

文章编号:0254-0096(2020)02-0181-07

# 计及谐波指标影响的含分布式电源配电网 多目标规划

王利猛<sup>1</sup>, 孙珮然<sup>1</sup>, 姜鸿儒<sup>2</sup>, 许成哲<sup>3</sup>

(1. 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 132012;  
2. 国网山东省电力公司费县供电公司, 临沂 273400; 3. 国网吉林省电力公司长春供电公司, 长春 130000)

**摘 要:** 以分布式电源给配电网带来的电能质量管理问题为研究对象,通过一种考虑谐波指标影响的配电网多目标规划方法,对分布式电源接入配电网的网损和节点谐波阻抗矩阵进行分析;然后以最小网络损耗指标和最大谐波管理指标为目标,通过构造隶属度函数,将多目标优化问题转化为对优化结果的满意度;最后采用乌鸦搜索算法进行求解,并通过对 IEEE 33 节点配电系统的仿真分析验证所提方法的有效性。

**关键词:** 分布式发电; 配电网规划; 多目标优化; 乌鸦搜索算法; 节点谐波阻抗矩阵

**中图分类号:** TM727.2/TM715 **文献标志码:** A

## 0 引 言

分布式发电(distributed generation, DG)作为能源领域的新技术,近年来受到国际社会越来越多的关注。但随着大量分布式电源并网,这给配电网的电能质量、网络损耗、稳定性等方面带来了巨大压力<sup>[1-3]</sup>。为提高分布式电源接入后的电能质量,已有大量文献对其控制的谐波管理方法进行研究,其中文献[4]提出一种基于逆变型分布式电源控制的重要节点电能质量管理方法。文献[5]则是通过提取接入点母线进线上的电流和直流电容电压,实现了两者与有功功率、无功功率的双闭环控制,从而有效控制了谐波以及电压不平衡问题。

而近年来,国内外学者提出可通过调整分布式电源的接入节点及容量大小的方法,更能简单有效提高配电网的电能质量,减小网络损耗<sup>[6-7]</sup>。文献[6]则是基于链式网络等要素的分布式电源稳态模型,从电压分布角度分析了 DG 接入节点和注入容量等应用问题。文献[7]通过分离出对网损变化起决定作用的部分网络,在电路参数不用计算的情况下,分别推导出最小网损下分布式电源接入节点和注入容量关系的重要结论。但此分析只考虑单一分布式电源并网的方法,未考虑多个电源以及功率因数的不等性,因此在网损最小的条件下 DG 的接入位置以及注入容量的配置关系尚不明确。

本文在分析分布式电源接入配电网的网损和节点谐波阻抗矩阵基础上,以最小网络损耗指标和最大谐波管理指标为目标函数,利用构造的隶属度函数优化结果的满意度,采用乌鸦搜索算法<sup>[8]</sup>进行求解,然后提出计及谐波指标影响的含分布式电源配电网多目标规划方法,最后用仿真结果验证该方法的有效性。

## 1 配电网网络损耗分析

分布式电源接入后,多电源配电网结构形成,此时潮流的方向不再是单向流通,会产生潮流回流等复杂变化,进而改变配电网的网络损耗<sup>[9]</sup>。由于分布式电源的接入,其并网容量、负荷需求大小、接入节点和功率因数等因素都将影响潮流<sup>[10]</sup>。

图 1 为配电网 3 节点配电系统,取  $i+1$  节点所接支路 1,根据网络潮流计算可得 DG 未接入时支路 1 的有功功率、无功功率损耗分别为:

$$\begin{cases} P_1(l) = R_l \left( \frac{P_{i+1}^2 + Q_{i+1}^2}{U_{i+1}^2} \right) \\ Q_1(l) = X_l \left( \frac{P_{i+1}^2 + Q_{i+1}^2}{U_{i+1}^2} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $R_l$  ——支路  $l$  的电阻,  $\Omega$ ;  $X_l$  ——电抗,  $\Omega$ ;  $U_{i+1}$  —— $i+1$  处的电压幅值, V;  $P_{i+1}$  ——有功功率, MW;  $Q_{i+1}$  ——无功功率, Mvar。

收稿日期: 2018-10-18

基金项目: 吉林省科技发展规划(20160307014GX); 全球能源互联网研究院项目(SGTYHT/16 JS 200)

通信作者: 王利猛(1971—), 男, 博士、副教授、硕士生导师, 主要从事电力系统监测与控制方面的研究。wlm\_28@163.com

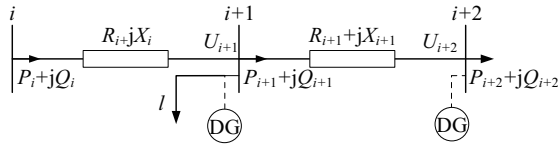


图1 配电网3节点等效图

Fig. 1 Distribution network 3 node equivalent diagram

未接入分布式电源时的网损为:

$$S_1 = \sum_{l=1}^N [P_l(l) + jQ_l(l)] \quad (2)$$

式中,  $N$ ——配电网支路数量。

接入分布式电源时支路  $l$  的有功功率、无功功率损耗分别为:

$$\begin{cases} P_{DG,l}(l) = R_l \left[ \frac{(P_{i+1} - P_{DG,i+1})^2 + (Q_{i+1} - Q_{DG,i+1})^2}{U_{i+1}^2} \right] \\ Q_{DG,l}(l) = X_l \left[ \frac{(P_{i+1} - P_{DG,i+1})^2 + (Q_{i+1} - Q_{DG,i+1})^2}{U_{i+1}^2} \right] \end{cases} \quad (3)$$

接入分布式电源时配电系统的网损为:

$$S_{DG,l} = \sum_{l=1}^N [P_{DG,l}(l) + jQ_{DG,l}(l)] \quad (4)$$

因此,建立配电网中网损指标:

$$f_1 = \frac{|S_{DG,l}|}{|S_1|} \quad (5)$$

## 2 基于逆变型分布式电源的配电网谐波管理

由于采用逆变型分布式电源来解决配电网的电能质量问题时,利用谐波电流的反相注入进行抵消实现的,因此其接入位置的选择对电能质量管理的效果至关重要。

本文利用各次谐波的节点谐波阻抗矩阵来确定分布式电源的接入位置,即考虑多次谐波的阻抗矩阵,并对其进行求和。

基于对注入网络的谐波电流的考虑,可利用  $h$  次谐波阻抗矩阵来表示:

$$Z^h = \begin{bmatrix} z_{11}^h & z_{12}^h & \cdots & z_{1n-1}^h & z_{1n}^h \\ z_{21}^h & z_{22}^h & \cdots & z_{2n-1}^h & z_{2n}^h \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ z_{n-11}^h & z_{n-12}^h & \cdots & z_{n-1n-1}^h & z_{n-1n}^h \\ z_{n1}^h & z_{n2}^h & \cdots & z_{nn-1}^h & z_{nn}^h \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中,  $z_{11}^h = R_{11} + jhX_{11}$ ,  $\cdots$ ,  $z_{nn}^h = R_{nn} + jhX_{nn}$ ;

$z_{12}^h = z_{21}^h = R_{12} + jhX_{12}$ ,  $\cdots$ ,  $z_{ij}^h = z_{ji}^h = R_{ij} + jhX_{ij}$   $\cdots$

在式(6)中,由于阻抗矩阵中的元素代表了某个节

点注入单位谐波电流时,在其他各节点上产生的谐波电压,因此选择与节点  $i$  相邻的互阻抗较大的节点作为分布式电源的接入点,在此节点注入谐波电流将对目标节点的谐波电压起到最大的改善作用。

文中将谐波含量较高 3、5、7 次谐波作为主要次谐波进行分析,设 DG 接入点为  $j$ ,在  $j$  点注入单位谐波电流,则考虑 3、5、7 多次谐波时,配电网的综合节点谐波阻抗可表示为

$$Z_{sy}^h = \frac{\alpha_1 Z^3 + \alpha_2 Z^5 + \alpha_3 Z^7}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3} \quad (7)$$

式中,  $Z^3$ 、 $Z^5$ 、 $Z^7$ ——网络的 3、5、7 次节点谐波阻抗矩阵;  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$ ——各次节点谐波阻抗矩阵的权值;  $h$ ——谐波次数。为计算快捷简单,用  $T$  表示计算中的  $Z_{sy}^h$ 。其中权值  $\alpha$  根据实际占比来取值,实际占比越多则权值越大。

在分布式电源接入规划中,如果考虑对节点  $i$  的电能质量进行管理,则满足如下目标的节点就是对其进行电能质量管理的最佳节点。

$$\max \{T_{ij}\} \quad (8)$$

将式(8)推广到一般形式,选择  $n$  个位置接入分布式电源,令  $m$  个目标节点谐波阻抗最大,即:

$$\max \left\{ \sum T_{i_m j_n} \right\}, i_m \neq j_n \quad (9)$$

式中,  $i_m$ —— $m$  个选中的目标节点;  $j_n$ —— $n$  个分布式电源接入节点,其中  $i_m \neq j_n$ 。

根据《电能质量公用电网谐波》标准<sup>[11]</sup>,电压总畸变率(total harmonic distortion, THD)表达式为:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n U_h^2}}{U_1} \times 100\% \quad (10)$$

式中,  $U_h$ —— $h$  次谐波电压方均根值, V;  $U_1$ ——基波电压方均根值, V。

$THD_i$  的表达式为:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n I_i^2}}{I_1} \times 100\% \quad (11)$$

式中,  $I_i$ ——第  $i$  个目标节点的  $h$  次谐波电流方均根值, A;  $I_1$ ——基波电流方均根值, A;  $i$ ——目标节点数。

## 3 考虑配电网谐波管理的分布式电源多目标接入规划

本文在满足约束条件的情况下,建立 DG 优化配置

的目标函数,其中以最小网络损耗指标最小和谐波管理指标最大为目标函数:

以网络损耗指标最小为目标函数:

$$f_1 = \frac{|S_{DG,1}|}{|S_1|} \quad (12)$$

以谐波管理指标最大为目标函数:

$$\max f_2 = \max \left\{ \sum T_{i_n j_n} \right\} \quad (13)$$

约束条件:

1) 功率平衡约束

$$\begin{cases} P_{DG_i} - P_{Li} - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \\ Q_{DG_i} - Q_{Li} - U_i \sum_{j=1}^n U_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $P_{DG_i}$  ——DG 有功出力, MW;  $Q_{DG_i}$  ——DG 无功出力, Mvar;  $P_{Li}$  ——负荷有功功率, MW;  $Q_{Li}$  ——负荷无功功率, Mvar;  $U_i$  ——节点电压, V;  $G_{ij}$  —— $i$ 、 $j$  节点间的线路电导, S;  $B_{ij}$  ——线路电纳, S。

2) 容量约束

$$S_i \leq S_i^{\max} \quad (15)$$

式中,  $S_i^{\max}$  ——接入 DG 后支路  $i$  的最大负载能力。

3) DG 接入的总容量约束

配电网中接入过大容量 DG 会带来不利影响, 约束为:

$$S_{DG} \leq S_{DG}^{\max} \quad (16)$$

式中,  $S_{DG}$  ——拟接入配电网的 DG 总装机容量, MW;  $S_{DG}^{\max}$  ——配电网中允许接入的 DG 最大装机容量, MW。

利用构造的隶属度函数来测结果优化的满意度, 旨在满足所有约束条件的前提下, 以使得综合满意度达到最大。网络损耗越小、谐波管理指标越大, 相应的隶属度越大。本文选用升半直线形和降半直线形作为各目标的隶属度函数, 相对应的函数为:

$$\mu(P) = \begin{cases} 1, & P < P_{\min} \\ (P_{\min} + \delta_1 - P)/\delta_1, & P_{\min} < P \leq P_{\min} + \delta_1 \\ 0, & P > P_{\min} + \delta_1 \end{cases} \quad (17)$$

$$\mu(K) = \begin{cases} 1, & K > K_{\max} \\ (K + \delta_2 - K_{\max})/\delta_2, & K_{\max} - \delta_2 \leq K \leq K_{\max} \\ 0, & K < K_{\max} - \delta_2 \end{cases} \quad (18)$$

式中,  $P_{\min}$  ——网络损耗目标最小值, MW;  $K_{\max}$  ——谐波管理指标最大值;  $\delta_1$  ——合理范围内网络损耗伸缩值;  $\delta_2$  ——合理范围内谐波管理指标伸缩值。

相应目标的隶属度函数如图 2 所示, 其中,  $S$  为相应目标值;  $S_1$  为理想目标值;  $\delta$  为目标伸缩值。

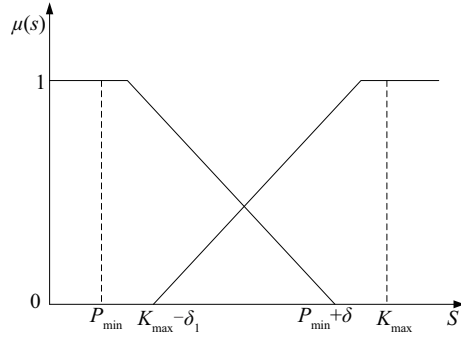


图2 各目标相应的隶属度函数

Fig. 2 Corresponding membership function of each target

综合考虑网络损耗和谐波管理指标, 加权求和法可将多目标优化转换为单目标优化问题, 建立分布式电源优化模型, 采用乌鸦搜索算法进行求解。这样原问题转化为求解在满足所有约束条件下的满意度  $\mu$  最大化的单目标非线性优化问题, 约束条件包括式(14)~式(16),  $\mu_{\max}$  的表达式为:

$$\mu_{\max} = k_1 \mu(K) + k_2 \mu(P) \quad (19)$$

式中,  $k_1$ 、 $k_2$  ——权重系数, 并满足  $k_1 + k_2 = 1$ ;  $\mu(K)$  ——谐波管理指标隶属度函数;  $\mu(P)$  ——网络损耗隶属度函数。

本文采用乌鸦搜索算法(crow search algorithm, CSA)来求解式(11)~式(19)的优化问题。CSA 假定存在包括若干乌鸦的  $d$  维空间, 乌鸦数(群体大小)为  $N$ , 在时间迭代过程中, 乌鸦  $g$  的位置在搜索空间由向量  $x^{g, iter}$  ( $g = 1, 2, \dots, N$ ;  $iter = 1, 2, \dots, iter_{\max}$ ) 指定, 其中  $x^{g, iter} = [x_1^{g, iter}, x_2^{g, iter}, \dots, x_d^{g, iter}]$ ,  $iter_{\max}$  是最大迭代次数。在迭代过程中, 乌鸦  $g$  的隐藏处的位置由  $m^{g, iter}$  表示, 这是目前乌鸦  $g$  获得的最佳的位置。

假设在迭代过程中, 乌鸦  $y$  要去它的隐藏位置  $m^{y, iter}$ , 在此迭代中, 乌鸦  $g$  决定跟着乌鸦  $y$  接近乌鸦  $y$  的隐藏处。在这种情况下, 可能发生 2 种状态:

状态 1: 乌鸦  $y$  不知道乌鸦  $g$  在跟踪它。结果, 乌鸦  $g$  会接近乌鸦  $y$  的隐藏处。在这种情况下, 乌鸦  $g$  的新位置:

$$x^{g, iter+1} = x^{g, iter} + r_i \times fl^{g, iter} \times (m^{y, iter} - x^{g, iter}) \quad (20)$$

式中,  $r_i$  ——0 和 1 之间均匀分布的随机数,  $fl^{g, iter}$  ——乌鸦  $g$  在迭代过程中的飞行距离。

状态 2: 乌鸦  $y$  知道乌鸦  $g$  在跟踪它。结果, 为了保护其储存不被窃取, 乌鸦  $y$  会在搜索空间中寻找另一个位置来愚弄乌鸦  $g$ 。

综上所述, 状态 1 和状态 2 可表示为:

$$x_{g,iter+1} = \begin{cases} x_{g,iter} + r_i \times fl^{g,iter} \times (m^{y,iter} - x_{g,iter}), & r_i \geq AP^{y,iter} \\ \text{随机位置}, & r_i < AP^{y,iter} \end{cases} \quad (21)$$

式中:  $r_i$  ——0 和 1 之间的均匀分布的随机数;  
 $AP^{y,iter}$  ——在迭代周期中,乌鸦  $y$  的感知概率。

CSA 流程:

#### 1) 初始化问题和调节参数

定义优化问题,决策变量和约束条件,对 CSA(群体大小( $N$ ),最大迭代次数( $iter_{max}$ ),飞行距离( $fl$ )和感知概率( $AP$ )的)可调参数进行估值。

#### 2) 初始化位置和对乌鸦的记忆

在  $d$  维搜索空间中随机放置  $N$  个乌鸦,作为群体的成员。每只乌鸦表示一个可行的问题解决方案, $d$  是决策变量的数量。

$$Crows = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_d^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_d^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^N & x_2^N & \dots & x_d^N \end{bmatrix} \quad (22)$$

每个乌鸦的记忆被初始化,由于在初次迭代时,乌鸦无经验,所以假设它们把食物隐藏在初始位置。

#### 3) 评估适应度(目标)函数

对于每个乌鸦,其位置的质量通过将决策变量值插入目标函数来计算。

#### 4) 生成新的位置

乌鸦在搜索空间中产生新的位置:假设乌鸦  $i$  想要生成一个新的位置,为达到这个目的,这只乌鸦随机选择一群乌鸦(例如乌鸦  $y$ ),并跟随它发现这只乌鸦( $m^y$ )隐藏的食物位置。乌鸦  $g$  的新位置由方程(19)确定。所有的乌鸦都重复此过程。

#### 5) 检查新位置的可行性

对每只乌鸦新位置的可行性进行验证。如果乌鸦的新位置可行,乌鸦会更新它的位置。否则,乌鸦停留在当前位置,不会移动到生成的新位置。

#### 6) 评估新位置的适应度函数

计算每只乌鸦新位置的适应度函数值。

#### 7) 更新记忆,乌鸦更新记忆为:

$$m^{g,iter+1} = \begin{cases} x^{g,iter+1}, & f(x^{g,iter+1}) > f(m^{g,iter+1}) \\ m^{g,iter+1}, & f(x^{g,iter+1}) \leq f(m^{g,iter+1}) \end{cases} \quad (23)$$

式中,  $f(\cdot)$  ——目标函数值。

结果表明,如果乌鸦的新位置的适应度函数值优于记忆位置的适应度函数值,则乌鸦用新位置更新其记忆。

#### 8) 检查终止标准

重复步骤 4)~步骤 7),直到达到  $iter_{max}$ 。当满足终止准则时,以目标函数值作为最佳解的最佳位置。

## 4 算例分析

图 3 所示的 IEEE33 节点配电网系统,额定电压为 12.66 kV,总负荷达到 3715+j2300 kVA,节点 33 个,其中包括 32 个 PQ 节点,支路共 37 条,其中包括 5 条为联络开关。计划接入的分布式电源数量为 4 个、功率因数  $\cos\varphi=0.85$ 、其总装机容量低于配电网总负荷的 25% 和总输出功率低于配电网的 20%,在节点 16、节点 21 和节点 24 处接入了三相整流负荷,作为 33 节点配电网系统谐波产生根源。本文在 Matlab 软件中应用 CSA 进行优化计算。设置 CSA 算法参数:维数  $d=30$ ,种群  $N=50$ ,迭代次数  $iter_{max}=500$ ,  $fl=2$ ,  $AP=0.1$  [5]。

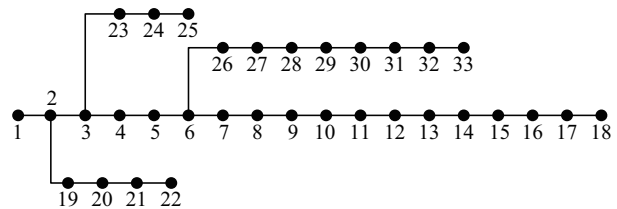


图3 33节点配电网系统

Fig. 3 33 node distribution network system

采用本文提出的方法,选择节点 3 作为电能质量管理目标节点,通过优化计算得到配电网节点  $h$  次谐波阻抗最大的前 4 个值分别为  $Z_{319}^h$ 、 $Z_{322}^h$ 、 $Z_{325}^h$ 、 $Z_{330}^h$ 。通过实时 FFT 模块进行分析,然后利用式(10)、式(11)对节点的谐波畸变率进行计算。采用 Matlab 工具软件对计及谐波指标影响的含分布式电源配电网多目标规划方法进行仿真。

从表 1 可看出,网络损耗指标作为对 DG 接入配电网进行选址与容量,其中给出了 18、21、25、32 节点的最优输出功率和安装容量,约占网络总负荷的 24.22%。

表1 网络损耗指标目标下的优化结果

Table 1 Network loss indicators objective optimization results

安装节点	网损指标	节点3谐波畸变率	最优输出容量/kW	安装容量/kW
18			99.641	100
21	0.369	0.065	145.416	200
25			319.839	400
32			178.104	200

从表 2 可看出,谐波管理指标作为对 DG 接入配电



网进行选址与容量,其中给出了 19、22、25、30 节点的最优输出功率和安装容量,约占网络总负荷的 24.22%。

表2 谐波管理指标目标下的优化结果

安装节点	网损指标	节点3谐波畸变率	最优输出容量/kW	安装容量/kW
19	0.486	0.003	291.175	300
22			56.903	100
25			192.027	200
30			202.914	300

从表3可看出,网络损耗指标和谐波管理指标多目标对 DG 接入配电网进行选址与容量的综合考量,其中给出了 18、25、30、32 节点的最优输出功率和安装容量,约占网络总负荷的 24.22%。

表3 多目标下的优化结果

安装节点	网损指标	节点3谐波畸变率	最优输出容量/kW	安装容量/kW
18	0.413	0.024	87.656	100
25			232.137	300
30			243.271	300
32			186.426	200

在多目标优化下 CSA 与标准粒子群算法的收敛结果如图4所示。由图4可知,CSA 迭代到约30次开始收敛,获得最优解,标准粒子群在约40次收敛。对比可知,CSA 在保证满意度前提下,加快寻优的收敛速度,提高了算法的寻优效率。

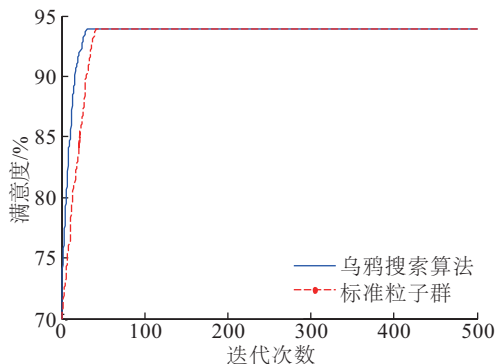


图4 多目标优化下不同算法收敛结果

Fig. 4 Convergence results of different algorithms under multiobjective optimization

为进一步验证该文方法的有效性,在 PSCAD/EMTDC 中按照本文多目标优化结果构建配电网搭建模

型,向 DG 注入电流中含有 3、5、7 次补偿性谐波电流进行时域仿真,其中给出节点 18 实时 FFT 模块分析,如 5 图所示。

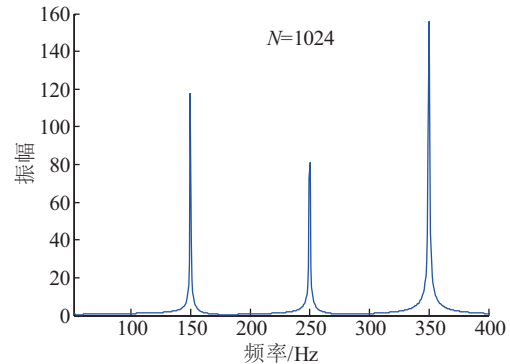


图5 节点18补偿电流实时FFT模块分析

Fig. 5 Node 18 compensation current real-time FFT module analysis

优化后目标节点3电压波形如图6所示。图6a为以网络损耗指标作为分布式电源接入优化的单一目标时节点3的三相电压波形,从图6a中可看出此时节点3的谐波畸变率为0.065,三相电压畸变水平较高。图6b为以谐波管理指标作为分布式电源接入优化的单一目标时节点3的三相电压波形,从图6b中可看出此时节点3的谐波畸变率为0.003,三相电压畸变水平较低。图6c为以网络损耗指标和谐波管理指标作为分布式电源接入优化的多目标时节点3的三相电压波形,从图6c中可看出此时节点3的谐波畸变率为0.024。其中以谐波管理指标作为分布式电源接入优化的单一目标时网络谐波指标最大,目标节点3的谐波畸变率最低。

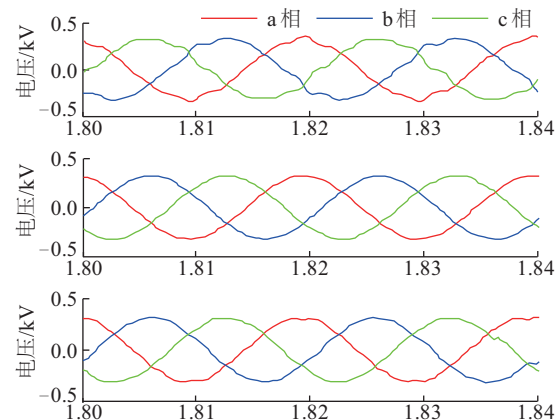


图6 优化后目标节点3电压波形

Fig. 6 Target node 3 voltage waveform after optimization

结合表1~表3和图6分析,从结果可看出,考虑网络损耗指标与谐波指标综合因素,采用本文优化模型优

化,系统网损指标为 0.413,比以网损指标最小(0.369)为目标时增加了 11.9%,比以谐波管理指标最大(0.486)为目标时降低了 17.6%,配电网网损水平比以网络损耗指标作为目标时有部分改善,比以谐波管理指标作为目标时有小幅降低。而节点 3 的谐波畸变率为 0.024 比以网络损耗指标最小为目标下减小了 63.07%,三相电压畸变水平比以网络损耗指标作为目标时有较大改善,比以谐波管理指标作为目标时有小幅度降低。

为验证该文优化方法的一般性,实验将节点 3 和节点 6 这 2 个节点同时作为电能质量管理的目标节点,进行配电网分布式电源选址定容,其他实验条件与单目标节点相同。实验结果如表 4 所示。可见在不同 DG 配置方案中,采用本文模型优化,比单一采取优化目标或 PSO 算法,更能有效的平衡降低网络损耗和谐波畸变率。

表 4 不同方法下 DG 优化配置情况

Table 4 DG configuration under different methods

DG 配置方案	DG 最优安装容量/kW (对应位置)	网损指标	目标节点 谐波畸变率/%	
			节点 3	节点 6
未优化	—	0.635	0.062	0.071
网络损耗指标单目标	99.64(18)	0.369	0.065	0.064
	145.40(21)			
	319.80(25)			
	178.10(32)			
谐波指标单目标	140.50(14)	0.453	0.006	0.002
	281.00(17)			
	174.30(30)			
	186.30(32)			
本文方法	114.10(14)	0.400	0.018	0.019
	271.20(18)			
	206.70(25)			
	85.670(32)			
PSO 算法	126.30(14)	0.424	0.027	0.022
	257.60(21)			
	232.60(25)			
	1003.50(32)			

## 5 结 论

本文针对分布式电源(DG)接入配电网对网络中各支路潮流的影响,建立分布式电源接入配电网优化的目标函数,综合考虑功率平衡约束、电压约束、容量约束及

DG 接入的总容量约束等约束条件,利用隶属度函数与 CSA 算法解决了不同目标不同量纲和优化的问题。通过仿真实验,得出了以下结论:

1)采用本文多目标优化方法,在同时考虑配电网网损与节点谐波畸变率时,其网损和目标节点谐波畸变水平平均比未优化时有较大改善。

2)与 PSO 算法对比可知,CSA 算法在保证满意度前提下,加快寻优的收敛速度,提高了算法的寻优效率。

3)本文方法具有普遍适用性,能实现多目标节点的管理,这便于从不同角度确定最佳配置方案,可为工程应用提供参考。

## [参考文献]

- [1] 王建,李兴源,邱晓燕. 含有分布式发电装置的电力系统研究综述[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 90-97.  
WANG J, LI X Y, QIU X Y, et al. Power system research on distributed generation penetration [J]. Automation of electric power systems, 2005, 29 (24): 90-97.
- [2] 杨琦,马世英,宋云亭,等. 分布式电源规划方案综合评判方法[J]. 电网技术, 2012, 36(2): 212-216.  
YANG Q, MA S Y, SONG Y T, et al. Comprehensive evaluation method for distributed power planning schemes [J]. Power system technology, 2012, 36 (2): 212-216.
- [3] 张翔,程浩忠,方陈,等. 考虑主动管理模式的多目标分布式电源规划[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48 (9): 1231-1238.  
ZHANG X, CHENG H Z, FANG C, et al. Multi-objective distributed power planning considering active management mode [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2014, 48(9): 1231-1238.
- [4] 李国庆,王鹤,张慧杰. 微电网中基于逆变电源控制的重要节点电能质量管理方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 177-184.  
LI G Q, WANG H, ZHANG H J. Power quality management method based on inverter source control for important node in microgrid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 177-184.
- [5] 李盛伟,李永丽,孙景钉,等. 基于逆变型分布式电源控制策略的微电网电能质量控制方法[J]. 电网技术, 2010, 34(8): 6-11.  
LI S W, LI Y L, SUN J L, et al. A power quality control algorithm for micro-grid based on control strategy of inverter interfaced distributed generator [J]. Power

- system technology, 2010, 34(8): 6-11.
- [6] 王志群, 朱守真, 周双喜, 等. 分布式发电接入位置和注入容量限制的研究[J]. 电力系统自动化学报, 2005, 17(1): 53-58.
- WANG Z Q, ZHU S Z, ZHOU S X, et al. Study on location and penetration of distributed generations [J]. Proceedings of electric power system and automation, 2005, 17(1): 53-58.
- [7] 钟嘉庆. 分布式发电注入容量与接入位置的优化配置分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 50-55.
- ZHONG J Q. Analysis of optimal configuration of distributed generation injection capacity and access location [J]. Power system protection and control, 2012, 40(7): 50-55.
- [8] ASKARZADEH A. A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: crow search algorithm [J]. Computers & structures, 2016, 169: 1-12.
- [9] 张沈习, 程浩忠, 邢海军, 等. 配电网中考虑不确定性的分布式电源规划研究综述[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(8): 1-9.
- ZHANG S X, CHENG H Z, XING H J, et al. Review of DG planning considering uncertainties for distribution network [J]. Electric power automation equipment, 2016, 36(8): 1-9.
- [10] FREITAS W, VIEIRA J C M, MORELATO A, et al. Influence of excitation system control modes on the allowable penetration level of distributed synchronous generators [J]. IEEE transactions on energy conversion, 2005, 20(2): 474-480.
- [11] CLAYTON N, EMERY N. Corvid cognition [J]. Current biology, 2005, 15(3): 80-81.

## MULTI-OBJECTIVE PLANNING WITH DISTRIBUTED POWER DISTRIBUTION NETWORK CONSIDERING INFLUENCE OF HARMONIC INDICATORS

Wang Limeng<sup>1</sup>, Sun Peiran<sup>1</sup>, Jiang Hongru<sup>2</sup>, Xu Chengzhe<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology,

Ministry of Education(Northeast Electric Power University), Jilin 132012, China;

2. State Grid Feixian Power Supply Company, Linyi 273400, China;

3. State Grid Jilin Power Supply Company, Changchun 130000, China)

**Abstract:** Distributed generation has significant impacts on power flow calculation and power quality management of distribution network, therefore, distributed generation planning has become an issue in research now. Distributed generation has the ability to assist management of power distribution harmonic, but management effect is closely related to the access of distributed generation. A method about multi-objective access of distributed generation planning is proposed in this paper. First of all, the power loss and node harmonic impedance matrix should be analyzed after the access of distributed generation; then the multi-objective optimization problem, with the goal of the least net loss and the highest harmonic management index, is taken as the satisfaction of optimization results, which is de-pending on the establishment of the membership function; finally, the improved crow search algorithm is used to solve this problem. The effectiveness of proposed method is verified by simulated analysis which is carried on IEEE 33 nodes power distribution network.

**Keywords:** distributed generation; distribution networks planning; multi-objective optimization; crow search algorithm; node harmonic impedance matrix