型变换器MMC电路结构和实际装置

二、机遇与挑战

◆ 半导体功率器件特性及其组合特性关系 (3)

- 功率半导体器件向两个方向发展：一是提高单个器件的功率和耐压等级；二是采用小功率器件进行组合而达到大容量应用的目的；
- 器件发展目标与装置发展目标并不完全一致，器件追求高压和高频；装置和系统追求高电能质量和高可靠性。



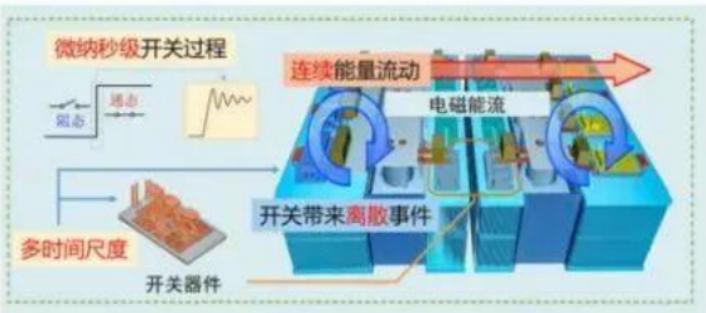
大容量半导体功率器件及其组合

◆ 电力电子变压器系统建模仿真 (4)

- 电力电子变压器由众多子模块组成，结构复杂、控制精度高，对仿真精度、仿真规模和运算速度都提出了很高的要求；
- 多时间尺度的电磁瞬态过程系统仿真算法的研究，在同步性、界面滑连接以及计算速度等方面需要深入研究，特别在仿真耗时和收敛性方面的问题急迫解决。



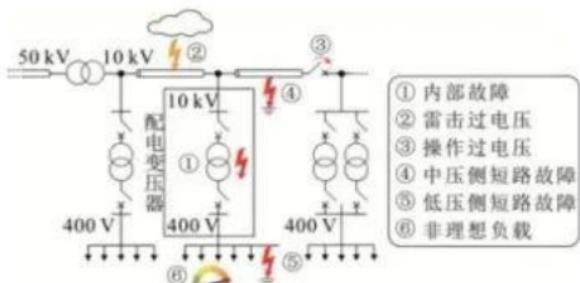
模块化的电力电子变压器



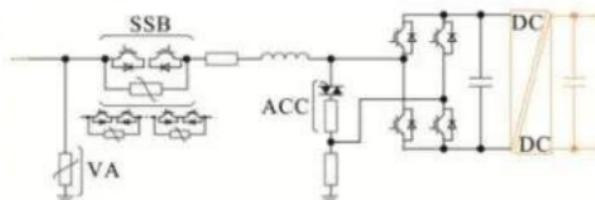
多时间尺度的电磁瞬态过程

◆ 故障保护与半导体开关器件及装置特性 (5)

- 直流电流没有自然过零点，常规直流断路器开断时引起的直流电弧不易熄灭。直流系统阻抗小，其短路电流增长极快；
- 高压直流断路器的隔离和快速恢复不仅要考虑高压直流断路器本身的特性，还需要考虑电力电子变压器的特性。



电力电子变压器典型故障情况^{[1][2]}



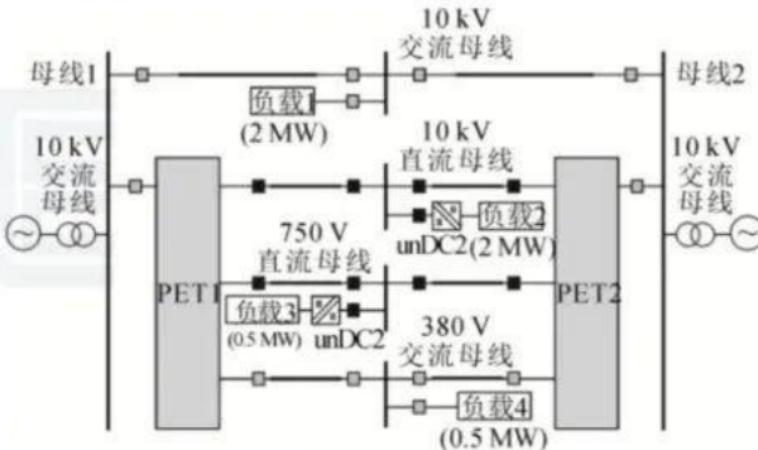
中压交流端口保护策略^{[1][2]}

[1] 李凯, 赵争鸣 等.面向交直流混合配电系统的多端口电力电子变压器研究综述[J].高电压技术,2021,47(04):1233-1250.

[2] GUILLOD T, KRISMER F, KOLAR J W. Protection of MV converters in the grid: the case of MV/LV solid-state transformers[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2017, 5(1): 393-408.

◆ 电力电子变压器集群系统建模与协调控制 (6)

- 多电力电子变压器集群系统建模 → 柔性交直流输配电系统中多电力电子变压器集群综合控制策略。
- 针对多电力电子变压器集群系统进行分层（功率模块、变换单元、电力电子变压器组合及系统），协调控制成为急迫解决的问题：如何组网，如何仿真分析，如何控制。



两台四端口PET集群运行实例[1][2]

[1] 李凯, 赵争鸣 等. 面向交直流混合配电系统的多端口电力电子变压器研究综述 [J]. 高电压技术, 2021, 47(04): 1233-1250.

[2] 杨汾艳 等. 多端口级联式电力电子变压器可靠性评估模型及其应用[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 41-49.

三、建模与仿真

◆ 综合来看，电力电子变压器的设计与运行给建模仿真带来重大挑战

结构复杂，功能丰富，控制多样
对仿真建模要求高



谐波问题



电压调节



保护方案



负载平衡与配电管理

功能设计（电网兼容性需考虑的问题）



多级控制



多模式控制



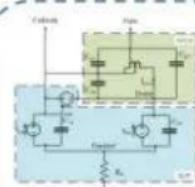
鲁棒性与稳定性

控制设计（多场景验证需开展的测试）

常规仿真技术及软件仿真耗时长
开关物理模型仿真难收敛

变换系统	SST1 (max 10 kHz)	SST2 (max 20 kHz)
开关器件数量	约80个	约500个
仿真耗时 (1s过程)	约3小时	约20小时

只能简化等效，不能实现精准设计



机理复杂
仿真发散

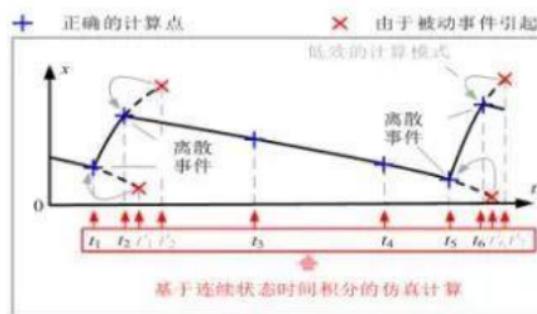
只能理想开关，不能认知瞬态行为和故障

◆ 传统仿真方法：

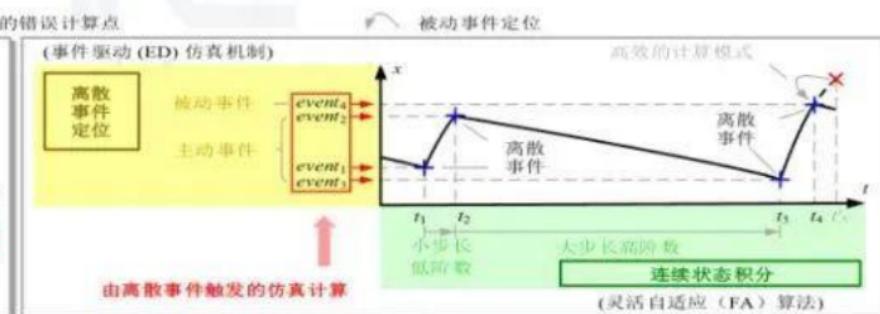
- 两个问题：1) 计算时间太长；2) 参数矩阵刚性，结果不收敛

◆ 离散状态事件驱动 (DSED) 仿真机制

- 事件驱动仿真机制：通过离散的事件划分仿真进程，仿真时钟由事件驱动。
- 灵活自适应算法：通过自适应调整步长减少计算点数、提升仿真速度，计算量相比经典 Ode45 算法大幅降低。



传统仿真方法示意图
时间离散，不适合电力电子系统



DSED 仿真方法示意图
事件驱动，高效的电力电子仿真算法

三、建模与仿真

◆ DSED中采用的开关器件瞬态建模方法 (PAT模型)

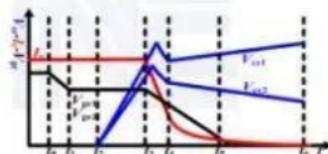
- 建模目标：反映器件瞬态中重要的开关特性：能力、损耗、时延、频率
- 建模方法：通过瞬态过程的时间分段实现机理解耦与参数解耦
- 参数获取：所有参数可完全从Datasheet直接获取
- 基于上述思想，提出功率开关器件换流单元的瞬态分段分析 (PAT) 模型



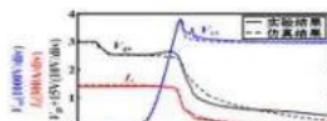
理想开关特性 (ms)



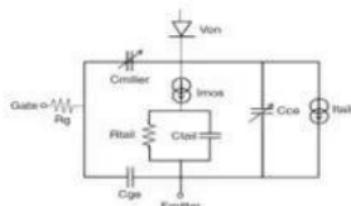
理想线性开关特性 (10-100us)



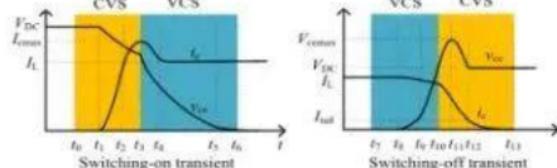
分段开关特性 (100ns-us)



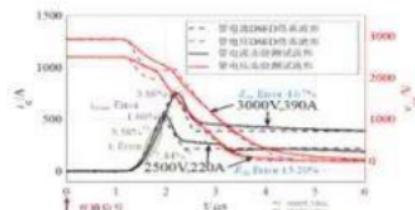
非理想开关特性 (1-10ns)



其他仿真软件中的瞬态模型
(收敛性差、计算速度慢、参数难获取)



PAT模型的波形和阶段划分
(解决收敛性问题、计算速度提升、
参数全部从Datasheet获取)

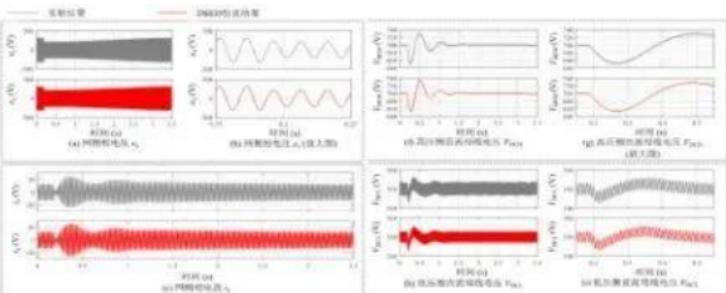


PAT模型与实验结果对比

三、建模与仿真

◆ 算例1：50kVA固态变压器

IGBT	16个	SiC MOSFET	8个
电压等级	网侧三相220V, 负载单相220V		
开关频率	最高20kHz		

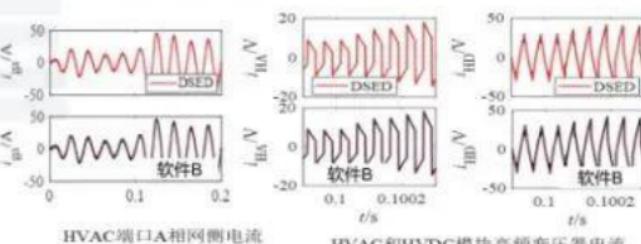


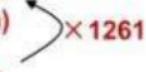
仿真工具	器件模型	仿真耗时 (s)
软件A (非理想开关)	IGBT/PiN diode: <i>igbt_b</i> and <i>dp1</i> SiC MOSFET/SiC SBD : <i>mp1</i> and <i>dp1</i>	3440.0 
DSED (非理想开关)	PAT模型	4.8

算例规模、与实验结果对比及仿真耗时对比

◆ 算例2：10kV-2MW固态变压器

IGBT	32个	SiC MOSFET	544个		
子模块数	87个	高频变压器			
电压等级	HVAC 10kV, HVDC 10kV LVAC 220V, LVDC ±750V				
开关频率	最高20kHz				

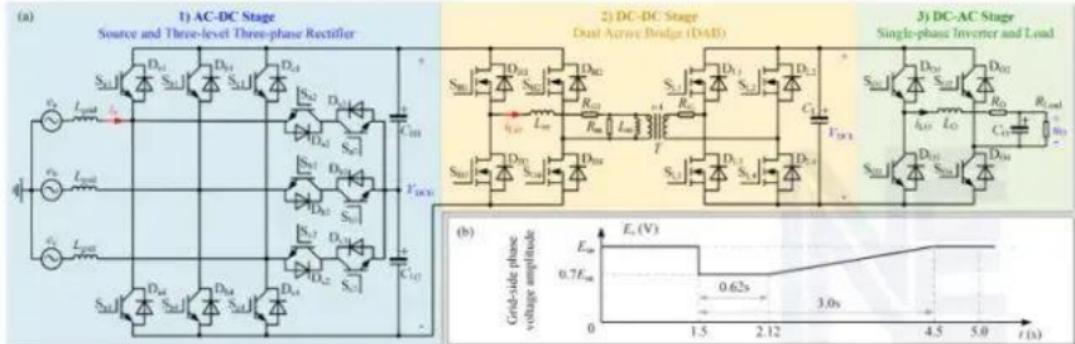


仿真工具	相对误差	仿真耗时 (s)
软件B (理想开关)	0.00264%	22328 (6.2h) 
DSED (理想开关)	0.00183%	17.7

算例规模、与其他仿真软件的对比及仿真耗时对比

三、建模与仿真

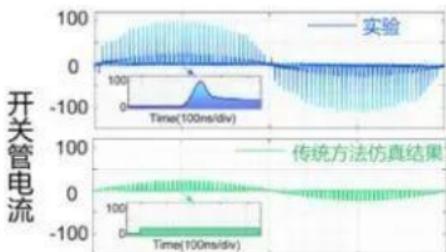
◆50kVA固态变压器 (SST) , 有效认知微-纳秒级开关瞬态过程



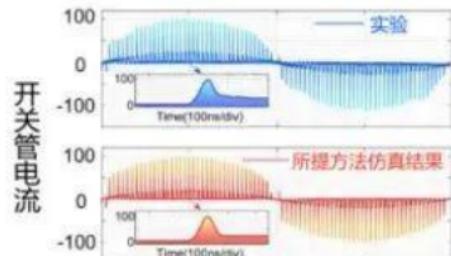
装置结构图及电网低电压穿越测试工况



装置样机实物图



国际通用软件仿真结果

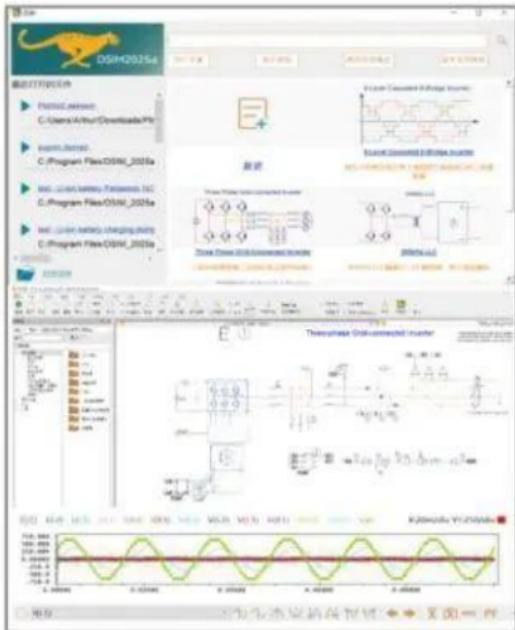


DSED方法仿真结果

精准分析瞬态边界
实现装置尽限设计
降低成本、提升可靠性

三、建模与仿真

◆ 基于离散状态事件驱动 (DSED) 建模仿真方法, 研制了通用**电力电子仿真软件DSIM** 已发布7个版本更新, 大规模系统**仿真速度明显提升**, **支持开关瞬态模型**且收敛性增强



2025a软件版本亮点

- 支持MATLAB的DSIM应用程序编程接口 (API) ;
- 支持C/C++的DSIM应用程序编程接口 (API) ;
- 与Simulink**联合仿真**的速度与灵活性增强;
- 波形显示**和数据后处理更稳定易用;
- 软件用户体验**持续提升;
- ...

DSIM软件界面



三、建模与仿真

◆DSIM软件模型库、仿真案例与软件功能不断丰富

350
元件

电力电子开关	无源和有源元件
各类开关器件和各式变换单元组合（半桥、H桥、二级管桥、NPC三电平、T型三电平、DAB、IGCT、GTO等）	RLC元件、磁元件、耦合电感、单相/多相各式绕组变压器、热元件（热阻、热容等），多种类型的独立和受控电源等
电机和机械负载模型	可再生能源模型
控制模型	
感应/永磁/绕线式同步电机等模型，多种机械负载与传感器。	太阳能电池、锂离子电池、风力发动机等可再生能源与储能模型

100
案例

电力系统	电机控制
并网逆变器、MMC变换器、光伏DC/DC变换器、微网系统等	感应电机和永磁同步电机矢量控制、VVVF控制、无传感器控制等
工业电源	开关瞬态
LLC变换器、正激/反激/推挽电路、buck/boost电路、DAB等	多脉冲测试电路、共模EMI分析、开关损耗计算与结温估计等

损耗计算&电热耦合



基于开关器件物理模型可以准确开展整个变换系统的仿真，计算开关和导通损耗，并搭建热路模型评估器件结温状况。

频率扫描分析



通过频率扫描分析功能，可以获得电路或控制回路的频率响应，从而优化设计并确保稳定性。

C模块&动态链接库



C模块使得用户可以编写定制化模型，动态链接库（DLL）则提供了用户编译的DLL模型与DSIM仿真电路之间的接口。

MATLAB/Simulink联合仿真



Cosim模块能够实现DSIM和MATLAB/Simulink之间的联合仿真，充分利用DSIM和Simulink的优势。

DSIM API (MATLAB)



可供MATLAB调用的API接口函数涵盖了电路图修改、仿真控制和数据后处理等各个环节，用户能够快速上手并且高效利用仿真过程中的各种功能。

DSIM API (C/C++)



能够帮助用户通过编写自定义功能和程序轻松实现电路仿真任务，实现参数设计，多场景测试和更多自定义功能，满足大多数电路仿真应用场景需求。

三、建模与仿真

◆面向高等院校的教学和科研支持计划，免费使用最新版本DSIM软件



DSIM

面向高等院校的DSIM教学支持计划 (2025)

立即申请面向高等院校教师的DSIM教育支持计划，免费获得最新版本的DSIM软件使用许可
轻松获得功能强大的教学工具及相应教程资源，课程更加生动完善

立即申请

DSIM

面向高等院校（非盈利性教育机构）的DSIM研究支持计划 (2025)

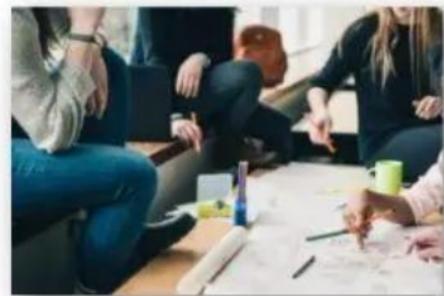
DSIM推出面向高等院校（非盈利性教育机构）的研究支持计划 (2025)，为高等院校教师、科研人员提供软件使用许可

立即申请



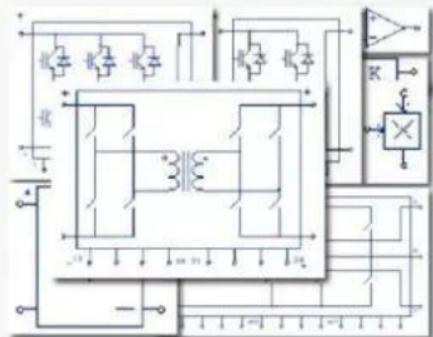
教学科研

电力电子课程教学
器件及其应用研究
新型电路拓扑分析
装置设计评估优化
控制算法仿真测试

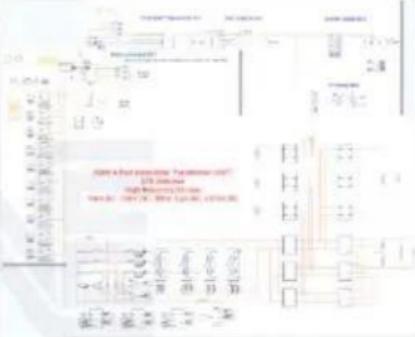


三、建模与仿真

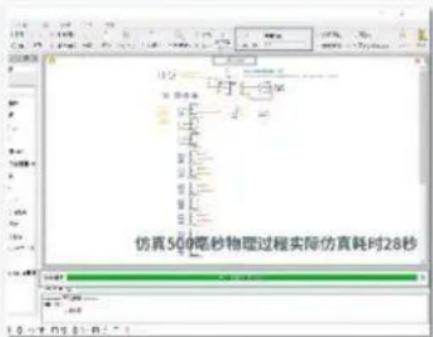
◆DSIM对SST仿真的支持能力



全面的元件库
提供SST设计所需的
各类主电路元件和
控制元件



丰富的SST案例
内置SST模块案例
(CHB、LLC等)
及整机案例
(两端口/多端口
等)

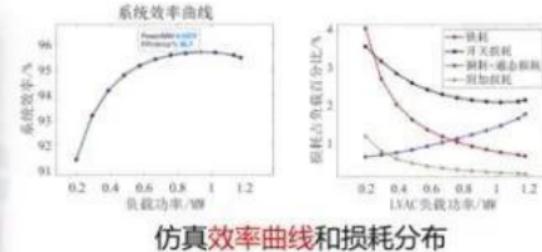
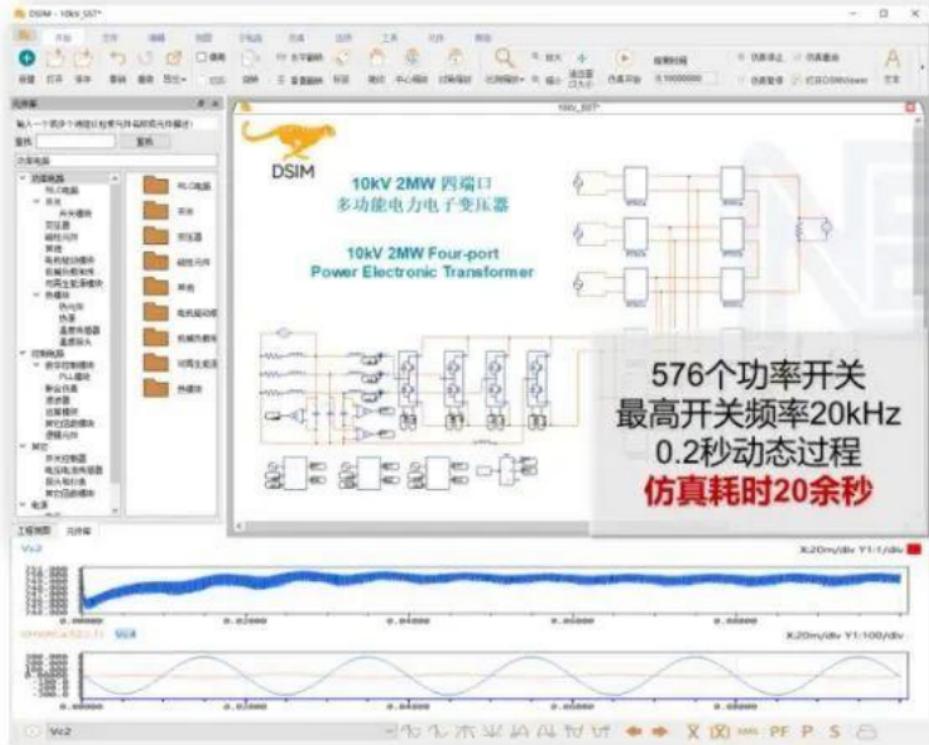


高仿真速度
大规模复杂SST
装备仿真，不牺
牲精度前提下，
速度提升10-100
倍甚至更高

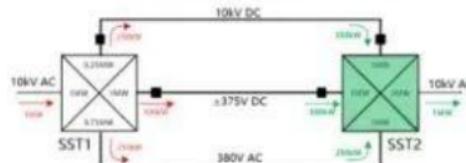


实践验证
“实现了几乎可以
完全表征实际物理
软硬件系统的高精
度数值模拟，耗时
仅为实际过程时间
的15倍（1秒过程
耗时15秒）”

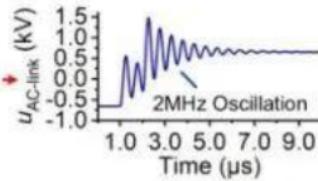
利用DSIM开展多端口电力电子变压器仿真设计与分析



仿真效率曲线和损耗分布

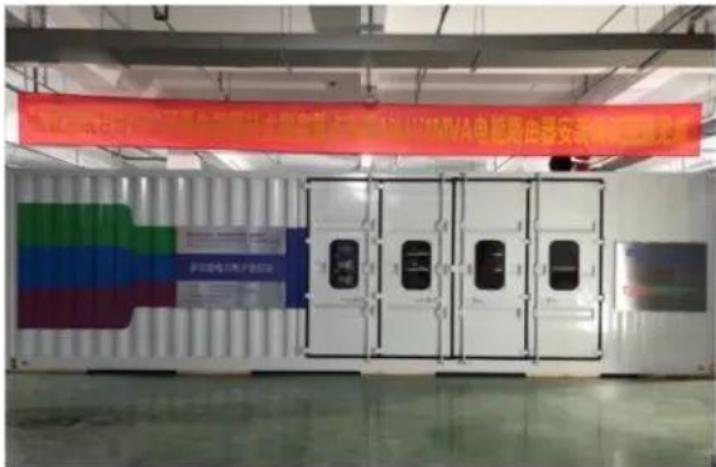


仿真多台装置集群运行和主从切换



分析2MHz高频振荡，解决EMI和可靠运行问题

交直流混合的分布式可再生能源关键技术、核心装备和工程示范研究



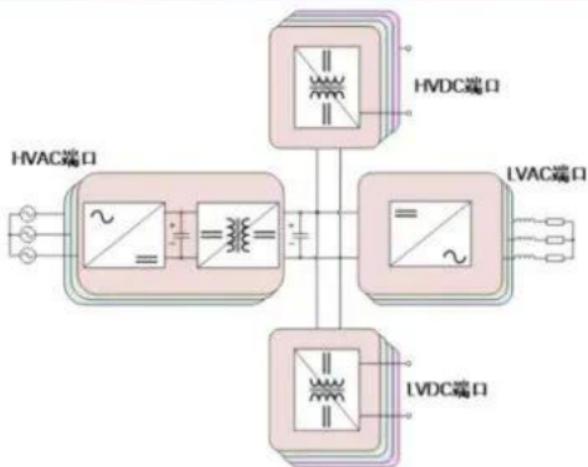
50kVA/380VAC/400VDC/220VAC
多功能电力电子变压器

2MW/10KVAC/10kVDC/
+ -375VDC/380VAC
多功能电力电子变压器



多端口、多级联、多流向、多形态 电力电子变压器 (MW/10kVAC/10kVDC/380VAC/+-375VDC)

研发具有多端口、多级联、多流向、多形态特点的多功能电力电子变压器，其中任意端口之间具备电气隔离特性，显著提升整机系统效率、可靠性及灵活组网能力

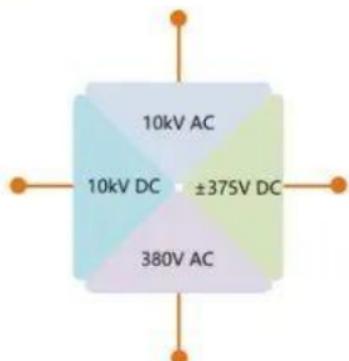


四端口电力电子变压器的主电路总体结构

- ◆ 电力电子变压器的4个端口可以独立运行，也可联合运行
- ◆ 任意端口之间电气隔离，各端口接地方式互不干扰
- ◆ 任意端口故障，其他端口仍然可正常运行
- ◆ 显著提升整机系统效率、可靠性及灵活组网能力

具备集群运行能力：分布、共享、互补、优化

电力电子变压器具备**多端口、多级联、多流向、多形态**四大特点，显著提升了整机系统效率及灵活组网能力

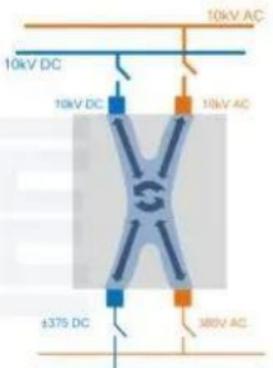
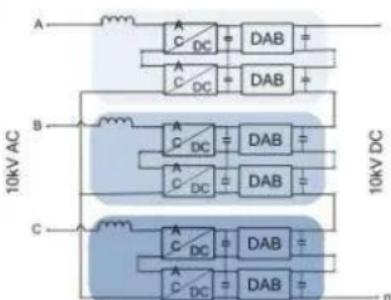


多端口

具备10kV交流、380V交流、10kV直流、 $\pm 375V$ 直流**四种电能端口**

多级联

电力电子变压器内部采用
DAB (双向有源桥) **级联型**
模块化结构

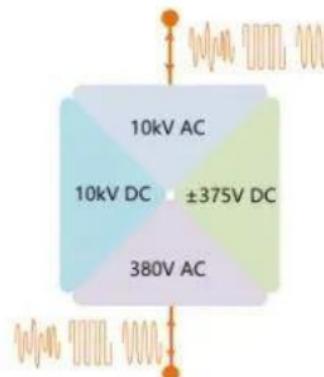


多流向

每个端口之间都有能量通
路，任意两端口可以能量
流通，实现**电能灵活路由**

多形态

具备**电能质量控制功能**，
便于实现灵活组网



多端口、多级联、多流向、多形态 电力电子变压器
(3台1MW, 总容量3MW/10kVAC/10kVDC/380VAC/+-375VDC)



整机系统效果图



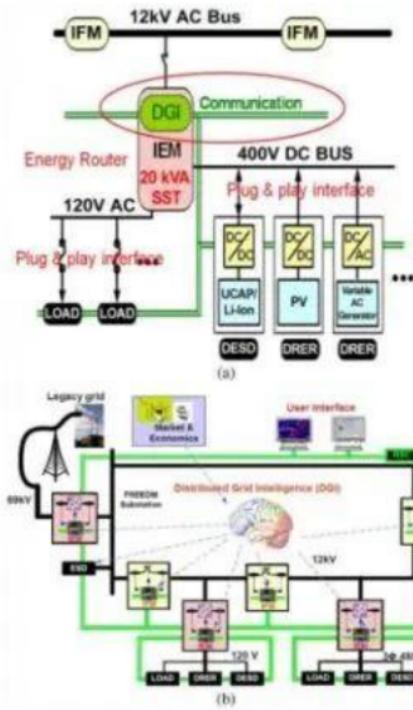
PET-I型现场图 (集装箱尺寸: 10*2.5*3m³)



PET-II型实验室安装调试完成图 (8*2.5*3m³)

五、发展与展望

➤ 能源互联网&多功能电力电子变压器——未来发展和应用



可再生能源电网：

主电路是复杂的SST，高/低压交直流端口，功能上实现发、输和用电的完全解耦。

能量控制中心：

将电网有层次的链接起来，作为能量流的“路由”为负载和分布式能源提供接口。

能源计算机：

能量路由器处于核心地位，具有交直流端口，将各种负载和分布式能源连接起来。

Energy Router in FREEDM^[1]

[1] A. Q. Huang, M. L. Crow, G. T. Heydt, J. P. Zheng and S. J. Dale, "The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) System: The Energy Internet," in Proceedings of the IEEE, vol. 99, no. 1, pp. 133-148, Jan. 2011

五、发展与展望

■ 技术层面：

面向电力电子装置与系统，将传统的“理想开关、集中参数和信号PWM调制”电力电子技术变革为基于“**非理想开关特性、杂散参数设计和电磁能量脉冲控制**”的新一代电力电子技术。

■ 应用层面：

发展**高效建模仿真方法及工业软件**，研制面向现代电网的**新一代电力电子装置**和系统（电力电子变压器），提升电力电子变换能力，**提高系统可靠性**，为分布式发电与微电网——新一代电网的发展提供更好的技术支撑！

“面向新一代电网需求的电力电子技术与装备”

谢 谢！