

交直交型机车的高频谐波混沌分析*

张鲲[†] 张扬 查晓明 熊一 彭光强 樊友平

(武汉大学电气工程学院, 武汉 430072)

(2012年2月23日收到; 2012年4月6日收到修改稿)

针对典型的交直交型动车组 CRH2 车型, 推导出其在正弦脉宽调制下的参数方程, 并建立一套新的非线性参数模型. 通过混沌原理分析了高次谐波的分形情况, 并针对典型的牵引变电站, 进行了计算和仿真, 依托实际录波的数据验证, 证实高频谐波能够导致系统谐振, 为混沌分析方法拓展了新的应用.

关键词: 电气化机车, 混沌分析, 高频谐波, 分岔

PACS: 05.45.Gg

1 引言

高速电气化机车是交通运输的发展趋势, 其以 CRH2 等车型为典型代表, 广泛采用电力电子变流装置, 具有调频、调幅、调相等诸多功能. 然而, 随着新型机车的应用, 牵引供电系统中的谐波特性发生了变化, 高频谐波含量陡增, 尽管这些谐波含有率较低, 但却增加了系统谐振的可能. 这是由系统结构和系统潮流共同作用而产生的.

国内外对该问题都进行了一系列研究. 文献 [1] 对电力系统谐波的产生机理、谐波的危害和影响以及谐波的潮流分析等方面进行了较为细致的阐述. 文献 [2, 3] 对电力系统谐波的分析算法进行了阐述. 文献 [4] 对交直交型牵引电路产生的谐波特性进行了仿真研究, 得出了交直交型牵引电路谐波次数主要分布在 40, 50 次以及 100, 120 次之间的结论. 在实际录波分析中, 发现有微小的偏差. 实际录波谐波次数主要分布在 30 次左右, 这和线路的参数有密切的关系. 文献 [5, 6] 提出了电力负荷谐波通用的模型, 在此基础上又根据最佳平方逼近的思想, 采用参数辨识的方法对负荷谐波进行建模,

但是对于牵引供电系统这个复杂的负荷谐波并没有做细致考虑. 文献 [7] 讨论了逆变器的非线性行为和混沌现象.

国内外还没有考虑电气化铁路的混沌特性. 本文首次运用混沌方法分析电气化铁路的高频谐波, 这样便于分析高频谐波主要集中在频段, 在混沌图上可以清晰地体现, 方便其在实际分析研究中的数据运用, 能够在最后治理谐波的工作中提供强大的数据支持, 并不因为大量的数据而无所适从. 通过混沌分析方法揭示了谐波的非线性规律.

2 电力机车模型

以 CRH2 型动车组为例分析牵引变流器主电路结构, 如图 1 所示, 可分为牵引线路和机车动力两个环节. 牵引变压器的二次侧牵引绕组额定电压为 25 kV, 电力机车采用 VVVF (变压变频) 的控制方式输出电压为 0—2300 V、频率为 0—220 Hz 可调的交流电驱动牵引电机.

通过对图 1 所示的电力机车部分分析知道, 整流器的每桥臂中点电位依据不同开关状态可以表示为 $U_d/2, 0, -U_d/2$ 三种情况 (U_d 表示直流侧的

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2012CB215100)、国家自然科学基金 (批准号: 61074101, 51177113) 和高等学校博士点专项基金 (批准号: 20090141120062) 资助的课题.

[†] E-mail: 80798558@qq.com

直流电压), U_N 为电气化铁路牵引线的电压. 不难看出下述关系式:

$$U_N = U_{ab} + I_N(R_N + j\omega L_N). \quad (1)$$

从图 1 可以看到, 牵引变压器二次侧绕组在一定的情况下 R_N, L_N 以及 U_N 的幅值和相位是确定的, 此时电流 I_N 幅值与相位仅仅由 U_{ab} 的大小及其与 U_N 的夹角确定, 只需通过对 U_{ab} 的幅值与相位的控制就可以实现对电流 I_N 的控制. 在理想牵引工况下, 一般希望功率因数为 1, 也就是 U_N 与 I_N 同相位, 即

$$U_{ab} = U_N - I_N(R_N + j\omega L_N), \quad (2)$$

$$R_{ab} = \frac{U_N - I_N(R_N + j\omega L_N)}{I_{ab}}, \quad (3)$$

得到 $R_{ab} = -j\omega L_N$.

电力机车的三相正弦脉宽调制 (SPWM) 变流器的电路模型为时变、非线性的高阶模型 [8]. 通过上面的计算和逆变器可以用非线性电容进行等值 [9,10], 为了方便计算, 将图 1 模型用图 2 模型替代. 虚线框图内为机车部分的电路模拟. 电气化铁路牵引线由于存在对地电容和相间互感, 加上变压器的电容和电感, 可以等效成图 2 的形式.

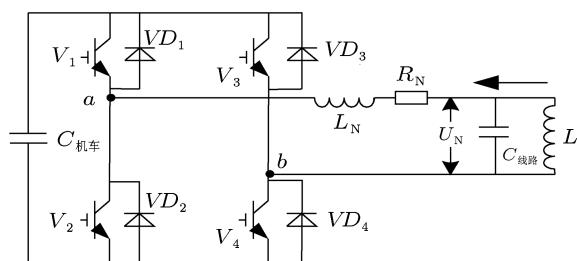


图 1 牵引变流器主电路结构

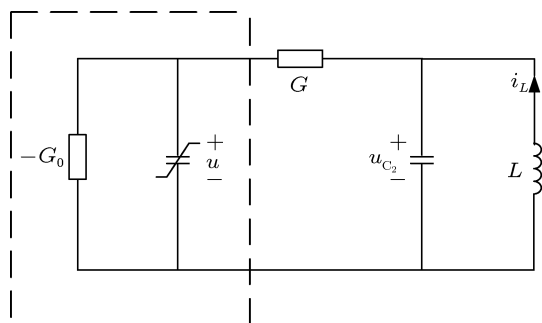


图 2 电力机车和牵引线路的电路图

对于非线性电容, 其特性可以表示为

$$u_C = f(q). \quad (4)$$

这样可以描述图 2 的电路状态方程为

$$\begin{cases} \frac{dq}{dt} = (G_0 - G)f(q) + Gu_{C_2}, \\ C_2 \frac{du}{dt} = Gf(q) - Gu_{C_2} + i_L, \\ L \frac{di_L}{dt} = -u_{C_2}. \end{cases} \quad (5)$$

在 (5) 式引进归一化因子 C (电容的量纲) 和 q_0 (电荷的量纲) 并且

$$\begin{aligned} x &= q/q_0, & y &= u_{C_2}(q_0/C), \\ z &= i_L(q_0G/C), & \tau &= t/(C_2/G), \\ \alpha &= C_2/C, & \beta &= C_2/LG^2, & r &= G_0/G, \end{aligned} \quad (6)$$

由 $\frac{dq}{dt} = (G_0 - G)f(q) + Gu_{C_2}$, 同时计入引入的量纲, 得到归一化方程为

$$\begin{cases} \frac{dx}{d\tau} = \alpha[(r-1)g(x) + y], \\ \frac{dy}{d\tau} = g(x) - y + z, \\ \frac{dz}{d\tau} = -\beta y. \end{cases} \quad (7)$$

下面对 (7) 式进行证明.

证明 由

$$\begin{aligned} \frac{d\left(\frac{q}{q_0}\right)}{d\left(\frac{\tau}{\frac{C_2}{G}}\right)} &= (G_0 - G) f\left(\frac{q}{q_0}\right) + \frac{Gu_{C_2}}{q_0}, \end{aligned}$$

化简得

$$\frac{dx}{d\tau} = \frac{C_2}{G} \left[(G_0 - G) f\left(\frac{q}{q_0}\right) + \frac{Gu_{C_2}}{q_0} \right].$$

当 $g(x) = Cf(q/q_0)$ 时, 则 $\frac{dx}{d\tau} = \alpha[(r-1)g(x) + y]$.

证毕.

以上证明得到 (7) 式的第一个方程, 下同, 不再一一证明.

在电气机车运行时, 得到了大量的数据. 要从这些数据中找出潜在的关系, 可以考虑一组数据 $(x_i, y_i) (i = 1, 2, \dots, m)$, 要求在函数类 $\Phi = \text{span}(\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_n)$ 中找到一个函数 $y = S^*(x)$, 使误差的平方和满足

$$\|\delta\|_2^2 = \sum_{i=0}^m W(x_i)[S^*(x_i) - y_i]^2$$

$$= \min_{S \in \Phi} \sum_{i=0}^m W(x_i)[S(x_i) - y_i]^2, \quad (8)$$

这里 $S(x) = a_0\varphi_0(x) + a_1\varphi_1(x) + \dots + a_n\varphi_n(x)$ ($n < m$). $W(x)$ 是 $[a, b]$ 上的权函数, 点 (x_i, y_i) 处的权 $W(x_i)$ 是这个点的重要程度, 这就是最小二乘逼近, 可以拟合 (8) 式:

$$u_C = ax + bx^3, \quad (9)$$

(9) 式中, a, b 为回归系数.

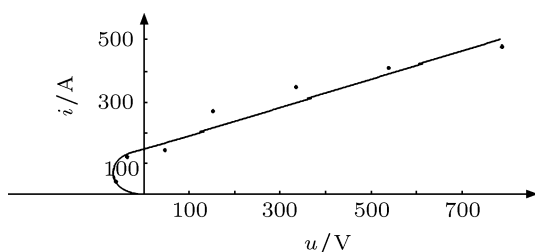


图3 电力机车实际逆变器的电流电压变化图

对于实验数据或者实测数据, 进行拟合时不应要求所做的曲线完全通过所有的数据点, 仅要求所得曲线能够反映数据的基本趋势. 而实测数据的拟合实质上就是在离散情况下的最佳平方逼近.

由图3经过拟合可以得下面的式子:

$$u_C = 4.8 \times 10^{-4}x^3 - 1.32x. \quad (10)$$

定理1 若电路及其非线性电容 (9) 式满足条件: 全局最终无源且 $a < 0$. 则称为有 3 个平衡点的条件.

下面对图2的电路进行分析. 设平衡点为 (x^1, y^1, z^1) , 由 (7) 式可以得到:

$$\begin{aligned} (r-1)g(x^1) + y^1 &= 0, \\ g(x^1) - y^1 + z^1 &= 0, \\ -\beta y^1 &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

解方程 (11) 式可以得到 $g(x^1) = ax^1 + b(x^1)^3 = 0$, $y^1 = 0$, $z^1 = 0$. 三个平衡点分别是 $(x^1, y^1, z^1) = (\sqrt{-\frac{a}{b}}, 0, 0)$, $(x^1, y^1, z^1) = (0, 0, 0)$, $(x^1, y^1, z^1) = (-\sqrt{-\frac{a}{b}}, 0, 0)$. 可以看到以 0 为中心的一对大小相等方向相反的对称点存在. 所以只要满足以上的条件, 电路必有三个平衡点存在.

通过对电气化铁路的数据的实际拟合, 可以得到逆变器非线性的特性曲线如图3所示, 同时这一

非线性特性接近电子管的实际特性, 证明电气化铁路机车所使用的 IGBT 的特性传承了电子管的特性. 同时也找到了电路有三个平衡点, 则可以分析电气化铁路的混沌问题.

3 电气化铁路的分岔和混沌问题

当电路的参数变化时, 特别是微小变化的时候, 能够引起电路的解发生质的变化, 称为分岔.

定理2 若电路的参数满足定理1的条件, 则存在 $a^* > 0$ 适合临界条件, 即

$$\beta + 2aa^*r - 4a^2(a^*)^2r(1-r) = 0. \quad (12)$$

证明 在临界条件下, 由关于 a 的方程式 (12) 式, 可以求出

$$\begin{aligned} a^* &= \frac{-2ar - \sqrt{(2ar)^2 + 16a^2\beta(1-r)}}{-8a^2r(1-r)} \\ &= \frac{1 - \sqrt{1 + 4\beta\frac{1-r}{r}}}{4a(1-r)}. \end{aligned} \quad (13)$$

前面知道 $a < 0, 1-r > 0, \beta > 0$, 于是 $a^* > 0$. 得证.

当 a 微小变化的时候, 这时候特征根为 $\lambda_{1,2}(a) = \delta(a) \pm j\omega(a)$.

定理3 若电路满足定理1的条件, 且 a^* 满足 (13) 式, 则 (7) 和 (11) 式的一对大小相等方向相反的点当 $\alpha = a^*$ 时存在 Hopf 分岔.

牵引网各导线型号及参数如表1—3.

表1 牵引线的型号规格

线	型号	直流电阻/ $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$	说明
接触线	CTSH-150	0.2000	铜锡 150 mm ²
承力索	JTMH-120	0.2500	铜镁 120 mm ²
正馈线	LBGLJ-240/30	0.1136	铝包钢芯线

下面研究当 $\alpha \neq a^*$ 或 $\alpha = a^*$ 这两种状态.

当 $\alpha \neq a^*$ 时, 电气化铁路大部分属于这种情况, 通过录波后整理的的数据, 发现谐波含量非常小.

通过分析图4可以发现, 在 21—29 次谐波附近有明显的突起, 但还是在国家的允许范围内, 即不超过 1.6%. 可以看到当 $\alpha \neq a^*$, 机车谐波变化比较平缓.

表 2 牵引系统和牵引网的参数

系统		牵引网	
系统等值阻抗/ Ω	1.18+j9.75	牵引网单位阻抗/ $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$	0.144+j0.5934
线路等值阻抗/ Ω	0.25+j0.58	牵引网单位导纳/S·km ⁻¹	j2.4765×10 ⁻⁶
变压器漏感/mH	1.027		

表 3 机车运动中的参数计算值

系统参数	计算值
G_0	$j\omega L_N = j314 \times 1.027 = j0.322/\Omega$
r	$\frac{G_0}{G} = \frac{0.322}{0.2x}$
β	$\frac{C_2}{LG^2} = \frac{0.5934x/314}{[(9.75 + 0.48x)/314] \times (0.2x)^2}$

注: x 为牵引线的长度

下面通过 MATLAB 仿真得出当 $\alpha \neq a^*$ 时电路的状态.

图 5 中 x 为非线性电容的电荷状态, 也就是电力机车逆变器的状态, 以电荷电量 q 为单位; y 为线路上的电容电压; z 为电感的电流. 在图 5 中可以看到三者是线性关系, 状态正常, 这与计算结果基本一致.

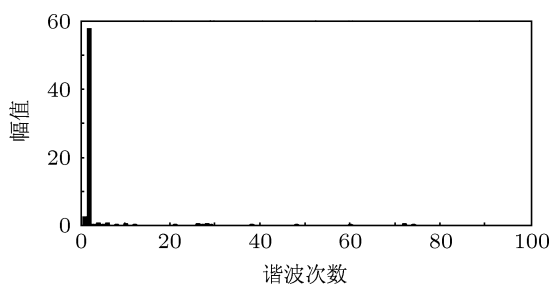


图 4 电气化铁路在 $a > 0$ 状态下的运行谐波图

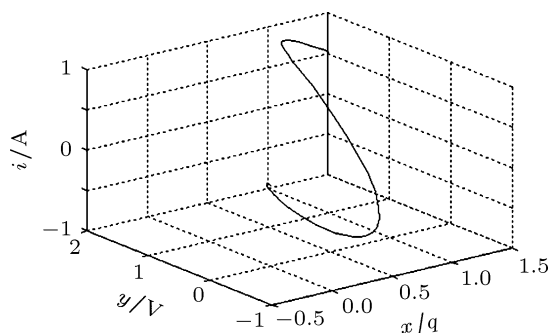


图 5 电气化铁路正常运行下的电路状态

当机车距离牵引站 40 km, $a = a^*$ 时, 通过计算可以得到

$$\gamma = \frac{G_0}{G} = \frac{0.322}{x \times 0.2} = \frac{0.322}{40 \times 0.2} = 0.04,$$

$$\begin{aligned} \beta &= \frac{C_2}{LG^2} \\ &= \frac{0.5934 \times x/314}{[(9.75 + 0.48 \times x)/314] \times (0.2x)^2} \\ &= \frac{0.5934 \times 40/314}{[(9.75 + 0.48 \times 40)/314] \times (0.2x)^2} \\ &= 0.01, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a^* &= \frac{1 - \sqrt{1 + 4\beta \frac{1-r}{r}}}{4a(1-r)} \\ &= \frac{1 - \sqrt{1 + 4 \times 0.01 \times \frac{1-0.04}{0.04}}}{4 \times 1.32 \times (1-0.04)} \\ &= -0.08, \\ \alpha &= \frac{0.5934 \times 40}{314} = 0.08, \end{aligned}$$

$a^* = -0.08$ 说明机车是背离牵引站, α 值为牵引线的电容值, 40 表示距离牵引站 40 km. 那么 $\alpha = |a^*| = 0.08$ 即说明通过计算电力机车在离开牵引站 40 km 时开始出现分叉, 图 6 为实际录波的谐波趋势图.

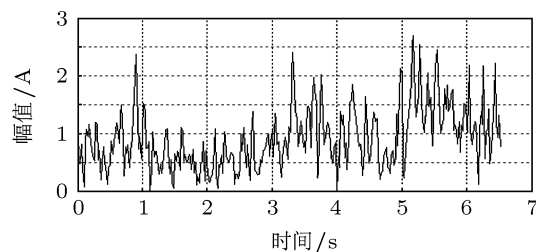


图 6 机车运行时的谐波变化的趋势图, 时间从 13 : 54 : 41.4847 起

图 6 表示实际机车运行时 23 次谐波变化的趋势. 由于电气化铁路牵引负荷是单相大功率整流负荷, 当公用电网向其供电时, 它将引起一系列电能质量问题, 如谐波、电压波动等. 在机车启动、爬坡、制动等等调节过程中谐波含量还会增大. 这些对电力系统产生的不良影响, 有可能进一步引发其他问题. 在实际录波的时候, 在一定的情况下, 谐波可以引起谐振, 从而对电网产生冲击. 这不仅仅会

对牵引供电系统本身的设备造成危害, 当其注入电网之后, 引起的过电压过电流将危及整个系统的安全稳定运行, 使得供电可靠性降低. 由于系统的谐振导致牵引变电所及分区所谐波电流严重放大, 导致母线电压升高, 造成事故的案例已有发生.

在国内的研究中, 因为电气化铁路的机车使用多 IGBT 的整流控制电路, 其研究者专门研究了两台 IGBT 在参数相近的情况下, 由于其特性参数的微小差异而导致混沌现象^[11].

国外有研究者将机车整流电路看作黑匣子, 利用实测数据建立机车谐波概率函数, 相当于黑匣子的传递函数, 可以得到该函数机车不同位置不同时刻产生的谐波情况^[12].

从图 6 可以看到, 电路的谐波变化很明显, 而且很频繁. 测量侧选择的是 110 kV 的母线. 国家标准规定 100 kV 的奇次谐波的含有率不大于 1.6%.

从图 7 可以看到机车的 23 次谐波已经明显超标. 在图 7 的分析中, 当基波为 15 时, 最大的谐波含有率达到 5%. 超出国家标准几倍. 而且总体的谐波含量都不低, 足以引起重视. 我国存在各类车型混跑的情况, 使得各牵引供电系统中谐波含量丰富, 谐波频带分布广泛. 所以在 23 次谐波超标应该是正常现象.

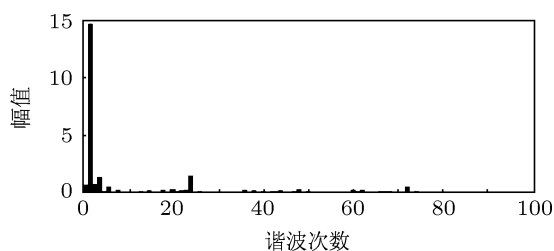


图 7 电流谐波变化实际测量图

通过图 6 可以发现, 当线路的参数变化时, 即机车在运行过程中其参数肯定是不不断变化的. 其谐波的大小也是随机变化的, 但是还是有一定的规律性.

混沌就是在某些确定性非线性系统中, 不需要附加任何的随机因素, 由于其系统内部存在非线性相互作用产生的类似随机现象.

图 8 是用 MATLAB 仿真所得电力机车在距离牵引站 40 km 时电路的混沌变化图形.

在电气化铁路运行实际录波的时候, 发现电气化铁路牵引线距离牵引站 40 km 过后. 在 23 次谐波有放大过程. 实际分析可以发现是谐振. 即分岔

到一定程度发生了混沌现象.

本节综合了电气化铁路的实际录波数据, 发现电气化铁路线路谐波大部分时间含量正常. 为了更好地分析实际数据, 我们建立了线路的数学模型. 分析数学模型可以发现存在 $\alpha \neq \alpha^*$ 的时候, 电气化铁路运行正常, 谐波含量在国家允许范围类, 通过仿真也可以证实到这一点. 但是在谐波超标的情况下, 理论分析发现存在 $\alpha = \alpha^*$, 在仿真时, 线路混沌明显, 证明建立的数学模型是正确的, 同时也说明在电气化铁路存在一定的隐患.

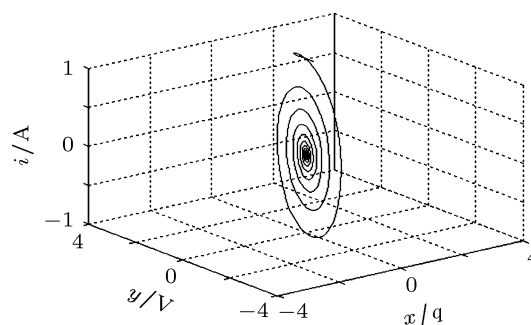


图 8 电力机车在距离牵引站 40 km 时的电路混沌图仿真图

4 结论

本文通过分析 CRH2 型动车组牵引变流器主电路结构, 就现在通用的模型进行建模分析, 抛弃了传统的将非线性方程转化成线性方程的分析, 坚持建立非线性数学模型. 这样分析没有模型转化的误差, 更加精确. 电气化铁路的机车是运动的, 导致参数不停变化, 加之国内的电气化铁路混跑现象严重, 很容易造成谐波超标. 在实际录波分析中, 电气化铁路发生高频谐波超标是存在的, 在对超标高频谐波分析中, 首次使用了混沌分析的方法. 用混沌分析的优点是便于发现谐波集中的频段, 为集中处理高频谐波提供了强大的数据保障. 通过对数据的实际分析, 电气化铁路在大部分情况下对电网没有任何影响, 谐波在机车运行时, 含量很低, 达到国家要求的标准. 但是, 在实际录波的过程中, 发现只要出现有些次谐波发生类似混沌现象, 就会发生谐振, 即分岔后发生混沌现象. 实际分析过程中, 超标的高频谐波的混沌现象非常明显. 这种短时间出现的高次谐波对电力系统的影响非常大, 可以导致开关误动作. 建议对 23 次这样的谐波使用单调滤波器进行处理, 对实际工程的安全运行和新的换流站设计均具有重要的参考价值.

- [1] Das J C 2002 *Short-Circuit Load Flow and Harmonics* (New York: Marcel Dekker) p433
- [2] Zhang F S, Geng Z X, Yuan W 2001 *IEEE Trans. Power Deliver.* **16** 160
- [3] Harris F J 1978 *Proc. IEEE* **66** 51
- [4] Guo L, Li Q Z, Liu W, Chen M W 2008 *National Doctoral Forum-Electrical Engineering* Chengdu, China, November 7, 2008 p663
- [5] Feng S G, Ai Q 2007 *Automation of Electric Power Systems* **31** 26 (in Chinese) [冯士刚, 艾芊 2007 电力系统自动化 **31** 26]
- [6] Han Y, Li J H, Huang S Z, Xia D Z 2001 *Automation of Electric Power Systems* **31** 36 (in Chinese) [韩奕, 李建华, 黄石柱, 夏道止 2001 电力系统自动化 **31** 36]
- [7] Wang X M, Zhang B, Qiu D Y 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 2248 (in Chinese) [王学梅, 张波, 丘东元 2009 物理学报 **58** 2248]
- [8] Pedro V, Marques G D 1998 *IEEE Trans. Industrial Electronics* **45** 263
- [9] Hefner J A R, Daniel D M 1991 *IEEE Power Electronics Specialists Conference* **9** 10
- [10] Hefner J A R 1990 *IEEE Trans. Ind. Appl.* **26** 995
- [11] Cha X M, Zhang Y, Sun J J, Fan Y P 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 020505 (in Chinese) [查晓明, 张杨, 孙建军, 樊友平 2012 物理学报 **61** 020505]
- [12] Yuen K H, Pong M H, Ye Z M 1999 *Applied Power Electronics Conference and Exposition* Dallas, USA, March 14–18, 1999 p458

Chaos analysis of high-frequency harmonics of locomotive LCI*

Zhang Kun[†] Zhang Yang Zha Xiao-Ming Xiong Yi
Peng Guang-Qiang Fan You-Ping

(School of Electric Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

(Received 23 February 2012; revised manuscript received 6 April 2012)

Abstract

Considering typical AC-DC-AC multiple units, CRH2 motor car, in this paper we deduce its parametric equations under sine pulse width modulation, and set up a new nonlinear parameter model. Fractal situation of higher harmonic is analyzed based on chaos theory. Aiming at typical traction substations, calculation and simulation are conducted, and the result is verified based on data from actual wave records, which proves that high-frequency harmonic can lead to system resonance and expands the application of chaos analysis method.

Keywords: electrification locomotive, chaotic analysis, high-frequency harmonics, bifurcation

PACS: 05.45.Gg

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB215100), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61074101, 51177113), and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20090141120062).

[†] E-mail: 80798558@qq.com