

ارائه یک منبع تغذیه بدون وقفه دینامیکی DUPS با ترکیب ذخیره‌ساز مکانیکی چرخ طیار و باتری

منصور رفیعی^۱ سعید امیری شادمهری^۲

۱- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهید بهشتی تهران- تهران- ایران

m_rafiee@sbu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق- دانشگاه شهید بهشتی تهران- تهران- ایران

s.amirishadmehri@mail.sbu.ac.ir

چکیده: در این مقاله یک منبع تغذیه بدون وقفه دینامیکی (DUPS) با ترکیب سیستم ذخیره‌ساز باتری و چرخ طیار با هدف غلبه بر مشکلات کیفیت توان نظیر کاهش موقت ولتاژ و قطعی برق ارائه شده است. برای تأمین برق در لحظه بروز خطا و چندثانیه بعد از آن از سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار و در چند دقیقه بعد از بروز خطا یا قطعی برق از سیستم ذخیره‌سازی باتری و در صورت رفع نشدن قطعی برق، از راه‌اندازی یک دیزل ژنراتور استفاده شده است. سیستم ذخیره‌سازی انرژی چرخ طیار متشکل از یک مبدل دوطرفه، یک چرخ طیار و یک موتور سنکرون آهنربای دائم (IPMSM) می‌باشد. در طرح کنترل IPMSM، از کنترل برداری، حداکثرسازی گشتاور در هر آمپر (MTPA) و تضعیف شار استفاده شده است. سیستم ذخیره‌سازی باتری، شامل یک مبدل دوطرفه DC/DC کاهنده-افزاینده به همراه یک کنترل‌کننده شارژ و دشارژ است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار در کمتر از ۱۰ ثانیه از حالت ساکن به حالت آماده کار تغییر وضعیت داده و آماده تأمین برق بار بحرانی برای پدیده‌های کوتاه‌مدت می‌شود. در حالت UPS نیز ولتاژ بار بحرانی را در کمتر از یک سیکل در مقدار نامی حفظ می‌کند. در صورت وقوع قطع برق بلندمدت نیز پس از تخلیه انرژی چرخ طیار طی حدود ۲ ثانیه، سیستم ذخیره انرژی باتری وارد مدار شده و ولتاژ لینک DC را با خطای ماندگار صفر، در مقدار مرجع خود حفظ نموده و زمان لازم برای راه‌اندازی دیزل ژنراتور را فراهم می‌کند.

واژه‌های کلیدی: منبع تغذیه بدون وقفه دینامیکی (DUPS)، سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار (FESS)، سیستم ذخیره انرژی باتری (BESS)، مبدل DC/DC کاهنده - افزایشنده، کیفیت توان، افت ولتاژ، قطع برق

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.20.2.215

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۱۲/۱۱

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۱/۰۳/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۰۵

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر منصور رفیعی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - تهرانپارس- بلوار شهید عباسپور - دانشگاه شهید بهشتی- پردیس فنی شهید عباسپور- دانشکده‌ی

برق

۱- مقدمه

امروزه، برق قابل اعتماد یکی از نیازهای اساسی واحدهای صنعتی مدرن است. باین حال، به دلیل وجود بارهای نامتعادل، پدیده‌های کلیدزنی و در مدار آمدن یا خارج شدن بارهای سنگین موتوری و رخداد خطای زمین در شبکه برق، پدیده کاهش موقتی ولتاژ به عنوان یک مشکل عمده در کیفیت توان شبکه‌های برق صنعتی تبدیل شده است [۱]. طبق آمار، ۹۲ درصد مشکلات کیفیت توان، کاهش ولتاژ موقتی است که بصورت کاهش ۱۰ الی ۹۰ درصد در مقدار مؤثر ولتاژ تعریف می‌شود [۲]. علاوه بر این، ۸۰ درصد از این کاهش ولتاژها تنها در حد ۲۰ الی ۵۰ میلی ثانیه طول می‌کشد [۳].

ذخیره‌سازهای انرژی به ویژه ذخیره‌سازهای مبتنی بر باتری به عنوان یک راهکار مؤثر برای غلبه بر این مشکلات مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۴]. باتری‌ها معمولاً به عنوان وسایل ذخیره انرژی در منبع تغذیه بدون وقفه استفاده می‌شوند. باین حال، مشکلاتی مانند طول عمر کوتاه و اثرات زیست محیطی در دفع پسماند وجود دارد [۵].

با پیشرفت تکنولوژی‌های الکترونیک قدرت، باتاقان‌های مغناطیسی و موتور/ژنراتورها، سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار^۱ (FESS) در برخی کاربردها، جایگزین مناسبی برای باتری‌های الکتروشیمیایی شده است. از مزایای سیستم‌های چرخ طیار در مقابل باتری‌ها می‌توان به چگالی توان بالاتر، عدم حساسیت به شرایط محیطی، طول عمر بیشتر، عدم وجود مواد شیمیایی خطرناک، مشکلات زیست محیطی کمتر و سهولت و سرعت شارژ اشاره نمود [۶]. به همین دلایل اخیراً چرخ طیار به عنوان ذخیره‌ساز انرژی مورد توجه قرار گرفته است. اگرچه این سیستم ذخیره انرژی، هزینه اولیه نسبتاً بالایی نیاز دارد (حدود ۵۰۰۰ دلار در کیلووات ساعت)، اما هزینه بهره‌برداری و نگهداری سالانه آن کم است (در حد ۱۹ دلار در کیلووات در سال) [۷]. مشخصه اصلی سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار یعنی چگالی انرژی کم و چگالی توان بالا، آن را برای کاربردهای کوتاه مدت مناسب می‌سازد [۸]. علاوه بر این، درحالی که انواع دیگر ذخیره‌ساز انرژی مانند BESS، ممکن است نیازمند سیستم کنترل دما باشند، چرخ طیار به محیط دمایی کنترل شده نیاز ندارد. همچنین به عنوان یک ذخیره‌ساز با پاسخ سریع، می‌تواند توان زیادی را در کسری از ثانیه تحویل دهد. عمر طولانی و بازده بالا (در حد ۹۰ تا ۹۵ درصد) نیز دو مزیت دیگر آن است [۹].

در سال ۱۹۸۷ برای اولین بار در [۱۰] مدل‌های متفاوت سیستم‌های منبع تغذیه بدون وقفه همراه با ذخیره انرژی چرخ طیار و موتور دیزل بررسی و ارائه شده‌اند. در [۱۱] طراحی و عملکرد یک سیستم منبع تغذیه بدون وقفه گردان با کوپلینگ القایی به عنوان ذخیره انرژی مکانیکی مطرح شده است. در [۱۲] یک مدل درایو برای یک سیستم منبع تغذیه بدون وقفه گردان کم مصرف ارائه شده است. همچنین جهت ذخیره انرژی مکانیکی از یک ماشین DFİG^۲ استفاده

شده است. در [۱۳] یک سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار برای استفاده هم به عنوان ابزاری برای جبران دینامیکی ولتاژ و هم به عنوان منبع تغذیه بدون وقفه در نظر گرفته شده است. [۱۴] نیز یک مبدل ماتریسی برای اتصال مستقیم ذخیره انرژی چرخ طیار برای منبع تغذیه بدون وقفه ارائه نموده است.

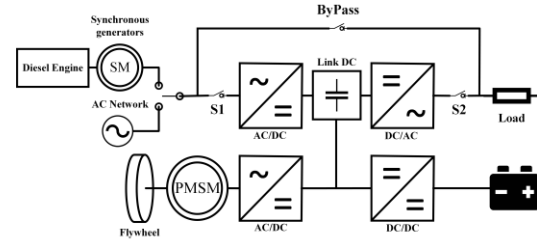
تعدادی از مقالات به طور ویژه بر روی کیفیت توان سیستم‌های قدرت به همراه سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار تمرکز کرده‌اند، به عنوان مثال در مقاله [۱] درمورد مدلسازی و شبیه‌سازی یک DVR با سیستم ذخیره‌سازی انرژی چرخ طیار برای کاهش ولتاژها بحث می‌کند. در مقاله [۱۵] یک سیستم قدرت دیزل بادی ارائه شده است که فرکانس شبکه در زمان انتقال به حالت‌های مختلف نظیر فقط دیزل، فقط بادی و هر دو با یکدیگر توسط چرخ طیار در مقدار نامی خود حفظ می‌شود. در [۱۶] سیستم ذخیره‌سازی انرژی چرخ طیار سرعت بالا با باتاقان‌های HTS با جزئیات مدل‌سازی و در زمان واقعی شبیه‌سازی شده است. نتایج سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار سرعت بالا را در پشتیبانی از ولتاژ و فرکانس شبکه در هنگام اختلالات، سریع و مؤثر نشان داده است. [۱۷] نیز امکان اتصال سیستم‌های منبع تغذیه بدون وقفه دینامیک چرخ طیار به یک شبکه توزیع ۲۰ کیلوولت را بررسی می‌کند. در این مقاله درباره جنبه‌های اصلی فنی که باید به دقت بررسی شود نظیر کیفیت برق از جمله هارمونیک‌ها، کنترل ولتاژ و فرکانس و از سوی دیگر، تأثیر بر سیستم حفاظت، زمین خنثی و دستگاه‌های محافظتی مشتریان، و همچنین رفتار پویا و ثبات کل سیستم (شبکه منبع تغذیه بدون وقفه و ولتاژ متوسط) بحث می‌شود.

اکثر مقالات [۱۰-۱۷] به ارائه یک کاربرد از سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار برای بهبود کیفیت توان و منبع تغذیه بدون وقفه پرداخته‌اند. هیچ یک از مقالات ارائه شده به استفاده باتری در کنار سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار برای تأمین زمان لازم راه‌اندازی ژنراتور دیزل نپرداخته‌اند و منبع تغذیه دینامیک ارائه شده در مقالات نیاز به یک ژنراتور دیزل آماده به کار دارد.

از این رو در مقاله حاضر، یک منبع تغذیه بدون وقفه دینامیکی با ترکیب ذخیره‌ساز مکانیکی چرخ طیار و باتری با هدف غلبه بر پدیده‌هایی نظیر افت ولتاژ موقت و قطع برق ارائه شده است. برای تأمین پدیده‌های بلندمدت برق نیاز به یک دیزل ژنراتور آماده به کار در کنار سیستم ذخیره‌سازی چرخ طیار است. استفاده از چرخ طیار در کنار باتری باعث کاهش تعداد شارژ و دشارژ باتری و افزایش طول عمر آن می‌شود و از طرفی اندازه باتری باتوجه به مدت زمان لازم برای روشن شدن و در مدار آمدن دیزل ژنراتور (معمولاً در حد چند دقیقه) تعیین می‌گردد که باعث کاهش هزینه‌های مربوط به باتری در منابع تغذیه بدون وقفه استاتیک با باتری و کاهش آلودگی‌های زیست محیطی مربوط آن و همچنین کاهش هزینه‌های مربوط به تعمیرات و استهلاک ژنراتور دیزل آماده به کار در منابع تغذیه بدون وقفه روتاری می‌شود.

۲- پیکربندی سیستم پیشنهادی

پیکربندی سیستم شامل منبع تغذیه بدون وقفه و سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار در شکل (۱) نشان داده شده است. این سیستم شامل دو مبدل الکترونیک قدرت است که موتور چرخ طیار و بار بحرانی را تأمین می کنند و به ترتیب به عنوان یکسوکننده AC/DC و اینورتر DC/AC عمل می کنند. سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار از طریق اتصال مستقیم بین دو مبدل به سیستم منبع تغذیه بدون وقفه متصل می شود. به این ترتیب ولتاژ لینک DC توسط سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار تنظیم می شود.



شکل (۱): پیکربندی سیستم منبع تغذیه بدون وقفه مورد مطالعه

مدل سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار که در منبع تغذیه بدون وقفه استفاده شده، شامل یک مبدل دو جهته است که انرژی جریان یافته سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار را کنترل می کند. در شرایط عادی، شبکه برق سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار را تا سرعت نامی خود شارژ می کند و به طور مستقیم انرژی لازم برای بار بحرانی فراهم می گردد. هنگامی که قطع برق کوتاه مدت رخ می دهد، سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار بلافاصله وارد سیستم می شود تا نبود منبع تغذیه جریان گردد.

چرخ طیار انرژی را به روش مکانیکی ذخیره می کند و ظرفیت ذخیره سازی متناسب با ممان اینرسی واحد چرخ طیار و مجذور سرعت زاویه ای آن است. در حالی که سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار عملی محدودیت سرعت عملکرد دارد، مقدار انرژی توسط رابطه (۱) تعیین می شود:

$$E_{flywheel} = \frac{1}{2} J (\omega_{max}^2 - \omega_{min}^2) \quad (1)$$

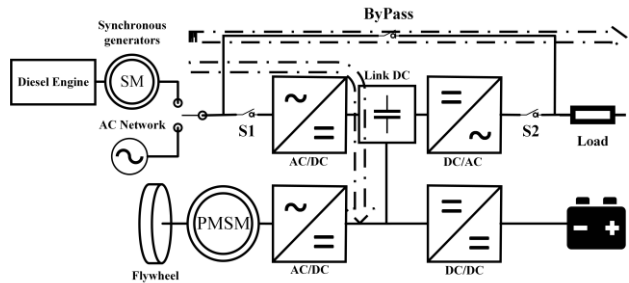
که در آن J ممان اینرسی، ω_{max} و ω_{min} به ترتیب سرعت زاویه ای حداکثر و حداقل چرخ طیار هستند.

چرخ طیار مورد استفاده در این سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار با سرعتی تا حد ۱۰۰۰۰ دور در دقیقه کار می کند. یک موتور سنکرون از نوع آهنربای دائمی داخلی (IPMSM) نیز با نصب مستقیم بر روی شفت چرخ طیار در نظر گرفته شده است.

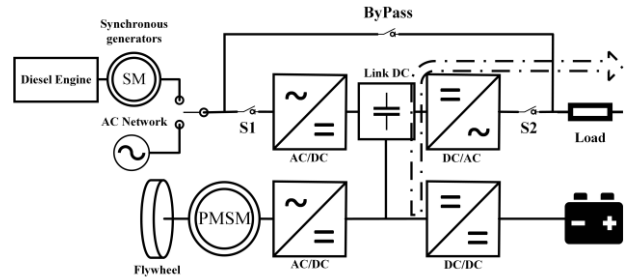
کنترل سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار در واقع کنترل موتور همراه با چرخ طیار است. چرخ طیار به عنوان اینرسی اضافی که به موتور ماشین سنکرون مغناطیس دائم اضافه می شود، مدل می شود.

سیستم ارائه شده دارای دو وضعیت عملکردی عادی و منبع تغذیه بدون وقفه است که در شکل های (۲) و (۳) ارائه شده اند. برای سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار، سه حالت عملیاتی در حال شارژ، آماده به کار و

در حال تخلیه در نظر گرفته می شود. در حالت شارژ، شبکه برق از طریق یکسوکننده AC/DC، مبدل دو جهته و موتور سنکرون مغناطیس دائم انرژی را به چرخ طیار تزریق می کند. وقتی چرخ طیار به سرعت نامی می رسد، سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار به حالت آماده به کار می رود و یک جریان شارژ کوچک نگه داشته می شود تا سرعت نامی را حفظ کند.



شکل (۲): جریان توان در حالت عملکردی عادی



شکل (۳): جریان توان در حالت عملکردی منبع تغذیه بدون وقفه

در صورت قطعی برق، حالت سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار به "در حال تخلیه" تغییر می کند، ماشین سنکرون مغناطیس دائم به عنوان ژنراتور برای تأمین انرژی بار بحرانی از طریق مبدل برق دو جهته و مبدل DC/AC کار می کند. وقتی شبکه برق بازبایی شد، سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار دوباره وارد حالت "در حال شارژ" می شود.

۳- سیستم ذخیره سازی چرخ طیار

۳-۱- مدل ماشین سنکرون مغناطیس دائم

معادلات ولتاژ و گشتاور الکترومغناطیسی در قاب dq با سرعت زاویه ای الکتریکی ω_e ، به صورت زیر بیان می شود [۱]:

$$V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q \quad (2)$$

$$V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e (L_d i_d + \psi_f) \quad (3)$$

$$T_e = 3p[\psi_f i_q + (L_d + L_q) i_d i_q] / 2 \quad (4)$$

محدودیت های جریان آرمیچر ماشین و ولتاژ ترمینال توسط روابط (۵) و (۶) بیان شده اند [۱]:

$$I_a = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq I_{am} \quad (5)$$

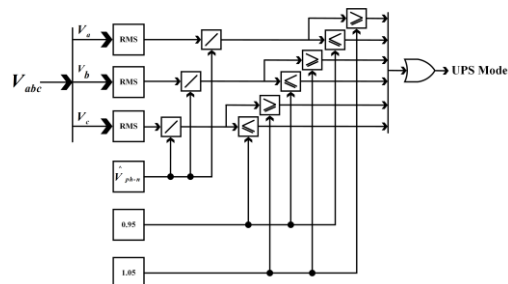
$$V_a = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \leq V_{am} \quad (6)$$

٢١٨

۳-۳- تنظیم ولتاژ لینک DC

افت ولتاژ یا قطعی کوتاه مدت توسط یک حسگر ولتاژ که در ورودی شبکه برق قرار می گیرد تشخیص داده شده و سیگنال لازم برای تعیین حالت منبع تغذیه بدون وقفه تولید می شود. اگر قطع برق یا افت ولتاژ شناسایی نشود، سوئیچ ۲ در وضعیت صفر است بدین معنی که سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار در حالت شارژ یا آماده به کار قرار دارد. در صورت بروز افت ولتاژ یا قطع شدن برق، سوئیچ ۲ در وضعیت ۱ است، یعنی سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار در حالت دشارژ یا "در حال تخلیه" کار می کند.

در حالت های شارژ یا آماده به کار، ولتاژ باس DC توسط یکسوساز AC/DC تنظیم می شود و گشتاور مرجع T_e^* از کنترل کننده PI سرعت که با خطای سرعت زاویه ای $(\omega_r^* - \omega_r)$ عمل می کند بدست می آید. در حالت تخلیه، سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار ولتاژ باس DC را با کاهش سرعت چرخ طیار تنظیم می کند و T_e^* از کنترل کننده PI ولتاژ که با خطای ولتاژ $(V_{DC}^* - V_{DC})$ عمل می کند بدست می آید. همان طور که در شکل (۶) مشخص است حالت منبع تغذیه بدون وقفه با اندازه گیری مقدار مؤثر ولتاژ شبکه و مقایسه آن با محدوده مجاز ولتاژ- که مقدار ۵٪ برای آن در نظر گرفته شده است- تعیین می شود.



شکل (۶): سیستم تشخیص حالت منبع تغذیه بدون وقفه

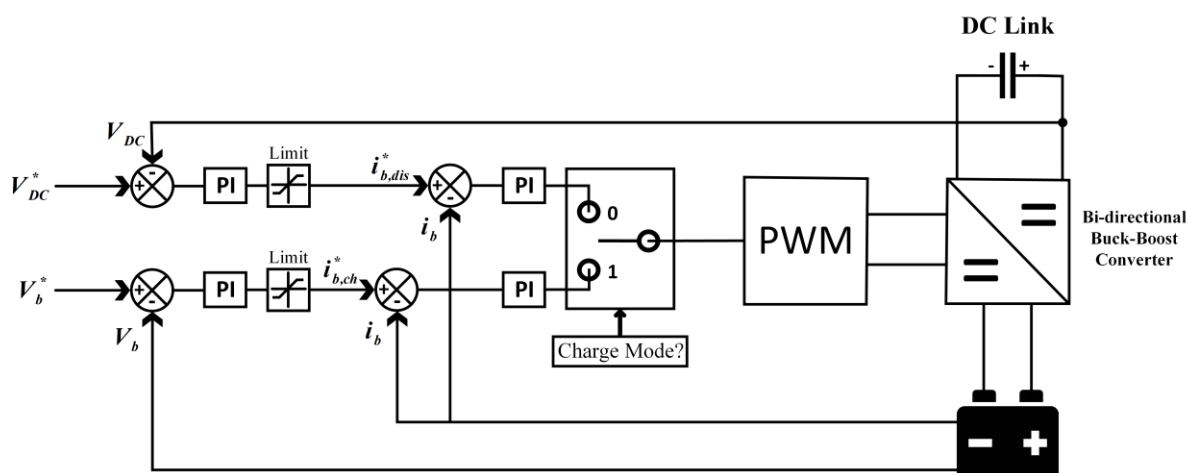
۴- سیستم ذخیره انرژی باتری

وظیفه باتری در سیستم پیشنهادی تأمین برق بار حیاتی برای پدیده هایی است که بیشتر از چند ثانیه طول می کشند و چرخ طیار قادر به تأمین انرژی نیست. در این صورت حالت باتری به "در حال تخلیه" منتقل می شود و هم زمان موتور دیزلی روشن می شود. در این سیستم باتری فقط برای تأمین زمان لازم جهت روشن شدن موتور دیزلی اندازه دهی می شود تا هزینه ها به کمترین مقدار ممکن برسد.

جهت افزایش طول عمر، باتری قبل از رسیدن به ولتاژ نامی، با جریان ثابت و پس از رسیدن ولتاژ نامی با ولتاژ ثابت شارژ شده و در این حالت جریان شارژ باتری تا نزدیک صفر کاهش خواهد یافت. شکل (۷) بلوک دیاگرام کنترل کننده شارژ و دشارژ باتری را نشان می دهد. در ابتدای فرایند شارژ، اگر V_b بسیار کمتر از V_b^* باشد، خروجی کنترل کننده ولتاژ PI به جریان ثابتی (حداکثر ۰.۵C) محدود می شود. با افزایش وضعیت شارژ، V_b به V_b^* نزدیک و حلقه ولتاژ از اشباع خارج می گردد و باتری با ولتاژ ثابت شارژ می شود.

هدف از تخلیه باتری، تنظیم ولتاژ لینک DC هنگام تخلیه ذخیره انرژی چرخ طیار است. در این حالت مبدل بصورت افزایشنده کار می کند. مقدار اندازه گیری شده V_{DC} با ولتاژ لینک DC مرجع مقایسه شده و خطای حاصل وارد یک کنترل کننده PI می شود. خروجی کنترل کننده توسط یک بلوک حد در مقدار جریان تخلیه نامی باتری محدود شده و با جریان باتری مقایسه می شود و توسط یک کنترل کننده PI دیگر خطای حالت ماندگار آن به صفر می رسد [۱۹].

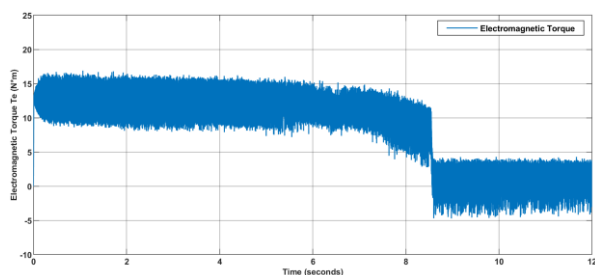
ولتاژ لینک DC در حالت عادی توسط یکسوساز در مقدار نامی تنظیم می شود. از آنجا که هدف سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار، تأمین برق برای غلبه بر پدیده های کمتر از چند ثانیه است، یک روش کنترلی جهت اولویت بندی تنظیم لینک DC توسط منابع ذخیره انرژی موجود



شکل (۷): بلوک دیاگرام کنترل شارژ باتری

آماده به کار قرار می گیرند. با تغییر حالت شبکه به منبع تغذیه بدون وقفه ابتدا چرخ طیار، لینک DC را برای تأمین بار حیاتی تنظیم

در حالت منبع تغذیه بدون وقفه مورد نیاز است. در وضعیت عادی شبکه چرخ طیار و باتری توسط یکسوکنده شارژ شده و در وضعیت



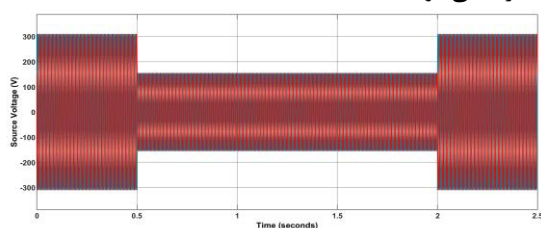
شکل (۱۰): گشتاور الکترومغناطیسی ماشین سنکرون مغناطیس دائم در فرایند شارژ چرخ طیار

در ثانیه ۸٫۶، به سرعت مرجع ۱۰۰۰ دور در دقیقه رسیده و سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار وارد حالت آماده‌به‌کار شده و برای تأمین انرژی بارهای بحرانی در مواقع رخداد کاهش ولتاژ یا قطعی برق آماده می‌گردد. در ادامه جهت بررسی کارایی سیستم ارائه شده در غلبه بر مشکلات ولتاژی، در سناریو اول یک پدیده افت ولتاژ کوتاه‌مدت و در سناریو دوم یک پدیده بلندمدت جهت ورود باتری، شبیه‌سازی شده است.

بر طبق استاندارد IEEE 1159 اگر افت ولتاژی از مقدار ۱۰٪ تا ۹۰٪ به مدت نیم سیکل تا یک دقیقه رخ دهد باید سیستم جبران‌ساز بتواند در کمتر از نیم سیکل این افت ولتاژ را جبران کند [۲۱].

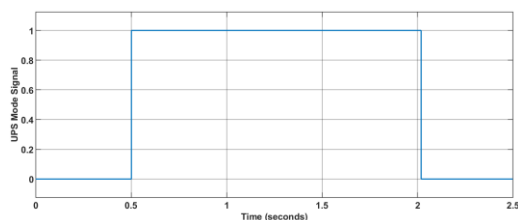
۵-۱- سناریوی اول: پدیده افت ولتاژ کوتاه‌مدت

افت ولتاژهای موقتی در یک شبکه توزیع، به طور معمول از دو سیکل تا بیش از ۱۰ سیکل طول می‌کشد. در این شبیه‌سازی یک خطای ۳ فاز در ثانیه ۰٫۵ ایجاد و به مدت ۱٫۵ ثانیه ادامه داده می‌شود، و در نتیجه آن ولتاژ متعادل همان گونه که در شکل (۱۱) نشان داده شده است به ۵۰٪ ولتاژ نامی شبکه برق کاهش می‌یابد. سیستم یک بار تحت بار مقاومتی و بار دیگر با بار مقاومتی سلفی شبیه‌سازی می‌شود.



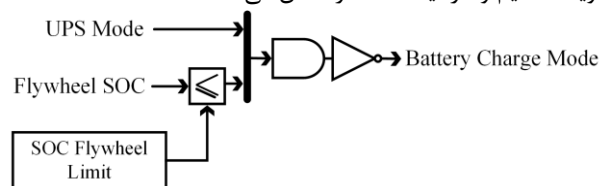
شکل (۱۱): پدیده افت ولتاژ کوتاه‌مدت در سیستم مورد مطالعه

شکل (۱۲) تشخیص دقیق رخداد این افت ولتاژ که با محاسبه پیوسته مقدار مؤثر ولتاژ انجام شده است را نشان می‌دهد. این سیگنال برای ورود به حالت منبع تغذیه بدون وقفه مورد استفاده قرار می‌گیرد.



شکل (۱۲): سیگنال تشخیص رخداد افت ولتاژ یا قطعی برق

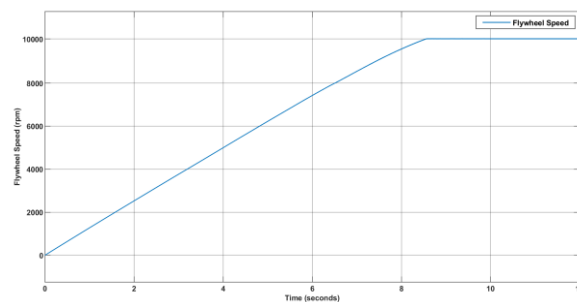
می‌کند. با کاهش انرژی ذخیره شده در چرخ طیار و در صورت باقی بودن خطا و حالت منبع تغذیه بدون وقفه، باتری تحویل انرژی و تنظیم ولتاژ لینک DC را شروع می‌کند و کنترل چرخ طیار غیرفعال می‌شود. هم‌زمان با تغییر وضعیت باتری از حالت آماده‌به‌کار به حالت تخلیه، فرایند روشن کردن ژنراتور دیزلی آغاز می‌شود تا با اتمام ظرفیت باتری، در صورت باقی بودن قطعی برق، تأمین بار توسط ژنراتور دیزلی انجام شود. در این فاصله، هرگاه شبکه به وضعیت عادی خود بازگردد، منابع ذخیره انرژی دوباره به حالت شارژ تغییر وضعیت داده و بار مستقیماً توسط شبکه تأمین می‌شود. شکل (۸) سیستم تشخیص اولویت تنظیم ولتاژ لینک DC را نشان می‌دهد.



شکل (۸): بلوک تشخیص اولویت تنظیم ولتاژ لینک DC

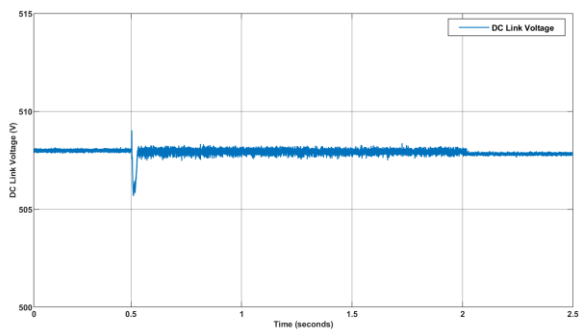
۵- شبیه‌سازی مدل پیشنهادی و ارائه نتایج

برای بررسی سیستم پیشنهادی شبیه‌سازی در محیط MATLAB / SIMULINK انجام شده است. جریان انرژی در سناریوهای مختلف از جمله شارژ سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار و تنظیم ولتاژ باس DC در هنگام تخلیه سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار و باتری با وقوع افت ولتاژ سه‌فاز متعادل و قطعی برق شبیه‌سازی و بررسی گردیده است. شبیه‌سازی از سرعت زاویه‌ای صفر شروع و سپس چرخ طیار تا ۱۰۰۰ دور در دقیقه شارژ می‌شود و به حالت آماده‌به‌کار می‌رود. وقتی افت ولتاژ یا قطعی برق تشخیص داده شد، سرعت چرخ طیار کندتر می‌شود تا بار بحرانی تأمین گردد.

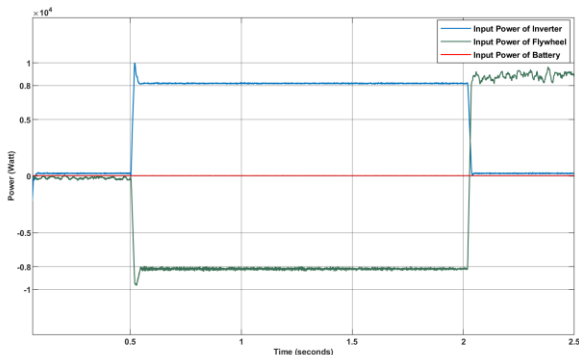


شکل (۹): روند افزایش سرعت چرخ طیار در حالت شارژ

شکل (۱۰) گشتاور الکترومغناطیسی موتور را نشان می‌دهد. ماشین سنکرون مغناطیس دائم تا سرعت ۸۰۰ دور در دقیقه توسط MTPA با گشتاور ثابت ۱۳ نیوتن متر کنترل می‌شود. وقتی سرعت چرخ طیار به ۸۰۰ دور در دقیقه می‌رسد، استراتژی کنترل به تضعیف شار تبدیل می‌شود و گشتاور ماشین سنکرون مغناطیس دائم یک کاهش را در منطقه توان ثابت تجربه می‌کند.



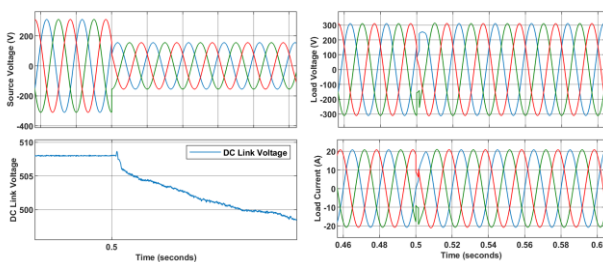
شکل (۱۳): ولتاژ لینک DC تحت پدیده کوتاهمدت بار مقاومتی سلفی



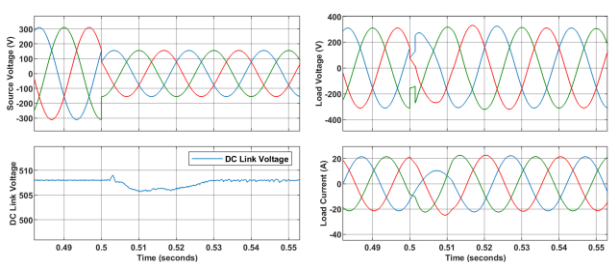
شکل (۱۴): توان ورودی مبدل، باتری و چرخ طیار طی پدیده

کوتاهمدت بار مقاومتی سلفی با ضریب قدرت ۰.۸

شکل (۱۵) و (۱۶) به ترتیب تغییرات ولتاژ و جریان بار را در لحظه تغییر وضعیت سیستم به حالت منبع تغذیه بدون وقفه تحت بار مقاومتی و مقاومتی سلفی نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود بار در کمتر از ۱۰ میلی‌ثانیه به حالت منبع تغذیه بدون وقفه منتقل می‌شود و افت ولتاژ روی بار جبران شده و در نتیجه استاندارد IEEE 1159 به خوبی تامین شده است [۲۱].



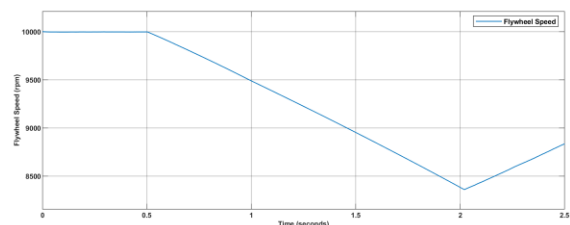
شکل (۱۶): شرایط بار در لحظه رویداد پدیده کوتاهمدت بار مقاومتی



شکل (۱۷): شرایط بار در لحظه رویداد پدیده کوتاهمدت بار مقاومتی

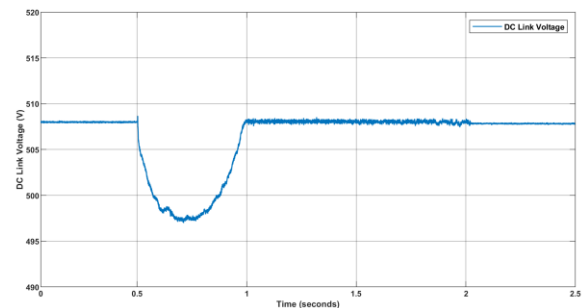
سلفی

شکل (۱۳) نشان می‌دهد سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار برای تنظیم ولتاژ باس DC شروع به تخلیه انرژی می‌کند و بار حیاتی را از آسیب احتمالی ناشی از قطع برق حفظ می‌کند. در ثانیه ۲، شبکه برق بازیابی و چرخ طیار دوباره وارد حالت شارژ شده و به سرعت مرجع خود نزدیک می‌شود.

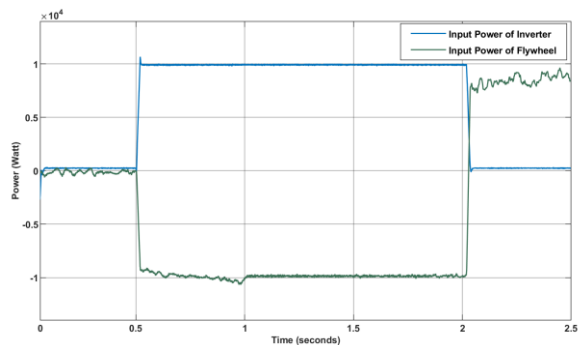


شکل (۱۴): سرعت چرخ طیار در حالت منبع تغذیه بدون وقفه

ولتاژ لینک DC همان‌طور که در شکل (۱۴) نشان داده شده است با خطای گذرای در حد ۲٪ و خطای ماندگار در حد صفر، روی ۵۰۸ ولت تنظیم می‌شود. شکل (۱۵) تغییرات توان ورودی مبدل و چرخ طیار را تحت سناریوی پدیده کوتاهمدت نشان می‌دهد. با تغییر وضعیت سیستم به حالت منبع تغذیه بدون وقفه، بار توسط مبدل تأمین می‌شود و توان موردنیاز آن توسط چرخ طیار پوشش داده می‌شود. شکل (۱۶) و (۱۷) نتایج مربوط به بار مقاومتی سلفی را برای این سناریو نشان می‌دهند.



شکل (۱۴): ولتاژ لینک DC تحت پدیده کوتاهمدت بار مقاومتی

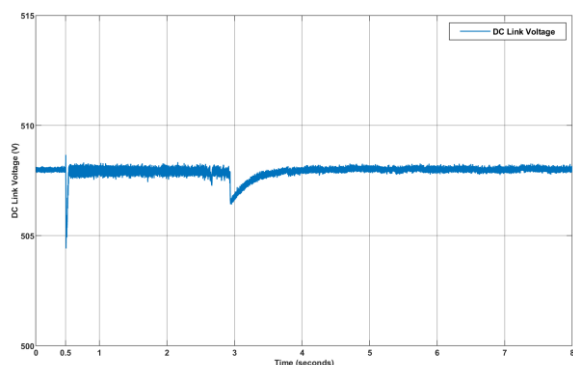


شکل (۱۵): توان ورودی مبدل و چرخ طیار طی پدیده کوتاهمدت بار مقاومتی

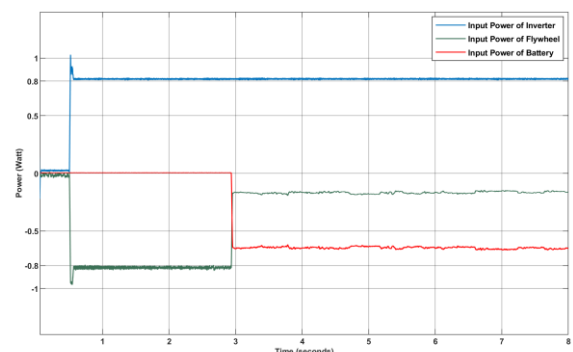
۵-۲- سناریو دوم : پدیده بلندمدت

در این سناریو یک قطع برق بلندمدت از ثانیه ۰.۵ به شبکه اعمال می‌شود. پس از تخلیه چرخ طیار، سیستم ذخیره انرژی باتری وارد مدار شده و ولتاژ لینک DC را با خطای گذرای کمتر از ۳٪ و خطای ماندگار صفر، در مقدار مرجع خود حفظ کرده و زمان لازم برای راه‌اندازی ژنراتور را فراهم نموده است. شکل (۲۰) تغییرات ولتاژ لینک DC در طی این پدیده را نشان می‌دهد.

شکل (۲۱) تغییرات توان ورودی مبدل، چرخ طیار و باتری را در همین سناریو نشان می‌دهد. با تغییر وضعیت سیستم به حالت منبع تغذیه بدون وقفه، بار توسط مبدل تأمین شده است. توان مورد نیاز ابتدا توسط چرخ طیار طی حدود ۲ ثانیه و سپس توسط باتری پوشش داده شده است.

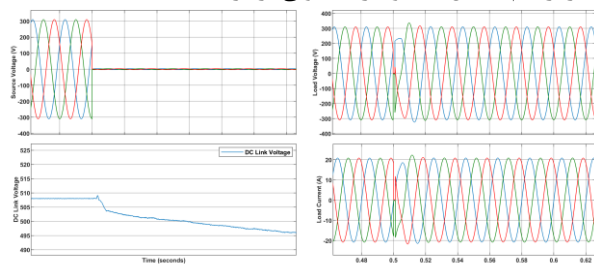


شکل (۲۲): ولتاژ لینک DC تحت پدیده بلندمدت بار مقاومتی سلفی

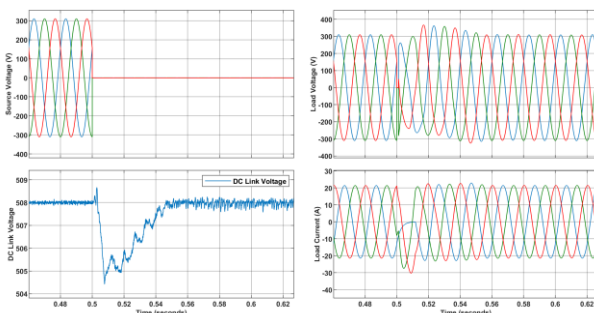


شکل (۲۳): توان ورودی مبدل، باتری و چرخ طیار طی پدیده بلندمدت بار مقاومتی سلفی

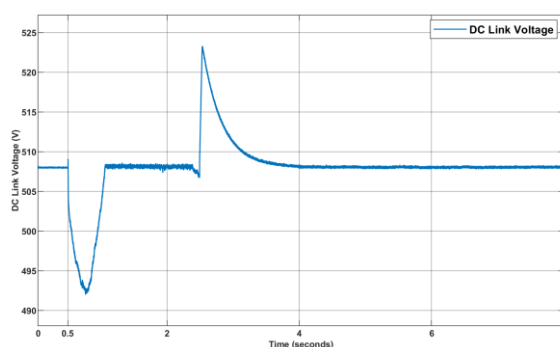
شکل (۲۴) و (۲۵) به ترتیب تغییرات ولتاژ و جریان بار را در لحظه تغییر وضعیت سیستم به حالت منبع تغذیه بدون وقفه تحت بار مقاومتی و مقاومتی سلفی برای سناریو دوم نشان می‌دهند. همانگونه که مشاهده می‌شود استاندارد IEEE 1159 به خوبی رعایت شده و در کمتر از نیم سیکل افت ولتاژ به خوبی برطرف شده است [۲۱].



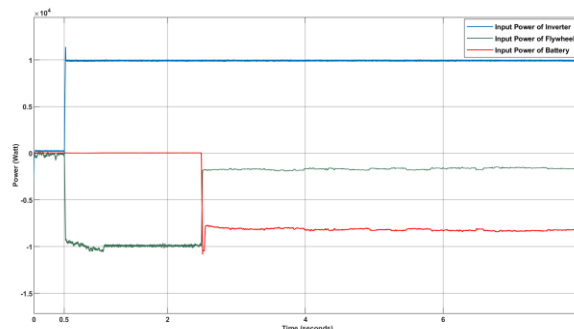
شکل (۲۴): تغییرات ولتاژ و جریان بار را در لحظه تغییر وضعیت سیستم به حالت UPS تحت پدیده بلندمدت بار مقاومتی سلفی



شکل (۲۵): تغییرات ولتاژ و جریان بار را در لحظه تغییر وضعیت سیستم به حالت UPS تحت پدیده بلندمدت بار مقاومتی سلفی



شکل (۲۰): ولتاژ لینک DC تحت پدیده بلندمدت بار مقاومتی



شکل (۲۱): توان ورودی مبدل، باتری و چرخ طیار طی پدیده بلندمدت بار مقاومتی

شکل (۲۲) تغییرات ولتاژ لینک DC را تحت سناریو دوم برای مقاومتی سلفی نشان می‌دهد از آنجا که توان راکتیو مورد نیاز بار توسط خازن فیلتر تأمین می‌شود بار مقاومتی سلفی با ضریب قدرت ۰.۸ توان کمتری نسبت به بار مقاومتی مصرف می‌کند. شکل (۲۳) تغییرات توان ورودی مبدل، چرخ طیار و باتری را در بار مقاومتی سلفی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود توان مصرفی اینورتر حدود ۸۰۰۰ وات است و چرخ طیار زمان بیشتری حدود ۰.۵ ثانیه نسبت به بار مقاومتی بار را تأمین می‌کند.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله یک مدل منبع تغذیه بدون وقفه ترکیبی با ذخیره ساز چرخ طیار و باتری ارائه گردید و نشان داده شد که سیستم پیشنهادی قادر است بر پدیده های کوتاه مدت در حد چند ثانیه توسط کنترل سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار و با تأمین انرژی در چند دقیقه اول توسط باتری و سپس توسط ژنراتور دیزلی بر پدیده های بلندمدت غلبه نماید.

تحلیل سیستم پیشنهادی، توسط شبیه سازی سناریوهای کوتاه مدت و بلندمدت افت ولتاژ و قطعی برق تأیید شد. نتایج شبیه سازی نشان داد که سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار در کمتر از ۱۰ ثانیه از حالت ساکن به حالت آماده کار تغییر وضعیت داده و آماده تأمین برق بار بحرانی برای پدیده های کوتاه مدت می شود. سیستم پیشنهادی در حالت UPS نیز به خوبی عمل کرده و کیفیت برق بار بحرانی را بدون توجه به دینامیک بار در کمتر از ۲۰ میلی ثانیه در مقادیر نامی حفظ می کند. تغییرات گذرای ولتاژ لینک DC در لحظه رخداد افت ولتاژ و قطعی برق حدود ۳ درصد است به سرعت مقدار مرجع را ردیابی می کند. استفاده از چرخ طیار با توجه به سرعت شارژ و دشارژ سریع باعث می شود بدون نیاز به باتری کیفیت برق بار حیاتی برای پدیده های کوتاه مدت تأمین شود. در نتیجه از شارژ و دشارژ مکرر باتری جلوگیری شده و سبب افزایش طول عمر باتری می شود. برای پدیده های طولانی مدت نیز سیستم پیشنهادی می تواند با کمک باتری و موتور دیزلی توان مورد نیاز بار حیاتی را پوشش دهد و از نیاز به ژنراتور آماده به کار جلوگیری کند.

ضمایم

جدول (۱) مشخصات منبع تغذیه بدون وقفه [۲۲]

مشخصات سیستم قدرت	۳ فاز، ۵۰ هرتز، ۳۸۰ ولت
مشخصات بار	۳ فاز، ۵۰ هرتز، ۳۸۰ ولت ۱۰ کیلوولت آمپر مقاومتی یا مقاومتی سلفی با ضریب قدرت ۰.۸
ولتاژ لینک DC	۵۰۸ ولت
خازن لینک DC	۱۲۵۰۰ میکروفاراد
فرکانس کلیدزنی اینورتر	۵۰۰۰ هرتز
فرکانس کلیدزنی سیستم ذخیره انرژی چرخ طیار	۲۰۰۰ هرتز
فرکانس کلیدزنی سیستم ذخیره انرژی باتری	۱۰۰۰۰ هرتز

جدول (۲): پارامترهای سنکرون مغناطیس دائم [۲۲]

مشخصات ماشین سنکرون مغناطیس دائم	
جفت قطب (p)	۲
اندوکتانس محور d (L_d)	۲.۰۱۷ میلی هانری
اندوکتانس محور q (L_q)	۴.۱۲ میلی هانری
مقاومت استاتور (R_s)	۰.۲ اهم
k_E	۴۴ ولت بر ۱۰۰۰ دور در دقیقه
ψ_f	۰.۱۷۱۵ وبر
سرعت پایه (ω_{base})	۸۰۰۰ دور در دقیقه
سرعت حداکثر (ω_{Max})	۱۰۰۰۰ دور در دقیقه
توان نامی (P_r)	۱۱ کیلووات
گشتاور الکترومغناطیسی (T_{er})	۱۳ نیوتون متر
اینرسی به همراه چرخ طیار (J)	۰.۰۹ کیلوگرم مترمربع

انتخاب ظرفیت خازن لینک DC

کنترل ولتاژ DC از طریق کنترل توان مبادله شده توسط مبدل با شبکه یا از طریق کنترل مبدل منابع ذخیره انرژی حاصل می شود. کاهش یا افزایش سطح ولتاژ DC با تزریق توان بیشتر یا کمتر به دست می آید. این واقعیت که ولتاژ DC با مقدار مرجع آن v_{dc}^* متفاوت است، بیانگر این است که مقدار انرژی که خازن باید دریافت کند تا به نقطه تنظیم برگردد برابر معادله (۱) است [۲۰].

$$\Delta E = \frac{(v_{dc}^*)^2 - v_{dc}^2}{2} C \approx v_{dc}^* \Delta v_{dc} C \quad (13)$$

توانی که مبدل باید متناسب با این انرژی مبادله کند برابر:

$$\Delta P = \frac{2\Delta E}{(3+n)T_s} \quad (14)$$

کنترل کننده نقشی را ایفا می کند که بعد از $(3+n)T_s$ واکنش نشان می دهد، که در آن $3T_s$ تأخیر کنترل جریان است و nT_s تأخیر فیلتر لینک DC است. از این رو با جایگزینی (۱) در (۲)، خطای ولتاژ لینک DC تخمین زده شده است [۲۰].

$$\Delta v_{dc} = \frac{\Delta P (3+n)T_s}{2Cv_{dc}^*} \quad (15)$$

در مورد توان لحظه ای نوسانی و با فرض اینکه عدم تعادل عمدتاً باعث عدم تطابق توان ورودی - خروجی حالت پایدار دوم می شود (فرکانس شبکه ۵۰ هرتز):

$$p_{in} - p_{out} = \frac{\Delta p_{pk-pk}}{2} \sin(2\pi \times 100t) \quad (16)$$

مقدار انرژی مرتبط با این نوسان آبی برابر است با:

زمان ۶ دقیقه جهت تخلیه به واحد وات ساعت تبدیل کرد برای این منظور:

$$wh = 10000 W \times 6 \text{ min} \times \frac{1h}{60 \text{ min}} = 1000 wh \quad (22)$$

آمپرساعت بدست آمده بر ضریب ۰,۸۵ که مربوط به تلفات و تبدیل برق مبدل است تقسیم می‌شود.

$$wh = \frac{1000 wh}{0.85} \approx 1177 wh \quad (23)$$

حال باتوجه به ولتاژ نامی باتری که برابر ۳,۲ ولت است و تعداد باتری‌های سری آمپرساعت مورد نیاز حاصل می‌شود.

$$Ah = \frac{1177 wh}{3.2 \times 132} \approx 2.79 Ah \quad (24)$$

طبق دیتاشیت مربوط به باتری ظرفیت باتری در سرعت تخلیه ۱۰C که برابر با ۶ دقیقه است برابر ۱ آمپرساعت خواهد بود در نتیجه تعداد باتری‌های موازی برابر خواهد شد با:

$$\text{Parallel Battery} = \frac{2.79}{1} = 2.79 \rightarrow 3 \quad (25)$$

در نتیجه تعداد باتری‌های مدنظر برای این سیستم برابر با $3 \times 132 = 396$ خواهد شد. دیتاشیت مربوط به باتری در لینک زیر آورده شده است.

<https://www.power-sonic.com/wp-content/uploads/2020/08/PSL-FP-IFR18650PC-Data-Sheet.pdf>

مراجع

- [1] Long Zhou, ZhiPing Qi, "Modeling and Simulation of Flywheel Energy Storage System with IPMSM for Voltage Sags in Distributed Power Network", International Conference on Mechatronics and Automation, 18 September 2009
- [2] M. F. McGranaghan, D. R. Mueller, and M. J. Samotyj, "Voltage sags in industrial systems", Industry Applications, IEEE Transactions on, vol. 29, pp. 397-403, 1993
- [3] W. E. Reid, Q. T. E. Inc, and P. A. Pittsburgh, "Power quality issues standards and guidelines", Industry Applications, IEEE Transactions on, vol. 32, pp. 625-632, 1996
- [4] B. B. Plater and J. A. Andrews, "Advances in flywheel energy storage systems", in Proceedings of the Tenth Power Systems World. Ventura, CA: Intertec International, Inc., Sept. 1997, pp. 460-469.
- [5] T. Taylor and K. Mistry, "Power, the broadband challenge", Telephony, pp. 52-54, Oct. 7, 1996.
- [6] B. Wang, G. Venkataramanan, "Dynamic Voltage Restorer Utilizing a Matrix Converter and Flywheel Energy Storage", IEEE Trans. on I.A, Vol. 45, No. 1, 2007, pp. 222-231.
- [7] Luo X, Wang J, Dooner M, Clarke J, "Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation", Appl Energy 2015;137:511-36.

$$\Delta E = \int_0^{T/2} (p_{in} - p_{out}) dt = \quad (17)$$

$$\int_0^{0.005} \frac{\Delta p_{pk-pk}}{2} \sin(2\pi \times 100t) dt$$

$$\Delta E = \frac{\Delta p_{pk-pk}}{2\pi \times 100} \quad (18)$$

از سوی دیگر، با جایگزینی (۶) در (۱)، دامنه ریپل ولتاژ لینک DC برابر با معادله (۷) است [۲۰].

$$\Delta v_{dc} = \frac{\Delta p_{pk-pk}}{2\pi \times 100 C v_{dc}^*} \quad (19)$$

در نتیجه ظرفیت خازن لینک DC از معادله (۸) حاصل می‌شود [۲۰].

$$C = \frac{\Delta p_{pk-pk}}{2\pi \times 100 v_{dc}^* \Delta v_{dc}} \quad (20)$$

اندازه‌گیری باتری

جهت اندازه‌گیری باتری باید به این نکته توجه شود که باتری باید برای زمان حدود ۵ دقیقه که برابر با راه‌اندازی ژنراتور دیزل است تعیین شود. از این رو به یک باتری که قابلیت تخلیه سریع در زمان کم را داشته باشد احتیاج است که به این منظور از باتری PSL-FP-IFR18650PC شرکت Power-Sonic استفاده شده است که مشخصات مربوط به آن در جدول ۵ ضمیمه ارائه شده است. این باتری توانایی تخلیه با سرعت ۳۰C که برابر با ۲ دقیقه است را دارد. برای اندازه‌گیری ابتدا باید در نظر گرفته شود که مبدل استفاده شده یک مبدل DC/DC افزایشنده کاهنده است و باتری در سمت کاهنده مبدل قرار دارد. از این رو باتوجه به ولتاژ لینک DC که برابر ۵۰۸ ولت و ولتاژ باتری در وضعیت شارژ کامل که برابر با ۳,۶۵ ولت است تعداد باتری‌هایی که باید سری شوند مشخص می‌شود، بدین صورت که مقدار مجاز افت ولتاژ برای لینک DC ۵ درصد است در نتیجه ولتاژ سمت کاهنده باید کمتر از ۴۸۲,۶ ولت باید حال باتوجه به ولتاژ باتری در وضعیت شارژ کامل و ولتاژ لازم سمت کاهنده مبدل دوطرفه تعداد باتری‌های سری برابر می‌شود با:

$$\text{Series Battery} = \frac{482.6}{3.65} = 132.21 \approx 132 \quad (21)$$

از آنجاکه باتری باید برای زمان ۵ دقیقه اندازه‌گیری شود و باتری انتخاب شده ظرفیت نامی را در سرعت تخلیه ۱۰C که معادل ۶ دقیقه است ارائه کرده است در نتیجه زمان ۶ دقیقه برای تعیین باتری در نظر گرفته شده است. برای محاسبه ظرفیت لازم باتری و تعداد باتری‌های موازی لازم است حداکثر بار سیستم که برابر با ۱۰ کیلووات است برای

- [20] Remus Teodorescu, Marco Liserre and Pedro Rodriguez, "Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems", Wiley-IEEE Press, 2007.
- [21] "IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality," in IEEE Std 1159-2019 (Revision of IEEE Std 1159-2009), vol., no., pp.1-98, 13 Aug. 2019
- [22] Khodadoost Arani A A, B. Gharehpetian G, Zaker B, "Modeling and Simulation of Flywheel Energy Storage System as V/f Reference in Islanded Microgrid", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, 2016; 13 (3) :11-18
- [23] Afrasiabi M, Rokrok E, "A Coordinated Control Scheme for Improving Voltage Quality Using Power Electronics Interfaced DGs", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, 2019; 16 (1) :51-62
- [8] Zhao H, Wu Q, Hu S, Xu H, Rasmussen CN, "Review of energy storage system for wind power integration support", Appl Energy 2015;137:545–53.
- [9] Chen H, Cong TN, Yang W, Tan C, Li Y, Ding Y, "Progress in electrical energy storage system: a critical review", Prog Nat Sci 3/10/2009;19:291–312.
- [10] Hansjoachim Dolezal, "UPS - Dynamic-Rotary Systems with Flywheel and Diesel Engine", The Ninth International Telecommunications Energy Conference, 14-17 June 1987
- [11] B.J. Beck, "The design and performance of a rotary UPS system", IEE Colloquium on Safeguarding Industrial Plant During Power System Disturbances, 4-4 Dec. 1989
- [12] T. Loix, E. Haesen, K. De Brabandere, J. Driesen and R. Belmans, "Dynamic UPS Drive Model for Low Power Applications", IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, 16 April 2007, ISBN:978-1-5090-9155-3
- [13] Robert S. Weissbach, George G. Karady, Richard G. Farmer, "A Combined Uninterruptible Power Supply and Dynamic Voltage Compensator Using a Flywheel Energy Storage System", IEEE Transactions on Power Delivery, April 2001
- [14] J. Itoh, H. Igarashi, "Direct Grid Connection of Matrix Converter with Transition Control for Flywheel UPS", 2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 11-14 Nov. 2012
- [15] R. Sebastián, R. Peña-Alzola and J. Quesada, "Simulation of a wind diesel power system with flywheel energy storage" in IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), Edinburgh, June 2017.
- [16] Shahab Karrari, Mathias Noe and Joern Geisbuesch, "High-speed Flywheel Energy Storage System (FESS) for Voltage and Frequency Support in Low Voltage Distribution Networks", in IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kharkiv, 2018.
- [17] T. Richard, R. Belhomme, N. Buchheit and F. Gorgette, "Power quality improvement case study of the connection of four 1.6 MVA flywheel dynamic UPS systems to a medium voltage distribution network", in IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Developing New Perspectives, Atlanta, 2001.
- [18] Long Zhou, Zhi ping Qi, "Modeling and control of a flywheel energy storage system for uninterruptible power supply", International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, 6-7 April 2009
- [19] Jianan Zhou, Haijin Li, Zhaoyu Liu, Changsheng Hu, Dehong Xu, "Control strategy of Li-Ion Battery module in Super UPS", International Power Electronics and Application Conference and Exposition, 5-8 Nov. 2014

زیر نویس ها

¹ Flywheel

² Flywheel Energy Storage System

³ Battery Energy Storage System

⁴ Doubly-Fed Induction Generator

⁵ Interior Permanent Magnet Synchronous Motor

⁶ Maximum Torque Per Ampere

⁷ Real Time