

## 基于 ETAP 的沪宁城际铁路谐波分析

郑爱霞<sup>1</sup>, 袁晓冬<sup>2</sup>, 李 群<sup>2</sup>

(1. 江苏省电力公司, 江苏 南京 210024;

2. 江苏省电力试验研究院, 江苏 南京 210036)

**摘要:** 针对高速电气化铁路的特点, 简要介绍了其产生的谐波对电网的影响。以 V/v 型牵引变压器的接线原理为基础, 推导了电气化铁路接入系统的等值方法。将谐波电流从低压侧的两相转换到高压侧的三相, 建立谐波负荷模型。在 ETAP 软件中进行仿真分析, 研究沪宁城际铁路对江苏电网的影响, 包括公共连接点的谐波电流和谐波电压。通过与实测值的比较, 验证了所采用的电气化铁路建模和仿真方法的正确性。对江苏电网部分容易引起谐振的站点进行了频率扫描, 并提出了一些谐波补偿和抑制的有益建议。

**关键词:** 电气化铁路; 牵引; 变压器; 谐波分析; 频率扫描; ETAP

**中图分类号:** U 223.6<sup>3</sup>

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-6047(2011)06-0108-04

## 0 引言

地铁牵引机车是单相大功率整流负荷, 在投运时产生大量的谐波和负序分量注入电力系统。目前, 我国铁路高速客运专线广泛采用以 PWM 技术为核心的交直动车组, 其谐波特性与传统的交直机车有很大区别, 总谐波含量小, 但频谱较宽, 高频谐波含量较高<sup>[1-3]</sup>。

牵引变压器是连接电力系统和牵引供电系统的核心设备, 其接线方式不仅影响变压器的容量和经济性, 而且对电气化铁道注入电力系统的谐波电流有很大影响。据文献[4]所述, V/v 接线牵引变压器有以下优点: 变压器容量利用率可达 100%; 主接线简单, 设备较少, 投资较省; 对接触网可实现双边供电; 2 台独立单相变压器的容量可以相等, 也可以不相等; 2 台的副边电压可以相同, 也可以不相同, 有利于实现分相有载或无载调压等, 因而在现行高速铁路建设中广泛采用。本文基于电力及电气系统综合计算分析软件(ETAP)来评估地铁负荷对江苏电网的影响。

## 1 谐波对电网的影响

高速动车组采用交直传动方式, 含有丰富的谐波, 属于谐波电流源。谐波电流对电网的影响如下<sup>[5-8]</sup>:

a. 谐波对同步发电机主要影响是引起附加损耗与发热, 其次就是附加振动、噪声和谐波过电压;

b. 谐波使变压器的铜耗增大, 其中电阻损耗、导体中的涡流损耗与导体外部因漏磁引起的杂散损耗都要增加, 谐波还使变压器的铁耗增大, 这主要表现在铁心中的磁滞损耗增加, 谐波使电压的波形

变得越差, 则磁滞损耗越大;

c. 按相位比较原理构成的继电器, 被比较的 2 个交流电量可用积分比相器或微分比相来实现, 由于谐波分量的存在, 2 种比相器的工作均受影响, 可能造成保护装置误动作;

d. 由于电缆的分布电容对谐波有放大作用, 在电网低谷负荷下, 当电网电压上升而使谐波电压也升高的时候, 电缆更易出现故障。

## 2 V/v 型变压器电气特性

图 1 为 V/v 型变压器的接线原理图。由图可见, 高压侧有 3 个出线端分别与系统三相母线相连, 当其接成固定的 V 结线时, V 的顶点( $X_1$ 与  $A_2$  连接点)为 C 相,  $A_1$  和  $X_2$  分别为 A 相和 B 相,  $\omega_1$ 、 $\omega_2$  为左侧单相变压器变比,  $\omega_1'$ 、 $\omega_2'$  为右侧单相变压器变比。低压侧引出 4 个端子, 根据牵引供电的要求, 在正“v”接的情况下,  $x_1$  和  $a_2$  相连并接地, 即“v”的顶点;  $a_1$ 、 $x_2$  端点分别为  $\alpha$ 、 $\beta$  两相。 $\alpha$ 、 $\beta$  两相分别与牵引侧两相母线相连, 然后向对应的供电臂牵引网供电。由于低压侧两相电压相位相差  $60^\circ$ , 所以也称为  $60^\circ$  接线, 其具体关系如图 2 所示。

对应图 1, 得端口电压变换矩阵如式(1)所示。

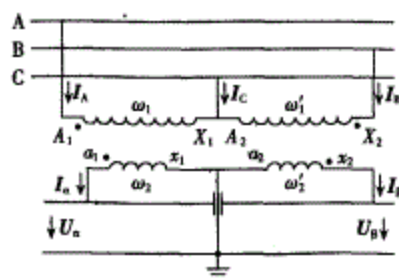


图 1 V/v 型变压器接线原理图

Fig.1 Wiring principle of V/v type transformer

收稿日期: 2011-02-16; 修回日期: 2011-04-05

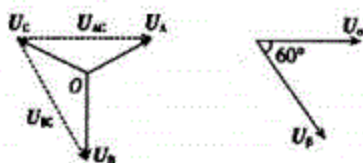


图2 V/v型变压器相量图

Fig.2 Phasor diagram of V/v type transformer

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \frac{1}{K_T} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} \quad (1)$$

端口电流变换矩阵:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{1}{K_T} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

根据式(1)(2),以电压  $U_{ac}$  为参考相量,可得如图3所示相量关系图。

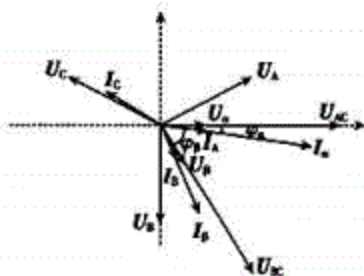


图3 电压电流相量图

Fig.3 Phasor diagram of voltages and currents

### 3 电气化铁路谐波负荷建模

在牵引供电系统中,供电臂上的电力机车是主要的谐波源,由于牵引变压器的特殊结构,不能将其低压侧的两相谐波电流直接接入,而需要转换成高压侧的三相谐波电流。两供电臂的谐波电流如式(3)所示。

$$\begin{bmatrix} I_{ah} \\ I_{bh} \end{bmatrix} = \lambda_h \begin{bmatrix} I_{a1} \\ I_{b1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中,  $I_{a1}, I_{b1}$  分别表示  $\alpha$  臂和  $\beta$  臂的基波电流值;  $\lambda_h$  为  $h$  次谐波电流含有率;  $I_{ah}, I_{bh}$  分别表示  $\alpha$  臂和  $\beta$  臂的  $h$  次谐波电流值。

本文中的 V/v 型牵引变压器注入到供电系统的三相  $h$  次谐波电流值由式(4)计算得出:

$$\begin{aligned} I_{Ah} &= I_{ah} / \sqrt{3} K_T \\ I_{Bh} &= I_{bh} / \sqrt{3} K_T \end{aligned} \quad (4)$$

$$I_{Ch} = \sqrt{I_{ah}^2 + I_{bh}^2} / K_T$$

其中,  $I_{Ah}, I_{Bh}, I_{Ch}$  分别表示注入到系统的 A、B、C 三相  $h$  次谐波电流值;  $I_{ah}, I_{bh}$  分别表示  $\alpha$  臂和  $\beta$  臂的  $h$  次谐波电流值;  $K_T$  表示牵引变压器变比。

由于电铁负荷的不平衡性,注入到供电系统的三相谐波电流幅值将不相等,为研究最严重的情况,取对应  $h$  次谐波电流幅值最大的一相作为三相谐波电流输入。通过铁路相关机构发表的文献资料提供的数据以及国家电网公司对其他高铁电能质量测试报告中统计的 CRH3 型动车谐波特性的分析,可得各次谐波电流含有率,由此可得三相谐波电流源,接入

方式如图4所示。

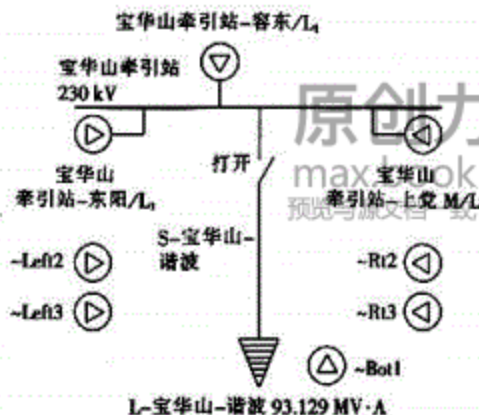


图4 电气化铁路谐波负荷模型

Fig.4 Harmonic load model of electric railroad

### 4 沪宁城际铁路实例仿真

#### 4.1 沪宁城际铁路工程简介

沪宁城际铁路项目是《长江三角洲地区城际轨道交通网规划》中的网络主轴之一,经由南京、镇江、常州、无锡、苏州至上海。沪宁城际铁路的建成,从根本上解决沪宁通道运输能力紧张的状况,对促进长三角区域经济一体化快速发展具有重要意义。

沪宁城际铁路正线全长 300 km,全线设近远期共 31 个车站,并设 5 个牵引变电所,均采用 220 kV 电压等级直接接入系统,采用 CRH3 高速动车组。

#### 4.2 沪宁城际铁路谐波分析

##### 4.2.1 电气化铁路在公共连接点注入的谐波电流

V/v 接线牵引变压器低压侧的各次谐波电流均会注入高压侧系统。电铁牵引负荷谐波分析有 3 种工况。

工况 1:轻重 2 个供电臂都以有效电流来计算,即两臂正常。

工况 2:重负荷臂为 95% 电流值,轻负荷臂为有效值,即 95% 电流+正常。

工况 3:重负荷臂为最大电流值,轻负荷臂为有效值,即最大+正常。

对各牵引站注入系统的谐波电流分别进行分析,其中无锡东牵引站注入系统的 2~25 次谐波电流值如图 5 所示。其特征次数谐波电流的允许值<sup>[9]</sup>和仿真值如表 1 所示。

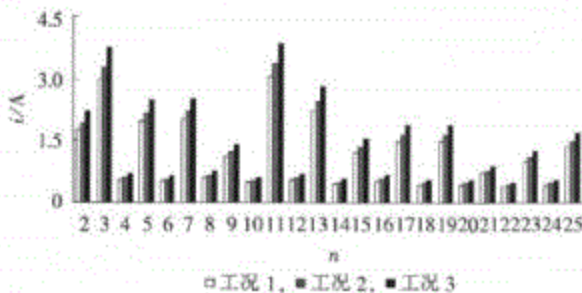


图5 无锡东牵引站注入系统的谐波电流图

Fig.5 Harmonic currents injected into grid at Wuxidong traction station



表1 无锡东牵引站注入公共连接点的谐波电流值

| Tab.1 Harmonic currents injected into PCC at Wuxidong traction station |      |      |      |      |
|------------------------------------------------------------------------|------|------|------|------|
| 谐波次数                                                                   | 允许值  | 正常值  | 95%值 | 最大值  |
| 3                                                                      | 7.00 | 2.99 | 3.27 | 3.75 |
| 5                                                                      | 8.34 | 1.97 | 2.16 | 2.47 |
| 7                                                                      | 7.77 | 2.02 | 2.21 | 2.53 |
| 9                                                                      | 5.99 | 1.11 | 1.22 | 1.40 |
| 11                                                                     | 7.08 | 3.06 | 3.35 | 3.84 |
| 13                                                                     | 6.52 | 2.25 | 2.46 | 2.82 |
| 17                                                                     | 5.24 | 1.49 | 1.62 | 1.86 |
| 19                                                                     | 4.68 | 1.49 | 1.62 | 1.86 |
| 25                                                                     | 3.56 | 1.37 | 1.50 | 1.72 |

由图5及表1可以看出无锡东牵引站注入系统的谐波电流有如下特点:

a. 3种工况下的谐波电流值呈增大趋势,工况1最小,工况3最大,但都没有超出各自谐波电流的允许值;

b. 偶次谐波电流较小,奇次谐波电流较大,各奇次谐波中,3、5、7、9、11、13次最为严重,其中11次谐波电流最大;

c. 随着次数的增加,实际的谐波电流值越接近于相应的允许值,这说明对于高速电气化铁路而言,高次谐波的影响要比低次谐波的影响大。

#### 4.2.2 电气化铁路在公共连接点产生的谐波电压

根据国家标准GB/T 14594—1993《电能质量——公用电网谐波》中的规定,公用电网谐波电压(相电压)限值如表2所示。

表2 公用电网谐波电压限值

| Tab.2 Harmonic voltage limits of utility grid |            |           |     |
|-----------------------------------------------|------------|-----------|-----|
| 电网标称电压/kV                                     | 电压总谐波畸变率/% | 谐波电压含有率/% |     |
|                                               |            | 奇次        | 偶次  |
| 110                                           | 2.0        | 1.6       | 0.8 |

注:220 kV公用电网可参照110 kV执行。

对沪宁城际铁路各个牵引站引起供电变电站的谐波电压进行仿真计算,计算中考虑各牵引站供电方式(供电变电站为一主一备方式给牵引变电站供电,对供电变电站进行排列组合),在不同的供电方式下,注入各种工况下的谐波电流,得到相应牵引站和公共连接点的各次谐波电压含有率及总谐波电压畸变率。其中,无锡东牵引站引起香楠公共连接点的各次谐波电压如图6所示。表3列出了一些特征次数

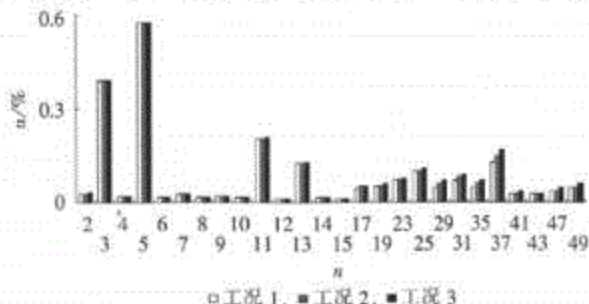


图6 香楠220 kV母线各次谐波电压

Fig.6 Harmonic voltages of Xiangnan 220 kV bus

表3 香楠站谐波电压及总谐波畸变率THD

| Tab.3 Harmonic voltages and THD of Xiangnan station |      |       |       |       |       |      |  |
|-----------------------------------------------------|------|-------|-------|-------|-------|------|--|
| 谐波电压/V                                              | 限值/V | 仿真值/V |       |       | 实测值/V |      |  |
|                                                     |      | 工况1   | 工况2   | 工况3   | 平均值   | 95%值 |  |
| 3                                                   | 1.6  | 0.393 | 0.393 | 0.393 | 0.35  | 0.38 |  |
| 5                                                   | 1.6  | 0.580 | 0.580 | 0.580 | 0.50  | 0.57 |  |
| 7                                                   | 1.6  | 0.029 | 0.029 | 0.029 | 0.04  | 0.05 |  |
| 11                                                  | 1.6  | 0.207 | 0.207 | 0.210 | 0.29  | 0.32 |  |
| 13                                                  | 1.6  | 0.127 | 0.127 | 0.131 | 0.14  | 0.16 |  |
| 17                                                  | 1.6  | 0.046 | 0.055 | 0.055 | 0.02  | 0.03 |  |
| 19                                                  | 1.6  | 0.052 | 0.052 | 0.062 | 0.01  | 0.02 |  |
| 23                                                  | 1.6  | 0.075 | 0.075 | 0.079 | 0.06  | 0.07 |  |
| 25                                                  | 1.6  | 0.103 | 0.103 | 0.108 | 0.07  | 0.08 |  |
| THD/%                                               | 2    | 0.767 | 0.774 | 0.788 | 0.71  | 0.77 |  |

的谐波电压和总谐波畸变率,并与实测值进行了比较。

由图6及表3可以看出香楠公共连接点谐波电压及总谐波畸变率THD值有如下特点:

a. 220 kV母线总谐波畸变率均满足国标规定2%的限值要求,各次谐波电压含有率也满足奇次谐波不超过1.6%、偶次谐波不超过0.8%的国标要求;

b. 3种工况下各次谐波电压及总谐波畸变率THD值呈增大趋势,其中工况1最小,工况3最大,但是数值相差不大,特别是次数较低时3种工况下的仿真值很接近;

c. 每种工况下的谐波电压呈现波动的特点,即在一个区间内会出现峰值和谷值,所有公共连接点的这种波动趋势基本一致,这与高速电气化铁路牵引站本身的谐波特性有关,其中,3、5、11、13、37次的谐波电压值比较大,特别是5次谐波峰值很突出,从图中可以看出,其频谱范围较宽,高次谐波含量较高,这是高速电气化铁路和普通电气化铁路在谐波特性上的一个很大的差别;

d. 通过与实测值的对比发现,对于谐波电压较大的次数,其仿真值与实测值比较接近,如3、5、11、13、23、25次等,而对于7、17、19次等谐波电压较小的次数,其仿真值相对实测值漂浮较大。

#### 4.2.3 谐波阻抗分析

在谐波频率下,系统中各个元件对地和相间分布电容的存在,使得电力系统中构成了一个复杂的由电容、电抗和电阻组成的网络,加上系统中本来存在的补偿电容器等大电容元件和电磁式电压互感器、变压器等非线性磁性元件的相互作用,会在系统的局部存在谐波谐振或对谐波敏感的点,因此高铁负荷注入系统的谐波可能引起谐振和谐波放大<sup>[10-12]</sup>。

沪宁高铁采用交直传动方式后,低次谐波的含量大幅度降低,但低次谐波的绝对值还是十分可观,同时,谐波频谱范围大幅度增加,高次谐波达到基波频率的几十倍。通过对电网各节点进行频率扫描,江苏电网内部分节点在20~50次谐波频率范围内可能会发生谐振现象,包括220 kV母线,如板桥、观五、海翔、华丰、华阳、黄岗、金港、梅山、平安、台南、天王、盐厂扩、洋口、真州、朱坝、卓圩等。

一些典型的节点阻抗频率扫描图如图7所示(图中, $n$ 为谐波次数, $Z$ 为阻抗)。实际上,在江苏电网内部,还有很多其他的站点都会引起不同程度的

谐振现象。由于沪宁高铁采用的交直交传动方式的特点,使得在电网中的高频谐波明显增加,这也增加了上述站点产生高频谐波谐振的几率。所以,必须采取相应措施来减小谐振现象造成的危害。

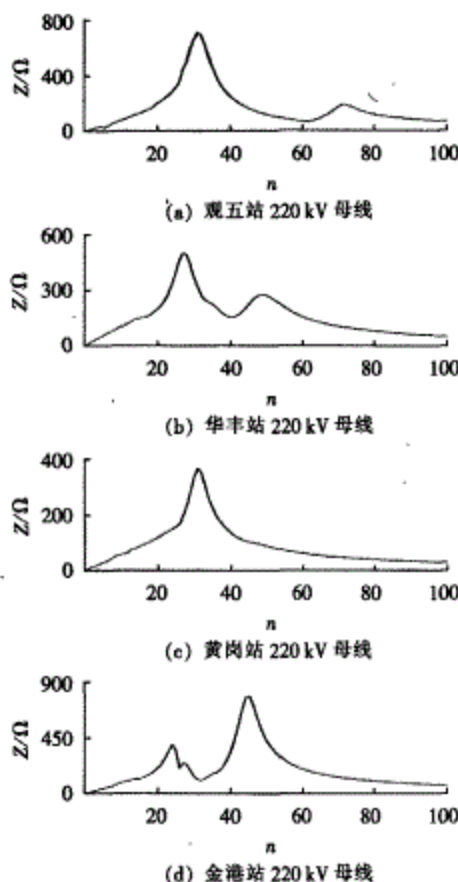


图7 容易引起谐振站点阻抗频率扫描图

Fig.7 Frequency scan chart of sites easy to resonate

## 5 结论与建议

本文建立了V/v型牵引变压器的理论模型,分析了各个电气量之间的关系特点,并推导了电气化铁路的谐波负荷模型。在ETAP中采用变换到高压侧的谐波电流源,较为准确地模拟了沪宁城际铁路的谐波特性,在此基础上完成了谐波潮流分析和频率扫描。

目前运行在高速电气化铁路上的交直交传动电力机车虽然在谐波方面比传统交直型机车有了很大改善,但从沪宁城际铁路仿真结果来看,电气化铁路负荷仍给电网造成一定的电能质量污染。因此,为保证电网的安全运行及用户使用优质电能的权益,必须采取相应的谐波治理措施<sup>[13-15]</sup>。如在牵引变电所的电容补偿使用带电抗器的补偿系统;采用静止无功补偿装置并结合谐波治理的综合补偿方式。现阶段谐波补偿和抑制的一个重要趋势是采用有源电力滤波器。

## 参考文献:

[1] QIU Shuisheng, FILANOVSKY I M. Harmonic analysis of PWM converters[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems

- I: Fundamental Theory and Applications, 2000, 47(9): 1340-1349.
- [2] 李群湛, 连级三, 高仕斌. 高速铁路电气化工程[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2005: 44-47.
- [3] 郭蕾, 李群湛, 刘炜, 等. 额定功率下高速机车谐波特性的仿真分析[J]. 西南交通大学学报, 2009, 44(6): 835-840.
- GUO Lei, LI Qunzhan, LIU Wei, et al. Simulation analysis of dynamic characteristic of harmonics for high-speed locomotive running at rated power[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2009, 44(6): 835-840.
- [4] 谭秀娟. 交流电气化铁道牵引供电系统[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007: 17-19.
- [5] 卢志海, 厉吉文, 周剑. 电气化铁路对电力系统的影响[J]. 继电器, 2004, 32(11): 33-36.
- LU Zhihai, LI Jiwen, ZHOU Jian. The impact of electrified railway on electric power system[J]. Relay, 2004, 32(11): 33-36.
- [6] 张力强, 罗文杰, 吕利军. 电气化铁路牵引负荷的不利影响及治理方案[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊): 196-198.
- ZHANG Liqiang, LUO Wenjie, LYU Lijun. Disadvantage and manage project on electrization railway draught load[J]. Power System Technology, 2006, 30(Supplement): 196-198.
- [7] 韩柳, 谈顺涛. 电气化铁路对电网的影响及对策[J]. 江苏电机工程, 2005, 24(3): 8-11.
- HAN Liu, TAN Shuntao. Power system operation affected by electrification railway and its improvement[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2005, 24(3): 8-11.
- [8] 胡煜, 郑建勇, 陈志飞. 沪宁电气化铁路对电网的影响研究[J]. 江苏电机工程, 2008, 27(5): 28-31.
- HU Yu, ZHENG Jianyong, CHEN Zhifei. Research on the influence of Hu-Ning electrified railway on power network[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2008, 27(5): 28-31.
- [9] 林海雪, 周胜军. 电气化铁路的谐波标准问题[J]. 中国电力, 1999, 32(9): 55-58.
- LIN Haixue, ZHOU Shengjun. Problems on harmonics standard for electrified railway[J]. Electric Power, 1999, 32(9): 55-58.
- [10] 吴克昌, 孙树勤, 宋文南, 等. 电力系统谐波[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988: 272-274.
- [11] 许克明, 徐云, 刘付平. 电力系统高次谐波[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1991: 60-63.
- [12] 刘文泽, 蔡泽祥, 冯顺萍. 变电站中电网谐波谐振分析与EMTP建模仿真[J]. 电力电容器与无功补偿, 2009, 30(2): 17-20.
- LIU Wenzhe, CAI Zexiang, FENG Shunping. Resonant analysis and EMTP model simulation of grid harmonics in transformer substation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2009, 30(2): 17-20.
- [13] 王兆安, 杨君, 刘进军, 等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 4-6.
- [14] EMANUEL A E. On the assessment of harmonics pollution[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(3): 1693-1698.
- [15] 才英华, 彭鸿飞, 王艳波. 高次谐波在电力系统的危害及防治[J]. 煤炭电气, 2002, 21(5): 10-12.
- CAI Yinghua, PENG Hongfei, WANG Yanbo. The harm and prevention of harmonic in power system[J]. Coal Technology, 2002, 21(5): 10-12.

(编辑: 汪仅珍)

## 作者简介:

郑爱霞(1968-), 女, 河南温县人, 处长, 硕士, 长期从事无功、线损、电能质量以及输配电管理工作(E-mail: alicc6808@sohu.com);

袁晓冬(1979-), 男, 江苏无锡人, 专业主管, 硕士, 长期从事电能质量测试、仿真和评估工作;

李群(1967-), 男, 江苏靖江人, 一级专家, 高级工程师, 博士, 从事无功补偿控制、电能质量监测及新能源研究工作。

(下转第121页 continued on page 121)



作者简介:

李晓波(1976-),男,河南灵宝人,副教授,博士,主要研究方向为供配电安全、微机保护与智能电器(E-mail:xbli\_cumt

@126.com);

王崇林(1956-),男,安徽天长人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为供配电安全、配网自动化。

## Survey of zero-residual-current arc suppression coil

LI Xiaobo, WANG Chonglin

(School of Information and Electrical Engineering,  
China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China)

**Abstract:** There are two ways to realize the zero residual current in China. One is to add a capacitor in the lagging phase or a inductor in the leading phase of the grounding phase. It needs a split-phase-operating switch and a capacitor or inductor and results in a two-phase grounding fault artificially. The other is to inject current. It selects the faulty line and realizes zero residual current based on concept of APF. As the faulty line selection in resonance grounding system is still imperfect, if the faulty line is improperly selected, the successive grounding current estimation and inverter control will be totally wrong. As the compensation current of arc suppression coil can not be directly measured, the scheme of APF can not be simply applied to realize zero residual current.

**Key words:** arc suppression coil; zero residual current; automatic tracking and compensation; capacitive current; resonance; electric grounding

(上接第111页 continued from page 111)

## Harmonic analysis based on ETAP for Shanghai-Nanjing Intercity Railroad

ZHENG Aixia<sup>1</sup>, YUAN Xiaodong<sup>2</sup>, LI Qun<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Province Electric Power Company, Nanjing 210024, China;

2. Jiangsu Province Electric Power Test and Research Institute, Nanjing 210036, China)

**Abstract:** The influence of harmonics produced by high-speed electric railroads on grid is introduced. Based on the wiring principle of V/v type traction transformer, the equivalent method of electric railroads connecting to grid is derived. Harmonic load model is established by transforming the harmonic currents from two-phase at LV side to three-phase at HV side. The influence of harmonics produced by Shanghai-Nanjing Intercity Railroad on Jiangsu Power Grid is studied with ETAP, including the harmonic current and voltage of PCC. The comparison with the measured values verifies the validity of the proposed method for the modeling and simulation of electric railroads. Frequency scan is carried out for some sites of Jiangsu Power Grid, which are easy to be resonated. Suggestions are put forward for harmonic compensation and suppression.

**Key words:** electric railroads; electric traction; electric transformers; harmonic analysis; frequency scan; ETAP

作者: 郑爱霞, 袁晓冬, 李群, ZHENG Aixia, YUAN Xiaodong, LI Qun  
作者单位: 郑爱霞, ZHENG Aixia(江苏省电力公司, 江苏南京, 210024), 袁晓冬, 李群, YUAN Xiaodong, LI Qun(江苏省电力试验研究院, 江苏南京, 210036)  
刊名: 电力自动化设备 ISTIC EI PKU  
英文刊名: ELECTRIC POWER AUTOMATION EQUIPMENT  
年, 卷(期): 2011, 31(6)  
被引用次数: 1次

## 参考文献(15条)

1. QIU Shuisheng; FILANOVSKY I M Harmonic analysis of PWM converters[外文期刊] 2000(09)
2. 李群湛; 连级三; 高仕斌 高速铁路电气化工程 2005
3. 郭蕾; 李群湛; 刘炜 额定功率下高速机车谐波特性的仿真分析[期刊论文]-西南交通大学学报 2009(06)
4. 谭秀炳 交流电气化铁道牵引供电系统 2007
5. 卢志海; 厉吉文; 周剑 电气化铁路对电力系统的影响[期刊论文]-继电器 2004(11)
6. 张力强; 罗文杰; 吕利军 电气化铁路牵引负荷的不利影响及治理方案 2006(增刊)
7. 韩柳; 谈顺涛 电气化铁路对电网的影响及对策[期刊论文]-江苏电机工程 2005(03)
8. 胡煜; 郑建勇; 陈志飞 沪宁电气化铁路对电网的影响研究[期刊论文]-江苏电机工程 2008(05)
9. 林海雪; 周胜军 电气化铁路的谐波标准问题[期刊论文]-中国电力 1999(09)
10. 吴竞昌; 孙树勤; 宋文南 电力系统谐波 1988
11. 许克明; 徐云; 刘付平 电力系统高次谐波 1991
12. 刘文泽; 蔡泽祥; 冯顺萍 变电站中电网谐波谐振分析与EMTP建模仿真[期刊论文]-电力电容器与无功补偿 2009(02)
13. 王兆安; 杨君; 刘进军 谐波抑制和无功功率补偿 2005
14. EMANUEL A E On the assessment of harmonics pollution[外文期刊] 1995(03)
15. 才英华; 彭鸿飞; 王艳波 高次谐波在电力系统的危害及防治[期刊论文]-煤炭电气 2002(05)

## 本文读者也读过(10条)

1. 谢珍建, 刘捷 浅谈铁路电气化改造对江苏电网的影响[会议论文]-2006
2. 王天一, WANG Tian-yi 电力牵引负荷对电网运行的影响[期刊论文]-湖南电力 2011, 31(1)
3. 曹广河 朔黄铁路牵引供电系统谐波监测与分析[学位论文] 2005
4. 陈安, 李其荣 10kV电力系统三相线路负荷不平衡问题分析[期刊论文]-建筑·建材·装饰 2009, 10(5)
5. 吴琼, 姜齐荣, 魏应冬, WU Qiong, JIANG Qirong, WEI Yingdong 新型STATCOM装置UPQC在电气化铁路中的应用[期刊论文]-科技传播 2011(10)
6. 胡煜, 郑建勇, 陈志飞, HU Yu, ZHENG Jian-Yong, CHEN Zhi-fei 陇海电气化铁路对电网的影响研究[期刊论文]-内蒙古石油化工 2008, 34(5)
7. 罗文杰, 张力强, 吕利军, LUO Wen-jie, ZHANG Li-qiang, LU Li-jun 大同电网电气化铁路牵引负荷的影响及对策[期刊论文]-山西电力 2007(2)
8. 段晓波, 梁志瑞, 张章, 刘勇 牵引变电站接入系统谐波评估中不同因素影响的分析[会议论文]-2008
9. 种衍师 京沪电气化铁路牵引站对山东枣庄电网的影响[会议论文]-2009
10. 张华, 熊继锋, 王虎, 程虹, ZHANG Hua, XIONG Ji-Feng, WANG Hu, CHENG Hong 浙赣铁路电气化牵引站负序电流及谐波对江西电网的影响[期刊论文]-江西能源 2005(2)