

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه برق - قدرت

# مدلسازی و شبیه‌سازی تنظیم کننده ولتاژ یک دیزل ژنراتور تغذیه کننده یک شارژر بانک باتری

دانشجو:

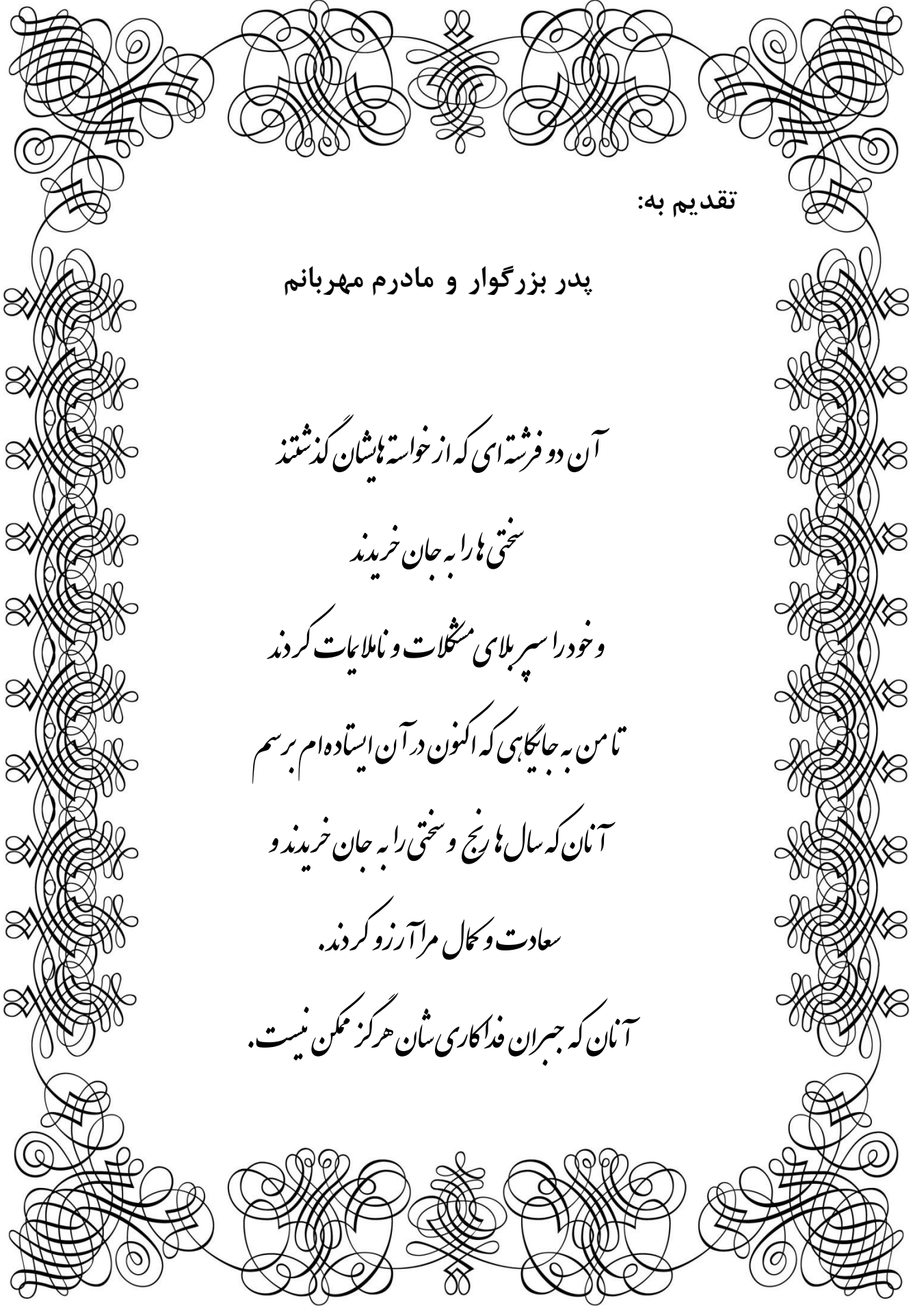
مجید حسینا

استاد راهنما:

دکتر احمد دارابی

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ماه ۱۳۹۰



تقدیم به:

پدر بزرگوار و مادرم مهربانم

آن دو فرشته‌ای که از خواسته‌هایشان گذشتند

سختی‌ها را به جان خریدند

و خود را سپر بلای مشکلات و ناملایمات کردند

تا من به جایگاهی که اکنون در آن ایستاده‌ام برسم

آنان که سال‌ها رنج و سختی را به جان خریدند و

سعادت و کمال مرا آرزو کردند.

آنان که جبران فداکاری‌شان هرگز ممکن نیست.

## تشکر و قدردانی

بر خود لازم می‌دانم از تلاش‌های بی‌دریغ، ارزشمند و دلسوزانه استاد گرامیم جناب آقای دکتر احمد دارابی تشکر و قدردانی کنم. بی‌شک اتمام این پایان‌نامه بدون زحمات دلسوزانه ایشان امکان پذیر نبود. همچنین از تمامی اساتید گروه برق دانشگاه صنعتی شاهرود که در این چند سال از راهنمایی‌های آنان بهره‌مند بودم تشکر می‌کنم. همچنین از کلیه دوستان خود در دانشگاه صنعتی شاهرود مخصوصاً آقای مهندس امیر حسن نیا که با یاری و راهنمایی‌هایشان سختی‌ها را برایم آسان نمودند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

## تعهد نامه

اینجانب **مجید حسینا** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق - قدرت دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **مدلسازی و شبیه سازی تنظیم کننده ولتاژ یک دیزل ژنراتور تغذیه کننده یک شارژر بانک باتری** تحت راهنمایی **دکتر احمد دارابی** متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافت های آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ ۱۳۹۰/۱۰/۱۴

امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

استفاده از باتری‌ها در تعداد و اندازه‌های بزرگ به‌عنوان یک سیستم ذخیره‌کننده انرژی و نیروی پیشران تجهیزات مدرن امروزی همچون کشتی‌ها، زیردریایی‌ها، لکوموتیوها و خودروهای الکتریکی در حال رواج می‌باشد. در تجهیزات و مکان‌هایی که دسترسی به شبکه قدرت امکان پذیر نبوده و یا به صرفه نیست، عموماً دیزل ژنراتورها نقش منبع تولید توان را ایفا می‌کنند. در این صورت برای شارژ یک بانک عظیم باتری، توان تولیدی توسط دیزل ژنراتور به شارژر فرستاده شده و ولتاژ و جریان مناسب برای شارژ بانک باتری‌ها تولید می‌شود. با توجه به سایز و ابعاد بزرگ بانک عظیم باتری‌ها، به شارژرهایی با ابعاد و توان خروجی بسیار بالا نیاز می‌باشد. ساخت شارژرهای با توان بالا، دارای محدودیت‌های المان‌های قدرت، محدودیت‌های کنترل، مسائل حفاظتی، قابلیت اطمینان، تلفات و عایق‌بندی مناسب است. همچنین با افزایش توان خروجی شارژر، قیمت، وزن و حجم شارژر نیز افزایش می‌یابد. از اینرو گاهی برای شارژ یک بانک عظیم باتری، آن را به بخش‌های کوچکتری تقسیم می‌کنند تا با شارژرهای کوچکتر بتوان آنها را شارژ نمود و نیاز به استفاده از شارژرهای بزرگ را مرتفع کرد. این کار نیز خود سبب ایجاد مشکلاتی همچون طولانی شدن پروسه شارژ خواهد شد. یک راه عملی و ابتکاری برای حل این مشکل، تغییر در عملکرد تنظیم‌کننده ولتاژ خودکار (AVR) دیزل ژنراتور به‌منظور حذف شارژر است. با کنترل ولتاژ خروجی دیزل ژنراتور توسط AVR، می‌توان شارژر را حذف و به‌جای آن از یک پل یکسوساز دیودی برای تبدیل ولتاژ AC به DC استفاده نمود. در این پایان‌نامه، با اضافه کردن یک جزء میکروپروسسوری به AVR و تغییر عملکرد در تولید ولتاژ مطابق با منحنی شارژ بجای تنظیم ولتاژ در مقداری ثابت، این امر ابتکاری محقق گردیده است. در این پایان‌نامه اجزاء یک دیزل ژنراتور، پل یکسوساز دیودی و باتری بطور دقیق برای سیستم شارژ پیشنهادی مدلسازی و شبیه‌سازی می‌شوند. شبیه‌سازی‌ها و نتایج بدست آمده از انجام این پایان‌نامه بیانگر عملکرد مطلوب سیستم شارژ پیشنهادی است.

کلمات کلیدی: دیزل ژنراتور، باتری، شارژر، AVR

## فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه ----- ۱

فصل دوم: دیزل ژنراتور ----- ۶

۱-۲. موتور دیزل ----- ۸

۲-۲. ژنراتور سنکرون ----- ۱۱

۳-۲. تنظیم کننده ولتاژ ----- ۱۸

۴-۲. سیستم سوخت دیزل ژنراتور ----- ۱۹

۵-۲. سیستم خنک کننده ----- ۱۹

۶-۲. کنترل پنل دیزل ژنراتور ----- ۲۰

۷-۲. شاسی دیزل ژنراتور ----- ۲۱

فصل سوم: باتری ----- ۲۲

۱-۳. باتری و مفاهیم آن ----- ۲۴

۲-۳. اصطلاحات مربوط به باتری ها ----- ۲۵

۳-۳. پتانسیل الکتروشیمیایی ----- ۲۶

۴-۳. باتری نیکل کادمیوم ----- ۲۷

۵-۳. باتری هیبرید نیکل فلز ----- ۲۸

۶-۳. باتری لیتیوم یون ----- ۲۸

۷-۳. باتری پلیمر لیتیوم یون ----- ۲۹

۸-۳. باتری سربی اسیدی ----- ۲۹

۱-۸-۳. معادلات شیمیایی درون سلول سربی اسیدی ----- ۳۰

۲-۸-۳. مشخصه های عملکرد باتری سربی اسیدی ----- ۳۱

۱-۲-۸-۳. منحنی های شارژ و دشارژ ----- ۳۱

۲-۲-۸-۳. منحنی تاثیر دما بر ظرفیت ----- ۳۴

۳-۲-۸-۳. منحنی دشارژ خود به خود ----- ۳۵

۳۷	منحنی ولتاژ مدار باز باتری	۴-۲-۸-۳
۳۸	منحنی مقاومت داخلی باتری	۵-۲-۸-۳
۳۹	اثر پوکرت	۶-۲-۸-۳
۴۰	تعیین وضعیت شارژ باتری	۹-۳
۴۱	مدل باتری سربی اسیدی	۱۰-۳

## فصل چهارم: شارژر

۴۵		
۴۶	روش‌های اساسی شارژ توسط شارژرها	۱-۴
۴۷	شارژ ولتاژ ثابت	۱-۱-۴
۴۸	شارژ جریان ثابت	۲-۱-۴
۴۹	شارژ جریان ثابت ولتاژ ثابت	۳-۱-۴
۵۰	شارژ جریان باریک	۴-۱-۴
۵۱	شارژ ملایم	۵-۱-۴
۵۱	شارژ پالسی	۶-۱-۴
۵۲	شارژ چند مرحله‌ای	۷-۱-۴
۵۳	سرعت شارژ شدن	۲-۴
۵۳	روش‌های پایان شارژ	۳-۴
۵۳	تایمر کنترل شده	۱-۳-۴
۵۴	سیستم برش شارژ دلتا منفی	۲-۳-۴
۵۴	سیستم شارژ $dT/dt$	۳-۳-۴
۵۴	سیستم کنترل شارژ جریان ثابت ولتاژ ثابت	۴-۳-۴
۵۵	دمای باتری	۵-۳-۴
۵۵	حداقل جریان شارژ	۶-۳-۴
۵۵	حداکثر ولتاژ شارژ	۷-۳-۴
۵۶	عملکرد شارژ	۴-۴
۵۷	مشخصات لازم برای انتخاب یک شارژ مناسب	۵-۴



## فصل پنجم: مدلسازی و شبیه سازی ----- ۵۹

۱-۵. مدلسازی ژنراتور سنکرون ----- ۶۱

۲-۵. مدلسازی کنترل کننده ولتاژ و سیستم تحریک ----- ۶۴

۳-۵. مدلسازی گاورنر، موتور دیزل و روتور ژنراتور سنکرون ----- ۶۶

۴-۵. مدلسازی شارژر ----- ۶۹

۵-۵. مدلسازی باتری ----- ۷۰

۶-۵. طراحی سیستم شارژ ----- ۷۵

۷-۵. الگوریتم شارژ ----- ۷۶

۸-۵. نتایج شبیه سازی ----- ۷۷

## فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهاد ----- ۹۷

ضمیمه ----- ۱۰۱

مراجع ----- ۱۰۳

## فهرست جداول و اشکال

- جدول ۱-۲: دسته بندی موتورهای دیزل ----- ۱۰
- شکل ۱-۲: مدارهای استاتور و رتور ماشین سنکرون ----- ۱۲
- شکل ۲-۲: مدارهای معادل ماشین سنکرون براساس تئوری پارک ----- ۱۸
- شکل ۳-۲: شماتیک سیستم کنترل ولتاژ ژنراتور سنکرون ----- ۱۹
- شکل ۱-۳: اجزای یک باتری ساده ----- ۲۴
- شکل ۲-۳: ولتاژ الکتروشیمیایی بعضی عناصر و مواد ----- ۲۷
- جدول ۱-۳: مقایسه چند باتری های قابل شارژ ----- ۳۰
- شکل ۳-۳: منحنی شارژ و دشارژ یک باتری ----- ۳۲
- شکل ۴-۳: منحنی دشارژ یک باتری سربی اسیدی با نرخ دشارژ  $0.05C-0.2C$  ----- ۳۳
- شکل ۵-۳: منحنی دشارژ یک باتری سربی اسیدی با نرخ دشارژ  $0.5C-2C$  ----- ۳۳
- جدول ۲-۳: ولتاژ پایان دشارژ بر حسب جریان دشارژ ----- ۳۴
- شکل ۶-۳: منحنی تاثیر دما بر ظرفیت باتری ----- ۳۵
- شکل ۷-۳: منحنی زمان نگهداری باتری سربی اسیدی در حالت بدون استفاده ----- ۳۶
- شکل ۸-۳: منحنی دشارژ خود به خود بر حسب دما در باتری سربی اسیدی ----- ۳۷
- شکل ۹-۳: منحنی ولتاژ مدار باز باتری سربی اسیدی ----- ۳۷
- جدول ۳-۳: چگالی و نقطه انجماد الکتروولت یک باتری سربی اسیدی بر حسب وضعیت شارژ ----- ۳۸
- شکل ۱۰-۳: منحنی مقاومت داخلی باتری بر حسب وضعیت شارژ ----- ۳۹
- جدول ۴-۳: ظرفیت یک بانک باتری بر حسب جریان دشارژ آن ----- ۴۰
- شکل ۱۱-۳: مدار معادل تونن یک باتری سربی اسیدی ----- ۴۲
- شکل ۱۲-۳: مدل یک باتری سربی اسیدی ----- ۴۳
- شکل ۱۳-۳: مدل یک باتری سربی اسیدی ----- ۴۳
- شکل ۱-۴: منحنی ولتاژ خروجی و جریان کشیده شده از شارژر در روش شارژ ولتاژ ثابت ----- ۴۸
- شکل ۲-۴: منحنی ولتاژ خروجی و جریان کشیده شده از شارژر در روش شارژ جریان ثابت ----- ۴۸
- شکل ۳-۴: منحنی ولتاژ خروجی و جریان کشیده شده از شارژر شارژ جریان ثابت ولتاژ ثابت ----- ۵۰
- شکل ۴-۴: منحنی جریان شارژر پالسی ----- ۵۱

- شکل ۴-۵: منحنی جریان و ولتاژ در شارژ چند مرحله‌ای ----- ۵۲
- جدول ۴-۱: روش های پایان شارژ ----- ۵۶
- شکل ۵-۱: بلوک دیاگرام دیزل ژنراتور ----- ۶۲
- جدول ۵-۱: مشخصات مربوط به توان دیزل ژنراتور ----- ۶۳
- جدول ۵-۲: مشخصات موتور دیزل ----- ۶۳
- شکل ۵-۲: شبیه سازی ژنراتور سنکرون ----- ۶۴
- شکل ۵-۳: مدار سیم پیچ تحریک ----- ۶۴
- شکل ۵-۴: شبیه سازی مدار تحریک ----- ۶۵
- شکل ۵-۵: بلوک دیاگرام AVR ----- ۶۵
- شکل ۵-۶: شبیه سازی AVR ----- ۶۶
- شکل ۵-۷: شبیه سازی گاورنر، موتور دیزل و روتور ژنراتور سنکرون ----- ۶۸
- شکل ۵-۸: طرح کلی ژنراتور سنکرون ----- ۶۸
- شکل ۵-۹: شماتیک پل سه فاز یکسوساز دیودی ----- ۶۹
- جدول ۵-۳: مشخصات مربوط به یک باتری از بانک باتری های مورد استفاده ----- ۷۰
- شکل ۵-۱۰: مدل باتری سربی اسیدی پیشنهادی ----- ۷۱
- شکل ۵-۱۱: منحنی های تخمین زده شده برای منحنی  $R_{bat}$  ----- ۷۲
- جدول ۵-۴: مشخصات برازندگی توابع ----- ۷۲
- شکل ۵-۱۲: مدل بسط داده شده باتری سربی اسیدی ----- ۷۴
- شکل ۵-۱۳: شبیه سازی باتری ----- ۷۴
- شکل ۵-۱۴: شماتیک سیستم شارژ پیشنهادی ----- ۷۵
- شکل ۵-۱۵: شبیه سازی سیستم شارژ پیشنهادی ----- ۷۶
- شکل ۵-۱۶: منحنی های شارژ و شارژ بانک باتری تحت مطالعه در بر حسب ظرفیت ----- ۷۸
- شکل ۵-۱۷: منحنی های شارژ و شارژ بانک باتری تحت مطالعه در بر حسب زمان ----- ۷۹
- شکل ۵-۱۸: منحنی ضریب مقاومت داخلی بانک باتری تحت مطالعه ----- ۸۰
- شکل ۵-۱۹: شبیه سازی سیستم شارژ معادل ----- ۸۱
- شکل ۵-۲۰: ولتاژ لحظه ای ترمینال ژنراتور ----- ۸۲
- شکل ۵-۲۱: ولتاژ موثر یک فاز ترمینال ژنراتور ----- ۸۳

- شکل ۵-۲۲: وضعیت شارژ و ولتاژ داخلی بانک باتری برای وضعیت شارژ اولیه ۲۰ درصد-----۸۴
- شکل ۵-۲۳: جریان شارژ بانک باتری -----۸۵
- شکل ۵-۲۴: جریان خروجی یک فاز ژنراتور -----۸۵
- شکل ۵-۲۵: طیف هارمونیکی جریان ژنراتور -----۸۶
- شکل ۵-۲۶: ضریب محسبه شده توسط پروسسور ( $K_{avr}$ ) -----۸۷
- شکل ۵-۲۷: ولتاژ خروجی AVR -----۸۷
- شکل ۵-۲۸: جریان شارژ باتری بانک باتری و مقدار متوسط آن در سیستم شارژ معادل -----۸۸
- شکل ۵-۲۹: جریان خروجی یک فاز منبع ولتاژ جایگزین ژنراتور سنکرون -----۸۹
- شکل ۵-۳۰: وضعیت شارژ و ولتاژ داخلی بانک باتری برای شارژ با وضعیت شارژ اولیه ۵ درصد ---۹۰
- شکل ۵-۳۱: وضعیت شارژ و ولتاژ داخلی بانک باتری برای شارژ -----۹۱
- شکل ۵-۳۲: وضعیت شارژ و ولتاژ داخلی بانک باتری برای شارژ جریان ثابت با وضعیت شارژ اولیه ۲۰ درصد -----۹۲
- شکل ۵-۳۳: وضعیت شارژ و ولتاژ داخلی بانک باتری برای شارژ جریان ثابت با وضعیت شارژ اولیه ۴۰ درصد -----۹۳
- شکل ۵-۳۴: مقدار متوسط جریان شارژ باتری برای شارژ ولتاژ ثابت با وضعیت شارژ اولیه ۶۰ درصد ۹۳
- شکل ۵-۳۵: وضعیت شارژ و ولتاژ داخلی بانک باتری برای شارژ ولتاژ ثابت با وضعیت شارژ اولیه ۸۰ درصد -----۹۴
- شکل ۵-۳۶: مقدار متوسط جریان شارژ باتری برای شارژ ولتاژ ثابت با وضعیت شارژ اولیه ۸۰ درصد ۹۴
- شکل ۵-۳۷: وضعیت شارژ و ولتاژ داخلی بانک باتری برای شارژ جریان ثابت ولتاژ ثابت با وضعیت شارژ اولیه ۲۰ درصد -----۹۵
- شکل ۵-۳۸: مقدار متوسط جریان شارژ باتری برای شارژ جریان ثابت ولتاژ ثابت با وضعیت شارژ اولیه ۲۰ درصد -----۹۵

## مقالات مستخرج از پایان نامه

- **Modify AVR Operation of a Diesel Generator for Charging a Battery Bank in Diesel Electric Submarine, International Conference On Advances in Electrical and Electronics Engineering (ICAEE 2012), Penang, Malaysia, Accepted.**
- طراحی و شبیه سازی سیستم شارژ باتری در شناورهای زیرسطحی دیزل الکتریک، نشریه علمی پژوهشی فناوری آموزش، تحت داوری

## فصل اول

# مقدمه

---

امروزه استفاده از دیزل ژنراتورها در صنایع مختلف از جمله صنعت برق، کارخانجات، صنایع نظامی، واحدهای رزرو و... بطور روز افزون در حال افزایش است. وجود مزایای بسیار، از جمله امکان ساخت دیزل ژنراتورها در اندازه‌های کوچک، متوسط و بزرگ و همچنین امکان جابجایی و سهولت نصب در هر نقطه دلخواه، از دلایل عمده گسترش کاربردهای این واحدهای تولید برق می‌باشد. در واقع تنوع کاربرد و گستردگی موارد استفاده از دیزل ژنراتورها، سازندگان این محصول را مجبور به ساخت دیزل ژنراتورهایی با ابعاد و توان‌های مختلف می‌کند. به‌گونه‌ای که دیزل ژنراتورها در رنج توانی وسیع چند کیلووات تا چند مگاوات قادر به تولید توان می‌باشند. همراه با توسعه کاربردها و استفاده روز افزون، تلاش‌های زیادی در جهت بهبود عملکرد دیزل ژنراتورها با توسل به تکنولوژی‌های جدید و توسعه روش‌های طراحی و کنترل صورت می‌گیرد. این تلاش‌ها گاه منجر به تغییراتی در ساختارهای جدید دیزل ژنراتورها و سیستم‌های کنترلی آنها می‌شود. از عمده‌ترین پارامترهای مورد توجه سازندگان و استفاده‌کنندگان دیزل ژنراتورها می‌توان به چند مورد کاهش قیمت دیزل ژنراتور، دقت در تنظیم ولتاژ خروجی، کاهش قیمت سیستم‌های کنترلی، بهبود عملکرد، افزایش قابلیت اطمینان و ... اشاره نمود.

دیزل ژنراتورها عموماً برای کاربری خاصی ساخته نمی‌شوند و دارای ساختار و عملکردی مشابه هستند. گستردگی موارد استفاده دیزل ژنراتورها به‌گونه‌ای است که گاه شامل استفاده‌های بسیار

---

خاص نیز می‌گردد. در این کاربردها می‌باید عملکرد دیزل ژنراتور تغییر کرده و کاملاً مطابق با خواسته‌های مصرف‌کننده گردد. یکی از این کاربردهای خاص، استفاده از دیزل ژنراتور به عنوان تغذیه کننده یک بانک باتری در یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی است. سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در کاربردهای وسیعی همچون واحدهای<sup>1</sup> UPS، سیستم‌های پشتیبانی و برق اضطراری و همچنین در تغذیه سیستم رانش خوردروهای الکتریکی، کشتی‌ها، زیردریایی‌های الکتریکی و... به سرعت در حال توسعه می‌باشند.

دیزل ژنراتورهای شارژ کننده یک بانک باتری، توان تولیدی خود را توسط یک شارژر به بانک باتری منتقل می‌کنند. در این کاربرد خاص یک اصلاح کلی در ساختار دیزل ژنراتور می‌تواند باعث استفاده مناسب‌تر از آن شود. چنین تغییر عملکرد برای تغییر کاربری مطابق با نیاز مصرف‌کننده، باعث طرح پیشنهادی مسئله تنظیم ولتاژ مناسب دیزل ژنراتور بر اساس توان مصرفی بار می‌شود. بر اساس این ایده پیشنهادی می‌توان برای تغییر کاربری دیزل ژنراتور برای شارژ کردن یک بانک باتری، یک تغییر عملکرد در سیستم تنظیم‌کننده ولتاژ (AVR<sup>2</sup>) آن صورت داد تا مطابق با منحنی شارژ بانک باتری، ولتاژ خروجی ژنراتور در مقادیر تحت کنترل تثبیت شود. به عبارت دیگر در چنین کاربردی در طول سیکل شارژ بانک باتری، مقدار ولتاژ مورد نیاز خروجی ژنراتور یک مقدار معین ثابت نمی‌باشد، بلکه این مقادیر بطور لحظه‌ای توسط منحنی شارژ مشخص می‌گردد. مهمترین مزیت این تغییر کاربری، حذف شارژر است. شارژر یک بانک باتری معمولاً دستگاهی نسبتاً حجیم شامل یک یکسوساز سه فاز تریستوری با ولتاژ خروجی DC تحت کنترل می‌باشد. با تغییر در عملکرد AVR و ایجاد ولتاژ مناسب شارژ، با توجه به منحنی‌های شارژ، نیاز به شارژر با یکسوسازهای حجیم و گرانیقیمت تریستوری کنترل شونده برطرف می‌شود و یک یکسوساز دیودی ساده می‌تواند شارژ باتری‌ها را به نحو مطلوب انجام دهد. این مزیت مهمترین دستاورد این تغییر عملکرد خواهد بود که

---

1- Uninterruptible Power Supply

2 -Automatic Voltage Regulator



---

سبب کاهش وزن و حجم سیستم شارژ می‌گردد. وزن و حجم سیستم شارژ پارامتری بسیار مهم در سیستم‌های پیشران الکتریکی می‌باشد. قابلیت اطمینان بالاتر، قیمت کمتر و دقت بیشتر این سیستم شارژ از دیگر مزایای این سیستم شارژ می‌باشد. چنین نیازمندی به ولتاژهای مرجع غیر ثابت برای تنظیم ولتاژ خروجی در کاربردهای دیگر نیز مثلاً در جایی که دیزل ژنراتورها و مصرف‌کننده‌ها در فاصله نسبتاً دوری نسبت به یکدیگر قرار دارند و تغییرات بار در سیکل کاری روزانه آنها زیاد و به تبع آن تغییرات ولتاژ در محل مصرف نیز زیاد می‌باشد متصور است. بدین ترتیب می‌توان با تغییر عملکرد AVR دیزل ژنراتور به کمک یک میکروپروسسور و حذف شارژر در سیستم رانش الکتریکی، علاوه بر مرتفع ساختن مشکلات وزن و هزینه‌های شارژر و نظارت و نگهداری، همان عملکرد مطلوب شارژر و حتی بهتر را از نقطه نظر و جنبه‌های فنی و اقتصادی متفاوت تحقق بخشید.

در این پایان‌نامه سیستم شارژ پیشنهادی فوق‌بطور کامل مدلسازی و شبیه‌سازی می‌شود. در مدلسازی باتری از یک مدل نو و پیشنهادی نسبت به مدل‌های پیشین باتری سربی اسیدی استفاده می‌شود. علاوه بر این، برای شارژ یک بانک باتری به ظرفیت ۵۰۰ آمپر ساعت که شامل ۲۲۰ باتری ۲ ولتی سری شده است، از یک دیزل ژنراتور کوچک 31.5 KVA، 50 Hz و 380 V استفاده می‌شود. دلیل انتخاب این نوع باتری و ژنراتور دیزلی کوچک در دسترس بودن پارامترها و اطلاعات مورد نیاز شبیه‌سازی و همچنین امکان مقایسه جواب‌های بدست آمده می‌باشد. پارامترهای تایید شده ژنراتور مورد شبیه‌سازی در مرجع [1]، مدل و پارامترهای AVR دیزل ژنراتور در مراجع [2] و [3] به تفصیل داده شده است. نتایج شبیه‌سازی و مقایسه آن با داده‌های شرکت‌های سازنده باتری و دیزل ژنراتور، عملکرد مطلوب مورد انتظار از کل سیستم شارژ را نشان می‌دهد. ساختار کلی پایان‌نامه به این شرح است که در فصل دوم به معرفی دیزل ژنراتور و اجزاء اصلی آن پرداخته می‌شود. در این فصل یک توضیح مختصر در رابطه با موتور دیزل، ژنراتور سنکرون، AVR، گاورنر<sup>۱</sup> و سایر تجهیزات جنبی دیزل ژنراتور داده می‌شود. در فصل سوم انواع باتری‌های شارژ شونده مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرند و

---

1 - Governor

---

مشخصه‌های عملکرد باتری‌های سربی اسیدی به‌عنوان باتری‌های به‌کار رفته در سیستم‌های ذخیره سازی انرژی توضیح داده می‌شوند. در فصل چهارم شارژرها مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرند. در این فصل پارامترهایی همچون روش‌های شارژ باتری‌ها، مشخصه‌های عملکرد شارژها، روش‌های کنترل و پایان شارژ مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرند. در فصل پنجم تمامی اجزای سیستم شارژ پیشنهادی مدلسازی و توسط نرم افزار MATLAB شبیه‌سازی می‌شوند و نهایتاً در فصل ششم جمع‌بندی و نتیجه‌گیری انجام می‌شود و پیشنهادهایی جهت تکمیل و ادامه کار ارائه می‌گردد.

# دیزل ژنراتور

---

به ترکیبی از یک موتور دیزل، ژنراتور و انواع متعلقات فرعی از قبیل شاسی، اتاقک پوشاننده، عایق‌های صدا، سیستم‌های کنترل، سیستم استارت اتومات و غیره که به‌عنوان یک مجموعه به یکدیگر متصل شده باشند دیزل ژنراتور می‌گویند. در دیزل ژنراتورها، موتور دیزل گشتاور مورد نیاز برای ژنراتور را تولید می‌کند. دیزل ژنراتورها می‌توانند توانی از ۱ تا ۲۰ کیلو ولت آمپر برای منازل، فروشگاه‌ها، ادارات کوچک و تا چند مگا ولت آمپر برای مصارف بزرگتر از قبیل ایستگاه‌های کوچک تولید برق، برق اضطراری مجتمع‌های بزرگ و کارخانه‌ها، نیروی رانش در کشتی‌ها، زیردریایی‌ها و لکوموتیوها و غیره برق تولید کنند. ژنراتورهای کوچک و معمولاً تا سایز ۲۰۰۰ کیلو ولت آمپر را می‌توان درون یک اتاقک ایزوله قابل حمل قرار داد. ژنراتورهای بزرگتر به صورت مجزا به محل نصب حمل شده و در آنجا مونتاژ و تجهیزات فرعی به آنها اضافه می‌گردد.

دیزل ژنراتورهای کوچک تا ۲۵۰ کیلو ولت آمپر نه تنها برای تولید برق اضطراری بلکه به جهت تامین برق مورد نیاز به صورت مستمر یا در زمان اوج مصرف و یا حتی در زمانی که کمبود ژنراتورهای بزرگتر حس می‌شود استفاده می‌شوند. کشتی‌ها و بسیاری از وسائل نقلیه بزرگ زمینی مانند قطارها نیز از دیزل ژنراتور نه فقط برای تامین برق روشنایی بلکه برای تامین نیروی محرکه مورد نیاز خود و به‌عنوان سیستم پیشران استفاده می‌کنند. به‌وسیله نیروی محرکه برقی می‌توان حرکت یکنواخت و قدرتمندتری علاوه بر استفاده مناسب تر از فضا داشت. محرکه‌های برقی قبل از

---

جنگ جهانی اول در کشتی‌ها مورد استفاده قرار گرفتند و در طول جنگ جهانی دوم به تکامل رسیدند [4].

هر دیزل ژنراتور از دو بخش اصلی موتور دیزل و ژنراتور سنکرون تشکیل شده است.

اجزاء اصلی یک دیزل ژنراتور عبارتند از [5]:

۱- موتور دیزل

۲- ژنراتور سنکرون

۳- تنظیم کننده ولتاژ (AVR)

۴- مخزن سوخت

۵- سیستم‌های خنک کننده و اگزوز

۶- شاسی دیزل ژنراتور

برای مصارف خاص و کاربردهای ویژه، ممکن است تجهیزاتی به اجزاء زیر اضافه گردد.

## ۲-۱. موتور دیزل

موتور دیزل یک موتور درون‌سوز است که از چرخه دیزل برای ایجاد حرکت استفاده می‌کند. موتور دیزل، به انواع گسترده‌ای از موتورها گفته می‌شود که بدون نیاز به یک جرقه الکتریکی می‌توانند ماده سوختنی را شعله‌ور سازند. در این موتورها برای شعله‌ور ساختن سوخت از حرارت‌های بالا استفاده می‌شود. در موتورهای دیزل ابتدا دمای اتاق احتراق را بسیار بالا می‌برند و پس از اینکه دما به اندازه کافی بالا رفت، ماده سوختنی را با هوا مخلوط می‌کنند. برای سوزاندن یک ماده سوختی به دو عامل حرارت و اکسیژن نیاز است. اکسیژن از طریق مجاری ورودی موتور وارد محفظه سیلندر می‌شود و سپس به‌وسیله پیستون فشرده می‌گردد. این فشردگی آنچنان زیاد است که باعث ایجاد حرارت بسیار بالا می‌گردد. سپس عامل سوم یعنی ماده سوختنی به گرما و اکسیژن افزوده می‌شود که در نتیجه آن

---

سوخت شعله‌ور می‌شود. طی سال‌های متمادی پس از اختراع موتور دیزل، از این نوع موتور عمدتاً و منحصر در کارهای درجا و سنگین از قبیل تولید برق، تلمبه کردن آب و همچنین برای تولید قدرت جهت رفع بعضی از نیازهای کارخانجات استفاده می‌شد. این موتورها سنگین، کم سرعت، دارای یک یا چند سیلندر و از نوع دوزمانه یا چهارزمانه بودند. پیشرفت بیشتر موتورهای دیزل، تا توسعه سیستم‌های پیشرفته تزریق سوخت در دهه ۱۹۳۰ طول کشید. در این سال‌ها رابرت بوش تولید انبوه پمپ‌های سوخت‌پاش خود را آغاز کرد. توسعه پمپ‌های سوخت‌پاش (پمپ‌های انژکتور) با توسعه موتورهای کوچکی که برای استفاده در خودروها مناسب بودند متعادل شد. موتورهای دیزل سبکتری که سرعتشان نیز بالا بود در سال ۱۹۲۵ به بازار عرضه شدند. با آنکه پیشرفت در ساخت این موتورها کند بود اما در سال ۱۹۳۰ موتورهای دیزل دارای قابل اطمینان مناسبی بودند. این پیشرفت تا پایان جنگ جهانی دوم برای مدتی کند بود. لیکن از آن تاریخ تاکنون طراحی و تولید این موتورها به طریقی پیشرفت نموده است که امروزه استفاده گسترده و فراگیر از موتورهای دیزل را شاهد هستیم. امروزه موتورهای دیزل جایگاه ویژه‌ای را در صنایع مختلف از قبیل حمل و نقل، تولید برق و غیره پیدا کرده‌اند. یکی از مضارفات عمده موتورهای دیزل، در دیزل ژنراتورها می‌باشد. از مزایای موتورهای دیزلی می‌توان به سازگاری آنها با هر نوع سوخت اعم از سوخت سبک یا سنگین، قابل اعتماد بودن، قابلیت نگهداری با ساده‌ترین تکنولوژی‌ها، بازدهی بالا (گاهی بیشتر از ۵۰٪) و قیمت پایین آنها اشاره کرد. در مقابل ایجاد لرزش و صدا، آلوده کردن محیط و کاهش نسبت نیرو به وزن در ترکیب شدن آنها با موتورهای گازی از معایب این موتورها به‌شمار می‌رود. موتورهای دیزل نیز مانند سایر موتورهای احتراق داخلی بر مبنای مختلفی قابل طبقه‌بندی هستند. مهمترین پارامترهای طبقه‌بندی موتورهای دیزل عبارتند از [6]:

۱- سرعت

۲- ساختمان<sup>۱</sup>

۳- نحوه پیکربندی<sup>۲</sup>

۴- نحوه تنفس<sup>۳</sup>

۵- خنک‌سازی<sup>۴</sup>

در جدول (۱-۲) موتورهای دیزل بر اساس پارامترهایی که گفته شد دسته بندی شده‌اند.

جدول ۱-۲: دسته بندی موتورهای دیزل [6]

دسته بندی	
سرعت کم (کمتر از ۲۵۰ دور در دقیقه) سرعت متوسط (بین ۲۵۰ تا ۱۰۰۰ دور در دقیقه) سرعت بالا (بیش از ۱۰۰۰ دور در دقیقه)	سرعت
موتورهای دو زمانه موتورهای چهار زمانه	ساختمان
موتورهای خطی موتورهای خورجینی (شکل ۷)	نحوه پیکربندی
طبیعی توسط کمپرسور	نحوه تنفس
خنک شونده با هوا خنک شونده با مایع	خنک سازی

موتور دیزل منبع انرژی مکانیکی ورودی به ژنراتور سنکرون می‌باشد. اندازه قدرت موتور دیزلی بطور مستقیم متناسب با حداکثر توان خروجی ژنراتور سنکرون کوپله شده با آن می‌باشد. در مدلسازی، دیزل به‌عنوان یک منبع تولید گشتاور ثابت در نظر گرفته می‌شود.

---

1 - Construction  
2 - Configuration  
3 - Aspiration  
4 - Cooling

---

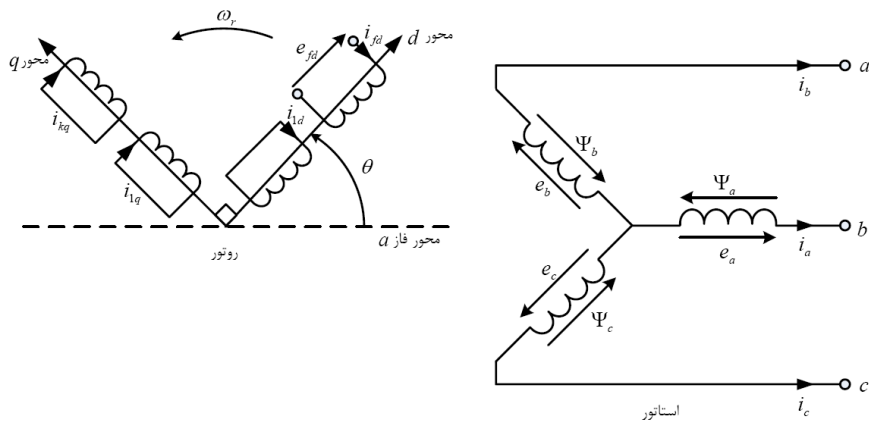
در یک سیستم ذخیره سازی انرژی، برای انتخاب یک دیزل ژنراتور، پارامترهای بسیار زیادی را می‌توان در نظر گرفت که از مهمترین آنها می‌توان به راندمان و قابلیت اطمینان بالا، طراحی جمع و جور، عملیات و مکانیزم ساده، دوام و کیفیت بالا، سر و صدای کم در طول عملیات، سطح انتشار پایین آلاینده‌گی و قیمت پایین اشاره نمود.

## ۲-۲. ژنراتور سنکرون

ژنراتور سنکرون بخشی از دیزل ژنراتور است که انرژی مکانیکی تولید شده توسط موتور دیزل را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌نماید. ژنراتور سنکرون تاریخچه‌ای بیش از صد سال دارد. اولین تحولات مربوط به ژنراتور سنکرون در دهه ۱۸۸۰ رخ داد. در نمونه‌های اولیه مانند ماشین جریان مستقیم، روی آرمیچر گردان یک یا دو جفت سیم‌پیچ وجود داشت که انتهای آنها به حلقه‌های لغزان متصل می‌شد و قطب‌های ثابت روی استاتور، میدان تحریک را تامین می‌کردند. به این طرح اصطلاحاً قطب خارجی می‌گفتند. در سال‌های بعد نمونه دیگری که در آن محل قرار گرفتن میدان و آرمیچر جابجا شده بود مورد توجه قرار گرفت. این نمونه که شکل اولیه ژنراتور سنکرون بود، تحت عنوان ژنراتور قطب داخلی شناخته و جایگاه مناسبی در صنعت برق پیدا کرد. شکل‌های مختلفی از قطب‌های مغناطیسی و سیم‌پیچ‌های میدان روی رتور استفاده شد، در حالیکه سیم‌پیچی استاتور، تکفاز یا سه فاز بود. محققان بزودی دریافتند که حالت بهینه از ترکیب سه جریان متناوب با اختلاف فاز نسبت به هم بدست می‌آید. استاتور از سه جفت سیم‌پیچ تشکیل شده بود که در یک طرف به نقطه اتصال ستاره و در طرف دیگر به خط انتقال متصل بودند. در یک ژنراتور سنکرون برای ایجاد یک میدان مغناطیسی در رتور یک جریان DC به سیم‌پیچ رتور اعمال می‌گردد. سپس رتور به وسیله محرک اصلی چرخانده می‌شود تا یک میدان مغناطیسی گردان در ماشین بوجود آید. این میدان مغناطیسی، یک ولتاژ سه فاز را در سیم‌پیچ‌های استاتور ژنراتور القاء می‌نماید. در یک ماشین الکتریکی دو عبارت سیم‌پیچ‌های میدان و سیم‌پیچ‌های آرمیچر بسیار مورد استفاده واقع می‌شود. بطور کلی عبارت سیم-



پیچ‌های میدان به سیم‌پیچ‌هایی گفته می‌شود که میدان مغناطیسی اصلی را در ماشین تولید می‌نماید و عبارت سیم‌پیچ‌های آرمیچر به سیم‌پیچ‌هایی اطلاق می‌شود که ولتاژ اصلی در آنها القاء می‌شود. در ژنراتورهای سنکرون، سیم‌پیچ‌های میدان در رتور و سیم‌پیچ‌های آرمیچر در استاتور می‌باشد. رتور ژنراتور سنکرون در اصل یک آهنربای الکتریکی بزرگ است. ولتاژ القایی در استاتور به شار در ماشین، فرکانس یا سرعت چرخش و ساختمان ماشین بستگی دارد. برای مدلسازی ژنراتور سنکرون، معمولاً از معادلات دو محوری پارک که از معمول‌ترین و پذیرفته‌ترین مدل‌های ماشین سنکرون می‌باشد استفاده می‌شود. در این بخش اصول مدلسازی ماشین سنکرون براساس تئوری دو محوری پارک به اختصار بیان می‌گردد. شکل (۱-۲) سیم‌پیچی‌های در نظر گرفته شده برای استاتور و رتور ماشین را نشان می‌دهد. مدار استاتور شامل یک سیم‌پیچی سه فاز است و رتور نیز یک سیم‌پیچی تحریک و یک سیم‌پیچی میراکننده بر روی محور  $d$  و دو سیم‌پیچی میراکننده بر روی محور  $q$  دارد. مدل نشان داده شده در شکل (۱-۲) براساس استاندارد IEEE 1110 می‌باشد [7].



شکل ۱-۲: مدارهای استاتور و رتور ماشین سنکرون

در شکل (۱-۲)  $a$ ،  $b$  و  $c$  سیم‌پیچی‌های سه فاز استاتور،  $fd$  سیم‌پیچی تحریک،  $ld$  سیم‌پیچی میرا کننده محور  $d$ ،  $1q$  و  $2q$  سیم‌پیچی‌های میرا کننده محور  $q$ ،  $\omega_r$  سرعت زاویه‌ای رتور بر حسب رادیان بر ثانیه و  $\theta$  زاویه بین محور مغناطیسی رتور و محور مرجع (محور مغناطیسی فاز  $a$ ) است.

در بدست آوردن معادلات ماشین سنکرون برای ساده‌سازی فرضیات زیر در نظر گرفته می‌شود:

الف) شکاف‌های موجود بر روی سطح داخلی استاتور تاثیر قابل توجهی بر اندوکتانس‌های رتور در حال حرکت ندارند.

ب) پسماند مغناطیسی آهن استاتور و رتور قابل صرف نظر کردن است.

ج) از نظر تاثیر متقابل استاتور و رتور، سیم‌پیچی‌های استاتور بصورت سینوسی در امتداد فاصله هوایی توزیع شده‌اند.

با فرض حالت ژنراتوری، معادلات ولتاژ مربوط به سیم‌بندی‌های استاتور و رتور را می‌توان بصورت

روابط (۱-۲) نوشت.

$$\begin{aligned} V_s &= \frac{d}{dt} \Psi_s - R_s I_s \\ V_r &= \frac{d}{dt} \Psi_r - R_r I_r \end{aligned} \quad (1-2)$$

در معادله (۱-۲) اندیس  $s$  برای استاتور و اندیس  $r$  برای رتور می‌باشد که در آن:

$$\begin{aligned}
V_s &= [v_a \quad v_b \quad v_c]^T \\
V_r &= [v_f \quad v_{1d} \quad v_{1q} \quad v_{2q}]^T \\
I_s &= [i_a \quad i_b \quad i_c]^T \\
I_r &= [i_f \quad i_{1d} \quad i_{1q} \quad i_{2q}]^T \\
\Psi_s &= [\psi_a \quad \psi_b \quad \psi_c]^T \\
\Psi_r &= [\psi_f \quad \psi_{1d} \quad \psi_{1q} \quad \psi_{2q}]^T \\
R_s &= \begin{bmatrix} r_a & 0 & 0 \\ 0 & r_b & 0 \\ 0 & 0 & r_c \end{bmatrix} \\
R_r &= \begin{bmatrix} r_f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_{1d} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{1q} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{2q} \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{۲-۲}$$

معادلات شاردهای استاتور و رتور را می‌توان به شکل زیر بیان کرد:

$$\begin{aligned}
\Psi_s &= L_{ss} I_s + L_{sr} I_r \\
\Psi_r &= L_{sr}^T I_s + L_{rr} I_r
\end{aligned} \tag{۳-۲}$$

که در آن ماتریس‌های اندوکتانس استاتور و رتور با روابط (۴-۲) بیان می‌شوند.

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_0 - L_{ms} \cos 2\theta_r & -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2\left(\theta_r - \frac{\pi}{3}\right) & -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2\left(\theta_r + \frac{\pi}{3}\right) \\ -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2\left(\theta_r - \frac{\pi}{3}\right) & L_{ls} + L_0 - L_{ms} \cos 2\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r - \pi) \\ -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2\left(\theta_r + \frac{\pi}{3}\right) & -\frac{1}{2}L_0 - L_{ms} \cos 2(\theta_r + \pi) & L_{ls} + L_0 - L_{ms} \cos 2\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix}$$

$$L_{rr} = \begin{bmatrix} L_{lf} + L_f & L_{f1d} & 0 & 0 \\ L_{1df} & L_{l1d} + L_{1d} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L_{l1q} + L_{1q} & L_{1q2q} \\ 0 & 0 & L_{2q1q} & L_{l2q} + L_{2q} \end{bmatrix} \quad (4-2)$$

$$L_{sr} = L_{rs}^T = \begin{bmatrix} L_{sf} \sin \theta_r & L_{s1d} \sin \theta_r & L_{s1q} \cos \theta_r & L_{s2q} \cos \theta_r \\ L_{sf} \sin \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & L_{s1d} \sin \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & L_{s1q} \cos \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) & L_{s2q} \cos \left( \theta_r - \frac{2\pi}{3} \right) \\ L_{sf} \sin \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & L_{s1d} \sin \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & L_{s1q} \cos \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) & L_{s2q} \cos \left( \theta_r + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix}$$

با استفاده از این دسته معادلات می‌توان بطور کامل ماشین سنکرون را بررسی نمود. اما این معادلات دارای عباراتی هستند که با  $\theta_r$  تغییر می‌کنند. با توجه به اینکه  $\theta_r$  نیز تابعی از زمان می‌باشد، این موضوع سبب پیچیده‌تر شدن تحلیل ماشین‌های سنکرون می‌شود. می‌توان با تبدیل مناسبی، متغیرهای استاتور را به شکل ساده‌تری درآورد. این تبدیل به نام تبدیل پارک معروف است و جزئیات آن در مرجع [8] آمده است. معادله (5-2) رابطه اساسی این تبدیل را نشان می‌دهد.

$$\begin{bmatrix} S_d \\ S_q \\ S_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (5-2)$$

در این رابطه،  $S$  می‌تواند هر کدام از متغیرهای ولتاژ، جریان یا شار دور ماشین باشد. عکس تبدیل پارک نیز بصورت رابطه (6-2) بیان می‌شود.

$$\begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_d \\ S_q \\ S_o \end{bmatrix} \quad (6-2)$$

با انتخاب دو محور طولی ( $d$ ) و عرضی ( $q$ ) که 90 درجه اختلاف فاز دارند، شارهای تولید شده توسط جریان‌ها بر روی یک محور هیچ پیوندی با شارهای محور دیگر نخواهند داشت. بنابراین دو دسته متغیر متعامد بدست خواهند آمد که این موضوع باعث ساده‌سازی بسیاری خواهد شد. زیرا می‌توان مدار معادل ماشین را بصورت دو مدار مستقل از هم در نظر گرفت. بنابراین با اعمال این تبدیل، معادلات حاکم بر ماشین سنکرون و متغیرهای متناظر بسیار ساده خواهند شد. در واقع این تبدیل را می‌توان به ابزاری برای ارجاع کمیت‌های استاتور به طرف رتور تشبیه کرد. مشابه این تبدیل در ارجاع متغیرهای ثانویه ترانسفورماتور به طرف اولیه آن جهت ساده‌سازی معادلات، انجام می‌شود. به دلایل زیر، بررسی معادلات ماشین سنکرون بر حسب متغیرهای  $dq0$  به‌میزان چشمگیری نسبت به کمیت‌های فاز آسان‌تر است:

الف) ماتریس اندوکتانس نهایی دارای مقادیری ثابت است.

ب) در حالت متعادل، کمیت‌های مولفه صفر ظاهر نمی‌شوند.

ج) در شرایط بهره‌برداری عادی و حالت ماندگار، تمامی جریان‌ها و شارهای سیم‌پیچی‌های استاتور و رتور دارای مقدار ثابتی خواهند بود.

د) پارامترهای محورهای  $d$  و  $q$  را می‌توان از طریق آزمایش در پایانه‌های ماشین بدست آورد.

معادلات نهایی ولتاژ در دستگاه مرجع رتور به شکل روابط (۷-۲) است. با داشتن این روابط، رفتار الکتریکی ماشین شبیه‌سازی می‌شود.

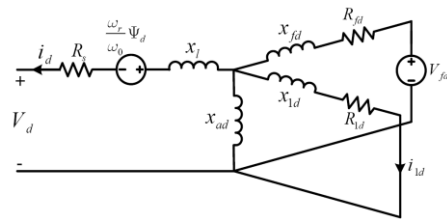
$$\begin{aligned}
 V_d &= \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} \Psi_d - \frac{\omega_r}{\omega_0} \Psi_q - r_d i_d \\
 V_q &= \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} \Psi_q + \frac{\omega_r}{\omega_0} \Psi_d - r_d i_q \\
 e_{fd} &= \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} \Psi_{fd} - r_{fd} i_{fd} \\
 0 &= \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} \Psi_{1d} - r_{1d} i_{1d} \\
 0 &= \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} \Psi_{1q} - r_{1q} i_{1q} \\
 0 &= \frac{1}{\omega_0} \frac{d}{dt} \Psi_{2q} - r_{2q} i_{2q}
 \end{aligned} \tag{۷-۲}$$

همچنین معادلات شار محورهای طولی، عرضی و خنثی مطابق روابط (۸-۲) می‌باشند.

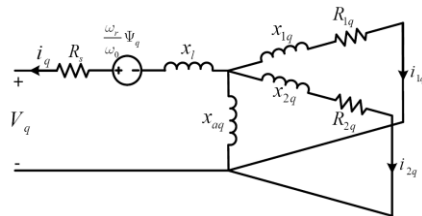
$$\begin{bmatrix} \Psi_q \\ \Psi_{1q} \\ \Psi_{2q} \end{bmatrix} = \frac{1}{\omega_0} \begin{bmatrix} X_l + X_{aq} & X_{aq} & X_{aq} \\ X_{aq} & X_{l1q} + X_{aq} & X_{aq} \\ X_{aq} & X_{aq} & X_{l2q} + X_{aq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_q \\ i_{1q} \\ i_{2q} \end{bmatrix} \tag{۸-۲}$$

براساس روابط ولتاژ و شار ارائه شده، می‌توان مدارهای معادل محورهای طولی و عرضی ماشین

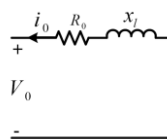
سنکرون را بدست آورد که در شکل (۲-۲) نشان داده شده‌اند.



(الف)



(ب)

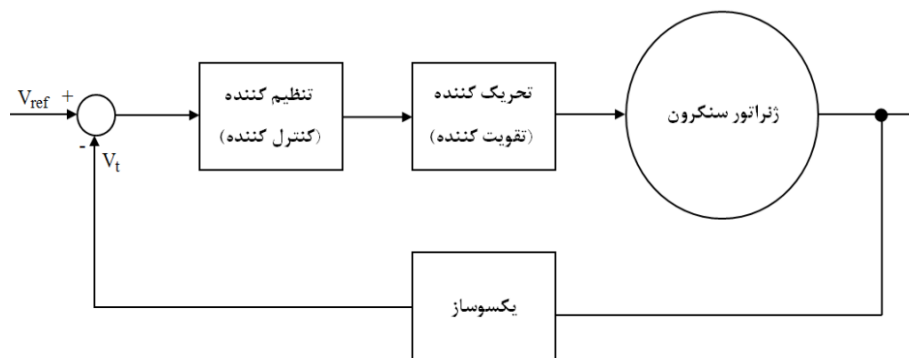


(ج)

شکل ۲-۲: مدارهای معادل ماشین سنکرون براساس تئوری پارک  
 (الف) مدار معادل محور طولی (ب) مدار معادل محور عرضی (ج) مدار معادل محور صفر

## ۲-۳. تنظیم کننده ولتاژ (AVR)

وظیفه AVR در یک ژنراتور سنکرون تنظیم ولتاژ خروجی ترمینال می‌باشد. دیزل ژنراتور باید بتواند خروجی خود را با مشخصات استاندارد به بار تحویل دهد. یکی از مهمترین پارامترها دامنه ولتاژ خروجی دیزل ژنراتور است که برای تنظیم آن از یک حلقه فیدبک ولتاژ استفاده می‌شود. در یک ژنراتور سنکرون عمل تنظیم ولتاژ از طریق کنترل بر روی ولتاژ DC اعمالی به سیم‌پیچ میدان که بر روی روتور قرار گرفته است انجام می‌گیرد. به این مجموعه در اصطلاح تحریک کننده گفته می‌شود. در شکل (۲-۳) شماتیک کلی نحوه ارتباط تنظیم کننده ولتاژ، سیستم تحریک و ژنراتور نشان داده شده است. ولتاژ در خروجی ژنراتور نمونه برداری شده و پس از یکسوسازی توسط یکسوسازها، با میزان ولتاژ مبنا مقایسه شده و به تنظیم کننده ولتاژ اعمال می‌شود [3].



شکل ۲-۳: شماتیک سیستم کنترل ولتاژ ژنراتور سنکرون

## ۲-۴. سیستم سوخت دیزل ژنراتور

مخزن سوخت دیزل ژنراتور معمولاً بطور متوسط ظرفیتی به اندازه روشن نگه داشتن موتور دیزل برای ۶ تا ۸ ساعت دارد. در دیزل ژنراتورهای کوچک، معمولاً مخزن سوخت، بخشی از پایه شاسی دیزل ژنراتور است و یا در بالای قاب دیزل ژنراتور نصب می‌شود. در اکثر موارد برای دیزل ژنراتورهای بزرگ نیاز به احداث و نصب یک مخزن سوخت خارجی در کنار دیزل می‌باشد. برای اکسیژن مصرفی نیز همانگونه که گفته شد دو نوع تنفس طبیعی و توسط کمپرسور وجود دارد.

## ۲-۵. سیستم خنک کننده

استفاده مداوم از دیزل ژنراتور باعث می‌شود اجزای مختلف آن داغ شود. ضروری است که خنک کننده و سیستم تهویه، گرمای حاصل دیزل ژنراتور را به خارج هدایت نماید. در دیزل ژنراتورهای کوچک، خنک‌سازی به وسیله هوا صورت می‌گیرد. در دیزل ژنراتورهای متوسط و واحدهای بزرگتر تا ظرفیت‌های ۲۲۵۰ کیلو ولت آمپر، معمولاً از آب به عنوان مایع خنک‌کننده برای دیزل ژنراتورها استفاده می‌شود. گاهی اوقات از هیدروژن به عنوان خنک‌کننده سیم‌پیچ‌های استاتور برای دیزل



---

ژنراتورهای بزرگتر (ظرفیت‌های بیشتر از ۲۲۵۰ کیلو ولت آمپر) استفاده می‌شود. هیدروژن در جذب گرما بهتر از سایر ماده‌های سردکننده عمل می‌نماید.

## ۲-۶. کنترل پنل دیزل ژنراتور

این قسمت در واقع یک رابط بین کاربر و دیزل ژنراتور است و شامل ابزارهای مدیریت و کنترلی می‌باشد. سازندگان دیزل ژنراتور کنترل پنل‌های متنوعی را برای کنترل آسان دیزل ژنراتورها تولید می‌کنند. که برخی از این موارد در ادامه ذکر شده است.

(الف) تنظیمات روشن و خاموش شدن دیزل ژنراتور: پنل‌های کنترل شروع خودکار، بطور خودکار دیزل ژنراتور را در هنگام قطع برق فعال می‌سازد.

(ب) موتور سنج‌ها: ابزارهای اندازه‌گیری پارامترهایی همچون فشار روغن، درجه حرارت مایع خنک‌کننده، ولتاژ باتری استارت، سرعت چرخش موتور دیزل و مدت زمان روشن بودن دیزل.

(ج) ژنراتور سنج‌ها: ابزارهای اندازه‌گیری پارامترهایی همچون جریان خروجی و ولتاژ خروجی و فرکانس دیزل ژنراتور.

(د) کنترلرهای دیگر: فاز سوئیچ انتخابگر، سوئیچ فرکانس، سنسورهای دما و فشار و غیره. اندازه‌گیری ثابت و نظارت بر این پارامترها امکان استفاده استاندارد از دیزل ژنراتور را برای کاربر فراهم می‌سازد تا مطابق با دستورالعمل‌های شرکت‌های سازنده، بهترین عملکرد دیزل ژنراتور حاصل گردد.

---

## ۲-۷. شاسی دیزل ژنراتور

دیزل ژنراتورهای کوچک قابل حمل می‌باشند و به‌صورت سیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. دیزل ژنراتورهای بزرگ به‌صورت ثابت مورد استفاده قرار می‌گیرند. در حالت کلی تمامی تجهیزات مربوط به دیزل ژنراتور بر روی سکو یا همان شاسی قرار می‌گیرد. در واقع شاسی نگه دارنده دیزل ژنراتور و تمامی متعلقات آن می‌باشد.

# باتری

---

حدود دو قرن پیش در سال ۱۷۸۹ شخصی به نام گالوانی منبع ذخیره‌سازی الکتریسیته را به جهانیان معرفی نمود. سه سال بعد شخصی به نام ولتا بر اساس تحقیقات گالوانی تکنولوژی باتری‌های قابل حمل را ارائه داد [9].

امروزه باتری‌ها در زندگی روزمره چنان نقشی پیدا کرده‌اند که به جرات می‌توان گفت بدون آنها، زندگی با مشکلات فراوانی روبرو خواهد شد. باتری به‌عنوان ساده‌ترین وسیله ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی کاربردهای وسیعی در صنایع مختلف پیدا کرده است. نیاز روز افزون نسبت به آن باعث شده تا تلاش به منظور بهبود کیفیت و افزایش بهره‌وری از آن ادامه داشته باشد [10]. باتری‌ها به‌عنوان بخشی اساسی در زندگی روزمره و صنعت کاربرد پیدا کرده‌اند. از مهمترین کاربردهای باتری‌ها می‌توان به موارد تامین انرژی لوازم و تجهیزات خانگی همچون تلفن‌های همراه، کامپیوترهای شخصی قابل حمل، دوربین و تجهیزات عکاسی و فیلم برداری، تجهیزات روشنایی و انواع اسباب بازی‌ها و وسایل سرگرمی و تفریحی که نیازمند منبع تغذیه هستند اشاره کرد. باتری‌ها به‌عنوان منابع تولید انرژی و پشتیبانی در نیروگاه‌های تولید برق، ایستگاه‌های فرعی و مخابرات، منابع تولید انرژی بدون وقفه (UPS<sup>۱</sup>)، منابع تولید انرژی دستی و قابل حمل نقش مهمی دارند. همچنین برای تولید انرژی در

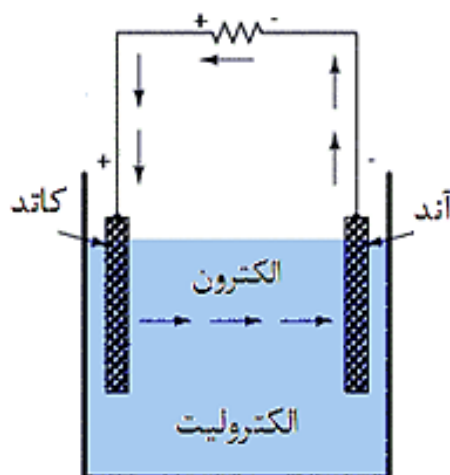
---

<sup>۱</sup>-Uninterruptible Power Supplies

سیستم‌های پیشران تجهیزات دریایی و فضایی مانند کشتی‌ها، زیردریایی‌ها و فضاپیماها از باتری‌ها استفاده می‌شود [11][12][13].

### ۱-۳. باتری و مفاهیم آن

باتری‌ها مولدهایی هستند که انرژی شیمیایی را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. باتری‌ها معمولاً از کنار هم قراردادن حداقل دو صفحه فلزی (یا آلیاژی) متفاوت در داخل یک محلول شیمیایی بوجود می‌آیند. (شکل ۱-۳) یکی از این دو صفحه دارای خاصیت الکترون دهی بیشتر (آند) و دیگری دارای خاصیت الکترون گیری بیشتر (کاتد) می‌باشد. محلول شیمیایی که باعث ایجاد ارتباط بین این دو صفحه می‌گردد الکترولیت نامیده می‌شود.



شکل ۱-۳: اجزای یک باتری ساده

باتری‌ها از نظر شارژ شدن به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند. دسته اول باتری‌هایی که در پایان فرایند دشارژ، عمر باتری به پایان می‌رسد و قابلیت شارژ مجدد را ندارند. به این باتری‌ها باتری‌های اولیه گفته می‌شود. مانند باتری‌های روی هوا، روی دی اکسید منگنز، باتری‌های لیتیومی اولیه و باتری‌های آلکالاین (قلیایی). دسته دوم باتری‌هایی که با عبور جریان از باتری در جهت مخالف جریان

---

دشارژ، مجددا شارژ می‌شوند. به این باتری‌ها، باتری‌های ثانویه نامیده می‌شوند. مانند باتری‌های سربی اسیدی، نیکل کادمیوم، هیبرید نیکل فلز، لیتیوم پلیمر و لیتیوم یون. نامگذاری باتری‌های ثانویه بر اساس جنس الکترولیت و صفحات کاتد و آند آنها می‌باشد.

### ۲-۳. اصطلاحات مربوط به باتری‌ها

در این بخش برای آشنایی بیشتر با باتری یک توضیح مختصر در مورد اصطلاحات معمول و رایج آنها بیان شده است.

- سلول: یک سلول شامل تعدادی صفحات باردار مثبت و منفی غوطه‌ور در یک الکترولیت است که به وسیله یک واکنش شیمیایی بار الکتریکی تولید می‌کند.
- باتری: از اتصال سری تعدادی سلول به یکدیگر ایجاد می‌شود.
- رشته یا بانک: یک رشته یا بانک از چند باتری که به صورت سری یا موازی به هم متصل شده‌اند تشکیل می‌شود تا توانایی تولید ولتاژ و ظرفیت مورد نیاز برای مصرف کننده بدست آید.
- ظرفیت باتری: ظرفیت اسمی باتری  $C_n$ ، ظرفیت تخلیه آن باتری برای مدت زمان مشخص  $T_n$  با شدت جریان نامی  $I_n$  است؛ طوریکه ولتاژ نهایی پس از تخلیه از حد معینی کمتر نشود و تخلیه با سطوح نامی و چگالی نامی الکترولیت و در درجه حرارت نامی انجام شود. در این صورت ظرفیت باتری برابر با رابطه (۱-۳) می‌شود. اگر جریان بر حسب آمپر  $A$  و زمان بر حسب ساعت  $H$  محاسبه گردد ظرفیت باتری بر حسب آمپرساعت  $AH$  خواهد شد.

$$C_n = I_n \times T_n \quad (1-3)$$

- ولتاژ نهایی تخلیه: ولتاژ نهایی تخلیه مقدریست که ولتاژ باتری نباید به ازاء جریان تخلیه مشخصی از آن کمتر شود.

- نرخ<sup>۱</sup> C: بر حسب آمپر که از نظر عددی با ظرفیت نامی باتری یا سلول برابر است. به عنوان مثال یک باتری با ظرفیت ۱۰۰ آمپر ساعت دارای نرخ C ای برابر با ۱۰۰ آمپر می باشد. مزیت استفاده از نرخ C اینست که سایز باتری را در مباحث مربوط به شارژ حذف می کند.

- وضعیت شارژ یا SOC<sup>۲</sup>: نشان دهنده میزان شارژ باتری است و به صورت ظرفیت شارژ شده باتری به ظرفیت نامی آن تعریف می گردد و توسط رابطه (۲-۳) بیان می شود. در این رابطه  $SOC_0$  وضعیت شارژ اولیه باتری،  $C_n$  ظرفیت نامی باتری،  $I_b$  جریان باتری و  $t_c$  زمان شارژ باتری است. در رابطه (۲-۳)، ۰٪ نشان دهنده دشارژ کامل و ۱۰۰٪ نشان دهنده شارژ کامل باتری است [14].

$$SOC = SOC_0 + \left( \frac{1}{C_n} \int_0^{t_c} I_b(\tau) d\tau \right) \times 100\% \quad (2-3)$$

- عمق دشارژ یا DOD<sup>۳</sup>: به بیان ساده به صورت ظرفیت دشارژ شده باتری به ظرفیت نامی آن تعریف می گردد و به صورت رابطه (۳-۳) نشان داده می شود. به عبارت دقیق تر DOD برابر با حاصل تقسیم ظرفیت تحویل داده شده توسط باتری بر ظرفیت نامی است.  $t_d$  زمان دشارژ باتری می باشد. می توان گفت برای DOD، ۰٪ بیان کننده شارژ کامل و ۱۰۰٪ بیان کننده دشارژ کامل باتری است [14].

$$DOD = \frac{1}{C_n} \int_0^{t_d} I_b(\tau) d\tau = 1 - SOC \quad (3-3)$$

### ۳-۳. پتانسیل الکتروشیمیایی

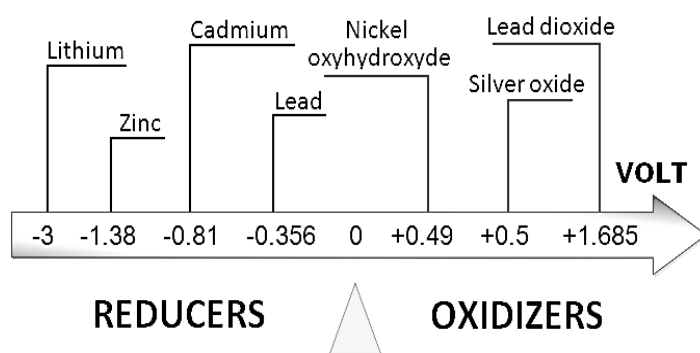
ولتاژ هر باتری فقط تابعی از جنس فلزات آند و کاتد آن می باشد. در واقع هنگام واکنش شیمیایی و جداسدن و حرکت الکترون ها، یک اختلاف پتانسیل بین دهنده و گیرنده الکترون بوجود می آید که این اختلاف پتانسیل ولتاژ باتری را سبب می شود. در علم شیمی یک شاخه به نام الکتروشیمی به

<sup>۱</sup> - C Rate

<sup>۲</sup> - State Of Charge

<sup>۳</sup> - Depth Of Discharge

محاسبه همین پتانسیل‌ها می‌پردازد. مبنای محاسبه ولتاژ باتری‌ها، پتانسیل اکسید هیدروژن (OH) می‌باشد. در شکل (۲-۳) پتانسیل الکتروشیمیایی چندین اکسنده و کاهنده آورده شده است. در هر سلول شیمیایی، پتانسیل سلول از اختلاف ولتاژ بین اکسنده و کاهنده آن سلول حاصل می‌شود. ابعاد باتری تاثیری در ولتاژ سلول آن ندارند، اما ظرفیت باتری تابعی از تعداد صفحات، مساحت صفحات و حجم باتری است.



شکل ۲-۳: ولتاژ الکتروشیمیایی بعضی عناصر و مواد

مهمترین و پرکاربردترین باتری‌های قابل شارژ از نظر جنس صفحات و الکترولیت را می‌توان بصورت زیر نام برد.

### ۳-۴. باتری نیکل کادمیوم

باتری‌های نیکل کادمیم (Nickel-Cadmium) با سرعت بالایی شارژ می‌شوند و می‌توانند طول عمر خوبی داشته باشند (با بیش از هزار چرخه شارژ و دشارژ). باتری‌های نیکل کادمیوم از اثر حافظه برخوردارند، یعنی در طی شارژهای متوالی به تدریج انرژی کمتری را بعد از هر شارژ ذخیره می‌کنند و کارایی باتری کمتر می‌گردد. برای جلوگیری از اثر حافظه، قبل از شارژ این باتری‌ها، باید آنها را بطور کامل دشارژ کرد. بعضی از شارژرهای باتری‌های نیکل کادمیم دارای مداری برای دشارژ کردن باتری، پیش از شارژ کردن آنها هستند.



---

باتری‌های نیکل کادمیوم باید حداقل هفته‌ای یک بار شارژ کامل و دشارژ کامل شوند، چون در غیر این صورت روزانه ۱٪ از ظرفیت آنها کم می‌شود. از اینرو این نوع باتری‌ها در وسایلی که بطور دائم استفاده می‌شوند کاربرد دارند. ظرفیت باتری‌های نیکل کادمیوم معمولاً در حدود میلی آمپر ساعت می‌باشد. باتری‌های نیکل کادمیوم می‌توانند در عرض ۱ تا ۲ ساعت شارژ شوند. این باتری‌ها دارای ماده سمی کادمیوم هستند [15].

### ۳-۵. باتری نیکل فلز

باتری‌های نیکل فلز (Nickel-Metal Hydride) ۳۰٪ تا ۴۰٪ ظرفیت ذخیره‌سازی بیشتری را نسبت به باتری‌های نیکل کادمیم دارند، اما تعداد چرخه شارژ و دشارژشان کمتر از باتری‌های نیکل کادمیوم است (معمولاً بین ۳۰۰ تا ۵۰۰ چرخه) و نسبت به باتری‌های نیکل کادمیوم، قیمت بیشتری دارند. باتری‌های هیبرید نیکل فلز، فاقد خاصیت اثر حافظه‌اند و پیش از شارژ به دشارژ کامل نیاز ندارند. اگر باتری هیبرید نیکل فلز بطور کامل دشارژ شوند عمر آنها کم می‌شود. شارژ کردن باتری‌های هیبرید نیکل فلز نسبت به باتری‌های نیکل کادمیم طولانی‌تر است. شارژرهای باتری‌های هیبرید نیکل فلز باید بتوانند جلوی شارژ بیش از حد باتری را بگیرند و یا اگر دمای داخلی باتری زیاد شد عمل شارژ را متوقف کنند. این باتری‌ها همچنین دارای درصد بالای دشارژ خود به خود می‌باشند و اگر حدود یک هفته بدون استفاده رها شوند، بطور کامل دشارژ می‌گردند [15] و [16].

### ۳-۶. باتری لیتیوم یون

باتری‌های لیتیوم یون (Lithium-Ion) بالاترین چگالی انرژی را در باتری‌های شارژ شدنی فراهم می‌سازند و چگالی انرژی آنها تقریباً دو برابر باتری‌های نیکل کادمیم است. باتری‌های لیتیوم یون به دشارژ کامل نیاز ندارند و دارای حافظه نمی‌باشند. یک باتری لیتیوم یون را بی آنکه روی کارایی آن تغییری ایجاد شود، می‌توان در هر زمانی شارژ کرد، اما چون معمولاً دارای طول عمر شارژ و دشارژ

---

۳۰۰ تا ۵۰۰ چرخه هستند، اگر زود به زود و قبل از تخلیه شارژ شوند طول عمر باتری پایین می‌آید. بیشترین کاربرد این باتری‌ها در کامپیوترهای قابل حمل می‌باشد.

### ۳-۷. باتری پلیمر لیتیوم یون

باتری‌های پلیمر لیتیوم یون (Lithium-Ion Polymer) اساساً شبیه باتری‌های لیتیوم یون هستند و از لحاظ ساختار اندکی اختلاف در با آنها دارند. باتری‌های پلیمر لیتیوم یون بسیار سبکتر و در برابر شارژ بیش از حد و نشست مواد شیمیایی نیز مقاوم‌ترند. اما تولید آنها گرانتر از باتری‌های لیتیوم یون تمام می‌شود و چگالی انرژی پایین‌تری دارند. باتری‌های پلیمر لیتیوم یون بیشتر در وسایل الکترونیکی سبک وزن و گران قیمت مانند گوشی‌های موبایل به کار می‌روند [15].

### ۳-۸. باتری سربی اسیدی

باتری سربی اسیدی (Lead-Acid) که اصطلاح صحیح‌تر آن باتری سرب اکسید سرب می‌باشد برای اولین بار توسط یک فیزیکدان فرانسوی به نام Gaston Plante در سال ۱۸۵۹ ساخته شد. در این باتری، سرب و اکسید سرب صفحات آند و کاتد و اسید سولفوریک الکترولیت باتری را تشکیل می‌دهد. باتری‌های سربی اسیدی در مقایسه با سایر باتری‌های قابل شارژ، به نسبت توانی که تولید می‌کنند، ارزان‌ترین باتری می‌باشند. چگالی انرژی این باتری‌ها در مقایسه با سایر باتری‌ها کمتر است و دارای طول عمر شارژ و دشارژ ۳۰۰ تا ۷۰۰ چرخه هستند. در باتری سربی اسیدی ولتاژ هر سلول ۲ ولت ( $1.685V - (-0.356V) = 2.041V$ ) می‌باشد. باتری‌های سربی اسیدی به دلیل انرژی مخصوص مناسب و توانایی عملکرد در دشارژ با جریان‌های زیاد، بطورگسترده‌ای در سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی استفاده می‌شوند [18]. با توجه به توانایی عملکرد در دشارژ با نرخ بالا و قیمت کم، این باتری‌ها در کشتی‌ها و زیردریایی‌های دیزل الکتریک، سیستم‌های برق اضطراری و منابع تغذیه سیستم‌های مخابراتی که نیاز به تعداد زیادی باتری است بیشترین استفاده را دارند [19].

توجه به توان مورد نیاز سیستم‌های الکتریکی و رنج دیزل ژنراتورهای موجود در بازار، در حال حاضر با توجه به مسائل اقتصادی، تنها گزینه مناسب برای ایجاد یک بانک باتری به منظور استفاده در سیستم‌های ذخیره سازی انرژی، باتری‌های سربی اسیدی می‌باشد. در این پایان‌نامه با توجه به کاربردی بودن مسئله مورد بررسی، باتری‌های تحت مطالعه که برای ذخیره سازی انرژی بکار می‌روند از نوع باتری‌های سربی اسیدی انتخاب می‌شوند. جدول (۳-۱) مقایسه‌ای بین باتری‌های قابل شارژ را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۱: مقایسه چند باتری باتری‌های قابل شارژ

	سربی اسیدی	نیکل کادمیوم	نیکل هیدرید فلز	لیتیوم یون
ولتاژ سلول (V)	2	1.2	1.2	3.6
انرژی مخصوص (Wh/Kg)	1-60	20-55	1-80	3-100
توان مخصوص (W/Kg)	<300	150-300	<200	100-1000
چگالی انرژی (KWh/m <sup>3</sup> )	25-60	25	70-100	80-200
چگالی توان (MW/m <sup>3</sup> )	<0.6	0.125	1.5-4	0.4-2
تعداد دفعات دشارژ	300-700	500-1000	600-1000	2000-3000
محدوده زمان دشارژ	>1min	1min-8hr	>1min	10s-1hr
هزینه (\$/kWh)	125	600	540	600
هزینه (\$/kW)	200	600	1000	1100
راندمان (%)	75-90	75	81	99

### ۳-۸-۱. معادلات شیمیایی درون سلول سربی اسیدی

در یک سلول سربی اسیدی، صفحه مثبت از جنس دی اکسید سرب ( $PbO_2$ ) و صفحه منفی از جنس سرب ( $Pb$ ) و الکترولیت آن اسید سولفوریک رقیق شده با آب ( $H_2SO_4 + H_2O$ ) می‌باشد. واکنش شیمیایی که در یک سلول سربی اسیدی انجام می‌شود توسط رابطه (۳-۴) بیان می‌گردد [20].



---

در یک سلول سربی اسیدی نرخ واکنش‌های شیمیایی تابعی از وضعیت شارژ باتری، ظرفیت باتری، نرخ شارژ و دشارژ، دمای محیط و عمر باتری می‌باشد. در یک سلول سربی اسیدی سرب و دی اکسید سرب با اسید سولفوریک واکنش می‌دهند و حاصل این واکنش سولفات سرب و آب می‌باشد. پس از دشارژ باتری، با تزریق جریان به باتری، واکنش در جهت برگشت انجام می‌شود و باتری مجدداً شارژ می‌گردد.

### ۳-۸-۲. مشخصه‌های عملکرد باتری سربی اسیدی

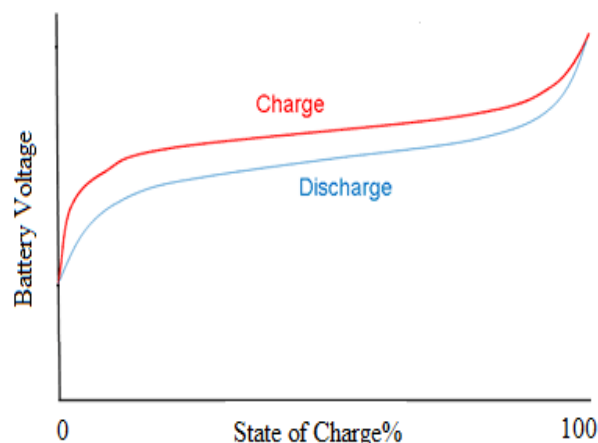
هر شرکت سازنده باتری، یک کاتالوگ برای محصولات خود در نظر می‌گیرد که در این کاتالوگ برخی مشخصه‌های مهم همچون منحنی‌های شارژ و دشارژ، منحنی ولتاژ مدار باز بر حسب وضعیت شارژ، تغییرات ظرفیت بر حسب دما، منحنی اثر پوکرت<sup>۱</sup> و ... آورده می‌شود. در این بخش برخی از مهمترین مشخصه‌های عملکرد باتری‌های سربی اسیدی بیان شده است.

### ۳-۸-۲-۱. منحنی‌های شارژ و دشارژ

شکل موج ولتاژ باتری بر حسب زمان بر اساس جریانی که از آن کشیده می‌شود با توجه به جهت جریان، منحنی شارژ یا دشارژ باتری نامیده می‌شود. منحنی‌های شارژ و دشارژ باتری مهمترین مشخصه باتری می‌باشند که مدلسازی باتری بر اساس آنها انجام می‌شود. در منحنی‌های شارژ و دشارژ عموماً محور عمودی بر حسب ولتاژ یک سلول (یا ضربی از آن بر حسب تعداد سلول‌های باتری) و محور افقی بر حسب زمان دشارژ (معمولاً ساعت) و یا درصد وضعیت شارژ است. در حالت کلی در باتری‌ها مشخصه شارژ کاملاً منطبق بر مشخصه دشارژ نمی‌باشد و بین مشخصه شارژ و دشارژ یک حلقه هیستریزیس بوجود می‌آید (شکل (۳-۳)). این عدم انطباق به دلیل تفاوت مقاومت داخلی باتری در پروسه شارژ و دشارژ می‌باشد و تابعی از عوامل شیمیایی درون سلولی است.

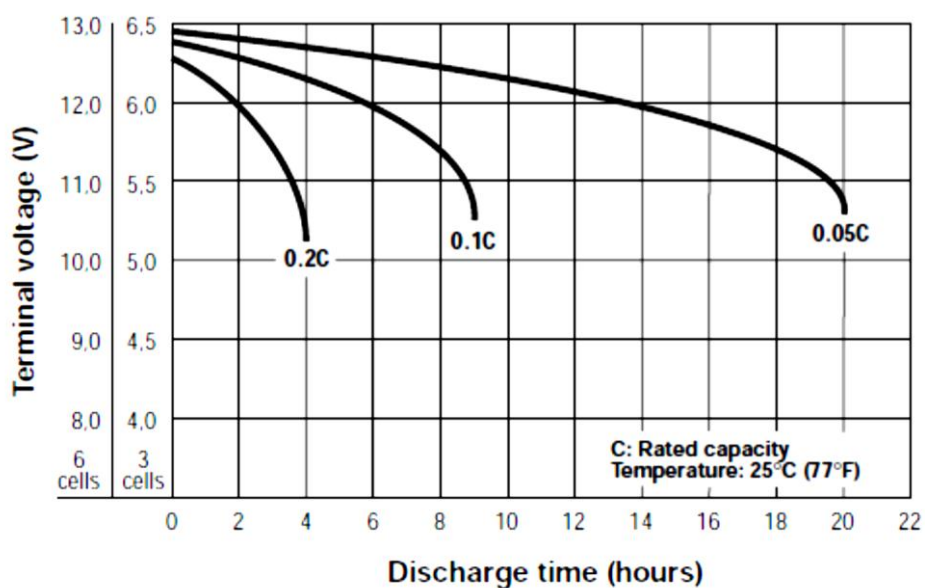
---

<sup>۱</sup> - PEUKERT EFFECT

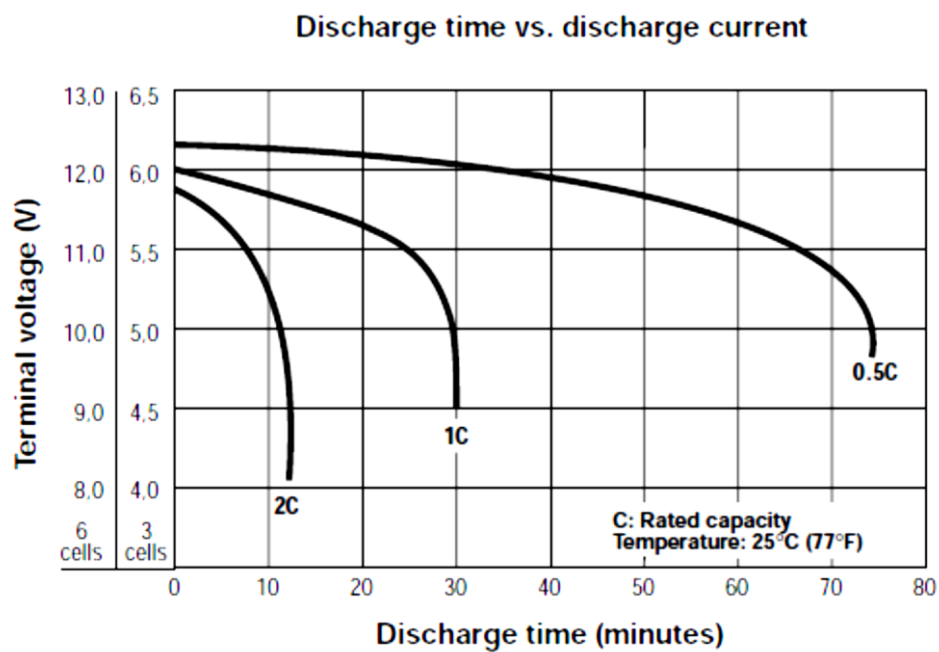


شکل ۳-۳: منحنی شارژ و دشارژ یک باتری

در باتری‌های سربی اسیدی مساحت این حلقه بسیار ناچیز است و در اکثر مدلسازی‌ها از این عدم انطباق صرف نظر می‌شود. از اینرو در کاتالوگ شرکت‌های سازنده باتری‌های سربی اسیدی، فقط منحنی‌های دشارژ باتری‌ها داده می‌شود. در باتری‌های سربی اسیدی منحنی‌های دشارژ، براساس جریان‌های مختلف دشارژ و معمولاً از رنج  $0.05C$  تا  $2C$  رسم می‌شوند. ماهیت منحنی‌های دشارژ باتری‌های سربی اسیدی یکسان است. اما ممکن است با توجه به مواد به کار رفته در باتری، عناصر اضافه شده به باتری (مانند کلسیم و آنتیموان) و... اندکی تفاوت در منحنی‌های دشارژ باتری‌های کارخانه‌های سازنده مشاهده شود. شکل (۳-۴) و شکل (۳-۵) منحنی‌های شارژ و دشارژ مربوط به یک باتری سربی اسیدی را بر اساس جریان‌های متفاوت دشارژ نشان می‌دهد. در این شکل‌ها محور عمودی برای دو نوع باتری ۶ و ۱۲ ولت ترسیم شده است. منحنی‌های دشارژ معمولاً برای شرایط محیطی (فشار و دما و رطوبت) استاندارد داده می‌شود. در ادامه خواهیم دید که تغییرات شرایط محیطی تغییراتی را پارامترهای باتری به وجود می‌آورد.



شکل ۳-۴: منحنی دشارژ یک باتری سربی اسیدی با نرخ دشارژ 0.05C-0.2C [21]



شکل ۳-۵: منحنی دشارژ یک باتری سربی اسیدی با نرخ دشارژ 0.5C-2C [21]

منحنی‌های دشارژ باتری‌ها بعد از مدت زمانی که در ناحیه خطی هستند به ناحیه غیر خطی وارد می‌شوند و در این ناحیه به سرعت ولتاژ افت می‌کند. شروع نقطه‌ای که تغییرات افت ولتاژ به شدت زیاد می‌شود نقطه ولتاژ پایان دشارژ را نشان می‌دهد. در باتری‌ها، ناحیه کار، ناحیه خطی می‌باشد. در جدول (۲-۳) ولتاژ پایان شارژ باتری‌های نمونه شکل (۳-۴) و (۳-۵) نشان داده شده است.

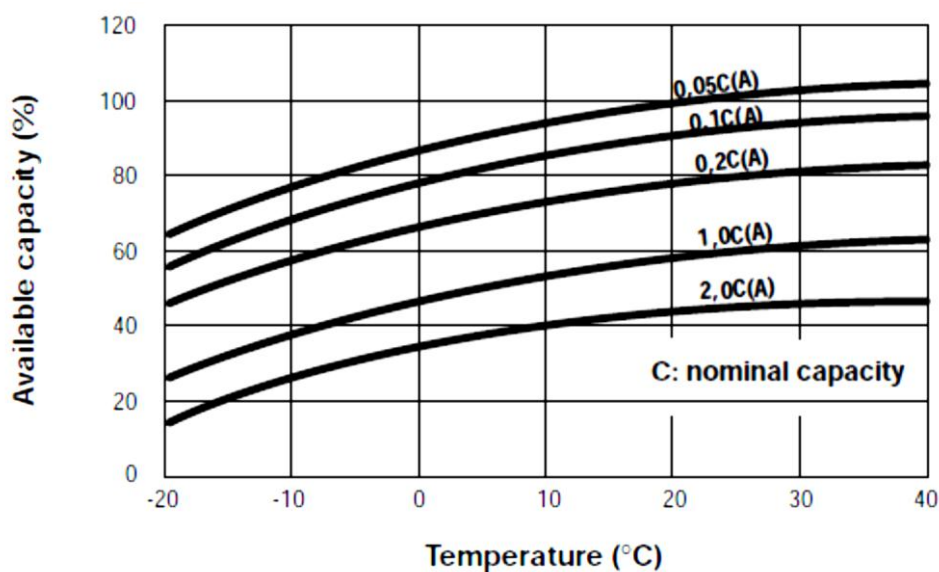
جدول ۲-۳: ولتاژ پایان دشارژ بر حسب جریان دشارژ [21]

ولتاژ پایان دشارژ (V/cell)	نرخ جریان دشارژ
1.75	کمتر از 0.2 C
1.7	0.2 C – 0.5 C
1.6	0.5 C – 1 C
1.5	1 C – 2 C
1.35	2 C – 3 C
1	بیشتر از 3 C

### ۳-۸-۲-۲. منحنی تاثیر دما بر ظرفیت

یکی از پارامترهای مهم در نگهداری باتری‌های سربی اسیدی دمای نگهداری آنها می‌باشد. همانگونه که در منحنی‌های شکل (۳-۶) مشخص می‌باشد کاهش دما سبب کم شدن ظرفیت باتری می‌شود. در واقع تاثیر دما بر روی نرخ واکنش‌های درون سلول می‌باشد و با کم شدن دما، ویسکوزیته الکترولیت بیشتر شده و در نتیجه واکنش‌های کمتری بین صفحات باتری رخ می‌دهد و سبب کم شدن ظرفیت باتری می‌گردد. باید توجه داشت در باتری‌های سربی اسیدی هرچند افزایش دما سبب افزایش ظرفیت می‌شود اما مشکلات دیگری مانند افزایش دشارژ خودبه خود و کاهش عمر باتری را به دنبال دارد. از اینرو سازندگان باتری، بهترین محدوده دمایی برای نگهداری از باتری‌ها را ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد پیشنهاد می‌کنند. در مدلسازی‌های باتری سربی اسیدی معمولاً اثر دما در نظر

گرفته نمی‌شود و مدلسازی برای دمای استاندارد ۲۵ درجه انجام می‌شود. همانگونه که در شکل (۳-۶) مشخص می‌باشد اثر دما بر روی ظرفیت باتری‌های سربی اسیدی تقریباً به صورت خطی است و می‌توان آن را به صورت یک عامل خارجی تاثیر گذار در ظرفیت باتری دانست.



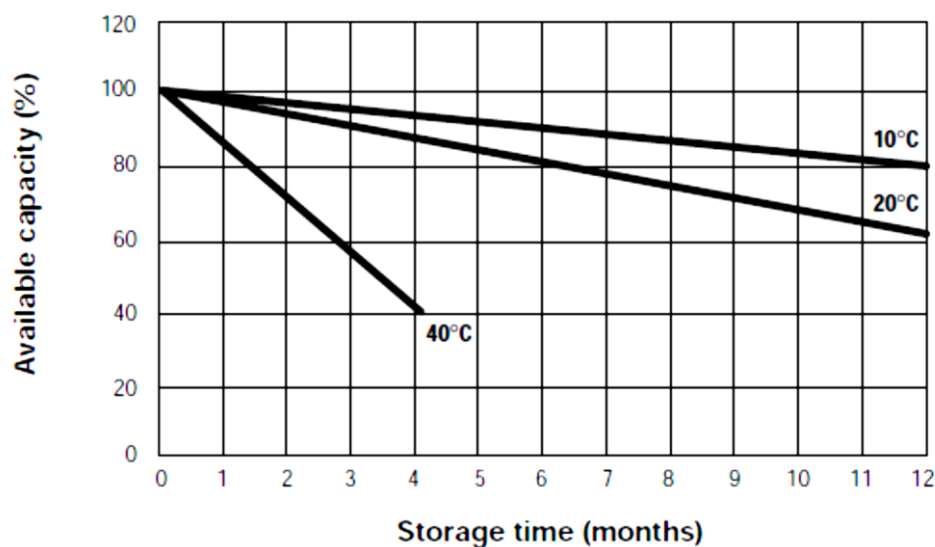
شکل ۳-۶: منحنی تاثیر دما بر ظرفیت باتری [21]

### ۳-۲-۸-۳. منحنی دشارژ خود به خود

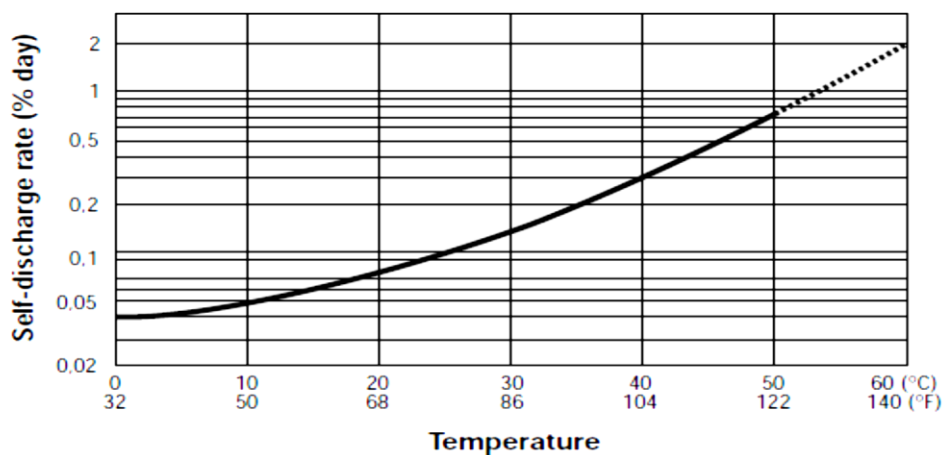
باتری‌های سربی اسیدی مانند سایر باتری‌ها اگر بدون استفاده قرار گیرند، پس از مدت زمانی معلوم تخلیه می‌گردند. کاهش خود به خود ظرفیت و یا دشارژ باتری بدون عبور جریان از مدار خارجی، دشارژ خود به خود نام دارد. در یک باتری سربی اسیدی، حتی در حالت مدار باز، سرب و دی اکسید سرب با اسید سولفوریک واکنش می‌دهند که نتیجه آن آزاد شدن اکسیژن در الکتروود مثبت و هیدروژن در الکتروود منفی است. با گذشت زمان بر اثر انجام این واکنش‌های شیمیایی باتری دشارژ می‌شود. دلیل اصلی دشارژ خود به خود، مقاومت داخلی باتری است که با توجه به اندازه آن،



نرخ دشارژ خود به خود مشخص می‌گردد. از عوامل محیطی، تاثیرگذارترین عامل در دشارژ خود به خود یک باتری سربی اسیدی، دما می‌باشد که با افزایش دما، دشارژ خود به خودی باتری نیز افزایش می‌یابد. هنگامیکه دشارژ خود به خود باتری‌ها به میزان ۵۰٪ رسید، باتری‌ها می‌باید دوباره شارژ شوند. شکل (۷-۳) منحنی مدت زمان نگهداری باتری سربی اسیدی در حالت بدون استفاده را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل (۷-۳) مشخص می‌باشد در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد باتری سربی اسیدی نمونه بعد از ۱ سال و در دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد بعد از ۳ ماه، ۴۰ درصد از ظرفیت خود را از طریق دشارژ خود به خود از دست می‌دهد. در شکل (۸-۳) منحنی دشارژ خود به خود بر حسب دما در باتری سربی اسیدی نشان داده شده است.



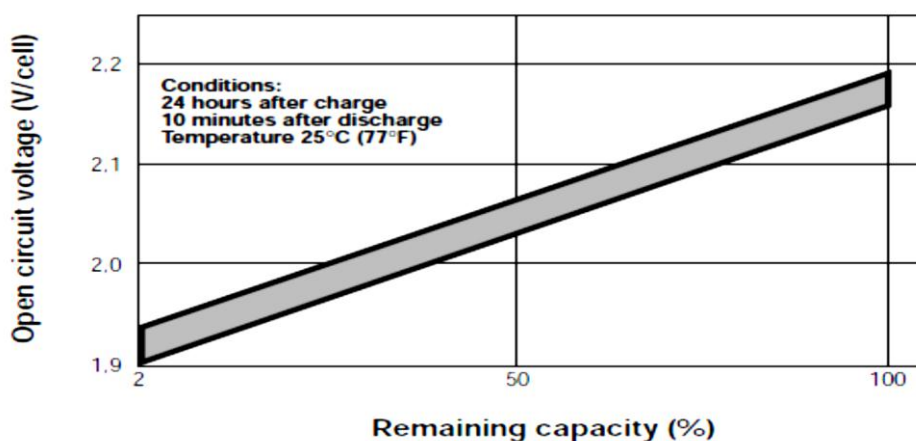
شکل ۷-۳: منحنی زمان نگهداری باتری سربی اسیدی در حالت بدون استفاده [21]



شکل ۳-۸: منحنی دشارژ خود به خود بر حسب دما در باتری سربی اسیدی [21]

### ۳-۸-۲-۴. منحنی ولتاژ مدار باز باتری

در باتری‌ها، ولتاژ مدار باز باتری تابعی از  $SOC$ ، باتری می‌باشد. با دشارژ شدن باتری، میزان ولتاژ مدار باز آن کاهش می‌یابد. یکی از راه‌های تعیین وضعیت شارژ باتری، اندازه‌گیری ولتاژ مدار باز آنها می‌باشد. در شکل (۳-۹) منحنی ولتاژ مدار باز یک سلول از باتری‌های نمونه بر حسب وضعیت شارژ آن نشان داده شده است.



شکل ۳-۹: منحنی ولتاژ مدار باز باتری سربی اسیدی [21]

### ۳-۸-۲-۵. منحنی مقاومت داخلی باتری

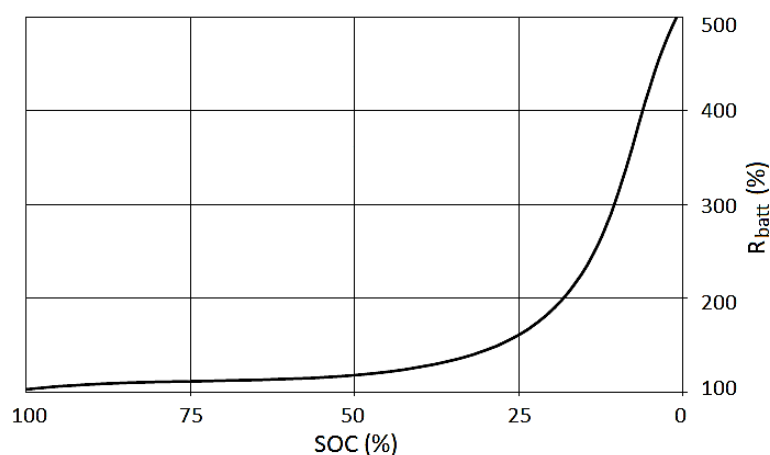
مقاومت داخلی باتری تابع پارامترهای متفاوتی همچون جنس جداساز، فاصله بین صفحه‌ها، وزن مخصوص الکترولیت، مساحت صفحات، رسانایی صفحات و ارتباطات درون سلول است. از میان پارامترهای فوق، وزن مخصوص الکترولیت تابعی از وضعیت شارژ باتری است. مطابق رابطه (۳-۴) با دشارژ باتری و تولید آب در سلول، رفته رفته غلظت اسید سولفوریک کم می‌شود. با تولید آب وزن مخصوص الکترولیت کم شده و مقاومت الکتریکی آن افزایش می‌یابد. یکی از راه‌های تعیین وضعیت شارژ باتری‌های سربی اسیدی اندازه‌گیری چگالی الکترولیت آن می‌باشد. در جدول (۳-۳) چگالی الکترولیت و نقطه انجماد آن برای وضعیت شارژهای مختلف نشان داده شده است.

جدول ۳-۳: چگالی و نقطه انجماد الکترولیت یک باتری سربی اسیدی بر حسب وضعیت شارژ [9]

وضعیت شارژ	چگالی الکترولیت (گرم بر سانتی متر مکعب)	نقطه انجماد الکترولیت (درجه سانتی گراد)
٪۷۵ - ٪۱۰۰	۱.۲۷ - ۱.۲۹	-۶۷
٪۵۰ - ٪۷۵	۱.۲۵ - ۱.۲۷	-۲۳
٪۲۵ - ٪۵۰	۱.۱۱ - ۱.۲۵	-۹
٪۰ - ٪۲۵	کمتر از ۱.۱۱	-۷

همانگونه که در جدول (۳-۳) مشاهده می‌شود با دشارژ باتری، چگالی الکترولیت کم شده که این امر سبب افزایش مقاومت داخلی باتری می‌شود. مهمترین پارامتر در سبب تغییر در مقاومت داخلی باتری می‌شود میزان شارژ باتری است. زمانیکه یک سلول به‌طور کامل شارژ است مقدار مقاومت داخلی آن مقدار نامی خواهد بود. با دشارژ سلول از وضعیت شارژ ٪۱۰۰ تا وضعیت شارژ ٪۲۵

مقاومت داخلی رفته رفته زیاد می‌شود و بعد از آن تا دشارژ کامل، مقاومت داخلی به‌طور سریع افزایش می‌یابد. این افزایش مقاومت در شکل (۳-۱۰) نمایش داده شده است.



شکل ۳-۱۰: منحنی مقاومت داخلی باتری بر حسب وضعیت شارژ [22]

### ۳-۸-۲-۶. اثر پوکرت

ظرفیت باتری‌های سربی اسیدی بطور قابل ملاحظه‌ای تابع جریان دشارژ می‌باشد. در جریان‌های دشارژ با نرخ بالا، ظرفیت سلول‌های سربی اسیدی بطور چشمگیری کاهش می‌یابد که این امر ناشی از عوامل شیمیایی و انجام واکنش‌های درون سلولی است. در سال ۱۹۸۷، پوکرت ظرفیت سلول‌ها را به‌صورت تابعی از جریان دشارژ معرفی کرد. پوکرت ظرفیت باتری‌ها را به‌صورت رابطه (۳-۵) بیان کرد که در این معادله  $K$  و  $P$  ضرایب ثابتی هستند که توسط منحنی‌های دشارژ شرکت‌های سازنده تعیین می‌شوند. متغیر  $P$  به‌طور نوعی بین  $1/3$  تا  $1/4$  می‌باشد.

$$C = \frac{K}{I_b^{(P-1)}} \quad (۳-۵)$$

به عنوان مثال در جدول (۳-۴) ظرفیت یک بانک باتری ۲۵۰۰ آمپر ساعتی را برحسب جریان‌های دشارژ نشان می‌دهد. همانگونه که مشخص می‌باشد با افزایش جریان دشارژ، ظرفیت در دسترس بانک باتری کاهش می‌یابد. از اینرو باید دقت داشت که برای شارژ یا دشارژ باتری‌های سربی اسیدی جریان کمتر از  $0.2C$  باشد. در غیر اینصورت ظرفیت باتری‌ها بطور چشمگیری کاهش خواهد یافت.

جدول ۳-۴: ظرفیت یک بانک باتری بر حسب جریان دشارژ آن [23]

درصد ظرفیت	ظرفیت باتری	زمان دشارژ	جریان دشارژ
100%	2500 AH	10 h	250 A
86%	2150 AH	5 h	430 A
75%	1875 AH	3 h	625 A
52%	1300 AH	1 h	1300 A
41%	1025 AH	0.5 h	2050 A
36%	900 AH	0.33 h	2700 A
31%	725 AH	0.25 h	3100 A

### ۳-۹. تعیین وضعیت شارژ باتری‌ها

تعیین وضعیت شارژ یک موضوع مهم در مبحث باتری‌هاست. این امر باعث کنترل مناسب پروسه شارژ باتری و کاهش خطراتی همچون گازدهی و اضافه ولتاژ می‌شود. اضافه ولتاژ باتری سبب کاهش ظرفیت و کم شدن عمر باتری می‌شود. راه‌های متفاوتی برای تعیین *SOC* همچون اندازه‌گیری ولتاژ ترمینال، اندازه‌گیری امپدانس داخلی باتری، اندازه‌گیری چگالی الکترولیت و ... وجود دارد [24]. مشخصه‌های شارژ و دشارژ باتری‌های سربی اسیدی، رابطه بین *SOC* و ولتاژ مدار باز باتری را مشخص می‌کند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که ولتاژ مدار باز باتری سربی اسیدی تابعی از *SOC*

---

می‌باشد. دانستن *SOC* به کاربر این اجازه را می‌دهد که یک استفاده کارآمد و یک مدیریت مناسب برای استفاده از باتری‌ها را داشته باشد. همچنین با دانستن *SOC* می‌توان از اضافه شارژ و یا اضافه دشارژ کردن باتری‌ها جلوگیری کرد و سبب افزایش عمر باتری‌ها شد. برای محاسبه یا تخمین *SOC* تکنیک‌های مختلفی بیان شده است. به هر حال بسیاری از این روش‌ها نیاز به اندازه‌گیری‌های خیلی دقیق از عوامل شیمیایی و یا شرایط عملکرد باتری دارند و تنها مناسب برای آزمایشگاه می‌باشند. در میان آنها، ساده‌ترین و معمول‌ترین روش، روش شمارش آمپرساعت باتری است. دقت این روش، متکی بر دقت در کالیبراسیون قبل از شمارش است. بدون کالیبراسیون مجدد، خطای انباشته شده اندازه‌گیری رفته رفته زیاد شده و پس از مدتی شارژ و دشارژ نتیجه غیرقابل قبولی می‌دهد. یکی دیگر از روش‌های تعیین *SOC* براساس ولتاژ ترمینال باتری می‌باشد. در این روش نیز مشکلاتی همچون وابستگی ولتاژ ترمینال به نرخ جریان شارژ یا دشارژ وجود دارد که در محاسبات می‌باید لحاظ شوند [25].

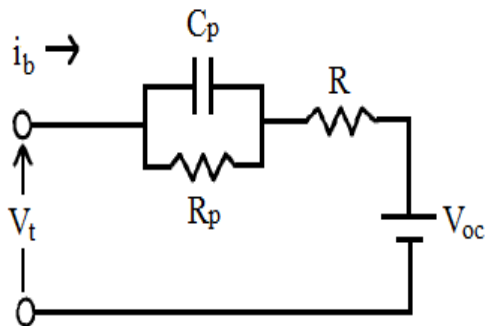
### ۳-۱۰. مدل باتری‌های سربی اسیدی

باتری‌های سربی اسیدی معمولاً بر اساس اطلاعات در دسترس و کاتالوگ شرکت‌های سازنده مدل‌سازی می‌شوند. مدل‌سازی و شبیه‌سازی‌ها با استفاده از داده‌های تولیدکنندگان و معادلات جبری که بیانگر تعاریفات زیر می‌باشد انجام می‌گیرد.

۱. ظرفیت باتری تابعی از جریان دشارژ است.
۲. ولتاژ شارژ و دشارژ باتری تابعی از وضعیت شارژ (*SOC*) است.
۳. مقاومت داخلی باتری تابعی از وضعیت شارژ (*SOC*) است.

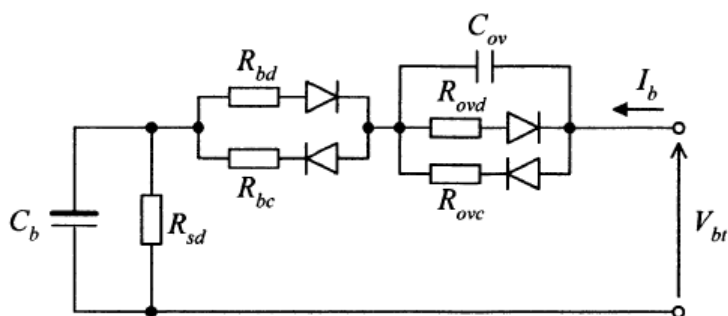
برای باتری‌های سربی اسیدی مدل‌های بسیاری در نظر گرفته شده است و مقالات بسیاری در این زمینه نوشته شده است. در حالت کلی برای یک سلول باتری سربی اسیدی می‌توان یک مدار معادل

از دید دو سر ترمینال آن در نظر گرفت که در شکل (۳-۱۱) نمایش داده شده است. این مدل یک راه ساده برای نشان دادن رفتار باتری است. ولتاژ مدار باز،  $V_t$  و ولتاژ ترمینال باتری،  $R$  مقاومت داخلی باتری،  $R_p$  مقاومت اضافه ولتاژ و  $C_p$  خازن اضافه ولتاژ می‌باشد. تمامی پارامترهای فوق متغیر و تابعی از وضعیت شارژ باتری می‌باشند [26].



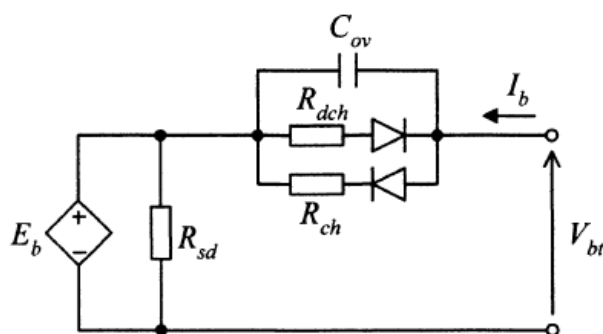
شکل ۳-۱۱: مدار معادل تونن یک باتری سربی اسیدی [26]

تمامی مدلسازی‌های باتری‌های سربی اسیدی، بر پایه مدار معادل تونن آن می‌باشد. در شکل (۳-۱۲) یک مدل دقیق‌تر برای باتری بیان شده است. این مدل شبیه مدار معادل تونن باتری و دقیق‌تر از آن می‌باشد. در این مدل ولتاژ داخلی باتری با ولتاژ خازن  $C_b$  مشخص می‌شود. مقاومت  $R_{sd}$  بیانگر دشارژ خود به خودی باتری است.



شکل ۳-۱۲: مدل یک باتری سربی اسیدی [27]

شکل (۳-۱۳) یک مدل‌سازی دیگر برای باتری سربی اسیدی را نشان می‌دهد. تفاوت عمده این مدل با مدل قبلی در مدل‌سازی ولتاژ داخلی باتری است که در این مدل، ولتاژ داخلی باتری، به صورت یک منبع ولتاژ وابسته به وضعیت شارژ باتری مدل‌سازی شده است.



شکل ۳-۱۳: مدل یک باتری سربی اسیدی [27]

در سال ۱۹۶۵ آقای Shepherd یک معادله ریاضی (۳-۶) را بیان نمود که بطور مستقیم رفتار الکتروشیمیایی باتری را توصیف می‌کرد. در این معادله  $E$  ولتاژ بی باری،  $E_s$  مقدار ثابت ولتاژ،  $R$  مقاومت داخلی باتری،  $Q$  ظرفیت باتری،  $i$  جریان شارژ (دشارژ)،  $A$ ،  $B$  و  $K$  ضرایب ثابت و مخصوص به باتری و شرکت سازنده آن می‌باشد. این یک مدل ساده برای بیان عملکرد باتری در شرایط دینامیکی می‌باشد [28].

$$E = E_s - K \left( \frac{Q}{Q - it} \right) i + A \exp(-BQ^{-1}it) \quad (۳-۶)$$

مدلسازی باتری‌ها در نرم افزار MATLAB نیز براساس همین معادله می‌باشد. در این پایان‌نامه نیز مدل‌سازی باتری سربی اسیدی بر اساس معادله (۳-۶) شکل گرفته است.

باتری‌های سربی اسیدی معمولاً در رنج توانی چند آمپر ساعت تا چند صد آمپر ساعت و معمولاً به صورت سلول‌های ۲ ولتی و یا باتری‌هایی ۲، ۶، ۱۲ و یا ۲۴ ولتی می‌باشند. از اینرو در یک بانک



---

باتری تعداد زیادی از این باتری‌ها را با هم سری و موازی می‌کنند و یک بانک باتری تشکیل می‌دهند. سری شدن باتری‌ها برای رسیدن به ولتاژ مورد نیاز بار و موازی شدن آنها برای تامین جریان بار صورت می‌گیرد. در مدلسازی باتری‌ها عموماً عمر باتری و تاثیرات دما در عملکرد باتری در نظر گرفته نمی‌شود. در یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی، اگر منبع تولید توان دیزل ژنراتور باشد؛ معمولاً پس از انتخاب باتری‌ها، دیزل ژنراتور بر اساس ظرفیت بانک باتری انتخاب می‌شود. این انتخاب معمولاً مهندسی و به‌گونه‌ای است که حداقل هزینه برای خرید دیزل ژنراتور صرف شود. معمولاً جریان نامی دیزل انتخابی با جریان نامی شارژ باتری‌ها در یک رنج می‌باشد (معمولاً  $0.05C - 0.1C$ ) و پروسه شارژ معمولاً بین ۱۰ تا ۲۰ ساعت طول می‌کشد. از اینرو در این سیستم شارژ توسط دیزل ژنراتور، باتری‌های با نرخ‌های بالای جریان شارژ نمی‌شوند. در این صورت برای مدلسازی می‌توان از اثر پوکرت نیز صرف نظر کرد. از آنجا که در یک بانک عظیم باتری، از تعداد زیادی باتری برای تولید توان استفاده می‌شود، ثابت فرض کردن مقاومت داخلی باتری خطای زیادی در مدلسازی ایجاد می‌کند. از اینرو ساده‌ترین مدل برای مدلسازی باتری‌های یک سیستم ذخیره ساز انرژی، یک منبع ولتاژ متغیر سری شده با یک مقاومت متغیر است که هر دو تابعی از وضعیت شارژ می‌باشند. این مدل در واقع یک مدل بهبود یافته و دقیق‌تر نسبت به سایر مدل‌های ارائه شده برای یک بانک باتری می‌باشد که در این پایان‌نامه ارائه شده است. این مدل دقیق و پیشنهادی در فصل پنجم به تفصیل توضیح داده می‌شود.

# شارژر

---

شارژر یک دستگاه الکترونیکی است که جریان و ولتاژ AC را به جریان و ولتاژ DC مورد نیاز باتری تبدیل می‌نماید. در واقع شارژر یک مبدل AC به DC است که وظیفه آن، ایجاد ولتاژ و جریان مطلوب برای شارژ باتری است. برای کنترل جریان و ولتاژ در شارژرها بیشتر از یکسوکننده‌های سیلیکونی کنترل شونده<sup>۱</sup> (SCR) استفاده می‌شود [29]. در عمل هر شارژر با اجزاء منحصر به فرد برای یک محدوده جریان و ولتاژ مشخص کار می‌کند که این اجزاء، تعیین کننده دقت، نوع و قیمت شارژر می‌باشند. امروزه همه شارژرهای صنعتی و تجاری، برای یک سایز باتری و ظرفیت مخصوص ساخته می‌شوند. برخی از شارژرها دارای چندین حالت مختلف شارژ می‌باشند. همچنین این یک امر طبیعی است که شارژر متناسب با باتری‌هایی که می‌خواهند شارژ شوند انتخاب شود [30].

#### ۴-۱. روش‌های اساسی شارژ توسط شارژرها

باتری‌های سربی اسیدی را می‌توان به روش‌های مختلفی شارژ نمود. از مهمترین روش‌های شارژ این باتری‌ها می‌توان روش‌های شارژ جریان ثابت، شارژ ولتاژ ثابت، شارژ جریان ثابت - ولتاژ ثابت، شارژ جریان باریک<sup>۲</sup>، شارژ ملایم<sup>۳</sup> (چکه‌ای)، شارژ پالسی و شارژ چند مرحله‌ای را نام برد.

#### ۴-۱-۱. شارژ ولتاژ ثابت

---

<sup>۱</sup> - Silicon Controlled Rectifier

<sup>۲</sup> - Taper Current Charge

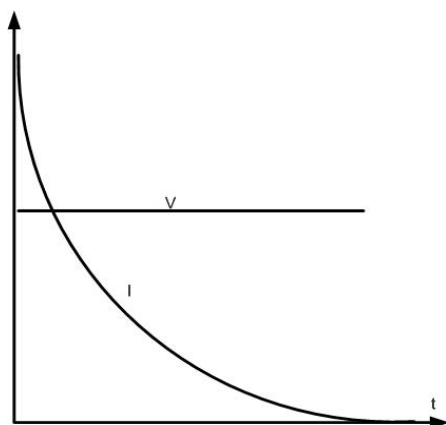
<sup>۳</sup> - Trickle Charge

---

در این روش شارژ از یک ولتاژ ثابت برای شارژ باتری استفاده می‌شود. شارژر ولتاژ ثابت اساساً یک منبع تغذیه DC است که در ساده‌ترین شکل شامل یک ترانسفورماتور کاهنده و یک یکسوکنده است که ولتاژ DC را به منظور شارژ باتری فراهم می‌کند. چنین طرح‌های ساده‌ای اغلب در شارژ باتری‌های سربی اسیدی استفاده می‌شود. روش شارژ ولتاژ ثابت باتری‌های سربی اسیدی قدمت زیادی دارد. در سال ۱۹۷۳ آقای Gross ملاحظات نظری تولید گاز و گرمای حاصل از شارژ ولتاژ ثابت را مورد مطالعه و بررسی قرار داد [31].

سلول‌های سربی اسیدی استفاده شده در خودروها و سیستم‌های پشتیبان از شارژرهای ولتاژ ثابت استفاده می‌کنند. باتری‌های لیتیومی نیز با این روش شارژ می‌شوند. این روش شارژ ساده‌ترین روش شارژ باتری می‌باشد که باتری توسط یک منبع تغذیه با ولتاژی ثابت و بالاتر از ولتاژ نامی سلول شارژ می‌گردد. همانگونه که در فصل سوم گفته شد، همراه با دشارژ باتری‌ها، ولتاژ آنها نیز کاهش می‌یابد. در این صورت با اتصال باتری به یک منبع ولتاژ ثابت، به‌علت وجود اختلاف پتانسیل، جریان از منبع ولتاژ به باتری تزریق می‌شود. این تزریق جریان به باتری سبب شارژ شدن باتری می‌گردد.

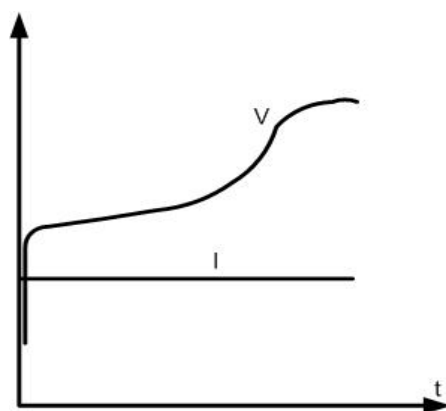
در این روش بدیهی است که در ابتدا به‌علت اختلاف پتانسیل بیشتر بین منبع ولتاژ و باتری، جریان شارژ بیشترین مقدار را خواهد داشت و رفته رفته با شارژ شدن باتری و افزایش ولتاژ آن، این اختلاف ولتاژ کمتر می‌شود. در نهایت ولتاژ باتری هم اندازه با ولتاژ منبع شده و جریان تزریقی صفر می‌گردد. منحنی‌های ولتاژ و جریان کشیده شده از شارژر در این روش در شکل (۴-۱) نشان داده شده است.



شکل ۴-۱: منحنی ولتاژ خروجی و جریان کشیده شده از شارژر در روش شارژ ولتاژ ثابت

#### ۴-۱-۲. شارژ جریان ثابت

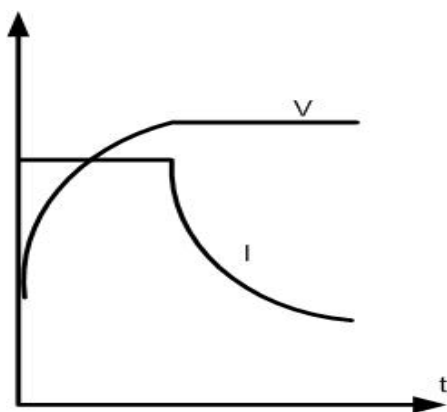
شارژرهای جریان ثابت، ولتاژ خروجی شارژر را به منظور ثابت ماندن جریان ارسالی به باتری تغییر می‌دهند. این روش شارژ معمولاً برای سلول‌های سربی اسیدی، نیکل کادمیوم و نیکل هیدرید فلزی استفاده می‌شود. در این روش شارژر به منظور ثابت ماندن جریان تزریقی به باتری، ولتاژ خروجی خود را افزایش می‌دهد. در واقع باید همواره یک اختلاف پتانسیل ثابت بین ولتاژ خروجی شارژر و ولتاژ ترمینال باتری در این روش شارژ برقرار گردد. منحنی‌های ولتاژ خروجی و جریان کشیده شده از شارژر در روش شارژ جریان ثابت در شکل (۴-۲) نشان داده شده است.



شکل ۴-۲: منحنی ولتاژ خروجی و جریان کشیده شده از شارژر در روش شارژ جریان ثابت

## ۴-۱-۳. شارژ جریان ثابت - ولتاژ ثابت

در قسمت‌های قبل روش‌های شارژ ولتاژ ثابت و شارژ جریان ثابت توضیح داده شدند. در روش شارژ ولتاژ ثابت همانگونه که در شکل (۴-۱) مشاهده می‌گردد، در ابتدای پروسه شارژ به علت بیشترین اختلاف پتانسیل بین شارژر و باتری، جریان زیادی از شارژر کشیده می‌شود. این جریان هنگامیکه باتری‌ها کاملاً دشارژ باشند ماکزیمم مقدار خود را خواهد داشت که ممکن است سبب آسیب رساندن به باتری‌ها و شارژر گردد. در واقع در این روش شارژ، باتری‌ها در ابتدای پروسه شارژ نرخ شارژ به شدت تند و در انتها، نرخ شارژ به شدت کند را خواهند داشت. در انتهای پروسه شارژ ولتاژ ثابت، با یکسان شدن ولتاژ باتری با ولتاژ خروجی شارژر، جریان رفته رفته صفر می‌شود و با یک انتخاب مناسب برای سطح ولتاژ، می‌توان باتری‌ها را بدون بالازدگی ولتاژ شارژ نمود. در روش جریان ثابت نرخ شارژ باتری‌ها به علت ثابت بودن جریان شارژ، نرخ شارژ در کل پروسه شارژ ثابت می‌باشد. در روش شارژ جریان ثابت، در انتهای پروسه شارژ، به علت ثابت بودن جریان شارژ، به سرعت ولتاژ باتری دچار بالازدگی می‌شود که سبب آسیب دیدن باتری می‌گردد که در شکل (۴-۲) این بالازدگی ولتاژ به خوبی نشان داده شده است. در مجموع می‌توان گفت در روش شارژ ولتاژ ثابت، باید ابتدای پروسه شارژ و در روش شارژ جریان ثابت، انتهای پروسه شارژ برای جلوگیری از آسیب دیدن باتری‌ها و شارژر کنترل گردد. از اینرو می‌توان از مزایای هر دو روش برای شارژ نمودن باتری‌ها استفاده نمود؛ طوریکه باتری‌ها به روش جریان ثابت در ابتدا و ولتاژ ثابت در انتها شارژ گردند. این روش شارژ، روش شارژ جریان ثابت - ولتاژ ثابت نامیده می‌شود. در این روش شارژ، ابتدا باتری‌ها با یک جریان ثابت شارژ می‌شوند و پس از آنکه ولتاژ باتری‌ها به مقدار از پیش تعیین شده‌ای رسید؛ شارژ به روش ولتاژ ثابت ادامه می‌یابد. منحنی‌های مربوط به ولتاژ خروجی شارژر و جریان کشیده شده از آن در شکل (۴-۳) نشان داده شده است. روش‌های شارژ ولتاژ ثابت، شارژ جریان ثابت و شارژ جریان ثابت - ولتاژ ثابت، روش‌های اساسی شارژ می‌باشند و سایر روش‌های شارژ، زیر مجموعه‌ای از این سه روش شارژ می‌باشند.



شکل ۴-۳: منحنی ولتاژ خروجی و جریان کشیده شده از شارژر در روش شارژ جریان ثابت ولتاژ ثابت

#### ۴-۱-۴. شارژ جریان باریک

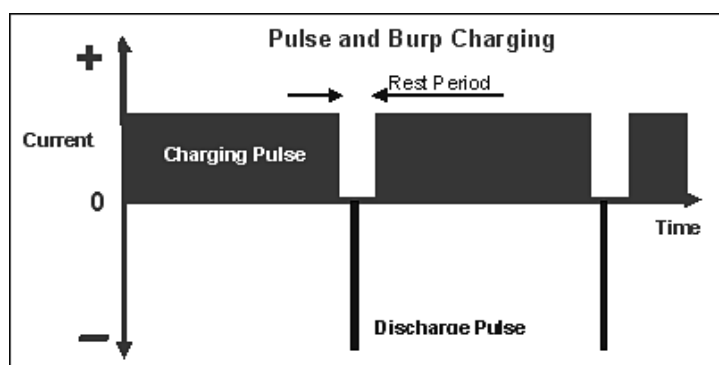
این روش شارژ با استفاده از یک منبع ولتاژ ثابت تنظیم شده انجام می‌شود و در واقع یک نوع شارژ ولتاژ ثابت است. در روش شارژ ولتاژ ثابت، برای کوتاه‌تر شدن پروسه شارژ، ولتاژ بیشتری از ولتاژ نامی سلول در حالت شارژ کامل به باتری‌ها اعمال می‌شود که در انتهای پروسه شارژ سبب اضافه ولتاژ باتری و آسیب دیدن آن می‌شود. در این روش شارژ پس از آنکه ولتاژ باتری به مقدار نامی خود رسید با یک سطح ولتاژ کمتر از مقدار قبل پروسه شارژ ادامه می‌یابد. این روش شارژ در واقع یک روش شارژ ولتاژ ثابت برای انتهای پروسه شارژ باتری‌ها می‌باشد. از این روش شارژ برای جلوگیری از دشارژ خود به خودی باتری‌ها نیز استفاده می‌شود.

#### ۴-۱-۵. شارژ ملایم

شارژ ملایم (تدریجی) یک شارژ جریان ثابت ممتد با یک نرخ پائین حدود  $\frac{C}{100}$  است که برای نگه داشتن شارژ باتری در وضعیت شارژ کامل استفاده می‌گردد. از شارژ ملایم نیز برای جبران دشارژ خود به خود باتری‌ها استفاده می‌گردد. این روش شارژ برای آماده نگه داشتن باتری‌هایی که استفاده نمی‌شوند و به صورت رزرو در حالت آماده قرار دارند مناسب است. این روش در نه تنها برای جبران تلفات داخلی باتری، بلکه برای بازیابی دشارژهای کوچک متناوب نیز کاربرد دارد.

#### ۴-۱-۶. شارژ پالسی

شارژهای پالسی، جریان شارژ باتری را به شکل پالس تامین می‌کنند. میزان نرخ شارژ را (بر اساس متوسط جریان) می‌توان با تنظیم دقیق عرض پالس‌ها تغییر داد. در این روش بین پالس‌های شارژ در طی فرایند شارژ دوره‌های استراحت کوتاهی در حدود ۲۰ تا ۳۰ میلی ثانیه قرار می‌دهند که باعث می‌شود فعالیت‌های شیمیایی درون باتری به حالت پایدار برسد. همچنین می‌توان ادعا کرد که این روش می‌تواند واکنش‌های شیمیایی ناخواسته در سطح الکتروود مانند تشکیل گاز و رشد بلور را کاهش دهد. شکل (۴-۴) شکل جریان را در این روش نشان می‌دهد.



شکل ۴-۴: منحنی جریان شارژ پالسی

#### ۴-۱-۷. شارژ چند مرحله‌ای

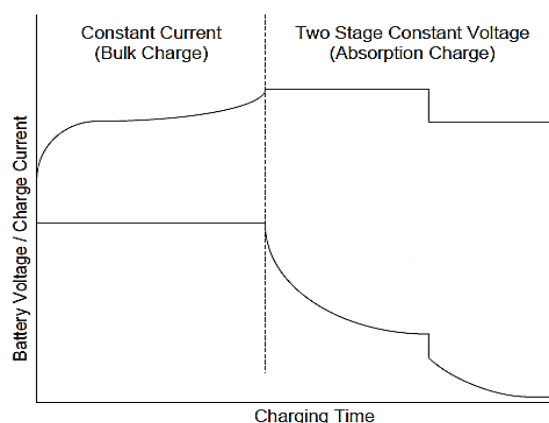


در این روش شارژ، باتری‌ها در چند مرحله و به روش‌های مختلف شارژ می‌شوند. شارژ چند مرحله‌ای شامل مراحل زیر برای شارژ کردن یک باتری سربی اسیدی می‌باشد.

مرحله ۱- شارژ جریان ثابت: شارژر باتری را با جریان ثابت شارژ می‌کند. هنگامیکه ولتاژ باتری به مقدار مشخصی (معمولاً  $2/4$  تا  $2/45$  ولت بر سلول) رسید، شارژ در این حالت پایان می‌پذیرد.

مرحله ۲- شارژ ولتاژ ثابت: پس از پایان شارژ با جریان ثابت، ولتاژ در همان مقدار ثابت نگه داشته می‌شود و پروسه شارژ با همان ولتاژ ثابت ادامه می‌یابد. سپس جریان شارژ رفته رفته کم می‌شود. زمانی که جریان شارژ به مقدار  $0.05C$  رسید شارژر، شارژ در این مرحله را پایان می‌دهد.

مرحله ۳- شارژ جریان باریک: در این حالت شارژر ولتاژ را کاهش می‌دهد و پروسه شارژ ولتاژ ثابت در ولتاژ کمتر ( $2/3$  ولت بر سلول) ادامه می‌یابد. جریان شارژ نیز آهسته تا مقدار صفر کم می‌شود. در واقع این مرحله برای شارژ کامل باتری و آسیب ندیدن باتری انجام می‌شود. گاهی اوقات در پایان مرحله سوم برای اطمینان از شارژ کامل باتری، به روش پالسی نیز به مدت چند دقیقه باتری شارژ می‌گردد. در شکل (۴-۵) شارژ چند مرحله‌ای نشان داده شده است.



شکل ۴-۵: منحنی جریان و ولتاژ در شارژ چند مرحله‌ای

## ۲-۴. سرعت شارژ شدن

---

بدون توجه به نوع روش‌های اساسی شارژ، اعم از شارژ ولتاژ ثابت، شارژ جریان ثابت و یا شارژ جریان ثابت - ولتاژ ثابت، شارژرها می‌توانند با سرعت‌های مختلفی باتری‌ها را شارژ نمایند. سرعت شارژ باتری‌ها فقط تابعی از نرخ جریان تزریقی به باتری می‌باشد. هر چه مقدار ولتاژ در روش ولتاژ ثابت و یا جریان در روش جریان ثابت بیشتر باشد پروسه شارژ مدت زمان کمتری به طول می‌انجامد. در یک دسته‌بندی کلی می‌توان گفت که سرعت‌های شارژ شدن باتری توسط شارژر را می‌توان به سه دسته کلی تقسیم بندی کرد که عبارتند از:

۱- شارژ آهسته: در این سرعت شارژ، پروسه شارژ یک پروسه شبانه روزی است.

۲- شارژ سریع: در این روش پروسه شارژ، ۳ الی ۶ ساعت طول می‌کشد.

۳- شارژ فوری: در این سرعت، باتری در کمتر از یک ساعت شارژ می‌شود.

## ۴-۳. روش‌های پایان شارژ

شارژرها برای پایان پروسه شارژ از روش‌های متفاوتی استفاده می‌کنند. انتخاب روش پایان شارژ تابع عواملی همچون سرعت شارژ، روش شارژ، نوع باتری، تعداد و توان باتری‌ها می‌باشد. روش‌های بسیاری در زمینه قطع شارژ باتری‌ها وجود دارد. این روش‌ها در دسته‌های زیر طبقه‌بندی می‌شوند.

## ۴-۳-۱. تایمر کنترل شده

در این روش یک تایمر بعد از مدت زمان مشخصی شارژر را از باتری‌ها قطع می‌نماید. در واقع با مشخص بودن نرخ جریان شارژر و ظرفیت باتری‌های شارژ شونده، مدت زمان پروسه شارژ مشخص می‌گردد. با شروع پروسه شارژ، تایمر شروع به کار می‌کند و پس از مدت زمانی مشخص، جریان شارژر را قطع می‌کند.

## ۴-۳-۲. کنترل سیستم برش شارژ دلتا منفی<sup>۱</sup> (NDV)

یکی از معمول‌ترین روش‌های پایان شارژ سریع برای باتری‌های نیکل کادمیوم و نیکل هیبرید فلز می‌باشد. ولتاژ این دو باتری در طی فرایند شارژ تا یک مقدار ماکزیمم، افزایش پیدا و بعد از آن ولتاژ افت می‌کند. این افت ولتاژ در باتری‌های نیکل کادمیوم مشهودتر است. دلیل این افت ولتاژ پلاریزاسیون یا بالا رفتن میزان اکسیژن در سلول در هنگام شارژ کامل است. بعد از شارژ کامل، سلول وارد ناحیه خطر بالازدگی شارژ می‌شود و دمای سلول افزایش می‌یابد. این افت ولتاژ صرف‌نظر از سطح دشارژ و درجه حرارت محیط قابل تشخیص می‌باشد. در این روش کنترل شارژ، شارژر تا جایی که ولتاژ باتری افزایش می‌یابد آن را شارژ می‌نماید و پس از آن پروسه شارژ پایان می‌یابد.

## ۴-۳-۳. کنترل سیستم شارژ $\frac{dT}{dt}$

باتری‌های نیکل هیبرید فلز، هنگامیکه بطور کامل شارژ شدند افت ولتاژ کمی را نشان می‌دهند که گاهی اوقات (در شارژهای آهسته و سریع) اندازه‌گیری آن مشکل می‌باشد. بنابراین روش NDV برای این باتری‌ها مناسب نیست. در این باتری‌ها از روش حساسیت به افزایش دمای سلول استفاده می‌شود. هنگامیکه تغییرات دما نسبت به زمان از مقدار از پیش تعیین شده‌ای بیشتر شد؛ شارژر عمل شارژ را متوقف می‌کند و شارژ تبدیل به شارژ ملایم می‌شود. این روش پایان شارژ جز روش‌های گران قیمت است؛ اما باعث جلوگیری از بالازدگی شارژ و افزایش عمر باتری می‌شود.

## ۴-۳-۴. سیستم کنترل شارژ جریان ثابت - ولتاژ ثابت

این روش برای باتری‌های لیتیومی و سربی اسیدی استفاده می‌شود، زیرا در صورت بالا رفتن ولتاژ آسیب خواهند دید. در این روش کنترل شارژ، همانگونه که توضیح داده شد ابتدا پروسه شارژ جریان

<sup>۱</sup> - Negative delta Voltage

---

ثابت بوده و ولتاژ باتری به سرعت بالا می‌رود تا به حد بالای ولتاژ برسد و سپس در آن سطح حفظ می‌شود. در حالت شارژ چند مرحله‌ای انتهایی پروسه شارژ، به صورت ملایم می‌باشد.

### ۴-۳-۵. روش کنترل دمای باتری

با ادامه پروسه شارژ پس از شارژ کامل، باتری‌ها گرم می‌شوند. این گرم شدن به علت واکنش‌های شیمیایی ناخواسته در سلول‌ها می‌باشد. در روش‌های شارژ جریان ثابت که نرخ شارژ ثابت است این گرم شدن کاملاً مشهود می‌باشد. یکی از روش‌های پایان شارژ در روش‌های ولتاژ ثابت و شارژ جریان ثابت سریع، گرم شدن سلول‌ها می‌باشد.

### ۴-۳-۶. حداقل جریان شارژ

این روش کنترلی برای شارژ ولتاژ ثابت استفاده می‌شود. در این روش، زمانیکه جریان شارژ از مقدار مشخصی (حداقل جریان شارژ) کمتر شد؛ پروسه شارژ پایان می‌پذیرد. حداقل جریان شارژ معمولاً در محدوده  $0.01C$  تا  $0.2C$  انتخاب می‌شود.

### ۴-۳-۷. حداکثر ولتاژ شارژ

در این روش پروسه شارژ تا زمانیکه ولتاژ باتری به مقدار ماکزیمم خود برسد شارژ می‌شود. در واقع در این روش برای شارژ باتری از یک محدودیت حداکثر ولتاژ شارژ استفاده می‌شود. این روش بیشتر برای شارژ باتری‌های لیتیومی کاربرد دارد.

گاهی اوقات به منظور سرعت بخشیدن به پروسه شارژ، محدودیت‌های مربوط به ولتاژ و جریان نادیده گرفته می‌شود و باتری‌ها با نرخ بیشتر از حد مجاز شارژ می‌شوند. این کار سبب آسیب دیدن باتری‌ها شده و منجر به کاهش عمر آنها می‌شود. کنترل نامناسب پروسه شارژ، از طریق تنش‌های حرارتی و بالازدگی شارژ به باتری آسیب می‌زند. در مراجع شماره [32] تا [35] استراتژی‌های کنترل

شارژرهای سریع پیشنهاد شده است. اکثر این تکنیک‌ها تلاش برای به حداقل رساندن هرگونه تخریب باتری از طریق کنترل پارامترهایی مانند محدود کردن ولتاژ و جریان شارژ است.

در جدول (۴-۱) روش‌های پایان شارژ مهمترین باتری‌های قابل شارژ نشان داده شده است.

جدول ۴-۱: روش‌های پایان شارژ

لیتیوم یون	نیکل هیبرید فلز	نیکل کادمیوم	سربی اسیدی	
ولتاژ ماکزیمم	تایمر	چکه‌ای	چکه‌ای	شارژ آهسته
جریان حداقل	$\frac{dT}{dt}$	NDV	جریان حداقل	شارژ سریع
-	NDV	$\frac{dT}{dt}$	گرم شدن باتری	شارژ فوری

#### ۴-۴. عملکرد شارژر

از مهمترین پارامترهایی که عملکرد مناسب یک شارژر را نشان می‌دهد پارامترهای زیر را نام برد:

۱- خلوص ولتاژ خروجی: ولتاژ خروجی شارژر باید یک ولتاژ بدون ریپل، بدون نویز و فرکانس‌های تداخلی باشد. وجود هر یک از عوامل فوق باعث بوجود آمدن مشکلاتی در کار باتری می‌شود.

۲- بازده: در شارژرهای با توان خروجی بالا، تلفات نیز بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد. بازده شارژرهای معمولی در حدود ۹۰٪ است. در سیستم‌های ذخیره کننده انرژی با توجه به آنکه توان باتری‌های شارژ شونده بالا و به تبع آن توان شارژ نیز بالا است؛ بنابراین نیاز به طرح‌های کارآمد همواره احساس می‌شود.

۳- جریان هجومی: هنگامیکه شارژر در ابتدا به باتری خالی متصل می‌شود جریان کشیده شده توسط باتری از شارژر به چندین برابر جریان نامی شارژر می‌رسد. بنابراین شارژر باید این جریان را محدود کند.

۴- ضریب توان: یکی از شاخص‌های مهمی است که بویژه در شارژرهای بزرگ باید در نظر گرفته شود.

#### ۴-۵. مشخصات لازم برای انتخاب یک شارژر مناسب

برای انتخاب یک شارژر دانستن ولتاژ AC ورودی، ولتاژ DC خروجی، جریان DC خروجی شارژر و در شارژرهای بزرگ و صنعتی، با توجه به نوع عملکرد و اجزای بکار رفته در شارژر، راندمان و ضریب قدرت شارژر حائز اهمیت می‌باشند. شبکه‌های قدرت و دیزل ژنراتورهای تک فاز معمولاً ۱۱۰ ولت و ۶۰ هرتز و یا ۲۲۰ ولت و ۵۰ هرتز می‌باشند. از اینرو شارژرهای بزرگ معمولاً با این دو ولتاژ AC ورودی کار می‌کنند. خروجی‌های شارژر با توجه به نوع و تعداد باتری‌های شارژر شونده تعیین خواهند شد. ولتاژ خروجی شارژر با توجه به تعداد سلول‌های سری شده که به آن متصل می‌شوند تعیین می‌شود. برای مثال ۱۲ سلول سربی اسیدی برای شارژر، به ولتاژ مستقیم ۲۴ ولتی احتیاج خواهد داشت. جریان خروجی شارژر نیز توسط ظرفیت مجموع سلول‌هایی که می‌خواهند شارژ شوند تعیین می‌شود. جریان خروجی یک شارژر می‌تواند توسط رابطه (۴-۱) تعیین شود.

$$I_{dc} = \frac{(K)(AH)}{h} + L \quad (4-1)$$

در رابطه (۴-۱)،  $K$  ضریب مربوط شارژر می‌باشد که برای هر باتری مقداری متفاوت می‌باشد. برای مثال برای باتری‌های سربی اسیدی ۱/۱ و برای باتری‌های نیکل کادمیوم ۱/۲ می‌باشد.  $AH$  مجموع آمپرساعت‌های سلول‌های شارژر شونده،  $h$  زمان شارژر بر حسب ساعت و  $L$  جریان‌های مورد نیاز برای بارهای دیگر متصل به شارژر (در صورت وجود) می‌باشد. با توجه به مسائل گفته شده و

---

دانستن نوع و تعداد باتری‌های مورد نظر برای شارژ، شارژری که نزدیکترین مشخصات را داشته باشد برای شارژ باتری‌ها انتخاب می‌شود [29].

با توجه به باتری مورد استفاده، می‌توان مشخصات و ویژگی شارژر مورد نیاز برای باتری را مشخص کرد. در انتخاب یک شارژر چندین فاکتور مهم وجود دارد که مهمترین آنها در ادامه لیست شده‌اند.

۱- مهم‌ترین شرط انتخاب یک شارژر این است که باید مناسب برای سلول شیمیایی باتری انتخابی باشد. زیرا استفاده از شارژرهای نامناسب باعث آسیب به باتری می‌شود.

۲- چندین روش برای حفاظت از بالازدگی شارژ وجود دارد. این خصوصیات هم باید در باتری و هم در شارژر آن لحاظ شود.

۳- شارژر طراحی شده باید با مشخصات در نظر گرفته شده با باتری هماهنگ باشد.

۴- زمان شارژ مطلوب باید مشخص شود.

۵- ظرفیت شارژر باید کافی برای شارژ باتری در زمان مورد نظر باشد.

۶- منبع انرژی باید مشخص شده باشد. این منبع می‌تواند برق AC، باتری DC، شارژ توسط دیزل، انرژی خورشیدی، باد و یا ترکیبی از این موارد باشد.

۷- در کاربردهای توان بالا، شاخص‌های عملکرد شارژر (بازده و ضریب توان) مهم است.

# مدلسازی و شبیه‌سازی



---

در این فصل به مدلسازی و شبیه‌سازی دیزل ژنراتور، پل یکسوساز و بانک باتری‌ها می‌پردازیم. در این بخش برای شارژ از یک دیزل ژنراتور کوچک  $31/5$  کیلو ولت آمپر،  $50$  هرتز و  $380$  ولت استفاده می‌شود. همچنین بانک باتری متشکل از  $220$  باتری  $2$  ولتی سری شده با ظرفیت  $500$  آمپر ساعت می‌باشد. پارامترهای ژنراتور سنکرون مورد شبیه‌سازی در مرجع [1] و پارامترهای AVR دیزل ژنراتور در مراجع [2] و [3] داده شده است. اطلاعات مربوط به باتری نیز از مرجع [38] گرفته شده است. همانگونه که در مقدمه گفته شد می‌توان با کنترل AVR ژنراتور سنکرون توسط یک جزء پروسسوری، ولتاژ ترمینال را مطابق با منحنی شارژ باتری‌ها در طول پروسه شارژ تغییر داد. در حالت معمولی، وظیفه AVR تثبیت ولتاژ ترمینال ژنراتور سنکرون می‌باشد. با تغییر عملکرد در AVR، می‌توان ولتاژ مناسب برای پروسه شارژ در ترمینال ژنراتور سنکرون را ایجاد نمود. در واقع با کنترل ولتاژ توسط AVR، نیاز باتری‌ها به شارژر برای شارژ شدن مرتفع می‌گردد و تنها استفاده از یک پل یکسوساز دیودی جهت تبدیل ولتاژ AC به DC برای شارژ باتری‌ها کفایت. از مزایای این روش علاوه بر حذف شارژر، قابلیت اطمینان بالاتر، راندمان بالاتر سیستم شارژ و بهبود عملکرد سیستم شارژ کننده را می‌توان نام برد. این شبیه‌سازی‌ها در محیط MATLAB/SIMULINK انجام گرفته است. در این فصل به مدلسازی و شبیه‌سازی ژنراتور سنکرون، کنترل کننده ولتاژ و سیستم تحریک، گاورنر و موتور دیزل و موتور ژنراتور، پل یکسوساز و بانک باتری‌ها می‌پردازیم.

## ۵-۱- مدلسازی ژنراتور سنکرون

دیزل ژنراتور موردنظر، دارای یک موتور دیزل ۴۸ اسب بخار به همراه یک ژنراتور سنکرون ۴ قطبی و با ظرفیت ۳۱/۵ کیلو ولت آمپر و ۳۸۰ ولت و ضریب قدرت ۰/۸۵ می‌باشد. ژنراتور سنکرون در مدل قاب اصلی abc مدلسازی شده است. اندوکتانس‌های وابسته به موقعیت روتور این ژنراتور سنکرون به روش اجزاء محدود محاسبه شده‌اند [3]. معادلات ژنراتور سنکرون دیزل ژنراتور به صورت زیر است که در آن شارهای ارتباطی داخل ماشین  $\lambda$ ، اندوکتانس‌ها  $L$ ، جریان‌ها  $I$ ، ولتاژهای القایی  $e$ ، ولتاژ ترمینال  $V$  و گشتاور الکترومغناطیسی ماشین  $T_e$  به ترتیب توسط روابط (۵-۱) تا (۵-۴) به هم مربوط می‌شوند.

$$[\lambda] = [L(\theta)][I] \quad (۱-۵)$$

$$[e] = \frac{d[\lambda]}{dt} \quad (۲-۵)$$

$$[V_{abc}] = [e_{abc}] - [R][i_{abc}] \quad (۳-۵)$$

$$T_e = \frac{1}{2} [i]^T \frac{d[L(\theta)]}{d\theta} [i] \quad (۴-۵)$$

در روابط فوق، ماتریس متغیرها به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\lambda = [\lambda_f \lambda_a \lambda_b \lambda_c]^T \quad (۵-۵)$$

$$i = [i_f i_a i_b i_c]^T \quad (۶-۵)$$

$$e = [e_f e_a e_b e_c]^T \quad (۷-۵)$$

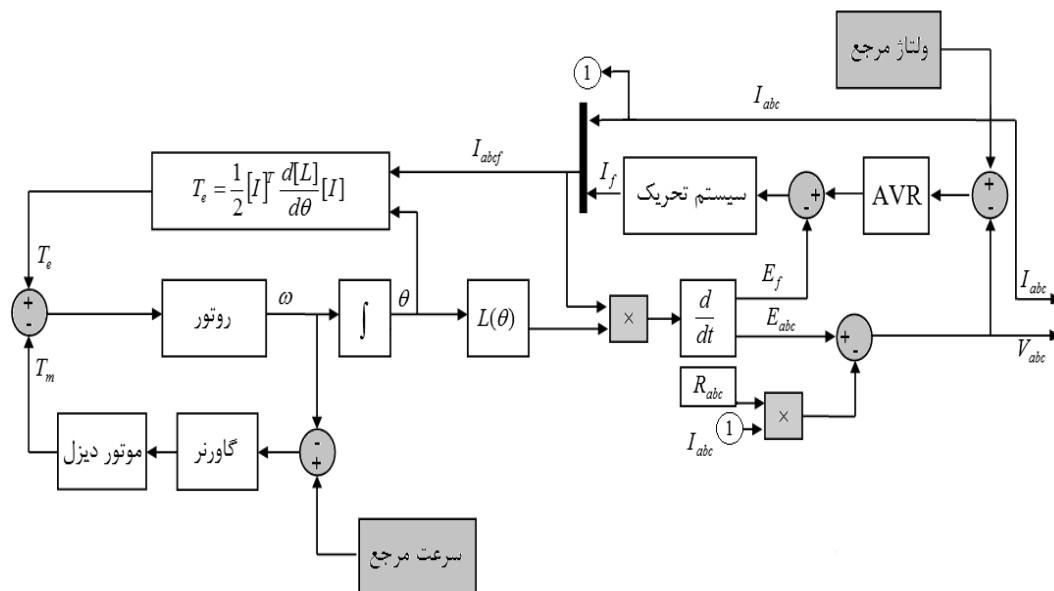
$$V = [V_f \ V_a \ V_b \ V_c]^T \quad (۸-۵)$$

$L(\theta)$  ماتریس اندوکتانس‌ها که تابعی از  $\theta$  و  $R$  ماتریس مقاومت‌های استاتور می‌باشد.

$$L(\theta) = \begin{bmatrix} L_{ff} & L_{fa} & L_{fb} & L_{fc} \\ L_{af} & L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{bf} & L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{cf} & L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \quad (۹-۵)$$

$$R = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \quad (۱۰-۵)$$

در مدل‌سازی دیزل ژنراتور از مدل‌سازی مرجع [7] استفاده شده است. در این مدل‌سازی که بلوک دیاگرام آن در شکل (۱-۵) نشان داده شده است، می‌توان با تعیین سرعت و ولتاژ مرجع، ولتاژ نامی را در خروجی دیزل ژنراتور دریافت کرد.



شکل ۱-۵: بلوک دیاگرام دیزل ژنراتور

مشخصات کلی مربوط به موتور و ژنراتور سنکرون دیزل ژنراتور در جدول‌های (۱-۵) و (۲-۵) آورده شده است. این دیزل توانایی کارکرد در دو سرعت ۱۵۰۰ و ۱۸۰۰ دور در دقیقه را دارد و با توجه به ۴ قطب بودن ژنراتور سنکرون آن، فرکانس تولیدی آن در سرعت‌های فوق به ترتیب ۵۰ و ۶۰ هرتز می‌باشد. محاسبات، مدلسازی و شبیه‌سازی در این پایان نامه برای سرعت ۱۵۰۰ دور بر دقیقه (۵۰ هرتز) انجام گرفته است.

جدول ۱-۵: مشخصات مربوط به توان دیزل ژنراتور [37]

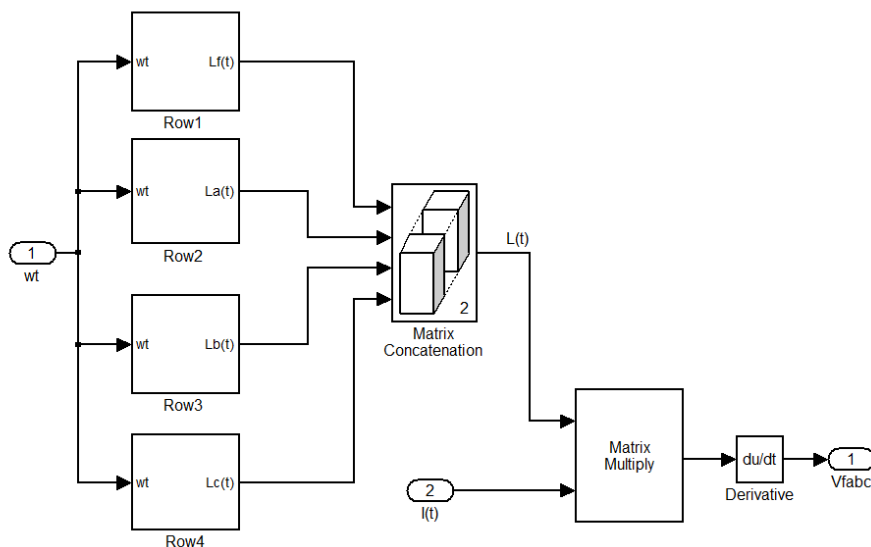
حالت کار	50 Hz	60 Hz
توان ناخالص تولیدی موتور (Kw)	36	40.5
توان ظاهری خروجی ژنراتور (KVA)	31.5	37.1
توان خالص ورودی به ژنراتور (Kw)	29	34.1
توان حقیقی خروجی ژنراتور (Kw)	25.2	29.7
راندمان الکتریکی	87%	
راندمان حرارتی	39.8%	

جدول ۲-۵: مشخصات موتور دیزل [37]

تعداد سیلندر	ساختمان	پیکربندی	تنفس	خنک سازی	ابعاد			وزن	
					ارتفاع	عرض	طول	تر	خشک
3	چهار زمانه	خطی	طبیعی	توسط هوا	951	634	1049	438	420

اندوکتانس‌های سیم پیچی استاتور و مقاومت‌های استاتور و روتور ژنراتور سنکرون در ضمیمه ۱ آورده شده است [3]. شکل (۲-۵) طرح شبیه‌سازی ژنراتور سنکرون مربوط به دیزل ژنراتور را نشان

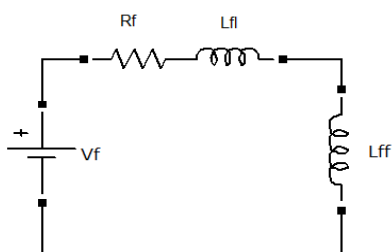
می‌دهد. در این طرح از معادلات (۱-۵) و (۲-۵) برای تولید ولتاژ در ژنراتور سنکرون استفاده شده است.



شکل ۲-۵: شبیه سازی ژنراتور سنکرون

## ۲-۵. مدلسازی کنترل کننده ولتاژ و سیستم تحریک

سیم‌پیچی میدان تحریک در شکل (۳-۵) نشان داده شده است. در مدار سیم پیچ تحریک روابط (۱۱-۵) و (۱۲-۵) برقرار می‌باشند. همانگونه که مشخص می‌باشد.



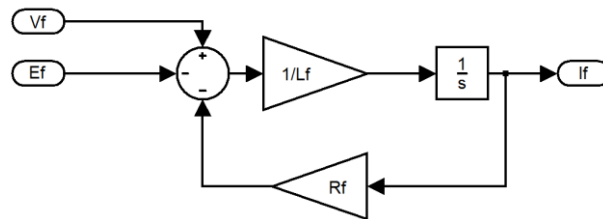
شکل ۳-۵: مدار سیم پیچ تحریک

$$-V_f + R_f i_f + L_{f1} \frac{di_f}{dt} + e_f = 0 \quad (11-5)$$

$$i_f = \frac{1}{L_{f1}} \int (V_f - R_f i_f - e_f) \quad (12-5)$$

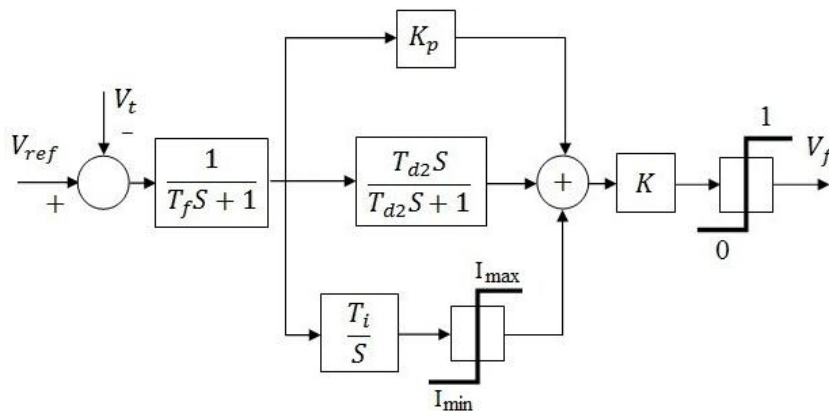
مطابق با رابطه (۱۲-۵) سیستم شبیه سازی سیستم تحریک به صورت شکل (۴-۵) می شود. در

شکل (۴-۵) ولتاژ القایی  $e_f$  از معادلات ژنراتور و مشتق شارهای پیوندی ماشین بدست می آید.



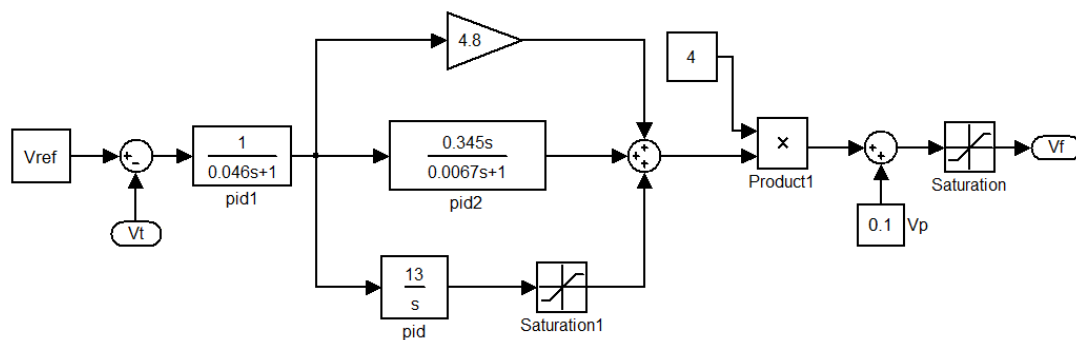
شکل ۴-۵: شبیه سازی مدار تحریک

ولتاژ  $V_f$  توسط AVR تولید می شود. با نمونه برداری از ولتاژ ترمینال و مقایسه آن با ولتاژ مرجع، AVR یک سیگنال خطا در جهت ثابت نگه داشتن ولتاژ ترمینال تولید می کند. در مدل سازی از بلوک دیاگرام یک تنظیم کننده ولتاژ خودکار آنالوگ استفاده می شود که در شکل (۵-۵) نشان داده شده است که تنظیم ولتاژ با کنترل Duty cycle توسط یک کنترل کننده PID آنالوگ انجام می گیرد.



شکل ۵-۵: بلوک دیاگرام AVR

مدل شبیه‌سازی شده AVR به صورت شکل (۵-۶) می‌باشد. پارامترهای AVR بکار رفته در ژنراتور سنکرون در ضمیمه آورده شده است. همانگونه که در شکل مشخص می‌باشد ولتاژ ترمینال با ولتاژ مرجع مقایسه شده و در نهایت ولتاژ  $V_f$  ساخته شده و به تحریک‌کننده<sup>۱</sup> اعمال می‌شود.



شکل ۵-۶: شبیه‌سازی AVR

### ۵-۳. مدلسازی گاورنر، موتور دیزل و روتور ژنراتور

در یک ژنراتور سنکرون کنترل توان اکتیو خروجی و ثبات فرکانس برعهده گاورنر می‌باشد. بطور کلی برای ثابت نگه داشتن فرکانس باید یک تعادل نسبی بین توان الکتریکی و مکانیکی ژنراتور برقرار باشد. گاورنر با کنترل سرعت محرک ژنراتور، اعم از توربین، موتور دیزل و ... توان مکانیکی را مطابق با تغییرات توان الکتریکی تغییر می‌دهد و این کار سبب ثابت ماندن فرکانس می‌گردد.

مدل‌های بسیار گوناگونی برای بیان رفتار حالت دینامیکی گاورنر ارائه شده است. اما از آنجائیکه در یک سیستم ذخیره‌کننده انرژی، دینامیک سیستم بسیار کند و دیزل ژنراتور بطور ایزوله بانک باتری‌ها را شارژ می‌کند؛ مدلسازی دقیق گاورنر اهمیت چندانی نخواهد داشت. از اینرو برای ساده‌تر شدن مدل، از یک مدل خطی بسیار ساده درجه اول برای مدلسازی گاورنر استفاده شده است.

1 - Exciter

همچنین با توجه به پاسخ سریع موتور دیزل به گاورنر و تغییر سرعت برای تغییر توان تولیدی، برای مدلسازی موتور دیزل نیز از یک مدل ساده درجه اول استفاده شده است.

موتور دیزل گشتاور مورد نیاز برای ژنراتور سنکرون را فراهم می‌کند. گشتاور از موتور دیزل به روتور ژنراتور سنکرون انتقال داده می‌شود و این گشتاور انتقالی توسط القای الکترومغناطیسی در سیم‌پیچ‌های استاتور ژنراتور سنکرون، به توان الکتریکی تبدیل می‌شود. گشتاورهای وارده به روتور توسط معادله نوسان<sup>۱</sup> (رابطه (۱۳-۵)) بیان می‌شوند.

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + D_d \omega_m = T_m - T_e \quad (13-5)$$

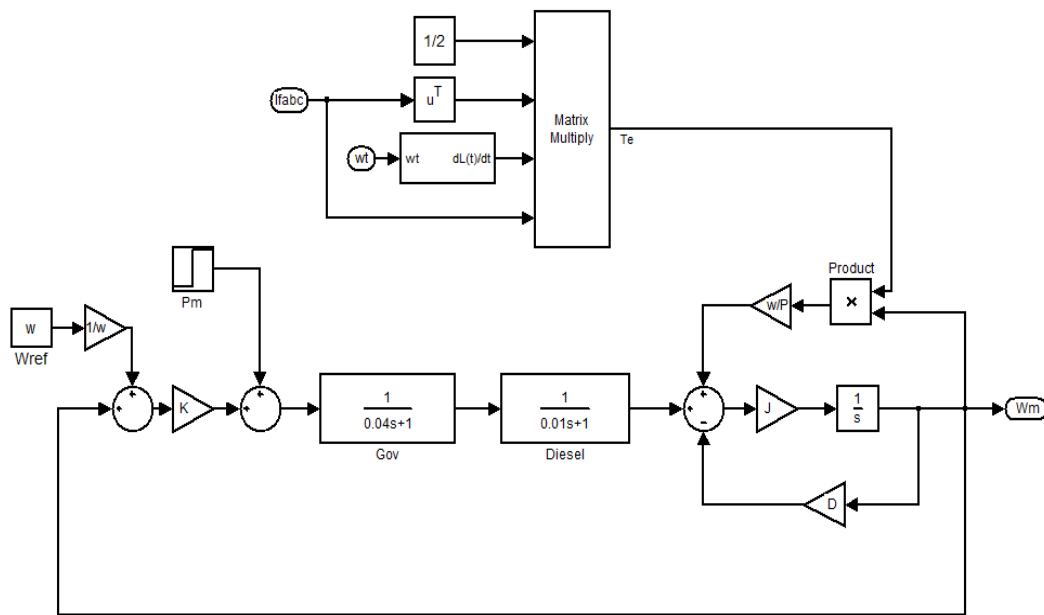
در رابطه (۱۳-۵)،  $J$  مجموع ضریب اینرسی موتور دیزل و روتور ژنراتور سنکرون،  $\omega_m$  سرعت مکانیکی روتور،  $T_m$  گشتاور مکانیکی تولید شده توسط موتور دیزل،  $T_e$  گشتاور الکتریکی تولید شده در سیم‌پیچ‌های استاتور و  $D_d$  ضریب میرایی گشتاور می‌باشد. با مشتق‌گیری از رابطه (۱۳-۵) و ساده کردن آن رابطه‌های (۱۴-۵) و (۱۵-۵) بدست می‌آیند که معرف دینامیک روتور می‌باشند و در شبیه‌سازی از آنها استفاده شده است.

$$\omega_m (JS + D) = T_m - T_e \quad (14-5)$$

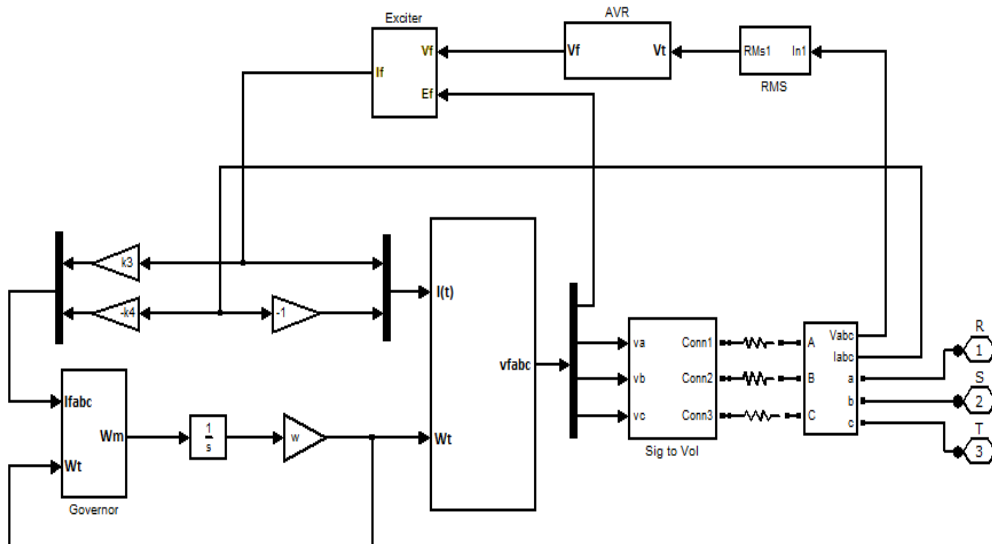
$$\omega_m = \frac{T_m - T_e}{JS + D} \quad (15-5)$$

شکل (۷-۵) مدل شبیه‌سازی گاورنر، موتور دیزل و روتور را نشان می‌دهد. در شکل (۸-۵) طرح کلی ژنراتور سنکرون نمایش داده شده است.





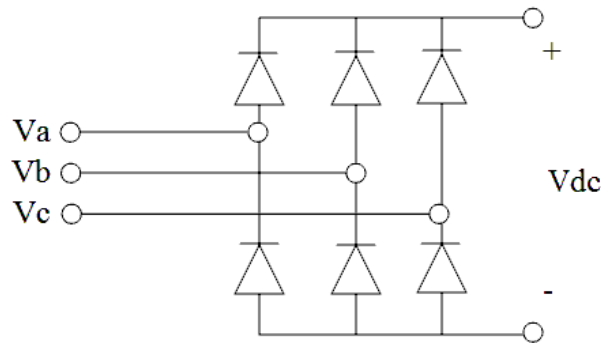
شکل ۵-۷: شبیه سازی گاورنر، موتور دیزل و روتور ژنراتور سنکرون



شکل ۵-۸: طرح کلی ژنراتور سنکرون

## ۴-۵. مدلسازی شارژر

همانگونه که در فصل چهارم گفته شد، شارژر یک مبدل AC به DC می‌باشد که وظیفه آن ایجاد ولتاژ و جریان مورد نیاز برای شارژر مطلوب باتری است. در فصل چهارم گفته شد که روش‌های اصلی شارژر باتری‌های سربی اسیدی سه روش شارژر ولتاژ ثابت، شارژر جریان ثابت و شارژر جریان ثابت - ولتاژ ثابت می‌باشد. در این پایان‌نامه کنترل عملیات شارژر به‌عهدده یک میکروپروسسور است که ولتاژ نمونه برداری شده AVR را کنترل می‌کند و با کنترل این ولتاژ، ولتاژ ترمینال ژنراتور سنکرون را تغییر می‌دهد. برای شارژر باتری‌ها در سیستم پیشنهادی فقط نیاز به یک پل یکسوساز دیودی جهت تبدیل ولتاژ AC خروجی ژنراتور به ولتاژ DC جهت شارژر کردن باتری‌هاست. پل یکسوساز سه فاز دیودی از ۶ دیود به‌صورت شکل (۵-۹) تشکیل شده است.



شکل ۵-۹: شماتیک پل سه فاز یکسوساز دیودی

در یک پل سه فاز دیودی، رابطه بین ولتاژ DC خروجی پل  $V_{dc}$  و ولتاژ موثر یک فاز ورودی  $V_{rms}$  مطابق رابطه (۵-۱۶) بیان می‌شود.

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}\sqrt{2}V_{rms}}{\pi} = 2.34V_{rms} \quad (۵-۱۶)$$

## ۵-۵. مدلسازی باتری

اطلاعات مربوط به یکی از ۲۲۰ باتری بانک باتری تحت مطالعه در جدول (۵-۳) آمده است.

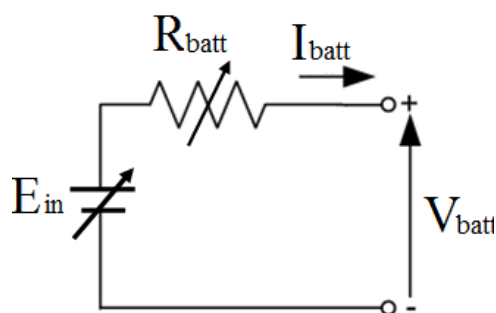
تمامی باتری‌های مورد استفاده در باتری از یک نوع می‌باشند.

جدول ۵-۳: مشخصات مربوط به یک باتری از بانک باتری‌های مورد استفاده

2 V	ولتاژ نامی	
500 AH	ظرفیت نامی	
175 mm	طول	ابعاد
177 mm	عرض	
350 mm	ارتفاع	
33.5 Kg	وزن	
4000 A (5sec)	ماکزیمم جریان دشارژ	
0 ~ 40 °C	شارژ	رنج دمای کاری
-15 ~ 50 °C	دشارژ	
-15 ~ 40 °C	ذخیره	
25 °C ± 3 °C	دمای نامی کار	
0.6mΩ	مقاومت داخلی در شرایط شارژ کامل	

همانگونه که در فصل سوم گفته شد، برای مدلسازی باتری، با توجه به ماهیت سیستم ذخیره کننده انرژی و اینکه یک بانک عظیم باتری از تعداد زیادی باتری (به صورت سری و موازی) تشکیل شده است؛ از یک مدل پیشنهادی برای باتری استفاده می‌شود. در این مدلسازی، همانگونه که در فصل سوم گفته شد می‌توان از اثر پوکرت بر ظرفیت باتری‌های سربی اسیدی صرف نظر کرد. در مدل

پیشنهادی، به دلیل تعداد زیاد باتری‌های مورد استفاده در یک بانک باتری، مقاومت داخلی بانک باتری که در مقایسه با مقاومت داخلی یک باتری، مقداری قابل توجه است؛ به صورت تابعی از وضعیت شارژ باتری مدل‌سازی می‌شود. در این مدل بر خلاف سایر مدل‌ها که مقاومت باتری سربی اسیدی مقداری ثابت فرض می‌شود، مقاومت داخلی باتری سربی اسیدی بر اساس منحنی مقاومت داخلی باتری (منحنی (۳-۱۰)) که توسط شرکت سازندگان باتری داده می‌شود محاسبه شده و در مدل‌سازی لحاظ می‌شود. شکل (۵-۱۰) مدل بانک باتری پیشنهادی برای یک سیستم ذخیره کننده انرژی را نشان می‌دهد.

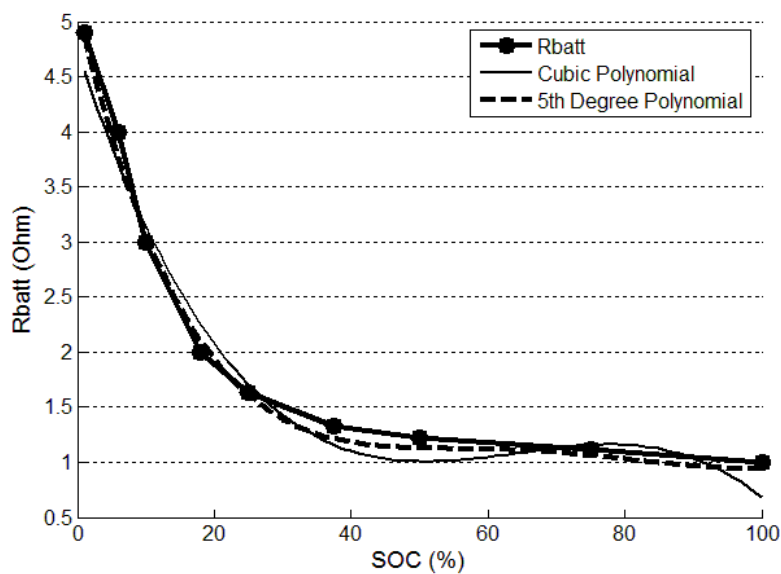


شکل ۵-۱۰: مدل باتری سربی اسیدی پیشنهادی

در مدل پیشنهادی منبع ولتاژ و مقاومت داخلی باتری، هر دو تابعی از وضعیت شارژ باتری می‌باشند. وابستگی منبع ولتاژ به وضعیت شارژ باتری بر اساس منحنی‌های (۳-۴) و (۳-۵) و وابستگی مقاومت داخلی باتری بر اساس منحنی (۳-۱۰) تعیین می‌شود.

با توجه به منحنی شکل (۳-۱۰)، مقاومت داخلی  $R_{batt}$  برحسب درصد شارژ  $SOC$  توسط یک تابع چند جمله‌ای می‌تواند تخمین زده شود. با توجه به منحنی شکل (۳-۱۰) حداقل درجه تابع برای فیت شدن یک تابع درجه ۳ می‌باشد. تخمین منحنی توسط نرم افزار MATLAB انجام شده است. با توجه به این نکته که علاوه بر دقت، سادگی مدل نیز مد نظر است، مناسب‌ترین تخمین برای منحنی مقاومت داخلی باتری، یک منحنی درجه ۵ می‌باشد. در تابع تخمین زده شده درجه ۳ و درجه ۵ در

شکل (۱۱-۵) نمایش داده شده است. در جدول (۴-۵) مقدار موثر خطا و مجموع مجذور مربعات خطای این دو تابع برازش نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱۱-۵) و جدول (۴-۵) بدیهی است که تابع درجه ۵، برای تخمین مناسب‌تر می‌باشد. رابطه (۱۷-۵) ضرایب مربوط به این تابع درجه ۵ را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱-۵: منحنی‌های تخمین زده شده برای منحنی  $R_{batt}$

جدول ۴-۵: مشخصات برازندگی توابع تخمین زده شده

مجموع مجذور مربعات خطا	مقدار موثر خطا	تابع فیت شده
۰/۲۴۲۲	۰/۲۹۳۲	تابع درجه ۳
۰/۰۶۲۹	۰/۱۴۴۹	تابع درجه ۵

$$R_{batt} = R_{fc} \times [(-7.51 \times 10^{-10})SOC^5 + (4.18 \times 10^{-7})SOC^4 + (-7.9 \times 10^{-5})SOC^3 + (67 \times 10^{-4})SOC^2 + (-0.265)SOC + 5.128] \quad (17-5)$$

توجه شود که  $0 \leq SOC \leq 100$  و  $R_{fc}$  مقاومت باتری در حالت شارژ کامل می‌باشد. معادلات مربوط به بار باتری  $q$ ، جریان باتری  $I_{batt}$ ، درصد شارژ باتری  $SOC$ ، ولتاژ داخلی  $E_{in}$  و ولتاژ ترمینال  $V_{batt}$  را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$I_{batt} = \frac{dq}{dt} \quad (18-5)$$

$$SOC = 100 \frac{q}{Q} \quad (19-5)$$

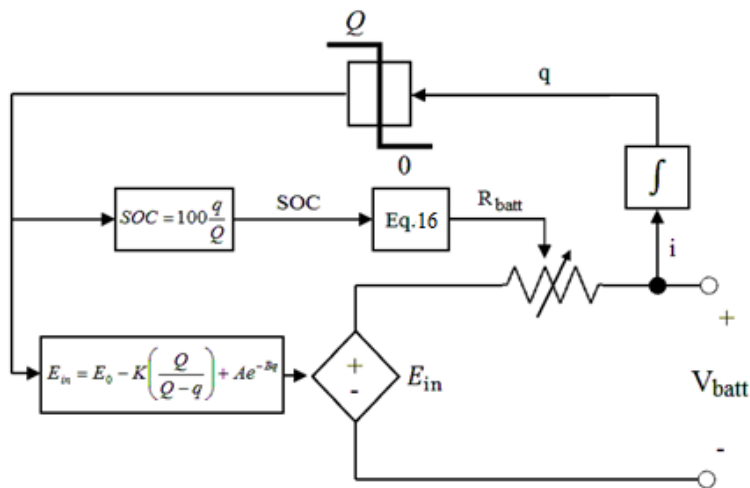
$$E_{in} = E_0 - K \left( \frac{Q}{Q-q} \right) + Ae^{-Bq} \quad (20-5)$$

$$V_{batt} = E_{in} - R_{batt} I_{batt} \quad (21-5)$$

که در آن پارامترهای  $E_0$ ،  $K$ ،  $A$  و  $B$  مقادیر ثابت وابسته به نوع باتری‌های سربی اسیدی انتخابی می‌باشند.  $Q$  ظرفیت بانک باتری می‌باشد که با توجه به جریان شارژ یا دشارژ، عمر باتری و شرایط محیطی ممکن است اندکی با ظرفیت نامی باتری  $C$  متفاوت باشد. برای مثال با کاهش دما یا افزایش جریان شارژ، ظرفیت باتری کمتر از ظرفیت نامی باتری می‌شود.

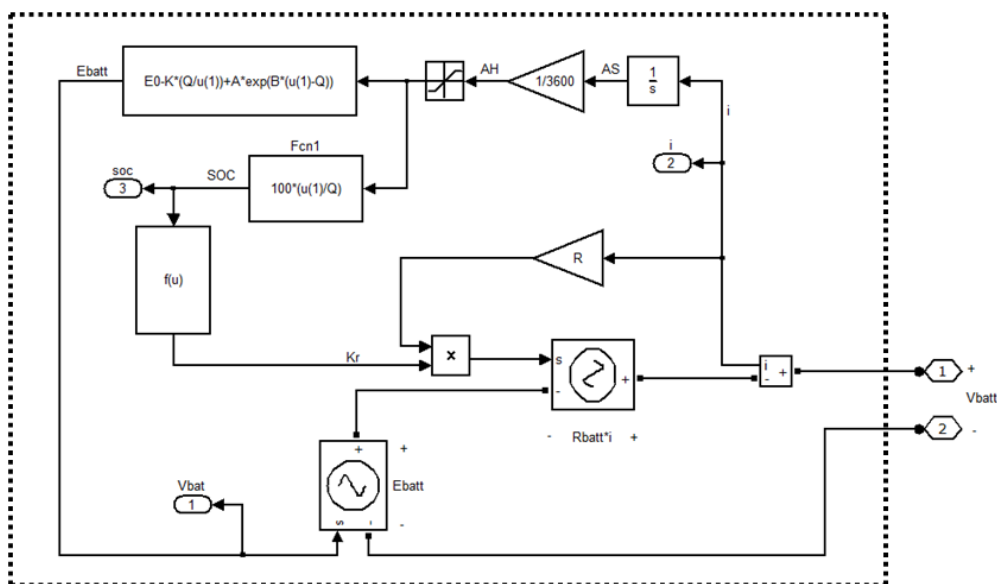
در مدلسازی با توجه به نادیده گرفتن اثر دما و پوکرت،  $Q = C$  می‌باشد. انتگرال جریان، معرف میزان بار باتری است. در واقع انتگرال جریان شارژ، میزان بار ذخیره شده در باتری و انتگرال جریان دشارژ، میزان بار تخلیه شده باتری را نشان می‌دهد. میزان بار باتری همواره بین مقدار عددی حد پایین صفر و حد بالای ظرفیت باتری ( $0 \leq q \leq Q$ ) می‌باشد. در این مدل با انتگرال گیری از جریان، بار باتری به دست می‌آید. با توجه به ظرفیت باتری و میزان بار لحظه‌ای آن، وضعیت شارژ باتری و ولتاژ داخلی آن مشخص می‌شود. با مشخص شدن وضعیت شارژ باتری، طبق رابطه (5-17) مقدار مقاومت داخلی آن معلوم می‌شود. با مشخص شدن ولتاژ داخلی باتری و مقاومت داخلی آن و

همچنین معلوم بودن جریان شارژ و یا دشارژ، مدل پیشنهادی شکل (۵-۱۰) تحقق می‌یابد. شکل (۵-۱۲) شماتیک مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۱۲: مدل بسط داده شده باتری سربی اسیدی

شبیه‌سازی مدل فوق به صورت شکل (۵-۱۳) می‌باشد.

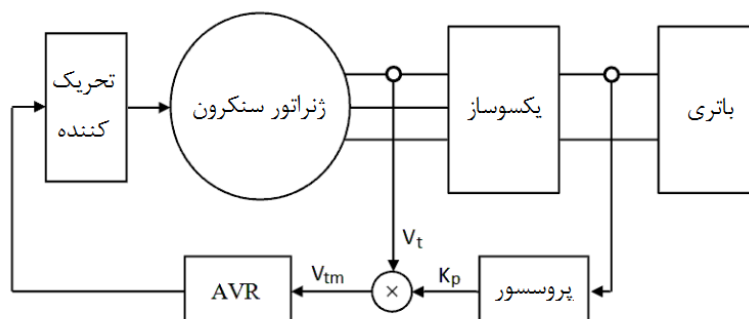


شکل ۵-۱۳: شبیه‌سازی باتری

## ۵-۶. طراحی سیستم شارژ

در این پایان‌نامه با حذف شارژر و تغییر عملکرد تثبیت ولتاژ AVR به تنظیم ولتاژ مطابق با خواسته شارژر مثلاً تثبیت جریان شارژر، پروسه شارژر باتری‌ها انجام می‌شود. در واقع با تغییر عملکرد AVR از تثبیت ولتاژ به تولید ولتاژ مطلوب برای شارژر، علاوه بر حذف شارژر، می‌توان یک شارژر بهینه و منعطف با نوع باتری‌ها را داشت. ساختار این سیستم شارژر در شکل (۵-۱۴) نشان داده شده است. در این ساختار، با اندازه‌گیری لحظه به لحظه ولتاژ و جریان در ترمینال باتری، مقاومت و ولتاژ داخلی باتری تخمین زده می‌شود. سپس با معلوم شدن ولتاژ و جریان در ترمینال باتری، مقاومت و ولتاژ داخلی آن و با اندازه‌گیری ولتاژ موثر فاز ترمینال ماشین  $V_t$ ، سیگنال فیدبک اصلاح شده  $V_{tm}$  برای AVR ساخته می‌شود (شکل (۵-۵) را ملاحظه فرمایید). نحوه اندازه‌گیری  $V_t$  بر اساس مرجع [38] و

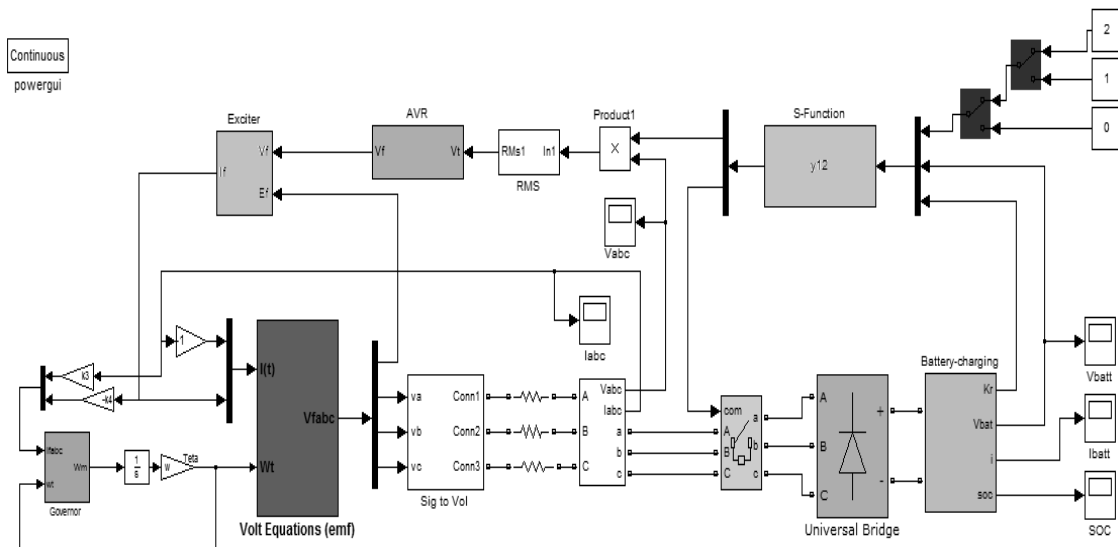
به صورت جذر میانگین مربعات ولتاژ لحظه‌ای فازها  $\left( \sqrt{\frac{v_a^2(t) + v_b^2(t) + v_c^2(t)}{3}} \right)$  می‌باشد.



شکل ۵-۱۴: شماتیک سیستم شارژر پیشنهادی

شبیه‌سازی سیستم شارژر پیشنهادی در شکل (۵-۱۵) نشان داده شده است. در شبیه‌سازی برای مدلسازی پروسسور از یک بلوک S-Function استفاده شده است. با کدنویسی در این بلوک، نحوه عملکرد پروسسور مشخص می‌شود. در واقع این بلوک کنترل‌کننده پروسه شارژر است. m-file های مربوط به روش‌های شارژر در ضمیمه آورده شده است.





شکل ۵-۱۵: شبیه سازی سیستم شارژ پیشنهادی

## ۵-۷. الگوریتم شارژ

در این سیستم شارژ تمامی روش‌های شارژ قابل پیاده‌سازی می‌باشند. ابتدا الگوریتم روش شارژ جریان ثابت توضیح داده می‌شود و در انتها سایر الگوریتم‌های شارژ گفته می‌شوند. فرض می‌کنیم دیزل ژنراتور در شرایط بی بار روشن می‌شود و سپس با فشار دادن دکمه استارت شارژ، ماشین از حالت عادی عملکرد به حالت شارژ تغییر وضعیت می‌دهد و الگوریتم شارژ اجرا می‌شود. در الگوریتم شارژ جریان ثابت، ابتدا ولتاژ بانک باتری‌ها ( $V_{bat}$ ) قبل از اینکه باتری‌ها به ترمینال ماشین متصل شوند، اندازه‌گیری می‌شود. با معلوم بودن جریان شارژ لازم یعنی  $I_{ch}$ ، در طول فرآیند شارژ باید شرط  $I_{bat} = I_{ch}$  برقرار باشد. قبل از شروع فرآیند شارژ چون  $I_{bat} = 0$  لذا طبق رابطه (۵-۲۱)،  $E_{in} = V_{bat}$  بدست می‌آید. با محاسبه ولتاژ داخلی باتری میزان شارژ باتری طبق منحنی (۳-۹) که منحنی ولتاژ مدار باز باتری بر حسب وضعیت شارژ آن است محاسبه می‌شود. با مشخص شدن  $SOC$  با توجه به رابطه (۵-۱۷) مقاومت داخلی باتری تعیین می‌شود. با مشخص شدن  $R_{bat}$  و  $E_{in}$  و با قرار دادن  $I_{bat}$  برابر با  $I_{ch}$  در رابطه (۵-۲۱)، ولتاژ مورد نیاز در ترمینال باتری برای لحظه شروع شارژ برای جاری

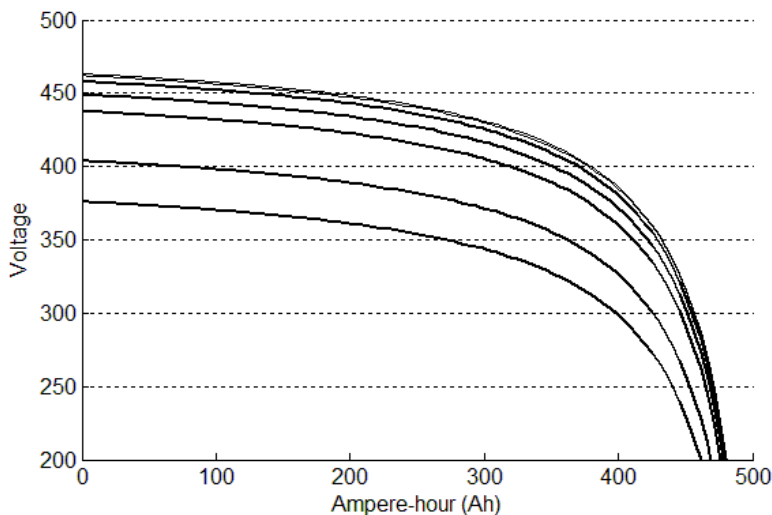
شدن جریان  $I_{ch}$  محاسبه می‌شود. برای ساختن این ولتاژ با توجه به استفاده از پل یکسوساز دیودی، لازم است مقدار موثر ولتاژ فاز ترمینال ماشین  $V_{t,rms} = \frac{V_{batt}}{2.34}$  باشد. بنابراین مقدار موثر سیگنال ولتاژ فاز فیدبک  $V_t$  در مقدار بهره‌ای که از رابطه (۵-۲۲) بدست می‌آید ضرب می‌شود به عنوان سیگنال فیدبک اصلاح شده  $V_{im}$  به AVR اعمال می‌شود.

$$K_{avr} = \frac{220 \times 2.34}{V_{batt}} = \frac{514.8}{E_{in} + (R_{fc} \times K_r \times I_{ch})} \quad (۵-۲۲)$$

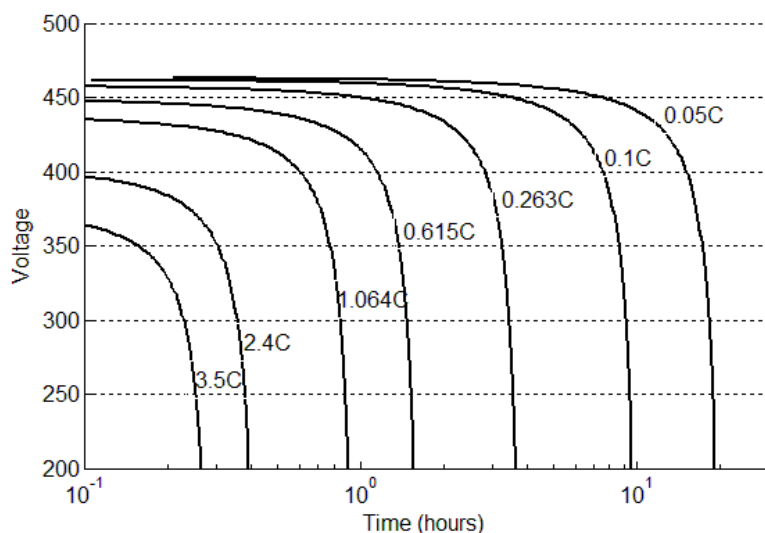
پس از گذشت چند دهم ثانیه و تثبیت ولتاژ ترمینال ماشین و آمادگی برای شارژ، با وصل شدن سوئیچ‌هایی که قبل از پل یکسوساز دیودی قرار گرفته‌اند، بانک باتری‌ها به ترمینال ماشین متصل می‌شود و فرایند شارژ آغاز می‌گردد. بعد از مدار قرار گرفتن بانک باتری‌ها، لحظه به لحظه جریان و ولتاژ شارژ باتری اندازه‌گیری می‌شود، اندازه مقاومت، ولتاژ داخلی باتری، بهره مورد نیاز و سیگنال فیدبک اصلاح شده به روال قبل توسط پروسوسور محاسبه می‌گردد و سیگنال فیدبک اصلاح شده صورت لحظه‌ای به AVR اعمال می‌شود. محاسبه گین AVR می‌تواند به صورت از پیش تعیین شده نیز محاسبه شود و توسط میکروپروسوسور به AVR اعمال شود. بسته به نوع روش شارژ، پروسه شارژ توسط برنامه‌ای که برای پروسوسور نوشته شده کنترل می‌شود. با دستور پروسوسور و قطع شدن اتصالات باتری توسط سوئیچ‌ها، پروسه شارژ اتمام می‌پذیرد. معمولاً پروسه شارژ تا حصول ولتاژ داخلی مورد نیاز باتری در شارژ کامل ادامه می‌یابد. در الگوریتم روش شارژ ولتاژ ثابت، همانند الگوریتم فوق فقط کفایت یک گین برای AVR با توجه به ولتاژ نامی باتری‌ها ساخته شود و تا رسیدن ولتاژ به مقدار نامی (تقریباً صفر شدن جریان شارژ) پروسه شارژ ادامه می‌یابد. در واقع بعد از زدن دکمه استارت، ولتاژ ترمینال در یک ولتاژ مرجع دیگر (اندکی بیشتر از ولتاژ نامی بانک باتری) ثابت شده و پس از آن پروسه شارژ انجام می‌پذیرد. در الگوریتم روش جریان ثابت - ولتاژ ثابت، دو الگوریتم گفته شده به ترتیب پیاده سازی می‌شوند.

## ۵-۸. نتایج شبیه‌سازی

بانک باتری شبیه‌سازی شده، یک بانک باتری متشکل از ۲۲۰ باتری سربی اسیدی ۲ ولتی سری شده با هم می‌باشد. که ظرفیت هریک از آنها یعنی  $Q$  برابر با ۵۰۰ آمپر ساعت و ولتاژ نامی مجموع آنها ۴۴۰ ولت است. مقاومت هر باتری در حالت شارژ کامل  $R_{fc} = 0.006 m\Omega$  می‌باشد. با تخمین منحنی‌های دشارژ باتری‌های مورد استفاده که در کاتالوگ باتری‌ها آمده است، پارامترهای ثابت معادله (۵-۲۰) بدست می‌آیند که برابر با  $E_0 = 488.7V$ ،  $K = 24.2$  و  $A = B = 0$  می‌باشد. با این مقادیر تخمین زده شده، منحنی‌های شارژ و دشارژ مربوط به باتری واقعی نشان داده شده در شکل (۳-۴) نتیجه می‌شود. این منحنی‌ها در شکل (۵-۱۶) و (۵-۱۷) نشان داده شده‌اند. تفاوت این دو شکل در مقیاس بندی است. در شکل (۵-۱۶) ولتاژ بر حسب ظرفیت و در شکل (۵-۱۷) ولتاژ بر حسب زمان دشارژ می‌باشد.



شکل ۵-۱۶: منحنی‌های شارژ و دشارژ بانک باتری تحت مطالعه در بر حسب ظرفیت

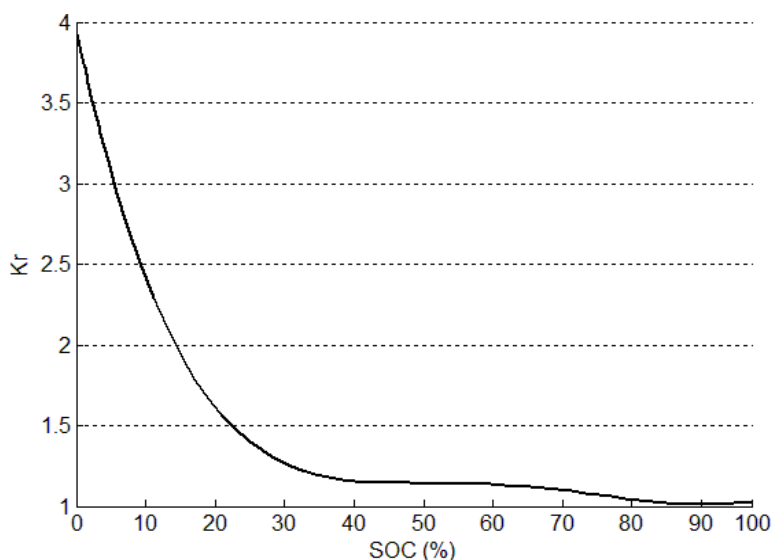


شکل ۵-۱۷: منحنی‌های شارژ و شارژ بانک باتری تحت مطالعه در بر حسب زمان

همانگونه که در شکل‌های (۵-۱۶) و (۵-۱۷) مشاهده می‌شود برای جریان ۲۵ آمپر، فرآیند شارژ یا دشارژ ۲۰ ساعت طول می‌کشد. طبق مشخصات شرکت سازنده باتری، جریان نامی برای شارژ یا دشارژ این باتری ۵۰ آمپر است که در این حالت پروسه شارژ یا دشارژ ۱۰ ساعت طول می‌کشد. در کاتالوگ شرکت سازنده باتری‌های تحت مطالعه، نرخ دشارژ باتری‌ها در محدوده 0.05 C تا 3.5 C است. منحنی‌های دشارژ شبیه‌سازی شده کاملاً مطابق با کاتالوگ شرکت سازنده و منطبق بر آنها می‌باشد.

شکل (۵-۱۸) منحنی ضریب مقاومت داخلی باتری را نشان می‌دهد که براساس رابطه (۵-۱۷) بدست آمده است. مقدار مقاومت داخلی باتری برابر با حاصلضرب ضریب مقاومت داخلی در مقدار باتری در حالت شارژ کامل  $(R_{batt} = R_{fc} \times K_r)$  می‌باشد. همانگونه که کاملاً مشخص است اندازه مقاومت داخلی باتری در حالت دشارژ تقریباً ۴ برابر اندازه آن در حالت شارژ کامل می‌باشد. برای نشان دادن تاثیر این تغییر مقاومت و خطای ناشی از آن کفایت این مقدار در تعداد باتری‌ها و مقاومت هر باتری و جریان شارژ ضرب شود. به‌عنوان مثال در روش شارژ جریان ثابت و با جریان شارژ ۵۰ آمپر، خطای ناشی از ثابت گرفتن مقاومت در ابتدا و انتهای پروسه شارژ تقریباً ۲۰ ولت است که

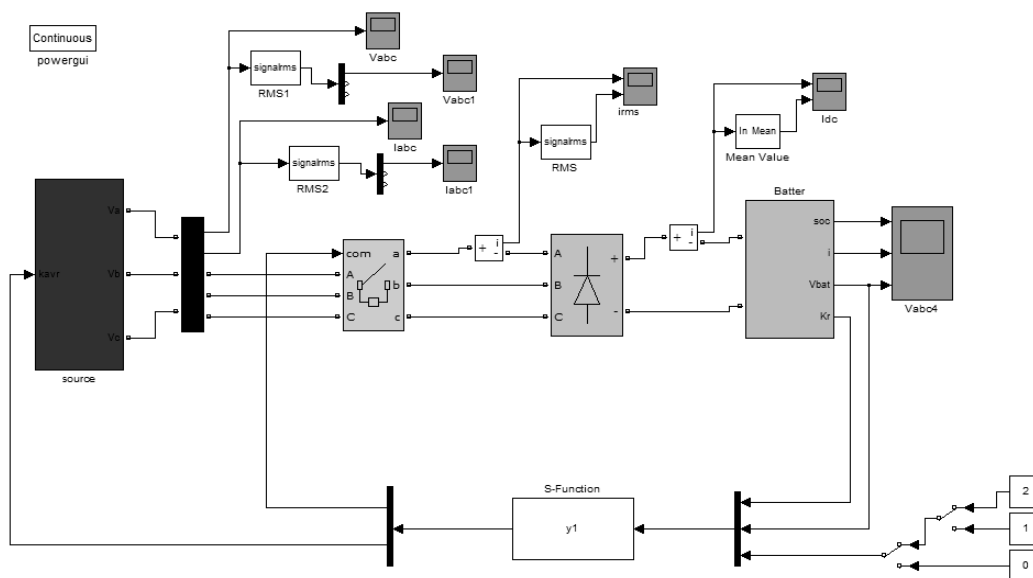
مقداری قابل توجه می‌باشد. همین خطای قابل توجه لزوم محاسبه مقاومت داخلی بر حسب وضعیت شارژ را تایید می‌نماید.



شکل ۵-۱۸: منحنی ضریب مقاومت داخلی بانک باتری تحت مطالعه

بعد از بدست آوردن ضرایب ثابت معادله (۵-۲۰) سیستم کلی شارژ (دیزل ژنراتور- یکسوساز- باتری) آماده شبیه‌سازی می‌شود. نکته‌ای که می‌باید به آن توجه نمود دینامیک سیستم فوق است که در دیزل ژنراتور، دینامیک سیستم بسیار سریع و ثابت زمانی‌ها در حدود میلی ثانیه می‌باشد. دینامیک باتری‌ها کند و ثابت زمانی‌ها در حدود ساعت است. از اینرو تغییرات خروجی ژنراتور سنکرون در حالت گذرای با توجه به دینامیک باتری‌ها قابل چشم پوشی است و می‌توان از اثر گاورنر صرف‌نظر کرد. با صرف‌نظر از دینامیک ژنراتور سنکرون در پروسه شارژ، می‌توان ژنراتور سنکرون را به مثابه یک منبع ولتاژ متغیر با زمان در نظر گرفت که AVR آن وظیفه کنترل ولتاژ را به‌عهده خواهد داشت. زمان مورد نیاز برای شارژ باتری‌ها در حدود چندین ساعت می‌باشد. با توجه به دینامیک ژنراتور سنکرون، با توجه به معادلاتی که برای شبیه‌سازی آن نوشته شده است، شبیه‌سازی ژنراتور سنکرون برای بازه زمانی طولانی چندین ساعته، کاری طاقت فرسا و طولانی می‌باشد. از اینرو برای

مشاهده دینامیک ژنراتور، عملکرد پروسسور بر روی AVR و تاثیر AVR بر روی ولتاژ خروجی ژنراتور شبیه‌سازی ژنراتور سنکرون در یک بازه زمانی ۱۰۰ ثانیه‌ای انجام شده است. همچنین با توجه به پیوستگی بار و بی تاثیر بودن دینامیک ژنراتور سنکرون در بازه زمانی چندین ساعته پروسه شارژ، برای شبیه‌سازی شارژ باتری‌ها، بجای ژنراتور سنکرون از یک منبع ولتاژ سه فاز کنترل شونده که کنترل آن توسط پروسسور انجام می‌شود استفاده شده است. این سیستم شارژ که در واقع بجای ژنراتور سنکرون آن، یک منبع ولتاژ سه فاز و به جای AVR ژنراتور سنکرون آن، یک گین ضرب شونده در منبع ولتاژ در نظر گرفته شده است در شکل (۵-۱۹) نشان داده شده است.

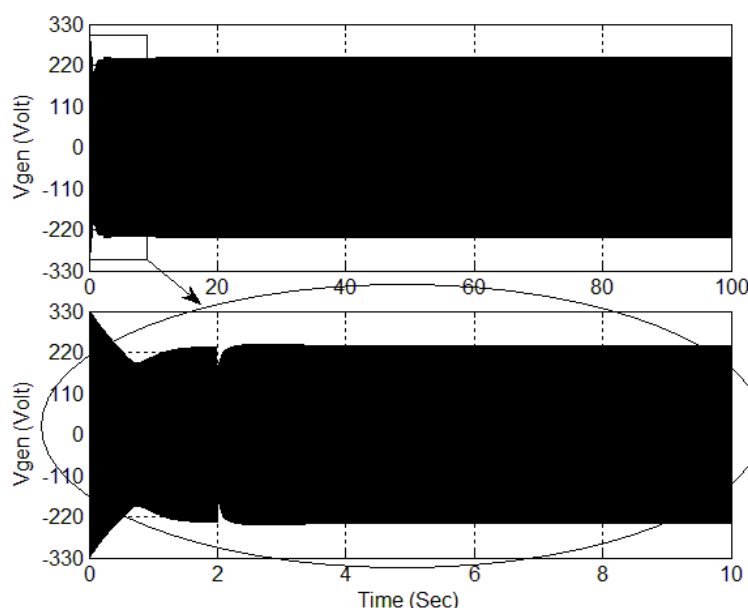


شکل ۵-۱۹: شبیه سازی سیستم شارژ معادل

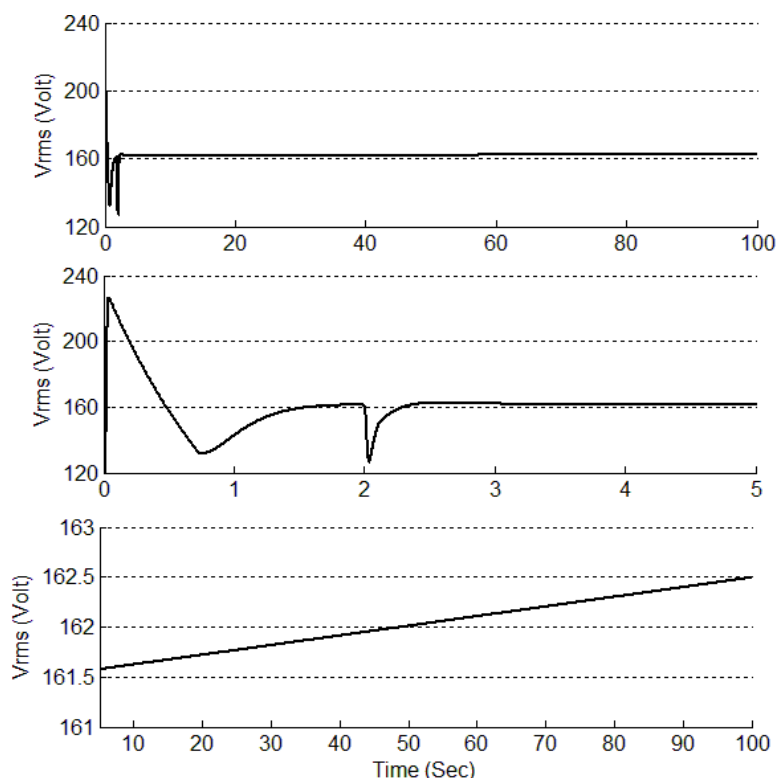
شبیه‌سازی ژنراتور سنکرون فقط برای حالت شارژ جریان ثابت انجام شده است. زیرا در حالت شارژ ولتاژ ثابت، ژنراتور عملکردی همانند عملکرد عادی خود در یک سطح ولتاژ دیگر خواهد داشت و در روش شارژ جریان ثابت - ولتاژ ثابت، ابتدای پروسه شبیه حالت شارژ جریان ثابت است و در انتها پس از رسیدن به ولتاژی از پیش تعیین شده، گین خروجی پروسسور ثابت شده و ولتاژ ثابت می‌شود.

شبیه‌سازی شارژ باتری‌ها توسط منبع ولتاژ سه فاز، برای هر سه حالت شارژ جریان ثابت، ولتاژ ثابت و جریان ثابت - ولتاژ ثابت انجام شده است.

در الگوریتم شارژ پیشنهادی، دیزل ژنراتور مدتی روشن می‌شود و پس از گرم و آماده عملیات شدن، دکمه استارت شارژ زده می‌شود. در شبیه‌سازی این نقطه، مرجع زمان صفر در نظر گرفته شده است. همزمان با زدن دکمه استارت پروسه شارژ، پروسسور در مدت زمان بسیار اندک (چند میکرو ثانیه) محاسبات مربوطه را انجام می‌دهد و گین محاسبه شده به AVR داده می‌شود. با توجه به دینامیک ژنراتور سنکرون و میزان ولتاژ خروجی ترمینال، در چند دهم ثانیه ولتاژ ترمینال آماده شارژ می‌گردد. در شبیه‌سازی دو ثانیه بعد از زدن دکمه استارت، سوئیچ‌های اتصال بانک باتری و یکسوساز به دیزل ژنراتور بسته شده و پروسه شارژ شروع می‌شود. همانگونه که گفته شد شبیه‌سازی در این قسمت برای صد ثانیه انجام گرفته است. شکل (۵-۲۰) ولتاژ لحظه‌ای یک فاز ترمینال ژنراتور را نشان می‌دهد. شکل (۵-۲۱) مقدار موثر ولتاژ یک فاز ولتاژ ترمینال ژنراتور را نشان می‌دهد. برای مشخص شدن تغییرات، ابتدا و انتهای شکل با وضوح بیشتر نیز نشان داده شده است.



شکل ۵-۲۰: ولتاژ لحظه‌ای ترمینال ژنراتور

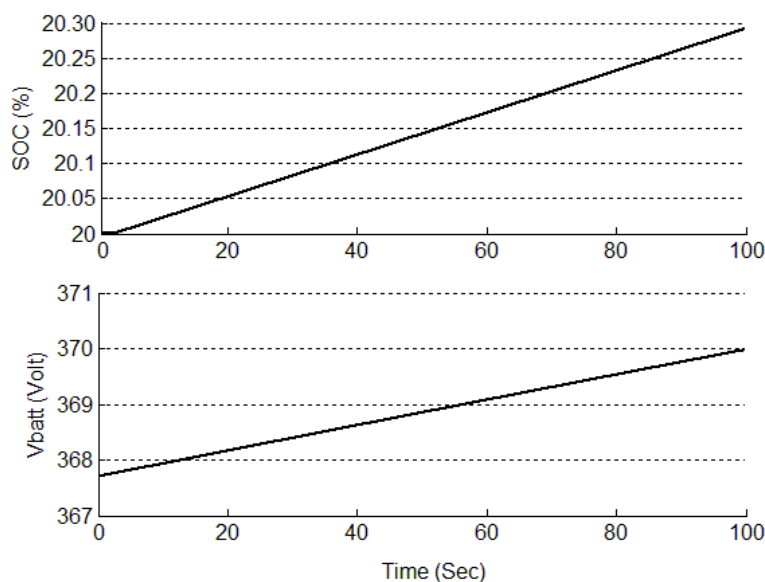


شکل ۵-۲۱: ولتاژ موثر یک فاز ترمینال ژنراتور

همانگونه که از شکل (۲۱-۵) کاملاً مشخص می‌باشد بعد از زدن دکمه استارت،  $1/5$  ثانیه طول می‌کشد تا ولتاژ ترمینال آماده شارژ گردد. در ثانیه ۲، باتری‌ها وارد مدار شده‌اند و ولتاژ ترمینال اندکی افت کرده که این افت ولتاژ به سرعت توسط AVR جبران شده و پروسه شارژ آغاز شده است. شکل (۲۲-۵) وضعیت شارژ و ولتاژ داخلی بانک باتری برای وضعیت شارژ اولیه ۲۰ درصد را نشان می‌دهد. همانگونه که از شکل‌های (۲۱-۵) مشخص می‌باشد ولتاژ موثر ابتدای پروسه شارژ در ترمینال ژنراتور  $161/5$  ولت می‌باشد که با توجه به ضریب  $2/34$  برابر شدن ولتاژ DC خروجی یکسوساز، ولتاژ  $377/9$  ولت به ترمینال باتری اعمال می‌گردد. ولتاژ داخلی باتری با توجه به شکل (۲۲-۵) در ابتدای پروسه شارژ  $367/8$  ولت می‌باشد. این اختلاف ولتاژ  $10/1$  ولتی بین ولتاژ خروجی یکسوساز و ولتاژ داخلی باتری مطابق با رابطه (۲۲-۵) سبب جاری شدن جریان DC  $50$  آمپری به درون باتری می‌شود. این روند محاسبات لحظه به لحظه ادامه داشته و در واقع بطور لحظه‌ای با

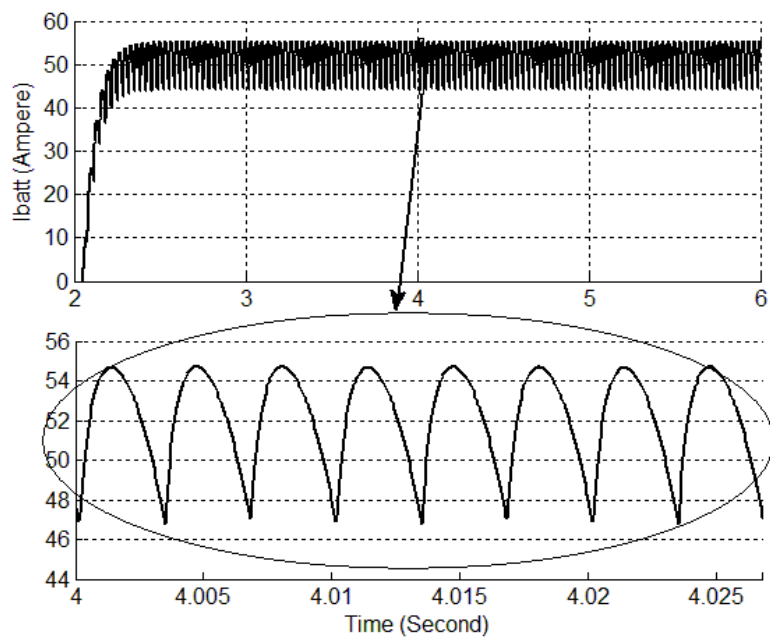


محاسبه ضریب مقاومت داخلی باتری و ولتاژ داخلی باتری و معلوم بودن جریان شارژ، مقدار اختلاف ولتاژ بین ترمینال باتری و ولتاژ داخلی باتری محاسبه شده و به AVR برای تولید این اختلاف ولتاژ اعمال می‌شود.

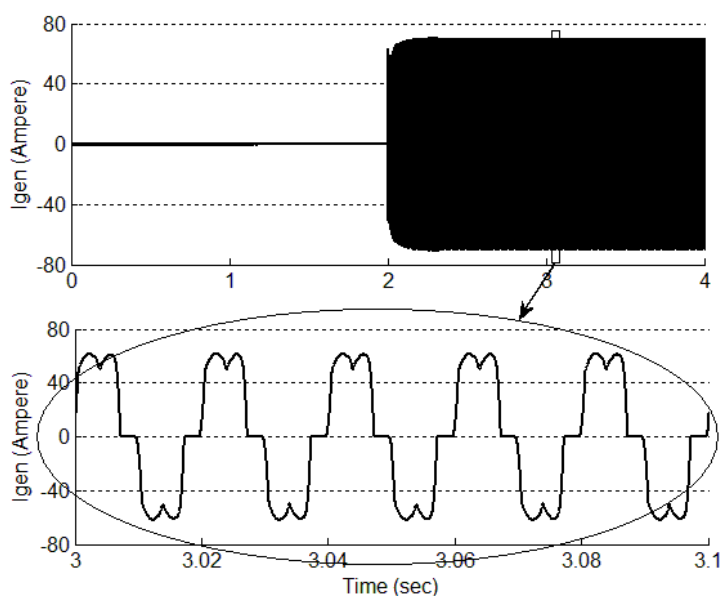


شکل ۵-۲۲: وضعیت شارژ و ولتاژ داخلی بانک باتری برای وضعیت شارژ اولیه ۲۰ درصد

جریان کشیده شده از خروجی یکسوساز توسط بانک باتری در شکل (۵-۲۳) نشان داده شده است. همانگونه که در شکل مشخص می‌باشد جریان پس از وصل سوئیچ‌ها در ثانیه دوم به باتری‌ها تزریق می‌شود که مقدار متوسط آن برابر با ۵۰ آمپر می‌باشد. همانگونه که در شکل (۵-۲۳) کاملاً مشخص می‌باشد، پالس‌های جریان تزریقی به باتری دارای فرکانس ۳۰۰ هرتز می‌باشد. این فرکانس به دلیل استفاده از ۶ دیود در پل سه فاز دیودی است که به همین خاطر، نام دیگر این پل، مبدل ۶ پالسه می‌باشد. در شکل (۵-۲۴) جریان ورودی یک فاز پل یکسوساز دیودی که برابر با جریان یک فاز ژنراتور می‌باشد رسم شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد جریان خروجی ژنراتور به دلیل پل سه فاز یکسوساز یک جریان هارمونیکی می‌باشد.

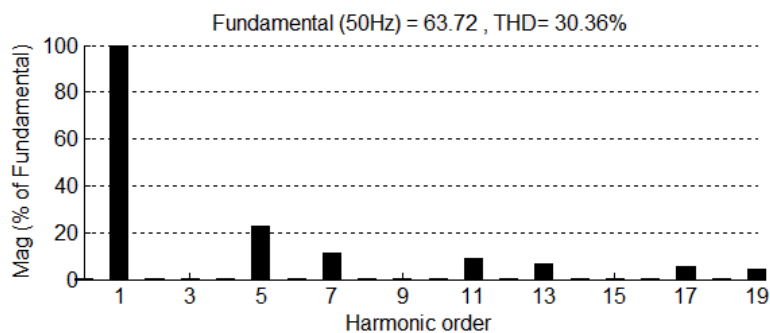


شکل ۵-۲۳: جریان شارژ بانک باتری



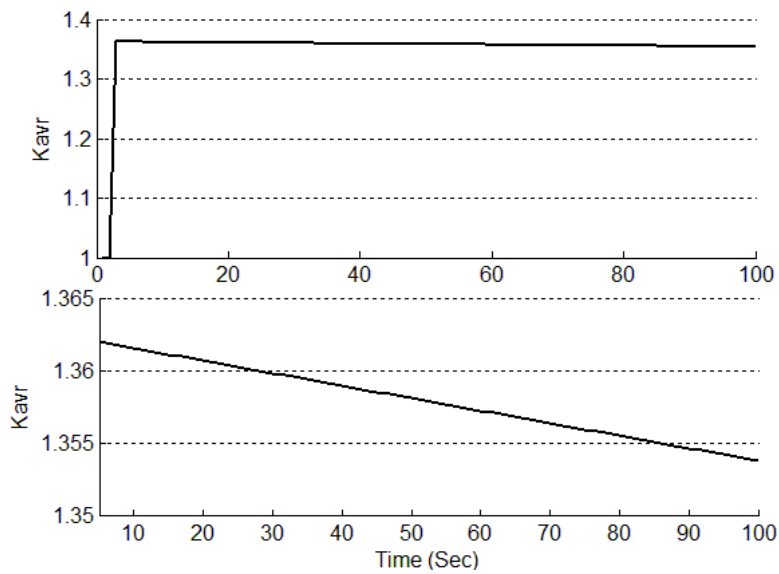
شکل ۵-۲۴: جریان خروجی یک فاز ژنراتور

در یک یکسوکننده  $P$  پالس ایده‌آل با جریان خروجی ثابت، هارمونیک‌های موجود در جریان ورودی یکسوکننده، هارمونیک‌های  $r = mp \pm 1$  می‌باشند که  $m = 1, 2, 3, \dots$  که دامنه هریک از این هارمونیک‌ها متناسب با  $\frac{1}{r}$  است. در یک یکسوکننده ۶ پالس ایده‌آل مقدار THD برابر  $29/87\%$  می‌باشد. در شکل (۵-۲۵) طیف هارمونیکی جریان یک فاز ژنراتور رسم شده است. میزان THD محاسبه شده برای جریان خروجی ژنراتور توسط نرم افزار MATLAB برابر با  $30/36\%$  می‌باشد.



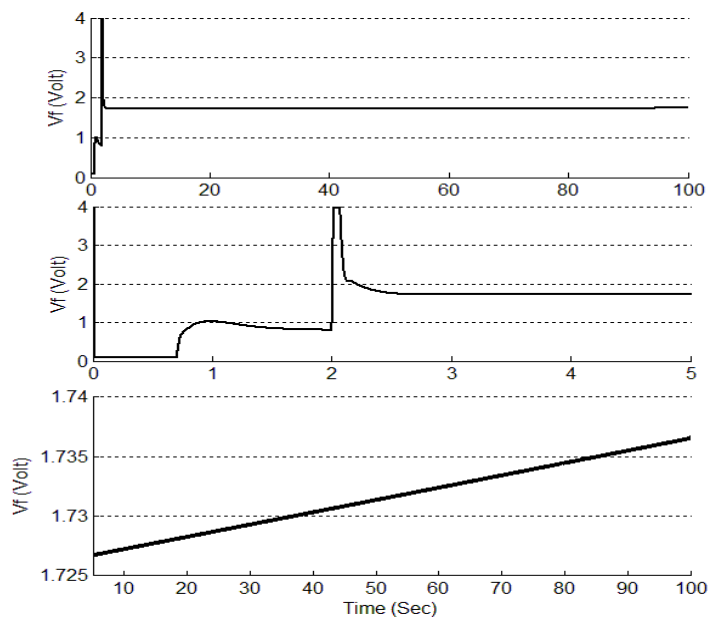
شکل ۵-۲۵: طیف هارمونیکی جریان خروجی ژنراتور

شکل (۵-۲۶) ضریب محاسبه شده توسط پروسسور را نشان می‌دهد. این ضریب که  $K_{avr}$  نام دارد در سیگنال نمونه‌برداری شده از ولتاژ ترمینال ضرب شده و سیگنال اصلاح شده  $V_{tm}$  را برای ورودی AVR می‌سازد که دیاگرام آن در شکل (۵-۱۴) نشان داده شد. همانگونه که از شکل (۵-۲۶) مشخص است بعد از شروع پروسه شارژ در ثانیه دوم، گین  $1/362$  در ولتاژ نمونه‌برداری شده از ترمینال ضرب می‌شود و باعث می‌شود که ولتاژ ترمینال  $377/9$  ولت بشود. در پایان ثانیه صدم این گین برابر  $1/354$  می‌باشد که ولتاژ  $380/25$  ولت در ترمینال را تولید می‌کند.



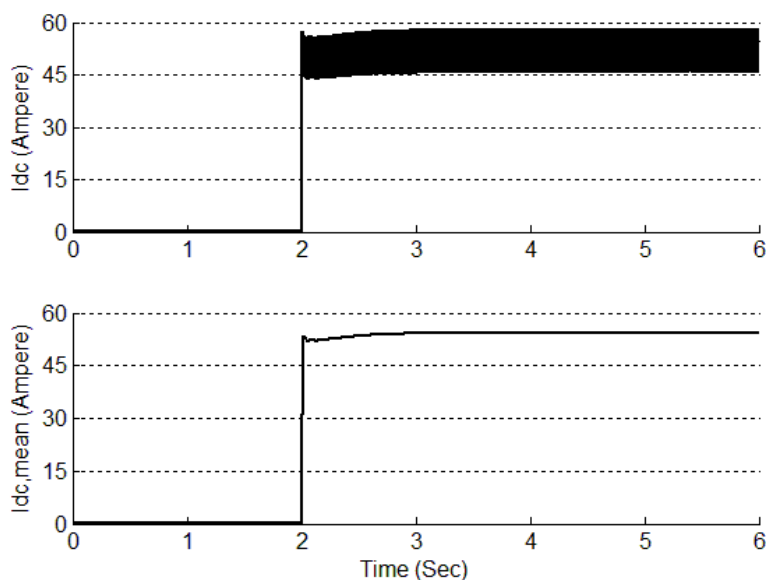
شکل ۵-۲۶: ضریب محاسبه شده توسط پروسور ( $K_{avr}$ )

در شکل (۵-۲۷) خروجی AVR که به سیستم تحریک اعمال می‌گردد نشان داده شده است. همانگونه که در شکل با وضوح بیشتر نشان داده شده است، خروجی AVR متناسب با شارژ شدن باتری‌ها بیشتر می‌شود تا ولتاژ ترمینال مطلوبی را برای شارژ مطابق شکل (۵-۲۱) تولید کند.

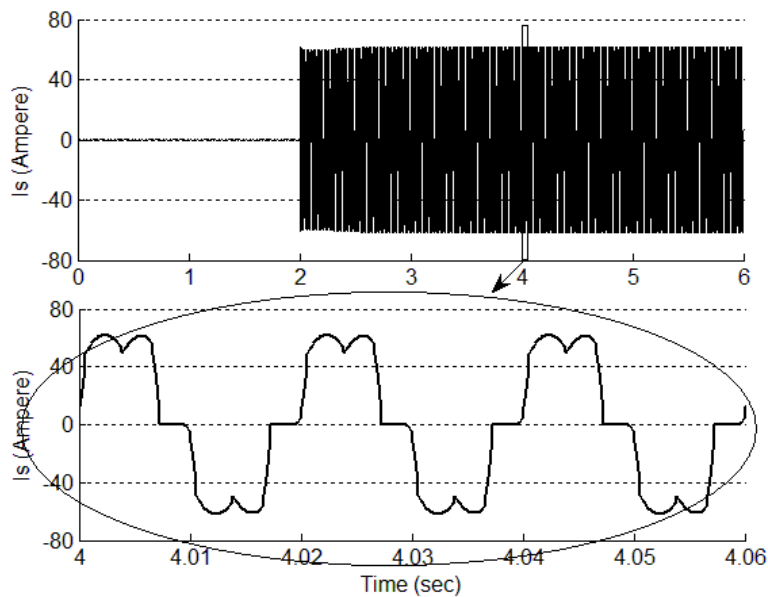


شکل ۵-۲۷: ولتاژ خروجی AVR

در این بخش همانگونه که گفته شد استفاده از شبیه‌سازی ژنراتور سنکرون برای شارژ باتری‌ها با توجه به تفاوت دینامیک آن کاری غیر ممکن است. از اینرو با آگاهی از دینامیک ژنراتور سنکرون و توجه به شکل‌های بدست آمده (۲۰-۵) تا (۲۷-۵) برای شبیه‌سازی شارژ باتری‌ها، از یک منبع ولتاژ سه فاز متغیر به جای ژنراتور سنکرون استفاده می‌شود. در واقع در سیستم شارژ جایگزین، گین تولید شده توسط پروسور، به جای اعمال به AVR ژنراتور سنکرون، به یک منبع ولتاژ اعمال می‌شود و دامنه آن را متناسب با ولتاژ شارژ باتری تغییر می‌دهد. سیستم شارژ معادل در شکل (۱۹-۵) نشان داده شد. برای مقایسه نتایج شارژ سیستم معادل، با سیستم شارژ اصلی، مشابه پروسه قبل برای این سیستم شارژ انجام شده است و تنها تفاوت اصلی در شکل موج‌های جریان خروجی ژنراتور و جریان ورودی باتری می‌باشد، که به ترتیب در شکل‌های (۲۸-۵) و (۲۹-۵) نشان داده شده‌اند. تفاوت جزئی این دو شکل موج در گذرایی آنها می‌باشد که در کسری از ثانیه به حالت پایدار می‌رسند که در پروسه چندین ساعته شارژ، هیچ تاثیری نخواهند داشت.

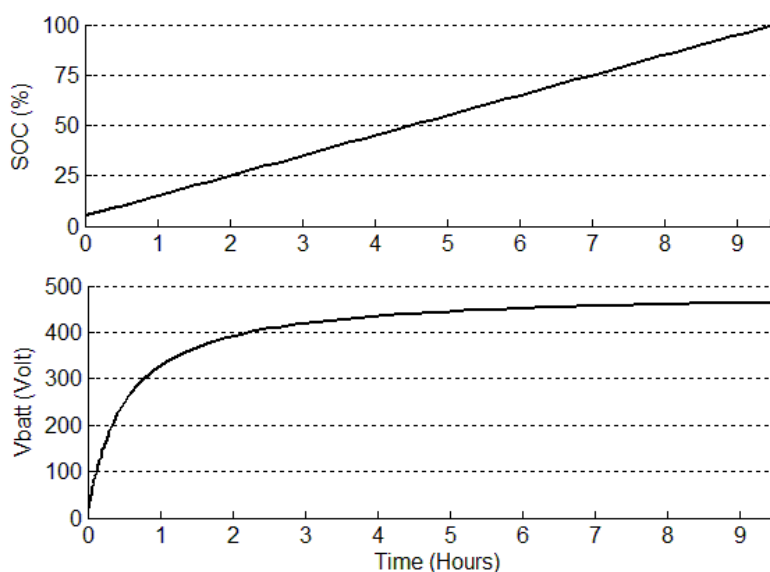


شکل ۲۸-۵: جریان شارژ باتری بانک باتری و مقدار متوسط آن در سیستم شارژ معادل



شکل ۵-۲۹: جریان خروجی یک فاز منبع ولتاژ جایگزین ژنراتور سنکرون

نتایج شارژ بانک باتری به روش شارژ جریان ثابت در شکل‌های (۵-۳۰) تا (۵-۳۲) برای وضعیت شارژ اولیه‌های متفاوت رسم شده است. در این بخش شبیه‌سازی برای چهار وضعیت اولیه ۵، ۲۰، ۴۰ درصد با جریان ثابت و نامی ۵۰ آمپر انجام شده است. سازندگان باتری‌های سربی اسیدی دشارژ بیش از ۸۰ درصد را برای باتری‌های سربی اسیدی مناسب نمی‌دانند. همچنین تخلیه کامل باتری‌های سربی اسیدی را به دلیل تشکیل سولفات در الکترولیت سبب کاهش عمر باتری می‌گردد. باتری‌های سربی اسیدی معمولاً بعد از دشارژ ۵۰ درصد ولتاژشان از مقدار نامی ۲ ولت بر سلول کمتر می‌شود. علاوه بر آسیب دیدن باتری، افت ولتاژ زیاد باتری نیز یک محدودیت دیگر برای جلوگیری از دشارژهای بالاست. در سیستم‌های ذخیره کننده انرژی با توجه به تعداد زیاد باتری‌ها، قیمت بانک باتری، عددی قابل ملاحظه است. از اینرو باید سعی نمود تمامی پارامترهایی که سبب افزایش عمر باتری‌ها می‌شود رعایت گردد.



شکل ۵-۳۰: وضعیت شارژ و ولتاژ داخلی بانک باتری برای شارژ جریان ثابت با وضعیت شارژ اولیه ۵ درصد

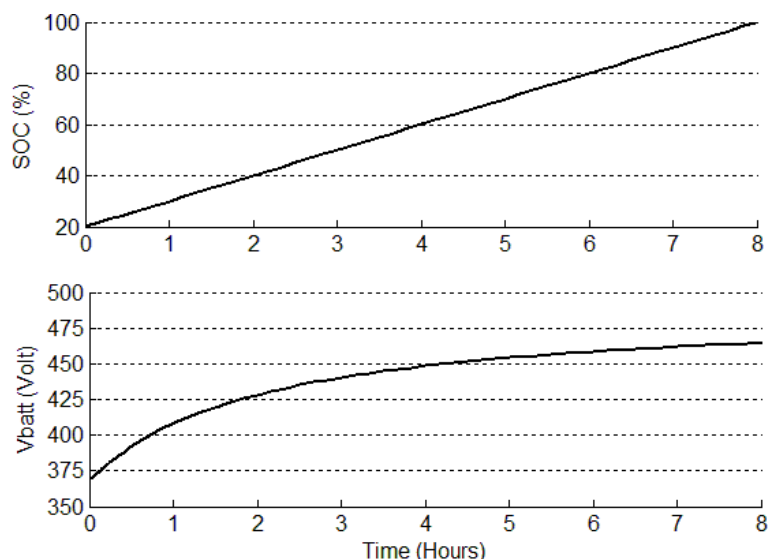
همانگونه که در شکل (۵-۳۰) مشخص می‌باشد، هنگامیکه تخلیه کامل در بانک باتری‌ها صورت می‌گیرد ولتاژ آنها به شدت افت می‌کند. برای وضعیت شارژ اولیه ۵ درصد که یک دشارژ بسیار عمیق برای باتری‌های سربی اسیدی محسوب می‌شود؛ ولتاژ بانک باتری به ۲۵ ولت می‌رسد. با توجه به شکل (۵-۱۸) ضریب مقاومت باتری در این حالت برابر با  $\frac{3}{5}$  می‌باشد. ولتاژ ترمینال باتری برابر با  $\frac{48}{1}$  ولت و با توجه به ضریب  $\frac{2}{34}$  یکسوساز، مقدار متوسط ولتاژ فاز ژنراتور باید  $\frac{20}{5}$  ولت شود که در عمل شاید امکان پذیر نباشد. برای این کار تمهیداتی همچون استفاده از یک مقاومت سری با باتری‌ها و یا یک تقسیم ولتاژ برای بانک باتری اندیشید. اما باید توجه داشت که باتری‌های سربی اسیدی به دلیل افت ولتاژ زیاد، بیش از ۸۰ درصد دشارژ نمی‌شوند.

برای وضعیت شارژ اولیه ۲۰ درصد، ولتاژ بانک باتری  $\frac{367}{8}$  ولت می‌باشد. در این حالت همانگونه که در بخش قبل گفته شد ولتاژ مورد نیاز برای شارژ  $\frac{377}{9}$  ولت می‌باشد که برای تولید این ولتاژ در خروجی یکسوساز، ولتاژ موثر فاز ژنراتور  $\frac{161}{5}$  ولت گردد. برای وضعیت شارژ اولیه ۴۰ درصد نیز ولتاژ بانک باتری ۴۲۹ ولت می‌باشد. ولتاژ مورد نیاز برای شارژ با توجه به ضریب مقاومت داخلی که

در این حالت مقدار آن  $1/2$  است؛ برابر  $437$  ولت می‌باشد. این ولتاژ مستلزم تولید ولتاژ موثر فاز  $186/75$  ولت در ژنراتور سنکرون است. در عمل دشارژ باتری‌های سربی اسیدی با توجه به نوع بار و میزان افت ولتاژ مجاز، معمولاً بین  $40$  تا  $80$  درصد است. نتایج شبیه‌سازی برای این دو محدوده انجام گرفته است. طبق رابطه (۵-۱۸) جریان باتری برابر با تغییرات بار باتری نسبت به تغییرات زمان می‌باشد. در روش شارژ جریان ثابت، با توجه به ثابت در نظر گرفتن جریان و صرف نظر از تغییرات ناشی از یکسوسازی می‌توان رابطه (۵-۲۳) و (۵-۲۴) را نتیجه‌گیری نمود. رابطه (۵-۲۴) بیانگر آن است که وضعیت شارژ باتری در روش شارژ جریان ثابت نسبت به زمان کاملاً خطی می‌باشد که نتایج شبیه‌سازی نیز کاملاً گویای آن می‌باشد.

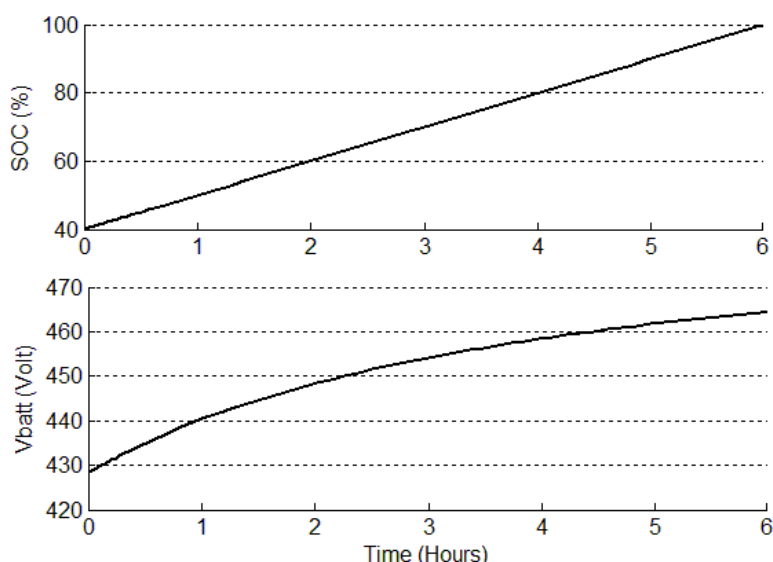
$$q = \int idt = \int I_{batt} dt \xrightarrow{I_{batt}=I_{ch}=Const} q = I_{ch} \times t = 50t (AH) \quad (23-5)$$

$$SOC = \frac{100q}{Q} = \frac{100 \times 50t (AH)}{500(AH)} = 10t (\%) \quad (24-5)$$



شکل ۳۱-۵: وضعیت شارژ و ولتاژ داخلی بانک باتری برای شارژ جریان ثابت با وضعیت شارژ اولیه ۲۰ درصد

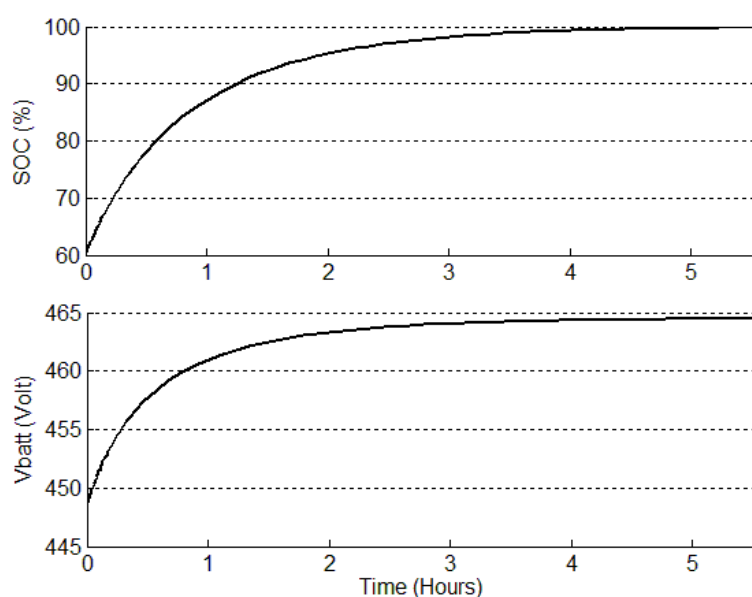




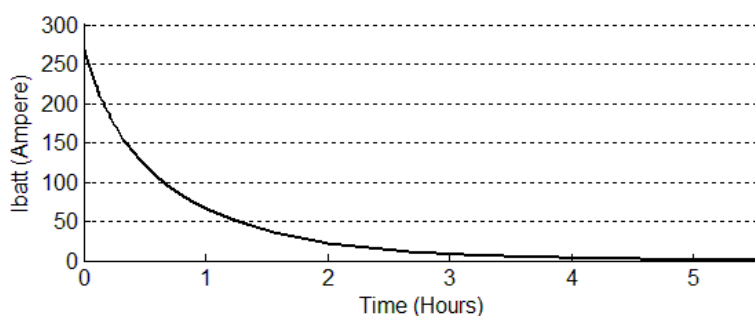
شکل ۵-۳۲: وضعیت شارژ و ولتاژ داخلی بانک باتری برای شارژ جریان ثابت با وضعیت شارژ اولیه ۴۰ درصد

در ادامه الگوریتم روش شارژ ولتاژ ثابت، برای بانک باتری‌ها بکار گرفته شده است. در این الگوریتم برای شارژ، با توجه به کاتالوگ شرکت سازنده، ولتاژ ثابت ۲/۱۱ ولت بر سلول (۴۶۵/۵ ولت) انتخاب شده است. شبیه‌سازی برای دو وضعیت شارژ اولیه ۶۰ و ۸۰ درصد انجام شده است. نتایج شبیه‌سازی به ترتیب در شکل‌های (۳۳-۵) تا (۳۵-۵) نشان داده شده است. همانگونه که در شکل (۳۳-۵) مشخص است، جریان شارژ باتری در روش شارژ ولتاژ ثابت به طور نمایی کم می‌گردد. برای وضعیت شارژ ۶۰ درصد، جریان اولیه شارژ در حدود ۲۵۰ آمپر و برای وضعیت شارژ ۸۰ درصد در حدود ۱۰۰ آمپر می‌باشد. از اینرو با توجه به ظرفیت دیزل ژنراتور، برای شارژ بانک باتری به روش شارژ ولتاژ ثابت، حداقل وضعیت شارژ بالای ۸۵ درصد توصیه می‌گردد که در این وضعیت شارژ، جریان ابتدایی پروسه شارژ در حدود ۵۰ آمپر می‌باشد. با توجه به رابطه (۲۴-۵) می‌توان گفت که برای حالت وضعیت شارژ اولیه ۸۰ درصد، پروسه شارژ با جریان ثابت با توجه به خطی بودن پروسه شارژ با جریان ثابت ۵۰ آمپر، ۲ ساعت طول خواهد کشید. با همین وضعیت شارژ اولیه و روش شارژ ولتاژ ثابت، با توجه به شکل (۳۵-۵) پروسه شارژ تقریباً ۴/۵ ساعت طول می‌کشد و علاوه بر آن در حدود ۴۰ دقیقه جریان شارژ بالاتر از ۵۰ آمپر خواهد بود. با مقایسه این دو روش شارژ بانک باتری توسط

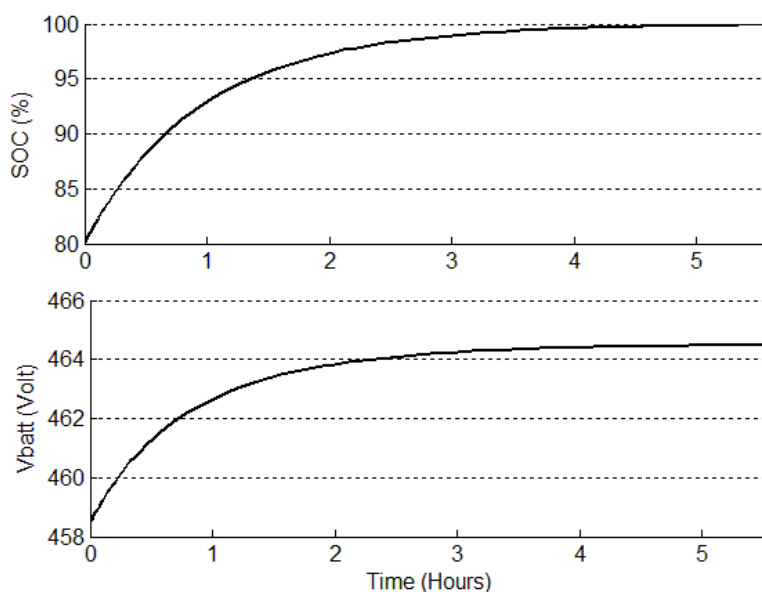
دیزل ژنراتور، متوجه می‌شویم روش شارژ جریان ثابت بسیار مناسب‌تر از روش شارژ ولتاژ ثابت است. تنها مزیت در روش شارژ ولتاژ ثابت اینست که در انتهای پروسه شارژ با توجه به صفر شدن جریان، نیازی به کنترل پروسه شارژ نمی‌باشد. در سیستم شارژ پیشنهادی با توجه به اینکه پروسه شارژ توسط پروسور انجام می‌شود و خطای انسانی در آن نقشی ندارد، از اینرو هیچ نگرانی در مورد پایان پروسه شارژ نمی‌باشد و پروسور پس از شارژ کامل باتری، پروسه شارژ را متوقف خواهد کرد.



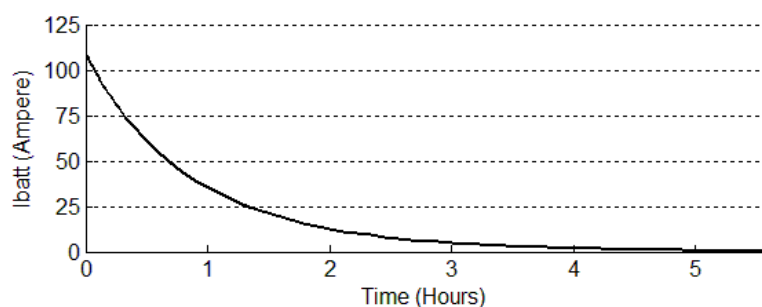
شکل ۳۳-۵: وضعیت شارژ و ولتاژ داخلی بانک باتری برای شارژ ولتاژ ثابت با وضعیت شارژ اولیه ۶۰ درصد



شکل ۳۴-۵: مقدار متوسط جریان شارژ باتری برای شارژ ولتاژ ثابت با وضعیت شارژ اولیه ۶۰ درصد



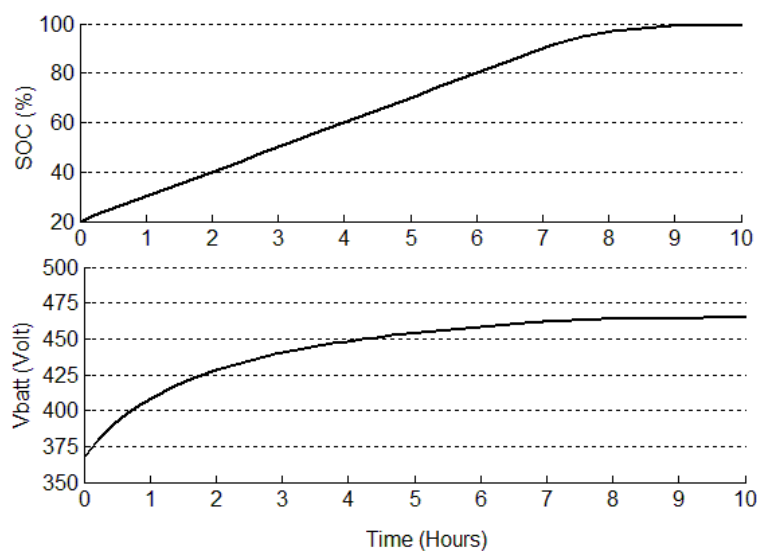
شکل ۵-۳۵: وضعیت شارژ و ولتاژ داخلی بانک باتری برای شارژ ولتاژ ثابت با وضعیت شارژ اولیه ۸۰ درصد



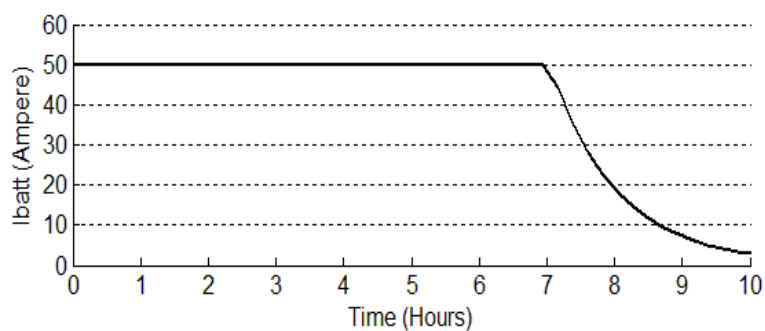
شکل ۵-۳۶: مقدار متوسط جریان شارژ باتری برای شارژ ولتاژ ثابت با وضعیت شارژ اولیه ۸۰ درصد

در شکل‌های (۵-۳۷) و (۵-۳۸) روش شارژ جریان ثابت - ولتاژ ثابت برای وضعیت شارژ اولیه ۲۰ درصد نشان داده شده است. همانگونه که مشخص می‌باشد، از ۸۰ درصد پروسه شارژ، ۷۰ درصد آن به روش جریان ثابت و ۱۰ درصد پایانی آن به روش شارژ ولتاژ ثابت انجام شده است. این روش که تلفیقی از دو روش جریان ثابت و ولتاژ ثابت می‌باشد مزایای هر دو روش را داراست. در پروسه شارژ

بانک باتری‌ها ابتدا به روش جریان ثابت و در انتها به روش ولتاژ ثابت شارژ می‌شوند. جریان شارژ در انتهای پروسه شارژ رفته رفته صفر می‌گردد و پروسه شارژ پایان می‌پذیرد.



شکل ۵-۳۷: وضعیت شارژ و ولتاژ داخلی بانک باتری برای شارژ جریان ثابت ولتاژ ثابت با وضعیت شارژ اولیه ۲۰ درصد



شکل ۵-۳۸: مقدار متوسط جریان شارژ باتری برای شارژ جریان ثابت ولتاژ ثابت با وضعیت شارژ اولیه ۲۰ درصد

تنها عیب روش شارژ جریان ثابت - ولتاژ ثابت در برابر مزیت آن نسبت به روش شارژ جریان ثابت، طولانی‌تر شدن پروسه شارژ می‌باشد. طول مدت زمان پروسه شارژ در این روش بسته به وزن استفاده

---

از دو روش شارژ متفاوت می‌باشد. اما در هر صورت برای یک ولتاژ و جریان شارژ، مدت زمان پروسه شارژ جریان ثابت - ولتاژ ثابت، از روش شارژ جریان ثابت بیشتر و از روش شارژ ولتاژ ثابت کمتر است. برای حالت وضعیت شارژ اولیه ۲۰ درصد و شارژ به روش ولتاژ ثابت در ۱۰ درصد پایانی، مطابق شکل (۳۷-۵) پروسه شارژ جریان ثابت - ولتاژ ثابت تقریباً ۱۰ ساعت طول خواهد کشید که این مدت زمان برای همین وضعیت و به روش جریان ثابت مطابق شکل (۳۱-۵)، ۸ ساعت بود.

# نتیجه‌گیری و پیشنهادات

---

در این پایان نامه یک روش نو و ابتکاری برای حذف شارژر به عنوان یک وسیله گران قیمت و دارای تلفات، در یک سیستم شارژ ارائه شد. ابتدا یک شناخت کلی در مورد باتری، شارژر و انواع روش‌های شارژ باتری‌ها حاصل گردید. با توجه به پارامترهای مورد نیاز برای تشکیل یک بانک باتری و بررسی خصوصیات باتری‌های شارژ شدنی، از قبیل قیمت، وزن و حجم، راندمان، چگالی انرژی، توان تولیدی قابلیت دشارژ با جریان‌های بالا و... می‌توان به این نتیجه رسید که تنها گزینه مناسب برای تشکیل یک بانک باتری با ظرفیت‌های بالا و کاربردی، استفاده از باتری‌های سربی اسیدی است. با یک بررسی جامع و کامل، مشخصه‌های عملکردی باتری‌های سربی اسیدی مورد مطالعه قرار گرفت و برای استفاده از اطلاعات و داده‌های واقعی یک باتری مناسب برای شبیه‌سازی انتخاب گردید. سپس با شبیه‌سازی اجزاء سیستم شارژ، یک روش نو و ابتکاری برای کنترل پروسه شارژ با تغییر عملکرد AVR ژنراتور سنکرون، مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. در یک ژنراتور سنکرون، AVR وظیفه تثبیت ولتاژ خروجی را بر عهده دارد. با نمونه برداری از ولتاژ ترمینال ژنراتور و مقایسه آن با ولتاژ مرجع، AVR یک سیگنال خطا برای سیستم تحریک ژنراتور سنکرون تولید می‌کند که این سیگنال خطا سبب تثبیت ولتاژ در ترمینال ژنراتور می‌گردد. ساختار AVR به گونه‌ای است که نمی‌توان در نقطه تنظیم ولتاژ مرجع آن (که معمولاً ۲۲۰ ولت موثر برای هر فاز است) تغییراتی را ایجاد نمود. از اینرو برای تغییر در خروجی آن، می‌باید تغییراتی را در سیگنال نمونه برداری شده از ترمینال ژنراتور ایجاد نمود. با قرار دادن یک جزء میکروپروسسوری به عنوان یک تصمیم گیر برای کنترل تغییرات بر روی سیگنال نمونه برداری شده، می‌توان تغییراتی دلخواه در ورودی و به تبع آن در خروجی

---

AVR حاصل نمود و ولتاژ دلخواه را در ترمینال ژنراتور ایجاد کرد. در سیستم شارژ طراحی شده، با این تغییر در سیگنال نمونه برداری شده، تغییر عملکرد در کار AVR ایجاد می‌شود. با این تغییر عملکرد، AVR به جای تثبیت ولتاژ، تغییر ولتاژ به نحو مطلوب را عهده‌دار می‌شود و از اینرو نیاز به استفاده از شارژر که همین وظیفه را دارد مرتفع می‌شود و فقط برای تبدیل ولتاژ AC به DC استفاده از یک پل سه فاز دیودی کافیست. حذف شارژ علاوه بر کاهش هزینه و حجم سیستم شارژ، مزایای دیگری همچون افزایش راندمان و قابلیت اطمینان را به همراه خواهد داشت. همچنین از دیگر مزایای بسیار این روش، انعطاف پذیری بالای آن می‌باشد. با برنامه‌ریزی مناسب جزء پروسسوری می‌توان روش‌های مختلف شارژ را پیاده‌سازی نمود. همچنین در هر روش شارژ، می‌توان پروسه شارژ را منطبق با الگوریتم‌های شارژ به‌طور بهینه کنترل نمود.

در این پایان‌نامه با مدلسازی و شبیه‌سازی تمامی اجزاء این سیستم شارژ از قبیل باتری، پل یکسوساز دیودی و دیزل ژنراتور که خود شامل موتور دیزل، ژنراتور سنکرون، سیستم تحریک و AVR، عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفت. هر سه روش اصلی شارژ باتری‌های سربی اسیدی یعنی روش‌های شارژ ولتاژ ثابت، جریان ثابت و جریان ثابت - ولتاژ ثابت مورد شبیه‌سازی قرار گرفتند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی علاوه بر صحت روش ابتکاری و پیشنهادی، دقت بالای آن را نیز نشان می‌دهد. دقت بالای این سیستم شارژ ناشی از محاسبات دقیق جزء پروسسوری می‌باشد که محاسبات در سریع‌ترین زمان ممکنه و با دقت بسیار بالایی انجام می‌پذیرد.

با توجه به نتایج حاصل از انجام این پایان‌نامه می‌توان اینگونه نتیجه‌گیری نمود که با تغییر در عملکرد AVR یک ژنراتور سنکرون، می‌توان از آن برای یک کاربری ویژه به‌عنوان یک شارژ بانک باتری استفاده نمود. همچنین از نتایج جدیدی که از انجام این شبیه‌سازی‌ها بدست آمد می‌توان به این نکته اشاره نمود که در این سیستم شارژ با توجه به مسائل اقتصادی مهندسی مربوط به انتخاب دیزل ژنراتور برای بانک باتری‌ها، روش شارژ ولتاژ ثابت به‌صورت یک مرحله‌ای، به‌دلیل جریان زیادی که از ژنراتور می‌کشد و همچنین طولانی شدن پروسه شارژ پیشنهاد نمی‌گردد. با توجه به نتایج



---

حاصله، پیشنهاد در مورد پروسه شارژ باتری‌ها اینست که اگر مدت زمان کافی برای شارژ بانک باتری در اختیار است، روش شارژ جریان ثابت - ولتاژ ثابت و اگر مدت زمان پروسه شارژ محدود است، پیشنهاد می‌گردد باتری‌ها با حداکثر جریان تولیدی ژنراتور، با روش جریان ثابت شارژ شوند. البته در اکثر مواقع استراتژی‌های تصمیم‌گیری برای شارژ مطلوب و بهینه توسط مصرف‌کننده تعیین می‌گردد.

با توجه به در دسترس بودن و تنوع رنج دیزل ژنراتورها و همچنین باتری‌های سربی اسیدی موجود در بازار، پیاده‌سازی سیستم شارژ پیشنهاد شده در هر سایز و اندازه‌ای امکان پذیر می‌باشد که این یکی دیگر از مزیت‌های سیستم شارژ پیشنهادی می‌باشد. می‌توان گفت انعطاف پذیری این سیستم شارژ مهمترین مزیت آن است که به‌سادگی می‌تواند با توجه به تصمیم‌گیری‌ها و مدت زمان شارژ، پروسه شارژ را به نحو احسن انجام دهد. با توجه به شناخت کافی از سیستم شارژ و فرکانس بالای محاسبات میکروپروسورها در مقابل دینامیک AVR و همچنین دینامیک کند شارژ شدن باتری‌ها، پیاده‌سازی سیستم فوق به‌سادگی امکان پذیر خواهد بود. انعطاف پذیری سیستم شارژ پیشنهادی، سادگی طرح و هزینه بسیار اندک جزء میکروپروسوری اضافه شده برای تغییر کاربری دیزل ژنراتور، دلیل مناسبی برای طراحی و ساخت این سیستم پیشنهادی می‌باشد. همانگونه که گفته شد با توجه به تنوع و فراوانی دیزل ژنراتورها و باتری‌های سربی اسیدی، تقریباً طراحی این سیستم شارژ با هر ظرفیتی برای استفاده در سیستم ذخیره انرژی برای یک واحد صنعتی، اداری و یا مسکونی و همچنین برای تغذیه سیستم‌های پیشران تجهیزاتی همچون کشتی‌ها، زیردریایی‌ها و لکوموتیوها امکان پذیر می‌باشد.

علاوه بر پیشنهاد ساخت سیستم شارژ فوق، پیشنهاد می‌گردد مطالعاتی بر روی استفاده از سیستم فوق به‌عنوان یک منبع تولید انرژی مستقل برای یک بار مصرفی مانند ساختمان‌های مسکونی و اداری بزرگ انجام پذیرد. مطالعاتی از قبیل برآورد هزینه انرژی تولیدی توسط یک سیستم دیزل ژنراتور باتری، انتخاب شارژ بهینه با توجه به نیازمندی‌ها و شرایط بار مصرفی، قابلیت اطمینان و... که خود می‌تواند سرفصل جدیدی در بخش تولیدات پراکنده برای استفاده‌های شهری باشد.

## ۱- اندوکتانس‌های ماشین [6]

$$\mathbf{L}(\theta) = \begin{bmatrix} L_{ff} & L_{fa} & L_{fb} & L_{fc} \\ L_{af} & L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{bf} & L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{cf} & L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix}$$

$$L_{ff} = 2.086471$$

$$L_{fa} = (0.200753095) \cos(2\theta + 1.83259581) \\ + (0.000697599) \cos(10\theta + 2.879827959) \\ + (0.000249698) \cos(14\theta - 2.8798369)$$

$$L_{aa} = (1.31137837 \times 10^{-2}) \\ + (0.005095737) \cos(4\theta - 2.61799383) \\ + (1.21262422 \times 10^{-4}) \cos(8\theta + 1.047204472) \\ + (3.53962868 \times 10^{-5}) \cos(12\theta - 1.57077744) \\ + (1.19904604 \times 10^{-5}) \cos(16\theta + 2.09447430) \\ + (5.84624347 \times 10^{-6}) \cos(20\theta + 2.61788131) \\ + (3.57955425 \times 10^{-6}) \cos(24\theta - 3.14145820) \\ + (8.38259564 \times 10^{-6}) \cos(28\theta + 0.523629389)$$

$$L_{ab} = (-6.51601136 \times 10^{-3}) \\ + (0.005770421) \cos(4\theta + 1.63704569) \\ + (1.11941105 \times 10^{-4}) \cos(8\theta - 1.095897511) \\ + (3.12355783 \times 10^{-5}) \cos(12\theta + 0.602627888) \\ + (3.29090539 \times 10^{-5}) \cos(16\theta + 0.339920335) \\ + (1.54135268 \times 10^{-5}) \cos(20\theta - 1.90334556) \\ + (4.78508636 \times 10^{-6}) \cos(24\theta + 1.186959968) \\ + (2.38942623 \times 10^{-5}) \cos(28\theta - 1.22370229)$$

$$L_{bb}(\theta) = L_{aa}(\theta - \frac{\pi}{3})$$

---

$$L_{cc}(\theta) = L_{aa}(\theta - \frac{2\pi}{3})$$

$$L_{bc}(\theta) = L_{ab}(\theta - \frac{\pi}{3})$$

$$L_{ca}(\theta) = L_{ab}(\theta - \frac{2\pi}{3})$$

$$L_{bf}(\theta) = L_{af}(\theta - \frac{\pi}{3})$$

$$L_{cf}(\theta) = L_{af}(\theta - \frac{2\pi}{3})$$

## ۲- مقاومت های استاتور و روتور

$$R_a = R_b = R_c = 0.199 \Omega$$

$$R_f = 3.7 \Omega$$

## ۳- پارامترهای AVR

$$T_f = 0.046 \quad K_p = 4.8 \quad T_{d1} = 0.345$$

$$T_{d2} = 0.0067 \quad T_i = 13 \quad 0 \leq V_f \leq 1 \quad K = 5.1$$

## مراجع

- [1] Darabi A, Hassannia A, Saedi M and Moeini A., (2010) ," Sequence Impedances Criterion for Loss of Main Detection of Embedded Generation," Environment and electrical engineering (EEEIC), 9th International Conference
- [2] Moeini A, Darabi A and Karimi M., (2010) " Clustering Governor Signal of Distributed Generation for Islanding Detection," IEEE Region 8 Sibircon-2010, Irkutsk Listvyanka, Russia, July 11-15,
- [3] Darabi A., (2005) "Auxiliary Windings, Supplying the AVR of a Brushless Synchronous Generator", Proceedings of the Eighth International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), pp. 81-85.
- [4] <http://fa.wikipedia.org/wiki/%D8%AF%DB%>
- [5] <http://www.raad-eng.com/product.html>
- [6] <http://www.abayaran.com/fa/abayaran-products/diesel-generator-abayaran-co.html>
- [7] حسن نیا الف، (۱۳۸۷)، پایان نامه ارشد " تعیین پارامترهای دینامیکی و گذرای یک ماشین سنکرون با استفاده از FE"، دانشکده مهندسی برق و رباتیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
- [8] Coultres M.E., Watson W., (1981) "Synchronous Machine Models by Standstill Frequency Response Tests", **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-100, 4, pp. 1480-1489.
- [9] <http://www.sababattery.ir/content/251>
- [۱۰] صدری م، شولایی ع، (۱۳۸۸)، " مدلسازی امپدانس داخلی باتری سرب اسید با در نظر گرفتن اثر سطح شارژ"، هفدهمین کنفرانس مهندسی برق ایران
- [11] Bandara C, Ivanov R, Gishin S., (1999) "Intelligent Fuzzy Controller for a Lead-Acid Battery Charger".
- [12] Laszlo B, (1998) "Implementing multi-stage charge algorithm with the UC3909 switch mode lead-acid battery charger controller", Unitrode application report, [www.unitrode.com](http://www.unitrode.com), pp. 1- 29

- 
- [13] Chan H , Sutanto D., (2000) "A new battery model for use with battery energy storage systems and electric vehicles power systems", **IEEE Power Engineering Society Winter Meeting**, volume 1, No.1, pp.470-475
- [14] Jantharamin N, Zhang Z., (2006) "A New Dynamic Model for Lead-Acid Batteries"
- [15] <http://www.greenbatteries.com/batterychargercompare.html>
- [16] [http://www.irpersian.net/index.php?option=com\\_content&view](http://www.irpersian.net/index.php?option=com_content&view)
- [17] Sauer D., (2003) "Electrochemical storage for photovoltaics", Handbook fphotovoltaic science and engineering, A. Luque and S. Hegedus, Eds Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd., pp. 799-862
- [18] Ziyad M, Salameh Margaret A, Casacca William A, (1992) "A Mathematical Model for Lead-Acid Batteries", **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol. 7, No.1
- [19] Sitterly M, YiWang L, GeorgeYin G, Wang C., (2011) "Enhanced Identification of Battery Models for Real-Time Battery Management", **IEEE Transactions on Sustainable Energy**, VOL. 2, NO. 3
- [20] H. W. Morse , (1912) , Storage Batteries, MacMillan Co., New York,
- [21] Tehnical Handbook Valve- Regulated Lead Acid Batteries, FIAMM- GS
- [22] Handbook for Stationary AGM-VRLA batteries, Part 2: Installation, Commissioning and Operation.
- [23] Papi I., (2006) "Simulation Model for Discharging a Lead-Acid Battery Energy Storage System for Load Leveling", **IEEE Transactions on Energy Conversion**, VOL. 21, NO. 2
- [24] Coleman M, Kwan Lee C, Zhu C, Gerard Hurley W., (2007) "State-of-Charge Determination From EMF Voltage Estimation: Using Impedance, Terminal Voltage, and Current for Lead-Acid and Lithium-Ion Batteries", **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, VOL. 54, NO. 5
- [25] Kong-Soon N, Chin-Sien M, Yi-Ping C,Yao-Ching H, (2008) "State-of-Charge Estimation for Lead-Acid Batteries Based on Dynamic Open-Circuit Voltage", 2nd

---

IEEE International Conference on Power and Energy (PECon 08), Johor Baharu, Malaysia.

[26] Ziyad M, Salameh Margaret A, Casacca William A., (1992) "A Mathematical Model for Lead-Acid Batteries", **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol. 7, No.1

[27] Salameh M, Casacca M, Lynch W. (1992) "A mathematical model for lead-acid batteries", **IEEE Transactions on Energy Conversion**, volume 7, No. 1.

[28] Shepherd C, (1965) "Design of Primary and Secondary Cells," **Journal of The Electrochemical Society**, vol. 112, pp. 657-664.

[29] Nelson J, Bolin W., (1995) "Basics and Advances in Battery Systems", **IEEE Transactions on Industry Application**, VOL. 31, NO. 2.

[30] Lacressonni F, Cassoret B, Brudny J., (2005) "Influence of a charging current with a sinusoidal perturbation on the performance of a lead-acid battery", **IEE Proc.-Electronic. Power Appl.**, Vol. 152, No. 5.

[31] Gross S., (1973) Conference Record of Eighth Annual Meeting of IEEE Industry Applications Society ,Milwaukee, Wisconsin, October 8- 16, 19 73, Institute of Electric and Electronic Engineers, Piscataway,N.J., 1973, pp. 905-912.

[32] Marcos J, Peñalver C., (2001) "An approach to real behaviour modeling for traction lead-acid batteries". 32nd Power Electronics Specialist Conference (PESC'2001). Vancouver, Canadá.

[33] Evans T, Nguyen T, White R., (1987) "Mathematical model of a lithium/thionyl chloride primary cell", **Journal of the Electrochemical Society**.

[34] Syracuse K , Clark W., (1997) "A statistical approach to domain performance modeling for oxyhalide primary lithium batteries", The 12<sup>th</sup> Annual Battery Conference on Applications and Advances.

[35] Lampinen M, Vuorisalo J., (1992) "Thermodynamic analysis of electrochemical cells based on a balanced matrix theory", **Journal of the Electrochemical Society**.

[36] Technical Data LPL SERIES-Long Life Standby, LPL2-500 (2V500AH), Gita Battery.

[37] Technical Data 1100 Series, Model1103A-33TG1,@Perkins.

---

[38] Darabi A, Tindall C.E., (2002) "Analogue AVR model for use in real time transient simulation of small salient pole alternators," IEE Conference Publication, Power Electronics, Machines and Drives, No. 487, pp. 451-455.