

影响电气化铁路牵引网模态分析结果的因素分析

为防止谐波对牵引供电系统的危害,可采用模态分析方法对系统的节点导纳矩阵进行分析和处理,通过解耦与特征值的求取来确定谐振信息。在建立牵引供电系统的过程中,牵引网分段处理时单位段长度选取不同将造成节点导纳矩阵的差异,若忽略牵引网线路参数的分布特性,也可能对模态分析结果的准确性造成影响,牵引网分段长度及牵引网线路分布参数在谐波阻抗特性分析研究中常被忽略。针对上述问题,考虑牵引网分布参数特性,在Matlab/Simulink软件平台上建立牵引网等效模型,用模态分析法确定牵引网谐波阻抗特征。最终得出分段方式不同对模态分析结果偏移的一般规律,以及在考虑牵引网参数分布特性时,可以提高模态分析结果准确度的结论。

唐诗光 黄彦全 魏光耀 张 远/西南交通大学电气工程学院

0 引言

谐波一直是电气化铁路迫切需要解决的问题,随着交-直-交机车投入运行的情况日益普及,其向牵引网注入的谐波电流所造成的危害也日益引起运营和研究部门的重视。与交-直机车不同,交-直-交机车具有谐波频谱范围广、低次谐波含量较低的特点。

尽管现今模态分析法已经用于牵引网谐波分析,对谐波谐振机理及造成的影响也有较深入的研究^[1-4],但是对于模态分析结果的准确度及影响准确度的因素研究较少。文献[5-8]对线路进行了模态分析,但是没有考虑到单位段选取差异对结果的影响;文献[9-12]揭示了牵引网系统的谐波谐振规律,但无法确定谐振影响范围;文献[13-15]对移动负荷对牵引网系统谐振规律的影响进行了分

析,但是忽略了交-直-交机车谐波输入范围广的特点和线路分布参数特性,因此可能会造成误差。

对以下两个可能对模态分析结果产生影响的因素进行分析:①改变单位段长度导致牵引网导纳矩阵变化;②对高次谐波研究中计及线路分布参数特性。在Matlab/Simulink软件平台上以电气化铁路直供系统为研究对象,分析当线路单位段取值不同导致节点数不同时,测得的谐振频率、关键模态和谐振影响范围的变化情况。在此基础上,总结出节点导纳矩阵与线路模态分析结果间影响的一般规律。最后对比计及线路分布参数特性时,对模态分析结果准确度的影响。

1 牵引网阻抗计算

牵引供电线路是分布参数的传输线,线路任一处无限小长度 dx 都可用阻抗 $Z_1 dx$ 和并联导纳 $Y_1 dx$ 表示,如图1所示。

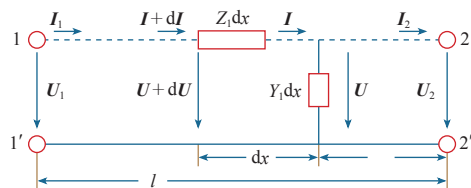


图1 牵引网模型示意图

由图1可得,当线路发生 h 次谐振时,稳态时分布参数线路的微分方程的解为

$$\begin{aligned} U^{(h)} &= U_2^{(h)} \cosh \gamma^{(h)} x + I_2^{(h)} Z_c^{(h)} \sinh \gamma^{(h)} x \\ I^{(h)} &= U_2^{(h)} / Z_c^{(h)} \sinh \gamma^{(h)} x + I_2^{(h)} \cosh \gamma^{(h)} x \end{aligned} \quad (1)$$



唐诗光/硕士研究生

关键词/Keywords

谐振·
模态分析·
分段处理方式·
牵引网分布参数特性·
规律·

式中, $Z_c^{(h)} = \sqrt{Z_1^{(h)} / Y_1^{(h)}}$; $\gamma^{(h)} = \sqrt{Z_1^{(h)} Y_1^{(h)}}$ 。

将牵引网作为无源的双端口网络来处理, 将线路单位长度 l 代入, 上述可用 π 形等效电路表示。等效电路的参数与传输参数的关系为

$$\begin{aligned} Z &= Z_c \sinh \gamma l = K_Z Z_1 l \\ Y &= (\cosh \gamma l - 1) / Z_c \sinh \gamma l = K_Y Y_1 l \end{aligned} \quad (2)$$

式中, Z 为分布阻抗; Z_1 为等效阻抗; K_Z 、 K_Y 为 π 形等效电路阻抗和导纳的修正系数。

考虑到牵引网实际长度与电磁波波长的关系, 在对基波与低次谐波分析时, 各修正系数可取1, 但对高次谐波而言, 忽略牵引网分布参数特性有可能影响分析结果的准确度。

dx 取值不同, 所得单位段 π 形模型中的元件值也会发生变化, 同时, 线路节点导纳矩阵的维数也不同, 最终可能对模态分析结果产生影响。用级联的 π 形等效电路作为牵引网系统等效模型, 示意图如图2所示。

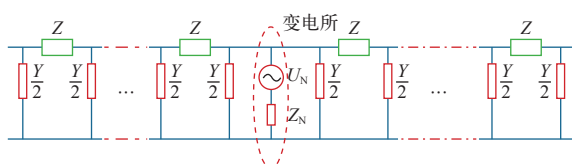


图2 牵引网系统等效模型

2 模态分析

系统的谐波谐振往往与网络节点导纳矩阵 Y 出现极小值有关, 极端的情况下, Y 呈现出奇异性, 系统响应的节点会产生非常高的过电压, 这就是并联谐振中最严重的形式。

如系统存在对频率 f 的谐波发生并联谐振, 则可通过下式计算出频率为 f 的电压向量有很大的值, 即

$$V_f = Y_f^{-1} I_f \quad (3)$$

式中, Y_f 为在频率 f 处的网络导纳矩阵; V_f 、 I_f 分别为向节点注入频率为 f 的电流向量和系统响应的电压向量。

严重的谐波谐振意味着某些节点电压非常高, 这一般在矩阵趋于奇异时发生。可通过特征根分析 Y_f 是如何趋近于奇异的。 Y_f 可以分解为以下形式

$$Y_f = L A T \quad (4)$$

式中, 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(4)代入式(3)得

$$\begin{cases} V_f = L A^{-1} T I_f \\ T V_f = A^{-1} T I_f \end{cases} \quad (5)$$

定义 $U_f = T V_f$ 为模态电压向量; $J_f = T I_f$ 为模态电流向量, 则式(4)可以化简为 $U_f = A^{-1} J_f$ 。

特征值倒数的单位是阻抗, 称为模态阻抗。根据上式, 如果 $\lambda_{f_1} = 0$ 或者非常小, 则很小的模态1注入电流 J_{f_1} 将导致很大的模态1电压 U_{f_1} 。另一方面, 其他的模态电压将不受影响, 因为它们和模态1电流之间没有耦合, 即在模态域中很容易地识别出谐振的位置。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二次方, 具有最大参与因子的节点可以被认为是谐振的中心。图3为等效模型模态分析流程图。

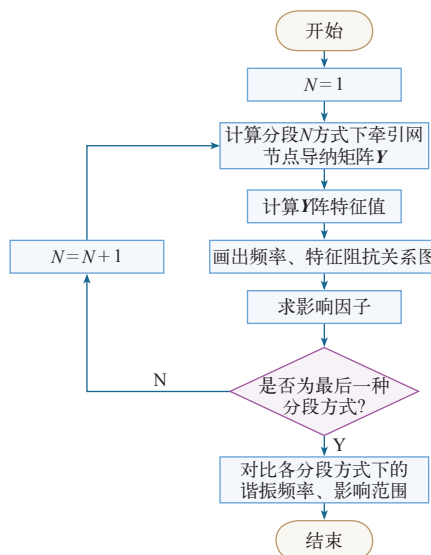


图3 等效模型模态分析流程

3 仿真

模态分析法是分析电气化铁路谐波谐振的有效工具, 与频谱分析法相比可以提供更多谐振的相关信息。本文选取大江口变电所及其左右两供电臂参数用于建模, 为便于研究, 取左右臂长各20 km, 依次取不同的单位段长度作为研究对象,

在Matlab/Simulink软件平台上建立相应的等效模型进行仿真。本节暂忽略线路的分布参数特性。

对线路取单位长10 km时的频谱分析结果与模态分析结果如图4、图5所示。

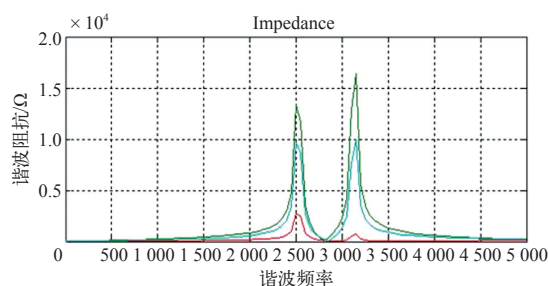


图4 频谱分析法分析结果

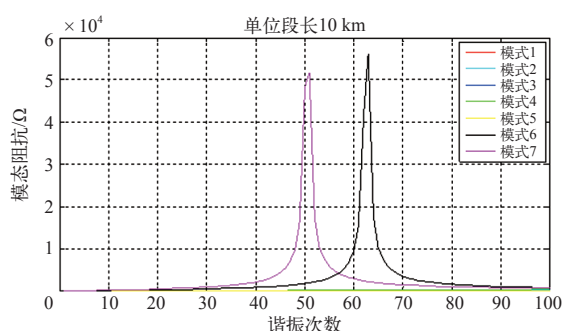
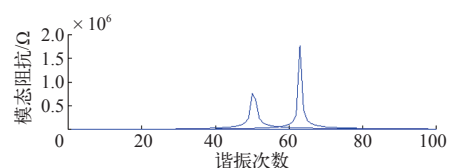


图5 模态分析法分析结果

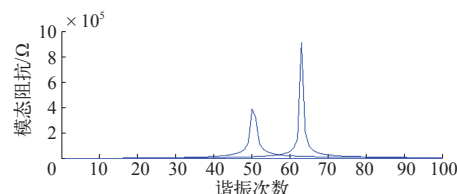
对比两种方法的分析结果可见：运用频谱分析法时，线路各节点均存在谐振，且都包含了谐振信息，难以直接识别出哪个节点在谐振中受影响最严重。由图5可知，其得到的谐振次数与频谱分析相同，但在某一谐振频率下的关键模态只有一个，并且七个节点中包含谐振信息的模式只有两个，之后可通过对关键模态进一步分析得到各节点的影响因子情况，识别出谐振在线路上的传播情况，为谐振的消除等后续工作提供指导意见。

3.1 分段差异与谐振频率关系

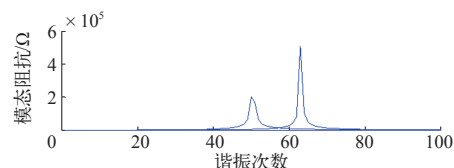
改变单位段长度，不改变线路参数，对牵引网模型进行仿真分析，线路单位长度分别取0.5 km、1 km、2 km、4 km、5 km和10 km，并进行仿真，结果如图6所示。尽管改变单位段使得节点导纳矩阵发生改变，但是测得的谐振频率基本一致，集中在50、63次谐波处。较一般结果不同的是，单位长设为10 km的分段方式仿真中，还测得了明显



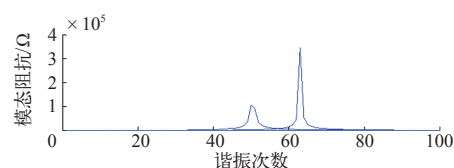
(a) 单位段长0.5 km



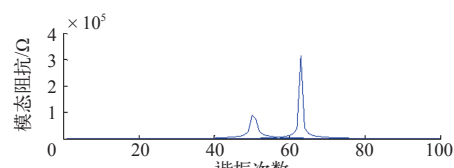
(b) 单位段长1 km



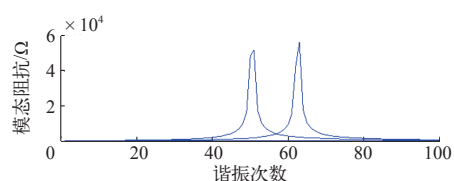
(c) 单位段长2 km



(d) 单位段长4 km



(e) 单位段长5 km



(f) 单位段长10 km

图6 不同单位段情况下的模态分析结果

的51次谐振频率。仿真结果如表1所示。

表1 不同单位段长度情况下的谐振频率

单位段/km	0.5	1	2	4	5	10
谐振频率/Hz	50	50	50	50	50	50
	63	63	63	63	63	51、63

图6中分别表示系统单位段取不同值时的仿真情况。由图6可知，仿真测得的各组模态阻抗的值随单位段长度的减小而增大，而模态阻抗值的大小反映了谐振点谐振的严重情况，因此单位段划

分得越细，对谐振的识别越灵敏。

在六种不同分段方式测得的结果中，虽然51次谐波的模态阻抗并非峰值，但是它与峰值50次谐波模态阻抗值较为相近，因此不能忽视。对50、51次谐波间频率进行以1 Hz为步长的扫频，结果如图7所示，发现真正的谐振峰值约在50.5次，由此可见，系统谐振并非一定发生在整数次谐波处。

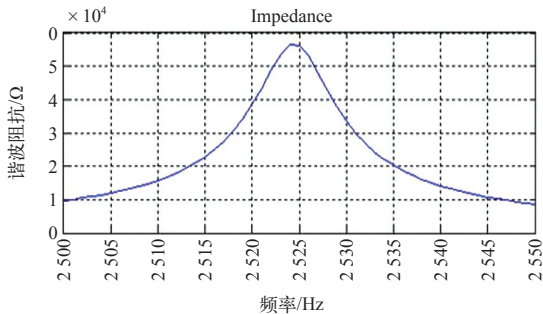


图7 谐波阻抗

此外，谐波阻抗峰值附近的一段范围也应受到重视。如50次谐波附近的49、51和52次谐波；63次谐波附近的62、64次谐波也存在较大的谐波阻抗。由此可见，引起系统谐振的不仅是某一特定次数谐波，也可以是一段范围内的谐波。

3.2 分段方式对传递范围影响

为研究谐振发生时各节点受影响的情况，需要进一步对线路矩阵各模态下的参与因子进行分析。

不同的分段方式下，所对应的节点编号在不同单位段维度的对比研究中不具备参考性，为便于对分析结果进行对比，节点统一用其所在线路

位置表示：规定供电臂左臂远离牵引变电所处为0 km，右臂远端为40 km，牵引变电所为20 km。发生50、63次谐振时，各种分段方式下的最大影响因子节点及其值如表2所示。表2中只给出每种情况下的最大影响因子，而在仿真过程中，单位段长度取值越短时，取到的节点数越多越密集，并且相邻各点间的影响因子数值上相差越小，当单位段取值足够小时，会出现多个最大影响因子。图8给出了三种不同分段方式下影响因子在线路各位置的分布情况，编号1的分段方式为单位段长2 km，编号2、3分别表示单位段长取5 km、10 km时情况。

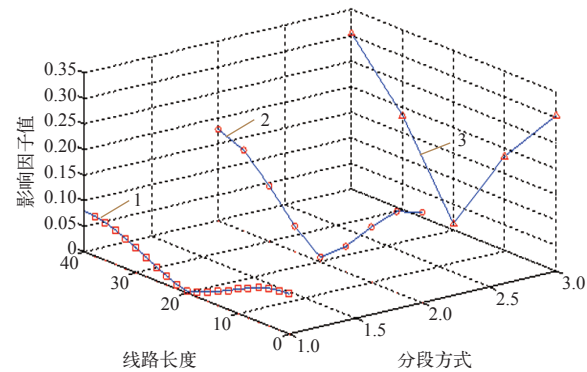


图8 各分段方式下谐振传递情况

通过上述研究，可以归纳出以下结论：

- 1) 虽然对于同一线路的单位段选取不同，但在同一次谐振中，最大影响因子即每种方式下通过模态分析识别出的谐振中心是一致的。
- 2) 此模型中，50、63次谐波的谐振中心均为

表2 各分段方式下最大影响因子情况

	单位段0.5 km		单位段1 km		单位段2 km		单位段4 km		单位段5 km		单位段10 km	
	节点	<i>p</i>	节点	<i>p</i>	节点	<i>p</i>	节点	<i>p</i>	节点	<i>p</i>	节点	<i>p</i>
50次	0	0.017 6	0	0.034 5	0	0.066 0	0	0.121 9	0	0.147 0	0	0.251 9
	0.5	0.017 6	0	0.034 5	0	0.066 0	0	0.121 9	0	0.147 0	0	0.251 9
	1	0.017 6										
	39	0.017 6										
	39.5	0.017 6										
	40	0.017 6										
63次	0	0.021 1	0	0.041 3	0	0.079 3	0	0.146 9	0	0.177 3	0	0.303 8
	0.5	0.021 1	0	0.041 3	0	0.079 3	0	0.146 9	0	0.177 3	0	0.303 8
	39.5	0.021 1										
	40	0.021 1										

线路末端,验证了普遍认为的牵引网线路末端更易受到激励而发生谐振的结论。

3) 影响因子的值反映了谐振在线路上的传递情况,本文中的线路模型为对称模型,谐振从两末端的谐振中心沿线路向牵引变电所传递,两条线路的谐振情况呈对称分布,并且越向中心变电所传递衰减越严重。

4) 在将所研究线路单位段长不断缩小的过程中,最大影响因子点与相邻的节点影响因子的值不断缩小,当单位段长小到一定程度时,会出现相邻节点出现多个最大影响因子的情况。此现象表明,当线路受到激励时,谐振位置并非一点,而是一个区域,此区域可称之为谐振区域。

4 考虑线路分布特性的仿真

电磁波在线路上的传播速度接近于光速,根据式 $C=\lambda f$ 可知,对于高次谐波, f 越大,导致波长 λ 越小。铁路供电臂一般较短,在进行频率较低的谐波阻抗特性研究中,往往会忽略线路的分布参数特性,随着谐波频率的升高,忽略线路分布参数特性可能导致分析结果产生偏差。

本文研究的对象是1~100次谐波,有必要考虑线路分布特性。为得到明显的试验结果,取单位段长10 km的分段方式进行研究,测得的谐振次数如图9所示。

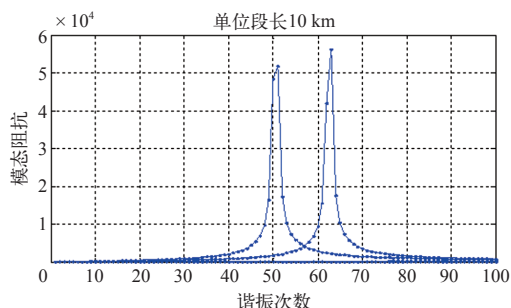


图9 考虑分布参数时模态分析结果

测得最易引起线路谐振的次数为51、63次,50次谐波也较易发生谐振,但并非峰值。与前文中忽略线路分布特性的同条件仿真结果相对比存在以下要点:

1) 50次谐波附近的谐振点发生了变化。

2) 对于模态阻抗,50次谐波变化不明显,63次谐波谐振点处,修正后的模态阻抗变大,说明修正参数可能提高谐振点的识别准确度,并对越高次谐波识别越灵敏。

参数修正前后,分别对50次左右谐振模态求影响因子,结果如表3所示。修正前后影响因子值的大小略有改变,但变化不大,因此修正参数只影响谐振点的识别,不改变谐振在线路的传播情况。

表3 考虑分布参数特性时影响因子情况

	0 km	10 km	出口	内部	出口	30 km	40 km
修正前	0.251 9	0.183 3	0.053 0	0.023 6	0.053 0	0.183 3	0.251 9
修正后	0.251 5	0.183 8	0.052 9	0.023 5	0.052 9	0.183 8	0.251 5

5 结束语

1) 对线路进行模态分析,改变单位段长度使得节点导纳矩阵发生变化,并不影响测得的谐振频率及谐振位置结果。

2) 谐振阻抗峰值出现的频率并不一定为整数次谐波;引起线路谐振的激励并非某次特定频率,而是一段频率范围,同样的,当发生某次谐振时,受影响最大的并非某一节点而是一段区域,可称为谐振区域。

3) 研究高次谐波时,考虑线路参数分布特性可以提高谐振点识别准确度,对于越高次谐波,识别越灵敏。

参考文献

- [1] 周辉,吴耀武.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.
- [2] 王硕禾.基于模态分析的牵引供电系统谐波谐振过电压研究[J].铁道学报,2013,35(7):32-41.
- [3] 付莉,张桂楠.高速铁路车网耦合系统网压振荡模态分析与对策[J].电力系统保护与控制,2016,44(1):24-32.
- [4] 李书铭,李陈莹,李琼林,等.电力系统串联谐波谐振的特性分析与灵敏度计算[J].电力系统保护与控制,2015,43(9):21-27.

(下转第85页)

- 力, 2009 (3): 491-494.
- [3] 朱志华. 电力客户信用评价与欠费风险预警系统的总体设计 [J]. 现代计算机: 专业版, 2009 (1): 188-190, 195.
- [4] 朱莹. 电力客户信用评估方法研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- [5] Zhang Jin, Tu Junxiang, Chen Zhuoning, et al. Quasi-bayesian software reliability model with small samples [J]. Journal of Shanghai University: English Edition, 2009 (4).
- [6] 罗毅, 李昱龙. 基于熵权法和灰色关联分析法的输电网规划方案综合决策 [J]. 电网技术, 2013, 37 (1): 77-81.
- [7] 欧阳森, 石怡理. 改进熵权法及其在电能质量评估中的应用 [J]. 电力系统自动化, 2014, 37 (21): 156-159.
- [8] 刘宇彬, 刘建华. 基于层次分析法和熵权法的电网风险评估 [J]. 电力科学与工程, 2013 (11): 37-43.
- [9] 朱莹. 电力客户信用风险管理系统 [J]. 华东电力, 2009, 37 (3): 491-494.
- [10] 赵建文, 张新忠. 基于客户信用评价的电费风险管理系统建设及应用 [J]. 中国电力企业管理, 2013 (6): 61-63.
- [11] 谢赤, 钟赞. 熵权法在银行经营绩效综合评价中的应用 [J]. 中国软科学, 2002 (9): 109-111, 108.
- [12] 杜娅丹, 曹红霞, 柳美玉, 等. 基于层次分析法和熵权法的TOPSIS模型在番茄生长综合评价中的应用 [J]. 西北农业学报, 2015 (6): 90-96.
- [13] Anjani Kumar, Singh D K. Prabhat kumar performanee of rural credit and faectors affecting the choiee of credit sources [J]. Indian Journal of Agrieultural Economics, 2007, 62 (3): 22-25.
- (收稿日期: 2017-03-17) **EA**

(上接第71页)

- [5] Wilsun Xu. Harmonic resonance mode analysis [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (2): 1182-1190.
- [6] 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.
- [7] 马啟潇. 高速电气化铁路谐振故障的分析与研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2009: 1-65.
- [8] 史天玉. 高速铁路谐波谐振抑制研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013: 1-78.
- [9] 蒋功连. 铁路牵引供电系统设计中的谐波 [J]. 铁道标准设计, 2014, 58 (6): 128-132.
- [10] 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, 2009: 1-82.
- [11] 李宏强. 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.
- [12] 方雷. 高速铁路牵引供电系统数字建模及仿真 [D]. 成都: 西南交通大学, 2010: 1-80.
- [13] 张民. 不同负荷模型下高速铁路牵引供电系统谐波谐振灵敏度分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43 (20): 21-28.
- [14] 胡海涛, 何正友. 基于模态分析的全并联AT 网动态谐波谐振研究 [J]. 电网技术, 2012, 36 (1): 163-169.
- [15] 徐志强, 李冰. 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.
- [16] 韩旭东. 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.
- [17] 仰彩霞, 刘开培. 谐波谐振模态灵敏度分析 [J]. 电工技术学报, 2011, 26 (1): 207-212.
- [18] 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, 2006.
- (收稿日期: 2017-03-17) **EA**