

基于 SAPF 的电网多节点电压谐波优化补偿方法

阴晓晴¹,易皓¹,杨泽斌¹,卓放¹,王蒙¹,刘夏宇¹,朱承治² (1. 西安交通大学电气工程学院,陕西西安 710048; 2. 国网浙江省电力有限公司,浙江杭州 310007)

摘 要:随着局域配电网中非线性负载的分布式接入,以谐波就地补偿为目标的并联型有源电力滤波器(shunt active power filter, SAPF)传统配置方式需要接入大量治理设备,存在治理效率低、成本高问题。因此,出现了面向局域配电网谐波全局综合抑制的SAPF优化配置问题。首先利用诺顿等效法建立局域配电网谐波电压优化补偿目标函数;其次,结合非线性规划原理和几何辅助分析法对优化问题进行求解,确定SAPF在系统中的安装位置和最优配置容量,提出一种基于SAPF的电网谐波电压优化综合抑制算法;最后,通过搭建IEEE-18节点仿真模型,对所提出的算法进行验证。在网络非线性负载的不同分布情况下,配置结果都具有良好的治理效果,可通过更少数量、容量的SAPF实现配电网整体谐波畸变的高效抑制。
 关键词:并联型有源电力滤波器;谐波;局域配电网;几何辅助分析;谐波抑制
 DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202007182

0 引言

谐波是局域配电网中主要的电能质量问题之 一,主要源于各类电力电子装置、变压器和荧光 灯等,会降低配电网中的电能传输效率,并导致 电气设备过热、产生噪声等问题[1-3]。随着中国电 网系统电力电子化进程的不断深入,电网中谐波 源的分布和谐波问题的治理都产生了新的变化。 一方面,局域配电网中谐波源的分布由过去高功 率集中式的分布逐渐向小功率分散式的方式变化[45]; 另一方面,局域配电网中敏感负荷逐渐增多,许 多基于新技术和新工艺的电力设备对电网电能质 量的要求逐渐提高。面对当前的谐波问题,并联 有源电力滤波器(shunt active power filter, SAPF) 可对变化的谐波和无功功率进行补偿,响应速度 极快,可同时补偿一个或多个谐波源和无功源, 不易受电网参数影响,使得电网谐波的局域综合 治理成为可能[6-11]。

当前,常见的有源治理设备补偿方案为点对 点补偿方案,该治理方案虽然能够精准抑制电网 中的谐波,但需要大量治理设备分别补偿各处谐

收稿日期: 2020-07-31; 修回日期: 2021-04-07。

基金项目:国家电网有限公司科技项目(面向区域优质电力 需求的柔性局域电网综合调控技术研究,52110418000S)。 波源,尤其对含有大量分布式电源及非线性负载 的局域配电网治理效率低且成本高^[12]。因此,在 SAPF 安装前对谐波优化补偿方法进行研究,选 择合适的设备安装位置及补偿容量,对于实现局 域电网的谐波综合补偿具有重要意义^[13-17]。

文献 [18-20] 最先探讨了以配电网谐波含量和 治理成本最小为目标时,单台谐波补偿设备的接 入节点及配置容量问题,并通过优化计算得到谐 波补偿结果。然而, 受单个补偿设备最大允许额 定值的限制,该方案在含有大量非线性负载的配 电网中, 难以达到预期的补偿目标。文献 [21-22] 进一步对小容量谐波治理设备群的最优安装策略 进行研究,提出了求解多台谐波治理设备的最优 补偿方案。该补偿方案基本满足了谐波补偿的要 求,但在治理设备台数和治理效果方面还有很大 提升空间。同时,将治理设备补偿容量视为连续 变量时,可采用广义归一化梯度算法找到一组谐 波补偿设备的最佳安装位置和补偿容量,以达到 减少电网谐波的目的。然而,实际上治理设备的 容量是离散值,针对这一情况文献[23-24]提出了 一种混合整数规划优化算法,但该方法难以实现 治理设备数量最优的目标。

综上,为了兼顾治理后电网谐波电压的含量 与治理成本,本文将研究利用多台 SAPF 对配电 网进行谐波综合补偿的优化配置方法。文章首先



通过诺顿等效电路法建立了配电网多节点谐波分 析模型,然后综合考虑了SAPF数量,补偿容量 和电网谐波含量的多目标方程进行分析,并对 SAPF安装数量和安装位置进行优化设计。同 时,确定各台SAPF输出最优补偿电流相位,并 以此为基础优化每台SAPF的补偿容量。最后, 本文利用Matlab模拟多组含有不同非线性负载的 IEEE-18节点标准模型,通过所提优化配置方法 得到SAPF的配置方案,并通过配置SAPF后的仿 真结果验证了所提方法在非线性负载的不同分布 情况下都具有良好的治理效果。

局域配电网谐波电压综合补偿目标函 数分析

1.1 单台 SAPF 对网络各节点单次谐波电压补偿 目标函数分析

局域配电网谐波电压综合补偿的目标是通过 对少量的有源治理设备的安装位置及补偿容量进 行优化配置,抑制配电网整体谐波潮流,降低电 网各节点的谐波畸变率,该问题是一个多约束条 件下的优化求解问题,求解较为困难。

首先将该优化问题简化,分析单台 SAPF 对 网络各节点单次谐波电压的影响。在一个包含大 量非线性负载的局域配电网中谐波电压主要来源 于背景谐波和非线性负载输出谐波电流产生的谐 波电压。对一个含有非线性负载的 k 节点电网进 行研究,电网中节点 k 的 h 次谐波电压的复数形 式可表示为

$$U_{k,\text{old}}^{h} = U_{k,\text{old}}^{h,\text{r}} + jU_{k,\text{old}}^{h,\text{i}}$$
(1)

式中: $U_{k,old}^{h,r}$ 为谐波治理前k节点h次谐波电压的实部; $U_{k,old}^{h,i}$ 为谐波治理前k节点h次谐波电压的虚部。

SAPF的治理原理是将谐波电流注入局域配电 网络,降低配电网中的谐波失真指数,使得配网 中电压的单次谐波含有率(harmonic ratio, HR) 和总谐波畸变率(total harmonic distortion, THD) 符合国家标准。治理前,SAPF的安装位置与配 置容量未知,假设在节点q处安装一台SAPF,其 容量为

$$I_q = \sum_{h=2}^{H} (I_q^{h,r} + I_q^{h,i})$$
 (2)

式中: $I_q^{h,r}$ 、 $I_q^{h,i}$ 分别为 SAPF 在节点 q 处输出谐波 电流的实部、虚部; H为最高谐波治理次数。同 时,为了保证每个治理点谐波畸变率满足文献 [25] 规定,单次谐波含有率和总谐波畸变率的约束为

$$\frac{\left|U_{k,\text{new}}^{h}\right|}{\left|U_{k,\text{old}}^{1}\right|} = H_{\text{HRU},k}^{h}, (H_{\text{HRU},k}^{h} \leqslant \alpha, \alpha = 3.2\%) \quad (3)$$

$$\frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{H} \left|U_{k,\text{new}}^{h}\right|^{2}}}{\left|U_{k,\text{old}}^{1}\right|} = T_{\text{THD},k}, (T_{\text{THD},k} \leqslant \beta, \beta = 4\%),$$

$$k = (1, 2, 3, \cdots, m) \quad (4)$$

式中: $U_{k,old}^{1}$ 为谐波治理前节点 k的基波电压状态; $U_{k,old}^{h}$ 为谐波治理后节点 k 的 h次谐波电压状态。

综上,忽略网络内各次谐波间的耦合,单台 SAPF 对节点 k 的 h 次谐波电压的补偿量等于 SAPF 输出的 h 次谐波电流(系统端口电流)乘以节点 k 与安装节点间的转移阻抗,治理后 k 节点的 h 次 谐波畸变率为

$$H_{\text{HRU},k}^{h} = \frac{1}{U_{k}^{1}} |U_{k,\text{old}}^{h,\text{r}} + (Z_{k,q}^{h,\text{r}}I_{q}^{h,\text{r}} - Z_{k,q}^{h,\text{i}}I_{q}^{h,\text{i}}) + j[U_{k,\text{old}}^{h,\text{i}} + (Z_{k,q}^{h,\text{r}}I_{q}^{h,\text{i}} + Z_{k,q}^{h,\text{i}}I_{q}^{h,\text{r}})]| \qquad (5)$$

式中: U_{k}^{1} 为 k节点基波电压; $Z_{k,q}^{h,r}$ 、 $Z_{k,q}^{h,i}$ 分别为配 电网中节点 k与 SAPF 安装节点 q 之间转移阻抗的 实部、虚部。

为了便于后续的分析将式(5)平方,且考虑 式(3)中的约束条件,得到单台设备单次谐波 的优化目标0函数为

$$g_{k}(I_{q}^{h,r}, I_{q}^{h,i}) = \frac{1}{|U_{k}^{1}|^{2}} \left\{ A_{k}^{h} + B_{k,q}^{h,r} I_{q}^{h,r} + C_{k,q}^{h} I_{q}^{h,i} + D_{k,q}^{h} \left[\left(I_{q}^{h,r} \right)^{2} + \left(I_{q}^{h,i} \right)^{2} \right] \right\} \leqslant \alpha^{2}$$
 (6)

其中:



$$X = \frac{Z_{k,q}^{h,r} U_{k,\text{old}}^{h,r} + Z_{k,q}^{h,i} U_{k,\text{old}}^{h,i}}{\left(Z_{k,q}^{h,r}\right)^2 + \left(Z_{k,q}^{h,i}\right)^2} \tag{8}$$

$$Y = \frac{Z_{k,q}^{h,r} U_{k,old}^{h,i} - Z_{k,q}^{h,i} U_{k,old}^{h,r}}{\left(Z_{k,q}^{h,r}\right)^2 + \left(Z_{k,q}^{h,i}\right)^2} \tag{9}$$

$$R^{2} = \frac{\left(\alpha \left| U_{k}^{1} \right| \right)^{2}}{\left(Z_{k,q}^{h,r} \right)^{2} + \left(Z_{k,q}^{h,i} \right)^{2}}$$
(10)

根据式(7)可知,当SAPF的补偿电流在复 平面内一个特定的圆形区域内时,节点k的h次 谐波畸变率满足约束条件。该圆形区域如图1所 示,圆心及半径见式(8)~(10),从式中可得 圆心的位置与谐波电压和转移阻抗相关,半径主 要与约束条件和转移阻抗相关。



图 1 优化目标函数的几何意义 Fig. 1 Graphical representation of the optimal objective function

1.2 单台 SAPF 对网络各节点单次谐波电压补偿 最优安装节点分析

已知单台 SAPF 对网络各节点单次谐波含有率的优化目标函数及其几何含义。在利用单台 SAPF 对整个网络进行谐波治理时,首先需要确 定治理设备的最优安装位置,其次是治理设备的 最优补偿容量。

在考虑治理设备的最优安装位置时,应首先 选择可令网络中各节点谐波畸变率都能满足文 献 [25] 标准的节点,但在含有大量非线性负载的 局域配电网中,单台治理设备可能无法使所有节 点谐波电压都降低到推荐范围内。因此,优先选 择治理后可令网络中各节点谐波电压畸变最接近 治理标准的候选节点进行容量优化配置,并更新 治理后网络中各节点的谐波信息,对上述过程进行迭代,直到满足治理要求。为了方便讨论,将单台 SAPF 对网络各节点单次谐波电压的优化目标函数中的不等式约束条件转化为等式条件,当在节点q接入一台 SAPF 时,每个节点的优化函数可以看成一个约束圆,治理前各节点圆心可表示为

$$\alpha_{c} = 3.2\% - \frac{U_{k,\text{old}}^{h}}{Z_{k,q}^{h}} = -\frac{(U_{k,\text{old}}^{h,r} + jU_{k,\text{old}}^{h,i})}{(Z_{k,q}^{h,r} + jZ_{k,q}^{h,i})} = \frac{-(U_{k,\text{old}}^{h,r}Z_{k,q}^{h,r} + U_{k,\text{old}}^{h,i}Z_{k,q}^{h,i})}{(Z_{k,q}^{h,r})^{2} + (Z_{k,q}^{h,i})^{2}} - \frac{j(U_{k,\text{old}}^{h,i}Z_{k,q}^{h,r} - U_{k,\text{old}}^{h,r}Z_{k,q}^{h,i})}{(Z_{k,q}^{h,r})^{2} + (Z_{k,q}^{h,i})^{2}}$$
(11)

半径见式(10)。图2显示了2种情况下一个3节点网络的单台SAPF谐波治理结果。



图 2 3 节点网络的单台 SAPF 谐波治理结果 Fig. 2 The harmonic control result of a 3-node network with one SAPF



图 2a)和图 2b)中的3个圆形区域分别代表 网络中3个节点的约束圆,圆内的区域即为该节 点满足谐波治理标准的可行域,X和Y可根据已 知网络内参数算出,分别代表对应约束圆的圆 心。*I*_{SAPF,q}为SAPF输出的补偿电流,补偿电流的 实部与虚部如图2所示。*l*为对应约束圆的圆心到 补偿电流向量末端的距离,根据式(10)可得, *l*越长则治理后对应的节点的HR越大。

由图 2a)可知,当各节点约束圆有公共区域时,区域内的点可以作为目标方程的解。此时,圆心间距离相近,SAPF进行治理后网络内的 h次谐波畸变率之和可用 l₁、 l₂ 和 l₃之和来表示。但各节点约束圆的圆心分散时(如图 2b)所示),SAPF 向网络内输出相同的补偿电流,网络内各节点的 h 次谐波含有率之和可用 l'₁、 l'₂和 l'₃之和来表示,即

$$l_1 + l_2 + l_3 < R_1 + R_2 + R_3 \tag{12}$$

$$R_1 + R_2 + R_3 \le l_1' + l_2' + l_3' \tag{13}$$

当各节点约束圆的圆心接近时,输出的补偿 电流的利用率更高,对网内各个节点都有更好的 治理效果。随着约束圆圆心逐渐分散,各节点谐 波对补偿电流利用率降低,网络内单次谐波含有 率之和下降缓慢,增加治理成本。

综上所述,为了提高 SAPF 输出补偿电流对 网络各节点谐波的治理效率,降低谐波治理成 本,选择令各节点约束圆圆心最集中的节点作为 SAPF 最优安装节点。利用数学中方差的求解思 路,利用式(11)所得各节点约束圆圆心,计算 网络中任意节点 q 作为安装节点时的治理系数为

$$\delta_q = \sum_{h=2}^{H} \frac{1}{\omega^h K} \left[\sum_{k=1}^{K} (I_{k,q}^{h,r} - \bar{I}^{h,r})^2 + \sum_{k=1}^{K} (I_{k,q}^{h,i} - \bar{I}^{h,i})^2 \right]$$
(14)

$$\bar{I}^{h,\mathrm{r}} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} \left[\frac{(U_{k,\mathrm{old}}^{h,\mathrm{r}} Z_{k,m}^{h,\mathrm{r}} + U_{k,\mathrm{old}}^{h,\mathrm{i}} Z_{k,m}^{h,\mathrm{i}})}{(Z_{k,m}^{h,\mathrm{r}})^2 + (Z_{k,m}^{h,\mathrm{i}})^2} \right]^2$$
(15)

$$\bar{I}^{h,i} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^{K} \frac{(U_{k,\text{old}}^{h,i} Z_{k,m}^{h,r} - U_{k,\text{old}}^{h,r} Z_{k,m}^{h,i})}{(Z_{k,m}^{h,r})^2 + (Z_{k,m}^{h,i})^2}$$
(16)

式中: $I_{k,q}^{h,i}$ 、 $I_{k,q}^{h,i}$ 分别为当 SAPF 安装于节点 q 时任 意节点 k 的完全补偿电流 (令 $T_{\text{THD},k}^{h}$ =0),可根 据式 (11) 计算得到,其几何意义是节点 k 约束 圆圆心的坐标。

式(15)、式(16)分别是最优补偿电流期 望的实部、虚部; ω^h为h次谐波的谐波系数,由 该次谐波含有量决定; K为局域网络中的节点总 数。对各节点进行排序,具有较小治理系数的安 装节点具有更高的优先权,选择具有最小治理系 数的候选节点作为最优安装点。

1.3 单台 SAPF 对网络各节点各次谐波电压补偿 最优补偿容量分析

确定治理设备最优安装位置之后,还需对治 理设备各次谐波电流的最优补偿容量进行分析计 算。首先仅考虑单次谐波抑制的最优容量,对 1.2节中提出的单台设备单次谐波的优化目标函数 进行分析,求解该目标函数最小值对应的输出补 偿电流解。根据非线性规划原理^[23-24],对式(6)求 极值,由一阶必要条件得到最优输出补偿电流解为

$$\begin{cases} \partial g_k(I_q^{h,r}, I_q^{h,i}) / \partial I_q^{h,r} = B_{k,q}^h + 2D_{k,q}^h I_q^{h,r} = 0\\ \partial g_k(I_q^{h,r}, I_q^{h,i}) / \partial I_q^{h,i} = C_{k,q}^h + 2D_{k,q}^h I_q^{h,i} = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} I_q^{h,r} = -B_{k,q}^h / 2D_{k,q}^h\\ I_q^{h,i} = -C_{k,q}^h / 2D_{k,q}^h \end{cases}$$
(17)

并对二阶必要条件进行验证,为了保证目标 函数取到全局最小值,目标函数的 Hession 矩阵应 正定。根据式(18)易得目标方程 Hession 矩阵正 定,单台 SAPF 优化配置容量如式(17)所示。

$$H = \begin{bmatrix} \frac{\partial^2 g_k(I_q^{h,r}, I_q^{h,i})}{\partial I_q^{h,r^2}} & \frac{\partial^2 g_k(I_q^{h,r}, I_q^{h,i})}{\partial I_q^{h,i} \partial I_q^{h,i}} \\ \frac{\partial^2 g_k(I_q^{h,r}, I_q^{h,i})}{\partial I_q^{h,r} \partial I_q^{h,i}} & \frac{\partial^2 g_k(I_q^{h,r}, I_q^{h,i})}{\partial (I_q^{h,i})^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2D_{k,q}^h & 0 \\ 0 & 2D_{k,q}^h \end{bmatrix}$$
(18)

在实际情况中,还需要考虑单台 SAPF 的容量限制,需对上述优化问题增加一个约束条件,即

$$f(I_q^{h,r}, I_q^{h,i}) = \sum_{h=2}^{H} [(I_q^{h,r})^2 + (I_q^{h,i})^2] - (I_{\max})^2 \leq 0 \quad (19)$$

局域网络内各节点多次谐波抑制的补偿电流 最优配置问题实质上是一个含有约束的极值问题, 可以采用拉格朗日乘数法进行求解,其拉格朗日 函数为



$$\begin{split} L_q[I_q^{h,\mathrm{r}}, I_q^{h,\mathrm{i}}, \mu_1] = &\sum_{h=2}^{H} \sum_{k=1}^{K} g_k(I_q^{h,\mathrm{r}}, I_q^{h,\mathrm{i}}) + \\ &\mu_1 f(I_q^{h,\mathrm{r}}, I_q^{h,\mathrm{i}}) \end{split} \tag{20}$$

此时满足该优化问题的h次谐波补偿电流解为

k=1

$$I_{C,q}^{h,r} = -\sigma_q^h \frac{\sum_{k=1}^{K} B_{k,q}^h}{2\sum_{k=1}^{K} D_{k,q}^h}$$
(21)

$$I_{C,q}^{h,i} = -\sigma_q^h \frac{\sum_{k=1}^{K} C_{k,q}^h}{2\sum_{k=1}^{K} D_{k,q}^h}$$
(22)

其中, 0 $\leqslant \sigma_a^h \leqslant 1_\circ$

任意次谐波的拉格朗日乘子 μ_1 都相同,由式 (20)~(22)可得任意两次谐波系数 σ_q^h 和 σ_q^n 之 间的关系为

$$\sigma_q^n = \frac{\sigma_q^h D_{k,q}^h}{D_{k,q}^n \sigma_q^h + D_{k,q}^n (1 - \sigma_q^h)} \tag{23}$$

2 基于 SAPF 的电网多节点电压谐波优化补偿算法

结合第1节中给出的最优安装节点及配置容量求解方法,本文提出一套完整的基于多台 SAPF的电网多节点电压谐波优化补偿算法,算法的程序流程如图3所示。

(1)初始化参数,其中包括局域网络节点数、最大考虑谐波次数、网络内节点间转移阻抗、各节点谐波电压、各节点各次谐波畸变率以及各节点SAPF最大允许安装容量。

(2) 计算局域电网中各节点的治理系数 δ_q , 根据治理系数的大小对候选节点进行排序,治理 系数较小的节点具有更高的优先级。依次对排序 后的候选节点进行检验,判断其是否存在 SAPF 安装余量,选择第一个具有安装余量的候选节点 作为最优安装节点。

(3)利用拉格朗日乘数法得到给定单位 SAPF 配置容量下,各次谐波补偿电流的配置容 量,并更新整个局域网络内各节点的谐波电压和



图 3 基于 SAPF 的电网多节点电压谐波优化补偿算法流程 Fig. 3 The optimal compensation algorithm flowchart for multi-node voltage harmonics based on SAPF

谐波畸变率。

(4)检验治理后局域电网中是否存在候选节点,可使所有节点的约束圆具有公共可行域,使整个网络的谐波畸变率满足国家标准。如存在继续下一步,如不存在返回步骤(2),重复上述过程。

(5)在该节点处安装最后一台单位 SAPF, 求得该公共域内距复平面原点最近的点作为输出 补偿电流。最后,将所有安装节点上的单位 SAPF 进行合并,输出最后的配置结果及电网此时的谐 波畸变率。

3 仿真验证与结果分析

在 Matlab 中搭建一个 IEEE-18 节点局域电网 模型,如图 4 所示,系统线路阻抗及负载参数见 文献 [19]。

图 4 中, 红色符号代表非线性负载, 各非线



A, rad





性负载输出电流的幅值和相位与负载特性相关, 本文主要考虑非线性负载的5、7次谐波,为方便 分析将各非线性负载用谐波源进行等效替换,其 谐波幅值和相位参数如表1所示。为了检验在局 域配电网中非线性负载不同分布情况下该优化配 置算法的有效性,本文设计了集中式和分布式 2种不同的非线性负荷分布情况,如表2所示。

表 1 非线性负载输出谐波电流幅值及相位 Table 1 Harmonic current amplitude and phase of nonlinear loads

		A, 180
节点序号	5次谐波电流	7次谐波电流
5	26.57∠2.140	9.92∠0.375
6	27.74∠2.127	7.40∠0.446
7	27.68∠2.102	7.12∠0.44
23	26.53/2.129	7.28∠0.50
25	25.55∠2.062	6.63∠0.48

Table 2 Harmonic current amplitude and phase of connection schemes of two non-linear loads

节点编号	情况1(集中式)		情况2(分布式)	
	5次谐波	7次谐波	5次谐波	7次谐波
5	26.57∠2.140	9.92∠0.375	26.57∠2.140	9.92∠0.375
6	27.74∠2.127	7.40∠0.446	27.74∠2.127	7.40∠0.446
7	27.68∠2.102	7.12∠0.44	27.68∠2.102	7.12∠0.44
23			26.53∠2.129	7.28∠0.50
25			25.55∠2.062	6.63∠0.48

表 3 显示了 2 种情况局域配电网优化补偿算 法的 SAPF 配置结果;情况 1,需要在节点 6 和 7 上配置 2 台 SAPF;情况 2,需要在节点 7 和 23 上配置 2 台 SAPF,具体配置结果见表 4。

在2种情况下,通过优化补偿算法得到的治

表 3 2种情况下 SAPF 的配置结果 Table 3 SAPF configuration results for two cases

情况	谐波源位置	平均THD/%	SAPF配置数量	配置容量/A
1	5,6,7	0.92	2(6,7)	91.08
2	5,6,7,23,25	2.00	2 (7, 23)	122.26

表 4 2种情况下 SAPF 的输出容量 Table 4 SAPF output capacity for two cases

				A
输出谐波	情况1		情况2	
	节点6	节点7	节点7	节点23
5次	58.28	8.815	66.5	44.38
7次	22.00	2.03	13.3	2.03

理结果中网络各节点平均 THD 均远小于 4%,符 合中国的规定标准值^[25]。同时,2个 SAPF 配置 结果的总输出容量小于非线性负载产生总谐波电 流量。

网络内各节点约束圆圆心可由式(11)得 到,以节点7为SAPF配置节点,利用SAPF对网 络进行迭代优化补偿的过程中,各节点圆心群的 位置变化如图5所示。蓝色圆心群为情况2下 SAPF补偿5次谐波前18节点中各节点的约束圆 圆心位置(部分节点圆心重叠);红色圆心群为 补偿算法迭代4次后各节点约束圆圆心群;黄色 圆心群为最后一次迭代前(第6次迭代)约束圆 圆心群。如图5所示,在补偿算法作用下,各节 点约束圆圆心群持续向原点靠近且迅速聚集,这 有效降低了电网内各节点谐波含有率,且减少了 算法的迭代次数。图6中,所有HRU和THD都 满足式(3)和式(4)的限制,这证明了提出的 谐波优化补偿方法对于解决局域电网内多 SAPF



安装位置及补偿容量的优化配置问题有效的,能 够使配电网整体谐波畸变率达到国标要求。









在情况 2 中, 图 7 显示了非线性负载的电流 以及配电网络中各节点 SAPF 输出补偿电流的配 置情况。为了证明该优化谐波补偿方法是一种有 效且经济的谐波抑制方法,特别是在具有大量分 散非线性负载的配电网中,将文献 [18-19] 中的补 偿算法整理后,得到情况 2 下的 SAPF 配置结 果,并与本文提出的优化算法的治理结果进行比 较。表 5 显示了在情况 2 下,2 种算法的最优解。 2 种方法的最佳治理方案都可以满足推荐标准。 在传统方法中,SAPF 的数量接近非线性负载, 并且随着非线性负载的增加,该方法将变得不经 济。在相同条件下,2 种方法具有相似的谐波抑 制效果,平均THD相近,但是本文提出的优化配 置方法的SAPF配置结果仅需2台SAPF,且总配 置容量更小。





Fig. 7 The harmonic current of non-linear loads and the SAPF output compensation current in case 2

表 5	情况2下2种治理方案的SAPF配置结果
Table 5	The SAPF configuration results of two control
	methods in case 2

算法	谐波源位置	平均THD/%	SAPF配置数	配置容量/A
优化	5,6,7,23,25	1.85	2	122.26
传统	5,6,7,24,25	1.03	5	134.16

综上所述,仿真结果证明,在集中式或分散 式2种非线性负载的不同接入情况下,文中提出 的配电网多节点电压谐波优化补偿方法都是有效 且经济的,并且这种方法的优点在具有大量非线 性负载的配电网络中将更加明显。

4 结论

本文提出了一种基于 SAPF 的电网多节点电 压谐波优化补偿方法,通过对 SAPF 安装位置及 补偿容量进行优化配置,抑制配电网整体谐波潮 流。本文搭建了 IEEE-18 节点标准系统仿真,验 证所提 SAPF 配置方案的可行性及高效性。在 2 个 不同谐波网络中,该算法的仿真结果均符合文献 [25] 中规定的标准,这表明该方法在配电网中存在集 中式或分布式非线性负载的情况下都是可行的。 通过与传统方法计算得出的解进行比较,该改进 方法可以通过减少 SAPF 的数量来达到优异的谐 波抑制效果。因此,该优化补偿方法对于具有分 散的非线性负载的配电网谐波抑制更为有效。



参考文献:

- 王兆安,刘进军,王跃.谐波抑制和无功功率补偿 [M]. 3 版.北京: 机械工业出版社, 2016.
- [2] 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.
- [3] 肖湘宁,韩民晓,徐永海,等.电能质量分析与控制[M].北京:中国 电力出版社,2010.
- [4] 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.
- [5] 张勤进,张博,刘彦呈,等. 基于低频电流注入的船舶直流微电网线 路阻抗检测 [J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(8): 134–134. ZHANG Qinjin, ZHANG Bo, LIU Yancheng, *et al.* A line impedance detection of a ship DC microgrid based on low frequency current injection[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(8): 134–134.
- [6] 王雪,高云广, 吝伶艳, 等. 有源电力滤波器的研究现状与展望 [J].
 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 177–186.
 WANG Xue, GAO Yunguang, LIN Lingyan, *et al.* Research status and prospect of active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 177–186.
- [7] 杨凌波,张尚春. 电压型有源电力滤波器在化工行业谐波治理中的应用 [J]. 电气传动自动化, 2014, 36(4): 26–29.
 YANG Lingbo, ZHANG Shangchun. Application of voltage APF for harmonic treatment in chemical industry[J]. Electric Drive Automation, 2014, 36(4): 26–29.
- [8] 刘聪. 并联型有源电力滤波器谐波抑制性能优化技术研究 [D]. 武 汉: 华中科技大学, 2014.

LIU Cong. Study on performance optimization technology of harmonic suppression with shunt active power filter[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2014.

[9] 寻骈臻. 有源电力滤波器谐波电流检测与控制策略研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.

XUN Pianzhen. Research of harmonic current detection and control strategy in active power filters[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.

[10] 陈东华,谢少军,周波.用于有源电力滤波器谐波和无功电流检测的一种改进同步参考坐标法 [J].中国电机工程学报,2005,25(20): 62-67.

CHEN Donghua, XIE Shaojun, ZHOU Bo. An improved synchronous reference frame method for harmonics and reactive currents detection of active power filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 62–67.

- [11] JINTAKOSONWIT P, FUJITA H, AKAGI H, et al. Implementation and performance of cooperative control of shunt active filters for harmonic damping throughout a power distribution system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(2): 556–564.
- [12] 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].
 Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 1–11.
- [13] AKAGI H, FUJITA H, WADA K. A shunt active filter based on voltage detection for harmonic termination of a radial power distribution line[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999, 35(3): 638–645.
- [14] WADA K, FUJITA H, AKAGI H. Considerations of a shunt active filter based on voltage detection for installation on a long distribution feeder[J]. Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference 36th IAS Annual Meeting (Cat No 01CH37248), 2001, 1: 157–163.
- [15] EMANUEL A E, ORR J A, CYGANSKI D, et al. A survey of harmonic voltages and currents at distribution substations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(4): 1883–1890.
- [16] 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.
- [17] 卓放,杨泽斌,易皓,等.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 [J]. 中国电力, 2020, 53(11): 40–49.
 ZHUO Fang, YANG Zebin, YI Hao, *et al.* Optimal allocation strategy for power quality control devices based on harmonic and three-phase unbalance comprehensive evaluation indices for distribution network[J]. Electric Power, 2020, 53(11): 40–49.
- [18] RAMOS-CARRANZA H A, MEDINA A. Single-harmonic active power line conditioner for harmonic distortion control in power networks[J]. IET Power Electronics, 2014, 7(9): 2218–2226.
- [19] 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.

- [20] GRADY W M, SAMOTYJ M J, NOYOLA A H. The application of network objective functions for actively minimizing the impact of voltage harmonics in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(3): 1379–1386.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 帅智康, 罗安, 祝文姬, 等. 并联型有源电力滤波器容量和最优安装
 位置的选择方法 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(13): 92–98.
 SHUAI Zhikang, LUO An, ZHU Wenji, *et al.* Study on the size and

optimal location of shunt active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 92–98.

[25] 国家技术监督局. 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. 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:

阴晓晴(1995—), 女, 通信作者, 硕士, 从事谐波与 不平衡的网络电能质量综合治理等研究, E-mail: yxqing@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;

杨泽斌 (1995—),男,博士研究生,从事谐波、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;

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。

(责任编辑 张重实)

Optimal Compensation Method for Multi-node Voltage Harmonics Based on SAPF

YIN Xiaoqing¹, YI Hao¹, YANG Zebin¹, ZHUO Fang¹, WANG Meng¹, LIU Xiayu¹, ZHU Chengzhi² (1. School of Electric Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710048, China; 2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd.,

Hangzhou 310007, China)

Abstract: With the decentralized access of non-linear loads in the local distributed network, the traditional shunt active power filter (SAPF) configuration method with the objective of local compensation of harmonics requires integration of a large number of control equipment, which leads to both low control efficiency and high control cost. Therefore, the optimization of SAPF configuration is needed for global comprehensive suppression of harmonics in the local distributed network. Firstly, the Norton equivalent method is used to establish an objective function for optimal compensation of the harmonic voltage in local distributed network. Secondly, the optimization problem is solved using the non-linear programming principle and the geometric aided analysis method to determine the installation position and optimal configuration capacity of SAPF in the system, and a comprehensive suppression algorithm is proposed for harmonic voltage in the power network based on SAPF. Finally, a simulation model of an IEEE-18 node system is established to verify the feasibility of the proposed algorithm. The results show that in the case of different distributed network can be effectively suppressed through fewer SAPFs with less capacities.

This work is supported by Science and Technology Project of SGCC (Research on Flexible and Comprehensive Control of Regional Distributed Network for High Quality Power Supply, No.52110418000S).

Keywords: shunt active power filter (SAPF); harmonics; local power network; aided geometric method; harmonic suppression