

## 铁路运行的电能质量影响(二):影响分析

李涛<sup>1</sup>,崔荣<sup>1</sup>,何小平<sup>1</sup>,侯荣均<sup>1</sup>,周倩<sup>1</sup>,黄可<sup>2</sup>,张乔<sup>2</sup>,周虹屹<sup>2</sup>,胡萍<sup>3</sup>

(1. 国网重庆市电力公司经济技术研究院,重庆 401120;2. 西南交通大学电气工程学院,四川 成都 611756;3. 成都医学院人文信息管理学院,四川 成都 610500)

**摘要:**电气化铁路负荷易对电网母线造成较严重的电能质量污染,有必要通过建模分析。作为2篇系列文章的第2篇,在第1篇文章的建模基础上,重点对电气化铁路可能出现的不同类型列车在不同工况运行时对变电站母线电能质量的影响进行了对比分析,即:分别针对电气化铁路无车、有1辆客车运行、有1辆货车运行和有2辆货车运行的4种典型工况,针对电气化铁路运行对220 kV三相母线电压波动、谐波、三相不平衡的影响进行了仿真对比。

**关键词:**电能质量污染;电气化铁路运行;220 kV母线;电压波动;谐波;三相不平衡

**中图分类号:**TM922 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd19390

### Power Quality Impact of Railway Operation—Part II: Impact Analysis

LI Tao<sup>1</sup>, CUI Rong<sup>1</sup>, HE Xiaoping<sup>1</sup>, HOU Rongjun<sup>1</sup>, ZHOU Qian<sup>1</sup>, HUANG Ke<sup>2</sup>,  
ZHANG Qiao<sup>2</sup>, ZHOU Hongyi<sup>2</sup>, HU Ping<sup>3</sup>

(1. Institute of Economic and Technological Research, Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401120, China; 2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, Sichuan, China; 3. School of Humanities and Information Management, Chengdu Medical College, Chengdu 610500, Sichuan, China)

**Abstract:** Considering that electrified railway load easily brings about serious power quality pollution for the power grid buses, it is necessary to give analyses through modeling. As the second part of the two-part paper, on the basis of the established model introduced in the first part, the influences of different electrified railway's operations on the power quality of bus bar in substation were analysed and compared, that is, focusing on the four conditions that the railway has no vehicle, one running passenger vehicle, one running truck and two running trucks. Simulation comparison on the impact of the running electrified railway on the voltage fluctuations, harmonics and three-phase unbalances of the 220 kV three phase bus bar was given.

**Key words:** power quality pollution; electrified railway operation; 220 kV busbar; voltage fluctuations; harmonics; three-phase unbalances

随着电气化铁路接入电网,其对整个电网系统的影响不可忽视。根据已有运行经验,电气化铁路运行主要对电网造成注入电压偏差、谐波无功、三相负荷不平衡等问题。

近年来,大量学者针对电气化铁路接入电力系统带来的电能质量问题进行了研究。文献[1]指出机车采用的大容量单相整流供电设施,除了产生大量谐波电流,还对三相交流供电系统产生不平衡负荷和负序电压电流;文献[2]通过TCR+FC静止无功补偿装置在电气化铁道投运前后电

能质量的比较分析,得出TCR+FC型装置不仅能动态补偿系统无功,还能抑制电网谐波,是电铁电能质量治理最佳方案的结论;针对实际的变电站和电铁线路,文献[3]分析了不同运行方式下,黔桂电铁对110 kV水任变电站的电能质量影响;文献[4]针对京沪电气化铁路牵引负荷带来的电能质量的主要问题(谐波和负序),通过研究建议选择平衡变压器作为普通电气化铁路的优化供电方式;文献[5]围绕河南电气化铁路负荷对电网电能质量影响,从理论上给出了讨论和建议。

也有一些学者对不同类型客车(包括高速动车组和普铁电力机车)运行对牵引网造成的不同电能质量问题(如过电压、牵引网低频振荡、谐波污染)及其解决措施进行了分析<sup>[6-8]</sup>。围绕电气化铁路接入对电网的影响,不少学者通过建模分析进行研究<sup>[9-13]</sup>,但存在2点不足:1)仿真模型涉及的电路结构和控制策略较复杂;2)只评估了单工况单辆列车运行下的影响。因此,文献[14]结合了电力机车的车型、工况、数量组合3个维度的仿真场景设置方案,相对全面地仿真分析了铁路接入对电网电能质量的影响。然而,接入电网的电气化铁路可能不仅包括普速铁路,也包括高速铁路。普速铁路货车运行时有可能对电网电能质量造成更严重的污染。

在系列文章第1篇文章的建模基础上,本文分别针对电气化铁路无车、有1辆客车(以高速铁路的CRH3型动车组为例)运行、有1辆货车运行和有2辆货车运行的4种工况,针对电气化铁路

运行对220 kV三相母线电压波动、谐波、三相不平衡的影响进行了仿真对比。

## 1 变电站-负荷模型

图1为系列文章第1篇建立的电力系统变电站-负荷模型。为研究电铁负载对变电所的影响,改变模型中电铁负载的接入情况形成4种电铁运行情况,并在这4种情况下进行仿真分析。本文计及客车运行和货车运行2种情况,4种工况分别为:没有车经过、有1列客车运行、有1列货车运行和2列货车同时运行。1列客车或货车运行时列车接入点为距离变电站30 km;2列货车同时运行时两货车接入点分别距离变电站2 km和30 km。仿真时间设置为0.08 s,步长设置为 $1 \times 10^{-5}$  s。此时间段内运行电铁外的其他负荷(负荷1~负荷12的具体位置见图1)输入至电网的有功功率和无功功率见表1,时间间隔设为0.01 s。

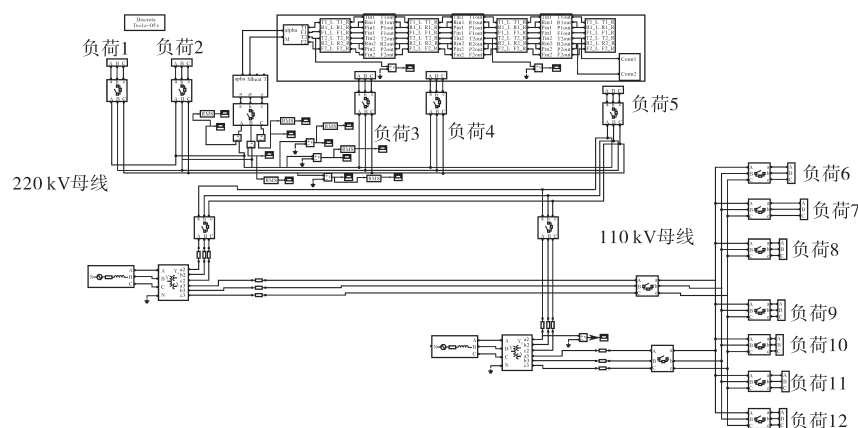


图1 已建立的电力系统变电站-负荷模型

Fig.1 Substation-load model for the power system established

表1 运行电铁外的其他负荷输入至电网的有功功率和无功功率

Tab.1 Active power and reactive power from other loads running out electrified railway to the grid

|                      | 负荷1 | 负荷2 | 负荷3 | 负荷4    | 负荷5    | 负荷6   | 负荷7    | 负荷8   | 负荷9    | 负荷10 | 负荷11 | 负荷12 |
|----------------------|-----|-----|-----|--------|--------|-------|--------|-------|--------|------|------|------|
| 有功功率 $P/\text{kW}$   | 0   | 0   | 0   | 72.074 | 70.787 | 0.000 | 42.057 | 2.085 | 28.622 | 0    | 0    | 0    |
| 无功功率 $Q/\text{kvar}$ | 0   | 0   | 0   | 3.218  | 3.539  | 0.804 | 4.262  | 1.123 | 5.226  | 0    | 0    | 0    |

## 2 没有车运行工况下的仿真

当电气化铁路没有车辆经过的情况下,即仿真模型中不接入车辆负荷,对变电站-负荷模型进行仿真分析,其220 kV侧母线三相对地电压及其谐波分量、电压不平衡度仿真结果如图2~图4所示。

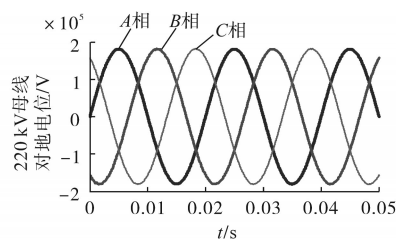


图2 无车时变电站220 kV侧母线三相对地电压  
Fig.2 Three-phase voltages to the ground of 220 kV side's bus of substation when no vehicle

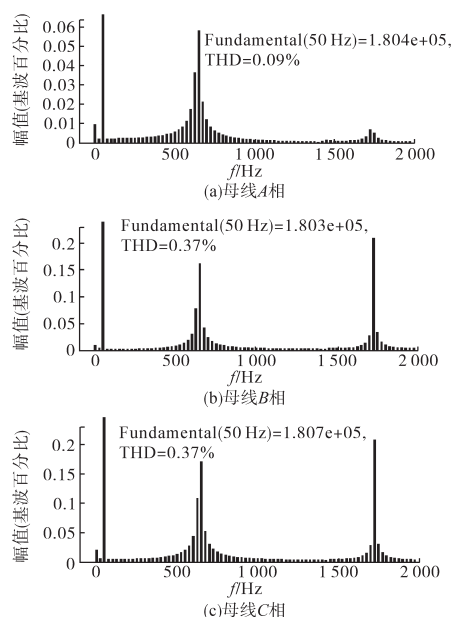


图3 无车时变电站220 kV侧母线三相电压谐波分析结果  
Fig.3 Harmonic analysis results of three-phase voltages of 220 kV side's bus of substation when no vehicle

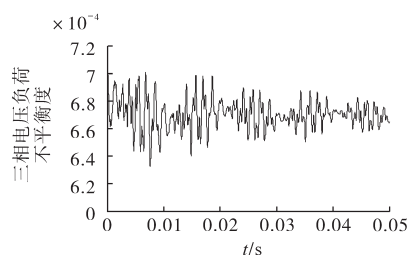


图4 无车时变电站220 kV侧母线三相电压不平衡度  
Fig.4 Three-phase voltage imbalance of three-phase voltages at 220 kV side's bus when no vehicle

根据仿真结果,求解得到的母线对地电压幅值和波形均正常;总谐波失真较低(A相0.09%,B相0.37%,C相0.37%),且A相电压谐波集中在600 Hz、B相电压谐波集中在600 Hz和1 750 Hz、C相电压谐波集中在600 Hz和1 750 Hz;三相电压不平衡度较低。

### 3 有1列客车运行工况下的仿真

当电气化铁路有1列客车在牵引网运行时,即变电站-负荷模型中在距离牵引变电所30 km处接入1个CRH3型动车组模型,进行仿真分析,这种情况下牵引变电所处接触网对地电压和列车处接触网对地电压仿真结果分别见图5、图6所示。由图5、图6仿真结果可知,接触网电压波形正常,且接触网电压峰值接近38 kV,也属正常。

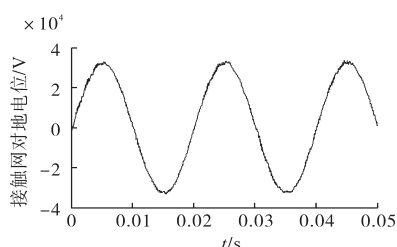


图5 有1列客车运行时牵引变电所处接触网对地电压  
Fig.5 Catenary voltage to the ground at the head end of feeder when one running passenger vehicle

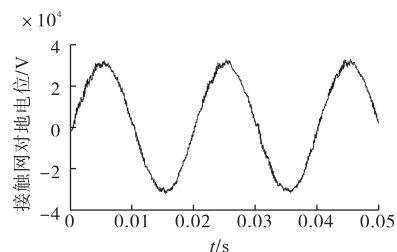


图6 有1列客车运行时列车处接触网对地电压  
Fig.6 Catenary voltage to the ground at the position of vehicle when one running passenger vehicle

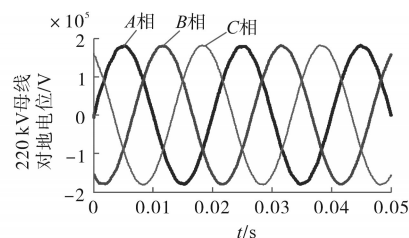


图7 有1列客车运行时变电站220 kV侧母线三相电压对地电压  
Fig.7 Three-phase voltages to the ground of 220 kV side's bus of substation when one passenger vehicle running

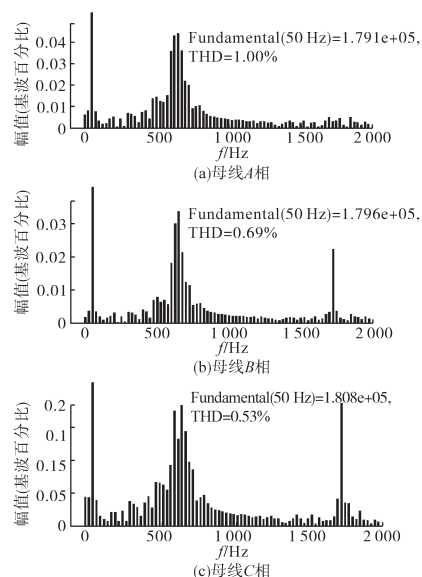


图8 有1列客车运行时变电站220 kV侧母线三相电压谐波分析结果

Fig.8 Harmonic analysis results of three-phase voltages at 220 kV side's bus of substation when one running passenger vehicle

当电气化铁路有1列客车经过时,仿真得到的220 kV侧母线三相对地电压及其谐波分量、电压不平衡度分别见图7~图9。由仿真结果可知,求解得到的母线对地电压幅值和波形均正常;总谐波失真相对无车的情况更明显(A相1%,B相0.69%,C相0.53%),且A相电压谐波集中在600 Hz,B相电压谐波集中在600 Hz和1 750 Hz,C相电压谐波集中在600 Hz和1 750 Hz;三相电压不平衡度比无车的情况显著一些。

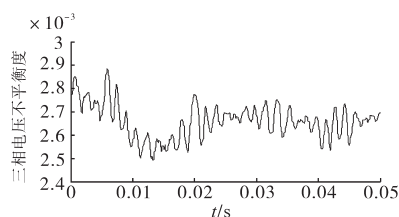


图9 有1列客车运行时变电站220 kV侧母线三相电压不平衡度

Fig.9 Imbalance of three-phase voltages at 220 kV side's bus of substation when one passenger vehicle running

#### 4 有1列货车运行工况下的仿真

当有1列货车在电气化铁路运行时,即仿真模型中在距离牵引变电所30 km处接入1个HXD2B型货车模型,对变电站-负荷模型进行仿真分析,在这种情况下牵引变电所处接触网对地电压和列车处接触网对地电压分别见图10、图11。

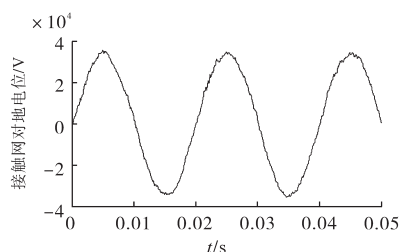


图10 有1列货车运行时牵引变电所处接触网对地电压

Fig.10 Catenary voltage to the ground at the head end of feeder when one running truck

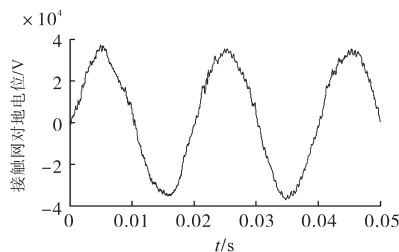


图11 有1列货车运行时列车处接触网对地电压

Fig.11 Catenary voltage to the ground at the position of vehicle when one truck running

由图10、图11可知,仿真得到的接触网电压波形和幅值均正常。相比1列客车运行情况下,接触网电压波形携带更多毛刺。

当电气化铁路有1列货车经过时,仿真模型得到的220 kV侧母线三相对地电压及其谐波分量、电压不平衡度的仿真结果分别如图12~图14所示。

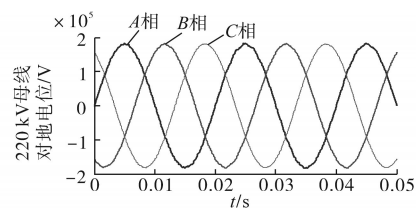


图12 有1列货车运行时变电站220 kV侧母线三相对地电压

Fig.12 Three-phase voltages to the ground at 220 kV side's bus of substation when one truck running

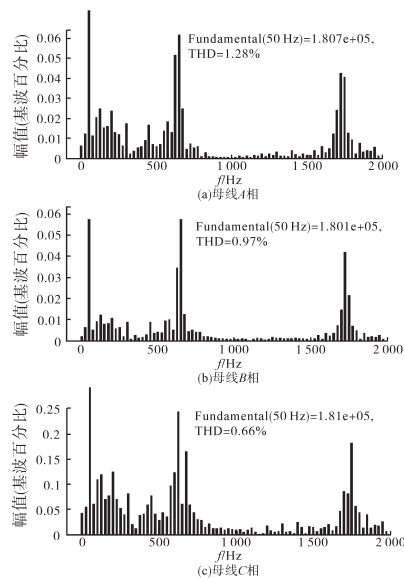


图13 有1货车运行时变电站220 kV侧母线三相电压谐波分析结果

Fig.13 Harmonic analysis results of three-phase voltages of 220 kV side's bus of substation when one truck running

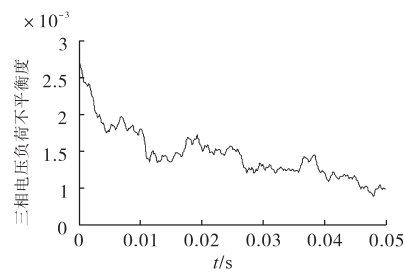


图14 有1货车运行时变电站220 kV侧母线三相电压不平衡度

Fig.14 Imbalance of three-phase voltages at 220 kV side's bus of substation when one truck running

由仿真结果可知,求解得到的母线对地电压波形和幅值均正常;总谐波失真相对无车、有1列客车运行的情况更显著( $A$ 相1.28%, $B$ 相0.97%, $C$ 相0.66%),且 $A$ 相, $B$ 相, $C$ 相电压谐波集中在600 Hz和1 750 Hz;三相电压不平衡度比无车、有1列客车运行的情况更明显一些。

## 5 两列货车运行工况下的仿真

当有2列货车在电气化铁路运行的情况下,即仿真模型中的牵引网部分在距离牵引变电所2 km和30 km处分别接入HXD2B型货车模型,对变电站-负荷模型进行仿真分析。在这种情况下牵引变电所处接触网对地电压和列车处接触网对地电压分别见图15、图16。根据仿真结果,电压波形和幅值均正常。相比1列客车运行、1列货车运行的情况下,接触网电压波形携带更多毛刺。

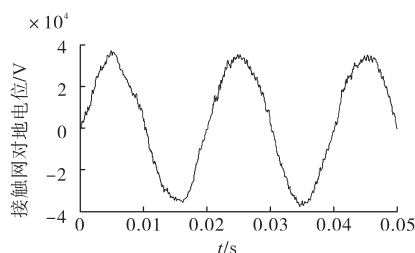


图15 有2列货车运行时接触网首段对地电压

Fig.15 Catenary voltage to the ground at the head end of feeder when two trucks running

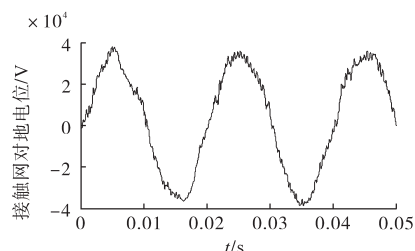


图16 有2列货车运行时列车处接触网对地电压

Fig.16 Catenary voltage to the ground at the position of vehicle when two trucks running

针对电气化铁路有2列货车运行的情况,仿真得到的220 kV侧母线三相相对地电压及其谐波分量、电压不平衡度分别见图17~图19。根据仿真结果,求解得到的母线对地电压无论幅值还是波形均正常;总谐波失真相对无车、有1列客车运行、有1列货车运行的情况更明显( $A$ 相2.15%, $B$ 相1.31%, $C$ 相1.08%),且 $A$ 相电压谐波集中在200 Hz,600 Hz和1 750 Hz, $B$ 相电压谐波集中在600 Hz和1 750 Hz, $C$ 相电压谐波集中在200 Hz,

600 Hz和1 750 Hz;三相电压不平衡度问题比无车、有1列客车运行、有1列货车运行的情况更严重。

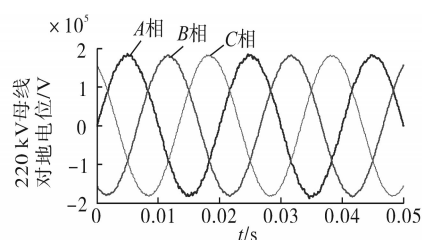


图17 有2列货车运行时变电站220 kV侧母线三相相对地电压

Fig.17 Three-phase voltages to the ground of 220 kV side's bus of substation when two trucks running

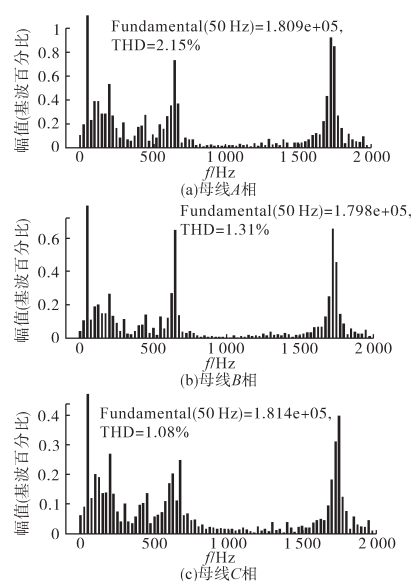


图18 有2列货车运行时变电站220 kV侧母线三相电压谐波分析结果

Fig.18 Harmonic analysis results for three-phase voltages at 220 kV side's bus of substation when two trucks running

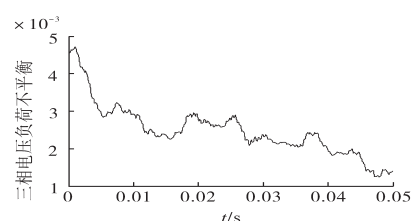


图19 有2列货车运行时变电站220 kV侧母线三相电压不平衡度

Fig.19 Imbalance of three-phase voltages at 220 kV side's bus of substation when two trucks running

## 6 结论

作为2篇系列文章的第2篇,本文在系列文章第1篇的建模基础上,分别针对电气化铁路无

车、有1列客车运行、有1列货车运行和有2列货车运行的4种典型工况,针对电气化铁路不同运行工况对220 kV三相母线电压波动、谐波、三相不平衡的影响进行了对比分析。具体结论如下:

1)在三相母线电压波动方面,没有车运行、有1列客车运行、有1列货车运行、有2列货车运

行4种情况对三相母线电压波动的影响区别不明显。

2)在谐波方面,如表2所示,相比于无车情况,有列车运行时会给电网母线电压注入更多谐波,引起更大的总谐波失真。其中,货车引起的谐波比客车更严重。

表2 4种电铁运行工况下变电站220 kV侧母线三相电压谐波分析结果对比

Tab.2 Comparison of harmonic analysis results for three-phase voltages to the ground at 220 kV side's bus of substation under four electrified railway's operational situations

|          | 总谐波失真THD/% |      |      | 集中的谐波频率/Hz      |            |                 |
|----------|------------|------|------|-----------------|------------|-----------------|
|          | A相         | B相   | C相   | A相              | B相         | C相              |
| 没有车经过时   | 0.09       | 0.37 | 0.37 | 600             | 600, 1 750 | 600, 1 750      |
| 有1列客车经过时 | 1          | 0.69 | 0.53 | 600             | 600, 1 750 | 600, 1 750      |
| 有1列货车经过时 | 1.28       | 0.97 | 0.66 | 600, 1 750      | 600, 1 750 | 600, 1 750      |
| 有2列货车经过  | 2.15       | 1.31 | 1.08 | 200, 600, 1 750 | 600, 1 750 | 200, 600, 1 750 |

3)在三相不平衡方面,如图20所示,列车运行时会比无车时给电网带来更显著的三相负荷不平衡。其中,相比客车,货车会带来更显著的三相负荷不平衡。

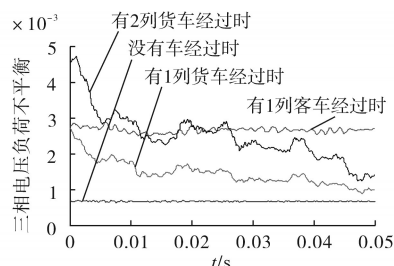


图20 4种电铁运行工况下变电站220 kV侧母线三相电压不平衡度对比

Fig.20 Unbalances comparison of three-phase voltage at 220 kV side's bus of substation under four electrified railway's operational situations

#### 参考文献

[1] 陈卓毅. 变电站的谐波分析与抑制[D]. 南宁:广西大学, 2005.  
[2] 谢玉成. 基于TCR+FC型电铁电能质量治理装置研究及应用[J]. 电测与仪表, 2010, 47(2): 45-47, 51.  
[3] 覃江英, 黄启哲. 黔桂电铁对110 kV水任变电站谐波影响分析[J]. 广西电力, 2012, 35(2): 62-65.

[4] 王同勋, 于坤山. 电气化铁路负荷对电网电能质量的影响及对策[J]. 供用电, 2009, 26(3): 8-11, 32.  
[5] 杜习周, 陈栋新, 余晓鹏, 等. 电气化铁路负荷对电网电能质量的影响[J]. 华中电力, 2010, 23(6): 35-37.  
[6] 宋小翠, 刘志刚. 计及弓网二次燃弧的高铁车-网建模与电磁暂态影响研究[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4): 118-124.  
[7] 韩智玲. 浅析电力机车对牵引网电能质量的影响[J]. 电气传动, 2010, 40(4): 41-42, 56.  
[8] 刘玉洁, 盛彩飞, 林飞, 等. 高速动车组网侧电流谐波特性的研究[J]. 电气传动, 2010, 40(1): 33-37, 50.  
[9] 刘莹. 电气化铁路接入对电网电能质量的影响评估及治理研究[D]. 济南:山东大学, 2014.  
[10] 刘金鑫, 葛琼璇, 王晓新, 等. 双端供电模式下高速磁浮列车牵引控制策略研究[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(6): 16-21, 44.  
[11] 余丹萍. 电气化铁路牵引供电系统的仿真及影响研究[D]. 杭州:浙江大学硕士学位论文, 2011.  
[12] 傅裕斌, 段拴峰, 曹玉胜, 等. 风电场与电铁同母线接入对供电质量的影响研究[J]. 电测与仪表, 2018, 55(12): 1-6.  
[13] 周盛. 高速铁路牵引负荷建模及分析[D]. 杭州:浙江大学, 2011.  
[14] 欧阳森, 梁伟斌. 基于PSCAD/EMTDC的电气化铁路接入电网的电能质量评估方法[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(12): 52-58.

收稿日期:2018-08-09

修改稿日期:2018-09-18