

牵引变压器负序分析及补偿

史明慧¹, 罗文广², 何多昌², 张志学²

(1. 南广铁路有限责任公司, 广西 南宁 530022; 2. 南车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 分析了不同联结形式的牵引变压器在不同负荷条件下的负序电流特性; 指出在同时具有牵引负荷和回馈负荷的工况下, 三相电流不对称程度的严重性; 介绍了采用铁路静止电能调节器(RPC)对负序、无功、谐波等电能质量问题进行综合治理的基本原理; 重点讨论了利用RPC消除三相-两相牵引变压器负序电流所需的装置容量问题, 为RPC的工程应用提供指导。

关键词: 牵引变压器; 负序电流; 铁路静止电能调节器; 制动电能回馈

中图分类号: TM761+.1

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2014)04-0054-04

doi:10.13889/j.issn.2095-3631.2014.04.013

Analysis and Compensation of Negative Phase-sequence for Traction Transformer

SHI Ming-hui¹, LUO Wen-guang², HE Duo-chang², ZHANG Zhi-xue²

(1. Limited Liability Company of Nan-Guang Railway, Nanning, Guangxi 530022, China;

2. CSR Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: It analyzed the characteristics of negative phase-sequence current for traction transformers with different connection types under different loads. The three-phase current asymmetry degree of traction transformers is serious under both traction load and feedback load. The basic theory of integrative compensation for railway static power conditioner (RPC) was introduced aiming to the power quality problems in terms of negative sequence current, reactive power and harmonic. It focused on analyzing the rating capability of RPC for eliminating the negative sequence current of three-phase to two-phase traction transformer, which could provide reference for engineering application of RPC.

Keywords: traction transformer; negative phase-sequence current; railway static power conditioner (RPC); braking energy feedback

0 引言

电气化铁路系统中, 电力机车是相互独立、随机波动的单相负荷, 它会引起电力系统三相电流不对称, 产生负序电流。负序电流给发电机带来附加损耗, 引起转子发热、附加振动等一系列问题, 严重影响电力系统的安全稳定运行。负序电流经过电网阻抗将引起三相电压不平衡。根据国标电压不平衡度规定, 电力系统公共

连接点处的电压不平衡度95%概率值不得超过2%, 短时值不得超过4%^[1]。负序电流的大小与牵引变电所两供电臂的牵引负载大小、相位差及牵引变压器的联结形式有关; 而三相电压不平衡度与负序电流成正比, 与高压进线短路容量成反比^[2]。因此, 对牵引负荷在三相电力系统中造成的负序问题进行分析一直是交流牵引供电系统的主要研究课题之一。

对负序电流的传统分析一般是针对直流机车负载, 未考虑电能回馈到牵引变压器时的情况^[3-4]。近年来具有制动电能回馈功能的交流机车已大批量投入运行, 牵引负载的变化使其产生的负序电流也发生改变, 因

收稿日期: 2014-05-08

作者简介: 史明慧(1983-), 男, 工程师, 从事电气化铁路建设管理工作。

此该条件下的负序特性值得深入研究。目前国内外对电气化铁路的负序补偿方法进行了一些研究和应用尝试,其中铁路静止电能调节器(railway static power conditioner, RPC)以其对负序、无功和谐波的综合治理性能优异而得到越来越广泛的关注。本文将分析和研究在不同牵引负载,包括具有再生制动电能回馈的情况下,不同联结方式的牵引变压器的负序电流特性,以及利用RPC对牵引变压器负序电流进行补偿的基本原理及装置容量设计,为RPC的工程应用提供参考和指导。

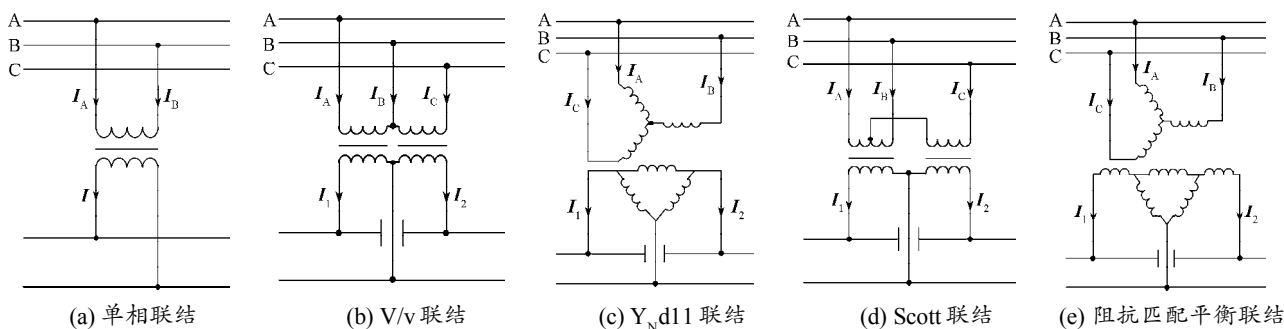


图1 牵引变压器常见联结形式

Fig. 1 Common connection types of traction transformers

若将图1所示的各种联结形式的牵引变压器视为多端口网络,则图1(a)牵引侧仅有一端口,其余的牵引侧都有2个端口。设一次侧电力系统的相电压和相电流分别为 U_A 、 U_B 、 U_C 和 I_A 、 I_B 、 I_C ;牵引侧2个端口的电压、电流分别为 U_m 、 I_m ($m=1, 2$),则所有端口负荷电流(即各供电臂负荷电流)在三相系统中造成的总正序电流 $I^{(+)}$ 和总负序电流 $I^{(-)}$ 分别为^[5]:

$$\begin{bmatrix} I^{(+)} \\ I^{(-)} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \sum_{m=1}^2 K_m I_m e^{-j\varphi_m} \\ \sum_{m=1}^2 K_m I_m e^{-j(2\psi_m + \varphi_m)} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: K_m ——牵引侧第 m 个端口的电压与一次侧线电压之比,即 $K_m = \frac{U_m}{\sqrt{3}U_A}$,一般有 $K_1=K_2$; ψ_m —— U_m 滞后 U_A 的相角(称为端口 m 的接线角); φ_m ——端口 m 的电流 I_m 滞后端口电压 U_m 的角度(即端口 m 的功率因数角)。

由式(1)可知,各端口负荷造成的三相系统正序电流与端口的接线角无关,而各端口负荷造成的三相系统负序电流与端口的接线角有关。端口的接线角和数量不同,在三相系统中产生的负序电流也不同。

定义电流不对称系数 ε_I 为负序电流与正序电流之比,即 $\varepsilon_I = \frac{I^{(-)}}{I^{(+)}}$ 。单相联结只有1个端口,由式(1)可见,正序和负序的电流大小始终相等,即电流不对称系数 $\varepsilon_I=1$ 。其余联结形式的牵引变压器负序电流与两供电臂

1 牵引变压器负序分析

1.1 各种联结形式牵引变压器及负序电流

负序电流的大小与牵引变压器的联结形式有关,牵引变压器常见的联结形式有单相联结、三相V/v联结、 $Y_N d11$ 联结、Scott联结、阻抗匹配平衡联结等(图1)。其中单相变压器、三相V/v变压器、 $Y_N d11$ 变压器为非平衡变压器,而Scott变压器和阻抗匹配平衡变压器为平衡变压器(即当牵引变压器二次侧连接的两供电臂电流大小和功率因数均相等时,一次侧三相电流对称)。

负荷电流大小及功率因数角有关。

1.2 各种负荷条件下负序电流仿真分析

设两供电臂的负荷电流大小及功率因数角分别为 I_1 、 I_2 及 φ_1 、 φ_2 ,且 $I_2=K_1 I_1$ 。以前对负序电流的分析一般只考虑供电臂下均为直流机车负载工况, K_1 的范围一般为0~1之间,且 φ_1 、 φ_2 在多数情况下不相等。目前交流机车已大批量投入运行,交流机车可以将再生制动电能回馈到牵引变压器,且可以轻易地保持以单位功率因数运行,因此考虑交流机车运行的供电臂, K_1 的范围应在-1至1之间,而 φ_1 、 φ_2 大小也基本相等(接近于0)。

在Matlab环境下搭建各种联结形式牵引变压器的仿真模型,计算几种典型的供电臂负荷条件下(设 $\varphi_1=\varphi_2=0$, $K_1=0$ 、 ± 0.5 、 ± 1 ,不考虑变压器损耗)电流不对称系数 ε_I (表1)。可以看到,4种牵引变压器在1个供电臂为牵引负荷、另1个供电臂为制动回馈的工况时,电流不对称系数将大于1。极端情况下,当两供电臂的牵引和回馈电流相等(即 $K_1=-1$)时,一次侧三相电流全为负序,正序分量为0,此时不对称系数为无穷大。图2给出了Scott联结变压器在这种情况下、二次侧电压和电流的仿真波形。从表1还可以看出,在相同的负载条件下,V/v和 $Y_N d11$ 联结的两种非平衡变压器的电流不对称系数相等,Scott和阻抗匹配联结的两种平衡变压器的电流不对称系数也相等。