Vol.35 No.2 Feb. 2015

一种改善同相牵引供电系统直流侧电压 及补偿容量的方案

黄小红,李群湛,解绍锋

(西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031)

摘要:针对电气化铁道同相牵引供电系统直流侧电压过高、补偿容量过大的问题,讨论了综合潮流控制器(IPFC)的改进方案。就牵引供电 Vv 接线、Scott 接线和 YN,d11 接线 3 种形式,提出同相供电统一改进方案,即根据 牵引和再生制动不同工况分别调整 IPFC 交流侧电抗属性及大小。对直流侧电压和核准容量的分析表明,改 进方案可有效降低直流侧电压并减小设备补偿容量。改进后 3 种接线形式的核准容量都为负载的有功功率, 且以 Vv 接线直流侧电压为最低,YN,d11 接线为最高;而 Scott 接线可简化 β 侧的电抗设计。通过对 Vv 接 线的仿真分析验证了所提方法的有效性与正确性。

关键词: 电气化铁道; 同相牵引供电系统; 综合潮流控制器; 变压器接线; 直流侧电压; 核准容量; 牵引; 补偿

中图分类号: TM 922.3

文献标识码:A

0 引言

同相牵引供电作为电气化铁道的一种理想供 电方式,有效消除了电分相,并实现了负序、谐波和 无功的动态补偿^[1-2]。文献[3-4]提出同相供电系统 理论,并针对无源补偿装置实现同相供电作了深入 研究。文献[5-7]研究了基于有源滤波器的同相供电 系统,实现了三相到单相的平衡变换。近年来,采用 综合潮流控制器(IPFC)与 Vv、Scott 和 YN,vd 接线变 压器相结合构成的同相供电系统成为研究热点^[8-11]。

目前,关于改善同相牵引供电系统直流侧电压 及补偿容量的研究并不多见。已有研究往往存在直 流侧电压给定值过高,与实际器件工作电压差距较 大的问题,且带来了较大的开关损耗^[12]。另外,大容 量的 IPFC 增加了设备投资,限制了同相牵引供电的 广泛推广。对此,本文提出针对 3 种常见接线形式 同相供电的统一改进方案,降低了直流侧电压,减小 了补偿容量,为电气化铁路供电研究提供参考。

1 牵引供电常见变压器接线形式

电气化铁道牵引供电系统常见的 3 种变压器接线 形式如图 1 所示。

以 U_A 为参考相量,变压器二次侧(牵引侧)端 口x的电压、电流可表示为^[13]:

$$\begin{cases} \boldsymbol{U}_{x} = \sqrt{3} K_{x} U_{A} e^{-j\psi_{x}} \\ \boldsymbol{I}_{x} = \boldsymbol{I}_{x} e^{-j(\psi_{x} + \varphi_{x})} \end{cases}$$
(1)



DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.02.014

图 1 常见变压器接线形式

Fig.1 Common transformer connection modes

其中, K_x 为牵引变压器副边端口电压与一次侧线电 压之比,即 $K_x=U_x/(\sqrt{3}U_A);\psi_x$ 为牵引变压器副边端 口接线角; I_x 为牵引变压器副边端口电流有效值; φ_x 为牵引变压器副边端口的功率因数角。

牵引侧各端口电流在三相系统中造成的总负序

收稿日期:2014-02-25;修回日期:2015-01-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51177139);高速铁路 基础研究联合基金重点项目(U1134205)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51177139) and High-speed Railway Basic Research Fund Key Project(U1134205)

电流 I⁽⁻⁾ 为^[1]:

$$I^{(-)} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sum_{x=1}^{n} K_x I_x e^{-j(2\psi_x + \varphi_x)}$$
(2)

3 种不同接线变压器的接线角形式之一为:Vv接线 ψ_{α} =30°、 ψ_{β} =90°;Scott 接线 ψ_{α} =-120°、 ψ_{β} =-30°; YN,d11 接线 ψ_{α} =0°、 ψ_{β} =120°。

3种接线形式原、副边电流的变换关系分别为[13]:

$$\begin{bmatrix} I_{A} \\ I_{B} \\ I_{C} \end{bmatrix}_{(Vv)} = \frac{K_{x}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix}$$
(3)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{A} \\ \mathbf{I}_{B} \\ \mathbf{I}_{C} \end{bmatrix}_{(\text{Scott})} = \frac{K_{x}}{\sqrt{3}} \begin{vmatrix} -1 & \sqrt{3} \\ -1 & -\sqrt{3} \\ 2 & 0 \end{vmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{\alpha} \\ \mathbf{I}_{\beta} \end{bmatrix}$$
(4)

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{\mathrm{A}} \\ \mathbf{I}_{\mathrm{B}} \\ \mathbf{I}_{\mathrm{C}} \end{bmatrix}_{(\mathrm{YN},\mathrm{dH})} = \frac{K_{x}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{\alpha} \\ \mathbf{I}_{\beta} \end{bmatrix}$$
(5)

2 同相牵引供电统一改进方案及补偿原理

2.1 同相牵引供电统一改进方案

针对以上3种接线形式,为消除电分相环节,实现不同变电所供电区段接触网电压同相位,将 IPFC 接于变压器副边α、β2个端口,将原有两相供电方式转变为仅由α端口供电的单相方式,即同相供电系统,如图2所示。



图 2 同相牵引供电系统

Fig.2 Co-phase power supply system

统一改进型 IPFC 的构成如图 3 所示,在传统同 相供电系统^[8-11,14]基础上增加虚线框所示的部分。 核心为 2个背靠背连接的电压源变流器,中间通过 直流环节耦合。 T_1 、 T_2 为降压变压器,起降低电压等级 和隔离的作用。 TSR_{α} 、 TSR_{β} 为晶闸管投切电抗器 (TSR),相当于一开关支路,用于控制电感支路的切 断与接通,在投切过程中产生的动态效应通过适当 的控制策略来改善。

传统同相牵引供电方案下,变流器(以图 3 左侧 变流器为例)输出电压如下:

$$u_{ab} = \frac{u_{\alpha}}{k_1} + L_{\alpha} \frac{\mathrm{d}i_{\alpha}}{\mathrm{d}t} \tag{6}$$

其中, u_{α} 为变压器端口电压; k_1 为变压器变比; i_{α} 为补偿电流。

变流器最大输出电压 *u_{ab_max}* 与直流侧电压的关系满足:

$$U_{C} = u_{ab_max} \tag{7}$$

变流器直流侧电压的控制是同相供电系统的关键问题之一。在相同的补偿电流下,直流侧电压大小也将直接影响变流器补偿容量。文献[9-11]实现了 IPFC 的有效控制,但直流侧电压达到 5 000 V,与器件工作电压有一定差距。文献[14]对 IPFC 直流侧电压进行了分析研究,提出改善直流侧电压波动的方法,但未涉及降低直流侧电压的措施。文献[15]对直流侧电压取值进行了研究,分析了完全补偿谐波时所需的直流侧电压理论最小值,指出当直流侧电压降到极限值以下时,将无法实现期望的补偿效果。 文献[12,16-17]提出优化的直流侧电压控制策略,但仍需以文献[15]提出的直流侧电压理论值为基础。鉴于此,本文提出上述同相供电的统一改进方案,以降低直流侧电压,减小补偿容量。

2.2 补偿原理

设牵引侧电压有效值为 U_1 ,负载基波电流有效值为 I_1 ,功率因数角为 φ_1 ,谐波分量为 i_h 。对于 V_V 接线,负载电流可表示为:

$$i_{\rm L} = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t - \varphi_1 - 30^\circ) + i_{\rm h}$$
 (8)

欲实现原边电流负序、谐波及无功的综合补偿, 结合式(2)和(3),则端口电流期望值为:

其中.I.,为电源电流期望有效值。



图 3 IPFC 改进结构 Fig.3 Improved structure of IPFC

$$p_{\rm S} = u_{\alpha} i_{\rm sar} + u_{\beta} i_{\rm s\beta r} = \sqrt{3} U_1 I_{\rm sr} \tag{11}$$

忽略损耗时,在一个周期
$$T$$
 内电源提供的能量

应等于负载消耗的能量,即 $|_{0}p_{s}dt = |_{0}p_{L}dt$,所以得:

$$I_{\rm sr} = \frac{I_{1p}}{\sqrt{3}} \tag{12}$$

其中, $I_{1p}=I_1\cos\varphi_1$,为负载有功电流。

故补偿指令电流期望值 icar vicar 为:

$$\begin{bmatrix} i_{car}(t) \\ i_{c}\beta_{r}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{L}(t) \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{sar}(t) \\ i_{s}\beta_{r}(t) \end{bmatrix}$$
(13)

同理,结合式(2)、(4)和(5)可得 Scott 接线及 YN.d11 接线的负载电流、端口电流期望值如下:

$$i_{\rm L}(t)_{\rm (Scott)} = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t - \varphi_1) + i_{\rm h}(t)$$
 (14)

$$\begin{bmatrix} i_{\text{sorr}} \\ i_{\text{s}\beta r} \end{bmatrix}_{(\text{Scott})} = \frac{\sqrt{2} I_1 \cos \varphi_1}{2} \begin{bmatrix} \sin (\omega t) \\ \sin (\omega t - 120^\circ) \end{bmatrix}$$
(15)

$$i_{\rm L}(t)_{\rm (YN,d11)} = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t - \varphi_1) + i_{\rm h}(t)$$
 (16)

$$\begin{bmatrix} i_{\text{scr}} \\ i_{\text{s}\beta\text{r}} \end{bmatrix}_{(\text{YN},\text{d}11)} = \frac{\sqrt{2} I_1 \cos \varphi_1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sin(\omega t - 30^\circ) \\ \sin(\omega t - 90^\circ) \end{bmatrix}$$
(17)

直流侧电压分析 3

目前,电力机车多采用交直交型机车,可运行于 牵引和再生制动工况。牵引工况下,机车从电网取 能,再生制动工况下,iL反向,向电网回馈电能。由式 (10)—(12)可知,2种工况下 I1p 反向,故可通过检测 负载有功电流方向来判别牵引和再生制动工况。当 无负荷时,补偿电流为0,TSR保持之前工作状态。

对于背靠背的 IPFC 而言, u_{ab} (或 u_{cd})的峰值直 接影响到直流侧电压 Uc 的大小。由图 3 可知:

$$\begin{cases} u_{ab} = u_{LC\alpha} + u_{\alpha}/k_1 \\ u_{cd} = u_{LC\beta} + u_{\beta}/k_2 \end{cases}$$
(18)

改进型 IPFC 通过控制交流侧 TSR 的断开或闭 合来减小 $u_{ab}($ 或 $u_{cd}),$ 以达到降低直流侧电压的目的。 为方便起见,以下分析仅基于基波情形。

牵引工况分析 3.1

对 α 侧,TSR_α控制 L_{Cα}支路断开,则 L_α 和 C_α构 成串联形式,将改进前交流侧的感性电抗调整为容 性,此时交流侧电抗电压 ULCa 与原来的 ULa 反向,如 图 4(a)所示。理想情况下, U_{ab} 与基波电流 $I_{\alpha(1)}$ 同向 (即 U_{ab} 垂直于 U_{LCa})时, U_{ab} 取得最小值, 且:

$$U_{ab} = (U_{\alpha}/k_1)\cos\theta \tag{19}$$

(20)

其中, θ 为基波电流 $I_{\alpha(1)}$ 滞后 U_{α} 的角度。 **波洪前的 II (図 4(_)**由唐建 低売)可丰売 も

改进則的
$$U_{ab}$$
(图 4(a)中虚线所示)可表示为:

$$U_{ab} = \sqrt{(U_{\alpha}/k_{1})^{2} + U_{l\alpha}^{2} + 2U_{\alpha}U_{l\alpha}\sin\theta/k_{1}}$$
(20)

$$U_{ab}$$

 U_{ab}
 $U_{L\alpha}$
 $U_{L\alpha}$
 U_{cd}
 $U_{LC\beta}$
 U_{LC}
 U_{cd}
 $U_{LC\beta}$
 U_{cd}
 $U_{LC\beta}$
 U_{b}
 U_{b}

图 4 牵引工况下改进 IPFC α、β 侧基波电压相量图 Fig.4 Phasor diagrams of α and β side fundamental voltage of improved IPFC in traction condition

故改进后的 U_{ab} 小于改进前的。

 θ 由机车负载功率因数角 φ_1 确定。由图 4 得 Vv 接线、Scott 接线和 YN.d11 接线的 $\cos\theta$ 值分别为.

$$\cos\theta_{(\rm Vv)} = \frac{0.5\cos\varphi_1}{\sqrt{1 - \frac{2}{3}\cos^2\varphi_1 + \frac{\sqrt{3}}{6}\sin(2\varphi_1)}}$$
(21)

$$\cos\theta_{(\text{Scott})} = \frac{0.5\cos\varphi_1}{\sqrt{1 - 0.75\cos^2\varphi_1}} \tag{22}$$

$$\cos\theta_{\rm (YN,d11)} = \frac{0.5\cos\varphi_1}{\sqrt{1 - \frac{2}{3}\cos^2\varphi_1 - \frac{\sqrt{3}}{6}\sin(2\varphi_1)}} \quad (23)$$

 $\cos\theta$ 随负载功率因数变化的曲线如图 5 所示。 从图中可看出,改进方案中 Vv 接线的 $\cos\theta$ 最小,故 直流侧电压最小,YN,d11 接线的最大。当负载功率 因数为 0.8 时, cos θ 分别为 0.4337(Vv) 0.5534(Scott) 和 0.735(YN,d11)。



图 5 $\cos\theta$ 随负载功率因数变化的曲线 Fig.5 Variation of $\cos\theta$ along with power factor of load

对 β 侧, TSR_B 控制 L_{CB} 支路接通, L_{CB} 与 C_B 并联 后呈感性,补偿改进前 L_{B} 的感性电压 U_{LB} ,见图 4(b)。 理想情况下, U_{cd} 垂直于 U_{LCB} 时, U_{cd} 取得最小值,且:

$$\boldsymbol{U}_{cd} = (U_{\beta}/k_2)\cos\theta' \tag{24}$$

其中, θ' 为 β 侧电压、电流夹角。对 Vv 接线和 YN, d11 接线, $\theta' = 30^\circ$, U_{cd} 小;对 Scott 接线, $\theta' = 0^\circ$, U_{cd} 大。 改进前的 U_{cd} (图 4(b)中虚线所示)可表示为:

 $U_{cd} = \sqrt{(U_{\beta}/k_2)^2 + U_{L\beta}^2 - 2U_{\beta}U_{L\beta}\sin\theta'/k_2}$ (25)故改进后的 U_{cd} 也小于改进前的。

3.2 再生制动工况分析

再生制动工况下, α 、 β 侧电流反向。

对 α 侧, TSR_a 控制 $L_{C\alpha}$ 支路接通, 使 $L_{C\alpha}$ 与 C_{α} 并 联后呈感性,补偿原有 L_{α} 的感性电压 $U_{L\alpha}$,如图 6(a)所示。理想情况下, Uab 垂直于 ULCa 时, Uab 取得最小 值,其值同式(19)。

对 β 侧, TSR_{β} 控制 $L_{C\beta}$ 支路断开, $L_{C\beta}$ 与 C_{β} 构成

串联形式,将改进前交流的感性电抗调整为容性电抗,如图 6(b)所示。理想情况下, U_{cd} 垂直于 $U_{LC\beta}$ 时, U_{cd} 取得最小值,其值同式(24)。



图 6 再生制动工况下改进 IPFCα、β 侧基波电压相量图 Fig.6 Phasor diagrams of α and β side fundamental voltage of improved IPFC in regenerative braking condition

从 β 侧看,改进方案中 Scott 接线的直流侧电压 最大。但由于 2 种工况下,Scott 接线电压、电流均在 同一直线上,故可取消 TSR_β 所在支路,以简化电路。

3.3 直流侧电压确定原则

由以上牵引和再生制动工况分析可知:

$$U_{ab\min} = (U_{\alpha}/k_1)\cos\theta \tag{26}$$

$$U_{cd\min} = (U_{\beta}/k_2)\cos\theta' \tag{27}$$

一般有 $U_{\alpha}=U_{\beta}$, 当 $k_1=k_2$ 时, α 、 β 侧电压不匹配, 故 $k_1 \neq k_2$ 。根据式(26), 直流侧电压应满足:

$$U_{c} > \sqrt{2} \left(U_{\alpha} / k_{1} \right) \cos \theta \tag{28}$$

$$k_2 > \sqrt{2} \left(U_\beta / U_c \right) \cos \theta' \tag{29}$$

4 核准容量分析

设 IPFC α 、 β 侧输入容量分别为 S_{α} 、 S_{β} ,定义核准 容量为:

$$S = S_{\alpha} + S_{\beta} \tag{30}$$

在相同的负载电流情况下,核准容量越小,设备 投资越低。

组合式(19)和(24),则有:

$$S_{\alpha} = U_{ab} I_{\alpha} = U_{\alpha} I_{c\alpha r} \cos \theta \tag{31}$$

$$S_{\beta} = U_{cd} I_{\beta} = U_{\beta} I_{c\beta r} \cos \theta' \tag{32}$$

考虑基波情形时,由式(28)—(30)得到3种接 线容量 S_α,S_β和S计算式如表1所示。

表13种接线形式容量分析 Table1 Capacity analysis for three transformer connection modes

接线形式	S_{α}	Sβ	S
Vv	$0.5U_1I_1\cos\varphi_1$	$0.5U_1I_1\cos{\varphi_1}$	$U_1 I_1 \cos \varphi_1$
Scott	$0.5U_1I_1\cos\varphi_1$	$0.5U_1I_1\cos{\varphi_1}$	$U_1 I_1 \cos \varphi_1$
YN,d11	$0.5U_1I_1\cos{\varphi_1}$	$0.5U_1I_1\cos{arphi_1}$	$U_1 I_1 \cos \varphi_1$

由表1可知,改进方案3种接线形式α、β侧变 流器容量匹配,核准容量相等,且仅由负载的有功功 率决定,即:

$$S_{\alpha} = S_{\beta} = 0.5S \tag{33}$$

$$S = U_1 I_1 \cos \varphi_1 \tag{34}$$

改进前的核准容量不仅与负载、运行工况有关, 而且与 IPFC 交流侧电感参数有关。图 7 和图 8 为 $L_{\alpha} = L_{\beta} = 1 \text{ mH}$ 时改进前后核准容量比值 K 随负载功 率因数变化的曲线。可见, IPFC 改进方案的容量降低,减少了设备投资。



图 7 牵引工况下改进前后核准容量比值





图 8 再生制动工况下改进前后核准容量比值 Fig.8 Ratio of approved capacity before improvement to that after improvement in regenerative braking condition

5 仿真分析

为验证本文所提改进方案的正确性,建立了 Vv 接线的 MATLAB/Simulink 仿真模型。牵引网电压 27.5 kV,负载电流 i_L =200 sin(ωt -36.8°)+42 sin($3\omega t$ -60°)+30 sin($5\omega t$ +150°)A,其中 3 次、5 次谐波含量 分别为 21%、15%,功率因数为 0.8(滞后),容量为 4800 kV·A^[9]。再生制动时电流取为 $-i_{Lo}$ IPFC 参数 取值为 $L_{\alpha} = L_{\beta} = 1$ mH, $C_{\alpha} = 1.6$ mF, $C_{\beta} = 3.6$ mF, $L_{C\alpha} =$ 2.57 mH, $L_{C\beta} = 0.63$ mH, $k_1 = 10$, $k_2 = 17$, $U_c = 2100$ V。

控制系统基于滞环比较控制策略如图 9 所示。 有功电流采用均值积分器实现分离^[18];指令电流生 成通过锁相环得到。TSR 工作于 2 个状态:导通状 态对应再生制动工况,断开状态对应牵引工况。



图 9 控制系统框图 Fig.9 Block diagram of control system

改进方案中电流的仿真波形如图 10 和图 11 所示。由图可见,在牵引和再生制动工况下,改进方案 均达到了满意的电流补偿效果。

流侧电压应满足:



图 10 牵引工况下改进 IPFC 的电流波形 Fig.10 Current waveforms of improved IPFC in traction condition



图 11 再生制动工况下改进 IPFC 的电流波形 Fig.11 Current waveforms of improved IPFC in regenerative braking condition

为便于对比分析,对传统同相牵引供电方案采 用本文相同的仿真参数和控制策略进行仿真。在 U_c 分别取 2100 V、4000 V、5000 V时,得到的电流波形 如图 12 所示。从图 12(a)、(b)可看出,由于变流器 直流侧电压给定值过低,造成原、副边电流明显畸变, 无法达到综合补偿效果。图 12(c)中,当直流侧电压 增大至极限值(仿真验证完全补偿时 U_c不应该小于





图 12 牵引工况下传统 IPFC 的电流波形 Fig.12 Current waveforms of traditional IPFC in traction condition

4900 V,图 12(c)中取为 5000 V)以上时,稳定后可 达到改进方案相同的补偿效果。因此,改进方案对 降低直流侧电压是行之有效的。

6 结论

a. 基于 IPFC 的同相牵引供电统一改进方案适用于 Vv 接线、Scott 接线和 YN,d11 接线这3 种常见的接线形式。

b.改进方案可有效降低直流侧电压,并减小设备补偿容量,可推进同相牵引供电的广泛推广。

c.改进方案中3种接线形式α、β侧变流器容量匹配,核准容量相等,且仅由负载的有功功率决定。

d. 改进方案中 Vv 接线理想直流侧电压最低, YN,d11 接线最高;而 Scott 接线可简化 β 侧的电抗 设计,取消 TSR 环节。

参考文献:

- 张志文,王丹,胡斯佳,等.一种混合型电气化铁道电能质量综合 治理系统及其容量分析[J].电力自动化设备,2014,34(12):89-94.
 ZHANG Zhiwen,WANG Dan,HU Sijia,et al. Hybrid railway power quality improvement system and its power capacity analysis
 [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(12):89-94.
- [2] 李群湛, 贺建闽, 解绍锋. 电气化铁路电能质量分析与控制[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2011:51-92.
- [3] 李群湛,张进思,贺威俊. 适于重载电力牵引的新型供电系统的研究[J]. 铁道学报,1988,10(4):23-31.
 LI Qunzhan,ZHANG Jinsi,HE Weijun. Study of a new power supply system for heavy haul electric traction[J]. Journal of the China Railway Society,1988,10(4):23-31.
- [4] 李群湛,贺建闽. 电气化铁路的同相供电系统与对称补偿技术[J].
 电力系统自动化,1996,20(4):9-11.
 LI Qunzhan,HE Jianmin. Electrified railway feeding system without phase exchange and symmetrical compensation technology
 [J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(4):9-11.
- [5] 曾国宏,郝荣泰.采用有源滤波器实现平衡变换的供电系统研究 [J].铁道学报,2003,25(1):48-53. ZENG Guohong,HAO Rongtai. A novel three-phase balanced traction supply system based on active power filter[J]. Journal of the China Railway Society,2003,25(1):48-53.
- [6] 张秀峰,高仕斌,钱清泉,等. 基于阻抗匹配平衡变压器和 AT 供电

方式的新型同相牵引供电系统[J]. 铁道学报,2006,28(4):32-37. ZHANG Xiufeng,GAO Shibin,QIAN Qingquan,et al. A novel cophase traction power supply system based on impedance matching balance transformer and AT power supply mode[J]. Journal of the China Railway Society,2006,28(4):32-37.

- [7] 张秀峰,钱清泉,李群湛,等. 基于有源滤波器和 AT 供电方式的 新型同相牵引供电系统[J]. 中国铁道科学,2006,27(6):73-78. ZHANG Xiufeng,QIAN Qingquan,LI Qunzhan,et al. A novel cophase power supply system based on active power filter and AT power supply mode[J]. China Railway Science,2006,27(6): 73-78.
- [8] SHU Zeliang,XIE Shaofeng,LI Qunzhan. Single-phase back-toback converter for active power balancing, reactive power compensation, and harmonic filtering in traction power system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(2):334-343.
- [9] 魏光,李群湛,黄军,等. 新型同相牵引供电系统方案[J]. 电力系 统自动化,2008,32(10):80-83.

WEI Guang,LI Quanzhan,HUANG Jun,et al. A new cophase traction power supply system[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(10):80-83.

[10] 魏光. 基于 V 型接线的同相牵引供电系统[J]. 电力自动化设备, 2010,30(12):60-65.

WEI Guang. Cophase traction power supply system based on V connection [J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30 (12):60-65.

[11] 张刚毅,李群湛. 电气化铁道异相供电方式向同相供电方式的转换[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):142-145.
 ZHANG Gangyi,LI Qunzhan. Transfer from out-phase power su-

pply to in-phase power supply [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(11): 142-145.

- [12] 谢斌,戴珂,张树全,等. 并联型有源电力滤波器直流侧电压优 化控制[J]. 中国电机工程学报,2011,31(9):23-29.
 XIE Bin,DAI Ke,ZHANG Shuquan,et al. Optimization control of DC link voltage for shunt active power filter[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(9):23-29.
- [13] 李群湛, 贺建闽. 牵引供电系统分析[M]. 成都: 西南交通大学 出版社, 2007:129-203.
- [14] 黄小红,李群湛,杨乃琪,等. 同相牵引供电系统控制策略研究 及仿真分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(1):43-47.
 HUANG Xiaohong,LI Qunzhan,YANG Naiqi,et al. Control stra-

tegy of co-phase traction power supply system and simulative analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 43-47.

 [15] 赵国鹏,林少伯,韩民晓.基于补偿特性的并联型有源电力滤波器直流侧电压取值分析[J].电力系统自动化,2012,36(14): 83-87.

ZHAO Guopeng,LIN Shaobo,HAN Minxiao. Design of voltage in DC link of parallel-type active power filter based on compensation characteristics [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(14):83-87.

 [16] 张小凤,王孝洪,田联房,等. 基于分数阶 PI^A 控制器的有源电力 滤波器直流侧电压控制[J]. 电力系统自动化,2013,37(16): 108-113.
 ZHANG Xiaofeng,WANG Xiaohong,TIAN Lianfang, et al. DC

voltage control of active power filter based on fractional-order PI^A controller[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37 (16):108-113.

- [17] 丁祖军,刘保连,张宇林. 基于自抗扰控制技术的有源电力滤波 器直流侧电压优化控制[J]. 电网技术,2013,37(7):2030-2034.
 DING Zujun,LIU Baolian,ZHANG Yulin. Optimal control for DC side voltage of active power filter based on auto-disturbance rejection control[J]. Power System Technology,2013,37 (7):2030-2034.
- [18] 陆秀令,张松华,曹才开,等. 单相电路谐波及无功电流新型检测方法[J]. 高电压技术,2007,33(3):163-166.
 LU Xiuling,ZHANG Songhua,CAO Caikai,et al. New detecting method for harmonics and reactive currents in singlephase circuit[J]. High Voltage Engineering,2007,33(3):163-166.

作者简介:



黄小红(1978—),男,湖北广水人,讲师,博士研究生,通讯作者,主要研究方向为 牵引供电系统分析、电气化铁路电能质量分析 与控制(E-mail:hhwjyj15534@163.com);

李群湛(1957—),男,河北元氏人,教 授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为 牵引供电系统理论及电能质量的分析与控 制(E-mail:lqz3431@263.net)。

Improvement scheme for DC link voltage and compensation capacity of co-phase traction power supply system

HUANG Xiaohong, LI Qunzhan, XIE Shaofeng

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Aiming at the higher DC link voltage and larger compensation capacity of co-phase traction power supply system for electrified railway, an improvement scheme of IPFC (Integrated Power Flow Controller) is discussed. A unified improvement scheme is proposed for three common transformer connection modes, i.e. Vv, Scott and YN, d11, which adjusts the property and magnitude of its AC-side reactance according to different operating conditions of traction and regenerative braking. Analysis shows that the improvement scheme reduces the DC link voltage and compensation capacity effectively. After improvement, the approved capacity of three connection modes is uniformly the active power of load, the DC-link voltage of Vv mode is the lowest while that of YN, d11 the highest, and the β -side reactance design of Scott mode is simplified. Simulative results for Vv mode validate the effectiveness and correctness of the proposed method.

Key words: electrified railway; co-phase traction power supply system; integrated power flow controller; transformer connection; DC link voltage; approved capacity; electric traction; compensation

90