

不同负荷模型下高速铁路牵引供电系统谐波谐振敏感度分析

张民¹, 何正友², 高仕斌²

(1. 国网天府新区供电公司, 四川 成都 610041; 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 高速铁路牵引供电系统不同的负荷模型将得到不同的节点导纳矩阵, 从而对谐波谐振幅度、频率产生较大的影响。利用复矩阵模态分析研究不同高速列车的谐波模型对高速铁路牵引供电系统谐波谐振特性的影响规律。将利用频谱分析得到的驱动点阻抗变化曲线与三种不同负荷谐波模型得到的模态幅值和频率敏感度分析进行对比。结果表明, 不同的谐波模型在相同的谐振模态下得到了相近的谐振频率区域。

关键词: 模态敏感度分析; 模态分析; 模态阻抗; 模态频率; 高速铁路牵引供电系统

Harmonic resonance modal sensitivity analysis for high-speed railway traction supply system considering different harmonic load models

ZHANG Min¹, HE Zhengyou², GAO Shibin²

(1. State Grid Tianfu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, China;

2. College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Different modal admittance matrix, obtained according to different harmonic model of non-linear loads (NLLs), may have a big influence on the modal impedance and modal frequency in a resonance mode. The effect of load modeling of high-speed train on resonance behavior of high-speed railway traction supply system employing modal sensitivity of modal analysis approach is investigated. Results inferred from the driving point impedance curve got from frequency scan are compared with those of the modal sensitivity analysis with three different NLL models. The results show that different NLL models produce closed resonance frequency zone in the same resonance modes.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1134205, No. 51177139, and No. 51477145).

Key words: modal sensitivity analysis; modal analysis; modal impedance; modal frequency; high-speed railway traction supply system

中图分类号: TM714

文章编号: 1674-3415(2015)20-0021-08

0 引言

越来越多的非线性设备和负荷的投入运行, 给电力系统带来了一定的电能质量问题, 其中谐波问题一直是广大学者关注的重点。谐波电流由谐波源产生并在电力网络传播过程中, 往往会因网络参数与谐波源参数相匹配引发谐波的放大、谐振现象^[1]。谐波谐振是电容性设备与电感性设备在某一频率下频繁地无功功率交换的结果^[2-3]。谐波谐振将产生危险的谐波过电压, 同时放大谐波电流, 又进一步造

成网络节点谐波电压的严重畸变, 从而形成了一个正反馈^[4]。在并联谐振下, 任何一个很小的谐波电流激励将可能激发一个较大的谐波电压^[5], 这将引发对电力网络元件的绝缘、损耗发热、系统运行等诸多不利影响。

电力系统谐波谐振的问题因其较大的危害性引起了人们的关注。近几十年来, 国内外学者在电力系统谐波谐振研究领域提出了较多的分析方法, 这些方法归纳起来大致可分四类: 谐波传输放大法^[6], 频谱分析法^[7]、谐振模态分析法(resonance modal analysis, RMA)^[4-5,8-9]、S域或频域传递函数法(s-domain or harmonic-domain transfer function, SDTF or HDTF)^[10]。相对于仿真分析和频率频谱分

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1134205, 51177139, 51477145)

析法, 由 Xu 提出的模态分析将系统节点导纳矩阵进行特征值解耦可以识别系统的谐振模态频率、谐振贡献率^[4-5]。从而可以更好地研究节点对模态谐振的贡献程度。Cui, Huang 等通过对模态分析的研究, 提出了模态分析的模态敏感度问题^[11]: 1)模态阻抗敏感度; 2)模态频率敏感度。通过对改变元件的参数变换, 考察谐波谐振的幅值、频率变化规律。模态分析逐渐成为谐波谐振分析的有效分析手段, 成为谐波谐振分析的主要手段。

然而, 模态分析的关键在于系统节点导纳矩阵的建立及其准确性。一方面, 对于牵引网络建模而言, 目前的建模方法相对较多, 如等效集中参数模型、多导体传输模型, 链式模型等^[12-13], 这些模型均能有效建立其节点导纳矩阵并反映牵引网的电气特性。另一方面, 由于非线性负荷或设备的建模多是独立于电力网络而存在, 如图 1 所示。系统的负荷类型差异性, 加上不同的建模方法将导致谐波谐振分析结果也有所不同, 对于线性负荷有传统串并联型负荷和 CIGRE 负荷类型, 文献[14]讨论了这两种负荷类型下 New Zealand 系统和 IEEE 30 节点系统的谐波谐振频率的差异性, 但文中却未讨论非线性负荷的建模。谐波负荷模型及其外特性目前多采用恒谐波电流源、Norton 模型等方法^[15-16], 这一类方法多基于经验条件的谐波电流频谱和功率需求作为参数, 建模方法简单, 但难以评估网侧与负荷侧之间的交互作用, 因此在谐波谐振建模中不足以表现负荷的谐波阻抗特性。近年来, 一些学者已经意识到网侧谐波电压与谐波电流之间的交互、耦合关系, 通过建立谐波耦合导纳矩阵(如交叉频率导纳矩阵, 谐波耦合导纳矩阵等)从频域角度揭示谐波电压与谐波电流之间的关系^[17-21]。同时, 高速铁路列车使用 SPWM 控制换流器, 针对其的谐波建模则主要有时域仿真模型、恒流源和传统负荷模型^[6]。

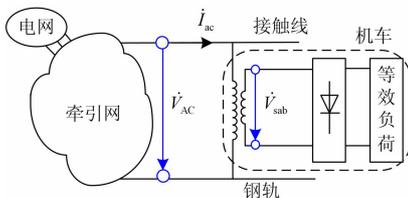


图 1 牵引供电系统车-网系统图

Fig. 1 Train-network coupled system of traction power supply system

因此, 本文通过对恒流源、传统负荷模型和谐波耦合导纳矩阵三种谐波负荷模型比较分析牵引供电系统谐波谐振的影响规律。建立高速铁路动车组运行特性, 求取其谐波耦合导纳矩阵, 分析其变化

对模态谐振的影响规律等特点。

1 模态敏感度分析

1.1 模态特征值解耦

系统的谐波谐振往往与网络节点导纳矩阵 Y_f 的奇异性有关。根据模态分析理论^[4-5], 可得到如下等式。

$$V_f = Y_f^{-1} I_f \quad (1)$$

$$Y_f = L A T \quad (2)$$

式中: Y_f 为在频率 f 处的系统节点导纳矩阵; V_f 、 I_f 分别为节点电压、注入电流向量。严重的并联谐波谐振意味着某些节点电压非常高, 一般在矩阵趋近于奇异时发生。 A 为对角特征值矩阵, $A = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k, \dots)$; L 、 T 分别为左、右特征向量矩阵, 且 $L = T^{-1}$ 。

将式(2)代入式(1)得

$$V_f = L A^{-1} T I_f; \quad R V_f = A^{-1} T I_f \quad (3)$$

根据文献[1], 定义: $U_f = R V_f$ 为模态电压向量, $J_f = T I_f$ 为模态电流向量, 则式(3)可以化简为

$$U_f = A^{-1} J_f \quad (4)$$

特征值倒数的单位为阻抗, 称为模态阻抗。根据式(4), 如果 $\lambda_{f1} = 0$ 或者非常小, 则很小的模态 1 注入电流 J_{f1} 将导致很大的模态 1 电压 U_{f1} 。另一方面, 其他的模态电压将不受影响, 它们和模态 1 电流之间没有耦合。即在模态域中可以很容易识别出谐振的位置。谐振实际上只对应某个特定模态而发生, 它与某个节点的注入无关也并非由其引起。参与因子等于特征向量的平方, 具有最大参与因子的节点可以被认为是“谐振的中心”。

对关键谐振模态 m 的特征值, 其左右特征向量满足

$$I_m t_m = 1, \quad Y t_m = \lambda_m t_m \quad \text{或} \quad I_m Y = \lambda_m I_m \quad (5)$$

而系统节点导纳矩阵的每个元素都将对谐振模态产生影响, 根据文献[12]定义敏感度为

$$S_{\lambda(m)ij} = \frac{\partial \lambda_m}{\partial Y_{ij}} = t_{mi} I_{jm} \quad (6)$$

1.2 特征值敏感度

假设 z_m 为模态阻抗, $z_m = 1/\lambda_m$ 。可得到模态阻抗和谐振频率对 α (α 可以为节点导纳矩阵元素或者系统元件)敏感度为

$$\begin{aligned} \frac{dz_m}{d\alpha} &= \lim_{\Delta\alpha \rightarrow 0} \frac{\Delta z_m}{\Delta\alpha} \\ \frac{df_m}{d\alpha} &= \lim_{\Delta\alpha \rightarrow 0} \frac{\Delta f_m}{\Delta\alpha} \end{aligned} \quad (7)$$

对于模态阻抗敏感度^[14-17]而言

$$\frac{dz_m}{d\alpha} = \lim_{\Delta\alpha \rightarrow 0} \frac{\Delta z_m}{\Delta\alpha} = \left. \frac{\partial z_m}{\partial \alpha} \right|_{f=f_m} = - \frac{1}{|\lambda_m|^2} \left. \frac{\partial \lambda_m}{\partial \alpha} \right|_{f=f_m} \quad (8)$$

对于模态频率敏感度而言, 由于模态阻抗在最大值点满足:

$$\left. \frac{\partial z_m}{\partial f} \right|_{f=f_m, \alpha=\alpha_m} = 0, \left. \frac{\partial z_m}{\partial f} \right|_{f=f_m+\Delta f, \alpha=\alpha_m+\Delta\alpha} = 0 \quad (9)$$

可以将上式进行 Taylor 分解

$$\left. \frac{dz_m}{df} \right|_{f=f_1+\Delta f, \alpha=\alpha_1+\Delta\alpha} \approx \left(\left. \frac{\partial z_m}{\partial f} \right|_{f=f_1, \alpha=\alpha_1} + \frac{\partial^2 z_m}{\partial f^2} \Delta f + \frac{\partial^2 z_m}{\partial f \partial \alpha} \Delta\alpha \right) \bigg|_{f=f_1, \alpha=\alpha_1} \quad (10)$$

利用式(9), 上式可以简化为

$$\frac{df_m}{d\alpha} = \frac{\Delta f}{\Delta\alpha} = - \frac{\frac{\partial^2 z_m}{\partial f \partial \alpha}}{\frac{\partial^2 z_m}{\partial f^2}} = - \frac{\frac{\partial^2 \lambda_m}{\partial f \partial \alpha}}{\frac{\partial^2 \lambda_m}{\partial f^2}} \quad (11)$$

通过离散化处理, 利用频率扫描得到的离散特征向量时间, 可求得

$$\frac{\partial^2 \lambda_m}{\partial f^2} = \frac{1}{4\Delta f^2} (\lambda_m^{f+2\Delta f} + \lambda_m^{f-2\Delta f} - 2\lambda_m^f) \quad (12)$$

可分别针对串并联元件求取 $\frac{\partial^2 \lambda_m}{\partial f \partial \alpha}$ 。

2 动车组非线性负荷模型

如图 2 所示, 高速列车牵引传动系统主要包括车载变压器、SPWM 变流器、直流环节(稳压滤波)、SVPWM 逆变器和三相交流牵引电机等。由于直流环节将整流器与逆变器进行了隔离, 逆变器在直流侧产生的谐波对网侧的影响较小, 因此可以将逆变器和牵引电机作为负载等效在直流环节中。这样对于交流侧的谐波分析只需对整流器的调制和控制进行分析即可。

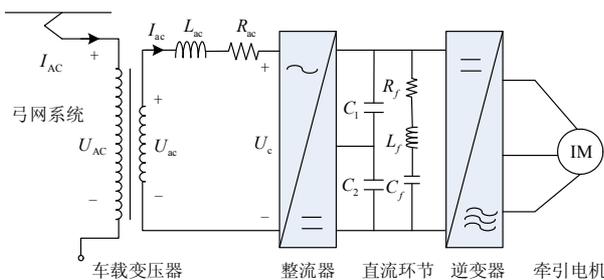


图 2 动车组牵引传动示意图

Fig. 2 Schematic diagram of EMUs traction drive system

2.1 恒流源模型

若单独考察电力网络的固有谐振特性时, 频率

扫描法及模态分析法均是将非线性负荷(NLL)视为理想的谐波电流源, 即 NLL 由一系列不同谐波次数的注入电流源组成。NLL 仅是系统谐振的激励源, 并非系统组成元件。

针对高速列车, 可仿真得到其电流频谱分布如图 3 所示, 此时忽略其他外特性。从图 3 中可发现, 高速列车谐波电流频谱主要集中在 50 次和 100 次附近, 较传统的电力系统 NLL 和普通电力机车均有较大的差异。因此, 高铁线路常有高次谐波谐振发生, 相关文献也进行了报道^[6,11]。

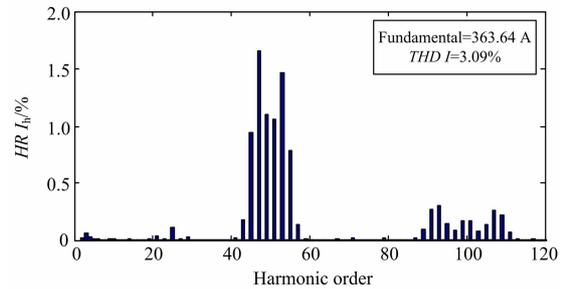


图 3 高速列车典型谐波频谱

Fig. 3 Typical current spectrum of high-speed train

本模型中认为非线性负荷只是谐波电流源, 不影响系统结构变化, 可认为串联 $Y_{sc}=0$ 。且恒流源模型因其建模简单, 考虑因素少, 是最为常用的谐波分析模型, 但也会有仿真结果不理想等情况。

2.2 传统负荷模型

传统负荷模型将负荷消耗的有功和无功率转变为阻抗或者导纳等效参数。这种等效方法在线性负荷中运用较广, 主要用于分析潮流计算及时域分析。文献[15]将其引入车网耦合参数计算, 即认为 NLL 的功率需求将对外呈现感性或容性特性。因此, 考虑这种模型下的 NLL 建模, 可以得到其并联或串联等效导纳, 如图 4 所示。其中, $Q = \frac{P}{\eta} \sqrt{1-\eta^2}$, η 为负荷功率因数, P 为负荷吸收的有功功率, Q 为负荷吸收的无功功率。

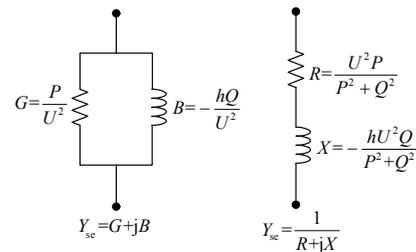


图 4 传统负荷模型

Fig. 4 Conventional load model

2.3 谐波耦合导纳模型

在系统谐波潮流计算中，基波与谐波是相互耦合的。NLL 的交流侧谐波电压与注入谐波电流之间存在频域上的耦合。如文献[17]利用仿真的方法建立了 NLL 的交叉频率导纳矩阵(crossed frequency admittance matrix, CFAM)，该方法建模方法简单且易于实现，但 CFAM 只是在某一种特定输入下建立的，理论上在不同运行工况需要多次重复实验。文献[18]从线性时域微分方程中得到了压控变流器的频率耦合矩阵(frequency coupling matrix, FCM)，文献从频域建立了不可控电力电子设备的耦合导纳矩阵[19-21]。这些模型不论从理论上还是实验上都说明了 NLL 的“谐波导纳”的存在，即 NLL 不仅是谐波谐振的激励源同时也是系统结构的组成元件。因此，本文在 FCM 和 CFAM 模型的思路建立高速列车的谐波导纳矩阵[22-24]。

研究高速列车交流侧等效模型，可将图 2 简化为图 5，即重点考察其 SPWM 变流器的谐波特性[25]。若将整流器中的功率开关器件视为理想元件，则可将动车组的主电路等效如图 2 所示，图中： R_{ac} 、 L_{ac} 为整流器交流侧等效电阻、电感； C_1 、 C_2 为直流侧支撑电容； S_A 、 S_B 为调制信号； E_{dc} 为直流方向电动势； R_{load} 为等效负荷； L 为直流平波电抗器。通过控制 S_A 、 S_B 的取值，实现对整流器的取值，实现对变流器的调制。

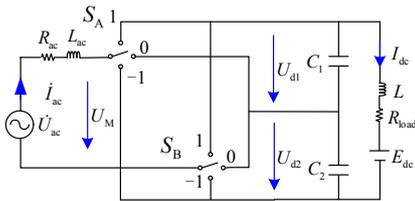


图 5 三电平整流器等效电路图

Fig. 5 Three-level converter equivalent circuit

CRH2 整流器采用瞬态直接电流控制策略，通过采集网侧电压 u_N 、电流 i_N ，直流侧电压 U_d ，根据式(13)计算得调制信号 u_{ab} 。

$$\begin{cases} I_{N1}^* = K_p(U_d^* - U_d) + 1/T_i \int (U_d^* - U_d) dt \\ I_{N2}^* = U_d^2 / (R_L U_N) \\ I_N^* = I_{N1}^* + I_{N2}^* \\ u_{ab}(t) = u_N(t) - (I_N^* R \sin \omega t + \omega L I_N^* \cos \omega t) - K [I_N^* \sin \omega t - i_N(t)] \end{cases} \quad (13)$$

式中： K_p 和 T_i 为 PI 调节器的参数； U_d^* 为中间直流侧电压给定值； U_N 为网侧电压 u_N 有效值； K 为比例放大系数； ω 为网侧电压的角频率； R_L 为负载， R 为网侧漏电阻； L 为牵引变压器二次侧漏感。

在图 6~图 8 的基础上，考察各次谐波电压对谐波电流的影响程度。 Y_{ij} 表示 i 次谐波电压 \dot{U}^i 对 j 次谐波电流 \dot{I}^j 影响大小。其具体求解步骤如下：

- 1) 将一个不含谐波的基波电压 \dot{U}^1 加在非线性负荷上，测量负荷的 h 次谐波电流 \dot{I}^h ，可得到 $Y_{h1} = \dot{I}^h / \dot{U}^1$ 。
- 2) 保持基波电压 \dot{U}^1 不变，单独叠加一个 k 次谐波电压 \dot{U}^k ，可测量得到负荷的 h 次谐波电流 \dot{I}^h ，可得到 $Y_{kh} = (\dot{I}^h - Y_{k1} \dot{U}^1) / \dot{U}^k$ 。

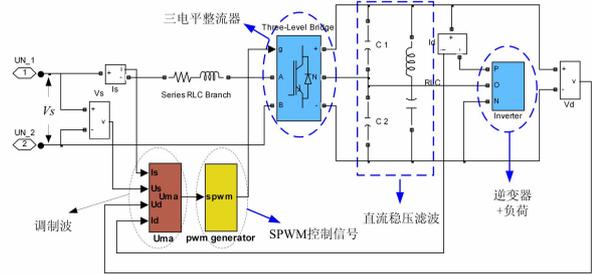


图 6 高速列车仿真模型

Fig. 6 Simulation model of high-speed train

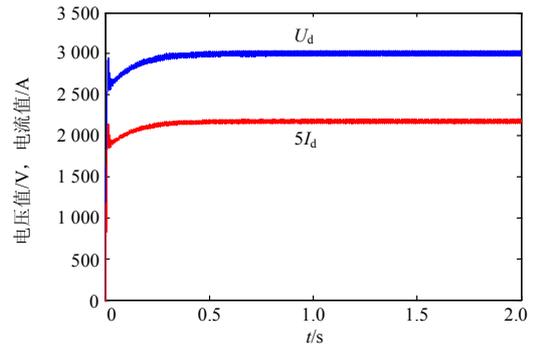


图 7 直流侧电压电流

Fig. 7 Voltage and current in DC side of SPWM converter

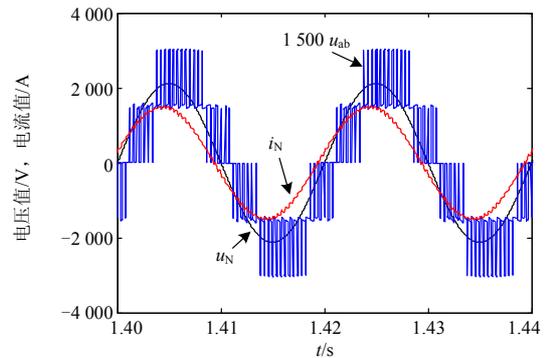


图 8 交流侧电压电流

Fig. 8 Voltage and current in AC side of SPWM converter

这样便可得到如图 9 的柱状图。从图中易知：

- ① 基波电压对谐波电流的影响较大, 如 40~60 次 (2MR±10), 100~120 次(4MR±10);
- ② 谐波电压对基波电流的影响较小;
- ③ 从对角元素可发现 h 次谐波电压对 h 次谐波电流的影响较大, 基波电压对基波电流的影响为 100%, 而 3 次谐波电压对 3 次谐波电流的影响可达到 150%, 其他次数呈递减趋势;
- ④ 不同次数的谐波导纳是不相同的, 建立谐波源导纳时需分别考虑。

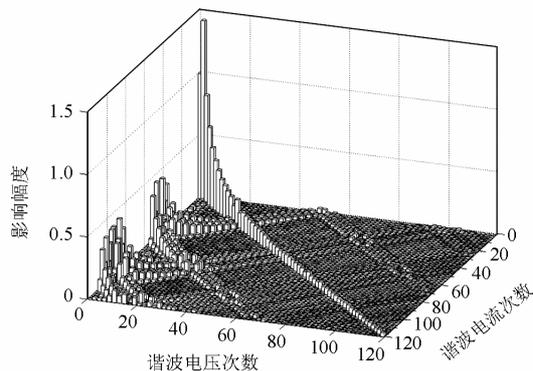


图 9 谐波耦合导纳矩阵

Fig. 9 Harmonic coupled admittance matrix

根据负荷等效导纳的物理意义, 实际上是网侧电压与注入电流之间的关系, 是元件的谐波相应特性。通过频域谐波耦合导纳矩阵分析可发现, 谐波电压主要对该次谐波电流产生影响, 因此可以得到谐波频率之间的耦合关系。因此定义谐波导纳

$$y_h = Y_{hh} \quad (14)$$

3 算例分析

为检验谐振模态分析及灵敏度分析方法的性能, 以京沪线某一牵引变电所为例, 如图 10 所示, 在 Matlab/Simulink 中进行仿真分析。两个供电臂各长 29 km, 变电站出口处中性区长 0.3 km。每个供电臂有两个 AT 段, 分别长 14 km 和 15 km, 接触网为全并联 AT 网。节点 1~3 为三相电力系统 ABC

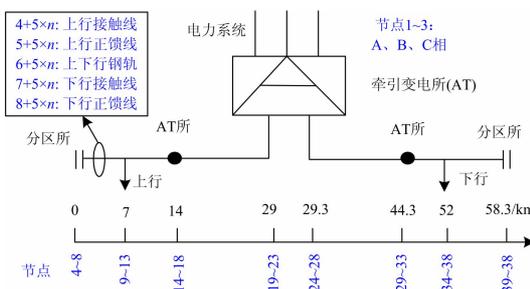


图 10 算例示意图

Fig. 10 Case study schematic diagram

相, AB 相经变压为 2×27.5 kV 为左臂供电, BC 相经变压为 2×27.5 kV 为右臂供电。牵引网由机车和 AT 所、分区所等划分为若干段, 每一段都是一个链式模型。链式模型中的节点分布为: 上行接触线、上行正馈线、钢轨、下行接触线、下行正馈线。设动车组负荷为 9.7 MW, 功率因数为 0.98。

图 11 是利用频率扫描法得到的系统各个节点的驱动点阻抗曲线。从图中可以发现 22.1 p.u., 67.4 p.u., 91.2 p.u.和 115 p.u.主要分布的谐振点。通过上节对不同动车组谐波模型的等效, 可得到如图 12~图 14 的模态分析结果。可发现, 不同的谐波模型下, 均发生了模态 25、38、39 等多个模态谐振, 出现较为集中的 22~24 p.u., 23~26 p.u., 66.9~67.0 p.u., 91~97 p.u., 115.3~115.6 p.u.的谐振带, 这与频谱分析结果基本上一致, 而谐振频率的差异主要与非线性负载的等效有关。将图 12~图 14 信息整理, 见表 1。

不同的机车负荷模型改变了同一模态下的谐振频率及谐振幅度。这同时也说明负荷模型对分析谐振具有重要的影响。从频谱分析和模态分析的对比来看, 二者均识别出了相同的谐振频率。由于频谱分析所得出的谐振幅值是真实幅值, 而模态分析得出的谐振幅值是模态幅值, 所以通过对比谐振幅值, 可以看出利用谐波耦合导纳矩阵进行的模态分析结果与频谱分析中的谐振幅值最为接近, 所以利用谐波耦合导纳矩阵进行模态分析较为合适。但频

表 1 不同负荷谐振信息

Table 1 Different load harmonic resonance information

| 恒流源 | | | 传统负荷 | | | 耦合导纳 | | |
|------|-----------|---------|------|-----------|--------|------|-----------|--------|
| 谐振模态 | 谐振频率/p.u. | 模态阻抗/Ω | 谐振模态 | 谐振频率/p.u. | 模态阻抗/Ω | 谐振模态 | 谐振频率/p.u. | 模态阻抗/Ω |
| 39 | 22.1 | 196 483 | 39 | 24.8 | 26 765 | | | |
| 38 | 23.3 | 185 644 | 38 | 26.0 | 21 135 | 38 | 23 | 7 629 |
| 36 | 66.9 | 1 365 | 36 | 67.0 | 1 326 | 36 | 67 | 1 225 |
| 32 | 81.1 | 2 518 | 32 | 81.2 | 2 389 | 32 | 81 | 2 375 |
| 33 | 91.1 | 24 592 | 33 | 92.0 | 23 333 | 33 | 91 | 12 188 |
| 41 | 96.7 | 13 538 | 41 | 96.9 | 14 027 | 41 | 97 | 10 558 |
| 25 | 115.3 | 4 248 | 25 | 115.6 | 3 793 | 25 | 115 | 3 832 |

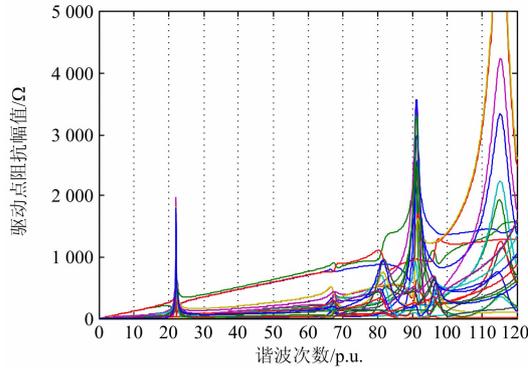


图 11 频谱法分析结果

Fig. 11 Modal analysis results using constant current model

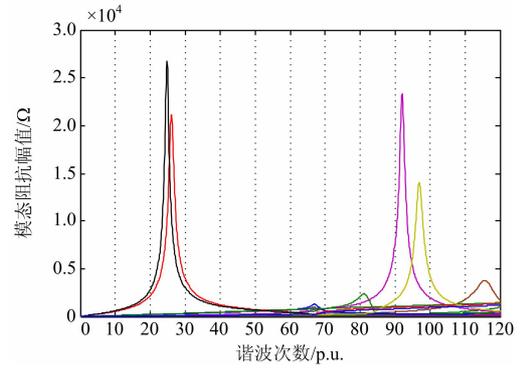


图 13 传统负荷模型的模态分析结果

Fig. 13 Modal analysis results using harmonic coupled

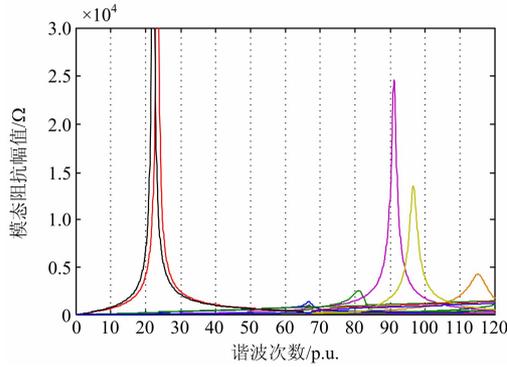


图 12 恒流源模型的模态分析结果

Fig. 12 Modal analysis results using conventional load model

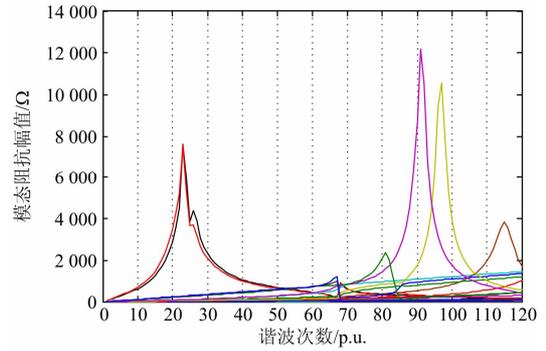


图 14 谐波耦合导纳矩阵下的模态分析结果

Fig. 14 Critical modal shape comparison of three load models

表 2 谐振的最大幅值贡献率及矩阵元素 (恒流源模型)

Table 2 Maximum resonance contribution rate and matrix elements (constant current source model)

| 频率敏感度 | 谐振频率/模态 | | | | | | |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| | 22.1 p.u./39 | 23.3 p.u./38 | 66.9 p.u./36 | 81.1 p.u./32 | 91.1 p.u./33 | 96.7 p.u./41 | 115.3 p.u./25 |
| $\frac{\partial \lambda_i}{\partial Y_{ij}}$ | 313 -667i | 125 -667i | 2.74-5.39i | 5.96-7.99i | 4.39-58.94i | -1.72-31.03i | 0.14+3.69i |
| | Y(5,4) | Y(40,39) | Y(5,4) | Y(43,42) | Y(23,22) | Y(43,42) | Y(5,6) |
| $\frac{\partial f_m}{\partial Y_{ij}}$ | -2.4311e5- | -1.9268e5- | -1.4813e4+ | -3.2967e3+ | -2.0736e3+ | -2.1507e3+ | -1.3886e2+ |
| | 7.4631e3i | 5.0370e3i | 1.4728e3i | 3.0154e2i | 4.6451e1i | 9.1124e2i | 3.9726e1i |
| | Y(7,7) | Y(42,42) | Y(4,4) | Y(40,40) | Y(22,22) | Y(42,42) | Y(8,8) |

表 3 谐振的最大幅值贡献率及矩阵元素 (传统负荷模型)

Table 3 Maximum resonance contribution rate and matrix elements (conventional current source model)

| 频率敏感度 | 谐振频率/模态 | | | | | | |
|--|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| | 22.1 p.u./39 | 23.3 p.u./38 | 66.9 p.u./36 | 81.1 p.u./32 | 91.1 p.u./33 | 96.7 p.u./41 | 115.3 p.u./25 |
| $\frac{\partial \lambda_i}{\partial Y_{ij}}$ | 2.93-151.12 i | 16.47-99.31i | 2.74-5.40i | 5.61-7.37i | 1.13-53.57i | -1.05-31.51i | 0.56+3.22i |
| | Y(40,39) | Y(7,8) | Y(7,8) | Y(39,40) | Y(23,22) | Y(28,27) | Y(11,13) |
| $\frac{\partial f_m}{\partial Y_{ij}}$ | -2.7721e5- | -2.0026e5- | -1.5475e4+ | -3.2102e3+ | -1.9782e3+ | -2.0882e3+ | -1.2983e2+ |
| | 0.0508e5i | 0.0359e5i | 6.9247e2i | 3.4598e2i | 6.2107e1i | 8.9375e2i | 4.1761e1i |
| | Y(39,39) | Y(5,5) | Y(5,5) | Y(43,43) | Y(7,7) | Y(7,7) | Y(8,8) |

谱分析不如模态分析更加直观: 1) 频谱分析中任何一个母线均包含系统所有的谐振点, 区分度较差; 2) 频谱分析只能提供除谐振频率和幅度, 不能提供更多的信息。

为考察机车谐波导纳大小对谐振频率的影响程度, 选择传统负荷模型下的负载谐波模型。考察 \mathbf{Y} 的矩阵参数 Y_{ij} 对关键谐振模态的特征值和谐振频率的影响程度, 对于恒流源负荷和传统负荷模型,

考察 $\frac{\partial \lambda_m}{\partial Y_{ij}}$ 和 $\frac{\partial f_m}{\partial Y_{ij}}$ 变化情况, 得到表 2 和表 3 中的相关参数。从中可发现针对模态阻抗的敏感度最大的是串联支路, 而对于谐振频率的敏感度最大的则是并联支路, 这也说明只要在关键节点修改系统结构和参数, 便可达到抑制谐振幅度和频率的目的。

可以进一步求取模态阻抗幅值以及谐振频率对 R 、 X 、 G 和 B 等参数的敏感度, 制定合理的谐振的抑制策略。

4 结论

本文建立了高速列车谐波耦合导纳模型, 利用频谱分析法与三种不同负荷模型下的模态分析结果进行对比, 发现利用谐波耦合导纳矩阵进行的模态分析结果与频谱分析中的谐振幅值最为接近, 因而采用谐波耦合导纳矩阵进行模态分析比较合理。同时, 通过考察关键模态幅值和频率对节点导纳元素以及具体的系统参数的变化率, 可以找到系统中关键元件对模态谐振幅度和频率的影响程度, 找到关键节点、元件, 进一步地可以有针对性地进行谐振的治理。

参考文献

[1] 孟金岭, 肖勇, 王文, 等. 适用于高速电气化铁路的低成本电能质量综合补偿装置[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 73-80.
MENG Jinling, XIAO Yong, WANG Wen, et al. A low cost power quality compensation scheme for high-speed electric railway[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 73-80.

[2] 孙楚平, 杨旭. 基于 S 变换模时频矩阵的电能质量扰动检测与识别[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 68-72.
SUN Chuping, YANG Xu. Detection and recognition of power quality disturbance based on module time-frequency matrixes by S transform[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 68-72.

[3] 彭卉, 邹舒, 付永生, 等. 冲击负荷接入电网的电能质

量分析与治理方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 54-61.

PENG Hui, ZOU Shu, FU Yongsheng, et al. Research of the power quality problem and treatment scheme for impact loads connected into Chongqing power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 54-61.

[4] 徐文远, 张大海. 基于模态分析的谐波谐振评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 89-93.
XU Wenyuan, ZHANG Dahai. A modal analysis method for harmonic resonance assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 89-93.

[5] XU W, HUANG Zhenyu, CUI Yu, et al. Harmonic resonance mode analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1182-1190.

[6] 何正友, 胡海涛, 方雷, 等. 高速铁路牵引供电系统谐波及其传输特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(16): 55-62.
HE Zhengyou, HU Haitao, FANG Lei, et al. Research on the harmonic in high-speed railway traction power supply system and its transmission characteristic[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(16): 55-62.

[7] 王彦东, 李群湛. 电力系统谐波阻抗特性及测量方法的探讨[J]. 电工技术杂志, 2004(3): 64-67.
WANG Yandong, LI Qunzhan. Study and discussion on electric power system harmonic impedance characteristics and its measurement method[J]. Electrotechnical Journal, 2004(3): 64-67.

[8] 周辉, 吴耀武, 娄素华, 等. 基于模态分析和虚拟支路法的串联谐波谐振分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(28): 84-89.
ZHOU Hui, WU Yaowu, LOU Suhua, et al. Series resonance analysis based on modal analysis and dummy branch method[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(28): 84-89.

[9] 雷之力, 艾欣, 崔明勇, 等. 基于模态评估法的微网串联谐振仿真[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2011, 45(1): 178-184.
LEI Zhili, AI Xin, CUI Mingyong, et al. Simulation on series harmonic resonance of microgrid based on modal assessment method[J]. Journal of Zhejiang University: Engineering Science, 2011, 45(1): 178-184.

[10] RAMIREZ A, SEMLYEN A, IRAVANI R. Harmonic domain characterization of the resonant interaction between generator and transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1753-1762.

- [11] HUANG Zhenyu, CUI Yu, XU W. Application of modal sensitivity for power system harmonic resonance analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 222-231.
- [12] 徐志强, 李冰, 周田华, 等. 基于模态分析的运动负荷牵引电网谐波谐振分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(19): 76-80.
XU Zhiqiang, LI Bing, ZHOU Tianhua, et al. Harmonic resonance assessment of traction system with moving load based on modal analysis[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 76-80.
- [13] 吴命利. 电气化铁道牵引网的统一链式电路模型[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(28): 52-58.
WU Mingli. Uniform chain model for traction network of electric railways[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28): 52-58.
- [14] ESMAILI M, SHAYANGFAR H A, JALILIAN A. Modal analysis of power systems to mitigate harmonic resonance considering load models[J]. Energy, 2008, 33(9): 1361-1368.
- [15] 李欣然, 张广东, 朱湘有, 等. 牵引供电系统综合负荷模型结构[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(16): 71-75.
LI Xinran, ZHANG Guangdong, ZHU Xiangyou, et al. Load model of traction power supply system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(16): 71-75.
- [16] THUNBERG E, SODER L. Norton approach to distribution network modeling for harmonic studies[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(1): 272-277.
- [17] FAURI M. Harmonic modeling of non-linear load by means of crossed frequency admittance matrix[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(4): 1632-1638.
- [18] LEHN P W, LIAN K L. Frequency coupling matrix of a voltage-source converter derived from piecewise linear differential equations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1603-1612.
- [19] SUN Yuanyuan, ZHANG Guibin, XU W, et al. A harmonically coupled admittance matrix model for AC/DC converters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1574-1582.
- [20] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-126, 131.
YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-126, 131.
- [21] 郑伟杰, 徐文远. TCR 非线性特性的线性耦合导纳矩阵模型[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 59-64.
ZHENG Weijie, XU Wen Yuan. Harmonically coupled linear matrix model for harmonic analysis of TCR[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 59-64.
- [22] 胡海涛, 何正友, 张民, 等. 高速铁路全并联 AT 供电系统串联谐振分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 52-60.
HU Haitao, HE Zhengyou, ZHANG Min, et al. Series resonance analysis in high-speed railway all-parallel AT transmission power supply system[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 52-60.
- [23] CHANG G W, LIN H E, CHEN S K. Modeling characteristics of harmonic currents generated by high-speed railway traction drive converters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2): 766-772.
- [24] 胡海涛, 何正友, 王江峰, 等. 基于车网耦合的高速铁路牵引网潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(19): 101-109.
HU Haitao, HE Zhengyou, WANG Jiangfeng, et al. Power flow calculation of high-speed railway traction network based on train-network coupling systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(19): 101-109.
- [25] 冯晓云. 电力牵引交流传动及其控制系统[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009: 90-98.

收稿日期: 2015-01-15; 修回日期: 2015-04-22

作者简介:

张民(1987-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统电能质量; E-mail: xnjdzm@qq.com

何正友(1970-), 男, 教授, 博导, 主要从事信号处理和信理理论在电力系统故障分析中的应用、新型继电保护原理、配网综合自动化等方向的研究工作;

高仕斌(1963-), 男, 教授, 博导, 研究方向为继电保护与变电站综合自动化、电气设备在线监测等。

(编辑 葛艳娜)