

地铁牵引站 V/V 牵引变压器 注入系统的谐波和负序分析

童庆刚¹, 汪茂盛²

(1. 攀枝花电业局, 四川 攀枝花 617000; 2. 西昌电业局, 四川 西昌 615000)

摘要: 为了分析牵引供电系统产生的谐波和负序电流所造成的影响, 建立了基于 PSCAD/EMTDC 的典型牵引供电系统和公用电网的模型。在 V/V 接线形式的牵引变压器下, 分析两供电臂机车不同台数运行方式下产生的谐波和负序的影响。

关键词: 牵引供电系统; V/V 接线; 谐波; 负序

Abstract: In order to analyze the influence caused by harmonic and negative sequence generated by traction power supply system, the models of typical traction power supply system and public power grid based on PSCAD/EMTDC are established. The impacts of harmonic and negative sequence of two feeding section locomotives under different operating modes are analyzed in detail based on the V/V traction transformer.

Key words: traction power supply system; V/V connection; harmonic; negative sequence

中图分类号: TM864 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2010)03-0065-04

0 引言

电力机车牵引负荷为波动性很大的大功率单相整流负荷。由于电力机车的非线性、单相、冲击特性, 电力机车运行过程中会产生大量的谐波和负序电流。且电力机车沿铁路沿线移动用电, 产生的危害比其他谐波源和负序源更为严重和广泛, 如不能得到及时有效的治理, 将注入电力系统, 影响全网^[1]。

电气化铁路的牵引供电制式全部采用单相工频 25 kV 交流制, 牵引站的谐波源主要是电力机车, 电力机车采用单相全波不控或半控整流, 脉动数为 2, 特征谐波为全部奇次谐波。电力机车为单相负荷, 由于其运行的随机性, 会在一定区段内造成电网三相严重失衡且难以调节, 电力机车牵引负荷对于供电系统来说为三相不对称负荷, 将会产生负序电流分量。

首先, 建立基于 PSCAD 的牵引供电系统和公共电网的典型模型。其次, 分析 V/V 接线牵引变压器两供电臂机车不同运行方式下产生的谐波和负序电流的影响。计算了与牵引变电站直接相连的系统变电站母线电压谐波总畸变率和三相不平衡度。

1 牵引供电系统模型及原理分析

1.1 区域电网模型

考虑区域供电能力、负荷特性以及牵引网的特点, 选择攀枝花、西昌区域电网作为分析对象。这个供电区域包含一个 220 kV 变电站, 两个 110 kV 变电站和两个牵引变电站。该区域是一个典型的牵引供电系统网络, 带有相对密集的电气化铁路负荷。可将此视为一个分析牵引供电系统和公用电网间相互作用的典型案例。牵引供电系统和公用电网示意图如图 1 所示。

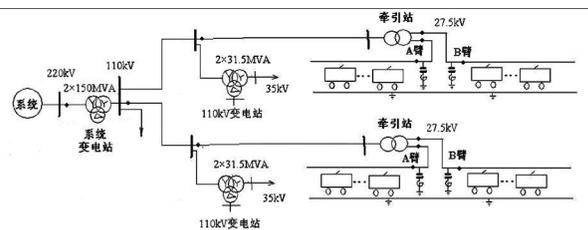


图 1 牵引供电系统和公用电网示意图

220 kV 变电站容量为 150 MVA, 1 号和 2 号牵引变压器均为三相 V/V 接线。1 号牵引站的供电线路总长度为 34 km, 2 号牵引站的供电线路总长度为 20 km。1 号牵引站变压器容量为 $2 \times (20 + 16) \text{MVA}$, 仿真中设定供电臂相别为 AC/BC。2 号牵引站变压器容量为 $2 \times (16 + 16) \text{MVA}$, 适当考虑换相, 仿真中设定供电臂相别为 AB/BC。1 号和 2 号牵引站安装了

3、5 次滤波器,按照可滤除 3 次 70% 谐波电流、5 次 20% 谐波电流、7 次 20% 谐波电流考虑。220 kV 变电站其他负荷按照变电容量 50% 考虑,110 kV 变电站负荷按照总变电容量 40% 考虑,功率因数均考虑 0.9。

1.2 电力机车模型

中国现在普遍运行的电力机车为交直型电力机车。交直型电力机车的牵引变压器低压侧采用的是三段半控桥晶闸管相控整流无级调压方式。机车的基本特性、参数和典型工作过程参见文献 [2]。图 2 为 SS6B 交直型电力机车的 PSCAD 仿真模型主电路图。

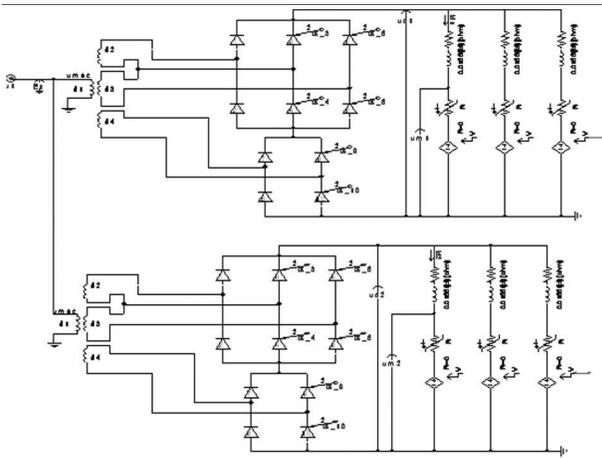


图 2 SS6B 电力机车仿真模型

表 1 列出了 SS6B 型电力机车运行在额定功率下的仿真结果。与文献 [3] 中 SS6B 型电力机车谐波电流统计值进行对比基本一致,说明所建立的 SS6B 型电力机车仿真模型可用于计算。

表 1 SS6B 型电力机车谐波电流仿真结果

谐波次数	1	3	5	7	9	11
百分比 /%	100	24~29	9~15	6~9	2~5	3~4

1.3 牵引变压器模型

1 号和 2 号牵引变压器均采用 V/V 接线形式。电力机车为单相谐波负荷,当通过 V/V 接线牵引变压器的不对称运行后,便在供电系统中产生三相不平衡谐波,有以下特点。

(1) 各次谐波,包括 3 和 3 的倍数次,都经过牵引变压器注入系统,注入系统的特征谐波为全部奇次谐波;

(2) 各次三相不平衡的谐波电流均由谐波序电流组成。各次三相谐波电流的相量和为零,组成闭合三角形,因而不含零序谐波分量。

由 V/V 接线原理图可知, \dot{U}_{a1x1} 与 \dot{U}_{AC} 、 \dot{U}_{x2a2} 与 \dot{U}_{BC} 相当于两台单相 V/V 变压器,变压器高压侧 C 相流过的电流为 A、B 两相电流的叠加。A 供电臂所接电压为 \dot{U}_{AC} , B 供电臂所接电压为 \dot{U}_{BC} 。V/V 接线牵引变压器的电压和电流关系如图 3 所示。

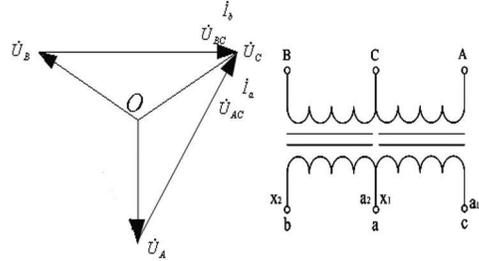


图 3 V/V 接线牵引变压器的电压电流关系

设系统电压为三相对称的正弦波,以供电臂超前相电压 \dot{U}_{AC} 为参考,则两臂 h 次谐波电流的复数形式为

$$\dot{I}_{ah} = I_{ah} e^{j\psi_h} \quad (1)$$

$$\dot{I}_{bh} = I_{bh} e^{j(\varphi_h - h \times 60^\circ)} \quad (2)$$

式中, ψ_h 和 φ_h 为 a 臂和 b 臂参照于各自供电臂电压的 h 次谐波初相角。C 相的电流为 $\dot{I}_{ch} = -(\dot{I}_{ah} + \dot{I}_{bh})$ 。设牵引变压器变比为 K,用三相对称分量法求得注入供电系统的谐波电流及序分量为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{I}_{ah} \\ \dot{I}_{bh} \\ \dot{I}_{ch} \end{bmatrix} &= \frac{1}{3K} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{ah} \\ \dot{I}_{bh} \\ \dot{I}_{ch} \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{\sqrt{3}K} \begin{bmatrix} e^{j30^\circ} \\ e^{-j30^\circ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j \\ j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{ah} \\ \dot{I}_{bh} \end{bmatrix} \quad (3) \end{aligned}$$

把式 (1) 和 (2) 代入即可得到各次谐波电流的数值和相位。各次电流的数值如下式。

$$I_{h+} = \sqrt{I_{ah}^2 + I_{bh}^2 + 2I_{ah}I_{bh} \cos[\varphi_h - \psi_h + (h-1)120^\circ]} \sqrt{3}K \quad (4)$$

$$I_{h-} = \sqrt{I_{ah}^2 + I_{bh}^2 + 2I_{ah}I_{bh} \cos[\varphi_h - \psi_h + (h+1)120^\circ]} \sqrt{3}K \quad (5)$$

$$I_{ah} = I_{ah} / K \quad (6)$$

$$I_{bh} = I_{bh} / K \quad (7)$$

$$I_{ch} = \sqrt{I_{ah}^2 + I_{bh}^2 - 2I_{ah}I_{bh} \cos(\varphi_h - \psi_h + h \times 120^\circ)} / K \quad (8)$$

2 仿真分析

2.1 谐波计算结果

电力机车运行时会产生大量的谐波电流, 这些电流注入系统后会使得系统电压产生畸变, 在所接牵引负荷较重的情况下会引起母线电压畸变率超标。仿真分析中, 选取 1 号和 2 号牵引站分别接 10 台和 5 台机车的重负荷情况, 计算牵引站注入系统的三相电流值, 以及系统变电站 110 kV 和 220 kV 母线电压畸变率。

机车运行方式如下。

1 号牵引变电站两臂运行情况: A 臂 6 台 (SS4 为 4 台, SS6 为 2 台), B 臂 4 台 (SS4 为 2 台, SS6 为 2 台), 100% 功率;

2 号牵引变电站两臂运行情况: A 臂 3 台 (SS4 为 2 台, SS6 为 1 台), B 臂 2 台 (SS4 为 2 台), 100% 功率;

两个牵引变电站注入系统的三相电流数值如表 2 所示。设两供电臂机车在相同触发角下运行, 即 $\psi_{lh} = \varphi_{lh}$ 。1 号和 2 号牵引站注入系统的电流波形如图 4 和图 5 所示。

表 2 牵引变电站注入系统的三相电流值 单位: A

谐波次数		1	3	5	7	9	11
1 号牵引站	A 相	311.6	21.12	36.99	13.93	10.62	7.06
	B 相	193.7	20.14	14.72	12.37	4.63	1.67
	C 相	439.2	5.45	47.47	19.67	6.07	8.66
2 号牵引站	A 相	133.1	13.78	13.6	10.28	7.52	3.94
	B 相	213.4	12.67	22.29	15.25	2.45	5.18
	C 相	93.8	9.17	12.73	8.91	5.55	4.32

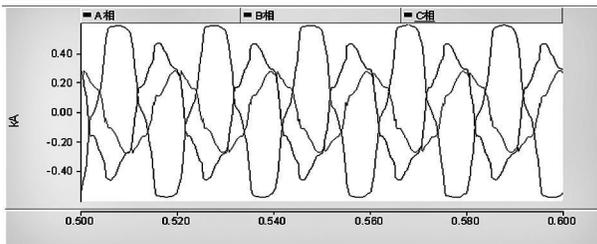


图 4 1 号牵引站注入系统的三相电流波形

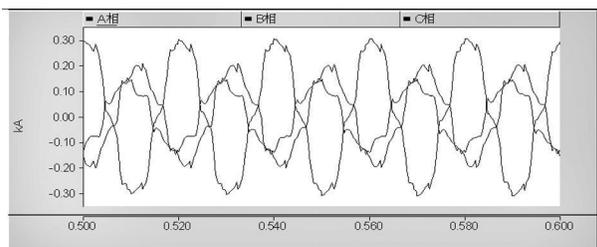


图 5 2 号牵引站注入系统的三相电流波形

文献 [4] 采用保持一臂谐波电流为最大值, 另一臂从零到最大值变化, 取 $I_{lh} = I_{lmax}$, 令 $x = I_{lh} / I_{lmax}$ ($0 \leq x \leq 1$)。牵引臂相别为 AC/BC, 只考虑基波正序和

负序及 C 相各次谐波, 将牵引站注入系统的谐波电流和序电流分为 4 类, 如表 3 所示。

表 3 V/V 牵引变压器注入系统的 4 类谐波电流

	$I_{h*} = I_h / (I_{lmax} \sqrt{3} K)$	相别、序别、次数
1	$I_{h*} = \sqrt{x^2 - x + 1}$	$I_{h-} : h = 3m + 1$
2	$I_{h*} = x + 1$	$I_{h+} : h = 3m + 1$
3	$I_{h*} = \sqrt{3(x^2 + x + 1)}$	$I_{ch} : h = 3m + 1, 3m + 2$
4	$I_{h*} = \sqrt{3}(1 - x)$	$I_{ch} : h = 3m + 3$

对比表 2 中牵引变电站注入系统的三相电流值, 可知仿真计算结果与理论分析得出的结论基本一致, 验证了仿真计算的正确性。

以上的分析均假设牵引站两供电臂的机车在相同触发角下运行, 这种情况在实际系统中很少出现。为考虑各次谐波相位的随机性, 现取两牵引站注入谐波电流的平均值为牵引负荷注入 220 kV 变电站的谐波电流。由此可计算得到系统变电站 110 kV 和 220 kV 母线电压谐波总畸变率如表 4 所示。

表 4 系统变电站母线电压谐波总畸变率 单位: %

	A 相	B 相	C 相
110 kV	3.971	3.524	5.426
220 kV	0.588	0.558	0.858

电力机车运行会引起与之直接相连的 110 kV 母线电压谐波总畸变率超标, 与牵引站不直接相连的 220 kV 母线电压也受到影响。因此, 应考虑采取滤波措施。

2.2 不平衡度计算结果

由于电力机车属于单相负荷, 运行时会向系统注入三相不平衡电流, 造成系统三相电压不平衡。仿真分析中, 选取 3 种运行方式, 以此分析不平衡电流对系统电压的影响。运行方式如下。

方式 1: 1 号牵引站: A 臂 6 台 (SS4 为 4 台, SS6 为 2 台), B 臂 4 台 (SS4 为 2 台, SS6 为 2 台); 2 号牵引站: A 臂 3 台 (SS4 为 2 台, SS6 为 1 台), B 臂 2 台 (SS4 为 2 台);

方式 2: 1 号牵引站: A 臂 6 台 (SS4 为 4 台, SS6 为 2 台), B 臂 0 台; 2 号牵引站: A 臂 3 台 (SS4 为 2 台, SS6 为 1 台), B 臂 0 台;

方式 3: 1 号牵引站: A 臂 0 台, B 臂 4 台 (SS4 为

2 台, SS6 为 2 台); 2 号牵引站: A 臂 0 台, B 臂 2 台 (SS4 为 2 台)。

上述 3 种情况下两个牵引站注入 110 kV 公共连接点的正序和负序电流如表 5 所示。

表 5 牵引站注入的正序和负序电流值 单位: A

机车运行方式	1号牵引站		2号牵引站	
	正序	负序	正序	负序
方式 1	291.775	155.487	129.378	86.178
方式 2	185.556	210.153	78.75	62.46
方式 3	102.505	100.257	62.54	102.42

系统变电站 110 kV 和 220 kV 母线电压不平衡度计算值如表 6 所示。

表 6 系统变电站母线电压不平衡度 单位: %

机车方式	220 kV	110 kV
方式 1	0.354	2.623
方式 2	0.489	3.559
方式 3	0.611	4.384

由于电力机车属于单相负荷, 运行时向系统注入大量的负序电流, 上述 3 种运行方式下, 系统变电站 110 kV 母线电压不平衡度均超出国家标准。

在之前的理论分析基础上可利用谐波线电流的数值估算谐波负序分量。

$$I_{h+} = \sqrt{I_{Ah}^2 + I_{Bh}^2 + 2I_{Ah}I_{Bh}\sqrt{3}} \quad (9)$$

$$I_{h-} = \sqrt{I_{Ah}^2 + I_{Bh}^2 - I_{Ah}I_{Bh}\sqrt{3}} \quad (10)$$

由负序电流的计算公式可知牵引站两臂所接机车在各种运行方式下均会向系统注入大量的负序电流。当一臂电流为最大, 另一臂电流为零, 以及两臂电流都为最大时, 向系统注入的负序基波电流为最大; 而当一臂电流为另一臂的一半时, 负序电流为最

小, 相对值为 $\sqrt{3}/2$ 。

3 结 论

电力机车属于非线性、单相、冲击性负荷, 在电力机车运行过程中产生大量的谐波和负序, 对与之直接相连的供电系统产生较大影响。向枢纽牵引站供电的系统变电站母线电压谐波总畸变率和三相不平衡度将超标。应考虑在系统变电站采取滤波措施。

总结了 V/V 牵引变压器运行时向系统注入谐波电流和序电流的特性。由于牵引变压器本身接线形式使注入系统的电流中含有大量的负序分量, 因此当系统变电站接多个牵引站运行时, 应考虑牵引变压器高压侧的换相使机车负荷均匀地分配在系统各相上, 减小负序电流。

参考文献

- [1] 张直平. 城市电网谐波手册 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [2] Gao Lin, Xu Yonghai, Xiao Xiangnin, et al. Analysis of Adverse Effects on the Public Power Grid Brought by Traction Power-supply System [C]. Electric Power Conference 2008, IEEE Canada, 1-7.
- [3] 林磊. 电气化铁路对电力系统影响的分析研究 [D]. 浙江大学, 2004.
- [4] 吴竞昌. 供电系统谐波 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

作者简介:

童庆刚, 男, 工程师, 从事电网运行管理。

汪茂盛, 男, 工程师, 从事电网运行管理。

(收稿日期: 2011-03-16)

智慧电网 节能减碳新利器

所谓「智慧电网」, 简单的说就是具有人工智能的电力供应网, 它能实时机动地整合调配用电供需, 并达到最佳节能的电力管理。智能电网包括了输配电网、先进电子电表、各式储能设施、信息分析管控软件及电路安全保护机制等。

智慧电网除了能更灵活有效地调配电力供需, 更需利用先进电子电表所提供的实时用电信息, 来改变用户的用电行为模式、节约用电; 另外也透过差异电价, 进一步降低尖峰用电, 避免增建电厂的庞大投资, 因此智慧电网对电力供需双方都有利, 有助于全面大幅节能减碳。AMI 系统除电子电表本身, 更重要的还有电能管理和交易服务、通讯与数据处理服务, 以及连结到用户家中的「智能家电」等新商机。

智慧电网的推动, 由于涉及法规、基础建设及科技应用, 只有结合政府、电力公司及民间企业的力量才能成功。