TEEGES

Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

Research Article (2026) 5(2):38-52

Performance Analysis of the Tau-Value Method for Loss Allocation in Radial and Weakly Meshed Distribution Networks

Mohammad Bayat[1,2], *Assistant Professor*, Mahyar Abasi[1,2], *Assistant Professor*, Masoud Aghabiglo[1,2], *M.Sc. Student*, Ali Asghar Ghadimi[1,2], *Associate Professor*

[1] *Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University, Arak, Iran*
[2] *Research Institute of Renewable Energy, Arak University, Arak, Iran*

Abstract:

In modern power distribution networks, traditional methods of allocating losses among participants are becoming inadequate due to the rise of distributed generation and the need for fair loss allocation. This paper investigates the τ-value method for allocating losses resulting from the connection of new consumers and producers in radial and weakly meshed networks. The results show that this method, with its low computational volume and high efficiency, is a suitable tool for loss allocation in restructured networks. It was also found that placing consumers in weakly meshed networks and producers in radial networks is economically and technically preferable. However, the τ-value method imposes stricter loss allocation on consumers, which is due to the initial allocation of losses among consumers. Despite this limitation, this method can be used as an efficient tool in competitive electricity markets. This study demonstrates that the network structure has a significant impact on how losses are allocated, and that the appropriate placement of producers and consumers can lead to reduced losses and improved network efficiency. Furthermore, the use of game theory-based methods such as the τ-value can contribute to fairer loss allocation and create healthy competition in the electricity market.

Keywords: Distributed generation, Fair loss allocation, Radial distribution network, Tau-value method, Weakly meshed network

Received: 26 March 2025
Revised: 19 May 2025
Accepted: 21 June 2025
Corresponding Author: Dr. Mohammad Bayat, m-baiat@araku.ac.ir
DOI: https://doi.org/10.71691/teeges.2026.1202733

فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز

TEEGES

مقاله پژوهشی

تحلیل کارایی روش Tau-Value در تخصیص تلفات شبکه‌های توزیع با ساختارهای شعاعی و مش ضعیف

محمد بیات[۱و۲]، *استادیار*، مهیار عباسی[۱و۲]، *استادیار*، مسعود آقابیگلو[۱و۲]، *دانشجوی کارشناسی ارشد*، علی اصغر قدیمی[۱و۲]، *دانشیار*

۱- گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی ، دانشگاه اراک، اراک، ایران

۲- پژوهشکده انرژی‌های تجدید پذیر، دانشگاه اراک، اراک، ایران

چکیده: در شبکه‌های توزیع برق مدرن، با افزایش تولیدات پراکنده و نیاز به تخصیص عادلانه تلفات بین مشارکت‌کنندگان، روش‌های سنتی دیگر پاسخگو نیستند. در این مقاله، روش τ-value برای تخصیص تلفات ناشی از اتصال مصرف‌کننده و تولیدکننده جدید در شبکه‌های شعاعی و مش ضعیف بررسی شد. نتایج نشان داد که این روش، با توجه به حجم محاسباتی کم و کارایی بالا، ابزاری مناسب برای تخصیص تلفات در شبکه‌های تجدیدساختار یافته است. همچنین، مشخص شد که قرارگیری مصرف‌کننده در شبکه مش ضعیف و تولیدکننده در شبکه شعاعی، از نظر اقتصادی و فنی، بهینه‌تر است. با این حال، روش τ-value در تخصیص تلفات به مصرف‌کنندگان، سختگیری بیشتری اعمال می‌کند که ناشی از تخصیص اولیه تلفات بین مصرف‌کنندگان است. با وجود این محدودیت، این روش می‌تواند در بازارهای رقابتی برق، به عنوان ابزاری کارآمد مورد استفاده قرار گیرد .این مطالعه نشان داد که ساختار شبکه تاثیر قابل توجهی بر نحوه تخصیص تلفات دارد و انتخاب مناسب مکان برای تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان می‌تواند به کاهش تلفات و بهبود کارایی شبکه منجر شود. همچنین، استفاده از روش‌های مبتنی بر نظریه بازی‌ها مانندτ-value، می‌تواند به تخصیص عادلانه‌تر تلفات و ایجاد رقابت سالم در بازار برق کمک کند.

واژه های کلیدی: تخصیص عادلانه تلفات، تولید پراکنده، شبکه مش ضعیف، شبکه توزیع شعاعی، روشτ-value .

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۰۶

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱

نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمد بیات، m-baiat@araku.ac.ir

DOI: https://doi.org/10.71691/teeges.2026.1202733

CC BY

۱- مقدمه

۱-۱- بیان مسئله

صنعت برق در سراسر جهان به سمت یک ساختار رقابتی در حال حرکت است. هدف از این تغییر، افزایش بهره‌وری، کاهش هزینه‌ها و در نهایت، بهبود رضایت مشتریان از طریق سازوکارهای بازار است. در این ساختار جدید، تولید، انتقال و توزیع برق به شرکت‌های مختلف واگذار شده است. برای ایجاد رقابت مؤثر در بازار برق، دسترسی غیرتبعیض‌آمیز و آزاد به شبکه‌های انتقال و توزیع ضروری است. تعیین تعرفه‌های مناسب برای استفاده از این شبکه‌ها و تخصیص عادلانه هزینه‌های شبکه به تمامی ذینفعان، از جمله تولیدکنندگان، مصرف‌کنندگان و شرکت‌های انتقال و توزیع، از چالش‌های اساسی این فرآیند است. بنابراین، تعرفه‌های شبکه باید به گونه‌ای طراحی شوند که هزینه‌های واقعی استفاده از شبکه را به دقت منعکس کنند.

در شبکه‌های برق با ساختار جدید، مشتریان می‌توانند با توجه به معیارهای خود، از میان شرکت‌های مختلف ارائه‌دهنده خدمات انتخاب کنند. برخی از معیارهای مهم در انتخاب مشتریان عبارتند از: قیمت خدمات، کیفیت خدمات (مانند پایداری ولتاژ و فرکانس)، قابلیت اطمینان خدمات (احتمال قطعی برق) و نوع شبکه از نظر سیستم حفاظتی. همانطور که گفته شد، قیمت خدمات یکی از مهم‌ترین عوامل برای مشتریان است. قیمت خدمات شامل دو بخش است: هزینه مصرف انرژی و سهم مشتری از هزینه‌های تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی، که مهم‌ترین بخش آن، تلفات تخصیص‌یافته به مشتری از شبکه است. بنابراین، تلفات تخصیص‌یافته به مشتریان در شبکه‌های برق جدید اهمیت دارد و می‌تواند در انتخاب مشتری تأثیرگذار باشد. در تخصیص تلفات به مشتریان، هم روش تخصیص تلفات و هم نوع شبکه توزیع نقش دارند [۱]. لذا در ادامه انواع روش‌های تخصیص تلفات را بررسی می‌کنیم.

۱-۲- مرور مراجع پیشین

در مطالعه‌ای که در [۲] ارائه شده است، روشی برای تخصیص تلفات پیشنهاد شده که در آن، تلفات به طور مساوی بین تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان تقسیم می‌شود و سپس بر اساس میزان توان هر واحد، سهم هر یک تعیین می‌گردد. با این حال، این روش توزیع عادلانه‌ای از تلفات را ارائه نمی‌دهد، زیرا عوامل مهمی مانند ساختار شبکه، موقعیت عناصر مختلف و نقش تجهیزات کاهش‌دهنده تلفات را در نظر نمی‌گیرد. در واقع، این روش ممکن است تجهیزاتی را که باعث کاهش تلفات می‌شوند، جریمه کند که از نظر اقتصادی و فنی توجیه‌پذیر نیست.

در [۳]، روش (BCDM)[۱] برای تخصیص تلفات به تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان در شبکه‌های توزیع شعاعی ارائه شده است. در این روش، جریان در یک شاخه به جریان‌های گره‌های پایین‌دست شاخه تجزیه می‌شود. اگرچه این روش بسیار ساده و کارآمد است و نتایج آن به سایر روش‌های دقیق بسیار نزدیک است، اما فقط در شبکه‌های توزیع شعاعی قابل استفاده است.

در [۴]، روش (SV)[۲] برای شبکه‌های انتقال ارائه شده است. در این روش، جایگشت‌هایی در ترتیب ورود مشارکت‌کنندگان انجام می‌شود و تمامی ترکیب‌های ممکن بررسی می‌شود. هزینه و سود، مشارکت یا مسئولیت هر بازیکن زمانی محاسبه می‌شود که اولین نفر، دومین نفر، سومین نفر و ... وارد بازی می‌شود. با استفاده از روش SV، نتایج معقولی به دست می‌آید و این راه حل به طور شهودی "عادلانه" در نظر گرفته می‌شود، زیرا همه عوامل فرصت یکسانی برای قرار گرفتن در بهترین و بدترین موقعیت‌های ترتیب دارند. با این حال، به دلیل ترکیبی بودن آن، اندازه مسئله به طور تصاعدی با افزایش تعداد مشارکت‌کنندگان افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، اگر ۱۰ مشارکت‌کننده در تلفات داشته باشیم، ۳۶۲۸۸۰۰ ترکیب ممکن برای محاسبه هزینه یک مشارکت‌کننده وجود دارد و باید برای حالت‌های مختلف پخش بار محاسبه انجام شود.

در [۵]، یک روش کارآمد بر پایه SV برای شبکه‌های توزیع شعاعی و مش ضعیف ارائه شده است. با این حال، با وجود تلاش برای کاهش زمان محاسبات، حجم محاسبات و تعداد پخش بارهای مورد نیاز در روش SV همچنان قابل توجه است. در [۶]، روشی جدید بر پایه نظریه مدار برای تخصیص تلفات در شبکه‌های توزیع با حضور گسترده ژنراتورهای پراکنده (DGs)[۳] ارائه شده است. این روش با حل ریاضیاتی پیچیدگی‌های مربوط به تجزیه عبارت متقاطع معادله تلفات توان، بدون هیچ‌گونه فرض یا تقریب، تلفات را به دقت به مشارکت‌کنندگان شبکه تخصیص می‌دهد. این تخصیص با در نظر گرفتن تقاضای بار، ضریب توان و موقعیت جغرافیایی مشارکت‌کنندگان در حضور یا عدم حضور DGs و در مدل‌های بار مختلف انجام می‌شود. مزیت اصلی این روش، سادگی اجرا و دقت

بالای آن در تخصیص تلفات، حتی در حضور DGs با ضرایب توان مختلف، است. علاوه بر این، عملکرد این روش با تغییرات ضریب توان بار نیز به خوبی تحلیل شده است. با این حال، با اینکه روش ارائه شده بسیار دقیق و کاربردی است، باید در نظر داشت که پیچیدگی محاسباتی آن با افزایش اندازه شبکه توزیع افزایش پیدا می کند، و در شبکه های بسیار بزرگ ممکن است نیاز به محاسبات سنگین داشته باشد. در [۷]، نویسندگان به بررسی و نقد روش‌های فعلی تخصیص تلفات، به ویژه روش جایگزینی مورد استفاده در انگلستان و ولز، برای ارزیابی تأثیر تولید پراکنده (EG)[۴] بر تلفات پرداخته‌اند. آن‌ها دو روش جدید تخصیص تلفات را پیشنهاد می‌کنند: یکی بر اساس تخصیص تلفات حاشیه‌ای و دیگری بر اساس تخصیص تلفات کل. ضرایب تخصیص تلفات محاسبه‌شده از این روش‌های پیشنهادی، وابسته به مکان و زمان استفاده هستند، که برای EG با تأثیر متغیر زمانی و مکانی بر تلفات، اهمیت ویژه‌ای دارد. مزیت قابل توجه این ضرایب، توانایی آن‌ها در شناسایی جریان‌های معکوس ناشی از EG با مقادیر مثبت یا منفی است. با این حال، پیچیدگی محاسباتی این روش‌ها، به ویژه در شبکه‌های بزرگ با تعداد گره‌های زیاد، می‌تواند یک چالش باشد. همچنین، وابستگی ضرایب به زمان و مکان، نیازمند داده‌های دقیق و به‌روز از شبکه است که ممکن است در عمل دشوار باشد. در [۸]، روشی جدید برای تخصیص تلفات انتقال به ژنراتورها و بارها در بازارهای برق با قیمت حاشیه‌ای واحد ارائه شده است. این روش بر پایه ماتریس امپدانس شبکه (Z-bus) است، اما محاسبات با استفاده از ماتریس ادمیتانس پراکنده (Y-bus) انجام می‌شود. مزیت اصلی این روش، استفاده از مجموعه کامل معادلات شبکه بدون نیاز به فرضیات ساده‌کننده است. این روش بر جریان‌ها به جای تزریق توان تمرکز دارد که منجر به تخصیص طبیعی تلفات بین شین‌های شبکه می‌شود و درک و پیاده‌سازی آن آسان است. نتایج نشان می‌دهند که این روش با نتایج مورد انتظار و عملکرد سایر روش‌ها سازگار است. با این حال، وابستگی به حل پخش بار و ماتریس‌های شبکه، ممکن است در شبکه‌های بسیار بزرگ با تغییرات سریع بار، محاسبات را پیچیده و زمان‌بر کند. در [۹]، مسئله تخصیص تلفات انتقال در سیستم‌های قدرت تجدید ساختار شده مورد بررسی قرار گرفته و روشی جدید برای بازارهای Pool ارائه شده است. با استفاده از حل پخش بار، این روش به آسانی تلفات توان اکتیو را بین شرکت‌کنندگان بازار تخصیص می‌دهد. ابتدا، رابطه‌ای بین تزریق جریان شین و جریان ژنراتور یا بار با استفاده از یک ماتریس ثابت توان تعیین می‌شود و سپس ماتریس امپدانس (Z-bus) اصلاح می‌گردد. این اصلاح، امکان بیان تلفات توان حقیقی شبکه را بر اساس جریان ژنراتور یا بار فراهم می‌کند. مزیت اصلی این روش، توانایی تخصیص تلفات کل به ژنراتورها و بارها به صورت جداگانه است، در حالی که روش معمول Z-bus فقط قادر به تخصیص تلفات به جریان معادل تزریق شده در هر شین است. با این حال، نیاز به اصلاح ماتریس Z-bus و محاسبه ماتریس ثابت توان، ممکن است در شبکه‌های بزرگ با توپولوژی پیچیده، محاسبات را سنگین و زمان‌بر کند. همچنین، دقت تخصیص تلفات به شدت وابسته به دقت حل پخش بار اولیه است. در [۱۰]، روشی جدید برای تخصیص تلفات در شبکه‌های توزیع فعال با حضور تولیدات پراکنده (DG) ارائه شده است. این روش بر پایه "نظریه مشارکت مجازی" و ساخت ماتریس مشارکت مجازی است که نحوه استفاده ژنراتورها و بارها از شبکه توزیع را نشان می‌دهد. با ترکیب این نظریه با ردیابی جریان توان، روشی دوطرفه برای تخصیص تلفات ارائه می‌شود. مزیت اصلی این روش، رفع بسیاری از محدودیت‌های روش‌های سنتی، از جمله پیچیدگی محاسباتی، کارایی پایین و محدودیت در محاسبات جریان توان دوطرفه است. این روش قادر به تخصیص عادلانه تلفات بین ژنراتورها و بارها در بازار خرده‌فروشی برق است. با این حال، نیاز به محاسبه ماتریس مشارکت مجازی و ردیابی جریان توان، ممکن است در شبکه‌های بسیار بزرگ و پیچیده، محاسبات را سنگین و زمان‌بر کند. همچنین، دقت تخصیص تلفات به دقت ردیابی جریان توان وابسته است. در [۱۱]، روشی دقیق برای تخصیص تلفات (EMLA)[۵] در سیستم‌های انرژی تبادلی (TE)[۶] با استفاده از سطوح توان-ولتاژ ارائه شده است. در این سیستم‌ها، تولیدکنندگان کوچک می‌توانند از طریق مکانیسم همتا به همتا (P2P)[۷] در معاملات انرژی شرکت کنند، که منجر به تلفات قابل توجهی در شبکه توزیع می‌شود. روش پیشنهادی، این تلفات را به معاملات تخصیص می‌دهد و نتایج آن با روش تخصیص تلفات مبتنی بر گراف (GBLA)[۸] مقایسه شده است. مزیت اصلی این روش، توانایی بازیافت مؤثر هزینه تلفات از مشارکت‌کنندگان شبکه است. با این حال، وابستگی به سطوح توان-ولتاژ ممکن است در شبکه‌های با نوسانات ولتاژ زیاد، دقت تخصیص را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین، پیچیدگی محاسباتی این روش در شبکه‌های بزرگ‌تر می‌تواند قابل توجه باشد. در [۱۲]، یک روش نوین برای تخصیص تلفات شبکه بر اساس روش قطعه‌بندی دلخواه و نظریه گراف ارائه شده است، که برای شبکه‌های انتقال و توزیع پیچیده با حضور تولیدات پراکنده (DG) قابل استفاده است. این روش با استفاده از معادلات ولتاژ شین و روش تجزیه زیرشبکه PQ-PV، تلفات شبکه را محاسبه کرده و تاثیر جریان توان دوطرفه را کاهش می‌دهد. همچنین، روشی برای شناسایی داده‌های اندازه‌گیری تلفات غیرعادی با استفاده از ویژگی "مجموع رتبه" و یک مدل تخمین منطقه

قطعه‌بندی برای تصحیح ناهنجاری‌ها ارائه می‌دهد. در نهایت، شبکه با استفاده از قطعه‌بندی دلخواه و نظریه گراف به مناطق ساده‌تر تقسیم شده و تلفات با استفاده از ردیابی جریان توان و بهبود روش ضریب تلفات متوسط شبکه به کاربران و DGها تخصیص می‌یابد. مزیت اصلی این روش، قابلیت اعمال آن در هر نوع شبکه برق با حضور DG و دقت بالای آن در تخصیص عادلانه تلفات است. با این حال، پیچیدگی محاسباتی مربوط به قطعه‌بندی شبکه، ردیابی جریان توان و تصحیح ناهنجاری‌ها، به ویژه در شبکه‌های بسیار بزرگ، می‌تواند قابل توجه باشد. در [۱۳,۱۴]، روشی جدید برای تخصیص تلفات در سیستم‌های توزیع بر اساس نظریه مدار ارائه شده است. این روش با هدف تخصیص عادلانه تلفات به کاربران سیستم قدرت، که یک جنبه حیاتی در عملکرد منصفانه سیستم است، طراحی شده است. روش پیشنهادی، تلفات را به صورت شفاف و قابل توضیح و بدون هیچ‌گونه فرض یا اختیار عمل تخصیص می‌دهد. مزیت اصلی این روش، دقت و شفافیت آن در تخصیص تلفات و قابلیت اعمال آن در تمامی سیستم‌های توزیع با هر پیکربندی، از جمله شبکه‌های شعاعی و مشبک، است. با این حال، نیاز به محاسبات مبتنی بر نظریه مدار ممکن است در شبکه‌های بسیار بزرگ و پیچیده، بار محاسباتی را افزایش دهد. همچنین، پیاده‌سازی این روش نیازمند دانش دقیق از پارامترهای شبکه و الگوریتم‌های مربوط به نظریه مدار است. در [۱۴,۱۵]، روشی برای تخصیص تلفات در میکروگریدهای متصل به شبکه اصلی، بر اساس نتایج پخش بار و موقعیت نسبی شین‌ها ارائه شده است. این روش برای میکروگریدهایی با تغییرات مکرر تولید ناشی از منابع تجدیدپذیر متغیر، بسیار مؤثر است. مزیت اصلی این روش، سادگی پیاده‌سازی آن در میکروگریدهای (MG)[۹] با توپولوژی مشبک و شعاعی، بدون پیچیدگی محاسباتی و با نیاز به تنها حل پخش بار (LF)[۱۰] و داده‌های شبکه است. این روش به ویژه برای شرایط تولید متغیر منابع تجدیدپذیر مناسب است. با این حال، وابستگی به نتایج پخش بار، ممکن است در شرایط تغییرات سریع بار و تولید، دقت تخصیص را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین، در شبکه‌های بسیار بزرگ و پیچیده، محاسبه موقعیت نسبی شین‌ها ممکن است به محاسبات اضافی نیاز داشته باشد.

۳-۱- چالش‌ها و خلأهای تحقیقاتی

خلأهای تحقیقاتی روش‌های پیشین در زیر بررسی می‌شوند:

- عدم توجه به عوامل مؤثر در تلفات (مرجع [۲])
- محدودیت در شبکه‌های توزیع شعاعی (مرجع [۳])
- پیچیدگی محاسباتی بالا (مراجع [۴] و [۵])
- پیچیدگی محاسباتی در شبکه‌های بزرگ (مراجع [۱۴-۶])
- وابستگی به حل پخش بار و داده‌های دقیق (مراجع [۸], [۹], [۱۵])
- عدم توجه به تغییرات دینامیکی شبکه
- شفافیت و قابلیت توضیح پائین تخصیص تلفات

در این مقاله، یک روش جدید برای تخصیص تلفات در شبکه‌های توزیع شعاعی و مش ضعیف بر اساس τ-value ارائه شده است. این روش به دو بخش تقسیم می‌شود:

- بخش اول :ابتدا تمامی ژنراتورهای پراکنده از مدار خارج شده و ضرایب τ-value برای محاسبه تلفات تخصیصی به مصرف‌کنندگان تعیین می‌شود.
- بخش دوم :سپس تمامی مصرف‌کنندگان از مدار خارج شده و ضرایب τ-value برای محاسبه تلفات تخصیصی به ژنراتورها محاسبه می‌شود.

مزیت اصلی این روش نسبت به سایر روش‌های موجود در شبکه‌های توزیع، این است که با ورود یک مشترک جدید یا تغییر توان تولیدی یا مصرفی هر مشترک، بیشترین تغییرات تلفات به همان مشترک اختصاص می‌یابد. به عبارت دیگر، اگر یک ژنراتور تغییر توان دهد، تلفات تخصیصی به مصرف‌کنندگان تغییری نمی‌کند و بیشترین تغییرات تلفات در بین ژنراتورها به همان ژنراتور اختصاص می‌یابد. این موضوع در تخصیص تلفات به مصرف‌کنندگان نیز تا حد زیادی صادق است. علاوه بر این، این روش هم در شبکه‌های توزیع شعاعی و هم در شبکه‌های توزیع مش ضعیف قابل استفاده است.

۴-۱- نوآوری‌ها و سهم تحقیق

نوآوری‌های روش پیشنهادی نسبت به مراجع قبلی:

۱. تخصیص عادلانه تغییرات تلفات :روش پیشنهادی با استفاده از τ-value ، تغییرات تلفات را به طور عادلانه به مشترکی که بیشترین تأثیر را داشته است، تخصیص می‌دهد. این امر به ویژه در شبکه‌های با تولیدات پراکنده متغیر، اهمیت زیادی دارد.

۲. قابلیت اعمال در انواع شبکه‌ها :برخلاف برخی روش‌ها که فقط برای شبکه‌های شعاعی یا مشبک مناسب هستند، این روش در هر دو نوع شبکه توزیع قابل استفاده است.

۳. پاسخگویی به تغییرات دینامیکی :با توجه به اینکه تغییرات توان تولیدی یا مصرفی یک مشترک، تأثیر قابل توجهی بر تلفات شبکه دارد، این روش به خوبی این تغییرات را در تخصیص تلفات منعکس می‌کند.

۴. شفافیت و قابلیت توضیح پائین تخصیص تلفات :روش پیشنهادی تلفات را به صورت شفاف و قابل توضیح تخصیص میدهد.

۲- روش پیشنهادی

در شبکه‌های توزیع الکتریکی، تخصیص دقیق و منصفانه تلفات بین شرکت‌کنندگان مختلف، از جمله مصرف‌کنندگان و ژنراتورهای تولید پراکنده، از اهمیت بالایی برخوردار است. این مسئله به ویژه در شبکه‌های پیچیده با ساختار شعاعی و مش ضعیف، که در آن‌ها جریان‌های توان و تلفات به طور قابل توجهی تحت تأثیر عوامل مختلف قرار می‌گیرند، چالش‌برانگیز است. روش‌های سنتی تخصیص تلفات اغلب قادر به ارائه یک راه حل عادلانه و کارآمد در این شرایط نیستند. روش τ-value، که از نظریه بازی‌های مشارکتی نشأت گرفته است، یک رویکرد نوآورانه برای حل این مسئله ارائه می‌دهد. این روش با در نظر گرفتن سهم حاشیه‌ای هر شرکت‌کننده در تلفات شبکه، یک تقسیم منصفانه و کارآمد از تلفات را تضمین می‌کند[۱۷]. در کاربرد مورد نظر، روش τ-value با تقسیم مسئله به دو بخش مجزا، امکان تخصیص دقیق‌تر تلفات به مصرف‌کنندگان و ژنراتورها را فراهم می‌کند. این رویکرد به ویژه در شبکه‌های دارای تولید پراکنده، که در آن‌ها نقش ژنراتورها در تلفات شبکه قابل توجه است، مفید واقع می‌شود. با استفاده از روش τ-value، می‌توان ضرایب تخصیص را به گونه‌ای محاسبه کرد که تأثیر عوامل مختلف، از جمله تولید پراکنده، به طور مناسب در نظر گرفته شود و در نتیجه، یک راه حل عادلانه و کارآمد برای تخصیص تلفات در شبکه‌های توزیع الکتریکی ارائه گردد. به طور خلاصه، مراحل این روش به صورت زیر می‌باشد:

۱- با وجود همه بارها و تولیدکنندگان با استفاده از پخش بار تلفات شبکه محاسبه می‌گردد. نام این تلفات را L، گذاشته می‌شود.

۲- وارد فاز اول شده و این فاز تا مرحله ۹ ادامه می‌یابد. در این بخش تمامی تولیدکنندگان، خارج می‌گردند.

۳- تلفات با وجود تمامی مصرف‌کنندگان محاسبه می‌گردد. نام این تلفات را L^{loads} گذاشته می‌شود.

۴- برای تمامی مصرف‌کنندگان، تنها با وجود مصرف‌کننده مورد نظر و خروج سایر مصرف‌کنندگان، تلفات محاسبه می‌شود. نام این تلفات را $L^{presence_load_i}$ گذاشته می‌شود.

۵- برای تمامی مصرف‌کنندگان، تلفات را بدون وجود مصرف‌کننده مورد نظر و با حضور بقیه مصرف‌کنندگان به‌دست‌آورده و نام آن را $L^{absence_load_i}$، گذاشته می‌شود.

۶- برای تمام مصرف‌کنندگان مقدار زیر مطابق رابطه (۱) محاسبه می‌گردد [۱۷]:

$$M^{load_i} = L^{loads} - L^{absence_load_i} \quad (۱)$$

واژه نامه مطابق با جدول (۱) است.

جدول (۱): واژه نامه.

تلفات در حضور همه منبع	L^{DGs}	تلفات در حضور همه بارها	L^{loads}
تلفات بدون منبع i	$L^{absence_DG_i}$	تلفات بدون بار i	$L^{absence_load_i}$
اختلاف تلفات با منبع i و بی منبع i	M^{DG_i}	اختلاف تلفات با بار i و بدون بار i	M^{Load_i}
مغایرت مقدار M و تلفات منبع i	λ^{DG_i}	مغایرت مقدار M و تلفات بار i	λ^{load_i}
ضریب کمکی DG	α_{DG}	ضریب کمکی بار	α_{load}
تعداد کل منبع‌ها	n_{DG}	تعداد کل بارها	n_{Load}
تلفات تخصیص یافته به منبع	L^{DG_i}	تلفات تخصیص یافته به بار	L^{load_i}
مقدار ضریب τ برای منبع i	τ^{DG_i}	مقدار ضریب τ برای بار i	τ^{load_i}

۷- برای تمام مصرف‌کنندگان، مقدار پارامتر λ^{load_i} مطابق رابطه (۲) محاسبه می‌گردد:

$$\lambda^{load_i} = M^{load_i} - L^{presence_load_i} \quad (۲)$$

۸- ضریب α_{load}، برای مصرف‌کنندگان مطابق رابطه (۳) به دست آورده می‌شود:

$$\alpha_{load} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{Load}} M^{load_i} - L^{loads}}{\sum_{i=1}^{n_{load}} \lambda^{load_i}} \quad (۳)$$

۹- مقدار τ^{load_i} برای مصرف‌کنندگان به دست آورده می‌شود. مقدار τ^{load_i} در مصرف‌کنندگان، در واقع همان تلفات تخصیص یافته است، یعنی رابطه (۴):

$$L^{load_i} = \tau^{load_i} = M^{load_i} - \alpha_{load}\lambda^{load_i} \quad (۴)$$

۱۰- وارد فاز دوم شده و در این بخش تمامی مصرف‌کنندگان، خارج و تمامی تولیدکنندگان وارد می‌شوند [۱۷].

۱۱- تلفات با وجود تمامی تولیدکنندگان محاسبه می‌گردد. نام این تلفات را L^{DGs}، گذاشته می‌شود.

۱۲- برای تمامی تولیدکنندگان، تنها با وجود تولیدکننده مورد نظر و خروج سایر تولیدکنندگان تلفات محاسبه می‌شود. نام این تلفات را $L^{presence_DG_i}$گذاشته می‌شود.

۱۳- برای تمامی تولیدکنندگان، تلفات را بدون وجود تولیدکننده مورد نظر و با حضور بقیه تولیدکنندگان به‌دست‌آورده و نام آن را $L^{absence_DG_i}$ گذاشته می‌شود.

۱۴- برای تمام تولیدکنندگان، مقدار رابطه (۵) می‌گردد:

$$M^{DG_i} = L^{DGs} - L^{absence_DG_i} \quad (۵)$$

۱۵- برای تمام تولیدکنندگان، مقدار پارامتر λ^{DG_i} مطابق رابطه (۶) محاسبه می‌گردد:

$$\lambda^{DG_i} = M^{DG_i} - L^{presence_DG_i} \quad (۶)$$

۱۶- ضریب α_{DG} برای تولیدکنندگان مطابق رابطه (۷) محاسبه می‌گردد:

$$\alpha_{DG} = \frac{\sum_{i=1}^{n_{DG}} M^{DG-i} - L^{DGs}}{\sum_{i=1}^{n_{DG}} \lambda^{DG_i}} \quad (۷)$$

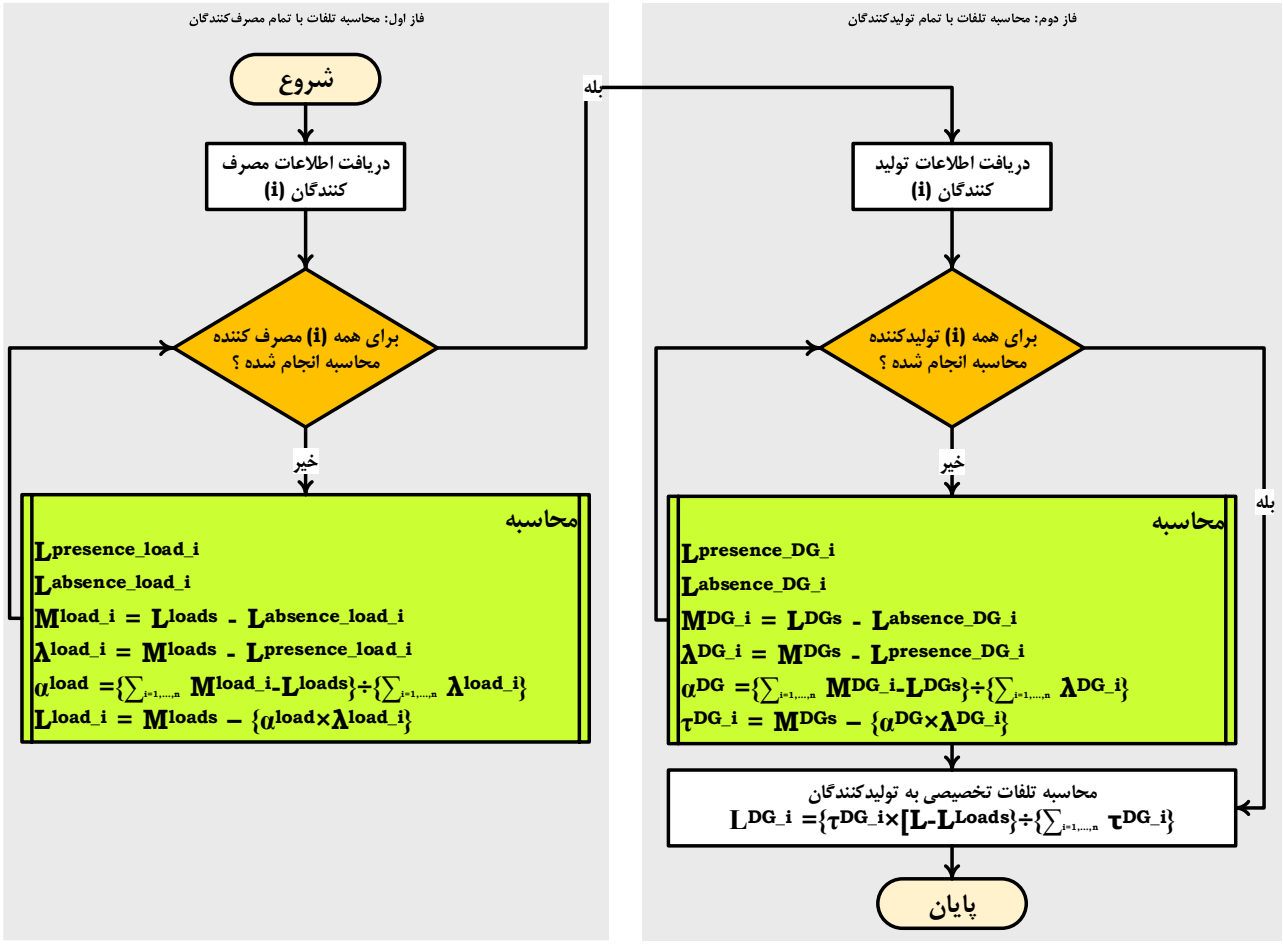
۱۷- مقدار τ^{DG_i} برای تولیدکنندگان محاسبه مطابق رابطه (۸) می‌گردد:

$$\tau^{DG_i} = M^{DG_i} - \alpha_{DG}\lambda^{DG_i} \quad (۸)$$

۱۸- مقدار تلفات تخصیصی به تولیدکنندگان را از رابطه (۹) محاسبه می‌گردد:

$$L^{DG_i} = \frac{\tau^{DG_i}[L - L^{loads}]}{\sum_{i=1}^{n_{DG}} \tau^{DG_i}} \quad (۹)$$

در شکل (۱)، مراحل این الگوریتم به خوبی توصیف شده است.



شکل (۱): فلوچارت روش τ-value.

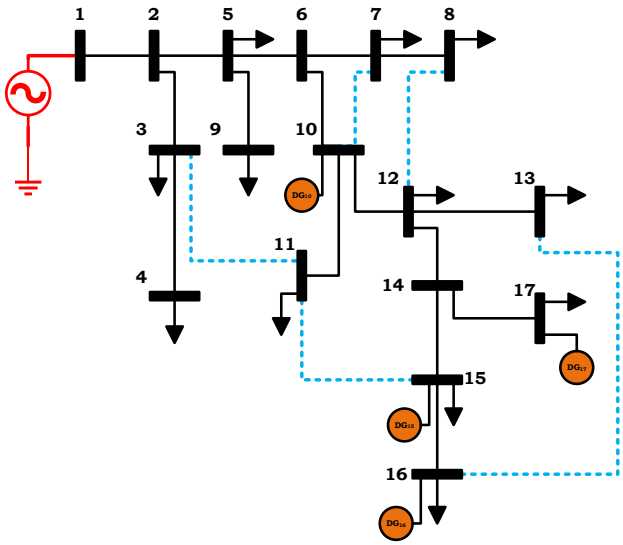
در مقایسه با سایر روش‌های موجود برای شبکه‌های توزیع، این روش از یک برتری کلیدی برخوردار است: زمانی که یک مشترک جدید به شبکه اضافه می‌شود یا توان تولیدی/مصرفی مشترکین فعلی تغییر می‌کند، این روش به طور دقیق و متناسب، میزان تغییر توان را به همان مشترک مربوطه تخصیص می‌دهد. به عنوان مثال، اگر یک مشترک تولیدکننده، توان تولیدی خود را تغییر دهد، تلفات تخصیص داده شده به سایر مصرف‌کنندگان شبکه ثابت باقی می‌ماند و بیشترین تغییر در تلفات، به همان تولیدکننده اعمال می‌شود. این ویژگی، در تخصیص تلفات به مصرف‌کنندگان نیز به طور مشابه مشاهده می‌شود. علاوه بر این، این روش قابلیت استفاده در هر دو نوع شبکه‌های توزیع شعاعی و شبکه‌های مش ضعیف را دارا می‌باشد. به همین دلیل، در این مقاله، از این روش برای تخصیص تلفات در شرایط مختلف شبکه‌های توزیع استفاده شده است.

۳- شبیه‌سازی و نتایج

در این بخش، به منظور تحلیل و بررسی تخصیص تلفات در شبکه‌های توزیع، از روش τ-value استفاده شده است. این تحلیل در دو سناریوی مجزا انجام شده است تا تاثیرات مختلف بر تخصیص تلفات مورد ارزیابی قرار گیرد.

۳-۱- شبکه مورد مطالعه

شبکه مورد مطالعه، یک شبکه ۱۷ شین است که در شکل (۲) قابل مشاهده است. این شبکه از یک ساختار شعاعی به یک ساختار مش ضعیف قابل تبدیل است. خطوطی که با خط‌چین در شکل (۲) نشان داده شده‌اند، نقش کلیدی در این تبدیل ایفا می‌کنند.



شکل (۲): شبکه ۱۷ شین شعاعی و مش ضعیف.

پارامترهای مورد استفاده در این شبیه‌سازی به شرح زیر هستند:

پارامترهای خطوط: این پارامترها، شامل مشخصات فنی خطوط شبکه مانند مقاومت، اندوکتانس و ظرفیت هستند و در جدول (۱) ارائه شده‌اند. این پارامترها برای محاسبه دقیق تلفات در خطوط ضروری هستند.

جدول (۱): پارامترهای خطوط شبکه ۱۷ شین.

شماره خط	شین شروع خط	شین انتهایی خط	مقاومت خط بر حسب پریونیت	راکتانس خط بر حسب پریونیت
۱	۱	۲	۰/۰۰۷۳	۰/۰۰۲۵
۲	۲	۵	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۰۷
۳	۲	۳	۰/۰۰۱۱	۰/۰۰۰۸
۴	۳	۴	۰/۰۰۰۹	۰/۰۰۰۷
۵	۵	۹	۰/۰۰۳۱	۰/۰۰۲۲
۶	۵	۶	۰/۰۰۴۶	۰/۰۰۲۱
۷	۶	۱۰	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۱
۸	۶	۷	۰/۰۰۲۷	۰/۰۰۰۹
۹	۷	۸	۰/۰۰۵۱	۰/۰۰۱۷
۱۰	۱۰	۱۱	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۶
۱۱	۱۰	۱۲	۰/۰۰۲۵	۰/۰۰۱۸
۱۲	۱۲	۱۳	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۳
۱۳	۱۲	۱۴	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۱۱
۱۴	۱۴	۱۵	۰/۰۰۱۳	۰/۰۰۱۱
۱۵	۱۴	۱۷	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۷
۱۶	۱۵	۱۶	۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۰۲
۱۷	۳	۱۱	۰/۰۰۵۰	۰/۰۰۵۰
۱۸	۷	۱۰	۰/۰۰۵۰	۰/۰۰۵۰
۱۹	۸	۱۲	۰/۰۰۵۰	۰/۰۰۵۰
۲۰	۱۱	۱۵	۰/۰۰۵۰	۰/۰۰۵۰
۲۱	۱۳	۱۶	۰/۰۰۵۰	۰/۰۰۵۰

پارامترهای مشارکت‌کنندگان: این پارامترها، شامل اطلاعات مربوط به مشارکت‌کنندگان در شبکه مانند میزان توان تولیدی یا مصرفی هر شین است و در جدول (۲) ارائه شده‌اند. این پارامترها برای تخصیص منصفانه تلفات بین مشارکت‌کنندگان مورد استفاده قرار می‌گیرند.

همچنین تخصیص تلفات با روش τ-value برای هر دو شبکه شعاعی و مش ضعیف محاسبه شده است.

جدول (۲): مشخصات مشارکت‌کنندگان شبکه شعاعی ۱۷ شین.

مصرف‌کننده /تولیدکننده	توان اکتیو (کیلووات)	توان راکتیو (کیلووار)	تخصیص تلفات (کیلووات) شعاعی	تخصیص تلفات (کیلووات) مش ضعیف
بار شین ۳	۸۹	۵۰	۱/۷۳۹	۱/۸۲۴
بار شین ۴	۱۱۰	۵۰	۲/۰۶۹	۲/۱۷۰
بار شین ۵	۱۴۰	۸۰	۳/۰۱۰	۲/۸۶۶
بار شین ۷	۱۵۱	۷۵	۴/۸۵۲	۳/۹۳۷
بار شین ۸	۳۳۸	۱۹۲	۱۱/۹۴۰	۹/۶۶۷
بار شین ۹	۸۹	۵۰	۱/۹۴۲	۱/۸۵۰
بار شین ۱۱	۱۵۲	۸۶	۴/۸۰۹	۳/۸۹۶
بار شین ۱۲	۲۶۶	۱۵۱	۹/۱۵۲	۷/۴۲۳
بار شین ۱۳	۵۰	۲۵	۱/۶۸۸	۱/۳۶۸
بار شین ۱۴	۱۱۲	۶۶	۴/۰۳۹	۳/۲۰۵
بار شین ۱۵	۲۰۵	۱۱۶	۷/۴۰۳	۵/۷۶۲
بار شین ۱۶	۷۶	۴۳	۲/۷۶۳	۲/۱۴۶
بار شین ۱۷	۱۵۴	۳۷	۴/۷۹۷	۳/۸۱۰
تولیدکننده شین ۱۰	-۱۰۰	-۴۰	-۴/۹۲۸	-۴/۲۶۵
تولیدکننده شین ۱۵	-۹۵	-۲۹/۲۹	-۵/۸۳۵	-۴/۴۹۴
تولیدکننده شین ۱۶	-۱۲۸	-۵۵/۸۶	-۸/۲۲۸	-۶/۳۳۳
تولیدکننده شین ۱۷	-۱۹	۱۱	-۰/۸۱۶	-۰/۶۴۹
مجموع تلفات			۴۰/۳۹۶	۳۴/۱۸۳

در ادامه دو سناریوی متفاوت برای بررسی روش پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته است که به شرح زیر معرفی میگردند.

- سناریوی ۱: قرارگیری یک مصرف‌کننده در دو شبکه ۱۷ شین شعاعی و مش ضعیف
- سناریوی ۲: قرارگیری یک تولیدکننده در دو شبکه ۱۷ شین شعاعی و مش ضعیف

۳-۲- سناریوی ۱: قرارگیری یک مصرف‌کننده در دو شبکه ۱۷ شین شعاعی و مش ضعیف

در این تحلیل، هدف بررسی تاثیر مکان‌یابی یک بار جدید بر تلفات شبکه در دو نوع ساختار مختلف شبکه توزیع است: شبکه‌های شعاعی و شبکه‌های مش ضعیف. شبکه‌های شعاعی، ساختاری ساده‌تر با یک مسیر اصلی برای جریان برق دارند، در حالی که شبکه‌های مش ضعیف، دارای چندین مسیر جایگزین برای جریان برق هستند که می‌تواند منجر به کاهش تلفات در برخی شرایط شود. یک بار جدید با توان اکتیو (فعال) ۱۰۰ کیلووات و توان راکتیو (غیرفعال) ۴۰ کیلووار در نظر گرفته شده است. این بار قرار است در شین ۱۰ از شبکه ۱۷ شین (که در شکل ۱ نمایش داده شده است) قرار گیرد. هدف اصلی این تحلیل، تعیین میزان تلفات تخصیص داده شده به این بار جدید در هر دو ساختار شبکه (شعاعی و مش ضعیف) است. با مقایسه تلفات تخصیص یافته، می‌توان تصمیم گرفت که بار جدید در کدام ساختار شبکه قرار گیرد تا تلفات کمتری به آن تحمیل شود. به عبارت دیگر، هدف بهینه‌سازی مکان‌یابی بار جدید برای کاهش تلفات کلی شبکه است. نتایج حاصل از تحلیل، در جدول (۳) ارائه شده است. این جدول شامل مقادیر تلفات تخصیص یافته به بار جدید

در هر دو ساختار شبکه (شعاعی و مش ضعیف) است. با مقایسه این مقادیر، می‌توان به این نتیجه رسید که بار جدید در کدام ساختار شبکه تلفات کمتری را تجربه خواهد کرد.

جدول (۳): تخصیص تلفات به مشارکت‌کنندگان در شبکه‌های ۱۷ شین شعاعی و مش ضعیف با اضافه شدن بار در شین ۱۰.

مصرف‌کننده /تولیدکننده	توان اکتیو (کیلووات)	توان راکتیو (کیلووار)	تخصیص تلفات با روش tau-value	
			شبکه شعاعی(کیلووات)	شبکه مش ضعیف(کیلووات)
بار شین ۳	۸۹	۵۰	۱/۸۲۶	۱/۹۱۷
بار شین ۴	۱۱۰	۵۰	۲/۱۷۳	۲/۲۸۰
بار شین ۵	۱۴۰	۸۰	۳/۱۶۶	۳/۰۱۲
بار شین ۷	۱۵۱	۷۵	۵/۱۱۳	۴/۱۴۵
بار شین ۸	۳۳۸	۱۹۲	۱۲/۵۳۸	۱۰/۱۴۴
بار شین ۹	۸۹	۵۰	۲/۰۴۰	۱/۹۴۲
بار شین ۱۰	۱۰۰	۴۰	۳/۱۱۱	۲/۵۵۰
بار شین ۱۱	۱۵۲	۸۶	۵/۰۸۱	۴/۱۰۴
بار شین ۱۲	۲۶۶	۱۵۱	۹/۶۳۱	۷/۷۹۸
بار شین ۱۳	۵۰	۲۵	۱/۷۷۷	۱/۴۳۷
بار شین ۱۴	۱۱۲	۶۶	۴/۲۴۳	۳/۳۶۴
بار شین ۱۵	۲۰۵	۱۱۶	۷/۷۷۴	۶/۰۵۰
بار شین ۱۶	۷۶	۴۳	۲/۹۰۱	۲/۲۵۳
بار شین ۱۷	۱۵۴	۳۷	۵/۰۴۶	۴/۰۰۴
تولیدکننده شین ۱۰	-۱۰۰	-۴۰	-۵/۲۲۵	-۴/۵۱۶
تولیدکننده شین ۱۵	-۹۵	-۲۹/۲۹	-۶/۱۸۷	-۴/۷۵۸
تولیدکننده شین ۱۶	-۱۲۸	-۵۵/۸۶	-۸/۷۲۶	-۶/۷۰۶
تولیدکننده شین ۱۷	-۱۹	۱۱	-۰/۸۶۵	-۰/۶۸۷
مجموع تلفات			۴۵/۴۲۲	۳۸/۳۳۸

با توجه به جدول (۳)، با اضافه شدن بار جدید به شین ۱۰، تلفات کلی شبکه در هر دو حالت شعاعی و مش ضعیف افزایش یافت، اما نکته قابل توجه این است که میزان افزایش تلفات در شبکه مش ضعیف (۴۵/۴۲۲ کیلووات) بیشتر از شبکه شعاعی (۳۸/۳۳۸ کیلووات) بود. این موضوع نشان می‌دهد که شبکه شعاعی در این سناریو، عملکرد بهتری در کاهش تلفات ناشی از بار جدید داشته است. به عبارت دیگر، با وجود اینکه روش τ-value سعی در تخصیص منصفانه تلفات دارد، اما ساختار شبکه مش ضعیف به گونه‌ای است که بار جدید تلفات بیشتری را متحمل می‌شود. این امر می‌تواند ناشی از وجود حلقه‌های بیشتر در شبکه مش ضعیف و در نتیجه افزایش جریان و تلفات در خطوط باشد. علاوه بر این، مقادیر تلفات تخصیص یافته به سایر بارها و تولیدکنندگان نیز در هر دو حالت شبکه تغییر کرده است که نشان‌دهنده تاثیر بار جدید بر توزیع جریان توان در کل شبکه است. به طور خاص، تولیدکننده شین ۱۰ در شبکه مش ضعیف تلفات بیشتری را متحمل شده است. در نهایت، با توجه به اینکه توان راکتیو بار جدید (۱۰۰ کیلووار) تاثیر قابل توجهی بر تلفات شبکه داشته است، می‌توان نتیجه گرفت که برای کاهش تلفات و بهبود کارایی شبکه، قرار دادن بار جدید در شبکه شعاعی در این سناریو مناسب‌تر است.

۳-۳- سناریوی ۲: قرارگیری یک تولیدکننده در دو شبکه ۱۷ شین شعاعی و مش ضعیف

با در نظر گرفتن شبکه‌های شعاعی و مش ضعیف نمایش داده شده در شکل (۲)، فرض می‌کنیم یک تولیدکننده با توان اکتیو ۱۰۰ کیلووات و توان راکتیو ۵۰ کیلووار قصد دارد در شین ۱۳ یکی از این دو شبکه قرار گیرد. هدف از این تحلیل، تعیین میزان تلفات تخصیص یافته به این تولیدکننده در هر دو ساختار شبکه (شعاعی و مش ضعیف) است تا مشخص شود کدام شبکه از نظر کاهش تلفات

و بهبود کارایی، مکان مناسب‌تری برای قرارگیری این تولیدکننده است. با استفاده از روشτ-value ، نتایج تخصیص تلفات در جدول (۴) ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، تلفات تخصیص یافته به تولیدکننده شین ۱۳ در شبکه شعاعی برابر با ۵/۸۱۰- کیلووات و در شبکه مش ضعیف برابر با ۴/۷۷۴- کیلووات است. این تفاوت نشان می‌دهد که قرارگیری تولیدکننده در شبکه شعاعی، تلفات کمتری را به همراه دارد و در نتیجه، از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر است. به عبارت دیگر، با فرض برابر بودن قیمت انرژی در هر دو شبکه، انتخاب شبکه شعاعی برای اتصال این تولیدکننده، منجر به کاهش هزینه‌های ناشی از تلفات خواهد شد. این تحلیل، اهمیت ساختار شبکه در تاثیرگذاری بر تلفات را نشان می‌دهد و می‌تواند به عنوان یک راهنمای تصمیم‌گیری برای انتخاب مکان مناسب تولیدکنندگان در شبکه‌های توزیع مورد استفاده قرار گیرد.

جدول (۴): تخصیص تلفات به مشارکت‌کنندگان در شبکه‌های ۱۷ شین شعاعی و مش ضعیف با اضافه شدن تولیدکننده در شین ۱۳

مصرف‌کننده /تولیدکننده	توان اکتیو (کیلووات)	توان راکتیو (کیلووار)	تخصیص تلفات با روش tau-value	
			شبکه شعاعی(کیلووات)	شبکه مش ضعیف(کیلووات)
بار شین ۳	۸۹	۵۰	۱/۷۳۸	۱/۸۲۴
بار شین ۴	۱۱۰	۵۰	۲/۰۶۹	۲/۱۶۹
بار شین ۵	۱۴۰	۸۰	۳/۰۱۰	۲/۸۶۵
بار شین ۷	۱۵۱	۷۵	۴/۸۵۱	۳/۹۳۶
بار شین ۸	۳۳۸	۱۹۲	۱۱/۹۴۰	۹/۶۶۷
بار شین ۹	۸۹	۵۰	۱/۹۴۱	۱/۸۵۰
بار شین ۱۱	۱۵۲	۸۶	۴/۸۰۸	۳/۸۹۵
بار شین ۱۲	۲۶۶	۱۵۱	۹/۱۵۲	۷/۴۲۳
بار شین ۱۳	۵۰	۲۵	۱/۶۸۸	۱/۳۶۷
بار شین ۱۴	۱۱۲	۶۶	۴/۰۳۸	۳/۲۰۵
بار شین ۱۵	۲۰۵	۱۱۶	۷/۴۰۳	۵/۷۶۱
بار شین ۱۶	۷۶	۴۳	۲/۷۶۲	۲/۱۴۶
بار شین ۱۷	۱۵۴	۳۷	۷/۷۹۶	۳/۸۱۰
تولیدکننده شین ۱۰	-۱۰۰	-۴۰	-۴/۸۷۳	-۴/۱۸۵
تولیدکننده شین ۱۳	-۱۰۰	-۵۰	-۵/۸۱۰	-۴/۷۷۴
تولیدکننده شین ۱۵	-۹۵	-۲۹/۲۹	-۵/۶۵۸	-۴/۳۷۱
تولیدکننده شین ۱۶	-۱۲۸	-۵۵/۸۶	-۷/۹۹۷	-۶/۱۸۰
تولیدکننده شین ۱۷	-۱۹	۱۱	-۰/۷۶۹	-۰/۶۱۱
مجموع تلفات			۳۵/۰۹۳	۲۹/۸۰۰

همانطور که در جدول (۴) نشان داده شده است، با اضافه شدن تولیدکننده جدید با توان اکتیو ۱۰۰ کیلووات و توان راکتیو ۵۰ کیلووار به شین ۱۳، تغییرات قابل توجهی در تخصیص تلفات در هر دو شبکه شعاعی و مش ضعیف مشاهده می‌شود. در شبکه شعاعی، تلفات تخصیص یافته به این تولیدکننده ۵/۸۱۰- کیلووات و در شبکه مش ضعیف ۴/۷۷۴- کیلووات است. این تفاوت نشان می‌دهد که قرارگیری تولیدکننده در شبکه شعاعی منجر به کاهش بیشتر تلفات می‌شود. به عبارت دیگر، شبکه شعاعی توانسته است تلفات ناشی از اتصال تولیدکننده جدید را به طور موثرتری کاهش دهد. این موضوع می‌تواند ناشی از ساختار ساده‌تر و جریان توان مستقیم‌تر در شبکه شعاعی باشد. در مقابل، شبکه مش ضعیف با وجود داشتن مسیرهای جایگزین برای جریان توان، تلفات بیشتری را به تولیدکننده جدید تخصیص داده است. این امر نشان می‌دهد که در این سناریو، شبکه شعاعی از نظر اقتصادی و کارایی، گزینه مناسب‌تری برای اتصال این تولیدکننده است. با توجه به اینکه قیمت انرژی در هر دو شبکه برابر فرض شده است، انتخاب شبکه شعاعی منجر به کاهش هزینه‌های ناشی از تلفات و افزایش سودآوری تولیدکننده خواهد شد.

٤- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با هدف بررسی تاثیر مکان‌یابی مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان جدید بر تلفات شبکه، از روش τ-value برای تخصیص تلفات در شبکه‌های ۱۷ شین شعاعی و مش ضعیف استفاده شد. در سناریوی اول، قرارگیری یک بار ۱۰۰ کیلوواتی در شین ۱۰ نشان داد که تلفات تخصیص یافته به این بار در شبکه شعاعی ۳/۱۱۱ کیلووات و در شبکه مش ضعیف ۲/۵۵۰ کیلووات است، که نشان می‌دهد شبکه شعاعی در این حالت تلفات کمتری را به بار تحمیل می‌کند. در سناریوی دوم، با قرارگیری یک تولیدکننده ۱۰۰ کیلوواتی در شین ۱۳، تلفات تخصیص یافته در شبکه شعاعی ۵/۸۱۰- کیلووات و در شبکه مش ضعیف ۴/۷۷۴- کیلووات به دست آمد، که حاکی از کاهش بیشتر تلفات در شبکه شعاعی به واسطه حضور تولیدکننده است. نتایج به دست آمده، صحت فرضیات اولیه را تا حدی تایید کرد و نشان داد که در سناریوی بار جدید، شبکه شعاعی عملکرد بهتری داشت، در حالی که در سناریوی تولیدکننده جدید نیز شبکه شعاعی در کاهش تلفات موثرتر بود. بنابراین، برخلاف ادعای بهینه‌تر بودن شبکه مش ضعیف برای مصرف‌کننده در تمام حالات، نتایج این مطالعه نشان داد که ساختار بهینه بستگی به نوع و محل قرارگیری عنصر جدید دارد.

روش τ-value به دلیل کارایی بالا و حجم محاسباتی پایین، به عنوان یک ابزار قدرتمند در شبکه‌های برق تجدیدساختار شده مطرح می‌شود، به ویژه در شرایطی که روش‌های سنتی تخصیص تلفات در شبکه‌های مش ضعیف با چالش‌هایی مواجه هستند. با تحلیل دقیق نتایج و تخصیص هوشمندانه مکان به تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان، مشخص شد که این روش قادر است به طور موثر تلفات را مدیریت کرده و پاداش‌های مناسبی را به تولیدکنندگان تخصیص دهد (همانطور که در سناریوی تولیدکننده با تلفات ۵/۸۱۰- کیلووات در شبکه شعاعی مشهود است). این امر نه تنها به کاهش هزینه‌های ناشی از تلفات کمک می‌کند، بلکه زمینه را برای رقابت سالم در بازار برق فراهم می‌سازد. با وجود اینکه روش τ-value در تخصیص تلفات به مصرف‌کنندگان ممکن است سختگیری بیشتری نشان دهد (مانند تخصیص ۳/۱۱۱ کیلووات تلفات به بار جدید در شبکه شعاعی)، اما این رویکرد می‌تواند در بازارهای جدید و رقابتی، به عنوان یک ابزار کارآمد مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به نتایج حاصل از تحلیل تخصیص تلفات با استفاده از روش τ-value در شبکه‌های شعاعی و مش ضعیف، می‌توان سه نکته مهم را به شرح زیر خلاصه کرد:

۱. تاثیر ساختار شبکه بر تخصیص تلفات: نتایج نشان می‌دهد که ساختار شبکه (شعاعی یا مش ضعیف) تاثیر قابل توجهی بر تخصیص تلفات دارد. به طور کلی، در این مطالعه، شبکه‌های شعاعی در کاهش تلفات ناشی از اضافه شدن تولیدکنندگان جدید (با کاهش ۵/۸۱۰- کیلووات تلفات) عملکرد بهتری نسبت به شبکه‌های مش ضعیف (با کاهش ۴/۷۷۴- کیلووات تلفات) از خود نشان داده‌اند. در مورد بار جدید نیز، شبکه شعاعی تلفات کمتری را به بار تخصیص داد (۳/۱۱۱ کیلووات در مقابل ۲/۵۵۰ کیلووات در شبکه مش ضعیف).

۲. کارایی روش τ-value در شبکه‌های تجدیدساختار شده: روش τ-value به دلیل حجم محاسباتی پایین و کارایی بالا، به عنوان یک ابزار مناسب برای تخصیص تلفات در شبکه‌های برق تجدیدساختار شده، به ویژه در شرایطی که روش‌های سنتی با محدودیت‌هایی مواجه هستند، مطرح می‌شود.

۳. تخصیص منصفانه تلفات و پاداش به تولیدکنندگان: با تحلیل دقیق نتایج و تخصیص هوشمندانه مکان به تولیدکنندگان، مشاهده شد که روش τ-value قادر است به طور موثر تلفات را مدیریت کرده و پاداش‌های مناسبی را به تولیدکنندگان تخصیص دهد (کاهش تلفات ۵/۸۱۰- کیلووات در شبکه شعاعی). این امر می‌تواند به کاهش هزینه‌های ناشی از تلفات و ایجاد رقابت سالم در بازار برق کمک کند.

دو پیشنهاد پژوهشی کوتاه برای آینده در حوزه تخصیص تلفات در شبکه‌های توزیع:

۱. توسعه روش‌های تخصیص تلفات پویا با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های منابع تجدیدپذیر: با افزایش نفوذ منابع تجدیدپذیر با تولید متغیر، بررسی و توسعه روش‌های تخصیص تلفات که بتوانند تغییرات لحظه‌ای تولید و مصرف را در نظر بگیرند و تخصیص عادلانه‌تری ارائه دهند، اهمیت فزاینده‌ای خواهد داشت. این پژوهش می‌تواند به ارائه راهکارهایی برای مدیریت بهتر تلفات در شبکه‌های هوشمند آینده منجر شود.

۲. ارزیابی تاثیر طرح‌های پاسخگویی بار و ذخیره‌سازی انرژی بر تخصیص تلفات: بررسی چگونگی تاثیر برنامه‌های پاسخگویی بار و ادغام سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در شبکه‌های توزیع بر الگوهای جریان توان و در نتیجه، تخصیص تلفات، یک زمینه

تحقیقاتی جذاب است. این پژوهش می‌تواند به درک بهتری از مزایای این فناوری‌ها از منظر کاهش و تخصیص عادلانه تلفات کمک کند.

مراجع

[1] M. Atanasovski and R. Taleski, "Power summation method for loss allocation in radial distribution networks with DG," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 26, no. 4, 2011, doi: 10.1109/TPWRS.2011.2153216.

[2] A. J. Conejo, J. M. Arroyo, N. Alguacil, and A. L. Guijarro, "Transmission Loss Allocation: A Comparison of Different Practical Algorithms," 2002. doi: 10.1109/MPER.2002.4312201.

[3] E. Carpaneto, G. Chicco, and J. S. Akilimali, "Branch current decomposition method for loss allocation in radial distribution systems with distributed generation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 3, 2006, doi: 10.1109/TPWRS.2006.876684.

[4] Y. P. Molina, R. B. Prada, and O. R. Saavedra, "Complex losses allocation to generators and loads based on circuit theory and aumann-shapley method," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 25, no. 4, 2010, doi: 10.1109/TPWRS.2010.2044425.

[5] S. Sharma and A. R. Abhyankar, "Loss Allocation for Weakly Meshed Distribution System Using Analytical Formulation of Shapley Value," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 2, 2017, doi: 10.1109/TPWRS.2016.2571980.

[6] A. P. Hota, S. Mishra, and D. P. Mishra, "Active power loss allocation in radial distribution networks with different load models and DGs," *Electric Power Systems Research*, vol. 205, 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107764.

[7] J. Mutale, G. Strbac, S. Curcic, and N. Jenkins, "Allocation of losses in distribution systems with embedded generation," *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, vol. 147, no. 1, 2000, doi: 10.1049/ip-gtd:20000003.

[8] A. J. Conejo, F. D. Galiana, and I. Kockar, "Z-bus loss allocation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 16, no. 1, 2001, doi: 10.1109/59.910787.

[9] A. Parastar, B. Mozafari, A. Pirayesh, and H. Omidi, "Transmission loss allocation through modified Z-bus," in *Energy Conversion and Management*, 2011. doi: 10.1016/j.enconman.2010.07.055.

[10] J. Zhao, S. Du, Y. Dong, J. Su, and Y. Xia, "A bidirectional loss allocation method for active distributed network based on Virtual Contribution Theory," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 153, 2023, doi: 10.1016/j.ijepes.2023.109349.

[11] I. Bhand, S. Debbarma, and S. D. Roy, "Loss Allocation in Distribution Network involving Peer-To-Peer Energy Transactions," in *4th International Conference on Energy, Power, and Environment, ICEPE 2022*, 2022. doi: 10.1109/ICEPE55035.2022.9798075.

[12] W. Tao, H. Chen, L. Chen, and S. Chen, "An arbitrary segmentation method for loss allocation in power grids with distributed generation," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 164, p. 110436, Mar. 2025, doi: 10.1016/j.ijepes.2024.110436.

[13] A. S. Abdelkader, I. I. Mansy, and A. A. Eladl, "Distribution System Losses Allocation Based on Circuit Theory with Distributed Generation," *Mansoura Engineering Journal*, vol. 49, no. 5, Jan. 2024, doi: 10.58491/2735-4202.3224.

[14] M. Emadi, H. R. Massrur, E. Rokrok, and A. Samanfar, "A Comprehensive Framework for Optimal Stochastic Operating of Energy Hubs Integrated with Responsive Cooling, Thermal and Electrical Loads, and Ice Storage System by an Improved Self-Adaptive Slime Mold Optimization Algorithm," *Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System*, vol. 2, no. 1, pp. 77–95, 2023, doi: 10.30486/teeges.2022.1969195.1043.

[15] D. Bharti, "Loss allocation method for microgrids having variable generation," in *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 2021. doi: 10.1007/978-981-16-0749-3_8.

[16] P. Khademi Astaneh and H. Sheikh Shahrokh Dehkordi, "Integrated Optimal Active and Reactive Power Planning in Smart Microgrids with Possibility of One-Hour Islanding," *Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System*, vol. 2, no. 2, pp. 36–50, 2023, doi: 10.30486/teeges.2023.1979749.1063.

[17] H. Kumar and D. K. Khatod, "τ-Value Based Approach for Loss Allocation in Radial and Weakly Meshed Distribution Networks With Distributed Generation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 37, no. 3, 2022, doi: 10.1109/TPWRD.2021.3099207.

زیرنویس‌ها

[1] Branch Current Decomposition Method
[2] Shapley Value
[3] Distributed Generation
[4] Effect Generation
[5] Exact Method-Based Loss Allocation
[6] Transactive Energy
[7] Peer-to-Peer
[8] Graph-Based Loss Allocation
[9] Microgrid
[10] Load Fellow