

城轨交通混合型再生制动能量利用系统及其控制策略

李志强¹, 胡海涛¹, 陈俊宇¹, 王科¹, 何正友¹, 王茜², 陈丽华¹

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 611756; 2. 成都艾特能电气科技有限责任公司, 四川 成都 610097)

摘要:针对城轨交通再生制动能量利用问题,结合城轨交通供电系统负荷特性,提出一种含能馈系统与储能系统的混合型再生制动能量利用系统及其控制策略。结合城轨交通供电系统架构与负荷特性,提出混合型再生制动能量利用系统拓扑结构并分析其运行原理。以充分利用再生制动能量为目标制定系统能量管理策略,实现在多种运行模式和运行工况下的功率潮流管理。提出计及牵引网母线电压控制和系统动态功率分配的分层控制策略。通过仿真分析验证所提系统及其控制策略的正确性和有效性,并借助相关技术指标和经济性指标对不同再生制动能量利用方案进行对比。结果表明,所提分层控制策略能协调控制系统按需回馈、存储/释放再生制动能量,实现城轨交通再生制动能量高效利用,并有效抑制牵引网母线电压波动;同时,所提混合型再生制动能量利用方案能较好地兼顾技术效果和经济效益,相比储能方案和能馈方案有一定优势,可作为城轨交通再生制动能量利用方案的选择之一。

关键词:城轨交通;再生制动能量;能馈系统;储能系统;能量管理

中图分类号:U231+.8;TM922.3

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202211022

0 引言

近年来,城轨交通由于运量大、速度快、换乘便捷等优点^[1],已在我国内地的50个城市开通运营^[2]。然而,随着城轨交通运营里程快速增长,其能耗问题日益严峻。根据中国城市轨道交通协会统计,2021年全国城轨交通总耗电高达 2.131×10^{10} kW·h,较2020年总耗电(1.724×10^{10} kW·h)同比增长23.6%^[2]。在城轨交通总运营成本中,其电力费用占比达到了约50%^[3]。因此,如何有效降低城轨交通能耗是其快速发展过程中亟待解决的问题。

城轨交通列车在制动过程中优先采用再生制动方式,加之其运行密度高、启停频繁等特点,产生了丰富的再生制动能量^[4]。然而,目前国内城轨交通牵引变电所普遍采用24脉波不控整流机组^[5],列车产生的再生制动能量不能被直接返送至交流电网,若同供电区间内没有牵引列车或牵引列车无法完全消纳再生制动功率,牵引网电压将迅速升高,触发制动电阻启动消耗多余能量。制动电阻消耗方式不仅造成再生制动能量浪费,其耗能产生的热量还会加重通风散热系统负担^[6]。

为提高再生制动能量利用率,国内外学者主要从列车运行优化、能馈技术和储能技术3个方面开展相关研究^[7]。其中,列车运行优化通过优化列车运行图,使更多再生制动能量被同供电区间牵引列

车利用^[8-9]。该技术无需额外设备即可实现再生制动能量利用,但受限于列车运行图的诸多优化限制条件,再生制动能量利用率提升有限。

能馈技术通过加装能馈装置,将再生制动能量回馈至城轨交通系统交流供电网^[10-11]。按照回馈目标交流供电网的电压等级,能馈技术可分为低压能馈技术(回馈至400 V低压配电网)和中压能馈技术(回馈至10 kV/35 kV中压环网)^[10]。低压能馈技术由于电压等级低,能馈装置性能要求和投资成本均较低。但受限于400 V配电网的容量,采用单一低压能馈方式难以完全消纳再生制动能量,通常仍需设置地面电阻配合使用^[11]。中压能馈技术由于中压环网容量大、可回馈功率大,能充分返送再生制动功率,再生制动能量利用率较高。然而中压能馈技术仍存在如下不足:①能馈时对中压环网冲击性强,可能威胁中压环网供电安全;②在中压环网负荷耗能需求低时,可能出现多余回馈能量倒送回电力系统的情况,导致再生制动能量无法有效提高牵引供电系统能效;③在列车高密度牵引运行时,无法向牵引网释放电能抑制牵引网电压跌落。

储能技术通过加装储能装置,在列车制动时存储牵引网上多余的再生制动能量,并在列车牵引时向牵引网释放能量。该技术不仅能实现再生制动能量的高效回收利用,还可在列车牵引和制动时抑制牵引网母线电压波动,在实际应用中具有优异的性能^[12-13]。然而,城轨列车制动功率大,再生制动能量丰富,对储能装置功率和容量要求较高,加之储能装置成本高昂,导致采用储能装置回收利用再生制动能量的投资成本高,占用空间大。

总体而言,上述3种再生制动能量利用技术各

收稿日期:2022-06-01;修回日期:2022-07-22

在线出版日期:2022-11-21

基金项目:四川省科技计划资助项目(2021YFG0118)

Project supported by the Science and Technology Program of Sichuan Province(2021YFG0118)

有优缺点。相比于单一类型的再生制动能量利用技术,结合能馈技术和储能技术构成的混合型再生制动能量利用系统能更大程度地发挥2种技术的优势,在保证再生制动能量利用率的同时提高经济性,实现了单一类型技术的互补。同时,低压能馈技术的性能要求和投资成本相比于中压能馈技术均更低,也不影响中压环网供电,在站内负载大的线路选择低压能馈技术更优,如某地铁线路站内动力及照明负荷容量达 $2\,452\text{ kV}\cdot\text{A}^{[14]}$ 。目前,已有研究提出了综合配备低压能馈技术和储能技术的再生制动能量利用方法^[15],但仍存在如下不足:①未深入分析系统在不同运行工况的潮流和能量管理策略;②2个子系统控制相互独立,未考虑其运行配合和协同控制;③能馈系统采用定功率回馈方式,未考虑回馈功率与400 V配电网负荷功率的不匹配。

为此,本文针对城轨交通混合型再生制动能量利用系统,首先研究系统拓扑结构并分析其运行原理;接着,以充分利用再生制动能量为目标制定系统能量管理策略,实现系统不同运行模式和运行工况下的功率潮流管理;在此基础上,提出计及牵引网母线电压控制和系统动态功率分配的分层控制策略;最后,通过仿真分析所提控制策略的正确性和有效性,并借助相关技术指标和经济性指标对不同再生制动能量利用方案进行对比。

1 混合型再生制动能量利用系统

1.1 系统拓扑结构

城轨交通混合型再生制动能量利用系统的拓扑结构如图1所示,其由能馈系统和储能系统所构成,各部分实现功能如下。

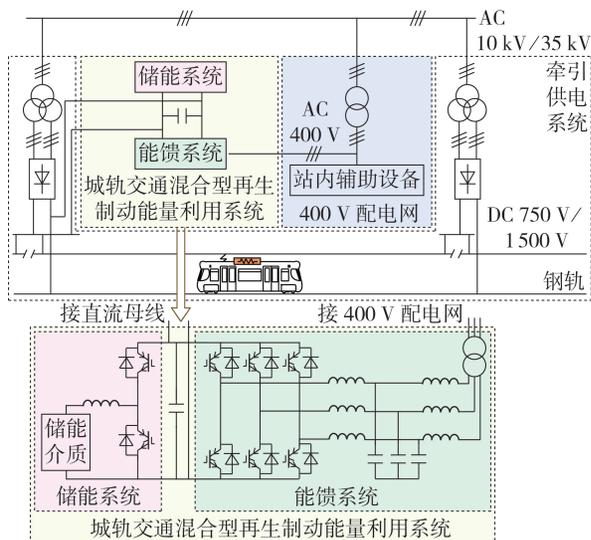


图1 城轨交通混合型再生制动能量利用系统

Fig.1 Hybrid regenerative braking energy utilization system in urban rail transit

1)能馈系统:将列车制动产生的再生制动能量,通过三相并网逆变器逆变为三相工频交流电,在LCL滤波器滤波后,经由隔离变压器连接至400 V配电网,为站内辅助设备供电。

2)储能系统:可切换充/放电工作状态,充电状态时存储回馈后剩余的再生制动能量并防止牵引网母线电压抬升,放电状态时为供电区间内牵引列车提供电能并抑制牵引网母线电压跌落。为适配城轨交通瞬时、频繁变化的再生制动功率,储能介质一般选取功率型介质,如超级电容和高功率密度锂电池。本文储能介质选择以超级电容为例进行分析。

通过协调控制能馈系统和储能系统,可实现牵引供电系统与储能系统之间的能量双向流动以及向400 V配电网的能量单向流动,从而实现再生制动能量的高效利用。

1.2 系统运行原理

混合型再生制动能量利用系统接入城轨交通供电系统后,其功率潮流如附录A图A1所示。

若规定各功率正方向为图A1中箭头方向所示,则通过分析可知,混合型再生制动能量利用系统接入后牵引供电系统与400 V配电网功率平衡关系分别如式(1)和式(2)所示(为便于分析,此处未考虑系统功率损耗)。

$$P_{\text{sub}} + P_{\text{sc}} = P_{\text{s}} + P_{\text{f}} + P_{\text{br}} \quad (1)$$

$$P_{\text{load400}} = P_{\text{g400}} + P_{\text{f}} \quad (2)$$

式中: P_{s} 为左、右供电区间内列车总功率; P_{f} 为能馈系统回馈功率; P_{sc} 为储能系统充/放电功率; P_{g400} 为400 V配电网功率; P_{load400} 为400 V配电网负荷功率; P_{sub} 为牵引变电所功率($P_{\text{sub}} \geq 0$,当 P_{s} 为正数时取正,其余情况时取0); P_{br} 为制动电阻功率($P_{\text{br}} \geq 0$,当牵引网电压达到制动电阻启动电压 U_{br} 时取正,其余情况时取0)。

城轨交通牵引变电所不控整流特性导致牵引网母线电压随供电区间内列车运行状态变化,因此可通过牵引网母线电压来间接反映牵引供电系统运行状态。目前城轨交通再生制动能量利用系统普遍采用传统电压阈值控制^[16],其原理如图2所示。基于该原理,可通过比较牵引网母线电压 U_{dc} 与牵引状态电压阈值 U_{r} 、制动状态电压阈值 U_{br} 之间的关系,将牵引供电系统运行状态划分为以下3种:空载状态、牵引状态和制动状态,其详细参数如表1所示。

由图2所示电压阈值控制原理可知,电压外环控制在 U_{dc} 低于 U_{r} 或超过 U_{br} 时启动,通过比例积分调节器输出电流内环控制的参考电流信号 I_{r} 或 I_{br} ,表征各运行状态的特点如下:

1)当牵引供电系统处于空载状态时,混合型再生制动能量利用系统不进行能量交互,电压外环控制未启动,输出量为0;

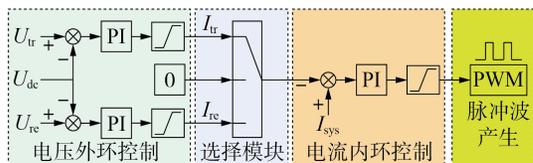


图2 传统电压阈值控制框图

Fig.2 Block diagram of classical voltage threshold control

表1 牵引供电系统运行状态

Table 1 Operating states of traction power supply system

名称	划分依据	潮流分布
空载状态	$U_{tr} \leq U_{dc} \leq U_{re}$	供电区间内无列车,或列车完成能量交互后无再生制动功率剩余和牵引功率需求
牵引状态	$U_{dc} < U_{tr}$	供电区间内列车完成能量交互后,仍有牵引功率需求
制动状态	$U_{dc} > U_{re}$	供电区间内列车完成能量交互后,仍有再生制动功率剩余

2)当牵引供电系统处于牵引状态时,混合型再生制动能量利用系统需释放能量满足牵引功率需求,以 U_{tr} 为参考的电压外环控制启动,输出量为 I_{tr} ($I_{tr} > 0$), I_{tr} 反映了系统维持供电区间牵引网母线电压至 U_{tr} 所能提供的牵引电流;

3)当牵引供电系统处于制动状态时,混合型再生制动能量利用系统需消纳富余的再生制动功率,以 U_{re} 为参考的电压外环控制启动,输出量为 I_{re} ($I_{re} < 0$), I_{re} 反映了系统维持供电区间牵引网母线电压至 U_{re} 所能吸收的再生制动电流。

由上述分析可知,电压外环控制输出量不仅反映混合型再生制动能量利用系统的运行状态,还与其运行电流有关。考虑到电流控制的实质为控制系统的输入输出功率,因此可基于上述分析建立电压外环控制输出量与系统运行功率的对应关系。为便于分析,引入中间变量 P_{tr} 和 P_{re} ,其中 P_{tr} 表示系统为达到目标牵引网母线电压 U_{tr} 所能提供的牵引功率, P_{re} 表示系统为达到目标牵引网母线电压 U_{re} 所能利用的再生制动功率。

从混合型再生制动能量利用系统的工作原理可知:当牵引供电系统处于牵引状态时,能馈系统不工作,仅储能系统放电以满足牵引功率需求;当牵引供电系统处于制动状态时,由能馈系统和储能系统对再生制动功率进行利用。因此, P_{tr} 、 P_{re} 可分别由式(3)和式(4)计算得到。

$$P_{tr} = \frac{I_{tr} P_{dis,m}}{I_{tr,m}} \quad (3)$$

$$P_{re} = \frac{I_{re} (P_{fm} + P_{char,m})}{I_{re,m}} \quad (4)$$

式中: P_{fm} 为能馈系统最大回馈功率($P_{fm} > 0$); $P_{dis,m}$ 为

储能系统最大放电功率($P_{dis,m} > 0$); $P_{char,m}$ 为储能系统最大充电功率($P_{char,m} > 0$); $I_{tr,m}$ 为牵引状态下电压控制最大输出量($I_{tr,m} > 0$); $I_{re,m}$ 为制动状态下电压控制最大输出量($I_{re,m} > 0$)。

通过式(3)和式(4),可得到混合型再生制动能量利用系统在牵引供电系统处于牵引状态和制动状态时的参考功率关系分别如式(5)和式(6)所示。

$$P_{tr} = P_{sc,ref} \quad (5)$$

$$P_{re} = P_{sc,ref} + P_{f,ref} \quad (6)$$

式中: $P_{sc,ref}$ 为储能系统参考功率; $P_{f,ref}$ 为能馈系统参考回馈功率。

根据上述分析,可以得到改进后的混合型再生制动能量利用系统电压阈值控制框图如图3所示。从图中可以看出,改进后的电压阈值控制将电压外环控制的输出参考电流转换为参考功率,在此基础上对参考功率进行合理分配即可实现储能系统和能馈系统的协调控制。因此,需制定有效的能量管理策略对混合型再生制动能量利用系统的参考功率进行分配,以实现再生制动能量在牵引供电系统和400 V配电网中的协同利用。

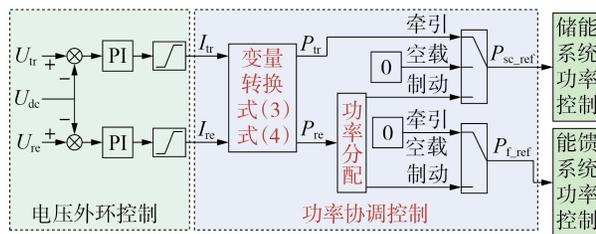


图3 混合型再生制动能量利用系统电压阈值控制框图

Fig.3 Voltage threshold control block diagram of hybrid regenerative braking energy utilization system

2 能量管理策略

2.1 功率分配原则

城市轨道交通列车再生制动功率波动大,目前普遍采用的定功率回馈方式存在回馈过度或回馈不足的弊端。为此,本文采用动态功率分配,即考虑400 V配电网负荷功率需求与可回馈再生制动功率的变化,对系统各参考功率进行分配。为充分利用再生制动能量,设计功率分配原则如下:

1)供电区间内列车完成能量交互后,能馈系统按400 V配电网负荷功率需求回馈电能;

2)能馈系统回馈后,储能系统存储剩余再生制动能量;

3)经以上步骤后,仍剩余的再生制动能量被车载制动电阻消耗。

基于上述功率分配原则,可以得到能馈系统和储能系统的参考功率。其中,能馈系统参考回馈功率 $P_{f,ref}$ 可表示为:

$$P_{f_ref} = \begin{cases} 0 & \text{牵引状态或空载状态} \\ \min(-P_{re}, P_{load400}, P_{fm}) & \text{制动状态} \end{cases} \quad (7)$$

储能系统在牵引供电系统处于空载状态或储能介质荷电状态(state of charge, SOC)超出正常范围时不工作;在牵引供电系统处于牵引状态且SOC高于下限时按需放电;在牵引供电系统处于制动状态且SOC低于上限时存储经能馈系统回馈利用后剩余的再生制动功率。为防止储能系统过充/过放,储能系统参考功率 P_{sc_ref} 可表示为:

$$P_{sc_ref} = \begin{cases} \min(P_{tr}, P_{dis_m}) & \text{牵引状态且 } S_{SOC} > S_{SOC_min} \\ 0 & \text{空载状态或 } S_{SOC} \leq S_{SOC_min} \\ & \text{或 } S_{SOC} \geq S_{SOC_max} \\ \max(P_{re} + P_{f_ref}, -P_{char_m}) & \text{制动状态且 } S_{SOC} < S_{SOC_max} \end{cases} \quad (8)$$

式中: S_{SOC} 为储能介质SOC采集量; S_{SOC_max} 、 S_{SOC_min} 分别为储能介质SOC上、下限。

SOC定义式采用安时积分法,计算式如下^[1]:

$$S_{SOC}(t) = \frac{C(t)}{C_{max}} = \frac{\int_0^t I_{sc} dt + C(0)}{C_{max}} \quad (9)$$

式中: $S_{SOC}(t)$ 为储能介质 t 时刻SOC; $C(t)$ 为储能介质 t 时刻电量; C_{max} 为储能介质最大存储电量; I_{sc} 为储能介质电流; $C(0)$ 为储能介质初始电量,可通过开路电压法确定^[1]。

式(7)和式(8)分别为能馈系统和储能系统参考功率的通用表达式。考虑到再生制动能量利用系统的运行工况将随牵引供电系统的负荷工况变化,不同运行工况的参考功率也不同,下文将对混合型再生制动能量利用系统的运行工况进行分析。

2.2 系统运行模式和运行工况分析

结合能馈系统和储能系统运行状态,将混合型再生制动能量利用系统运行模式划分为以下4种:①空闲模式,储能系统和能馈系统均不工作,不进行能量交互;②储能模式,能馈系统不工作,储能系统释放能量满足牵引供电需求;③能馈模式,储能系统工作,能馈系统回馈再生制动功率满足400V配电网负荷功率需求;④混合模式,储能系统和能馈系统均工作,能馈系统回馈再生制动功率至400V配电网,同时储能系统存储回馈后剩余的再生制动功率。

混合型再生制动能量利用系统运行时,能量管理策略将根据实时牵引网母线电压、储能介质SOC和400V配电网负荷功率对系统运行模式进行选择。各运行模式的详细特点分析如下。

1)空闲模式:当 $U_{dc} \leq U_{re}$ 时,若 $U_{dc} \geq U_{tr}$ 或 $S_{SOC} \leq S_{SOC_min}$,此时系统运行于空闲模式。空闲模式下只有

1种运行工况,设定此工况为工况1。此模式下牵引供电系统处于空载状态,牵引变电所满足供电区间牵引功率需求,400V配电网独立为其负荷供电,制动电阻未启动。

2)储能模式:当 $U_{dc} < U_{tr}$ 且 $S_{SOC} > S_{SOC_min}$ 时,系统运行于储能模式。根据储能系统是否按最大功率放电,可划分为2种运行工况,分别设定为工况2和工况3。此模式下牵引供电系统处于牵引状态,若能稳压至 U_{tr} ,则除牵引变电所需提供的少量功率(由于 U_{tr} 低于空载电压),剩余牵引功率需求缺额全部由储能系统提供,否则储能系统按最大功率放电,牵引变电所提供剩余功率缺额。400V配电网独立为其负荷供电,制动电阻未启动。

3)能馈模式:当 $U_{dc} > U_{re}$ 时,若 $-P_{re} \leq P_{fm}$ 且 $-P_{re} \leq P_{load400}$,或 $S_{SOC} \geq S_{SOC_max}$,此时系统运行于能馈模式。根据能馈系统回馈功率可划分为3种运行工况,分别设定为工况4—6。此模式下牵引供电系统处于制动状态,在稳压至 U_{re} 后能馈系统按400V配电网负荷功率需求回馈。若无再生制动功率剩余,则制动电阻未启动;若仍有再生制动功率剩余,则牵引网母线电压抬升至 U_{br} 后制动电阻启动进行消耗。

4)混合模式:当 $U_{dc} > U_{re}$ 时,若 $-P_{re} > P_{fm}$ 或 $-P_{re} > P_{load400}$,且 $S_{SOC} < S_{SOC_max}$,此时系统运行于混合模式。根据能馈系统回馈功率以及储能系统是否按最大功率充电,可划分为4种运行工况,分别设定为工况7—10。此模式下牵引供电系统处于制动状态,在稳压至 U_{re} 后能馈系统按400V配电网负荷功率需求回馈,储能系统存储回馈后剩余再生制动功率。若无再生制动功率剩余,则制动电阻未启动;若仍有再生制动功率剩余,则牵引网母线电压抬升至 U_{br} 后制动电阻启动进行消耗。

选择每种运行模式下的典型工况,根据前文分析,得到各运行模式典型工况的功率潮流分布,如附录A图A2所示。

综合上述分析,可制定混合型再生制动能量利用系统的能量管理策略,如附录A图A3所示。10种运行工况对应参考功率如附录A表A1所示。

3 控制策略

为保证混合型再生制动能量利用系统在城轨交列车复杂运行工况下有效实现再生制动能量利用,同时稳定牵引网母线电压,需对以下目标进行控制:①不同运行工况下能馈系统和储能系统参考功率;②牵引网母线电压;③能馈系统回馈功率;④储能系统充放电功率。

基于此,本文提出一种含能量管理层和变流器控制层的分层控制策略,其控制原理图如附录A图A4所示。其中,能量管理层根据牵引供电系统、

400 V 配电网和储能系统实时状态确定系统运行模式和运行工况,并分配能馈系统和储能系统参考功率;变流器控制层包括电压外环控制、储能系统功率控制和能馈系统功率控制三部分。电压外环控制输出量作为能量管理层输入量参与功率分配决策,功率控制则将能量管理层输出参考功率转为参考电流进行跟踪,使能馈系统和储能系统有效协同工作以实现回馈功率和充放电功率控制。

3.1 能量管理层

在系统投入运行前,需根据供电区间列车负荷以及 400 V 配电网负荷特点,确定合适的系统设定参数。系统运行后,需实时检测牵引供电系统、400 V 配电网和储能系统状态,同时电压外环控制输出量实时传递至能量管理层。能量管理层根据各参数综合决策划分系统运行模式和运行工况,并进行功率分配,其核心部分为功率协调控制逻辑模块,包括运行模式选择及运行工况划分和功率分配两部分,其运行流程如附录 A 图 A3 所示。

3.2 变流器控制层

为有效跟踪电压阈值和能量管理层输出参考功率,本文在变流器控制层采用电压电流双闭环控制。将 U_{dc} 分别与电压阈值 U_{tr} 、 U_{re} 作差,通过电压控制器得到输出量 I_{tr} 和 I_{re} ,经能量管理层功率协调控制得到能馈系统和储能系统参考功率。

由于能馈系统采用 LCL 滤波器结构,采用经典直接控制并网逆变器方式可能导致系统不稳定。因此,本文对能馈系统采用考虑电容电流前馈的输出侧电流闭环控制^[17]。将 400 V 配电网电压通过锁相环(phase locked loop, PLL)得到基准相位 θ ,并将 400 V 配电网电压(u_a 、 u_b 、 u_c)、LCL 滤波器电容电流(i_{ca} 、 i_{cb} 、 i_{cc})、逆变器输出侧电流(i_{ia} 、 i_{ib} 、 i_{ic})经 Park 变换得到其 dq 坐标系分量。然后将能馈系统参考回馈功率和所有 dq 坐标系分量作为电流控制器输入量,通过 Park 反变换将电流控制器闭环控制后的输出量送入空间矢量脉宽调制(space vector pulse width modulation, SVPWM)模块进行调制,并产生控制脉冲对并网逆变器进行控制。为保证单位功率因数,设定能馈系统参考回馈电流 q 轴分量为 0。其中,能馈系统参考回馈电流 d 轴分量 $I_{f,ref,d}$ 可由式(10)计算得到。

$$I_{f,ref,d} = \frac{2P_{f,ref}}{3U_d} \quad (10)$$

式中: U_d 为 400 V 配电网电压 d 轴分量。

储能系统采用经典电流闭环控制^[16]。储能系统在接收到参考功率后,与采集的储能介质电流和电压一起作为电流控制器的输入量,经电流控制器闭环控制后的输出量送入脉宽调制(pulse width modulation, PWM)模块进行调制,并产生控制脉冲对储

能变流器进行控制。其中,储能系统参考电流 $I_{sc,ref}$ 的计算表达式如下:

$$I_{sc,ref} = \frac{P_{sc,ref}}{U_{sc}} \quad (11)$$

式中: U_{sc} 为储能介质电压。

综上所述,所提分层控制策略通过能量管理层为变流器控制层生成动态参考功率,变流器控制层则跟踪来自能量管理层的参考功率以控制各子系统协同工作,不仅能稳定牵引网母线电压,还能将再生制动能量通过能馈系统以单位功率因数并网回馈以满足 400 V 配电网负荷动态功率需求,同时可根据需求控制储能系统的充放电功率。

4 仿真实验

4.1 仿真条件

为验证所提混合型再生制动能量利用系统及其控制策略的正确性和有效性,基于图 1 所示拓扑结构搭建了仿真模型,其中城轨交通供电系统、能馈系统和储能系统的仿真参数如附录 A 表 A2 所示。考虑到空闲模式下再生制动能量利用系统不运行,故不单独验证。其余 3 种运行模式下 9 种运行工况的负荷仿真参数如附录 A 表 A3 所示,模式切换验证时负荷仿真参数如附录 A 表 A4 所示。

4.2 仿真结果

4.2.1 储能模式

储能模式系统仿真结果如图 4 所示,可知在此运行模式下牵引供电系统处于牵引状态,能馈系统不工作($P_f=0$)。其中:工况 2 下牵引变电所提供少量功率($P_{sub}=0.16$ MW)用于稳压在 U_{tr} ,牵引功率需求缺额由储能系统放电提供($P_{sc}=0.84$ MW);工况 3 下储能系统达最大放电功率($P_{sc}=1.5$ MW),牵引变电所不能稳压在 U_{tr} 并提供剩余牵引功率需求缺额

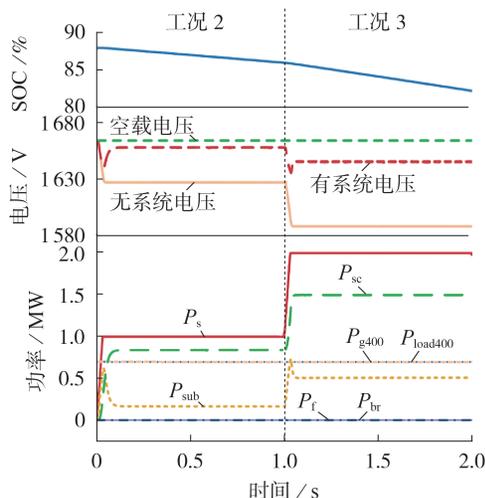


图 4 储能模式仿真结果

Fig.4 Simulative results of energy storage mode

($P_{\text{sub}}=0.5 \text{ MW}$)。在2种工况下制动电阻均未启动($P_{\text{br}}=0$), 400 V 配电网独立为其负荷供电($P_{\text{g400}}=P_{\text{load400}}=0.7 \text{ MW}$)。上述结果验证了储能模式下系统功率分配的正确性以及牵引网母线电压稳定性提升的有效性。

4.2.2 能馈模式

能馈模式仿真结果如图5所示。图5(a)为能馈系统并网电压和电流的A相波形, 可知电压和电流具有相同相位且波形正弦程度高, 验证了能馈系统实现单位功率因数并网的有效性。图5(b)为能馈模式下储能介质SOC、牵引网母线电压及系统功率分配结果。在此运行模式下牵引供电系统处于制动状态, 储能介质SOC超过上限, 储能系统不工作($P_{\text{sc}}=0$)。工况4下牵引网母线电压稳定在 U_{re} 后, 再生制动功率全部回馈至400 V 配电网($P_{\text{r}}=-P_{\text{re}}=0.85 \text{ MW}$), 400 V 配电网提供功率缺额($P_{\text{g400}}=P_{\text{load400}}-P_{\text{r}}=0.35 \text{ MW}$), 制动电阻未启动($P_{\text{br}}=0$)。工况5下能馈系统按最大功率回馈($P_{\text{r}}=P_{\text{fm}}=1 \text{ MW}$), 再生制动功率仍有剩余, 牵引网母线电压抬升至 U_{br} , 制动电阻启动消耗剩余全部功率($P_{\text{br}}=1 \text{ MW}$), 400 V 配电网提供功率缺额($P_{\text{g400}}=P_{\text{load400}}-P_{\text{r}}=0.2 \text{ MW}$)。工况6下能馈系统按400 V 配电网负荷功率需求进行回馈($P_{\text{r}}=P_{\text{load400}}=0.7 \text{ MW}$), 400 V 配电网不出力($P_{\text{g400}}=0$),

再生制动功率仍有剩余, 牵引网母线电压抬升至 U_{br} , 剩余功率全部被制动电阻消耗($P_{\text{br}}=1.3 \text{ MW}$)。上述结果验证了能馈模式下系统功率分配的正确性以及牵引网母线电压稳定性提升的有效性。

4.2.3 混合模式

混合模式仿真结果如附录A图A5所示, 可知在此运行模式下牵引供电系统处于制动状态, 储能介质SOC处于正常工作范围内, 能馈系统和储能系统均处于工作状态。对比工况7与工况8可知两者区别在于储能系统能否完全消纳回馈后剩余再生制动功率: 工况7时储能系统可完全存储剩余再生制动功率($P_{\text{sc}}=-0.7 \text{ MW}$), 牵引网母线电压稳定在 U_{re} , 制动电阻未启动($P_{\text{br}}=0$); 工况8时储能系统达最大充电功率($P_{\text{sc}}=-1.5 \text{ MW}$), 剩余再生制动功率使牵引网母线电压抬升至 U_{br} 并启动制动电阻($P_{\text{br}}=0.5 \text{ MW}$)。2种工况下能馈系统均以最大功率回馈, 400 V 配电网提供其功率缺额。同理, 对比工况9与工况10可以发现除能馈系统回馈功率完全满足400 V 配电网负荷功率需求($P_{\text{g400}}=0$)外, 其余特点分别与工况7、工况8相同。上述结果验证了混合模式下系统功率分配的正确性以及牵引网母线电压稳定性提升的有效性。

4.2.4 模式切换

为验证在各运行模式切换时控制策略的正确性和有效性, 选择4种模式下典型工况进行模式切换仿真, 仿真结果如附录A图A6所示。由图可知, 系统在4种模式间变化时, 其储能介质SOC、牵引网母线电压及系统功率分配结果与前文4种模式结果一致, 系统能顺利在不同模式间切换, 验证了系统模式切换时能量管理及控制策略的正确性和有效性。

从上述特定工况的仿真结果可以总结发现:

1) 所提混合型再生制动能量利用系统可有效实现城轨交通再生制动能量利用;

2) 所提分层控制策略可在不同运行模式和运行工况下有效管理与精确控制系统功率, 实现再生制动能量的高效利用和牵引网母线电压稳定性的提升。

4.2.5 方案对比

为对比混合型再生制动能量利用方案与其他方案, 在相同供电系统条件下, 分别对比未加装再生制动能量利用系统、加装混合型再生制动能量利用系统、加装储能系统和加装能馈系统(后文分别简称为未加装系统、混合型方案、储能方案和能馈方案), 其中能馈方案采用定功率回馈。仿真参数如附录A表A5所示^[18], 负荷仿真参数按附录A表A4设置, 仿真结果如附录A图A7所示。

为定量反映再生制动能量利用效果、稳压效果和经济指标, 引入节能率、稳压率和设备投资成本3个指标^[19]。其中: 节能率 e 定义为加装系统前后牵

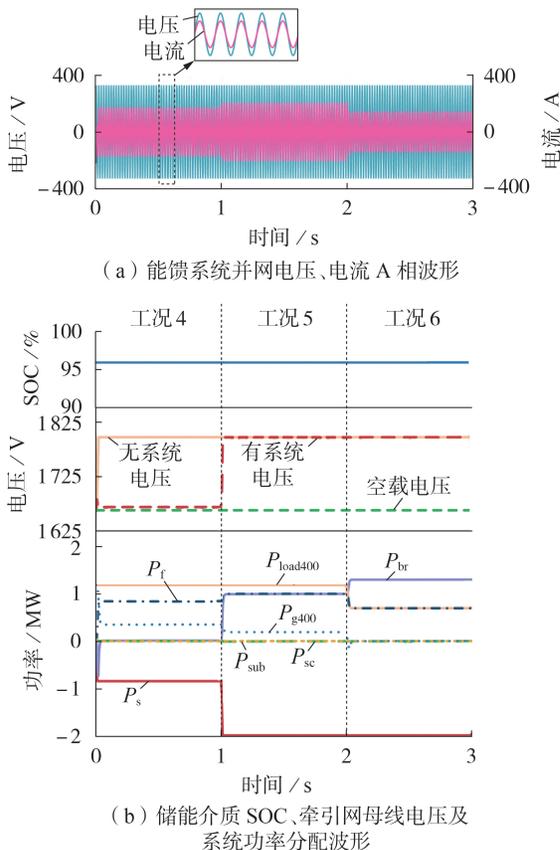


图5 能馈模式仿真结果

Fig.5 Simulative results of energy feedback mode

引变电所和 400 V 配电网总输出能量变化量占未加装系统时总输出能量的百分比;稳压率 u 定义为加装系统前后牵引网母线电压超过 / 低于空载电压部分积分变化量占未加装系统时积分的百分比;设备投资成本 c 定义为安装设备所需费用。3 个指标的计算表达式分别如式(12)—(14)所示。

$$e = \left[1 - \frac{\int_0^T (p_{\text{sub}_s} + p_{\text{g400}_s}) dt}{\int_0^T (p_{\text{sub}_{ns}} + p_{\text{g400}_{ns}}) dt} \right] \times 100 \% \quad (12)$$

式中: T 为计算时间; p_{sub_s} 和 $p_{\text{sub}_{ns}}$ 分别为加装和未加装系统时的牵引变电所功率; p_{g400_s} 和 $p_{\text{g400}_{ns}}$ 分别为加装和未加装系统时的 400 V 配电网功率。考虑电网公司“反向不计”计费原则,当 p_{g400_s} 和 $p_{\text{g400}_{ns}}$ 为负时设置为 0。

$$u = \left[1 - \frac{\int_{\Delta T_h} \Delta u_{\text{dc}_s_h} dt + \int_{\Delta T_l} \Delta u_{\text{dc}_s_l} dt}{\int_{\Delta T_h} \Delta u_{\text{dc}_{ns}_h} dt + \int_{\Delta T_l} \Delta u_{\text{dc}_{ns}_l} dt} \right] \times 100 \% \quad (13)$$

式中: ΔT_h 为牵引网母线电压超过空载电压时间段; ΔT_l 为牵引网母线电压低于空载电压时间段; $\Delta u_{\text{dc}_s_h}$ 和 $\Delta u_{\text{dc}_{ns}_h}$ 分别为加装和未加装系统时牵引网母线电压超过空载电压的差值; $\Delta u_{\text{dc}_s_l}$ 和 $\Delta u_{\text{dc}_{ns}_l}$ 分别为加装和未加装系统时牵引网母线电压低于空载电压的差值。

$$c = (c_f + c_i) s_f + (c_d + c_{sc}) s_{sc} \quad (14)$$

式中: c_f 、 c_i 、 c_d 和 c_{sc} 分别为并网逆变器、隔离变压器、储能变流器和超级电容的单位成本; s_f 和 s_{sc} 分别为配置的能馈系统和储能系统的容量。

根据仿真结果计算不同方案的节能率、稳压率和设备投资成本 3 个指标,得到不同方案的指标对比结果如附录 A 表 A6 所示。由表可知:能馈方案的设备投资成本远低于其他方案,但其节能率和稳压率均较差;储能方案具有最优的稳压率和良好的节能率,但其设备投资成本高昂;混合型方案在设备投资成本适中的情况下,具有较好的节能率和稳压率,综合来看优于另外 2 个方案。上述结果验证了混合型方案在兼顾技术指标和经济性时较储能方案和能馈方案更具优势。

5 结论

针对城轨交通再生制动能量利用问题,本文提出了一种含能馈系统与储能系统的混合型再生制动能量利用系统及其控制策略,通过理论分析和仿真验证,得到如下结论:

1) 本文所提混合型再生制动能量利用系统及其控制策略,能够协调控制能馈系统和储能系统充分利用再生制动能量,同时还能有效抑制牵引网母线电压波动;

2) 本文所提控制策略,通过建立牵引网母线电压与系统运行功率的对应关系,实现了动态功率回馈,与目前普遍采用的定功率回馈方式相比,避免了其回馈过度或回馈不足的弊端;

3) 本文所采用的混合型方案相比储能方案和能馈方案,以适中的投资成本取得了优异的节能和稳压效果,在保证技术指标的同时兼顾了经济性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 信月,杨中平,林飞,等. 基于参数反馈的城轨交通超级电容健康状态估算[J]. 电工技术学报,2019,34(增刊1):396-404.
XIN Yue, YANG Zhongping, LIN Fei, et al. Research on state of health estimation of supercapacitor in urban rail transit based on parameter feedback[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(Supplement 1): 396-404.
- [2] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2021 年度统计和分析报告[R]. 北京:城市轨道交通,2022.
- [3] 杨浩丰,刘冲,李彬,等. 基于列车运行工况的城轨地面混合储能系统控制策略研究[J]. 电工技术学报,2021,36(增刊1):168-178.
YANG Haofeng, LIU Chong, LI Bin, et al. Research on control strategy of urban rail ground hybrid energy storage device based on train operating condition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(Supplement 1): 168-178.
- [4] 李志广,金龙,杨铁成,等. 基于比例正弦幅值积分器的地铁二重化能馈变流器控制[J]. 电力自动化设备,2017,37(9):146-152.
LI Zhiguang, JIN Long, YANG Yicheng, et al. Control of dual-series energy-fed converter for subway based on proportional sinusoidal amplitude integrator[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9): 146-152.
- [5] 黄宇剑,林圣,吴鉴舟,等. 基于波形特征的地铁牵引整流器二极管开路故障诊断方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(5):195-204.
HUANG Yujian, LIN Sheng, WU Jianzhou, et al. Fault diagnosis method of diode open circuit in metro traction rectifier based on waveform characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 195-204.
- [6] 刘炜,吴拓剑,禹皓元,等. 直流牵引供电系统地面储能装置建模与仿真分析[J]. 电工技术学报,2020,35(19):4207-4215.
LIU Wei, WU Tuojian, YU Haoyuan, et al. Modeling and simulation of way-side energy storage devices in DC traction power supply system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(19): 4207-4215.
- [7] KHODAPARASTAN M, MOHAMED A A, BRANDAUER W. Recuperation of regenerative braking energy in electric rail transit systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(8): 2831-2847.
- [8] YANG X, LI X, NING B, et al. A survey on energy-efficient train operation for urban rail transit[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(1): 2-13.
- [9] LIU H, ZHOU M, GUO X, et al. Timetable optimization for regenerative energy utilization in subway systems[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2019, 20(9): 3247-3257.
- [10] 刘炜,许伶俐,廖钧,等. 含逆变回馈装置的城市轨道交直流混合潮流计算[J]. 铁道学报,2019,41(11):65-71.
LIU Wei, XU Lingli, LIAO Jun, et al. Calculation of AC-DC

- hybrid power flow in urban rail traction power supply system with regenerated energy feedback device[J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(11): 65-71.
- [11] LIN S, HUANG D, WANG A, et al. Research on the regeneration braking energy feedback system of urban rail transit[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019, 68(8): 7329-7339.
- [12] ZHU F, YANG Z, LIN F, et al. Decentralized cooperative control of multiple energy storage systems in urban railway based on multiagent deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(9): 9368-9379.
- [13] 刘宇嫣, 杨中平, 林飞, 等. 城轨地面式混合储能系统自适应能量管理与容量优化配置研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(23): 4874-4884.
LIU Yuyan, YANG Zhongping, LIN Fei, et al. Study on adaptive energy management and optimal capacity configuration of urban rail ground hybrid energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(23): 4874-4884.
- [14] 杨波. 城市轨道交通再生制动能量反馈技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
YANG Bo. Research on regenerative braking energy feedback technology of urban rail transit[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [15] 张秋瑞. 城市轨道交通再生制动能量利用技术研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
ZHANG Qiurui. Research on regenerating energy utilization technique in urban rail system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [16] 张芳, 沈浩明, 杨丰瑜. 大储能容量超导磁储能系统的拓扑结构及控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 146-155.
ZHANG Fang, SHEN Haoming, YANG Fengyu. Topological structure and control strategy of superconducting magnetic energy storage system with large energy storage capacity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 146-155.
- [17] 支娜, 赵佳宝, 明旭. 一种应用于直流微电网并网变换器的双电流反馈控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(5): 85-91.
ZHI Na, ZHAO Jiabao, MING Xu. Dual current feedback control strategy for DC microgrid grid-connected converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5): 85-91.
- [18] 胡海涛, 陈俊宇, 葛银波, 等. 高速铁路再生制动能量储存与利用技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 246-256, 391.
HU Haitao, CHEN Junyu, GE Yinbo, et al. Research on regenerative braking energy storage and utilization technology for high-speed railways[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 246-256, 391.
- [19] YANG Z, ZHU F, LIN F. Deep-reinforcement-learning-based energy management strategy for supercapacitor energy storage systems in urban rail transit[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2020, 22(2): 1150-1160.

作者简介:

李志强(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为城轨交通再生制动能量利用技术(**E-mail**: mrlitaylor@my.swjtu.edu.cn);

胡海涛(1987—), 男, 教授, 博士研究生导师, 通信作者, 主要研究方向为牵引供电系统稳定性与供电品质(**E-mail**: hht@swjtu.edu.cn);

何正友(1970—), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为信号处理和信息理论在电力系统中的应用、配电网综合自动化等(**E-mail**: hezy@swjtu.edu.cn)。

(编辑 李莉)

Hybrid regenerative braking energy utilization system and its control strategy in urban rail transit

LI Zhiqiang¹, HU Haitao¹, CHEN Junyu¹, WANG Ke¹, HE Zhengyou¹, WANG Qian², CHEN Lihua¹

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. Chengdu Aiteneng Electrical Science and Technology Co., Ltd., Chengdu 610097, China)

Abstract: Aiming at the utilization problem of regenerative braking energy (RBE) in urban rail transit, hybrid RBE utilization system (HRBEUS) combining energy feedback system and energy storage system and its control strategy are proposed considering load characteristics of power supply system in urban rail transit. The topology of HRBEUS is proposed considering the structure and load characteristics of power supply system of urban rail transit and the operating principle of HRBEUS is analyzed. Aiming at the full utilization of RBE, the energy management strategy of HRBEUS is formulated to realize the power flow management under various operating modes and conditions. Moreover, a hierarchical control strategy of HRBEUS combining the DC bus voltage control and the dynamic power allocation is proposed. The validity and feasibility of the above design are verified by simulation analysis, and the indexes of different RBE utilization schemes are compared. The results show that the proposed hierarchical control strategy can coordinate the control system to feedback, store and release RBE on demand, so as to realize the full utilization of RBE of urban rail transit, and restrain the DC bus voltage variation effectively. At the same time, the proposed HRBEUS can better take into account the technical effect and economy, and has certain advantages compared with energy storage scheme and energy feedback scheme, so it can be used as one of the choices of RBE utilization scheme in urban rail transit.

Key words: urban rail transit; regenerative braking energy; energy feedback system; energy storage system; energy management

附录 A

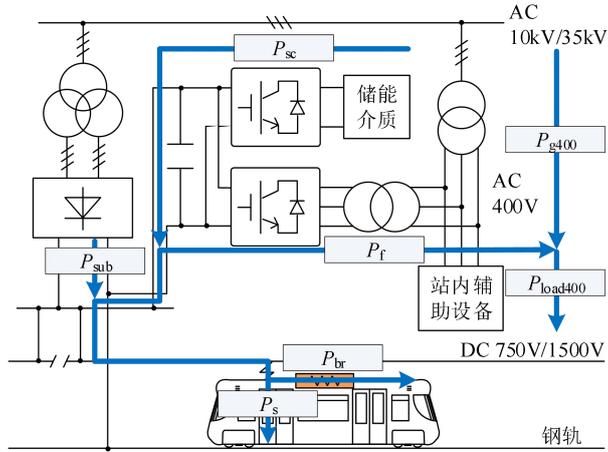


图 A1 混合型再生制动能量利用系统功率潮流图

Fig.A1 Power flows diagram of hybrid regenerative braking energy utilization system

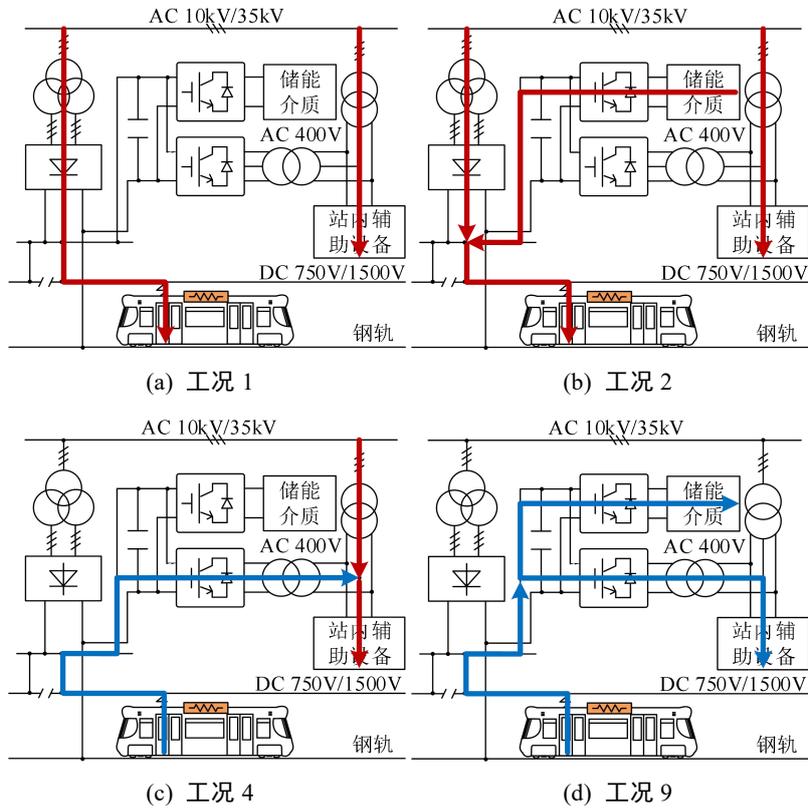


图 A2 典型工况功率潮流

Fig.A2 Power flows in typical operating conditions

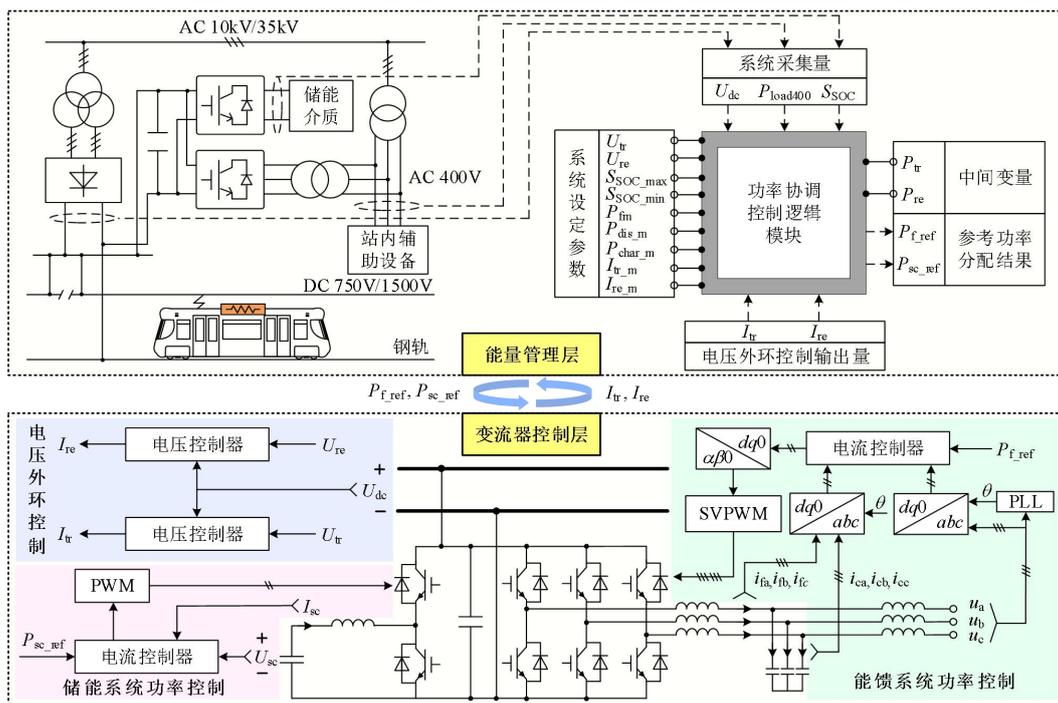


图 A4 混合型再生制动能量利用系统控制原理图

Fig.A4 Control schematic diagram of hybrid regenerative braking energy utilization system

表 A2 系统仿真参数

Table A2 Simulation parameters of system

位置	参数	数值
供电系统	中压环网三相电压	35 kV
	电网频率	50 Hz
	整流变压器电压比	35 kV/1.18 kV
	整流系数	1.41
	变电所等效内阻	0.06 Ω
	牵引状态电压阈值	1 658 V
	制动状态电压阈值	1 670 V
	制动电阻启动电压	1 800 V
能馈系统	低压配电网三相电压	400 V
	LCL 滤波器逆变器侧电感	2.8 mH
	LCL 滤波器网侧电感	1.5 mH
	LCL 滤波器电容	526 μF
	LCL 滤波器阻尼电阻	1.37 Ω
	最大回馈功率	1 MW
储能系统	隔离变压器电压比	400 V/400 V
	支撑电容	9 800 μF
	超级电容容量	50 F
	超级电容额定电压	960 V
	超级电容 SOC 上限	95%
	超级电容 SOC 下限	25%
	最大充电功率	1.5 MW
最大放电功率	1.5 MW	

表 A3 负荷仿真参数

Table A3 Simulation parameters of loads

运行模式	工况序号	列车总功率/MW	400 V 配电网负荷功率/MW
储能	2	1	0.7
	3	2	0.7
	4	-0.85	1.2
能馈	5	-2	1.2
	6	-2	0.7
	7	-1.7	1.2
混合	8	-3	1.2
	9	-1.9	0.7
	10	-2.7	0.7

表 A4 模式切换负荷仿真参数

Table A4 Simulation parameters of loads of mode switching

运行模式	工况序号	列车总功率/MW	400V 配电网负荷功率/MW
空闲	1	0.1	0.3
储能	2	1.4	0.3
能馈	4	-0.5	0.6
混合	9	-1.5	0.6

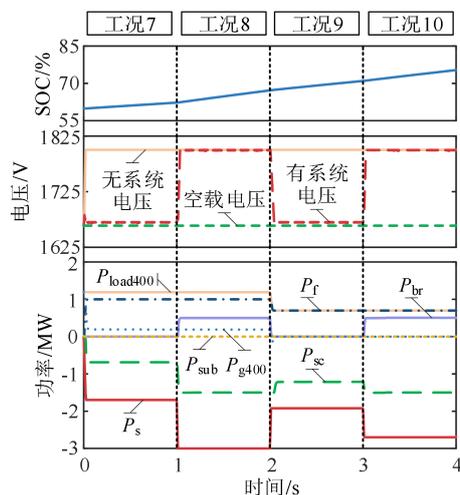


图 A5 混合模式仿真结果

Fig.A5 Simulative results of hybrid mode

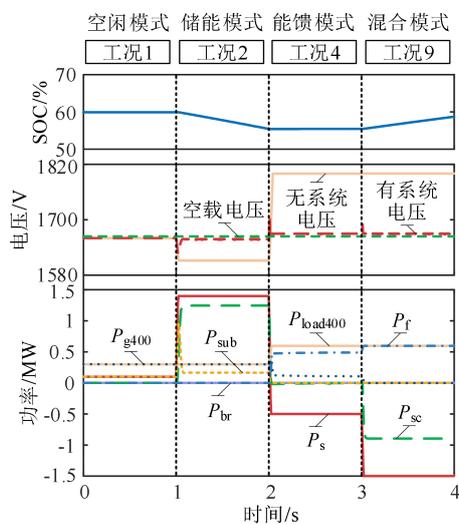


图 A6 模式切换仿真结果

Fig.A6 Simulative results of mode switching

表 A5 方案对比仿真参数

Table A5 Simulation parameters of schemes comparison

参数		数值
混合型方案	储能系统容量	1 MW, 10 kW·h
	能馈系统容量	1 MW
储能方案	储能系统容量	2 MW, 20 kW·h
能馈方案	能馈系统容量	2 MW
经济性参数 ^[18]	并网逆变器成本	20 万元/MW
	隔离变压器成本	3 万元/MW
	储能变流器成本	15 万元/MW
	超级电容成本	80 万元/MW

(功率与容量比满足 1 MW:10 kW·h)

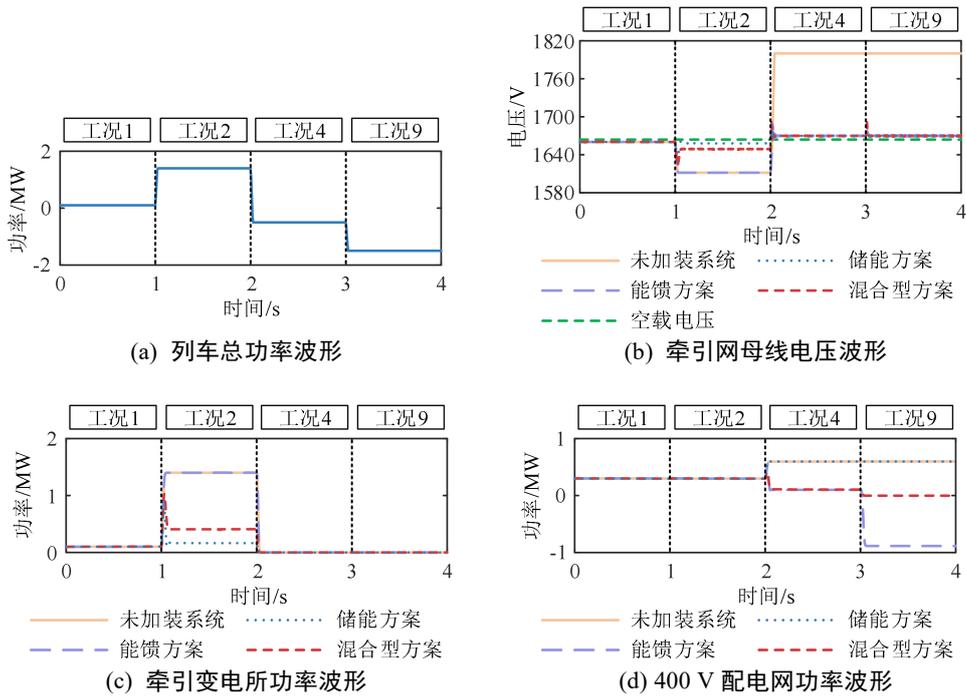


图 A7 不同方案对比仿真结果

Fig.A7 Simulative results of comparison of different schemes

表 A6 不同方案指标对比

Table A6 Indexes comparison of different schemes

方案	节能率/%	稳压率/%	设备投资成本/万元
混合型	60	90	118
储能	42	95	190
能馈	33	79	46