



International Journal of Electrical Power and Energy Systems

Configuration and Control Strategy of Flexible Traction Power Supply System Integrated with Energy Storage and Photovoltaic

作者：陈民武 代先锋 赖俊宏 陈垠宇 Stuart Hillmansen 田中北

2023. 08



CONTENT

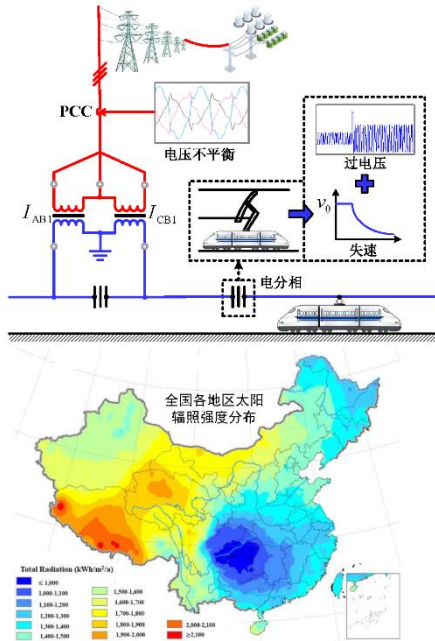
01 研究背景与意义

02 系统拓扑与工作原理

03 分层协调控制策略

04 仿真及硬件在环实验验证

01 研究背景与意义



背景 1

- 传统牵引供电系统中的**电分相**和以**负序**为主的电能质量问题成为了**制约电气化铁路高速重载化发展的关键因素**，**同相供电技术**的提出有效解决以上问题，并且已逐步运用于**工程实践**中；

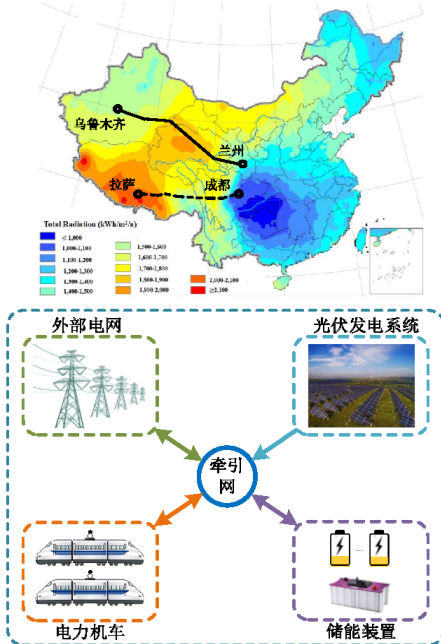
背景 2

- 动车组制动时会产生大量**再生制动能量**，但其**利用率较低**，而**储能装置**的接入可以**高效利用再生制动能量**，**降低铁路系统能耗**；

背景 3

- 为实现“碳中和”和可持续发展目标，以**光伏发电**为代表的**可再生能源**备受青睐，我国**光照资源丰富**但由于发电与用电**分布不均**，**光伏电能的安全可靠消纳**是目前亟待解决的问题。

01 研究背景与意义



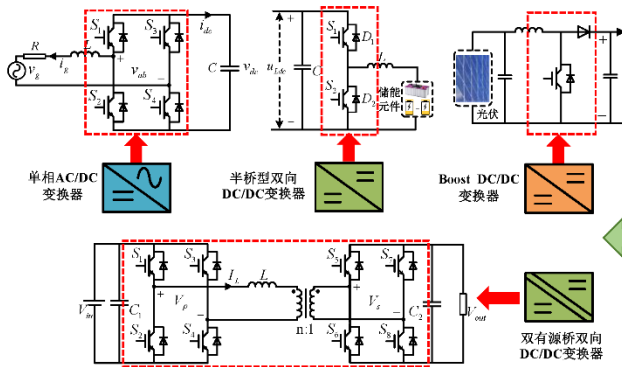
意义

- 电气化铁路分布广泛，**铁路网**与**可再生能源网**在地理位置上存在着**天然交汇**，此外，**牵引负荷功率需求较大**，具有很高的**能量消纳潜力**；将**光伏和储能**接入牵引供电系统不仅可以**降低铁路的综合能耗**，还可以促进**光伏电量和再生制动能量**的**就近消纳**，**缓解能源供需矛盾**。

- 储能和光伏**的集成引入了新的**能量流动渠道**，使得牵引供电系统潮流更加**灵活**；同时其既要实现**负序补偿**，又要**有效利用再生制动能量和光伏发电量**。因此，为系统的**多功能运行**，需对其**潮流管理方案和协调控制策略**展开研究，这对电气化铁路的**节能减排、高效安全运行**具有重要意义。

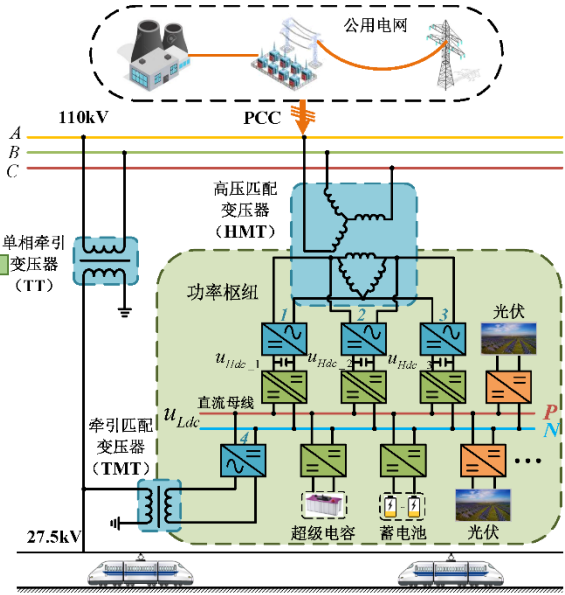
02 系统拓扑与工作原理

集成光储的柔性牵引供电系统拓扑结构



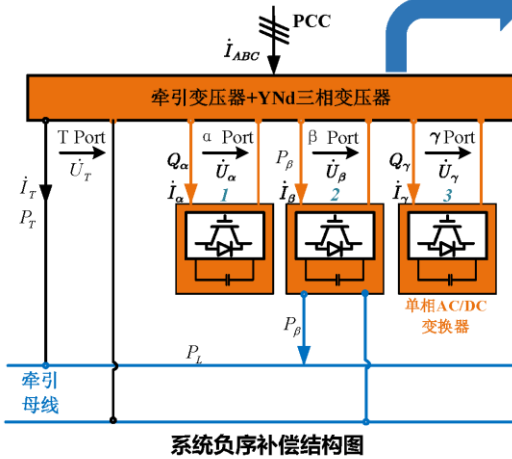
优势特点

- 引入一个综合功率枢纽，增加了系统潮流的可控性，可以实现再生制动能量的回收利用和光伏电能的就近消纳；
- 网侧三组单相AC/DC变换器协同完成系统负序补偿，实现了对补偿容量的分割；
- 低压直流母线为铁路沿线分布式光伏发电系统的就地接入和储能装置的集成提供了友好接口。



02 系统拓扑与工作原理

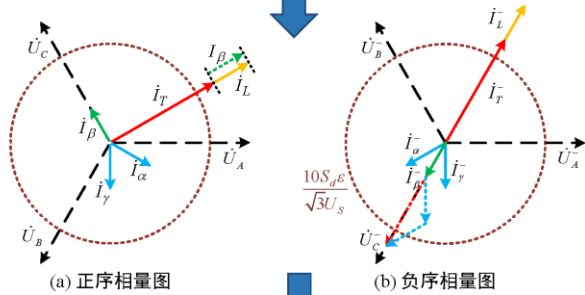
系统负序补偿机理



$$\frac{S_d \varepsilon_r}{100\sqrt{3}U_s} e^{-j2\psi_r} = \frac{1}{\sqrt{3}}(k_r I_L - k_\beta I_\beta) e^{-j2\psi_r} + \frac{1}{\sqrt{3}} k_\alpha I_\alpha e^{-j(2\psi_\alpha + \varphi_\alpha)} + \frac{1}{\sqrt{3}} k_\beta I_\beta e^{-j2\psi_\beta} + \frac{1}{\sqrt{3}} k_\gamma I_\gamma e^{-j(2\psi_\gamma + \varphi_\gamma)}$$

系统允许负序电流

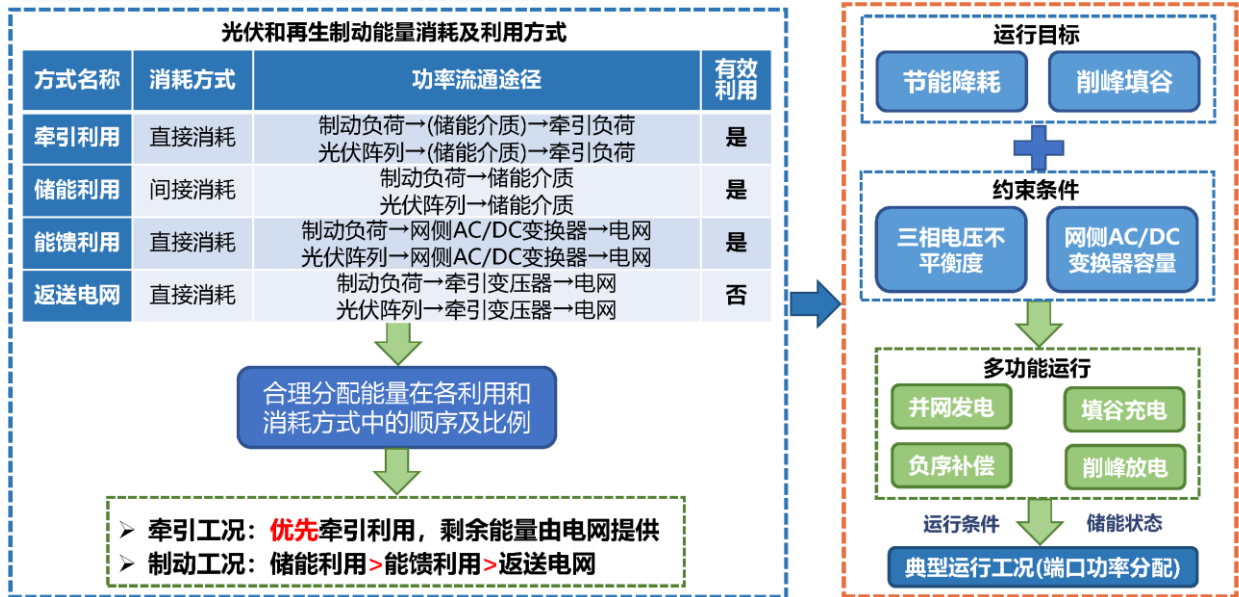
$$= \frac{1}{\sqrt{3}}(k_r I_L - 2k_\beta I_\beta) e^{-j2\psi_r} + \frac{1}{\sqrt{3}} k_\alpha I_\alpha e^{-j(2\psi_\alpha + \varphi_\alpha)} + \frac{1}{\sqrt{3}} k_\gamma I_\gamma e^{-j(2\psi_\gamma + \varphi_\gamma)}$$



- 有功型负序补偿与无功型负序补偿相结合的三端口补偿方案

02 系统拓扑与工作原理

集成光储的柔性牵引供电系统功率分配

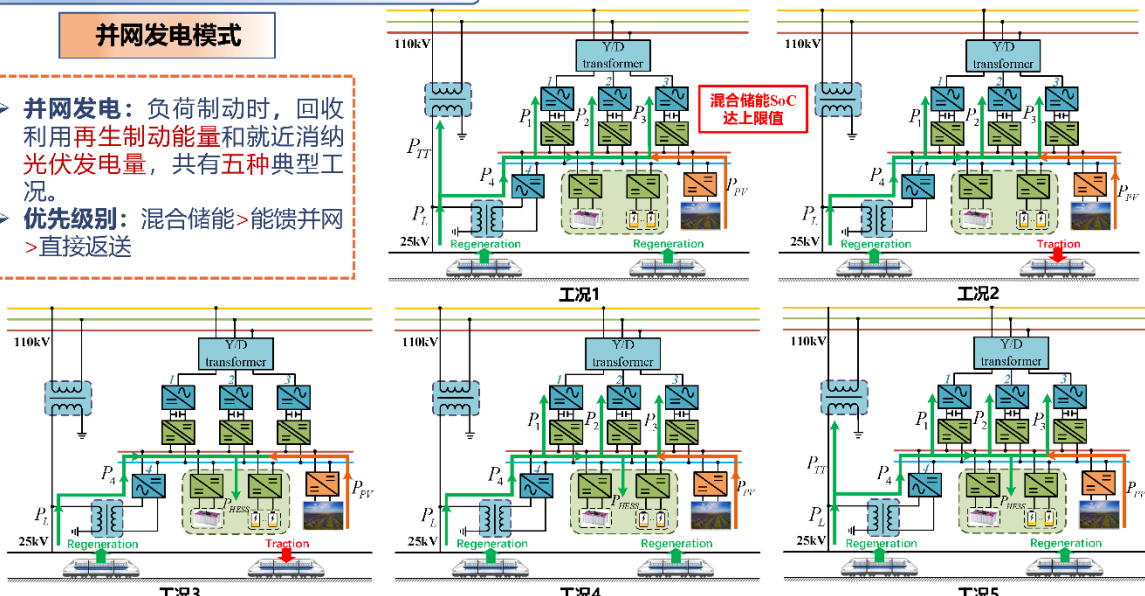


02 系统拓扑与工作原理

集成光储的柔性牵引供电系统运行模式

并网发电模式

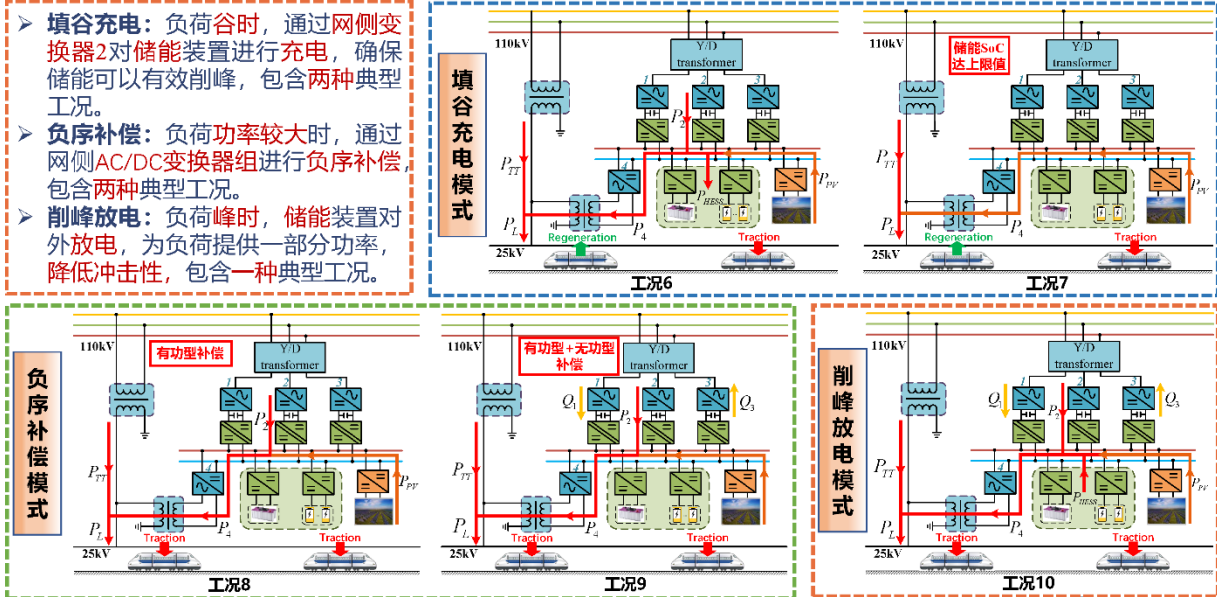
- 并网发电: 负荷制动时, 回收利用再生制动能量和就近消纳光伏发电量, 共有五种典型工况。
- 优先级别: 混合储能 > 能馈并网 > 直接返送



02 系统拓扑与工作原理

■ 集成光储的柔性牵引供电系统运行模式

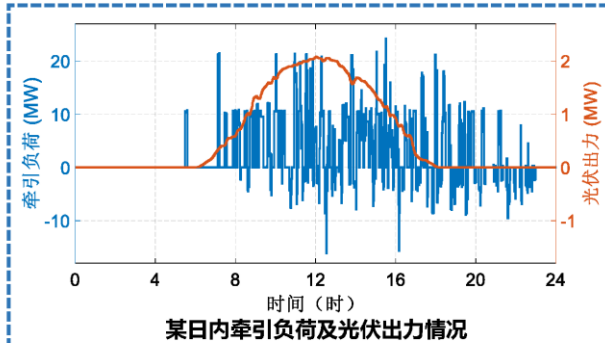
- **填谷充电**：负荷谷时，通过网侧变换器2对储能装置进行充电，确保储能可以有效削峰，包含**两种**典型工况。
- **负序补偿**：负荷功率较大时，通过网侧AC/DC变换器组进行**负序补偿**，包含**两种**典型工况。
- **削峰放电**：负荷峰时，储能装置对外放电，为负荷提供一部分功率，降低冲击性，包含**一种**典型工况。



02 系统拓扑与工作原理

■ 基于实测数据的算例分析

(1) 输入参数



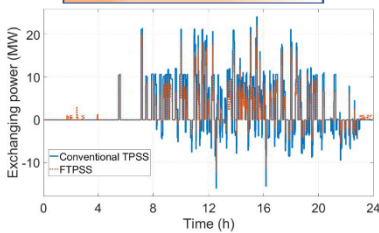
- 牵引负荷具有较强的**随机波动性**，在牵引状态和制动状态的相互转换且功率大小**分布随机**，其中最大牵引功率达到**23.56MW**，最大制动功率达**16.14MW**；
- 光伏发电系统的最大**输出功率**随着一天中太阳辐照强度改变而变化，并也伴随着一定的**随机波动性**，最大输出功率可达**2.08MWp**；

公用电网			单相AC/DC变换器		混合储能		
U_s (kV)	S_d (MVA)	ε_r (%)	$S_{1,2,3}^{rate}$ (MVA)	S_4^{rate} (MVA)	SoC 范围	P_{HESS}^{max} (MW)	S_{HESS}^{rate} (MWh)
110	500	2	2	10	0.2~0.8	4	5

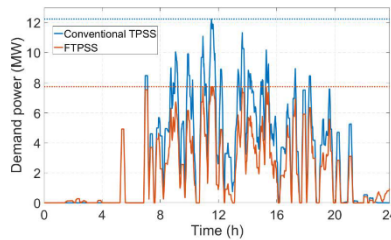
02 系统拓扑与工作原理

基于实测数据的算例分析

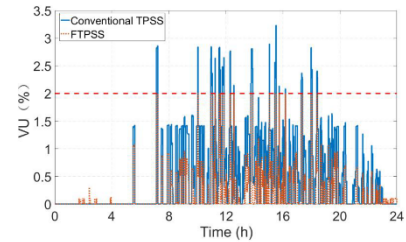
(2) 工作效果比较



(a) 交互功率



(b) 需求功率



(c) 电压不平衡度

系统运行指标对比

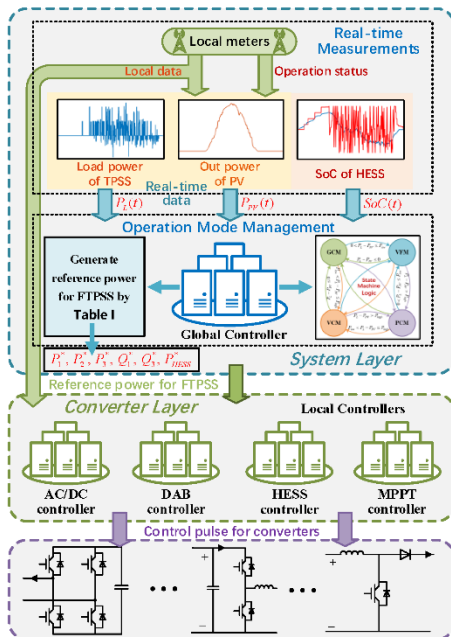
指标	传统牵引供电系统	混合同相供电系统	提升百分比
电压不平衡度	3.23%	2%	38.08%
最大需求功率	12.24MW	7.74MW	36.76%
再生制动能量利用率	0	65.21%	-
光伏能量利用率	-	100%	-
综合能耗	71.39MWh	47.14MWh	33.97%

- 柔性牵引供电系统削峰填谷效果明显，系统与电网之间的交互功率大幅减少，综合能耗从71.39MWh降低到了47.14MWh；
- 系统最大需量功率由12.24MW降至7.74MW，减弱了对牵引变压器的冲击；
- 传统牵引供电系统三相电压不平衡度多次超过限值，而混合同相供电系统始终满足标准要求2%。

11

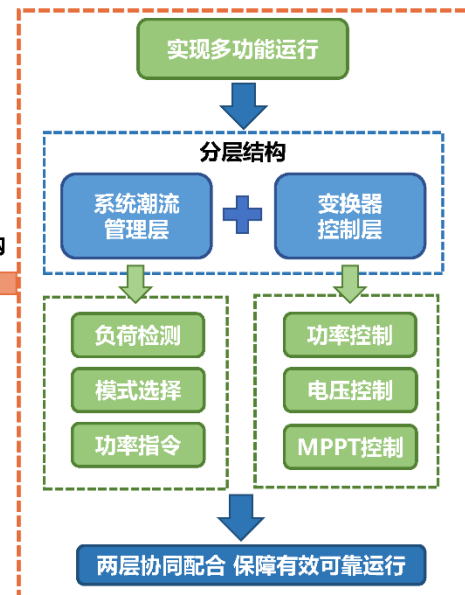


03 分层协调控制策略



分层协调控制策略结构

多功能运行

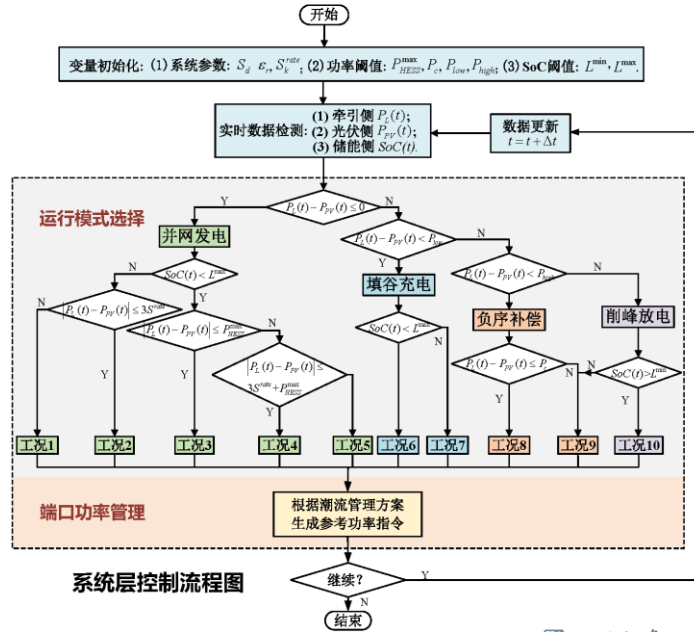
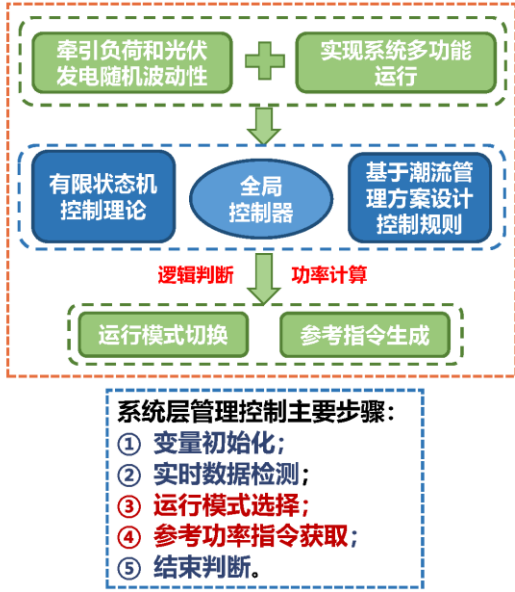


12



03 分层协调控制策略

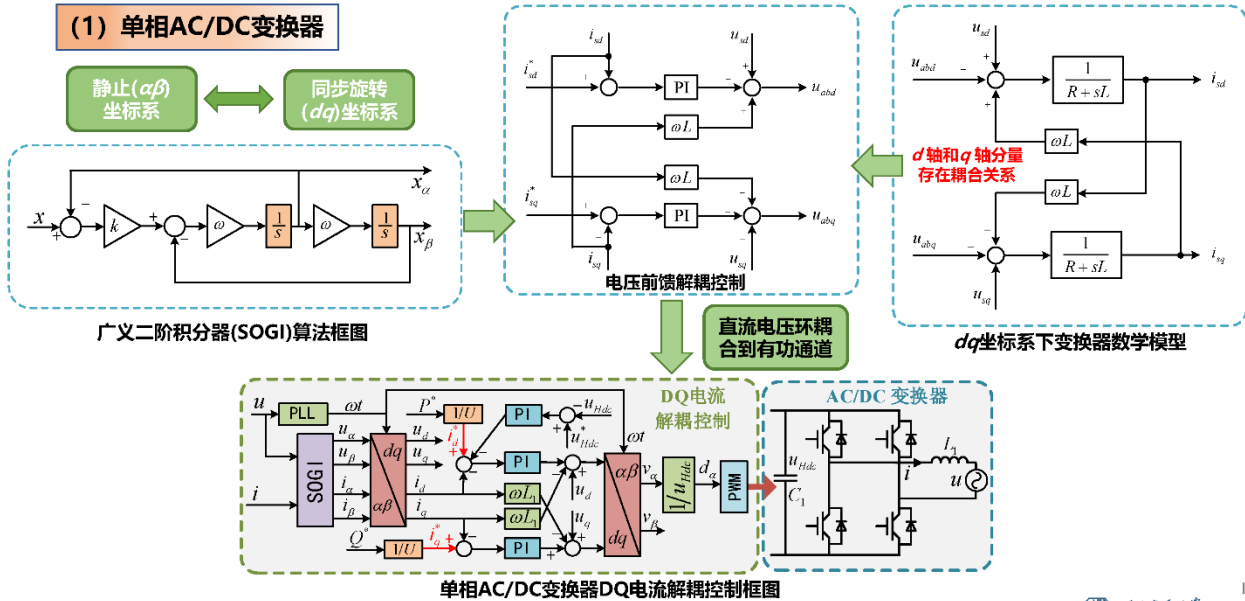
■ 系统潮流管理



03 分层协调控制策略

■ 变换器控制层

(1) 单相AC/DC变换器

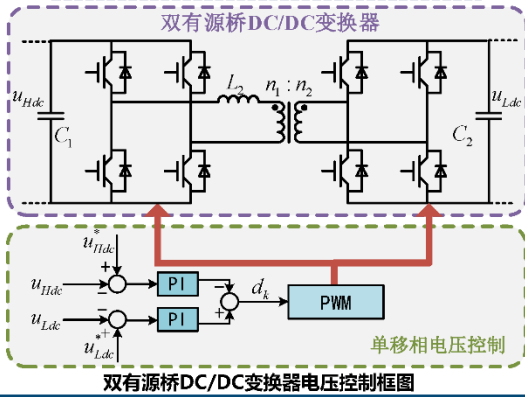


03 分层协调控制策略

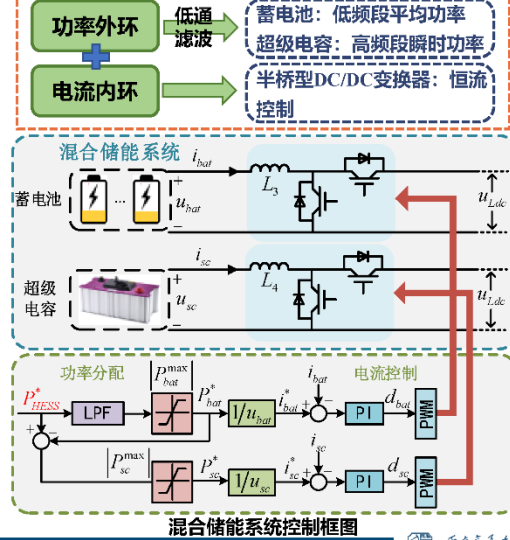
■ 变换器控制层

(2) 双有源桥DC/DC变换器

- 维持高压直流环节和低压直流母线电压的稳定；
- 实现能量双向传输；
- 单移相控制：无需复杂计算，控制简单。



(3) 混合储能装置



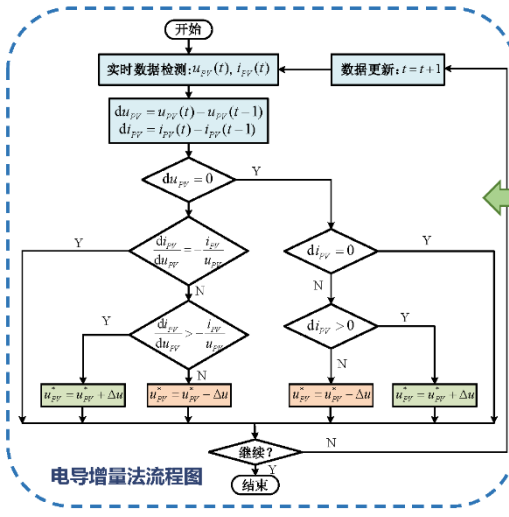
15



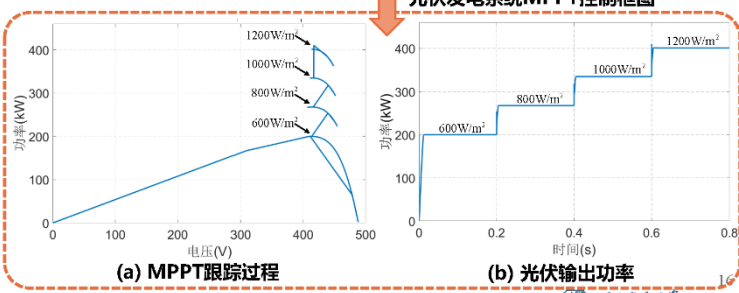
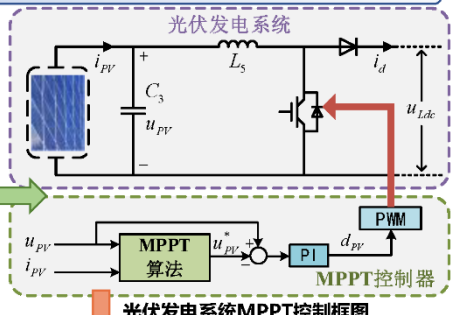
03 分层协调控制策略

■ 变换器控制层

(4) 光伏发电系统



- 采用最大功率点跟踪 (MPPT) 控制，保证光伏阵列始终最大出力；
- 采用电导增量法作为 MPPT 控制器算法。



16



04 仿真及硬件在环实验验证

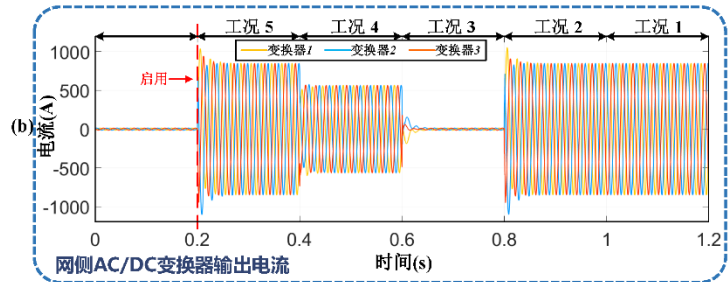
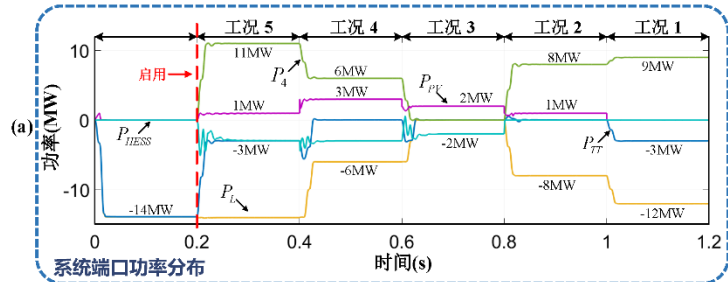
Matlab/Simulink平台部分仿真结果

并网发电模式仿真结果

- **功率分布:** 启用前再生制动能量直接通过牵引变压器返回电网, 启用后再生制动能量和光伏能量通过混合储能和能馈装置得到有效利用。
- **输出电流:** 网侧AC/DC变换器的输出电流均具有良好的正弦性, 三相对称并网。

工况参数设置

典型工况	牵引负荷功率	光伏输出功率
工况1	-12MW	0
工况2	-8MW	1MW
工况3	0	2MW
工况4	-6MW	3MW
工况5	-14MW	1MW



17

04 仿真及硬件在环实验验证

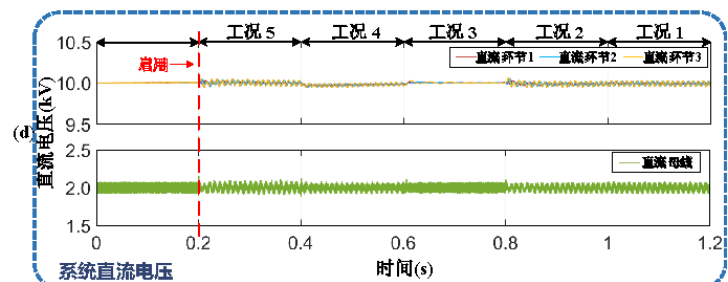
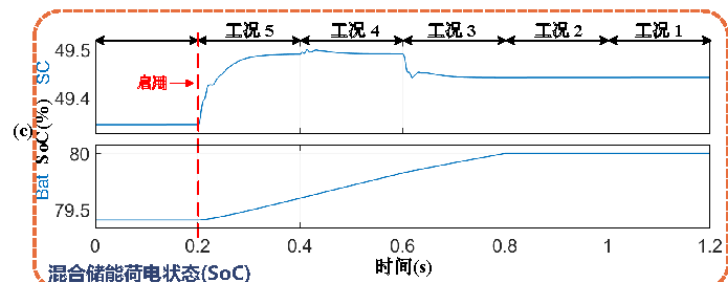
Matlab/Simulink平台部分仿真结果

并网发电模式仿真结果

- **荷电状态:** 储能介质荷电状态随着充电过程而上升, 当蓄电池荷电状态达到上限值0.8, 混合储能停止充电。
- **直流电压:** 高压直流环节和低压直流母线电压在各个工况下始终保持稳定。

工况参数设置

典型工况	牵引负荷功率	光伏输出功率
工况1	-12MW	0
工况2	-8MW	1MW
工况3	0	2MW
工况4	-6MW	3MW
工况5	-14MW	1MW



18

04 仿真及硬件在环实验验证

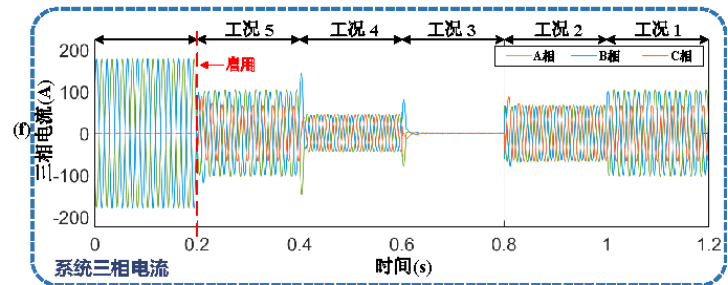
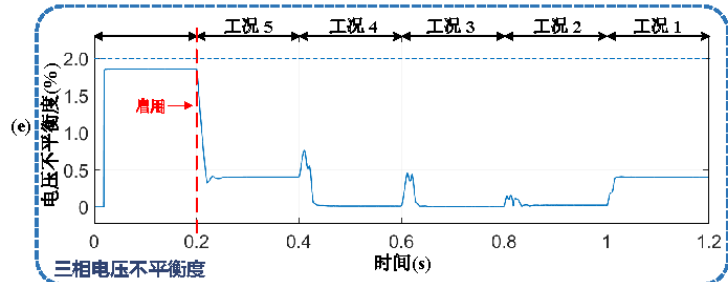
Matlab/Simulink平台部分仿真结果

并网发电模式仿真结果

- 三相电压不平衡度: 启用前制动能量直接返回电网, 使得三相电流不对称, 电压不平衡度较高; 启用后大部分制动能量和光伏能量被混合储能吸收或通过回馈装置三相对称并网, 电压不平衡度显著降低。

工况参数设置

典型工况	牵引负荷功率	光伏输出功率
工况1	-12MW	0
工况2	-8MW	1MW
工况3	0	2MW
工况4	-6MW	3MW
工况5	-14MW	1MW

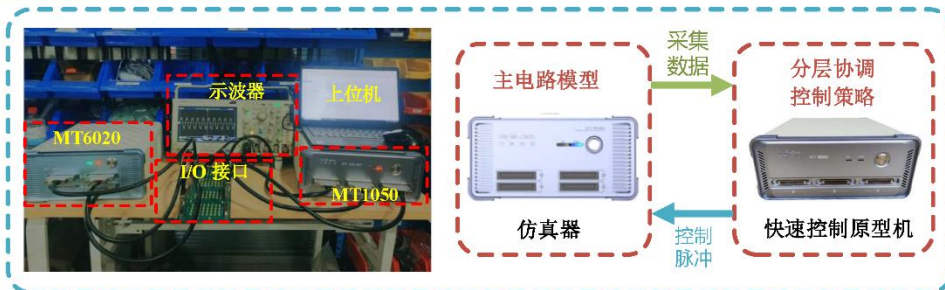


04 仿真及硬件在环实验验证

远究平台硬件在环实验结果

硬件在环实时实验平台及实验参数

硬件在环实验平台组成



- 通过硬件在环平台综合验证系统在协调控制策略下的动态转换性能, 如图所示, 该平台包括StarSim MT6020实时仿真器、StarSim MT1050 RCP控制器等

系统实验工况参数

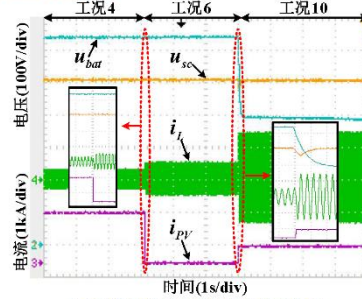
牵引负荷功率	光伏输出功率	典型工况	运行模式
-6MW	3MW	工况4	并网发电
10MW	0	工况6	填谷充电
28MW	1MW	工况10	削峰放电

04 仿真及硬件在环实验验证

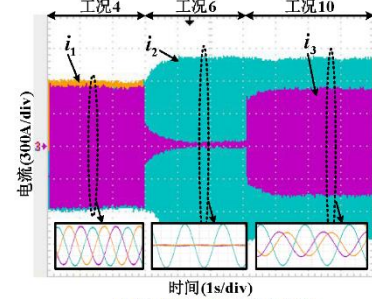
远宽平台硬件在环实验结果

- **运行指标:** 输出电流正弦性好, 直流电压保持稳定, 三相电流符合要求;
- **模式切换:** 正确完成不同运行模式之间的灵活、快速转换, 实现多功能运行;
- **动态响应:** 具有良好的动态性能, 在运行条件变化后, 其可以在两个主电网周期内再次恢复到稳定状态。

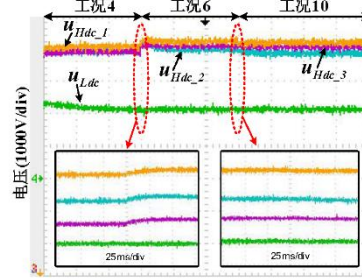
➢ 综合验证了集成光储的混合同相供电系统拓扑结构和协调控制策略的正确性和有效性



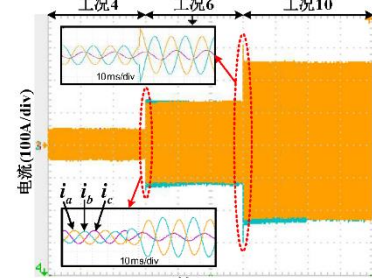
(a) 负荷和光伏电流及混合储能电压



(b) 单相AC/DC变换器电流



(c) 直流侧电压



(d) PCC处三相电流

21



作者简介

陈民武: 分别于2004年和2009年在西南交通大学获得电气工程学士和博士学位, 2018年起任西南交通大学电气工程学院正教授, 现任电气工程学院副院长; 2010年至2012年, 他在中铁第一勘察设计院集团公司从事博士后研究, 2014年至2015年, 他是英国伯明翰大学的访问学者, 他的研究方向包括铁路牵引系统的新技术和电能质量。

代先锋: 于2020年在沈阳建筑大学获得电气工程及其自动化学士学位, 现于西南交通大学攻读电气工程硕士学位, 研究方向为电气化铁路牵引供电系统、可再生能源和储能系统的集成以及电能质量治理。

赖俊宏: 于2020年在西南交通大学获得电气工程及其自动化学士学位, 现于西南交通大学攻读电气工程硕士学位, 研究方向包括电能质量治理、可再生能源和储能系统的集成以及电力牵引系统的能源管理策略。

陈垠宇: 分别于2017年和2020年在昆明理工大学和西南交通大学获得电气工程学士学位和工程硕士学位, 现于西南交通大学攻读电气工程博士学位, 研究方向包括铁路牵引系统以及电能质量评估和治理。

Stuart Hillmansen: 于伦敦帝国理工学院获得博士学位, 目前任伯明翰大学电子与电气工程系教授; 他也是伯明翰铁路研究与教育中心的成员, 领导铁路牵引研究小组, 该小组的活动得到了铁路行业和政府的支持; 他的研究兴趣包括用于铁路车辆的混合动力牵引系统以及铁路系统能耗的建模和测量。

田中北: 于2013年在华中科技大学获得工程学士学位, 2013年至2017年, 他在英国伯明翰大学获得电气和电子工程博士学位, 目前是利物浦大学的电能系统讲师; 他的研究兴趣包括铁路牵引电力系统建模和分析、节能列车控制、能源系统优化以及可持续交通能源系统集成和管理。

22





THANK YOU
感谢您的观看!

作者：陈民武 代先锋 赖俊宏 陈垠宇 Stuart Hillmansen 田中北