



# 综合配网谐波及三相不平衡评价指标的 治理设备优化配置策略

卓放<sup>1</sup>, 杨泽斌<sup>1</sup>, 易皓<sup>1</sup>, 杨光宇<sup>1</sup>, 王蒙<sup>1</sup>, 阴晓晴<sup>1</sup>, 朱承治<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

2. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310007)

**摘要:** 以有源电力滤波器为代表的电能质量治理设备多用于补偿本地负载产生的谐波及不平衡电流。随着配网中非线性负荷的大量接入, 本地补偿的配置策略存在成本高、效率低的问题, 出现了面向网络电能质量全局综合提升的关键点治理设备配置需求。首先, 提出了一种基于层次分析法和模糊隶属度的电能质量数据全局评价方法, 作为衡量治理设备配置效果的尺度; 其次, 以全局配置效果、总装机数量和装机容量为优化目标, 以网络各节点谐波含量及不平衡度均满足标准为约束条件, 通过多目标粒子群算法确定治理设备最优配置节点及容量的配置策略; 最后, 通过搭建含有分布式不平衡及谐波负荷的 IEEE-18 节点仿真模型, 验证所提全局评价及设备配置策略对于网络电压谐波及不平衡综合优化的有效性和优越性。

**关键词:** 电能质量全局评价; 层次分析法; 模糊隶属度函数; 谐波综合补偿; 三相不平衡综合补偿; 治理设备配置; 多目标粒子群算法

**DOI:** 10.11930/j.issn.1004-9649.202007181

## 0 引言

以并联型有源电力滤波器 (shunt active power filter, SAPF) 为代表的电力电子电能质量治理设备, 多并联于本地负载并可实时精准补偿负载所产生的谐波及不平衡电流<sup>[1-3]</sup>。然而随着配电网规模扩大、新能源渗透率提高及大量非线性负载分散接入电网, 点对点就近配置治理设备进行负载电流补偿的方案所需的设备数量较多, 且配置效果往往无法满足网络电能质量整体提升的需求<sup>[4-6]</sup>。因此, 研究基于网络电压不平衡及谐波综合抑制的电能质量治理设备优化配置策略至关重要。

目前, 针对单个电能质量指标, 如提升网络电压不平衡度和电压偏差等的治理设备配置及全局潮流优化算法已有大量相关研究<sup>[4,7]</sup>。由于谐波的次数较多, 算法自变量维度更高、收敛难度也

更大, 且存在单次谐波含有率限值和总谐波畸变率限值等多个约束条件, 因而关于网络谐波综合补偿的治理设备配置算法往往被单独提出<sup>[8]</sup>。文献<sup>[9-13]</sup>均以网络谐波灵敏度矩阵为基础, 以各节点总谐波畸变率的平均值为优化目标函数, 分段搜寻谐波治理设备最优安装节点, 但存在配置节点数较多、容量利用率低的问题。文献<sup>[8]</sup>对比了基于灵敏度矩阵的解析优化算法和粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 应用于谐波治理设备最优配置问题的效果, 验证了 PSO 算法处理此类多变量、多约束、非线性的混合整数规划问题的有效性。文献<sup>[14]</sup>进一步采用多目标粒子群 (multi-objective particle swarm optimization, MOPSO) 算法, 同时面向配置效果 (即网络平均总谐波畸变率)、设备配置数量和总配置容量进行优化。

然而, 同时面向多个电能质量指标进行网络综合补偿的治理设备优化配置算法相关研究较少。网络节点数量、各节点电能质量指标均较多, 配置时的自变量维度更高、约束条件更复杂, 因而算法模型中目标函数的合理选择更为重要。由于配电网不同电能质量指标的限值均不相

**收稿日期:** 2020-07-31; **修回日期:** 2020-09-22。

**基金项目:** 国家电网公司总部科技项目 (面向区域优质电力需求的柔性局域网综合调控技术研究, 52110418000S); 国家自然科学基金资助项目 (基于端口阻抗的有源电力滤波器动态特性及其与源荷系统的交互影响研究, 51977172)。

同，传统以网络各节点各电能质量指标的平均值为目标函数得到的结果难以保证所有电能质量指标均满足限值标准。因此，需建立配电网多节点多种电能质量指标的归一化综合评价模型，以此作为反映治理设备配置效果的目标函数。

目前，已有大量对网络多种电能质量数据进行综合评估的相关研究，并未将评价结果应用于网络电能质量的治理研究中。文献[15-17]中详细列举了各类电能质量指标及其限值，但对于网络电能质量综合指标讨论不多。文献[18]建立了面向微电网电压指标、电流和频率指标的电能质量特点分析及综合评价模型，但文章对于客观权重和主观权重的解释较为模糊。文献[19]建立了基于层次分析法（analytic hierarchy process, AHP）和模糊综合评估的船舶电能质量评估系统，但是未考虑基于模糊算法的权重取值过于主观的问题，会导致评价结果不准确。文献[20]将 AHP 与灰度分析相结合，但其评分只表示相对优劣，并未与指标的限值相结合。

综上，本文以配电网电压不平衡与谐波的综合抑制为目标，结合网络电能质量数据综合评价与网络电能质量的综合治理，实现多台电能质量治理设备的系统化、经济化和高效化的网络配置。首先，建立网络不平衡及谐波综合补偿模型，并确定所考虑的单节点单电能质量指标；其次，建立基于 AHP 的多电能质量网络综合评价模型，将评价结果作为设备配置模型的目标函数之一；以此为基础，综合考虑治理设备配置效果、配置数量及总容量，通过 MOPSO 算法求解符合各节点电能质量限值下治理设备的最优配置结果。最后，本文通过仿真搭建含大量非理想负载的 IEEE-18 节点标准配电系统，分别建立网络电能质量综合评价模型和设备最优配置模型，得到了满足网络各节点不平衡、谐波限值下多台治理设备的高效配置方案。

## 1 谐波及三相不平衡综合补偿模型与指标

通过并联型电能质量补偿设备实现配电网电压不平衡及谐波综合抑制，其本质上是以设备的输出补偿电流为控制对象，优化网络三相不平衡及谐波潮流，从而实现网络电压质量的综合提升<sup>[9]</sup>。

首先考虑对谐波的治理。文献[10-12]详细推导了 APF 注入谐波电流实现网络谐波电压综合补偿的原理。假设所研究配电网节点数量为  $M$ ，对其各节点三相电压分别做谐波分离算法，定义配置治理设备前，网络  $h$  次节点三相电压列向量为

$$\underbrace{U_{bf,abc}^h}_{3M \times 1} = [U_{bf,a,1}^h, U_{bf,b,1}^h, U_{bf,c,1}^h, \dots, U_{bf,a,m}^h, U_{bf,b,m}^h, U_{bf,c,m}^h, \dots, U_{bf,a,M}^h, U_{bf,b,M}^h, U_{bf,c,M}^h]^T \quad (1)$$

式中：角标 bf 表示配置治理设备前；下角标 abc 分别表示 A、B、C 三相； $m$  表示节点序号； $U_{bf,a,m}^h$  表示在配置设备前节点  $m$  的 A 相电压第  $h$  次谐波量。

网络级谐波控制的时间尺度远大于电力电子电能质量治理设备自身闭环控制的时间尺度，因此在系统级建模时可不考虑治理设备的动态特性。定义配置治理设备的补偿电流序列为  $I_{device,abc}^h$ ，电流序列维度及定义与电压列向量相同。在不考虑各次谐波间耦合的情况下，配置治理设备后，网络  $h$  次节点三相电压列向量为

$$U_{af,abc}^h = U_{bf,abc}^h + \underbrace{Z_{abc}^h}_{3M \times 3M} \underbrace{I_{device,abc}^h}_{3M \times 1} \quad (2)$$

式中： $Z_{abc}^h$  为配电网  $h$  次谐波三相等效阻抗矩阵，维度为  $3M \times 3M$ ；角标 af 表示配置治理设备后； $U_{af,abc}^h$  为配置治理设备后网络  $h$  次谐波电压向量。网络谐波治理的指标包含网络各节点各相各次电压谐波含有率（harmonic ratio, HR）和总谐波畸变率（total harmonic distortion, THD），以节点  $m$  中 A 相电压为例，即

$$HRU_{af,a,m}^h = |U_{af,a,m}^h| / |U_{af,a,m}^1| \quad (3)$$

$$THD_{af,a,m} = \sqrt{\sum_{h=2}^H |U_{af,a,m}^h| / |U_{af,a,m}^1|} \quad (4)$$

式中：下角标  $m$  表示节点编号； $|U_{af,a,m}^1|$  表示该节点 A 相电压的基波幅值； $|U_{af,a,m}^h|$  表示 A 相第  $h$  次谐波电压的幅值； $H$  指所考虑的最大谐波次数； $HRU_{af,a,m}^h$  表示 A 相电压第  $h$  次谐波电压含有率； $THD_{af,a,m}$  表示 A 相电压总谐波畸变率。为简化模型，取单节点三相中单次谐波含有率及总畸变率最严重的某一相统一衡量该节点电压谐波含量。

其次，考虑网络三相不平衡的治理模型<sup>[4]</sup>。

配置治理设备后网络三相电压向量为

$$U_{af,abc}^1 = U_{bf,abc}^1 + Z_{abc}^1 I_{device,abc}^1 \quad (5)$$

式中： $Z_{abc}^1$  为配电网基波三相等效阻抗矩阵； $U_{af,abc}^1$  为配置治理设备后网络基波三相电压向量。将上式电压、电流及阻抗矩阵变换至正负零三序可得

$$\underbrace{T_{net} U_{af,abc}^1}_{U_{af,PNZ}^1} = \underbrace{T_{net} U_{bf,abc}^1}_{U_{bf,PNZ}^1} + \underbrace{T_{net} Z_{abc}^1 (T_{net})^{-1}}_{Z_{PNZ}^1} \underbrace{T_{net} I_{device,abc}^1}_{I_{device,PNZ}^1} \quad (6)$$

式中：角标 PNZ 表示将式 (5) 中三相基波电压、电流及阻抗矩阵分别变换为正负零三序； $T_{net}$  为网络电压三相到三序的变换矩阵<sup>[4]</sup>。三相不平衡的相关指标包括负序不平衡度和零序不平衡度，因为电网中的零序分量可以通过适当的变压器结构进行隔离，所以本文主要以网络节点电压不平衡度 (voltage unbalance factor, VUF) 为研究指标，即

$$VUF_{af,m}^1 = |U_{af,N,m}^1| / |U_{af,P,m}^1| \quad (7)$$

式中： $|U_{af,P,m}^1|$  和  $|U_{af,N,m}^1|$  分别为节点  $m$  基波电压的正序和负序幅值； $VUF_{af,m}^1$  为节点  $m$  的电压不平衡度。

## 2 基于 AHP 的网络电能质量综合评价模型

在对面向网络谐波和不平衡综合补偿的治理设备配置效果进行评估时，需要考虑设备配置前后网络各个节点的三相不平衡度、各相各次电压谐波含有率及各相电压谐波总畸变率等指标。若将上述所有指标均作为独立的优化目标，配置模型将因目标函数的维度过高而难以精准求解，因而常对各节点各电能质量指标求取加权平均值以作为配置模型的目标函数。由于配电网不同电能质量指标的限值均不相同，且该限值会随着配电网电压等级变化而变化，以加权平均值为目标函数得到的配置结果难以满足实际限值标准。基于此，本章通过层次分析法和模糊算法，建立了面向配电网多节点多种电能质量指标的网络电能质量综合评价模型，并将评价模型得到的结果作为反映治理设备配置效果的系统级指标。

### 2.1 单节点单电能质量指标隶属度计算

在评估系统级电能质量指标前，需建立单节

点单电能质量问题的归一化连续评估指标，从模糊控制的角度即为建立隶属度函数。连续评估指标的目标在于建立各电能质量指标 ( $0 \rightarrow \infty$ ) 到归一化隶属度 ( $1 \rightarrow 0$ ) 的连续区间映射  $F$ 。在建立映射时，首先需确定关键点映射，如图 1 所示。

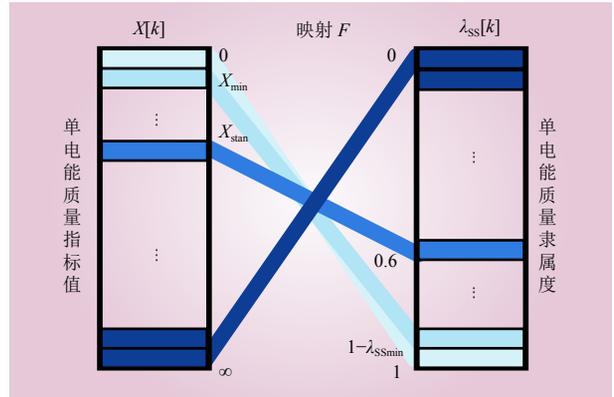


图 1 单电能质量指标映射关键点

Fig. 1 Key points of single power quality index mapping

图 1 中， $X$  表示网络所有单节点单电能质量指标组成的列向量； $X[k]$  表示其中的单电能质量指标。电能质量指标固有大小为零 ( $X[k]=0$ ) 对应归一化标准 (隶属度) 的最大值 ( $\lambda_{SS}[k]=1$ )；电能质量指标固有大小达到其最小测量精度 ( $X[k]=X_{min}$ ) 对应隶属度的最大值减去最小评分精度 ( $\lambda_{SS}[k]=1-\lambda_{SSmin}$ )；电能质量指标恰符合其标准限值 ( $X[k]=X_{stan}$ ) 对应归一化标准的及格点 ( $\lambda_{SS}[k]=0.6$ )；该节点电能质量指标为无穷大 ( $X[k]=\infty$ ) 对应隶属度的零点 ( $\lambda_{SS}[k]=0$ )。

在确定映射的关键点后，需选取合适的隶属度函数进行拟合，将离散的映射点扩充为连续的映射区间。由于柯西分布可同时满足上述关键点映射，本文采用柯西分布隶属度函数建立各指标的评估映射，柯西分布<sup>[18]</sup>为

$$\lambda_{SS}[k] = F(X[k]) = 1 / (1 + \alpha_k X[k]^{\beta_k}) \quad (8)$$

式中： $\alpha_k$  和  $\beta_k$  分别表示指标  $X[k]$  的映射参数。映射的隶属度函数需经过  $(X_{stan}, 0.6)$  和  $(X_{min}, 1-\lambda_{SSmin})$  点，以此计算出映射常数  $\alpha_k$  和  $\beta_k$  的值。

### 2.2 网络多电能质量指标综合评价

电能质量综合评价的目的是客观地将多节点的多个电能质量指标转换为单个统一的指标，即将电能质量指标从高维空间映射到低维空间。本节基于层次分析法，结合反映电能质量严重程度



的客观权重与反映重要程度的主观权重，建立系统级多种电能质量指标的综合评价模型。模型数据映射层级如图 2 所示。

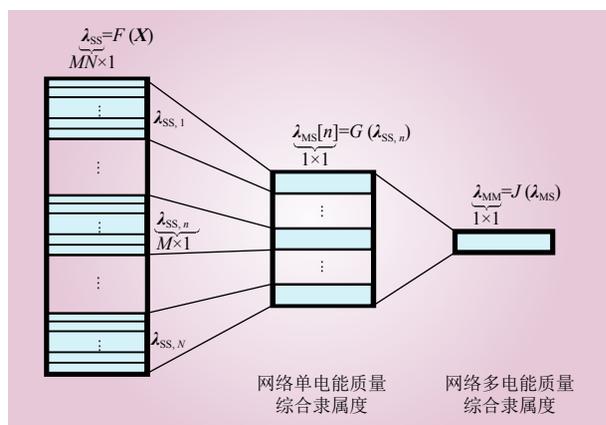


图 2 基于层次分析法的模型层级

Fig. 2 Model hierarchy based on analytic hierarchy process

首先，根据 2.1 节计算单节点单电能质量指标隶属度向量  $\lambda_{SS}$ 。 $\lambda_{SS}$  中各电能质量隶属度排列方式为

$$\lambda_{SS} = \begin{bmatrix} \lambda_{SS,1}^T, \dots, \lambda_{SS,n}^T, \dots, \lambda_{SS,N}^T \end{bmatrix}^T, n = 1, 2, \dots, N \quad (9)$$

式中： $\lambda_{SS}$  维度为  $MN \times 1$ ， $M$  表示网络节点数量， $N$  表示所考虑的电能质量指标数量； $\lambda_{SS,n}$  表示网络所有节点第  $n$  个电能质量隶属度组成的维度为  $M \times 1$  的列向量。

其次，将每个  $\lambda_{SS,n}$  分量映射至一维，形成网络单电能质量综合隶属度为

$$\lambda_{MS}[n] = G(\lambda_{SS,n}) = \mathbf{W}_{MS,n} \lambda_{SS,n} \quad (10)$$

式中： $\lambda_{MS}[n]$  表示网络第  $n$  个单电能质量综合隶属度； $\mathbf{W}_{MS,n}$  表示对  $\lambda_{SS,n}$  映射所需的权重系数行向量。

在建立层次间高维数据到低维数据的映射时，需确定指标的权重系数向量。各指标的权重由主观权重和客观权重组成。主观权重主要反映节点及相关电能质量指标的重要程度，由节点所接入负载的重要程度、该电能质量指标的重要程度及负载对特定电能质量问题的敏感度决定，区间为  $[0, 1]$ 。在负载情况不确定时，设置主观权重为 1。定义  $u_{n,m}$  为  $\lambda_{SS,n}$  中节点  $m$  电能质量隶属度的

主观权重系数。

由于整个系统的电能质量水平往往由劣势指标决定，为了使系统总指标更客观地反映评估结果，隶属度较低的指标其客观权重系数较高<sup>[18]</sup>。基于此，客观权重系数为

$$v_{n,m} = \frac{1}{\lambda_{SS,n}[m]}, n = 1, 2, \dots, N \quad (11)$$

$$\sum_{k=1}^M \frac{1}{\lambda_{SS,n}[k]}$$

式中： $v_{n,m}$  为  $\lambda_{SS,n}$  中节点  $m$  电能质量隶属度  $\lambda_{SS,n}[m]$  的客观权重系数。

将主观权重与客观权重按照式 (12) 进行归一化处理，可得到  $\lambda_{SS,n}[m]$  的综合权重  $w_{n,m}$ <sup>[18]</sup>。根据式 (10) 和式 (13) 可计算出网络单电能质量综合隶属度  $\lambda_{MS}$ 。

$$w_{n,m} = \frac{u_{n,m} v_{n,m}}{\sum_{m=1}^M u_{n,m} v_{n,m}}, n = 1, 2, \dots, N \quad (12)$$

$$\mathbf{W}_{MS,n} = [w_{n,1}, \dots, w_{n,m}, \dots, w_{n,M}] \quad (13)$$

最后，建立网络单电能质量综合隶属度  $\lambda_{MS}$  到网络多电能质量综合隶属度  $\lambda_{MM}$  的映射  $J$ ，其主观权重及客观权重的确定过程与  $\lambda_{SS,n}$  至  $\lambda_{MS}[k]$  的映射相同。特别的，由于对谐波的规定同时含有多个指标 (THD 及各次 HRU)，设置 THD 的主观权重系数为 0.5，各次 HRU 的权重系数为  $0.5/H$ ， $H$  表示所考虑的总谐波次数。最终，得到网络多节点多种电能质量指标的综合隶属度  $\lambda_{MM}$ ，即为网络电能质量的综合评价值。

$$\lambda_{MM} = J(G(F(X))) \quad (14)$$

### 3 基于 MOPSO 算法的治理设备最优配置方案求解

对于面向网络三相不平衡和谐波综合补偿的治理设备优化配置问题，其首要优化目标为抑制网络各节点电压不平衡度及谐波含量，并在配置治理设备后网络各节点各指标均符合限值要求的条件下，搜寻治理设备的高效安装节点，使得网络治理设备的总装机数量和容量最小。本文采用 MOPSO 算法对模型进行求解，得到一组满足各约束条件时，综合考虑治理设备配置效果、配置数

量及容量的非劣解。

由于 MOPSO 算法已被广泛使用<sup>[21-22]</sup>，本章着重介绍 MOPSO 算法在求解模型中的应用。为使第 1 节建立的设备配置模型其适用于 MOPSO 算法，需明确模型中相关变量及函数与 MOPSO 算法中基本要素间的对应关系，如粒子位置、速度、适应度函数的定义等。

(1) 需要定义 MOPSO 算法中的粒子位置。

粒子位置即为算法自变量，反映模型中设备的安装节点及安装容量。根据第一章，排列模型中补偿电流的所有待补偿分量，定义粒子位置为

$$\mathbf{X} = \underbrace{\left[ \underbrace{I_{\text{device},N}^1, I_{\text{device},abc}^2, \dots, I_{\text{device},abc}^h, \dots, I_{\text{device},abc}^H}_{3M \times 1} \right]^T}_{(3MH-2) \times 1} \quad (15)$$

式中： $I_{\text{device},N}^1$  表示网络各节点治理设备补偿负序电流序列，维度为  $M$ ； $I_{\text{device},abc}^h$  表示各节点治理设备补偿三相  $h$  次谐波电流序列，维度为  $3M$ ； $\mathbf{X}$  表示 MOPSO 算法中粒子位置，包含各节点治理设备待补偿的所有电流分量，维度为  $3MH-2$ 。

(2) 确定粒子的适应度函数。

粒子的适应度函数即为模型中的目标函数，包含配置治理设备后的治理效果，治理设备的总安装数量和安装容量（最小）。

① 反映治理效果的目标函数。治理效果包含配置治理设备后网络各节点电压不平衡度及各相各次谐波含有率及总谐波畸变率，可通过式 (1)~(7) 得到。为降低目标函数维度，对电能质量指标进行网络电能质量综合评价，将结果作为反映治理效果的目标函数。为统一优化目标的优化方向（取最小值为最优），定义目标函数为

$$\text{OF}[1] = -\lambda_{MM} = -H(G(F(\mathbf{X}))) \quad (16)$$

② 治理设备总安装数量。为使得算法结果尽快收敛于总安装数量最少的目标，规定当某节点某次待补偿电流分量幅值小于  $I_{\text{device},\text{min}}$  时，将认为在该节点此待补偿电流分量为零<sup>[14]</sup>。

$$X[k] = \begin{cases} X[k], & |X[k]| > I_{\text{device},\text{min}} \\ 0, & |X[k]| \leq I_{\text{device},\text{min}} \end{cases}, 0 < k \leq 3MH-2 \quad (17)$$

式中： $\mathbf{X}[k]$  表示各粒子位置向量的第  $k$  个分量。

若节点补偿电流中任意待补偿分量不为 0，即认为该节点配置一台设备。假定设备配置总数

量为  $Q$ ，则目标函数为

$$\text{OF}[2] = Q \quad (18)$$

③ 治理设备总容量。设备总容量目标函数<sup>[14]</sup>为

$$\text{OF}[3] = \sum_{k=1}^{3MH-2} |X[k]| \quad (19)$$

(3) 确定 MOPSO 算法中各粒子位置及速度的迭代策略。

PSO 算法在确定更新速度时，以自身最优解和全局最优解为参考，确定粒子更新速度。与 PSO 算法不同，MOPSO 算法由于粒子具有多维适应度函数，其全局最优解为一组非劣解集，因而在更新粒子速度时，需要在非劣解集中选择当前粒子的支配粒子<sup>[14]</sup>。

$$V_j^{r+1} = \omega V_j^r + c_1 \text{rand}() * (\mathbf{Pbest}_j^r - X_j^r) + c_2 \text{rand}() * (\mathbf{Archive}_j^r - X_j^r) \quad (20)$$

$$X_j^{r+1} = X_j^r + V_j^r \quad (21)$$

式中： $X_j^r$  和  $V_j^r$  分别为种群中第  $j$  个粒子在第  $r$  次迭代时的位置和速度；函数  $\text{rand}()$  表示随机选择 0 或 1； $\omega$  表示惯性系数； $c_1$  和  $c_2$  均为学习因子； $\mathbf{Pbest}_j^r$  为第  $j$  个粒子在第  $r$  次迭代时的个体最优解， $\mathbf{Archive}_j^r$  为在当前迭代的非劣解集中随机选出当前粒子的支配粒子。

(4) 确定算法的终止条件。

① 当非劣解集  $\mathbf{Archive}$  中粒子的位置在迭代次数  $r - \text{Itr}_{\text{lim}}$  至  $r$  次间，种群 Pareto 最优解集的变化量满足式 (22) 则算法终止。

$$\|\mathbf{Archive}^r - \mathbf{Archive}^{r-\text{Itr}_{\text{lim}}}\| > \varepsilon \quad (22)$$

式中： $\text{Itr}_{\text{lim}}$  和  $\varepsilon$  均为常数， $r$  表示当前迭代次数， $\|\mathbf{Archive}^r - \mathbf{Archive}^{r-\text{Itr}_{\text{lim}}}\|$  表示非劣解集在  $r - \text{Itr}_{\text{lim}}$  至  $r$  次迭代间矩阵差值的二范数。

② 当迭代次数超过设定上限  $\text{Itr}_{\text{max}}$ ，迭代终止。

$$r > \text{Itr}_{\text{max}} \quad (23)$$

式中： $\text{Itr}_{\text{max}}$  表示最大迭代次数。

通过 MOPSO 算法可以得到一组非劣解集，从非劣解集中选取满足配置设备后，各节点各电能质量指标均符合标准的解，作为基于网络谐波及三相不平衡综合补偿的设备配置可行解。在可行解中，选择数量及容量最小的可行解作为最经济的配置方案。

### 4 仿真与结果分析

本文搭建了 IEEE-18 节点标准配电系统仿真，电压等级为 12.5kV，系统线路参数及负载参数见文献 [10]。将原系统中部分理想负荷换为不平衡负荷及触发角为 90°的三相整流桥（使得谐波电流占比较大），如图 3 所示。

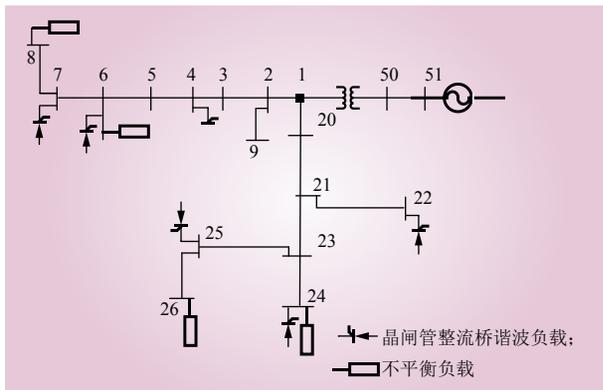


图 3 IEEE-18 节点系统模型与非理想负载接入节点示意  
Fig. 3 IEEE-18 node system model with access of non-ideal loads

图 3 中，晶闸管图标表示整流桥谐波负载，电阻图标表示额外接入的不平衡负载。通过仿真计算各非理性负载的电流，并分离出其负序电流分量和各次谐波分量。晶闸管整流桥电路输出谐波频谱范围较广，本文仅考虑谐波电流含量较大的 5、7、11 次谐波。表 1 为得到的基波正、负序

表 1 系统接入非理想负载的等效电流分量  
Table 1 Equivalent current component of system connected to non-ideal loads

节点编号	基波正序电流幅值/A	电流的比值/%			
		负序基波/正序基波	负序5次谐波/正序基波	正序7次谐波/正序基波	负序11次谐波/正序基波
4	35.32	0	37.60	17.22	12.11
6	96.95	39.99	13.63	6.24	4.39
7	35.12	0	37.59	17.16	12.08
8	111.83	67.07	0	0	0
22	146.05	51.36	8.76	3.66	2.70
24	34.24	0	37.38	15.61	11.54
25	62.03	62.50	0	0	0
26	34.18	0	37.36	15.56	11.50

及各次谐波的电流分量。

首先，根据网络线路阻抗参数计算网络基波及各次谐波等效阻抗矩阵，根据式 (1) ~ (4) 建立网络谐波综合补偿模型，根据式 (5) ~ (7) 建立网络三相不平衡综合补偿模型，得到网络各节点电压 5、7、11 次谐波电压含有率，总谐波畸变率及负序不平衡度等电能质量指标。将部分节点电压数据展示在表 2 中。可以看出，由于非理想负载的接入，网络中部分节点电压负序不平衡度、5 次谐波电压含有率和总谐波畸变率超标。

表 2 配置治理设备前部分节点电压电能质量指标数据  
Table 2 Partial node voltage power quality index data before configuring compensation devices

节点编号	电压负序不平衡度/%	5次谐波含有率/%	7次谐波含有率/%	11次谐波含有率/%	总谐波畸变率/%
1	1.24	3.67	1.28	0.55	3.92
4	1.60	3.78	1.92	0.52	4.27
8	2.82	3.59	2.17	0.23	4.20
22	2.84	5.90	0.62	0.20	5.94
24	1.86	8.86	0.84	0.43	8.91
26	1.83	8.14	0.61	0.02	8.17
51	0	0	0	0	0
平均值	1.65	4.71	1.26	0.37	4.98
最大值	2.84	8.86	2.22	0.65	8.91

其次，对已得到的网络各节点单电能质量指标表建立基于层次分析法的网络电能质量综合评价模型。根据相关国标规定 [23-24]，该电压等级下系统电压等级下负序不平衡度限值为 2%，奇数次谐波电压含有率限值为 3.2%，总谐波畸变率限值为 4%。通过式 (8) 得到表中电能质量指标的隶属度，通过式 (9) ~ (13) 将单节点单指标的隶属度映射为网络级单电能质量综合隶属度。计算得到的网络单指标的综合隶属度可用雷达图表示，如图 4 所示。图 4 中数据包含配置治理设备前网络电压负序不平衡度 VUF，5、7、11 次电压 HRU 及 THD。可以看出，网络负序电压分量及 5 次谐波分量较大，相关综合指标评价较低，亦符合表 2 中的数据情况。以单电能质量隶属度为基础，通过式 (14) 建立网络多电能质量指标综合隶属度，得到网络多电能质量的综合评价结果为 0.4596（不及格）。此结果反映了客观权重选

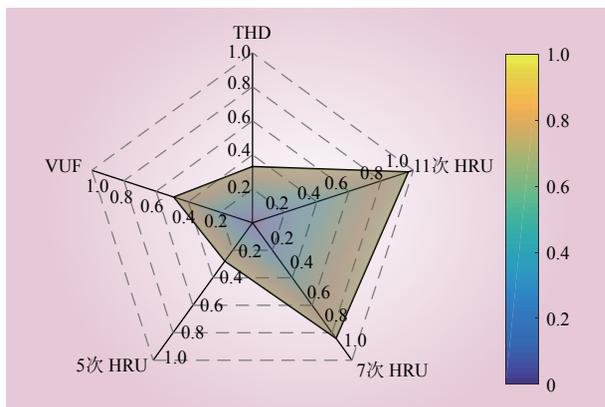


图 4 配置设备前网络单电能质量指标综合隶属度  
Fig. 4 Comprehensive membership degree of single power quality index for overall network before configuring devices

取的有效性，即网络综合电能质量评价受其单指标隶属度中较差的隶属度影响较大。

然后，根据第 3 节，建立基于 MOPSO 算法的设备最优配置模型，分别确定粒子位置、速度及适应度函数。通过 MOPSO 算法可以得到一组关于网络电能质量综合评价隶属度、配置设备的数量及总容量共 3 个目标函数的非劣解，其 Pareto 前沿如图 5 所示。Pareto 前沿反映了算法中补偿效果最优与配置容量、配置台数最少间存在折中。图 5 中，在不配置任何治理设备时，补偿效果最差，网络电能质量综合评价最低（评分为

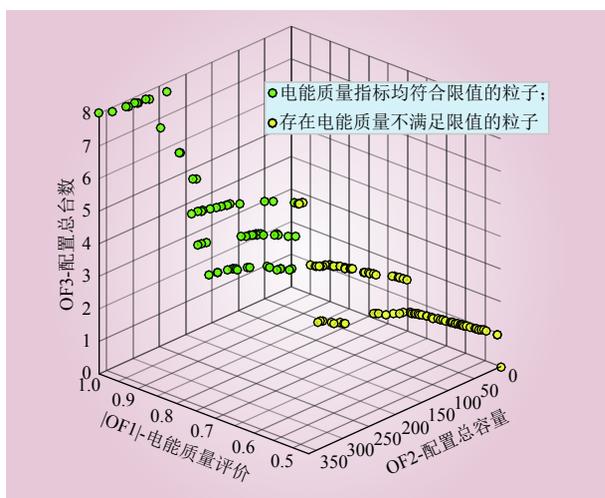


图 5 反映电能质量综合评价、设备配置数量及总容量间关系的 Pareto 前沿  
Fig. 5 Pareto frontier reflecting the relationship among comprehensive evaluation of power qualities, and allocation quantity and total capacity of devices

0.4596)；在所有含非理想负载的节点处均配置治理设备时，网络电能质量综合评价值最高（评分为 1），此时网络不存在三相不平衡及谐波问题，但所需配置的治理设备数量及总容量最多（8 台，共 364.4 A）；在综合评价从 0 至 1 的区间里，随着评价值的增加（补偿效果增加），所需的治理设备数量及总容量亦增加。在 Pareto 最优解集中，选择满足配置治理设备后网络各节点各相电能质量指标均达标的解集作为治理设备配置的可行解，将其对应粒子的适应度函数在图 5 的 Pareto 前沿中用绿色粒子表示。

在可行解集中，选择所需配置设备数量及容量最少的方案作为最终配置方案。最终配置节点序号为 7 和 24。配置的节点及各设备所需最少安装容量如表 3 所示。

表 3 网络电能质量达标时设备最优配置方案  
Table 3 Optimal devices allocation strategy when network power qualities reach the standard

配置节点	配置总容量/A	负序电流分量占比/%	5次谐波分量占比/%	7次谐波分量占比/%	11次谐波分量占比/%
7	111.50	54.40	32.00	13.60	0
24	65.80	32.29	50.22	17.45	0

配置设备后，网络部分节点电压 5、7、11 次谐波含有率，总谐波畸变率及负序不平衡度等电能质量指标如表 4 所示。对比表 2 可以看出，配置设备后，网络节点电压负序不平衡度、5 次谐波电压含有率和总谐波畸变率均达标；网络原先已达标的 7 次谐波电压含有率进一步被改善；网

表 4 配置设备后部分节点电压电能质量指标数据  
Table 4 Partial node voltage power quality index data after configuring compensation devices

节点编号	电压负序不平衡度/%	5次谐波含有率/%	7次谐波含有率/%	11次谐波含有率/%	总谐波畸变率/%
1	0.41	0.07	0.08	0.55	0.56
4	0.44	0.17	0.18	0.52	0.58
8	1.16	0.52	0.64	0.23	0.86
22	1.73	0.51	0.41	0.20	0.68
24	0.51	1.51	0.60	0.43	1.68
26	0.81	0.01	0.28	0.02	0.28
51	0	0	0	0	0
平均值	0.60	0.28	0.24	0.37	0.61
最大值	1.72	1.51	0.64	0.65	1.68



络原先已达标且含有率很低的 11 次谐波电压无须进一步抑制。

配置治理设备后，通过网络电能质量综合评价模型得到的网络单指标的综合隶属度雷达图，如图 6 所示。

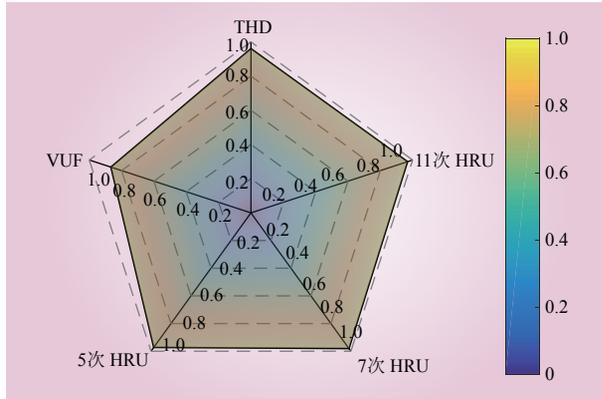


图 6 配置设备后网络单电能质量指标综合隶属度  
Fig. 6 Comprehensive membership degree of single power quality index for overall network after configuring devices

与图 4 相比，图 6 中配置治理设备后网络各项指标综合评价均明显上升。配置治理设备后网络所有电能质量综合评价值为 0.9476。网络综合评价值的上升同时证明了所提网络电能质量综合评价模型及治理设备最优配置模型的有效性。

在网络各节点关于三相不平衡及谐波电能质量均达标的情况下，所配置治理设备的数量为 2 台，仅占非理想负载接入节点数量的 25%；设备总容量为 177.30 A，仅占负载产生总负序及谐波电流的 48.6%。因此，本文所提基于网络不平衡及谐波综合评价及补偿的设备配置方案相比于现有逐点配置的方案具备更高的补偿效率和更经济的配置成本。

## 5 结论

本文主要以含有大量分布式不平衡负载及谐波负载网络的电能质量全局综合提升为目标，通过层次分析法建立网络多项电能质量指标的综合评价模型，并通过 MOPSO 算法求解治理设备的全局优化配置方案。在建立评价模型时，先确定单节点单电能质量指标的隶属度函数，再通过合理设置各指标的客观权重与主观权重确定网络多

电能质量综合隶属度。在求解治理设备的配置方案时，首先以评价模型得到的网络综合隶属度、配置治理设备的数量和治理设备总容量为优化目标，结合 MOPSO 算法得到治理设备配置的非劣解集；其次，筛选出各节点电压负序及谐波含量满足标准时的治理设备配置可行解，并选择所需治理设备数量及容量最小的高效解作为最终配置方案。

最后，文章通过仿真搭建了含不平衡及谐波负载的 IEEE-18 节点标准网络模型，计算得到网络仅需 2 台治理设备即可对 8 个节点非理性负载不平衡及谐波电流进行综合补偿，并在配置后实现网络所有节点电压质量达标。仿真验证了所提面向网络多电能质量指标综合评价模型的有效性及其治理设备网络最优配置策略相比于逐点配置的高效、经济性。

## 参考文献：

- [1] ZHAI H, ZHUO F, ZHU C Z, *et al.* An optimal compensation method of shunt active power filters for system-wide voltage quality improvement[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020, 67(2): 1270–1281.
- [2] 易皓, 卓放, 翟灏. 基于矢量谐振调节器的有源电力滤波器网侧电流检测控制方法研究 [J]. *电工技术学报*, 2015, 30(7): 72–79.  
YI Hao, ZHUO Fang, ZHAI Hao. Research on source current detection type APF control scheme based on vector resonant regulator[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(7): 72–79.
- [3] 许柳, 吕智林, 孟泽晨, 等. 非线性负载下的多变流器谐波电压补偿控制策略 [J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(7): 1–11.  
XU Liu, LÜ Zhilin, MENG Zechen, *et al.* Multi-converter harmonic voltage compensation control strategy under nonlinear loads[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 47(7): 1–11.
- [4] 翟灏, 卓放, 易皓, 等. 基于 SVG 的电网多节点电压不平衡综合抑制方法 [J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(12): 40–47.  
ZHAI Hao, ZHUO Fang, YI Hao, *et al.* SVG based comprehensive unbalance suppression method for multi-node voltage[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(12): 40–47.
- [5] 王振雄, 易皓, 卓放, 等. 应用于光伏微网的一种虚拟同步发电机结构及其动态性能分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37(2): 444–454.  
WANG Zhenxiong, YI Hao, ZHUO Fang, *et al.* A hardware structure

- of virtual synchronous generator in photovoltaic microgrid and its dynamic performance analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 444–454.
- [6] ZHAI H, ZHUO F, YI H, *et al.* A fast calculation method for rectifier matrix model and its application in optimized control of SAPF for network-wide harmonic suppression[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2018, 12(8): 1897–1905.
- [7] 朱晓航, 陈红坤, 胡畔. 考虑电能质量约束下的电弧炉无功补偿方案[J]. 电力电容器与无功补偿, 2017, 38(1): 28–34.
- ZHU Xiaohang, CHEN Hongkun, HU Pan. Reactive power compensation scheme for arc furnace with consideration of power quality constraints[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(1): 28–34.
- [8] ZIARI I, JALILIAN A. A new approach for allocation and sizing of multiple active power-line conditioners[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 1026–1035.
- [9] 帅智康, 罗安, 涂春鸣, 等. 并联混合型有源电力滤波器的最优安装点[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(27): 48–55.
- SHUAI Zhikang, LUO An, TU Chunming, *et al.* Optimal placement of hybrid active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(27): 48–55.
- [10] GRADY W M, SAMOTYJ M J, NOYOLA A H. Minimizing network harmonic voltage distortion with an active power line conditioner[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(4): 1690–1697.
- [11] CHANG W K, GRADY W M. Minimizing harmonic voltage distortion with multiple current-constrained active power line conditioners[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(2): 837–843.
- [12] CHANG W K, GRADY W M, SAMOTYJ M J. Meeting IEEE-519 harmonic voltage and voltage distortion constraints with an active power line conditioner[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(3): 1531–1537.
- [13] CHANG W K, GRADY W M, SAMOTYJ M J. A practical method for siting and sizing multiple active power line conditioners in a power system[C]//Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference. Chicago, IL, USA. IEEE, 1994: 117–120.
- [14] YANG Z B, ZHUO F, TAO R, *et al.* Implementation of multi-objective particle swarm optimization in distribution network for high-efficiency allocation and sizing of SAPFs[C]//2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Harbin, China. IEEE, 2019: 1–5.
- [15] 宁志毫, 张坤, 左剑. 大电网电能质量综合评估方法及应用[J]. 电测与仪表, 2015, 52(19): 74–78.
- NING Zhihao, ZHANG Kun, ZUO Jian. A power quality comprehensive evaluation method and its application in large-scale power grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(19): 74–78.
- [16] 陶顺, 肖湘宁. 电能质量单项指标和综合指标评估的研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2008, 35(2): 25–29, 41.
- TAO Shun, XIAO Xiangning. Individuation indices and global indicator of power quality[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2008, 35(2): 25–29, 41.
- [17] 林海雪. 电能质量指标的完善化及其展望[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5073–5079.
- LIN Haixue. Perfecting power quality indices and prospect[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5073–5079.
- [18] 曾君, 徐冬冬, 郭华芳, 等. 面向可再生能源的微电网电能质量特点分析与综合评价方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(19): 10–16.
- ZENG Jun, XU Dongdong, GUO Huafang, *et al.* Renewable energy-oriented micro-grid power quality characteristic analysis and comprehensive evaluation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 10–16.
- [19] 张文保, 施伟锋, 兰莹, 等. 基于层次分析—模糊综合评估法的电力推进船舶电能质量实时评估系统[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(6): 48–57.
- ZHANG Wenbao, SHI Weifeng, LAN Ying, *et al.* Realtime power quality evaluation system of the electric propulsion ship based on AHP-fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(6): 48–57.
- [20] JIANG L M, YAN H G, MENG J X, *et al.* Comprehensive evaluation system of power quality compensation based on grey relational analysis[C]//2017 2nd International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE). Chengdu, China. IEEE, 2017: 617–621.
- [21] COELLO C A C, PULIDO G T, LECHUGA M S. Handling multiple objectives with particle swarm optimization[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2004, 8(3): 256–279.
- [22] 王侨侨, 曾君, 刘俊峰, 等. 面向微电网源-储-荷互动的分布式多目标优化算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1421–1432.
- WANG Qiaoqiao, ZENG Jun, LIU Junfeng, *et al.* A distributed Multi-objective optimization algorithm for Resource-storage-load interaction of microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1421–1432.



[23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国推荐性国家标准: 电能质量 三相电压不平衡 GB/T 15543—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. National Standard (Recommended) of the People's Republic of China: Power quality —Three-phase voltage unbalance GB/T 15543 —2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.

[24] 国家技术监督局. 中华人民共和国推荐性国家标准: 电能质量 公用电网谐波 GB/T 14549—1993[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.

State Bureau of Quality and Technical Supervision of the People's Republic of China. National Standard (Recommended) of the People's Republic of China: Quality of electric energy supply-Harmonics in public supply network GB/T 14549—1993[S]. Beijing:

Standards Press of China, 1994.

#### 作者简介:

卓放 (1962—), 男, 博士, 教授, 从事电能质量治理、电力电子变流器控制、微电网建模与控制等研究, E-mail: zffz@xjtu.edu.cn;

杨泽斌 (1995—), 男, 通信作者, 博士研究生, 从事面向谐波、不平衡及电压偏差的网络电能质量综合治理等研究, E-mail: yangzbin@stu.xjtu.edu.cn;

易皓 (1984—), 男, 博士, 副教授, 从事电能质量治理、并网变流器控制、微电网运行控制等研究, E-mail: yi\_hao@xjtu.edu.cn;

杨光宇 (1995—), 男, 硕士研究生, 从事电能质量综合评价, 网络超高次谐波的影响评估等研究, E-mail: yangguangyu@stu.xjtu.edu.cn.

(责任编辑 张重实)

## Optimal Allocation Strategy for Power Quality Control Devices Based on Harmonic and Three-Phase Unbalance Comprehensive Evaluation Indices for Distribution Network

ZHUO Fang<sup>1</sup>, YANG Zebin<sup>1</sup>, YI Hao<sup>1</sup>, YANG Guangyu<sup>1</sup>, WANG Meng<sup>1</sup>, YIN Xiaoqing<sup>1</sup>, ZHU Chengzhi<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China)

**Abstract:** Power quality control devices represented by active power filter are mostly used to compensate harmonic and unbalanced current generated by local loads. With the massive access of non-linear loads in the distribution network, the local compensation configuration strategy becomes expensive and inefficient. Therefore, the device configuration strategy for global improvement of network power quality is necessary. Firstly, a global evaluation strategy for power quality indices based on analytic hierarchy process is proposed to evaluate the configuration effects of control devices. Secondly, taking the global configuration effects, the total number and capacity of control devices as the optimization goals, and regarding the harmonic distortions and unbalance degrees of the nodes satisfying the standard as the constraint condition, the optimal configuration node and capacity of each device is determined by multi-objective particle swarm algorithm. Finally, an IEEE-18 node simulation model with non-ideal loads is built to verify the effectiveness and superiority of the proposed global evaluation and power quality control device configuration strategy for the comprehensive optimization of network harmonic and unbalance voltage.

This work is supported by the Science and Technology Project of SGCC (Research on Flexible and Comprehensive Control of Regional Distributed Network for High Quality Power Supply, No.52110418000S) and National Natural Science Foundation of China (Terminal Impedance Based Research about Dynamic Interactions Between Active Power Filter (APF) and Its Source-Load System, No.51977172).

**Keywords:** global evaluation of power quality; analytic hierarchy process; fuzzy membership function; harmonic comprehensive control; three-phase unbalanced comprehensive control; control device configuration; multi-objective particle swarm optimization