

含分布式电源的辐射状配电网损耗分配方法

刘博¹, 周洁², 陈剑¹, 徐超¹, 何禹清¹

(1. 国网湖南省电力公司经济技术研究院, 湖南 长沙 410004;

2. 国网湖南省电力公司株洲供电分公司, 湖南 株洲 412000)

摘要: 随着售电侧有序开放以及分布式电源的接入, 如何公正合理地分配配电网损耗已经成为影响电力市场健康发展的一个关键问题。为此, 提出了一种含分布式电源的辐射状配电网损耗分配方法, 以实现各市场主体间合理的损耗分配。该方法基于潮流计算的结果, 根据线路的有功和无功功率流动进行损耗分配, 可分为三个步骤: 首先, 从电源节点(即发电量大于负荷的节点)开始, 依次计算出所有节点分配的损耗, 得到连接于节点的负荷分配的损耗; 然后, 计算连接于节点的分布式电源分配的损耗, 同样先计算出节点分配的损耗, 与第一步不同的是, 节点分配损耗从汇聚节点(即负荷大于发电量的节点)开始计算; 最后, 对损耗计算结果进行规范化处理。对 17 节点和 IEEE33 节点算例系统进行仿真计算, 并与其他方法进行对比, 表明了所提出方法的公平性和合理性。

关键词: 分布式电源; 配电网; 损耗分配

A loss allocation method for radial distribution networks with distributed generations

LIU Bo¹, ZHOU Jie², CHEN Jian¹, XU Chao¹, HE Yuqing¹

(1. Institute of Economic Technology, State Grid Hunan Electric Power Corporation, Changsha 410004, China;

2. Zhuzhou Power Supply Company, State Grid Hunan Electric Power Corporation, Zhuzhou 412000, China)

Abstract: With the orderly liberalization of the electricity selling side and introduction of distributed generation (DG), how to allocate the loss in distribution system fairly and properly is becoming a critical problem, which has influenced the healthy development of electricity market. Thus, this paper proposes a loss allocation method for radial distribution networks with DGs. The method, which is based on power flow solutions and allocates power loss according to the active and reactive power flow of lines, consists of three steps. Firstly, starting from the source nodes (the nodes whose generation is more than their load), the power loss allocated to all nodes is calculated, then, the loss allocated to the loads connected to the nodes can be obtained. Secondly, the power loss allocated to DGs connected to the nodes is also calculated according to the loss allocated to the nodes. But in this step, the loss allocated to the nodes is calculated starting from the slack nodes (the nodes whose load is more than their generation), which is different with the first step. Finally, the normalization of the result is executed. The application of the proposed method in a 17-node distribution system and IEEE 33-node test system are analyzed, and the results compared with other methods demonstrate the fairness and reasonability of the proposed method.

Key words: distributed generations; distribution networks; loss allocation

0 引言

随着分布式电源的发展和大规模接入, 一部分电力用户由消费者变为生产者, 使得配电系统从被动模式转变为主动模式^[1-2]。同时, 也在配电网中引入了损耗分配问题, 即如何公平、合理地将配电网总损耗在各负荷和分布式电源之间进行分配^[3-5]。

目前, 国内外关于配电网损耗分配方法研究还较少^[6], 且大部分损耗分配方法是基于输电网提出

的, 主要包括: ① 比例分配法^[7], 该方法根据分布式电源和负荷的有功等级进行损耗分配, 简单且易于实现, 但未考虑电网的拓扑结构, 缺乏公平性; ② 边际损耗系数法^[8], 该方法是一种基于微观经济学原理和已知潮流解的损耗分配方法, 能够提供很好的经济信号, 但其计算过程复杂, 在实际中难以推广; ③ 基于电路理论的方法, 主要包括: Z-bus 方法^[9], 该方法不能应用于纯架空线路的配电系统, 因为架空线路的并联导纳可以忽略不计, 将

导致系统的导纳矩阵不可逆; 支路电流分解法^[10], 该方法基于结点前向支路(即连接该节点与根节点的支路)的电流, 计算该节点分配的损耗。④追踪法^[11]。该方法将支路功率流动归因于节点的注入功率, 具有明确的物理特性, 能够清晰地表达各电源节点和负荷节点之间的潮流情况。

配电网损耗分配方法与输电网损耗分配方法的不同在于: 配电网损耗分配方法通常选择连接输配电系统的节点为平衡节点(根节点), 且不承担任何损耗, 此外, 配电网损耗分配方法还需考虑负荷和分布式电源与配电企业之间存在的双边交易^[12]。而输电网损耗分配方法平衡节点的选择不唯一并承担一部分损耗, 且不能将损耗同时、自然地分配给电网中所有的负荷和电源。因此, 输电网损耗分配方法难以直接应用于配电网。

本文提出了一种含分布式电源的辐射状配电网损耗分配方法, 该方法首先根据潮流计算结果得到各支路的功率损耗; 然后, 确定零功率损耗节点, 基于支路的功率损耗, 计算出与零损耗节点相邻节点分配的损耗, 并依次计算得到所有节点分配的损耗。最后, 为了确保收支平衡, 对计算结果进行规范化处理。该方法简单且以电路定律为基础, 损耗分配结果公平合理且具有丰富的经济学意义。

1 理论基础

图1所示为两个节点组成的简单配电网。其中, $P_{1,2}$ 和 $Q_{1,2}$ 分别为节点1流向节点2的有功功率和无功功率, U_1 为节点1的电压, D_1 和 D_2 为连接于节点2的负荷。

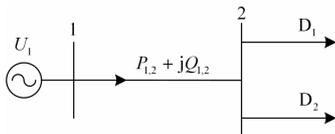


图1 两节点配电网结构图

Fig. 1 Structure of a 2-node distribution network

连接节点1和节点2支路的有功损耗表示为

$$\Delta P_{1,2} = \frac{R_{1,2}}{U_1^2} \cdot (P_{1,2}^2 + Q_{1,2}^2) \quad (1)$$

式中, $R_{1,2}$ 为支路的电阻。由式(1)可知, $\Delta P_{1,2}$ 可以分解成两部分, 第一部分 $kP_{1,2}^2$ 为有功功率流动引起的线路损耗; 第二部分 $kQ_{1,2}^2$ 为无功功率流动引起的线路损耗。将它们分别表示为 $\Delta P_{1,2}^p$ 和 $\Delta P_{1,2}^q$, 式(1)可以改写为

$$\Delta P_{1,2} = \Delta P_{1,2}^p + \Delta P_{1,2}^q \quad (2)$$

由于 $P_{1,2} = P_{D_1} + P_{D_2} + \Delta P_{1,2}$, 其中 P_{D_1} 和 P_{D_2} 分别为负

荷 D_1 和 D_2 的有功需求, 则 $\Delta P_{1,2}^p$ 可以表示为

$$\Delta P_{1,2}^p = k \cdot (P_{D_1} + P_{D_2} + \Delta P_{1,2})^2 \quad (3)$$

因为与 P_{D_1} 和 P_{D_2} 相比, $\Delta P_{1,2}$ 可以忽略不计。因此, 可以近似认为 $\Delta P_{1,2}^p \approx k(P_{D_1} + P_{D_2})^2$ 。根据夏普利值法^[13-14], 有 $\Delta P_{1,2}^p$ 中 P_{D_1} 的贡献为 $k(P_{D_1}^2 + P_{D_1} \cdot P_{D_2})$, 同理, 可以得到 $\Delta P_{1,2}^p$ 中 P_{D_2} 的贡献为 $k(P_{D_2}^2 + P_{D_2} \cdot P_{D_1})$ 。

类似地, 可以计算出 $\Delta P_{1,2}^q$ 中 Q_{D_1} 与 Q_{D_2} 的贡献分别为 $k(Q_{D_1}^2 + Q_{D_1} \cdot Q_{D_2})$, $k(Q_{D_2}^2 + Q_{D_2} \cdot Q_{D_1})$, 其中 Q_{D_1} 和 Q_{D_2} 分别为负荷 D_1 和 D_2 的无功需求。夏普利值法为本文所提出的损耗分配法的理论基础。

2 损耗分配方法

如图2所示, 当 $(P_{G_1} + P_{G_2} + \dots) > (P_{D_1} + P_{D_2} + \dots)$ 时, 即节点 n 为有功电源节点时, 连接于该节点的所有负荷均由连接于该节点的分布式电源就地提供能量, 因此, 连接于该节点的负荷不承担因有功流动引起的损耗; 当 $(P_{G_1} + P_{G_2} + \dots) < (P_{D_1} + P_{D_2} + \dots)$ 时, 即连接于节点 n 的分布式电源发出的有功小于节点 n 所连接负荷的有功需求时, 连接于该节点的分布式电源发出的有功功率由连接于该节点的负荷就地消耗了, 因此, 连接于该节点的分布式电源不承担因有功流动引起的损耗。同理, 可以对无功流动引起的损耗进行分析。

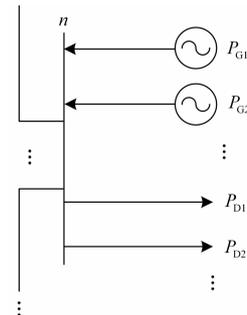


图2 配电网节点示意图

Fig. 2 Diagram of a sample node in distribution network

综上所述, 负荷和分布式电源的损耗分配计算应有所不同。此外, 本文只讨论对有功损耗的分配。

2.1 负荷分配损耗的计算

首先, 计算出每个节点因有功功率流动分配的损耗, 再将节点损耗在连接于节点的负荷和节点向其输送的有功为正的相邻节点之间进行分配, 从而得到负荷因有功流动分配的损耗。此时, 节点分配的损耗取决于与其相邻且向其输送的有功为正的节点所分配的损耗。

将支路 $b_{h,i}$ 中节点 h 向节点 i 输送的有功表示为

$P_{h,i}^s$ 。假设求得节点 h 因有功流动分配的损耗为 L_h^p ，将 L_h^p 在连接于节点 h 的负荷和节点 h 向其输送的有功为正的相邻节点之间进行分配。若 $P_{h,i}^s$ 为正，由夏普法可知， L_h^p 中 $P_{h,i}^s$ 的贡献为

$$L_h^p \cdot \frac{(P_{h,i}^s)^2 + P_{h,i}^s \left(\sum_{\substack{m \in A_{h+1} \\ m \neq i}} P_{h,m}^s + \sum_{D_m \in D_h} P_{D_m} \right)}{\left(\sum_{m \in A_{h+1}} P_{h,m}^s + \sum_{D_m \in D_h} P_{D_m} \right)^2} \quad (4)$$

式中： A_{h+1} 为通过支路 $b_{h,m}$ 与节点 h 相邻且节点 h 向其输送的有功为正的节点组成的集合； $P_{h,m}^s$ 为节点 h 向节点 m 输送的有功，且为正； P_{D_m} 为负荷 D_m 的有功需求； D_h 为连接于节点 h 的负荷组成的集合。

节点 i 不仅应承担一部分节点 h 所分配的损耗，还应承担支路 $b_{h,i}$ 因有功流动引起的损耗，因此节点 i 因有功流动分配的损耗 L_i^p 为

$$L_i^p = \sum_{h \in A_{i-1}} \left[L_h^p \cdot \frac{(P_{h,i}^s)^2 + P_{h,i}^s \left(\sum_{\substack{m \in A_{h+1} \\ m \neq i}} P_{h,m}^s + \sum_{D_m \in D_h} P_{D_m} \right)}{\left(\sum_{m \in A_{h+1}} P_{h,m}^s + \sum_{D_m \in D_h} P_{D_m} \right)^2} + \Delta P_{h,i}^p \right] \quad (5)$$

式中： A_{i-1} 为通过支路 $b_{h,i}$ 与节点 i 相邻，且向节点 i 输送的有功为正的节点组成的集合； $\Delta P_{h,i}^p$ 为支路 $b_{h,i}$ 因有功流动引起的损耗，其计算过程可见附录。

由式(5)可知， L_i^p 的计算步骤如下：

(1) 确定根节点和有功电源节点，令其 $L_i^p=0$ ；

(2) 循环计算所有节点的 L_i^p 。如果所有向节点 i 输送的有功功率为正的节点所分配的损耗均已得到，那么可以利用式(5)计算出节点 i 分配的损耗；

(3) 如仍有节点的 L_i^p 未计算出来，返回步骤(2)，否则计算结束。

如图3所示，为了证明所提出的方法能够计算出所有节点的 L_i^p ，假设有节点 n_1 ，其分配的损耗不能通过计算得到，可以推理出与节点 n_1 相邻且向其输送的有功为正的的一个或多个节点分配的损耗无法通过计算得到，如节点 n_2 。同样地，节点 n_2 所分配的损耗不能得到，可以推理出与其相邻且向其输送的有功为正的节点 n_3 所分配的损耗不能得到。因为配电网为辐射状，依此类推肯定存在一个节点 n_n ，其为根节点或者电源节点，该节点分配的损耗为零，与不能通过计算得到 n_1, n_2, n_3 的分配损耗这一假设相矛盾。因此，所提出的方法能计算出所有节点分配的损耗。

此外，值得注意的是式(5)计算得到的 L_i^p 并不是节点 i 实际的损耗，而是为了计算连接于该节点的负荷分配的损耗而分配给节点 i 的损耗。

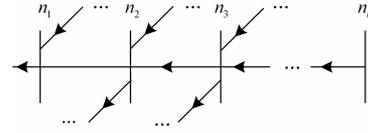


图3 含 n_n 个节点的配电网示意图

Fig. 3 Diagram of a n_n -node distribution network

类似于式(4)，将节点 i 所分配的损耗在连接于节点 i 的负荷和节点 i 向其输送的有功为正的相邻节点之间进行分配，可以得到连接于节点 i 的负荷 D_k 分配的损耗计算式为

$$L_{D_k}^p = L_i^p \cdot \frac{P_{D_k}^2 + P_{D_k} \left(\sum_{\substack{D_n \in D_i \\ n \neq k}} P_{D_n} + \sum_{h \in A_{i+1}} P_{h,i}^s \right)}{\left(\sum_{D_n \in D_i} P_{D_n} + \sum_{h \in A_{i+1}} P_{h,i}^s \right)^2} \quad (6)$$

式中， D_i 为连接于节点 i 的负荷组成的集合。

由式(6)可知， $L_{D_k}^p$ 取决于 L_i^p ，又 L_i^p 中包含支路损耗 $\Delta P_{h,i}^p$ 。因此，负荷所分配的损耗实际取决于向其输送功率的支路的损耗。负荷功率越大，供电线路越长，负荷所分配的损耗也越大，保证了分配结果的公平性和合理性。

同理，可以分别计算出节点和负荷因无功流动分配的损耗 L_i^q 以及 $L_{D_k}^q$ 。

$$L_i^q = \sum_{h \in R_{i-1}} \left[L_h^q \cdot \frac{(Q_{h,i}^s)^2 + Q_{h,i}^s \left(\sum_{\substack{m \in R_{h+1} \\ m \neq i}} Q_{h,m}^s + \sum_{D_m \in D_h} Q_{D_m} \right)}{\left(\sum_{m \in R_{h+1}} Q_{h,m}^s + \sum_{D_m \in D_h} Q_{D_m} \right)^2} + \Delta P_{h,i}^q \right] \quad (7)$$

$$L_{D_k}^q = L_i^q \cdot \frac{Q_{D_k}^2 + Q_{D_k} \left(\sum_{\substack{D_n \in D_i \\ n \neq k}} Q_{D_n} + \sum_{h \in R_{i+1}} Q_{h,i}^s \right)}{\left(\sum_{D_n \in D_i} Q_{D_n} + \sum_{h \in R_{i+1}} Q_{h,i}^s \right)^2} \quad (8)$$

式中： R_{i-1} 为通过支路 $b_{h,i}$ 与节点 i 相邻，且向节点 i 输送的无功为正的节点组成的集合； $Q_{h,i}^s$ 为支路 $b_{h,i}$ 中节点 h 向节点 i 输送的无功，且为正； $Q_{h,m}^s$ 为支路 $b_{h,m}$ 中节点 h 向节点 m 输送的无功，且为正； R_{h+1} 为通过支路 $b_{h,m}$ 与节点 h 相邻，且节点 h 向其输送的无功为正的节点组成的集合； $\Delta P_{h,i}^q$ 为支路 $b_{h,i}$ 因无功流动引起的损耗，其计算过程可见附录； D_h 为连接于节点 h 的负荷组成的集合； D_i 为连接于节点 i 的负荷组成的集合。

将式(6)和式(8)相加即可得到负荷 D_k 分配的总损耗 L_{D_k} 为

$$L_{D_k} = L_{D_k}^p + L_{D_k}^q \quad (9)$$

2.2 分布式电源分配损耗的计算

为了计算连接于节点 i 的分布式电源 G_k 所分配的损耗，首先应计算出节点 i 所分配的损耗。与负

荷分配损耗计算不同的是: 此时节点 i 所分配的损耗 L_i 取决于从其接收的有功功率为正的节点所分配的损耗, 同样的 L_i 也由 L_i^p 和 L_i^q 两部分组成。

节点 i 因有功流动分配的损耗 L_i^p 计算公式为

$$L_i^p = \sum_{h \in A_{i+1}} \left[L_h^p \cdot \frac{(P_{i,h}^r)^2 + P_{i,h}^r \left(\sum_{\substack{m \in A_{h-1} \\ m \neq i}} P_{m,h}^r + \sum_{G_m \in G_h} P_{G_m} \right)}{\left(\sum_{m \in A_{h-1}} P_{m,h}^r + \sum_{G_m \in G_h} P_{G_m} \right)^2} + \Delta P_{i,h}^p \right] \quad (10)$$

式中: A_{i+1} 为通过支路 $b_{i,h}$ 与节点 i 相邻, 且从节点 i 接收的有功为正的节点组成的集合; L_h^p 为节点 h 因有功流动分配的损耗; $P_{i,h}^r$ 为节点 h 从节点 i 接收的有功, 且为正; $P_{m,h}^r$ 为节点 h 从节点 m 接收的有功, 且为正; A_{h-1} 为通过支路 $b_{m,h}$ 与节点 h 相邻, 且节点 h 从其接收的有功为正的节点组成的集合; $\Delta P_{i,h}^p$ 为支路因有功流动引起的损耗, 其计算过程可见附录; G_h 为连接于节点 h 的分布式电源组成的集合; P_{G_m} 为分布式电源 G_m 输出的有功。

由式(10)可知, L_i^p 的计算步骤如下:

- (1) 确定根节点和有功汇聚节点, 令其 $L_i^p=0$;
- (2) 循环计算所有节点的 L_i^p 。如果所有从节点 i 接收的有功功率为正的节点所分配的损耗已得到, 那么可以利用式(10)计算出该节点分配的损耗;
- (3) 如仍有节点的 L_i^p 未计算出来, 返回步骤(2), 否则计算结束。

将节点 i 所分配的损耗在连接于节点的分布式电源和节点 i 从其接收的有功为正的相邻节点之间进行分配, 可以得到连接于节点 i 的分布式电源 G_k 分配的损耗计算式为

$$L_{G_k}^p = L_i^p \cdot \frac{P_{G_k}^2 + P_{G_k} \left(\sum_{\substack{G_n \in G_i \\ n \neq k}} P_{G_n} + \sum_{h \in A_{i-1}} P_{h,i}^r \right)}{\left(\sum_{G_n \in G_i} P_{G_n} + \sum_{h \in A_{i-1}} P_{h,i}^r \right)^2} \quad (11)$$

式中, G_i 为连接于节点 i 的分布式电源组成的集合。

同理, 可以分别计算出节点和分布式电源因无功流动分配的损耗 L_i^q 以及 $L_{G_k}^q$ 。

$$L_i^q = \sum_{h \in R_{i+1}} \left[L_h^q \cdot \frac{(Q_{i,h}^r)^2 + Q_{i,h}^r \left(\sum_{\substack{m \in R_{h-1} \\ m \neq i}} Q_{m,h}^r + \sum_{G_m \in G_h} Q_{G_m} \right)}{\left(\sum_{m \in R_{h-1}} Q_{m,h}^r + \sum_{G_m \in G_h} Q_{G_m} \right)^2} + \Delta P_{i,h}^q \right] \quad (12)$$

$$L_{G_k}^q = L_i^q \cdot \frac{Q_{G_k}^2 + Q_{G_k} \left(\sum_{\substack{G_n \in G_i \\ n \neq k}} Q_{G_n} + \sum_{h \in R_{i-1}} Q_{h,i}^r \right)}{\left(\sum_{G_n \in G_i} Q_{G_n} + \sum_{h \in R_{i-1}} Q_{h,i}^r \right)^2} \quad (13)$$

式中: R_{i+1} 为与通过支路 $b_{i,h}$ 节点 i 相邻, 且从节点 i 接收的无功为正的节点组成的集合; $Q_{i,h}^r$ 为支路 $b_{i,h}$

中节点 h 从节点 i 接收的无功, 且为正; $Q_{m,h}^r$ 为支路 $b_{m,h}$ 中节点 h 从节点 m 接收的无功, 且为正; R_{h-1} 为通过支路 $b_{m,h}$ 与节点 h 相邻且节点 h 从其接收的无功为正的节点组成的集合; $\Delta P_{i,h}^q$ 为支路因无功流动引起的损耗, 其计算过程见附录; G_h 为连接于节点 h 的分布式电源组成的集合; G_i 为连接于节点 i 的分布式电源组成的集合; Q_{G_m} 为分布式电源 G_m 输出的无功。

将式(11)和式(13)相加即可得到负荷 G_k 分配的总损耗 L_{G_k} 为

$$L_{G_k} = L_{G_k}^p + L_{G_k}^q \quad (14)$$

2.3 计算结果规范化处理

由于计算得到的负荷和分布式电源的总损耗大于系统实际损耗, 为了确保“收支平衡”, 需要对计算结果进行规范化处理。规范因子为

$$NF = \frac{\sum \Delta P}{\sum L_{D_k} + \sum L_{G_k}} \quad (15)$$

规范化后负荷和分布式电源分配的损耗为

$$L_{D_k}^{\text{normalized}} = L_{D_k} NF \quad (16)$$

$$L_{D_k}^{\text{normalized}} = L_{D_k} NF \quad (17)$$

3 算例分析

在 Matlab7.0 环境下用本文所提出的损耗分配法对 17 节点和 IEEE33 节点配电网^[9]进行仿真计算。

算例 1: 如图 4 所示, 为一由 17 个节点组成的 10 kV 辐射状农村配电网, 根节点 0 连接于一台 110/10 kV 变压器。系统由 12 个负荷(分别连接于节点 2、5、7、8、9、10、11、12、13、14、15、16)、3 个分布式电源(分别连接于节点 7、8、16)以及 16 条支路组成, 其潮流计算结果以及支路参数如表 1 所示。支路参数以 1 MVA 和 10 kV 为基准功率和基准电压。采用比例分配法、Z-Bus 法、支路电流分解法以及本文所提出的损耗分配法计算得到的损耗分配结果如表 2 和表 3 所示。

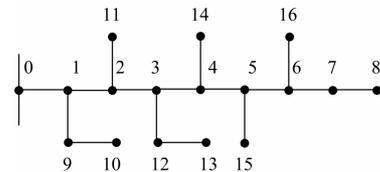


图 4 17 节点配电网算例

Fig. 4 a 17-node test distribution network

由式(5)可知, 采用本文所提出的损耗分配法, 节点因有功流动分配的损耗由两部分组成: (1) 向其输送有功功率的节点所分配损耗的一部分; (2) 与节

点相连且向其输送有功功率的支路的损耗。由此可知,相同功率条件下,负荷供电线路越长,距离电源节点越远所分配的损耗比例也越高。如表 2 中有,在负荷功率相等的情况下,采用本文所提出的方法连接于节点 2 的负荷所分配的损耗较小,而连接于节点 14 的负荷因距离电源节点较远所分配的损耗

较大,由此可知,本文所提出的损耗分配法在进行损耗分配时考虑了系统的拓扑结构,与不考虑负荷在电网中接入位置的比例分配法相比更公平。如表 2 中有,因未考虑系统的拓扑结构,采用比例分配法连接于节点 2 的负荷和节点 14 的负荷所分配的损耗相等。

表 1 17 节点配电网数据

Table 1 Data of the 17-node test distribution network

支路编号	始节点 h	终节点 i	支路参数			$P_{h,i(\text{end})}/\text{kW}$	$Q_{h,i(\text{end})}/\text{kvar}$	$\Delta P_{h,i}/\text{kW}$	$\Delta Q_{h,i}/\text{kvar}$
			$r/\text{p.u.}$	$x/\text{p.u.}$	$b/\text{p.u.}$				
1	0	1	0.0025	0.0026	0.03	1160.018	532.083	4.084	4.248
2	1	2	0.0007	0.0007	0.02	949.178	456.244	0.779	0.779
3	2	3	0.0020	0.0021	0.02	707.857	382.858	1.302	1.367
4	3	4	0.0001	0.0001	0	166.185	132.185	0.004	0.004
5	4	5	0.0018	0.0018	0	16.161	60.161	0.007	0.007
6	5	6	0.0011	0.0011	0	-258.923	-93.923	0.084	0.084
7	6	7	0.0011	0.0011	0	-237.997	-99.997	0.074	0.074
8	7	8	0.0001	0.0001	0	-168.000	-60.000	0.003	0.003
9	1	9	0.0008	0.0008	0.02	210.015	110.015	0.045	0.045
10	9	10	0.0007	0.0007	0	120.000	80.000	0.015	0.015
11	2	11	0.0021	0.0021	0.02	90.000	30.000	0.019	0.020
12	3	12	0.0009	0.0009	0.01	541.339	265.339	0.329	0.329
13	12	13	0.0017	0.0017	0.01	400.000	195.000	0.339	0.339
14	4	14	0.0006	0.0006	0	150.000	72.000	0.017	0.017
15	5	15	0.0003	0.0003	0	10.000	5.000	0.000	0.000
16	6	16	0.0007	0.0007	0	-21.000	6.000	0.000	0.000

表 2 节点负荷损耗分配结果

Table 2 Results of loss allocated to load

节点编号	P_D/kW	Q_D/kvar	损耗分配结果/kW			
			比例分配法	Z-Bus 法	支路电流法	本文所提出的方法
2	150	72	0.272	0.462	0.660	0.635
5	265	149	0.481	1.363	1.732	0.330
7	210	100	0.381	-0.257	1.187	0.000
8	72	36	0.131	-0.090	0.410	0.000
9	90	40	0.163	0.222	0.336	0.322
10	120	80	0.218	0.315	0.501	0.476
11	90	40	0.163	0.304	0.410	0.381
12	141	80	0.256	0.782	0.997	0.949
13	420	200	0.762	2.514	3.103	2.957
14	150	72	0.272	0.772	0.953	0.916
15	10	5	0.018	0.050	0.064	0.012
16	239	136	0.434	-0.511	1.479	0.001
合计			3.550	5.925	11.832	6.979

此外,由表 2 中连接于节点 13 的负荷功率较大所分配的损耗比例较大可知,本文所提出的方法不仅考虑了系统的拓扑结构,而且还考虑了用户的功率需求。

表 3 节点分布式电源损耗分配结果

Table 3 Results of loss allocated to DG

节点编号	P_G/kW	Q_G/kvar	损耗分配结果/kW			
			比例分配法	Z-Bus 法	支路电流法	本文所提出的方法
7	300	150	1.331	0.337	-1.599	0.082
8	240	196	1.065	0.289	-1.309	0.034
16	260	130	1.154	0.551	-1.565	0.005
合计			3.550	1.176	-4.473	0.121

Z-Bus 法基于节点阻抗矩阵进行损耗计算,当系统节点数量较多时,计算量大,耗时长。而且,Z-Bus 损耗分配法源于输电系统,根节点承担了一部分损耗,与配电网损耗分配中根节点不应承担任何损耗不符。因此,将 Z-Bus 法运用到配电网中需

要对其进行改进, 将根节点损耗在其他节点之间进行分配^[16]。而本文所提出的损耗分配法是直接基于配电网提出的, 不需要再进行改进, 且除了潮流计算以外不再需要进一步计算。

由表 3 可知, 采用支路电流分解法, 连接于节点 7、8 和 16 的分布式电源所分配的损耗均为负, 但当连接于节点的分布式电源发出的功率大于连接于节点的负荷的功率需求时, 分布式电源也应承担一部分因其发出功率的流动所引起的损耗。由表 3 可知, 采用本文所提出的方法, 分布式电源所承担的损耗均为正, 且连接于节点 16 的分布式电源发出的功率被连接于该点的负荷就地消耗的较多, 功率流动小, 分配的损耗也较小, 因此, 与支路电流分解法相比, 本文所提出的损耗分配法更具合理性。

算例 2: 将所提出的方法应用于文献[17-19]中的 IEEE33 节点配电网测试系统(如图 5 所示), 节点负荷及参数详见文献[19]。

为验证本文所提出的损耗分配法的仿真效果, 对测试系统进行一定的修改, 增加三个分布式电源分别连接于节点 7、17 和 32, 负荷和分布式电源的损耗分配结果如表 4 和表 5 所示。

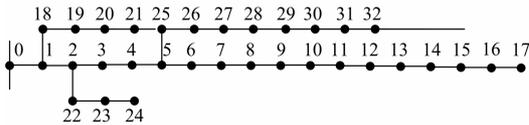


图 5 IEEE33 节点系统

Fig. 5 IEEE 33-node system

表 4 负荷损耗分配结果

Table 4 Results of loss allocated to load

节点 编号	P_D / kW	Q_D / kvar	损耗 分配 结果/ kW	节点 编号	P_D / kW	Q_D / kvar	损耗 分配 结果/ kW
1	100	60	0.236	17	90	40	0
2	90	40	1.082	18	90	40	0.238
3	120	80	2.218	19	90	40	0.526
4	60	30	1.269	20	90	40	0.578
5	60	20	1.611	21	90	40	0.624
6	200	100	6.136	22	90	50	1.437
7	200	100	1.214	23	420	200	9.241
8	60	20	0.379	24	420	200	10.568
9	60	20	0.488	25	60	25	1.776
10	45	30	0.593	26	60	25	1.870
11	60	35	0.743	27	60	20	2.059
12	60	35	0.886	28	120	70	5.432
13	120	80	1.214	29	200	600	25.209
14	60	10	0.318	30	150	70	2.521
15	60	20	0.248	31	210	100	0.478
16	60	20	0.102	32	60	40	0

表 5 分布式电源损耗分配结果

Table 5 Results of loss allocated to DG

节点编号	P_G /kW	Q_G /kvar	损耗分配结果/kW
7	240	96	0.092
17	240	96	0.818
32	400	100	0.424

由表 4 和表 5 可知, 算例 2 中连接于节点 18、19、20、21 的负荷功率相等, 但随着供电线路越长, 其所分配的损耗逐渐增大, 而连接于节点 23、24 的负荷其功率相对较大, 所分配的损耗也较大。此外, 功率相等的情况下, 连接于节点 7 的分布式电源其发出的功率就地消耗较多, 分配的损耗小于连接于节点 17 的分布式电源所分配的损耗, 与算例 1 的结论一致。

4 结论

本文提出了一种含分布式电源的辐射状配电网损耗分配方法。该方法中节点分配的损耗取决于其相邻节点分配的损耗以及连接于节点的支路损耗。损耗分配结果与潮流计算结果一致, 与比例分配方法、Z-bus 法以及支路电流法相比, 不仅考虑了用户的功率需求而且考虑了系统的拓扑结构, 确保了配电网损耗分配的公平性和合理性。本文的损耗分配方法简单易懂, 不需要复杂的程序或者大量的计算, 易于实施, 是一种快速, 简单和有效的配电网损耗分配方法。

附录 支路功率损耗计算

附录图 1 所示为一个由 $n+1$ 个节点组成的简单辐射状配电网, 图中实线表示支路功率流动、支路损耗以及负荷和分布式电源注入节点的功率, 功率单位为 kVA。其中平衡(根)节点的编号为 0, 依次对网络中的节点进行编号, 定义支路中靠近根节点的节点为始节点, 另一节点为终结点, 且始节点编号小于终结点编号。

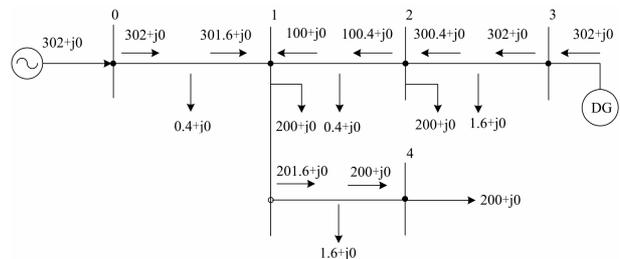


图 1 简单辐射状配电网

Fig. 1 A simple distribution network

对任意节点 i , 注入节点的复功率计算公式为

$$P_i + jQ_i = \sum_{D_m \in D_i} P_{D_m} - \sum_{G_m \in G_i} P_{G_m} + j \left(\sum_{D_m \in D_i} Q_{D_m} - \sum_{G_m \in G_i} Q_{G_m} - \frac{1}{2} B_i U_i^2 \right) \quad (1)$$

式中: P_{D_m} 和 Q_{D_m} 分别为负荷 D_m 的有功和无功需求, D_i 为连接于节点 i 的负荷组成的集合; P_{G_m} 和 Q_{G_m} 分别为分布式电源 G_m 输出的有功和无功, G_i 为连接于节点 i 的分布式电源组成的集合; B_i 为与节点 i 相连支路的电纳之和。

将连接节点 h 和节点 i 的支路表示为 $b_{h,i}$ (或 $b_{i,h}$), 定义始节点到终节点的方向为支路正方向, 支路 $b_{h,i}$ 的功率损耗为

$$\Delta P_{h,i} + j\Delta Q_{h,i} = \frac{R_{h,i} + jX_{h,i}}{U_{h,i(\text{end})}^2} (P_{h,i(\text{end})}^2 + Q_{h,i(\text{end})}^2) \quad (2)$$

式中: $R_{h,i}$ 和 $X_{h,i}$ 分别为支路 $b_{h,i}$ 的电阻和电抗; $U_{h,i(\text{end})}$ 为支路 $b_{h,i}$ 中终节点的电压; $P_{h,i(\text{end})}$ 和 $Q_{h,i(\text{end})}$ 分别为支路 $b_{h,i}$ 中流过终节点的有功功率和无功功率, 其计算公式为

$$P_{h,i(\text{end})} + jP_{h,i(\text{end})} = \sum_{j \in \alpha} (P_j + jQ_j) + \sum_{\substack{b_{k,m} \in \beta \\ b_{k,m} \neq b_{h,i}}} (\Delta P_{k,m} + j\Delta Q_{k,m}) \quad (3)$$

式中: α 为到根节点的路径经过支路 $b_{h,i}$ 的节点组成的集合; β 为到根节点的路径经过支路 $b_{h,i}$ 的支路组成的集合。当 i 为末端节点时, β 为空集。由附录式(1)~附录式(3)可以依次计算出各支路的功率损耗以及支路中流过终节点的有功功率和无功功率。

联合附录式(2)和附录式(3), 可计算出支路 $b_{h,i}$ 中节点 h 向节点 i 输送的有功 $P_{h,i}^s$ 和无功 $Q_{h,i}^s$, 分别表示为

$$P_{h,i}^s = \begin{cases} P_{h,i(\text{end})} + \Delta P_{h,i} & i \text{ 为终结点} \\ -P_{h,i(\text{end})} & h \text{ 为终结点} \end{cases} \quad (4)$$

$$Q_{h,i}^s = \begin{cases} Q_{h,i(\text{end})} + \Delta Q_{h,i} & i \text{ 为终结点} \\ -Q_{h,i(\text{end})} & h \text{ 为终结点} \end{cases} \quad (5)$$

同理, 支路 $b_{h,i}$ 中节点 h 从节点 i 接收的有功 $P_{i,h}^r$ 和无功 $Q_{i,h}^r$ 可分别表示为

$$P_{i,h}^r = \begin{cases} -P_{i,h(\text{end})} - \Delta P_{i,h} & i \text{ 为终结点} \\ P_{i,h(\text{end})} & h \text{ 为终结点} \end{cases} \quad (6)$$

$$Q_{i,h}^r = \begin{cases} -Q_{i,h(\text{end})} - \Delta Q_{i,h} & i \text{ 为终结点} \\ Q_{i,h(\text{end})} & h \text{ 为终结点} \end{cases} \quad (7)$$

此外, 支路 $b_{h,i}$ 因有功流动引起的损耗 $\Delta P_{h,i}^p$ 和因无功流动引起的损耗为

$$\Delta P_{h,i}^p = \frac{R_{h,i}}{U_{h,i(\text{end})}^2} P_{h,i(\text{end})}^2 \quad (8)$$

$$\Delta P_{h,i}^q = \frac{R_{h,i}}{U_{h,i(\text{end})}^2} Q_{h,i(\text{end})}^2 \quad (9)$$

参考文献

- [1] 张跃, 杨汾艳, 曾杰, 等. 主动配电网的分布式电源优化规划方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 67-72.
ZHANG Yue, YANG Fenyan, ZENG Jie, et al. Research of distributed generation optimization planning for active distributed network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 67-72.
- [2] 王旭强, 刘广一, 曾沅, 等. 分布式电源接入下配电网电压无功控制效果分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 47-53.
WANG Xuqiang, LIU Guangyi, ZENG Yuan, et al. Analysis on the effects of Volt/Var control method considering distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 47-53.
- [3] 柳春芳. 主动配电网的一体化设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 49-55.
LIU Chunfang. An integrated design method of active distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 49-55.
- [4] 张立梅, 唐巍, 赵云军, 等. 分布式发电接入配电网后对系统电压及损耗的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 91-101.
ZHANG Limei, TANG Wei, ZHAO Yunjun, et al. Analysis of DG influences on system voltage and losses in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 91-101.
- [5] 江辉, 周友庆, 彭建春, 等. 基于节点电纳摄动的通用配电网损耗分配方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 42-48.
JIANG Hui, ZHOU Youqing, PENG Jianchun, et al. A universal procedure for allocation losses in distribution networks by perturbing shunt susceptance[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 42-48.
- [6] 曾鸣, 马少寅, 王蕾, 等. 基于分布式电源并网的配电网损耗分摊定价模型[J]. 华东电力, 2011, 39(12): 1965-1968.
ZENG Ming, MA Shaoyin, WANG Lei, et al. Loss allocation pricing model for distribution network with distributed generation[J]. East China Electric Power, 2011, 39(12): 1965-1968.
- [7] MACQUEEN C N, IRVING M R. An algorithm for the

- allocation of distribution system demand and energy losses[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(1): 338-343.
- [8] 刘梓洪, 程浩忠, 刘晓东, 等. 边际网损系数法中节点无功功率对电力市场网损分摊的影响[J]. 电网技术, 2004, 28(3): 51-54.
LIU Zihong, CHENG Haozhong, LIU Xiaodong, et al. Influence of node-injected reactive power on loss allocation in electricity market by marginal loss coefficient method[J]. Power System Technology, 2004, 28(3): 51-54.
- [9] CONEJO A J, GALIANA F D, and KOCHAR I. Z-bus loss allocation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2001, 16(1): 105-110.
- [10] CARPANETO E, CHICCO G, and AKILIMALI J S. Branch current decomposition method for loss allocation in radial distribution systems with distributed generations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(3): 1170-1179.
- [11] 王铮, 刘创华, 魏珍, 等. 基于叠加定理和 Aumann-Shapley 法的发电权交易网损分摊[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 13-22.
WANG Zheng, LIU Chuanghua, WEI Zhen, et al. Losses allocation resulting from generation rights trade based on superposition principle and Aumann-Shapley method[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 13-22.
- [12] CARPANETO E, CHICCO G, and AKILIMALI J S. Characterization of the loss allocation techniques for radial systems with distributed generation[J]. Spain: IEEE Melecon, 2006: 1028-1031.
- [13] MOLONA Y P, SAAYEDRA O R, and et al. Transmission Network cost allocation based on circuit theory and the Aumann-Shapley method[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4568-4577.
- [14] 胡朝阳, 韩祯祥. 基于 Shapley 值的网损分摊新方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(7): 32-35.
HU Chaoyang, HAN Zhenxiang. A new Shapley value based method for allocation of transmission losses[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(7): 32-35.
- [15] BOMPARD E, CARPANETO E, CHICCO G, et al. Convergence of the backward/forward sweep method for load-flow analysis of radial distribution systems[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2000, 22(7): 521-530.
- [16] 赵娜, 别朝红, 宋永红. 改进的 Z-BUS 网损分摊方法[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(10): 7-13.
ZHAO Na, BIE Zhaohong, SONG Yonghong. Improved Z-BUS loss allocation method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(10): 7-13.
- [17] 胡晓松, 张殷, 谢光彬, 等. 含 PV 节点的配电网合环[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 8-13.
HU Xiaosong, ZHANG Yin, XIE Guangbin, et al. A loop closing power flow calculation algorithm of distribution network with PV nodes[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 8-13.
- [18] 赵金利, 于莹莹, 李鹏, 等. 一种基于锥优化的 DG 优化配置快速计算方法[J]. 电工技术学报, 2015, 29(12): 173-179.
ZHAO Jinli, YU Yingying, LI Peng, et al. A fast determination method of DG capacity in distribution network based on conic programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 29(12): 173-179.
- [19] BARAN M, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [20] CONEJO A J, ARROYO J M, and et al. Transmission loss allocation: a comparison of different practical algorithms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(3): 571-576.

收稿日期: 2015-12-20; 修回日期: 2016-03-07

作者简介:

刘博(1990-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为线损理论计算与电网规划; E-mail: Bo_Liu1990@126.com

周洁(1990-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为分布式发电技术与电能计量。E-mail: Jie_zhou1990@126.com

(编辑 姜新丽)