

基于新型 YNvd 平衡变压器的电气化铁道同相供电系统

崔贵平, 罗隆福, 李 勇, 刘裕兴, 王 涛

(湖南大学 国家电能变换与控制工程技术研究中心, 湖南 长沙 410082)

摘要:针对电气化铁路牵引供电系统中存在的无功、负序、谐波及过分相问题,提出了一种由新型 YNvd 平衡变压器、综合潮流控制器(IPFC)组成的同相供电系统。与采用传统的 YNvd 平衡变压器进行同相供电的装置相比,其通过合理配置新型 YNvd 平衡变压器绕组的电压等级,节省了1台单相耦合降压变压器,从而降低了整套装置的成本和占地空间。对新型 YNvd 同相牵引供电系统的补偿原理进行了详细的分析,为实现补偿电流的无偏差跟踪,提出了一种基于广义积分迭代控制算法的电流控制器设计方法。仿真结果证明了所提方法和控制策略的可行性和有效性。

关键词:电气化铁路;YNvd 平衡变压器;同相供电;综合潮流控制器;广义积分;电分相

中图分类号:U 223.5

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.02.024

0 引言

随着我国电气化铁路向重载高速化方向发展,负序、谐波、无功等电能质量问题日益突出,严重影响着牵引网和供电网的安全可靠运行。同时,电分相环节的存在不仅造成机车牵引力、速度的损失,而且机车过分相时会导致车网之间电气暂态过程复杂化,严重时还会危及机车、牵引网的安全可靠运行^[1]。

为了同时解决上述电能质量和电分相问题,国内外专家学者们展开了深入的研究。文献[2-3]提出一种采用无源对称补偿的同相供电方法,该方法存在不能实现功率动态补偿的缺陷。文献[4-5]提出通过电力电子变压器将电网的三相交流电转换成单相交流电直接给电力机车供电,该方法能够彻底解决电能质量问题,但是存在可靠性低、成本较高的问题。为了降低有源部分的补偿容量和直流电压,文献[6-8]提出一种采用有源和无源装置混合补偿的同相供电系统,该装置能在一定程度上减少有源部分的容量,但该方法算法复杂,工程实现难度较大。文献[9-16]提出一种由平衡变压器和潮流控制器构成的同相供电方案,该方案虽然能有效消除牵引变电所处的电分相环节,并实现负序、谐波及无功的动态补偿,但为了实现电气隔离和降低开关器件所承受的电压等级,需要2台单相耦合降压变压器。

关于同相供电变换装置综合潮流控制器(IPFC)的控制方法^[11-16],目前主要有滞环控制和比例-积分(PI)控制。滞环控制虽然实现简单、动态响应速度快、鲁棒性强,但由于滞环控制的开关频率不固定、频谱范围广,加大了滤波器的设计难度;PI

控制在对交流信号进行跟踪时存在幅值和相位的偏差^[17-18],降低了系统的控制性能。

本文提出了一种基于新型 YNvd 平衡变压器的同相供电系统。通过合理配置 YNvd 平衡变压器绕组的电压等级,节省了1台单相耦合降压变压器,降低了整套装置的成本和占地空间。本文对新型同相供电系统的补偿原理进行了详细的分析,针对电流滞环控制和 PI 控制所存在的固有缺陷,设计了一种基于广义积分迭代控制算法的电流控制器。仿真结果表明,本文所提的新型同相供电系统能够同时治理负序、谐波及功率因数等电能质量问题,此方案在工程实践中具有较好的推广价值。

1 系统结构

文献[10-15]提出了采用传统 YNvd 平衡变压器的同相供电系统结构。主变压器将电网的三相交流电转换成两相交流电。 α 相和 β 相具有相同的电压等级,其中, α 相直接给电力机车供电, β 相通过 IPFC 与 α 相并联。耦合变压器 T_1 、 T_2 起到电气隔离和降低电压等级的作用。

图1为采用新型 YNvd 平衡变压器的同相供电系统结构。其接线方式和文献[10-15]所述的接线方式大致相同,不同的是可通过合理地设置 YNvd 平衡变压器三角形绕组的变比来与 IPFC 开关器件的电压/电流等级相匹配。因而,IPFC 可与三角形绕组的端子(a和b)直接相连。与文献[10-15]的结构相比,本文提出的同相供电系统节省了1台单相耦合降压变压器,使得整套装置的成本和占地空间得到减少。

2 主变结构和补偿原理

2.1 主变结构

图1中, W_A 、 W_B 、 W_C 为新型 YNvd 平衡变压器的原边三相绕组, W_{a1} 、 W_{c1} 构成了二次侧的 α 相, W_{ab} 、

收稿日期:2018-04-12;修回日期:2018-12-08

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477046);湖南省重大科技专项(2015GK1027,2017GK2241)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51477046) and Hunan Province Major Science and Technology Project(2015GK1027,2017GK2241)

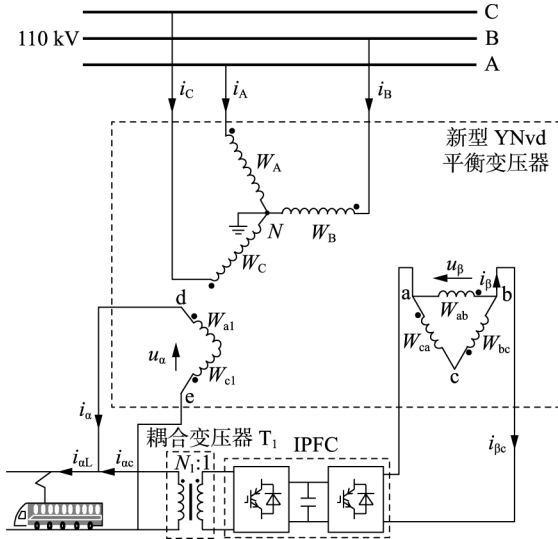


图1 新型同相供电系统

Fig.1 Novel co-phase power supply system

W_{bc} 、 W_{ca} 构成了二次侧的 β 相,其中 W_{ab} 、 W_{bc} 、 W_{ca} 的绕组数可根据实际需要进行合理配置。各绕组之间满足以下关系:

$$\begin{cases} W_A = W_B = W_C = W_1 \\ W_{ab} = W_{bc} = W_{ca} = W_2 \\ W_{a1} = W_{c1} = W_3 \\ Z_{a1} = Z_{c1} = Z_1 \\ Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = Z_2 \\ W_3/W_2 = n \end{cases} \quad (1)$$

其中, Z_{a1} 、 Z_{c1} 、 Z_{ab} 、 Z_{bc} 、 Z_{ca} 为对应绕组的等效阻抗; n 为变压器二次侧 α 相 V 形绕组与 β 相三角形绕组的匝数比。

2.2 补偿原理

图2为本文所提的同相供电系统的等效电路。对主变二次侧的三角形绕组运用基尔霍夫电压/电流定律(KVL/KCL),有:

$$\begin{cases} i_{c2} = i_{b2} + i_{\beta c} \\ i_{a2} = i_{b2} + i_{\beta c} \\ i_{a2}Z_2 + i_{b2}Z_2 + i_{c2}Z_2 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

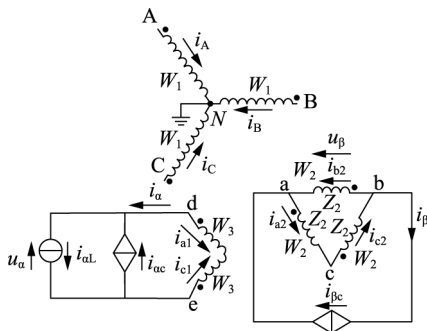


图2 同相供电系统等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of co-phase power supply system

忽略变压器的励磁电流,由安匝平衡原理可得:

$$\begin{cases} i_A W_1 + i_{a2} W_2 + i_{a1} W_3 = 0 \\ i_B W_1 + i_{b2} W_2 = 0 \\ i_C W_1 + i_{c2} W_2 + i_{c1} W_3 = 0 \end{cases} \quad (3)$$

对于 V 形绕组,有:

$$\begin{cases} i_{a1} = i_{\alpha c} - i_{\alpha L} \\ i_{c1} = i_{\alpha L} - i_{\alpha c} \end{cases} \quad (4)$$

联立式(1)——(4)可得:

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{W_3}{W_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ -\frac{W_3}{W_1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha L} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{W_3}{W_1} & -\frac{1}{3} \frac{W_2}{W_1} \\ 0 & \frac{2}{3} \frac{W_2}{W_1} \\ \frac{W_3}{W_1} & -\frac{1}{3} \frac{W_2}{W_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha c} \\ i_{\beta c} \end{bmatrix} \quad (5)$$

由图2可知, $i_{\beta} = i_{\beta c}$ 。因此,可将式(5)变形为:

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{W_3}{W_1} & -\frac{1}{3} \frac{W_2}{W_1} \\ 0 & \frac{2}{3} \frac{W_2}{W_1} \\ -\frac{W_3}{W_1} & -\frac{1}{3} \frac{W_2}{W_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha L} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -\frac{W_3}{W_1} & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{W_3}{W_1} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha c} \\ i_{\beta c} \end{bmatrix} \quad (6)$$

本文提出的方案中,新型 YNvd 平衡变压器副边三角形绕组与 V 形绕组具有不同的电压等级。设 $U_{\alpha} = jnU_{\beta}$ 、变压器原边绕组与二次侧绕组的匝数比 $K_T = W_1/W_2$,因此有 $W_2 = (\sqrt{3}/n)W_3$ 。将上述关系代入式(6)中可得:

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = \frac{1}{K_T} \begin{bmatrix} \frac{n}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{2}{3} \\ -\frac{n}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha L} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} + \frac{1}{K_T} \begin{bmatrix} -\frac{n}{\sqrt{3}} & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{n}{\sqrt{3}} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha c} \\ i_{\beta c} \end{bmatrix} = S_1 \begin{bmatrix} i_{\alpha L} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} + S_2 \begin{bmatrix} i_{\alpha c} \\ i_{\beta c} \end{bmatrix} \quad (7)$$

以 A 相电压为参考,定义各相电压如下:

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \\ u_{\alpha} \\ u_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_A \angle 0^\circ \\ U_B \angle -120^\circ \\ U_C \angle 120^\circ \\ u_{\alpha} \angle -30^\circ \\ u_{\beta} \angle 60^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_A D_A \\ U_B D_B \\ U_C D_C \\ u_{\alpha} D_{\alpha} \\ u_{\beta} D_{\beta} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中, $D_x (x \in \{A, B, C, \alpha, \beta\})$ 为各相电压的方向矢量; U_x 为各相电压的幅值。

本文所提补偿方法的补偿原理可通过图3所示

的补偿原理图来加以说明。设负载的电流为 $i_{\alpha L}$, 其有功电流分量和无功电流分量分别为 $i_{\alpha Lp}$ 和 $i_{\alpha Lq}$ 。根据 YNvd 平衡变压器的供电特性^[10-15,19], 当两供电臂输出的基波有功功率相等且基波电流(即图3中的 i_{α}^* 和 i_{β}^*)与各自供电臂的电压同相位时, YNvd 平衡变压器的原边三相电流平衡且与对应相的三相输入电压同相位。

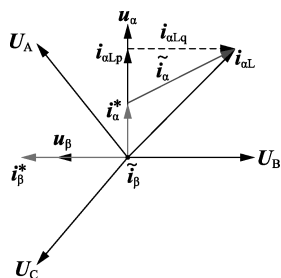


图3 补偿原理图

Fig.3 Diagram of compensation principle

将 $i_{\alpha L}$ 和 i_{β} 分别写成如下形式 $i_{\alpha L} = i_{\alpha}^* + \tilde{i}_{\alpha}$ 和 $i_{\beta} = i_{\beta}^* + \tilde{i}_{\beta}$ 。因此, 式(7)可改写为:

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = S_1 \begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \end{bmatrix} + S_1 \begin{bmatrix} \tilde{i}_{\alpha} \\ \tilde{i}_{\beta} \end{bmatrix} + S_2 \begin{bmatrix} i_{\alpha c} \\ i_{\beta c} \end{bmatrix} \quad (9)$$

其中, $\tilde{i}_{\alpha} = i_{\alpha L} - 0.5i_{\alpha Lp}D_{\alpha}$; $i_{\alpha}^* = 0.5i_{\alpha Lp}D_{\alpha}$; $i_{\beta}^* = -0.5ni_{\alpha Lp}D_{\beta}$; $\tilde{i}_{\beta}$ 位于坐标原点, 即 $\tilde{i}_{\beta} = 0$ 。

通过适当的控制使 $i_{\alpha c}$ 、 $i_{\beta c}$ 满足:

$$S_1 \begin{bmatrix} \tilde{i}_{\alpha} \\ \tilde{i}_{\beta} \end{bmatrix} + S_2 \begin{bmatrix} i_{\alpha c} \\ i_{\beta c} \end{bmatrix} = 0 \quad (10)$$

则主变压器的原边三相电流只包含由 i_{α}^* 和 i_{β}^* 变换而来的三相基波正序电流分量 i_A^* 、 i_B^* 和 i_C^* , 即:

$$\begin{bmatrix} i_A^* \\ i_B^* \\ i_C^* \end{bmatrix} = S_1 \begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{K_T} \begin{bmatrix} \frac{n}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{2}{3} \\ -\frac{n}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha}^* \\ i_{\beta}^* \end{bmatrix} \quad (11)$$

因此, 由式(10)可推导出补偿电流 $i_{\alpha c}$ 、 $i_{\beta c}$ 为:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha c} \\ i_{\beta c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha L} - 0.5i_{\alpha Lp}D_{\alpha} \\ -0.5i_{\alpha Lp}D_{\beta} \end{bmatrix} \quad (12)$$

图4为该同相供电变换装置 IPFC 的等效结构图。其是由2个单相背靠背的变流器组成, 中间共用1个直流环节。与传统的同相牵引供电系统相比, IPFC 的 β 相变流器通过滤波电感直接与新型 YNvd 平衡变压器三角形绕组的端子(a和b)相连, 从而节省了1台单相耦合降压变压器。通过对单相背靠背变流器进行控制, 使其实际电流跟踪指令电

流, 即可实现无功、负序、谐波等电能质量问题的综合治理。

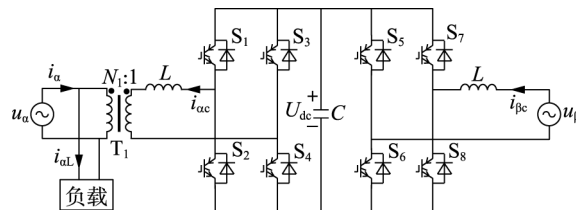


图4 IPFC 的等效结构图

Fig.4 Equivalent structure diagram of IPFC

3 控制策略

同相供电系统的控制框图如图5所示。其主要由检测模块和控制模块构成。检测模块的作用是得到电压的相位和负载电流的大小。 α 相供电臂的相位由锁相环(PLL)检测得到, 然后根据 α 相和 β 相电压之间的关系($u_{\alpha} = jnu_{\beta}$)可以得到 β 相供电臂的相位。

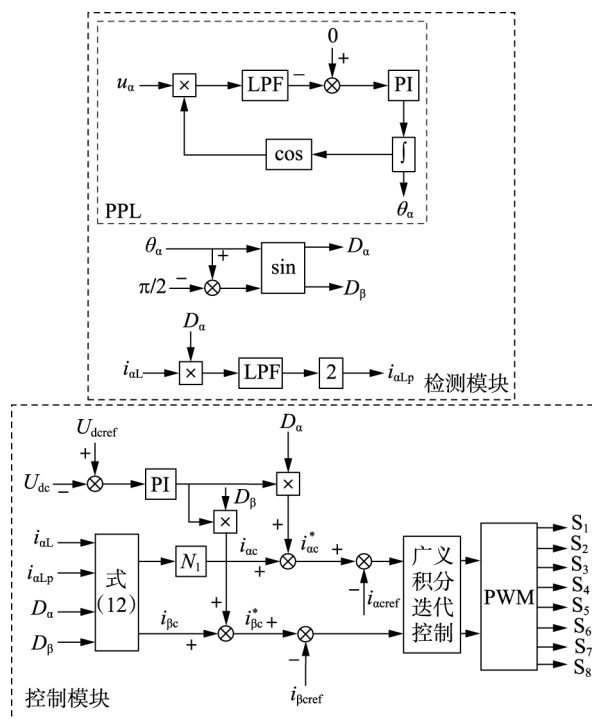


图5 系统控制框图

Fig.5 Control block diagram of system

设 α 相供电臂电压的单位同步信号 $D_{\alpha} = \sin(\omega t)$, 且某时刻负载电流为:

$$i_{\alpha L} = i_{\alpha Lp} \sin(\omega t) + i_{\alpha Lq} \cos(\omega t) + \sum_{h=2}^{\infty} i_{\alpha Lh} \sin(h\omega t + \theta_h) \quad (13)$$

其中, $i_{\alpha Lp}$ 和 $i_{\alpha Lq}$ 分别为负载的基波有功电流和无功电流幅值; $i_{\alpha Lh}$ 为负载电流的 h 次谐波分量幅值; θ_h 为 h 次谐波分量的初始相位。

将负载电流 $i_{\alpha L}$ 和 α 相供电臂电压的单位同步

信号 D_α 相乘,即:

$$i_{\alpha L} D_\alpha = i_{\alpha L} \sin(\omega t) = i_{\alpha Lp} \sin^2(\omega t) + i_{\alpha Lq} \sin(\omega t) \cos(\omega t) + \sin(\omega t) \sum_{h=2}^{\infty} i_{\alpha Lh} \sin(h\omega t + \theta_h) \quad (14)$$

再将由式(14)所得的结果通过低通滤波器(LPF)即可得到负载的基波有功电流幅值 $i_{\alpha Lp}$ 。

直流侧电压的跟踪误差信号经过 PI 控制器后分别与 α 和 β 相的单位同步信号 D_α 、 D_β 相乘,然后分别叠加到指令电流信号 $i_{\alpha c}$ 和 $i_{\beta c}$ 上形成新的指令电流信号 $i_{\alpha c}^*$ 和 $i_{\beta c}^*$ 。考虑到传统 PI 控制器在跟踪正弦量时存在幅值和相位上的偏差,因此,为了提高 IPFC 的电流跟踪控制精度,本文提出了一种基于广义积分迭代控制算法的电流控制器,以实现实际电流对参考电流的无差跟踪^[20-23]。

在 IPFC 中,电流跟踪误差 $e(t)$ 为变流器输出的参考电流指令 $i_{\alpha c}^*$ ($i_{\beta c}^*$) 与实际电流 $i_{\alpha cf}$ ($i_{\beta cf}$) 的差值。 $e(t)$ 的广义积分 $y(t)$ 在频域满足以下方程:

$$y(s) = E(s) \sum_{h=1}^{\infty} G_h(s) = E(s) \sum_{h=1}^{\infty} \frac{2\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + (h\omega_0)^2} \quad (15)$$

实际工程应用中,考虑到谐波治理的要求、开关频率和 IPFC 容量的大小,只需滤除电力机车产生的有限次谐波,即:

$$y(s) = E(s) \sum_{h \in H} \frac{2\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + (h\omega_0)^2} \quad (16)$$

其中, H 为 IPFC 需补偿电流次数的集合。在本文中主要针对电气化铁道中存在的主要次谐波,因而有: $H \subseteq \{1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, 19, 21, 23, 25\}$ 。需要指出的是,由式(12)可知, β 相变流器需补偿的电流只含基频成分。因此, β 相变流器只需采用一个广义积分控制器来跟踪基波电流。

因此,类似于常规的 PI 控制,可以得到 IPFC 的基于广义积分算法的等效控制为:

$$y_{eq}(s) = e(s) \left[K_p + \sum_{h \in H} \frac{2K_{lh}\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + (h\omega_0)^2} \right] \quad (17)$$

其中, K_p 为比例系数,可根据系统的稳定性和动态响应情况进行设计; K_{lh} 为 h 次谐波的积分系数,用于减少稳态误差; ω_c 为截止频率,决定控制器的带宽; ω_0 为基波角频率,所以取 $\omega_0 = 100\pi$ rad/s。

由于控制器包含多个广义积分器,为了减小控制算法的计算量,便于离散化数字控制。本文提出了一种基于广义积分迭代控制算法的电流控制器来实现 IPFC 的无差调节。

令对 h 次谐波的广义积分控制量为:

$$U_{lh}(s) = e(s) \frac{2K_{lh}\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + (h\omega_0)^2} \quad (18)$$

整理得:

$$s^2 U_{lh}(s) + 2\omega_c s U_{lh}(s) + (h\omega_0)^2 U_{lh}(s) = 2K_{lh}\omega_c s e(s) \quad (19)$$

由式(19)可得其时域方程为:

$$\frac{d^2 u_{lh}(t)}{dt^2} + 2\omega_c \frac{du_{lh}(t)}{dt} + (h\omega_0)^2 u_{lh}(t) = 2K_{lh}\omega_c \frac{de(t)}{dt} \quad (20)$$

将式(20)写成差分方程的形式为:

$$\{[u_{lh}(k) - u_{lh}(k-1)] - [u_{lh}(k-1) - u_{lh}(k-2)]\} / \Delta T^2 + 2\omega_c [u_{lh}(k) - u_{lh}(k-1)] / \Delta T + (h\omega_0)^2 u_{lh}(k) = 2K_{lh}\omega_c [e(k) - e(k-1)] / \Delta T \quad (21)$$

其中, ΔT 为采样周期。

整理式(21)得:

$$u_{lh}(k) = \frac{2\Delta T K_{lh}\omega_c [e(k) - e(k-1)]}{1 + 2\Delta T \omega_c + (\Delta T h\omega_0)^2} + \frac{(2 + 2\Delta T \omega_c) u_{lh}(k-1) - u_{lh}(k-2)}{1 + 2\Delta T \omega_c + (\Delta T h\omega_0)^2} \quad (22)$$

由式(22)可知,只需保留 2 个控制周期的广义积分控制量 $u_{lh}(k-1)$ 和 $u_{lh}(k-2)$ 以及上一个控制周期的电流偏差 $e(k-1)$, 就可以得到新的广义积分控制量 $u_{lh}(k)$ 。则其离散等效控制率为:

$$u_{eq}(k) = K_p e(k) + \sum_{h=1}^{\infty} u_{lh}(k) \quad (23)$$

根据式(17)可得系统的开环传递函数为:

$$G(s) = \left[K_p + \sum_{h=1}^{\infty} \frac{2K_{lh}\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + (h\omega_0)^2} \right] \frac{K_{PWM}}{R + sL} \quad (24)$$

其中, L 为滤波电感值; R 为等效电阻值,其大小为开关损耗等效电阻与滤波电感等效电阻之和; K_{PWM} 为变流器的电压放大系数。

取 $K_p = 0.05$ 、 $K_{lh} = 0.5$ 、 $\omega_c = 5$ rad/s, 做式(24)的频谱特性曲线如图 6 所示。从图 6 中可以看出,广义积分控制器可使 1、3、5、7、9、11、13、15、17、19、21、23、25 次谐振频率处及其附近频段的增益较大,这意味着系统能在谐振频率处实现零稳态误差跟踪。

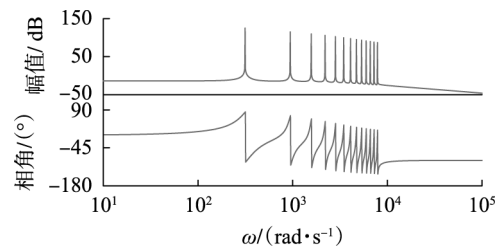


图 6 广义积分迭代控制开环传递函数 Bode 图

Fig.6 Bode diagram of open-loop transfer function of generalized integral iterative control

4 仿真分析

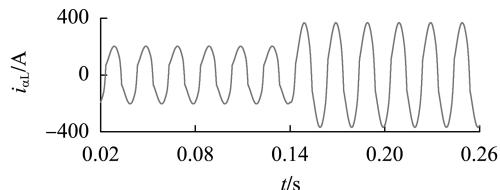
为了验证本文所提拓扑和控制方法的正确性,在 MATLAB/Simulink 软件上搭建了仿真平台。机车 I 和机车 II 均采用二极管整流桥连接阻感负载进行模拟,有功功率和无功功率分别为 2.5 MW 和 2 Mvar。其他仿真参数的设置如表 1 所示。

表 1 仿真参数

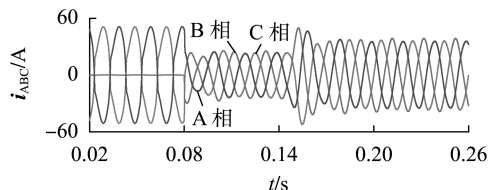
Table 1 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
系统短路容量	800 MV·A	降压变压器 T_1 变比	27.5:2.5
主变压器容量	20 MV·A	绕组匝数比 n	11
三相电网电压	110 kV	滤波电感 L	1.5 mH
α 相供电臂电压 u_α	27.5 kV	直流电容 C	40 mF
β 相供电臂电压 u_β	2.5 kV	直流电压	6 000 V

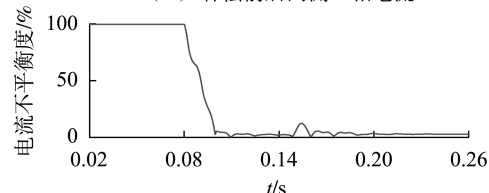
图 7(a) 为负载电流的波形,可以看出其中含有大量的谐波电流成分。在 0.02~0.14 s 时间段内,机车 I 运行在该线路上;在 0.14 s 时刻,机车 II 进入该



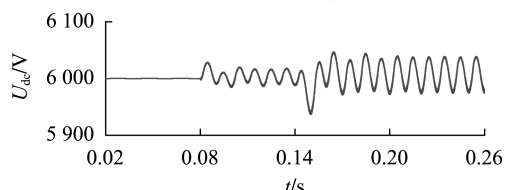
(a) 负载电流



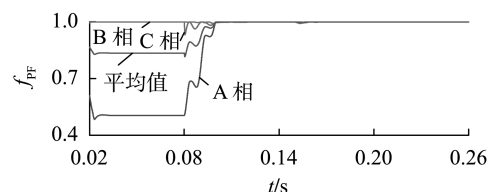
(b) 补偿前后网侧三相电流



(c) 电流不平衡度



(d) 直流侧电压



(e) 网侧功率因数

图 7 仿真波形

Fig.7 Simulative waveforms

线路。图 7(b) 为投入 IPFC 装置前后的网侧三相电流波形。在 0.02~0.08 s 时间段内未投入 IPFC 装置,新型 YNvd 平衡变压器运行在单相带负荷工况下,A 相和 C 相电流大小相等、方向相反且含有大量谐波,电流总谐波畸变率(THD)为 15.9%,B 相电流大小为 0。图 7(c) 为电流不平衡度曲线。由图 7(c) 可知,初始阶段三相电流不平衡度为 100%;在 0.08 s 时刻,IPFC 装置投入运行,三相电流的不平衡度下降到 1.92%,三相电流的 THD 皆减小到 2% 左右;在 0.14 s 时刻,机车 II 投入运行,网侧三相电流仍然趋于平衡,电流不平衡度为 2.25%,三相电流的 THD 分别为 2.18%、2.04%、2.11%。图 7(d) 为直流侧电压波形。从图 7(d) 中可以看出,初始阶段直流电压稳定在参考值 6 000 V 左右,并存在小幅度的 2 倍频纹波分量波动;当负载突变后,直流电压经过短时间的调整后又恢复到参考值附近,说明该系统具有良好的静态和动态性能。图 7(e) 为网侧功率因数曲线,可见在 IPFC 投运后,网侧平均功率因数由原来的 0.83 提高到 1。仿真结果表明,本文提出的同相供电系统能够同时消除谐波和负序电流,提高功率因数,显著地改善了电气化铁道牵引供电系统的电能质量。

5 结论

a. 为了解决电气化铁道中存在的负序、谐波、无功及过分相问题,本文提出了一种基于新型 YNvd 平衡变压器的电气化铁道同相供电系统;

b. 相比于传统的同相供电系统,本文提出的新型同相供电系统通过合理配置新型 YNvd 平衡变压器绕组的电压等级,节省了 1 台单相耦合降压变压器,因而使得整套装置的成本和占地空间得到减少,具有较好的工程推广价值;

c. 本文对新型同相供电系统的补偿原理进行了分析,设计了一种基于广义积分迭代控制算法的电流控制器,以实现 IPFC 补偿电流的无差跟踪,仿真结果验证了本文所提方法和控制策略的正确性。

参考文献:

- [1] 许龙,崔艳龙,魏建忠,等. 动车组不分闸过分相时牵引变压器差动保护误动分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):105-108.
- XU Long, CUI Yanlong, WEI Jianzhong, et al. Misoperation of traction transformer differential protection when train passes phase-separation with electrical load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(4):105-108.
- [2] 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.

- [3] 贺建闽,李群湛. 用于同相供电系统的对称补偿技术[J]. 铁道学报,1998,20(6):47-51.
HE Jianmin,LI Qunzhan. Symmetrical compensation technology used in feeding system without phase exchange[J]. Journal of the China Railway Society,1998,20(6):47-51.
- [4] 何晓琼,彭旭,周瑛英,等. 一种新型同相牵引供电系统均流性能研究[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):53-58.
HE Xiaojiong,PENG Xu,ZHOU Yingying,et al. Current-sharing performance of advanced co-phase traction power supply system[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(4):53-58.
- [5] 王丹,毛承雄,陆继明. 基于电子电力变压器的自平衡牵引变压器[J]. 高电压技术,2008,34(1):176-181.
WANG Dan,MAO Chengxiong,LU Jiming. Auto-balancing traction transformer with electronic power transformer[J]. High Voltage Engineering,2008,34(1):176-181.
- [6] DAI N Y,LAO K W,WONG M C,et al. Hybrid power quality conditioner for co-phase power supply system in electrical railway[J]. IET Power Electronics,2011,5(7):1084-1094.
- [7] LAO K W,DAI N Y,LIU W G. Hybrid power quality compensator with minimum DC operation voltage design for high-speed traction power systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2013,28(4):2024-2036.
- [8] LAO K W,WONG M C,DAI N Y,et al. Analysis in the effect of co-phase traction railway HPQC coupled impedance on its compensation capability and impedance-mapping design technique based on required compensation capability for reduction in operation voltage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2017,32(4):2631-2646.
- [9] SHU Z L,XIE S F,LU K,et al. Digital detection,control,distribution system for co-phase traction power supply application[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2013,60(5):1831-1839.
- [10] 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.
- [11] 吴萍,李群湛. 基于YN-vd接线变压器的新型同相牵引供电系统[J]. 电力自动化设备,2008,28(10):87-91.
WU Ping,LI Qunzhan. Cophase traction power supply system based on YN-vd connection transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(10):87-91.
- [12] 张友鹏,董海燕. 基于Y/△平衡变压器的同相牵引供电系统[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):101-104.
ZHANG Youpeng,DONG Haiyan. Co-phase traction power supply system based on Y/△ balanced transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(4):101-104.
- [13] 段胜朋,李群湛,杜雪松,等. 同相供电系统的改进型电流检测方法[J]. 电网技术,2010,34(9):65-69.
DUAN Shengpeng,LI Qunzhan,DU Xuesong,et al. Modified current detection for cophase power supply system[J]. Power System Technology,2010,34(9):65-69.
- [14] SHU Z,XIE S,LI Q. Single-phase back-to-back 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.
- [15] 刘晓菊,李群湛,康婕,等. 同相牵引供电系统的补偿原理及再生制动特性[J]. 电网技术,2010,34(12):99-103.
LIU Xiaoju,LI Qunzhan,KANG Jie,et al. Compensation principle of cophase traction power supply system and its regenerative braking characteristics[J]. Power System Technology,2010,34(12):99-103.
- [16] 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 strategy of co-phase traction power supply system and simulative analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(1):43-47.
- [17] ZMOOD D N,HOLMES D G. Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2003,18(3):814-822.
- [18] 马庆安,李群湛,解绍锋,等. AT供电系统同相供电PR控制器设计[J]. 电力自动化设备,2013,33(11):154-159.
MA Qingan,LI Qunzhan,XIE Shaofeng,et al. Design of PR regulator for co-phase AT-feeding traction power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(11):154-159.
- [19] 蒋寿生,周有庆,刘光晔,等. Y/△平衡变压器运行特性分析与模型试验[J]. 中国电机工程学报,2003,23(4):102-106.
JIANG Shousheng,ZHOU Youqing,LIU Guangye,et al. Operation characteristic analysis and model tests of Y/△ connected balance transformer[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(4):102-106.
- [20] 帅智康,罗安,刘定国,等. 静止无功补偿器与有源电力滤波器联合运行系统[J]. 中国电机工程学报,2009,29(3):56-64.
SHUAI Zhikang,LUO An,LIU Dingguo,et al. Combined system of static var compensator and active power filter[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(3):56-64.
- [21] 武健,何娜,徐殿国. 并联混合有源滤波器复合控制策略[J]. 电力自动化设备,2009,29(3):97-100.
WU Jian,HE Na,XU Dianguo. The composite control strategy of parallel hybrid active power filter[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(3):97-100.
- [22] 唐诗颖,彭力,康勇,等. 并联有源滤波器广义积分控制设计新方法[J]. 中国电机工程学报,2011,31(12):40-45.
TANG Shiyong,PENG Li,KANG Yong,et al. Novel design procedure of generalized integrators for shunt active power filters[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(12):40-45.
- [23] 涂春鸣,罗安,汤赐,等. 注入式混合型有源电力滤波器的控制算法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(24):52-58.
TU Chunming,LUO An,TANG Ci,et al. Control of injection type hybrid active power filter[J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(24):52-58.

作者简介:



崔贵平

崔贵平(1986—),男,湖南衡阳人,博士研究生,主要研究方向为电气化铁路电能质量治理、储能技术、配电网电能质量治理等(E-mail: stefaniecui@126.com);

罗隆福(1962—),男,湖南长沙人,教授,博士,主要研究方向为新型换流变压器及高压直流输电新理论、高效节能型交直流电能变换技术等。

(下转第180页 continued on page 180)

- [14] 张开宇,宋依群,严正. 考虑用户违约可能的负荷聚合商储能配置策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(17):127-133.
ZHANG Kaiyu, SONG Yiqun, YAN Zheng. Energy storage capacity optimization for load aggregators considering probability of demand response resources' breach[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(17): 127-133.
- [15] 章栋恩. 截断正态分布参数估计的 EM 算法[J]. 北京轻工业学院学报, 1998(2): 74-78.
ZHANG Dongen. Estimation of parameter for truncated normal distribution via the EM algorithm[J]. Journal of Beijing Institute of Light Industry, 1998(2): 74-78.
- [16] 施展武,杨莉,甘德强. PAB 和 MCP 电价机制下考虑不同容量水平的市场均衡分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 10-13.
SHI Zhanwu, YANG Li, GAN Deqiang. A price completion model in MCP and PAB pricing considering different capacity constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 10-13.

- [17] 2015 state of the market report for PJM[EB/OL]. (2016-03-31) [2017-12-08]. <http://www.pjm.com/~media/commtees-groups/committees/mc/20160331-state-of-market-report-review/20160331-som-presentation.ashx>.

作者简介:



索瑞鸿

索瑞鸿(1994—),女,山西吕梁人,硕士研究生,研究方向为电力市场(E-mail: srh@sjtu.edu.cn);

陈杏(1992—),女,福建连江人,硕士,主要研究方向为电力市场(E-mail: chenxing0050@163.com);

宋依群(1970—),女,浙江宁波人,副教授,博士,主要研究方向为电力市场以及电力系统分析(E-mail: yqsong@sjtu.edu.cn)。

Trading model considering bilateral performance indexes of generation and load

SUO Ruihong¹, CHEN Xing¹, SONG Yiqun¹, YAN Zheng¹, YAO Liangzhong²

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education, Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: To promote the development of high-quality controllable load and generators, and improve system's ability to maintain power balance under a high share of renewable energy sources, an electricity market trading model considering response performance of generation and load is proposed. At the power supply side, indices that evaluate the response ability of generators are introduced. At the electricity demand side, the case that load aggregators participating in the electricity market is considered. Also, an index that measures the response performance of load aggregators is established considering demand response uncertainties, in which the variation in operating costs with respect to the demand response performance can be identified. To ensure an optimal allocation of generator and demand resources, a two-stage market clearing framework is proposed. A day-ahead market clearing model that minimizes the operation cost is formulated, which includes the participation of load aggregators. Test results demonstrate that the proposed model contributes to an optimal allocation of both generator and demand resources, and hence reduces the market risk and possible losses.

Key words: electricity market; demand response performance; high share of renewable energy sources; market trading model; response performance

(上接第163页 continued from page 163)

Co-phase power supply system based on novel YNvd balanced transformer for electrified railway

CUI Guiping, LUO Longfu, LI Yong, LIU Yuxing, WANG Tao

(National Electric Power Conversion and Control Engineering Technology Research Center, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: To address the problems of reactive power, negative sequence, harmonic and passing over of neutral section in electrified railway traction power supply system, a co-phase traction power supply system that consists of novel YNvd balanced transformer and IPFC (Integrated Power Flow Controller) is proposed. Compared with the co-phase power supply system with traditional YNvd balanced transformers, the proposed approach saves a single-phase coupled step-down transformer by reasonably configuring the voltage level of the winding of the novel YNvd balanced transformer, which results in reduced investment cost and space of the entire equipment. Detailed compensation principle of the co-phase traction power supply system based on novel YNvd balanced transformer is analyzed. A current controller design method based on generalized integral iterative control algorithm is proposed to enable the error free tracking of the compensation current. Simulative results verify the feasibility and effectiveness of the proposed method and control strategy.

Key words: electric railways; YNvd balanced transformer; co-phase power supply; integrated power flow controller; generalized integral; neutral section