基于 YNVD 平衡变压器的电气化铁路电能质量管理系统

唐宏伟^{1,2},唐 杰¹,林 立¹

(1. 邵阳学院 多电源地区电网运行与控制湖南省重点实验室,湖南 邵阳 422000;2. 湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082)

摘要:提出了一种基于 YNVD 平衡变压器的电气化铁路电能质量管理系统。该系统利用 YNVD 平衡变压器 二次三角连接侧可引出三相抽头,连同二次 V 形连接侧安装的耦合变压器一起为单-三相背靠背变流器提供 电气接口。相比于传统用于电气化铁路的背靠背变流器,该系统中使用的三相变流器比传统的单相变流器 复杂,但该系统只需要1 台耦合变流器,在一定程度上弥补了其不足之处。同时,三相变流器可以在 c 相桥 臂开关发生故障时转变成单相变流器使用以保证系统补偿能力,而且可以在单相变流器故障情况下单独运 行以保证系统补偿能力,所以该系统可靠性较高。根据理论分析搭建了 MATLAB 仿真模型及小容量原理样 机,仿真和实验结果均验证了所提系统的有效性。

关键词:平衡变压器;电气化铁路;电能质量;系统补偿能力

中图分类号:TM 922;TM 46 文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.10.031

0 引言

电力机车因其运量大、速度快、无污染等特点而 受到了广泛的关注与应用[1]。但由于电力机车是一 种极强的非线性负荷,给牵引网和电力系统带来了 诸多电能质量问题,如一次侧功率因数低、电压电流 畸变严重等^[2]。同时,由于电力机车由非对称系统 供电(即单相供电),且机车负荷本身还具有极大的 波动性和随机性,所以三相电网侧存在较大的负序 电流。大量无功和负序电流不仅引起巨大的能量耗 损,同时也极大降低了牵引变压器的容量利用率及 线路的有功传送能力[34]。随着牵引技术的不断发 展,越来越多的电力机车尤其是高速电力机车采用 了先进的四象限牵引传动系统,在实现单位功率因 数运行的同时几乎不产生低次谐波电流,可以大幅 改善牵引网的供电质量^[5]。而不平衡问题不但没能 得到缓解,在一定程度上反而因牵引功率的增大和 行车密度的增加而进一步加剧。

对于电气化铁路牵引供电系统电能质量问题的 治理,国内外学者已经做了研究并提出了诸多的有 源、无源解决方法^[6]。无源治理方案是通过加装无 源滤波装置来滤除部分低次谐波并兼顾无功补 偿^[7]。但由于电力机车工况复杂多变,无源滤波器 不仅设计困难、补偿效果不佳,且存在与系统或机车 发生谐振的风险^[8]。为缓解因机车负荷不对称而带 来的负序问题,平衡变压器在牵引系统中得到广泛

收稿日期:2017-08-16;修回日期:2018-06-08

基金项目:湖南省科技计划项目(2016TP1023);邵阳市科技 计划项目(2017ZD11)

Project supported by the Planned Science and Technology Project of Hunan Province (2016TP1023) and the Planned Science and Technology Project of Shaoyang(2017ZD11)

的应用^[9]。但由于平衡变压器的负序抑制能力依赖 于负荷的对称程度^[10],即负荷越对称,其负荷抑制 效果越好,所以单独使用平衡变压器也难以从根本 上解决一次侧负序电流问题。基于先进电力电子器 件和控制技术的有源电能质量治理方案可以很好地 弥补无源方案的不足。通过与负荷并接有源电力滤 波器,注入与负荷侧谐波反相的谐波电流可以达到 抑制电源侧谐波电流的目的[11-12]。但由于该装置对 开关频率要求较高,所以难以在如电气化铁路等中、 大功率场合得到应用。与谐波治理相比,基波负序 和无功补偿在电气化铁路中相对容易实现,如单相 静止无功补偿器 SVC(Static Var Compensator)和静 止同步补偿 STATCOM (STATic synchronous COMpensator)等电力电子装置在铁路电能质量治理方面 都有一定的应用^[13-14]。铁路静止功率调节器 RPC (Railway static Power Conditioner)在 STATCOM 的基 础上通过背靠背结构将两臂无功补偿装置连接在一 起,不仅实现了两臂无功的独立补偿,还可以通过转 移两臂有功实现对负序的治理,达到综合治理电气 化铁路电能质量的目的^[15-16]。但由于 RPC 系统中 需要2台大容量、高成本的耦合变压器,所以该系统 性价比并不太令人满意。为了探研具有更高性价比 的电气化铁路电能质量补偿装置,本文提出了一种 基于 YNVD 平衡变压器的新型电气化铁路电能质量 管理系统。该系统利用 YNVD 平衡变压器二次三角 连接侧可引出三相抽头为不对称单-三相背靠背变 流器提供三相接口,二次 V 形连接侧安装的耦合变 压器为不对称单一三相背靠背变流器提供单相接口。 相比于传统用于电气化铁路的背靠背变流器,该系 统中因一侧使用了三相变流器,所以比传统的背靠 背单相变流器更复杂。但由于该系统只需要1台耦 合变流器,这一优势在一定程度上弥补了其上述的

不足。三相变流器可以在 c 相桥臂开关发生故障时 转变成单相变流器使用以保证系统补偿能力,还可 以在单相变流器故障情况下单独运行以保证系统补 偿能力,所以该系统的可靠性与连续性相比传统补 偿系统均有所提升。

系统接线 1

本文所提电能质量管理系统接线如图1所示。 从图1可以看出,YNVD平衡变压器将三相电网电 压变换成单相牵引电压给电力机车供电。由于 YNVD 二次三角接绕组(β相侧绕组)可以提供三相 抽头 m-n-c,且其电压等级灵活可调,所以不对称单-三相背靠背变流器三相端口可以直接与该三相抽头 相连。对于该不对称变流器的单相侧,则通过1台 单相耦合变压器与 V 形绕组(α 相侧绕组)相连。 由于该系统中引入了三相变流器,系统结构比传统 RPC 系统稍复杂。但由于该系统只使用了1台耦合 变压器,所以在一定程度上弥补了其以上不足。同 时,由于抽头 m-n 的电压与 β 相电压同相,可以证 明当三相变流器 c 相桥臂开关发生故障无法正常工 作时,该三相变流器剩余两相(m相和n相)可以充 当单相变流器使用以保证系统补偿成功,此时,该背 靠背变流器拓扑与传统 RPC 相同,即单相背靠背变 流器。另外,当不对称背靠背变流器中的单相变流 器发生故障无法使用时,其中的三相变流器可以单 独使用以保证系统补偿能力(在补偿策略中将对以 上两点加以解释说明)。需要说明的是:变压器两端 二次侧与一次侧耦合程度可能因接线方式不对称而 有所差异,会给补偿结果的准确度带来影响,但若变 压器满足一般工业设计要求,其带载及补偿特性不 会受到本质性影响[13]。



Fig.1 System connection

补偿策略 2

根据图1,首先定义以下变量:

$$\begin{cases} N_{A} = N_{B} = N_{C} \\ N_{a I I} = N_{b I I} = N_{c I I} \\ N_{a I} = N_{c I} \\ N_{mc} = y N_{a I I} , N_{cn} = y N_{c I I} \\ Z_{a I I} = Z_{b I I} = Z_{c I} \\ Z_{a I} = Z_{c I} \\ Z_{mc} = \gamma Z_{a I I} , Z_{cn} = \gamma Z_{c I I} \end{cases}$$
(1)

其中, $N_{\rm A}$ 、 $N_{\rm B}$ 、 $N_{\rm C}$ 、 $N_{\rm aII}$ 、 $N_{\rm bII}$ 、 $N_{\rm cII}$ 、 $N_{\rm aI}$ 、 $N_{\rm cI}$ 、 $N_{\rm cI}$ 、 $N_{\rm mc}$ 、 $N_{\rm cm}$ 为各绕组匝数; Z_{all} 、 Z_{bll} 、 Z_{cll} 、 Z_{all} 、 Z_{cll} 、 Z_{mc} 、 Z_{mc} 为各 绕组等效漏抗; N_{aII}/N_{aII} =1.732。同时,为了保证平 衡变压器的平衡条件,有 $\gamma = \gamma^{[13]}$ 。

其次,定义该系统的参考方向如下:

$$\begin{cases} \boldsymbol{V}_{\mathrm{A}} = \boldsymbol{V}_{\mathrm{A}} \angle 120^{\circ}, \ \boldsymbol{V}_{\mathrm{B}} = \boldsymbol{V}_{\mathrm{B}} \angle 0^{\circ}, \ \boldsymbol{V}_{\mathrm{C}} = \boldsymbol{V}_{\mathrm{C}} \angle -120^{\circ} \\ \boldsymbol{V}_{\alpha} = \boldsymbol{V}_{\alpha} \angle 90^{\circ}, \ \boldsymbol{V}_{\beta} = \boldsymbol{V}_{\beta} \angle 180^{\circ} \end{cases}$$
(2)

2.1 YNVD 平衡变压器在不同情况下一、二次侧电 流变换关系

两相馈线带负荷工况下系统等效电路如图 2 (a) 所示。在以下公式推导中电流全部采用相量形 式表示,图形中相应的电流用其瞬时量表示。不忽 略变压器励磁电流,由安匝平衡原理可得,

$$\begin{cases} \boldsymbol{I}_{A}N_{A} + \boldsymbol{I}_{a1}N_{a1} + \boldsymbol{I}_{a2}N_{a1} = 0 \\ \boldsymbol{I}_{B}N_{B} + \boldsymbol{I}_{b}N_{b1} = 0 \\ \boldsymbol{I}_{C}N_{C} + \boldsymbol{I}_{c1}N_{c1} + \boldsymbol{I}_{c2}N_{c1} = 0 \end{cases}$$
(3)

同时,根据基尔霍夫电流定律有:

$$\begin{cases} \boldsymbol{I}_{a1} = -\boldsymbol{I}_{\alpha 1}, \ \boldsymbol{I}_{c1} = \boldsymbol{I}_{\alpha 1} \\ \boldsymbol{I}_{a2} = \boldsymbol{I}_{c2} = -\boldsymbol{I}_{\beta 1}/3, \ \boldsymbol{I}_{b} = 2\boldsymbol{I}_{\beta 1}/3 \end{cases}$$
(4)

结合式(3)及式(4),可以推导出:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{A} \\ \boldsymbol{I}_{B} \\ \boldsymbol{I}_{C} \end{bmatrix} = \frac{1}{3K} \begin{bmatrix} \sqrt{3} & 1 \\ 0 & -2 \\ -\sqrt{3} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{\alpha l} \\ \boldsymbol{I}_{\beta l} \end{bmatrix} = \boldsymbol{S}_{I} \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{\alpha l} \\ \boldsymbol{I}_{\beta l} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,K=N₄/N₄ 为变压器变比。

同理可得抽头 m-n-c 带负荷工况下(等效电路 见图 2(b))的一、二次侧变换关系为:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{A} \\ \boldsymbol{I}_{B} \\ \boldsymbol{I}_{C} \end{bmatrix} = \frac{y}{3K} \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{m} \\ \boldsymbol{I}_{n} \\ \boldsymbol{I}_{c} \end{bmatrix} = \boldsymbol{S}_{II} \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{m} \\ \boldsymbol{I}_{n} \\ \boldsymbol{I}_{c} \end{bmatrix} \quad (6)$$

由于抽头 m-n 处电压与 β 相馈线电压同相且 为其 γ 倍,所以考虑如图 2(c)所示的带载情况。根 据同样的计算方法可得:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{A} \\ \boldsymbol{I}_{B} \\ \boldsymbol{I}_{C} \end{bmatrix} = \frac{1}{3K} \begin{bmatrix} -\sqrt{3} & -y \\ 0 & 2y \\ \sqrt{3} & -y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{\alpha c} \\ \boldsymbol{I}_{m} \end{bmatrix} = \boldsymbol{S}_{II} \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{\alpha c} \\ \boldsymbol{I}_{m} \end{bmatrix}$$
(7)



(c) α 相馈线和抽头 m-n 带负荷情况

图 2 不同负荷情况下系统等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit of system on different load conditions

比较式(7)与式(5)可以看出,由于抽头 m-n 处 电压与β相馈线电压同相且为其y倍,所以抽头 m-n 处电流与其对应一次侧电流也就乘了一个系数y。

结合式(5)及图 1 可以看出,若存在两相负荷电流 $I_{\alpha\rho}$, $J_{\beta\rho}$ 大小相等, β 相负荷电流 $I_{\beta\rho}$ 与 B 相电压反相,且 α 相负荷电流 $I_{\alpha\rho}$ 滞后 β 相负荷电流 $I_{\beta\rho}$ 90° (即 $I_{\alpha\rho} = I_{\alpha\rho} \angle 90^{\circ}$, $I_{\beta\rho} = I_{\beta\rho} \angle 180^{\circ}$,且 $I_{\alpha\rho} = I_{\beta\rho}$,两电流均为有功电流)时,一次侧三相电流是对称的,且功率因数为 1(即 $I_{A} = \frac{2}{3K} I_{\alpha\rho} \angle 120^{\circ}$, $I_{B} = \frac{2}{3K} I_{\alpha\rho} \angle 0^{\circ}$, $I_{C} = \frac{2}{3K} I_{\alpha\rho} \angle -120^{\circ}$)。考虑对于任意负荷,当最终实现补偿时,一次侧三相电流都是对称的,且功率因数为 1。根据能量守恒定律可推出:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{\alpha p} \\ \mathbf{I}_{\beta p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{I_{\alpha l p} + I_{\beta l p}}{2} \angle 90^{\circ} \\ \frac{I_{\alpha l p} + I_{\beta l p}}{2} \angle 180^{\circ} \end{bmatrix}$$
(8)

其中, $I_{\alpha l p}$ 、 $I_{\beta l p}$ 分别为负荷电流 $I_{\alpha l}$ 、 $I_{\beta l}$ 中有功分量的幅值。

基于以上分析,可通过以下 3 种方式实现补偿。 2.2 不对称背靠背变流器拓扑下的补偿策略

图 3 给出了不对称背靠背变流器拓扑下系统的 等效电路图。在此系统拓扑下,若将 α 侧补偿电流 *I*_{αc}与负荷电流 *I*_{αl}一起考虑,则图 3 可等效由图 2 (a)和(b)叠加而成。此时补偿的基本思路如下所 述。首先,通过补偿电流 I_{\alphac} 将综合电流 I_{\alphas} 电流构造成为一个与 I_{μ} 大小相等并滞后于 I_{μ} 90°的电流。根据式(5),此时一次侧电流三相对称,但功率因数视 I_{μ} 而定。若 I_{μ} 功率因数为1则一次侧功率因数也为1,否则一次侧功率因数不为1。其次,电流 I_{m} 、 I_{n} 、 I_{c} 将补偿一次侧无功并吸收或发出有功以平衡 I_{\alphac} 中的有功分量。



图 3 不对称背靠背变流器拓扑下系统的等效电路图

Fig.3 Equivalent circuit of system under asymmetrical back-to-back converter topology

根据以上分析可知:

$$\boldsymbol{I}_{\alpha c} = \boldsymbol{I}_{\alpha l} - \boldsymbol{I}_{\alpha s} = \boldsymbol{I}_{\alpha l} - \boldsymbol{I}_{\beta l} e^{-j\pi}$$
(9)

此时一次侧电流为:

$$\begin{bmatrix} I_{A} \\ I_{B} \\ I_{C} \end{bmatrix} = S_{I} \begin{bmatrix} I_{\alpha s} \\ I_{\beta l} \end{bmatrix} = S_{I} \begin{bmatrix} I_{\alpha p} \\ I_{\beta p} \end{bmatrix} + S_{I} \left(\begin{bmatrix} I_{\alpha s} \\ I_{\beta l} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_{\alpha p} \\ I_{\beta p} \end{bmatrix} \right) \quad (10)$$

$$\frac{E \operatorname{d}(10) + \operatorname{d}(1) + \operatorname{d$$

若式(11)中等号右侧第2、3项之和为0,即:

$$\mathbf{S}_{\mathrm{I}}\left(\begin{bmatrix}\mathbf{I}_{\alpha s}\\\mathbf{I}_{\beta 1}\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}\mathbf{I}_{\alpha p}\\\mathbf{I}_{\beta p}\end{bmatrix}\right) + \mathbf{S}_{\mathrm{II}}\begin{bmatrix}\mathbf{I}_{\mathrm{m}}\\\mathbf{I}_{\mathrm{n}}\\\mathbf{I}_{\mathrm{c}}\end{bmatrix} = 0 \qquad (12)$$

则一次侧电流最终将如式(13)所示,实现补偿。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{A} \\ \mathbf{I}_{B} \\ \mathbf{I}_{C} \end{bmatrix} = \mathbf{S}_{I} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{\alpha p} \\ \mathbf{I}_{\beta p} \end{bmatrix}$$
(13)

根据式(12)得:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{m} \\ \boldsymbol{I}_{n} \\ \boldsymbol{I}_{c} \end{bmatrix} = \frac{1}{3y} \begin{bmatrix} \sqrt{3} & 3 \\ \sqrt{3} & -3 \\ -2\sqrt{3} & 0 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{\alpha s} \\ \boldsymbol{I}_{\beta l} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{\alpha p} \\ \boldsymbol{I}_{\beta p} \end{bmatrix} \right) \quad (14)$$

综上,式(9)和式(14)即为在不对称背靠背变 流器拓扑情况下实现补偿时的参考电流计算公式。

2.3 对称背靠背变流器拓扑下的补偿策略

图 4 为对称背靠背变流器拓扑下系统的等效电

200

路图,即为 c 相桥臂开关发生故障退出工作时的等效电路图。在此系统拓扑下,通过由补偿电流 $I_{\alpha c}$ 和 I_m 变换得到的一次侧电流去抵消由负荷电流 $I_{\alpha l}$ 和 $I_{\beta l}$ 中除 $I_{\alpha l p}$ 和 $I_{\beta l p}$ 以外变换得到的一次侧电流以实现补偿。



图 4 对称背靠背变流器拓扑下系统的等效电路图 Fig.4 Equivalent circuit of system under symmetrical back-to-back converter topology

根据以上分析可知:

$$\begin{bmatrix} I_{A} \\ I_{B} \\ I_{C} \end{bmatrix} = S_{I} \begin{bmatrix} I_{\alpha l} \\ I_{\beta l} \end{bmatrix} + S_{II} \begin{bmatrix} I_{\alpha c} \\ I_{m} \end{bmatrix} = S_{I} \begin{bmatrix} I_{\alpha p} \\ I_{\beta p} \end{bmatrix} + S_{I} \begin{bmatrix} I_{\alpha l} \\ I_{\beta l} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_{\alpha p} \\ I_{\beta p} \end{bmatrix} + S_{II} \begin{bmatrix} I_{\alpha c} \\ I_{m} \end{bmatrix} (15)$$

若式(15)中第2个等号右侧第2、3项之和为 0,即:

$$\mathbf{S}_{\mathrm{I}}\left(\begin{bmatrix}\mathbf{I}_{\alpha \mathrm{l}}\\\mathbf{I}_{\beta \mathrm{l}}\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}\mathbf{I}_{\alpha p}\\\mathbf{I}_{\beta p}\end{bmatrix}\right) + \mathbf{S}_{\mathrm{III}}\begin{bmatrix}\mathbf{I}_{\alpha \mathrm{c}}\\\mathbf{I}_{\mathrm{m}}\end{bmatrix} = 0 \qquad (16)$$

则一次侧电流最终也将如式(13)所示,实现补偿。 根据式(16)得:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{\alpha c} \\ \boldsymbol{I}_{m} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1/y \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{\alpha l} \\ \boldsymbol{I}_{\beta l} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \boldsymbol{I}_{\alpha p} \\ \boldsymbol{I}_{\beta p} \end{bmatrix} \end{pmatrix}$$
(17)

综上,式(17)即为在对称背靠背变流器拓扑情况下实现补偿时的参考电流计算公式。

2.4 三相变流器拓扑下的补偿策略

图 5 为三相变流器拓扑下系统的等效电路图, 即为单相变流器发生故障退出工作时的等效电路 图。在此系统拓扑下,通过由补偿电流 *I*_m、*I*_n、*I*_e变 换得到的一次侧电流去抵消由负荷电流 *I*_{al}和 *I*_{pl}中



除 $I_{\alpha \mu}$ 和 $I_{\beta \mu}$ 以外变换得到的一次侧电流以实现 补偿。

根据以上分析可知:

$$\begin{bmatrix} I_{A} \\ I_{B} \\ I_{C} \end{bmatrix} = S_{I} \begin{bmatrix} I_{\alpha l} \\ I_{\beta l} \end{bmatrix} + S_{II} \begin{bmatrix} I_{m} \\ I_{n} \\ I_{c} \end{bmatrix} = S_{I} \begin{bmatrix} I_{\alpha p} \\ I_{\beta p} \end{bmatrix} + S_{I} \begin{bmatrix} I_{\alpha l} \\ I_{\beta l} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I_{\alpha p} \\ I_{\beta p} \end{bmatrix} + S_{II} \begin{bmatrix} I_{m} \\ I_{n} \\ I_{c} \end{bmatrix}$$
(18)

若式(18)中第2个等号右侧第2、3项之和为 0,即:

$$\boldsymbol{S}_{\mathrm{I}}\left(\begin{bmatrix}\boldsymbol{I}_{\alpha \mathrm{l}}\\\boldsymbol{I}_{\beta \mathrm{l}}\end{bmatrix} - \begin{bmatrix}\boldsymbol{I}_{\alpha \rho}\\\boldsymbol{I}_{\beta \rho}\end{bmatrix}\right) + \boldsymbol{S}_{\mathrm{II}}\begin{bmatrix}\boldsymbol{I}_{\mathrm{m}}\\\boldsymbol{I}_{\mathrm{n}}\\\boldsymbol{I}_{\mathrm{c}}\end{bmatrix} = 0 \qquad (19)$$

则一次侧电流最终也将如式(13)所示,实现补偿。 根据式(19)得:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{m} \\ \mathbf{I}_{n} \\ \mathbf{I}_{c} \end{bmatrix} = \frac{1}{3y} \begin{bmatrix} \sqrt{3} & 3 \\ \sqrt{3} & -3 \\ -2\sqrt{3} & 0 \end{bmatrix} \left(\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{\alpha l} \\ \mathbf{I}_{\beta l} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{\alpha p} \\ \mathbf{I}_{\beta p} \end{bmatrix} \right) \quad (20)$$

综上,式(20)即为在三相变流器拓扑情况下实 现补偿时的参考电流计算公式。

综合 2.2—2.4 节所述,在不对称单-三相背靠背 变流器正常情况下,按 2.2 节所提策略进行补偿;当 三相变流器中 c 相桥臂开关发生故障无法正常工作 时,按 2.3 节所提策略进行补偿;当单相变流器发生 故障退出工作时,按 2.4 节所提策略进行补偿。当 α_{β} 两侧负荷视在功率分别为 $\sqrt{P_{\alpha}^2+Q_{\alpha}^2}, \sqrt{P_{\beta}^2+Q_{\beta}^2}$ 时,表 1 给出了在不同策略下补偿系统所需视在容 量情况。其中, P_{α}, Q_{α} 分别为 α 侧有功、无功分量; P_{β}, Q_{β} 分别为 β 侧有功、无功分量。表 1 中需要注 意的是,对于前 2 种补偿策略,由于两侧变流器均工

表1 不同策略下补偿系统所需视在容量

Table 1 Apparent compensation capacity under different strategies

different strategies			
补偿策略		取值	
不对称背靠背 变流器拓扑	α侧	$\sqrt{(P_{\alpha}-P_{\beta})^2+Q_{\alpha}^2}$	
	β侧	$\sqrt{(P_{\alpha}-P_{\beta})^2+Q_{\beta}^2}$	
对称背靠背 变流器拓扑	α侧	$\sqrt{\left[0.5(P_{\alpha}-P_{\beta})\right]^2+Q_{\alpha}^2}$	
	β侧	$\sqrt{\left[0.5(P_{\alpha}-P_{\beta})\right]^2+Q_{\beta}^2}$	
三相变流器 拓扑	m 相	$\frac{2}{3}\sqrt{\mid a\mid^2 + \mid b\mid^2 - 2\mid a\mid \mid b\mid \cos(\mid a\mid / \mid b\mid)}$	
	n 相	$\frac{2}{3}\sqrt{\mid c\mid^2 + \mid d\mid^2 - 2\mid c\mid \mid d\mid \cos(\mid c\mid / \mid d\mid)}$	
	c 相	$\frac{2}{3}\sqrt{\left(0.5 \left P_{\alpha} - P_{\beta} \right + Q_{\alpha} \right)^{2}}$	
$\dot{\Xi}: a = \frac{\sqrt{3}}{4} P_{\alpha} - P_{\beta} + Q_{\alpha}/2; b = \frac{1}{4} P_{\alpha} - P_{\beta} + \sqrt{3}Q_{\beta}/2;$			
$c = \frac{\sqrt{3}}{4} P_{\alpha} - P_{\beta} -Q_{\alpha}/2; d = \frac{1}{4} P_{\alpha} - P_{\beta} -\sqrt{3}Q_{\beta}/2_{\circ}$			

作在对称状态,所以给出的也就是两侧变流器的容量;对于最后一种补偿策略,由于该策略下三相变流器工作在不对称状态下,所以给出的是变流器连接端口中每一相的补偿容量,且是在三角接m-n-c被等效换算到Y接m-n-c后计算得到的。为了实现较好的补偿效果,本文采用无源控制方法以实现对参考电流的实时跟踪。

3 仿真验证及结果分析

为验证本文所提出补偿系统的正确性,基于实 测数据在 MATLAB/Simulink 中搭建了仿真模型,仿 真参数如下:三相电网,电压为 110 kV,短路容量为 500 MV·A;YNVD 平衡变压器,变比为 110 kV/27.5 kV,容量为 20 MV·A,y=0.3818;负荷工况,α侧负 荷为 5 MW+1 Mvar,β侧负荷为 8 MW+5 Mvar;耦合 变压器,变比为 27.5 kV/10.5 kV,容量为 20 MV·A; 变流器,连接电感为 3 mH,直流电容为 10 mF,直流 电压为 20 kV,载波频率为 10 kHz。下面对 2 种情况 进行了仿真,0.1 s 时补偿开始,0.3 s 时补偿拓扑 变换。

3.1 情况 1:由不对称补偿→对称补偿

在情况1下,补偿拓扑由不对称补偿拓扑变为 对称补偿拓扑以模拟在三相变流器 c 相桥臂发生故 障而无法正常工作时为实现补偿正常进行的系统应 对情况,仿真结果见图 6。从图 6(a)可以看出,在补 偿系统开始工作前,一次侧电能质量较差;当系统补 偿开始后直到仿真最终结束,一次侧电流都是对称 且功率因数为1,实现了完全补偿。由此可以证明, 该系统可以实现补偿且补偿的效果没有因三相变流 器 c 相桥臂开关故障退出运行而受到影响,但为了 实现一次侧电流的补偿,变流器输出电流的分布发 生了一定的变化(见图 6(c) 和(d))。同时,由于原 本的三相变流器因 c 相桥臂退出而变成单相变流 器,所以两出线电流(i_,,i_)变为大小相等、方向相 反(见图 6(d))。从图 6(b)可以看出,补偿系统启 动及补偿拓扑变换时直流电压都出现了一个暂态过 程,但由于系统对直流电压进行了合理的控制,所以 直流电压均能很快地恢复到其设定值 20 kV。

3.2 情况 2:由不对称补偿→三相变流器补偿

在情况2下,补偿拓扑由不对称补偿拓扑变为 三相变流器补偿拓扑以模拟在单相变流器发生故障 无法正常工作时为实现补偿正常运行的系统应对情 况,仿真结果见图7。从图7(a)可以看出当系统补 偿开始后直到仿真最终结束,一次侧电流都是对称 且功率因数为1,由此证明了该系统在三相变流器 单独运行情况下的补偿能力。从图7(c)可以看出, 由于单相变流器在0.3 s 后退出运行,所以α侧变流 器输出电流在0.3 s 后变为0。由于没有单相变流



器,所以为了实现最终的补偿效果,三相变流器输出 电流的分布有了较大的变化(由单相变流器退出前 的对称分布变为单相变流器退出后的不对称分布, 见图 7(d))。同样,在该情况下,直流电压呈现出与 情况1类似的波动(见图 7(b)),但最终都能趋于 稳定。

4 实验验证与分析

为了进一步验证本文所提补偿系统的正确性, 搭建了一台小容量原理样机,并在3种拓扑下分别 进行了补偿试验。样机参数如下:三相电网,电压为 400 kV;YNVD平衡变压器,变比为1 kV/220 V,容 量为1 500 V·A,y=0.618 2;负荷工况, α 侧负荷为 16+j3 Ω , β 侧负荷为 10+j6 Ω ;耦合变压器,变比为 220 V/136 V;变流器,连接电感为3 mH,直流电容 为3 mF,直流电压为 200 V,载波频率为5 kHz。

图 8 为补偿前一次侧三相电流波形。补偿前, 一次侧三相电流较不对称,且功率因数较低(见表 2)。图 9—11 分别为三相变流器拓扑、不对称背靠背 变流器拓扑及对称背靠背变流器拓扑情况下的补偿 结果。从实验结果来看,不管是采用何种补偿拓扑,







(a) 一次侧电流波形



都可以实现对一次侧电流的补偿,功率因数得到了 有效的改善,负序电流明显得到了抑制,与仿真结果基 本相符,验证了该系统补偿理论的正确性及可行性。

5 结论

本文提出了一种基于 YNVD 平衡变压器的电气 化铁路电能质量管理系统,该系统利用 YNVD 平衡 变压器二次三角连接侧可引出三相抽头,连同二次 V形连接侧安装的耦合变压器一起为不对称单-三 相背靠背变流器提供电气接口。本文首先介绍了系 统的结构,然后对 YNVD 平衡变压器一、二次侧电流 变换关系进行了分析:接着在分析一、二次侧电流变 换关系的基础上,着重讨论了系统在不对称单-三相 背靠背变流器拓扑、对称背靠背变流器拓扑及三相 变流器拓扑下的补偿策略。通过 MATLAB 仿真模 型及小容量原理样机试验,验证了该系统的正确性 及可行性。相比于传统用于电气化铁路的背靠背变 流器,该系统中使用的不对称单-三相背靠背变流器 可以在不同的状况下工作在不同的补偿拓扑,大幅 增强了系统的可靠性和适应性,具有一定工程实用 价值。

参考文献:

- [1]许志伟,罗隆福,张志文,等.一种新型电气化铁道电能质量综合补偿[J].电工技术,2015,30(8):265-272.
 XU Zhiwei, LUO Longfu, ZHANG Zhiwen, et al. A novel power quality integrated compensation for electrified railway[J]. Electric Engineering,2015,30(8):265-272.
- [2] GAZAFRUDI S, LANGERUDY A, FUCHS E, et al. Power quality

issues in railway electrification: a comprehensive perspective [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(5): 3081-3090.

- [3] ZHANG D, ZHANG Z, WANG W, 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, 2015, 31(1):200-212.
- [4] 辛业春,李国庆,王朝斌. 无功和三相负荷不平衡的序分量法补 偿控制[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(14):72-78.
 XIN Yechun,LI Guoqing,WANG Chaobin. Compensation control of reactive power and three-phase unbalance load based on the method of sequence component[J]. Power System Protection and Control, 2014,42(14):72-78.
- [5] BRENNA M, FOIADELLI F, ZANINELLI D. New stability analysis for tuning PI controller of power converters in railway application [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58 (2): 533-543.
- [6] 李国庆,王鹤,张慧杰. 微电网中基于逆变电源控制的重要节点 电能质量管理方法[J]. 电工技术,2014,29(2):177-184.
 LI Guoqing, WANG He, ZHANG Huijie. Power quality management method based on inverter source control for important node in microgrid[J]. Electric Engineering,2014,29(2):177-184.
- [7] 周文,段晓波,胡文平,等. 混合有源与无源滤波器的配合及控制研究[J]. 高电压技术,2016,42(4):1308-1315.
 ZHOU Wen, DUAN Xiaobo, HU Wenping, et al. coordination and control of hybrid active power filter and passive filter [J]. High Voltage Engineering,2016,42(4):1308-1315.
- [8] 刘浅,高仕斌,李丹丹. 高速铁路高通滤波器接入位置研究[J].
 电力自动化设备,2017,37(2):157-163.
 LIU Qian,GAO Shibin,LI Dandan. Installation location of high-pass filter in high-speed railway[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(2):157-163.
- [9] ZHANG Z, WU B, KANG J, et al. A multi-purpose balanced transformer for railway traction applications [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(2):711-718.
- [10] 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, LI Guangye, et al. Operation characteristic analysis and model tests of Y/>/▽ connected balance transformer[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(4):102-106.
- [11] 黄海宏,王钰,许若冰,等.双环重复控制三相四线制有源电力 滤波器[J].电力自动化设备,2016,36(4):40-45.
 HUANG Haihong, WANG Yu, XU Ruobing, et al. Three-phase fourwire active power filter with dual-loop repetitive control[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(4):40-45.
- [12] 李达义,孙玉鸿,熊博,等. 一种并联型有源电力滤波器的新型 控制方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(15):112-117,123.
 LI Dayi,SUN Yuhong,XIONG Bo, et al. A novel control method for shunt active power filter [J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(15):112-117,123.
- ZHU Guiping, CHEN Jianye, LIU Xiaoyu. Compensation for the negative-sequence currents of electric railway based on SVC[C]// IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2008. ICIEA 2008. Singapore; IEEE, 2008; 1958-1963.
- [14]杨昆,陈磊,陈国柱. DSTATCOM 补偿不平衡负载分序控制策略
 [J].电力自动化设备,2012,32(7):36-41.
 YANG Kun, CHEN Lei, CHEN Guozhu. Individual sequence control of DSTATCOM compensation for unbalanced load [J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(7):36-41.
- [15] 马茜,谭磊,罗培. V/v牵引供电所混合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.

[16] 王果,常文寰,Claus Leth Bak,等. 基于无谐波检测和选择性谐 波补偿原理的组合式同相供电系统控制策略[J]. 电力自动化 设备,2017,37(12):130-137.

WANG Guo, CHANG Wenhuan, Claus Leth Bak, et al. Control strategy for combined co-phase power supply system based on theory of control without harmonic detection and selective harmonic compensation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(12): 130-137. 作者简介:



唐宏伟(1982—),男,湖南邵阳人,副 教授,博士研究生,主要研究方向为电力电 子与电能质量控制(E-mail:thwei2008@126.

唐 杰(1975—),男,湖南邵阳人,教 授,博士,主要研究方向为电能质量先进控 制技术及装备(E-mail:706648502@qq.com)。

Power quality management system of electrical railway based on YNVD balance transformer

TANG Hongwei^{1,2}, TANG Jie¹, LIN Li¹

(1. Hunan Provincial Key Laboratory of Grids Operation and Control on

Multi-Power Sources Area, Shaoyang University, Shaoyang 422000, China;

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

Abstract: A power quality management system of electrical railway based on YNVD balance transformer is proposed. By using the delta connected secondary taps of YNVD balance transformer, together with the coupling transformer installed at the V-shape connected secondary side, an electric interface for a single-three phase back-to-back converter is provided. Compared with the traditional back-to-back converters, the proposed three-phase converter has more complex topology than single-phase one, while it only needs one coupling transformer, so that the disadvantages of the proposed system can be faded. Meanwhile, in order to keep the system compensation capacity, the three-phase converter can not only degenerate into single-phase converter on the malfunction of the c-phase bridge arm but also operate independently with the malfunction of single-phase inverter, which ensures the high reliability of the proposed system. Based on the theoretical analysis, a simulation model is built with MATLAB, and a small-capacity prototype is established. Both the simulative and experimental results verify the effectiveness of the proposed system.

Key words: balance transformer; electrical railway; power quality; system compensation capacity

• * • * • * • * • * • * • * • * • * • * • * • * • * • * • * •
究方向为电力电子技术研究、集成电路设计与研发(E-mail:
edgarma@126.com);
张子麒(1993—),男,甘肃平凉人,硕士研究生,主要研
究方向为电力电子技术及新能源应用(E-mail:1034742109@
qq.com) $_{\circ}$

Comparative analysis and design of CRT with magnetic integrated structures

TIAN Mingxing^{1,2}, WANG Tiange^{1,2}, MA Changli^{1,2}, ZHANG Ziqi^{1,2}

(1. School of Automation & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Rail Transit Electrical Automation Engineering Laboratory of Gansu Province,

Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract:By comparatively analyzing the structure characteristics of magnetic integrated CRT(Controllable Reactor of Transformer type), such as the array structure, multi magnetic material structure, split structure and multi basic independent unit structure, a structure design principle for a multi control winding basic unit magnetic integrated CRT is proposed. Based on this structure design principle, a novel magnetic integrated CRT named double control winding basic unit magnetic integrated CRT is proposed. Meanwhile, compared with the existing magnetic integrated CRT in aspect of volume, weight and structural complexity, the advantages of this novel magnetic integrated CRT is illustrated. The results show that the double control winding basic unit magnetic integrated CRT can meet the design requirements of "high impedance" and "weak coupling", moreover, it has obvious advantages such as small volume, light weight and simple structure.

Key words: controllable reactor of transformer type; magnetic integrated structure; design principle; comparative analysis

