

文章编号: 1005-0523(2013)02-0085-05

基于分层分区模型的分布式电源分布优化

彭春华, 齐彦伟, 陈首昆

(华东交通大学电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 在含分布式电源的配网规划中, 分布式电源模型的建立、潮流计算方法的选择和优化算法的运用, 对优化结果至关重要。在配网分布式电源三类传统模型基础上, 为便于计算支路电流, 对含分布式电源的支路引入新模型——分层分区 DG 模型; 基于新模型, 分析了各种潮流算法, 结合含分布式电源的配网特点, 改良了推回代潮流计算; 最后通过微分进化算法, 以网损最小为目标, 对计算结果进行优化, 得出配网电源的最优位置和容量。

关键词: 分布式电源; 潮流计算; 前推回代; 配电网

中文分类号: O346.1

文献标志码: A

分布式发电 (distributed generation, DG) 作为新生事物, 其电力就地生产、就地消费, 与传统电网结合, 可整合现有资源, 为用户提供多样可靠的供电^[1]。随着分布式发电的理论研究和运行实践不断深入, 新设备新技术的应用和国家对清洁能源的重视, 分布式发电正逐步渗入传统电网中。同时, 分布式电源无序的接入, 使配网演变为多电源网络, 对其潮流走向、无功电压、故障检测等产生影响^[2-4]。众多不利的因素又制约着分布式发电不能直接使用。因此, 分布式电源分布和容量规划的优化尤为重要。

本文通过含分布式电源的配网潮流计算, 在不影响潮流走向、故障检测情况下 (通过约束条件, $s_{DG} \leq s_{load}$), 以网损最小为目标, 利用微分进化算法对电网规划中分布式电源的容量和位置进行优化 (后续进行以网损和电压为目标的综合优化)。

1 分层分区模型

1.1 含分布式电源的支路引入新的模型

配网中分布式电源的传统模型基本上可分为 3 类: P, Q 恒定模型; P, V 恒定模型; P 恒定 $Q=f(v)$ 模型^[12]。在前推回代法中为便于计算支路电流, 本文对含分布式电源的支路引入新模型:

以一条 10 kV 馈线 i 为一个分布式发电单元, 如图 1 所示, 馈线上的用电负荷为 $s_{load \cdot i}(t)$, 分布式电源功率为 $s_{DG \cdot i}(t)$, 则馈线 i 需从外界吸收的功率 $s_i(t)$ 为: $s_i(t) = s_{load \cdot i}(t) - s_{DG \cdot i}(t)$ 。其中, 吸收的功率 $s_i(t)$ 为正, 表示 $s_{load \cdot i}(t) > s_{DG \cdot i}(t)$; 吸收的功率 $s_i(t)$ 为负, 表示 $s_{load \cdot i}(t) < s_{DG \cdot i}(t)$; 分布式电源功率为 $s_{DG \cdot i}(t)$ 为正, 表示分布式电源发出功率; 分布式电源功率为 $s_{DG \cdot i}(t)$ 为负, 表示分布式电源吸收功率; 分布式电源功率为 $s_{DG \cdot i}(t)$ 为零, 表示分布式电源发出功率为 0 或馈线 i 没有分布式电源。

以一个区 j 为例, 如图 2 所示, 区 j 的用电负荷为 $s_{load \cdot j}(t)$, 该区的电源功率为 $s_{G \cdot j}(t)$, 分布式电源的功率为 $s_{DG \cdot j}(t)$, 波动比例系数为 $\lambda_j(t)$, 则区 j 需从外界

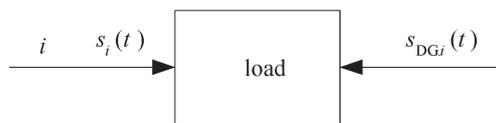


图 1 含分布式电源的馈线潮流
Fig.1 Power flow of a branch with distributed power supply

收稿日期: 2013-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51167005); 江西省自然科学基金项目 (GJJ12288)

作者简介: 彭春华 (1973—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为电力系统及其自动化。

吸收的功率 $s_j(t)$ 为

$$s_j(t) = [s_{\text{load}\cdot j}(t) - s_{\text{DG}\cdot j}(t) - s_{G\cdot j}(t)] \cdot [1 - \lambda_j(t)]$$

其中: $s_{\text{load}\cdot j}(t) = \sum_{i=1}^n s_{\text{load}\cdot i}(t)$; $s_{\text{DG}\cdot j}(t) = \sum_{i=1}^n s_{\text{DG}\cdot i}(t)$ 。

以此类推。以一配网 k 为例,如图3所示,配网 k 需从外界吸收的功率,该区的电源功率为 $s_{G\cdot j}(t)$,分布式电源的功率为 $s_{\text{DG}\cdot j}(t)$,波动比例系数为 $\lambda_j(t)$,则区 j 需从外界吸收的功率 $s_j(t)$ 为:即从主网的传输功率 $s_k(t)$ 为

$$s_k(t) = [s_{\text{load}\cdot k}(t) - s_{\text{DG}\cdot k}(t) - s_{G\cdot k}(t)] \cdot [1 - \lambda_k(t)]$$

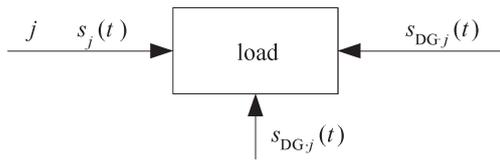


图2 含分布式电源的地区潮流

Fig.2 Power flow of a district with distributed power supply

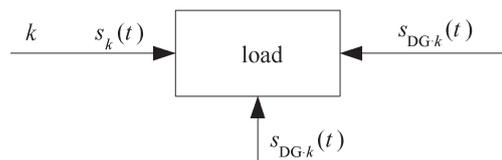


图3 含分布式电源的地区潮流

Fig.3 Power flow of a distribution network with distributed power supply

1.2 分布式电源功率模型

$$s_{\text{DG}\cdot i}(t) = \lambda_1(t) \cdot s_{s\cdot i}(t) + \lambda_2(t) \cdot s_{w\cdot i}(t) + \lambda_3(t) \cdot s_{g\cdot i}(t) + \lambda_4(t) \cdot s_{t\cdot i}(t) + \lambda_5(t) \cdot s_{f\cdot i}(t) + \lambda_6(t) \cdot s_{b\cdot i}(t) \quad (1)$$

式中: i 为一个分布式发电单元; n 为某个区域内分布式发电单元的个数; $s_{s\cdot i}(t)$ 为第 i 个单元的单位太阳能光伏电池在 t 时刻的功率; $s_{w\cdot i}(t)$ 为第 i 个单元的单位风力机组在 t 时刻的功率; $s_{g\cdot i}(t)$ 为第 i 个单元的单位燃气轮机在 t 时刻的功率; $s_{t\cdot i}(t)$ 为第 i 个单元的单位火电机组在 t 时刻的功率; $s_{f\cdot i}(t)$ 为第 i 个单元的单位燃料电池在 t 时刻的功率; $s_{b\cdot i}(t)$ 为第 i 个单元的蓄电池在 t 时刻的功率; t 取 0~24 h; $\lambda_m(t)$ 为每个单元内第 m 型分布式电源在 t 时刻的比例系数。本文针对某一时刻的分布式电源优化,以上均视为非变量。

2 潮流计算

在含分布式发电的配电网中,需要对系统网耗计算以得出网损较小的分布式电源点配置方案,配电网常用的潮流计算有牛顿拉夫逊法^[5-6]、前推回代法^[7]等,具体可参阅文献[8-17]。由于前推回代法性能高、编程简单、收敛速度快、计算效率高,程序不需要对节点做特殊处理,本文选择前推回代法用于计算网络损耗。

前推回代法计算,采用支路电流计算,基本步骤如下:

1) 初始化。初始化数据,生成 S_i , V_i , Y_i 初始矩阵,迭代一次生产 I_i 初始值。其中: S_i 为节点 i 分布式电源功率; V_i 为节点 i 电压值; Y_i 为节点 i 导纳; I_i 为节点 i 注入电流。

2) I_i 计算

$$I_i^k = (S_i / V_i^{k-1})^* - Y_i^* V_i^{k-1} \quad (2)$$

式中: V_i^{k-1} 为第 $k-1$ 次迭代值。

3) 支路电流 I_L 计算。从支节点到根节点,支路 L 上的电流

$$I_L^k = -I_j^k + \sum I_m \quad (3)$$

式中: I_L^k 为支路电流第 k 次迭代值; I_j^k 为节点注入电流第 k 次迭代值; $\sum I_m$ 为节点电流总和,输出为正,

输入为负, m 为与节点相邻的支路数。

4) 节点电压计算。从根节点到支节点

$$V_j^k = V_i^k - Z_L I_L^k \quad (4)$$

式中: V_j^k 为节点电压第 k 次迭代值; Z_L 为支路阻抗值。

5) 判收敛。迭代后,以节点功率差判断是否收敛

$$\Delta S_i^k = V_i^k (I_i^k)^* - Y_i^* |V_i^k|^2 - S_i \quad (5)$$

如果 $\Delta S_i^k \leq \varepsilon$ 重新迭代,直到收敛条件满足为止。

3 微分进化算法优化

微分进化(differential evolution)算法,其主要特点是收敛速度快、可调参数少、鲁棒性好、算法简单^[13],近些年逐渐被人们所接受,成为研究的热点之一。基本微分进化的变异算子是从当前种群中选取的两个或多个任意个体做差值运算,并乘以系数得到的。

3.1 变异算子

目标向量表示为 $\mathbf{x}_i = (\mathbf{x}_{0,i}, \dots, \mathbf{x}_{N-1,i})^T$, 试验向量表示为 $\mathbf{v}_i = (\mathbf{v}_{0,i}, \dots, \mathbf{v}_{N-1,i})$, $i=0, 1, \dots, N_p-1$, N 是目标向量的维数。下标 G 表示代数。常用算子

1) 最优算子1

$$\text{DE/best/1: } \mathbf{v}_{i,G} = \mathbf{x}_{\text{best},G} + F(\mathbf{x}_{r2,G} - \mathbf{x}_{r3,G}) \quad (6)$$

2) 随机算子1

$$\text{DE/rand/1: } \mathbf{v}_{i,G} = \mathbf{x}_{r1,G} + F(\mathbf{x}_{r2,G} - \mathbf{x}_{r3,G}) \quad (7)$$

3) 随机最优算子1

$$\text{DE/rand-to-best/1: } \mathbf{v}_{i,G} = \mathbf{x}_{i,G} + F_1(\mathbf{x}_{\text{best},G} - \mathbf{x}_{i,G}) + F_2(\mathbf{x}_{r1,G} - \mathbf{x}_{r2,G}) \quad (8)$$

4) 最优算子2

$$\text{DE/best/2: } \mathbf{v}_{i,G} = \mathbf{x}_{\text{best},G} + F(\mathbf{x}_{r1,G} + \mathbf{x}_{r2,G} - \mathbf{x}_{r3,G} - \mathbf{x}_{r4,G}) \quad (9)$$

5) 随机算子2

$$\text{DE/rand/2: } \mathbf{v}_{i,G} = \mathbf{x}_{r1,G} + F(\mathbf{x}_{r2,G} + \mathbf{x}_{r3,G} - \mathbf{x}_{r4,G} - \mathbf{x}_{r5,G}) \quad (10)$$

这里, $r1, r2, r3, r4, r5$, 为介于 $1 \sim N_p$ 之间的随机整数; F 为比例因子, 表示变异大小的控制参数。 $r1, r2, r3, r4, r5$ 分别选取不同的值, 其值与 i 不等。

3.2 交叉算子

变异操作结束后,目标向量与其它变异向量进行交叉操作,交叉方式

$$\mathbf{u}_i = (\mathbf{u}_{0,i}, \dots, \mathbf{u}_{N-1,i})^T \quad (11)$$

$$\mathbf{u}_{j,i,G} = \begin{cases} \mathbf{v}_{j,i,G}, & (\text{rand}_j[0, 1] \leq CR) \text{ or } (j = j_{\text{rand}}) \\ \mathbf{x}_{j,i,G}, & \end{cases} \quad (12)$$

式中: $j=0, 1, \dots, N-1$; $CR \in [0, 1]$; $j_{\text{rand}} \in [0, N-1]$ 。

CR 是交叉因子,其决定微分进化算法收敛速度和鲁棒性,其值越大算法收敛越快,其值越小鲁棒性越好。

3.3 选择算子

接着进入选择操作,算子表达式为

$$\mathbf{x}_{j,i,G} = \begin{cases} \mathbf{u}_{j,G}, & f(\mathbf{u}_{j,G}) < f(\mathbf{x}_{i,G}) \\ \mathbf{x}_{i,G}, & \end{cases} \quad (13)$$

如果目标向量值超过了设定值域,该参数将在设定值域内重新随机生成,然后计算目标向量适应度,与本代的适应度相比较,将最优的适应度值取代当前值。

3.4 实例仿真

本文以 IEEE33 节点的配网为例,基准电压为 12.66 kV,共有 37 条支路,33 个节点,总共负荷 3.715 MW+2.3 Mvar,选择接入的分布式电源的个数为 2。再利用枚举算法,对 C_{33}^2 (528) 个组合分别利用微分进化算法进行容量优化,如图 4 所示。

1) 模型。以网损为最小目标

$$\min f = \sum_{i=1}^{37} r_i \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_i^2} \quad (14)$$

式中: f 为网损,可通过潮流计算求得;37 为支路总数; r_i 为第 i 条支路的电阻; P_i, Q_i 为支路 i 末端的有功功率和无功功率; U_i 为第 i 条支路的节点电压。

2) 约束条件。配网中共接入 2 个 DG,每个 DG 的容量小于接入点负荷,选取 DG 的有功功率 $P_{DG} \leq P_{load}$,无功功率通过公式 $Q_{i,DG} = \sqrt{I_i^2 V_i - P_{DG}}$ 。

3) 求解。任选一组合 {32,30} 为例,种群数量为 10,最大迭代次数为 10。

DE 算法中:设 $\mathbf{x}_{r,G} = [\mathbf{x}_{r1,G}, \mathbf{x}_{r2,G}]$ 为第 G 代的第 r 个体,其值为两个位置的分布式电源的容量。采用算子 $\mathbf{v}_{i,G} = \mathbf{x}_{best,G} + F(\mathbf{x}_{r2,G} - \mathbf{x}_{r3,G})$,式中 $\mathbf{v}_{i,G}$ 为 $\mathbf{x}_{r,G}$ 变异后的向量; $\mathbf{x}_{r2,G}, \mathbf{x}_{r3,G}$ 为第 G 代中的第 2 个随机个体; $\mathbf{x}_{best,G}$ 为第 G 代中最优值。

交叉操作将变异向量 $\mathbf{v}_{i,G}$ 和目标向量 $\mathbf{x}_{r,G}$ 进行交叉,生成 $\mathbf{u}_{j,i,G}$ 。其中交叉概率 CR 取 1。

DE 算法通过“优胜劣汰”选择操作不断向最优解进化。

仿真结果优化了不同节点组合的最优容量值,而且找出了最优的组合。在不同的节点装入分布式电源网损有明显的差别,网损最大 197.3914 kW,最小为 156.089 kW,其中网损最小的位置在 {32,30}。

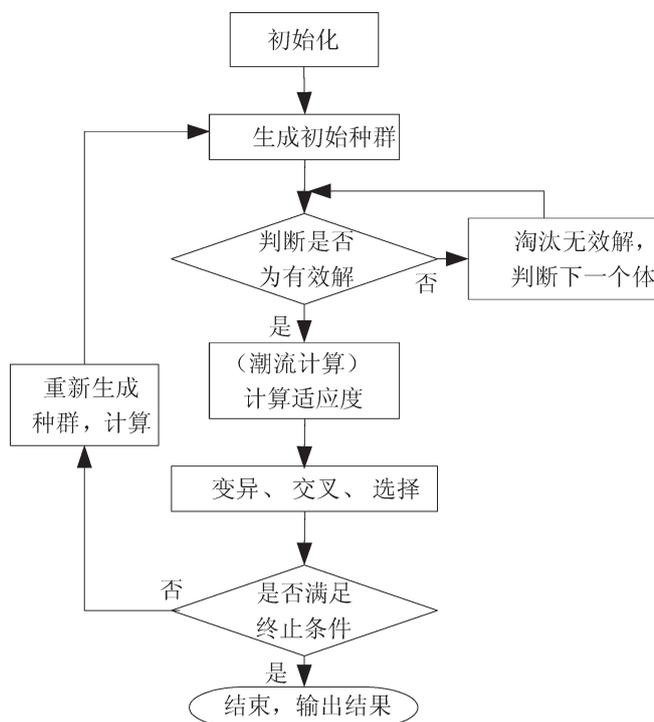


图 4 算法流程图
Fig.4 The algorithm flow chat

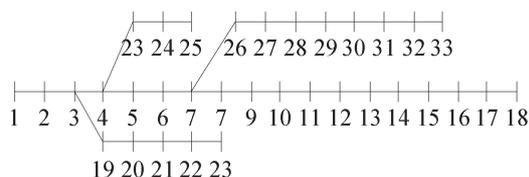


图 5 33 节点配电系统图
Fig.5 Distribution system of 33 nodes

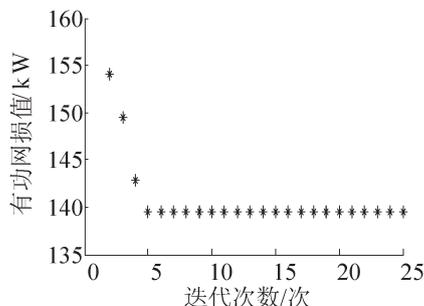


图 6 寻优过程
Fig.6 The optimization process

此外,为反映本文算法的寻优性能,按上述算例中设置好的参数将其连续运行50次,每次进化5代后都能稳定收敛,如图6所示。

表1 部分仿真结果
Tab.1 Simulation results

部分节点组	对应节点DG容量优化结果/kW		网损/kW
{10,4}	59.999 97	120	186.5
{11,2}	44.999 99	99.999 37	192.2
{14,3}	120	89.999 98	180.2
{19,14}	89.999 94	120	182.1
{23,11}	89.999 96	44.999 89	189.8
{25,11}	420	45	175.6
{26,24}	59.999 94	419.999 1	177.1
{28,27}	59.998 61	59.999 69	187
{30,8}	200	200	160.2
{32,30}	209.998 7	199.999 7	156.1
{32,31}	210	150	159.9

4 结论

- 1) 含分布式电源的配网模型充分考虑了配电网络拓扑结构,提出了更实用的分层、分区模型方案。
- 2) 基于分层、分区模型的前推回代算法具有很好的收敛特性。同时,测试数据表明以网损为目标的优化程序能更快找到DG的最佳并网位置、容量。
- 3) 本文算法迭代次数较少,对解决配电网重构问题有良好的寻优性能。

参考文献:

- [1] 王立乔,孙孝峰. 分布式发电系统中的光电发电技术[M]. 北京:机械工业出版社,2010:1-2.
- [2] JOHAN D, FARID K. Design for distributed energy[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2008, 23(13):30-40.
- [3] 余昆,曹一家,陈星莺,等. 含分布式电源的地区电网无功电压优化[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9):27-33.
- [4] 康文文,赵建国,丛伟,等. 含分布式电源的配电网故障检测与隔离算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(9):25-29.
- [5] 王守相,黄丽娟,王成山,等. 分布式发电系统不平衡三相潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(9):10-16.
- [6] 彭谦,姜彤,杨以涵,等. 快速三相高斯潮流算法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(5):47-53.
- [7] LUO G X, SEMLYEN A. Efficient load flow for large weakly meshed networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(4), 1309-1316.
- [8] 郭剑峰,孙惠娟,苑方丞. 一种实用的配电网潮流算法[J]. 华东交通大学学报, 2009, 26(5):84-88.
- [9] 欧阳武. 含分布式发电的配电网规划研究[D]. 上海:上海交通大学, 2009.
- [10] 陈海焱,陈金富,段献忠. 含分布式电源的配电网潮流计算[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1):35-40.
- [11] 孙宏斌,张伯明,相年德. 配电潮流前推回推法的收敛性研究[J]. 中国电机工程学报. 1999, 19(7):26-29.
- [12] THOMSON M, INFELD D G. Network power-flow analysis for a high penetration of distributed generation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(3):1157-1162.
- [13] 苏海军,杨煜普,王宇嘉. 微分进化算法的研究综述[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(9):1793-1797.

(下转第121页)

The Procedure Rules for Initial Allocation of Emission Rights

Jin Hai, Zhang Hongyan

(School of Law, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Initial allocation of emission rights is essentially the allocation of the interests concerning environmental administrative organs, sewage enterprises and the public. Hence, it is of great significance to construct the procedure rules for coordinating and balancing the interest conflicts and ensuring the just distribution. In light of Habermas' deliberative democracy, this paper discusses the construction of specific procedure rules about the initial allocation of emission rights based on current theories and practice. It maintains the procedure rules about initial allocation of emission rights can be established gradually through strengthening the regional cooperation, consummating watershed management and making the position of public participation clear.

Key words: initial allocation of emission rights; procedure rules; deliberative democracy; public participation

(上接第89页)

- [14] CHEN T H, CHEN M S. Distribution system power flow analysis-a rigid approach[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(3): 1146-1152.
- [15] SHIRMOHAMMADI D, HONG H W, SEMLYEN A, et al. A compensation based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(5): 753-762.
- [16] 张学松, 柳焯, 于尔铿, 等. 配电网追赶法潮流[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(6): 382-385.
- [17] 白宏坤, 李干生. 关于电磁环网弱开环方式的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 60-64.
- [17] 饶攀, 彭春华. 基于改进微分进化算法的节能减排发电调度研究[J]. 华东交通大学学报, 2010, 27(5): 48-52.
- [17] 苏海军, 杨煜普, 王宇嘉. 微分进化算法研究综述[J]. 系统工程与电子技术, 2008, 30(9): 1793-1797.

Distribution Optimization of DGs in Distribution Networks Based on Hierarchical Partitioning Model

Peng Chunhua, Qi Yanwei, Chen Shoukun

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: It is of vital importance to establish the models of distributed generators (DGs), choose the power flow calculation method and optimize the algorithm for optimizing distribution of DGs in distribution network. The paper firstly introduces the new models of branches with distributed power supply. Then taking the minimization of the losses as the objective, it explores the optimal location and capacity of DGs in the network planning by using the back/forward sweep method and differential evolution algorithm.

Key words: distributed generation; power flow calculation; forward-backward sweep method; distribution network