

电气化铁路对电力系统的影响

卢志海¹, 厉吉文¹, 周剑²

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 威海市体育场, 山东 威海 264200)

摘要: 电气化铁路作为电力系统的一个特殊用户,其负荷具有非线性、不对称和波动性的特点。该文以斯考特变压器的供电系统为例,分析了注入系统的不平衡谐波,介绍了其对电力系统的危害,并提出了一些应对措施;针对电铁负荷功率因数较低的现象,分析了无功补偿的必要性以及目前存在的问题和解决措施。通过分析表明可以把电铁对电力系统的影响降到最低。

关键词: 电气化铁路; 电力系统; 不平衡谐波; 无功补偿

中图分类号: TM712 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)11-0033-04

0 引言

随着我国市场经济的发展,传统的内燃机式机车已越来越不能满足市场的需求,电力机车运营成本可以降低 30%~40%,因此越来越成为发展的方向。但是由于电铁电力机车是波动性很大的大功率单相整流负荷,对于三相对称的电力系统供电来说,电铁牵引负荷具有非线性、不对称和波动性的特点,将产生三相不平衡的谐波电流注入系统,使电力系统的电压波动,因此必须对电铁机车对电力系统的影响有足够的重视并且采取应对措施。

1 电铁经牵引变压器注入系统的不平衡谐波电流^[1,12]

电铁的供电是在铁道沿线建立若干个牵引变电站,一般由电力系统 110 kV 双电源供电,经牵引变压器降压为 27.5 kV 或 55 kV 后通过牵引网向电力机车供电,电力机车采用 25 kV 单相工频交流电压,经全波整流后驱动直流牵引电动机,在架空接触导线和钢轨之间行驶。电铁为两相或单相不对称的谐波电流,经各种牵引变压器的变换后,高压侧注入电力系统的谐波电流为三相不平衡谐波,且有基波负序电流注入系统。下面以牵引变压器斯考特(T)接线为例分析(这里把基波作为谐波的特例 $h = 1$ 统一分析)。

T接线的斯考特变压器为一次侧三相系统和二次侧两相系统之间的变压器,其原理接线及电压相量如图 1 所示。一次三相侧绕组不对称,匝数关系为 $W_{BD} = W_{DC}$, $W_{AD} = \sqrt{3} W_{BC} / 2$,中性点 N 位于绕组 AD 的 $1/3$ ($W_{DN} = W_{AD} / 3$),二次侧两相绕组的匝数相等 $W_{ac} = W_{bc}$ 。高压侧接 110 kV 系统三相对称的

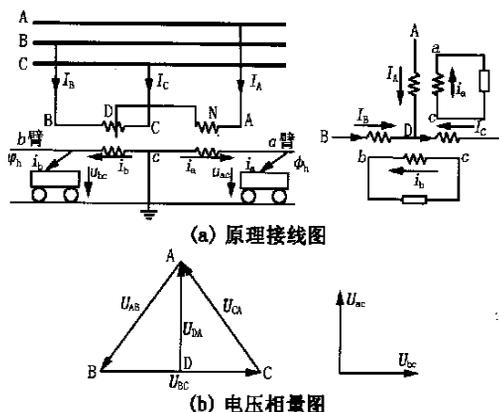


图 1 斯考特变压器的供电系统

Fig. 1 Power supply system of Scott transformer

正弦电压,低侧两相电压 U_{bc} 滞后于 U_{ac} 90° ,组成了、两相系统,分别向两侧的牵引网及电力机车供电。

两供电臂输入牵引变压器的各次谐波电流以超前相电压 U_{ac} 为参考,则 h 次谐波电流的复数形式为:

$$\begin{cases} I_{ah} = I_{ah} e^{j\phi_h} \\ I_{bh} = I_{bh} e^{j(\phi_h - h \times 90^\circ)} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ϕ_h 和 ϕ_h 参照于各自供电臂电压的谐波初相角。

设变压器 T 的绕组的变比为 $K_T = W_{AD} / W_{ac}$,利用、0 两相系统转换至三相系统坐标变换关系式^[7],高压侧中性点 N 不接地,不存在零序谐波分量,高压侧输入电力系统的谐波分量电流及线电流为:

$$\begin{bmatrix} I_{h+} \\ I_{h-} \end{bmatrix} = \frac{1}{2K_T} \begin{bmatrix} 1 & j \\ 1 & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ah} \\ I_{bh} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} I_{Ah} \\ I_{Bh} \\ I_{Ch} \end{bmatrix} = \frac{1}{2K_T} \begin{bmatrix} 2 & 0 \\ -1 & \sqrt{3} \\ -1 & -\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ah} \\ I_{bh} \end{bmatrix} \quad (2)$$

把式(1)代入式(2),各次谐波电流计算式为:

$$\begin{aligned} I_{h+} &= \sqrt{I_{ah}^2 + I_{bh}^2 + 2I_{ah}I_{bh}\cos[h - \phi_h + (h-1)90^\circ]} / 2K_T \\ I_{h-} &= \sqrt{I_{ah}^2 + I_{bh}^2 + 2I_{ah}I_{bh}\cos[h - \phi_h + (h+1)90^\circ]} / 2K_T \\ I_{Ah} &= I_{ah} / K_T \\ I_{Bh} &= \sqrt{I_{ah}^2 + I_{bh}^2 + 2\sqrt{3}I_{ah}I_{bh}\cos[h - \phi_h + h \times 90^\circ]} / 2K_T \\ I_{Ch} &= \sqrt{I_{ah}^2 + I_{bh}^2 + 2\sqrt{3}I_{ah}I_{bh}\cos[h - \phi_h + h \times 90^\circ]} / 2K_T \end{aligned} \quad (3)$$

当变比采用变压器一、二次额定线电压之比 K 时, $K = W_{BC} / W_{bc} = 2K_T / \sqrt{3}$, 上列各式中 $K_T = \sqrt{3}K/2$ 。

当 $h = \phi_h$ 时,对于电力机车产生的奇次特征谐波电流,输入电力系统的特征电流简化为下式:

$$\begin{aligned} I_{Ah} &= 2I_{ah} / (\sqrt{3}K) \\ I_{Bh} &= I_{Ch} = \sqrt{I_{ah}^2 + I_{bh}^2} / (\sqrt{3}K) \\ I_{h+} &= \begin{cases} (I_{ah} + I_{bh}) / (\sqrt{3}K) & h = 4m + 1 \\ |I_{ah} - I_{bh}| / (\sqrt{3}K) & h = 4m + 3 \end{cases} \\ &\quad (m = 0, 1, 2 \dots) \\ I_{h-} &= \begin{cases} |I_{ah} - I_{bh}| / (\sqrt{3}K) & h = 4m + 1 \\ (I_{ah} + I_{bh}) / (\sqrt{3}K) & h = 4m + 3 \end{cases} \\ &\quad (m = 0, 1, 2 \dots) \end{aligned} \quad (4)$$

假设保持一臂为最大电流, (令 $h = 1$) 如 $I_{a1} = I_{1max}$, 另一臂电流 I_{b1} 在零到 I_{1max} 之间变化时, 令 $I_{b1} / I_{1max} = x$ 则由式(4)可得:

$$\begin{cases} I_{1+} = I_{1max}(1+x) / \sqrt{3}K \\ I_{1-} = I_{1max}(1-x) / \sqrt{3}K \end{cases} \quad (5)$$

则 $I_{1-} / I_{1+} = (1-x) / (1+x)$ (6)

表1列出了T接牵引变压器在3种典型工况下 I_{1-} 、 I_{1+} 和 I_{1-} / I_{1+} 的值。

表1 T接牵引变压器在3种典型工况下电流不平衡度

Tab.1 The unbalanced current of T traction transformer on three typical work conditions

X	0.5	0	1
I_{1-}	$\sqrt{3}I_{1max}/6k$	$\sqrt{3}I_{1max}/3k$	0
I_{1+}	$\sqrt{3}I_{1max}/2k$	$\sqrt{3}I_{1max}/3k$	$2\sqrt{3}I_{1max}/3k$
I_{1-} / I_{1+}	1/3	1	0

由以上分析可知,除基波正序电流是由系统向电铁馈送的电流外,所有谐波电流及基波负序电流均为电铁产生,并向系统倒送电流。

由式(5)可知输入系统的基波负序电流为:

$$I_{1-} = (I_{1max} - I_{b1}) / \sqrt{3}K = (0 \sim 57.7\%) I_{1max}$$

在零到最大值之间变化,而最大基波负序电流为供电臂最大电流折算值的1/2左右。输入系统的最大相谐波总电流估计为 $I_H = 25\%I_{1max}$ 。即在电铁不采取抑制措施的情况下,高压侧输入系统的最大相谐波总电流为供电臂最大电流折算值的1/4,为输入系统的基波负序电流最大值的1/2左右。

2 谐波电流和负序电流对电力系统的主要影响

2.1 对旋转电机的影响

1) 汽轮发电机转子为敏感部位,因为汽轮发电机转子的谐波和负序温升比定子大,存在局部的突出高温部位,国内曾发生过向电铁供电的汽轮发电机转子部件嵌装面过热受损的事故。并且当负序电流流过发电机时,产生负序旋转磁场,产生负序同步转矩,使发电机产生附加振动。谐波也会引起电机的振动并发出噪声,长时间的振动会引起金属疲劳和机械损坏^[2]。

2) 对邻近牵引变电所而远离(指电气距离)电源的异步电动机,其定子绕组为敏感部位。同时还将电动机中产生一反向旋转磁场,此反向磁场对电动机转子起制动作用,影响其出力。在谐波和负序电流的共同影响下,国内曾发生多起定子绕组过热烧毁事故^[3]。

2.2 对电力变压器的影响

谐波电流在变压器绕组要产生附加损耗,该损耗相当大,除此之外还能引起外壳、外层硅钢片和某些紧固件发热,并可能局部过热,加速变压器的老化,影响其使用寿命。负序电流造成电力系统三相电流不对称,造成变压器的额定出力不足(即变压器容量利用率下降)^[4]。

2.3 对输电线路的影响

谐波使网损增大,在发生系统谐振或谐波放大的情况下,谐波网损可达到相当大的程度。负序电流流过电力网时,它并不做功,只是降低了电力线路的输送能力。

2.4 对继电保护和自动装置的影响^[5]

谐波在负序(基波)量的基础上产生的干扰,如

对各种以负序滤波器为启动元件的保护及自动装置的干扰。由于保护按负序(基波)量整定,整定值小、灵敏度高。滤波器为启动元件时,实际运行中已引起下列保护和自动装置误动:

- 1) 发电机的负序电流保护误动。
- 2) 变电站主变压器的复合电压启动过电流保护装置的负序电压启动元件误动。
- 3) 母线差动保护的负序电压闭锁元件误动。
- 4) 线路相差高频保护误动。
- 5) 自动故障录波装置的负序启动元件的误启动,导致无故障记录而浪费记录胶卷。在频繁误动时,可能造成未能及时装好新胶卷而导致发生故障时无记录。
- 6) 当谐波注入系统,在谐振或谐波流大的情况下,会造成过流、过压、过负荷及过热,可能造成电容器或串联电抗器的损坏,导致无功补偿装置无法投入运行。

3 电铁的无功补偿

针对电铁负荷功率因数较低的现象,严重危害设备和线路的安全,必须对电铁采取相应的无功补偿措施。目前电铁牵引变电所一般安装两组不可调并联电容补偿装置,分别补偿两个供电臂牵引负荷。但由于牵引负荷为间歇性负荷,负荷变化大,电容补偿不能自动追踪补偿,影响功率因数的提高。

3.1 目前电铁无功补偿存在的问题

- 1) 电容补偿装置容量为固定容量,不能根据电力机车负荷进行无功补偿。
- 2) 供电臂负荷与电容补偿容量不匹配,没有根据供电臂负荷决定补偿装置容量。
- 3) 电容器、电抗器设备有缺陷,造成电容补偿装置不能投运。
- 4) 无功计量方式不合理,牵引供电部门无法投入电容补偿装置。

3.2 为了解决目前电铁无功补偿存在的问题,可以采取以下措施

1) 实现电容分组补偿。即将电容器和电抗器分成5~6组独立补偿单元,根据近期、远期运输量及牵引负荷情况,分组投入补偿装置,使电容补偿装置产生适量无功,补偿电力机车所需的无功功率,尽量不产生过补。虽然这种方法仅能减少无功功率的过补偿,不能进行追踪补偿,但比现有的固定容量补偿的方式效果要好,适合新建变电所和改造旧的变电所采用^[6,11]。

2) 研制新型的电容补偿设备,达到自动跟踪补偿的目的。目前许多国家研制了多种类型的静止无功补偿装置(简称SVC)。SVC具有快速调节无功的功能,能够达到较为理想的补偿效果,虽然价格较高,但无疑是今后的发展方向^[8]。

3) 选择高质量的电容器、电抗器,减小电容、电抗值误差。

4) 在电力机车上装设电容补偿装置,直接吸收电力机车牵引过程中产生的无功成分。

4 改善电铁对电力系统影响的主要措施

电铁产生的负序和谐波电流对相关电厂以及其他电力设备有着重大影响,对其安全性构成很大的威胁,因此必须对电力机车负序电流的影响程度进行定量分析,在此基础上制定切实可行的技术措施。

4.1 降低和限制负序电流措施

- 1) 牵引变电站高压侧接入系统采用换相连接。
- 2) 合理安排列车方式,使单相负载均衡分配在电铁沿线。
- 3) 采用同相供电系统与对称补偿技术。
- 4) 合理安排牵引站供电电源,使每一个保证有可靠的主电源和备用电源,不至使牵引站产生的负序电流过于集中,要由多个电源分担,特别要注意离牵引站的电气距离,容量小的发电机组不能接受较多的负序电流,更不能单独作牵引电源。
- 5) 对电力系统的改进,可在发电厂或枢纽变电站安装特殊的同期调相机,其允许承受负序电流的能力较大,负序阻抗较低,而且有良好的防震性能。在发电机的出线端加装限流电抗器,可以有效地减小注入发电机的负序电流。

4.2 谐波防治措施

- 1) 利用整流变压器绕组移相,抑制高次谐波。
- 2) 对牵引变电站应加装谐波监测仪器,各个供电臂均应装设滤波器。
- 3) 单相应用条件下,将两组工作于不同电磁参数的单相可控电抗器并联,通过实施协调控制,可使每个并联单元(可控电抗器)所产生的谐波相互补偿,从而使单相并联电抗器组的谐波水平大大降低^[9]。
- 4) 保持电铁牵引变专线用电,其余铁路生产、生活用电必须与电铁供电严格分开。

5 结束语

电铁负荷对电力系统的影响不但与系统结构、

容量大小关系较大,而且还与铁路运量的增长运行、方式及牵引变压器的接线方式有一定的关系。因此,电铁的技术发展,必须充分研究和处理这些问题,根据具体情况采取相应的措施,使电铁对电力系统的影响控制在合理范围内,保证电力系统安全运行,并有利于电铁发展,从而获得满意的综合社会效益。

参考文献:

- [1] 田立军,魏殿杰(TIAN Li-jun, WEI Dianjie). 电网电能质量控制(硕士学位论文)(Electric Power Quality Control, Thesis) [D]. 济南:山东大学(Jinan: Shandong University), 2000.
- [2] 章清奇,林国荣(ZHANG Qing-qi, LIN Guo-rong). 电气化铁路负序电流对漳平电厂发电机的影响(The Impact of Electrified Railway Negative Sequence on the Generator) [J]. 福建电力与电工(Fujian Power and Electrotechnics), 1995, 15(4): 48-49.
- [3] 赵旺初(ZHAO WANGchu). 电力网的谐波源及降低谐波的措施(Harmonic Wave Source in Power Networks and Measure to Reduce Harmonic) [J]. 电力建设(Electric Power Construction), 1999, 20(9): 22-25.
- [4] 王公社(WANG Gong-she). 电气化铁路对电力系统的负序影响浅析(An Analysis of Electrified Railway about Impact on the Power System Negative Sequence) [J]. 电力电容器(Power and Capacitor), 1998, (4): 19-22.
- [5] 任元,等(REN Yuan, et al). 信阳和驻马店地区电气化铁路谐波引起 220 kV 高频保护动作的分析(Analyzing the Unwanted Operation of High Frequency Phase Differential Protection Caused by Electric Railway) [J]. 电网技术(Power System Technology), 1995, 19(2): 32-35.
- [6] 李力,等(LI Li, et al). 牵引变电所采用 SVG 实现无功和负序综合补偿方法(A Study on the Comprehensive Compensation for the Reactive Power and the Negative Sequence by Using SVG in the Traction Substations) [J]. 现代电力(Modern Electric Power), 2001, 21(1): 58-62.
- [7] 诸骏伟(ZHU Jun-wei). 电力系统分析(Electric Power System Analysis) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press), 1995.
- [8] 刘凡,杨洪耕(LIU Fan, YANG Hong-geng). 静止无功补偿器对提高电铁电压稳定水平的研究(Research of Improving the Voltage Stability of Electrical Railway Transmission System with Static VAR Compensator) [J]. 继电器(Relay), 2003, 31(5): 30-32.
- [9] 陈柏超,田翠华,等(CHEN Bai-chao, TIAN Cui-hua, et al). 单相可控电抗器的一种谐波抑制原理及实现(Principle and Implementation of a Harmonic Depression Approach for Single Phase Controlled Saturable Reactor) [J]. 中国电机工程学报(Proceedings of the CSEE), 2002, 22(3): 63-67.
- [10] 李群湛,等(LI Qun-zhan, et al). 电气化铁路的同相供电系统与对称补偿技术(About Instantaneous Reactive Power Theory in Non-sinusoidal Asymmetrical Circuits) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1996, 20(4): 9-11.
- [11] Morrison R E, Warburton K, Singh A, et al. The Application of Shunt Compensation on AC Railways [A]. IEE Conf Electric Railway Systems. 1987.
- [12] LI Geng-yin, XU Chun-xia, LIU Guan-qi, et al. Calculation of Three-phase Harmonic Power Flow in Power Systems with Traction Loads Power System Technology [A]. Proceedings of 1998 International Conference on powercon. 1998. 2: 1565-1570.

收稿日期: 2003-08-24; 修回日期: 2003-09-03

作者简介:

卢志海(1976 -),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化控制与无功补偿;

厉吉文(1962 -),男,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统优化控制与无功补偿;

周剑(1973 -),男,科长,主要从事配电网管理工作。

The impact of electrified railway on electric power system

LU Zhi-hai¹, LI Ji-wen¹, ZHOU Jian²

(1. Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Weihai Palestra, Weihai 262400, China)

Abstract: Electrified railway is a special consumer of electric power system, its load is of nonlinear, asymmetry and fluctuation. Taking power supply of Scott transformer as an example, this paper analyzes the unbalanced harmonic of inputting electric power system, explains its impairment on electric power system, and presents a series of countermeasures. Based on the lower load power factors of electrified railway, it expounds the necessity of reactive power compensation, existing problems, and relevant countermeasures. Detailed analysis shows that the negative effects of electrified railway on power system can be reduced greatly.

Key words: electrified railway; electric power system; unbalanced harmonic; reactive power compensation