

# 计及动车组多种工况的牵引网谐波分析与抑制

朱琴跃<sup>1</sup>, 陈江斌<sup>2</sup>, 谭喜堂<sup>1</sup>, 张有华<sup>1</sup>

(1. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804; 2. 国网杭州供电公司, 杭州 310009)

**摘要:** 采用多导体传输线等效降阶法建立了 CRH2 型动车组和某实际复线自耦变压器(AT)牵引网车网联合仿真模型, 仿真分析了动车组处于固定位置、动态运行、不同工况、不同功率时各种因素对牵引网谐振频率以及谐振点处谐波电流放大倍数的影响规律, 并通过部分实测数据验证了所建模型和分析方法的有效性。最后提出采用 C 型滤波器来抑制谐波电流, 在确保装设滤波器后车网系统达到良好电气匹配的基础上, 给出了滤波器电气参数设计和安装位置选取方法, 并对最佳位置分区所(SP)处加装滤波器后的牵引网谐波电流放大抑制效果进行了仿真验证。

**关键词:** 牵引网谐波特性; 动车组工况; 谐波抑制; 滤波器  
**中图分类号:** TM712 **文献标志码:** A

## Analysis and Suppression on Harmonic of Traction Net Considering Various Conditions for Electric Motor Units

ZHU Qinyue<sup>1</sup>, CHEN Jiangbin<sup>2</sup>, TAN Xitang<sup>1</sup>, ZHANG Youhua<sup>1</sup>

(1. School of Electronics and Information, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. State Grid Hangzhou Power Supply Company, Hangzhou 310009, China)

**Abstract:** The train-net coupling simulated model combined CRH2 type high-speed electric motor units (EMUs) with the certain actual double-track auto-transformer (AT)-structure traction net is built by multi-conductor transmission line equivalent order reduction method. With the model, the influences of various factors on resonance frequency and harmonic current amplification factor of traction net when EMUs run in fixed positions, dynamic positions, different conditions and different power are analyzed. The simulation results are verified by the measured data. In the end, C-type filter is proposed to suppress the harmonic current, and the methods of parameters design and installation location selection for filter are proposed to make sure the electrical

matching between EMUs and traction nets after filtering. The corresponding suppression effects of traction net harmonic current amplification are also simulated and validated when C-type is installed at satisfied section post (SP).

**Key words:** harmonic characteristic of traction net; condition of electric motor units; harmonic suppression; filter

近年来,随着我国高速铁路的快速发展,大量交-直-交型高速动车组(electric motor units, EMUs)投入运行。作为典型的时变非线性负荷, EMUs 在运行过程中向牵引网注入高次谐波,在特定频率下将导致牵引网产生谐波谐振<sup>[1-2]</sup>,由此引起的谐波电流放大则会引发 EMUs 避雷器击穿、邻近通信线路受到干扰、谐波损耗增大、继电保护装置误动作和电器设备绝缘损坏等一系列问题<sup>[3]</sup>。同时,不同型号的 EMUs 具有不同的非线性特征,相应的在牵引网侧的谐波谐振特性也各有不同。因此,如何准确分析牵引网谐波电流特性并抑制其谐波的发生,是急需解决的主要技术难题。

迄今为止,国内外专家学者对高速铁路牵引网谐波电流放大特性(harmonic current amplification characteristic, HCAC)进行了研究和分析,取得了一定成果。然而,既有研究一般均将 EMUs 视为理想谐波电流源模型且通过注入等幅值谐波电流方式来分析牵引网参数对 HCAC 的影响规律,而对 EMUs 运行于各种不同工况和模式时牵引网 HCAC 的影响未作过多的研究,由此而得的分析结果与实际情况相距甚远<sup>[4-5]</sup>。同时,现有研究成果中对牵引网谐波谐振的抑制研究仍处于初步阶段,部分文献虽然提出了无源滤波器的抑制方案<sup>[6-7]</sup>,但未从加装滤波器后综合考虑车-网电气参数匹配情形下给出滤波器的参数设计方法以及相应的抑制效果。

收稿日期: 2015-05-12

基金项目: 国家自然科学基金(51177109)

第一作者: 朱琴跃(1970—),女,工学博士,副教授,主要研究方向为电力牵引与传动控制。E-mail: zqymelisa@tongji.edu.cn

通讯作者: 陈江斌(1990—),男,工学硕士,主要研究方向为电力牵引与电能质量在线监测。E-mail: chenjiangbinzhz@gmail.com

为深入研究并分析 EMUs 运行于各种不同工况和模式时对牵引网 HCAC 的影响, 本文根据 CRH2 型动车组和某实际 AT 牵引网参数建立了车网联合仿真模型, 基于此对 EMUs 处于固定位置、EMUs 动态运行过程中、以及 EMUs 处于不同运行工况和功率时不同因素对牵引网 HCAC 的影响规律进行了研究; 同时, 进一步对谐波电流放大的抑制方法进行了研究和仿真验证。

### 1 牵引网谐波电流放大原理

EMUs 在运行过程中产生的谐波电流将注入牵引网, 当某次谐波的频率与牵引网参数相匹配时系统将发生谐波谐振, 主要表现为牵引网谐波电流放大。牵引网是单相供电系统, 目前在分析谐波电流放大时普遍采用图 1 所示的 T 型等效电路<sup>[4]</sup>。图中 SS 是牵引变电所; SP 是分区所;  $I_T$  为 EMUs 注入牵引网的等效电流;  $I_1$  和  $I_2$  分别为流向 SS 和 SP 方向的等效电流;  $L_1$  和  $L_2$  分别为 EMUs 距 SS 和 SP 的距离;  $Z_{T1}$ 、 $Z_{T2}$ 、 $Y_{T1}$ 、 $Y_{T2}$  为 T 型电路参数;  $Z_1$  和  $Z_2$  分别为 EMUs 位置处向 SS 和 SP 方向看去的牵引网总阻抗;  $Z_{SS}$  为系统阻抗。

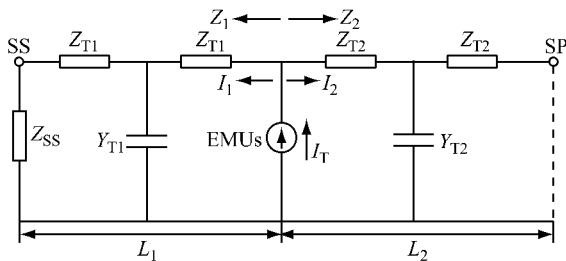


图 1 牵引网 T 型等效电路

Fig. 1 T-type equivalent circuit of traction net

根据均匀传输线理论可求得 T 型等效电路中的参数<sup>[8]</sup>, 由此可得牵引网谐波电流放大倍数为<sup>[9]</sup>

$$K = \frac{I_x}{I_1} = \frac{\cosh \gamma L 2(Z_{SS} \sinh \gamma x + Z_c \cosh \gamma x)}{Z_{SS} \sinh \gamma L + Z_c \cosh \gamma L} \quad (1)$$

其中,  $I_x$  为距离 SS  $x$  处牵引网的电流;  $Z_c$  为线路特性阻抗,  $Z_c = \sqrt{Z_0/Y_0}$ ;  $\gamma$  为线路传播常数,  $\gamma = \sqrt{Z_0 \cdot Y_0}$ ;  $Z_0$ 、 $Y_0$  分别为牵引网 1 km 单位长等值阻抗和导纳;  $L$  为牵引网总长度。

由式(1)可知, 牵引网长度  $L$  及其单位阻抗和导纳、系统阻抗  $Z_{SS}$  和 EMUs 位置  $L_2$  都将影响牵引网 HCAC, 且当分母为 0 时牵引网将发生谐振, 若系统阻抗为  $Z_{SS} = j\omega L_{SS}$ , 则近似计算可得牵引网谐振频率

$$f = 1/(2\pi \cdot \sqrt{L_{SS} \cdot C}),$$

其中  $C$  为牵引网等效电容。

### 2 车网仿真模型

#### 2.1 牵引网仿真模型

图 2 为某实际复线 AT 牵引网示意图, 主要由保护线 PW、正馈线 PF、承力索 MW、接触线 CW 和钢轨  $R_{11} \sim R_{22}$  构成。根据该牵引网建立仿真模型时, 由于其中导线数目较多, 为简化计算并提高仿真速度, 首先采用多导体传输线等效降低法<sup>[10]</sup>将上行 MW、CW 合并为上行 CW, 下行 MW、CW 合并为下行 CW, 上下行 PW、贯通地线和四根钢轨合并为一根钢轨, 从而将牵引网仿真模型简化为 5 导线等效电路。接着根据卡松理论分别计算各导线对地的自阻抗、自逆电容以及各导线之间的互阻抗、互逆电容<sup>[3, 11]</sup>, 由此可得牵引网每 1km 单位长度的等效阻抗和等效电容矩阵, 在此基础上便可建立单位长度牵引网仿真模型, 最终进行扩展使得整个牵引网仿真模型。

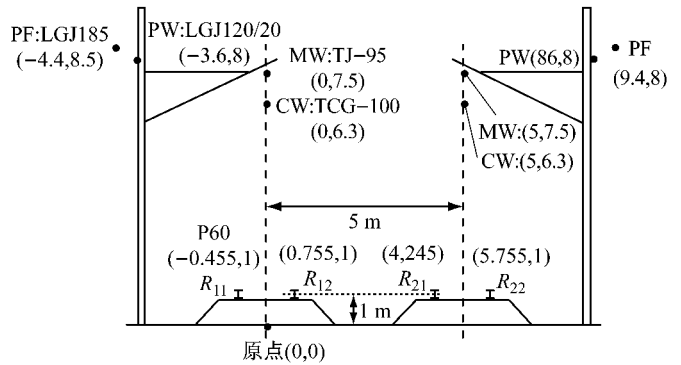


图 2 全并联 AT 牵引网示意图

Fig. 2 Diagram of all-parallel AT traction net

#### 2.2 EMUs 仿真模型

本文 EMUs 仿真模型主要针对 CRH2 型动车组牵引传动系统而建, 主电路拓扑及其控制策略以及仿真参数均与实际系统一致<sup>[12]</sup>, 仿真时一台牵引变压器带 4 台牵引电机, 整个 EMUs 共有 16 台牵引电机。根据所建模型仿真可得 EMUs 处于牵引和再生制动工况时网侧电流波形和相应的频谱分析如图 3 所示, 以及不同额定功率时处于牵引和再生制动工况下的网侧电流总谐波畸变率 (total harmonic distortion, THD) 的仿真结果见表 1。

由图 3a 和 3b 可以看出 EMUs 在牵引和再生制动工况下均能够实现单位功率因数运行; 而由图 3c 和 3d 可知, 在两种工况下网侧电流谐波分布规律一致, 低次谐波主要为 3、5、7、9 次, 高次谐波主要分布

在开关频率的偶数倍附近( $50 \pm 5$  和  $100 \pm 5$  的奇次),这与文献[2]中的理论分析结果相一致;同时由表 1 可知,在两种工况下,网侧电流  $I_{THD}$  均随着 EMUs 额定功率的增大而逐渐减小,但制动工况下电流  $I_{THD}$  明显大于牵引工况,这也与 EMUs 实际运行情况相吻合,由此验证了前文所建模型的正确性。

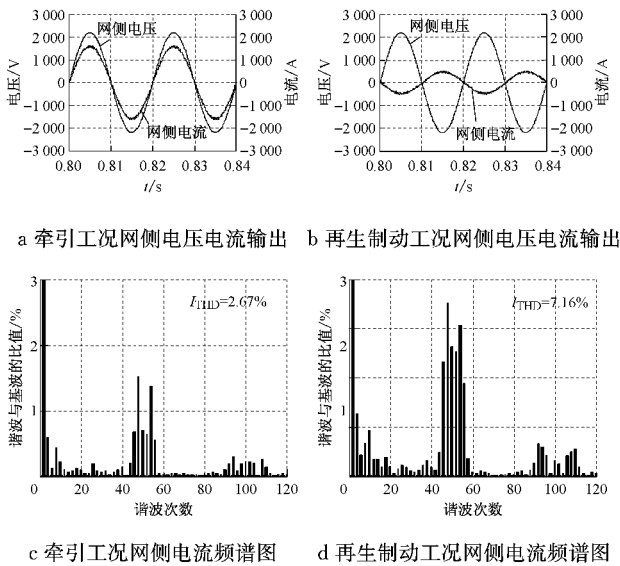


图 3 不同工况下网侧信号输出

Fig.3 Power grid-side signal output under different conditions

表 1 不同功率下网侧电流总谐波畸变率

	功率/MW			
	1.2	2.4	3.6	4.8
牵引	7.51%	4.52%	3.36%	2.79%
制动	11.57%	7.28%	4.13%	3.14%

### 3 多种工况的牵引网 HCAC 仿真分析与验证

为了全面考察车-网系统中 EMUs 运行于不同工况对牵引网 HCAC 的影响,本文根据第 2 节建立的车-网模型,对以下 3 种情形进行研究和分析。

#### 3.1 EMUs 位置固定时牵引网长度对 HCAC 的影响

目前,高速铁路牵引网供电臂长度一般为 20~50 km,因此本文对牵引网长度分别为 50、40、30 和 20 km,且 EMUs 固定位于牵引网末端时牵引网各处的 HCAC 进行仿真分析;同时假设 EMUs 的额定功率为 4.8 MW,且为了便于描述,将 SS 处标记为牵引网长度的起点。相应的仿真结果如表 2 和图 4 所示,其中表 2 为不同牵引网长度所对应的谐波电流谐振情况,图 4 则显示了  $L=40$  km 时牵引网各处

的谐波电流放大情况。表 2 中 pu 代表的是工频 50 Hz 的倍数。

表 2 不同牵引网长度谐波电流放大情况

Tab.2 HCAC of different length of traction net						
长度/km	谐振频率/pu	与 SS 的距离/km	电流放大倍数			
50	20	62	0	30	32	27
40	25	75	0	25	17	24
30	31	95	0	20	30	16
20	41	0	21			

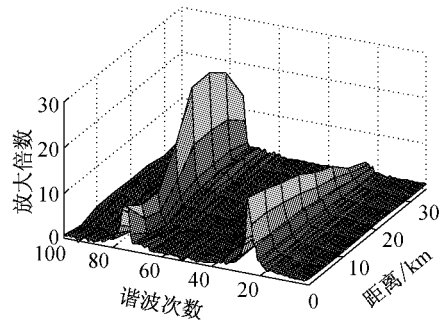


图 4 牵引网不同位置处的 HCAC ( $L=40$  km)  
Fig.4 HCAC of different positions for traction net ( $L=40$  km)

对表 2 和图 4 分析可知:当 EMUs 处于某一固定位置时,牵引网谐波谐振频率取决于牵引网长度,即一旦牵引网长度确定,相应的谐振点位置及其谐振频率大小也随之确定;随着牵引网长度增加,谐振频率逐渐降低,即谐振频率与牵引网长度成反比,这是由于随着线路长度增加其等效电容也增加而导致的。同时,就某一长度牵引网而言,网上不同位置处具有相同的谐波电流放大趋势,且当牵引网长度大于 30 km 时,牵引网会在两种不同频率附近发生谐振,但首次发生谐振时谐波电流均在距离 SS 0 km 处被放大,从而极易引起变电所由于母线电压升高而发生跳闸事故。2009 年合武线在 EMUs 运行过程中先后发生 7 次 SS 主变压器跳闸,造成上下行接触网全部停电<sup>[13]</sup>的原因便在于此。

#### 3.2 EMUs 动态运行时所处位置对 HCAC 的影响

从第 3.1 节分析可知,当 EMUs 处于固定位置时不同牵引网长度下 SS 处谐波电流均严重放大,因此有必要对 EMUs 动态运行过程中 SS 处谐波电流放大情况进行研究。假设牵引网长度  $L=40$  km,EMUs 运行于额定功率,则 EMUs 动态运行过程中处于不同位置时 SS 处 HCAC 的仿真结果如图 5 所示。

由图 5 可知:当 EMUs 动态运行到不同位置时,各自对应的 SS 处谐波电流均在 25 次和 75 次谐波处被放大,这进一步表明牵引网的谐波谐振频率取

决于牵引网长度,而不会随着 EMUs 所处位置的变化而变化;但相应谐振点的谐波电流放大倍数则随着 EMUs 与 SS 距离的增加而逐渐变大。

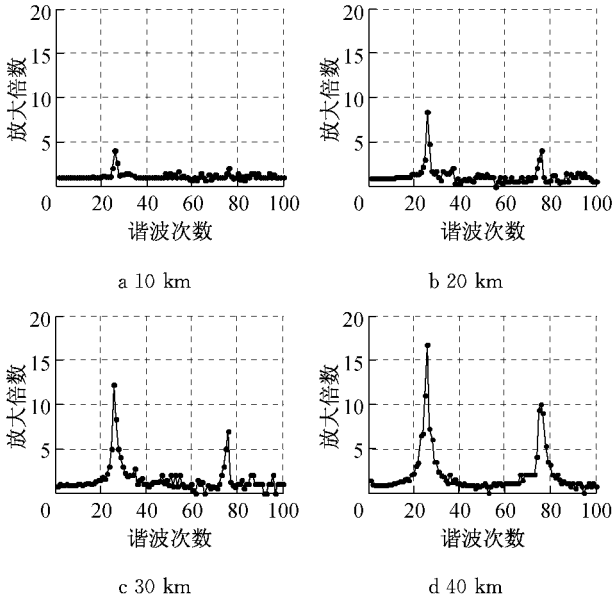


图 5 EMUs 动态运行中处于不同位置时 SS 处的 HCAC  
Fig.5 HCAC of Substation in different positions for EMUs

### 3.3 EMUs 运行工况及额定功率对 HCAC 的影响

为进一步研究 EMUs 处于牵引和再生制动工况以及不同额定功率时对牵引网 SS 处 HCAC 的影响规律,假设牵引网长度  $L=40\text{ km}$ , EMUs 位于牵引网末端,则 EMUs 运行于不同工况和功率下 SS 处 HCAC 的仿真结果见表 3。

表 3 EMUs 运行于不同工况和额定功率时 SS 处的 HCAC  
Tab.3 Substation HCAC of different conditions and rated power for EMUs

功率/MW	谐振频率/pu	电流放大倍数(牵引)	电流放大倍数(制动)
1.2	25/75	16.1/10.1	17.2/10.1
2.4	25/75	16.5/10.5	17.5/10.7
3.6	25/75	16.7/10.3	17.7/10.4
4.8	25/75	17/10.8	17.9/10.6

由表 3 可知:当 EMUs 分别运行于牵引和再生制动工况时,在同一工况下相应谐振点的电流放大倍数基本相同,不会随着 EMUs 功率的变化而变化;但在同一功率下,EMUs 再生制动时的谐波电流放大值要高于其牵引时的对应值,这与表 1 中的仿真结果也基本吻合。

### 3.4 部分实例分析与验证

为了验证 EMUs 运行于各种不同工况和模式时牵引网 HCAC 仿真结果的正确性,本文采用 CRH2 型动车组在沪宁线上测试运行时的部分实测

数据对第 3.1 和 3.3 节的仿真结果进行验证。

图 6 为 EMUs 处于重载运行、牵引功率为 4.8MW 且其运行至距离牵引变电所 40 km 时 SS 处谐波电流实测数据经分析处理后的结果,可见 SS 处谐波电流在 25 和 75 倍频处分别被放大 17.8 倍和 10.3 倍,这与图 4 中 0 km 处牵引网谐波电流放大曲线基本吻合。

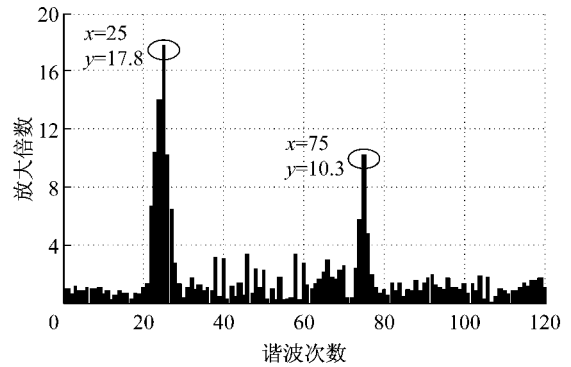


图 6 实际线路 SS 处谐波电流实测数据分析结果  
Fig.6 Result of actually measured data at substation

表 4 则为 EMUs 分别在牵引和再生制动工况下处于不同负载情形且其运行至距离牵引变电所 40 km 时在 SS 处的谐波电流实测数据经分析处理后的结果.由表可知,该牵引网在不同等级负载下牵引时的谐波电流均放大 17 倍左右,而再生制动时则均放大约 18.5 倍,这与第 3.3 节的仿真结果基本吻合,由此初步验证了本文所建模型和谐波电流特性分析方法的正确性。

表 4 不同工况和功率时 SS 处谐波电流实测数据分析结果  
Tab.4 Result of actually measured data at substation in different conditions and rated power for EMUs

功率/MW	谐振频率/pu	电流放大倍数(牵引)	电流放大倍数(制动)
1.2	25/75	17.1/10.6	18.4/11.3
2.4	25/75	16.9/10.2	18.6/11.4
3.6	25/75	17.3/10.9	18.9/11.7
4.8	25/75	17.8/10.3	18.7/11.6

## 4 牵引网谐波电流放大抑制

牵引网谐波抑制方法可归结为两类<sup>[14]</sup>:一是通过改变动车组牵引传动系统控制策略来抑制谐波源;二是通过改变牵引网系统的等效参数来抑制谐波幅值或转移谐振频率.本文主要针对第二种方法采用无源滤波器对牵引网谐波电流放大进行抑制。

### 4.1 滤波器结构设计

在各类无源滤波器中,由于 C 型滤波器具有设

计简单,基波能耗低,且能够对高频谐波进行抑制等特点,故本文采用图 7 所示的低耗能 C 型高通滤波器对牵引网谐波进行抑制.图中, $C_1, C_3$  为电容, $L$  为电感, $R$  为电阻.实际应用中将两组结构完全对称的 C 型滤波器并联装设于接触线(T)、馈线(F)和钢轨(R)之间,当工作时检测到谐波高于阈值时开关关闭, C 型滤波器投入运行,通过改变系统阻抗来抑制牵引网谐波谐振;当谐波小于阈值或者牵引网上无动车时开关断开,滤波器退出运行.

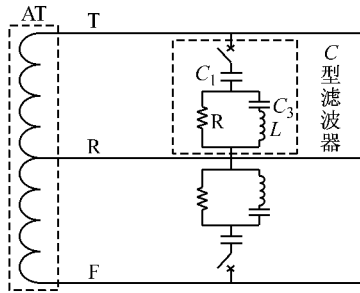


图 7 安装 C 型滤波器后等效电路

Fig.7 Equivalent circuit with C-type filter

### 4.2 滤波器参数设计

考虑到实际运行中每个供电区间内真正运行的 EMUs 一般不超过两列,因此滤波器的无功补偿

主要考虑单车情况.假定 CRH2 动车组的功率因数  $\cos \theta = 99.5\%$ ,额定功率  $P = 4.8 \text{ MW}^{[12]}$ ,由此可得:

$$C_z = \frac{P \sqrt{1 - \cos^2 \theta}}{\omega_1 V^2 \cos \theta} = 2.029 \text{ uF} \quad (2)$$

式中: $\omega_1$  为基波角频率; $V$  为牵引网额定电压.

由于牵引网上下行共需装设 4 个 C 型滤波器单元,故  $C_1 = C_z / 4 = 0.507 \text{ uF}$ .同时,为了使滤波器有功损耗最小, $L$  和  $C_2$  应调谐于基波.此时,若忽略谐波损耗,则 C 型滤波器的有功损耗为零,这样:

$$\omega_1 = \sqrt{1 / (LC_2)} \quad (3)$$

为了调谐指定的  $h_0$  次谐波,电抗器  $L$  应为

$$h_0 \cdot \omega_1 = \sqrt{(C_1 + C_2) / (C_1 C_2 L)} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)得:

$$C_2 = C_1 (h_0^2 - 1) \quad (5)$$

本文以牵引网长度  $L = 40 \text{ km}$  为例进行滤波器参数设计.由上述仿真结果可知,谐波电流在 SS 处被严重放大,为了使注入牵引网的谐波最小, $h_0$  应取 25,由此可得  $C_2 = 316.368 \text{ uF}$ ,  $L = 32.06 \text{ mH}$ .

将 C 型滤波器装于牵引网上并考虑 EMUs 谐波源的作用,这样注入原有牵引网的第  $h$  次谐波系数  $K_{sh}(h)$  为<sup>[15]</sup>:

$$K_{sh}(h) = \frac{Z_f(h)}{Z_f(h) + Z_{eq}(h)} = \frac{1}{1 + Z_{eq}(h)Y_f(h)} \quad (6)$$

式中, $Z_{eq}(h)$ 、 $Z_f(h)$  和  $Y_f(h)$  分别为第  $h$  次谐波下原有牵引网等效阻抗、C 型滤波器等效阻抗和导纳.

由图 7 和式(3)—(5)又可得,在任意  $h$  次谐波下 C 型滤波器的导纳  $Y_f(h)$  为

$$Y_f(h) = G_f(h) + jB_f(h) = \frac{R h^2 m^2}{m^2 X_{C_1}^2 + R^2 (1 - hm)^2} + j \frac{R^2 h (1 - hm) + hm^2 X_{C_1}^2}{m^2 X_{C_1}^3 + R^2 X_{C_1} (1 - hm)^2} \quad (7)$$

其中,  $m = (h^2 - 1) / h / (h_0^2 - 1)$ .

同时,由 C 型滤波器的频率阻抗特性可知<sup>[15]</sup>,在截止频率附近  $G_f \gg B_f$ ,若令  $Z_{eq}(h) = R_{eq}(h) + jX_{eq}(h)$ ,则  $X_{eq} \gg R_{eq}$ ,此时可得:

$$K_{sh}(h) \approx \frac{1}{1 + jX_{eq}(h)G_f(h)} \quad (8)$$

其中: $R_{eq}(h)$ 、 $X_{eq}(h)$  分别为第  $h$  次谐波下 C 型滤波器的等效电阻和等效电抗.

显然,为了使  $K_{sh}(h)$  最小,只需取  $G_f(h)$  最大.由式(7)可知,当  $R = |mX_{C_1} / (1 - hm)| \approx mX_{C_1}$  时取得  $[G_f(h)]_{\max}$ ,由此可得  $R \geq 150.33 \Omega$ .

由于滤波器的装设会改变 EMUs 在牵引网侧呈现的电气负荷特性,从而对包括动车组在内的整个牵引供电网络系统的电气匹配产生影响.若滤波器参数等设计不当,可能会引入新的谐振点而激发新的谐波谐振,从而无法达到较好的抑制效果.为此,上述 C 型滤波器  $R$  参数的选取须确保装设滤波器后的车网系统达到良好的电气匹配.基于此,根据本节已得的  $C_1, C_2, L$  参数值,再假设牵引网长度为 40 km 并将滤波器安装在 SS 处,由此可得不同电阻值对 SS 处谐波电流放大抑制的影响效果,具体如图 8 所示.

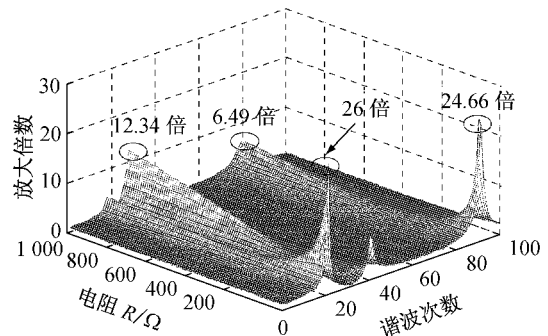


图 8 不同 R 对抑制的影响

Fig.8 Suppression effect of different R

由图可知,当  $R$  取  $200 \Omega$  左右时,SS 处谐波电流放大得到较好的抑制效果. 而当  $R$  取值较小或者较大时尽管原来的谐振点不存在,但由于整个系统电气参数的不匹配将引入新的谐振点,从而能引发新的谐波电流放大,无法达到良好的抑制效果.

### 4.3 滤波器安装位置选取

迄今为止,滤波器装设于牵引网何处将起到较好的抑制效果尚无明确的定论<sup>[7,10]</sup>. 为此,本文根据第 1 节的分析方法分别推导出 C 型滤波器分别安装于 SS、SP 和 EMUs 3 种不同位置处相应的谐波电流放大倍数计算公式分别为

$$K_{SS} = \frac{\cosh \gamma L_2 (Z'_{SS} \sinh \gamma x + Z_c \cosh \gamma x)}{Z'_{SS} \sinh \gamma L + Z_c \cosh \gamma L} \quad (9)$$

$$K_{SP} = \frac{(Z_f \cosh \gamma L_2 + Z_c \sinh \gamma L_2)(Z_{SS} \sinh \gamma x + Z_c \cosh \gamma x)}{(Z_{SS} Z_f + Z_c^2) \sinh \gamma L + (Z_{SS} Z_c + Z_f Z_c) \cosh \gamma L} \quad (10)$$

$$K_{EMU} = \frac{\cosh \gamma L_2 (Z_c \cdot N + Z_f \cdot M)}{Z_{SS} Z_f \sinh \gamma L + Z_c Z_f \cosh \gamma L + Z_c \cdot N \cosh \gamma L_2} \quad (11)$$

其中,  $Z'_{SS} = Z_f // Z_{SS}$ ;  $M = Z_{SS} \sinh \gamma x + Z_c \cosh \gamma x$ ;  $N = Z_{SS} \cosh \gamma x + Z_c \sinh \gamma x$ .

由此可得当具有相同参数的 C 型滤波器分别安装在上述 3 种不同位置时,对谐波谐振最严重情况下(即 EMUs 位于牵引网末端,SS 处谐波电流放大情况)的抑制效果如图 9 所示. 显然,滤波器安装在不同位置时,SS 处谐波电流放大均可得到有效抑制,但若安装在 SP 处能获得最好的抑制效果.

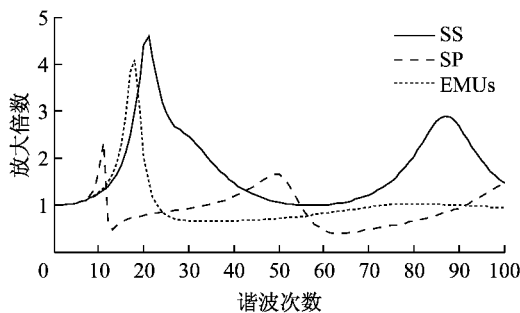


图 9 滤波器安装在不同位置的抑制效果

Fig.9 Suppression effect of filter in different position

### 4.4 抑制效果仿真实证

基于第 3 节分析,下面进一步从以下 2 种情形对 C 型滤波器装设于 SP 后牵引网谐波电流放大抑制效果进行仿真实证. 假设牵引网长度  $L=40 \text{ km}$ , EMUs 工作于额定功率.

(1) EMUs 固定位于牵引网末端时的谐波电流抑制效果. 相应的仿真结果如图 10 所示.

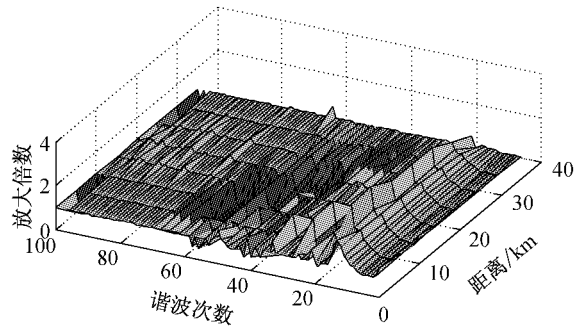


图 10 滤波后牵引网不同位置处的 HCAC

Fig.10 HCAC of different positions for tractionnet after filtering

对比图 10 和图 4 可以发现,装设滤波器后尽管牵引网不同位置处谐波电流放大趋势仍然一致,但其放大倍数明显减小,原 25 次和 75 次附近谐波电流放大得到了有效抑制,而且也没有产生新的谐振点,由此说明滤波器与牵引网以及 EMUs 实现了良好的电气匹配.

(2) EMUs 运行时牵引网 SS 处的谐波电流抑制效果. 相应的仿真结果如图 11 所示.

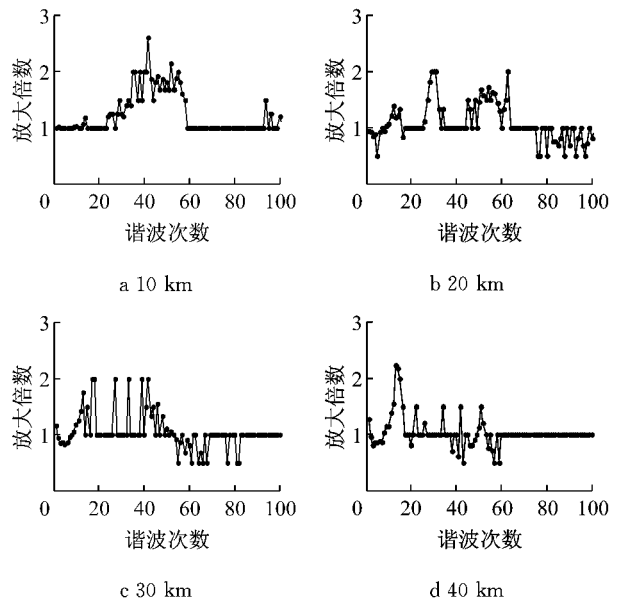


图 11 滤波后 EMUs 处于不同位置时 SS 处的 HCAC

Fig.11 HCAC of substation in different positions for EMUs after filtering

对比图 11 和图 5 可知:装设 C 型滤波器后当 EMUs 分别位于牵引网  $10 \sim 40 \text{ km}$  时,SS 处谐波电流放大倍数均小于 3,而且当 EMUs 位于  $40 \text{ km}$  处时也没有出现高次谐波电流放大的现象. 同时,经过滤波后大部分谐波电流的放大倍数均在 1 附近波动,也没有产生新的谐振点,取得了较为理想的抑制

效果,从而验证了本文提出的C型滤波器参数设计以及安装位置选择方法的正确性和有效性。

## 5 结论

本文基于Matlab建立了车网仿真模型,研究分析了EMUs运行于各种不同工况和模式时对牵引网HCAC的影响,并设计了C型滤波器用以抑制谐波谐振,从而得出如下结论:

(1) 牵引网谐波电流特性不仅与牵引网结构和参数有关,还与动车组的电气控制方式和负荷特性有关。基于车-网耦合关系建立较为准确和合理的仿真模型是研究牵引网谐波电流放大特性的基础。

(2) 动车组不同运行工况和模式对牵引网谐波电流放大特性均会产生影响。其中,牵引网谐振频率与牵引网长度有关,与EMUs所处位置及其工况和功率无关;但谐振点处谐波电流放大倍数与EMUs所处的位置和工况有关,且再生制动工况下的谐波电流放大倍数要高于牵引工况时的对应值。

(3) 较另两种安装位置而言,在牵引网SP处装设C型滤波器能更有效抑制谐波电流的谐振。滤波器的参数设计与安装位置选取须确保装设滤波器后的车网系统达到良好的电气匹配,以达到较好的谐波电流放大抑制效果。

## 参考文献:

- [1] 李群湛. 我国高速铁路牵引供电发展的若干关键技术问题[J]. 铁道学报, 2010, 32(4): 119.  
LI Qunzhan. On some technical key problems in the development of traction power supply system for high-speed railway in China[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(4): 119.
- [2] 王张民, 何正友, 胡海涛, 等. 高速动车组再生制动下网侧电流谐波特性分析[J]. 电网技术, 2012, 36(9): 257.  
WANG Zhangmin, HE Youzheng, HU Haitao, et al. Analysis on harmonic characteristics of grid-side current during regenerative braking of high speed train[J]. Power System Technology, 2012, 36(9): 257.
- [3] 李群湛, 贺建闽. 牵引供电系统分析[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007.  
LI Qunzhan, HE Jiangmin. Traction power supply system analysis[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2007.
- [4] 王奇. 高速铁路牵引供电系统高次谐波谐振仿真研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.  
WANG Qi. Simulation study on high order harmonic resonance in traction power supply system of high speed railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.
- [5] Lee H, Lee C, Jang G, et al. Harmonic analysis of the Korean high-speed railway using the eight-port representation model[J]. Power Delivery, IEEE Transactions on, 2006, 21(2): 979.
- [6] 智慧, 高宏, 杜青, 等. 高速铁路牵引网谐波谐振的影响因素与抑制措施研究[C]//第七届电能质量研讨会论文集. 成都: [s. n.], 2014: 402-408.  
ZHI Hui, GAO Hong, DU Qing, et al. Study on the influence factor and suppression method of harmonic resonance in traction net of high speed railway [C]//The Seventh Conference on Power Quality. Chengdu: [s. n.], 2014, 402-408.
- [7] 蒋功连. 铁路牵引供电系统设计中的谐波谐振分析及抑制方案研究[J]. 铁道标准设计, 2014, 58(6): 129.  
JANG Gonglian. Harmonic resonance analysis and harmonic suppression scheme research in rail way traction power supply system design[J]. Railway Standard Design, 2014, 58(6): 129.
- [8] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析: 上册[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.  
HE Yangzan, WEN Zengyin. Power system analysis[M]. WU Han: Huazhong University of Science and Technology Press, 2002.
- [9] Hu H, Zhang M, Qian C, et al. Research on the harmonic transmission characteristic and the harmonic amplification and suppression in high-Speed traction system [C]//Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2011 Asia-Pacific. [S.l.]: IEEE, 2011: 1-4.
- [10] Lee H, Lee C, Cho H, et al. Harmonic analysis model based on PSCAD/EMTDC for korean high-speed railway[C]//2004 Large Engineering Systems Conference on Power Engineering. [S.l.]: IEEE, 2004: 93-97.
- [11] Liu J, Yang Q, Zheng T Q. Harmonic analysis of traction networks based on the CRH380 series EMUs accident[C]//Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). [S.l.]: IEEE, 2012: 1-6.
- [12] 邓学寿. CRH2型200 km·h<sup>-1</sup>动车组牵引传动系统[J]. 机车电传动, 2008(4):1.  
DENG Xueshou. Traction drive system of 200km/h CRH2 EMUs[J]. Electric Drive for Locomotives, 2008(4):1.
- [13] 赵朝蓬, 田旭东. 交直交电力牵引谐波的影响与改进[J]. 电气化铁道, 2010(3): 6.  
ZHAO Chaopeng, TIAN Xudong. AC-DC-AC electric traction harmonic characteristics and impact on the traction power supply system and improbement of research [J]. Electric Railway, 2010(3):6.
- [14] 崔恒斌, 冯晓云, 林轩, 等. 车网耦合下高速铁路牵引网谐波谐振特性研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 54.  
CUI Hengbin, FENG Xiaoyun, LIN Xuan, et al. Resonance characteristic of high-speed railway traction net considering coupling of trains and traction nets[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 54.
- [15] 吴竞昌. 供电系统谐波[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.  
WU Jingchang. Power supply system harmonic[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.