

基于“负荷质心”的分布式电源并网优化配置

唐小波^{1,2}, 徐青山¹, 唐国庆¹

(1. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096;

2. 南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

摘要: 分布式电源(DG)对配电网网损和电压的影响主要与其位置和容量以及负荷分布有关。提出一种基于“负荷质心”的 DG 优化配置新方法,将 DG 的供电范围看成一个不规则形状的“负荷块”,节点负荷的大小看成该处的质量,DG 安装在负荷块的“质心”时,配电网有功损耗最小。为保证重要负荷连续可靠供电,根据负荷对供电可靠性要求不同引入了负荷权重系数。该方法简单易行,避免传统优化算法的繁琐过程。仿真算例证明了所提方法的有效性和准确性。

关键词: 配电网; 分布式电源; 优化配置; 负荷质心; 网损

中图分类号: TM 714

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2011)02-0012-05

0 引言

分布式电源 DG(Distributed Generation)是指规模不大(几千瓦到几十千瓦)、安装在用户处或其附近的小型发电机组,用于支持已有配电网的经济运行,保证负荷的供电可靠性,提高电能质量。大电网与 DG 相互补充、协调已被国内外电力专家公认为是节省投资、降低能耗、提高供电可靠性和灵活性的最佳运行方式,是 21 世纪电力工业的发展方向^[1-2]。

DG 接入配电网以后,对配电网有较大的影响,包括电压水平、线损、故障水平、供电可靠性等方面,其影响程度不仅与 DG 的安装位置和容量有关,还与网络拓扑结构和负荷分布密切相关。因此,如何优化配置 DG,减小 DG 对配电网的不良影响,同时减少线损并提高供电可靠性,是 DG 优化配置的首要问题。国内外学者已开展了相关研究。文献[4]认为小容量的 DG 宜配置在线路末端,大容量的 DG 应配置在线路的中部。该结论比较模糊,没有明确 DG 容量与负荷大小的比例关系,以及 DG 容量与最佳安装位置之间的关系。文献[5]以最小化网损为目标,重点分析了离散负荷情况下,电压分布上、下限对 DG 安装位置的影响。文献[6]中提出了一种用于放射型和网状配电网结构的 DG 最优布置策略,用于减小系统的有功损耗;但是,该算法只适用于连续模型,且没有考虑沿线电压分布的限制。文献[7]采用双层优化理论,考虑电压调整约束提出了至少准入功率的计算模型并分析了 DG 启停对系统的影响。文献[8]考虑 DG 对降低线损和调节电压的作用,提出一种图解方法求解 DG 的最佳位置,但该算法没有

考虑配电网拓扑结构的影响,且局限于链式配电网络。还有一些学者采用遗传算法、禁忌搜索算法、粒子群算法等启发式算法来解决相关问题^[10-13]。但这类启发式方法收敛速度一般较慢,对模型的建立、参数的变化有很大的依赖性,而且最终结果只是局部优化解或拟全局优化解,为避免陷入局部优化解的可能,需要以增加计算时间为代价。

本文提出了一种基于“负荷质心”的 DG 优化配置方法。该方法简单有效,避免了传统启发式优化方法的繁琐过程和过多假设条件。

1 DG 接入对配电网有功损耗的影响

配电网的拓扑结构类型较多,我国城乡配电系统以放射状链式结构为主,馈线中不同位置分布若干负荷。一个含 DG 的链式配电网络如图 1 所示,沿线等距离分布有 20 个负荷点,网络节点编号依次为 0,1,2,⋯,20。为便于研究,馈线首端采用恒电压输出模型,节点电压 $U_0 = U_0 e^{j0}$,负荷采用恒功率模型,同时假设负荷三相对称,因电压等级较低、配电线路较短,三相线路间的互感也不予考虑。分析 DG 接入位置和容量对配电网有功损耗的影响。

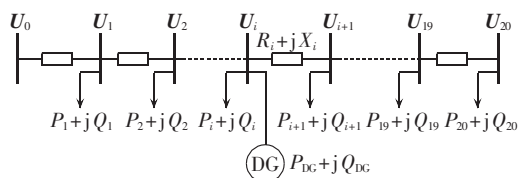


图 1 含有 DG 的链式配电网络

Fig.1 Distribution network chain including DG

1.1 DG 接入容量对配电网有功损耗的影响

图 1 所示配电网络中,负荷均匀分布(每个负荷大小相等,均为 $175 + j178.5 \text{ kV} \cdot \text{A}$),未接入 DG 时,网络的有功损耗为 30.2392 kW 。现在节点 14 接入

一 DG, DG 的有功容量 P_{DG} 与配电网有功损耗 P_{loss} 之间的关系如图 2 所示。

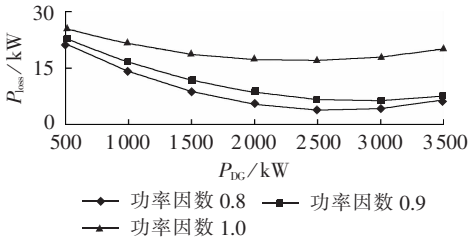


图 2 DG 容量对配电网有功损耗的影响
Fig.2 Influence of DG capacity on power loss of distribution network

由图 2 可见,接入 DG 后,配电网的有功损耗减小,且随着 DG 有功容量增大而逐步减小;但是当 DG 的有功容量继续增大超过某个定值后,网络的有功损耗反而会增大。可见,DG 并入配电网后可以降低网络有功损耗,但 DG 的有功容量应该取一个适当的值,并不是越大越好。

考虑配电网节点电压约束,DG 的容量也不宜过大,如果 DG 容量过大、超过总负荷时,馈线上就有可能出现部分节点电压越限。DG 容量 S_{DG} 及其与总负荷的比值 η 如表 1 所示,其对配电网电压分布的影响如图 3 所示(图中,节点电压 u_i 为标么值)。可见,当 DG 的容量与总负荷的比值较小($<50\%$)时,馈线上的电压是持续递减的;当 DG 的容量超过总负荷的 50% 时,馈线上的电压分布就会出现峰谷变化。因此,DG 容量一般不宜超过总负荷的 50% 。

表 1 DG 容量及其与总负荷的比值
Tab.1 Ratio of DG capacity to total load

编号	I	II	III	IV	V	VI	VII
$S_{DG}/(kV \cdot A)$	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500
$\eta/\%$	14.29	28.57	42.86	57.14	71.43	85.71	100

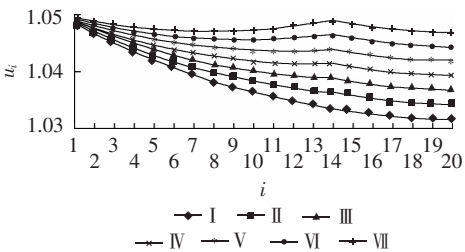


图 3 DG 容量对配电网电压分布的影响
Fig.3 Influence of DG capacity on voltage distribution of distribution network

1.2 DG 接入位置对配电网有功损耗的影响

仍采用图 1 所示的配电网,负荷均匀分布。DG 的类型和有功容量考虑表 2 所示的 6 种情况,在不同节点分别接入这 6 个 DG,得出 DG 的接入位置与配电网有功损耗之间的关系如图 4 所示。

由图 4 可见,DG 接入的位置位于线路首端时,配电网的有功损耗最大;其接入位置靠近线路末端时,配电网有功损耗较小。但是当 DG 处于线路最末端

表 2 DG 的类型和容量
Tab.2 Type and capacity of DG

DG 类型	PQ 型		PV 型			
	I	II	III	IV	V	VI
P_{DG}/kW	1000	2000	1000	2000	1000	2000
$Q_{DG}/kvar$	484.322	968.644	2000	2000	∞	∞

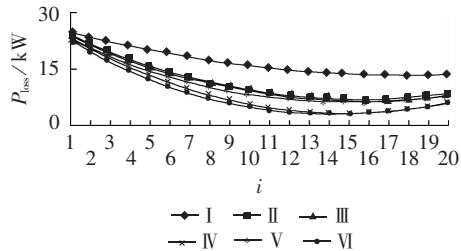


图 4 DG 接入位置对配电网有功损耗的影响
Fig.4 Influence of DG location on power loss of distribution network

时,配电网的有功损耗并不一定最小。以降低有功损耗为目标时,DG 的接入位置与 DG 容量和线路上负荷的分布有关。

图 1 所示配电网,负荷分布考虑均匀分布、递增分布和递减分布 3 种情况。现有一 DG,其功率因数为 0.9,将其接入配电网用以减小线路上的有功损耗,则 DG 的容量及对应的最佳接入位置如表 3 所示。

表 3 不同负荷分布情况下有功损耗最小的 DG 接入位置

Tab.3 Optimal DG configuration with least power loss for different load distributions

$S_{DG}/(kV \cdot A)$	DG 接入位置		
	负荷均匀分布	负荷递增分布	负荷递减分布
500	19	20	16
1000	18	19	14
1500	17	19	13
2000	16	18	12
2500	15	18	11
3000	14	17	10
3500	13	16	9
4000	12	16	8
4500	11	15	7
5000	10	14	6

由表 3 可见,DG 的容量越小,其最佳接入的位置越靠近线路末端;同时负荷的分布情况对 DG 的接入位置影响很大。当负荷递增分布时,DG 的最佳接入位置较负荷均匀分布时更加靠近线路末端;而负荷递减分布时,DG 最佳接入位置则较负荷均匀分布时远离线路末端。可以得出结论,DG 的接入位置越靠近负荷的中心,配电网有功损耗越小。

2 “负荷质心”原理

2.1 “负荷质心”基本概念

为了分析 DG 的接入位置对配电网有功损耗的影响,本文引入了“功率圆”和“负荷质心”的概念。所谓“功率圆”即 DG 能够供电的范围,DG 的容量越大,功率圆的半径也就越大。线路上的有功损耗不

仅与线路上流过的有功和无功功率的大小有关,还与线路上的电阻有关。借鉴物理上的“质心”概念,将 DG 的供电范围看成一个不规则形状的“负荷块”,节点负荷的大小看成该处的质量。负荷块中各负荷节点距离负荷质心的负荷平方矩 $S_i^2 z_i$ 相等,则由有功损耗计算公式 $\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R$ 可知,若将 DG 安装在“负荷质心”,则 DG 的供电半径最小,可以有效降低网络有功损耗。

由物理知识可知,若将负荷块悬挂于空中,则其“质心”必处于“垂线”上。因此,“负荷质心”的确定就转化为垂线的搜索和质心与根节点距离的求解,具体步骤分为以下 3 步。

a. 根据 DG 容量,由线路末端向首端搜索,确定 DG 的功率圆。对 DG 功率圆内的节点重新进行编号,并且令由系统向功率圆内注入功率的节点为功率圆的根节点,编号为 0。

b. 计算各条支路的权值,并根据支路的权值搜索负荷块的垂线。

c. 计算负荷质心距离 DG 功率圆根节点的阻抗。

2.2 “垂线”的搜索方法

首先计算各负荷节点的负荷平方矩,即节点负荷视在功率的平方乘以该负荷流过的路径阻抗之和,即

$$M_i = S_i^2 z_i \quad (1)$$

其中, M_i 为节点 i 上负荷平方矩; S_i 为节点 i 上负荷视在功率; z_i 为节点 i 上负荷流过的路径阻抗之和。

支路的权值 W 就等于流过该支路的所有负荷的平方矩之和,即

$$W_k = \sum_{i=1}^m M_i \quad (2)$$

其中, m 为负荷功率流过支路 k 的节点数; M_i 为节点 i 的负荷平方矩,且节点 i 的负荷功率流过支路 k 。

由根节点出发,以支路的权值作为优先级进行搜索,直至末节点,则搜索得到的路径即为该负荷块的垂线。

2.3 “负荷质心”的确定

负荷质心的搜索方法分为以下 4 步。

a. 由线路末端开始向首端搜索,确定 DG 功率圆的大小,令功率圆内所有节点的负荷之和等于 DG 容量,即

$$\sum_{i=1}^n S_i = S_{DG} \quad (3)$$

其中, n 为功率圆内负荷节点总数。

实际配电系统中,很可能出现这样一种情况:将节点 $n+1$ 划入 DG 功率圆内,则 $\sum_{i=1}^{n+1} S_i > S_{DG}$;若不将节点

点 $n+1$ 划入功率圆内, $\sum_{i=1}^n S_i < S_{DG}$, 往往 DG 容量不等于功率圆内节点负荷之和。对此,可采用在功率圆根节点增加一个等效负荷的方法来处理。首先确定功

率圆的范围,节点 $n+1$ 不在功率圆内,然后在功率圆根节点增加一个等效负荷 ΔS ,其大小为

$$\Delta S = S_{DG} - \sum_{i=1}^n S_i \quad (4)$$

b. 计算功率圆中各负荷节点平方矩之和 M_{sum} 。

c. 从功率圆根节点出发,沿垂线搜索负荷质心。若某条支路的权值大于 $M_{\text{sum}}/2$,即 $W_i > M_{\text{sum}}/2$,则沿该支路继续搜索;若 $W_i < M_{\text{sum}}/2$,则负荷质心在该支路的上一级支路上。

d. 假设负荷质心距离该支路首节点的阻抗为 z ,计算各节点包括功率圆首节点至负荷质心的阻抗,并重新计算各负荷点相对于负荷质心的负荷平方矩 M' 。由负荷质心的定义可知,负荷质心上游节点负荷平方矩之和与下游节点负荷平方矩之和相等,即

$$\sum_{i=0}^m M'_i = \sum_{i=m+1}^n M'_i \quad (5)$$

其中, m 为负荷质心上游的节点数,即功率圆根节点与负荷质心之间的节点数; n 为功率圆中节点总数。

根据式(5)可以求得负荷质心距离支路首端节点的阻抗 z 。如果 DG 必须接在现有节点上,则选取距离负荷质心最近的节点作为 DG 的接入位置即可。

2.4 支路功率约束条件的处理

DG 接入配电网以后,对配电网潮流的分布产生较大影响,因此 DG 接入位置的优化应当考虑网络支路传输功率的限制。由配电网辐射式结构的特点可知,未接入 DG 时,支路潮流等于该支路下游所有节点负荷功率之和;DG 接入后,DG 接入点下游的支路潮流并未改变,因此不会发生支路功率越限。只有当功率圆内“负荷质心”上游节点负荷功率之和大于“负荷质心”及其下游节点负荷功率之和,“负荷质心”上游支路才可能会出现功率越限,此时应当校验支路的功率上限。如果有支路功率越限,则应当将 DG 安装位置由“负荷质心”沿“垂线”向上游节点移动,直到满足功率约束条件或者到达功率圆的根节点。

3 负荷可靠性与不确定性的影响

3.1 负荷可靠性的影响

DG 接入配电网除了能够有效降低系统有功损耗、改善电压分布以外,在大系统故障时,DG 还可以主动与外部大电网断开,带部分负荷独立运行,从而保证重要负荷的连续可靠性供电。一般情况下,用于保证负荷供电的 DG 应尽可能安装在重要负荷的附近。为此,必须对“垂线”和“负荷质心”的求解方法进行修正。在式(5)负荷平方矩的计算公式中引入负荷权重 ω_i ,如式(6)所示。

$$M'_i = S_i'^2 z_i = (\omega_i S_i)^2 z_i \quad (6)$$

权重 ω_i 由负荷对供电可靠性的要求决定,负荷对供电可靠性要求越高,其权重值越大,如表 4 所示。负荷的权重确定以后,按照式(6)计算出各负荷节点修正后的负荷平方矩,再按照式(1)~(5)所述方法搜

索“垂线”并确定“负荷质心”即可。此时根据负荷质心确定的 DG 接入位置既能满足降损的要求,又邻近重要负荷,有利于提高供电可靠性。

表 4 负荷对供电可靠性要求及其权重

Tab.4 Reliability requirement of load and weight

可靠性要求	非常高	高	一般	低	非常低
权重	1	0.8	0.6	0.4	0.2

3.2 负荷不确定性的影响

近、中长期负荷预测是配电网架规划的重要依据,而负荷预测结果不可避免地存在不确定性。一般可将预测负荷看作是一个围绕某个均值的正态分布的随机变量。

$$S \sim N(\mu, \delta^2)$$
 (7)

其中, μ 和 δ^2 分别为该预测负荷的均值和方差。

S_i^2 的均值 $\overline{S_i^2}$ 即为 S_i 的二阶原点矩:

$$\overline{S_i^2} = E(S_i^2) = \mu_i^2 + \delta_i^2$$
 (8)

将负荷平方的均值代入式(1),可得节点的负荷平方矩均值:

$$\overline{M_i} = \overline{S_i^2} z_i$$
 (9)

一般可认为各节点负荷相互独立,将节点负荷平方矩均值代入式(2)计算出支路的权值,然后再按照式(3)~(5)所述方法搜索“垂线”即可确定考虑负荷不确定性情况下的“负荷质心”。

4 算例分析

在改进的 IEEE 13 节点的配电线路中接入一容量为 1000 kV·A、功率因数为 0.9 的 DG,其功率圆和负荷块的垂线如图 5 所示(图中,虚线为垂线,标有下划线的数字为支路的权值)。

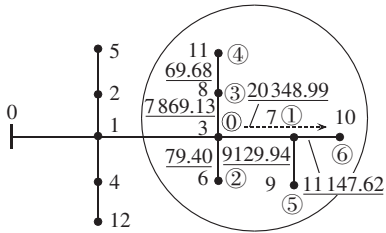


图 5 改进 IEEE 13 节点系统中 DG 的功率圆和垂线

Fig.5 Power circle and perpendicular of DG for improved IEEE 13-bus system

由垂线搜索的方法可知,DG 应当接在支路 3、7。设负荷质心距离节点 3 的阻抗为 z ,则有

$$\sum_{i=6,8,11} S_i^2(z_i+z) + S_3^2 z = \sum_{i=7,9,10} S_i^2(z_i-z)$$

解得该负荷块的质心距离节点 3 的阻抗为 0.028 Ω 。距离负荷质心最近的节点为节点 3,因此将该 DG 安装在节点 3,配电系统的有功损耗最小。这与表 5 中的潮流计算结果完全吻合。可以证明本文提出的基于“负荷质心”的 DG 接入位置优化方法是正确有效的,并且不需要随机优化方法的复杂建模计算过程。

表 5 改进 IEEE 13 节点算例网损潮流计算结果

Tab.5 Results of power flow calculation for improved IEEE 13-bus system

DG 安装节点	$P_{\text{loss}}/\text{kW}$	DG 安装节点	$P_{\text{loss}}/\text{kW}$
3	4.137	9	5.236
6	5.624	10	6.032
7	4.485	11	5.918
8	4.703		

考虑负荷对供电可靠性的要求,DG 功率圆内各节点的权重如表 6 所示,则负荷修正以后重新搜索得到的垂线如图 6 所示,由此确定的负荷质心距离节点 3 的阻抗为 0.12 Ω ,即 DG 的最佳接入位置为节点 8。由此可见,考虑负荷对供电可靠性的要求以后求得的 DG 最佳接入位置更加靠近大容量重要负荷,从而保证了重要负荷的可靠供电。

表 6 DG 功率圆内各负权重

Tab.6 Load weights in power circle of DG

节点编号	权重	节点编号	权重
3	0.6	9	0.4
6	0.8	10	0.2
7	0.6	11	1.0
8	1.0		

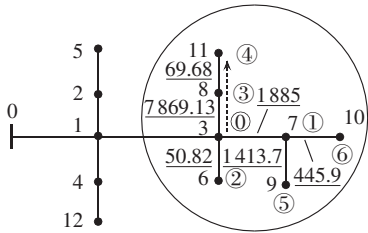


图 6 考虑负荷可靠性要求时的垂线

Fig.6 Perpendicular of load block considering reliability requirement of load

考虑负荷的不确定性,设负荷 9 和 10 具有正态随机特性,其均方差分别为相应均值的 3%。按照式(8)(9)计算负荷平方矩均值和支路权值(是不考虑负荷随机性时的 1.0009 倍),然后再搜索“垂线”并确定“负荷质心”,仍为节点 3。可见负荷预测均方差较小时,对“负荷质心”的求取影响不大。

5 结论

本文在分析了 DG 接入位置和容量对配电网有功损耗和电压分布的影响的基础上,提出了基于“负荷质心”的 DG 优化配置方法,DG 接入位置处于其功率圆的负荷质心时,可以有效缩短 DG 的供电半径,从而减小配电网有功损耗。该方法原理简单,避免传统优化算法的繁琐求解过程。针对负荷对供电可靠性要求不同,提出了“负荷质心”的修正求解方法,使得 DG 接入不仅可以降低有功损耗,还能保证重要负荷的可靠供电。考虑负荷的不确定性,对“负荷质心”的求解方法进行了修正,并得出结论,如果负荷预测结果的均方差较小,对“负荷质心”的求解影响较

小。算例分析验证了此方法在解决 DG 优化配置问题的有效性。

参考文献:

- [1] 丁明,王敏. 分布式发电技术[J]. 电力自动化设备,2004,24(7): 31-36.
DING Ming,WANG Min. Distributed generation technology [J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(7):31-36.
- [2] 张保会. 分散式能源发电接入电力系统科学技术问题的研究[J]. 电力自动化设备,2007,27(12):1-4.
ZHANG Baohui. Study on connection of distributed energy generation to power system [J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(12):1-4.
- [3] 唐小波,徐青山,唐国庆. 含分布式电源的配网潮流算法[J]. 电力自动化设备,2010,30(5):34-37.
TANG Xiaobo,XU Qingshan,TANG Guoqing. Power flow algorithm for distribution network with distributed generation [J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(5):34-37.
- [4] 刘鹏,马明,张俊芳. 分布式电源对配电网损影响的研究[J]. 现代电力,2008,25(6):27-30.
LIU Peng,MA Ming,ZHANG Junfang. Impact of distributed generation on network loss of power system [J]. Modern Electric Power,2008,25(6):27-30.
- [5] 顾承红,艾芊. 配电网中分布式电源最优布置[J]. 上海交通大学学报,2007,41(11):1896-1900.
GU Chenghong,AI Qian. The optimal layout of distributed generation in distribution system [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University,2007,41(11):1896-1900.
- [6] 王志群,朱守真,周双喜,等. 分布式电源接入位置和注入容量限制的研究[J]. 电力系统及其自动化学报,2005,17(1):53-57.
WANG Zhiqun,ZHU Shouzheng,ZHOU Shuangxi,et al. Study on location and penetration of distributed generations [J]. Proceedings of the CSU-EPSS,2005,17(1):53-57.
- [7] 胡骅,吴汕,夏翔,等. 考虑电压调整约束的多个分布式电源准入功率计算[J]. 中国电机工程学报,2006,26(19):13-19.
HU Hua,WU Shan,XIA Xiang,et al. Computing the maximum penetration level of multiple distributed generators in distribution network taking into account voltage regulation constraints [J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(19):13-19.
- [8] 李鹏,廉超,李波涛. 分布式电源并网优化配置的图解方法[J]. 中国电机工程学报,2009,29(4):91-96.
LI Peng,LIAN Chao,LI Botao. A graph-based optimal solution for siting and sizing of grid-connected distributed generation [J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(4):91-96.
- [9] TANG Xiaobo,TANG Guoqing. Multi-objective planning for distributed generation in distribution network [C]//DRPT2008. Nanjing,China:IEEE,2008:2664-2667.
- [10] KIM K H,LEE Y J,RHEE S B,et al. Dispersed generator placement using fuzzy-GA in distribution systems [C]//2002 IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Chicago,USA:IEEE,2002:1148-1153.
- [11] NARA K,HAYASHI Y,IKEDA K,et al. Application of Tabu search to optimal placement of distributed generators [C]//2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Columbus, Ohio,USA:IEEE,2001:918-923.
- [12] SILVESTR A,BERIZZI A,BUONANNO S. Distributed generation planning using genetic algorithms [C]//IEEE International Conference on Electric Power Engineering. Budapest,Hungary:IEEE,1999:257.
- [13] 刘波,张焰,杨娜. 计及分布式电源的配电网潮流和断线故障分析算法[J]. 上海交通大学学报,2008,42(12):2028-2032.
LIU Bo,ZHANG Yan,YANG Na. Research on power flow and line outage of distribution network with distributed generation [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University,2008,42(12):2028-2032.
- [14] 林霞,陆于平,吴新佳. 分布式发电系统对继电保护灵敏度影响规律[J]. 电力自动化设备,2009,29(1):54-59,64.
LIN Xia,LU Yuping,WU Xinjia. Influence law of distributed generation on relay protection sensitivity [J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(1):54-59,64.

(实习编辑:李莉)

作者简介:

唐小波(1977-),男,江苏兴化人,博士研究生,主要研究方向为分布式发电、智能电网和电网规划(E-mail:xiaobotang@126.com);

徐青山(1979-),男,江苏姜堰人,副教授,博士,研究方向为新能源发电、微网运行与控制(E-mail:xuqingshan@seu.edu.cn);

唐国庆(1937-),男,上海人,教授,博士研究生导师,主要研究方向为人工智能及其在电力系统中的应用、分布式发电(E-mail:gq_tang@seu.edu.cn)。

Optimal configuration based on load centroid for distributed generation grid-connection

TANG Xiaobo^{1,2}, XU Qingshan¹, TANG Guoqing¹

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. School of Electrical & Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: The power loss and voltage distribution of distribution network are closely related to the location and size of DG(Distributed Generation) and the load distribution. A DG optimal configuration based on load centroid is proposed, which treats the district DG supplied as a load block with irregular shape and the load as its quality. The power loss is the least when DG is located at the load centroid. In order to ensure the continuity and reliability of power supply to the important load, the load weight coefficient is introduced according to the reliability requirement of load. This method avoids the complicated process of traditional optimization algorithms. Its effectiveness and accuracy are verified by the simulative results.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China(50907010 & 50707004) and the Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions of China(10KJB470008).

Key words: distribution network; distributed generation; optimal configuration; load centroid; power loss