

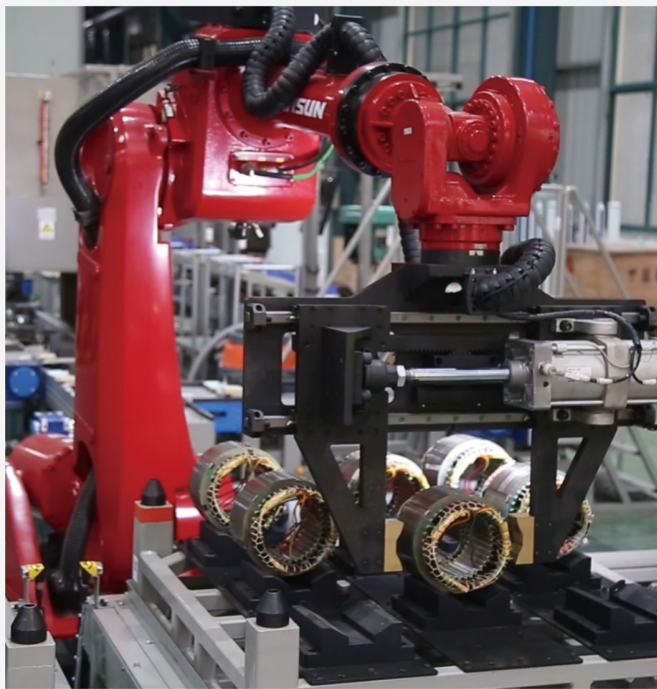
本文全文线上首发由
上海电器科学研究所
(集团) 有限公司
支持

卜健怡, 张长征.
基于81电平铁路功率调节器的不平衡
补偿策略.
电机与控制应用, 2022, 49(2): 97.



中国智能制造系统解决方案供应商联盟 (成员)
上海智能制造系统解决方案供应商 (首批)

电机·智能制造



咨询服务

规划设计

设计制造

信息化系统

项目实施



扫码联系
我们

联系人: 黄先锋 手机: 13501892388
上海电器科学研究所 (集团) 有限公司
上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司
上海市武宁路505号9号楼6层

基于 81 电平铁路功率调节器的不平衡补偿策略^{*}

卜健怡, 张长征

(湖北工业大学 太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070)

摘要: 为进一步降低铁路功率调节器在大功率补偿过程的开关频率, 采用开关频率较低的混合级联 81 电平变换器作为电压源、开关频率较高的单相全桥变换器作为电流源, 将两个电压源背靠背连接, 提出一种 81 电平铁路功率调节器。由于系统中承担 85% 的补偿功率的开关器件的开关频率在 250 Hz 及以下, 开关频率高的电流源仅承担 1% 的功率, 因此系统开关损耗小且对补偿电流参考信号的跟踪性能好。研究了系统的基本结构及其等效电路, 通过构建等效对称三相电压源建立等效三相电路, 采用有功功率平均分配法, 使得补偿后的系统等效为 Y-Y 型对称三相电路, 从而实现不平衡电流补偿, 并提出一种新的补偿电流检测方法。仿真结果证明所提系统及其补偿方法的有效性和可行性。

关键词: 铁路; 铁路功率调节器; 多电平; 不平衡补偿

中图分类号: U223; TM922 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2022)02-0097-07

doi: 10.12177/emca.2021.171

Imbalance Compensation Strategy of 81-Level Railway Power Conditioner^{*}

BU Jianyi, ZHANG Changzheng

(Hubei Key Laboratory for High-Efficiency Utilization of Solar Energy and Operation Control of Energy Storage System, Hubei University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: In order to reduce the switching frequency of railway power conditioner in the process of high power compensation, a hybrid cascade 81-level converter with low switching frequency is used as the voltage source and a single-phase H bridge converter with high switching frequency is used as the current source. The two voltage sources are connected back-to-back, and an 81-level railway power conditioner is proposed. Since the switching frequency of the switching devices that bear 85% of the compensation power in the system is 250 Hz and below, and the current sources with high switching frequency only bear 1% of the power, the system has small switching loss and good tracking performance for the compensation current reference signal. The basic structure of the system and its equivalent circuit is studied, the equivalent three-phase circuit is established by constructing the equivalent symmetrical three-phase voltage source, the active power average distribution method is used to make the system equivalent to Y-Y symmetrical three-phase circuit, so that the imbalance compensation is realized, and a new compensation current detection method is put forward. Simulation results show the effectiveness and feasibility of the proposed system and its compensation method.

Key words: railway; railway power conditioner; multi-level; imbalance compensation

收稿日期: 2021-10-27; 收到修改稿日期: 2021-12-24

^{*} 基金项目: 湖北省技术创新专项重大项目(2019AAA018)

作者简介: 卜健怡(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为铁路电能质量治理。

张长征(1978—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电能质量治理与新能源发电。

0 引言

铁路牵引供电系统将三相电转换为两相电向电力机车供电,是一种不对称三相电路,这导致铁路牵引供电系统中存在不平衡电流问题^[1]。不平衡电流不但影响电力系统继电保护的正常工作,而且导致相邻的发电机产生振动等危害^[2-3]。

为了消除不平衡电流,文献[4-5]从同相供电的观点出发,提出了两电平、多电平等不同结构的同相供电装置,但较高的成本限制其推广应用。日本学者 Uzuka 等提出一种电压波动补偿装置^[6],即铁路功率调节器(RPC),可以解决不平衡电流问题^[7],但其补偿功率小^[8]。模块化多电平结构具有开关频率低、适用于高压大功率场合的优点,有学者将两个单相模块化多电平变流器背靠背连接,提出一种多电平 RPC,但其存在环流抑制问题^[8-9]。

考虑到采用多电平可以降低电压源变换器的开关频率,适用于高压大容量有源补偿场合,文献[10]提出一种 27 电平铁路同相供电系统,可以有效消除不平衡电流,但其电流源交流侧电压较高。为降低电流源交流侧电压,有学者提出一种以 81 电平混合级联变换器为基础的铁路单相电能质量调节器,但其无法消除不平衡电流^[11]。以 81 电平混合级联变换器为基础的 RPC 研究较少。

结合串联电压源和电流源拓扑结构的优点,本文将两个 81 电平混合级联变换器背靠背连接,提出一种基于串联电压源和电流源结构的 81 电平 RPC。考虑到我国牵引变电所主要采用三相 V/v 牵引变压器,本文以此为研究背景,首先对 81 电平 RPC 的系统结构进行分析。接着通过构造等效对称三相电压源,建立系统的三相三线制等效电路,进而分析负载的不对称性及铁路牵引供电系统产生不平衡电流的原因,并通过有功转移将负载有功功率重新平均分配,使补偿后的负载等效为对称三相负载,从而实现不平衡电流补偿。然后结合不平衡电流补偿原理提出对应的补偿电流计算方法并对系统控制方法进行分析。最后搭建仿真模型验证本文所提补偿装置及其补偿方法的有效性和可行性。

1 系统结构

81 电平 RPC 的结构及其在铁路牵引变电所的接入方式如图 1 所示,该变电所采用三相 V/v 牵引变压器作为主变压器,一次侧接入三相电压 u_A 、 u_B 和 u_C ,二次侧通过馈线接入供电臂。主变压器等效为两个单相变压器^[1-2],110 kV 三相电接入主变压器的一次侧, i_A 、 i_B 和 i_C 分别是流入一次侧的 A、B、C 相电流,其中左侧的单相变压器将一次侧 A、C 相 110 kV 线电压 $u_A - u_C$ 变换为二次侧 27.5 kV 的单相电 u_a ,右侧的单相变压器将一次侧 B、C 相 110 kV 线电压 $u_B - u_C$ 变换为二次侧 27.5 kV 的单相电 u_b ,即:

$$\begin{cases} u_a = \frac{1}{k}(u_A - u_C) \\ u_b = \frac{1}{k}(u_B - u_C) \end{cases} \quad (1)$$

式中: k 为牵引变压器的变比, $k=110/27.5$ 。

图 1 中符号定义如下:左侧供电臂为 a 臂,右侧供电臂为 b 臂; u_a 、 u_b 和 i_a 、 i_b 是牵引变压器二次侧输出到 a、b 臂的电压和电流, i_c 是回流到主变压器的 a、b 相供电臂电流之和。 i_{aL} 、 i_{bL} 是 a、b 臂的负荷电流, i_{ca} 、 i_{cb} 是 RPC 输出到 a、b 臂的补偿电流, u_{dc} 是电压源直流侧电压。

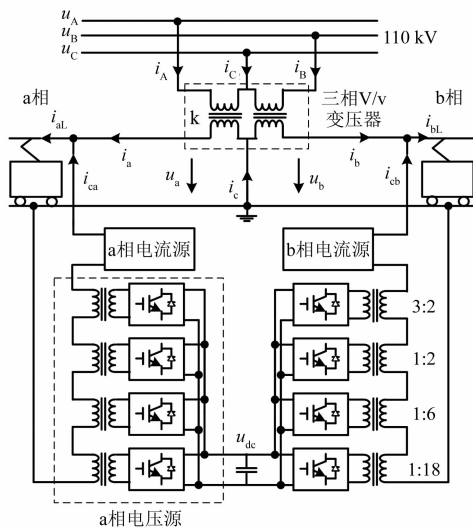


图 1 新型 RPC 结构图

新型 RPC 包括 a、b 相电压源和 a、b 相电流源。电压源采用混合级联 81 电平变换器,包括 4 个单相全桥变换器和 4 个单相变压器,变比分别

为 3:2、1:2、1:6、1:18。a、b 相电压源输出 81 电平电压,该电压与主变压器的二次侧电压具有相同的相位和频率。同时 81 电平电压的基波有效值接近 27.5 kV,而电流源交流侧电压为主变压器的二次侧电压与 81 电平电压的差值,因此电流源交流侧电压较小。图 2 是初相为 0 的 81 电平电压 $f_0(t)$ 的波形, t_i 是各电平的输出时刻, T 是周期。

由文献[11]可知变比为 1:18 的变压器承担 80% 补偿功率, 连接该变压器的单相全桥变换器的开关频率为 50 Hz, 变比为 1:6 的变压器承担 16% 补偿功率, 连接该变压器的单相全桥变换器的开关频率为 250 Hz, 假设系统补偿功率为 10 MW, 开关频率为 50 Hz 的单相全桥变换器将承担 8 MW 的补偿功率, 故 96% 的补偿功率由低频开关器件承担。

电流源采用单相全桥变换器,通过跟踪补偿电流参考信号实现不平衡电流补偿,由于电流源交流侧电压较低,允许其运行在较高的开关频率,使得电流源有着较好的跟踪性能。

u_{dc} 与 81 电平基波有效值 U 的关系为

$$u_{\text{dc}} = \frac{\sqrt{2}}{27}U \quad (2)$$

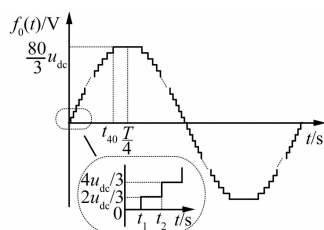
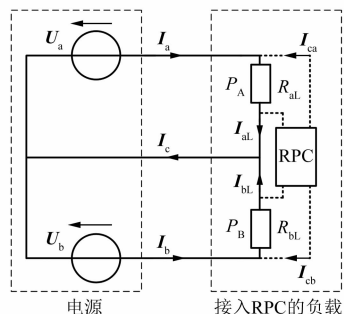


图 2 81 电平电压

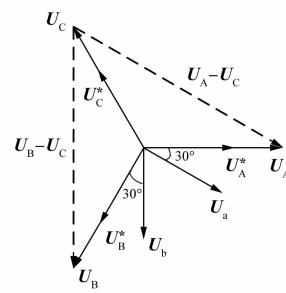
2 不平衡电流补偿机理

为分析新型 RPC 的不平衡电流补偿机理,忽略谐波和线路阻抗,在三相 V/v 牵引变压器的二次侧建立系统的基波等效电路和相量图,如图 3 所示。

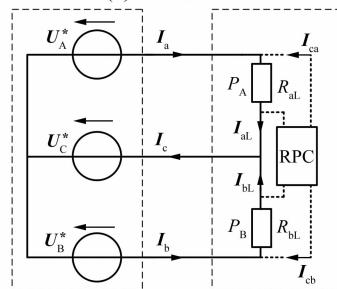
图 3(a) 是系统的基波等效电路, U_a 、 U_b 、 I_a 、 I_b 、 I_c 、 I_{aL} 、 I_{bL} 是 u_a 、 u_b 、 i_a 、 i_b 、 i_c 、 i_{aL} 、 i_{bL} 的相量表达式。考虑到交直交型电力机车的功率因数接近 1, 忽略电力机车的无功功率^[12-13], 令 R_{aL} 、 R_{bL} 分别是 a、b 臂电力机车的等效电阻, P_A 、 P_B 分别是 a、b 臂电力机车的额定有功功率。 I_{ca} 、 I_{cb} 是补偿电流 i_{ca} 、 i_{cb} 的相量表达式。



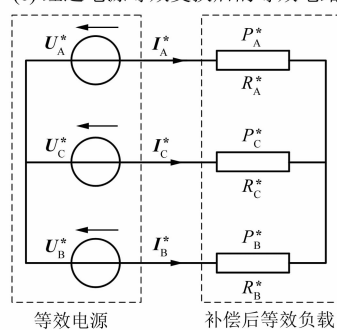
(a) 牵引供电系统基波等效电路



(b) 电压相量图



等效电源 接入RPC的负载



(d) 经过补偿后的等效对称Y-Y型三相纯电阻电路

图 3 等效电路和相量图

令 U_A 、 U_B 、 U_C 是 u_A 、 u_B 、 u_C 的相量表达式, 结合式(1)得:

$$\begin{cases} U_a = \frac{1}{k}U_A - \frac{1}{k}U_C \\ U_b = \frac{1}{k}U_B - \frac{1}{k}U_C \end{cases} \quad (3)$$

令:

$$\begin{cases} U_A^* = \frac{1}{k} U_A \\ U_B^* = \frac{1}{k} U_B \\ U_C^* = \frac{1}{k} U_C \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可得 U_A^* 、 U_B^* 、 U_C^* 和 U_A 、 U_B 、 U_C 相位一致,以 U_A 、 U_B 、 U_C 作为参考方向,结合式(3)和式(4)得相关的电压相量图如图 3(b)所示。

将式(4)代入式(3)得:

$$\begin{cases} U_a = (U_A^* - U_C^*) \\ U_b = (U_B^* - U_C^*) \end{cases} \quad (5)$$

结合式(4)和式(5)构建 U_A^* 、 U_B^* 、 U_C^* 对称三相电压源,对两相电压源 U_a 、 U_b 进行等效变换,如图 3(c)所示。经过等效变换后,负载 R_{aL} 两端承受的电压为线电压 $U_A^* - U_C^*$,其值与 U_a 相等。同理,负载 R_{bL} 两端承受的电压为线电压 $U_B^* - U_C^*$,其值与 U_b 相等,因此在电源等效变换前后,负载端口电压保持不变。

通过对图 3(c)分析可知,经过电源等效变换后的牵引供电系统的等效电路是一个由对称三相电压源和不对称负载构成的 Y-Y 型三相三线制电路。其中,A、B 相分别接入负载 R_{aL} 、 R_{bL} ,C 相等效为接入一个被短接的负载,忽略牵引供电系统空载的情况,则不论 A、B 相负载如何变化,三相电路的各相负载阻抗均不相等,因此将产生不平衡电流^[1-2]。

图 3(d)所示, I_A^* 、 I_B^* 、 I_C^* 是经过不平衡电流补偿后 A、B、C 相的电流, P_A^* 、 P_B^* 、 P_C^* 是经过不平衡电流补偿后等效对称三相纯电阻负载 A、B、C 相的有功功率, R_A^* 、 R_B^* 、 R_C^* 是经过不平衡电流补偿后等效对称三相纯电阻负载 A、B、C 相的电阻。为了消除不平衡电流, RPC 通过补偿对 A、B、C 三相的总有功功率 ($P_A + P_B$) 进行重新分配,使得补偿后的负载侧等效为对称三相纯电阻负载,即补偿后各相无功功率为 0, A、B、C 三相的有功功率相等 ($P_A^* = P_B^* = P_C^*$)。

由图 3(d)可见,经过 RPC 补偿后的铁路牵引供电系统的等效电路是一个对称 Y-Y 型三相纯电阻电路,电路中不平衡电流消失,不平衡和无功问题得到解决。忽略系统开关损耗,系统在补偿前后

的总有功功率保持不变,则在补偿后 A、B、C 各相负载有功功率与补偿前的总有功功率关系如下:

$$P_A^* = P_B^* = P_C^* = \frac{1}{3}(P_A + P_B) \quad (6)$$

3 补偿电流计算与系统控制方法

3.1 补偿电流计算方法

令 u_A^* 、 u_B^* 、 u_C^* 是 U_A^* 、 U_B^* 、 U_C^* 的瞬时值表达式,结合图 3(b)可知, u_A^* 、 u_B^* 、 u_C^* 和 u_A 、 u_B 、 u_C 相位一致,可得:

$$\begin{cases} u_A^* = \sqrt{2} U_A^* \sin(\omega t) \\ u_B^* = \sqrt{2} U_B^* \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ u_C^* = \sqrt{2} U_C^* \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (7)$$

式中: U_A^* 、 U_B^* 、 U_C^* 是 U_A^* 、 U_B^* 、 U_C^* 的有效值。

补偿后的牵引供电系统的等效电路是一个对称 Y-Y 型三相电路,结合图 3(d),令 I_A^* 、 I_B^* 、 I_C^* 分别是 I_A^* 、 I_B^* 、 I_C^* 的有效值,各相的相电压有效值、相电流有效值和相功率的关系为

$$\begin{cases} I_A^* = \frac{P_A^*}{U_A^*} \\ I_B^* = \frac{P_B^*}{U_B^*} \\ I_C^* = \frac{P_C^*}{U_C^*} \end{cases} \quad (8)$$

令 i_A^* 、 i_B^* 、 i_C^* 是 I_A^* 、 I_B^* 、 I_C^* 的瞬时值表达式,由于补偿后各相负载为纯电阻负载,故 i_A^* 、 i_B^* 、 i_C^* 分别与 u_A^* 、 u_B^* 、 u_C^* 相位一致,补偿后 A、B、C 相电流为

$$\begin{cases} i_A^* = \sqrt{2} I_A^* \sin(\omega t) \\ i_B^* = \sqrt{2} I_B^* \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_C^* = \sqrt{2} I_C^* \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (9)$$

补偿后系统三相对称,由基尔霍夫电流定律, i_A^* 、 i_B^* 和 i_C^* 三相电流和为 0,故只需补偿任意两相电流满足式(9),则三相电流自然满足式(9)从而实现不平衡电流补偿。以 A、B 相电流作为补偿对象,结合图 1 和图 3,则 RPC 在 A、B 相输出的补偿电流的参考信号 i_{ca}^* 、 i_{cb}^* 为

$$\begin{cases} i_{ca}^* = i_{aL} - i_A^* \\ i_{cb}^* = i_{bL} - i_B^* \end{cases} \quad (10)$$

考虑到 RPC 输出的补偿电流的参考信号是在等效对称三相电路中求解,因此还需要获取等效电路中的对称三相电源的电压 u_A^* 、 u_B^* 。结合式(1)得:

$$u_a + u_b = \frac{1}{k}(u_A - u_C) + \frac{1}{k}(u_B - u_C) = -3 \frac{u_C}{k} \quad (11)$$

即

$$\frac{1}{k}u_C = -\frac{1}{3}(u_a + u_b) \quad (12)$$

结合式(1)、式(4)和式(12),得 u_A^* 、 u_B^* 的计算如下:

$$\begin{aligned} u_A^* &= \frac{1}{k}u_A = \left(\frac{1}{k}u_A - \frac{1}{k}u_C + \frac{1}{k}u_C \right) = \\ &u_a + -\frac{1}{3}(u_a + u_b) \\ u_B^* &= \frac{1}{k}u_B = \left(\frac{1}{k}u_B - \frac{1}{k}u_C + \frac{1}{k}u_C \right) = \\ &u_b + -\frac{1}{3}(u_a + u_b) \end{aligned} \quad (13)$$

由式(13)可得 u_A^* 、 u_B^* 的有效值和电压同步信号。

根据以上分析,RPC 补偿电流的参考信号的计算方法如图 4 所示。

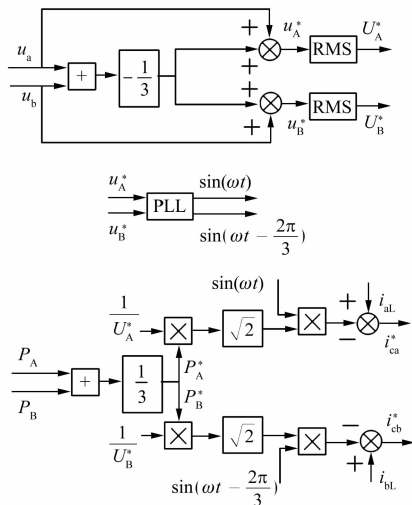


图 4 补偿电流计算方法

3.2 系统控制方法

图 5 是新型 RPC 的控制方法。电压源采用

阶梯波调制产生 81 电平,如图 5(a)所示。电流源采用 PR 控制器跟踪补偿电流参考信号,并通过载波同相层叠法(PD-PWM)进行调制,如图 5(b)所示。

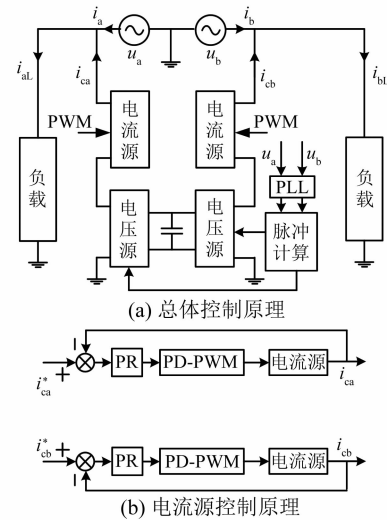


图 5 控制框图

4 仿真研究

设牵引供电系统采用变比为 110 kV:27.5 kV 的三相 V/v 牵引变压器,电压源直流侧电压为 1 440 V,电流源开关频率为 5 000 Hz,建立系统 Simulink 仿真模型。

4.1 电压源输出电压特性

令 a、b 相电压源输出的 81 电平电压为 $f_a(t)$ 、 $f_b(t)$,图 6(a)是 u_a 、 u_b 与 $f_a(t)$ 、 $f_b(t)$ 电压波形的对比结果。从图 6(a)中可见 $f_a(t)$ 、 $f_b(t)$ 与 u_a 、 u_b 波形基本重合,说明 81 电平电压 $f_a(t)$ 、 $f_b(t)$ 可以有效抵消 u_a 、 u_b ,使得施加在电流源交流侧的电压较小。a、b 相电流源交流侧电压 $u_a - f_a(t)$ 、 $u_b - f_b(t)$ 如图 6(b)所示,由图 6 可见,该电压最大值仅为 550 V,电流源可以采用较高的开关频率,有效提高系统的跟踪性能。

4.2 不平衡电流补偿特性

设 a、b 相电力机车功率均为 3.83 MW。根据式(4)和式(5)构建的等效对称三相电压源 u_A^* 、 u_B^* 、 u_C^* 与接入牵引供电系统的三相电压 u_A 、 u_B 、 u_C 的波形如图 7(a)所示,图 7(a)中 u_A^* 、 u_B^* 、 u_C^* 的幅值约为 22.45 kV,有效值为 $27.5/\sqrt{3}$ kV, u_A 、 u_B 、 u_C 的幅值为 89.81 kV,有效值为 $110/\sqrt{3}$ kV。

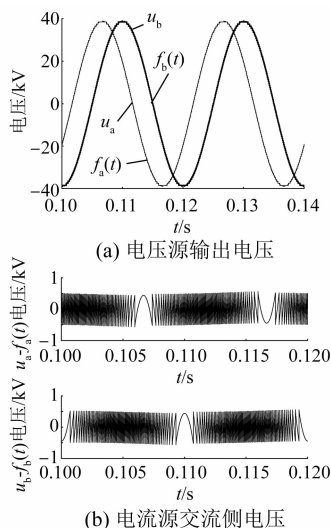


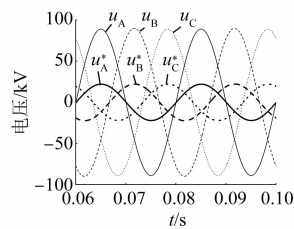
图6 电压源和电流源的仿真波形

u_A 与 u_A^* 的比值为 $110/27.5$, 满足式(4)。此外, 由图7(a)可见 u_A^* 、 u_B^* 、 u_C^* 与 u_A 、 u_B 、 u_C 的相位一致, 因此经过补偿后的 i_a^* 、 i_b^* 、 i_c^* 三相电流不但与等效三相电路的对称三相电压源相位一致, 同时也与接入牵引供电系统的三相电压源相位一致, 使得三相系统中的不平衡电流问题得到解决。

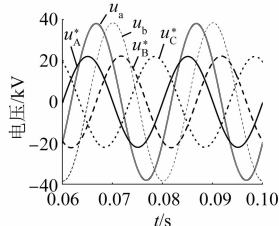
等效对称三相电压源 u_A^* 、 u_B^* 、 u_C^* 与牵引变压器二次侧电压 u_a 、 u_b 波形如图7(b)所示, 图7(b)中 u_a 、 u_b 的幅值为 38.89 kV , 有效值为 27.5 kV , u_a 、 u_b 的有效值与 u_A^* 、 u_B^* 、 u_C^* 线电压的有效值相等, 说明对电源等效变换不影响负载端电压。

在等效三相电路中, 当系统没有投入补偿时, 三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 的波形如图7(c)所示, 由图7(c)可见, 在接入不对称负载情况下, i_a 、 i_b 、 i_c 的有效值分别为 $197/\sqrt{2}$ 、 $197/\sqrt{2}$ 、 $340/\sqrt{2} \text{ A}$, 三相电流大小不相等, 说明 A、B、C 相存在不平衡电流。同时, i_a 、 i_b 与 u_A^* 、 u_B^* 的相位不相等但 i_c 与 u_C^* 的相位相等, 说明 A、B 相存在有功和无功电流, 而 C 相只有有功电流。A、B、C 相的有功功率分别为 1.93 、 1.93 、 3.8 MW , 三相有功功率之和为 7.66 MW 。A、B、C 相的无功功率分别为 1.1 、 -1.1 Mvar 、 0 , 三相无功功率之和为 0 , 说明不对称负载在 A、B 相引起了无功问题。

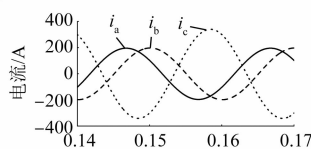
经过补偿后, 三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 的波形如图7(d)所示, i_a 、 i_b 、 i_c 的有效值约为 $227/\sqrt{2} \text{ A}$, i_a 、 i_b 、 i_c 三相电流对称且相位与 u_A^* 、 u_B^* 、 u_C^* 的相位一



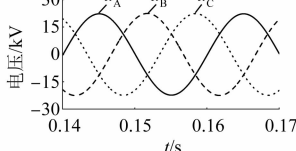
(a) 等效电压源与一次侧三相电压波形对比



(b) 等效电压源与二次侧两相电压波形对比



(c) 等效电路补偿前电压电流波形



(d) 等效电路补偿后电压电流波形

图7 不平衡电流补偿分析

致; 各相功率为 2.55 MW , 三相有功功率之和与 a、b 相电力机车功率之和相等。由于电压电流同相位, 各相无功功率为 0 , 说明经过 RPC 的补偿, 负载侧等效为对称三相纯电阻负载, 不平衡问题和无功问题得到有效解决。

4.3 系统补偿特性

工况 1。a 臂的机车功率为 $(6 + j1.5) \text{ MV} \cdot \text{A}$, b 臂的机车功率为 $(8 + j2) \text{ MV} \cdot \text{A}$, 系统在 0.18 s 投入补偿。工况 2。a 臂的机车功率为 $7.2 \text{ MV} \cdot \text{A}$, b 臂的机车功率为 $0 \text{ MV} \cdot \text{A}$, 三

相电流在初始时已经实现不平衡电流补偿,在 0.3 s 电力机车的功率均发生变化,a 臂的机车功率为 0 MV·A,b 臂的机车功率为 3 MV·A。

图 8(a)为工况 1 接入牵引变电所的三相电流在补偿前后的波形。由图 8(a)可见,初始情况下的三相电流的幅值存在较大的差异,牵引供电系统存在不平衡电流。在 0.18 s 开始不平衡补偿后,三相电流在 0.02 s 内就可以实现三相对称,说明新型 RPC 在不平衡电流补偿性能时具有良好的动态响应性能。

图 8(b)为工况 2 接入牵引变电所的三相电流在补偿前后的波形。由图 8(b)可见,初始情况下的三相电流在不平衡补偿下保持三相对称状态。当负载功率在 0.3 s 发生变化后,三相电流失去对称,但经过 0.02 s 后三相电流再次恢复对称状态,说明新型 RPC 在机车功率变化时具有良好的不平衡电流补偿性能。

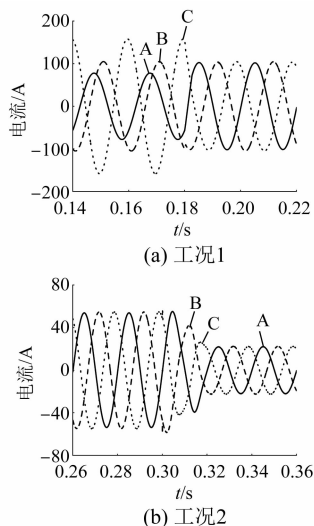


图 8 一次侧三相电流波形

5 结 语

本文提出一种新型 81 电平 RPC,电压源承担主体补偿功率的开关器件开关频率较低,因此开关损耗小。通过构建等效电源提出牵引供电系统的等效三相电路,为分析不平衡电流问题及其补偿原理提供理论依据。然后结合有功功率平均分配思想提出一种具有良好不平衡电流补偿性能的补偿方法。最后仿真结果表明新系统及不平衡电流补偿方法可以有效解决牵引供电系统中的不平衡电流问题,兼顾无功问题。

【参 考 文 献】

- [1] 李群湛,贺建闽. 牵引供电系统分析[M]. 2 版. 成都: 西南交通大学出版社, 2007.
- [2] 李群湛,解绍锋,张丽,等. 电气化铁路供电系统及其电能质量控制技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [3] 王铁欧. 电气化铁路牵引供电用光伏发电系统的接入拓扑及其电流控制策略[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(11): 91.
- [4] LIU L, DAI N, LAO K W, et al. A co-phase traction power supply system based on asymmetric three-leg hybrid power quality conditioner [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(12): 14645.
- [5] SHU Z, XIE S, LU K, et al. Digital detection, control, and distribution system for co-phase traction power supply application [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(5): 1831.
- [6] UZUKA T, IKEDO S, UEDA K. A static voltage fluctuation compensator for AC electric railway[C]// 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No. 04CH37551), 2004.
- [7] 邱大强,李群湛,周福林,等. 基于背靠背 SVG 的电气化铁路电能质量综合治理[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(6): 36.
- [8] 宋平岗,林家通,李云丰,等. 基于模块化多电平的铁路功率调节器直接功率控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2511.
- [9] 冯志国,葛曼玲,陈玉民. 模块化多电平换流器的环流抑制方法研究[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(10): 48.
- [10] BU J, ZHANG C. Twenty-seven level co-phase traction power supply system [C] // 2021 Power System and Green Energy Conference (PSGEC), 2021.
- [11] 王琪,张长征,舒泳皓. 含光伏电源的新型电气化铁道电能质量调节器[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(4): 88.
- [12] LUO A, WU C, SHEN J, et al. Railway static power conditioners for high-speed train traction power supply systems using three-phase V/V transformers [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(10): 2844.
- [13] 韩红彬,丁丽娜. 四象限脉冲整流器 IGBT 开路故障检测[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(8): 95.