

考虑智能配电网谐波谐振模式不确定性的抑制措施

余光正^{1,2}, 林 涛^{1,2}, 陈汝斯^{1,2}, 徐遐龄³

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 湖北工业大学 太阳能高效利用湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430068; 3. 华中电网调控分中心, 湖北 武汉 430077)

摘要: 智能配电网的操作运行, 如智能配电网中分布式电源的分期接入等, 可能导致电网节点导纳矩阵的特征值发生变化, 使电网谐波谐振模式发生变化, 谐振频率发生偏移, 采用模态分析法及常规的抑制措施难以有效应对。针对这一问题, 提出了一种无源滤波器优化策略。以目标模式模态阻抗幅值最小化为优化目标建立优化模型, 并利用改进模拟植物生长算法(PGSA)对优化模型进行求解。利用 IEEE 14 节点标准系统构造测试算例, 对所提方法进行验证并与传统方法进行对比, 结果表明了所提方法的有效性和优越性。

关键词: 智能配电网; 谐波谐振; 模态分析法; 分布式电源; 智能优化算法

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.07.010

0 引言

电力电子装置的广泛应用以及大功率非线性负荷的日益增加^[1], 使得注入电网中的谐波分量增多, 导致电力设备的过热和损坏。电力系统中普遍装设电容器组作为无功补偿的手段, 当其参数选择不当时有可能导致谐波谐振, 造成电力设备的损坏, 影响系统安全运行^[2-4]。因此, 对电网谐波谐振现象进行监测和抑制具有重要意义。

对谐波谐振问题常见的分析方法有频谱分析法、模态分析法等。频谱分析方法能够识别谐振的存在并确定谐振频率, 然而该方法无法得出谐波谐振的更多信息, 并且只能对系统运行状态(主要指电网的拓扑结构和运行方式)不发生变化的情况进行确定性分析^[5-6]。特别地, 对于谐波谐振的抑制措施主要是针对电网中特定谐振频率进行设计。文献[7]提出了基于模态分析的谐波谐振评估方法。该方法通过分析网络节点导纳矩阵特征根的幅值, 揭示了有关谐振机理和程度的信息。在此基础上, 文献[8-9]介绍了抑制谐波谐振的方法。该方法针对某一次谐振频率, 以无源滤波器投资费用最少作为目标函数, 以无源滤波器安全约束和谐波潮流约束作为约束条件, 以无源滤波器品质因数和电容值作为优化变量构建优化模型, 对无源滤波器进行设计。

在智能配电网中, 各种新能源发电装置、可控负荷通过电力电子变换器接入电网。研究^[10]表明并网

逆变器可以等效成为由电感、电容以及变换器控制策略构成的输出阻抗的形式。由于智能配电网的操作运行可能导致电网节点导纳矩阵的特征值发生变化。根据模态分析法, 电网节点导纳矩阵特征值发生变化可能造成某个运行状态下谐振模式在另一个运行状态下消失; 反之, 原本不存在的谐振模式在电网新的运行状态下可能出现; 此外, 还有可能出现谐振模式在不同的运行状态下频率发生偏移的现象。抑制谐波谐振多采用在电网中装设滤波装置的方法。由于无源滤波器具有成本低、补偿无功、调节电压、功能易于实现的优点, 因此一直是应用最为广泛的滤波方法。无源滤波器的抑制谐波谐振原理, 就是对应于谐波频率, 电容器与电抗器的阻抗相匹配, 滤波器支路呈纯阻性, 使谐波电流得到有效的分流, 从而减少流入电网中的谐波电流。

文献[11]提出的谐波谐振“模态分析”方法定义电网节点导纳矩阵特征值倒数(即模态阻抗)出现极大值时, 该特征值即为谐波谐振的“关键模式”。本文根据电网节点导纳矩阵特征值幅值离散的特点, 提出了一种基于聚类算法的自动搜索不同运行状态下关键模式的识别方法, 并根据关键模式集合选择所需抑制的目标模式, 采用无源滤波器作为抑制电网谐波谐振的方法。根据目标模式的参与因子集合, 取强相关节点的交集作为无源滤波器的安装地点。针对目标模式, 以无源滤波器品质因数 Q 和电容量 C 为优化变量, 以目标模式的模态阻抗幅值最小化为优化目标, 以优化后其他模式模态阻抗幅值不发生明显变化为约束条件建立优化模型, 并采用基于云理论的改进模拟植物生长算法(PGSA)对优化模型进行求解。同时采用了模式追踪技术确保优化过程始终对目标模式进行, 优化后的滤波器参数可以

收稿日期: 2015-04-11; 修回日期: 2016-05-06

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51177111); 太阳能高效利用湖北省协同创新中心重大专项基金资助项目(HBSZD2014003)
Project supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China(51177111) and Cultivation Foundation of Hubei Collaborative Innovation Center for High-Efficient Utilization of Solar Energy(HBSZD2014003)

保证对系统运行状态发生改变情况下的频率偏移问题具有良好的适应性。

1 谐波谐振模式分析简介

模态分析法利用系统节点导纳矩阵奇异性和特征值确定得到相关谐振信息和程度,并利用矩阵左右特征向量给出谐振模式的最高可激励性和最高可观测性节点,并利用参与因子确定谐振中心。

根据频谱分析,设系统经受频率为 f 的并联谐振。这意味着通过式(1)计算出的电压向量的某些元素对应于频率 f 有很大的值。

$$\mathbf{U}_f = \mathbf{Y}_f^{-1} \mathbf{I}_f \quad (1)$$

其中, $\mathbf{Y}_f$ 为在频率 f 处的网络导纳矩阵; $\mathbf{U}_f$ 、 $\mathbf{I}_f$ 分别为节点电压、节点注入电流矩阵。省略下标 f , 根据文献[11], 矩阵 $\mathbf{Y}$ 可以分解为以下形式:

$$\mathbf{Y} = \mathbf{L} \mathbf{A} \mathbf{T} \quad (2)$$

其中, $\mathbf{A}$ 为对角特征值矩阵; $\mathbf{A}$ 为特征值对角矩阵; $\mathbf{L}$ 、 $\mathbf{T}$ 分别为左、右特征向量矩阵, 且 $\mathbf{L} = \mathbf{T}^{-1}$ 。将式(2)代入式(1)得:

$$\mathbf{U} = \mathbf{L} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{T} \mathbf{I} \text{ 或 } \mathbf{T} \mathbf{U} = \mathbf{A}^{-1} \mathbf{T} \mathbf{I} \quad (3)$$

其中, $\mathbf{A}^{-1}$ 为 $\mathbf{Y}_f^{-1}$ 的对角特征值矩阵, 且有 $\mathbf{A}^{-1} = \text{diag}(\lambda_1^{-1}, \lambda_2^{-1}, \dots, \lambda_l^{-1}, \dots)$, 如果 $\lambda_1 = 0$ 或者非常小, 则 λ_1^{-1} 趋近于无穷大, 即很小的模态 1 注入电流 J_1 将导致很大的模态电压 U_1 ; $\mathbf{I}$ 为节点注入电流向量。定义 $\mathbf{U}_m = \mathbf{T} \mathbf{U}$ 为模态电压向量, $\mathbf{J} = \mathbf{T} \mathbf{I}$ 为模态电流向量。

2 智能配电网谐波谐振不确定性分析

在传统电网中, 对电网的节点导纳矩阵进行特征值分析, 计算出谐振模式下的参与因子, 根据参与因子排序大小确定无源滤波器的最优配置位置。特别地, 主要针对电网的拓扑结构和运行方式不变的情况对谐波谐振抑制进行确定性分析。对于谐波谐振的抑制方法, 主要是针对电网中特定次谐振频率进行设计。

在智能配电网中, 各种分布式电源、可控负荷通过电力电子变换器接入电网。研究[12]表明并网逆变器可以等效成为由电感、电容以及变换器控制策略构成的输出阻抗的形式。文献[13]从阻抗角度对并网逆变器建模, 得出并网逆变器的阻抗模型。文献[14]考虑控制方式对并网逆变器阻抗的影响。并网逆变器相当于一个受控电流源, 可等效为一个电流源 i_0 并联一个阻抗(并网逆变器输出阻抗) z_0 的形式, 即诺顿等效电路, 如图 1 所示。电网可等效为电压 u_g 串联电网输入阻抗 Z_g , 并网开关 S_1 控制分布式电源投入和退出电网运行。逆变器通过公共连接点(PCC)的 LC 滤波器耦合到电网中。

以 LC 单相并网逆变器为例进行分析, 由于逆变

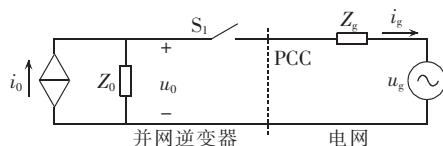


图 1 并网逆变器诺顿等效电路模型

Fig.1 Norton equivalent circuit of grid-connected inverter

器开关管频率远远高于电网基波频率, 且忽略直流母线电压波动及开关频率以上的高次谐波, 则有如图 2 所示的平均模型。图中, R_{Lf} 、 L_f 和 C_f 组成滤波电路; R_{Lg} 为电网电阻; L_g 为电网电感; u_g 为电网电压; u^* 为调制信号; G_{inv} 为脉宽调节逆变器线性增益; i^* 为电网参考电流; i_L 为电网电感反馈电流。

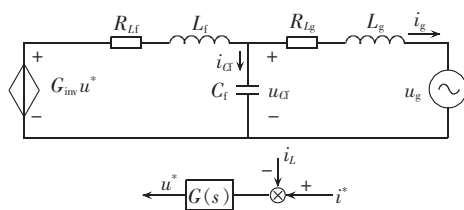


图 2 单相并网逆变器的平均电流模型

Fig.2 Average circuit model of single-phase grid-connected inverter

为了简化模型, 逆变器的反馈回路 PI 调节器控制为:

$$G(s) = k_p + k_i/s \quad (4)$$

其中, k_p 、 k_i 为 PI 调节参数。

由图 2 可得输出阻抗为:

$$Z_0(s) = \frac{u_{Cf}(s)}{-i_g(s)} \Big|_{i^*=0} \quad (5)$$

则有:

$$Z_0(s) = \frac{Z_{Cf}Z_{Lf} + Z_{Cf}G_{inv}G(s)}{Z_{Cf} + Z_{Lf} + G_{inv}G(s)} \quad (6)$$

其中, $Z_{Cf} = 1/(sC_f)$; $Z_{Lf} = R_{Lf} + sL_f$ 。由式(6)可得逆变器等效输出阻抗与控制结构方式和方式有关。

由此可见, 智能配电网分布式电源分期接入时, 智能配电网发生故障需要分布式电源退出运行导致并网逆变器等效输出阻抗(即图 1 中的 Z_0)发生变化, 从而造成电网参数发生变化。此外, 配电网自动化系统为保证电网运行的安全性和经济性会进行电网拓扑结构调整, 这些过程均可导致电网运行状态发生变化。从谐波谐振的模式分析角度分析, 受上述不确定因素的影响, 网络导纳矩阵或回路阻抗矩阵中的元素是变化的, 这导致特征值和对应的模式参与因子也是变化的, 从而可能使电网谐波谐振模式发生变化。比较常见地, 还有可能出现谐振模式在不同的运行状态下谐振频率发生偏移的现象[15]。然而传统方法是针对某一谐振频率对谐波谐振现象进行抑制, 当谐振频率发生偏移时, 基于确定性的常规谐波

谐振抑制方法在智能配电网中可能效果不够理想,针对这种情况,下文提出了一种针对谐振模式进行治理的无源滤波器参数优化方法,该方法考虑了智能配电网谐波谐振不确定性。

3 适应于谐波谐振不确定性的无源滤波器参数优化策略

通过第 2 节的分析,针对智能配电网谐波谐振不确定的现象,本文提出了一种适应于系统不同运行方式下谐波谐振频率发生偏移的谐振抑制策略。下面对各个关键技术进行介绍。

3.1 关键模式搜索技术

传统方法利用离散的数值绘制各个模式的阻抗频谱曲线,根据频谱峰值对应的频率确定谐振频率。这主要凭借人工判断,缺乏量化依据。文献[12]定义模态阻抗与全部模态阻抗之和的比值大于 0.5,则认为此模态阻抗对应的模式是关键模式,然而该方法缺乏理论依据,且当系统出现若干关键模式时该方法难以判断。为了解决难以人工设定关键模式模态阻抗整定值的问题,本文提出了一种基于围绕中心点的划分 PAM (Partitioning Around Medoid) 聚类算法的识别方法,该方法能自动提取系统关键模式,并对其归类。

本文基于模态分析法分析各个模式的模态阻抗幅值,经观察可知模态阻抗幅值在数值上有明显的分层,其中关键模式的模态阻抗幅值明显大于其他模式的模态阻抗幅值。基于该现象,可根据模态阻抗幅值的间距大小来辨识关键模式。文中采用 PAM 聚类算法,以 HS (Homogeneity-Separation) 指标为有效性指标,对电网进行模态分析,将所有模式的模态阻抗幅值进行聚类分析,模态阻抗明显大于其他模式的一类模式即为关键模式。

PAM 聚类算法在聚类的过程中最小化各样本到其最近的代表样本的不相似度之和。其基本思想是选用簇中位置最中心的对象,然后反复地用非代表对象来代替代表对象,试图找出更好的中心点,对 n 个节点导纳矩阵特征值给出 k 个划分。当类标未知时,采用 HS 指标作为有效性指标。HS 指标用同质性表示类内的样本具有内聚的结构,用分离性表示类与类之间被很好地分开。同质性定义为平均的类内样本之间的相似度,而分离性定义为不同类的样本之间的平均相似度。HS 指标最大值对应的类数作为最优的聚类个数,其定义为:

$$C_{HS}(k) = |H_{om}(k) - S_{ep}(k)| \quad (7)$$

$$k_{opt} = \arg \max \{C_{HS}(k)\} \quad 2 \leq k \leq n \quad (8)$$

$$H_{om}(k) = \frac{2}{\sum_{i=1}^k n_i(n_i-1)} \sum_{i=1}^k \sum_{\substack{t \in C_i \\ s < t}} R(s, t) \quad (9)$$

$$S_{ep}(k) = \frac{1}{\sum_{i,j=1; i < j}^k n_i n_j} \sum_{i,j=1}^k \sum_{\substack{s,t \in C_i \\ s < t}} R(s, t) \quad (10)$$

其中, $C_{HS}(k)$ 为数据集聚成 k 类时的 HS 指标值; k_{opt} 为最佳分类数; $R(s, t)$ 为第 s 个和第 t 个样本之间的相似度(例如 Pearson 相关系数); 具有 n 个样本的数据集被 PAM 聚类算法划分为 k 个聚类, n_i 为第 i 个聚类 C_i 的样本个数。评价的过程实为一优化过程, HS 指标值越大, 表明聚类质量越高。通过不断地进行计算直至 HS 指标最大值出现, 其对应的聚类数即为模态阻抗幅值的最佳分类数。

假设电网中有 n 个节点, 则通过模态分析法, 可计算出 n 个模式的模态阻抗幅值的数据集合为 $A_r = [A_{r1}, A_{r2}, \dots, A_{rn}]^T$ 。结合 PAM 聚类算法以及 HS 指标来确定最佳分类数。步骤归纳如下:

a. 实验中模态阻抗幅值的等级划分方案 k 的范围为 $[2, k_{max}]$, 根据普遍使用的经验规则 $k_{max} \leq \sqrt{n}$, 取 $k_{max} = \text{Int}(\sqrt{n})$;

b. 由计算所得的模态阻抗幅值数据集 A_r , 从 $k_{min}=2$ 至 k_{max} 循环调用 PAM 聚类算法, 以 HS 指标为评价标准对每个聚类结果进行评估;

c. 比较各个 HS 指标值, 取对应 HS 指标值最大的聚类数作为最佳分类数 k_{opt} ;

d. 输出最佳分类数、有效性指标值和聚类结果。将模态阻抗幅值数据集 A_r 分为 k_{opt} 类时, 数值最大的一类模式即为关键模式, 其对应的频率即为谐振频率。

3.2 目标函数和约束条件

谐波谐振是由系统节点导纳矩阵的奇异性引起的, 根据谐波谐振产生的机理, 本文选取待改善的关键模式为目标模式, 以目标模式模态阻抗幅值最小化为优化目标, 以无源滤波器阻容参数及品质因数为优化变量, 在满足滤波器安全可靠运行的前提下, 以其他模式模态阻抗幅值不出现较大升高为约束条件建立了无源滤波器的参数优化模型。该过程可以表述为如下带约束的优化问题:

$$\begin{aligned} \min \quad & A_{tgt} \\ \text{s.t.} \quad & \begin{cases} x_{1min} \leq x_1 \leq x_{1max} \\ x_{2min} \leq x_2 \leq x_{2max} \\ \vdots \\ x_{Nmin} \leq x_N \leq x_{Nmax} \\ S_i < t_0 \\ \frac{|\Delta S_i|}{S_i} \leq t_1 \end{cases} \end{aligned} \quad (11)$$

其中, A_{tgt} 为目标模式的模态阻抗幅值; $x_1, x_2, \dots, x_N$ 为待优化参数, N 为待优化参数的个数; S_i 为非目标模式的模态阻抗幅值; t_0 为给定的阈值; t_1 为给定的非目标模式的模态阻抗幅值变化百分比。

3.3 模式追踪技术

对于一个谐波振荡模式,从物理意义上分析指谐波导纳矩阵(谐波阻抗矩阵)的一对共轭特征值,其对应的特征向量称为振荡模式。振荡模式的振荡频率与其对应的特征值虚部有关,然而对于某个确定的谐振模式,不能仅仅依靠其频率是否变化来判断。对于优化目标的选取,文献[17]是以谐振频率为研究对象,对谐波谐振进行抑制,然而由上文分析可得在智能配电网中可能出现谐振模式频率发生偏移的情况,针对这种情况,本文以谐振模式为研究对象,利用模式追踪技术,在关键模式谐振频率发生变化的情况下保证无源滤波器始终对关键模式进行抑制。

模式追踪技术是通过确定模式的频率、强相关节点参与因子排序和左右特征向量夹角等信息来确定目标模式。模式追踪技术保证在优化过程中始终将选取的目标模式作为优化目标进行优化。

3.4 智能优化算法

采用 PGSA 对谐振中心的无源滤波器参数进行(协调)优化。

PGSA 具有参数设置简单、全局寻优能力较强等优点^[18],但其近乎遍历的搜索过程直接影响收敛速度,降低了算法效率^[19],同时该算法只适用于整数规划问题。基于云理论的改进 PGSA 采用了变步长的搜索策略并将云模型理论应用于新生长点的选取^[20],且适用于连续函数的优化。

以下通过改进的 IEEE 14 节点标准系统算例对谐波谐振不确定性的无源滤波器参数优化策略的应用进行说明,对其效果进行验证。

4 算例验证

4.1 算例简介与谐波谐振不确定性分析

基于改进的 IEEE 14 节点标准系统(见图 3)设计 2 种运行状态:在运行状态 1 下,由节点 2、8 处接入新能源发电装置,图 3 中虚线部分表示在运行状态 1 下不与电网相连接;在运行状态 2 下,在节点 1、2、6、8 处接入新能源发电装置。其中,系统基准容量为 100 MV·A,基准电压等级为 10 kV。

通过数据仿真得到模态阻抗幅值最大的 14 个测试系统谐振模式,如表 1 所示,表中的模态阻抗幅值为标么值,下文中同。以运行状态 1 为例,第 19 次和 37 次谐振频率对应的模态阻抗幅值远大于其他谐振频率对应的模态阻抗幅值。

对算例基于 PAM 聚类算法进行不同运行状态下的关键模式搜索、归类,结果如图 4 所示。

结合聚类结果,由图 4 可知,采用 PAM 聚类算法将 2 种运行状态下系统的关键模式分成了 2 类。

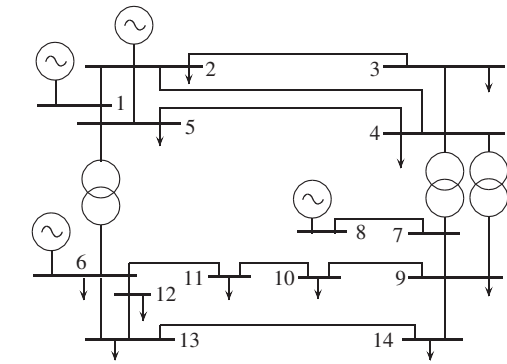


图 3 改进的 IEEE 14 节点标准系统拓扑图

Fig.3 Topological diagram of modified standard IEEE 14-bus system

表 1 前 14 名模态阻抗幅值排序结果
Table 1 Top 14 of modal impedance amplitude

排序	模态阻抗幅值		谐振次数	
	运行状态 1	运行状态 2	运行状态 1	运行状态 2
1	97.9500	137.4096	37	20
2	92.0398	91.3819	19	37
3	50.3219	62.2862	4	17
4	43.3887	57.0041	20	5
5	42.6759	28.6329	49	50
6	41.7408	27.9984	48	49
7	40.8029	27.3592	47	48
8	39.8616	26.9142	46	36
9	38.9164	26.7174	45	19
10	37.9668	26.7140	44	47
11	37.0118	26.0615	43	46
12	36.0500	25.3992	17	45
13	35.2099	24.7239	42	44
14	35.0795	24.0302	41	43

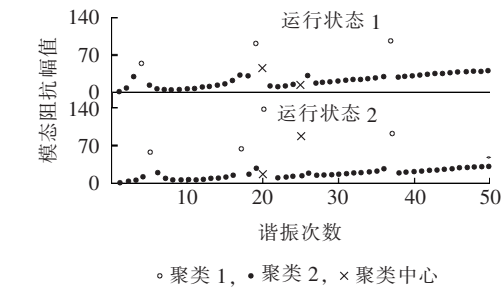


图 4 2 种运行状态下关键模式的聚类结果

Fig.4 Results of critical mode clustering for two operating conditions

算法自动选择出了模态阻抗幅值相对较大的一类,如图中空心圆点所示。分析可得在 2 种运行状态下,关键模式集合中最危险的模式如表 1 中加粗部分所示。

采用模态分析方法,得到各个关键模式具体信息如表 2 所示,由表 2 中数据可以看出运行状态 1 下谐振次数为 4 的关键模式在运行状态 2 下消失,而运行状态 2 下出现了谐振次数为 5 的关键模式。对于谐振次数为 37 的关键模式,在系统运行方式发生变化时,其模态阻抗幅值也发生变化,且谐振中心节

表 2 2 种运行状态下的模态分析结果
Table 2 Results of modal analysis for two
operating conditions

谐振次数		关键模式模态 阻抗幅值		谐振中心 节点号	
运行 状态 1	运行 状态 2	运行 状态 1	运行 状态 2	运行 状态 1	运行 状态 2
4	5	50.322	57.004	12	14
17	17	35.210	62.286	3	3
19	20	92.040	137.410	11	11
26	26	32.616	18.965	3	3
37	37	97.950	91.382	5	7

点号不同,这说明在 2 种不同的运行方式下同一次谐波谐振频率的谐振中心会发生改变,即谐振模式发生了变化。由表 2 数据可知,电网运行状态发生改变会引起谐振频率偏移的现象。

进一步地,通过模式追踪技术,由表 3 分析可知,在运行状态 1 下谐振次数为 19 的关键模式与运行状态 2 下谐振次数为 20 的关键模式的谐振中心相同,左、右特征向量的夹角基本相同,所以可以判定它们为同一个谐振模式,即谐波谐振模式的谐振频率由于电网运行方式的变化发生了改变。

表 3 2 种运行状态下的研究对象具体信息
Table 3 Specific information of research target
for two operating conditions

运行 方式	谐振 次数	谐振中心 节点号	左特征向量	右特征向量
1	19	11	0.6090	0.2625+j0.0094
2	20	11	0.6207	0.3391+j0.0093

4.2 采用无源滤波器参数优化方法抑制谐波谐振效果验证

为了简单起见,针对上文分析的关键模式谐振频率随着电网运行状态的改变而发生偏移的现象,本文以运行状态 1 和运行状态 2 下共同存在的谐波谐振模式(见表 3)为研究对象,对无源滤波器参数进行优化来抑制谐波谐振。非目标模式阻尼比阈值 $t_0=92.0398$,非目标模式模态阻抗幅值变化百分比 $t_1=5\%$ 。

根据模态分析结果,在公共谐振中心节点 11 对应安装单调谐滤波器,以单调谐滤波器品质因数 Q 和电容 C 为优化变量,采用第 3 节的优化模型,得到一组优化值 $Q=30$ 、 $C=0.00216\text{ F}$ 。安装滤波器后电网在 2 种运行状态下的模态分析结果如表 4 所示。

采用本文方法设计的单调谐滤波器,在 2 种运行状态下对系统进行模态分析,结果如图 5 所示。

由表 2 和表 4 中加粗部分分析可得,在运行状态 1 下谐振次数为 19 的关键模式的模态阻抗幅值由 92.040 降为 20.453;在电网运行状态 2 下谐振次数为 20 的关键模式的模态阻抗幅值由 137.410 降为 49.289,而其他关键模式的模态阻抗幅值没有

表 4 滤波器参数优化后电网在 2 种状态下的
模态分析结果

Table 4 Results of modal analysis for two operating
conditions after filter parameters are optimized

谐振次数		关键模式模态 阻抗幅值		谐振中心 节点号	
运行 状态 1	运行 状态 2	运行 状态 1	运行 状态 2	运行 状态 1	运行 状态 2
4	5	50.321	57.004	12	14
17	17	35.206	62.286	3	3
19	20	20.453	49.289	11	11
26	26	32.520	18.965	3	3
37	37	97.950	91.381	5	7

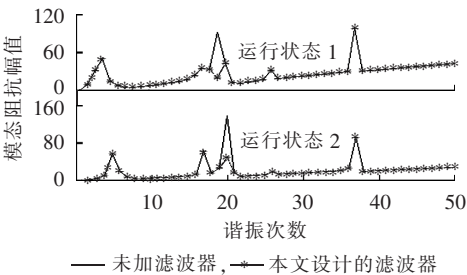


图 5 采用本文设计的无源滤波器后,运行
状态 1、2 下的模态分析结果

Fig.5 Results of modal analysis for operating condition
1 and 2,when designed passive filter is adopted

发生明显变化。

因此,在电网运行状态改变造成同一谐振模式的谐振频率改变的情况下,在参与因子最大处选择滤波器安装地点,采用优化的方法用一个单调谐滤波器能够有效应对同一个谐振模式在不同的运行状态下谐振频率偏移的情况。

4.3 对比方法验证

作为比较,传统方法从抑制某次谐振频率的角度进行分析,在某次谐振频率对应的参与因子最大处装设滤波器,消除该频率下的谐波谐振。

为了滤除运行状态 2 下的 20 次谐波,在节点 11 (谐振中心)处装设单调谐滤波器。单调谐滤波器的设计采用文献[21]中的公式,由单调谐滤波器计算公式得出单调谐滤波器参数为: $Q=60$, $C=0.00301\text{ F}$, $R=6.9805\times 10^{-4}\text{ }\Omega$, $L=6.6659\times 10^{-6}\text{ H}$ 。从谐波谐振的角度分析,系统运行状态 1 和运行状态 2 下模态分析结果如表 5 所示。

采用针对 20 次谐振次数设计的传统无源滤波器后,对在 2 种运行状态下的系统进行模态分析,结果如图 6 所示。

由图 6 可知,利用传统方法针对 20 次谐振设计的无源滤波器在运行状态 2 下将谐振次数为 20 的关键模式的模态阻抗幅值从 137.410 p.u. 降为 12.069 p.u.,达到了抑制 20 次谐波谐振的目的;此时运行状态 1 下谐振次数为 19 的关键模式的模态阻抗幅值也得

表 5 PCC 处装设单调谐波滤波器时,系统的模态分析结果

Table 5 Results of modal analysis when single-tuned filter is installed at PCC

谐振次数		关键模式模态阻抗幅值		谐振中心节点号	
运行状态 1	运行状态 2	运行状态 1	运行状态 2	运行状态 1	运行状态 2
4	5	50.2100	57.004	12	14
17	17	35.1123	62.286	3	3
19	20	78.1870	12.069	11	11
26	26	31.0980	18.965	3	3
37	37	96.2200	91.381	5	7

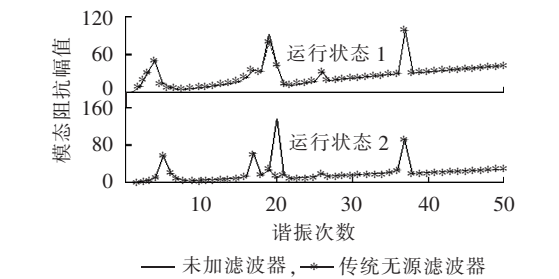


图 6 采用传统的无源滤波器后,运行状态 1、2 下的模态分析结果

Fig.6 Results of modal analysis for operating condition 1 and 2,when traditional passive filter is adopted

到了一定的降低,这是因为两者有相同的谐振中心。然而对于运行状态 1 下谐振次数为 19 的关键模式,其模态阻抗幅值下降幅度明显不如本文方法。这是因为按照确定运行方式下针对某次谐波频率设置无源滤波器只对相应次的谐波电流有明显的抑制作用,从谐波谐振抑制措施角度来看,其对关键模式模态阻抗幅值的改善不能同时兼顾谐振频率发生变化的情况。因此,本文设计的无源滤波器优化方法能够适应关键模式的谐振频率发生偏移的情况,达到了在关键模式的谐振频率随着电网运行状态发生变化的情况下有效抑制谐波谐振的目的。

5 结论

智能配电网运行状态发生改变时谐波谐振具有不确定性。本文对谐波谐振不确定性的产生原因进行了分析,针对智能配电网谐波谐振不确定性问题中存在谐振频率偏移的情况,提出了一种谐波谐振抑制方法。利用改进的 IEEE 14 节点标准系统对本文方法进行验证,结果证明其能够适应关键模式的谐振频率发生变化的情况,达到了抑制谐波谐振的目的。

目前,本文方法应用于系统离线状态。但是当电力系统在线运行时,根据实时配电网自动化运行状态可以在线计算出电网节点导纳矩阵,而本文方法中涉及的特征值计算、关键模式识别方法以及模式追踪技术均可以在线化实施,根据优化模型得出

的无源滤波器参数也可以通过自适应性无源滤波器进行调整,因此本文方法是可以在线实施的。由于篇幅有限,本文仅以智能配电网谐波谐振不确定性问题中同一谐振模式下谐振频率发生变化的现象进行了抑制,对于关键模式发生改变的多目标模式情况需要作进一步研究。

参考文献:

[1] 赵书强,马燕峰,贺春. 抑制谐波的配电网无功优化规划[J]. 电网技术,2004,28(16):71-75.
ZHAO Shuqiang,MA Yanfeng,HE Chun. Reactive power optimal planning of distribution network with harmonic mitigation [J]. Power System Technology,2004,28(16):71-75.

[2] LMIEUX G. Power system harmonic resonance;a documented case[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,1990,26(3):483-488.

[3] The Institute of Electrical and and Electronics Engineers Incoorperated Company. IEEE recommended practice for industrial and commercial system analysis:IEEE Std. 399-1997[S]. New York, USA:IEEE,1998.

[4] 董国震. 电磁式电压互感器引起的谐波谐振研究[J]. 变压器,2008,45(9):36-40.
DONG Guozhen. Research on harmonic resonance of electro-magnetic potential transformer[J]. Transformer,2008,45(9):36-40.

[5] 许德志,汪飞,毛华龙,等. 多并网逆变器与电网的谐波交互建模与分析[J]. 中国电机工程学报,2013,33(12):64-71.
XU Dezhi,WANG Fei,MAO Hualong,et al. Modeling and analysis of harmonic interaction between multiple grid-connected inverters and the utility grid[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(12):64-71.

[6] 方恒福,梁英. 基于戴维南等值的多谐波源配电网单调谐波滤波器分布配置[J]. 电力系统自动化,2013,37(22):60-65.
FANG Hengfu,LIANG Ying. A step-by-step configuration method of single tuned filter for multi-harmonic sources in distribution network based on Thevenin equivalent[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(22):60-65.

[7] XU Wilsun,HUANG Zhengyu,CUI Yu,et al. Harmonic resonance mode analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(2):1182-1190.

[8] CUI Yu,XU Wilsun. Harmonic resonance mode analysis using real symmetrical nodal matrices[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2007,22(3):1989-1990.

[9] 李欣,蒋平,徐杏桃. 模态分析法在无源滤波参数设计校核中的应用[J]. 江苏电机工程,2008,27(4):48-51.
LI Xin,JIANG Ping,XU Xingtao. Application of modal analysis in parameter checking of passive filters[J]. Jiangsu Electrical Engineering,2008,27(4):48-51.

[10] WANG F,DUARTE J L,HENDRIX M A M,et al. Modeling and analysis of grid harmonic distortion impact of aggregated DG inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2011,26(3):786-797.

[11] 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.
- [12] CESPEDDES M,SUN J. Renewable energy systems instability involving grid-parallel inverters[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition. Washington DC,USA:IEEE,2009:1971-1977.
- [13] CHEN X,SUN J. A study of renewable energy system harmonic resonance based on a DG test-bed[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition. Fort Worth,TX,USA:IEEE,2011:995-1002.
- [14] SUN J. Impedance-based stability criterion for grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2011,26(11):3075-3078.
- [15] YU Cui,XU Wilsun. Assessment of potential harmonic problems for systems with distributed or random harmonic sources[C]//Power Engineering Society General Meeting 2007. Tampa,FL,USA:IEEE,2007:1-6.
- [16] 贾莉. 基于模态分析法的无源滤波器优化配置[D]. 北京:中国石油大学,2010.
- JIA Li. Optimal allocation of passive power filters based on modal analysis[D]. Beijing:China University of Petroleum,2010.
- [17] 李普明,徐政,黄莹,等. 高压直流输电交流滤波器参数的计算[J]. 中国电机工程学报,2008,28(16):115-120.
- LI Puming,XU Zheng,HUANG Ying,et al. Algorithm for the parameters of AC filters in HVDC transmission system [J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(16):115-120.
- [18] 徐遐龄,林涛,张帆,等. 基于 TLS-ESPRIT 的低频振荡负荷参与程度量化分析[J]. 电网技术,2012,36(11):109-113.
- XU Xialing,LIN Tao,ZHANG Fan,et al. TLS-ESPRIT based quantitative analysis on participating degree of load in low-frequency oscillation[J]. Power System Technology,2012,36(11):109-113.
- [19] 叶婧,汪芳宗. 基于改进模拟植物生长算法的配电网重构[J]. 计算技术与自动化,2009,28(3):49-52.
- YE Jing,WANG Fangzong. Distribution network reconfiguration based on refined plant growth simulation algorithm[J]. Computing Technology and Automation,2009,28(3):49-52.
- [20] 王淳,程浩忠. 基于模拟植物生长算法的配电网重构[J]. 中国电机工程学报,2007,27(19):50-55.
- WANG Chun,CHENG Haozhong. Reconfiguration of distribution network based on plant growth simulation algorithm[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(19):50-55.
- [21] 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.
- 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.

作者简介:



余光正

余光正(1987—),男,湖北宜昌人,博士研究生,研究方向为电能质量分析与控制、电力系统运行与控制(E-mail:1848353649@qq.com);

林涛(1969—),男,浙江温州人,教授,博士研究生导师,主要从事电能质量分析与控制、电力系统继电保护与自动装置、电力系统运行与控制等方面的研究工作(E-mail:tlin@whu.edu.cn)。

Harmonic resonance suppression considering harmonic resonance mode uncertainty of smart distribution grid

YU Guangzheng^{1,2}, LIN Tao^{1,2}, CHEN Rusi^{1,2}, XU Xialing³

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Hubei Collaborative Innovation Center for High-Efficient Utilization of Solar Energy, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China; 3. Central China Electric Power Dispatching and Communication Centre, Wuhan 430077, China)

Abstract: The operations of smart distribution grid, such as the staged grid-connection of DGs (Distributed Generators), may change the eigenvalues of grid node admittance matrix, resulting in the harmonic resonance mode change and the harmonic resonance frequency shift, which could not be effectively dealt with by the modal analysis method or traditional suppression measures. A strategy of passive filter optimization is proposed, which builds an optimization model with the minimum modal impedance amplitude of target mode as its objective and applies the improved PGSA (Plant Growth Simulation Algorithm) to solve it. With the standard IEEE 14-bus system as a test example, the proposed method is verified and compared with the traditional method, showing its effectiveness and superiority.

Key words: smart distribution grid; harmonic resonance; modal analysis method; distributed power generation; intelligent optimization algorithms