

谐波谐振的模态分析法及其应用

丘凌¹, 丘扬²

(1. 国网浙江省电力公司经济技术研究院, 杭州 310008;

2. 国网浙江省电力公司杭州供电公司, 杭州 310009)

摘要: 通过计算与分析, 论证了系统并联谐振频率与回路串联谐振频率完全相同。比较几种不同的模态分析法并得出结论: 基于节点导纳矩阵或基于节点阻抗矩阵的模态分析法适用于系统并联谐振分析, 且两种方法结果相同; 基于回路阻抗矩阵的模态分析法适用于回路串联谐振分析, 由于系统回路串联谐振频率与并联谐振频率完全相同, 因而与系统并联谐振分析结果相同, 单一使用基于回路阻抗矩阵的模态分析法并不能求得支路串联谐振频率; 结合运用基于节点导纳矩阵的模态分析法和虚拟支路法, 可求得包括支路串联谐振频率在内的系统全部谐波谐振频率。论证了虚拟支路法对于支路串联谐振分析的适用性。

关键词: 谐波谐振; 模态分析; 并联谐振; 回路串联谐振; 支路串联谐振

中图分类号: TM712

文献标志码: A

文章编号: 1007-1881(2014)02-0014-04

Modal Analysis Method of Harmonic Resonance and the Application

QIU Ling¹, QIU Yang²

(1. State Grid Zhejiang Economy Research Institute, Hangzhou 310008, China;

2. State Grid Hangzhou Power Supply Company, Hangzhou 310009, China)

Abstract: Through calculation and analysis, the paper demonstrates that the parallel resonance frequency of the system is the same as the loop series resonance frequency. It is concluded by comparing several different modal analysis methods that modal analysis methods based on node admittance matrix or node impedance matrix are suitable for the analysis of parallel resonance, and the results of the two methods are the same. The modal analysis methods based on loop impedance matrix are suitable for the analysis of loop series resonance. Because parallel resonance frequency of the system is the same as loop series resonance frequency of the system, the results of harmonic resonance are the same as the analysis of parallel resonance. The modal analysis method using loop impedance matrix only can not conclude branch series resonance frequency. In combination with modal analysis method and virtual branch based on node admittance matrix, all harmonic resonance frequencies including branch series resonance frequency can be concluded. The paper demonstrates that the virtual branch method can be applicable to tributary series resonance analysis.

Key words: harmonic resonance; modal analysis; parallel resonance; loop series resonance; branch series resonance

1 概述

电力系统中大量使用的电力电子设备, 如交直流整流器、电气化机车、电弧炉等, 在运行时会产生高次谐波。这些设备在电力系统中的应用不断增加, 已成为系统中客观存在的高次谐波源。构成电力系统的发电机、变压器、输电线路、电抗器和电容器等均为感性元件或容性元件, 其

参数及连接方式决定了系统的固有谐振频率。由于系统固有谐振频率不同, 对各次谐波的反应或敏感程度也不相同, 表现为谐波电压/电流的放大或衰减, 特别当系统中的某次谐波与系统的固有谐振频率相同或接近时, 会导致该次谐波严重放大, 即发生谐波谐振, 可能危及系统运行安全。由此可见, 电力系统谐波谐振是由谐波源的激励与系统的内在特性共同造成的。因此, 治理

电力系统的谐波问题,不仅要消除或减少系统中的谐波源及其影响,还应防止系统固有频率与可能的谐波源频率接近甚至重合的情况。由于发现系统中的谐波源然后进行治理具有滞后性,因而通过事前了解系统的谐波谐振频率并采取预防措施应该是治理电力系统谐波问题更合理可行的途径。因此,研究电力系统的谐波谐振频率具有理论和实际意义。

计算系统谐波谐振频率的方法主要有解析法、频谱分析法、模态分析法^[1-2]等,前两种方法存在计算复杂、耗时长的问题,模态分析法由于其高效方便的特点受到重视^[3-5],通过灵敏度矩阵和参与因子^[6-8]等可为治理方案提供更多的信息^[9-10]。但单一使用模态分析法有其局限性,仅适用于部分谐波谐振模式,不能得到全部谐波谐振频率。在有些文献中,将谐波的谐振模式划分为并联谐振和串联谐振,并认为必须分析回路阻抗矩阵才能准确获得串联谐振频率及相关支路的信息,但本文论证实际情况并非如此。文献[3]提出1个改进的模态分析法,该方法结合使用基于回路阻抗矩阵的模态分析法和虚拟支路法,可求得包括串联谐振频率在内的全部谐波谐振频率,并指出求解串联谐振问题必须使用回路阻抗矩阵的结论。文献[4]算例中求得的3个串联谐振频率实际上是与并联谐振频率完全相同的回路串联谐振频率。实际上,基于回路阻抗矩阵的模态分析法获得的是回路串联谐振频率,与基于导纳矩阵的模态分析得到的并联谐振频率完全相同,因而使用基于节点导纳矩阵的模态分析法和虚拟支路法也可求得系统全部谐波谐振频率,且计算比基于回路阻抗矩阵的方法更简化,适合实际应用。此外,为准确理解和运用,对于虚拟支路法需要更合理的解释。

2 谐波谐振的模态分析法

系统节点电压电流方程为:

$$YV=I, \quad (1)$$

式中: Y 为 $n \times n$ 节点导纳矩阵; n 为系统节点数; $V=(V_1, \dots, V_n)^T$ 和 $I=(I_1, \dots, I_n)^T$ 分别为节点电压和节点注入电流向量。

导纳矩阵可分解为:

$$Y=L\Lambda T, \quad (2)$$

式中: L 和 T 分别为左、右特征向量矩阵,且 $T=L^{-1}$; Λ 为对角特征值矩阵,如果导纳矩阵 Y 的 n 个特征值各不相同,可得:

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_n \end{bmatrix}. \quad (3)$$

由式(1)和式(2)可得:

$$V=Y^{-1}I=T^{-1}\Lambda^{-1}L^{-1}I=L\Lambda^{-1}TI, \quad (4)$$

或表示为:

$$U=\Lambda^{-1}J, \quad (5)$$

式中: $U=TV$ 定义为模态电压向量, $U=(U_1, \dots, U_n)^T$; $J=TI$ 定义为模态电流向量, $J=(J_1, \dots, J_n)^T$; Λ^{-1} 可称为模态阻抗矩阵。

当电网发生节点并联谐波谐振时,某些节点的注入电流将产生很高的节点电压。由式(3)和式(5)可知,如果 λ_i 等于0或很小,则很小的模态电流 J_i 可能导致很大的模态电压 U_i 。因此,可由 λ_i 等于或接近零判断并联谐振状态。实际应用时,可通过扫描发现特征值的符号改变来判断谐振点所在区间。为减少计算量,可先选择较大的扫描步长,然后不断在缩小的区间内使用较小的扫描步长,以获得足够的精度。由于导纳矩阵与阻抗矩阵的互逆关系,其特征值互为倒数,因此基于阻抗矩阵的模态分析法只能得到相同的结果,差别在于是以 $1/\lambda_i$ 等于或接近零判断谐波的并联谐振状态。

对于如图1所示的3节点系统^[3],运用基于节点导纳矩阵的模态分析方法可求得3个并联谐振频率(或回路串联谐振频率)。在一些文献中,认为其余的谐波谐振为串联谐振,需通过基于回路阻抗矩阵的模态分析法求得谐振频率。但实际上,基于回路阻抗矩阵的模态分析法仅能获得回路串联谐振频率,与基于导纳矩阵的模态分析法得到的并联谐振频率完全相同,单一使用基于回路阻抗矩阵的模态分析法并不能求得支路串联谐振频率。为求取其余的串联谐波谐振频率,文献[3]提出的虚拟支路法是行之有效的,本文对此给出如下解释。

为便于说明,先忽略各支路阻抗的电阻分量。将节点 i 的连接支路等值为接地支路 x_A ,当节点 i 的连接支路发生并联谐振,则 $x_A \rightarrow \infty$;当节点 i 的连接支路发生串联谐振,则 $x_A=0$ 。为模

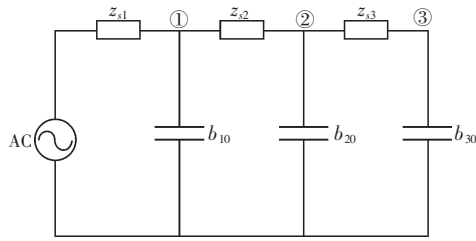


图1 3节点系统接线

拟支路串联谐振条件 $x_A=0$, 可以通过与 x_A 并联一短接支路。在节点 i 上并联支路阻抗 x_i , 可得:

$$x'_A = \frac{x_A x_i}{x_A + x_i} \quad (6)$$

当节点 i 发生并联谐振, 须满足 $x_A + x_i = 0$, 即为 x_i 与 x_A 构成回路串联谐振, 可见 x_i 与 x_A 发生并联谐振即等同于 x_i 与 x_A 构成回路串联谐振, 这也印证了并联谐振与回路串联谐振的一致性。运用模态分析法可求得此接线下的并联谐振频率(回路串联谐振频率), 在谐振状态下须满足 $x_A + x_i = 0$, 即:

$$x_A = -x_i \quad (7)$$

如果并联支路电抗 x_i 足够小, 式(7)近似等于支路串联谐振条件 $x_A = 0$ 。由此可知, 通过与 x_A 并联短接支路可以实现支路串联谐振频率计算, 此短接支路即为文献[3]提出的虚拟支路。

如果计及支路阻抗的电阻分量, 支路串联谐振条件可表示为 $\text{Im}(z_A) = 0$ ($\text{Im}(z_A)$ 表示阻抗 z_A 的虚部), 由于系统中各支路阻抗的电阻分量一般小于电抗分量, 故可近似以 $z_A = 0$ 作为支路串联谐振条件。类似地, 通过支路 z_i 与 z_A 并联, z_i 阻抗足够小, 运用模态分析法求得此接线下的并联谐振频率(回路串联谐振频率), 即近似等于支路 z_A 的串联谐振频率。

综上所述, 运用基于节点导纳矩阵的模态分析法和虚拟支路法, 通过频率扫描可求得系统全部谐波谐振频率, 且无须使用基于回路阻抗矩阵的分析方法, 计算得以简化, 更适合实际应用。由于导纳矩阵 Y 的元素为复数, 谐波谐振的模式分析涉及求取复系数矩阵的特征值和特征向量, 可利用标准计算机程序求得。

3 与谐波谐振的解析法结果比较

以图1所示的3节点系统为例。图中, 各阻

抗值均为对应于基波的阻抗值, $z_{s1} = 0.02 + j0.3\Omega$, $z_{12} = 0.08 + j0.3\Omega$, $z_{23} = j0.25\Omega$, $b_{10} = j0.015\Omega^{-1}$, $b_{20} = j0.015\Omega^{-1}$, $b_{30} = j0.07\Omega^{-1}$ 。可列出系统的谐振方程并求得谐振频率, 为便于计算, 在谐振方程中忽略了各支路阻抗的电阻分量。

并联谐振方程如下:

$$1/\{(x_{10}/h)/x_{s1} h/[x_{12} h + (x_{20}/h)]/[x_{23} h + (x_{30}/h)]\} = 0, \text{ 可求得谐振频率 } h \text{ 为 } 3.8374, 16.5070 \text{ 和 } 26.5192;$$

$$1/\{(x_{20}/h)/[x_{12} h + (x_{10}/h)]/x_{s1} h/[x_{23} h + (x_{30}/h)]\} = 0, \text{ 可求得谐振频率 } h \text{ 为 } 3.8374, 16.5070 \text{ 和 } 26.5192;$$

$$1/\{(x_{30}/h)/[x_{23} h + (x_{20}/h)]/[x_{12} h + (x_{10}/h)]/x_{s1} h\} = 0, \text{ 可求得谐振频率 } h \text{ 为 } 3.8374, 16.5070 \text{ 和 } 26.5192。$$

回路串联谐振方程如下:

$$(x_{10}/h) + x_{s1} h/[x_{12} h + (x_{20}/h)]/[x_{23} h + (x_{30}/h)] = 0, \text{ 可求得谐振频率 } h \text{ 为 } 3.8374, 16.5070 \text{ 和 } 26.5192;$$

$$x_{s1} h + (x_{10}/h)/[x_{12} h + (x_{20}/h)]/[x_{23} h + (x_{30}/h)] = 0, \text{ 可求得谐振频率 } h \text{ 为 } 3.8374, 16.5070 \text{ 和 } 26.5192;$$

$$(x_{10}/h)/x_{s1} h + x_{12} h + (x_{20}/h)/[x_{23} h + (x_{30}/h)] = 0, \text{ 可求得谐振频率 } h \text{ 为 } 3.8374, 16.5070 \text{ 和 } 26.5192;$$

$$(x_{20}/h) + [x_{12} h + (x_{10}/h)]/x_{s1} h/[x_{23} h + (x_{30}/h)] = 0, \text{ 可求得谐振频率 } h \text{ 为 } 3.8374, 16.5070 \text{ 和 } 26.5192;$$

$$(x_{30}/h) + x_{23} h + (x_{20}/h)/[x_{12} h + (x_{10}/h)]/x_{s1} h = 0, \text{ 可求得谐振频率 } h \text{ 为 } 3.8374, 16.5070 \text{ 和 } 26.5192。$$

支路串联谐振方程如下:

$$x_{12} h + (x_{20}/h)/[x_{23} h + (x_{30}/h)] = 0, \text{ 可求得谐振频率 } h \text{ 为 } 4.9336 \text{ 和 } 22.8406;$$

$$x_{12} h + (x_{10}/h)/x_{s1} h, \text{ 可求得谐振频率 } h \text{ 为 } 21.0819;$$

$$x_{23} h + (x_{30}/h) = 0, \text{ 可求得谐振频率 } h \text{ 为 } 7.5593;$$

$$x_{23} h + (x_{20}/h)/[x_{12} h + (x_{10}/h)]/x_{s1} h = 0, \text{ 可求得谐振频率 } h \text{ 为 } 15.5992 \text{ 和 } 26.2678。$$

在上述公式中, 符号“//”表示支路并联运算;

x_{s1} , x_{12} , x_{23} 分别表示 z_{s1} , z_{12} , z_{23} 的电抗分量, $x_{10} = -1/b_{10}$, $x_{20} = -1/b_{20}$, $x_{30} = -1/b_{30}$; h 表示谐振频率, 单位为标么值(p.u.)。根据计算结果, 并联谐振频率与回路串联谐振频率完全相同, 原因很简单, 因为两端相连的并联阻抗 x_1 与 x_2 也可以看作是头尾相连构成的串联回路。因此, 将谐振模式简单地定义为并联谐振和串联谐振并不严谨, 应该区

分回路串联谐振和支路串联谐振。

运用基于导纳矩阵的模态分析法对上述系统进行计算(为与解析结果比较,忽略了各支路阻抗的电阻分量),可得到3个谐振频率,分别为3.837 4, 16.507 0和26.519 2,与解析结果完全一致,可见基于导纳矩阵的模态分析法适用于并联谐振(或回路串联谐振)分析。

4 算例

对于图1所示的3节点系统,运用解析法、频谱分析法和基于节点导纳矩阵的模态分析法,谐波谐振评估计算结果示于表1,其中支路串联谐振1-3分别为与节点1-3接入虚拟接地支路后构成回路对应的支路。由于解析法、频谱分析法为精确方法,其结果可作为标准答案。由表1可见,如忽略支路阻抗的电阻分量,模态分析法结果与解析法、频谱分析法完全一致;如计入支路阻抗的电阻分量,模态分析法的误差也很小,能满足实际应用要求。系统模态阻抗示于图2,各曲线编号按其峰值出现顺序,其中曲线1,5,9为系统模态阻抗曲线,其峰值对应于系统并联谐振;曲线2,7为节点1虚拟接地时的模态阻抗曲线,模拟节点1上接入谐波电压源时的系统模态阻抗曲线,其峰值对应于相关支路(与虚拟接地支路构成回路)的串联谐振;曲线3,6为节点2虚拟接地时的模态阻抗曲线,模拟节点2上接入谐波电压源时的系统模态阻抗曲线;曲线4,8为节点3虚拟接地时的模态阻抗曲线,模拟节点3上接入谐波电压源时的系统模态阻抗曲线。

表1 系统谐振频率及分类

谐振类型	不计支路阻抗电阻分量		计入支路阻抗电阻分量	
	解析法(频谱法)	模态法	频谱法	模态法
节点并联谐振(回路串联谐振)	3.837 4	3.837 4	3.834 8	3.835 3
	16.507 0	16.507 0	16.506 7	16.507 0
	26.519 2	26.519 2	26.517 4	26.518 3
支路串联谐振1	4.933 6	4.933 6	4.933 6	4.930 5
	22.840 6	22.840 6	22.840 6	22.839 9
支路串联谐振2	7.559 3	7.559 3	7.559 3	7.559 3
	21.081 9	21.081 9	21.081 7	21.080 9
支路串联谐振3	15.599 2	15.599 2	15.599 2	15.599 2
	26.267 8	26.267 8	26.263 0	26.266 9

5 结论

基于节点导纳矩阵或基于节点阻抗矩阵的模

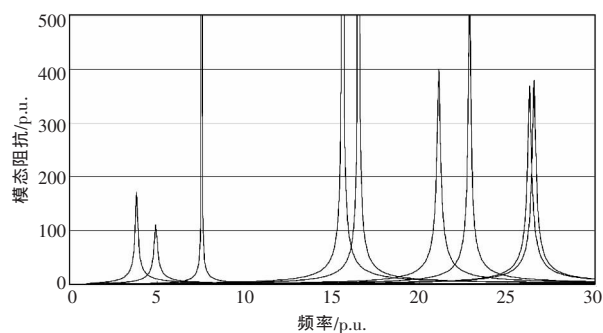


图2 系统模态阻抗曲线

态分析法适用于系统并联谐振分析。实际应用时,可通过扫描发现特征值的符号改变来判断谐振点所在区间。由于导纳矩阵与阻抗矩阵的互逆关系,其特征值互为倒数,因此两种方法的结果相同。

系统谐波谐振可分为并联谐振和串联谐振,串联谐振又可分为回路串联谐振与支路串联谐振。基于回路阻抗矩阵的模态分析法适用于回路串联谐振分析,由于系统回路串联谐振频率与并联谐振频率完全相同,因而与系统并联谐振分析结果相同,单一使用基于回路阻抗矩阵的模态分析法并不能求得支路串联谐振频率。

结合运用基于节点导纳矩阵的模态分析法和虚拟支路法,可以求得包括支路串联谐振频率在内的系统全部谐波谐振频率,且计算比基于回路阻抗矩阵的方法更简化和规范,适合实际应用。

参考文献:

- [1] WILSON XU, HUANG ZHENGYU, YU CUI, et al. Harmonic resonance mode analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1182-1190.
- [2] 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.
- [3] 周辉, 吴耀武, 姜素华, 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.
- [4] 仰彩霞, 刘开培, 王东旭. 基于回路模态分析法的串联谐波谐振评估[J]. 高电压技术, 2008, 34(11): 2459-2462.
- [5] 雷之力, 艾欣, 崔明勇, 等. 基于模态评估法的微网串联谐振仿真[J]. 浙江大学学报(工学版), 2011, 45(1): 178-184.
- [6] PEREZ-ARRIAGA I J, VERGHESE G C, SCHWEPPE F

(下转第29页)

用系统账号,在上传数据中如果有多个人员信息,系统仅对第一个人进行权限验证,其他如测试人、复核人等不进行权限验证,但要验证上传的账号是否在系统中存在。

电测仪表检定接口支持出库时不扫描的情况。此时检定接口上传的数据应保证有申请编号,使系统能够将相应表计对应到工作单中,否则系统将返回找不到检定任务的错误信息。

所有的数值可不带单位,比如温度数据,300即可,而不必采用300℃。

当网络不通时,如校验台在未下载基础信息的情况下完成表计检定,当网络重新连通后,校验台可通过条形码等编号调用接口,补全相应信息,再按照标准格式返回系统。

3 需要解决的问题

在系统实际应用中,大部分设备都已实现了与系统的完美对接,其准确性和可靠性也得到了验证。但部分仪表检定尚未实现微机化,受现有标准器具和计量器具的限制,各部门和单位正在积极开发对应的自动检定设备和软件,以减少人工干预的影响。例如,2012年绍兴供电公司针对指针式万用表,已研制出通过图像识别实现全自动检定的功能;2013年,绍兴供电公司针对直流单臂电桥,开始研制通过数字微伏计替代传统检流计,实现智能检定等等。以上都是本系统未来需进一步发展的目标和方向。

4 结语

计量技术监督和设备管理系统根据国家电网公司三集五大管理要求,紧密结合计量技术监督与设备管理的现状,针对目前测量设备管理职

责不够清晰、部分测量设备游离于体系之外等问题,提出了可行的解决途径,为计量管理标准化建设提供依据,并提升测量设备的管理水平,使所有测量设备纳入管理系统,实现了档案信息的完整、规范,实现了量值的准确、可靠传递,确保设备档案的准确性和设备的健康状况。由于检定数据通过接口自动上传,避免了人工干预,确保了数据的真实性、安全性和完整性,可提高工作效率30%以上。系统还便于各级技术监督人员实时统计、分析本单位测量设备的使用和运行情况,发现问题可以及时进行监督、指导,也便于决策层及各级领导全面了解和掌握仪器、设备状况,有助于提高设备的使用率、完好率。

参考文献:

- [1] 崔怡,王润孝,罗志清,等.大型制造企业网络化计量管理系统[J].计量技术,2004(9):50-53.
- [2] JJF 1051-2009 计量器具命名与分类编码技术规范[S].北京:中国标准出版社,2009.
- [3] 曹国昌,杨世元,龚仁鹏,等.基于ISO 10012的计量管理信息系统设计[J].计量技术,2007(09):58-60.
- [4] 蔡惠.CIMS环境下计量检测与信息集成系统的研究[D].广东工业大学,2000.
- [5] 刘殿英,王守存.建立有效的计量信息管理体系[J].石油工业技术监督,2003(9):30-31.
- [6] 盛胜利.计量器具的检定校准与网络化管理系统[J].计量技术,2008(10):60-62.

收稿日期:2013-07-17

作者简介:顾 杲(1969-),男,浙江宁波人,高级技师,从事电测计量技术和设备管理工作。

(本文编辑:龚 皓)

(上接第17页)

- C.Selective model analysis with application to electric power systems(part I):heuristic introduction[J].IEEE Trans on Power Apparatus and Systems,1982,101(9):3117-3125.
- [7] 周双喜,朱凌志,郭锡玖,等.电力系统电压稳定性及其控制[M].北京:中国电力出版社,2004.
 - [8] 彭谦,马晨光,杨雪梅,等.线性模态分析中的参与因子与贡献因子[J].电网技术,2010,34(2):92-96.
 - [9] 张丽莹,杨洪耕,刘亚梅.基于网络固有结构理论的集

中滤波器配置[J].现代电力,2008,25(2):42-46.

- [10] 王艳松,刘军,李中树.配电网无源滤波器的优化配置[J].高电压技术,2010,36(9):2324-2328.

收稿日期:2013-07-23

作者简介:丘 凌(1981-),男,浙江杭州人,工程师,从事电力系统工程建设管理工作。

(本文编辑:龚 皓)