

数字化配电网分布式谐波治理的 VDAPF 优化配置策略

贾清泉¹, 张雪瑞¹, 刘文邈¹, 张晨瑞², 卜令岩³

(1. 电力电子节能与传动控制河北省重点实验室(燕山大学电气工程学院), 河北 秦皇岛 066004; 2. 国网山西省电力公司大同市云州区供电公司, 山西 大同 037300; 3. 国网辽宁省电力有限公司沈阳供电公司, 辽宁 沈阳 110811)

摘要: 基于数字化配电网分布式谐波治理方案, 考虑多功能并网逆变器(MFGTI)的辅助谐波治理功能, 提出一种计及 MFGTI 贡献的电压检测型有源电力滤波器(VDAPF)优化配置策略。首先, 介绍 VDAPF 和 MFGTI 协同谐波治理分区方法, 确定 VDAPF 最佳安装位置; 其次, 利用场景分析法构建谐波和 MFGTI 的双重不确定性; 然后, 构建多目标的 VDAPF 容量优化配置模型, 同时兼顾经济性和治理效果, 利用规格化法平面约束(NNC)将多目标模型转化为单目标模型进行求解; 最后, 以 IEEE33 节点配电系统为例进行仿真验证。结果表明在 VDAPF 配置中考虑 MFGTI 的治理功能, 可达到更好的经济性和治理效果, 验证了所提策略的有效性。

关键词: 数字化配电网; 分布式谐波治理; 多功能逆变器; 场景分析; 多目标优化

中图分类号: TM712; TM73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-9898(2021)03-0049-07

VDAPF Optimization Configuration Strategy of Distributed Harmonic Control in Digital Active Distribution Grid

JIA Qingquan¹, ZHANG Xuerui¹, LIU Wenmiao¹, ZHANG Chenrui², BU Lingyan³

(1. Key Lab of Power Electronics for Energy Conservation and Motor Drive of Hebei Province (School of Electrical Engineering, Yanshan University), Qinhuangdao 066004, China; 2. State Grid Shanxi Electric Power Company Datong Supply Company, Datong 037300, China; 3. State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd. Shenyang Supply Company, Shenyang 110811, China)

Abstract: Based on the distributed harmonic control scheme of digital distribution network, considering the auxiliary harmonic control function of multi-functional grid-tied inverter (MFGTI), An optimal configuration strategy of Voltage Detection Active Power Filter (VDAPF) considering the contribution of MFGTI is proposed. Firstly, the VDAPF and MFGTI coordinated harmonic control zoning method is introduced to determine the best installation location of VDAPF. Secondly, the dual uncertainties of harmonics and MFGTI are constructed by using scenario analysis. Then, a multi-objective VDAPF capacity optimal allocation model is built, and both economic and governance effects are taken into account. Normalized Normal Constraint (NNC) is used to transform the multi-objective model into a single objective model for solution. Finally, an IEEE33 node distribution system is taken as an example for simulation verification. The results show that considering the governance function of MFGTI in the configuration of VDAPF can achieve better economic and governance effects, and the effectiveness of the proposed strategy is verified.

Key words: digital distribution network; harmonic partition mitigation; multi-functional grid-tied inverter; scenario analysis; multi-objective optimizing

0 引言

随着分布式电源大规模并网和电力电子非线性负荷数量的激增, 现代配电网电力电子化程度显著提高^[1-3]。高密度全网分布的谐波源使现代

配电网谐波污染呈分散化、全网化态势^[4-5], 谐波问题愈加严重。

传统配电网谐波源数量较少且分布集中, 通常可采用点对点的治理模式从污染源侧就地治理。电压检测型有源电力滤波器(Voltage Detec-

收稿日期: 2021-06-08

作者简介: 贾清泉(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电能质量分析与控制、分布式电源与微电网的研究。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51877186); 河北省自然科学基金项目(E2018203358)。

tion Active Power Filter, VDAPF)作为点对点治理模式中广泛应用的补偿装置,通过向污染线路注入反向谐波电压形成抵消,以实现谐波治理^[6-9]。文献[10]研究了基于VDAPF的分布式全局优化治理方案,提出一种全局优化与本地控制相结合的分布式治理策略。这些研究工作^[11-13]为解决现代配电网谐波问题提供了一种分布式治理的新思路。

分布式电源并网逆变器与VDAPF具有相同的主电路拓扑,因而并网逆变器可以兼有VDAPF的谐波治理功能。采用具备谐波治理功能的多功能并网逆变器(Multi-Functional Grid-Tied Inverter, MFGTI)作为分布式电源的并网接口,在实现有功并网的同时,可利用其剩余容量辅助治理谐波^[14-19]。文献[14-15]针对谐波、电压偏差、三相不平衡等电能质量问题,研究利用多功能逆变器同时实现谐波、无功、负序补偿的控制策略。文献[16]针对不同分布式电源(Distributed Generation, DG)出力及功率需求情况,分别为多功能逆变器设计相应的控制策略,以确保不同供需状况下的并网和有源滤波功能。

本文考虑MFGTI辅助谐波治理的作用,提出VDAPF配置策略。创建考虑MFGTI安装位置的两阶段分区方法,划分治理区域并确定VDAPF最佳安装节点。计及MFGTI治理资源,建立兼顾经济性和治理效果的多目标VDAPF容量优化配置模型。考虑到谐波及MFGTI剩余容量的不确定性,基于多场景分析技术构建双重不确定性运行场景集。最后,结合规格化法平面约束(Normalized Normal Constraint, NNC)和改进遗传算法求解多目标优化模型。选取IEEE33节点配电系统进行仿真分析,验证了本文所提方法的有效性和经济性。

1 电气设备治理谐波方法

1.1 VDAPF治理谐波方法

治理设备的安装位置、容量不同,对配电网电能质量的治理能力、治理效果也不同。因此,确定合理治理设备分布与容量对治理作用的发挥非常关键。目前已有文献大多是将谐波治理效果最好和以谐波水平达标所需治理容量最小为目标,建立了治理设备优化方案,利用遗传算法、粒子群算法等智能算法进行求解。

利用VDAPF治理谐波,其谐波补偿容量IAPF与等效电导关系如式(1)所示。

$$I_{APF,i} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (G_{APF,h,i} \times U_{h,i})^2} \quad (1)$$

式中: $G_{APF,h,i}$ 为接入*i*节点VDAPF的*h*次谐波电导值; $U_{h,i}$ 为*i*节点的*h*次谐波电压。

1.2 VDAPF联合多功能逆变器治理谐波

考虑电网内配置VDAPF和MFGTI 2种治理设备,其中,MFGTI位于DG安装节点,位置及容量均已知;对于VDAPF,在考虑MFGTI已知的基础上,利用分区算法及优化配置模型得到VDAPF最佳配置信息。VDAPF及MFGTI运行参数由主站端根据采集的谐波电压及DG功率输出信息,从全网角度进行优化求得。

MFGTI与VDAPF基本结构相似,不但具有常规逆变器实现可再生能源并网的基本功能,还增加了谐波治理功能,可利用其实现并网以外的剩余容量进行谐波治理,且补偿原理与VDAPF基本相同。

利用MFGTI剩余容量治理谐波,其谐波补偿容量IMFGTI与等效电导的关系如式(2)所示。

$$I_{MFGTI,i} = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (G_{MFGTI,h,i} \times U_{h,i})^2} \quad (2)$$

式中: $G_{MFGTI,h,i}$ 为MFGTI的*h*次谐波电导值。

1.3 MFGTI单独治理谐波

当光伏渗透率足够高时,每个点都装有光伏逆变器,若将一些点的普通逆变器换成多功能逆变器,使微电网本身直接具有谐波治理功能。

谐波治理中,MFGTI的最大谐波补偿容量受设备剩余容量限制,需在求得剩余容量的基础上,进一步计算得出。对于MFGTI可参与谐波治理的设备剩余容量 S_{re} ,仅考虑DG并网有功功率 P_{DG} ,则 S_{re} 与总容量 S_N 及 P_{DG} 的关系为

$$S_N^2 = S_{re}^2 + P_{DG}^2 \quad (3)$$

式中: S_N 为定值,故MFGTI剩余容量主要由 P_{DG} 决定。 P_{DG} 受天气影响,具有不确定性,致使MFGTI参与谐波治理的剩余容量同样具有不确定性,且与天气情况紧密相关。由剩余容量 S_{re} 即可确定MFGTI用于谐波治理的最大可补偿容量 $I_{MFGTI,i}^*$ 。

$$I_{MFGTI,i}^* = S_{re} / U_{N,i} \quad (4)$$

式中: $U_{N,i}$ 为节点*i*的额定基波电压。

2 VDAPF 和 MFGTI 协同谐波治理分区及设备安装节点确定方法

2.1 VDAPF 和 MFGTI 协同治理分区方法

谐波治理分区应满足区域内节点强耦合、区域间节点弱耦合的特点,且各区治理设备的安装节点,应具有较强的控制能力。按谐波治理设备初始配置情况,配电网节点可分为普通节点和配有 MFGTI 的 DG 节点。考虑到 DG 节点已具备一定谐波治理能力,为满足上述分区的要求,分两阶段进行谐波治理分区,具体分区方法如下。

2.1.1 第1阶段分区

设网络含 a 个 DG 节点,以每个 DG 节点为中心,根据 DG 节点对不同节点的控制效果,形成 a 个初始 DG 治理区域。

a. 求节点谐波响应灵敏度。节点谐波电压与节点注入谐波电流满足关系式(5),由此计算 h 次节点 j 谐波电压对节点 i 注入谐波电流的灵敏度 $w_{1,h,ji}$,进而得到节点总谐波响应灵敏度 $w_{1,ji}$,具体见式(6)、式(7)。

$$U_h = Y_h^{-1} I_h = \frac{1}{|Y_h|} A I_h \quad (5)$$

$$w_{1,h,ji} = \frac{\partial U_{h,j}}{\partial I_{h,i}} = \frac{1}{|Y_h|} A_{i,j} \quad (6)$$

$$w_{1,ji} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{h=2}^H w_{1,h,ji}^2} \quad (7)$$

式中: Y_h 为节点导纳矩阵,取其某一负荷场景下的典型值用于计算; A 为 Y_h 的伴随矩阵; $U_{h,j}$ 为节点 j 的 h 次谐波电压; $I_{h,i}$ 为节点 i 的 h 次谐波补偿电流; $A_{i,j}$ 为矩阵 A 中元素; N 为谐波频率总个数。

b. 将普通节点对各 DG 节点的谐波响应灵敏度从高到低排序,设定阈值 ϑ ,选出谐波响应灵敏度高于 ϑ 的节点,并划分到与其响应灵敏度最大的 DG 节点的控制区域。

c. 求节点谐波耦合度。按式(8)计算区内 h 次任意的节点 i 对节点 j 谐波电压的响应灵敏度 $w_{U,h,ij}$,进而按式(9)得到节点总谐波耦合度 β_{ij} 。

$$w_{U,h,ij} = \frac{\partial U_{h,i}}{\partial I_{h,j}} = \frac{\partial U_{h,j}}{\partial I_{h,i}} = w_{h,i,j} / w_{h,j,i} \quad (8)$$

$$\beta_{ij} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{h=2}^H \left(\frac{w_{U,h,ij}^2 + w_{U,h,ji}^2}{2} \right)} \quad (9)$$

d. 为保证区内节点高耦合的要求,设置耦合度最低限值 ξ ,将区内各节点间谐波电压耦合度不

满足要求的节点作为待定节点。

e. 针对不满足耦合度要求的各组待定节点,若其中一个节点为 DG 节点,则直接剔除另一节点;若不含 DG 节点,则计算 2 节点与区域内其他节点间的谐波耦合度,剔除耦合度之和较低的节点,以确保区内节点的强耦合性。最终所得各初始 DG 治理区域的节点满足式(10)的要求。

$$\begin{cases} w_{1,zj} \geq \vartheta \\ \beta_{ij} \geq \xi \end{cases} \quad (10)$$

式中: z 为区域内 DG 节点。

2.1.2 第2阶段分区

在第1阶段分区基础上,基于社团发现算法,求得全网最优分区结果。

本阶段将每个未分区节点和初始 DG 治理区域均视为独立的社团,作为网络初始分区,在此基础上应用社团发现算法划分网络,并以最大模块度对应分区作为最终分区结果。网络划分以谐波电压耦合度作为节点关联程度的评判指标,且连边权重 $A_{ij} \in [0,1]$,因此,设定节点 i 与 j 的连边权重 A_{ij} 如式(11)。

$$A_{ij} = \frac{\beta_{ij}}{\max_{e,g \in n} \{\beta_{eg}\}} \quad (11)$$

2.2 VDAPF 最佳安装节点的确定

含 DG 节点的区域虽具备一定的谐波治理能力,但通常不足以使区内各节点谐波水平平均达标。因此,需对所有区域配置 VDAPF。

VDAPF 的最佳安装节点应对区内各节点具有较强的可控性。利用最大平均灵敏度节点作为 VDAPF 安装节点,平均灵敏度的计算见式(12)。

$$w_{1,i}^{av} = \frac{1}{\lambda} \sum_{j \in \Omega_z} w_{1,ij} \quad (12)$$

式中: $w_{1,i}^{av}$ 为节点 i 与区域内其他节点的平均灵敏度; λ 为该区内节点数; Ω_z 为区内所含节点的集合。谐波治理分区及 VDAPF 安装节点确定流程如图1所示。

2.3 双重不确定性场景的构建

本文以规划年为时间域,将全年按季节划分为不同的典型日,再按时序对典型日划分时段,以小时级时间尺度对典型日进行时段划分。划分时段后,对其中某一时段 t 构建运行场景,具体方法如下。

a. 针对谐波不确定性,以 t 时段内网络 n 个节点的谐波预测信息构建该时段的谐波场景,一

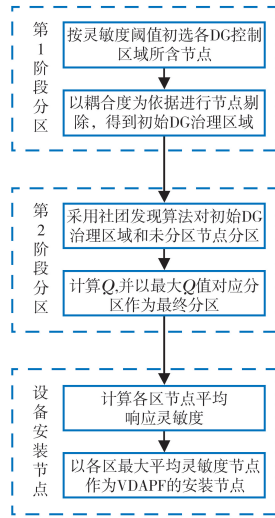


图1 谐波治理分区及VDAPF安装节点确定流程
组网络谐波信息作为一个场景,用向量 $\mathbf{H}$ 表示,由若干谐波向量构成原始谐波场景集 M 。

$$\mathbf{H}=[H_1, H_2, \dots, H_i], i \in N_+ \quad (13)$$

$$M=\{H'_v \mid v \leq m, v \in N_+\} \quad (14)$$

式中: H_i 为节点 i 在时段 t 内的谐波电流; N_+ 为非零自然数集合; H'_v 为第 v 个原始谐波场景; m 为原始谐波场景的数量。

由于原始谐波场景数量过多,采用 k 均值聚类法进行场景压缩^[20],聚合出具有代表性的典型谐波场景集 C ,其中第 γ 个典型场景发生的概率为 $P(H_\gamma)$ 。

$$C=\{H_\gamma \leq c, \gamma \in N_+\} \quad (15)$$

$$P(H_\gamma)=\frac{n_\gamma}{m} \quad (16)$$

式中: H_γ 为第 γ 个典型谐波场景; c 为典型谐波场景的数量; n_γ 为 H_γ 这一类包含的原始场景数量。

b. 针对 MFGTI 剩余容量的不确定性,对各时段按 MFGTI 剩余容量大小分为不同场景,构成 MFGTI 剩余容量场景集 G 。

$$G=\{G_a \mid a \leq g, a \in N_+\} \quad (17)$$

式中: G_a 为第 a 个逆变器剩余容量场景; g 为逆变器剩余容量场景的数量。

基于概率密度拟合法,可得光伏并网有功功率 P_{PV} 的概率密度函数,用 $f_r(r)$ 表示^[23]。利用 $f_r(r)$ 可求得处于第 a 个场景 G_a 发生的概率 $P(G_a)$ 及均值 μ_a 。

$$P(G_a)=\left|\int_{r_1}^{r_2} f_r(r) dr\right| \quad (18)$$

$$\mu_a=\left|\int_{r_1}^{r_2} S_{re}(r) f_r(r) dr\right| \quad (19)$$

式中: r_1 和 r_2 分别为 G_a 的剩余容量下限 $S_{re,a1}$ 和上限 $S_{re,a2}$ 所对应的光照强度。

c. 谐波治理运行场景 Y 兼顾谐波及 MFGTI 剩余容量的不确定性,故 Y 由典型谐波场景 C 和 MFGTI 剩余容量场景 G 共同构成。所得双重不确定场景集 Y 、场景个数及场景概率见式(20)–(22)。

$$Y=\{Y_l=(G_a, H_\gamma) \mid G_a \in G, H_\gamma \in C, l \in N_+\} \quad (20)$$

$$R(Y)=R(G)R(C) \quad (21)$$

$$P(Y_l)=P(G_a)P(H_\gamma) \quad (22)$$

式中: Y_l 为时段 t 内第 l 个规划场景; $R(g)$ 表示集合中元素的数量; $P(Y_l)$ 为 Y_l 发生的概率。

2.4 VDAPF 容量最优化配置

本文 VDAPF 安装容量的优化,在考虑经济性的基础上,兼顾谐波治理效果,以 VDAPF 投资成本最小为目标函数 1,以多运行场景下 VDAPF 和 MFGTI 协同治理的谐波电压畸变率加权之和最小为目标函数 2。运行场景采用 2.3 节构建的考虑谐波污染及 MFGTI 治理功能双重不确定性的场景集。基于上述思路构建 VDAPF 优化配置模型,基本结构如图 2 所示。

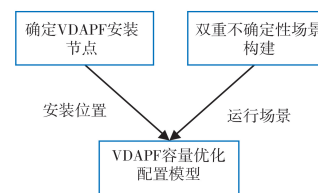


图2 VDAF 优化配置模型基本结构

2.4.1 目标函数

2.4.1.1 目标函数 1

关注谐波治理经济性,考虑设备购置成本和安装成本。

$$\min f_1=\min \sum_{i=1}^n d_i(C_i+k I_{APF,i}^*) \quad (23)$$

式中: n 为网络节点总数; d_i 为是否安装 VDAPF,若安装用 1 表示,若不安装用 0 表示; C_i 为第 i 个节点 VDAPF 的安装费用; k 为 VDAPF 单位容量费用; $I_{APF,i}^*$ 为第 i 个节点 VDAPF 的安装容量。

2.4.1.2 目标函数2

各场景下的电网谐波电压畸变率之和评估治理效果,以总畸变率最小为目标函数。

$$\min f_2 = \min \sum_{y=1}^Y [THD^y P^y] \quad (24)$$

式中: P^y 为场景 y 发生的概率; THD^y 为场景 y 下所有节点谐波电压总畸变率。式(25)为 THD^y 目标函数。

$$\min THD^y = \min \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^H |U_{h,i}^y|^2}{|U_{N,i}|}} \quad (25)$$

式中: $U_{h,i}^y$ 为场景 y 下节点 i 的 h 次谐波电压,可由 h 次谐波潮流计算求得。

2.4.2 约束条件

2.4.2.1 谐波潮流方程等式约束

$$U_h^y = (Y_h^y)^{-1} I_h^y \quad (26)$$

式中: I_h^y , U_h^y 和 Y_h^y 分别为场景 y 下节点 h 次注入谐波电流列向量、谐波电压列向量和节点导纳矩阵。

2.4.2.2 VDAPF 和 MFGTI 可选谐波补偿容量约束

为保障 VDAPF 和 MFGTI 安全运行,所有场景下 VDAPF 和 MFGTI 参与谐波补偿容量在不超过其安装容量基础上,需留有一定的容量裕度。

$$\max_{0 < y \leq R(Y)} I_{APF,i}^y \leq e_{APF} I_{APF,i}^* \quad (27)$$

$$\max_{0 < y \leq R(Y)} I_{MFGTI,i}^y \leq e_{MFGTI} I_{MFGTI,i}^* \quad (28)$$

式中: $I_{APF,i}^y$, $I_{MFGTI,i}^y$ 分别为场景 y 下 i 节点 VDAPF 和 MFGTI 谐波补偿容量; $I_{APF,i}^*$, $I_{MFGTI,i}^*$ 分别为 i 节点 VDAPF 和 MFGTI 最大谐波补偿容量; e_{APF} , e_{MFGTI} 分别为 VDAPF 和 MFGTI 容量裕度安全系数。

2.4.2.3 节点总谐波电压畸变率约束

治理后配电网每个节点的总谐波电压畸变率要求符合 GB/T 14549—1993《电能质量 公用电网谐波》的规定^[24]。

$$THD_i^y = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H |U_{h,i}^y|^2}}{|U_{N,i}|} \times 100\% < C_{THD} \quad (29)$$

式中: C_{THD} 为节点总谐波电压畸变率最大值。

2.4.2.4 VDAPF 安装容量约束

VDAPF 安装容量为有上限的离散变量。

$$I_{APF,i}^* = KI_0, K \in N_+ \quad (30)$$

$$I_{APF,i}^* \leq I_{APF,i,\max}^* \quad (31)$$

式中: I_0 为 VDAPF 的单位最小可安装容量; $I_{APF,i,\max}^*$ 为 VDAPF 节点最大可安装容量。

3 算例分析

3.1 算例说明

选取 IEEE 33 节点配电系统模型进行仿真验证,网络结构如图3所示。根据本文研究需要,在低压侧各节点设置谐波源,以表征高密度的分散谐波,节点6、24和27为分布式光伏并网节点,相应的 MFGTI 配置信息如表1所示。线路及 VDAPF 相关参数设置均参考文献[14],MFGTI 及 VDAPF 的容量裕度安全系数均设为95%。按 GB/T 14549—1993 规定,设置谐波电压畸变率的允许上限为4%。谐波响应灵敏度阈值取最大灵敏度的70%,设置初始 DG 治理区域内节点耦合度最低限值。光照和谐波数据参照河北某地区的年平均光照和谐波的调研数据,并按本文网络结构做出相应调整。

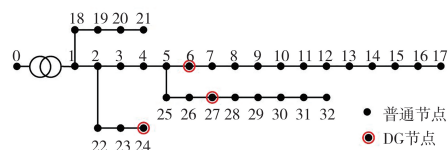


图3 IEEE33节点配网结构

表1 MFGTI 配置信息

节点	6	24	27
MFGTI 安装容量/kVA	80.7	62.3	74.5

为简化计算,首先进行时段划分,将全年分为4个典型日,每个典型日划分为24个时段,然后,分别对这96个时段进行场景构建。对96个不同时段的谐波调研数据,以1组32节点各次谐波含量数据为1个原始谐波场景,将同一典型日同时段的原始谐波场景进行聚类,96个时段均各自得到4个典型谐波场景。对96个不同时段的光照强度分别进行概率密度函数拟合,因夜间光强始终为零,夜间各时段均仅有1个MFGTI剩余容量场景;将日间按光强大小分为低、中、高3个等级,则日间各时段MFGTI剩余容量场景数为3。将同时段的典型谐波场景和MFGTI剩余容量场景按2.3节方法组合,即可得该时段的运行场景集。

限于篇幅,本文仅以谐波含量最大的场景为例。在所有谐波场景中,最大谐波场景处于第2个典型日12:00—13:00时段。该时段为日间中午时

段,光照充足,逆变器剩余容量较少,按光强高、中、低划分为3个场景,根据式(3)、(18)、(19)计算不同光强等级下各节点的MFGTI剩余容量均值及对应发生概率,构建逆变器剩余容量场景,结果如表2所示。

表2 MFGTI 剩余容量均值及概率

光强等级	节点	MFGTI 剩余容量均值/kVA	概率
高	6	17.15	0.5825
	24	13.62	
	27	16.28	
中	6	36.58	0.2527
	24	29.06	
	27	34.75	
低	6	55.03	0.1648
	24	43.71	
	27	52.27	

3.2 谐波治理区域划分结果

考虑5、7、11、13次谐波,采用2.1节2阶段分区方法进行谐波治理分区。按第1阶段分区方法,以DG节点为中心,对网络节点进行筛选和剔除,得到初始DG治理区域,具体如表3所示。

表3 初始 DG 治理分区结果

DG 节点	初始 DG 治理区域所含节点
6	5、7、8
24	22、23
27	25、26、28、29

在表3划分结果的基础上,按第2阶段分区方法,采用社区发现算法划分区域,得到模块度函数Q与区域数关系如图4所示。

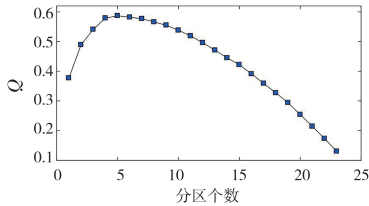


图4 Q值与分区个数关系

由图4可知,区域数为5时Q值最大,最大值为0.589,则最佳分区数为5,将对应划分结果作为最终分区,并按灵敏度最大准则确定VDAPF安装节点,具体分区及配置结果如图5所示。

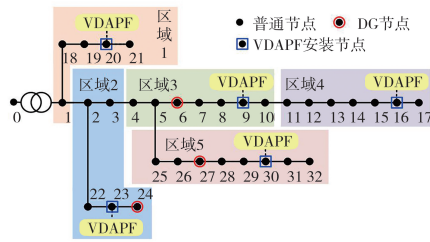


图5 配电网区域划分结果

3.3 VDAPF 配置结果及谐波治理分析

利用NNC法结合改进遗传算法求解此模型,得到16个帕累托前沿点,如图6所示,每个帕累托前沿点代表了1种规划方案。

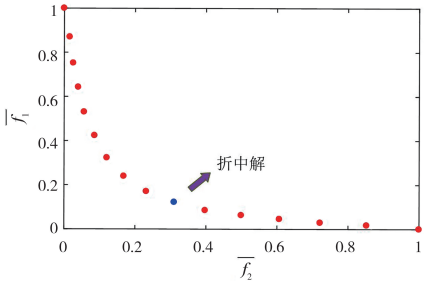


图6 16个帕累托前沿点数据

由图6可知,谐波治理经济成本随总谐波电压畸变率降低而增加,说明治理水平的提高势必以经济性为代价。综合上述分析,按照经济投资与治理效果的高回报率原则,以及谐波治理水平不应过低的规避风险原则,选取图中标记前沿点作为折中解,具体配置方案信息如表4所示。实际应用中,也可按照具体配电网对谐波治理效果的要求及决策者意向,选择所需最优配置方案。

表4 所选配置方案信息

节点	VDAPF 安装容量/A	投资成本/元	总谐波畸变率/%
9	15.86	253 942.78	56.74
16	18.56		
20	14.94		
23	13.18		
30	16.72		

按表5方案配置VDAPF,利用VDAPF和MFGTI协同进行谐波治理,得到了谐波治理前后全部784个运行场景下各节点电压畸变率如图7所示。

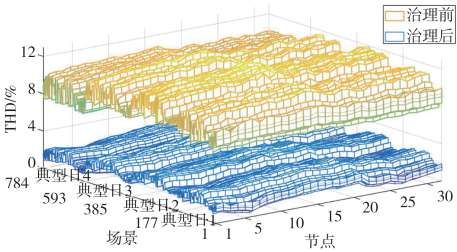


图7 治理前后各节点谐波电压畸变率

由图7可知,治理后所有场景下各节点谐波污染状况明显改善,达到国家标准。治理前,各节点电压畸变率均超过国标规定值4%,整体处于8.8%左右。利用VDAPF和MFGTI协同治理

后,所有节点谐波电压畸变率明显下降,均降至规定的4%以下,整体保持在2.8%左右。说明考虑MFGTI辅助治理的VDAPF分布式配置策略,可有效进行谐波治理并达到规定标准,验证了本文策略的有效性。

4 结论

为充分利用谐波治理资源,本文提出了一种计及MFGTI贡献VDAPF分布式谐波治理优化配置策略,并以IEEE 33节点配电网络进行仿真分析,说明本文方案可充分利用治理资源,显著提高系统经济性。本文主要研究三相谐波平衡条件下VDAPF配置问题,对于不平衡情况,可按最大一相所需治理容量配置。治理中VDAPF的不平衡输出,易导致直流电压波动增大,如何有效控制VDAPF输出仍有待研究。本文主要贡献及结论如下。

a. 提出考虑MFGTI谐波治理功能的两阶段分区方法和VDAPF容量优化模型,确定了合理的网络分区和VDAPF最佳配置方案。仿真结果表明本文方案可提高逆变器的设备利用率,有效减少VDAPF的安装容量,实现更为经济合理的配置。

b. 构建兼顾经济性和治理效果的双目标优化配置模型,并求解出多种治理水平的配置方案,为不同决策需求提供了选择性。

c. 基于多场景分析技术构建计及MFGTI剩余容量和谐波不确定性的运行场景集,考虑了复杂不确定性对规划造成的影响,同时压缩了运行场景数,减少了计算量。

参考文献:

[1] Sumner M, Abusorrah A, Thomas D, et al. Real time parameter estimation for power quality control and intelligent protection of grid-connected power electronic converters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1602-1607.
[2] Zhang ZD, Ochoa L F, Valverde G. A novel voltage sensitivity approach for the decentralized control of DG plants[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1566-1576.
[3] Ebrahimzadeh E, Blaabjerg F, Wang Xiongfei, et al. Optimum design of power converter current controllers in large-scale power electronics based power systems[J]. IEEE Trans-

actions on Industry Applications, 2019, 55(3): 2792-2799.
[4] Arghandeh R, Onen A, Jung J, et al. Harmonic interactions of multiple distributed energy resources in power distribution networks[J]. Electric Power Systems Research, 2013, 105(6): 124-133.
[5] 孙媛媛, 李树荣, 石 访, 等. 含分布式谐波源的配电网多谐波源责任划分[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5389-5398, 5586.
[6] 周 柯, 罗 安, 汤 赐, 等. 一种大功率混合注入式有源电力滤波器的工程应用[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 80-86.
[7] 陆 康, 刁 倩. 有源滤波器在不同网络中的应用分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 143-149.
[8] 王 宁, 田书娅, 贾清泉, 等. 主动配电网谐波治理设备的综合优化配置方法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(4): 91-98.
[9] Carpinelli G, Proto D, Russo A. Optimal planning of active power filters in a distribution system using trade off/risk method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(2): 841-851.
[10] 石磊磊, 贾清泉, 林丽娟, 等. 电力电子化配电网谐波分布式全局优化治理策略[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2914-2924.
[11] 卜令岩, 贾清泉, 田书娅, 等. 电压检测型 APF 构成的分布式谐波治理系统稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(21): 99-106.
[12] 曾 正, 杨 欢, 赵荣祥. 多功能并网逆变器及其在微电网中的应用[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 28-34.
[13] 刘宏达, 周 磊. 多功能并网逆变器及其在接入配电系统的微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2649-2658.
[14] Preetha S, Vinod K. Direct control of the inverter impedance to achieve controllable harmonic sharing in the islanded microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(1): 827-836.
[15] 肖传亮, 赵 波, 周金辉, 等. 配电网中基于网络分区的高比例分布式光伏集群电压控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 147-155.
[16] 徐俊俊, 戴桂木, 吴在军, 等. 计及电动汽车和光伏不确定性的主动配电网量测优化配置[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 57-64.
[17] 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.
[18] 刘澧庆, 吴 宁, 张焕亨, 等. 微电网经济型二次频率和电压控制的多目标优化模型及仿真验证[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 521-530.
[19] 赵小冰. 单目标_多目标遗传算法的研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2011.

本文责任编辑: 齐胜涛