

رتبه‌بندی مصرف‌کنندگان نهایی جهت مشارکت در تزریق توان راکتیو به منظور بهبود پروفیل ولتاژ

رضا اعتماد

دانشجوی دکتری مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی
(نویسنده مسئول)
re.etemad@gmail.com

محمدصادق قاضی‌زاده

دانشیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی
ghazizadeh.ms@gmail.com

محمد احمدیان

استادیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی
m_ahmadian@sbu.ac.ir

هوشمندسازی و استفاده از قابلیت‌های مصرف‌کنندگان نهایی در راستای سیاست‌های کلان بخش صنعت برق می‌باشد. با معرفی ادوات اندازه‌گیری هوشمند در سطح مصرف‌کنندگان نهایی موقعیتی فراهم گردید که بتوان از بازخوردهای این ادوات به منظور بهبود سطح ولتاژ، کاهش تلفات، بهبود پایداری ولتاژ و ... استفاده نمود. برخی از ادوات مصرف‌کنندگان نهایی از مدارهای واسط الکترونیک قدرتی به منظور تامین توان موردنیاز خود استفاده می‌نمایند که این مدارات با توجه به ساختارهای خود، با اعمال تغییراتی قابلیت تزریق و یا جذب توان راکتیو را دارا می‌باشند. یکی از موضوعات کلیدی در استفاده از این قابلیت مصرف‌کنندگان نهایی، رتبه‌بندی مصرف‌کنندگان با توجه به معیارهای تاثیرگذار می‌باشد. در واقع، تعیین شین‌های ارجح به منظور مشارکت در تامین توان راکتیو در بهبود حاصل از این مشارکت بسیار تاثیرگذار خواهد بود. در این مقاله، به رتبه‌بندی شین‌ها به وسیله روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و بررسی تاثیر استفاده بهینه از قابلیت‌های تزریق توان راکتیو توسط مصرف‌کنندگان نهایی پرداخته خواهد شد.

واژه‌های کلیدی: پروفیل ولتاژ، تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، تزریق توان راکتیو محلی، شبکه هوشمند، مصرف‌کنندگان نهایی

۱. مقدمه

با توجه به سیاست‌های کلی تصمیم‌گیران صنعت برق در حرکت به سمت هوشمندسازی و استفاده از قابلیت‌های بالقوه موجود، بهره‌گیری از توانایی مصرف‌کنندگان نهایی در بهبود سطح ولتاژ و مشارکت در تامین توان راکتیو به صورت ناحیه‌ای یکی از موارد مهم می‌باشد. استفاده از قابلیت‌های مصرف‌کنندگان نهایی، بهبودهای فراوانی از جمله کاهش تراکم خطوط، بهبود پایداری و بهبود مسایل زیست محیطی را به ارمغان می‌آورد. (صادقی و همکاران، ۱۳۹۶)

یکی از مسایل اصلی در بهره‌برداری سیستم قدرت، ایجاد تعادل بین توان اکتیو و راکتیو تولیدی و مصرفی می‌باشد. از جمله ادواتی که در حال حاضر می‌توانند برای این منظور به کمک بهره‌برداران بیایند، منابع تغذیه بر پایه مدارات الکترونیک قدرت ادوات مشترکین نهایی می‌باشند. (عابسی و همکاران، ۲۰۱۶)^۱، (دوان و همکاران، ۲۰۱۵)^۲ و (ورهرامی، ۱۳۹۵)

در گذشته، بانک‌های خازنی و جبران‌سازهای سنکرون^۳ به منظور تامین توان راکتیو به کار می‌رفتند که در حال حاضر این ادوات می‌توانند با ادوات الکترونیک قدرت دارای قابلیت تزریق توان راکتیو جایگزین شوند. از جمله این ادوات می‌توان منابع تغذیه بر پایه اینورتر ادوات خانگی و صنعتی، خودروهای الکتریکی، پنل‌های خورشیدی، منابع تغذیه بدون وقفه^۴، رابانه‌ها، تلویزیون‌ها، ادوات روشنایی و ... را نام برد. در این ادوات از منابع تغذیه اینورتری برای تامین توان موردنیاز دستگاه استفاده شده است. این وسایل، رفتار تقریباً مشابهی با منابع سنتی تامین توان راکتیو در ابعاد کوچک نشان می‌دهند. جبران‌سازی ضریب توان در نزدیکی بار موجب بهبود بارگذاری و بهره‌وری خطوط انتقال می‌گردد. به طور کلی، هدف از بهبود ضریب توان در سطح توزیع، نزدیک نمودن

-
1. Abessi, et al
 2. Duan, et al
 3. Synchronous Compensator
 4. Uninterruptible Power Supply (UPS)

ضریب توان به یک می‌باشد. ادوات دارای قابلیت تزریق و یا جذب توان راکتیو می‌توانند به منظور تامین توان راکتیو برای خود و ادوات نزدیک خود به کار روند. (عابسی و همکاران، ۲۰۱۶)

همان‌طور که پیشتر به این موضوع اشاره گردید، استفاده از منابع تغذیه اینورتری در ادوات خانگی قابلیت‌هایی را به این ادوات اضافه می‌نماید که از جمله آنها می‌توان قابلیت مشارکت این ادوات در تزریق توان راکتیو را نام برد (عابسی و همکاران، ۲۰۱۶) و (وکارو و همکاران، ۲۰۱۱) ^۱.

در مرجع (راجرز و همکاران، ۲۰۱۰) ^۲ به بررسی قابلیت مشارکت مصرف‌کنندگان نهایی به منظور کنترل ولتاژ پرداخته شده است. در این مرجع، تابع هدف بهبود سطح ولتاژ در نظر گرفته شده و با استفاده از تحلیل حساسیت به تعیین شین‌های ارجح جهت تزریق توان راکتیو پرداخته شده است. همچنین تحلیل حساسیت مورد استفاده در این مقاله از روابط پخش بار AC حاصل شده است. شبیه‌سازی پیشنهادی این مرجع بر روی شبکه ۲۴ شین استاندارد RTS ^۳ پیاده‌سازی شده است که با توجه به سطح ولتاژ شبکه و پخش بار مورد استفاده، روش پیشنهادی جهت بررسی قابلیت تزریق توان مصرف‌کنندگان نهایی مناسب به نظر نمی‌رسد. در مرجع (بیات و همکاران، ۲۰۱۵) ^۴ از قابلیت‌های مصرف‌کنندگان نهایی به منظور کنترل ولتاژ و فرکانس استفاده شده است. پخش بار مورد استفاده در این مرجع AC می‌باشد و این مقاله، تاثیر تغییر فرکانس را در حل مساله در نظر گرفته است. برای این منظور، بارهای مورد استفاده در این مقاله بر اساس مدل ZIP ^۵ شبیه‌سازی شده است که این موضوع نقطه قوت این مرجع می‌باشد. تابع هدف این مقاله شامل دو جزء بهبود ولتاژ و فرکانس می‌باشد و شین‌های تاثیرگذار تنها با در نظر گرفتن معیار تحلیل حساسیت تعیین شده‌اند و موارد تاثیرگذار دیگری مانند تلفات و میزان توان راکتیو در دسترس در تعیین شین‌های تاثیرگذار لحاظ نگردیده‌اند.

-
1. Vaccaro, et al
 2. Rogers, et al
 3. Reliability Test System
 4. Bayat, et al
 5. Constant Impedance, Constant Current, Constant Power

که این موضوع صحت نتایج را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در مرجع (راجرز و همکاران، ۲۰۱۰)^۱ بیشتر به مساله روش کنترل موردنیاز برای استفاده از قابلیت تزریق توان مصرف‌کنندگان نهایی پرداخته شده است و بخش اصلی این مرجع به توضیح این موضوع پرداخته است. شبکه مورد استفاده این مرجع شبکه ۲۴ شین RTS بوده است. مرجع (آنجل و همکاران، ۲۰۱۱)^۲ به ادامه تحقیقات مرجع (راجرز و همکاران، ۲۰۱۰) پرداخته است. در این مقاله، شبکه موردبررسی و بخش بار مورد استفاده نسبت به کار پیشین بهبود یافته است. بررسی قابلیت تزریق توان با توجه محدودیت‌های مصرف‌کنندگان نهایی در مرجع (عابسی و همکاران، ۲۰۱۶) انجام پذیرفته است. نقطه قوت این مرجع نسبت به مراجع پیشین، در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود در تعیین شین‌های منتخب است و بخش بار مورد استفاده و شبکه بکار گرفته شده کاملاً مناسب با هدف مشارکت مصرف‌کنندگان نهایی است. یکی از مسایل اساسی در بررسی مشارکت مصرف‌کنندگان نهایی و تعامل آنها در تامین توان راکتیو، تعیین شین‌های منتخب می‌باشد، زیرا در شرایط حاضر و با توجه به زیرساخت‌های موجود می‌بایست تعداد بهینه‌ای از شین‌های تاثیرگذار به منظور مشارکت تعیین گردند. در برخی از مراجع جهت تعیین شین‌های تاثیرگذار همانند مساله خازن‌گذاری رفتار شده است (ابوالعلا و همکاران، ۲۰۱۶)^۳ و (فرهانی و همکاران، ۲۰۱۲)^۴. از جمله مواردی که می‌بایست جهت تعیین شین‌های تاثیرگذار در نظر گرفته شود می‌توان حساسیت، میزان توان راکتیو در دسترس، بهبود تلفات و بهبود انحراف ولتاژ را نام برد. در این مطالعه، سعی شده است با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی^۵ درک بهتری از مساله انتخاب شین‌های تاثیرگذار وجود داشته باشد. همچنین

-
1. Rogers, et al
 2. Angel
 3. Abou El-Ela, et al
 4. Farahani, et al
 5. Fuzzy Analytical Hierarchy Process (FAHP)

تاثیر تزریق بهینه توان راکتیو توسط مصرف‌کنندگان نهایی در این مقاله مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

در ادامه این مقاله، پس از مقدمه، در بخش دوم، مدل‌سازی‌های مورد استفاده در مقاله به اختصار بیان شده‌اند؛ روش پیشنهادی این مقاله در تعیین شین‌های منتخب و تعیین میزان مشارکت مصرف‌کنندگان نهایی در بخش سوم طرح شده است؛ در بخش چهارم، نتایج حاصل از پیاده‌سازی روش پیشنهادی بر روی شبکه نمونه عنوان گردیده و نتیجه‌گیری در بخش پنجم ارائه شده است.

۲. مدل‌سازی مساله و فرمولاسیون

مدل و فرمولاسیون مورد استفاده در مقاله در سه بخش مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

مشترکین نهایی فرمان‌پذیر

این دسته از مشترکین، مصرف‌کنندگان نهایی می‌باشند که از واسط الکترونیک قدرت^۱ به منظور تامین توان مصرفی خود و اتصال به شبکه بهره می‌برند. وجود واسط الکترونیک قدرت در این دسته از مصرف‌کنندگان به آنها قابلیت مشارکت در تزریق و جذب توان راکتیو را می‌دهد. این قابلیت موجب می‌گردد این دسته از مشترکین بتوانند در مواقع مورد نیاز و با توجه به شرایط شبکه پیرامون خود، توان راکتیو را جذب و یا تزریق نمایند. هدف از جذب و یا تزریق توان راکتیو می‌تواند بهبود سطح ولتاژ، کاهش تلفات و یا ایجاد تعادل در توان تولیدی و مصرفی باشد. میزان قابلیت مشارکت این مشترکین بستگی به ظرفیت طراحی شده واسط الکترونیک قدرت آنها دارد. همچنین این موضوع حائز اهمیت می‌باشد که حجم زیادی از این ظرفیت در زمان روشن بودن این ادوات به وسیله توان اکتیو مصرفی اشغال گردیده است و در زمان خاموش بودن این ادوات، ظرفیت در دسترس به منظور مشارکت آنها افزایش خواهد یافت. موضوع بیان شده توسط رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$ARP_i = P_{ON,i} \times Q_{ON,i}^{accessible} + (1 - P_{ON,i}) \times Q_{OFF,i}^{accessible} \quad (1)$$

در رابطه فوق، پارامتر ARP نشان‌دهنده میزان توان راکتیو دردسترس است و اندیس i نشان‌دهنده شین در شبکه می‌باشد و همچنین پارامتر $P_{ON,i}$ احتمال مشارکت را نشان می‌دهد. میزان توان راکتیو دردسترس در حالت روشن و خاموش به ترتیب با پارامترهای $Q_{ON,i}^{accessible}$ و $Q_{OFF,i}^{accessible}$ نشان داده شده است.

به منظور بهره‌وری بهینه از مزایای ادوات فرمان‌پذیر مشترکین نهایی می‌بایست به رده‌بندی شین‌های شبکه با توجه به قابلیت‌های آنها پرداخت و با توجه به هدف بهره‌بردار، تعدادی از موثرترین شین‌ها را برای مشارکت فراخوانی نمود.

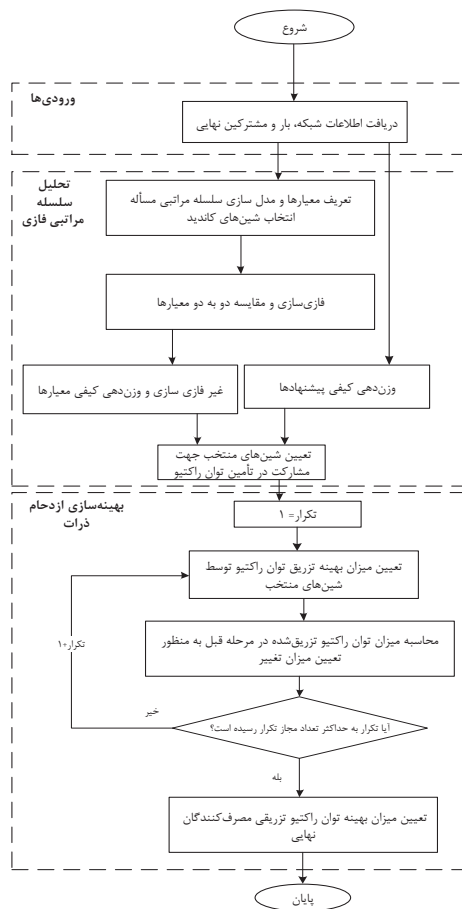
پخش بار

شبکه توزیع با توجه به مقادیر مقاومت، راکتانس و ساختار شعاعی، در دسته شبکه با شرایط ضعیف جهت حل با الگوریتم‌های حل نیوتن-رافسون^۱ و پخش بار مجزای سریع^۲ قرار می‌گیرد. بررسی‌های انجام‌پذیرفته در مرجع (شیر محمدی و همکاران، ۱۹۸۸)^۳ نشان داده است که استفاده از روش‌های بیان‌شده مطلوب نمی‌باشند و به واگرایی در اکثر مواقع منجر می‌گردند. با توجه به مشکلات بیان‌شده، پخش بار مبتنی بر ماتریس‌های جریان تزریق شین به جریان شاخه^۴ و جریان شاخه به ولتاژ شین^۵ جهت پخش بار شبکه توزیع پیشنهاد می‌گردد. از مزایای این روش می‌توان سرعت حل مساله و همگرایی را نام برد (شیر محمدی و همکاران، ۱۹۸۸). با توجه به مزایای بیان‌شده، این روش در این مقاله به منظور مطالعات پخش بار مورد استفاده قرار گرفته است.

-
1. Newton-Raphson
 2. Fast Decoupled Power Flow
 3. Shirmodammadi, et al
 4. Bus Injection to Branch Current
 5. Branch Current to Bus Voltage

۳. روش پیشنهادی

برای بررسی روش پیشنهادی، ابتدا الگوریتم پیشنهادی به صورت شماتیک در شکل (۱) نشان داده شده است و سپس در ادامه، به توضیح هر یک از بخش‌های روش پیشنهادی پرداخته خواهد شد.



شکل ۱. الگوریتم پیشنهادی

ورودی‌ها

ابتدا، ورودی‌های موردنیاز شبیه‌سازی فراخوانی می‌شوند. این ورودی‌ها شامل اطلاعات شبکه توزیع، اطلاعات مصرف‌کنندگان و اطلاعات بارها می‌باشد.

روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی

در این مقاله، به منظور تعیین کارآمدترین شین‌ها جهت مشارکت در تزریق توان راکتیو، از روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی استفاده شده است. به منظور درک درستی از این روش، ابتدا روش تحلیل سلسله‌مراتبی تبیین می‌گردد و در ادامه، روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی و مزایای آن نسبت به سایر روش‌ها توضیح داده خواهد شد. روش تحلیل سلسله‌مراتبی یکی از کارآمدترین روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌باشد که توسط Saaty تعمیم یافته است (ساعتی، ۱۹۸۰)^۱. در روش تحلیل سلسله‌مراتبی، مساله ساختار درخت تصمیم‌گیری به خود می‌گیرد که این موضوع درک مساله را بمراتب راحت‌تر می‌نماید. به رغم تمام مزایای روش تحلیل سلسله‌مراتبی در میان سایر روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، ناتوانی در لحاظ نمودن عدم قطعیت‌ها و نادقیقی‌های موجود در نشان دادن ادراک تصمیم‌گیران با اعداد قطعی، منجر به استفاده از نظریه اعداد فازی در مسایل گردیده است (مچفسکه و ونگ، ۲۰۰۱)^۲ و (زیمرن، ۱۹۸۷)^۳. به بیان دیگر، در بسیاری از موارد تصمیم‌گیران با عدم قطعیت و موارد فازی در لحاظ نمودن اهمیت نسبی یک معیار با معیارهای دیگر مواجه می‌گردند. بنابراین، روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی به کار گرفته می‌شود که در آن، نسبت‌های مقایسه‌ای غیرقطعی با رفتار فازی مدل می‌گردند.

در روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی متداول، پس از تعریف ساختار تصمیم‌گیری، گروهی از افراد ارزیابی‌کننده یک ماتریس مقایسه‌ای مانند جدول (۱) را تکمیل می‌نمایند.

1. Saaty
2. Mechefske and Wang
3. Zimmermann

جدول ۱. ماتریس مقایسه معیارها در روش تحلیل سلسله‌مراتبی

معیار ۴	معیار ۳	معیار ۲	معیار ۱	
$C_{۱۴}$	$C_{۱۳}$	$C_{۱۲}$	۱	معیار ۱
$C_{۲۴}$	$C_{۲۳}$	۱	$C_{۲۱}$	معیار ۲
$C_{۳۴}$	۱	$C_{۳۲}$	$C_{۳۱}$	معیار ۳
۱	$C_{۴۳}$	$C_{۴۲}$	$C_{۴۱}$	معیار ۴
$C_{۴}$	$C_{۳}$	$C_{۲}$	$C_{۱}$	وزن نهایی

در اکثر موارد، به منظور تکمیل ماتریس مقایسه از متغیرهای زبانی مندرج در جدول (۲) استفاده می‌گردد (ساعتی، ۱۹۸۰). در ماتریس مقایسه هر درایه معکوس درایه ترانهاد خود است. با استفاده از این روش می‌توان به داده‌های کیفی همانند داده‌های کمی، مقداری عددی نسبت داد. معمولاً دامنه اعداد از ۱ تا ۹ است، به این معنا که عدد ۱ نشاندهنده "به یک اندازه مهم" و عدد ۹ نشاندهنده "فوق‌العاده مهم‌تر" می‌باشند و تمام دامنه مقایسه را پوشش می‌دهند.

جدول ۲. متغیرهای زبانی مورد استفاده در روش تحلیل سلسله‌مراتبی

تعریف	مقیاس
به یک اندازه مهم	۱
اندکی مهم‌تر	۳
خیلی مهم‌تر	۵
خیلی خیلی مهم‌تر	۷
فوق‌العاده مهم‌تر	۹
مقادیر میانی	۲، ۴، ۶ و ۸

گرچه مقایسه قطعی معیارها در روش تحلیل سلسله‌مراتبی نشان داده شده در جدول (۲) دارای مزایایی مانند سادگی می‌باشد، اما برای نشان دادن دقیق نظرات تصمیم‌گیران کافی نیست. لذا اعداد

فازی برای مقایسه معیارها در روش تحلیل سلسله‌مراتبی به کار گرفته می‌شود که در جدول (۳) نشان داده شده است.

در روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، عدم قطعیت در قضاوت و نادقیق بودن نظرات متخصصان دخیل در امر تصمیم‌گیری بخوبی لحاظ می‌گردد و نتایج نهایی دارای دقت و قابلیت اطمینان بالاتری خواهند بود که در واقع، این موضوع برتری روش FAHP نسبت به روش AHP می‌باشد.

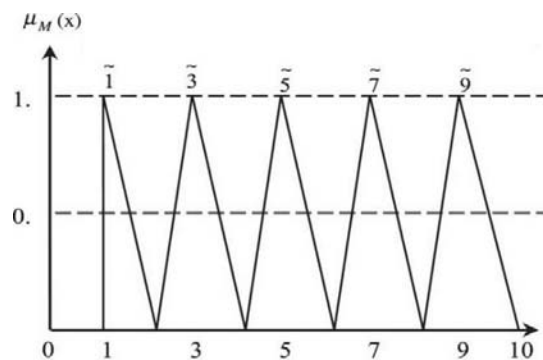
جدول ۳. فازی‌سازی روش تحلیل سلسله‌مراتبی
با استفاده از اعداد مقیاس فازی

مقیاس	تعریف	تابع عضویت
$\tilde{1}$	به یک اندازه مهم	(۱, ۱, ۲)
$\tilde{2}$	اندکی مهم‌تر	(۲, ۳, ۴)
$\tilde{3}$	خیلی مهم‌تر	(۴, ۵, ۶)
$\tilde{4}$	خیلی خیلی مهم‌تر	(۶, ۷, ۸)
$\tilde{9}$	فوق‌العاده مهم‌تر	(۸, ۹, ۹)

در این مقاله، از اعداد فازی مثلثی جهت فازی‌سازی روش تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شده است. تابع عضویت اعداد فازی مثلثی \tilde{N} در $\mathfrak{R} = (-\infty, +\infty)$ توسط رابطه (۲) تعریف می‌گردد.

$$\mu_{\tilde{N},x} = \begin{cases} \frac{x-l}{m-l} & l < x < m \\ \frac{u-x}{u-m} & m < x < u \\ \cdot & otherwise \end{cases} \quad (2)$$

هنگامی که تابع عضویت $\mu_{\tilde{M}} : \mathfrak{R} \rightarrow [0, 1]$ باشد، \tilde{a} به عنوان حد پایین، m به عنوان حد متوسط و \tilde{b} به عنوان حد بالا تابع عضویت در نظر گرفته می‌شود. شکل (۲) مقیاس اعداد فازی بیان‌شده توسط Saaty را نشان می‌دهد. (کازمی و دهقانیان، ۲۰۱۲)^۱



شکل ۲. رفتار فازی بیان‌شده توسط Saaty

پس از آنکه تصمیم‌گیران از اعداد فازی نشان داده‌شده در جدول (۳) برای تکمیل ماتریس مقایسه استفاده نمودند، ماتریس قضاوت \tilde{A} حاصل می‌گردد.

$$\tilde{A} = (\tilde{a}_{ij}) = \begin{pmatrix} \tilde{a}_{11} & \cdots & \tilde{a}_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{a}_{n1} & \cdots & \tilde{a}_{nn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

در این ماتریس، n تعداد معیارهای مورد کاربرد جهت مقایسه را نشان می‌دهد. تعدادی از عملگرهای فازی مهم و مورد استفاده در این مقاله به شرح زیر بیان می‌گردد. (زیمرمن، ۱۹۸۷) و (هانس، ۲۰۰۵)^۲

دو عدد فازی مثلثی $A_1 = (l_1, m_1, u_1)$ و $A_2 = (l_2, m_2, u_2)$ را در نظر می‌گیریم.

1. Kazemi and Dehghanian

2. Hanss

(۱) جمع:

$$A \oplus A_r = (l_1 + l_r, m_1 + m_r, u_1 + u_r) \quad (۴)$$

(۲) ضرب:

$$A \otimes A_r = (l_1 l_r, m_1 m_r, u_1 u_r) \quad (۵)$$

(۳) معکوس:

$$(l, m, u)^{-1} = \left(\frac{1}{u}, \frac{1}{m}, \frac{1}{l}\right) \quad (۶)$$

شایان ذکر است که معمولاً تصمیم‌گیران در دنیای واقعی در رتبه‌بندی مسایل با تعداد زیادی از توصیفات مواجه می‌شوند. بنابراین، مقایسه‌های بیشتری بین معیارها لازم است. در هنگام تکمیل ماتریس مقایسه، تصمیم‌گیران به مقایسه هر یک از معیارها به صورت مجزا می‌پردازند. در این صورت، ممکن است تصمیم‌گیران در تکمیل ماتریس مقایسه به صورت ناسازگار و ناهماهنگ اقدام نمایند. به عنوان مثال، تصمیم‌گیری ممکن است $A > B$ و $B > C$ را درجه‌بندی نماید، اما به صورت ناسازگاری $C > A$ نیز درجه‌بندی نماید. در این صورت، اگر درجه‌بندی C اندکی بالاتر از A باشد، قابل قبول بوده و جواب مناسب نیز حاصل می‌گردد، اما در صورتی که C بسیار بیشتر از A درجه‌بندی گردد، درجه‌بندی نادرست است. لذا باید سازگار و هماهنگ بودن ماتریس مقایسه کیفی مورد بررسی قرار گیرد. نرخ سازگاری جهت بررسی سازگاری و هماهنگی تصمیمات تصمیم‌گیر صورت می‌پذیرد (ساعتی، ۱۹۸۰). برای این منظور، در مرحله اول، شاخص سازگاری (CI) محاسبه می‌گردد.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (۷)$$

در این رابطه، پارامتر λ_{max} نشان‌دهنده بزرگترین مقدار ویژه ماتریس مقایسه است. نرخ سازگاری (CR) به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (8)$$

در صورتی که نرخ سازگاری کوچکتر از عدد ۰/۱ باشد، ماتریس مقایسه، سازگار و در واقع، مناسب می‌باشد.

معیارهای مورد استفاده در این مقاله عبارتند از حساسیت ولتاژ به توان راکتیو تزریقی، میزان توان راکتیو در دسترس، انحراف ولتاژ و تلفات.

در این مقاله، از روش پیشنهادی در مرجع (خاتد و همکاران، ۲۰۰۶) جهت محاسبه ماتریس حساسیت استفاده شده است. بررسی‌ها نشان داده است که تغییرات اندک در بار موجب بروز تغییرات قابل توجهی در اطلاعات ماتریس حساسیت نمی‌گردد. لذا اطلاعات حالت پایه جهت محاسبه ضرایب حساسیت به کار می‌روند.

حساسیت g نسبت به تزریق توان راکتیو به وسیله رابطه (۹) محاسبه می‌گردد. (عابسی و همکاران، ۲۰۱۶)

$$\nabla g = |2\eta\Lambda_{vQ}| \quad (9)$$

در این رابطه، پارامتر Λ_{vQ} بیانگر حساسیت ماتریس ولتاژ نسبت به تزریق توان راکتیو است و پارامتر η انحراف ولتاژ از ولتاژ مرجع را نشان می‌دهد.

میزان توان راکتیو در دسترس یکی دیگر از معیارهای موثر در تعیین شین‌های منتخب است. همان‌طور که پیشتر به این موضوع پرداخته شده، مشترکین نهایی با توجه به ظرفیت طراحی واسط الکترونیکی قدرتی خود و وضعیت خاموش یا روشن بودن می‌توانند ظرفیت متفاوتی جهت تزریق یا

جذب توان راکتیو در اختیار بهره‌بردار قرار دهند. میزان توان راکتیو در دسترس هر شین توسط رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$Q_i^{accessible} = K \times \sqrt{P_i^2 + Q_i^2} \quad (10)$$

در این رابطه، P_i و Q_i به ترتیب میزان بار اکتیو و راکتیو هر شین را نشان می‌دهند و ضریب K مبین سهمی از ظرفیت واسط الکترونیکی قدرت ادوات است که جهت مشارکت در برنامه تزریق توان راکتیو در دسترس می‌باشد.

دو شاخص دیگر مورد استفاده در این مقاله، میزان انحراف ولتاژ و تلفات می‌باشند که این شاخص‌ها با اضافه نمودن مقادیری از توان راکتیو به هر شین در حالت پایه محاسبه می‌گردند.

بهینه‌سازی

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات^۱ در این مقاله به منظور تعیین میزان بهینه مشارکت مصرف‌کنندگان نهایی به کار گرفته شده است.

تابع هدف مورد استفاده به صورت کمینه‌سازی اختلاف ولتاژ شین‌ها از مقدار مرجع و حداقل نمودن میزان مشارکت است که این تابع هدف و قیود اصلی مساله بهینه‌سازی در رابطه‌های (۱۱) و (۱۲) نمایش داده شده است.

$$Objective\ function = \left(w_1 \sum_{i=1}^{N_b} [V_i - V_{ref}]^2 + w_2 \sum_{j=1}^M [\Delta Q_j] \right) \quad (11)$$

$$Subject\ to : V_{min} \leq V_i \leq V_{max} \quad (12)$$

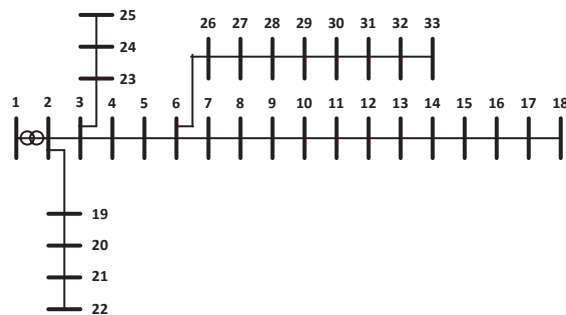
$$\Delta Q_j < \Delta Q_j^{accessible}$$

1. Particle Swarm Optimization

در روابط فوق، V_i ولتاژ هریک از شین‌ها و V_{ref} ولتاژ مرجع (۱ p.u.) می‌باشد. پارامتر ΔQ_i نشان‌دهنده مقدار توان راکتیو تزریقی شین i ام می‌باشد.

۴. مطالعه موردی

در این مقاله، به منظور بررسی روش پیشنهادی از شبکه توزیع استاندارد ۳۳ شین IEEE استفاده شده است. این شبکه از ۳۳ شین و ۳۲ خط توزیع تشکیل یافته است. بار پایه و ولتاژ پایه در شبکه توزیع استاندارد ۳۳ شین IEEE به ترتیب ۱۰۰ مگاوات آمپر و ۱۲/۶۶ کیلوولت می‌باشد و همچنین مجموع بار اکتیو و راکتیو این شبکه به ترتیب برابر ۳۷۲۰ کیلووات و ۲۳۰۰ کیلووار می‌باشد. دیاگرام تک خطی این شبکه در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل ۳. دیاگرام تک خطی شبکه توزیع استاندارد ۳۳ شین IEEE

روش بهینه‌سازی مورداستفاده در این مقاله، الگوریتم ازدحام ذرات می‌باشد. در این الگوریتم، فرضیاتی مطرح می‌گردد و یک سرعت ابتدایی به ذرات اختصاص داده شده و همچنین کانال‌های ارتباطی بین ذرات در نظر گرفته می‌شود، سپس این ذرات در فضای پاسخ حرکت می‌نمایند و نتایج حاصل بر مبنای یک «ملاک شایستگی» پس از هر بازه زمانی محاسبه می‌شود. با گذشت زمان، ذرات به سمت ذراتی که دارای ملاک شایستگی بالاتری هستند و در گروه ارتباطی یکسانی قرار دارند، شتاب می‌گیرند.

روش مورد کاربرد جهت تعیین و رتبه‌بندی شین‌ها همان طور که پیشتر به تفصیل بیان گردید، روش تحلیل سلسله‌مراتبی فازی می‌باشد. این روش بر مبنای اطلاعاتی می‌باشد که توسط متخصصان و صاحب‌نظران تعیین می‌گردد. حاصل مقایسه دو به دو معیارهای مورد استفاده در این مقاله در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴. مقایسه دو به دو معیارها

معیار	حساسیت			انحراف ولتاژ			ظرفیت در دسترس			تلفات		
حساسیت	۱	۱	۲	۱/۶۸	۲/۷۱	۳/۷۲	۲/۴۵	۳/۵۶	۴/۶۰	۴/۱۶	۵/۱۸	۶/۱۹
انحراف ولتاژ	۰/۲۷	۰/۳۷	۰/۵۹	۱	۱	۲	۴/۱۶	۵/۱۸	۶/۱۹	۴	۵	۶
ظرفیت در دسترس	۰/۲۲	۰/۲۸	۰/۴۱	۰/۱۶	۰/۱۹	۰/۲۴	۱	۱	۲	۳/۷۶	۴/۸۲	۵/۸۶
تلفات	۰/۱۶	۰/۱۹	۰/۲۴	۰/۱۷	۰/۲۰	۰/۲۵	۰/۱۷	۰/۲۱	۰/۲۷	۱	۱	۲

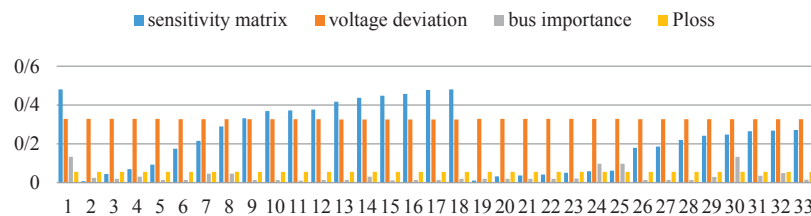
وزن نهایی هر یک از معیارها از میانگین‌گیری هندسی و نرمالیزه نمودن اعداد مقایسه معیارها حاصل می‌گردد. مقادیر وزن نهایی معیارها در جدول (۵) نشان داده شده‌اند.

جدول ۵. وزن نهایی معیارها

معیار	حساسیت	انحراف ولتاژ	ظرفیت در دسترس	تلفات
وزن نهایی	۰/۴۸۰۹	۰/۳۲۸۷	۰/۱۳۳۹	۰/۰۵۶۲

مقایسه‌ای از وزن نهایی هر معیار در هر یک از شین‌های شبکه در شکل (۴) به تصویر کشیده

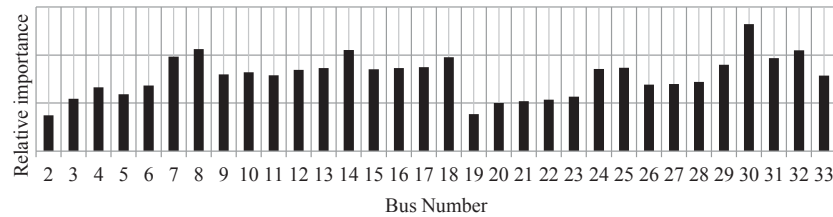
شده است.



شکل ۴. مقایسه وزن هر معیار در هر شین شبکه

رتبه‌بندی شین‌های شبکه با توجه به معیارهای بیان‌شده در شکل (۵) نشان داده شده است.

FAHP RANKING



شکل ۵. رتبه‌بندی شین‌های شبکه توزیع استاندارد ۳۳ شین IEEE

در این مقاله، به منظور بررسی تاثیر میزان مشارکت مصرف‌کنندگان نهایی بر سطح ولتاژ شین‌های شبکه، سه سناریو تعریف گردیده است. در سناریو اول، مصرف‌کنندگان نهایی در بحث تامین توان راکتیو مشارکتی ندارند؛ در سناریو دوم، ۱۰ شین کاندید دارای بیشترین ارجحیت مشارکت خواهند کرد و در سناریو سوم، تعداد شین‌های کاندید مشارکت‌کننده به ۲۰ شین افزایش می‌یابد.

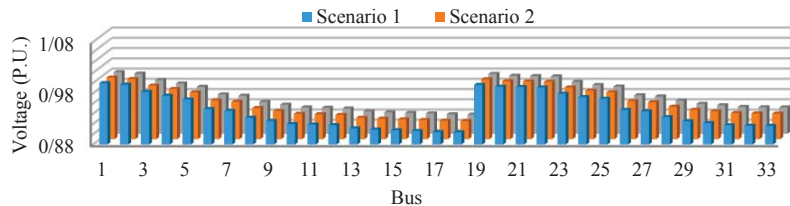
رتبه‌بندی شین‌ها در سناریوهای بیان شده در جدول (۶) نشان داده شده است.

جدول ۶. رتبه‌بندی شین‌های شبکه ۳۳ شین استاندارد IEEE در سناریوهای دوم و سوم

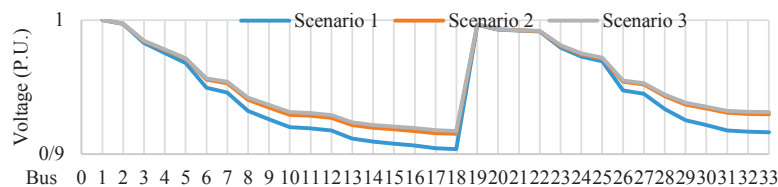
۱۰ شین منتخب	۳۰	۸	۱۴	۳۲	۷	۱۸	۳۱	۲۹	۱۷	۲۵
۲۰ شین منتخب	۳۰	۸	۱۴	۳۲	۷	۱۸	۳۱	۲۹	۱۷	۲۵
	۱۳	۱۶	۲۴	۱۵	۱۲	۱۰	۹	۱۱	۳۳	۲۸

ولتاژ هر یک از شین‌ها در هر یک از سه سناریو از پیش تعریف شده در شکل‌های (۶) و (۷) نشان

داده شده است.



شکل ۶. ولتاژ شین‌ها در سه سناریو تعریف شده



شکل ۷. مقایسه ولتاژ شین‌ها در سه سناریو تعریف شده

همان‌طور که انتظار می‌رفت، با بهره‌وری از قابلیت تزریق توان راکتیو توسط مصرف‌کنندگان نهایی پروفیل ولتاژ بهبود یافته است. همچنین با افزایش تعداد مشارکت‌کنندگان، تامین توان راکتیو در محل نیاز انجام می‌پذیرد که این موضوع موجبات بهبود بیشتر در پروفیل ولتاژ را فراهم می‌نماید. در مطالعات مشابه پیشین (عابسی و همکاران، ۲۰۱۶)^۱ تنها شاخص حساسیت ولتاژ به تزریق توان راکتیو جهت رتبه‌بندی شین‌ها در نظر گرفته شده بود. گرچه این شاخص دارای اهمیت فراوانی می‌باشد، اما استفاده از این شاخص به تنهایی به طور حتم به بهترین نتیجه ختم نمی‌گردد. به عنوان مثال، یک شین با ضریب حساسیت بالا در صورتی که دارای ظرفیت مناسب جهت مشارکت در تزریق توان نباشد، مسلماً انتخاب مناسبی نخواهد بود. در نظر گرفتن چندین شاخص دارای اهمیت و استفاده از نظرات خبرگان و کارشناسان در این مقاله، موجب انتخاب شین‌های بهینه به منظور مشارکت می‌گردد.

۵. نتیجه‌گیری

با توجه به سیاست‌های کلی انرژی در صنعت برق، در این مقاله به بررسی قابلیت‌های موجود مصرف‌کنندگان نهایی پرداخته شده است. با ظهور شبکه هوشمند، قابلیت‌های متعددی به شبکه سنتی افزوده شده است که از جمله این قابلیت‌ها می‌توان توانایی مشارکت مصرف‌کنندگان نهایی در تامین توان راکتیو و بهبود سطح ولتاژ شبکه را نام برد. این موضوع به وسیله واسط‌های الکترونیک قدرت موجود در منبع تغذیه این ادوات امکان‌پذیر می‌گردد. این واسط‌های الکترونیک قدرت در حال حاضر در اکثر مصرف‌کنندگان موجود می‌باشند و با تغییرات اندکی می‌توان قابلیت تزریق توان راکتیو را برای این مصرف‌کنندگان فراهم نمود. در این مقاله، با استفاده از چهار شاخص نسبت به رتبه‌بندی مصرف‌کنندگان نهایی به منظور مشارکت در تزریق توان راکتیو پرداخته شد و تاثیر این مشارکت در سه سناریو مقایسه گردید. تعریف چندین شاخص به منظور رتبه‌بندی شین‌ها و تعیین شین‌های کاندید در مقایسه با روش‌های پیشنهادی در مقالات پیشین دارای مزایای فراوانی می‌باشد و با بهره‌وری از این روش می‌توان اطمینان حاصل نمود که شین‌های منتخب دارای ویژگی‌های مناسب جهت مشارکت در تزریق توان راکتیو می‌باشد. در این مقاله، پس از تعیین شین‌های منتخب، میزان مشارکت بهینه این شین‌ها با کمک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات محاسبه گردیده و تاثیر این مشارکت با کمک از نمودارها نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد با مشارکت تعداد مناسبی از مصرف‌کنندگان نهایی می‌توان سطح ولتاژ شین‌ها را به ولتاژ مطلوب نزدیک نمود و پایداری شبکه توزیع را بهبود بخشید.

منابع

صادقی، سید کمال؛ سجودی، سکینه و فهیمه احمدزاده دلجوان (۱۳۹۶)، "تاثیر انرژی‌های تجدیدپذیر بر رشد اقتصادی و کیفیت محیط‌زیست در ایران"، فصلنامه پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی، شماره ۶، صص ۲۰۲-۱۷۱.

ورهرامی، ویدا (۱۳۹۵)، "تابع تقاضای برق خانگی شهرستان‌های منتخب تهران در زمان پیک و غیر پیک"، فصلنامه پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی، شماره ۵، صص ۵۵-۷۳.

Abessi, A; Vahidinasab, V. and M. S. Ghazizadeh (2016), "Centralized Support Distributed Voltage Control by Using End-Users as Reactive Power Support", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 7, No. 1, pp. 178 – 188.

Abou El-Ela, A. A; El-Sehiemy, R. A; Kinawy, A. and M. T. Mouwafi (2016), "Optimal Capacitor Placement in Distribution Systems for Power Loss Reduction and Voltage Profile Improvement", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 10, No. 5, pp. 1209-1221.

Angel, A; Lugo, A; Klump, R. and T. J. Overbye (2011), "A Control Framework for the Smart Grid for Voltage Support Using Agent-Based Technologies", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 2, No. 1, pp. 173-180.

Bayat, M; Sheshyekani, K. and A. Rezazadeh (2015), "A Unified Framework for Participation of Responsive End-User Devices in Voltage and Frequency Control of the Smart Grid", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 30, No. 3, pp. 1369-1379.

Duan, Q; Wang, J; Ma, C; Gu, B; Ji, B; Qiu, P. and J. You (2015), "Flexible Power Distribution Unit-A Novel Power Electronic Transformer Development and Demonstration for Distribution System", *41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 000534–000537.

Farahani, V; Vahidi, B. and H. Askarian Abyaneh (2012), "Reconfiguration and Capacitor Placement Simultaneously for Energy Loss Reduction Based on an Improved Reconfiguration Method", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 27, No. 2, pp. 587 – 595.

Hanss, M. (2005), *Applied Fuzzy Arithmetic: An Introduction with Engineering Applications*. Berlin, Germany: Springer.

Khatod, D. K; Pant, V. and J. Sharma (2006), "A Novel Approach for Sensitivity Calculations in the Radial Distribution System", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, No. 4, pp. 2048 – 2057.

Mechefske, C. K. and Z. Wang (2001), "Using Fuzzy Linguistics to Select Optimum Maintenance and Condition Monitoring Strategies", *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 15, No. 6, pp. 1129–1140.

Razi Kazemi, A. A. and P. Dehghanian (2012), "A Practical Approach on Optimal RTU Placement in Power Distribution Systems Incorporating fuzzy Sets Theory", Vol. 37, No. 1, pp. 31-42.

Rogers, K. M; Klump, R; Khurana, H. and T. J. Overbye (2010), "Smart-Grid – Enabled Load and Distributed Generation as a Reactive Resource", *IEEE Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*.

Rogers, K. M; Klump, R; Khurana, H. A; Aquino-Lugo, A. and T. J. Overbye (2010), "An Authenticated Control Framework for Distributed Voltage Support on the Smart Grid", *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol. 1, No. 1, pp. 40-47.

Saaty, T.L. (1980), *The Analytic Hierarchy Process*, New York: McGraw-Hill.

Shirmodammadi, D; Hong, H. W; Semlyen, A. and G. X. Luo (1988), "A Compensation-Based Power Flow Method for Weakly Meshed Distribution and Transmission Networks", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 3, No. 2, pp. 753–762.

Vaccaro, A; Velotto, G. and A. F. Zobaa (2011), "A Decentralized and Cooperative Architecture for Optimal Voltage Regulation in Smart Grids", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 58, No. 10, pp. 4593-4602.

Zimmermann, H. J. (1987), *Fuzzy Sets, Decision Making and Expert Systems*, Norwell, MA: Kluwer.