

车网耦合的牵引供电系统谐波仿真分析

李宏强, 王晓茹, 徐家俊

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 牵引供电系统是电力系统重要负荷, 也是电力系统主要的谐波源之一。在研究牵引供电系统谐波传输特性和谐波对电力系统的影响时往往对牵引供电系统模型进行一定的简化, 虽然具有一定的合理性, 但是这样分析出来的结果与实际结果相比必然存在一定的误差。针对牵引供电系统谐波分析模型不精确, 利用 PSCAD/EMTDC 搭建了电力机车-牵引网-电网仿真模型, 仿真研究了机车位置、机车数量和牵引网长度变化时牵引供电系统谐振以及电网总谐波畸变率的特性。仿真结果表明该仿真模型能更准确地分析牵引供电系统谐波特性, 分析结果更加符合实际。

关键词: 牵引供电系统; 谐波分析; PSCAD/EMTDC; 谐振; 谐波畸变率

Harmonic simulation analysis of traction power supply system based on train-network coupling system

LI Hong-qiang, WANG Xiao-ru, XU Jia-jun

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

Abstract: Traction power supply system is an important load and one of main harmonic source of power system. Certain simplification is made on traction power supply system modeling when studying the harmonic transmission characteristic of traction power supply system and the impact of traction power supply system harmonic in power system. Although simplified model has a certain rationality, there will be some errors in the analysis results based on simplified model compared with the actual results. According to the inaccuracy of traction power supply system model, the united model of electric locomotive and traction network and power system is built by PSCAD/EMTDC software. The characteristics of traction power system resonance and the total harmonic distortion (THD) when the location and number of trains and the length of traction network change are studied. Simulation results show that the united model can more accurately analyze the harmonic characteristics of traction power supply system, and the analysis results are more realistic.

Key words: traction power supply system; harmonic analysis; PSCAD/EMTDC; resonance; total harmonic distortion

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)20-0116-07

0 引言

目前我国大量的电力机车为交-直整流电力机车^[1], 其网侧整流器一般采用二极管或晶闸管相控整流器, 使得电力机车在获得工频电能的同时也产生了大量的谐波电流, 这些谐波分量经牵引网与牵引变电所渗透到三相电力系统中, 造成电力系统电能质量下降, 可能威胁电网的安全运行及其他设备的安全与正常工作^[2-5]。

目前牵引供电系统谐波特性及对电力系统的影响方面已经做了大量研究。文献[6-7]利用时域分析法, 对 SS4 型电力机车各工作段建立微分方程, 从而求出电力机车各次谐波含量。文献[8]利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件建立了交-直型电力机车

的仿真模型。文献[9]利用牵引网多导体传输特性, 构建了牵引网的链式谐波模型及电压方程, 利用切面上注入电流源的方法计算牵引网谐波电流、电压的分布。文献[10]对牵引网八端口网络模型进行降阶, 建立了牵引网简化模型, 并利用 1~50 次 100 A 的等幅电流源仿真分析牵引网谐波电流传输特性。文献[11]利用 PSCAD/EMTDC 搭建了牵引供电系统仿真模型, 但牵引负荷采用恒功率模型。文献[12-13]利用机车实测的谐波电流数据作为牵引负荷模型, 研究牵引供电系统谐振特点。上述研究在研究牵引供电系统谐波特性时所建立的模型往往都是忽略牵引网或者是对谐波源进行一定的简化。事实上, 电力机车在移动过程中基波功率和谐波功率不断的变化, 并且相互影响, 在分析牵引供电系统谐振问题

和牵引供电系统谐波对电网的影响时,如果不考虑机车-牵引网-电网之间的耦合关系,这样得出的结论与实际存在一定的误差。

本文利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件建立了韶山IV型(SS4型)交-直型电力机车详细模型,然后建立了机车-牵引网-电网联合仿真模型,并在此基础上仿真研究了机车位置、机车数量以及牵引网长度对牵引供电系统谐振点以及电网谐波畸变率的影响。

1 牵引供电系统

牵引供电系统由外部电源、牵引变电所、牵引网和电力机车组成,其结构图如图1所示。

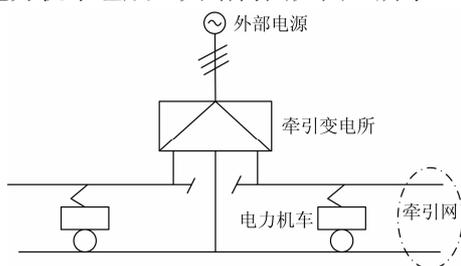


图1 牵引供电系统结构图

Fig. 1 Structure of traction power supply system

1.1 外部电源系统

外部电源系统为牵引供电系统提供高压电源,其电压等级为110 kV或者220 kV。目前我国普通电气化铁路大多接入110 kV电网,而高速客运专线则接入220 kV电网。

1.2 牵引变电所模型

牵引变电所的核心元件是牵引变压器,牵引变压器将外部电源110 kV或者220 kV电能变为55 kV或者27.5 kV的电能。主要有单相牵引变压器、V/v接线牵引变压器和Scott平衡变压器等。以上牵引变压器在我国铁路均有应用,本文以Scott接线变压器为例,对其进行分析与建模。Scott接线型牵引变压器原理如图2所示。

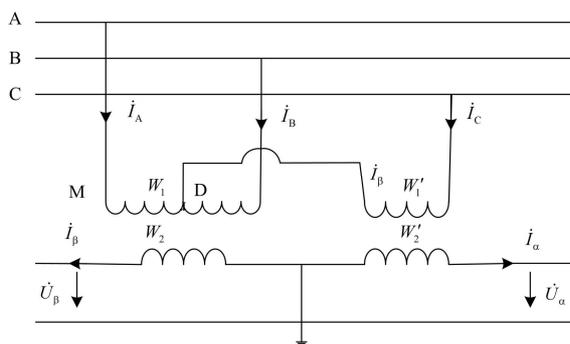


图2 Scott接线型牵引变压器原理图

Fig. 2 Principle of Scott transformer

以原边相电压 \dot{U}_A 为参考,则底座(M)电压 $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A \angle 30^\circ$,高座(T)原边电压 $\dot{U}_{CD} = \frac{3}{2} \dot{U}_A \angle 120^\circ$ 。

根据Scott变压器原理可知底(M)座变比 $\frac{W_1}{W_2} = k_T$ 则高(T)座变比 $\frac{W_1'}{W_2'} = \frac{\sqrt{3}}{2}$,根据磁势平衡和电流平衡关系式如(1)。

$$\begin{cases} \dot{i}_A + \dot{i}_B + \dot{i}_C = 0 \\ \frac{W_1}{2} \dot{i}_A - \frac{W_1}{2} \dot{i}_B = W_2 \dot{i}_\beta \\ W_1' \dot{i}_C = W_2' \dot{i}_\alpha \end{cases} \quad (1)$$

可得出Scott变压器原边和次变电流关系如式(2)所示。

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_A \\ \dot{i}_B \\ \dot{i}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}k_T} \begin{bmatrix} -1 & \sqrt{3} \\ -1 & \sqrt{3} \\ 2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_\alpha \\ \dot{i}_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

当原边线电压为110 kV,次边为27.5 kV时, $k_T = 4$ 。在仿真建模时,Scott也可以根据其接线原理利用一个单绕组变压器和三绕组变压器组合而成,根据其电压关系可知单绕组变压器变比为95.26/55 kV,三绕组变压器变比为55/55/55 kV。

1.3 自耦变压器

在AT供电系统中,牵引变电所牵引侧电压为单相55 kV或者两相 2×27.5 kV。牵引网接触线T和正馈线F接在自耦变压器的原边,构成55 kV回路,而钢轨与自耦变压器中点连接,使接触网与钢轨的电压保持为27.5 kV。自耦变压器的间距通常是8~12 km,本文每10 km设置一台。

1.4 AT牵引网模型

牵引网包括供电网和回流网两部分。供电网由接触网T组成,包含承力索(MW)、接触线(CW)、加强线等。回流网由钢轨(R)、负馈线(NF)、正馈线(PF)和保护线(PW)等组成^[9]。其结构图如图3所示。

牵引网为一平行多导体传输线,由于导体数目较多,如果对所有导体建模,这样必然会增加模型建立的难度,因此在建立模型时可根据牵引网空间分布以及导体参数计算出牵引网电气参数,然后利用导线合并方法,将承力索、加强线等效到接触线中,将钢轨合并为一条导线^[14]。本文利用文献[10]的方法将单线牵引网线路建立单位长度T型等效电路,然后扩展单位长等效模型即可得到任意长度的牵引网线路模型。

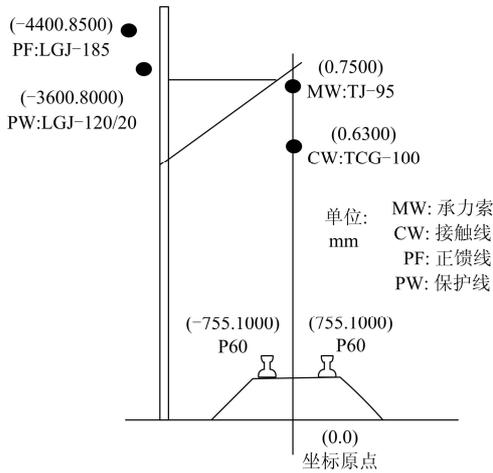


图 3 AT 供电方式单线牵引网导线结构图

Fig. 3 Schematic diagram of single AT network

1.5 电力机车

在已有的文献中，对电力机车建模往往根据不同的研究重点，适当地对机车模型进行简化。在研究牵引供电系统潮流计算时，电力机车看作是有功功率和无功功率恒定的功率源，在研究电力系统谐波潮流时以及牵引供电系统谐波传输特性时，通常把电力机车看作电流源。但是随着电力机车在牵引网中的位置及运行工况的改变，其功率和谐波电流特性也必然发生变化，只以其中某一电气量对电力机车负荷建模是不够准确的。

我国目前使用的电力机车，大部分还都属于交-直型电力机车。本文以我国典型的交-直型电力机车韶山 IV 型 (SS4) 为例，对其进行详细建模。SS4 型电力机车采用 4 段半桥式晶闸管相控整流调压方式，其主电路图如图 4 所示。

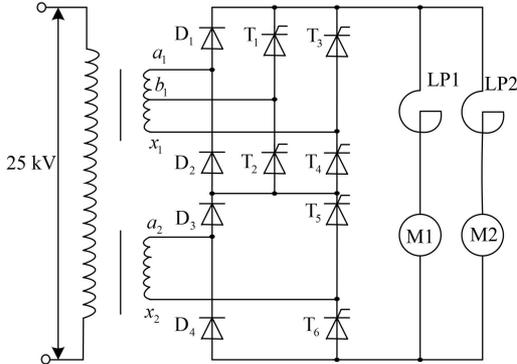


图 4 SS4 型电力机车主电路图

Fig. 4 SS4 electric locomotive main circuit

1.5.1 SS4 型电力机车仿真模型

本文所建立的 SS4 型电力机车模型主要由牵引电源、主变压器、整流调压电路、平波电抗器、串励电动机等几部分组成。其仿真模型控制原理图如

图 5 所示。

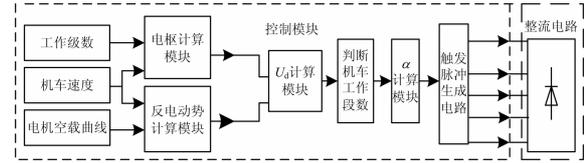


图 5 SS4 型电力机车控制原理图

Fig. 5 SS4 electric locomotive control schematics

(1) 反电动势的确定^[15]

反电动势与机车速度、磁通以及其他参数的关系如式 (3)。

$$E = \frac{1000\mu C_e \varphi v}{60\pi D} = 229.696\varphi v \quad (3)$$

式中： μ 为牵引电机齿轮传动比，取 4.19； D 为牵引电动机动轮直径，取 1.2 m； C_e 为牵引电动机结构常数，取 12.4； v 为机车速度，km/h； φ 为主磁通量，Wb。

磁通 φ 的确定可通过对 SS4 型牵引电机的空载特性曲线确定，其特性曲线可参考文献[15]。由于磁路饱和的影响，牵引电机的空载特性曲线是非线性的，因此本文对曲线进行分段线性拟合得出各电流区间磁通的数学表达式如式 (4) 所示。

$$\varphi = \begin{cases} 1.6129 \times 10^{-4} I_f + 2.645 \times 10^{-3} & (0 < I_f < 250) \\ 9.6774 \times 10^{-5} I_f + 0.018 & (250 \leq I_f < 500) \\ 6.4516 \times 10^{-5} I_f + 0.03694 & (500 \leq I_f < 650) \\ 3.2258 \times 10^{-5} I_f + 0.05437 & (650 \leq I_f < 840) \\ 2.4194 \times 10^{-5} I_f + 0.06455 & (I_f \geq 840) \end{cases} \quad (4)$$

(2) 晶闸管触发角的确定

SS4 型电力机车电动机电枢电流的大小是由牵引控制系统的级位和速度共同决定的，其关系式如式 (5) 所示。

$$I_d = \min \begin{cases} 150k \\ 600k - 54v \\ 1096 \end{cases} \quad (5)$$

式中： v 为机车速度，km/h； k 为机车档位，取 0~10； I_d 为电枢电流，单位为 A。

确定电动机电枢电流、反电动势的大小后，便可根据式 (6) 计算出整流电路直流电压。

$$U_d = E + I_d \sum R \quad (6)$$

式中， $\sum R$ 为牵引电机回路总电阻，包括平波电抗器、励磁绕组、电枢绕组以及反映磁化曲线等值电阻。

根据 U_d 大小就可以判断出机车的工作哪一段

桥,然后根据电力机车每一段工作时的 U_d 与触发角 α 的关系计算出触发角的大小。以第IV段为例,晶闸管触发角与直流侧电压 U_d 与交流侧电压关系式如式(7)所示^[16]。

$$\alpha = \arccos \left[\frac{\frac{\pi U_d}{\sqrt{2}} + \frac{I_d X_{B2}}{\sqrt{2}} - 4U_{blx1} - 3U_{blx1} \cos \gamma_4}{U_{blx1}} \right] \quad (7)$$

式中, $\gamma_4 = \arccos(1 - \frac{2I_d X_{B3}}{\sqrt{2}U_{blx1}})$, 其中 X_{B3} 为绕组 a_2x_2 折算到二次侧的漏电抗。

1.5.2 SS4型电力机车谐波特性

当机车行驶速度50 km/h时,机车工作在第四段,图6为此时机车取用电流仿真波形图,表1为此时机车奇次谐波电流含量仿真结果,表2列出了SS4型电力机车谐波含量典型统计值^[17]。

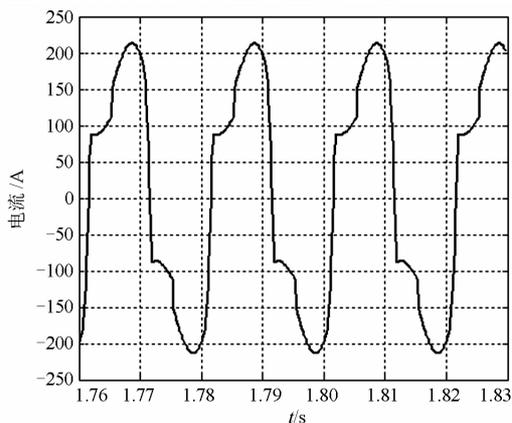


图6 机车取流波形图

Fig. 6 Diagram of current flowing through the locomotive

通过对比表1与表2中3、5、7、9、11次谐波含量值,验证了本文所搭SS4型电力机车模型的正确性。

表1 SS4型电力机车谐波含量仿真结果

Table 1 Simulation results of harmonic current of SS4 electric locomotive

谐波次数	谐波含量/%	谐波次数	谐波含量/%	谐波次数	谐波含量/%
1	100	19	0.26	37	0.15
3	23.68	21	1.1	39	0.45
5	13.12	23	0.92	41	0.27
7	6.76	25	0.22	43	0.17
9	5.57	27	0.85	45	0.35
11	4.02	29	0.49	47	0.20
13	1.35	31	0.20	49	0.15
15	1.93	33	0.53	51	0.27
17	1.38	35	0.36	53	0.15

表2 SS4型电力机车谐波含量典型统计值

Table 2 Typical statistics of SS4 electric locomotive

谐波次数	3	5	7	9	11
谐波电流含有率/%	23	12	7	4	3

2 系统仿真分析

2.1 仿真条件及参数设置

本文搭建了机车-牵引网-电网联合仿真模型,牵引变压器采用Scott接线变压器,供电方式为AT供电方式,牵引网采用单线双臂,其中左臂40 km,右臂30 km,其他的相关的系统参数如表3所示,系统仿真图如图7所示。

2.2 牵引网稳态电压分析

牵引电压分布与机车距牵引变电所的距离和机车数量都有一定的关系,本文分别对表4所示的三种算例建立相应的仿真模型。仿真比较三种情况下牵引网电压分布,其仿真结果如图8所示。

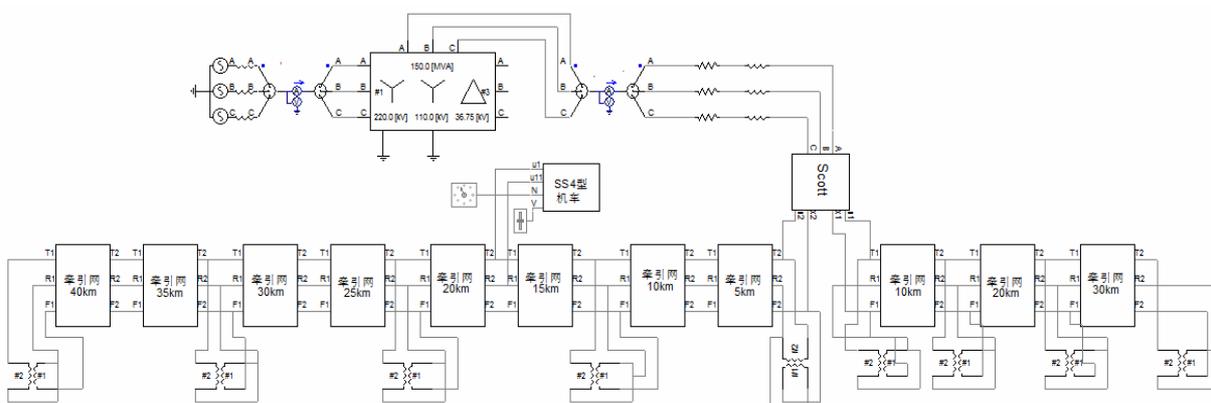


图7 系统仿真模型图

Fig. 7 Diagram of system simulation model

表 3 系统参数取值

Table 3 System parameter values

系统元件	参数名称	参数取值
220 kV 系统	系统容量/MVA	1 000
	额定电压/kV	220
三绕组变压器	容量/MVA	150
	额定电压/kV	220/110/36.75
Scott 接线变压器	容量/MVA	50
	短路阻抗/%	10.5
自耦变压器	电压/kV	110/55
	容量/MVA	5
	变比	55/27.5

表 4 稳态电压分析算例

Table 4 Case of steady state-voltage analysis

算例	机车数量	机车距变电所距离/km
case1	1	15
case2	2	15, 25
case3	3	15, 25, 35

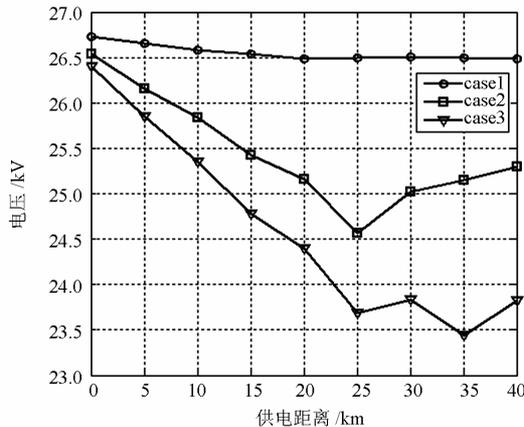


图 8 不同机车数量接触网电压分布

Fig. 8 Contact voltage distribution with different number of trains

由图 8 可以看出接触网电压随着供电距离的增加而降低，在机车位置，电压降至最低，由于自耦变压器的作用，电压又呈上升趋势，但是总趋势仍然是降低的。同时随着机车负荷数量的增加，牵引网整体电压水平降低。

2.3 牵引网谐振与电网谐波畸变率仿真分析

2.3.1 机车位置对牵引网谐振与谐波畸变率影响

设牵引网长度为 40 km，分别使机车处于距离变电所 0、5、15、25、35、40 km 位置，其牵引网首段电流谐振情况如图 9 所示。

由图 9 可以看出，当牵引网长度固定时，随着机车位置的变化，牵引网发生谐振的频率不变，都

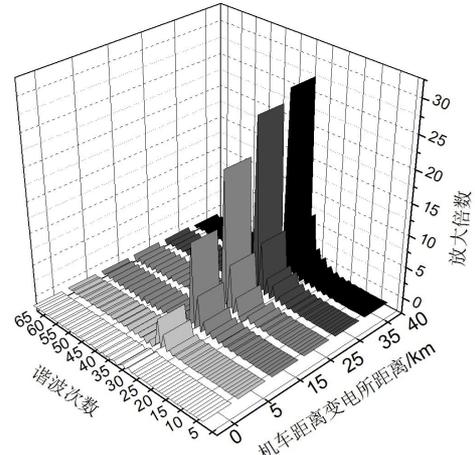


图 9 机车位置不同谐波电流放大情况

Fig. 9 Harmonic current amplification with different train location

是 27 次谐波。同时随着机车距牵引变电所越远，其谐振点的电流放大倍数也逐渐增大。

机车位置发生变化时机车取流、牵引网首端电流、110 kV 侧电流、电压谐波畸变率值如表 5 所示。

表 5 机车位置变化时谐波畸变率

Table 5 Total harmonic distortion with different train location

机车位置	机车取流/%	首端电流/%	110 kV 侧电流/%	110 kV 电压/%
0	29.91	28.85	29.87	2.38
5	27.42	27.6	27.82	2.36
15	25.15	26.3	25.75	2.04
25	23.32	24.65	24.31	2.02
35	21.38	23	23	2.27
40	21.5	22.62	22.67	2.22

由 2.2 节可知，随着机车距牵引变电所距离增大，机车两端电压是逐渐降低的，此时机车所产生的谐波电流也逐渐减小。虽然 27 次谐波电流放大倍数逐渐增大，但是由于 27 次谐波含量很低，所以 110 kV 侧电流总畸变率也是逐渐减小，同时电压畸变率总体减小。另外虽然电压总畸变率在减小，但是明显已经超过了国家谐波限值标准，即 110 kV 电压等级电压总谐波畸变率不超过 2%^[18]。

2.3.2 牵引网长度对牵引网谐振与谐波畸变率影响

为了研究牵引网长度对牵引网谐振和谐波畸变率影响，本文将牵引网长度分别取 20 km、30 km、40 km，机车固定在牵引网末端，其牵引网首段电流谐振情况如图 10 所示。

不同牵引网长度时机车取流、牵引网首端电流、110 kV 母线处电流、电压谐波畸变率值如表 6 所示。

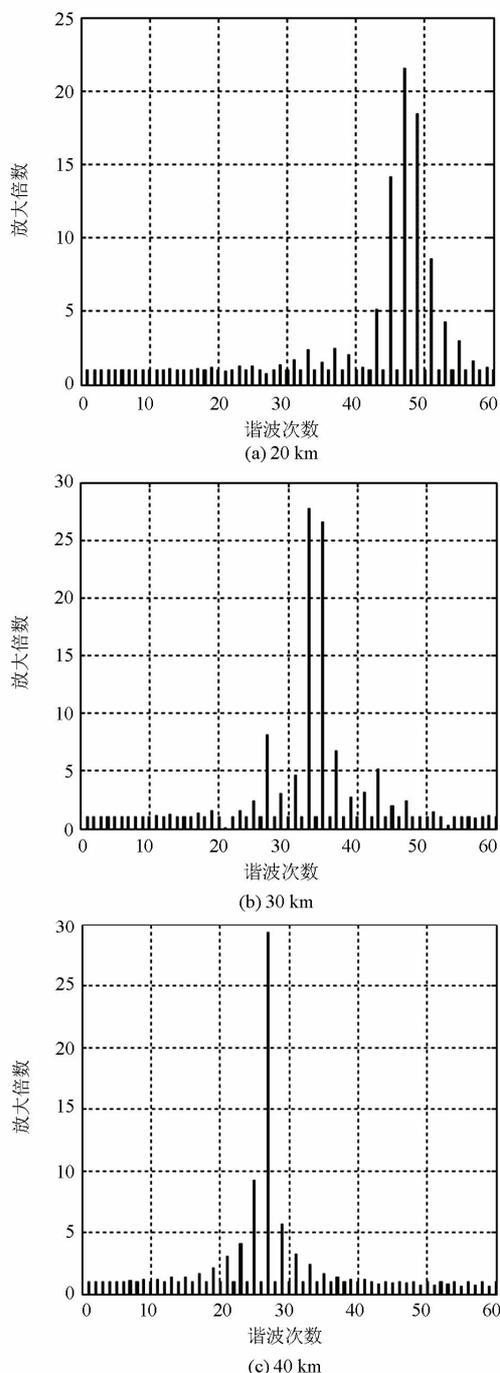


图 10 不同牵引网长度谐波电流放大情况

Fig. 10 Harmonic current amplification with different traction network length

由图 10 可以看出牵引网长度为 20 km 时 47 次谐波发生谐振; 30 km 时 33 次谐波发生谐振; 40 km 时 27 次谐波发生谐振, 因此随着牵引网长度变长, 牵引网谐振点逐渐降低。同时由表 6 也可以看出随着牵引网长度的增加, 110 kV 侧电流、电压总谐波畸变率逐渐降低, 但是均超过了国家规定的限值。

表 6 不同牵引网长度的谐波畸变率
Table 6 Total harmonic distortion with different traction network length

牵引网长度	机车取流/%	首端电流/%	110 kV 电流/%	110 kV 电压/%
20	24.56	25.99	24.46	5.15
30	22.91	23.87	23.36	3.09
40	21.5	22.62	22.67	2.22

2.3.3 机车数量对牵引网谐振与谐波畸变率影响

在牵引网左臂上分别接入 2、3、4 辆机车时, 其牵引网首端谐振情况如图 11 所示。

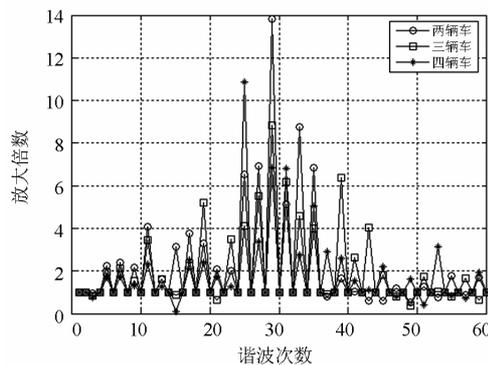


图 11 不同机车数量时牵引网谐振情况

Fig. 11 Resonance of traction network with different number trains

表 7 机车数量变化时谐波畸变率

Table 7 Total harmonic distortion with different number trains

机车数量	2	3	4
110 kV 电压畸变率/%	2.75	2.95	3.04

由图 11 可知, 随着机车数量的增加, 牵引网谐振频率变化不大, 主要集中在 25~31 次谐波, 同时由表 7 可知, 随着机车数量的增加, 虽然牵引网电压水平会降低, 但是此时 110 kV 侧电压总谐波畸变率仍然是逐渐增大。

3 结论

本文利用 PSCAD/EMTDC 搭建了机车-牵引网-电网联合仿真模型, 研究机车位置、机车数量和牵引网长度发生变化时牵引网谐振和电网谐波畸变率变化特性。通过仿真分析得出了如下结论:

(1) 机车-牵引网-电网联合仿真模型在分析牵引网谐振和谐波对电力系统的影响时, 其结果更加符合实际。

(2) 牵引网的谐振频率与机车位置、机车数量无关, 与牵引网的长度有关, 牵引网越长, 谐振频率越低。当牵引网长度固定时, 机车距离牵引变电所越远, 其机车两端电压越低, 机车谐波电流也逐渐降低, 虽然谐振点谐波电流放大倍数增大, 但是

由于交-直型电力机车高次谐波含量很低,因此电力系统侧电流、电压总谐波畸变率是逐渐降低的。牵引网越长,谐振点越低,电压谐波畸变率也逐渐降低。同一供电臂上机车数量的增加会使系统侧电压谐波畸变率增大。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 姚金雄, 张涛, 林榕, 等. 牵引供电系统负序电流和谐波对电力系统的影响及补偿措施[J]. 电网技术, 2008, 32(9): 60-64.
YAO Jin-xiong, ZHANG Tao, LIN Rong, et al. Impacts of negative sequence current and harmonic in traction power supply system for electric railway on power system and compensation measures[J]. Power System Technology, 2008, 32(9): 60-64.
- [3] 马伏军, 罗安, 徐先勇, 等. 大功率混合型电气化铁路功率补偿装置[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 93-102.
MA Fu-jun, LUO An, XU Xian-yong, et al. High-power hybrid power quality compensation system in electrified railway[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 93-102.
- [4] 张定华, 桂卫华, 王卫安, 等. 新型电气化铁道电能质量综合补偿系统的研究及工程应用[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 189-194.
ZHANG Ding-hua, GUI Wei-hua, WANG Wei-an, et al. Study and application of a new power quality combined compensation system for electrified railway[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(3): 189-194.
- [5] 陈民武, 宫衍圣, 李群湛, 等. 电气化铁路电能质量评估及新型控制方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(16): 141-147.
CHEN Min-wu, GONG Yan-sheng, LI Qun-zhan, et al. Assessment of power quality of electrified railway and the research on the new control scheme[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(16): 141-147.
- [6] 李建华, 豆凤梅, 夏道止. 韶山IV型电力机车谐波电流的分析计算[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(16): 10-13.
LI Jian-hua, DOU Feng-mei, XIA Dao-zhi. Analysis and calculation of harmonic current for Shaoshan IV electric locomotive[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(16): 10-13.
- [7] 徐春侠, 李庚银, 赵成勇, 等. 韶山IV型电力机车谐波分析[J]. 华北电力大学学报, 1998, 25(3): 40-46.
XU Chun-xia, LI Geng-yin, ZHAO Cheng-yong, et al. Harmonic analysis of electric locomotive typed SS4[J]. Journal of North China Electric Power University, 1998, 25(3): 40-46.
- [8] 张俊杰, 肖湘宁, 尹忠东, 等. 基于 PSCAD/EMTDC 的 SS6B 型电力机车仿真模型研究[J]. 机车电传动, 2008(6): 27-29.
ZHANG Jun-jie, XIAO Xiang-ning, YIN Zhong-dong, et al. Simulation model of SS6B electrical locomotive based on PSCAD/EMTDC[J]. Electric Drive for Locomotives, 2008(6): 27-29.
- [9] 郎兵, 吴命利. 牵引网谐波模型及其仿真计算[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 76-80.
LANG Bing, WU Ming-li. Harmonic model of traction network and its simulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 76-80.
- [10] HANMIN L, CHANGMU L, GILSOO J, et al. 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.
- [11] 王奇, 刘志刚, 白玮莉, 等. 基于 PSCAD/EMTDC 的牵引供电系统仿真模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(16): 35-40.
WANG Qi, LIU Zhi-gang, BAI Wei-li, et al. Research on the simulation model of traction power supply system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(16): 35-40.
- [12] 韩旭东, 高仕斌, 王斌. 牵引供电方案设计中谐波谐振问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 142-147.
HAN Xu-dong, GAO Shi-bin, WANG Bin. Research on the harmonic resonance in the design of traction power supply scheme[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 142-147.
- [13] 刘建强, 郑琼林, 杨其林. 高速列车牵引传动系统与牵引网谐振机理研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 221-227.
LIU Jian-qiang, ZHENG T Q, YANG Qi-lin. Resonance mechanism between traction drive system of high-speed train and traction network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 221-227.
- [14] 姚楠. 电气化铁道牵引网基波与谐波模型研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
- [15] 刘友梅. 韶山IV型电力机车[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2003.
- [16] 余丹萍. 电气铁路牵引供电系统的仿真及其影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [17] 林海雪, 孙树勤. 电力网中的谐波[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [18] GB/T 14549-1993 电能质量 公用电网谐波[S].

收稿日期: 2014-01-18; 修回日期: 2014-02-19

作者简介:

李宏强(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析与建模仿真; E-mail: lhq1652@126.com

王晓茹(1962-), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统保护和安全稳定控制、配电网与变电站自动化技术等;

徐家俊(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统建模与仿真。