

文章编号:1671-6833(2016)04-0011-04

电气化铁路单三相组合式变压器电气特性分析

夏焰坤

(西华大学 电气与电子信息学院,四川 成都 610039)

摘 要:研究了一种应用于电气化铁路的单相和三相组合式变压器供电系统.分析了单三相组合式供电系统的结构和工作原理,以及容量利用率和负序特性.使用 Matlab/Simulink 首先对单三相组合式供电系统的变压器进行了仿真,仿真结果表明,单三相组合式供电系统的结构和原理符合理论分析.其次,对组合式变压器构成的同相供电系统进行了仿真验证,仿真结果表明补偿方案是有效的.

关键词:组合变压器;电气化铁路;容量利用率;负序;补偿

中图分类号:TM722 文献标志码:A doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2016.04.003

0 引言

由于电力机车是单相负载,而电力系统是三相系统,机车需要从相应变压器取电,并最大可能地减小负序^[1-2].目前牵引变电所的变压器有多种类型,主要分为三相-两相非平衡变压器、三相-两相平衡变压器^[3-5]、单相变压器等.经验表明,平衡变压器具有较好的负序抑制效果,因此在国内外电铁中得到广泛应用.但平衡变压器存在接线复杂、制造成本高、难以制造较大容量等不足.

采用不同类型变压器组合也能起到减小负序的作用,特别适合电气化铁路异相和同相供电^[6]场合.文献[7-10]研究了同相供电模式,大多直接在平衡变压器或者单相变压器上进行改造,采用组合变压器的研究较少.笔者探讨了组合变压器在异相和同相供电系统上的应用方案.

笔者对三相和单相变压器组合一起的等效平衡变压器方案电气特性进行了研究.首先分析了组合式变压器结构、原理;其次分析了组合式变压器绕组容量利用率和负序特性以及同相供电方案应用实例;最后在 Matlab 仿真平台上进行建模仿真,仿真结果表明,组合式变压器具有较好的平衡特性.

1 单三相组合式变压器供电系统结构

由单相 TT 和三相变压器 HMT 组合构成的供电系统结构如图 1 所示,单相变压器输出电压取自三相系统线电压 B、C 相,三相变压器输出电压取自三相系统 A 相.该系统电压相量图如图 2 所示,从图 2 中可以看出两个变压器次边组合构成两相正交电压,与平衡接线变压器原理相同.

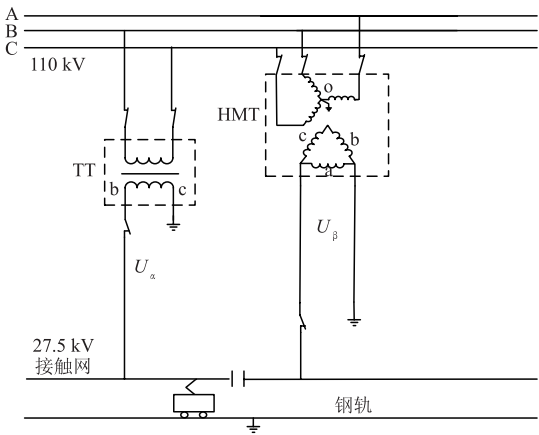


图 1 单相和三相变压器构成的电铁牵引供电系统

Fig.1 Electrified railway power supply system based on the single-phase and three-phase transformer

收稿日期:2015-09-26;修订日期:2015-11-19

基金项目:四川省教育厅资助项目(16ZB0159);西华大学重点科研基金资助项目(Z1520909);四川省电力电子节能技术与装备重点实验室开放课题(szjj2015-068)

作者简介:夏焰坤(1984—),男,湖北黄冈人,西华大学讲师,博士,主要从事电力系统分析和电能质量分析与控制等方面的研究,E-mail:yankunjtdx@126.com.

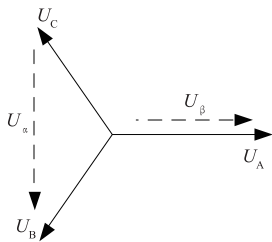


图 2 单相和三相变压器电压相量图

Fig.2 Voltage phasor diagram of the single-phase and three-phase transformer

2 组合变压器容量利用率及负序特性分析

2.1 容量利用率分析

单三相组合式同相供电平衡变压器由单相变压器和三相变压器构成,单三相组合式变压器的接线方式如图 3 所示。

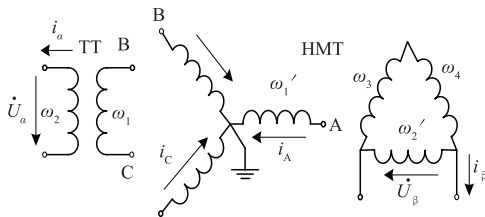


图 3 组合式变压器接线图

Fig.3 Wiring map of the single-phase and three-phase transformer

图 3 中设单相变压器的输出容量 $S_{\alpha} = U_{\alpha}I_{\alpha}$,三相变压器的输出容量 $S_{\beta} = U_{\beta}I_{\beta}$,且有 $S_{\beta} = kS_{\alpha} (0 < k < 1)$,其中 k 为单三相组合式变压器两端口的负荷量之比。

由单相变压器的性质知单相变压器次边绕组上的容量为

$$S_1 = U_{\alpha}I_{\alpha} = S. \tag{1}$$

由三相变压器的性质可知,次边 Δ 绕组 ω_2' 上的电流为 $\frac{2}{3}I_{\beta}$, ω_3 、 ω_4 绕组上的电流为 $\frac{1}{3}I_{\beta}$,这里若考虑三相变压器按照一重两轻特殊制造,则有

ω_2' 绕组上的容量为

$$S_2 = U_{\beta} \cdot \frac{2}{3}I_{\beta} = \frac{2}{3}kS. \tag{2}$$

ω_3 、 ω_4 绕组上的容量为

$$S_3 = U_{\beta} \cdot \frac{1}{3}I_{\beta} = \frac{1}{3}kS. \tag{3}$$

由此可得单三相组合式变压器次边绕组容

量为

$$S_{\Sigma} = S_1 + S_2 + 2S_3 = \frac{4k + 3}{3}S, \tag{4}$$

所以,可得单三相组合式同相供电平衡变压器的绕组容量利用率为

$$\eta = \frac{S + kS}{S_{\Sigma}} = \frac{3k + 3}{4k + 3} \times 100\%. \tag{5}$$

由上式可得单三相组合式同相供电平衡变压器的绕组容量利用率与两端口负荷量比 k 的关系如图 4 所示。

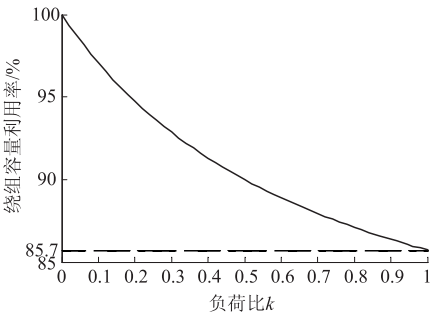


图 4 绕组容量利用率与两端口负荷量比 k 的关系图

Fig.4 Elation between capacity utilization ratio and load ratio

由图 4 可以看出,当两端口负荷容量相等时,单三相组合式变压器的绕组容量利用率最小为 85.7%,最大值为 1,对应单相变压器容量利用率。由文献[11]可知,YNvd 平衡变压器的绕组容量利用率为 80.38%,由此对比可得单三相组合式同相供电平衡变压器在原理上与 YNvd 平衡变压器一致,但是在绕组容量利用率上要优于 YNvd 平衡变压器,且制造简单。

2.2 负序特性分析

如图 3 所示, ω_1 、 ω_1' 分别为单相牵引变压器和高压匹配变压器一次侧绕组,二次侧绕组分别为 ω_2 、 ω_2' , ω_2 构成低压侧 α 相, ω_2' 构成低压侧 β 相。

这里令单相牵引变压器原、次边变比为

$$K_1 = \sqrt{3}U_A/U_{\alpha} = \omega_1/\omega_2. \tag{6}$$

高压匹配平衡变压器原、次边变比为

$$K_2 = \sqrt{3}U_A/U_{\beta} = \omega_1'/\omega_2'. \tag{7}$$

假设

$$\begin{cases} U_{\alpha} = U; \\ U_{\beta} = mU_{\alpha}, m < 1. \end{cases} \tag{8}$$

按磁势平衡原理可得,单相变压器原、次边电流变换关系为

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_2/\omega_1 \\ -\omega_2/\omega_1 \end{bmatrix} \dot{I}_\alpha = \frac{1}{\sqrt{3}K_1} \begin{bmatrix} 0 \\ \sqrt{3} \\ -\sqrt{3} \end{bmatrix} \dot{I}_\alpha \quad (9)$$

同理按磁势平衡原理可得,三相变压器原、次边电流变换关系为

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2\sqrt{3}\omega'_2/3\omega'_1 \\ -\sqrt{3}\omega'_2/3\omega'_1 \\ -\sqrt{3}\omega'_2/3\omega'_1 \end{bmatrix} \dot{I}_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}K_1} \begin{bmatrix} 2m \\ -m \\ -m \end{bmatrix} \dot{I}_\beta \quad (10)$$

根据对称分量法可得,单相变压器单独给机车负载供电和三相变压器单独给机车负载供电时,三相输电线路正序电流和负序电流的表达式分别为

(1)单相

$$\begin{cases} \dot{I}^+ = 1/3(\dot{I}_A + a\dot{I}_B + a^2\dot{I}_C) = \frac{1}{\sqrt{3}K_1} \dot{I}_\alpha e^{j90^\circ} \\ \dot{I}^- = 1/3(\dot{I}_A + a^2\dot{I}_B + a\dot{I}_C) = \frac{1}{\sqrt{3}K_1} \dot{I}_\alpha e^{-j90^\circ} \end{cases} \quad (11)$$

(2)三相

$$\begin{cases} \dot{I}^+ = 1/3(\dot{I}_A + a\dot{I}_B + a^2\dot{I}_C) = \frac{1}{\sqrt{3}K_1} m\dot{I}_\beta \\ \dot{I}^- = 1/3(\dot{I}_A + a^2\dot{I}_B + a\dot{I}_C) = \frac{1}{\sqrt{3}K_1} m\dot{I}_\beta \end{cases} \quad (12)$$

若要原边三相对称,则只需将式(11)和(12)中负序分量相加赋值为 0,即

$$\dot{I}^- = \frac{1}{\sqrt{3}K_1} (m\dot{I}_\beta + \dot{I}_\alpha e^{-j90^\circ}) = 0 \quad (13)$$

所以次边两相电流满足 $\dot{I}_\alpha = -jm\dot{I}_\beta$, 即当两相的负载功率相同时,原边三相电流负序分量为 0;当两相负载功率不相等时,三相侧将有剩余的负序分量.

3 组合变压器在同相供电系统中的应用

组合式变压器特别适合普速和高速电气化铁路同相供电系统的设计或改造,如图 5 所示.单相变压器 TT 可以作为主变压器,安装容量较大;三相变压器 HMT 经过电力电子变流装置补偿三相系统的负序分量,HMT 安装容量相对较小. ADA 为大功率同相供电变流装置.

该方案的主要特点有:

(1)方便当前高速铁路牵引变电所同相供电改造.我国新建高速铁路主要采用单相变压器构

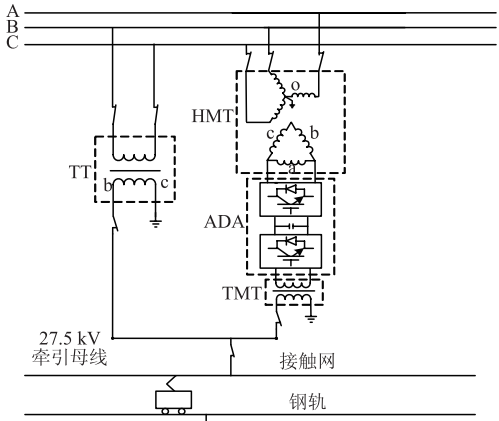


图 5 单相和三相变压器构成的同相供电系统结构
Fig. 5 Co-phase power supply system based on the single-phase and three-phase transformer

成 Vv 或 Vx 接线牵引变压器,并且容量较大.在不改变主变基础上,通过增加较小容量三相变压器来实现同相供电,将有助于实现资源高效利用,减小新设备投资;

(2)可以最大程度减少价格昂贵的同相补偿装置中电力电子变流器的容量及其所占比重,有效减少同相供电装置的一次性投资,其可以提高牵引变电所的供电资源与设备利用率;

(3)变压器 HMT 次边为三相结构,方便变电所内用电;

(4)变压器 HMT 次边电压可以灵活设计成较低电压,尽量与电力电子器件耐压水平相匹配,从而省去一个单相降压隔离变压器.

4 建模仿真分析

为验证笔者所提组合式变压器电压和负序关系,在 Matlab/Simulink 平台上进行了仿真验证.仿真模型见图 6 所示,三相系统电压为 110 kV,单相变压器次边电压为 27.5 kV.

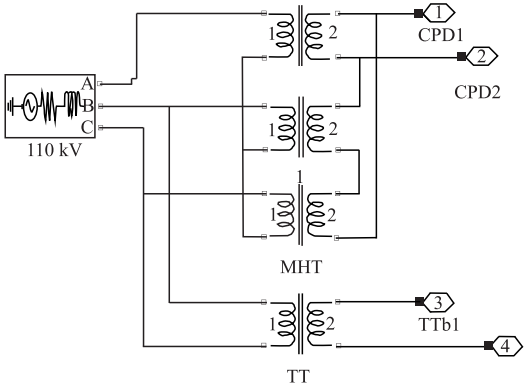


图 6 组合变压器仿真模型
Fig. 6 Combined transformer simulation model

4.1 变压器特性仿真

图 7 和图 8 给出了在两单相电压端口分别接 5 MW 有功负载时,组合变压器次边电压和电流波形以及原边电压和电流波形.

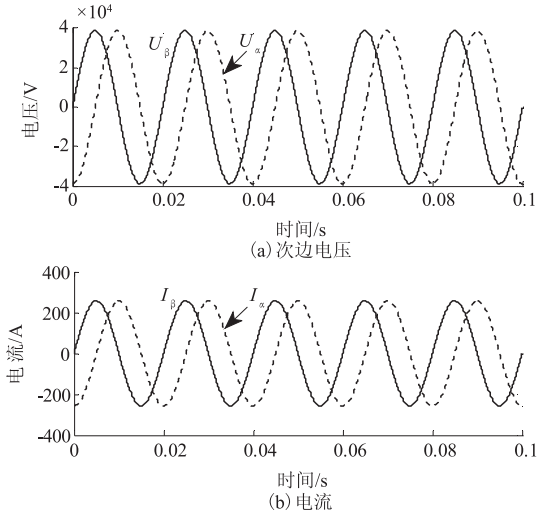


图 7 次边电压和电流波形

Fig.7 Secondary side voltage and current waveform

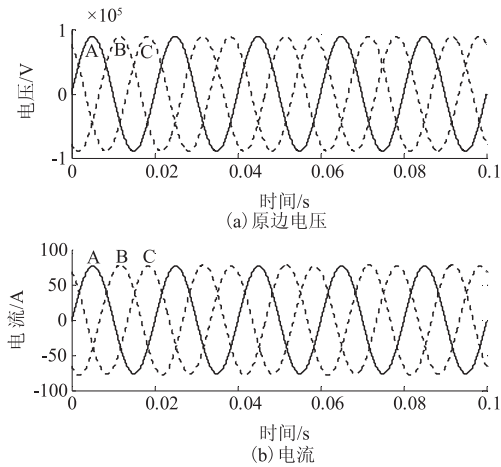


图 8 原边电压和电流波形

Fig.8 Primary side voltage and current waveform

从以上仿真波形图中可知, \dot{U}_α 超前 \dot{U}_β 90° . 仿真的结论符合图 2 电压向量图中所示的关系. 负载功率相等时三相侧电流完全对称.

4.2 变压器组合式同相供电仿真

牵引负荷为一列满载运行的交直交型车辆, 负荷电流 $i_L(t) = 560\sqrt{2}\sin(\omega t - 25.84^\circ)$, 即负载的视在功率为 14 MVA, 功率因数为 0.9 (滞后), 仿真结果如图 9 所示.

从图 9 可以看出,在未使用补偿的情况下,只有 B、C 两相给负载供电,另一相空载,此时造成三相电力系统负载严重不对称;同相供电装置投入后,负序电流得以完全补偿,此时三相电流波形对称且与电压同相位.

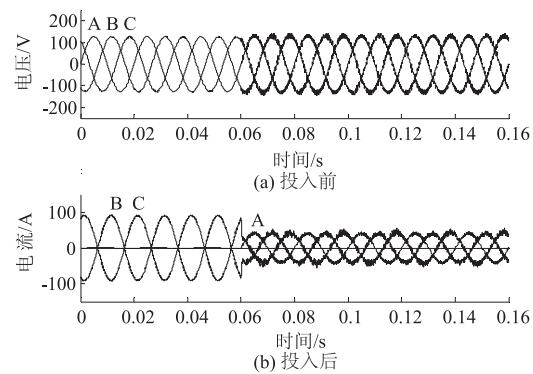


图 9 同相供电装置投入前后效果对比

Fig.9 The effect with and without co-phase power supply system

5 结论

- (1) 组合变压器等效于平衡变压器功能,且具有较高的容量利用率;
- (2) 组合变压器适合变电所同相供电改造或设计,经过同相供电系统补偿三相电力系统将有较高的电能质量水平.

参考文献:

[1] 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, 2012.

[2] 王晓茹,高仕斌. 电力系统分析[M]. 北京:高等教育出版社, 2011.

[3] 夏焰坤,解绍锋,宿婉,等. 同相供电系统无源补偿方案及参数匹配[J]. 郑州大学学报(工学版), 2013, 34(4):64-68.

[4] 吴命利,李群湛. 同相供电对称补偿的接线形式与补偿装置容量选择[J]. 机车电传动, 2000, 40(5): 15-18.

[5] 黄军,魏光,周晋,等. YN, vd 平衡变压器负序仿真分析[J]. 四川电力技术, 2009, 22(2):81-84.

[6] 李群湛. 我国高速铁路牵引供电发展的若干关键技术问题[J]. 铁道学报, 2010, 32(4): 119-124.

[7] SHU Z L, XIE S F, LI Q Z. Single-phase back-to-back converter for active power balancing, reactive power compensation, and harmonic filtering in traction power system[J]. IEEE Trans. on power electron, 2011, 26(2): 334-343.

[8] SHU Z L, XIE S F, LU K, et al. Digital detection, control, and distribution system for co-phase traction power supply application[J]. IEEE Trans. on Ind. electron, 2013, 60(5): 1831-1839.