

计及配电网节点边际容量成本的多类型分布式电源规划

钱佳琦, 江岳文

(福州大学 电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要: 配电网负荷增加或分布式电源(DG)的接入将导致供电设备扩容的提前或延迟,从而引起容量成本的变动。根据辐射形配电网潮流特点,推导得到节点注入功率对支路电流影响的灵敏度系数,并结合节点-支路潮流关联矩阵,建立相应的灵敏度系数矩阵,用于计算配电网节点边际容量成本(LMCC)。基于LMCC,在用户自备的产权下,分析评估不同电价体制下的DG容量效益;在电网所有的产权下,建立多类型DG规划模型,并采用粒子群优化算法求解优化模型。算例对比验证了模型和方法的可行性。

关键词: 分布式发电; 电源规划; 灵敏度系数矩阵; 节点边际容量成本; 配电网; OpenDSS

中图分类号: TM 715

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.03.015

0 引言

如今,分布式电源 DG(Distributed Generator)凭借着污染排放低、灵活方便、可靠性高和效率高等传统集中式大型机组发电设备所不具备的优点,受到了电力行业人员的广泛关注。但目前的DG规划主要以系统可靠性、投资运行费用和环保性等指标为主,较少考虑网络设备的利用率等问题^[1-4]。而且在现行的电价体制中,输电和配电企业的供电容量成本(主要是输电线路的容量成本)不能明确地在电价中体现出来,而只能转移到电量电价或其他电价中去。随着电力事业的发展和改革,输配电可能进行分离,负荷也不断增大,如不明确容量成本,将严重地影响未来电网的发展。因此,在实际工程中,对容量成本确定以及基于容量成本的DG规划等都具有非常重要的意义。文献[5]提出了长期增量成本(LRIC)的概念,用来表示负荷增加引起支路扩容投资提前而产生的成本。文献[6]和文献[7]在LRIC的基础上,提出节点边际容量成本(LMCC)的概念,并将其应用于配电网的DG规划中。但这些均为有功潮流计算,忽略了网损和无功功率的影响。文献[8]基于交流潮流计算建立了考虑无功功率影响的LMCC模型,并提出了支路边际容量成本(BMCC)的概念,用于评价支路的利用率和充裕度,并基于LMCC重点介绍了电网公司产权的DG规划。然而文献使用的基于交流潮流的二分法计算支路扩容时间,多次调用潮流计算程序,花费了较长的计算时间。文献[9]运用回路电流,推导了节点注入有功、无功功率与支路电流之间的灵敏度关系矩阵,并将其应用到输电网的线路有功、无功安全校正中,得到了很好的效果。

文献[5-8]对容量成本进行了不同程度的研究,但仍存在容量成本模型建立不全面以及计算过程不够简明等不足。基于此,本文参考文献[9]关于灵敏度计算的思想,建立了符合辐射性配电网的潮流特点的灵敏度系数矩阵,并推导得到支路扩容时间和LMCC计算公式。该计算公式在保证计算准确性和快速性的前提下,综合反映了配电网无功潮流和网损的影响,为容量成本的量化研究提供了支持。基于LMCC,本文进一步分析、评估了用户自备DG在不同电价体制下的容量成本效益;在电网公司的产权下,建立基于容量成本效益的多类型DG规划模型,并运用粒子群优化算法求解规划模型。

1 配电网 LMCC 模型

LMCC指节点增加单位负荷而引起支路扩容现值的增量,反映了各节点负荷对当前配电网供电设备的容量占用情况,同时也可用来表示各节点的容量成本。其计算公式可运用灵敏度的计算思路,并结合辐射型配电网潮流特点推导而得。

1.1 灵敏度系数矩阵

1.1.1 节点-支路潮流关联矩阵

从原点出发,采用深度搜索法对配电网的节点和支路重新进行编号,如图1所示。

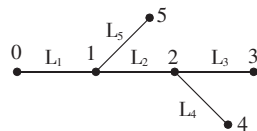


图1 配电网示例

Fig.1 Example of distribution network

深度优先搜索是从某一节点开始,沿着其搜索到的第一个节点不断深入下去,当无法再继续深入的时候,回溯节点,然后再在回溯中的某一节点开始,沿另一个方向深度搜索,直到不重复地遍历所有节点。

收稿日期:2015-04-06;修回日期:2015-11-11

基金项目:福建省自然科学基金资助项目(2013J01176)

Project supported by the Natural Science Foundation of Fujian Province(2013J01176)

A 为节点-支路潮流关联矩阵,表示各节点负荷变化引起相应支路潮流变化的关联关系,用于后续建立灵敏度系数矩阵和单位负荷增量成本矩阵。 $A_{ij}=1$ 表示节点 i 是支路 j 的下游节点,否则 $A_{ij}=0$ 。对于图 1,可根据节点和支路的潮流关系得:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

1.1.2 支路电流灵敏度

已知某配电网某部分线路如图 2 所示。

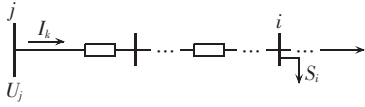


图 2 某配电网部分线路示例

Fig.2 Partial transmission line of a distribution network

由图可知,支路 k 首端的输入功率等于支路 k 所有的下游节点负荷与节点 j 所有的下游支路网损之和,可将其分为三部分:节点 j 到节点 i 之间所有支路的网损,对应支路用集合 B 表示;节点 i 的负荷功率 S_i ;其他的支路网损和节点负荷,用 S_Σ 表示。当节点 i 负荷变化 ΔS_i 时,其集合 B 中的支路网损将随之变化。忽略相应支路网损变化对支路电流增量的影响,即假设给节点 i 输送功率的支路电流都变化 ΔI_k 。综上所述可得:

$$\begin{cases} \sum_{s \in B} I_s^2 Z_s + S_i + S_\Sigma = \sqrt{3} U_j I_k \\ \sum_{s \in B} (I_s + \Delta I_k)^2 Z_s + S_i + \Delta S_i + S_\Sigma = \sqrt{3} U_j (I_k + \Delta I_k) \end{cases} \quad (2)$$

其中, U_j 表示支路 k 的起始节点 j 的线电压; I_k, I_s 分别表示支路 k 和支路 s 的电流; Z_s 表示支路 s 的阻抗。

化简式(2),则节点 i 注入功率对于支路 k 电流的灵敏度可以表示为:

$$r_{ik} = \frac{\Delta I_k}{\Delta S_i} = \frac{1 + \frac{\Delta L_\Sigma}{\Delta S_i}}{\sqrt{3} U_j - 2 \sum_{s \in B} I_s Z_s} \quad (3)$$

其中, $\Delta L_\Sigma = \sum_{s \in B} \Delta I_k^2 Z_s$ 表示集合 B 中所有支路变化的网损之和。

当 $\Delta S_i \rightarrow 0$ 时,有:

$$r_{ik} = \frac{\partial I_k}{\partial S_i} = \frac{1 + \frac{\partial L_\Sigma}{\partial S_i}}{\sqrt{3} U_j - 2 \sum_{s \in B} I_s Z_s} \quad (4)$$

1.1.3 灵敏度系数矩阵

根据 1.1.1 节和 1.1.2 节,可建立支路电流节点灵敏度矩阵 r 。显然, r 和节点-支路网络关联矩阵一样,是一个稀疏的下三角矩阵,且矩阵元素与当前网

络负荷分布有关,可表示为:

$$r = [r_{ik}(S_0)] \quad (5)$$

其中, S_0 表示在现网络结构下,各节点的负荷功率初始分布情况。

1.2 支路扩容时间

假设负荷每年以恒功率因数等比增长,因此对于支路 k 有:

$$\Delta I_k = \sum_{i=1}^N (r_{ik} \Delta S_i) \quad (6)$$

其中, N 表示节点数; ΔI_k 表示支路 k 的电流变化量。

设初始状态下,支路 k 的电流为 I_k ,负荷以负荷增长率 d 增长,经过扩容时间 τ_k 后,支路 k 的电流达到其最大载流量 I_k^{CAP} ,根据式(6)可得:

$$I_k^{\text{CAP}} - I_k = [(1+d)^{\tau_k} - 1] \sum_{i=1}^N S_i r_{ik} \quad (7)$$

则扩容时间 τ_k 可表示为:

$$\tau_k = \frac{\ln \left(\frac{I_k^{\text{CAP}} - I_k}{\sum_{i=1}^N S_i r_{ik}} + 1 \right)}{\ln(1+d)} \quad (8)$$

1.3 LMCC

考虑扩容方式为增加同一型号和容量的供电设备并联运行,则贴现值为^[6-8]:

$$C_k^{\text{PV}} = \frac{C_k}{(1+\eta)^{\tau_k}} \quad (9)$$

其中, C_k 表示支路 k 的扩容成本; C_k^{PV} 表示支路 k 扩容成本现值; η 表示折现率。

当节点 i 的负荷以恒定的功率因数增加 ΔS_i ,引起其关联支路的电流 I_k 增加使得扩容时间 τ_k 减小,从而增大了扩容供电设备的折现值。节点 i 对于支路 k 的单位负荷增长成本为:

$$\Delta C_{ik} = \frac{\Delta C_k^{\text{PV}}}{\Delta S_i} = \frac{C_k^{\text{PV}*} - C_k^{\text{PV}}}{\Delta S_i} \quad (10)$$

其中, $C_k^{\text{PV}*}$ 表示负荷变化引起扩容时间改变后支路 k 新的投资现值。

当 $\Delta S_i \rightarrow 0$ 时,有:

$$\Delta C_{ik} = \frac{\partial C_k^{\text{PV}}}{\partial S_i} \quad (11)$$

根据式(9),求导可得:

$$\begin{aligned} \Delta C_{ik} &= \frac{\partial C_k^{\text{PV}}}{\partial S_i} = C_{ik} \frac{\partial \left[\frac{1}{(1+\eta)^{\tau_k}} \right]}{\partial S_i} = \\ &= -\frac{C_k}{(1+\eta)^{\tau_k}} \ln(1+\eta) \frac{\partial \tau_k}{\partial S_i} \end{aligned} \quad (12)$$

对式(7)求导:

$$\begin{aligned} -r_{ik} &= -\frac{\partial I_k}{\partial S_i} = (1+d)^{\tau_k} \ln(1+d) \frac{\partial \tau_k}{\partial S_i} \sum_{i=1}^N S_i r_{ik} + \\ &= [(1+d)^{\tau_k} - 1] \tau_k \end{aligned} \quad (13)$$

$$\frac{\partial \tau_k}{\partial S_i} = -\frac{r_{ik}}{\ln(1+d) \sum_{i=1}^N S_i r_{ik}} \quad (14)$$

结合式(12)和式(14),可得节点 i 对于支路 k 的单位负荷增长成本为:

$$\Delta C_{ik} = \frac{C_k \ln(1+\eta) r_{ik}}{(1+\eta)^{r_{ik}} \ln(1+d) \sum_{i=1}^N S_i r_{ik}} \quad (15)$$

$$\Delta c_{ik} = \Delta C_{ik} R \quad (16)$$

其中, R 表示等年值系数; Δc_{ik} 表示节点 i 对于支路 k 的单位增量成本年值。

重复计算所有节点对所有支路的单位负荷增长成本,即可得单位负荷增量成本矩阵:

$$C = (\Delta c_{ik})_{(N-1) \times b} \quad (17)$$

其中, b 表示支路数; N 表示节点数(本文设起始节点为 0 节点,该点负荷变化不会引起任意支路的电流变化,故在矩阵中不考虑该节点)。

节点 i 的 LMCC 为节点 i 对所有支持该节点功率输送的支路的单位增量成本之和,即:

$$C_{LMCC,i} = \sum_{k=1}^b \Delta c_{ik} \quad (18)$$

2 基于 LMCC 的 DG 容量效益评估和应用

当前 DG 按产权可分为用户自备和电网公司所有 2 种形式。

2.1 用户自备 DG

用户自备 DG 的容量效益可根据实行的电价机制进行评估。

第一种情况:电价机制还未单独考虑容量电价。这种情况下,电网公司可根据用户自行配置 DG 引起的供电设备容量成本减少来量化和评估 DG 的容量成本效益,并根据容量成本效益 F_{DG} 补贴 DG 投资的用户。

$$\Delta C_{LMCC} = \sum_{i=1}^N (C_{LMCC,i}^* - C_{LMCC,i}) \quad (19)$$

$$F_{DG} = -S_{DG} k_P \Delta C_{LMCC} \quad (20)$$

其中, S_{DG} 表示 DG 接入的额定容量; k_P 表示容量系数,本文直接参考英国贸易与工业部(DTI)的技术标准,风电、光伏和燃气轮机的容量系数分别取 0.43、0.33 和 1.0^[7,10]; $C_{LMCC,i}^*$ 、 $C_{LMCC,i}$ 分别表示 DG 接入前和接入后节点 i 的 LMCC。

第二种情况:电价体系完善,有明确的容量电价的定价和计算方式。这种情况下,用户 DG 的容量成本效益可以直接体现在容量电价中。对于小容量的 DG 接入,其他节点的 LMCC 所受影响较小,故可直接以 DG 接入后的 LMCC(即 $C_{LMCC,i}^*$,其值小于接入前的 $C_{LMCC,i}$)作为容量定价的标准。对于大容量 DG 的接入,则不能只考虑接入点的 LMCC 大小,而应充分考虑用户 DG 接入引起整个配电网容量成本下降的情况(即根据 $C_{LMCC,i} + \Delta C_{LMCC}$ 作为容量定价的标准),防止交叉补贴的情况发生。

2.2 电网公司配置 DG

电网公司配置 DG,一般可将 DG 安装到配电网中最合理的位置,使效益最大化。但实际工程应用中,尤其是城市配电网的规划,必须考虑占地空间、噪声、环境等附加因素,从而限制了 DG 类型、容量和接入点的选择。配置 DG 会提高供电可靠性,风力、太阳能等使用清洁能源的 DG 能节省运行成本、节能减排,因此,电网公司配置 DG 与用户自备不同,其往往能通过配置 DG 带来比较稳定的收益,尤其随着社会的进步,用电负荷不断增加,投资 DG 则能获得更多的容量效益。

文献[6-7]提出了根据对比节点 LMCC 和 DG 投资成本进行 DG 规划,这较适合供电容量较为紧张的配电网,但一般很少出现这种极端的情况;而文献[8]提出通过比例因子确定 DG 投资带来的收益进行 DG 规划,这更适合于一般情况下配电网的 DG 规划,但其只考虑单类型的 DG 规划,在现实应用中仍有一定的局限性。

因此本文考虑 DG 的容量成本效益,根据多类型 DG 的特点,建立相应的数学模型进行规划。具体数学模型如下。

(1)目标函数。最小的 DG 配置容量为规划的目标:

$$\min f = \min \sum_{i=1}^{n_{DG}} S_{DG,i} \quad (21)$$

其中, n_{DG} 表示 DG 配置总数; $S_{DG,i}$ 表示节点 i 接入的 DG 容量。

(2)等式约束。等式约束为接入 DG 后配电网的潮流平衡方程。

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^N (G_{ij} U_j \cos \theta_{ij} + B_{ij} U_j \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^N (G_{ij} U_j \sin \theta_{ij} - B_{ij} U_j \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (22)$$

其中, P_i 和 Q_i 分别表示节点 i 的有功功率注入和无功功率注入; U_i 表示节点 i 电压幅值; G_{ij} 和 B_{ij} 分别表示导纳矩阵对应元素的实部和虚部; θ_{ij} 表示节点 i 和 j 之间的相角差。

(3)不等式约束:

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (23)$$

$$I_k \leq I_k^{\text{CAP}} \quad (24)$$

$$S_{DG,i} \leq S_{DG,i,\max} \quad (25)$$

$$F_{DG} = -\Delta C_{LMCC} \sum_{i=1}^{n_{DG}} k_P S_{DG,i} \geq \beta R \sum_{i=1}^{n_{DG}} C_{DG,i} S_{DG,i} \quad (26)$$

其中, $S_{DG,i,\max}$ 表示节点 i 可以接入的最大 DG 容量; $C_{DG,i}$ 表示节点 i 接入 DG 的单位综合成本; β 表示供电容量成本占有所有成本的比例系数。式(23)为电压约束;式(24)为支路潮流约束;式(25)为各节点接入 DG 容量约束;式(26)表示 DG 的容量延缓效益对 DG 投资成本中容量成本部分的回收效益约束。

利用粒子群优化算法求解模型流程如图 3 所示。

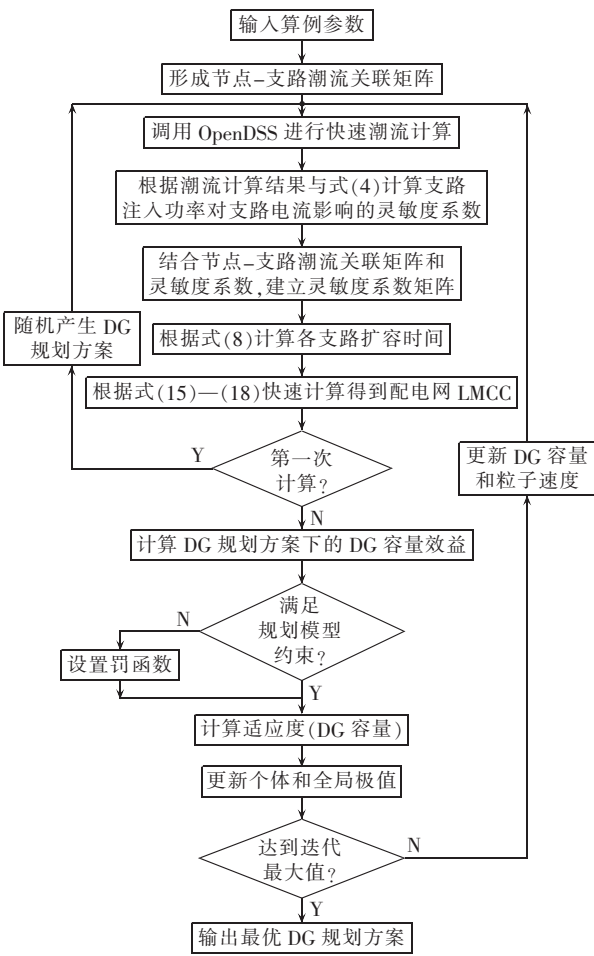


图 3 基于 LMCC 的 DG 规划流程
Fig.3 Flowchart of DG planning based on LMCC

3 算例分析

3.1 算例介绍

以 IEEE 33 节点辐射型配电网为例,如图 4 所示。线路选用 LGJ 架空线路,根据原始线路数据设定相应的线路长度,并根据 1.1.1 节的方法进行重新编号,节点 0(N_0)为发电机节点。

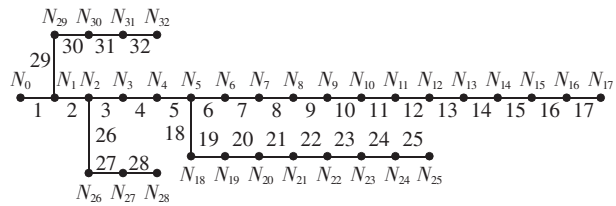


图 4 IEEE 33 节点配电系统
Fig.4 IEEE 33-bus distribution system

假设该配电网负荷的功率以每年 3% 的速度增长,折现率为 8%,线路投资回报年限为 40 a。本文采用 OpenDSS 软件作为仿真计算工具。

OpenDSS 是一款可用于仿真分析和规划含 DG 的配电网的软件。该软件具有丰富全面的配电网模

型、快速稳定的潮流计算能力以及不同时间尺度下的潮流计算分析和系统故障分析的功能。因此,软件支持几乎所有的配电系统的规划和分析、分布式发电分析、智能电网应用分析以及谐波分析。此外软件 COM 接口的运用,可以使用户利用其他仿真软件自行对 OpenDSS 进行应用的扩展,来满足各种配电网仿真的需要^[12-13]。

3.2 扩容时间及计算过程对比验证

根据式(15)可以看出,扩容时间 τ_k 是 LMCC 计算公式的重要组成部分,对 LMCC 的准确计算起到了十分重要的作用。

运用二分法单纯按照年负荷增长率增加负荷求解交流潮流计算支路扩容时间,将会导致节点电压偏低,而使得计算得到的扩容时间有不同程度的偏小。因此,在运用二分法潮流计算时,对一般的交流潮流计算进行改进,以第一次交流潮流计算得到的电压值为准,之后运用前推潮流的方法进行潮流计算。对比二分法和本文提出的灵敏度法,算例的各支路扩容时间以及计算花费的时间和潮流程序调用次数进行对比分别如图 5 和表 1 所示。

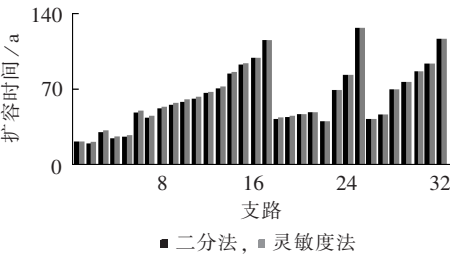


图 5 扩容时间对比
Fig.5 Comparison of capacity expansion time

表 1 不同方法计算时间和程序调用次数对比
Table 1 Comparison of computing time and program-call times between methods

方法	计算时间/s	潮流程序调用次数
二分法	10.33	555
灵敏度法	0.045	1

通过图 5 和表 1 对比可以看出:相较于二分法,运用灵敏度法计算得到的各支路扩容时间在大幅减少计算时间的情况下,其最大误差仅为 2.59%,以此扩容时间计算得到的各节点 LMCC 的误差也都在 5% 以内,这些误差都在允许范围之内。由此可得:本文运用的灵敏度法计算扩容时间和 LMCC 在大幅减少计算量和计算时间的同时,保证了较高的准确度。

3.3 电网公司产权下的 DG 配置规划

运用本文推导的 LMCC 计算公式快速计算得到 IEEE 33 测试系统各节点 LMCC,如图 6 所示。

假设 DG 类型有出力稳定的燃气轮机以及风力、光伏发电机组。其综合投资费用分别为 0.48、0.63、1 万元/(kV·A)^[14]。考虑有些末端节点无法配

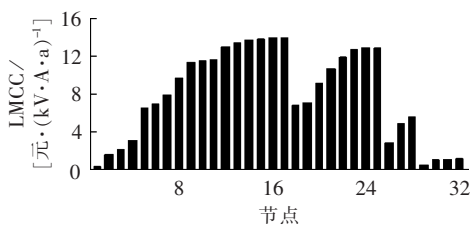


图 6 IEEE 33 节点系统 LMCC
Fig.6 LMCC of IEEE 33-bus system

置 DG 的情况,现可以规划建设 DG 的位置有: N_{12} — N_{15} 、 N_{22} 、 N_{27} 、 N_{28} 、 N_{30} 和 N_{31} 。其中, N_{13} — N_{15} 靠近高层楼房小区用户,适合安装风力发电设备或光伏设备, N_{22} 为郊区工业区,较适合安装光伏发电设备,其他节点可任意配置。 β 取 10%。DG 的功率因数固定为 0.95,最小接入容量为 $100\text{ kV}\cdot\text{A}$,增量为 $100\text{ kV}\cdot\text{A}$,最大接入容量除 N_{13} — N_{15} 为 $200\text{ kV}\cdot\text{A}$,其他节点都为 $400\text{ kV}\cdot\text{A}$ 。

粒子群优化算法参数设置:种群规模为 20,加速系数 $c_1=c_2=2$,最大迭代次数 100 次。

运用粒子群优化算法对 2.2 节建立的电网公司产权下的 DG 规划模型多次求解,得到最优 DG 规划方案有以下 2 种方案:第一种方案, N_{12} 为 $400\text{ kV}\cdot\text{A}$ 微型燃气轮机, N_{28} 为 $200\text{ kV}\cdot\text{A}$ 微型燃气轮机, F_{DG} 为 $2.46\times 10^4\text{ 元/a}$,DG 投资容量部分的成本年值为 $2.39\times 10^4\text{ 元/a}$;第二种方案, N_{12} 为 $400\text{ kV}\cdot\text{A}$ 微型燃气轮机, N_{15} 为 $100\text{ kV}\cdot\text{A}$ 风力发电机, N_{28} 为 $100\text{ kV}\cdot\text{A}$ 微型燃气轮机, F_{DG} 为 $2.55\times 10^4\text{ 元/a}$,DG 投资容量部分的成本年值为 $2.51\times 10^4\text{ 元/a}$ 。考虑节能减排等因素,第二种方案较第一种方案更优,因此选择第二种方案。

将规划结果对比文献[8]可以看出:由于 N_{13} — N_{15} 接入 DG 类型限制,虽然 N_{13} — N_{15} 比 N_{12} 有更大的 LMCC,但规划结果表明只有 N_{12} 接入了最大允许接入容量($400\text{ kV}\cdot\text{A}$)的 DG;如果运用文献[8]的“DG 优先接入 LMCC 最大的节点”的启发式方法进行多类型 DG 规划时,其 LMCC 最大的节点 N_{15} 必定会最先接入最大允许接入容量的 DG。由于风电、光伏这类 DG 在实际运行时无法满负荷运行,其实际容量效益会远小于能以额定容量满负荷运行的 DG(如燃气轮机)。因此,运用启发式方法进行多类型 DG 规划时,其规划的结果往往不是最优的。DG 规划结果对比如表 2 所示,其中括号内数据表示 DG 安装容量,单位为 $\text{kV}\cdot\text{A}$ 。

本文寻优求解规划模型时,优化算法将频繁地调用 LMCC 计算程序。通过 3.2 节对比验证可知,运用灵敏度系数矩阵求解 LMCC,可在保证精度的前提下大幅减少计算时间。因此,对于计及配电网 LMCC 的多类型 DG 规划,运用灵敏度系数矩阵进行配

表 2 不同方法 DG 规划结果对比
Table 2 Comparison of DG planning results between methods

DG 类型	DG 规划结果	
	启发式方法	智能算法
燃气	$N_{12}(400)$ 、 $N_{28}(400)$	$N_{12}(400)$ 、 $N_{28}(100)$
风力	$N_{13}(200)$ 、 $N_{14}(200)$ 、 $N_{15}(200)$	$N_{15}(100)$
光伏	$N_{22}(400)$	—
目标函数 $\min f$	1800	600

网 LMCC 快速计算是十分必要的。

4 结语

在电网不断升级改革的今天,随着智能电网的不断推进和电力市场的逐步发展和完善,DG 的渗透率不断提高,电网企业则更需要可以准确反映市场价值的配电网规划方案,不断提升电力企业的活力和效率。

本文基于配电网 LMCC 进行配电网 DG 规划,主要工作如下:

- a. 根据配电网特点得到节点功率对支路电流影响的灵敏度系数矩阵,用于配电网各支路扩容时间以及配电网 LMCC 的公式推导及其快速求解;
- b. 在用户自备产权下,分析和评估不同电价体制下配置 DG 在容量成本方面的效益;
- c. 在电网公司产权下,建立多类型 DG 的规划模型,并通过算例验证了多类型 DG 规划建立快速求解配电网 LMCC 方法的可行性。

在本文的基础上可进行的下一步工作:考虑存在环网的配电网 LMCC 灵敏度计算方法;考虑多类型 DG 的出力时序特性,建立更贴近实际的 DG 规划模型。

参考文献:

[1] 王成山,陈恺,谢莹华,等. 配电网扩展规划中分布式电源的选址和定容[J]. 电力系统自动化,2006,30(3):38-43.
WANG Chengshan, CHEN Kai, XIE Yinghua, et al. Siting and sizing of distributed generation in distribution network expansion planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 38-43.

[2] 刘波,张焰,杨娜. 改进的粒子群优化算法在分布式电源选址和定容中的应用[J]. 电工技术学报,2008,23(2):103-108.
LIU Bo, ZHANG Yan, YANG Na. Improved particle swarm optimization method and its application in the siting and sizing of distributed generation planning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(2): 103-108.

[3] 栗然,马慧卓,祝晋尧,等. 分布式电源接入配电网多目标优化规划[J]. 电力自动化设备,2014,34(1):6-13.
LI Ran, MA Huizhuo, ZHU Jinyao, et al. Multi-objective optimization for DG integration into distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 6-13.

[4] 彭春华,于蓉,孙惠娟. 基于 K-均值聚类多场景时序特性分析的分布式电源多目标规划[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):58-65.

- PENG Chuanhua, YU Rong, SUN Huijuan. Multi-objective DG planning based on K-means clustering and multi-scenario timing characteristics analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 58-65.
- [5] LI F, TOLLEY D L. Long-run incremental cost pricing based on unused capacity[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(4): 1683-1689.
- [6] 欧阳武, 程浩忠, 张秀彬, 等. 配电网节点边际容量成本及应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(1): 18-21.
- OUYANG Wu, CHENG Haozhong, ZHANG Xiubin, et al. Locational marginal capacity cost in distribution network and its application[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(1): 18-21.
- [7] 欧阳武, 程浩忠, 张秀彬. 基于配电网节点边际容量成本的分布式电源规划[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(18): 28-31.
- OUYANG Wu, CHENG Haozhong, ZHANG Xiubin. Distributed generation planning method based on locational marginal capacity cost in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(18): 28-31.
- [8] 任龙霞, 雷金勇, 甘德强. 计及配电网节点/支路边际容量成本的分布式电源规划[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(21): 34-39.
- REN Longxia, LEI Jinyong, GAN Deqiang. Distributed generator planning in distribution network considering locational/branch marginal capacity cost model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(21): 34-39.
- [9] 王承民, 蒋传文. 基于支路电流状态变量的灵敏度分析方法研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21(1): 42-46.
- WANG Chengmin, JIANG Chuanwen. Research on sensitivity analysis method based on line current variable[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(1): 42-46.
- [10] JEITH K, HEDGE COCK J, GREGORY R, et al. Technical guide to the connection of generation to the distribution network[EB/OL]. [2004-02-15]. http://www.energywork.org/engineering/pdfs/DG/FES_00318_V040211.pdf.
- [11] 胡庶. 分布式发电装置经济性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- HU Shu. Economic analysis of distributed generation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007.
- [12] 李鹏, 孙充勃, 王成山, 等. 基于 OpenDSS 的智能配电网仿真与模拟平台及其应用[J]. 中国电力, 2013, 46(11): 12-16.
- LI Peng, SUN Chongbo, WANG Chengshan, et al. OpenDSS-based simulation and modeling platform of smart distribution system and its application[J]. Electric Power, 2013, 46(11): 12-16.
- [13] ROGER C D. Reference guide the open distribution system simulator[EB/OL]. [2014-08-29]. <http://nche.dl.sourceforge.net/project/electricdss/OpenDSS/OpenDSSManual.pdf>.
- [14] 徐迅, 陈楷, 龙禹, 等. 考虑环境成本和时序特性的微网多类型分布式电源选址定容规划[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1-8.
- XU Xun, CHEN Kai, LONG Yu, et al. Optimal site selection and capacity determination of multi-types of distributed generation in microgrid considering environment cost and timing characteristics[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1-8.
- [15] WOO C K, DEBRA L Z, REN O, et al. Marginal capacity costs of electricity distribution and demand for distributed generation[J]. The Energy Journal, 1995, 16(2): 111-120.

作者简介:



钱佳琦

钱佳琦(1991—),男,浙江建德人,硕士研究生,研究方向为分布式电源发电与电力市场(E-mail:n130127020@fzu.edu.cn);

江岳文(1977—),女,湖南岳阳人,副教授,博士,研究方向为电力系统优化运行与电力市场。

Multi-type distributed generator planning considering locational marginal capacity cost of distribution network

QIAN Jiaqi, JIANG Yuewen

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The load increase or DG(Distributed Generator) integration of distribution network may advance or delay the expansion of power-supply equipment and then cause the change of capacity cost. The sensitivity of branch current to the nodal injection power is deduced according to the power flow of radial distribution network, which is combined with the node-branch power-flow correlation matrix to build the corresponding sensitivity matrix for calculating the LMCC(Locational Marginal Capacity Cost) of distribution network. For the DG owner, LMCC can be used to evaluate the DG capacity benefit under different electricity price systems; for the grid with DGs, it can be used to build a multi-type DG planning model, which is then solved by the particle swarm optimization algorithm. Case study verifies the feasibility of the proposed model and method.

Key words: distributed power generation; power generator planning; sensitivity coefficient matrix; LMCC; electric power distribution; OpenDSS