

# 含极端反向潮流的有源配电网损耗分配

陈 昀<sup>1</sup>, 李娅迪<sup>2</sup>, 刘继雷<sup>1</sup>, 刘世篷<sup>1</sup>, 张 杰<sup>1</sup>, 马勇飞<sup>1</sup>,  
刘亚辉<sup>1</sup>, 潘子砚<sup>2</sup>, 葛祎萌<sup>2</sup>, 胡俊杰<sup>2</sup>, 卢斌先<sup>2</sup>

(1. 国网青海省电力公司, 青海 西宁 810000; 2. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 随着有源配电网的快速发展, 配电网中反向潮流的出现和激增已不可避免, 如何公正合理地分配中低压配电网中反向潮流引起的高损耗已经成为影响电力系统经济运行和电力市场健康发展的一个关键问题。目前的分配方法没有考虑极端反向潮流存在的情况。为研究反向潮流配电网中的损耗分配, 结合前推回代潮流计算和合作博弈改进  $\tau$  值法, 考虑光伏输出和负荷的时变性, 分析了该方法在单个 DG 和多个 DG 接入的含极端反向潮流的配电网应用的合理性, 研究了有源配电网极端反向潮流对损耗的影响机理。分析表明: 在有源配电网中, 存在着分布式电源最佳供电功率, 使网络降损最小; 在含极端反向潮流的配电网中, 分布式电源分配的网络损耗占网络总损耗的 95% 以上。

**关键词:** 反向潮流; 损耗分配; 合作博弈论; 分布式电源; 有源配电网

**中图分类号:** TM73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2691 (2026) 02-0047-08

## Loss Allocation in Active Distribution Network under Extreme Reverse Power Flow

CHEN Yun<sup>1</sup>, LI Yadi<sup>2</sup>, LIU Jilei<sup>1</sup>, LIU Shipeng<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>1</sup>, MA Yongfei<sup>1</sup>,  
LIU Yahui<sup>1</sup>, PAN Ziyang<sup>2</sup>, GE Yimeng<sup>2</sup>, HU Junjie<sup>2</sup>, LU Binxian<sup>2</sup>

(1. State Grid Qinghai Electric Power Company, Xining 810000, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** With the rapid development of active distribution networks, it is inevitable for the emergence and surge of reverse power flow in distribution networks. How to fairly and reasonably allocate the high losses caused by reverse power flow in medium and low-voltage distribution networks has become a key issue affecting the economic operation of the power system and the healthy development of the power market. Current loss allocation methods do not account for scenarios involving extreme reverse power flow. In order to study the loss allocation in distribution networks with reverse power flow, this paper combines a forward-backward power flow algorithm with a cooperative game modified  $\tau$ -value method. Considering the time-varying characteristics of photovoltaic (PV) output and loads, it analyzes the rationality of this method in its application to distribution networks with extreme reverse power flow, where either a single distributed generator (DG) or multiple DGs are integrated. Additionally, it investigates the influence mechanism of extreme reverse power flow on power loss in active distribution networks. The results show that there exists an optimal power supply from distributed generators that minimizes loss reduction in the network. Moreover, in distribution networks with extreme reverse power flow, more than 95% of the total system losses are allocated to the distributed generators.

**Key words:** reverse power flow; loss allocation; cooperative game theory; distributed power supply; active distribution network

和”、屋顶光伏等概念的普及和建设任务的推进,配电网中分布式光伏发电得到持续快速发展。2022 年我国光伏新增装机 8 741 万千瓦,累计装机容量达到 39 261 万千瓦,同比增长 28.6%。2022 年新增分布式光伏并网规模 5 111.4 万千瓦<sup>[1]</sup>。与一些发达国家的电力系统不同,国家电网和南方电网的输配电基础设施属于国有资产,所有的新能源电力公司都可以利用该平台大力发展新能源发电,促进我国双碳目标早日实现,这是我国大力发展新能源发电的极大优势。因此我国已经出现了大量分布式新能源经 10 kV 中压配电网将电力送入电网的情况,这大大提高了电网的利用效率。但是大量的新能源经 10 kV 配电网接入电网,若发电功率过高,在没有配置储能的情况下会引发反向潮流<sup>[2]</sup>(reverse power flow, RPF),导致网络损耗过高。当反向潮流远大于辐射状配电网负荷总功率时称为极端反向潮流。

由于可再生能源并网存在的间歇性和不确定性问题还没有解决,在世界范围大力推进新能源建设的背景下,这种极端反向潮流情况在局部地区,甚至更大范围会持续很久。研究极端反向潮流情况下分布式光伏高损耗的损耗分配,能够在“双碳”背景下明确各发电主体应承担的高损耗责任,为后续制定各分布式光伏动态上网电价提供依据,对电网经济运行和电力市场健康发展具有重要意义。

目前配电网损耗分配方法研究大多是由输电网的损耗分配方法改进而来。这些方法可划分为两类,其一是基于综合成本的分摊方法<sup>[3-5]</sup>,将分摊以损耗费用分配的形式体现,包括比例分配法、合同路径法、兆瓦公里法等。其二是基于电力系统理论的损耗分摊方法<sup>[6,7]</sup>,包括边际网损系数法、潮流追踪法等。文献[3]中的比例分配法简单且易于实现,但未考虑电网的拓扑结构,缺乏公平性。文献[4]中的 MW-mile 方法在一定程度上弥补了比例分配法无法计及电网结构的缺陷,但没有考虑无功潮流对损耗的影响。文献[6]中提出的边际损耗系数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。由于配电网一般呈辐射状且节点众多、结构复杂,导致上述网损分摊方法不易实现。

随着分布式电源的快速发展,一些学者研究

了含分布式电源的配电网损耗分摊方法<sup>[8-16]</sup>,包括基于叠加定理的损耗分配方法、基于数学理论的损耗分配方法与考虑三相不平衡的网损分摊方法<sup>[10]</sup>。文献[8]在电网平衡节点电压不变的前提下,应用叠加原理,将各电源单独作用时支路上流过的电流与该支路的电压降相乘,以此方式获得各电源应分摊的损耗。此法将系统中的损耗公平、合理的全部分配给各交易方,即分布式电源或负荷。文献[9]中的支路电流分解法是基于结点前向支路(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。文献[11]和[12]讨论了基于图论面向分支的能源交易系统损耗分配技术。随着博弈论理论的发展,以博弈论<sup>[13-16]</sup>为基础的损耗分配方法被提出,这类方法主要有基于 Shapley 值(SV)、Nucleolus 值(NV)、Aumann Shapley(AS)以及  $\tau$  值的损耗分配方法。SV 法在负荷节点众多时计算量较大,AS 法是对 SV 法的一种改进,也受到 SV 法局限性的限制。 $\tau$  值方法具有 100%效率,分配损耗时考虑了网络拓扑结构,能够自然合理地负载和分布式电源分配损耗。因此,本文利用合作博弈的  $\tau$  值概念对配电网进行损耗分配。此外,上述方法可以较好地应用在有源配电网中,但还没有对含极端反向潮流的有源配电网损耗分配的研究和分析,分布式电源在含极端反向潮流的配电网中高损耗的责任量化研究目前仍处于空白。

本文考虑了含极端反向潮流情形下的有源配电网损耗分配。第一部分介绍了合作博弈论  $\tau$  值法的基本理论,第二部分介绍了改进  $\tau$  值损耗分配模型,第三部分考虑光伏输出时变性和负载的时变性,分析了以每小时时间尺度采样数据为输入含反向潮流单 DG 和多 DG 配电网损耗分配,分析了极端反向潮流对损耗的影响机理。第四部分为本文结论。

## 1 基于合作博弈论的 $\tau$ 值分配法

将配电网中的损耗分配问题建模为一个合作博弈问题<sup>[18]</sup>,在该场分配博弈中,将配电网中不同节点上的负载和分布式电源作为参与博弈的玩家。所有玩家都参与的联盟为最大联盟,其总收益为配电网中产生的总线路损耗。

假设配电网中有  $n$  个负载,在合作博弈中,最大联盟包含所有负载,记为  $CL_{\max} = \{1, 2, 3, \dots, n\}$ 。 $CL_{\max}$  所有子集组成的集合记为  $K$ ,任意联

盟用  $k$  表示。

$$K = \{\phi, k_1, k_2, k_3, \dots, k_{2^n}\} \quad (1)$$

式中:  $\phi$  表示空集。

负载的边际贡献含义为联盟  $k$  中所有负载接入配电网时的网络损耗与  $k$  中去掉该负载时的网络损耗之差。任意负载  $i$  的边际贡献为

$$X_i(k, v) = v(k) - v(k - \{i\}) \quad (2)$$

式中:  $X_i(k, v)$  为在联盟  $k$  中参与者  $i$  的边际贡献。 $v$  为特征函数, 代表参与者的总收益, 在配电网损耗分配模型中指的是网络损耗。

$n$  个参与者在最大联盟里的边际贡献为上限值, 其所组成的向量为上限向量, 记为  $X(v)$ 。参与者  $i$  的下限值为在包含参与者  $i$  的所有联盟中联盟  $k$  的总收益与除参与者  $i$  以外的所有参与者在联盟  $k$  中的边际贡献总和之差的极大值。下限向量记为  $x(v)$ 。

$$X(CLmax, v) = \{X_1(CLmax, v), X_2(CLmax, v), X_3(CLmax, v), \dots, X_n(CLmax, v)\} \quad (3)$$

$$x(v) = \{x_1(v), x_2(v), x_3(v), \dots, x_n(v)\} \quad (4)$$

$$X_i(CLmax, v) = v(CLmax) - v(CLmax - \{i\}) \quad (5)$$

$$x_i(v) = \max_{k \in 2^n} \left[ v(k) - \sum_{j \in k - \{i\}} X_j(CLmax, v) \right] \quad (6)$$

合作博弈法要求应用场景必须为满足准平衡条件, 即满足

$$x_i(v) \leq X_i(CLmax, v), \quad \forall i \in CLmax \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i \leq v(CLmax) \leq \sum_{i=1}^n X_i(CLmax, v) \quad (8)$$

式(7)要求任意玩家的边际贡献下限值小于等于上限值; 式(8)为在最大联盟中所有玩家的边际贡献下限值之和必须小于等于总收益, 而总收益必须小于等于所有玩家边际贡献上限值之和。在一个满足准平衡条件的合作游戏中, 为了使分配方法公平公正和具有说服力, 往往将第  $i$  个  $\tau_i$  值定义为区间  $[x_i(v), X_i(CLmax, v)]$  上一个唯一确定的值。玩家  $i$  的  $\tau_i$  值可以表示为

$$\tau_i(v) = \alpha x_i(v) + (1 - \alpha) X_i(CLmax, v) \quad (9)$$

上限向量的计算量并不复杂, 但下限向量的计算却复杂得多。为简化计算步骤, 减轻计算负担, 定义一组间隙值, 如公式(10)所示。

$$f(k) = \sum_{j \in k} X_j(CLmax, v) - v(k), \quad \forall k \in 2^n - \phi \quad (10)$$

引入间隙值之后, 因为下限向量值取值为计算所得数值中的极大值。一组间隙值中最小值为  $\lambda_i$ 。

$$\lambda_i = \min_{k: i \in k} [f(k)] = X_i(CLmax, v) - x_i(v), \quad \forall i \in CLmax \quad (11)$$

联立式(9)和式(11), 计算玩家  $i$  的  $\tau_i$  值的最终表达式为

$$\tau_i(v) = X_i(CLmax, v) - \alpha \lambda_i \quad (12)$$

由于各个玩家所分配收益之和应该等于最大联盟的总收益, 因此建立如下关系。

$$\sum_{i \in N} \tau_i(v) = v(CLmax) \quad (13)$$

联立式(12)和式(13),  $\alpha$  值的最终计算公式为

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n X_i(CLmax, v) - v(CLmax)}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (14)$$

## 2 改进 $\tau$ 值损耗分配模型

对于  $n$  个负载, 由传统方法中的式(11)可知至少要计算  $2^{n-1}$  个间隙值。这就需要进行与间隙值的数量一样多的潮流计算, 增加了计算负担。为了减少计算负担, 使用式(15)可以在不计算出所有间隙值和不影响结果精度的情况下一步计算  $\lambda_i$ , 详细证明过程见文献[16]。

$$\lambda_i = X_i(N_L, v) - v(i) \quad (15)$$

本文计算分配损耗时所需的特征函数值  $v$  时采用的是前推回代算潮流的方法直接计算出配电网中各个支路电流的值和网络中的总损耗。以一个含  $M_L$  个负荷和  $M_G$  的辐射状配电网为例, 将负载和分布式电源分别计算其  $\tau$  值, 详细计算步骤如下。

设该配电网中所连接的负载的极大联盟为  $N_L = \{1, 2, 3, \dots, M_L\}$ 。

负载  $i$  的上限值计算公式为

$$X_i(N_L, v) = v(N_L) - v(N_L - \{i\}) = P_{loss} - P_{loss-i} \quad (16)$$

式中:  $P_{loss}$  为网络中所有负载接入时的网络损耗,  $P_{loss-i}$  为网络中去仅除第  $i$  个负载之后的网络损耗。

负载  $i$  的最小间隙值计算公式为

$$\lambda_i^L = X_i(N_L, v) - v(i) = \frac{P_{\text{loss}} - P_{\text{loss}-i} - p_{\text{loss}-i}}{P_{\text{loss}} - P_{\text{loss}-i} - p_{\text{loss}-i}} \quad (17)$$

式中:  $p_{\text{loss}-i}$  为网络中只有负载  $i$  接入时的网络损耗。

设  $N_G = \{1, 2, 3, \dots, M_G\}$  为配电网中连接的分布式电源的集合, 每个分布式电源的  $X_i(N_G, v)$  和  $\lambda_i^G$  可以通过负载计算时的类似概念来计算。最后根据式(14)分别计算负载与分布式电源的  $a_L$  与  $a_G$ , 根据式(12)分别计算负载与分布式电源  $\tau$  值。

由于仅有负载接入和仅有分布式电源接入的网络线路损耗总和并不等于实际配电网络中同时连接负载和分布式电源产生的线路损耗, 故计算得到的  $\tau$  值并不直接作为负载和分布式电源的所分配的损耗。为了有效且公平地分配损失, 负载所分配到的损耗等于在仅有负载接入时计算的相应  $\tau$  值, 而分布式电源所分配的损耗应等于网络中同时接入负载和电源的损耗减去负载分配的损耗。

### 3 含反向潮流配电网损耗分配分析

#### 3.1 方法验证

本文使用的算法相关程序包括前推回代潮流计算程序和基于合作博弈论分配损耗程序, 均通过运行得以实现正常预想功能, 并且在 11 kV、17 节点的配电网中进行测试, 测试系统的相关参数见附录, 将仿真结果与文献[16]进行比较, 结果如图 1 所示。

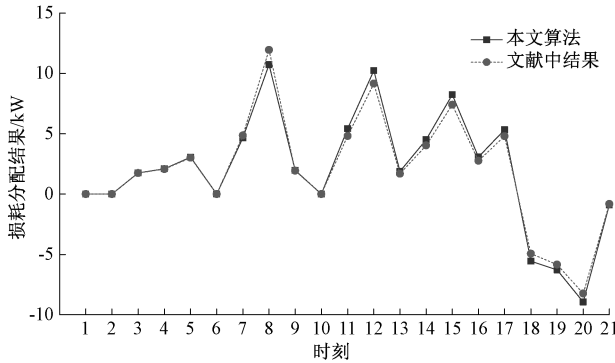


图 1 损耗分配结果验证

Fig. 1 Validation of loss allocation results

网络负荷之间分配的损耗略有不同, 这是由于计算网络损耗的方法不同所致。考虑方法的简单实用性, 本文程序采用前推回代方法计算网络损耗。两者最大误差为 1.20 kW, 平均误差为

0.437 kW, 不同计算损耗的方法对最终计算影响可忽略, 验证了本文使用算法程序的有效性。

#### 3.2 算例仿真

##### 3.2.1 含反向潮流的单 DG 配电网损耗分配

利用附录 A 图 A1 所示的青海省农牧区 10 kV 实际辐射状配电网对一天 24 小时内的反向潮流进行研究分析。该配电网包括 72 个节点, 71 条支路, 分布式光伏电站在 72 节点接入。该配电网支路阻抗数据、节点负荷功率数据见附录 A。光伏发电和各个节点的负荷数据是一天 24 小时每隔 1 小时记录一次的实际功率, 规定零点为第 1 个时刻, 一天共 24 个时刻。配电网运行数据以及损耗分配结果如图 2 所示。

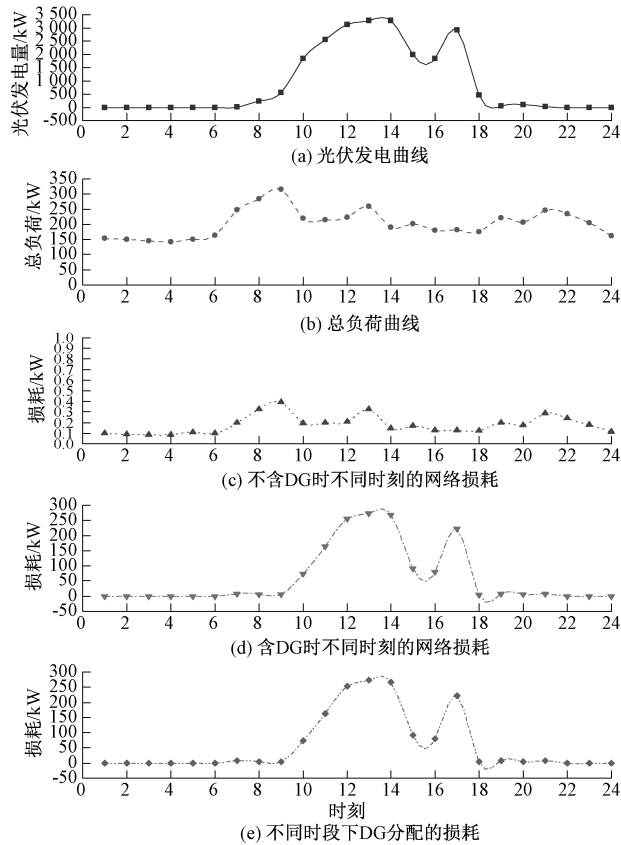


图 2 配电网运行数据和损耗分配结果

Fig. 2 Distribution network operation data and loss allocation results

光伏发电接入配电网中, 上午 9:00 时, 总负荷为 220 kW, 光伏发电量为 1 834 kW; 下午 16:00 时, 总负荷为 180 kW, 光伏发电量为 2 911 kW; 网络中在 9:00–16:00 期间存在极端反向潮流。若网络中不含分布式光伏电源, 网络各个时刻的总损耗最高为 0.39 kW, 由于反向潮流的存在, 网络总损耗最高增加至 273 kW, 在 9:00–16:00 期间

内 DG 分配的损耗曲线和网络总损耗曲线十分接近。使用基于合作博弈  $\tau$  值的损耗分配方法将存在反向潮流时网络增加的损耗分配给 DG,即 DG 承担了这部分的损耗。将一天 24 小时的 DG 承担的网络损耗曲线对时间进行积分,再按照目前的居民电价进行费用计算,假设电价  $c=0.45$  元/(kW·h),一天 24 小时内 DG 承担的费用应为 661.54 元。网络中负载承担的费用为 1.94 元。在含有极端反向潮流的配电网中,DG 应承担的线损费用非常可观。

3.2.2 含反向潮流的多 DG 配电网损耗分配

利用附录图 A1 所示的青海省农牧区 10 kV 实际辐射状配电网对含极端反向潮流配电网损耗分配进行研究分析。该配电网接入 4 个分布式电源,该配电网实际运行负载总有功为 241.71 kW,总无功为 48.70 kvar,网络中无 DG 时总损耗为 0.16 kW。分布式电源接入位置和容量见表 1。损耗分配结果见图 3 和表 2。

表 1    DG 接入位置及容量

Tab. 1    Losses and expenses borne by DG

|     | 接入位置  | P/kW  | Q/kvar |
|-----|-------|-------|--------|
| DG1 | 24 节点 | 100   | 40     |
| DG2 | 36 节点 | 400   | 100    |
| DG3 | 68 节点 | 100   | 40     |
| DG3 | 72 节点 | 2 417 | 487    |

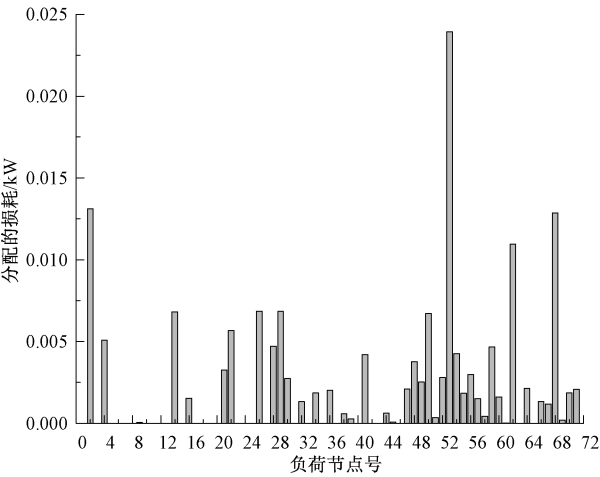


图 3    负荷损耗分配结果

Fig. 3    Load loss distribution results

表 2    DG 损耗分配结果

Tab. 2    Loss distribution results of DG

|     | 接入位置  | 损耗分配结果/kW |
|-----|-------|-----------|
| DG1 | 24 节点 | 4.84      |
| DG2 | 36 节点 | 1.81      |
| DG3 | 68 节点 | 4.79      |
| DG3 | 72 节点 | 116.58    |

多个 DG 接入配电网时,DG 的总发电量远远大于网络总负荷,网络中存在极端反向潮流。从损耗分配结果可知,DG1 与 DG3 发电功率相同,但接入配电网的位置不同,DG3 相比于 DG1 更接近根节点,该分配方法为二者分配的损耗包含了网络的拓扑结构信息,更加合理。DG2 虽然发电量多余 DG3,但因为距离根节点较近,反向潮流引起的网络损耗较小,故其分配的损耗小于 DG3。由于 DG4 发电量极大,导致网络中出现极端反向潮流,与其他 DG 相比,该分配方法为 DG4 分配了最大的损耗。结果表明,该损耗分配方法在多个 DG 接入的含极端反向潮流的配电网应用的合理性。

3.2.3 极端反向潮流对功率损耗影响机理分析

仍利用附录图 A1 所示的配电网进行典型时刻下反向潮流和损耗分析,典型时刻为中午 12 点时刻,在 72 节点处接入一个光伏分布式电源。本文仿真中该光伏电源实际最大发电量是该辐射状配电网实际运行负载的 10 倍之多,该场景属于可再生能源接入配电网使得潮流极端返送情况。本节设置两个算例,算例一对比了存在极端反向潮流时和无反向潮流时网络支路损耗。算例二分析了反向潮流逐渐增加时 DG 分配的损耗、DG 分配的损耗占总损耗的比例变化。

为简化分析,不影响通用性,本文将 DG 作为功率因数恒定的 PQ 节点。为分析 DG 发电量与网络总负荷不同比例关系时反向潮流对损耗分配的影响,定义光伏发电量与负荷总有功、无功需求相等时的大小作为标准发电量。光伏发电量用功率系数  $\lambda$  和标准发电量的乘积表示,如式(18)所示。

$$\begin{cases} P_{\text{DG}} = \lambda \times P_{\text{st}} \\ Q_{\text{DG}} = \lambda \times Q_{\text{st}} \end{cases} \quad (18)$$

式中: $P_{\text{DG}}$ 、 $Q_{\text{DG}}$  分别表示 DG 所发出的有功功率和无功功率, $P_{\text{st}}$ 、 $Q_{\text{st}}$  分别表示标准发电有功功率和无功功率,它们等于辐射配电网负荷的总有功功率和总无功功率。

算例一:基于改进  $\tau$  值损耗分配方法分析了 72 节点配电网损耗分布。图 4 为  $\lambda=0$  和  $\lambda=10$  两种情况下 72 节点配电网模型 1-26 节点支路损耗分布对比,纵坐标为对数坐标。

由附录 C 中的理论推导可知,DG 影响接入点之前的支路损耗,接入点之后的支路损耗没有变

化。当 DG 发电量远远大于网络中的总负荷时,线路上存在极端反向潮流,DG 接入点之前的支路损耗可近似为

$$\Delta P'_i \approx (P_{DGk}^2 + Q_{DGk}^2) \times \frac{r_i}{U_i^2} \quad (19)$$

式中: $i$  表示支路序号, $P_{DGk}$ 、 $Q_{DGk}$  表示在  $k$  节点接入的分布式电源的发电功率, $r_i$  表示支路电阻, $U_i$  表示支路首端电压。

可见当网络中只有负荷时的网络损耗与网络中存在极端反向潮流时的网络损耗相比可以忽略不计,网络中的损耗主要是由 DG 引起的。

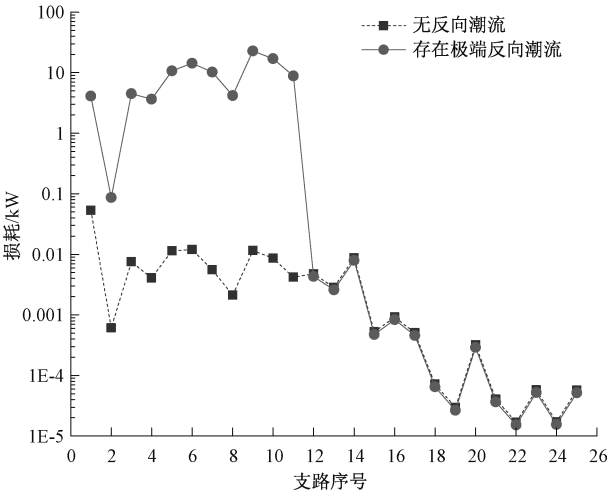


图4 有无反向潮流时的支路损耗

Fig. 4 Branch losses with and without RPF

基于改进  $\tau$  值损耗分配方法分析了 72 节点配电网损耗分布。图 4 为  $\lambda=0$  和  $\lambda=10$  两种情况下 72 节点配电网模型 1-26 节点支路损耗分布对比,纵坐标为对数坐标。实际运行中在晴天的情况下,下午光伏站的输出功率很大,一般  $\lambda > 10$ 。极端反向潮流大大增加了从平衡节点到 DG 接入点之间支路的损耗。

算例二:当系数  $\lambda$  从 0 开始,间隔 0.1 增加到 4.0 时,网络总损耗、DG 分配的损耗、DG 分配的损耗占总损耗的比例变化如图 5 所示。将网络总损耗随  $\lambda$  的变化关系曲线进行拟合,得到如式 (20) 和式 (21)。

$$P_{\text{loss}} = 1.188\lambda^2 - 0.5365\lambda + 0.1203 \quad (20)$$

$$P_{\text{loss\_DG}} = 1.188\lambda^2 - 0.5365\lambda - 0.03961 \quad (21)$$

式中: $P_{\text{loss}}$  表示网络总损耗, $P_{\text{loss\_DG}}$  表示 DG 分配的损耗,它们与  $\lambda$  呈二次方程关系。

将 DG 分配损耗占比随  $\lambda$  的变化关系曲线进

行分段拟合,得到式 (22),曲线拟合优度  $R^2$  为 0.99。

$$D = \begin{cases} 16.8 \times \lambda^2 - 8.718 \times \lambda + 0.0591 & \lambda \in [0, 0.5] \\ -0.2107 \times \lambda^{-2.458} + 0.9969 & \lambda \in (0.5, 4] \end{cases} \quad (22)$$

式中:

$$D = \frac{P_{\text{loss\_DG}}}{P_{\text{loss}}} \times 100\% \quad (23)$$

表示 DG 分配的损耗占比。

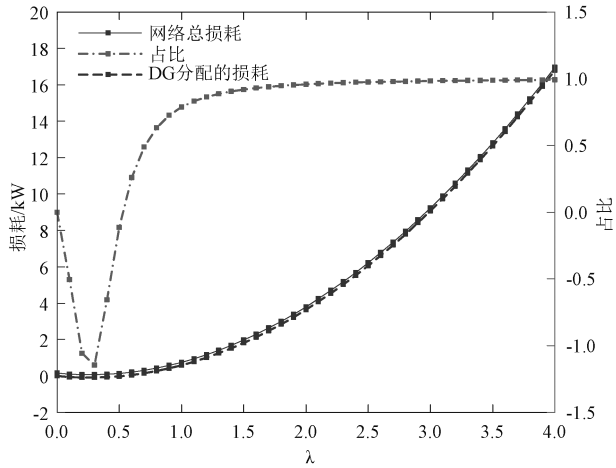


图5 网络损耗及 DG 分配的损耗占比

Fig. 5 Loss and loss percentage of DG allocation

当  $0 < \lambda \leq 0.5$  时,DG 分配的损耗占总损耗的比例为负值,表明损耗分配方法为 DG 分配一个负值损耗,DG 接入使网络总损耗降低。此时比例的绝对值越大,DG 对网络的降损效果越好。在本算例中,当  $\lambda = 0.3$  时,网络总损耗最低,为 0.074 kW,此时 DG 接入对配电网降损效果最好。

当  $\lambda > 0.5$  时,DG 分配的损耗占总损耗的比例为正值,表明损耗分配方法为 DG 分配一个正值损耗,DG 接入使网络总损耗增加。此时接入电网的光伏发电越大,网络总损耗的增加量越大。

当  $\lambda = 1$  时,光伏发电量与负荷总需求相等,损耗的 75% 由 DG 承担;当  $\lambda \geq 1$  时,网络中存在反向潮流, $\lambda$  越大,网络中的反向潮流越大,随着反向潮流的增加,网络总损耗迅速增加。此时 DG 分配的损耗占网络总损耗的比例趋近于 1,可以得出,DG 是反向潮流出现的原因,利用  $\tau$  值损耗分配方法使 DG 承担了反向潮流引发高损耗的后果。

在图 5 中,随着  $\lambda$  的增加,DG 分配的损耗占比先减小,后增大趋近于 1,在此过程中,网络总损

耗和 DG 分配的损耗曲线基本保持一致。这是因为使用基于合作博弈  $\tau$  值的分配方法需要满足准平衡条件。

## 4 结 论

针对高比例的分布式光伏接入配电网导致反向潮流引发的高损耗问题,研究了有源配电网所有参与者间网络损耗的分配。基于合作博弈改进  $\tau$  值损耗分配方法研究了有源配电网极端反向潮流对损耗和损耗分配的影响,如下结论:

1)在本文含极端反向潮流的配电网中,DG 分配的网络损耗占网络总损耗的 95% 以上,负载分配的损耗只占极小一部分。

2)在辐射状配电网中,分布式电源发电过剩导致网络中出现反向潮流,极端反向潮流主要使 DG 接入点之前的支路损耗增加,使配电网的经济性和稳定性下降。

3)配电网只接入一个分布式电源时,分布式电源的发电量小于网络总负荷的一半可以使网络总损耗降低,即 DG 存在最佳供电功率,这为配电网分布式电源接入容量规划提供了一个经济信号。

目前,工程实际上存在含有反向潮流的有源配电网,本文研究成果可用于电网公司的线损管理和电网公司与新能源公司线损分配管理中,合理分配和管理线损,为分布式电源制定合理的上网电价,对促进新能源发电的健康发展具有非常重要的实际意义。

## 参考文献:

[1] 孙媛媛,程凯强,许庆桑,等.考虑光伏出力相关性的主动配电网薄弱环节识别[J].电力系统自动化,2022,46(15):96-103.

SUN Yuanyuan, CHENG Kaiqiang, XU Qingshen, et al. Identification of weak link for active distribution network considering correlation of photovoltaic output[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 96-103 (in Chinese).

[2] 曾强,谢善益,周刚,等.倒送功率约束下的分布式电源最大接入容量分析[J].电力系统保护与控制,2019,47(10):16-22.

ZENG Qiang, XIE Shanyi, ZHOU Gang, et al. Maximum capacity analysis for distributed generation considering reverse power constraint[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 16-22 (in Chinese).

[3] CONEJO A J, ARROYO J M, ALGUACIL N. Transmission loss allocation: a comparison of different practical algorithms [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 17(3): 571-576.

[4] LIMA J W M. Allocation of transmission fixed charges: an overview [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1996, 11(3): 1409-1418.

[5] BALDICK R, KAHN E. Contract paths path-shifters and efficient electricity trade [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(2): 749-755.

[6] 刘梓洪,程浩忠,刘晓东,等.边网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 (in Chinese).

[7] 江辉,彭建春,欧亚平,等.输电网损的公正分配[J].电网技术,2003,27(5):10-14.

JIANG Hui, PENG Jianchun, OU Yaping, et al. Fair allocation of transmission network power losses [J]. Power System Technology, 2003, 27(5): 10-14 (in Chinese).

[8] 王勋.基于电路叠加定理的网损分摊模型研究[J].科技风,2012,(16):23-25.

WANG Xun. Research on network loss sharing model based on circuit superposition theorem [J]. Science and Technology Wind, 2012, (16): 23-25 (in Chinese).

[9] 于继来,张婷,盛玉和,等.基于瞬时值解析的支路电能损失与成本分摊方法[J].中国电机工程学报,2021,41(6):2064-2074.

YU Jilai, ZHANG Ting, SHENG Yuhe et al. Method of branch energy loss and cost allocation based on instantaneous value analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2064-2074 (in Chinese).

[10] USMAN M, COPPO M, BIGNUCOLO F, et al. Multi-phase losses allocation method for active distribution networks based on branch current decomposition [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3605-3615.

[11] BHAND I, DEBBARMA S. Transaction-tracing based loss allocation in distribution networks under TE system [J]. 2021, 15(4): 5664-5673.

[12] NIKOLAIDIS A, CHARALAMBOUS C A, MANCARELLA P. A graph-based loss allocation framework for transactive energy markets in unbalanced radial dis-

- tribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34 (5): 4109–4118.
- [13] FARSANI E A, ABYANEH H A, ABEDI M, et al. A novel policy for Imp calculation in distribution networks based on loss and emission reduction allocation using nucleolus theory [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31 (1): 143–152.
- [14] SHARMA S, ABHYANKAR A R. Loss allocation for weakly meshed distribution system using analytical formulation of shapley value [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32 (2): 1369–1377.
- [15] AMARIS H, MOLINA Y P, ALONSO M, et al. Loss allocation in distribution networks based on aumann shapley [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33 (6): 6655–6666.
- [16] KUMAR H, KHATOD D K.  $\tau$ -Value based approach for loss allocation in radial and weakly meshed distribution networks with distributed generation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37 (3): 1845–1855.
- [17] 黄湘, 欧阳森, 马少华. 考虑 DG 对配电网损贡献率的网损分摊方法 [J]. 电测与仪表, 2019, 56 (18): 16–24.
- HUANG Xiang, OUYANG Sen, MA Shaohua. Line loss allocation method considering the contribution rate of the distributed generation to distribution network loss [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56 (18): 16–24 (in Chinese).
- [18] MADINEHI N, ABYANEH H A, AGAH M M, et al. Loss reduction allocation to distributed generation units in distribution systems [C]. 16th Conference on Electrical Power Distribution Networks, Bandar Abbas, Iran, 2011.
- [19] 陈丽霞, 孙弢, 周云, 等. 电力系统发电侧和负荷侧共同碳责任分摊方法 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42 (19): 106–111.
- CHEN Lixia, SUN Tao, ZHOU Yun, et al. Method of carbon obligation allocation between generation side and demand side in power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42 (19): 106–111 (in Chinese).
- [20] 崔俊泰. 基于电路理论的含分布式电源配电网线损计算与分摊 [D]. 济南: 山东大学, 2020.
- CUI Juntao. Circuit theory-based method for power loss estimation and allocation in distribution systems with distributed generator [D]. Jinan: Shandong University, 2020 (in Chinese).
- [21] 李蒙赞, 霍成军, 王玮茹, 等. 基于改进 MLC 的含 DG 配电网损耗分摊研究 [J]. 电力工程技术, 2022, 41 (1): 180–184.
- LI Mengzhan, HUO Chengjun, WANG Weiru, et al. Loss allocation of distribution network with distributed generations based on improved marginal loss coefficients method [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41 (1): 180–184 (in Chinese).
- [22] 汪超群, 陈懿, 文福拴, 等. 电力系统碳排放流理论改进与完善 [J]. 电网技术, 2022, 46 (5): 1683–1693.
- WANG Chaoqun, CHEN Yi, WEN Fushuan, et al. Improvement and perfection of carbon emission flow theory in power systems [J]. Power System Technology, 2022, 46 (5): 1683–1693 (in Chinese).
- [23] 胡显楠. 网损分摊法在输电网中的应用研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- HU Yunan. Research on loss allocation application of transmission network [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2022 (in Chinese).
- [24] TENG J H. A direct approach for distribution system load flow solutions [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18 (3): 882–887.
- [25] 刘文颖, 陈鑫鑫, 王方雨, 等. 基于图论和潮流追踪的网损分摊方法 [J]. 华北电力大学学报 (自然科学版), 2020, 47 (5): 1–9.
- LIU Wenying, CHEN Xinxin, WANG Fangyu, et al. Network loss allocation based on graph theory and power flow tracking [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition). 2020, 47 (5): 1–9 (in Chinese).

#### 作者简介:

陈昀(1982),男,高级工程师,研究方向为电力系统运行规划,E-mail:cun2030@qh.sgcc.com.cn;

李娅迪(2000),女,硕士研究生,研究方向为配电网线损管理,E-mail:120222201229@ncepu.edu.cn;

卢斌先(1969),男,教授,博士生导师,通信作者,研究方向为配电网降损、电晕放电、换流阀冷却水路系统金属电极电化学腐蚀、多物理场耦合、电子式电压测量等,E-mail:lhx@ncepu.edu.cn。