DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.123

基于潮流转移装置的混合储能接入牵引供电系统控制策略研究

黄　军
（中铁第四勘察设计院集团有限公司，湖北 武汉 430063）

摘　要：采用单相工频交流制式的电气化铁路具有无污染、运输效率高的优点，但在现有的牵引供电系统中，负序和再生制动能量利用的问题较为突出。因此，文章提出了一种集成混合储能系统的潮流转移拓扑。文章分析了集成混合储能的潮流转移装置的拓扑结构，研究了削峰、填谷、再生制动和同相运行模式及其能量管理策略；为减少系统损耗，进一步提高系统再生制动能量利用率和削峰填谷的控制精度，文章提出了一种协调控制策略，并采用无源控制的非线性电流控制器提升变流器控制响应速度。仿真结果表明，该系统可以充分利用牵引供电系统的再生制动能量，提高系统中能量流动的灵活性，并且解决了牵引供电系统中的负序问题。

关键词：电气化铁路；负序；再生制动能量；混合储能系统；协调控制；仿真

中图分类号：TM922.3；U223.6　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1000-128X（2024）01-0166-08

0　引言

电气化铁路具有无污染、运输效率高的优点，对实现零碳排放、实现碳达峰碳中和的“双碳”政策具有重要意义[1-2]。但现有的牵引供电系统存在以下问题：①传统的牵引供电系统大多采用单相变压器为列车供电，导致三相电网负序超标；②当不同列车同时牵引或同时制动时，电气化铁路再生制动能量利用率低。文献[3]介绍通过采用灵活控制潮流的方式，可有效利用再生制动能量，电力机车的能耗可以降低10%~45%。目前，已有潮流转移装置在国内线路实现工程应用，并取得了较好的经济收益，而且投运后未发生任何影响自身和牵引供电系统安全的情况，具有非常高的工程应用价值[4-6]。

为解决负序超标问题，文献[7-8]提出将静止无功补偿器（Static Var Compensator，SVC）并联在高压三相侧，对系统的负序进行补偿。文献[9]提出采用基于电压变换器的静态同步补偿器，该装置具有动态性能好、效率高的优点。然而，上述方法都需要配置1个大容量变换器来补偿负序。

在交流牵引供电系统中，如果再生制动能量不能被同臂下的电力机车吸收利用，那么再生制动能量将通过牵引变电所回送到电网中，这部分反送的再生制动能量造成了较低的能量利用率[10]。近年来，利用储能技术实现节能和提高再生制动能量利用率成为研究热点。文献[11]将飞轮储能系统接入电气化铁路，实现了再生制动能量利用和牵引变电所削峰填谷，并深入研究了其能量管理策略和变流器控制策略。文献[12-14]提出将超级电容连接到功率调节器，同时划分了系统的工作模式，并设计了相应的控制策略。文献[15-17]提出了基于超级电容器的同相牵引供电系统，并对其工作模式和分层控制策略进行了研究。上述文献提及的储能装置为超级电容，其在大功率和循环充放电的场合有很好的适用性，但能量密度偏低，不适合大规模储能，而蓄电池的能量密度高，但是其功率密度

基金项目：中铁第四勘察设计院集团有限公司科研课题（2022K126）
通信作者：黄　军（1983—），男，高级工程师，主要从事电气化铁路牵引供变电系统设计；E-mail: iaile@qq.com
引用格式：黄军. 基于潮流转移装置的混合储能接入牵引供电系统控制策略研究[J]. 机车电传动, 2024(1): 166-173.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.123.
Citation：HUANG Jun. Research on coordinated control method of hybrid energy storage systems connected traction power supply system based on PTFD[J]. Electric drive for locomotives,2024(1): 166-173.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2024.01.123.

低，充放电效率低，循环寿命短，不适合大功率、频繁充放电。综合两者的优缺点，将超级电容器与蓄电池混合使用，能互补其优缺点，提高系统功率输出的能力，从而提高系统经济性。因此，本文提出一种集成了单相牵引变压器、潮流转移装置和混合储能的牵引供电系统，为电分相两侧供电臂提供能量交互通道，可以提高再生制动能量的利用率，并解决传统牵引供电系统的负序问题；其次，根据负荷工况，将集成混合储能系统的潮流转移装置的工作模式划分为4种，实现对牵引变电所的削峰填谷和对再生制动能量的充分利用。此外，本文设计了协调控制策略，以满足不同工作模式下更高的再生制动能量利用率或更高的功率传递精度的目的。

1　系统拓扑与能量管理策略

1.1　拓扑结构

本文提出的集成混合储能系统的潮流转移装置拓扑结构如图1所示。其中，牵引变电所采用单相牵引变压器，实现同相供电；潮流转移装置采用背靠背变流器拓扑结构，接入到分区所两侧的供电臂上，以此实现两侧负荷的平衡和系统的负序补偿；超级电容和蓄电池作为混合储能装置，分别通过双向DC/DC变换器与潮流转移装置的直流母线并联，用于吸收和释放电力机车产生的再生制动能量，实现系统的削峰填谷。

1.2　能量管理策略

根据牵引负载工况和负载功率大小，将集成混合储能系统的潮流转移装置的能量管理分为削峰模式、填谷模式、同相运行模式、再生制动模式共4种模式，各模式的功率潮流如图1所示，同时记从牵引供电臂到潮流转移装置为P_α^*和P_β^*的参考正方向。

1.2.1　削峰模式

当总负载功率大于削峰模式的功率切换阈值（$P_{l1}+P_{l2}>2P_H$）时，混合储能系统以参考功率P_{HE}^*放电。由潮流转移装置均衡供电臂两侧所需的功率，负载所需要的剩余部分的功率由2个单相牵引变压器各提供50%。系统工作在削峰模式时，混合储能系统和潮流转移装置的参考功率为：

$$\left.\begin{aligned} P_{xf}&=P_{l1}+P_{l2}-2P_H\\ P_{HE}^*&=\min\left[P_h,P_{HE_max}\right]\\ P_\alpha^*&=P_{l1}-\frac{P_{l1}+P_{l2}-P_{HE}^*}{2}\\ P_\beta^*&=P_{l2}-\frac{P_{l1}+P_{l2}-P_{HE}^*}{2}\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

式中：P_{xf}为混合储能系统由于系统削峰需要释放的功率。

图1和式(1)、式(2)中代号意义如下：$P_{\alpha TT}$—左侧单相变压器的功率；P_{l1}—左侧供电臂负载功率；$P_{\beta TT}$—右侧单相变压器的功率；P_{l2}—右侧供电臂负载功率；P_{ba}—蓄电池功率；P_{SC}—超级电容功率；P_H—单个牵引变电所在削峰模式下的功率切换阈值；P_{low}—单个牵引变电所在填谷模式下的功率切换阈值；P_{HE_max}—混合储能系统的最大充放电功率；P_{HE}—混合储能系统功率；P_{HE}^*—混合储能系统参考功率；P_α—潮流转移装置左侧功率；P_α^*—潮流转移装置左侧参考功率；P_β—潮流转移装置右侧功率；P_β^*—潮流转移装置右侧参考功率 。

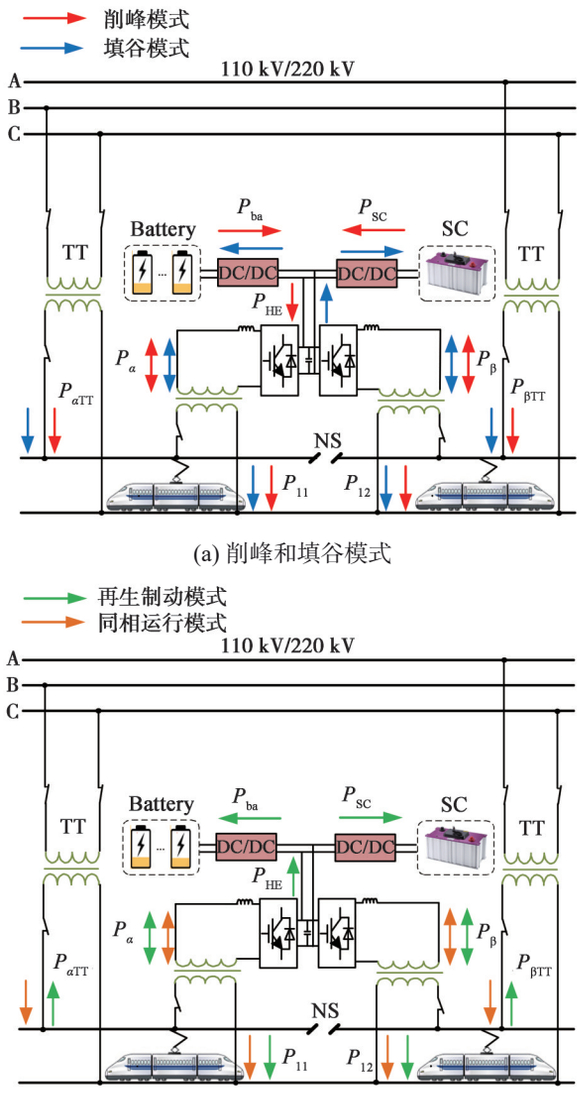


图1　基于混合储能系统的牵引供电系统结构

Fig. 1　Structure of traction power supply system based on hybrid energy storage system

1.2.2　填谷模式

当总负载功率小于填谷模式的功率切换阈值（$0<P_{l1}+P_{l2}<2P_{low}$）时，混合储能系统以参考功率P_{HE}^*充电。由潮流转移装置均衡供电臂两侧所需的功率，负载所需要的剩余部分的功率由2个单相牵引变压器各提供50%。当系统工作于填谷模式时，混合储能系统和潮流转移装置的参考功率为：

$$\left.\begin{aligned} P_{\mathrm{tg}}&=2P_{\mathrm{low}}-P_{\mathrm{l1}}-P_{\mathrm{l2}}\\ P_{\mathrm{HE}}^{*}&=\min\left[P_{\mathrm{tg}},P_{\mathrm{HE_max}}\right]\\ P_{\alpha}^{*}&=P_{\mathrm{l1}}-\frac{P_{\mathrm{l1}}+P_{\mathrm{l2}}+P_{\mathrm{HE}}^{*}}{2}\\ P_{\beta}^{*}&=P_{\mathrm{l2}}-\frac{P_{\mathrm{l1}}+P_{\mathrm{l2}}+P_{\mathrm{HE}}^{*}}{2} \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

式中：P_{tg}为混合储能系统因系统填谷需要吸收的功率。

1.2.3 再生制动模式

当总负载功率小于0（$P_{\mathrm{l1}}+P_{\mathrm{l2}}<0$）时，混合储能系统以参考功率$P_{\mathrm{HE}}^{*}$吸收再生制动能量。如果再生制动能量不能被完全吸收，由潮流转移装置均衡供电臂两侧的再生制动能量，剩余能量由2个单相牵引变压器平均分担，回送电网。当系统处于再生制动模式时，混合储能系统和潮流转移装置的参考功率为：

$$\left.\begin{aligned} P_{\mathrm{HE}}^{*}&=\min\left[\left|P_{\mathrm{l1}}+P_{\mathrm{l2}}\right|,P_{\mathrm{HE_max}}\right]\\ P_{\alpha}^{*}&=\frac{\left|P_{\mathrm{l1}}+P_{\mathrm{l2}}\right|-P_{\mathrm{HE}}^{*}}{2}+P_{\mathrm{l1}}\\ P_{\beta}^{*}&=\frac{\left|P_{\mathrm{l1}}+P_{\mathrm{l2}}\right|-P_{\mathrm{HE}}^{*}}{2}+P_{\mathrm{l2}} \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

1.2.4 同相运行模式

当总负载功率大于填谷模式的功率切换阈值，但小于削峰模式切换阈值（$2P_{\mathrm{low}}<P_{\mathrm{l1}}+P_{\mathrm{l2}}<2P_{\mathrm{H}}$）时，混合储能系统退出工作。潮流转移装置均衡供电臂两侧所需的功率，使两侧单相变压器输出功率相等。当系统处于同相运行模式时，混合储能系统的参考功率为0 kW。

$$\left.\begin{aligned} P_{\alpha}^{*}&=\frac{\left|P_{\mathrm{l1}}+P_{\mathrm{l2}}\right|-P_{\mathrm{HE}}^{*}}{2}+P_{\mathrm{l1}}\\ P_{\beta}^{*}&=\frac{\left|P_{\mathrm{l1}}+P_{\mathrm{l2}}\right|-P_{\mathrm{HE}}^{*}}{2}+P_{\mathrm{l2}} \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

2 潮流转移装置控制策略

为了优化系统的性能，本章将提出2种控制方案，并对不同方案下系统各工作模式的性能进行分析比较。2种控制方案如下：①方案A：一侧变换器采用直流电压控制，另一侧变换器和双向DC-DC变换器采用功率控制；②方案B：两侧变换器采用功率控制，DC-DC变换器采用直流电压控制。

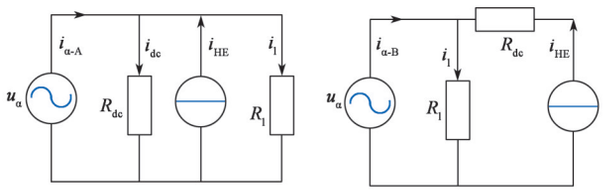
2.1 方案对比

2.1.1 削峰模式

假设潮流转移装置α侧工作于削峰模式时，2种控制方案作用下的潮流转移装置等效电路如图2所示。

忽略电压变化的影响，对于方案A和方案B而言，根据KCL定律分别存在$i_{\alpha\text{-A}}=i_{\mathrm{l}}+i_{\mathrm{dc}}-i_{\mathrm{HE}}$，$i_{\alpha\text{-B}}=i_{\mathrm{l}}-i_{\mathrm{HE}}$，并且潮流转移装置α侧变换器电压和电流相位一致。因此，潮流转移装置α侧变换器承担的有功功率为：

方案A



(a) 方案A (b) 方案B

u_{α}—潮流转移装置α侧变换器端口电压；i_{HE}—混合储能系统发出或吸收的电流；$i_{\alpha\text{-A}}$—“方案A”潮流转移装置α侧变流器端口电流；$i_{\alpha\text{-B}}$—“方案B”潮流转移装置α侧变流器端口电流；i_{l}—潮流转移装置α侧负载电流；R_{l}—潮流转移装置α侧负载；R_{dc}—系统的其他损耗等效负载，包括直流侧电容损耗；i_{dc}—流过R_{dc}的电流。

图2 削峰模式下的等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of peak clipping mode

$$P_{\alpha\text{-A}}=u_{\alpha}i_{\alpha\text{-A}}=u_{\alpha}\left(i_{\mathrm{l}}+i_{\mathrm{dc}}-i_{\mathrm{HE}}\right) \tag{5}$$

方案B

$$P_{\alpha\text{-B}}=u_{\alpha}i_{\alpha\text{-B}}=u_{\alpha}\left(i_{\mathrm{l}}-i_{\mathrm{HE}}\right) \tag{6}$$

式中：$P_{\alpha\text{-A}}$为方案A潮流转移装置α侧变流器功率；$P_{\alpha\text{-B}}$为方案B潮流转移装置α侧变流器功率。

当系统工作于削峰模式时，系统需要实现的主要功能是通过混合储能系统放电，以减少峰值负荷的影响。此时，系统的工作效果可以用削峰率k来表示。

经计算，2种控制方案下的系统削峰率为：

方案A

$$k_{\mathrm{A}}=\frac{P_{\mathrm{l}}-\left(P_{\alpha\text{-A}}+P_{\alpha\mathrm{TT}}\right)}{P_{\mathrm{l}}}=1-\frac{u_{\alpha}\left(i_{\mathrm{l}}+i_{\mathrm{dc}}-i_{\mathrm{HE}}\right)+P_{\alpha\mathrm{TT}}}{P_{\mathrm{l}}} \tag{7}$$

方案B

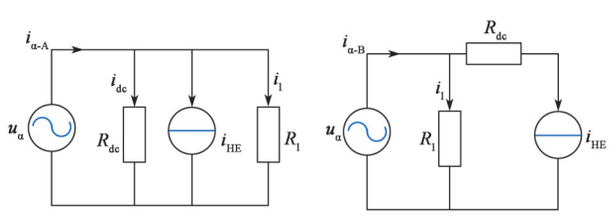
$$k_{\mathrm{B}}=\frac{P_{\mathrm{l}}-\left(P_{\alpha\text{-B}}+P_{\alpha\mathrm{TT}}\right)}{P_{\mathrm{l}}}=1-\frac{u_{\alpha}\left(i_{\mathrm{l}}-i_{\mathrm{HE}}\right)+P_{\alpha\mathrm{TT}}}{P_{\mathrm{l}}} \tag{8}$$

式中：P_{l}为负载R_{l}的功率。

基于以上计算结果，对比2种控制方案，可以得到$k_{\mathrm{A}}<k_{\mathrm{B}}$。因此，当系统工作在削峰模式时，方案B可以使系统达到更理想的削峰率。

2.1.2 填谷模式

假设潮流转移装置α侧工作于填谷模式时，2种控制方案作用的潮流转移装置等效电路如图3所示。



(a) 方案A (b) 方案B

图3 填谷模式下的等效电路

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of valley filling mode

当系统处于填谷模式时，为表征系统的工作效果，采用ε作为填谷精度，ε定义为

$$\varepsilon=1-\left|\frac{P_{\alpha\mathrm{TT}}+P_{\alpha}-P_{\mathrm{low}}}{P_{\mathrm{low}}}\right| \tag{9}$$

根据上式可以计算出系统2种控制方案的填谷精度为：

方案A

$$\varepsilon_{\mathrm{A}}=1-\left|\frac{P_{\alpha\mathrm{TT}}+P_{\alpha\text{-}\mathrm{A}}-P_{\mathrm{low}}}{P_{\mathrm{low}}}\right|=1-\left|\frac{u_{\alpha}\left(i_{\mathrm{l}}+i_{\mathrm{dc}}+i_{\mathrm{HE}}\right)+P_{\alpha\mathrm{TT}}-P_{\mathrm{low}}}{P_{\mathrm{low}}}\right| \tag{10}$$

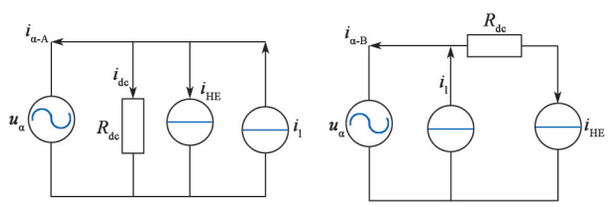
方案B

$$\varepsilon_{\mathrm{B}}=1-\left|\frac{P_{\alpha\mathrm{TT}}+P_{\alpha\text{-}\mathrm{B}}-P_{\mathrm{low}}}{P_{\mathrm{low}}}\right|=1-\left|\frac{u_{\alpha}\left(i_{\mathrm{l}}+i_{\mathrm{HE}}\right)+P_{\alpha\mathrm{TT}}-P_{\mathrm{low}}}{P_{\mathrm{low}}}\right| \tag{11}$$

由于2种控制方案的$P_{\alpha\mathrm{TT}}$和P_{low}相等，可以得到$\varepsilon_{\mathrm{A}}<\varepsilon_{\mathrm{B}}$。这意味着，当系统工作在填谷模式时，方案B可以使系统达到更高的填谷精度。

2.1.3　再生制动模式

假设只有潮流转移装置α侧有电力机车牵引列车通过，而且电力机车工作于制动工况，则2种控制方案的潮流转移装置等效电路如图4所示。



(a) 方案A　　(b) 方案B

图4　再生制动模式下的等效电路

Fig. 4　Equivalent circuit diagram of regenerative braking mode

在再生制动模式下，系统的工作效果可以用再生制动能量利用率γ来表示，2种控制方案的系统再生能源利用率为：

方案A

$$\gamma_{\mathrm{A}}=\frac{P_{\mathrm{l}}-\left(P_{\alpha\text{-}\mathrm{A}}+P_{\alpha\mathrm{TT}}\right)}{P_{\mathrm{l}}}=1-\frac{u_{\alpha}\left(i_{\mathrm{l}}-i_{\mathrm{dc}}-i_{\mathrm{HE}}\right)+P_{\alpha\mathrm{TT}}}{P_{\mathrm{l}}} \tag{12}$$

方案B

$$\gamma_{\mathrm{B}}=\frac{P_{\mathrm{l}}-\left(P_{\alpha\text{-}\mathrm{B}}+P_{\alpha\mathrm{TT}}\right)}{P_{\mathrm{l}}}=1-\frac{u_{\alpha}\left(i_{\mathrm{l}}-i_{\mathrm{HE}}\right)+P_{\alpha\mathrm{TT}}}{P_{\mathrm{l}}} \tag{13}$$

比较式(12)和式(13)，可以得到$\gamma_{\mathrm{A}}>\gamma_{\mathrm{B}}$。因此，当系统处于再生制动模式时，方案A可以使系统具有更高的再生制动能量利用率。

2.1.4　同相运行模式

当系统处于同相运行模式时，如果采用方案B，即混合储能系统的AC-DC变流器采用直流侧电压控制，此时虽然不需要混合储能装置对负荷削峰、填谷或吸收再生制动能量，但需要其放电以保持直流侧电压稳定，这就会造成储能系统能量的浪费。因此，在同相运行模式下，需要采用控制方案A，既能保证电力的正常传输，又能保证直流侧电压的稳定，还能避免储能系统不受控放电的问题。

2.2　基于无源控制的交–直流变换器非线性电流控制器

变换器控制的目标是快速、准确地跟踪参考信号，因此变换器的动态响应性能具有重要意义。为了实现快速稳定的控制性能，本文设计了一种基于无源控制（Passivity-Based Control, PBC）的AC-DC变换器非线性电流控制器。图5是AC-DC变换器的等效电路图，其中R_{α},L_{α}分别为等效电阻和等效电感；u_{α},$u_{\alpha\mathrm{c}}$分别为变换器的输入电压和输出电压；i_{α}为变流器的电流。

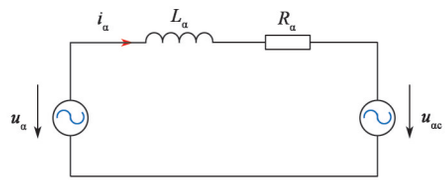


图5　AC-DC变换器等效电路图

Fig. 5　Equivalent circuit diagram of AC-DC converter

根据图5，可以得到如下等式：

$$u_{\alpha\mathrm{c}}=u_{\alpha}+L_{\alpha}\frac{\mathrm{d}i_{\alpha}}{\mathrm{d}t}+R_{\alpha}i_{\alpha} \tag{14}$$

以α相电压u_{α}为参考，其相应的电压和电流为：

$$\left.\begin{aligned}u_{\alpha\mathrm{c}}&=U_{\alpha}\cos(\omega t)=U_{\alpha\mathrm{p}}\cos(\omega t)\\u_{\alpha\mathrm{c}}&=U_{\alpha\mathrm{cp}}\cos(\omega t)+U_{\alpha\mathrm{cq}}\sin(\omega t)\\i_{\alpha\mathrm{c}}&=I_{\alpha\mathrm{cp}}\cos(\omega t)+I_{\alpha\mathrm{cq}}\sin(\omega t)\end{aligned}\right\} \tag{15}$$

式中：$U_{\alpha\mathrm{p}}$,$U_{\alpha\mathrm{cp}}$都为潮流转移装置α侧端口电压U_{α}有功分量的幅值；$I_{\alpha\mathrm{cp}}$为潮流转移装置α侧端口电流I_{α}有功分量的幅值；$U_{\alpha\mathrm{cq}}$, $I_{\alpha\mathrm{cq}}$分别为潮流转移装置α侧端口电压U_{α}和端口电流I_{α}无功分量的幅值。

将式(15)代入式(14)，可得：

$$\left.\begin{aligned}L_{\alpha}\frac{\mathrm{d}I_{\alpha\mathrm{cp}}}{\mathrm{d}t}+\omega L_{\alpha}I_{\alpha\mathrm{cq}}+R_{\alpha}I_{\alpha\mathrm{cp}}&=U_{\alpha\mathrm{cp}}-U_{\alpha\mathrm{p}}\\L_{\alpha}\frac{\mathrm{d}I_{\alpha\mathrm{cq}}}{\mathrm{d}t}-\omega L_{\alpha}I_{\alpha\mathrm{cp}}+R_{\alpha}I_{\alpha\mathrm{cq}}&=U_{\alpha\mathrm{cq}}\end{aligned}\right\} \tag{16}$$

根据式(16)，可以得到AC-DC变换器的“欧拉–拉格朗日”数学模型为

$$\boldsymbol{M}\mathrm{p}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{J}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{R}\boldsymbol{x}=\boldsymbol{u} \tag{17}$$

其中

$$\boldsymbol{M}=\begin{bmatrix}L_{\alpha}&0\\0&L_{\alpha}\end{bmatrix},\boldsymbol{x}=\begin{bmatrix}I_{\alpha\mathrm{cp}}\\I_{\alpha\mathrm{cq}}\end{bmatrix},\boldsymbol{J}=\begin{bmatrix}0&\omega L_{\alpha}\\-\omega L_{\alpha}&0\end{bmatrix},$$
$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}R_{\alpha}&0\\0&R_{\alpha}\end{bmatrix},\boldsymbol{u}=\begin{bmatrix}U_{\alpha\mathrm{cp}}-U_{\alpha\mathrm{p}}\\U_{\alpha\mathrm{cp}}\end{bmatrix}$$

式中：$\boldsymbol{M}$为正定对称矩阵，$\boldsymbol{M}=\boldsymbol{M}^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{x}$为状态向量，为反对称矩阵；$\boldsymbol{J}=-\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{R}$为正系数矩阵，$\boldsymbol{R}=\boldsymbol{R}^{\mathrm{T}}$；$\boldsymbol{u}$是控制输入变量向量；p是微分算子。

根据无源性的定义，对于一个系统，如果存在半正定储能函数$E(x)$和正定函数$Q(x)$，当$t>0$时，满足式(18)和式(19)，那么系统是严格无源的。

$$E\left(x(t)\right)-E\left(x(0)\right)\leqslant\int_{0}^{t}u^{\mathrm{T}}y\mathrm{d}\tau-\int_{0}^{t}Q(x)\mathrm{d}\tau \tag{18}$$

$$\mathrm{p}E\leqslant u^{\mathrm{T}}y-Q(x) \tag{19}$$

式中：x, u, y分别表示状态向量、输入向量和输出向量；$u^{\mathrm{T}}y$为外部注入的供能率；$E(x(t))-E(x(0))$为系统储存的能量。

式(18)和式(19)表明系统的能量增量不应大于来自外部注入的能量增量，因此一个无源系统的运动总是伴随着能量的损失。误差向量定义为$\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}}=\boldsymbol{x}-\boldsymbol{x}^{*}$，$E$为储能函数，其可表示为

$$E=\frac{1}{2}L_{\alpha}\left[\left(I_{\alpha\mathrm{cp}}-I_{\alpha\mathrm{cp}}^{*}\right)^{2}+\left(I_{\alpha\mathrm{cq}}-I_{\alpha\mathrm{cq}}^{*}\right)^{2}\right]=\frac{1}{2}\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}} \tag{20}$$

将$x=\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}}+\boldsymbol{x}^{*}$代入式(17)，可得到

$$\boldsymbol{M}\mathrm{p}\left(\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}}+\boldsymbol{x}^{*}\right)+\boldsymbol{J}\left(\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}}+\boldsymbol{x}^{*}\right)+\boldsymbol{R}\left(\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}}+\boldsymbol{x}^{*}\right)=\boldsymbol{u} \tag{21}$$

经整理，可得到

$$\boldsymbol{M}\mathrm{p}\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}}+\boldsymbol{J}\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}}+\boldsymbol{R}\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}}=\boldsymbol{u}-\left(\boldsymbol{M}\mathrm{p}\boldsymbol{x}^{*}+\boldsymbol{J}\boldsymbol{x}^{*}+\boldsymbol{R}\boldsymbol{x}^{*}\right) \tag{22}$$

为加速E收敛到0，采用虚阻尼矩阵$\boldsymbol{R}_{\mathrm{N}}=\mathrm{diag}\{R_{\mathrm{N}},R_{\mathrm{N}}\}$，其中$R_{\mathrm{N}}$为虚阻尼系数，$R_{\mathrm{N}}>0$。因此，可得

$$\boldsymbol{R}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}}=\left(\boldsymbol{R}+\boldsymbol{R}_{\mathrm{N}}\right)\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}} \tag{23}$$

式中：$\boldsymbol{R}_{\mathrm{d}}$为系统的新阻尼矩阵。

将式(23)代入式(22)，可得到

$$\boldsymbol{M}\mathrm{p}\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}}+\boldsymbol{J}\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}}+\boldsymbol{R}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}}=\boldsymbol{u}-\left(\boldsymbol{M}\mathrm{p}\boldsymbol{x}^{*}+\boldsymbol{J}\boldsymbol{x}^{*}+\boldsymbol{R}\boldsymbol{x}^{*}-\boldsymbol{R}_{\mathrm{N}}\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}}\right)=\varepsilon \tag{24}$$

结合式(20)，并考虑$\boldsymbol{J}=-\boldsymbol{J}^{\mathrm{T}}$，可得到

$$\mathrm{p}E=\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\mathrm{p}\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}}=\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}}^{\mathrm{T}}\left(\varepsilon-\boldsymbol{J}\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}}-\boldsymbol{R}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}}\right)=\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}}^{\mathrm{T}}\varepsilon-\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{R}_{\mathrm{d}}\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}} \tag{25}$$

如果$\varepsilon=0$，则$\mathrm{p}E\leqslant 0$，因此存在1个正实数，使得式(26)成立。

$$\mathrm{p}E=-\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{M}\mathrm{p}\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}}\leqslant-\lambda E<0 \tag{26}$$

根据李雅普诺夫稳定性定理，储能函数E是收敛的，这表明AC-DC变换器呈指数渐近稳定。因此，为了使$\varepsilon=0$，根据式(23)，系统的控制调节需满足下式：

$$\boldsymbol{u}=\left(\boldsymbol{M}\mathrm{p}\boldsymbol{x}^{*}+\boldsymbol{J}\boldsymbol{x}^{*}+\boldsymbol{R}\boldsymbol{x}^{*}-\boldsymbol{R}_{\mathrm{N}}\boldsymbol{x}_{\mathrm{e}}\right) \tag{27}$$

根据式(17)和式(27)，可得AC-DC变换器的PBC函数为：

$$\left.\begin{aligned}u_{\alpha\mathrm{cp}}&=L_{\alpha}\frac{\mathrm{d}I_{\alpha\mathrm{cp}}^{*}}{\mathrm{d}t}+\omega L_{\alpha}I_{\alpha\mathrm{cq}}^{*}+R_{\alpha}I_{\alpha\mathrm{cp}}^{*}-R_{\mathrm{N}}\left(I_{\alpha\mathrm{cp}}-I_{\alpha\mathrm{cp}}^{*}\right)+U_{\alpha\mathrm{p}}\\u_{\alpha\mathrm{cq}}&=L_{\alpha}\frac{\mathrm{d}I_{\alpha\mathrm{cq}}^{*}}{\mathrm{d}t}-\omega L_{\alpha}I_{\alpha\mathrm{cp}}^{*}+R_{\alpha}I_{\alpha\mathrm{cq}}^{*}-R_{\mathrm{N}}\left(I_{\alpha\mathrm{cq}}-I_{\alpha\mathrm{cq}}^{*}\right)\end{aligned}\right\} \tag{28}$$

2.3 协调控制策略

基于上述理论分析，本文设计了集成混合储能系统潮流转移装置的协调控制策略。当电力机车处在不同的工况时，该控制策略可以根据机车所处的工况切换控制方案，在不同的工况下均能达到良好的控制效果，如图6所示（图中S_1、S_2的开关状态均为断开），u_{dc}为潮流转移装置中间直流电压，其参考值为u_{dc}^{*}。

当系统处于削峰模式和填谷模式时，S_1断开，S_2闭合；当系统处于再生模式和同相运行模式时，S_1闭合，S_2断开。该协调策略可以提高系统的削峰率、填谷精度和再生制动能量利用率，避免储能装置的不可控放电，提高系统的经济性和稳定性。对于蓄电池与超级电容的功率分配问题，由于蓄电池工作效率受使用次数影响，能量密度较高，更适合承担持续充放电工作[18]，然而超级电容恰恰相反，其充放电效率不受充放电次数影响。因此，在通过能量管理策略得到混合储能装置的参考功率后，采用滤波分配功率的方法，使蓄电池承担参考功率低频部分，超级电容负责其高频部分。

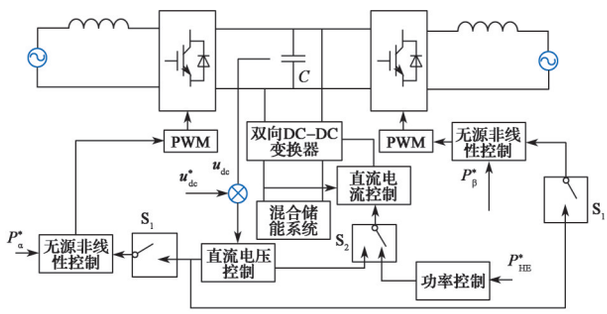


图6 协调控制框图

Fig. 6 Block diagram of coordinated control strategy

3 仿真分析

为了验证系统的性能，证明本文提出的集成混合储能系统潮流转移装置的可行性和控制策略的有效性，在MATLAB/Simulink平台搭建了仿真模型并进行分析。系统仿真参数见表1，混合储能的参数来自于文献[18]。

表1 系统仿真参数

Table 1 Parameters for system simulation

参数	相电压/kV	短路容量/ MVA	u_{dc}^{*}/ kV	P_{H}/MW	P_{low}/MW
参数值	110	750	2	9	4

图7为不同控制策略之间变流器控制性能比较。由图7可知，对于AC-DC变流器的电流，与传统的dq解耦控制策略相比，本研究中采用的PBC控制的超调更短，沉降时间更短。

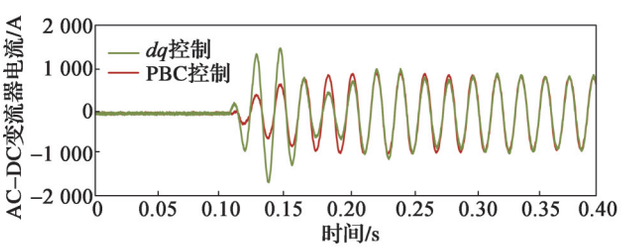


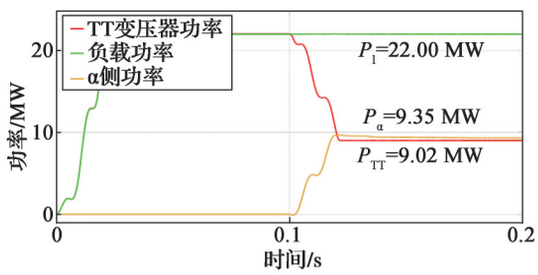
图7 AC-DC变流器的PBC控制和传统dq解耦控制性能对比

Fig. 7 Performance comparison between PBC and traditional dq decoupling control of AC-DC converter

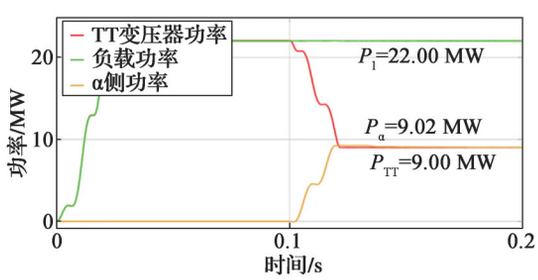
对削峰模式和再生制动模式进行了仿真和分析，验证2种控制方案在不同工作模式下对系统表现的影响。假设β侧的负荷为22 MW，牵引供电系统和混合储能系统在0.05 s时投入工作，并工作在削峰模式，系统仿真结果如图8所示。

根据式(7)和式(8)，在控制方案A的作用下，系统

的削峰率 $k_A=1-(9.35+9.02)/22=16.50\%$；同理，在控制方案 B 的作用下，系统的削峰率 $k_B=1-(9.02+9)/22=18.09\%$。因此，采用控制方案 B 可以使系统的削峰率提高 1.59 个百分点。



(a) 控制方案 A

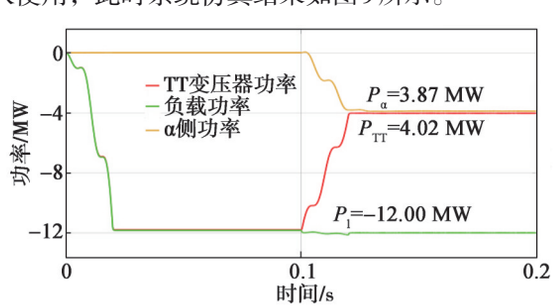


(b) 控制方案 B

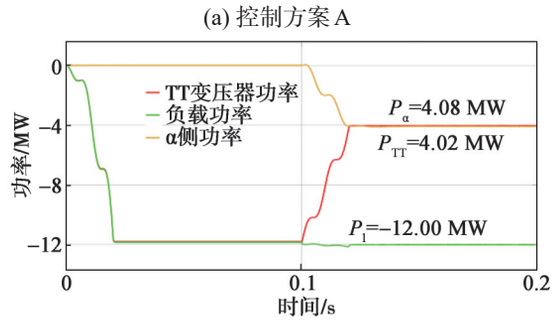
图 8　削峰模式下不同控制方案的功率

Fig. 8　Power diagram of different control schemes in peak shaving mode

假设负载的仿真条件为再生制动，再生制动功率为 12 MW，同相供电装置和混合储能装置在 t=0.05 s 时投入使用，此时系统仿真结果如图 9 所示。



(a) 控制方案 A



(b) 控制方案 B

图 9　再生制动模式下不同控制方案的功率

Fig. 9　Power diagram of different control schemes in regenerative braking mode

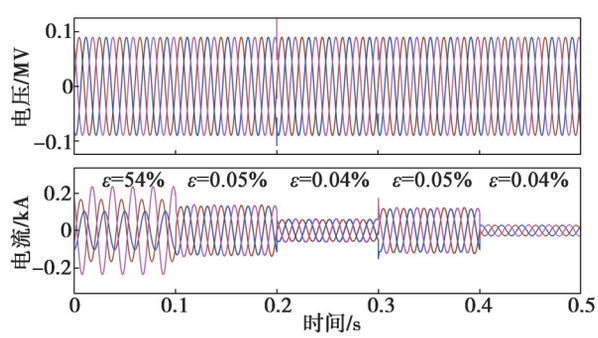
根据式(12)和式(13)，在控制方案 A 的作用下，系统的再生制动能量利用率 $\gamma_A=1-(3.87+4.02)/12=34.25\%$；同理，在控制方案 B 的作用下，系统的再生制动能量利用率 $\gamma_B=1-(4.08+4.02)/12=32.50\%$。因此，采用控制方案 A 可使系统再生制动能量利用率提高 1.75 个百分点。

为了验证本文提出的协调控制的有效性，本节基于国内某条线路测试得到的负荷数据对系统在各工作模式下切换工作进行了仿真验证，仿真参数如表 2 所示，仿真结果如图 10 所示。

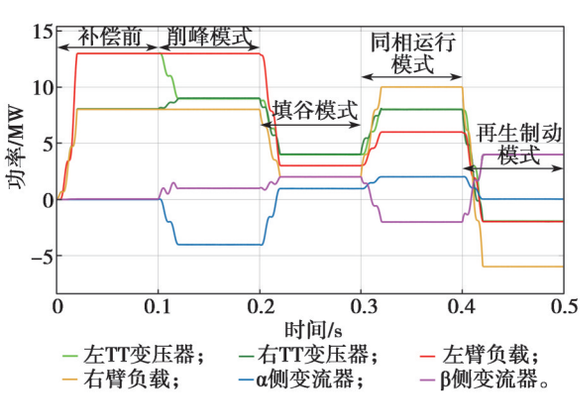
表 2　协调控制仿真参数

Table 1　Parameters for coordination control simulation

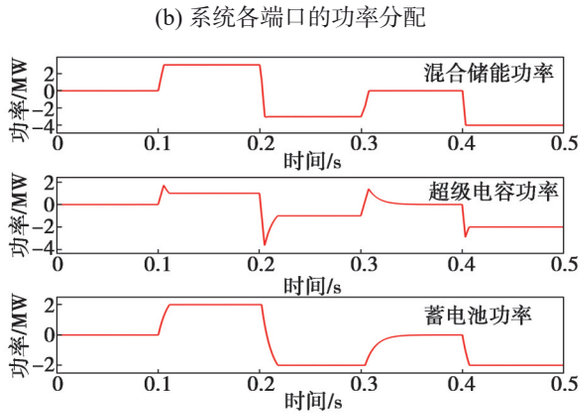
仿真时间/s	左臂负载功率/MW	右臂负载功率/MW	运行模式	直流侧控制方案
0~<0.1	13	8		
0.1~<0.2	13	8	削峰	控制方案 B
0.2~<0.3	3	2	填谷	控制方案 B
0.3~<0.4	6	10	同相运行	控制方案 A
0.4~<0.5	−2	−6	再生制动	控制方案 A



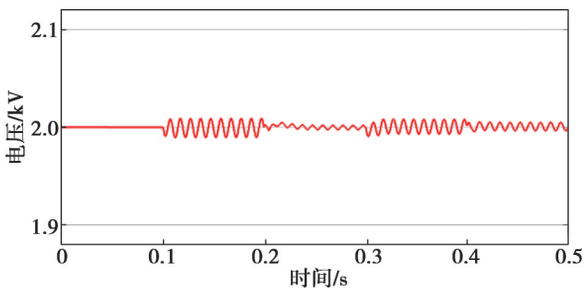
(a) 三相侧电压和电流



(b) 系统各端口的功率分配



(c) 混合储能单元的功率



(d) 潮流转移装置中间直流电压

图 10　协调控制仿真波形

Fig. 10　Simulation waveforms of coordination control

在 0~ < 0.1 s 时，P_{l1}=13 MW,P_{l2}=8 MW，装置未工作，其中 α 侧和 β 侧变流器功率均为 0 MW，混合储能功率为 0 MW，由于左、右臂负荷大小不同，三相电流严重不对称，负序严重超标；在 0.1~ < 0.2 s 时，P_{l1}=13 MW,P_{l2}=8 MW，装置投入工作，P_{l1}+P_{l2}=21 MW > 18 MW（2×9 MW），处于削峰模式，混合储能削峰功率为 3 MW，α 侧变流器传输功率为 –4 MW，β 侧变流器传输功率为 1 MW，平衡左右臂负荷，使三相电流对称，完全补偿负序；在 0.2~ < 0.3 s 时，P_{l1}=3 MW,P_{l2}=2 MW，装置投入工作，P_{l1}+P_{l2}=5 MW < 8 MW（2×4 MW），处于填谷模式，混合储能填谷功率为 –3 MW，α 侧变流器传输功率为 1 MW，β 侧变流器传输功率为 2 MW，平衡左右臂负荷，使三相电流对称，完全补偿负序；在 0.3~ < 0.4 s 时，P_{l1}=6 MW,P_{l2}=10 MW，装置投入工作，8 MW（2×4 MW）< P_{l1}+P_{l2}=16 MW < 18 MW（2×9 MW），处于同相运行模式，混合储能功率为 0 MW，α 侧变流器传输功率为 2 MW，β 侧变流器传输功率为 –2 MW，平衡左右臂负荷；在 0.4~ < 0.5 s 时，P_{l1}= –2 MW,P_{l2}=–6 MW，装置投入工作，P_{l1}+P_{l2}=–8 MW < 0 MW，处于再生制动模式，混合储能功率为 –4 MW，α 侧变流器传输功率为 0 MW，β 侧变流器传输功率为 4 MW，平衡左右臂负荷。在整个工作过程中，潮流转移装置中间直流电压始终处于稳定状态。

综上所述，本文提出的协调策略可以实现系统在不同模式下的有效切换，保证系统的动态响应，最大程度上保证系统的性能。

4　结论

本文提出了一种包含混合储能系统的潮流转移装置及其协调控制策略，可以完全补偿系统的负序，实现再生制动能量的高效利用。文中分析了集成混合储能潮流转移装置的拓扑结构，并基于拓扑结构分析了该系统的能量管理策略，提出了 2 种控制方案，建立了 2 种控制方案下的等效电路，分析了 2 种控制方案在不同工作模式下对系统性能的影响，提出了一种协调控制策略。为 AC-DC 变换器设计了无源控制的非线性电流控制器。仿真结果表明：①该潮流转移装置可以有效降低电压不平衡度；②在各种仿真条件下，均能实现装置的稳定运行，并且有良好的动态响应速度；③该协调策略可以提高系统的削峰率、填谷精度和再生制动能量利用率，避免储能装置的不可控放电，提高系统的经济性和稳定性。

参考文献：

[1] 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.

[2] LAI Junhong, CHEN Minwu, DAI Xianfeng, et al. Energy management strategy adopting power transfer device considering power quality improvement and regenerative braking energy utilization for double-modes traction system[J]. CPSS transactions on power electronics and applications, 2022, 7(1): 103-111.

[3] GONZÁLEZ-GIL A, PALACIN R, BATTY P. Sustainable urban rail systems: strategies and technologies for optimal management of regenerative braking energy[J]. Energy conversion and management, 2013, 75: 374-388.

[4] 吕顺凯 . 交流牵引变电所间再生制动能量利用系统及工程运行分析[J]. 电气化铁道, 2022, 33(4): 1-6.
LYU Shunkai. Analysis of regenerative braking energy utilization system between AC traction substations and its engineering operation analysis[J]. Electric railway, 2022, 33(4): 1-6.

[5] 刘正雄, 陈婷, 陈颖, 等 . 重载铁路牵引供电再生制动能量调度系统研究及应用[J]. 控制与信息技术, 2023(2): 34-39.
LIU Zhengxiong, CHEN Ting, CHEN Ying, et al. Research and application of regenerative braking energy dispatching system for heavy haul railway traction power supply[J]. Control and information technology, 2023(2): 34-39.

[6] 吕顺凯 . 重载铁路再生制动能量利用方案研究与应用[J]. 中国铁路, 2022(11): 45-54.
LYU Shunkai. Research and application of regenerative braking energy utilization scheme for heavy haul railway[J]. China railway, 2022(11): 45-54.

[7] 姚金雄, 张涛, 林榕, 等 . 牵引供电系统负序电流和谐波对电力系统的影响及其补偿措施[J]. 电网技术, 2008, 32(9): 61-64.
YAO Jinxiong, ZHANG Tao, LIN Rong, et al. Impacts of negative sequence current and harmonics in traction power supply system for electrified railway on power system and compensation measures[J]. Power system technology, 2008, 32(9): 61-64.

[8] ZHU G P, CHEN J Y, LIU X Y. Compensation for the negative-sequence currents of electric railway based on SVC [C]//IEEE. 2008 3rd IEEE Conference on Industrial Elec-

tronics and Applications. Singapore: IEEE, 2008: 1958-1963.

[9] 张定华, 桂卫华, 王卫安, 等. 牵引变电所电能质量混合动态治理技术[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(7): 48-55.
ZHANG Dinghua, GUI Weihua, WANG Weian, et al. Hybrid dynamic power quality compensation technology for traction substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(7): 48-55.

[10] JIANG Yong, LIU Jianqiang, TIAN Wei, et al. Energy harvesting for the electrification of railway stations: getting a charge from the regenerative braking of trains[J]. IEEE electrification magazine, 2014, 2(3): 39-48.

[11] 李群湛, 王喜军, 黄小红, 等. 电气化铁路飞轮储能技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(7): 2025-2032.
LI Qunzhan, WANG Xijun, HUANG Xiaohong, et al. Research on flywheel energy storage technology for electrified railway[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(7): 2025-2032.

[12] 马茜, 郭昕, 罗培, 等. 一种基于超级电容储能系统的新型铁路功率调节器[J]. 电工技术学报, 2018, 33(6): 1208-1218.
MA Qian, GUO Xin, LUO Pei, et al. A novel railway power conditioner based on super capacitor energy storage system [J]. Transactions of China electrotechnical society, 2018, 33(6): 1208-1218.

[13] 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.

[14] CUI Guiping, LUO Longfu, LIANG Chonggan, 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.

[15] CHEN Minwu, CHENG Yilin, CHENG Zhe, et al. Energy storage traction power supply system and control strategy for an electrified railway[J]. IET generation transmission & distribution, 2020, 14(12): 2304-2314.

[16] CHENG Yilin, CHEN Minwu, CHENG Zhe, et al. An advanced traction power supply system in electrified railway [C]//IEEE. 2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Kristiansand: IEEE, 2020: 402-406.

[17] 陈铁, 张会颖, 李咸善, 等. 基于超级电容的交直交牵引供电系统及控制策略[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(5): 1921-1928.
CHEN Tie, ZHANG Huiying, LI Xianshan, et al. AC-DC-AC traction power supply system based on super capacitor and control strategy[J]. Science technology and engineering, 2022, 22(5): 1921-1928.

[18] 程一林. 含混合储能的同相供电系统建模及协调控制策略研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2021.
CHENG Yilin. Modeling and coordination control strategy of hybrid energy storage intergrated co-phase power supply system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2021.

Research on coordinated control method of hybrid energy storage systems connected traction power supply system based on PFTD

HUANG Jun

(China Railway SIYUAN Survey and Design Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430063, China)

Abstract: Electrified railways using single-phase power-frequency AC systems have the advantages of pollution-free operation and high transportation efficiency. However, the current traction power supply systems face prominent challenges related to negative sequence and inefficient utilization of regenerative braking energy. Therefore, this paper proposed a power flow transfer topology for integrated hybrid energy storage systems. The analysis focused on the topology structure of the power flow transfer device (PFTD) for integrated hybrid energy storage, and delved into peak shaving, valley filling, regenerative braking, and in-phase operation modes, along with corresponding energy management strategies. Moreover, a coordinated control strategy was proposed, to reduce system losses, as well as further improve the utilization of regenerative braking energy and the control accuracy of peak shaving and valley filling. Additionally, a passive nonlinear current controller was introduced to improve the control response speed of converters. Finally, the simulation results indicate that the proposed system fully utilize the regenerative braking energy of the traction power supply system, improve the flexibility of energy flow in the system, and solved concerns related to negative sequence in the traction power supply system.

Keywords: electrified railway; negative sequence; regenerative braking energy; hybrid energy storage system; coordinated control; simulation

收稿日期：2023-07-27；修回日期：2023-11-25