



مدیریت انرژی در شبکه های توزیع هوشمند توسط بازیگر مجازی توان

ابوالفضل عرب پور^۱، پوریا معقولی^۲

^۱دانشجوی دکتری دانشگاه شاهد، abolfazl_arabpoor@yahoo.com

^۲استادیار دانشگاه شاهد، P.maghoulia@shahed.ac.ir

چکیده - حضور گسترده منابع تولید پراکنده در سیستم های قدرت بویژه در شبکه های توزیع، مدیریت این منابع انرژی را به مهمترین مسأله در بهره برداری از شبکه های الکتریکی مبدل کرده است. علاوه بر منابع تولیدی، عناصر ذخیره ساز انرژی و پاسخگویی بار نیز باید بدرستی مدیریت شده تا اهداف مدنظر از یک شبکه هوشمند در ارائه انرژی با کیفیت و بدون ایجاد آلاینده های زیست محیطی، فراهم گردد. از اینرو عوامل جدیدی مانند بازیگران مجازی توان (VPP) در شبکه های الکتریکی معرفی شده اند که وظیفه مدیریت انرژی در سطح شبکه های توزیع را برعهده خواهند داشت. در این مقاله روشی نوین در برنامه ریزی کوتاه مدت شبکه های توزیع الکتریکی در محیط شبکه هوشمند ارائه می گردد که براساس آن، یک VPP با در نظر گرفتن اطلاعات مربوط به پیش بینی توان تولیدی منابع تجدیدپذیر، قیمت انرژی در بازار روز بعد، قیود پخش بار شبکه و محدودیت منابع، اقدام به تعیین میزان تولید هر یک از منابع برای ۲۴ ساعت آینده می نماید. نتایج بدست آمده از شبیه سازی با الگوریتم PSO بیانگر عملکرد مناسب روش پیشنهادی است.

کلید واژه- شبکه هوشمند، مدیریت انرژی منابع، بازیگران مجازی توان (VPP)، الگوریتم PSO

بکارگیری منابع تجدیدپذیر عدم قطعیت در تولید آنها است. خروجی منابعی همچون فتوولتائیک و توربین های بادی کاملاً وابسته به شرایط آب و هوای بوده و باطبع مدیریت انرژی در شبکه را نیز با تغییرات اساسی مواجه می سازد، از اینرو ادغام این منابع در شبکه های الکتریکی نیاز به ملاحظات خاصی دارد. طی چند سال اخیر، محققین با معرفی شبکه هوشمند راهکارهای نوینی را در مدیریت صحیح DER در شبکه ای توزیع الکتریکی بیان کرده اند [۱].

در ساختار یک شبکه هوشمند، بازیگران برای فعالیت در حوزه انرژی نیاز به روش های کنترلی جدیدی مبتنی بر ساختار سلسله مراتبی خواهند داشت. بهره بردار مستقل شبکه (ISO) در بالاترین سطح قرار داشته و در پایین ترین سطح، سیستم های کنترلی مصرف کنندگان قرار خواهد داشت که براساس سناریوهای از پیش تعیین شده، تجهیزات الکتریکی آنها را

۱- مقدمه

رشد فزاینده منابع تولید پراکنده (DG) و ظهور مفاهیم جدیدی از قبیل تجدیدساختار در سیستم های انرژی الکتریکی، تغییرات گسترده ای را در بهره برداری از شبکه های الکتریکی بوجود آورده است. شبکه های الکتریکی آینده با انواع منابع انرژی توزیع شده (DER) مانند منابع تولیدی، عناصر ذخیره ساز انرژی و پاسخگویی بار سر و کار خواهد داشت. در آینده، مصرف کننده های شبکه قادر خواهند بود تا با کمک انواع منابع مقیاس کوچک بخشی از بار خود را تغذیه کنند و بخش دیگر را با توجه به قیمت لحظه ای (Real-time price) از طریق خرید انرژی در بازار انرژی تامین نمایند. با توسعه فناوری های جدید در تولید منابع تجدید پذیر، این منابع نیز نقش بسزایی در تامین بار شبکه های الکتریکی آینده خواهند داشت. مهمترین مشکل در

VPP در مدیریت منابع انرژی زیرمجموعه خود بدنبال حداقل- سازی هزینه با بکارگیری انواع DER خواهد بود. اما در عمل DER بطور فزاینده‌ای تعداد متغیرهایی که باید در توزیع اقتصادی منابع در نظر گرفته شوند افزایش می‌دهد، از اینرو ضروریست تا روش‌های نوینی در مدیریت انرژی معرفی شوند تا کارآمدی بیشتری در حل مسائل فوق داشته باشند [۳-۴]. مدیریت انرژی منابع در کوتاه‌مدت بخش مهمی از سیستم انرژی مدرن خواهد بود که هدف اصلی آن کاهش هزینه بهره‌برداری است [۵-۸]. این هزینه شامل هزینه تولید منابع بادی، فتوولتائیک، Fuel cell و عناصر ذخیره‌ساز می‌باشد [۹]. پاسخگویی بار و هزینه‌های مرتبط با آن نیز به عنوان یک منبع حائز اهمیت، می‌بایست در کنار سایر منابع در برنامه‌ریزی کوتاه- مدت شبکه لحاظ گردد [۱۰].

با توجه به مطالب بیان شده، در این مقاله هدف برنامه‌ریزی کوتاه مدت در بهره‌برداری از یک شبکه توزیع الکتریکی خواهد بود که علاوه بر بکارگیری منابع ذکر شده، قابلیت قطع بخشی از بار مصرف‌کنندگان را نیز در قالب برنامه پاسخگویی بار دارد.

۲- بیان مسأله

تابع هدف مسئله حداقل ساختن هزینه بهره‌برداری VPP می‌باشد که از چند قسمت تشکیل شده است. مسئله برنامه‌ریزی منابع انرژی به عنوان مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی آمیخته با عدد صحیح (MINLP) می‌باشد. بنابراین تابع هدف می‌تواند به صورت روابط زیر بیان شود.

معادله (۱) هزینه‌ای که باید با روش پیشنهادی حداقل شود را نشان می‌دهد:

$$\text{Objective Function} = F1 + F2 + F3 + F4 \quad (1)$$

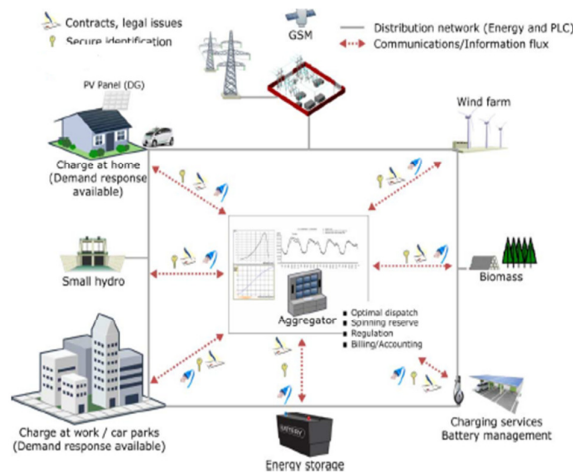
تابع F1 نشان‌دهنده کل هزینه بهره‌برداری VPP با DG (از زمان t=1 الی t=T) می‌باشد:

$$F1 = \sum_{t=1}^T \sum_{DG=1}^{N_{DG}} P_{DG}(DG,t) \times C_{DG}(DG,t) \quad (2)$$

$P_{DG}(DG,t)$ تولید توان اکتیو DG و $C_{DG}(DG,t)$ هزینه تولید DG در زمان t هستند.

مدیریت می‌نماید. در سطوح میانی نیز بازیگر مجازی توان^۱ VPP در نقش یک واسطه قادر خواهند بود با انعقاد قرارداد با مصرف‌کنندگان، در سناریوهایی برق را با قیمت و کیفیت متفاوت در اختیار آنها قرار دهد [۲].

VPP به عنوان یک جمع‌کننده منابع انرژی^۲ که می‌تواند هر نوع از انواع اشاره شده باشد، در نظر گرفته شده است. شکل ۱ طرحی از یک VPP در یک محیط شبکه هوشمند را نشان می‌دهد. ارتباط می‌تواند از طرق مختلفی مانند فناوری ارتباطی PLC^۳ یا سیستم سراسری موبایل^۴ (GMS) پیاده‌سازی شود.



شکل ۱: ارتباط VPP با سایر اجزا در یک شبکه هوشمند

¹Virtual Power Player

²Energy Aggregator

³Power Line Carrier

⁴Global System for Mobile

$$V_{i(t)} \times \sum_{j \in Li} V_{j(t)} (G_{ij} \sin(\theta_{i(t)} - \theta_{j(t)}) - B_{ij} \cos(\theta_{i(t)} - \theta_{j(t)})) - V_{i(t)}^2 \times B_{ii} = Q_{Gi(t)} - Q_{Di(t)} \quad (9)$$

$$Q_{Gi(t)} = \sum_{S=1}^{N_S^i} Q_{Grid(S,t)}^i \quad (10)$$

$$Q_{Di(t)} = \sum_{L=1}^{N_L^i} Q_{Load(L,t)}^i \quad (11)$$

در این روابط $V_{i(t)}$ و $V_{j(t)}$ به ترتیب دامنه ولتاژ باس i و j در زمان t ، $\theta_{i(t)}$ و $\theta_{j(t)}$ زاویه متناظر با ولتاژ باس i و j در زمان t ، G_{ij} و B_{ij} به ترتیب، قسمت حقیقی و موهومی ماتریس ادمیتانس متناظر با سطر i و ستون j ، $P_{Gi(t)}$ و $P_{Di(t)}$ به ترتیب توان اکتیو تولیدی و تقاضا در باس i در زمان t ، و همچنین $Q_{Gi(t)}$ و $Q_{Di(t)}$ به ترتیب توان راکتیو تولیدی و تقاضا در باس i در زمان t می باشند. N_S و N_B به ترتیب تعداد کل باس ها و تعداد باتری ها هستند.

محدودیت ولتاژ در باس ها:

$$V_i^{Min} \leq V_{i(t)} \leq V_i^{Max} \quad (12)$$

V_i دامنه ولتاژ باس i ام و V_i^{Max} ماکزیمم دامنه ولتاژ باس i ام می باشند.

محدودیت حرارتی خطوط در خط k ام در زمان t :

$$S_{K(t)} \leq S_K^{Max} \quad (13)$$

$S_{k(t)}$ توان ظاهری خط k ام در زمان t و S_K^{Max} ماکزیمم توان ظاهری خط k ام هستند.

قیود برابری و نابرابری DG:

$$P_{DG(DG,t)} \leq P_{DGmax(DG,t)} \quad (14)$$

$P_{DGmax(DG,t)}$ ماکزیمم توان تولیدی DG در زمان t است.

قیود برابری و نابرابری باتری ها:

الف) تعادل توان در باتری:

$$P_{StorageBattery(S,t)} = P_{StorageBattery(S,t-1)} - P_{StorageBatteryDischarge(S,t)} + P_{StorageBatteryCharge(S,t)} \quad (15)$$

تابع F2 نشان دهنده هزینه VPP که مربوط به انرژی خریداری شده از شبکه است.

$$F2 = \sum_{t=1}^T P_{Grid(t)} \times C_{Grid(t)} \quad (3)$$

$P_{Grid(t)}$ توان اکتیو مورد نیاز از شبکه و $C_{Grid(t)}$ قیمت انرژی شبکه در زمان t می باشند.

تابع F3 نشان دهنده هزینه شارژ و دشارژ باتری های الکتریکی می باشد. این تابع هدف به دو ترم تقسیم می شود. هنگامی که باتری ها برای شارژ انرژی الکتریکی خریداری می کنند، و هنگامی که VPP مقداری از انرژی باتری ها را برای تامین تقاضای شبکه استفاده می کند (دشارژ). دشارژ باتری ها معرف هزینه برای VPP و شارژ باتری ها آوردن سود و منفعت می باشد.

$$F3 = \sum_{t=1}^T \sum_{S=1}^{N_S} \times C_{Storage Battery Discharge(S,t)} - P_{Storage Battery Charge(S,t)} \times C_{Storage Battery Charge(S,t)} \quad (4)$$

$P_{Storage Battery Discharge(S,t)}$: توان دشارژ باتری

$P_{Storage Battery Charge(S,t)}$: توان شارژ باتری

$C_{Storage Battery Discharge(S,t)}$: قیمت انرژی دشارژ باتری

$C_{Storage Battery Charge(S,t)}$: قیمت انرژی شارژ باتری

تابع F4 نشان دهنده هزینه مربوط به پاسخگویی بار می باشد:

$$F4 = \sum_{t=1}^T \sum_{DR=1}^{N_{DR}} P_{DR(L,t)} \times C_{DR(L,t)} \quad (5)$$

$P_{DR(L,t)}$ کاهش بار و $C_{DR(L,t)}$ هزینه پاسخگویی بار i ام در زمان t می باشند.

قیود برابری و نابرابری شبکه:

$$V_{i(t)}^2 \times G_{ii} + V_{i(t)} \times \sum_{j \in Li} V_{j(t)} (G_{ij} \cos(\theta_{i(t)} - \theta_{j(t)}) + B_{ij} \sin(\theta_{i(t)} - \theta_{j(t)})) = P_{Gi(t)} - P_{Di(t)} \quad (6)$$

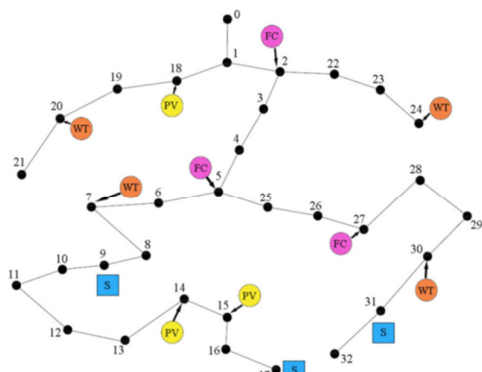
$$P_{Gi(t)} = \sum_{DG=1}^{N_{DG}^i} P_{DG(DG,t)}^i + P_{Grid(t)} + \sum_{S=1}^{N_S^i} P_{Storage Battery Discharge(S,t)}^i + \sum_{L=1}^{N_L^i} P_{DR(L,t)}^i \quad (7)$$

$$P_{Di(t)} = \sum_{L=1}^{N_L^i} P_{Load(L,t)}^i + \sum_{S=1}^{N_S^i} P_{Storage Battery Charge(S,t)}^i \quad (8)$$

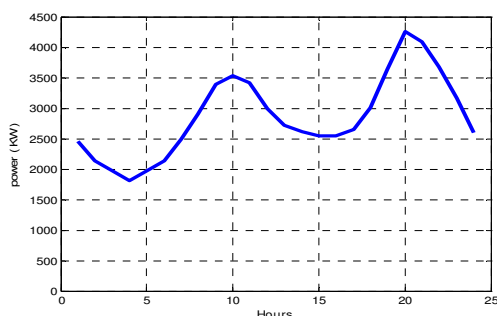
۳- سناریوی مورد مطالعه

نمونه مورد مطالعه در این مقاله با استفاده از یک شبکه توزیع ۳۳ باس در شکل ۲ نشان داده شده است. مقاومت، امپدانس و ظرفیت حرارتی هر یک از شاخه‌ها در [۱۱] ارائه شده است.

این شبکه شامل ۱۰ DG (۳ عدد فتوولتائیک، ۴ عدد توربین بادی و ۳ عدد سلول سوختی (FC)) و نیز ۳ عدد باتری می‌باشد. باس صفر به عنوان باس تامین انرژی از شبکه به شمار می‌رود. قیمت انرژی در شبکه در جدول ۱ نشان داده شده است، همچنین منحنی بار الکتریکی در ۲۴ ساعت در شکل ۳ نشان داده شده است. اطلاعات لازم برای DG، اعم از توان تولیدی و قیمت توان تولیدی را در [۱۱] ارائه شده است. بازه زمانی در نظر گرفته شده در این مطالعه ۲۴ ساعته می‌باشد.



شکل ۲: شبکه توزیع ۳۳ باس مورد مطالعه



شکل ۳: منحنی کل بار الکتریکی در شبکه مورد مطالعه

$P_{StorageBattery(S,t)}$ توان ذخیره شده باتری S در زمان t می‌باشد.

(ب) محدودیت انرژی باتری در زمان t

$$P_{StorageBattery(S,t)} \leq P_{BatteryCapacity(S)} \quad (16)$$

$P_{BatteryCapacity(S)}$ ظرفیت باتری S است.

ماکزیمم محدودیت دشارژ و شارژ در هر باتری S

$$P_{StorageBatteryDischarge(V,t)} \leq P_{DischargeLimit(S,t)} \times X_{(S,t)}, X_{(S,t)} \in \{0,1\} \quad (17)$$

$P_{DischargeLimit(V,t)}$ محدودیت دشارژ باتری S در زمان t می‌باشد.

$$P_{StorageBatteryCharge(S,t)} \leq P_{ChargeLimit(S,t)} \times Y_{(S,t)}; Y_{(S,t)} \in \{0,1\} \quad (18)$$

$P_{ChargeLimit(S,t)}$ محدودیت شارژ باتری S در زمان t است.

(ج) عدم امکان شارژ و دشارژ باتری در یک زمان:

$$X_{(S,t)} + Y_{(S,t)} \leq 1 \quad (19)$$

$X_{(S,t)}$ و $Y_{(S,t)}$ به ترتیب متغیر باینری شارژ و دشارژ خودروی S در زمان t می‌باشند.

(د) ماکزیمم محدودیت دشارژ باتری S با در نظر گرفتن تعادل باتری:

$$P_{StorageBatteryDischarge(S,t)} - P_{StorageBattery(S,t-1)} \leq 0 \quad (20)$$

(ه) ماکزیمم محدودیت شارژ باتری S با در نظر گرفتن ظرفیت باتری و وضعیت شارژ قبلی:

$$P_{StorageBatteryCharge(S,t)} + P_{StorageBattery(S,t-1)} \leq P_{BatteryCapacity(V)} \quad (21)$$

(و) وضعیت اولیه باتری:

$$P_{StorageBattery(S,t=0)} = 0 \quad (22)$$

پاسخگویی بار در این مقاله شامل کاهش بار می باشد. مقدار کاهش بار در باسها حداکثر ۱۰ درصد بار در هر ساعت است. هزینه پاسخگویی بار ۰.۱ یورو به ازای هر KWH در تمامی ساعات می باشد.

قبل از بررسی نتایج در ابتدا شبکه را بدون منابع تجدیدپذیر و باتری ها آنالیز پخش بار می گردد. شبیه سازی این بخش از آن جهت دارای اهمیت است که بعد از بدست آوردن نتایج می توان سناریوها را با هم مقایسه کرد. هزینه بهره برداری در این حالت (شبکه بدون حضور منابع) برابر با ۷۵۹۷.۲ یورو شده است.

حال برنامه ریزی بهینه منابع انرژی با توجه به تابع هدف تعریف شده انجام می گیرد. VPP برنامه ریزی بهینه منابع را به منظور تامین منحنی بار ارائه شده در شکل ۳ تعیین خواهد کرد. هزینه بهره برداری برنامه ریزی بهینه منابع ۷۰۹۱ یورو شده است، که از این مقدار، ۶۱۱۰.۹ یورو مربوط به شبکه، ۸۵۶.۴ یورو مربوط به بهره برداری از DG ها، ۱۱۰.۹ یورو هزینه پاسخگویی بار و ۲۱ یورو هزینه دشارژ باتری ها می باشد. شکل ۴ برنامه ریزی بهینه را با حضور DG و توان دریافتی از شبکه نشان می دهد.

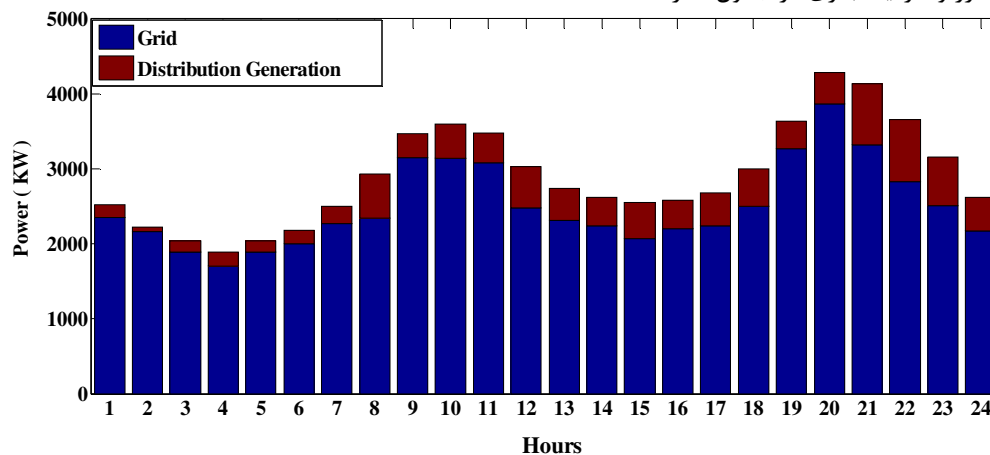
جدول ۱: قیمت انرژی در شبکه

ساعت	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
قیمت (€/kwh)	۰.۰۷	۰.۰۶	۰.۰۶	۰.۰۶	۰.۰۶	۰.۰۷	۰.۰۷	۰.۰۸
ساعت	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶
قیمت (€/kwh)	۰.۰۹	۰.۱	۰.۱	۰.۱	۰.۰۹	۰.۰۹	۰.۱	۰.۱
ساعت	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
قیمت (€/kwh)	۰.۱۲	۰.۱۳	۰.۱۵	۰.۱۶	۰.۱۶	۰.۱۵	۰.۱۳	۰.۱

جدول ۲: مشخصات باتری نصب شده در شبکه

ظرفیت باتری	نرخ دشارژ	نرخ شارژ
200 KWH	25 KWH	50 KWH

نرخ شارژ و دشارژ و ظرفیت باتری در جدول ۲ ارائه شده است.

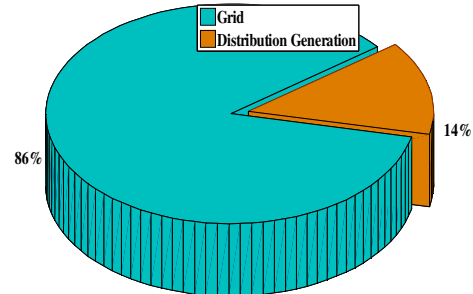


شکل ۴: برنامه ریزی بهینه منابع انرژی

نتایج حاصل از شبیه سازی این سناریو آمده است.

شکل ۵ درصد تامین انرژی مصرفی را توسط DG و شکل ۶ توان تولیدی هر نوع از DG را در شبکه نشان می دهد. در جدول ۳

تلفات (kw)	هزینه دشارژ باتری (€)	هزینه پاسخگویی بار (€)	هزینه DG (€)	هزینه شبکه (€)	هزینه بهره برداری (€)	
۲۵۹۷	-----	-----	-----	۷۵۹۷	۷۵۹۷	شبکه معمول
۱۸۸۴	۲۱	۱۱۰	۸۵۶	۶۱۱۰	۷۰۹۱	شبکه هوشمند

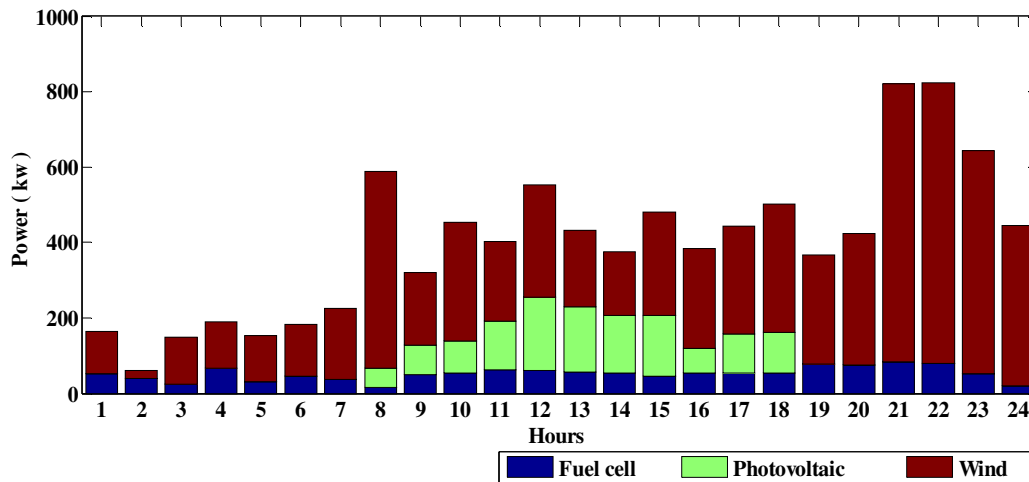


شکل ۵: درصد تامین انرژی مصرفی

دلیل اصلی کاهش تلفات در سناریوی دوم حضور منابع تولید پراکنده در سطح شبکه توزیع است که موجب می گردند بخشی از بار بصورت محلی تامین گردد.

با توجه به جدول ۳ هزینه بهره برداری نسبت به شبکه معمول کاهش یافته است. مقدار تلفات توان اکتیو هم کاهش چشمگیری داشته است.

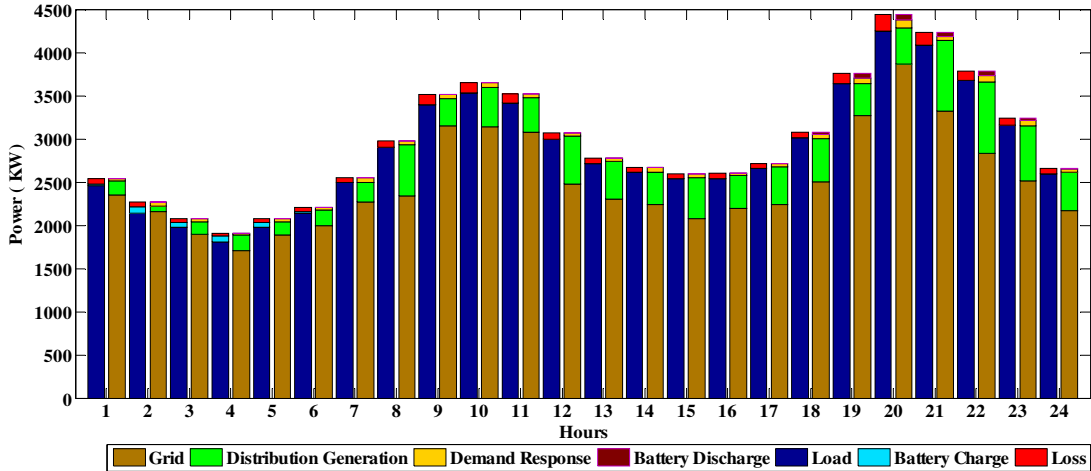
جدول ۳: نتایج حاصل از شبیه سازی



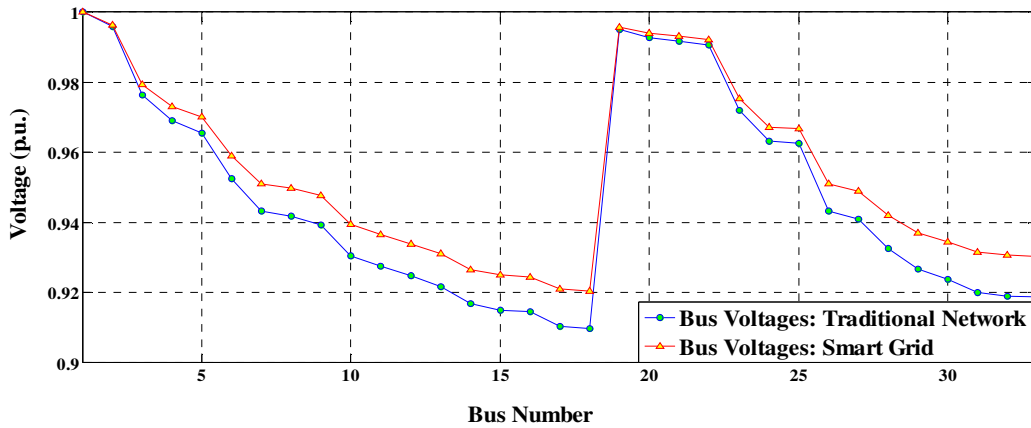
شکل ۶: توان تولیدی هر نوع از منابع تولید پراکنده

برای این مقایسه ساعت ۲۰، با توجه به منحنی بار که ساعت پیک بار می باشد در نظر گرفته شده است. همانطور که از شکل واضح است پروفیل ولتاژ بهبود کافی داشته است.

شکل ۷ همانطور که مشخص است تعادل توان در هر ساعت در شبکه را بر اساس روابط (۷) نشان می دهد. در شکل ۹ پروفیل ولتاژ برای این حالت با شبکه معمول مقایسه شده است.



شکل ۷: منحنی تعادل توان شبکه در هر ساعت



شکل ۸: پروفیل ولتاژ در هر دو حالت شبکه معمول و هوشمند

۴- نتیجه گیری

تولید منابع و در نتیجه کاهش قیمت برق، عملکرد شبکه توزیع را نیز از لحاظ فنی بهبود دهد. نتایج این مقاله نشان می‌دهند که VPP قادر خواهد بود تا اهداف مدنظر از یک شبکه توزیع هوشمند را بخوبی فراهم سازد.

ادغام منابع انرژی جدید، مانند تولیدات پراکنده (DG) مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه‌های توزیع چالش جدیدی را ایجاد نموده است. در زمینه شبکه‌های هوشمند آینده، مدیریت موثر این منابع انرژی توسط VPP (به عنوان یک جمع کننده این منابع) می‌تواند در نظر گرفته شود. در این صورت VPP با کنترل و مدیریت محلی منابع قادر خواهد بود تا علاوه بر کاهش هزینه



انجمن علمی شبکه هوشمند انرژی ایران

کنفرانس شبکه های هوشمند ۹۲، خوزستان

www.SGC2013.ir

۲۷-۲۶ آذر ماه ۱۳۹۲



پروفسور فنی مهندسی شهید عباسپور



دانشگاه شهید بهشتی

مراجع

- [1] A. Bose, "Smart transmission grid applications and their supporting infrastructure," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 1, no. 1, pp. 11–19, 2010.
- [2] Z. Vale *et al.*, "Towards a future SCADA," in *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, 2009, vol. 1–8, pp. 1894–1900.
- [3] E. Lightner and S. Widergren, "An orderly transition to a transformed electricity system," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 1, no. 1, pp. 3–10, 2010.
- [4] Z. Vale *et al.*, "Computational intelligence applications for future power systems," in *Computational Intelligence for Engineering Systems*, A. Madureira, J. Ferreira, and Z. Vale, Eds. Dordrecht, The Netherlands: Springer, 2011, vol. 46, pp. 176–193.
- [5] R. Doucette and M. McCulloch, "Modeling the prospects of plug-in hybrid electric vehicles to reduce CO2 emissions," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 7, pp. 2315–2323, Jul. 2011.
- [6] A. Saber and G. Venayagamoorthy, "Efficient utilization of renewable energy sources by gridable vehicles in cyber-physical energy systems," *IEEE Syst. J.*, vol. 4, no. 3, pp. 285–294, 2010.
- [7] K. Clement-Nyns, E. Haesen, and J. Driesen, "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, 2010.
- [8] A. Saber and G. Venayagamoorthy, "Intelligent unit commitment with vehicle-to-grid—A cost-emission optimization," *J. Power Sources*, vol. 195, no. 3, pp. 898–891, Feb. 2010.
- [9] J. Soares *et al.*, "An optimal scheduling problem in distribution networks considering V2G," in *Proc. IEEE Symp. Series Comput. Intell. (CIASG)*, Apr. 11–15, 2011.
- [10] Z. Vale, H. Morais, and H. Khodr, "Intelligent multi-player smart grid management considering distributed energy resources and demand response," in *Proc. IEEE Power Energy Soc.*, Minneapolis, MN, Jul. 25–29, 2010.
- [11] Sousa, Tiago, *et al.* "Intelligent energy resource management considering vehicle-to-grid: A simulated annealing approach." *Smart Grid, IEEE Transactions on* 3.1 (2012): 535–542.