

机车车辆试验检修基地牵引供电系统 综合补偿方案分析及应用

任 韬

(北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044)

摘 要: 为开发确保机车车辆厂内牵引供电系统主变压器高效运行的综合补偿系统, 简要介绍3种国内常用的工厂牵引供电系统相应综合补偿装置的方案。通过给出的三相电流不平衡情况以及变压器利用率的分析, 计算了各种形式变压器的负序电流, 并以其中一种供电方案为例, 给出了综合补偿系统的设计方案。该系统方案在现场使用情况良好, 满足供电系统需求, 提高了供电可靠性以及供电效率, 并可在铁路正线内使用。

关键词: 牵引供电系统; 综合补偿; SVC; SVG

中图分类号: U223.5⁺3

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2018.04.023

Analysis and Application of Comprehensive Compensation Scheme for Traction Power Supply of Locomotive and Rolling Stock Test and Maintenance Base

REN Tao

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: In order to develop a comprehensive compensation system for efficient operation of the main transformer of the traction power supply system in the locomotive and rolling stock factory, three domestic commonly used factory traction power supply system corresponding comprehensive compensation device were briefly introduced. Through the analysis of the three-phase current imbalance and transformer utilization, the negative sequence currents of various transformers were calculated. Taking one of the power supply schemes as an example, the design scheme of the comprehensive compensation system was provided. The system scheme was in good condition in the field and could meet the requirements of the power supply system and provide power supply reliability and power supply efficiency, it could be used within the railway line.

Keywords: traction power supply system; comprehensive compensation; SVC; SVG

0 引言

随着国内高速铁路的快速发展, 各机车车辆制造企业、车辆使用单位都需要建立动车试验或检修基地, 基地的供电系统设计作为一个工程化的课题越来越得到重视。根据市场调研, 现阶段规划或建成的动车试验或检修基地均以10 kV或35 kV电压等级作为牵引供电系统的接入点, 采用V/V变压器或单相变压器等

变压器产生27.5 kV单相电源。单相机车负载会造成供电系统三相电流、电压严重不平衡(当电网接入点短路容量较小时特别明显), 导致继电保护难以配置, 继电保护频繁动作, 因此必须采取有效措施进行补偿, 使三相供电系统电压、电流平衡度以及功率因数满足供电系统电能质量指标的要求。

1 常用供电系统分析

3种常用典型的动车试验或检修站的供电系统图如

收稿日期: 2017-11-13; 修回日期: 2018-06-06

图1~图3所示,以下分别分析其供电情况。为方便分析,假定三相供电系统短路容量无穷大,牵引变压器为理想变压器。

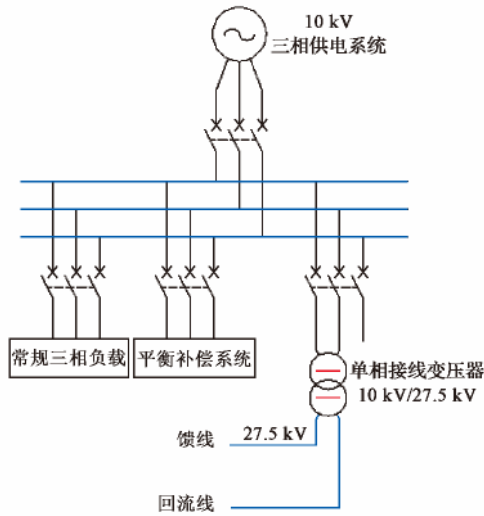


图1 单相变压器供电

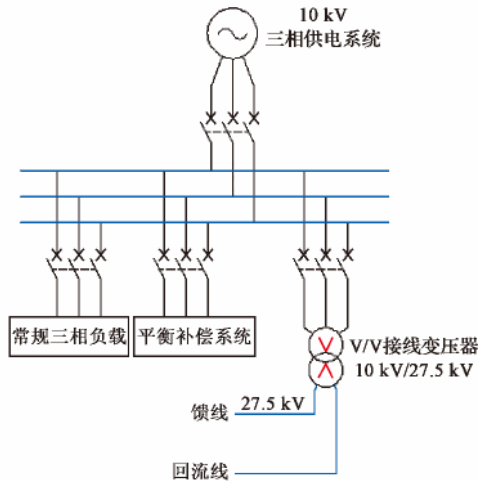


图2 V/V变压器供电

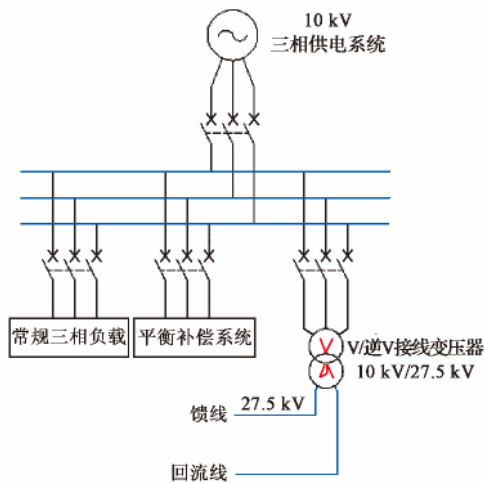


图3 V/逆V变压器供电

1.1 单相牵引变供电

单相变压器绕组接线图如图4所示。

以三相供电系统A相电压为基准,三相供电系统

相电压分别为

$$\left. \begin{aligned} U_A &= U_m \sin(\omega t) \\ U_B &= U_m \sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \\ U_C &= U_m \sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

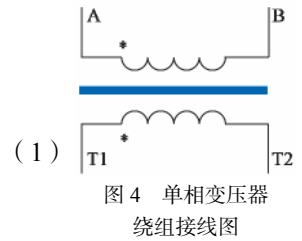


图4 单相变压器绕组接线图

三相供电系统线电压分别为

$$\left. \begin{aligned} U_{AB} &= \sqrt{3}U_m \sin(\omega t + \frac{1}{6}\pi) \\ U_{BC} &= \sqrt{3}U_m \sin(\omega t - \frac{1}{2}\pi) \\ U_{CA} &= \sqrt{3}U_m \sin(\omega t + \frac{5}{6}\pi) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

通过图4单相变压器绕组图可得牵引变压器输出电压为

$$U_{Load} = kU_{AB} = \sqrt{3}kU_m \sin(\omega t + \frac{1}{6}\pi) \quad (3)$$

式中: k 为变压器匝比, $k = \frac{N_2}{N_1}$ (N_2 为变压器二次侧匝数, N_1 为变压器一次侧匝数)。

牵引负载

$$Z_{Load} = R_{Load} + jX_{Load} = Z(\cos\alpha + jsin\alpha) \quad (4)$$

牵引电流

$$I_{Load} = \frac{U_{Load}}{Z_{Load}} = \frac{\sqrt{3}kU_m}{Z} \sin(\omega t + \frac{1}{6}\pi - \alpha) \quad (5)$$

牵引变压器一次侧电流分别为

$$\left. \begin{aligned} I_A &= \frac{\sqrt{3}k^2U_m}{Z} \sin(\omega t + \frac{1}{6}\pi - \alpha) \\ I_B &= -\frac{\sqrt{3}k^2U_m}{Z} \sin(\omega t + \frac{1}{6}\pi - \alpha) \\ I_C &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

电压电流矢量图如图5。

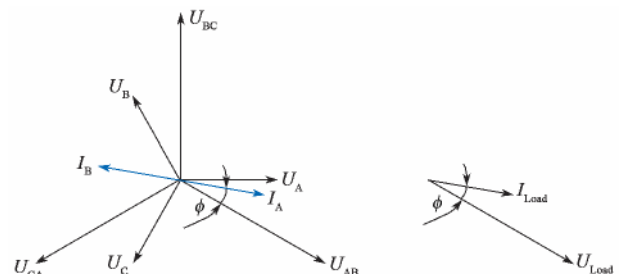


图5 单相牵引变电压电流矢量图

由图5可见,如无平衡补偿装置,系统电流将严重不平衡,电流不平衡又将导致电压的不平衡。

1.2 V/V牵引变供电^[1]

V/V牵引变压器绕组接线图如图6所示。

三相供电系统电压见式(1)、式(2)。

通过图 6 所示的 V/V 变压器绕组接线图, 可得牵引变压器二次侧各绕组电压为

$$\left. \begin{aligned} U_{T2-\alpha} &= kU_{AB} = \sqrt{3}kU_m \sin(\omega t + \frac{1}{6}\pi) \\ U_{T2-\beta} &= kU_{CB} = -\sqrt{3}kU_m \sin(\omega t - \frac{1}{2}\pi) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

图 6 V/V 变压器绕组接线图

牵引变压器输出电压为

$$\begin{aligned} U_{Load} &= U_{T2-\alpha} - U_{T2-\beta} = \\ &= \sqrt{3}kU_m \sin(\omega t + \frac{1}{6}\pi) + \sqrt{3}kU_m \sin(\omega t - \frac{1}{2}\pi) = \\ &= \sqrt{3}kU_m \sin(\omega t - \frac{1}{6}\pi) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: k 为变压器匝比, $k = \frac{N_2}{N_1}$ (N_2 为变压器二次侧

单相匝数, N_1 为变压器一次侧单相匝数)。

牵引负载描述见式 (4)。

牵引电流

$$I_{Load} = \frac{U_{Load}}{Z_{Load}} = \frac{\sqrt{3}kU_m}{Z} \sin(\omega t - \frac{1}{6}\pi - \alpha) \quad (9)$$

牵引变压器一次侧电流分别为:

$$\left. \begin{aligned} I_A &= \frac{\sqrt{3}k^2U_m}{Z} \sin(\omega t - \frac{1}{6}\pi - \alpha) \\ I_B &= 0 \\ I_C &= -\frac{\sqrt{3}k^2U_m}{Z} \sin(\omega t - \frac{1}{6}\pi - \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

电压电流矢量图如图 7。

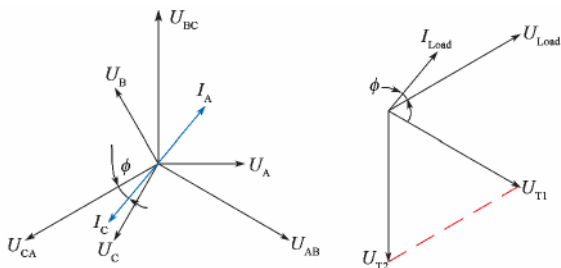


图 7 V/V 牵引变电压电流矢量图

由图 7 可见, 最终电压电流矢量图与单相变压器的类似, 存在严重的三相电流不平衡。

1.3 V/逆 V 牵引变供电

V/逆 V 变压器绕组接线如图 8 所示。

三相供电系统电压如式 (1)、式 (2) 所示。

通过图 8 所示的 V/逆 V 变压器绕组接线图, 可得牵引变压器二次侧各绕组电压为

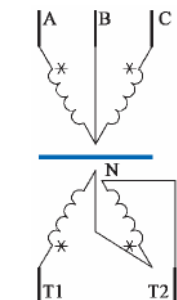


图 8 V/逆 V 变压器绕组接线图

$$\left. \begin{aligned} U_{T2-\alpha} &= kU_{AB} = \sqrt{3}kU_m \sin(\omega t + \frac{1}{6}\pi) \\ U_{T2-\beta} &= kU_{CB} = -\sqrt{3}kU_m \sin(\omega t - \frac{1}{2}\pi) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

牵引变压器输出电压为

$$\begin{aligned} U_{Load} &= U_{T2-\alpha} + U_{T2-\beta} = \sqrt{3}kU_m \sin(\omega t + \frac{1}{6}\pi) - \\ &= \sqrt{3}kU_m \sin(\omega t - \frac{1}{2}\pi) = 3kU_m \sin(\omega t + \frac{1}{3}\pi) \end{aligned} \quad (12)$$

式中: k 为变压器匝比, $k = \frac{N_2}{N_1}$ (N_2 为变压器二次侧单相匝数, N_1 为变压器一次侧单相匝数)。

牵引负载描述如式 (4) 所示。

牵引电流

$$I_{Load} = \frac{U_{Load}}{Z_{Load}} = \frac{3kU_m}{Z} \sin(\omega t + \frac{1}{3}\pi - \alpha) \quad (13)$$

牵引变压器一次侧电流分别为

$$\left. \begin{aligned} I_A &= \frac{3kU_m}{Z} \sin(\omega t + \frac{1}{3}\pi - \alpha) \\ I_B &= -(I_A + I_C) = -\frac{6kU_m}{Z} \sin(\omega t + \frac{1}{3}\pi - \alpha) \\ I_C &= \frac{3kU_m}{Z} \sin(\omega t + \frac{1}{3}\pi - \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

电压电流矢量图如图 9。

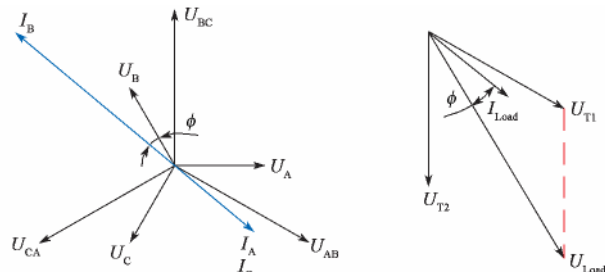


图 9 V/逆 V 牵引变电压电流矢量图

由图 9 可见, 采用 V/逆 V 牵引变压器, 变压器一次侧三相电流依然存在严重的不平衡。

1.4 对比分析

下面以 10 MVA 牵引变压器为例, 表 1 给出了各种牵引变压器的电气参数对比。

表 1 不同牵引变压器电气参数对比

项目	单相变压器	V/V 变压器	V/逆 V 变压器
变压器容量 / MVA	10	10	10
绕组数量	1	2	2
绕组容量 / MVA	10	5+5	5+5
绕组连接角 / (°)	-	60	120
27.5 kV 输出容量 / MVA	10	5	8.67
10 kV 侧电流有效值	$I_A=I_B, I_C=0$	$I_A=I_C, I_B=0$	$I_A=I_C=0.5I_B$

对表 1 数据进行分析可知, 采用上述 3 种变压器接线, 均不能避免三相供电系统中的三相电流不平衡, 必须依靠在三相供电系统侧加装适当的三相不平衡补偿装

置才能解决该问题。

对于变压器的选择，以简单可靠、利用率高、造价低为标准。以下对补偿装置的分析以单相变压器为例，其他形式变压器补偿方式类似推理。

2 综合补偿系统设计

为提高牵引变压器的负载能力，27.5 kV 侧负载无功功率必须就近补偿，考虑机车负载特性（快速变化且冲击性较大），因此采用高压静止无功发生器（SVG）进行快速实时补偿。

10 kV 侧采用晶闸管相控电抗器型 SVC 实现分相补偿，解决牵引变压器导致的系统三相负载不平衡问题，并提高系统功率因数。固定滤波电容器组提供无功支撑并兼顾滤波功能。为降低系统 TCR 装置安装容量，提升效率，采用三相不等容量的 TCR 装置。

2.1 容量配置

图 10 给出了 10 kV/27.5 kV 单相牵引变压器的平衡补偿矢量图^[2-3]。图 10 中， I_{ZA} 、 $-I_{ZA}$ 为补偿前 10 kV 侧的 A 相、B 相电流； I_{CA} 、 $-I_{CA}$ 为补偿系统的接入 A 相、C 相间的感性电流； I_{BC} 、 $-I_{BC}$ 为补偿系统的接入 B 相、C 相间的容性电流。 I_A 、 I_B 、 I_C 为补偿后 10 kV 侧三相电流。

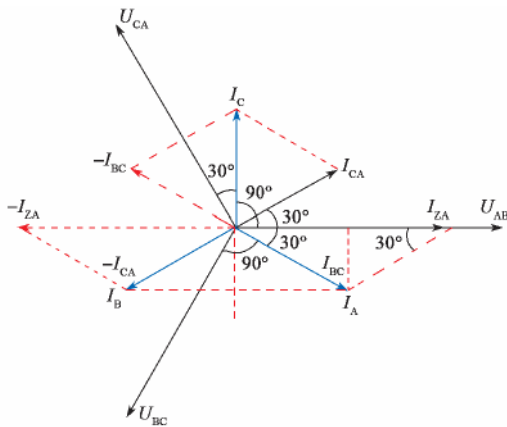


图 10 10 kV/27.5 kV 单相牵引变压器平衡补偿的矢量图

对图 10 矢量图进行分析可知，补偿后三相电流完全平衡。考虑兼顾牵引变压器以外负载的三相平衡补偿及滤波，设置三相对称的滤波电容器组。基于矢量图分析可知该综合补偿系统容量需求如表 2 所示。其中 Q 为

单相所需补偿无功功率， $Q = \frac{P_{Load}}{\sqrt{3}} = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5.77 \text{ MVA}$ ，

“+”代表容性，“-”代表感性。补偿装置之相序与变压器接线方式有关，需要根据实际相序进行调整，本文以牵引变压器接 AB 相为例。

表 2 综合补偿系统容量配置

相	平衡补偿无功需求	三相平衡电容器组	TCR 装置无功需求
AB	$-Q$	$+Q$	$-2Q$
BC	$+Q$	$+Q$	$-Q$
CA	0	$+Q$	$-Q$

2.2 主电路设计

根据上述分析，最终确定的综合不平衡补偿系统主电路如图 11 和图 12 所示。10 kV 侧采用非对称配置的 TCR+FC 型 SVC，FC 部分设置 H3、H5、H7 这 3 个滤波通道。27.5 kV 侧安装 SVG 型补偿装置，实时补偿牵引负载无功功率。

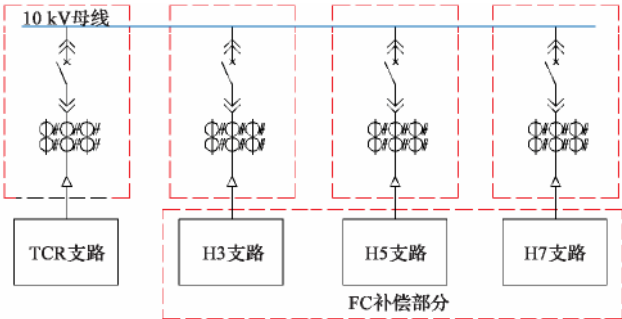


图 11 综合补偿系统主电路框图（10 kV 部分）

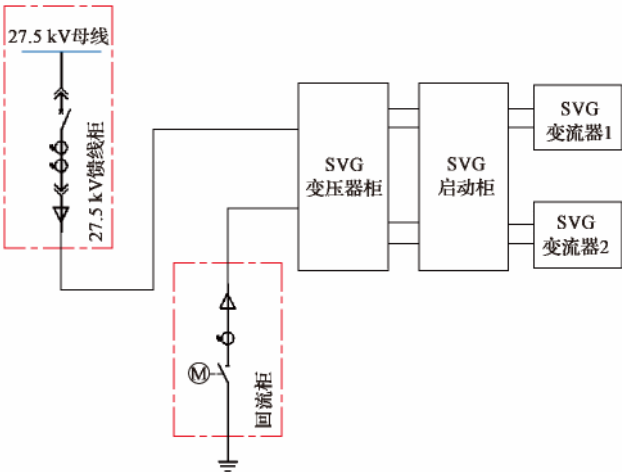


图 12 综合补偿系统主电路框图（27.5 kV 部分）

SVG 成套装置配置为 $\pm 2 \times 3\,000 \text{ kvar}$ ，可根据负载无功变化实现 $-6\,000 \sim +6\,000 \text{ kvar}$ 连续可调的无功输出，单组变流器故障时可由另一组可提供 $3\,000 \text{ kvar}$ 的补偿能力，满足大部分负载工况，提高了系统可靠性。SVG 变流器工作电压为单相 11 kV （通过中点接地方式降低变流器的绝缘水平，以利用常规 10 kV 机组结构），再通过三绕组升压变压器接至 27.5 kV 母线。成套装置主要包括变压器、变流器、启动装置、控制保护系统等，单重变流器由 22 个 H 桥模块级联而成。

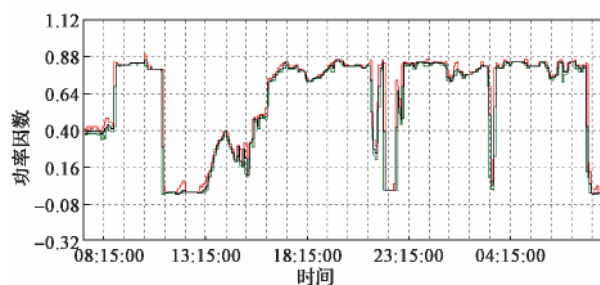
10 kV SVC 补偿装置由晶闸管控制电抗器（TCR）、滤波器、控制系统等构成，TCR 补偿容量为 20 Mvar ，其中 AB 相为 $2 \times 5 \text{ MVA}$ ，BC、CA 相为 5 MVA 。主要设备包括全数字控制系统，晶闸管阀组 4 台，相控电抗器 4 台以及 3 个滤波电容器组。

SVC 控制系统是通过检测 10 kV 母线电压电流检测进行综合补偿计算，实时调整三相 TCR 输出电流，实现 10 kV 母线的电流平衡和功率因数改善。

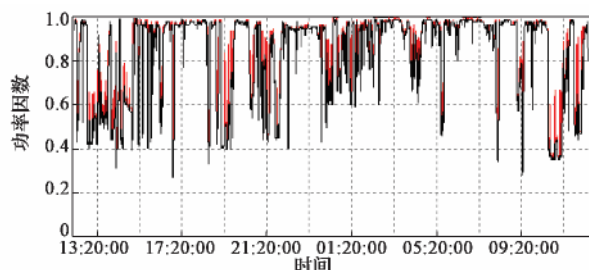
2.3 现场验证

所研制的装置在某工厂牵引变电所实现了挂网运

行,采用功率测试仪进行数据记录,然后对数据进行分析,具体试验结果如图 13~图 15 所示。

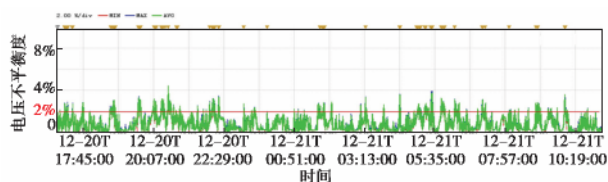


(a) 补偿前

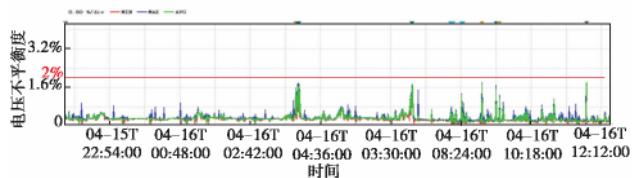


(b) 补偿后

图 13 补偿前后功率因数

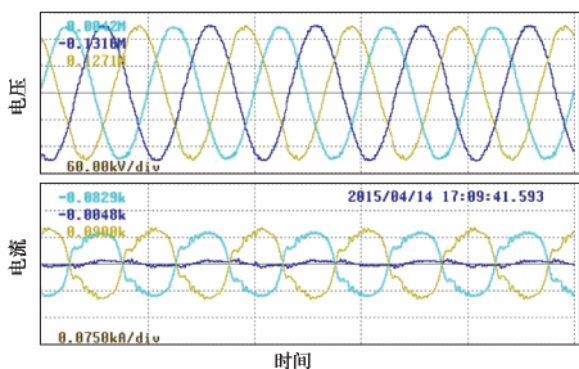


(a) 补偿前

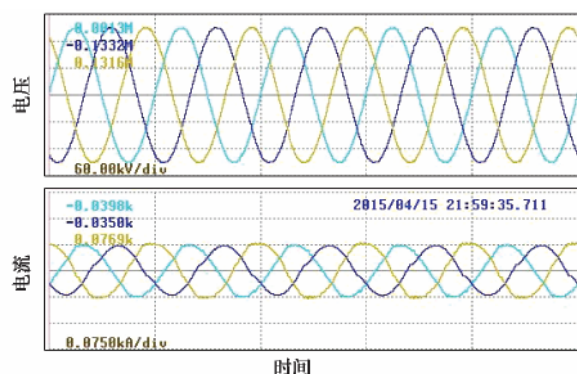


(b) 补偿后

图 14 补偿前后电压不平衡度



(a) 补偿前



(b) 补偿后

图 15 补偿前后 10 kV 侧电压电流波形

由图 13~图 15 可知,该综合补偿装置在实现挂网运行后,各项指标均满足国标要求,具体结论如下:

①无功补偿效果显著。10 kV 侧功率因数由补偿前的 0.8 上升到 0.95 以上。

②负序电流治理效果好。电压不平衡度基本控制在 0.4% 左右;10 kV 侧母线电流相位与电压相位重合,三相母线电流趋于相等,负序电流大大减小;同时 10 kV 侧网压更为平稳。

3 结语

本文分析了 3 种牵引供电方式下三相电流不平衡情况及变压器利用率,并以 10 kV/27.5 kV 单相变压器供电为例设计了综合补偿系统方案。投入运行结果表明,10 kV 侧三相电压和电流保持同相位,电压波动小,系统功率因数提高至 0.95 以上。该综合补偿装置可有效提高牵引供电系统的可靠性,并降低变压器的装机容量,可在各铁路机车制造、检修基地等得到推广应用。

参考文献:

- [1] 符德川. 三相 V/V 接线牵引变压器的应用 [J]. 铁道机车车辆, 1999 (4): 25-28.
- [2] 陈智博, 蒋家久, 胡晓东, 等. 动车试验线牵引供电 TSC+TSR 型三相平衡补偿装置控制系统研制 [J]. 大功率变流技术, 2010 (6): 46-50.
- [3] 蒋家久, 陈智博, 沈辉, 等. 动车试验线牵引供电三相平衡补偿装置的系统设计 [J]. 大功率变流技术, 2010 (5): 38-44.

作者简介:任 韬(1986-),男,工程师,现从事牵引供电设计工作。