

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2014.09.025

基于谐波限值的分布式电源准入功率研究^{*}

朱海鹏¹, 郑 凯¹, 金立军^{2*}, 孙 浩²

(1. 山东电力集团公司 济宁供电公司, 山东 济宁 272001; 2. 同济大学 电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要:针对分布式电源接入配电网后会对电网电能质量产生不利影响的问题,对分布式电源的接入容量及位置进行了研究。在以配电网电能质量符合国家标准的前提下,采用一种结合人工蜂群算法的分布式电源准入功率最大化配置方法对分布式电源准入功率进行了计算。针对多种分布式电源接入配电网的情况,首先分析了不同接入位置 and 不同容量的分布式电源对电网的影响;然后考虑了分布式电源对配电网电压偏差和谐波的影响;最后利用算例对优化配置方法的可行性进行了测试,确定了分布式电源接入配电网的优化配置方案。研究结果表明,该优化方案能够达到优化目标,满足电压调整和谐波畸变限制的约束条件,最大化地提高分布式电源准入功率,同时为分布式电源最佳接入点提供参考。

关键词:分布式电源;谐波限值;准入功率;人工蜂群算法

中图分类号:TM74

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2014)09-1218-05

Study of distributed generation penetration level based on harmonic limitation

ZHU Hai-peng¹, ZHENG Kai¹, JIN Li-jun², SUN Hao²

(1. Shandong Electric Power Corporation, Jining Power Supply Company, Jining, 272001, China;

(2. School of Information Engineering, Tongji University, Shanghai, 201804, China)

Abstract: Aiming at the harmonic problem of the distributed generation (DG) connected with power distribution network, the capacity and installation of DG in power distribution network were studied. The DG penetration levels were calculated by artificial bee colony (ABC) algorithm in compliance with the limitation of harmonics in GB/T14549-1993. The impact of harmonic injection on power distribution network caused by capacity and installation of DG was analyzed; The limitations in compliance with the requirements of voltage regulation and harmonic distortion were determined; The DG penetration level was calculated complying with the limitation of harmonics by ABC algorithm. The results indicate that, the method for calculating DG penetration level can achieve the optimization goal, satisfy the constraint voltage adjustment and harmonic distortion limits, maximize access power distributed power, and provide the reference for the distributed power supply the best integration point.

Key words: distributed generation (DG); harmonic limitation; penetration level; artificial bee colony algorithm

0 引 言

当今,随着传统能源不断消耗殆尽,环境问题日益凸显,世界各国都在迫切地寻求一个环保并且灵活的

方式解决环境和能源问题。分布式电源^[1]可以任意接入,实现灵活而高效地利用清洁能源,因此分布式能源已经成为各国电力系统研究领域的热点。然而,分布式电源的引入直接影响了传统配电网的结构及控制

收稿日期:2013-10-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51177109)

作者简介:朱海鹏(1971-),男,山东济宁人,硕士,高级工程师。主要从事电力系统自动化方面的研究。E-mail:zhuhp7111@126.com

通信联系人:金立军,男,教授,博士生导师。E-mail:jlinlj@tongji.edu.cn

方式,给电网的安全运行和电能质量带来了新的挑战:对电网潮流、网损及动态稳定性产生影响^[2],特别是逆变型分布式电源,会向电网注入一定量谐波电流^[3],谐波电流还会导致线路发热和设备故障。因此,在分布式电源安装之前,需要通过合理地规划,在满足谐波要求限制的基础上,尽可能充分利用分布式电源。

文献[4]通过试凑法确定不同位置的分布式电源容量,通过逐渐增加分布式电源容量直到其注入谐波达到限值,以此来确定准入功率最大值。文献[5]以谐波限值为依据,在一个简单的电网模型中,确定负载在线性增加或减少情况下的最大准入功率。文献[6]作为人工蜂群算法的研究综述,比较了人工蜂群算法、遗传算法、蚁群算法和粒子群算法的优缺点适用范围及性能。文献[7]利用人工蜂群算法,在考虑网络安全约束的基础上,解决风电田中风力发电机组组合优化问题。

本研究以 GB/T14549-1993^[8] 标准为依据,提出一种分布式电源规划方法,在满足分布式电源谐波准入限值的基础上,利用人工蜂群算法确定一个最优的分布式电源位置和容量的分布方案,使得分布式电源总注入功率最大。

1 分布式电源对谐波分布的影响

1.1 谐波潮流计算

谐波潮流是通过解耦谐波潮流算法 (Decoupled Harmonic Power Flow, DHPF) 计算得到。谐波解耦算法忽略谐波间的耦合关系,直接利用基波潮流计算电网中各次谐波响应,然后将各次谐波相加就是电网谐波潮流计算的结果。本研究首先利用潮流计算方法获得电网的基波潮流,然后利用谐波阻抗矩阵计算出各节点的各次谐波含量。假设分布式电源的逆变器内阻无穷大,其向电网注入的谐波电流的幅值与基波电流的幅值线性相关,这一关系可由逆变器谐波频谱获得。

六脉波逆变器的谐波频谱^[9]如表1所示,其中给出了各次谐波幅值占基波幅值的百分比。

表1 六脉波分布式电源谐波频谱						
谐波次数	11	13	17	19	23	25
六脉波 (%)	9.1	7.7	5.9	5.3	4.3	4.0
谐波次数	29	31	35	37	43	49
六脉波 (%)	3.4	3.2	2.8	2.7	2.3	2.0

1.2 仿真分析

针对分布式电源谐波对配电网的影响,本研究结

合仿真算例进行分析^[10]。算例采用的十六节点链式配电网的负荷模型如图1所示。

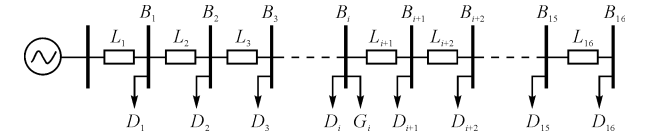


图1 十六节点链式配电网的负荷模型
 B_i, L_i, D_i, G_i —节点编号、线路阻抗、负载和分布式电源

为研究分布式电源容量及位置变化对谐波分布的影响,笔者在配电网1~16各个节点处,依次放置一个逆变型分布式电源。其容量占配电网负载容量的比例逐渐增加,从2% (容量1) 依次增加至20% (容量2)、50% (容量3)、100% (容量4)。电网的总谐波畸变率变化如图2所示。

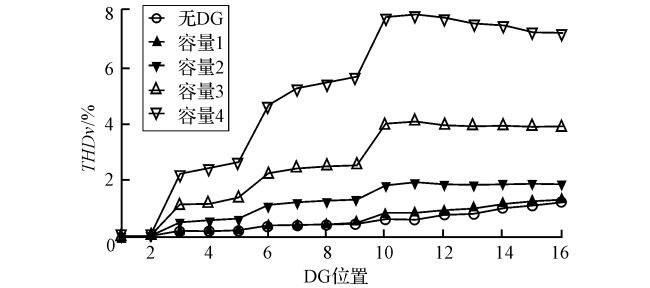


图2 分布式电源容量变化对谐波分布的影响

通过仿真分析,可以看出:
(1) 分布式电源接入位置确定时,馈线上电压畸变受分布式电源的容量的影响。分布式电源容量所占比例越高,馈线各节点电压谐波畸变率就越大。
(2) 分布式电源容量确定时,分布式电源接入位置越接近系统母线,分布式电源接入点与母线间的电压畸变越大,分布式电源接入节点与线路末端间的电压畸变越小;分布式电源越接近线路末端,分布式电源接入点与母线间的电压畸变越小,分布式电源接入点到线路末端间的电压畸变越大。

2 优化问题模型分析

最大准入功率计算要求在满足谐波约束条件下,获得分布式电源有功出力之和最大。因此,目标函数为:

$$F = \max \sum_{i=1}^N (P_{DG,i}) \quad (1)$$

式中: N —系统总节点数; $P_{DG,i}$ —在节点*i*处分布式电源注入的有功功率,若节点*i*处无分布式电源,则 $P_{DG,i}=0$ 。

2.1 等式约束

电网安全稳定运行时,含分布式电源的配电网各

节点都必须满足有功功率方程、无功功率方程。因此,本研究中等式约束为潮流方程,如下式所示:

$$P_{G,i} - P_{D,i} - V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) = 0 \quad (2)$$

$$Q_{G,i} - Q_{D,i} - V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \delta_{ij} + B_{ij} \cos \delta_{ij}) = 0 \quad (3)$$

式中: $P_{G,i}, Q_{G,i}$ —节点 i 处分布式电源的基波有功功率和无功功率; $P_{D,i}, Q_{D,i}$ —节点 i 处负载消耗的基波有功功率和无功功率; δ_{ij} —节点 i 和节点 j 之间电压的相角差; V_i —节点 i 处的电压幅值; G_{ij}, B_{ij} —节点 i 和节点 j 之间的互电导和互电纳。

2.2 不等式约束

不等式约束包括电压偏差约束、总谐波畸变和单次谐波畸变约束。电压偏差约束中,各节点电压幅值满足如下不等式:

$$V_N(1 - \varepsilon_1) \leq V_{rms,i} \leq V_N(1 + \varepsilon_2) \quad (4)$$

式中: V_N —系统标称电压; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ —GB/T12325-2008^[11]规定的允许偏差值。按照 GB/T14549-1993 的要求, 10 kV 系统中总谐波电压畸变被限制在 4% 之内, 如下式所示:

$$THD_{V,i} \leq THD_{V,max} \quad (5)$$

式中: $THD_{V,max}$ —可接受的最大谐波电压畸变率。单次电压畸变被限值在 1.6% 之内, 如下式所示:

$$IHD_{V,i}^k \leq IHD_{V,max}^k \quad (6)$$

式中: $IHD_{V,max}^k$ —可接受的最大单次谐波电压畸变率。

3 基于人工蜂群算法的分布式电源规划

3.1 人工蜂群算法

作为启发式优化算法,人工蜂群(Artificial Bee Colony, ABC)算法于 2005 年由 Karaboga 提出用于解决数值优化问题。它受启发于蜜蜂的觅食行为,主要基于 Tereshko 和 Loengarov 提出的蜂群觅食行为模型。人工蜂群算法包括蜜源和 3 种类型的蜜蜂:雇佣蜂、跟随蜂和侦查蜂^[12]。

(1)蜜源:即可以产出蜂蜜的花朵,可以获得其位置和质量。蜜源位置 $x_i = [x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{ij}]$ 代表优化问题的一个可行解,其中每个元素代表待优化的参数。用适应度(fitness)表征蜜源的价值,适应度越大表示蜜源的质量越好,也越能吸引更多的蜜蜂。适应度由以下公式获得:

$$fitness_i = F = \max \sum_{i=1}^N (P_{DG,i}) \quad (7)$$

式中: $fitness$ —第 i 个蜜源的适应度; F —这个蜜源对应的分布式电源配置方案下的准入功率。

(2)雇佣蜂:即已经找到蜜源的蜂蜜。一个雇佣蜂对应一个被发现的蜜源,这个雇佣蜂记录了对应蜜源的位置和质量信息,并将这些信息以一定的概率分享给跟随蜂。跟随概率 p_i 与蜜源的适应度有关,可以通过下式获得:

$$p_i = \frac{fitness_i}{\sum_{i=1}^{E_b} fitness_i} \quad (8)$$

因此,跟随蜂利用式(8)随机跟随雇佣蜂,可使优质的蜜源吸引更多的蜜蜂,加快寻找最优蜜源的速度。

(3)跟随蜂:在蜂巢内等待的蜜蜂。跟随蜂在蜂巢内等待雇佣蜂分享其对应蜜源的质量信息,然后根据蜜源质量按一定概率随机选择跟随哪个雇佣蜂。

(4)侦查蜂:负责随机搜索蜂巢附近是否有新的蜜源。当雇佣蜂因持续无法在蜜源附近找到更优的蜜源时,便转变成侦查蜂;当侦查蜂找到新蜜源时,其转变为雇佣蜂。

人工蜂群算法优化过程如图 3 所示。首先,系统初始化蜜源,随机为雇佣蜂分配蜜源 $x_i (i = 1, 2, 3, \dots, E_b)$, 其中, E_b —雇佣蜂数量。初始化后,雇佣蜂前往蜜源获取蜜源信息,并利用下式在已知蜜源周围产生一个新蜜源:

$$x_{ij}^{new} = x_{ij}^{old} + u(x_{ij}^{old} - x_{kj}) \quad (9)$$

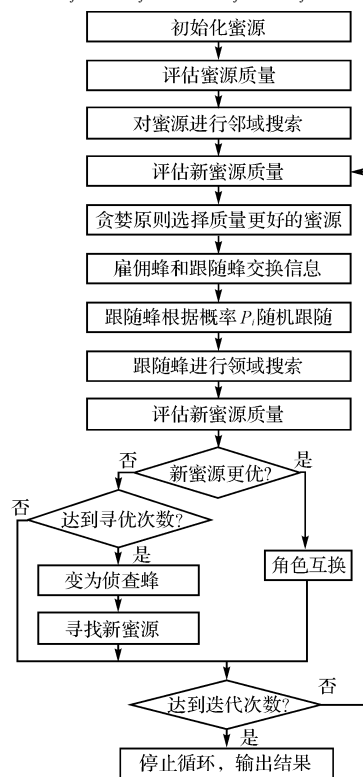


图 3 人工蜂群算法优化过程的流程图

此后,雇佣蜂采用贪婪原则,比较原蜜源和新蜜源的适应度,选择记住质量更好的蜜源。然后,雇佣蜂和

跟随蜂交换蜜源信息。每一个跟随蜂按照蜜源质量及概率随机跟随雇佣蜂去其蜜源进行邻域搜索,如果搜索的新蜜源质量更差,跟随蜂返回蜂巢继续等待;如果新蜜源质量更好,跟随蜂与雇佣蜂角色互换。在雇佣蜂邻域搜索过程中,其持续无法在蜜源附近找到更优的蜜源时,便转变成侦察蜂,利用下式随机搜寻新蜜源。

$$x_{ij}^{\text{new}} = \min(x_{ij}) + u[\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})] \quad (10)$$

式中: u ——一个在-1和+1之间的随机数。

如此重复上述循环即可获得优化问题的解。

3.2 算例仿真

本研究将原有16节点配电网改成树状结构,系统容量15 MVA,非线性负载3 MW。

笔者采用 Matlab 软件编写了基于人工蜂群算法的分布式电源准入功率优化配置程序。首先在只有一个分布式电源接入的情况下,通过计算得到了16节点网络中,分布式电源接入各节点后的最大准入功率分布如图4所示,图4中显示,在节点1处获得的最大准入功率为23.16%。

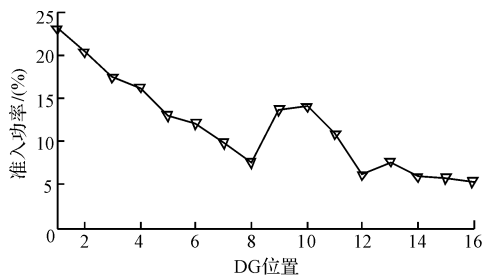


图4 十六节点配电网最大准入功率分布

在蜂群算法迭代过程中,最佳适应度与迭代数的关系如图5所示。在优化初期阶段,适应度增长很快,算法效率较高;在计算至准入功率20 MW之后,由于搜索的领域内数值相差较小,优化过程缓慢,在迭代次数内,能够达到最优解。

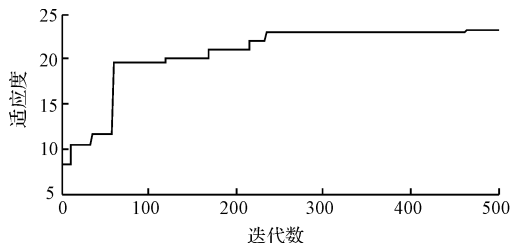


图5 最佳适应度变化曲线

现在假设系统存在2个分布式电源,通过人工蜂群算法配置最佳接入点及接入容量。多分布式电源接入最优节点如图6所示,深黑色为分布式电源1和2的最佳接入点,对系统的影响最小。可见,在配电线路中间位置接入分布式电源能够满足约束条件,同时分支线路过多也对分布式电源的接入有不利影响。经过优化配置,2组分布式电源接入系统的总准入容量为23.54%,比单组DG接入更优,从而提高了利用可再生能源利用率。

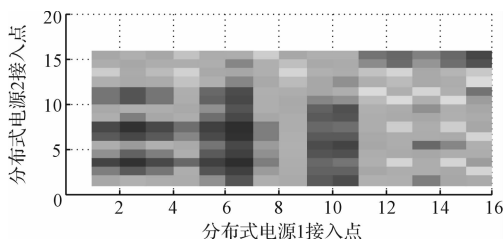


图6 多分布式电源接入最优节点

4 结束语

笔者深入研究了不同类型,不同并网点和容量的分布式电源接入配电网后的整体谐波分布特征,在分布式电源并网前、后配电网需要满足电压调整约束和谐波畸变约束条件的情况下,提出了基于人工蜂群算法的分布式电源优化配置方法。该配置方法将人工蜂群算法与分布式电源配置问题相结合,配置时通过初始值选择和领域搜寻达到最优解,在能够确保准确性的同时,缩短运行时间。

本研究提出的分布式电源优化配置方法能够对单点接入和多点接入的分布式电源位置和容量进行最优配置,使配电网始终满足电压及谐波限值要求,通过理论分析和仿真算例证明,该方案具有良好的可行性和有效性。

参考文献 (References):

- [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.
- [2] TIRONI E, BRENNAN M, FARANDA R. Constraints for the Interconnection of Distributed Generation in Radial Distribution Systems[C]//10th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Janeiro: [s. n.],2002:310-315.

(下转第1230页)

本文引用格式:

朱海鹏,郑凯,金立军,等. 基于谐波限值的分布式电源准入功率研究[J]. 机电工程,2014,31(9):1218-1221,1230.

ZHU Hai-peng, ZHENG Kai, JIN Li-jun, et al. Study of distributed generation penetration level based on harmonic limitation[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(9):1218-1221,1230.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

参考文献 (References) :

[1] 罗 元,谢 彧,张 毅. 基于 Kinect 传感器的智能轮椅手势控制系统的设计与实现[J]. 机器人,2012,34(1): 110-113,119.

[2] WILSON A. Using a Depth Camera as Touch Sensor[C]// ITS'10 ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces. Kobe: [s. n.],2010:69-72.

[3] KEMURA S, FUJIYOSHI H. Real-time Human Detection using Relational Depth Similarity Features[C]// with ACCV. New Zealand:[s. n.],2011,25-38.

[4] URTASUN R, FUA P. 3D Human Body Tracking using Deterministic Temporal Motion Models[C]// European Conference on Computer Vision Prague:[s. n.],2004:92-106.

[5] 张 毅,张 烁,罗 元,等. 基于 Kinect 深度图像信息的手势轨迹识别及应用[J]. 计算机应用研究,2012,29(9):3547-3550.

[6] 余 涛,叶金永,邵菲杰,等. Kinect 核心技术之骨架追踪技术[J]. 数字技术与应用,2012(10):115.

[7] 程 晨. Arduino 开发实战指南[M]. 北京:机械工业出版社,2012.

[8] 沈卓民,姜周曙,黄国辉. 基于 ZigBee 的太阳能集热器无线跟踪系统[J]. 机电工程,2012,29(10):1228-1231.

[9] 李 备,张茂青,丁国强,等. 基于 TMS320F28027 的无线测温系统设计[J]. 机电信息,2013(30):126-127.

[10] 余 涛. Kinect 应用开发实战:用最自然的方式与机器对话[M]. 北京:机械工业出版社,2012.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

张 鑫,徐文胜,刘阶萍,等. 基于 Kinect 的智能花盆体感控制系统研究[J]. 机电工程,2014,31(9):1226 - 1230.

ZHANG Xin, XV Wen-sheng, LIU Jie-ping, et al. Research on intelligent flowerpots control system based on Kinect[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014,31(9):1226 - 1230.

《机电工程》杂志;http://www.meem.com.cn

(上接第 1221 页)

[3] SIMIN D, YINLI H, JUNFANG Z. Research on Distributed Generation Source Placement[C]//SUPERGEN '09. International Conference on Sustainable Power Generation and Supply. Naning: [s. n.],2009:1-4.

[4] HUIZHU D, JUN L, HONG S. Calculation of wind power penetration based on power system transient stability analysis [J]. **Power System Technology**,2002,26(8):8-11.

[5] BHOWMIK A, MAITRA A, HALPIN S M. Determination of allowable penetration levels of distributed generation resources based on harmonic limit considerations[J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**,2003,18(2):619-624.

[6] 张超群,郑建国,王 翔. 蜂群算法研究综述[J]. 计算机应用研究,2011,28(9):3201-3214.

[7] 岳云力. 基于改进人工蜂群算法的机组组合优化方法[D]. 杭州:浙江大学机械工程学院,2012.

[8] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. GB/T14549-1993. 电能质量公用电网谐波[S]. 北京:中国标准出版社,1993.

[9] MASOUM A S, LADJAVARDI M, ISLAM S. Impact of a SG Nonlinear Model on the Harmonic Distortion of a Distribution Generation System[C]// 2008 Australasian Universities Power Engineering Conference. Sydney: [s. n.],2008:1-6.

[10] 江 南,龚建荣,甘德强. 考虑谐波影响的分布式电源准入功率计算[J]. 电力系统自动化,2007,31(3):19-23.

[11] 全国电压电流等级和频率标准化技术委员会. GB/T12325-2008. 电能质量-供电电压偏差[S]. 北京:中国标准出版社,2008.

[12] ROY A K, HUSSAIN I. Optimal Distributed Generation Allocation in Distribution Systems Employing Modified Artificial Bee Colony Algorithm to Reduce Losses and Improve Voltage Profile[C]// 2012 International Conference on Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM). Nagapptinam: [s. n.],2012:310-315.

[编辑:李 辉]