

高速铁路车网耦合系统网压振荡模态分析与对策

付莉, 张桂南, 高仕斌

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 高速铁路车网耦合系统出现电压低频振荡现象, 导致多个动车所的多台动车组牵引封锁, 目前对其机理研究处于初期阶段。首先根据赫尔维茨稳定判据以及瞬态能量平衡方程判定车网开环系统的稳定性, 并采用小增益定理分析电压振荡的影响因素。接着, 基于十导体链式电路搭建精确的高速铁路全并联 AT(autotransformer)供电系统模型, 并基于瞬态电流控制建立 CRH3 型动车组电气模型。在此基础上, 实现车网系统的互联, 并仿真再现电压振荡现象。随后, 采用 FFT、小波分析及 Prony 分析的方法实现了振荡电压低频成份的辨识。

关键词: 瞬态能量平衡; 小增益定理; 全并联 AT 供电; CRH3 型动车组; 小波分析; Prony 法

Modal analysis and countermeasures on voltage low frequency oscillation of high-speed railway traction network and EMU coupling system

FU Li, ZHANG Guinan, GAO Shibin

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: With voltage low frequency oscillation of high-speed railway traction network and EMU coupling system, many EMU of different places appear traction blockade. Mechanism of this phenomenon is currently in its early stages. Firstly, the transient energy balance equation of traction network and EMU coupled system are derived. Secondly, the open-loop stability of the traction network and EMU system is determined and the factors of voltage oscillations are analyzed with the small gain theorem. Thirdly, the all-parallel autotransformer traction supply model is precisely built by using the 10-conductor chain circuit and the CRH3 EMU electrical model is established based on the transient current control. On this basis, the interconnected system of the traction network and EMU is implemented, and voltage oscillation phenomenon is reproduced. In addition, the frequency of the oscillating voltage is accurately extracted by using FFT method, wavelet algorithm and Prony method.

Key words: transient energy balance; small gain theorem; all-parallel autotransformer traction supply; CRH3 EMU; wavelet algorithm; Prony method

中图分类号: TM76

文章编号: 1674-3415(2016)01-0024-09

0 引言

近年来, 我国高速铁路的飞速发展使得高速动车和大功率电力机车也得到快速发展, 截至 2014 年 7 月共有 1 330 对动车组投入运行。然而, 随着动车组的高密度运行, 也陆续出现了一些新的问题。如: 2009 年 12 月以来上海南翔动车所 CRH1 型动车组出现了变流器封锁现象^[1]; 2010 年 9 月北京、沈阳、郑州等地动车所均出现 CRH5 型动车组牵引

封锁、列车无法出发的现象; 2011 年 5 月到 2012 年 3 月徐州地区网压频繁发生振荡, 期间多次造成机车停车无法继续运行。

国内外学者经过对以上相关事故分析, 发现高铁牵引网电压均出现低频振荡现象。该现象不同于电力系统的低频振荡^[2], 其发生在同一供电臂下多台空载机车同时运行的情况下, 为等幅或增幅振荡。针对该现象, 国内外均开展了一定的前期研究, 文献[3]研究多台 Re450 型机车引起的低频振荡现象; 文献[4]通过波特图相位裕量来选择 PI 控制参数, 强化了变流器抵抗电压振荡能力; 文献[5-6]提出一种整流器的最优线性二次型多变量控制方法, 显著

基金项目: 高速铁路基础研究联合基金重点项目(高速铁路电力牵引系统安全性预测与控制)(U1134205)

提高了变流器的低频稳定性。然而低频振荡作为牵引供电系统的一种复杂动态行为, 分析与控制的难度都较大。目前, 分析低频振荡现象模态参数的方法有实时快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)、Prony 算法、MUSIC 法、小波算法等, 如何有效地辨识高铁牵引网低频振荡现象的频率成份, 对“动车组-牵引网”耦合系统(车网耦合系统)低频振荡过电压的理论研究与防治, 对维护高速铁路牵引供电系统的安全稳定运行具有非常重要的实际工程意义。

本文搭建高铁全并联 AT 供电方式下的牵引网链式模型及 CRH3 型动车组牵引传动系统电气模型, 并实现车网系统的互联, 对低频振荡现象进行仿真再现; 最后, 采用 4 种模态辨识方法: FFT、MUSIC 法、小波算法以及 Prony 法等提取振荡电压的频率, 对比分析发现振荡电压存在 5 Hz、7.5 Hz 的低频成份。本文的分析为高速铁路车网低频振荡过电压的防治提供了思路, 具有一定的工程实用参考价值。

1 高速铁路车网耦合系统稳定性分析

目前高速铁路上运行的 CRH1、CRH3、CRH5 型动车组中均采用两重化脉冲整流器。对于 8 编组的动车组, 在 2、7 车各有一台牵引变压器, 其二次侧有两个牵引绕组, 为两套四象限整流器供电。由于低频振荡现象多发生于在同一供电臂下多台空载机车同时运行的情况下, 因而可对动车组牵引传动系统的逆变器、牵引电机部分进行简化处理; 同时将牵引网上的供电变压器阻抗、供电变压器至动车组输入端线路阻抗折算至动车组车载变压器副边, 如图 1 所示。

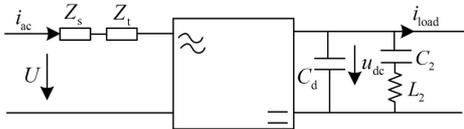


图 1 高铁车网耦合级联系统等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit of high-speed railway traction network and EMU coupling system

图 1 中: U 为牵引变电所变压器输出电压折算到动车组车载变压器副边的电压; Z_s 为供电变压器阻抗及变压器至动车组输入端线路阻抗一起折算到动车组车载变压器副边的阻抗; Z_n 为动车组车载变压器的阻抗; i_{ac} 为 PWM 四象限整流器输入电流; u_{dc} 为整流器直流环节的电压; L_2 、 C_2 组成了二次滤波电路; C_d 为直流侧支撑电容; i_{load} 表示逆变器及电机

在中间直流环节的等效电流。

当同一供电臂下有 n 台机车同时整备或启动时, 其电路图如图 2 所示。

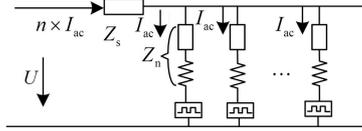


图 2 多台动车整备时的等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit of kinds of EMU at start

由图 1 和图 2, 则有:

$$V_{in} = U - nI_{ac}Z_s \quad (1)$$

由式(1)知, n 台机车网侧阻抗压降是 1 台机车的 n 倍。忽略四象限变流器的损耗, 其输入、输出功率相等, 即有瞬态平衡方程式(2)。

$$\begin{cases} u_{ac}i_{ac} = i_d u_{dc} \\ U \cdot nI_{ac} - (n^2Z_s + nZ_n)I_{ac}^2 - U^2Z_c = \frac{nu_{dc}^2}{Z_c} + nu_{dc}i_{load} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: $Z_s = R_s + sL_s$, $Z_n = R_n + sL_n$, $Z_{dc} = (sL_2 + \frac{1}{sC_2}) //$

$\frac{1}{sC_d}$ 。

设 $x = X + \Delta x$, 其中 X 为稳态量, Δx 为扰动量, 且扰动量远小于稳态量。根据赫尔维茨稳定判据中系统的特征根方程式^[7], 可令式(2)中网侧电流 I_{ac} 和直流侧电压 u_{ac} 为

$$\begin{cases} I_{ac} = I'_{ac} + \Delta I_{ac} \\ u_{ac} = u'_{ac} + \Delta u_{ac} \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2), 并经过线性化处理并忽略扰动量的高次项^[7], 则有:

$$U\Delta I_{ac} - 2(nZ_s + Z_n)I'_{ac}\Delta I_{ac} = \frac{2u'_{dc}\Delta u_{dc}}{Z_{dc}} + i_{load}\Delta u_{dc} \quad (4)$$

根据式(4), 可得:

$$G_1 = \frac{\Delta u_{dc}}{\Delta I_{ac}} = \frac{[U - 2(nZ_s + Z_n)I'_{ac}]Z_{dc}}{2u'_{dc} + i_{load}Z_{dc}} \quad (5)$$

为了使中间直流电压 u_{dc} 稳定于给定值 u_{dc}^* , 一般用 PI 调节器作为稳定控制器, 则有:

$$G_2 = \frac{u_{dc}^*}{u_{dc}} = K(1 + \frac{1}{sT})G_1 \quad (6)$$

式(6)是直流电压环节的传递函数, 其控制系统结构如图 3 所示。

由图 3 可以得出直流电压环节的闭环传递函数为

$$G_3 = \frac{G_2}{1 + G_2} \quad (7)$$

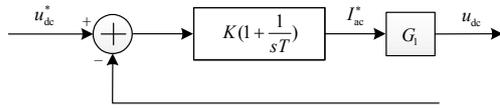


图3 直流电压环节控制系统结构图

Fig. 3 DC link voltage control system structure

根据式(7)可以得出该控制系统的特征根方程为

$$k_4 s^4 + k_3 s^3 + k_2 s^2 + k_1 s + k_0 = 0 \quad (8)$$

式(8)中:

$$\begin{cases} k_4 = 2TL_2 C_2 (u'_{dc} C_d - KI'_{ac} L_n - KnI'_{ac} L_s) \\ k_3 = TL_2 C_2 (i_{load} + KU) - 2KL_2 C_2 n(TI'_{ac} R_n - I'_{ac} L_s - TI'_{ac} R_s - I'_{ac} L_n) \\ k_2 = 2Tu'_{dc} (C_d + C_2) - 2KTI'_{ac} (nL_s - L_n) + KL_2 C_2 \cdot (U - 2nI'_{ac} R_s - 2I'_{ac} R_n) \\ k_1 = K TU - 2KI'_{ac} (nL_s - L_n - TnR_s - TR_n) + Ti_{load} \\ k_0 = K(U - 2I'_{ac} R_n - 2nI'_{ac} R_s) \end{cases}$$

由赫尔维茨稳定判据,若控制系统特征根方程的各项系数均大于零,则控制系统稳定。

根据某动车所基地的实际位置,相邻牵引变电所、进线高压电缆、传输线长度以及实际动车组四象限整流器器件参数,提取车网系统各组件参数,如表1所示。

表1 车网系统组件参数

Table 1 Component parameters of traction network and EMU system

系统组件	参数取值	系统组件	参数取值
输入电压 u	1 500 V/50 Hz	中间直流电压	3 000 V
输入电流 i_{ac}	460 A	二次滤波电感 L	0.84 mH
供电变压器及线路折算电感	3.8 mH	二次滤波电容 C_2	3.0 mF
车载变压器电感	2.3 mH	支撑电容 C_d	3.3 mF

将表1中系统参数代入式(8),可以计算“车-网”耦合系统特征方程的各项系数均大于零,满足赫尔维茨稳定判据,所以该系统是稳定的。

在控制系统满足赫尔维茨稳定判据的条件下,可以用小增益原理进行外环电压控制系统稳定性的分析^[8]。如图4所示是一个不确定控制系统, $H(s)$ 为标称量, Δs 为扰动量,根据小增益定理,如果 $H(s)$ 和 Δs 都是稳定的,那么只要式(9)成立,则这个反馈系统是稳定的。

$$\begin{cases} |H(j\omega)\Delta(j\omega)| < 1 \\ \omega \in [0, \infty] \end{cases} \quad (9)$$

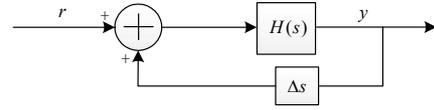


图4 小增益原理图

Fig. 4 Principle diagram of the small gain

根据小增益定理可以推导四象限变流器电压环外环控制系统稳定的充分条件为

$$|G_2| < 1 \quad (10)$$

根据式(9)、式(10),可以得到:

$$G_1 = \frac{KI'_{ac} (L_n + nL_s)}{u'_{dc} C_d} < 1 \quad (11)$$

从式(11)可得,当系统参数一定时,机车四象限变流器控制系统的稳定性受限于机车数量 n 和 PI 调节器的参数 K ,当机车数量 n 变化时,适当调节 K 可仍保证系统的稳定性。将表1的系统组件参数代入式(8)和式(11),可得车网系统稳定时的参数匹配关系如表2所示。

表2 车网系统稳定的参数匹配

Table 2 Parameter matching for the stability of the traction network and EMU system

机车数量/台	PI 调节器的参数 K	系统参数 R_s/Ω
≤ 6	1	< 0.1906
7	< 0.9621	0.012
< 120	< 0.0621	0.012

由上可知,牵引网参数与整流变压器控制参数的不匹配,将影响“车-网”耦合系统稳定性,导致车网发生振荡现象,严重时使动车组出现牵引封锁。该结论与目前国内学者对HXD1型电力机车运行测试结果分析一致,即低频振荡可能是由变流器的控制参数与牵引网的系统参数不匹配造成的^[9]。

2 高速铁路车网耦合系统建模

2.1 牵引网全并联 AT 链式网络模型

高速铁路牵引网存在多导体传输线的平行分布,结构非常复杂。多导体传输线主要由接触线、承力索、正馈线、钢轨、保护线和贯通地线组成。由于导线数目较多,实际应用中,大多采用降阶的方法^[9],然而线路参数的微变却可引起模态幅值的较大变化^[10],可见牵引网的精确建模不容忽视。

本文将复线 AT 牵引网等效为 10 根导线,分别为:上、下行接触网、钢轨、正馈线、保护线、贯通地线。高速铁路牵引网的各导线彼此平行分布,构成高铁链式网络电路:通过对牵引网进行特定长度切割,在保证其分布参数特性前提下,建立链式

网络模型。该链式网络模型由串联子网和并联支路两部分构成：将牵引网分割为若干个串联子网，子网的串联支路由平行多导体传输线构成，如图 5 所示；以电流支路作断面，在其两侧用 π 型等效电路表示每个子网的多根传输线如图 6 所示，计算方法可参考文献[11-12]。

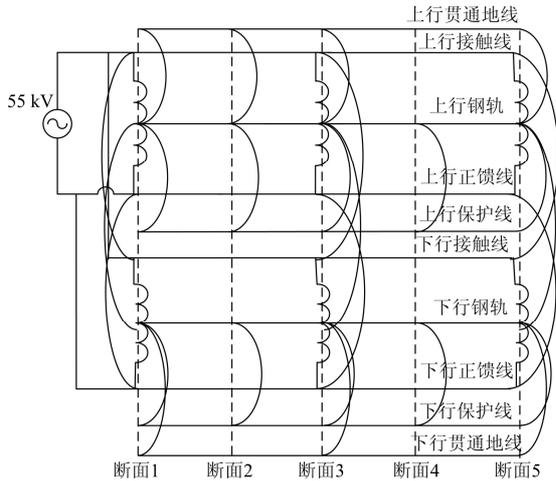


图 5 全并联 AT 牵引网的断面划分

Fig. 5 Section divided of all-parallel autotransformer traction

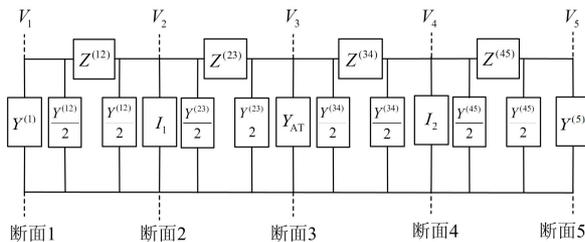


图 6 牵引网切割后的等效电路

Fig. 6 Section of traction network equivalent circuit

在图 6 中，断面 1 上 $Y^{(1)}$ 表示牵引变电所，断面 2、4 上 I_1 、 I_2 表示动车组电流，断面 3 上 Y_{AT} 表示自耦变压器，断面 5 上 $Y^{(5)}$ 表示牵引网末端，断面间的平行多导线以 π 型电路等效，从而将各支路阻抗及导纳用 $m \times m$ 阶矩阵表示， m 为牵引网平行导体的数目。假设将牵引网切割成 N 个部分，对串联子网和并联支路建模，得到总体链式网络形式，如图 7 所示。

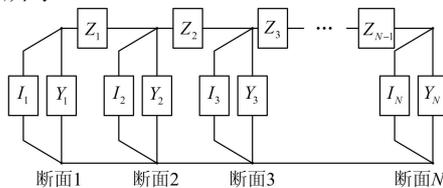


图 7 牵引网总体链式电路模型

Fig. 7 Overall chain circuit model of traction network

2.2 动车组四象限整流器建模

动车组 PWM 整流器具有能量双向流动、直流环节电压恒定、网侧电流谐波含量低等优点，因此要求单相 PWM 整流器控制系统满足维持整流器直流侧电压恒定，整流器交流侧电流能够快速跟踪电流指令的要求^[13]。目前对于单相 PWM 整流器控制方法主要有间接电流^[14]、直接电流控制两种。直接电流控制可分为^[15-17]双闭环、状态反馈、反馈线性化、滑模控制等，可降低控制性能对系统参数的敏感度。本文使用瞬态直接电流控制方法，基于瞬态直接电流控制的 CRH3 型动车组整流器模型如图 8 所示。图中端口 1、2 分别与牵引网仿真模型断面 2 或者断面 4 上行线接触线及钢轨连接，从而实现高速铁路车网的联合仿真。

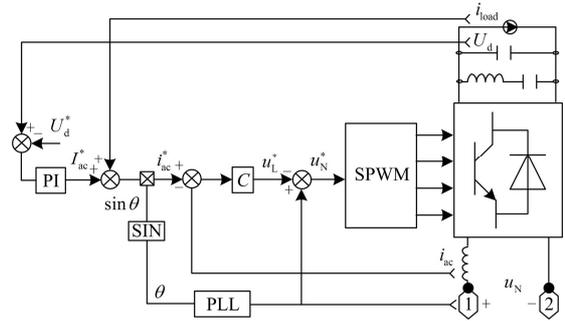


图 8 基于瞬态直接电流控制的四象限整流器电路

Fig. 8 Four quadrant rectifier circuit based on the transient current control

因此，可以在 Matlab/Simulink 中搭建“车-网”模型，如图 9 所示。

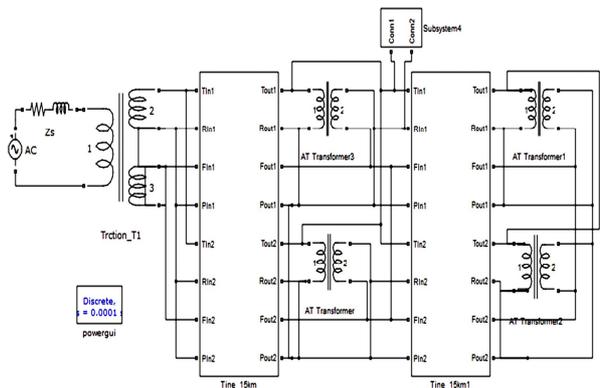


图 9 “车-网”耦合系统仿真模型

Fig. 9 Simulation model of high-speed railway traction network and EMU coupling system

2.3 “车-网”系统振荡电压仿真

在图 9 动车组位置增加动车组台数至 6 台，“车-网”系统网压出现振荡，如图 10 所示。

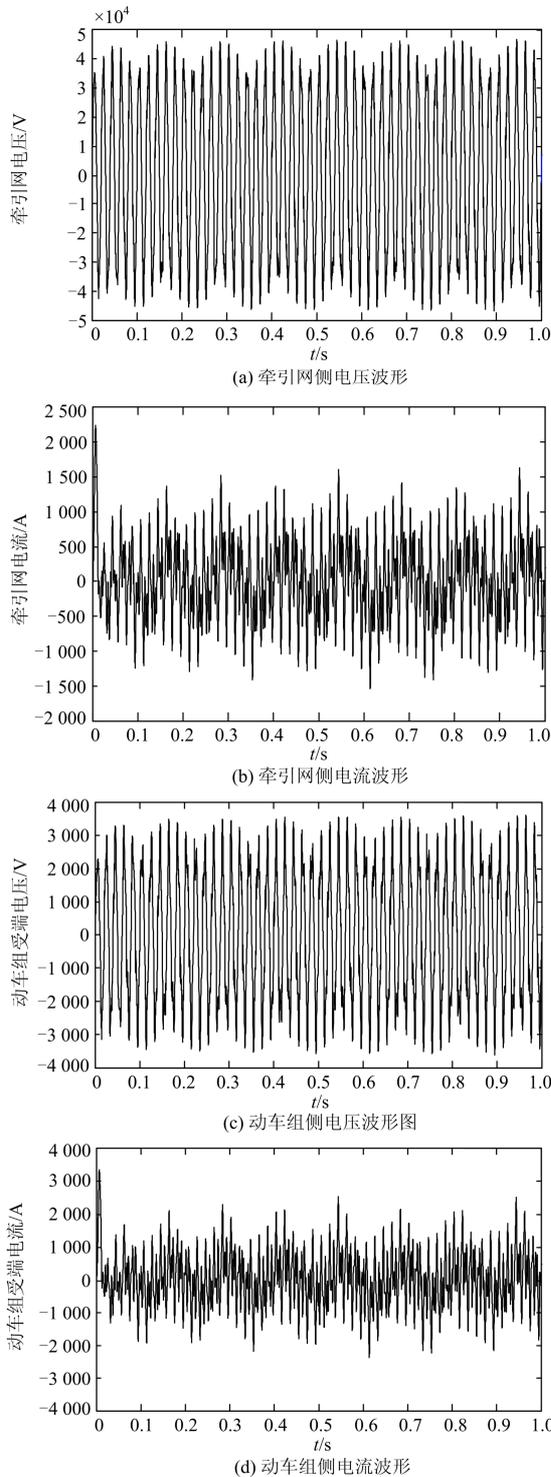


图 10 6 台动车组接入时网侧电压电流波形图

Fig. 10 Voltage and current waveforms of 6 EMU input

由图 10 可以看出，网侧电压/电流出现低次频率调制信号，网侧电压峰值在 29.8~46 kV 波动。受端电压、电流也出现振荡现象，导致四象限整流器工作失败，严重时将导致动车组出现牵引封锁故障。

3 “车-网”系统网压振荡模态分析

为更好地研究高速铁路车网耦合系统低频振荡现象机理，本文将采用模态分析方法分析低频振荡时电压、电流信号，提取幅值、频率等模态特征参数。

3.1 低频振荡模式的方法

目前分析实测数据、识别低频振荡模式的方法较多，本文将采用 FFT、短时傅里叶变换(STFT)、多重信号分类(Multiple Signal Classification)法、小波算法、Prony 算法^[18]等 4 种方法综合对比分析“车-网”系统网压低频振荡现象。

1) 短时傅里叶变换

短时傅里叶变换将时域和频域结合起来描述信号的时频联合特征，其基本思想是：把信号划分成很多小的时间间隔，用傅里叶变换来分析每一个时间间隔，以便确定该时间间隔内存在的频率。其定义为

$$S(\omega, t) = \int_R f(t)g^*(t - \tau)e^{-j\omega\tau} dt \quad (12)$$

式中：“*”表示复共轭； $g(t)$ 是有紧支集的函数； $f(t)$ 为待分析的信号。

短时傅里叶变换在一定程度上克服了传统傅里叶变换所不具有的时域局部分析能力，但窗函数 $g(t)$ 确定后，矩形窗口的形状就确定了。

2) MUSIC 法

Schmidt 提出了一种具有较高分辨能力的多重信号分类方法^[19]，其基本思想是将任意阵列输出数据协方差矩阵进行特征分解，从而得到与信号分量相对应的信号子空间和与信号分量相正交的噪声子空间，然后利用这两个子空间的正交性来估计信号的特征参数。

如果有 K 个信号入射到阵列天线上，则 M 元阵列天线接收到的输入数据向量可以表示为

$$x(t) = \sum_{k=0}^{K-1} a(\phi_k) s_k(t) + n(t) \quad (13)$$

式中： $s(t)$ 是入射信号矢量； $n(t)$ 是空间加性白噪声矢量； $a(\phi_k)$ 是第 k 个信号的波达方向对应的 $M \times 1$ 维阵列导向矢量。

噪声子空间可如下构造为一个包含所有对应于噪声的特征向量的矩阵^[20]。

$$V = [q_K, q_{K+1}, \dots, q_{M-1}] \quad (14)$$

则当 ϕ 为信号的 DOA 时， $a^H(\phi) V_n V_n^H a(\phi) = 0$ 成立，即 $a(\phi)$ 和 V 的正交性使得上式达到最小值。

因此，MUSIC 空间谱定义为

$$P_{\text{MUSIC}}(\phi) = \frac{1}{a^H(\phi_k) V_n V_n^H a(\phi)} \quad (15)$$

空间谱中的 K 个最大峰值就对应着入射到阵列上的 K 个信号的波达方向 ϕ_i 。

3) 小波算法

小波变换是一种信号的时间-尺度分析方法, 它具有多分辨率分析的特点, 并且在时频两域都具有表征信号局部特征的能力。

设函数 $\psi(t) \in L^2(R)$, 它的傅里叶变换 $\psi(\omega)$ 满足条件^[20]:

$$\int_R \frac{|\psi(\omega)|}{\omega} d\omega < \infty \quad (16)$$

则称 $\psi(t)$ 为一个基本小波或小波母函数。把小波母函数在时域上进行伸缩和平移: 设伸缩因子为 a 、平移因子为 b , 可以得到小波基函数 $\psi_{a,b}(t) = a^{-1/2} \psi((t-b)/a)$ 。则任意函数 $f(t)$ 的连续小波变换为

$$WT_f(a,b) = \langle f(t), \psi_{a,b}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_R f(t) \psi_{a,b}(t) dt$$

由小波变化定义可知, 小波变换与傅里叶变换不同, 小波基的 a 、 b 两个参数使窗口变化但窗口面积固定不变, 是一种变分辨率的时频联合分析方法。

在实际应用中, 连续小波必须加以离散化。离散化是针对连续尺度参数 a 和连续平移参数 b 的。通常将小波参数离散化为 $a=a_0^j$, $b=ka_0^j b_0$, 则有离散化小波函数定义为

$$\psi_{j,k}(t) = a_0^{-j/2} \psi((t - ka_0^j b_0) / a_0^j) \quad (17)$$

离散化小波变换系数则可表示为

$$C_{j,k} = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{j,k}^*(t) dt = \langle f, \psi_{j,k} \rangle \quad (18)$$

本文取 $a_0=2$, $b_0=1$, 即其只是对尺度参量进行离散化, 在时间域上的平移量依然保持着连续的变化, 介于连续小波和离散小波之间。

4) Prony 算法

快速傅立叶变换和小波分析都存在难以提取衰减特征的局限性。Prony 算法^[20]采用一个指数函数的线性组合来分析等间距采样数据, 可以方便地估算给定信号的频率、衰减因子、幅值和初相, 因而可以直接利用实测数据通过 Prony 算法进行低频振荡模式的分析。

设有 N 个原始数据 $x(n)$, 其中 $n=0 \sim N-1$, 选用的模型为

$$\hat{x}(n) = \sum_{i=1}^p b_i z_i^n \quad (19)$$

式中: $b_i = A_i \exp(j\theta_i)$; $z_i = \exp[(\alpha_i + j2\pi f_i)\Delta t]$; $\hat{x}(n)$ 为

$x(n)$ 的近似值; A_i 、 f_i 、 θ_i 、 α_i 分别为振荡的幅值、频率、初相角和衰减因子; Δt 为采样间隔。

通过常系数线性差分方程为

$$\hat{x}(n) = - \sum_{i=1}^p a_i x(n-i) \quad (20)$$

则式(19)是式(20)的齐次解, 设估计误差为 $e(n) = x(n) - \hat{x}(n)$, 求解式(20)得:

$$x(n) = - \sum_{i=1}^p a_i x(n-1) + u(n) \quad (21)$$

式中, $u(n) = \sum_{i=0}^p e(n-i)$, 求解式(21)就可得到 A_i 、 f_i 、 θ_i 、 α_i 的线性估计。 $x(n)$ 可以看作是噪声 $u(n)$ 激励一个自回归(Autoregressive Model, AR)模型产生的输出信号。求解 AR 模型的正则方程可求得差分方程的系数 a_i , 再通过下式多项式求根得到 z_i :

$$\sum_{i=0}^p a_i z_i^{p-i} = 0 \quad (22)$$

通过奇异值分解, 得到归一化奇异值 $\bar{\sigma}_{kk}$ 以确定阶数 p ^[21]。将 z_i 代入式(19)可得到振荡频率和衰减因子分别为

$$\begin{cases} f_i = \arctan[\text{Im}(z_i)/\text{Re}(z_i)] / 2\pi\Delta t \\ \alpha_i = \ln|z_i| / \Delta t \end{cases} \quad (23)$$

3.2 “车-网”系统网压振荡模态分析

由 3.1 节, 本文先采用 FFT、MUSIC 频率估计方法进行振荡信号的主导振荡参数辨识, 采样频率为 10 000 Hz, 数据长度为 9 000, 分析结果如图 11 所示。

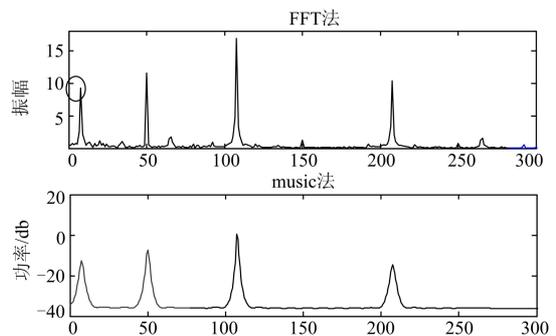


图 11 动车组侧电流 FFT、MUSIC 频谱分析

Fig. 11 FFT and MUSIC spectrum analysis to EMU side current

由图 11 可知, 相比 FFT 分析结果, MUSIC 法的频率提取效果较好, 这是因为采用傅里叶变换分析信号时会带进高频干扰, 使得信号的频率成份较多。从 FFT、MUSIC 法分析结果可知, 车网发生低频振荡时, 动车组侧振荡电流信号出现了除 50 Hz 以外的其他频率成份, 包括 7.5 Hz、107.5

Hz、207.5 Hz，即“车-网”振荡时网侧电压存在低频成份。

为进一步分析，在FFT频率估计基础上，对采样信号进行短时傅里叶变换、小波变换时频分析，描述信号的时频联合特征。采样周期取0.1 ms，采样时间为0.9 s，STFT窗函数取hamming，小波函数取cmor3-5，分析结果如图12所示。

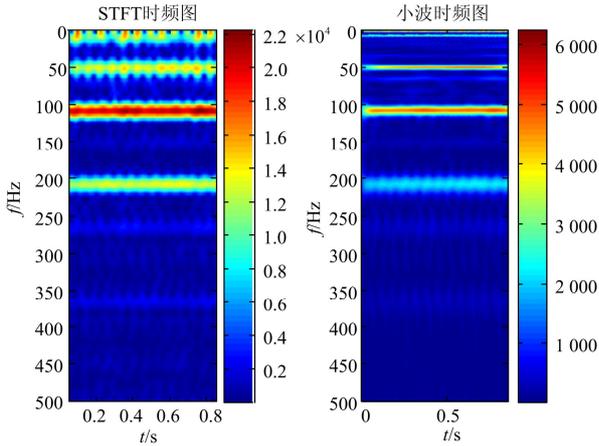


图 12 动车组侧电流时频分析

Fig. 12 Time-frequency analysis to EMU side current

由图 12 可知，两种时频图分析同样存在除 50 Hz 以外的高、低频分量，分析结果与 FFT 和 MUSIC 法分析基本一致，进一步佐证了“车-网”低频振荡现象。同时可以发现，STFT 时频图在频域上的分辨率随选定的窗函数而固定，而小波分析则具有多分辨率特点，在低频信号时频率分辨率高。因此，可以采用小波分析得到低频时信号的时频分析，如图 13 所示。

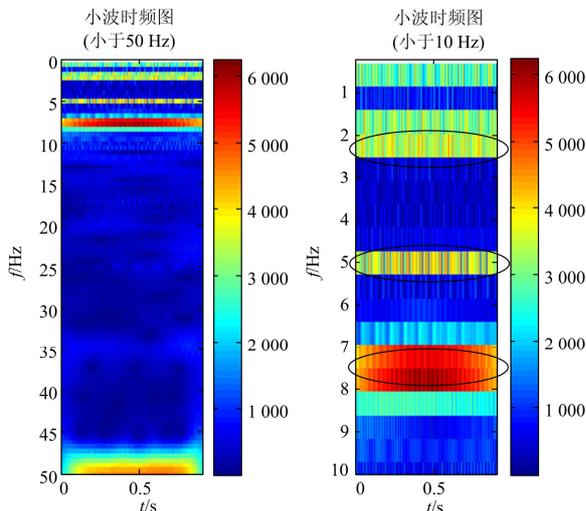


图 13 动车组侧电流小波时频分析(低频)

Fig. 13 Wavelet time-frequency analysis to EMU side current (low frequency)

由图 13 可知，车网振荡网侧电压信号中 50 Hz 以下的低频成份主要是 2.2 Hz、5 Hz、7.5 Hz 左右的分量。且由时频图颜色知低频成份主要为 7.5 Hz；而 2.2 Hz 和 5 Hz 可能是由于选择的小波基 cmor3-3 不具有对称性引起，但其能量较少，可忽略。

同时，对网侧电压信号进行 prony 分析时，采样周期取 0.1 ms，采样时间为 0.9 s，模型阶数取 150，分析结果如表 3 所示。

表 3 基于 Prony 分析的网侧电压信号模态分析

Table 3 Modal analysis of traction side voltage signal

based on Prony method			
衰减因子/(1/s)	频率/Hz	幅值/V	相位/°
-0.200	107.6	392.5	11.8
-2.200	50.0	302.3	95.2
-2.351	2.500	299.2	180
-0.500	207.5	238.9	154.9
-491.7	1.071	195.5	154.9
-5.300	7.5	182.6	94.0
-368.2	1.410	119.7	115.6

由表 3 可以看出，Prony 分析出的网侧电压频率成份有 7.5 Hz、50 Hz、107.6 Hz、207.6 Hz 等，其中的 2.500 Hz、1.071 Hz 及 1.410 Hz 频率成份存在较大的衰减因子，将不会稳定存在。

综合图 11~图 13 以及表 3 可知，网侧电压的频率成份除了 50 Hz、还存在 7.5 Hz、107.5 Hz、207.5 Hz 等频率成份，主要由于车网级联耦合系统中非线性电路的增多导致振荡电压频率成份复杂。综合 FFT、MUSIC、STFT、小波、Prony 等几种分析方法的基本原理和分析结果，发现 Prony 分析方法可以较好地辨识出频率参数，辨识到车网振荡时具有低频信号成份。该信号对网侧电压及中间直流电压的调制作用将直接导致动车组出现“牵引封锁”。

针对以上现象，分析认为主要是动车组四象限整流器闭环控制采用 PI 调节造成的。双闭环控制策略实质是电压外环和电流内环的紧耦合作用：若输出的不稳定电压量引入到闭环回路中，将会引起输入电流的畸变，且负载越轻输入电流畸变越严重，从而引发输出电压持续的振荡。

4 结论与措施

结合高铁车网低频振荡产生的现场环境，本文基于 Matlab/Simulink 搭建全并联 AT 牵引网链式网络模型与动车组的耦合系统，仿真研究结果与理论分析结果一致，验证了理论分析模型的准确性。通过理论研究和仿真分析得到如下结论，并给出相应

的措施和建议。

1) 本文实现牵引网与动车组模型的互联, 仿真再现了低频振荡现象, 验证了理论分析的正确性。因此, 车网低频振荡过电压的防治可结合文中给出的车网耦合系统电压低频振荡条件, 通过调节动车组四象限整流器闭环系统 PI 控制器参数; 或调节同一供电臂相同位置处运行的动车组台数来实现。此外, 还可以采用一些其他方法抑制牵引供电系统的低频振荡, 包括改变牵引变流器系统的控制策略、在机车主变压器上增设 RC 滤波装置滤除四象限整流器产生的振荡电流、调整列车运行方式改变并联机车的输入阻抗等。

2) 采用 FFT、MUSIC 算法、小波算法及 Prony 分析法对振荡电压模态分析, 对比分析结果确定了网侧电压信号中存在的低频信号成份。

参考文献

- [1] 上海南翔开闭所. CRH1067 接触网电压电流测试报告 [R]. 北京: 中国铁道科学研究院研究报告, 2010.
- [2] 易建波, 黄琦, 丁理杰. 提升经验模态分解检测低频振荡模式精度的改进算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 71-72.
YI Jianbo, HUANG Qi, DING Lijie. Research on an improved algorithm to enhance the detection accuracy of low-frequency oscillation modes by empirical mode decomposition[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 71-72.
- [3] MENTH S, MEYER M, WETTINGEN. Low frequency power oscillations in electric railway systems[J]. Elektrische Bahnen, 2006, 104(5): 216-221.
- [4] BRENNAM M, FOIADELLI F, ZANINELLI D. New stability analysis for tuning PI controller of power converters in railway application[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(2): 533-543.
- [5] OETTMEIER M, GORSKIL M, HEISING C H D. Q-optimized multivariable control for a single-phase 50-kW, 16.7-Hz railway-grid representation featuring variable grid parameters[C] // Compatibility and Power Electronics, 2009. CPE'09. IEEE, 2009: 224-231.
- [6] HEISING C, OETTMEIER M, STAUDT V, et al. Improvement of low-frequency railway power system stability using an advanced multivariable control concept[C] // Industrial Electronics, 2009. IECON'09. 35th Annual Conference of IEEE, 2009: 560-565.
- [7] 郑琼林. HXD1 交流传动电力机车谐振原因分析与对策[J]. 变频器世界, 2009, 12(5): 44-47.
ZHENG Qionglin. A probe on causes and solutions of the HXD1 AC locomotive's resonance[J]. The World of Inverters, 2009, 12(5): 41-47.
- [8] 韩智玲, 唐蕾, 李伟. 交流传动电力机车车网电压不稳定的原因分析与解决[J]. 铁道学报, 2011, 33(10): 25-28.
HAN Zhiling, TANG Lei, LI Wei. Causal analysis and resolution of the voltage instability between AC drive electric locomotive and power supply network[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(10): 25-28.
- [9] YANG Y S, ZHOU C J. Adaptive fuzzy stabilization for strict-feedback canonical nonlinear systems via backstepping small-gain approach[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2005, 13(1): 104-114.
- [10] HANMIN L, CHANGMU L, GILSOO J. Harmonic analysis of the Korean high-speed railway using the eight-port representation model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 26(2): 979-986.
- [11] HUANG Zhenyu, CUI Yu, XU W. Application of modal sensitivity for power system harmonic resonance analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 222-231.
- [12] 王斌, 姜晓锋, 黄文, 等. 高速铁路车网耦合下的谐波潮流计算方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 47(17): 15-23.
WANG Bin, JIANG Xiaofeng, HUANG Wen, et al. Harmonic load-flow approach based on train-catenary coupling system of high-speed railway[J]. Power System Protection and Control, 2014, 47(17): 15-23.
- [13] 张杨, 刘志刚. 基于电磁暂态分析的高速铁路牵引网谐波模型及谐波特性分析[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 70-75.
ZHANG Yang, LIU Zhigang. Modeling and characteristic analysis of harmonic in high-speed railway traction network based on PSCAD/ EMTDC platform[J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 70-75.
- [14] 李宏强, 王晓茹, 徐家俊, 等. 车网耦合的牵引供电系统谐波仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 116-122.

- LI Hongqiang, WANG Xiaoru, XU Jiajun, et al. Harmonic simulation analysis of traction power supply system based on train-network coupling system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 116-122.
- [15] WILSON J W A. The forced-commutated inverter as a regenerative rectifier[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1978, 14(4): 335-340.
- [16] JINHWAN J, SUNKYOUNG L, KWANGHEE N. A feedback linearizing control scheme for a PWM converter-inverter having a very small DC-link capacitor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(5): 1124-1131.
- [17] 王辉, 苏小林. Prony 算法的若干改进及其在低频振荡监测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 140-145.
- WANG Hui, SU Xiaolin. Several improvements of Prony algorithm and its application in monitoring low-frequency oscillations in power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 140-145.
- [18] 刘学军, 刘畅, 王景芝. 一种 FFT 法和 MUSIC 法结合的间谐波频率估计[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(5): 37-40.
- LIU Xuejun, LIU Chang, WANG Jingzhi. Inter-harmonic parameter estimation based on FFT and MUSIC[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(5): 37-40.
- [19] HIYAMA T, SUZUKI N, FUNAKOSHI T. On-line identification of power system oscillation modes by using real time FFT[C] // IEEE PES Winter Meeting, Singapore, 2000.
- [20] 李安娜, 吴熙. 基于形态滤波和 Prony 算法的低频振荡模式辨识的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 137-142.
- LI Anna, WU Xi. Research on identifying low frequency oscillation modes based on morphological filtering theory and Prony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 137-142.
- [21] 王铁强, 贺仁睦, 王卫国, 等. 电力系统低频振荡机理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 21-25.
- WANG Tieqiang, HE Renmu, WANG Weiguo, et al. The mechanism study of low frequency oscillation in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 21-25.

收稿日期: 2015-03-18; 修回日期: 2015-05-05

作者简介:

付 莉(1990-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与变电站综合自动化、牵引供电稳定性分析; E-mail: 18121964868@163.com

张桂南(1988-), 男, 博士, 研究方向为高速铁路车网耦合系统稳定性研究;

高仕斌(1963-), 男, 教授, 研究方向为轨道交通牵引供电系统安全、电力系统继电保护与变电站综合自动化。

(编辑 葛艳娜)