电力系统串联谐波谐振的特性分析与灵敏度计算

刘书铭[1]，李陈莹[2]，李琼林[1]，崔 雪[2]，刘会金[2]

(1.国网河南省电力公司电力科学研究院，河南 郑州 450052;
2.武汉大学电气工程学院，湖北 武汉 430072)

摘要：分析电力系统谐波背景下模态分析与谐波谐振关联的机理，根据回路阻抗矩阵，绘制矩阵特征值频谱和串联谐波谐振下的关键模态导纳。根据串联谐振及谐波激励的自身特点，提出使用虚拟支路对系统拓扑结构进行修正处理，对网络进行谐波谐振模态分析，将模态分析结果与系统导纳频谱扫描结果进行比较，验证谐波谐振频率计算方法的可行性和准确性。定义灵敏度矩阵，通过基本回路矩阵确定系统元件与回路阻抗矩阵元素间的关联性，推导关键模态下特征值对各网络元件电气参数的灵敏度，通过标准化处理，提高了各支路元件灵敏度的可比性。对IEEE30母线系统进行仿真分析，得出串联谐振对元件的灵敏度影响程度和串联谐振的定位及传播范围。

关键词：串联谐波谐振；模态分析；虚拟支路；谐振定位；灵敏度分析

Characteristics analysis of power system series harmonic resonance and sensitivity calculation

LIU Shuming[1], LI Chenying[2], LI Qionglin[1], CUI Xue[2], LIU Huijin[2]
(1. State Grid HAEPC Electric Power Research Institute, Zhengzhou 450052, China;
2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The mechanism of association between modal analysis and harmonic resonance in power system harmonics is analyzed firstly, and the spectrums of matrix eigenvalues and critical modal admittance in series harmonic resonance are drawn according to the loop impedance matrix. Then, the system topology corrected with dummy branch is proposed based on the characteristics of series resonance and harmonic excitations to analyze the harmonic resonance of power network. The result of analysis is compared with the result of system admittance spectrum scan to verify feasibility and accuracy of the harmonic resonance frequency calculation method. Next, defining the sensitivity matrix, the sensitivity of key model eigenvalue to each network element electrical parameters is derived using fundamental loop matrix to determine relevance between system components and loop impedance matrix elements. The comparability among the sensitivities of branch elements is improved using the standardization. Finally, simulation analysis of the IEEE30 bus system is made, and the impact of series resonance on the element sensitivity, the series resonance positioning and transmission range are obtained.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177112).

Key words: series harmonic resonance; modal analysis; dummy branch; resonance positioning; sensitivity analysis

中图分类号： TM71 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2015)09-0021-07

0 引言

电力系统中的元件大多为感性元件，考虑到装设的补偿电容器和高压输电线路的电容，系统形成性电容与电感元件并联或串联的网络。系统中出现谐波激励时可能发生并联谐振或者串联谐振，从而出现过电流或过电压现象，严重时甚至会造成电力元件的损害，影响系统的正常运行。因此，对电力系统谐波谐振的分析、谐波谐振程度与电力元件之间的关联研究对整个系统的安全运行具有十分重要的意义[1-5]。

目前国内外研究主要通过频谱扫描的方式对系统谐振点进行分析，该方法可以准确找出谐振频率却不能对谐振情况进行评估。采用谐振模态分析的方法对该问题有所解决，但目前研究主要针对并联谐振进行灵敏度分析，对串联谐振并未给出准确的

基金项目：国家自然科学基金项目(51177112)

评估。文献[6-12]介绍了模态分析法在并联谐波谐振中的应用，未结合串联谐振特点，对串联谐振点的分析仅类比于并联谐振，分析结果并不准确。文献[9]针对串联谐振特点对模态分析法进行改进，但未对谐振灵敏度进行分析，缺乏对系统串联谐波谐振激励及元件的深入研究。

本文沿用模态分析法，引入虚拟支路对串联谐波谐振进行分析，对特定母线出现的谐波电压情况进行系统网络串联谐振的分析，结合网络基本回路矩阵，提出分析系统元件串联谐振灵敏度计算方法。该方法继承模态法求解谐波谐振问题的优点，并对之进行了补充和完善。本文的研究结果可作为分析串联谐波谐振问题及谐振情况评估的基本方法，可用于分析串联谐振对系统元件的影响程度。

1 谐波谐振模态分析

随着电力电子器件广泛运用于电力系统，系统中易出现大量的谐波电压激励，因系统自身电气元件发生串联谐振，从而产生谐振过电流现象。对系统列写回路电流方程，如式(1)所示。

$$\boldsymbol{Z}^{-1}\boldsymbol{E}=\boldsymbol{I} \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{Z}$ 为系统回路阻抗矩阵，该矩阵与谐波频率相关；$\boldsymbol{I}$ 为回路电流矩阵；$\boldsymbol{E}$ 为回路电压矩阵。对 $\boldsymbol{Z}$ 进行谱分解，再正交单位化，可以得到

$$\boldsymbol{Z}=\boldsymbol{B}_f\boldsymbol{Z}_b\boldsymbol{B}_f^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{P}\boldsymbol{\Lambda}\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

其中：$\boldsymbol{B}_f$ 为基本回路矩阵；$\boldsymbol{Z}_b$ 为支路阻抗矩阵；$\boldsymbol{P}$ 为单位正交阵，$\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}$ 为其转置矩阵；$\boldsymbol{\Lambda}$ 仅主对角线上有非零元素，且为 $\boldsymbol{Z}$ 矩阵的特征值。化简式(1)可得

$$\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{I}=\boldsymbol{\Lambda}^{-1}\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{E} \tag{3}$$

定义模态回路电流相量 $J=\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{I}$，模态回路电压相量 $\boldsymbol{U}=\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{E}$，则

$$J=\boldsymbol{\Lambda}^{-1}\boldsymbol{U} \tag{4}$$

其中，$\boldsymbol{\Lambda}^{-1}$ 为模态导纳矩阵，该矩阵自身结构特点决定了式(4)可以获得电压间解耦的效果。模态导纳中的最大值为关键模态导纳[13-15]。系统发生串联谐波谐振，即在某特定次谐波下，系统某处出现谐波电压激励，从而在系统中产生谐波过电流现象。该现象可以通过修正特定谐波频率下的 $\boldsymbol{Z}$ 矩阵，结合式(1)~式(4)，分析模态导纳矩阵各元素中的最大值，寻求到谐振点的具体位置。可见，阻抗回路矩阵 $\boldsymbol{Z}$ 的奇异性对于串联谐波谐振有着显著的影响。

特征向量 $\boldsymbol{P}$、$\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}$ 表现了模式下的最高可观测性及最大可激励性，定义特征向量的乘积作为谐振参与因子，其幅值反映了谐振能够传播的距离。具有最大幅值的母线可以被认为是“谐振的中心”。

根据串联谐振自身特点，谐振激励会影响网络拓扑，本文对谐波电压激励母线处引入虚拟支路，依据母线位置对谐振可能情况进行分类。对各类分别讨论，针对特定类确定虚拟支路参数，从而确定的系统网络拓扑结构。再依据上述模态分析方案寻求每一类下的关键模态导纳，进而寻求到谐振频率及谐振发生位置。综合各类下的分析结果，获得更精确、全面的串联谐振结果。

2 虚拟支路的应用

根据文献[5-9]，使用谐振模态分析(RMA)，对串联谐振及并联谐振进行相关讨论，从文献中各类方法对比可知，不同于并联谐振，串联谐振产生过电流现象主要与系统节点及回路结构相关。并联谐振的模态分析，是模拟系统母线处出现谐波电流激励，激励阻抗大，不会影响网络结构。而串联谐振模态分析时需要在系统中模拟谐波电压源，激励阻抗小，会造成拓扑结构的变化。因此，如若直接将模态分析法运用于串联谐振，会造成检测精度的降低。

为解决该问题，对系统结构进行特定的修正，再进行串联谐波谐振的相关分析。依据可能存在谐波电压激励的母线划分谐振类别，如图 1 所示 5 节点系统，若各母线均存在谐波源，则可根据谐振激励位置将串联谐振分为母线 1 类谐振、母线 2 类谐振、……、母线 5 类谐振。对系统引入虚拟支路，于谐波激励处母线处各添加一条电阻性虚拟接地支路，通过改变该支路修正系统结构。在考虑母线 k 类谐振时，母线 k 处的虚拟支路电阻阻值设为零，表现为该节点接地，系统其余虚拟支路设为阻值较大电阻，模态分析修正后的系统串联谐波谐振情况；当分析母线 j 类谐振时($j\neq k$)，母线 k 处虚拟支路设为一阻值较大的电阻，表现为虚拟支路开路，再对系统进行模态分析。综合各类谐振模态分析结果，可得系统全部串联谐振点位置及串联谐振频率。

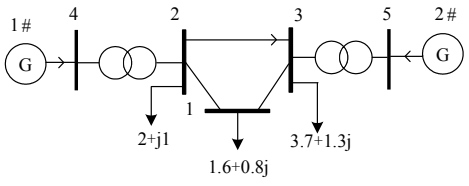

图 1 IEEE5 母线系统图

Fig. 1 IEEE5 bus system diagram

以 IEEE5 母线系统为例，发电机组基波阻抗标幺值为 0.015j，系统结构如图 1 所示。对系统阻抗回路矩阵直接使用模态分析法的结果如图 2 所示。

考虑各母线均存在谐波电压激励，对母线 1~5 类谐振分别进行分析，绘制各类谐振下的模态导纳频谱结果如图 3 所示。

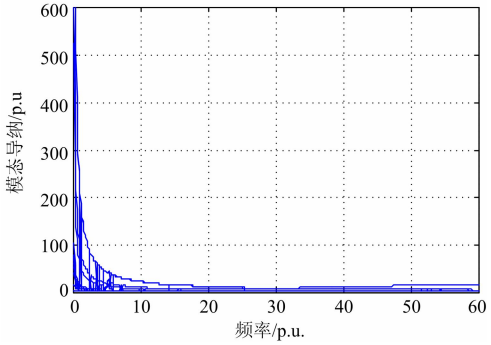

图 2 IEEE5 母线系统模态导纳频谱

Fig. 2 IEEE5 bus system modal admittance spectrum

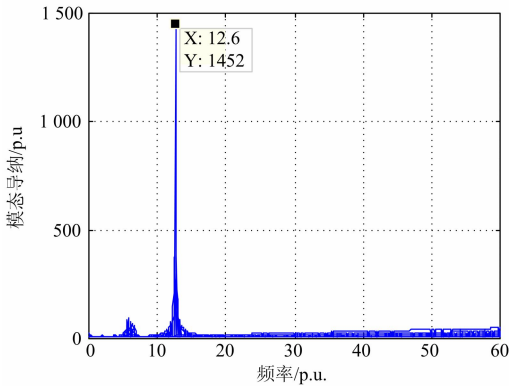

图 3 基于虚拟支路法的 IEEE5 母线系统模态导纳

Fig. 3 IEEE5 bus system modal admittance based on dummy branch method

比较图 2、图 3，可见使用虚拟支路处理网络后进行模态分析有助于寻求串联谐振频率，而对系统直接使用模态分析法在本案例中无法寻求谐振点。为验证该方案的正确性，在 Simulink 中搭建 5 节点系统网络模型，对各节点输入导纳进行频谱扫描，结果如图 4 所示。

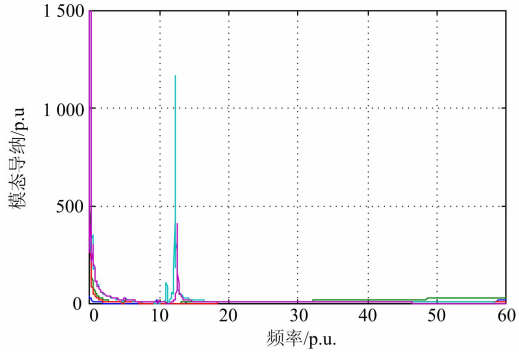

图 4 IEEE5 母线系统各节点导纳频谱

Fig. 4 Each node admittance spectrum of IEEE5 bus system

对比图 3、图 4，由基于虚拟支路的模态分析可得谐振频率为 12.6 p.u.，对系统导纳进行频谱扫描获得的谐振点为 12.68 p.u.，进而验证了该方案的正确性。

3　灵敏度分析

通过上述分析，串联谐波谐振与网络回路阻抗矩阵特征根的最小值有关，参与因子表现谐振中心位置，但并不能将该定位精确到系统元件。因此各元件谐振灵敏度分析有助于研究网络元件对谐振发生的影响程度[16-18]。确定谐波谐振影响较大的元件，利于调整元件的参数来消除谐波谐振。

3.1　灵敏度矩阵分析

确定串联谐波谐振频率下的回路阻抗矩阵 $\boldsymbol{Z}$，进行模态分析，不妨设 $\boldsymbol{\Lambda}$ 中最大的特征值为 λ_k，且 λ_k 为 $\boldsymbol{\Lambda}$ 对角线第 k 个元素。α为系统中某一元件，P_k 为 $\boldsymbol{P}$ 矩阵第 k 个列向量，$\boldsymbol{P}_k^{\mathrm{T}}$ 为 $\boldsymbol{P}^{\mathrm{T}}$ 第 k 个横向量。显然有

$$\boldsymbol{P}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{Z}=\lambda_k\boldsymbol{P}_k^{\mathrm{T}} \tag{5}$$

结合式(5)，对系统中的任一元素α求偏微分，得到

$$\boldsymbol{P}_k^{\mathrm{T}}\frac{\partial Z}{\partial\alpha}+\frac{\partial P_k^{\mathrm{T}}}{\partial\alpha}\boldsymbol{Z}=\frac{\partial\lambda_k}{\partial\alpha}\boldsymbol{P}_k^{\mathrm{T}}+\lambda_k\frac{\partial P_k^{\mathrm{T}}}{\partial\alpha} \tag{6}$$

等式两边右乘 P_k，结合 $\boldsymbol{P}$ 矩阵的正交性，得到

$$\frac{\partial\lambda_k}{\partial\alpha}=\boldsymbol{P}_k^{\mathrm{T}}\frac{\partial Z}{\partial\alpha}P_k \tag{7}$$

若α为回路阻抗矩阵 $\boldsymbol{Z}$ 的元素 Z_{ij}，则特征值对 Z_{ij} 的偏导值为

$$\frac{\partial\lambda_k}{\partial Z_{ij}}=\boldsymbol{P}_k^{\mathrm{T}}(i)\cdot P_k(j) \tag{8}$$

其中：$P_k^{\mathrm{T}}(i)$ 表示 $\boldsymbol{P}_k^{\mathrm{T}}$ 向量中的第 i 个元素；$P_k(j)$ 表示 P_k 的第j个元素。为方便计算，定义灵敏度矩阵 S_λ 为

$$S_\lambda=P_k\cdot P_k^{\mathrm{T}} \tag{9}$$

则式(8)可以表示为

$$\frac{\partial\lambda_k}{\partial Z_{ij}}=S_\lambda(j,i) \tag{10}$$

3.2　特征值对网络元件的灵敏度分析

结合式(10)可得特征值对网络元件β的灵敏度表达式为

$$\frac{\partial\lambda_k}{\partial\beta}=\Sigma\frac{\partial Z_{ij}}{\partial\beta}\cdot S_\lambda(j,i) \tag{11}$$

网络元件β对于网络阻抗矩阵的影响主要体现在基本回路矩阵 $\boldsymbol{B}_f$中，通过对基本回路的分析获得

式(11)中 $S_\lambda(j,i)$ 的系数。不妨设β所在支路编号为k，$\boldsymbol{B}_f$的第 k 列表示为 $B_f(k)$，则式(11)中 $S_\lambda(j,i)$ 系数对应的矩阵可以表示为

$$\boldsymbol{C}=B_f(k)\cdot B_f(k)^{\mathrm{T}} \tag{12}$$

则式(11)可以化简为

$$\frac{\partial\lambda_k}{\partial\beta}=\Sigma C(i,j)\cdot S_\lambda(j,i) \tag{13}$$

研究模态导纳频谱时，仅考虑特征值的模值，元件 β 实部虚部分别表现该元件的电气参数。不妨设 β 表示为某元件的阻抗，基波情况下 $\beta=R+\mathrm{j}X$。若 X 发生变动，特征值亦发生偏移，其偏差可表现为

$$\Delta|\lambda_k|=\sqrt{|\lambda_k+\Delta\lambda_k|^2-|\lambda_k|^2}=\sqrt{2\left(S_r\lambda_i-S_i\lambda_r\right)\Delta X+(S_r{}^2+S_i{}^2)(\Delta X)^2} \tag{14}$$

其中：S_r、S_i 为 $\dfrac{\partial\lambda_k}{\partial\beta}$ 的实部及虚部；λ_i、λ_r 为 λ_k 的实部及虚部。ΔX 趋近于 0 时，忽略 $(\Delta X)^2$，可以获得 $(\Delta|\lambda_k|)^2$ 关于 X 的偏导数，从而推导出 X 的灵敏度为

$$\frac{\partial|\lambda_k|}{\partial X}=\frac{S_r\lambda_i-S_i\lambda_r}{\sqrt{\lambda_r^2+\lambda_i^2}} \tag{15}$$

同理可以推导 R 的灵敏度为

$$\frac{\partial|\lambda_k|}{\partial R}=\frac{S_r\lambda_r+S_i\lambda_i}{\sqrt{\lambda_r^2+\lambda_i^2}} \tag{16}$$

实际系统中某些元件常以导纳的形式给出电气参数，可将导纳先转换为阻抗形式，求取 R、X 的灵敏度，再根据复合函数求偏导的方法确定 G、B 的灵敏度。不妨设 $\dfrac{\partial|\lambda_k|}{\partial X}$、$\dfrac{\partial|\lambda_k|}{\partial R}$ 分别为 S_R、S_X，则有

$$\frac{\partial|\lambda_k|}{\partial G}=\frac{S_R(B^2-G^2)+2S_XGB}{(G^2+B^2)^2} \tag{17}$$

$$\frac{\partial|\lambda_k|}{\partial B}=\frac{S_X(B^2-G^2)-2S_RGB}{(G^2+B^2)^2} \tag{18}$$

3.3 灵敏度标准化

对于不同的电气元件可以求取关于特征值的灵敏度，但由于不同元件电气参数的物理意义不尽相同，因而上述灵敏度值仅反映了实际网络元件与特征值幅值的关系，灵敏度值可比性较差。为了更准确地揭示灵敏度相关影响程度，类比于标幺值的方式，对灵敏度进行标准化。元件 β 对应于特征值 λ_k 的灵敏度可以定义为

$$S_\beta^{\lambda_k}=\frac{\partial|\lambda_k|}{\partial\beta}\cdot\frac{\beta}{|\lambda_k|} \tag{19}$$

4　案例分析

本文采用图 5 所示的 IEEE30 母线系统作为实例，对串联谐波谐振灵敏度进行分析。考虑 4 节点出现谐波电压激励，线路以 PI 型电路等值，该系统总计 67 条支路。使用虚拟支路修改系统拓扑结构，模态分析获得模态导纳频谱及关键模态导纳频谱，具体结果如图 6 所示。

根据图 6 模态导纳频谱可以得到串联谐振频率及关键模态导纳，根据关键模态导纳确定关键模态对应的特征值 λ_k 在矩阵 $\boldsymbol{\Lambda}$ 中的位置。最终计算结果如表 1 所示。

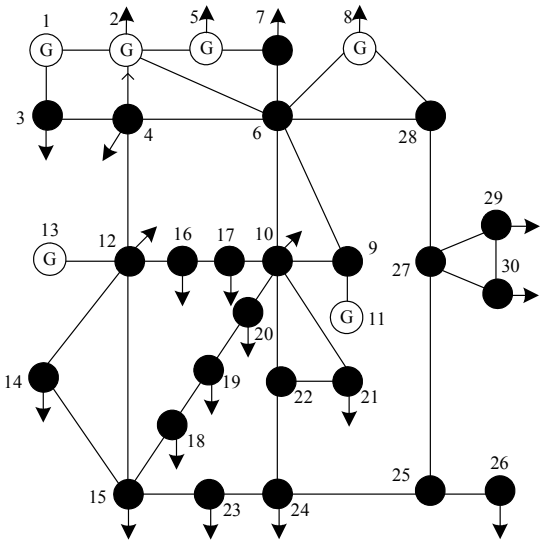

图 5 IEEE30 母线系统接线图

Fig. 5 IEEE30 bus system wiring diagram

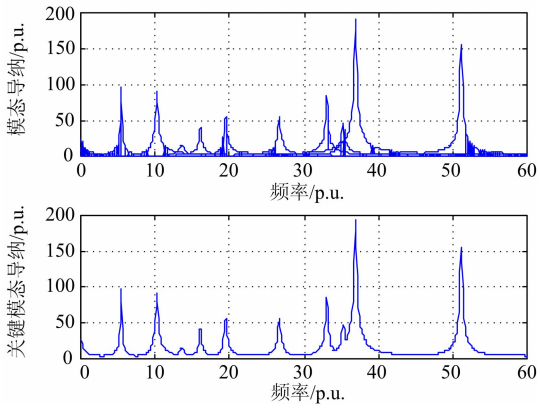

图 6 模态导纳频谱

Fig. 6 Modal admittance spectrum

通过 Simulink 搭建 IEEE30 母线系统模型，采用频谱扫描方法仿真获得 4 号母线入端导纳频谱，结果如图 7 所示，谐振频率标幺值分别为：5.4、10.2、16.1、19.5、26.8、32.8、36.9、51.2。对照表 1，最大谐振频率偏差仅 0.2 p.u.，可见本方案对系统串联谐波谐振频率点的寻求准确度高、精度高，且省去了一般频谱扫描需搭建系统模型的步骤，可有效分析系统串联谐振问题。

因篇幅有限，仅以频率 36.9 p.u.为例，进行灵敏度分析。此时关键模态位置 k=56，对系统支路进行编号，进行灵敏度分析。部分编号如表 2 所示，10-18 号支路电阻灵敏度如图 8 所示。图 8 结果可知，10、11、12、14、15 号支路电阻灵敏度较大，表现为其电阻值对谐波谐振点的影响比支路 13、16、17、18 大。

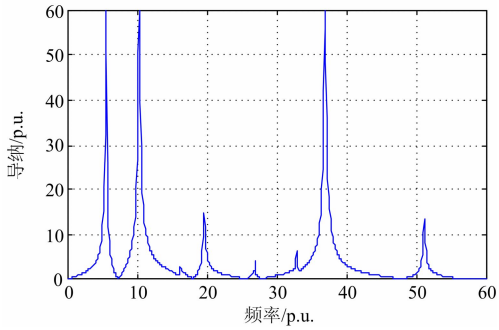

图 7 4 号母线导纳频谱

Fig. 7 Admittance spectrum of bus 4

表 1 IEEE30 串联谐波谐振相关数据

Table 1 IEEE30 series harmonic resonance data

频率/p.u.	5.4	10.2	16	19.5	26.7	33	36.9	51.1
模态导纳/p.u.	95.42	90.75	38.45	55.94	54.18	84.34	191.5	155.2
关键模态位置	50	54	56	56	57	59	56	58

表 2 IEEE30 支路编号表

Table 2 IEEE30 branch number

支路编号	1	2	7	10	11	12	13	14	15	16	17	18	31	33
两端节点	1	1	6	6	6	4	12	12	16	12	15	18	3	2
	2	3	8	9	10	12	13	16	17	14	18	19	4	6

由图 8 可见，灵敏度出现了正负之分，表征了电气参数对谐振程度的影响方式。以支路 10、12 为例，支路 10 灵敏度为正，当支路 10 电阻参数变大，对应的关键特征值会相应增大，从而导致关键模态导纳值的减小，谐振程度减弱；支路 12 灵敏度为负，当支路 12 电阻参数变大，对应的关键特征值会相应减小，从而导致关键模态导纳值的增大，谐振程度加强。

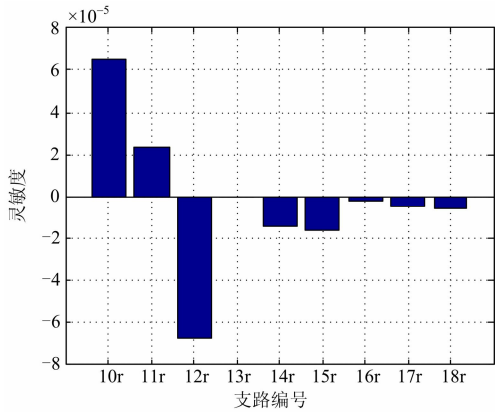

图 8 10-18 号支路电阻灵敏度

Fig. 8 No. 10-18 branch resistance sensitivity

分析 2 号支路电阻、电抗及容抗的灵敏度，结果如图 9 所示。电抗的灵敏度最小，接近于 0，容抗的灵敏度最高，达到 14.6，电阻的灵敏度居中。可见对于同一支路不同电气参数，对谐振程度的灵敏度相差较大，所以对于谐振程度分析时，需要对各电气参数给予考究。

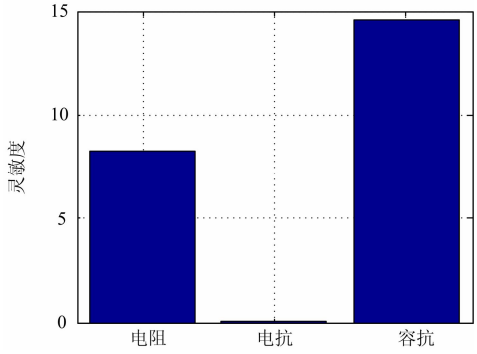

图 9 2 号支路灵敏度

Fig. 9 No. 2 branch resistance sensitivity

综合所有支路电气参数的灵敏度，挑选灵敏度最高的 10 个参数，结果如表 3 所示。其中 31 号支路电阻参数的灵敏度值最高，可见谐振中心处于 31

号支路附近。根据表 2 所确定的灵敏度较高的支路参数可以确定该谐振情况下串联谐振的传播范围。

表 3 支路参数灵敏度

Table 3 Branch parameter sensitivity

参数	1r	1b	2r	2x	2b
灵敏度	1.030	0.488	8.288	0.030	14.585
参数	7r	31r	31x	31b	33r
灵敏度	0.058	1 796.009	0.131	3.038	0.098

结合表 3，就本例可知，1、2、3、4、6、8 节点会受到显著的谐振影响，如图 10 虚线框内部所示。该现象的出现主要是因为分析得到的节点间构成了串联谐振回路。可见该方案可以估计谐振传播范围，利于串联谐振治理工作的开展。结合表 3，可以对灵敏度较高的支路进行参数方面的调整，以此削弱串联谐振的发展。就该类谐振，可以通过增大 3、4 母线间的 31 号支路的电阻来削弱串联谐振的发展。亦可对谐波传播区域内的 37 次谐波电压进行滤波处理来抑制相应的串联谐波谐振。

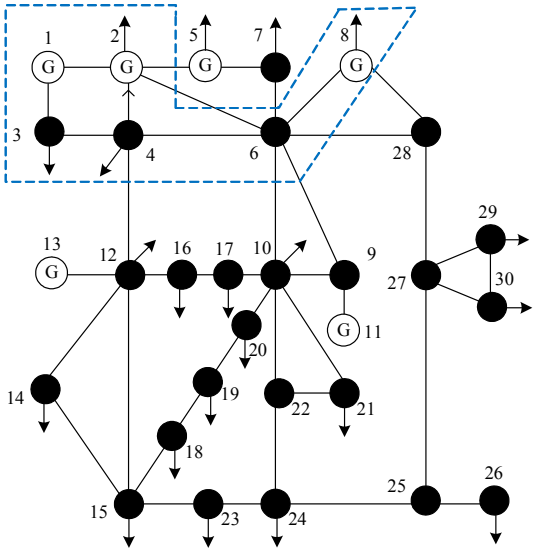

图 10 串联谐振传播范围图

Fig. 10 Series resonance transmission range

5 结论

本文基于模态分析法，结合虚拟支路，分析了串联谐波谐振的特性，并给出相关电气参数的灵敏度分析。根据案例分析，验证该方法的可行性，并获得以下结论：

(1) 本方案可以有效地寻求到串联谐振频率，结合系统的基本回路矩阵，可以获得系统各元件电气参数基于关键特征值的灵敏度，体现各元件的谐振影响程度。

(2) 同一支路的不同物理意义的电气参数具有差异较大的灵敏度，为抑制串联谐振的影响，可以对特定的电气参数进行一定的设计。

(3) 通过各元件灵敏度的正负及大小可以确定削弱谐波谐振的方案，有助于定性地指明抑制方案的设计方向。

(4) 灵敏度分析有助于寻求串联谐波谐振传播范围，为谐振对策的设计提供一定的理论基础。

然系统谐振情况错综复杂，为抑制不同处谐波激励产生的谐振，可能会对系统元件产生相悖的调整要求，为此综合考虑各类谐振情况的谐振抑制方案有待进一步研究。

参考文献

[1] 初曦, 林飞, 杨中平, 等. 高速列车与牵引供电网高次谐波谐振分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 354-359.
CHU Xi, LIN Fei, YANG Zhongping, et al. Analysis of high frequency resonances in the power supply line of the high speed train[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 354-359.

[2] 苑舜, 贾红光, 刘劲松, 等. 并联谐振电容对电磁谐振耦合无线电能传输系统的影响[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 51-54.
YUAN Shun, JIA Hongguang, LIU Jinsong, et al. The impact of the parallel resonant capacitance to the magnetic resonance coupling wireless power transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 51-54.

[3] 杨庆新, 陈海燕. 无接触电能传输技术的研究进展[J]. 电工技术学报, 2010, 25(7): 6-13.
YANG Qingxin, CHEN Haiyan. Research progress in contactless power transmission technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(7): 6-13.

[4] 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): 76-80.
HAN Xudong, GAO Shibin, WANG Bin. Research on the harmonic resonance in the design of traction power supply scheme[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 76-80.

[5] 刘春玲, 耿卫星, 刘建武, 等. 一起电力系统谐振事故分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 108-117.
LIU Chunling, GENG Weixing, LIU Jianwu, et al. Analysis on accidents of syntony in power system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 108-117.

[6] XU W, HUANG Z, CUI Y, et al. Harmonic resonance

mode analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1182-1190.

[7] HUANG Zhenyu, CUI Yu, XU W. Application of modal sensitivity for power system harmonic resonance analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 222-231.

[8] 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.
XU W, ZHANG Dahai. A modal analysis method for harmonic resonance assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 89-93.

[9] 周辉, 吴耀武, 娄素华, 等. 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.
ZHOU Hui, WU Yaowu, LOU Suhua, et al. Series resonance analysis based on modal analysis and dummy branch method[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(28): 84-89.

[10] HUANG Zhenyu, XU W, DINAVAHI V R. A practical harmonic resonance guideline for shunt capacitor applications[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(4): 1382-1387.

[11] 徐志强, 李冰, 周田华, 等. 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.
XU Zhiqiang, LI Bing, ZHOU Tianhua, et al. Harmonic resonance assessment of traction system with moving load based on modal analysis[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(19): 76-80.

[12] YONG Jing, CHEN Liang, XU W. A frequency-domain harmonic model for compact fluorescent lamps[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 1182-1189.

[13] TEMMA K, ISHIGURO F, TOKI N, et al. Clarification and measurements of high frequency harmonic resonance by a voltage sourced converter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 450-457.

[14] YONG Jing, CHEN Liang, CHEN Shuangyan. Modeling of home appliances for power distribution system harmonic analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 3147-3155.

[15] BORNER A, GREBE T, GUNTHER E. Modelling and simulation of the propagation of harmonics intelectric power networks: part I[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(1): 452-460.

[16] 张国军, 张强, 于欢欢. 提高小电网系统故障选线灵敏度的方法和实验[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(5): 100-104.
ZHANG Guojun, ZHANG Qiang, YU Huanhuan. Method and experiment of improving sensitivity of leakage fault line selection in small power system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(5): 100-104.

[17] 马越, 陈星莺, 余昆, 等. 基于灵敏度分析法的分布式电源准入功率计算[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(9): 18-22.
MA Yue, CHEN Xingying, YU Kun, et al. Calcuation of the maximum penetration level of distributed generation based on sensitivity analysis[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(9): 18-22.

[18] 黄新波, 张周熊, 程文飞, 等. 智能型串联谐振试验电源电压及频率的研究[J]. 高压电器, 2014, 50(6): 7-12.
HUANG Xinbo, ZHANG Zhouxiong, CHENG Wenfei, et al. Research for voltage and frequency of intelligent series resonant test power supply[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(6): 7-12.

收稿日期：2014-07-24；　修回日期：2014-09-10

作者简介：

刘书铭(1984-)，男，硕士，工程师，主要从事电力系统电能质量分析与控制等方面的研究；E-mail: losuwing@126.com

李陈莹(1990-)，女，硕士研究生，研究方向为电能质量分析与控制；E-mail:chlichenying@163.com

李琼林(1980-)，男，博士，高级工程师，主要从事电能质量分析与控制、无功电压等方面的研究。

(编辑　周金梅)