

بهینه‌سازی هزینه توان مصرفی مراکز داده توزیع شده تحت بازارهای متفاوت به همراه بافری انرژی

شاهین علیزاده مقدم، محسن اصیلی، سهیل کعبه پهنه کلایی

دانشکده برق دانشگاه شاهرود

شاهرود، ایران

shaahinalizadeh1@gmail.com, m.assili@shahrood.ac.ir, Soheilkaabe@gmail.com

چکیده - تعداد مراکز داده در سراسر دنیا به صورت روزافزون در حال افزایش است. هزینه بالای توان مصرفی این مراکز گول پیکر باعث کاهش سود ارائه‌دهنده اینترنت می‌شود. بنابراین به مسئله مهمی برای مالکان مرکز داده تبدیل شده است. معمولاً مراکز داده به صورت توزیع شده در موقعیت‌های مختلف ساخته می‌شوند که تحت بازارهای برق متفاوت واقع شده‌اند. قیمت برق در شبکه هوشمند به صورت متغیر با زمان و وابسته به موقعیت است. در این مقاله، سیستمی با چند مرکز داده توزیع شده مجهز به باتری‌های ظرفیت بالا در نظر گرفته می‌شود. مسئله بهینه‌سازی را طوری مدل می‌کنیم تا علاوه بر توزیع بهینه حجم بار بین مراکز داده، با استفاده از بافری انرژی هزینه توان مصرفی را کاهش دهد. به این صورت که در ساعات‌هایی که قیمت برق پایین است، باتری شارژ شده و در ساعات‌های گرانی قیمت برق، باتری دشارژ می‌شود. مسئله بهینه‌سازی استفاده از برنامه تخصصی گمز شبیه‌سازی می‌شود. در نهایت مشاهده می‌شود که هزینه توان مصرفی به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش و الگوی مصرف توان بهبود می‌یابد.

کلید واژه- مرکز داده، توزیع حجم بار، کیفیت سرویس‌دهی، بافری انرژی

به دلیل فراهم کردن قابلیت اطمینان و کاهش تأخیر برای مشترکین، به صورت توزیع شده در نواحی مختلف ساخته می‌شوند [۴]. سرورهای رابطی وجود دارند که درخواست‌ها مشترکین ابتدا به این سرورها انتقال می‌یابد و سپس سرورهای رابط حجم‌بار را بین مراکز داده توزیع می‌کنند. برای بهینه‌سازی هزینه مرکز داده سرورهای رابط برنامه‌ریزی می‌شوند تا حجم بارها را به صورت اقتصادی بین مراکز داده تقسیم کنند. به این ترتیب که قیمت برق در هر موقعیت جغرافیایی پایین‌تر باشد، در صورت رعایت کیفیت سرویس‌دهی، انتقال حجم‌بار به آن مرکز داده در اولویت قرار بگیرد [۶ و ۵].

قیمت برق در شبکه هوشمند، اصولاً متغیر با زمان است. به این صورت که در ساعاتی که مصرف برق کم است، قیمت برق نیز پایین بوده و در اوج ساعات مصرف برق، قیمت آن بیشترین مقدار خود را دارا می‌باشد. بنابراین با استفاده از روش بافری انرژی می‌توان هزینه برق را کاهش داد. به این صورت که زمانی که قیمت برق پایین است توان ذخیره شود و در ساعات گرانی برق، توان ذخیره‌شده به مرکز داده تحویل داده شود. در حال حاضر این ذخیره توان می‌تواند با استفاده از باتری صورت گیرد و

۱- مقدمه

مرکز داده از سه بخش اصلی تشکیل شده است که عبارتند از، تکنولوژی اطلاعات، قسمت خنک‌کننده و تکنولوژی پشتیبانی. سرورها در اتاق کامپیوتر در اثر فعالیت گرما تولید می‌کنند که دمای محیط را افزایش می‌دهد. ضریب عملکرد سرورها با افزایش دما کاهش می‌یابد. بنابراین واحد خنک‌کننده موظف است تا مانع افزایش دما از حد مشخصی شود [۱].

برای ارزیابی بازدهی توان از نرخ تأثیر بهره‌وری توان (PUE) استفاده می‌شود. PUE عبارت است از نسبت کل توان مصرفی مرکز داده به توان مصرفی قسمت IT. بر اساس آمارها PUE در حدود ۲ است. به عبارتی توان مصرفی سرورها ۵۰٪ کل توان مصرفی مرکز داده را شامل می‌شود. روش‌های مختلفی برای کاهش این نرخ در مقالات ارائه شده است [۲ و ۳]. سه روش برای کاهش هزینه توان مصرفی وجود دارد که عبارت است از: کاهش توان مصرفی، مدیریت هزینه توان و مدیریت بافری انرژی. روش اول مربوط به سطح داخلی مرکز داده است. مراکز داده

سرور رابط i به مرکز داده j در زمان t انتقال می‌یابد. مراکز داده نیز به شبکه متصل هستند، در حالی که یک باتری برای هر مرکز داده نیز جهت بافری انرژی در نظر گرفته می‌شود.

۱-۲- تابع هدف

تابع هزینه کل مراکز داده است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Min}_{ut, qt, \lambda_{ij}(t), nj(t)} \sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^V (Pr_j(t) \cdot Ptj(t) + Pr_j(t) \cdot \frac{ut}{\theta} + Pr_bj(t) \cdot qj(t)) \quad (1)$$

در رابطه بالا، متغیرهای مسئله y_{ij}, nj, u_{ij}, q است. Y_{ij} نیز معرفی شد. nj تعداد سرورهای فعال مرکز داده j در ساعت t است. در رابطه بالا، $Ptj(t)$ قیمت برق در موقعیت جغرافیایی j در زمان t است. $Ptj(t)$ توانی که مرکز داده j از شبکه دریافت می‌کند. ut مقدار توان شارژ شده باتری در موقعیت j و در ساعات t است و qt مقدار توان دشارژ شده در موقعیت j و در زمان t است. در بالا $Pr_j(t)$ نشان‌دهنده هزینه انرژی بافری در باتری است که در بخش مدل کردن هزینه باتری توضیح داده می‌شود. هر سرور با فرکانس خاصی، پردازش اطلاعات را انجام می‌دهد. برای سادگی کار فرض می‌شود که کل سرورها در هر سه مرکز داده با فرکانس و توان مصرفی یکسان کار می‌کنند.

۲-۲- محدودیت‌ها

۱-۲-۲- مدل بار محاسباتی

هر مشترکی که با اینترنت کار می‌کند، حجم بارهایی به سرورهای رابط ارسال می‌شود. این سرورها وظیفه توزیع حجم بارها را به مراکز داده دارند. بنابراین نرخ بار محاسباتی که به هر سرور توزیع‌کننده می‌رسد بین مراکز داده تقسیم می‌شود که آن به صورت فرمول زیر نوشته می‌شود:

$$\sum_{j=1}^V \lambda_{ij}(t) = li(t) \quad (2)$$

$$\lambda_{ij}(t) \in N, i = 1, \dots, C$$

که واحد $y_{ij}(t)$ ، (درخواست/ثانیه) است، همچنین $li(t)$ نرخ حجم بار ارسالی به سرور رابط i است.

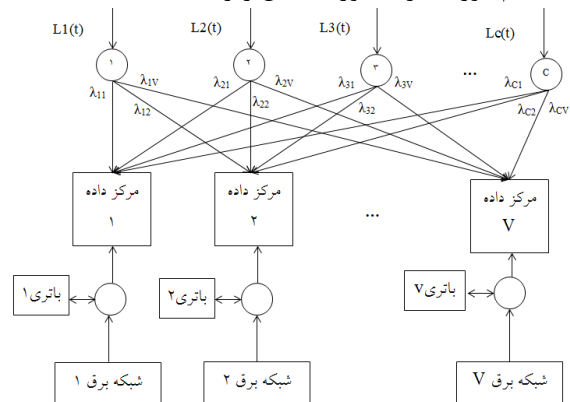
۲-۲-۲- محدودیت QoS

در آینده‌ای نه‌چندان دور می‌تواند با استفاده از خودروهای برقی که مالکانشان کارمندان مراکز داده هستند، صورت گیرد. همچنین به دلیل انعطاف‌پذیری خودروهای برقی و مراکز داده توزیع‌شده از لحاظ توان مصرفی، این دو به صورت مشترک می‌توانند جهت تنظیم فرکانس به کار گرفته شوند [۹۰۸]. روش بافری انرژی علاوه بر کاهش هزینه توان مصرفی مرکز داده، الگوی مصرف مرکز داده را بهبود می‌بخشد و توان دریافت شده از شبکه در ساعات اوج کاهش می‌یابد.

در این مقاله، سه مرکز داده به صورت توزیع‌شده در نظر گرفته می‌شود. حجم بار بین مراکز داده با رعایت کیفیت سرویس‌دهی به صورت بهینه توزیع می‌شود. همچنین با توجه به اینکه قیمت برق متغیر با زمان است، با استفاده از باتری هزینه توان مصرفی را کاهش و الگوی مصرف برق را بهبود می‌بخشیم.

۲- مدل‌سازی مسئله

در این مقاله، سیستمی در نظر گرفته می‌شود که دارای تعدادی مرکز داده است در محیط بازار برق چندگانه واقع شده‌اند. سرورهای رابط، درخواست را که از مشترکین اینترنت دریافت می‌کنند، بین مراکز داده توزیع می‌کنند. همچنین هر مرکز داده دارای یک باتری با ظرفیت بالا است. مقداری از ظرفیت این باتری جهت قابلیت اعتماد مرکز داده و مابقی ظرفیت جهت بافری توان استفاده می‌شود تا هزینه برق کاهش یابد. سیستم مورد نظر به صورت شکل زیر است:



شکل ۱. سیستم کلی

در سیستم بالا تعداد مراکز داده با j و تعداد سرورهای رابط را با i نشان داده می‌شود. $Li(t)$ نرخ حجم باری است که به سرور رابط i در زمان t می‌رسد. $\lambda_{ij}(t)$ نرخ حجم باری است که از

$$Pr b(t) = \frac{PI}{r0.nt.C} \quad (6)$$

PI قیمت باتری، nt تعداد شارژ و دشارژها در طول عمر باتری و C حداکثر ظرفیت باتری است. r0 میانگین نرخ ظرفیت دشارژ است [۷].

۲-۲-۵- محدودیت شارژ و دشارژ باتری

هر باتری دارای حداکثر نرخ شارژ شدن و حداکثر نرخ دشارژ شدن هستند که با رابطه‌های زیر نشان داده می‌شوند:

$$0 \leq u_j(t) \leq U_j \quad (7)$$

$$0 \leq q_j(t) \leq Q_j \quad (8)$$

در رابطه (۷)، ut مقدار انرژی شارژ شده در باتری و Ut حداکثر نرخ شارژ شدن است. در رابطه (۸)، qt مقدار انرژی شارژ شده در باتری و Qt حداکثر نرخ دشارژ شدن باتری است.

۲-۲-۶- محدودیت سطح توان باتری

هر باتری دارای حداکثر ظرفیت ذخیره‌سازی است و با عملیات شارژ و دشارژ، سطح توان باتری تغییر می‌کند. رابطه زیر تغییر سطح توان باتری را نشان می‌دهد:

$$X_j(t+1) = X_j(t) + u_j(t) - q_j(t) \quad (9)$$

که در رابطه بالا، Xt سطح توان باتری در ساعت t ام است. همان‌طور که گفته شد این باتری برای قابلیت اطمینان برق‌رسانی به مرکز داده و بافری انرژی مورد استفاده قرار می‌گیرد. محدودیت سطح توان باتری به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_e \leq X_j(t) \leq C \quad (10)$$

در فرمول بالا Ce مقدار توان لازم برای مواقع اضطراری است و C ظرفیت باتری است.

۲-۲-۷- محدودیت تعادل توان:

در این مسئله باید یک تعادل توانی بین توان دریافت شده از شبکه توسط مرکز داده و توان مصرفی مرکز داده و توانی که مرکز داده از باتری می‌گیرد، برقرار کنیم:

$$P_{sj}(t) = n_j(t) \cdot P_{oj}(t) \quad (11)$$

$$P_{tj}(t) = P_{sj}(t) - q_j(t) \quad (12)$$

که P_{sj}(t) توان مصرفی مرکز داده ز در زمان t است و P_{tj}(t) توانی است که مرکز داده ز در زمان t از شبکه برق دریافت می‌کند.

۲-۲-۸- محدودیت شارژ و دشارژ باتری به‌طور

هم‌زمان:

در این مقاله برای مدل‌سازی تأخیر صف‌بندی از مد صف-بندی M/M/n استفاده می‌کنیم. بر اساس قوانینی که بر مراکز داده اعمال می‌شود، این مدت‌زمان باید کمتر از مقدار مشخص باشد که به آن کیفیت سرویس‌دهی (QoS) گفته می‌شود [۹]. این تأخیر را با استفاده از رابطه زیر نشان می‌دهیم:

$$D_j(t) = \frac{I}{n_j(t) \mu_j(t) - \sum_{i=1}^c \lambda_{ij}(t)} \quad (3)$$

$$\lambda_{ij}(t) \in N$$

که در فرمول بالا λ_{ij}(t) نرخ سرویس‌دهی سرورهای مرکز داده z در زمان t است. بر اساس کیفیت سرویس‌دهی، رابطه زیر باید برقرار باشد:

$$D_j(t) < D_{dy} \quad (4)$$

که D_{dy} زمان مشخص شده توسط SLA است.

در رابطه (۳) دو متغیر n_j(t) و y_{ij}(t) در مخرج کسر واقع شده‌اند و قید بالا غیرخطی است. بنابراین باید قید بالا خطی-سازی شود.

۲-۲-۳- خطی سازی محدودیت تأخیر انتقال

با ادغام رابطه‌ها (۳) و (۴)، آن‌ها را به صورت زیر می‌توان نوشت:

$$\frac{I}{D_{dy}} \leq n_j(t) \cdot \mu_j(t) - \sum_{i=1}^c \lambda_{ij}(t) \quad (5)$$

$$j = 1, \dots, V$$

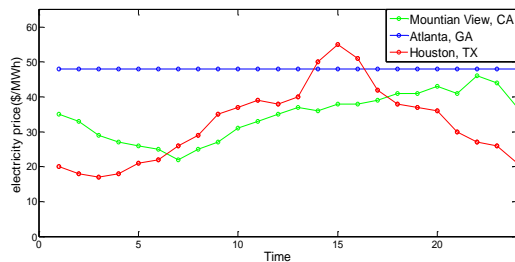
همان‌طور که در رابطه (۵) دیده می‌شود، متغیرها در صورت رابطه قرار گرفتند. بنابراین رابطه بالا یک رابطه خطی است.

۲-۲-۴- مدل هزینه باتری

باتری‌ها دارای طول عمر محدود هستند. برای استفاده از UPS معمولاً از باتری‌های لیتیوم یون استفاده می‌شود. طول عمر باتری به سه عامل بستگی دارد که عبارت است از: تعداد شارژ و دشارژ در طول عمر، عمق دشارژ و دما.

هر چه عمق دشارژ کمتر باشد، تعداد شارژ و دشارژها در طول عمر بیشتر می‌شوند. به‌عنوان مثال، اگر میانگین نرخ شارژ باتری در طول عمر ۲۰٪ ظرفیتش باشد، تعداد شارژ و دشارژ آن ۲۸۰۰ بار است و در صورتی که میانگین نرخ شارژ در طول عمر ۱۰۰٪ باشد، تعداد شارژ و دشارژ باتری در طول عمرش برابر ۴۰۰ مرتبه است. هزینه باتری برحسب کیلووات ساعت به صورت زیر محاسبه می‌شود:

اطلاعات مربوط به سرورها در جدول ۱ نشان داده می‌شود. N_j تعداد کل سرورهای هر مرکز داده است. برای سادگی، فرض می‌شود همه سرورهای مراکز داده با فرکانس یکسان عمل می‌کند.



شکل ۲. قیمت برق در ساعات مختلف

جدول ۱: پارامترهای مربوط به سرورها

J	N_j	P_{oj}	Ddy	μ
۱	۵۰۰۰۰	۱۳۴	۰/۰۰۱	۲
۲	۲۰۰۰۰	۱۳۴	۰/۰۰۱	۲
۳	۴۰۰۰۰	۱۳۴	۰/۰۰۱	۲

جدول ۲: نرخ حجم بار سرور رابط

i/t	۱_۸	۹_۱۸	۱۹_۲۴
۱	۳۰۰۰۰	۴۰۰۰۰	۲۵۰۰۰
۲	۴۰۰۰۰	۵۰۰۰۰	۳۵۰۰۰
۳	۴۰۰۰۰	۵۵۰۰۰	۴۰۰۰۰
۴	۳۰۰۰۰	۳۵۰۰۰	۲۰۰۰۰

جدول ۲ نرخ درخواست‌های ارسالی به سرورهای رابط در ساعات‌های مختلف را نشان می‌دهد. جدول ۳ نیز مشخصات باتری استفاده‌شده در دو مرکز داده واقع در مونتین و هوستون را نشان می‌دهد. P_1 قیمت باتری است. μ نرخ انجام کار سرورهاست که job/s است. C و C_e به ترتیب حداکثر ظرفیت باتری و حداقل مقداری از ظرفیت باتری که جهت قابلیت اعتماد سیستم در نظر گرفته می‌شود. بنابراین سطح توان باتری باید حداقل برابر با C_e باشد. محدودیت زمان تأخیر (Ddy) برابر ۱ ms است.

جدول ۳: پارامترهای مربوط به باتری

نماد	Θ	P_1	C	C_e	n_t
مقادیر	۰/۹۸	۱۶۰۰۰۰	۱۶۰۰۰	۲۰۰۰	۲۰۰۰

شارژ و دشارژ باتری به صورت هم‌زمان غیرممکن است. این محدودیت به صورت رابطه زیر نشان داده می‌شود:

$$u_j(t) \cdot q_j(t) = 0 \quad (13)$$

رابطه بالا به این منظور است که یا یکی از متغیرها یا هر دو آن‌ها در یک زمان باید مساوی صفر باشد. رابطه بالا حاصل ضرب دو متغیر مسئله بهینه‌سازی است که رابطه‌ای غیرخطی است. برای خطی‌سازی این رابطه، متغیر باینری $\alpha_j(t)$ را، تعریف می‌کنیم. حال رابطه (۱۳)، به دو رابطه زیر تبدیل می‌شود:

$$u_j(t) \leq U_j \cdot \alpha_j(t) \quad (14)$$

$$q_j(t) \leq (1 - \alpha_j(t)) \cdot Q_j \quad (15)$$

$u_j(t)$ و $q_j(t)$ متغیرهای مثبت هستند. همچنین U_j و Q_j به ترتیب حداکثر نرخ شارژ و دشارژ باتری است. در رابطه (۱۴)، اگر $\alpha_j = 1$ ، کمتر یا مساوی حداکثر توانی است که می‌تواند در یک ساعت جذب کند. حال می‌تواند صفر یا همان حداکثر توان باشد. در همان زمان، در رابطه (۱۵)، q کمتر مساوی صفر می‌باشد و چون q متغیر مثبت است، بنابراین مساوی صفر است. حال اگر $\alpha_j = 0$ ، عکس این قضیه رخ می‌دهد و $u = 0$ می‌شود و q می‌تواند بین صفر تا حداکثر مقدار توان دشارژ شده متغیر باشد.

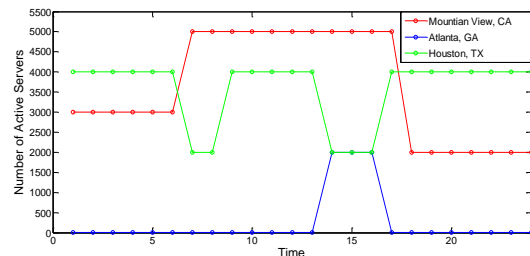
۳- مطالعه موردی

در این مقاله سه مرکز داده در سه ایالت مختلف تحت بازارهای متفاوت بررسی می‌شوند. مراکز داده در مناطق مونتین، آتلانتا و هوستون به ترتیب در ایالت‌های کالیفرنیا، تگزاس و جورجیا واقع شده‌اند. شکل ۲ قیمت‌ها را در سه ایالت نشان می‌دهد. قیمت برق در دو منطقه مونتین و هوستون، وابسته به زمان است و در ساعات مختلف، متفاوت است. در حالی قیمت برق در منطقه آتلانتا در همه ساعات یکسان است. قیمت برق در مناطق مونتین و هوستون به ترتیب از بازارهای روز قبل ایالت‌های کالیفرنیا [۱۱] و تگزاس [۱۲] گرفته شده است. در ایالت جورجیا قیمت برق برای صنایع بزرگ به صورت عقد قراردادهای دوجانبه مشخص می‌شود که $48 \text{ \$/MWh}$ در نظر گرفته می‌شود [۱۳].

با توجه به اینکه قیمت برق در مناطق مونتین و هوستون متغیر با زمان است، برای مرکز داده در این دو منطقه، یک باتری با ظرفیت بالا جهت بافری انرژی در نظر گرفته می‌شود.

۴- نتایج شبیه‌سازی

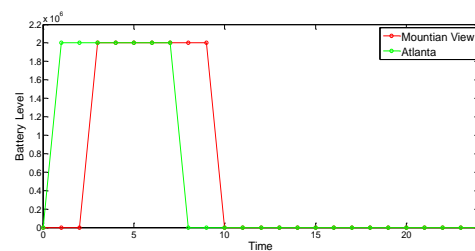
در این بخش نتایج شبیه‌سازی را تحلیل می‌کنیم. شکل ۳ تعداد سرورهای فعال هر مرکز داده را نشان می‌دهد.



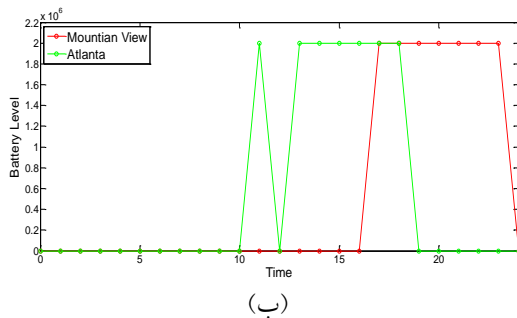
شکل ۳. تعداد سرورهای فعال

همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، حجم بار ابتدا به مرکز داده‌ای انتقال می‌یابد قیمت برق پایین باشد، در حالی که کیفیت سرویس‌دهی نیز در نظر گرفته شده است. الگوی شارژ و دشارژ باتری‌ها در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده می‌شود. شکل ۶ نیز سطح توان باتری را نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود حداقل سطح توان باتری برای قابلیت اعتماد سیستم رعایت شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود باتری در مرکز داده مونتین از ساعت ۳ الی ۹ شارژ می‌شود و ظرفیتش کامل می‌شود. در این ساعت‌ها قیمت برق کمترین مقادیر خود را دارد. سپس این توان در ساعت‌های ۱۷ الی ۲۳ که بیشترین قیمت را دارد دشارژ می‌شود. در منطقه هوستون، باتری در ساعت‌های ۱ الی ۷ شارژ شده و در ساعت‌های ۱۱ و ۱۳ الی ۱۸ دشارژ می‌شود که قیمت برق این ساعت‌ها در بیشترین مقادیر خود هستند.

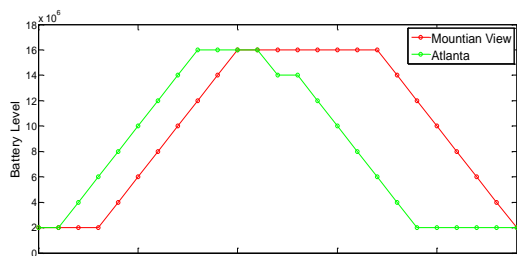
در شکل ۷، هزینه توان مصرفی در سه حالت برای ساعات مختلف شبانه‌روز بررسی شده است. حالت اول وقتی سرورهای رابط، حجم بار را به‌صورت میانگین توزیع می‌کنند و بافری انرژی در نظر گرفته نمی‌شود. حالت حجم بار به‌صورت اقتصادی توزیع می‌شود ولی باتری در سیستم در نظر گرفته نمی‌شود. در حالت سوم توزیع بهینه حجم بار و بافری انرژی هم‌زمان در نظر گرفته می‌شوند.



(الف)

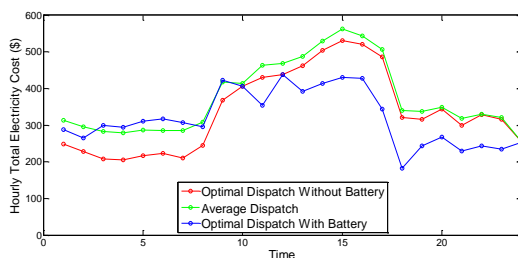


(ب)



(ج)

شکل ۴. الف- الگوی شارژ باتری‌ها ب- الگوی دشارژ ج- سطح توان باتری



شکل ۷. هزینه توان مصرفی مراکز داده

همان‌طور که دیده می‌شود هزینه کل توان مراکز داده در حالت توزیع میانگین $\$8979/5$ و در حالت توزیع بهینه درخواست‌ها بدون باتری برابر $\$8110$ و در حالت با باتری $\$7662/5$ می‌باشد. هزینه برق در حالت توزیع بهینه به همراه بافری انرژی نسبت به حالت توزیع میانگین $14/66\%$ و نسبت به حالت توزیع بهینه $5/52\%$ کاهش یافته است.

همان‌طور که گفته شد، مسئله بهینه‌سازی طوری مدل‌سازی می‌شود که تعادلی بهینه بین قیمت باتری و ذخیره هزینه برق برقرار کند. فرض می‌شود که قیمت باتری برابر $\$240000$ باشد. در این حالت الگوی شارژ و دشارژ باتری به‌صورت زیر شکل ۶ تبدیل می‌شود. در این شکل فقط تغییرات سطح توان باتری آورده شده است.

Electric Smart Grids, Power Electronics and Power Systems 3, 2012

[2] Jauregui, E., "PUE: The Green Grid metric for evaluating the energy efficiency in DC (Data Center). Measurement method using the power demand", IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC), page 1-8, 2011

[3] Thomas I. Breen, Ed J. Walsh and et, " From Chip to Cooling Tower Data Center Modeling Validation of a Multi-Scale Energy Management Model", 13th IEEE Intersociety Conference on, 2012

[4] Jianguo Yao, Xue Liu, Wenbo He, Ashikur Rahman, "Dynamic Control of Electricity Cost with Power Demand Smoothing and Peak Shaving for Distributed Internet Data Centers", 32nd IEEE International Conference on Distributed Computing Systems, 2012

[5] Lei Rao, Xue Liu, Le Xie, Wenyu Liu, "Coordinated Energy Cost Management of Distributed Internet Data Centers in Smart Grid", IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, VOL. 3, NO. 1, MARCH 2012

[6] Lei Rao, Xue Liu, Le Xie, Wenyu Liu, " Minimizing Electricity Cost: Optimization of Distributed Internet Data Centers in a Multi-Electricity-Market Environment", INFOCOM, 2010 Proceedings IEEE, Pages: 1 - 9, 2010

[7] Jianguo Yao; Xue Liu; Chen Zhang, "Predictive Electricity Cost Minimization Through Energy Buffering in Data Centers", Smart Grid, IEEE Transactions on, Vol. 5, No. 1, 2014

[8] Sen Li; Brocanelli, M.; Wei Zhang; Xiaorui Wang, " Integrated Power Management of Data Centers and Electric Vehicles for Energy and Regulation Market Participation", Smart Grid, IEEE Transactions on, Vol. 5, No. 5, 2014

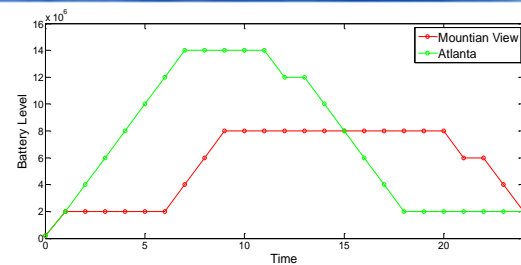
[9] Ortega-Vazquez, M.A., "Optimal scheduling of electric vehicle charging and vehicle-to-grid services at household level including battery degradation and price uncertainty", Generation, Transmission & Distribution, IET, Vol. 8, No. 6, 2014

[10] Lei Rao; Xue Liu; Ilic, M.D.; Jie Liu, "Distributed Coordination of Internet Data Centers Under Multi regional Electricity Markets", Proceedings of the IEEE, Vol. 100, No. 1, 2012

[11] California ISO. [Online]. Available: <http://www.casio.com/>.

[12] Electric Reliability Council of Texas. [Online]. Available: <http://www.ercot.com/mktinfo/dam/>.

[13] Georgia Gas and Electric. [Online]. Available: <http://www.georgiagasandelectric.com/>.



شکل ۶. سطح توان باتری‌ها

در این شکل مشاهده می‌شود که باتری در مرکز داده مونتین از ساعت ۶ الی ۹ شارژ و در ساعت‌های ۲۰، ۲۲ و ۲۳ دشارژ می‌شود، به عبارتی فقط ۳۰٪ از ظرفیتش در عملیات بافاری استفاده شده است. همچنین باتری مرکز داده هوستون نیز ۶ ساعت شارژ و دشارژ شده و از تمام ظرفیتش استفاده نمی‌شود. با توجه به قیمت باتری، شارژ و دشارژ ساعت‌های دیگر از لحاظ هزینه بهینه نیست، زیرا افزایش عمق دشارژ باعث کاهش عمر باتری می‌شود. در نهایت نتیجه می‌گیریم که عملیات شارژ و دشارژ زمانی بهینه است که هزینه انرژی بافاری (P_r^b)، کمتر از اختلاف قیمت دو ساعت موردنظر برای عملیات شارژ و دشارژ باشد.

۵- نتیجه‌گیری

مسئله اصلی هزینه بالای توان مصرفی مراکز داده و مصرف بالای برق مرکز داده، به‌خصوص در ساعات اوج مصرف است. در این مقاله از توزیع اقتصادی بار بین مراکز داده توزیع شده تحت بازارهای برق مختلف جهت کاهش هزینه توان مصرفی بهره بردیم. علاوه بر آن برای کاهش بیشتر هزینه و بهبود الگوی مصرف به سیستم موردنظر یک باتری بزرگ برای بافاری انرژی استفاده کردیم. شبیه‌سازی در این مقاله، با استفاده از نرم‌افزار تخصصی بهینه‌سازی انجام شد. از آنجایی که نرم‌افزار گمز در حل مسائل خطی دارای جواب بهینه سراسری است، قیود غیر-خطی مسئله، خطی سازی شدند. در نهایت، هزینه برق کاهش و همچنین الگوی مصرف برق نیز بهبود یافت.

منابع

[1] Luca Parolini, Bruno Sinopoli, and Bruce H. Krogh, "Models and Control Strategies for Data Centers in the Smart Grid", Control and Optimization Methods for