

ارائه یک روش نیمه‌هوشمند برای شارژ خودروهای برقی در شبکه‌های توزیع چهارسیمه نامتعادل

سعید ذوالفقاری مقدم

پارامترها

$BC_{i,ph}$: ظرفیت باتری خوردوری برقی قرارگرفته در فاز ph
شین i ام
 ChP : نرخ توان شارژ خودرو (همان ۳/۵ kW)
 $Dep_{i,ph}$: زمان خروج خوردوری برقی واقع در فاز ph شین i ام
در صبح روز بعد
 $ISOC_{i,ph}$: مقدار شارژ اولیه خوردوری برقی قرارگرفته در فاز ph
شین i ام
 $P_{i,ph,t}^{Conv}$: توان اکتیو بار خانگی معمولی قرارگرفته در فاز ph شین
 i ام در زمان t
 $Q_{i,ph,t}^{Conv}$: توان راکتیو بار خانگی معمولی قرارگرفته در فاز ph شین
 i ام در زمان t
 $Z_{ij,ph}$: امپدانس فاز ph موجود بین شین‌های i و j
 $Z_{ij,n}$: امپدانس هادی نول موجود بین شین‌های i و j

متغیرها

$I_{ij,ph,t}$: جریان هادی فاز ph موجود بین شین‌های i و j در
زمان t
 $I_{ij,n,t}$: جریان هادی نول موجود بین شین‌های i و j در زمان t
 $I_{i,ph,t}^{Load}$: جریان بار الکتریکی بین فاز ph و نول شین i ام در
زمان t
 $P_{i,ph,t}^{Load}$: توان اکتیو بار الکتریکی قرارگرفته بین فاز ph و نول
شین i ام در زمان t
 $P_{i,ph,t}^{PHEV}$: توان اکتیو خوردوری برقی قرارگرفته در فاز ph شین i ام
در زمان t
 $Q_{i,ph,t}^{Load}$: توان راکتیو بار الکتریکی قرارگرفته بین فاز ph و نول
شین i ام در زمان t
 $TCT_{i,ph}$: مدت زمان لازم برای شارژ خودرو
 $V_{i,ph,t}$: ولتاژ فاز ph شین i ام در زمان t
 $V_{i,n,t}$: ولتاژ نول شین i ام در زمان t
 $V_{i,ph,n,t}$: اختلاف پتانسیل فاز ph شین i ام نسبت به نول در
زمان t

۱- مقدمه

کاهش منابع سوخت فسیلی و نیز گسترش آلاینده‌های زیست‌محیطی، موجب گسترش استفاده از خودروهای برقی در صنعت حمل و نقل شده است [۱]. خودروهای برقی در حالت کلی شامل انواع مختلفی می‌باشند که از جمله کارآمدترین آنها، خودروهای برقی هیبریدی قابل شارژ است.

چکیده: گسترش روزافزون خودروهای برقی در شبکه‌های توزیع، چالش‌های زیادی را برای شرکت‌های توزیع برق ایجاد کرده است، از جمله: افزایش مقدار افت ولتاژ، افزایش مقدار تلفات شبکه و افزایش تعداد قطعی‌های ناشی از اضافه بار. برای غلبه بر موضوع ذکرگرفته، پیشنهاد می‌شود که از روش شارژ کنترل‌شده استفاده گردد. با این حال، روش مذکور نیازمند وجود زیرساخت‌های مخابراتی، اندازه‌گیری و پردازشی با هزینه‌های بالا بوده و تنها در شبکه‌های هوشمند قابل پیاده‌سازی است. در این مقاله، یک روش نیمه‌هوشمند برای شارژ خودروهای برقی ارائه شده تا بدون نیاز به زیرساخت‌های پیچیده و تنها با استفاده از سیستم اتوماسیون ساده محلی و ارزان‌قیمت، خودروهای برقی را در زمان‌های کم‌باری شبکه شارژ کرده و به این ترتیب، پارامترهای شبکه را به میزان قابل قبولی بهبود بخشد. بنابراین روش ارائه‌شده علاوه بر شرکت توزیع برق، به نفع مالکین خودرو نیز می‌باشد، زیرا هزینه شارژ خودروها بر اساس تعرفه پایین محاسبه می‌شود. برای رسیدن به نتایج واقعی، شبکه توزیع به صورت چهارسیمه و با در نظر گرفتن اثر سیم نول مدل‌سازی شده است. با اعمال روش پیشنهادی بر روی شبکه توزیع ۱۹ شینه استاندارد و مقایسه نتایج به دست آمده با روش‌های مختلف شارژ کنترل‌نشده، کارایی روش پیشنهادشده تأیید می‌گردد.

کلیدواژه: خوردوری برقی، شبکه توزیع چهارسیمه، روش شارژ نیمه‌هوشمند، هادی نول، روش مونت کارلو.

فهرست علائم

اندیس‌ها

i, j, k : اندیس‌های مربوط به شین‌های شبکه
 ph : اندیس مربوط به فاز
 n : اندیس مربوط به نول
 t : اندیس مربوط به بازه زمانی

مجموعه‌ها

B : مجموعه تمام شین‌های شبکه
 L : مجموعه تمام خطوط شبکه
 PH : مجموعه تمام فازهای شبکه $\{a, b, c\}$
 T : مجموعه تمام بازه‌های زمانی

این مقاله در تاریخ ۳۰ آذر ماه ۱۴۰۰ دریافت و در تاریخ ۵ اردیبهشت ماه ۱۴۰۱ بازنگری شد.

سعید ذوالفقاری مقدم (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی برق، دانشکده فناوری‌های صنعتی، دانشگاه صنعتی ارومیه، ارومیه، ایران، (email: s.zolfaghari@uut.ac.ir).

مرجع [۱۹] یک مدل بهینه‌سازی مبتنی بر سناریو برای حل مسأله در مدار قرار گرفتن منابع تولید پراکنده در حضور منابع انرژی تجدیدپذیر و خودروهای برقی ارائه می‌دهد. در [۲۰]، انواع روش‌های شارژ خودروهای برقی به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است.

همان گونه که اشاره شد، روش‌های شارژ کنترل‌شده در مقابل روش شارژ کنترل‌نشده مطرح می‌گردند. در روش شارژ کنترل‌نشده، فرض بر آن است که مالک هر خودروی برقی به محض رسیدن به منزل، خودروی خود را به برق متصل کرده و خودرو شروع به شارژ شدن می‌کند. با توجه به این که زمان ورود افراد به منزل معمولاً در زمان‌های پیک بار (ساعت ۱۶:۰۰ الی ۱۸:۰۰ عصر) است، لذا استفاده از روش شارژ کنترل‌نشده، فشار بسیار زیادی بر شبکه توزیع وارد خواهد کرد. بنابراین استفاده از روش‌های شارژ کنترل‌شده یا هوشمند، بسیار مؤثر خواهد بود. زیرا در این گونه روش‌ها، اطلاعات مربوط به شبکه در هر لحظه، جمع‌آوری و به پردازشگر مرکزی ارسال شده و نهایتاً زمان شارژ و نیز نرخ توان شارژ هر خودروی برقی تعیین می‌گردد. با این حال، لازمه پیاده‌سازی روش‌های هوشمند، وجود زیرساخت‌های مخابراتی، اندازه‌گیری و پردازشی است که احداث آن دارای هزینه‌های بسیار بالایی می‌باشد.

در این مقاله، روشی نیمه‌هوشمند ارائه شده که در آن از یک سیستم اتوماسیون ساده، کاربردی و ارزان‌قیمت برای شارژ خودروهای برقی در زمان‌های کم‌باری شبکه استفاده می‌شود. استفاده از روش پیشنهادی از یک سو باعث کاهش اثر سوء ناشی از شارژ خودروهای برقی در زمان‌های پیک بار بر پارامترهای شبکه می‌شود و از سوی دیگر باعث می‌گردد که مالکین خودروی برقی، هزینه شارژ خودروی خود را بر مبنای تعرفه زمان‌های کم‌باری پرداخت کنند. برای مدل‌سازی دقیق شبکه توزیع و رسیدن به پاسخ‌های واقعی، شبکه به صورت چهارسیمه نامتعادل در نظر گرفته شده و تأثیر حضور سیم نول در شارژ خودروهای برقی مورد بررسی قرار می‌گیرد. این موضوعی است که در کمتر مقاله‌ای به آن پرداخته شده است. به عبارت بهتر، در تحقیقات انجام‌گرفته در این زمینه، معمولاً شبکه توزیع یا به صورت متعادل در نظر گرفته شده و یا این که در صورت نامتعادل بودن، سیم نول مدل‌سازی نشده است [۲۱]. عدم قطعیت‌های مختلفی چون مقدار توان اکتیو و راکتیو مصرفی، ساعت ورود و خروج خودرو، شارژ اولیه و ظرفیت باتری خودرو در نظر گرفته شده که برای مدل‌سازی آنها از روش مونت‌کارلو و توابع احتمالاتی مناسب استفاده می‌گردد. برای بررسی کارایی روش ارائه‌شده، از یک شبکه توزیع نمونه استفاده گردیده و روش شارژ نیمه‌هوشمند پیشنهادی با روش شارژ کنترل‌نشده و نیز چند استراتژی شارژ دیگر مقایسه می‌گردد. در هر یک از روش‌های بیان‌شده، پارامترهای مختلف شبکه از جمله تلفات شبکه توزیع، پروفیل ولتاژ، حداکثر افت ولتاژ و نیز اندازه ولتاژ سیم نول در شین‌های مختلف شبکه محاسبه می‌گردد. نتایج به دست آمده، کارایی روش پیشنهادی را تأیید می‌کنند. بنابراین نوآوری‌های این مقاله عبارتند از:

- ۱) ارائه یک روش نیمه‌هوشمند برای شارژ خودروهای برقی که دارای مزایای زیر است:
 - ارزان‌قیمت، بدون نیاز به تجهیزات و زیرساخت‌های مختلف اندازه‌گیری، مخابراتی و پردازشی
 - جلوگیری از اثر سوء ناشی از شارژ کنترل‌نشده خودروهای برقی در زمان‌های پیک بار بر پارامترهای شبکه
 - حداقل‌سازی هزینه شارژ خودروهای برقی
- ۲) در نظر گرفتن شبکه توزیع سه‌فاز چهارسیمه نامتعادل برای مشاهده تأثیر حضور سیم نول و رسیدن به پاسخ‌های واقعی

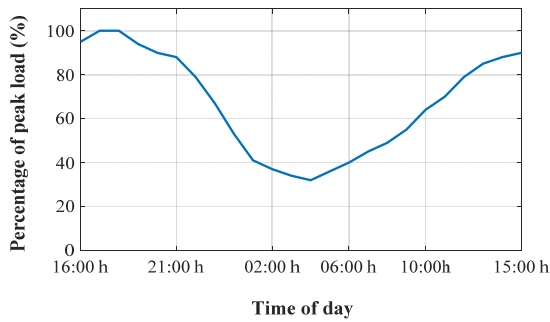
این گونه خودروها از سیستم احتراق داخلی و باتری الکتریکی به صورت ترکیبی استفاده کرده و قابلیت شارژ/دشارژ شدن از/ به شبکه توزیع برق را دارند [۲].

با وجود این، گسترش هرچه بیشتر خودروهای برقی قابل شارژ و نیاز آنها به توان الکتریکی، موجب ایجاد مشکلات عدیده‌ای برای شرکت‌های توزیع برق شده که از جمله آنها می‌توان به نوسانات شدید ولتاژ، افزایش تلفات و افزایش احتمال بروز خاموشی ناشی از اضافه بار [۳] اشاره کرد. این موضوع، خود چالش مهمی در زمینه مسأله مدیریت سمت تقاضا برای شرکت‌های توزیع برق محسوب می‌شود.

در پی تجدید ساختار سیستم‌های قدرت و ایجاد شبکه‌های هوشمند توزیع برق و گسترش زیرساخت‌های مخابراتی و کنترلی، می‌توان تا حد زیادی به این مشکلات غلبه کرد. در واقع در شبکه‌های هوشمند، خودروهای برقی به عنوان بارهای الکتریکی قابل کنترل محسوب می‌شوند که زمان‌بندی شارژ آنها قابل برنامه‌ریزی است. به این نوع شارژ خودروهای برقی که با استفاده از زیرساخت‌های مخابراتی، اندازه‌گیری و پردازشی انجام می‌گیرد، شارژ هماهنگ، کنترل‌شده یا هوشمند گفته می‌شود [۴] و [۵].

تحقیقات زیادی در زمینه تأثیر شارژ هوشمند خودروهای برقی بر پارامترهای مختلف شبکه از جمله: پروفیل ولتاژ، تلفات، قابلیت اطمینان، هارمونیک و ... انجام گرفته و به مزایای آن در مقایسه با شارژ کنترل‌نشده یا تصادفی اشاره گردیده است [۶] تا [۸]. در [۹]، مدلی برای شارژ کنترل‌شده خودروهای برقی ارائه می‌گردد که در آن، از یک تابع سه‌هدفه با اهداف کمینه‌سازی تلفات، بیشینه‌سازی ضریب بار^۱ و کمینه‌سازی تغییرات بار استفاده می‌شود. در [۱۰] از برنامه‌نویسی خطی باینری برای مسأله شارژ هماهنگ خودروهای برقی استفاده می‌شود. مرجع [۱۱] از استراتژی پرکردن دره^۲ برای شارژ کنترل‌شده خودروهای برقی استفاده می‌کند. مرجع [۱۲] در راستای شارژ هماهنگ خودروهای برقی به مصالحه بین هزینه تولید کل و هزینه‌های ناشی از اضافه بار شبکه و فرسودگی باتری پرداخته و برای حل مسأله بهینه‌سازی، از یک رویکرد غیر متمرکز استفاده می‌کند. مرجع [۱۳] از دید انتشار گازهای آلاینده به مسأله شارژ خودروهای برقی پرداخته است. تابع هدف به کار رفته در این مرجع، کمینه‌کردن انتشار گاز CO₂ و هزینه‌های مربوط به شارژ خودرو می‌باشد. در [۱۴]، مدلی برای شارژ هماهنگ خودروهای برقی ارائه می‌شود که در آن از تعریف دو ضریب به نام‌های ضریب حاشیه ظرفیت و ضریب اولویت شارژ استفاده می‌شود. مدل به کار رفته در [۱۵]، یک مدل برنامه‌ریزی ترکیبی چندلایه است که برای شارژ هوشمند خودروهای برقی در شبکه توزیع استفاده می‌شود. تابع هدف مدل فوق، هزینه‌های کلی شارژ و نسبت بار پیک به بار متوسط را کمینه می‌کند. در [۱۶]، مسأله شارژ خودروهای برقی در حضور منابع تولید پراکنده انجام می‌شود. مدل به کار رفته در این مرجع، یک مسأله بهینه‌سازی چندهدفه است که تابع هدف آن، شامل هزینه‌های بهره‌برداری، کاهش آلاینده‌ها و تغییرات بار است. مرجع [۱۷]، یک روش شارژ هوشمند را ارائه می‌دهد که در آن میزان انرژی دریافتی از شبکه بالادست، حداقل شده و میزان انرژی تولیدشده توسط منابع انرژی تجدیدپذیر حداکثر می‌گردد. در [۱۸] یک مسأله بهینه‌سازی چندهدفه در حضور خودروهای برقی ارائه شده که در آن هزینه تولید انرژی و میزان انتشار گازهای آلاینده حداقل می‌گردد.

1. Load Factor
2. Valley Filling



شکل ۲: منحنی بار پایه برای بارهای خانگی معمولی.

$$V_{i,phn,t} = V_{i,ph,t} - V_{i,n,t}, \quad \forall i \in B, ph \in PH, t \in T \quad (7)$$

یکی از روش‌های مرسوم برای حل معادلات پخش بار در شبکه‌های توزیع چهارسیمه شعاعی، استفاده از روش پسر-پیشرو [۲۲] است.

۳- مدل‌سازی بارهای الکتریکی شبکه توزیع

در این مقاله، بارهای الکتریکی به دو دسته بارهای خانگی معمولی و بار مربوط به خودروی برقی تقسیم‌بندی گردیده که در ادامه این بخش به نحوه مدل‌سازی هر یک از آنها پرداخته می‌شود.

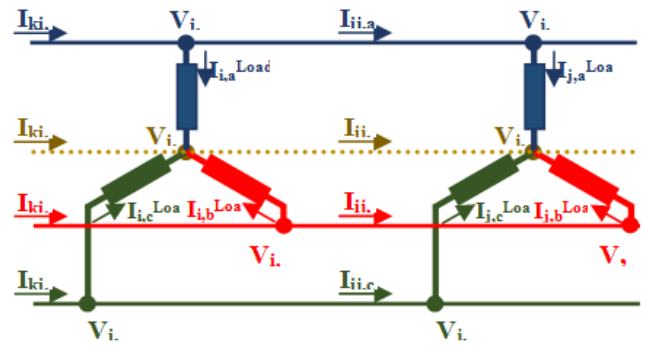
۳-۱ مدل‌سازی بارهای خانگی معمولی

در این مقاله، بارهای خانگی از نوع تک‌فاز بوده و دارای توان اکتیو و راکتیو معلوم هستند. به این ترتیب با یک شبکه توزیع نامتعادل مواجه خواهیم بود که بارهای موجود در آن دارای عدم قطعیت هستند. برای تعیین بار هر یک از مشترکین، ابتدا یک منحنی بار پایه مشابه شکل ۲ در نظر گرفته می‌شود [۳]. با استفاده از توزیع نرمال و روش مونت‌کارلو، منحنی بار هر یک از مشترکین بر اساس منحنی بار پایه به دست می‌آید. برای این کار مقدار منحنی بار در هر بازه زمانی، به عنوان مقدار میانگین تابع توزیع نرمال و انحراف معیار برابر با ۲۰٪ در نظر گرفته شده است.

۳-۲ مدل‌سازی خودروهای برقی

نوع دیگر بارهای در نظر گرفته شده در این مقاله، خودروهای برقی هستند که جزو بارهای الکتریکی قابل کنترل محسوب می‌شوند. خودروهای برقی نیز مانند بارهای خانگی معمولی دارای عدم قطعیت‌های مختلفی از جمله: ظرفیت باتری، زمان ورود به منزل، مقدار شارژ اولیه و زمان خروج از منزل هستند. در این مقاله برای مدل‌سازی پارامترهای فوق، مشابه روش ارائه‌شده برای تعیین منحنی بار خانگی مشترکین عمل می‌شود. با این تفاوت که به جای تابع توزیع نرمال، از توابع توزیع احتمال مناسب برای هر یک از پارامترهای فوق بر اساس اطلاعات مقالات موجود در این زمینه استفاده شده است [۲۳].

نکته مهم دیگر در مدل‌سازی خودروهای برقی، تعیین توان مصرفی آنها به هنگام شارژ است. معمولاً از دو نوع شارژ کند و سریع برای شارژ خودروهای برقی استفاده می‌شود [۲۰]. در روش شارژ کند که معمولاً در منازل انجام می‌گیرد، جریان کشیده‌شده توسط خودروی برقی برابر با ۱۶ A و یا ۳۲ A تحت ولتاژ ۲۲۰ V است که معادل توان ۳/۵ kW و ۷ kW است. در شارژ سریع، توان مصرفی خودروی برقی تا ۵۰ kW یا بالاتر افزایش می‌یابد که این نوع شارژ، معمولاً در پارکینگ‌های مخصوص شارژ خودروهای برقی مورد استفاده قرار می‌گیرد. به علاوه برای رسیدن به مقادیر بهینه پارامترهای مختلف شبکه توزیع هوشمند، می‌توان نرخ توان شارژ را نیز کنترل نمود. اما در این مقاله، فرض بر آن است که شبکه،



شکل ۳: مدار معادل مربوط به دو شین متوالی در یک شبکه توزیع شعاعی چهارسیمه LV.

۲- مدل‌سازی شبکه توزیع

شبکه‌های توزیع معمولاً دارای ساختار حلقه‌ای هستند که به صورت شعاعی مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند. مصارف موجود در شبکه توزیع به صورت تک‌فاز و سه‌فاز بوده و به دلیل رفتار متفاوت مشترکین موجود، بار الکتریکی شبکه در حالت کلی، نامتعادل است. مادامی که بار شبکه به صورت متعادل باشد، هیچ گونه جریانی از سیم نول عبور نمی‌کند. اما در حالت نامتعادل، جریان سیم نول مخالف صفر بوده و این موضوع باعث متفاوت بودن ولتاژ نول در شین‌های مختلف شبکه توزیع می‌شود. از آنجایی که بار شبکه‌های توزیع به صورت نامتعادل است، لذا برای مدل‌سازی دقیق این شبکه و رسیدن به پاسخ‌های واقعی، باید به صورت چهارسیمه در نظر گرفته شود. شکل ۱، مدار معادل مربوط به دو شین متوالی در یک شبکه توزیع شعاعی چهارسیمه را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، معادلات مربوط به افت ولتاژ در خطوط فاز (ph) و نول (n) دو شین متوالی i و j را در زمان t می‌توان به فرم زیر در نظر گرفت

$$V_{i,ph,t} - V_{j,ph,t} = Z_{ij,ph} I_{ij,ph,t}, \quad \forall i, j \in B, ph \in PH, t \in T \quad (1)$$

$$V_{i,n,t} - V_{j,n,t} = Z_{ij,n} I_{ij,n,t}, \quad \forall i, j \in B, t \in T \quad (2)$$

همچنین معادلات جریان فاز ph و نول شین iام در زمان t به صورت زیر خواهد بود

$$\sum_{\substack{k=i \\ k < i}}^N I_{ki,ph,t} - I_{i,ph,t}^{Load} = \sum_{\substack{j=i \\ j > i}}^N I_{ij,ph,t}, \quad \forall i, j, k \in B, ij, ki \in L, ph \in PH, t \in T \quad (3)$$

$$\sum_{\substack{k=i \\ k < i}}^N I_{ki,n,t} + \sum_{ph} I_{i,ph,t}^{Load} = \sum_{\substack{j=i \\ j > i}}^N I_{ij,n,t}, \quad \forall i, j, k \in B, ij, ki \in L, ph \in PH, t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{\substack{j=i \\ j \neq i}}^N I_{ij,ph,t} + I_{ij,n,t} = 0, \quad \forall i, j, k \in B, ij \in L, ph \in PH, t \in T \quad (5)$$

مقادیر توان‌های اکتیو و راکتیو بار موجود در هر گره، بر اساس ولتاژ و جریان همان گره با استفاده از روابط زیر تعیین می‌شوند

$$P_{i,ph,t}^{Load} + jQ_{i,ph,t}^{Load} = (V_{i,phn,t})(I_{i,ph,t}^{Load})^* \quad (6)$$

$$\forall i, j \in B, ph \in PH, t \in T$$

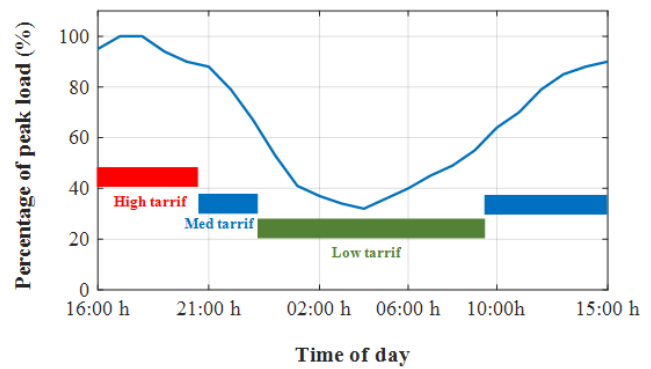
خانگی معمولی را می‌توان به سه ناحیه تقسیم‌بندی کرد: (۱) کم‌باری، (۲) میان‌باری و (۳) پرباری یا پیک بار. برای جلوگیری از اعمال فشار بر شبکه توزیع در زمان‌های پیک بار، معمولاً تعرفه انرژی الکتریکی نیز مطابق شکل ۳ به سه ناحیه تقسیم‌بندی می‌شود که عبارت هستند از: (۱) ناحیه سبز (تعرفه کم)، (۲) ناحیه آبی (تعرفه متوسط) و (۳) ناحیه قرمز (تعرفه زیاد).

همان گونه که از شکل ۳ برمی‌آید، شارژ خودروهای برقی در ناحیه کم‌باری از یک سو باعث اعمال فشار کمتر بر شبکه توزیع و در نتیجه بهبود پارامترهای شبکه توزیع شده و از سوی دیگر، هزینه شارژ کمتری برای مالکین خودرو خواهد داشت. این در حالی است که اکثر مالکین خودرو ترجیح می‌دهند که به محض رسیدن به منزل، خودروی خود را به شبکه متصل کنند تا خودرو برای صبح روز بعد، با شارژ کامل آماده باشد. از آنجایی که شارژ کنترل نشده، به شدت به شبکه فشار وارد می‌کند و استفاده از روش شارژ هوشمند نیز هزینه‌بر است، در این مقاله یک روش نیمه‌هوشمند ارائه گردیده که در آن، با استفاده از تجهیزات ارزان قیمت مانند کلید قابل برنامه‌ریزی، خودروهای برقی در زمان‌های کم‌باری شبکه شارژ می‌شوند. روش کار به این ترتیب است که مالک خودرو به محض رسیدن به منزل، خودروی خود را از طریق یک کلید قابل برنامه‌ریزی به شبکه متصل کرده و اطلاعات مربوط به زمان خروج از منزل، شارژ اولیه و ظرفیت باتری خودروی خود را به عنوان اطلاعات ورودی به کلید وارد می‌کند. با توجه به اطلاعات ورودی و با استفاده از (۸)، مدت زمان لازم برای شارژ کامل باتری خودروی برقی توسط پردازشگر کلید محاسبه شده و بازه زمانی شارژ خودروی برقی به گونه‌ای تعیین می‌شود که انتهای آن، لحظه خروج از منزل مالک خودرو در صبح روز بعد باشد. زمان شروع شارژ، بر اساس مدت زمان لازم برای شارژ خودرو و نیز نرخ توان شارژ خودرو یا همان ۳/۵ kW محاسبه می‌شود. به عبارت دیگر، مقدار $P_{i,ph,t}^{PHEV}$ برای تمام خودروهای برقی توسط کلیدهای قابل برنامه‌ریزی نصب شده در پارکینگ‌های منازل و بر اساس اطلاعات ورودی مالکین خودرو، به صورت محلی و با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌گردد

$$P_{i,ph,t}^{PHEV} = \begin{cases} ChP, & Dep_{i,ph} - TCT_{i,ph} \leq t \leq Dep_{i,ph} \\ , & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

علت این انتخاب، آن است که معمولاً زمان خروج از منزل، حوالی ۷ صبح انجام می‌شود که مقارن با زمان‌های کم‌باری شبکه است. بنابراین شارژ خودرو در بازه‌ای که در ناحیه کم‌باری قرار داشته باشد، علاوه بر شرکت توزیع برق، به نفع مالک خودرو نیز می‌باشد؛ زیرا قیمت توان الکتریکی بر اساس تعرفه کم محاسبه می‌شود. بنابراین استفاده از روش شارژ نیمه‌هوشمند پیشنهادی دارای مزایای زیر است:

- (۱) شارژ خودروهای برقی در زمان‌های پیک بار انجام نمی‌شود و پارامترهای شبکه در زمان‌های مذکور تحت تأثیر قرار نمی‌گیرند.
- (۲) مالک خودرو کمترین هزینه را از بابت شارژ خودروی خود پرداخت می‌کند، زیرا شارژ خودروها در زمان‌های کم‌باری انجام شده و هزینه توان بر اساس تعرفه پایین صورت می‌گیرد.
- (۳) با توجه به تصادفی بودن پارامترهای خودروهای برقی، شارژ خودروها به صورت هم‌زمان انجام نمی‌گیرد و در نتیجه فشاری بر شبکه توزیع وارد نخواهد شد.
- (۴) مالک خودرو مطمئن است که خودروی او در لحظه خروج از منزل به صورت کامل شارژ شده است.



شکل ۳: یک نمونه تعرفه انرژی بر مبنای منحنی بار مصارف خانگی معمولی.

فاقد زیرساخت‌های مخابراتی و کنترلی ویژه می‌باشد و به همین دلیل، مقدار آن ۳/۵ kW در نظر گرفته شده است.

با توجه به این که خودروهای برقی فقط توان اکتیو مصرف می‌کنند، مقادیر $Q_{i,ph,t}^{Load}$ و $P_{i,ph,t}^{Load}$ موجود در (۶) را می‌توان به صورت روابط زیر در نظر گرفت

$$P_{i,ph,t}^{Load} = P_{i,ph,t}^{Conv} + P_{i,ph,t}^{PHEV}, \quad \forall i \in B, ph \in PH, t \in T \quad (8)$$

$$Q_{i,ph,t}^{Load} = Q_{i,ph,t}^{Conv}, \quad \forall i \in B, ph \in PH, t \in T \quad (9)$$

به هنگام ورود هر خودرو به منزل و با معلوم‌بودن شارژ اولیه باتری خودرو، ظرفیت باتری و توان شارژ، مدت زمان لازم برای شارژ کامل خودروی برقی از رابطه زیر به دست می‌آید

$$TCT_{i,ph} = \frac{BC_{i,ph} \times (0.95 - ISOC_{i,ph})}{ChP}, \quad \forall i \in B, ph \in PH \quad (10)$$

لازم به ذکر است که معمولاً برای جلوگیری از خرابی باتری و کاهش عمر مفید آن، شارژ باتری تا ۹۵٪ ظرفیت آن انجام می‌گیرد.

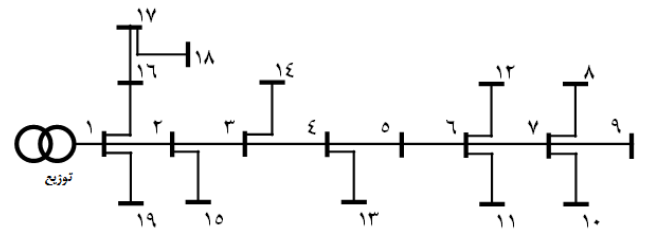
نکته اصلی پس از تعیین مدت زمان لازم برای شارژ خودروهای برقی، تعیین زمان شارژ خودرو می‌باشد. در بخش بعدی، یک روش نیمه‌هوشمند جهت شارژ خودروی برقی ارائه شده است.

۴- شارژ نیمه‌هوشمند خودروهای برقی

همان گونه که در بخش‌های قبل اشاره شد، معمولاً از دو روش برای شارژ خودروهای برقی استفاده می‌شود که عبارت هستند از: (۱) روش کنترل شده یا هوشمند و (۲) روش کنترل نشده یا تصادفی. در روش کنترل نشده، هر خودروی برقی به محض ورود به منزل و اتصال به شبکه، شروع به شارژ شدن می‌کند. در این حالت، نیازی به هیچ گونه بستر و زیرساخت مخابراتی جهت کنترل شارژ خودروها وجود ندارد و با توجه به رفتار تصادفی مالکین خودرو، دارای ماهیت غیر قطعی است. اما در حالت کنترل شده، هدف عبارت است از: "تعیین زمان و نیز نرخ توان شارژ بهینه برای شارژ خودروهای برقی موجود در شبکه". مشخصاً در روش هوشمند، وجود بسترهای مخابراتی و تجهیزات هوشمند اندازه‌گیری و یک سیستم پردازش و کنترل مرکزی، امری اجتناب‌ناپذیر است. در این بخش، یک روش شارژ نیمه‌هوشمند خودروهای برقی ارائه می‌شود که از یک سو نیازی به هوشمندسازی شبکه و استفاده از تجهیزات گران قیمت نداشته و از سوی دیگر، از اثرات سوء ناشی از شارژ کنترل نشده خودروهای برقی در زمان‌های پیک بار بر پارامترهای شبکه جلوگیری می‌کند. همان گونه که از شکل ۲ برمی‌آید، منحنی بار یک مصرف‌کننده

جدول ۱: مشخصات خطوط فیدر ۱۹ شینه.

اندوکتانس (خط Ω)	مقاومت (خط Ω)	خط	
		به باس	از باس
۰.۰۱۴۵	۰.۰۴۱۵	۲	۱
۰.۰۱۸۹	۰.۰۴۲۴	۳	۲
۰.۰۱۹۸	۰.۰۴۴۴	۴	۳
۰.۰۱۶۵	۰.۰۳۶۹	۵	۴
۰.۰۲۳۲	۰.۰۵۲۰	۶	۵
۰.۰۲۳۴	۰.۰۵۲۴	۷	۶
۰.۰۰۰۲	۰.۰۰۰۵	۸	۷
۰.۰۱۹۹	۰.۰۲۰۰۲	۹	۷
۰.۱۷۲۹	۱.۷۳۴۰	۱۰	۷
۰.۰۲۶۰	۰.۲۶۰۷	۱۱	۶
۰.۱۳۵۷	۱.۳۶۰۵	۱۲	۶
۰.۰۱۴۰	۰.۱۴۰۰	۱۳	۴
۰.۰۷۷۴	۰.۷۷۶۳	۱۴	۳
۰.۰۵۹۶	۰.۵۹۷۷	۱۵	۲
۰.۰۴۹۶	۰.۱۴۲۳	۱۶	۱
۰.۰۲۹۲	۰.۰۸۳۷	۱۷	۱۶
۰.۰۳۱۱	۰.۳۱۲۳	۱۸	۱۷
۰.۰۰۶۲	۰.۰۱۶۳	۱۹	۱
۰.۰۶۵۴	ترانسفورماتور توزیع		



شکل ۴: فیدر LV توزیع ۱۹ شینه شبکه توزیع.

لازم به ذکر است که مزیت دوم در صورتی محقق می‌شود که فرض اصلی و معمول حاکم بر روش ارائه‌شده، همان خروج خودروهای برقی قبل از شروع کار و حوالی ساعت ۷ صبح روز بعد، باشد.

باید توجه داشت که روش‌های نیمه‌هوشمند دیگری نیز می‌توان برای شارژ خودروهای برقی در نظر گرفت که نسبت به روش پیشنهادی فوق ساده‌تر بوده و دارای هزینه اجرا و پیاده‌سازی کمتر هستند. برای مثال، در ادامه به دو روش پیشنهادی اشاره می‌شود:

الف) روش شارژ نیمه‌هوشمند با استفاده از کلید تایمردار: در این روش، فرض بر آن است که شارژ خودروی برقی در منزل از طریق یک کلید تایمردار انجام می‌شود که زمان عمل کردن آن توسط شرکت توزیع برق انجام می‌گیرد. به عبارت بهتر، مالک خودرو به محض رسیدن به منزل، خودروی خود را از طریق کلید تایمردار به شبکه متصل می‌کند و شارژ خودرو در زمان از پیش تعیین شده‌ای از ناحیه کم‌باری، مثلاً ۲۴:۰۰، آغاز می‌شود. بنابراین مقدار $P_{i,ph,t}^{PHEV}$ برای تمام خودروهای برقی به صورت زیر قابل محاسبه است

$$P_{i,ph,t}^{PHEV} = \begin{cases} ChP, & ST \leq t \leq ST + TCT_{i,ph} \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

در رابطه فوق، ST بیان‌کننده زمان از پیش تعیین شده برای شروع شارژ خودروهایی برقی واقع در کل شبکه است که توسط شرکت توزیع برق مشخص می‌شود. همان‌گونه که مشخص است، این روش در مقایسه با روش پیشنهادی، ساده‌تر و ارزان‌تر بوده و دارای مزایای زیر است:

- ۱) شارژ خودروهای برقی در زمان‌های پیک بار انجام نمی‌شود و پارامترهای شبکه در زمان‌های مذکور تحت تأثیر قرار نمی‌گیرند.
 - ۲) مالک خودرو کمترین هزینه را از بابت شارژ خودروی خود پرداخت می‌کند، زیرا شارژ خودروها در زمان‌های کم‌باری انجام شده و هزینه توان بر اساس تعرفه پایین صورت می‌گیرد.
- با این حال، این روش دارای معایب اساسی زیر است:

۱) تضمینی برای شارژ کامل خودرو در لحظه خروج از منزل وجود ندارد. زیرا شارژ خودرو در یک زمان از پیش تعیین شده‌ای شروع می‌شود، بدون این که شارژ اولیه خودرو و زمان خروج از منزل مد نظر قرار گیرد.

۲) با توجه به شروع هم‌زمان شارژ خودروهای برقی، در نتیجه فشار زیادی بر شبکه توزیع وارد خواهد شد.

ب) روش شارژ نیمه‌هوشمند با استفاده از کلید تایمردار و ناحیه‌بندی شبکه توزیع: همان‌گونه که مشاهده شد، یکی از معایب مهم روش قبلی این است که شارژ تمام خودروهای برقی در یک لحظه مشخص شروع شده و این موضوع باعث ایجاد فشار بر شبکه توزیع می‌شود. برای حل این معضل می‌توان شبکه را به چند ناحیه تقسیم‌بندی کرد به طوری که لحظه شروع شارژ هر ناحیه با ناحیه‌های دیگر متفاوت باشد. لازم به ذکر است که در اینجا نیز لحظه شروع شارژ تمام ناحیه‌ها توسط شرکت توزیع

برق و در زمان‌های کم‌باری شبکه تنظیم می‌شود. مقدار $P_{i,ph,t}^{PHEV}$ برای تمام خودروهای برقی به صورت زیر قابل محاسبه است

$$P_{i,ph,t}^{PHEV} = \begin{cases} ChP, & ST_z \leq t \leq ST_z + TCT_{i,ph} \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

در رابطه فوق، ST_z بیان‌کننده زمان از پیش تعیین شده برای شروع شارژ خودروهایی برقی واقع در ناحیه z می‌باشد که توسط شرکت توزیع برق مشخص می‌شود. باید توجه داشت که در این روش نیز همچنان این امکان وجود دارد که خودرو به هنگام خروج از منزل در صبح روز بعد، به صورت کامل شارژ نشده باشد که از مهم‌ترین عیوب آن محسوب می‌شود. از آنجایی که پیاده‌سازی روش شارژ نیمه‌هوشمند، از یک سو ارزان بوده و از سوی دیگر به نفع شرکت توزیع برق و مالک خودرو می‌باشد، خرید و نصب تجهیزات آن ممکن است توسط شرکت توزیع برق و یا مالک خودرو و یا به صورت مشترک انجام گیرد. لازم به ذکر است که ممکن است برخی از مالکین خودرو بنا به دلایل مختلف، تمایلی به استفاده از این سیستم نداشته باشند.

۵- شبیه‌سازی

برای بررسی و ارزیابی کارایی روش پیشنهادی از یک فیدر ۱۹ شینه سه‌فاز ۳۸۰ ولت، مطابق شکل ۴ استفاده گردیده و اطلاعات مربوط به مقاومت و اندوکتانس خطوط فاز در جدول ۱ آمده است [۳]. مشخصات هادی نول نیز مانند هادی‌های فاز در نظر گرفته شده است.

فرض بر آن است که در هر شین، سه مصرف‌کننده خانگی به هر یک از فازها متصل است و بنابراین تعداد کل مشترکین موجود در شبکه برابر با ۵۷ می‌باشد. دوره مورد مطالعه، یک شبانه‌روز است که به بازه‌های ۱۵ دقیقه‌ای تقسیم شده است. منحنی بار مشترکین خانگی مطابق روش ارائه‌شده در بخش ۳-۱ تعیین گردیده و بار پیک و ضریب توان مشترکی

جدول ۲: پارامترهای خودروهای برقی.

پارامتر	تابع توزیع احتمال	مقدار متوسط	انحراف معیار	مقدار حداقل	مقدار حداکثر
ظرفیت (kWh)	یکنواخت	۱۸	۶۹۳	۶	۳۰
زمان ورود (h)	نرمال قطع شده	۱۹	۲	۱۶	۱
زمان خروج (h)	نرمال قطع شده	۷	۲	۵	۱۲
شارژ اولیه (%)	نرمال قطع شده	۷۵	۲۵	۲۵	۹۵

جدول ۴: نحوه تقسیم‌بندی نواحی و نیز زمان شروع شارژ هر ناحیه در حالت چهارم.

شماره ناحیه	شماره شین‌های موجود در هر ناحیه	زمان شروع شارژ
ناحیه ۱	۱، ۲، ۱۵، ۱۶، ۱۷، ۱۸، ۱۹	۳۰
ناحیه ۲	۳، ۴، ۵، ۶، ۱۳، ۱۴	۲۴:۰۰
ناحیه ۳	۷، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲	۰۱:۰۰

به ترتیب برابر با ۲ kW و ۰/۹۱ پس‌فاز در نظر گرفته شده است. برای اختصاص خودروهای برقی به مشترکین شبکه، روش کار به این ترتیب می‌باشد که ضریب نفوذ خودروهای برقی برابر با ۶۰٪ در نظر گرفته شده است. به عبارت بهتر، ۶۰٪ مشترکین خانگی، یعنی ۳۴ مشترک از ۵۷ مشترک واقع در فازهای مختلف، مالک خودروی برقی هستند که به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند. برای مدل‌سازی عدم قطعیت موجود در پارامترهای خودروهای برقی، مشابه روش ارائه شده در بخش ۳-۱ برای مدل‌سازی بارهای خانگی استفاده می‌شود، با این تفاوت که به جای تابع نرمال، از توابع توزیع احتمال نشان داده شده در جدول ۲ استفاده شده است [۲۳]. جدول ۳، محل قرارگیری خودروهای برقی که به صورت تصادفی انتخاب شده‌اند و نیز پارامترهای مختلف مربوط به آنها را بر اساس توضیحات فوق، نشان می‌دهد. همان گونه که از جدول ۳ برمی‌آید، برای مثال در شین ۱، تنها مشترکین فازهای a و b دارای خودروی برقی هستند که ظرفیت باتری آنها به ترتیب برابر با ۲۶ و ۱۹ کیلووات ساعت است.

برای مشاهده تأثیر حضور خودروهای برقی بر پارامترهای شبکه، ابتدا شبکه بدون حضور خودروهای برقی شبیه‌سازی شده که حالت پایه نامیده می‌شود. همچنین نتایج مربوط به روش نیمه‌هوشمند ارائه شده برای شارژ خودروهای برقی با سه روش دیگر مورد مقایسه قرار خواهند گرفت. بنابراین شبیه‌سازی‌ها در پنج حالت مختلف انجام می‌شوند که عبارتند از:

الف) حالت اول: شبکه توزیع، بدون حضور خودروی برقی

ب) حالت دوم: شبکه توزیع با حضور خودروی برقی و شارژ خودروها به صورت کنترل نشده

پ) حالت سوم: شبکه توزیع با حضور خودروی برقی و شارژ خودروها با استفاده از کلید تایمردار. در این حالت فرض بر آن است که تمام خودروها در ساعت ۲۴:۰۰ شب شروع به شارژ شدن می‌کنند.

ت) حالت چهارم: شبکه توزیع با حضور خودروی برقی و شارژ خودروها با استفاده از کلید تایمردار و ناحیه‌بندی شبکه توزیع. در این حالت فرض بر آن است که شبکه توزیع به ۳ ناحیه تقسیم‌بندی گردیده و خودروهای هر ناحیه از ساعت ۲۳:۰۰ شب و با فاصله زمانی یک ساعت شروع به شارژ شدن می‌کنند. نحوه تقسیم‌بندی نواحی و ساعت شروع شارژ در هر ناحیه، در جدول ۴ نشان داده شده است.

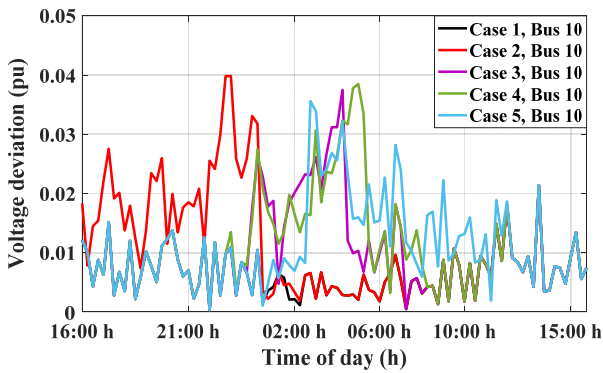
ث) حالت پنجم: شبکه توزیع با حضور خودروی برقی و شارژ خودروها با استفاده از کلید قابل برنامه‌ریزی

جدول ۳: محل قرارگیری خودروهای برقی و نیز پارامترهای مختلف مربوط به آنها.

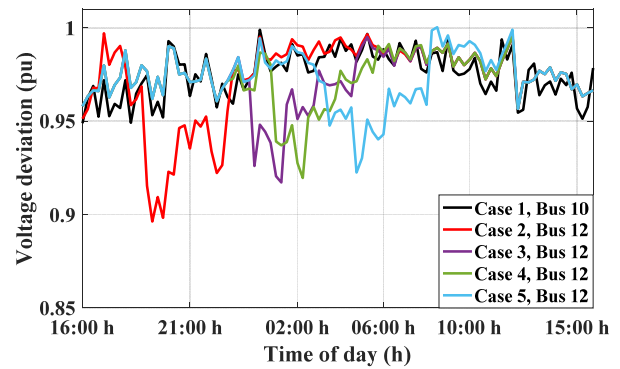
شین / فاز	ظرفیت (kWh)	زمان ورود (h)	زمان خروج (h)	شارژ اولیه (%)
a-۱	۲۶	۱۷:۰۰	۰۵:۳۰	۶۵
b-۱	۱۹	۲۳:۱۵	۰۵:۰۰	۶۵
a-۲	۳۰	۱۸:۰۰	۰۷:۴۵	۱۷
b-۲	۸	۱۶:۳۰	۰۹:۳۰	۱۴
b-۳	۱۷	۱۹:۰۰	۰۶:۱۵	۴۲
c-۳	۹	۱۸:۴۵	۰۵:۴۵	۷۰
a-۴	۲۹	۲۱:۰۰	۰۵:۳۰	۶۴
c-۴	۲۵	۲۰:۰۰	۱۱:۴۵	۶۰
a-۵	۲۶	۱۸:۱۵	۰۸:۰۰	۳۱
c-۵	۸	۲۰:۴۵	۰۹:۱۵	۴۹
c-۶	۲۵	۲۱:۰۰	۰۸:۴۵	۶۵
a-۷	۱۶	۱۹:۳۰	۰۵:۴۵	۴۸
b-۷	۲۸	۱۶:۰۰	۰۸:۳۰	۵
c-۷	۱۰	۱۸:۴۵	۱۰:۱۵	۲۵
b-۸	۹	۱۸:۰۰	۰۹:۰۰	۴۹
c-۸	۹	۲۰:۳۰	۰۵:۴۵	۲۲
a-۹	۲۷	۱۸:۰۰	۰۸:۴۵	۳۴
b-۹	۲۰	۱۷:۰۰	۱۱:۳۰	۵۶
c-۹	۱۹	۱۸:۱۵	۰۸:۰۰	۲۵
b-۱۰	۲۶	۲۰:۳۰	۰۷:۴۵	۳۴
a-۱۱	۱۴	۲۰:۴۵	۰۸:۰۰	۲۳
a-۱۲	۸	۱۹:۳۰	۰۶:۳۰	۳۲
c-۱۲	۹	۱۷:۱۵	۰۶:۱۵	۶۰
a-۱۳	۱۰	۱۶:۰۰	۰۹:۳۰	۷۴
c-۱۳	۱۶	۱۹:۱۵	۰۷:۰۰	۴۱
c-۱۴	۲۹	۲۳:۰۰	۰۸:۰۰	۵۳
a-۱۵	۱۸	۱۹:۰۰	۰۷:۴۵	۶۴
b-۱۵	۱۸	۲۰:۴۵	۰۵:۳۰	۶۰
c-۱۶	۹	۲۰:۱۵	۰۶:۰۰	۳۵
a-۱۷	۲۵	۱۷:۳۰	۰۷:۱۵	۵۴
b-۱۷	۱۵	۱۶:۴۵	۰۵:۴۵	۴۲
a-۱۸	۱۶	۱۶:۳۰	۰۶:۳۰	۶۵
b-۱۸	۸	۱۹:۰۰	۰۵:۴۵	۷۶
c-۱۹	۲۰	۲۱:۴۵	۰۹:۰۰	۵۶

در هر سه حالت، از روش پسر-پیشرو [۲۲] برای انجام پخش بار در هر بازه زمانی، استفاده گردیده است. ولتاژ فاز شین ۱ به صورت ۲۲۰ ولت متعادل و ولتاژ نول در شین ۱ برابر با صفر در نظر گرفته شده است. اولین پارامتری که برای مقایسه روش شارژ نیمه‌هوشمند با شارژ کنترل نشده به کار می‌رود، پروفیل ولتاژ در طول فیدر است. در شکل‌های ۵ تا ۷، تغییرات ولتاژ فازهای مختلف نسبت به نول برای بدترین شین در پنج حالت بیان گردیده نشان داده شده است. لازم به ذکر است که منظور از بدترین شین، عبارت است از شینی که بیشترین مقدار افت ولتاژ در آن رخ می‌دهد. مقادیر ولتاژ در بدترین شین به ازای حالت‌های مختلف در جدول ۵ نشان داده شده است.

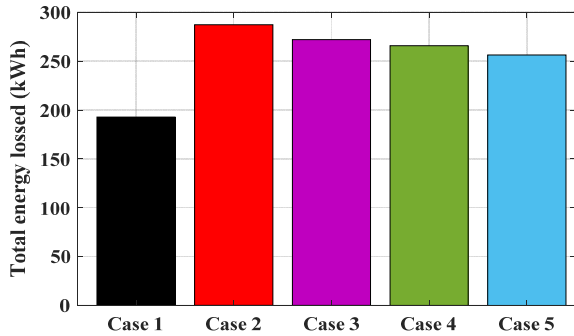
همان گونه که از نتایج مشخص است، بیشترین میزان افت ولتاژ مربوط به حالتی است که خودروها با استفاده از کلید تایمردار و در یک زمان مشخص، همان ۲۴:۰۰، شروع به شارژ شدن می‌کنند. این موضوع با



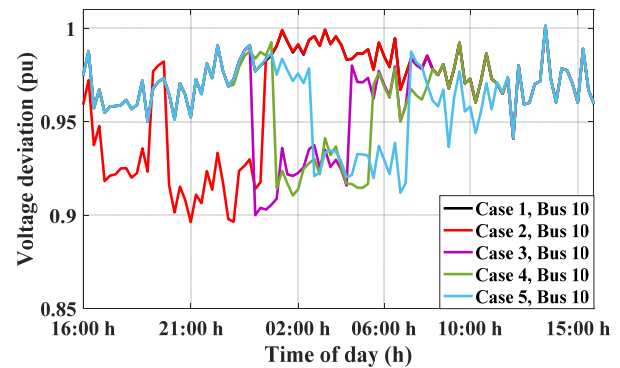
شکل ۸: تغییرات ولتاژ نول در بدترین شین.



شکل ۵: تغییرات ولتاژ فاز a نسبت به نول در بدترین شین.



شکل ۹: مقدار انرژی تلف شده در طول شبانه‌روز.



شکل ۶: تغییرات ولتاژ فاز b نسبت به نول در بدترین شین.

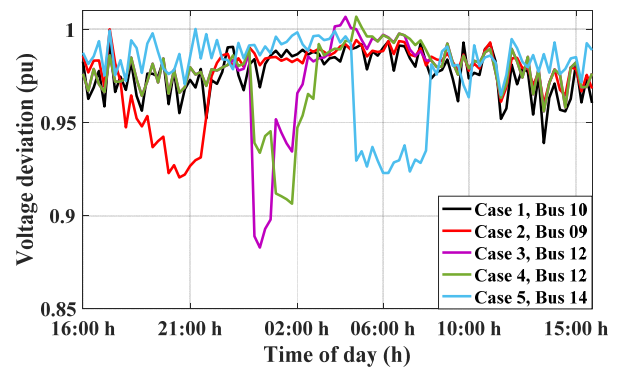
جدول ۵: مقادیر ولتاژ در بدترین شین به ازای حالت‌های مختلف.

شماره حالت	مقدار ولتاژ در بدترین شین (pu)			کمترین مقدار ولتاژ (pu)
	V_{cn}	V_{bn}	V_{an}	
حالت اول	۰٫۹۳۸۹	۰٫۹۴۰۹	۰٫۹۴۸۹	۰٫۹۳۸۹
حالت دوم	۰٫۸۹۶۲	۰٫۸۹۶۳	۰٫۸۹۶۲	۰٫۸۹۶۲
حالت سوم	۰٫۸۸۲۹	۰٫۹۰۰۰	۰٫۹۱۷۲	۰٫۸۸۲۹
حالت چهارم	۰٫۹۰۶۴	۰٫۹۱۰۶	۰٫۹۱۹۵	۰٫۹۰۶۴
حالت پنجم	۰٫۹۱۲۱	۰٫۹۱۲۱	۰٫۹۲۲۵	۰٫۹۱۲۱

خودروها در زمان‌های پرباری شبکه، نامتعادل و به صورت تصادفی صورت می‌گیرد. در روش‌های مربوط به استفاده از کلید تایمردار نیز نوعی هم‌زمانی بین ورود بارهای بزرگ غیر متعادل به شبکه وجود دارد که خود می‌تواند میزان عدم تعادل شبکه پایه را افزایش دهد. اما در روش ارائه شده، شارژ خودروها در زمان‌های کم‌باری شبکه و به صورت غیر هم‌زمان صورت می‌گیرد و این باعث دستیابی به نتایج مطلوب‌تر در مقایسه با روش‌های دیگر شارژ می‌شود.

از جمله پارامترهای دیگری که در شبکه توزیع از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است، تلفات شبکه است. شکل ۹، مقدار کل انرژی تلف شده مربوط به حالت‌های اول تا پنجم را در طول شبانه‌روز نشان می‌دهد.

همان گونه که ملاحظه می‌شود، مقدار انرژی تلف شده در حالت بدون حضور خودروهای برقی، برابر با ۱۹۲/۸۰۳ کیلووات ساعت است که با ورود خودروهای برقی به شبکه و شارژ کنترل نشده آنها به مقدار ۲۸۷/۲۴۹ کیلووات ساعت افزایش می‌یابد. با استفاده از روش‌های نیمه‌هوشمند و شارژ خودروهای برقی در ساعات کم‌باری، مقدار تلفات شبکه کاهش می‌یابد، به طوری که با استفاده از کلید تایمردار به مقدار ۲۷۱/۹۴۹ کیلووات ساعت و با استفاده از کلید تایمردار و ناحیه‌بندی شبکه به مقدار ۲۶۵/۸۳۰ کیلووات ساعت کاهش می‌یابد. این بدان معناست که با استفاده از تجهیزات ساده و بدون هوشمندسازی شبکه، مقدار تلفات شبکه با



شکل ۷: تغییرات ولتاژ فاز c نسبت به نول در بدترین شین.

تقسیم‌بندی شبکه به سه ناحیه و اختصاص زمان‌های شارژ مجزا به هر ناحیه قابل حل است و ملاحظه می‌شود که با استفاده از این روش، مقدار افت ولتاژ نسبت به روش شارژ کنترل نشده بهبود می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که برای رسیدن به پاسخ بهتر، می‌توان از کلید قابل برنامه‌ریزی استفاده کرد و میزان افت ولتاژ را به مقدار قابل قبول رساند. مقدار ولتاژ نول، پارامتر دیگری است که تغییرات آن در بدترین شین برای حالت‌های مختلف مقایسه گردیده و نتایج در شکل ۸ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که منظور از بدترین شین در اینجا، شینی است که بیشترین مقدار ولتاژ نول در آن رخ می‌دهد.

همان گونه که انتظار می‌رود به دلیل نامتعادل بودن بار شبکه، جریان عبوری از سیم نول صفر نبوده و در نتیجه ولتاژ سیم نول نیز در شین‌های مختلف شبکه مخالف صفر خواهد بود. ورود بدون کنترل خودروهای برقی به شبکه، باعث می‌شود که شبکه نامتعادل‌تر شده و اندازه ولتاژ نول افزایش یابد. با این حال ملاحظه می‌شود که اندازه ولتاژ نول در حالت استفاده از کلید قابل برنامه‌ریزی نسبت به حالت‌های دیگر، کمتر می‌باشد. برای توضیح مطلب باید توجه داشت که در روش کنترل نشده، شارژ

- [8] F. Salah, J. P. Ilg, C. M. Flath, H. Basse, and C. V. Dintner, "Impact of electric vehicles on distribution substations: a Swiss case study," *Appl. Energy*, vol. 137, pp. 88-96, Jan. 2015.
- [9] E. Sortomme, M. M. Hindi, S. D. J. MacPherson, and S. S. Venkata, "Coordinated charging of plug-in hybrid electric vehicles to minimize distribution system losses," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 2, no. 1, pp. 198-205, Mar. 2011.
- [10] V. L. Nguyen, T. Tran-Quoc, S. Bacha, and B. Nguyen, "Charging strategies to minimize the peak load for an electric vehicle fleet," in *Proc. 40th Annual Conf. of the IEEE Industrial Electronics Society, IECON'14*, pp. 3522-3528, Dallas, TX, USA, 29 Oct.-1 Nov. 2014.
- [11] L. Jian, Y. Zheng, and Z. Shao, "High efficient valley-filling strategy for centralized coordinated charging of large-scale electric vehicles," *Appl. Energy*, vol. 186, pp. 46-55, 2017.
- [12] Z. Ma, S. Zou, L. Ran, X. Shi, and I. A. Hiskens, "Efficient decentralized coordination of large-scale plug-in electric vehicle charging," *Automatica*, vol. 69, pp. 35-47, Jul. 2016.
- [13] V. Tikka, J. Lassila, J. Haakana, and J. Partanen, "Electric vehicle smart charging aims for CO2 emission reduction?" in *Proc. IEEE Pes Innovative Smart Grid Technologies Conf. Europe, 6 pp.*, Ljubljana, Slovenia, 9-12 Oct. 2017.
- [14] Y. Zheng, Y. Shang, Z. Shao, and I. Jian, "A novel real-time scheduling strategy with near-linear complexity for integrating large-scale electric vehicles into smart grid," *Appl. Energy*, vol. 217, pp. 1-13, May 2018.
- [15] R. Mehta, D. Srinivasan, A. Trivedi, and J. Yang, "Hybrid planning method based on cost benefit analysis for smart charging of plug-in electric vehicles in distribution systems," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 99, no. 1, pp. 523-534, Jan. 2017.
- [16] X. Lu, K. Zhou, S. Yang, and H. Lio, "Multi-objective optimal load dispatch of micro grid with stochastic access of electric vehicles," *J. Clean Prod.*, vol. 195, pp. 187-199, Sept. 2018.
- [17] E. Fouladi, H. R. Baghaee, M. Bagheri, and G. B. Gharehpetian, "Power management of microgrids including PHEVs based on maximum employment of renewable energy resources," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 56, no. 5, pp. 5299-5307, Sept.-Oct. 2020.
- [18] R. A. Swief, N. H. El-Amari, and M. Z. Kamh, "Optimal energy management integrating plug in hybrid vehicle under load and renewable uncertainties," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 176895-176904, 2020.
- [19] H. Li, A. Rezvani, J. Hu, and K. Ohshima, "Optimal day-ahead scheduling of microgrid with hybrid electric vehicles using MSFLA algorithm considering control strategies," *Sustainable Cities and Society*, vol. 66, Article ID: 102681, Mar. 2021.
- [20] Y. Zheng, S. Niu, Y. Shang, Z. Shao, and L. Jian, "Integrating plug-in electric vehicles into power grids: a comprehensive review on power interaction mode, scheduling methodology and mathematical foundation," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 112, pp. 434-439, 2019.
- [21] M. R. Kikhavani, A. Hajizadeh, and A. Shahirinia, "Charging coordination and load balancing of plug-in electric vehicles in unbalanced low-voltage distribution systems," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 14, no. 3, pp. 389-399, Feb. 2019.
- [22] N. K. Meena, J. Yang, and P. Singh, "Backward/forward method for three-phase power flow calculation in low voltage distribution networks with EV charging points," in *Proc. 8th IEEE India Int. Conf. on Power Electronics, IICPE'18*, 6 pp., Jaipur, India, 13-15 Dec. 2018.
- [23] S. Z. Moghaddam and T. Akbari, "Network-constrained optimal bidding strategy of a plug-in electric vehicle aggregator: a stochastic/robust game theoretic approach," *Energy*, vol. 151, pp. 478-489, May 2018.

سعید ذوالفقاری مقدم در سال ۱۳۸۶ مدرک کارشناسی مهندسی برق - الکترونیک خود را از دانشگاه علم و صنعت ایران و در سال ۱۳۸۸ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت خود را از دانشگاه تهران دریافت نمود و در سال ۱۳۹۴ موفق به اخذ درجه دکترا در مهندسی برق - قدرت از دانشگاه صنعتی امیرکبیر گردید. دکتر ذوالفقاری مقدم از سال ۱۳۹۵ در گروه مهندسی برق دانشگاه صنعتی ارومیه در ارومیه به عنوان عضو هیأت علمی مشغول به فعالیت گردید. زمینه‌های علمی مورد علاقه نامبرده شامل برنامه‌ریزی، بهره برداری و قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت، انرژی‌های تجدیدپذیر، شبکه‌های هوشمند و مدیریت انرژی می‌باشد.

استفاده از روش‌های فوق به ترتیب به اندازه ۵/۶٪ و ۸٪ بهبود می‌یابد. نهایتاً با استفاده از کلید قابل برنامه‌ریزی، مقدار تلفات شبکه به مقدار ۲۵۶/۳۴۰ کیلووات ساعت می‌رسد که به معنی کاهش ۱۲/۱٪ تلفات شبکه است. ملاحظه می‌شود که روش شارژ نیمه‌هوشمند با استفاده از کلید قابل برنامه‌ریزی، پارامترهای شبکه را در حضور خودروهای برقی نسب به روش شارژ کنترل‌نشده، بهبود داده و هزینه‌های شارژ خودرو را برای مالکین به حداقل مقدار ممکن می‌رساند. لازم به ذکر است که با تعمیم مدل ارائه‌شده، می‌توان قابلیت تزریق توان از خودرو به شبکه (V2G) را نیز به آن اضافه نمود. این موضوعی است که در تحقیقات آینده به آن پرداخته خواهد شد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک روش نیمه‌هوشمند برای شارژ خودروهای برقی در شبکه توزیع ارائه شده است. این روش در مقایسه با روش‌های هوشمند، دارای هزینه بسیار ناچیزی بوده و نسبت به روش شارژ کنترل‌نشده، پارامترهای شبکه توزیع را در حضور خودروهای برقی بهبود می‌بخشد. در این روش، فرض بر آن است که نرخ شارژ خودروهای برقی ثابت بوده و هدف، تعیین بازه شارژ خودرو می‌باشد. برای انجام این کار، با استفاده از یک کلید قابل برنامه‌ریزی، بازه زمانی شارژ خودروی برقی به نحوی تعیین می‌شود که انتهای بازه، زمان خروج خودرو در صبح روز بعد باشد. بنابراین لازم است که مالک خودرو اطلاعات خودروی خود را به عنوان ورودی به کلید قابل برنامه‌ریزی وارد نماید. با اعمال روش ارائه‌شده بر روی شبکه ۱۹ شینه توزیع و مقایسه نتایج حاصل از آن با روش‌های مختلف کنترل‌نشده، کارایی آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. در هر حالت پارامترهای اصلی شبکه شامل مقادیر تلفات، افت ولتاژ و نیز مقدار ولتاژ نول محاسبه شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که استفاده از روش پیشنهادی، باعث بهبودی ۱۲/۱٪ در مقدار تلفات شبکه و نیز ۳/۳٪ در مقدار افت ولتاژ شبکه می‌گردد. نکته حایز اهمیت آن است که استفاده از روش پیشنهادی، باعث حداقل شدن هزینه شارژ خودروهای برقی برای مالکین آنها می‌شود، زیرا در روش ارائه‌شده، شارژ خودروهای برقی در زمان‌های کم‌باری شبکه انجام می‌گیرد که در آن، هزینه توان مصرفی بر مبنای تعرفه پایین محاسبه می‌گردد.

مراجع

- [1] C. C. Chan and Y. S. Wong, "The state of the art of electric vehicles technology," in *Proc. 4th Int. Power Electronics and Motion Control Conf., IPEMC'04*, vol. 1, pp. 46-57, Xi'an, China, 14-16 Aug. 2004.
- [2] B. Pournazerian, P. Karimyan, G.B. Gharehpetian, M. Abedi, E. Pouresmaeil, "Smart participation of PHEVs in controlling voltage and frequency of island microgrids," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 110, pp. 510-522, 2019.
- [3] S. Deilami, A. S. Masoum, P. S. Moses, and M. A. S. Masoum, "Real-time coordination of plug-in electric vehicle charging in smart grids to minimize power losses and improve voltage profile," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 2, no. 3, pp. 456-467, Sept. 2011.
- [4] A. Ipakchi and F. Albuyeh, "Grid of the future," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 7, no. 2, pp. 52-62, Mar./Apr. 2009.
- [5] K. Clement-Nyns and E. Haesen, "The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 1, pp. 371-380, Feb. 2010.
- [6] W. Sierzechula, S. Bakker, K. Maat, and B. Van Wee, "The influence of financial incentives and other socio-economic factors on electric vehicle adoption," *Energy Policy*, vol. 68, pp. 183-194, May 2014.
- [7] E. Akhavan-Rezai, M. F. Shaaban, E. F. El-Saadany, and A. Zidan, "Uncoordinated charging impacts of electric vehicles on electric distribution grids: normal and fast charging comparison," in *Proc. IEEE Power and Energy Society General Meeting*, 7 pp., San Diego, CA, USA, 22-26 Jul. 2012.