

电气化铁路牵引变压器的选择

龙禹¹,丁永辉²

(1.南京供电公司,江苏南京 210008;2.江苏科能电力工程咨询有限公司,江苏南京 210024)

摘要:为降低电铁负荷对电网的影响,采用合理的牵引变压器型式将能有效解决该问题。介绍了电气化铁路牵引变压器的工作原理,从技术和经济性两方面对江苏常用的阻抗匹配平衡变压器和V,v接线变压器2种牵引变压器进行了综合比较分析,提出了应用建议,可供电铁牵引变压器的选择参考。

关键词:电气化铁路;电能质量;牵引变压器;接线型式

中图分类号:U224

文献标志码:B

文章编号:1009-0665(2011)05-0036-04

中国电气化铁路飞速发展,在拓展运输能力、带来巨大经济效益和社会效益的同时,也带来了严重的电能质量问题,对电网的安全运行和电网中其他用户的用电,都产生了不良影响^[1-6]。牵引变压器的合理选择,对降低电气化铁路对电能质量的影响将起到巨大作用。文中对牵引变压器进行了比较研究,并结合江苏电网实际情况对牵引负荷对电能质量的影响进行了深入研究,推荐出适合江苏电网的牵引变压器型式。

1 牵引变压器

电气化铁路是指从外部电源和牵引供电系统获得电能,通过电力机车牵引列车运行的铁路。电气化铁路的供电是在铁路沿线建立若干个牵引变电所,一般由电力系统110 kV或220 kV双电源供电,经牵引变压器降为27.5 kV或55 kV后通过牵引网(接触网)向电力机车供电。

1.1 牵引变压器分类

牵引变压器是一种特殊电压等级的电力变压器,应能满足牵引负荷变化剧烈、外部短路频繁的要求,是牵引变电所的“心脏”。一般来说,牵引变压器均有100%过载能力,我国牵引变压器采用三相、三相-二相和单相3种类型。

我国常用的牵引变压器主要有单相接线变压器、单相V,v接线变压器、三相V,v接线变压器、Y,d11接线变压器、阻抗匹配平衡接线变压器。国内常用牵引变压器技术性能对比如表1所示。

江苏省内现有的京沪电气化和陇海电气化铁路均采用阻抗匹配平衡接线变压器;而正在建设的京沪高铁、沪宁城际、宁杭客专均采用单相V,v接线变压器。

1.2 基本供电原理

1.2.1 单相V,v接线变压器

表1 牵引变压器性能比较表

比较项目	纯单相接线	V,v接线	平衡接线	YN,d11接线
变压器结构	简单	简单	较复杂	较复杂
容量利用率	高	高	较高	低
无功冲击负荷的影响	大	较大	较小	与V,v接线相当
负序电流影响	大,对系统短路容量要求高	为纯单相接线的一半	高密度行车条件下几乎为零	与V,v接线相当

电路原理图和相量关系如图1和图2所示。

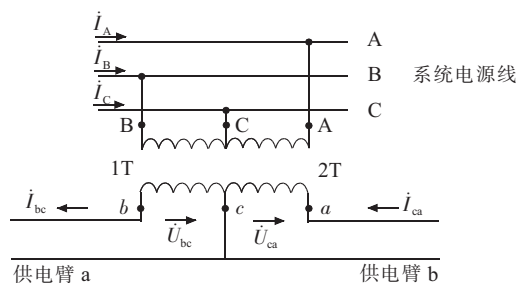


图1 单相V,v变压器接线原理

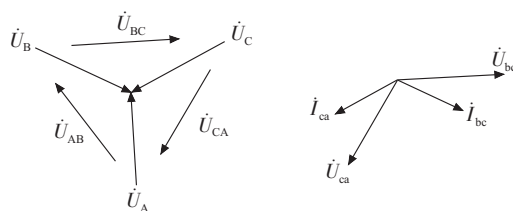


图2 单相V,v变压器原副边相量关系

牵引变电所装设2台单相接线牵引变压器1T和2T,作V,v连接。1T和2T的原边分别接入电力系统的BC相和AC相;副边各有一端分别接到牵引侧的两相母线上,各有另一端与轨道及接地网连接。BC相向左边供电臂的牵引网供电,AC相向右边供电臂的牵引网供电,即通常所说的60°接线。原、副边电流关系如式(1)(忽略空载电流)。

应用余弦定理,可得1T和2T副边v接顶点出线电流相量和如式(2)。

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \frac{-\dot{I}_{ca}}{K} \\ \dot{I}_B = \frac{\dot{I}_{bc}}{K} \\ \dot{I}_C = \frac{1}{K}(\dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}) \end{cases} \quad (1)$$

$$I_c = \sqrt{\dot{I}_{bc}^2 + \dot{I}_{ca}^2 - 2\dot{I}_{bc}\dot{I}_{ca}\cos\Phi} \quad (2)$$

式中: K 为每台单相牵引变压器的变比; Φ 为 \dot{I}_{bc} 与 \dot{I}_{ca} 的夹角。

单相V,v接线牵引变压器的优点是:牵引变压器容量利用率高;在正常运行时,牵引侧保持三相,因此可供应牵引变电站自用电和地区三相负载;主接线较简单,设备较少,投资较省。其主要缺点是,当一台牵引变压器故障时,另一台必须跨相供电,其中有一个倒闸过程,同时地区三相电力供应也将中断。倒闸过程完成后,实质上它成为单相接线牵引变电站,对电力系统的负序影响也随之增大。

1.2.2 阻抗匹配平衡变压器(简称平衡变压器)

电路原理图和相量关系如图3和图4所示。原边情况与普通三相YN,d11接线变压器的原边情况完全相同,铁芯也是三相芯式的。副边绕组三角形接线在非接地相改设两个外移绕组 $a\alpha$ 、 $b\beta$,内缩三角形接线的一角 c 与轨道、接地网连接, α 、 β 两端分别接到牵引侧两相母线上,由两相牵引母线分别向两侧对应的供电臂牵引网供电。

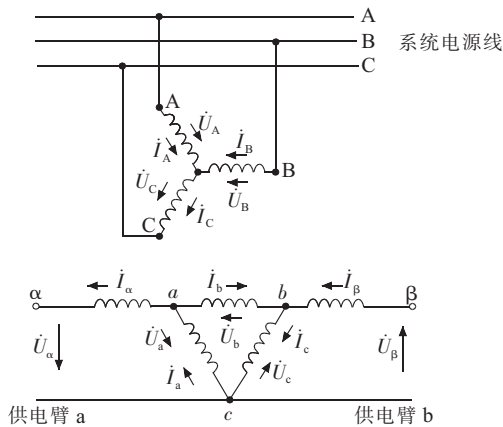


图3 平衡变压器接线原理

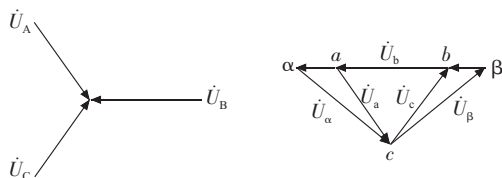


图4 平衡变压器原副边相量关系

平衡变压器副边三相绕组电流 \dot{I}_a 、 \dot{I}_b 、 \dot{I}_c 与副边

两供电臂电流 \dot{I}_α 、 \dot{I}_β 关系如式(3)所示。

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda+2} \begin{bmatrix} \lambda+1 & -1 \\ -1 & -1 \\ -1 & \lambda+1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_\alpha \\ \dot{I}_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, λ 为阻抗匹配系数,当满足原边三相电流平衡,并且当 $\dot{I}_\beta = j\dot{I}_\alpha$,原边三相电流对称时,有以下关系式:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \frac{1}{2\sqrt{3}K} \begin{bmatrix} \sqrt{3}+1 & -j(\sqrt{3}-1) \\ -2 & -j2 \\ -(\sqrt{3}-1) & j(\sqrt{3}+1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_\alpha \\ \dot{I}_\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(4)表明,无论负载电流 \dot{I}_α 、 \dot{I}_β 如何变化,原边三相电流 \dot{I}_a 、 \dot{I}_b 、 \dot{I}_c 都保持平衡,无零序电流,原边绕组的中性点可以接地。

平衡变压器的优点是原边三相制的视在功率可完全转化为副边二相制的视在功率,变压器容量可以全部利用。在两臂牵引负荷相等的前提下,平衡牵引变压器的原边三相是对称的;其过载能力强,容量利用率较高,可改善牵引变电站发生三相不平衡的概率和减少对电力系统的负序影响,但设计计算及制造工艺复杂,造价较高。

1.3 供电能力分析

1.3.1 V,v接线变压器

当低压侧两臂电流夹角为 60° 时,有:

$$\begin{cases} S_A = \frac{S_\alpha}{\sqrt{3}} \\ S_B = \frac{S_\beta}{\sqrt{3}} \\ S_C = \frac{\sqrt{S_\alpha^2 + S_\beta^2 + S_\alpha S_\beta}}{\sqrt{3}} \end{cases} \quad (5)$$

显然有 $S_{\max} = S_C$,则V,v接线变压器高压侧所需三相供电能力为:

$$3S_{\max} = \sqrt{3} \times \sqrt{S_\alpha^2 + S_\beta^2 + S_\alpha S_\beta} \quad (6)$$

设 $S_{\text{低}} = S_\alpha + S_\beta$, $n = \frac{S_\alpha}{S_\beta}$,则

$$3S_{\max} = \frac{\sqrt{3n^2 + 3n + 3}}{n+1} \times S_{\text{低}} \quad (7)$$

其中 S_{\max} 为功率最大相的视在功率, $3S_{\max}$ 则反映了电力系统需满足牵引负荷的三相供电能力。

1.3.2 阻抗匹配平衡变压器

牵引变压器高压侧各相功率为:

$$\begin{cases} S_A = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(1 + \frac{\sqrt{3}}{2})S_\alpha^2 + (1 - \frac{\sqrt{3}}{2})S_\beta^2} \\ S_B = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{S_\alpha^2 + S_\beta^2} \\ S_C = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(1 - \frac{\sqrt{3}}{2})S_\alpha^2 + (1 + \frac{\sqrt{3}}{2})S_\beta^2} \end{cases} \quad (8)$$

当 $S_\alpha > S_\beta$ 时, 有 $S_A > S_B > S_C$; 当 $S_\alpha < S_\beta$ 时, 有 $S_C > S_B > S_A$ 。式中 S_A 和 S_C 相互对称, 可设 $S_\alpha > S_\beta$, 则阻抗匹配平衡接线变压器高压侧所需三相供电能力为:

$$3S_{\max} = \sqrt{2} \times \sqrt{(1 + \frac{\sqrt{3}}{2})S_\alpha^2 + (1 - \frac{\sqrt{3}}{2})S_\beta^2} \quad (9)$$

设 $S_{\text{低}} = S_\alpha + S_\beta$, $n = \frac{S_\alpha}{S_\beta}$, 则

$$3S_{\max} = \frac{\sqrt{(2 + \sqrt{3})n^2 + (2 - \sqrt{3})}}{n+1} \times S_{\text{低}} \quad (10)$$

2 牵引变性能比较

2.1 抑制负序电流

比较式(4)、(5)和式(9)、(10), 当 $n=1$, 即两臂负荷相等时, V, v 接线变压器的不对称系数为 50%, 阻抗匹配平衡接线牵引变压器不对称系数为 0; 当 $n=0$, 即一臂带负荷, 另一臂负荷为 0 时, 两种接线型式变压器负荷在电力系统中引起的不对称度相同, 都为 100%。总的来说, 阻抗匹配平衡接线变压器负荷的负序影响小于 V, v 接线变压器。

2.2 供电能力

比较式(7)和式(10), 当 $n=1$, 即两臂负荷相等时, V, v 接线变压器高压侧所需三相供电能力为低压侧两臂负荷之和的 1.5 倍, 阻抗匹配平衡接线牵引变压器高压侧所需三相供电能力为低压侧两臂负荷之和; 当 $n=0$, 即一臂带负荷, 另一臂负荷为 0 时, V, v 接线变压器高压侧所需三相供电能力为低压侧一臂负荷的 1.732 倍, 阻抗匹配平衡接线牵引变压器高压侧所需三相供电能力为低压侧一臂负荷的 1.93 倍。可见两臂负荷不平衡度越大, 需要高压侧的三相供电能力也越高; 采用 V, v 接线变压器时, 高压侧所需电力系统三相供电的能力小于采用平衡变压器。

2.3 建设周期与造价

目前国内已投运的平衡变压器电压等级都是 110 kV, 最大容量可做到 80 MV·A。尚无厂家生产 220 kV 等级的平衡变压器, 但一些厂家已具备了生产能力。110 kV 平衡变压器和 V, v 接线变压器从设计到制造出产品大约需要 3 个月, 220 kV 平衡变压器制造时间略长, 大概需要 4 个月。由于平衡变压器设计及制造工艺较 V, v 接线变压器复杂, 造价上

略高于 V, v 接线变压器, 相同供电容量的平衡变压器(如 40 MV·A)和 (20+20) MV·A 的 V, v 接线变压器在其他参数都相同的情况下, 平衡变压器比 V, v 接线变压器价格要高出约 15%。

3 无功冲击影响对比

由于电气化铁路铁道条件多变, 列车行进过程中遇到的阻力不断变化, 列车需要频繁地启动、加速、惰行、制动, 或者从一个供电区进入或退出, 都将造成牵引负荷剧烈波动, 并产生较大的冲击电流, 在公共连接(PCC)点将产生电压波动, 又由于江苏境内铁路班次多, 间隔时间短, 长时闪变也不可忽视。

由式(7)和(10)知, 在两臂负荷相等的情况下, 在机车启动瞬间, 平衡变压器高压侧最大一相的无功冲击负荷比 V, v 接线变压器小 1.5 倍, 因此在 PCC 点产生的电压波动也小于 V, v 接线变压器。

以沪宁城际铁路和宁启电气化铁路为例。沪宁城际铁路由 220 kV 电压等级接入电网, 客车采用交直动车组, 单列机车 8 辆编组功率为 8 800 kW, 双机重联 16 辆编组为 17 600 kW, 在南京境内设有宝华山牵引站; 宁启电气化铁路由 110 kV 电压等级接入电网, 客车拟采用交直动车组, 单列机车 8 辆编组功率为 4 800 kW, 双机重联 16 辆编组功率为 9 600 kW; 货车拟采用 HXD3 型机车, 机车功率为 7 200 kW, 在南京境内设有六合牵引站。

采用不同接线型式变压器时, PCC 点的电压波动如表 2 所示。

表 2 牵引变不同接线方式 PCC 点电压波动

牵引站	主变接线型式	PCC 点电压波动 /%
宝华山	V, v 接线	2.88
	平衡接线	1.75
六合	V, v 接线	1.77
	平衡接线	1.19

从表 2 可以看出, 在相同接入电网条件下, 平衡接线牵引变压器在降低冲击负荷引起 PCC 点电压波动方面能力更强。

4 综合比较

4.1 经济比较

牵引变电站采用不同接线型式主变压器时的经济比较(仅以六合站为例)如表 3 所示。

从比较结果来看, 平衡变压器造价略高于 V, v 接线变压器, 但变电站所需无功补偿装置的容量小于采用 V, v 接线变压器, 总投资低于采用 V, v 接线变压器。

4.2 综合对比

采用不同接线型式的牵引变压器的综合比较如

表4所示。

表3 同容量V,v变与平衡变压器经济比较

比较项目	V,v 接线	平衡接线
主变容量/(MV·A)	2×20	40
电压波动改善率/%	44	16
低压侧每臂补偿容量/Mvar	20	7.1
投资/万元	无功补偿	2 000
	主变制造	300
	合计	2 300
		710
		345
		1 055

注:只对两者的差异部分进行比较,不代表实际投资。

表4 牵引站采用不同接线型式主变的比较

比较项目	阻抗匹配平衡变压器	V,v 接线变压器
供电能力	较大	较小
对PCC点电压波动和闪变的影响	较小	较大
对电网负序影响	较小	较大
制造工艺	复杂	简单
制造价格	相对高约15%	相对低约15%
牵引供电方式	带回流线的直接供电	带回流线的直接供电或AT供电
牵引站所需无功补偿	较小	较大
无功补偿所需投资	较小	较大

从比较结果来看,平衡变压器供电能力强,抑制电铁对电网的影响能力更强,而且综合造价也相对较低。

5 结束语

电铁负荷不仅对电能质量、继电保护及自动装

置等产生严重干扰或影响,直接威胁电网的安全运行,降低供电可靠性;而且影响电动机、变压器及输电线路等的使用效率或寿命,增加了系统投资和运营管理费用。而采用合适的牵引变压器将可以降低电铁负荷对电网的影响。综合前述技术与经济比较,为减小电气化铁路对电力系统的影响,建议牵引站变压器采用阻抗匹配平衡变压器。

参考文献:

- [1] 李群湛.试论电气化铁道的电能质量问题[J].电气化铁道,2006(S1):1-6.
- [2] 陈邦达.电气化铁路供电若干问题探讨[J].湖北电力,2007,31(1):21-29.
- [3] GRILLO D. An On-board Monitoring System for Electrical Railway Traction Systems [C]. Instrumentation and Measurement Technology Conference Sorrento, 2006.
- [4] XU X Z. Electrical Railway Active Power Filter Research Based on Genetic Algorithms [C]. IEEE International Conference on Control and Automation Guangzhou, 2007.
- [5] LI J. Electrical Railway Harmonics Suppression Research Based on Genetic Algorithms [C]. The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments, 2007.
- [6] 安鹏,张雷.电气化铁路对电力系统安全运行的影响及对策[J].山东电力技术,2005(4):16-20.

作者简介:

龙禹(1973-),女,黑龙江佳木斯人,高级工程师,从事电网规划、设计管理工作;

丁永辉(1972-),男,江苏如皋人,高级工程师,从事电网规划、设计管理工作。

The Selection of Traction Transformers Used in Electrified Railway

LONG Yu¹, DING Yong-hui²

(1.Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210008, China;

2.Jiangsu Keneng Electric Power Engineering Consulting Co. Ltd., Nanjing 210024, China)

Abstract: With the rapid development of electrified railway system in China, the adverse effect on power quality caused by electric locomotive load is more significant. To reduce the impacts of electrified railway on power grid, the reasonable use of traction transformer type will solve this problem effectively. In the paper, the principles of traction transformers used in electrical railway were introduced. Besides, this paper deals with the analysis and comparison of two types of classical traction transformers in Jiangsu province from the two aspects of technology and economy. Finally, the suitable type of transformer for power grid has been provided, which can give reference for the selection of traction transformer.

Key words: electrified railway; power quality; traction transformer; mode of connection

常见气象名词(二)

(5) 副热带高压

副热带高压是位于副热带地区的暖性高压系统。它对中、高纬度地区和低纬度地区之间的水汽、热量、能量的输送和平衡起着重要的作用,是大气环流的一个重要系统。副热带高压的东部是强烈的下沉运动区,下沉的气流因绝热压缩而变暖,所控制地区会出现持续性的晴热天气。而副热带高压的西部是低层暖湿空气辐合上升运动区,容易出现雷阵雨天气。