

# 宽频域谐波谐振监测装置优化配置

罗淞泓<sup>1</sup>, 舒勤<sup>1</sup>, 刘勇<sup>2</sup>, 徐方维<sup>1</sup>

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065; 2. 国网四川省电力公司阿坝供电公司, 四川 阿坝藏族羌族自治州 623200)

**摘要:**近年来,宽频谐波谐振成为危害电力系统安全稳定运行的重要问题之一。为构建宽频域谐波谐振监测系统,提出一种基于电网拓扑结构的监测装置优化配置方法。首先,从谐波谐振可观性的角度定义综合节点关键度;然后,在保证电力系统关键线路发生 $N-1$ 故障仍全网可观的前提下,以监测装置配置数目最低以及关键度最高为目标,构建0-1整数规划数学模型,并利用改进二进制粒子群算法求解模型得出最优配置方案;最后,通过IEEE 14、IEEE 30节点系统的仿真试验,验证所提算法的可靠性和经济性。

**关键词:**谐波谐振监测;可观性;综合节点关键度;改进二进制粒子群算法

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.04.019 中图分类号: TM711 文章编号: 1673-9140(2023)04-0177-10

## Optimized placement of wide-band frequency harmonic resonance monitoring device

LUO Songhong<sup>1</sup>, SHU Qin<sup>1</sup>, LIU Yong<sup>2</sup>, XU Fangwei<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Aba Power Supply Company, State Grid Sichuan Electric Power Company, Aba Tibetan and Qiang Autonomous Prefecture 623200, China)

**Abstract:** In recent years, the wide-band harmonic resonance has become one of the most important issues that endanger the stability of the power system. In order to build wide-band harmonic resonance oscillation monitoring system, an optimal placement method of monitor device is proposed based on the power grid topology. Firstly, this method defines the criticality of comprehensive nodes from the perspective of the harmonic resonance observability. Then, under the premise of ensuring the overall observability of the power system in the event of  $N-1$  contingencies on critical transmission lines, a 0-1 integer programming mathematical model is constructed for the goal of monitoring device configurations number minimization and the criticality maximization. The optimal placement scheme is obtained by using the improved binary particle swarm algorithm to solve the model. Finally, the reliability and economy of the proposed algorithm are verified through the simulation tests of the IEEE 14-bus system and the IEEE 30-bus system.

**Key words:** harmonic resonance monitoring; observability; comprehensive node criticality; improved binary particle swarm optimization algorithm

近年来,新能源在电源结构中所占地位越来越高,以新能源为主体,融合风光储直柔的电力系统

中还包含大量非线性负荷,如城市轨道交通、电动汽车充电站及零碳建筑等,电力系统呈现高度电力

收稿日期: 2022-05-30; 修回日期: 2022-09-20

基金项目: 国家自然科学基金(51877141)

通信作者: 舒勤(1958—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事电力系统稳定与控制、智能电网以及现代信号处理等方面的研究;

E-mail: shuchin@163.com

电子化特征<sup>[1]</sup>。在电力电子化的电力系统中,新能源场站和柔性直流输电会向电网注入大量谐波;同时,非线性负荷大规模接入电网,导致谐波含量增加,电网背景谐波与用户谐波源交互作用,区域电网呈现宽频域的谐波特性。此外,由于城市电网的高电缆化率,计及电缆分布参数的感容耦合效应可进一步引发谐波谐振及放大效应,严重恶化电能质量并可能进一步诱发电网安全稳定事故<sup>[2]</sup>。

现有基础量测设备利用网络对时,这种对时方式时延高,将造成各监测点间采样数据不同步,难以满足对宽频域谐波谐振的监测需求,由此,有必要使用具备卫星对时功能的宽频同步相量测量单元(wideband phasor measurement unit, WPMU)获得同步测量信号。在电网各条母线与支路均配置WPMU,虽能实现对整个网络的实时监控,但受限于高昂的设备成本及通讯成本,使该方案实现困难,因此,应该首先对WPMU进行优化配置<sup>[3]</sup>。

目前,对监测装置优化配置的研究主要致力于在满足全网可观测模型的基础之上使得监测装置数量最少,并得出具体的配置方案。常用的可观测分析方法分为代数可观法<sup>[4]</sup>和拓扑可观法<sup>[5]</sup>2类。对于优化配置模型的求解方法又可分为2种:①确定性算法,如整数规划法<sup>[6]</sup>和分支定界法<sup>[7]</sup>等;②现代启发性算法,主要包括遗传算法<sup>[8]</sup>、禁忌搜索算法<sup>[9]</sup>、模拟退火算法<sup>[10]</sup>、最小生成树<sup>[11]</sup>以及深度优先搜索法<sup>[12]</sup>等。

除满足全网可观的目标外,往往还希望配置方案拥有更好的性能或满足不同的应用条件。针对提高谐波状态估计精度的优化配置问题,文献[13]优先在出线度较高的节点以及可能含有谐波源的节点上和需要重点监视的节点上安装监测装置,并综合考虑装置位置和状态估计误差等构建多目标数学模型,最后应用遗传算法求解得到量测最优配置,但是该算法迭代次数多、收敛速度较慢;文献[14]采用最小方差准则和序列法进行谐波监测装置优化配置,使用奇异值分解法进行可观性分析,最后使用加权最小二乘法进行状态估计,该法可使监测装置的数量和估计误差同时最小化,并使系统完全可观;文献[15-16]根据给定的监测装置

个数,将有限的监测装置配置在最优的监测节点上。文献[15]基于网络拓扑和网络参数形成三相多频率系统模型,使用最小方差法对监测装置进行优化配置,将协方差矩阵的迹作为最优配置中的目标函数,运用遗传算法求解该目标函数,但是该配置方法对于不同次数谐波的最优配置方案不同,不能一次性放置监测装置;文献[16]在文献[15]的基础上将各次谐波权重与相应的协方差矩阵的迹乘积之和定义为平均迹值,将平均迹值变化作为目标函数,使用粒子群算法求得适合多次谐波的综合最优配置方案,提高了实用性和经济性。

但是现有同步相量单元的(phasor measurement unit, PMU)优化配置均未考虑配置情况对宽频域谐波谐振监测、溯源的影响,无法满足对宽频域谐波谐振监测的需求。为此,本文基于模态分析法,从谐波谐振可观性的角度定义当前网络拓扑下的节点关键度。然而电网存在不同的典型运行工况,当工况切换、网络拓扑发生改变时,节点关键度也会随之改变。故而本文通过优序图法赋予不同工况不同的权重系数,加权后得到综合节点关键度。此外,从电力系统安全方面,还考虑对一些关键线路进行重点监测。

当保证电力系统关键线路发生 $N-1$ 故障后,在谐波谐振状态仍完全可观前提下,本文以WPMU配置数目最低以及配置结果对谐波谐振监测的贡献度最高为目标,计及零注入节点、非线性负荷分布及各节点的可安装性构建0-1整数规划数学模型;然后利用改进二进制粒子群(improved binary particle swarm optimization, EBPSO)算法求解得出最优配置方案。该方案在保证经济性的同时,可以提高监测系统的可靠性。

## 1 综合节点关键度

首先基于模态分析法,研究谐波谐振的可观性指标,从而定义当前网络拓扑下的节点关键度;其次考虑到电网存在不同的典型运行工况,给予不同工况不同的权重系数,加权后获得综合节点关键度。

### 1.1 模态分析法

模态分析法首先需要获得电力系统的节点导纳矩阵,再根据电路原理,节点电压和电流的关系可表示为

$$V_h = Y_h^{-1} I_h \quad (1)$$

式中,  $h$  为谐波次数;  $V_h$  为节点电压向量;  $I_h$  为节点注入电流;  $Y_h$  为节点导纳矩阵。

对一个  $N$  节点网络,将  $Y_h$  特征值分解为

$$Y_h = L_h D_h R_h \quad (2)$$

$$D_h = \begin{bmatrix} \lambda_{h1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_{h2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_{hN} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(2)、(3)中,  $D_h$  为特征值对角矩阵;  $L_h$ 、 $R_h$  分别为左、右特征向量矩阵,且  $L_h = R_h^{-1}$ ;  $\lambda$  为节点导纳矩阵的对角特征值矩阵中的元素。

将式(2)代入式(1),得到:

$$R_h V_h = D_h^{-1} R_h I_h \quad (4)$$

定义  $U_h = R_h V_h$  为模态电压向量,  $J_h = R_h I_h$  为模态电流向量,则  $U_h = D_h^{-1} J_h$ ,即

$$\begin{bmatrix} U_{h1} \\ U_{h2} \\ \vdots \\ U_{hN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_{h1}^{-1} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_{h2}^{-1} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_{hN}^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_{h1} \\ J_{h2} \\ \vdots \\ J_{hN} \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,  $\lambda$  倒数的绝对值称为模态阻抗。当节点导纳矩阵的第  $m$  个特征值  $\lambda_m$  较小时,对应的模态阻抗将会很大,很小的模态电流都将引起很大的模态电压。此外,由于  $D_h^{-1}$  非对角元素全为 0,即向量  $U_h$  与  $J_h$  之间不存在耦合,故而  $J_{hm}$  不影响除  $U_{hm}$  外的其他模态电压。由此谐波谐振对应  $m$  这个特定模态而发生,即此时电网发生模态  $m$  谐振。

对模态电压与节点电压的关系进行分析,由  $U_h = R_h V_h$  可得:

$$\begin{bmatrix} V_{h1} \\ V_{h2} \\ \vdots \\ V_{hN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{h11} & L_{h12} & \cdots & L_{h1N} \\ L_{h21} & L_{h22} & \cdots & L_{h2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{hN1} & L_{hN2} & \cdots & L_{hNN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{h1} \\ U_{h2} \\ \vdots \\ U_{hN} \end{bmatrix} \quad (6)$$

对于模态  $m$  谐振,其模态电压  $U_{hm}$  对实际节点电压的贡献远大于其他模态电压 ( $U_{h1} \sim U_{hm-1}$ ,  $U_{hm+1} \sim U_{hN}$ ),从而近似有

$$\begin{bmatrix} V_{h1} \\ V_{h2} \\ \vdots \\ V_{hN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{h11} \\ L_{h12} \\ \vdots \\ L_{h1N} \end{bmatrix} U_{h1} + \cdots + \begin{bmatrix} L_{hm1} \\ L_{hm2} \\ \vdots \\ L_{hmN} \end{bmatrix} U_{hm} + \cdots + \begin{bmatrix} L_{hN1} \\ L_{hN2} \\ \vdots \\ L_{hNN} \end{bmatrix} U_{hN} \approx \begin{bmatrix} L_{h1m} \\ L_{h2m} \\ \vdots \\ L_{hNm} \end{bmatrix} U_{hm} \quad (7)$$

式(7)表明可以用关键左特征向量来表征模态电压对实际电压的关系。令  $a$  为节点编号,  $L_{ham}$  的模值越大,则  $V_{ha}$  被放大的程度越高<sup>[17]</sup>,即发生模态  $m$  谐振后节点  $a$  上的谐波电压最高,在该节点安装 WPMU 就更容易观测到电网当前所处的谐振状态。

### 1.2 综合节点关键度

在获得各次谐波关键左特征向量后,通过求平均值获得当前网络拓扑下节点  $i$  的可观性指标:

$$o_i = \frac{\sum_{h \in H} L_{him}}{\text{card}(H)} \quad (8)$$

式中,  $L_{him}$  为节点  $i$  对应的关键左特征向量元;  $H$  为谐波/间谐波总次数,本文考虑 100 次谐波/间谐波,  $H = \{1.1, 1.2, 1.3, \dots, 99.9, 100.0\}$ ;  $\text{card}(H)$  为集合  $H$  中所包含元素的个数。

定义当前网络拓扑下节点  $i$  的关键度指标为

$$l_i = \frac{o_i}{\sum_{i=1}^{\text{card}(H)} o_i} \quad (9)$$

然而电网存在不同典型运行工况,工况切换会造成网络拓扑发生改变。以切除非线性负荷节点滤波器组为例,根据变化情况对谐波导纳矩阵进行修正,获得新拓扑下的节点导纳矩阵,进而分析新网络拓扑下电网的节点关键度指标。

当电力系统长时间运行在全部负荷投入运行的情况下,网络拓扑下的节点关键度指标所获权重系数应大于切除非线性负荷节点滤波器组后新拓扑下的节点关键度指标。设全部负荷投入运行的网络拓扑权重系数为  $\sigma_1$ ,系统有  $m$  个节点含有非线性负荷,当切除第  $n$  个非线性负荷节点滤波器组后,该网络拓扑的权重系数为  $\sigma_{n+1}$ ,为了定量表示权重系数,本文采用优序图法(precedence chart, PC)确定权重系数。指标的重要性排序为  $\sigma_1 > \sigma_2 = \dots = \sigma_{m+1}$ ,计算得出:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \frac{2m+1}{m^2+2m+1} \\ \sigma_2 = \dots = \sigma_{m+1} = \frac{m}{m^2+2m+1} \end{cases} \quad (10)$$

定义全部负荷投入运行的情况下节点*i*的关键度指标为 $l_{i1}$ ,切除第*n*非线性负荷节点滤波器组后新拓扑下节点*i*的关键度指标为 $l_{in+1}$ ,则节点*i*的综合节点关键度为

$$c_i = \sigma_1 l_{i1} + \sigma_2 l_{i2} + \dots + \sigma_{m+1} l_{im+1} \quad (11)$$

## 2 计及零注入节点的可观测性分析方法

可观测性分析是研究电力系统全网状态是否可观的方法<sup>[10]</sup>。若电力系统中有足够的量测可以估计出电力系统中所有节点的电压相量及所有支路的电流相量,则称该电力系统是可观的。若某个节点的电压相量及其所连支路的电流相量有直接的测量值或可以通过电路原理计算得到,则称该节点是可观测的。

WPMU基于高精度的北斗卫星通讯技术,能够测量同步相量。根据拓扑可观原理及WPMU的特点可得到节点及支路的可观测规则:

规则1 若某节点已安装WPMU,则该节点的电压相量及与该节点相连支路的电流相量均可被量测;

规则2 若某支路一端已配置WPMU,则另一端的节点电压可由基尔霍夫电压、电流定律计算得到;

规则3 若某节点的所有支路只有一条支路的电流相量未知,其他都已知,则可以通过基尔霍夫电流定律计算这条支路的电流。

规则1称为直接测量,规则2、3称为伪测量<sup>[5]</sup>。这3个规则可进一步总结为若某节点上已安装WPMU,则该节点及其所有相邻节点均可观察。

在实际电网中,还存在着没有发电机及负荷的传输节点,这类节点称为零注入节点<sup>[18]</sup>。引入零注入节点后可观测规则可扩展如下。

规则4 将零注入节点与其相连节点组成一个集合,若此集合中仅有一个不可观节点时,则该不可观节点可通过其他节点数据计算使其可观。

如图1所示,若仅使用规则1~3,至少需要在节点2、3或者节点2、4安装2个监测装置才能满足全网可观测,考虑零注入节点后仅需要在节点2安装WPMU即可满足全网可观。这是因为若节点2安装WPMU,则根据规则1~3,节点1~4就是可观的;然后根据规则4,由于零注入节点3与相邻节点组成的集合{2,3,4,5}中仅有节点5不可观,则可通过基尔霍夫电压、电流定律计算后使节点5可观。因此,考虑零注入节点后能够得到更优的配置方案。

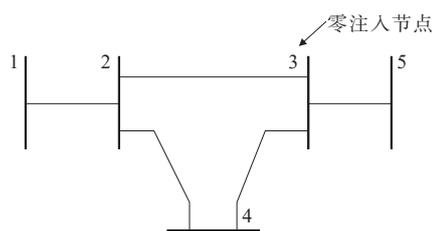


图1 5节点系统

Figure 1 5-bus system

## 3 基于0-1整数规划的数学模型

0-1整数规划是指规划中的决策变量全由0或1表示,用于解决WPMU优化配置问题十分合适。对于一个表示WPMU在电力系统中安装位置的向量,若其中某个元素为0,则表示对应节点未安装WPMU;反之,该元素为1,表示在对应节点安装了WPMU。

### 3.1 可观测性约束函数

#### 3.1.1 不考虑零注入节点

基于上述可观测规则1~3以及0-1整数规划的WPMU配置模型,针对一个节点数为*N*的系统,节点*i*对应的可观测性约束函数可以表述为

$$l_i(x) = \sum_{j=1}^N a_{ij} x(j) \geq 1 \quad (12)$$

其中, $a_{ij}$ 表示节点*i*、*j*是否相连,当节点*i*、*j*相连接或为同一点时, $a_{ij}=1$ ,否则, $a_{ij}=0$ ; $x(j)=1$ 表示在节点*j*处安装WPMU, $x(j)=0$ 则表示不安装。

根据可观测性规则,若电力系统中所有的节点都可观,则整个系统就是可观的。整个系统的可观测性数学基本模型可以表示为

$$L(x) = Ax \geq I \quad (13)$$

式中, $L(x)$ 为可观测性约束函数的向量函数; $A$ 为

节点邻接矩阵,  $A$  中的元素由  $a_{ij}$  组成;  $x$  为 WPMU 安装位置的  $N \times 1$  维列向量;  $I$  为  $N \times 1$  维列向量, 且  $I$  的元素全为 1。

### 3.1.2 考虑零注入节点

零注入节点的引入会使 WPMU 的优化配置变得复杂, 一般通过修改式(12)将可观性不等式从线性约束变成非线性约束来解决这一问题。

根据规则 4, 对于零注入节点和其相连节点组成集合, 若只有一个节点不可观, 而其他节点都可观, 则该不可观节点可以通过计算实现可观。因此, 给式(12)引入一个辅助的二元变量  $m_{ij}$  来表示节点  $i$  能否由这个集合的其他节点使其可观。通过这种方式, 节点  $i$  对应的可观性约束函数  $l_i$  可以修改为

$$l'_i(x) = \sum_{j=1}^N a_{ij}x(j) + \sum_{j=1}^N a_{ij}m_{ij}n_j \geq 1 \quad (14)$$

式中,  $m_{ij}$  为辅助二元变量, 若节点  $j$  及其相连节点但不包括节点  $i$  都可观, 则其值为 1, 否则为 0;  $n_j$  为二进制参数, 若节点  $j$  为零注入节点, 则其值为 1, 否则为 0。

整个系统的可观性数学基本模型可做相同变换:

$$L'(x) = (l'_1, l'_2, \dots, l'_N)^T \geq I \quad (15)$$

### 3.2 WPMU 优化配置数学模型

满足电力系统全网可观是量测系统需要达到的第 1 个目标。此外, 还需对含有非线性负荷的节点进行重点监测以及考虑安装点的可安装性。在电力系统实际运行中, 影响电力系统安全的往往是一些关键线路<sup>[19]</sup>。当这些线路发生故障时, 会对系统性能产生较大影响, 因此, 同样需要对这些关键线路进行重点监测, 保证这些线路两端发生  $N-1$  故障后仍然可观。

当考虑关键故障集后, 优化目标包括布置 WPMU 的节点最少以及关键度最高。数学模型为

$$\min \sum_{i=1}^N x(i) - c_i x(i) \quad (16)$$

$$\text{s.t.1 } L'_1(x) \geq I, L'_2(x) \geq I \quad (17)$$

$$\text{s.t.2 } x(p) = 1, x(q) = 0 \quad (18)$$

式中,  $L'_1(x)$  为所有节点及支路全部运行时的可观

测性约束函数的向量函数;  $L'_2(x)$  为考虑关键故障集的可观测性约束函数的向量函数;  $x(p)$  为节点  $p$  有非线性负荷, 必须安装 WPMU 进行重点监测;  $x(q)$  为节点  $q$  无法安装 WPMU。

## 4 基于 IBPSO 的 WPMU 综合最优配置

WPMU 的优化布点问题是一个复杂的多目标非线性整数组合优化问题, 能够快速准确地找到最优解是基本要求。由此, 需要选择速度快、效率高的求解算法。

### 4.1 改进二进制粒子群算法

对于 WPMU 的优化布点这种离散空间的优化问题, J.Kennedy 和 R.C.Eberhart 等人在 1997 年提出一种二进制粒子群 (binary particle swarm optimization, BPSO) 算法<sup>[20]</sup>。BPSO 算法在每次迭代过程中, 通过跟踪第  $i$  个粒子本身取得的最佳适应值  $P_b(i)$  和所有粒子目前找到的最佳适应值  $P_{gb}$  来更新速度, 继而更新自己的位置。

速度更新公式为

$$V_i^{t+1} = W \cdot V_i^t + c_1 \text{rand}() \cdot (P_b(i) - X_i) + c_2 \text{rand}() \cdot (P_{gb} - X_i) \quad (19)$$

式中,  $W$  为惯性权重;  $V$  为粒子的速度;  $X_i$  为粒子的当前位置;  $\text{rand}()$  为 0~1 间的随机数;  $c_1, c_2$  为学习因子。

位置更新公式为

$$s(V_i^{t+1}) = \frac{1}{e^{-V_i^{t+1}} + 1} \quad (20)$$

$$X_i^{t+1} = \begin{cases} 1, & \text{rand}() \leq s(V_i^{t+1}) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (21)$$

由于 BPSO 极易陷入局部最优, 本文对其进行改进, 提出 IBPSO 算法, 主要体现在引入动态自适应惯性权重及遗传算法中的变异算子操作和修复不满足可观性的粒子上。

#### 4.1.1 动态自适应惯性权重

影响 BPSO 算法效率的因素有 2 个。

1) 进化速度因子。

$$P_v = \frac{1}{e^{\min((P_{best} - P_{gb,pre}), (P_{gb,pre} - P_{best}))} + 1} \quad (22)$$

式中,  $P_v$  为进化速度因子;  $P_{best}$  为当前代最佳适应值;  $P_{gb,pre}$  为上一代所有粒子找到的最佳适应值。

在算法迭代过程中,  $P_{best}$  始终优于或等于  $P_{gb,pre}$ , 故  $0 \leq P_v \leq 1$ 。进化速度因子的值反映了粒子群的进化速度, 该值越大, 进化速度越小。经过一定次数的迭代后  $P_v$  将等于 1, 此时算法得到最优解或陷入局部最优。

2) 聚集度因子。

$$T = \frac{1}{e^{\min((mP_{best} - P), (P - mP_{best}))} + 1)} \quad (23)$$

式中,  $T$  为聚集度因子,  $0 \leq T \leq 1$ ;  $m$  为种群大小;  $P$  为当前代所有粒子的适应度之和。

聚集度因子反映了种群的多样性, 该值越大, 种群的多样性越低。经过一定次数的迭代后  $T$  也将等于 1, 此时粒子趋近于一致性, 若算法停滞, 则陷入局部最优, 算法就很难跳出局部最优。

由于速度更新式(19)中的  $W$  较小时算法具有较强的局部开发能力,  $W$  较大时能够增强算法的全局搜索能力<sup>[21]</sup>, 因此, 本文通过进化速度因子和聚集度因子控制惯性权重。当算法进化速度较慢时, 通过减小  $W$  的取值使粒子在小的范围内进行搜索, 以便能够快速找到最优解; 经过一定次数的迭代后随着粒子聚集度的提高, 算法极易陷入局部最优, 可通过增大  $W$  的取值增强算法的全局搜索能力。

综上, 将  $W$  表示为  $P_v$  与  $T$  的函数, 即

$$W = 1 - \omega_h P_v + \omega_s T \quad (24)$$

式中,  $\omega_h$ 、 $\omega_s$  为常数, 它们的取值可针对不同的数学模型进行调整。

#### 4.1.2 变异算子

为保持BPSO算法中种群的多样性, 引入遗传算法的变异操作。具体过程: 以一定概率随机选择一部分粒子, 然后针对选中的粒子随机选择某一位取反。每一次迭代粒子变异的概率采用自适应机制, 当粒子的聚集程度低、多样性高时, 减小变异概率, 避免破坏优良个体; 当粒子的聚集程度高、同一性高时, 增大变异概率。变异概率为

$$P_m = \begin{cases} 0.10, & T \geq 0.95 \\ 0.05, & T < 0.95 \end{cases} \quad (25)$$

式中,  $P_m$  为每一次迭代粒子变异的概率。

#### 4.1.3 修复不满足可观性的粒子

为保证初始化的粒子满足使系统可观的条件, 同时又保持粒子的多样性, 本文对 3/4 不可观测粒子进行修复。具体步骤: 根据式(14)计算出各个不满足条件粒子的不可观节点编号, 随机选择一个节点 WPMU, 即将该节点所对应的位置置 1, 然后根据式(15)判断该粒子是否满足可观条件, 如果不能则重复上述过程, 直到满足可观条件为止。

### 4.2 IBPSO在WPMU最优配置中的应用

粒子所在空间的维数即为控制变量的个数, 由全网节点总数决定。基于IBPSO的WPMU优化配置流程如图2所示, 运用IBPSO算法求解WPMU优化配置数学模型。首先, 将粒子群初始化, 根据电网拓扑结构、节点参数生成节点邻接矩阵  $A$ , 并判断出零注入节点的位置, 构建可观测数学模型式(17); 然后, 根据式(16)计算每个粒子的适应度, 找到  $P_b(i)$  和  $P_{gb}$ , 根据式(19)、(22)、(23)更新每个粒子的速度, 根据式(20)、(21)更新每个粒子的位置, 最后通过多次迭代得到WPMU最优配置方案。

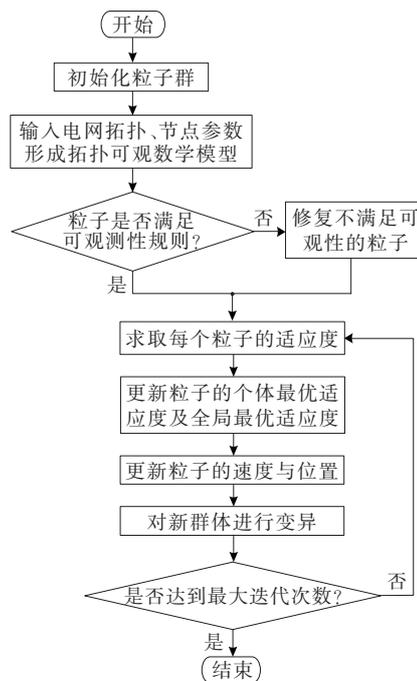


图2 基于IBPSO的WPMU优化配置流程

Figure 2 Flowchart of optimal WPMU placement based on IBPSO

## 5 算例分析

在 Matlab 2018b 软件环境下,本文开发 EBPSO 算法、WPMU 可观性分析及 WPMU 优化配置的应用程序,并在 IEEE 14、IEEE 30 节点系统进行仿真验证。

### 5.1 IEEE 14 节点系统仿真

IEEE 14 节点系统的结构拓扑如图 3 所示,假设 8、13 号节点含有非线性负荷即该系统含有 2 个谐波源,其中 8 号节点有一个静止无功补偿器 (static var compensator, SVC), 13 号节点有一个 12 脉冲高压直流输电终端 (high voltage direct current, HVDC)<sup>[22]</sup>, 7 号节点无法安装 WPMU; 根据文献[23]提供的数据,线路 1-2、5-6 为关键故障线路。

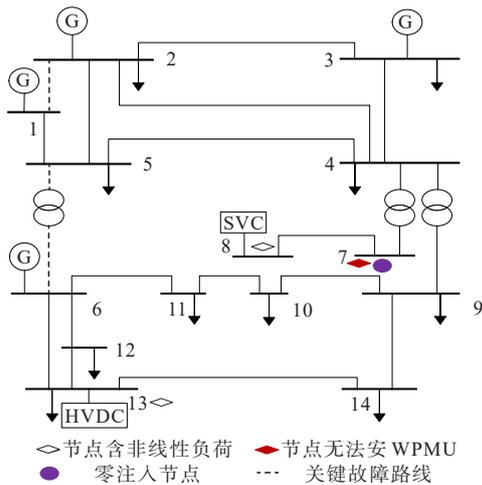


图3 IEEE 14 节点系统

Figure 3 IEEE 14-bus system

由式(8)~(10)可得 IEEE 14 综合节点关键度指标,如图 4 所示,其中节点 11 的关键度最高、节点 12 次之,节点 8 的关键度最低。根据图 4 综合节点关键度分别采用改进二进制粒子群 (modified binary particle swarm optimization, MBPSO) 算法<sup>[24]</sup>、BPSO、改进自适应遗传算法 (improved adaptive genetic algorithm, IAGA)<sup>[8]</sup>、混合蛙跳算法 (hybrid frog leaping algorithm, HFLA) 和本文所提 IBPSO 算法求解数学模型式(16)~(18),得到 WPMU 最优配置方案。

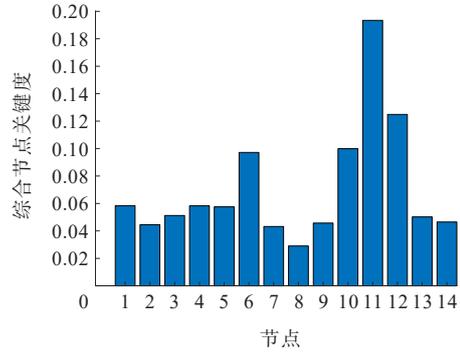


图4 IEEE 14 综合节点关键度

Figure 4 Comprehensive node criticality of IEEE14-bus system

算法参数设置:  $c_1=c_2=2$ 、 $\omega_h=0.45$ 、 $\omega_s=0.5$ , 种群大小为 50, 最大迭代数为 100。重复仿真 50 次, 得到上述 5 种方法的收敛对比平均迭代曲线, 如图 5 所示, 适应度即为式(16)的值。由图 5 可知, 5 种算法每次仿真都能收敛到全局最优; IBPSO 算法收敛速度最快, 但优势不大。本文配置方案与不考虑综合节点关键度的配置方案对比如表 1 所示。

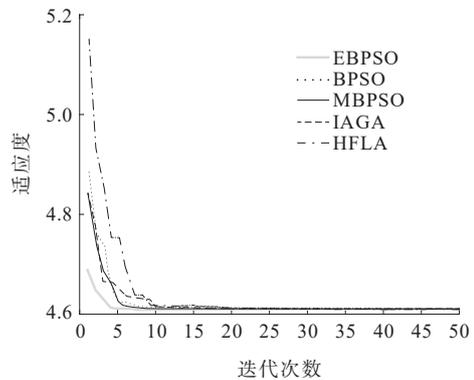


图5 IEEE 14 节点不同算法收敛曲线对比

Figure 5 Convergence curve comparison of different algorithms for IEEE 14-bus system

表 1 IEEE 14 节点系统配置

Table 1 IEEE 14-bus placement

配置方法	WPMU 安装点	关键度
本文方法	1,4,8,11,13	0.389 3
不考虑综合节点关键度	3,5,8,10,13	0.288 0

不考虑综合节点关键度配置方案的目标函数为

$$\min \sum_{i=1}^N x(i) \quad (26)$$

其约束条件与式(17)、(18)一致。按照本文配置

方法能够在不增加装置数目的基础上,将WPMU优先配置在关键度最高的11节点上。

### 5.2 IEEE 30节点系统仿真

IEEE 30节点系统的结构拓扑如图6所示,假设1、5、12号节点含有非线性负荷即该系统含有3个谐波源,其中1、5号节点各有一个SVC,13号节点有一个12脉冲HVDC,26、30号节点无法安装WPMU,6、9、22、25、27、28号节点为零注入节点;根据文献[23]提供的数据,线路6-8、9-10、27-28为关键故障线路。

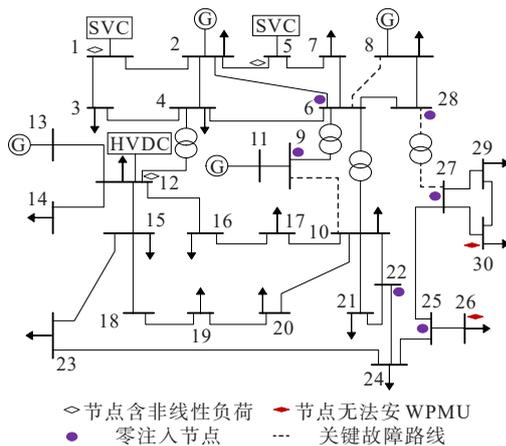


图6 IEEE 30节点系统

Figure 6 IEEE 30-bus system

IEEE 30节点系统各综合节点关键度指标如图7所示,其中节点29的关键度最高。根据图7综合节点关键度,分别采用上述5种算法求解数学模型式(16)~(18),得到WPMU最优配置方案。将种群大小设置为200,最大迭代数设置为500,重复仿真50次,收敛性能对比如表2所示,收敛性对比的平均迭代曲线如图8所示。

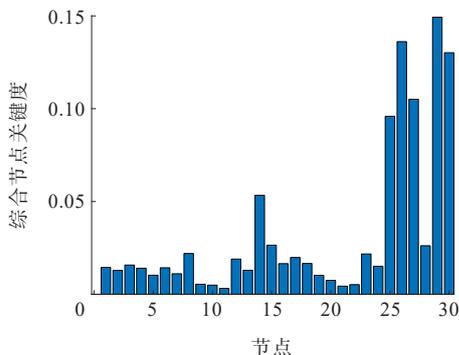


图7 IEEE 30综合节点关键度

Figure 7 Comprehensive node criticality of IEEE 30-bus system

表2 算法性能分析

Table 2 Algorithms performance analysis

算法	次数	
	配置数目最低	配置数目最低且关键度最高
EBPSO	50	35
BPSO	35	12
MBPSO	40	10
GA	24	18
HFLA	11	4

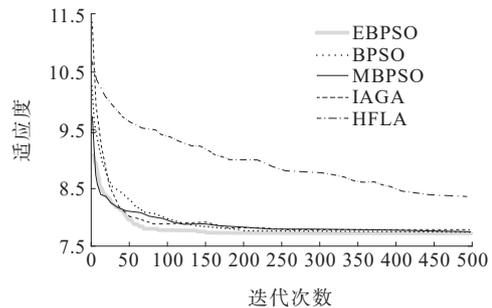


图8 IEEE 30节点不同算法收敛曲线对比

Figure 8 Convergence curve comparison of different algorithms for IEEE 30-bus system

由表2及图8可知,随着系统规模的增加,IBPSO算法明显优于其他4种算法,收敛速度最快且不易陷入局部最优解。此外,由于GA存在变异操作,其跳出局部最优解的能力比BPSO和MBPSO算法强。为验证本文配置方法的优势,将其与文献[10]、[24]、[25]的配置方法对比,如表3所示,按照本文配置方法,所需WPMU数目为8;相比于文献[24]、[25]未计及零注入节点,本文方法可少配置2台WPMU;相比于文献[10](计及零注入节点),本文方法虽然增加了1台WPMU,但是能够保证关键线路发生N-1故障后谐波谐振状态仍完全可观。此外,本文方法能够将WPMU优先配置在关键度最高的29号节点处。

表3 IEEE 30节点系统配置

Table 3 IEEE 30-bus system placement

配置方法	WPMU安装位置	WPMU配置数目	发生关键N-1故障后不可观节点
本文	1、5、10、12、15、18、28、29	8	均可观
文献[10]	2、4、10、12、19、24、27	7	7、8、9、11、28
文献[24]	1、5、8、10、11、12、18、23、26、29	10	均可观
文献[25]	2、4、6、9、10、12、15、18、25、30	10	均可观

## 6 结语

本文针对宽频域谐波谐振问题提出了完整的监测装置优化配置方法。首先,使用模态分析法从谐波谐振可观性的角度定义了当前网络拓扑下的节点关键度,再考虑当电网切换运行工况、网络拓扑发生改变时,节点关键度也会随之改变。由此,通过优序图法赋予不同工况不同的权重系数,加权后得到综合节点关键度,然后,提出了计及零注入节点的可观性分析方法,保证了谐波谐振全网可观。其次,建立了多目标约束的WPMU优化配置模型,最大化减少监测装置的配置成本并提升监测系统的鲁棒性,以保证电网发生 $N-1$ 故障后系统依然可观。最后,依托IEEE 14和IEEE 30节点系统的仿真试验,验证了算法的经济性和可靠性。

### 参考文献:

- [1] 胡钰杰,李子欣,罗龙,等.串联谐振间接矩阵型电力电子变压器高频电流特性分析及开关频率设计[J].电工技术学报,2022,37(6):1442-1454.  
HU Yujie, LI Zixin, LUO Long, et al. Characteristic analysis of high-frequency-link current of series resonant indirect matrix type power electronics transformer and switching frequency design[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(6): 1442-1454.
- [2] 李明节,于钊,许涛,等.新能源并网系统引发的复杂振荡问题及其对策研究[J].电网技术,2017,41(4):1035-1042.  
LI Mingjie, YU Zhao, XU Tao, et al. Study of complex oscillation caused by renewable energy integration and its solution[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1035-1042.
- [3] 王杨,宋子宏,占颖,等.风电并网系统次同步振荡监测装置优化配置方法[J].电力系统自动化,2021,45(13):141-150.  
WANG Yang, SONG Zihong, ZHAN Ying, et al. Optimal placement method for subsynchronous oscillation monitoring devices in grid-connected wind power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(13): 141-150.
- [4] KRUMPHOLZ G R, CLEMENTS K A, DAVIS P W. Power system observability: a practical algorithm using network topology[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & System, 1980, 99(4): 1534-1542.
- [5] BALDWIN T L, MILI L, BOISEN M B, et al. Power system observability with minimal phasor measurement placement [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(2): 707-715.
- [6] XU B, ABUR A. Observability analysis and measurement placement for systems with PMUs[C]//IEEE Power Systems Conference and Exposition, New York, NY, USA, 2004.
- [7] 蒋正威.相量测量装置优化配置的研究[D].杭州:浙江大学,2008.  
JIANG Zhengwei. Research on optimal placement of phasor measurement units[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [8] 曹鹏,刘敏.基于改进的整数规划法结合零注入节点的PMU优化配置方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(16):143-150.  
CAO Peng, LIU Min. PMU placement method based on improved integer programming method combined with zero injection buses[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 143-150.
- [9] 罗毅,赵冬梅.电力系统PMU最优配置数字规划算法[J].电力系统自动化,2006,30(9):20-24.  
LUO Yi, ZHAO Dongmei. Optimal PMU placement in power system using numerical formulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(9): 20-24.
- [10] 李强,于尔铿,吕世超,等.一种改进的相量测量装置最优配置方法[J].电网技术,2005,29(12):57-61.  
LI Qiang, YU Erkeng, LÜ Shichao, et al. An improved optimal phasor measurement unit placement algorithm[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 57-61.
- [11] 蔡田田,艾芊.电力系统中PMU最优配置的研究[J].电网技术,2006,30(13):32-37.  
CAI Tiantian, AI Qian. Research on optimal PMU placement in power systems[J]. Power System Technology, 2006, 30(13): 32-37.
- [12] 贾宏杰,吕英辉,曾沅,等.PMU在电力系统中的优化配置方法[J].电力科学与技术学报,2010,25(1):54-59+66.  
JIA Hongjie, LÜ Yinghui, ZENG Yuan, et al. Optimal PMU placement in power system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2010, 25(1): 54-59+66.

- [13] 王艳松,韩美玉,谭志勇.基于遗传算法的PMU配置对谐波状态估计质量影响的研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(21):233-236+240.  
WANG Yansong,HAN Meiyu,TAN Zhiyong.Study on the effect of PMU allocation on the quality of harmonic state estimation[J].Power System Protection and Control,2010,38(21):233-236+240.
- [14] RAD M S,MOKATARI H,KARIMI H.A new algorithm for optimal measurement placement, observability analysis and Harmonic State Estimation in power systems[C]//IEEE Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC),Tehran,Iran,2013.
- [15] KUMAR A,DAS B,SHARMA J.Genetic algorithm-based meter placement for static estimation of harmonic sources [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1088-1096.
- [16] 吴杰,杨阳,卢志刚.应用粒子群算法的谐波状态估计量测点综合最优配置[J].电网技术,2010,34(9):115-121.  
WU Jie, YANG Gang, LU Zhigang. Particle swarm optimization-based integrated optimal configuration for measuring point of harmonic state estimation[J]. Power System Technology,2010,34(9):115-121.
- [17] ABU-HASHIM R, BURCH R, CHANG G, et al. Test systems for harmonics modeling and simulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1999,14(2):579-587.
- [18] XU W,HUANG Z,YU C,et al.Harmonic resonance mode analysis[J].IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(2):1182-1190.
- [19] 张园园,龚庆武,刘栋,等.保留电压可观节点降阶的系统受扰轨迹快速预测[J].电力系统自动化,2010,34(6):17-21.  
ZHANG Yuanyuan,GONG Qingwu,LIU Dong,et al.Fast prediction of perturbed trajectories using a reduced-order approach of reserving voltage-observable nodes[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(6):17-21.
- [20] CAPITANESCU F, GLAVIC M, ERNST D, et al. Contingency filtering techniques for preventive security-constrained optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2007,22(4):1690-1697.
- [21] KENNEDY J,EBERHART R C.A discrete binary version of the particle swarm algorithm[C]//IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Computational Cybernetics and Simulation, Orlando, FL, USA,1997.
- [22] LIU J, MEI Y, LI X. An analysis of the inertia weight parameter for binary particle swarm optimization[J].IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2016, 20(5): 666-681.
- [23] 樊海锋.电力系统PMU优化配置研究[D].杭州:浙江大学,2013.  
FAN Haifeng.Investigation of optimal PMU placement in power system[D].Hangzhou:Zhejiang University,2013.
- [24] 何胜,杨斌,俞明,等.一种谐波量测点优化配置的两阶段算法[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(6):22-27.  
HE Sheng, YANG Bin, YU Ming, et al. A two-stage algorithm for optimal configuration of harmonic measurement device[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021,33(6):22-27.
- [25] 闫玲玲,刘中印,艾永乐,等.基于0-1整数规划算法的PMU量测点优化配置新方法[J].电力系统保护与控制,2017,45(12):101-106.  
YAN Lingling, LIU Zhongyin, AI Yongle, et al. A new method of the optimal placement PMU based on 0-1 integer program[J]. Power System Protection and Control, 2017,45(12):101-106.