

DOI: 10.7667/PSPC180557

# 基于双星型多电平潮流控制器与 YNvd 变压器的同相供电系统

周净轩, 罗隆福, 王海龙

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 针对高速电气化铁路领域中存在的负序、谐波与电分相问题, 提出了一种基于双星型多电平潮流控制器与 YNvd 平衡变压器的新型铁路同相供电系统。该双星型多电平潮流控制器为交交变换结构, 由四个多电平级联型 H 桥子模块链节组成, 无需直流母线电容。与潮流控制器两端均通过降压隔离变压器连接于变压器二次侧的传统作法不同, 该系统将双星型多电平潮流控制器的一侧连接于 YNvd 平衡变压器二次侧  $\beta$  相分接头, 减少了一个降压隔离变压器的成本。分析了该同相供电系统的拓扑结构与工作原理, 提出了一种综合控制策略, 最后通过仿真验证了所提方案的可行性与有效性。

**关键词:** 同相供电系统; 潮流控制器; 模块化多电平; 平衡变压器; 负序电流; 谐波

## Co-phase power supply system based on double star multilevel power flow controller and YNvd transformer

ZHOU Jingxuan, LUO Longfu, WANG Hailong

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

**Abstract:** In order to solve the problem of negative sequence current, harmonic current and electric phase splitting in high-speed railway power supply system, a novel co-phase power supply system based on Double Star Multilevel Power Flow Controller (DS-MPFC) and YNvd balanced transformer is proposed in this paper. This DS-MPFC which consists of four H-Bridge links is AC-AC conversion circuit structure and no direct current bus capacitance is required. Different from the conventional power flow controller based co-phase power supply systems, this system integrates DS-MPFC into the phase- $\beta$  side flexible taps of YNvd balance transformer instead of into phase- $\beta$  side via a step-down and isolation transformer, thus the costs are reduced significantly. The topology structure and the working principle are analyzed, furthermore, a synthetical control strategy is proposed. The simulation results show the feasibility and effectiveness of the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477046).

**Key words:** co-phase power supply system; power flow controller (PFC); modular multilevel converter (MMC); balanced transformer; negative sequence current; harmonic

## 0 引言

近年来, 我国高速铁路的建设取得了举世瞩目的成就, 与此同时, 也给牵引供电系统带来了严重的负序、谐波和无功等电能质量问题与电分相问题<sup>[1-2]</sup>。目前交直交型电力机车是我国高速铁路上普遍使用的机车类型, 与普通机车负荷相比, 具有瞬时

功率大, 低次谐波含量大大降低, 谐波影响转移到高次谐波, 功率因素接近于 1 等特点, 这对补偿装置的负序、高次谐波补偿能力提出了更高的要求<sup>[3-4]</sup>。同时由于电分相装置的存在, 列车的取流频繁切断, 速度与牵引力均受到了限制, 不利于机车向高速重载方向发展<sup>[5]</sup>。因此, 以负序、高次谐波为主的电能质量问题与由电分相装置引起的速度、牵引力损失问题, 得到了国内外学者的广泛关注。

为了解决这些难题, 文献[6-8]提出了基于单相

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51477046)

背靠背结构潮流控制器的同相供电方案，两背靠背结构变流器共用一个直流母线电容，并通过两个降压隔离变压器与牵引变压器的二次侧相连。文献[9-10]提出了有源与无源补偿相结合的同相供电系统，降低了单相背靠背结构有源补偿部分的容量，减少了成本。文献[11]提出了一种五电平结构潮流控制器，提高了补偿容量。文献[12]提出了一种基于三相-单相变换的同相供电方案，整流侧由移相变压器与不可控整流桥构成，逆变侧由单相 PWM 逆变器构成，但该方案中不可控整流电路不具备四象限运行的能力。文献[13-14]提出了一种由三相多电平结构代替单相背靠背结构的同相供电方案，该结构可直接与变压器二次侧相连，所需的子模块数量与开关器件数量较多，但可节省三相降压变压器成本。文献[15]分析比较了多重化背靠背结构，三桥臂 MMC 结构与四桥臂 MMC 结构等拓扑结构的优缺点。文献[16]提出了一种“Γ”型直挂型有源补偿拓扑结构，两级联型 H 桥链节构成“Γ”型结构，但由于直接与 27.5 kV 侧相连，H 链节所需要的子模块与开关器件数量要大于传统装置。文献[17]提出了一种双星型多电平铁路功率调节器，该结构能够直接进行交交变换。但文章仅分析了该结构的负序补偿能力，没有针对现代高速铁路牵引供电系统中较为突出的高次谐波等电能质量问题进行研究。

牵引变压器的种类选择也会影响负序电流的大小，YNvd 平衡变压器作为一种新型平衡变压器，负序抑制能力远强于 V/v 变压器等非平衡变压器，同时与 Scott 平衡变压器、阻抗匹配平衡变压器等平衡变压器相比，YNvd 平衡变压器具有二次侧两输出回路无电气联系、结构简单等特点<sup>[18-20]</sup>。因此 YNvd 平衡变压器在铁路牵引供电系统中是一种较为理想的变压器形式。

为此，针对电气化铁路牵引供电系统中的负序、高次谐波与电分相问题，本文将提出一种基于双星型多电平潮流控制器与 YNvd 变压器的新型铁路同相供电系统。双星型多电平潮流控制器(Double Star Multilevel Power Flow Controller, DS-MPFC)为交交变换结构，无需直流母线电容，能直接进行功率的双向流动。与传统背靠背结构潮流控制器相比，通过将 DS-MPFC 右侧直接连接于 YNvd 平衡变压器二次侧β相分接头的方式，取代了将潮流控制器左右两侧均通过降压隔离变压器连接于牵引变压器二次侧两相的传统方法，节省了一个降压隔离变压器的成本。同时该结构与两桥臂 MMC 结构相比无需直流母线电容，与三桥臂与四桥臂 MMC 相比，相同电压等级下 H 桥链节子模块与开关器件所需数量

相对较少。文中首先给出了该系统的拓扑结构，并对工作原理进行了详细的分析，提出一种综合控制策略，最后通过仿真验证了所提出方案的正确性与可行性。

### 1 系统工作原理

基于双星型多电平潮流控制器与 YNvd 变压器的同相供电系统拓扑结构如图 1 所示，绕组  $W_{a1}$ 、 $W_{c1}$  构成 YNvd 平衡变压器的二次侧α相，绕组  $W_{a2}$ 、 $W_{b2}$  和  $W_{c2}$  组成二次侧β相。DS-MPFC 左侧通过降压隔离变压器  $T_1$  与二次侧α相连接，右侧与 YNvd 平衡变压器二次侧β相的“m”“n”两抽头相连。DS-MPFC 由四个 H 桥链节与滤波电感构成，其中 H 桥链节由多个 H 桥模块串联而成。根据 DS-MPFC 工作原理可知，DS-MPFC 左右两侧电压  $\dot{U}_{ca}$ 、 $\dot{U}_{cb}$  应满足幅值相等，相位互相垂直，令 YNvd 平衡变压器变比为  $K_T$ ，YNvd 平衡变压器各绕组匝数关系如式(1)所示<sup>[18]</sup>。

$$W_A : W_B : W_C : W_{a1} : W_{c1} : W_{a2} : W_{b2} : W_{c2} = K_T : K_T : K_T : \frac{1}{\sqrt{3}} : \frac{1}{\sqrt{3}} : 1 : 1 : 1 \quad (1)$$

令降压变压器  $T_1$  的变比为  $K_{T1}$ ，则满足  $K_{T1} = W_{a2} / W_{m2} = W_{c2} / W_{n2}$ 。

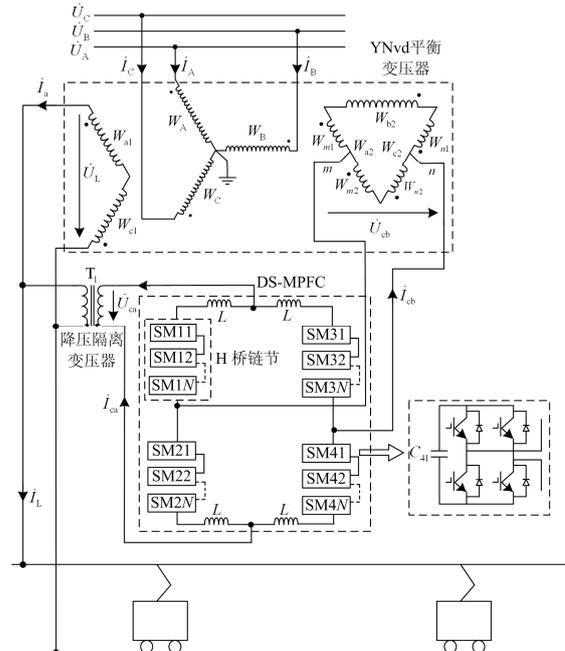


图 1 系统拓扑结构图

Fig. 1 Topology of proposed system

原边次边电压向量关系如图 2 所示，原边次边

电流关系满足

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{K_T} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{3} \\ 0 & -\frac{2}{3} \\ -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_L - \frac{\dot{I}_{ca}}{K_{T1}} \\ -\frac{\dot{I}_{cb}}{K_{T1}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

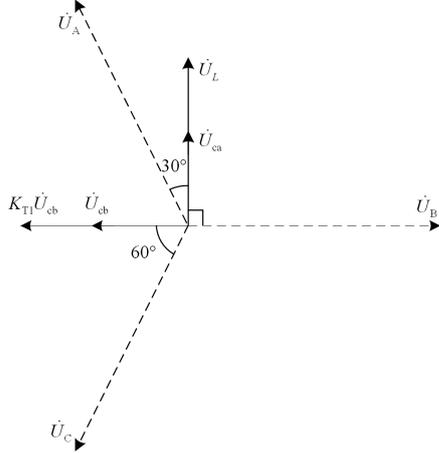


图 2 YNvd 变压器电压矢量关系图

Fig. 2 Voltage vector of YNvd transformer

DS-MPFC 结构电流电压高度对称, 等效电路如图 3 所示。根据基尔霍夫电流、电压定律可得<sup>[17]</sup>:

$$\begin{cases} \dot{U}_{ca} - \dot{U}_{cb} = \dot{U}_1 + \dot{U}_4 + L \frac{d(\dot{I}_1 + \dot{I}_4)}{dt} + R(\dot{I}_1 + \dot{I}_4) \\ \dot{U}_{ca} + \dot{U}_{cb} = \dot{U}_2 + \dot{U}_3 + L \frac{d(\dot{I}_2 + \dot{I}_3)}{dt} + R(\dot{I}_2 + \dot{I}_3) \\ \dot{I}_{ca} = \dot{I}_1 + \dot{I}_3 = \dot{I}_2 + \dot{I}_4 \\ \dot{I}_{cb} = \dot{I}_2 - \dot{I}_1 = \dot{I}_3 - \dot{I}_4 \end{cases} \quad (3)$$

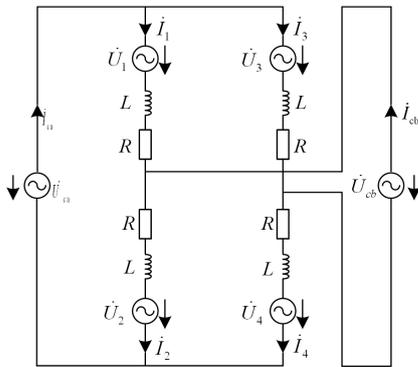


图 3 DS-MPFC 等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit of DS-MPFC

又令链节 1、4 为链节组 1, 链节 2、3 为链节组 2, 可得四链节电流电压关系如式(4)所示。

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \dot{U}_4 = \frac{\dot{U}_{ca} - \dot{U}_{cb}}{2} - \frac{L}{2} \frac{d(\dot{I}_{ca} - \dot{I}_{cb})}{dt} - \frac{R}{2} (\dot{I}_{ca} - \dot{I}_{cb}) \\ \dot{U}_2 = \dot{U}_3 = \frac{\dot{U}_{ca} + \dot{U}_{cb}}{2} - \frac{L}{2} \frac{d(\dot{I}_{ca} + \dot{I}_{cb})}{dt} - \frac{R}{2} (\dot{I}_{ca} + \dot{I}_{cb}) \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_4 = \frac{\dot{I}_{ca} - \dot{I}_{cb}}{2} \\ \dot{I}_2 = \dot{I}_3 = \frac{\dot{I}_{ca} + \dot{I}_{cb}}{2} \end{cases} \quad (4)$$

由此可知, 可以通过控制  $\dot{I}_1$ 、 $\dot{I}_2$ 、 $\dot{I}_3$  和  $\dot{I}_4$  四个 H 桥链节电流来实现对  $\dot{I}_{ca}$  与  $\dot{I}_{cb}$  的间接控制, 进而实现 YNvd 变压器二次侧  $\alpha$  相与  $\beta$  相之间的能量流动。

令  $\dot{U}_{ca}$  与  $\dot{U}_{cb}$  的基波有效值为  $u_s$ , 由于  $\dot{U}_{ca}$  滞后  $\dot{U}_{cb}$   $90^\circ$ , 故这里以  $\dot{U}_{ca}$  为基准, 有

$$\begin{cases} \dot{U}_{ca} = \sqrt{2}u_s \sin \omega t \\ \dot{U}_{cb} = \sqrt{2}u_s \cos \omega t \end{cases} \quad (5)$$

令负载电流  $\dot{I}_L$  的基波有效值为  $I_{L1}$ , 与  $\dot{U}_L$  相位差为  $\theta_a$ , 第  $h$  次谐波电流的有效值与相位分别为  $I_{Lh}$  与  $\theta_h$ , 此时有

$$\begin{aligned} \dot{I}_L = & \sqrt{2}I_{L1} \sin(\omega t + \theta_a) + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2}I_{Lh} \sin(h\omega t + \theta_h) = \\ & \sqrt{2}I_{L1} \cos \theta_a \sin \omega t + \sqrt{2}I_{L1} \sin \theta_a \cos \omega t + \\ & \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2}I_{Lh} \sin(h\omega t + \theta_h) \end{aligned} \quad (6)$$

假设各器件的损耗忽略不计, 则 DS-MPFC 的作用就是将大小为  $I_{L1} \cos \theta_a / 2$  的有功电流从二次侧  $\alpha$  相转移至  $\beta$  相, 同时对谐波与无功进行补偿。此时补偿电流  $\dot{I}_{ca}$  与  $\dot{I}_{cb}$  分别为

$$\begin{cases} \dot{I}_{ca} = K_{T1} \left[ \frac{\sqrt{2}I_{L1} \cos \theta_a}{2} \sin \omega t + \sqrt{2}I_{L1} \sin \theta_a \cdot \right. \\ \left. \cos \omega t + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2}I_{Lh} \sin(h\omega t + \theta_h) \right] \\ \dot{I}_{cb} = -\frac{\sqrt{2}}{2} K_{T1} I_{L1} \cos \theta_a \cos \omega t \end{cases} \quad (7)$$

## 2 DS-MPFC 功率分析

对双星型多电平潮流控制器进行功率分析, 则 DS-MPFC 整体的瞬时输入总功率为

$$\begin{aligned} P_z = & \dot{U}_{ca} \dot{I}_{ca} + \dot{U}_{cb} \dot{I}_{cb} = K_{T1} u_s \left[ -I_{L1} \cos \theta_a \cos 2\omega t + \right. \\ & \left. I_{L1} \sin \theta_a \sin 2\omega t + 2 \sum_{h=2}^{\infty} I_{Lh} \sin(h\omega t + \theta_h) \sin \omega t \right] \end{aligned} \quad (8)$$

由此可看出 DS-MPFC 整体的输入瞬时总功率

中仅含有交流分量, 直流有功部分是相互抵消的。不计各器件的损耗, 忽略  $R$  与  $L$  上的压降, 可得四个链节的瞬时功率  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$  与  $P_4$  如式(9)所示。可见四个链节瞬时功率中除了含有交流分量, 还存在直流有功分量。直流有功分量能使电容电压发散, 令链节 1、4 与链节 2、3 的直流有功分量分别为  $P_{dc14}$  与  $P_{dc23}$ 。如式(10)所示,  $P_{dc14}$  与  $P_{dc23}$  的大小与  $I_{Lr} \sin \theta_a$  有关, 四链节直流有功分量总和为 0, 链节 1、4 与链节 2、3 的直流有功分量大小满足  $P_{dc14} = -P_{dc23}$ 。假设  $I_{Lr} \sin \theta_a > 0$ , 为防止链节 1、4 电容电压下降, 链节 2、3 电容电压上升的情况出现, 需对四链节进行电压平衡控制。

$$\begin{cases} P_1 = P_4 = \dot{U}_1 \dot{I}_1 = \frac{K_{T1} u_s}{4} [-I_{Lr} \cos \theta_a \cos 2wt + \\ I_{Lr} \sin \theta_a (\sin 2wt - \cos 2wt) + 2 \sum_{h=2}^{\infty} (\sin wt - \\ \cos wt) I_{Lh} \sin (hwt + \theta_h) - I_{Lr} \sin \theta_a] \\ P_2 = P_3 = \dot{U}_2 \dot{I}_2 = \frac{K_{T1} u_s}{4} [-I_{Lr} \cos \theta_a \cos 2wt + \\ I_{Lr} \sin \theta_a (\sin 2wt + \cos 2wt) + 2 \sum_{h=2}^{\infty} (\sin wt + \\ \cos wt) I_{Lh} \sin (hwt + \theta_h) + I_{Lr} \sin \theta_a] \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} P_{dc14} = -\frac{K_{T1} u_s}{4} I_{Lr} \sin \theta_a \\ P_{dc23} = \frac{K_{T1} u_s}{4} I_{Lr} \sin \theta_a \end{cases} \quad (10)$$

令四链节电压平衡控制指令电流参考值分别为  $\dot{I}_{pref1}$ 、 $\dot{I}_{pref2}$ 、 $\dot{I}_{pref3}$  与  $\dot{I}_{pref4}$ , 理想状态下, 它们在数值上应满足:

$$\begin{cases} P_{dc14} = \dot{I}_{pref1} \dot{U}_1 = \dot{I}_{pref4} \dot{U}_4 \\ P_{dc23} = \dot{I}_{pref2} \dot{U}_2 = \dot{I}_{pref3} \dot{U}_3 \end{cases} \quad (11)$$

考虑一定的误差, 将参考电容电压与第  $x$  链节电容电压的差值经过  $P$  环节并乘以该链节电压同步信号得到误差修正信号  $k_p \Delta U_{refx}$ , 令第  $x$  链节的电压平衡指令电流为  $\dot{I}_{px}$ , 则满足

$$\dot{I}_{px} = -\dot{I}_{prefx} + k_p \Delta U_{refx} \quad (12)$$

将各链节电压平衡指令电流与原先各链节电流叠加后, 将抵消掉链节瞬时功率中的直流有功分量。令叠加后的四链节指令电流分别为  $\dot{I}_{z1}$ 、 $\dot{I}_{z2}$ 、 $\dot{I}_{z3}$  与  $\dot{I}_{z4}$ , 此时有

$$\begin{cases} \dot{I}_{z1} = \dot{I}_1 + \dot{I}_{p1} = \dot{I}_1 - \frac{P_{dc14}}{\dot{U}_1} + k_p \Delta U_{ref1} \\ \dot{I}_{z2} = \dot{I}_2 + \dot{I}_{p2} = \dot{I}_2 - \frac{P_{dc23}}{\dot{U}_2} + k_p \Delta U_{ref2} \\ \dot{I}_{z3} = \dot{I}_3 + \dot{I}_{p3} = \dot{I}_3 - \frac{P_{dc23}}{\dot{U}_3} + k_p \Delta U_{ref3} \\ \dot{I}_{z4} = \dot{I}_4 + \dot{I}_{p4} = \dot{I}_4 - \frac{P_{dc14}}{\dot{U}_4} + k_p \Delta U_{ref4} \end{cases} \quad (13)$$

DS-MPFC 两端补偿电流  $\dot{I}_{zca}$  与  $\dot{I}_{zcb}$  此时满足:

$$\begin{cases} \dot{I}_{zca} = \dot{I}_{z1} + \dot{I}_{z3} = \dot{I}_{ca} + \\ \frac{K_{T1} u_s}{4} I_{Lr} \sin \theta_a \left( \frac{1}{\dot{U}_1} - \frac{1}{\dot{U}_3} \right) + k_p (\Delta U_{ref1} + \Delta U_{ref3}) \\ \dot{I}_{zcb} = \dot{I}_{z2} - \dot{I}_{z4} = \dot{I}_{cb} - \\ \frac{K_{T1} u_s}{4} I_{Lr} \sin \theta_a \left( \frac{1}{\dot{U}_1} + \frac{1}{\dot{U}_2} \right) + k_p (\Delta U_{ref2} - \Delta U_{ref1}) \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)可知, 当进行链节电压平衡控制后, 若负载中含有无功电流分量,  $\dot{I}_{zca}$ 、 $\dot{I}_{zcb}$  与完全补偿理想状态下的补偿电流  $\dot{I}_{ca}$ 、 $\dot{I}_{cb}$  之间, 存在一定差值, 进而会影响补偿效果。且负载电流无功分量越大, 对补偿效果影响越大, 若无功分量很小, 则影响可忽略不计。因此 DS-MPFC 仅适合对牵引系统中的负序、谐波进行补偿, 不适合存在大量无功的情况。但由于目前国内高速铁路普遍使用的是交直交型电力机车, 功率因素已接近于 1, 所以可不考虑无功的影响, 此时有  $\theta_a = 0$ ,  $P_{dc14}$  与  $P_{dc23}$  值均为 0, 即在不计各器件损耗与无功的情况下, DS-MPFC 总体处于自然能量平衡状态, 四链节的瞬时功率中不存在能够使电容电压发散的直流有功分量。

### 3 系统控制策略

如图 4 所示, 同相供电系统的控制可分为以下四个部分: 1) 指令电流检测计算; 2) 指令电流跟踪; 3) 环流抑制; 4) 四 H 桥链节电压平衡与 H 桥链节各子模块电压平衡。

在第一部分补偿电流检测计算环节中, 将  $(\dot{U}_A - \dot{U}_C)$  与  $(-\dot{U}_B)$  分别通过锁相环, 可得  $\dot{U}_{ca}$  与  $\dot{U}_{cb}$  的电压同步信号  $\sin wt$  和  $\cos wt$ 。将  $\dot{I}_L$  与  $\sin wt$  相乘, 可得变量  $P_{sz}$ 。

$$\begin{aligned} P_{sz} = \dot{I}_L \sin wt &= \frac{\sqrt{2}}{2} I_{Lr} \cos \theta_a - \frac{\sqrt{2}}{2} I_{Lr} \cos \theta_a \\ &\cos 2wt + \frac{\sqrt{2}}{2} I_{Lr} \sin \theta_a \sin 2wt + \sqrt{2} \\ &\sum_{h=2}^{\infty} I_{Lh} \sin wt \sin (hwt + \theta_h) \end{aligned} \quad (15)$$

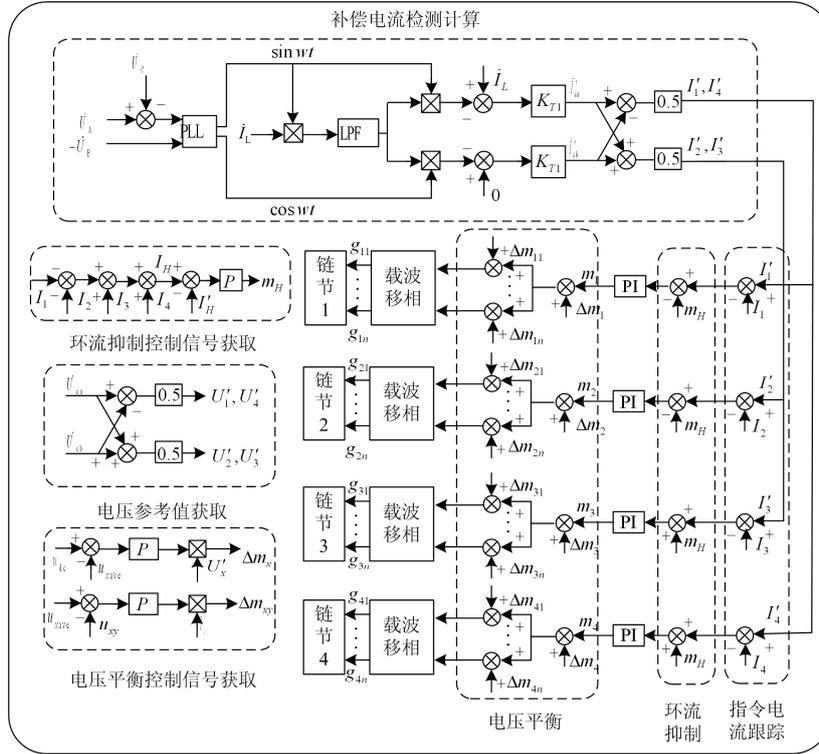


图 4 DS-MPFC 控制策略图

Fig. 4 Control strategy of DS-MPFC

$P_{SZ}$  通过低通滤波器后, 滤掉多倍频成分, 可得到直流分量  $P_{SZ1}$

$$P_{SZ1} = \frac{\sqrt{2}}{2} I_{Lf} \cos \theta_a \quad (16)$$

将  $P_{SZ1}$  分别与  $\sin \omega t$  和  $\cos \omega t$  相乘之后, 分别用  $I_L$  和 0 与之相减并乘以变比  $K_{T1}$  则可得到 DS-MPFC 两端补偿电流参考值  $I'_{ca}$  与  $I'_{cb}$ 。

$$\begin{cases} I'_{ca} = K_{T1} \left[ \frac{\sqrt{2} I_{Lf}}{2} \cos \theta_a \sin \omega t + \sqrt{2} I_{Lf} \sin \theta_a \cdot \right. \\ \left. \cos \omega t + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2} I_{Lh} \sin(h\omega t + \theta_h) \right] \\ I'_{cb} = -\frac{\sqrt{2}}{2} K_{T1} I_{Lf} \cos \theta_a \cos \omega t \end{cases} \quad (17)$$

这之前分析的式(7)是一致的, 不考虑无功的影响, 令  $\theta_a = 0$ , 此时有:

$$\begin{cases} I'_{ca} = K_{T1} \left[ \frac{\sqrt{2} I_{Lf}}{2} \sin \omega t + \sum_{h=2}^{\infty} \sqrt{2} I_{Lh} \sin(h\omega t + \theta_h) \right] \\ I'_{cb} = -\frac{\sqrt{2}}{2} K_{T1} I_{Lf} \cos \omega t \end{cases} \quad (18)$$

如图 4 中所示的补偿电流检测计算环节, 可根

据补偿电流参考值  $I'_{ca}$  与  $I'_{cb}$  得到四个 H 桥链节的补偿电流参考值  $I'_1$ 、 $I'_2$ 、 $I'_3$ 、 $I'_4$ 。为简化控制忽略 R 与 L 上的压降, 如图 4 电压参考值获取部分可得四链节电压参考值  $U'_1$ 、 $U'_2$ 、 $U'_3$ 、 $U'_4$ 。根据 DS-MPFC 四链节电流关系, 令  $I_H = I_3 + I_4 - I_1 - I_2$ , 可以通过控制  $I_H = 0$  来抑制环流。令参考值  $I'_H = 0$ , 将  $I_H$  与其的差值经过 P 环节, 可得环流抑制控制信号  $m_H$ 。将四个链节补偿电流参考值分别与实际值作差并与  $m_H$  叠加, 其中链节 1、2 与  $m_H$  相减, 其中链节 3、4 与  $m_H$  相加, 通过 PI 环节, 可得四个链节的控制信号为  $m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_3$  与  $m_4$ 。当不计器件损耗与无功时, DS-MPFC 处于功率平衡状态, 但在实际中开关器件等损耗是不可避免的, 因此 DS-MPFC 四链节在跟踪指令电流与进行环流抑制的同时, 还应保证四 H 桥链节电压平衡与 H 桥链节各子模块电压平衡。设子模块电容电压参考值为  $u_{dc}$ , 第  $x$  链节各子模块电容电压平均值为  $u_{xave}$ , 第  $x$  链节的第  $y$  个子模块的电容电压为  $u_{xy}$ ,  $u_{dc}$  与  $u_{xave}$  的差值和  $u_{xave}$  与  $u_{xy}$  ( $u_{xy}$  与  $u_{xave}$  交换一下顺序)的差值分别经过 P 环节并分别乘以第  $x$  链节的参考电压与参考电流, 可得链节间电压平衡控制信号  $\Delta m_x$  与链节内各子模块电容电压平衡控制信号  $\Delta m_{xy}$ 。令第  $x$  链节的第  $y$

个子模块的调制信号为  $m_{xy}$ ，则有

$$m_{xy} = m_x + \Delta m_x + \Delta m_{xy} \quad (19)$$

调制信号经载波移相环节可得各链节子模块的开关驱动信号，通过开关驱动信号控制各子模块开关器件的动作，从而实现负序、高次谐波电能质量补偿。

### 4 仿真实验

为验证本文所提出系统的可行性与有效性，以图 1 所示的拓扑结构为基础，用 Matlab/Simulink 软件进行建模仿真，详细参数如表 1 所示。由于现代高速铁路广泛使用交直交型电力机车，功率因数接近于 1，且含有高次谐波，因此令高速电力机车典型负载电流为  $I_L(t) = 200\sin \omega t + 40\sin(3\omega t - 60^\circ) + 20\sin(5\omega t - 90^\circ) + 4\sin(31\omega t + 120^\circ)$ 。

表 1 系统仿真参数

Table 1 Simulation parameters of compensation system

参数	取值
系统三相电压/kV	110
供电臂电压/kV	27.5
DS-MPFC 两端电压/kV	10.5
链节模块数/个	12
链节电感/mH	10
链节电阻/ $\Omega$	0.2
链节子模块电容/mF	7.0
链节子模块电容电压/V	2 000
载波频率/Hz	1 000

在 0 s 投入高速电力机车负载，在 0.4 s 时 DS-MPFC 投入工作，0.8 s 时停止。

图 5 与图 6 为 DS-MPFC 投入工作时四链节电流与 DS-MPFC 两端补偿电流  $I_{ca}$ 、 $I_{cb}$ ，图 7 为 YNvd 变压器二次侧两相电流补偿前后图，其中二次侧  $\alpha$  相电流为  $I_a$ ，二次侧  $\beta$  相电流为  $I_{cb} / K_{T1}$ 。由此可知，DS-MPFC 能将一半的负载有功功率从 YNvd 平衡变压器  $\alpha$  相转移至  $\beta$  相，同时还能对  $\alpha$  相高速电力机车典型负载电流进行谐波补偿。

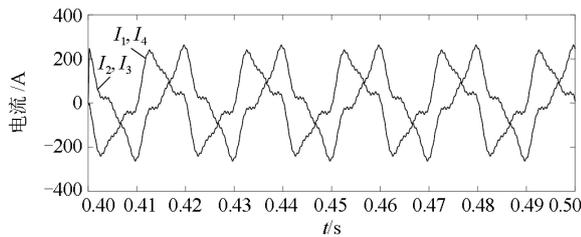


图 5 DS-MPFC 四链节补偿电流图

Fig. 5 Four-link compensation current of DS-MPFC

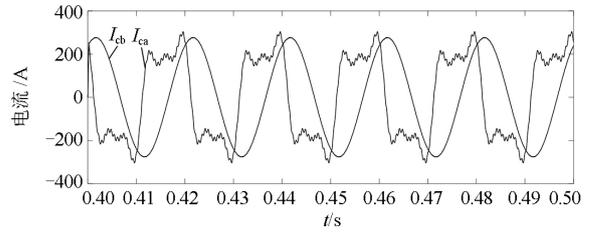


图 6 DS-MPFC 补偿电流图

Fig. 6 Compensation current of DS-MPFC

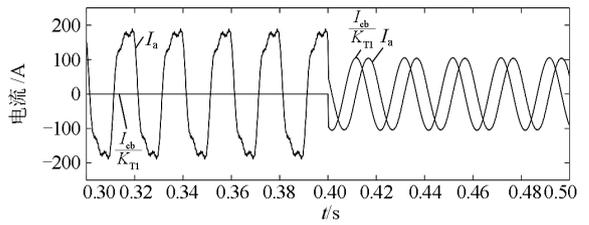


图 7 YNvd 变压器二次侧两相电流补偿前后图

Fig. 7 Two-phase currents of YNvd transformer secondary side with and without compensation

图 8 为 DS-MPFC 补偿前后系统侧三相电流图，图 9 为补偿前后 YNvd 二次侧  $\alpha$  相电流频谱图，图 10 为负序电流与正序电流比值补偿前后变化图。在补偿前，B 相电流为 0，此时负序电流与正序电流比值达到 100%，同时 A、C 两相电流也含有一定量的高次谐波。经补偿后，三相电流接近平衡，谐波含量明显减少。负序电流与正序电流比值由 100% 降至 0.49%，YNvd 二次侧  $\alpha$  相电流 THD 由 22.45% 降至 1.42%，该系统在有效解决电分相问题的基础上，同时具有良好的负序谐波治理能力。

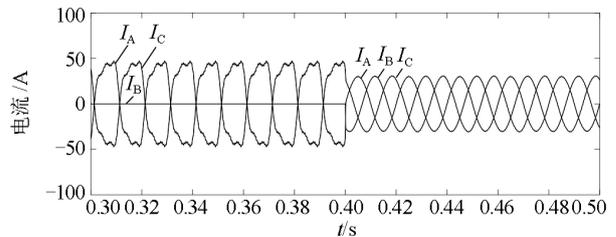
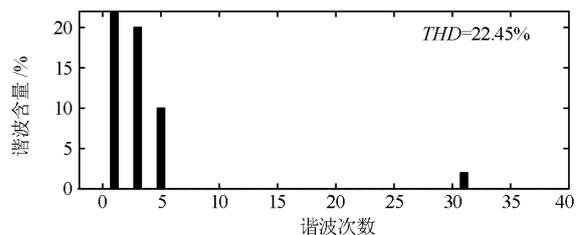


图 8 三相电流补偿前后图

Fig. 8 Three-phase currents with and without compensation



(a) 补偿前电流频谱图

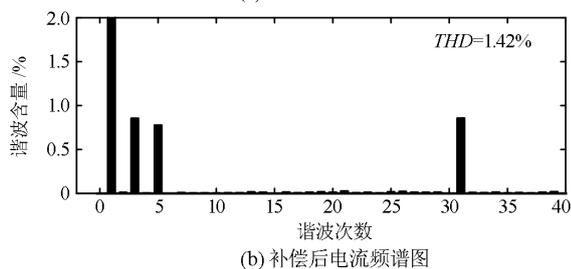
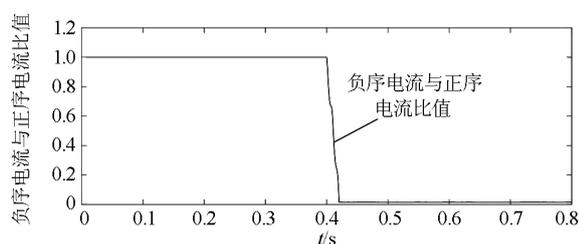
图 9 补偿前后 YNvd 变压器二次侧  $\alpha$  相负载电流频谱图Fig. 9 Phase  $\alpha$  current spectrum of YNvd transformer secondary side with and without compensation

图 10 负序正序电流比值补偿前后变化图

Fig. 10 Ratio of negative sequence current to positive sequence current with and without compensation

## 5 结论

本文研究了一种基于双星型多电平潮流控制器与 YNvd 变压器的新型铁路同相供电系统, 详细分析了该系统的拓扑结构和工作原理, 提出了一种综合控制策略, 并通过仿真结果得到以下结论:

1) 该系统与传统同相供电系统相比, 通过将 DS-MPFC 一侧直接连接于 YNvd 平衡变压器二次侧  $\beta$  相分接头的方式, 节省了一个降压隔离变压器的成本。

2) DS-MPFC 为交交变换型结构, 无直流母线电容, 结构简单, 所需链节子模块数量、开关器件数量相对较少, 应用于采用 YNvd 平衡变压器的同相系统时, 在不计器件损耗与无功的情况下, 该 DS-MPFC 处于自然能量平衡状态, 不存在造成各链节子模块电容电压发散的直流有功分量。

3) 该同相供电系统暂不适用于存在大量无功的情况, 但是由于目前我国高速铁路上广泛应用的是交直交型电力机车, 功率因数接近于 1, 无功问题对牵引供电系统的影响已经很小。该系统能有效解决负序、高次谐波与电分相问题, 是适合于现代高速铁路的新型同相供电系统。

## 参考文献

[1] SONG Shuguang, LIU Jinjun, OUYANG Shaodi, et al. A

- modular multilevel converter based railway power conditioner for power balance and harmonic compensation in Scott railway traction system[C] // IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference, May 22-26, 2016, Hefei, China: 2412-2416.
- [2] 唐宏伟, 唐杰, 林立. 新型电气化铁路电能质量管理体系[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 84-91.
- TANG Hongwei, TANG Jie, LIN Li. New power quality management system in electrical railway[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 84-91.
- [3] 唐骥. 高速铁路牵引供电系统电能质量分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2016.
- TANG Ji. Power quality analysis of high-speed rail traction power supply system[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2016.
- [4] HU Haitao, HE Zhengyou, LI Xin, et al. Power quality impact assessment for high-speed railway associated with high-speed trains using train timetable—part I: methodology and modeling[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 693-703.
- [5] 陈朝珍. 电力机车过电分相电气过程的机理分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- CHEN Chaozhen. The analysis on the course of electric motive passing though phase separation[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [6] 常文寰, 王果. 组合式同相供电系统容量配置优化及分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 94-101.
- CHANG Wenhuan, WANG Guo. Optimizing and analyzing of capacity configuration in combined co-phase power supply system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 94-101.
- [7] 赵元哲, 朱鹏, 李群湛. 基于 YNvd 平衡变压器和模拟负载的同相供电试验系统[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 143-148.
- ZHAO Yuanzhe, ZHU Peng, LI Qunzhan. Co-phase supply test system based on YNvd balanced transformer and simulated load[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 143-148.
- [8] 夏焰坤, 李群湛, 解绍锋, 等. 高速和重载电气化铁路 V 型接线牵引变压器负序补偿研究[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 73-78.
- XIA Yankun, LI Qunzhan, XIE Shaofeng, et al. Negative sequence compensation of high-speed and heavy-haul electric railroad with V-connection transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 73-78.
- [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] 夏焰坤, 周福林, 陈民武. 高速铁路 V 型接线牵引变压器混合补偿式同相供电方案[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29(4): 89-94.
- XIA Yankun, ZHOU Fulin, CHEN Minwu. Hybrid compensation co-phase traction power supply scheme for high-speed railway with V connection transformer[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29(4): 89-94.
- [11] 周阳, 李群湛, 易东. 同相供电二极管箝位五电平潮流控制器研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(增刊 1): 106-110.
- ZHOU Yang, LI Qunzhan, YI Dong. Research on diode-clamped five-level power flow controller of co-phase power supply system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(S1): 106-110.
- [12] 漆炜之, 刘全景, 谢永强, 等. 基于三相-单相变换的新型同相供电系统方案[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 93-98.
- QI Weizhi, LIU Quanqing, XIE Yongqiang, et al. A new cophase power supply system based on three-phase to single-phase converter[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 93-98.
- [13] 周阳, 李群湛. 基于 MMC 的同相供电有源补偿器[J]. 铁道学报, 2017, 39(4): 25-31.
- ZHOU Yang, LI Qunzhan. Research on active power compensator for co-phase power supply system based on MMC[J]. Journal of the China Railway Society, 2017, 39(4): 25-31.
- [14] ZHAO Yan, DAI Ningyi, WANG Baoan. Application of three-phase modular multilevel converter (MMC) in co-phase traction power supply system[C] // 2014 IEEE Conference and Expo on Transportation Electrification Asia-Pacific, August 31- September 3, 2014, Beijing, China: 1-6.
- [15] XU Qianming, MA Fujun, HE Zhixing, et al. Analysis and comparison of modular railway power conditioner for high-speed railway traction system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(8): 6031-6048.
- [16] 黄小红, 李群湛, 吴萍. 基于模块化 H 桥和 Vv 接线变压器的髙速铁路同相牵引供电系统[J]. 铁道学报, 2016, 38(6): 38-44.
- HUANG Xiaohong, LI Qunzhan, WU Ping. Co-phase traction power supply systems of high speed railway based on modular multilevel cascaded H bridge and Vv-connected transformer[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(6): 38-44.
- [17] MA Fujun, XU Qianming, HE Zhixing, et al. A railway traction power conditioner using modular multilevel converter and its control strategy for high-speed railway system[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2016, 2(1): 96-109.
- [18] 樊北辰. YNvd 及其变形接线变压器的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- FAN Zhichen. Research on the YNvd traction transformer and its deformation wiring traction transformer[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [19] 张艳霞, 赵冉, 张亚洲, 等. YNvd 接线平衡变压器的电气分析与负序差动保护[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3598-3602.
- ZHANG Yanxia, ZHAO Ran, ZHANG Yazhou, et al. Electrical analysis and negative sequence differential protection of YNvd connected balance transformer[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3598-3602.
- [20] ZHANG Zhiwen, XIE Bin, HU Sijia, et al. Reactive power compensation and negative-sequence current suppression system for electrical railways with YNvd-connected balance transformer—part I: theoretical analysis[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(1): 272-282.

收稿日期: 2018-05-13; 修回日期: 2018-07-03

作者简介:

周净轩(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量控制技术; E-mail: 510629676@qq.com

罗隆福(1962—), 男, 博士, 博士生导师, 研究方向为现代电器设备的设计、优化及仿真研究、髙压直流输电新技术和电能质量管理研究等; Email: llf\_hnu@163.com

王海龙(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力变压器保护与仿真、电机控制。E-mail: 1693303421@qq.com

(编辑 张爱琴)