



基于双制式牵引供电系统的能量 路由器潮流优化与控制策略

作者：赖俊宏

2023.12

答辩提纲

- 01 研究背景与意义
- 02 双制式能量路由器基本原理
- 03 能量路由器的能量管理策略研究
- 04 能量路由器的变流器控制策略研究
- 05 能量路由器实验验证



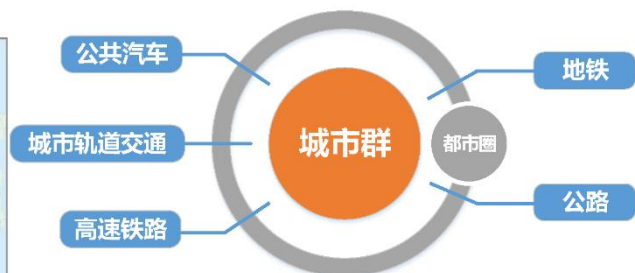


Page 3

Page 4

一. 研究背景与意义

背景

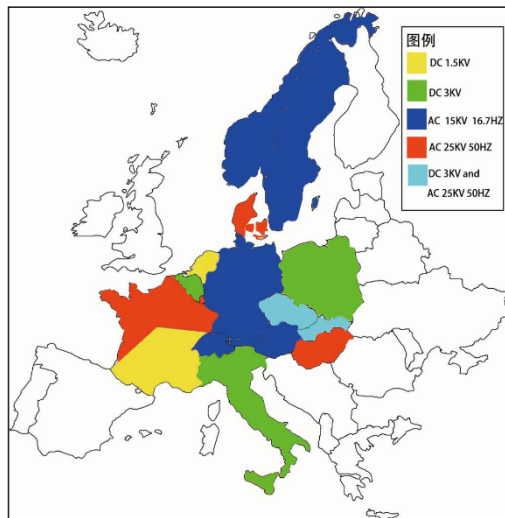


- “十四五”规划中指出，要推动**城市群都市圈交通一体化**的发展，推进城市轨道交通发展，提高交通通达深度。将我国干线铁路、市域（郊）铁路与地铁、轻轨等城市轨道交通**互联互通**，实现**不同供电制式的铁路之间的一体化衔接**，已成为未来的发展方向之一^[1]。

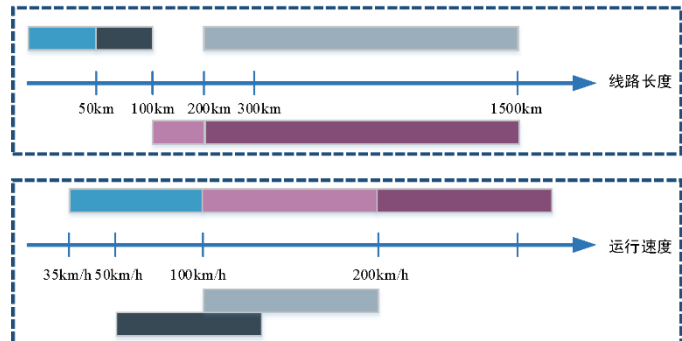
[1] 倪艺文, 杨茜婷, 唐锐等. 轨道交通四网融合与都市圈协同发展问题研究[J]. 城市公共交通, 2022, No.290(08): 44-49.

一. 研究背景与意义

背景



城市轨道交通 城际轨道交通 高速铁路
市郊轨道交通 普通干线机车



➤ 轨道交通因其在运输任务和运行区间等方面的差异，存在多种形式以及多种供电制式的现状^[1]，常见有25kV 50Hz的交流牵引供电制式和1500V或750V的直流牵引供电制式，不同的制式之间存在着天然的隔离。

[1] 范锦江, 陈慧民, 姜东杰. 城市轨道交通不同牵引供电制式的比较[J]. 城市轨道交通研究, 2016, 19(12): 97-100.

一. 研究背景与意义

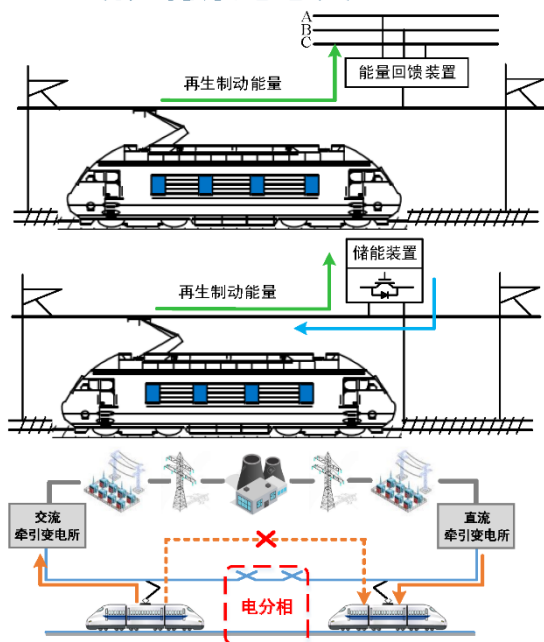
背景



➤ 双制式电力机车可以无障碍切换供电制式，乘客无需换乘，在欧洲、日本，已有正在运营的双制式或多制式电力机车。2022年8月6日，我国重庆市市郊铁路江跳线正式通车^[1]，成为我国首条将双制式线路应用于商用的轨道交通线路。

[1] 全国首列“双流制”列车将在重庆开跑 实现铁路地铁互通[J]. 隧道与轨道交通, 2021(02): 62.

一. 研究背景与意义



意义

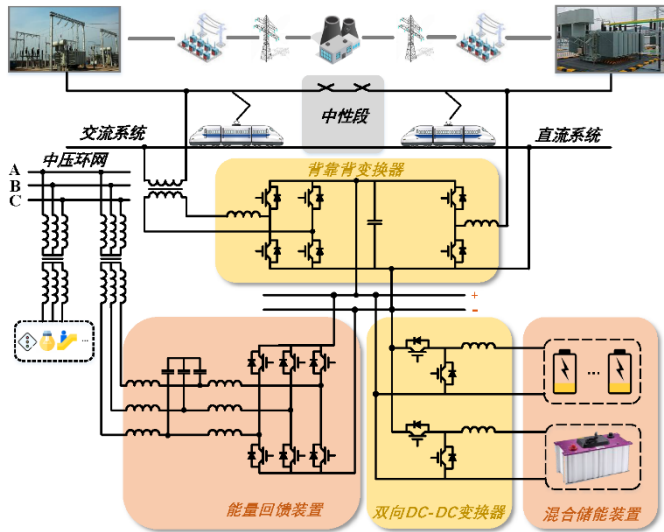
- 电力机车会产生大量**再生制动能量**，如果将这部分能量送入**中压环网**，可以实现降低电费的效果；如果将这部分能量用**储能装置**存储，可以实现削峰填谷，降低需量电费和电度电费。
- **电分相阻碍**了交流和直流系统之间能量的流动，如果能搭建一个“桥梁”，使两侧能量能够**互相流通**，这样不仅**提高了再生制动能量利用率**，还可以对两个系统的潮流进行统一的**优化管理**，进一步降低**电费成本**。

- 提高再生制动**能量利用率**；
- 搭建能量流动的**桥梁**，使**能量能够互相流动**；
- 实现对两个系统中潮流的**统一优化管理**，降低**电费**。

PART 02

双制式能量路由器基本原理

二. 双制式能量路由器基本原理

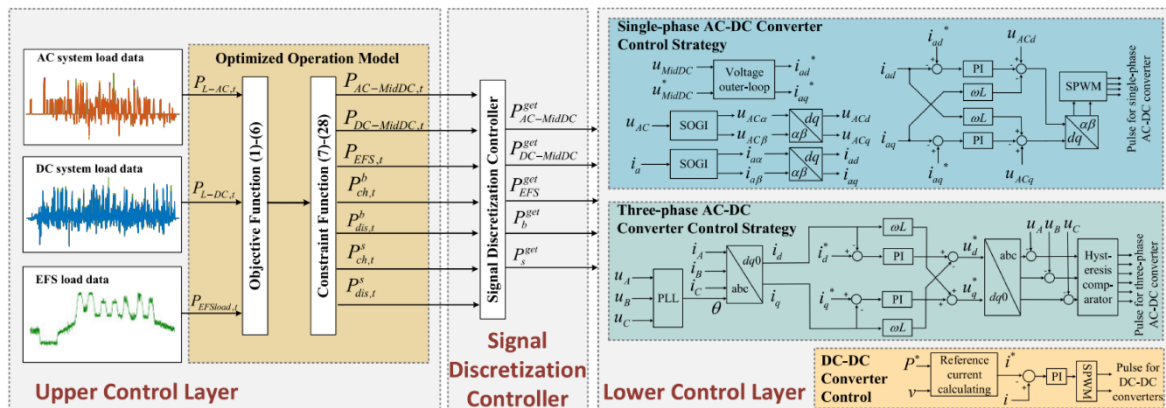


能量路由器拓扑结构图

- 通过单相AC-DC变换器和双向DC-DC变换器分别与交流和直流系统相连，二者组成背靠背变流器，构成了能量交互的“桥梁”
- 混合储能由蓄电池和超级电容组成，通过两个DC-DC变换器连接在中间直流环节上，实现了RBE的回收利用。
- 三相AC-DC变换器构成能量回馈装置，连接了中间直流环节与中压环网，实现了再生制动能量的及时利用。

二. 双制式能量路由器基本原理

■ 双制式能量路由器分层控制策略



- 分层控制策略分为上层能量管理策略和下层变流器控制策略；
- 上层：建立能量路由器优化运行模型，得到能量路由器日运行计划，以此作为能量管理策略
- 下层：为各个变流器设计控制策略，变流器之间协调配合，在不同工况下稳定运行，有良好的动态响应速度
- 信号离散化控制器：协调上层与下层的时间尺度



Page 11

Page 12

三. 能量路由器能量管理策略研究

■ 目标函数

$$\min f_0 = C_{grid} + C_{dem} + C_{HESS}$$

牵引变电所需量电费之和:

$$C_{dem} = \left[\max(P_{ACdem,t}) + \max(P_{DCdem,t}) \right] \cdot c_{dem} / N_{day}$$

包括交流牵引变电所需量电费、直流牵引变电所电度电费;

需量功率计算公式:

$$P_{ACdem,t} = \sum_t^{t+14} P_{ACgridbuy,t} / 15 \quad \forall t=1,2,\dots,N_T-14$$

$$P_{DCdem,t} = \sum_t^{t+14} P_{DCgridbuy,t} / 15 \quad \forall t=1,2,\dots,N_T-14$$

需量电费

牵引变电所电度电费之和:

电度电费

$$C_{grid} = \sum_{t=1}^{N_T} [c_{buy,t} (P_{ACgridbuy,t} + P_{DCgridbuy,t}) - 0.8c_{buy,t} P_{EFS,t} + c_{fed,t} P_{ACgridfed,t}] \cdot \Delta t$$

包括交流牵引变电所电度电费、直流牵引变电所电度电费、能量回馈装置售电所得电费。

混合储能装置运行维护成本:

$$C_{HESS} = \sum_{t=1}^{N_T} [c_{b,t} (P_{bdis,t} + P_{bch,t}) + c_{s,t} (P_{sdis,t} + P_{sch,t})] \cdot \Delta t$$

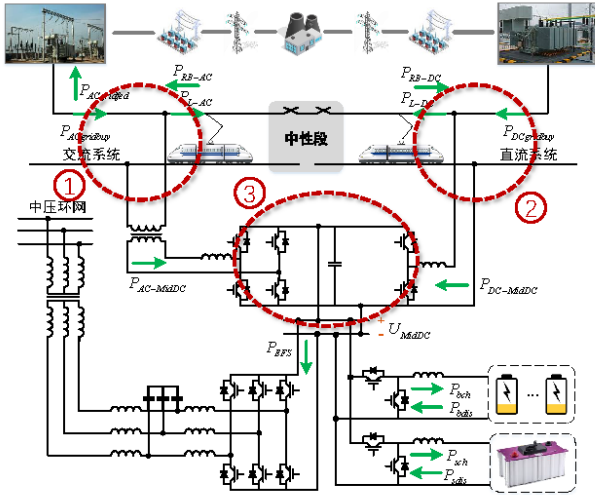
包括蓄电池的运行维护成本、超级电容的运行维护成本。

混合储能运维成本

三. 能量路由器能量管理策略研究

■ 约束条件

(1) 功率平衡约束



可以列写如下功率平衡约束：

功率平衡约束

$$P_{ACgridbuy,t} - P_{ACgridfed,t} = P_{L-AC,t} + P_{AC-MidDC,t} - P_{RB-AC,t}$$

$$P_{DCgridbuy,t} = P_{L-DC,t} + P_{DC-MidDC,t} - P_{RB-DC,t}$$

$$P_{AC-MidDC,t} + P_{DC-MidDC,t} + P_{bdis,t} + P_{sdis,t} = P_{EFS,t} + P_{bch,t} + P_{sch,t}$$

牵引变电所与电网交互功率不超过限值，可列写约束：

$$0 \leq P_{ACgridbuy,t} \leq v_{ACgrid,t} \overline{P_{ACgrid}}$$

$$0 \leq P_{ACgridfed,t} \leq (1 - v_{ACgrid,t}) \overline{P_{ACgrid}}$$

$$0 \leq P_{DCgridbuy,t} \leq v_{DCgrid,t} \overline{P_{DCgrid}}$$

交互功率约束

为保证能量回馈装置与中压环网交互功率不超过限值，且不直接从中压环网取用电能，可列写约束：

$$0 \leq P_{EFS,t} \leq (1 - v_{EFSgrid,t}) \overline{P_{EFS}}$$

能量回馈装置约束

三. 能量路由器能量管理策略研究

■ 约束条件

(2) 混合储能装置约束

前后时刻功率与能量约束

$$E_{b,t+1} = (1 - \varepsilon_b) E_{b,t} - \frac{P_{bdis,t} \Delta t}{\eta_{bdis}} + \eta_{bch} P_{bch,t} \Delta t$$

$$E_{s,t+1} = (1 - \varepsilon_s) E_{s,t} - \frac{P_{sdis,t} \Delta t}{\eta_{sdis}} + \eta_{sch} P_{sch,t} \Delta t$$

描述储能装置相邻两个时刻之间所储存的能量与功率的关系

储能装置功率约束

$$0 \leq P_{bdis,t} \leq v_{b,t} P_{b,rate} \quad 0 \leq P_{bch,t} \leq (1 - v_{b,t}) P_{b,rate}$$

$$0 \leq P_{sdis,t} \leq v_{s,t} P_{s,rate} \quad 0 \leq P_{sch,t} \leq (1 - v_{s,t}) P_{s,rate}$$

功率不超过额定值，充电或放电状态不能同时存在

储能装置SOC约束

$$\underline{SoC}_b \cdot E_{b,rate} \leq E_{b,t} \leq \overline{SoC}_b \cdot E_{b,rate}$$

$$\underline{SoC}_s \cdot E_{s,rate} \leq E_{s,t} \leq \overline{SoC}_s \cdot E_{s,rate}$$

任何时刻储能装置的SOC不超过其上下限值

初始与最终荷电状态约束

$$E_{b,t=1} = E_{b,t=N_T} = SoC_{b,t=0} \cdot E_{b,rate}$$

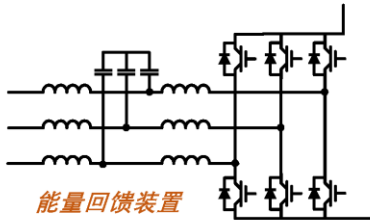
$$E_{s,t=1} = E_{s,t=N_T} = SoC_{s,t=0} \cdot E_{s,rate}$$

每天初始时刻和结束时刻的SOC保持一致，方便每日调度

三. 能量路由器能量管理策略研究

■ 约束条件

(3) 能量回馈装置功率约束



$$0 \leq P_{EFS,t} \leq P_{EFSload,t}$$

能量路由器传输至中压环网的功率不能超过中压环网的负荷功率

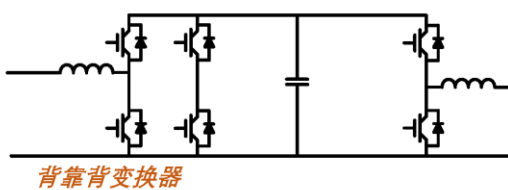
$$(P_{L-AC,t} + P_{L-DC,t}) \cdot P_{EFS,t} \leq 0$$

必须当负荷整体处于制动状态时，才允许将电能传输至中压环网

$$P_{EFS,t} \leq -(P_{L-AC,t} + P_{L-DC,t})$$

传输至中压环网的功率不能超过此刻系统中的再生制动功率之和

(4) 变流器容量约束



$$-S_{AC-DC,cap} \leq P_{AC-MidDC,t} \leq S_{AC-DC,cap}$$

流经单相AC-DC变换器的功率不超过其容量

$$-S_{DC-DC,cap} \leq P_{DC-MidDC,t} \leq S_{DC-DC,cap}$$

流经双向DC-DC变换器的功率不超过其容量

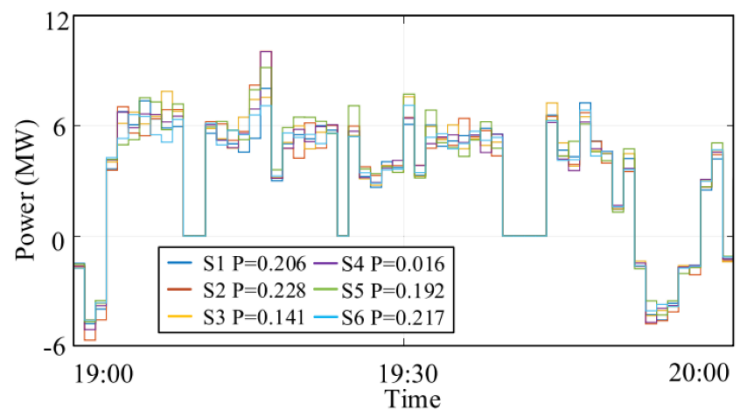
$$P_{EFS,t} \leq S_{3pAC-DC,cap}$$

流经能量回馈装置的功率不超过其容量

三. 能量路由器能量管理策略研究

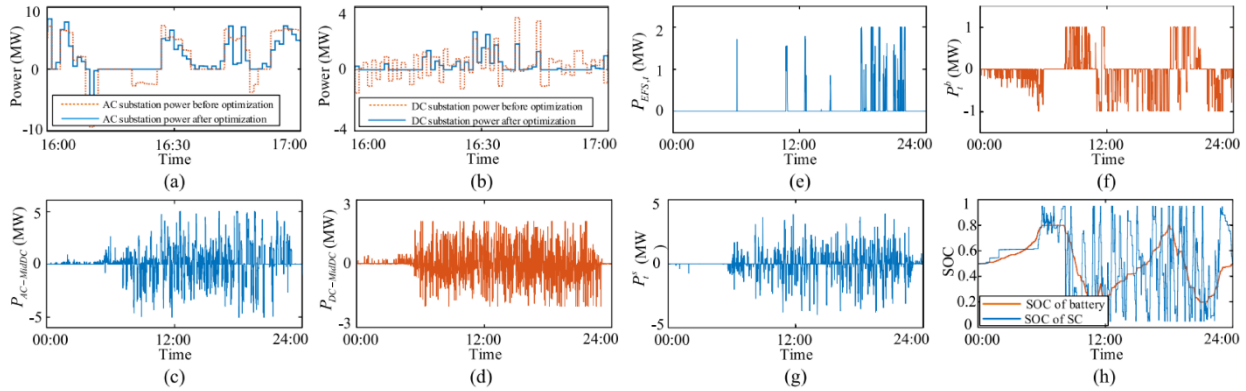
■ 负荷不确定性建模

- 由于**随机坡度**等因素的影响，牵引负荷日内实际运行曲线与牵引负荷模拟运行曲线之间的偏差服从**高斯分布**
- 基于场景的方法通过**情景削减法**得到不确定性，在每个保留场景中都需要满足供需平衡的约束
- 基于全天预测负荷数据，使用前向约简算法，生成**6个代表性场景**。其中S1~S6表示6个代表性场景1~6。P表示概率



三. 能量路由器能量管理策略研究

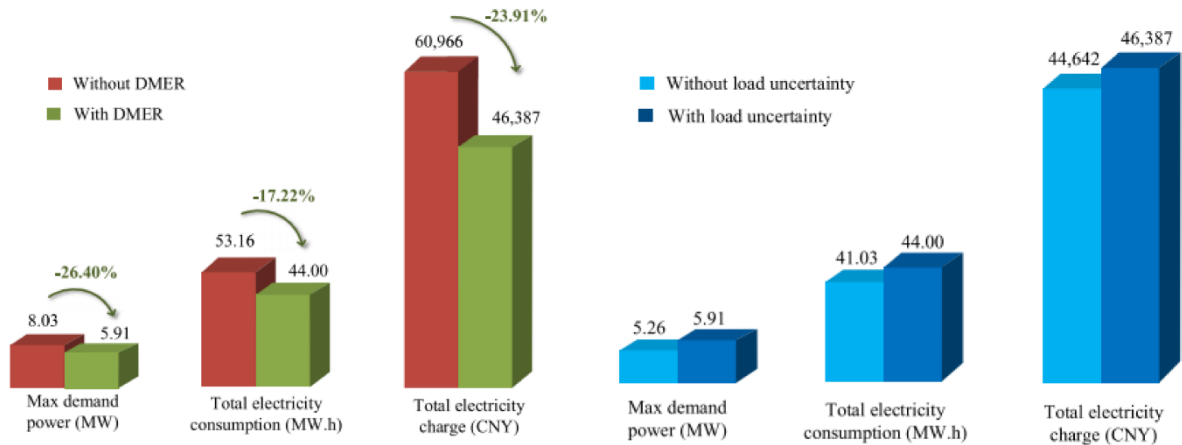
■ 算例分析



优化结果如图所示：(a)交流牵引所的功率；(b)直流牵引所的功率；(c)单相AC-DC变换器一日功率；(d)DC-DC变换器一日功率；(e)三相AC-DC变换器一日功率；(f) 电池一日功率；(g)超级电容一日功率；(h) 电池和超级电容一日的SoC

三. 能量路由器能量管理策略研究

■ 算例分析



有/无能量路由器的经济指标对比：安装能量路由器之后，最大需量下降了26.40%，用电量下降了17.22%，总电费下降了23.91%

在优化模型中考虑/不考虑不确定性的经济指标对比

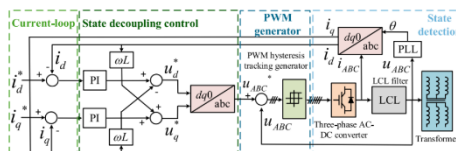
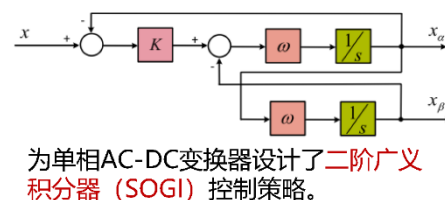
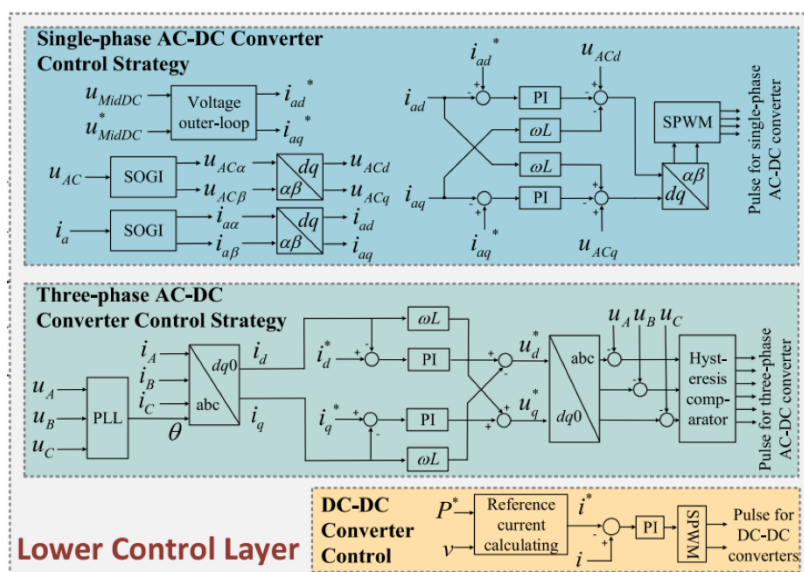


Page 19

Page 20

四. 能量路由器变流器控制策略研究

■ 变换器控制策略

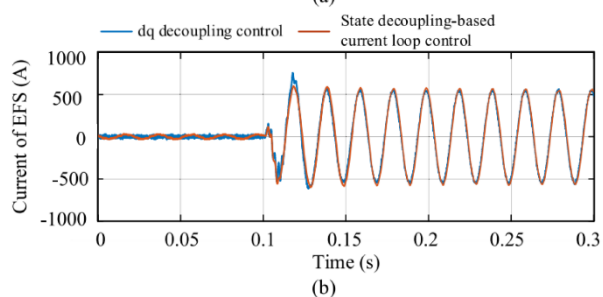
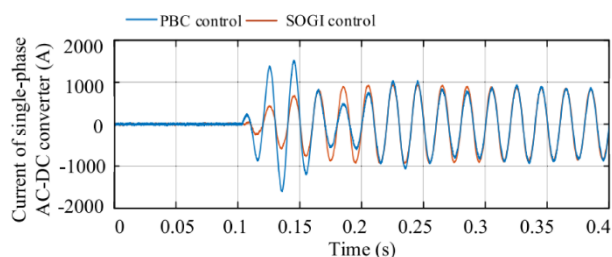


为三相AC-DC变换器设计基于状态解耦的电流回路控制策略。

为DC-DC变换器设计了恒功率控制策略，以准确地跟踪参考功率。

四. 能量路由器变流器控制策略研究

■ 变换器控制策略对比仿真



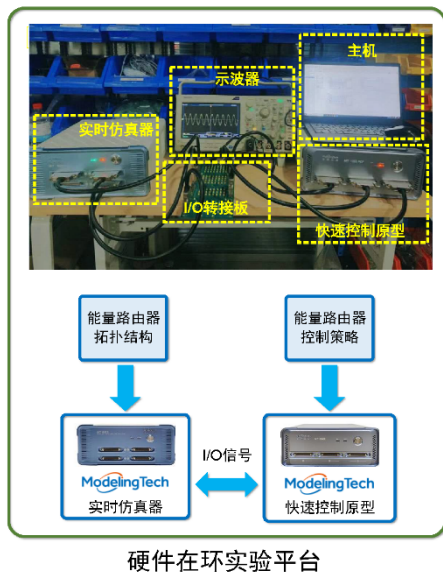
- 控制性能的比较:
- (a)单相交流-直流转换器的**无源性控制 (PBC)** 和 **SOGI控制**之间的控制性能
- (b)三相交流直流变换器**基于状态解耦的电流回路控制**与传统**dq解耦控制**之间的控制性能。

如图所示，与传统的控制策略相比，本研究中采用的控制策略的超调更小，调节时间更短。



五. 能量路由器实验验证

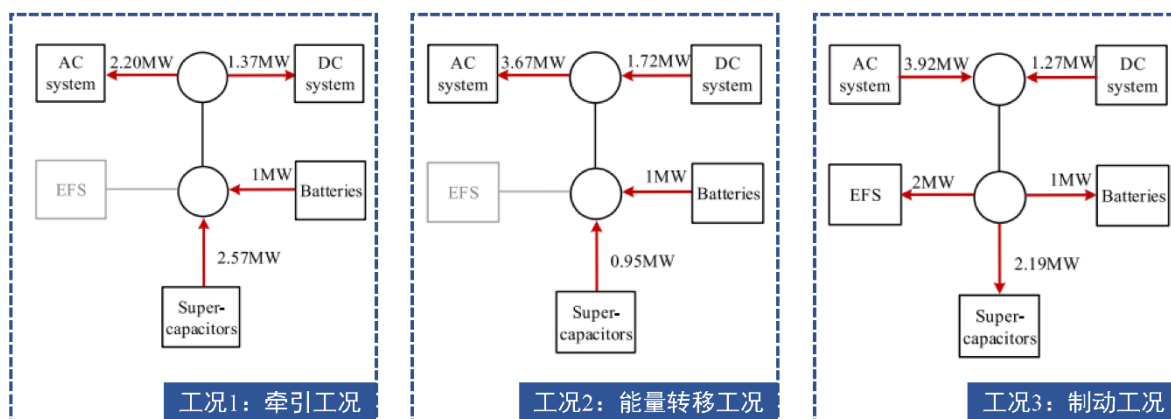
■ 实验平台概述



仪器	参数	数值
实时仿真器 MT 6020	处理器	双核ARM Cortex-A9, 主频800MHz
	FPGA	芯片逻辑单元444K, 芯片内存资源26.5Mb
	模拟输出	24路, 16bit, 1MSPS, $\pm 10V$
	模拟输入	16路, 16bit, 1MSPS, $\pm 10V$
	数字输入	64路, 10MSPS
	数字输出	16路, 10MSPS, 0~3.3V TTL
仪器	参数	数值
快速控制原型 MT 1050	处理器	双核ARM Cortex-A9, 主频800MHz
	FPGA	芯片逻辑单元444K, 芯片内存资源26.5Mb
	模拟输出	8路, 16bit, 1MSPS, $\pm 10V$
	模拟输入	16路, 16bit, 1MSPS, $\pm 10V$
	数字输入	16路, 10MSPS
	数字输出	48路, 10MSPS, 0~3.3V TTL

五. 能量路由器实验验证

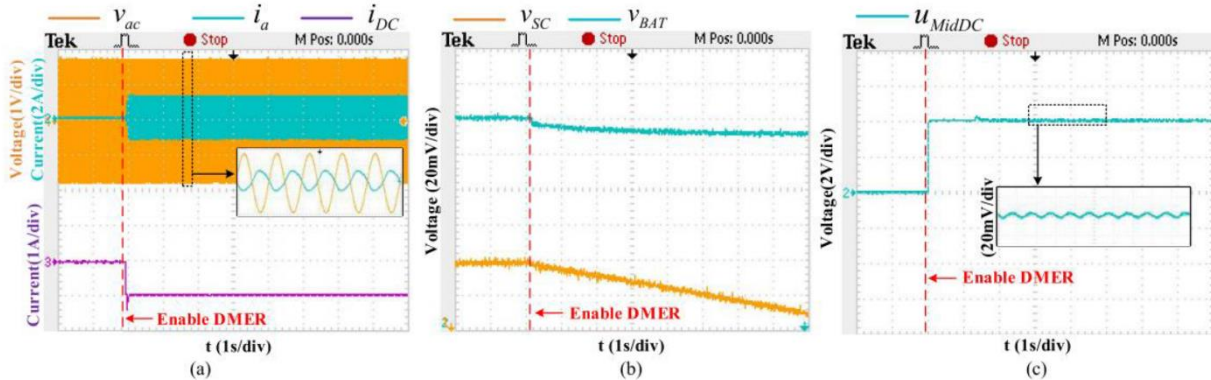
■ 典型工况选择



为了尽可能覆盖所有类型的工况，在优化结果中选取了三种典型工况：**工况1为牵引工况**，储能装置为两侧系统释放能量；**工况2为能量转移工况**，直流侧能量转移到交流侧，储能装置释放能量；**工况3为制动工况**，两侧系统将制动能量传递至EFS和储能装置中。

五. 能量路由器实验验证

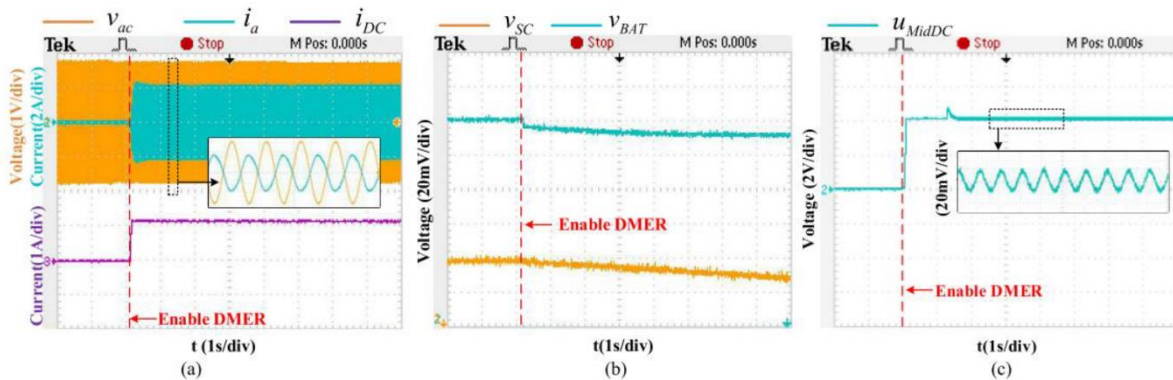
■ 工况1实验结果：牵引工况



工况1的实验结果：(a)交流系统的电压和电流，以及直流系统的电流。(b)SC和电池的电压。(c)中间直流环节的电压。如图所示，交流系统的电压和电流频率相同但反相。直流系统的电流为负值。SC和电池的电压由于它们释放能量而逐渐降低。中间直流环节的电压保持稳定。

五. 能量路由器实验验证

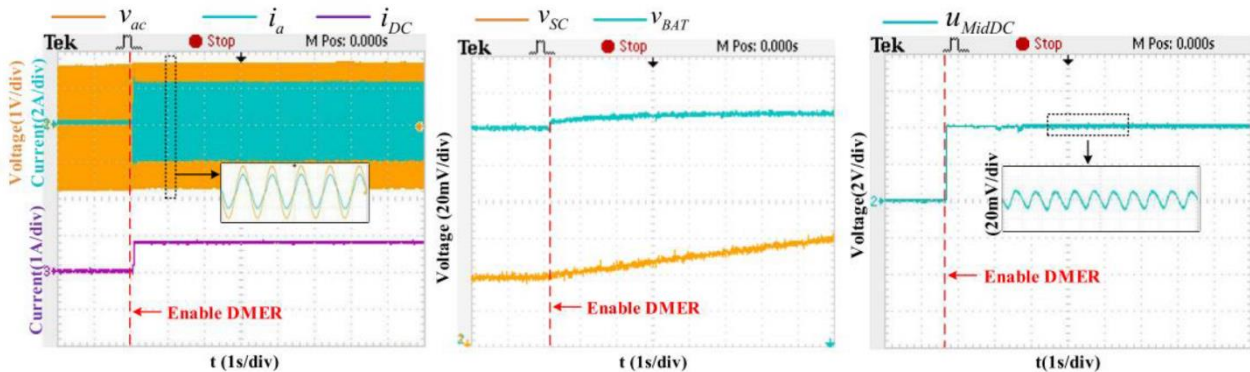
■ 工况2实验结果：能量转移工况



工况2的实验结果：(a)交流系统的电压和电流，以及直流系统的电流。(b)SC和电池的电压。(c)中间直流环节的电压。如图所示，交流系统的电压和电流频率相同但反相。直流系统的电流为正值。SC和电池的电压由于它们释放能量而逐渐降低。中间直流环节的电压保持稳定。

五. 能量路由器实验验证

■ 工况3实验结果：制动工况



工况3的实验结果：(a)交流系统的电压和电流，以及直流系统的电流。(b)SC和电池的电压。(c)中间直流环节的电压。如图所示，交流系统的电压和电流同频同相。直流系统的电流为正值。SC和电池的电压由于它们释吸收能量而逐渐上升。中间直流环节的电压保持稳定。

结论与展望

结论

- 设计了基于双制式牵引供电系统的**能量路由器拓扑结构**，实现了再生制动能量回收利用、系统之间能量交互、提高能量流动的灵活性。为能量路由器提出了“**上层能量管理-下层变流器控制**”的分层控制策略架构。
- 建立了能量路由器优化运行模型，得到了能量路由器的日运行计划，以此作为**上层能量管理策略**。算例分析表明，接入能量路由器可以**有效降低牵引变电所的用电量和需量功率**，日运行**电费成本降幅可达23.91%**；
- 为单相AC-DC变换器设计了基于二阶广义积分算法的dq电流解耦控制策略；为三相AC-DC变换器设计了基于状态解耦的电流反馈控制策略；为双向DC-DC变换器设计了恒功率控制策略，共同构成了**能量路由器的下层变流器控制策略**；
- **仿真和硬件在环实验**验证了能量路由器良好的**动态响应表现**和**稳定运行能力**，证明了拓扑结构和控制策略的正确性。

展望

- 当牵引负荷存在不确定性时，考虑混合储能和转换器的容量配置是一个挑战，未来的研究应考虑到这一点。
- 目前提出的一些新型储能装置，如混合太阳能电池的应用，也是一个有意义的研究方向。



感谢观看

作者：赖俊宏