第 49 卷 第 2 期：772-780　　高电压技术　　Vol.49, No.2: 772-780
2023 年 2 月 28 日　　High Voltage Engineering　　February 28, 2023
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20211877

计及电网电压不平衡的储能型铁路功率调节器负序优化补偿策略

郭　亚[1]，陈小强[1,2]，王　英[1,2]，贺彦强[1]，杨　欢[1]，常占宁[3]
（1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院，兰州 730070;
2. 教育部光电技术与智能控制重点实验室，兰州 730070;
3. 中国铁路兰州局集团有限公司供电部，兰州 730070）

摘　要：针对偏远地区电网电压不平衡条件下牵引供电系统负序补偿及再生制动能量回收利用问题，基于储能型铁路功率调节器，提出一种在补偿装置容量有限时，计及电网电压不平衡条件的再生制动能量利用及负序综合补偿优化策略。分析了电网电压不平衡时储能型铁路功率调节器负序完全补偿机理，引入储能系统补偿系数，有功、无功电流补偿系数，以负序补偿度和牵引变电所补偿容量及供电臂负荷平衡度作为优化目标，提出储能型铁路功率调节器优化补偿模型。采用序列二次规划法对优化模型进行求解，最后通过仿真验证，表明该策略可以在电网电压不平衡时，使电网侧负序不平衡度降低的同时提高再生制动能量利用率，减少牵引负荷对牵引变电所的能量需求。

关键词：储能型铁路功率调节器；电网电压不平衡；负序电流；优化补偿；电能质量

Negative Sequence Optimization Compensation Strategy for Energy Storage Type Railway Power Conditioner Considering Grid Voltage Imbalance

GUO Ya[1], CHEN Xiaoqiang[1,2], WANG Ying[1,2], HE Yanqiang[1], YANG Huan[1], CHANG Zhanning[3]
(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Intelligent Control, Ministry of Education, Lanzhou 730070, China;
3. China Railway Lanzhou Bureau Group Co., Ltd. Power Supply Department, Lanzhou 730070, China)

Abstract：To research the negative sequence compensation and regenerative braking energy recovery and utilization of traction power supply system under the condition of unbalanced grid voltage in remote areas, based on the energy storage type railway power conditioner, this paper proposes a regenerative braking energy utilization and negative sequence comprehensive compensation optimization strategy that takes into account the grid voltage imbalance condition when the capacity of the compensation device is limited. When the grid voltage is unbalanced, the complete compensation mechanism of negative sequence of the energy storage type railway power conditioner is analyzed, and the compensation coefficients of active and reactive current and the energy storage system are introduced. Negative sequence compensation degree, the compensation capacity of the traction substation and the load balance of the power supply arm are taken as the optimization targets, and an optimal compensation model for the energy storage type railway power conditioner is proposed. The optimization model is solved by the sequential quadratic programming method, and finally it is verified by simulation. It is revealed that this strategy can reduce the negative sequence imbalance on the grid side while increasing the utilization rate of regenerative braking energy when the grid voltage is unbalanced, and can reduce the energy demand of traction load on the traction substation.

Key words：energy storage type railway power conditioner (ES-RPC); unbalance grid voltage conditions; negative sequence current; optimal compensation; power quality

---

基金资助项目：国家自然科学基金(52067013)；教育部重点实验室开放课题(KFKT2020-12)；甘肃省科技厅自然科学重点基金(21JR7RA280)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52067013), the Natural Science Foundation of Opto-electronic Technology and Intelligent Control Key Laboratory of Education Ministry (KFKT2020-12), the Natural Science Key Foundation of Science and Technology Department of Gansu Province(21JR7RA280).

0　引言

在电网系统薄弱的山区，存在交流电网电压不平衡，导致电网中存在负序电压分量，产生负序问题[1]。全国铁路电气化比例达到 71.9%，电气化铁路系统是碳排放的重点之一，为达成碳中和目标，电气化铁路需实现节能高效，低碳交通[2-3]。列车在制动状态下产生大量再生制动能量，若将其直接回馈给牵引变电所，不仅使能量无法有效利用，还会由于其中含有大量负序和谐波含量，加重负序电压不平衡度，降低电网的电能质量[4-6]。因此加强再生制动能量利用，减少电气化铁路碳排放很有必要。

为解决电气化铁路负序问题，学者提出了多种补偿措施，如电容补偿装置、静止无功补偿器、静止同步补偿器、统一电能质量控制器、铁路功率调节器(railway power conditioner，RPC)等[7-10]，其中 RPC 具有极佳的综合补偿性能、端口延展性等优势，得到广泛关注。

随着“碳中和”概念的提出，降低运输能耗和二氧化碳排放强度，推进铁路运营低碳化，具有十分重要的意义。为解决再生制动能量利用问题，有学者提出在 RPC 中间直流侧加入储能系统，构成储能型铁路功率调节器(energy storage type railway power conditioner, ES-RPC)，实现供电臂之间功率双向流通，其中 RPC 用来改善负序问题，储能系统存储和释放再生制动能量，实现对负荷功率的削峰填谷作用[11-13]。文献[14]提出了基于超级电容储能的新型铁路功率调节器的协调控制策略。文献[15]针对基于超级电容储能的 RPC，提出了一种由能量管理层和变流器控制层组成的分层控制策略。文献[16]提出了储能型 RPC 负序完全补偿策略，解决了储能装置接入牵引供电系统后的负序补偿问题。文献[17]对 RPC 建立了电压波动约束下负序电流最小的数学模型，采用基于序列二次规划方法的智能优化算法进行优化补偿。文献[18]采用微分进化算法，建立以 RPC 补偿容量最小为目标，容量优化补偿系数为决策变量的优化模型，实现了 RPC 优化补偿。文献[19]提出了一种由铁路功率调节器和静止无功补偿器构成的低成本混合型电能质量控制系统，进行了负序优化补偿分析及容量优化方案。文献[20]基于灵敏度解耦简化 RPC 补偿模型，提出解耦计算方案，能快速简便地计算补偿功率并且使补偿功率尽可能小。文献[17-20]只进行了 RPC 负序优化或补偿容量优化，没有考虑储能装置接入情况。

此外，针对 ES-RPC 系统优化问题，文献[21]采用改进粒子群算法，提出了基于超级电容储能的铁路功率调节器的电网侧最小负序电流控制策略。文献[22]以供电臂电压波动和 RPC 补偿容量为目标，采用粒子群多目标优化算法求解，有效减小系统两供电臂电压波动并减少 RPC 补偿容量。文献[23]提出了一种以功率因数优先的部分补偿策略来优化 RPC 的补偿容量。文献[21-23]虽考虑了储能装置接入，但是未考虑三相电网接入强度不够情况；如何在 ES-RPC 容量有限并考虑三相电网电压不平衡情况下，使电网侧负序不平衡度降低，缺乏深入研究。

基于此，考虑电网电压的负序不平衡，本文对 ES-RPC 提出了一种负序优化补偿方案，引入储能系统补偿系数，有功、无功电流补偿系数，提出将负序补偿度，牵引变电所出力度、两臂负荷平衡度 3 个函数作为优化目标，在约束条件下采用序列二次规划法求解优化模型。在“碳中和”目标下提高再生制动能量利用率，减少牵引负荷对牵引变电所的能量需求。

1　储能型铁路功率调节器系统结构

储能型铁路功率调节器系统(ES-RPC)结构图如图 1 所示。图 1 中，$\boldsymbol{U}_{\mathrm{A}}$、$\boldsymbol{U}_{\mathrm{B}}$、$\boldsymbol{U}_{\mathrm{C}}$ 分别为电网侧三相电压；$\boldsymbol{I}_{\mathrm{A}}$、$\boldsymbol{I}_{\mathrm{B}}$、$\boldsymbol{I}_{\mathrm{C}}$ 分别为电网侧三相电流；$\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}}$、$\boldsymbol{I}_{\mathrm{R}}$ 分别为铁路左右牵引供电臂负荷电流；$\boldsymbol{U}_{\mathrm{L}}$、$\boldsymbol{U}_{\mathrm{R}}$ 分别为铁路左右牵引供电臂电压；$\boldsymbol{I}_{\mathrm{Lc}}$、$\boldsymbol{I}_{\mathrm{Rc}}$ 分别为 ES-RPC 在铁路左右牵引供电臂上的补偿电流；$\boldsymbol{I}_{\mathrm{tL}}$、$\boldsymbol{I}_{\mathrm{tR}}$ 分别为 ES-RPC 补偿后铁路左右牵引供电臂负荷电流。

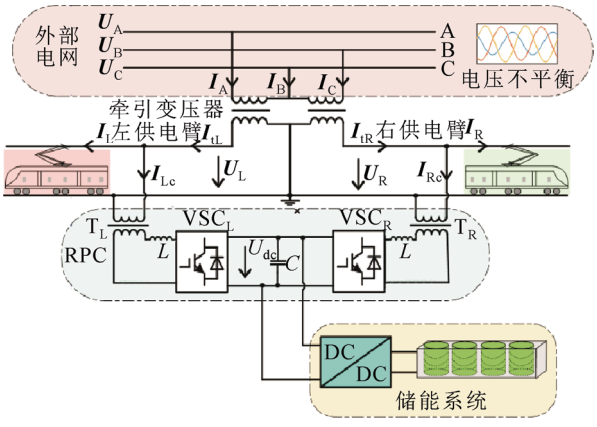


图 1　储能型铁路功率调节器系统图

Fig.1　System diagram of energy storage type railway power conditioner

图 1 的 ES-RPC 系统由外部电网、V/v 牵引变压器、铁路左右牵引供电臂(下文简称为左右供电臂)、列车、降压变压器，铁路功率调节器和新增加的储能系统构成。110 kV 三相电网经 V/v 牵引变压器后转换为两相 27.5 kV 电压，通过左右供电臂为列车提供电能；左右供电臂分别通过降压变压器 T_L、T_R 与变流器 VSC_L、VSC_R 连接，中间直流电容实现功率转移。储能系统的储能介质通过双向 DC/DC 变换器接入中间直流侧，根据供电臂负荷工况实现储能介质的充放电，从而实现再生制动能量的利用。

ES-RPC 中 RPC 在平衡左右供电臂的同时也是储能装置与左右供电臂进行功率流动的端口。外部电网的电压不平衡传递至 V/v 牵引变压器，加重了牵引供电系统的电压不平衡，进而影响 ES-RPC 的补偿特性。

2 ES-RPC 完全补偿数学描述

2.1 V/v 变压器电网电压不平衡传递机理

在图 1 中，假定电网电压不平衡时的三相电压 $\boldsymbol{U}_A$、$\boldsymbol{U}_B$、$\boldsymbol{U}_C$ 分别为[1]

$$\begin{cases} \boldsymbol{U}_A = U^+ e^{j0} + U^- e^{j\alpha^-} \\ \boldsymbol{U}_B = U^+ e^{j(-\frac{2\pi}{3})} + U^- e^{j(\frac{2\pi}{3}+\alpha^-)} \\ \boldsymbol{U}_C = U^+ e^{j(\frac{2\pi}{3})} + U^- e^{j(-\frac{2\pi}{3}+\alpha^-)} \end{cases} \tag{1}$$

式中：U^+、U^-分别为电网的正序、负序电压有效值；α^-为负序电压相对正序电压的相位。

则图 1 中的左右供电臂电压 $\boldsymbol{U}_L$、$\boldsymbol{U}_R$ 分别为

$$\begin{cases} \boldsymbol{U}_L = (\boldsymbol{U}_A - \boldsymbol{U}_B)/k = U_L e^{j(-\frac{\pi}{6}-\alpha_L^-)} \\ \boldsymbol{U}_R = (\boldsymbol{U}_B - \boldsymbol{U}_C)/k = U_R e^{j(-\frac{\pi}{2}+\alpha_R^-)} \end{cases} \tag{2}$$

式中：k 为 V/v 牵引变压器的变比；U_L、U_R 分别为左右供电臂电压有效值；α_L^-、α_R^- 分别为交流电压不平衡时的相位增量。

在系统未采取补偿措施时，左右供电臂电压和电流相量如图 2 所示。图 2 中，U_A^+、U_B^+ 分别为电网电压正序分量；I_L、I_R 分别为左右供电臂负荷电流有效值；α_L、α_R 分别为供电臂电压与负荷电流的相位角；I_{Lp}、I_{Rp} 分别为左右供电臂负荷有功电流有效值；I_{Lq}、I_{Rq} 分别为左右供电臂负荷无功电流有效值。

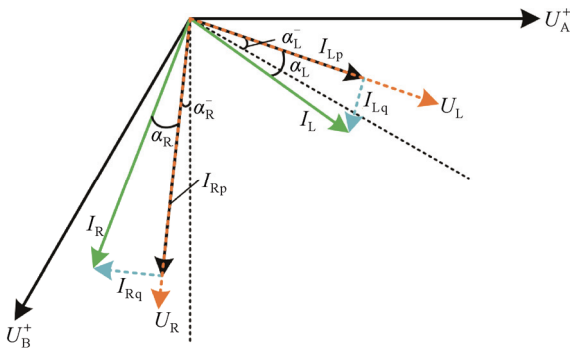


图 2 未补偿时电压、电流相量图

Fig.2 Uncompensated phasor diagrams

电网电压不平衡度γ为电网电压负序分量U^-与正序分量U^+的比值[24]，其表达式为

$$\gamma = \frac{U^+}{U^-} \times 100\% \tag{3}$$

式(2)中左右供电臂电压有效值和相位的表达式分别为：

$$\begin{cases} U_L = U_L^+ \sqrt{1+\gamma^2+2\gamma\cos(\alpha^- + \frac{2\pi}{3})} \\ U_R = U_R^+ \sqrt{1+\gamma^2-2\gamma^2\cos\alpha^-} \end{cases} \tag{4}$$

$$\begin{cases} \alpha_L^- = \arctan\left(\dfrac{\gamma\sin(\frac{\pi}{3}+\alpha^-)}{1+\gamma\cos(\frac{\pi}{3}+\alpha^-)}\right) \\ \alpha_R^- = \arctan\left(\dfrac{1-\gamma\cos\alpha^-}{\gamma\sin\alpha^-}\right) - \dfrac{\pi}{2}\mathrm{sgn}(\alpha^-) \end{cases} \tag{5}$$

当γ已知时，左右供电臂电压 U_L、U_R，相位增量 α_L^-、α_R^- 可由式(4)—(5)计算得出。

则左右供电臂负荷电流 $\boldsymbol{I}_L$、$\boldsymbol{I}_R$ 分别为

$$\begin{cases} \boldsymbol{I}_L = I_L e^{j(-\frac{\pi}{6}-\alpha_L^- - \alpha_L)} \\ \boldsymbol{I}_R = I_R e^{j(-\frac{\pi}{2}+\alpha_R^- - \alpha_R)} \end{cases} \tag{6}$$

由图 2 和式(2)—(6)可得，由于电网电压不平衡，传递至 V/v 变压器副边使左右供电臂电压有效值不再相等，相位差不等于 60°。

2.2 ES-RPC 完全补偿机理

在电网电压不平衡情况下的 ES-RPC 完全补偿机理如图 3 所示，通过对左右供电臂负荷电流的有功分量和无功分量补偿实现电网侧三相电流的完全对称，从而达到消除三相侧负序电流目的。其补偿步骤分为有功电流补偿和无功电流补偿两部分[16]。

图 3 中：I_{Lcp}、I_{Rcp} 分别为 ES-RPC 提供给左右供电臂的有功补偿电流；I_{L1}、I_{R1} 分别为有功电流完

全补偿后的左右供电臂负荷电流；I_{Lcq}、I_{Rcq} 分别为 ES-RPC 提供给左右供电臂的无功补偿电流。

1）有功电流补偿

ES-RPC 对两臂负荷有功电流进行补偿，实现两臂有功电流的平衡，有功补偿电流 I_{Lcp}、I_{Rcp} 可表示为

$$\begin{cases} I_{Lcp}=\dfrac{-(I_{Lp}-I_{Rp})+I_{es}}{2} \\ I_{Rcp}=\dfrac{(I_{Lp}-I_{Rp})+I_{es}}{2} \end{cases} \tag{7}$$

式中 I_{es} 为储能系统补偿给左右供电臂的总有功电流有效值，其值由储能系统充放电规则决定[16]。

从式(7)可得，RPC 将右供电臂与左供电臂负载有功电流差值的一半从右供电臂转移至左供电臂，储能系统分别补偿给左右供电臂的电流恒为储能总补偿有功电流的一半，从而实现左右供电臂有功电流的平衡。

2）无功电流补偿

由图 3 可知，有功电流补偿后，左右供电臂负荷电流与电网侧三相电压仍有相位差，ES-RPC 进行无功电流补偿，无功补偿电流 I_{Lcq}、I_{Rcq} 可表示为

$$\begin{cases} I_{Lcq}=-I_{Lq}-I_{Lp1}\tan(\dfrac{\pi}{6}-\alpha_L^-) \\ I_{Rcq}=-I_{Rq}+I_{Rp1}\tan(\dfrac{\pi}{6}+\alpha_R^-) \end{cases} \tag{8}$$

式中 I_{Lp1}、I_{Rp1} 分别为有功电流完全补偿后供电臂负荷电流 I_{L1}、I_{R1} 的有功分量。

ES-RPC 完全补偿可以消除电网侧负序电流，但所需要的 RPC 系统容量大，当所需补偿容量超过系统最大容量时，完全补偿无法根据现有容量实现负序电流的最小化，为得到 ES-RPC 在有限容量内再生制动能量利用的最优补偿效果，对 ES-RPC 采用优化补偿策略。

3　一种有限容量下的负序优化补偿策略

基于以上分析，为定量化地表示 ES-RPC 负序优化补偿情况，本文以储能系统补偿系数ρ_{es}、有功电流补偿系数λ_p 和无功电流补偿系数λ_{q1}、λ_{q2} 为控制变量，选取负序补偿度ψ、牵引变电所出力度σ、两臂负荷平衡度 δ 作为优化目标，建立优化模型。图 4 为 ES-RPC 负序优化补偿策略框图。

针对负序问题，优化补偿机理如图 5 所示。

图 5(a)中：I'_{Lcp}、I'_{Rcp} 分别为 ES-RPC 提供给左

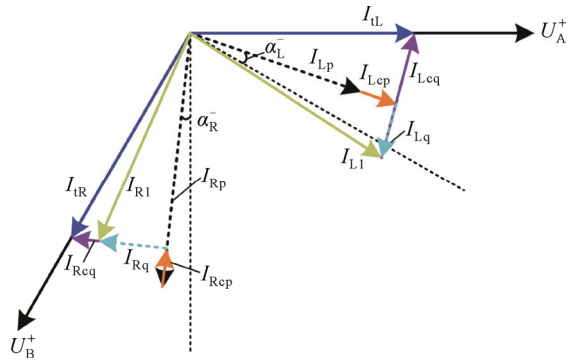


图 3　完全补偿相量图

Fig.3　Fully compensated phasor diagrams

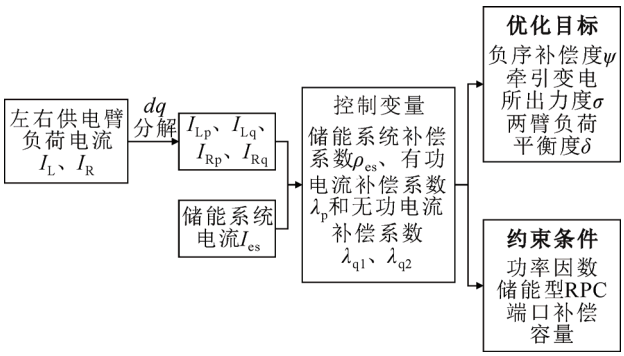


图 4　ES-RPC 负序优化补偿策略框图

Fig.4　Block diagram of optimized compensation strategy

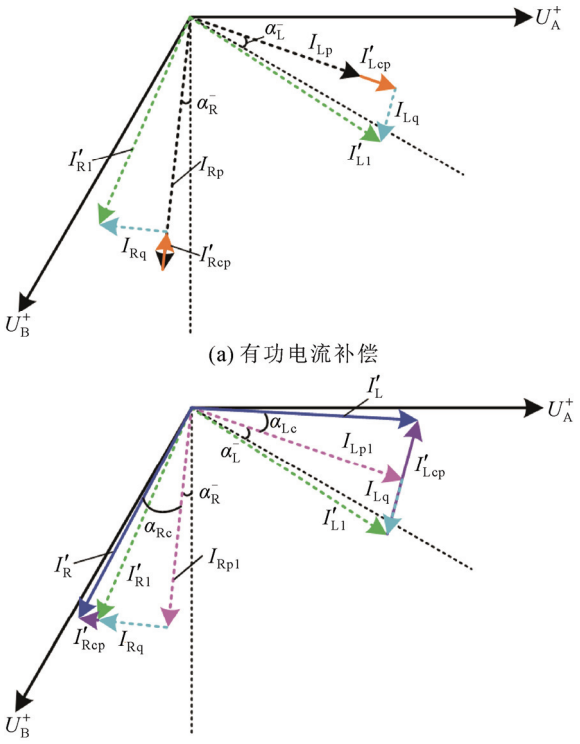


图 5　优化补偿相量图

Fig.5　Optimal compensation phasor diagram

右供电臂的有功优化补偿电流；I'_{L1}、I'_{R1} 分别为优化有功电流补偿后的左右供电臂负荷电流。图 5(b)中：I'_{Lcq}、I'_{Rcq} 分别为 ES-RPC 提供给左右供电臂的无功优化补偿电流；I'_{L}、I'_{R} 分别为优化补偿后的左右供电臂负荷电流；α_{Lc}、α_{Rc} 分别为优化补偿后左右供电臂与负荷电流的夹角。

3.1 选取控制变量

基于第 2 章 ES-RPC 负序电流完全补偿机理，可分为有功电流补偿和无功电流补偿，所以在优化补偿时，定义 4 个控制变量(其中无功电流补偿系数 λ_{q1}、λ_{q2} 一起归类)，储能系统补偿系数 ρ_{es}、有功电流补偿系数 λ_p 和无功电流补偿系数 λ_{q1}、λ_{q2} 来衡量 ES-RPC 的补偿程度。

1）储能系统补偿系数

定义储能系统提供的总有功电流 I_{es} 与其最大输出电流 I_{esmax} 的比值为储能系统补偿系数。

$$\rho_{es}=\frac{I_{es}}{I_{esmax}},\ \rho_{es}\in[-1,1] \tag{9}$$

式中：$\rho_{es}>0$ 时，储能系统处在充电阶段，吸收再生制动功率；$\rho_{es}<0$ 时，储能系统处在放电阶段，输出功率。

2）有功电流补偿系数

以完全补偿时 ES-RPC 转移的有功电流为基准，定义有功电流补偿系数 λ_p 为

$$\lambda_p=\frac{2I'_{Lcp}}{I_{Lp}-I_{Rp}}=\frac{-2I'_{Rcp}}{I_{Lp}-I_{Rp}},\ \lambda_p\in[0,1] \tag{10}$$

则 ES-RPC 优化补偿的有功电流 I'_{Lcp}、I'_{Rcp} 可表示为

$$\begin{cases} I'_{Lcp}=\dfrac{-\lambda_p(I_{Lp}-I_{Rp})+\rho_{es}I_{esmax}}{2} \\ I'_{Rcp}=\dfrac{\lambda_p(I_{Lp}-I_{Rp})+\rho_{es}I_{esmax}}{2} \end{cases} \tag{11}$$

3）无功电流补偿系数

由式(8)可得，以 ES-RPC 完全补偿的无功电流为基准，定义无功电流补偿系数 λ_{q1}、λ_{q2} 为

$$\begin{cases} \lambda_{q1}=\dfrac{I_{Lcq}+I_{Lq}}{-(I_{Lp}+I_{Lcp})\tan(\dfrac{\pi}{6}-\alpha_L^-)},\ \lambda_{q2}\in[-1,1] \\ \lambda_{q2}=\dfrac{I_{Rcq}+I_{Rq}}{(I_{Rp}+I_{Rcp})\tan(\dfrac{\pi}{6}+\alpha_R^-)},\ \lambda_{q2}\in[-1,1] \end{cases} \tag{12}$$

则 ES-RPC 优化补偿的无功电流 I'_{Lcq}、I'_{Rcq} 可表示为

$$\begin{cases} I'_{Lcq}=-I_{Lq}-\tan(\dfrac{\pi}{6}-\alpha_L^-)\times \\ \qquad \lambda_{q1}\left(I_{Lp}+\dfrac{-\lambda_p(I_{Lp}-I_{Rp})+\rho_{es}I_{esmax}}{2}\right) \\ I'_{Rcq}=-I_{Rq}+\tan(\dfrac{\pi}{6}+\alpha_R^-)\times \\ \qquad \lambda_{q2}\left(I_{Rp}+\dfrac{\lambda_p(I_{Lp}-I_{Rp})+\rho_{es}I_{esmax}}{2}\right) \end{cases} \tag{13}$$

当无功补偿系数 λ_{q1}、λ_{q2} 均为 1 时，可以实现完全补偿。

则优化补偿后左右供电臂与负荷电流的夹角 α'_{Lc}、α'_{Rc} 分别为

$$\begin{cases} \alpha'_{Lc}=\arctan(-\lambda_{q1}\tan(\dfrac{\pi}{6}-\alpha_L^-)) \\ \alpha'_{Rc}=\arctan(\lambda_{q2}\tan(\dfrac{\pi}{6}+\alpha_R^-)) \end{cases} \tag{14}$$

3.2 提出优化模型

3.2.1 目标函数

根据负序优化策略，为减小电网侧负序电压不平衡度并尽量减少左右供电臂对牵引供电系统的能量需求，提出将负序补偿度，牵引变电所出力度、两臂负荷平衡度 3 个函数作为优化目标。

1）负序补偿度

根据国标 GB/T15543《电能质量三相电压不平衡度》[24]，负序电压不平衡度为

$$\varepsilon_u=\frac{\sqrt{3}I^-U_L}{S_k}\times100(\%) \tag{15}$$

式中：I^-为负序电流值；U_L 为牵引网额定线电压；S_k 为公共连接点处的三相短路容量。且接于公共连接点的每个用户引起该点负序电压不平衡度允许值一般为 1.3%。

在 V/v 牵引变压器接线下，负序电流表达式为

$$I^-=\frac{\sqrt{3}}{3k}\sqrt{\begin{aligned}&I_{Lp}^2+I_{Lq}^2+I_{Rp}^2+I_{Rq}^2- \\ &2\sqrt{I_{Lp}^2+I_{Lq}^2}\sqrt{I_{Rp}^2+I_{Rq}^2}\times \\ &\cos(\frac{\pi}{3}+\alpha_L-\alpha_R+\alpha_L^-+\alpha_R^-)\end{aligned}} \tag{16}$$

定义负序补偿度 ψ 为补偿后与未补偿时负序电压不平衡度的比值，ψ 表示归一化后的负序电压不平衡度，即

$$\psi=\frac{I'^-}{I^-} \tag{17}$$

式中：I'^- 为补偿后的负序电流值；I^- 为补偿前的负序电流值。

当有功电流补偿系数 λ_p 为 1，无功电流补偿系

数相等为λ_q时，ψ的表达式为

$$\psi=\frac{\left|I_{Lp}+I_{Rp}+\rho_{es}I_{esmax}\right|\times\sqrt{\frac{1}{2}+\frac{1}{4}\lambda_q^2\left(\tan^2(\frac{\pi}{6}-\alpha_L^-)+\tan^2(\frac{\pi}{6}+\alpha_R^-)\right)-\frac{1}{2}\sqrt{1+\lambda_q^2\tan^2(\frac{\pi}{6}-\alpha_L^-)}\sqrt{1+\lambda_q^2\tan^2(\frac{\pi}{6}+\alpha_R^-)}\times\cos(\frac{\pi}{3}+\alpha_{Lc}-\alpha_{Rc})}}{\sqrt{I_{Lp}^2+I_{Lq}^2+I_{Rp}^2+I_{Rq}^2-2\sqrt{I_{Lp}^2+I_{Lq}^2}\sqrt{I_{Rp}^2+I_{Rq}^2}\times\sqrt{\cos(\frac{\pi}{3}+\alpha_L-\alpha_R+\alpha_L^-+\alpha_R^-)}}} \tag{18}$$

2）牵引变电所出力度

定义 ES-RPC 补偿后的两臂功率与未补偿前总功率的比值为牵引变电所出力度σ

$$\sigma=\frac{I'_{Lp}+I'_{Rp}}{|I_{Lp}|+|I_{Rp}|}\times100\%,\ \sigma\in[-1,1] \tag{19}$$

由式(19)，σ越接近 0，表示牵引变电所提供的能量越少，再生制动能量利用率越高。

3）两臂负荷平衡度

令两臂补偿后的负荷电流有功分量差值与未补偿之前总有功电流的比值为两臂负荷平衡度δ

$$\delta=\frac{\left|I'_{Lp}-I'_{Rp}\right|}{|I_{Lp}|+|I_{Rp}|}\times100\% \tag{20}$$

由式(20)可得，δ比值越小，表示左右供电臂有功负荷越平衡。

3.2.2　约束条件

根据国家电能质量标准，选取功率因数(power factor，PF)F_P作为优化模型的约束条件，且 ES-RPC 的补偿容量不能超过 RPC 端口的最大容量。

1）功率因数

国家标准要求在高压计量点处测量三相电网功率因数不小于 0.9，故约束条件为 F_P≥0.9。该系统功率因数表达式为

$$F_P=\frac{(P'_{Lc}+P'_{Rc})}{\sqrt{(P'_{Lc}+P'_{Rc})^2+(Q'_{Lc}+Q'_{Rc})^2}}=\sqrt{\frac{1}{1+\left(\frac{I_{Lq}+I_{Lcq}+I_{Rq}+I_{Rcq}}{I_{Lp}+I_{Lcp}+I_{Rp}+I_{Rcp}}\right)^2}} \tag{21}$$

式中：P'_{Lc}、Q'_{Lc}分别为补偿后左供电臂有功和无功功率；P'_{Rc}、Q'_{Rc}分别为补偿后右供电臂有功和无功功率。

当有功电流补偿系数$\lambda_p=1$时，F_P可化简为

$$F_P=\sqrt{\frac{1}{1+\frac{1}{4}\left(\lambda_{q2}\tan(\frac{\pi}{6}+\alpha_R^-)-\lambda_{q1}\tan(\frac{\pi}{6}-\alpha_L^-)\right)^2}} \tag{22}$$

由式(22)可得，当有功电流平衡时(λ_p=1)，功率因数与储能系统补偿系数ρ_{es}无关，而与无功补偿系数λ_{q1}、λ_{q2}及负序角相位增值α_L^-、α_R^-有关。

2）ES-RPC 端口补偿容量

ES-RPC 端口补偿容量表达式为

$$\begin{cases}S_{Lc}=U_L\sqrt{I_{Lcp}^2+I_{Lcq}^2}\\S_{Rc}=U_R\sqrt{I_{Rcp}^2+I_{Rcq}^2}\end{cases} \tag{23}$$

式中 S_{Lc}和 S_{Rc}分别为左右端口的补偿容量。

定义左右供电臂补偿容量中的最大值为 S_c，且端口补偿容量的限制为不能超过容量最大值，即

$$S_c=\max(S_{Lc},S_{Rc})\le S_{cmax} \tag{24}$$

通过以上分析，采用加权法，目标分别乘以加权系数 f_1、f_2、f_3，将多目标转化为单目标 F。其中负序补偿度为主要优化目标，设置f_1=0.6，f_2=0.3，f_3=0.1，建立本文提出的优化补偿数学模型如下

$$\begin{cases}\min F=\min(f_1\psi+f_2|\sigma|+f_3\delta)\\-\pi\le\alpha^-\le\pi\\0\le\lambda_p\le1\\-1\le\rho_{es}\le1\\-1\le\lambda_{q1}\le1\\-1\le\lambda_{q2}\le1\\F_P\ge0.9\\S_c\le S_{cmax}\end{cases} \tag{25}$$

求解式(25)可通过序列二次规划法得到最优解使电网侧负序不平衡度降低的同时减少牵引负荷对牵引变电所的能量需求，提高再生制动能量利用率。

4　测试分析与验证

为验证所提计及电网电压不平衡的储能型铁路功率调节器负序优化策略的有效性，对 ES-RPC 系统进行基于 Matlab/Simulink 下的优化补偿测试对比分析。表 1 为储能型铁路功率调节器系统模型的具体仿真参数。

在系统模型测试仿真过程中，具体时长为 2.55 s，设置不同工况如下：工况 1(0.1~0.7 s)左右臂牵引状态各 3.20 MW，2.20 MW；工况 2(0.7~1.3 s)左臂牵引状态 1.71 MW，右臂制动状态 3.29 MW；工况

表 1 储能型铁路功率调节器系统仿真参数

Table 1 Simulation parameters of energy storage type railway power conditioner system

系统	参数	数值
牵引变电所	V/v 变压器变比	110 kV/27.5 kV
	变电所容量/MVA	40
铁路功率调节器(RPC)	降压变压器变比 k	27.5 kV/1.5 kV
	RPC 设备容量 S_{cmax}/MVA	4
	滤波电感 L_s/H	0.8×10^{-3}
	支撑电容 C/F	10×10^{-3}
	中间直流侧电压 U_{dc}/V	3100
储能系统	DC/DC 设备容量 P_{esmax}/MW	2
	储能介质	超级电容
	储能容量/MWh	0.07
	充放电程度	10%~95%

3(1.3~1.9 s)左臂制动状态 2.46 MW，右臂牵引状态 3.09 MW；工况 4(1.9~2.5 s)左、右臂制动状态各 1.42 MW，1.35 MW。

在电网电压不平衡度为 10%，负序电压初始角为 30°情况下进行了以上工况的补偿，测试对比结果如下：

图 6 为左右供电臂 4 种工况的补偿前后功率情况，其中 P_L、P_R 分别为补偿前左右供电臂功率；P'_L、P'_R 分别为优化补偿后左右供电臂功率。

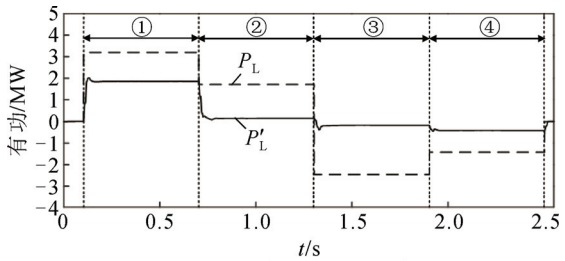
图 7 为 ES-RPC 端口补偿容量，图 8 为牵引变电所优化前后补偿功率比较，P_t 为补偿前牵引变电所功率；P'_t 为优化补偿后牵引变电所功率。

由图 6—图 8 可以看出，所提出的 ES-RPC 优化策略可以在负序电压不平衡度降低的情况下，实现了两供电臂有功功率的平衡，牵引负荷对牵引变电的能量需求减少，提高了再生制动能量利用率。

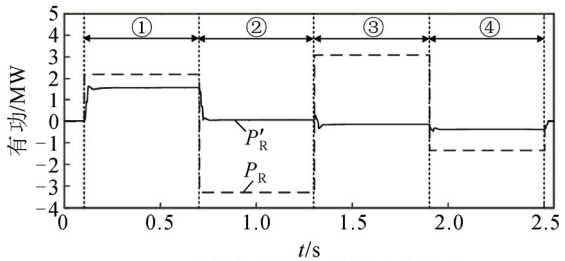
图 9 为储能系统超级电容的荷电状态，图 10 为储能系统存储与释放功率。具体各工况分析如表 2 所示。

1）工况 1 情况下，两臂均处于牵引状态，由于储能系统释放的最大功率为 2 MW，所以还需牵引变电所提供 3.40 MW，牵引变电所提供的能量减少至 63.74%；ES-RPC 的端口补偿容量最大值为 3.02 MVA，负序电流值由 15.40 A 降至 1.18 A，负序补偿度降至 7.65%；且在 Intel(R) Core(TM) Core(TM) i5-7200U，8GB 运行环境下序列二次规划法计算延时为 2 ms，可满足实时补偿需求。

2）工况 2 情况下，从表 2 和图 6 可知两臂分别处于牵引和制动状态，且制动功率大于牵引功率，两供电臂进行有功转移后，图 10 中储能系统存储能



(a) 左供电臂优化补偿功率比较



(b) 右供电臂优化补偿功率比较

图 6 左右供电臂优化补偿功率比较

Fig.6 Two power supply arm compensation before and after optimization of compensation

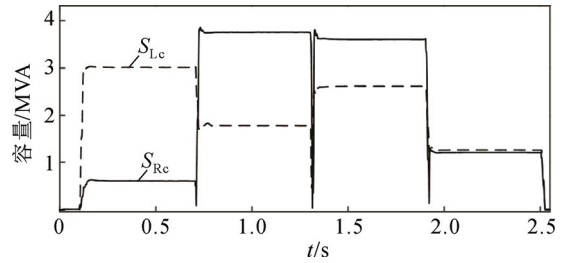


图 7 ES-RPC 端口补偿容量

Fig.7 Compensation capacity of ES-RPC

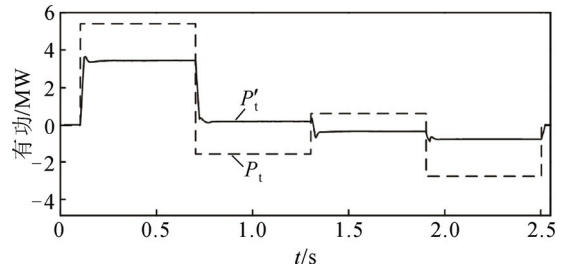


图 8 牵引变电所优化补偿功率比较

Fig.8 Compensation power of traction substation before and after compensation

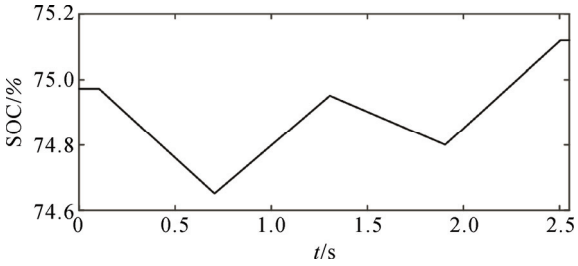


图 9 超级电容荷电状态

Fig.9 Supercapacitor state of charge

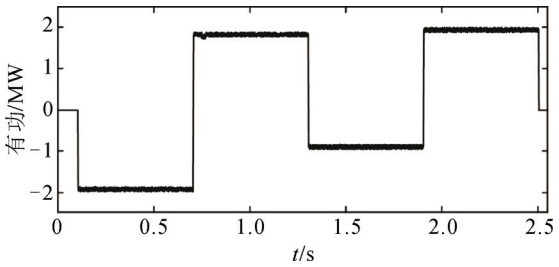


图 10　储能系统功率

Fig.10　Energy storage system power

表 2　4 种工况优化补偿指标比较

Table 2　Comparison of optimal compensation indexes for four working conditions

工况	模式	ψ/%	σ/%	δ/%	S_c/MVA	F_P
1	补偿前	100	100.00	18.52	—	0.89
	优化补偿	7.65	63.74	5.04	3.02	1.00
2	补偿前	100	−31.60	100.00	—	0.89
	优化补偿	3.26	4.26	2.25	3.75	0.99
3	补偿前	100	11.35	100.00	—	0.88
	优化补偿	1.51	−5.85	0.53	3.61	1.00
4	补偿前	100	−100.00	2.53	—	0.88
	优化补偿	20.08	−28.42	1.28	1.25	1.00

量 1.79 MW，补偿后两部负荷功率分别为 0.16 MW 和 0.05 MW，两臂不平衡度为 2.25%，ES-RPC 的端口补偿容量最大值为 3.76 MVA，负序补偿度降至 3.26%，负序电流值由 27.72 A 降至 0.91 A。

3）工况 3 情况下，从表 2 和图 6 可知左臂处于制动状态，右臂处于牵引状态，且牵引功率大于制动功率，由图 9—10 可得储能系统释放 0.63 MW 功率，负序补偿度降至 1.51%，负序电流值由 32.03 A 降至 0.48 A；ES-RPC 的端口补偿容量最大值为 3.61 MVA，功率因数补偿至 1。

4）工况 4 情况下，左右两臂均处于制动状态，总制动功率为 2.77 MW，其中 2 MW 由储能系统吸收，剩下 0.77 MW 回馈至电网侧，负序补偿度降至 20.08%，负序电流值由 6.91 A 降至 1.39 A，ES-RPC 的端口补偿容量最大值为 1.25 MVA。

在 4 种典型工况情况仿真下，优化模型实现了负序电压不平衡度的优化，结合储能系统存储与释放能量，减小了牵引变电所所需提供能量，提高了再生制动功率的利用率。

5　结论

针对电网电压不平衡时 V/v 牵引供电系统引起的负序及再生制动能量难以回收利用问题，提出了计及电网电压不平衡的储能型铁路功率调节器负序优化补偿策略，得出结论如下：

1）分析了电网电压不平衡时 ES-RPC 负序完全补偿机理：储能系统存储和释放能量，RPC 进行有功和无功补偿使左右供电臂功率平衡，从而减少电网侧负序电流。

2）提出了储能系统、有功、无功电流补偿系数等控制量，将优化目标转化为储能系统电流、左右供电臂负荷电流有功和无功分量的函数。

3）提出了一种补偿装置容量有限时 ES-RPC 负序优化补偿策略，以负序补偿度和牵引变电所补偿容量及供电臂负荷平衡度为优化目标，策略使电网侧负序不平衡度降低的同时提高再生制动能量利用率，减少牵引负荷对牵引变电所的能量需求。

4）此外，针对储能系统和 RPC 容量配比关系及储能系统容量与优化策略约束关系，今后工作中需继续深入。

参考文献　References

[1] 张建辉，许莹莹. 交流电网电压负序分量影响铁路功率调节器运行特性的机理研究[J]. 高电压技术，2020，46(7)：2398-2406.
ZHANG Jianhui, XU Yingying. Research on influence mechanism of negative-sequence voltage of power system on the operating characteristics of railway power conditioner[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2398-2406.

[2] 国务院新闻办公室. 《中国交通的可持续发展》白皮书[EB/OL]. 2019[2020]. http://www.scio.gov.cn/ztk/dtzt/42313/44564/index.htm.
The State Council Information Office of the People's Republic of China. Sustainable development of transport in China. 2019[2020]. http://www. scio.gov.cn/ztk/dtzt/42313/44564/index.htm.

[3] 胡海涛，葛银波，黄　毅，等. 电气化铁路“源−网−车−储”一体化供电技术[J]. 中国电机工程学报，2022，42(12)：4374-4391.
HU Haitao, GE Yinbo, HUANG Yi, et al. “Source-network-train-storage” integrated power supply system for electric railways[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4374-4391.

[4] LU S F, WESTON P, HILLMANSEN S, et al. Increasing the regenerative braking energy for railway vehicles[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2014, 15(6): 2506-2515.

[5] 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.

[6] ŞENGÖR İ, KILIÇKIRAN H C, AKDEMIR H, et al. Energy management of a smart railway station considering regenerative braking and stochastic behaviour of ESS and PV generation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(3): 1041-1050.

[7] 张　宇，王　辉，李群湛，等. 基于 Dd 匹配变和 SVG 的牵引变电所群贯通供电系统负序治理方案及控制策略[J]. 高电压技术，2021，47(1)：150-158.
ZHANG Yu, WANG Hui, LI Qunzhan, et al. Negative sequence treatment and control strategy for the co-phase interconnected power

supply system of traction substation group based on Dd transformer and SVG[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 150-158.

[8] 王 辉，李群湛，解绍锋，等. 采用 YNd-SVG 的电气化铁路负序补偿模型及控制策略[J]. 高电压技术，2021，47(5)：1740-1750.
WANG Hui, LI Qunzhan, XIE Shaofeng, et al. Negative sequence compensation model and control strategy of electrified railway with YNd tansformer and SVG[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1740-1750.

[9] 杨朋威，康祎龙，苗世洪，等. V/v 牵引供电系统中铁路功率调节器的改进滑模控制策略[J]. 高电压技术，2020，46(6)：2218-2229.
YANG Pengwei, KANG Yilong, MIAO Shihong, et al. Improved sliding mode control strategy for railway static power conditioner in V/v traction power supply system[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 2218-2229.

[10] 江友华，杨金婉，赵 乐，等. 适应机车功率波动特性的高压铁路功率调节器控制策略[J]. 高电压技术，2021，47(8)：2846-2855.
JIANG Youhua, YANG Jinwan, ZHAO Le, et al. Control strategy for high voltage railway static power conditioner adapting to power fluctuation characteristics of electric locomotive[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2846-2855.

[11] 邓文丽，戴朝华，韩春白雪，等. 计及再生制动能量回收和电能质量改善的铁路背靠背混合储能系统及其控制方法[J]. 中国电机工程学报，2019，39(10)：2914-2923.
DENG Wenli, DAI Chaohua, HAN Chunbaixue, et al. Back-to-back hybrid energy storage system of electric railway and its control method considering regenerative braking energy recovery and power quality improvement[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(10): 2914-2923.

[12] 邓文丽，戴朝华，陈维荣，等. 铁路功率调节器研究进展[J]. 中国电机工程学报，2020，40(14)：4640-4655.
DENG Wenli, DAI Chaohua, CHEN Weirong, et al. Research progress of railway power conditioner[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4640-4655.

[13] LUO P, LI Q R, ZHOU Y, et al. Multi-application strategy based on railway static power conditioner with energy storage system[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2021, 22(4): 2140-2152.

[14] 马 茜，郭 昕，罗 培，等. 基于超级电容储能的新型铁路功率调节器协调控制策略设计[J]. 电工技术学报，2019，34(4)：765-776.
MA Qian, GUO Xin, LUO Pei, et al. Coordinated control strategy design of new type railway power regulator based on super capacitor energy storage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4): 765-776.

[15] CUI G P, LUO L F, LIANG C G, et al. Supercapacitor integrated railway static power conditioner for regenerative braking energy recycling and power quality improvement of high-speed railway system[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(3): 702-714.

[16] 魏文婧，胡海涛，王 科，等. 基于铁路功率调节器的高速铁路牵引供电系统储能方案及控制策略[J]. 电工技术学报，2019，34(6)：1290-1299.
WEI Wenjing, HU Haitao, WANG Ke, et al. Energy storage scheme and control strategies of high-speed railway based on railway power conditioner[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6): 1290-1299.

[17] ZHANG D H, ZHANG Z X, WANG W A, et al. Negative sequence current optimizing control based on railway static power conditioner in V/v traction power supply system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 200-212.

[18] 罗 培，陈跃辉，罗隆福，等. 铁路电能质量控制系统容量优化设计[J]. 电工技术学报，2016，31(8)：181-188，228.
LUO Pei, CHEN Yuequn, LUO Longfu, et al. Railway power quality manage system capacity optimization design[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(8): 181-188, 228.

[19] 马 茜，谭 磊，罗 培. V/v 牵引供电所混合型电能质量控制系统负序优化补偿策略[J]. 电力自动化设备，2017，37(4)：128-132.
MA Qian, TAN Lei, LUO Pei. Optimal negative-sequence compensation of hybrid power-quality management system for V/v traction substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 128-132.

[20] 罗 培，许 倩，孙吉浩. 基于灵敏度解耦的 RPC 满意补偿策略研究[J]. 高电压技术，2020，46(9)：3202-3211.
LUO Pei, XU Qian, SUN Jihao. Satisfied compensation scheme of RPC based on sensitivity decoupling[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3202-3211.

[21] 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.

[22] 罗 培，杨维民，周冠东，等. 考虑供电臂电压波动的铁路功率调节器多目标优化设计[J]. 电工技术学报，2018，33(22)：5346-5356.
LUO Pei, YANG Weimin, ZOU Guandong, et al. Multi-objective optimization design of railway static power conditioner considering voltage fluctuation of power supply arm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(22): 5346-5356.

[23] ZHANG Z W, LIN S X, LI Y, et al. An energy storage-type power quality control system with partial compensation strategy for electrified railway[C] // Proceedings of the 2021 IEEE 4th International Electrical and Energy Conference. Wuhan, China: IEEE, 2021: 1-6.

[24] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 电能质量 三相电压不平衡：GB/T 15543—2008[S]. 北京：中国标准出版社，2009.
Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. Power quality-three-phase voltage unbalance: GB/T 15543—2008[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2009.



郭 亚
1998—，女，硕士生
主要从事铁路列车再生制动能量管理与电能质量方向的研究工作
E-mail: 1321555160@qq.com

GUO Ya



陈小强(通信作者)
1966—，男，博士，教授，博导
主要从事铁路电能质量分析与控制方面研究工作
E-mail: xqchen@mail.lzjtu.cn

CHEN Xiaoqiang
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2021-11-22 修回日期 2022-10-20 编辑 陈 蔓