

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231060

基于无相位谐波监测数据的谐振源辨识方法

高敏¹, 朱明星¹, 张华赢², 丁同¹, 焦亚东¹

(1. 安徽大学电气工程与自动化学院, 安徽 合肥 230601; 2. 南方电网公司新型智慧城市高品质供电联合实验室(深圳供电局有限公司), 广东 深圳 518020)

摘要: 针对电网中大量谐波监测数据因缺乏相位信息难以实现电网谐振监测的技术难题, 提出了一套计及主导系数、相关系数及敏感度指标的电网谐振源辨识方法。首先, 基于多谐波源谐振分析模型, 分析了谐振状态下谐波参数的相关特性与回归特征, 提出了计及主导系数的强主导谐振状态判别方法。其次, 论证了强主导谐振状态下的谐波阻抗特征及数据特征, 构建了融合机理模型和谐振数据特征的电网谐振状态及谐振源辨识方法。最后, 基于建模仿真和工程案例验证, 在背景谐波对母线谐波电压贡献率小于20%的工况下, 敏感谐振支路和敏感谐波源的耦合谐波阻抗测量偏差小于2%, 所提方法能够准确辨识谐振状态及谐振源。

关键词: 监测数据; 相关性分析; 敏感性分析; 敏感谐振支路; 敏感谐波源

Resonance source identification method based on phase-free harmonic monitoring data

GAO Min¹, ZHU Mingxing¹, ZHANG Huaying², DING Tong¹, JIAO Yadong¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Anhui University, Hefei 230601, China;
2. New Smart City High-Quality Power Supply Joint Laboratory of China Southern Power Grid (Shenzhen Power Supply Co., Ltd.), Shenzhen 518020, China)

Abstract: There is a technical problem that with a large amount of harmonic monitoring data in the power grid it is difficult to realize the resonance monitoring of the power grid because of the lack of phase information. A set of grid resonance source identification methods considering dominant coefficients, correlation coefficients and sensitivity indices is proposed. First, based on a multi-harmonic source resonance analysis model, the correlation and regression characteristics of the harmonic parameters in the resonance state are analyzed, and a strong dominant resonance state identification method taking into account the dominant coefficients is proposed. Secondly, the harmonic impedance and data characteristics in the strong dominant resonance state are demonstrated, and the resonance state of the power grid and the resonance source identification method integrating the mechanism model and the resonance data characteristics are constructed. Finally, based on modeling simulation and engineering cases, it is verified that the coupled harmonic impedance measurement deviation of the sensitive resonant branch and the sensitive harmonic source is less than 2% in the condition that the background harmonic contribution to the harmonic voltage of the bus is less than 20%. The proposed method is able to accurately identify the resonance state and the resonance source.

This work is supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Company Limited (No. 090000KK52220014/SZKJXM20220021).

Key words: monitoring data; correlation analysis; sensitivity analysis; sensitive resonant branch; sensitive harmonic source

0 引言

随着各类电力电子设备在新能源发电、电气化

铁路、城市轨道交通以及直流换流站等场景中的广泛应用, 输配电网中谐波畸变程度日趋严重^[1]。此外, 随着输配电网中电缆化率的不断提升及各类电感或电容元件的大量应用, 谐波谐振事件日趋频繁, 如光伏发电系统谐振^[2-3]、风电系统谐振^[4-7]、电气化铁路系统谐振^[8-9]、直流换流站系统谐振^[10]、交流

基金项目: 南方电网公司科技项目(090000KK52220014/SZKJXM20220021)

变电站系统谐振^[11-12]等。谐波谐振造成谐波畸变率超标^[13], 甚至出现谐振过电压或过电流问题^[14-15], 极易造成电气设备损坏或绝缘击穿等事故^[1], 严重影响电力系统安全稳定运行^[3]。因此, 准确辨识电网中的谐振工况或谐振路径对于开展谐振保护或抑制、保障电网安全稳定运行具有重要意义。

当前, 电网谐振分析方法主要基于阻抗模型。通过构建谐波阻抗模型建立全系统状态方程或导纳矩阵, 再通过特征根法^[16-17]、状态空间法^[18]、模态分析法^[19-20]等对电网谐振风险进行多维度分析。该方法虽然取得了较好的应用效果, 但分析结果依赖于分析模型和电网参数的准确性。随着电力电子技术被广泛应用, 源-网-荷交互耦合加剧^[21], 实际电网的谐振分析模型构建难度显著增大。此外, 大量新能源发电的随机性和不确定性导致电网运行状态多变, 基于特定阻抗模型的谐振分析方法无法穷尽所有谐振模式。因此, 实际电网谐振分析模型的构建难度和不确定性给谐振防治带来巨大挑战。

随着新型电力系统建设及智能电网发展, 电网中积累了大量的监测数据, 为基于数据的电网谐振源辨识提供了基础。但目前基于数据的谐振源辨识研究几乎处于空白, 能检索到的相关文献^[22-23]是研究谐振监测点的优化配置问题, 其研究手段仍基于阻抗模型和模态分析法, 研究目标是通过优化配置构建谐振监测矩阵实现对谐振的可观性, 但尚未实现对敏感谐振支路及敏感谐波源的准确辨识。

实际电网存在多谐波源交互耦合问题, 导致谐波阻抗的物理意义不明确, 这是基于数据的谐振源辨识面临的重大工程难题。此外, 目前电网中的各类监测数据往往缺乏相位信息, 无法通过谐波阻抗角的分布区间对谐波潮流或谐振路径进行推演, 进一步加剧了谐振源辨识难度。

本文基于多谐波源谐振分析模型研究了谐振状态下耦合谐波阻抗特征, 针对各关键节点谐波电压和谐波电流有效值监测数据, 提出了一套计及主导系数、相关系数及敏感度指标的电网谐振源辨识方法, 实现对电网谐振源的准确辨识及谐振严重程度的定性评价。该方法不依赖于电网的模型参数和谐波的相位信息, 便于工程应用及推广, 为基于数据的谐振源辨识提供了切实可行的工程应用方案。

1 分析模型与关键方法

1.1 多谐波源谐振分析模型

将上级电网背景谐波等效为谐波电压源, 本级电网的馈线支路等效为谐波电流源, 折算到同一电压等级的多谐波源谐振分析模型, 如图1所示。

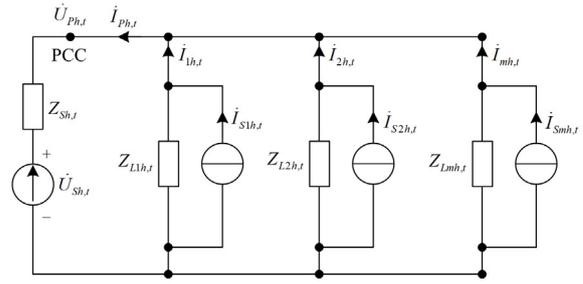


图1 多谐波源谐振分析模型

Fig. 1 Analytical model for resonance analysis of multiple harmonic sources

图1中: $\dot{U}_{Sh,t}$ 为背景 h 次谐波电压时序列; $Z_{Sh,t}$ 为系统 h 次谐波阻抗时序列; $\dot{U}_{Ph,t}$ 为公共连接点(point of common coupling, PCC) h 次谐波电压时序列; $\dot{i}_{Ph,t}$ 为 PCC 的 h 次谐波电流时序列; $\dot{i}_{1h,t}, \dots, \dot{i}_{mh,t}$ 为馈线 1~ m 并网点处的 h 次谐波电流时序列; $Z_{L1h,t}, \dots, Z_{Lmh,t}$ 为馈线 1~ m 负荷侧的 h 次谐波阻抗时序列; $\dot{i}_{S1h,t}, \dots, \dot{i}_{Smh,t}$ 为馈线 1~ m 中谐波电流源的 h 次谐波电流时序列; t 为时序列的时间维度。实际电网中, $\dot{U}_{Ph,t}$ 和 $\dot{i}_{Ph,t}$ 是可直接观测量, $\dot{U}_{Sh,t}$ 和 $\dot{i}_{Smh,t}$ 是不可直接观测量。当负载支路 m 不含谐波源时, 则 $\dot{i}_{Smh,t} = 0$ 。

根据图1, 各谐波源在 PCC 引起的谐波电压和谐波电流表达式分别为

$$\dot{U}_{Ph,t} = \sum_{m=1}^M \dot{U}_{mh,t} + \frac{Z_{Lh,t}}{Z_{Lh,t} + Z_{Sh,t}} \dot{U}_{Sh,t} \quad (1)$$

$$\dot{i}_{Ph,t} = \sum_{m=1}^M \dot{i}_{Pmh,t} - \frac{\dot{U}_{Sh,t}}{Z_{Lh,t} + Z_{Sh,t}} \quad (2)$$

式中: $\dot{U}_{mh,t}$ 为 $\dot{i}_{Smh,t}$ 在 PCC 引起的谐波电压, 是不可直接观测量; $Z_{Lh,t}$ 为所有馈线 h 次谐波并联阻抗值; M 为馈线数量; $\dot{i}_{Pmh,t}$ 为谐波源 $\dot{i}_{Smh,t}$ 注入系统的谐波电流成分, 如式(3)所示。

$$\dot{i}_{Pmh,t} = \dot{i}_{Smh,t} \times \frac{Z_{Lmh,t}}{Z_{Smh,t} + Z_{Lmh,t}} \times k_{mh,t} \quad (3)$$

式中: $Z_{Smh,t}$ 为馈线 m 并网点的系统谐波阻抗; $k_{mh,t}$ 为 $\dot{i}_{Smh,t}$ 由并网点流入系统的谐波电流系数。

$$Z_{Smh,t} = \frac{Z_{Sh,t} Z'_{Lmh,t}}{Z_{Sh,t} + Z'_{Lmh,t}} \quad (4)$$

$$k_{mh,t} = \left| \frac{Z'_{Lmh,t}}{Z'_{Lmh,t} + Z_{Sh,t}} \right| \quad (5)$$

式中, $Z'_{Lmh,t}$ 是除馈线 m 外其他馈线的 h 次谐波并联阻抗值。根据式(5), 当 $k_{mh,t} > 1$ 时, 则 $\dot{I}_{Smh,t}$ 由并网点注入系统时被谐振放大, 谐波电流系数越大, 谐振放大倍数越高, 其主要受电网阻抗参数的影响。

在多谐波源交互影响下, 若馈线 m 为线性负荷支路, 则 $\dot{I}_{Smh,t} = 0$, $\dot{I}_{mh,t}$ 是 $\dot{U}_{Ph,t}$ 在 $Z_{Lmh,t}$ 上产生的谐波电流, 即 $\dot{I}_{mh,t}$ 与 $\dot{U}_{Ph,t}$ 的耦合谐波阻抗为 $Z_{Lmh,t}$ 。若馈线 m 为非线性负荷支路, 当忽略其他谐波源的影响时, $\dot{I}_{mh,t}$ 在 PCC 引起的谐波电压有效值 $U_{mh,t}$ 为

$$U_{mh,t} = \left| \dot{I}_{mh,t} \times Z_{Smh,t} \right| = I_{mh,t} \times k_{mh,t} \times Z_{Sh,t} \quad (6)$$

根据式(6), 当 $Z_{Sh,t}$ 一定时, $k_{mh,t}$ 越大, 谐振放大倍数越高, $I_{mh,t}$ 引起的 $U_{mh,t}$ 越大。在实际电网中, 由于不同馈线对应的 $Z'_{Lmh,t}$ 不同, 注入系统的谐波电流系数不同, 对谐波电压的影响也不同。

在电网谐振状态下, 电网中一般存在主导谐波源。当 $I_{mh,t}$ 为主导谐波源时, 其在 PCC 引起的谐波电压 $U_{mh,t}$ 对 $U_{Ph,t}$ 的贡献较大, 当 $U_{mh,t} \approx U_{Ph,t}$ 时, $I_{mh,t}$ 与 $U_{Ph,t}$ 的耦合谐波阻抗近似为 $Z_{Smh,t}$, 当 $Z_{Smh,t}$ 保持稳定时, $I_{mh,t}$ 与 $U_{Ph,t}$ 必然存在强相关性。当 $I_{mh,t}$ 为非主导谐波源, 若 $I_{mh,t}$ 由 $U_{Ph,t}$ 主导产生, 则 $I_{mh,t}$ 与 $U_{Ph,t}$ 的耦合谐波阻抗近似为 $Z_{Lmh,t}$, 当 $Z_{Lmh,t}$ 保持稳定时, $I_{mh,t}$ 与 $U_{Ph,t}$ 也必然存在强相关性; 若 $I_{mh,t}$ 不受 $U_{Ph,t}$ 主导时, 则 $I_{mh,t}$ 与 $U_{Ph,t}$ 的耦合谐波阻抗并无明确的物理意义, 两者的相关性减弱。

根据前述分析, 对于不同类型的馈线支路, 其谐波电流与母线谐波电压的耦合谐波阻抗值及相关性特征也存在差异。因此, 通过对不同馈线谐波电流与母线谐波电压之间耦合谐波阻抗的量化分析, 为无相位信息条件下谐振源辨识提供了理论支撑。

1.2 敏感谐波源及敏感谐振支路定义

电网发生谐波谐振时, 必然存在频率匹配的谐波源及谐振回路。目前, 谐波源及谐振回路的定义是明确的, 但关于敏感谐波源及敏感谐振支路并无明确的定义。在实际电网中一般存在多个谐波源, 根据式(6), $Z_{Sh,t}$ 对所有线路的谐波源均是一致的, 但不同馈线的谐波源注入系统时对应的谐波电流系数 $k_{mh,t}$ 不同, $k_{mh,t}$ 越大, 其对应的 $Z_{Smh,t}$ 也越大, 对谐波电压的影响越大。因此, 本文给出敏感谐波源的定义如下: 当电网发生谐振时, $k_{mh,t}$ 最大的支路所对应的谐波源为敏感谐波源。

虽然不同馈线的谐波阻抗均会影响谐振回路的谐振频率或谐波阻抗, 但在大多场景下, 谐振回路

往往由部分阻抗支路所主导。因此, 在构成并联谐振的多个阻抗支路中, 本文定义对谐振阻抗影响最大的支路为敏感谐振支路。为便于说明, 以 $Z_{L1h,t}$ 和 $Z_{L2h,t}$ 两个负荷支路为例, 其并联阻抗计算公式为

$$Z_{L12h,t} = Z_{L1h,t} Z_{L2h,t} / (Z_{L1h,t} + Z_{L2h,t}) \quad (7)$$

式(7)两边分别对 $Z_{L1h,t}$ 和 $Z_{L2h,t}$ 求偏导, 得到

$$\partial Z_{L12h,t} / \partial Z_{L1h,t} = Z_{L2h,t}^2 / (Z_{L1h,t} + Z_{L2h,t})^2 \quad (8)$$

$$\partial Z_{L12h,t} / \partial Z_{L2h,t} = Z_{L1h,t}^2 / (Z_{L1h,t} + Z_{L2h,t})^2 \quad (9)$$

则 $Z_{L1h,t}$ 对并联阻抗 $Z_{L12h,t}$ 的敏感度为

$$S_{Z_{L1}} = \frac{\partial Z_{L12h,t}}{\partial Z_{L1h,t}} \left/ \left(\frac{\partial Z_{L12h,t}}{\partial Z_{L1h,t}} + \frac{\partial Z_{L12h,t}}{\partial Z_{L2h,t}} \right) \right. = \frac{1}{1 + K_Z} \quad (10)$$

$Z_{L2h,t}$ 对并联阻抗 $Z_{L12h,t}$ 的敏感度为

$$S_{Z_{L2}} = K_Z^2 / (1 + K_Z^2) \quad (11)$$

式中, $K_Z = Z_{L1h,t} / Z_{L2h,t}$ 。

当 $Z_{L1h,t} = Z_{L2h,t}$ 时, $Z_{L1h,t}$ 对并联阻抗变化的敏感度为 0.5; 当 $Z_{L1h,t} < Z_{L2h,t}$ 时, $Z_{L1h,t}$ 对并联阻抗的敏感度大于 0.5, 且随着 K_Z 的减小, $Z_{L1h,t}$ 对并联阻抗的敏感度呈指数越长。因此, 谐波阻抗越小的支路对并联阻抗影响越大, 即敏感谐振支路为对应谐波阻抗较小的支路。在实际电网中, 谐振回路由感性支路和容性支路构成, 因此敏感谐振支路一般有两个阻抗特性相反的支路。

1.3 相关性分析与线性回归

相关性分析主要用于衡量不同变量之间的相关程度, 常用相关系数进行量化。皮尔逊相关系数 r_{xy} 常用于表征两个连续变量 X 和 Y 之间的线性相关程度, r_{xy} 计算式为

$$r_{xy} = \frac{\sum_{n=1}^N (X_n - \bar{X})(Y_n - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{n=1}^N (X_n - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{n=1}^N (Y_n - \bar{Y})^2}} \quad (12)$$

式中: \bar{X} 和 \bar{Y} 分别为连续变量 X 和 Y 的均值; n 为连续变量的时序编号; N 为连续变量的总数据长度。 r_{xy} 的取值在 -1.0 至 1.0 内, 正值表示正相关, 负值表示负相关, r_{xy} 的绝对值越大表示两个连续变量之间的线性相关性越强, 反之则越弱。

实际电网中, 相关系数同时受多谐波源交互耦合和电网运行状态的影响, 当电网运行状态发生较大变化时应分段计算相关系数, 重点凸显多谐波源交互耦合的影响。工程应用时, 相关系数大于等于 0.90 时具有强相关性, 相关系数小于 0.60 时具有弱相关性。在多谐波源谐振分析模型中, 当 $I_{mh,t}$ 与

$U_{Ph,t}$ 之间呈弱相关性时, $I_{mh,t}$ 和 $U_{Ph,t}$ 之间具有非主导关系。当 $I_{mh,t}$ 和 $U_{Ph,t}$ 之间呈强相关性时, 可基于最小二乘法用二元一次方程进行线性回归, 回归方程如式(13)所示。

$$U_{Ph,t} = \beta_1 I_{mh,t} + \beta_2 \quad (13)$$

式中: β_1 为回归直线的斜率, 定义为回归系数; β_2 为回归直线在纵轴上的截距, 定义为回归截距。

线性回归可拟合出 4 类回归直线, 如图 2 所示。

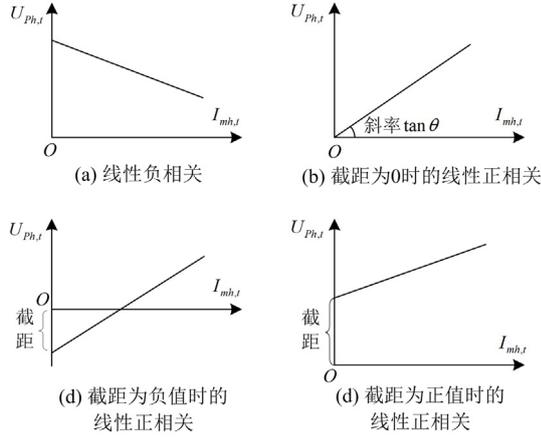


图 2 线性回归类别

Fig. 2 Type of linear regression

图 2(a)中, $I_{mh,t}$ 和 $U_{Ph,t}$ 呈线性负相关, 说明 $I_{mh,t}$ 和 $U_{Ph,t}$ 之间必然存在多谐波源耦合问题, 对应耦合谐波阻抗值和阻抗角物理意义不明确。图 2(b)中, $I_{mh,t}$ 和 $U_{Ph,t}$ 呈线性正相关且线性拟合曲线过坐标原点, 则 $I_{mh,t}$ 和 $U_{Ph,t}$ 之间存在因果关系, 回归系数对应 $I_{mh,t}$ 和 $U_{Ph,t}$ 之间的耦合谐波阻抗, 回归系数越大, 耦合谐波阻抗越大。实际电网中由于谐波源广域分布, $I_{mh,t}$ 和 $U_{Ph,t}$ 的线性回归结果多为图 2(c)和图 2(d)所示的形式, 回归截距不为 0, 说明 $I_{mh,t}$ 和 $U_{Ph,t}$ 之间存在多谐波源耦合问题。当截距较大时, 说明各谐波源的影响较为分散, 对应耦合谐波阻抗值和阻抗角物理意义不明确; 当截距较小时, 则可认为 $I_{mh,t}$ 和 $U_{Ph,t}$ 之间存在一个强主导谐波源, 曲线斜率近似为 $I_{mh,t}$ 和 $U_{Ph,t}$ 之间的耦合谐波阻抗。

回归截距的大小是相对的, 回归截距相对值越小, 表明单一谐波源贡献越大, 为判断单一谐波源的主导作用, 定义主导系数 k_0 为

$$k_0 = 1 - \beta_2 / \max(U_{Ph,t}) \quad (14)$$

式中: k_0 为主导系数; $\max(U_{Ph,t})$ 表示 $U_{Ph,t}$ 的最大值。当主导谐波源对谐波电压贡献率达到非主导谐

波源的 4 倍以上时, k_0 约为 0.8, 此时可判定 $I_{mh,t}$ 和 $U_{Ph,t}$ 之间存在强主导谐波源。

1.4 基于监测数据的谐振参数敏感性分析

谐振参数的敏感性分析是辨识系统中各部分参数变化对谐波谐振的影响程度, 可通过量化各测量参数的变化对谐振影响的强弱来辅助辨识敏感谐波源或敏感谐振支路。

设 Z_h 为某节点的耦合谐波阻抗, 当耦合谐波阻抗由 Z_{h1} 变为 Z_{h2} 时, 对应的母线谐波电压由 U_{h1} 变化为 U_{h2} , 则可定义耦合谐波阻抗 Z_h 对谐波电压 U_h 的敏感度指标 S_{U_h} 为

$$S_{U_h} = \frac{U_{h1} - U_{h2}}{U_{h1}} \times \frac{Z_{h1}}{Z_{h1} - Z_{h2}} \quad (15)$$

当某个馈线的耦合谐波阻抗对谐波电压的敏感度指标越大时, 该馈线对谐波谐振的影响越大。

2 谐振参数特征及辨识方法

2.1 谐振时的阻抗敏感性特征

实际电网中 $Z_{Sh,t}$ 的谐波阻抗一般较小, 只有当 $Z_{Sh,t}$ 与 $Z_{Lh,t}$ 发生并联谐振时, 才会导致谐波电流注入系统时发生谐振放大, 进而导致母线电压严重畸变。若只是负荷馈线间的并联谐振, 与 $Z_{Sh,t}$ 并联后的谐波阻抗由 $Z_{Sh,t}$ 主导, 并不会造成母线电压严重畸变。因此, 电网中产生严重影响的并联谐振, 系统支路必是敏感谐振支路。而对于各负荷馈线支路, 并联谐波阻抗对阻抗较小的线路敏感度更高, 因此谐波阻抗最小的负荷线路即第二条敏感谐振支路。

敏感谐波源是造成母线电压畸变的主导谐波源, 在其支路测试的耦合谐波阻抗 $Z_{Smh,t} = k_{mh,t} Z_{Sh,t}$, $k_{mh,t}$ 越大的馈线支路, 对应的 $Z_{Smh,t}$ 较大, 则其对谐波电压的敏感度指标越大。

非敏感谐振支路的谐波阻抗相对较大, 对谐振时的并联谐波阻抗影响较小, 因此非敏感谐振支路的谐波阻抗对母线谐波电压的敏感度指标相对较低。

2.2 谐振时的谐波相关性特征

当电网发生 h 次谐波并联谐振时, 在背景谐波电压源 $\dot{U}_{Sh,t}$ 和各馈线谐波电流源 $\dot{I}_{Smh,t}$ 共同作用下, PCC 谐波电压为

$$\dot{U}_{Ph,t} = \sum_{m=1}^M \dot{I}_{Pmh,t} Z_{Sh,t} - \frac{\dot{U}_{Sh,t}}{Z_{Lh,t} + Z_{Sh,t}} Z_{Lh,t} \quad (16)$$

当电网发生 h 次谐波并联谐振时, 理想情况下, $Z_{Lh,t}$ 和 $Z_{Sh,t}$ 的虚部阻抗值相等、极性相反。若

系统侧谐波阻抗呈阻感特性且不考虑电阻分量时, 则 $Z_{Sh,t} = jX_{Sh,t}$ 、 $Z_{Lh,t} = -jX_{Sh,t}$, 根据式(1)、式(2)和式(16)得到 $\dot{U}_{Ph,t}$ 和 $\dot{I}_{Ph,t}$ 的耦合阻抗关系, 如式(17)所示。

$$\dot{U}_{Ph,t} = \dot{I}_{Ph,t} \times jX_{Sh,t} \quad (17)$$

根据式(17), 当电网发生 h 次谐波并联谐振时, PCC 的 $\dot{U}_{Ph,t}$ 与 $\dot{I}_{Ph,t}$ 总是近似呈线性关系, 且耦合谐波阻抗为系统谐波电抗, 由于系统电抗一般远大于电阻分量, 因此 $\dot{U}_{Ph,t}$ 和 $\dot{I}_{Ph,t}$ 的耦合谐波阻抗即系统的 h 次谐波阻抗。

当电网发生并联谐振时, 敏感谐振支路的谐波电流往往是敏感谐波源并网点谐波电流的数倍, 因此敏感谐振支路和敏感谐波源支路的谐波电流与母线谐波电压均呈线性正相关。

对于非敏感谐振支路, 当其负荷侧无谐波源时, 其支路中的谐波电流由母线谐波电压引起, 谐波电流与母线谐波电压存在强相关性, 且回归截距近似为 0; 当其负荷侧含谐波源时, 由于其支路谐波阻抗相对较大, 馈线中谐波电流受主导谐波源影响相对较小, 因此, 在多谐波源交互影响下, 非敏感谐振支路的谐波电流与母线谐波电压间的线性相关性减弱。

2.3 谐振源辨识流程

根据谐振时的阻抗敏感性特征及谐波相关性特征, 本文提出一种无相位谐波监测数据的谐振源辨识方法, 其流程如图 3 所示。辨识流程主要分为两个部分:

第一部分是谐振状态判断, 基于式(17)中谐振时母线谐波电压与总进线谐波电流的线性相关性特征及耦合谐波阻抗特性(对应回归系数), 实现电网谐振状态的判断;

第二部分是谐振源辨识, 基于各线路谐波电流与谐波电压的相关系数、回归系数、回归截距及敏感度指标, 实现对敏感谐波源、敏感谐振支路及非敏感谐振支路的辨识。

3 仿真验证

3.1 仿真模型和参数

以 220 kV 系统为例, 建立多谐波源谐振分析模型, 对敏感谐波源和敏感谐振支路的辨识方法进行量化分析和综合验证。仿真模型的基波阻抗参数设置见表 1。

线路 1 谐波源的 5 次谐波电流呈方波变化趋势(波动频率为 3 rad/s, 同时叠加均值为 0、方差为 0.01 的高斯噪声); 线路 2 谐波源的 5 次谐波电流呈正弦

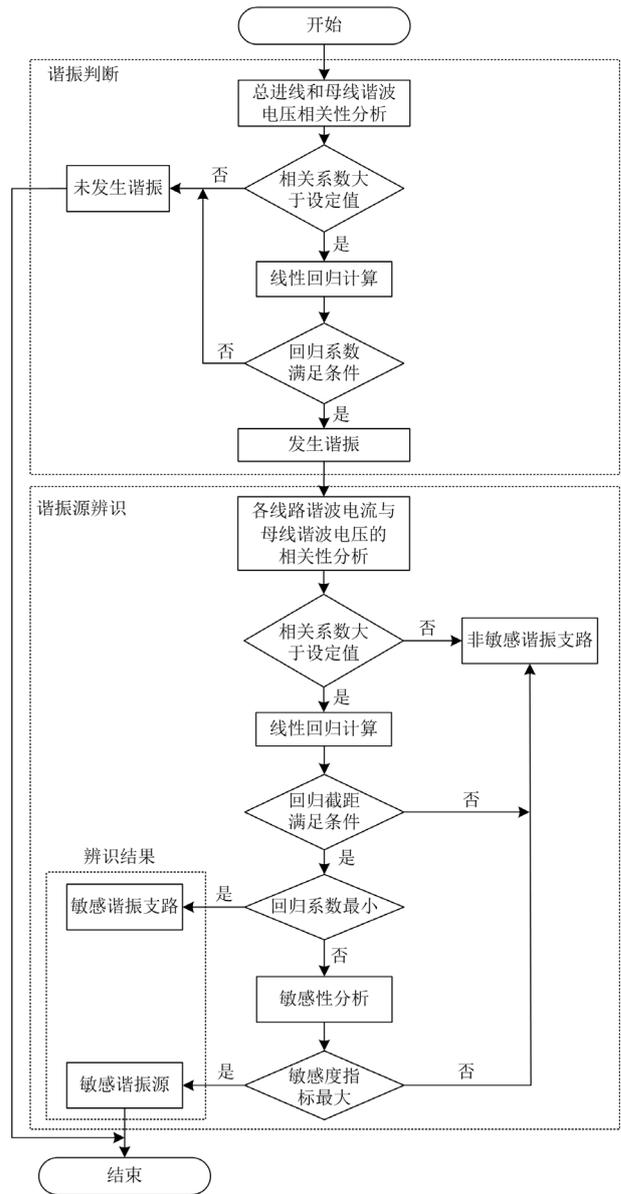


图 3 敏感谐波源和敏感支路辨识流程

Fig. 3 Flow of identifying sensitive harmonic sources and resonant branches

表 1 仿真模型的阻抗参数设置

Table 1 Impedance parameter settings of simulation model

支路	基波	基波	基波	支路类别
	感抗/ Ω	容抗/ Ω	电阻/ Ω	
总进线	10.00	—	1.00	敏感谐振支路
线路 1	60.00	—	6.00	敏感谐波源
线路 2	—	240.00	8.00	敏感谐振支路
线路 3	300.00	—	50.00	非敏感谐振支路

波变化趋势(波动频率为 3 rad/s, 同时叠加均值为 0、方差为 0.01 的高斯噪声); 线路 3 谐波源的 5 次

谐波电流呈锯齿波变化趋势(波动频率为 3 rad/s, 同时叠加均值为 0、方差为 0.01 的高斯噪声); 增加 400 V 的背景 5 次谐波电压(含有率为 0.315%), 背景谐波电压呈方波变化趋势(波动频率为 0.5 rad/s, 同时叠加均值为 0、方差为 0.01 的高斯噪声)。其中, 当各谐波源单独作用时, 在各自线路并网点测得的 5 次谐波电流趋势如图 4 所示。

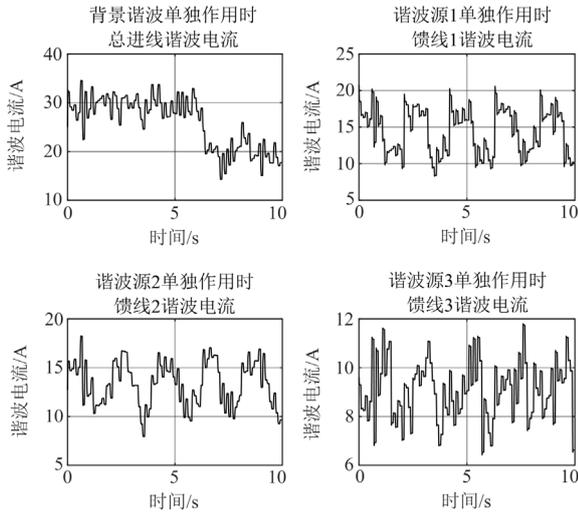


图 4 各谐波源单独作用时对应并网点谐波电流趋势

Fig. 4 Trend of harmonic currents at the corresponding shunt point when each harmonic source acts individually

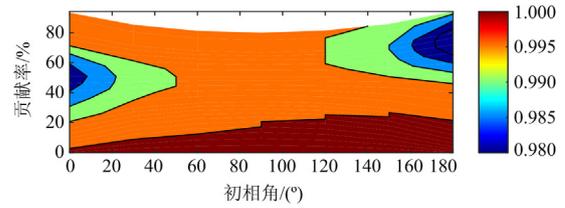
3.2 多谐波源交互影响量化分析

1) 仿真工况设置

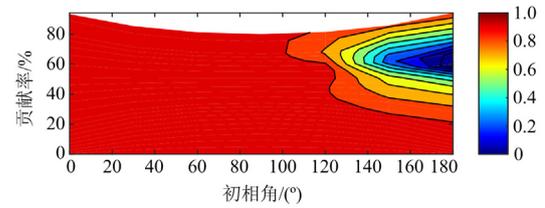
为量化分析多谐波源交互对谐振参数辨识的影响, 在 3.1 节仿真模型和参数的基础上, 仅投入背景谐波电压源和线路 1 的谐波电流源。仿真时, 线路 1 的谐波电流源幅值和相角均保持不变, 仅改变背景谐波电压源的幅值和初相角, 使背景谐波电压源的初相角在 0° 到 180° 区间变化, 且对 PCC 谐波电压贡献率在 0 到 80% 区间变化, 分析在不同背景谐波电压影响下各节点的相关性系数和线性回归结果。

2) 多谐波源交互对相关系数的影响

在仿真工况下, PCC 的 5 次谐波电流与 5 次谐波电压的相关系数变化如图 5(a) 所示, 仿真工况下的相关系数均大于 0.98, 验证了式(17)所示的耦合阻抗关系。但受背景谐波电压的影响, 线路 1 的 5 次谐波电流与母线 5 次谐波电压的相关系数变化区间较大, 如图 5(b) 所示, 但其在 70.8% 的区间内仍保持在较高水平 (≥ 0.95), 因此通过相关性分析可以实现电网谐振判断及敏感谐振支路和敏感谐波源辨识。



(a) 不同背景谐波影响下的总进线谐波相关系数变化趋势



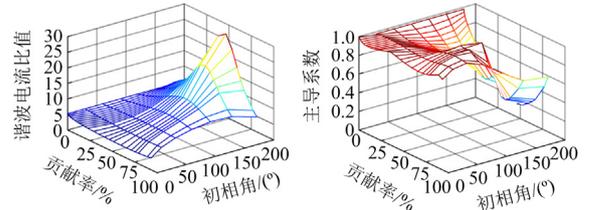
(b) 不同背景谐波影响下的线路1谐波相关系数变化趋势

图 5 背景谐波电压对相关系数的影响

Fig. 5 Effect of background harmonic voltage on correlation coefficient

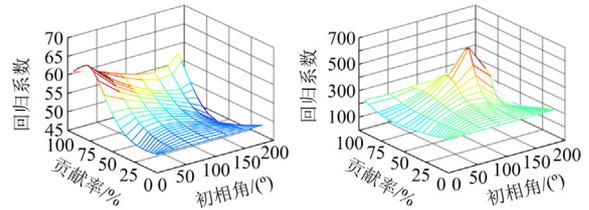
3) 多谐波源交互对线性回归的影响

基于回归系数的谐波阻抗辨识方法也受多谐波源的影响。对于不同的监测点, 串联谐振和并联谐振时的耦合谐波阻抗不同, 当背景谐波电压逐渐增大时, 谐振模式逐渐由并联谐振主导转变为串联谐振主导, 耦合谐波阻抗也同步发生转移。仿真工况下, 在不同的背景谐波电压贡献率下的各参数回归计算结果如图 6 所示。



(a) 总进线与线路1 谐波电流比值

(b) 线路1主导系数趋势



(c) 总进线回归系数趋势

(d) 线路1回归系数趋势

图 6 背景谐波电压对其他指标的影响趋势

Fig. 6 Trend of background harmonic voltage on other indicators

当背景谐波电压为 0 时, 线路 1 的主导系数为 1(对应回归截距为 0), 总进线和线路 1 的回归系数分别为 50.0 和 253.74, 均与设置的耦合谐波阻抗参

数一致；总进线 5 次谐波电流与敏感谐波源的谐波电流比值为 5.23，与阻抗法仿真计算得到的线路 1 至总进线的谐波电流系数完全一致。因此，对于仅含单个谐波源的谐振工况，本文所提方法能够准确辨识电网谐振时的阻抗参数及谐振放大倍数。

当两个谐波源同时作用且影响相当时，相关谐振参数测试结果会出现较大偏差，但当其中一个谐波源起主导作用时，也可近似估算系统的谐振参数。根据仿真结果，当背景谐波电压贡献率小于 20% 时，在随机幅值和相位条件下的各谐振参数均值统计结果为：线路 1 主导系数为 0.90；总进线和线路 1 的回归系数分别为 49.78 和 248.81，与线路 1 谐波电流源单独作用时所对应的耦合谐波阻抗偏差率分别为 0.26% 和 1.94%，仍能较准确地反映所对应测点的耦合谐波阻抗值；总进线与线路 1 的 5 次谐波电流比值为 5.75，与阻抗分析法仿真计算得到的谐波电流系数偏差率为 9.94%，基本能反映电网谐振的严重程度。

3.3 多谐波源交互影响下的谐振源辨识

为仿真多谐波源交互下的谐振源辨识结果，在 3.1 节仿真模型和参数的基础上分 4 种工况进行仿真：工况 1 设置为背景谐波电压源和所有线路的谐波电流源均投运；工况 2 是在工况 1 的基础上将线路 3 的谐波电流源退出运行；工况 3 是在工况 2 的基础上将线路 2 的负荷谐波阻抗降低 1/3；工况 4 是在工况 3 的基础上将线路 3 的负荷谐波阻抗降低 1/3。

1) 工况 1 仿真结果

工况 1 下的各线路并网点 5 次谐波电压与母线 5 次谐波电压的散点图及回归直线如图 7 所示，相关系数、回归系数和回归截距统计结果见表 2。

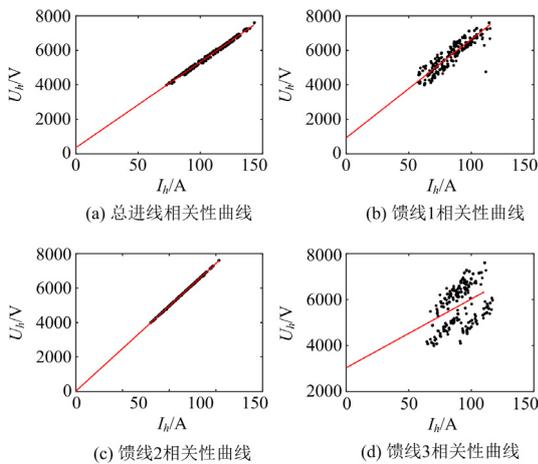


图 7 谐波电压和谐波电流散点图及回归直线(工况 1)

Fig. 7 Harmonic voltage and harmonic current scatter plot and regression line (Case 1)

表 2 相关系数和线性回归参数

Table 2 Correlation coefficients and linear regression parameters

支路	工况 1			工况 2		
	相关系数	回归系数	回归截距	相关系数	回归系数	回归截距
总进线	0.996	49.69	361.42	0.994	49.42	407.27
线路 1	0.917	285.44	929.51	0.957	237.73	-166.32
线路 2	1.000	49.32	33.05	1.000	49.52	53.65
线路 3	0.399	299.25	3033.72	1.000	1500.08	4.15

根据仿真结果，线路 3 的 5 次谐波电流与供电母线 5 次谐波电压的相关系数仅为 0.399，相关性较弱，因此线路 3 为非敏感谐振支路。总进线、线路 1 和线路 2 的 5 次谐波电流与母线 5 次谐波电压的相关系数均大于 0.90，呈强相关性，且根据式(14)得到总进线、线路 1 和线路 2 的主导系数分别为 0.95、0.88 和 1.00，即 3 条线路的 5 次谐波电流与母线 5 次谐波电压之间存在一个强主导谐波源，回归系数近似等于各测点的耦合谐波阻抗值。因总进线和线路 2 的回归系数最小，因此总进线和线路 2 均为敏感谐振支路。而线路 1 的回归系数较大，对应 5 次谐波阻抗也大，则线路 1 为敏感谐波源。

2) 工况 2 仿真结果

为增加谐振辨识难度，工况 2 将非敏感谐振支路(线路 3)的谐波电流源退出运行，通过仿真得到工况 2 下的相关系数、回归系数和回归截距统计结果，如表 2 所示。此时，非敏感谐振支路的谐波电流完全受母线谐波电压主导，其 5 次谐波电流与母线 5 次谐波电压相关系数为 1.000，回归截距为 4.15 V，回归系数为 1500.08，线路 1 和线路 3 均可能是敏感谐波源。可见，在工况 2 下仅通过相关性分析和线性回归计算无法直接识别敏感谐波源，须进一步结合各线路的耦合谐波阻抗对 PCC 谐波电压或谐波电流的敏感度指标进行敏感谐波源辨识。

3) 工况 3 和工况 4 仿真结果

工况 2—工况 4 仿真得到的线路 1、线路 3 并网点处的耦合谐波阻抗与对应谐波电压、谐波电流的散点图如图 8 所示。

可见，从工况 2 到工况 3，在线路 1 并网点测试的 5 次耦合谐波阻抗由 227.9 Ω 降至 91.2 Ω，PCC 谐波电压由 4047.3 V 降至 2583.8 V，PCC 谐波电流由 73.7 A 降至 48.7 A，则线路 1 的耦合谐波阻抗对 PCC 谐波电压和谐波电流的敏感度指标分别为 0.60 和 0.56；从工况 3 到工况 4，在线路 3 并网点测试的 5 次耦合谐波阻抗由 1501.3 Ω 降至 1126.1 Ω，PCC 谐波电压由 2583.8 V 降至 2494.6 V，PCC 谐波电流由 48.7 A 降至 46.9 A，则线路 3 的耦合谐波阻抗对

PCC 谐波电压和谐波电流的敏感度指标分别为 0.13 和 0.15。显然, 通过敏感性分析, 可辨识出线路 1 是敏感谐波源, 而线路 3 为非敏感谐振支路, 辨识结果与模型参数设置结果完全一致。

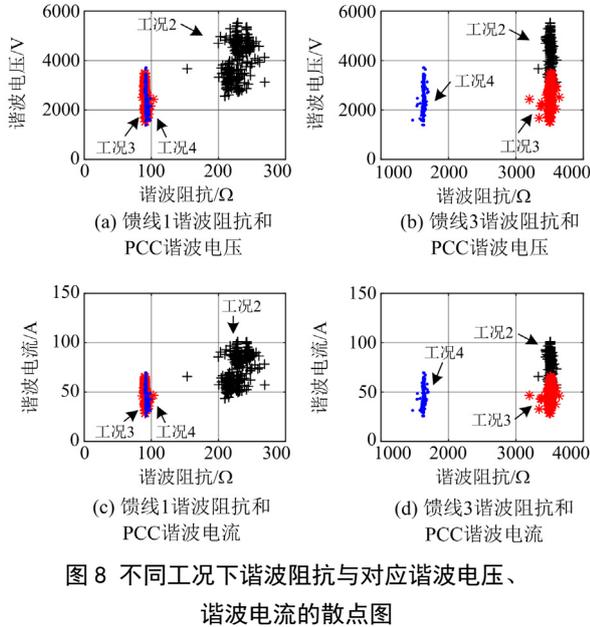


图 8 不同工况下谐波阻抗与对应谐波电压、谐波电流的散点图

Fig. 8 Scatter plot of harmonic impedance to harmonic voltage and current under different operating conditions

3.4 谐振严重程度辨识

基于敏感谐振支路和敏感谐波源的辨识结果, 在工况 1 和工况 2 下测试的 PCC 与敏感谐波源支路的谐波电流比值均为 4.14, 而在工况 3 和工况 4 下测试的谐波电流比值分别为 1.70 和 1.83, 可见, 在工况 1 和工况 2 下, 对敏感谐波源的谐波电流谐振放大倍数更大, 谐振严重程度更高。

4 应用案例

以 500 kV 变电站 220 kV 系统为例, 变电站电网架构及监测点位置如图 9 所示。

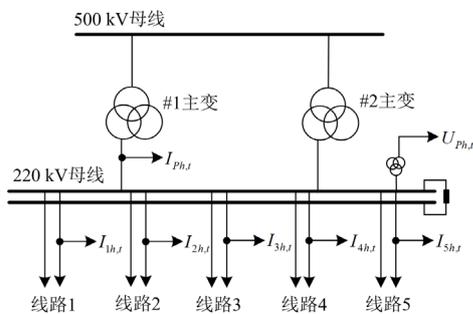


图 9 500 kV 变电站电网拓扑及测点位置示意图

Fig. 9 Schematic diagram of 500 kV substation grid topology and location of measurement points

变电站共有 5 路 220 kV 出线, 均采用双回路供电, 谐波监测时仅采样其中一个回路。根据对 20 h 的谐波电压和各线路谐波电流有效值监测结果(分析间隔为 3 s), 计算各线路 5 次谐波电流与母线 5 次谐波电压的相关系数, 并对相关系数大于 0.9 的线路进行线性回归, 结果如图 10(a)所示, 相关系数、回归系数、回归截距和主导系数计算结果见表 3。

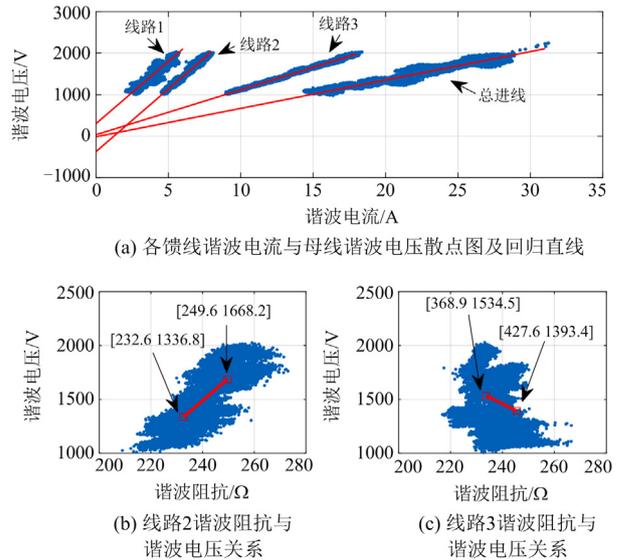


图 10 各线路的相关系数及线性回归结果

Fig. 10 Correlation coefficients and linear regression results for each route

表 3 相关系数及回归参数统计报表

Table 3 Statistical statement of correlation coefficients and regression parameters

支路	相关系数	回归系数	回归截距	主导系数
总进线	0.943	68.33	-13.20	0.99
线路 1	0.995	107.97	36.00	0.98
线路 2	0.982	301.59	-372.07	0.82
线路 3	0.907	299.71	302.27	0.85
线路 4	0.522	—	—	—
线路 5	0.318	—	—	—

由表 3 可知: 线路 4 和线路 5 的 5 次谐波电流与母线 5 次谐波电压的相关系数较弱, 均属于非敏感谐振支路; 总进线、线路 1、线路 2 和线路 3 的 5 次谐波电流与母线 5 次谐波电压的相关系数均大于 0.90, 且主导系数均大于 0.80, 说明上述 4 条线路的 5 次谐波电流与母线 5 次谐波电压之间存在一个强主导谐波源, 回归系数可近似反映各线路谐波电流与母线谐波电压的耦合谐波阻抗。由于总进线和线路 1 的回归系数最小, 对应耦合谐波阻抗最小, 因此总进线和线路 1 为敏感谐振支路。

线路2和线路3的回归系数和相关系数均较大,无法直接辨识敏感谐波源。通过对线路2和线路3谐振参数的敏感性分析,如图10(b)和图10(c)所示,母线5次谐波电压对线路2和线路3的5次耦合谐波阻抗的敏感度指标分别为3.59和-0.58,母线谐波电压对线路2的耦合谐波阻抗敏感度更高,因此线路2是敏感谐波源,而线路3为非敏感谐振支路。

此外,根据对辨识的敏感谐波源和敏感谐振支路的5次谐波电流95%概率值统计结果,敏感谐波源产生的5次谐波电流为7.6 A,而系统总进线的5次谐波电流为27.5 A,因此敏感谐波源产生的谐波电流在注入系统时被放大3.6倍。

5 结论

在电网谐振状态下,各线路并网点处的负荷侧谐波阻抗不同,系统侧谐波阻抗也不同,因此各线路对谐振状态的影响也不同,各线路中必然存在对谐振状态影响更敏感的谐波源和谐振支路,因此对电网谐振状态、敏感谐振支路和敏感谐波源的在线准确辨识,是实现电网谐振保护或高效治理的前提。为此,本文提出了一种基于无相位谐波监测数据的谐振源辨识方法。

1) 在电网谐振状态下,系统侧和负荷侧谐波阻抗接近且虚部符号相反,无论是单谐波源主导或多谐波源影响,各谐波源对PCC处谐波电压和谐波电流的影响都是同方向的,谐波电压和谐波电流始终满足线性正相关,回归系数近似等于系统谐波阻抗,回归截距近似为0,这是电网谐振状态辨识的关键特征。

2) 电网谐振状态由敏感谐波源主导时,可基于相关系数、回归系数、回归截距及敏感度指标准确测量敏感谐波源和敏感谐振支路的耦合谐波阻抗,进而实现敏感谐波源和敏感谐振支路的准确辨识。

3) 电网谐振受多谐波源影响时,敏感谐振支路的耦合谐波阻抗仍可以准确测量,而敏感谐波源的耦合谐波阻抗测量结果会受到影响。当其他谐波源对母线谐波电压的影响越大时,敏感谐波源的耦合谐波阻抗与对应系统谐波阻抗的偏差越大。根据仿真结果,当背景谐波电压对母线谐波电压贡献率小于20%时,敏感谐波源的谐波电流和母线谐波电压的回归系数与敏感谐波源的系统谐波阻抗平均偏差率仅为1.94%,仍可实现敏感谐波源的准确辨识。

本文所提方法基于谐振的机理模型和数据特征,通过谐波电压和谐波电流有效值实现电网谐振状态和谐振源的辨识,无需谐波相位信息和同步采样,有利于充分挖掘电能质量在线监测数据在电网谐振状态监测方面的应用价值。但在某些特殊工况

下,当电网中非敏感谐振支路或背景谐波电压对母线谐波电压贡献率过大($> 20\%$)时,会导致耦合谐波阻抗测量值偏差增大,可能会影响对敏感谐振支路和敏感谐波源的准确判断。

参考文献

- [1] 张华赢,李艳,高敏,等. 计及容量加权的谐波责任划分方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(4): 135-141.
ZHANG Huaying, LI Yan, GAO Min, et al. Harmonic responsibility division method considering capacity weighting[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(4): 135-141.
- [2] 张计科,王贵发. 基于阻抗重塑的多并网逆变器并联系统谐振抑制方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(6): 1-7.
ZHANG Jike, WANG Guifa. Research on the resonance suppression method of the multiple grid-connected inverter parallel system based on impedance remodeling[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(6): 1-7.
- [3] 郑嘉龙,杨鸽,陈开宇,等. LCL型多逆变器并网系统谐振研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21): 177-186.
ZHENG Jialong, YANG Ge, CHEN Kaiyu, et al. An overview on resonance for a multiple LCL-type inverter grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21): 177-186.
- [4] 杜晓东,陈泽,赵百捷,等. 基于双传播模型的含风电场的配电网谐波谐振影响分析[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(4): 129-134.
DU Xiaodong, CHEN Ze, ZHAO Baijie, et al. Influence analysis of harmonic resonance in the distribution network containing wind farms based on double propagation model[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(4): 129-134.
- [5] 徐政,金砚秋,李斯迅,等. 海上风电场交流并网谐波谐振放大机理分析与治理[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 85-91.
XU Zheng, JIN Yanqiu, LI Sixun, et al. Mechanism analysis and mitigation of harmonic resonance amplification caused by AC integration of offshore wind farm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 85-91.
- [6] 秦垚,王晗,庄圣伦,等. 海上风电场集电网的高频谐振分析[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(14): 5169-5182.
QIN Yao, WANG Han, ZHUANG Shenglun, et al. Analysis on high frequency resonance of collector network in offshore wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(14): 5169-5182.
- [7] 陈继开,祝世启,王瑞全,等. 集群风场系统链式SVG高频谐振分析与抑制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(1): 52-62.
CHEN Jikai, ZHU Shiqi, WANG Ruiquan, et al. Analysis and suppression of chained SVG high-frequency resonance in a cluster wind farm system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(1): 52-62.
- [8] 伍智鹏,李天楚,高敏. 海南环岛铁路电能质量测试

- 分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(5): 70-75.
WU Zhipeng, LI Tianchu, GAO Min. Power quality test analysis on ring railway in Hainan[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(5): 70-75.
- [9] 罗忠游, 侯冰, 蔡永军, 等. 电气化铁路牵引线路高次谐波异常机理分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(2): 136-141.
LUO Zhongyou, HOU Bing, CAI Yongjun, et al. Analysis on high-order harmonics anomaly mechanism of electrified railway traction line[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(2): 136-141.
- [10] 徐攀腾, 朱博, 喻文翔, 等. 昆柳龙直流工程受端高频谐振评估及抑制[J]. 中国电力, 2022, 55(3): 9-17.
XU Panteng, ZHU Bo, YU Wenxiang, et al. High-frequency resonance evaluation and suppression measures for receiving-end of Kun-Liu-Long DC project[J]. Electric Power, 2022, 55(3): 9-17.
- [11] 刘佳, 李爱锋, 臧斌, 等. 基于希尔伯特-黄变换和小波变换的500 kV变电站谐振数据对比分析[J]. 电测与仪表, 2016, 53(7): 107-112.
LIU Jia, LI Aifeng, ZANG Bin, et al. The harmonic resonance data contrast analysis of a 500 kV substation based on HHT and WT[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(7): 107-112.
- [12] 徐斌, 潘岩, 朱明星, 等. 光伏扶贫地区220 kV变电站电能质量运行状态研究[J]. 电气应用, 2019, 38(12): 14-20.
XU Bin, PAN Yan, ZHU Mingxing, et al. Research on power quality running state of 220 kV substation in photovoltaic poverty alleviation area[J]. Electrotechnical Application, 2019, 38(12): 14-20.
- [13] 黄玉辉, 张涛, 刘东, 等. 基于模态分析的电动汽车充电站并网谐振研究[J]. 全球能源互联网, 2019, 2(6): 617-624.
HUANG Yuhui, ZHANG Tao, LIU Dong, et al. Grid-connected resonance of electric vehicle charging station based on modal analysis[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(6): 617-624.
- [14] 徐群伟, 罗华峰, 梅冰笑, 等. 海上风电场并网对暂态过电压和谐波谐振特性的影响[J]. 浙江电力, 2023, 42(2): 1-8.
XU Qunwei, LUO Huafeng, MEI Bingxiao, et al. Research on the impact of grid-connected offshore wind farms on transient overvoltage and characteristics of harmonic resonances[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(2): 1-8.
- [15] 李玉龙, 杨明, 杨倬, 等. 抑制谐波谐振的并网逆变器机侧电流反馈的CVFAD设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 125-136.
LI Yulong, YANG Ming, YANG Zhuo, et al. Design method for CVFAD of grid-connected inverter inverter-side current feedback with harmonic resonance suppression[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(18): 125-136.
- [16] VARRICCHIO S L, FREITAS F D, MARTINS N, et al. Computation of dominant poles and residue matrices for multivariable transfer functions of infinite power system models[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3): 1131-1142.
- [17] 朱明星, 孔彬彬, 张华赢. 电缆化配电系统高频谐振频移方法[J]. 中国电力, 2021, 54(8): 19-26.
ZHU Mingxing, KONG Binbin, ZHANG Huaying. High frequency resonance frequency shift method for cable distribution system[J]. Electric Power, 2021, 54(8): 19-26.
- [18] 黄方能, 韦超, 周剑, 等. 基于谐波状态空间模型的MMC系统高频振荡分析[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1967-1976.
HUANG Fangneng, WEI Chao, ZHOU Jian, et al. MMC system high frequency resonance based on harmonic state space model[J]. Power System Technology, 2021, 45(5): 1967-1976.
- [19] 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 Wenyuan, ZHANG Dahai. A modal analysis method for harmonic resonance assessment[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 89-93.
- [20] 王志洁, 李书江, 胡红阳, 等. 构网型光伏发电系统振荡模态分析及抑制策略[J]. 电力电子技术, 2022, 56(12): 82-86.
WANG Zhijie, LI Shujiang, HU Hongyang, et al. Oscillation mode analysis and suppression strategy of grid-forming photovoltaic power generation system[J]. Power Electronics, 2022, 56(12): 82-86.
- [21] 胡臻, 李欣然, 刘光晔, 等. 基于动态阻抗的源-网-荷耦合特性分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 1106-1113.
HU Zhen, LI Xinran, LIU Guangye, et al. An analyzing method of coupling characteristic of source-network-load based on dynamic impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 1106-1113.
- [22] BOTTURA F B, OLESKOVICZ M, LE T D, et al. Optimal positioning of power quality meters for monitoring potential conditions of harmonic resonances in a MV distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(5): 1885-1897.
- [23] 蒋华玮, 徐永海, 何志轩, 等. 考虑系统参数不确定性的谐波谐振监测点优化配置方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(23): 141-151.
JIANG Haiwei, XU Yonghai, HE Zhixuan, et al. Optimal placement method for harmonic resonance monitoring points considering uncertainties of system parameters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(23): 141-151.

收稿日期: 2023-08-16; 修回日期: 2023-10-28

作者简介:

高敏(1985—), 男, 通信作者, 博士研究生, 工程师, 研究方向为电能质量分析与控制; E-mail: gaomin_pq@163.com

朱明星(1968—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电能质量分析与控制; E-mail: xysah@163.com

张华赢(1981—), 男, 硕士, 教授级高工, 研究方向为电能质量监测与治理技术。E-mail: zhyszpower@163.com

(编辑 姜新丽)