



新能源接入高速铁路牵引供电系统的 多目标优化补偿策略

李国俭¹, 徐进¹, 吴学刚¹, 邱勇², 杨汶坡², 李新雨³

(1. 内蒙古察哈尔新能源有限公司, 内蒙古 乌兰察布 012000;

2. 新源智储能源发展(北京)有限公司, 北京 102400;

3. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 随着新能源大规模接入电力系统, 高速铁路牵引供电系统在运行中面临三相电流不平衡、负序电流增加以及电能质量下降等问题。为解决传统全补偿模式下铁路功率调节器(MRPC)容量受限导致的新能源接入受阻与电能质量恶化的矛盾, 文章提出一种面向新能源接入的优化补偿控制策略。首先对新能源接入V/v牵引供电系统的功率流动特性及MRPC全补偿机理进行分析, 明确了不同机车组合工况下MRPC容量约束对新能源消纳能力的影响; 然后在此基础上, 构建以新能源接入电流限制量 ΔI 与三相负序电流 I 为目标的优化补偿数学模型, 将两相桥臂转移有功电流、两相牵引供电臂机车功率因数角及三相电流不平衡度作为关键决策变量, 并引入多目标遗传算法NSGA-II进行求解; 最后通过半实物仿真试验验证了所提策略的有效性。结果表明, 即使在最大不平衡工况下接入50 kW新能源, 该方法仍能显著提升电能质量, 将负序电流由37.5 A抑制至14.4 A。相比传统全补偿策略, 优化补偿不仅能够更大程度消纳新能源, 还能在MRPC容量受限的条件下保持系统的安全性和可靠性。研究创新性地将传统的全补偿范式转化为多目标优化补偿范式, 揭示了新能源接入与电能质量改善之间的权衡关系, 为新能源消纳与铁路电气化供电系统的协调运行提供了一种切实可行的新思路。

关键词: 多端口铁路功率调节器(MRPC); 新能源接入; 负序电流抑制; 多目标优化; NSGA-II; 电能质量; 高速铁路

中图分类号: U264; U223.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)03-0065-09

0 引言

可再生能源因清洁、无污染等优势, 已成为电力行业与学术界的研究热点。截至2021年, 我国新能源发电装机容量达1 120 GW, 占全国总装机容量的47.10%^[1-2]。我国以集中式开发的新能源发电系统主要集中在西北地区, 其外送与就地消纳矛盾日益突出。铁路系统作为国家的重要基础设施, 在社会和经济发展中发挥着重要的作用, 高速铁路的快速发展使得每

年消耗的电量不断增加, 因此将新能源接入高速铁路具有重要的现实意义^[3-4]。

电力机车作为单相负荷, 牵引网对其供电时会产生大量的负序电流, 造成三相不平衡等问题^[5]。目前已有较多补偿装置, 如静止无功补偿器(SVC)、有源电力滤波器(APF)、铁路功率调节器(RPC)等^[6-8]。文献[9]采用RPC和基于磁控电抗器(MCR)的静止无功补偿器(MSVC)协同补偿方案, 提出了相应的控制策略; 文献[10]研究了一种低成本混合的电能质量控制系统, 能够根据负载情况实时在线计算补偿容量。以上文献虽从

基金项目: 湖南省科技创新计划项目(2024JK2105)

通信作者: 李新雨, 男, 硕士研究生, 从事新能源接入的多端口能量路由器的研究; E-mail: lixinyuhnu@163.com

引用格式: 李国俭, 徐进, 吴学刚, 等. 新能源接入高速铁路牵引供电系统的多目标优化补偿策略[J]. 机车电传动, 2025(3): 65-73.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.03.008.

Citation: LI Guojian, XU Jin, WU Xuegang, et al. Multi-objective optimization compensation strategy for integrating renewable energy into high-speed railway traction power supply systems[J]. Electric drive for locomotives, 2025(3): 65-73.DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.03.008.

不同角度提出了解决电能质量问题的方案,但均未考虑新能源的接入。因此,文献[11-13]提出了基于电压源变换器(VSC)的中压直流(MVDC)牵引供电系统(TPSS),通过使用中压直流电取代高压交流电供给机车负载,采用直流母线可以解决电能质量的问题,新能源可以通过直流配电网接入牵引供电系统;文献[14]设计了一种新型的适用于新能源接入的多端口铁路功率调节器;文献[15]提出了一种交-直流互联“源-网-储-荷”一体化供电系统,研究了一体化供电系统多环节供电机制,阐述了一体化供电系统的协同控制策略;文献[16]提出了一种基于序列二次规划(SQP)的优化方法,通过协调RPC输出电流的有功和无功分量来抑制电网三相不平衡;文献[17]采用基于粒子群优化(PSO)算法,通过优化RPC的有功功率和无功功率输出来提高电能质量和功率因数;文献[18]建立了含混合能源与储能系统的能量管理模型,利用动态规划降低谐波与负序电流。

现有研究大多忽略了不同机车组合运行下,铁路RPC容量对新能源接入的限制,接入新能源会在一定程度上占用RPC固定容量,导致其无法对机车负载进行功率全补偿,进而又会出现三相电流不平衡等问题,威胁高铁运行安全。针对上述问题,本文以MRPC为基础,提出一种适用于新能源接入的优化补偿策略。

1 新能源接入牵引系统功率流分析

在中国高速铁路V/v牵引系统中,变压器的一次侧为三相110 kV/220 kV的主电网,二次侧为单相 2×27.5 kV,如图1所示。机车所在的轨道与AT中性线相连,使接触线和机车轨道间的电压为27.5 kV,由于机车连接的是电网二次侧单相电压,故而容易造成电网三相功率不平衡。

为了缓解机车对牵引供电系统的冲击和负担,提

出将新能源接入高速铁路牵引供电系统,由于新能源为辅助能源,通常表现为光伏阵列或储能形式,通过DC-DC变换器接入MRPC,并不考虑新能源完全接管机车负载或将多余电能送入电网的情况^[19]。接下来,对新能源接入牵引供电系统的功率流进行分析,系统有功功率流向如图1所示。

当无新能源接入时,MRPC功率流动与传统铁路功率调节器并无差异,两机车负载大小相等时,MRPC转移无功功率;两机车负载不相等时,轻载侧输出功率通过MRPC流向重载侧,如图1(a)~图1(c)所示。

当接入新能源时,不考虑MRPC功率容量限制,若接入新能源功率小于等于两相牵引供电臂负载功率差值,认为新能源功率全部流入重载侧,此时功率流向与无新能源接入情况相同,如图1(d)~图1(g)所示。若接入新能源功率大于两相牵引供电臂负载功率差值,认为新能源功率按照两相牵引供电臂负载功率相等的准则进行流动,如图1(h)所示。

2 MRPC全补偿原理及运行工况分析

2.1 MRPC全补偿原理

本文以MRPC为研究对象,其结构如图2所示, i_{SA} 、 i_{SB} 、 i_{SC} 为变压器一次侧三相电流, I_{pin} 为新能源接入的有功电流, I_{Sa} 和 I_{Sb} 为电网通过牵引变压器提供给两相牵引供电臂的电流, I_{La} 和 I_{Lb} 为两相机车负载电流, I_{Ca} 和 I_{Cb} 为流过MRPC的两端口电流。

当进行全补偿时,对于机车负载,其负载电流由MRPC和牵引变压器提供,只考虑有功电流时,其关系为:

$$\begin{cases} I_{Sap} = I_{La} + I_{Cap} \\ I_{Sbp} = I_{Lb} + I_{Cbp} \end{cases} \quad (1)$$

假设a相牵引供电臂为重载侧,b相牵引供电臂为轻载侧,MRPC将两相牵引供电臂负载电流差值的一半从重载侧转移到轻载侧,同时将接入新能源电流平

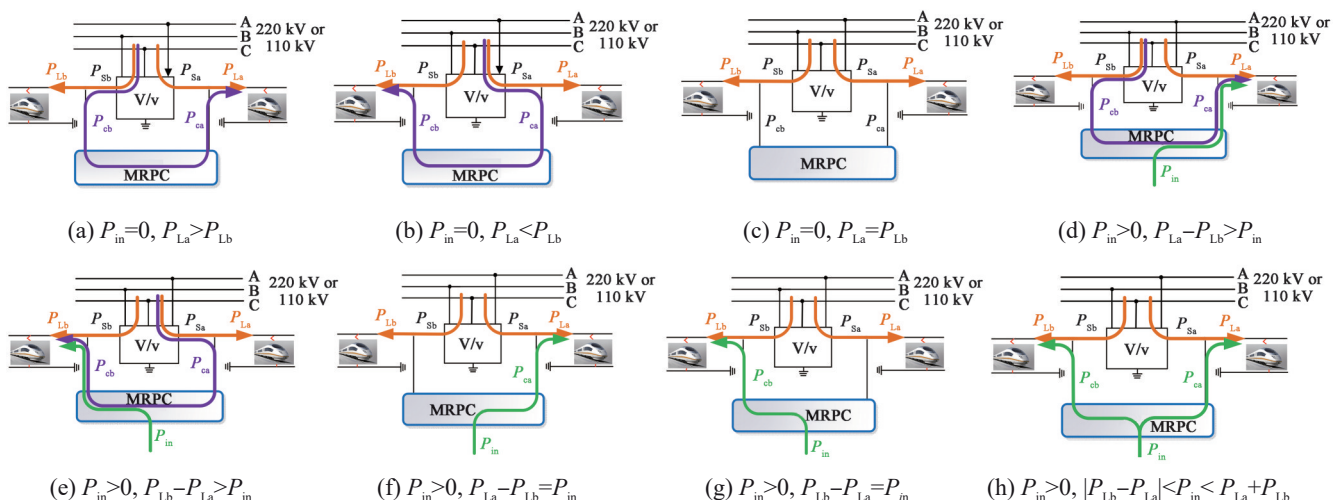


图1 系统有功功率流向图

Fig. 1 System active power flow diagram

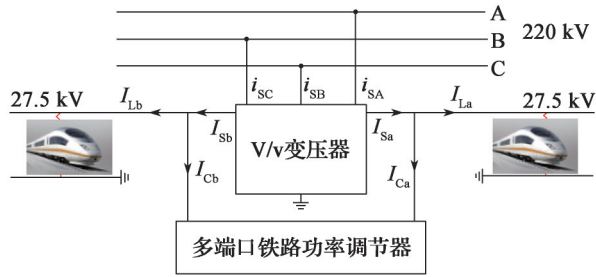


图2 新能源接入V/v牵引供电系统结构图

Fig. 2 Structural diagram of V/v traction power supply system with renewable energy integrated

分给两相牵引供电臂机车负载来进行有功补偿, 如式(2)。

$$\left. \begin{aligned} I_{Cap} &= \frac{I_{La} + I_{Lb} - I_{pin}}{2} - I_{La} \\ I_{Cbp} &= \frac{I_{La} + I_{Lb} - I_{pin}}{2} - I_{Lb} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

按照图1(d)中的情况, 此时接入新能源电流小于两相牵引供电臂负载电流差值, 按照功率流向分析可以认为接入新能源电流全部流入a相牵引供电臂负载, 此时MRPC再进行两相牵引供电臂间的电流转移, 两相桥臂间转移有功电流值为 I_p , 其关系为:

$$\left. \begin{aligned} I_{Sap} &= I_{La} - I_{pin} - I_p \\ I_p &= \frac{I_{La} - I_{Lb} - I_{pin}}{2} \\ I_{Sbp} &= I_{Lb} + I_p \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

在牵引供电系统中MRPC可以对无功功率进行补偿, 因此可以得到无功功率关系为:

$$\left. \begin{aligned} I_{Caq} &= I_{Sa} \tan \theta_a = \frac{\sqrt{3}}{3} \frac{I_{La} + I_{Lb} - I_{pin}}{2} \\ I_{Cbq} &= I_{Sb} \tan \theta_b = -\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{I_{La} + I_{Lb} - I_{pin}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

式中: θ_a 、 θ_b 分别为两相牵引供电臂机车功率因数角, 在全补偿时 $\theta_a = \theta_b = 60^\circ$ 。

新能源接入高速铁路全补偿示意图如图3所示。

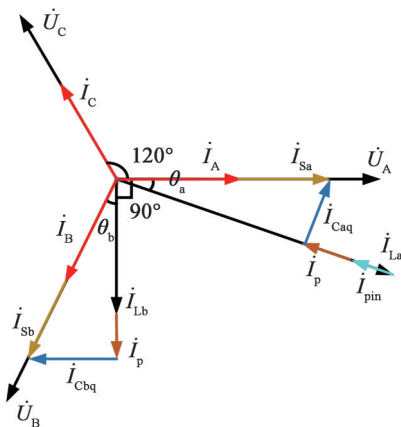


图3 机车全补偿相量图

Fig. 3 Phasor diagram of full compensation of locomotive

对于MRPC来说, 接入的新能源是随机的, 同时机车负载的功率是不可控的, 当新能源接入时, 注入

的新能源流向两相机车负载, 能够有效地缓解三相电网供能的压力, 随着注入新能源功率的增加, 新能源注入功率将超出系统功率容量限制, 影响MRPC的补偿特性。因此, 需要进一步对新能源接入高速铁路系统的运行工况进行分析。

2.2 机车运行工况分析

高速铁路行车间隔受中国列车控制系统(CTCS)的限制^[20], 不同速度等级的线路其最小行车间隔也不同, 一条线路上的机车数量由机车全周转时间来确定, 同时双线铁路是我国高速铁路的主要形式, 为了方便分析, 假设V/v变压器两侧可能有4、3、2、1、0列列车, 两侧一共有25种组合。

当新能源接入 $P_{in}=0$ 时, MRPC均可以对25种情况的机车组合进行全补偿, 假设单台机车的额定功率为 M , 可以计算各机车组合进行全补偿时的功率情况, 如表1所示。

表1 机车组合工况表

Table1 Locomotive combination conditions

(N_a, N_b)	a-arm		b-arm	
	P_{Ca}	Q_{Ca}	P_{Cb}	Q_{Cb}
(0,0)	$-P_{in}/2$	$-\sqrt{3} P_{in}/6$	$-P_{in}/2$	$\sqrt{3} P_{in}/6$
(0,1)	$(M-P_{in})/2$	$\sqrt{3} (M-P_{in})/6$	$(-M-P_{in})/2$	$-\sqrt{3} (M-P_{in})/6$
(0,2)	$(2M-P_{in})/2$	$\sqrt{3} (2M-P_{in})/6$	$(-2M-P_{in})/2$	$-\sqrt{3} (2M-P_{in})/6$
(0,3)	$(3M-P_{in})/2$	$\sqrt{3} (3M-P_{in})/6$	$(-3M-P_{in})/2$	$-\sqrt{3} (3M-P_{in})/6$
(0,4)	$(4M-P_{in})/2$	$\sqrt{3} (4M-P_{in})/6$	$(-4M-P_{in})/2$	$-\sqrt{3} (4M-P_{in})/6$
(1,0)	$(-M-P_{in})/2$	$\sqrt{3} (M-P_{in})/6$	$(M-P_{in})/2$	$-\sqrt{3} (M-P_{in})/6$
(1,1)	$-P_{in}/2$	$\sqrt{3} (2M-P_{in})/6$	$-P_{in}/2$	$-\sqrt{3} (2M-P_{in})/6$
(1,2)	$(M-P_{in})/2$	$\sqrt{3} (3M-P_{in})/6$	$(-M-P_{in})/2$	$-\sqrt{3} (3M-P_{in})/6$
(1,3)	$(2M-P_{in})/2$	$\sqrt{3} (4M-P_{in})/6$	$(-2M-P_{in})/2$	$-\sqrt{3} (4M-P_{in})/6$
(1,4)	$(3M-P_{in})/2$	$\sqrt{3} (5M-P_{in})/6$	$(-3M-P_{in})/2$	$-\sqrt{3} (5M-P_{in})/6$
(2,0)	$(-2M-P_{in})/2$	$\sqrt{3} (2M-P_{in})/6$	$(2M-P_{in})/2$	$-\sqrt{3} (2M-P_{in})/6$
(2,1)	$(-M-P_{in})/2$	$\sqrt{3} (3M-P_{in})/6$	$(M-P_{in})/2$	$-\sqrt{3} (3M-P_{in})/6$
(2,2)	$-P_{in}/2$	$\sqrt{3} (4M-P_{in})/6$	$-P_{in}/2$	$-\sqrt{3} (4M-P_{in})/6$
(2,3)	$(M-P_{in})/2$	$\sqrt{3} (5M-P_{in})/6$	$(-M-P_{in})/2$	$-\sqrt{3} (5M-P_{in})/6$
(2,4)	$(2M-P_{in})/2$	$\sqrt{3} (6M-P_{in})/6$	$(-2M-P_{in})/2$	$-\sqrt{3} (6M-P_{in})/6$
(3,0)	$(-3M-P_{in})/2$	$\sqrt{3} (3M-P_{in})/6$	$(3M-P_{in})/2$	$-\sqrt{3} (3M-P_{in})/6$
(3,1)	$(-2M-P_{in})/2$	$\sqrt{3} (4M-P_{in})/6$	$(2M-P_{in})/2$	$-\sqrt{3} (4M-P_{in})/6$
(3,2)	$(-M-P_{in})/2$	$\sqrt{3} (5M-P_{in})/6$	$(M-P_{in})/2$	$-\sqrt{3} (5M-P_{in})/6$
(3,3)	$-P_{in}/2$	$\sqrt{3} (6M-P_{in})/6$	$-P_{in}/2$	$-\sqrt{3} (6M-P_{in})/6$
(3,4)	$(M-P_{in})/2$	$\sqrt{3} (7M-P_{in})/6$	$(-M-P_{in})/2$	$-\sqrt{3} (7M-P_{in})/6$
(4,0)	$(-4M-P_{in})/2$	$\sqrt{3} (4M-P_{in})/6$	$(4M-P_{in})/2$	$-\sqrt{3} (4M-P_{in})/6$
(4,1)	$(-3M-P_{in})/2$	$\sqrt{3} (5M-P_{in})/6$	$(3M-P_{in})/2$	$-\sqrt{3} (5M-P_{in})/6$
(4,2)	$(-2M-P_{in})/2$	$\sqrt{3} (6M-P_{in})/6$	$(2M-P_{in})/2$	$-\sqrt{3} (6M-P_{in})/6$
(4,3)	$(-M-P_{in})/2$	$\sqrt{3} (7M-P_{in})/6$	$(M-P_{in})/2$	$-\sqrt{3} (7M-P_{in})/6$
(4,4)	$-P_{in}/2$	$\sqrt{3} (8M-P_{in})/6$	$-P_{in}/2$	$-\sqrt{3} (8M-P_{in})/6$

由表1可知, 当某一相牵引供电臂机车数为4, 另一相牵引供电臂机车数为0, 此时进行全补偿所需要的

功率容量最大, 为 $2.309M$ 。由于铁路功率调节器(RPC)功率容量有限, 其设计值通常按“最大不平衡工况下实现完全补偿所需功率的 1.2 倍”选取。在本文中, 若 MRPC 的功率容量设定为 $2.309M$, 接入新能源后, MRPC 将受到最大功率容量限制从而无法继续对全部机车负荷实施完全补偿。

考虑 MRPC 补偿容量的限制时, 在最大不平衡工况机车组合接入新能源无法进行全补偿, 但在其他机车组合工况时能否接入新能源或能接入多少新能源仍需进一步分析。不考虑 MRPC 补偿容量的限制, 接入新能源量为 P_{in} , 将其代入表 1 中可以计算不考虑 MRPC 补偿容量限制时各机车组合进行全补偿时的功率情况。

将表 1 中所有工况点功率绘制于坐标系中, 其中横坐标表示有功功率补偿量, 纵坐标表示无功功率补偿量, 可得到系统各机车组合工况功率坐标情况, 如图 4 所示。其中实线圆代表 MRPC 能够实现全补偿的最大补偿容量, 蓝色圆点代表 a 相牵引供电臂机车功率点, 浅红色星点代表 b 相牵引供电臂机车功率点。

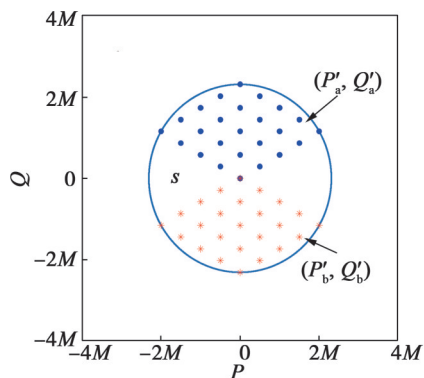


图 4 $P_{in}=0$ 时系统 25 种机车组合功率坐标

Fig. 4 Coordinates of 25 locomotive combinations in the system when $P_{in}=0$

当新能源接入为 P_{in} 时, 分别取 P_{in} 为 $2M$ 和 $4M$ (在该 25 种机车工况下, 考虑接入新能源量不超过 $4M$), 将其代入表 1 进行计算, 将计算出的所有的工况点功率绘制于坐标系中, 如图 5、图 6 所示, 其中虚线圆为新能源接

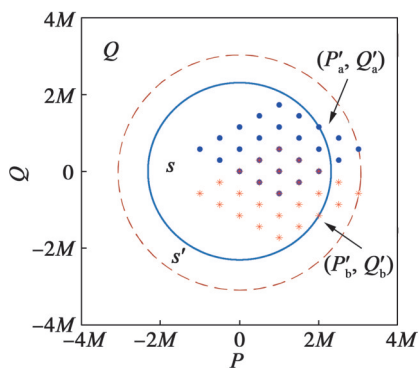


图 5 $P_{in}=2M$ 时系统 25 种机车组合功率坐标

Fig. 5 Coordinates of 25 locomotive combinations in the system when $P_{in}=2M$

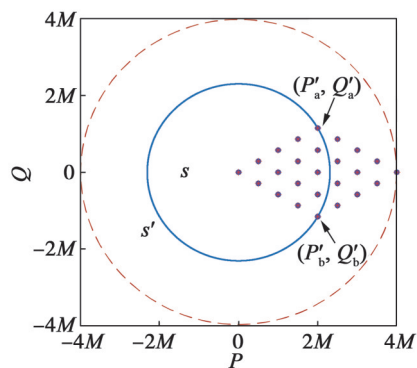


图 6 $P_{in}=4M$ 时系统 25 种机车组合功率坐标

Fig. 6 Coordinates of 25 locomotive combinations in the system when $P_{in}=4M$

入后不考虑容量限制进行全补偿的最大补偿容量。

通过对 25 种机车组合进行计算, 当无新能源接入时, 所有工况点均在蓝色实线圆内, 即均能够被全补偿。在新能源接入后, 随着新能源接入量的增加, 有功功率的转移量也随之增加, 对所有机车组合工况进行全补偿所需要的 MRPC 的补偿容量也越来越大。

在 MRPC 容量受限的前提下, 若仅通过持续扩大其额定容量来提升新能源接入比例, 势必显著增加设备成本; 反之, 若维持现有容量, 则负序电流将超标, 危及系统安全。为此, 本文提出一种面向容量约束的 MRPC 优化补偿策略, 以在既定容量内实现新能源的最大化接入与负序电流的有效抑制。

3 新能源接入下的优化补偿控制策略

为在既定容量约束下实现新能源最大化接入且负序电流最小化, 本文以新能源接入电流限制量 ΔI 以及三相负序电流 I_{-} 最小为优化目标, 以两相桥臂转移有功电流 I_p 、两相牵引供电臂机车功率因数角 θ_a 、 θ_b 以及电网三相电流不平衡度 ξ 为决策变量, 在功率因数、容量限制等约束条件下建立 MRPC 的多目标优化问题。

3.1 确定目标函数与约束条件

一个完整的多目标优化问题由目标函数和约束条件构成。本文将首先对模型的优化目标进行数学定义, 然后详细阐述模型在运行中必须遵守的各项物理及电气约束。

3.1.1 目标函数

根据 V/v 变压器特性以及补偿原理, 可计算一次侧三相电流, 其中 I_{La} 和 I_{Lb} 为两相牵引供电臂负载电流, $\dot{I}_A$ 、 $\dot{I}_B$ 、 $\dot{I}_C$ 为变压器一次侧三相电流, I_{pin} 为新能源接入有功电流, ΔI 为限制新能源接入电流量, I_p 为两相桥臂转移有功电流, k 为 V/v 变压器的变比 (计算时取 $k=1$)。电网三相电流数学表达式可表示为:

$$\left. \begin{aligned} k\dot{I}_A &= I_{La} \cdot e^{-\frac{\pi}{6}j} - (I_p + I_{pin} - \Delta I) \cdot e^{-\frac{\pi}{6}j} + I_{Caq} \cdot e^{\frac{\pi}{3}j} \\ k\dot{I}_B &= I_{Lb} \cdot e^{-\frac{\pi}{2}j} + I_p \cdot e^{-\frac{\pi}{2}j} + I_{Cbq} \cdot e^{-\frac{\pi}{2}j} \\ k\dot{I}_C &= -(I_A + I_B) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由式(3)、式(4)可知, 无功电流补偿可以表示为:

$$\left. \begin{aligned} I_{Caq} &= (I_{La} - I_p - I_{pin} + \Delta I) \tan \theta_a \\ I_{Cbq} &= (I_{Lb} + I_p) \tan \theta_b \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

新能源接入有功电流 I_{pin} 是从直流侧转移至交流侧的等效电流, 可以由下式计算:

$$I_{pin} = \frac{P_{in}}{\sqrt{2} U_{AB}} \quad (7)$$

其中 U_{AB} 为三相电网额定线电压。通过式(5)可以计算负序电流 I_- 与正序电流 I_+ 如式(8)所示, 其中 $\alpha = e^{j120^\circ}$ 。

$$\left. \begin{aligned} I_- &= \frac{(\dot{I}_A + \alpha^2 \dot{I}_B + \alpha \dot{I}_C)}{3} \\ I_+ &= \frac{(\dot{I}_A + \alpha \dot{I}_B + \alpha^2 \dot{I}_C)}{3} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

电网三相电流不平衡度是评估电流均衡性的重要参数之一, 三相电流不平衡度过高会导致电力系统中出现各种问题, 如变压器过热、谐波污染等, 因此, 在工程上尽可能控制电网三相电流不平衡度小于5%是比较理想的。由式(8)可以计算电网三相电流不平衡度 ξ , 结果如下:

$$\xi = \frac{|I_-|}{|I_+|} = \frac{\left| \frac{1}{3} (\dot{I}_A + \alpha^2 \dot{I}_B + \alpha \dot{I}_C) \right|}{\left| \frac{1}{3} (\dot{I}_A + \alpha \dot{I}_B + \alpha^2 \dot{I}_C) \right|} \times 100\% \quad (9)$$

联立式(5)~式(9)可以求解得到目标函数新能源接入电流限制量 ΔI 以及三相负序电流 I_- 为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta I &= f_1(I_p, \theta_a, \theta_b, \xi) \\ I_- &= f_2(I_p, \theta_a, \theta_b, \xi) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

3.1.2 约束条件

1) 功率因数

根据GB/T 15543—2008关于功率因数的要求, 变压器一次侧三相功率因数需要达到0.9以上, 故计算时功率因数取 $A_{PF} = 0.9$ 。MRPC的功率因数 A_{PF} 可由下式计算:

$$A_{PF} = \frac{\sum_{i=A,B,C} P_i}{\sum_{i=A,B,C} S_i} \quad (11)$$

变压器一次侧负序电流的视在功率之和为零, 即变压器一次侧三相功率因数取决于正序电流大小^[21]。求取变压器一次侧正序电流有功和无功分量值即可求得功率因数表达式, 具体为

$$\left. \begin{aligned} (I_{La} - I_p - I_{pin} - \Delta I) \tan \theta_a - (I_{Lb} + I_p) \tan \theta_b &\leq \\ \frac{\sqrt{1 - A_{PF}^2}}{A_{PF}} \times (I_{La} + I_{Lb} - I_{pin} + \Delta I) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

2) 三相电压不平衡度

根据GB/T 15543—2008关于三相电压不平衡度的要求, 系统电压不平衡度需要小于2%, 在公共连接点处, 负序电压不平衡度指标取值为1.2%, 其中 S_k 为公共点三相短路容量, 可表示如下:

$$\varepsilon_u = \frac{\sqrt{3} U_{AB} I_-}{S_k} \times 100\% \leq 1.2\% \quad (13)$$

3) MRPC容量限制

为了检测优化补偿策略的效果, 同时考虑机车负载突变情况, 设定MRPC容量为未接入新能源时最大不平衡机车组合工况全补偿时所需要功率 S_{max} 的1.2倍, 见式(12)。

$$\left. \begin{aligned} (U_{AB} (I_{La} - I_p - I_{pin} + \Delta I) \tan \theta_a)^2 + \\ (U_{AB} (I_p + I_{pin} - \Delta I))^2 &\leq 1.414 S_{max}^2 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

3.2 MRPC优化补偿数学模型

通过以上分析, 结合目标函数与约束条件, 可以得到MRPC优化补偿数学模型为:

$$\left. \begin{aligned} \Delta I &= \min f_1(I_p, \theta_a, \theta_b, \xi) \\ I_- &= \min f_2(I_p, \theta_a, \theta_b, \xi) \\ \text{s.t. } (I_{La} - I_p - I_{pin} - \Delta I) \tan \theta_a - (I_{Lb} + I_p) \tan \theta_b &\leq \\ \frac{\sqrt{1 - A_{PF}^2}}{A_{PF}} \times (I_{La} + I_{Lb} - I_{pin} + \Delta I) & \\ \frac{\sqrt{3} U_{AB} I_-}{S_k} \times 100\% &\leq 1.2\% \\ (U_{AB} (I_{La} - I_p - I_{pin} + \Delta I) \tan \theta_a)^2 + \\ (U_{AB} (I_p + I_{pin} - \Delta I))^2 &\leq 1.414 S_{max}^2 \\ 0 < I_p &\leq \frac{I_{La} - I_{Lb}}{2} \\ 0 < \theta_a &\leq \frac{\pi}{6} \\ 0 < \theta_b &\leq \frac{\pi}{6} \\ 0 &\leq \xi \leq 0.05 \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

由优化补偿数学模型可知, 该模型是一个较为复杂的非线性多目标约束问题, 本文考虑采用多目标遗传算法NSGA-II进行求解。

3.3 多目标遗传算法NSGA-II

NSGA-II是一种常用于计算多目标问题的遗传算法, NSGA-II算法使用非支配排序和拥挤距离计算等技术来处理多目标问题, 能够有效地适应复杂问题, 避免落入局部最优解。同时, NSGA-II算法具有较高的收敛性和稳定性, 易于实现和扩展, 比其他算法更具有优势。

该算法首先随机生成一个种群 P ，并计算每个个体的适应度值；然后对种群进行非支配排序，并计算每个个体的拥挤度。接着根据非支配排序和拥挤度选择最优的 N 个个体进行交叉和变异操作，生成新的种群；最后判断是否达到终止条件，如未达到则将新种群作为原种群继续进行下一轮迭代，否则算法结束。NSGA-II 算法能够在多目标优化问题中生成一组非支配解，这组解代表了问题的最优解集合^[21]。NSGA-II 算法主要参数见表2，具体实现流程如图7所示。

表2 NSGA-II算法主要参数

Table 2 Main parameters of NSGA-II algorithm

参数	数值
初始化种群数量	50
最大迭代次数	300
交叉比例	0.8
变异概率	0.05

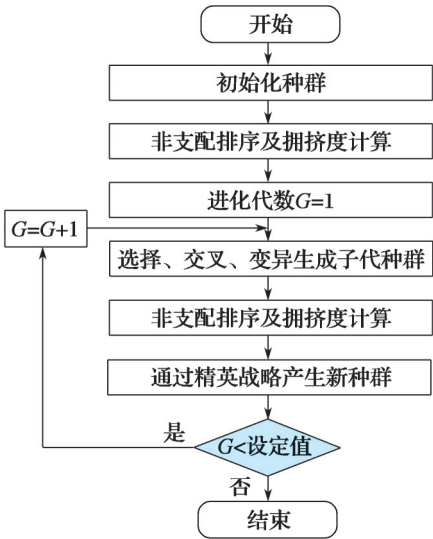


图7 NSGA-II算法求解优化模型流程图

Fig. 7 Flowchart of NSGA-II algorithm solving optimization model

4 仿真及试验验证

为了验证新能源接入优化补偿控制策略的有效性和可靠性，在MATLAB/Simulink中搭建MRPC系统模型。搭建三相400 V模拟牵引供电系统，牵引网电压400 V，MMC上下桥臂采用2个H桥级联，直流侧电压800 V，单个机车的功率为25 kW，并在远宽半实物仿真平台上搭建案例系统的试验模型，具体仿真和试验参数的选取如表3所示。

1) 工况1

假设a相牵引供电臂机车负载数为4，b相牵引供电臂机车负载数为0，此时为最大不平衡机车组合工况，设定在1 s时接入50 kW新能源，MRPC功率容量为最大不平衡工况全补偿所需功率的1.2倍，将MRPC

表3 仿真参数

Table 3 Simulation parameters

参数	数值
三相电网电压/频率	400 V/50 Hz
V/v变压器变比	1
各桥臂子模块数	4
直流侧额定电压值	800 V
子模块电容值	2.7 mF
桥臂电感值	3 mH
网侧电感值	2 mH
单个机车负载功率	25 kW
三相短路容量	0.1 MVA

系统参数代入目标函数及约束条件中，通过NSGA-II进行计算可以得到最优解如图8所示，其中NSGA-II计算出的一系列最优解称为帕累托前沿(Pareto front)。图8中的所有解均是在满足电能质量要求的前提下对MRPC进行控制以使其工作在设定容量内的最优解。

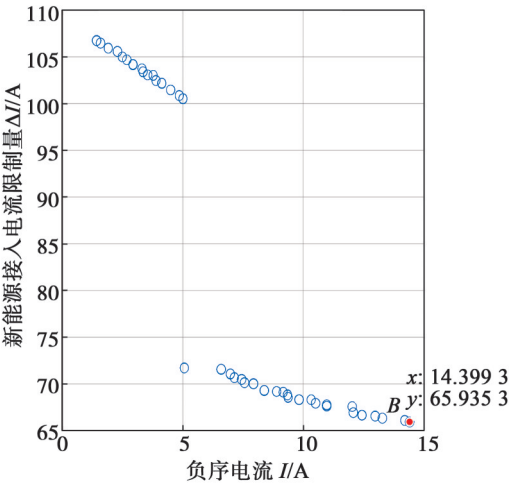


图8 工况1最优解

Fig. 8 Optimal solution for simulation condition 1

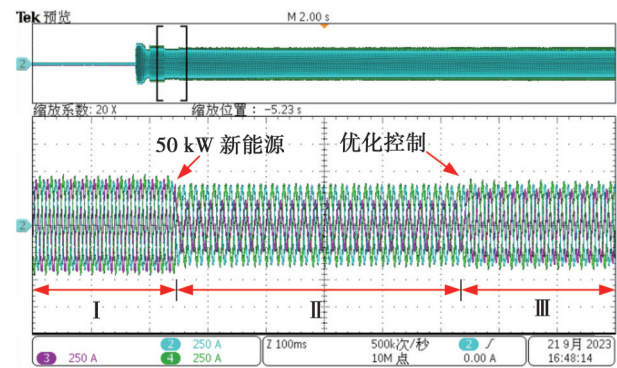
为了考察在较大新能源接入时优化算法对负序电流的补偿能力，可以使MRPC工作在负序电流 I_- 最大、新能源接入电流限制量 ΔI 最小的点，该点在图8中标注为B点。此时从NSGA-II中读得的优化参数 I_p 、 θ_a 、 θ_b 和 ζ 如表4所示。试验时三相电流幅值缩小到1/25倍，负序电流幅值缩小到1/6倍，结果如图9所示。

表4 工况1优化参数

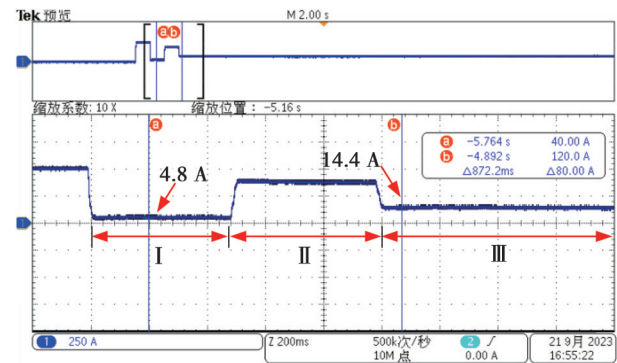
Table 4 Optimization parameters for simulation condition 1

参数项目	I_p/A	θ_a/rad	θ_b/rad	ζ	I_-/A	$\Delta I/A$
参数值	94.542	0.312 3	0.504 6	0.04	14.399 3	65.935 3

从图9可以看到，开始时MRPC没有开始工作，进入I时段时MRPC开始工作并进行全补偿，图9(a)为MRPC全补偿时三相电流波形，负序电流减小至4.8 A，1 s时接入50 kW新能源，此时补偿容量超出MRPC设定最大容量，三相电流波形变差，负序电流剧增，随



(a) 三相电流波形



(b) 负序电流波形

图9 工况1波形图

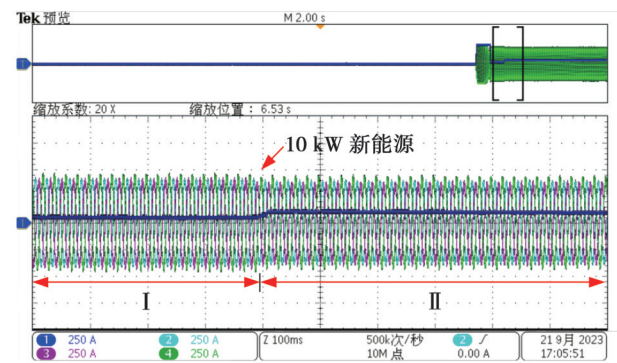
Fig. 9 Waveform diagram of simulation condition 1

即进行优化控制, 将B点参数 d 代入系统中, 经过限制后三相电流波形明显改善, 负序电流降至14.4 A, 相比采用优化补偿前降低了23.1 A, 接近优化算法计算结果, 在满足电能质量的要求下尽可能多地接入新能源, 证明该算法具有良好的优化补偿效果。

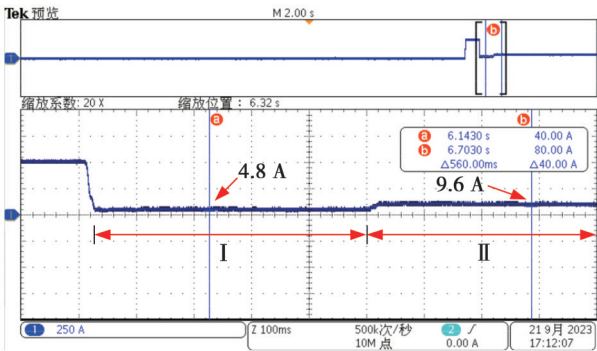
2) 工况2

假设a相牵引供电臂机车负载数为4, b相牵引供电臂机车负载数为0, 1 s时接入10 kW新能源, 将上述各参数代入优化算法进行计算, 可以得到工况2优化参数如表5所示, 结果如图10所示。

从图10可以看到, 系统在I时段运行过程与工况1相同, 1 s时接入10 kW新能源并将工况2优化参数代入系统中, 负序电流由4.8 A增至9.6 A。由此可知, 当新能源接入较小时, 在满足电能质量要求的情况下,



(a) 三相电流波形



(b) 负序电流波形

图10 工况2波形图

Fig. 10 Waveform diagram of simulation condition 2

表5 工况2优化参数

Table 5 Optimization parameters for simulation condition 2

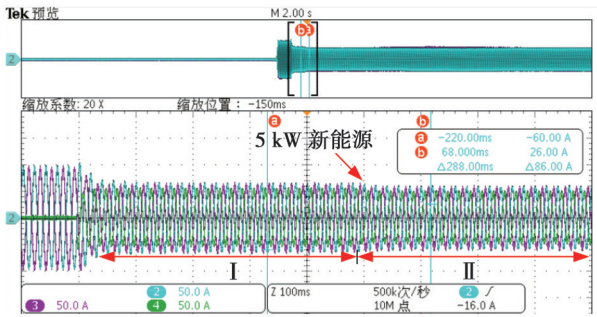
参数项目	I_p/A	θ_d/rad	θ_v/rad	ζ	I/A	$\Delta I/A$
参数值	110.54	0.532 3	0.524 6	0.001	9.023 1	0.021 3

可以通过减小补偿量使新能源全部接入。

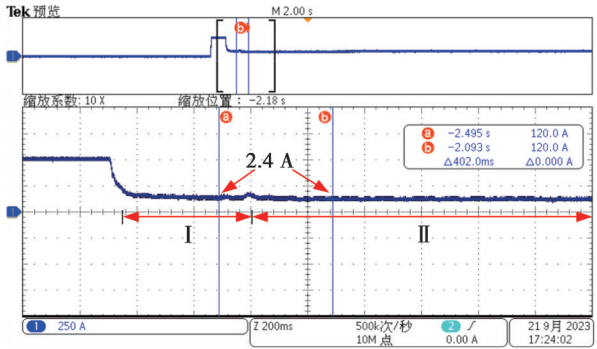
3) 工况3

假设a相牵引供电臂机车负载数为2, b相牵引供电臂机车负载数为0, 1 s时接入5 kW新能源, 将上述各参数代入优化算法进行计算, 可以得到工况3优化参数如表6所示, 结果如图11所示。

由图11可知, 系统在I时段的运行过程与前两个工况相同, 在1 s时接入5 kW新能源并将工况3优化参数代入系统。可以看到, 三相电流幅值变小, 产生的负序电流大小几乎不变, 可知此时MRPC仍以全补偿



(a) 三相电流波形



(b) 负序电流波形

图11 仿真工况3波形图

Fig. 11 Waveform diagram of simulation condition 3

进行工作，证明了工况分析的正确性。

表6 工况3优化参数

Table 6 Optimization parameters for simulation condition 3

参数项目	I_p/A	θ_a/rad	θ_b/rad	ζ	I/A	$\Delta I/A$
参数值	124.18	0.572 3	0.567 5	0	2.153 1	0.021 3

5 结束语

本文针对MRPC容量限制而引发的功率补偿能力与新能源消纳需求之间的矛盾问题进行了系统研究。为此，提出了一种优化补偿控制策略，在满足电能质量标准的前提下，实现新能源接入量的最大化与系统负序电流的最小化。首先，分析了新能源接入后系统复杂的功率流动情况与MRPC全补偿原理，然后建立了以两相桥臂转移有功电流、两相牵引供电臂机车功率因数角及电网电流不平衡度为决策变量，以新能源接入电流限制量和三相负序电流为优化目标的多目标优化数学模型，并采用NSGA- II对该非线性约束问题进行求解。仿真与半实物试验结果验证了该策略的有效性：即使在接入50 kW新能源的最大不平衡工况下，本策略仍能将负序电流有效抑制在14.4 A，较优化前降低了23.1 A。本文聚焦于MRPC固定容量对新能源接入量的制约，通过将问题从传统的“全补偿”框架转化为“优化补偿”，更全面地揭示了工程中多个优化目标之间的权衡关系，为解决新能源接入与电能质量改善的协调控制问题提供了新的思路。

参考文献：

[1] 文劲宇,周博,魏利岫.中国未来电力系统储电网初探[J].电力系统保护与控制,2022,50(7):1-10.
WEN Jinyu, ZHOU Bo, WEI Lishen. Preliminary study on an energy storage grid for future power system in China[J]. Power system protection and control, 2022, 50(7): 1-10.

[2] 周希唯,段沛一.国际能源署发布《2022年世界能源投资报告》[J].世界石油工业,2022,29(4):77.
ZHOU Xiwei, DUAN Peiyi. The international energy agency releases the 2022 world energy investment report[J]. World petroleum industry, 2022, 29(4): 77.

[3] 熊嘉阳,沈志云.中国高速铁路的崛起和今后的发展[J].交通运输工程学报,2021,21(5):6-29.
XIONG Jiayang, SHEN Zhiyun. Rise and future development of Chinese high-speed railway[J]. Journal of traffic and transportation engineering, 2021, 21(5): 6-29.

[4] 谢毅,肖杰.高速铁路发展现状及趋势研究[J].高速铁路技术,2021,12(2):23-26.
XIE Yi, XIAO Jie. Research on high-speed railway development status and trend[J]. High speed railway technology, 2021, 12(2): 23-26.

[5] 李琼林,刘书铭,余晓鹏,等.300 km/h系列高速客运专线对电网电能质量的影响研究[J].电力系统保护与控制,

2011, 39(22): 78-82.

LI Qionglin, LIU Shuming, YU Xiaopeng, et al. Study on the impact of the 300 km/h series high-speed special railway on the grid power quality[J]. Power system protection and control, 2011, 39(22): 78-82.

[6] 周晓华,张银,刘胜永,等.静止无功补偿器新型自适应动态规划电压控制[J].电力系统保护与控制,2018,46(12):77-84.
ZHOU Xiaohua, ZHANG Yin, LIU Shengyong, et al. Voltage control of static var compensator based on novel adaptive dynamic programming[J]. Power system protection and control, 2018, 46(12): 77-84.

[7] 王雪,高云广,吝伶俐,等.有源电力滤波器的研究现状与展望[J].电力系统保护与控制,2019,47(1):177-186.
WANG Xue, GAO Yunguang, LIN Lingyan, et al. Research status and prospect of active power filter[J]. Power system protection and control, 2019, 47(1): 177-186.

[8] 孟金岭,肖勇,王文,等.适用于高速电气化铁路的低成本电能质量综合补偿装置[J].电力系统保护与控制,2013,41(14):73-80.
MENG Jinling, XIAO Yong, WANG Wen, et al. A low cost power quality compensation scheme for high-speed electric railway[J]. Power system protection and control, 2013, 41(14): 73-80.

[9] 陈柏超,张晨萌,袁傲,等.基于V/V牵引供电系统的混合式电能质量补偿研究[J].电工技术学报,2013,28(12):60-69.
CHEN Baichao, ZHANG Chenmeng, YUAN Ao, et al. Research on a hybrid compensation system for V/V high-speed railway power supply system[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2013, 28(12): 60-69.

[10] 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.

[11] GÓMEZ-EXPÓSITO A, MAURICIO J M, MAZA-ORTEGA J M. VSC-based MVDC railway electrification system[J]. IEEE transactions on power delivery, 2014, 29(1): 422-431.

[12] YANG Xiaowei, HU Haitao, GE Yinbo, et al. An improved droop control strategy for VSC-based MVDC traction power supply system[J]. IEEE transactions on industry applications, 2018, 54(5): 5173-5186.

[13] 葛银波,胡海涛,杨孝伟,等.模块化多电平变流器型中压直流牵引供电系统控制方法研究[J].电工技术学报,2018,33(16):3792-3801.
GE Yinbo, HU Haitao, YANG Xiaowei, et al. Research on control strategy of modular multilevel converter based medium-voltage direct current traction power supply system [J]. Transactions of China electrotechnical society, 2018, 33(16): 3792-3801.

[14] MA Fujun, WANG Xin, DENG Lingfeng, et al. Multiport railway power conditioner and its management control strat-

- egy with renewable energy access[J]. IEEE journal of emerging and selected topics in power electronics, 2020, 8(2): 1405-1418.
- [15] 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): 4374-4390.
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): 4374-4390.
- [16] ZHANG Dinghua, ZHANG Zhixue, WANG Weian, 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.
- [17] DENG Wenli, DAI Chaohua. A multifunctional energy storage system with fault-tolerance and its hierarchical optimization control in AC-fed railways[J]. IEEE transactions on power delivery, 2022, 37(4): 2440-2452.
- [18] TANG Sida, HUANG Xiaohong, LI Qunzhan, et al. Optimal sizing and energy management of hybrid energy storage system for high-speed railway traction substation[J]. Journal of electrical engineering & technology, 2021, 16(3): 1743-1754.
- [19] 邓文丽, 戴朝华, 陈维荣. 光伏接入牵引供电系统的多元制约因素初探[J]. 太阳能学报, 2020, 41(8): 192-203.
DENG Wenli, DAI Zhaohua, CHEN Weirong. Preliminary research of multiple constriction for PV access traction power supply system[J]. Acta energiae solaris sinica, 2020, 41(8): 192-203.
- [20] 税爽, 郭进. 高铁CTCS-3级列车运行控制系统轨道电路建模与仿真[J]. 交通运输工程与信息学报, 2013(4): 110-116.
SHUI Shuang, GUO Jin. Track circuit's modeling and simulation of China CTCS-3 train operation control system[J]. Journal of transportation engineering and information, 2013(4): 110-116.
- [21] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE transactions on evolutionary computation, 2002, 6(2): 182-197.

Multi-objective optimization compensation strategy for integrating renewable energy into high-speed railway traction power supply systems

LI Guojian¹, XU Jin¹, WU Xuegang¹, QIU Yong², YANG Wenpo², LI Xinyu³

(1. Inner Mongolia Chahar New Energy Co., Ltd., Ulanqab, Inner Mongolia 012000, China;

2. XYZ Storage Energy Development (Beijing) Co., Ltd., Beijing 102400, China;

3. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: With the large-scale integration of renewable energy into power systems, high-speed railway traction power supply systems face increasing challenges, including three-phase current imbalance, higher negative-sequence current, and deterioration of power quality. To address the conflict between the limited capacity of the multi-port railway power conditioner (MRPC) in traditional full compensation mode and the simultaneous demand for integrating renewable energy and power quality improvement, this paper proposes an optimization compensation control strategy for integrating renewable energy. First, this study analyzed the power flow characteristics of the V/v traction power supply system with renewable energy integrated, along with the full compensation principle of MRPC. The influence of MRPC capacity constraints on the absorptive capacity of renewable energy under different locomotive operation combination conditions was determined. Building on this analysis, an optimization compensation mathematical model was developed with two objectives: current limit for integrating the renewable energy (DI) and the three-phase negative-sequence current (I). The model included key decision-making variables such as active current transfer between two-phase bridge arms, the locomotive power factor angle of the two-phase traction supply arms, and the three-phase current imbalance. The model was solved using the multi-objective genetic algorithm NSGA-II, and the effectiveness of the proposed strategy was validated through hardware-in-the-loop experiments. Results show that even under the most imbalanced condition with 50 kW of renewable energy integrated, the negative-sequence current can be reduced from 37.5 A to 14.4 A, significantly improving system stability and power quality. Compared to the traditional full compensation approach, the proposed optimization method not only facilitates greater absorption of renewable energy but also ensures safe and reliable system operation within the constraints of limited MRPC capacity. This study innovatively transformed the paradigm from "full compensation" to "optimization compensation", revealing the trade-off between renewable energy integration and power quality enhancement, while providing a feasible solution for the absorption of renewable energy and coordinated operation of electrified railway power supply systems.

Keywords: multi-port railway power conditioner (MRPC); renewable energy integration; negative-sequence current suppression; multi-objective optimization; NSGA-II; power quality; high-speed railway