

طراحی شبیه‌ساز قسمتهای مختلف زیر سیستم تامین توان ماهواره

علی نهاری^۱، سید مهدی موسوی بادجانی^۲، اصغر ابراهیمی^۳، مجتبی بیگلر احمدی^۴

۱ کارشناسی ارشد برق قدرت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان Kavehnahari@gmail.com

۲ استادیار دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان.

۳ عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران.

۴ کارشناسی ارشد برق قدرت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان.

تاریخ دریافت: ۹۲/۱۰/۱۱ تاریخ پذیرش: ۹۴/۷/۴

چکیده

امروزه یکی از صنایع مهم و پرهزینه در جهان صنایع فضا نیست که ساخت ماهواره‌ها از زیرمجموعه‌های آن به شمار می‌رود. از این رو بررسی رفتار و عملکرد ماهواره‌ها در فضا با توجه به در دسترس نبودن آنها اهمیت به سزایی پیدا می‌کند. از راه‌حلهای موجود در این زمینه، ساخت شبیه‌ساز جهت بررسی کارایی ماهواره‌ها در شرایط مختلف آزمایشگاهی است. یکی از قسمتهای مهم در ماهواره‌ها زیرسیستم تامین توان آنهاست، که خود از قسمتهای مختلفی تشکیل شده است. این قسمت از حیاتی‌ترین قسمتهای ماهواره می‌باشد. در این مقاله به طراحی شبیه‌ساز قسمتهای مختلف زیرسیستم تامین توان ماهواره اعم از سیستم فتوولتائیک، باتری و بار با توجه به مدل‌های موجود پرداخته شده است. از آنجائیکه بررسی رفتار ماهواره‌ها در شرایط کار در فضا مشکل می‌باشد این سیستم می‌تواند در زمینه صنایع فضایی بسیار پرکاربرد باشد. این شبیه‌ساز براساس مدل‌های کاربردی موجود قسمتهای مختلف زیرسیستم تامین توان ماهواره، در محیط سیمولینک نرم‌افزار MATLAB، شبیه‌سازی شده و نتایج خروجی آن ارائه گردیده است. همچنین این شبیه‌ساز قابلیت شبیه‌سازی دنبال کننده حداکثر توان را نیز دارد و می‌تواند حداکثر توان ممکن را به سیستم تحویل دهد. جهت طراحی از اطلاعات یک پانل فتوولتائیک ۲۰۰ واتی ساخت شرکت KYOCERA و باتری لیتیوم یونی ساخت شرکت Saft مدل MP 176065 Integration با ظرفیت ۶/۸ آمپر ساعت استفاده شده است.

کلیدواژه

شبیه‌ساز، ماهواره، باتری لیتیوم یون، سیستم فتوولتائیک، بار الکتریکی.

مقدمه

زیرسیستم می‌نامند و توسط یکی از رشته‌های مهندسی طراحی و ساخته می‌شوند. زیرسیستم تامین توان ماهواره از جمله این زیرسیستمهاست که از زیرمجموعه‌های مهندسی برق قدرت می‌باشد. وظیفه اصلی این زیرسیستم، تامین انرژی در طول دوران مأموریت ماهواره است. با توجه به نوع مأموریت و طول عمر ماهواره، زیرسیستم تامین توان، خود نیز به قسمتهای مختلفی تقسیم می‌گردد که مهمترین تقسیم‌بندی آن را می‌توان تنظیم، کنترل و توزیع توان، قسمت ذخیره انرژی و منبع توان نام برد. با توجه به دلایل زیر الزام به طراحی و ساخت شبیه‌ساز قسمتهای مختلف زیرسیستم تامین توان ماهواره احساس می‌شود:

- ۱- با وجود کاهش قیمت پانلهای فتوولتائیک در طول دهه گذشته، هزینه تمام شده آن کماکان زیاد می‌باشد. نصب و

امروزه یکی از عمده صنایع رو به رشد صنعت هوا و فضا است که یکی از صنایع گران و پرهزینه می‌باشد و کشورها هزینه زیادی در این زمینه صرف می‌کنند. ماهواره‌ها از جمله محصولات این صنعت می‌باشند که به منظور تامین توان آنها، از منابع مختلفی از جمله سیستمهای فتوولتائیک^۱ و باتری بهره می‌برند. ماهواره‌ها در فضا غیرقابل دسترس هستند، به همین منظور بررسی عملکرد و رفتار تجهیزات به کار رفته در آنها مشکل است، از این رو از شبیه‌سازها استفاده می‌شود تا بتوان به کمک آنها رفتار قطعات به کار رفته در ماهواره را شبیه‌سازی کرد. ماهواره‌ها با توجه به عمر و کاربردشان از قسمتهای مختلفی تشکیل می‌گردند. هریک از این قسمتها را

۱ . Photovoltaic (PV)

راه‌اندازی ماژول فتوولتائیک نیز یک فرایندی گران و وقت‌گیر است.

۲- با توجه وابسته بودن خروجی پانلهای فتوولتائیک به میزان تابش و درجه حرارت محیط و تاثیر پذیر بودن این پارامترها در روی زمین به زمان سال، آب و هوا و ساعات روز، شرایط آزمون کنترل‌ناپذیر، سخت و غیر قابل تکرار می‌باشد.

۳- به طور کلی تغییر در ظرفیت زیرسیستم تامین توان ماهواره از این طریق به طور ارزانه‌تری قابل انجام است.

۴- تکرار در استفاده از باتریها از عمر آنها می‌کاهد.

۵- با توجه به این نکته که فراهم آوردن شرایط آزمایشگاهی جهت انجام آزمایش بر روی باتریها دشوار است، استفاده از شبیه‌ساز می‌تواند تاثیر به‌سزایی در آسان شدن شرایط آزمایش پدید آورد.

۶- استفاده از باتری، شرایط نگهداری آن و همچنین کاهش عمر مفید آن به مرور زمان هزینه‌بر است.

۷- بررسی تغییر رفتار در باتریها در ظرفیتهای گوناگون و همچنین انواع مختلف آن، با این شبیه‌ساز قابل بررسی است.

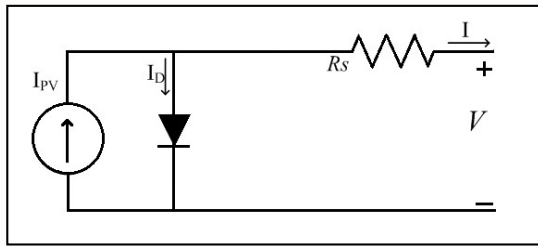
با توجه به علت‌های بیان شده و دیگر علت‌هایی که پیشتر بیان شد، تلاش‌هایی در این خصوص صورت پذیرفته است. مرجع [۱] تمامی مدل‌های بهینه سیستم فتوولتائیک اعم از تک دیودی و دو دیودی را عنوان و روابط شبیه‌سازی‌های آنها بیان داشته است. مرجع [۲] به معرفی رابطه جدیدی جهت مدل کردن رفتار سیستم فتوولتائیک پرداخته است. روابط ارائه شده در این مراجع در حالیکه به عنوان یکی از اصلی‌ترین مدل‌های موجود در زمینه مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های خورشیدی هستند، با ایراداتی نیز مواجه‌اند که می‌توان عدم انطباق مقدار خروجی توان با نتایج آزمایشگاهی را یکی از آنها نامید. مراجع [۳-۶] با معرفی و استفاده از مدل تک دیودی و چند دیودی به شبیه‌سازی سیستم فتوولتائیک با نرم افزار Matlab پرداخته‌اند. مرجع [۷] علاوه بر بیان روابط حاکم بر توان خروجی سلولهای خورشیدی، روابط مقاومت معادل را براساس عوامل محیطی بیان می‌دارد. روابطی که در مرجع [۸] برای سلولهای خورشیدی بیان شده بر اساس مدل‌های ریاضیست. مرجع [۹] بیان‌کننده مدلی جهت طراحی شبیه‌ساز پانلهای فتوولتائیک خورشیدی می‌باشد. در مرجع [۱۰] با طراحی یک کنترل‌کننده جریان، شبیه‌ساز سیستم فتوولتائیک طراحی و ساخته شده است. روابط شبیه‌ساز مذکور براساس روابط مدل تک‌دیودی و روشهای مبتنی بر محاسبات عددی استوار است. مرجع [۱۱] به معرفی مدل باتری براساس مدل توانی و ولتاژی و همچنین تعیین رفتار شارژر آن پرداخته است. مدلی که در مرجع [۱۲] در خصوص باتری ارائه شده مشتمل بر یک منبع ولتاژ، یک مقاومت داخلی و یک کنترل‌کننده است. با توجه به مستقل بودن این مدل نسبت به دما، کنترل‌کننده، ولتاژ منبع تغذیه را با پسخوری که از جریان خروجی باطری دارد، کنترل می‌نماید. در

مرجع [۱۳] شبیه‌ساز باطری نیکل هیدروژن طراحی شده است. مرجع [۱۴] مدل یک باطری سرب-اسید را بیان می‌کند. این مدل شامل یک منبع ولتاژ DC ایده‌آل سری شده با مقاومت و دو شاخه با دو گروه از خازن و مقاومت‌های موازی متصل است. مدلی که در مرجع [۱۵] جهت باتری بیان شده، یک مدار مرتبه دوم است که از یک منبع ولتاژ DC سری شده با مقاومت داخلی و دو شاخه سری خازن و مقاومت‌های موازی، تشکیل شده است. در این مدل تمامی پارامترها تابعی از وضعیت شارژ باتری، دما و همچنین جریان می‌باشند. در این مقاله روابط به صورت محدود و فقط براساس دمای ۲۰ درجه سانتیگراد بیان شده‌اند. مرجع [۱۶] مدلی از باتری ارائه داده است که در آن باتری لیتیوم-یون را براساس وضعیت شارژ باتری و دما آنالیز می‌کند. در این مدل تمامی پارامترها تابعی از وضعیت شارژ باتری و یا دمای آن می‌باشند. در مدل ارائه شده در مرجع [۱۷] به شبیه‌سازی رفتار باتری لیتیوم یونی به منظور کاربرد در خودروهای الکتریکی پرداخته شده است. در این مدل تمامی پارامترها تابعی از وضعیت شارژ باتری و دما می‌باشند. این مدل بر پایه تخمین SOC استوار است. مقدار قطعات و اجزای تشکیل دهنده مدار به SOC و دمای درونی سلول بستگی دارد. در مرجع [۱۸] رفتار یک باتری لیتیوم یونی با ظرفیت ۱/۸ آمپر ساعت شبیه‌سازی شده است. آنچه در غالب این مراجع می‌توان یافت این است که مدل ارائه شده برای باتری یا ناقص ارائه شده است و یا اینکه در صورتیکه مدل باتری ارائه شده کامل باشد به منظور مصرفی خاص به غیر از باتری‌هایی است که در صنایع فضایی کاربرد دارند و پارامترهای داخلی آنها اعم از نیروی محرکه و مقاومت داخلی و سایر موارد جهت آن باتری، با ظرفیت مذکور طراحی شده و قابلیت بسط به سایر موارد و باتری‌های فضایی را ندارد.

در این مقاله در خصوص منبع تامین توان بر اساس مدل‌های مداری ارائه شده در سایر مراجع، به طراحی یک شبیه‌ساز پانل خورشیدی پرداخته شده است. با استفاده از این شبیه‌ساز می‌توان ضمن دریافت منحنی ولتاژ و جریان به ولتاژ و جریان در حداکثر توان پانل دست یافت. روش به کار رفته در این مقاله، استفاده از یک منبع ولتاژ قابل کنترل و یک کنترل‌کننده با استفاده از مدل چهار پارامتری سیستم‌های فتوولتائیک می‌باشد. جهت بررسی عملکرد شبیه‌ساز، از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده و خروجی براساس زوجهای ولتاژ و جریان در یک جدول مراجعه‌ایی^۲ ذخیره و با توجه به اندازه و ظرفیت بار متصل به سیستم، ولتاژ، جریان و توان خروجی تعیین گردید. همچنین این شبیه‌ساز قابلیت شبیه‌سازی دنبال‌کننده حداکثر توان^۳ را دارد. جهت انجام شبیه‌سازی، رفتار یک پانل فتوولتائیک ۲۰۰ واتی ساخت شرکت KYOCERA و

۲ . Look-up Table (LUT)

۳ . Maximum Power Point Tracker (MPPT)



شکل ۱. مدل چهار پارامتری به کار رفته در مدلسازی طراحی شبیه‌ساز PV

در این مدل یک منبع جریان با یک دیود موازی شده است. در حالی که سایه وجود داشته باشد پانل خورشیدی غیرفعال است و به صورت یک دیود عمل می‌کند. که در این حالت ولتاژ و جریانی را تولید نخواهد نمود. در این مدل پارامتر دیود ایده‌آل به منظور دقت بیشتر لحاظ شده است. این پارامتر تابعی از دماست و با آن تغییر می‌کند. در مدل ایده‌آل مقدار مقاومت سری R_s و مقاومت موازی R_{sh} حذف می‌گردد. در حالیکه در این مدل، مقاومت سری لحاظ می‌گردد، مقاومت موازی به دلیل بزرگ بودن، بینهایت در نظر گرفته می‌شود. در سیستمهای فتولتائیک به منظور تولید سطح ولتاژ مورد نظر، پانلهای خورشیدی را با یکدیگر سری و برای رسیدن به توان مورد نیاز پانلهای سری شده را به صورت موازی با یکدیگر متصل می‌کنند.

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{nkT}} - 1 \right) \quad (1)$$

T: دمای محیط پانل برحسب کلونین

V: ولتاژ خروجی ماژول PV

I: جریان خروجی ماژول PV

q: میزان شارژ الکترون بر حسب کلون

K: ثابت بولتزمن

N: ضریب ایده‌آل بودن

N_s : تعداد ماژول سری قرار گرفته در PV

I_D : جریان دیود یا جریان سایه

I_0 : جریان اشباع معکوس دیود

I_{ph} : جریان تولیدی توسط منبع جریان ناشی از تابش نور خورشید

$$I_{ph}(T, G) = (I_{ph}(T_{nom}, G_{nom}) + K_i(T - T_{nom})) * \frac{G}{G_{nom}} \quad (2)$$

$$K_i = \frac{I_{sc}(T_2) - I_{sc}(T_1)}{T_2 - T_1} \quad (3)$$

غالباً ضریب تغییرات دمایی جریان در دیتاشیت پانلهای فتولتائیک ارائه می‌شود.

K_i : ضریب تغییرات دمایی جریان

مدل KC200GT شبیه‌سازی شده است. در خصوص سیستم ذخیره کننده انرژی الکتریکی در ماهواره سعی شده است با استفاده از دیتاشیت باتریهای پرکاربرد در صنایع فضایی و منحنی وضعیت شارژ و ولتاژ آنها، به یک مدل براساس دما رسیده و از طریق این مدل، یک شبیه‌ساز به عنوان سیستم ذخیره و پشتیبان انرژی در زیرسیستم تامین توان ماهواره در هنگام سایه به منظور ذخیره انرژی تولید شده از انرژی خورشیدی طراحی گردد. باتری انتخاب شده در این مقاله جهت مدل کردن، باتری لیتیوم یونی ساخت شرکت Saft مدل MP 176065 Integration با ظرفیت ۶/۸ آمپرساعت می‌باشد. در ادامه به تشریح قسمت‌های مختلف زیرسیستم طراحی شده پرداخته خواهد شد. بار الکتریکی طراحی شده در این مقاله، یک بار الکتریکی توان ثابت است که قابلیت بسط به سایر ظرفیتهای را داراست.

زیرسیستم تامین توان ماهواره

زیرسیستم تامین توان ماهواره یکی از زیرسیستمهای ماهواره است که از زیرمجموعه‌های مهندسی برق قدرت می‌باشد. وظیفه اصلی این زیرسیستم، تامین انرژی در طول دوران مأموریت ماهواره است. با توجه به نوع مأموریت و طول عمر ماهواره زیرسیستم تامین توان خود نیز به قسمت‌های مختلفی تقسیم می‌شود که مهمترین تقسیم‌بندی آن را می‌توان تنظیم، کنترل و توزیع توان، قسمت ذخیره انرژی و منبع توان نام برد. قسمت تنظیم، کنترل و توزیع توان شامل بخشهایی از ماهواره است که وظیفه کنترل کردن، تبدیل سطح ولتاژ، یکسوسازی یا متناوب‌سازی جریان، انتقال انرژی تولید شده به سایر قسمت‌ها، قطع و وصل بارها و حفاظت الکتریکی از آنها را به عهده دارد و از مهمترین اجزای آن می‌توان به ادوات الکترونیک قدرت، سیم‌ها، رله‌ها و سوئیچها نام برد.

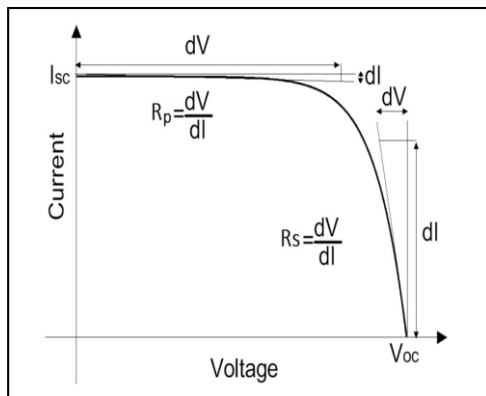
طراحی شبیه‌ساز پانل فتولتائیک

مدلهای مداری بسیاری برای شبیه‌سازی سیستمهای فتولتائیک در مقالات مختلف معرفی شده‌اند. تمامی این مدلها از یک ساختار یکسان بهره می‌برند که تنها تمایز آنها در حذف یا به کارگیری برخی پارامترهاست. به طور مثال از مدل‌های ارائه شده می‌توان به مدل تک دیودی، دو و چند دیودی، با مقاومت سری و بدون مقاومت موازی، با مقاومت سری و موازی اشاره کرد که در این بین مدل تک دیودی با مقاومت سری معمولترین مدل می‌باشد. این مدل، که مدل چهار پارامتری نیز نامیده می‌شود در بسیاری از مقالات مورد استفاده قرار گرفته است. مراجع [۳] الی [۸] از این مدل بهره جسته‌اند که مرجع [۷] به طور کامل و با جزئیات این مدل را تشریح نموده است.

جریان تقریبی پانل در شرایط محیطی و در ولتاژ مورد نظر محاسبه و در فرمول چهار پارامتری جایگزین می‌شود تا جریان براساس آن محاسبه گردد. با توجه به این نکته که مقدار مقاومت سری ناچیز است در خروجی تغییر محسوسی ایجاد نخواهد شد.

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{qV}{nkT}} - 1 \right) \quad (۱۳)$$

مقاومت سری و موازی را می‌توان مطابق با شکل زیر با محاسبه شیب خط در منحنی I-V بدست آورد و یا از طریق محاسبات به آن دست یافت.



شکل ۲. طریقه محاسبه مقاومت سری و موازی در پانل PV

در شکل ۲ شیب R_p مقاومت موازی و شیب R_s مقاومت سری را نشان می‌دهد. در برخی از دیتاشیت‌های موجود مقادیر مقاومت‌های سری و موازی قید نشده است در این صورت می‌توان با محاسبه این شیب براساس روش‌های مختلف، به طور مثال با کمک نرم‌افزارهای پردازش تصویر، منحنی موجود در دیتاشیت را بررسی کرد و یا با روش اندازه‌گیری و محاسبات و یا مقیاس‌بندی به مقادیر مقاومتها دست یافت. یکی دیگر از روش‌های بدست آوردن مقاومتها استفاده از روابط محاسباتیست که در مرجع [۱] روابط آن ارائه شده است. به منظور محاسبه توان خروجی آرایه‌های به وجود آمده ولتاژ و جریان در یکدیگر ضرب شده و توان خروجی را به ازای ولتاژها و جریانهای مختلف می‌سازند. با توجه به مراجع در این مقاله مدل چهار پارامتری انتخاب شده است که در این شبیه‌ساز از یک کنترل کننده، یک LUT و یک منبع تغذیه ولتاژ قابل کنترل، استفاده می‌شود. در اینجا ابتدا بر اساس دما و میزان تابش ورودی، پارمترهای اولیه مدل بدست آمده سپس منحنی ولتاژ-جریان براساس یک جفت عدد در LUT ذخیره می‌شود تا براساس آن توان و مقدار توان خروجی ناشی از مقدار مقاومت بار محاسبه گردد.

T_{nom} : دمای محیط پانل برحسب کلوین در شرایط استاندارد آزمایش

G: میزان تابش خورشید

G_{nom} : میزان تابش خورشید در شرایط استاندارد آزمایش

$$I_0(T) = I_0(T_{nom}) * \left(\frac{T}{T_{nom}} \right)^{\frac{3}{N_S}} * e^{\frac{qV_0(T_{nom})}{nk \left(\frac{1}{T_{nom}} - \frac{1}{T} \right)}} \quad (۴)$$

$$\frac{n}{n_{Ref}} = \frac{T}{T_{Ref}} \quad (۵)$$

Π_{Ref} : ضریب ایده‌آل بودن شرایط استاندارد آزمایش

T_{Ref} : دمای محیط پانل برحسب کلوین شرایط استاندارد آزمایش

$$I_0(T_1) = \frac{I_{SC}(T_1)}{\left(e^{\frac{qV_{OC}(T_1)}{nkT_1}} - 1 \right)} \quad (۶)$$

برای یک بار مقاومتی، منحنی بار یک خط صاف با شیب معکوس مقاومت بار است که میزان توان دریافتی بار به محل تقاطع این منحنی با منحنی توان خروجی بستگی دارد. مقاومت پایین، جریانی نزدیک به جریان اتصال کوتاه پانل و مقاومت بالا، ولتاژی نزدیک به ولتاژ مدار باز پانل خواهد داشت. جریان اتصال کوتاه برابر با بزرگترین جریان تولید شده توسط یک سلول است که در شرایط اتصال کوتاه رخ می‌دهد. ($I_{sc} = I_{ph}$) ولتاژ مدار باز ولتاژیست که در حالت بی باری سلول خورشیدی بدست می‌آید و بیشترین ولتاژیست که یک سلول می‌تواند به آن دست پیدا کند.

$$V_{OC} = \frac{nkT}{q} \ln \left(\frac{I_L}{I_0} \right) = V_t \ln \left(\frac{I_L}{I_0} \right) \quad (۷)$$

V_t : ولتاژ حرارتی

تغییرات ولتاژ تابعی از تغییرات تابش و تغییرات دماست که از طریق رابطه زیر بیان می‌شود. از طریق همین رابطه می‌توان به ولتاژ مدار باز و ولتاژ در حداکثر توان براساس تغییرات دما و دست یافت.

(۸)

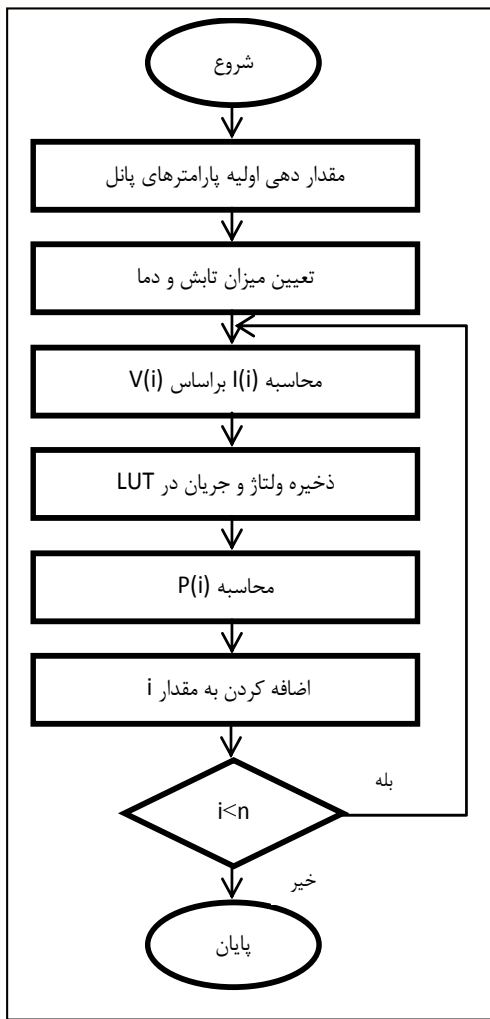
$$V(T, G) = V(T_{nom}, G_{nom}) + \left(\left(V_t * \log \left(\frac{G}{G_{nom}} \right) \right) + K_v * (T - T_{nom}) \right)$$

غالباً ضریب تغییرات دمایی ولتاژ در دیتاشیت پانلهای فتوولتائیک ارائه می‌شود که رابطه آن به قرار زیر است.

$$K_v = \frac{V_{OC}(T_2) - V_{OC}(T_1)}{T_2 - T_1} \quad (۹)$$

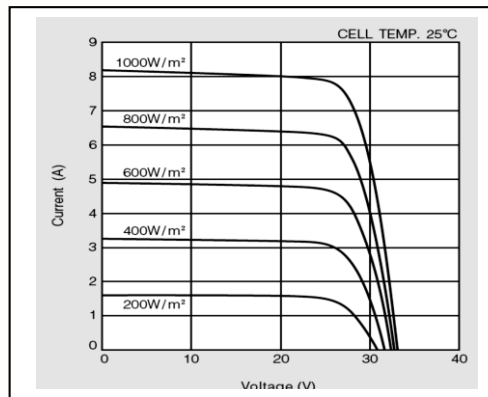
K_v : ضریب تغییرات دمایی ولتاژ

با توجه به اینکه در دو طرف رابطه (۱) پارامتر جریان وجود دارد ابتدا از طریق رابطه پانل فتوولتائیک ایده‌آل مطابق با فرمول زیر،

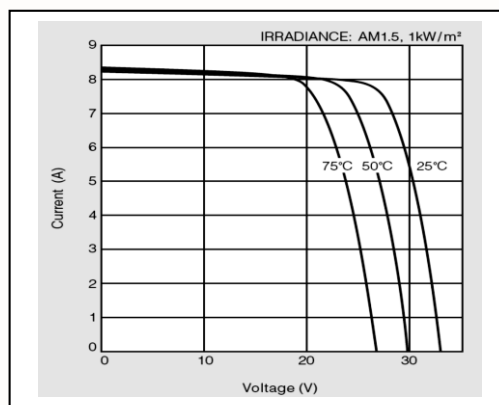


شکل ۶. فلوجارت ایجاد منحنی ولتاژ و جریان

جهت انجام شبیه‌سازی از نرم‌افزار Matlab استفاده شد و رفتار یک پانل فتوولتائیک ۲۰۰ واتی ساخت شرکت KYOCERA و مدل KC200GT شبیه‌سازی گردید. در ادامه نتایج خروجی آن تحت شرایط STC و همچنین تحت دمای ۷۵ سانتیگراد و میزان تابش ۱۵۰۰ وات بر متر مربع ملاحظه می‌شود. با مقایسه نتایج شبیه‌سازی و کاتالوگ ارائه شده توسط کارخانه سازنده، خروجی با خطای ۳ درصد ملاحظه می‌شود که با توجه به تلورانس ۳ تا ۵ درصد، خروجی پانل رفتاری قابل قبول را نمایش می‌دهد. با توجه به مدل و ساختار ارائه شده و می‌توان از یک میکروکنترلر با حافظه کافی جهت LUT و یا یک کامپیوتر به جای آن به منظور کنترل منبع تغذیه بهره برد. می‌توان به این نکته اشاره کرد که استفاده از کامپیوتر به عنوان کنترل‌کننده محدودیت ظرفیت تعداد نقاط تقسیم شده ولتاژ را نخواهد داشت در عین حالیکه سرعت پردازش نیز می‌تواند با استفاده از یک کامپیوتر با قدرت پردازش بالا افزایش یابد. همچنین می‌توان از یک مدل



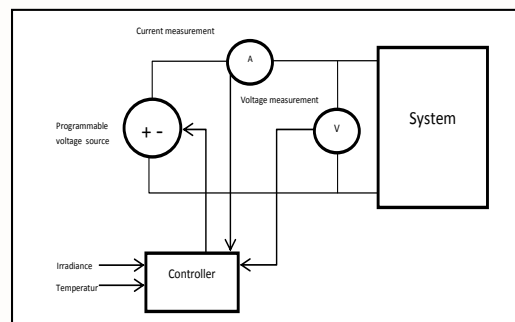
شکل ۳. منحنی ولتاژ - جریان ناشی از تغییرات تابش



شکل ۴. منحنی ولتاژ - جریان ناشی از تغییرات دما

جهت ساخت منحنی ولتاژ - جریان و منحنی ولتاژ - توان در ابتدا ولتاژ به Π قسمت مساوی از صفر تا ولتاژ مدار باز، شکسته می‌شود تا از طریق جایگذاری آن در رابطه جریان، جریان متناظر با هر ولتاژ را بسازد. جریان در ولتاژ صفر برابر با جریان اتصال کوتاه و در ولتاژ مدار باز برابر با صفر خواهد بود. مقادیر متناظر به صورت زوج در یک جدول LUT ذخیره می‌شوند.

حاصل تقسیم ولتاژ بر جریان مقاومت متناظر با بار و ضرب این دو مقدار در یکدیگر توان متناظر با بار را خواهد ساخت. سپس از طریق یک کنترل‌کننده با توجه به مقدار ورودی تابش خورشید بر حسب وات بر مترمربع و میزان دما بر حسب سانتیگراد با فراخوانی ولتاژ و جریان متناظر با تابش خورشید و میزان دما و اعمال آن به منبع ولتاژ قابل کنترل، شبیه‌سازی انجام می‌گردد.



شکل ۵. بلوک دیاگرام شبیه‌سازی پانل PV طراحی شده

پرداخت. تمامی پارامترها تابعی از وضعیت شارژ باتری و دما می‌باشند.

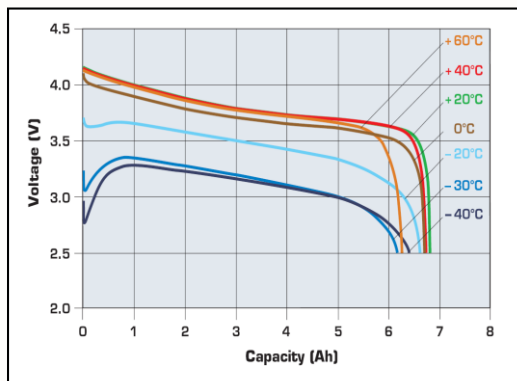
مدل کردن باتری در حالت دشارژ شدن

با توجه به مطالب مطرح شده و مدنظر بودن طراحی یک شبیه‌ساز با قابلیت انعطاف‌پذیری و توسعه برای تمامی ظرفیتهای، روش به کار رفته در این مقاله، یافتن رابطه میان منحنی ولتاژ و وضعیت شارژ از روی دیتاشیت باتریهاست که اساس آن محاسبه وضعیت شارژ باتری از طریق رابطه زیر، می‌باشد.

$$Q_e(t) = \int_0^t I_m(\tau) d\tau \quad (14)$$

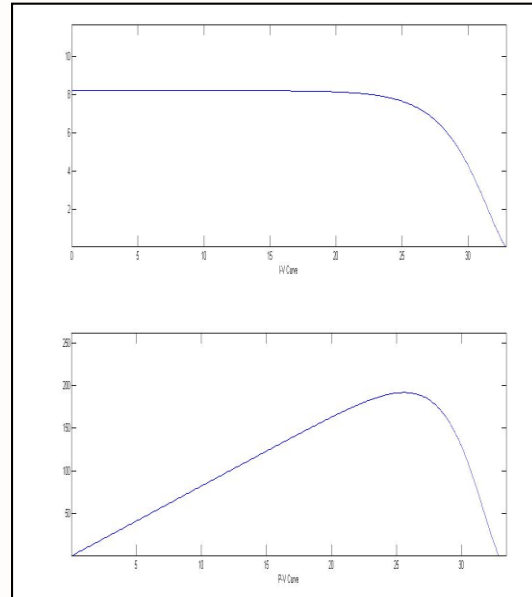
$$SOC = 1 - \frac{Q_e}{C_Q} \quad (15)$$

در این رابطه Q_e ظرفیت شارژ باتری (آمپرساعت)، C_Q ظرفیت نامی باتری (آمپرساعت) و SOC وضعیت شارژ باتریست که بر اساس درصد بیان می‌شود. باتری انتخاب شده جهت طراحی شبیه‌ساز باتری لیتیوم‌یونی ساخت شرکت Saft مدل MP 176065 Integration با ظرفیت ۶٫۸ آمپرساعت می‌باشد که در صنایع فضایی کاربرد دارد. با توجه به منحنی‌های دشارژ ارائه شده در دیتاشیت باتریها می‌توان آنها را به ۲ دسته بالای ۲۰ درجه سانتیگراد و زیر ۲۰ درجه سانتیگراد تقسیم کرد. که در دسته بالای ۲۰ درجه سانتیگراد نقطه شروع منحنی تقریباً یکسان ولی نقطه فرود متفاوتی دارد و در دسته زیر ۲۰ درجه سانتیگراد دارای افت ولتاژ در وضعیت شارژ ۱۰۰٪ تا تقریباً ۸۷٪ و در ادامه تقریباً مشابه با منحنیهای بالای ۲۰ درجه سانتیگراد در وضعیت شارژ ۸۷٪ تا ۱۰۰٪ می‌باشد. در دسته زیر ۲۰ درجه سانتیگراد افت ولتاژ در ابتدای دشارژ در غالب مراجع نادیده گرفته شده است. در این مقاله دمای ۲۰ درجه سانتیگراد به عنوان دمای مرجع در نظر گرفته شده است. با استفاده از نرم‌افزار plot digitayzer منحنی‌های زیر تحلیل و اطلاعات آنها استخراج شده است. در شکل زیر محور عمودی ولتاژ خروجی باتری و محور افقی وضعیت شارژ باتری است که از سمت چپ وضعیت شارژ کامل و سمت راست وضعیت دشارژ کامل باتریست.

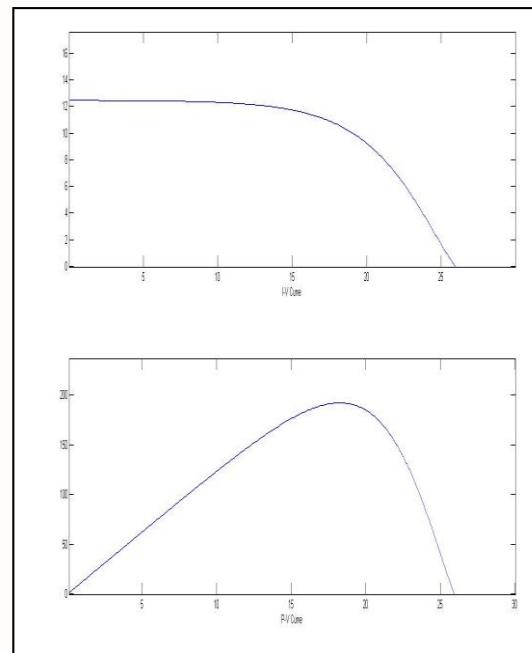


شکل ۹. منحنی ارائه شده در دیتاشیت باتری MP 176065 Integration در حالت دشارژ شدن

جریان مستقیم با قابلیت کنترل ولتاژ خروجی مانند آنچه در مرجع [۱۰] اشاره شده است، استفاده نمود.



شکل ۷. نتایج شبیه‌سازی تحت شرایط STC (دمای ۲۵ درجه سانتیگراد و میزان تابش ۱۰۰۰ وات بر متر مربع)



شکل ۸. نتایج شبیه‌سازی تحت دمای ۷۵ درجه سانتیگراد و میزان تابش ۱۵۰۰ وات بر متر مربع

طراحی شبیه‌ساز باتری لیتیوم-یون

با توجه به مراجع بررسی شده و مدل‌های ارائه شده در آنها، به منظور شبیه‌سازی رفتار یک باتری، از مدل مرسوم در غالب مراجع، یک مدار سری شامل یک منبع تغذیه و یک مقاومت داخلی و یک مدار RC موازی تشکیل شده است. با تحلیل این مدار می‌توان به محاسبه ولتاژ باتری و ظرفیت باقیمانده آن

مدل کردن باتری در حالت دشارژ

با کمک نرم افزار Matlab و تولباکس Curve fitting، می‌توان به یک رابطه کلی جهت منحنی ولتاژ وضعیت شارژ با دقت ۹۹٪ برای تمامی دماهای برابر و بالای ۲۰ درجه سانتیگراد دست یافت. در صورتیکه دمای مرجع را برابر ۲۰ درجه سانتیگراد در نظر بگیریم خواهیم داشت:

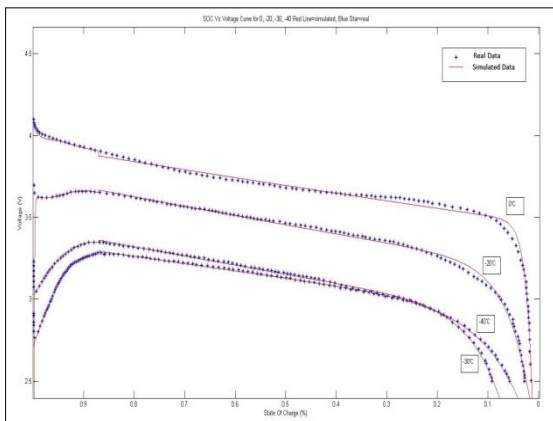
$$V(soc, T) = a(T) * e^{b(T)*soc} + 3.556 + 0.647 * soc + 0.823 * soc^2 + 0.778 * soc^3 \quad (16)$$

دمای زیر ۲۰ درجه سانتیگراد و وضعیت شارژ ۸۷٪ تا ۱۰۰٪

همانند دو منحنی قبل و با استفاده از نرم‌افزار Matlab می‌توان به یک رابطه با ساختار یکسان با دقت بالای ۹۸٫۵٪ برای تمامی دماهای ارائه شده در دیتاشیت باتری مذکور رسید.

$$V(soc, T) = a_1(T) * e^{-\left(\frac{soc-b_1(T)}{c_1(T)}\right)^2} + a_2(T) * e^{-\left(\frac{soc-b_2(T)}{c_2(T)}\right)^2} + a_3(T) * e^{-\left(\frac{soc-b_3(T)}{c_3(T)}\right)^2} \quad (18)$$

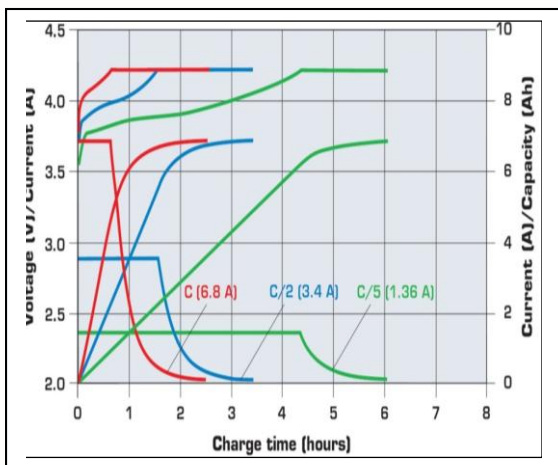
رابطه براساس وضعیت شارژ می‌باشد و ضرائب آن تابعی از دما می‌باشند.



شکل ۱۱. منحنی شبیه‌سازی شده ولتاژ وضعیت دشارژ باتری در دماهای زیر ۲۰ درجه سانتیگراد

مدل کردن باتری در حالت شارژ شدن

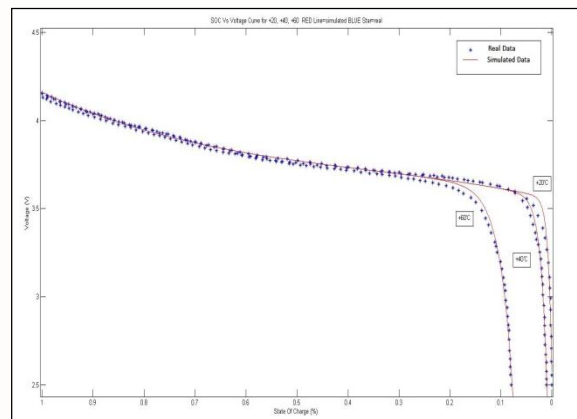
با استفاده از نرم افزار plot digitayzer منحنی شارژ شدن باتری تحلیل و اطلاعات آنها استخراج شده است.



شکل ۱۲. منحنی شبیه‌سازی شده ولتاژ وضعیت دشارژ باتری در دماهای زیر ۲۰ درجه سانتیگراد

با استفاده از تولباکس Curve fitting در نرم‌افزار Matlab می‌توان به یک رابطه با ساختار یکسان با دقت بالای ۹۹٪ در دیتاشیت

که پس از استفاده از تولباکس Curve fitting در نرم‌افزار Matlab ضرائب آن بدست می‌آید. ضریب a و b هر دو تابعی از دما هستند. در ادامه منحنی‌های شبیه‌سازی شده به همراه منحنی‌های اصلی، قابل مشاهده است. منحنی آبی رنگ منحنی اصلی و منحنی قرمز رنگ منحنی حاصل از شبیه‌سازی می‌باشد. در شکل زیر محور عمودی ولتاژ خروجی باتری و محور افقی وضعیت شارژ باتری می‌باشد که از سمت راست وضعیت شارژ کامل و سمت چپ وضعیت دشارژ کامل باتریست.



شکل ۱۰. منحنی شبیه‌سازی شده ولتاژ وضعیت دشارژ باتری در دماهای بالای ۲۰ درجه سانتیگراد

دمای زیر ۲۰ درجه سانتیگراد و وضعیت شارژ ۰٪ تا ۸۷٪

با استفاده از تولباکس Curve fitting در نرم‌افزار Matlab می‌توان به یک رابطه با ساختار یکسان با دقت بالای ۹۹٪ برای تمامی دماهای ارائه شده در دیتاشیت باتری مذکور براساس وضعیت شارژ باتری دست یافت که ضرائب آن تابعی از دما می‌باشد.

(۱۷)

$$V(soc, T) = a(T) * e^{b(T)*soc} + c(T) * e^{d(T)*soc}$$

طراحی شبیه‌ساز بار

بارهای الکتریکی به بارهایی اطلاق می‌شود که انرژی انجام کار و یا تبدیل انرژی در آنها از طریق جریان الکتریسیته تامین می‌شود. بارهای الکتریکی انواع مختلفی دارند که رفتار بار الکتریکی توان ثابت به عنوان یک نوع بار پرکاربرد در صنایع فضایی و ماهواره‌ها، در ادامه شبیه‌سازی شده است.

طراحی شبیه‌ساز بار الکتریکی توان ثابت

بارهای الکتریکی توان ثابت به بارهایی اطلاق می‌شود که با توجه به رابطه زیر توان ثابتی مصرف می‌کنند و در صورت تغییر در ولتاژ ورودی، جریان آنها نیز تغییر می‌کند تا توان را ثابت نگه دارد.

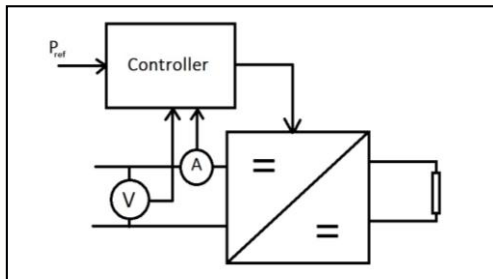
$$P = VI \quad (20)$$

بدین صورت که با کاهش ولتاژ جریان افزایش می‌یابد و با افزایش آن جریان کاهش می‌یابد. در ادامه به طراحی شبیه‌ساز یک بار توان ثابت خواهیم پرداخت.

$$P_{in} = K \frac{V_{in}^2}{R} \quad (21)$$

K: نسبت کارکرد پهنای پالس مدولاسیون

در این شبیه‌ساز از یک کنترل‌کننده، یک مقاومت و یک مبدل جریان مستقیم جهت ثابت نگه داشتن توان با تغییر پهنای پالس مدولاسیون در زمان تغییر در ولتاژ ورودی، استفاده شده است. این شبیه‌ساز با توجه به توان تعیین شده و با در نظر گرفتن مقدار مقاومت در خروجی چاپر، پهنای پالس مدولاسیون را از طریق کنترل‌کننده، کنترل می‌نماید.



شکل ۱۵. بلوک دیاگرام شبیه‌ساز باتری طراحی شده

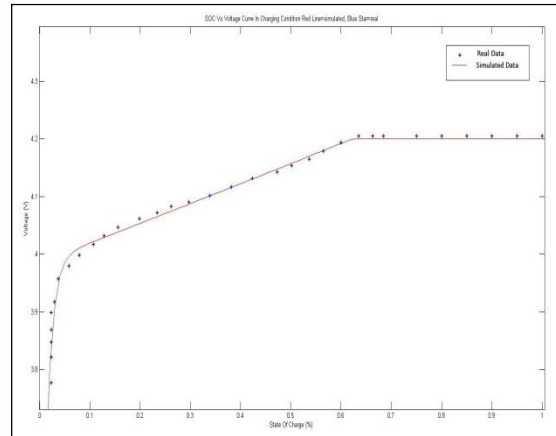
بار توان ثابت طراحی شده جهت توان مصرفی ۱۰۰ وات در ولتاژ ۲۶ ولت، از یک چاپر و یک مقاومت یک اهمی تشکیل شده است که با نسبت کارکرد پهنای پالس مدولاسیون ۱۴٫۷۹ درصد خروجی مطابق شکل فوق را خواهد داشت. در این شکل رفتار دینامیکی بار برای زمان ۳ ثانیه نمایش داده شده است که پس از گذشت یک ثانیه ولتاژ افزایش پیدا می‌کند و به ۳۰ ولت می‌رسد. در اینصورت نسبت کارکرد پهنای پالس مدولاسیون به ۱۱/۱۱ درصد کاهش پیدا می‌کند. در این هنگام توان به مقدار ۱۵ درصد در مدت زمان ۰/۰۲ ثانیه افزایش پیدا می‌کند و سپس به مقدار توان مرجع که ۱۰۰ وات می‌باشد، بازمی‌گردد. سپس در ثانیه دوم ولتاژ از ۳۰

باتری مذکور دست یافت. این رابطه برای ولتاژهای زیر ۴٫۲ ولت می‌باشد و هنگامی که ولتاژ باتری به ۴٫۲ رسید برای جلوگیری از آسیب رسیدن به باتری ولتاژ ثابت نگه داشته می‌شود.

(۱۹)

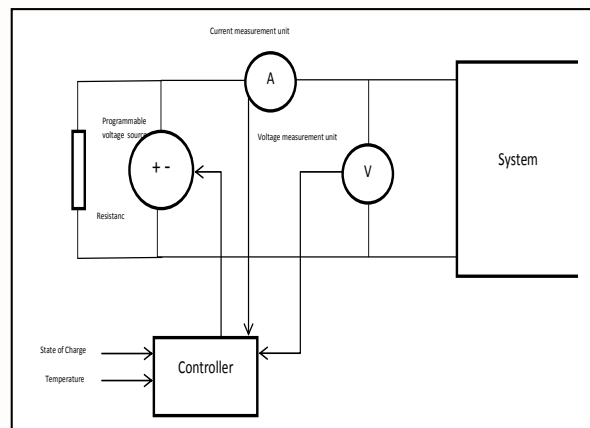
$$V(soc, T) = 3.986 * e^{0.08407 * soc} - 0.9546 * e^{-80.74 * soc} \quad V < 4.2$$

در شکل زیر منحنی آبی رنگ منحنی ولتاژ، وضعیت شارژ شبیه‌سازی شده و منحنی قرمز رنگ منحنی ولتاژ، وضعیت شارژ واقعی موجود در دیتاشیت باتری است.



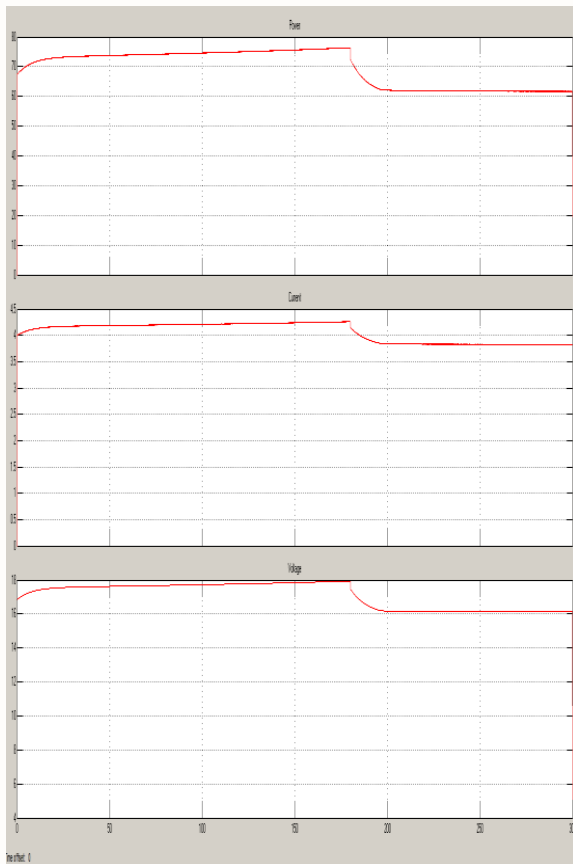
شکل ۱۳. منحنی شبیه‌سازی شده ولتاژ وضعیت شارژ باتری

پس از یافتن مدل بر اساس وضعیت شارژ و دما می‌توان با کمک گرفتن از یک کنترل‌کننده و یک منبع تغذیه ولتاژ قابل کنترل شبیه‌ساز را طراحی نمود. در اینجا ابتدا بر اساس دما و وضعیت شارژ ورودی، پارمترهای اولیه مدل بدست آمده سپس براساس آن سطح ولتاژ باتری محاسبه گردد، پس از آن کنترل‌کننده به منبع ولتاژ، سطح ولتاژ تعیین شده را ارسال می‌دارد. در حالت شارژ شدن، میزان ولتاژ از طریق رابطه محاسبه شده و منبع ولتاژ از سوی کنترل‌کننده تنظیم می‌شود. جهت جریان، تعیین‌کننده حالت شارژ و یا دشارژ خواهد بود.



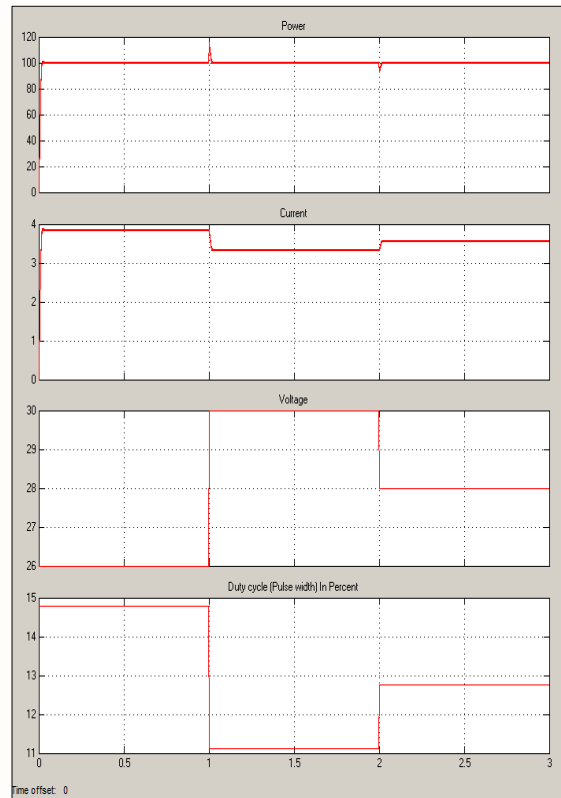
شکل ۱۴. بلوک دیاگرام شبیه‌ساز باتری طراحی شده

است. در حالت اول بلوک دیاگرامهای Matlab جهت شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفته است. در حالت دوم شبیه‌ساز طراحی شده پانل خورشیدی، باتریهای و بار توان ثابت جایگزین شبیه‌سازهای موجود در سیستم نمونه شده است. در شکل‌های ۱۷ و ۱۹ خروجی شبیه‌سازی سیستم ارائه گردیده که در آن منحنی اول تغییرات توان، منحنی دوم تغییرات جریان و منحنی سوم تغییرات ولتاژ را برای حالت‌های اول و دوم نشان می‌دهد. در شکل‌های ۱۸ و ۲۰ خروجی باتری شبیه‌سازی شده است که در آن منحنی اول تغییرات وضعیت شارژ، منحنی دوم تغییرات جریان و منحنی سوم تغییرات ولتاژ را برای حالت‌های اول و دوم می‌باشد.



شکل ۱۷. نتایج خروجی شبیه‌سازی بار در حالت اول

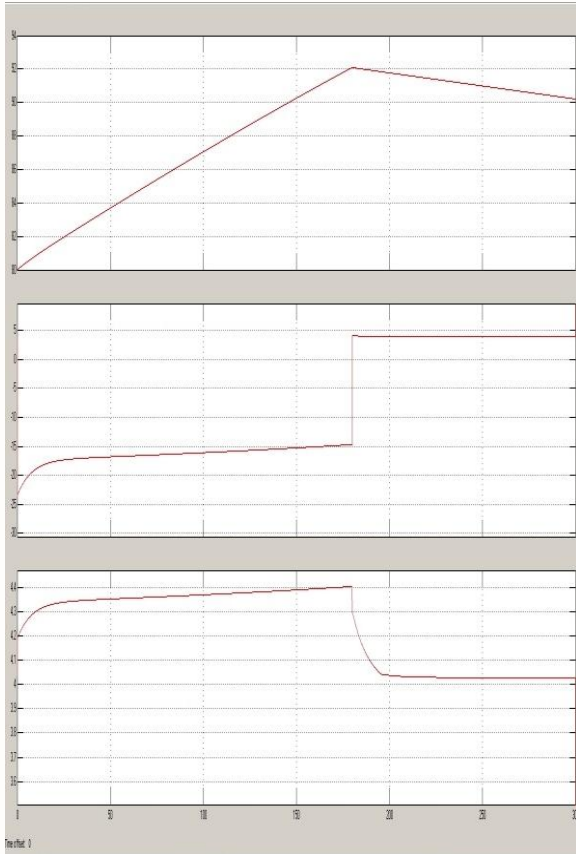
ولت به ۲۸ ولت کاهش می‌یابد که در این حالت پهنای پالس تغییر کرده و به مقدار نهایی ۱۲/۷۵۵ درصد می‌رسد. با افت ولتاژ، توان به مقدار ۹۳ وات کاهش پیدا کرده و در زمان ۰/۰۲ ثانیه به مقدار ۱۰۰ وات باز می‌گردد.



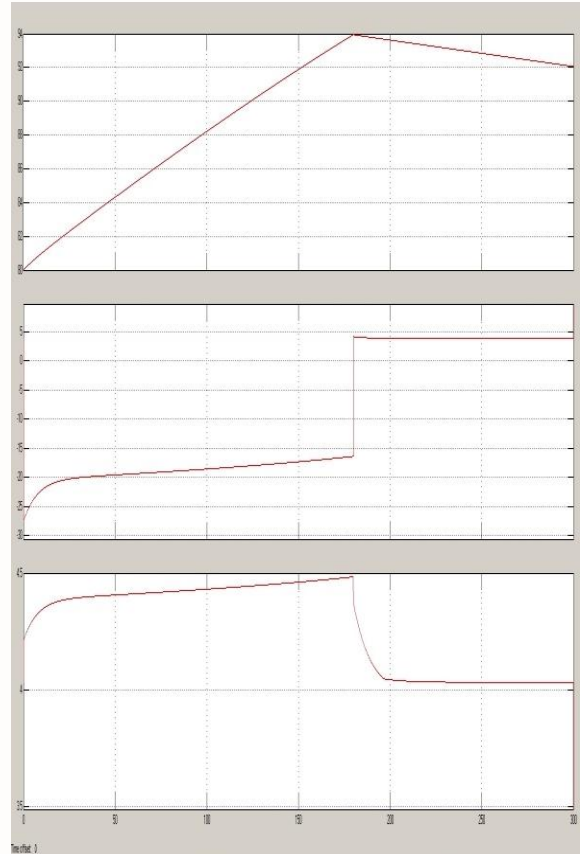
شکل ۱۶. توان مصرفی ۱۰۰ وات در ولتاژ ۵۰ ولت شبیه‌ساز طراحی شده

شبیه‌ساز زیرسیستم تامین توان الکتریکی ماهواره به صورت یکپارچه

در این قسمت یک سیستم EPS به طور کامل شبیه‌سازی شده است. ابتدا از بلوک‌های موجود در قسمت Simpower نرم‌افزار Matlab جهت مدل‌سازی یک سیستم نمونه استفاده گردیده، سپس شبیه‌سازهای طراحی شده در این مقاله، جایگزین بلوک دیاگرامهای این شبیه‌سازی شده و رفتار آنها با رفتار شبیه‌سازهای موجود مقایسه گردیده است. در این سیستم از دو پانل فتولتاییک ۸۵ وات، چهار عدد باتری لیتیوم یونی و یک بار ۹۵ وات استفاده شده است. ولتاژ سیستم برابر با ۱۵ ولت می‌باشد. از هر دو پانل با استفاده از سیستم استحصال حداکثر توان، ماکزیمم توان ممکن استخراج می‌شود. این شبیه‌سازی برای دو حالت در یک سیکل کاری ۵ دقیقه‌ای سیستم تامین توان ماهواره، انجام شده است که در هر دو حالت در سه دقیقه ابتدایی پانلهای خورشیدی علاوه بر تامین توان بار، باتریها را نیز شارژ نموده و در دو دقیقه بعد توان بار از طریق باتریها تامین می‌شود. در این دو حالت شارژ باتری برابر با ۸۰ درصد ظرفیت کامل شارژ باتری، در نظر گرفته شده

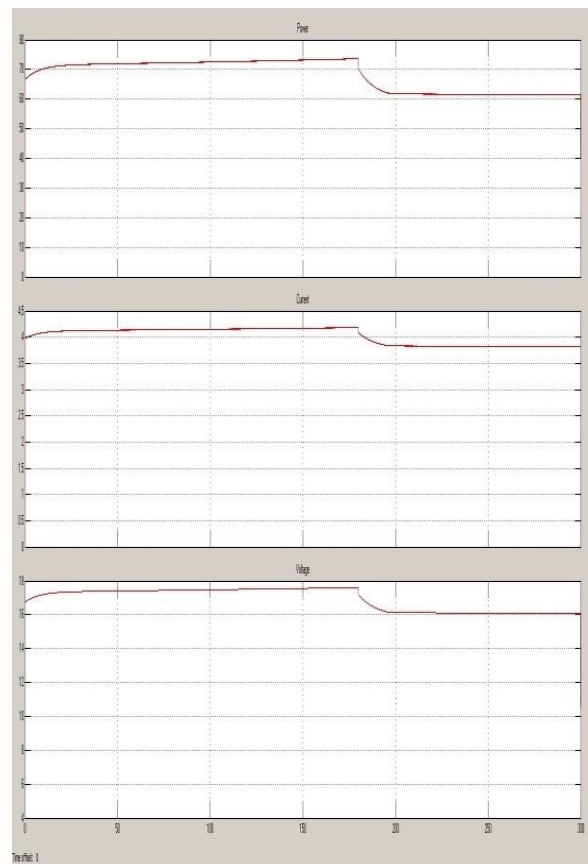


شکل ۲۰. نتایج خروجی شبیه‌سازی باتری در حالت دوم



شکل ۱۸. نتایج خروجی شبیه‌سازی باتری در حالت اول

در صورتیکه میزان تابش برابر با ۱۰۰۰ وات بر مترمربع در نظر گرفته شود در حالت دوم خروجی دو پانل خورشیدی برابر ۱۷۰ وات خواهد شد که در مقایسه با خروجی ۱۷۰٫۴ وات مدل نمونه اختلافی ۰٫۲۵ درصدی دارد، یعنی ۸۵٫۱۴ وات با ولتاژ خروجی ۴٫۹۵ ولت و جریان ۱۷٫۲ آمپر به ازای هر پانل، که مقدار قابل قبولی می‌باشد. رفتار باتری در حالت دوم در مقایسه با حالت اول در زمان یکسان از سطح شارژ ۸۰ درصد به ۹۲٫۸ درصد می‌رسد که در برابر ۹۴ درصد حالت اول، اختلافی ۱٫۲ درصد دارد که مقدار قابل قبولی می‌باشد. با توجه به اینکه سطح ولتاژ باتری تابعی از وضعیت شارژ آن است بنابراین در ولتاژ خروجی باتری شاهد تفاوتی بسیار ناچیز با در نظر گرفتن اختلاف ۱٫۲ درصدی شبیه‌ساز باتری طراحی شده با شبیه‌ساز باتری مدل، خواهیم بود. توان بار در حالی که در مدل نمونه با افزایش در دقیقه دوم و سپس کاهش تدریجی آن مواجه می‌شود در شبیه‌ساز بار توان ثابت طراحی شده برابر با مقدار ۹۴٫۱ وات ثابت می‌ماند و در دقیقه دوم پس از افزایش توانی کوتاه، مجدداً در مقدار قبل ثابت می‌ماند و با افزایش ولتاژ، شاهد کاهش جریان مصرفی بار خواهیم بود.



شکل ۱۹. نتایج خروجی شبیه‌سازی بار در حالت دوم

نتیجه گیری

همان گونه که در نتایج نشان داده شده است، می توان با استفاده از اطلاعات ارائه شده در دیتاشیت پانلهای خورشیدی، به شبیه سازی پانلهای خورشیدی مختلفی پرداخت و به نتایج خروجی با دقت بالا، دست یافت. خروجی بدست آمده خطایی در حدود ۳ درصد را نشان می دهد که با توجه به تلورانس در نظر گرفته شده در کاتالوگ دستگاه، دقت قابل قبولی است. شبیه ساز طراحی شده دارای قابلیت انعطاف پذیری بالاییست بطوریکه می توان با کمک آن دامنه وسیعی از انواع پانلهای خورشیدی را در تمامی شرایط ممکن اعم از شرایط کاربرد خانگی و یا صنایع فضایی شبیه سازی نمود. این شبیه ساز قابلیت این را دارد که بجای پردازشگر به عنوان کنترل کننده از یک کامپیوتر بهره گیرد. استفاده از کامپیوتر می تواند باعث کاهش هزینه ها و انعطاف پذیری بیشتری جهت این شبیه ساز گردد. در خصوص باتری با کاربری فضایی، می توان با استفاده از رابطه و مدل ارائه شده در این مقاله به ولتاژی با دقت بالای ۹۹ درصد دست یافت. همانگونه که در نتایج نشان داده شده است روابط ارائه شده برخلاف باتریهایی که در برخی از منابع که در دمایی ثابت بررسی شده اند، علاوه بر لحاظ نمودن تاثیر دما دارای دقت بالایی در خروجی، در هر دو حالت شارژ و دشارژ است که در برخی موارد به ۹۹/۹ درصد نیز می رسد. ویژگی متمایز کننده این مدل عدم وابستگی آن به مدل مدار است و فقط ولتاژ خروجی را با توجه به وضعیت شارژ و دما تخمین می زند. شبیه ساز طراحی شده جهت سیستم دنبال کننده حداکثر توان علاوه بر ارائه خروجی با دقت بالا، به دلیل اینکه با سیستم فتوولتائیک به صورت یکپارچه کار می کند، می تواند از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه باشد. نتایج خروجی از بار توان ثابت با دقت قابل قبول و زمان پاسخگویی مناسبی می باشد. همانگونه که در نتایج شبیه سازی نشان داده شد، به ازای تغییرات در ورودی پاسخگویی سریعی دارد و در زمانی در حدود ۲۰ صدم ثانیه به حالت ماندگار می رسد. در ادامه گامهای بعدی توسعه شبیه ساز پانلهای خورشیدی، اضافه کردن پارامترهایی از جمله سن پانل و شرایط میدانهای مغناطیسی و بادهای مغناطیسی می باشد. در خصوص باتری نیز اضافه کردن پارامتر سیکل کارکرد، می تواند رفتار باتری را دقیق تر نشان دهد. می توان به جای کنترل کننده در این شبیه ساز از یک نرم افزار و کامپیوتر جهت انجام محاسبات بهره جست. جهت توسعه این نرم افزار می توان در گامهای بعدی با استفاده از نرم افزارهای پردازش تصویر برای تمامی باتریها به رابطه مخصوص به آنها دست یافت.

مرجع ها

- [1]D. Rekioua and E. Matagne, "Optimization of Photovoltaic Power Systems -Modelization, Simulation and Control", Springer, 2012.
- [2]Wei Zhou, Hongxing Yang and Zhaohong Fang, "A novel model for photovoltaic array performance prediction", Applied Energy 84, 2007, 1187-1198.
- [3]Tarak Salmi, Mounir Bouzguenda, Adel Gastli and Ahmed Masmoudi, "MATLAB/Simulink Based Modelling of Solar Photovoltaic Cell", International Journal of Renewable Energy Research, 2012, Vol.2, No.2.
- [4]Francisco M. González-Longatt, "Model of Photovoltaic Module in Matlab™", 2Do Congreso Iberoamericano De Estudiantes De Ingenieria Electrica, Electronica Y Computacion, 2005.
- [5]R Khezzar, M Zereg and A Khezzar, "Comparative Study of Mathematical Methods for Parameters Calculation of Current-Voltage Characteristic of Photovoltaic Module".
- [6]Kashif Ishaque, Zainal Salam and Hamed Taheri, "Accurate MATLAB Simulink PV System Simulator Based on a Two-Diode Model", Journal of Power Electronics, 2011, Vol. 11, No. 2.
- [7]W. De Soto, S.A. Klein and W.A. Beckman, (2006), "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance", Solar Energy 80, 2006, pp 78-88.
- [8]Weixiang Shen, Yi Ding, Fook Hoong Choo, Peng Wang, Poh Chiang Loh and Kuan Khooon Tan, "Mathematical model of a solar module for energy yield simulation in photovoltaic systems", 2009.
- [9]Avneet Singh, Ashish R. Hota and Amit Patra, "Design and Implementation of A Programmable Solar Photovoltaic Simulator", Power, Control and Embedded Systems (ICPCES), 2010.
- [10]Jie Ang Zhao, "A Digitally Implemented Practical Photovoltaic Simulator With A Double Current Mode Controller", A Thesis Of Master Of Science In Electrical., Missouri University Of Science And Technology, 2012.
- [11]Anca D.Hansen, Poul Sorensen, Lars H.Hansen and Henrik Bindne, "Model for a stand-alone PV system", Riso National Laboratory, Roskilde, 2000.
- [12]Emil A. Jimenez-Brea, "Control of Alternative Energy Hybrid System for Residential and Low Power Applications", University Of Puerto Rico Mayaguez Campus, 2009.
- [13]M. A. Gofovatov, D. V. Berber, "Nickel-Hydrogen Storage Battery Simulator Of 28HB70-P Type", Modern Technique and Technologies, 2003.
- [14]Septimiu Mischie and Dan Stoiciu, "A New and Improved Model of a Lead Acid Battery", ELEC. ENERG. vol. 20, no. 2, August 2007, pp 187-202
- [15]Suguna Thanagasundram, Raghavendra Arunachala, Kamyar Makinejad, Tanja Teutsch and Andreas Jossen, "A Cell Level Model for Battery Simulation", EEVC European Electric Vehicle Congress, 2012.
- [16]Robert m.Spotnitz, "Battery Modeling", The Electrochemical Society Interface, 2005.
- [17]Tarun Huria, Massimo Ceraolo, Javier Gazzarri and Robyn Jackey "High Fidelity Electrical Model with Thermal Dependence for Characterization and Simulation of High Power Lithium Battery Cells", Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International.
- [18]Y.K. Tan, J.C. Mao and K.J. Tseng, "Modelling of Battery Temperature Effect on Electrical Characteristics of Li-ion Battery in Hybrid Electric Vehicle", IEEE PEDS 2011, Singapore, 5 - 8 December 2011.

