

## طراحی و ساخت دستگاهی به منظور بازیابی انرژی آسانسور

علی طیبان<sup>۱</sup>، دکتر فرزاد تهامی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>شرکت نیان الکترونیک

<sup>۲</sup>دانشگاه صنعتی شریف،

چکیده - در این مقاله سیستمی ارائه شده که به وسیله آن می توان از اتلاف انرژی در آسانسورها جلوگیری کرد و بهره‌وری مجموعه را افزایش داد. این سیستم با استفاده از یک مبدل  $DC/DC$ ، توان برگشتی را ذخیره کرده و در زمان لازم، مجدداً این مقدار انرژی را با بازدهی بالا به سیستم برمی‌گرداند. به این ترتیب از اتلاف انرژی در مقاومت ترمز جلوگیری شده و بهره‌وری مجموعه به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش خواهد یافت. در طراحی این سیستم علاوه بر هدف اصلی دستگاه در جهت استفاده از انرژی تلف شده، همواره به این مسئله توجه شده که هیچ‌گونه اختلالی در عملکرد عادی آسانسور ایجاد نشود و سیستم به راحتی بر روی انواع آسانسورهای درایو دار نصب گردد. پس از ساخت نمونه طراحی شده، ابتدا شرایط آزمایشگاهی برای دستگاه فراهم گردید و عملکرد آن مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت نیز نمونه‌ی طراحی شده، در شرایط واقعی، بر روی یک آسانسور فعال نصب شده و میزان کاهش مصرف انرژی الکتریکی مجموعه محاسبه شد.

کلید واژه - مبدل  $DC/DC$ ، تلفات در سیستم آسانسور، صرفه جویی در مصرف انرژی، ابرخازن

نشان داده شده است. اتلاف توان در این مقاومت، علاوه بر اتلاف

### ۱- مقدمه

انرژی، هزینه تعمیر و نگهداری بیشتری نیز به مجموعه تحمیل کرده و در برخی شرایط، استفاده از سیستم تهویه و کولر، به منظور خنک سازی فضای تابلوی آسانسور، ضروری می‌گردد.

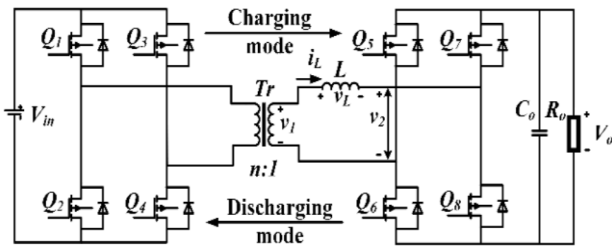
با استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت، می‌توان این انرژی را به یک ذخیره کننده منتقل کرده و در بازه‌هایی که موتور آسانسور مصرف کننده انرژی است و به صورت موتوری کار می‌کند، به آن تحویل داد. بدین ترتیب انرژی کمتری از شبکه دریافت شده و مصرف انرژی کاهش خواهد یافت. شرکت نیان الکترونیک با توجه به سابقه طولانی خود در زمینه مبدل‌های الکترونیک قدرت، سیستمی را بدین منظور طراحی نموده که به وسیله آن بتوان تا حد امکان مانع از اتلاف انرژی شده و مصرف انرژی را به طور قابل توجهی کاهش داد.

در این مقاله خلاصه‌ای از وضعیت سیستم طراحی شده و چگونگی عملکرد آن و نتایج آزمایشگاهی و عملیاتی آن ارائه خواهد شد.

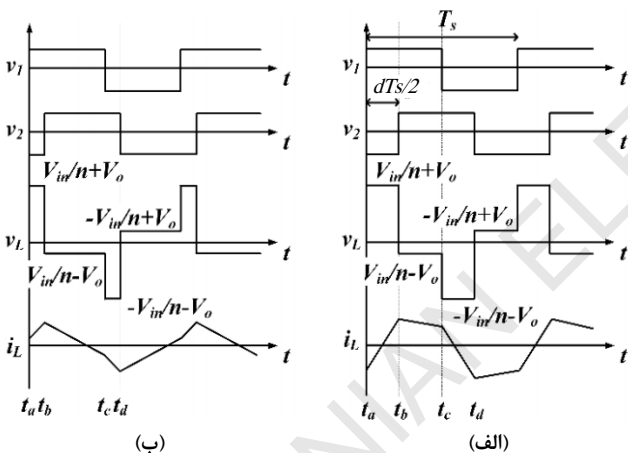
در ادامه، پس از معرفی ساختار و توپولوژی دستگاه، روابط و قوانین حاکم بر آن بیان شده و حلقه‌های کنترلی آن بررسی می‌گردد. پس از بررسی روابط تئوری، عملکرد دستگاه در محیط آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفته و وضعیت آن در شرایط کاری مختلف بررسی خواهد شد. در نهایت نتایج تست‌های انجام شده در محیط واقعی ارائه خواهد شد.

با گسترش تکنولوژی و همچنین حرکت به سمت هوشمند سازی مصارف انرژی، کاهش مصرف انرژی مورد توجه صنعت قرار گرفته است. بخش قابل توجهی از مصرف انرژی نیز به صورت انرژی الکتریکی است که آسانسورها یک نمونه از مصرف کننده‌های انرژی الکتریکی می‌باشند. بیش از هشت درصد مصارف انرژی الکتریکی شهری در اروپا مربوط به آسانسور است. در ایران آمار دقیقی برای این منظور وجود ندارد، اما تخمین‌ها حاکی از همین حدود مصرف انرژی در آسانسورهای کشور را دارد و با در نظر گرفتن سیستم‌های مشابه همانند پله برقی، این مصرف بیش از این مقدار خواهد شد. همچنین با پیشرفته شدن ساختمان‌های مسکونی و تجاری، استفاده از آسانسور در ساختمان‌ها گسترش خواهد یافت. در آسانسورهای امروزی با درایو  $VVVF$ ، موتور آسانسور همواره مصرف کننده‌ی انرژی الکتریکی نبوده و در برخی حالات در وضعیت ژنراتوری قرار می‌گیرد که در این حالت تولیدکننده‌ی انرژی است. این انرژی در واقع همان انرژی پتانسیلی است که به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود و در آسانسورهای معمولی توسط یک مقاومت، که به مقاومت ترمز معروف است، تلف می‌گردد. شماتیک مجموعه یکسو ساز، اینورتر و مقاومت ترمز آسانسور  $VVVF$ ، در شکل ۱

در این مبدل به منظور انتقال توان، از تئوری شیفت فاز [2] استفاده می‌گردد. به این ترتیب که هر پل به صورتی کنترل می‌شود تا بتواند یک ولتاژ مربعی فرکانس بالا را در خروجی ترمینال خود ایجاد کند. با استفاده از مقدار سلف و شیفت فاز مناسب بین دو موج مربعی تولیدی، می‌توان مقدار توان عبوری را کنترل کرد. شیفت فاز پس فاز یا پیش فاز جهت عبور توان را تعیین می‌کند. شکل ۳ ولتاژهای دو طرف سلف و همچنین جریان آن را در حالت شارژ ابرخازن نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با کاهش میزان اختلاف فاز بین ولتاژها از حالت (الف) به (ب)، مقدار مؤثر جریان سلف نیز کاهش یافته است.



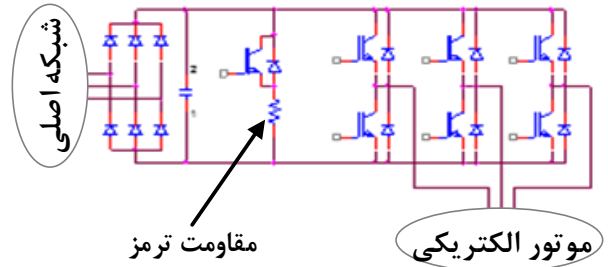
شکل ۲: مبدل DC به DC با ساختار DAB [1]



شکل ۳: تغییر میزان جریان در حالت شارژ ابرخازن با تغییر شیفت فاز (الف) شیفت فاز بیشتر، جریان زیاد (ب) شیفت فاز کمتر، جریان کم [1]

## ۲-۲- ذخیره کننده انرژی

ذخیره کننده‌های الکتریکی موجود در حال حاضر، انواع باتری‌ها و ابرخازن‌ها هستند. به طور کلی، باتری‌ها دارای چگالی انرژی بالا و ابرخازن‌ها نیز دارای چگالی توان بالایی می‌باشند [3]. شکل ۴ و شکل ۵ نیز سیکل شارژ و دشارژ ابرخازن و باتری را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، ابرخازن به لحاظ چگالی توان و سرعت شارژ و دشارژ آن بسیار بهتر از باتری عمل



شکل ۱: شماتیک ساختار یکسوساز و اینورتر متصل به موتور الکتریکی

## ۲- بازایی انرژی دریافتی آسانسور در حالت ژنراتوری

زمانی که موتور آسانسور در حالت ژنراتوری قرار می‌گیرد، انرژی به لینک DC منتقل شده و به منظور کنترل مقدار ولتاژ لینک DC، به طور معمول از مقاومت ترمز استفاده می‌شود. سیستم طراحی شده توسط شرکت نیان الکترونیک، با متصل شدن به لینک DC اینورتر آسانسور، این انرژی را برداشت کرده و در یک ذخیره کننده نگهداری می‌کند. در شرایطی که الکتروموتور در حالت موتور قرار گرفت، انرژی ذخیره شده مجدداً به لینک DC تزریق شده و توسط آسانسور مصرف می‌گردد.

## ۱-۲- توپولوژی و ساختار اصلی دستگاه

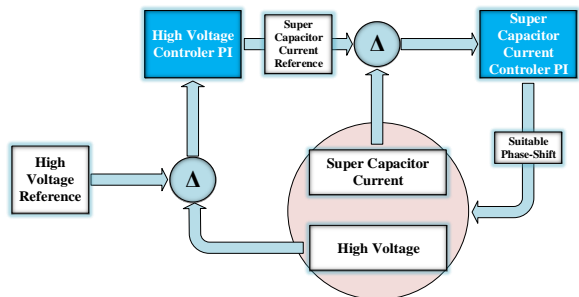
به منظور ذخیره کردن انرژی و همچنین استفاده مجدد از آن، احتیاج به مبدلی می‌باشد که بتواند انرژی یا توان را در هر دو جهت و با سطح ولتاژ مورد نظر، انتقال دهد. ولتاژ لینک DC اینورتر، معمولاً در حدود ۵۰۰ الی ۶۰۰ ولت بوده و ولتاژ سمت ابرخازن کمتر از ۴۸ ولت می‌باشد. لذا احتیاج به یک مبدل DC به DC است. که علاوه از تبدیل سطح ولتاژ DC، قابلیت انتقال توان در هر دو جهت را داشته باشد. ساختارهای مختلفی در این زمینه معرفی شده است [1]. با توجه به قابلیت اطمینان بالا، سرعت عمل سریع و سادگی سیستم کنترل، نسبت به سایر ساختارها، ساختار <sup>۱</sup>FBDAB و یا <sup>۲</sup>DAB برای ساخت دستگاه در نظر گرفته شده است. این ساختار شامل دو مبدل تمام پل می‌باشد که از طریق یک ترانسفورماتور ایزوله و یک سلف به یکدیگر متصل شده‌اند. این سلف می‌تواند به صورت جدا از ترانسفورماتور و یا سلف نشتی آن باشد. این ساختار در شکل ۲ نشان داده شده است.

<sup>۲</sup> Dual Active Bridge

<sup>۱</sup> Fullbridge Dual Active Bridge

اینورتر می‌باشد، دستگاه باید از طریق تغییرات ولتاژ آن، وضعیت آسانسور را تعیین کرد. لذا مبدل همواره سعی می‌کند ولتاژ لینک DC را بر روی ۶۰۰ ولت ثابت نگه دارد، به این ترتیب زمانی که موتور در حالت ژنراتوری قرار گیرد، دستگاه توان را دریافت کرده و تا حد امکان مانع افزایش ولتاژ شده و در حالت موتوری نیز با تزریق توان، ولتاژ لینک DC تا حد امکان ثابت می‌ماند.

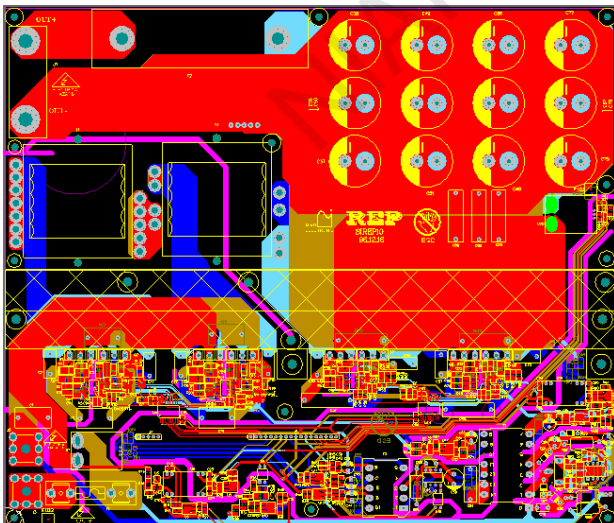
عملکرد سیستم کنترل در حالت کلی به این صورت است که با مقایسه ولتاژ لینک DC با مقدار مرجع، میزان و جهت جریان ابرخازن تعیین گشته و به عنوان ورودی به حلقه کنترل جریان داده می‌شود. حلقه کنترل جریان نیز میزان شیفت فاز مناسب را تعیین خواهد کرد. شکل ۶ حلقه‌های کنترل سیستم را نشان می‌دهد.



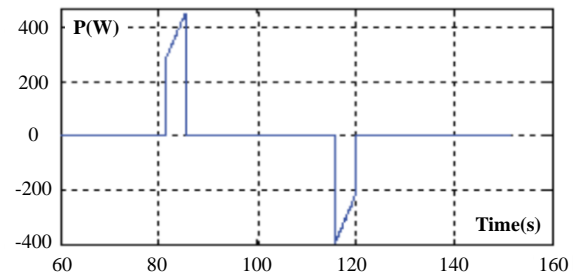
شکل ۶: حلقه‌های کنترلی سیستم

### ۳- ساخت نمونه اولیه

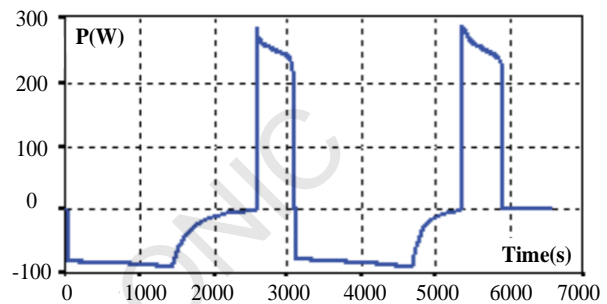
شکل ۷ و شکل ۸ به ترتیب، برد اصلی و کارت کنترل طراحی شده را نشان می‌دهند. در شکل ۹ نیز ابرخازن استفاده شده نمایش داده شده است.



می‌کند. لذا نتیجه می‌شود که ابرخازن می‌تواند عکس‌العمل مناسب و سریعی را در حالت ژنراتوری و موتوری نشان دهد [4].



شکل ۴: سیکل شارژ و و تخلیه‌ی ابرخازن [4]



شکل ۵: سیکل شارژ و تخلیه‌ی یک نمونه باتری توان بالای لیتیومی [4]

### ۲-۳- کلید زنی در ولتاژ صفر (ZVS)

بخش عمده تلفات در یک مبدل سوئیچینگ، مربوط به تلفات کلیدزنی می‌باشد. لذا با کاهش هر چه بیشتر این بخش از تلفات، علاوه بر افزایش طول عمر و قابلیت اطمینان مبدل، بازدهی دستگاه نیز افزایش خواهد یافت. بدین منظور، سیستم طراحی شده، به طور تقریبی در حالت بدون تلفات (ZVS) کلیدزنی می‌شود. شرایط کلیدزنی در ولتاژ صفر عبارت است از:

- در هنگام روشن شدن هر سوئیچ، دیود موازی معکوس آن در حال هدایت باشد.
  - در هنگام خاموش شدن هر سوئیچ، کمترین جریان مثبت از آن عبور کند.
- از آن جا که در لحظات کلیدزنی، جریان سلف باید مقدار انرژی لازم برای شارژ و تخلیه‌ی خازن سوئیچ‌ها را داشته باشد، در عمل محدودیت‌های ZVS کمی پیچیده‌تر می‌شود [5].

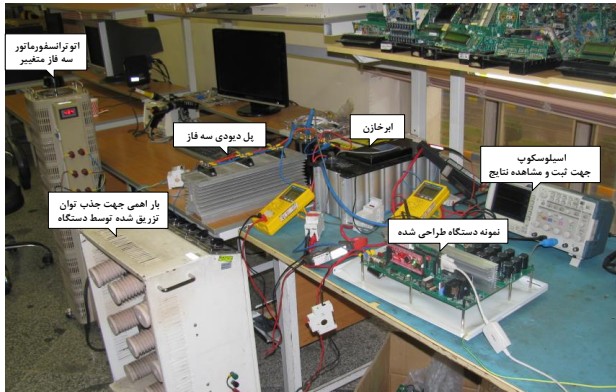
### ۲-۴- الگوریتم کنترل

از آن جا که تنها راه ارتباطی آسانسور و مبدل، لینک DC

<sup>۱</sup> Zero-Voltage Switching

شکل ۷: برد اصلی طراحی شده دستگاه بازیاب انرژی آسانسور

سیستم تنها دارای دو پورت اولیه و دو پورت ثانویه می‌باشد. قسمت اولیه به لینک DC اینورتر متصل می‌گردد که در اکثر اینورترهای استفاده شده در تابلو آسانسور، این ترمینال‌ها موجود می‌باشند. سمت ثانویه‌ی سیستم نیز به ابر خازن متصل می‌گردد. از آن‌جا که مقاومت داخلی ابر خازن بسیار ناچیز است، می‌تواند باعث عبور جریان‌های شدیدی شود، لذا در اتصال ابر خازن به سیستم، باید تمهیدات لازم در نظر گرفته شود و ابر خازن با خازن‌های نصب شده بر روی برد هم ولتاژ گردیده باشد. جدول ۱ مشخصات کلی سیستم ارائه گردیده است.

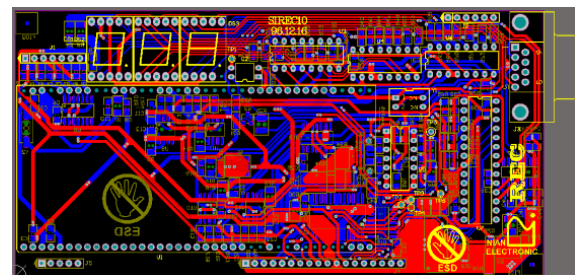


شکل ۱۰: تست دستگاه در شرایط آزمایشگاهی

همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، در شرایط تست، اتوترانسفورماتور (واریاک) استفاده گردیده که خروجی آن توسط پل دیودی یکسو شده و به عنوان ورودی به دستگاه اعمال گردیده است. به این ترتیب می‌توان با تغییر ولتاژ واریاک، مقدار ولتاژ DC را تغییر داد. در این شرایط مشاهده گردید که پس از راه‌اندازی سیستم، در شرایطی که ولتاژ DC ورودی کمتر از ۶۰۰ ولت است، توان توسط مبدل، از ابر خازن به سمت ورودی تزریق گردیده و جریان آن مثبت است. با افزایش ولتاژ واریاک و بیشتر از ۶۰۰ ولت شدن ولتاژ لینک DC نیز مشاهده گردید که وضعیت سیستم تغییر کرده و ابر خازن با جریان منفی شارژ می‌گردد.

شکل ۱۱ و شکل ۱۲ نتایج ثبت شده به وسیله‌ی اسیلوسکوپ در این دو وضعیت مختلف را می‌دهد. در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که ولتاژ DC ورودی و ولتاژ ابر خازن، به ترتیب ۶۸۴ ولت و ۲۵/۶ ولت می‌باشد. در این شرایط خازن با جریان ۱۸/۸ آمپر در حال شارژ است. به طور مشابه، در شکل ۱۲، ولتاژ DC ورودی و ولتاژ ابر خازن، به ترتیب ۵۵۴ ولت و ۲۵/۶ ولت بوده که در این حالت ابر خازن با جریان ۲۳/۹ آمپر در حال تخلیه شدن و تزریق انرژی به ورودی می‌باشد.

در این سیستم برای شارژ و دشارژ ابر خازن نیز محدودیت در نظر گرفته شده است. به این ترتیب که با رسیدن ولتاژ ابر خازن به مقدار ۴۰ ولت، عملیات شارژ متوقف شده و از این لحظه به بعد، دستگاه تنها در حالت تزریق توان به لینک DC کار خواهد کرد. در حالت تخلیه شدن ابر خازن نیز، چنانچه ولتاژ آن به مقدار ۱۸ ولت برسد، عملیات تزریق توان متوقف می‌گردد و



شکل ۸: کارت کنترل دستگاه بازیاب انرژی آسانسور



شکل ۹: ابر خازن ۴۸ ولت، ۱۶۵ فاراد

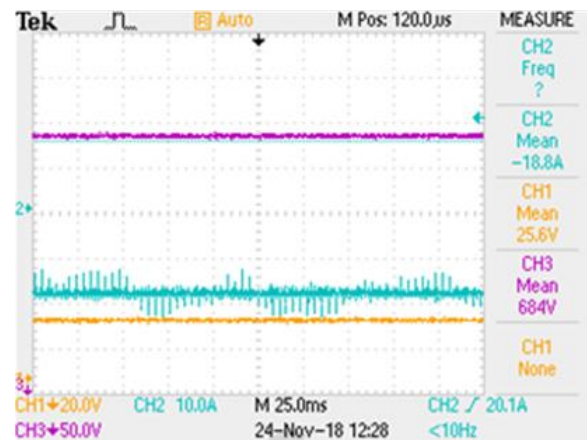
جدول ۱: مشخصات سیستم طراحی شده

ولتاژ سمت اولیه	مطابق با لینک DC اینورتر (یکسوسدهی برق شهر)
ولتاژ ثانویه	ولتاژ ابر خازن (۴۸ ولت)
حداکثر جریان ثانویه	۵۰ آمپر
حداکثر توان خروجی	۲۵۰۰ وات
مشخصات ابر خازن	۴۸ ولت، ۱۶۵ فاراد

#### ۴- تست دستگاه در شرایط آزمایشگاهی

به منظور تست دستگاه در شرایط آزمایشگاهی، یک منبع ولتاژ DC متغیر به ورودی مبدل اعمال گردید تا بتوان وضعیت لینک DC اینورتر را در حالت تست فراهم کرد. شکل ۱۰ دستگاه را در شرایط تست نشان می‌دهد.

تنها سیستم در شرایط شارژ ابرخازن کار خواهد کرد تا اینکه مجدداً ولتاژ ابرخازن افزایش یابد.



شکل ۱۱: وضعیت سیستم در حالت شارژ ابر خازن (ذخیره انرژی در حالت ژنراتوری موتور آسانسور)؛ CH1: ولتاژ ابرخازن، CH2: جریان ابرخازن، CH3: ولتاژ اولیه (معدل ولتاژ لینک DC اینورتر)



شکل ۱۲: وضعیت سیستم در حالت تخلیه ابر خازن (تزریق انرژی در حالت موتوری)؛ CH1: ولتاژ ابرخازن، CH2: جریان ابرخازن، CH3: ولتاژ اولیه (معدل ولتاژ لینک DC اینورتر)

لازم به ذکر است که این سیستم هیچ گونه اختلالی در عملکرد عادی آسانسور ایجاد نخواهد کرد و در شرایطی که میزان انرژی بازگشتی بیشتر از ظرفیت دستگاه باشد و دستگاه نتواند ولتاژ لینک DC را کاهش دهد، مقاومت ترمز وارد عمل شده و انرژی اضافه را مصرف خواهد کرد.

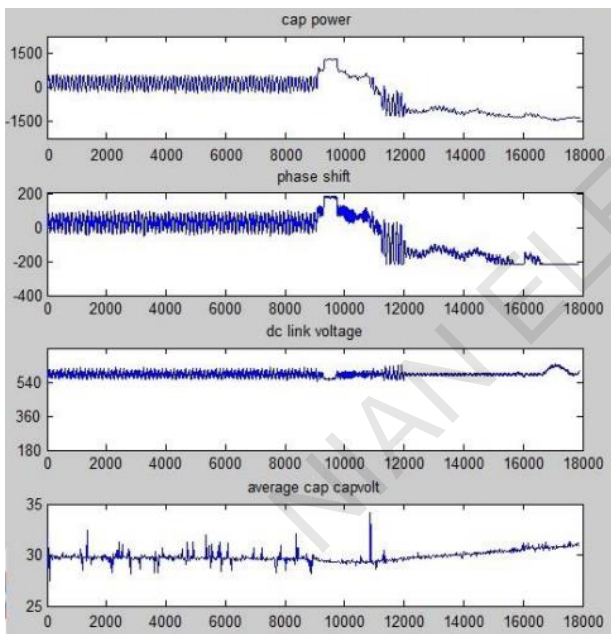
## ۵- نصب دستگاه در شرایط واقعی

پس از تست دستگاه در محیط آزمایشگاهی، در شرایط واقعی نیز دستگاه به یکی از آسانسورهای یک مجتمع تجاری متصل گردید و وضعیت سیستم بررسی شد. این مجتمع شامل ۱۹ آسانسور ۱۰ نفره و ۱۷ طبقه می‌باشد که در طبقات ۹- تا

۳- پارکینگ، طبقات ۲- تا ۱+ تجاری، طبقه ۲+ فودکورت، طبقه ۳+ تا ۶+ سینما و در طبقه ۷+ رستوران قرار دارند. دستگاه در ساعت ۱۸:۴۵ الی ۱۸:۴۵ یکی از روزهای بین هفته بر روی یکی از آسانسورها نصب شد و داده‌ها ثبت گردیده است.

### • وضعیت دستگاه در حالت ژنراتوری

در این حالت آسانسور ۲ طبقه را به صورت خالی به سمت بالا حرکت می‌نماید. وضعیت سیستم در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در این حالت انرژی به لینک DC اینورتر بر می‌گردد و ولتاژ آن بالا می‌رود. اما با وجود مبدل در مدار، مطابق شکل، آسانسور در ثانیه ۲۲ (داده‌ی ۱۱۰۰۰ در شکل) شروع به حرکت می‌نماید اما ولتاژ لینک DC توسط مبدل، روی ۶۰۰ ولت ثابت می‌ماند. میانگین توان ورودی به خازن تقریباً برابر با ۱۴۰۰ وات بوده که به معنی شارژ خازن می‌باشد و مشاهده می‌شود که در طول ۱۴ ثانیه کار سیستم، ولتاژ خازن از مقدار ۲۸/۵ ولت تا ۳۱/۵ ولت افزایش یافته است. تغییرات شیف‌فاز در شکل ۱۳ نیز مبین عملکرد صحیح حلقه کنترل می‌باشد.



شکل ۱۳: وضعیت دستگاه در حالت حرکت آسانسور خالی به سمت بالا (ژنراتوری)

### • وضعیت دستگاه در حالت موتوری

در این حالت که موتور آسانسور مصرف کننده انرژی می‌باشد، کابین خالی به سمت پایین حرکت کرده و در مدت ۲۸ ثانیه، ۶ طبقه پایین می‌رود. اما مشاهده می‌شود که ولتاژ لینک DC روی مقدار ۶۰۰ ولت ثابت نگه داشته شده است و انرژی توسط مبدل، از طریق ابرخازن تأمین می‌گردد و موتور جریانی از شبکه برق اصلی دریافت نمی‌کند. طبق شکل ۱۴، ولتاژ خازن از ۳۲ ولت در ابتدای حرکت به

از این داده‌ها، مشاهده شد که در طی بازه‌ی نصب دستگاه، حدوداً ۳۶٪ در مصرف برق آسانسور صرفه جویی شده است. لذا نتیجه می‌شود که استفاده از این مبدل، به ویژه در آسانسورهای با ترافیک بالا، می‌تواند کاهش چشمگیری را در مصرف انرژی ایجاد کرده و همچنین هزینه‌ها را کاهش دهد.

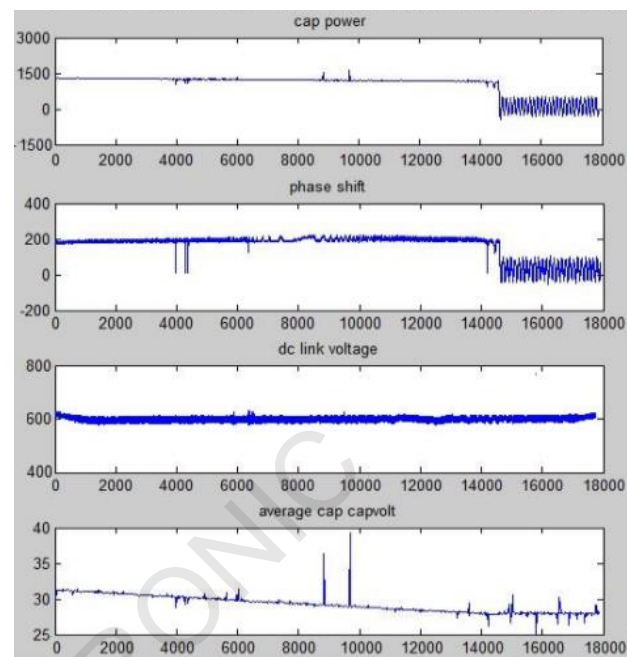
## ۷- تشکر و قدردانی

در پایان لازم است از مدیریت محترم شرکت نیان الکترونیک، به دلیل حمایت‌های ایشان در راستای انجام این پروژه تشکر کنم. بدون تردید، بدون حمایت‌های ایشان از طرح‌ها و ایده‌های جدید به منظور کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری سیستم‌های رایج، به انجام رساندن چنین پروژه‌هایی امکان پذیر نبود.

## مراجع

- [1] H. P and K. A, "Comprehensive Analyses and Comparison of 1kW Isolated DC-DC Converters for Bidirectional EV Charging Systems," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2016.
- [2] X. Dehong, Z. Chuanhong and F. Haifeng, "A PWM Plus Phase-Shift Control Bidirectional DC-DC Converter," *IEEE Tranaaction on Power Electronics*, vol. 19, no. 3, 2004.
- [3] R. B.Sepe, A. Steyerl and S. P.Bastien, "Lithium-Ion Supercapacitors for Pulsed Power Applications," in *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2011.
- [4] M. Vincenzo, T. Enrico and d. M. Politecnico, "A Comparison of Supercapacitor and high-power Lithium batteries," in *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*, 2010.
- [5] R. Naayagi and A. Forsyth, "Bidirectional DC-DC Converter for Aircraft Electric Energy Storage Systems," in *PEMD*, 2010.

حدود ۲۷/۵ ولت در انتهای مسیر کاهش یافته است. میانگین توان دریافتی از ابر خازن تقریباً برابر با ۱۳۰۰ وات بوده که به معنی دشارژ شدن خازن می‌باشد.



شکل ۱۴: وضعیت دستگاه در حالت حرکت آسانسور خالی به سمت پایین (موتوری)

## • محاسبه میزان کاهش مصرف برق

در تست شرایط واقعی، دستگاه در حدود یک ساعت بر روی تابلو آسانسور مجتمع تجاری نصب بود. با استفاده از داده‌های ثبت شده و بدست آوردن الگوی مصرف در طی این مدت، نتایج نشان می‌دهد که ۳۶/۴٪ در مصرف انرژی آسانسور کاهش ایجاد شده است. لازم به ذکر است که هیچ‌گونه اختلالی در عملکرد آسانسور نیز ایجاد نگردید.

## ۶- جمع بندی و نتیجه گیری

در طی این مقاله، راهکاری به منظور کاهش مصرف انرژی الکتریکی در آسانسورهای اینورتردار ارائه گردید. در ابتدا حالت‌های مختلف موتوری و ژنراتوری موتور آسانسور توضیح داده شد و مبدلی برای ذخیره و بازگردانی انرژی موتور در حالت ژنراتوری ارائه گردید. پس از بیان مختصری از روابط حاکم بر مبدل، طی آزمایشی، شرایط واقعی برای دستگاه فراهم گشته و دستگاه مورد تست قرار گرفت. نتایج آزمایشی نشان داد که مبدل به خوبی عمل می‌کند و می‌توان آن را در شرایط واقعی به آسانسور متصل نمود. لذا در نهایت دستگاه بر روی آسانسوری از یک مجموعه‌ی تجاری نصب شده و داده‌ها ثبت گردید. با استفاده