DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.04.014　　文章编号：1000-128X(2023)04-0098-09

基于超级电容型MMC系统的电铁负序补偿控制策略

罗忠游[1]，赵普志[2]，段　玉[1]，秦艳辉[1]，陈天舒[3]
（1.国网新疆电力有限公司电力科学研究院，新疆 乌鲁木齐　830011；
2.国网新疆电力有限公司，新疆 乌鲁木齐　830063；
3.西南交通大学 电气工程学院，四川 成都　611756）

摘　要：为了解决单相电铁负荷在三相电网中引起以负序为主的电能质量问题，文章以超级电容储能型模块化多电平变流器(SC-MMC)系统为对象，以变流器精确补偿负序电流与储能高效利用再生制动能量为调控手段，提出一种适用电铁负序补偿的控制策略，在MMC的子模块中分散接入超级电容储能装置，协调MMC与储能装置共同补偿负序，提高系统的可靠性与灵活性。首先，以主电路拓扑结构和负序补偿原理为基础，分析储能型模块化多电平系统的工作原理；然后，基于单相等效电路构建系统数学模型并结合机车负荷特性与超级电容荷电状态(SOC)划分充电、放电、平衡工作模式；最后，提出分层协调控制策略，其中上层能量管理判断工作模式并以相关国标限值为约束计算各端口参考功率，下层端口电流控制实现各端口的功率跟踪并协调不同工作模式间的动态切换。案例分析表明：SC-MMC系统在不同的机车负荷水平和超级电容SOC下能够有效实现电网负序的补偿，并协调控制超级电容与MMC参与补偿。

关键词：超级电容储能系统；模块化多电平变流器；电能质量；分层协调控制
中图分类号：U223.5　　**文献标识码：**A

Negative sequence compensation control strategy for electrified railways with super-capacitor integrated MMC

LUO Zhongyou[1], ZHAO Puzhi[2], DUAN Yu[1], QIN Yanhui[1], CHEN Tianshu[3]

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang 830011, China;
2. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi, Xinjiang 830063, China;
3. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China)

Abstract: In order to solve the power quality issue caused by dominant negative sequences, which result from single-phase loads of electrified railways in the three-phase grids, this paper presented a control strategy of compensation for negative sequences particularly suitable for electrified railways, taking the super-capacitor integrated modular multilevel converter (SC-MMC) system as the object, and leveraging precise compensation of negative sequence current by converters and efficient utilization of regenerative braking energy through energy storage facilities as the regulation means. Aimed to improve system reliability and flexibility, the MMC sub-modules were connected with super-capacitor storage devices in a decentralized pattern, to coordinate the MMC and energy storage devices for joint negative sequence compensation. This study began with an analysis of the working theory of the energy storage modular multilevel system, based on the main circuit topology and negative sequence compensation principle. Then, a system mathematical model was constructed based on a single-phase equivalent circuit and working modes were divided into charging, discharging, and balancing, taking

基金项目：国网新疆电力有限公司科技项目（5230DK220009）；国家自然科学基金项目（52277126）
通信作者：赵普志（1985—），男，硕士，高级工程师，主要从事电能质量分析与管理工作；E-mail: 394586050@qq.com
引用格式：罗忠游, 赵普志, 段玉, 等. 基于超级电容型MMC系统的电铁负序补偿控制策略[J]. 机车电传动, 2023(4): 98-106.
Citation: LUO Zhongyou, ZHAO Puzhi, DUAN Yu, et al. Negative sequence compensation control strategy for electrified railways with super-capacitor integrated MMC[J]. Electric drive for locomotives,2023(4): 98-106.

into account the locomotive load characteristics and super-capacitor state of charge (SOC). Finally, a hierarchical coordinated control strategy was proposed, among which energy management is designed at the upper layer to identify working modes and calculate reference power for each port within the limits specified in relevant national standards, while port current control was designed at the lower layer to enable power tracking for each port and dynamic switching coordination between different operating modes. The case study shows the effectiveness of the SC-MMC system in compensating for negative sequences in the grid under different locomotive load levels and super-capacitor SOC scenarios, and coordinated control of the super-capacitor and MMC to contribute to compensation.

Keywords: super-capacitor energy storage system; modular multilevel converter; power quality; hierarchical coordinated control

0　引言

近年来，可持续发展引起广泛关注，能源消耗问题是其重点之一。我国电气化铁路（简称“电铁”）每年能耗超过800亿kW·h，用能需求巨大[1]。随着电力机车的峰值功率持续增加，电铁负荷在大功率牵引取流和制动反送再生电能时，会向三相电网注入大量不平衡功率，造成以负序为代表的电能质量问题愈发凸显，导致新能源场站无法并网发电[2-3]。因此，通过负序电流精确补偿和再生制动能量高效利用是解决这一“痼疾”的有效手段[4]。

在改善电铁接入电网引起的电能质量问题方面，既有研究主要聚焦于两个方向：一是采用以SVG、STATCOM为代表的无功型电能质量补偿装置补偿负序电流[5]，文献[6]提出了一种基于V-v变压器的三端口SVG补偿系统，实现了同相供电的负序补偿，但是此类装置功能单一，由于无法调控再生制动能量导致所需的补偿容量巨大；二是采用以同相供电、铁路功率调节器(railway power conditioner, RPC)为代表的有功型潮流转移装置进行补偿，文献[7]提出一种基于三端口变流器的对称补偿同相供电系统，实现三相到单相的平衡变换，文献[8]针对级联H桥链式结构的RPC，设计了一种无源控制器，具有参数整定简单和器件参数摄动影响小的优点，文献[9]提出模块化多电平变换器结构(Modular Multilevel Converter, MMC)的同相补偿装置，相较于级联H桥链式结构无需匹配变压器，系统损耗显著降低，然而MMC结构内部环流复杂，传统的控制策略不再适用，难以实现负序精确补偿与再生制动能量的高效利用。

随着储能技术的兴起，已有学者提出利用储能系统参与电铁的电能质量补偿研究[10-13]。文献[10]基于飞轮储能的牵引变电所能量回收和电能质量综合治理研究，降低了电网的负序并产生了经济效益。基于单相整流器的直流母线通过DC-DC变换器接入超级电容并通过三相逆变反馈电网，实现吸收列车制动功率并补偿负序电流[11]。但既有文献均在直流母线处接入储能系统，一般采用降压变压器才具备合适的电压水平，系统损耗较高且占地多。MMC的众多子模块(Sub-Module, SM)提供了多个低压直流端口，将储能分散接入SM，具有可靠性高和控制灵活性强的优点，文献[12]提出一种基于MMC的车载超级电容储能系统，分析储能模块的工作模式，实现了能量在储能和车网之间的流动。文献[13]基于MMC的电池储能系统，分析储能型MMC的工作原理，研究了解耦控制方法。然而，相比于低功率密度和低循环寿命的电池，具有响应速度快、功率密度高、使用寿命长特点的超级电容器(Super Capacitor, SC)更适合于快速平抑牵引负荷瞬时冲击。因此，灵活调控SC-MMC系统实现电能质量补偿和再生制动能量高效利用是亟待解决的问题[14]。

本文针对超级电容的模块化多电平系统（SC-MMC）研究了适用电铁负序补偿的的控制策略，基于系统拓扑和负序补偿分析系统工作原理，根据等效电路建立系统数学模式并按SOC与负荷特性划分3种工作模式，提出一种分层协调控制策略，上层能量管理以国标限值为约束整定各工作模式下的功率目标，下层实现端口电流的跟踪和储能装置的充放电，在此基础上建立SC-MMC的仿真模型，并对牵引负荷的不同工况进行仿真验证。

1　SC-MMC工作原理

1.1　拓扑结构

系统主电路拓扑结构如图1所示，可主要分为两部分：一是单相组合式同相牵引供电系统，包括单相牵引变压器(Traction Transformer, TT)、高压匹配变压器(High voltage Matching Transformer, HMT)和单相交直交变流器，两台变压器构成Scott接线并由TT和变流器共同为牵引母线供电；二是SC-MMC主电路结构，由单相交直交四桥臂MMC构成，可分为α、β两侧分别接入HMT和牵引母线，每侧分为a、b两相和上下(p，n)桥臂，每个桥臂由N个半桥SM和一个桥臂电感串联组成，其中β侧桥臂中各个SM的直流电容与超级电容储能装置并联。图中：$\boldsymbol{U}_j$和$\boldsymbol{I}_j$分别为三相电网电压和电流，相数$j=\mathrm{A,B,C}$；$\boldsymbol{I}_{\mathrm{T1}}$和$\boldsymbol{I}_{\mathrm{H1}}$分别为TT和HMT的一次侧电流；$\boldsymbol{I}_{\mathrm{T}}$为TT的二次侧电流；$\boldsymbol{U}_i$和$\boldsymbol{I}_i$为变流器α端口和β端口的电压和电流，$L_i$为端口扼流电感，端口$i=\alpha,\beta$；$\boldsymbol{I}_{\mathrm{L}}$为可变机车负载电流；$L_{\mathrm{arm}}$为桥臂电感。

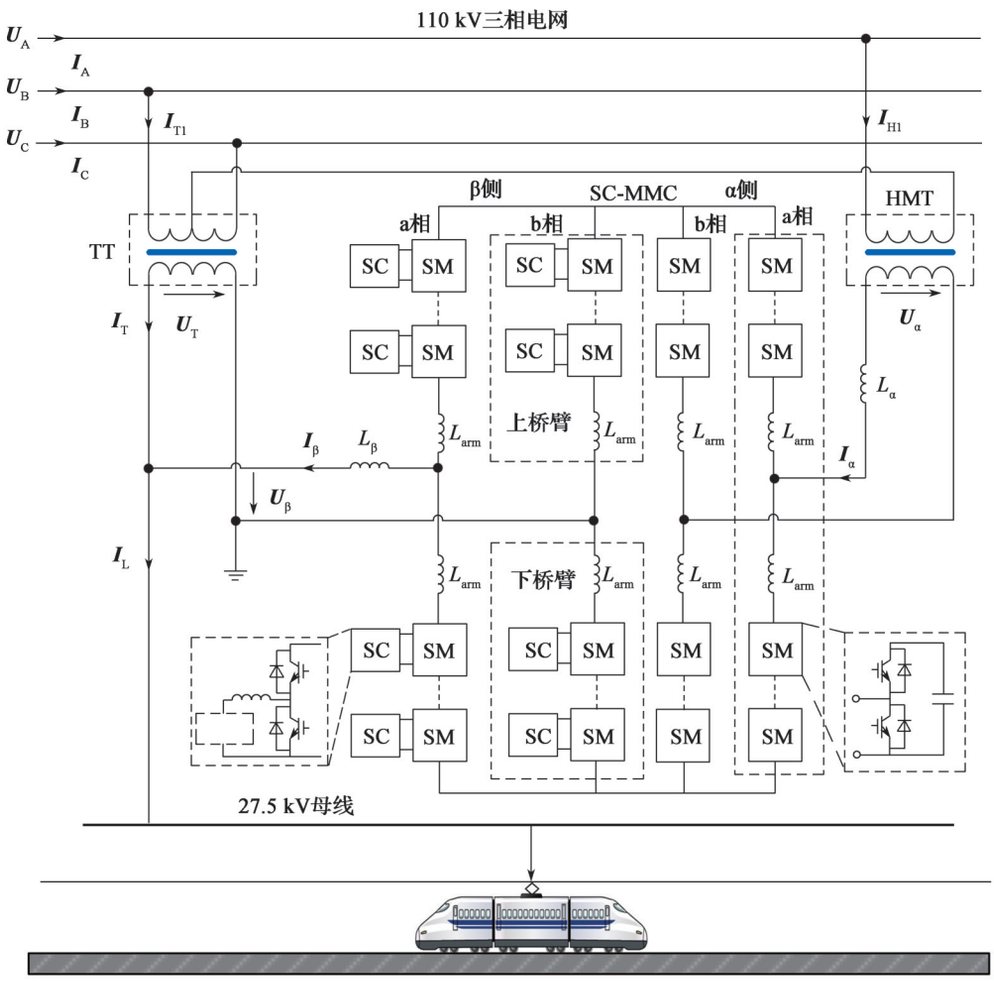


图1 SC-MMC与同相供电系统主电路拓扑结构

Fig. 1 Main circuit topology of SC-MMC and co-phase power supply system

1.2 负序补偿原理

实现电网三相完全平衡的传统补偿方式往往需要巨大的变流器容量，极大地提高了系统的成本。因此有必要分析负序补偿原理，以国标限制为目标进行补偿，从而降低变流器的安装容量。本文以运行交直交机车的电铁作为对象，假设负载功率因数为1。

由图1主电路拓扑和功率守恒关系可得：

$$\left.\begin{aligned} U_\beta I_\beta &= U_\alpha I_\alpha + U_\beta I_{ES} \\ \boldsymbol{I}_L &= \boldsymbol{I}_T + \boldsymbol{I}_\beta \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

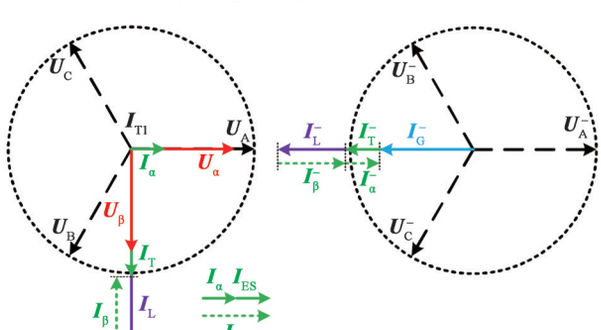
式中：I_{ES}为储能功率等效交流电流有效值；端口电压有效值U_α、U_β相等。

根据各变压器一次和二次电流的比率和相位关系[15]，系统各端口电流引起的电网负序电流为

$$\boldsymbol{I}^-_{Grid} = \underbrace{\frac{1}{\sqrt{3}\,N_1}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(-90°)}\boldsymbol{I}_T}_{\boldsymbol{I}^-_T} + \underbrace{\frac{1}{2N_2}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(0°)}\boldsymbol{I}_\alpha}_{\boldsymbol{I}^-_\alpha} = \underbrace{\frac{1}{\sqrt{3}\,N_1}I_L\mathrm{e}^{\mathrm{j}(-180°)}}_{\boldsymbol{I}^-_L} - \underbrace{\frac{1}{\sqrt{3}\,N_1}I_\beta\mathrm{e}^{\mathrm{j}(-180°)}}_{\boldsymbol{I}^-_\beta} + \underbrace{\frac{1}{2N_2}I_\alpha\mathrm{e}^{\mathrm{j}(0°)}}_{\boldsymbol{I}^-_\alpha} \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{I}^-_T$、$\boldsymbol{I}^-_\alpha$、$\boldsymbol{I}^-_L$和$\boldsymbol{I}^-_\beta$分别为TT、HMT、机车负载和变流器β端口电流在电网侧产生的负序电流；$\boldsymbol{I}^-_{Grid}$为三相电网电流的负序分量；N_1和N_2分别为TT和HMT的变比。

以上两式可在图2系统各端口电流的正负序矢量图中体现，其中$\boldsymbol{U}^-_A$、$\boldsymbol{U}^-_B$和$\boldsymbol{U}^-_C$为负序三相电压。



(a) 正序电流矢量 (b) 负序电流矢量

图2 电网负序电流补偿矢量图

Fig. 2 Vector diagram of negative sequence current compensation in power grid

2 SC-MMC数学模型

2.1 单相等效平均开关模型

系统建模时不考虑系统的损耗，假设系统中各器件为理想器件，三相电网电压对称，且DC-DC变换器

可等效为受控电流源。

由MMC调制原理[16]可设桥臂平均开关函数为S_{xy}，相x=a，b，桥臂y=p，n，模块k=1~N，桥臂SM等效开关模型为：

$$\left.\begin{aligned} u_{xy} &= S_{xy}\sum_{1}^{N}U_{Cxyk} \\ S_{xy}i_{xy} &= \frac{C_{sm}}{N}\sum_{1}^{N}\frac{\mathrm{d}U_{Cxyk}}{\mathrm{d}t}+\sum_{1}^{N}i_{ESxyk} \end{aligned}\right\} \tag{3}$$

式中：u_{xy}为桥臂SM等效瞬时输出电压；U_{Cxyk}为SM电容电压；C_{sm}为SM电容值；i_{xy}为桥臂电流；i_{ESxyk}为直流变换器等效输出电流。

忽略开关谐波的影响，则S_{xy}可表示为：

$$\left.\begin{aligned} S_{xp} &= \frac{1}{2}\left[1-m\sin\left(\omega t+\theta_x\right)\right] \\ S_{xn} &= \frac{1}{2}\left[1+m\sin\left(\omega t+\theta_x\right)\right] \end{aligned}\right\} \tag{4}$$

式中：m为调制策略调制比；ω为基波角频率；θ_x为交流电压初相角。

因此，可建立如图3所示的SC-MMC单相等效平均开关模型。图中：u_s和i_s分别为交流侧电压和电流；i_z为相间环流；L_s为交流端口扼流电感；L_{arm}为桥臂电感。其中，桥臂上所有SM可等效为一个受控电压源，其直流侧可等效为两个受控电流源和SM电容的并联形式，以此将SM内外工作特性进行区分。

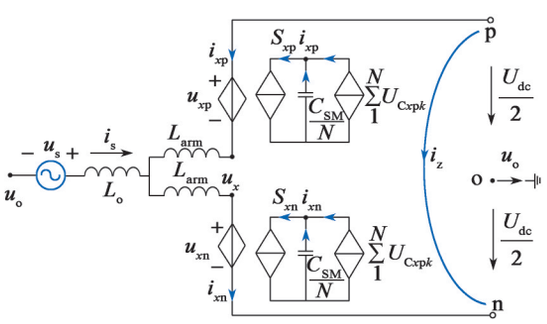


图3　SC-MMC单相等效平均开关模型

Fig. 3　SC-MMC single-phase equivalent average switching model

SC-MMC的外特性与传统MMC相似，针对系统等效电路基于基尔霍夫电压和电流方程可解出其等值数学模型为：

$$\left.\begin{aligned} \frac{U_{dc}}{2}-u_{xp}-L_{arm}\frac{\mathrm{d}i_{xp}}{\mathrm{d}t}+L_s\frac{\mathrm{d}i_s}{\mathrm{d}t} &= u_s \\ u_{xn}-\frac{U_{dc}}{2}+L_{arm}\frac{\mathrm{d}i_{xn}}{\mathrm{d}t}+L_s\frac{\mathrm{d}i_s}{\mathrm{d}t} &= u_s \end{aligned}\right\} \tag{5}$$

$$\left.\begin{aligned} 2i_z &= i_p+i_n \\ i_s &= i_n-i_p \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

由式(5)和式(6)可得系统交直流端口等值数学模型为：

$$\left.\begin{aligned} u_s &= u_x-L_{eq}\frac{\mathrm{d}i_s}{\mathrm{d}t} \\ U_{dc} &= u_{xp}+u_{xn}+2L_{arm}\frac{\mathrm{d}i_z}{\mathrm{d}t} \end{aligned}\right\} \tag{7}$$

式中：$L_{eq}=L_s+L_{arm}/2$，为交流侧等效电感；u_x为内部虚拟电动势，$u_x=\left(u_{xn}-u_{xp}\right)/2$；$U_{dc}$为直流母线电压。

由上式可知，控制桥臂电压即可间接控制交流端口的电流，且在SM等效开关模型中储能装置电流与桥臂电流存在耦合关系，因此可以实现超级电容与交流端口间的功率交换。同时也可控制环流实现两侧端口之间的功率传递，基于负序补偿原理提高电网电能质量。

2.2　工作模式分析

根据牵引负荷的状态和储能单元的SOC，将工作模式分为充电模式、放电模式和平衡模式3种，划分条件如表1所示。其中：P_L为牵引负荷功率；P_{ESM}为储能装置最大充放电功率；P_D为放电模式切换功率阈值；K_{SOC}为平衡模式荷电状态阈值；P_{ESM}、P_D和K_{SOC}均为正值。

表1　工作模式划分

Table 1　Division of work mode

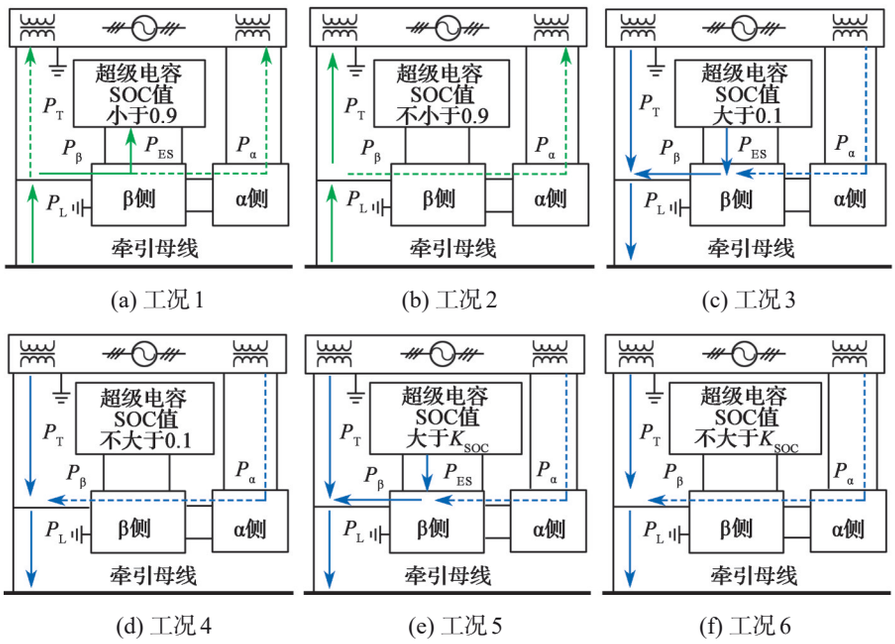
工作模式	工况	划分条件	储能功率
充电模式	工况1	$P_L<0$且SOC值小于0.9	$P_{ES}=\max\left(P_L,-P_{ESM}\right)$
	工况2	$P_L<0$且SOC值不小于0.9	$P_{ES}=0$
放电模式	工况3	$P_L>P_D$且SOC值大于0.1	$P_{ES}=\min\left(P_L-P_D,P_{ESM}\right)$
	工况4	$P_L>P_D$且SOC值不大于0.1	$P_{ES}=0$
平衡模式	工况5	$0<P_L<P_D$ 且SOC值大于K_{SOC}	$P_{ES}=\min\left(P_L,P_{ESM}\right)$
	工况6	$0<P_L<P_D$ 且SOC值不大于K_{SOC}	$P_{ES}=0$

图4为各工作模式下端口功率流图，其中实线功率流仅可改变大小，虚线功率流可判断有无。图4中P_T为TT端口功率，P_α和P_β为储能系统α端口和β端口功率，P_{ES}为储能装置端口功率。

当列车进行再生制动时($P_L<0$)，系统将进入充电模式。在此模式中牵引负荷功率小于零，也可被称为再生制动功率，并根据超级电容SOC值是否小于0.9可分为工况1和工况2。当列车进行牵引且机车功率大于放电阈值($P_L>P_D$)时，系统将进入放电模式，根据牵引负荷功率的提升逐步增加放电功率，以降低电网峰值功率并补偿负序，根据超级电容的SOC值是否大于0.1可分为工况3和工况4。当列车进行牵引且机车功率小于等于放电阈值时($P_L\leqslant P_D$)，系统将进入平衡模式。为减少储能系统不工作的工况2和工况4出现，设定荷电状态阈值K_{SOC}维持超级电容SOC值处于0.1~0.9，并根据超级电容SOC值是否大于K_{SOC}可分为工况5和工况6。

3　分层协调控制策略

SC-MMC系统的正常工作需要协调系统的能量分配和实际的功率控制，以第2节的工作模式为基础，提



(a) 工况 1　(b) 工况 2　(c) 工况 3

(d) 工况 4　(e) 工况 5　(f) 工况 6

图 4　充电、放电和平衡模式下各端口功率流

Fig. 4　Power flow of each port in charging, discharging and balance modes

出了包括上层能量管理和下层端口电流控制的分层协调控制策略，以有效协调超级电容的充放电和电网负序的补偿。

3.1　上层能量管理

系统能量管理过程如图 5 所示。首先，检测负载功率和超级电容 SOC 并根据阈值判断工作模式。然后，根据第 1.2 节中负序补偿原理计算各端口参考电流，传递到下层端口电流控制部分。

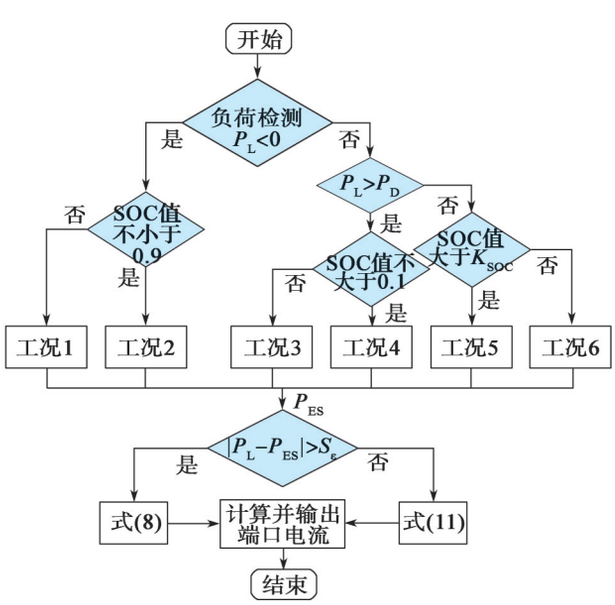


图 5　上层能量管理

Fig. 5　Upper level energy management

机车功率由超级电容和电网提供，可根据电网功率与负序功率上限的关系分为两种情况。其一，电网功率小于等于负序功率上限，无须负序补偿，则 TT 功率等于电网功率，端口功率如下：

$$\left.\begin{aligned} P_\alpha &= 0 \\ P_\beta &= P_{ES} \\ P_T &= P_L - P_{ES} \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

其二，电网功率大于负序功率上限，则 TT 功率小于电网功率，由图 2(a)得到端口电流关系后在两侧乘以端口电压变换为功率单位，并列出需要补偿的负序功率与牵引负荷和负序功率上限的关系，得到式(9)和式(10)。

$$\underbrace{U_T(I_L^- - I_G^-)}_{P_{GC}^-} = \underbrace{U_\beta I_{ES}}_{P_{ES}} + \underbrace{2U_\alpha I_\alpha^-}_{2P_\alpha} \tag{9}$$

$$\left.\begin{aligned} P_{GC}^- &= P_L - \mathrm{sgn}(P_L)\cdot S_\varepsilon \\ S_\varepsilon &= \frac{u_\varepsilon S_d}{100} \end{aligned}\right\} \tag{10}$$

式中：P_{GC}^- 为待补偿负序功率；sgn 函数返回变量的正负号；u_ε 为国标三相不平衡度；S_d 为三相电网短路容量。

联立上述两式可得：

$$\left.\begin{aligned} P_\alpha &= (P_L - \mathrm{sgn}(P_L)\cdot S_\varepsilon - P_{ES})/2 \\ P_\beta &= (P_L - \mathrm{sgn}(P_L)\cdot S_\varepsilon + P_{ES})/2 \\ P_T &= (P_L + \mathrm{sgn}(P_L)\cdot S_\varepsilon - P_{ES})/2 \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

3.2　下层端口电流控制

由上层能量管理得到 MMC 与储能装置端口功率，通过 SC-MMC 控制策略实现 α 和 β 端口的电流控制，采用双环控制实现储能装置的充放电。

3.2.1　MMC 控制

MMC 内环电流控制采用无差拍控制器，该控制器结构基于系统数学模型构建并获得控制参数，具有控制简单和动态特性好的优点[17]。包含无差拍电流内环控制器在内的 MMC 控制框图如图 6 所示，其中：变量

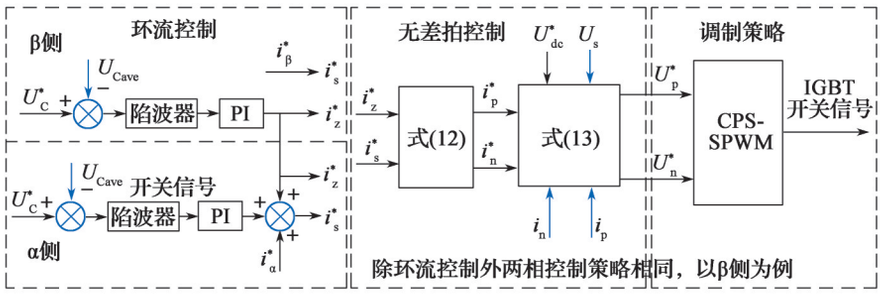


图6　MMC控制框图

Fig. 6　Block diagram of MMC control

的*上标表示其为参考值；U_{Cave}为该相所有SM电压的均值；U_s为交流端口电压。

根据系统单相等效数学模型推导无差拍内环电流控制算法，分析式(6)可得：

$$\left.\begin{aligned} i_p &= \frac{2i_z + i_s}{2} \\ i_n &= \frac{2i_z - i_s}{2} \end{aligned}\right\} \tag{12}$$

在单相交直交MMC中，直流环流既传递两侧功率，又参与SM稳压稳定控制。将β侧SM电压参考值U_C^*与上下桥臂SM电压均值U_{Cave}的差值通过PI控制作为系统环流参考值，而α侧承担系统损耗，其实际端口参考电流为参考功率、稳压控制和参考环流三者之和。在PI控制器前加入陷波器可以滤除二倍频分量，避免不必要的环流损耗。

由式(12)可知，通过环流参考值i_z^*与端口电流参考值i_s^*可得桥臂电流参考值，以跟踪控制桥臂电流。假设$\Delta i = i^* - i \neq 0$，在第$K$个控制周期$T_K$，将式(7)代入式(5)并进行离散化，同时以参考电压电流代替下一周期电压电流可得：

$$\left.\begin{aligned} U_p^* &= \frac{1}{2}U_{dc}(K) - U_s(K) - L_{eq}\frac{i_p^* - i_p(K)}{T} \\ U_n^* &= \frac{1}{2}U_{dc}(K) + U_s(K) - L_{eq}\frac{i_n^* - i_n(K)}{T} \end{aligned}\right\} \tag{13}$$

式中：T为单个控制周期持续时间；K为当前控制周期序号，U_p^*，U_n^*分别为上、下桥臂参考电压；$i_p(K)$，$i_n(K)$为该周期上、下桥臂电流；i_p^*，i_n^*分别为上、下桥臂参考电流；$U_s(K)$为该周期交流侧输出电压；$U_{dc}(K)$为该周期直流侧电压。

参考值U_p^*、U_n^*通过载波移相调制(CPS-SPWM)产生实际开关信号对变流器端口电压电流进行控制。由对称性可知，各桥臂参考电压关系为$U_{ap}^* = U_{bn}^* = U_p^*$，$U_{an}^* = U_{bp}^* = U_n^*$。

3.2.2　超级电容储能装置控制

DC-DC变换器控制框图如图7所示，其中U_{SC}和I_{SC}分别为超级电容的输出电压和电流。控制策略为双环控制，功率外环中将储能端口参考功率P_{ES}^*除以U_{SC}得到参考电流I_{SC}^*，在电流内环中将I_{SC}^*与I_{SC}的差值信号通过PI控制器和PWM调制产生触发脉冲。

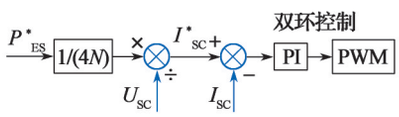


图7　DC-DC变换器控制框图

Fig. 7　Block diagram of DC-DC converter control

4　验证分析

为了验证上文建立的系统模型和控制策略的正确性和有效性，基于MATLAB/Simulink仿真平台搭建超级电容储能型模块化多电平系统仿真模型，具体仿真参数见表2。

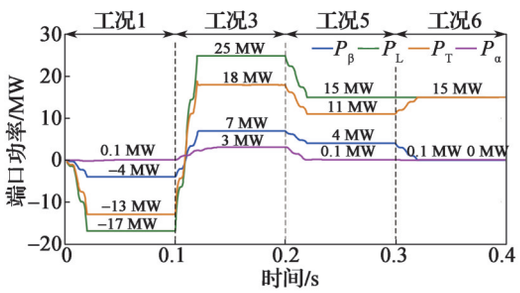
表2　系统仿真参数

Table 2　System simulation parameters

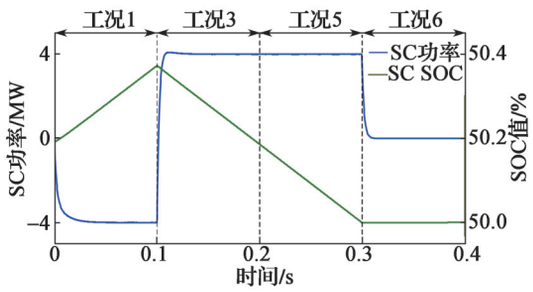
位置	参数	数值
三相电网	网侧三相线电压	110 kV
	电网频率	50 Hz
	短路容量	750 MV·A
TT变压器	变比N_1	110.0/27.5
HMT变压器	变比N_2	95.3/27.5
SC-MMC	桥臂子模块数量N	4 个
	子模块电容C	2 mF
	子模块额定电压U_C	11 kV
	桥臂电感L	5 mH
	开关频率f	2 500 Hz
	储能最大功率P_{ESM}	4 MW
	DC-DC电感L_{SC}	10 mH
工作模式阈值	放电模式阈值P_D	15 MW
	荷电状态阈值K_{SOC}	0.5

协调控制下仿真波形如图8~图10所示。其中，图8(b)中超级电容功率为16个储能装置的功率之和，图9、图10的工况与图8工况相同。

由图8可知：0~<0.1 s时机车处于再生制动状态，制动功率为17 MW（充电模式）且超级电容SOC值小于0.9（工况1），此时制动功率经由β端口反馈给储能装置，超级电容以4 MW功率充电，剩余13 MW功率经过TT反馈回电网，α端口承担系统损耗0.1 MW；0.1~<0.2 s时机车处于牵引状态，牵引负荷为25 MW（放电模式）且超级电容SOC值大于0.1（工况3），此



(a) 四端口功率流图



(b) 超级电容功率及SOC值图

图8 上层能量管理图

Fig. 8 Schematic diagram of upper level energy management

时超级电容以4 MW功率放电，同时α端口从HMT取电3 MW进一步补偿负序，储能与α端口功率汇集到β端口输出7 MW功率，剩余18 MW功率由TT提供；0.2~<0.4 s时牵引负荷降到15 MW（平衡模式），其中0.2 ~<0.3 s时超级电容SOC值大于0.5（工况5），超级电容以4 MW功率放电由β端口输出，0.3 ~<0.4 s时超级电容SOC值小于等于0.5（工况6），超级电容不再放电，系统处于热备用状态，机车功率完全由TT提供。

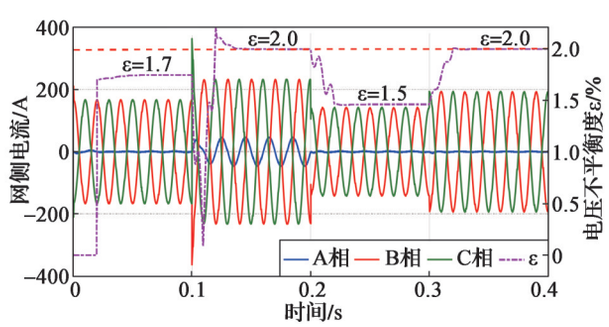
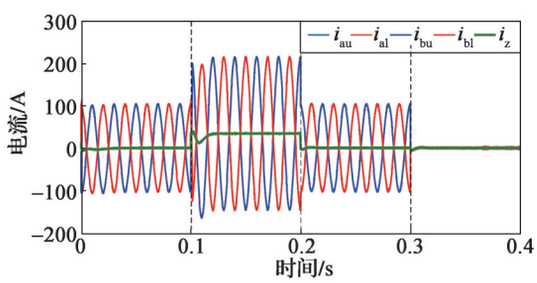


图9 网侧三相电流及电压不平衡度图

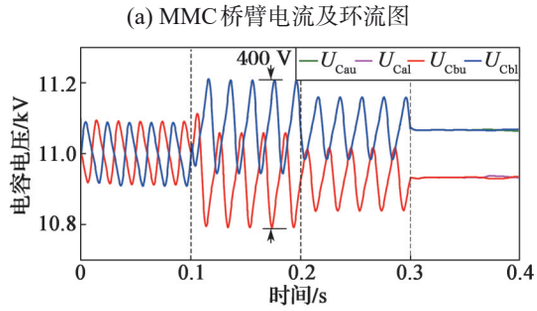
Fig. 9 Schematic diagram of unbalance in grid-side three-phase current and voltage

由图9可知：0~<0.1 s时机车反馈回电网的功率较小，网侧电压不平衡度为1.7%，小于2.0%的标准限值；0.1~<0.2 s时机车负荷为25 MW，根据负序补偿原理，超级电容放电功率4 MW不足以达成补偿目标，因此α端口从HMT取电3 MW，总共补偿10 MW负序功率，剩余15 MW负序功率满足2.0%的负序标准限值；0.2~<0.4 s时机车处于牵引状态，其中0.2~<0.3 s时超级电容以4 MW功率放电，降低了网侧负序，0.3~<0.4 s时超级电容不再放电，由于机车负荷引起的网侧电压不平衡度未超过标准限值，系统处于热备用状态，各端口功率为0，不进行补偿。

图10为MMC的β侧桥臂电流和SM电压，α侧波形与之类似，其中下标au，al，bu，bl分别代表a相上桥臂、a相下桥臂、b相上桥臂和b相下桥臂。由图10可知：0~<0.1 s时超级电容以4 MW功率充电，则β侧需吸收机车制动功率，此时功率和电容电压波动较小，没有向α侧传递功率，无直流环流；0.1~<0.2 s时超级电容以4 MW功率放电，同时α侧传递3 MW功率给β侧，存在直流环流，此时β侧传输功率最大，电容电压波动较大，为400 V，即电容电压波动范围为3.6%，满足MMC运行要求；0.2~<0.4 s时机车功率降低，其中0.2~<0.3 s时超级电容以4 MW功率放电，桥臂电流与SM电压波动类似0~<0.1 s的工况；0.3~<0.4 s时超级电容不再放电，β侧功率为0，系统处于热备用状态，桥臂电流与SM电压波动均接近0。



(a) MMC桥臂电流及环流图



(b) MMC桥臂SM电容电压图

图10 下层端口电流控制图

Fig. 10 Schematic diagram of lower level port current control

综合上述仿真结果表明，在各工况下系统均能有效实现超级电容的充放电控制和网侧负序的补偿，且能够实现不同工况的有效切换，确保系统的稳定运行，验证了系统各工作模式和分层协调控制策略的有效性。

5 结论

针对电铁接入电网的负序问题，本文提出一种SC-MMC系统，研究了系统内超级电容参与负序补偿的协调控制策略，结论如下：

①SC-MMC系统可有效解决由电铁接入导致的电网负序问题，同时以国标限值为目标进行补偿可以降低系统容量，减少系统投资，提升了经济效益。

②超级电容分散接入MMC子模块的方式可以降低

接入电压等级并提高可靠性和灵活性，同时控制策略实现了超级电容对电网负序的协调补偿。

后续将结合蓄电池储能装置与SC-MMC系统构建基于混合储能单元的MMC，以弥补超级电容能量密度低的不足。此外，针对不同MMC结构与储能装置接入的适应性也有待进一步研究。

参考文献：

[1] 中华人民共和国国务院新闻办公室.《中国交通的可持续发展》白皮书[EB/OL]. (2020-12-01) [2023-02-18]. http://www.scio.gov.cn/ztk/dtzt/42313/44564/index.htm.
The State Council Information Office of the People's Republic of China. White paper on sustainable development of transportation in China[EB/OL]. (2020-12-01) [2023-02-18]. http://www. scio. gov. cn/ztk/dtzt/42313/44564/index.htm.

[2] 万千, 夏成军, 管霖, 等. 含高渗透率分布式电源的独立微网的稳定性研究综述[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 598-612.
WAN Qian, XIA Chengjun, GUAN Lin, et al. Review on stability of isolated microgrid with highly penetrated distributed generations[J]. Power system technology, 2019, 43(2): 598-612.

[3] 曾淑云, 江全元, 陆韶琦, 等. 适用于不对称情况的线换相换流器动态相量模型[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(11): 129-135.
ZENG Shuyun, JIANG Quanyuan, LU Shaoqi, et al. Dynamic phasor model of line commutated converter under unbalanced conditions[J]. Automation of electric power systems, 2018, 42(11): 129-135.

[4] 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.

[5] 张志文, 黄际元, 罗隆福, 等. 高速电气化铁路负序和谐波统一治理方法[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(8): 22-29.
ZHANG Zhiwen, HUANG Jiyuan, LUO Longfu, et al. Unified negative sequence and harmonic suppression control method for high-speed electric railway[J]. Electric machines and control, 2013, 17(8): 22-29.

[6] 王辉, 李群湛, 解绍锋, 等. 基于Vv-SVG的电气化铁路同相供电综合补偿方案及控制策略[J]. 铁道学报, 2021, 43(9): 46-55.
WANG Hui, LI Qunzhan, XIE Shaofeng, et al. Comprehensive compensation scheme and control strategy of cophase power supply for electrified railway based on Vv-SVG[J]. Journal of the China railway society, 2021, 43(9): 46-55.

[7] 冯文杰, 侯鹏飞, 周方圆, 等. 基于对称补偿的同相供电系统研究[J]. 机车电传动, 2019(5): 6-9.
FENG Wenjie, HOU Pengfei, ZHOU Fangyuan, et al. Research on in-phase power supply system based on symmetric compensation[J]. Electric drive for locomotives, 2019(5): 6-9.

[8] 闵俊, 叶盛, 何志兴, 等. 多电平铁路功率调节器的无源控制方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(19): 102-109.
MIN Jun, YE Sheng, HE Zhixing, et al. Passivity-based control method for multi-level railway power conditioner[J]. Automation of electric power systems, 2017, 41(19): 102-109.

[9] 陈民武, 刘若飞, 陈玲, 等. 组合式同相供电系统补偿算法与控制策略优化[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(8): 28-34.
CHEN Minwu, LIU Ruofei, CHEN Ling, et al. Compensation algorithm and control strategy optimization of combined co-phase power supply system[J]. Electric machines and control, 2019, 23(8): 28-34.

[10] 李彦吉, 陈鹰, 李祎杨. 基于飞轮储能的牵引变电所能量回收和电能质量综合治理系统的设计[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(12): 3883-3894.
LI Yanji, CHEN Ying, LI Yiyang. Design of regenerative braking and power quality harnessed synthetically system in traction substation based on flywheel energy storage[J]. Energy storage science and technology, 2022, 11(12): 3883-3894.

[11] 吕顺凯, 张敏, 张志学. 交流电气化铁路再生制动能量高效协同利用技术[J]. 机车电传动, 2022(3): 53-61.
LYU Shunkai, ZHANG Min, ZHANG Zhixue. Regenerative braking energy efficient synergistic utilization technology for AC electrified railways[J]. Electric drive for locomotives, 2022(3): 53-61.

[12] 杨丰萍, 郑文奇, 金林, 等. 基于MMC的车载超级电容储能系统综合控制策略[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(6): 1151-1158.
YANG Fengping, ZHENG Wenqi, JIN Lin, et al. Integrated control strategy of vehicle supercapacitor energy storage system based on MMC[J]. Energy storage science and technology, 2019, 8(6): 1151-1158.

[13] 韩啸, 陈强, 李睿. 储能型模块化多电平换流器的分析与控制方法[J]. 电力电子技术, 2020, 54(2): 99-101.
HAN Xiao, CHEN Qiang, LI Rui. Analysis and control method of modular multilevel converter integrated with energy storage[J]. Power electronics, 2020, 54(2): 99-101.

[14] 张华志, 付程成, 郑毅, 等. 超级电容有轨电车多区间节能优化研究[J]. 机车电传动, 2022(3): 62-68.
ZHANG Huazhi, FU Chengcheng, ZHENG Yi, et al. Research on energy-saving optimization of supercapacitor trams in multi-section[J]. Electric drive for locomotives, 2022(3): 62-68.

[15] CHEN Yinyu, CHEN Minwu, TIAN Zhongbei, et al. Voltage unbalance management for high-speed railway consider-

ing the impact of large-scale DFIG-based wind farm[J]. IEEE transactions on power delivery, 2020, 35(4): 1667-1677.

[16] 孙谦浩, 李亚楼, 宋强, 等. 基于桥臂基波平均开关函数的MMC模型在直流电网仿真中的应用[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(8): 24-30.
SUN Qianhao, LI Yalou, SONG Qiang, et al. Application of MMC model based on arm fundamental wave average switching function in DC grid simulation[J]. Electric power automation equipment, 2018, 38(8): 24-30.

[17] 荣飞, 龚喜长, 黄守道, 等. 模块化多电平换流器的无差拍控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(6): 1753-1763.
RONG Fei, GONG Xichang, HUANG Shoudao, et al. The deadbeat control strategy of modular multilevel converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(6): 1753-1763.

收稿日期：2023-03-16
修回日期：2023-07-01