

基于合蚌线铁路谐振机理及抑制方案研究

叶 涛

(中铁上海设计院集团有限公司, 上海 200070)

摘 要: 以合蚌线为例, 对牵引供电系统谐振特性进行了理论分析, 证明了谐波与供电臂长、机车位置、接触网特性阻抗、传播系数以及牵引变电所等效阻抗等有关。建立牵引供电系统仿真模型, 并对阻频特性、电流、电压进行测试。通过分析谐振特性影响因素, 提出相应抑制措施, 如在供电系统设计初期, 根据车网匹配情况对供电系统进行优化设计, 破坏谐振发生的基本条件, 可以达到抑制谐振的目的。

关键词: 交直交电力机车; 谐波特性; 谐振; 供电系统

中图分类号: U223.5

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2017.06.016

Study on Resonance Mechanism and Suppression Scheme of Railway Based on Hefei-Bengbu Line

YE Tao

(China Railway Shanghai Design Institute Group Co., Ltd., Shanghai 200070, China)

Abstract: Taking Hefei-Bengbu line as an example, the resonant characteristics of the traction power supply system were analyzed theoretically. It was proved that the harmonics were related to the length of the supply arm, locomotive location, characteristics impedance of the contact line, transmission coefficient and the equivalent impedance of traction substation. On this basis, the simulation model of traction power supply system was established. And the frequency characteristics, current and voltage were tested. Based on the analysis of the influence factors of resonance characteristics, the corresponding suppression measures were proposed. In the early stage of the power supply system design, the optimal design of the power supply system according to the matching condition of the vehicle network could destroy the basic condition of resonance, and achieve the purpose of inhibiting resonance.

Keywords: AC-DC-AC electric locomotive; harmonic characteristic; resonance; power supply system

0 引言

随着客运专线的建设和铁路大提速的发展, 我国大量采用了交直交型电力机车, 其注入电网的谐波含量低, 降低了低频带的谐波含量, 但是高频带的谐波含量增加, 并且在机车启动、爬坡、制动等调节过程中, 谐波含量还会进一步增加。当注入的某次谐波使得系统等值感抗等于或接近容抗时, 会产生谐波谐振。由谐振引发的过电压、过电流将会使得保护误动作, 从而损坏设备, 降低供电可靠性, 影响供电系统以及机车的稳定运行。因此, 对谐振机理进行研究分析, 并采取有效抑制措施, 对于保证铁路安全平稳运行具

有重要意义。

谐波谐振问题普遍存在于高速铁路运行中, 研究内容也日趋完善。文献 [1-11] 均对谐波谐振问题进行了理论研究和试验分析。总体来看, 该领域的研究主要集中在车上以及车下 2 个方案。车上方案包括在机车变压器的高压侧增加 LC 滤波器以及有源滤波器, 或者通过改变网侧变流器控制方式, 改变注入电网谐波电流的能量分布, 以此从源头上减少谐波电流实现抑制。车下方案主要是采用无源、有源或者混合的补偿装置对谐振谐波进行滤除从而达到抑制的目的。

电力机车谐波特性以及在牵引网中的分布规律, 有源、无源抑制方案均有较为全面的研究, 但是对于谐振后, 车网的最优匹配, 同时结合牵引供电系统的

优化设计达到抑制谐振目的的研究尚处于研究阶段。此外,如果多种车型混跑,会使得牵引供电系统中谐波含量更加多变,频带分布更加广泛,从而使得谐振概率大大增加。

本文以合蚌线为例,研究电力机车谐波输出特性及其影响因素,以及车网之间的相互关系,并以此为基础,分析谐振产生条件,提出在设计初期通过对牵引供电系统结构或相关设备进行优化,通过改变匹配参数,避开谐波输出含量较大的范围,以此避免谐振的发生从而减小对系统带来的影响。

1 合蚌线简介

合肥至蚌埠铁路客运专线位于安徽省中部,北起蚌埠市,沿蚌淮高速公路跨徐高速公路、水蚌铁路、窑河,经淮南市,沿淮南铁路并行,经长丰县,至合肥市。线路大致呈南北走向,全长 130.700 km,其中新建线路长 120.200 km。

线路北端通过京沪高速蚌埠站与京沪高速相连,南端通过合肥枢纽与沪汉蓉快速通道相接,是京沪铁路与华东二通道以及沪汉蓉快速通道间重要快速客运连通线,也是京福高速铁路的重要组成部分。

该工程采用双线,近期速度 300 km/h,远期速度 350 km/h,牵引种类为电力。全线设 8 个车站和 1 个线路所,依次为合肥站、合肥北城站、大包郢线路所、双墩集站、下塘集站、水平家湖站、淮南东站、新刘府站、蚌埠南站。

合蚌客运专线车辆类型为 CRH 系列交直交型动车组,采用 16 辆编组,城际列车采用 8 辆或 16 辆编组。

全线采用 AT 供电方式,新建刘府南、水家湖、合肥北城共 3 座牵引变电所,新建蚌埠南、淮南东、朱巷、合肥北共 4 座分区所。水家湖、合肥北城、刘府南牵引变电所均同时为淮南、水蚌铁路供电。

淮南、水蚌区段上运行的机车有交直交型 HXD 系列电力机车以及交直型 SS₉ 型电力机车,即水家湖、合肥北城、刘府南是包含交直交型、交直型电力机车的混跑线路。

由此可见,合蚌线路多种车型混跑,使得牵引供电系统中谐波含量更加丰富,分布更为广泛,因而谐振可能性更大。对合蚌线路谐振规律机理进行研究和总结,对于保证高速电气化铁路安全具有重大意义。

2 牵引供电系统谐振特性

2.1 理论分析

目前我国高速铁路牵引供电系统大多采用 AT 供电方式,包括接触线、承力索、正馈线、钢轨等组成的若干平行导线,以及由 AT 自耦变压器、横连线等组成的导线间连接元件。进行谐波分布特性研究时,为获得较高的计算精度,可根据电气回路节点和列车运行

时的实际位置对牵引网进行自然切割。

自然切割后的牵引网等值电路由平行的横向元件和垂直的纵向元件组成。其中,横向元件由平行的多导体传输线构成,根据多导体传输线理论,可将其等效为 π 模型。其等效电路如图 1 所示。

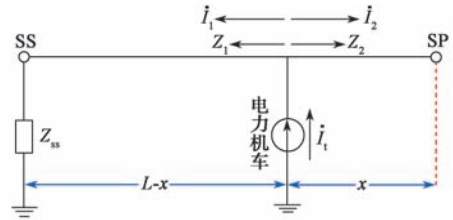


图 1 牵引供电系统等效电路

图 1 中, Z_{ss} 为牵引变电所等效阻抗; L 为供电臂长度; x 为机车距离分区所距离; Z_1 、 Z_2 分别为在机车位置向牵引变电所方向和分区所方向看去的接触网阻抗; i_1 为机车谐波电流; i_1 、 i_2 分别为流向牵引变电所 (SS) 方向和分区所 (SP) 方向的电流。

利用无源双端口网络可求解得到

$$Z_1 = z_c \cdot \frac{Z_{ss} \cosh \gamma(L-x) + z_c \sinh \gamma(L-x)}{Z_{ss} \sinh \gamma(L-x) + z_c \cosh \gamma(L-x)} \quad (1)$$

$$Z_2 = z_c \cdot \frac{\cosh \gamma x}{\sinh \gamma x} \quad (2)$$

式中: $z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}}$ 为导线的特性阻抗 (波阻抗); $\gamma = \sqrt{ZY}$ 为导线的传播系数。

由机车所在位置看去,整个接触网的等值阻抗

$$Z = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} = z_c \cdot \frac{\cosh \gamma x \cdot (Z_{ss} \cosh \gamma(L-x) + z_c \sinh \gamma(L-x))}{Z_{ss} \sinh \gamma L + z_c \cosh \gamma L}$$

$$\text{令 } Z = |Z| \angle \theta = R + jX$$

$$\text{或等值导纳 } Y = \frac{1}{Z} = G + jB$$

式中: Z 为等值阻抗; θ 为阻抗角; R 为电阻; X 为电抗; Y 为等值导纳; G 为电导; B 为电纳。

当机车的某次谐波使得 $\theta \rightarrow 0$ 或 $X \rightarrow 0$ 或 $B \rightarrow 0$ 时,系统发生谐振,对应此时的机车谐波频率即谐振频率,又称为谐振点。

由图 1 可知:

$$i_1 = i_1 + i_2 \quad (3)$$

$$i_1 = i_1 \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (4)$$

$$i_2 = i_1 \cdot \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (5)$$

将式 (1)、式 (2) 代入式 (4) 可得

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_t \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} =$$
$$\dot{I}_t \cdot \frac{\cosh \gamma x \cdot (Z_{ss} \sinh \gamma (L-x) + z_c \cosh \gamma (L-x))}{Z_{ss} \sinh \gamma L + z_c \cosh \gamma L}$$

继而可求得接触网首端电流：

$$\dot{I}_{ss} = \dot{I}_t \cdot \frac{z_c \cosh \gamma (L-x)}{Z_{ss} \sinh \gamma L + z_c \cosh \gamma L} \quad (6)$$

接触网首端电压：

$$\dot{U}_{ss} = \dot{I}_t \cdot \frac{Z_{ss} \cdot z_c \cosh \gamma (L-x)}{Z_{ss} \sinh \gamma L + z_c \cosh \gamma L} \quad (7)$$

供电臂末端分区所处电压：

$$\dot{U}_{sp} = \dot{I}_t \cdot z_c [Z_{ss} \cosh \gamma (L-x) + z_c \sinh (L-x)] \quad (8)$$

当 $\dot{I}_t$ 为谐振谐波电流时，式（6）~式（8）即为谐振谐波在相关点引起的过电压、过电流，可以看出，谐波主要与供电臂长度 L 、机车位置 x 、接触网的特性阻抗 z_c 和传播系数 γ 及牵引变电所等效阻抗 Z_{ss} 有关。

2.2 仿真分析

以合蚌线为例，建立牵引供电系统仿真模型，对其谐振特性进行分析。

原始参数如表 1~ 表 3。

表 1 牵引变压器参数

项目	额定容量 / MVA	额定电压 / kV	空载损耗 / kW	空载电流	阻抗 接线 电压 组别
变压器 1	40	220	<36	小于额定电 流的 0.5%	10.5% II0 i6
变压器 2	35	220	<34	小于额定电 流的 0.5%	10.5% II0 i6

表 2 自耦变压器参数

项目	额定容量 / MVA	额定电压 / kV	空载损耗 / kW	空载电流 / %	短路损耗 / kW
分区所	25	2 × 27.5/27.5	<10	0.35	45
AT 所	32	2 × 27.5/27.5	<12	0.30	55

以合蚌线为例，建立牵引供电系统仿真模型，对其谐振特性进行分析。仿真模型如图 2 所示。

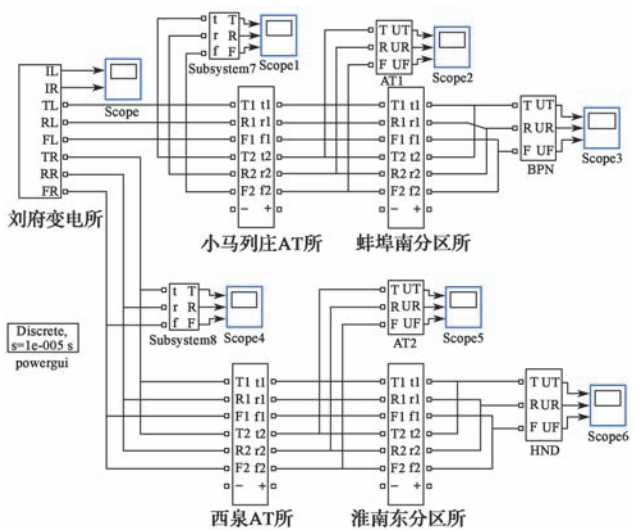


图 2 牵引供电系统等效电路

表 3 线路参数

名称	接触线	承力索	回流线	正馈线	钢轨
线型	CTMH150	JTMH120	JL/LB1A-250-26/7	JL/LB1A-315-45/7	60 kg

2.2.1 阻频特性测试

令机车分别在供电臂首端、AT 和分区所处，测量由机车所在位置看入的整个接触网的阻抗与谐波频率的关系，结果如图 3 所示。

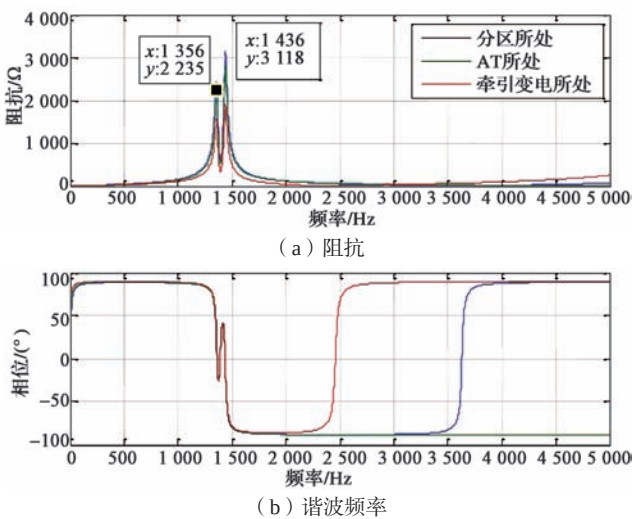


图 3 机车在同一供电臂不同位置的阻频特性图

如图 3 所示，当机车产生的谐波使阻抗相位角由正变负时，阻抗出现极大值，系统发生并联谐振，对应的谐波称为并联谐振点；当机车产生的谐波使阻抗相位角由负变正时，阻抗出现极小值，系统发生串联谐振，对应的谐波称为串联谐振点。

串联谐振点随机车位置的改变而改变，当机车位于牵引变电所处时为 2 456 Hz（49 次）；当机车位于 AT 所时在 100 次谐波范围内无串联谐振点；当机车位于供电臂末端分区所处时为 3 628 Hz（73 次），即串联谐振点随机车位置的变化而变化。

当机车处于不同位置时，并联谐振点均为 1 356 Hz（27 次）和 1 436 Hz（29 次），即并联谐振点与机车位置无关。

2.2.2 电流测试

令机车分别于供电臂首端、AT 与分区所处，向牵引供电系统注入 50~5 000 Hz 的整次谐波电流，大小均为 1 A，测试点仿真结果如表 4 所示。

表 4 各点仿真结果汇总表

机车位置	并联谐振点	并联谐振点谐波含有率 /%	并联谐振点谐波有效值 /A	串联谐振点	串联谐振点谐波含有率 /%
牵引变电所	27 次	1 324.34	10.36	49 次	17.89
	29 次	1 316.90	10.32		
AT 所处	27 次	2 278.91	12.08	无	
	29 次	2 421.27	12.84		
分区所处	27 次	2 436.50	12.65	73 次	38.20
	29 次	2 610.89	13.56		

可得如下结果：

①并联谐振会引起谐波电流放大，放大幅度与机

车位置有关。以牵引变电所处电流为例,当机车在供电臂末端时,谐波电流放大幅度最大。

②并联谐振时,除了谐振点谐波电流会放大外,谐振点附近的其他次谐波电流也会被放大,放大幅度以谐振点为中心向两边递减。

③和并联谐振相比,串联谐振对系统的电流影响较小,可忽略不计。

2.2.3 电压测试

分别测试机车在不同位置时牵引变电所、AT 所以及分区所母线电压,结果如图 4 所示。

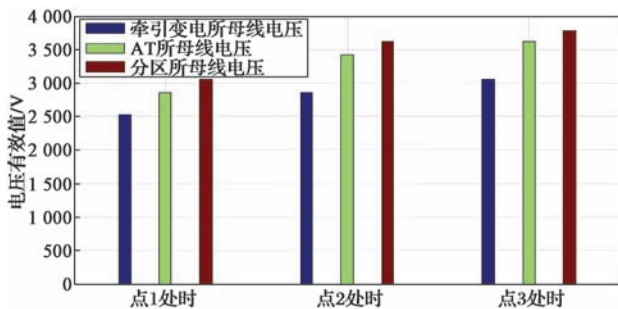


图 4 机车在供电臂不同位置时牵引网各点电压

分析图 4 可得出如下结论:

①并联谐振时,谐振点谐波会在接触网各点引起过电压,其值随机车位置的改变而变化。当机车位于供电臂末端时,在各点引起的谐振过电压最大。

②当机车位置不变时,谐振谐波在牵引网各点引起的过电压大小不同,在供电臂首端牵引变电所处最低,在供电臂末端分区所处最高。

③谐振时,除了谐振点谐波会引起过电压外,谐振点附近的其他次谐波电流也会引起过电压,幅值以谐振点为中心向两边递减。

④串联谐振对系统的影响较小,可以忽略不计。

2.2.4 谐振特性影响因素分析

1) 供电臂长 L 的影响

在变压器容量等其他参数完全相同的情况下,供电臂越长,谐振点频率越低,这是由于供电臂越长,等值分布电容越大。

2) 机车位置的影响

机车位置的改变对并联谐振点没有影响,但对谐振幅度有影响。当机车在供电臂末端时,在牵引网各点引起的过电压、过电流最大;当机车在某一位置时,在牵引网各点引起的过电流、过电压是不同的,牵引变电所处最低,分区所处最高。

3) 接触网的特性阻抗 z_c 和传播系数 γ 的影响

由前分析可知,特性阻抗 z_c 和传播系数 γ 与单位阻抗矩阵 $\mathbf{Z}$ 和单位导纳矩阵 $\mathbf{Y}$ 有关,其中阻抗矩阵 $\mathbf{Z}$ 中各参数分别为各平行导线的自阻抗、互阻抗,计算公式如下:

自阻抗:

$$Z_{ii} = r_{ii} + 0.05 + 0.145 \lg \frac{D_g}{R_i} \quad (9)$$

互阻抗:

$$Z_{ij} = 0.05 + 0.145 \lg \frac{D_g}{d_{ij}} \quad (10)$$

导纳矩阵 $\mathbf{Y} = j2\pi fC = j2\pi f|P^{-1}|$

$$P_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2h_i}{R_i} \quad (11)$$

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{ij}}{d_{ij}} \quad (12)$$

式中: h_i 为该线对地垂直距离; R_i 为该线计算半径; D_{ij} 为 i 线与 j 线镜像间距离; d_{ij} 为 i 线与 j 线间距离。

由此可知,接触网的特性阻抗 z_c 和传播系数 γ 决定于自身参数以及线索空间位置。由于线材选型需要考虑成本、受力、载流等因素,因此,此处只考虑附加线索的空间位置的影响。令机车位于供电臂末端,分别升高和降低 F 线和 PW 线的高度进行仿真,对接触网首端电流进行 FFT 分析谐波含量从而判断谐振,并测量接触网首端电压、机车电压以及接触网末端电压,仿真结果如图 5 所示。

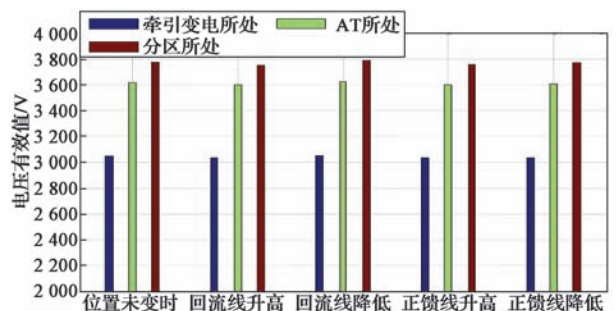


图 5 各测试点电压的变化趋势

由图 5 可知, F 线和 PW 线高度的改变对谐振点影响不大,但对谐振幅度有影响,降低 F 线高度和升高 PW 线高度,会减小牵引变电所首端的电流谐波含量,同时各测试点的电压会相应地降低;升高 F 线高度和降低 PW 线高度则相反。

2.2.5 牵引变电所等效阻抗 Z_{ss} 的影响

牵引变电所等效阻抗 Z_{ss} 由进线电源阻抗和牵引变压器等值阻抗组成,进线电源阻抗取决于外部电源,一般不便调整,所以主要考虑牵引变压器等值阻抗的改变。牵引变压器等值阻抗由变压器容量、励磁阻抗、绕组漏抗等参数决定,工程中常以变压器容量、短路电压百分比、短路损耗、空载损耗等铭牌参数描述。由于变压器容量的选择主要考虑行车容量,因此此处只考虑相同容量的变压器在不同短路电压百分比下对系统谐振的影响,即取变压器短路电压百分比分别为 8.5%、10.5% 和 12.5% 进行测试,结果如图 6~图 8 所示。

由图 6~图 8 可知,当短路电压百分比减小时,系统的谐振频率变大,谐振幅度也变大,这主要是由于变压器短路电压百分比减小时,等值电感减小,进而

引起谐振频率升高。

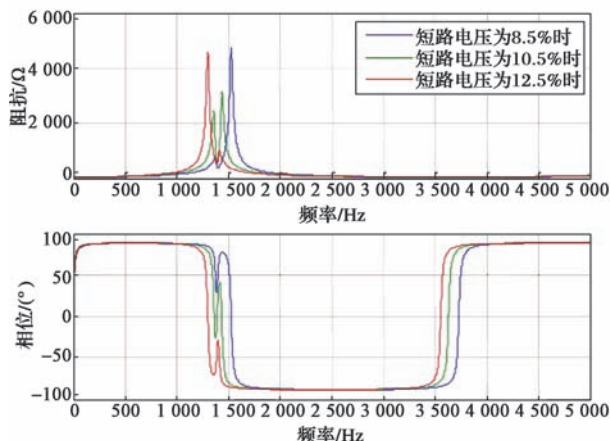


图6 变压器短路电压百分比改变对谐振点的影响

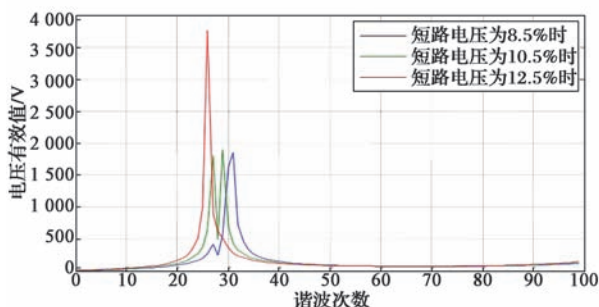


图7 变压器短路电压百分比改变对谐振过电压的影响

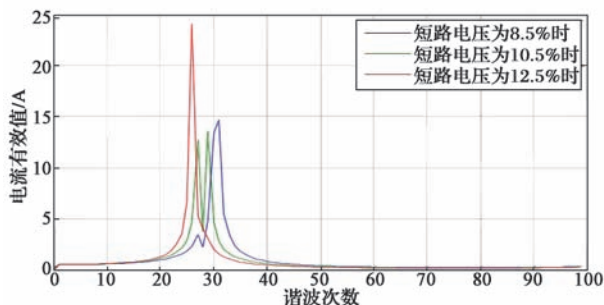


图8 变压器短路电压百分比改变对谐振过电流的影响

2.2.6 小结

在对牵引供电系统谐振特性进行理论分析的基础上,以合蚌线为例,对机车在同一供电臂不同点以及不同供电臂上运行时的谐振点、谐振过电压、谐振过电流以及影响谐振的因素进行了仿真分析,结论是高次谐波会引起供电系统的谐振。谐振分为串联、并联谐振,其中串联谐振对系统的影响较小,可以忽略不计。并联谐振会引起谐振点及其附近的谐波放大,产生谐振过电压、过电流的大小与谐波含量、机车位置、牵引供电系统结构参数等有关。并联谐振点主要由牵引变电所等效阻抗及分布电容等系统自身结构参数有关,与机车位置无关。改变供电臂长度、变压器短路电压百分比以及接触悬挂线索位置可以改变谐振点。

3 抑制措施

由上述分析可知,防止谐振发生的关键就是要尽量避免供电系统的谐振点、谐振频带与机车的高次谐

波频带交叉或重叠。

为此,对于新建铁路,可在设计初期,综合考虑各供电臂在正常以及越区供电等不同方式下的谐振点,根据系统谐振特性以及机车谐波输出特性,在车网匹配的基础上,对牵引供电系统结构参数进行优化设计,使其谐振频带尽量完全避开机车高次谐波频带,破坏谐振发生的基本条件,从而达到抑制谐振的目的。以合蚌线为例,其各种运行方式下全线供电臂谐振频率50次以内集中在16至29次之间,假设在考虑其他原则的情况下,CRH1型车和CRH2型车为备选车型,则由二者的谐波输出特性可知,选配CRH2型车优于CRH1型车,因为CRH1型车高次谐波主要分布在31、33、35、37、39、41次附近,与合蚌线谐振点为29次谐波的多个供电臂谐振频带可能形成交叉,引起谐振。而CRH2型车则不存在这个问题。

对于已运行线路,如条件允许,可通过调整结构参数来减小谐振的影响,如条件不允许,则可考虑在供电臂末端分区所处安装高通滤波器来抑制谐振。

4 结论

本文对牵引供电系统谐振特性和机车谐波输出特性及其影响因素进行了理论分析和仿真研究,以此为基础,结合合蚌线实际线路谐振特点,对谐振产生条件进行分析,得出如下结论:

- ①电力机车的高次谐波会引起牵引供电系统谐振。
- ②谐振分为串联谐振和并联谐振,但对谐振的研究主要是对并联谐振的研究。
- ③并联谐振点(频率)是有牵引供电系统结构参数决定的,与变电所等效阻抗、供电臂长度、接触悬挂线空间位置等有关,不同线路,同一线路不同供电臂,上述参数不同,则谐振点不同。

④在供电系统设计初期,根据车网匹配情况对供电系统进行优化设计,破坏谐振发生的基本条件,从而达到抑制谐振的目的。该项措施有效降低了由谐振产生的过电压,与在分区所采用高通滤波器相比,效果基本一致,但不需要进行任何额外的投资。

参考文献:

- [1] Hanmin L, Changmu L, Gilsoo J. Harmonic analysis of the Korean high-speed railway using the eight-port representation model [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(2): 979-986.
- [2] Guo Lei, Li Qunzhan, Xu Yinglei. Study on harmonic resonance of traction line in electrified high-speed traction system [C] //International Conference on Sustainable Power Generation and Supply. Nanjing: UK-China Network of Clean Energy Research, 2009: 1-4.
- [3] Pee-Chin T, Poh C L, Holmes D G. Optimal impedance termination of 25 kV electrified railway systems for improved power quality [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(2): 1703-1710.
- [4] 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, 2010.

(下转第92页)