

مدیریت شارژ هوشمند خودروهای برقی در شبکه توزیع در حضور برنامه پاسخ‌گویی بار

موید محسنی^۱، محمود جورابیان^{۲*}، افشین لشکر آرا محمره^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه برق، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، moaiadmohsenii@gmail.com

*۲- استاد، گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، mjoorabian@scu.ac.ir

۳- دانشیار، گروه برق، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران، lashkarara@ieee.org

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۸/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۱۳

چکیده: شارژ خودروهای برقی در شبکه توزیع یکی از اساسی‌ترین راه‌کارها جهت مدیریت فنی و اقتصادی توزیع انرژی است. در بسیاری از روش‌های شارژ سنتی، قید شارژ شدن کامل خودروها در هنگام خروج از پارکینگ همواره در مساله لحاظ شده است. اما در این مقاله هر خودرو به صورت هوشمند تنها بر اساس مقدار انرژی مورد نیاز پیمایش سفرهای روزانه خود شارژ می‌شود. به منظور پیاده‌سازی این روش هوشمند، مالکان خودروی برقی اطلاعاتی را در مورد تعداد سفرها و طول مسیر آنها در اختیار مدیریت شارژ پارکینگ قرار می‌دهند، و بر اساس مشخصات خودروها و سطح انرژی اولیه باتری آنها در زمان ورود به پارکینگ، میزان شارژ مورد نیاز آنها تعیین می‌گردد. سپس مسئول شارژ بر اساس تعرفه زمان مصرف انرژی، محدودیت ترانسفورماتورهای شبکه توزیع، نوع سطح شارژ انتخابی (نرمال یا سریع) اقدام به برنامه‌ریزی شارژ می‌نماید به طوری که هزینه‌های شارژ با رعایت محدودیت‌های فنی و اقتصادی کمینه گردد. نتیجه شارژ هوشمند خودرو در شرایط شارژ نرمال و سریع و در محدودیت‌های مختلف شبکه توزیع و در حضور یا غیاب برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار با یکدیگر مقایسه شده است. از نرم افزار YALMIP و MOSEK برای حل مدل برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: شارژ هوشمند خودروهای برقی، برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار، برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح، شبکه توزیع

نمادها و علائم اختصاری

نماد	توصیف
B_c	ظرفیت باتری هر خودرو
$C_{b,k}$	هزینه باتری خودروی k ام در هر کیلووات ساعت
C_k	بردار شارژ خودروی k ام
C'_k	مقدار شارژ خودروی k در بازه زمانی t
C_L	هزینه کارگر برای تعویض باتری
$Cost_{bat}$	هزینه فرسایش باتری خودروها
$Cost_{change}$	هزینه شارژ خودروها
$Cost_{Total}$	هزینه مجموع خودروها
d	مسافت اولین سفر هر خودروی برقی

توان راکتیو انتقالی از گره m به گره n در زمان t	Q_{nm}^t	مسافت کل پیموده شده ی هر خودروی برقی	d_R
نرخ شارژ یا دشارژ خودروی برقی k ام	$r_{PEV,k}$	بردار دشارژ خودروی k ام	D_k
قیمت زمان واقعی پیش بینی شده در بازه زمانی t	$RTP(t)$	مقدار دشارژ خودروی k در زمان t	D_k^t
مقاومت انشعاب واصل دو باس m و n	r_{nm}	عمق دشارژ	DOD
بردار استراتژی شارژ خودروی برقی k	S_k	انرژی مورد نیاز خودروی k ام	$E_{req,k}$
مقدار استراتژی شارژ خودروی برقی k در زمان t	S_k^t	مجموع انرژی دشارژ شده خودروی k ام	$E_{dis,k}$
توان ظاهری کل شبکه در بازه زمانی t	S_{total}^t	انرژی ذخیره شده در ذخیره ساز S در بازه زمانی t	E_t^S
انتگرال توان ظاهری در زمان t	S_{agg}^t	حداقل انرژی ذخیره شده در ذخیره ساز S در بازه زمانی t	\underline{E}_t^S
سطح شارژ اولیه هر خودروی برقی در زمان ورود	SOC_A	حداکثر انرژی ذخیره شده در ذخیره ساز S	\bar{E}_t^S
سطح شارژ مطلوب خودروی برقی در زمان خروج	SOC_D	سطح شارژ اولیه موجود در ذخیره ساز S	E_{ini}^S
سطح شارژ مورد نیاز هر خودرو در زمان پارک	SOC_{req}	سطح شارژ نهایی موجود در ذخیره ساز S	E_{final}^S
حد پایین سطح شارژ باتری خودروی برقی	SOC_{min}		
حد بالای سطح شارژ باتری خودروی برقی	SOC_{max}		
سطح شارژ خودروی k در بازه زمانی t	SOC_k^t	ظرفیت باتری خودروی k ام	$E_{b,k}$
توان ظاهری عبوری از انشعاب j	SP_j	بردار افق زمانی	H
محدودیت پرشدگی انشعاب j	SP_j^{max}	اندیس گره های شبکه توزیع	i
اندیس بازه های زمان	t	اندیس انشعابات شبکه توزیع	j
زمان ورود خودروی k	$t_{in,k}$	اندیس خودروهای رسیده در بازه زمانی خاص	k
زمان خروج خودروی k از پارکینگ	$t_{out,k}$	چرخه عمر باتری در عمق شارژ معین	L_c
ظرفیت نامی توان ترانسفورمر توزیع	T_{rat}	مجموع تعداد خودروهای برقی رسیده به پارکینگ	N
مجموع تعداد بازه های زمانی روز	T	باس متصل به شبکه بالادستی	N^{main}
مجدور ولتاژ گره n در بازه زمانی t	V_n^t	توان نامی شارژر نصب شده در پارکینگ	P_{rated}
حد بالای دامنه ولتاژ در گره i	\bar{V}_n^2	بار پایه غیر خودروی برقی در شبکه صنعتی و در بازه زمانی t	P_{base}^t
حد پایین دامنه ولتاژ در گره i	\underline{V}_n^2	بردار مدت پارک خودروی برقی k	$P_{t,k}$
راکتانس انشعاب واصل دو باس m و n	x_{mn}	توان کل مورد نیاز برای N خودروی برقی در بازه زمانی t	P_{PEV}^t
بردار نمایانگر تعداد خودروهای رسیده به پارکینگ در هر زمان	Z	بار کل مصرفی در بازه زمانی t پس از ادغام N خودروی برقی	P_{total}^t
راندمان شارژ	η_{ch}	توان اکتیو تولیدی در گره n در زمان t	PG_n^t
راندمان دشارژ	η_D	توان اکتیو مصرفی در گره n در زمان t	PD_n^t
ضرایب وزنی هزینه و ناراضیاتی در برنامه پاسخ گویی بار	ϵ_1, ϵ_2	توان اکتیو انتقالی از گره m به گره n در زمان t	P_{nm}^t
قیمت واحد ناراضیاتی مشترک	γ^L	توان مصرفی بار L در بازه زمانی t	P_t^L
مجموعه بازه زمانی	T	توان مطلوب مصرفی بار L در بازه زمانی t	\tilde{P}_t^L
تاخیر زمانی بار مصرفی L	τ^L	توان شارژ ذخیره ساز S در بازه زمانی t	P_t^S
مجموعه گره های شبکه	Ω^{Bus}	حداقل توان شارژ ذخیره ساز S در بازه زمانی t	\underline{P}_t^S
مجموعه انشعابات شبکه	Ω^{Line}	حداکثر توان شارژ ذخیره ساز S در بازه زمانی t	\bar{P}_t^S
مجموعه بارهای منزل	Ω^{load}	مولفه توان راکتیو بار پایه فاقد خودروی برقی در بازه زمانی t	Q_{base}^t
مجموعه ذخیره سازها	Ω^{strg}	توان راکتیو تولیدی در گره n در زمان t	QG_n^t
مجموعه بارهای توان منعطف	Ω^{FPL}	توان راکتیو مصرفی در گره n در زمان t	QD_n^t
مجموعه بارهای زمان منعطف	Ω^{FTL}		
مجموعه بارهای غیرمنعطف	Ω^{NFL}		

۱- مقدمه

برنامه‌ریزی شارژ خودروهای برقی از جمله مطالعات بنیادی در شبکه‌های توزیع به شمار می‌آید که همزمان با ظهور و گسترش خودروهای برقی، مورد توجه محققین قرار داده شده است. بدون برنامه‌ریزی منظم خودروهای برقی عملاً امکان بهره‌برداری مفید و موثر از این فناوری بدون به خطر انداختن امنیت و پایداری شبکه توزیع وجود نخواهد داشت. تاکنون روش‌های گوناگونی برای شارژ خودروهای برقی معرفی شده است. معمولاً روش‌های شارژ یا برای تامین هدف شرکت توزیع، یا برای تامین منافع مشترکین و یا با در نظرگیری منافع مالک پارکینگ انجام می‌گیرد که هر یک مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند [۱]. از دیدگاه پیکربندی کنترل این روش‌ها به سه دسته شارژ متمرکز، شارژ غیرمتمرکز و شارژ هیبرید دسته‌بندی شده‌اند [۲]. دسته‌بندی دیگری از روش‌های شارژ هوشمند بر اساس مدیریت عدم قطعیت نیز در مرجع [۳] ارائه شده است و چالش‌های هر یک از این روش‌ها مطرح شده است. در این مقاله مستقیماً به ذکر روش‌های شارژ هوشمند پرداخته خواهد شد. یکی از روش‌های شارژ هوشمند، تصمیم‌گیری بر اساس مقدار بار شبکه، شرایط محیطی، الگوی رفتاری رانندگان، قیمت برق می‌باشد که با هدف کاهش قیمت شارژ در زمان ازدحام شبکه توزیع با استفاده از ابزار یادگیری ماشین انجام شده است که از قابلیت پیاده‌سازی به صورت زمان واقعی برخوردار است [۴]. روش دیگری شارژ هوشمند خودروی برقی بر اساس شرایط ترافیکی، شرایط آب و هوایی می‌باشد که در داخل خودرو نصب می‌شود و با استفاده از سطح شارژ اولیه خودرو، میزان مصرف خودرو در هر مایل و اطلاعات سیستم موقعیت‌یابی جهانی به صورت آنلاین با استفاده از یک ابزار یادگیری ماشین راننده را از میزان شارژ مورد نیاز خود برای سفر بعدی مطلع می‌سازد [۵]. در مرجع [۶] روش شارژ هوشمندی ارائه شده است که قابلیت ادغام با برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار را داشته و از روش‌هایی برای محاسبه‌ی مساله جهت همگرایی سریع‌تر مساله استفاده کرده است. یکی از روش‌های شارژ هوشمند، روش مبتنی بر تشویق بر اساس داده‌های واقعی بازار برق کشور آلمان و فرانسه است رانندگان با طول مسیر کمتر از ۱۰۰ کیلومتر در روز را تشویق به انعطاف بیشتر کرده تا پیک بار شبکه کاهش یابد [۷]. تعرفه بندی تولیدات پراکنده و خودروهای برقی یکی دیگر از راه‌کارهای پیشنهادی این مرجع است. روش شارژ هوشمند دیگری برای پایداری و حفاظت شبکه، کمینه‌سازی هزینه‌های شارژ، کاهش ازدحام شبکه و مدیریت عدم قطعیت در [۸] ارائه شده است که در آن مولفه‌های روانشناسی و اجتماعی رانندگان خودرو در برنامه‌ریزی شارژ در نظر گرفته شده است تا زمینه ساز گسترش هرچه بیشتر خودروهای برقی در شبکه شود. کشور چین یکی از کشورهایی است که پتانسیل بالایی برای پیاده‌سازی شارژ هوشمند خودروهای برقی دارد که لازمه پیاده سازی را در تغییر تعرفه قیمت‌گذاری انرژی، گسترش تنوع خودروها (سواری، نیمه‌سنگین و سنگین) و گسترش سیستم‌های اطلاعاتی جدید می‌داند [۹]. روش‌های

شارژ هوشمند از مزایا و محدودیت‌های گوناگونی برخوردار هستند. یکی از محدودیت‌های این روش ریسک مالی ناشی از عدم قطعیت مساله است که در مرجع [۱۰] برای مقابله با آن از یک مدل کسب و کار ریسک‌گریز بهره‌گرفته شده است تا با تغییر قیمت‌گذاری ریسک مالی پارکینگ مدیریت شود. یکی از مزایای شارژ هوشمند افزایش طول عمر ترانسفرمرهای توزیع ذکر شده است که ناشی از کاهش پیک بار و ازدحام شبکه بر اثر شارژ هوشمند می‌باشد. همچنین کاهش هزینه از جمله مزایای اقتصادی روش نیز هست. مجهزسازی ایستگاه‌های شارژ به پنل‌های فتوولتائیک نیز مزایای روش هوشمند را افزایش می‌دهد [۱۱]. همزمان منافع مشترکین خودروی برقی و تجمع‌کنندگان توان در شارژ هوشمند خودروی برقی یکی از راه‌کارهای کاهش اثرات منفی نفوذ خودروی برقی در شبکه ارائه شده است که نتیجه پیاده‌سازی آن در یکی از شهرهای اکوادور نمایانگر صرفه‌جویی ۵ الی ۵۰ درصدی مصرف انرژی می‌باشد [۱۲]. یکی از گزارش‌های مبتنی بر نظرسنجی مردمی، مصاحبه با صاحب نظران، داده‌های ثبت شده خودروها و سیستم‌های موقعیت‌یابی جهانی مشخص شده است که در حال حاضر با توجه به رشد کم خودروهای برقی بهتر است روش‌های شارژ خانگی خودروهای برقی هوشمند شود و در صورت گسترش سطح شارژ خودروها، پارکینگ‌ها نیز مجهز به این سیستم گردند. هنوز فناوری شارژ هوشمند به بلوغ خود نرسیده است و بنابراین تخمین دقیقی از زیرساخت‌های لازم برای پیاده‌سازی این روش مشخص نیست. یکی دیگر از ضرورت‌های این زمینه تدوین قوانین و تصویب سیاست‌های جدید دولت‌ها می‌باشد [۱۳]. در برخی از مقالات مانند [۱۴-۱۸] عبارت شارژ هوشمند خودروی برقی به معنای مدیریت هوشمندانه جریان انرژی در داخل یک خودروی هیبریدی تعبیر شده است که هدف آن افزایش راندمان خودرو جهت پیمایش مسیر بیشتر با سوخت و برق کمتر است که در اینجا این تعبیر مد نظر نیست.

در این مقاله، هدف ارائه یک روش مدیریت هوشمند شارژ خودروی برقی است که دارای مشخصات زیر است:

- ۱) به جای شارژ کامل خودروها در این روش، خودروها بر اساس میزان مسافت مسیریهای روزانه و سطح انرژی اولیه باتری خود شارژ می‌شوند.
- ۲) برخلاف روش‌های سنتی که در آن نرخ شارژ معمولاً عددی پیوسته بود، نرخ شارژ به صورت گسسته بر اساس مرجع [۱۹] در نظر گرفته شده است.
- ۳) مقایسه میان نرخ شارژ نرمال و سریع صورت گرفته است.
- ۴) مدل مساله به صورت برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح در آمده است که با استفاده از نرم افزار MOSEK و YALMIP حل شده است.
- ۵) محدودیت مربوط به اضافه باری ترانسفرمرهای توزیع بر اساس مدل مرجع [۲۰-۲۲] لحاظ شده است.

کاسته شود. قیود مرزی برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار مربوط به محدودیت‌های متنوعی است که در اینجا بدان اشاره خواهد شد.

الف) محدودیت بار منعطف توانی:

بار منعطف توانی دارای قابلیت تغییر زمان مصرف نیست بنابراین میزان تاخیر یا تعویق اندازی آن طبق رابطه (۲) صفر خواهد بود. اما این بار قابلیت تغییر توان کاری خود در محدوده مجاز را طبق رابطه (۳) دارد.

$$\tau^L = 0; \quad L \in \Omega^{FPL} \quad (2)$$

$$0 \leq P_t^L \leq \bar{P}_t^L, \quad \forall L \in \Omega^{FPL}, t \in T \quad (3)$$

ب) محدودیت بار منعطف زمانی:

بار منعطف توانی دارای قابلیت تغییر زمان مصرف در محدوده مجاز بر اساس رابطه (۴) است. اما این بار قابلیت تغییر توان کاری خود را طبق رابطه (۵) نخواهد داشت.

$$0 \leq \tau^L \leq \bar{T}; \quad L \in \Omega^{FTL} \quad (4)$$

$$P_t^L = \bar{P}_{t-\tau^L}^L, \quad \forall L \in \Omega^{FTL}, t \in T \quad (5)$$

ج) محدودیت بار غیرمنعطف:

طبق رابطه (۶) و (۷) بار غیر منعطف به ترتیب امکان تغییر زمان بهره‌برداری و تغییر توان مصرفی خود را نخواهد داشت.

$$\tau^L = 0; \quad L \in \Omega^{NFL} \quad (6)$$

$$P_t^L = \bar{P}_t^L, \quad \forall L \in \Omega^{NFL}, t \in T \quad (7)$$

د) محدودیت ذخیره ساز

توان و انرژی ذخیره ساز در هر لحظه طبق رابطه (۸) و (۹) به ترتیب باید در محدوده مجاز خود قرار داشته باشد. همچنین ارتباط میان توان و انرژی ذخیره ساز در رابطه (۱۰) و ارتباط میان انرژی اولیه و نهایی آن در رابطه (۱۱) ذکر شده است.

$$P_t^S \leq P_t^S \leq \bar{P}_t^S \quad \forall S \in \Omega^{strg}, t \in T \quad (8)$$

$$E_t^S \leq E_t^S \leq \bar{E}_t^S \quad \forall S \in \Omega^{strg}, t \in T \quad (9)$$

$$E_{t+1}^S = E_t^S + P_t^S \quad \forall S \in \Omega^{strg}, t \in T \quad (10)$$

$$E_{t_{final}}^S = E_{t_{ini}}^S, \quad t_{final}, t_{ini} \in T, \forall S \in \Omega^{strg} \quad (11)$$

۲-۲ مدل برنامه‌ریزی شارژ خودروی برقی

هدف از شارژ خودروهای برقی در این مقاله کاهش هزینه شارژ باتری و هزینه فرسودگی آن است که در رابطه‌های (۱۲) الی (۱۴) به ترتیب تعریف شده‌اند.

$$\min \text{Cost}_{Total} = \text{Cost}_{charge} + \text{Cost}_{bat} \quad (12)$$

$$\text{Cost}_{charge} = \sum_{t=1}^T \left(RTP(t) \cdot \left(r_{PEV,k} \sum_{k=1}^N (C_k^t - D_k^t) \right) \right) \quad (13)$$

(۶) شبکه مورد برررسی و مدل بار سنتی از یک شبکه واقعی مرجع [۲۳] اقتباس شده است.

(۷) منافع همزمان مشترکین (کاهش فرسایش باتری) و منافع بهره‌بردار شبکه (پروفیل بار شبکه) بر اساس مدل مرجع [۲۴] مورد استفاده قرار گرفته است.

(۸) تاثیر روش در حضور و عدم حضور برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار مورد بررسی قرار گرفته است که مدل پاسخ‌گویی بار از [۲۵]، [۲۶] اقتباس شده است.

سایر بخش‌های مقاله به شرح ذیل خواهد بود. بخش ۲ و ۳ به ترتیب به مدل سازی مساله و شبیه سازی اختصاص دارد. بخش ۴ مربوط به نتیجه‌گیری خواهد بود.

۲- توصیف و مدل سازی

مدل‌های بهینه‌سازی این مقاله مربوط به مساله برنامه‌ریزی پاسخ‌گویی بار و برنامه‌ریزی شارژ هوشمند خودروهای برقی می‌باشد. در ابتدا مدل برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار ارائه می‌شود که بر گرفته از مرجع [۲۵] و [۲۶] است. سپس مدل برنامه‌ریزی شارژ هوشمند خودروهای برقی با استفاده از مراجع [۱۹] و [۲۴] ارائه می‌گردد که نرخ شارژ در آن گسسته در نظر گرفته شده است.

۱-۲-۲ مدل برنامه‌ریزی پاسخ‌گویی بار

برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار در نظر گرفته در این تحقیق، معطوف به سیستم مدیریت انرژی در منازل مسکونی می‌باشد که در آن هر یک از مشترکین با توجه به امکانات خود و بر اساس علایق خود اقدام به برنامه‌ریزی مصرف برق خود می‌نمایند. سه نوع بار در این مقاله در نظر گرفته شده است که بار منعطف توانی (زمان کاری مشخص با توان قابل تنظیم)، بار منعطف زمانی (توان کاری مشخص با زمان قابل تغییر) و بار غیرمنعطف نام دارد. تابع هدف برنامه پاسخ‌گویی بار ترکیبی از هزینه و نارضایتی مشترک در نظر گرفته شده است که در رابطه (۱) بدان اشاره شده است.

$$f_{DR} = \varepsilon_1 \sum_{t \in T} \sum_{L \in \Omega^{load}} \underbrace{RTP(t) (P_t^L + P_t^S)}_{\text{هزینه برق}} + \varepsilon_2 \sum_{t \in T} \sum_{L \in \Omega^{load}} \underbrace{\gamma^L (\bar{P}_t^L - P_t^L) \cdot \bar{P}_t^L}_{\text{هزینه شارژ}} \quad (1)$$

ضرایب ε_1 و ε_2 به ترتیب وزن مربوط به هزینه برق و هزینه نارضایتی هستند که هر دو عددی مثبت بوده و در این مقاله فرض شده است که مجموع آنها همواره برابر یک باشد، تا اگر مشترکی قصد اهمیت دادن به هدف خاصی را داشته باشد، از اهمیت هدف دیگر

$$SOC_i^{req} = \begin{cases} 1 - SoC_A & \text{if : } SoC_D \geq 1 \\ SoC_D - SoC_A & \text{if : } SoC_A < SoC_D < 1 \\ 0 & \text{if : } SoC_A = SoC_F \\ -(SoC_A - SoC_D) & \text{if : } SoC_A > SoC_F > 0.2 \end{cases} \quad (25)$$

$$E_i^{req} = \frac{SoC_i^{req} B_C}{\eta} \quad (26)$$

$$\sum_{t=t_n.k}^{t=t_{n+1}.k} S_k^t r_{PEV,k}^t = E_{req,k}, \quad \forall k \in Z \quad (27)$$

$$PG_n^t + PLS_n^t - PD_n^t = I_{map}^{Br} P_{ij}^t, \quad \forall n \in \Omega^{Bus}, t \in T \quad (28)$$

$$QG_n^t + QLS_n^t - QD_n^t = I_{map}^{Br} Q_{ij}^t, \quad \forall n \in \Omega^{Bus}, t \in T \quad \forall n \in \Omega^{Bus}, t \in T$$

$$v_i^t - v_j^t = 2(r_{ij}^t P_{ij}^t + x_{ij}^t Q_{ij}^t), \quad \forall (i, j) \in \Omega^{Bus}, t \in T \quad (30)$$

$$V_n^2 \leq v_n^t \leq \bar{V}_n^2; \quad \forall n \in \Omega^{Bus}, t \in T \quad (31)$$

$$v_n^t \geq 1, \quad n = N^{main}, \forall t \in T \quad (32)$$

$$s_{agg}^t \leq T_{rat}, \quad \forall t \in H \quad (33)$$

$$Sp_{ij} \leq Sp_j^{\max} \quad (34)$$

در بخش بعدی مدل‌های ذکر شده برای برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار و برنامه‌ریزی شارژ خودروهای برقی، در محیط نرم‌افزار متلب و جعبه‌ابزارهای Yalmip و Mosek پیاده‌سازی خواهد شد. همچنین نتایج مربوط به چندین مورد مطالعاتی با یکدیگر مقایسه می‌گردد تا دید و سیع‌تری نسبت به مساله بدست آید. الگوریتم شارژ هوشمند خودروها در حضور برنامه پاسخ‌گویی بار (DRP) در دو مرحله اجرا شده است. مرحله اول از شماره ۱ تا ۶ و مرحله دوم از شماره ۷ تا ۱۲ انجام می‌شوند. اجرای دو مرحله بصورت زیر می‌باشد.

۱- شروع

۲- دریافت داده‌های بارهای PFL, TFL, NFL

۳- در صورت انتخاب برنامه DRP برو به مرحله ۴ در غیر اینصورت برو به مرحله ۶

۴- اجرای برنامه DRP مبتنی بر اولویت‌های مشترکین طبق رابطه‌های (۱) الی (۱۱)

۵- محاسبه پروفیل کل بار و ارسال آن جهت شارژ خودروهای برقی

۶- ثبت پروفیل بار سنتی منطقه مسکونی و سپس برو به مرحله ۵

۷- در صورت انتخاب برنامه شارژ هوشمند خودروها برو به مرحله ۸ در غیر اینصورت برو به مرحله ۱۰

۸- عمل کردن خودروهای برقی طبق اطلاعات کاری و سپس برو به مرحله ۹

۹- اجرای شارژ هوشمند مبتنی بر رابطه‌های (۱۲) الی (۳۴)

۱۰- عدم نیاز به اطلاعات کاری راننده بلکه نیاز به شارژ کامل خودروها می‌باشد و سپس برو به مرحله ۹

۱۱- چاپ نتایج

$$Cost_{bat} = \sum_{k=1}^N (c_{b,k} E_{b,k} + c_L) \frac{E_{dis,k}}{L_c E_{b,k} DOD} \quad (14)$$

در این روابط میزان توان شارژ خودروها و انرژی دشارژ شده خودرو بر اساس روابط (۱۵) و (۱۶) بدست می‌آید:

$$P_{PEV}^t = \sum_{k=1}^N (C_k^t - D_k^t) r_{PEV,k} \quad \forall t \in H \quad (15)$$

$$E_{dis,k} = \sum_{t=1}^T D_k^t r_{PEV,k}, \quad \forall k \in Z \quad (16)$$

قیود مرزی برنامه‌ریزی شارژ خودرو مربوط به محدودیت‌های متنوعی است که در اینجا بدان اشاره خواهد شد.

الف) محدودیت‌های مربوط به ذخیره‌ساز خودروی برقی

همواره توان شارژ خودروهای و سطح انرژی آنها باید طبق روابط (۱۷) و (۱۹) در محدوده مجاز قرار داشته باشند. همچنین در زمانی که خودرو در پارکینگ حضور ندارد، توان شارژ آن طبق رابطه (۱۸) برابر صفر باشد.

$$0 \leq r_{PEV,k} \leq P_{rated} (C_k^t - D_k^t), \quad \forall k \in Z \quad (17)$$

$$r_{PEV,k} = 0, \quad \forall k \notin Z \quad (18)$$

$$SOC_{\min} \leq SOC_k^t \leq SOC_{\max}, \quad \forall k \in Z, \forall t \in H \quad (19)$$

ب) محدودیت‌های مربوط به وضعیت شارژ و دشارژ

وضعیت شارژ و دشارژ خودروهای برقی طبق رابطه (۲۱) متغیرهای باینری هستند که امکان وقوع همزمان شارژ و دشارژ برای یک خودرو در یک لحظه طبق رابطه (۲۰) ناممکن می‌باشد. همچنین متغیر مربوط به وضعیت آماده به کار خودروی برقی طبق رابطه (۲۲) تعریف می‌شود.

$$0 \leq C_k^t + D_k^t \leq 1 \quad (20)$$

$$C_k^t, D_k^t \in \{0, 1\} \quad (21)$$

$$s_k^t = \begin{cases} \{-1, 0, 1\} & \forall t \in P_{t,k}; \forall k \in Z \\ 0 & \forall t \notin P_{t,k}; \forall k \in Z \end{cases} \quad (22)$$

ج) محدودیت مربوط به توان مورد نیاز خودرو

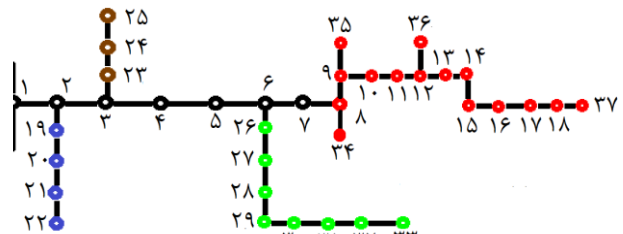
در مساله شارژ هوشمند خودروی برقی، مسافت حرکت خودرو از خانه تا پارکینگ طبق رابطه (۲۳) و از طول سفرهای بعدی آن طبق رابطه (۲۴) محاسبه می‌شود. سطح شارژ مورد نیاز هر خودرو و مقدار انرژی صرف شده برای آن ذخیره ساز به ترتیب از روابط (۲۵) و (۲۶) بدست می‌آید. قید (۲۷) نیز تضمین کننده تامین توان مورد نیاز خودروهای برقی می‌باشد.

$$SOC_A = 1 - (d / d_R) \quad (23)$$

$$SOC_D = 0.2 + (STD / d_R) \quad (24)$$

۳- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

در این مقاله ۴ مورد مطالعاتی بررسی شده است که مشخصات هر یک از آنها در جدول (۱) نمایش داده شده است. شبکه‌ی مورد بررسی یک شبکه ۳۷ باس واقعی [۲۳] است که شمای آن در شکل (۱) نمایش داده شده است. مشخصات مربوط به بار نامی هر یک از گره‌های شبکه و محدودیت خطوط انتقال از مرجع [۲۳] اقتباس شده است. نقاط سبز، قرمز، آبی و قهوه‌ای به ترتیب بیانگر مناطق مسکونی، بخش کامپوزیت، ناحیه تجاری و صنعتی است. با تمامی نواحی مطابق با مرجع مذکور است و تنها امکان برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار برای نواحی مسکونی در نظر گرفته شده است. پارکینگ‌های شارژ خودرو نیز تنها در بخش صنعتی قرار دارند (گره ۲۳-۲۵). تعداد کل خودروهای برقی ۱۰۰۰ عدد در نظر گرفته شده است که برای تسریع در محاسبات بر اساس به ۱۰۰ خوشه ۱۰ تایی بر اساس مشابهتشان دسته بندی شده‌اند. مشخصات مربوط به بارهای پاسخگو از مرجع [۲۵ و ۲۶] اقتباس شده است که شامل بار منقطع زمانی (ماشین لباسشویی)، منقطع توانی (روشنایی و سیستم تهویه هوا) و بار غیرمنقطع (یخچال فریزر، توستر و کتری) می‌باشد که مشخصات هر یک از آنها برای یک منزل مسکونی نمونه در جدول (۲) نمایش داده شده است. به منظور سادگی مساله، فرض شده است که ۱۰۰ منزل در نواحی مسکونی وجود دارد و الگوی مصرف مشترکین در انتخاب ضریب رضایتمندی یا کاهش هزینه از یک توزیع نرمال تبعیت کند. حد مجاز افت ولتاژ نیز برابر ۵ درصد اختلاف کمابیش از مقدار نامی ۱ پریونیت در نظر گرفته شده است. ظرفیت ترانسفرمر توزیع پست شبکه نیز ۱ مگاوات لحاظ شده است. انواع خودروهای برقی به کار رفته در این مقاله در جدول (۳) نمایش داده شده است. سایر مشخصات مربوط به خودروهای برقی مورد استفاده در این مقاله نیز از مرجع [۲۵] اقتباس شده است. دو نوع نرخ شارژ برای ایستگاه‌های شارژ خودروی برقی فرض شده است که عبارتند از: شارژ نرمال با نرخ توان ۴ کیلووات و شارژ سریع با نرخ ۸ کیلووات می‌باشد.



شکل (۱) دیاگرام تک خطی شبکه توزیع مورد بررسی

جدول (۱) موردهای مطالعاتی مقاله

مورد	۱	۲	۳	۴
مد شارژ	نرمال	سریع	نرمال	سریع

برنامه پاسخ‌گویی	دارد	دارد	دارد	ندارد
------------------	------	------	------	-------

جدول (۲) مشخصات بارهای پاسخگوی یک منزل نمونه

نوع بار	منقطع زمانی	منقطع توانی			غیرمنقطع
		تهویه	کتری	توستر	
نام بار	لباسشویی	روشنایی	تهویه	کتری	توستر
زمان	۲ ساعت	۱ - ۱۹	تمام وقت	۸-۹	تمام وقت
توان	۰/۷	صفر تا ۰/۸	صفر تا ۱/۴	۰/۳	۰/۲

جدول (۳) اطلاعات مربوط به انواع خودروهای برقی

نام خودرو	برد مسافتی	ظرفیت (kWh)	درصد پراکندگی	نوع ذخیره-ساز
هیبرید ۳۰	۳۰ مایل	۱۳/۸	۳۰	باتری
هیبرید ۴۰	۴۰ مایل	۱۸/۴	۶۰	باتری
نیسان لیف	۷۲ مایل	۲۴	۱۰	باتری

جدول (۴) اطلاعات آماری رانندگان خودروی برقی

توصیف	مقدار	یکا
مسافت روزانه متوسط	توزیع نرمال $\mu = 55, \sigma^2 = 10$	km
تعداد سفرها در روز	۳	عدد
میانگین طول هر سفر	۱۷/۳	km
کمترین طول هر سفر	۱	km
بیشترین طول هر سفر	۳۷/۵	km

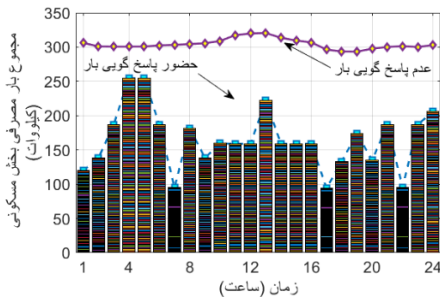
جدول (۵) جمع بندی اطلاعات ناشی از خوشه بندی خودروها

خوشه	زمان ورود	زمان خروج	شارژ اولیه %	شارژ نهایی %	ظرفیت مورد نیاز (kWh)
۱	۹	۱۷	۳۶/۴۸	۸۹/۹۶	۷/۳۸
۲	۷	۱۸	۲۶/۸۰	۹۰/۳۶	۸/۷۷
۳	۹	۱۸	۲۰/۰۰	۹۹/۸۸	۱۱/۰۲
۴	۱۱	۱۷	۲۰/۰۵	۹۷/۱۰	۱۴/۱۷
۵	۹	۱۸	۳۴/۴۲	۹۹/۲۵	۱۱/۹۲
۶	۱۰	۱۷	۲۳/۶۷	۹۳/۵۸	۱۲/۸۶
۷	۸	۱۹	۳۱/۸۹	۸۸/۰۷	۱۰/۳۳
۸	۱۰	۱۸	۳۸/۴۶	۹۸/۷۰	۱۱/۰۸
۹	۸	۱۸	۲۰/۰۰	۸۹/۵۹	۱۲/۸۰
۱۰	۹	۱۸	۴۳/۴۲	۸۴/۶۴	۱۱/۸۹

اطلاعات آماری خودروها بر اساس آمار واقعی کشور سنگاپور [۲۷]

است که در قالب جدول (۴) نمایش داده شده است. فرض شده است که طول سفر اول برابر با مسافت میان منزل تا پارکینگ عمومی باشد که مالک برای ورود به پارکینگ آن را پیموده است و طول دو سفر

گسترده‌ای از جزئیات مساله بدست آید و تفاوت میان چهار مورد مطالعاتی حاصل گردد.



شکل (۲) پروفیل بار مناطق مسکونی در عدم حضور برنامه پاسخ‌گویی بار (با فرض ناهمزمانی نرمال) و در حضور برنامه پاسخ‌گویی بار

جدول (۶): مقایسه پروفیل بار تجمعی منازل مسکونی در حضور و غیاب برنامه پاسخ‌گویی بار

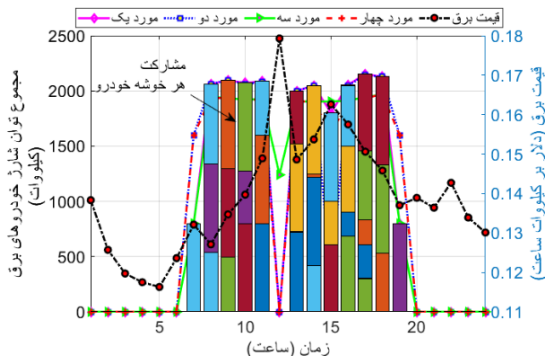
برنامه پاسخ‌گویی بار	میانگین	انحراف معیار	پیک بار	کمینه بار	ضریب بار
حضور	۱۶۴/۳۸	۴۳/۵۷	۲۵۴/۸۰	۹۴/۲۰	۱/۵۵
عدم حضور	۳۰۴/۵۴	۷/۴۱	۳۲۰/۶۶	۲۹۳/۴۷	۱/۰۵

نتیجه مقایسه چهار مورد مطالعاتی در جدول (۷) نمایش داده شده است. در حل مسائل بهینه‌سازی توسط ترکیب نرم‌افزارهای Yalmip و Mosek هر یک از این نرم‌افزارها زمان مخصوص به خود را صرف خواهند کرد. زمانی که نرم‌افزار Yalmip صرف می‌کند بیشتر جهت مرتب‌سازی قیود مرزی و بررسی اولیه مدل بهینه‌سازی است که معمولاً کمتر از چندین ثانیه به طول می‌انجامد. به نوعی وظیفه Yalmip آماده‌سازی مدل و معرفی آن به حل‌کننده‌های Mosek است. پس از دریافت مدل توسط Mosek مساله بهینه‌سازی با استفاده از ابزارهای مبتنی بر الگوریتم ساقه و ریشه شروع به حل می‌کند. نحوه تعریف هر یک از قیود تاثیر به‌سزایی در همگرایی این نرم‌افزار دارد. در مورد مدل خاص استفاده شده در این مقاله، حساسیت جواب‌ها به قیود مربوط به محدودیت ولتاژ گره‌ها، محدودیت ظرفیت خطوط، تعریف گسسته یا پیوسته بودن نرخ شارژ، محدودیت بار تامین نشده در هر گره، و محدودیت تامین توان مورد نیاز خودروها از جمله مواردی است که می‌تواند منجر به همگرایی یا واگرایی مساله شود. بنابراین تعیین دقیق و صحیح این محدودیت‌ها در زمان حل مساله و همگرایی آن بسیار اثرگذار است. اختلاف زمان حل مساله در هر یک از موارد مطالعاتی، به دلیل تاثیر گذاری پروفیل بار مسکونی این موارد و توان شارژ خودروهای برقی است که منجر به افزایش زمان حل مساله در مورد شارژ سریع نسبت به نرمال و در مورد بار سنتی نسبت به پاسخ‌گویی بار شده است. چون نرخ شارژ گسسته در نظر گرفته شده است (از صفر تا ۱۰۰ نرخ شارژ به ۱۰۰ بازه گسسته تقسیم شده است)، مساله در حالت نرمال، با پله‌های کوچکتری می‌تواند خودروها را شارژ کند و سریع‌تر موجب همگرایی می‌شود. اما

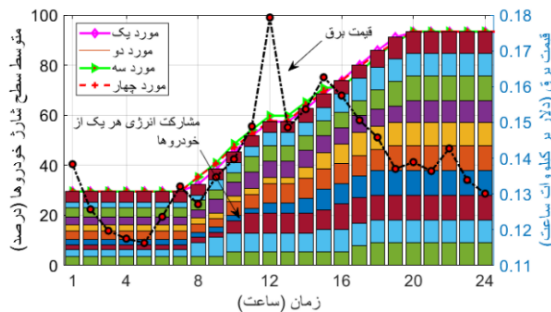
بعدی از زمان خروج خودرو از پارکینگ محاسبه گردد. بر اساس مشخصات فنی و آماری ذکر شده برای خودروهای برقی، اطلاعات پرسشنامه تجمیع کنندگان توان در پارکینگ خودروهای برقی در قالب جدول (۵) در خواهد آمد. انرژی نیاز مربوط به هر یک از خوشه‌های خودرو برقی باید به گونه‌ای تامین شود که اولاً سطح شارژ خودرو به کمتر از ۲۰ درصد ظرفیت نامی‌اش نرسد و از ۱۰۰ درصد این مقدار نیز تجاوز ننماید. همچنین در صورت در نظرگیری محدودیت ترانسفرم توزیع، حد مجاز بار کشیده شده از شبکه بالادستی رعایت گردد. قبل از برنامه‌ریزی هوشمند خودروهای برقی، نیاز به محاسبه بار مصرفی شبکه در حالت حضور بار پاسخ‌گو و عدم حضور آن است که نمودار آن در شکل (۲) نمایش داده شده است. در صورتی که برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار حضور داشته باشد، بستگی به ضریب رضایتمندی مشترکین، بارهایی از قبیل ماشین لباسشویی را می‌توان در زمان‌های مناسب‌تری بهره‌برداری نمود و یا اینکه می‌توان سیستم‌های تهویه و یا روشنایی را با توان کمتری نسبت به توان نامی مورد استفاده قرار داد. بنابراین انتظار می‌رود، منحنی بار انعطاف بیشتری نسبت به مورد سنتی داشته باشد. در صورت حضور برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار برای نزدیکی بیشتر به واقعیت، فرض شده است که الگوی انتخاب ضریب رضایتمندی مشترکین از یک توزیع نرمال پیروی کند. هرچه ضریب رضایتمندی به سمت ۱ نزدیک شبکه بدین معناست که مشترک تمایل بیشتری به حفظ رفاه خود دارد و افزایش هزینه را حاضر است پرداخت کند. هرچه این ضریب به صفر نزدیک شود، بدین معناست که مشترک کاهش هزینه را به تامین رفاه خود ترجیح می‌دهد. در صورتی که بار پاسخ‌گویی حضور نداشته باشد و به بیان دیگر امکان تغییر زمان یا توان بارها وجود نداشته باشد، آنگاه پروفیل بار رشد قابل توجهی خواهد داشت. به منظور نزدیکی به واقعیت، فرض شده است که ناهمزمانی میان رفتار مشترکین وجود داشته باشد. این ناهمزمانی از توزیع نرمال پیروی می‌کند. مقایسه کمی میان پارامترهای پروفیل بار در شرایط حضور و غیاب برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار در قالب جدول (۶) نمایش داده شده است. همانطور که در این جدول مشخص است، میانگین بار و پیک بار شبکه در حضور برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار به ترتیب به اندازه ۴۶/۰۲ درصد و ۲۰/۵۳ درصد نسبت به حالت سنتی عدم حضور بارهای پاسخ‌گو کاهش یافته است. این مقایسه، میزان کارایی برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار را در بهبود پارامترهای شبکه توزیع به خوبی نمایش می‌دهد. مسلماً برنامه‌ریزی خودروهای برقی، در شرایطی که محدودیت مربوط به ترانسفورماتورهای توزیع در نظر گرفته شود، تاثیر قابل توجهی در شارژ خودروهای برقی خواهد داشت. هر چه توان عبوری از خطوط با ازدحام بیشتری توسط منازل مسکونی مواجه باشد، امکان شارژ خودروهای برقی در آن بازه‌های زمانی نیز کاهش می‌یابد. حتی امکان دارد هزینه‌های شارژ خودروهای برقی نیز به دلیل جابجایی زمان شارژ آنها به بازه‌های گران‌قیمت‌تر نیز افزایش پیدا کند. در این مقاله انواع پارامترهای شبکه که توزیع مورد بررسی قرار می‌گیرد تا ابعاد

زمان Yalmip (ثانیه)	۵/۰۳	۱/۴۹	۱/۴۸	۱/۱۷
زمان Mosek (ثانیه)	۲۱۰/۹۰	۲۴۹/۵۳	۲۴۵/۱۵	۳۲۵/۸۹
هزینه شارژ (دلار)	۳۲۲۳/۱۳	۳۱۸۵/۱۹	۳۲۶۶/۷۸	۳۲۰۸/۲۳
هزینه فروسی (دلار)	صفر	صفر	صفر	صفر
هزینه کل (دلار)	۳۲۲۳/۱۳	۳۱۸۵/۱۹	۳۲۶۶/۷۸	۳۲۰۸/۲۳
دفعات شارژ	۱۲۲۰۰	۱۰۸۰۰	۱۹۶۰۰	۱۱۶۰۰
دفعات دشارژ	۷۴۰۰	۸۸۰۰	صفر	۸۰۰۰
مجموع شارژ تامین نشده (kWh)	۵۲/۷۸	۹۲/۷۸	۵۲/۷۸	۹۲/۷۸
مجموع بارزدایی (kWh)	۱/۰۴	صفر	۱/۴۳	۱/۴۳
باس های دارای بارزدایی	۵	۳۳ و ۳۲ و ۹ و ۵ و ۴	۶	۲۶ و ۶

زمانی که شارژ سریع است، اندازه هر گام بزرگتر بوده و امکان تامین قیودی که به دقت بالاتر (گام های کوچکتر) نیاز دارند کمتر فراهم می شود. بنابراین زمان همگرایی افزایش می یابد. همچنین در این جدول به خوبی مشخص است که توان تامین نشده خودروها در حالت شارژ سریع نسبت به نرمال بیشتر خواهد بود. مقدار بارزدایی باس ها مقدار بسیاری اندکی است و این نشان می دهد، که با توجه به ظرفیت توان خطوط، تعریف صحیح قید افت ولتاژ شبکه، مساله به جویی همگرا شده است که توان هر یک بارهای شبکه بدون اینکه افت ولتاژ از محدوده مجاز خارج شود، به خوبی تامین گردد. تعداد دفعات شارژ و دشارژ نیز به خوبی نمایانگر تفاوت شارژ سریع و نرمال است. در شارژ نرمال، تعداد دفعات شارژ به دلیل کوچک بودن مقدار توان شارژ در هر مرحله نسبت به حالت سریع افزایش می یابد. لازم به ذکر است که در حضور برنامه پاسخ گویی بار نسبت تعداد کلیدزنی شارژ ۱/۱۲۹۶ و در غیاب آن ۱/۶۸۹۷ بدست آمده است که دلیل این امر محدودیتی است که پروفیل بار مسکونی برای پست توزیع ایجاد کرده است و مقدار موثر شارژ در هر مرحله باید در گام های کوچکتر و دفعات بالاتر صورت گیرد تا پست توزیع دچار اضافه بار نشود. نمودار مربوط به توان شارژ مجموع خودروهای برقی در شکل (۳) نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل نشان داده شده است، در ساعات ۱۰ الی ۱۳ که قیمت برق در پیک قرار دارد، هیچ خودرویی شارژ نشده است تنها در مورد سوم کمی شارژ صورت گرفته است، چون با توجه به پایین بودن سطح شارژ نرمال و محدودیتی که بار سنتی ایجاد کرده است، جهت تامین توان خودروها مقداری از شارژ به ساعات پیک به اجبار باید موکول می شده است ولی این اتفاق برای سایر موارد رخ نداده است. به منظور درک بهتر زمان شارژ و میزان شارژ هر یک از خوشه های خودرو، نمودارهای میله ای مشارکت هر خوشه نیز در همین شکل نشان داده شده است. با کاهش هزینه ی برق، میزان شارژها بیشتر شده است. در هر لحظه نیز حداکثر ۴ الی ۵ خودرو همزمان شارژ شده اند. وضعیت متوسط سطح شارژ باتری ها در هر لحظه بر حسب درصد کیلووات متوسط در شکل (۴) نمایش داده شده است. تا قبل از ورود خودروها به پارکینگ به طور میانگین خودروها در حدود ۳۰ درصد ظرفیت خود شارژ دارند. تا قبل از به پیک رسیدن قیمت در ساعت ۱۲ به طور متوسط خودروها کمتر از ۶۰ درصد شارژ شده اند. سپس در ساعت پیک شارژی صورت نگرفته است و پس از آن تا ساعت ۱۸ به طور میانگین حدوداً ۸۰ درصد شارژ هر خودرو شارژ دارد و از آن پس خودروها به طور میانگین تا حدود ۹۴ درصد شارژ خواهند شد. تفاوت روش شارژ هوشمند با شارژ سنتی در همین جا به خوبی مشخص می شود. به جای شارژ کامل هر خودرو به میزان نیازش شارژ شده است.



شکل (۳) مجموع توان شارژ خودروها در هر یک از موردهای مطالعاتی و نمایش مشارکت هر خوشه در مورد ۱

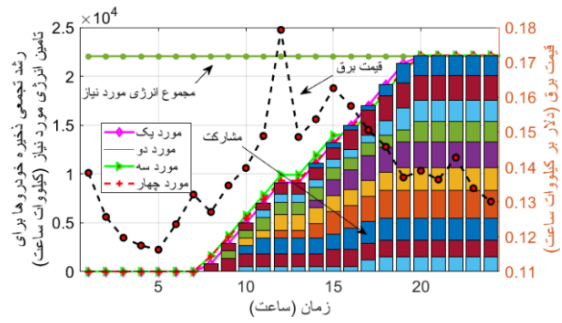


شکل (۴) میانگین سطح انرژی ذخیره شده بر حسب درصد در موردهای مطالعاتی و نمایش مشارکت هر خوشه

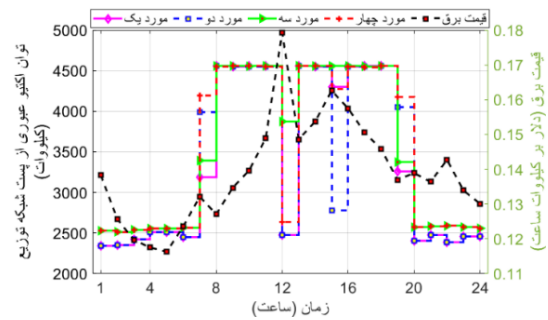
جدول (۷) مقایسه نتایج موردهای مطالعاتی

مورد ۴	مورد ۳	مورد ۲	مورد ۱
--------	--------	--------	--------

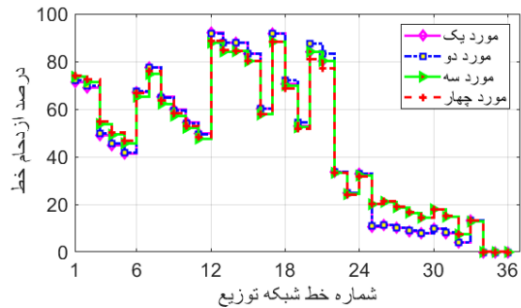
مقدار انرژی مورد نیاز شارژ خودروها که بر اساس تقاضای مشترکین طبق جدول (۵) محاسبه می‌شود، به مرور زمان باید تامین گردد تا مساله از جواب قابل قبول برخوردار باشد. نحوه تامین تدریجی این میزان شارژ نیز در قالب شکل ۵ نمایش داده شده است. به تدریج با ورود خودروها به درون پارکینگ (اثر بهمنی)، مقدار شارژ آنها آغاز شده است و در نهایت به طور کامل این انرژی به خودروها اختصاص داده شده است. همانطور که مشخص است، تفاوت میان موردهای مطالعاتی، چندان نیست. به منظور درک بهتر تفاوت میان موردهای مطالعاتی، توان عبوری از پست توزیع در شکل (۶) نمایش داده شده است. همانطور که مشخص است، تا قبل از ساعت ۸ که خودرویی وارد پارکینگ نشده است یا ساعت بعد از ۲۰ که خودرویی در پارکینگ حضور ندارد، به دلیل بیشتر بودن بار مصرفی حالت سنتی نسبت به حالت پاسخ‌گویی بار، توان عبوری از پست توزیع در این زمان برای موردهای سه و چهار بیشتر از دو مورد دیگر است. از ساعت ۷ الی ۲۰ خودروها در پارکینگ حضور دارند و به دلیل بالا بودن قیمت برق، توان خریداری شده در حالت شارژ سریع بیشتر از شارژ نرمال است. مشاهده می‌شود که مورد سه نسبت به مورد یک (و همچنین مورد چهار نسبت به دو)، در همان زمان اولیه (ساعت ۷) با شارژ بالاتری شروع به کار کرده است. در شکل ۴ و ۵ هم به خوبی مشخص است که منحنی مورد سه بالاتر از مورد یک قرار گرفته است. سپس طبق شکل ۶ محدودیت پست توزیع نقشی سرنوشت ساز پیدا می‌کند، و خودروها مجبور به کاهش نرخ شارژ و به تعویق اندازی آن می‌شوند. به منظور جبران این عقب ماندگی اولیه روش پاسخ‌گویی بار نسبت به روش سنتی، مشاهده شارژ مورد ۱ و ۲ در ساعت ۱۵ (به دلیل کاهش بار مسکونی و آزادسازی ظرفیت) هستیم و از آن پس طبق شکل ۴ و ۵ مشاهده می‌کنیم که منحنی سطح شارژ خودروها در مورد یک از ساعت ۱۵ به بعد بالاتر از مورد سه قرار گرفته است و به نوعی آن تعویق جبران شده است. متوسط توان عبوری از هر یک خطوط در شکل (۷) نمایش داده شده است. خطوط ۲۲ تا ۲۴ مربوط به نواحی صنعتی هستند و تغییرات پاسخ‌گویی بار بر آنها تاثیری ندارد. همچنین میانگین توان عبوری از این خطوط در حالت نرمال و سریع با یکدیگر برابر است چون در طول روز باید مقدار یکسانی از انرژی را نهایتاً شارژ نمایند، بنابراین منحنی آنها بر یکدیگر منطبق شده است. خطوط ۲۶ تا ۳۰ مربوط به نواحی مسکونی هستند که تاثیر برنامه پاسخ‌گویی بار در آنها کامل مشخص است و شارژ یا د شارژ خودروها نیز تاثیری بر اختلاف موارد (مورد یک با دو یا مورد سه با چهار) ایجاد نکرده است. این توان‌ها از خطوط ۱ تا ۶ (که واسط پست توزیع به ناحیه مسکونی هستند) نیز عبور می‌کند. این نمودار نشان می‌دهد، جریان عبوری از خطوط انتقال در محدوده مجاز خود قرار گرفته‌اند و هیچ‌یک به طور ۱۰۰ درصد دچار ازدحام نشده‌اند. بیشتر درصد ازدحام حدود ۹۰ درصد می‌باشد. متوسط پروفیل ولتاژ شبکه نیز در شکل (۸) ترسیم شده است. همانطور که مشخص است تمامی باس‌های شبکه در



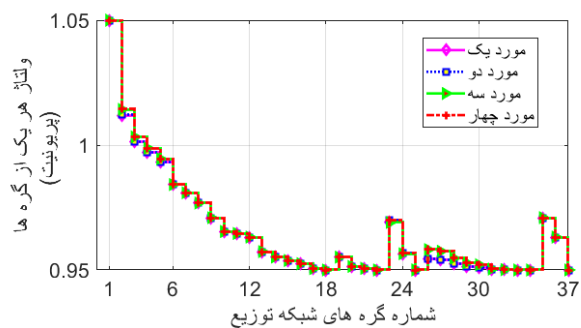
شکل (۵) تامین تدریجی انرژی مورد نیاز شارژ خودروها در هر مورد مطالعاتی



شکل (۶) توان عبوری از پست شبکه توزیع (توان خریداری شده از شبکه بالادستی) در هر مورد مطالعاتی



شکل (۷) مگاوات آمپر عبوری از هر یک خطوط شبکه



شکل (۸) ولتاژ هر یک از گره‌های شبکه (پریونیت)

- [5] S. Grammatico, "Fast Convergence in Electric Vehicle Smart Charging," in *Intelligent Integrated Energy Systems*: Springer, 2019, pp. 123-139.
- [6] A. Ensslen, P. Ringler, L. Dörr, P. Jochem, F. Zimmermann, and W. Fichtner, "Incentivizing smart charging: Modeling charging tariffs for electric vehicles in German and French electricity markets," *Energy research & social science*, vol. 42, pp. 112-126, 2018.
- [7] S. Sachan and N. Adnan, "Stochastic charging of electric vehicles in smart power distribution grids," *Sustainable cities and society*, vol. 40, pp. 91-100, 2018.
- [8] L. Jian, Z. Yongqiang, and K. Hyoungmi, "The potential and economics of EV smart charging: A case study in Shanghai," *Energy policy*, vol. 119, pp. 206-214, 2018.
- [9] M. M. Hussain, M. S. Alam, M. S. Beg, and H. Malik, "A risk averse business model for smart charging of electric vehicles," in *Proceedings of First International Conference on Smart System, Innovations and Computing*, 2018: Springer, pp. 749-759.
- [10] C. de Mattos Affonso and M. Kezunovic, "Technical and economic impact of PV-BESS charging station on transformer life: A case study," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 4, pp. 4683-4692, 2018.
- [11] J.-M. Clairand, J. Rodríguez-García, and C. Álvarez-Bel, "Smart charging for electric vehicle aggregators considering users' preferences," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 54624-54635, 2018.
- [12] S. Hardman et al., "A review of consumer preferences of and interactions with electric vehicle charging infrastructure," *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 62, pp. 508-523, 2018.
- [13] E. Kamal and L. Adouane, "Intelligent energy management strategy based on artificial neural fuzzy for hybrid vehicle," *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 3, no. 1, pp. 112-125, 2017.
- [14] E. Kamal and L. Adouane, "Hierarchical energy optimization strategy and its integrated reliable battery fault management for hybrid hydraulic-electric vehicle," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 5, pp. 3740-3754, 2018.
- [15] X. Qi, G. Wu, K. Boriboonsomsin, and M. J. Barth, "Development and evaluation of an evolutionary algorithm-based online energy management system for plug-in hybrid electric vehicles," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 18, no. 8, pp. 2181-2191, 2016.
- [16] L. Guo, B. Gao, Y. Gao, and H. Chen, "Optimal energy management for HEVs in eco-driving applications using bi-level MPC," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 18, no. 8, pp. 2153-2162, 2016.
- [17] L. Qiu, L. Qian, H. Zomorodi, and P. Pisu, "Global optimal energy management control strategies for connected four-wheel-drive hybrid electric vehicles," *IET Intelligent Transport Systems*, vol. 11, no. 5, pp. 264-272, 2017.
- [18] G. Binetti, A. Davoudi, D. Naso, B. Turchiano, and F. L. Lewis, "Scalable real-time electric vehicles charging with discrete charging rates," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 5, pp. 2211-2220, 2015.
- [19] B. Sun, Z. Huang, X. Tan, and D. H. Tsang, "Optimal scheduling for electric vehicle charging with discrete charging levels in distribution grid," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 2, pp. 624-634, 2016.
- [20] O. Sundstrom and C. Binding, "Flexible charging optimization for electric vehicles considering distribution

محدوده مجاز ولتاژی قرار دارند. نکته قابل توجه اینکه در شبکه‌های شعاعی، با فاصله گرفتن از پست توزیع، ولتاژها بر اساس توان عبوری از خطوط افت پیدا می‌کند. اگر در این مثال پست توزیع قابلیت افزایش ولتاژ خود به ۱/۰۵ پریونیت را نداشت و به طور مثال در ولتاژ ۱ پریونیت تنظیم می‌شد، آنگاه یا مساله جواب نداشت (یعنی خطوط قابلیت انتقال توان را با رعایت محدودیت ولتاژ نداشتند) و یا نیاز به بارزدایی بیشتر برای کاهش توان عبوری از خطوط و حفظ پروفیل ولتاژ بود.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی برای شارژ هوشمند خودروهای برقی ارائه شده است که در آن بر اساس میزان انرژی مورد نیاز برای پیش‌مایش سفرهای روزانه، فرآیند شارژ خودروهای برقی با در نظر گیری محدودیت‌های فنی و اقتصادی شبکه و با هدف کاهش هزینه‌های شارژ صورت می‌گیرد. نتیجه پیاده‌سازی روش در دو مد شارژ نرمال و سریع در حضور و عدم حضور محدودیت توان عبوری از ترانسفورماتور توزیع با یکدیگر مقایسه شد. همچنین نتیجه حضور و عدم حضور برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار در مساله مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که روش شارژ سریع به مراتب نتایج بدتری نسبت به روش شارژ نرمال ایجاد می‌کند. در واقع، هم مقدار هزینه‌ی این روش و هم مقدار پیک بار این روش نسبت به روش نرخ شارژ نرمال بیشتر است. همچنین در صورتی که روش شارژ هوشمند به شبکه توزیع اعمال می‌شود، توان عبوری از پست شبکه توزیع نیز کاهش یافته و ظرفیت آن آزادتر می‌شود. بنابراین دیگر نیازی به احداث پست جدید یا تقویت همان پست نیست و هزینه‌های توسعه شبکه توزیع معوق خواهد شد. در صورت ادغام برنامه‌ی پاسخ‌گویی بار در مساله نیز، امکان مدیریت موثرتر پیک بار شبکه و هزینه‌های شارژ فراهم خواهد شد.

مراجع

- [1] Q. Wang, X. Liu, J. Du, and F. Kong, "Smart charging for electric vehicles: A survey from the algorithmic perspective," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1500-1517, 2016.
- [2] I. Rahman, P. M. Vasant, B. S. M. Singh, M. Abdullah-Al-Wadud, and N. Adnan, "Review of recent trends in optimization techniques for plug-in hybrid, and electric vehicle charging infrastructures," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 58, pp. 1039-1047, 2016.
- [3] K. L. López, C. Gagné, and M.-A. Gardner, "Demand-side management using deep learning for smart charging of electric vehicles," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 3, pp. 2683-2691, 2018.
- [4] X. G. Yang, J. M. Marcicki, P. Addepalli, D. B. Dave, and J. Lu, "Smart charging battery systems and methods for electrified vehicles," ed: Google Patents, 2019.



افشین لشکر ارا محمدره در تهران متولد شده است (۱۳۵۲). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول (۱۳۷۴)، کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه بابل (۱۳۸۰) و دکتری مهندسی برق- قدرت در دانشگاه علم و صنعت (۱۳۹۰) سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه مطالعات سیستم قدرت، بازار برق، شبکه هوشمند است.

- grid constraints," IEEE Transactions on Smart grid, vol. 3, no. 1, pp. 26-37, 2011.
- [21] V. Aravinthan and W. Jewell, "Controlled electric vehicle charging for mitigating impacts on distribution assets," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, no. 2, pp. 999-1009, 2015.
- [22] N. Chen, C. W. Tan, and T. Q. Quek, "Electric vehicle charging in smart grid: Optimality and valley-filling algorithms," IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, vol. 8, no. 6, pp. 1073-1083, 2014.
- [23] D. Singh, R. K. Misra, and D. Singh, "Effect of load models in distributed generation planning," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 22, no. 4, pp. 2204-2212, 2007.
- [24] M. L. Crow, "Electric vehicle scheduling considering co-optimized customer and system objectives," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 9, no. 1, pp. 410-419, 2017.
- [25] A. Safdarian, M. Fotuhi-Firuzabad, and M. Lehtonen, "Benefits of demand response on operation of distribution networks: A case study," IEEE systems journal, vol. 10, no. 1, pp. 189-197, 2014.
- [26] S. Paudyal, C. A. Cañizares, and K. Bhattacharya, "Optimal operation of industrial energy hubs in smart grids," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, no. 2, pp. 684-694, 2014.
- [27] www.lta.gov.sg/content/ltagov/en/who_we_are/statistics_and_publications/statistics.html

رزومه



موید محسنی در کشور کویت متولد شده است (۱۳۵۶). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون (۱۳۸۰)، کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول (۱۳۹۰) و اکنون دانشجوی دکتری مهندسی برق- قدرت در دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول را سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت، بازار برق، شبکه هوشمند و سیستم‌های انرژی نو است.



محمود جورابیان در شوشتر متولد شده است (۱۳۴۰). تحصیلات دانشگاهی خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق- قدرت از دانشگاه New Haven, CT, USA (1362)، کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت از دانشگاه Rensselaer Polytechnic Institute, NY, USA (1364) و دکتری مهندسی برق- قدرت از دانشگاه Bath, Bath, UK را سپری کرده است. فعالیت‌های پژوهشی و علاقه‌مندی ایشان در زمینه شبکه هوشمند، مطالعات سیستم قدرت است.

Smart Charge Management of Electric Vehicles in the Distribution Network in the Presence of Demand Response Program

Moaiad Mohseni ¹, Mahmood Joorabian ^{2*}, Afshin Lashkar Ara ³

1- PhD student - Department of Electrical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

2-Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. Email: *mjoorabian@scu.ac.ir.

3-Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran

Abstract: Charging electric vehicles in the distribution network is one of the most basic solutions for technical and economic management of energy distribution. In many traditional charging methods, the condition of fully charging cars when leaving the parking lot has always been a problem. But in this article, each car is intelligently charged only based on the amount of energy required to travel its daily journeys. In order to implement this smart method, owners of electric vehicles provide information about the number of trips and the length of their route to the parking charge management, and based on the specifications of the vehicles and the initial energy level of their battery when entering the parking lot, the amount The charge required for them is determined. Then, the charging manager plans the charging based on the tariff of energy consumption time, limitation of distribution network transformers, type of charge level selected (normal or fast) so that charging costs are minimized by observing technical and economic constraints. . The result of intelligent car charging in normal and fast charging conditions and in different limitations of the distribution network and in the presence or absence of load response program is compared with each other. YALMIP and MOSEK software have been used to solve the mixed integer linear programming model.

Keywords: Smart Charging Vehicles, demand Response program, mixed integer linear programming, Distribution Network.