

地铁牵引供电系统接入对电网电能质量影响分析

王宇飞¹ 徐琳²

(1. 国网四川省电力公司客户服务中心, 四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 首先介绍了某地铁牵引供电系统的结构、特点及牵引供电方式, 对电力机车、牵引网、电缆构成的牵引供电系统进行详细地仿真建模, 分析计算了各种运行工况下牵引供电系统的谐波电流水平。最后针对不同系统阻抗下 110 kV 电缆可能引发谐波电流放大的风险进行了评估。

关键词: 电能质量评估; 地铁牵引供电系统; 谐波; 谐波电流放大

中图分类号: TM922.3 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)01-0033-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.01.007

Analysis on Integration Effect of Metro Traction Power Supply System on Grid Power Quality

Wang Yufei¹, Xu Lin²

(1. State Grid Sichuan Customer Service Center, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Firstly, the structure, characteristics and traction power supply mode of a traction power supply system are introduced, and then the detailed simulation modeling of the traction power supply system is carried out which is composed of electric locomotive, traction network and cable. The injection of harmonic current component is analyzed under different operating conditions. Finally, the risk of harmonic current amplification by the 110 kV cables is assessed under different system impedance.

Key words: power quality assessment; metro traction power supply system; harmonic; harmonic current amplification

0 引言

地铁牵引供电系统大多由电力机车、牵引网、电缆等几部分组成, 由于该系统采用直流牵引方式, 具有非线性强、电压波动大、电缆引发的充电无功功率大等诸多特征, 其接入对城市电网电能质量以及供电可靠性、稳定性都带来了较大的影响^[1-4]。为了防患于未然, 在轨道交通接入前进行电能质量预评估并提出相应的预防性措施, 可提高电网的电能质量及供电可靠性和稳定性, 消除轨道交通接入对电网造成事故的潜在隐患^[5-8]。

首先介绍了某地铁主变电所的接入系统方案以及负荷情况。基于 PSCAD 对电力机车、牵引网、电缆构成的牵引供电系统进行详细地仿真建模, 然后

分析了各种运行工况下地铁牵引系统的谐波电流水平。最后针对不同系统阻抗下 110 kV 电缆可能引发谐波电流放大的风险进行了评估, 为轨道交通接入电网提供强有力的技术保障。

1 牵引供电系统仿真建模

1.1 牵引供电方式

研究的牵引供电系统采用单相工频 25 kV 交流制、带回流线的直接供电方式, 如图 1 所示。

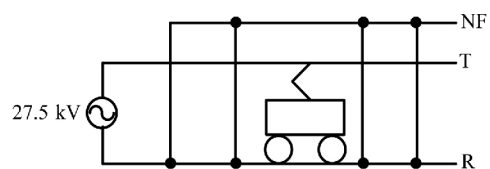


图 1 带回流线的直接供电方式

该供电方式在接触网同高度的外侧增设了一条回流线,减轻了接触网对邻近通信线路的干扰,结构简单、维护量小、供电可靠性高。

地铁主变电所牵引部分采用两台三相V/V接线牵引变压器,一主一备。其中每台V/V变压器由两台单相变压器组成,分别接入两个不同的线电压,其接线形式如图2所示。

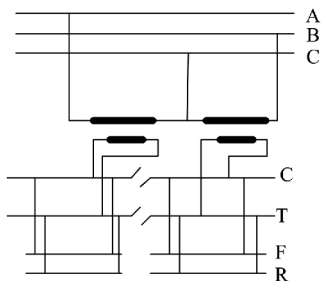


图2 V/V变压器接线形式

1.2 交直交型电力机车模型

表1为所选用的A+型车的主要特征参数,其中列车最高运行速度为140 km/h,其载荷和重量参数如表2所示,牵引特性曲线如图3所示。可以看出,单车最大输出功率为7200 kW。列车的加速过程为:0→48 km/h为恒牵引力加速;48 km/h→100 km/h为恒功率加速;100 km/h→160 km/h以自然特性加速,转差效率恒定。

表1 A+型机车的相关参数

参数名称	参数要求
列车正线最高运行速度 /(km·h ⁻¹)	140
列车起动平均加速度 /(m·s ⁻²)	(0→50 km/h) ≥ 1 (0→140 km/h) ≥ 0.5
制动平均减速度 /(m·s ⁻²)	≥ 1.0
列车紧急制动平均减速度 /(m·s ⁻²)	≥ 1.2
列车辅助用电功率/kW	600

表2 车辆总重

载容量	单车/t				列车/t
	TC车	M车	Mp车	8辆编组	
空车(AW0)	38	40	43		322
座席(AW1)	41.6	43.6	46.6		350.8
定员(AW2 4人/m ²)	50.6	52.8	55.8		424
超员(AW3 9人/m ²)	61.9	64.4	67.4		516.2

注:乘客人均体重按60 kg计,轴重≤17 t。

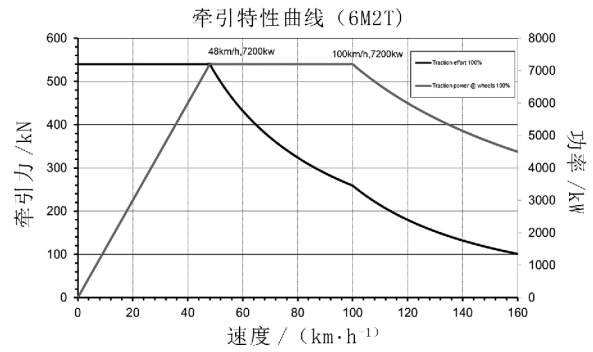


图3 A+型8辆编组机车牵引特性曲线

交直交机车的交流传动系统普遍采用“交-直-交”型主电路,主要由牵引变压器、四象限整流器、逆变器、三相异步交流电机等组成,主电路原理如图4所示。

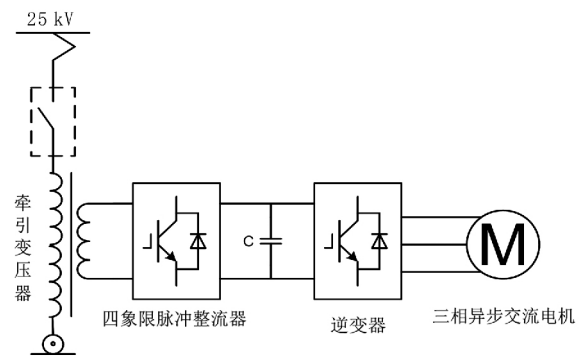


图4 交直交机车主电路结构原理

2 牵引网仿真模型

2.1 牵引网串、并联元件

在单一频率下,牵引网输电线路可近似线性,等效为如图5所示的π型对称线性无源二端口网络电路。

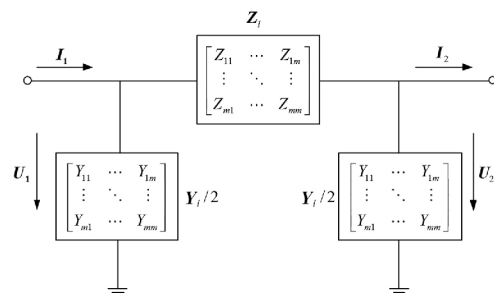


图5 π型等值电路

当牵引网的平行导线较多时,可对导线进行等值合并处理。建立串联阻抗元件的支路导纳矩阵为

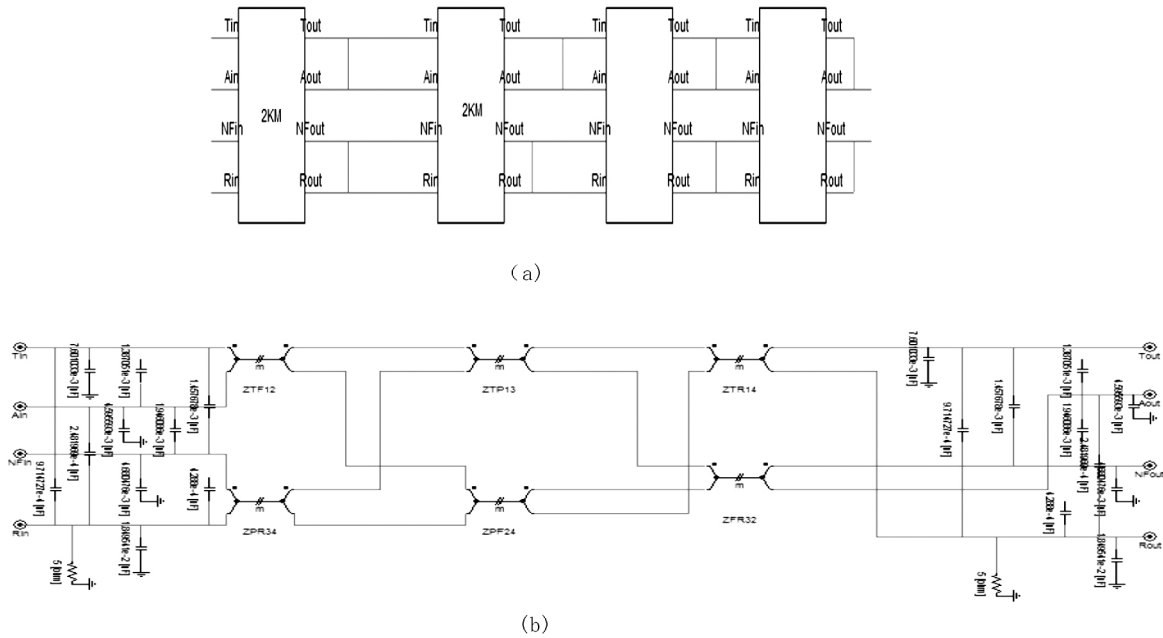


图 6 电缆供电方式牵引网模块以及子模块

$$Y_s = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/Z_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

牵引网中并联元件的节点导纳矩阵为

$$Y = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \Delta & -\Delta \\ 0 & 0 & -\Delta & \Delta \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中 Δ 为大实数, 而其他并联设备的节点导纳矩阵为

$$Y_s = \frac{1}{Z_p} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.2 牵引网简化仿真模型

复线带回流线直供方式牵引网采用 8 根导线等值, 包括上/下行接触网 (T1/T2)、上/下行钢轨 (R1/R2)、上/下行加强导线 (A1/A2)、上/下行回流线 (NF1/NF2)。图 6 中搭建了基于直供带回流线供电方式的牵引网模型。

3 谐波电流水平评价

为了评估地铁牵引系统接入对区域电网的影响, 下面考虑较为严重的运行工况, 即考虑多车紧密

运行时注入电网的谐波水平。

设机车处于紧密运行状态, 正常供电下某主变电所牵引变压器的计算负荷分别为 19.57 MW 和 9.9 MW, 因此重载 8.615 km 线路布置 3 列机车, 各列车运行功率分别为 7.2 MW、7.2 MW、5.2 MW; 轻载 5.639 km 线路布置 2 列车, 每列功率为 5 MW。考虑最严重情况, 有两列车分别处于牵引网上下行末端, 列车在线路上分布见图 7 所示。

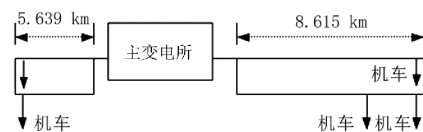


图 7 牵引网中列车分布示意

图 8 和图 9 为某地铁主变电所接入电网 110 kV 侧三相电压和电流仿真波形以及最大相电压、电流的 FFT 频谱, 谐波电流主要集中在 1950 Hz 和 2050 Hz 高频段, 最大相 1950 Hz 谐波电流含量为 3.63 A。

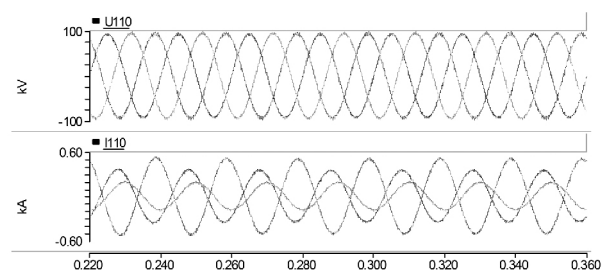


图 8 多车紧密运行时 110 kV 郭家堰侧电压和电流波形

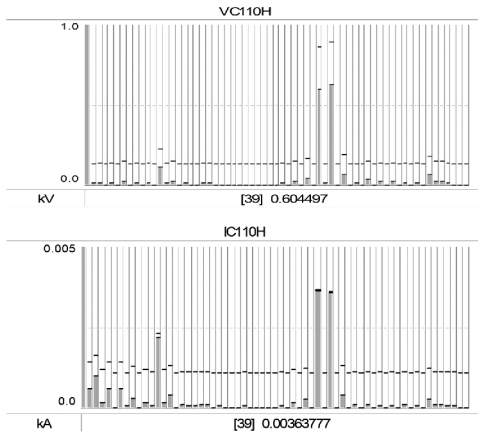


图 9 多车紧密运行时 110 kV 接入点电压和电流 FFT 频谱

图 10 和图 11 为重载臂 V/V 变压器 27.5 kV 侧电压、电流仿真波形和 FFT 频谱,表 3 和表 4 则分别对 110 kV 接入点的电压和电流畸变情况进行了统计,可以看出,110 kV 母线各相电压总畸变率分别达到 0.97%、0.61%、1.36%,110 kV 接入点各次谐波电流也均满足国标限值要求。

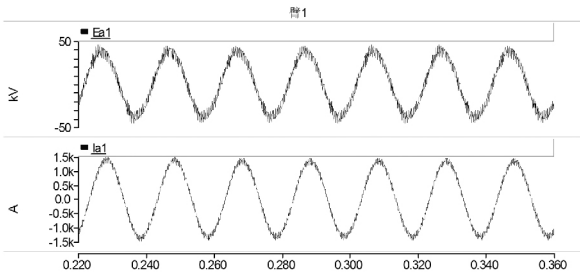


图 10 重载臂 V/V 变压器 27.5 kV 侧电压和电流仿真波形

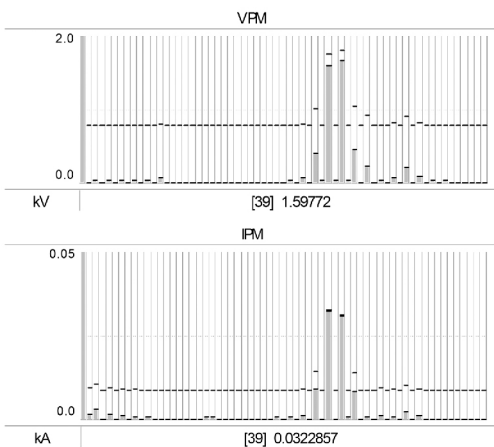


图 11 重载臂 V/V 变压器 27.5 kV 侧电压和电流 FFT 频谱

表 3 110 kV 接入点电压畸变情况

测试参数	A 相	B 相	C 相
基波电压/kV	65.51	66.61	66.13
总畸变率/%	0.97	0.61	1.36
650 Hz/%	0.05	0.11	0.10
1950 Hz/%	0.64	0.36	0.91
2050 Hz/%	0.67	0.37	0.94

表 4 110 kV 接入点电流畸变情况

测试参数	A 相	B 相	C 相
基波电流/A	239.71	128.63	348.51
650 Hz 电流/A	0.42	1.78	2.18
1950 Hz 电流/A	2.54	1.44	3.63
2050 Hz 电流/A	2.52	1.42	3.60
总畸变率/%	1.65	2.53	1.67

4 110 kV 电缆引发谐波电流放大风险分析

当牵引系统产生的谐波电流与接入电网的 110 kV 电缆线路参数、系统阻抗共同作用时,易引发并联谐振,造成谐波电流放大,进一步增大电网侧的谐波含量。图 12 给出了牵引供电系统与电网交互的并联谐振等效电路。图中 $\dot{U}_{S,h}$ 为系统 h 次谐波电压; $\dot{Z}_{S,h}$ 对应 h 次谐波的系统阻抗; $\dot{U}_{S1,h}$ 为 PCC 点 h 次谐波电压; $\dot{Z}_{1,h}$ 和 $\dot{Z}_{C,h}$ 为 110 kV 传输电缆对应的 h 次谐波阻抗; $\dot{Z}_{L1,h}$ 和 $\dot{Z}_{L2,h}$ 为 PCC 点等效负荷与牵引系统等效 h 次谐波阻抗。分别考虑主变电所在系统运行大方式和小方式两种模式下 110 kV PCC 点 h 次谐波电流 $\dot{I}_{S,h}$ 与牵引站 h 次谐波电流 $\dot{I}_{1,h}$ 的关系,当 $\dot{I}_{S,h} > \dot{I}_{1,h}$ 时,则表明牵引系统的 h 次谐波电流经 110 kV 电缆有放大现象。

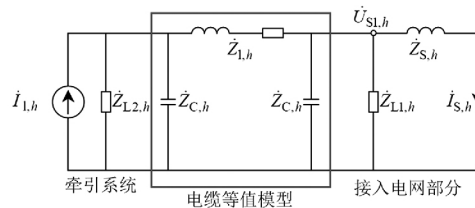


图 12 牵引供电系统与电网交互的并联谐振等效电路

图 13 则为大方式和小方式下各次谐波电流经 110 kV 电缆传输后 $\dot{I}_{S,h} / \dot{I}_{1,h}$ 传递函数的幅频特性曲线(下转第 71 页)

尤其是配用的 BLK222 型操动机构。

北京 ABB 高压开有限公司的《LTB245E1 - BLK222 型断路器维护管理导则》中规定的中期检修项目繁多,设备运维单位应加强对检修项目的督导检查,保证检修重点的落实,确保断路器状态良好,动作可靠准确,进而保障电力系统的安全稳定运行。

参考文献

[1] 张成林. 高压断路器状态检修系统研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2007.

[2] 许婧, 王晶, 高峰, 等. 电力设备状态检修技术研究综述[J]. 电网技术, 2000, 24(8): 48 - 52.

[3] 孙兵. LTB245E1 型断路器 BLK222 型弹簧机构的故障分析和预防[J]. 价值工程, 2013(1): 68 - 70.

[4] 崔景春, 袁大陆, 杜彦明. SF₆ 断路器操动机构的运行可靠性和选型探讨[J]. 高压电器, 2001, 37(2): 1 - 4.

[5] 方可行. SF₆ 断路器的弹簧操动机构及其应用[J]. 高压电器, 2003, 39(6): 76 - 77.

[6] 邓瑞鹏. BLK222 型弹簧机构故障分析及研究[J]. 电力系统装备, 2018(1): 145 - 146.

[7] 熊胜源, 邱偲, 刘涛. BLK222 型弹簧机构故障分析及研究[J]. 山西电力, 2017(5): 51 - 54.

[8] 唐跃林, 伍平, 谢林涛, 等. 一台 252 kV SF₆ 断路器合闸故障分析及处理[J]. 高压电器, 2011, 47(2): 72 - 75.

作者简介:

熊攀(1983) 大学本科、高级工程师, 从事变电检修试验技术研究及管理。

(收稿日期: 2018 - 10 - 31)

(上接第 36 页)

线。从图中看出,随着系统阻抗的增大,谐振点向低频移动,大方式和小方式下的低频谐振点分别在 643 Hz 和 443 Hz。小方式下,在低频段 300 ~ 600 Hz 谐波电流均有放大可能,在 443 Hz 附近谐波电流放大最明显;大方式下,在低频段 300 ~ 1000 Hz 谐波电流均有放大风险,在 643 Hz 附近谐波电流放大最明显。而在高频段 2718 Hz 和 4977 Hz 附近大方式和小方式下均存在谐波电流放大风险。

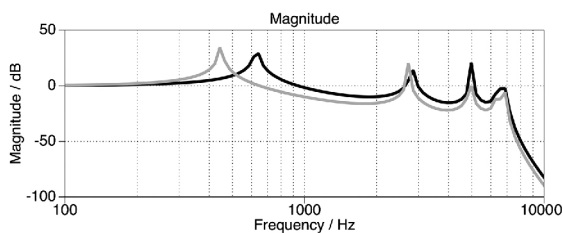


图 13 i_{s_h}/i_{1_h} 传递函数的幅频特性
(浅色: 小方式, 深色: 大方式)

5 结 语

针对城市轨道交通牵引系统进行了详细的仿真建模,考虑了多车紧密运行方式下牵引供电系统的谐波电流水平,并针对不同系统阻抗下 110 kV 电缆可能引发谐波电流放大的风险进行了评估。结果表明:一方面根据当前主变电所接入点的短路容量计算得知,各次谐波电流均满足国标限值要求;另一方

面,牵引系统产生的谐波电流经 110 kV 电缆线路注入电网时,在低频段和高频段均存在谐波电流放大风险。

参考文献

[1] 李扬, 胡文平, 任建文. 城市轨道交通牵引供电系统对电网的影响[J]. 河北电力技术, 2013(5): 36 - 38.

[2] 孙才勤. 地铁供电系统谐波无功功率的综合治理方案[J]. 电气化铁道, 2009(5): 40 - 43.

[3] 赵顺, 曾志. 地铁 24 脉波整流机组特性及谐波分析[J]. 电子元器件应用, 2012, 14(5): 38 - 41.

[4] 邱长文. 三相 V/V 接牵引变压器在工程设计中的应用[J]. 华东交通大学学报, 2005(5): 100 - 105.

[5] 李建民, 孙建设. 城市轨道交通供电系统谐波分布研究[J]. 电测与仪表, 2008, 45(2): 1 - 6.

[6] 邵岩. 基于 RTDS 的地铁牵引供电系统建模与仿真[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.

[7] 马沂文, 白秀梅. 城市轨道交通供电接触网类型的比较[J]. 城市轨道交通研究, 2003, 6(1): 20 - 24.

[8] 李群湛, 贺建闽. 牵引供电系统分析[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2012.

作者简介:

王宇飞(1987) 助理工程师, 目前主要从事大客户供用电管理工作;

徐琳(1984) 高级工程师, 目前主要从事电能质量分析与评估。

(收稿日期: 2018 - 09 - 25)