

文章编号: 1001-4632 (2026) 04-0196-11

引用格式: 吴丽然, 叶晶晶, 吴命利, 等. 基于分区所 RPC 的电气化铁路再生制动能量利用功率控制方法与验证[J]. 中国铁道科学, 2026, 47(4): 196-206.

Citation: Wu Liran, Ye Jingjing, Wu Mingli, et al. Power control method and validation of regenerative braking energy utilization for electrified railways based on railway power conditioner located in section post[J]. China Railway Science, 2026, 47(4): 196-206.

基于分区所 RPC 的电气化铁路再生制动能量利用功率控制方法与验证

吴丽然^{1,2}, 叶晶晶³, 吴命利³, 卢景涛³, 李孟桐³

- (1. 北京交通大学 先进轨道交通自主运行全国重点实验室, 北京 100044;
2. 北京交通大学 智慧高铁系统前沿科学中心, 北京 100044;
3. 北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044)

摘 要:为促进电气化铁路再生制动能量在不同供电区间的高效利用, 提出一种基于分区所铁路功率调节器(RPC)的再生制动能量利用功率控制方法。根据牵引网和 RPC 工作原理, 建立以受控源为核心的再生制动能量利用系统电路模型, 阐明电能相邻供电区间传输时的电流关系; 基于实测数据, 从电量、功率的角度分析再生制动特征, 对相邻供电区间的负荷状态进行分类和占比统计, 评估再生制动能量在相邻供电区间相互利用的潜能; 提出以牵引变电所总进线功率最小为目标建立目标函数和约束条件, 当相邻供电区间的牵引负荷处于负荷状态 2 (一个区间的电力机车和动车组处于再生制动工况, 另一区间的处于牵引工况) 时, 通过 RPC 将再生制动能量从一个供电区间转移至另一个相邻供电区间的再生制动能量利用功率控制方法, 降低再生制动能量向电网返送量。以某实际运营铁路线路为例, 对该控制方法进行算例分析和工程试验。结果表明: 采用该控制方法后, 当某供电区间的电力机车和动车组处于再生制动工况、相邻供电区间的超过 80% 的时间处于牵引工况时, 再生制动能量在相邻供电区间相互利用潜力最大; 分区所 RPC 能够降低再生制动能量占比, 约 20% 再生制动能量被利用, 验证了该控制方法的有效性。

关键词: 电气化铁路; 再生制动能量; 供电区间; 分区所; 铁路功率调节器; 牵引变电所; 总进线功率

中图分类号: U223

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-4632.2026.04.15

交流传动电力机车和动车组 (简称电动列车) 因牵引功率大、功率因数高、谐波含量低和可再生制动等优点, 已被广泛应用于我国电气化铁路^[1]。随着我国铁路向着高速、重载方向的不断发展, 列车运行速度越来越高、单车载重越来越大、行车密度越来越高, 牵引能耗相应增大^[2]。在电气化铁路中, 牵引耗能一般约占总用电量的 50%, 甚至超过 80%^[3]。随着全球能源供给日趋紧张以及我国“双碳”战略的指引, 轨道交通行业的能源高效利用和节能减排越来越受到重视。我国交通运输部

颁布的《绿色交通“十四五”发展规划》和《“十四五”铁路科技创新规划》均提出需要改善交通用能结构, 推进能源循环利用, 大幅提升交通运输绿色发展水平^[4-6]。

我国和大多数国家的电气化铁路接触网是由专用的 25 kV 单相交流系统供电, 且接触网为分段供电, 即牵引变电所的牵引变压器通常输出 2 个单电源向相邻的 2 段接触网供电^[7]。2 段相邻的接触网之间为实现电气隔离常设置电分相, 电动列车产生的再生制动能量只能由同一供电区间处于牵引状

收稿日期: 2025-06-06; 修订日期: 2026-07-16

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2025YFB2606700)

第一作者: 吴丽然 (1987—), 男, 河北石家庄人, 副研究员, 硕士研究生导师, 博士。E-mail: lrwu@bjtu.edu.cn

态的电动列车吸收,或通过接触网、牵引变电所反馈至公用电网,因此再生制动能量利用效率不高。重载电动列车在长大下坡道运行时再生制动功率大、持续时间长,大量再生制动能量无偿反馈至公用电网,将增大负序电流,还可能导致接触网出现过压,不利于电动列车的安全运行^[8-9]。因此,为提高运行安全、促进能源的高效利用,再生制动能量在铁路牵引供电系统内部的有效利用具有重要意义。

近年来,针对电动列车再生制动能量利用开展了多方面研究,车载储能成为就近收集和利用再生制动能量的有效方法,这对降低牵引能耗起到一定作用^[10]。首先,电动列车数量多,总体储能成本巨大;其次,优化列车牵引特性和运输组织可以降低再生制动能量的产生或增加电动列车之间的利用率,但该方法受运行条件限制发挥的作用有限^[11]。铁路功率调节器(Railway Power Conditioner, RPC)在我国和日本得到了一定的研究和应用^[12-14],基于RPC的不同再生制动能量利用方法被提出,如文献[15]和文献[16]分别提出用于牵引变电所的储能型RPC回收利用再生制动能量的不同方法。但这些方法的效果受到储能容量的限制,储能容量较小时再生制动能量利用率不理想,而容量较大时储能系统重量和体积庞大、控制复杂、成本高、循环寿命短。另外,为提高再生制动能量在全线的利用率,文献[17]提出在牵引变电所设置储能型RPC、在分区所设置传统RPC。该方法虽然增大了再生制动能量有效利用区间,但大量RPC的一次性投入很高,且能量长距离传输的损耗较大,整体经济效益受限。

本文建立基于分区所RPC的再生制动能量利用系统电路模型,构建电能跨供电区间传输时的电流关系。基于大量实测数据从电量、功率的角度分析再生制动特性,根据相邻区间负荷工况的不同归纳出3种牵引负荷状态,根据其占比说明在相邻供电区间实现再生制动能量利用的潜能。根据再生制动特性提出以牵引变电所总进线功率最小为目标的再生制动能量利用功率控制方法,即相邻供电区间的牵引负荷处于负荷状态2(一个区间的电动列车处于再生制动工况,另一区间处于牵引工况)时,将再生制动能量从1个供电区间转移至由另一个牵引变电所供电的相邻供电区间。通过算例分析和工程试验验证所提方法的有效性。

1 基于分区所RPC的再生制动能量利用系统建模

1.1 系统结构

基于分区所RPC的电气化铁路再生制动能量利用系统结构如图1所示,整个系统主要由2个牵引变电所(TSS1和TSS2)、接触网和RPC构成。其中,RPC主要由1台交直交变流器和2台降压变压器(T_{ca} 和 T_{cb})构成,2台降压变压器的高压侧分别连接至分区所的2段牵引母线。既有牵引变电所的牵引变压器(T_1 或 T_2)将电网三相电源变换为2个单相电源,向相邻的接触网供电。接触网被分为4个供电区间,记为区间1—区间4。为降低负序电流,电网侧电源轮换相序,一般牵引变电所出口处2侧接触网电压相序不同,但分区所2侧接触网电源尽量来自相同相序。图中: $U_{T1-\beta}$, $U_{T1-\alpha}$, $U_{T2-\beta}$ 和 $U_{T2-\alpha}$ 分别表示4个区间的牵引网电压; $I_{T1-\beta}$, $I_{T1-\alpha}$ 和 $I_{T2-\beta}$, $I_{T2-\alpha}$ 分别为牵引变压器 T_1 和 T_2 的牵引母线电流; $I_{RPC-\alpha}$ 和 $I_{RPC-\beta}$ 分别为RPC的2个交流侧输出电流。

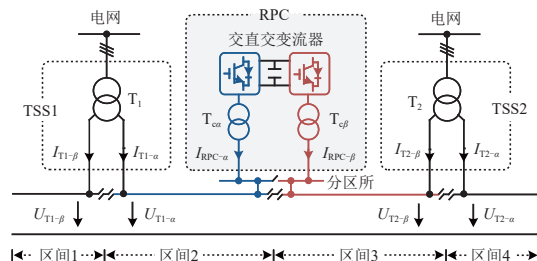


图1 基于分区所RPC的再生制动能量利用系统结构

1.2 等效电路

由于RPC属于有源型变流设备,难以与牵引网共同构建等效阻抗模型。牵引变电所将公用电网三相电源变换为2个单相电源,可将包含1个牵引变电所及相邻接触网的牵引网等效为共地的2个单相系统,如图2(a)所示^[18];构成RPC的单相变流器和降压变压器共同等效为受控电流源,可将RPC等效为2端口电路,如图2(b)所示。若忽略RPC的损耗,则RPC的2个输出端有功功率之和为0。因此,将牵引变电所和RPC等效为受控源,构建统一的等效电路如图2所示。图中: $Z_{Ti-\alpha}$ 和 $Z_{Ti-\beta}$ ($i=1, 2$)分别为牵引变电所 i 负载前后的接触网阻抗; $Z_{TiL-\alpha}$, $Z_{TiL-\beta}$ 和 $I_{TiL-\alpha}$, $I_{TiL-\beta}$ 分别为牵引负荷在2个区间的等效阻抗和电流; $P_{TiL-\alpha}$ 和

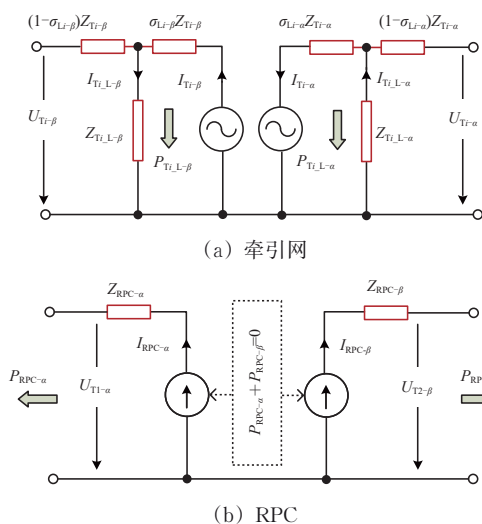


图2 系统等效电路

$P_{Ti-L-\beta}$ 分别为牵引负荷的有功功率； $\sigma_{Li-\alpha}$ 和 $\sigma_{Li-\beta}$ 分别为负载所在牵引网的位置， $\sigma_{Li-\alpha} \in [0, 1]$ ， $\sigma_{Li-\beta} \in [0, 1]$ ； $Z_{RPC-\alpha}$ ， $Z_{RPC-\beta}$ 和 $I_{RPC-\alpha}$ ， $I_{RPC-\beta}$ 分别为 RPC 的 2 个输出端等效阻抗和电流； $P_{RPC-\alpha}$ 和 $P_{RPC-\beta}$ 分别为 RPC 的 2 个输出端有功功率。

每个牵引变电所进线侧有功功率 P_{Ti} 为 2 个区间的有功功率 $P_{Ti-\alpha}$ 和 $P_{Ti-\beta}$ 之和，为

$$P_{Ti} = P_{Ti-\alpha} + P_{Ti-\beta} \quad (1)$$

电动列车的网侧变流器多采用脉宽调制 (PWM) 整流技术，功率因数较高^[19]。为简化分析，忽略牵引网阻抗和 RPC 输出等效阻抗的影响，认为牵引变电所输出电压与 RPC 连接电压相等。在单位功率因数条件下，有

$$\begin{pmatrix} I_{T1-\alpha} \\ I_{T2-\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{T1-L-\alpha} \\ I_{T2-L-\beta} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_{RPC-\alpha} \\ I_{RPC-\beta} \end{pmatrix} \quad (2)$$

2 再生制动特性

再生制动能量利用潜能和控制方法与其特性相关，考虑电量、功率和相邻供电区间负荷状态，以大量实测数据量化分析再生制动的数值特征，为再生制动能量控制方法提供支撑。

2.1 再生制动能量

电动列车的网侧变流器可实现四象限运行，当牵引电机的电压、电流反向时其运行在发电状态，产生电制动力，将机械能转换为电能（即再生制动能量），向牵引网反馈再生制动能量^[20-22]。

以单个牵引变电所为计量节点，定义一段时间

内电动列车从电网吸收的平均电量 E_{PO} 和向电网反送的平均再生制动电量 E_{RB} 分别为

$$\begin{cases} E_{PO} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N E_{POj} = \int_{t=0}^{T_d \cdot N} P_{Ti} dt & P_{Ti} \geq 0 \\ E_{RB} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N E_{RBj} = \int_{t=0}^{T_d \cdot N} |P_{Ti}| dt & P_{Ti} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中： j 为天数； N 为一段时间内的总天数； E_{POj} 和 E_{RBj} 分别为第 j 天从电网吸收的电量（即正向电量）和向电网反送的再生制动电量（即反向电量）； t 为时间； T_d 为每天的持续时间。

为评估再生制动能量的相对大小，定义单个牵引变电所的再生制动能量占比 η_p 为

$$\eta_p = \frac{E_{RB}}{E_{PO} + E_{RB}} \times 100\% \quad (4)$$

以我国西北部某铁路为例，选择运行高速动车组、重载交流电力机车的 15 个牵引变电所连续监测 3 个月牵引负荷，监测结果如图 3 所示。

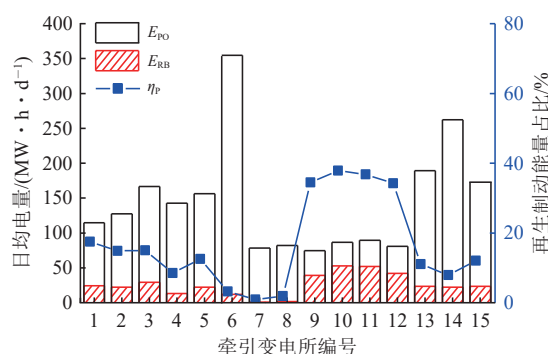


图3 不同牵引变电所牵引负荷消纳电量

从图 3 可以看出：单个牵引变电所的日平均再生制动电量约为 0~50 MW·h，占比约为 0~38%。

再生制动能量是反映电动列车再生制动功率在一段时间内的累积效果，是长时间尺度的再生制动特性表征之一。电动列车再生制动能量与诸多因素有关，如电动列车牵引传动类型、线路坡道与限速、客货牵引质量、司机操作习惯等，均影响再生制动功率的大小和持续时间^[23]。在典型重载铁路和高速铁路，尤其是我国西部地区的长大坡道线路，电动列车再生制动频繁或持续时间长，产生大量的再生制动能量。

2.2 再生制动功率

再生制动功率可以表征不同时刻再生制动特性，其大小和持续时间是影响其累积能量的主要因素，且对 RPC 容量优化设计有直接影响。

以图 3 所示的某个牵引变电所典型日负荷为

例，分析再生制动功率的表现特征，其典型日有功功率曲线如图 4 所示，典型时刻放大图如图 5 所示。图中：24 h 为 1 个基本运行周期；有功功率正值表示牵引变电所从电网吸收能量，负值表示牵引变电所向电网反送能量。

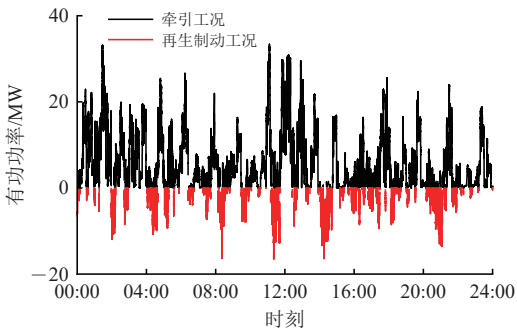
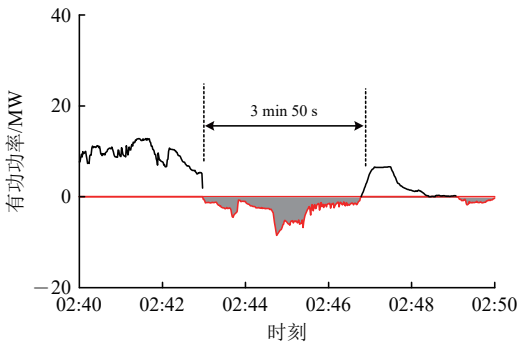
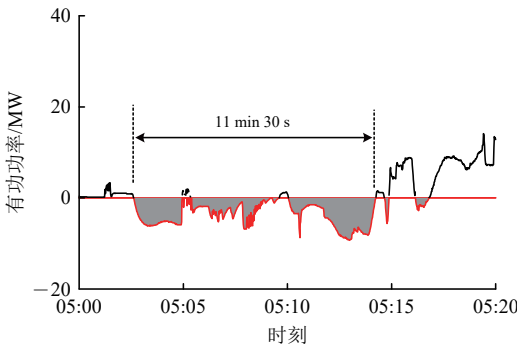


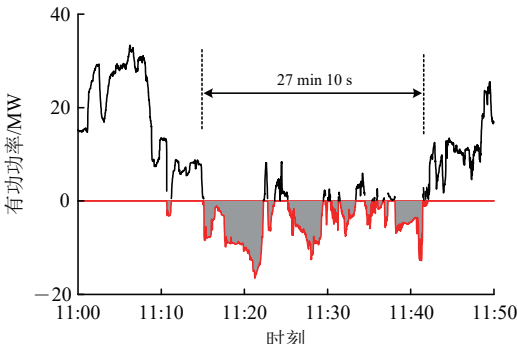
图 4 不同工况下某牵引变电所典型日有功功率曲线



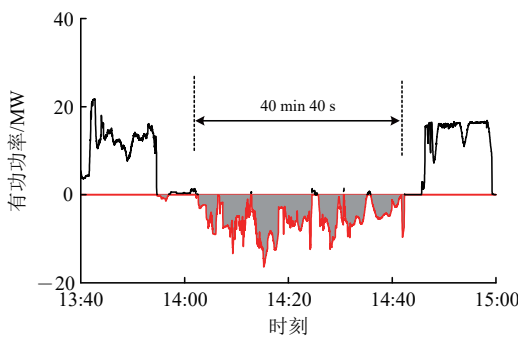
(a) 功率 7.6 MW，电量 177 kW · h



(b) 功率 9.1 MW，电量 847 kW · h



(c) 功率 16 MW，电量 2 800 kW · h



(d) 功率 16 MW，电量 3 360 kW · h

图 5 典型时刻有功功率曲线放大

从图 4 和图 5 可以看出：再生制动工况下有功功率波动明显，一般为几 MW 至十几 MW，甚至可能超过 20 MW；单次再生制动持续几分钟至几十分钟，单次再生制动能量达 150 kW · h 以上，甚至超 3 300 kW · h。上述特征适用于大多数运量较大的重载铁路和高速铁路；运量较小的普速铁路和以直流机车为主的铁路再生制动功率很小，暂不做详细分析。

2.3 牵引负荷状态占比

再生制动能量利用系统需要实时检测不同供电区间的牵引负荷信息并识别其状态，一般根据电动列车运行工况和有功功率分为多种运行状态。根据相邻 2 区间的电动列车运行工况，将负荷简化为 3 种组合状态，定义如下。

负荷状态 1：一个区间的电动列车处于牵引工况，另一区间的处于牵引或空载工况。

负荷状态 2：一个区间的电动列车处于再生制动工况，另一区间的处于牵引工况。

负荷状态 3：一个区间的电动列车处于再生制动工况，另一区间的处于再生制动或空载工况。

一段时间内的再生制动特性，采用不同负荷状态下的累积时间占比 η_m 表示，为

$$\eta_m = \frac{\sum T_m}{T_{\text{Total}}} \tag{5}$$

式中： m 为负荷状态编号， $m=1, 2, 3$ ； T_m 和 T_{Total} 分别为负荷状态累积时间和 1 个完整运行周期时间。

以图 3 所示的多个牵引变电所典型 24 h 负荷数据，得出不同负荷状态下累积时间占比见表 1。从表 1 可知：有再生制动时的累积时间占比即负荷状态 2 和负荷状态 3 的合计累积时间占比超过 30%，

表 1 不同负荷状态下累积时间占比

负荷状态	状态 1	状态 2	状态 3
累积时间占比/%	69.5	25.4	5.1

且负荷状态2占大多数,表明当某供电区间的电动列车处于再生制动工况时相邻区间电动列车超过80%的时间处于牵引工况。

由于不同供电区间的电动列车多处于牵引工况,当某区间内电动列车处于再生制动工况时其相邻供电区间的电动列车多处于牵引工况,因此负荷状态2的占比明显大于负荷状态3,这表明再生制动能量在不同变电所的相邻供电区间相互利用的潜力较大。

3 变电所间能量利用功率控制方法

分区所RPC需要根据负荷信息识别负荷状态,以牵引变电所总进线功率最小为目标构建目标函数,在约束条件下进行再生制动能量利用控制,实现在特定负荷状态时将再生制动能量转移至相邻供电区间被消纳利用。

3.1 目标函数

我国铁路牵引用电量多数采用有功功率的正向正计、反向不计的计量方式,若以节省电费即减少从电网消耗的电能为目标,则在2个相邻牵引变电所总进线有功功率一正一负时运行RPC是有意义的。由此可以得到以2个牵引变电所总进线有功功率描述的目标函数 f ,为

$$f = \min P_T \quad (6)$$

其中,

$$P_T = \frac{P_{T1} + P_{T2}}{\gamma_T} \Big|_{P_{T1} > 0, P_{T2} > 0} = \frac{1}{\gamma_T} \sum_{i=1,2} (P_{Ti-\alpha} + P_{Ti-\beta}) \Big|_{P_{T1} > 0, P_{T2} > 0}$$

式中: P_T 为2个牵引变电所的总进线功率; γ_T 为牵引变压器效率。

仍以图1所示系统结构为例,RPC只能调整区间2和区间3之间的有功功率,而区间1和区间4的负荷状态不受影响。因此,式(6)可简化为

$$P_T = \frac{1}{\gamma_T} (P_{T1-\alpha} + P_{T2-\beta}) \Big|_{P_{T1} > 0, P_{T2} > 0} \quad (7)$$

当区间2和区间3的电动列车处于负荷状态2时,根据电能供给侧和需求侧的电量关系,并考虑传输损耗可以得到功率关系为

$$\begin{cases} P_{T1-\alpha} = P_{T1,L-\alpha} - \tau_\alpha P_{RPC} \\ P_{T2-\beta} = P_{T2,L-\beta} - \tau_\beta P_{RPC} \\ \tau_\alpha = \gamma_{RPC} (1 - \eta_{loss-\alpha}) \\ \tau_\beta = \gamma_{RPC} (1 - \eta_{loss-\beta}) \end{cases} \quad (8)$$

式中: P_{RPC} 为RPC输出有功功率, $P_{RPC} \geq 0$; γ_{RPC} 为RPC效率; $\eta_{loss-\alpha}$ 和 $\eta_{loss-\beta}$ 分别为2个区间的接触网功率传输损耗率。

将式(8)代入式(7)可以得到以负载功率和RPC功率表示的目标函数 P_T 为

$$P_T = \left(\frac{1}{\gamma_T} \sum P_{T1,L-\alpha} - \tau_\alpha P_{RPC}^* \right) \Big|_{P_{T1,L-\alpha} > 0, P_{T2,L-\beta} < 0} + \left(\frac{1}{\gamma_T} \sum P_{T1,L-\beta} - \tau_\beta P_{RPC}^* \right) \Big|_{P_{T1,L-\alpha} < 0, P_{T2,L-\beta} > 0} \quad (9)$$

式中: P_{RPC}^* 为RPC输出有功功率指令, $P_{RPC}^* \geq 0$ 。

由式(9)可知,在考虑RPC损耗、接触网损耗条件下,该式通过区间2和区间3的负载功率、RPC输出有功功率构建了目标函数。通过迭代计算,当目标函数取得 P_T 的最小值时RPC功率值即为其输出有功功率指令值。

3.2 约束条件

1) 潮流约束

假设牵引负载功率因数为 ± 1 ,则根据2个牵引变电所的母线电压和电流可以计算负载功率。同理可得到RPC的输出有功功率。此外,结合式(8)的功率关系,可以得到整个系统的潮流约束,为

$$\begin{cases} P_{T1,L-\alpha} = U_{T1-\alpha} (I_{T1-\alpha} + I_{RPC-\alpha}) \\ P_{T1,L-\beta} = U_{T1-\beta} (I_{T1-\beta} + I_{RPC-\beta}) \\ P_{RPC} = \min(|U_{T1-\alpha} I_{RPC-\alpha}|, |U_{T1-\beta} I_{RPC-\beta}|) \\ P_{T1-\alpha} = P_{T1,L-\alpha} - \tau_\alpha P_{RPC} \\ P_{T2-\beta} = P_{T2,L-\beta} - \tau_\beta P_{RPC} \end{cases} \quad (10)$$

2) 设备运行约束

为避免再生制动能量通过另一区间的牵引变电所回馈至公用电网,造成不必要的能量环流,在RPC运行时需限制其输出有功功率。因此,由2个区间的负载功率和RPC设备容量可以获得RPC的功率指令约束条件,为

$$P_{RPC}^* \leq \begin{cases} \min \left(\frac{-P_{T1,L-\alpha}}{\tau_\beta}, \frac{P_{T2,L-\beta}}{\tau_\beta}, S_{RPC} \right) \Big|_{P_{T1,L-\alpha} < 0, P_{T2,L-\beta} > 0} \\ \min \left(\frac{P_{T1,L-\alpha}}{\tau_\alpha}, \frac{-P_{T2,L-\beta}}{\tau_\alpha}, S_{RPC} \right) \Big|_{P_{T1,L-\alpha} > 0, P_{T2,L-\beta} < 0} \end{cases} \quad (11)$$

此外,若RPC兼顾一定的无功补偿功能,则还需以下约束条件,为

$$\sqrt{P_{RPC}^{*2} + Q_{RPC}^{*2}} \leq S_{RPC} \quad (12)$$

式中: Q_{RPC}^* 为RPC输出无功功率指令; S_{RPC} 为RPC

的额定容量。

以区间2的电动列车处于再生制动工况为例，RPC的有功功率控制流程如图6所示。图中： k 表示当前时刻。

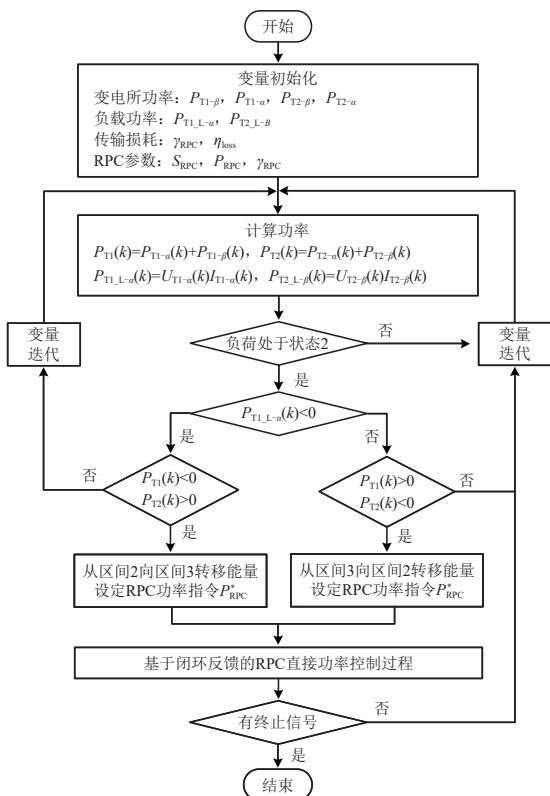


图6 PRC有功功率控制流程简图

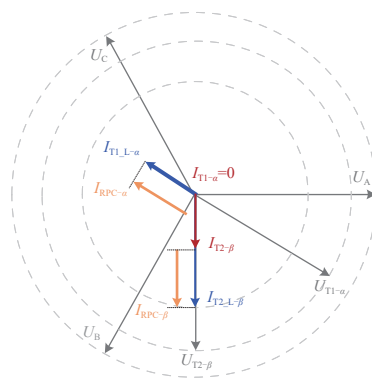
设定2个牵引变电所采用Vv接线牵引变压器，且假设区间2和区间3的牵引网电压有效值相等、负载功率因数为 ± 1 ，则2个区间的各电压、电流矢量关系如图7所示。

4 案例验证

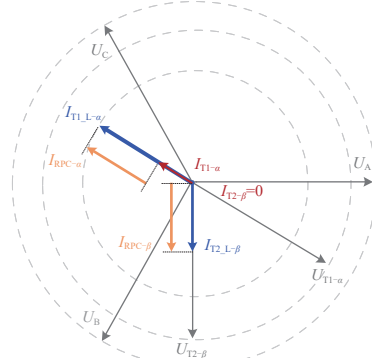
4.1 算例分析

以我国某Ⅰ级客货共线铁路为例，采集了相邻2个牵引变电所的牵引负荷数据。以此数据为基础，采用Matlab软件的m文件实现图6所示的能量管理策略，并将实测负荷数据导入软件以离线测算的方式验证本文所提方法。

假设RPC额定容量足够大（设定10 MW），采用上文第3节所述方法，得到采用RPC后区间2和区间3的牵引负荷和牵引变电所母线的有功功率，如图8所示。由图8可知：2个区间的再生制动频次较高，再生制动功率峰值一般大于10 MW，甚至接近30 MW。

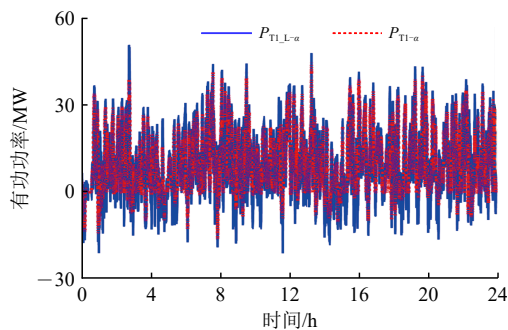


(a) 再生制动功率<牵引功率

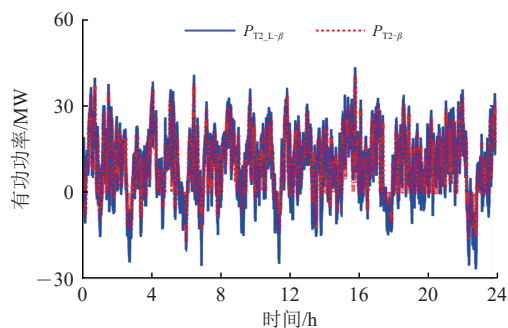


(b) 再生制动功率>牵引功率

图7 2个区间电压、电流矢量关系



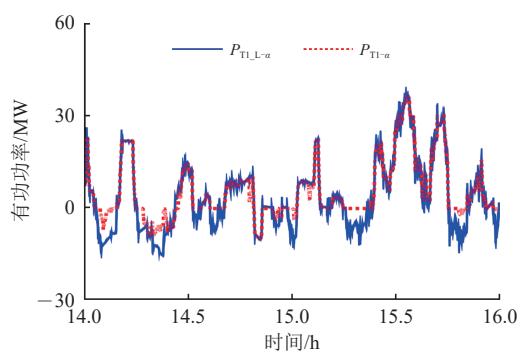
(a) 区间2



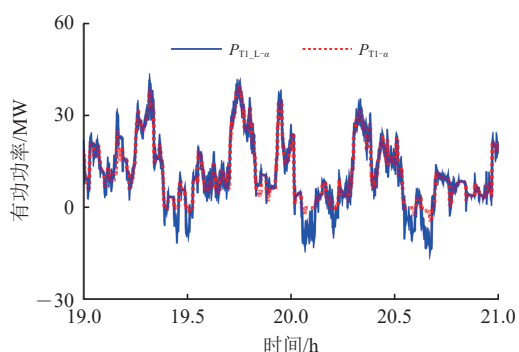
(b) 区间3

图8 采用RPC后2个区间有功功率

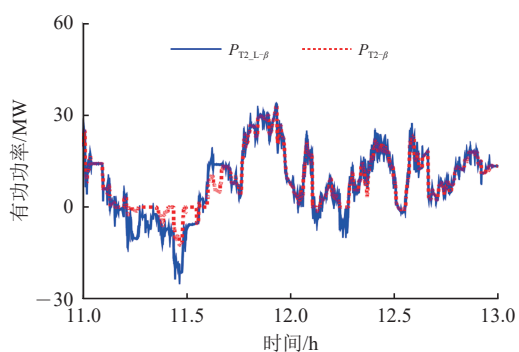
图9为典型时刻牵引负荷和牵引变电所母线有功功率放大图。由图9可知：相较牵引负荷而言，



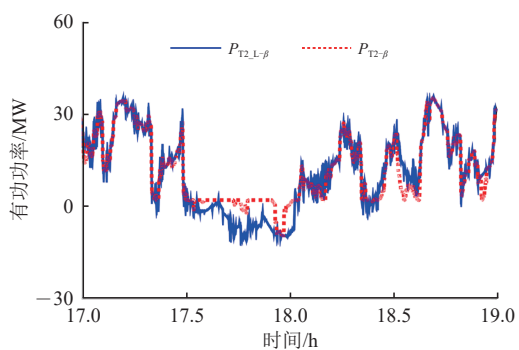
(a) 区间2典型时段1



(b) 区间2典型时段2



(c) 区间3典型时段1



(d) 区间3典型时段2

图9 典型时刻有功功率放大

牵引变电所母线的负向有功功率有所减小, 部分时段正向有功功率也有所减小, 这是因为由RPC转移并被相邻区间利用了再生制动能量, 进而减小了2个牵引变电所从电网获取的电能。

图10为典型时段2个区间的有功功率曲线。由图10可知: 区间3中区段①和区段④的再生制动能量全部转移至区间2, 区间3中区段②的再生制动能量部分转移至区间2 (区间2牵引负荷较小), 区间2中区段③的再生制动能量全部转移至区间3, 符合图6所示的控制方法。

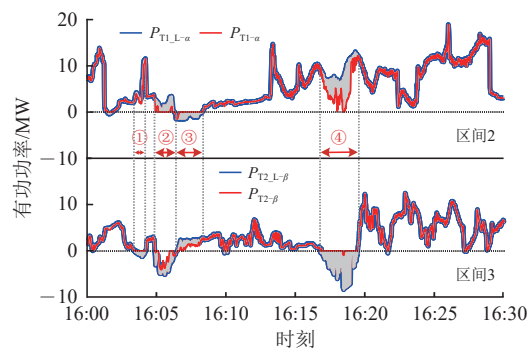


图10 典型时刻有功功率曲线

设定由区间2和区间3所消纳的再生制动能量与负荷总再生制动能量的比值为再生制动能量利用率。不同的RPC额定容量的再生制动能量利用率如图11所示。由图11可知: 随着RPC额定容量的提高, 再生制动能量利用率逐渐增大, 但增大趋势有所减缓; 当RPC额定容量接近9 MW时, 2个区间的再生制动能量利用率均在25%左右。

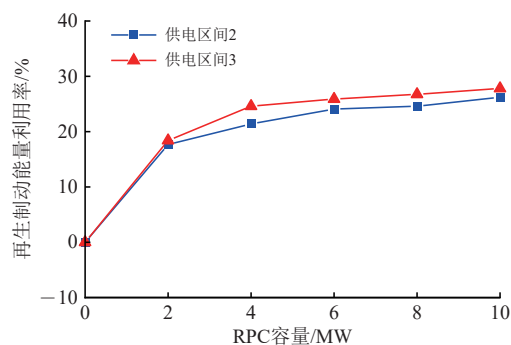


图11 不同RPC额定容量下再生制动能量利用率

4.2 工程试验

为验证本文方法的可行性, 在我国某铁路分区间进行了工程试验和应用, 主要设备如图12所示。

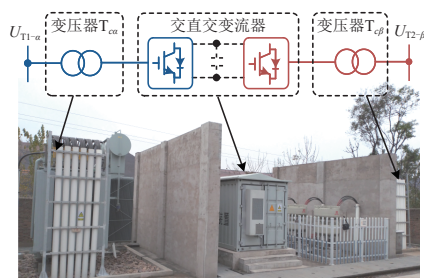


图12 RPC工程应用

RPC 主要包括 1 个集装箱式交直交变流器和 2 个降压变压器，关键参数见表 2。

表 2 RPC 主要参数	
参数	取值
额定容量	9 MW
降压变压器容量	9 MV · A
降压变压器电压	27.5 kV/1 kV
支撑电容	30 mF
二次滤波电容	12.6 mF
二次滤波电抗	0.2 mH

若以 RPC 的 α 相变流器输出为正方向，正值表示 β 相变流器从区间 3 吸收再生制动能量，并通过 α 相变流器向区间 2 释放，典型周期即 24 h 输出有功功率和累计电量如图 13 所示。由图 13 可知：在系统运行期间，RPC 最大有功功率为 9 MW；24 h 内 α 相和 β 相变流器对外输出电量分别为 5.2 和 6.5 MW · h，即累计传输电量 11.7 MW · h。

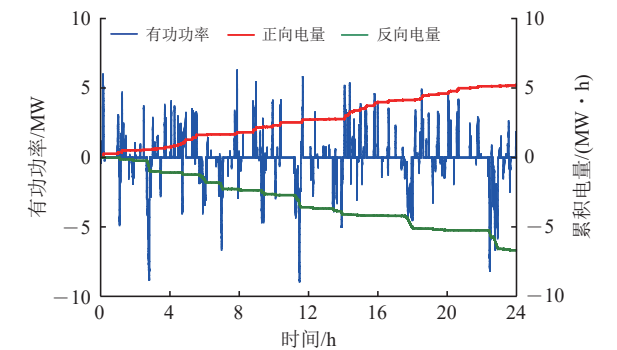
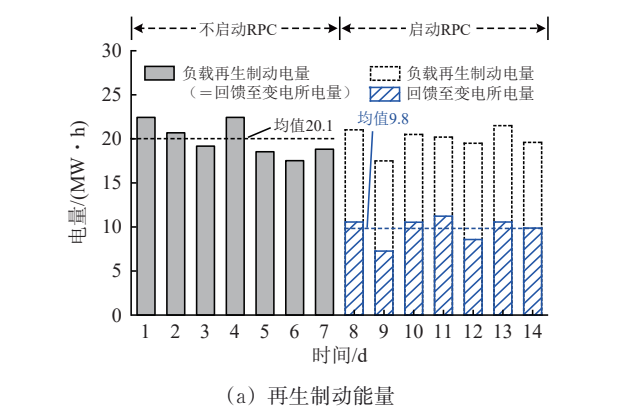


图 13 RPC 输出有功功率和累积电量

为评估再生制动能量利用率，在连续 14 d 内开展对比试验，试验结果如图 14 所示。由图 14 可知：不启动 RPC 时，2 个区间每日负载再生制动电量在 17.5~22.5 MW · h 之间、均值为 20.1 MW · h，再生制动能量占比 η_p 的范围为 7.0%~9.1%、均值为 8.1%；启动 RPC 时，2 个区间的日均负载再生制动电量为 20.0 MW · h，负荷水平较 PRC 启



(a) 再生制动能量

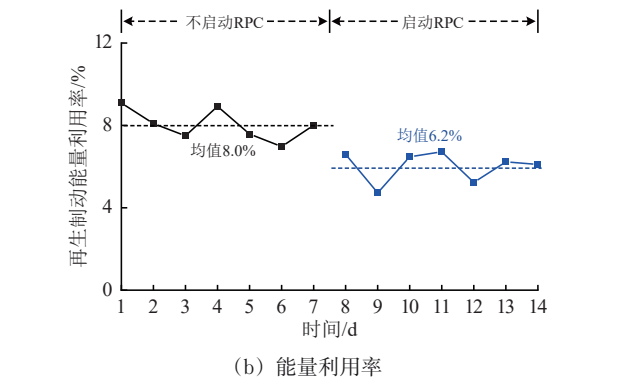


图 14 对比试验结果

动前差异不大，回馈至牵引变电所电量在 7.0~11.0 MW · h 之间，均值降至 9.8 MW · h，较 PRC 启动前降低 10.3 MW · h；再生制动能量占比 η_p 的范围为 4.7%~6.7%，均值为 6.2%；由此可见，启动 PRC 后约 20% 以上的再生制动能量通过 RPC 转移至相邻区间被消纳。

5 结 论

- (1) 首先建立以受控源为核心的基于分区所 RPC 的电气化铁路再生制动能量利用系统电路模型，然后根据实测数据分析再生制动特性，并对负荷状态进行分类和占比统计，最后根据再生制动特性表征结果提出以牵引变电所总进线功率最小为目标的分区所 RPC 功率控制方法。通过算例分析和工程试验，验证了所提控制方法的有效性。
- (2) 高速铁路、重载铁路再生制动能量大，典型区段的单个牵引变电所日再生制动能量可达 50 MW · h，超过与电网双向传输电量的 30% 以上。对运量较大的高速铁路、重载电气化铁路相邻 2 个区间而言，当 1 个区间的电动列车处于再生制动工况时，另一个区间的电动列车多处于牵引工况；采用所提控制方法，约 20% 以上的再生制动能量可以在相邻区间被消纳利用。
- (3) 不同铁路线路再生制动能量特性差异较大，本文仅以我国西北部某铁路 15 个牵引变电所实测负荷为例分析再生制动特性，以某特定场景验证所提功率控制方法可行性和再生制动能量利用率，因此数据适用范围具有一定局限性。此外，负荷检测与远距传输均存在延时，因此不同负荷特性下的设备容量最优配置、考虑通信延时和负荷快速变化时的多目标动态控制是核心问题，将在后续进一步研究。

参 考 文 献

- [1] 游小杰,杨才伟,王剑,等.一种适用于机车PWM整流器的比例积分-谐振电流控制器设计[J].电工技术学报,2021,36(23):4926-4936.
You Xiaojie, Yang Caiwei, Wang Jian, et al. A tuning method for proportional integral-resonant current controller in locomotive PWM rectifiers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(23): 4926-4936.
- [2] 王辰,彭旸,答子虔,等.时速400km高速铁路隧道气动压力分布规律[J].中国铁道科学,2026,47(2):162-174.
Wang Chen, Peng Yang, Da Ziqian, et al. The distribution law of aerodynamic pressure of high-speed railway tunnel with a speed of 400 km · h⁻¹[J]. China Railway Science, 2026, 47(2): 162-174.
- [3] Deng Wenli, Dai Chaohua, Chen Weirong, et al. Experimental investigation and adaptability analysis of hybrid traction power supply system integrated with photovoltaic sources in AC-fed railways[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(3): 1750-1764.
- [4] 交通运输部.绿色交通“十四五”发展规划[EB/OL].(2021-10-29)[2022-01-21].https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202201/t20220121_3637584.html.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. The 14th Five-Year Plan for green transportation[EB/OL]. (2021-10-29)[2022-01-21]. https://xxgk.mot.gov.cn/2020/jigou/zhghs/202201/t20220121_3637584.html.
- [5] 国家铁路局.“十四五”铁路科技创新规划[EB/OL].(2021-12-14)[2021-12-23].https://www.nra.gov.cn/jglz/fgzd/gfwj/202112/t20211223_337038.shtml.
National Railway Administration of People's Republic of China. Railway science and technology innovation plan of the 14th Five-Year Plan[EB/OL]. (2021-12-14)[2021-12-23]. https://www.nra.gov.cn/jglz/fgzd/gfwj/202112/t20211223_337038.shtml.
- [6] 陈冲,贾利民,赵天宇,等.基于储能的非电气化铁路新型牵引供电系统架构及关键技术[J].中国铁道科学,2024,45(1):162-177.
Chen Chong, Jia Limin, Zhao Tianyu, et al. Architecture and key technologies of new traction power supply system for non-electrified railway based on energy storage[J]. China Railway Science, 2024, 45(1): 162-177.
- [7] Pilo E, Mazumder S K, González-franco I. Smart electrical infrastructure for AC-fed railways with neutral zones[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2015, 16(2): 642-652.
- [8] Zhang Qiao, Zhang Yexin, Huang Ke, et al. Modeling of regenerative braking energy for electric multiple units passing long downhill section[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2022, 8(3): 3742-3758.
- [9] 陈民武,陈天舒,代先锋,等.基于MMC的储能型同相供电系统模型及控制策略[J].中国铁道科学,2022,43(3):132-143.
Chen Minwu, Chen Tianshu, Dai Xianfeng, et al. Modeling and control strategy of energy storage co-phase power supply system based on MMC[J]. China Railway Science, 2022, 43(3): 132-143.
- [10] Fang Xiaochun, Lin Shuai, Wang Xiaofan, et al. Model predictive current control of traction permanent magnet synchronous motors in six-step operation for railway application[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(9): 8751-8759.
- [11] 林卫宁.基于运行图优化的牵引负荷削峰措施研究[D].北京:北京交通大学,2022.
Lin Weining. Study on peak-cutting measures of traction load based on operation chart optimization[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2022.
- [12] 何棒棒,高志宣,马超.一种基于储能系统的混合铁路功率调节器及其控制策略[J].电工技术学报,2021,36(23):4905-4915.
He Bangbang, Gao Zhixuan, Ma Chao. A hybrid railway power conditioner based on energy storage system and its control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(23): 4905-4915.
- [13] 罗培,杨维民,张敏.高铁再生制动工况下公用电网负序电流优化[J].中国铁道科学,2018,39(6):126-132.
Luo Pei, Yang Weimin, Zhang Min. Optimization of negative sequence current in public power grid under regenerative braking condition of high speed railway[J]. China Railway Science, 2018, 39(6): 126-132.
- [14] Lin Jinjie, Hu Sijia, Li Yong, et al. A novel power programming strategy for railway power regulation with dynamic exploration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(4): 2798-2811.

- [15] 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.
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.
- [16] 耿安琪,胡海涛,张育维,等.基于阶梯能量管理的电气化铁路混合储能系统控制策略[J].电工技术学报,2021,36(23):4916-4925.
Geng Anqi, Hu Haitao, Zhang Yuwei, et al. Control strategy of hybrid energy storage system for electrified railway based on increment energy management[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(23): 4916-4925.
- [17] Chen Junyu, Ge Yinbo, Wang Ke, et al. Integrated regenerative braking energy utilization system for multi-substations in electrified railways[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(1): 298-310.
- [18] 张俊琪,吴命利.基于多负荷端口戴维南等效的电气化铁路牵引网潮流算法[J].电工技术学报,2018,33(11):2479-2485.
Zhang Junqi, Wu Mingli. Power flow algorithm for electric railway traction network based on multiple load port Thévenin equivalence[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(11): 2479-2485.
- [19] 王科,胡海涛,魏文婧,等.基于列车运行图的高速铁路动态牵引负荷建模方法[J].中国铁道科学,2017,38(1):102-110.
Wang Ke, Hu Haitao, Wei Wenjing, et al. Modelling method for dynamic traction load of high speed railway based on train working diagram[J]. China Railway Science, 2017, 38(1): 102-110.
- [20] 张瑜,哈大雷,姜雪,等.动车组多制式牵引传动系统设计探讨[J].铁道机车车辆,2021,41(2):95-101.
Zhang Yu, Ha Dalei, Jiang Xue, et al. Research design on multi-mode traction drive system of EMU[J]. Railway Locomotive & Car, 2021, 41(2): 95-101.
- [21] He Liqun, Xiong Jian, Ouyang Hui, et al. High-performance indirect current control scheme for railway traction four-quadrant converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(12): 6645-6654.
- [22] 马驰.两相两重四象限变流器的控制方法及实现[J].中国铁道科学,2017,38(1):95-101.
Ma Chi. Control method and implementation for double-phase dual four quadrant converter[J]. China Railway Science, 2017, 38(1): 95-101.
- [23] Sun Xubin, Yao Zemin, Dong Chunjiao, et al. Optimal control strategies for metro trains to use the regenerative braking energy: a speed profile adjustment approach[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2023, 24(60): 5883-5894.

Power control method and validation of regenerative braking energy utilization for electrified railways based on railway power conditioner located in section post

Wu Liran^{1,2}, Ye Jingjing³, Wu Mingli³, Lu Jingtao³, Li Mengtong³

(1. State Key Laboratory of Advanced Rail Autonomous Operation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Frontiers Science Center for Smart High-Speed Railway System, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

3. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To promote the efficient utilization of regenerative braking energy (RBE) within different power supply sections of electrified railways, a power control method for RBE utilization based on the railway power conditioner (RPC) located in the section post is proposed. Based on the operating principles of the traction network and the RPC, a unified circuit model of the RBE utilization system, with the controlled source as the core model, is established, and the current relationships are described when section-crossing energy transferring. Large-scale field data were analyzed to explore the regenerative braking characteristics from the perspectives of energy and power, classify load states of adjacent power sections, and calculate their proportions, thereby assessing the potential for mutual utilization of RBE in adjacent power supply sections. With the objective of minimizing the total input power to the traction substations, an objective function and constraints are established

to propose a control method for RBE utilization reducing the RBE fed back into the power grid. In this method, when the traction loads in adjacent power sections are in Load State 2 (one power section is in regenerative braking mode and the other power section is in traction mode), the PRC transfers RBE from one power supply section to the other adjacent power supply section. Case studies and engineering experiments are conducted based on a specific operational railway line to verify the proposed method. The results indicate that when one electric train in a power supply section is in regenerative braking conditions, other electric trains in adjacent power supply sections are in traction conditions for more than 80% of the time, indicating significant potential for the mutual utilization of RBE within adjacent power supply sections. The RPC located in the section post can reduce the proportion of RBE, with approximately 20% of RBE being utilized adopting the method, thereby validating the effectiveness of the proposed control method.

Key words: Electrified railway; Regenerative braking energy; Power supply section; Section post; Railway power conditioner; Traction substation; Total input power

(责任编辑 金 燕)